

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期
Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM _{2.5} 质量浓度演变及驱动因子分析	蔡子颖,郝国,韩素芹,唐颖潇,杨旭,樊文雁,姚青,邱晓滨(1129)
天津市PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及来源分析	肖致美,徐虹,高璟,蔡子颖,毕温凯,李鹏,杨宁,邓小文,戴运峰(1140)
基于随机森林模型的武汉市城区大气PM _{2.5} 来源解析	张志豪,陈楠,祝波,陶卉婷,成海容(1151)
华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析	任秀龙,胡伟,吴春苗,胡偲豪,高娜娜,张崇崇,岳亮,王金喜,樊景森,牛红亚(1159)
“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征	吴安南,黄小娟,何仁江,李金建,叶林麟,吴涛,肖智丹,刘子锐,王跃思,张小玲,张军科(1170)
郑州市典型污染过程PM ₁₀ 中重金属浓度、来源及健康风险评估	翟诗婷,王申博,张栋,赵孝因,杨洁茹,刘洋,陈红阳,张瑞芹(1180)
长江经济带PM _{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测	王丽丽,刘笑杰,李丁,孙颖琦(1190)
长三角地区PM _{2.5} 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应	周丽霞,吴涛,蒋国俊,张建珍,濮励杰,徐飞,解雪峰(1201)
“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析	朱媛媛,王晓斐,汪巍,刀语,王帅,陈善荣(1212)
基于小波变换的山西省PM _{2.5} 污染特征及影响因素	张可可,胡冬梅,闫雨龙,彭林,段小琳,尹浩,王凯,邓萌杰(1226)
中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估	赵楠,卢毅敏(1235)
湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别	刘妍妍,杨雷峰,谢丹平,泽仁央宗,黄志烟,杨俊,赵鹏,韩静磊,贾文超,袁自冰(1246)
山东半岛近地面O ₃ 浓度时空变化及潜在源区解析	李乐,刘旻霞,肖仕锐,王思远,米佳乐(1256)
COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析	刘新军,王淑娟,刘程,范莉茹,付翠轻,齐堃,宿文康(1268)
淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析	王帅,王秀艳,杨文,王雨燕,白瑾丰,程颖(1277)
淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较	秦涛,徐勃,王信梧,李丽明,杨文,王晓丽,耿春梅(1286)
四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单	钱骏,韩丽,陈军辉,王斌,姜涛,徐晨曦,李英杰,王成辉,王波(1296)
餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征	李源速,吴爱华,童梦雪,栾胜基,李骞(1307)
堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构	于奥园,邢礼军,孙兴滨,仇天雷,王旭明,高敏(1315)
城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路	李廷昆,冯银厂,毕晓辉,张裕芬,吴建会(1323)
黄河干流水质评价与时空变化分析	刘彦龙,郑易安(1332)
典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例	王超,叶秋,贾伯阳,何文战,党超军,黄焱,杜浪(1346)
三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响	黄伟,张研,罗晓佼,张磊(1356)
派河及其支流溶解性有机质分子组成特征	詹亚,尹浩,冯景伟,冯艾荣,胡艳云,张刘,郑刘根(1365)
粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素	崔新月,莫武秋,廖建波(1375)
骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评价	龚润强,赵华璋,高占啟,胡冠九,卜元卿,张圣虎,邱慧(1384)
宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估	李富娟,高礼,李凌云,郑兰香,陶红,杨桂钦(1394)
百年以来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应	龚雄虎,赵中华,丁琪琪,张路,姚书春,薛滨(1404)
长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异	胡愈忻,张静,黄杰,段春建,李天翠,刘威,王英才,胡圣(1414)
河套平原灌溉间隙期乌梁素海水体细菌群落结构特征	史玉娇,李文宝,张博尧,姚国旺,史小红(1424)
不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响	舒旺,王鹏,丁明军,张华,黄高翔,聂明华(1434)
鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征	刘淑丽,简敏菲,邹龙,胡启武(1447)
微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响	陶辉,戚怡婷,于多,杨兰,顾颖,厉彦辉(1455)
乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律	刘禹,史小红,张生,郝若男,孙标,赵胜男(1463)
老化前后微塑料对富里酸的吸附	宋亚丽,俞娅,郝磊,汪华,朱文芳(1472)
天津市滨海河流N、O ₃ 扩散通量及控制因子	汤梦瑶,胡晓康,王洪伟,王云仓,常素云,王松庆,钟继承(1481)
铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响	陈鑫童,郝庆菊,熊艳芳,胡剑,江长胜(1492)
降雨径流污染风险等级识别与优化方法	齐小天,张质明,赵鑫,胡文翰,刘迪(1500)
基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析	江杉杉,王臻宇,高权,杨愿愿,高方舟,胡佩,应光国(1512)
聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(Ⅲ)的选择性吸附效果与机制	赵文金,张顺,安晓强,兰华春,刘会娟,曲久辉(1521)
F/M对活性污泥微生物生态网络的影响	张冰,孙展翔,文湘华(1529)
城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例	刘书准,王德伟,施泽明,唐亮,章凤英,廖程,李晓雨,徐文斌(1535)
基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估	王蕊,陈楠,张二喜(1546)
湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转化特征及污染评价	张龙,宋波,黄凤艳,肖乃川,顿梦杰(1558)
生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应	杨士,刘祖文,龙培,毕永顺,林苑,左华伟(1567)
溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤	闵涛,罗彤,陈丽丽,茹思博,李俊华(1577)
铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制	连斌,吴骥子,赵科理,叶正钱,袁峰(1584)
不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异	刘畅,徐应明,黄青青,陶雪莹,王林,孙约兵,赵立杰(1596)
镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性	任超,任成仲,王浩,朱利文,李竞天,杜倩倩,李萍(1606)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响	刘坤和,薛玉琴,竹兰萍,徐飞,朱志豪,张拓,张富斌(1620)
蚯蚓/钾锰改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响	苏倩倩,李莲芳,朱昌雄,叶婧,刘雪,耿兵,田云龙,黄晓雅(1630)
DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响	罗洋,孙丽,刘方,任军,郭金梅,闫修民(1641)
地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响	胡志娥,肖谋良,王双,童瑶瑶,鲁顺保,陈剑平,葛体达(1649)
增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响	王兴,钟泽坤,朱玉帆,王佳懿,杨改河,任成杰,韩新辉(1657)
秸秆还田、地膜覆盖及施氮对冬小麦田N ₂ O和N ₂ 排放的影响	彭毅,李惠通,张少维,阳婷,王筱斐,周春菊,王林权(1668)
基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤氮挥发的影响	赵政鑫,王晓云,田雅洁,王锐,赵青,蔡焕杰(1678)
施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析	冉继伟,肖琼,黄敏,蔡岸冬,张文菊(1688)

长三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应

周丽霞¹, 吴涛¹, 蒋国俊¹, 张建珍¹, 濮励杰^{2,3}, 徐飞⁴, 解雪峰^{1,3*}

(1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 金华 321004; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 3. 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 4. 浙江财经大学土地与城乡发展研究院, 杭州 310018)

摘要: 长三角地区 $PM_{2.5}$ 污染受区域空间效应的影响, 其可持续治理方向仍不清晰. 结合随机森林、空间计量模型和多尺度地理加权回归模型 (MGWR), 探讨 $PM_{2.5}$ 浓度对土地利用/覆盖转换的多尺度空间响应过程. 结果表明: ① 2000 ~ 2018 年长三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出 4 类空间连续聚集的时空变化模式, 区域性同步变化强烈; ② 土地转换对 $PM_{2.5}$ 浓度的相对影响表现复杂, 耕地与林地的源-汇效应显著. 邻域分析表示周围聚集性土地利用/覆盖转换普遍比单一像元时作用更显著, 空间效应明显; ③ $PM_{2.5}$ 浓度变化与林地、草地转换类型大多呈显著负相关, 与耕地、建设用地和水体之间的转换类型呈显著正相关. 随机森林模型重要性排序及相关系数强度表明: 耕地-耕地 (29.65% 及 0.650)、林地-林地 (26.98% 及 0.726)、建设用地-耕地 (22.57% 及 0.519)、耕地-林地 (17.84% 及 0.602) 和耕地-建设用地 (16.34% 及 0.424) 之间转换对 $PM_{2.5}$ 浓度变化贡献度较高. 空间杜宾模型显示 $PM_{2.5}$ 浓度变化存在显著的空间依赖性和空间溢出效应; ④ MGWR 模型揭示了不同土地利用/覆盖转换方式作用于 $PM_{2.5}$ 浓度变化的尺度效应及空间关系的非平稳性特征, 其空间关系表现出强烈的转移类型差异. 而多模型结果显示不同土地转换对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的驱动方式不同, 因此需分类别分层制定针对性联合管理策略.

关键词: $PM_{2.5}$; 土地利用/覆盖转换; K-means 聚类; 随机森林; 空间计量; 多尺度地理加权回归 (MGWR)

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)03-1201-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202106039

Spatial Heterogeneity of $PM_{2.5}$ Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region

ZHOU Li-xia¹, WU Tao¹, JIANG Guo-jun¹, ZHANG Jian-zhen¹, PU Li-jie^{2,3}, XU Fei⁴, XIE Xue-feng^{1,3*}

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection of Ministry of Natural Resources, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 4. Institute of Land and Urban-Rural Development, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The sustainable management direction of $PM_{2.5}$ concentrations in the Yangtze River Delta region remains unclear due to regional spatial effects. This study combined the random forest model, spatial econometric model, and multi-scale geographically weighted regression model (MGWR) to explore the multi-scale spatial response of $PM_{2.5}$ concentration to land use/cover conversion. The results show that: ① $PM_{2.5}$ concentrations in the Yangtze River Delta region from 2000 to 2018 showed four types of spatial-temporal patterns of spatially continuous aggregation, with strong regional synchronous changes. ② The relative influence of land conversion on $PM_{2.5}$ concentrations showed a complex performance, and the source-sink effect of cultivated land and forest land was obvious. Neighborhood analysis indicated that the effect of surrounding aggregated land use conversion was generally more significant than that of single cells on $PM_{2.5}$ concentration change, and the spatial effect was obvious. ③ $PM_{2.5}$ concentration changes were mostly significantly negatively correlated with forest land and grassland conversion types and significantly positively correlated with conversion types between cropland, construction land, and water bodies. The importance ranking of the random forest model and correlation coefficient intensity indicated that the conversion between cropland-cropland (29.65%; 0.650), forest land-forest land (26.98%; 0.726), construction land-cropland (22.57%; 0.519), cropland-forestland (17.84%; 0.602), and cropland-construction land (16.34%; 0.424) contributed more to the variation in $PM_{2.5}$ concentration. The spatial Durbin model revealed a significant spatial dependence of the change in $PM_{2.5}$ concentration and a strong spatial spillover effect. ④ The MGWR model revealed the scale effects and non-stationary characteristics of the spatial relationships between different land use conversions acting on $PM_{2.5}$ concentration change, and its spatial relationship showed strong differences in transfer types. However, the multi-models revealed that different land conversions drove the $PM_{2.5}$ concentration change in different ways, so it is necessary to formulate targeted joint management strategies in a categorical and hierarchical manner.

Key words: $PM_{2.5}$; land use/cover conversion; K-means clustering; random forest; spatial econometric model; multi-scale geographically weighted regression model (MGWR)

$PM_{2.5}$ 污染在全球气候系统的驱动及交互影响下可引起巨大的社会经济损失, 在公共卫生领域承担着较大疾病负担贡献率^[1,2]. 为缓解 $PM_{2.5}$ 污染及健康风险, 世界卫生组织^[3]、美国环保署^[4] 和中国国家环境保护部^[5] 等环境组织和国家制定了一系列干预措施与法规, 污染改善效果明显^[6]. 然而, 长三角地区由于人口密集、产业发展迅速、城市急剧

扩张和人类活动活跃仍然为中国东部地区重要雾霾区^[7]. 因此, 深入探讨长三角地区 $PM_{2.5}$ 时空演变

收稿日期: 2021-06-04; 修订日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871083, 41230751); 浙江省自然科学基金项目 (LY19D010007)

作者简介: 周丽霞 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用及其环境效应, E-mail: 384318400@qq.com

* 通信作者, E-mail: xiexuefeng@zjnu.cn

特征,识别关键影响因素及其响应过程具有重要意义.然而,当前多利用多时间尺度、时间序列数据及多空间尺度、空间截面数据进行统计分析,而获取时空动态分异特征^[8,9],忽略了地理过程的时空不可分离性,缺乏对时空变化特征抽象规律的提取,而聚类是时空模式提取的重要手段^[10].

PM_{2.5}浓度变化受自然因素与人为活动综合影响,鉴于对PM_{2.5}源解析及间接传输扩散条件的物理作用的认识,多数研究者从工业生产、交通排放和地面扬尘等直接排放因素^[11]、扩散沉降条件因素(地形、气象条件、地表条件)^[12,13]和人类活动强度(城市化过程、城市形态)^[14,15]等间接因素方面探讨PM_{2.5}驱动机制.而土地利用类型和景观格局可囊括自然/人工源与人类活动强度^[16,17]而作为自然与人为复合因素,其对PM_{2.5}的影响机制尚待深入.由于不同土地类型作为地表下垫面存在强烈的物理性质差异,与PM_{2.5}浓度表现为显著的空间响应关系^[18],其土地利用空间分布及景观结构的变化一方面会改变水热条件并与大气活动交互作用影响颗粒物的动态传播^[19],另一方面会改变地表源-汇景观系统的空间格局^[20],均会对PM_{2.5}浓度产生直接或间接的影响.目前针对土地利用与PM_{2.5}关系的探讨多采用多元线性回归^[20]、广义可加模型^[21]和空间计量模型^[21,22]等.而这些传统统计分析模型易受限于变量选择对结果的敏感性,如何选择合适的变量组合是关键.在识别关键影响因子中,随机森林模型因具备运行高效、抗干扰与泛化能力强和无多重共线性,在土壤属性^[23]和PM_{2.5}浓度^[24]等方向得到了

较好地模拟效果.此外,目前对PM_{2.5}浓度与土地利用空间关系的探索较少考虑到空间非平稳性及作用范围的差异性的影响^[16,17,19],较难把握PM_{2.5}的空间异质性与区域空间多尺度影响过程.因此,本研究以我国长三角地区为例,结合随机森林模型、空间计量模型和多尺度地理加权回归模型多角度尝试阐明土地利用/覆盖类型及转移对PM_{2.5}浓度的空间响应过程.其结果可精确分析土地利用/覆盖因素对PM_{2.5}的空间响应,从区域空间联合角度为联防联控的政策提供精细理论支持,期望助力共建人与自然生命共同体.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长三角地区工业化与城市化迅速,人类活动密集,人为污染源排放强度大,土地覆盖变化明显,是我国PM_{2.5}污染最为严重的区域之一,在空间上呈现东南高西北低的格局(图1).我国自2010年开展了区域性大气污染联防联控治理,长三角地区在国家战略高度上于2013年成立区域大气污染防治协作机制,以排放控制为主实施大气污染防治行动,效果显著,2013~2016年期间PM_{2.5}浓度下降了27%^[25],但仍然有超过一半的区域高出年均浓度限值,可见长三角地区PM_{2.5}污染并未得到根本性解决.长三角地区地形起伏、气候条件差异不明显,但土地利用变化剧烈,明确高强度人类活动影响下土地利用/覆盖转换对PM_{2.5}浓度的影响机制将为PM_{2.5}污染防控提供重要参考.

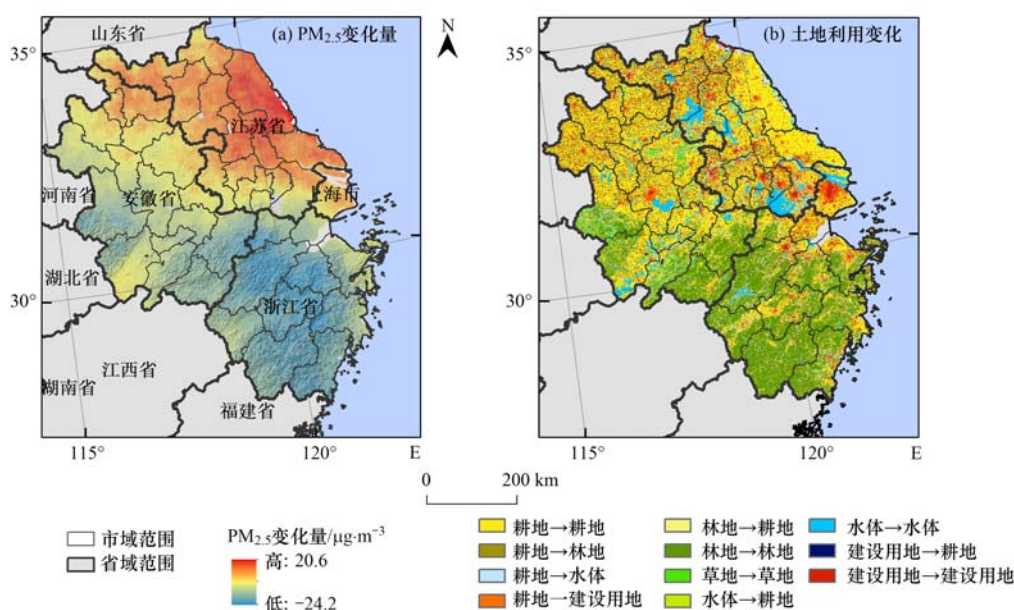


图1 2000~2018年研究区PM_{2.5}浓度变化及土地利用转换特征

Fig. 1 PM_{2.5} concentration change and land use conversion characteristics in the study area from 2000-2018

1.2 数据来源与处理

考虑到地面监测站空间分布的不均匀性,选取大气成分分析组织的中国区域地面 PM_{2.5} 空间分布数据集(V4.CH.03),空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,该数据集是通过化学传输模型(GEOS-Chem)基于 NASA MODIS、MISR 和 SeaWiFS 等卫星产品的 AOD 与 PM_{2.5} 之间的地球物理关系进行估算浓度值并利用地面测量数据校准^[26]. 为验证该数据集在研究区域的可靠性,本文利用生态环境部发布的 2015~2018 年长三角区域地面监测站的 PM_{2.5} 指标计算站点年平均 PM_{2.5} 浓度,通过空间匹配提取出对应的 PM_{2.5} 浓度值,结果表明二者间的相关系数为 0.732~0.927,均方根误差为 $3.576 \sim 6.197 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,信息损失不大,能够捕捉到 PM_{2.5} 浓度变化信息,可用于长三角区域 PM_{2.5} 浓度空间分析。

研究区土地利用/覆盖数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km,时间上选取 2000 年与 2018 年. 根据研究目的,选取一级土地分类,计算 10 km × 10 km 格网单元内 2000~2018 年土地利用/覆盖转换类型的面积比例及格网单元内 PM_{2.5} 浓度平均值,共获得 3462 个样本。

1.3 研究方法

1.3.1 K-means 算法时空聚类

K-means 聚类算法经多项研究检验可产生稳定的聚类边界,考虑到时间变化特性,采用余弦距离作为相似性度量,是研究地理要素时空分异特征的重要手段之一^[10,27]. 另外,聚类效果仍需体现 PM_{2.5} 浓度的空间分异性特征,地理探测器则是一种广泛使用的空间分层异质性探测的空间统计方法,通过 q 统计量量化空间分异与分层性来评估聚类内部与聚类之间空间上的相似性与差异性^[28,29]. 本研究将时间序列的 PM_{2.5} 数据中具有相似时间变化的格网分组合在一起,以每年原始 PM_{2.5} 浓度值为因变量,聚类结果为自变量计算 q 统计量,以获取聚类结果的平均 q 值, q 值计算过程见王劲峰的研究^[28]. 越趋近于 1 的 q 值表示聚类结果有效地区分了长三角地区 PM_{2.5} 浓度的区域分异。

1.3.2 随机森林回归模型

随机森林(RF)模型是由 Breiman 提出的一种基于决策树的 Bagging 典型算法^[30],该模型的回归过程是通过 Bagging 随机且有放回的采样方法将原数据集按一定比例进行多轮抽取形成多组训练集,对每个训练集分别进行随机选择特征进行递归构建相应决策树,所有决策树结果的均值即为回归结果^[24,30]. 随机森林回归模型基于本身机器学习的算

法具有运行高效、对异常值不敏感和无需特征选择等多个独特优势,同时其变量重要性排序可增强模型解释能力^[24]. 本文以 3462 个样本所对应的 2000~2018 年 PM_{2.5} 浓度变化量与各土地利用/覆盖转移类型的面积比例,分别作为因变量和解释变量构建随机森林模型,通过变量重要性函数识别影响 PM_{2.5} 浓度变化的关键变量。

1.3.3 空间计量模型

PM_{2.5} 浓度变化受大气传输及区域聚集性人类活动的影响,其空间分布存在较强的空间自相关性,不同的土地利用/覆盖转换类型因其下垫面的性质变化及空间影响对 PM_{2.5} 浓度存在较强的空间溢出效应,相邻地区的土地利用/覆盖转换及相邻地区 PM_{2.5} 浓度的变化均能影响本地的变化趋势^[21,22]. 因此,通过引入空间回归模型量化不同土地转换类型对相邻地区的空间溢出效应信息,包括空间误差模型(SEM)、空间滞后模型(SLM)和空间杜宾模型(SDM)^[31]. 本研究应用空间相关性来估计约束模型^[22,31],利用拉格朗日检验各土地利用/覆盖转换类型对 PM_{2.5} 浓度变化的空间滞后和空间误差影响,检验结果显示在 0.01 的置信水平下拒绝了空间滞后和空间误差影响的假设,因此选择纳入解释变量和被解释变量的空间滞后变量构建空间杜宾模型. 空间杜宾模型表达式为:

$$Y = \beta X + \rho WY + \gamma W\bar{X} + \varepsilon \quad (1)$$

式中, Y 为 PM_{2.5} 浓度变化值, β 为自变量的回归估计系数,系数值表示土地利用/覆盖转换方式对 PM_{2.5} 浓度变化的影响方向及程度, ρ 为因变量 Y 空间滞后变量的空间自回归系数, W 为空间权重矩阵, $W\bar{X}$ 为自变量空间加权后对应的空间滞后自变量, γ 为空间滞后自变量的回归系数,其系数值表示相邻单元内土地利用/覆盖转换方式对本单元内 PM_{2.5} 浓度变化的影响, ε 为随机误差项。

1.3.4 多尺度地理加权回归模型

地理加权回归(GWR)是基于最小二乘线性回归(OLS)进行局部优化并使用空间关系加入运算的建模工具,可以通过局部参数量化自变量和因变量之间的空间异质性^[17,32]. 考虑到各因子与因变量之间的空间关系在不同规模空间尺度下起不同作用与关系的尺度依赖性,Fotheringham 等^[32]的研究在 GWR 基础上进行扩展,放宽了模型中所有空间变化过程都在同一空间尺度上运行的假设(即所有解释变量均在相同空间尺度下作用于 PM_{2.5} 浓度),为每个变量指定专用带宽以适应模型校准其多尺度效应,该模型称之为多尺度地理加权回归模型(MGWR),MGWR 模型可以表示为:

$$y_i = \beta_{bw0}(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^n \beta_{bwk}(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, (u_i, v_i) 为样本点 i 的坐标, y_i 和 x_{ik} 分别为因变量和第 k 个解释变量, 表示样本点 i 的第 k 个解释变量的局部参数估计, $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距, ε_i 为误差项, bwk 为第 k 个解释变量与自变量的条件关系的校准中使用的特定最佳带宽, 代表模型中解释变量与因变量之间的关系允许在空间上发生变化。

2 结果与讨论

2.1 2000 ~ 2018 年 PM_{2.5} 浓度时空模式

2000 ~ 2018 年间, 长三角地区 PM_{2.5} 浓度变化分为 4 类模式时其轮廓系数 (0.45) 最大, 具备良好的簇内紧凑度和簇间分离度, 4 类时变模式及空间分布见图 2。为表征聚类结果能否体现研究期间内年 PM_{2.5} 浓度的空间分异程度, 采用地理探测器 q 值评估聚类之间的空间差异, q 值范围区间在

[0.40, 0.73], 平均 q 值达 0.59, 显著高于 Chen 等^[29]对中国区域各季节 PM_{2.5} 浓度时空聚类结果的平均 q 值 (0.23 ~ 0.31)。从时间变化趋势上看, 4 类时变模式分别表现为长时间平稳后波动下降 (Cluster 1); 剧烈波动上升后波动下降 (Cluster 2); 非剧烈波动上升形成短暂平台后波动下降 (Cluster 3); 非剧烈到剧烈波动上升形成稳定波动后波动下降 (Cluster 4), 在浓度值上呈现分层模式。同时时变模式在空间上存在空间聚集性, 形成长三角地区南部, 中部, 西北部和东北部空间分异形态。在本聚类算法中并没有将空间属性纳入计算, 其结果的空间连续性及聚集性再一次体现了 PM_{2.5} 浓度变化的空间效应, 距离较近的浓度变化趋势是相似的, 而空间距离较远的浓度变化呈现较大的差异, 表明 PM_{2.5} 当地的污染改善就不仅仅取决于当地污染情况, 更取决于区域性的同步变化。

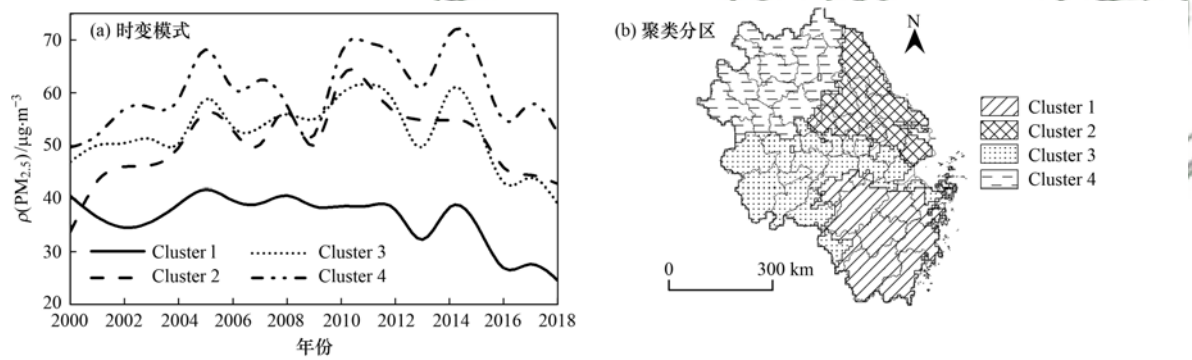


图 2 长三角地区 PM_{2.5} 浓度时空变化模式

Fig. 2 Spatial and temporal patterns of PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta region

2.2 不同土地利用/覆盖转换方式对 PM_{2.5} 浓度变化的相对影响及空间影响

人为排放及气象条件的变化对 PM_{2.5} 浓度存在的贡献不可忽略^[33]。因此, 为剔除土地利用/覆盖转换之外因素的影响, 以长三角地区县域各地类未发生变化的 PM_{2.5} 浓度变化值为标准进行修正, 计算土地利用/覆盖转换的 PM_{2.5} 浓度变化值的相对量。由于未利用地占比较小, 仅考虑耕地、林地、草地、水体和建设用地的转换对 PM_{2.5} 浓度的相对影响。未发生土地利用/覆盖转换的 PM_{2.5} 浓度变化及空间计算修正后的不同土地利用/覆盖转换方式下的 PM_{2.5} 浓度的变化见表 1。

土地利用未发生转换时, PM_{2.5} 浓度在耕地、建设用地、水体呈增幅状态, 林地与草地呈减幅状态, 林地与草地对 PM_{2.5} 浓度的缓解作用程度明显, 与多项土地利用/覆盖类型与 PM_{2.5} 关系研究结果一致^[19,22]。土地转换对 PM_{2.5} 浓度的相对影响表现复

表 1 不同土地利用/覆盖转换方式下的 PM_{2.5} 浓度的
相对变化量/μg·m⁻³

Table 1 Relative change in PM_{2.5} concentration under
different land use conversions/μg·m⁻³

土地利用/覆盖 转换类型	转换前土地类型的 平均 PM _{2.5} 变化量	修正变化量
耕地→林地	0.059	-0.286
耕地→水体	0.059	-0.160
耕地→建设用地	0.059	-0.044
林地→耕地	-13.386	0.052
林地→草地	-13.386	0.628
林地→建设用地	-13.386	0.136
草地→耕地	-8.147	1.563
草地→林地	-8.147	-0.016
水体→耕地	0.167	0.071
水体→建设用地	0.167	-0.027
建设用地→耕地	1.119	-0.081
建设用地→水体	1.119	0.680

杂。耕地向其他用地类型转换会引起 PM_{2.5} 浓度下降, 林地的转出则会引起 PM_{2.5} 浓度的上升, 耕地与

林地的源-汇效应明显,其他转换类型无一致性转换方向. PM_{2.5} 浓度变化增幅最大的是草地转耕地及建设用地转水体,放大了耕地的源作用和水体正向作用. 水体由于吸湿作用对二次颗粒物形成、累积、扩散等过程影响对 PM_{2.5} 浓度的作用存在多向性^[34],但水体的转入对 PM_{2.5} 浓度变化作用显著,表现出倾向性的颗粒物累积作用. 耕地、建设用地等人工性质下垫面的转出反映出向林地、水体等自然性质下垫面的转换对 PM_{2.5} 浓度的作用显著强于人工用地之间的相互转换.

土地利用/覆盖对 PM_{2.5} 浓度的影响过程并不是局部独立进行的,地表的物理性质(尤其是热力性质)差异与大气传输的相互作用使得土地利用/覆盖对 PM_{2.5} 浓度的影响存在较强的空间溢出效应^[23],区域性同步变化再次强调了 PM_{2.5} 浓度变化存在对周围环境变化的响应信息. 因此,通过对单一像元和周围聚集性土地利用/覆盖转换的 PM_{2.5} 浓度变化进行对比来明确周围的土地利用/覆盖转换类型对 PM_{2.5} 浓度的影响(表 2). 结果表明,周围聚集性未发生土地利用/覆盖转换区域耕地、林地、水体和建设用地比单一像元时对 PM_{2.5} 浓度变化的作用表现更强烈,而草地的聚集性作用出现了弱化的情况,但草地的变化程度最大. 而周围聚集性发生土地转换区域草地向耕地的转换出现弱化,林地向耕地出现反向情况(降低→升高),其他转换类型均比单一像元时作用更为显著,尤其以建设用地向耕地的转换与水体向草地的转换为甚,周围聚集影响的 PM_{2.5} 浓度变化量是单一像元的近 4 倍.

表 2 周围聚集性土地利用/覆盖转换对 PM_{2.5} 浓度变化量的影响/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Effect of peripheral aggregated land use conversion on the change in PM _{2.5} concentration/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$		
转换类型	PM _{2.5} 浓度变化量	
	自身影响	周围聚集影响
耕地→耕地	0.059	1.223
耕地→水体	0.477	3.049
耕地→建设用地	-1.089	-1.220
林地→耕地	-3.386	1.828
林地→林地	-13.386	-13.969
林地→建设用地	-11.026	-13.861
草地→耕地	11.386	10.403
草地→草地	-8.147	-6.087
草地→水体	11.677	15.448
水体→耕地	2.775	8.310
水体→草地	3.153	12.628
水体→水体	0.167	1.748
水体→建设用地	2.232	6.219
建设用地→耕地	4.685	18.451
建设用地→水体	4.211	7.817
建设用地→建设用地	1.119	1.733

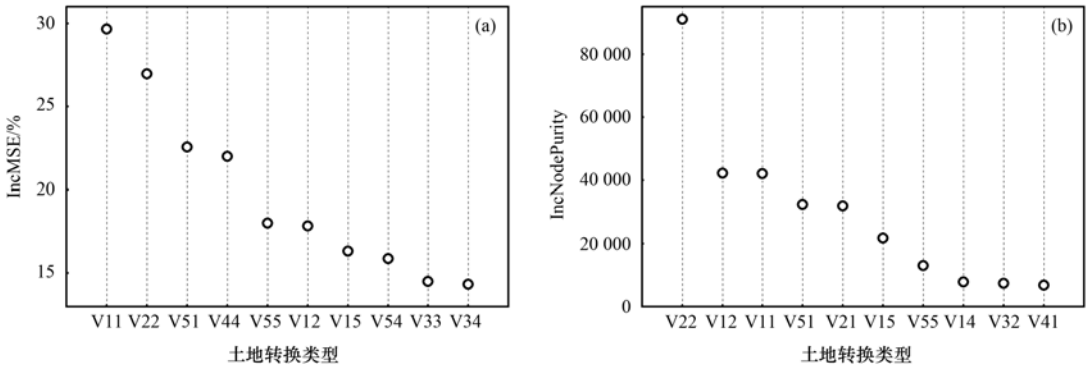
2.3 PM_{2.5} 浓度变化对土地利用/覆盖转换的全局响应关系

相关系数表明 PM_{2.5} 浓度变化与大部分土地利用/覆盖转换类型均具备显著关系,但强度与方向略有差异(表 3). 其中,在未发生土地转换的类型中, PM_{2.5} 浓度变化与林地、草地呈显著负相关,而与水体、建设用地和耕地呈显著正相关,与多项研究证实的单一土地利用类型对 PM_{2.5} 的作用方向一致^[19,21],同时耕地的正效应比建设用地更强,表明农业活动比城市活动对 PM_{2.5} 浓度贡献更大. 发生土地转换的类型中, PM_{2.5} 浓度变化与林地、草地发生转换的类型多呈显著负相关,而 PM_{2.5} 浓度变化与耕地、建设用地、水体之间的转换类型呈显著的正相关. 另外,值得注意的是林地和耕地之间的转换与 PM_{2.5} 浓度变化之间的关系强于林地和草地之间的转换,接近于林地未发生转换的作用强度,表明林地与耕地的相互转换中耕地的农作物植被效应发挥了较大的作用.

通过随机森林模型获得各土地利用/覆盖转换类型对 PM_{2.5} 浓度变化的重要性排序(图 3). 未发生转换的耕地(29.65%)、林地(26.98%)与建设用地(18.00%)以及发生转换的耕地-林地(17.84%)、耕地-建设用地(16.34%)、建设用地-耕地(22.58%)均对 PM_{2.5} 浓度变化有重要影响. 从未发生转换的土地类型上看,耕地、林地的重要性均强于建设用地,从发生转换的土地变化类型上看,建设用地-耕地的重要性均强于耕地-建设用地. 另外,随机森林模型的重要性及相关系数的强度排序结果相比,耕地-耕地(29.65%及 0.650)、林地-林地(26.98%及 0.726)、建设用地-耕地(22.57%及 0.519)、耕地-林地(17.84%及 0.602)和耕地-建设用地(16.34%及 0.424)与 PM_{2.5} 浓度变化之间表现出一致性的较强关系,表明耕地的转换对 PM_{2.5} 浓度变化的影响可能是污染控制的关键.

结合相关分析和随机森林模型筛选出对 PM_{2.5} 浓度变化具有重要影响的变量构建空间杜宾模型,结果见表 4. PM_{2.5} 变化的自回归系数(ρ)为正且显著,表明 PM_{2.5} 浓度变化存在显著的空间依赖性,周围网格单元的 PM_{2.5} 浓度的快速增加会显著加剧本单元的污染. 另外林地-林地、林地-耕地、林地-草地、林地-建设用地、建设用地-耕地这 5 个自变量的空间滞后变量在 SDM 模型中均通过 95% 的显著性检验,而且其系数比其自变量系数数值更大,说明以上 5 个自变量对于 PM_{2.5} 浓度变化的影响不仅存在显著的空间溢出效应,而且其空间溢出效应比本

身的影响强度更强.此外,将相关系数与SDM模型中自变量系数相比,发现林地-林地、林地-草地的关系方向出现差异,但相关系数与滞后变量系数方向一致,表明林地-林地与林地-草地对PM_{2.5}的作用是由空间滞后效应所导致的,而其他变量的作用是由类型本身所决定的.



类型编号中首位数字表示转换前地类代码,末位数字表示转换后地类代码,1为耕地,2为林地,3为草地,4为水体,5为建设用地; IncMSE为精度减少平均值,IncNodePurity为节点不纯度平均减少值,分别从模型估算误差和决策树节点两方面判断变量重要性程度

图3 随机森林模型识别出的重要变量及重要性排序

Fig. 3 Significant variables identified by the random forest model and ranking of importance

表3 PM_{2.5}浓度变化量与土地利用/覆盖转换的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient between the amount of change in PM_{2.5} concentration and land use conversion

类型	相关系数	类型	相关系数	类型	相关系数	类型	相关系数	类型	相关系数
V11	0.650 **	V21	-0.581 **	V31	-0.008	V41	0.251 **	V51	0.519 **
V12	-0.602 **	V22	-0.726 **	V32	-0.344 **	V42	-0.183 **	V52	-0.119 **
V13	-0.069 **	V23	-0.336 **	V33	-0.100 **	V43	0.082 **	V53	0.060 **
V14	0.271 **	V24	-0.215 **	V34	0.134 **	V44	0.146 **	V54	0.134 **
V15	0.424 **	V25	-0.257 **	V35	-0.007	V45	0.145 **	V55	0.250 **

1) **表示相关性在0.01水平显著(双尾检验);类型编号中首位数字表示转换前地类代码,末位数字表示转换后地类代码,1为耕地,2为林地,3为草地,4为水体,5为建设用地,下划线表示强度排序前10的变量

表4 多元线性回归和空间计量模型回归结果¹⁾

Table 4 Results of multiple linear regression and spatial econometric model regression

变量名	OLS	SDM	变量名	OLS	SDM
ρ	/	0.987 **	W_V21	/	0.017 *
Intercept	3.16E-07	0.001	W_V22	/	-0.058 **
V11	0.085 **	0.012 **	W_V25	/	0.019 **
V12	-0.169 **	-0.014 **	W_V51	/	-0.020 **
V21	-0.102 **	-0.007 *	W_V23	/	-0.008 *
V22	-0.472 **	0.043 **	LM (lag)	11 387.345	/
V23	-0.047 **	0.007 *	LM (error)	16 587.258 4	/
V25	-0.078 **	-0.005 *	Robust LM (lag)	841.247 4	/
V51	0.035 **	0.010 **	Robust LM (error)	6 041.160 8	/

1) **表示 $P<0.01$, *表示 $P<0.05$; ρ 表示PM_{2.5}浓度变化量的空间自回归系数;变量V11~V51中首位数字表示转换前地类代码,末位数字表示转换后地类代码,1为耕地,2为林地,3为草地,4为水体,5为建设用地;W_V21~W_V23表示自变量对应的空间滞后自变量;“/”表示无相关数据

2.4 PM_{2.5}浓度变化对土地利用/覆盖转换的多尺度响应关系

考虑到空间关系的非平稳性特性,为获取PM_{2.5}浓度变化对土地利用/覆盖转换的影响范围差异,以消除模型内生性问题为目标,选择了耕地-耕地、耕地-林地、耕地-建设用地、林地-耕地、林地-林地、林地-草地、林地-建设用地、建设用地-耕地和建设用地-建设用地这9个变量进行多尺度地理加权回

归(MGWR)建模,并通过调整后的 R^2 、赤池信息量准则(AIC)、修正赤池信息量准则(AICc)、残差平方和(RSS)评估MGWR模型的拟合优度,从残差的Moran'I指数评估模型是否具备解决空间自相关问题的能力^[16](见表5).通过比较发现MGWR调整后的 R^2 、AIC远远高于OLS和RF,但略低于SDM模型,RSS值远远低于OLS、RF和SDM模型,表明MGWR模型在空间要素的拟合优度方面仅对传统

回归分析有较大的优势. 这主要是由于 SDM 模型中因变量滞后变量的自回归大大提高了模型的拟合度^[31]. 但是, MGWR 的残差表现为非常低的空间自相关, 与线性回归残差假设相符合, 而 SDM 模型残差仍表现出较强的空间自相关, 同时与 Tu 等^[16] 的

研究(应用 GWR 模型)进行比较, MGWR 模型残差随机性更强, 模型结果更为可靠. 这表示土地利用/覆盖转换与 PM_{2.5} 浓度变化量之间的关系存在强烈的空间非平稳性特征, MGWR 模型在量化空间关系中具备较大的模型优势.

表 5 模型效果评估¹⁾

Table 5 Model effectiveness evaluation				
参数	OLS	RF	SDM	MGWR
Adjusted R ²	0. 601	0. 685	0. 985	0. 978
AIC	6 594. 786	/	- 4 377. 77	- 2 828. 084
AICc	6 596. 862	/	/	- 2 634. 646
RSS	1 354. 048	34 631. 330	942. 141	65. 866
残差 Moran's I	0. 783	/	0. 721	0. 007

1) OLS 和 MGWR 为指筛选变量后所有样本量的模型计算结果; RF 为按 7:3 划分的测试集的模型计算结果; “/”表示无相关数据

MGWR 模型中不同带宽可以揭示不同土地利用/覆盖转换方式作用于 PM_{2.5} 浓度变化的尺度效应. 具体来说, 较大的带宽对应的土地利用/覆盖转换方式对 PM_{2.5} 浓度变化的作用方式及强度在较大的空间尺度范围内大致相同, 存在较小的空间梯度, 其空间关系距离衰减程度较弱, 空间异质性程度低, 空间关系趋近平稳, 对空间位置较不敏感. 结果表明, 不同土地利用/覆盖转换方式对 PM_{2.5} 浓度变化影响的尺度效应有所不同(表 6), 呈现出: V22 < V11 < V12 < V15 < V21 < V25 < V23 < V55 < V51 的顺序. 未发生土地利用/覆盖转换的类型上, 耕地与林地影响空间尺度明显比建设用地小得多, 距离衰减程度较大, 空间异质性程度更强, 表明 PM_{2.5} 浓度变化量对耕地与林地的位置十分敏感. 而发生土地

类别变换的土地转换类型与未发生土地类别变换相比, 其与 PM_{2.5} 浓度变化量的空间关系在作用尺度上呈现扩张状态, 空间关系距离衰减梯度减缓. 另外, 空间尺度呈现出耕地向其他用地的转换 < 林地向其他用地的转换 < 建设用地的转换的现象, 耕地转换的空间影响明显受距离所限制, 需要根据其作用方向考虑耕地转换的空间位置及密集度. 发生类型转换与转换前类型的带宽相比较来看, 耕地转出类型带宽大小接近耕地-耕地, 建设用地转出类型带宽大小接近建设用地-建设用地, 而相反, 林地转出类型带宽大小与林地-林地差异较大, 那可以推测耕地与建设用地的转换受转换前土地类型的空间尺度效应所影响, 林地的转换对 PM_{2.5} 浓度变化量作用空间尺度变化较大, 其影响机制可能更为复杂.

表 6 MGWR 模型中各变量的空间带宽¹⁾

Table 6 Spatial bandwidth of each variable in the MGWR model									
变量	V11	V12	V15	V21	V22	V23	V25	V51	V55
带宽/个	57	70	119	295	44	476	423	1 222	1 093

1) 带宽实际意义是纳入局部回归的样本个数, 类型编号中首位数字表示转换前地类代码, 末位数字表示转换后地类代码, 1 为耕地, 2 为林地, 3 为草地, 4 为水体, 5 为建设用地

2.5 土地利用/覆盖转换对 PM_{2.5} 浓度变化驱动的空间分异性

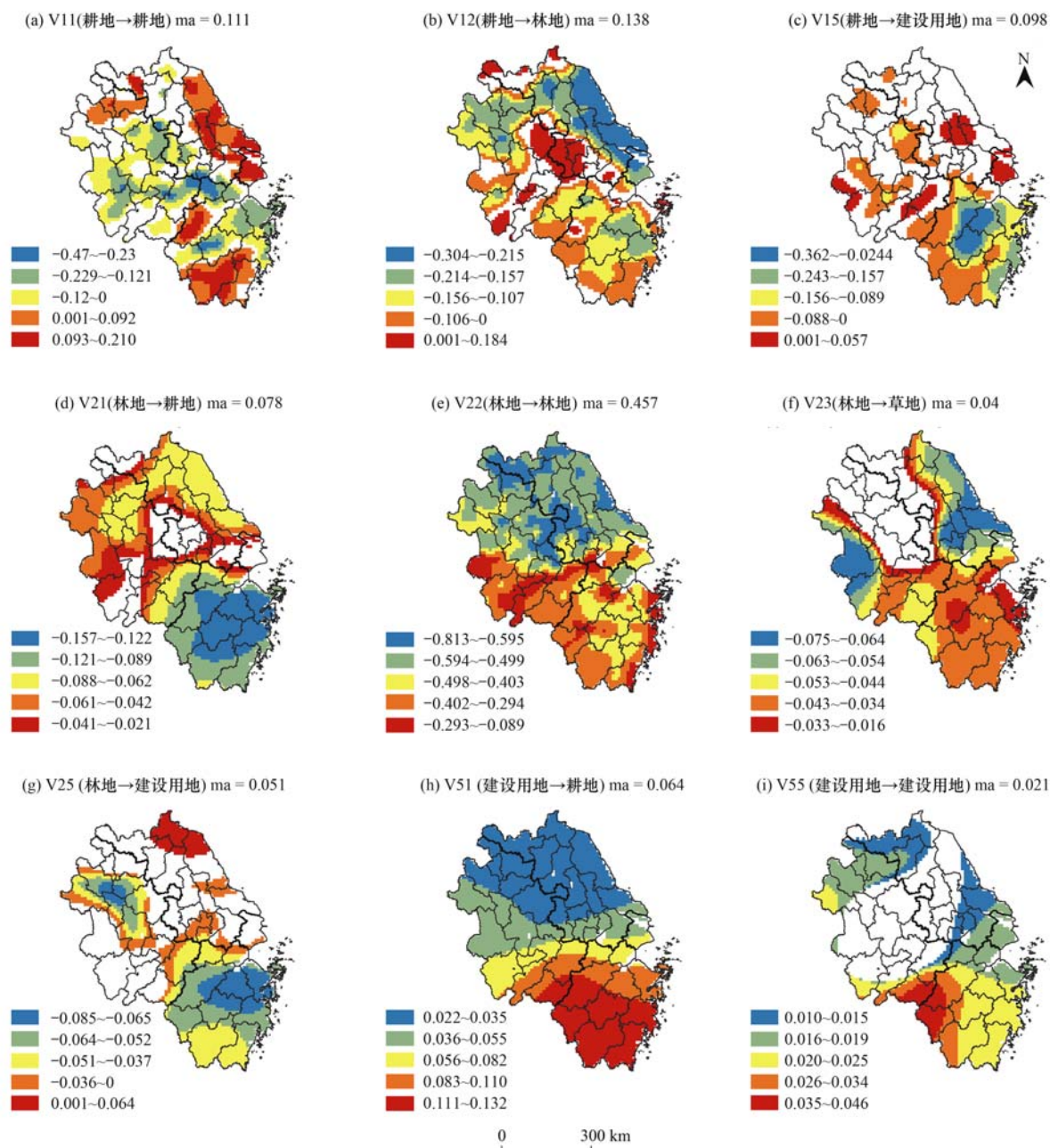
MGWR 模型输出结果中以每个样本点的回归系数来揭示各个变量对 PM_{2.5} 浓度变化的影响的空间异质性特征(图 4). 为寻找空间关系与 PM_{2.5} 浓度时空变化的关联性, 利用 q 统计量量化时空聚类分区能否表征空间关系的空间分异程度. 结果显示耕地-建设用地 ($q = 0.437$)、林地-耕地 ($q = 0.614$)、林地-林地 ($q = 0.533$) 和建设用地-耕地 ($q = 0.833$) 对 PM_{2.5} 浓度变化的空间响应关系与 PM_{2.5} 浓度时空演变存在较强的关联性, 那么 PM_{2.5} 时空模式的地理分区同样适用于耕地-建设用地、林地-耕地、林地-

林地和建设用地-耕地这 4 个土地转换方式进行地区差别管理.

从系数的空间分布上看, 不同土地利用/覆盖转换方式对 PM_{2.5} 影响方式存在显著差异. 以因子系数绝对值的平均值(ma)判定各变量对 PM_{2.5} 浓度变化的影响强度, 发现各土地利用/覆盖转换类型对 PM_{2.5} 浓度变化的影响强度依次为: V22 > V12 > V11 > V15 > V21 > V51 > V25 > V23 > V55, 与相关系数强度排序相比可明显发现耕地-林地、耕地-建设用地和林地-建设用地的影响强度增强, 表明人工用地与自然用地的相互转换对 PM_{2.5} 的影响需要引起重视. 另外从 7 种土地转换方式对 PM_{2.5} 浓度变化的作

用信息来看(见表7),不同土地转换对 $PM_{2.5}$ 浓度变化驱动方式不同,耕地-耕地、耕地-林地与林地-林地在线性模型和非线性模型中均对 $PM_{2.5}$ 变化的作用表现较强,说明这3类土地转换方式在整个土地转换与 $PM_{2.5}$ 浓度变化交互系统中是关键性的地类,

尤其要发挥林地-林地的强负效应及强负空间溢出效应.而林地-耕地与建设用地-耕地对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的多种作用方式下在全局作用上表现相对明显,即使两者带宽差异明显,但仍然要从区域性宏观调控入手更为有效.



ma 为绝对强度平均值; 各土地利用/覆盖转换类型通过 95% 置信检验的回归系数(即 $P < 0.05$) 占全样本量的 49.6%~100%; 图中空白区域表明回归系数不具备显著性

图4 不同土地转换类型与 $PM_{2.5}$ 浓度变化量回归系数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of regression coefficients between different land conversion types and the change in $PM_{2.5}$ concentration

耕地未发生转换或转出对 $PM_{2.5}$ 的影响在区域范围内均存在正负向双重作用[图4(a)~4(c)]. 苏沪沿海及浙南地区呈现出耕地本身的正效应[图4(a)], 而耕地向林地的转换在长三角地区大范围呈现较强的负效应, 尤其在安徽中北部及江苏东部

沿海地区[图4(b)], 耕地向建设用地转换在江苏、安徽大部分地区的回归系数不显著, 一定程度上反映出建设用地的低解释性[图4(c)]. 耕地向自然用地与人工用地的转换对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响出现了较大的差异, 对于其差异性仍然需要根据其效应关

表 7 7 种土地转换方式对 PM_{2.5} 浓度变化量的作用信息对比¹⁾

Table 7 Comparison of information on the effect of seven land conversions on the change in PM_{2.5} concentration

变量	MGWR 模型	相关系数	随机森林/%	SDM 模型
V11	[-0.470, 0.210]; 0.111	0.650	29.65	0.012
V12	[-0.304, 0.184]; 0.138	-0.602	17.84	-0.014
V21	[-0.157, -0.021]; 0.078	-0.581	14.13	-0.007(0.017)
V22	[-0.813, -0.089]; 0.457	-0.726	17.84	0.043(-0.058)
V23	[-0.075, -0.016]; 0.04	-0.336	7.33	0.007(-0.008)
V25	[-0.085, 0.064]; 0.051	-0.257	9.37	-0.005(0.019)
V51	[0.022, 0.132]; 0.064	0.519	22.57	0.010(-0.02)

1) 类型编号中首位数字表示转换前地类代码,末位数字表示转换后地类代码,1 为耕地,2 为林地,3 为草地,4 为水体,5 为建设用地;MGWR 模型、相关系数、随机森林和 SDM 模型这 4 列分别表示 4 类不同模型结果中各变量与因变量的关系数值表示,其中 MGWR 模型括号内表示系数范围,括号外表示绝对强度平均值,SDM 模型括号内为空间滞后变量系数

系区别差异化管理. 多项研究表示耕地对 PM_{2.5} 的影响由于农作物的植被效应及秸秆燃烧、农药施肥等农业活动引发颗粒源贡献而存在双向性^[21,22],如耕地变化过程中秸秆燃烧、农药施肥等农业活动的变化也可通过与大气的交互及大气对流引发的远距离传输等一系列反馈机制^[19,21,22]及空间溢出效应而影响区域 PM_{2.5} 浓度变化,其空间影响距离是对耕地及其转换合理调控的重要考虑因素. MGWR 模型结果显示耕地及耕地转换的带宽为 57 ~ 119 个,空间作用半径尺度约为 42 ~ 61 km,而黑龙江农作物秸秆燃烧对 PM_{2.5} 的影响区域集中在 50 ~ 80 km 之间^[35]. 耕地上生物质燃烧、土壤翻种等农业活动被认为对 PM_{2.5} 具备重要贡献,但由于农作物的植被效应的季节性变化使耕地成为了动态的源-汇景观^[21,22]. 长三角地区禁止秸秆燃烧的政策实施,2016 年后生物质燃烧火点下降 60%^[36],其颗粒源的远距离传输受到一定阻断. 此外,耕地向林地的转换使得植被类型的变化及土壤翻种等农业活动大大减少,同时所引发的暴雨、致冷效应等间接气候效应使气象条件变化来影响其对 PM_{2.5} 浓度的空间影响距离^[37]. 因此,土地转换情况下空间影响尺度的收缩意味着需尤为注意对 PM_{2.5} 浓度正效应发生区域的耕地转换中心.

林地未发生转换或转出对 PM_{2.5} 的影响在区域范围内呈现出负向作用[图 4(d) ~ 4(g)],林地转换过程中植被类型的变化、植被配置结构以及林地的空间溢出效应也会由于一系列反馈机制使得对 PM_{2.5} 作用存在转换类型间的差异. 多项研究表示不同林地配置结构因郁闭度、通透度的不同而对 PM_{2.5} 的调控能力存在较大差异^[38],林地-林地对 PM_{2.5} 浓度变化量的负效应强度呈现由南向北递增的空间趋势[图 4(e)],这与林地的空间布局完全相反,表示绿地规模并不是对 PM_{2.5} 浓度呈单调作用,植物生长也与 PM_{2.5} 排放周期的影响绿地滞留效

果与需求之间存在错位^[39],因此仅考虑林地规模对 PM_{2.5} 浓度进行调控是不可行的. 从图 4(d) ~ 4(e) 比较来看,江苏和安徽地区对比当地林地-林地的负效应,林地向耕地的转换的负效应呈断崖式减弱,而在林地广布耕地零散的浙江地区反而是林地-耕地的强负效应区域. 林地转换过程中乔木等植被向农作物的植被更换使 PM_{2.5} 的调控能力减弱,另外 Cai 等^[20]的研究指出表示绿色空间与非绿色空间的相互作用使得非绿色空间与 PM_{2.5} 之间的关系随着规模的增加大大降低,浙江的林地-耕地与较大规模的林地相互作用而弱化了耕地的关系,同时江苏和安徽地区林地-耕地周围的耕地的空间溢出效应所影响本地 PM_{2.5} 浓度的上升使负效应的大幅度减弱. 因此,相同转换类型对 PM_{2.5} 的影响会引发空间溢出效应而发生变化. 林地向草地的转换则会弱化林地的负效应[图 4(f)],更是突出植被类型对 PM_{2.5} 浓度的影响差异性. 而林地向建设用地转换类型通过显著性检验的回归系数在空间上集中在浙江区域,其强度呈东向西递减的空间趋势[图 4(g)],呈现以杭州湾为中心的辐射作用.

建设用地未发生转换和向耕地转换对 PM_{2.5} 的影响在研究区内呈现出正向作用,并从西南向东北方向递减,且空间异质性程度较低,加上其平均强度较弱,表现出建设用地的大作用范围及弱正向作用[图 4(g) ~ 4(i)]. 建设用地作为城市活动的表征,加上其下垫面易升温的热力性质^[40],建设用地对 PM_{2.5} 的重要贡献与城市内部较弱的扩散条件均在各级城市尺度研究中得到证实^[17~19]. 但是仅仅考虑土地利用/覆盖转换来看,未发生转换的建设用地本身对 PM_{2.5} 变化贡献并不明显,说明城市中心区域不是 PM_{2.5} 污染控制的关键区域. 而城市中心外围所发生的建设用地的转入与转出的影响更强,尤其是建设用地与耕地之间人类活动的相互触发. 其中,建设用地转向耕地表现出全区域的显著性作用,作用空

间尺度最大,距离衰减梯度小,城市联合调控较为合适。

3 结论

(1)2000~2018年长三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度出现了4类空间连续聚集的时空变化模式,形成南-中-西北-东北空间分异形态,区域性的同步变化十分强烈。 $PM_{2.5}$ 时空模式的地理分区适用于耕地-建设用地、林地-耕地、林地-林地和建设用地-耕地这4个土地转换方式进行地区差别管理。

(2)土地转换对 $PM_{2.5}$ 浓度的相对影响表现复杂,耕地与林地的源-汇效应明显。周围聚集性土地利用/覆盖转换普遍比单一像元时对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的作用表现更显著,空间效应明显。

(3) $PM_{2.5}$ 浓度变化与林地、草地转换类型大多呈显著负相关,而与耕地、建设用地和水体之间的转换类型呈显著的正相关,耕地-耕地、耕地-林地、耕地-建设用地、林地-林地和建设用地-耕地之间转换对 $PM_{2.5}$ 浓度变化贡献度较高。 $PM_{2.5}$ 浓度变化存在显著的空间依赖性,林地-林地、林地-耕地、林地-草地、林地-建设用地和建设用地-耕地存在较强的空间溢出效应。

(4)MGWR模型在拟合优度及解决空间自相关能力上具备优势,并揭示了不同土地利用/覆盖转换类型对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的多尺度空间作用关系。其空间关系表现出强烈的转移类型差异,而多模型结果显示不同土地转换对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的驱动方式不同,因此需分类别分层制定针对性联合管理策略。

参考文献:

- [1] Xu J Y, Yao M H, Wu W J, *et al.* Estimation of ambient $PM_{2.5}$ -related mortality burden in China by 2030 under climate and population change scenarios: a modeling study[J]. *Environment International*, 2021, **156**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106733.
- [2] 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 等. 2013~2017年中国 $PM_{2.5}$ 污染防治的健康效益评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 513-522. Zhang M J, Su F C, Xu Q X, *et al.* Health impact attributable to the control of $PM_{2.5}$ pollution in China during 2013-2017[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 513-522.
- [3] WHO. Air quality guidelines global update 2005 [M]. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2006.
- [4] US EPA. Integrated review plan for the national ambient air quality standards for particulate matter[M]. Triangle Park: U. S. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards, 2016.
- [5] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [6] 钟巍盛, 周颖, 程水源, 等. 首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3449-3457. Zhong Y S, Zhou Y, Cheng S Y, *et al.* Comparison analysis of the effect of emission reduction measures for major events and heavy air pollution in the capital[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3449-3457.
- [7] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [8] 杨文涛, 譙鹏, 刘贤赵, 等. 2011~2017年中国 $PM_{2.5}$ 多尺度时空分异特征分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5236-5244. Yang W T, Qiao P, Liu X Z, *et al.* Analysis of multi-scale spatio-temporal differentiation characteristics of $PM_{2.5}$ in China from 2011 to 2017[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5236-5244.
- [9] Xiao Q Y, Geng G N, Liang F C, *et al.* Changes in spatial patterns of $PM_{2.5}$ pollution in China 2000-2018: impact of clean air policies[J]. *Environment International*, 2020, **141**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105776.
- [10] 张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 等. 武汉市 $PM_{2.5}$ 化学组分时空分布及聚类分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4764-4773. Zhang H T, Tian Y Z, Liu B S, *et al.* Spatial temporal characteristics and cluster analysis of chemical components for ambient $PM_{2.5}$ in Wuhan[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4764-4773.
- [11] Li Y J, Chen B, Fang D L, *et al.* Drivers of energy-related $PM_{2.5}$ emissions in the Jing-Jin-Ji region between 2002 and 2015[J]. *Applied Energy*, 2021, **288**, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116668.
- [12] 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013-2017年气象条件变化对中国重点地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度下降的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, **50**(4): 483-500. Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $PM_{2.5}$ mass reduction in key regions in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [13] 黄小刚, 赵景波, 辛未冬. 基于网格的长三角 $PM_{2.5}$ 分布影响因素及交互效应[J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3107-3117. Huang X G, Zhao J B, Xin W D. Factors and their interaction effects on the distribution of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Delta based on grids[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3107-3117.
- [14] Luan Q Z, Jiang W, Liu S, *et al.* Impact of urban 3D morphology on particulate matter 2.5 ($PM_{2.5}$) concentrations: case study of Beijing, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2020, **30**(2): 294-308.
- [15] 郭向阳, 穆学青, 丁正山, 等. 长三角多维城市化对 $PM_{2.5}$ 浓度的非线性影响及驱动机制[J]. *地理学报*, 2021, **76**(5): 1274-1293. Guo X Y, Mu X Q, Ding Z S, *et al.* Nonlinear effects and driving mechanism of multidimensional urbanization on $PM_{2.5}$ concentrations in the Yangtze River Delta[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(5): 1274-1293.
- [16] Tu M Z, Liu Z F, He C Y, *et al.* The relationships between urban landscape patterns and fine particulate pollution in China: a multiscale investigation using a geographically weighted regression model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **237**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117744.
- [17] Wu T, Zhou L X, Jiang G J, *et al.* Modelling spatial heterogeneity in the effects of natural and socioeconomic factors, and their interactions, on atmospheric $PM_{2.5}$ concentrations in China from 2000-2015[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(11),

- doi: 10.3390/rs13112152.
- [18] 杨伟, 姜晓丽. 华北地区大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 2995-3003.
- Yang W, Jiang X L. Interannual characteristics of fine particulate matter in north China and its relationship with land use and land cover change[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 2995-3003.
- [19] Xu G Y, Ren X D, Xiong K N, *et al.* Analysis of the driving factors of PM_{2.5} concentration in the air: a case study of the Yangtze River Delta, China [J]. Ecological Indicators, 2020, **110**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105889.
- [20] Cai L Y, Zhuang M Z, Ren Y. A landscape scale study in Southeast China investigating the effects of varied green space types on atmospheric PM_{2.5} in mid-winter[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, **49**, doi: 10.1016/j.ufug.2020.126607.
- [21] 万伟华. 土地利用变化对 PM_{2.5} 浓度的影响及空间效应研究——以长三角核心区为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- Wan W H. Effects of land use change on PM_{2.5} concentration and its spatial effects: a case study of the core area of Yangtze River Delta[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [22] Lu D B, Xu J H, Yue W Z, *et al.* Response of PM_{2.5} pollution to land use in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118741.
- [23] Xie X F, Wu T, Zhu M, *et al.* Comparison of random forest and multiple linear regression models for estimation of soil extracellular enzyme activities in agricultural reclaimed coastal saline land[J]. Ecological Indicators, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106925.
- [24] 夏晓圣, 陈菁菁, 王佳佳, 等. 基于随机森林模型的中国 PM_{2.5} 浓度影响因素分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2057-2065.
- Xia X S, Chen J J, Wang J J, *et al.* PM_{2.5} concentration influencing factors in China based on the random forest model [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2057-2065.
- [25] 宓科娜, 庄汝龙, 梁龙武, 等. 长三角 PM_{2.5} 时空格局演变与特征——基于 2013-2016 年实时监测数据[J]. 地理研究, 2018, **37**(8): 1641-1654.
- Mi K N, Zhuang R L, Liang L W, *et al.* Spatio-temporal evolution and characteristics of PM_{2.5} in the Yangtze River Delta based on real-time monitoring data during 2013-2016 [J]. Geographical Research, 2018, **37**(8): 1641-1654.
- [26] Van Donkelaar A, Martin R V, Li C, *et al.* Regional estimates of chemical composition of fine particulate matter using a combined geoscience-statistical method with information from satellites, models, and monitors[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(5): 2595-2611.
- [27] 冯克鹏, 田军仓, 沈晖. 基于 K-means 聚类分区的西北地区近半个世纪气温变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, **42**(6): 1239-1252.
- Feng K P, Tian J C, Shen H. Temperature variation characteristics of northwest China based on K-means clustering partition in the past half century [J]. Arid Land Geography, 2019, **42**(6): 1239-1252.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 116-134.
- [29] Chen Z Y, Chen D L, Xie X M, *et al.* Spatial self-aggregation effects and national division of city-level PM_{2.5} concentrations in China based on spatio-temporal clustering[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **207**: 875-881.
- [30] Breiman L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, **45**(1): 5-32.
- [31] Anselin L. Spatial econometrics: methods and models [M]. Dordrecht: Springer, 1988.
- [32] Fotheringham A S, Yang W B, Kang W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR) [J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, **107**(6): 1247-1265.
- [33] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities [J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 484-496.
- [34] Lou C R, Liu H Y, Li Y F, *et al.* Relationships of relative humidity with PM_{2.5} and PM₁₀ in the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, **189**(11), doi: 10.1007/s10661-017-6281-z.
- [35] Chen Z Y, Chen D L, Zhuang Y, *et al.* Examining the influence of crop residue burning on local PM_{2.5} concentrations in Heilongjiang Province using ground observation and remote sensing data [J]. Remote Sensing, 2017, **9**(10), doi: 10.3390/rs9100971.
- [36] 朱永慧, 王倩, 黄凌, 等. 长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 [J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3511-3517.
- Zhu Y H, Wang Q, Huang L, *et al.* Emission inventory of intermediate volatility organic compounds (IVOCs) from biomass burning in the Yangtze River Delta during 2010-2018 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3511-3517.
- [37] 赵彩杉. 中国耕地撂荒的空间格局及气候效应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2019.
- Zhao C S. Spatial pattern and climatic effects of cropland abandonment in China[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2019.
- [38] 包红光, 王成, 杜万光, 等. 基于实地监测的城市林木调控 PM_{2.5} 能力研究[J]. 生态学报, 2020, **40**(14): 4699-4709.
- Bao H G, Wang C, Du W G, *et al.* PM_{2.5} regulation capacity of urban trees in field monitoring studies: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(14): 4699-4709.
- [39] 余欣璐, 高吉喜, 张彪. 基于城市绿地滞尘模型的上海市绿色空间滞留 PM_{2.5} 功能评估[J]. 生态学报, 2020, **40**(8): 2599-2608.
- She X L, Gao J X, Zhang B. PM_{2.5} removal service of green spaces in Shanghai based on the dust retention simulation on urban vegetation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(8): 2599-2608.
- [40] Chen T, Sun A C, Niu R Q. Effect of land cover fractions on changes in surface Urban Heat Islands using Landsat time-series images[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, **16**(6), doi: 10.3390/ijerph16060971.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2+26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(Ⅲ) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shun, AN Xiao-qi, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(Ⅱ) and As(Ⅲ)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)