

DOI: 10.20103/j.stxb.202404250934

石川森, 陈天. 空气污染暴露视角下城市绿色基础设施供需关系的空间格局——以天津市为例. 生态学报, 2025, 45(8): 3776-3789.

Shi C M, Chen T. Spatial patterns of urban green infrastructure supply-demand relationship from the perspective of air pollution exposure in Tianjin. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 3776-3789.

空气污染暴露视角下城市绿色基础设施供需关系的空间格局

——以天津市为例

石川森, 陈 天 *

天津大学, 天津 300072

摘要: 空气污染暴露对公众健康造成危害, 而绿色基础设施 (GI) 具有减轻空气污染的生态系统服务功能, 是重要的公共资源与增进居民健康的公共服务设施。开展空气污染暴露视角下的 GI 供需研究, 将人口空气污染暴露导致的健康风险定义为 GI 需求, GI 净化空气的能力定义为 GI 供给, 使用土地利用回归 (LUR) 模型获取高分辨率 2020 年 11 月—2021 年 10 月天津市 $PM_{2.5}$ 空间分布, 使用人口密度、土地覆盖与 NDVI 数据和 Fragstats 等软件分别测度 GI 供给与需求指标。提出供需配适关系划分方法并绘制空间分布, 揭示 GI 供需配适关系的失衡现象。结论如下: (1) $PM_{2.5}$ 浓度分布具有时间差异与城乡空间差异, 人类活动影响污染浓度; (2) 城市建成区 GI 资源无法满足高暴露风险带来的健康需求, 农田、盐场植被类型单一或覆盖不足、景观格局破碎, 限制 GI 供给能力; (3) 采暖季污染物浓度升高与地表植被流失加剧 GI 供需失配, 在高密度建成区与乡镇村庄表现为不同的供需矛盾。针对不同供需配适关系类型区域提出差异化优化策略, 以期优化公共资源配置、健康城市空间治理提供理论与数据支持。

关键词: 空气污染暴露; 绿色基础设施; 供需关系; 空间格局; 天津

Spatial patterns of urban green infrastructure supply-demand relationship from the perspective of air pollution exposure in Tianjin

SHI Chuanmiao, CHEN Tian *

Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Air pollution is one of the most pressing environmental issues, and prolonged exposure to air pollution, which is linked to several chronic diseases, represents a notable risk factor for public health. Green infrastructure (GI), through its ecosystem service of reducing air pollution, plays a crucial role in addressing this challenge. As a vital public resource and an integral component of urban infrastructure, properly planned GI can optimize its service efficiency, enhance urban environmental quality, and improve residents' health and quality of life. We carried out a study on the GI supply-demand relationship in Tianjin, focused on air pollution exposure. Using the Land Use Regression (LUR) method, we analyzed the high-resolution spatial distribution of $PM_{2.5}$ from November 2020 to October 2021. The demand for GI stems from residents' need to mitigate the risks associated with prolonged exposure to air pollution. It also reflects their expectations for GI to reduce air pollution and enhance their health and well-being. Population exposure risk (PER) was quantified as the GI demand, using data on $PM_{2.5}$ distribution and population density. GI's capacity to clean the air was evaluated as the GI

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078329); 国家自然科学基金项目 (52378066)

收稿日期: 2024-04-25; **网络出版日期:** 2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chentian5561@vip.sina.com

supply, using land cover and NDVI datasets to calculate the supply indicators. Subsequently, we proposed a classification method to determine the types of GI supply-demand relationships, representing the degree to which GI supply fits demand. Utilizing Fragstats and ArcGIS, we calculated these indicators and mapped the spatial and temporal distribution to highlight critical imbalances in the GI supply-demand relationship. The results showed the following conclusions. (1) The distribution of air pollutants exhibited temporal variations and urban-rural spatial differences, with human activities significantly contributing to $PM_{2.5}$ levels. (2) Air pollution exposure was closely associated with high-intensity urban development, as GI resources in those areas were inadequate to address the health demands caused by high exposure risks. (3) The vegetation in farmlands and salt fields was monoculture or insufficiently covered, and the landscape pattern was fragmented which reduced GI supply. (4) The increase in pollutant concentrations during the heating season and the loss of surface vegetation exacerbated the mismatch between GI supply and demand, manifesting in different supply-demand conflicts in high-density built-up areas and rural villages. We suggested tailored optimization strategies based on varying supply-demand correlations and types of surface vegetation. This study identified the issue of spatial imbalances in the GI supply-demand relationship from the perspective of air pollution exposure, aiming to provide theoretical and practical insights for optimizing the allocation of GI resources and for healthy city governance.

Key Words: air pollution exposure; green infrastructure; supply-demand relationship; spatial patterns; Tianjin

空气污染是显著的公众健康威胁,已有研究证实城市空气污染与多种慢性疾病与健康损害相关,2000—2016 年我国归因于长期 $PM_{2.5}$ 污染暴露的死亡人数达 3080 万^[1]。空气污染暴露指居民与空气污染物直接暴露接触的状态或过程^[2],通勤、休闲娱乐、工作等户外活动均会增加人群接触空气污染的机会并导致健康风险,使空气污染暴露成为重大公共卫生问题,为城市可持续发展与居民健康带来挑战,要求公共政策积极应对、寻找改善途径。

绿色基础设施 (Green Infrastructure, GI) 是由相互关联的生态系统、生态技术以及基础设施组成的系统^[3],可以提供抵御城市洪涝灾害、调节水体污染、保育城市生境、减轻空气污染和缓解城市热岛等多种生态系统服务,并在景观、文化与休闲功能等层面提供福祉^[4]。GI 可以增加污染物疏散有利条件、阻滞并吸附大气污染物,一项在武汉开展的研究显示,当城市绿化覆盖率增加 10% 时,可以降低 13.83% 的 PM_{10} 与 7.58% 的 $PM_{2.5}$ 浓度^[5]。GI 在削减颗粒物浓度、改善空气质量方面表现出不可忽视的价值。

GI 作为重要的公共资源,合理的空间配置可以提升其服务效率、确保环境与社会正义^[6]。近年来,GI 影响人类生存环境从而间接影响公共健康成为热点议题,供需关系、空间表达与异质性辨析尚待研究^[7-9]。本文基于“居民应对空气污染的健康需求”与“GI 提供减轻空气污染的生态系统服务”路径,开展空气污染暴露视角下的 GI 供需关系研究。需求指人类消耗、使用或期望的服务量,包含服务的实际使用和消费、降低风险、价值偏好等,本研究的 GI 需求是居民因长期暴露于空气污染产生的降低风险需求,与对 GI 减轻空气污染服务、满足自身健康福祉的期望^[10-11]。供给指 GI 为人类生产产品与服务的能力,空气污染暴露研究视角关注 GI 减轻空气污染、缓解居民长期健康风险的能力^[12]。供给与需求构成了生态系统与人类社会的互馈过程,基于供需空间密度相适应原则,本研究将供需关系定义为 GI 提供的减轻空气污染服务对居民规避健康风险需求的满足程度,通过分析其空间分布特征表征 GI 生态系统服务效率与环境资源配置公平性,识别规划管理的差异性与优先区域,为建构公平环境提供依据^[13]。

本文以我国特大城市天津作为研究区域,建立 LUR 模型获取高精度污染物浓度分布,将人口空气污染暴露风险作为 GI 需求指标、可获得性与斑块聚集性作为供给指标,随后划分供需配适类型并揭示了研究区域空气污染暴露视角下 GI 时空分布的供需失配现象。将公共健康、地理与城市科学研究融入 GI 供需关系研究,以期优化城市基础设施格局、保障公共健康的空间治理提供可信依据。

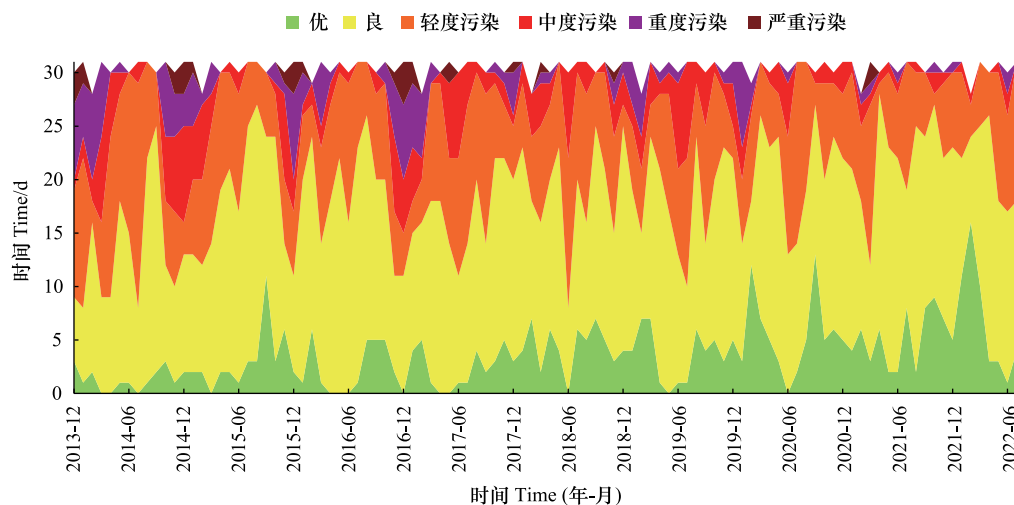


图2 天津空气质量月度分布情况(2013年12月至2022年9月)

Fig.2 Tianjin air quality index (AQI) monthly distribution (December 2013 to September 2022)

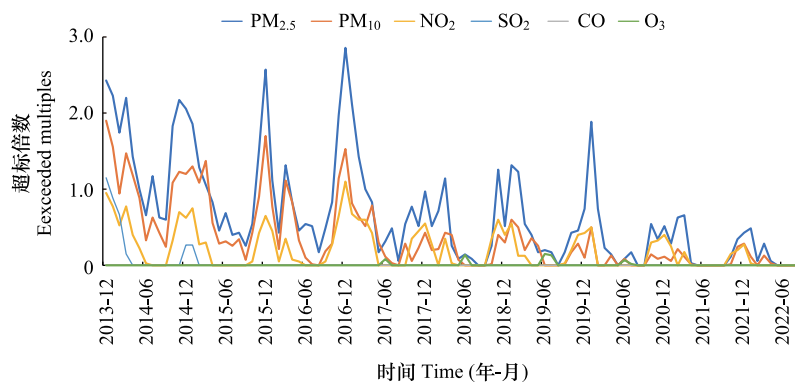


图3 天津主要空气污染物超标倍数(2013年12月至2022年9月)

Fig.3 Exceedance of major air pollutants in Tianjin (December 2013 to September 2022)

自全球 MODIS 归一化植被指数 (SDC500) (<https://data-starecloud.pcl.ac.cn/zh/resource/27>), 计算研究期间月均值。由于 NDVI 数据精度为 0.05° , 最终在 ArcGIS 中计算 GI 供需配适网格为 $5\text{km} \times 5\text{km}$ 。

2.2 高精度空气污染空间分布模拟方法

政府公开的环境空气质量监测数据多为区县面域数据或监测站点数据, 难以反映污染物在地理空间中的连续分布, 因此需要借助分析模拟方法计算高精度空气污染分布。常用方法适用性比较见表 1。综合考虑方法优劣与获取数据可行性, 选择土地利用回归模型 (LUR)。

土地利用回归模型 (Land Use Regression, LUR) 可分析道路网络、交通量、土地利用、海拔等地方环境特征与 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布的回归关系^[21]。经过改进和应用, 模型自变量类别逐步拓展、解释力逐渐升高^[28], 是模拟城市尺度大气污染物浓度时空分异最主要、最体系化的方法之一。LUR 建模包含下列四个步骤:

(1) 因变量生成

污染物浓度监测数据是模型因变量。天津市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度波动周期与采暖周期相符, 与集中供暖相关的化石燃料燃烧是北方城市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高的主要原因^[29]。采暖季与非采暖季的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响要素不同, 对采暖季与非采暖季分别进行 LUR 建模可以提高模型精确度^[25]。计算采暖季 (2020 年 11 月—2021 年 3 月) 和非采暖季 (2021 年 4 月—2021 年 10 月) $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值, 生成因变量。

表 1 不同方法的应用特征对比

Table 1 Comparison of characteristics of different methods

研究方法 Research methods	优势 Strengths	劣势 Weaknesses	应用范例 Application examples
遥感反演法 Remote sensing retrieval	可以进行大范围的模拟,可用于跨区域研究,数据需求较低	受卫星限制,空间分辨率低,时间分辨率有限,难以评估误差,不适于中小范围研究	[18]
空间插值法 Spatial interpolation	数据需求较低,经过多次迭代,方法较为成熟	监测站点数量不足或分布不均时,准确性差	[19]
扩散模型 Diffusion model	分辨率高、准确性高,适用性广	数据需求高,对计算机算力要求高,通常用于小尺度研究	[20]
土地利用回归模型(LUR) Land use regression	预测值与测量值之间具有较好的一致性,易于整理输入数据,实用且成本低,有一定可转移性	对监测点的位置和密度敏感	[21—27]

(2) 自变量生成

城市尺度的 LUR 建模常用变量包含交通量、排放源、气象参数、社会经济因素等^[25],结合同类研究经验与天津市实际情况,选取道路交通、土地利用、人口、兴趣点(POI)、气象和地理条件六类影响因子(表 2)^[22,26—29]。划分多重缓冲区有助于确定自变量对污染浓度解释力最强的空间精度,根据地理数据精度和污染物的扩散规律确定缓冲区半径,选取 300、500、1000、1500、2000、3000m。

表 2 用于 LUR 建模的自变量

Table 2 Independent variables used for LUR modeling

变量类别 Variable categories	变量名称 Variables	单位 Unit	缓冲区半径 Buffer radius	数据来源 Data Sources
道路交通 Road traffic	根据道路等级与运力分为四类	km	300、500、1000、 1500、2000、3000m	OpenStreetMap (https://www.openstreetmap.org/)
土地利用 Land use	居住、商业、工业、交通、公共管理与服务、公园和绿地	%		中国基本城市土地利用类型制图(EULUC-China)(https://data-starccloud.pcl.ac.cn/)
	水体、不透水地表、裸地、耕地、森林、草地、灌木林地、湿地	%		全球土地覆盖制图(FROM-GLC10)(https://data-starccloud.pcl.ac.cn/)
人口 Population	人口密度	万人	/	WorldPop2020 数据集 (https://hub.worldpop.org/)
兴趣点(POI) Point of interest	加油站数量	个	1500、2000、3000	Python 抓取高德地图 API (https://lbs.amap.com/)
	最近加油站距离	km	/	
	丧葬设施距离	km	/	
	公交车站数量	个	300、500、1000、1500、 2000、3000m	
	餐厅数量	个		
	工厂数量	个		
气象 Weather	气温	℃	/	欧洲中期天气预报中心 ERA5 数据集 (https://www.ecmwf.int/)
	风速	m/s	/	
	相对湿度	%	/	
	降水量	mm	/	
地理条件 Geographical conditions	高程	m	/	DEM 数据(www.resdc.cn/)
	距海岸线距离	Km	/	GIS 生成

API:应用程序编程接口 Application programming interface;DEM:数字高程模型 Digital elevation model

(3) 模型构建

在 SPSS 26.0 中采用后向算法,LUR 模型基本公式为^[29]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

式中, y 为因变量, $X_1 \cdots X_n$ 为自变量, $\beta_0 \cdots \beta_n$ 为待定系数, ε 为随机变量。

(4) 模型精度验证

使用留出交叉验证 (Holdout cross-validation), 每个模型分别抽取 10%、25%、50% 样本点作为验证集重复 3 次, 比较模拟值与实测值的吻合度验证模型精度, 可基于较少站点开发模型、准确评估 LUR 模型解释力^[30-31]。

(5) 回归映射

使用 ArcGIS 10.2 对研究区进行网格化处理, 根据 LUR 模型计算网格预测点的 $PM_{2.5}$ 浓度, 使用克里金插值法生成研究区的 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布。

2.3 定义需求: 空气污染暴露测度

居民是 GI 的消费主体, 抵御空气污染暴露风险的健康需求催生了对 GI 服务的期望。采用人口暴露相对风险模型 (PER) (公式 2) 量化空气污染暴露风险与公共健康损失, 作为 GI 需求的量化指标。高 $PM_{2.5}$ 浓度、高人类活动强度的区域, 具有较高的净化空气需求^[9, 32]。

$$PER_j = \frac{P_j \times C_j}{\sum_{j=1}^m (P_j \times C_j)} \quad (2)$$

式中, PER_j 是网格 j 的 PER, C_j 是网格 j 的平均 $PM_{2.5}$ 浓度, P_j 是网格 j 的人口密度, m 是研究区域的总网格数。

2.4 定义供给: GI 供给指标选取与测度

GI 通过提供净化空气的生态系统服务降低污染暴露健康风险。为了量化 GI 提供服务的能力, 回顾同类研究后, 选取可获得性与斑块聚集性两个指标^[33-34]。

可获得性指 GI 的物理量, 即单位面积内的绿地面积或数量, 量化指标包括归一化植被指数 (NDVI)、绿地覆盖率和树木覆盖密度等^[35]。与绿量、绿地面积等指标相比, NDVI 对降低 $PM_{2.5}$ 浓度贡献最为显著, 可以解释 $PM_{2.5}$ 浓度变化的 15.3%^[36-37]。同时, 斑块聚集性与缓解空气污染相关, 聚集性高、连通性强的 GI 格局具有抗干扰能力与群聚效应, 滞尘作用更为显著^[34]。选择聚集指数 (AI, 单位为%) 表征绿地斑块聚集性, 在 Fragstats 4.2 中计算得到。GI 供给计算公式为:

$$S_j = NDVI_j \times AI_j \quad (3)$$

式中, S_j 是网格 j 的 GI 供给水平指数。

2.5 GI 供需配适关系量化

GI 供需配适关系指供给与需求间协调、适应的程度。借鉴赵海霞等划分供需配适类型区的方法, 对供给与需求进行归一化处理后, 分别由高至低划分为 5 个等级并构建排列矩阵, 形成由“极高供给-极低需求”至“极低供给-极高需求”25 种配适关系^[9]。供给水平等于或高于需求水平的区域为供需平衡或供给充足类型, 重点关注 GI 供给低于需求的区域类型, 其需求满足程度低于研究区平均水平。在 Geoda 1.12 中对研究区域“需求-供给-配适关系”三个指标进行层次聚类分析, 进一步划分空间类型并分析成因^[38]。通过存量改造与资源整合补足 GI 需求、抑制空气污染暴露的健康损害是空间治理的必要职责。

3 结果与分析

3.1 GI 需求的空间格局与特征

3.1.1 LUR 模型与 $PM_{2.5}$ 空间分布特征

使用后向回归算法并验证精度后, 得到采暖季与非采暖季 LUR 模型如下:

$$y_{\text{heating}} = 41.262 + 0.052x_{\text{industrial300}} + 9.597x_{\text{wetland1500}} + 4.512x_{\text{temp}} \quad (4)$$

$$y_{\text{nonheating}} = 102.444 + 1.057x_{\text{class2_500}} + 0.057x_{\text{cropland300}} + 4.746x_{\text{grassland500}} - 3.470x_{\text{wetland300}} - 0.834x_{\text{humid}} - 0.237x_{\text{rain}} - 0.777x_{\text{gasdist}} \quad (5)$$

模型自变量含义见表 3,自变量数分别为 3 个和 7 个,在 LUR 模型自变量数量的普遍范围内。采暖季与非采暖季模型调整 R^2 分别为 0.856 和 0.871,表示模型能够解释 85% 以上的 $PM_{2.5}$ 浓度变化,拟合结果较为理想。精度验证结果与同类研究相比较为理想,预测值与实测值模拟精度 R^2 分别为 0.890 和 0.864,建模结果可用于研究。

表 3 LUR 模型中自变量释义
Table 3 Interpretation of independent variables in LUR model

模型时段 Seasons	编码 Code	释义 Interpretation	编码 Code	释义 Interpretation
采暖季 Heating season	industrial300	300m 缓冲区内工业用地面积占比	Temp	气温
	wetland1500	1500m 缓冲区湿地面积占比		
模型时段 Seasons	编码 Code	释义 Interpretation	编码 Code	释义 Interpretation
非采暖季 Non-heating season	class2_500	500m 缓冲区内二级道路长度	Humid	相对湿度
	cropland300	300m 缓冲区内耕地面积占比	Rain	降水量
	grassland500	500m 缓冲区内草地面积占比	Gasdist	最近加油站距离
	wetland300	300m 缓冲区内湿地面积占比		

在 GIS 中进行空间映射,得到 2km×2km $PM_{2.5}$ 浓度空间分布如图 4。

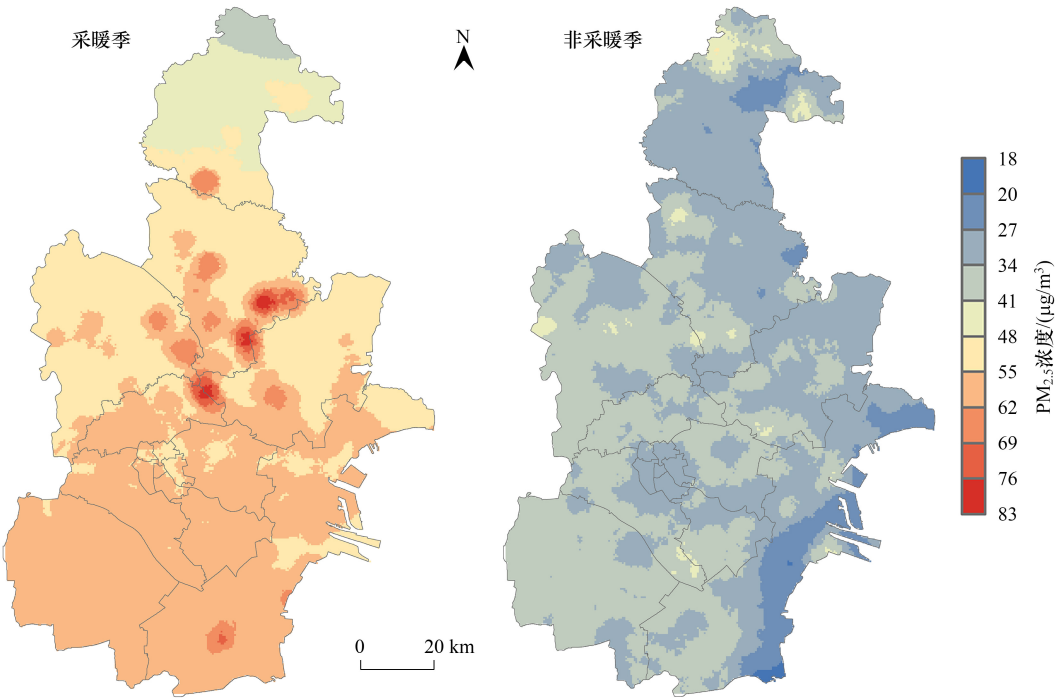


图 4 采暖季与非采暖季 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布
Fig.4 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentrations in heating and non-heating seasons

(1) $PM_{2.5}$ 污染超标情况存在时间分布差异与城乡分布差异

研究区域采暖季平均 $PM_{2.5}$ 浓度是非采暖季的 1.64 倍,采暖季全域浓度均高于《环境空气质量标准》(GB3095—2012)规定的年均 $35\mu g/m^3$,非采暖季 28% 市域面积污染物超标。采暖季化石燃料燃烧与大气扩散条件差导致污染浓度升高^[39],暴露风险更高。

中心城区和滨海新区建成区的污染物浓度略低于周边的郊县各区,由于耕地的植被结构单一、焚烧秸秆和土壤粉尘等^[40],乡镇村庄污染浓度更高,且居民抵御健康风险的能力较弱,城乡空气污染差异成为社会公正问题。

(2) 农业与工业生产、道路交通等人类活动对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有显著影响

模型中与人类生产生活相关的自变量可以划分为以下三类:1) 与农业生产有关,如草地、湿地与耕地,对比卫星图观察后发现,大多是用于农业生产的农田、养殖池塘和盐场;2) 与工业生产有关,工业用地在 300m 缓冲区内增加采暖季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度;3) 与道路交通有关,如 500m 缓冲区内二级道路长度、300m 内公交站数量和最近加油站距离。

3.1.2 空气污染暴露空间格局与特征

采暖季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,在人口空间分布相对稳定的情况下,采暖季的研究区域整体人口空气污染暴露风险显著高于非采暖季,GI 需求更高。

使用人口暴露相对风险模型计算 PER 空间分布格局,如图 5。对比人口暴露风险与天津城市建成区及人口密度分布(图 6),发现人口暴露风险极高值聚集的区域也是高强度城市建设区,与人口密度分布有极强的协同特征。人口密度较高的城市建成区、乡镇中心所在地人口暴露风险高于全域平均水平,风险极高值位于中心城区与滨海新区核心区,相应产生极高的 GI 服务需求;人口稀少的乡村地区暴露风险一般低于平均水平。

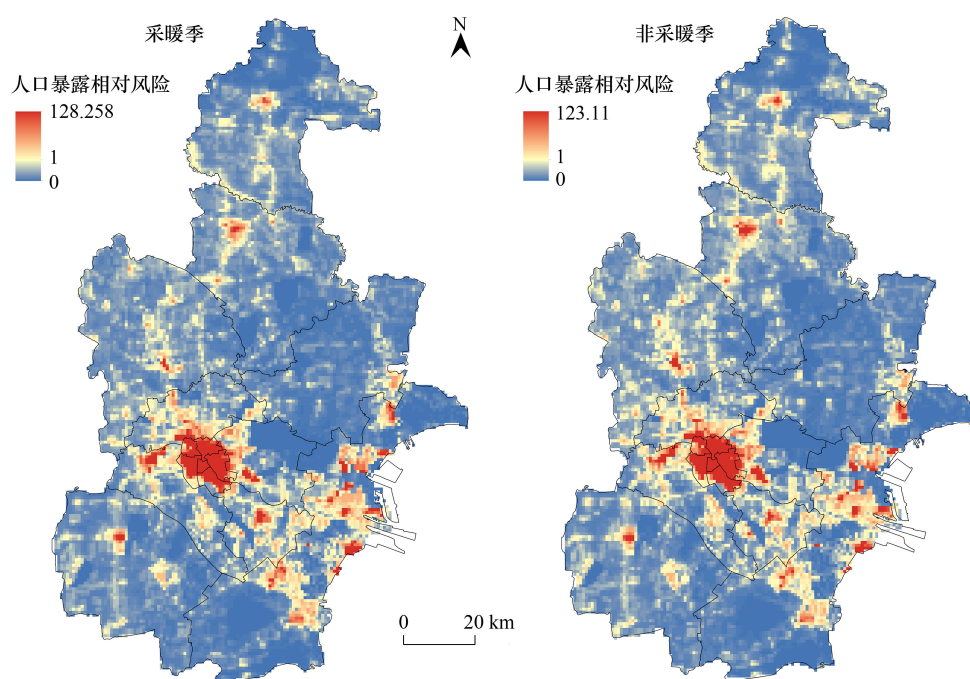


图 5 采暖季与非采暖季人口暴露风险分布

Fig.5 Distribution of population exposure risk in heating and non-heating seasons

3.2 GI 供给空间格局与特征

分别绘制采暖季与非采暖季 GI 供给分布如图 7,具有下列特征:

(1) 空间分布特征

研究区域 GI 供给总体呈现北高南低、周边区县高中心城区低的空间分布特征。北部蓟州区山地蕴含大量的 GI 资源,而东南部沿海大面积盐场地表植被流失严重,GI 供给能力极弱。中心城区、滨海新区与周边区县的城市建成区 NDVI 相对较低,非建成区中的草地与林地等 GI 供给较高,耕地因植被结构单一且聚集度低,导致乡村地区 GI 供给水平差异较大。

(2) 时间演变特征

采暖季与非采暖季 NDVI 最大值分别是 0.34 与 0.66,GI 聚集指数平均值分别为 59.8 与 64.0,符合北方夏季植物生长茂盛,冬季树木落叶、地表植被流失的规律。华北平原植被覆盖度在 11 月—次年 3 月间降至 0.15

及以下,为年内最低值^[41],导致研究区域采暖季 GI 供给水平极低。两个时段间 NDVI 差值较大的山地与林地、农田的植被流失更为显著。

3.3 GI 供需配适关系空间格局与特征

(1) 空间分布特征

GI 供需配适关系的空间分布如图 8,使用层次聚类法划分供需配适类型如图 9。供需配适较差、即供给严重不能满足需求的区域(表 4)亟需空间治理,可以划分为两种类型:第一种是高密度的中心城区与各区县中心区,极高的人口聚集度导致极高的 GI 需求,城市土地开发无法提供匹配的生境资源;第二种是东部沿海的大面积盐场与工业区,无植被覆盖、单一土地利用类型导致 GI 供给极度不足。北部蓟州区污染物浓度低且山地、森林地表植被丰富,GI 供给相对充足,具有创造公共健康增益的潜能;乡村农田一定程度上破坏了景观格局的连续性,削弱地表植被的生态系统服务能力。

(2) 时间演变特征

经计算,研究区域采暖季 GI 供给满足需求的平均程度约为非采暖季的 1/3。化石燃料燃烧导致污染浓度升高,季节性落叶导致地表植被严重损失,GI 供需强烈失衡导致天津市全域空气污染暴露健康风险增高。其中,乡镇村庄的农田、森林在采暖季植被损失显著,低城镇化水平地区面临的危机来自 GI 供给波动导致的健康风险季度性波动;高密度建成区人口分布密集,需同时应对高强度空气污染暴露和植被覆盖不足导致的 GI 供需失衡与采暖季污染物超标导致的 GI 需求升高问题。

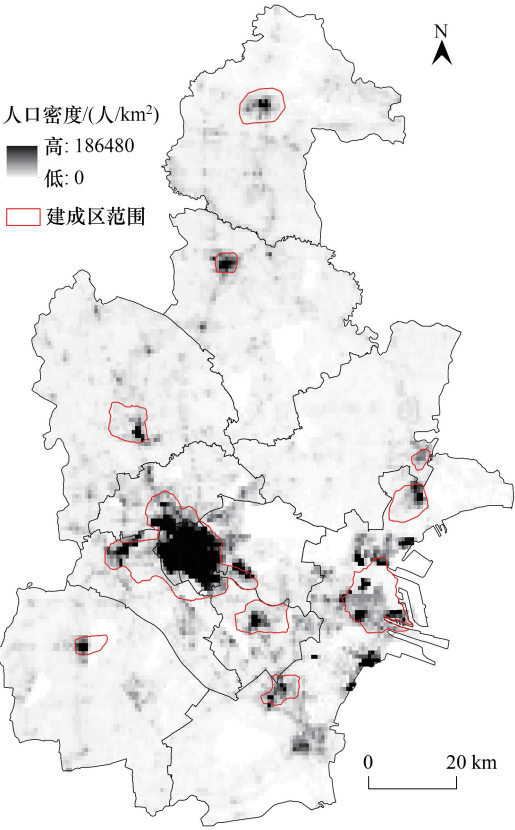


图 6 天津城市建成区与人口密度分布
Fig.6 Distribution of built area and population density

表 4 供需配适评价较差的区县、街道

Table 4 Districts with poor supply-demand matching evaluation		
时段 Seasons	供需配适类型 Supply-demand matching type	行政区与街道 Districts and subdistricts
采暖季 Heating season	中等需求-低供给-供给极度不足	滨海新区(寨上街道、大沽街道、轻纺经济区、海滨街道、南港工业区)、宁河区(板桥镇)、静海区(独流镇)
	高需求-较低供给-供给不足	中心城区全域、东丽区(东丽开发区)、滨海新区(北塘街道)
非采暖季 Non-heating season	中等需求-低供给-供给极度不足	中心城区(和平区、红桥区、河北区、河东区全域、南开区、河西区大部)、西青区(杨柳青镇)、东丽区(东丽开发区)、滨海新区(寨上街道、新港街道、临港工业区)、宝坻区(钰华街道)
	较低需求-中等供给-供给不足	滨海新区大部、宁河区(苗庄镇、芦台经济开发区)、武清区(杨村街道、武清区开发区)、静海区(团泊新城、天津子牙工业园区)、环城四区(东丽区、西青区、津南区、北辰区)邻近中心城区的大部分街道

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 与空气污染暴露相关研究对比

使用 LUR 方法模拟得到的天津市空气污染浓度分布与污染暴露格局与环境部门发布的监测数据及相关

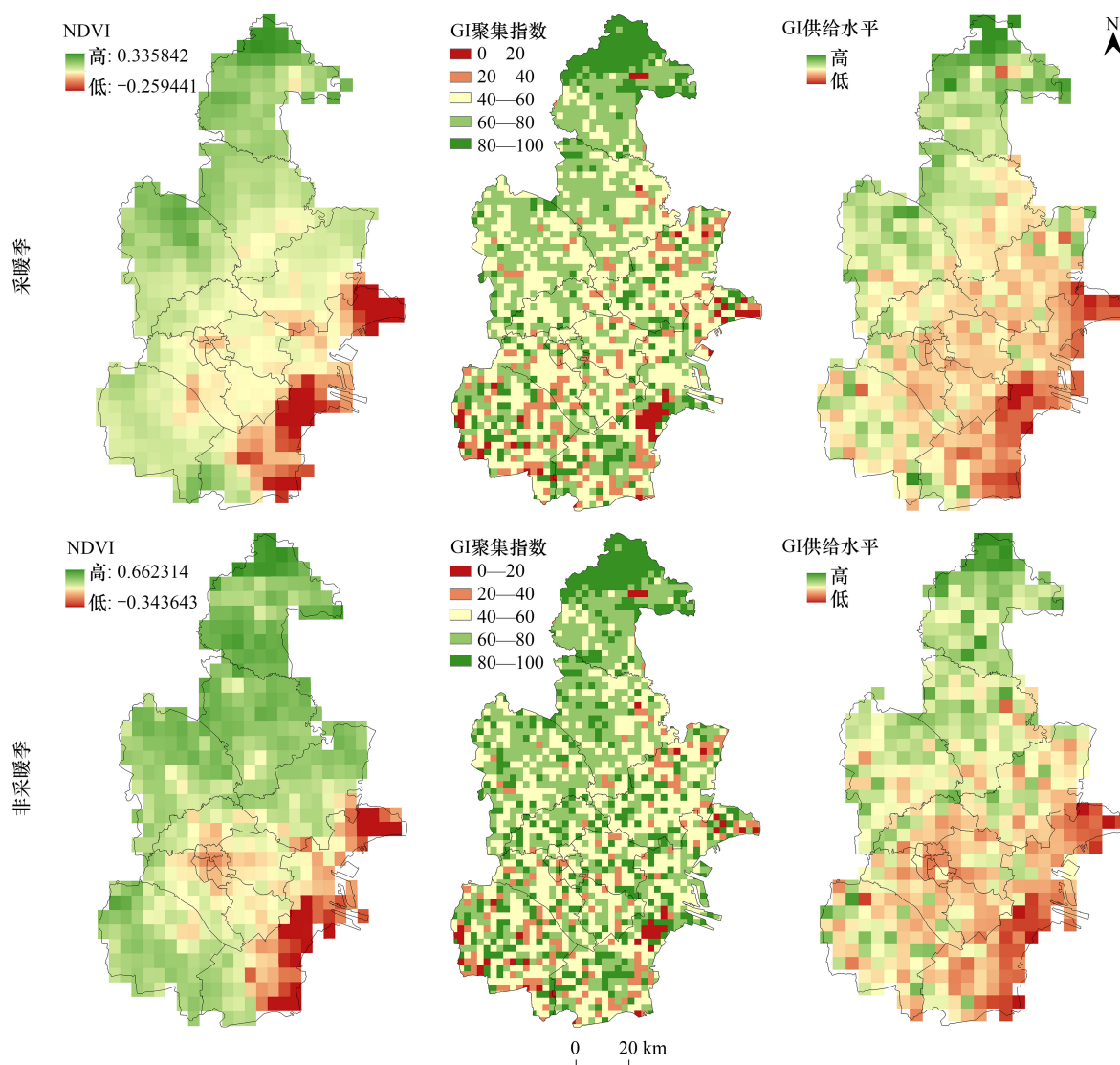


图7 采暖季与非采暖季 GI 供给空间分布

Fig.7 Spatial distribution of GI service in heating and non-heating seasons

研究结论相符。王迪等发现京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 人口暴露风险与人口密度分布有高度的一致性,主城区高风险暴露地区集中^[42];曾穗平等发现污染暴露度由天津市中心到外围圈层递减,应增加绿地系统承污能力以提升城市适应力^[38]。本文以空气污染影响公共健康为标准制定了环境品质评价方法,探索将物理环境研究引入公共健康议题的路径;制定了绿色基础设施评价标准并指出供需失配现象的时空分布特征,缓解研究区域在该领域研究成果欠缺的问题。

(2) 为优化 GI 供需关系、改善城市环境品质提供建议

GI 是与人类生存环境与健康福祉密切相关的公共服务和自然资源^[43],根据配适关系针对性地优化资源配置,是改善空间环境品质、促进公共健康的自然解决方案。

在城市尺度,进行城市总体下垫面规划、增加植被覆盖度和植被高度变异性、建立绿化廊道以增强斑块连通性可以有效提高 GI 供给、改善空气质量^[36]。城市植被去除 $\text{PM}_{2.5}$ 、调节空气质量带来的健康效益价值可达 3800 美元/ hm^2 (纽约)^[44]。研究区域存在乡村地区农田与农业生产导致污染物浓度较高、大面积盐场 GI 供给极低的问题,耕地与盐场破碎化布局有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降,应加强耕地污染治理,进一步扩大林草规模、丰

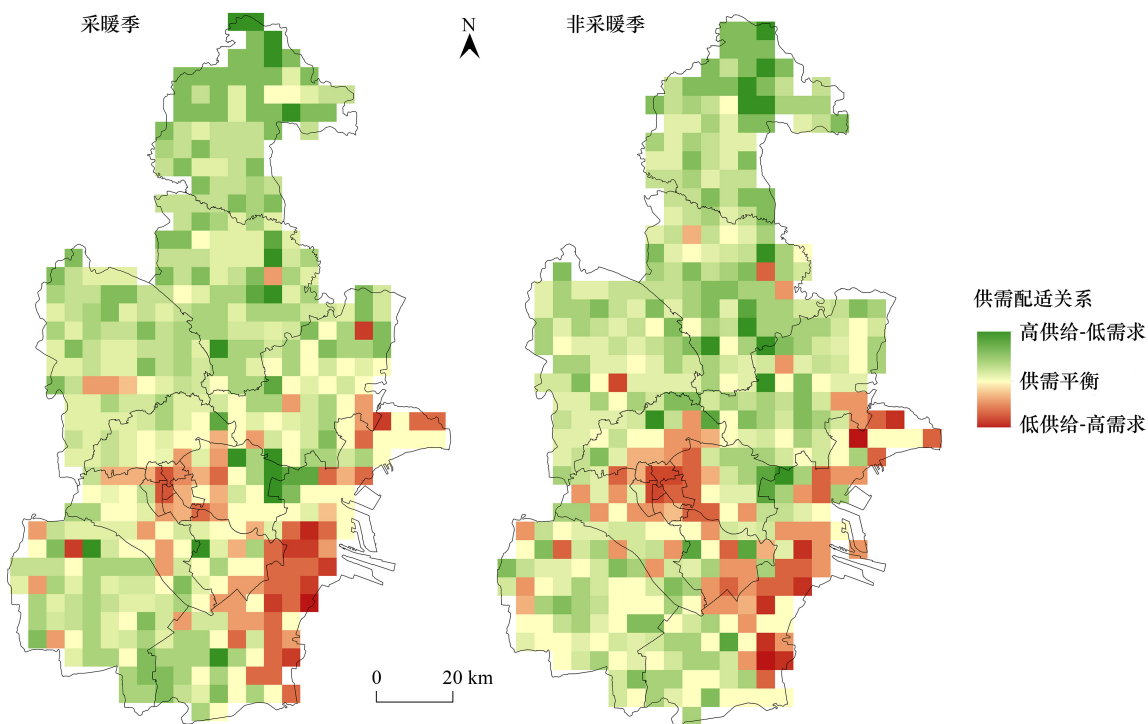


图8 采暖季与非采暖季 GI 供需配适关系分布

Fig.8 Distribution of GI supply-demand relationship in heating and non-heating seasons

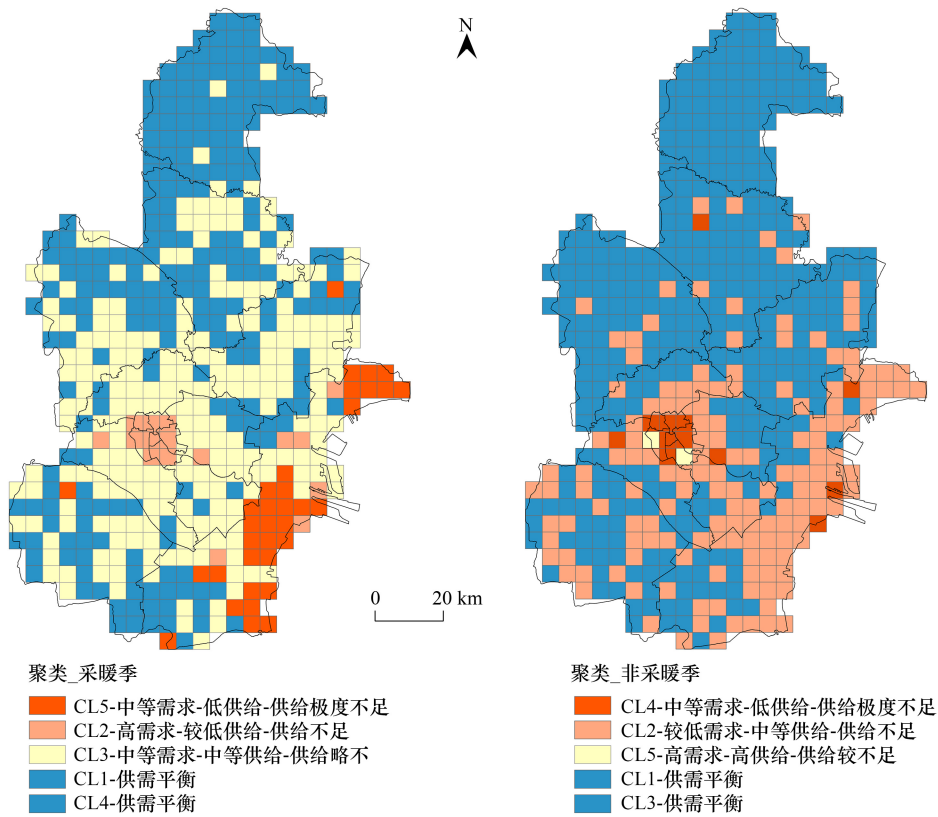


图9 采暖季与非采暖季供需配适类型

Fig.9 The types of supply-demand relationship in the heating and non-heating seasons

CL: 聚类 Cluster

富植被类型,推进退耕还林还草,合理控制人工地表规模^[40],并通过构建生态源地和生态廊道、建设生态岸线等方式,减少连续的 GI 供给不足区域对生态格局的负外部效应影响。

对于高密度建成区而言,大量增加绿地面积、缓解空气污染的路径难以实现,垂直绿化、屋顶绿化是减少街区污染的最佳 GI 解决方案,已有研究估算绿色屋顶每年可去除 $0.2\text{kg}/\text{m}^2$ 的颗粒物或减少 16.6% $\text{PM}_{2.5}$ ^[44-45]。在邻里尺度中改善景观格局对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响更为显著,应进一步探索景观格局尺度效应,确定提高斑块聚集度、增加绿地面积、提高形状复杂度等治理手段效益最大化的实施方案^[34,46]。

针对采暖季污染物浓度上升与植被落叶加剧供需失配问题,应注重健康风险的季节性波动应对,可行措施包括:优化城市植被配置,选择冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 捕获能力强的常绿阔叶灌木与针叶树种;根据盛行风向规划街区角度,改善通风条件^[47]等。此外,通过社会经济途径加强居民对空气污染的响应与抗风险能力,如:建立重度污染天气预警机制并加强公共卫生科普,提高防治意识;医疗资源城乡均等化覆盖,建立高敏感人群日常健康监测与应急救治机制;优化城市功能布局,迁移高排放污染源,增设远离污染源的医疗、养老设施^[38]。

4.2 结论

本文以天津为研究区域,使用 LUR 模型获取高精度 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布数据,并在空气污染暴露视角下制定了绿色基础设施供给与需求评价指标及其量化方法,揭示了 GI 供需配适的时空分布特征与失配现象。主要结论包括:空气污染物的分布存在时间差异与城乡空间差异,人类活动对 $\text{PM}_{2.5}$ 有显著贡献;空气污染暴露与高强度城市建设密切相关,城市建成区 GI 资源无法满足高暴露风险带来的健康需求;农田、盐场等地表覆盖类型存在植被类型单一或覆盖不足、景观格局断裂问题,限制 GI 供给能力;采暖季污染物浓度升高与地表植被流失加剧时间维度的 GI 供需失配现象,且在高密度建成区与乡镇村庄表现为不同的供需矛盾。

4.3 研究不足与发展方向

数据来源存在局限性,WorldPop 静态人口数据忽视了人口时空行为特征对空气污染暴露测度的影响。Yu 等的研究认为,当样本总量较大时,详细的人口流动信息对平均暴露估算没有显著影响,家庭位置数据可以满足研究精度要求^[48]。静态数据适用于长周期、大尺度的研究,高精度暴露研究可选用个体活动追踪^[43]、标准化问卷与自我报告问卷^[49]、手机信令数据^[50]等人口位置信息收集方法。

在量化方法与指标选取方面存在不足,后续研究中可考虑多种空气污染物对健康的综合影响,并引入健康影响结果的定量计算方法,如人力资本法(HCA)与条件价值法(CVM)^[51]、空气质量健康指数(AQHI)^[52]、体力活动代谢当量(MET)与剂量-反应关系^[53]等。

GI 具有生态环境、资源、经济社会、文化等多重价值,本文讨论了单一价值的深入评价方法,多价值、多领域、跨学科的综合评价体系将成为后续研究发展方向,并与现行城乡规划体系衔接,将理论研究转化为科学的城乡空间发展指引。

参考文献(References):

- [1] Liang F C, Xiao Q Y, Huang K Y, Yang X L, Liu F C, Li J X, Lu X F, Liu Y, Gu D F. The 17-y spatiotemporal trend of $\text{PM}_{2.5}$ and its mortality burden in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(41): 25601-25608.
- [2] Ott W R. Concepts of human exposure to air pollution. *Environment International*, 1982, 7(3): 179-196.
- [3] Grabowski Z J, McPhearson T, Matsler A M, Groffman P, Pickett S T. What is green infrastructure? A study of definitions in US city planning. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2022, 20(3): 152-160.
- [4] 栾博, 柴民伟, 王鑫. 绿色基础设施研究进展. *生态学报*, 2017, 37(15): 5246-5261.
- [5] 戴菲, 陈明, 朱晟伟, 陈宏, 傅凡. 街区尺度不同绿化覆盖率对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减研究——以武汉主城区为例. *中国园林*, 2018, 34(3): 105-110.
- [6] 吝涛, 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.
- [7] Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kazmierczak A, Niemela J, James P. Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure; a literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(3): 167-178.

- [8] Ying J,Zhang X J,Zhang Y Q,Bilan S. Green infrastructure: systematic literature review. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*,2022,35(1): 343-366.
- [9] 赵海霞,顾斌杰,王俊淇,范金鼎,李欣. 绿色基础设施供需适配关系演进特征及其规律——以南京市为例. *生态学报*,2024,44(2): 463-475.
- [10] 许超,孟楠,逯非,刘晓明,欧阳志云. 生态系统服务需求视角下的澳门城市绿色基础设施管理研究. *中国园林*,2020,36(9): 104-109.
- [11] 肖华斌,何心雨,王玥,王洁宁,姜芊孜. 城市绿地与居民健康福祉相关性研究进展——基于生态系统服务供需匹配视角. *生态学报*,2021,41(12): 5045-5053.
- [12] 马琳,刘浩,彭建,吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. *地理学报*,2017,72(7): 1277-1289.
- [13] 王永衡,李春林,王昊,梁碧苗,吕建树. 绿色基础设施的生态环境领域研究现状及热点. *生态学报*,2022,42(6): 2510-2521.
- [14] 中华人民共和国生态环境部. 2022 中国生态环境状况公报. (2023-05-24) [2024-04-20]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202305/P020230529570623593284.pdf>
- [15] World Health Organization. Air quality,energy and health. (2024) [2024-04-20]. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>.
- [16] United Nations Department of Economic and Social Affairs. *World Population Prospects 2022*. New York: United Nations,2022.
- [17] 娄彩荣,刘红玉,李玉玲,李玉凤. 大气颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)对地表景观结构的响应研究进展. *生态学报*,2016,36(21): 6719-6729.
- [18] Wang H,Gao Z Q,Ren J Z,Liu Y B,Chang L T C,Cheung K,Feng Y,Li Y B. An urban-rural and sex differences in cancer incidence and mortality and the relationship with PM_{2.5} exposure: an ecological study in the southeastern side of hu line. *Chemosphere*,2019,216: 766-773.
- [19] Pinichka C,Bundhamcharoen K,Shibuya K. Diseases burden of chronic obstructive pulmonary disease (COPD) attributable to ground-level ozone in Thailand: estimates based on surface monitoring measurements data. *Global Journal of Health Science*,2015,8(1): 1-13.
- [20] Johansson L,Karppinen A,Kurppa M,Kousa A,Niemi J V,Kukkonen J. An operational urban air quality model ENFUSER, based on dispersion modelling and data assimilation. *Environmental Modelling & Software*,2022,156: 105460.
- [21] 谢晓苇,李代超,卢嘉奇,吴升,许芳年. 基于移动监测数据的不同城市场景下 PM_{2.5} 浓度精细模拟与时空特征解析. *地球信息科学学报*,2022,24(8): 1459-1474.
- [22] Ji W,Wang Y,Zhuang D F. Spatial distribution differences in PM_{2.5} concentration between heating and non-heating seasons in Beijing, China. *Environmental Pollution*,2019,248: 574-583.
- [23] Ma X Y,Zou B,Deng J,Gao J,Longley I,Xiao S,Guo B,Wu Y R,Xu T T,Xu X,Yang X S,Wang X Q,Tan Z L,Wang Y F,Morawska L,Salmond J. A comprehensive review of the development of land use regression approaches for modeling spatiotemporal variations of ambient air pollution: a perspective from 2011 to 2023. *Environment International*,2024,183: 108430.
- [24] 王佳佳,夏晓圣,程先富,廖润霞. 合肥市 PM_{2.5} 浓度时空分布特征及影响因素分析. *长江流域资源与环境*,2020,29(6): 1413-1421.
- [25] Zhang Y,Cheng H G,Huang D,Fu C B. High temporal resolution land use regression models with POI characteristics of the PM_{2.5} distribution in Beijing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,2021,18(11): 6143.
- [26] 杨明亮,朱宗玖. 基于 LUR 模型下 PM_{2.5} 浓度的空间分布模拟分析. *大气与环境光学学报*,2022,17(3): 347-359.
- [27] 王大娟,赵敏,王俊钦,王开心,王长梅. 运用多因子 LUR 模型的长沙市 PM_{2.5} 空间预测模拟. *安全与环境学报*,2023,23(1): 222-229.
- [28] 吴健生,谢舞丹,李嘉诚. 土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用. *环境科学*,2016,37(2): 413-419.
- [29] 赵明升,任丽红,李刚,刘亚妮,赵刚,张佳浩,高元官,杨小阳. 2018—2019 年冬季天津和青岛 PM_{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评价. *环境科学*,2022,43(12): 5376-5386.
- [30] Dirgawati M,Barnes R,Wheeler A J,Arnold A L,McCaul K A,Stuart A L,Blake D,Hinwood A,Yeap B B,Heyworth J S. Development of Land Use Regression models for predicting exposure to NO₂ and NO_x in Metropolitan Perth, Western Australia. *Environmental Modelling & Software*,2015,74: 258-267.
- [31] Cowie C T,Garden F,Jegasothy E,Knibbs L D,Hanigan I,Morley D,Hansell A,Hoek G,Marks G B. Comparison of model estimates from an intra-city land use regression model with a national satellite-LUR and a regional Bayesian Maximum Entropy model, in estimating NO₂ for a birth cohort in Sydney, Australia. *Environmental Research*,2019,174: 24-34.
- [32] 邹滨,彭芬,焦利民,翁敏. 高分辨率人口空气污染暴露 GIS 空间区划研究. *武汉大学学报(信息科学版)*,2013,38(3): 334-338.
- [33] 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. *风景园林*,2020,27(4): 95-100.
- [34] 雷雅凯,段彦博,马格,田国行. 城市绿地景观格局对 PM_{2.5}、PM₁₀ 分布的影响及尺度效应. *中国园林*,2018,34(7): 98-103.
- [35] Chen M,Dai F,Yang B,Zhu S W. Effects of neighborhood green space on PM_{2.5} mitigation: evidence from five megacities in China. *Building and Environment*,2019,156: 33-45.
- [36] Lyu R F,Zhang J M,Pang J L,Zhang J M. Modeling the impacts of 2D/3D urban structure on PM_{2.5} at high resolution by combining UAV multispectral/LiDAR measurements and multi-source remote sensing images. *Journal of Cleaner Production*,2024,437: 140613.

- [37] Wei F L, Li S, Liang Z, Huang A Q, Wang Z W, Shen J S, Sun F Y, Wang Y Y, Wang H, Li S C. Analysis of spatial heterogeneity and the scale of the impact of changes in $PM_{2.5}$ concentrations in major Chinese cities between 2005 and 2015. *Energies*, 2021, 14(11): 3232.
- [38] 曾德平, 杨帆, 田健. 应对空气颗粒物污染的高密度城区健康脆弱性评价——以天津市为例. *灾害学*, 2023, 38(2): 134-140.
- [39] 肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰. 2013—2020 年天津市 $PM_{2.5}$ - O_3 污染变化趋势和影响因素分析. *环境科学*, 2023, 44(8): 4211-4219.
- [40] Xu W Y, Jin X B, Liu M M, Ma Z W, Qian Wang, Zhou Y K. Analysis of spatiotemporal variation of $PM_{2.5}$ and its relationship to land use in China. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, 12(9): 101151.
- [41] 阿多, 赵文吉, 宫兆宁, 张敏, 范云豹. 1981—2013 华北平原气候时空变化及其对植被覆盖度的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 576-592.
- [42] 王迪, 韩立建, 李世玉, 李伟峰, 钱雨果, 周伟奇, 谭晓芮, 李国栋, 城市群空气污染综合评估范式与应用——以京津冀城市群 $PM_{2.5}$ 污染为例. *生态学报*, 2021, 41(11): 4278-4287.
- [43] Shupler M, Hystad P, Birch A, Miller-Lionberg D, Jeronimo M, Arku R E, Chu Y L, Mushtaha M, Heenan L, Rangarajan S, Seron P, Lanas F, Cazor F, Lopez-Jaramillo P, Camacho P A, Perez M, Yeates K, West N, Ncube T, Ncube B, Chifamba J, Yusuf R, Khan A, Hu B, Liu X Y, Wei L, Tse L A, Mohan D, Kumar P, Gupta R, Mohan I, Jayachitra K G, Mony P K, Rammohan K, Nair S, Lakshmi P V M, Sagar V, Khawaja R, Iqbal R, Kazmi K, Yusuf S, Brauer M, Study P A. Household and personal air pollution exposure measurements from 120 communities in eight countries: results from the PURE-AIR study. *The Lancet Planetary Health*, 2020, 4(10): e451-e462.
- [44] Chen H S, Lin Y C, Chiueh P T. Nexus of ecosystem service-human health-natural resources: the nature-based solutions for urban $PM_{2.5}$ pollution. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 91: 104441.
- [45] Kostadinović D, Jovanović M, Bakić V, Stepanić N. Mitigation of urban particulate pollution using lightweight green roof system. *Energy and Buildings*, 2023, 293: 113203.
- [46] Li K M, Li C L, Liu M, Hu Y M, Wang H, Wu W. Multiscale analysis of the effects of urban green infrastructure landscape patterns on $PM_{2.5}$ concentrations in an area of rapid urbanization. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 325: 129324.
- [47] Wang F, Sun B, Zheng X, Ji X. Impact of block spatial optimization and vegetation configuration on the reduction of $PM_{2.5}$ concentrations: a roadmap towards green transformation and sustainable development. *Sustainability*, 2022, 14(18): 11622.
- [48] Yu X N, Ivey C, Huang Z J, Gurram S, Sivaraman V, Shen H Z, Eluru N, Hasan S, Henneman L, Shi G L, Zhang H L, Yu H F, Zheng J Y. Quantifying the impact of daily mobility on errors in air pollution exposure estimation using mobile phone location data. *Environment International*, 2020, 141: 105772.
- [49] Hou J, Liu X T, Tu R Q, Dong X K, Zhai Z H, Mao Z X, Huo W Q, Chen G B, Xiang H, Guo Y M, Li S S, Wang C J. Long-term exposure to ambient air pollution attenuated the association of physical activity with metabolic syndrome in rural Chinese adults: a cross-sectional study. *Environment International*, 2020, 136: 105459.
- [50] Xia C. The role of everyday mobility in adaptation to air pollution hazard: a mixed-method approach combining big and traditional data. *Global Environmental Change*, 2024, 88: 102914.
- [51] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [52] 倪洋, 张继勉, 白羽, 曾强. 基于大气污染累积健康风险的天津市空气质量健康指数研究. *环境与职业医学*, 2022, 39(11): 1242-1248.
- [53] Sriram K, Mulder H S, Frank H R, Santanam T S, Skinner A C, Perrin E M, Armstrong S C, Peterson E D, Pencina M J, Wong C A. The dose-response relationship between physical activity and cardiometabolic health in adolescents. *American Journal of Preventive Medicine*, 2021, 60(1): 95-103.