

DOI: 10.5846/stxb201910032064

权秋梅, 王聪, 杨磊, 刘焱序, 孙艺铭, 王超. 景观生态学在大气污染研究中的应用. 生态学报, 2021, 41(2): 435-443.

Quan Q M, Wang C, Yang L, Liu Y X, Sun Y M, Wang C. Application of landscape ecology in air pollution research. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 435-443.

景观生态学在大气污染研究中的应用

权秋梅¹, 王 聪^{2,*}, 杨 磊², 刘焱序³, 孙艺铭¹, 王 超⁴

1 西华师范大学, 西南野生动植物保护教育部重点实验室, 南充 637002

2 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

4 山东省济宁市梁山县气象局, 济宁 272600

摘要:快速城市化和工业化进程造成了一系列大气污染问题,亟需在宏观尺度上解析大气污染时空分布规律。景观生态学关注格局与过程耦合,景观“源汇”理论可对应解析大气污染物的源与汇效应,将景观生态学的理论与方法引入大气污染研究中已成为解决当前区域发展与大气污染权衡的有效途径。从景观生态学视角辨识了景观与大气污染物的源汇关系,系统梳理了景观格局与大气污染的定量关系,指出当前景观格局指标仍需进一步完善以表征大气污染时空分布特征,而高质量大气污染物时空数据的缺乏是限制景观格局与大气污染过程耦合分析的重要因素,拓展应用景观“源汇”理论,定量解析景观格局对大气污染的源汇效应,同时进一步研发遥感反演技术,实现大气污染物分布格局的精细刻画,将为区域景观规划提供重要支撑。强化大气污染研究中的景观生态学分析途径,将有助于深化景观生态学格局与过程耦合研究体系,也将为景观可持续管理提供有力的科学支撑。

关键词:大气污染;景观生态学;景观格局;景观规划;“源汇”理论

Application of landscape ecology in air pollution research

QUAN Qiumei¹, WANG Cong^{2,*}, YANG Lei², LIU Yanxu³, SUN Yiming¹, WANG Chao⁴

1 Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation, Ministry of Education, China West Normal University, Nanchong 637002, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

4 Meteorological Bureau of Liangshan County, Jining 272600, China

Abstract: Rapid urbanization and industrialization process have caused a series of atmospheric pollution problems, and it's necessary to explore the spatio-temporal distributions of atmospheric pollution at macro scale. Landscape ecology focuses on landscape pattern and process coupling. The “source-sink” theory of landscape ecology can be applied to analyze the source and sink effects of atmospheric pollutants. Introducing the theory and method of landscape ecology to air pollution research has become an effective way to solve the problem on the tradeoff between current development and atmospheric pollution. From the perspective of landscape ecology, the relationships between landscape and source and sink of atmospheric pollutants were identified. The quantitative effects of landscape pattern on atmospheric pollution were also reviewed. We found that the current landscape pattern index should be improved to characterize the spatial and temporal distribution characteristics of atmospheric pollution, and the lack of high-quality spatio-temporal air pollutants data limited coupling

基金项目:中国科协青年人才托举工程(2017QNRC001)

收稿日期:2019-10-03; 网络出版日期:2020-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: congwang@cees.ac.cn

analysis of landscape pattern and the atmospheric pollution process. Expanding the application of landscape “source-sink” theory, quantitatively analyzing source and sink effects of atmospheric pollutants, and developing remote sensing techniques to characterize atmospheric pollutants distribution pattern would provide important support for regional landscape planning. Strengthening the approach of landscape ecology analysis in air pollution research will extend the landscape ecology system on pattern and process coupling and will provide scientific supports for sustainable management of landscape.

Key Words: air pollution; landscape ecology; landscape pattern; landscape planning; “source-sink” theory

快速城市化和工业化进程中能源开发、交通运输及其他人类活动等强度的加剧,一方面强烈影响了城市及周边的下垫面,另一方面造成了严重的大气污染,城市发展与人类健康、生态环境保护之间的矛盾与日俱增。景观格局与大气污染存在密切的联系,景观格局中人工建筑的增加以及绿地面积的减少导致大气污染物的剧增与扩散,出现城市热岛效应、酸雨等严重的负面现象,甚至造成生态灾难^[1-3]。研究景观格局演变与大气污染形成机理的关系,优化景观配置提高生态环境质量,构建生态安全格局,是当前景观生态学在大气污染与治理应用研究中的重要议题^[4]。强化大气污染研究中的景观生态学分析途径,不但对研究局地 and 区域环境变化具有重要意义,同时有利于提高景观规划水平,为居民创造更适宜的生活环境,增进人类福祉^[5]。

目前,景观格局与生态过程耦合研究已在景观生态学各研究方向上取得丰硕成果,但是对景观格局与大气污染过程的耦合机理探讨依然较为薄弱。景观生态学在大气污染研究中的应用主要围绕土地利用及景观格局与大气污染的关系,大气污染物主要针对颗粒物,多以城市景观为研究对象,地理信息系统和遥感手段是开展景观格局与大气污染研究的主要技术方法,在控制大气污染进行蓝天保卫战的迫切需求下,亟待明晰景观格局与大气环境的定量关系,提出理想景观格局模式^[2]。此外,辨识大气污染与景观格局特征的关联机理,也是对基于景观生态学的大气污染研究的进一步深化,有助于在学科理论层面上更深入的探讨景观生态学格局与过程耦合研究前沿议题,具有相对明确的学科贡献。基于此,本研究拟从景观与大气污染物的源汇关系入手,系统梳理景观格局与大气污染的定量关系,提出大气污染研究中的景观生态学分析的重点关注领域,以期从学科交叉角度推动景观生态学的发展。

1 基于景观生态学的大气污染研究

从景观生态学视角出发,下垫面的空间和结构布局构成景观格局,当前的研究可以分为景观组分和景观配置特征两个层次:在景观组分层次上强调下垫面类型的不同对大气环境的影响,主要研究特定景观类型对大气污染物影响的物理效应,目前从人工建筑、绿地组分等出发进行探究,如分析绿地景观的滞尘、吸收二氧化硫和氯气等多种大气污染物作用,探究景观类型中植物生理过程的调节效应;在景观配置层次上主要研究不同景观组分的空间组合效应对大气环境的影响。其中,应用土地利用回归模型分析景观格局与大气污染分布的关系是当前研究的重要方法^[6]。

1.1 景观与大气污染物的源汇关系

1.1.1 大气污染物来源

大气污染物是指在人类活动或自然过程中,产生并排放到大气中对人类和环境产生负面影响的物质。颗粒物(PM)、氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)和多环芳烃(PAH)等是当前大气污染的典型污染物。具体来说,颗粒物(PM)来源主要是扬尘和工业活动。氮氧化物(NO_x)和二氧化硫(SO_2)主要来源于工业燃烧过程、采暖和汽车尾气排放。多环芳烃(PAH)主要由煤、石油、有机高分子化合物等有机物不完全燃烧时产生。大气污染物具有显著的空间分布特征^[7],也呈现出复杂的时间动态特征,如随着区域不同空间内人口(机动车)数量的增加,大气污染物的假日效应显著^[8],目前对大气污染物空间异质性的机理解释仍然不足,并且对人为及其他因素影响下的溢出效应识别不充分^[9-10]。

1.1.2 大气污染物的景观源汇

“源”景观是指那些能够促进过程发展的景观类型,“汇”景观是指那些能够阻止或延缓过程发展的景观类型^[11]。对大气污染来说,“源”景观指居民区、工业用地、道路等产生或者促进大气污染的景观类型。“汇”景观指可以缓解或者减轻大气污染的一些景观类型或生态系统类型,如城市绿地、树林、水体等景观类型,但也存在特殊情况,如农田在不同的季节对 $PM_{2.5}$ 浓度影响不同^[12],植被对 PAH 的吸收作用也受到季节因素的影响^[13]。在研究景观格局与生态过程时,厘定景观与大气污染物源汇的关系,对城市下垫面不同的组分进行合理的景观规划,有助于进行大气污染的缓解与控制,实现人与生态环境的和谐相处。

图 1 展示城市下垫面对大气环境的影响。景观组分的影响是通过组分的物理属性之间的差异改变对大气环境中物质能量交换过程,当前研究多集中于人工建筑、绿地以及水体等城市下垫面与大气环境之间相互作用的关系,人工建筑主要指的是道路、住宅、工厂等地区。一方面,对大气环境排放的大气污染物主要由人工建筑直接产生,如住宅区集中供暖、道路交通运输、工厂生产等排放的大量大气污染物等;另一方面,当人工建筑达到一定数量,导致城市下垫面颜色较深,在太阳辐射下吸收大量的热量,并且在城市参差不齐的建筑物中,不断反射加强能量的吸收^[14],产生城市热岛效应。在热岛效应的影响下,人类生活、工业生产、交通运输过程中所形成 SO_2 、 NO_x 等大气污染物会在城市中心区域上空汇集,加重大气污染程度,对人类的健康带来严重的危害。

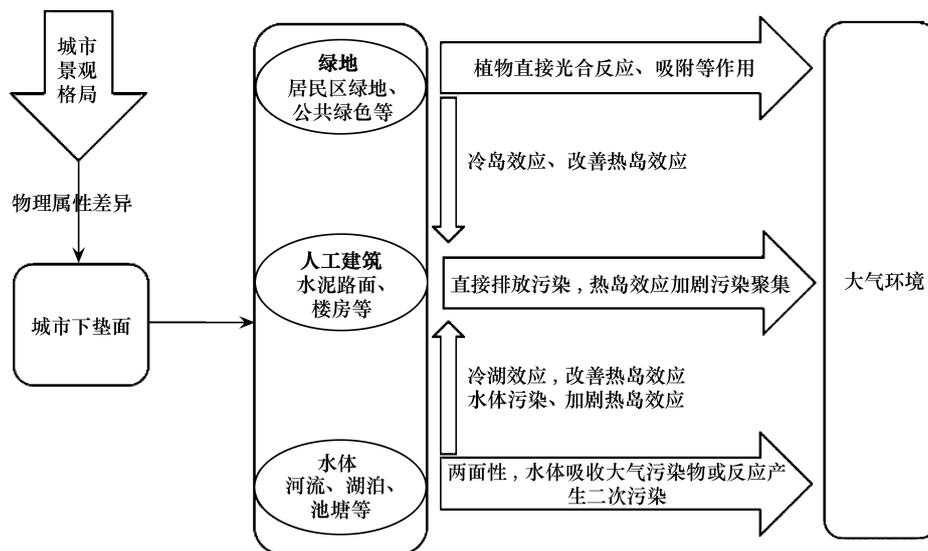


图 1 不同景观组分层次对大气环境影响

Fig.1 Effects of different landscape component levels on atmospheric environment

绿地主要指的是居民区绿地、公共绿色、农林等地区。与人工建筑不同,绿地能够吸附大气污染物,并能有效缓解城市热岛效应,形成“冷岛效应”^[15]。植物的存在对污染物具有一定吸附作用,因此空间规划考虑绿地及污染源的空间分布可以显著提高大气环境保护的有效性^[16-18]。合理配置城市景观中绿地的空间布局可以控制大气污染扩散,而这种作用往往会受到背景环境因素影响,对植被下垫面作用的刻画除植被本身特征外,还需要考虑大气污染物颗粒大小、到源头距离以及排放水平、风速和湿度等^[19-20]。在主要道路和居民点之间建立植被屏障,成熟的植被可以适度改善道路附近地区交通运输产生的大气污染状况,减少黑炭和颗粒物大气污染移动源暴露^[21]。有学者运用建模综合评估了伦敦的树木对大气环境的影响,行道树如大比例使用针叶树和阔叶树, PM_{10} 沉积量将大幅度增加,规划者进行可持续的景观规划设计,可以提升未来空气质量^[22-23]。水体组分主要指河流、湖泊、池塘等区域,水体在一定条件下能够对大气污染的程度进行改善,其存在可形成“冷湖效应”,即在相同的太阳辐射下,由于湖泊或河流的存在,反射到空气中的热量减少,水面上方

的温度相对其他下垫面温度低,大气污染物得以扩散,污染物浓度降低。通过对大气污染物“源”“汇”景观的深入探索不仅有助于进一步明晰景观格局演变的生态环境形成机理,也可与景观规划直接对接,形成服务于生态环境治理的景观优化策略。

1.2 景观格局对大气污染的影响量化

景观格局是指景观组分在空间上的排列,探究景观格局与大气污染之间的相关规律,辨识影响大气污染物浓度景观格局特征,有利于探索大气污染研究中的景观生态学分析途径。格局的定量分析是研究格局与过程相互关系的基础^[24],景观生态学的研究方法一定程度上满足规划定量表达的需求。根据景观格局与大气污染关系进行合理景观配置,可以指导景观规划,通过定量模型分析大气污染变化,解析大气污染物与景观格局之间的关系,是完善景观格局规划的重要基础。

目前模拟预测大气污染的方法包括使用暴露指标变量、空间插值、扩散模型和土地利用回归(LUR)模型^[25],而量化景观格局对大气污染的影响多采用LUR模型,该模型采用随机模拟技术在GIS系统中将空间属性变量(如土地覆盖、交通数据、地形等)与大气污染物浓度进行回归,这一基于回归的方法可以对大气污染物水平进行稳定评估,利用GIS绘制大气污染分布,可预测识别潜在污染源,并通过相关政策以及其他的干预措施缓解大气污染程度^[26]。总结梳理不同区域LUR模型对多种典型大气污染物的模拟效果及建模变量特征(表1),可为景观规划提供科学指引,促进景观生态学研究结果在大气污染防治领域的实践应用,为城市和区域提供景观规划途径。

表1 LUR模型应用研究对比
Table 1 Comparison of LUR model applications

研究区域(国家或地区) Study area	研究对象 Research indicator	预测变量/景观指数 Predictive variables/ landscape metrics	解释率 R^2	土地利用 Land use
欧洲 European ^[27]	NO ₂	土地利用、道路交通指标、人口密度、气候和地形变量以及到海洋距离	53%	农业用地、城市用地、工业用地、林地等
荷兰 Netherlands ^[28]	NO ₂ , NO, 黑烟, SO ₂	区域、居民数量、缓冲区大小、土地利用、交通	67%、46%、49%、35%	家庭住所
纽约市 New York City ^[29]	PM _{2.5}	交通、人口、土地利用	64.2%	工业用地
罗马,意大利 Vancouver, CA ^[30]	NO ₂ , NO, PM _{2.5}	土地利用、交通密度、道路长度、人口密度	39%—62%	住宅、商业、政府、工业、开放区域
哥德堡,瑞典 Rome, Italy ^[31]	NO ₂	交通、人口、海拔、到海距离、污染物排放	68.6%;69%(添加苯排放项)	环形交通区、公园
Gothenburg, Sweden ^[32]	NO ₂	海拔、密度、道路类型、交通和土地利用	59.4%	城市的高速公路和工业区
奥克兰,新西兰 Auckland, NZ ^[33]	NO ₂	到主要道路的距离、100m 缓冲区内的公交车站数目、遮阳篷和街道宽度	70%	交通繁忙道路
欧洲 Europe (36个研究区域) ^[34]	NO _x , NO ₂	本地交通密度数据	49%—91%, 55%—92%	高密度住宅用地、低密度住宅用地、工业、港口、城市绿地、半自然区和林地
中国台湾台北 Taipei, Taiwan, China ^[40]	NO _x , NO ₂	干道长度、工业区、城市绿地、半自然和森林地区	81%、74%	城市绿地、半自然区和森林区、低密度居民区
奥格斯堡,德国 Augsburg, Germany ^[41]	O ₃ , PM, 煤烟和 NO _x	交通、土地利用、地形和人口数据	68%(PM)—94%(NO ₂)	住宅用地、工业用地、建筑用地、城市绿地、森林和半自然区以及水体
辛辛那提,俄亥俄,美国 Cincinnati, Ohio, USA ^[42]	元素碳	海拔、卡车数量、缓冲区公交线路长度、土地利用	75%	住所

续表

研究区域(国家或地区) Study area	研究对象 Research indicator	预测变量/景观指数 Predictive variables/ landscape metrics	解释率 R^2	土地利用 Land use
慕尼黑, 德国 Munich, Germany ^[43]	NO ₂ , PM _{2.5}	人口和家庭密度, 缓冲区交通变量与土地利用	51%、67%	土地覆盖因子
奥斯陆, 挪威 Oslo, Norway ^[44]	NO ₂ , NO and NO _x	土地利用、交通、人口密度、海拔	77%、66%、73%	道路
温莎, 安大略省, 加拿大 Windsor, Ontario, Canada ^[45]	NO ₂ , SO ₂ , 苯和甲苯	交通、人口密度、居住密度、土地利用、污染物排放	77%、69%、73%、46%	距路桥距离
蒙特利尔, 加拿大 Montreal, Canada ^[46]	NO ₂	最近公路的距离与交通量、开放空间的面积和人口密度	54%	空地
埃尔帕索, 德克萨斯州, 美国 El Paso, Texas, USA ^[47]	NO ₂	海拔、距离主干道及港口距离	81%	无
北莱茵-威斯特法伦州, 德国 North-Rhine Westphalia, Germany ^[48]	NO ₂ , PM _{2.5}	交通密度、建筑数量、到主要道路的距离	90%和 82%	工业城市与邻近农村地
哈密尔顿, 加拿大 Hamilton, Canada ^[49]	NO ₂	土地利用、交通、人口密度、自然地理、气象	76%	工业化地区
中国长江三角洲 Yangtze River Delta, China ^[37]	PM _{2.5}	土地利用, 景观格局指数: FO_LPI, UR_MPS	37.1%、45.3%	农田、林地和城市建设用地
埃尔帕索, 德克萨斯州, 美国 El Paso, Texas, USA ^[50]	NO ₂ , VOC	到美墨边境的距离、公路和主要道路的距离、交通密度、海拔高度、人口密度、到石油设施的距离	90%以上	学校和两个密集场所(位于大桥和市中心街道)
中国浙江 Zhejiang, China ^[39]	PM _{2.5}	土地利用、地形、交通、气候、人口、污染源, 景观格局指数: CA, PLAND, LPI, ED, PD, CONTAG, SHDI, SHEI	68.1%、73.3%	林地、住宅、工业、商业、城市绿地、交通、农业、裸地、水域和道路
中国北京 Beijing, China ^[12]	PM _{2.5}	街道网络、海拔、人口、土地利用, 景观指数: PLAND, PD, ED, SHEI, CONTAG	84.9% (年) 80.2% (春) 68.4% (夏) 62.4% (秋) 65.8% (冬)	建设用地、植被覆盖区、水体、裸地和农田
中国武汉 Wuhan, China ^[51]	PM _{2.5} , PM ₁₀	土地利用、位置、气象、交通量、道路长度、距市中心距离、周围 500m 缓冲区未建面积比例, 景观指数 LSI	48.3%—96.9%、36.5%—98.2%	城市湖泊湿地
中国香港 Hong Kong, China ^[52]	PM _{2.5}	土地利用、景观指数: PLAND, LPI, AI, CONNECT	89.8%	城市用地、混交林、灌丛、农田、草地、水体

NO₂: 二氧化氮 Nitrogen dioxide; NO: 一氧化氮 Nitric oxide; SO₂: 二氧化硫 Sulfur dioxide; PM: 颗粒物 Particulate matter; VOC: 挥发性有机化合物 Volatile organic compounds; FO_LPI: 森林最大斑块指数 Forest land's largest patch index; UR_MPS: 城市建设用地平均斑块面积 Urban construction land's mean patch size; CA: 斑块类型面积 Class area; PLAND: 斑块所占景观面积比例 The percent of area of different patch types; PD: 斑块密度 Patch density; LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; ED: 边缘密度 Edge density; MPS: 平均斑块面积 Mean patch size; CONTAG: 蔓延度指数 Contagion index; SHDI: 香农多样性指数 Shannon's diversity index; SHEI: 香农均匀度指数 Shannon's evenness index; AI: 聚合指数 Aggregation index; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; CONNECT: 连接指数 Connectance index

使用 LUR 模型的优势是能够预测城市空气质量限值的超标情况, 评估减轻污染措施的有效性, 通过模型所获得的相关信息可作为环境和健康政策的基础, 用于预测特定大气污染的缓解措施效果^[27]。LUR 模型已成为预测城市或国家尺度上无监测数据区域大气污染物浓度的重要方法。具体应用中, 当地交通强度数据是 LUR 模型的重要预测变量^[28-31, 35-38], 海拔等地理特征对城市空气质量也有较大影响, 将这些因素纳入模型能够显著提高模型的性能^[32-33]。在欧洲大气污染影响研究 (Escape) 中, LUR 模型能够解释年平均 NO₂ 和 NO_x 浓度的空间变化^[34]。在对中国 PM 时空格局探索的回归结果表明城市 PM 与人口规模、大气污染物排放量、周边排放量呈正相关, 与降水量和风速呈负相关^[35], 其中气候因素中风速对其影响最为严重^[36], 但大面积绿色景观的存在能使 PM 浓度维持在较低水平。从景观层面上, 景观的均匀度及破碎度与 PM_{2.5} 浓度密切相

关^[12],将土地利用类型和景观指标纳入 LUR 模型来估算 $PM_{2.5}$ 浓度是当前研究的新趋势^[37]。

当然,LUR 模型也存在一定局限性。LUR 模型虽然能够较好地预测空间的变异性,但是不同研究之间的模型结构存在很大差异。数据质量和土地利用的差异也导致模型性能的差异,需采用更标准的方法进行数据的收集;模型基于土地利用对大气污染物浓度进行评估,存在空间范围大、时间分辨率低的特点,通过对 LUR 模型与气象变量模型进行耦合,可提高其时间分辨率^[6];LUR 模型在进行区域外推时应注意同一模型并不适用于其他区域^[38],其在小尺度上的适用性也需进一步研究;相比只纳入土地利用类型,LUR 模型在引入景观格局指数后,相应的预测精度提高^[39],但当 LUR 模型应用于不同污染物时,纳入景观格局指数对模型模拟能力的影响也不尽相同(表 1)。LUR 模型方法的使用还需要更多区域性案例,对模型的可移植性及可靠性进行探索^[25]。

2 存在问题

纵观当前大气污染与景观生态学的相关研究,存在以下问题和不足。首先,就景观格局的刻画而言,目前可以利用的指标含义不够明确,不利于直接筛选与大气污染扩散相关的指标;其次,就污染物的空间刻画而言,目前相应的监测站点相对缺乏,遥感反演技术仍需进一步发展,而大气污染物自身的扩散范围过大,易受极端天气事件影响,不利于开展格局与过程耦合分析;再次,就学科理论和实践而言,目前的分析仅针对局部地区,缺乏多地区、多尺度的综合分析,以便对指标和模型进行开发优化,便于规划决策者做出快速评估。

第一,景观格局指标的刻画相对简略。景观格局指数是景观格局分析的重要手段,然而目前景观格局指数只能粗略的对景观现状和总体特征进行描述,无法准确描述格局与过程相互作用关系,需要发展一系列针对特定生态过程且具有明确指示意义的景观格局指数,因此,如何建立具有生态学意义的景观格局指数和分析方法,如何将景观格局与大气污染迁移扩散联系起来^[23],是利用景观生态学研究大气污染问题的关键问题。

第二,大气污染物的空间数据缺乏。污染物的空间传递在大气环境中的传递受到多重因素的影响,不同地区污染物的输送和扩散特征也不尽相同^[53],大气污染物在扩散中的相互作用及极端气象事件的影响加大了其与景观格局耦合分析的难度,此外,目前缺乏足够的监测站点和高空间分辨率的污染物排放指标数据,数据质量限制了在时空尺度上进行景观格局与污染扩散过程的耦合分析。

第三,景观生态学科理论与大气污染防治实践脱节。将景观生态学应用到大气污染防治中,使土地资源的效益达到生态环境治理和社会经济发展的最佳结合,是目前区域发展的迫切需求。结合人口聚集地空气改善目标,建立土地利用和景观格局与大气污染之间的定量关系,可以指导景观格局规划以达到控制大气污染的效果。此外,现有景观生态学理论研究成果并未有效应用于景观规划实践中,如景观生态学“基质-斑块-廊道”的经典格局理论以及“源汇”景观格局理论等都是景观格局分析的基础,但是如何将此理论更好地应用到解决实际大气污染防治问题中,截至目前仍然缺乏好的实例^[23]。

3 研究展望

快速城市化和工业化是我国未来相当长一段时间内发展的必然趋势,会对大气环境造成严重威胁。大气污染与景观生态学的关联研究将成为学术界、管理者以及公众共同关注的热点问题。深入研究景观格局与大气污染过程的耦合机理,是提升景观生态学规划支持作用的关键所在。完善景观格局指标、加强大气污染过程的空间表征、促进景观规划实践是未来应用景观生态学研究大气污染问题的重要发展方向。

3.1 完善景观格局指标

景观格局与生态过程耦合是景观生态学研究的核心议题,景观格局是生态过程的载体,生态过程是影响格局的动因和驱动力,能够影响景观的整体动态,对于景观格局与过程互馈机制的解析是景观生态学研究的关键环节,在景观格局对大气污染影响研究中需发展具有物理意义的景观模型或格局指数进行评价^[54]。城

市局地景观格局(如住宅区、道路格局等)与区域尺度间动力、热力的相互作用显著影响大气污染物的迁移、转化、扩散^[55],城市的三维格局特征(如建筑群高度)与动力粗糙度存在定量关系^[56],可为数值模式边界层物理参数提供重要依据,因此,筛选、完善与大气污染扩散模式相关的景观格局指标具有重要意义。传统上刻画平面景观格局的景观指数并不能反映城市景观(城市绿化基面、交通基面、城市建筑等)立体化和高层化的三维特征,多尺度、多维景观格局分析可以更加全面反映景观格局特征,并拓展大气污染过程相关联的景观格局指数集^[5,57]。总之,景观格局指标的完善有利于定量解析景观格局对大气污染的影响。

3.2 加强大气污染过程的空间表征

大气污染物时空格局演变特征是应用景观生态学方法探究景观格局与污染过程的重要基础,因此,亟需加强大气污染物时空格局的定量表征。深化遥感反演技术、耦合气候/气象模型模拟、优化监测网络是提高大气污染物时空分布数据质量的重要手段^[58]。传统遥感方法可以提供实时下垫面信息,为大气数值模型提供有效参数^[59],随着遥感技术进步,利用全覆盖的卫星影像与污染物之间的定量关系建立模型,可获取全覆盖的大气污染物分布格局^[58]。今后需在大气环境遥感的量化、高性能传感器的研制、主动式遥感与被动式的一体化、相关系统的建立以及多时相、多数据源(包括非遥感数据资料数据)的信息复合与综合分析等方面进一步加强^[60];气候/气象模型模拟除依托于复杂的物理化学过程模型模拟外,还依赖于监测数据的输入及验证,因此,增加大气污染相关监测站点,在多个典型地区进行布点监测,并且注意多时段数据的获取,同时补充流动监测手段获取大气污染物分布现状格局,将有利于对大气污染过程的精准刻画。此外,大气污染物主要存在于近地表,辨识其三维空间分布特征有利于与三维景观格局指数匹配分析,精细刻画景观格局与污染物分布特征的定量关系,可进一步为景观格局优化、通风廊道建设提供科学支撑^[58]。

3.3 强化对景观规划实践的定量支持

景观格局的实质揭示了景观规划的需求,景观规划通过城市空间的合理布局和绿化建设优化城市功能^[61-62]。建立景观格局优化模型,明确不同规划方案下大气污染物状况,找出合理生态用地布局以进一步优化空间格局^[1],是对景观规划实践的重要支撑;在城市大气污染对周边区域显著影响的背景下,从景观生态学的“源汇”理论出发,在区域尺度上辨析“源汇”格局的时空变化是进行区域景观规划的重要前提^[58];此外,组建跨学科团队,多角度识别景观格局对大气污染的影响,深入探讨不同时空尺度上景观格局对大气污染的影响规律,辨析景观格局下的大气污染过程变化及污染物形成、扩散、消减机理,可为景观规划提供科学依据。

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] 张惠远, 饶胜, 迟妍妍, 金陶陶. 城市景观格局的大气环境效应研究进展. 地球科学进展, 2006, 21(10): 1025-1032.
- [3] 张润森, 濮励杰, 刘振. 土地利用/覆被变化的大气环境效应研究进展. 地域研究与开发, 2013, 32(4): 123-128.
- [4] 吕一河, 陈利顶, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的耦合途径分析. 地理科学进展, 2007, 26(3): 1-10.
- [5] 宫继萍, 胡远满, 刘森, 常禹, 布仁仓, 熊在平, 李春林. 城市景观三维扩展及其大气环境效应综述. 生态学杂志, 2015, 34(2): 562-570.
- [6] Liu W, Li X D, Chen Z, Zeng G M, León T, Liang J, Huang G H, Gao Z H, Jiao S, He X X, Lai M Y. Land use regression models coupled with meteorology to model spatial and temporal variability of NO₂ and PM₁₀ in Changsha, China. Atmospheric Environment, 2015, 116: 272-280.
- [7] 刘洁, 张小玲, 徐晓峰, 徐宏辉. 北京地区 SO₂、NO_x、O₃ 和 PM_{2.5} 变化特征的城郊对比分析. 环境科学, 2008, 29(4): 1059-1065.
- [8] Tan P H, Chou C, Chou C K. Impact of urbanization on the air pollution “holiday effect” in Taiwan. Atmospheric Environment, 2013, 70: 361-375.
- [9] Du Y Y, Sun T S, Peng J, Fang K, Liu Y X, Yang Y, Wang Y L. Direct and spillover effects of urbanization on PM_{2.5} concentrations in China's top three urban agglomerations. Journal of Cleaner Production, 2018, 190: 72-83.
- [10] Du Y Y, Wan Q, Liu H M, Liu H, Kapsar K, Peng J. How does urbanization influence PM_{2.5} concentrations? Perspective of spillover effect of multi-dimensional urbanization impact. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 974-983.
- [11] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [12] Wu J H, Xie W D, Li W F, Li J C. Effects of urban landscape pattern on PM_{2.5} pollution—a Beijing case study. PLoS One, 2015, 10

- (11): e0142449.
- [13] Viippola V, Rantalainen A L, Yli-Pelkonen V, Tervo P, Setälä H. Gaseous polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations are higher in urban forests than adjacent open areas during summer but not in winter-exploratory study. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 233-240.
- [14] 彭少麟, 周凯, 叶有华, 栗娟. 城市热岛效应研究进展. *生态环境*, 2005, 14(4): 574-579.
- [15] 周志翔, 邵天一, 唐万鹏, 王鹏程, 刘学全, 徐永荣. 城市绿地空间格局及其环境效应——以宜昌市中心城区为例. *生态学报*, 2004, 24(2): 186-192.
- [16] Franchini M, Mannuccib P M. Mitigation of air pollution by greenness: a narrative review. *European Journal of Internal Medicine*, 2018, 55: 1-5.
- [17] Yin S, Shen Z M, Zhou P S, Zou X D, Che S G, Wang W H. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: an experimental approach in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 2155-2163.
- [18] Asgarian A, Amiri B J, Sakieh Y. Assessing the effect of green cover spatial patterns on urban land surface temperature using landscape metrics approach. *Urban Ecosystems*, 2015, 18(1): 209-222.
- [19] Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution-deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 2015, 105: 130-137.
- [20] Viippola V, Whitlow T H, Zhao W L, Yli-Pelkonen V, Mikola J, Pouyat R, Setälä H. The effects of trees on air pollutant levels in peri-urban near-road environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 30: 62-71.
- [21] Brantley H L, Hagler G S W, Deshmukh P J, Baldauf R W. Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 120-129
- [22] Jeanjean A P R, Buccolieri R, Eddy J, Monks P S, Leigh R J. Air quality affected by trees in real street canyons: the case of marylebone neighbourhood in central London. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 22: 41-53.
- [23] Tallis M, Taylor G, Sinnett D, Freer-Smith P. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 129-138.
- [24] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 冯晓明, 傅伯杰. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来. *生态学报*, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [25] Hoek G, Beelen R, De Hoogh K, Vienneau D, Gulliver J, Fischer P, Briggs D. A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(33): 7561-7578.
- [26] Briggs D J, Collins S, Elliott P, Fischer P, Kingham S, Lebre E, Pryn K, Reeuwijk H V, Smallbone K, Van Der Veen A. Mapping urban air pollution using GIS: a regression-based approach. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, 11(7): 699-718.
- [27] Vizcaino P, Lavalle C. Development of European NO₂ land use regression model for present and future exposure assessment: implications for policy analysis. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 140-154.
- [28] Beelen R, Hoek G, Fischer P, van den Brandt P A, Brunekreef B. Estimated long-term outdoor air pollution concentrations in a cohort study. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(7): 1343-1358.
- [29] Ross Z, Jerrett M, Ito K, Tempalski B, Thurston G D. A land use regression for predicting fine particulate matter concentrations in the New York city region. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(11): 2255-2269.
- [30] Henderson S B, Beckerman B, Jerrett M, Brauer M. Application of land use regression to estimate long-term concentrations of traffic-related nitrogen oxides and fine particulate matter. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(7): 2422-2428.
- [31] Rosenlund M, Forastiere F, Stafoggia M, Porta D, Perucci M, Ranzi A, Nussio F, Perucci C A. Comparison of regression models with land-use and emissions data to predict the spatial distribution of traffic-related air pollution in Rome. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 2008, 18(2): 192-199.
- [32] Habermann M, Billger M, Haeger-Eugensson M. Land use regression as method to model air pollution. Previous results for Gothenburg/Sweden. *Procedia Engineering*, 2015, 115: 21-28.
- [33] Weissert L F, Salmond J A, Miskell G, Alavi-Shoshtari M, Williams D E. Development of a microscale land use regression model for predicting NO₂ concentrations at a heavily trafficked suburban area in Auckland, NZ. *Science of the Total Environment*, 2018, 619-620: 112-119.
- [34] Beelen R, Hoek G, Vienneau D, Eeftens M, Dimakopoulou K, Pedeli X, Tsai M Y, Künzli N, Schikowski T, Marcon A, Eriksen K T, Raaschou-Nielsen O, Stephanou E, Patelarou E, Lanki T, Yli-Tuomi T, Declercq C, Falq G, Stempfelet M, Birk M, Cyrus J, von Klot S, Nádor G, Varró M J, Dédélé A, Gražulevičienė R, Mölter A, Lindley S, Madsen C, Cesaroni G, Ranzi A, Badaloni C, Hoffmann B, Nonnemacher M, Krämer U, Kuhlbusch T, Cirach M, de Nazelle A, Nieuwenhuijsen M, Bellander T, Korek M, Olsson D, Strömberg M, Dons E, Jerrett M, Fischer P, Wang M, Brunekreef B, de Hoogh K. Development of NO₂ and NO_x land use regression models for estimating air pollution exposure in 36 study areas in Europe-The ESCAPE project. *Atmospheric Environment*, 2013, 72: 10-23.
- [35] Zhang H F, Wang Z H, Zhang W Z. Exploring spatiotemporal patterns of PM_{2.5} in China based on ground-level observations for 190 cities. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 559-567.
- [36] Han L J, Zhou W Q, Li W F, Meshesha D T, Li L, Zheng M Q. Meteorological and urban landscape factors on severe air pollution in Beijing.

- Journal of the Air & Waste Management Association, 2015, 65(7): 782-787.
- [37] Lu D B, Mao W L, Yang D Y, Zhao J N, Xu J H. Effects of land use and landscape pattern on PM_{2.5} in Yangtze River Delta, China. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(4): 705-713.
- [38] Vienneau D, de Hoogh K, Beelen R, Fischer P, Hoek G, Briggs D. Comparison of land-use regression models between Great Britain and the Netherlands. Atmospheric Environment, 2010, 44(5): 688-696.
- [39] Yang S, Wu H T, Chen J, Lin X T, Lu T. Optimization of PM_{2.5} estimation using landscape pattern information and land use regression model in Zhejiang, China. Atmosphere, 2018, 9(2): 47.
- [40] Lee J H, Wu C F, Hoek G, de Hoogh K, Beelen R, Brunekreef B, Chan C C. Land use regression models for estimating individual NO_x and NO₂ exposures in a metropolis with a high density of traffic roads and population. Science of the Total Environment, 2014, 472: 1163-1171.
- [41] Wolf K, Cyrus J, Harciníková T, Gu J W, Kusch T, Hampel R, Schneider A, Peters A. Land use regression modeling of ultrafine particles, ozone, nitrogen oxides and markers of particulate matter pollution in Augsburg, Germany. Science of the Total Environment, 2017, 579: 1531-1540.
- [42] Ryan P H, LeMasters G K, Biswas P, Levin L, Hu S H, Lindsey M, Bernstein D I, Lockey J, Villareal M, Khurana Hershey G K, Grinshpun S A. A comparison of proximity and land use regression traffic exposure models and wheezing in infants. Environmental Health Perspectives, 2007, 115(2): 278-284.
- [43] Morgenstern V, Zutavern A, Cyrus J, Brockow I, Gehring U, Koletzko S, Bauer C P, Reinhardt D, Wichmann H E, Heinrich J. Respiratory health and individual estimated exposure to traffic-related air pollutants in a cohort of young children. Occupational & Environmental Medicine, 2006, 64(1): 8-16.
- [44] Madsen C, Carlsen K C L, Hoek G, Oftedal B, Nafstad P, Meliefste K, Jacobsen R, Nystad W, Carlsen K H, Brunekreef B. Modeling the intra-urban variability of outdoor traffic pollution in Oslo, Norway—A GA² LEN project. Atmospheric Environment, 2007, 41(35): 7500-7511.
- [45] Wheeler A J, Smith-Doiron M, Xu X H, Gilbert N L, Brook J R. Intra-urban variability of air pollution in Windsor, Ontario—measurement and modeling for human exposure assessment. Environmental Research, 2008, 106(1): 7-16.
- [46] Gilbert N L, Goldberg M S, Beckerman B, Brook J R, Jerrett M. Assessing spatial variability of ambient nitrogen dioxide in Montréal, Canada, with a land-use regression model. Journal of the Air & Waste Management Association, 2005, 55(8): 1059-1063.
- [47] Gonzales M, Qualls C, Hudgens E, Neas L. Characterization of a spatial gradient of nitrogen dioxide across a United States - Mexico border city during winter. Science of the Total Environment, 2005, 337(1/3): 163-173.
- [48] Hochadel M, Heinrich J, Gehring U, Morgenstern V, Kuhlbusch T, Link E, Wichmann H E, Krämer U. Predicting long-term average concentrations of traffic-related air pollutants using GIS-based information. Atmospheric Environment, 2006, 40(3): 542-553.
- [49] Sahsuvaroglu T, Arain A, Kanaroglou P, Finkelstein N, Newbold B, Jerrett M, Beckerman B, Brook J, Finkelstein M, Gilbert N L. A Land use regression model for predicting ambient concentrations of nitrogen dioxide in Hamilton, Ontario, Canada. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, 56(8): 1059-1069.
- [50] Smith L, Mukerjee S, Gonzales M, Stallings C, Neas L, Norris G, Özkaynak H. Use of GIS and ancillary variables to predict volatile organic compound and nitrogen dioxide levels at unmonitored locations. Atmospheric Environment, 2006, 40(20): 3773-3787.
- [51] Zhu C Y, Zeng Y Z. Effects of urban lake wetlands on the spatial and temporal distribution of air PM₁₀ and PM_{2.5} in the spring in Wuhan. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 31: 142-156.
- [52] Shi Y, Ren C, Lau K K L, Ng E. Investigating the influence of urban land use and landscape pattern on PM_{2.5} spatial variation using mobile monitoring and WUDAPT. Landscape and Urban Planning, 2019, 189: 15-26.
- [53] 陈燕, 蒋维楣, 郭文利, 苗世光, 陈鲜艳, 季崇萍, 王晓云. 珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响. 环境科学学报, 2005, 25(5): 700-710.
- [54] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. 生态学报, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [55] 徐祥德, 丁国安, 卞林根. 北京城市大气环境污染机理与调控原理. 应用气象学报, 2006, 17(6): 815-828.
- [56] 徐祥德. 城市化环境大气污染模型动力学问题. 应用气象学报, 2002, 13(S1): 1-12.
- [57] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121-125.
- [58] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5}时空格局演变及其影响因素的研究进展. 地理科学进展, 2018, 37(8): 1011-1021.
- [59] 迟妍妍, 张惠远. 大气污染物扩散模式的应用研究综述. 环境污染与防治, 2007, 29(5): 376-381.
- [60] 程立刚, 王艳皎, 王耀庭. 遥感技术在大气环境监测中的应用综述. 中国环境监测, 2005, 21(5): 17-23.
- [61] 谭衢霖, 邵芸. 遥感技术在环境污染监测中的应用. 遥感技术与应用, 2000, 15(4): 246-251.
- [62] 郭青海, 马克明, 赵景柱, 杨柳, 尹澄清. 城市非点源污染控制的景观生态学途径. 应用生态学报, 2005, 16(5): 977-981.