

绿色基础设施对呼吸健康的影响研究进展

A Review of the Impact of Green Infrastructure on Respiratory Health

魏家星 寿田园 李永钧*

WEI Jiaxing SHOU Tianyuan LI Yongjun*

(南京农业大学园艺学院, 南京 210095)

(College of Horticulture, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu, China, 210095)

文章编号: 1000-0283(2024)08-0004-07

DOI: 10. 12193/j. laing. 2024. 08. 0004. 001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2024-05-05

修回日期: 2024-06-26

摘要

绿色基础设施对支持和保障居民呼吸健康具有重要意义。科学认知绿色基础设施与呼吸健康的关联性及其影响路径, 可有效推进绿地健康效益理论研究与健康人居环境建设实践。以 Web of Science 数据库与中国知网(CNKI)为数据来源, 对与呼吸健康相关的绿色基础设施研究进行综述。结果表明, 绿色基础设施的多维特征均与呼吸健康存在显著关联, 但现有研究结论存在差异性; 绿色基础设施影响呼吸健康的多条路径耦合交织, 其中空气质量和体力活动是重要的中介变量。目前研究存在侧重单维绿地指标、聚焦孤立绿地空间、局限单一影响路径和偏重理论层面描述的局限性, 未来研究需在完善多维绿色暴露测度体系的基础上, 进一步关注“环境风险暴露—体力活动促进”耦合作用下的绿色基础设施构建模式及其健康影响机制。

关键词

风景园林; 绿色基础设施; 呼吸健康; 研究进展

Abstract

Green infrastructure is of great significance in supporting and safeguarding respiratory health. Scientific knowledge of the correlation between green infrastructure and respiratory health, as well as its influence pathways, can effectively promote both theoretical research on the health benefits of green spaces and the practice of building healthy living environments. This paper summarized the research on green infrastructure related to respiratory health, using the Web of Science and China National Knowledge Infrastructure as data sources. The results showed that the multidimensional characteristics of green infrastructure were significantly associated with respiratory health, but there was variability in the conclusions of the existing studies. The multiple pathways of green infrastructure affecting respiratory health are coupled and intertwined, with air quality and physical activity as essential mediators. The current study is limited in focusing on unidimensional green space indicators, isolated green space, a single impact pathway, and emphasizing theoretical descriptions. Future studies need to improve the multidimensional measurement of green infrastructure and pay more attention to the construction mode of green infrastructure and its health impact mechanism under the coupling of risk exposure and physical activity promotion.

Keywords

landscape architecture; green infrastructure; respiratory health; research progress

魏家星

1986年生/男/河南南阳人/博士/教授/研究方向为绿色基础设施的健康效益

寿田园

2000年生/女/浙江绍兴人/在读硕士研究生/研究方向为绿色基础设施的健康效益

李永钧

1995年生/女/山东烟台人/博士/讲师/研究方向为绿色基础设施的健康效益、景观偏好

绿色基础设施 (Green Infrastructure) 是人居环境中重要的自然空间, 可提供支持健康的生态系统服务。绿色基础设施概念是多维复合的, 指具有内部连接性的自然区域及开放空间的跨尺度、多层次网络, 包括景观斑块和廊道等绿色空间网络以及公园、行道树和水体等其他自然要素^[1]。这一网络具有自然生态体系功能和价值, 可为人类和野生动物提

基金项目:

国家自然科学基金“基于空间保护优先级的城市群绿色基础设施时空变化及布局研究——以苏南城市群为例”(编号: 32001360); 江苏省自然科学基金“改善热环境的城市绿色基础设施网络格局与降温机理——以南京市为例”(编号: BK2019044048); 江苏省农业科技自主创新资金“休闲观光新业态下的苏南地区花海低成本配置技术研究”(编号: CX(22)3187)

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: yongjunli@njau.edu.cn

供全面的生态系统服务，并促进环境、社会与经济可持续发展^[2]。传统绿色基础设施研究多着眼于生态保护领域^[3]，关注生态网络的构建和优化提升^[4]。近年来在“以人为本”理念的引导下，研究热点逐渐由关注单一的物质性环境本身转向人类健康福祉^[5]。其中，呼吸系统疾病作为一类主要由环境暴露主导的疾病，与绿色基础设施关联紧密^[6]。因此，在后疫情时代，探明绿色基础设施与呼吸健康的关联与影响路径，对于提升人居环境健康效益意义重大。本文对与呼吸健康相关的绿色基础设施研究进行系统梳理，以期为健康人居环境建设提供一定的理论依据。

1 研究方法与数据来源

WoS (Web of Science) 和CNKI数据库是国内学术研究和科研决策的权威平台，其文献数量较为全面，本文基于以上数据库进行文献的初步检索。纵观已有研究，“绿色基础设施”的应用领域主要包括绿地规划、城市生态和雨洪管理，但鲜有研究将用于雨洪管理的绿色基础设施与健康结果联系起来^[5,7]。因此，本综述中的绿色基础设施侧重于绿地规划和城市生态，关注中观尺度上基础

设施化的绿色空间，包括公园、行道树等自然要素及其所构成的绿色空间网络^[3]。呼吸健康可从不同维度来衡量，包括慢性呼吸系统疾病、急性呼吸系统症状以及肺功能^[8-10]。根据上述定义，选择相关搜索词（表1），并将其应用于WoS和CNKI数据库中的主题、标题、摘要和关键词字段。检索时间为2024年3月。对这些文献进行篇名、关键词和摘要筛查后，最终获得356篇文献。

2 研究主题分析

2.1 绿色基础设施与呼吸健康的关联性

绿色基础设施的内涵复合而多样，现有研究多从不同视角对绿色基础设施特征进行测度，主要包括绿色基础设施的数量、布局 and 内部特征三个方面（表2）。绿色基础设施数量（Amount）指度量空间绿度（Greenness）的物理量，表征绿地的可获得性；绿色基础设施布局（Layout）指绿地的空间分布情况（分散或集中、与居民区的距离等）；绿色基础设施内部特征指绿地内部的群落特征及相关属性。

2.1.1 绿色基础设施数量与呼吸健康的关联性

该类型特征的选取最为广泛，可进一步

细分为整体绿量和特定绿地面积两个维度。整体绿量方面，主要采用的指标包括归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）^[11-12]、土壤调节植被指数（Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI）^[13]、增强植被指数（Enhanced Vegetation Index, EVI）^[14]、绿视率（Green View Index, GVI）^[15]等植被指数以及景观百分比（PLAND）^[16]、最大斑块指数（LPI）^[17]等景观格局指数。特定绿地面积方面，主要采用的指标包括公园面积或数量^[12]、私人花园面积^[18]、树冠覆盖率^[19]等。其中，NDVI的应用最为广泛。

该类型特征与呼吸健康的关联大多为负相关，即提升绿色基础设施数量对呼吸健康可起到保护作用，结论主要包括：（1）可降低特定呼吸系统疾病的发病率或死亡率，如慢性阻塞性肺疾病、哮喘、肺癌、支气管炎等^[11,20]；（2）有助于整体呼吸系统的提升，主要表现为肺功能指标的上升^[15,21]；（3）可降低喘息等呼吸系统异常症状的风险^[22]。

但亦有少量研究报告了绿色空间数量对呼吸健康的潜在风险。例如，随着环境绿化的增加，哮喘、过敏性鼻炎、慢性阻塞性肺疾病的发病率也会增加^[23-24]；绿地面积与夜间干咳等不适症状有一定关联^[25]。

表1 WoS和CNKI数据库的搜索词选择
Tab. 1 Selection of search terms in WoS and CNKI databases

	绿色基础设施 Green infrastructure	呼吸健康 Respiratory health
WoS 搜索词选择	“green infrastructure” OR “green space*” OR “greenspace*” OR “greenness” OR “greenery” OR “ecological network*” OR “ecological security pattern” OR “landscape pattern” OR “green exposure” OR “green land*” OR “vegetation*” OR “park*” OR “garden*” OR “street tree*” OR “urban forest*” OR “green roof*” OR “natural land*” OR “natural environment*”	“respiratory health” OR “respiratory disease*” OR “respiratory system” OR “lung function*” OR “lung disease*” OR “lung cancer” OR “chronic obstructive pulmonary disease” OR “asthma” OR “pulmonary tuberculosis” OR “tracheitis” OR “bronchitis” OR “emphysema” OR “rhinitis” OR “hayfever” OR “sensitization” OR “allergic respiratory disease*” OR “cough*” OR “wheeze*” OR “spirometry”
CNKI 搜索词选择	“绿色基础设施”或“绿色空间”或“绿地”或“自然环境”或“绿度”或“绿化”或“生态网络”或“景观”或“绿色暴露”或“植被”或“公园”或“花园”或“行道树”或“城市森林”或“绿色屋顶”	“呼吸健康”或“呼吸系统疾病”或“呼吸系统”或“肺功能”或“肺癌”或“慢性阻塞性肺病”或“哮喘”或“肺结核”或“气管炎”或“支气管炎”或“肺气肿”或“鼻炎”或“花粉症”或“过敏”或“过敏性呼吸道疾病”或“咳嗽”或“喘息”

表2 绿色基础设施特征分类与测度指标
Tab. 2 Classification and measurement indicators of green infrastructure

绿色基础设施特征分类 Classification of green infrastructure	特征定义 Definition of classification	测度指标 Indicators	指标描述 Description of indicators
数量	度量空间绿度的物理量	整体绿量	归一化植被指数 $NDVI=(NIR-Red)/(NIR+Red)$, 值越高说明绿量越高
			土壤调节植被指数 $SAVI=(NIR-Red)\times(1+0.5)/(NIR+Red+0.5)$, 值越高说明绿量越高
			增强植被指数 $EVI=2.5\times(NIR-Red)/(NIR+6\times Red-7.5\times Blue+1)$, 值越高说明绿量越高
			绿视率 视野中的绿化面积与总视野面积的比值, 值越高说明绿量越高
			景观百分比 斑块所占景观面积的比例, 值越高说明绿量越高
			最大斑块指数 最大斑块面积占整个景观面积的比例, 值越高说明绿量越高
		特定绿地面积	公园面积或数量 基于开源地图集统计, 值越高说明绿量越高
			私人花园面积 基于开源地图集统计, 值越高说明绿量越高
			树冠覆盖率 树冠投影面积与地表面积的比值, 值越高说明绿量越高
布局	绿地的空间分布情况	绿地破碎化程度	斑块密度 斑块数量与景观总面积的比值, 值越高说明绿地破碎化程度越高
			聚集度指数 基于同类型斑块像元间公共边界长度计算, 值越高说明绿地破碎化程度越低
			斑块蔓延度 衡量特定斑块之间的物理连通性, 值越高说明绿地破碎化程度越低
		绿地形状复杂程度	斑块形状指数 斑块周长与同面积圆周长的比值, 值越高说明绿地形状越复杂
		景观类型异质性	香农多样性指数 各斑块类型的面积比乘以其值的自然对数之后的和的负值, 值越高说明景观类型越多
		绿地可达性	到达特定绿色空间的距离 基于 ArcGIS 软件计算, 值越高说明可达性越弱
内部特征	绿地内部的群落特征及相关属性	植被种类	优势种、致敏植被的数量与密度
		植被结构	乔木、灌木、草本的复合配置
		生物多样性水平	基于开源数据库统计, 值越高说明生物多样性水平越高

注：NIR为近红外波段的反射值，Red为红光波段的反射值，Blue为蓝光波段的反射值。

2.1.2 绿色基础设施布局与呼吸健康的关联性

该类型特征主要通过可达性和景观格局指数进行测度。可达性方面，多通过到达特定绿色空间的距离^[26]进行测度。学者普遍认为到达绿地的距离越近，绿色基础设施的呼吸健康效益越高，主要表现为可降低呼吸系统疾病的患病率^[26]、提升肺功能水平^[27]、降低出现喘息等症状的风险^[28]；但也有研究报告称住得离公园近似乎是患哮喘的

一个危险因素^[29]。

景观格局指数方面，主要采用斑块密度(PD)、聚集度指数(AI)和斑块蔓延度(COHESION)测度绿地的破碎化程度，采用斑块形状指数(SHAPE)表征绿地形状的复杂程度，采用香农多样性指数(SHDI)表征景观类型的异质性^[17]。学者普遍认为，减少绿地斑块的碎片化程度、提升聚集度，适度保持绿地形状的不规则程度，可有效降低呼吸系统

疾病的发病率^[17,30]和死亡率^[31]。

2.1.3 绿色基础设施内部特征与呼吸健康的关联性

该类型特征主要包括植被种类、植被结构和生物多样性水平等。主要结论包括：(1) 具较强污染吸附能力的树种更有利于呼吸健康^[14]，易释放出花粉等致敏性物质的植被是呼吸健康的潜在威胁^[32]；(2) 植被结构可显著影响呼吸健康效益，“乔—灌—草”复合

结构的呼吸健康效益较高^[14]；(3) 关于生物多样性水平的结论较不一致，有研究支持接触植被多样性可有效降低哮喘风险^[33]，但也有研究指出较高的气传纤维植物多样性和动物多样性与较高的呼吸系统不适症状风险有关^[34]，儿童的生物多样性接触并不能明确降低患哮喘的风险^[35]。

2.2 绿色基础设施影响呼吸健康的路径

前已述及，绿色基础设施与呼吸健康之间存在显著关联，但关联性结论尚不一致，这很可能与绿色基础设施对健康的影响机制密切相关。已有学者将潜在中介变量 (Potential mediators) 引入绿色基础设施健康效益的关联性研究中，试图揭示城市绿地通过一系列中介以实现健康效益的复杂路径^[36]。基于该理论框架，本文通过梳理后发现，对绿色基础设施影响呼吸健康的作用起到中介作用 (Mediating effect) 的中介变量多集中于空气质量和体力活动。其中，以空气质量为中介的影响路径分别通过消减空气污染和释放致敏物质对呼吸健康产生积极和消极影响；以体力活动为中介的影响路径分别通过提高免疫调节能力和增加致病风险暴露产生积极和消极影响 (图1，表3)。

在同一中介变量的介导下，绿色基础设施对呼吸健康的影响路径也兼具保护和危害作用。具体而言，连通性、聚集度和覆盖率较

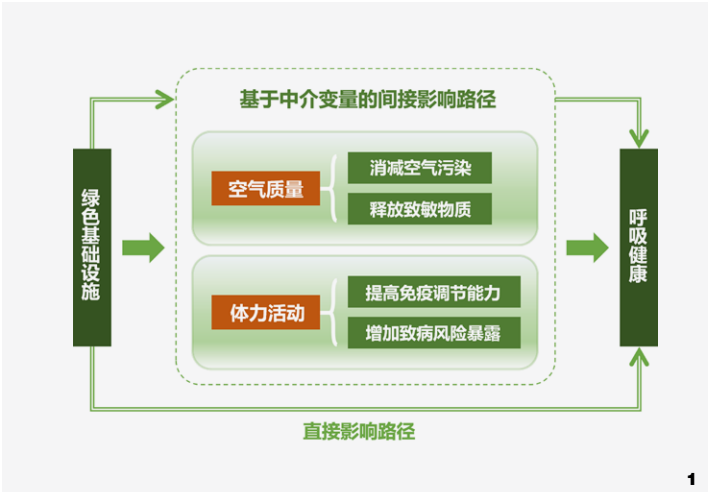


图1 绿色基础设施影响呼吸健康的中介变量和间接影响路径
Fig. 1 Mediators and indirect pathways linking green infrastructure and respiratory health

高的绿色空间分布以及“乔—灌—草”配置结构往往能有效消减多种空气污染物，可达性和可获得性较高、场地设施和管养完善的绿色空间可提升体力活动水平，从而分别通过减少有害暴露和促进健康行为的方式^[36]降低呼吸道疾病发病率、提升肺功能指标。但与此同时，在特定绿地中发生的体力活动也可能导致致敏原、空气污染和热浪等暴露风险的升高，其与前者的健康效益相互抵消^[37]，导致夜间干咳等不适症状及呼吸道疾病发病率的升高。不同路径间影响效应的耦合作用，在一定程度上导致了关联性中正负结论的不一致。

2.2.1 以空气质量为中介的影响路径

一方面，多维绿色基础设施可有效减少空气污染。例如，基于绿色基础设施数量与布局视角，斑块面积、斑块形状指数、斑块连接度为影响气溶胶分布的核心景观格局指数^[38]，绿地斑块聚集性、绿地覆盖率与污染物浓度呈负相关^[31]；基于绿色基础设施内部特征视角，植被的横向结构、竖向结构及植被类型在一定程度上有助于削减大气颗粒物^[39]，沿街绿地中的乔灌木植被配置组合对大气颗粒物削减能力最强^[40]。同时，学者也普遍认为，空气污染暴露是导致呼吸系统疾病发病率^[41]与死亡率^[42]上升以及肺功能降低^[43]的风险因素。故空气污染消减是在理论上成立的绿色基础设施影响呼吸健康的作用路径。

但另一方面，一些研究表明绿色基础设施中的特定植被会释放致敏物质，对呼吸健康产生潜在威胁。例如，植被在代谢过程中会产生

表3 绿色基础设施影响呼吸健康的间接影响路径及关键指标
Tab. 3 Indirect pathways and key indicators of green infrastructure affecting respiratory health

中介变量 Mediators	间接影响路径 Indirect pathways	关键指标 Key indicators
空气质量	消减空气污染	数量 绿地覆盖率
		布局 绿地斑块面积
		内部特征 绿地斑块连接度 绿地斑块聚集度
	释放致敏物质	内部特征 植被类型 植被结构
		内部特征 植被种类 致敏植被密度
		内部特征 致敏植被密度
体力活动	提高免疫调节能力	数量 绿地覆盖率
		布局 绿地斑块聚集度
		内部特征 可达性 场地安全性
	增加致病风险暴露	内部特征 管养水平 设施配置
		内部特征 场地空气污染暴露
		内部特征 场地热暴露

不同类型和数量的花粉和挥发性有机化合物 (Volatile Organic Compounds, VOCs), 这些物质还会与空气污染物相结合, 对呼吸健康产生协同抑制作用^[44]。另一些研究则证实呼吸道疾病发生率与特定植被覆盖率正相关^[32]。此外, 在城市绿地中, 致敏植物种植密度较高而植物多样性相对较低, 令植物花粉致敏原浓度进一步升高, 进一步提升过敏性呼吸道疾病的风险^[45]。主要致敏树种的预防性清除不能充分抵消其他树种引起的、因环境变化而放大的过敏风险^[46], 这无疑为健康导向的绿色基础设施建设带来了挑战。

2.2.2 以体力活动为中介的影响路径

一方面, 多维绿色基础设施可显著促进体力活动。基于绿色基础设施数量和布局视角, 绿地斑块聚集性低, 布局相对分散, 则周边居民的自然体验活动参与频率和时长较高^[47]; 绿地可达性与可获得性越高, 居民自然体验活动的参与性也越高^[48]。基于绿色基础设施内部特征视角, 较高的场地安全性和管养水平、充足的设施配置等要素均可影响体力活动的发生。例如, 安全、整洁和维护良好的绿地是居民进行体力活动的前提条件^[49], 健身器材的设置可显著提升居民体力活动的频度与强度^[50]。亦有研究证实, 体力活动的增加是影响免疫调节能力的重要因素^[51], 其可显著促进心肺功能健康^[52]、提升生活质量^[53]。故提升免疫调节能力是在理论上成立的绿色基础设施影响呼吸健康的作用路径。

但另一方面, 绿色基础设施通过促进体力活动带来的健康效应并非都是正向的。研究证实, 体力活动是环境健康风险评估的关键性呼吸暴露参数。在空气质量较差时, 居民进行体力活动的健康效益不能抵消

空气污染暴露造成的危害, 活动越多, 健康风险越高^[54]。体力活动还可能带来更多的热浪暴露风险, 加剧热相关呼吸系统疾病的发病风险^[55]。

3 存在问题和关键展望

3.1 多侧重单维绿地指标, 忽略绿色暴露的多维性

绿色基础设施研究是跨尺度、功能复合的应用领域, 这决定了绿色基础设施影响呼吸健康的特征是多维度的。但目前研究所遴选的指标相对单一, 多数研究仍聚焦空间绿度的单维测度。这往往会忽视一些重要的场所性特征。例如, 同等绿度下开敞度和设施数量等小尺度特征的不同, 可能导致与体力活动相关的路径证据不一致^[56]。同时, 植被种类和植物结构等群落特征对空气污染的影响也更为显著^[57]。因此, 亟待完善不同空间尺度下绿色暴露测度方法的基础上, 补充多源微观数据, 基于多维视角明晰绿色基础设施对呼吸健康的影响机制。

3.2 多聚焦孤立绿地空间, 忽略绿色网络的连通性

现有关于绿色暴露对呼吸健康影响的研究中, 自变量多选取孤立的绿色空间特征。事实上, 与绿色空间相比, 绿色基础设施更强调连通性和系统性^[3], 强调城市与周边各绿地的质量及其相互之间的关系与形成网络带来的生态和经济效益^[58]。故绿色基础设施可能具有单一绿色空间不可替代的健康益处^[5]。目前虽涌现出较多以多功能为导向的绿色基础设施研究, 但鲜有以提升人类健康福祉特别是呼吸健康效益为导向的绿色基础设施网络构建研究。在后疫情时代的背景下, 呼吸健康视角下的绿色基础设施网络构建理论亟

待完善补充。

3.3 多局限单一影响路径, 忽略影响机制的耦合性

现有研究中对于绿色暴露的健康结论存在差异性, 其中一个原因即是绿色基础设施对呼吸健康的影响路径复杂多样^[36], 存在正负两方面的健康效应。而现有关于影响路径的研究多集中于空气污染消减或体力活动促进等单一方面, 以较为割裂的视角思考绿色基础设施对呼吸健康的影响机制。这在一定程度上忽略了不同路径间交互作用产生的耦合影响效应。因此, 亟待加强在环境风险暴露和体力活动促进的耦合作用下, 对绿色基础设施呼吸健康效应的综合评估。后续研究可基于“环境风险暴露—体力活动促进”权衡视角^[54], 进一步探索多维路径耦合作用下的绿色暴露影响机制。

3.4 多偏重理论层面描述, 忽略更新优化的实践性

现有研究所关注的科学问题多聚焦绿色基础设施对呼吸健康的影响效应, 多停留于理论的描述性层次, 对绿色基础设施影响呼吸健康的关键指标阈值关注较少^[59]。相关理论研究在健康人居环境建设实践的应用成果难以定量指导绿地规划实践, 尚有以下问题亟待解决。例如, 如何通过城市绿色空间的规划调控 (如针对植被覆盖率、绿视率、郁闭度等的定量管控) 促进居民的呼吸健康福祉提升? 如何将城市绿色空间建设与呼吸健康多维度影响路径进行耦合关联, 引导健康城市空间格局建设? 因此, 需在探明城市绿色空间呼吸健康多路径影响机制的基础上, 引入关键阈值解析技术, 进一步凝练易操作、实践性强的城市绿色空间规划途径和技术方法。

4 结论

绿色基础设施的数量、布局和内部特征均与呼吸健康存在显著关联，其多通过空气质量和体力活动两大中介变量对呼吸健康产生影响。但绿色基础设施对呼吸健康的影响路径较为复杂，现有研究结论存在差异性。目前研究存在侧重单维绿地指标、聚焦孤立绿地空间、局限单一影响路径和偏重理论层面描述的局限性，未来研究需在完善多维度绿色暴露体系的基础上，进一步关注污染暴露—活动促进耦合作用下的绿色基础设施构建模式及其健康影响机制。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

[1] MATSLER A M, MEEROW S, MELL I C, et al. A ‘Green’ Chameleon: Exploring the Many Disciplinary Definitions, Goals, and Forms of ‘Green Infrastructure’[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 214: 104145.

[2] WEBER T, SLOAN A, WOLF J. Maryland’s Green Infrastructure Assessment: Development of a Comprehensive Approach to Land Conservation[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 77(1-2): 94-110.

[3] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5246-5261.

[4] 魏家星, 宋轶, 王云才, 等. 基于空间优先级的快速城市化地区绿色基础设施网络构建——以南京市浦口区为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(04): 1178-1188.

[5] NIEUWENHUIJSEN M J. Green Infrastructure and Health[J]. *Annual Review of Public Health*, 2021, 42: 317-328.

[6] 李畅. 环境流行病学视角下城市绿地空间的健康效应研究[J]. *风景园林*, 2021, 28(08): 94-99.

[7] VENKATARAMANAN V, PACKMAN A I, PETERS D R, et al. A Systematic Review of the Human Health and Social Well-being Outcomes of Green Infrastructure for Stormwater and Flood Management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 868-880.

[8] BOUSQUET J, DAHL R, KHALTAEV N. Global Alliance Against Chronic Respiratory Diseases[J]. *Allergy*, 2007, 62(3): 216-223.

[9] VAN DER WIEL E, HACKEN N H T T, POSTMA D S, et al. Small-airways Dysfunction Associates with Respiratory Symptoms and Clinical Features of Asthma: A Systematic Review[J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2013, 131(3): 646-657.

[10] PELLEGRINO R. Interpretative Strategies for Lung Function Tests[J]. *European Respiratory Journal*, 2005, 26(5): 948-968.

[11] YU K, ZHANG Q, MENG X, et al. Association of Residential Greenness with Incident Chronic Obstructive Pulmonary Disease: A Prospective Cohort Study in the UK Biobank[J]. *Environment International*, 2023, 171: 107654.

[12] ALMEIDA D Q, PACIENCIA I, MOREIRA C, et al. Green and Blue Spaces and Lung Function in the Generation XXI Cohort: A Life-course Approach[J]. *European Respiratory Journal*, 2022, 60(6): 2103024.

[13] BAUWELINCK M, CASAS L, NAWROT T S, et al. Residing in Urban Areas with Higher Green Space is Associated with Lower Mortality Risk: A Census-based Cohort Study with Ten Years of Follow-up[J]. *Environment International*, 2021, 148: 106365.

[14] WU J, YANG M, XIONG L, et al. Health-oriented Vegetation Community Design: Innovation in Urban Green Space to Support Respiratory Health[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 205: 103973.

[15] YU H, HU L, ZHOU Y, et al. Association Between Eye-level Greenness and Lung Function in Urban Chinese Children[J]. *Environmental Research*, 2021, 202: 111641.

[16] SHEN Y, LUNG S C. Mediation Pathways and Effects of Green Structures on Respiratory Mortality via Reducing Air Pollution[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 42854.

[17] 谢波, 陈宇杰, 庞哲, 等. 面向呼吸健康的国土空间规划生态空间布局优化[J]. *城市规划学刊*, 2022(05): 67-73.

[18] ROSCOE C, MACKAY C, GULLIVER J, et al. Associations of Private Residential Gardens Versus Other Greenspace Types with Cardiovascular and Respiratory Disease Mortality: Observational Evidence from UK Biobank[J]. *Environment International*, 2022, 167: 107427.

[19] LEE S, BAEK J, KIM S W, et al. Tree Canopy, Pediatric Asthma, and Social Vulnerability: An Ecological Study in Connecticut[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 225: 104451.

[20] ASRI A K, LIU T, TSAI H, et al. Residential Greenness and Air Pollution’s Association with Nasal Microbiota Among Asthmatic Children[J]. *Environmental Research*, 2023, 219: 115095.

[21] CILLUFFO G, FERRANTE G, FASOLA S, et al. Association Between Greenspace and Lung Function in Italian Children-adolescents[J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2022, 242: 113947.

[22] ZENG X, LOWE A J, LODGE C J, et al. Greenness Surrounding Schools is Associated with Lower risk of Asthma in Schoolchildren[J]. *Environment International*, 2020, 143: 105967.

[23] LEE H, WU Y, ASRI A K, et al. Linkage Between Residential Green Spaces and Allergic Rhinitis Among Asian Children[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 202: 103868.

[24] ELDEIRAWI K, KUNZWEILER C, ZENK S, et al. Associations of Urban Greenness with Asthma and Respiratory Symptoms in Mexican American Children[J]. *Annals of Allergy Asthma & Immunology*, 2019, 122(3): 289-295.

[25] YANG L, YANG Z C, ZHAO Z H, et al. Exposure to Greenness, Air Pollution and Respiratory Health Among Pre-school Children in Northern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2023, 298: 119608.

[26] DZHAMBOV A M, LERCHER P, RÜDISSE J, et al. Allergic Symptoms in Association with Naturalness, Greenness, and Greyness: A Cross-sectional Study in Schoolchildren in the Alps[J]. *Environmental Research*, 2021, 198: 110456.

[27] YE T, GUO Y, ABRAMSON M J, et al. Greenspace and Children’s Lung Function in China: A Cross-sectional Study Between 2013 and 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 858: 159952.

[28] E ALMEIDA L D O, FAVARO A, RAIMUNDO-COSTA W, et al. Influence of Urban Forest on Traffic Air Pollution and Children Respiratory Health[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(3): 175.

[29] LI L, HART J, COULL B, et al. Effect of Residential Greenness and Nearby Parks on Respiratory and Allergic Diseases Among Middle School Adolescents in a Chinese City[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(6): 991.

[30] YE Y, QIU H. Using Urban Landscape Pattern to Understand and Evaluate Infectious Disease Risk[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 62: 127126.

[31] JAAFARI S, SHABANI A A, MOEINADDINI M, et al. Applying Landscape Metrics and Structural Equation Modeling to Predict the Effect of Urban Green Space on Air Pollution and Respiratory Mortality in Tehran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(7): 412.

- [32] STAS M, AERTS R, HENDRICKX M, et al. Exposure to Green Space and Pollen Allergy Symptom Severity: A Case-crossover Study in Belgium[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146682.
- [33] DONOVAN G H, LANDRY S M, GATZIOLIS D. The Natural Environment, Plant Diversity, and Adult Asthma: A Retrospective Observational Study Using the CDC's 500 Cities Project Data[J]. *Health and Place*, 2021, 67: 102494.
- [34] ZHANG M, DONG R, WANG X. Plants with Health Risks Undermine Residents' Perceived Health Status, Evaluations and Expectations of Residential Greenery[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 216: 104236.
- [35] WINNICKI M H, DUNN R R, WINTHER-JENSEN M, et al. Does Childhood Exposure to Biodiverse Greenspace Reduce the Risk of Developing Asthma?[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 850: 157853.
- [36] MARKEVYCH I, SCHOIERER J, HARTIG T, et al. Exploring Pathways Linking Greenspace to Health: Theoretical and Methodological Guidance[J]. *Environmental Research*, 2017, 158: 301-317.
- [37] 干靓, 杨伟光, 王兰. 不同健康影响路径下的城市绿地空间特征[J]. *风景园林*, 2020, 27(04): 95-100.
- [38] 岳峰, 傅凡, 戴菲, 等. 基于遥感反演的绿色空间景观格局对气溶胶污染的影响[J]. *中国园林*, 2021, 37(09): 83-88.
- [39] 邱玲, 刘芳, 张祥, 等. 城市公园不同植被结构绿地削减空气颗粒物浓度研究[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(10): 1685-1694.
- [40] 孙晓丹, 李海梅, 刘霞, 等. 不同绿地结构消减大气颗粒物的能力[J]. *环境化学*, 2017, 36(02): 289-295.
- [41] KWON M Y, LEE J S, PARK S. The Effect of Outdoor Air Pollutants and Greenness on Allergic Rhinitis Incidence Rates: A Cross-sectional Study in Seoul, Korea[J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2019, 26(3): 258-267.
- [42] 方博, 钱耐思, 陈蕾, 等. 2013-2017年上海市PM_{2.5}短期暴露对人群呼吸系统疾病超额死亡的风险评估[J]. *疾病监测*, 2022, 37(08): 1112-1117.
- [43] ZHANG J, WANG Y, FENG L, et al. Effects of Air Pollution and Green Spaces on Impaired Lung Function in Children: A Case-control Study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(8): 11907-11919.
- [44] YAN F C, ZHANG Z, LIN Y C, et al. Subpollens Delivery of *Platanus Acerifolia* Pollen Allergen Pla a3 and Nucleic Acid into Lungs and Cells[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2019, 513(4): 767-774.
- [45] 龚惠莉, 崔俊. 生物多样性视角下的植物花粉致敏问题溯源及景观设计对策研究[J]. *中国园林*, 2022, 38(08): 111-116.
- [46] AERTS R, BRUFFAERTS N, SOMERS B, et al. Tree Pollen Allergy Risks and Changes Across Scenarios in Urban Green Spaces in Brussels, Belgium[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 207: 104001.
- [47] SOGA M, YAMAURA Y, AIKOH T, et al. Reducing the Extinction of Experience: Association Between Urban Form and Recreational Use of Public Greenspace[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 143: 69-75.
- [48] SOGA M, YAMANOI T, TSUCHIYA K, et al. What are the Drivers of and Barriers to Children's Direct Experiences of Nature?[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 180: 114-120.
- [49] 李宇涵, 申悦. 健康视角下社区环境对休闲性体力活动的影响研究进展[J]. *科技导报*, 2024, 42(03): 63-74.
- [50] 符兴源, 刘帅, 温琦, 等. 城市公园绿地质量对青少年体力活动影响——以哈尔滨市为例[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(32): 13129-13136.
- [51] 王巍, 谌晓安, 张福兰, 等. 体力活动与成功老龄化: 纵向队列研究的系统回顾与Meta分析[J]. *解放军护理杂志*, 2022, 39(06): 17-21.
- [52] BAHLS M, ITTERMANN T, EWERT R, et al. Physical Activity and Cardiorespiratory Fitness: A Ten-year Follow-up[J]. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2021, 31(3): 742-751.
- [53] YEN H, CHIU H, HUANG H. Green and Blue Physical Activity for Quality of Life: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Control Trials[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 212: 104093.
- [54] TAINIO M, JOVANOVIĆ ANDERSEN Z, NIEUWENHUIJSEN M J, et al. Air Pollution, Physical Activity and Health: A Mapping Review of the Evidence[J]. *Environment International*, 2021, 147: 105954.
- [55] NGUYEN V T, DOAN Q, TRAN N N, et al. The Protective Effect of Green Space on Heat-related Respiratory Hospitalization Among Children Under 5 Years of Age in Hanoi, Vietnam[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(49): 74197-74207.
- [56] 董雯, 朱逊, 赵晓龙. 社区绿道建成环境特征与体力活动强度关联性研究——以深圳市为例[J]. *风景园林*, 2021, 28(12): 93-99.
- [57] ABHIJITH K V, KUMAR P, GALLAGHER J, et al. Air Pollution Abatement Performances of Green Infrastructure in Open Road and Built-up Street Canyon Environments: A Review[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 162: 71-86.
- [58] WANG S, WU M, HU M, et al. Promoting Landscape Connectivity of Highly Urbanized Area: An Ecological Network Approach[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107487.
- [59] YU Z, YANG G, LIN T, et al. Exposure Ecology Drives a Unified Understanding of the Nexus of (Urban) Natural Ecosystem, Ecological Exposure, and Health[J]. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024, 10: 165.