

高校校园疫情风险评估与校园防疫规划

——以天津大学卫津路校区为例

Campus Epidemic Risk Assessment and the Epidemic Prevention for Campus Planning: A Case Study of Tianjin University Weijin Road Campus

一级学科: 城乡规划学
研究方向: 环境行为学
作者姓名: 肖天意
指导教师: 何捷

答辩日期	2022年3月1日		
答辩委员会	姓名	职称	工作单位
主席	江曼琦	教授	南开大学
委员	王学斌	教授	天津大学
	许熙巍	副教授	天津大学
	张赫	副教授	天津大学
	蔡良娃	副教授	天津大学

天津大学建筑学院
二〇二二年六月

摘要

高校是城市空间配置和疫情防控的重要组成单元，其防疫效果关系到师生的健康和社会的稳定。疫情改变了学生的心理和出行特征，也对校园空间提出了更高的要求。随着防疫进入常态化，人类要与新冠病毒长时间共存，传统的校园物质空间难以满足未来长时间的防疫需要。后疫情时代的校园空间应该具备预防突发性公共卫生事件的能力，需要进行校园防疫规划。

新冠病毒的传播与出行行为有着密切的关系。本文设计了一个多智能体模型，实现了疫情下学生出行行为和新冠病毒在校园空间中传播的动态模拟。基于仿真模拟数据，构建了高校疫情风险评估指标体系，可用于识别校园中的易感染区域，分析空间存在的问题。基于上述模型，提出了“仿真模拟-风险评估-优化后评估”的规划路径。利用仿真模拟对校园进行疫情风险评估，评估结果用于分析空间问题并指导校园防疫规划的方案制定。对优化方案再次进行仿真模拟来验证方案的有效性。

以天津大学卫津路校区为实例，进行了校园防疫规划的实证研究。首先，通过现状调研分析学生出行特征和校园环境问题，定位防疫重点区域。第二，根据防疫重点区域设定仿真模拟范围，进行实验设计和模拟场景搭建。基于多智能体模型，对防疫重点区域进行疫情风险评估，定位易感染区域，分析防疫重点区域和易感染区域的特征与问题。第三，构建“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系。针对各级防疫体系的问题，提出对应的防疫规划方案，逐步细化规划内容，促进资源梯次配置。校园防疫规划关注防疫分区、应急救援和物资通道、应急物资储备分发设施和应急医疗救治设施布局。防疫重点区域针对公共空间和防疫设施布局进行优化。易感染区域主要考虑空间的风貌、品质、功能、形态和分布特征，从路网结构优化、可步行宽度提升和绿化体系构建三个方向对问题道路和空间进行优化。整合防疫重点区域的优化方案，进行优化后评估。评估成果证明校园防疫规划对于抑制病毒在校园中的传播具有积极意义。

最后，总结归纳文中采用的规划原则和方法，提出了防疫规划流程、分级防疫和空间优化三大方面的十一点建议。本文以实证应用研究，力求寻找一条普适性强、推广性高的校园防疫规划之路，也希望能为今后的实际工作提供一个可参照的范本。

关键词：校园，新冠肺炎，疫情风险，仿真模拟，防疫规划

ABSTRACT

As an essential unit of urban space allocation and epidemic prevention and control, the epidemic prevention effect of colleges and universities is related to the health of teachers and students and social stability. The epidemic has changed the characteristics of students' travel behavior and put forward new requirements for campus space. With the normalization of epidemic prevention and control, humankind must coexist with COVID-19 for a long time. The traditional campus material space is challenging to meet the needs of epidemic prevention and management for a long time. In this context, the campus space in the post epidemic era should have the ability to prevent sudden public health events, and special planning for campus epidemic prevention is needed.

To explore the basic principles, methods, and design points of campus epidemic prevention special planning, this paper puts forward the technical path of "simulation - risk assessment – post-optimization assessment." First, the multi-agent simulation model is designed to achieve the dynamic simulation of the student travel behavior and the COVID-19's propagation in the campus space under the epidemic situation. Second, build the University epidemic risk assessment index system, identify the susceptible areas in the campus, and analyze the problems existing in the space. Third, carry out special planning for campus epidemic prevention to improve the ability of campus space to prevent and respond to the epidemic. The optimization scheme is simulated again to verify the optimization effect.

Taking Weijin Road Campus of Tianjin University as an example, this paper makes an empirical study on campus epidemic prevention planning using the above technical path. Firstly, according to the travel characteristics of students, comprehensively evaluate the campus environment and locate the key areas of campus epidemic prevention. Second, set the simulation range, design the experiment, build the virtual scene and calibrate the model parameters. Simulate student travel and virus transmission in key epidemic prevention areas, and locate vulnerable areas according to epidemic risk assessment indicators. Third, build a three-level epidemic prevention system of "Campus - key epidemic prevention areas - vulnerable areas." According to the current situation, characteristics, and problems of epidemic prevention system at all levels put forward the corresponding epidemic prevention planning scheme and gradually refine the planning content. Campus epidemic

prevention planning pays attention to the layout of epidemic prevention zoning, emergency rescue and material channels, emergency material reserve, and distribution facilities, and emergency medical treatment facilities. The layout of public space and epidemic prevention facilities in key epidemic prevention areas shall be optimized. Invulnerable areas, the style, quality, function, form, and distribution characteristics of campus streets are mainly considered. The problem streets are optimized from three directions: the optimization of road network structure, the improvement of walkable width, and the construction of the greening system. Integrate the optimization scheme of key epidemic prevention areas and evaluate after optimization. The evaluation results show that the campus epidemic prevention planning is of positive significance to curb the spread of the virus on the campus.

Finally, based on the empirical application research, this paper tries to find a road of campus epidemic prevention special planning with strong universality and high popularization, and also hopes to provide a reference model for practical work in the future. This paper summarizes the planning principles and design methods used in this paper. It puts forward seven planning methods and design method suggestions in two aspects: campus hierarchical epidemic prevention system planning and campus space optimization design.

KEY WORDS: University, COVID-19, Epidemic risk, Simulation, Epidemic prevention planning

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景.....	1
1.1.1 高校校园是疫情防控的重要场所.....	1
1.1.2 高校与城市的防疫体系存在差异.....	2
1.1.3 常态化防疫对校园空间提出了新的要求	4
1.2 相关概念阐述.....	6
1.2.1 高校校园.....	6
1.2.2 疫情风险评估.....	6
1.2.3 校园防疫规划.....	7
1.3 研究问题与假设.....	7
1.3.1 研究问题.....	7
1.3.2 研究假设.....	7
1.4 研究目标与意义.....	8
1.4.1 研究目标.....	8
1.4.2 研究意义.....	8
1.5 研究内容与框架.....	9
1.5.1 研究内容与方法.....	9
1.5.2 研究框架.....	10
第 2 章 国内外相关研究综述	11
2.1 高校校园空间规划研究.....	11
2.1.1 公共空间规划.....	11
2.1.2 交通体系规划.....	12
2.1.3 设施布局规划.....	13
2.1.4 疫情下校园的空间响应措施.....	14
2.2 高校校园环境评估研究.....	16
2.2.1 交通环境评估.....	16
2.2.2 空间布局评估.....	17
2.2.3 景观环境评估.....	18
2.3 高校学生出行行为研究.....	18
2.3.1 出行行为特征.....	19
2.3.2 出行影响因素.....	20
2.4 计算机仿真模拟研究.....	21
2.4.1 行人仿真模拟.....	21
2.4.2 传染仿真模拟.....	24

2.4.3 协同仿真模拟.....	26
2.5 本章小结.....	27
第3章 多智能体仿真模型设计	29
3.1 行人动力学模型设计.....	30
3.1.1 社会力模型原理.....	30
3.1.2 全局约束条件设置.....	33
3.1.3 动力学算法设计	34
3.2 传染评估模型设计.....	37
3.2.1 新冠病毒传播特征.....	37
3.2.2 SIE 传染模型设计.....	38
3.3 仿真模型的代码实现.....	40
3.3.1 仿真环境构建.....	40
3.3.2 核心算法搭建.....	41
3.3.3 数据记录收集.....	43
3.4 本章小结.....	44
第4章 疫情风险评估指标体系构建	45
4.1 相关评估指标汇总.....	45
4.1.1 行人仿真评估指标.....	45
4.1.2 传染仿真评估指标.....	47
4.1.3 协同仿真评估指标.....	50
4.2 评估指标体系构建.....	51
4.2.1 指标体系构建原则.....	52
4.2.2 评估指标选取结果.....	53
4.2.3 评估指标释义.....	53
4.3 本章小结.....	54
第5章 天津大学卫津路校区现状特征与疫情风险评估	55
5.1 研究区概况与数据收集.....	56
5.1.1 研究区概况.....	56
5.1.2 校园环境数据收集.....	56
5.1.3 学生出行数据收集.....	58
5.2 学生出行特征与心理特征分析	63
5.2.1 轨迹特征分析.....	63
5.2.2 心理特征分析.....	66
5.3 校园环境现状特征与问题分析	67
5.3.1 校园公共空间.....	67
5.3.2 校园交通体系.....	68
5.3.3 校园设施布局.....	69
5.4 校园环境评价与防疫重点区域定位	71

5.4.1 道路效用评价	71
5.4.2 实地调研评价	74
5.4.3 防疫重点区域定位	75
5.5 仿真模拟实验设置	76
5.5.1 模拟场景搭建	76
5.5.2 仿真实验设计	77
5.5.3 模型参数标定	78
5.6 防疫重点区域疫情风险评估	80
5.6.1 行人模拟指标分析	81
5.6.2 病毒传播指标分析	84
5.6.3 防疫重点区域问题分析	86
5.6.4 易感染区域识别与问题分析	87
5.7 本章小结	89
第 6 章 校园防疫规划方案制定与规划方法研究	91
6.1 规划基本原则	91
6.1.1 学生出行行为作为规划依据	92
6.1.2 营造弹性稳健的校园空间环境	93
6.1.3 遵循平疫结合的空间规划模式	94
6.2 分级防疫体系构建	95
6.3 校园防疫规划方案制定	96
6.3.1 防疫分区划分	96
6.3.2 防疫应急救援和物资通道规划	97
6.3.3 防疫应急物资储备分发设施规划	99
6.3.4 防疫应急医疗救治设施规划	102
6.4 防疫重点区域防疫规划方案制定	104
6.4.1 防疫重点区域公共空间体系优化	104
6.4.2 防疫重点区域防疫设施布局优化	105
6.5 易感染区域空间优化方案制定	106
6.6 优化方案模拟验证	108
6.6.1 优化方案场景搭建	108
6.6.2 行人模拟指标分析	109
6.6.3 病毒传播指标分析	112
6.7 校园防疫规划方法建议	113
6.7.1 对于校园防疫规划流程的建议	114
6.7.2 对于校园分级防疫规划的建议	114
6.7.3 对于校园空间优化的建议	115
6.8 本章小结	116
第 7 章 总结与展望	119

7.1 研究结论.....	119
7.2 研究创新点.....	121
7.2.1 研究内容创新.....	121
7.2.2 技术方法创新.....	121
7.3 研究展望.....	122
参考文献.....	123
附录 A:道路要素偏好预调查问卷	141
附录 B:步行环境偏好调查问卷.....	142

第1章 绪论

1.1 课题研究背景

2019年12月，一种新型呼吸道传染性疾疾病袭击了中国湖北省武汉市。2020年2月11日，这种新型疾病被世界卫生组织正式命名为“COVID-19”（新型冠状病毒肺炎，简称新冠肺炎）。研究发现，新冠肺炎经常表现为咳嗽、发烧和呼吸急促，具有较强的传染性，已经成为全球大流行传染病。此外，世界卫生组织变异毒株监测网络^[1]显示，病毒已经出现变异株，拥有比原始毒株更强的传播性和抵抗抗体的能力。例如，德尔塔变异株和奥密克戎变异株造成全球疫情大反弹，很多国家的防控形势不容乐观。截至2021年8月20日，全球已有超过2亿人感染了新冠肺炎，约造成440万人死亡^[2]，世界各地的确诊情况如图1.1所示。

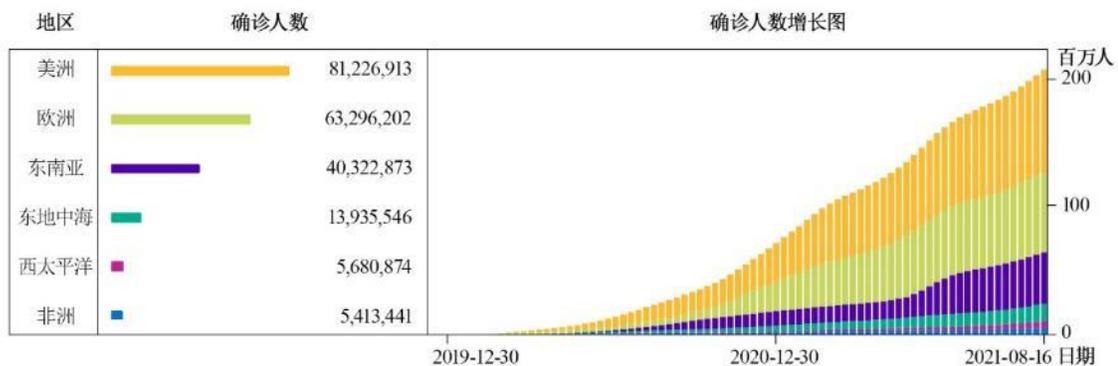


图 1.1 截至 2021 年 8 月 20 日新冠疫情全球确诊情况
图片来源：WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard^[2]

1.1.1 高校校园是疫情防控的重要场所

高校作为城市空间配置和疫情防控的重要组成单元，其防疫效果关系到师生的健康安全和社会的稳定。自新冠疫情爆发以来，高校疫情防控工作一直是国家和社会重点关注的对象，陆续发生的高校聚集性感染事件给校园防疫敲响了警钟。高校在疫情传播风险主要体现在开学季大规模返校以及返校后的日常生活两个方面^[3]：

(1) 返校复课需谨慎。随着高校扩招浪潮，中国高校学生人数持续上升，一项统计结果^[4]显示，2020年全国各类高等教育毛入学率54.4%，在学人数达到了惊人的4183万人。高校学生人口基数大、分布广，返校、复课等行为会造成全国范围跨省、市的大规模人口流动，带来疫情的输入性风险。在全球范围内有大量开学导致的疫情传播案例，以2020年秋季开学为例，据《纽约时报》报道，美国50多个院校的4万多名师生被确诊感染^[5]；英国《天空新闻》还报道，英国32所大学的640多位师生确诊新冠肺炎，有4000多人被隔离^[6]。

(2) 日常防疫需坚持。高校学生群体基数较大，人口密度较高；由于课程设置、活动组织等原因，学生出行存在短时间、高集聚的“潮汐性”特征；部分校园历史悠久、道路狭窄、没有将车行道和人行道进行区分，导致人车混行、通行效率低下、道路拥挤，人与人之间近距离接触频繁；高校学生年龄构成相对年轻，好奇心较强，社交需求旺盛，喜欢参加各种各样的活动，人与人之间的交往互动频繁；上课时，师生会在相对封闭的环境内长时间聚集并近距离交流^[7]。上述特性使得高校的防疫工作在开学之后也不能放松，需要时刻保持警惕。一旦在有宿舍、教室、学生活动和跨学科团队研究项目的半封闭大学中发生传播事件，感染人数会增长很快且难以控制^[8]。

国内发生的校园疫情聚集性感染事件也证实了高校爆发疫情的危害性和严重性。例如，2022年3月11日吉林农业科技学院检测出91例阳性病患，但是校方的处理办法暴露出校园防疫能力的不足^[9]：由于缺乏隔离设施，所有学生被迫在图书馆过夜，导致交叉感染；还有大量的确诊学生无处隔离，只能在寝室卧床，导致寝室内其他学生被感染；针对确诊学生，校园内无法提供足够的医疗手段，只能吃感冒药；校园内消毒设施严重不足，日常生活用品严重缺乏。除了吉林农业科技学院，上海交通大学、重庆城市管理职业学院等学校都陆续出现交叉感染事件，冲上各大社交媒体的热搜。这些校园疫情事件充分反映了校园疫情防控的重要性，以及校园疫情防控能力的缺失。

1.1.2 高校与城市的防疫体系存在差异

高校防疫体系与城市防疫体系存在差异，国内有关防疫评估的研究大多忽视了这种差异，导致提出的解决方案适用于城市、社区防疫，却难以在校园环境下实施。究其原因，在于针对校园防疫的研究较少，对校园防疫的特殊性和局限性缺乏明确的认识。下文三个视角切入，探讨高校与城市防疫体系的差异：

(1) 校园可以长时间封闭式管理，城市难以长时间“封城”。在空间设计层面，我国早期的高校校园规划借鉴了当时欧美国家的思想，多采取封闭式的校园布局^[10]。21世纪以来，随着校园规划体系的完善，校园与城市的联系逐步加强，半开放或全开放的校园慢慢出现，但是大部分校园依旧保持着围墙。在空间的使用层面，高校校园在很大程度上自给自足，校园内有较为完善的超市、食堂、健身场馆、宿舍、教学楼，可以满足师生的日常生活、学习需求，受外界影响因素较少。在新冠疫情爆发后，高校纷纷采取全封闭式管理模拟，校外学生不允许返校，校内学生不允许出校。随着疫情形势的缓解，高校变为相对封闭式管理，学生可以通过学生卡和健康码出入。校园封闭管理措施的顺利实施，得益于高校“学住”平衡的空间模式和校园空间的围合设计。

城市通过完善的基础设施、丰富的功能结构促进了人口的聚集^[11]。除了少部分军事基地、监狱、私人场馆为封闭空间外，还有大量的山川、湖泊等自然土地，公园、绿地、街道、广场、交通用地等活动区域和医疗、教育、体育、文化、购物、休闲等公共场所。这些场所促进了人流、物流、信息流在城市当中的快速而广泛的传播，促进了经济的发展，但是也为病毒的传播提供了便利^[12]。城市空间联系紧密，服务人口多，人口流动频繁，不适合长时间的执行“封城”措施。即使在疫情爆发最严重的时期，也要保证救援物资、人员和设备可以快速进入城市，并为市民提供生活保障^[13]，因此很难对城市进行全封闭管理。所以，城市空间可以通过测温、宣传防疫、远程办公、限制人流等方式进行管理^[14]，但不能像校园那样长期封闭管理，否则会造成巨大的经济损失并给居民生活带来不便。

(2) 校园空间改造相对容易，城市空间改造相对复杂。校园产权清晰，高校具有很大的自主改造权力。教育部印发的《教育部直属高等学校国有资产管理暂行办法》^[15]，及各省出台的高校资产管理办法，如《浙江省高等学校国有资产管理暂行办法》^[16]中，对高校的产权和资产管理行为进行了明确规定：高校占有、使用的资源，例如土地使用权、专利权、商标权、著作权等无形资产和大型仪器设备、建筑等有形资产，都属于国有资产；高校对校内长期闲置、低效运转的资产，应进行调剂，提高资产使用效益，推动国有资产共享、共用；高校可以对国有资产中闲置、拟置换的资产进行处置。因此，高校产权清晰明确，有助于校园防疫体系的规划与改造。

相比之下，城市利益相关者众多，对于城市空间的改造需要政府多部门的审批，改造流程较为复杂。按照城市空间的产权属性，可以将其分为公共产权和非公共产权。建国以来，我国城市基础设施一直保持着单一的公共产权^[17]。直到改革开放

之后，地方政府的自主意识与经济实力和日俱增，城市基础设施开始接纳越来越多的社会投资^[17]，医疗、文化、教育等设施产权实现了多元化^[18]。除此之外，城市中还有很多非政府投资（例如开发商、集体、个人等）建设项目，产权也很复杂。因此，城市的产权复杂，改造流程复杂，空间改造的资金来源复杂，这些给城市防疫体系的建设带来了难度，很多空间优化和空间管理政策难以快速落实。

（3）校园的人群构成以学生为主，城市的人群构成相对复杂。校园中包含大量的学生和科研人员，他们是校园空间的主要使用人群，年龄结构和职业结构都较为相近。城市受到人口结构、生产生活、社会建设等因素的影响，居民的数量更多，职业结构、年龄结构和文化结构也更加丰富多样。因此，与城市相比，校园内人群活动相对简单，空间相对固定。校园中会频繁出现潮汐性交通的现象，在每个上下课的间隙都有可能出现大股人流。校园还有寒暑假，在假期的时候校园人口骤减，在开学季人口会突然增加，这些特性都是城市空间不具备的。校园的疫情防控应充分考虑到这些特点，建立因地制宜的防疫体系，不能将城市的经验直接照搬，而应该在充分理解使用主体的出行特性、行为习惯和思想特点之后，有针对性地制定相应的空间优化和空间管理政策。

此外，不可忽视高校防疫中的局限性，主要体现在防疫需求与校园资源服务能力的矛盾和校园现有的物质空间难以满足防疫需求两方面。一方面，防疫政策要求高校控制食堂、图书馆、实验室、教学楼的人员密度。这些政策会削弱校园内设施的服务能力，减少服务人数，造成校园内资源紧张的问题。另一方面，现有的校园建设没有充分考虑突发性公共卫生事件，因此在物资储备、应急隔离空间、疏散通道规划和医疗设施布局等方面的响应能力较弱，具有较大的提升空间。

综上所述，高校防疫体系与城区防疫体系具有差异，不能直接照搬城区防疫手段。本文希望结合高校的特点和局限，因地制宜地制定相关空间管理政策和空间优化方案。结合疫情发展的不同阶段，综合考虑物资储备、管理体系、实施成本、应急能力等方面提出校园防疫规划。

1.1.3 常态化防疫对校园空间提出了新的要求

疫情防控下，离散空间体系和增距出行成为常态，人们的心理以及出行方式、习惯和特征也随之改变，这些改变会显著影响城市空间的使用方式，对建筑设计和空间规划提出了更高的要求^[19]。现有的校园防疫措施以管理“人”为主，忽略了校园配套空间的建设。虽然通过封闭校园和加强监管等政策可以起到很好的预防作

用，但是在一旦校园疫情真的爆发则会出现很多问题，例如 2022 年 1 月天津市疫情爆发，天津大学缺乏室内隔离和检查措施，全体师生在寒风中到运动场接受核酸检测；2022 年 3 月吉林农业科技学院检测出超过九十名学生确诊，但是确诊学生只能在宿舍、图书馆隔离，导致大量交叉感染事件；2022 年 3 月重庆城市管理职业学院出现学生交叉感染事件，执行紧急封校和全员核酸检测。随着疫情防控进入常态化，人类要与新冠疫情长时间共存，现有的校园物质空间难以满足未来长时间的疫情防控需要，具体表现在如下几个方面。

首先，疫情对校园的公共空间提出了新的要求。我国高校更新经历了多次院系调整、合并和校园的更新改造，很多校园尚未形成系统的公共空间结构，存在校园公共空间品质低下、活力不足等问题^[20]，在疫情下这些问题更加凸显。一方面，由于长时间的封闭管理和网上授课，学生会产生一定程度的心理失衡和精神焦虑^[19]，渴望与人交往，校园交往空间的缺失不利于学生孤独心态的缓解。另一方面，疫情下出行活动的减少使学生渴望体育锻炼，但是疫情下各种室内健身场地往往限制人数或者不开放，而校园中也缺少室外健身设施和公共活动空间，不利于学生的身体健康。因此，常态化防疫对校园的公共空间和交往空间的建设提出了更高的要求。在后疫情时代，应该为学生提供更多的公共空间，促进学生的身心健康。

其次，疫情对校园的交通体系提出了新的要求。当前很多校园重车行轻人行，忽视了校园慢行系统的打造。由于缺乏合理的规划，经常出现人车混行的情况，也缺少专用的疫情应急物资运输通道，降低了校园对于疫情的抵抗能力。随着校园封闭性管理政策的实施，校园禁止社会车辆的进入，原先人车混行的道路变成了纯人行的道路。校园暂时拥有了一套“慢行系统”，一方面可以促进学生步行出门，控制与他人的距离，也可以提高自身的免疫能力，降低被病毒传播的风险。另一方面提高了校园内出行方式的多样性，自行车、滑板车等交通方式的出现，提高了校园交通系统抵抗突发事件的能力。但是，随着疫情常态化，全封闭的政策不可持续，随着相对封闭政策的出现，社会车辆慢慢又出现在校园中，降低了学生的出行舒适性。后疫情时代的校园建设，应该重视校园慢行系统的打造，从车行主导转为人行主导，让疫情应急物资运输通道远离学生的日常出行通道，保证物资运送和紧急救援的效率的同时，提升学生日常步行出行的舒适性。

最后，疫情对校园的设施布局提出了新的要求。此前的校园规划中缺少对应急公共卫生事件的思考，物资储备分发设施、医疗设施、隔离设施等都较为缺乏。根据疫情防控政策的需要，校园中需要添加一些防疫基础设施来提高校园的防疫能力。

然而这些设施的选址、规模、尺寸等都尚未明确，也缺乏足够的研究支撑，为校园防疫体系建设提出了新的难题。

综上所述，随着防疫进入常态化，应对公共卫生突发事件已成为我国未来的高校校园规划中不可避免的挑战^[22]。现有的校园建设无法满足疫情防控提出的新需求，关于疫情下的校园空间规划的研究也非常缺乏。为提高校园应对公共卫生事件的能力，需要有针对性的进行空间提升，系统性的归纳出相关的规划设计准则，以指导后疫情时代校园空间的规划设计与更新改造。

1.2 相关概念阐述

1.2.1 高校校园

英国教育家纽曼在《大学的理念》中首次赋予了大学与场所有关的概念，将其定义为“用来探索普遍学问的场所”。此后随着教育的普及，相关的理念与制度逐步完善，高校校园的物质空间也逐步完备^[22]。

现代汉语词典指出，高校是高等学校的简称^[23]，高校除了为受教育者提供高等教育教学服务外，还具有科学研究、社会服务等功能^[24]，是广大师生科研、工作、学习和娱乐的聚集地。具体而言，高校指由国家部委、省级人民政府（含新疆生产建设兵团）、省（市、区）教育行政部门主管或联合主管的实行普通高等学历教育的学校。根据 2021 年教育部公布的名单^[25]，全国共有高等学校 3012 所。

柯林斯词典对校园（campus）的定义为：“包含高校或学院主要建筑物的一块土地。”2018 年发布的《普通高等学校建筑面积指标》^[26]中列出了十二项综合高校需要满足的建筑类型，包括教室、实验实习用房、校行政办公用房、院系及教师办公用房、师生活动用房、会堂、学生宿舍、图书馆、室内体育用房、食堂、单身教师宿舍和后勤及附属用房。

1.2.2 疫情风险评估

首先明确疫情的概念，疫情指在短时间内某种传染病导致大量的病人或死亡病例，波及范围广泛，其发病率远远超过往常发病率的情况^[27]。风险指一件事情的发生存在着不确定性，包括发生与否的不确定性、发生时间的不确定性和导致结果的不确定性^[23]。本文针对新型冠状病毒肺炎引发的高校校园的疫情风险进行研究，因此本文语境下的疫情风险评估指测算新冠病毒在高校校园中传播的不确定性。

《城市防疫专项规划编制导则》^[28]是本文的规范指导依据，导则中对疫情风险评估的内涵和外延都进行了详细规定。导则指出，疫情风险包括疫情潜在风险评估，指对各类疫情可能发生的频次与影响进行分析；易感区域评估，指对传染病疫情影响程度、空间分布及特征进行分析，识别传染病的高危爆发区域、潜在的传染通道和易感染区域。

1.2.3 校园防疫规划

防疫的定义是，为了预防、控制和消除传染病的发生与流行，保障人体健康和公共卫生安全，而采取一系列预防、疫情控制、医疗救治、监测预警、监督管理等措施^[27]。

参考城市防疫规划^[28]的定义，本文将校园防疫规划定义为以提高校园应对突发公共卫生事件的能力为目标，对一定时期内校园防疫的防疫体系、配置标准、设施布局的综合部署、具体安排和实施管理。

1.3 研究问题与假设

1.3.1 研究问题

本文的研究问题有三个，分别为：

- (1) 病毒在校园中的传播会受到哪些因素的影响？
- (2) 如何结合校园中学生的出行行为对校园的疫情风险进行评估？
- (3) 校园防疫规划的流程是什么？需要遵循哪些原则？如何进行校园防疫规划？

1.3.2 研究假设

在研究问题的框架下，做出以下假设：

- (1) 校园的建成环境，例如交通体系、公共空间体系、设施布局等，学生的出行行为和个人属性，以及校园的管理政策等因素会影响病毒的传播；
- (2) 可以通过多智能体仿真模型，模拟校园中的学生出行和病毒传播进行模拟，结合仿真数据，建立指标体系，对校园的疫情传播风险进行评估。分析疫情的影响程度、空间分布特征，识别易感染区域，以进行有针对性的优化设计；

(3) 校园防疫规划应该遵循现状调研与分析, 防疫重点区域定位, 易感染区域识别和校园分级防疫规划等流程。应该遵循学生出行行为作为规划依据、营造弹性稳健的校园空间和遵循平疫结合的规划模式三个规划基本原则。通过“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系, 对校园的防疫应急物资储备、防疫应急物资分发、防疫应急通道、防疫应急医疗设施、公共空间体系和空间设计等方面进行优化。

1.4 研究目标与意义

1.4.1 研究目标

(1) 实现学生出行和病毒传播的动态模拟。本文拟利用计算机仿真模拟技术, 将行人动力学模型与传染评估模型相结合, 提出一个基于多智能体的动态仿真模型, 用于获取病毒传播发生的时间和地点。考虑疫情背景, 行人动力学模型充分考虑了常见的社交隔离政策, 可以模拟行人的增距出行。利用该模型对学生流动过程和病毒传播过程进行仿真模拟, 研究空间形态对病毒传播的影响。模拟是实时动态运行的, 除了分析模拟产生的统计数据外, 还可以对模拟过程进行视觉评估。

(2) 建立传染病疫情风险量化评估指标体系。面对突如其来的疫情, 规划师还没有提出针对校园情景的疫情风险评估的系统路径, 针对校园的防疫策略也缺乏数据支撑。本文拟通过仿真模型, 收集学生出行数据和病毒传播数据。针对仿真模拟数据, 设计配套的疫情风险量化评估体系, 包含行人模拟指标和病毒传播指标。利用该指标体系对校园环境进行评估, 根据行人空间分布特征和病毒传播特征定位校园的易感染区域和潜在传染通道, 便于后续的空间优化改造。

(3) 提出校园防疫规划的原则和方法。本文希望提出适合校园的防疫规划的原则、流程和方法, 针对校园的防疫应急设施布局、公共空间、交通体系和空间设计等方面进行优化, 并验证防疫规划方案的有效性。通过对防疫规划方法的总结, 助力空间规划学科的理论发展。

1.4.2 研究意义

(1) 该研究为校园防疫重点区域和易感染区域的检测和识别提供数据支撑和决策依据。易感染区域的检测识别是一个复杂的过程, 现有的方法和手段很难适应疫情下的规划场景。本项研究通过仿真模型设计, 评估空间的疫情风险, 定位易感

染区域，发现空间问题，然后进行优化设计。该研究将成为上级主管部门确定防疫规划的决策依据，有助于防疫资源的合理利用。

(2) 该研究可以增强校园防疫规划的科学性、合理性和可实施性，有助于提升校园防疫能力。目前对于高校校园的防疫手段，大多依据城市防疫的经验，沿袭城市防疫的方法，缺少针对校园防疫规划的理论支撑和实践。本文的研究方法和规划路径可以为其他校园的防疫规划提供参考。

(3) 该研究的规划路径可为其他大规模、多尺度的公共人流聚集场所的管理、引导和规划提供擦模拟考。可以通过改变模型的参数和模拟场景，用于其他相似呼吸道传染病的传播模拟和优化评估，还可以对不同情境下的场景进行建模，例如博物馆、火车站、飞机场等。

1.5 研究内容与框架

1.5.1 研究内容与方法

本文的研究内容及采用的研究方法如下：

(1) 研究多智能体模型的设计问题。通过演绎的方法，查阅、梳理评价历史文献和资料，研究仿真模拟算法的发展历程，为本文的多智能体模型设计和指标体系设计提供理论支撑。通过实验和代码撰写的方法，研究什么样的动力学公式可以模拟增距出行。此外，还需要研究新冠病毒的传播方式，设计一个传染评估模型。多智能体模型的设计是本文数据和决策的技术支撑。

(2) 研究校园疫情风险的评判方法和指标体系。通过描述方法，通过归纳和推理手段，概括出普遍性的结论，实现本文的评判方法和指标的选取。研究如何利用多智能体模型产生的数据，通过哪些指标来合理的进行校园疫情风险的评估，这些指标该如何计算，如果通过评估确定空间问题和易感染区域，以及如何对数据进行计算，如何对评估结果进行可视化呈现。

(3) 研究校园防疫规划的基本流程、规划原则、组成部分和空间设计要点。通过实证方法，以实际案例为对象，研究如何将有限的资源合理利用，如何进行资源的梯度分配，如何对校园空间进行优化，如何合理布局各类防疫设施，确定设施的选址也是研究的重点。

(4) 研究校园防疫规划的标准。通过抽象方法，对归纳的成果进一步的深化和提升，总结原理。即将本文的技术方法和规划实践总结归纳成可以推广的标准和

建议，研究通过怎样的分级方法和规划原则有助于规划的实施，为疫情后的校园防疫规划提供建议和参考。

1.5.2 研究框架

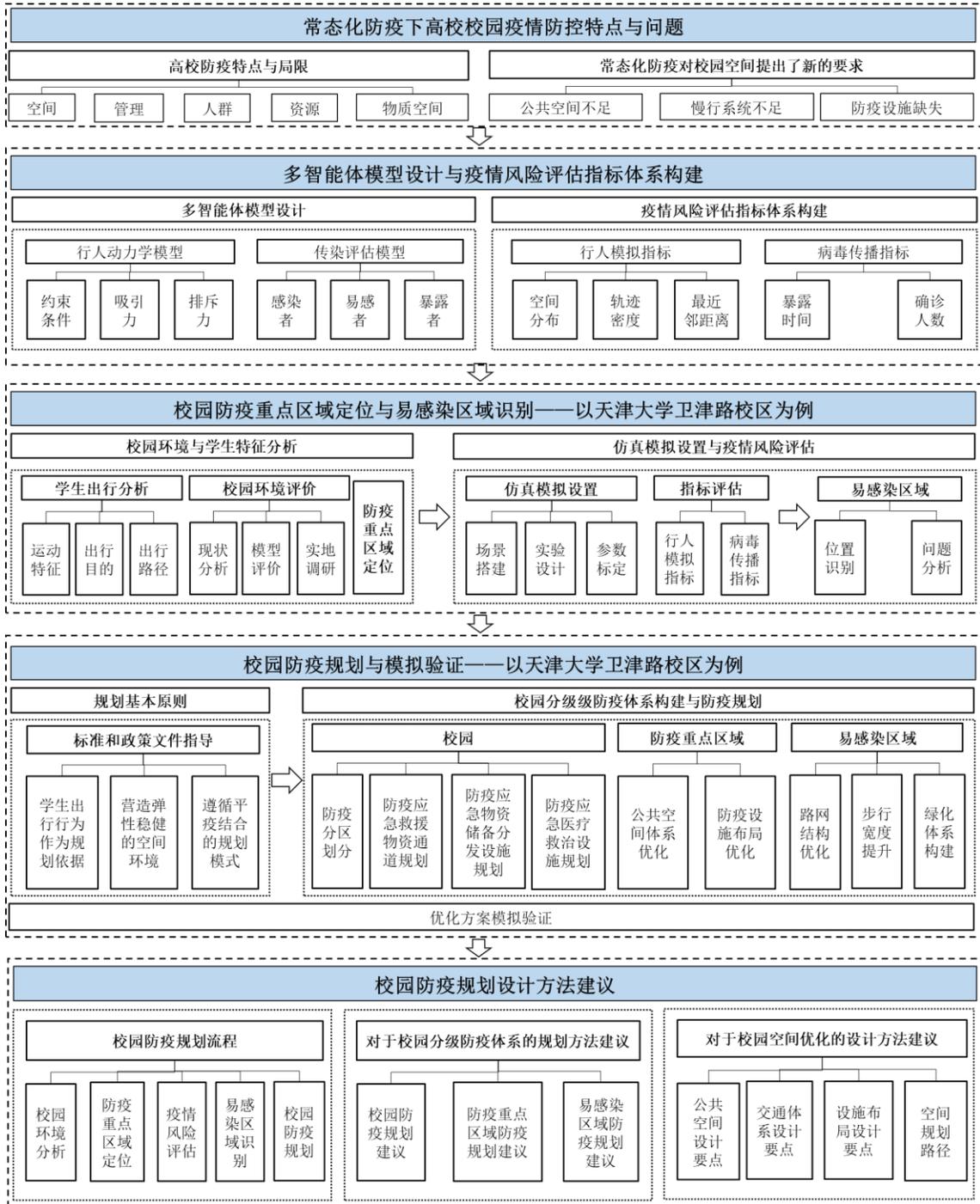


图 1.2 研究框架
图片来源：作者自绘

第2章 国内外相关研究综述

本章从高校校园空间规划方法、校园环境评估、学生出行行为、仿真模拟技术四个方面对国内外相关研究和技术方法进行总结回顾。首先，总结对比国内外高校校园的空间规划手法，研究疫情下校园的空间响应措施，为校园防疫规划做好理论支撑。第二，从校园建成环境评估角度探寻校园空间管理的方法和疫情风险评估的方法。第三，梳理现有文献，总结学生出行行为研究的历史沿革、发展脉络及现有的相关成果进展，关注重点放在学生出行行为的影响因素和学生出行特征两方面，探求对学生出行行为的引导和管控措施。第四，从行人仿真模拟和传染病模拟两方面研究计算机仿真技术在新冠肺炎疫情防控中的应用。

2.1 高校校园空间规划研究

2.1.1 公共空间规划

国内外学者从宏观和微观角度探索校园公共空间规划的基本方法和原则。从宏观的校园空间形态角度，李宏超、张亚丽等人分别基于空间句法对河南大学、武汉大学的校园空间结构、认知程度、协同度与可理解性等方面进行分析，剖析不同类型空间布局的优劣，并提出优化策略^[30,31]。从微观的校园空间设计角度，钟薇、阳柏苏研究指出大学校园公共空间普遍存在的如下问题：缺少小尺度空间设计，公共活动空间单一；公共空间设计不人性化，导致其利用率极低^[32]。Wood 和 Dovey 等人的研究表明，小尺度空间环境有利于促进自由交流的活力^[33]，如座椅布局、景观种植等是实现多种用户活动和交互的关键媒介^[33,34]。因此，校园公共空间规划应研究合理布局，创造适宜的空间规模，丰富层次的校园空间，考虑合理和舒适的步行尺度，将各个区域的活动规模保持在 5-10 分钟的步行范围以内，从而为学生提供更便捷的生活。

与欧美国家相比，国内关于校园空间规划的研究发展较晚。国内研究最早可以追溯到周逸湖等人写的《高等学校建筑·规划与环境设计》^[35]。书中重点研究了校园公共活动空间、景观绿地系统规划的设计方法，提出了从学生出行轨迹和活动特征来确定校园规划的核心，强调校园空间的文化性和景观性等规划原则和方法。

何镜堂院士指出^[36]，我国大学校园规划的发展趋势是建设多样化、整体化、生态化、地域化、人文化、弹性化的大学校园。校园空间的发展要与城市融合，兼顾现实与未来。大学可以被看作是一个微型城市，校园空间呈现出规模化、功能社会化和空间开放化的趋势，其城市形态的空间特征日益明显^[37]。校园空间形态可以分为两种：一、按照教学、生活和后勤进行功能划分的传统布局方式，也是大学校园空间的主要布局方式；二、借鉴现代主义城市设计理论的功能复合式布局方式，与严格的功能划分原则相反，将合理的功能连接控制在步行距离内，即每个功能分区都是混合使用的，既要保持其运行的独立性，又要鼓励各种活动在时间和空间上相互补充和促进。

国内不少大学将校园公共空间作为展示地域文化和城市特色的平台。黄劲回顾了中山大学和广东外语外贸大学的大学城校区组团规划设计，认为尊重自然、因地制宜的设计方法是构建岭南山水生态校园空间的关键^[38]。刘宇波回顾了江南大学蠡湖校区规划设计，认为除建设生态校园以外也要顺应高等教育发展潮流，创造多层次交往空间，延续当地的地域文脉^[39]。赵哲等认为大学校园的独特性与地方性紧密相关，校园文脉的延续可以促进大学的可持续发展^[40]。陈剑等认为通过整合校园空间布局、自然景观和生态环境，可以形成浓厚的校园文化氛围^[41]。韩玉洁进一步提出湖区凝聚了校园的文脉与精神，增强了师生对校园的认同感和归属感，具有明显的文化表征意义^[42]。

2.1.2 交通体系规划

国外关于高校校园交通问题的研究比较早，在一些国家已经有了较为成熟和系统的理论和实践经验。欧美地区的机动化程度较高，大学校园面积很大，学生和生生都是以汽车为主要交通工具。国外的大学交通规划从一味满足激增的停车需求无限制加建停车设施，到反思过度依赖汽车对校园环境造成不利影响后逐步探索系统的校园静态交通体系优化策略，有很多可借鉴的实践经验与教训。Christian 指出大学校园可通过停车收费等以经济杠杆为手段的措施来改变小汽车出行的成本，并将其以补贴的形式用于慢行环境的改善，增加校园内的绿色出行^[43]；Demaio 倡导在校园内推行清洁能源汽车来减少机动车尾气、噪声的污染，改善校园的交通出行环境。还可以通过交通需求管理来实现校园交通的可持续发展，例如哈佛大学通过停车优惠的方式鼓励学校开车上下班的教职工拼车，减少机动车的使用量，斯坦福大

学通过开通全覆盖校园的 23 条免费巴士来引导师生选择公交出行，英属哥伦比亚大学则通过设立机动车禁驶区来保障慢行交通的安全^[44]。

我国对于校园交通的研究起步较晚，主要集中于校园交通系统的设计和管理两个方面。王建国对当前存在于校园交通系统中的问题进行了研究分析，分别从城市设计及交通管理两个层面出发提出了相应的解决办法^[45]；金键对校园交通稳静化的行为意向进行了研究，并对三所大学进行实例研究^[46]；张先玲在对大学校园进行总体规划的基础上，提出了“步行为主，人车分流”的校园交通体系建设原则，以校园格局和功能布局为导向，科学布置可达性良好的道路系统和交通体系；陶致，龚岳在总结国外经验进行的基础上，对大学校园的步行模式进行了研究，论证了我国大学校园扩展步行交通的可行性^[47]；黄平等在校园总体布局的基础上以校园交通出行需求为切入点，对校园交通网络进行了设计，并应用到了上海交通大学闵校区交通规划当中^[48]；孙建军，颜昌文从动态及静态两个方面对同济大学的校园交通构成和存在的问题进行了分析，并且提出了可行性较强的解决方案，为我国部分高校解决自身的交通问题提供了参考^[49]。

2.1.3 设施布局规划

二战后期，战后经济的复苏促进了欧美发达国家的大学校园建设，涌现出了很多与校园规划相关的研究和文献。美国著名校园规划专家 Richard Dober 撰写了一系列与大学校园规划相关的书籍，奠定了美国校园空间规划的理论基础^[50,51]。他总结了各个国家的大学校园建设经验，将校内设施进行分类，主要包括：教学设施、研究设施、图书馆、娱乐设施、服务设施和宿舍，并提出了各类设施的设计准则。国外高校进行校园规划建设中，并不是将校园完全封闭，而是校园与附近区域的配套设施相互结合，从而形成一体化的设施、道路、景观等等，最终实现高校资源与社会资源相互共享的状态^[52]。Michael brown 从校园规模、空间结构、与城市的距离等方面分析了英、美、德等国家在上世纪中叶的大学校园，并对大学建筑组群的集聚组织方式以及院系设置及扩建方式做了详细的研究^[53]。

我国高校服务设施布局一般在校内外表现出两种不同的状态，在校外服务设施布局多表现为线性带状空间布局，多分布在教学区和生活区过渡空间、或者在校外周边街道呈线性带状空间布局，通常是沿街商业的形式；在校内多呈现为点状分布。2017 年秦瀚以重庆几所高校中服务辅助设施作为研究对象，找出服务辅助设施现存的问题，结合气候、地形等因素提出了重庆高校新校区建设适应性设计策略^[54]。

2014 年程思以昆明呈贡大学城里几所高校作为研究对象，通过实地调研、问卷访谈等方式研究大学城空间各类服务设施的可达性，通过分析各类商业服务设施存在问题和布局可达性进行分析，提出对呈贡大学城商业服务设施布局的优化建议^[52]。2014 年陈之曦以北京航空航天大学校园开放式项目作为研究载体，强调校园应当持开放的态度，开放式校园的体现了校园与城市相互促进融合的格局。通过实地调研配合问卷调查的方式，得出使用者的使用偏好和使用需求，对高校校园开放模式下景观设计提供理论基础^[55]。

2.1.4 疫情下校园的空间响应措施

本节从空间引导、政策管控、科技监管等多方面探讨疫情下校园的空间响应措施。面对新冠疫情的爆发，一些设计师探索后疫情时代公共空间的发展模式，以安全社交距离为准则进行了校园空间设计和改造实践。在校园中可以通过简单的空间隔离与设计引导标志等方法，加强学生的社交隔离意识。如设置“一米线”文明引导标识、在地面上绘制距离标识和人员单向行走路线标识，引导学生出行时保持社交隔离；通过为公共空间座位增加隔板、减少桌椅数量等方式，降低室内空间的人员密度，确保学生保持安全距离。一些设计也应运而生，如艾因霍芬设计学院的 Anna 为学生设计了可穿戴装置作品 Bounding Spaces，可随身体改变形态，从而自然创造距离以保护穿戴者（图 2.1 左）^[56]；英国的一个工作室设计了“帐篷教室”，在校园公共空间设立临时教学点，调整和改造校园现有的空间结构，减少学生对交通路线的依赖。帐篷内桌子之间保持 2 米的间距，并设有专门的洗手区，以实现安全的社交距离（图 2.1 右）^[57]。

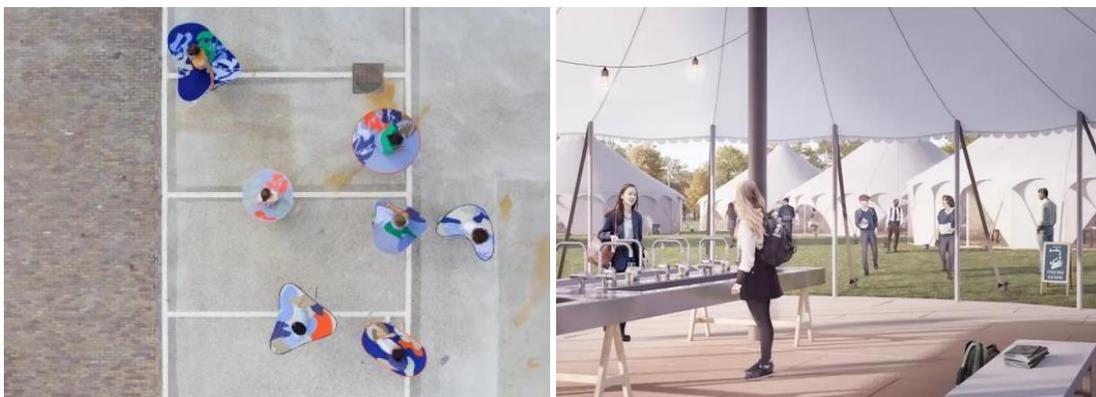


图 2.1 校园社交隔离实践

图片来源：左 Bounding Spaces^[56]，右帐篷教室^[57]

国外高校创新管理形式，制定多样的政策管理方案。韩国首尔一所高校将操场改造为露天考场，保证参试者的座位间隔为 1.5 米^[58]；多国高校实施“停课不停学”，采取线上与线下授课相结合，减少学生上课聚集，并对教学楼的座位进行调整，确保线下授课的人员保持社交隔离^[59]。对公共场所“限时限流”也是常用的手段，如日本要求学生图书馆、公共教学楼等空间的使用需提前预约，并规定最长逗留时间。对各类校内活动进行风险性评级，禁止人口的局部聚集；如新加坡的高校将课堂和活动总人数限制在 50 人，小组活动人数限制在 5 人^[60]。校门实施监测，避免外来人入校等，有助于实现校园内的社交隔离。美国高校实施的非药物控制的校园防疫政策包括要求学生佩戴口罩或其他个人防护装备、减小班级人数、错开上课时间、加强卫生清洁、取消大型集会、减少宿舍人数、限制校外活动等^[61]。

中国高校也分别执行了隔离防控政策，预防新冠疫情在校园内爆发。2022 年 3 月初，奥密克戎变异株来势汹汹，迅速席卷中国 20 余个省市，国内疫情多点散局部爆发，全国一天内新增病例超过千个，引起了社会的广泛关注^[62]。在这样的背景下，全国高校纷纷行动，复旦大学宣布在校师生不离校，实施相对封闭管理，师生不跨区流动；华东师范大学的两个校区启动闭环管理，人员只进不出，外校人员不得入内，不得进行跨区交流；吉林大学全面展开线上教学工作，执行“一区一策”、“一楼一策”等政策；哈尔滨工业大学严格校园出入管理，加强日常健康监测；上海交通大学严格实施“足不出户”管控措施；华东政法大学实行全闭环管理，全体师生进行核酸检测；杭州电子科技大学加强出行审批管理，严禁校园聚集性活动，遵循“能线上不线下”的原则；青岛理工大学实行出门三级审核制度，鼓励学生非必要不出门。

一些高校通过智能技术实施疫情监管。例如，天津大学建立综合服务平台，实现疫情数据录入、更新、追踪的“全过程”管理模式，可以对进出校园的人流精准管理；新加坡要求包括学生在内，所有进入校园内的访客需使用定位追踪 APP，对其行动轨迹进行监控；英国应用实时监测系统，监视校园疫情传播状况^[63]。此外，高校依托自身学科和专业优势，集中开展疫情防控研究，加强多学科协作，开展疫情防控智能技术研究。同济大学研发了一款智能识别系统^[64]（Tongji NCP-AIS），依靠大数据支持，可以针对人群中的个人感染者风险进行评估；天津大学联合天津智慧物联研究院研发校园疫情防控场景的扫码技术，便于管理人员检测进出校园人员登记；荷兰的一所高校和比利时的一个创新中心合作研发一款智能传感器，可以记录建筑物内人员的精确数量、位置和距离，设置安全距离警报（如图 2.2）^[65]，鼓励学生践行社交隔离的同时，优化办公空间利用率。

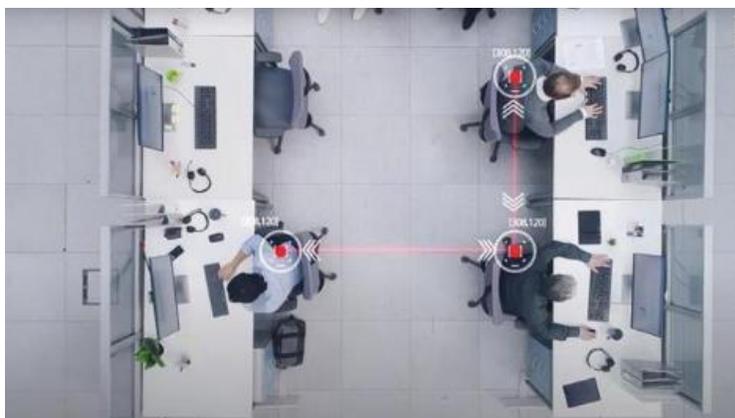


图 2.2 智能传感器效果图
图片来源：PointGrab^[65]

2.2 高校校园环境评估研究

校园建成环境会对学生行为产生影响。与学生出行相关的环境要素包括校园交通环境、景观环境、空间布局。接下来对这三个方面展开综述。

2.2.1 交通环境评估

国外学者对校园交通环境的关注起始于 20 世纪 60 至 80 年代，此时欧美高校处于大规模开发建设时期，校园内机动车交通量激增，校园内的建筑也出于机动车优先视角而围绕停车设施布置^[66]。此时校园人车矛盾尖锐，步行交通体系受到车行交通的极大干扰，不利于学生的各类出行行为的发生。此后很长的一段时间，美国城市规划师逐渐增强了校园各等级道路的综合分析规划，探讨了各建成环境要素对校园交通环境的影响。研究表明良好的、连续的校园物质空间环境会促进学生出行行为的产生^[67]。相比较国外，我国关于校园交通环境评估的研究较少。部分原因是我国各等级校园的建设在时间上滞后于欧美国家，且我国校园多为封闭式、半封闭式管理，校园内交通流量小于国外同等级院校，导致部分结构性交通问题没有充分暴露。

综合国内外关于校园交通环境评估的研究，主要分为以下几个方面：（1）交通物质空间环境评估^[68]。校园交通物质空间环境是校园交通环境的基础，一系列良好的、体系完整的交通空间能促进学生出行行为的产生。交通的物质空间环境主要包括动态交通设施（例如机动车道、步行道、自行车道等）、静态交通设施（地上、

地下停车场等)、交通配套设施(例如路灯、维修点、指示牌等);(2)交通对环境的影响评估^[68]。交通系统的运行效果会通过交通对环境的影响表现出来,故交通对环境影响的评估是校园交通评估的重要组成部分。交通对环境的影响主要表现在对不同类行人、建筑、室外空间、活动产生影响;(3)对出行者的反馈进行评估。该方法带有鲜明的主观性,但也是对校园交通物质空间环境最直接的反馈^[69]。统计手段主要包含舒适度调查、便捷度调查、满意度调查、路径选择倾向、出行时间、出行距离、出行方式选择等;(4)利用数学模型进行量化评估^[70]。出行者的评估虽然直观,但不可避免带有较强的主观性,这种主观性因个体而不同,同一个体的评估也可能因为时间、空间的不同而产生偏差。通过构建数学模型,可以有效降低主观性的影响,目前针对校园交通环境评估的数学模型包括:基于D-S证据理论的校园交通环境评估方法^[71]、基于大气扩散模型的校园交通环境评估方法^[72]、基于交通环境承载力动态评估及障碍因子诊断的校园交通环境评估方法、基于灰色聚类分析法的交叉口交通环境影响评估^[73]等。

2.2.2 空间布局评估

针对校园空间布局的研究由来已久,一直是校园物质空间环境研究中的热点话题。从研究内容来看,集中在公共服务设施的选址布局、交通系统、空间设计等方面;从研究方法来看,既包括传统的案例分析、实地调研、问卷调查和访谈,也包括GIS、RS及空间句法等新型研究方法^[74]。在此基础上,综合国内外针对校园空间与布局评估的相关研究,可以得出校园空间与布局评估要素主要包括:教育科研功能布局评估、道路交通功能布局评估、生活服务功能布局评估,如表2-1所示。

表 2-1 校园空间布局评估

分类	定义	指标	参考文献
教育科研	服务师生日常上课、科研研发、学术讲座等功能	功能实用性、影响辐射性、文化宣传性、精神体现性、历史传承性	史艳妍 ^[75] 牛毅 ^[76]
道路交通	沟通校园空间的脉络与骨架	连通便捷性、出行舒适性、运行高效性、景观风貌性	裴文祥 ^[77] 郑小梅 ^[78]
生活服务	维持师生吃饭、住宿、娱乐及体育锻炼等功能	范围辐射性、功能齐全性、分布合理性	邓巧明 ^[79] 彭筠 ^[80] 邓清 ^[81]

2.2.3 景观环境评估

西方高等教育院校受到宗教因素的影响，在校园景观营造上有着较为严格的规范^[66]。国外学者主要从绿地规划及景观文化内涵塑造两个方面对校园景观进行研究，且更注重对校园景观人文内涵的传承与发展。相比较国外，国内学者对校园景观环境更多地从景观生态学角度出发，进行以生态效益为目标导向的研究。综合国内外关于校园景观环境评估的研究，主要分为功能性、观赏性、生态性及文化性评估，如下表示。

表 2-2 校园景观环境评估

分类	定义	指标	参考文献
功能性	研究校园景观环境构建的目的	交通通畅性、绿地可达性、空间丰富性、照明、服务设施等	余晓丽等 ^[82]
观赏性	从艺术和美学的角度评估景观环境	景观空间层次的丰富性、空间尺度的适宜性、景观的协调性、设施小品的艺术性等	甘永洪等 ^[83] 毛炯玮等 ^[84]
生态性	评估景观对自然、能源和物质的可持续利用	植物种类多样性、观赏时序多样性、植物与环境的和谐性等	朱云辰等 ^[85]
文化性	评估校园的文化特色、社会属性和特定意义	校园时代特征、历史积淀	范钦栋等 ^[86] 朱程程等 ^[87]

2.3 高校学生出行行为研究

国外学者较早地开展了针对城市居民出行的行为研究，发现了不同出行人群行为的显著差异，并将研究主体深入到学生群体当中。关于学生出行的研究可以追溯到 1988 年，DiGuiseppe 等人研究了 6-12 岁的学龄儿童的出行，家长倾向于将安全作为主要考虑因素而不使用非机动车的交通方式^[88]。随后针对学生出行影响因素的研究范围不断扩大，研究主体也从儿童扩展到高校学生。2003 年 Bamberg 等人开展了关于预付公交车票对高校学生出行公交使用量的影响，发现这些干预措施会改变高校学生的态度和对行为控制的看法，进而影响高校学生的出行行为^[89]。2011 年 Bopp 等人运用层次回归分析使用人口学、心理学和环境变量预测步行和骑自行车的方差^[90]。2012 年 Rissel 等人对弗吉尼亚联邦高校的学生旅行行为进行了统

计分析,在出行生成、出行分布、出行方式选择和基于活动的建模方面提出了一系列建议^[91]。2015 年 Rotaris 等人基于运输需求模型,对意大利的里雅斯特高校的 9 个假设运输政策的有效性进行了估计,旨在为高校设计更好的交通管理政策^[92]。2016 年 Bopp 等人利用智能手机出行数据,对高校校园内出行路线、出行时间、天气、自行车停放等数据进行可视化处理,为使用者提供出行建议^[93]。2020 年 Gutierrez 通过一个陈述性选择实验研究哥伦比亚巴兰基利亚的高校学生出行中使用自行车作为交通工具的低概率问题,希望可以激发高校学生自行车出行的潜在需求^[94]。

相比较国外,国内的相关研究领域开展较晚,多聚焦于构建数学模型进行数据分析。例如 2017 年高雅通过人流量统计、动态观察、认知地图、访谈调查等方法研究路径特征和学生出行特征,分析校园内存在的问题并给出出行环境规划^[95]。2017 年石剑桥等人基于北京高校 345 名在校学生的出行数据,通过 logit 模型研究校园步行与骑行者的路径选择行为和各类要素对路径选择行为的影响程度^[96]。余周林于 2018 年采用基于预期的敏感度分析法,分析了影响大学生骑车次数、出行方式的因素,为政府、企业制定相应的经营管理策略^[97]。

通过梳理国内外针对高校学生出行的研究进展,可以发现研究多基于正常出行环境,对疫情环境下校园内出行行为的研究较少。在新冠疫情爆发的时代背景下,高校实施社交隔离政策,学生的出行行为会发生很大变化。如何解读学生疫情期间的出行行为机理、如何解读社交隔离出行的行为特征和空间需求、如何对学生出行行为进行管理以及如何对疫情下校园出行环境进行优化,是急需回答的问题,需要进行针对性研究。

2.3.1 出行行为特征

按时间及类型可以将高校学生在高校校园内的出行总结为 3 类:上下课期间的交通性出行、校园内购物、就餐等活动组成的生活性出行以及散步、游憩为目的的休闲性出行^[98]。不同学生的出行特征因个体差异、行为习惯、生活方式等原因存在较大不同^[98];根据出行目的不同,学生的出行时间和距离也有所不同。接下来分别对这 3 类出行行为进行具体分析。

(1) 交通性出行。高校学生的交通性出行发生在高校校园内,以教学楼为起讫点,出行时间集中在上下课的几个时间段内^[99]。路径集中于校园内非教学空间与教学空间之间的交通路线上。受距离的限制,校园内的交通性出行以步行、自行

车、电动车为主。而面对校园外的交通性出行，部分学生会选择乘坐学校配备的连通不同校区的小型公交车^[100]。

(2) 生活性出行。学生通过生活性出行解决除上课外的必要性生活需求。出行发生在宿舍、校园及周边商业设施甚至城市范围内，多以服务设施为起讫点^[101]。出行时间集中在早晨上课前时间段、中午午休时间段、晚上下课后时间段，其中晚上的生活性出行持续时间最长、规模最大^[102]。节假日学生生活性出行的时间较为分散，且个体之间存在较大差异。按照距离可以将生活性出行分为两类：一类是短距离出行，一般在一公里以内，集中在学校内部及周边，解决较低等级的生活需求，如日常就餐、购买日用品等；另一类是长距离出行，主要解决较高等级的需求，如购物、娱乐等，长距离生活性出行的距离与校园距离商圈、市中心的距离呈正相关^[103]。短距离生活性出行以步行、自行车为主；长距离生活性出行则主要以自行车、电动车、公共交通、摩托车、小汽车为主^[104]。

(3) 休闲性出行。学生的休闲性出行主要指校园范围内散步、游憩活动，而离开校园后的出游活动被归类为长距离生活性出行^[105]。休闲性出行行为主要发生在傍晚或者夜间，在晚八点钟前后达到高峰，学生主要在校园内与朋友散步或者在学校周边吃饭、在咖啡馆聊天或在操场上锻炼。休闲性出行的距离与交通性出行相仿，主要由高校规模、校园空间布局及学生个人生活习惯等要素决定。因为休闲性出行以休息游憩为目的，在出行活动发生时常伴随着与同伴交谈、嬉戏等行为的发生^[106]，并因休闲性出行常发生在绿地等场所，因此出行方式以步行为主^[47]。

2.3.2 出行影响因素

总结相关文献，可以将学生出行影响因素分为以下四点：

(1) 校园的交通系统^[95]。校园步行交通系统对学生的出行有很大的影响，步行环境会影响学生对道路的选择^[95]。校园机动车交通系统并不直接作用于学生出行，但会对步行交通系统产生影响，例如与步行路线的冲突会影响学生的出行选择。国内部分校园内道路没有等级划分与功能分类，施行人车混行的设计策略^[107]，步行系统很大程度上受制于机动车交通系统，进一步增强了机动车交通系统对学生出行选择的影响^[47]。

(2) 校园的空间结构^[95]。校园的空间结构决定了教学楼与宿舍的空间关系、各功能分区之间的联系紧密程度、校园步行和机动车交通系统的相互关系。不同的空间结构会促使学生选择不同的出行方式和路径。

(3) 学生的社会属性、个人偏好^[98]。性别、年龄等会对学生出行产生影响,例如男生的出行自主性高于同年龄段的女生,且更趋向于选择更加活跃的交通出行方式^[108]。个人的选择偏好也会影响出行方式的选择,如喜欢运动的学生更倾向于选择步行或自行车作为出行方式,而忽略时间和经济因素^[99]。

(4) 新交通方式的出现。近年来,共享单车、共享电动车、电动滑板、共享汽车、网约车等新交通方式的出现,为学生出行提供了更多选择^[109]。相比较普通市民,高校学生群体思想开放,对于新交通方式的接受度更高^[98]。因此在高校校园中除了常见的自行车之外,还可以经常见到滑板车、共享电动车等新交通方式。

2.4 计算机仿真模拟研究

计算机仿真模拟是实现社交隔离出行模拟、病毒传播动态模拟数据获取的核心技术方法。传染病的人际传播的动态模拟是一项复杂的任务,需要各个研究领域的密切合作。前人在这一领域的研究可以根据其多学科特征分为两大主题:行人动力学和传染病学。下文对这些研究进行综述,为本文的模型设计提供理论指导。

2.4.1 行人仿真模拟

关于行人行为的研究最早是从1958年开始的^[110],至今已经有半个世纪的历史,在建筑设计、计算机图形学和机器人运动规划等领域有很多新颖的应用^[111]。早期研究以行人设施的设计要素、规划指南或服务提升为主要的研究目标^[112],多是基于观察、照片、延迟摄影等技术手段,难以进行定量评估^[113]。同时,因为缺乏系统数据,所以对于更精细尺度的研究进展非常缓慢^[114]。20世纪70年代至今,随着信息技术、地理信息技术、遥感、系统科学、人工智能等领域的普及和发展,在数学上处理和定义此类问题的方法得以产生,涌现出了很多行人建模、仿真模拟和路径规划模型。仿真是通过模型来模拟现实系统,帮助我们了解、改进现实系统,对新系统进行开发设计和规划的一种活动^[115]。仿真建模的核心问题是抽象出被建模对象的主要特征,然后通过概念模型进行形式化表达,再利用数学逻辑模型来构建一个可计算模型^[116]。

行人出行是一个复杂系统,具有自治性、非线性和涌现性等等特性,很难进行理论分析。人群规模很大,往往达到成百上千人,难以精确重复,也难以通过在现实世界进行研究,因此,使用仿真的方法研究行人系统几乎已成为必须。通过对行

人系统建模、运行、数据收集、数据分析、改进模型、再运行的循环也可以不断加深研究者对行人系统规律的发现和认识^[117]。行人仿真模型通过数学模型模拟人群与环境在不同场景和影响因素下的交互，与真实系统的实验相比，有如下好处：（1）方便灵活，降低成本，消除不确定因素的影响，更加安全可靠；（2）实现对疏散策略、相关理论和假设的验证与评估；（3）当重新规划的成本有限时，管理者可以在规划阶段早期使用模拟来深入了解疏散的可能问题，优化疏散策略；（4）大型事故中的救援队可以提前使用模拟来更好地了解各种情况^[113]。

目前有多种行人模拟的仿真模型，可根据空间表现、聚集程度、群体行为生成和行人动态进行分类^[118]：（1）根据空间表现，现有的行人仿真模型包括连续型模型和离散型模型两种，区分标准是用于描述行人系统的基本变量，例如空间、时间和状态（例如速度）是离散的还是连续的。例如元胞自动机模型、格子气模型是离散型模型的代表，而社会力模型是连续型模型的代表。（2）按聚集程度，可将现有模型分为三类，即宏观、中观和微观模型。宏观模型将疏散人群假设为具有一定密度和速度的连续流体进行图形表示和计算建模^[119,120]，关注于整体运动的动力学表征。中观模型可以单独表示行人，但是行人的运动是统一计算的，因此不具有任何个性化特征。微观模型将行人视为离散的个体，将个体的身体素质、情感、偏好、性格等生理和心理特征纳入模型以实现对每个个体的单独建模，目的是模拟同一场景下不同个体的差异化反馈^[121]。（3）根据群体行为生成，可分为基于智能体的、基于规则的、基于力的模型。在智能体模型中，智能体用来描述一类行人，他们具有自己的个性化特征。智能体能够感知环境，并被其他智能体感知，从而与环境和其他智能体交互，可以细致地刻画人的相互作用和决策^[122]。基于规则的模型中，个体行为受到他们当前的状态、附近的情况和目标等因素的影响^[118]。基于力的模型使用牛顿运动定律作为对行人运动建模的基础。这类模型通过计算微分方程的数值解，模拟智能体受到内外部施加的力的作用而产生加速度，进行连续的微观仿真，例如离心力模型^[123]和社会力模型^[124]等。（4）根据行人动态，可分为随机行为与确定性行为。在随机行为中，行为受到概率的控制，在相同的情况下可能会做出不同的反馈，即使将随机性用于简单系统，也可以产生相当复杂的行为。在确定性模型中，特定的行为完全取决于当前的状态。

事实上，没有任何一种分类方法可以包含所有种类的模型，因为模型的某些特征之间是互相交叉的。为了构建社交隔离下行人出行行为的动态仿真，本文主要参考社会力模型的相关概念，接下来对其国内外研究进展进行简要总结。

2.4.1.1 社会力模型发展

自 Helbing 和 Molna^[29]的工作以来, 社会力模型已被用于各种研究, 例如紧急疏散研究^[113]、设施设计^[113]、行人自组织现象^[112]和室内路线优化^[125]。图 2.3 展示了在封闭环境、烟雾环境、通道环境和障碍环境下社会力模型的应用。然而, 使用该模型进行行人动力学模拟仍然需要更好的算法, 因为许多问题还没有得到充分解决, 如行人振荡^[126]、系统平衡^[127]、行人之间的碰撞^[128]和模型参数的校准^[129]。

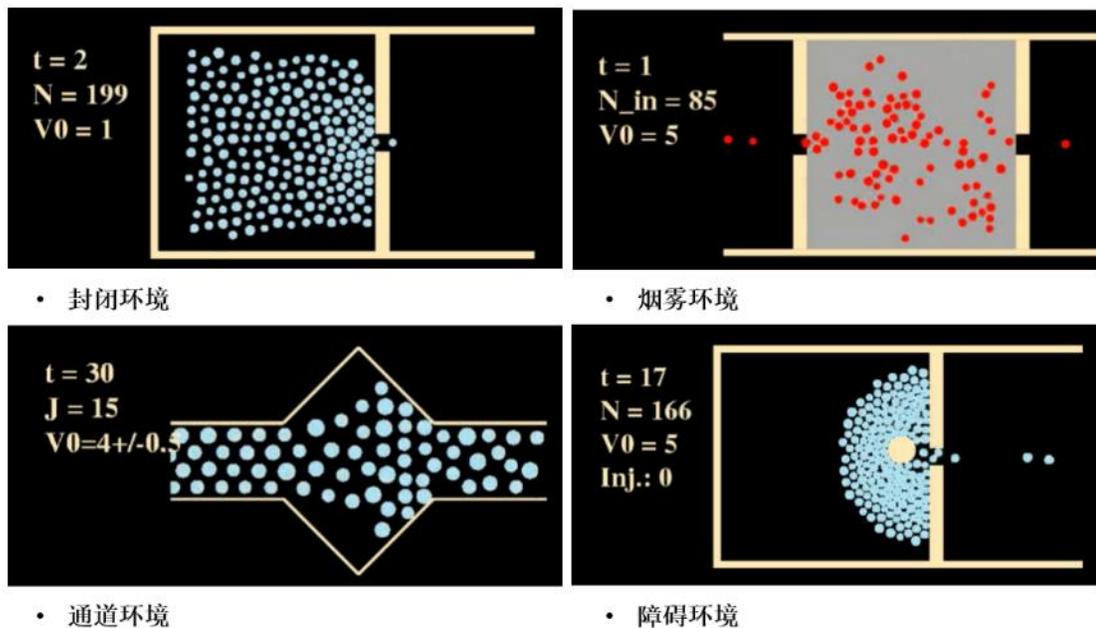


图 2.3 社会力模型在不同环境下的模拟快照

图片来源: Helbing 等^[124]

一些学者基于不同需求对社会力模型进行优化。为了提升模拟准确度, Helbing 等人根据行人运动的视频记录, 确定社会力模型的最佳参数规格^[113]; Liu 等人^[130]提出了一种视频数据驱动的人群疏散社会力模型, 定义了适应度函数来模拟行人的目标选择行为; 文献^[131]提出了基于推断和预测的分段函数来描述速度和行人间距离的线性关系, 以及行人间的排斥力和相对距离的关系; 魏娟等人^[132]结合鸽群算法, 改进了自驱力的方向, 可以提高人群在多出口环境下=疏散的模拟精度。为了解决行人避障时的震荡和碰撞引发的异常行为, 文献^[128]引入尊重距离来衡量行人的避障意识, 在行人的期望运动方向前生成一个以尊重距离为直径的圆形尊重领域, 当它被侵占时行人的期望速度会变为 0; 面对同样的问题, 文献^[133]和文献^[134]均用速度和距离两个参数设计避障机制, 其中前者通过行人现状速度预

测其下一个时间步的位置，将预测的位置带入行人和其他行人及障碍物的排斥力的计算，后者在原有的排斥力上增加了由“相对速度影响系数”计算的“心理速度作用力”，发现疏散效率随着相对速度影响系数的调整呈现正负两方面的变化。为了研究冲突对行人运动的影响，文献^[135]增加了干扰作用力来模拟“插队”和“离队”行为，发现疏散效率受人群密度和截面位置与初始期望速度的夹角的综合影响；梁柯等人^[136]引入紧张因子描述行人逃生时的情绪变化，得出紧张心理对行人疏散的影响规律。

2.4.1.2 社交隔离下的相关模型发展

在新冠疫情大流行的推动下，越来越多的研究在算法或实验上考虑了行人社交隔离下的出行动态模拟。Daniel 等人^[137]在“收缩智能体模型”^[138]的基础上增加了一个与距离有关的回避机制，模拟行人在超市中的活动，测量了小于 2 米的接触事件及其持续时间，以研究顾客数量对社交隔离的影响，研究建议增加结账点的数量并减少顾客的结账时间以保持足够的距离。Christina 等人^[139]提出了最优步数模型（OSM）中个人空间参数的新取值，模拟了行人之间保持 1.5 米和 2.0 米安全距离的出行行为。Echeverria 等人^[140]实施了一个受控的实验室实验，研究人们在相对密集的人群中试图维持与他人的物理隔离时的行为，研究发现为了满足 1 米的社交距离，行人密度不应高于 $0.16 \text{ 人}/\text{m}^2$ ^[140]。Caspar 等人^[141]开发了一种可扩展的算法来实时分析人群中接触的“距离-时间”模式，基于行人跟踪传感器数据识别社会群体和监测安全距离，为公共空间的行人距离管理提供了技术支持。

2.4.2 传染仿真模拟

疾病自始至终都是人类的一大挑战和难题，从古至今基本上每一个时代每一个国家都会遭受到疾病的危害，疾病对人类产生了重要的影响。瘟疫、鼠疫、天花、霍乱、流感等等疾病造成了无数人付出生命的代价，但是之前的疾病人类的研究并没有考虑到人传人这一现象，直到 19 世纪人们才开始讨论人与人之间的传染^[142]。传染病的发生和传播受到各种各样环境因素的影响，因此对其的研究一直是难点和热点之一。

2.4.2.1 传染动力学模型

数学和统计模型的出现给传染病传播过程带来新的研究方向。最早在 1854 年，英国伦敦的医生通过绘制霍乱地图发现了霍乱病毒的污染源^[143]。为了研究黑死病

和瘟疫的传播规律，苏格兰流行病学家提出了被广泛应用和研究的经典流行病传播的 SIR (Susceptible, Infectious, Recovered) 动力学模型^[144]，该模型将人群分为易感者 S 类、传染者 I 类以及治愈者 R 类，用确定性微分方程组描述 3 类人群在数量上的变化关系，被广泛应用于各种各样的流行病建模中^[145-147]。经过多年的发展，流行病学领域将传染病的传播过程中涉及的主要人群分为四类，第一类是 S 类，指的是虽未得病但是缺乏免疫力者，为易感人群；第二类是 E (Exposed) 类，指的是已经感染但无法传播病毒的暴露人群；第三类是 I 类，指的是已经感染传染病的人群，这部分人群可将疾病传播给 S 类人群使其成为 E 类或 I 类人群；第四类是 R 类，指的是被治愈而拥有免疫力的人群^[148]。

下面对几种常见模型进行简单介绍。在 SIR 模型基础上，如果加入潜伏期的概念，则可在 SIR 模型的基础上引入 E 类（携带病原体但无法传播）人群，就形成了 SEIR 模型^[148]。而 SIS 模型为易感-传染-易感模型，它将人群划分为两类，分别为易感人群 S 类和染病人群 I 类。模型认为，I 类有一定概率被治愈并转化为 S 类，同时也有一定概率将病毒传给 S 类，使 S 类成为新的传染源（I 类）^[149]。

然而，上述流行病学的模型多将人口规模视为常数，没有考虑到现实生活中公共场所的行人数量是可变和动态的。此外，尽管微观层面的人口流动过程和人群中的人际互动^[37]对病毒传播至关重要，但是鲜有研究考虑。因此，上述模型很少能揭示出一个人是由谁、在什么时候、以及在哪儿感染的^[150]。

2.4.2.2 疫情下的模型发展

从 2019 年末新冠疫情爆发以来，很多学者对新冠病毒的传播过程进行分析和研究，开发了很多传染动力学模型。文献^[151]中，作者提出一种带有隔离机制的 SEIR 模型，该模型考虑了无症状感染者和被隔离的易感者，文章表明对密切接触者进行隔离措施可以有效阻止病毒的传播；文献^[152]发表在著名的期刊《柳叶刀》上，基于 SEIR 模型分别考虑了从武汉来往国内外主要城市的交通总流量，研究证明中国在采取强有力的公共干预措施之后，对疫情的控制比世界其他没有采取干预措施的国家要好的多。与之类似的，文献^[153]也是基于 SEIR 模型，考虑了武汉与国内主要城市交通流量对新冠病毒传播的影响，发现在疫情早期阶段与疫情有关的不确定性相当大。研究结果表明与其他紧急冠状病毒相比，本次新冠疫情的基本繁殖数更高，这说明遏制这一病原体可能要困难得多。

还有学者利用数据拟合和时间变化对新冠疫情的传播进程进行了研究。文献^[154]利用经典的 SIR 模型对新冠病毒发病率的流行病学曲线进行了拟合，对基本繁

殖数进行了计算，并对疫情曲线的高峰和终止时间进行了预测。文献^[155]利用参数化的 SEIR 模型，通过敏感性分析确定了关键因素，绘制出了基本繁殖数的走势图，模拟后进行数据拟合。实验分析表明，早发现、早隔离、充足的医疗用品和综合治疗等策略具有十分重要的意义。文献^[156]采用随时间变化的病毒传播速率来研究新冠病毒的传播，研究结果表明中国的春运高峰是疫情向境外扩散的导火索。

2.4.3 协同仿真模拟

行人动力学和传染病学是两个复杂的学科，将两个学科结合起来可以更好的预测新冠病毒在人群中传播动态。下面从宏观和微观两个尺度介绍行人仿真模拟和传染仿真模拟的协同仿真模拟研究。

2.4.3.1 宏观尺度研究

一些学者考虑了人群的行为规则，通过模拟大规模人口和区域的交互，提出宏观尺度下空间规划与行人管理建议。如赵翌僮等人^[157]运用空间聚类和多主体模型对疫情传播规律进行分析，确定了疫情最严重的地区，并为医疗卫生资源的投入指明了方向；潘海啸等人^[158]利用居民出行调查数据，构建行人仿真出行模型，模拟病毒在城市内的动态传播过程，对抑制传播途径和采取全民预防措施的效果进行模拟分析；Moslem 等人以通勤方式选择为研究重点，利用最佳最差方法（BWM）定制模型评估居民出行选择方案，提出新的通勤方式决策方法^[159]；Pakz 等人对伊斯坦布尔的 337 名参与者调查发现，疫情的爆发降低了人们对休闲活动空间的兴趣，未来公共空间设计可能会转向小型公共空间^[160]；不少学者运用多智能体构建新冠肺炎病毒防控仿真模型，模拟在不同防控措施下的疫情动态发展趋势，为疫情防控提供空间规划策略和管理决策依据^[161-163]。

这些研究虽然较好的拟合并预测了城市的总体感染人数的发展趋势和病毒扩散网络，但是提出的解决方案尺度过大，难以在校园防疫中被有效的执行。

2.4.3.2 微观尺度研究

一些研究通过对人流密集的公共场所的步行轨迹进行精细建模，分析人与人的相互作用，评估微观尺度下人群流动过程中病毒传播情况，为公共场所的空间组织与行人管理策略提供科学指导。如 Derjany 等人通过一个结合了行人动力学和随机感染传播模型的多尺度模型评估不同蛇形队列下新感染人群的总数和概率，发现硬质隔板和短通道的组合有效地降低了感染传播^[164]；方乐恒等^[165]基于强化学习建立

了个体与复杂环境交互模型，分别模拟了有、无干预手段下的新冠疫情发展进程，为针对疫情传播精细化管控和实施智能防控策略建立了可计算的框架基础；Namilae 等人结合社会力模型与随机传染动力学模型，评估了飞机内旅客流动和航空旅行政策对传染病空间传播的影响，发现小型飞机可以有效地减少乘客之间的接触，登机政策比下机政策对感染传播更重要^[166,167]。

这类研究与本文类似，但是他们的侧重点与本文有所不同（关注机场、排队等），基于校园空间的研究较少。同时，这类研究对于感染的判断大多数通过概率，难以模拟飞沫传播的过程。

2.5 本章小结

本章从高校校园空间规划、校园环境评估、学生出行行为和仿真模拟 4 个角度对本文涉及到的各领域文献进行了系统综述。在文献查阅的过程中，相关研究和实践给了本文很多启发，但也存在很多不足，总结如下：

（1）经过数十年的发展，高校校园规划已经形成了较为完整的体系，总结了很多规划原则、设计手法和空间布局策略。疫情背景下，虽然国内外管理者、设计师提出了一些校园防疫的空间措施，但是总体而言，目前的校园防疫手段仍以政策管理为主，缺乏物理空间规划的支撑，即使有空间层面的设计，范围也比较小，不成体系，缺乏从校园整体空间入手的防疫体系规划策略。

（2）我国的校园建设与国外相比起步较晚，相关问题暴露较少，校园环境评估的相关研究也较少，现有研究大多从物质空间环境、主客观视角、定量、定性方法、指标体系等方向来研究校园交通体系。研究结果表明，校园的建成环境、道路结构、管理政策等均会影响学生在校园中的行为。相关研究尺度较大，关注整体和系统，将评估结论反馈到设计手段的探索较少，难以在物质空间中有效落实。另外，关于校园环境疫情风险的相关评估方法和指标体系十分缺乏，现有的评估方法和指标很难直接用于校园疫情风险的评估，需要提出新的针对性指标体系。

（3）关于学生出行行为的研究发现，国内外学者把研究重点放在了学生的交通性出行上，对校园内的生活性出行和休闲性出行的研究较少。现有研究表明校园的交通系统、空间结构和学生的个体属性与偏好等会影响出行行为。但是，现有研究是建立在在正常出行条件下，研究结果对社交隔离条件下的出行是否有效，缺乏理论和数据支撑，因此相关结论难以直接用于指导疫情时期的校园空间管理实践。

(4) 在仿真模拟领域，行人仿真和传染评估模型各自有较为成熟的发展。自新冠病毒爆发以来，众多学者对新冠病毒的传播、社交隔离出行及感染防治进行的研究，提出了很多行人仿真和传染病仿真协同模型，为本文提供坚实的理论支撑。但是，这些仿真模型仍然存在一定的局限性，例如对于感染的判断大多数通过概率或者偏微分方程，涉及行人在运动过程中与呼吸道飞沫接触而导致感染的物理模拟类研究较少；大多都是从宏观角度进行研究，而从微观的、短时的角度研究行人之间的互动行为所做的努力相对较少，难以用于社区尺度的感染预防措施的模拟。

在新冠疫情的背景下，高校校园面临严峻的防疫压力。为了提高大学校园对疫情的预防和应对能力，将防疫体系落实到校园物质空间显得十分重要，需要更多的研究作为支撑。另外，随着防疫常态化和防疫政策深入人心，很多师生在出行时也有意识的保持安全隔离。必须要考虑学生出行行为的变化，才能有效指导校园的疫情防控。由于新冠病毒的传播十分迅速，常常发生在人与人近距离接触的时候，因此需要研究行人动态出行过程中的病毒传播情况，而校园内的出行往往距离、时间较短，因此过往研究采取的仿真模型难以应用，需要开发更适合短时模拟的病毒传播评估模型。综上，开展社交隔离下高校学生出行行为评估，对建立校园易感染区域的检测和识别机制具有重要意义，有助于校园防疫规划的实施。

第3章 多智能体仿真模型设计

新冠病毒的传播与行人出行具有密切关系，想要对校园空间的疫情风险进行合理的评估，必须要掌握空间中人的出行特征、轨迹特征和新冠疫情的传播规律。校园环境的使用者是学生，校园疫情风险评估离不开对学生行为的把握。计算机仿真技术可以很好的模拟学生的出行行为，研究学生在空间中的分布规律，是本文风险评估、问题定位、优化设计的技术支撑。

本章从学生的步行特点出发，结合疫情防控下的社交隔离需求，设计了一个能够模拟增距出行的行人动力学模型。该模型可以模拟遵守社交隔离的行人和不遵守社交隔离的行人的混合出行，更贴近疫情下的真实出行场景。此外，根据新冠病毒的传播特点设计了一个基于呼吸周期、感染颗粒浓度、病毒传播半径的传染评估模型。将传染评估模型与行人动力学模型结合，可以模拟疫情下学生的出行行为，判断新冠病毒在校园中的传播情况。仿真模型框架如图 3.1 所示。

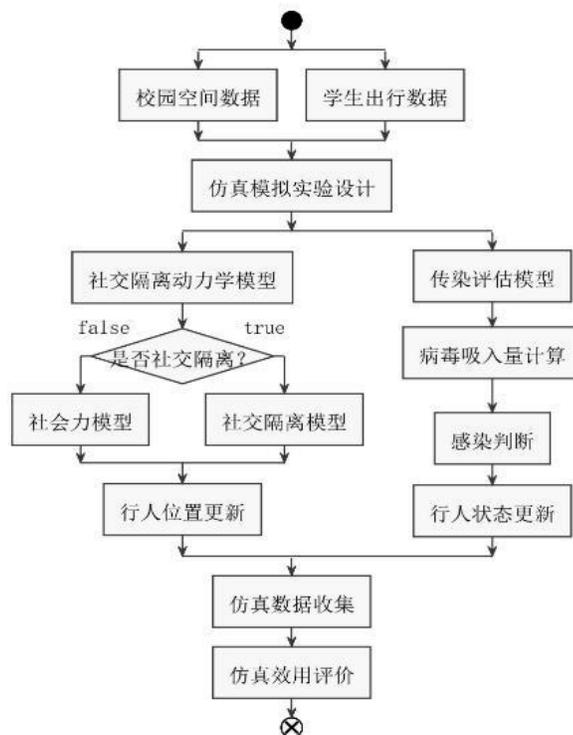


图 3.1 仿真模型框架
图片来源：作者自绘

3.1 行人动力学模型设计

疫情下行人出行与正常出行最主要的区别就是人与人的距离不同，社交隔离作为最有效的防控手段之一，被世界各国广泛采用。随着疫情防控进入常态化，社交隔离的理念逐步深入人心，越来越多的人在日常出行中，会主动选择远离人群，以降低自己被感染的风险。为了实现上述出行场景下的行人行为的仿真模拟，本文在“社会力模型”的基础上设计新的动力学公式，可以实现如下三个特性：（1）行人与障碍物之间的排斥力，可以模拟建成环境对于学生出行行为的影响；（2）自航力，可以模拟学生受课程设置、活动组织等“外力”影响的带有目的性的出行行为；（3）在行人之间社交排斥力的基础上，增加与社交隔离相关的排斥力，可以模拟不同的社交距离下的学生出行行为。

整个模型设计框架如图 3.2 所示。首先，全局约束条件主要指人的生理属性和心理意识对人的出行行为产生影响，因此需要作为模型的触发条件加以考虑。第二，修正社会力模型的动力学方程，应用了邻域依赖的自我减速机制和防疫的心理排斥机制，防止模拟中行人之间密切接触。通过上述两点，修改后的模型可以用于模拟学生的社交隔离出行行为。

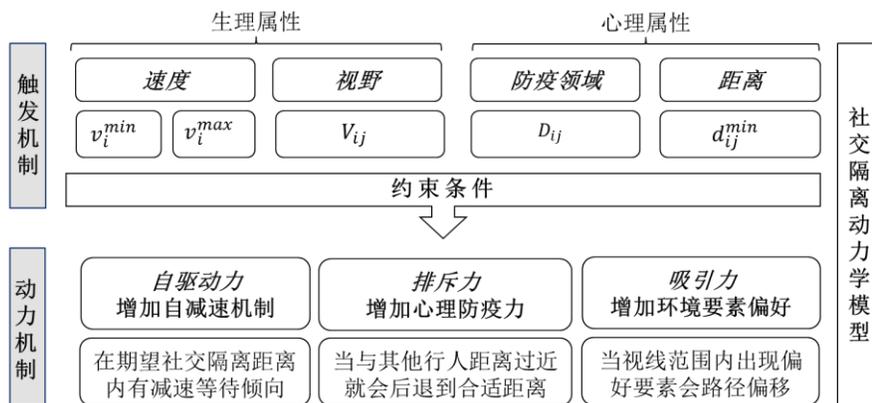


图 3.2 行人动力学模型框架

图片来源：作者自绘

3.1.1 社会力模型原理

本文设计的行人动力学模型参考了社会力模型，因此先对社会力模型的基本原理进行介绍。社会力模型是一种基于牛顿力学的多智能体模型，可以在连续空间中

灵活的模拟单个行人的运动。该模型的提出基于如下假设：行人运动是一个相对确定的系统^[112]，具有规律性^[168]，可以通过反映环境影响的力的矢量叠加来描述，行为受场域和心理环境的影响发生变化^[29]。在上述假设下，可以用社会力反映行人间的社交互动和避障行为，模拟运动中的加速或减速效果。社会力在模型中具体表现为出行意图和环境影响的力的叠加：（1）自航力，行人根据其出行目的，会有向着目标地点前进的趋势；（2）排斥力，行人会与其他行人和障碍物之间保持距离来避免碰撞；（3）吸引力，表达了同行人的亲密关系和舞台、美景等对行人的吸引效果^[113]。排斥力和吸引力共同影响行人运动的强度和方向。

社会力模型具有评估流行病研究中接触估计所需的完整个体轨迹的优势^[164]，这是因为该模型可以通过定义一些力在连续空间中灵活的模拟单个行人的运动^[169]，也能够实现对意愿和动机的建模^[170]。因此，本文选择社会力模型作为研究疫情防控下校园人员流动的基本模型。社会力模型的数学表达示^[124]如下

$$\vec{F}_i = \vec{f}_i + \sum_{j(\neq i)} \vec{f}_{ij} + \sum_w \vec{f}_{iw} = m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} \quad (3-1)$$

上式中， \vec{f}_i 指行人向目的地前进的自航力。 \vec{f}_{ij} 描述了两个行人*i*和*j*之间的排斥力，力的大小取决于他们的速度和距离。 \vec{f}_{iw} 指行人*i*与障碍物*w*间的排斥力，行人和障碍物的距离越远，力的强度越小，距离越近，强度越大。当行人与其他行人或障碍物发生物理接触时会触发额外的相互作用力和摩擦力。 \vec{F}_i 的示意图如图 3.3（a）所示。

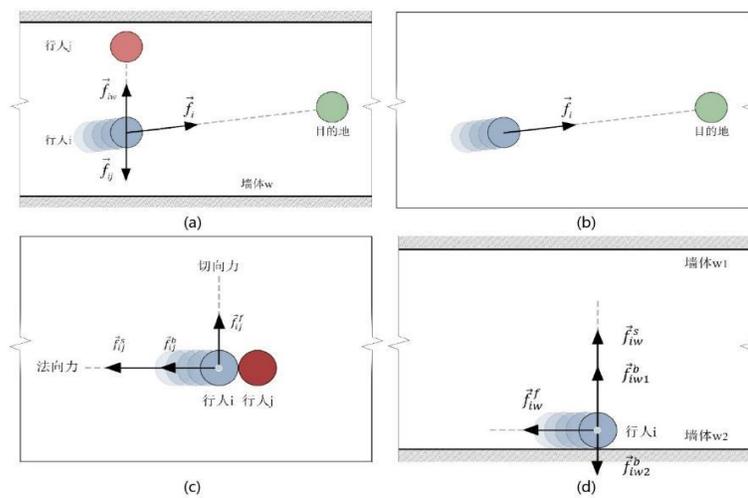


图 3.3 社会力模型受力示意图。（a）合力（b）自航力（c）行人力（d）环境力
图片来源：作者自绘

人的行为和决策通常取决于效用最大化理论，即行人期望以最便捷的方式前进，尽量避免障碍物和其他行人以减少延误的风险^[168]。因此在无外界其它干扰的运动过程中，行人会出现以期望速度沿着最短路径抵达目的地的行为，可以通过自航力 \vec{f}_i 表示，计算方法如下

$$\vec{f}_i = \frac{m_i}{\tau} \left(v_i^0(t) \vec{e}_i^0(t) - \vec{v}_i(t) \right) \quad (3-2)$$

上式中， m_i 代表着行人 i 的体重； $v_i^0(t)$ 为行人 i 在 t 时刻的期望速率； $\vec{e}_i^0(t)$ 为行人 i 在 t 时刻的期望运动方向的单位向量，一般是从行人 i 指向目的地的单位向量； $\vec{v}_i(t)$ 为行人 i 在 t 时刻的实际速度向量。当行人的实际速率超过或低于 $v_i^0(t)$ 时，他会尝试在接下来的一段时间内回到期望速率，这段时间称为弛豫时间 τ 。 \vec{f}_i 的示意图如图 3.3 (b) 所示。

行人之间的作用力 \vec{f}_{ij} 可以拆分为社会力 \vec{f}_{ij}^s ，身体作用力 \vec{f}_{ij}^b 和滑动摩擦力 \vec{f}_{ij}^f 三部分， \vec{f}_{ij} 的计算方法如下

$$\vec{f}_{ij} = \vec{f}_{ij}^s + \vec{f}_{ij}^b + \vec{f}_{ij}^f \quad (3-3)$$

$$\begin{cases} \vec{f}_{ij}^s = A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] \vec{n}_{ij} \\ \vec{f}_{ij}^b = kg(r_{ij} - d_{ij}) \vec{n}_{ij} \\ \vec{f}_{ij}^f = \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \vec{t}_{ij} \end{cases} \quad (3-4)$$

$$g(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ x, & x \geq 0 \end{cases} \quad (3-5)$$

公式(3-4)中， \vec{f}_{ij}^s 指社会力，其中 A_i 和 B_i 是常量，分别表示相互排斥作用力的强度和范围。 $r_{ij} = (r_i + r_j)$ 表示行人 i 和 j 的半径 r_i 与 r_j 的和； $d_{ij} = \|\vec{r}_i - \vec{r}_j\|$ 代表行人 i 和 j 重心的距离； \vec{n}_{ij} 表示从行人 j 指向 i 方向的单位向量。 \vec{f}_{ij}^b 代表身体作用力， \vec{f}_{ij}^f 代表切向的滑动摩擦力，这两个力只有在人与人发生接触的时候才会触发，由开关函数 $g(x)$ 控制，见公式(3-5)。 $\vec{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ 代表行人 i 和 j 的切线方向， $\Delta v_{ji}^t = (v_j - v_i) \cdot \vec{t}_{ij}$ 和分别代表切线速度差； k 和 κ 是两个很大的常量，分别代表身体作用力和滑动摩擦力作用的强度。 \vec{f}_{ij} 的示意图如图 3.3 (c) 所示。

行人与障碍物之间的作用力 \vec{f}_{iw} 可以拆分为社会力 \vec{f}_{iw}^s ，身体作用力 \vec{f}_{iw}^b 和滑动摩擦力 \vec{f}_{iw}^f 三部分， \vec{f}_{iw} 的计算方法如下

$$\vec{f}_{iw} = \vec{f}_{iw}^s + \vec{f}_{iw2}^b - \vec{f}_{iw}^f \quad (3-6)$$

$$\begin{cases} \vec{f}_{iw}^s = A_i \exp[(r_{ij} - d_{iw})/B_i] \vec{n}_{iw} \\ \vec{f}_{iw}^b = kg(r_i - d_{iw}) \vec{n}_{iw} \\ \vec{f}_{iw}^f = \kappa g(r_i - d_{iw})(\vec{v}_i \cdot \vec{t}_{iw}) \vec{t}_{iw} \end{cases} \quad (3-7)$$

公式(3-6)中社会力 \vec{f}_{iw}^s ，身体作用力 \vec{f}_{iw2}^b 和滑动摩擦力 \vec{f}_{iw}^f 的计算方法与上文类似，差异在于 d_{iw} 代表行人 i 与墙 w 的垂线距离， \vec{n}_{iw} 为行人到墙的垂线向量， \vec{t}_{iw} 为行人到墙切线方向的向量。 \vec{f}_{iw} 的示意图如图 3.3 (d) 所示。

3.1.2 全局约束条件设置

在社交隔离防疫措施下，许多因素不知不觉地影响着行人的行为决定，这些因素包括行人视线范围、与他人的距离和心理因素。为了更精细化的描述行人运动，符合人的生理属性，本文提出了 4 个全局约束条件，即速度、视觉角度、最小距离和平均防疫领域来表达行人行动的各向异性。现假设在行人集合 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 中有位置为 (x_i, y_j) 、肩宽为 r_i 的行人 P_i 和位置为 (x_j, y_j) 、肩宽为 r_j 的行人 P_j ，且满足 $\{i, j | i \in N, j \in N(i \neq j)\}$ 。则对于行人 P_i 和 P_j 这 4 个约束条件定义将在下文详细阐述，其中视野、最小距离、平均防疫领域的示意图如图 3.4 所示。

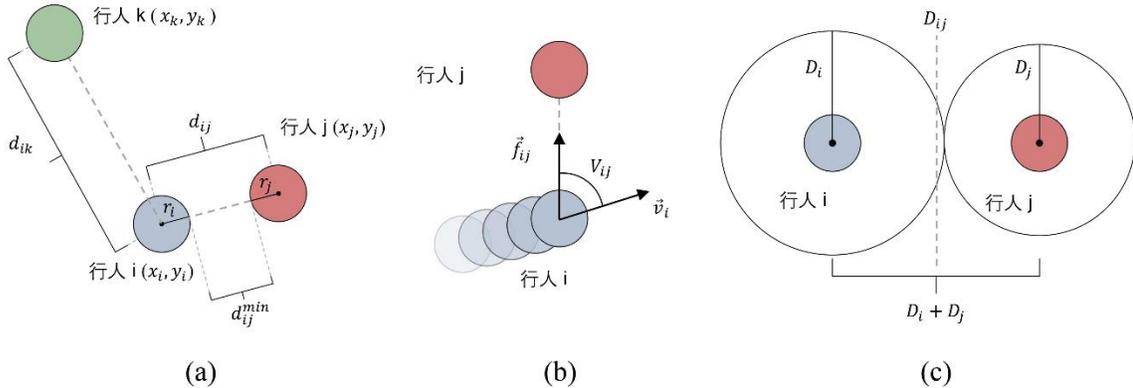


图 3.4 约束示意图。(a) 最小距离 (b) 视野 (c) 平均防疫领域
图片来源：作者自绘

(1) 速度约束。该约束旨在限制疏散期间行人 P_i 的最大速度 \vec{v}_i^{max} ，如果超过该速度则有受伤的风险，同时考虑到速度过小的情况，引入最小速度 \vec{v}_i^{min} 来进行一些相关的判断， $\vec{v}_i(t)$ 为行人的实际运动速度，则相关判断可表示为公式(3-8)。

$$\vec{v}_i(t) = \begin{cases} \vec{v}_i^{min}, & \|\vec{v}_i(t)\| < v_i^{min} \\ \vec{v}_i(t), & \|\vec{v}_i^{min}\| \leq \|\vec{v}_i(t)\| \leq \|\vec{v}_i^{max}\| \\ \vec{v}_i^{max}, & \|\vec{v}_i(t)\| > \|\vec{v}_i^{max}\| \end{cases} \quad (3-8)$$

(2) 距离约束。对于一个正在移动并遵守社交隔离的行人而言，他受最近的人的影响最大，因此本文只将与当前行人距离最近的其他行人的距离作为计算依据。为了模拟这种情况，我们引入最小距离 (d_{ij}^{min})。定义如公式(3-9)所示。

$$d_{ij}^{min} = \min \{d_{ij} - r_j; j \neq i\} \quad (3-9)$$

式中， $d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2}$ 表示行人 P_i 和行人 P_j 的中心点之间的距离。

(3) 视野约束。根据经验，行人一般只注意到他们前面的行人，而不是他们后面的行人^[113]。因此，我们增加了视角 V_{ij} 以加强我们的模拟在视觉、生理学或心理感知方面的有效性。在平面维度上行人之间的视角 V_{ij} 由公式(3-10)给出。

$$V_{ij} = \arccos\left(\frac{\vec{v}_i \cdot \vec{n}_{ij}}{\|\vec{v}_i\| \|\vec{n}_{ij}\|}\right) \quad (3-10)$$

其中 $\vec{n}_{ij} = \frac{(x_i, y_i) - (x_j, y_j)}{d_{ij}}$ 指从 P_j 指向 P_i 的单位向量。 V_{ij} 表示行人 P_i 的移动方向与从行人 P_i 指向行人 P_j 的矢量之间的弧度大小。

(4) 防疫领域约束。本文引入平均防疫领域 (D_{ij}) 参数来反映行人与他人保持距离的倾向。如果行人 P_i 的防疫领域 D_j 为零，则代表该行人没有社交隔离的意识，否则代表行人期望的防疫距离。则行人 P_i 和行人 P_j 的 D_{ij} 可以表示为公式(3-11)。

$$D_{ij} = (D_i + D_j)/2 \quad (3-11)$$

3.1.3 动力学算法设计

动力学算法设计的核心是实现调节人与人之间距离的功能。借鉴社会力模型的基本框架^[124]，创建多智能体系统。在该系统中，每个行人都被单独表示为具有独立属性（质量、期望速度、期望防疫距离和视角等）的智能体。每个智能体的加速度由其偏好速度和其他智能体的影响控制。对于一个质量为 m_i ，且遵守社交隔离（即 $D_i > 0$ ）的行人 P_i 而言，他受到的合力可以表示为

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = \vec{f}_i^{(self)} + \frac{1}{m_i} \vec{f}_i^{(others)} + \frac{1}{m_i} \vec{f}_i^{(walls)} + \frac{1}{m_i} \vec{f}_i^{(attraction)} \quad (3-12)$$

$\vec{f}_i^{(self)}$ 代表自航力，使智能体试图以其期望的速度移动到终点，因此可以被视为一个驱动项。其中 $\vec{f}_i^{(others)}$ 是由于其他智能体而产生的总力。 $\vec{f}_i^{(walls)}$ 是该智能体与障碍物产生的排斥力之和，在本文中计算方法与社会力模型完全一致，因此下文不做赘述。 $\vec{f}_i^{(attraction)}$ 可以表示行人偏好的要素对行人的吸引力，例如舞台、景点、特殊表演或一些不寻常的活动等^[124]。接下来对每一个力的具体计算方法进行阐述。

(1) 自航力 $\vec{f}_i^{(self)}$ 。如约束条件所述，距离和视野是遵守社交隔离的行人运动中的两个关键因素。由于智能体应该与前面的智能体保持一定的距离，当智能体接触到他与前面的智能体的平均防疫领域时，就会引入一个自我减速机制，该机制令智能体 P_i 的期望速度减少到零，直到后面的智能体不再接触二者的平均防疫领域为止。在没有头部运动的情况下，人类的水平双眼视角为 124° (0.68π)^[171]，这可以作为减速检测的判断标准。基于上述论述，智能体的 $\vec{f}_i^{(self)}$ 的典型结构可以被定义为

$$\vec{f}_i^{(self)} = \begin{cases} \frac{\varphi v_i^0 \vec{e}_i^0 - \vec{v}_i}{\tau} \left[1 - \varphi \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}^{min}} \right)^2 \right], & V_{ij} \leq 0.34\pi; \varphi = \begin{cases} 0, & D_{ij} \geq d_{ij}^{min} \\ 1, & D_{ij} < d_{ij}^{min} \end{cases} \\ \frac{1}{\tau} (v_i^0 \vec{e}_i^0 - \vec{v}_i), & V_{ij} > 0.34\pi \end{cases} \quad (3-13)$$

上式中， P_j 是距离 P_i 最近的智能体， v_j^0 是智能体的期望速度。 \vec{e}_i^0 是智能体的期望运动方向， $\vec{v}_i(t)$ 是智能体的实际运动速度， τ 是松弛时间，在此时间内智能体的速度从 \vec{v}_i 到达 $v_i^0 \vec{e}_i^0$ 。 φ 是截断距离，如果平均防疫领域被 P_j 占据 ($D_{ij} \geq d_{ij}^{min}$)，则等于0，否则等于1。因此，当 $\varphi = 0$ 时， P_i 的期望速度减小到零，当 $\varphi = 1$ 时， P_i 的自驱动力随着接近 P_j 而减小。 φ 意味着，当行人之间的距离过小时，行人会做期望速度为0的减速运动，即有保持静止的趋势，如图3.5（左）所示。当行人之间的距离大于平均防疫领域时，行人的自航力随着与他人的距离增大而增大，如图3.5（右）所示。

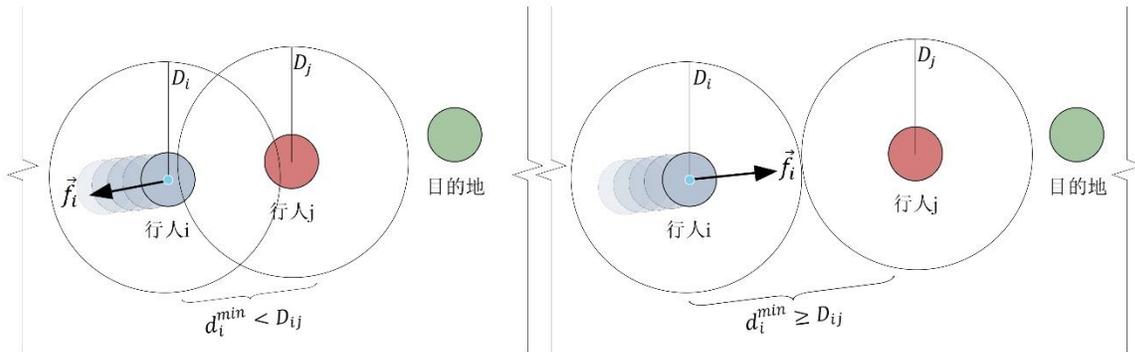


图 3.5 自航力示意图
图片来源：作者自绘

(2) 排斥力 $\vec{f}_i^{(others)}$ 。在社交隔离条件下，智能体之间会保持一定的距离，以防止病毒的传播。一个智能体离另一个给定智能体越近，那么另一个智能体在给定智能体的心理中引起的警惕性就越高。我们用排斥相互作用力来描述这种心理效应，如公式(3-14)所示，该公式分为两个部分：第一部分是最近智能体 (P_j) 的防疫排斥力 \vec{f}_{ij}^p ，第二部分是除 P_j 之外的周围的其他智能体的社交排斥力 \vec{f}_{ij} 。排斥力的示意图如图 3.6 所示。

$$\vec{f}_i^{(others)} = \begin{cases} A_i^p \left[\frac{D_i - d_{ij}^{min}}{D_{ij}} \right] \vec{n}_{ij} + \sum_{k(\neq i, j)} A_i^1 \exp \left[\frac{r_{ik} - d_{ik}}{B_i^1} \right] \vec{n}_{ik}, & D_i > d_{ij}^{min} \\ \sum_{k(\neq i)} A_i^1 \exp \left[\frac{r_{ik} - d_{ik}}{B_i^1} \right] \vec{n}_{ik}, & D_i \leq d_{ij}^{min} \end{cases} \quad (3-14)$$

其中 A_i^p , A_i^1 , 和 B_i^1 是常数：前两个参数可以解释为防疫领域和社交领域的互动强度，第三个参数决定了社交领域的互动范围。 \vec{n}_{ik} 和 \vec{n}_{ij} 具有相同的结构，即 $\vec{n}_{ik} = \frac{(x_i, y_i) - (x_k, y_k)}{d_{ik}}$ 是从 P_k 指向 P_i 的归一化矢量。此外， D_i 是 P_i 和 P_j 之间的直线临界距离。如果距离过小，后方智能体会受到排斥力而后退。式(3-14)确保当 P_i 位于另一个智能体的防疫领域内时，智能体之间的斥力增加从而促使智能体之间相互远离。而当它们之间的距离超过防疫领域时，公式(3-14)中的第一项不再适用，取值为零。

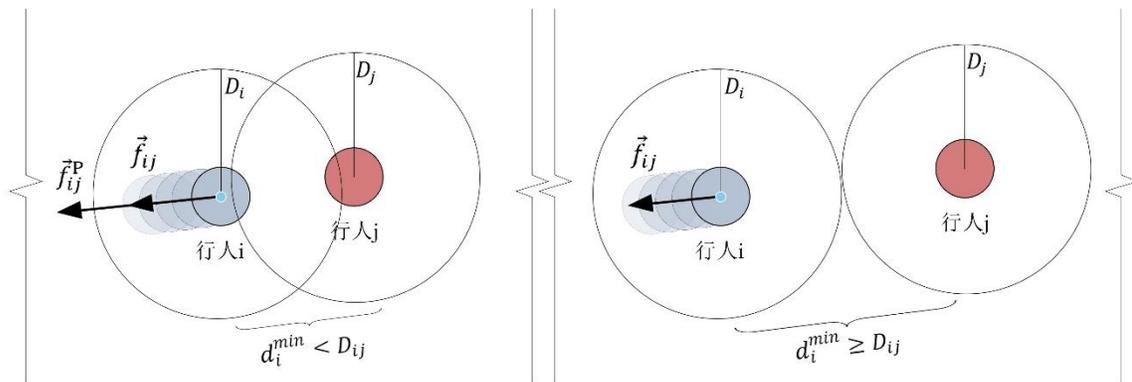


图 3.6 排斥力示意图
图片来源：作者自绘

(3) 吸引力 $\vec{f}_i^{(attraction)}$ 。为了更好的描述学生在校园内出行过程中对于某些要素的偏好，本文在社会力模型原始公式的基础上添加了吸引力。该力的整体形式与排斥力类似，但是符号相反，而且相互作用范围更大。同时，由于吸引不可能是永久的，因此吸引力还应该受到时间的影响，即随着时间的推移，要素对于行人的吸引力不断衰减。因此，可以用如下公式表示

$$\vec{f}_i^{(attraction)} = \sum_a \frac{A_i^a}{\lambda t} \exp\left[\frac{r_{ia} - d_{ia}}{B_i^a}\right] \vec{n}_{ai} \quad (3-15)$$

其中 A_i^a ， B_i^a ，和 λt 是常数，前两个参数可以解释为要素的吸引力大小和吸引范围，第三个参数决定了吸引力随着时间 t 的衰减速度。 \vec{n}_{ai} 和 \vec{n}_{ij} 具有相同的结构，是从 P_i 指向 P_a 的归一化矢量。在运动中，如果要素出现在行人感知范围内，则会产生吸引力，而且吸引力随着出现的时间推移趋向于 0。

3.2 传染评估模型设计

传染评估模型是仿真模型的重要组成部分，可以用于评估行人在各种空间形态中的被感染的情况，并模拟不同社交隔离比例（代表人口中有多少行人试图保持与他人的社交隔离距离）对大流行病传播的影响。本节先对新冠病毒的传播方式进行分析，再根据其特点进行模型设计。

3.2.1 新冠病毒传播特征

新型冠状病毒的主要传播方式如下：

(1) 飞沫与气溶胶传播。新冠病毒感染者在呼吸、说话、唱歌、锻炼、咳嗽、打喷嚏时会释放传染性飞沫^[172,173]，与这些飞沫的接触是导致大量人感染新冠肺炎的主要原因^[174-176]。传染性飞沫在被呼出后会从源头向外移动，与源头距离越远，感染风险越低^[177]。考虑上述新冠肺炎的传播特性可知，病毒传播距离、传染性颗粒浓度是两个关键参数。

(2) 接触传播。传染性颗粒有可能会对物体表面造成污染。如果触摸被污染物体后接触身体粘膜，例如眼睛、口鼻等，也容易引发感染^[178]。例如，在拥挤的车厢内，乘客会不可避免的发生身体接触，或者由于走动而导致感染者和易感者之间发生接触，如果易感者接触后触碰自己的口鼻等部位，会大大增加病毒的传播几率^[167]。

根据新冠病毒的传播特征，行人的呼吸周期、感染传播概率、感染性强度和病毒传播半径是四个关键性参数。

3.2.2 SIE 传染模型设计

人呼出的气体是三维的，这让其空间分布很难被测量，本文将呼出的气体视为二维来进行传染计算以减少计算量。由于本文的研究是微观的、短时的新冠病毒传播研究，因此没必要模拟感染后康复的情景，仅需对暴露进行判断。因此传统传染评估模型中的四类人群，R类是不存在的。本文中采用的感染模型只保留S类、I类、E类人群，即SIE模型。类别转换规则为，一个S类的行人可以通过与I类人群接触而吸入新冠病毒颗粒，然后因此转变为E类行人（被感染但是无法传播病毒）^[179]。根据病毒的感染半径、I类行人的传染性、S类行人吸入的病毒颗粒数量等参数，来确定S类行人转变为E类行人（被感染但是无法传播病毒）的概率。

用 $\{p_1, \dots, p_n\}$ 来表示人口为 N 的人群，则在 t 时刻有 $N(t) = I(t) + S(t) + E(t)$ 。在所有S和I行人之间创建潜在的传染链接。形式上，这些链接可以写为 $L = \{\overline{P_i P_s} \mid P_i \in I \wedge P_s \in S\}$ 。通过 $t \in [0, T]$ 表示持续的时间，其中 0 和 T 分别表示一个呼吸周期的起始和结束时间。在时间 $t \in [0, T]$ 中， C_n 是指行人在一个呼吸周期中接触到的气溶胶横截面中传染性颗粒的数量，对于每一个传染对 $\overline{P_i P_s}$ 计算公式如下

$$C_n = C_0 \int_0^T f(\vec{r}_i(t) - \vec{r}_s(t)) dt \quad (3-16)$$

$$f(\vec{r}_i(t) - \vec{r}_s(t)) = \frac{1}{\pi R_C^2} \exp\left[-\left(\frac{\|\vec{r}_i(t) - \vec{r}_s(t)\|}{R_C}\right)^2\right] \quad (3-17)$$

上式中， $\vec{r}_i(t)$ 和 $\vec{r}_s(t)$ 分别代表行人 P_i 和行人 P_s 的位置； R_C 是新冠病毒的传播半径； C_0 是I类行人呼出的气溶胶中传染性颗粒的最大初始浓度^[180]。公式(3-17)是一个高斯距离权重函数^[181]，根据I类和S类行人之间的距离描述新冠病毒颗粒脱落的分布。假设带有感染颗粒的气溶胶的浓度呈现与距离相关的空间分布^[180]，即传染性颗粒物的浓度随着与传染源的接近而增加，随着与传染源的远离而减少。当S类行人在I类行人附近时，他会吸入一定量的病毒颗粒，病毒传播过程如图3.7所示。

一个呼吸周期结束后，关于 C_n 的感染概率可通过Wells-Riley方程^[180] $p = 1 - e^{-\gamma C_n}$ 计算，其中 γ 是调整系数。因为实际情况中感染者的传染性可能根据其感染时间长短而不同，因此本文只考虑每个传染对之间的病毒颗粒的传播，并不将这些病毒颗粒累加计算。传染判定在每一次呼吸周期结束后进行，如果行人没有感染，则进入下一个呼吸周期，将 C_n 重置后开始新的评估。这样的好处在于无论行人之间是否若即若离，或者某些行人分开一段时间后再次相遇，都不影响他们之间的感染判定。

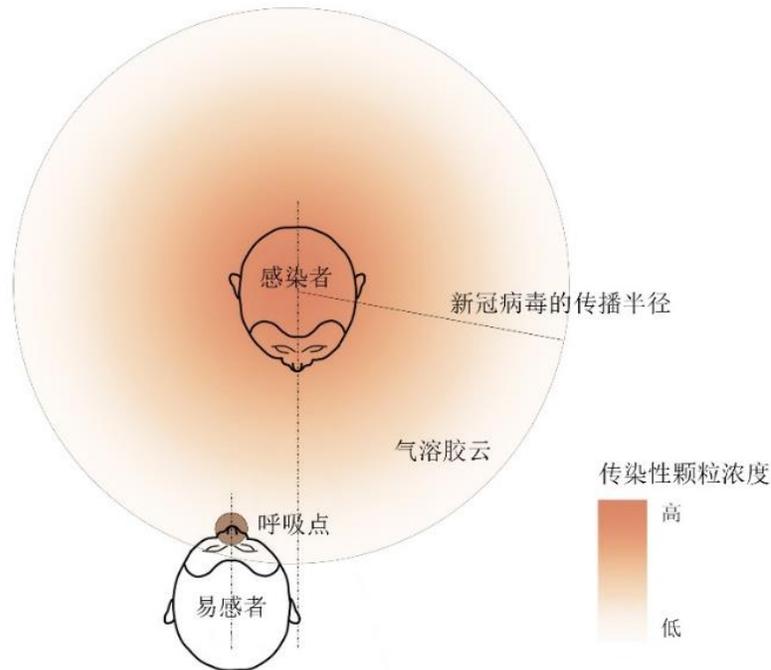


图 3.7 病毒传播示意图

图片来源：作者自绘

3.3 仿真模型的代码实现

由于本文对动力学公式进行了修正，无法使用 Anylogic、Vissim 等软件的内置算法进行仿真模拟，因此采用 Python 编程语言进行仿真模型实现。模型的代码框架分为三大部分，分别是仿真环境构建，核心算法搭建和数据记录收集三大模块。代码框架如图 3.8 所示。

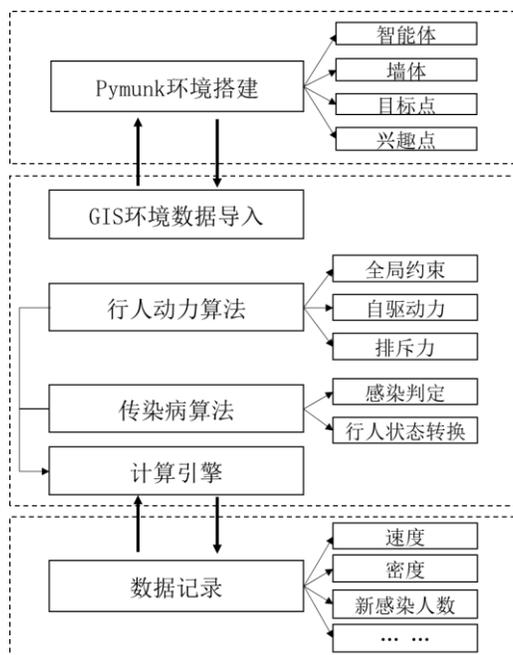


图 3.8 社交隔离模型代码框架

图片来源：作者自绘

3.3.1 仿真环境构建

仿真环境包括智能体属性设置，步行环境引入，目标点设置和兴趣点设置。

第一，智能体代表行人，用一个圆盘来表示。智能体具有质量、半径、防疫领域、最大速度、最小速度、弛豫时间、位置、运动方向、期望速度、实际速度、视域等属性。

第二，利用 Pymunk 物理引擎搭建智能体系统。Pymunk 是一个易于使用的开源二维物理引擎，已成功用于许多游戏开发和仿真模拟中^[182]。Pymunk 中可以通过设置实体 (Body) 和碰撞形状 (Circle, Segment 和 Poly) 来定义环境中的行人、墙等事物。实体具有物体的物理特性，例如质量、重心、位置、旋转 (由力矩和转动惯量决定)、速度等，但是没有形状，是一个抽象的概念。接下来，将碰撞形

状附加到实体上来定义实体的形状。基本形状包括圆形、线形和多段线。通过上述两个功能的结合，可以将场景中的行人和墙以真实尺寸建模。空间（Space）是 Pymunk 中的基本模拟单元，所有的物理模拟在其中完成。通过在空间中添加实体，形状和物理约束，每隔一定的时间步来更新空间中各实体的物理属性，就能稳定的控制所有实体之间的相互作用。

第三，利用 GeoPandas 将绘制好的 shp 文件导入仿真环境，包括墙体、场地边界、行人生成边界。GeoPandas 是一个开源项目，它在 Pandas 的 DataFrame 数据类型的基础上加入了几何信息，允许开发者对几何数据进行空间操作^[183]。Pandas 也是一个开源项目，它是一个数据分析库^[184]，可以实现数据的处理、清洗、分析、统计等工作。使用 GeoPandas 可以很方便的对 shp 文件中的几何物体进行属性提取和分析、计算几何体之间的距离、对几何体进行仿射变换和布尔运算，因此用它来提取环境中各元素的空间属性非常方便快捷。利用 GeoPandas 读取 shp 文件中墙体的位置坐标，赋予到 pymunk 的碰撞形状上，可以避免手动设置坐标，起到快速搭建墙体的效果。除了墙体外，其他的均是抽象概念，不会在画面中呈现，仅起到限定作用。如场地边界指行人最远能抵达的区域，如果超过这个边界，则行人视为脱离仿真环境，会自动消失。场地边界也是可视化渲染的画面边界。行人生成边界是一个虚拟范围，行人会在该范围内生成，不会超过这个范围，通过这个设定可以自由指定行人入场地的位置。目标点是行人出行的目的地，行人可以有多个目标点，行人会按照给定的目标点顺序向着目的地前进。兴趣点是行人在出行过程中会感兴趣的点，如果在行人的视域范围内出现了兴趣点，则有一定概率偏离原始轨迹，去兴趣点游逛。

3.3.2 核心算法搭建

算法主要包括行人动力算法和传染病算法两部分。行人动力学算法包括全局约束条件设定、自航力算法计算、行人之间的排斥力算法和人与墙之间的排斥力计算。值得注意的是，行人动力学算法只能对输入项（行人位置、行人之间的距离、行人与墙的距离等）进行计算，而无法实现对于环境的主动感知，因此需要计算引擎来统筹协调这些输入项。传染病算法负责计算行人在呼吸周期中吸入的颗粒数，然后根据吸入颗粒数计算感染概率。

计算引擎的作用主要体现在合力计算、距离判断和感染判断上。距离计算运用四叉树结构，常应用于二维空间数据的分类问题^[185]，非常适合本文的模型。首先

遍历环境中的所有行人，一方面，利用四叉树快速获取在当前行人的感知范围内的其他行人，并找出距离最近的行人，将其传入行人动力算法计算防疫排斥力，非最近距离的其他行人则计算社交排斥力；另一方面，利用四叉树算法快速获取当前行人与传染源之间的距离，并计算传染颗粒物的累加值。类似地，利用四叉树算法计算得到行人感知范围内的障碍物，传入行人动力算法计算行人与墙之间的排斥力。计算结束后，根据行人动力学算法传回数据，计算得到对应行人的受力之和，根据牛顿运动定律更新行人的位置坐标。第二，计算引擎负责检测行人的呼吸周期是否结束，如果结束，则根据感染概率判断行人是否感染。如果行人感染了，则进入状态转换算法，将行人的感染状态从易感转变为暴露。

伪代码（Pseudocode）是一种非正式的、类似于英语结构的、用于描述模块结构图的语言，使用伪代码的目的是使被描述的算法可以容易地以任何一种编程语言实现^[186]。采用伪代码的形式讲解计算引擎的代码实现，方便理解。计算引擎的伪代码如下表所示。

表 3-1 计算引擎的伪代码

计算引擎的算法
REPEAT 初始化 四叉树 (quadtree) FOR EACH 行人 P_α DO 更新 感染状态 如果行人感染则将其状态从易感转换为暴露 更新 行人 P_α 的自航力 (self_force) 初始化 行人 P_α 与环境的排斥力 (wall_force) 初始化 行人 P_α 的社交排斥力 (people_force) 初始化 行人 P_α 的防疫排斥力 (prevention_force) 初始化 行人 P_α 受的合力 (sum_force) 根据 quadtree 查询 行人 P_α 感知半径内的最近 行人 P_k 更新 感染链接 $\overline{P_\alpha P_k}$ 更新 prevention_force 根据 quadtree 查询 行人 P_α 感知半径内的其他 行人 P_β FOR EACH 行人 P_β DO 更新 感染链接 $\overline{P_\alpha P_\beta}$ 更新 people_force END FOREACH FOR EACH 障碍物 DO 更新 wall_force END FOREACH 更新 sum_force 为 self_force + wall_force + people_force + prevention_force END FOREACH 满足模拟结束条件 END REPEAT

3.3.3 数据记录收集

将模拟过程中的数据保存到一个 excel 表中，保存的内容包括以时间步为单位的详细记录，和试验结束后的整体统计分析记录。

详细记录如下表所示，每一次实验以编号作为标识；时间步数记录了模拟时间长度，单位是秒；模拟人口指场地内的人口上限；平均速度是场地内所有行人的速度的平均值；平均密度是场地内所有行人在自己感知范围内感知到的周围人群密度的平均值；平均距离是场地内所有行人之间的距离的平均值；感染率指由易感状态转移为感染状态的比例；接触概率是指全体行人之间发生接触事件的行人占总人口的比例，接触在本文中指两人之间的距离小于社交隔离距离。

表 3-2 仿真模拟实验数据详细记录表

编号	场景	时间步数	模拟人口	平均速度	平均密度	平均距离	感染率	接触概率
1	1	0.05	120 p	0 m/s	0.12 p/m ²	1.06m	0%	60%
1	1	0.8	120 p	1.29 m/s	0.12 p/m ²	1.06m	0%	62%
1	1	1.55	120 p	1.5 m/s	0.13 p/m ²	0.98m	0%	62%
1	1	2.3	120 p	1.49 m/s	0.15 p/m ²	0.9m	0%	63%

汇总记录表如表 3-3 所示，是在详细记录表的基础上进行统计分析，记录每次实验的整体数据。计算每场模拟中的最大速度和平均速度，因为行人初始速度为 0，因此最小速度恒定为 0，不予计算；记录人与人之间的最大距离、平均距离和最小距离；每场模拟的感染率；每场模拟的平均接触频率。

表 3-3 仿真模拟实验数据汇总记录表

编号	场景	时长	模拟人口	最大速度	平均速度	最大距离	平均距离	最小距离	感染率	接触概率
1	1	29s	120 p	1.51 m/s	1.00 m/s	1.66m	0.66m	0.3m	2%	60%
2	1	28s	120 p	1.51 m/s	0.98 m/s	3.96m	0.79m	0.4m	2%	62%
3	1	29s	120 p	1.46 m/s	1.00 m/s	1.82m	0.64m	0.26m	1%	61%
4	1	27s	120 p	1.45 m/s	1.01 m/s	5.29m	0.83m	0.45m	1%	63%

3.4 本章小结

为了更好的模拟疫情下的行人运动规律以及病毒的传播动态，本章设计了一个多智能体仿真模型，并利用 python 编程实现了模型。在该系统中，行人被抽象成一个具有速度、半径等属性，以及寻路、避障等行为的智能体。通过定义智能体之间和智能体与环境之间的交互规则，设计行人动力学公式，可以模拟行人之间保持一定社交距离的出行行为，更加贴合疫情下的实际出行场景，提升模拟的准确度。除此之外，针对新冠病毒以飞沫传播为主的传播特性，设计了一个以病毒颗粒浓度、呼吸周期、接触距离为主要参数的传染评估模型。将行人动力学模型和传染评估模型相结合，可以有效模拟病毒在人群中的传播，为后文的疫情风险评估提供数据支持。

第4章 疫情风险评估指标体系构建

《城市防疫专项规划编制导则》^[28]指出，疫情风险评估应包括疫情潜在风险评估、易感区域评估等内容，要对疫情可能发生的频次、影响、空间分布及特征进行分析，识别传染病的高危爆发区域、潜在的传染通道和易感染区域。基于上述思想，本章希望构建指标体系来评估高校的疫情风险，识别高校中疫情传播的空间规律和易感染区域。根据本文仿真模型的设计框架，可以从行人出行和病毒传播两个方面构建指标体系。首先，梳理现有研究的评估方法及其性能，确定本文的评估途径。第二，确定指标评估原则，进行指标的对比分析。最后，根据研究重点和研究内容，筛选本文选取的指标，确定其计算方法，完成指标体系构建。

4.1 相关评估指标汇总

依据本文仿真模型的设计框架，指标主要涉及行人模拟指标和病毒传播指标。为能够准确、全面地反映两方面内容，指标的筛选应扩大研究范围，防止指标遗漏。在指标的选择上，应借鉴前人关于行人模拟、病毒传播及二者协同研究的评估指标体系研究成果。查阅高校背景下的传染病疫情风险评估的相关资料，了解高校疫情防控的指标设计的相关信息，对文献资料进行整理、筛选和汇总。将其中的具体指标与高校的环境特性进行对接，选取关联度较高的指标作为本文的评价指标，或在其启发下综合构建新的指标要素。

4.1.1 行人仿真评估指标

专门针对校园环境的行人模拟较少，部分研究者对社交隔离下的行人出行进行了模型设计。王振报等人^[187]通过行人密度和人流输入、输出量等指标对社交隔离下高校食堂服务承载能力进行评估和分析。Parisi 等人^[137]设计了一个收缩粒子模型（Contractile Particle Model, CPM）来模拟超市内的社交隔离出行，该研究利用步行轨迹及密度、平均停留时间、平均接触时间、与最近邻居距离的概率密度函数、不同社交隔离距离和店铺容量下的平均接触概率和频率对模拟效果进行评估。Christina 等人^[139]在最优步长模型（Optimal Steps Model, OSM）的基础上引入个人

空间参数来模拟社交隔离出行，利用平均接触时间和平均接触频率来评估改进模型是否可以模拟社交隔离情景。Thomas 等人^[188]通过改变社会力模型的参数，模拟行人的社交隔离出行，并追踪行人之间小于 1.5 米安全距离的情况。研究用箱型图展示了人群规模、安全距离、初始感染比率对暴露时间的影响。相关研究的指标汇总如表 4-1 所示。

表 4-1 基于模型的行人模拟评估指标汇总

评估指标	影响因子	模型类别	参考文献
暴露时间	安全距离 人群规模 初始感染比率	社会力模型	文献 ^[188]
接触时间	安全距离	OSM 模型	文献 ^[139]
步行轨迹	人群规模	CPM 模型	文献 ^[137]
轨迹密度	人群规模		
平均停留时间	人群规模 模型类别		
最近邻距离的概率密度函数	人群规模		
最近邻距离小于安全距离的概率	模型类别		
粒子对间距小于安全距离的概率	模型类别		
粒子对间距小于安全距离的事件数量	模拟时间 时间阈值		
社交隔离系数	时间阈值 人群规模		
轨迹密度	是否采取社交隔离措施	Legion 模型	文献 ^[189]
人流量	同上		
室内人数	同上 食堂 / 就餐区		

部分研究者组织了真人实验来分析社交隔离出行的特点，虽然这类研究不是仿真模拟，但是他们采用的评估指标仍然具有借鉴意义。文献^[190]设置了环形实验场景，招募了 46 名大学生进行 1 米或 2 米规定安全距离下的步行实验，利用摄像机提取步行轨迹，计算行人密度、瞬时速度、流量，统计行人违反社交隔离的频率、速度概率密度等。文献^[140]招募了 12 到 32 名志愿者参与实验，要求他们保持 1.5 或 2 米规定安全距离。实验通过改变人群密度、步行速度、规定安全距离等要素研究社交隔离出行特征。相关研究的指标汇总如表 4-2 所示。

表 4-2 基于实验的行人模拟评估指标汇总

评估指标	影响因子	参考文献
两个连续行人通过测量区域中线的时间间隔	人群密度 安全距离	文献 ^[190]
步行速度的概率密度函数	同上	
步行速度小于0.25m/s的时间占比	同上	
步行轨迹	同上	
时空关系	同上	
速度-与前人的距离的关系	安全距离	
密度-速度	同上	
流量-密度	同上	
步行轨迹	无	文献 ^[140]
最近邻距离	无	
步行速度	无	
最近邻距离小于1米的时长百分比	人群密度 步行速度 安全距离	
步行方向持续性的概率密度函数	同上	
最近邻距离小于安全距离(暴露)时长的概率密度函数	同上	
暴露次数	同上	
步行速度的概率密度函数	同上	
最近邻距离的概率密度函数	同上	

4.1.2 传染仿真评估指标

在病毒传播估计中,利用传染动力学模型的研究占据了大多数。Natasha 等人^[8]为了研究疫情爆发的早期阶段,确定情况所需的最低检测频率,设计了一个传染动力学模型,并将该模型用于大学场景下的模拟。在大学中引入一名感染者后,通过设定不同的主动检测人口比例、免疫率、病毒传播率、被卫生站(被动)检测人口比例,来比较检测到至少1例病例的概率超过90%时,整个大学中可检测感染的预期数量。Lopman 等人^[61]针对大学生和教职工返校的问题,设计了一个传染动力学模型。该研究将人群分为住校生、走读生和教职工,设定不同类别的人群之间具有不同的传播概率、重症率、病死率、有症状率。研究还将核酸检测、接触追踪、隔离、非药物干预手段(社交隔离、口罩佩戴等)参数化,研究筛查(按照给定的频率进行核酸检测,无论是否存在症状)和检测(对有症状的进行核酸检测)的时间间隔和延迟时间对于病毒传播的影响。Gregory 等人^[191]针对学校和企业场景,开发了一个SIR分类传播模型对基础变量和可调变量,包括检测灵敏度、检测频率、检测结果返回的延迟时间、测试样本池大小、流行率、检测成本)对结果(包括累积感

染的减少率和假阳性)的影响进行建模。黄梦瑶等人^[192]基于 SEIR 模型从隔离时间和隔离程度两方面对疫情发展态势进行仿真模拟, 利用确诊人数变化曲线和其最大波峰峰值两个指标评估了社交隔离政策的效果。哈佛大学的研究表明新冠疫情可能会反复爆发, 因此需要长期或间歇性保持社交隔离状态^[193], 该研究主要通过有效再生数、基本复制数等指标来评估社交隔离的效果。指标汇总如表 4-3 所示。

表 4-3 分类传播模型的病毒传播评估指标汇总

评估指标	影响因子	参考文献
可检测病例的最低数量	病毒传播率 主动检测人口比例 免疫率 被卫生站(被动)检测人口比例	文献 ^[8]
活跃确诊人数	输入感染率(社区流行率) 检测结果返回的延迟时间 检测灵敏度 症状追踪频率 检测频率	文献 ^[191]
累积确诊人数的减少率	检测成本 输入感染率(社区流行率) 假阳性数 测试样本池大小 检测灵敏度 检测结果返回的延迟时间 检测特异性	
检测成本	测试样本池大小 检测结果返回的延迟时间 检测灵敏度 是否有确认检测 输入感染率(社区流行率)	
活跃确诊人数	国家 社交隔离政策实施时长 社交隔离程度	文献 ^[192]
活跃确诊人数峰值	国家 社交隔离程度	
发病率	检测阳性率 每周就诊的人口	文献 ^[193]
有效再生数	季节	
活跃确诊人数	社交隔离政策实施时长 基本复制数	
累积确诊人数	同上	
活跃确诊人数	身份(学生/教职工) 非药物干预手段 检测频率 检测结果返回的延迟时间	文献 ^[61]

评估指标	影响因子	参考文献
累积确诊人数	身份（学生 / 教职工） 检测频率	
住院数	检测结果返回的延迟时间 接触追踪率 身份（学生 / 教职工） 检测频率 筛查频率 联合检测与筛查	
活跃确诊人数峰值	同上	
死亡数	同上	
隔离数	同上	
检测执行总数	同上	
每人检测执行数	同上	

少部分研究利用其他方法进行传染风险评估，包括回归分析、流体力学、重力模型、数学模型等。Enright 等人^[3]利用多变量逻辑回归模型，研究了大学中病毒的爆发程度与宿舍人数的关系；大学疫情爆发对周边社区的影响程度，以及是否存在双向传播；学生交错返校并接受核酸检测、隔离、跟踪政策对于病毒传播的影响。Santosh 等人^[194]采用统计和流体力学的方法计算受感染者在打喷嚏时喷出飞沫的轨迹，研究了温度、湿度、气流变化对飞沫轨迹的影响，还考虑了不同尺寸和喷射速度飞沫的停留时间和漂浮距离受阻力、扩散和重力等因素的影响。文献^[195]设计了GLEaM 模型，该模型将重力模型和传染动力学模型结合，分析了长、短距离航空网络对全球病毒传播的影响。Amit 和 Rajneesh 利用数学模型量化了封闭空间中由咳嗽导致感染的概率，并评估了口罩在降低感染概率方面的好处。他们计算了咳嗽飞沫中传染性颗粒的空间分布，并利用 Wells-Riley 方程将其转换为了感染的概率分布。相关研究的指标汇总如表 4-4 所示。

表 4-4 其他模型的病毒传播评估指标汇总

评估指标	影响因子	模型类别	参考文献
感染概率	宿舍人数	统计学模型	文献 ^[3]
爆发概率	输入病例数		
检测阳性率	有无症状 感染日期 学生数量		
隔离人数	学生返校时的患病率 宿舍人数		
发病率	患者年龄 社区位置 感染日期		

评估指标	影响因子	模型类别	参考文献
飞沫漂浮距离	喷射速度 飞沫尺寸 空气流量 空气温度 空气湿度	流体力学模型	文献 ^[194]
飞沫漂浮时间	飞沫尺寸		
疫情爆发概率	是否有航空往来	GLEaM 模型	文献 ^[195]
活跃确诊人数	国家 地区 是否有航空往来		
病毒传播网络	是否有航空往来		
感染概率	是否佩戴口罩 是否为超级传播者	数学模型	文献 ^[180]
感染概率的空间变化	距离 是否为超级传播者		

4.1.3 协同仿真评估指标

一些研究将行人仿真和病毒传播模型结合，通过分析人群的相互作用，对中、微观场景下人群流动和接触过程中新冠病毒传播情况进行评估。如 Derjany 等人通过一个多尺度模型评估蛇形队列形态对病毒传播的影响，通过感染分布和接触次数两个指标评估不同传染半径和队列分隔材质下病毒的传播^[164]；Namilae 等人^[166,167]结合社会力模型与传染动力学模型评估飞机大小和上下机政策对传染病空间传播的影响，主要采用感染分布指标对不同的政策效果进行评估；孙皓宸等人^[196]基于真实高精度的学生接触数据与贴合新冠肺炎实际传播情况的连续感染模型，通过确诊人数变化曲线、频率分布随传播时间变化值两个指标评估不同防控措施对校园疫情的防控效果。Xiao 等人^[197]利用个体疫情传播模型研究行人身体接触导致的感染事件，采用了平均暴露时间、高危暴露人数和高风险比等指标对感染程度进行评估。Bouchnita 等人^[198]设计了一个混合多尺度动力学模型用于描述行人的运动行为，将行人分为了易感、感染、隔离、免疫、死亡五种状态，对直接接触和通过被污染表面的间接接触传播进行模拟，探究非药物干预手段对疾病传播的影响。此外，Bouchnita 等人^[199]还用相同的模型研究了封锁和强制佩戴口罩对病毒传播的影响。相关研究的指标汇总如下表所示。

表 4-5 协同研究的评估指标汇总

评估指标	影响因子	参考文献
行人分布	空间形态	文献 ^[164]
新感染人数的概率密度函数	同上	
新感染人数-感染概率图	空间形态	
	接触半径	
	空间分隔材质	
接触频率	空间形态	
	接触半径	
	空间分隔材质	
	单排 / 多排	
新感染人数的概率密度函数	空间形态	文献 ^[166,167]
	感染天数	
	接触半径	
	登机政策	
行人分布	无	文献 ^[197,199]
暴露时间	步行速度	
	非药物干预手段	
高风险比率	同上	
高风险人数	同上	
累积确诊人数	非药物干预手段（封锁、佩戴口罩）	
	症状前传播持续时间	
活跃确诊人数	同上	
活跃确诊人数（有症状）	非药物干预手段（封锁、佩戴口罩）	
隔离人数	同上	
死亡人数	同上	
免疫人数	同上	
累积住院人数	无	
平均病毒浓度	时间	
	病毒衰变周期	
接触频率	人群密度	
	社交排斥力的大小	
	期望速率	
	期望安全距离	

4.2 评估指标体系构建

通过对相关研究评估指标的归纳与总结，不仅可以掌握相关研究领域的进展，还可以梳理出不同技术方法与指标之间的关系。上述评估指标中，部分指标与所用的技术方法有关，部分指标与文献的研究内容、目的有关，还有部分指标属于通用指标，在很多文献中都有所采用。除了评估指标本身外，很多文献通过改变影响因子进行对比研究，在上述的汇总中也有所体现。

为了合理的对上述指标进行筛选，构建符合本文的指标体系，接下来明确指标构建的原则，结合本文的研究内容、方法，构建本文的高校疫情风险评估指标体系。

4.2.1 指标体系构建原则

合理的指标体系能够客观、公正地根据仿真模拟结果衡量高校的疫情防控效果，并辅助制定合理的规划实施手段。为了全面反映疫情风险，评估指标体系应该尽可能全面。但从仿真模型的设计理念、应用场景和计算方法三方面考虑，并非所有的评估指标都能得到模拟数据或得出有效结论。此外，指标过多可能导致评估内容重复，数量过少会导致评估内容不全面。因此，构建指标体系必须经过筛选，本文根据如下原则构建疫情风险评估指标：

(1) 代表性与特征性。一方面，指标选取要繁简适宜，过多会导致计算效率低下，指标之间的关系也不明确，过少则会导致信息的遗漏。应该选取可以客观、全面地反映其要说明内容特征的指标。另一方面，高校社交隔出行仿真模拟的目标是为师生提供安全、健康的校园环境，提高防疫效果。因此，所确定的指标应抓住本文仿真模拟的主体，即学生出行行为和病毒传播动态，针对这两个方面的特点进行设置。

(2) 可得性与可计算性。指标既要满足理论要求，又要复合实际操作的需要。本文的仿真模型主要用于微观行为模拟，包括行人步行行为和病毒微观传播两个层面，因此指标的选取应该充分考虑模型设计框架，以及模型的应用场景来确定。指标应简洁、明了，充分考虑模型可收集的数据类型，尽量选取可以通过模拟过程直接获取，或者根据模拟数据进行计算间接获取的数据。该原则有助于指标的收集、统计、分析和量化。

(3) 科学性与适应性。指标的选取必须建立在科学的基础上，要求客观、公正的反映仿真模拟过程中的行人流动和病毒传播状况。指标的确定和计算方法必须符合行人动力学、传染病学、环境行为学等学科的基本规律，保证评估结果的科学性。此外，一切事物都是在不断发展和变化的，在仿真模拟中更是如此。指标要能适应不同模拟环境、参数的变化，应该充分考虑仿真模拟数据的收集过程和分析方法，动态、灵活的对指标进行计算。

4.2.2 评估指标选取结果

根据本文的研究重点，参考上述构建原则，即所选取的指标应该可以反映学生出行的客观特征和病毒传播的客观程度，以及指标合理、数据易于获取和量化，指标具有代表性，并且很方便进行可视化表达与分析。本文最终筛选出3个行人模拟指标和2个病毒传播指标用于高校疫情风险评估。指标体系如表4-6所示。

表4-6 高校疫情风险评估指标体系

指标类别	评估指标	影响因子	参考文献
行人模拟指标	行人空间分布	空间形态	文献 ^[164, 197, 199]
	步行轨迹密度	人群规模	文献 ^[137]
	最近邻距离概率密度函数	遵守社交隔离的人口比例	文献 ^[137]
病毒传播指标	平均暴露时间	同上	文献 ^[188, 197, 199]
	累积确诊人数	同上	文献 ^[61, 191-193]

4.2.3 评估指标释义

下面对行人模拟的3个指标进行释义，并阐述其获取、可视化方法：

(1) 行人空间分布：指行人在空间中的散布位置。该指标的获取方法是在模拟结束后，汇总获取每个行人的重心坐标，利用 ArcGIS 进行核密度分析，利用自然间断法将分析结果可视化，可得到人口密度图。

(2) 步行轨迹密度：步行轨迹指行人移动出的曲线或路径。该指标的获取方法是每隔固定的时间间隔追踪行人的当前位置，将所追踪的位置连线即可得到行人的轨迹。步行轨迹密度指单位面积上的步行迹轨迹数量。该指标的获取方法是收集模拟过程中的步行轨迹，利用 ArcGIS 平台的线密度分析工具计算密度图，以红绿色表示轨迹密度的大小。

(3) 最近邻距离概率密度函数：指在一次模拟中，目标行人和与其距离最近的行人之间的欧式距离。该指标的获取方法是每隔固定的时间间隔统计行人之间最近邻距离，多次模拟将模拟结果汇总，最后得到概率密度函数。最近邻距离的计算方法同公式(3-9)。该指标的可视化方法是采用直方图和连续密度(KDE)图相结合的方式显示所收集最近邻距离的分布。直方图是一种经典的可视化工具，旨在通过分箱和计数观察来近似生成数据的潜在概率密度函数。KDE 为同一问题提供了不同的解决方案，它不使用离散箱，而是使用高斯核平滑观察，产生连续密度估计。

下面对病毒传播的 2 个指标进行释义，并阐述其获取方法：

(1) 平均暴露时间 (*AveET*)：指一个呼吸周期内，对于每个行人而言，他/她与其他人之间的最小距离小于病毒传播半径的时间。该指标的获取方法每隔固定的时间间隔统计行人暴露时间的均值。公式如下：

$$AveET = \sum_{i=1}^N T_i / NT \quad (4-1)$$

上式中， T 代表呼吸周期的长度； T_i 代表行人 i 在一个呼吸周期内，规定安全距离内有其他行人的时间长度； N 代表模拟人数。

(2) 累积确诊人数：指模拟过程中存在的暴露者的累加和。该指标的获取方法为每隔固定的时间间隔统计模拟中行人的健康状态，对确诊人数进行汇总分析。

4.3 本章小结

根据上一章的仿真模型设计，可以将评估指标体系分为行人模拟评估和病毒传播评估两部分。首先对相关研究中采取的行人模拟评估指标、病毒传播评估指标和二者协同研究的评估指标进行了汇总分析。然后，根据汇总结果，分析指标的产生逻辑。设定指标体系构建的三大原则，即代表性与特征性、可得性与可计算性、科学性与适应性，以原则为基础，综合分析本文的内容和目标，最后确定了 3 个行人模拟指标，包括行人空间分布、步行轨迹密度、最近邻距离概率密度函数，和 2 个病毒传播指标，包括平均暴露时间、累积确诊人数。对上述指标进行释义，明确各类指标的计算方法，为后文的实证研究打下基础。

第5章 天津大学卫津路校区现状特征与疫情风险评估

本章以天津大学卫津路校区为例进行实证研究。首先通过现场调研、调查问卷等方式，收集校园物理环境数据和学生出行行为数据。统计学生的出行目的，分析学生出行特征和心理特征，判断校园内人群聚散的时空高峰。利用多项 Logit 模型评估校园步行环境，结合现场调研结果，定位校园防疫重点区域进行仿真模拟。建立仿真环境，矫正模型参数，进行仿真模拟。利用校园疫情风险评估指标体系对防疫重点区域的防疫能力进行评估，定位易感染区域，分析导致病毒传播的空间问题，为校园防疫规划提供依据。实证研究的框架如图 5.1 所示。

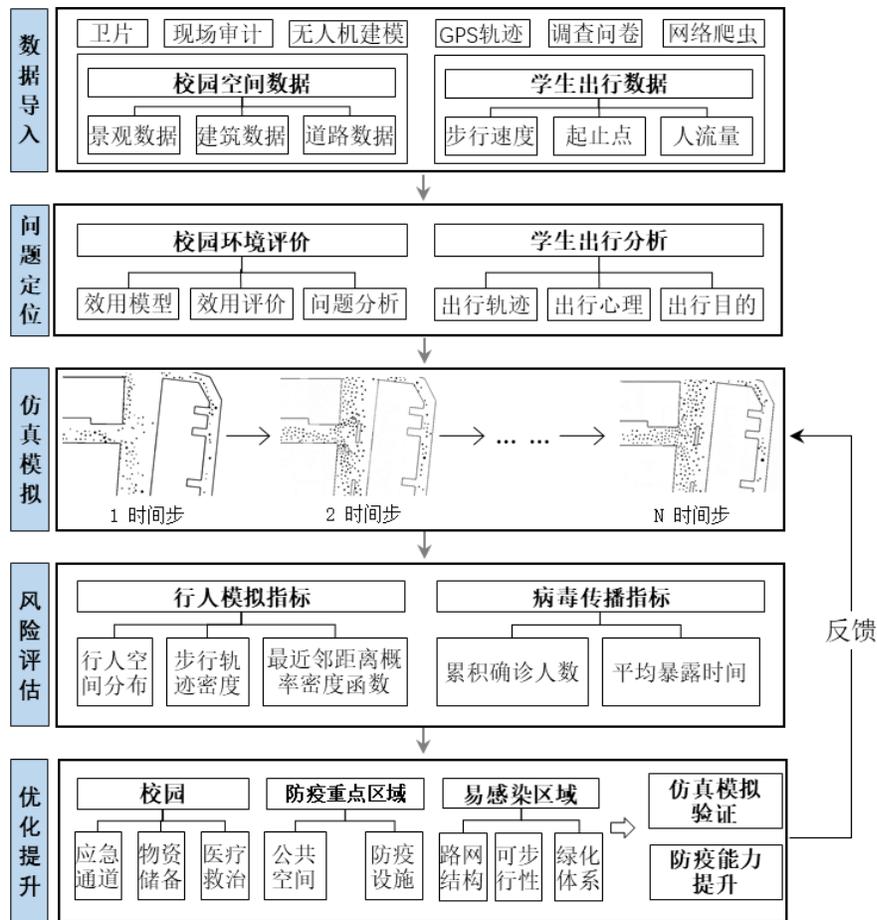


图 5.1 实证研究实施框架

图片来源：作者自绘

5.1 研究区概况与数据收集

5.1.1 研究区概况

天津大学卫津路校区位于天津市南开区卫津路，占地面积达 182 万平方米，建筑面积 83 万平方米。校园用地是对南开区的洼地填湖造陆所得，校园内包含爱晚湖、友谊湖、青年湖和敬业湖四大湖泊，为校园中增添了很多美景。校园根据学生行为与建筑功能可分为生活区、教学办公区和运动区，其中生活区包含学生宿舍、教职工宿舍、校医院、食堂，集中分布在校园东南侧和西北侧，运动区包含体育场、体育馆、篮球馆和游泳馆，分布在校园东北侧，如图 4-1 所示。



图 5-1 天津大学卫津路校区功能分区

图片来源：作者自绘

5.1.2 校园环境数据收集

利用无人机采集天津大学卫津路校区的连续航片影像，在飞行过程中采集垂直和倾斜的多角度影像，对采集到的具有一定重叠度的摄影数据进行空中三角测量计算，最终获得天津大学卫津路校区的无偏鸟瞰高清影像地图（图 5.2）。基于高清影像地图提取校园道路路网与建筑轮廓，结合实地测量对其进行修正与补充，形成校

园矢量地图和 CAD 文件（图 5.3），为本文的数据可视化和 GIS 空间分析提供了高精度的数据支撑。



图 5.2 天津大学卫津路校区无人机航拍图
图片来源：作者自绘

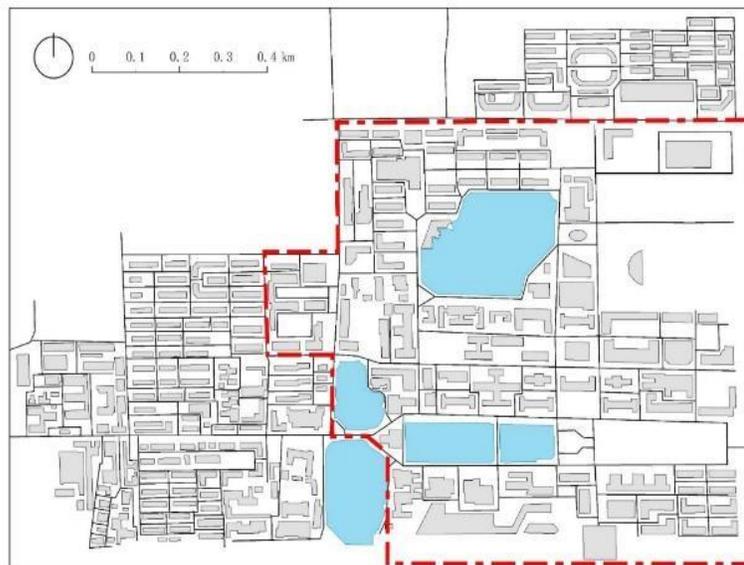


图 5.3 天津大学卫津路校区矢量地图
图片来源：作者自绘

5.1.3 学生出行数据收集

利用手机 APP 的 GPS 轨迹记录、问卷调查与建筑扫码数据爬虫等方式收集学生在校园内的出行路径、出行目的、出行意愿和出行偏好等数据，分析疫情状态下学生的出行特征（见表 5-1）。

表 5-1 学生出行数据采集表

数据名称	采集日期	数据来源	数据量
出行轨迹	6.1-6.15	志愿上报	325 条轨迹
	10.1-10.15		315 条轨迹
建筑扫码	8.22-9.22	网络爬虫	16000 条扫码数据
步行环境偏好调查	10.1-10.15	问卷调查	100 份

5.1.3.1 出行轨迹数据

通过志愿者在校园内的 GPS 轨迹记录和受访者在地图手绘出行路线两种方式记录学生出行轨迹数据。分别于 2020 年 6 月 1 日-15 日和 2020 年 10 月 1 日-15 日完成两次校园内学生出行轨迹的收集工作。志愿者出行数据记录要求如下：

(1) 志愿者完成一份调查问卷，包含志愿者性别、年级、年龄、宿舍区、肩宽、体重等属性数据；

(2) 志愿者利用“行者”app 记录每日每次的室外出行轨迹，从起始地点抵达目标地点就记录为一次出行。每一次出行均在“行者”上新建一个记录。一天结束后，在“行者”的网站上，按时间先后顺序，依次导出当日出行轨迹 gpx 文件，并将 APP 上的行为数据填入出行日志。

两次共收集校园内 120 名学生出行轨迹数据共 640 条。对所收集轨迹的有效性进行检验，部分轨迹因 GPS 信号出错导致轨迹不连贯、跳跃等情况，将这些轨迹删除后，剩余 630 条有效轨迹数据。出行轨迹配有详细撰写出行日志（如

表 5-2 所示）。收集信息包括社会属性志愿者性别、学历、年龄、宿舍区、记录日期、出行起止时间、运动时间、停驻时间、全程时间、出行起始点、终止点、距离、出行轨迹、出行频次、出行目的、速度和出行方式。

表 5-2 实验数据记录表示例

日期	编号	性别	年级	宿舍	出行 1								
					开始时间	结束时间	运动时间	全程时间	距离	方式	起点	终点	目的
6	3	女	本科毕业	鹏翔三斋	7:16	7:27	4:47	9:16	740	骑行	鹏翔二斋	鹏翔三斋	吃饭
6	5	男	本科毕业	鹏翔二斋	9:05	9:09	4:01	4:01	350	步行	鹏翔二斋	学五食堂	吃饭

表 5-3 总结了志愿者的人口统计特征。志愿者中男女比例基本相当，其中女性 62 人，男性 58 人。学生年龄分布在 17-26 岁之间，19-24 岁的人群占了 91%。学生的学历以本科非毕业生为主，占比 60%，研究生次之，占比 28%。大部分受访者拥有骑行能力。学生宿舍集中在鹏翔公寓，占比 47%；六里台宿舍区次之，占比 24%。

表 5-3 样本的人口统计学信息

指标	类别	频数	比例
性别	男	58	48%
	女	62	52%
年龄	17-18	15	13%
	19-20	30	25%
	21-22	29	24%
	23-24	30	25%
	25-26	11	9%
	学历	本科非毕业生	72
本科毕业生		10	8%
硕士		34	28%
博士		4	3%
骑行能力	会	100	83%
	不会	10	8%
宿舍区	鹏翔公寓	56	47%
	七里台	10	8%
	六里台	29	24%
	其他	15	13%

5.1.3.2 建筑扫码数据

在新冠肺炎疫情防控之初，天津大学联合姚建铨院士创办的天津智慧物联研究院开展了针对校园疫情防控场景的扫码技术研发工作，为人员进出校园的信息登记做好技术储备。在天津大学卫津路校区，出入校区门岗和校内各个建筑均需打开天津大学综合服务平台 app，扫描出入口处的二维码填报信息，才可进入校园或者办公楼。利用网络爬虫，本文采集了8月24日—9月21日各校园建筑（校门、食堂、超市、图书馆、体育场、各专业系馆）的扫码数据，获取校园师生进出教学楼的时间、人流量等具体数据。每隔两分钟自动爬取一次数据，累计获取共 20077 条数据，数据库如表 5-4 所示。

表 5-4 校园建筑人口数据库

时间	三食堂	体育场	西门	五教学楼	图书馆
2020-08-24 08:18:00	187	68	13	1	259
2020-08-24 08:20:00	179	69	13	1	270

5.1.3.3 问卷调查数据

问卷调查主要收集学生的出行心理、对于校园防疫政策的接纳程度以及疫情下的步行环境偏好。通过问卷调查，可以获取学生对校园疫情防控政策的反馈和出行特征。问卷在简洁明了、条理清晰的设计原则下，通过多模块设计，并附以必要的填写说明，减少被调查者的作答负荷。

(1) 道路要素偏好预调查问卷。为了确定学生偏好的道路属性，设计了出行偏好调查问卷（见附录 A）进行预调查，共收集到 107 份有效问卷。图 5.4 展示了出行偏好调查结果，利用百分比堆叠柱图显示学生出行时靠近、偶尔靠近、偶尔远离和远离的各类要素，可以得知学生的出行偏好。学生靠近前三位的为湖水、艺术景观和景观绿化分别占比 74%、61%和 47%；信息设施是学生偶尔靠近最多的要素，占比达到了 52%；偶尔靠近大巴车的学生较少，占比为 18%；没有学生愿意偶尔靠近汽车。学生远离前三位的为汽车、建筑物和交通和卫生设施分别占比 85%、62%和 38%；综合靠近和远离两项来看，景观绿化、湖水、广场、其他行人、信息设施、艺术景观设施是比较受欢迎的，而汽车、建筑物、交通和卫生社区、台阶是最不受欢迎的要素。

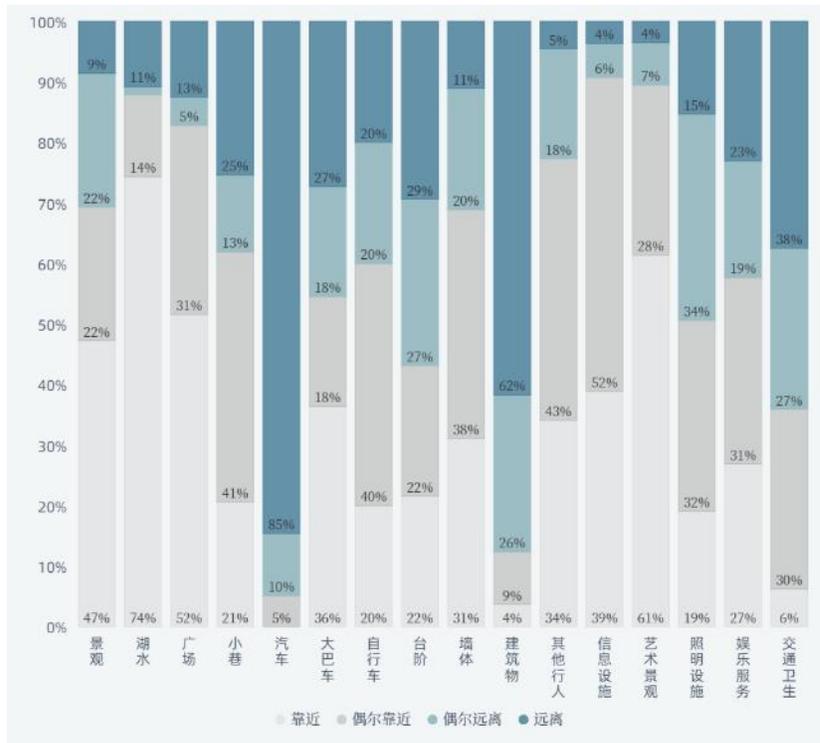


图 5.4 道路要素偏好调查结果

图片来源：作者自绘

(2) 步行环境偏好调查问卷。为了得到学生的步行环境偏好，利用离散选择模型分析学生的路径选择行为。离散选择模型分为显式性偏好法（revealed preference, RP）和陈述性偏好法（stated preference, SP），前者研究实际步行路径，后者研究虚拟步行路径。相比之下，SP 法数据成本低、可以规避属性间的多重共线性^[202]，还可以研究现实中不存在的场景，适合本文的研究。实验设计是 SP 法的关键一环，影响要素和水平设计要满足合理、科学、高效的原则。通过道路要素偏好预调查结果、校园道路的实际情况、文献综述最终确定 SP 问卷的影响要素设计。

根据道路要素偏好预调查问卷的结果，可知道路环境，例如景观、艺术景观等是学生较为偏向的路径要素；学生对湖水偏爱，是因为湖水带来了开阔的视野，让人心情愉悦；而汽车、大巴车等交通设施是学生希望远离的要素，因为人车混行的路径给学生出行带来危险，停靠路边的汽车又阻碍了学生出行。以上述信息为基础，结合文献阅读和实际情况，最后综合设定了 7 个影响要素，每个要素包含 3 个水平，据此设计步行环境偏好调查问卷（见附录 B）。表 5-5 列出了这个 SP 选择实验涉及的影响要素、水平和选取依据。

表 5-5 步行出行环境影响要素与水平设置

要素类型	影响要素	水平 1	水平 2	水平 3	指标选取依据
路段要素	路段长度	$\leq 100\text{m}$	100 – 300m	$\geq 300\text{m}$	文献 ^[203, 204]
	路段宽度	$\leq 3\text{m}$	3 – 7m	$\geq 7\text{m}$	文献 ^[205]
	绿化种类	无	行道树	有灌木、草坪或花圃	预调查 文献 ^[206-208]
	视野开阔度	低	中	高	文献 ^[209, 210]
	人车混行度	$\leq 30\%$	30% – 60%	$\geq 60\%$	预调查 文献 ^[211]
防疫要素	拥挤度	不拥挤	有些拥挤	非常拥挤	文献 ^[212]
	疫情标识	无标识	仅墙体贴纸	墙体贴纸与其他标识	文献 ^[213]

问卷分为三个部分。第一部分主要用来记录个人的基本信息，包括年龄、性别、年级和宿舍。第二部分关注旅行态度，调查对象被问及疫情下的出行意愿、出行难点等，为便于被调查者理解和区别，选项均以李克特量表的形式展现，将问题答案划分为五个等级，表示从非常不喜欢到非常喜欢。第三部分是 SP 调查，提供假想的道路情况供人选择。由于要素数量多，需采用正交试验设计对各要素进行简化^[214]，最终得到具有代表性、均好性的 64 个选择场景。为了减少被测试者的答题压力，将 64 道选择题分配给 4 套调查问卷，每套问卷有 16 项选择任务。每道题目有两个备选方案，受试者可以在两条道路中选择他更喜欢的一条。

接下来介绍问卷的有效性检验与样本比例。2020 年 10 月 1 日至 15 日，在案例校园内进行了问卷的实地发放，共有 107 名受访者完成了作答。其中，有 7 份调查问卷内容不完整，或者受访者答题时间过短，被判断为无效问卷；剩余的 100 份问卷作为有效问卷，道路选择 1600 次，将其数据录入数据库，以便后续的分析。

下表总结了问卷调查受访者的口统计特征。在收集的 100 份问卷中，男女比例基本相当，其中女性 55 人，男性 45 人。学生年龄分布在 17-26 岁之间，19-24 岁的人群占了 94%。学生的学历以本科非毕业生为主，占比 57%，研究生次之，占比 33%。92%的受访者拥有骑行能力。学生宿舍集中在鹏翔公寓，占比 56%；六里台宿舍区次之，占比 25%。

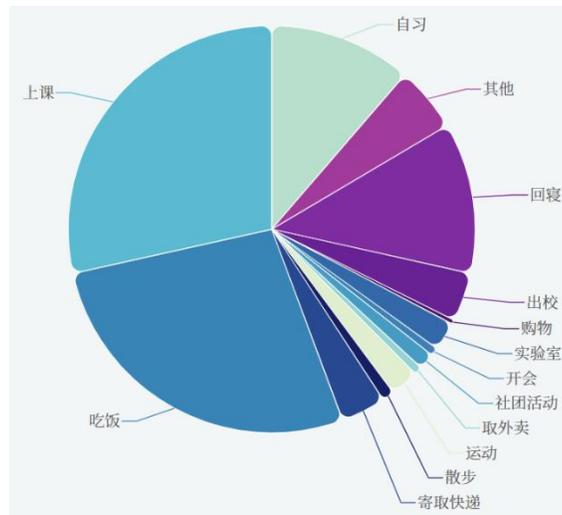
表 5-6 样本的人口统计学信息

指标	类别	频数	比例
性别	男	45	45%
	女	55	55%
年龄	17-18	12	12%
	19-20	28	28%
	21-22	27	27%
	23-24	27	27%
	25-26	6	6%
学历	本科非毕业生	57	57%
	本科毕业生	8	8%
	硕士	33	33%
	博士	2	2%
骑行能力	会	92	92%
	不会	8	8%
宿舍区	鹏翔公寓	56	56%
	七里台	4	4%
	六里台	25	25%
	其他	5	5%

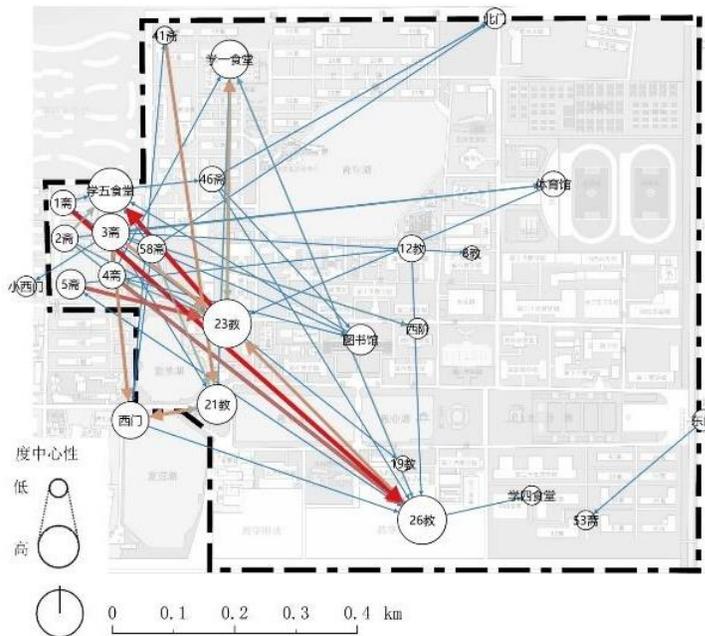
5.2 学生出行特征与心理特征分析

5.2.1 轨迹特征分析

对收集到的 630 条学生出行轨迹进行分析, 根据出行日志中的出行目的, 绘制如图 5.5 所示的饼状图。由图可知, 上课、回寝室和吃饭分别占了学生所有活动的 28%、11.9%和 27%。其他占比较高的活动还包括运动出校、实验、开会、社团活动、运动、寄取快递等。



根据出行日志的起止点，绘制网络分析图（图 5.6）。图中圆圈越大，代表该节点出现的频率越高。连线越粗且连线的颜色越红，代表两点之间的连线越紧密，连线越细且颜色越蓝，代表联系越少。由图可知，学五食堂、23 教、26 教、学一食堂、西门等都是学生的主要出行目的地。学生的出行轨迹在“宿舍-教学楼-食堂-校门”四类节点之间广泛链接。



将学生出行轨迹导入 GIS，建立矢量数据库。对出行轨迹进行线密度分析，如图 5.7 所示。根据线密度图可知，本科生占校园内人口比例较高，鹏翔公寓附近的轨迹最密集。敬业湖边和 23 教学楼的路口处、青年湖路口处也有较多的学生活动。除了宿舍区外，学生轨迹广泛的分布在学校的各个出入口，体育馆、教学楼、图书馆和食堂之间。在学生出行的平均距离为 601 米，最大距离为 2726 米，最小距离为 61 米，中位数为 515 米。

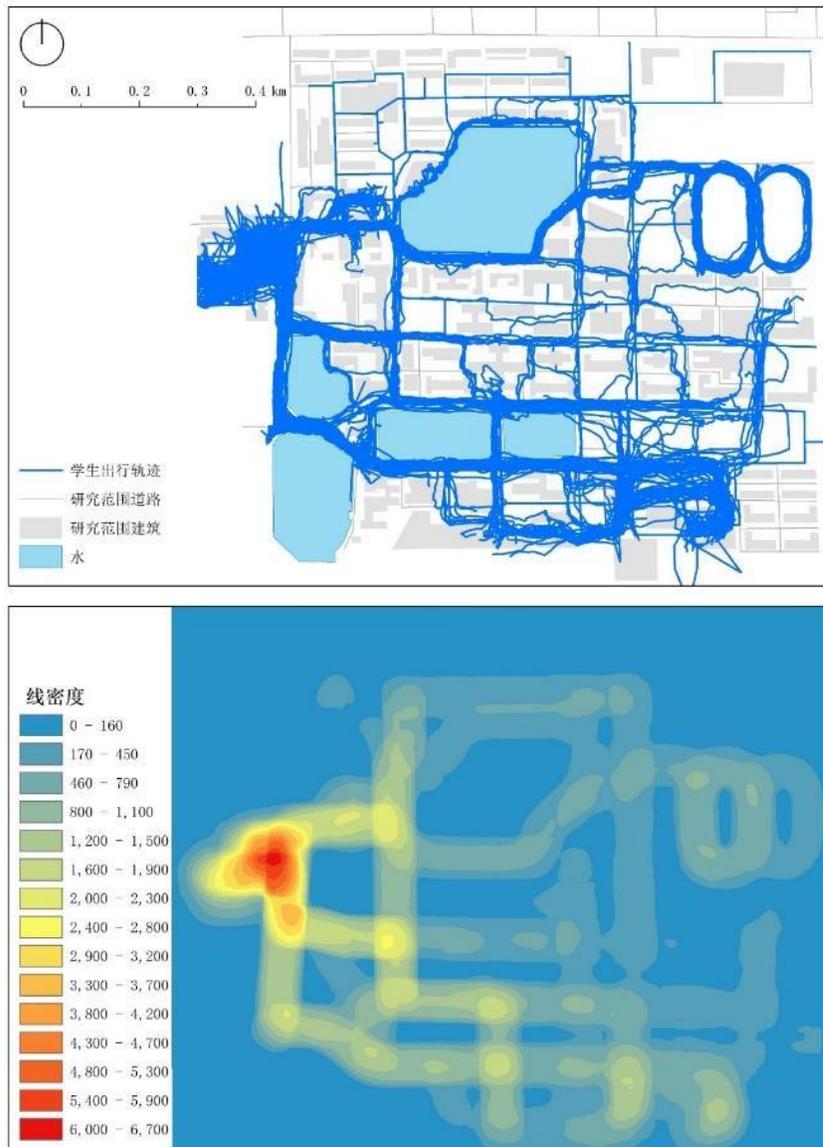


图 5.7 上：学生出行轨迹；下：轨迹线密度图
图片来源：作者自绘

园总面积的 13%；运动空间集中在校园东北角，与各类体育馆相邻，总面积约 9.5 公顷，约占校园总面积的 10%；废弃空间为超五年未整治荒地，总面积约 1.0 公顷，约占校园总面积的 2%。

校园公共空间的问题在于公园较少，虽然绿化率较高，但是大部分绿地都不可进入，仅仅起到了隔离降噪或景观效果，缺少与人的互动。校园绿地整体分布较为均匀，但是品质较差，很多地方长时间未修建，荒草丛生，也没有配套的景观小品或城市家具，具有提升空间。校园虽然湖泊众多，但是湖边空间没有被很好利用，缺乏亲水设施与亲水平台。青年湖附近的绿化较为杂乱，水边路径路面不平整，地砖破碎，可步行性较差。

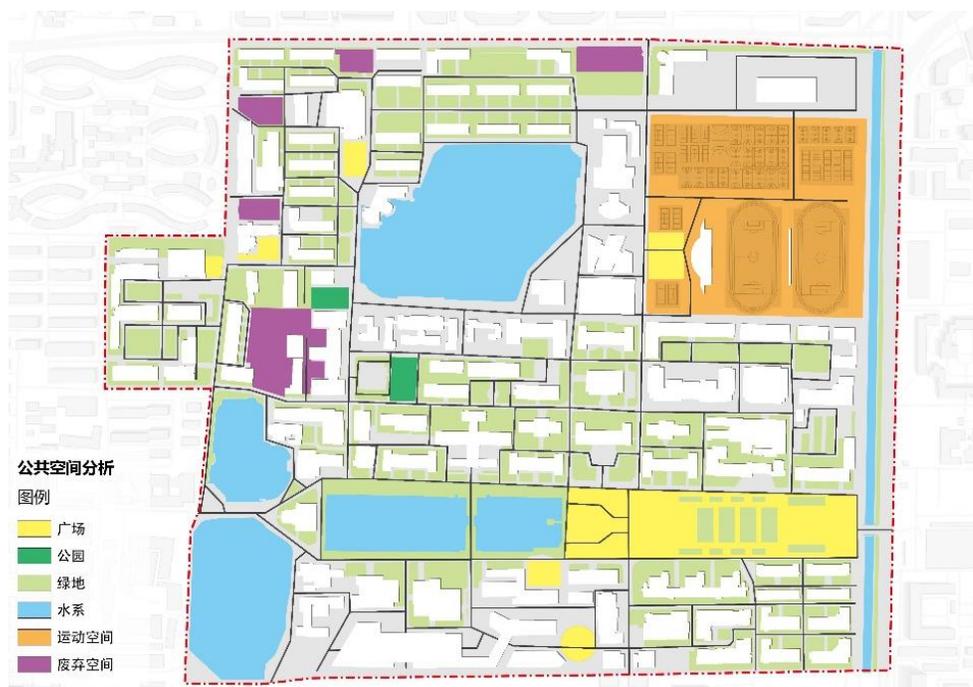


图 5.10 校园公共空间现状梳理
图片来源：作者自绘

5.3.2 校园交通体系

校园交通体系在平时连接校园的各种功能，在疫情时期可为紧急救援和物资运输提供通道。校园交通体系现状如图 5.11 所示。将内部道路共分为车行道，自行车道和人行道三类。车行道指机动车、自行车、人均可通行道路，为校园主要道路，这类道路一般宽度较大，起到连接校园各个部分的功能；自行车道指机动车难以通行，但自行车和人可以通行的道路，主要分布在宿舍、教学楼附近人流密集区域，

这些道路的宽度适中，较为平整，可以供师生日常骑自行车通行。校园没有专门规划自行车专用道，很多都是依附于车行道，容易造成人、自行车、机动车混行的局面；人行道指仅允许人通行道路，主要分布在教学楼、校园广场、景观湖沿岸，通常具有彩色地面铺装，这些道路错综复杂，植物或障碍物较多，不适合自行车和机动车通行，可以增加道路体系的可达性和多样性。

通过分析可以发现，目前校园交通体系的最大问题是以机动车为主，忽视了人的因素，没有完整、明确的慢行系统。交通流线组织混乱，行人路权不明确，道路引导不到位，导致很多机动车在校园中迷路，影响了学生的步行出行安全，也降低了机动车的通行效率。校园的步行路径舒适性和步行品质都较差，缺乏完善的道路绿化网络，路边以行道树为主。部分路面不平整，铺装老旧，凹凸起伏。部分路面环境幽暗，照明不足，具有安全风险

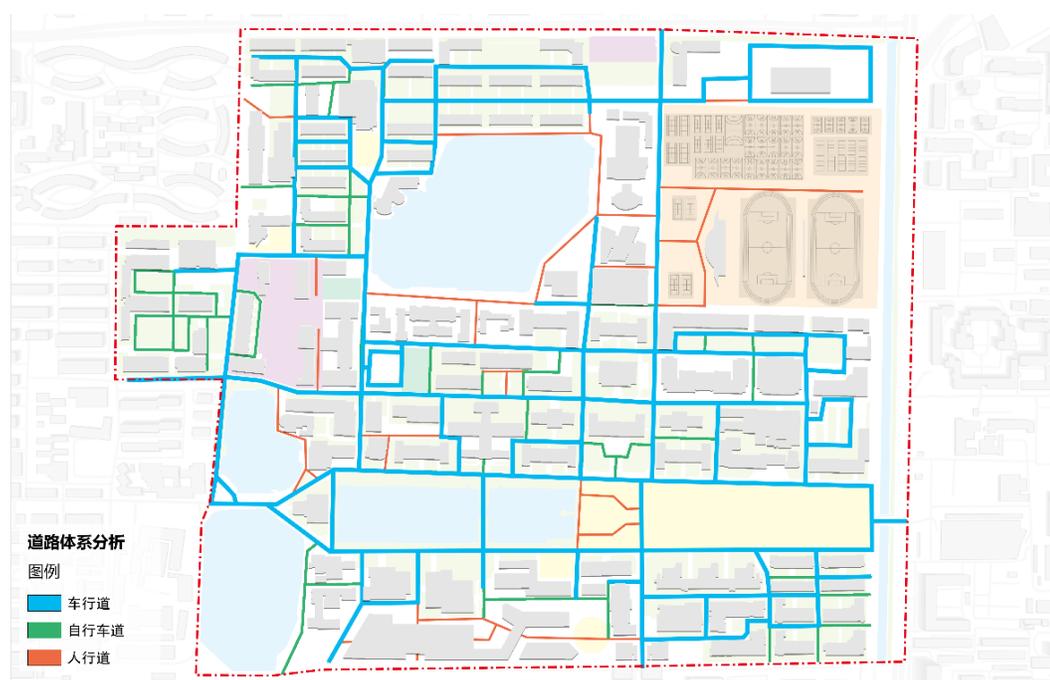


图 5.11 校园交通体系现状梳理

图片来源：作者自绘

5.3.3 校园设施布局

天津大学卫津路校区的设施分布如图 5.12 所示，主要分为公共服务设施（医院、快递点），商业设施（超市、餐饮、银行、邮局、浴室），交通设施（停车场、自行车棚），文化设施（图书馆、大学生活动中心），体育设施（体育馆、篮球馆、

游泳馆), 5 大类, 12 小类。其中医院 1 处, 快递点 1 处, 超市 7 处, 餐饮点 7 处 (食堂 4 处, 民营餐厅集中点 3 处), 银行 2 处, 邮局 1 处, 浴室 2 处, 停车场 28 处, 自行车棚 (架) 24 处, 图书馆 2 处, 大学生活动中心 1 处, 体育馆 3 处。

目前校园内的设施以商业设施为主, 公共服务设施较少。设施分布不均衡, 大部分设施都分布在鹏翔公寓 5 分钟步行生活圈内, 而六里台、七里台宿舍区的设施较少。食堂的分布较为均匀, 主要围绕 3 个宿舍区进行布置, 分布在校园的南北两侧。体育设施以室内设施为主, 而且远离宿舍区, 集中于校园的东北角。

校园内的医疗卫生设施极度缺乏。第一是因为校园医院的工作量具有周期性, 在假期学生较少, 工作量减少, 如果配备大量医护人员, 可能会造成资源的浪费。第二, 由于案例校园地处天津市老城区, 周边有很多大型三甲医院, 因此师生遇到重大疾病, 一般会选择就近就医, 导致校医院在平时也难以接触到重大疾病, 自然也缺乏对于重大疾病的治疗能力和经验。第三, 校医院目前主要的服务对象是离退休教职工, 服务内容大多数是日常疾病和慢性病, 缺乏对于新冠疫情等传染病的防治经验和能力。

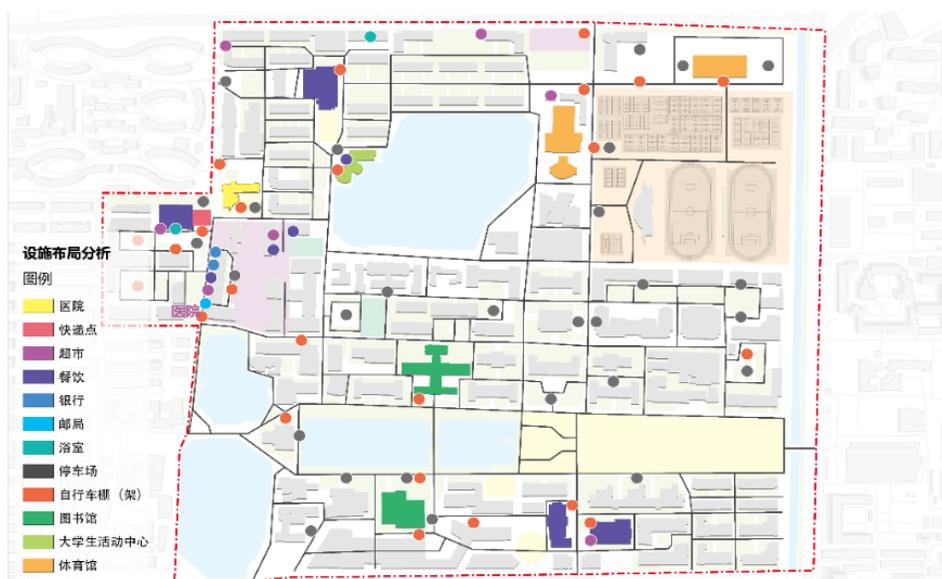


图 5.12 校园设施布局现状梳理

图片来源：作者自绘

校园薄弱的医疗资源在面对重大疫情时显得力不从心。例如 2022 年 1 月天津市遭遇重大疫情, 天津大学卫津路校区组织了很多次全员核酸检测。由于在宿舍区周边缺乏临时医疗点和检测地点, 无法做到送检上门或就近检测, 全校师生都要聚集到校园东侧的体育场进行检测。一方面大量学生需要经过长时间的行走才能抵达

检测地点，增加了路途上的交叉感染风险。另一方面，由于医护服务人员人手不足，检测速度慢，在检测时要排着长队，抵御北方的寒冷天气，给学生和医护人员都带来了很不好的体验。

5.4 校园环境评价与防疫重点区域定位

通过定量、定性相结合的办法对校园步行环境进行综合评估，定位防疫重点区域，用于后续的仿真模拟。首先，利用多项 logit 模型得出校园路径的效用公式，利用效用公式对计算得到校园路段综合评价得分分布图。将校园路段得分、学生出行特征和实地调查结果进行联合分析，确定评分较低且学生出行频率较高的路段，作为亟待改造的防疫重点区域，以期依据仿真和评估结果对相应片区进行优化。

5.4.1 道路效用评价

调查问卷中的道路选择问题属于未加标签（即选项的名称对应答无意义）的离散选择模型问题，应答者被要求在两个未加标签的道路之间进行选择，总共收集到 100 个应答者的数据。未加标签的选择模型在建模上具有特殊性，需要对数据进行预处理。第一，模型可以含特定选项常数，在行为意义上指人们的阅读顺序或其他未观测因素导致的选项之间的选择偏差效应。第二，因为属性和效用之间的非线性关系，还需要构建一些重新编码的新变量，本文中采用虚拟编码方式，对所有分类属性进行重新编码。理论基础是随机效用最大化理论^[215]，假定学生会选择对其效用最大的路线。令 U_{ia} 和 U_{ib} 分别表示应答者 i 选择道路 a 和道路 b 的效应函数， U_{ia} 和 U_{ib} 的公式类似，这里以 U_{ia} 为例构建道路效用函数如下：

$$U_{ia} = C_0 + C_1 * leng2_a + C_2 * leng3_a + C_3 * wid2_a + C_4 * wid3_a + C_5 * gre2_a + C_6 * gre3_a + C_7 * mix2_a + C_8 * mix3_a + C_9 * visi2_a + C_{10} * visi3_a + C_{11} * crow2_a + C_{12} * crow3_a + C_{13} * mak2_a + C_{14} * mak3_a \quad (5-1)$$

公式(5-1)中 U_{ia} 表示应答者 i 从路径 a 中所能获得的可观测部分的效用，公式采用常见的线性函数形式，描述选项 a 的属性，对变量名的定义详见表 5-5； C_1 至 C_{14} 表示各个分量的待估参数，反映了决策者对选项每个属性的选择权重^[215]。将参数与变量结合，就得到了代表决策者对选项持有的整体效用。

利用 NLOGIT5 软件求出各要素的权重系数。参数拟合结果如

表 5-7 所示。模型的 *McFadden's Rho Square* (ρ^2) = 0.225，对应于平均的预测准确度约为 51%，在同类研究中属于较好水平。

表 5-7 多项 logit 模型全样本拟合结果

影响要素	等级	参数值	T 检验值	显著性
常数项	常数项	A0	0.049	0.43
道路长度	100 – 300m	leng2	-0.234	-1.26
	≥ 300m	leng3	-0.904	-4.24 ***
宽度	3 – 7m	wid2	0.428	3.14 ***
	≥ 7m	wid3	0.685	4.94 ***
绿化种类	仅行道树	gre2	0.199	1.58
	有灌木丛、草坪或花圃	gre3	0.498	3.96 ***
人车混行度	30% – 60%	mix2	-0.22	-1.7 *
	≥ 60%	mix3	-0.414	-2.97 ***
视野开阔度	中	visi2	0.366	2.87 ***
	高	visi3	0.267	2.03 **
拥挤度	有些拥挤	crow2	-0.885	-7.02 ***
	非常拥挤	crow3	-1.944	-12.98 ***
疫情标识	仅墙体贴纸	mak2	-0.393	-3.08 ***
	墙体贴纸与其他标识	mak3	-0.142	-1.1
对数似然数		-581.616		
AIC		1.11		
ρ^2		0.2252		
调整 ρ^2		0.2106		
样本				
应答者人数		100		
观察点个数		1600		

注：***在1%情况下显著 ** 在5%情况下显著 * 在10%情况下显著

模型参数的符号符合预期。特定选项常数不显著，说明其他未观测偏差对路径选择的影响在统计上不显著。道路长度（100-300m）相对于参照组（道路长度（<100m））在路径选择效用不存在显著差异，而道路长度（>300m）通过了 t 检验，在 1% 的显著水平上相对于参照组存在显著差异，比其少 0.904，这说明道路长度延长会增加负效用。道路宽度相对于参照组在 1% 的显著水平上显著，宽度增加会增加正效用，说明学生偏好更宽的道路。绿化种类（仅行道树）相对于参照组（无绿化）在路径选择效用不存在显著差异，而绿化种类（有灌木丛、草坪或花圃）通过 t 检验，在 1% 的显著水平上相对于参照组存在显著差异，比其多 0.498，这说明行人偏好有灌木丛、草坪或花圃的道路。人车混行度（30%-60%）和人车混行度（>60%）相比于参照组均会增加负效用，这与预期相符。视野开阔度（中）

和视野开阔度（高）相对于参照组在 1%和 5%的显著水平上显著，开阔度增加会增加正效用，说明学生偏好视野更开阔的道路。疫情标识（仅墙体贴纸标识）相比于参照组均增加会增加负效用，说明学生不喜欢有疫情标识的道路。

根据表 5-5 中的影响要素，获取天津大学卫津路校区道路要素，要素的获取方法如表 5-8 所示。

表 5-8 影响要素获取方法

影响要素	获取方法
路段长度	CAD 测量
路段宽度	CAD 测量
绿化种类	无人机航拍图观测
人车混行度	实地调研
视野开阔度	空间句法视野分析
拥挤度	出行轨迹线密度分析
疫情标识	实地调研

其中，在计算视野开阔度时利用了空间句法视线分析中的视觉步深分析。绿化中类根据无人机航拍图，进行人工识别得到。拥挤度则根据收集到的学生志愿者出行轨迹的线密度值，将其调整为 3 个水平数映射到路网上，即可得到每个路段的拥挤度水平。将所得影响要素数据进行数字化处理后映射到地图上，得到图 5.13 所示的属性分级地图。

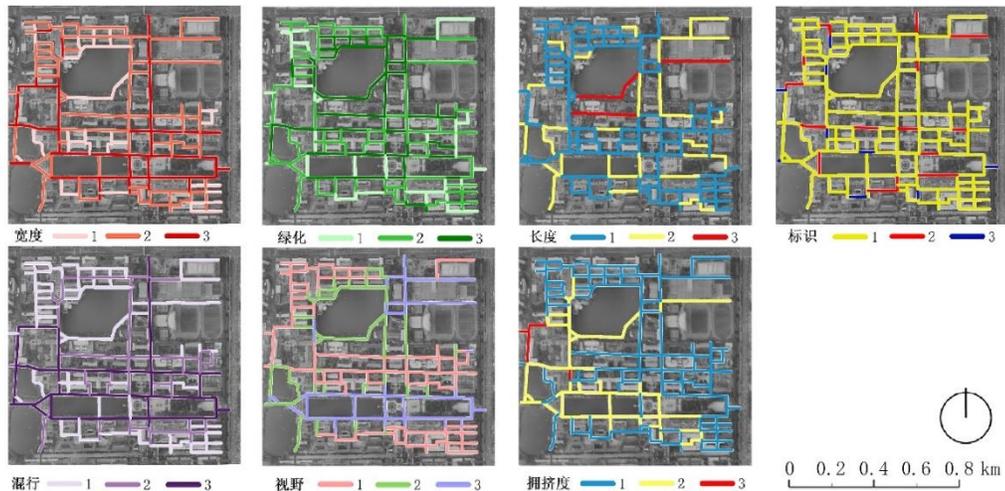


图 5.13 路段属性分级地图

图片来源：作者自绘

根据选择模型的参数拟合结果，计算天津大学卫津路校区路段的效用得分，根据得分的最低值和最高值，将校园路段的步行环境评价指数分为 3 个等级。根据地图可知，鹏翔公寓周边存在大量的低分路段，二十一教门口、二十三教门口、花堤路、体育场北侧存在部分低分路段。根据图 5.14 可知，低分路段大多数集中在以鹏翔公寓为核心的 5 分钟步行范围内。



图 5.14 天津大学卫津路校区校园路段评价得分分布
图片来源：作者自绘

5.4.2 实地调研评价

将校园路段评分和学生出行轨迹密度叠加分析可知，学生的出行轨迹和目的地集中于鹏翔公寓到 23 教学楼的 5 分钟步行生活圈内，而这一区域又是校园路段效用较低的区域。为了对该片区域有更深入的了解，对该区域进行了实地调研，评估场地的实际问题。

根据实地调研照片可知，鹏翔公寓周边路段确实存在诸多问题，包括：（1）路面不平整。鹏翔公寓前的金辉路路砖年久失修，井盖设施与铺装之间不契合，铺砖不平整（如图 5.15 右上）；（2）道路可步行宽度小。学五食堂门口快递点占据了大量的公共空间（如图 5.15 左上）、不法摊贩占道经营（如图 5.15 右上）、共享单车和机动车的违规停放、公共服务设施设置不合理，极大的削弱了道路有效步行宽度；（3）人车混行。一方面由于金辉路是车辆从西门进入后的常走路段，学五食堂门

口快递点常有送货大货车将道路堵塞。另一方面而且学生出行方式多样，包括共享单车、电动车、滑板等，导致路段上经常塞满各种交通工具，非常危险（如图 5.15 左下）；（4）人流量大且拥堵。由于鹏翔公寓周边汇集了众多宿舍区，包括本科生、硕士生、博士生公寓，因此该路段人流量很大（如图 5.15 左下）。鹏翔公寓旁边的学五食堂在早、中、晚饭时间会汇集大量前来吃饭的学生。另一方面，由于快递点的存在，因此这一路段又会汇集大量取快递的学生，由于取快递往往需要停留一段时间，导致该路段经常拥堵。

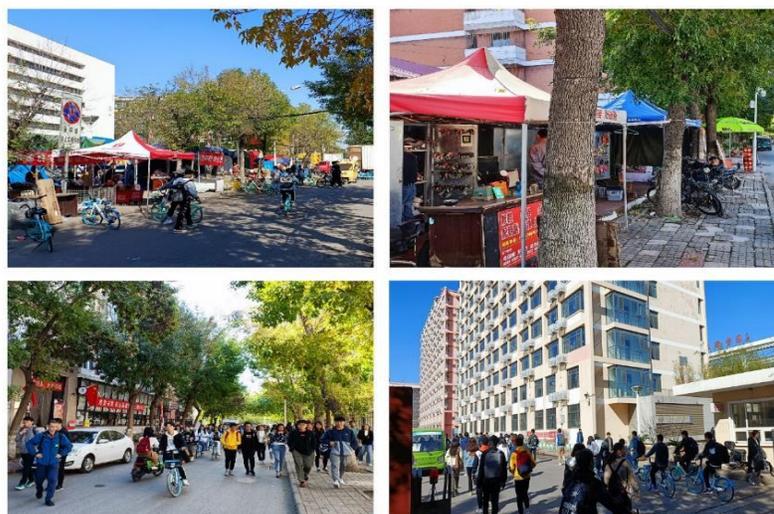


图 5.15 鹏翔公寓周边步行环境实拍。左上：学五食堂门口的快递棚；右上：人行道上占道经营；左下：早高峰时期鹏翔公寓门口；右下：中午高峰时期鹏翔公寓门口
图片来源：作者自摄

5.4.3 防疫重点区域定位

通过上述分析可知，鹏翔公寓附近即是学生活动最频繁的区域，也是步行环境评分较低的区域，而这一区域又确实有很多实际的问题，因此这一片区极易引发拥挤和堵塞，造成病毒的潜在传播风险，因此本文将鹏翔公寓周边 5 分钟步行圈范围确定为防疫重点区域。利用 ArcGIS 的服务区分析，可得如图 5.16 所示范围用于仿真模拟。

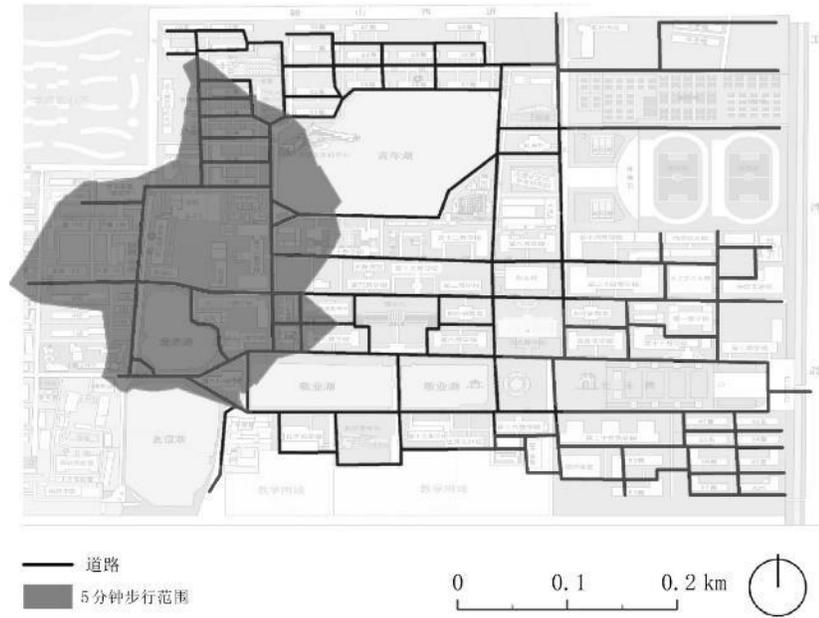


图 5.16 五分钟模拟范围示意图
图片来源：作者自绘

5.5 仿真模拟实验设置

5.5.1 模拟场景搭建

以防疫重点区域的现状环境为基础，考虑到模型计算量，将建筑物外轮廓进行适当简化，以表现其宏观占地面积和拓扑结构为目标，利用 CAD 描出仿真模拟区域不可步行区域的轮廓，围合出可步行路径范围。值得注意的是，为了模拟真实情况，将占道摊位、快递点、违规停放车辆、花坛、占道交通服务设施等均列为不可行走区域，仅将人行道可通过区域、广场、车行道等划分为可通行区域。仿真场景中的元素包括 POI 点、景观要素（花坛、绿地等）、湖水、车辆、快递点、建筑、自行车停车设施等。仿真模拟场景如图 5.17 所示。

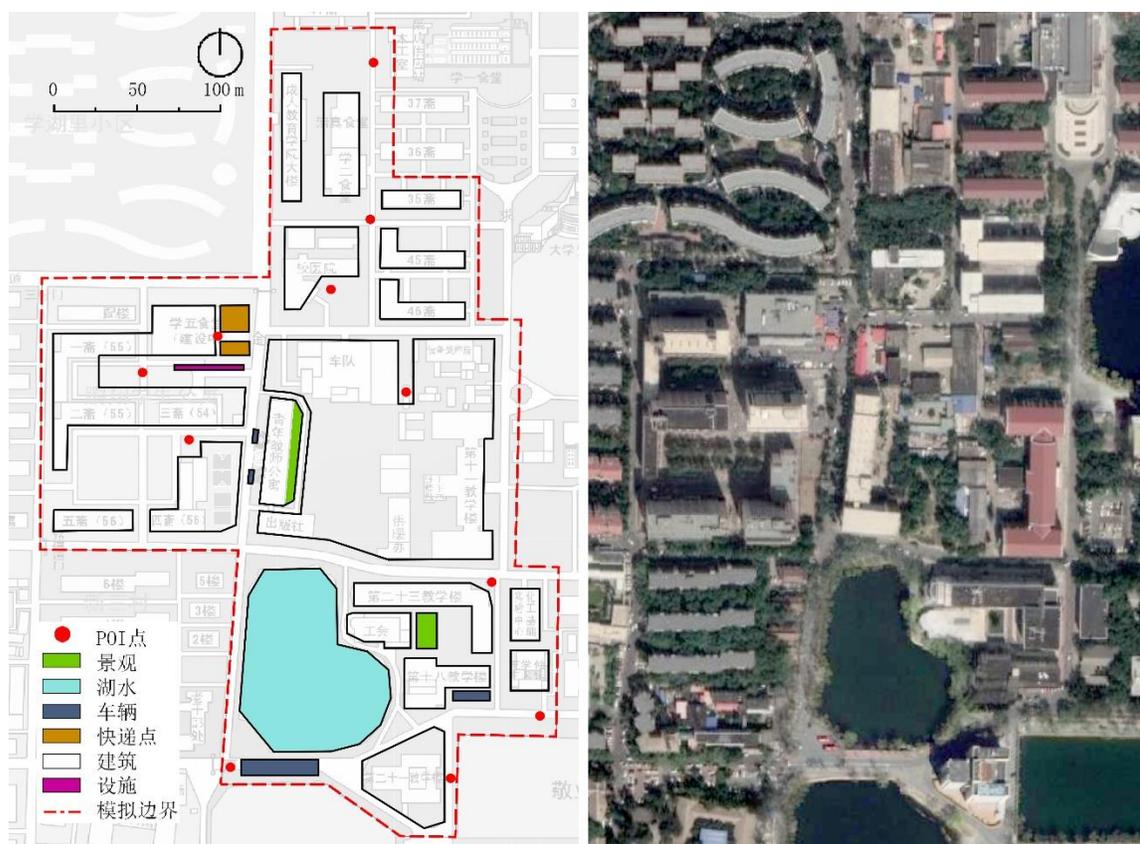


图 5.17 仿真模拟场景及卫星地图实景

图片来源：作者自绘

5.5.2 仿真实验设计

根据仿真模拟场景设计仿真模拟实验。首先，根据爬虫所得的建筑扫码数据估计出行人数，选择数据较为完整的9月14日至9月20日一周的数据作为分析依据。选取中午 12:00-12:20 时刻，取一周的平均值作为某时刻该建筑内人数的期望值，计算模拟时段始末时刻人数差值。结合学生出行起止网络图（图 5.6）情况，考虑到未扫码学生比例，对数据进行适当的矫正处理。最终所得综合人数作为仿真模拟中判断人员流动方向与数量的依据。其次，根据学生出行起止网络图中度中心性较大且联系较强的节点，设计模拟时间段内学生主要的出行目的为：吃饭、回寝、出校、其他。其他目的的起止点则根据全部兴趣点的位置随机设置，以此来模拟各方人流。按照调查问卷中学生对社交隔离的支持情况，在模拟时设置 27% 的人不遵守社交隔离，而 73% 的人遵守社交隔离。模拟结束条件为模拟时长达到 300 秒，即五分钟步行时长，即停止模拟，收集相关数据。

实验设计如表 5-9 所示，总共模拟 1000 名学生的出行轨迹。设定好人流的起始点和终止点后，从各个起始点总共以每秒 30 人的人流量放出行人，直到整个场地内的人数满足人口上限。当有人抵达终止点后消失，然后会有新的人从起始点放出来，周而复始，使场地内人口总量保持上限。除了美国、印度等疫情控制不利的国家之外，大部分国家的新冠病毒抗体阳性检出率已经控制在 1% 左右^[216]，因此设定人流中有 1% 的人为感染者，剩下的行人均为易感染者。

表 5-9 仿真模拟实验设计

出行目的	起始点	终止点	人数
吃饭	鹏翔公寓区	学五食堂	200
	23 教学楼	学五食堂	200
回寝	23 教学楼	鹏翔公寓区	100
出校	鹏翔公寓区	西门	100
	21 教学楼	西门	100
其他	随机	随机	300

5.5.3 模型参数标定

模型参数标定的正确与否，对仿真效果合理与否至关重要。根据收集到的出行轨迹数据，分析学生出行速度等信息，同时询问学生的身宽、体重等信息，标定智能体参数。行人动力学模型参数主要根据调查问卷和参考文献标定。传染评估模型的参数则主要根据新冠病毒的传播特性和参考文献标定。

5.5.3.1 智能体参数标定

智能体参数包括肩宽 r_i 、质量 m_i 和期望步行速度 v_i^0 。在调查问卷的第一部分，征得学生同意后，以匿名的方式收集了学生的肩宽、体重和性别等参数，对所得数据取平均值，作为行人动力学中关于智能体半径、重量的设定依据。在志愿者提交的出行日志中，摘取学生步行出行情况下的运动时间和运动距离，通过二者的比值求得步行速度的范围。表 5-10 列出了参数的具体取值。

表 5-10 天津大学学生物理特征

参数	定义	男生范围	女生范围
r_i	肩宽的一半	191 – 243 mm	173 – 229 mm
m_i	质量	44 – 83 kg	38 – 74 kg
v_i^0	期望步行速度	1.30 – 1.82 m/s	1.20 – 1.72 m/s

5.5.3.2 行人动力学模型参数标定

社交隔离动力学中的参数可以反映学生的心理属性，包括期望安全距离、私人领域强度和范围、对障碍物的排斥强度和范围、弛豫时间、防疫领域互动强度和范围、被偏好要素的吸引程度、范围和衰减速率。根据调查问卷结果，学生最认可的校园内社交隔离距离为 1 米其次是 1.5 米，分别占据了 33%和 29%。仅有少量同学（17%）认为需要执行 2 米及以上的社交隔离距离。因此，本文采用 1.5 米作为学生的期望安全距离。关于学生的防疫领域强度，同样参考调查问卷结果，超过 90%的同学认为社交隔离是一项有效途径。支持社交隔离的同学占到绝大多数，只有 4%的同学非常不支持，23%的同学不太支持。社交隔离作为一项防疫措施，已经被同学广泛接受。因此，将防疫领域互动强度设置为较大，以反映学生对于社交隔离的接纳度。为了简化模拟的计算量，仅考虑景观对于学生的吸引力，根据图 5.4 中学生对于景观的偏好可知，47%的学生愿意靠近、22%的学生愿意偶尔靠近、31%的学生比较排斥，根据上述比例设定景观要素对于学生的吸引或排斥系数。由于期望私人领域范围、弛豫时间、对墙的排斥程度指标难以收集，因此采用社会力模型的系数。表 5-11 列出了这些学生心理参数的具体取值。

表 5-11 行人动力学模型参数

参数	定义	估计值或范围	参考
A_i^1	私人领域互动强度	3 m/s^2	文献 ^[113]
B_i^1	私人领域互动范围	0.2 m	
τ	弛豫时间	1 s	
D_i	期望安全距离	1.5 m	问卷调查
A_i^p	防疫领域互动强度	3 m/s^2	
A_i^a	吸引要素互动强度	$1 \text{ m/s}^2 - 3 \text{ m/s}^2$	
B_i^a	吸引要素互动范围	10 m	
λ	吸引要素衰减速率	$1/\text{s}$	

5.5.3.3 传染评估模型参数标定

根据新型冠状病毒的传播特性，标定传染评估模块中的四个参数，即 T ， R_C ， C_0 ，和 γ 。研究表明^[217]，一个人可以在 4 秒内吸入传染性颗粒物，因此我们设定 T 为 4 秒。 C_0 由新冠病毒颗粒脱落的概率分布表示，感染颗粒在症状出现前一周多开始出现，并在症状出现后 7 天内迅速下降^[218]，如图 5.18 (a) 所示。为了减少计算量，我们设置所有感染者均处于 $C_0 = 0.16$ 的状态。在之前的研究中^[219,220]，在距离患者 2 米的空气采样器中检测到携带新冠病毒的气溶胶，因此我们设置 $R_C = 2$ m。然而，较小的液滴和气溶胶可以在空气中停留很长时间，从而导致疾病在较长距离内传播^[221]。因此，尽管随着距离增加感染概率急剧降低，但是在传染半径以外仍然存在感染风险，如图 5.18 (b) 所示。最后，由于病毒传播是意外和致命的，这导致现实生活中的实验不可行，本文无法找到传染性强度的相关数据来定量测试我们的模型。因此，本文给出了 $\gamma = 4$ 的合理估计值，用于衡量传染性的强度。

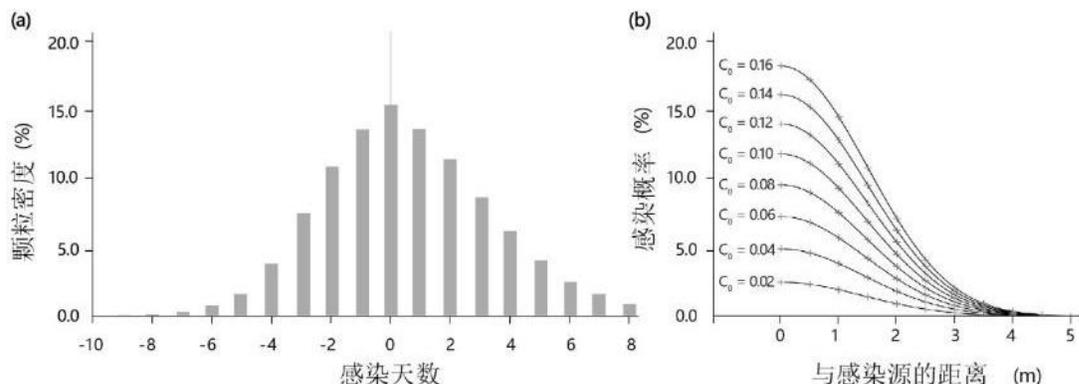


图 5.18 (a) 新冠病毒颗粒脱落概率分布^[218] (b) 在 $\gamma = 4$ ， $R_C = 2$ m， $T = 4$ s下，不同 C_0 对应的感染率分布图

5.6 防疫重点区域疫情风险评估

在仿真模拟的过程中，收集学生的轨迹、位置、学生之间的距离等信息，在仿真模拟结束后，针对这些数据进行数据挖掘，根据疫情风险评估指标体系对仿真模拟结果进行评估。

5.6.1 行人模拟指标分析

5.6.1.1 行人空间分布

图 5.19（右上）展示了行人的具体空间分布位置，为了更好的显示感染者和暴露者的空间分布情况，在可视化时对他们进行了半径放大五倍的处理。此外，根据位置坐标在 ArcGIS 中进行核密度分析，可以更好的显示人群在空间中的聚集情况，得到图 5.19（左上）的行人核密度图。

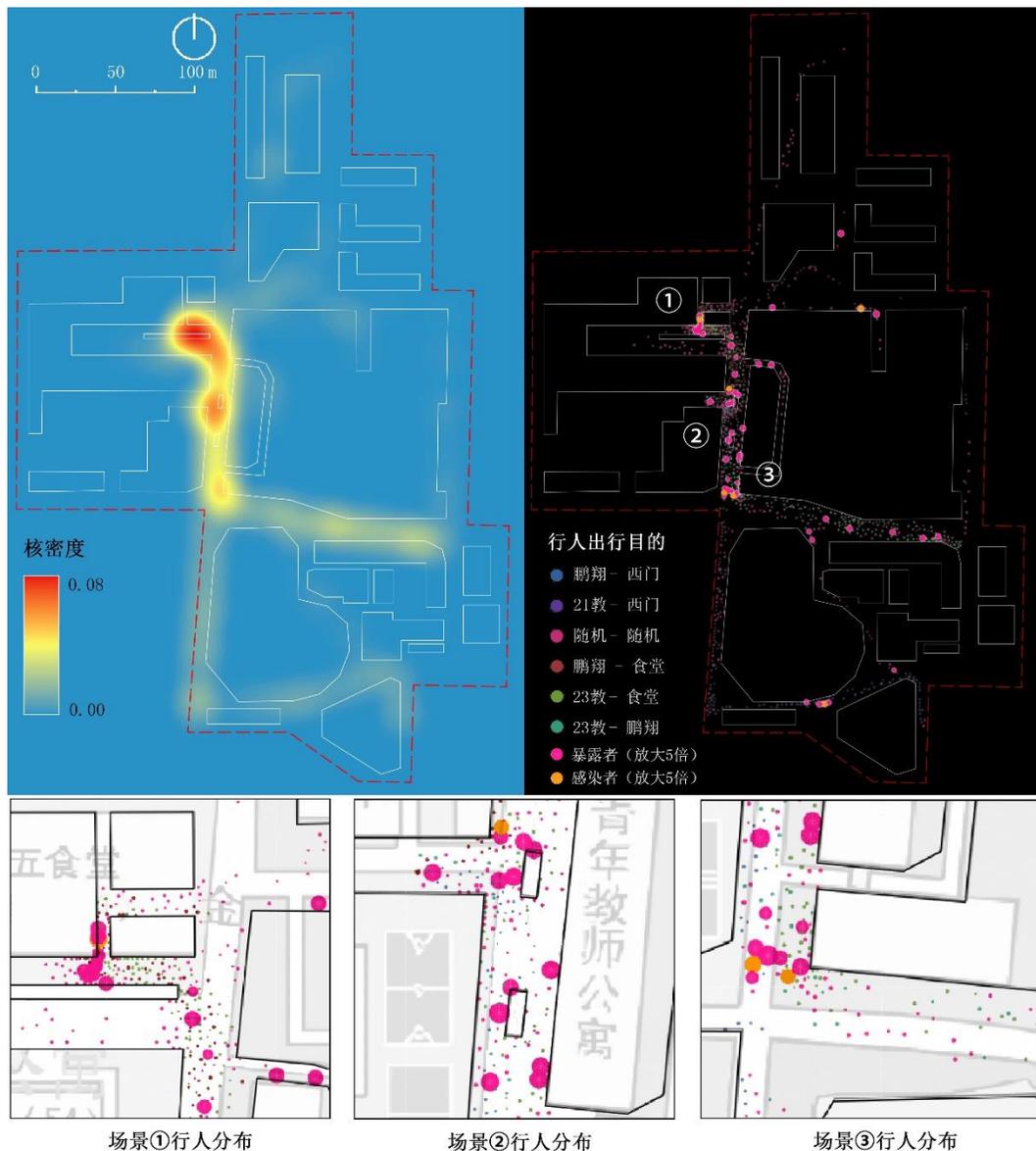


图 5.19 行人核密度与行人分布
图片来源：作者自绘

根据核密度图,可知行人主要聚集在学五食堂(场景①)、鹏翔公寓门口(场景②)、金晖道与铭德道的交叉口(场景③)。根据暴露者的空间分布,将上述三个区域的行人空间分布放大,得到图 5.19(下)的三张行人空间分布图,可以发现均出现了聚集性感染事件,具体分析如下:

场景①主要是由于快递点导致通向学五食堂的路径过窄,学生难以遵守社交隔离,同时大量堵塞在门口,导致了病毒的聚集性传播。

场景②主要是由于门口有各个方向回宿舍而学生,也有从宿舍出门的学生,多股人流交汇,而门口难以承载如此多的人流。另一个原因是在这里人车混行,占车辆据了一部分道路,导致道路可步行宽度减少。学生为了躲避车辆,导致车辆周围的人群密度更高,因此有更高的暴露概率。

场景③虽然道路宽阔,但是并没有被有效利用。由于行人偏好最短路径,所以会选择从铭德道斜着走入金晖路。这导致虽然爱晚湖侧道路景观较好却少有人走,而老年人活动中心前的人群特别密集,造成了大量感染。

5.6.1.2 步行轨迹密度

收集模拟中的 1000 名学生的步行轨迹,将它们导入 ArcGIS,利用线密度分析得到轨迹密度,显示整个模拟过程中步行轨迹密度的平均值。在记录步行轨迹时,将轨迹追踪的时间间隔设置为 10 帧一次。虽然这样会出现部分轨迹穿墙的问题,但是比例相对较少,而这种方式可以大幅减少计算损耗。

步行轨迹如图 5.20(右上)所示,轨迹覆盖了所有设置的起止点和终止点,学生会根据最短距离选择合适的路径。因为社交隔离背景下人与人之间的距离更大,需要更多的空间,因此原本就宽度不足的步行环境在社交隔离下显得更为局促。轨迹显示出不均衡性,在学五食堂门口和鹏翔公寓门口处的轨迹非常密集,从 21 教出发到学五食堂的轨迹也较为密集。步行轨迹密度如图 5.20(左上)所示,显示了学生出行时的路径选择情况。如预期的那样,在金晖路和铭德道的交叉口、敬业道以及学五食堂门口具有更高的密度值。因为这些区域是多股人流交汇之处,各个方向的人流汇聚在相对狭小的空间内,必定会发生一定的交互。此外,步行轨迹密度在拐角处呈现更高的值,说明在拐角处更容易发生行人交互。

将模拟结果与实际拍摄照片进行对比,发现模拟与实景基本一致,证明模拟的准确性。照片均拍摄于中午 12 点钟,与模拟时间保持一致。下面对结合每个场景的实景照片进行分析:场景①的照片展现了由于学五食堂附近有从校医院方向来往

的行人、金晖路方向来往的行人，人口密度大。场景②中，人车混行在照片中有所体现，这一路段充满了各个方向的人流，包括从学五食堂或教学楼回宿舍以及从宿舍去往西门、学五食堂的学生，轨迹密集。场景③的照片显示与模拟结果一致，即靠近建筑一侧人群密集，而另一侧空无一人。

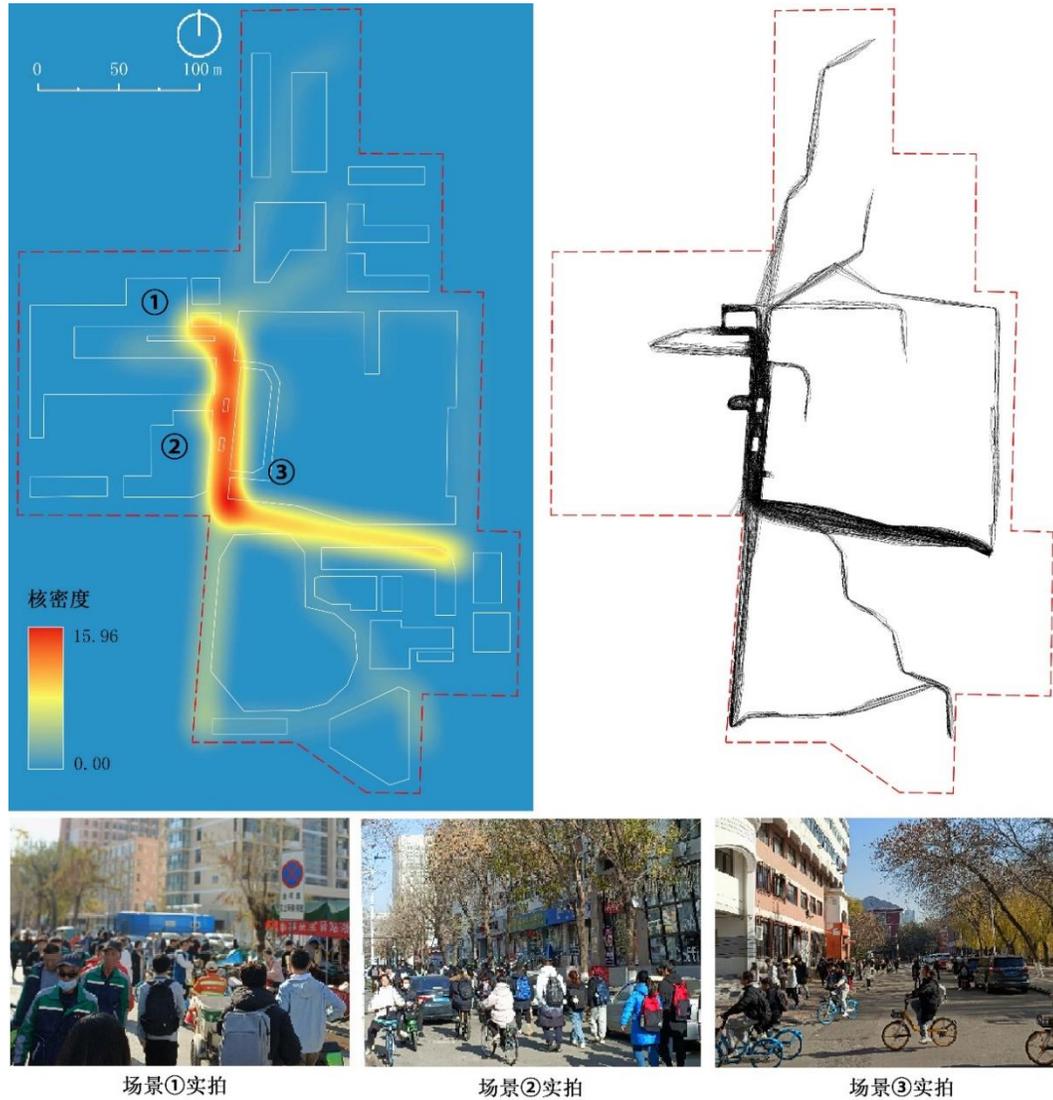


图 5.20 步行轨迹与实景照片
图片来源：作者自绘

5.6.1.3 最近邻距离概率密度函数

模拟中最近邻距离概率密度函数（PDF）如图 5.21 所示。由图可知在校园现状环境下的仿真模拟过程中，最近邻居距离小于 $PDF \sim 5\text{ m}$ 的概率为 70.2%，小于

$PDF \sim 10\text{ m}$ 的概率为 73.9%。最近邻距离中位数为 2.58 米，均值为 2.67 米，标准差为 1.35 米。最大可能距离为 $PDF \sim 3.1\text{ m}$ ，约占总数的 4.2%，其次为 $PDF \sim 1\text{ m}$ ，约占总数的 3.5%。

以设定的 1.5 米安全距离作为阈值，计算最近邻距离小于安全距离的概率为 14.9%。由此可见，虽然设置了 1.5 米的社交隔离距离，但是由于学生数量较多，道路狭窄，且部分被车辆、设施、快递点等占据，导致很多学生难以满足安全距离，有超过七分之一的学生不得不暂时靠近他人来穿过道路，否则可能导致路径拥堵而更加难以通过。

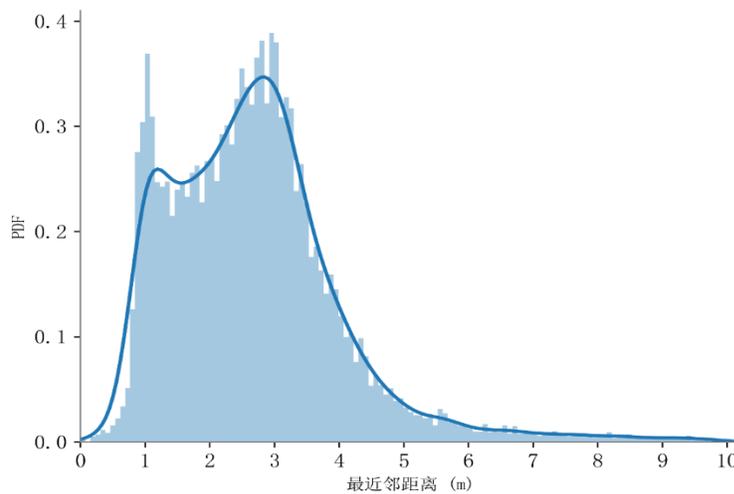


图 5.21 最近邻居距离概率密度函数

图片来源：作者自绘

5.6.2 病毒传播指标分析

5.6.2.1 平均暴露时间

进行多次重复实验后，将收集到的数据进行汇总分析，为了更好的分析暴露时间，利用暴露时间占呼吸周期的比重，得到暴露时间占比图，如图 5.22 所示，图中的浅蓝色区域为 95%置信区间。在模拟初期，由于行人刚从建筑内出来，相互距离没有拉开，暴露时间占比较高。随着模拟的进行，场地内最终达到设定的人口上限后维持动态平衡，因此模拟的前期场地内人数处于不断增加的状态，暴露时间占比也因此剧烈变化。随着模拟的进行，行人向着目的地前进，出现多股人流交错的情况。在模拟后期，平均暴露时间占呼吸周期比重的 45%，时长逐步稳定在 1.7 秒

每呼吸周期（4 秒）。也就是说，行人在呼吸过程中最少有 45%的概率处于病毒传播半径内，这是十分危险的。造成这一现象的主要原因是同一时间段内，处于同一路段的学生数量太多，而路段的可步行宽度较小，导致行人之间的距离较近，难以保持社交隔离的安全距离。

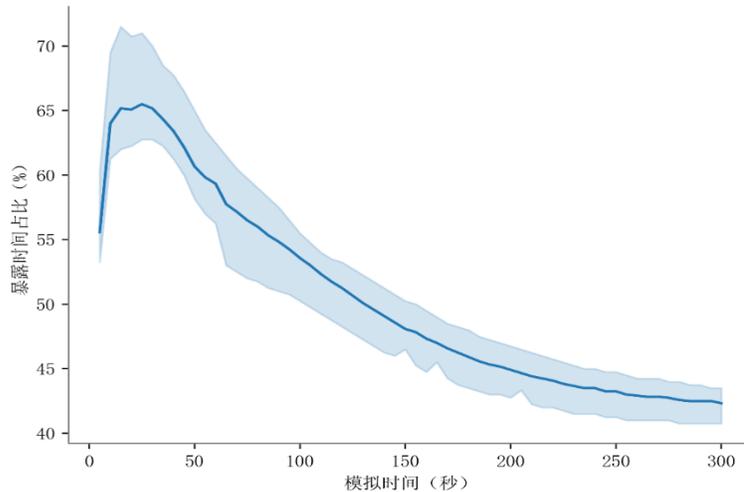


图 5.22 平均暴露时间占比图

图片来源：作者自绘

5.6.2.2 累积确诊人数

进行多次重复实验后，将收集到的数据进行汇总分析，得到如图 5.23 的累计确诊人数图，图中的浅蓝色区域为 95%置信区间。在模拟初期，由于行人刚从建筑内出来，因此确诊人数较少，不过随着模拟时间的增加，行人之间的交互越来越多，场地内的人数达到人口上限，拥挤随之而来。累计确诊人数与模拟时间基本呈现线性关系，即随着模拟时间的增加，累计确诊人数逐步上升，在模拟结束后，达到均值约 120 人的总确诊人数，占总人数的比例为 12%。根据置信区间可知，随着模拟时间的增加，数据的方差增大，表明爆发性传播的可能性也在增大，爆发性传播可造成超过 160 人感染。

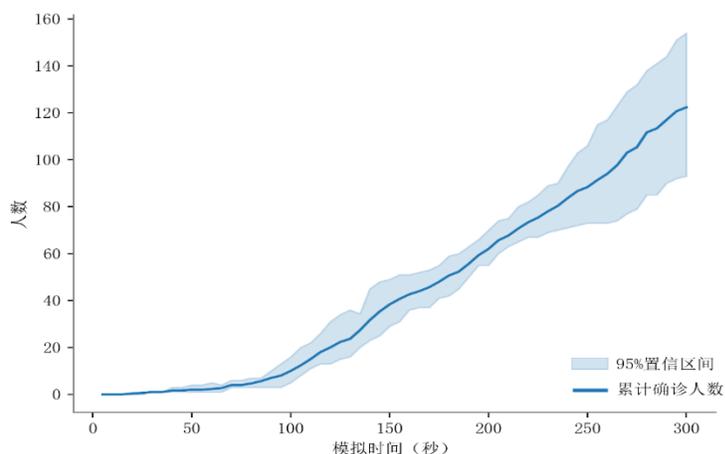


图 5.23 累计确诊人数图

图片来源：作者自绘

5.6.3 防疫重点区域问题分析

根据仿真模拟和疫情风险评估结果，探寻空间现状特征与问题，为后文的防疫规划提供依据。

5.6.3.1 防疫重点区域公共空间

根据仿真模拟结果可以发现模拟区域缺乏连续的、多样的绿化空间和开放空间，或者本来较大的开放空间被快递点、障碍物占据，难以发挥其功能，也就无法对病毒的传播提供防护和隔离，导致人群充斥了整个空间，病毒大规模传播。

防疫重点区域的公共空间包括爱晚湖湖畔亲水踏步空间，老年活动中心附近的街角空间，鹏翔公寓中间广场，57 斋入口广场，学五食堂、鹏翔浴室门前广场和快递投放点，校医院前的花园广场、建筑学院周边三角广场空间。目前公共空间的主要作用为交通组织和穿行功能，几乎没有为教职工及学生提供的停留、休憩、交谈、健身、学习的空间，导致公共空间在平时使用中的存在感较低、使用人群对公共空间的认知较差。

具体而言，爱晚湖湖畔的亲水踏步空间面积较小，设施老旧，环境较差，学生的使用频率较低，长时间空置；大量公共空间位于建筑出入口附近，人流量较大，且缺少城市家具、小品等设施支持；鹏翔公寓中间广场和 57 斋入口广场经常出现暂时停留及等候的人群，堵塞交通，且由于自行车停放，占据了大量的公共空间；学五食堂、鹏翔浴室门前广场和快递投放点人群密集、拥挤，在中午和晚上的高峰时期，可活动空间几乎全部被摊贩、快递点、运输车辆、自行车占据；校医院前的

花园广场虽然环境较好，但是因为高差的原因，使用频率较低，仅有少量同学偶尔穿行；建筑学院周边三角广场空间几乎荒废，仅用作停车，几乎无人停留。此外，还存在很多废弃空间和环境较差的空间，例如 57 斋东侧有一大片荒废绿地，垃圾遍地，野猫横行；“分子+”研究院西侧的建筑凹进处则堆满了垃圾、建筑废料，平时几乎无人行走。

5.6.3.2 防疫重点区域交通体系

防疫重点区域的交通体系的问题在于道路宽度不足，例如金晖道的宽度仅有 7 米，但是这一条道路是学生出行和校园车辆通行的高频道路，因此很容易造成拥堵。在仿真模拟中，金晖道也是人流量最大，人口分布最密集的区域。道路的可步行宽度较小，空间设计也有问题，道路步行舒适性较差。在道路两旁缺乏绿化空间、停留空间和交往空间，学生无法在道路旁停留，一旦停留就会阻塞交通。道路交叉口缺乏行人管理设施，导致行人聚集在建筑拐角处，引发病毒传播风险。路网结构不合理，道路导向型太强，可替代路径较少，道路抵御风险的能力较弱。道路连通性不够，路径多样性不足。道路的功能结构混乱，没有完善的慢行系统。在仿真模拟中可以发现道路上塞满了行人，且经常发生拥堵，人车混行严重，车辆占据了大量的可步行空间。

5.6.3.3 防疫重点区域设施布局

防疫重点区域的设施以商业设施为主，尽管有校医院，但是等级较低，医护人员较少，治疗能力较差，缺乏隔离设施和物资储备分发设施。部分室外交通设施布局不合理，影响学生出行和路径选择，增加疫情传播风险，例如学五食堂南侧的自行车架难以支撑高峰时段的停车需求，反而会占据空间，阻碍出行，破坏校园的风貌。快递设施的位置不合理，学五食堂本身就是人流密集区域，而快递点也是人流密集区域，将快递点布置在学五食堂门口，必然会造成就餐人流和取快递人流的冲突，加剧这一区域的病毒传播风险和拥堵的可能性。

5.6.4 易感染区域识别与问题分析

在前文的第五章第六节中，对防疫重点区域的疫情风险进行了评估。根据行人空间分布图（图 5.19）和行人轨迹密度图（图 5.20），可以发现防疫重点区域内存在三处人流密集区域，分别是学五食堂门口广场、鹏翔公寓门口路段、金晖道与铭德道的交叉口。结合这三个区域的病毒传播和接触数据，可以发现，这三个区域也

是大规模接触和感染的主要发生地。基于上述仿真模拟结果，将这三处认定为易感染区域。接下来对这三处易感染区域进行分析，探求其导致人流拥挤和病毒传播的原因和空间设计问题，为后文的防疫规划和空间优化提供参考。

5.6.4.1 学五食堂门口广场

学五食堂门口是道路交叉口，从鹏翔公寓到六里台宿舍区、医院、浙佰超市、学生活动中心等设施都需要经过这里，这里汇聚了各个方向、各种出行目的的人群。然而原本较为充足的广场空间长期被快递棚子、机动车、自行车停车架占据，降低了空间的可步行宽度。快递点除了占据空间外，还会引发大量的学生在此处停留，进一步堵塞交通。在中午、傍晚的就餐高峰时段，学五食堂会接纳超过 1500 名学生就餐，由于学生的就餐时间比较集中，且部分学生会骑自行车就餐，大量的自行车占据了学五食堂附近的公共空间，导致可步行宽度进一步下降。



图 5.24 基于仿真模拟的学五食堂行人分布图（左）与实景照片（右）

图片来源：作者自绘

5.6.4.2 鹏翔公寓门口路段

鹏翔公寓门口路段宽度仅有 7 米，人行道虽然有 6.5 米，但是基本被台阶、树木、商贩占据，路面不平整，可步行性较差，可步行宽度窄。这一路段是车辆常走的路段，人、自行车、机动车混行严重，路边常有违规停车，经常发生机动车堵塞交通事件。由于邮政和快递点设置在附近，因此该路段经常被各种货运大卡车侵占。这部分车辆卸货时间长，停留时间也长，往来频繁，进一步降低了路段的有效步行宽度。此外，由于学生对于车辆具有排斥心理，为了躲避机动车经常需要走走停停，减缓人群的疏散效率，增加了病毒传播的暴露时间，造成了大规模的感染。



图 5.25 基于仿真模拟的鹏翔公寓行人分布图（左）与实景照片（右）
图片来源：作者自绘

5.6.4.3 金晖道与铭德道交叉口

这一片区域是学生从 21 教学楼、23 教学楼、西门去学五食堂或者鹏翔公寓区的必经之路，人流较多。虽然该处空间宽敞，但是由于学生们都偏好于走最短路径，而这一路段又缺乏必要的行人管理措施装置来对学生进行分流，导致行人的步行路径大多数贴着建筑拐角，使之成了拥堵区域。

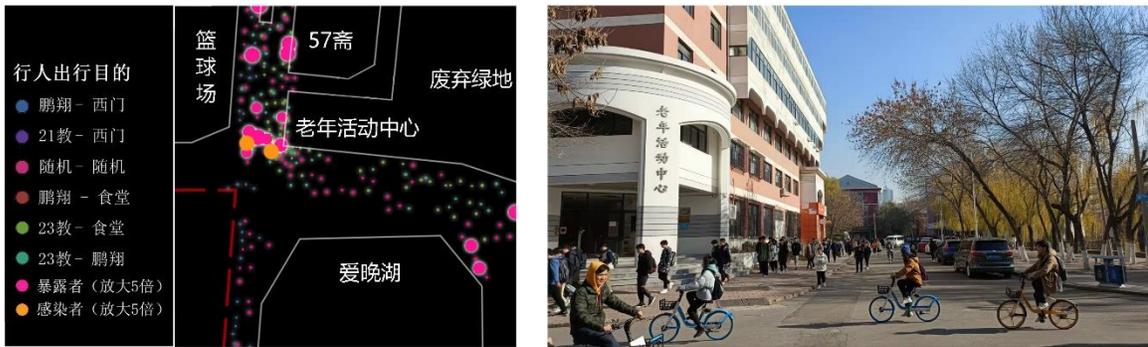


图 5.26 基于仿真模拟的建筑拐角行人分布图（左）与实景照片（右）
图片来源：作者自绘

5.7 本章小结

本章以天津大学卫津路校区作为实证研究案例，通过无人机航拍、实地测量等方式获取校园空间环境数据，通过志愿者招募、网络爬虫和调查问卷收集学生出行数据。将学生出行特征分析与校园环境综合评估结果相结合，确定防疫重点区域进

行实验设计和实验场景搭建。根据收集数据和对新冠肺炎传播特征的研究，标定模型相关参数。模拟结束后，根据评估指标体系，对行人模拟指标和病毒传播指标进行分析。通过指标分析，发现防疫重点区域内存在三个问题区域，分别为五食堂门口、鹏翔公寓门口、金晖道与铭德道的交叉口。

第6章 校园防疫规划方案制定与规划方法研究

本章以《公共卫生防控救治能力建设方案》、《城市防疫专项规划编制导则》等文件为依据，提出校园防疫规划的基本原则和方法。构建“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系，逐步细化防疫规划的内容，促进资源梯次配置，形成层级完善，体系健全，运转高效的校园防疫体系。根据三级防疫体系的现状特征与问题，分别提出对应的防疫规划方案。

针对校园防疫设施缺乏，交通体系不完善等问题，提出防疫分区划分、防疫应急救援和物资通道规划、防疫应急物资储备分发设施规划和防疫应急医疗救治设施规划，为校园的疫情防控提供防疫医疗救治、物资保障、防护隔离、基础保障等服务。针对防疫重点区域公共空间品质较差、利用率低、防疫设施缺乏等问题，提出公共空间体系优化和防疫设施布局优化，通过设计手段提升防疫重点区域的疫情预防能力。针对易感染区域，根据风险评估结果分析引发病毒传播的空间问题，总结道路和空间优化方法，对问题道路和空间进行优化设计。充分考虑校园空间的风貌、品质、功能、形态和分布特征，归纳相关规划设计方法，从路网结构优化、步行宽度提升和绿化体系构建三个方向，降低问题道路的局部人口密度，减少病毒在问题道路传播的风险。最后，为了验证优化方案的可实施性，对优化后的校园防疫重点区域再次进行模拟评估，检验优化方案的效果。

本章虽然以天津大学为实证案例，但是规划的基本原则、方法和手段可以进一步总结与归纳，发展出一些普适性原则，为未来的校园空间的防疫能力优化提升提供参考。

6.1 规划基本原则

2020年5月9日，国家发改委、卫健委和中医药局联合发布的《公共卫生防控救治能力建设方案》指出，疫情防控暴露出我国重大疫情防控救治存在不少能力短板和体制机制问题，在未来一段时间要全面做好公共卫生工作，加强公立医疗卫生机构建设，保障人民生命安全^[222]。方案提出了坚持平战结合、坚持合理布局、坚持防治协同等基本思想：（1）平战结合指满足“战时”快速反应、集中救治和物资

保障需要，又充分考虑“平时”职责任务和运行成本，推动公共卫生和疾病预防控制体系改革发展；（2）合理布局指加快补齐医疗卫生短板、统筹谋划医疗卫生资源布局；（3）防治协同指着眼于各级医疗机构的整合协同，促进医疗梯次配置，开放共享，实现预防和医疗协同发展。上述建设的基本思想，为本文的工作提供了政策支持。

2021年9月23日，中国城市规划学会发布的团体标准《城市防疫专项规划编制导则》^[28]，也是本文进行校园防疫规划的重要依据。城市防疫规划指对城市传染病疫情防治的规划目标、防疫体系、配置标准、设施布局的综合部署、具体安排和实施管理，是指导城市防疫设施建设和提升城市应对重大疫情防控能力的重要依据。该团体标准指出，防疫规划应遵循以人为本、平疫结合、分级分类的总体原则，在城市规划、建设和管理的全过程中贯彻全生命周期健康管理理念。上述理念和原则为本文规划基本原则的提出提供坚实基础。

新冠疫情具有隐蔽性强、预测困难、传播速度快、传播范围大等特点，因此疫情防控工作应从医疗救治转向基层管控^[223]。校园空间是学生活动的重要载体，疫情下学生的生活方式、出行特征发生了改变，传统的校园物质空间难以满足未来长时间的疫情防控需要。面虽然疫情已经持续了一段时间，但是校园防疫的物理空间支持体系仍然没有完全建立起来。目前校园防控措施集中在宣传教育、舆情监控、人员管控等管理措施和校门管控、楼宇管控、实验室管理等节点管理措施，并没有系统的建立与防疫手段相结合的物理空间支持，具有很大的优化空间。面对社会、自然环境的飞速变化，只关注物理空间的规划方法已经难以满足日益多元的生活场景的诉求，需要从规划理念、空间设计、空间管理等多方面提出适合校园防疫体系建设的基本原则，提高校园应对重大疫情风险的能力。

6.1.1 学生出行行为作为规划依据

在传统的校园规划中，注重校园的空间布局、环境氛围、文化特色、建筑风格、空间构成、空间组织、道路组织等方面的问题，过分强调平面的轴、形的视觉艺术效果，忽视了校园规划中的人际互动需要^[45]。近年来，随着人本主义和精细化设计的盛行，校园规划逐步关注到“人”的因素，例如崔愷院士在进行天津大学北洋园校区的建设时，就提出了“以学生活动为中心”的设计理念，通过观景平台的灵活布置、将建筑庭院与轴线上的休息区相结合、设计尺度宜人的林荫大道等设计手段，形成了丰富的学生活动空间^[224]。校园空间是学生学习和活动的基本载体，校

园规划的首要对象是全体师生，学生的活动才是校园空间的主角，而不是标志性建筑物^[224]。校园的户外空间，包括露台、广场、长廊、坡道等多种建筑元素，是学生交流、学习、娱乐、休息的场所，是校园中最有活力和最具开放性的空间^[224]。

伦敦大学学院的研究者指出，新冠疫情对空间规划提出了新的要求，从事空间规划和管理的城市规划师和政策制定者应仔细考虑如何将“以人为本”的原则纳入空间规划系统，以减少对城市和人民的负面影响^[19]。新冠疫情的传播方式是接触传播，病毒传染常发生在学生出行的过程中。在进行校园防疫空间的规划时，应该充分考虑学生的出行行为，结合学生的出行特征和习惯进行设计。根据师生的出行路径，对于学生活动比较集中的区域，例如宿舍区、餐饮区、体育活动区、教学区等进行重点研究，将校园空间与疫情防控措施密切结合，给学生出行和活动带来便利和舒适，提高校园应对疫情风险的能力。

空间规划的防疫效果也要依据学生在空间当中的出行行为来进行评估。未来空间规划的逻辑将发生改变，单纯从形态、功能、轴线等角度难以评判空间是否可以抵御疫情的风险，需要新的评判方法。考虑到疫情传播与人的出行行为之间的密切关系^[225]，空间防疫能力可以通过行为来检验。因此，在未来的校园规划设计中，学生的出行行为特征、轨迹特征等将成为防疫规划的重要依据。

6.1.2 营造弹性稳健的校园空间环境

弹性城市是近年来城市规划研究的重点话题，指城市系统能够预防和响应经济、环境、社会和制度等可能发生的威胁并从中恢复的同时对公共健康和经济的影响降至最低^[226]。中国积极响应弹性城市建设，习近平总书记在《国家中长期经济社会发展战略若干重大问题》中强调“要打造宜居城市、韧性城市、智能城市，建立高质量的城市生态系统和安全系统。”在重点城市开展试点工作，近五年来上海、北京等城市的弹性水平不断提升，从空间预防、工程技术、社会治理等方面增强了城市韧性，成为国内弹性城市的建设先驱^[19,227]。弹性规划理念的重要性在新冠疫情大流行期间，已经变得越来越清晰和重要^[19]。在后疫情时代，弹性规划可以被视作支持未来空间规划的有效方式，从空间弹性、环境弹性和设施弹性开始，旨在以合理、高效的方式促进城市空间的最佳发展^[19]。

为了应对新冠疫情，校园应该具有弹性和稳健的特质，使校园能够快速调配资源，靠自身力量恢复常态。弹性指在危机发生时，校园能提供足够的空间和服务资源的弹性容量，最大限度地降低灾害损失，同时还能进行功能变换和紧急扩展^[228]。

稳健指校园可以保障学生的基本生活需求，并具备抵御疫情冲击的能力^[229]。为了达到上述目标，可以在各类设施和空间的配置上保留一定的冗余和空白。研究表明，规划留白可以有效增强空间弹性^[230]。各类设施可以增加 10%~20%的弹性配置^[231]，增加一定的重复功能，一方面在干扰发生时，后备资源能够快速响应和跟进，降低影响程度，确保效能稳定，以便尽快恢复或找到替代方案^[232,233]，另一方面也可以满足更大范围的人口服务需求。可以选择校园中的绿地和公共空间作为校园发展的弹性用地，可以进行预先规划和准备，保持“即需即用”的状态^[234]。保证校园在受到疫情冲击后，能够根据环境的变化调节自身形态，恢复系统原有的结构和功能^[229]。具备一定的学习能力，从灾难中汲取教训和经验，转化为应对疫情的免疫力，促进新的发展^[228]。

6.1.3 遵循平疫结合的空间规划模式

平疫结合是从平战结合引申而来，指城市空间在平时为人们提供居住生活、卫生健康和商业休闲等功能，在疫时要满足初诊、核查、监督和互助等防疫需求^[235]。平疫结合的空间规划模式在发达国家中广泛采用。为了应对突发性公共卫生事件，发达国家建立了完备的应急医疗物资储备系统和健全的基层管控体系。例如，新加坡的平时防疫体系由“国家传染病中心-综合医院-全科诊疗所-物资储备库”组成，基层的医疗系统可以满足日常 80%以上的诊疗服务，基本实现了全民覆盖。在疫情期间，新加坡利用大型公共设施和预备用地，将其改造成临时性医院，满足大部分确诊患者的隔离治疗^[234]。日本的防疫体系具备完善的应急医疗物资储备系统，构建了“国立传染病研究所-综合医院-基层保健所-基层医疗卫生机构-各级各类物资储备场所”日常公共卫生防疫设施体系，每年都会更新防灾物资的数量和储备地点等。在疫情期间，日本凭借全民保险制度、公共卫生中心和医疗机构的协调作用的结合，成功控制了病毒的传播并避免医疗保健系统不堪重负^[236]。

如果校园空间建设只注重日常时期的师生健康情况，而忽视紧急时期的应对能力，那么在面对突发性公共卫生事件时，就会缺乏足够的应对能力。反之，如果只关注突发性的公共卫生事件，那么就会造成资源的浪费和空间的闲置^[13]。因此，与传统的校园规划相比，疫情下的校园规划应该在时间维度上进行扩展，充分考虑疫情的发展周期，遵守平疫结合的思想。在平时可以满足师生的居住、生活、娱乐、卫生健康和商业休闲等生活服务需求，在传染病灾害爆发时，可以保证师生的身体

健康和校园的公共卫生安全，为师生提供初诊、监督核查、物资供给、医疗救治等疫情防控功能。

“平”时的规划手段包括：（1）推进校园防疫设施的建设。从规模、选址、分区、防护距离、面积、数量、形式、连通性等角度进行防疫设施的规划设计^[237]，使校园内的设施具备应对公共卫生灾害能力的同时，促进师生日常的体育锻炼活动；

（2）建立易感染区域的检测与识别机制。利用大数据、人工智能等技术手段，追踪、绘制人群的移动趋势，识别校园中潜在的易感染区域；（3）对识别出的易感染区域进行空间改造，充分考虑病毒的传播特征，调整空间要素的布局，营造健康的空间环境，减少致病概率；（4）加强校园空间管理体系建设。推动疫情治理向基层转移^[235]，增强学生对校园防疫工作的支持力度，提高学生的防疫意识，增强校园的自组织能力，构建师生互助自治的防疫应急治理框架。

“疫”时的规划手段为建立校园疫情响应体系：（1）在疫情爆发早期，重点是疾病的监测、识别和控制，各种空间和设施向着疫情时期转换，为疾病的发生做准备；（2）在疫情爆发中期，通过隔离、分流等措施，切断病毒的传播途径，通过各级医疗机构的配合，增设紧急医院、隔离点与临时物资点等，保护师生的健康安全；

（3）在疫情爆发后期，进入常态化防控阶段，在集中管理高风险区域的同时，逐步放开低风险区域，各种空间和设施逐步向着日常状态下的公共卫生防疫体系进行有序转换；（4）在疫情结束后，总结、分析、反馈校园防疫中存在的问题，提高校园应对公共卫生事件的能力。

6.2 分级防疫体系构建

依托《城市防疫专项规划编制导则》分级分类思想，对校园防疫体系进行分级。校园无法像城市一样根据行政区划来进行防疫体系分级，根据第五章仿真模拟和疫情风险评估的结果，将校园防疫体系分为“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级。根据防疫体系，明确各级防疫责任与分工，确定各级防疫规划重点和空间要求，逐步细化防疫规划的内容，形成层级完善，体系健全，运转高效的校园防疫体系。校园分级防疫体系的范围如图 6.1 所示。



图 6.1 “校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系范围示意图
图片来源：作者自绘

6.3 校园防疫规划方案制定

在第五章第四节中，分析了校园公共空间、交通体系和设施布局的问题，针对这些问题，进行相应的校园防疫规划。

6.3.1 防疫分区划分

根据疫情管控需要，结合校园内学生分布和步行生活圈范围，合理划定校园防疫分区，构建基本防疫空间单元。根据防疫分区，可以更有效的进行校园空间优化，为每个片区都配置足够的医疗救治、集中隔离、物资储备、物资分发和基础设施。天津大学卫津路校区的宿舍区成片布置，根据宿舍区可以自然划分为鹏翔宿舍区、六里台宿舍区和七里台宿舍区三个防疫分区，其中鹏翔宿舍区位于校园西侧，六里台宿舍区位于校园北侧，七里台宿舍区位于校园东南侧。

利用 ArcGIS 的服务区分析，计算得到三个宿舍区的 5 分钟步行生活圈，作为校园防疫分区划分的重要依据，如图 6.2 所示。六里台宿舍区和鹏翔宿舍区生活圈范围存在一部分重叠区域，充分利用重叠区域的空间进行防疫设施的布置，可以同时服务两个宿舍区，有助于空间的高效利用。其他各类防疫设施、空间、通道的规划布局，也应该充分考虑三个宿舍区的步行生活圈范围，进行合理规划。

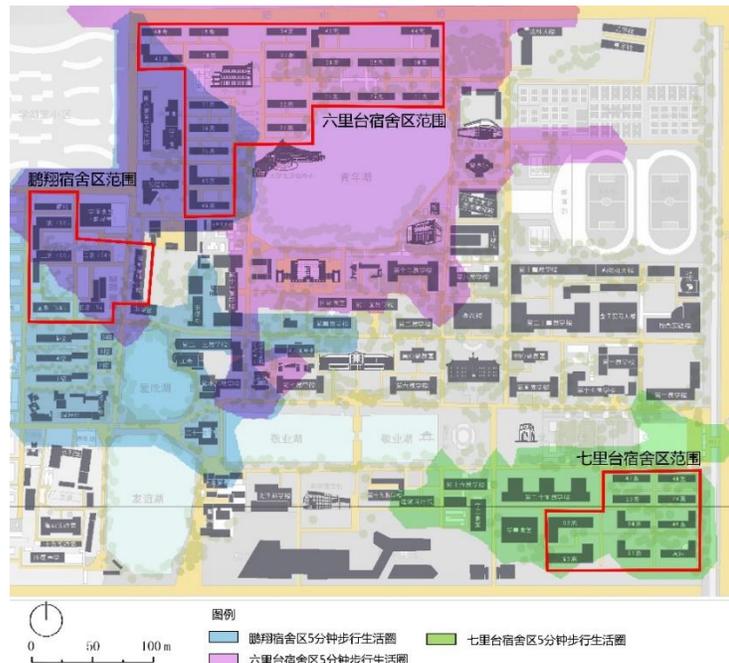


图 6.2 校园防疫分区划分图

图片来源：作者自绘

6.3.2 防疫应急救援和物资通道规划

李晔等人^[1]描述了疫情不同阶段下城市交通系统的状态，为本节的校园交通体系优化和防疫应急通道规划提供思路：在平时阶段，出行目的多样，包括通勤、娱乐、休闲等，应注重交通系统的多样化建设，保证易达性，预防疫情对基本生活产生严重影响；在疫情爆发初期，应严格控制客流密度，保证物资运输通道的畅通，并针对目前存在的问题进行优化；在疫情爆发中期，要阻断出行，城市交通转向社区防疫，以物资采购为主，出行距离下降，出行范围在居住地周围，要注意应急保障物资的配送；疫情爆发后期，恢复阻断的交通，考虑复工复产需求，出行需求逐步增加，以通勤交通为主，需要控制人流密度。在校园语境下，应该更多的考虑学生的出行特点和出行目的，对校园的交通体系进行优化。在疫情时期，进行校园防疫应急救援和物资通道规划，保证校园的响应能力。

在平时阶段，校园交通体系应具有动态性、可达性和多样性^[1]。校园交通系统应具备一些功能类似的设施，避免单一的交通发展模式，提高校园交通系统对特殊情况的应对能力。在5分钟步行生活圈内配备学生日常生活所需的学习、锻炼、

交往等服务功能和公共空间，提高学生出行的友好性和便捷性，减少学生到达各个设施的时间和距离。

疫情爆发初期主要通过监管、上报和线上教学等方式，减少学生的出行频率，鼓励学生非必要不出行，出行也采取社交隔离出行的方式，避免校园内出现人群聚集。这一时期如果学生进行必要性出行，可以充分利用校园的慢行系统，在校园采用步行或骑行的方式，尽量避免使用与他人有密切接触的交通方式，如校园电瓶车、机动车。校园慢行系统的规划方案如图 6.3 所示。

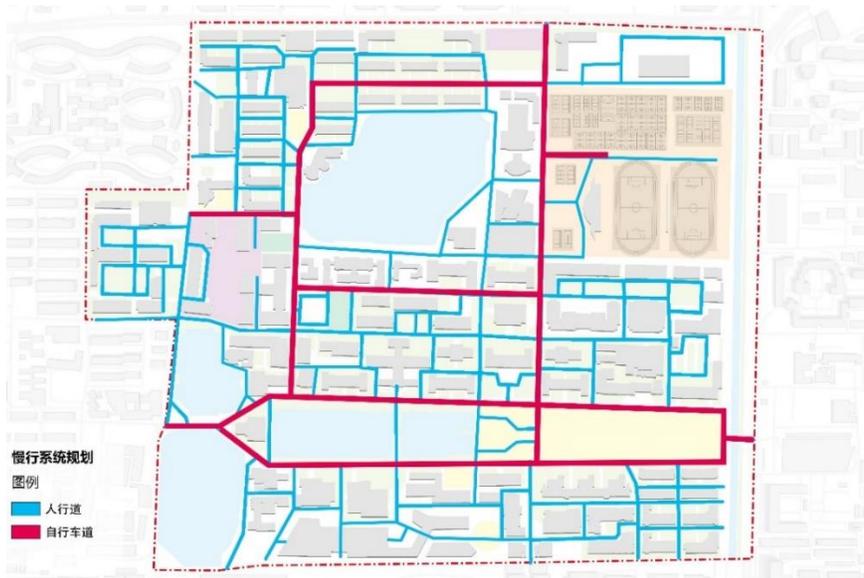


图 6.3 校园慢行系统规划方案
图片来源：作者自绘

在疫情爆发中期交通体系优化方案如图 6.4 所示。这一时期校园应实行全封闭管理，在学生宿舍区、餐饮区和教学区进行卡口管理，通过禁止外部人员的进入、进出人员检查、限制出行频次等方式，避免传染源向内传播^[238]。尽量避免校外车辆进入校园，减少交叉感染风险，保证学生在校园内有更多的可步行空间，与他人保持更大的安全距离。要保证紧急物资运输通道和医疗救治通道的畅通，同时注意运输过程中的隔离问题，避免感染周边的人。规划紧急物资运输通道和医疗救治通道时应该注意防疫通道的有效宽度要求，选择宽度大于 7 米的校园主要道路作为防疫应急主通道，选择宽度大于 4 米的校园道路作为防疫应急的次通道^[28]。通道尽可能与学生日常通行的路径分离，以保证通道的畅通。通道应该连接校园的主要出入口或物资储备空间。同时注意运输过程中的隔离问题，通道尽量远离人群密集区。

可以强化校园智能管理系统，可以通过智能监控、人脸识别、自动体温测量设备，实现校门的自动化管理，减少防疫和安保人员的工作强度和感染风险^[238]。

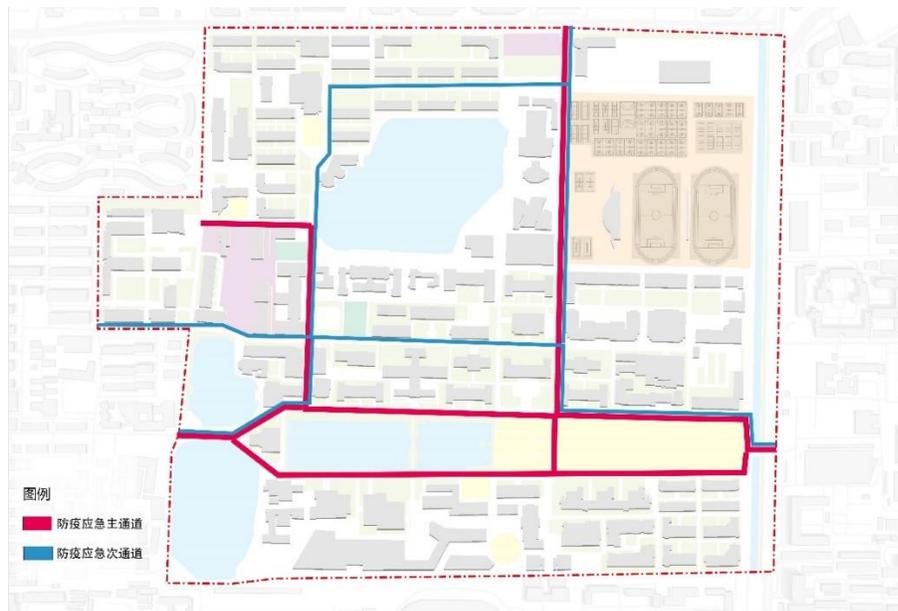


图 6.4 校园防疫应急救援和物资通道规划图

图片来源：作者自绘

疫情爆发后期校园交通体系从隔离管控转向流动性管控^[11]。控制人流密度仍是最主要措施，鼓励学生非必要不出行，即使出行也要遵守社交隔离政策，可以充分利用校园的慢行系统，尽量避免与他人的接触，保持足够的社交距离，降低校园内的人群密度，鼓励延迟出行和错峰出行。

6.3.3 防疫应急物资储备分发设施规划

《高等学校新冠肺炎疫情防控技术方案》规定，高校要做好消毒剂、手套、温度计等防疫物资的储备工作。保证上述物资的有效运输、存储、分配，是保证校园成功应对新冠疫情和学生安全健康的前提^[239]。在疫情爆发时，学生会大量购买防疫物资，导致超市缺货率提升，引发恐慌。充足的防疫物资储备可以避免物资短缺的现象，是稳定学生心态、保证校园正常运转、控制疫情蔓延、提升疫情应对能力的重要先决条件和必要物质基础^[240]。

应急物资储备场地的选址要考虑到物资的规模、运输、配送等功能^[234]，空间可利用面积、周边道路的通行能力、空间覆盖的人口规模等都是可以考虑的要素^[241]。合理的物资储备设施布局，能够有效减少用于物资分配的人力，同时提高物

资分配的效率和安全性。物资储备空间在整个公共区域中应该处于地势较高或有局部抬升的区域，保证有足够的新鲜空气供给，避免与水源接触，以保证极端天气下物资的干燥。同时，物资储备区域的大小，应与该公共空间的人口容纳量、在校园中的位置以及使用频率相结合。物资储备空间的选址应靠近主要道路或出入口。结合校园公共空间的物资储备区域的设置，能够将防疫流程由大化小，由集中变分散，更有利于学校疫情期间防疫秩序的维持。

校园内的各种广场和活动空间，不仅是重要的空间节点，还起到了连接各个主要功能区域的作用^[242]，是理想的物资储备的空间载体。根据仿真模拟的行人空间分布特征和步行轨迹密度特征，可以发现一些废弃空间和建筑背面空间没有被很好的利用，例如 57 斋东侧的废弃空间、校医院后侧的废弃空间、“分子+”研究中心建筑西侧凹进处。这些空间虽然面积不小，但是由于道路网络不完善，学生进入频次较少，路径被选择的频率较低，空间利用率较低。通过改造和利用这类空间，将他们接入到校园交通网络中，在平时可以缓解人流密集道路的拥挤情况，为学生提供更多的交往空间。在疫情时期，则可以从上述空间中筛选出区位较好且环境适宜的，作为物资储备空间的预备空间。在遇到紧急情况时可以启用这些地块，提高校园空间的恢复能力和弹性。

在疫情爆发初期的公共空间优化方案如图 6.5 所示。考虑到物资配送的交通便利性，和物资储存的安全性，可以在体育馆门口广场布置临时性大型物资储备中心，通过校园北门可以方便的运输物资，然后通过校园防疫应急物资通道向校园的物资分发点输送物资。选择距离宿舍区较近、交通便利的公共空间划定临时性的物资储备点，用来预防疫情风险和日常防疫物资的发放。根据鹏翔宿舍区防疫分区内的公共空间资源，可以选择 57 斋东侧的荒废绿地搭建临时性的物资储备点，这里面积较大，与宿舍区交通联系紧密，适宜进行物资储备。由于校医院前广场处于鹏翔宿舍区防疫分区和六里台宿舍区防疫分区内，且背靠校医院的医护能力，是很好的物资发放点，可以服务两个防疫分区内的同学。类似的，学一食堂门口广场也是处于两个防疫分区的交界处，在此处设施物资分发点，可以方便的服务周边的学生。考虑七里台宿舍区防疫分区周边的公共空间，可以在东门广场布置物资分发点，为从东门进入的学生和七里台宿舍区的学生分发物资。

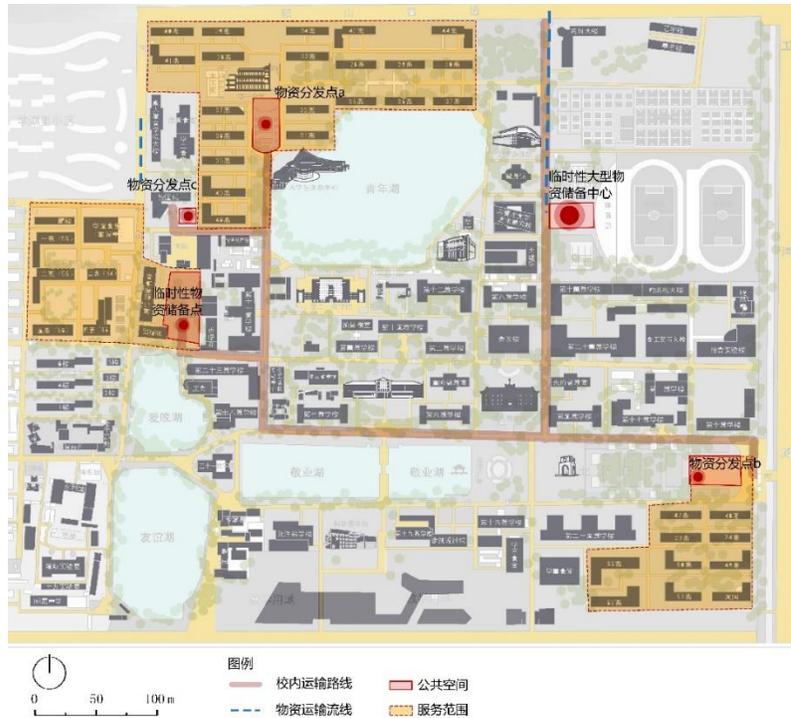


图 6.5 疫情爆发初期校园防疫应急物资储备分发设施规划图

图片来源：作者自绘

疫情爆发中期的校园防疫应急物资储备分发设施规划方案如图 6.6 所示。随着病例增多，对于防疫物资的需求呈几何级上升，需要综合考虑全校的资源，建设半永久性制的大型物资储备中心，同时在人流密集处设立小的物资分发点。物资储备中心应该可以辐射整个校园，起到物资的总体存储、调度的功能，因此应该选择面积较大、通风良好、人流较少、交通便利的公共空间。统筹整个校园的公共空间资源，可以选择北洋广场和体育馆前广场，设立两处大型的物资储备中心。还可以根据宿舍区位置，分散、均匀的布置小型物资分发点，在校园中的很多空间都具备作为物资储备功能的潜力：校医院门前广场是极佳的选址，因为这里空间开阔、地势较高、远离水源、靠近医疗资源、交通便利，距离鹏翔公寓和六里台宿舍区都较近；可以在 57 斋东侧的荒废绿地设置临时性物资储存空间，为周边的学生提供物资；可以在学一食堂门口设立小型物资分发点，为六里台宿舍区北侧的同学提供物资；在北门广场设立小型物资分发点，为六里台宿舍区东侧的学生和从北门入校的学生提供物资；在东门广场设立小型物资分发点，为七里台宿舍区的学生和从东门入校的学生提供物资。

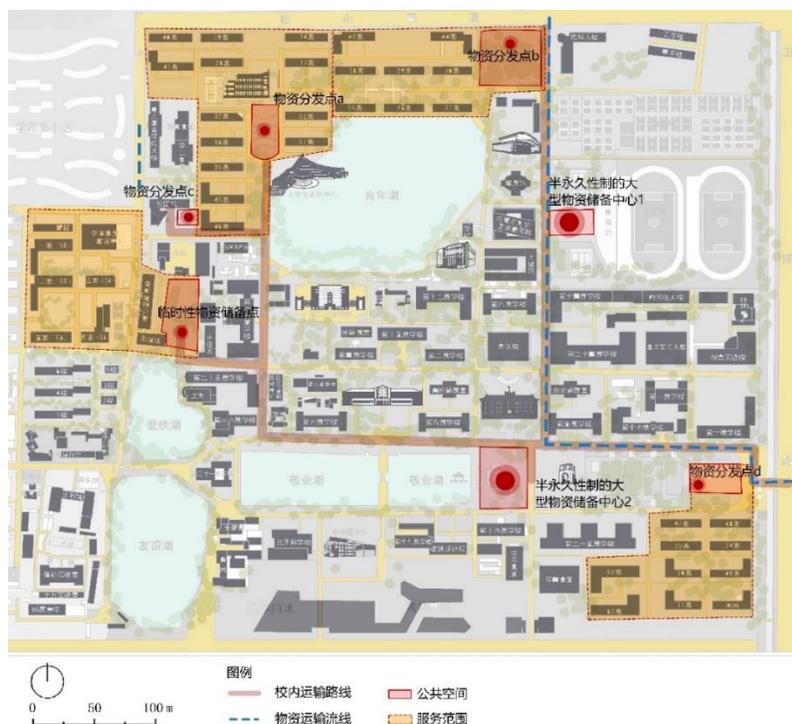


图 6.6 疫情爆发中期校园防疫应急物资储备分发设施规划图
图片来源：作者自绘

在疫情爆发后期，随着疫情逐步进入常态化防疫阶段，可以逐步拆除大型物资储备中心，保留小型物资分发点，以应对不时之需。随着疫情逐步消失，可以将小型物资分发点合并，仅保留部分物资分发点，以服务校园东西两侧宿舍区的学生。

6.3.4 防疫应急医疗救治设施规划

《城市防疫专项规划编制导则》指出，社区卫生服务中心是疾病预防控制体系的重要一环，要提升预警能力、现场调查处置能力和检查检测能力，主要起到平时预防和疫时应急的功能^[28]。防疫应急医疗设施的选址要综合考虑环境、交通、服务半径、卫生隔离等因素，应选择地形规整、地势较高地段建设，与周边应设置 20 米以上的卫生隔离带。

根据上述指导思想，校内医疗机构是以预防、救治、康复为主的基层医疗机构，在疫情期间，它是应对疫情的最前线，起到及时分诊、监督核查、核酸检测等功能^[234]。但是，校医院存在很多问题，难以实现功能的快速转换和新冠病毒的防治。具体问题如下：（1）大学校医院规模较小、等级较低，仅能承担基础的临床检验、化验、超声检测和日常慢性疾病的检测等，医疗水平较低，服务能力较弱。由于校

医院仅能对日常的小病加以诊断，大病必须向综合性大医院转诊治疗，会导致综合性医院承担了很多本该由校园医院提供的医疗服务^[243]，在平时会占据城市的医疗资源，在疫情期间则会增加学生交叉感染的风险；（2）校园医院的服务水平不足，缺乏专业的医护人员，在疫情时难以向新冠病毒防治的功能聚集和转换；（3）校医院的研究水平不足，也会导致不能对新冠病毒进行研究、分析与流行病学检测。

针对上述问题，需要重点对校园内的防疫应急医疗救治设施进行优化。医疗设施最重要的功能是服务周边的学生，所以了解学生的常走路径、学生在校园中的空间分布特征，对于设施的选址很有帮助。结合上文公共空间优化和交通体系优化的基本成果，在适宜的校园公共空间上建立应急医疗救助设施、应急物资储备分发设施、应急救援和物资通道和应急集中隔离设施，保证在疫情发生的紧急时期，可以有有效的调动校园的基层医疗设施，完成核酸检测和基本筛查工作，为校园内的发热病人或轻度感染者提供有效的隔离治疗场所。可以对校园内的废弃场地和建筑进行改造利用，补充防疫期间的医疗场所，提高医疗设施的配置。另一方面，增强校园医院的医护力量，配备更多的传染病学医生，对医护人员进行专业训练，使他们可以完成校园的排查工作，并能够更加方便地监控轻度感染者病症情况。经过训练的医护人员也可以保证校园医院更快的完成功能的聚集和转换，增加对疫情的紧急应对能力。

校园防疫应急医疗救治设施规划如图 6.7 所示。主要提升校园内医疗卫生设施的数量和规模，增加医护人员的数量。在医疗设施方面，在六里台宿舍区的建筑内增设一处临时性的发热门诊，以保证这一片区的学生可以及时得到诊断。可以充分利用校医院北侧的荒废绿地，对校医院进行扩建，补充医学隔离观察室，增加服务人员和医疗设施，使校医院可以服务更大的范围和更多的学生，提高面对疫情时的应急检测能力。在疫情爆发后，可以在上文规划的临时性物资发放点配备医护人员，进行核酸检测和体温测量等工作，提高检测效率，避免交叉感染。

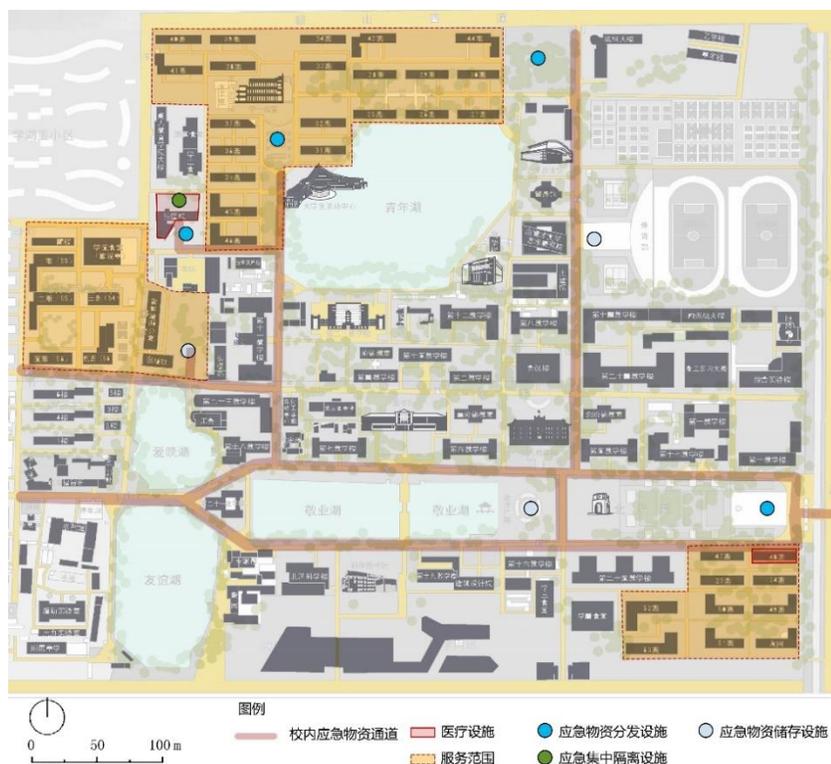


图 6.7 校园防疫应急医疗救治设施规划图

图片来源：作者自绘

6.4 防疫重点区域防疫规划方案制定

在本文的第五章，根据学生出行特征和校园环境综合评价，确定鹏翔公寓 5 分钟步行生活圈范围为防疫重点区域（图 5.16）。在第五章的第六节，利用疫情风险评估指标对防疫重点区域的疫情风险进行了评估。根据仿真模拟的结果，发现防疫重点区域的公共空间、交通体系和设施布局存在一些问题。本节针对防疫重点区域的现状特征和问题，有针对性的进行防疫规划方案制定。

6.4.1 防疫重点区域公共空间体系优化

基于防疫重点区域公共空间的空间特征、问题和空间使用状况，对区域内的问题公共空间进行改造，改造结果如图 6.8 所示。优化方法为建立连续的、丰富的绿化体系和公共空间体系，促进空气流动，在疫情时可以作为防护隔离带使用。在公共空间增加建筑小品、景观小品和体育活动设施，既可以满足学生日常的休息、锻炼、学习、交流等需求，还可以作为疫情时物资发放点的预备空间。具体而言，在

爱晚湖边建立亲水平台，建设座椅、健身器材等设施；把废弃的绿地利用起来，建设小广场和设施，成为学生活动、交往的场所；在路边建设景观带和绿廊，建立道路绿化体系、慢行系统，鼓励学生步行出门，加强体育锻炼；将 57 斋入口处小广场范围扩大，并且进行绿化装饰，为平时停留的人提供等候休憩空间。鹏翔公寓的中庭与 57 斋处理手法相似，不再赘述；将学五食堂门口的快递点面积缩小或移至他处，分离取快递和就餐的人流，将学五食堂门口小广场开放出来，用于学生出行、自行车停放等功能，可以极大缓解食堂门口的人流压力。



图 6.8 防疫重点区域公共空间体系优化方案

图片来源：作者自绘

6.4.2 防疫重点区域防疫设施布局优化

防疫重点区域应急物资储备分发设施规划方案如图 6.9 所示。该方案是在校园应急物资储备分发设施规划方案的指导下，对防疫重点区域的空间使用情况和特征进行进一步的梳理，结合防疫重点区域公共空间体系优化结果，和六里台宿舍区防疫分区和鹏翔宿舍区防疫分区的影响范围，进行应急物资储备设施和应急物资分发设施的选址。选择距离宿舍区较近、交通便利的公共空间划定临时性的物资储备点，

用来预防疫情风险和日常防疫物资的发放。选择 57 斋东侧的增设绿化空间搭建临时性的物资储备点，选择校医院前广场布置物资分发点，根据两处空间的交通资源进行应急物资通道的规划。

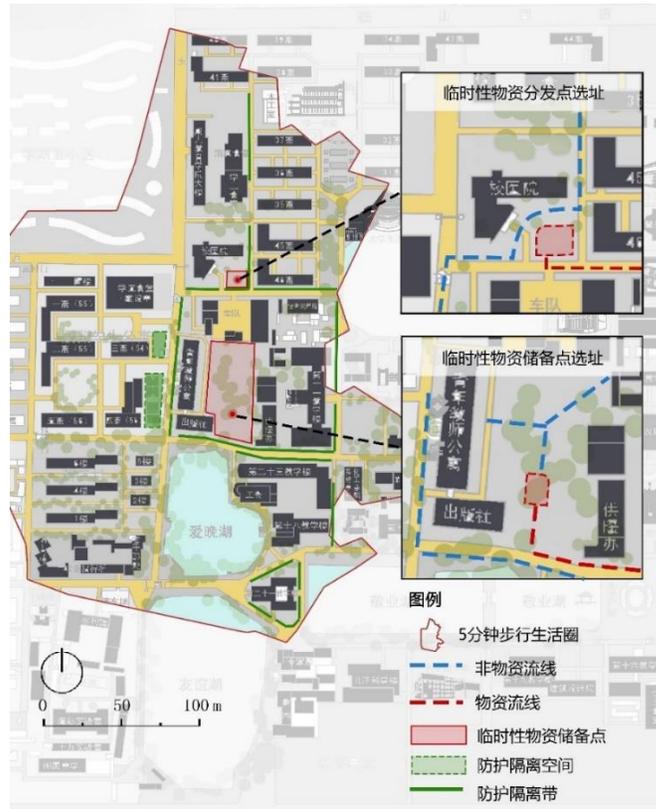


图 6.9 防疫重点区域应急物资储备分发设施规划方案
图片来源：作者自绘

6.5 易感染区域空间优化方案制定

在第五章的第六节，通过防疫重点区域的仿真模拟，识别出三处易感染区域，结合易感染区域的空间特征，总结归纳易感染区域导致病毒传播的空间问题。针对这些问题，在校园和防疫重点区域级防疫体系优化方案的基础上，进行易感染区域的空间优化设计。重点提升易感染区域的疫情防控能力，降低其疫情风险，为其他校园区域的空间优化提供参考。

在对第五章的仿真模拟中，部分道路暴露出了很大的问题，尤其是金晖道周边聚集了三个易感染区域。分析这条道路的问题，可以为校园慢行道路的空间优化提

供思路和方法。根据人口分布图可知,金晖道的人口密度远大于周边道路,成为了病毒潜在的传播通道。金晖道有150米长,但是道路周边完全没有公共座椅或休憩节点。该道路人车混行严重,通行效率低下,在人流量大的高峰时段,道路难以承受大量的人流,很容易发生拥堵。

根据上述问题,可以总结出校园道路的设计方法和原则。道路是校园中很常见的一种线性空间,由于这类空间的导向性较强,如果在空间设计上不结合一些宽度上的变化,一旦行人因为紧急情况或者前方出现障碍物而停下来,就会堵塞后面的行人。因此,对于道路空间优化设计而言,可以通过在道路旁边添加小广场的方式,打破线性空间的导向型。还可以在道路两旁布置一些休憩节点、健身设施、景观小品、商业建筑等,为学生的停留提供缓冲空间,为偶然的会面提供机遇。此外,要注意交通协调的问题,在高峰时段,车辆会极大的占据可步行空间,降低步行舒适性,可以通过绿化来进行隔声降噪,也可以合理规划停车位置避免路边停车,还路于人。基于上述校园道路设计方法,结合易感染区域的实际情况,进行优化方案设计,设计方案如图6.10所示。

针对鹏翔公寓门口的问题区域,首先要优化路网,提升路网连接性。打开鹏翔公寓与小西门之间的通道,同时开启鹏翔公寓北侧通道,保证学生可以由多条路径回到宿舍,而不是聚集在金辉路上。第二,拆掉鹏翔公寓东侧篮球场的围墙,将篮球场开放作为开放的体育活动场所。一方面可以提高篮球场平时利用率,也可以为周边宿舍区提供体育健身场所,提高学生的身体素质,另一方面在高峰时间段,篮球场可以作为分担很多人流,缓解道路拥挤的情况。

针对学五食堂门口广场的问题,该广场作为防疫重点区域内较大的公共空间,本应该成为学生日常活动的交往空间,但是因为快递点占道,这里反而成为了易感染区域。因此,应该重新规划快递投点各商家的布局,考虑室外风环境,通过自然通风缓解人流聚集带来的安全隐患。预留出取快递的等待区域,提高学五食堂门口的步行性。

针对金晖道与铭德道交叉口的拐角行人密度高的问题,基本优化思想以提升道路的可达性和多样性为主。通过合理利用道路周边的公共空间,规划更多的可替代路径,减少学生对于拐角路径的选择。充分利用57斋东侧的新增绿地,连接一条新的步行路径到学五食堂或浙佰超市,为学生提供更多的可选择路径,分散拐角处人流。还可以优化拐角对面的爱晚湖周边的亲水平台和景观步道,提升爱晚湖侧道路的吸引力,吸引学生通过景观廊道通行。

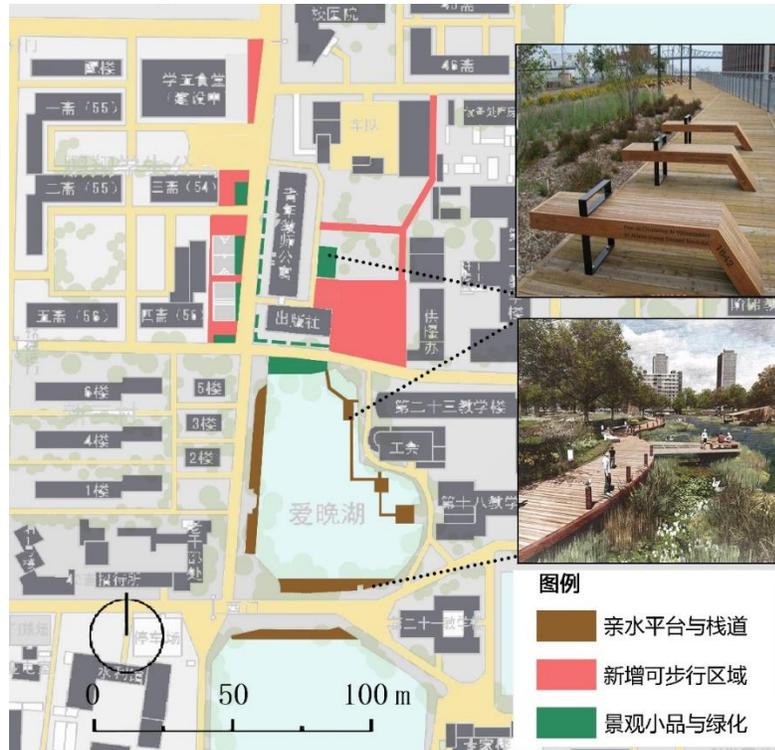


图 6.10 易感染区域空间优化设计方案
图片来源：作者自绘

6.6 优化方案模拟验证

上文对“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系的相关内容进行了优化方案制定，方案逐步细化，从宏观到微观，形成层级完善的校园防疫体系。为了验证优化方案的效果，对防疫重点区域再次进行模拟，在不改变基本参数的前提下，与现状的模拟数据进行对比。根据疫情风险评估指标体系，判断优化方案是否有效的降低了人群密度，减少了道路的拥挤，最终降低了病毒在校园中的传播。

6.6.1 优化方案场景搭建

整合三级防疫体系的相关优化措施，对于模拟场景的改动如下：将 57 斋东侧的废弃绿地改造为公共空间，连接周边道路，优化了路网结构。将鹏翔公寓门口的篮球场对外开放，可以增加道路的可步行面积，也可以提升体育健身设施的利用率。优化了鹏翔公寓周边的公共空间，布置体育设施，提高空间活力。重新规划了学五食堂的快递点布局，根据通风需要，缩减了快递面积，预留出小广场与道路对接，

增加了活动空间和道路连接度。利用校医院后的废弃空间，扩建了校医院，增加了物资储备空间、隔离空间和核酸检测点。在湖水周边新建了很多亲水平台，拓宽了道路的可步行距离，也提升了景观的品质。根据上述措施，布置方案仿真场景，如图 6.11 所示。

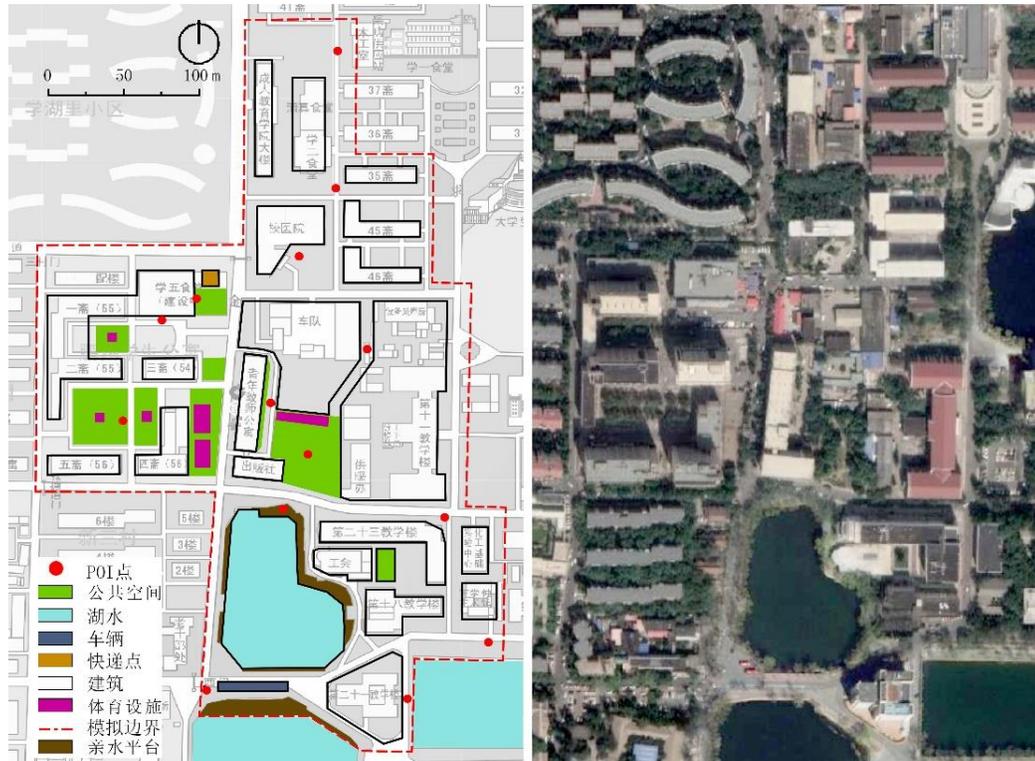


图 6.11 优化方案仿真模拟场景及卫星地图实景
图片来源：作者自绘

6.6.2 行人模拟指标分析

6.6.2.1 行人空间分布

图 6.12（右上）展示了行人的空间分布位置，与优化前相比，不会出现聚集性感染的情况，暴露多是感染者周边发生的。防疫重点区域的三个问题场景的人口密度低于现状，在空间管理优化措施的作用下，行人有更广阔的可步行空间，更便捷的通行路径，拓宽了行人的路径选择范围，也降低了单一道路上的人群密度。图 6.12（左上）的行人核密度图与现状的行人核密度图采取了相同的色彩范围，可以

发现优化方案（下称方案）的行人密度没有出现红色，即行人密度保持在较低的状态，与现状相比有了很大改善。

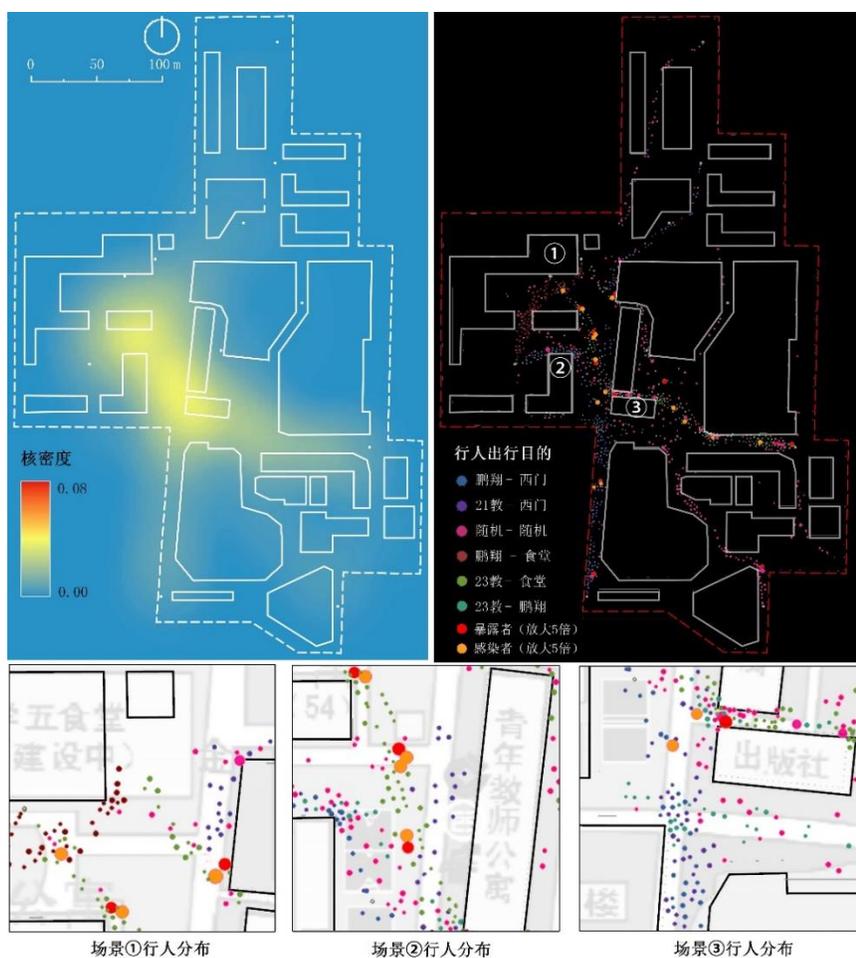


图 6.12 优化方案的行人核密度与行人分布

图片来源：作者自绘

6.6.2.2 步行轨迹密度

方案的步行轨迹如图 6.13（右上）所示，与现状相比学生的步行轨迹更加分散，尤其是在学五食堂增加了出入口，且门口的广场空间被留出来了之后，学生的可选择路径更多了；金晖道与铭德道交叉口的轨迹也比现状更加的稀疏，没有聚集于建筑拐角了。步行轨迹密度如图 6.13（左上）所示，与现状的行人核密度图采取了相同的色彩范围，可以看到方案的步行轨迹没有出现红色区域，整体密度较低。

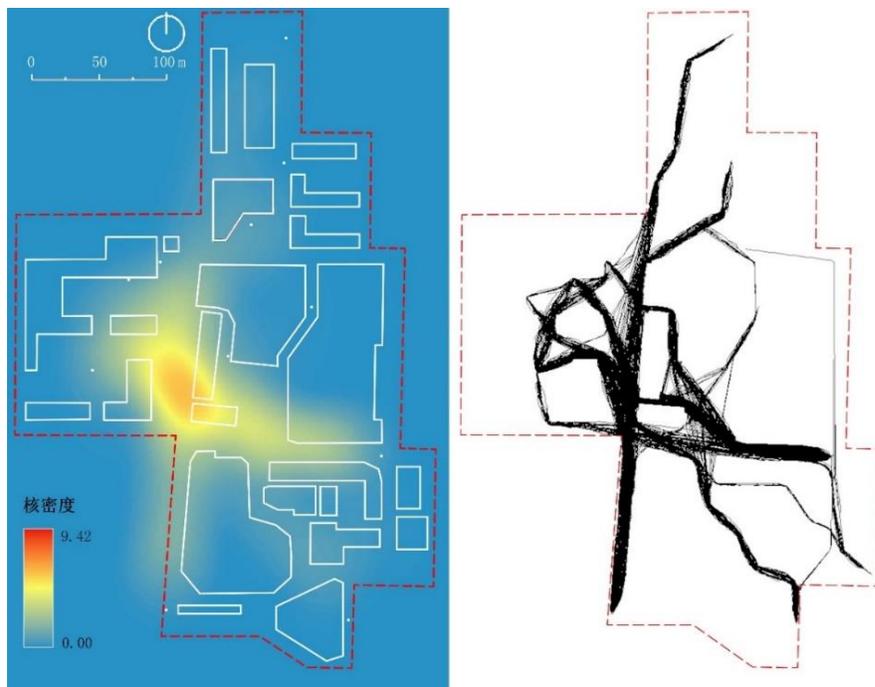


图 6.13 方案的步行轨迹
图片来源：作者自绘

6.6.2.3 最近邻距离概率密度函数

方案的最近邻距离概率密度函数 (PDF) 如图 6.14 所示。方案最近邻居距离小于 $PDF \sim 5 m$ 的概率为 92.7%，小于 $PDF \sim 10 m$ 的概率为 98%，与现状相比均有提升。最近邻距离中位数为 2.94 米，与现状相比上升 0.32 米，均值为 3.04 米，与现状相比上升了 0.4 米，标准差为 1.23 米，与现状相比下降 0.12 米。最大可能距离为 $PDF \sim 3.2 m$ ，约占总数的 5.2%。以设定的 1.5 米安全距离作为阈值，计算最近邻距离小于安全距离的概率为 7.6%，下降了 7.3%，接近一半。由此可见，方案提高了学生之间的距离，大幅减少了接触的概率。

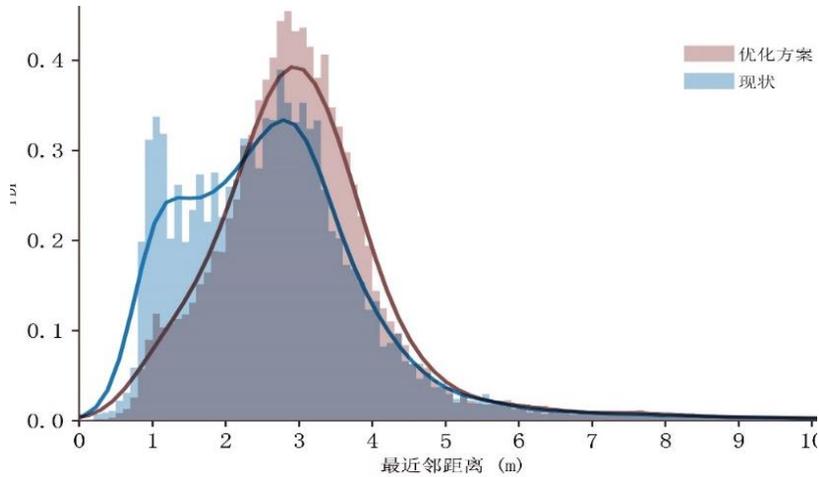


图 6.14 优化方案的最近邻居距离概率密度函数
图片来源：作者自绘

6.6.3 病毒传播指标分析

6.6.3.1 平均暴露时间

方案的暴露时间占比图如图 6.15 所示，图中的浅红色区域为 95%置信区间。模拟后期的平均暴露时间占呼吸周期比重仅为 30%，时长逐步稳定在 1.1 秒每呼吸周期（4 秒），与现状相比下降了 15%。暴露时间占比的趋势与现状类似，在模拟了 50 秒之后开始急速下降。均值为 1.36 秒，方差为 0.5 秒，最大值为 2.69 秒，与现状相比均有大幅下降。

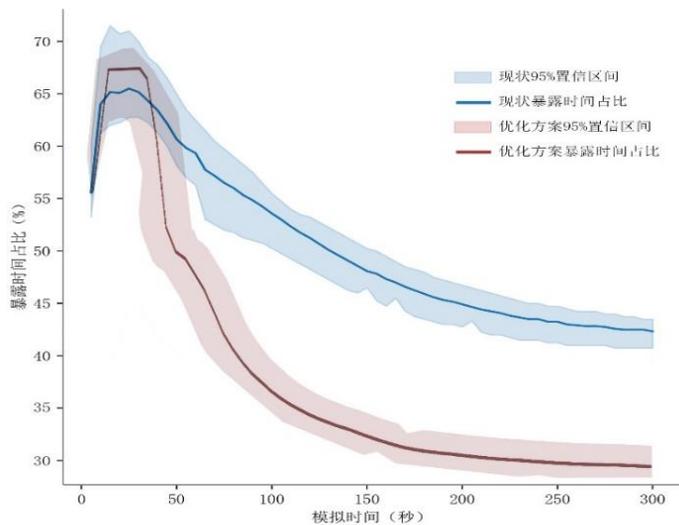


图 6.15 优化方案的平均暴露时间占比图
图片来源：作者自绘

6.6.3.2 累积确诊人数

进行多次重复实验后，将收集到的数据进行汇总分析，得到如图 6.16 所示的累积确诊人数图，图中的浅红色区域为 95%置信区间。与现状相比，方案的累积感染人数有了大幅下降，在模拟结束时的均值仅为 55 人，占总人数的比例为 5.5%，与现状相比下降了超过一半。

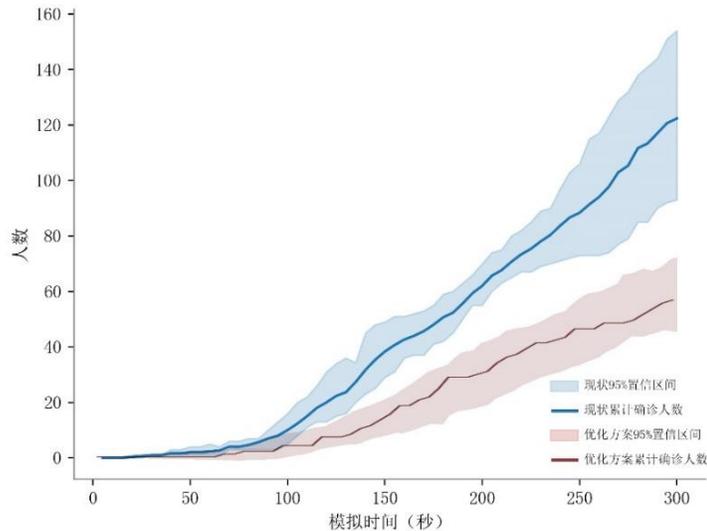


图 6.16 优化方案的累积确诊人数图

图片来源：作者自绘

6.7 校园防疫规划方法建议

后疫情时代校园防疫体系的设计方法应该摒弃传统的以空间为导向的规划思维和单纯的追求轴线、美感、图面效果的设计方法，而更多的去考虑传染病的传播方式和校园空间的使用主体的行为特征。未来的校园空间规划和设计的目标，应该是建设弹性的校园、稳健的校园和多样的校园，让校园空间能够响应多种紧急情况，迅速地从危害中恢复过来，在遭遇冲击后依然能保持校园空间的基本结构和功能运作。为了达到上述目标，需要进行校园防疫规划。

虽然本文的防疫规划实践是建立在天津大学卫津路校区之上，但是在规划当中引发的一些思考、采用的一些手法，可以进一步归纳总结成普适性的规划方法和设计方法建议，应用于后疫情背景下的未来校园防疫规划的广阔规划情景中，提高本文研究结果的普适性和价值。

6.7.1 对于校园防疫规划流程的建议

(1) 通过现状调研分析校园环境与学生出行的现状特征与问题，定位防疫重点区域。收集校园空间数据和学生出行数据，分析学生出行特征和校园空间的特征与问题。筛选学生出行频繁、分布密集且出行环境较差的区域，作为防疫重点区域进行仿真模拟，检测区域内的疫情风险。

(2) 运用仿真模型检测和识别易感染区域。建立防疫重点区域的模拟场景，进行实验设计，利用本文设计的多智能体模型进行防疫重点区域的疫情风险评估。识别易感染区域，分析易感染区域的空间问题。

(3) 建立“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系，逐步细化防疫内容。根据各层级防疫体系的服务范围、可利用资源等，针对各层级的现状特征与问题，提出对应的防疫规划，提升校园对公共卫生事件的预防和响应能力。

6.7.2 对于校园分级防疫规划的建议

(1) 校园防疫规划是指导校园防疫设施建设、提升校园应对重大疫情防控能力的重要依据。规划应遵循平疫结合的空间规划模式，营造弹性稳健的校园空间环境，将学生出行行为作为规划依据，把全生命周期健康管理理念贯穿整个校园空间的设计和管理各个关节。构建“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系，明确各级防疫责任与分工，确定每一级的防疫规划重点和空间要求，逐步细化防疫规划的内容，形成层级完善，体系健全，运转高效的校园防疫体系。

(2) 校园防疫规划主要包括防疫分区划分、防疫应急救援和物资通道规划、防疫应急物资储备设施布局、防疫应急物资储备分发设施布局、防疫应急医疗救助设施布局、防疫应急集中隔离设施布局等方面。这一层级的防疫体系规划利用整个校园的公共空间、交通体系和设施资源，为整个校园的疫情防控提供防疫物资保障、医疗救治、预防控制、集中隔离、基础保障等服务。

(3) 防疫重点区域防疫规划要结合防疫规划成果进行进一步防疫体系构建，包括易感染区域识别、防疫重点区域防疫应急物资储备设施布局、防疫重点区域防疫应急物资储备分发设施布局、防疫重点区域交通体系优化和空间设计优化。依据仿真模拟结果，分析防疫重点区域的交通体系和空间设计问题，优化防疫重点区域的公共空间布局、绿化景观布局、景观小品设置、道路品质等方面，通过设计手段提升防疫重点区域的疫情预防能力。

(4) 易感染区域防疫规划是在区域级防疫规划相关成果的基础上,重点从空间设计的角度,优化易感染区域的空间布局、可步行宽度、步行舒适性、绿化景观、公共空间布局等空间要素。充分考虑校园空间的风貌、品质、功能、形态和分布特征,归纳校园道路的规划设计方法,通过改变空间的长、宽和空间排列组合关系,降低高峰时段道路的人口密度,减少病毒接触概率,为学生社交隔离出行提供物质基础。

6.7.3 对于校园空间优化的建议

校园防疫规划聚焦于公共空间优化、交通体系优化和设施布局优化三方面。接下来归纳总结本文空间优化设计方法,针对这三方面提出普适性的设计要点,为其他大学的校园防疫体系规划提供参考。

(1) 公共空间的设计要点在于,平时作为师生交往、活动和体育锻炼的场地,疫情时期为防疫应急物资储备分发设施、防疫应急医疗救助设施提供空间。在进行防疫设施选址时,应该重点关注公共空间的道路连接性、尺寸面积大小和服务范围。选择可以辐射整个校园的大型公共广场或运动场地,作为半永久性物资储备设施的备选空间,选择距离宿舍区较近、交通便利的小型公共广场,作为物资分发设施的备选空间。还可以改造校园内的废弃空间,作为应急备用地块。在空间设计层面,公共空间布局应充分考虑城市通风廊道的位置、校园地形地貌特征和校园建筑布局特征,重点关注公共空间覆盖率、绿化空间连续性和绿地率等指标,充分利用城市家具和景观小品,结合校园慢行系统,构建校园绿化体系。

(2) 交通体系的设计要点在于,平时应注重交通系统的多样化建设,保证易达性,预防疫情对基本生活产生严重影响。应采用步行优先的规划理念,通过交通宁静化措施控制校园内主要道路的车行速度,减少车流量,打造连续、便捷的健步慢骑路线。在疫情时期,应该重视交通管控,严格控制校园内的人流密度。采用多通道设计,将应急通道与学生日常出行路径分离,保证应急物资运输通道和应急医疗救助通道的畅通。在空间设计层面,道路作为典型的线性空间,应重点提升空间的多样性,可以将面状空间穿插在道路空间中,或者在道路旁边添加小广场,打破线性空间的导向型。还可以在道路两旁布置休憩节点、健身设施、景观小品等,为学生的停留提供缓冲空间,为偶然的会面提供机遇。还可以充分利用立体空间,通过空中连廊和立体交通等方式,扩大校园的可步行空间及绿化面积。

(3) 设施布局的设计要点在于, 应该保证设施供应的弹性, 在原有设施的基础上增加一些备用设施。重点提升校园医疗设施建设, 建立防疫应急医疗救助设施、防疫应急集中隔离设施、防疫应急物资储备分发设施和防疫应急救援和物资通道。在平时校内医疗设施是以预防、救治、康复为主的基层医疗机构。在疫情时期, 可以有效的调动校园的基层医疗设施, 完成核酸检测和基本筛查工作。设施的选址要充分结合校园公共空间和交通体系, 根据学生的常走路径和学生在校园中的空间分布特征, 选择交通便利, 可以服务更多学生的地方。可以对校园内的废弃场地和建筑进行改造利用, 作为防疫期间的备用设施选址, 提高校园的抗冲击能力。

(4) 将上述设计要点总结为如下普适性的空间优化路径, 为更多的校园空间优化设计提供思路。第一, 优化路网结构。在现有路径的旁边增加可替代路径, 在平时可以起到分散人流、增加学生可选路径、减少拥堵的作用, 在疫情时可以分别用于防疫应急通道和学生日常出行通道, 起到分离人流的作用。第二, 增加道路的可步行宽度, 减少道路高峰时期的人群密度。第三, 构建绿化体系。在道路周边设置小广场、绿化、座椅等, 起到缓冲和分割人流的作用, 避免人流过于聚集, 增大人与人之间的距离。当人流量大时, 行人还可以在在这些区域停留等待, 起到缓冲的作用。在平时也可以作为学生休憩交谈的场所, 提高道路的可步行性和舒适性。还可以在湖面上设置步行栈道, 增加景观性和可供选择的路径。

6.8 本章小结

本章以《公共卫生防控救治能力建设方案》、《城市防疫专项规划编制导则》等文件为依据, 从校园防疫体系的规划准则入手, 提出了学生出行为行为作为规划依据、营造弹性稳健的校园空间环境和遵循平疫结合的空间规划模式三个规划原则。在此原则的基础上, 构建“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系。根据三级防疫体系现状特征与问题提出对应的规划方案, 补足各级防疫体系的漏洞。

针对校园防疫设施缺乏, 交通体系不完善等问题, 进行校园防疫设施布局规划。依据校园宿舍区范围, 划分校园防疫分区。根据防疫分区 5 分钟步行生活圈、校园公共空间分布、交通体系特征和设施布局特征, 结合疫情不同阶段的不同要求, 提出防疫应急救援和物资通道规划、防疫应急物资储备分发设施规划和防疫应急医疗救治设施规划。针对防疫重点区域公共空间品质较差、利用率低、防疫设施缺乏等问题, 重点进行了防疫重点区域公共空间体系优化和防疫重点区域防疫设施布局优化。为防疫重点区域建立了连续的、丰富的绿化体系和公共空间体系, 充分挖掘区

域内的公共空间资源，对废弃空间进行利用，建设小广场和设施，成为学生活动、交往的场所。在疫情时期，则利用场地内的公共空间布置物资储备点和物资分发点，做到平疫结合。根据风险评估结果，识别易感染区域，重点对易感染区域的空间进行优化设计。

最后，整合防疫重点区域的优化方案，再次进行仿真模拟，参数与现状模拟保持一致，根据疫情风险评估指标体系对优化方案进行效果评估。评估结果显示本文提出的优化方案有效的减少了行人密度和轨迹密度，增加了行人之间的距离，减少了平均暴露时间，大幅度降低了病毒的传播概率。研究成果证明了校园防疫规划对于抑制病毒在校园中的传播具有重要意义。

总结实证研究的分析过程，可以提出校园防疫规划的三条合理化建议：（1）可运用仿真模型建立校园易感染区域的检测和识别机制。利用本文第三章的多智能体模型，描述学生的移动轨迹和趋势，对校园中潜在的易感染区域进行识别，探索疫情的影响程度和空间分布特征。在完成识别后，重点针对识别出的易感染区域进行空间改造，可以提高空间优化效率，充分利用有效的资源，补足校园防疫体系的短板。（2）校园疫情风险评估是校园防疫规划的重要组成部分。通过校园疫情风险评估，可以发现场地现状存在的空间问题，分析导致病毒传播的空间因素，然后有针对性的提出空间优化策略。通过对优化方案再次进行评估，可以检验方案的有效性和合理性。（3）分级进行校园防疫规划有助于形成层级完善，体系健全的校园防疫体系。根据不同层级的设施服务范围 and 可利用资源，逐步完善和细化防疫规划的内容，实现校园资源的充分、合理的利用，迅速提高校园预防和应对突发性卫生事件的能力。

第7章 总结与展望

7.1 研究结论

现有研究表明,人类将长期与新冠病毒共存,社交隔离等防疫措施将长期存在。随着相关政策深入人心,越来越多的人选择社交隔离出行,带来了出行模式、出行习惯和出行特征的改变。上述因素迫使规划师重新审视空间的设计与使用问题。高校作为疫情防控的重要场所,受到社会和政府的广泛关注,国内陆续爆发的校园内聚集性感染事件,暴露了校园防疫能力的不足。传统的校园物质空间难以满足未来长时间疫情防控的需要,需要进行校园防疫规划来提升校园预防突发性公共卫生事件的能力。

新冠病毒是通过接触传播的,想要对校园空间的疫情风险进行合理的评估,必须要掌握空间中学生的出行轨迹特征和新冠疫情的传播规律。为了探究不同的空间布局对学生出行行为和病毒传播的影响,本文提出了“仿真模拟-风险评估-优化后评估”的规划路径。基于该规划路径,设计了一个多智能体模型对学生出行行为和病毒传播进行模拟,构建了高校疫情风险评估指标体系,以天津大学卫津路校区为例进行了实证研究。实证研究表明,校园的建筑布局、绿化体系、交通体系、公共空间、设施布局等都会影响学生的出行行为,进而影响病毒在人群中的传播。在进行空间优化中,应重点考虑校园内的各项空间资源,进行规划。本文的主要工作总结如下:

(1) 实现了多智能体仿真模型设计。为了对疫情下的行人出行进行更准确的模拟,本文对“社会力模型”进行修改,研发了一个可以模拟增距出行场景的多智能体模型。人的步行行为由朝向目的地的自航力、躲避障碍物的排斥力、躲避其他行人的排斥力、与他人保持安全距离的防疫排斥力和外界要素所吸引而产生的吸引力五种力的合力控制。这五种力可以模拟复杂条件下的学生出行行为,例如模型可以通过排斥力或吸引力模拟建成环境要素对行人的作用力;还可以通过自航力模拟课程设置、社团活动、吃饭、娱乐等不同的出行目的对学生出行方向的影响;还可以通过防疫排斥力模拟学生为保持安全距离而远离他人的行为;还可以通过调整智能体的参数,模拟个人属性(如体重、速度、视域等)对模拟的影响;还可以通过

吸引力模拟道路要素偏好对学生的出行轨迹的影响。除了行人动力学模型设计外，本模型还包括了一个传染评估模型。通过步行轨迹分析感染者与易感者之间的相互作用，确定潜在的暴露人数。研究结果证明，本文提出的仿真模型可以有效模拟疫情下的学生出行行为，评估校园的疫情传播风险，发现易感染区域。

(2) 构建了高校疫情风险评估指标体系，可以识别校园空间的易感染区域。本文构建的风险评估指标与仿真模型之间是一个有机整体，分为行人模拟指标和病毒传播指标，包括行人空间分布、步行轨迹密度、最近邻居里概率密度函数、平均暴露时间、累计确诊人数五个指标。利用本文的仿真模型，可以追踪、描述学生的移动轨迹和趋势。数据通过多智能体模型产生后，利用指标体系可以实现对校园疫情风险的定量分析，对校园中潜在的易感染区域进行识别，探索疫情的影响程度和空间分布特征。在完成识别后，重点针对识别出的易感染区域进行空间优化，充分利用区域内的资源，补足校园防疫体系的短板。

(3) 构建了“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系，提出了校园防疫规划的基本原则和规划方法。本文以《公共卫生防控救治能力建设方案》、《城市防疫专项规划编制导则》等文件为依据，提出了学生出行行为作为规划依据、营造弹性稳健的校园空间和遵循平疫结合的规划模式三个规划基本原则。利用天津大学卫津路校区进行了防疫规划实践，提出了多层级的优化方案。分别针对“校园-防疫重点区域-易感染区域”三级防疫体系的现状特征与问题，提出了逐层深入的防疫规划方案。为了提高校园针对突发性公共卫生情况的应对能力，防疫规划的重点集中在校园的防疫应急物资储备、防疫应急物资分发、防疫应急通道、防疫应急医疗设施等方面。模拟验证结果表明，本文提出的相关防疫规划可以有效缓解病毒在校园中的传播，验证了本文方法的有效性。

(4) 将文中采用的规划原则和设计手法进行总结归纳，提出了防疫规划流程、分级防疫和空间优化三大方面的十一点建议，包括校园防疫规划的技术要点和流程，各级防疫体系的规划内容和侧重点，校园公共空间、交通体系和设施布局的空间优化方法，以及普适性的空间优化路径。本文力求寻找一条普适性强、推广性高的校园防疫规划之路，也希望能为今后的实际工作提供一个可参照的范本，用于指导后疫情时代校园防疫规划的实施，促进健康视角下的校园空间规划和设计手法的提升。

7.2 研究创新点

7.2.1 研究内容创新

在常态化防疫的背景下，规划师迅速展开行动，提出了很多规划思想和空间改造措施，但是这些内容往往针对城市空间或者社区空间，缺少针对校园空间的防疫体系规划。考虑到新冠病毒的传播与行人行为之间的密切关系，本文结合了高校学生的出行行为特征和新冠病毒的传播特征，从学生出行行为出发，通过仿真模拟研究校园空间环境对病毒传播的影响，进而提出了校园防疫规划的相关准则和规划方法。本文以天津大学卫津路校区为案例进行了校园防疫规划设计实践，提出了三级校园防疫体系的构建，对校园的应急救援和物资通道、物资储备分发设施、医疗救治设施、公共空间体系和空间优化进行规划。最后通过仿真模拟验证了方案的有效性。本文提出的规划原则和技术方法，具有一定的普适意义，可以以本文的规划设计为参照，进行其他高校校园的防疫规划，具有研究内容的创新性。

7.2.2 技术方法创新

本文提出一种依托计算机仿真模拟的技术方法和“仿真模拟-风险评估-优化后评估”的规划路径，适用于流行病时期的疫情风险评估，可以支持校园防疫规划的实施和效果评估。为了实现该规划路径，本文设计了一个多智能体模型。设计了一个多智能体模型。模型可以实现对增距出行的模拟，也可以对病毒在空间中的传播动态进行模拟。该模型可以模拟人与人之间丰富的互动场景，包括不遵循社交隔离的行人之间的互动，遵循社交隔离的行人之间的互动，以及这两类行人之间的互动。这使本文能够研究病毒传播动态与可能防止病毒传播的空间措施之间的关系。该模型利用了计算机编程的可重复性和可调节性，减少了实验成本，便于实验数据的收集和分析，尤其是对于病毒传播这种危险情景而言，可以极大的降低实验风险。通过这一多智能体模型，本文实现了对校园空间中中学生出行行为的动态模拟，为本文找到校园中易感染区域和潜在的传染通道、提出防疫规划方案提供了坚实的数据基础。本文有效地说明了数学建模可以指导空间规划和空间设计，提出的规划路径和仿真模型具有创新性。

7.3 研究展望

虽然本文为确保我们结论的有效性做出了大量努力，但在参数校准、模型验证和规划方案的效果验证方面仍存在一些局限性。在模型参数和验证方面，尽管本文大范围地测试了模型参数，保证现有模型参数可以有效模拟社交隔离出行，但这些参数配比是否是最优的仍有待确定。第二，为了提高模拟结果的信度和效度，需要将模拟结果与真实数据进行比较，以确认我们模拟的外部有效性，但这超出了本文的范围。不可否认的是，这仍然是一个需要探索的关键方面。因此，在未来的工作中，可以使用行人出行的视频跟踪数据来校准该模型。第三，虽然本文对提出的优化方案进行了再次模拟，但是只模拟了防疫重点区域，没有模拟整个校园。因为整个校园的模拟尺度较大，人员较多，如果对整个校园进行模拟，需要考虑的因素过多，难以保证模拟参数设定和模拟场景设定的准确性。在未来的研究中，可以逐步提升模拟的范围和尺度，将本文的多智能体模型和空间规划方法应用于更大尺度的研究当中。

参考文献

- [1] World Health Organization. Tracking SARS-CoV-2 variants[EB/OL]. World Health Organization, 2021 (8-13) [2020-8-21]. <https://www.who.int/en/activities/tracking-SARS-CoV-2-variants/>.
- [2] World Health Organization. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard[EB/OL]. WHO, 2021 (8-21) [2021-8-21]. <https://covid19.who.int/>.
- [3] Enright J A, Hill E M, Stage H B, et al. SARS-CoV-2 infection in UK university students: lessons from September–December 2020 and modelling insights for future student return[J]. Royal Society Open Science, 2021, 8: 210310.
- [4] 教育部. 2020 年全国教育事业发展统计公报[EB/OL].2021 (08-27) [2021-10-10]. http://www.moe.gov.cn/jyb_sjzl/sjzl_fztjgb/202108/t20210827_555004.html.
- [5] 北美家长帮. 美国新冠肺炎疫情持续恶化, 在美留学生们面临的又是什么 [EB/OL].2020 (10-30) [2021-11-14]. https://www.sohu.com/a/428413263_380470.
- [6] 张冰. 英国至少 32 所高校出现疫情 超过 4000 名学生在宿舍隔离[EB/OL].2020 (09-28) [2021-11-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1679058450017415701&wfr=spider&for=pc>.
- [7] Viboud C, Böelle P, Cauchemez S, et al. Risk factors of influenza transmission in households[J]. The British journal of general practice : the journal of the Royal College of General Practitioners, 2004, 54 506: 684-9.
- [8] Martin N, Schooley R T, De Gruttola V. Modelling testing frequencies required for early detection of a SARS-CoV-2 outbreak on a university campus[J]. medRxiv, 2020.
- [9] 零感视频. 到底咋回事? 吉林农业科技学院, 聚集性疫情爆发……[EB/OL].2022 (03-13) [2022-03-13]. <https://www.163.com/dy/article/H2AES45605338GIU.html>.
- [10] 李志远. 基于行为分析的大学校园外部空间原型研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [11] 李晔, 刘兴华, 何青. 面向防疫的城市交通系统韧性特征及提升策略[J]. 城市交通, 2020, 18(03): 80-87+10.
- [12] Krykavskyy Y, Woronina R. The Impact of Globalization on the Development of City Logistics[C], 2015.
- [13] 杨俊宴, 史北祥, 史宜, 等. 高密度城市的多尺度空间防疫体系建构思考[J]. 城市规划, 2020, 44: 17-24.

- [14] 广州日报. 广州多措并举保证交通防疫工作落到实处[EB/OL].2020 (03-02) [2021-11-15]. http://www.gdzf.org.cn/zwgd/202003/t20200302_1026716.htm.
- [15] 教育部. 教育部关于印发《教育部直属高等学校国有资产管理暂行办法》的通知 [EB/OL].2012 (12-17) [2021-11-15]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A05/s7052/201212/t20121217_181258.html.
- [16] 浙江省教育厅, 浙江省财政厅, 浙江省审计厅. 浙江省高等学校国有资产管理暂行办法[EB/OL].2013 (04-21) [2021-11-15]. <https://zcsb.zjtie.edu.cn/info/1013/1062.htm>.
- [17] 高健. 我国城市基础设施产权制度的变迁[J]. 城市问题, 2012(04): 95-100.
- [18] 宋锋华. 我国公共品多元化供给模式问题与对策[J]. 合作经济与科技, 2010(08): 102-103.
- [19] Xinyao S, Mengqiu C, Keyu Z, et al. The Effects of Spatial Planning, Well-Being, and Behavioural Changes During and After the COVID-19 Pandemic[C]. Frontiers in Sustainable Cities, 2021.
- [20] 付雅艺, 刘东昭, 李嘉霖. 大学校园公共空间品质提升的探索[J]. 中外建筑, 2021(09): 86-90.
- [21] 邱彬, 毕晓莉, 柴凯. 浅谈中小学建筑校园规划设计与功能布局[J]. 工业建筑, 2021, 51(06): 262-263.
- [22] 谢玖峰. 校园户外空间改造设计策略探究[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2021.
- [23] 中国社会科学院语言研究所词典室. 现代汉语词典.第 5 版[M]. 现代汉语词典.第 5 版, 2005.
- [24] 刘宁. 大学园区对城市发展的影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [25] 教育部. 全国高等学校名单 [EB/OL].2021 (09-30) [2021-11-15]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xxgk/s5743/s5744/A03/202110/t20211025_574874.html.
- [26] 住建部,发改委. 国家发展改革委关于批准发布《普通高等学校建筑面积指标》的通知 [EB/OL].2018 (03-28) [2021-11-15]. http://mohurd.gov.cn/wjfb/201812/t20181226_238995.html.
- [27] 中国城市规划学会. 中国城市规划学会关于发布团体标准《城市防疫专项规划编制导则》的公告 [EB/OL].2021 (09-29) [2021-11-21]. <https://www.biaozhunku.net/buildingcode/qita/20034.html>.
- [28] 中国城市规划学会. 关于发布团体标准《城市防疫专项规划编制导则》的公告 [EB/OL].2021 (09-23) [2022-03-10]. http://www.planning.org.cn/solicity/view_news?id=1738.

- [29] D H, P M. Social force model for pedestrian dynamics[J]. Physical review. E, Statistical physics, plasmas, fluids, and related interdisciplinary topics, 1995, 51(5): 4282-4286.
- [30] 李宏超, 马倩倩. 基于空间句法的校园空间形态对比研究——以河南大学金明校区和明伦校区为例[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(03): 63-68+74.
- [31] 张亚丽. 基于空间句法的校园空间形态认知研究——以武汉大学校园为例[J]. 建筑与文化, 2020(07): 131-132.
- [32] 钟薇, 阳柏苏. 大学校园外部环境公共空间模式探讨[J]. 怀化学院学报(自然科学), 2007(01): 94-96.
- [33] Wood S, Dovey K. Creative Multiplicities: Urban Morphologies of Creative Clustering[J]. Journal of Urban Design, 2015, 20: 52-74.
- [34] Kim J G. Designing multiple urban space: an actor-network theory analysis on multiplicity and stability of public space[J]. Journal of Urban Design, 2019, 24: 249 - 268.
- [35] 周逸湖, 宋泽方. 高等学校建筑·规划与环境设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [36] 何镜堂. 理念·实践·展望——当代大学校园规划与设计[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(7): 5.
- [37] Ping S. Study on Urban Design Methods of Currently Campus Planning[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 174-177: 2457 - 2460.
- [38] 黄劲. 创造岭南山水生态校园环境——广州大学城中山大学·广东外语外贸大学的规划设计[J]. 南方建筑, 2004(02): 69-70.
- [39] 刘宇波. 基于地域环境文脉的大学校园可持续设计探索——江南大学蠡湖校区规划设计随笔[J]. 城市建筑, 2010(03): 30-32.
- [40] 赵哲, 李丽, 李彬. 大学校园风貌特色中的文脉延续探析——以河南大学郑州龙子湖校区为例[J]. 住宅与房地产, 2019(05): 260-261.
- [41] 陈剑, 蒲向军. 文脉视角下的华中师范大学校园文化空间与自然生态景观研究[J]. 建筑与文化, 2019(11): 33-35.
- [42] 韩玉洁. 景观生态与场所精神的营造——以华北水利水电大学龙子湖校区水景设计为例[J]. 华北水利水电大学学报(社会科学版), 2015, 31(06): 17-20.
- [43] Christian T, Adolfo P, Arnaud M. Cost and CO2 Aspects of Future Vehicle Options in Europe under New Energy Policy Scenarios[J]. Energy Policy, 2010, 38: 7142-7151.
- [44] Demaiio P. Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future[J]. The Journal of Public Transportation, 2009, 12: 3.

- [45] 王建国. 从城市设计角度看大学校园规划[J]. 城市规划, 2002(05): 29-32.
- [46] 金键. 校园交通稳静化行为意向研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006(03): 97-99.
- [47] 陶郅, 龚岳. 大学校园的步行模式研究[J]. 城市规划, 2002(10): 55-56.
- [48] 黄平, 郁朝鸣, 马立, 等. 大学校园交通规划与设计方法研究——以上海交通大学闵行校区为例[J]. 交通与运输(学术版), 2006: 15-18.
- [49] 孙建军, 颜昌文. 浅析同济大学校园交通[J]. 山西建筑, 2008(23): 39-40.
- [50] Dober R P. Campus Architecture: Building in the Groves of Academe[M]. Campus Architecture: Building in the Groves of Academe, 1996.
- [51] Dober R P. Campus Landscape: Functions, Forms, Features[M]. Trees in the Urban Landscape: Site Assessment, Design, and Installation, 2000.
- [52] 程思. 基于空间句法的昆明呈贡大学城商业设施布局研究[D]. 云南: 云南大学, 2014.
- [53] Brawne M, Sussex U O. University planning and design : a symposium[M]. London: Lund Humphries for the Architectural Association, 1967.
- [54] 秦瀚. 重庆高校新校区学生生活服务辅助设施适应性设计策略[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [55] 陈之曦. 基于环境行为学的北京航空航天大学开放式校园空间改造[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [56] 帕特君. 后隔离时代 — 为社交距离而做的设计 [EB/OL].2020 (12-25) [2021-11-10].
https://mp.weixin.qq.com/s?src=11×tamp=1636504781&ver=3427&signature=rgIv3KHJvN0IdPYefj*2ffpg5CrqKjqpbN*LkuEDSbs5SQ0N622GsC8RsjwntujdlBuhbuvOp0uJ1kAURA5S7Y*upGzPjt2J-JMzw3rG1OcwYyGoZs6LHIBoFDpr7JQ&new=1.
- [57] 环艺考研狗. 方案拓展 | 后疫情时代, 那些需要了解的全球设计案例/环艺考研狗 [EB/OL].2021 (06-06) [2021-11-10].
https://mp.weixin.qq.com/s?src=11×tamp=1636505289&ver=3427&signature=vFeaJFAcdg6Cub2tn0NtgrfhuAL4mUKaJXgPxPyEL6zpURJmeqIPhcjOf*96ZBhB833KD2Dp38HR-QCqOvLZEcKcHLNzLM6YFVJVYFGvso9qk06UIpaHzMGpK-hPI3m4&new=1.
- [58] 央视网新闻. 韩国 7000 余人在操场露天考试 卷子被狂风吹一地 [EB/OL].2020 (04-26) [2021-10-13].
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1665009945208424000&wfr=spider&for=pc>.

- [59] 沈小晓,刘玲玲. 多国努力加强校园防疫和教学工作[EB/OL]. 人民日报, 2021 (09-29) [2022-02-02]. <https://new.qq.com/omn/20210929/20210929A01RTK00.html>.
- [60] 马东影, 徐琼. 世界一流大学应对疫情挑战的组织机制研究——以新加坡南洋理工大学为例[J]. 比较教育研究, 2021, 43(09): 104-112.
- [61] Lopman B A, Liu C Y, Guillou A L, et al. A model of COVID-19 transmission and control on university campuses[J]. medRxiv, 2020.
- [62] 数据洞见未来. 准封闭管理! 复旦等多校发布紧急通知! [EB/OL].2022 (03-13) [2022-03-13]. https://mp.weixin.qq.com/s/jdF-7bVCu_XwUs8Ci4TGvQ.
- [63] Moro G L, Sinigaglia T, Bert F, et al. Reopening Schools during the COVID-19 Pandemic: Overview and Rapid Systematic Review of Guidelines and Recommendations on Preventive Measures and the Management of Cases[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(23): 8839.
- [64] 环球网. 同济大学研发疫情防控智能识别系统, 如有发热将自动报警 [EB/OL].2020 (02-15) [2021-10-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1658599458511409398&wfr=spider&for=pc>.
- [65] 中国日报网. 智能传感器让办公室社交隔离更容易[EB/OL].2020 (10-27) [2021-10-14]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1681664081661179114&wfr=spider&for=pc>.
- [66] 叶敏, 秦华, 林莹, 等. 校园公共空间景观评价[J]. 安徽农业科学, 2010, 38: 3254-3256+3261.
- [67] Wang X, Zheng W. College neighborhood in coexistence with the city-Analysis on sustainable campus construction planning for the University of Calgary in Canada[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2017, 44(2): 221-227.
- [68] 金国平, 徐鹤, 刘梦, 等. 基于 GIS 的城市综合交通规划环境影响评价支持系统初探[J]. 城市发展研究, 2008: 81-84+92.
- [69] He J, Li Y, Zheng X, et al. Study on subjective evaluation methods of the campus built environment:A university of Xi ' an as an example[J]. Journal of Northwest University. Natural Science Edition, 2012, 42(1): 115-120.
- [70] 赖信君, 李军. 校园交通服务水平属性数学识别与评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(06): 1136-1139.
- [71] 张丽莉, 唐震, 肖雷, 等. 基于 D-S 证据理论的校园交通环境评价方法研究[J]. 物流技术, 2013, 32: 267-269.
- [72] 吴亦政, 张乐琦. 面向交通环境影响评价的大气扩散模型应用策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(11): 1612-1619.

- [73] 胡列格, 闫晓燕. 基于灰色聚类分析法的交叉口交通环境影响评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2012, 9(01): 51-55.
- [74] 方杰雄. 基于 POI 数据的大学城功能布局研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.
- [75] 史艳妍. 寒地大学校园生活区建筑复合化设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [76] 牛毅. 大学校园教学中心区建筑群体设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [77] 裴文祥. 华南理工大学北校区校园交通优化策略研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [78] 郑小梅. 国外高校校园静态交通体系研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [79] 邓巧明. 集约化高校校园空间形态与空间品质的关联性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [80] 彭筠. 基于景观功能视角的大学城校园综合活动空间设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [81] 邓清. 网络时代的大学校园功能空间规划研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2014.
- [82] 余晓丽. 福州大学旗山校区校园景观的功能性评价[J]. 江西建材, 2021(08): 234-235.
- [83] 甘永洪, 罗涛, 张天海, 等. 视觉景观主观评价的"客观性"探讨——以武汉市后官湖地区景观美学评价为例[J]. 人文地理, 2013, 28: 58-63+120.
- [84] 毛炯玮, 朱飞捷, 车生泉. 城市自然遗留地景观美学评价的方法研究——心理物理学方法的理论与应用[J]. 中国园林, 2010, 26(03): 51-54.
- [85] 朱云辰, 毛一平. 基于层次分析法的浙江大学紫金港东区植物景观评价[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, 39(04): 452-459.
- [86] 范钦栋. 高校景观文化性的模糊评价[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(06): 199-201.
- [87] 朱程程. 基于大学校园文化景观视角下的立体绿化研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(09): 40-42.
- [88] Diguseppi C, Roberts I, Li L, et al. Determinants of car travel on daily journeys to school: cross sectional survey of primary school children[J]. Bmj-British Medical Journal, 1998, 316(7142): 1426-1428.
- [89] Bamberg S, Ajzen I, Schmidt P. Choice of travel mode in the theory of planned behavior: The roles of past behavior, habit, and reasoned action[J]. Basic and Applied Social Psychology, 2003, 25(3): 175-187.

- [90] Bopp M, Kaczynski A, Wittman P. Active Commuting Patterns at a Large, Midwestern College Campus[J]. *Journal of American College Health*, 2011, 59(7): 605-611.
- [91] Rissel C, Mulley C, Ding D. Travel Mode and Physical Activity at Sydney University[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(8): 3563-3577.
- [92] Rotaris L, Danielis R. Commuting to college: The effectiveness and social efficiency of transportation demand management policies[J]. *Transport Policy*, 2015, 44: 158-168.
- [93] Bopp M, Sims D, Matthews S A, et al. There's an app for that: development of a smartphone app to promote active travel to a college campus[J]. *Journal of Transport & Health*, 2016, 3(3): 305-314.
- [94] Gutierrez M, Cantillo V, Arellana J, et al. Estimating bicycle demand in an aggressive environment[J]. *International Journal of Sustainable Transportation*, 2021, 15(4): 259-272.
- [95] 高雅. 基于学生出行行为的校园步行交通系统研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [96] 石剑桥, 张梦竹, 赵鹏军. 心理因素对校园步行和自行车出行路径选择的影响研究——以北京大学燕园为例[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(06): 97-104.
- [97] 余周林. 共享单车影响下大学生出行行为分析及建模[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [98] 杨亚瓯, 吴瑶, 刘玉印. 基于计划行为理论的大学生出行方式选择行为研究[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 43(04): 124-130.
- [99] Hafezi M H, Daisy N S, Liu L, et al. Daily activity and travel sequences of students, faculty and staff at a large Canadian university[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2018, 41(5): 536-556.
- [100] Zhengyu D, Chun W, Zengxiang L, et al. A Comparison of College Students' Travel Patterns in Different Campuses Using Mobile Phone Positioning Data: A Case Study of Tongji University, China[C]. *International Conference On Civil Engineering And Urban Planning 2012*, 2018: 38-48.
- [101] Dibaj S, Golroo A, Habibian M, et al. Activities and Daily trips of University Students in a CBD area (Case Study: Amirkabir University of Technology)[C]. *14th World Conference on Transport Research (WCTR)*, 2016: 2494-2503.
- [102] Chen X M. Statistical and activity-based modeling of university student travel behavior[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2012, 35(5): 591-610.

- [103] 周蕾, 熊礼阳, 顾春雨, 等. 高校学生消费行为时空特征研究——以南京仙林大学城为例[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2017, 40: 154-162.
- [104] 吴麟麟, 杨彪, 景鹏. 基于 IPOS-SVM 的大学生出行方式识别研究[J]. 计算机工程, 2018, 44(01): 193-198.
- [105] 肖冰, 孙冰. 大学校园绿地景观规划与设计探析[J]. 安徽农业科学, 2007(20): 6029-6031.
- [106] 朱康丽, 吴建军, 李大庆. 社交与出行的相互作用研究综述[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(04): 69-78.
- [107] 张斌, 谭涵方, 杨瑞琪, 等. 疫情防控下的校园交通组织管理研究[J]. 产业与科技论坛, 2021, 20: 242-243.
- [108] Carr L J, Dunsiger S I, Marcus B H. Validation of Walk Score for estimating access to walkable amenities[J]. British Journal of Sports Medicine, 2011, 45(14): 1144-1148.
- [109] Verma A, Vajjarapu H, Thuluthiyil Manoj M. Planning and Usage Analysis of Bike Sharing System in a University Campus[J]. Recent Advances in Traffic Engineering. Select Proceedings of RATE 2018. Lecture Notes in Civil Engineering (LNCE), 2020: 339-349.
- [110] Hankin B, Wright R A. Passenger Flow in Subways[J]. Journal of the Operational Research Society, 1958, 9: 81-88.
- [111] Francesco, Farin, Daniele, et al. Walking Ahead: The Headed Social Force Model[J]. PLOS ONE, 2017, 12(1): e0169734.
- [112] Helbing D, Johansson A. Pedestrian, Crowd, and Evacuation Dynamics[J]. Encyclopedia of Complexity & Systems Science, 2013, 16: 697-716.
- [113] Helbing D, Buzna L, Johansson A, et al. Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions[J]. Transp. Sci., 2005, 39: 1-24.
- [114] Batty M, Desyllas J, Duxbury E. The discrete dynamics of small-scale spatial events: agent-based models of mobility in carnivals and street parades[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2003, 17: 673 - 697.
- [115] Law A M, Kelton W D. Simulation Modeling and Analysis[M]. New York: McGraw Hill, 2000.
- [116] 邱晓刚, 段红, 谢旭, 等. 仿真学科知识体系的若干问题研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33: 753-762.
- [117] 段红, 邱晓刚, 谢旭, 等. 仿真学科知识领域构成研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33: 763-772.

- [118] Schadschneider A, Klingsch W, Klüpfel H, et al. Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications[M]. New York: Springer, 2011: 517-550.
- [119] Henderson L. The Statistics of Crowd Fluids[J]. Nature, 1971, 229: 381-383.
- [120] Hughes R. A continuum theory for the flow of pedestrians[J]. Transportation Research Part B-methodological, 2002, 36: 507-535.
- [121] 孙立博, 孙晓峰, 秦文虎. 基于连续模型和动力学仿真模型的高密度人群仿真算法[J]. 计算机学报, 2016, 39(07): 1375-1392.
- [122] 赵飒. 基于社会力模型的人群疏散仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [123] Yu W J, Chen R, Dong L Y, et al. Centrifugal force model for pedestrian dynamics[J]. Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics, 2005, 72(2): 026112.
- [124] Helbing D, Farkas I, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407: 487-490.
- [125] Ningbo C, Zhaowei Q, Yongheng C, et al. Destination and route choice models for bidirectional pedestrian flow based on the social force model[J]. Iet Intelligent Transport Systems, 2017, 11: 537-545.
- [126] Suma Y, Yanagisawa D, Nishinari K. Anticipation effect in pedestrian dynamics: Modeling and experiments[J]. Physica A-statistical Mechanics and Its Applications, 2012, 391: 248-263.
- [127] Farina F, Fontanelli D, Garulli A, et al. When Helbing meets Laumond: The Headed Social Force Model[C]. 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control, 2016: 3548-3553.
- [128] Parisi D, Gilman M, Moldovan H. A modification of the Social Force Model can reproduce experimental data of pedestrian flows in normal conditions[J]. Physica A: statistical Mechanics and Its Applications, 2009, 388: 3600-3608.
- [129] Ko M, Kim T, Sohn K. Calibrating a social-force-based pedestrian walking model based on maximum likelihood estimation[J]. Transportation, 2013, 40: 91-107.
- [130] Liu B, Liu H, Zhang H, et al. A social force evacuation model driven by video data[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018, 84: 190-203.
- [131] Steffen B. A Modification of the Social Force Model by Foresight[J]. Pedestrian and Evacuation Dynamics, 2010: 677-682.
- [132] 魏娟, 郭阳勇, 游磊, 等. 一种基于多出口环境的人群疏散改进模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30: 139-145.

- [133] Gao Y, Luh P, Zhang H B, et al. A modified social force model considering relative velocity of pedestrians[C]. 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2013: 747-751.
- [134] 陈涛, 应振根, 申世飞, 等. 相对速度影响下社会力模型的疏散模拟与分析[J]. 自然科学进展, 2006: 1606-1612.
- [135] Wei J, Fan W, Guo Y, et al. An extended social force model for pedestrian evacuation under disturbance fluctuation force[J]. International Journal of Modern Physics C, 2020, 31: 2050102.
- [136] 梁柯, 李健, 陈颖雪, 等. 基于社会力模型的地铁车站应急疏散仿真分析[J]. 智能计算机与应用, 2019, 9: 236-240.
- [137] Parisi D R, Patterson G A, Pagni L, et al. Social Distance Characterization by means of Pedestrian Simulation[J]. Physics and Society, 2020.
- [138] Baglietto G, Parisi D R. Continuous-space automaton model for pedestrian dynamics[J]. Physical Review E, 2011, 83(5): 056117.
- [139] Mayr C, Köster G. Social distancing with the Optimal Steps Model[J]. Physics and Society, 2020.
- [140] Echeverría-Huarte I, Garcimartín A, Hidalgo R C, et al. Estimating density limits for walking pedestrians keeping a safe interpersonal distancing[J]. Scientific Reports, 2021, 11.
- [141] Pouw C a S, Toschi F, Van Schadewijk F, et al. Monitoring physical distancing for crowd management: Real-time trajectory and group analysis[J]. PLoS ONE, 2020, 15.
- [142] 张本红. SIR 传染病模型参数估计及其应用[D]. 山东: 山东大学, 2018.
- [143] Ramsdale J. The Ghost Map: A Street, a City, an Epidemic and the Hidden Power of Urban Networks [Book Review][J]. Geographical education, 2008, 21: 61.
- [144] Kermack W O, Mckendrick À. A contribution to the mathematical theory of epidemics[J]. Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 115: 700-721.
- [145] 黄德生, 关鹏, 周宝森. SIR 模型对北京市 SARS 疫情流行规律的拟合研究[J]. 疾病控制杂志, 2004(05): 398-401.
- [146] 张刚庆, 洪文松, 张国伟, 等. 基于 SIR 流行病模型的应急反应优化分析[J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2014: 59-61.
- [147] Towers S, Geisse K V, Tsai C-C, et al. The impact of school closures on pandemic influenza: Assessing potential repercussions using a seasonal SIR model[J]. Mathematical biosciences and engineering : MBE, 2012, 9 2: 413-30.

- [148] Yang Z-F, Zeng Z, Wang K, et al. Modified SEIR and AI prediction of the epidemics trend of COVID-19 in China under public health interventions[J]. *Journal of thoracic disease*, 2020, 12 3: 165-174.
- [149] 韩克春, 张晓勇, 吴海英, 等. 基于复杂网络的流行病传播 SIS 模型仿真研究[J]. *现代预防医学*, 2014, 41(20): 3649-3651.
- [150] Andersson H, Britton T. *Stochastic Epidemic Models and Their Statistical Analysis*[C], 2000.
- [151] Tang B, Wang X, Li Q, et al. Estimation of the Transmission Risk of the 2019-nCoV and Its Implication for Public Health Interventions[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2020, 9(2): 462.
- [152] Wu J T, Leung K, Leung G. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study[J]. *Lancet (London, England)*, 2020, 395: 689 - 697.
- [153] Read J, Bridgen J, Cummings D, et al. Novel coronavirus 2019-nCoV: early estimation of epidemiological parameters and epidemic predictions[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2021, 376(1829): 20200265.
- [154] Shanshan W, Sun P, Li R, et al. Epidemiological Development of Novel Coronavirus Pneumonia in China and Its Forecast[J]. *medRxiv*, 2020.
- [155] Fang Y, Nie Y, Penny M. Transmission dynamics of the COVID 19 outbreak and effectiveness of government interventions: A date driven analysis[J]. *Journal of Medical Virology*, 2020, 92(6): 645-659.
- [156] Shen M, Peng Z, Xiao Y, et al. Modelling the epidemic trend of the 2019 novel coronavirus outbreak in China[J]. *Innovation (N Y)*, 2020, 1(3): 100048.
- [157] 赵翌僮, 梅珊, 马亮, 等. 基于空间聚类的北京 H1N1 流感仿真分析[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29: 2115-2120+2127.
- [158] 潘海啸, 崔毅. 基于微观仿真出行模型的病毒时空扩散分布与控制[J]. *城市交通*, 2020, 18(03): 62-70.
- [159] Moslem S, Campisi T, Szmelter-Jarosz A, et al. Best-Worst Method for Modelling Mobility Choice after COVID-19: Evidence from Italy[J]. *Sustainability*, 2020, 12: 6824-6824.
- [160] Paköz M Z, Sözer C, Dp An A E. Changing perceptions and usage of public and pseudo-public spaces in the post-pandemic city: the case of Istanbul[J]. *URBAN DESIGN International*, 2021: 1-16.
- [161] 丁莹, 张健钦, 杨木, 等. 新冠疫情发生城市仿真模型及防控措施评价——以武汉市为例[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 61(12): 1452-1461.

- [162] 高德华. 流行病防控策略的多主体仿真研究[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4580-4583.
- [163] 潘理虎, 秦世鹏, 李晓文, 等. COVID-19 病毒防控多智能体仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2020, 32: 2244-2257.
- [164] Derjany P, Namilae S, Liu D, et al. Multiscale model for the optimal design of pedestrian queues to mitigate infectious disease spread[J]. PLoS ONE, 2020, 15(7): e0235891.
- [165] 方乐恒, 侯嘉文, 来俊杰, 等. 基于真实城市地图的新型冠状病毒疫情传播仿真数学模型: 计算模拟与防控策略的初试研究[J]. 应用数学学报, 2020, 43(2): 383-401.
- [166] Namilae S, Derjany P, Mubayi A, et al. Multiscale model for pedestrian and infection dynamics during air travel[J]. PHYSICAL REVIEW E, 2017, 95(5-1): 052320.
- [167] Namilae S, Srinivasan A, Mubayi A, et al. Self-propelled pedestrian dynamics model: Application to passenger movement and infection propagation in airplanes[J]. Physica A: statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 465: 248-260.
- [168] Helbing D. A mathematical model for the behavior of pedestrians[J]. Systems Research and Behavioral Science, 1991, 36: 298-310.
- [169] Yuen J, Lee E, Lam W. An intelligence-based route choice model for pedestrian flow in a transportation station[J]. Applied Soft Computing, 2014, 24: 31-39.
- [170] Xu S, Duh H. A Simulation of Bonding Effects and Their Impacts on Pedestrian Dynamics[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11: 153-161.
- [171] Tilley A R. The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design[M]. Hoboken: Wiley, 2001.
- [172] Asadi S, Wexler A, Cappa C, et al. Effect of voicing and articulation manner on aerosol particle emission during human speech[J]. PLoS One, 2020, 15(1): e0227699.
- [173] World Health Organization. Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19)[R]. Geneva: World Health Organization, 2020-02-16.
- [174] Liu J, Liao X, Qian S, et al. Community Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2, Shenzhen, China, 2020[J]. Emerging Infectious Diseases, 2020, 26: 1320 - 1323.
- [175] Chan J, Yuan S, Kok K, et al. A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster[J]. Lancet, 2020, 395: 514-523.

- [176] Li Q, Guan X, Wu P, et al. Early Transmission Dynamics in Wuhan, China, of Novel Coronavirus Infected Pneumonia[J]. The New England Journal of Medicine, 2020, 382: 1199 - 1207.
- [177] National Center for Immunization and Respiratory Diseases. Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission[EB/OL]. Centers for Disease Control and Prevention, 2021 (5-7) [2021-8-21]. https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html#anchor_1619805240227.
- [178] World Health Organization. Coronavirus disease (COVID-19) advice for the public[EB/OL].2021 (11-15) [2021-11-15]. <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>.
- [179] Chinazzi M, Davis J T, Ajelli M, et al. The effect of travel restrictions on the spread of the 2019 novel coronavirus (COVID-19) outbreak[J]. Science, 2020, 368(6489): 395 - 400.
- [180] Agrawal A, Bhardwaj R. Probability of COVID-19 infection by cough of a normal person and a super-spreader[J]. Physics of Fluids, 2021, 33.
- [181] Helbing D, Johansson A, Al-Abideen H Z. Dynamics of crowd disasters: an empirical study[J]. PHYSICAL REVIEW E, 2007, 75(4): 046109.
- [182] Viblo V. Pymunk[EB/OL].2021 (09-01) [2021-09-01]. <http://www.pymunk.org/en/latest/>.
- [183] Numfocus. GeoPandas 0.9.0[EB/OL].2021 (09-01) [2021-09-01]. <https://geopandas.org/index.html>.
- [184] Numfocus. pandas[EB/OL].2021 (08-15) [2021-09-01]. <https://pandas.pydata.org/>.
- [185] 郭利进, 师五喜, 李颖, 等. 基于四叉树的自适应栅格地图创建算法[J]. 控制与决策, 2011, 26: 1690-1694.
- [186] Brassard G, Bratley P. Fundamentals of Algorithmics[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [187] 王振报, 温苏皖. 疫情防控措施下的高校食堂服务能力分析:以某高校食堂为例 [J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2021, 30(03): 39-44.
- [188] Harweg T, Bachmann D, Weichert F. Agent-based simulation of pedestrian dynamics for exposure time estimation in epidemic risk assessment[J]. Z Gesundh Wiss, 2021: 1-8.
- [189] Abdul Nasir N a B, Hassan A S, Khozaei F, et al. Investigation of spatial configuration management on social distancing of recreational clubhouse for

- COVID-19 in Penang, Malaysia[J]. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 2021, 39(5): 782-810.
- [190] Lu T, Zhao Y, Wu P, et al. Dynamic analysis of single-file pedestrian movement with maintaining social distancing in times of pandemic[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2021: 093402.
- [191] Lyng G D, Sheils N E, Kennedy C J, et al. Identifying optimal COVID-19 testing strategies for schools and businesses: Balancing testing frequency, individual test technology, and cost[J]. *PLoS ONE*, 2021, 16.
- [192] 黄梦瑶, 黄丽达, 袁宏永, 等. 社交隔离对 COVID-19 的发展影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61: 96-103.
- [193] Kissler S, Tedijanto C, Goldstein E, et al. Projecting the transmission dynamics of SARS-CoV-2 through the postpandemic period[J]. *Science*, 2020, 368(6493): abb5793.
- [194] Das S K, Alam J-E, Plumari S, et al. Transmission of airborne virus through sneezed and coughed droplets[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(9): 097102.
- [195] Balcan D, Colizza V, Gonçalves B, et al. Multiscale mobility networks and the spatial spreading of infectious diseases[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(51): 21484-21489.
- [196] 孙皓宸, 刘肖凡, 许小可, 等. 基于连续感染模型的新冠肺炎校园传播与防控策略分析[J]. *物理学报*, 2020, 69: 74-83.
- [197] Xiao Y, Yang M, Zhu Z, et al. Modeling indoor-level non-pharmaceutical interventions during the COVID-19 pandemic: A pedestrian dynamics-based microscopic simulation approach[J]. *Transport Policy*, 2021, 109(51): 12-23.
- [198] Bouchnita A, Jebrane A. A hybrid multi-scale model of COVID-19 transmission dynamics to assess the potential of non-pharmaceutical interventions[J]. *Chaos, Solitons, and Fractals*, 2020, 138: 109941 - 109941.
- [199] Bouchnita A, Jebrane A. A multi-scale model quantifies the impact of limited movement of the population and mandatory wearing of face masks in containing the COVID-19 epidemic in Morocco[J]. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*, 2020.
- [200] 津门教育网. 天津大学 2021 级本科新生大数据来啦! [EB/OL].2021 (09-06) [2021-11-24]. <https://mp.weixin.qq.com/s/3O9IjLWRRwfYVbbFicYJIA>.
- [201] 天津大学 . 学校简介 [EB/OL].2020 (12-31) [2021-11-24]. <http://www.tju.edu.cn/tdgk/xxjj.htm>.

- [202] 朱玮, 翟宝昕, 简单. 基于可视化 SP 法的城市道路自行车出行环境评价及优化——模型构建及上海中心城区的应用[J]. 城市规划学刊, 2016(03): 85-92.
- [203] Evenson K R, Sotres-Alvarez D, Herring A H, et al. Assessing urban and rural neighborhood characteristics using audit and GIS data: derivation and reliability of constructs[J]. The International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 2009, 6: 44 - 44.
- [204] 黄宇涛, 古新仁. 大学校园道路问题及对策初探[J]. 绿色科技, 2019(01): 102-104.
- [205] Emery J, Crump C, Bors P A. Reliability and Validity of Two Instruments Designed to Assess the Walking and Bicycling Suitability of Sidewalks and Roads[J]. American Journal of Health Promotion, 2003, 18: 38 - 46.
- [206] Millington C, Ward Thompson C, Rowe D, et al. Development of the Scottish Walkability Assessment Tool (SWAT)[J]. Health & place, 2009, 15(2): 474-481.
- [207] Clifton K, Smith A L, Rodriguez D A. The development and testing of an audit for the pedestrian environment[J]. Landscape and Urban Planning, 2007, 80: 95-110.
- [208] 潘江琼, 刘婷婷, 孙梦楠. 校园道路动态景观分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(03): 290-294.
- [209] 胡昂, 戴维维, 郭仲薇, 等. 城市生活型街道空间视觉品质的大规模测度[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 483-493.
- [210] 戴智妹, 朱查松. 基于街景图片的街道空间品质对比研究[J]. 城市建筑, 2021, 18(19): 165-169.
- [211] 王雪. 大学校园道路空间环境行为调查分析——以厦门大学思明校区为例[J]. 福建建筑, 2014(03): 88-91.
- [212] 周妍. 中心型地铁站点地区街道步行空间品质评价研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [213] 李俏君, 严晋, 郭莉莉, 等. 新冠疫情对公立医院门诊患者就医体验的影响——基于患者满意度调查数据[J]. 现代医院, 2021, 21(6): 855-858.
- [214] Sener I N, Eluru N, Bhat C R. An analysis of bicycle route choice preferences in Texas, US[J]. Transportation, 2009, 36: 511-539.
- [215] Hensher D A, Greene W, Chorus C G. Random regret minimization or random utility maximization: An exploratory analysis in the context of automobile fuel choice[J]. Journal of Advanced Transportation, 2013, 47(7): 667-678.
- [216] 21 新健康. 全球新冠突破一亿大关, 美国疫情缓解, 英国死亡率最高 [EB/OL]. 2021 (01-29) [2022-03-11]. <https://www.cn-healthcare.com/articlewm/20210129/content-1185539.html>.

- [217] Moskal A, Gradón L. Temporary and spatial deposition of aerosol particles in the upper human airways during breathing cycle[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2002, 33: 1525-1539.
- [218] He X, Lau E, Wu P, et al. Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19[J]. *Nature Medicine*, 2020, 26: 672-675.
- [219] Liu Y, Ning Z, Chen Y, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals[J]. *Nature*, 2020, 582: 557-560.
- [220] Lednicky J, Lauzardo M, Fan Z, et al. Viable SARS-CoV-2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients[J]. *medRxiv*, 2020.
- [221] Prather K, Wang C C, Schooley R. Reducing transmission of SARS-CoV-2[J]. *Science*, 2020, 368(6498): 1422-1424.
- [222] 国家发展改革委, 国家卫生健康委, 国家中医药局. 关于印发公共卫生防控救治能力建设方案的通知 [EB/OL].2020 (05-09) [2022-03-10]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202005/t20200522_1228686.html?code=&state=123.
- [223] 高楠. 平疫结合视角下城市韧性社区防疫规划策略研究[J]. *天津职业院校联合学报*, 2021, 23(08): 104-108.
- [224] 梁丰. 以学生活动为中心的校园设计——天津大学新校区创作实践[J]. *当代建筑*, 2020(10): 141-143.
- [225] Xiao T, Mu T, Shen S, et al. A dynamic physical-distancing model to evaluate spatial measures for prevention of Covid-19 spread[J]. *Physica a*, 2021, 592: 126734 - 126734.
- [226] Wilbanks T J, Sathaye J. Integrating mitigation and adaptation as responses to climate change: a synthesis[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006, 12: 957-962.
- [227] 徐振强, 王亚男, 郭佳星, 等. 我国推进弹性城市规划建设的战略思考[J]. *城市发展研究*, 2014, 21: 79-84.
- [228] 王世福, 张晓阳, 邓昭华. 突发公共卫生事件下城市公共空间的韧性应对[J]. *科技导报*, 2021, 39(05): 36-46.
- [229] 王世福, 黎子铭. 强化应急治理能力的韧性社区营造策略——新型冠状病毒肺炎疫情的启示[J]. *规划师*, 2020, 36(06): 112-115.
- [230] 左为. 城市规划的“留白”之道[J]. *城市规划*, 2018, 42(01): 83-91.
- [231] 黄建中, 马煜箫, 刘晟. 城市规划中的风险管理与应对思考[J]. *规划师*, 2020, 36(06): 33-35+39.

- [232] 周艺南, 刘晋华, 施展. 面向韧性城市的防疫体系空间问题探讨[EB/OL].2020 (02-14) [2022-03-05]. https://mp.weixin.qq.com/s/b7wGJC_WE4_3j6kARATyXg.
- [233] 周一丹, 宁宁, 周文婧, et al. 社区韧性理论视角下城市社区新型冠状病毒肺炎疫情防控[J]. 中华卫生应急电子杂志, 2020, 6(03): 181-182.
- [234] 廖家仪. 应对新冠疫情的公共卫生防疫设施体系研究[C]. 2020/2021 中国城市规划年会暨 2021 中国城市规划学术季, 2021: 674-683.
- [235] 于洋, 吴茸茸, 谭新, 等. 平疫结合的城市韧性社区建设与规划应对[J]. 规划师, 2020, 36: 94-97.
- [236] Sakamoto H. Japan's Covid-19 Strategy[EB/OL].2021 (04-01) [2022-03-10]. <https://items.ssrc.org/covid-19-and-the-social-sciences/covid-19-in-east-asia/japans-covid-19-strategy/>.
- [237] 石羽, 李振兴, 石铁矛. 公共卫生事件背景下城市防疫规划思考[EB/OL].2020 [2022-03-04]. <https://mp.weixin.qq.com/s/FmQFkHvELRU9qBZKRZOuAg>.
- [238] 杨俊宴, 史北祥, 史宜, et al. 高密度城市的多尺度空间防疫体系建构思考[J]. 城市规划, 2020, 44(03): 17-24.
- [239] 王晨, 王金秋. 新冠疫情下国家物资储备制度需进一步改革优化[EB/OL].2020 [2022-03-06]. http://www.jsthinktank.com/zhikuyanjiu/202003/t20200320_6568428.shtml.
- [240] 傅正堂, 董沛武, 李周秩, et al. 突发公共卫生事件下疫情防控与医疗物资协同保障研究[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(03): 8-17.
- [241] 姜文鹏, 钱云楼. 数字化视域下应急物资储备点选址优化模式研究[J]. 运输经理世界, 2021(13): 60-62.
- [242] 王小永, 汪忠, 王春保, et al. 基于共享理念的中小学校园公共空间设计研究[J]. 中外建筑, 2021(10): 108-112.
- [243] 郑卫, 刘兆文, 徐剑锋. 城市医疗卫生设施布局规划失效探析[J]. 建筑与文化, 2017(03): 135-137.

附录 A：道路要素偏好预调查问卷

疫情期间，校园内出行，您会有意靠近或远离校园中的某些要素吗？

- A. 景观绿化 B. 湖水 C. 广场 D. 汽车 E. 小巷
F. 自行车 G. 台阶 H. 墙体 I. 建筑物 J. 其他行人
K. 信息设施（路标、地图、展板
L. 艺术景观设施（雕塑、艺术小品、校门、亭子）
M. 照明设施（路灯、地灯）
N. 娱乐服务设施（座椅、桌子、游乐器械、售货亭）
O. 交通设施（自行车点、停车场）
P. 卫生设施（公共卫生间、垃圾箱、饮水机）

靠近_____偶尔靠近_____

远离_____偶尔远离_____

无所谓_____

附录 B: 步行环境偏好调查问卷

感谢您参加天津大学建筑学院项目, 本问卷只供天津大学建筑学院师生进行科学研究, 旨在研究疫情背景下的学生出行行为, 为校方管理提供建议, 非常感谢您花费宝贵的时间参与本次问卷!

第一部分-个人基本情况

1. 年龄 _____
2. 肩宽 _____
3. 体重 _____
4. 性别为 男 女
5. 年级为 本科非毕业班 本科毕业班 硕士研究生 博士研究生
6. 宿舍区 鹏翔__斋 七里台__斋 六里台__斋 其他__
7. 骑行能力 可以正常骑行 不会/不便骑行

第二部分-出行观念与态度

8. 疫情前后, 校园内出行, 您的出行意愿是否有变化:
非常愿意 比较愿意 保持不变 稍微减少 急剧减少
9. 疫情前后, 校园内出行, 您的出行频率是否有变化:
急剧增加 稍微增加 保持不变 稍微减少 急剧减少
10. 疫情前后, 校园内出行, 您的出行距离是否有变化:
急剧增加 稍微增加 保持不变 稍微减少 急剧减少
11. 疫情前后, 校园内出行, 您共同出行的同伴数是否有变化:
急剧增加 稍微增加 保持不变 稍微减少 独自出行
12. 疫情期间, 校园内出行, 您一般几人同行:
5人及以上 4人 3人 2人 独自出行
13. 疫情期间, 您喜欢步行出行吗?
非常喜欢 比较喜欢 一般 比较不喜欢 非常不喜欢
14. 疫情期间, 校园内出行, 如果步行的话, 您能接受的最长行走时长为__分钟
15. 疫情期间, 您喜欢骑共享单车出行吗?
非常喜欢 比较喜欢 一般 比较不喜欢 非常不喜欢
16. 在天津大学校园内您的宿舍、实验室、教学楼、食堂, 容易找到可用的共享单车吗?

非常容易 比较容易 一般 比较难 基本没有

17. 疫情期间，校园内出行，如果骑自行车的话，您能接受的最长骑车时长为 _____ 分钟

18. 疫情期间，您在校园内出行方式的占比（请填写百分比）

步行 _____ 骑行 _____

19. 疫情期间，校园内出行，你有什么出行策略么（例如，错峰出行、走小路）：

20. 疫情期间，校园内出行，疫情给你带来了哪些困难、影响？

第三部分-路径选择记录

在需要注意社交隔离的背景下，您在校园内会偏好选择什么样的场景？

注：建筑限进*：路径途中两旁建筑限制进入的比率，0%为无限制都可进入，100%为全限制不可进入。

问题 1	道路 1	道路 2
路段长度	>300m	>300m
路段宽度	≤3m	≤3m
绿化种类	有灌木丛、草坪或花圃	无绿化
人车混行度	30%以下	30%-60%
视野开阔度	高	中
拥挤度	不拥挤	非常拥挤
疫情标识	仅墙体贴纸标识	仅墙体贴纸标识
您的选择	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
问题 2	道路 1	道路 2
路段长度	≤100m	≤100m
路段宽度	≤3m	≤3m
绿化种类	无绿化	仅行道树
人车混行度	60%以上	30%以下
视野开阔度	高	高
拥挤度	有些拥挤	不拥挤
疫情标识	墙体贴纸标识与其他标识	无标识
您的选择	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
问题 3	道路 1	道路 2
路段长度	100-300m	100-300m
路段宽度	≤3m	>7m
绿化种类	有灌木丛、草坪或花圃	仅行道树

人车混行度	30%-60%	30%-60%
视野开阔度	高	中
拥挤度	非常拥挤	有些拥挤
疫情标识	仅墙体贴纸标识	墙体贴纸标识与其他标识
您的选择	[]	[]
问题 4	道路 1	道路 2
路段长度	≤100m	100-300m
路段宽度	3-7m	>7m
绿化种类	有灌木丛、草坪或花圃	仅行道树
人车混行度	60%以上	30%以下
视野开阔度	低	低
拥挤度	不拥挤	不拥挤
疫情标识	无标识	仅墙体贴纸标识
您的选择	[]	[]
问题 5	道路 1	道路 2
路段长度	100-300m	>300m
路段宽度	3-7m	3-7m
绿化种类	无绿化	无绿化
人车混行度	30%-60%	30%以下
视野开阔度	低	高
拥挤度	非常拥挤	非常拥挤
疫情标识	仅墙体贴纸标识	无标识
您的选择	[]	[]
问题 6	道路 1	道路 2
路段长度	>300m	>300m
路段宽度	>7m	>7m
绿化种类	无绿化	有灌木丛、草坪或花圃
人车混行度	30%-60%	60%以上
视野开阔度	低	低
拥挤度	有些拥挤	不拥挤
疫情标识	仅墙体贴纸标识	墙体贴纸标识与其他标识
您的选择	[]	[]
问题 7	道路 1	道路 2
路段长度	100-300m	100-300m
路段宽度	>7m	≤3m
绿化种类	仅行道树	仅行道树

人车混行度	30%以下	60%以上
视野开阔度	中	低
拥挤度	不拥挤	不拥挤
疫情标识	墙体贴纸标识与其他标识	无标识
您的选择	[]	[]
问题 8	道路 1	道路 2
路段长度	100-300m	≤100m
路段宽度	3-7m	≤3m
绿化种类	仅行道树	有灌木丛、草坪或花圃
人车混行度	30%-60%	30%以下
视野开阔度	低	中
拥挤度	非常拥挤	非常拥挤
疫情标识	无标识	仅墙体贴纸标识
您的选择	[]	[]
问题 9	道路 1	道路 2
路段长度	>300m	≤100m
路段宽度	≤3m	>7m
绿化种类	有灌木丛、草坪或花圃	有灌木丛、草坪或花圃
人车混行度	30%以下	60%以上
视野开阔度	中	高
拥挤度	有些拥挤	有些拥挤
疫情标识	无标识	无标识
您的选择	[]	[]
问题 10	道路 1	道路 2
路段长度	>300m	>300m
路段宽度	>7m	3-7m
绿化种类	仅行道树	仅行道树
人车混行度	60%以上	30%-60%
视野开阔度	低	高
拥挤度	不拥挤	不拥挤
疫情标识	无标识	墙体贴纸标识与其他标识
您的选择	[]	[]
问题 11	道路 1	道路 2
路段长度	>300m	>300m
路段宽度	>7m	>7m
绿化种类	仅行道树	无绿化

人车混行度	60%以上	60%以上
视野开阔度	中	中
拥挤度	非常拥挤	有些拥挤
疫情标识	墙体贴纸标识与其他标识	无标识
您的选择	[]	[]
问题 12	道路 1	道路 2
路段长度	>300m	≤100m
路段宽度	>7m	3-7m
绿化种类	无绿化	无绿化
人车混行度	60%以上	30%-60%
视野开阔度	高	低
拥挤度	有些拥挤	非常拥挤
疫情标识	无标识	仅墙体贴纸标识
您的选择	[]	[]

第四部分-疫情政策反馈

21. 您认为社交隔离是一种防止传播的有效途径吗？

[] 是 [] 不是

22. 您认为社交隔离将是一项长期政策吗？

[] 是 [] 否

23. 您是否支持校方的社交隔离政策？

[] 非常支持 [] 比较支持 [] 一般支持 [] 不太支持 [] 非常不支持

24. 出门时一般会几人同行，是否自觉社交隔离

出行人数（含本人）_____

是否社交隔离 [] 是 [] 否

25. 你认为校园内社交隔离的距离应为

[] 2.5 米及以上 [] 2 米 [] 1.5 米 [] 1 米 [] 不需要

26. 您对天津大学的校园政策有什么建议或意见？

再次感谢您对本次问卷的支持！