

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继强, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应

许凯¹, 余添添^{1*}, 孙姣姣², 袁兆祥³, 秦昆⁴

(1. 中国地质大学(武汉)信息工程学院, 武汉 430070; 2. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 3. 国网北京经济技术研究院, 北京 100010; 4. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079)

摘要: 以武汉市为例, 利用多源遥感数据研究城市“源”“汇”景观格局与大气霾污染的相关关系。首先, 基于武汉市 Landsat8 数据的地表覆盖分类结果, 计算不同尺度下地表覆盖的整体异质性景观指数, 选择异质性最大的尺度作为“源”“汇”景观分析的最优尺度; 在此基础上, 用 MODIS 数据的气溶胶光学厚度(AOD)产品作为大气霾污染程度的度量, 基于自相关性较小的“类别层”景观指数, 使用地理加权回归分析模型对“源”“汇”景观与 AOD 进行局部回归分析, 并在工业区、商业区和居民区 3 种功能区内分析建筑物对大气霾污染影响的差异。结果表明: 6 km 是本文分析的最优尺度; 大气霾污染的“源”景观为建筑物, “汇”景观为灌木和林地; 减小“源”景观面积所占比例、增大其破碎化程度、“源”“汇”穿插均匀分布, 可以有效减小气溶胶光学厚度, 降低大气霾污染; 对于武汉市来说, 其大气霾污染的主要来源为中心城区的商业区和居民区, 即来自于市民生活。针对中心城区要发挥其经济、交通等功能, 已有的建设用地不宜大面积改动这一现状, 可以采取小幅度优化措施, 而对于非建成区可采取建前合理规划“源”“汇”景观空间分布的措施。

关键词: 霾; 气溶胶光学厚度(AOD); 尺度效应; “源”“汇”景观; 地理加权回归

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-4905-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702032

Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks

XU Kai¹, YU Tian-tian^{1*}, SUN Jiao-jiao², YUAN Zhao-xiang³, QIN Kun⁴

(1. Faculty of Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430070, China; 2. Faculty of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. China State Power Economic Research Institute, Beijing 100010, China; 4. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Based on a geo-weighted regression model, this study analyzes the relationship between the landscape patterns of sources and sinks in urban areas and atmospheric haze pollution. First, the classification result of the study area is divided into a number of square grids with side lengths of 2-9 km. Heterogeneity indices at different scales are calculated and compared to select an optimal scale for the following analysis. Then, the category level landscape indices, such as PLAND, PD, COHEDION, LPI, and FRAC_MN, are calculated in each grid. The aerosol optical thickness (AOD) of Wuhan is used to represent the degree of atmospheric haze pollution. Furthermore, the mean value of the pixels in each grid is regarded as the value of the grid's center. Next, the landscape sources and sinks of atmospheric haze pollution are selected based on the analysis of the correlation between landscape indices and AOD. To make the following analysis more efficient, the indices selected previously are determined using their correlation coefficients. Finally, the geo-weighted regression analysis model is used to analyze the relationship between the landscape indices of the category level and AOD. In addition, the influences of industrial, commercial, and residential areas on haze pollution are analyzed based on the result of the classification of urban functional areas. The results show that the heterogeneity of the whole landscape is most obvious at a 6 km scale, so 6 km is the optimal scale for the analysis. The landscape sources of atmospheric haze pollution are the buildings, and the landscape sinks are shrubs and woodland. Reducing the proportion of landscape source area and increasing the degree of fragmentation can cut down aerosol optical thickness. Distributing the landscape sources and sinks evenly and interspersedly could effectively reduce aerosol optical thickness, which represents atmospheric haze pollution. For Wuhan City, the main sources of haze pollution are commercial and residential areas in the city center, representing public sources. Since it is not easy to adjust existing facilities and infrastructure, adjusting built-up areas slightly and planning reasonably for those areas that are not yet built up can reduce atmospheric haze pollution.

Key words: haze; aerosol optical thickness (AOD); scale effect; landscape sources and sinks; geo-weighted regression

收稿日期: 2017-02-09; 修订日期: 2017-06-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0502603); 地理国情监测国家测绘地理信息局重点实验室开放基金项目(2016NGCM09); 遥感技术在全球能源互联网建设中的应用研究项目(JYYKJXM(2017)011)

作者简介: 许凯(1983~), 男, 博士后, 讲师, 主要研究方向为资源与环境遥感, E-mail: xukai_cug@163.com

* 通信作者, E-mail: ml3618650845_1@163.com

近年来,随着城市经济的迅速发展,城市大气污染日趋严重,霾天气频频发生.霾是悬浮在大气中的大量微小尘粒、烟粒或盐粒的集合体,是在大气相对湿度小于80%,水平能见度低于10 km的一种天气现象^[1].“源”“汇”景观理论是基于大气污染研究提出的,对于大气霾污染,景观生态学认为,“源”景观是指增大霾浓度的景观,“汇”景观是指抑制霾浓度增大、降低大气污染的景观^[2].城市化过程中,如何在有限的土地资源条件下合理布置各类景观类型的空间分布至关重要,“源”“汇”景观分布不均衡,会影响城市内污染物的扩散速度和浓度分布,导致城市大气组成的变化,从而引起城市大气环境的变化^[3~5].合理规划城市“源”“汇”景观格局,可以减少大气霾污染,降低城市建设本身引起的大气环境的负面变化^[6].

目前,大气霾污染的研究多集中于研究气象因素对霾形成及发展的影响、霾的质量浓度和化学成分以及持续性霾污染的传输轨迹^[7~9]这3个方面.而对于城市“源”“汇”景观格局与城市大气霾污染之间关系的研究还不够充分^[10,11].城市发生大气霾污染的一个重要原因是城市景观格局不合理、“源”“汇”景观分布失衡、城市内部污染难以及时扩散^[4,12],因此准确判别“源”“汇”景观、分析城市“源”“汇”景观格局与大气霾污染的相关关系、合理规划城市“源”“汇”景观格局,是降低大气霾污染的有效途径.

本文以武汉市为例,基于 Landsat8 和 MODIS 气溶胶光学厚度产品两种遥感数据,使用地理加权回归模型分析了城市“源”“汇”景观格局与大气霾污染的相关关系,并在工业区、商业区和居民区这3种功能区内分析建筑物这一复合地表要素对大气霾污染影响的差异,以期为城市“源”“汇”景观格局的合理规划、减轻大气霾污染、改善城市大气环境提供理论参考.

1 材料与方法

地表覆盖数据为 Landsat8 影像分类后处理数据,包括建筑、林地、水域、耕地、灌木等地物类别,如图1所示.

气溶胶光学厚度数据使用 MODIS 气溶胶光学厚度产品 MOD04,经过几何校正、镶嵌、裁剪、波段运算等处理,得到武汉市2015年年平均气溶胶光学厚度(剔除极端天气,如阴雨、大风、沙尘暴等),如图2所示.

每种土地覆盖类型对应的 AOD 均值和标准差如表1所示.

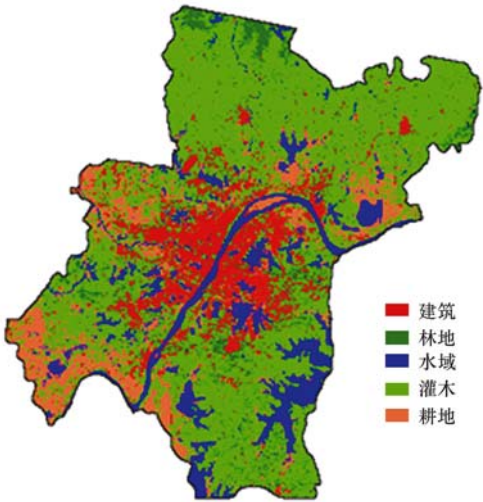


图1 武汉市景观分类结果
Fig. 1 Classification result for Wuhan

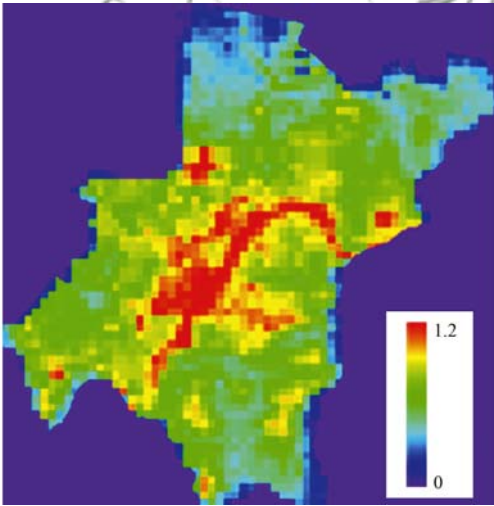


图2 武汉市 AOD 分布
Fig. 2 AOD distribution of Wuhan

表1 每种土地覆盖类型对应的 AOD 的均值和标准差

Table 1 Mean value and standard deviation of AOD corresponding to each land cover type					
项目	建筑	林地	水域	灌木	耕地
均值	0.712 5	0.403 9	0.620 6	0.481 9	0.564 8
标准差	0.130 5	0.148 8	0.264 6	0.139 2	0.196 3

2 尺度选择与“源”“汇”景观判别

2.1 景观格局和景观指数

地表上大小和形状各异的景观要素在空间上的排列和组合构成景观格局,包括景观组成单元的类型、数目及空间分布配置.景观指数是高度浓缩景观格局信息反映其结构组成和空间配置某些方面特

征的简单定量指标，适合定量表达景观格局和生态过程之间的关联的空间分析方法^[13]。

景观指数的计算可以在斑块、类别和整体景观 3 个层次上进行。其中斑块层次上的景观指数尺度过小，对描述整体景观格局不具有很大价值；类别层次指数可以相应计算一些统计学指标；整体景观层次上，可以计算各种多样性指数和聚集度指数等以反映整体景观的异质性程度^[14,15]。

2.2 尺度效应

景观格局具有尺度效应。尺度效应表现为，景观指数的计算结果随空间尺度的变化而变化^[16]。尺度的大小选择决定了景观格局的研究结果，研究尺度过大或过小都会降低景观与环境的相关性和解释性^[17]。景观的异质性决定了景观空间格局的研究重要性^[18]。对于大气环境来说，在一定的研究区域内，异质性越好，表明各景观类型分布越均匀，越有利于大气中物质、能量等的流动和传播，从而保持优良的大气环境。因此本文分析不同尺度下整体景观的异质性程度，选择异质性最高的尺度来进行景观格局的大气霾效应研究。

选取能够从不同角度反映整体景观异质性特征、便于景观格局全面分析的景观指数进行最优尺度分析(如表 2)，在 2~9 km 空间尺度计算景观指数。

表 2 所选取景观指数及意义	
Table 2 Landscape index selected in this study	
整体的景观指数	意义
斑块密度 (PD)	单位面积内的斑块数，可以用来表示整体景观的破碎化程度
蔓延度指数 (CONTAG)	描述的是景观里不同拼块类型的团聚程度或延展趋势。由于该指标包含空间信息，是描述景观格局的最重要的指数之一
香农多样性 (SHDI)	SHDI 在景观级别上等于各拼块类型的面积比乘以其值的自然对数之后的和的负值，反映景观的异质性
Shannon 均匀度 (SHEI)	反映各类斑块分布的均匀程度

表 3 所选取景观指数及意义	
Table 3 Landscape index selected in this study	
类别级景观指数	意义
斑块类型面积百分比 (PLAND)	某一拼块类型的总面积占整个景观面积的百分比
斑块密度 (PD)	反映某一景观斑块空间分布的均匀(破碎化)程度
分维数 (FRAC_MN)	描述斑块或景观镶嵌体几何形状复杂程度的非整数维数值，接近 1 说明越规则
斑块结合度 (COHEDION)	反映相应斑块类型的连接状况，数值越大，斑块之间越聚集，连接性越好
最大斑块指数 (LPI)	某一类别中最大斑块在整个景观中所占比例

表 4 可以看出，建筑物的 PLAND、LPI、FRAC_MN、COHESION 均与 AOD 呈正相关，而 PD 与其呈负相关。即一定尺度内建筑物所占面积越大、单

将反映整体景观异质性的各景观指数线性归一化，最终各指数在不同尺度下的计算结果如图 3 所示。

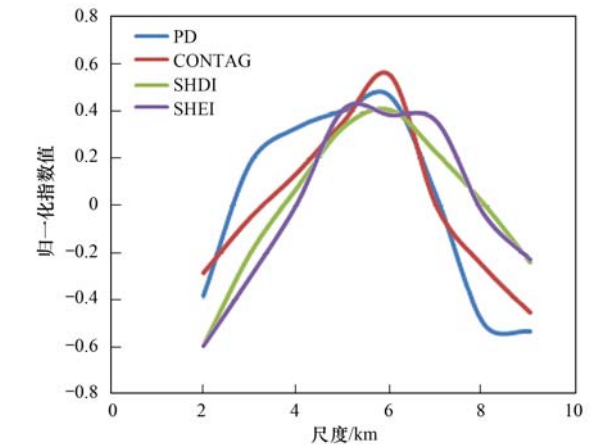


图 3 不同尺度下归一化后的异质性指数
Fig. 3 Heterogeneity index after normalization at different scales

从图 3 可以看出，归一化后的整体景观的异质性指数除 SHEI 在 5 km 处达到最大值外，其他指数均在 6 km 处达到最大。总体而言，各指数在 6 km 时，整体景观的异质性表现的最为明显，因此本文基于 6 km 尺度来研究“源”“汇”景观格局与 AOD 的相关关系。

2.3 “源”“汇”景观判别

类别级景观指数可以反映各类景观的排列分布特征，本文基于类别级景观指数来区分大气霾污染的“源”“汇”景观。将地表覆盖分类结果分割为 6 km 的网格，计算每个格网内的类别级景观指数；对 AOD 进行同样的分割，取每个分割块的 AOD 均值作为格网的中心值，并对二者进行相关性分析，以判别大气霾污染的“源”“汇”景观。所选取的类别级景观指数如表 3 所示。各类别的景观指数与 AOD 的相关系数如表 4 所示。

个斑块面积越大、几何形状越规则、斑块之间越紧促，AOD 值就越高。因此，可以认为大气霾污染的“源”景观为建筑物。而对于林地和灌木，各指数均

表 4 类别级各景观指数与 AOD 的相关性分析结果¹⁾

Table 4 Correlation analysis results of landscape index and AOD by class level

项目	PLAND	PD	LPI	FRAC_MN	COHESION
建筑	0.654 **	-0.565 **	0.489 **	0.321 **	0.58 **
水域	0.017	-0.225 **	-0.077	-0.121	0.338 **
林地	-0.646 **	-0.582 **	-0.499 **	-0.329 **	-0.639 **
灌木	-0.566 **	-0.495 **	-0.467 **	-0.307 **	-0.71 **
耕地	-0.065	-0.094	-0.148 **	0.074	0.335 **

1) * * 表示在 0.01 水平上显著相关

与 AOD 呈负相关. 即灌木和林地在一定尺度内所占面积越大、连接性越好、分布越均匀, AOD 值就越低. 因此, 可以认为大气霾污染的“汇”景观为林地和灌木.

而在景观格局的环境效应研究中, 一直被看作“汇”景观的水域却与 AOD 无明显的相关性. 通过分析, 可能是以下两个原因造成的: ①从图 2 可以看出, 长江上空气溶胶浓度很高, 这是由于路经武汉市的船只较多, 其消耗的化石燃料放出的废气很容易在相对湿度很高的江面发生反应生成气溶

胶^[19]; ②武汉市气候条件的原因, 武汉常年处于相对湿度高、近地风速低的状态^[20]. 较高的相对湿度成为凝结而形成气溶胶的“催化剂”; 较低的近地风速不利于气溶胶前体物的扩散.

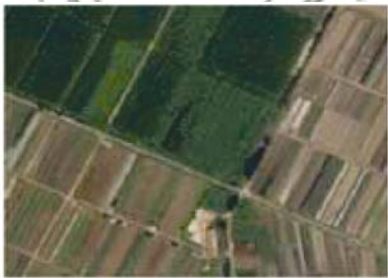
对于耕地, 由于其种类多样: 普通田地和有塑料大棚的田地[图 4(a)]、旱田和水田[图 4(b)]、生长期和收割期的耕地[图 4(c)]等等, 在对大气霾污染的作用中差别很大, 且多种农田混合交叉分布, 这是与 AOD 相关性不明显的主要原因.



(a) 普通田和塑料大棚田



(b) 水田和旱田



(c) 生长期和收割期田地

图 4 各种类型农田示意

Fig. 4 Various types of cultivated land

综上所述, 本文选择建筑物为大气霾污染的“源”景观, 灌木和林地作为大气霾污染为“汇”景观, 进行“源”“汇”景观与 AOD 的地理加权回归分析, 反映“源”“汇”景观格局对大气霾污染的影响.

3 地理加权回归分析

对景观格局的大气霾效应定量分析常使用的基于统计学的模型, 如相关性分析、线性回归模型、指数模型等, 均为全局模型, 实际上大气霾污染与景观格局往往表现出局部变化特征, 即使是同样的景观类型, 其排列布局不同对应的霾严重程度也会有所不同, 因此使用局部模型可以更准确地反映景观格局与大气环境的耦合关系^[21, 22]. 地理加权回归(geographically weighted regression)作为一种局部统计模型, 可以避免由地理位置引起的空间非平稳性的影响, 因此本文选取地理加权回归模型, 对因

变量 AOD 和自变量各景观指数进行回归分析.

3.1 地理加权回归分析原理

地理加权回归模型是对普通线性回归模型的扩展, 将数据的地理位置嵌入到回归参数中, 即:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i$$
$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, (u_i, v_i) 为第 i 个采样点的坐标(如经纬度), $\beta_0(u_i, v_i)$ 为第 i 个采样点上的第 k 个回归系数, 是地理位置的函数.

本文使用地理加权回归模型进行“源”“汇”景观的大气霾效应分析, 以“类别级”景观指数为自变量, AOD 为因变量, 分析“源”“汇”景观分布的均衡性和排列组合方式的合理性对大气霾污染的影响.

3.2 景观指数选择

景观指数之间存在很大的相关性^[23], 这就使

得在与 AOD 进行地理加权回归分析时出现自变量组合冗余现象，导致模型不稳定、不可靠。因此，本文在 6km 尺度下分析各景观指数之间的相关性（如表 5），取相关性较小的景观指数进行地理加权回归分析。

表 5 显示，各个类别中，PD 与 PLAND、LPI 无相关性，但 PLAND 和 LPI 相关性明显，而 PLAND 意义更直观，因此这里选取 PLAND 和 PD 对各类别景观进行地理加权回归分析。

3.3 地理加权回归分析

3.3.1 “源”景观的地理加权回归

建筑区的 PLAND 和 PD 指数分布如图 5 所示，对其进行地理加权回归分析的拟合度为 0.752 1，具体分析结果如图 6 所示。

表 5 景观类别级别上各景观指数的自相关性分析表¹⁾

Table 5 Self correlation of landscape index by landscape class

建筑	PD	LPI	FRAC_MN	COHESION
PLAND	-0.021	0.97 **	0.41 **	0.484 **
PD		-0.049	0.128 **	-0.286 **
LPI			0.346 **	0.411 **
FRAC_MN				0.637 **
灌木	PD	LPI	FRAC_MN	COHESION
PLAND	-0.01	0.959 **	0.486 **	0.451 **
PD		-0.003	-0.054 **	-0.069 **
LPI			0.484 **	0.386 **
FRAC_MN				0.29 **
林地	PD	LPI	FRAC_MN	COHESION
PLAND	0.033	0.938 **	0.331 **	0.486 **
PD		0.19	-0.006	0.213 **
LPI			0.245 **	0.387 **
FRAC_MN				0.502 **

1) * * 表示在 0.01 水平上显著相关

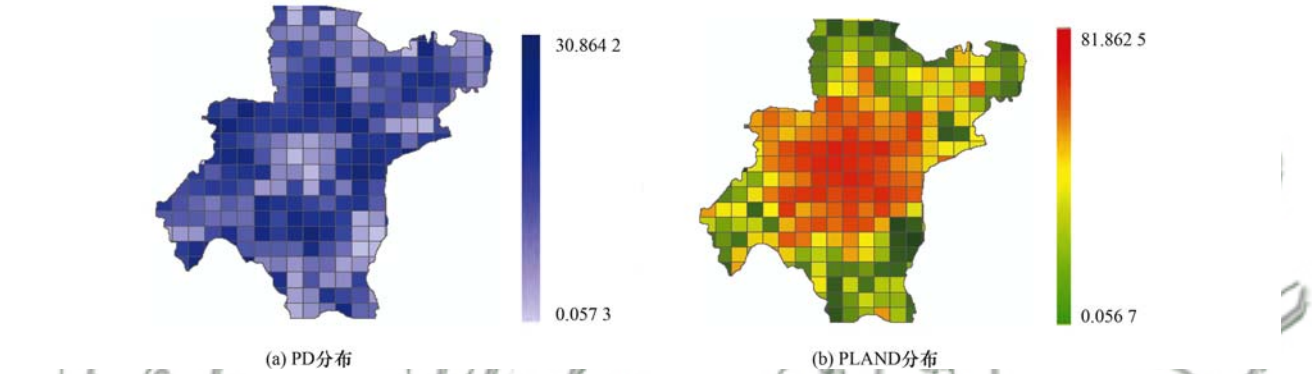


图 5 建筑物类别 PLAND 和 PD 指数分布
Fig. 5 Distribution of PLAND and PD index for building class

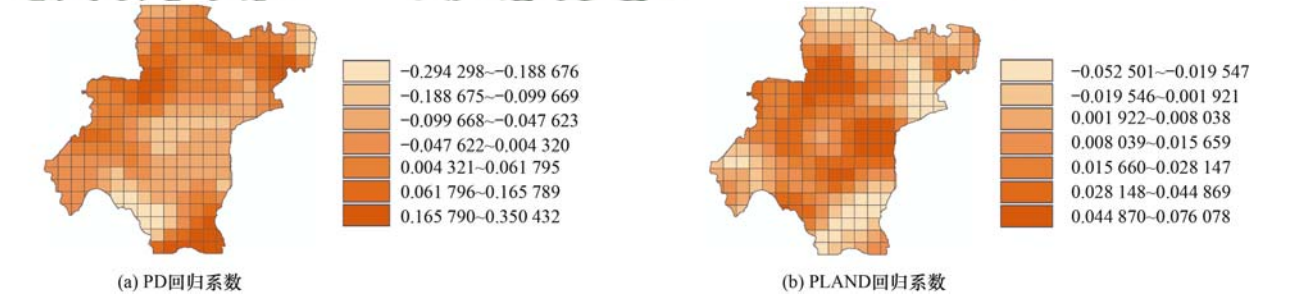


图 6 建筑物类别地理加权回归分析结果

Fig. 6 Geographical weighted regression analysis results for building category

图 6(a) 显示，总体上在主城区斑块密度 PD 的回归系数为负，而在非主城区系数为正。图 6(b) 显示 PLAND 系数几乎全部为正。这是由于在主城区建筑区呈大片斑块出现，虽然建筑物的斑块密度小，但是其在景观格局中所占比例极大；而在非主城区，建筑与其他类别混合交叉排列，其斑块密度增大，建筑所占面积有所减小。由此可得，减小建筑物面积所占比例，增大其斑块密度有降低 AOD 的作用，即建筑物类型斑块破碎化程度越低、占面

积百分比越大，AOD 浓度越高。

建筑物等地面要素对大气污染的影响具有一定的差异，即排放与地表要素呈非线性关系，同样是建筑物，在工业区、商业区和居民区具有显著的差异，为了探究复合地表要素对大气霾污染的影响，本文在 6 km 网格中划分工业区、居民区、商业区、水域等 7 种城市功能区（如图 7），在工业区、商业区和居民区 3 种功能区内分析建筑物对大气污染影响的差异。并分别统计 3 种功能区对应的 PD、

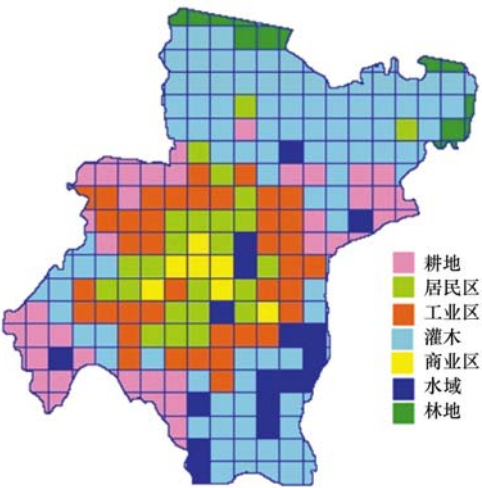


图 7 3 种城市功能区的分布
Fig. 7 Distribution of urban functional areas

表 6 3 种城市功能区对应的 PD、PLAND 和 AOD 均值和标准差

Table 6 Mean values and standard deviation of PD, PLAND, and AOD of urban functional areas

功能区	PD		PLAND		AOD	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
商业区	0.59	0.235 5	57.3	16.256	0.7413	0.071
居民区	0.93	0.307 8	38.89	21.727	0.711 5	0.092
工业区	1.45	0.574 1	30.34	19.934	0.621 4	0.126

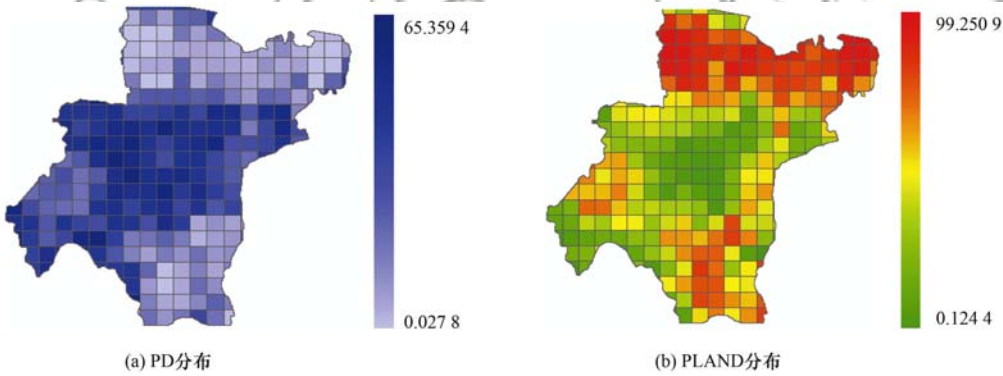


图 8 灌木类别 PLAND 和 PD 指数分布

Fig. 8 Distribution of PLAND and PD index for shrubs

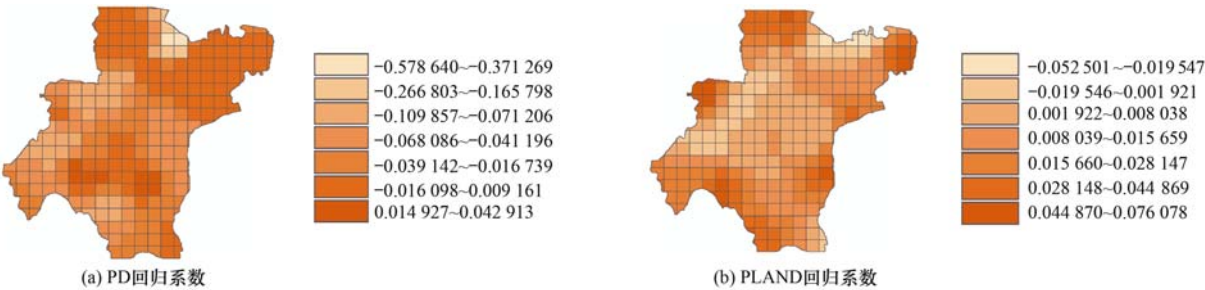


图 9 灌木类别地理加权回归分析结果

Fig. 9 Geographic weighted regression analysis results for shrub types

的面积所占比例相当,此时 PD 占主导作用,总体上 PD 和 PLAND 的回归系数均为负值,由此可得,灌木类别对 AOD 浓度具有降低的作用,且其分布

PLAND 和 AOD 均值和标准差如表 6 所示.

表 6 印证了减小建筑物面积所占比例,增大其斑块密度可降低 AOD 的结论,同时也显示出,同样的建筑物,在工业区、商业区和居民区对大气霾污染具有显著差异的特点.对于武汉市来说,大气霾污染的真正之源为商业区和居民区,即来源于市民生活.而工业区的污染排放监管不断加强使得工业区已不再是大气霾污染的主要源头.

3.3.2 “汇”景观的地理加权回归

灌木的 PLAND 和 PD 的分布图及地理加权回归分析结果分别如图 8、9 所示,对其分别进行地理加权回归分析的拟合度为 0.7708.图 9 显示,在主城区灌木的斑块密度很大,但面积所占比例极小,此时 PLAND 占主导作用,而非主城区,灌木分布

均匀度越高、占面积百分比越大,其降低 AOD 浓度作用越明显.

林地类别的 PLAND 和 PD 的分布图及地理加

权回归分析结果分别如图 10、11 所示, 拟合度为 0.699 7。图 10 显示出林地分布的不均衡性, 图 11 (a) 显示, 除在耕地处, 其他类别地区的回归系数均为负值; 图 11(b) 可以看出, 林地 PLAND 大的区

域其系数绝对值越大, 即对大气颗粒物的减小能力越强。总体分析, 林地对大气的作用同灌木几乎相同, 即增大其分布面积和分布均匀度可有效降低大气颗粒物浓度。

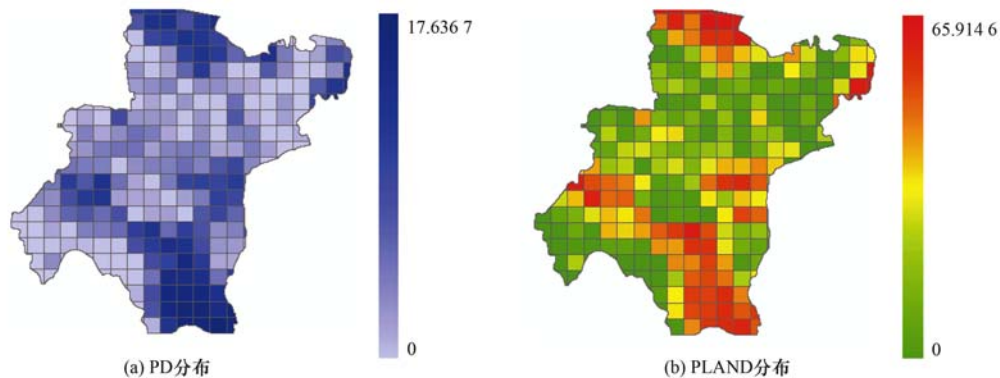


图 10 林地类别 PLAND 和 PD 指数分布

Fig. 10 Distribution of PLAND and PD index for forest

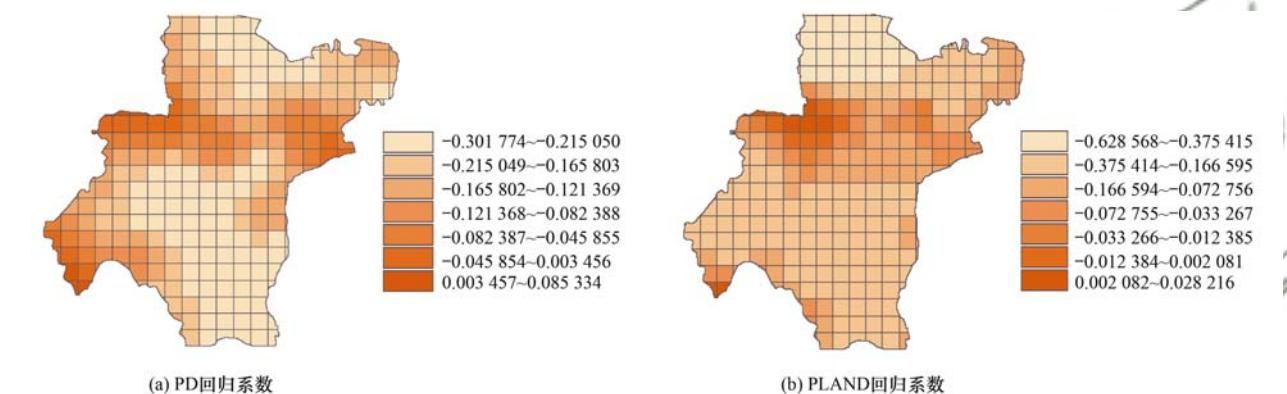


图 11 林地类别地理加权回归分析结果

Fig. 11 Geographical weighted regression analysis results for the forest category

4 结论

(1) 在 2~9 km 尺度下分析整体景观异质性, 各景观指数值归一化后, 整体上在 6 km 时达到最大, 即 6 km 时整体景观的异质性表现得最为明显;

(2) 对于大气霾污染来说, 其“源”景观为建筑物, “汇”景观为林地和灌木;

(3) 减小“源”景观的面积所占比例 (PLAND 值)、增大“源”“汇”景观斑块密度 (PD 值), 即增大“源”景观破碎化程度, “源”“汇”景观穿插均匀分布, 可以有效减小气溶胶光学厚度, 降低大气霾污染程度。

(4) 武汉市大气霾污染的主要来源为中心城区的商业区和居民区, 即来自于市民生活。而中心城区由于需要发挥其经济、交通等功能, 已有的建设用地不宜大面积改动, 针对这一现状, 可以采取小幅度优化措施, 重点调整景观斑块的密度。而对于

非建成区, 可采取建前优化规划方案的措施, 均衡“源”“汇”景观的面积和空间分布。

参考文献:

- [1] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 257-269.
Wu D. Hazy weather research in China in the last decade: a review[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(2): 257-269.
- [2] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
Chen L D, Fu B J, Zhao W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [3] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677.
Peng J, Dang W X, Liu Y X, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 664-677.
- [4] 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[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.
Chen L D, Sun R H, Liu H L. Eco-environmental effects of

- urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(4): 1042-1050.
- [5] Peng J, Xie P, Liu Y X, *et al.* Urban thermal environment dynamics and associated landscape pattern factors: A case study in the Beijing metropolitan region [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **173**: 145-155.
- [6] 孙然好, 许忠良, 陈利顶, 等. 城市生态景观研究的基础理论框架与技术构架[J]. *生态学报*, 2012, **32**(7): 1979-1986.
- Sun R H, Xu Z L, Chen L D, *et al.* Theoretical framework and key techniques of urban ecological landscape research[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(7): 1979-1986.
- [7] 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 等. 北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM_{2.5} 变化特征对气象因素的响应[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2419-2427.
- Zhang N, Xiong H G, Ge X X, *et al.* Response of human respiratory height PM_{2.5} variation characteristics to meteorological Factors during winter haze days in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2419-2427.
- [8] 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 等. 石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3258-3267.
- Liu J Y, Liu Z R, Wen T X, *et al.* Characteristics of the size distribution of water soluble inorganic ions during a typical Haze pollution in the Autumn in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3258-3267.
- [9] 李莉, 蔡鋈琳, 周敏. 2013 年 12 月中国中东部地区严重雾霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- Li L, Cai J L, Zhou M. Potential source contribution analysis of the particulate matters in Shanghai during the heavy haze episode in eastern and middle China in December 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- [10] 韩晔, 周忠学. 西安市绿地景观吸收雾霾生态系统服务测算及空间格局[J]. *地理研究*, 2015, **34**(7): 1247-1258.
- Han Y, Zhou Z X. Evaluation on ecosystem services in haze absorption by urban green land and its spatial pattern analysis in Xi'an [J]. *Geographical Research*, 2015, **34**(7): 1247-1258.
- [11] Fameli K M, Assimakopoulos V D, Kotroni V, *et al.* Effect of the land use change characteristics on the air pollution patterns above the Greater Athens Area (GAA) after 2004 [J]. *Global Nest Journal*, 2013, **15**(2): 169-177.
- [12] 滕明君. 快速城市化地区生态安全格局构建研究——以武汉市为例[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [13] 关键. 石家庄城市景观格局对灰霾效应的影响研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- [14] Tian G J, Jiang J, Yang Z F, *et al.* The urban growth, size distribution and spatio-temporal dynamic pattern of the Yangtze River Delta megalopolitan region, China [J]. *Ecological Modelling*, 2011, **222**(3): 865-878.
- [15] 郭建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 104-105.
- [16] Johnson C J, Boyce M S, Mulders R, *et al.* Quantifying patch distribution at multiple spatial scales: applications to wildlife-habitat models [J]. *Landscape Ecology*, 2004, **19**(8): 869-882.
- [17] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. *生态学报*, 2008, **28**(11): 5521-5531.
- Chen L D, Liu Y, Lv Y H, *et al.* Landscape pattern analysis in landscape ecology: current, challenges and future [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(11): 5521-5531.
- [18] 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1091-1097.
- Han L Y, Huang Z L, Xiao W F, *et al.* Effects of land use and landscape pattern on nitrogen and phosphorus exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1091-1097.
- [19] 张明明. 大气气溶胶光学厚度遥感反演及其环境效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [20] Wang L C, Gong W, Xia X, *et al.* Long-term observations of aerosol optical properties at Wuhan, an urban site in Central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **101**: 94-102.
- [21] Brown S, Versace V L, Laurenson L, *et al.* Assessment of spatiotemporal varying relationships between rainfall, land cover and surface water area using geographically weighted regression [J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2012, **17**(3): 241-254.
- [22] 吴建生, 王茜, 李嘉诚, 等. PM_{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2191-2201.
- Wu J S, Wang X, Li J C, *et al.* Comparison of models on spatial variation of PM_{2.5} concentration: a case of Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2191-2201.
- [23] Turner M G, Gardner R H. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process (2nd ed.) [M]. New York: Springer-Verlag, 2015. 325-332.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui, <i>et al.</i> (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si, <i>et al.</i> (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong, <i>et al.</i> (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi, <i>et al.</i> (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)