

DOI: 10.20103/j.stxb.202401190162

杨高原,余兆武,张金光,刘红晓,金贵,居阳,洪波,赵卓慧,张理卿,姚希晗,马文娟,熊浚祺,邵钰涵,姜斌.暴露生态学视角下绿地暴露健康效益研究进展.生态学报,2024,44(14):5914-5924.

Yang G Y, Yu Z W, Zhang J G, Liu H X, Jin G, Ju Y, Hong B, Zhao Z H, Zhang L Q, Yao X H, Ma W J, Xiong J Q, Shao Y H, Jiang B. Research progress on the health benefits of greenspace exposure from the perspective of exposure ecology. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 5914-5924.

暴露生态学视角下绿地暴露健康效益研究进展

杨高原¹, 余兆武^{2,*}, 张金光³, 刘红晓⁴, 金 贵⁵, 居 阳⁶, 洪 波⁷, 赵卓慧⁸, 张理卿⁹, 姚希晗², 马文娟², 熊浚祺², 邵钰涵¹⁰, 姜 斌¹¹

1 上海师范大学 环境与地理科学学院, 上海 200234

2 复旦大学 环境科学与工程系, 上海 200438

3 南京林业大学 风景园林学院, 南京 210037

4 中国科学院华南植物园, 广州 510650

5 中国地质大学(武汉) 经济管理学院, 武汉 430078

6 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023

7 西北农林科技大学 风景园林艺术学院, 杨凌 712100

8 复旦大学 公共卫生学院, 上海 200032

9 上海交通大学 设计学院, 上海 200240

10 同济大学 建筑与城市规划学院, 上海 200092

11 香港大学 建筑学院(城市环境与人类健康实验室), 香港 999077

摘要:城市绿地与居民健康福祉密切相关,绿地暴露所带来的多重健康效益已经成为耦合城市生态与健康科学的前沿热点议题。尽管绿地健康效应的综述研究并不鲜见,但是目前仍缺乏基于统一理论框架视角下对绿地暴露健康效益的系统综述。近期提出的暴露生态学作为一个耦合“自然生态系统-生态暴露-健康效应”框架体系,能够全面剖析、归纳已有绿地暴露健康效应研究,并指引未来相关领域研究发展。因此,研究在暴露生态学研究视域下,在主体-现实,客体-现实,主体-虚拟,客体-虚拟界面下进行了研究进展的综述分析,并指出了研究截面(尺度)单一、阈值研究与虚拟(及多感官)研究不足等问题。最后提出了未来研究展望:(1)构建跨时空、多尺度的绿地暴露测度模型,并量化绿地健康之间的因果效应;(2)构建阈值模型,分析健康促进的绿地暴露主体阈值与客体阈值;(3)探索绿地特征、暴露方式和剂量、多感体验对健康的影响。研究成果可以进一步加深对相关领域前沿与不足的认识,也可以进一步促进暴露生态学理论体系的丰富和完善。

关键词:暴露生态学;绿地暴露;健康效益;研究进展

Research progress on the health benefits of greenspace exposure from the perspective of exposure ecology

YANG Gaoyuan¹, YU Zhaowu^{2,*}, ZHANG Jinguang³, LIU Hongxiao⁴, JIN Gui⁵, JU Yang⁶, HONG Bo⁷, ZHAO Zhuohui⁸, ZHANG Liqing⁹, YAO Xihan², MA Wenjuan², XIONG Junqi², SHAO Yuhan¹⁰, JIANG Bin¹¹

1 School of Environmental and Geographical Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

2 Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200438, China

3 School of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

4 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

基金项目:国家自然科学基金(42171093, 42271308, 32101322);上海市公共卫生三年行动计划(第六轮)学科带头人项目(GWVI-11.2-XD11)

收稿日期:2024-01-19; **网络出版日期:**2024-03-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowu_yu@fudan.edu.cn

5 School of Economics and Management, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

6 School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

7 School of Landscape Architecture and Art, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

8 School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China

9 School of Design, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

10 College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China

11 Faculty of Architecture (Laboratory for Urban Environment and Human Health), The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

Abstract: Urban greenspace is closely related to the health and well-being of residents, and the multiple health benefits brought by exposing to greenspace has become a hot topic that couples urban ecology and health science. Although review studies in this field are common, it still lacks a systematic review of the health benefits of greenspace exposure which is based on a unified theoretical framework. The recently proposed theory of exposure ecology, as a coupled framework of natural ecosystem-ecological exposure-health effects, can comprehensively summarize the existing research and guide future research in related fields. Therefore, this study conducted a review from the perspective of exposure ecology, under four interfaces of subject-reality, object-reality, subject-virtual, and object-virtual. Further, we pointed out some gaps, such as the research section (scale) was single and threshold and virtual (and multi-sensory) research were insufficient. Finally, future research prospects were proposed to: (1) Construct a cross-temporal, multi-scale greenspace exposure measurement model, and quantify the causal effect between greenspace and health; (2) Construct a threshold model to analyze the subject and object thresholds of greenspace exposure for health promotion; and (3) Explore how greenspace characteristics, exposure methods and doses, and multi-sensory experiences would impact on health. This research can further deepen the understanding of the frontiers and deficiencies in related fields, as well as enrich the theoretical system of exposure ecology.

Key Words: exposure ecology; greenspace exposure; health effect; research progress

城市扩张与城市化的显著特征之一就是城市绿地数量不断减少、质量退化、空间分布不均匀且破碎化^[1-3],并伴随着热岛效应、大气污染、土壤污染、水污染、生物多样性丧失等一系列生态环境问题以及居民身心健康问题^[4-8]。大量研究表明,绿地作为城市自然生态系统的重要组成部分,不仅具有净化环境、调节小气候、减少噪音和空气污染、节约能源等生态系统服务功能^[9-10];居民暴露于绿地(即绿地暴露)也有助于减少心血管及呼吸道疾病的发病率及死亡率,促进体力活动、减少肥胖,降低压力,缓解抑郁症、焦虑症等,对人群生理和心理健康有积极作用^[11-12];还可以增进居民参与感和归属感,改善社会关系,促进社会健康^[13-14]。

总体说来,居民绿地暴露健康效应已得到广泛认可,并逐渐成为一个多学科交叉的新研究热点,日益受到来自生态学、地理学、环境流行病学、城乡规划和风景园林等各个学科研究人员的关注。目前,已有相关研究从不同角度对居民绿地暴露的生理、心理与社会健康效应进行了综述分析^[4, 10, 15-16],也提出了一些研究框架与可能关联路径^[14, 17-20]。然而,目前仍缺乏基于统一理论框架下的绿地暴露健康效益的系统性综述研究。值得提及的是,Yu 等^[21]近期提出了暴露生态学理论框架,构建了包括“现实-虚拟”(X 轴)两维度和“主体-客体”两视角(Y 轴)交叉的四界面研究范畴与框架体系,形成了系统理解“自然生态系统-生态暴露-健康效应”的耦合体系(图 1)。因此,本研究将在暴露生态学视角下对绿地暴露健康效益在不同范畴下的研究进展进行系统综述,以期提出领域内的研究不足与未来热点议题。

主体是指与自然生态系统接触的个体或群体,客体是指自然生态系统的客观空间格局;虚拟是通过虚拟现实、元宇宙与数字孪生等虚拟现实技术呈现的自然生态系统,而现实则是现实世界中存在的自然生态系统。以往所有相关研究都可以被这个坐标系覆盖。

1 国内外研究现状

1.1 “主体-现实”界面:绿地暴露健康效益及其作用机制

在“主体-现实”界面,已有大量研究证实居民(主体)暴露于城市绿地(现实)具有多重健康效益(包括生



图1 暴露生态学“四界面”^[21](主体-现实、客体-现实、主体-虚拟、客体-虚拟)

Fig.1 “Four interfaces” of Exposure Ecology (subject-reality, object-reality, subject-virtual, object-virtual)

理、心理和社会健康效益)^[9-10, 14]。相关实证研究基于不同的场所和群体,证实了位于学校、单位周围的绿地可以改善学生注意力无法集中问题、减少近视比例、提升员工幸福感^[22],且绿地暴露对新生儿、儿童和孕妇、以及低收入等特殊群体具有更为突出的健康影响^[23]。但也有部分研究证实了人群绿地暴露的负向健康效应。例如,植物的花粉传播可能导致过敏性疾病,植被和水体可能成为致病性微生物和蚊虫的温床,植被丰富的郁闭空间可能会增加城市犯罪率,以及因绿地维护不当而造成的人员损伤等^[24]。

与此同时,绿地暴露健康效应的作用机制一直是热门话题。其中,“土壤-空气-植物”界面的微生物直接影响暴露在绿地中的个人或群体^[21, 25-26]。研究指出接触绿色空间可以增加皮肤和鼻腔微生物的多样性,并改变人体微生物群的组成、调节免疫系统,因而对健康带来积极的影响^[27-28]。总体来看,国内外学者认为城市绿地促进居民健康的作用路径主要包括减少健康风险暴露(如降低空气污染、缓解城市热岛、缓冲噪声等),促进健康行为活动(如引导人们进行体力活动和社会交往),以及提高心理恢复能力(减压理论和注意力恢复理论)等三方面^[10, 29-31]。但是,近年来越来越多的学者开始关注人群绿地暴露的“剂量-反应”关系,即暴露水平(时间、频率、体验等)与健康效应或风险的定量关系。例如,Cox等^[32]发现,当居民参观花园的频率增加到每周4—5次时,对心理健康的益处就达到了最佳值(之后的作用有限);White等^[33]提出每周暴露于自然环境120 min能够有效促进居民健康和提升幸福感,但是超过该阈值其边际收益呈现下降趋势;Kondo等^[34]也发现,与30 min内趋势相比,绿地暴露10 min内的情绪变化更明显,这表明绿地暴露与情绪变化可能存在急性反应关系。

1.2 “客体-现实”界面:客观空间格局的测度及其健康效应

在“客体-现实”界面,相关研究从探讨个体或群体绿地暴露健康效应转化为对绿地客观空间格局(如组成、配置与空间格局等)的测度,并在此基础上探讨其健康效应。这一界面的研究又包括两个层面:(1)绿地暴露与具体生理及心理疾病的研究,具有显著的环境流行病学研究属性;(2)绿地最优空间格局与潜在居民健康效应的研究,具有显著的地理空间分析属性。在环境流行病学层面,大部分研究都证实一定程度上城市和社区内部绿地数量的增加和质量的提升可以有效改善居民健康状况,尤其是在降低高血压、呼吸系统和心血管疾病患病率、以及出生率和死亡率方面^[10, 35]。例如,Engemann等^[36]发现儿童青少年至成年期患精神障碍的风险与居住区是否有绿地密切相关,Slawsky等^[37]发现较高的社区绿地暴露与75岁以上老年人的痴呆

风险降低有关。

在第二层面,相关研究重点关注了诸如如何利用可达性和可获得性等各类指标来表征人群绿地暴露水平,并探索绿地暴露水平差异形成的原因^[38-40]。然而,用这两个指标来衡量人群绿地暴露水平是局限的,可能忽略个体对绿地实际可获得的机会与邻近度情况,造成大尺度范围内(如城市尺度)平均每位居民的绿地供应量很高,但实际在小尺度范围内(如社区尺度)出现绿地供应不足的现象。因此,Zhang 等^[41]提出了一种新的层级化的框架——可得性、可达性、可吸引力来评估绿地暴露的情况。斯坦福大学也开发了基于可得性、绿地质量、人口特征的城市绿地可达性模型^[42]。此外,越来越多的学者开始关注绿地暴露的公平性问题。例如,Chen 等^[43]在全球尺度上对南北方城市的绿地暴露差异进行了对比。近期,Yu 等^[44]进一步提出了绿地暴露不平等指数,通过可获得性、可达性、以及基尼指数来评估绿地暴露的不平等性。

1.3 “主体-虚拟”界面:虚拟绿地暴露的机遇与挑战

“主体-虚拟”界面的研究近年刚兴起,但也已取得一些研究成果。狭义的虚拟暴露主要指主体(人群)通过暴露于景观照片等虚拟空间来代替其实地体验^[45-46],广义的虚拟暴露主要指伴随着沉浸式虚拟环境等虚拟现实技术发展(Virtual Reality, VR)而兴起的研究。例如,Zhang 等^[47]的研究表明,使用 VR 技术沉浸于绿地环境中对个体的注意力疲劳和消极情绪有积极的恢复作用;White 等^[48]的研究表明,尽管与现实世界的自然接触是首选,但对于某些行动受限的人来说,使用虚拟自然景观可以作为有效的替代方案,在疼痛管理、康复治疗、减轻癌症患者压力等方面都具有显著作用;Hedblom 等^[49]通过多感官虚拟实验,发现人们暴露于虚拟公园可以显著减轻压力,并提出城市规划不仅应该关注视觉刺激还应考虑多感官协同作用(视觉、听觉、嗅觉)。从长远来看,VR 系统很可能不仅限于视觉和听觉的刺激,还会出现虚拟嗅觉显示器、以及通过超声波渲染出的体积触觉等技术革新^[48, 50]。Chandler 等^[51]甚至提出了“虚拟生态学”概念,并通过三维建模虚拟场景的制作让被试者有更好的在场感与沉浸感体验,提出未来可能的方向包括生态三维模型的开源库,以及历史景观和未来气候变化场景的可视化模拟。

然而,由于自然环境的复杂性和多样性,开发逼真的虚拟现实自然场景一直是一项具有挑战性的任务^[48],这一界面仍有诸多不确定性与科学问题值得探索。例如,Huang 等^[52]在研究不同类型的 VR 自然环境对人体减压的影响时,有部分受访者在实验后报告了“视力模糊”、“轻微恶心”、“VR 设置不如预期真实”等问题。因此,使用 VR 技术来替代传统疗法可能只适用于某些群体,需要仔细评估,并考虑用户的心理和身体承受能力^[10];再加上使用 VR 设备存在潜在过度使用和成瘾性风险^[48],虚拟绿地暴露所能带来的积极健康效益还有待进一步研究。

1.4 “客体-虚拟”界面:元宇宙引领下的虚拟绿地暴露

总体而言,“客体-虚拟”界面的研究还鲜有报道,相关研究也与“主体-虚拟”界面研究密切相关。然而,随着数字孪生、元宇宙等技术的发展,“客体-虚拟”界面相关研究将成为暴露生态学未来的重要前沿^[21]。根据虚拟现实技术发展情况,本界面研究也可以大致划分为两个层面——初级阶段与高级阶段:第一层面是增强现实、虚拟现实、混合现实等技术下的研究。例如,有研究通过虚拟现实技术(干预)手段(如改变不同的树木覆盖度、绿地组成与配置)来探索虚拟绿地暴露的健康效益^[49]。例如,利用 VR 技术,Gao 等^[47]探究了 6 种不同类型的城市蓝绿空间对测试者生理和心理的反应,发现半开放绿色空间对个体注意力疲劳和负面情绪具有最积极的作用,但是,脑电图生理指标显示测试者的生理指标在上述蓝绿空间按类型之间没有统计上的显著差异。Zhu 等^[53]探究了多种可见绿色指数(Visible Green Index, VGI)和植被结构的住宅绿地场景对生理健康(脑电波)的影响,结果表明最适合人脑放松场景的 VGI 为 60%—80%,并具有三层植被结构。最近,Liu 等^[54]使用 VR 技术评估沈阳 12 个绿地的恢复效益,发现具有高度自然性的开放绿地(包括树木、灌木及水体等自然元素)对健康具有更积极的影响。也可以看到,这些运用 VR 技术的研究普遍认识到不同虚拟绿地组成和配置对健康的影响,并且这种效应不是单纯的正负效应。第二层面高级阶段则是未来真正进入数字孪生与元宇宙时代,探索虚拟客观绿地空间格局对健康的影响的研究,但是目前还未有这一层面的研究。针对这

部分研究,Yu 等^[21]已经在暴露生态学理论下提出了“最佳暴露生态幅”理论推测。

2 问题与不足

2.1 单一时间与空间尺度导致结果异质性较高

在时间尺度上,目前大多数和绿地暴露有关的研究仍然为单一时相的横断面(静态)研究,即在较短时间内收集有关绿地格局、居民健康水平等信息。同时,大部分研究都讨论了这种横断面研究存在的缺陷^[40, 55],如难以检验因果关系及识别真正起作用的中介因素。例如,身体更健康的人以及收入更高的人或许更倾向于住在绿地附近即选择偏误。此外,不同研究的实验对象涵盖了来自不同年龄段和不同社会经济阶层群体,也是造成结果异质性较高、结论不一致的重要原因。因此,越来越多的学者开始提倡使用长时间的纵向研究设计、自然或准自然实验(比如在过去没有绿地的区域提供绿地并测量行为变化),以帮助更好地理解绿地暴露相关行为^[56]。然而,考虑到数据收集的实用性,横断面研究仍可能在一段时间内继续主导该领域的研究^[30]。

在空间尺度上,目前全球不同国家和地域内学者已开展了绿地暴露人群健康效应的广泛实证研究,涵盖了区域、城市、社区等不同空间尺度。然而,人群健康受到遗传、行为、社会等诸多因素的复杂影响,造成城市绿地与人群健康效应之间的相关性缺乏统一结论^[12, 57]。例如,Bixby 等^[58]研究显示,在城市尺度上 61% 和 17% 的绿地率在疾病死亡率方面差异微弱,但在邻里和家庭尺度绿地率则与健康效益呈正相关关系。此外,绿地暴露评估时的缓冲距离也存在尺度效应,其大小显著影响研究结果。例如,Helbich 等^[59]通过多个住宅地址的随机样本为中心,发现不同缓冲区大小(300 m、600 m 和 1000 m)下住宅区年度 NDVI 暴露量均存在显著差异;Browning 等^[60]的研究也表明,较大的缓冲区(1000—1999 m)比较小的缓冲区(<250 m)更能预测身体健康。

2.2 缺乏定量的“暴露剂量-健康反应”阈值研究

尽管目前绿地暴露健康效益研究已经开始从定性转向定量,即不仅探索绿地暴露与健康结果之间的关联与中介机制、而且更加注重其“剂量-反应”关系,但目前对绿地暴露健康效益阈值的研究仍存在不足^[54, 61]。Jiang 等^[62]构建了树木覆盖密度与人群压力恢复水平的倒 U 形“剂量-反应”曲线,并对男女差异进行对比;Barton 和 Mao 等^[56, 63]探讨户外绿色运动的最佳剂量;以及 Shanahan 等^[64]系统阐述“剂量-反应”模型对于提供健康指南并增强健康结果的重要性,并预测“剂量-反应”曲线可能的各种形式、以及影响模型的各种复杂要素等。但以上研究并未对人群的绿地暴露时间、频率及强度阈值进行系统研究。Yao 等^[61]首次提出了绿地暴露生理健康效益的阈值模型,并在该模型中引入了效率阈值和效益阈值概念与方法,并通过初步实验发现大学生人群绿地(林地)暴露在 4 min 内即可达到效率阈值,12 min 内即可达到效益阈值。效率阈值与效益阈值的提出为居民提出绿地暴露健康指导迈出了重要一步。

此外,目前大多数关于绿地暴露人群健康效应的研究主要基于静态和固定的地理单元(例如住宅小区、基于邮政编码的行政单元等)^[15, 65—66],而忽略了个人日常活动的流动性及其日常时空行为。由于环境对个体的影响程度通常是由个体活动的(动态)差异所决定,学者也逐渐意识到仅从静态角度分析会导致研究结果的不准确性^[67—68]。近年来,各类新技术快速发展(如智能手机及其位置服务、谷歌街景与深度学习技术、眼动仪等可穿戴便携式生理仪器),为相关研究从“静态”转向“动态”提供了技术支撑。已有部分研究将人群流动性纳入绿地暴露评估,以更好地量化跨时空尺度下人类与其不断变化的环境之间的关系^[69]。然而,尽管已有少量研究聚焦“动态”并证实了绿地暴露对健康的积极影响^[59, 66, 70],但这些研究并未将“阈值”这一概念应用到动态绿地暴露生理健康效益的研究中。此外,从现实-虚拟维度看,基于沉浸式虚拟环境的绿地暴露生理心理健康效益阈值是否存在?若阈值的确存在,那么暴露于现实绿地与计算机“虚拟化”后相同的绿地之间,其生理健康阈值是否存在差异?这些都是值得研究的话题。

2.3 虚拟绿地暴露健康效应及多感官视角仍不足

尽管有研究证实了暴露于虚拟绿地空间也可以改善人体心理及生理指标^[71],但该领域仍存在诸多不确

定性。一方面,通过虚拟绿地量化绿地暴露健康效益的研究,往往忽视了真实绿地暴露中所伴随的等中介因素(空气污染、交通噪声、体育锻炼和社交等)所产生的影响,造成基于虚拟绿地所估计的健康效应或行为影响具有不准确性^[72];另一方面,相关研究忽略了人们除视觉以外的其他感官要素如听觉、嗅觉、热舒适度以及人们与周围环境的互动等^[73]。例如,大多数探讨虚拟环境中不同类型的绿地以及不同等级的绿地水平对人群的压力恢复潜力,仅设置了不同的 VR 图片进行随机对照实验^[52, 73-74],而 Chandler 等^[51]的研究发现,83% 的受访者希望在虚拟绿地暴露时与场景互动,而不仅仅只是观察和聆听。因此,利用虚拟环境观察到的健康效应改善或许并不能完全反映真实绿地暴露对健康的影响,在虚拟绿地暴露时多感官(视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉)共同作用下对人体健康的影响值得进一步探讨^[21]。

此外,目前尚缺乏相关比较不同虚拟景观类型中暴露时间长短对人体健康的相对影响的研究,也缺少探讨虚拟绿地空间组成与配置(如乔灌草比与蓝绿比等)对人体健康效益阈值的作用机制。因此,研究重点应关注是否有可能通过最优的虚拟绿地空间格局达到最佳的健康效果。虚拟绿地暴露可以避免真实绿地暴露的一些负面作用,如花粉过敏、蚊虫、有害微生物等情况,同时可以有效控制相关变量,这是未来需加强虚拟绿地暴露健康效应与多感官视角研究的重要原因。

3 研究展望

3.1 绿地暴露测度的长时间序列与多尺度研究

当前绿地暴露对人群健康效益相关结论在不同空间尺度和时间维度上常存在不一致性^[17-18]。因此,未来可考虑在小规模自然实验和大规模横断面研究基础上,开展随机、可控的实验设计,并在全国、区域、城市、社区、个体尺度差异上跟踪验证绿地暴露的长期健康效应。具体说来,尽管越来越多的研究表明绿地暴露可以在短期内改善生理与心理健康,但目前仍未明晰的是,绿地暴露活动结束后情绪改善会持续多长时间,以及重复接触后是否会产生累计效应?因此,未来研究应对人群绿地暴露后的生理心理数据进行长期纵向监测,从而一定程度上突破横断面研究及短期因果实验的限制。目前来看,借用手机信令大数据、GPS、可穿戴电子设备等追踪器来收集长时间段的人群绿地暴露的详细数据,从而基于人群活动轨迹进行动态实验研究是该领域的必然趋势。除此之外,由于绿地中的树木及其他植被会随着季节而变化,相关研究也证实了人群的绿地暴露具有季节性动态,且存在显著的纬度梯度差异^[12],因此未来需要进行季节性比较实验以解释相关研究中未涉及的动态联系。与此同时,绿地暴露对特殊人群(如孕妇、儿童、老人、军人等)的作用机制也应被更多关注。

3.2 构建阈值模型,量化主体阈值与客体阈值

目前,健康科学领域通常使用“剂量-反应”模型来帮助制定个人暴露于自然的最低剂量建议。尽管已经有阈值模型开始关注这个方面^[61],但由于城市绿地对居民的健康作用因研究的时空尺度、绿地的空间特征、建成环境特征、个体特征、社会和文化因素的不同而改变,因此该模型需要尽可能多的考虑上述各种中介因素和混杂变量的影响^[4, 14, 17]。通过构建剂量-反应模型,可以明确人群绿地暴露在不同时空范围内对健康效益的阈值。

结合最新研究结果^[61],其中,在主体阈值方面,随着可达性、可获得性等相关指标的不断完善和发展,需要更多考虑居民的绿地暴露频率、时长及强度等是如何产生影响的,以及通过静态暴露和绿色运动的对比,探讨对人体产生健康效益所需的最佳剂量是否存在差异。在客体阈值的研究中,不仅应关注绿地的水平特征(如绿地面积,绿地与水体比例模式),也应关注其垂直结构(如乔灌草格局、绿视率、垂直可见度、冠层覆盖度等)。此外,未来研究也可关注绿色空间、蓝色空间、城市空间这三个不同要素的组合是如何对人群的健康效益发挥作用的,其组合及比例是否存在一个发挥最大效益的阈值。同时,绿视率(Green View Index, GVI)作为立面空间绿化评价指标,被认为可以从个体与环境的交互视角更加真实地反映居民对绿色环境的感知状况,因此未来研究可以进一步细化。基于自然解决方案研究所出了 3-30-300 的客体阈值来创建更绿色、更健

康的城市 (<https://nbsi.eu/the-3-30-300-rule/>)。要求每个人应该能从家里至少看到 3 棵树,生活在至少有 30% 的树冠(或植被)覆盖的社区,并且离最近的可以进行多种娱乐活动的绿地不超过 300 m。但是,这种客体阈值的界定方式过于主观化、经验化和范化,未来研究应进一步探索究竟什么样的植被形态、高度、结构、绿视率等特征组合可以带来最佳的健康促进效益,并且确定这些客体阈值是否会受到时空、过程和尺度差异的影响。另外,主体阈值和客体阈值可能受到个体差异的影响,例如研究表明,受试者对城市和自然景观产生的心理健康反应取决于个体的自然联结度(图 2)。

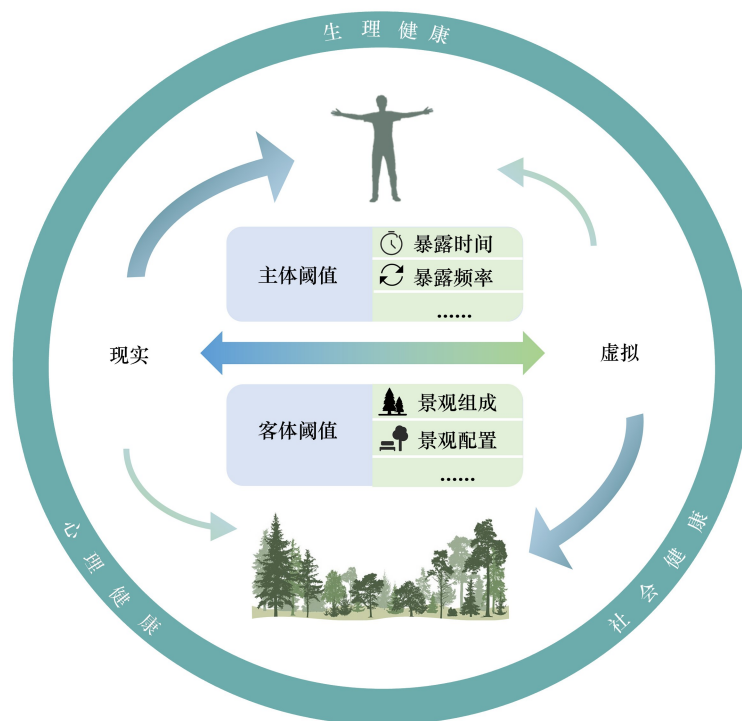


图 2 现实-虚拟视角下的主体-客体阈值未来研究框架图(改编自^[61])

Fig.2 Framework diagram for future research on the subject-object threshold from a reality-virtual perspective(revised from^[61])

3.3 探索多种绿地自身特征及暴露方式的影响

由于人群暴露于不同的现实或者虚拟的绿地类型(如乔木与灌木、草地等)会产生不同的健康效益,因此明确特定类型绿色空间的哪些组成或特征构成了人群健康最重要的驱动因素非常关键。比如,某些树种是否比其他树种更有益?某区域内树种的多样性是否比种植单一树种对于人体健康更加有益?其中,尽管城市绿地质量的重要性已被关注到,但具体用哪些指标来评估其质量还未达成共识^[75],不同研究中所涉及到的相关指标(如设施的便利性、维护情况、安全性、步道密度等)还需进一步被确认。与此同时,绿地的生物多样性水平对人群健康的促进作用尚不明确。在数据来源方面,虽然 NDVI(植被归一化指数)数据可以免费获得且覆盖范围广,但其应用在绿地暴露与健康领域时仍有较大的改进空间,比如缺乏绿地类型、质量、结构、季节差异和生物多样性之间的区别。此外,长时间序列遥感影像,街景图像和激光雷达等数据源和测度手段可以提供上述信息,丰富绿地暴露测度指标,从而帮助研究者识别看更多可能起作用的特定因素。这些数据的可获取性日益增强,未来应在研究中予以更多使用^[76-77]。

在人群暴露方式方面,绿地暴露的效果会因其与人群自然相互作用的类型、感官输入的形式(如视觉、嗅觉、听觉、触觉)、主体的状态(如许多心理的研究表明,心理状态是绿地暴露对于心理健康结果的重要影响因素)而不同。例如,人群进入绿地的不同方式(如步行、公共交通、骑自行车、开车等)是否会产生不同的影响?目前大多数研究默认将视觉作为自然接触的主要方式,但视觉是如何与听觉、触觉、嗅觉等产生交互作用从而

对人的生理心理状况产生影响?此外,以上研究方向均需充分考虑虚拟绿地暴露情形,并探索现实和虚拟维度的相互耦合、相互论证并共同指导健康城市规划的可能性。

4 结论

绿地暴露对健康有积极效应,提供了比处理疾病这种“下游健康”后果更有效的(上游)预防措施,因此绿地暴露及其多重健康效应已经成为耦合城市生态、环境流行病学、地理、规划与景观等学科的热点与前沿议题。暴露生态学理论体系可以作为理解(城市)自然生态系统、生态暴露和健康之间的关系“上游健康”的统一框架。因此,本文结合暴露生态学提出的“四象限”研究范畴体系,全面综合归纳了相关研究进展、不足与展望。具体而言,“主体-现实”界面研究聚焦绿地暴露健康效益及其作用机制;“客体-现实”界面聚焦客观空间格局测度及其健康效应;“主体-虚拟”界面虚拟绿地暴露存在机遇与挑战;“客体-虚拟”界面面向未来元宇宙引领下虚拟绿地暴露。研究指出了以下三方面不足:横断面与单一尺度导致研究结果异质性较高;缺乏定量的“暴露剂量-健康反应”阈值研究;虚拟绿地暴露健康效应及多感官视角仍不足。最后提出了未来研究展望:(1)构建跨时空、多尺度的绿地暴露测度模型,并剖析绿地健康之间的因果效应;(2)构建阈值模型,分析健康促进的绿地暴露主体阈值与客体阈值;(3)探索绿地特征、暴露方式和剂量、多感体验对健康的影响。本文研究成果可以进一步加深对相关领域前沿与不足的认识,进一步促进暴露生态学理论体系的丰富和完善。

参考文献(References):

- [1] 陈利顶,孙然好,刘海莲.城市景观格局演变的生态环境效应研究进展.生态学报,2013,33(4):1042-1050.
- [2] Forman, R.T., Urban ecology: science of cities. Cambridge University Press, 2014.
- [3] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, Wang X R, Vejre H. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995-2015) of Southern China. The Science of the Total Environment, 2019, 674: 242-254.
- [4] 齐涛,曾志伟,姚霞,耿红凯,余兆武,王兰,林美霞,张浚茂,郑毅诚.城市人群绿地暴露及其健康效应研究综述.生态学报,2023,43(23):10013-10021.
- [5] Wu W B, Yu Z W, Ma J, Zhao B. Quantifying the influence of 2D and 3D urban morphology on the thermal environment across climatic zones. Landscape and Urban Planning, 2022, 226: 104499.
- [6] Wang J, Chen Y, Liao W L, He G H, Tett S F B, Yan Z W, Zhai P M, Feng J M, Ma W J, Huang C R, Hu Y M. Anthropogenic emissions and urbanization increase risk of compound hot extremes in cities. Nature Climate Change, 2021, 11: 1084-1089.
- [7] Yu Z W, Yao Y W, Yang G Y, Wang X R, Vejre H. Strong contribution of rapid urbanization and urban agglomeration development to regional thermal environment dynamics and evolution. Forest Ecology and Management, 2019, 446: 214-225.
- [8] Chapman S, Watson J E M, Salazar A, Thatcher M, McAlpine C A. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. Landscape Ecology, 2017, 32(10): 1921-1935.
- [9] Akpınar A, Barbosa-Leiker C, Brooks K R. Does green space matter? Exploring relationships between green space type and health indicators. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 20: 407-418.
- [10] Browning M H E M, Rigolon A, McAnirlin O, Yoon H. Where greenspace matters most: a systematic review of urbanicity, greenspace, and physical health. Landscape and Urban Planning, 2022, 217: 104233.
- [11] Bowler D E, Buyung-Ali L M, Knight T M, Pullin A S. A systematic review of evidence for the added benefits to health of exposure to natural environments. BMC Public Health, 2010, 10(1): 456.
- [12] Chen B, Tu Y, Wu S B, Song Y M, Jin Y F, Webster C, Xu B, Gong P. Beyond green environments: multi-scale difference in human exposure to greenspace in China. Environment International, 2022, 166: 107348.
- [13] Konijnendijk C C. Evidence-based guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: introducing the 3-30-300 rule. Journal of Forestry Research, 2023, 34(3): 821-830.
- [14] 张金光,余兆武.城市绿地促进人群健康的作用途径:理论框架与实践启示.景观设计学,2020,8(4):104-113.
- [15] Yang B Y, Zhao T Y, Hu L X, Browning M H E M, Heinrich J, Dharmage S C, Jalaludin B, Knibbs L D, Liu X X, Luo Y N, James P, Li S S, Huang W Z, Chen G B, Zeng X W, Hu L W, Yu Y J, Dong G H. Greenspace and human health: an umbrella review. The Innovation, 2021, 2(4): 100164.
- [16] Zare Sakhvidi M J, Knobel P, Bauwelinck M, de Keijzer C, Boll L M, Spano G, Ubalde-Lopez M, Sanesi G, Mehrparvar A H, Jacquemin B,

- Dadvand P. Greenspace exposure and children behavior: a systematic review. *The Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153608.
- [17] Zhang J G, Yu Z W, Zhao B, Sun R H, Vejre H. Links between green space and public health: a bibliometric review of global research trends and future prospects from 1901 to 2019. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(6): 063001.
- [18] Marselle M R, Hartig T, Cox D T C, de Bell S, Knapp S, Lindley S, Triguero-Mas M, Böhning-Gaese K, Braubach M, Cook P A, de Vries S, Heintz-Buschart A, Hofmann M, Irvine K N, Kabisch N, Kolek F, Kraemer R, Markevych I, Martens D, Müller R, Nieuwenhuijsen M, Potts J M, Stadler J, Walton S, Warber S L, Bonn A. Pathways linking biodiversity to human health: a conceptual framework. *Environment International*, 2021, 150: 106420.
- [19] Markevych I, Schoierer J, Hartig T, Chudnovsky A, Hystad P, Dzhambov A M, de Vries S, Triguero-Mas M, Brauer M, Nieuwenhuijsen M J, Lupp G, Richardson E A, Astell-Burt T, Dimitrova D, Feng X Q, Sadeh M, Standl M, Heinrich J, Fuertes E. Exploring pathways linking greenspace to health: theoretical and methodological guidance. *Environmental Research*, 2017, 158: 301-317.
- [20] Zhang L Q, Tan P Y, Diehl J A. A conceptual framework for studying urban green spaces effects on health. *Journal of Urban Ecology*, 2017, 3(1): jux015.
- [21] Yu Z W, Yang G Y, Lin T, Zhao B, Xu Y Y, Yao X H, Ma W Y, Vejre H, Jiang B. Exposure ecology drives a unified understanding of the nexus of (urban) natural ecosystem, ecological exposure, and health. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024, 10: Article 0165.
- [22] 姜斌. 城市自然景观与市民心理健康: 关键议题. *风景园林*, 2020, 27(9): 7.
- [23] 李畅. 环境流行病学视角下城市绿地空间的健康效应研究. *风景园林*, 2021, 28(8): 6.
- [24] Fong K C, Hart J E, James P. A review of epidemiologic studies on greenness and health: updated literature through 2017. *Current Environmental Health Reports*, 2018, 5(1): 77-87.
- [25] Trivedi P, Leach J E, Tringe S G, Sa T M, Singh B K. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18(11): 607-621.
- [26] Flies E J, Clarke L J, Brook B W, Jones P. Urbanisation reduces the abundance and diversity of airborne microbes - but what does that mean for our health? A systematic review. *The Science of the Total Environment*, 2020, 738: 140337.
- [27] Mills J G, Weinstein P, Gellie N J C, Weyrich L S, Lowe A J, Breed M F. Urban habitat restoration provides a human health benefit through microbiome rewilding: the Microbiome Rewilding Hypothesis. *Restoration Ecology*, 2017, 25(6): 866-872.
- [28] Roslund M I, Puhakka R, Grönroos M, Nurminen N, Oikarinen S, Gazali A M, Cineke O, Kramná L, Siter N, Vari H K, Soininen L, Parajuli A, Rajaniemi J, Kinnunen T, Laitinen O H, Hyöty H, Sinkkonen A, research group A D E L E. Biodiversity intervention enhances immune regulation and health-associated commensal microbiota among daycare children. *Science Advances*, 2020, 6(42): eaba2578.
- [29] James P, Banay R F, Hart J E, Laden F. A review of the health benefits of greenness. *Current Epidemiology Reports*, 2015, 2(2): 131-142.
- [30] Lachowycz K, Jones A P. Towards a better understanding of the relationship between greenspace and health: development of a theoretical framework. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 118: 62-69.
- [31] Kaplan, R. and S. Kaplan, *The experience of nature: A psychological perspective*. Cambridge University Press, 1989.
- [32] Cox D T C, Shanahan D F, Hudson H L, Fuller R A, Gaston K J. The impact of urbanisation on nature dose and the implications for human health. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 179: 72-80.
- [33] White M P., Alcock I, Grellier J, Wheeler B W., Hartig T, Warber S L., Bone A, Depledge M H., Fleming L E., Spending at least 120 minutes a week in nature is associated with good health and wellbeing. *Scientific reports*, 2019, 9(1): 1-11.
- [34] Kondo M C., Triguero-Mas M, Donaire-Gonzalez D, Seto E, Valentín A, Hurst G, Carrasco-Turigas G, Masterson D, Ambrós A, Ellis N, Swart W, Davis N, Maas J, Jerrett M, Gidlow C J., Nieuwenhuijsen M J.. Momentary mood response to natural outdoor environments in four European cities. *Environment International*, 2020, 134: 105237.
- [35] Yang B Y, Markevych I, Bloom M S, Heinrich J, Guo Y, Morawska L, Dharmage S C, Knibbs L D, Jalaludin B, Jalava P, Zeng X W, Hu L W, Liu K K, Dong G H. Community greenness, blood pressure, and hypertension in urban dwellers: The 33 Communities Chinese Health Study. *Environment International*, 2019, 126: 727-734.
- [36] Engemann K, Pedersen C B, Arge L, Tsirogianis C, Mortensen P B, Svenning J-C. Residential green space in childhood is associated with lower risk of psychiatric disorders from adolescence into adulthood. *Proc Natl Acad Sci*, 2019, 116(11): 5188-5193.
- [37] Slawsky E D, Hajat A, Rhew I C, Russette H, Semmens E O, Kaufman J D, Leary C S, Fitzpatrick A L. Neighborhood greenspace exposure as a protective factor in dementia risk among US adults 75 years or older: a cohort study. *Environmental Health*, 2022, 21(1): 1-10.
- [38] Ekkel E D, de Vries S. Nearby green space and human health: Evaluating accessibility metrics. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 157: 214-220.
- [39] Rigolon A. A complex landscape of inequity in access to urban parks: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 153: 160-169.
- [40] Crouse D L, Pinault L, Christidis T, Lavigne E, Thomson E M, Villeneuve P J. Residential greenness and indicators of stress and mental well-

- being in a Canadian national-level survey. *Environmental Research*, 2021, 192: 110267.
- [41] Zhang J G, Yu Z W, Cheng Y Y, Sha X H, Zhang H Y. A novel hierarchical framework to evaluate residential exposure to green spaces. *Landscape Ecology*, 2022, 37(3): 895-911.
- [42] Liu H X, Hamel P, Tardieu L, Remme R P, Han B L, Ren H. A geospatial model of nature-based recreation for urban planning: case study of Paris, France. *Land Use Policy*, 2022, 117: 106107.
- [43] Chen B, Wu S B, Song Y M, Webster C, Xu B, Gong P. Contrasting inequality in human exposure to greenspace between cities of Global North and Global South. *Nature Communications*, 2022, 13: 4636.
- [44] Yu Z W, Ma W Y, Hu S Y, Yao X H, Yang G Y, Yu Z W, Jiang B. A simple but actionable metric for assessing inequity in resident greenspace exposure. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110423.
- [45] Ode Å, Miller D. Analysing the relationship between indicators of landscape complexity and preference. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2011, 38(1): 24-40.
- [46] Xu M, Luo T, Wang Z. Urbanization diverges residents' landscape preferences but towards a more natural landscape: case to complement landsenses ecology from the lens of landscape perception. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2020, 27(3): 250-260.
- [47] Gao T, Zhang T, Zhu L, Gao Y N, Qiu L. Exploring psychophysiological restoration and individual preference in the different environments based on virtual reality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(17): 3102.
- [48] White M P, Yeo N L, Vassiljev P, Lundstedt R, Wallergård M, Albin M, Lohmus M. A prescription for "nature" - the potential of using virtual nature in therapeutics. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 2018, 14: 3001-3013.
- [49] Hedblom M, Gunnarsson B, Irvani B, Knez I, Schaefer M, Thorsson P, Lundström J N. Reduction of physiological stress by urban green space in a multisensory virtual experiment. *Scientific Reports*, 2019, 9: 10113.
- [50] 张凤军, 戴国忠, 彭晓兰. 虚拟现实的人机交互综述. *中国科学:信息科学*, 2016, 46(12): 1711-1736.
- [51] Chandler T, Richards A E, Jenny B, Dickson F, Huang J W, Klippel A, Neylan M, Wang F, Prober S M. Immersive landscapes: modelling ecosystem reference conditions in virtual reality. *Landscape Ecology*, 2022, 37(5): 1293-1309.
- [52] Huang Q Y, Yang M Y, Jane H A, Li S H, Bauer N. Trees, grass, or concrete? The effects of different types of environments on stress reduction. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 193: 103654.
- [53] Zhu H Z, Yang F, Bao Z Y, Nan X G. A study on the impact of Visible Green Index and vegetation structures on brain wave change in residential landscape. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 64: 127299.
- [54] Liu L H, Qu H Y, Ma Y M, Wang K, Qu H X. Restorative benefits of urban green space: physiological, psychological restoration and eye movement analysis. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113930.
- [55] van den Berg M, van Poppel M, Smith G, Triguero-Mas M, Andrusaityte S, van Kamp I, van Mechelen W, Gidlow C, Gražulevičienė R, Nieuwenhuijsen M J, Kruize H, Maas J. Does time spent on visits to green space mediate the associations between the level of residential greenness and mental health? *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 25: 94-102.
- [56] Barton J, Pretty J. What is the best dose of nature and green exercise for improving mental health? A multi-study analysis. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(10): 3947-3955.
- [57] 杨春, 杨春, 谭少华, 高银宝, 董明娟, 陈璐瑶. 基于荟萃分析的城市绿地居民健康效应研究. *城市规划*, 2023, 06: 1-21.
- [58] Bixby H, Hodgson S, Fortunato L, Hansell A, Fecht D. Associations between green space and health in English cities: an ecological, cross-sectional study. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0119495.
- [59] Helbich M. Spatiotemporal contextual uncertainties in green space exposure measures: exploring a time series of the normalized difference vegetation indices. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(5): 852.
- [60] Browning M, Lee K. Within what distance does "greenness" best predict physical health? A systematic review of articles with GIS buffer analyses across the lifespan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, 14(7): 675.
- [61] Yao X H, Yu Z W, Ma W Y, Xiong J Q, Yang G Y. Quantifying threshold effects of physiological health benefits in greenspace exposure. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 241: 104917.
- [62] Jiang B, Chang C Y, Sullivan W C. A dose of nature: tree cover, stress reduction, and gender differences. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 26-36.
- [63] Mao Y H, He Y C, Xia T Y, Xu H R, Zhou S, Zhang J G. Examining the dose - response relationship between outdoor jogging and physical health of youths: a long-term experimental study in campus green space. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(9): 5648.
- [64] Shanahan D F, Fuller R A, Bush R, Lin B B, Gaston K J. The health benefits of urban nature: how much do we need? *BioScience*, 2015, 65

- (5): 476-485.
- [65] Bratman G N, Anderson C B, Berman M G, Cochran B, de Vries S, Flanders J, Folke C, Frumkin H, Gross J J, Hartig T, Kahn P H Jr, Kuo M, Lawler J J, Levin P S, Lindahl T, Meyer-Lindenberg A, Mitchell R, Ouyang Z Y, Roe J, Scarlett L, Smith J R, van den Bosch M, Wheeler B W, White M P, Zheng H, Daily G C. Nature and mental health: an ecosystem service perspective. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaax0903.
- [66] Wang R Y, Helbich M, Yao Y, Zhang J B, Liu P H, Yuan Y, Liu Y. Urban greenery and mental wellbeing in adults: cross-sectional mediation analyses on multiple pathways across different greenery measures. *Environmental Research*, 2019, 176: 108535.
- [67] Wang R Y, Feng Z Q, Pearce J, Zhou S H, Zhang L, Liu Y. Dynamic greenspace exposure and residents' mental health in Guangzhou, China: from over-head to eye-level perspective, from quantity to quality. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 215: 104230.
- [68] Zhang L, Zhou S H, Kwan M P, Chen F, Lin R P. Impacts of individual daily greenspace exposure on health based on individual activity space and structural equation modeling. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(10): 2323.
- [69] Song Y M, Huang B, Cai J X, Chen B. Dynamic assessments of population exposure to urban greenspace using multi-source big data. *The Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1315-1325.
- [70] Vries S, Nieuwenhuizen W, Farjon H, Hinsberg A, Dirx J. In which natural environments are people happiest? Large-scale experience sampling in the Netherlands. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 205: 103972.
- [71] 张丽娜, 陈仁杰, 孟夏, 阚海东. 绿地空间暴露与人群健康效应的研究进展. *环境与职业医学*, 2021, 38(2): 8.
- [72] Klompaker J O, Janssen N A H, Bloemsma L D, Gehring U, Wijga A H, van den Brink C, Lebret E, Brunekreef B, Hoek G. Associations of combined exposures to surrounding green, air pollution, and road traffic noise with cardiometabolic diseases. *Environmental Health Perspectives*, 2019, 127(8): 087003..
- [73] Yin J, Yuan J, Arfaei N, Catalano P J, Allen J G, Spengler J D. Effects of biophilic indoor environment on stress and anxiety recovery: a between-subjects experiment in virtual reality. *Environment International*, 2020, 136: 105427.
- [74] Sun Y, Li F, He T, Meng Y H, Yin J, Yim I S, Xu L Y, Wu J. Physiological and affective responses to green space virtual reality among pregnant women. *Environmental Research*, 2023, 216(Pt 1): 114499.
- [75] Fan P L, Xu L H, Yue W Z, Chen J Q. Accessibility of public urban green space in an urban periphery: the case of Shanghai. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 165: 177-192.
- [76] Giannico V, Stafoggia M, Spano G, Elia M, Dadvand P, Sanesi G. Characterizing green and gray space exposure for epidemiological studies: moving from 2D to 3D indicators. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 72: 127567.
- [77] Ma Q, Lin J, Ju Y, Li W K, Liang L, Guo Q H. Individual structure mapping over six million trees for New York City USA. *Scientific Data*, 2023, 10: 102.