

DOI: 10.20103/j.stxb.202403310689

刘航, 马烨清, 朱争鸣. 健康视角下城市密度与绿地空间暴露关系的脉络及展望. 生态学报, 2024, 44(24): 11096-11108.

Liu H, Ma Y Q, Zhu Z M. The relationship and prospects between urban density and green space exposure from a health perspective. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11096-11108.

健康视角下城市密度与绿地空间暴露关系的脉络及展望

刘 航¹, 马烨清¹, 朱争鸣^{2,*}

¹ 浙江工商大学旅游与城乡规划学院, 杭州 310018

² 浙江建设职业技术学院, 杭州 311231

摘要: 随着健康议题在国家、社会及个体层面的日益凸显, 空间要素对健康的影响机制成为跨学科研究焦点。探究城市密度、绿地空间暴露与健康之间的深层联系, 不仅关乎个人身心健康、社会健康的提升, 更是整合、协调空间要素的关键所在。研究旨在探讨城市密度、绿地空间暴露、健康三者之间的关系, 揭示这些因素对城市现代化进程的意义。梳理归纳 (1) 绿地空间暴露的发展、量化评估方法以及城市密度的研究历程、关键研究成果和突现热点; (2) 城市密度不同研究阶段与健康的交互关系, 并从动态与静态两个层面, 系统地梳理了绿地空间暴露与健康的相互作用机制; (3) 高密度城市环境中绿地空间暴露的主被动关系状态、机制与未来发展方向, 揭示了城市绿地空间之间的“竞合关系”。强调了在高密度城市规划和空间治理中充分考虑绿地空间的整体性、重要性, 以促进居民的整体福祉和社会的可持续发展, 以期构建更加宜居、健康的城市环境提供科学依据。

关键词: 城市密度; 高密度城市; 绿地空间暴露; 健康

The relationship and prospects between urban density and green space exposure from a health perspective

LIU Hang¹, MA Yeqing¹, ZHU Zhengming^{2,*}

¹ School of Tourism and Urban-Rural Planning, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

² Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China

Abstract: With the increasing prominence of health issues at the national, social, and individual levels, the impact mechanism of spatial factors on health has become a focus of interdisciplinary research. Exploring the deep connection between urban density, green space exposure, and health is not only related to the improvement of individual physical and mental health, social health, but also the key to integrating and coordinating spatial factors. This study aims to explore the relationship between urban density, green space exposure, and health, and to explore the significance of these factors in the process of urban modernization. It is summarized as follows: (1) The development of green space exposure, quantitative assessment methods, and the research history, key research results, and emergent hotspots of urban density are summarized; (2) The interaction relationship between different research stages of urban density and health, and the interaction mechanism between green space exposure and health are systematically sorted out from both dynamic and static perspectives; (3) The active and passive relationship, mechanism, and future development direction of green space exposure in high-density urban environments, revealing the “competing relationship” between urban green spaces. This study emphasizes the importance of the holistic nature of green space in high-density urban planning and spatial governance, which can contribute to the overall well-being of the residents and the sustainable development of the society, hoping to

基金项目: 杭州市哲学社会科学规划课题成果 (M24JC002); 浙江省教育厅科研项目 (Y202353340); 浙江工商大学研究生科研创新基金项目 (23020060004)

收稿日期: 2024-03-31; **网络出版日期:** 2024-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 001487@zjjs.edu.cn

provide a scientific basis for the construction of a more livable and healthy urban environment.

Key Words: urban density; high density cities; green space exposure; health

绿地空间暴露与健康存在高度关联,已经成为社会广泛共识^[1-3]。随着我国生态文明建设的深入推进,绿地空间作为城市生态系统的重要组成部分和公共开放空间的重要构成,提供了广泛的生态系统服务和健康效益。以暴露为切入点,将绿地资源的考量从数量层面提升至兼顾人本主义视角的空间问题,既是现实需求,也是时代变迁的必然趋势。

在城市存量规划背景下,传统的“地均性”规划设计范式已难以满足居民、社会、国家对公共开放绿地空间的需求^[4],寻求空间层面的环境公平正义成为现实需求与时代要求。然而,历史经验已经证实,一味地“摊大饼”式扩张对于城市的可持续发展与建设并无裨益。因此,自 20 世纪 80 年代以来,以新城市主义为基础的“精明增长”和“紧凑城市”等发展理论在世界范围内迅速扎根^[5]。当前,高密度城市的发展模式已逐渐成为我国乃至世界很多发展中国家城市的发展趋势亦或是现状。从历史进程的角度,深入探讨这一趋势与绿地空间暴露之间的相互关系显得尤为必要。为此,亟需构建一个全面且系统的 ESCG 体系,从环境、社会、文化与治理四个维度施力,推动中国城市与区域治理精准化施策,共同探索美好人类未来社会的底层逻辑^[6]。

基于此,本研究将聚焦“城市密度”等 20 世纪以来的突现热点研究方向的演进,构建“城市密度-健康-绿地空间暴露”的研究框架,梳理三者之间的相互关系,厘清高密度城市对主被动绿地空间暴露的作用机制,揭示高密度城市在空间要素配置上面临的关键问题,提出未来研究展望,力求促进居民的整体福祉和社会的可持续发展,以期构建更加宜居、健康的城市环境提供科学依据。

1 绿地空间暴露

“暴露”一词发端于 20 世纪中叶医学领域,切口、缝口手术中涉及的空气暴露、细菌暴露概念。从 20 世纪 80 年代至今,由于工作环境特殊性,医护人员作为“职业暴露”主要群体,逐渐引发了国内外学者的广泛关注。21 世纪初,职业安全领域开始运用量化评估与安全防护措施,标志着环境暴露研究思想的初步形成^[2]。而后“暴露科学”^[7]、“暴露组”^[8]等相关概念也随之应运而生,用于概括暴露关系的深刻内涵与复杂关系。随着环境问题的日益凸显,环境健康科学领域的暴露概念得到了广泛的研究和关注,其应用范围已扩展至交通运输^[9]、城市地理学^[10]、城市规划^[11]、灾害管理等诸多领域。“环境暴露科学”作为环境健康科学的核心组成部分^[12],是保障公共卫生的重要基石,它研究的是人与自然生态环境、社会活动环境之间的交互过程,以及这些交互过程对人体身心健康的影响和背后的机制。其核心目标在于尽可能规避人体与有害物质(如环境污染物)的接触,如大气污染^[13],土壤污染^[14],甚至气候变化^[15]等。

绿地空间作为城市公共开放空间的重要构成,评估城市生态环境建设的核心要素,在恢复认知能力、减少慢性疾病等方面已获得社会广泛认可,因此,研究绿地空间暴露关系与机制对厘清健康效益发生路径具有重要意义。绿地空间暴露的研究中,主要探讨的是人与绿地系统之间相互接触与影响的关系^[16],以期通过科学的方法和手段,优化绿地空间布局和设计,提升人们与绿地的互动体验,从而进一步提升居民幸福感和满意度。

根据现有国内外研究,绿地空间暴露的研究主要基于公平性视角^[17]、空间感知^[18]以及荟萃分析^[3,19]等,从人本和空间两个维度着手展开研究。人本维度研究绿地空间暴露与生理健康^[1]、心理健康^[20]及社会健康^[21]的关联度。空间维度,研究者们运用多样化的数据与方法,量化社区邻里尺度^[11]、城市尺度^[22]至国家尺度^[23]绿地空间的可达性、可见性、可用性等角度展开调查分析与研究,其中最为常见的是居民社区与城市公园的可达性、可见性研究。在量化手段上,研究者们通常采用构建缓冲区、(高斯)两步移动搜寻法等手段来计算绿地空间的可达性;通过计算绿地百分比、街景图像绿色占比^[24]等方法来评估其可视性;并利用绿地

环境面积、品质、数量等指标来量化其可用性。此外,借助洛伦茨曲线、基尼系数^[25-27]或帕尔马比值^[28]等经济学概念,探究绿地空间暴露的公平性。

2 城市密度

自“城市”发源,便与物质资料的集聚息息相关。时至今日,伴随城乡二元结构的形成,城市成为人口、资源、技术与信息等要素高度汇聚之地^[29]。城市密度,即反映城市形态与结构的量化指标,既表明上述要素集聚程度,又体现城市开发强度。从概念上看,城市密度是一个用来描述城市空间形态和人口集聚程度的定量指标。它的定义存在广义、狭义两个层面,狭义城市密度指生活在城市范围内的人口集聚的程度,是单位面积内的人口数,用以衡量一个国家或地区的发展水平,广义的城市密度,还包括城市交通密度、城市建筑密度、城市就业密度、城市资本密度、城市建筑密度等指标。密度的高低是相对而言的,当空间或人口要素超出城市承载能力时,常借助中心性、道路可达性、土地利用混合度、紧凑度等指标进行评估。

利用知网与 web of science 两大数据库,检索城市密度“urban density”主题的相关文献发文情况,得到知网中文文献 841 篇(1984—2024),web of science 文献 44418 篇(1929—2024)。这一数据对比显示,我国对城市密度的研究相较于世界范围而言,起步晚了约半个世纪。为确保对总体研究现状的准确分析,避免 2024 年文献数量较少可能带来的偏差,将文献时间范围调整至截止至 2023 年。基于这一调整,重点关注了 1987—2023 年期间的文献数据,并绘制知网与 web of science“城市密度”主题发文量折线图(图 1)。通过折线图分析,可以清晰地观察到我国与世界在城市密度研究领域的趋势变化。总体来看,国内外对城市密度的研究均呈现出上升趋势。然而,在具体的发文量变化上,两者呈现出不同的特点。我国城市密度主题的文章发文量虽然总体上升,但波动性较为显著,特别是在 2013—2020 年间达到了一个峰值,近年来略有下降。相比之下,国际上对城市密度的研究则呈现出更为显著的上升趋势,当前正处于研究的峰值状态。这一对比不仅反映了我国与国际在城市密度研究领域的发展阶段差异,也为未来的研究方向和重点提供了参考。

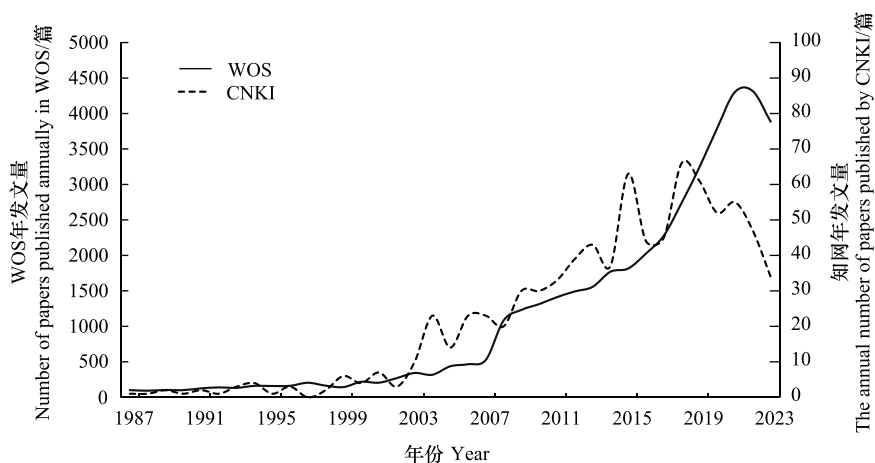


图 1 知网 CNKI 与 WEB OF SCIENCE“城市密度”主题发文量折线图

Fig.1 The number of publications on the theme of “Urban Density” by CNKI and WEB OF SCIENCE line chart

采用可视化文献计量分析软件 CiteSpace(6.2.R4),以“城市密度”为主题词在知网进行搜索,将文献语言设置为中文文献,检索后,首先剔除与主题无关的文献,将文献以 refworks 格式从知网下载,并运用 CiteSpace 软件,进行相应的格式转换和除重操作,最终检索到 1987—2023 年有效文献共 821 篇。将文献导入 CiteSpace 进行关键词可视化聚类分析,并得到基于知网的的城市密度研究时间线图(图 2)。从时间维度来看,城市密度、人口密度以及鼠密度、鼠群种类四种研究的起源时间较早,反映了由于人口快速集聚现象引发了对城市密度的关注。然而,值得注意的是,“鼠密度”与“鼠群种类”等关键词也较早出现,这揭示了在当时高密度城市环

境下,由于环境卫生问题的忽视,导致鼠类密度过高,鼠疫频发,从而间接引发了对城市密度的关注^[30]。进入 21 世纪后,一系列与城市发展相关的聚类词,如城市交通、城市形态、城市化、密度、密度分区以及居住密度等开始涌现。这一时期处于新中国城市建设的市场化推动阶段,虽然粗放式的城市建设存在众多固有的弊端,但城市发展进入迅速扩张的阶段^[31]。城市的楼房大量增加,城市的规模成倍扩展,城市的基础设施不断完善^[32],为城市密度的深入研究提供了丰富的实践背景和迫切的现实需求。

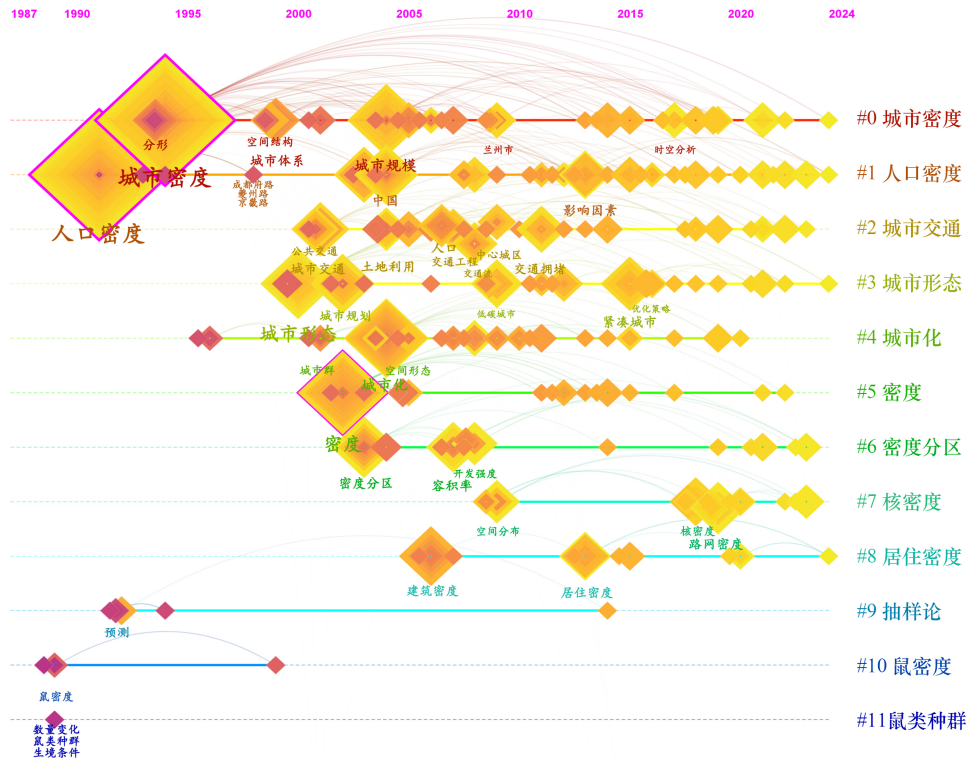


图 2 基于知网的的城市密度研究时间线图

Fig.2 Timeline chart of urban density research based on CNKI

为了解当前研究领域历史及当前最新演化动态,预测未来研究的发展趋势,识别潜在的热点研究主题,利用 CiteSpace 软件,通过调整 γ 参数,识别出 25 个引用突变词。引用突变词是指含该关键词的文献在短时间内被大量引用,可展现该阶段的研究现状,同时反映出后一阶段的研究热点。结合突变词列表中的前沿词汇,本研究深入剖析了城市密度研究的前沿问题和领域演变趋势。据此,将城市密度的突现热点研究方向划分为四个阶段(图 3):高速扩张蔓延阶段(1994—2007 年),挖掘内置影响因素阶段(2011—2014 年),管控城市形态阶段(2015—2019 年),探求软性提质阶段(2021 年至今)。四个阶段的演变,不仅反映了城市空间形态与结构发展的内在逻辑,也体现了我国城市建设中主要矛盾变化的外在表现。20 世纪 80 年代以来很长一段时间,我国社会发展的主要矛盾都是“人民日益增长的物质文化需要同落后的社会生产之间的矛盾”,因此在城市发展的前三个阶段,尽管关注的内容和方向有所调整,但整体上均围绕“以经济建设为中心”的战略导向展开。随着人们对美好生活的向往和追求日益增强,城市建设也逐渐从单一的物质扩张转向品质提升。近十年,特别是在近三年内,容积率指标限制^[33]以及提升城市韧性^[34]等议题成为研究热点,这标志着我国城市建设正朝着更加精细化、品质化的方向发展。

3 城市密度、绿地空间暴露与健康的基础关系梳理

3.1 城市密度-健康

通过对上述“城市密度”文献的量化分析,可以深入剖析其四个阶段的演变特征及其带来的城市问题。

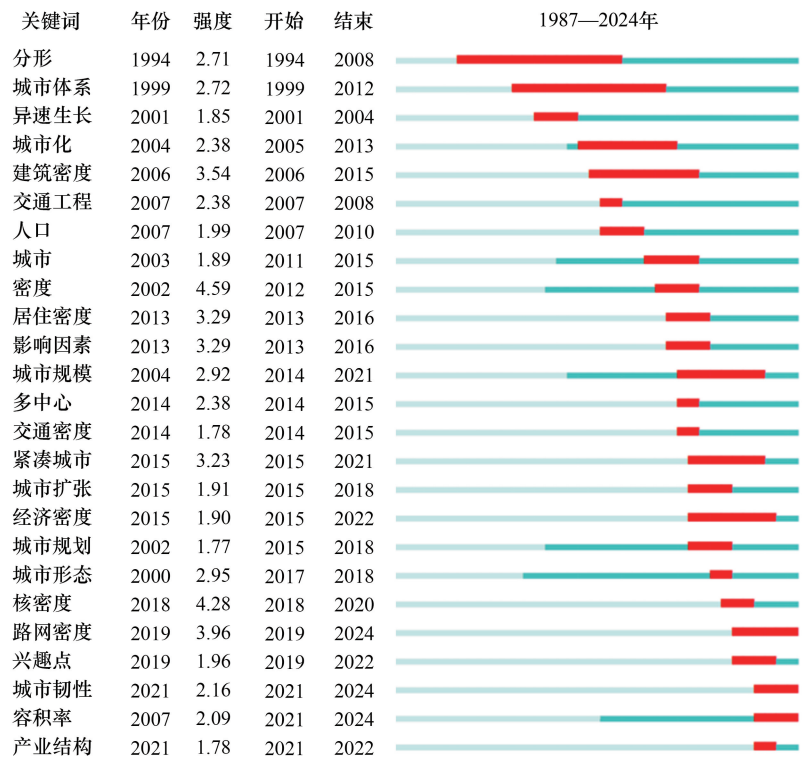


图 3 1987—2024 年城市密度研究引用最多的 25 个突现关键词

Fig.3 Top 25 burst keywords with the strongest citations of research on urban density from 1987 to 2024

在高速扩张蔓延阶段,快速化、无序性等特征显著,造成资源枯竭、城乡二元割据、环境污染加剧、风貌同质化等一系列问题^[35],这些问题不仅直接体现在城市的物理空间上,也成为公共健康问题频发的底层原因;后三个阶段关注内置影响因素,管控城市形态,探求软性提质,是有关城市问题空间治理的深层探索与应对,是健康理念指导下逐渐摆脱不健康发展惯性和路径依赖的实践历程^[36]。健康作为贯穿于城市规划管理的潜在底层逻辑之一,其重要性不言而喻。然而,由于城市密度是一个相对抽象的概念,直接探究城市密度与健康之间的关联性存在难度。现有研究在探讨这一议题时,往往借助体力活动^[37]、通风状况^[38]等中介变量展开。在城市密度与健康之间的相互作用关系中,存在着众多复杂且相互交织的因果关系。这些关系不仅涉及到物理环境、社会经济因素,还涉及到人类行为和心理层面。它们共同构成了城市密度与健康之间复杂的互动网络,为提供了理解和应对城市问题的新视角(图4)。

健康理念在推动城市空间布局优化方面发挥着至关重要的作用。城市高速扩张蔓延阶段引发了一系列空间与人口问题,如空间急速扩张与存量规划呼声之间的矛盾、局部人口减少与整体人口增长之间的不平衡等^[39]。自工业革命以来,国内外生产力与生产方式的深刻变革推动了大量工人向低租金地区聚集的“进城潮”。然而,居住在以高居住人口密度、陈旧的基础设施以及脏乱的环境卫生为基本特征的“贫民窟”^[40],存在高传染性疾病预防的风险^[41]。面对这些挑战,健康理念要求加快解决环境矛盾,调整空间结构,改造人居环境,以建筑高层化、立体化作为解决手段,疏散拥挤状况。聚焦当下,全球性的新型冠状病毒肺炎疫情影响,极大地提升了全球对健康的关注与重视,要求在城市规划的各个层面置入健康理念与人本视角^[42],构建健康城市。经历几十年的研究与实践,健康意识已内嵌于土地利用、交通规划、建筑设计、功能布局以及文化活动等多个研究领域^[36,43]。以“健康城市”为规划背景与目标,开展了包括不同土地利用的碳排放识别^[44]、基于城市道路交通网络系统的医疗服务设施可达性^[45]、城市居民活动与健康空间供需匹配程度^[46]等在内的多项健康城市理论研究,以指导规划建设实践。此外,城市密度与健康之间的非线性关系^[47]已经得到研究证

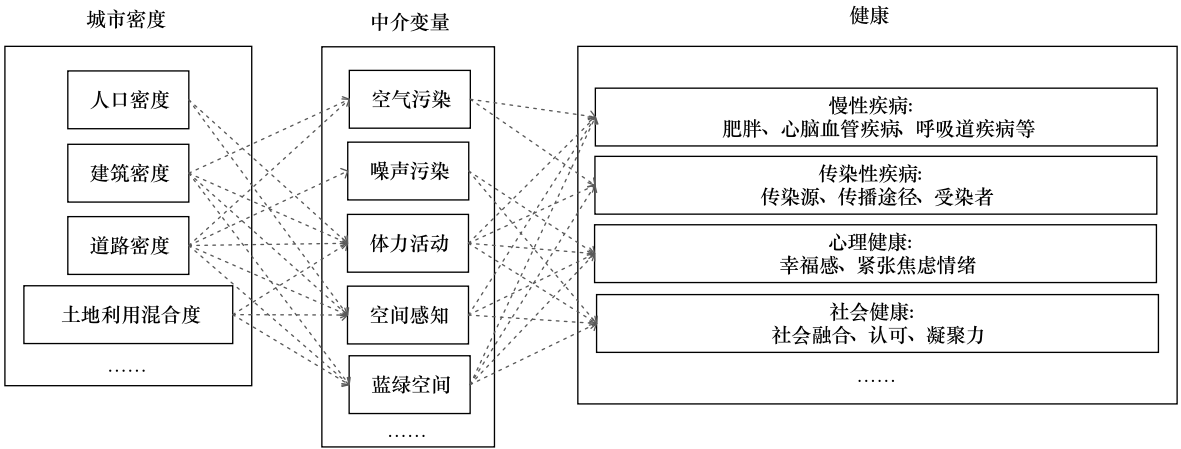


图 4 城市密度对健康的作用机制示意图

Fig.4 Schematic diagram of the mechanism of the effect of urban density on health

实,当城市密度处于特定阈值范围内时,会产生正向或负向的健康效益。因此,探讨人口密度、建筑密度、土地利用混合度以及道路网密度等单一指标城市密度对身心健康的作用机制,已经成为优化城市建设的重要依据与理论支撑(表 1)。

表 1 城市密度相关指标对身心健康的作用机制文献梳理

指标 Index	篇名 Title	作者 Authors	“密度-健康”作用机制 Mechanism of action of “density-health”
人口密度 Population density	时空机会和健康促进综合效益下城市居民休闲步行特征及影响因素	姜玉培,孙鸿鹄.	人口密度等城市建成环境要素对休闲步行的影响,总体上呈现,好的可步行环境产生积极效应,然而高密度人口对参与休闲步行的体力活动产生抑制作用。
	人口密度与城市宜居性关系的一般性规律探索	尹春,孙斌栋,姚夏劼	人口密度对个体的身体健康水平和主观幸福感的影响效应存在一定的阈值,表现为非线性的关系,最终作用在城市的宜居性。
	Urban population density and mortality in a compact Dutch city: 23-year follow-up of the Dutch GLOBE study	Beenackers M A, Oude Groeniger J, Kamphuis C B M, Van Lenthe F J.	拥有良好步行和骑自行车基础设施的人口密集城市,高人口密度可能会对死亡率产生负面影响。
建筑密度 Building density	A. Environmental influence in the brain, human welfare and mental health	Tost H, Champagne F A, Meyer-Lindenberg	高密度城市以其立体化的、高异质性的城市面貌特点,以及对个人空间的入侵、社会距离的被迫压缩,构成对心理健康的影响。
	From oppressiveness to stress: A development of Stress Reduction Theory in the context of contemporary high-density city	Luo L, Jiang B.	较高的建筑密度阻碍原本的空气循环过程,降低风向、风速和风力,间接影响人体的城市舒适感体验与压力感知。
	公共健康视角下城市街区综合通风效能与规划响应研究	马童,陈天	过多的车辆、广告牌等街景要素,所产生的压抑感,是连接城市街景和心理压力的一个主要媒介。
土地利用混合度 Land use mixing degree	基于倾向值匹配法的城市建成环境对居民生理健康的影响	张延吉,秦波,唐杰.	高密度的土地利用对居民总体的身体健康状况具有负向影响,而功能混合、支路网通达的城市肌理,以及充足的健康设施在降低身体质量指数 BMI、抑制超重和减少慢性病方面发挥着积极作用。

续表

指标 Index	篇名 Title	作者 Authors	“密度-健康”作用机制 Mechanism of action of “density-health”
道路密度 Road density	基于 POI 混合度的城市公园体力活动类型多样性研究——以深圳市福田区为例	郑权一,赵晓龙,金梦潇,刘笑冰	城市兴趣点 (POI) 混合度与城市公园公园体力活动类型多样性 (DPAT) 有明显的相关性。
	交通暴露与土地利用模式对社区 COVID-19 传播风险的影响	李武,赵胜川,耿晓峰,马静文	道路密度、公交线网密度、中央商务区 (CBD) 邻近度、建筑密度、人口密度和土地价值与小区 COVID-19 传播风险呈显著正相关。
	武汉市建成环境对慢性呼吸系统疾病的影响研究	张俊磊,程世丹,李欣,李永高	城市建筑密度、交叉口密度、公共交通设施密度、建材市场分布因素对居民呼吸健康影响明显。
	Neighbourhood walkability, road density and socio-economic status in Sydney, Australia.	Cowie C T, Ding D, Rolfe M I, Mayne D J, Jalaludin B, Bauman A, Morgan G G.	高道路密度的高可达性与高空气污染对健康的交互作用。

综上,健康理念作为认识论指导规划实践,为建设健康绿色城市提供了理论基础。由于城市密度内涵丰富,在探究与健康的关联性中,存在相关指标与方法异构的问题,致使不同区域的相关研究没有横向对比的可比性。因此,构建综合城市密度的评价方法,探究其与健康效益的关系,为宏观层面城市之间的空间异质对比提供有效方法。再者,在针对若干项指标突出的城市研究中,可探究多项指标的交互作用对健康效益的影响,为政策精准调控提供具有指向性的理论支撑与实践基础。

3.2 绿地空间暴露-健康

已有大量研究证实,绿地空间暴露与生理健康、心理健康^[20]及社会健康^[21]存在密切的关联。本文从特征催化、过程推动,即动、静两个维度进一步剖析绿地空间暴露与健康的关联性,以揭示绿地空间健康效益的深层生成机制。首先,绿地空间的基础属性,包括其固有的绿地规模、绿地布局与植被配置等特征,是催化健康效益的基础属性^[43,48](表2),厘清绿地空间基础属性是指导规划实践的前提。其次,绿地空间暴露过程推动健康效益。绿地空间暴露过程,强调个体、社会与绿地空间的互动关系,也就意味着只有通过有形或无形接触才能达到有效探究暴露的健康效益的目的。有研究表明,个体在绿地空间中的暴露所产生的健康效益,与其暴露关系的规模、持续时间和频次均呈现显著的关联性。具体而言,绿地空间规模的大小与单次暴露的时长成正比,而与访问的频次则成反比^[49]。此外,步行在绿地空间中的持续时间不同,所带来的心理健康效益也各异。有研究进一步指出,步行暴露于绿地空间持续近一小时才能带来认知功能的显著改善,进而引起神经活动变化^[50]。反复暴露于自然和城市环境的带来的心理生理健康效益具有一致性,在自然环境中的恢复性体验较城市环境会有额外的改善^[51];除此之外,暴露健康效应存在时效性,需要保持一定的暴露频率以维持其健康益处^[52]。城市密度与绿地空间暴露对个体健康以及公共健康存在不容忽视的作用。鉴于居民与社会对健康促进的迫切需求,完善城市空间形态结构、优化绿地空间的合理布局显得尤为重要。

综上,构建“城市密度-健康-绿地空间暴露”的研究框架(图5),旨在梳理三者之间的相互关系,厘清城市空间要素之于健康的作用机理,分析城市密度与健康之间的作用机理。这一框架从动、静两个维度探讨绿地空间暴露与健康的关联性,潜在的是绿地空间的数量与空间两个层面的思考。在绿地空间规划方面,传统的仅从数量层面进行规划的方法已逐渐显露出其局限性,人们越来越意识到需要关注绿地空间的空间维度,包括其可达性和可视性等关键属性。这种转变不仅是对绿地空间规划理念的更新,更是对绿地空间公平性关注的重要体现。

4 “城市密度-绿地空间暴露”作用机制剖析

在全球城市无序扩张的背景下,新城市主义学者们普遍认为紧凑城市是更可持续的城市发展模式。然而,事实表明,紧凑的城市中绿地空间的稀缺性会危及城市生态系统的正常运行。这一紧凑化趋势不仅构成

表 2 绿地空间特征催化健康效益文献梳理

Table 2 Literature review of the catalytic health benefits of green space spatial characteristics

绿地特征 Green space feature	篇名 Title	作者 Authors	“绿地特征-健康”作用机制 Mechanism of action of “green space characteristics-health”
绿地规模 The Scale of green space	基于空间分析的森林公园对游憩者健康的影响研究	朱晋立,陈千山,吴舒扬,王琬青,郑燊玥,董建文,郑宇	绿地斑块密度、可获得性、植被覆盖度以及归一化植被指数等作为量化依据,它直观反映了单位城市面积内绿地空间的占比情况。研究显示,绿地规模与生理健康之间呈现显著的正向相关性。
	Greenness Availability and Respiratory Health in a Population of Urbanised Children in North-Western Italy	Giulia Squillacioti, Valeria Bellisario, Stefano Levra, Pavilio Piccioni, Roberto Bono	绿色(NDVI)和呼吸健康之间的关系。较高的 NDVI 暴露量与哮喘、支气管炎和当前喘息的概率显著较低有关。
绿地布局 The layout of green space	Are the accessibility and facility environment of parks associated with mental health? A comparative analysis based on residential areas and workplaces	Marco Helbicha,Yao Yaob, Ye Liuc, Jinbao Zhangc, Penghua Liuc, Wang Ruoyu	公园的设施环境对居民心理健康的影响比可达性更重要。对于街头公园来说,开阔的草坪和更好的可达性与人们的心理健康呈正相关,而综合公园则并非如此。此外,与工作场所的公园相比,住宅公园与郊区居民的精神恢复呈更正相关,当人们在靠近城市中心地区生活和工作时,公园的好处更为明显。
	影响呼吸系统健康的城市绿地空间要素研究——以上海市某中心区为例	王兰,廖舒文,王敏	分析呼吸系统健康(以肺癌患病率 作为指标)和城市绿地空间布局、规模及植物配置的相关性,明确显著影响呼吸系统健康的城市绿地空间要素。
	Urban green space alone is not enough: A landscape analysis linking the spatial distribution of urban green space to mental health in the city of Chicago	Jaeyoung Haa,Hyung Jin Kim, Kimberly A. With	居民在水体较小且森林区域之间距离较大的城市景观中报告的心理困扰较少。就总绿地而言,相对于单个(或几个)大型绿地,城市绿地(即许多小绿地)分布分散的景观的心理困扰水平较低。
植被配置 Vegetation configuration	植被配置结构对人体热舒适度影响的数值模拟研究	董冬,邵宇,罗毅,张五四,顾康康	采用均匀点植的乔草结构在改善热环境、降温增湿方面效果最为显著,这种配置方式适用于宏观视角下的城市大规模植被布局。而在均匀点植的乔灌草结构方案中,人体舒适度达到了最优状态。
	Global inequities in population exposure to urban greenspaces increased amidst tree and nontree vegetation cover expansion	Song Leng, Ranhao Sun, Xiaojun Yang, Liding Chen	不同人口群体暴露于树木和非树木植被的公平性研究。通过对人均绿地暴露和 Gini 指数的分析,还揭示了城市绿化扩大与人口不平等性加剧之间的关系。
	Association of Urban Green Space With Mental Health and General Health Among Adults in Australia	Thomas Astell-Burt; Xiaoqi Feng	在住宅区周围绿地植被配置(树冠、草地和其他低洼植被)与心理健康关系研究。

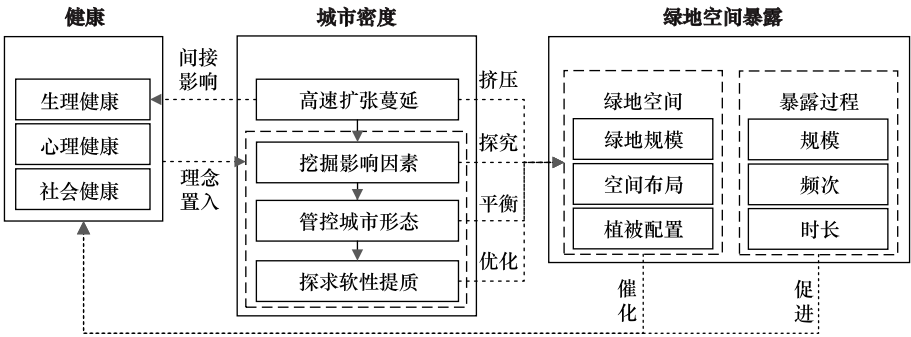


图 5 “城市密度-健康-绿地空间暴露”的研究框架

Fig.5 The research framework of “urban density-health-green space exposure”

了当前研究的重要社会背景,也对公共绿地空间的规划与发展提出了严峻挑战。如何在有限的空间内最大化绿地空间暴露的效益,实现最优化布局,已成为当前研究的迫切议题。因此,量化评估绿地空间服务能力、归纳绿地供给和居民需求评价^[53]、探索高密度城市绿地规划布局适用指标^[54]、总结高密度城市公园建设水平演变特征^[55]等,均是当下聚焦“管控城市形态”“探求软质提升”的主流研究方向。发展紧凑型绿色城市并非简单的折衷之策,而是顺应历史与时代发展的内在要求。尽管当前研究已在有限空间内致力于实现绿地空间暴露效益的最优化,但如何在紧凑发展与绿色发展之间找到平衡,仍需落实到具体的空间层面。紧凑型发展与绿色发展似乎占据在城市发展的两个对立面,在构建兼具紧凑和绿色特性的城市上仍然缺乏清晰的路径。

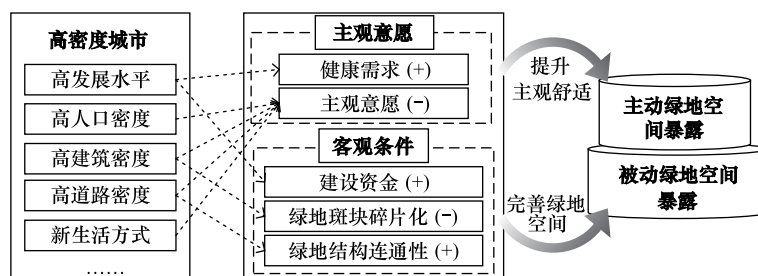


图6 高密度城市对绿地空间暴露的作用机制

Fig.6 The mechanism of high density cities on green space exposure

+表示对绿地空间暴露的正向作用,-表示负向作用

为了优化高密度城市的空间布局,应聚焦绿地空间暴露的主被动形式,并深入探讨其作用机制(图6)。具体而言,主动绿地暴露是指居民以绿地空间为目的,常以游憩、休闲、社交或体力活动为目的,有意识地靠近或到达公园绿地空间,涉及视、触、嗅觉等多种感知的互动关系;而被动绿地关系则是指居民在通勤、购物出行等日常活动中无意识靠近绿地空间,为过程性暴露,同样涉及视、触、嗅觉等多种感知的互动过程。对这两种绿地空间暴露形式的深入研究,将有助于借助绿地空间与人类活动之间的互动形式,找寻构建紧凑型绿色城市的理论方法。

4.1 高城市密度与主动绿地空间暴露分析

在高密度城市中,主动绿地空间暴露关系常展现出积极的互动效应。快速城镇化进程所推动的高密度城市,通常具备优越的社会经济条件,这为城市绿地空间的规划与建设提供了有力保障。凭借资金支持与资源集聚优势,高密度城市能够引入先进的规划设计理念,完善绿地系统规划与治理,以实现有限空间的高效利用^[56]。具体而言,高密度城市通过扩大绿地空间规模、优化空间布局等手段,显著提升了绿地空间的供需匹配度。这不仅体现在城市绿化面积的增加,特别是城市公园绿地的建设,以及森林公园、湿地公园的维护,还在于通过科学合理的空间布局,为居民创造更多亲近自然、享受绿色生活的机会。这样的规划和设计不仅提升了城市的生态环境质量,丰富了居民的户外活动选择,还提高了整体生活质量。此外,绿地空间在高密度城市中是缓解个体压力、排解压抑焦躁情绪^[57]的重要场所。因此,在高密度城市背景下,深入研究和优化绿地空间暴露关系,对于提升居民生活质量、促进城市可持续发展具有重要意义。

然而,高密度城市对主动绿地空间暴露同样存在不容忽视的消极影响。由于城市空间的有限性,大量建筑和道路占据了宝贵的土地资源,导致绿地空间面积大幅缩减,进而限制了城市居民在日常生活中接触到多样绿地空间的机会,从根本上减少了个体与自然的亲密接触的机会^[58]。同时,高人口密度意味着人均享有的绿地空间数量的减少,尤其是在高首位度城市,人口的快速流入与绿地空间的增设难以保持动态均衡^[59],可能导致绿地空间使用紧张、噪音干扰等问题,降低居民在绿地中的舒适度和愉悦感。此外,高道路密度在带来便捷的出行的同时,也带来了空气污染、噪声污染等环境问题,尤其是道路交叉口数量的增加,机动车频繁减速、怠速、加速,会产生更多地尾气排放,进而增加空气污染暴露的可能性^[60-61]。高密度城市的新兴生活方式也会影响主动绿地空间暴露。网络时代科技设备极大地吸引个体的注意力,占据人们的休闲时间,替代人与

绿地空间的互动^[62];已有研究证明虚拟绿地对个体同样具有一定的健康效益^[63],很大程度上削弱了人们主动参与实体绿地空间暴露的积极性。

经济社会快速的发展,为城市绿地空间建设提供先进理论与物质支撑的同时,也从心理层面加剧了暴露于绿地空间需求。以游憩、休闲、社交与体力活动为主要形式的主动绿地暴露,其程度和频率在很大程度上受到暴露主体的主观感受与暴露倾向的影响。在高密度城市中,建筑密度、人口密度的提升,以及环境质量的潜在破坏,都在无形中影响着居民参与绿地空间活动的主观意愿。这些因素可能导致居民对绿地空间的需求与供给之间的不匹配,进而限制了主动绿地空间暴露的实际效果。

4.2 高城市密度与被动绿地空间暴露分析

被动绿地暴露关系是指居民在上下班、购物出行等日常活动中,非有意识地主动靠近或到达绿地空间,而与之产生的自然互动。其核心涵盖除城市公园、森林公园等正式绿地之外的所有公共绿地空间,暴露的主体为无意中通过视觉、嗅觉、触觉等方式与绿地空间产生感知互动的人群。因此,这种被动绿地暴露是个体生产生活过程中所固有的、不易受波动的暴露过程,可以将其归纳为城市生活中绿地空间暴露基础指数,奠定了日常生活轨迹中暴露程度的基数。

城市空间结构的日趋复杂以及功能的日益紧凑,加之空间物理距离的显著缩短,均显著减少了日常出行的距离和时间,从而增强了居民的出行意愿,并促使出行方式发生转变^[64-65]。这种出行模式的转变,促进了在碎片化的时间内与绿地空间的互动,从而提升了被动绿地空间暴露程度。但相比与高密度城市对被动暴露的积极效应,其负面效应更为值得关注。根据上文梳理可知,暴露关系产生效益需要一定的时长与频率。然而,在高密度城市建设过程中,用地类型发生的转变导致了原有绿地形态与结构的破坏。特别是二十一世纪以来,城市化的驱动导致区域绿地因开发、建设成本较低而遭受大面积侵占或蚕食,绿地面积显著减少^[66]。同时,道路交通建设也在一定程度上改变了绿地的分布格局。尽管交通设施的大规模建设有助于经济发展,但对绿地空间结构产生了负面影响,主要表现在绿地斑块形态日趋复杂,稳定性降低,空间聚集性减弱,离散性增强,绿地破碎化程度不断加剧^[67]。破碎化的绿地生态景观虽然提升了被动暴露关系产生的频次,暴露健康效益却受限于暴露关系的持续时间。因此,从客观条件出发,提升绿地空间品质,核心在于提升绿地空间结构的连通性,修整破碎化的状态,提升被动暴露的基础性健康效益。

综上所述,高密度城市对绿地空间暴露关系产生了复杂的影响,既有积极的促进作用,也存在一些问题与挑战。首先,主动绿地空间暴露的理论研究已经相当丰富,实践层面,如何协调城市建筑布局、功能分区与绿地空间的和谐共存,已成为空间规划领域亟待解决的重要议题。其次,当前针对绿地空间暴露的研究多聚焦于城市公园、国家公园等单一尺度,未来研究需要从更宏观、全域的视角来审视和理解高密度城市背景下的绿地空间暴露问题。再者,绿地空间暴露的主被动关系是相互补充、相互依赖的,这进一步印证了城市中各类绿地空间之间存在的“竞合关系”^[53]。城市绿地空间的暴露程度受到绿地自身特性与居民接触意愿的双重影响。主动绿地空间暴露受个体主观意愿的影响较大;而被动绿地空间暴露作为城市生活中绿地空间暴露的基础,虽然不易受到外在条件以及主观意愿的影响,但依然对绿地系统规划提出了更为严苛的要求。因此,城市绿地建设应串联公园绿地节点,充分发挥小尺度绿地空间开敞性较高、视野通透的优势,改善绿带破碎化状态,提升绿地空间整体连通性^[68],为打造紧凑型绿色城市提供有益的借鉴和思路^[69]。

5 结论与展望

5.1 结论

基于城市密度研究历程中的突现热点,本文构建了“城市密度-健康-绿地空间暴露”的综合性研究框架,旨在厘清三者之间的相互关系,并揭示高密度城市存在的空间要素配置问题。创新性地从主被动绿地空间暴露的视角,探讨了高密度城市与绿地空间之间复杂的互动及其内在作用机制。探寻最优化的空间发展模式,以缓解城市病、提升居民的生活品质与满意度。具体结论如下:(1)健康理念与空间布局之间存在着理论与

实践的紧密联系。为了应对早期无序扩张所引发的公共卫生问题,健康理念已经深入到空间规划与治理之中,成为指导未来规划实践的基石。(2)本文从动态与静态两个维度,对绿地空间的数量与空间分布进行了公平性评估,这一方法既符合时代发展的要求,也为城市规划提供了更为全面和深入的视角。(3)在高密度紧凑型城市中,绿地空间暴露的主被动关系揭示了城市绿地空间之间的“竞合关系”。具体而言,主动绿地空间暴露水平受到暴露个体主观意愿的显著影响;而被动绿地空间暴露则更多地受制于小尺度、基础性的绿地空间特征。

5.2 展望

随着城市空间要素与健康等研究的日益完善,已对实践规划与治理产生了积极的指导作用。然而,仍有一些研究不足和热点值得进一步讨论:

第一,当前研究在绿地空间整体性考量方面尚存在不足。绿地空间包括大尺度的公园绿地,也包括小尺度的街边绿地等多元化类型。从提升被动绿地空间暴露水平出发,未来研究需从全域的视角关注绿地空间的整体布局的发展。当前研究大多聚焦于城市公园、社区公园等等开放性强、普惠性广、数据可得性高的绿地类型,探讨其与社区居民之间的主动绿地空间暴露关系,量化评估或空间公平性等内容。相对而言,被动绿地空间暴露研究涉及个体活动的差异性大、绿地斑块破碎化严重以及数据获取难度大等问题,目前难以从宏观层面进行整合分析,相关研究领域仍处于空白。然而,被动暴露在总体暴露上占据重要地位,对于提升居民于提升城市居民的整体绿地空间暴露水平具有不可忽视的意义。因此,未来的研究应进一步扩大研究范围与尺度,深入探讨工业区、商业区等不同功能区域活动人群的绿地空间暴露程度。这将有助于更全面地了解城市居民绿地空间暴露的实际情况,为优化城市绿地空间布局和提升居民健康福祉提供更为科学的依据。

第二,城市密度交互作用机制具有复杂性。当前研究在探究城市密度时,往往采用单一指标作为分析基准,然而在实际情境中,人口密度、建筑密度等多项指标不仅各自独立,而且相互之间存在复杂的交织影响。这种多指标间的交互作用对于绿地空间暴露的影响尤为显著,当前鲜有研究深入探究这一交互作用机制。为了更全面地理解城市密度对绿地空间暴露的影响,需要突破单一指标的局限,综合考虑多个指标之间的相互作用。通过厘清各个指标之间正、负向影响的综合作用结果,能够更准确地把握城市密度与健康、绿地空间之间的复杂关系。这不仅有助于深入理解城市密度的本质和作用机制,而且能够为健康效益、绿地空间等相关领域的研究提供更为清晰、有力的理论支撑。因此,未来的研究应更加注重城市密度多指标交互作用机制的探讨,通过综合分析和实证研究,揭示城市密度与健康、绿地空间之间的深层次联系,为城市规划、绿地空间布局 and 居民健康福祉的提升提供科学依据和决策支持。

第三,城市密度相关指标的监管与管理需因地制宜。研究显示,当前多数高密度城市人口密度为 15000 人/ km^2 ,无上限设定,远超国标规定的 10000 人/ km^2 的阈值。这种无序的人口涌入,无疑加剧了城市内部资源的紧张状态,国家标准的城市密度指标在现实中未得到充分遵循,缺乏有效的指导和约束作用。因此,亟需因地制宜地制定和调整城市密度标准,并强化各项指标的监管与治理。同时,构建健全的环境容量测算体系,因地制宜地设定环境容量标准,为政府合理调配资源和人口提供坚实的科学依据。此外,虽然我国及众多发展中国家仍致力于紧凑城市的建设与发展,但在可预见的人口负增长背景下,城市收缩的趋势已逐渐显现。城市收缩会导致人口减少和经济衰退,进而降低城市人口密度,引发土地利用方式的变化和城市空间的重新配置。因此,未来研究可深入研究城市收缩如何影响城市绿地、城市交通、基础设施和公共服务设施的布局 and 效率,以及这些变化如何影响城市的生态环境和居民的生活质量与健康行为等。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] 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): 1-10.

- [3] 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, 47(6): 89-109.
- [4] 王春晓, 黄舒语, 邓孟婷, 魏伟. 供需耦合协调视角下高密度城市公园绿地公平性研究——以深圳龙华区为例. 中国园林, 2023, 39(1): 79-84.
- [5] 邹兵. 由“增量扩张”转向“存量优化”——深圳市城市总体规划转型的动因与路径. 规划师, 2013, 29(5): 5-10.
- [6] 胡安华. 建立 ESCG 体系 推动中国城市与区域治理精准化施策——访清华大学中国新型城镇化研究院执行副院长、清华大学建筑学院教授尹稚中国城市报, 2024-04-29(A11).
- [7] 吝涛, 曾志伟, 姚霞, 耿凯凯, 余兆武, 王兰, 林美霞, 张浚茂, 郑毅诚. 城市绿地暴露与人群健康效应研究. 生态学报, 2023, 43(23): 10013-10021.
- [8] Wild C P. Complementing the genome with an “exposome”: the outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology. Cancer Epidemiology, Biomarkers & Prevention: a Publication of the American Association for Cancer Research, Cosponsored by the American Society of Preventive Oncology, 2005, 14(8): 1847-1850.
- [9] Bigazzi A Y, Figliozzi M A, Clifton K J. Traffic congestion and air pollution exposure for motorists: comparing exposure duration and intensity. International Journal of Sustainable Transportation, 2015, 9(7): 443-456.
- [10] 张金光, 宋安琪, 夏天禹, 赵兵. 社区生活圈视角下城市公园绿地暴露水平测度. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2023, 47(3): 191-198.
- [11] 王子琳, 李志刚, 程哈蓓. 社区网格尺度下城市密度对居民绿地暴露水平的影响——以特大城市武汉市为例. 经济地理, 2022, 42(12): 82-91, 161.
- [12] 屈卫东, 郑唯韡, 薛鹏. 整合暴露组与毒性通路的环境健康研究策略. 中国毒理学会第七次全国毒理学大会暨第八届湖北科技论坛论文集. 武汉, 2015: 6.
- [13] Liang F C, Yang X L, Liu F C, Li J X, Xiao Q Y, Chen J C, Liu X Q, Cao J, Shen C, Yu L, Lu F H, Wu X P, Zhao L C, Wu X G, Li Y, Hu D S, Huang J F, Liu Y, Lu X F, Gu D F. Long-term exposure to ambient fine particulate matter and incidence of diabetes in China: a cohort study. Environment International, 2019, 126: 568-575.
- [14] Yang Q Q, Li Z Y, Lu X N, Duan Q N, Huang L, Bi J. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment. Science of the Total Environment, 2018, 642: 690-700.
- [15] Kulesza K, Hościło A. Influence of climatic conditions on Normalized Difference Vegetation Index variability in forest in Poland (2002 – 2021). Meteorological Applications, 2023, 30(5): e2156.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 郑凌予, 杨淑梅, 伍夏, 郭良. 基于空间感知的社区绿色暴露指数对活动行为影响研究. 中国园林, 2023, 39(1): 92-97.
- [19] 陈箐, 翟雪倩, 叶诗韵, 张颖倩, 于珏. 恢复性自然环境对城市居民心智健康影响的荟萃分析及规划启示. 国际城市规划, 2016, 31(4): 16-26, 43.
- [20] 李智轩, 何仲禹, 张一鸣, 金霜霜, 王雪梅, 朱捷, 刘师岑. 绿色环境暴露对居民心理健康的影响研究——以南京为例. 地理科学进展, 2020, 39(5): 779-791.
- [21] 姚亚男, 李树华. 基于公共健康的城市绿色空间相关研究现状. 中国园林, 2018, 34(1): 118-124.
- [22] Jarvis I, Gergel S, Koehoorn M, van den Bosch M. Greenspace access does not correspond to nature exposure: measures of urban natural space with implications for health research. Landscape and Urban Planning, 2020, 194: 103686.
- [23] 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.
- [24] Xiao Y, Zhang Y H, Sun Y Y, Tao P H, Kuang X M. Does green space really matter for residents' obesity? A new perspective from Baidu street view. Frontiers in Public Health, 2020, 8: 332.
- [25] 时雪连. 基于公平性判别的城市绿色空间布局与优化研究——以北京市建成区为例. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [26] 杨盼盼. 城市建成区绿地暴露度公平性空间差异及其驱动因子研究——以上海大都市圈为例. 上海: 上海师范大学, 2023.
- [27] Song Y M, Chen B, Ho H C, Kwan M P, Liu D, Wang F, Wang J H, Cai J X, Li X J, Xu Y, He Q Q, Wang H Z, Xu Q Y, Song Y Z. Observed inequality in urban greenspace exposure in China. Environment International, 2021, 156: 106778.
- [28] Cao Y, Li G, Huang Y. Spatiotemporal Evolution of Residential Exposure to Green Space in Beijing. Remote Sensing, 2023, 15(6): 1549.
- [29] 杨俊宴, 史宜. 城市规划语境下密度研究的源流演化与展望. 国际城市规划, 2023, 38(2): 1-7.
- [30] 刘翀, 孙作庆, 杨德敏, 佟桂馥. 城市排水系统灭鼠后鼠密度回升原因分析. 中国公共卫生, 1989, 5(9): 14.
- [31] 阳建强, 陈月. 1949—2019 年中国城市更新的发展与回顾. 城市规划, 2020, 44(2): 9-19, 31.
- [32] 刘吕红, 余红军. 70 年来城市建设的历史进程、主要特征和基本经验. 江西社会科学, 2019, 39(9): 18-26.
- [33] 陈群元, 蒋伟. 强度分区约束下的居住容积率赋值方法研究——以长沙市为例. 上海城市规划, 2022(4): 96-101.
- [34] 吴向阳, 李拓, 徐瑶, 汪志伟. 高密度城市住区韧性空间研究导论. 住区, 2021(4): 38-42.
- [35] 吴屹豪, 刘阳. 紧凑高密度环境下的城市形态研究进展——源流演进、主流范畴与应对策略. 新建筑, 2023(5): 139-145.
- [36] 鲍海君, 李灵灵. 国土空间规划视角下健康城市规划评价指标体系构建. 生态学报, 2024, 44(10): 4081-4091.
- [37] 杨茗涵, 黄晓军, 赵凯旭, 王恬. 体力活动视角下城市绿色空间与居民健康研究进展与展望. 西部人居环境学刊, 2023, 38(6): 46-53.

- [38] Xue F, Gou Z H, Lau S. Human factors in green office building design: the impact of workplace green features on health perceptions in high-rise high-density Asian cities. *Sustainability*, 2016, 8(11): 1095.
- [39] 龙瀛, 吴康. 中国城市化的几个现实问题: 空间扩张、人口收缩、低密度人类活动与城市范围界定. *城市规划学刊*, 2016(2): 72-77.
- [40] 孟延春, 郑翔益, 谷浩. 渐进主义视角下 2007—2017 年我国棚户区改造政策回顾及分析. *清华大学学报: 哲学社会科学版*, 2018, 33(3): 184-189, 194.
- [41] Dubey S, Sahoo K C, Dash G C, Sahay M R, Mahapatra P, Bhattacharya D, Del Barrio M O, Pati S. Housing-related challenges during COVID-19 pandemic among urban poor in low- and middle-income countries: a systematic review and gap analysis. *Frontiers in Public Health*, 2022, 10: 1029394.
- [42] von Seidlein L, Alabaster G, Deen J, Knudsen J. Crowding has consequences: prevention and management of COVID-19 in informal urban settlements. *Building and Environment*, 2021, 188: 107472.
- [43] 王兰, 廖舒文, 赵晓菁. 健康城市规划路径与要素辨析. *国际城市规划*, 2016, 31(4): 4-9.
- [44] 潘浩之, 施睿, 蔡子攀, 黄贤金. 基于城市土地利用碳排放源识别的国土空间规划支撑研究——以南京市为例. *现代城市研究*, 2024, 39(1): 1-7, 15.
- [45] 温旭丽, 张志成. 公共交通对健康城市医疗服务公平性影响研究. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(1): 364-372.
- [46] 刘家栋, 欧阳安蛟, 曹秀婷. 基于城市生态肌理的网络化健康空间构建研究. *现代城市研究*, 2023, 38(10): 19-26.
- [47] 尹春, 孙斌栋, 姚夏劫. 人口密度与城市宜居性关系的一般性规律探索. *地理科学*, 2024, 44(2): 179-191.
- [48] 王兰, 廖舒文, 王敏. 影响呼吸系统健康的城市绿地空间要素研究——以上海市某中心区为例. *城市建筑*, 2018(9): 10-14.
- [49] 杜新存, 李方正. 绿色暴露作为促进健康服务的评估指标与机制研究综述. *风景园林*, 2022, 29(10): 26-31.
- [50] Bratman G N, Hamilton J P, Hahn K S, Daily G C, Gross J J. Nature experience reduces rumination and subgenual prefrontal cortex activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(28): 8567-8572.
- [51] Jones M V, Gidlow C J, Hurst G, Masterson D, Smith G, Ellis N, Clark-Carter D, Tarvainen M P, Braithwaite E C, Nieuwenhuijsen M. Psychophysiological responses of repeated exposure to natural and urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 209: 104061.
- [52] Shanahan D F, Bush R, Gaston K J, Lin B B, Dean J, Barber E, Fuller R A. Health benefits from nature experiences depend on dose. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28551.
- [53] 兰强, 黄瓴. 高密度城区公共绿地游憩服务能力评价——以成都市中心城区为例. *风景园林*, 2023, 30(11): 105-112.
- [54] 肖希, 李敏. 绿斑密度: 高密度城市绿地规划布局适用指标研究——以澳门半岛为例. *中国园林*, 2017, 33(7): 97-102.
- [55] 徐吉羽, 刘志强, 余慧, 洪亘伟. 中国大陆高密度城市公园建设水平演变特征分析——从 1996 年到 2019 年. *上海城市规划*, 2022(6): 82-88.
- [56] 安晓娇. 澳门高密度城区绿色空间营造策略研究. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [57] Astell-Burt T, Feng X Q. Association of urban green space with mental health and general health among adults in Australia. *JAMA Network Open*, 2019, 2(7): e198209.
- [58] 幸丽君, 杜赛南, 仝照民, 张蕾. 环境正义视阈下城市公园绿地时空可达性及其影响因素. *生态学报*, 2023, 43(13): 5370-5382.
- [59] He Y T, Liang Y J, Liu L J, Yin Z C, Huang J J. Loss of green landscapes due to urban expansion in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 199: 107228.
- [60] Yang J Y, Shi B X, Shi Y, Marvin S, Zheng Y, Xia G Y. Air pollution dispersal in high density urban areas: research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 54: 101941.
- [61] 张俊磊, 程世丹, 李欣, 李永高. 武汉市建成环境对慢性呼吸系统疾病的影响研究. *现代城市研究*, 2023, 38(2): 22-31.
- [62] Minor K, Glavind K L, Schwartz A J, Danforth C M, Lehmann S, Bjerre-Nielsen A. Nature exposure is associated with reduced smartphone use. *Environment and Behavior*, 2023, 55(3): 103-139.
- [63] 杨高原, 余兆武, 张金光, 刘红晓, 金贵, 居阳, 洪波, 赵卓慧, 张理卿, 姚希哈, 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与展望. *生态学报*, 2024(14): 1-11.
- [64] Masnavi M R. Measuring Urban Sustainability: developing a Conceptual Framework for Bridging the Gap Between theoretical Levels and the Operational Levels. *Sustainability*, 2024, 16(9): 3847.
- [65] Wolff M, Haase D. Mediating sustainability and liveability—turning points of green space supply in European cities. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, 7: 61.
- [66] Sun C G, Lin T, Zhao Q J, Li X H, Ye H, Zhang G Q, Liu X F, Zhao Y. Spatial pattern of urban green spaces in a long-term compact urbanization process—a case study in China. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 111-119.
- [67] 许浩, 李欢欣, 刘伟. 近 15 年南京都市圈区域绿地变化研究. *西北林学院学报*, 2021, 36(5): 215-222.
- [68] 龚阳春, 周亮, 孙东琪, 陈志杰. 韧性视角下中国超大城市绿带破碎化与连通性测度分析——以北京、西安及成都为例. *地理科学*, 2023, 43(7): 1195-1205.
- [69] Artmann M, Kohler M, Meinel G, Gan J, Ioja I C. How smart growth and green infrastructure can mutually support each other—a conceptual framework for compact and green cities. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 10-22.