

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化特征遥感监测与影响因素分析

李梦真¹, 张廷斌^{1,2*}, 易桂花³, 秦岩宾¹, 李景吉^{2,4}, 刘贤¹, 蒋杰¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 成都 610059; 2. 成都理工大学, 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室, 成都 610059; 3. 成都理工大学旅游与城乡规划学院, 成都 610059; 4. 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059)

摘要: 四川盆地因其独特的地形地貌、静风和高湿等气象条件, 导致盆地内部大气污染物扩散难度大, 随着城市化与工业化进程加快, 区内 $PM_{2.5}$ 污染日益加重, 四川盆地已成为国家大气污染防治的重点地区之一. 基于 $PM_{2.5}$ 浓度遥感反演产品, 采用空间自相关分析与灰色关联分析方法, 研究了四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度的时空分布特征及其影响因素. 结果表明, 四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著的空间聚集性, 高-高聚集类型分布集中, 低-低聚集类型分布较为分散; 针叶林对 $PM_{2.5}$ 的吸收抑制作用明显高于灌丛和草地等其他植被类型. 研究认为, 影响四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度的主要气象因子是风速和气温, 人口密度与经济规模则是影响四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度的主要人类活动因子, 产业结构及其规模变化对四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度也产生一定影响.

关键词: 细颗粒物($PM_{2.5}$); 空间聚集; 时空格局; 灰色关联分析; 四川盆地

中图分类号: X513; X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3136-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202009235

Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of $PM_{2.5}$ Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China

LI Meng-zhen¹, ZHANG Ting-bin^{1,2*}, YI Gui-hua³, QIN Yan-bin¹, LI Jing-ji^{2,4}, LIU Xian¹, JIANG Jie¹

(1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Synergetic Control and Joint Remediation for Soil & Water Pollution, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. College of Tourism and Urban-Rural Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The spread of atmospheric pollutants in the Sichuan Basin is difficult because of its unique topography, static wind, high humidity, and other meteorological conditions. Owing to the acceleration of urbanization and industrialization, $PM_{2.5}$ pollution in the region is becoming increasingly severe, and the Sichuan Basin has become one of the key areas of national air pollution prevention and control. In this study, based on the remote sensing inversion product of $PM_{2.5}$ concentration, spatial autocorrelation and gray correlation analyses are used to evaluate the spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of $PM_{2.5}$ concentration in the Sichuan Basin. The results show that $PM_{2.5}$ concentration has significant spatial aggregation; the high-high aggregation types are concentrated, low-low aggregation types are more dispersed, and coniferous forest has a significantly higher inhibitory effect on the absorption of $PM_{2.5}$ than the shrub, grassland, and other vegetation types. The main meteorological factors affecting $PM_{2.5}$ concentration in the Sichuan Basin are wind speed and temperature; population density and economic scale are the main human-activity factors affecting $PM_{2.5}$ concentration in the Sichuan Basin, and the change in the industrial structure and scale also has a certain influence on the $PM_{2.5}$ concentration.

Key words: fine particulate matter ($PM_{2.5}$); spatial aggregation; spatial and temporal pattern; gray correlation analysis; Sichuan Basin

细颗粒物($PM_{2.5}$, 粒径 $\leq 2.5 \mu m$)是一个动态和复杂的混合颗粒物^[1]. 有研究表明, $PM_{2.5}$ 与各类心肺疾病的发病率及死亡率有关^[2]. 世界卫生组织环境(室外)空气质量和健康报告(2018年)统计表明,2016年,环境(室外)空气污染导致全球420万人过早死亡. 此外, $PM_{2.5}$ 作为大气气溶胶的重要组成部分,对生态环境、气候变化及农业生产具有重要影响^[3]. 近年来,我国经济迅猛发展,工业化和城市化进程持续加快,人为排放逐步增多,已成为世界上 $PM_{2.5}$ 污染最严重的国家之一^[4], $PM_{2.5}$ 污染作为

我国环境及社会的焦点问题,引起了学术界和公众的密切关注^[5~7].

有研究发现, $PM_{2.5}$ 浓度存在明显的空间异质性和空间依赖性^[8], $PM_{2.5}$ 浓度的空间差异是自然因素与人为因素共同作用的结果. 气象因子(气温、气

收稿日期: 2020-09-24; 修订日期: 2021-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801099); 四川省安全监管局(煤监局)安全生产科技项目(aj20170517210246)

作者简介: 李梦真(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为生态环境遥感, E-mail: lmzflw@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangtb@cdut.edu.cn

压、相对湿度与风速等)可以很大程度上扩散与稀释大气污染物,对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度产生重要影响.同时,地形、植被和人口等因素也会影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的分布格局^[9~11].区域尺度的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响因素研究主要分为两方面,一是从研究区域内 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学构成以及形成机制出发,识别 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要污染源,定量解析 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的成因^[12~14];二是通过构建计量模型,针对各类因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响进行分析,为 $\text{PM}_{2.5}$ 污染治理提供科学参考与依据^[15~17].影响因素主要包含自然因素与人类活动因素,其中自然因素有植被、气象与地形等方面^[18,19],人类活动方面则以人口、经济以及能源消耗等因素为主要指标^[20,21].当前 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响因子研究多基于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度站点监测数据^[22~25],然而中国 $\text{PM}_{2.5}$ 监测系统于 2012 年年底建成,相关研究时段集中在 2013 年以后,无法进行长时间序列分析.此外,监测站的数量有限且空间分布不均,无法满足大区域尺度的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布规律研究.

气溶胶光学厚度(aerosol optical depth,AOD)是大气气溶胶在垂直大气柱内直接太阳辐射衰减的无量纲数,其大小和气溶胶在整个大气柱的负荷成正比^[26,27],可利用遥感反演的 AOD 数据估算近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,与传统的站点监测方法相比,遥感反演

具有覆盖范围广、成本低、获取速度快和时间序列长等优势,有效地弥补了地面监测站点的不足.我国有关 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究主要集中在京津冀^[28,29]、珠三角^[30~32]和长三角^[33,34]等经济发达地区,四川盆地作为中国区域性大气污染最严重的地区之一,近年来频繁受到空气污染的影响.本文利用 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度反演产品,总结了四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空变化格局和空间聚集特征,实现了基于灰色关联分析的区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响因子空间化表达,以期完善四川盆地地区大气污染治理联防联控体系提出科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四川盆地位于中国西南区域($103^{\circ}20' \sim 110^{\circ}05'E$, $28^{\circ}00' \sim 32^{\circ}00'N$),总面积约 260 000 km^2 ,包括四川省中东部和重庆市,海拔 78 ~ 4 946 m[图 1(a)],盆地内植被类型丰富,包括针叶林、阔叶林、草甸与灌丛等[图 1(b)].四川盆地具有独特的地形环境以及静风高湿等气象条件,导致大气污染物难以扩散,加上工业化与城市化高度集中等因素,已成为中国雾-霾较为严重的地区之一.近年来,四川盆地雾-霾污染发生频次高、持续时间长、污染强度大和影响范围广,呈现出显著的区域性特征^[35].

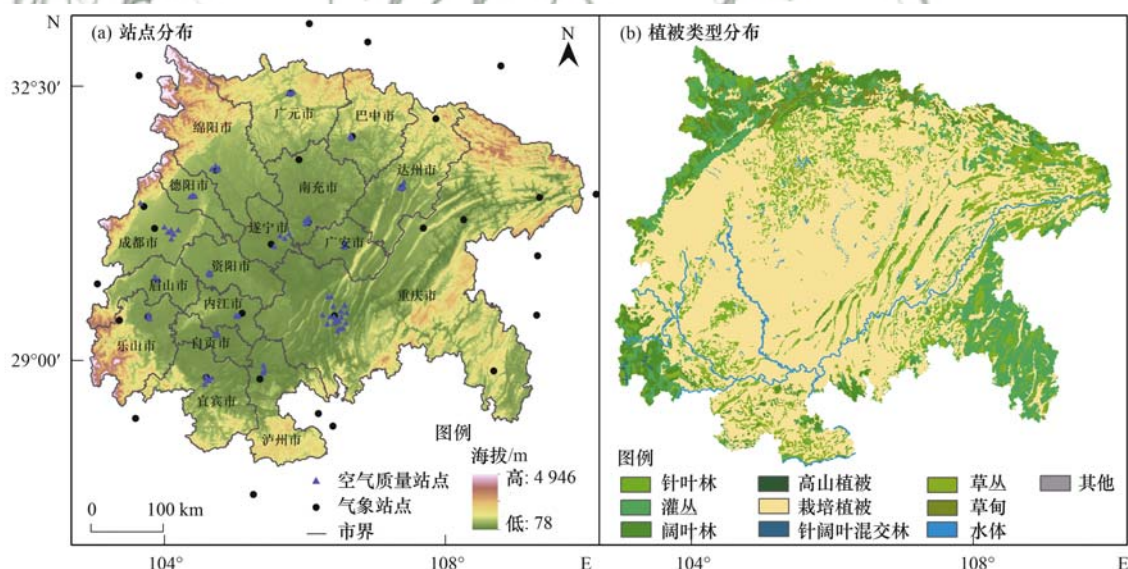


图 1 四川盆地监测站点与植被类型分布

Fig. 1 Distributions of monitoring site and vegetation types in the Sichuan Basin

1.2 数据与预处理

1.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 遥感反演数据

$\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度数据来自 Dalhousie University 大气成分分析组织 (<http://fizz.phys.dal.ca>), 该数据基于多个卫星传感器 (multi-angle imaging spectro radiometer, MISR; moderate-resolution imaging

spectroradiometer, MODIS; sea-viewing wide field-of-view sensor, SeaWiFS) 的气溶胶光学厚度产品并与化学传输模型 (GEOS-Chem) 相结合, 通过地理加权回归对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行估算, 并在全球范围内与地面测量数据进行验证, 得到了较好的精度^[36]. 该产品空间分辨率为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$, 是当前全球覆盖面积

最大、时间序列最长和精度最高的 $PM_{2.5}$ 遥感反演数据^[37~40]. 为验证该数据产品在四川盆地的可靠性, 本文利用中国环境监测总站 (<http://webinterface.cnemc.cn/sss2092874.jhtml>) 在 2015~2016 年四川盆地的站点 $PM_{2.5}$ 浓度实测数据, 与站点对应像元的 $PM_{2.5}$ 浓度进行了相关性分析, 结果表明 (表 1), $PM_{2.5}$ 浓度遥感数据与地面观测数据具有较好的相关性, 该数据集可用于四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度空间分析.

表 1 $PM_{2.5}$ 遥感数据与地面监测数据相关性检验¹⁾

Table 1 Correlation test of $PM_{2.5}$ between remote sensing data and ground monitoring data

年份	Pearson 相关系数	Kendall 相关系数	Spearman 相关系数
2015	0.818 **	0.647 **	0.842 **
2016	0.799 **	0.601 **	0.813 **
2015~2016	0.810 **	0.633 **	0.834 **

1) ** 表示在 0.01 水平上显著

1.2.2 气象数据

气象数据来源于中国国家气象数据共享平台 (<http://date.com.cma.cn/>), 选取四川盆地及其周边共 69 个气象站点, 统计各气象站点 2000~2017 年的年均气温 ($^{\circ}C$)、年累计降水量 (mm)、年均相对湿度 (%)、年累计日照时长 (h)、年均风速 ($m \cdot s^{-1}$) 和年均气压 (hPa), 年均气温数据以高程为协变量使用薄板样条函数插值法得到连续的栅格数据, 其他气象数据采用普通克里金法插值.

1.2.3 社会统计数据

利用地区生产总值 (gross domestic product, GDP)、第二产业 GDP 总值、人均地区生产总值和人口密度等社会经济统计数据, 探讨人类活动因素对 $PM_{2.5}$ 的影响, 统计数据来自四川统计年鉴^[41] 与重庆统计年鉴^[42].

1.2.4 植被类型和 NDVI 数据

植被类型数据来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 发布的中国 1:100 万植被类型空间分布数据, 将四川盆地植被分为针叶林、阔叶林、针阔叶混交林、灌丛、高山植被、草丛、草甸以及培育植被等 8 种.

归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 采用美国国家航空和宇航局 (national aeronautics and space administration, NASA) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 发布的 MODIS MOD13A2 产品, 时间分辨率 16 d, 空间分辨率为 1 km, 利用 MRT (moderate resolution imaging spectroradiometer reprojection tools) 进行镶嵌、投影转换、重采样等预处理工作后, 使用最大值

合成法 (maximum value composite, MVC) 计算 NDVI 月值, 最后得到 2000~2017 年的年均 NDVI.

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析

大气是一个复杂的动态系统, $PM_{2.5}$ 等污染物在各种因素的作用下不断地传播和扩散, 进而影响邻近地区的大气环境^[43]. 因此, $PM_{2.5}$ 具有很强的时空自相关性^[44]. 本文使用空间自相关分析研究四川盆地某一地区 $PM_{2.5}$ 浓度是否与邻近地区的 $PM_{2.5}$ 浓度相关, 并分析局部区域内 $PM_{2.5}$ 浓度的集聚性和分布特征. Moran's I 指数是反映空间变量和分布的重要指标, 空间自相关可分为全局自相关和局部自相关, 分别用全局 Moran's I 指数与局部 Moran's I 指数来度量^[45].

(1) 全局 Moran's I 指数

全局 Moran's I 指数考察了区域内所有空间要素的平均关联度及其显著性^[44]. Moran's I 值越接近 1, 正相关水平越高; 越接近 -1, 负相关程度越高; 具体表达式如下:

$$\text{Moran}'I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (y_i - \bar{y}) (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

式中, n 表示研究区/县个数, y_i 与 y_j 表示区/县 i 与区/县 j 的 $PM_{2.5}$ 浓度均值, $\bar{y}$ 表示所有区/县的 $PM_{2.5}$ 浓度均值, W_{ij} 表示研究区/县 i 、 j 之间的空间权重矩阵.

为了验证空间自相关的显著性水平, 计算标准化统计量 $Z(I)$:

$$Z(I) = |1 - E(I)| / \sqrt{\text{Var}(I)} \quad (2)$$

式中, $E(I)$ 表示数学期望, $\text{Var}(I)$ 表示变异数.

(2) 局部 Moran's I 指数

为克服全局 Moran's I 指数无法观察聚类相似区域具体位置的局限性, 采用局部 Moran's I 指数来定义空间自相关特征的具体位置. 本质上, 局部 Moran's I 指数将全局自相关分解为区域单元, 通过绘制散点图来对特定区域的空间分布特征进行可视化^[44]. 通过局部自相关分析, 可得到高值集群与低值集群, 即热点与冷点区域. 局部 Moran's I 指数的表达式为:

$$\text{local Moran}'I = \frac{(X_i - \bar{X}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_j - \bar{X})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3)$$

式中, n 表示研究区/县个数, X_i 与 X_j 表示区/县 i 与区/县 j 的 $PM_{2.5}$ 浓度值, $\bar{X}$ 表示所有区/县的 $PM_{2.5}$

浓度均值, W_{ij} 表示研究区县 i 和 j 之间的空间权重矩阵.

局部 Moran's I 的标准化统计量如下:

$$Z(I_i) = |1 - E(I_i)| / \sqrt{\text{Var}(I_i)} \quad (4)$$

式中, $E(I_i)$ 表示数学期望, $\text{Var}(I_i)$ 表示变异数.

1.3.2 灰色关联分析

灰色关联分析是一种根据曲线的几何特征构造关联程度的方法. 灰色关联分析方法不严格要求样本数量以及样本的分布规律, 既可以揭示数据的普遍性, 又可以揭示数据的特殊性, 对动态信息的充分利用使得结果更科学和更准确^[46,47]. 计算过程如下.

(1) 求各序列的初值象, 令:

$$X'_i = \frac{X_i(k)}{X_i(1)} = [X'_i(1), X'_i(2), \dots, X'_i(n)] \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

式中, $X_i(1)$ 表示初始年份的像元值, 即 PM_{2.5} 浓度及影响因子 2000 年的值, $X_i(k)$ 表示 PM_{2.5} 浓度及影响因子第 k 年的值.

(2) 求 X_0 和 X_i 的初值象对应分量之差的绝对值序列, 公式为:

$$\Delta_i(k) = |X'_0(k) - X'_i(k)|, \quad \Delta_i = [\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n)] \quad (6)$$

式中, $X'_0(k)$ 表示 PM_{2.5} 浓度第 k 年的初值象, $X'_i(k)$ 表示影响因子 i 第 k 年的初值象.

(3) 求 $\Delta_i(k) = |X'_0(k) - X'_i(k)|$ ($k=2, 3, \dots, n$; $i=1, 2, \dots, m$) 的最大值与最小值, 分别记为:

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k) \quad (7)$$

$$m = \min_i \min_k \Delta_i(k) \quad (8)$$

(4) 计算关联系数:

$$\gamma_{oi}(k) = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M}, \quad \xi \in (0, 1) \quad (9)$$

$$(k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m)$$

式中, $\gamma_{oi}(k)$ 表示第 k 年 PM_{2.5} 浓度与影响因子 i 的关联系数.

(5) 求关联系数的平均值, 即所求的关联度:

$$\gamma_{oi} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma_{oi}(k) \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

式中, n 表示研究年数, γ_{oi} 表示 PM_{2.5} 浓度与影响因子 i 的灰色关联度.

2 结果和分析

2.1 四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空特征

基于文献^[48,49], 根据四川盆地 PM_{2.5} 污染现状, 将四川盆地年均 PM_{2.5} 浓度划分为 4 个等级 (图 2).

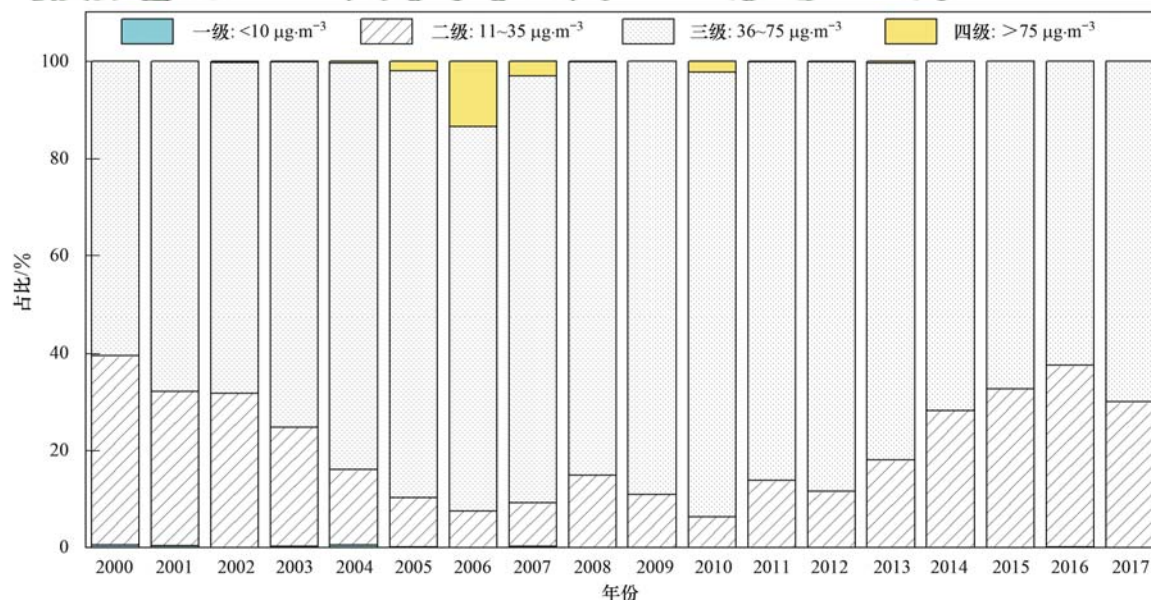


图2 四川盆地 2000~2017 年 PM_{2.5} 浓度分布统计

Fig. 2 Statistical chart of PM_{2.5} concentration distribution in the Sichuan Basin from 2000 to 2017

结果显示, 二级 ($11 \sim 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 与三级 ($36 \sim 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 是四川盆地近 18 年间 PM_{2.5} 浓度区域占比的主要等级, 四川盆地 PM_{2.5} 年均浓度一级 ($< 10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 与四级 ($> 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的面积占比持续低于 0.61%, 部分年份无两个等级出现; 四川盆地

PM_{2.5} 年均浓度在 2006 年达到峰值, 第四等级区域占比高达 13.49%. 近 18 年间, 四川盆地 PM_{2.5} 年均浓度符合环境质量标准二级浓度限值 ($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的面积平均占比为 20.86%, 符合 WHO 年均 PM_{2.5} 浓度准则值 ($10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 的面积占比则更少

(0.14%),四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 具有年均浓度高、高浓度区面积占比大的特点, $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重。

四川盆地 2000~2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值空间分布表明(图 3), $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有盆地中间浓度高、盆地周边浓度低的空间分布格局。根据上述分级标准,四川盆地 2000~2017 年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度一级($\leq 10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)分布最少,主要分布于四川盆地边缘山区。二级($11\sim 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)主要分布于四川盆地周围的乐山、绵阳、泸州和宜宾等地。三级($36\sim 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)占比最大(85.7%),分布于四川盆地中心位置。四级($>75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)分布较少,仅占四川盆地总面积的 0.08%,位于四川省成都市主城区。

2.2 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间自相关特征

本文选取 2000、2006、2012 和 2017 作为空间自相关分析的年份,基于区县尺度进行全局自相关分析与局部自相关分析,四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的全局 Moran's I 指数如表 2 所示。

表 2 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度全局 Moran's I 值
Table 2 Global Moran's I value of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Sichuan Basin

项目	2000 年	2006 年	2012 年	2017 年
Moran's I	0.735	0.785	0.735	0.790
P -value	0.001	0.001	0.001	0.001
Z -value	15.633	15.930	15.065	16.395

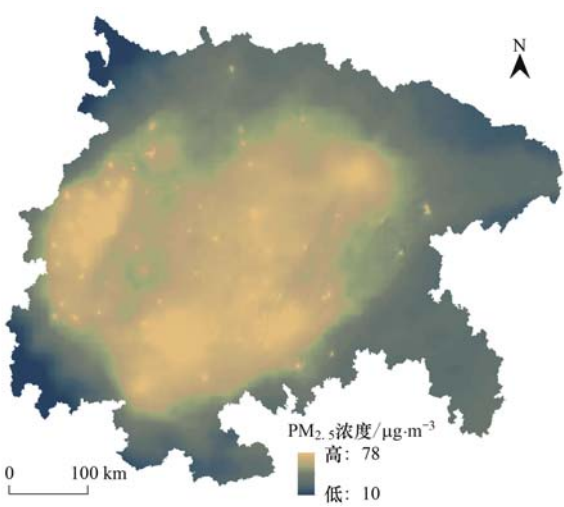


图 3 四川盆地 2000~2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值
Fig. 3 Mean value of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Sichuan Basin from 2000 to 2017

四川盆地年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的全局 Moran's I 指数显著高于 0.7,并且通过了 99% 显著性检验,说明四川盆地城市之间存在显著的全局自相关,空间聚集效应无明显变化,城市之间的空间关联效应比较稳定。

四川盆地年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度局部 Moran's I 指数分析结果显示(图 4),四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 聚集类型以高-高聚集类型与低-低聚集类型为主,无低-高聚集类

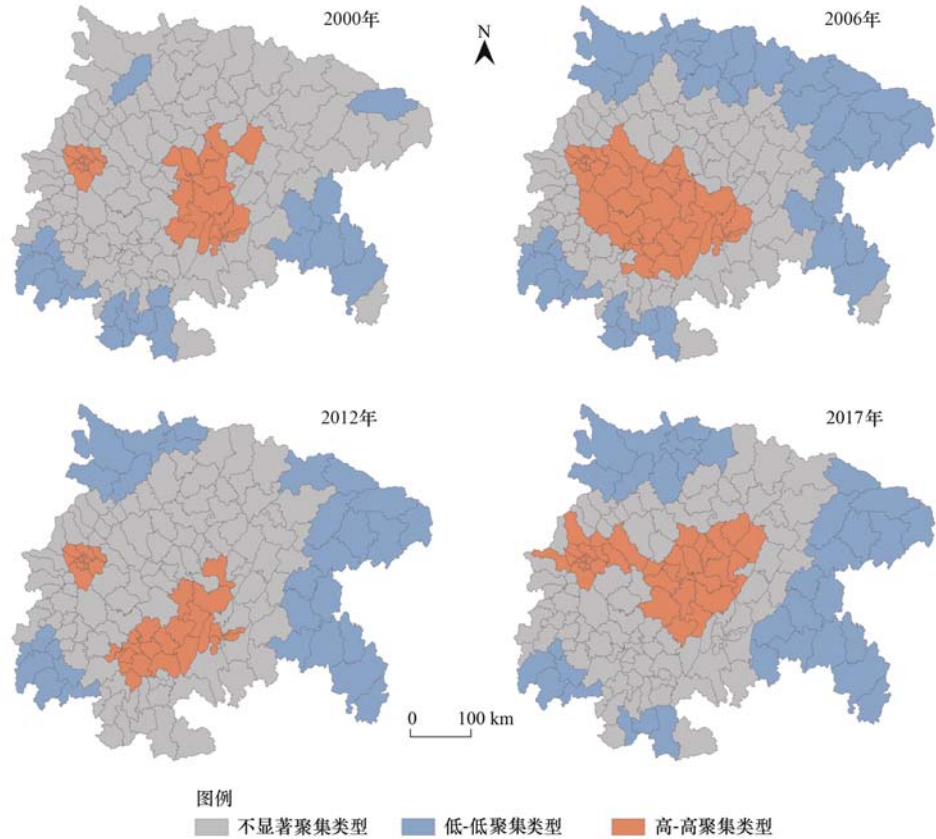


图 4 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度局部空间自相关

Fig. 4 Local spatial autocorrelation results of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Sichuan Basin

型与高-低聚集类型. 其中,高-高聚集区主要集中在成都和重庆主城区,区域内空间自相关性强, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,是四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重的地区. 低-低聚集区主要分布在四川盆地四周边缘绵阳、广元、巴中、乐山和泸州等地,这些地区及其邻近地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度值较低,空间自相关较弱, $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度较低. 2000 年高-高聚集区主要位于成都市与重庆市主城区,表示这些地区及周边 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重. 2006 年严重污染地区在成都市、重庆市主城区、资阳市、内江市、遂宁市、德阳市和眉山市呈连片分布,表明该时期 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高的地区受成都市与重庆市主城区的影响,逐渐变为热点区,该现象至 2012 年有所缓和,空间集聚状况恢复至 2000 年水平,但 2017 年的空间自相关结果显示,高-高聚集区又具有连片分布趋势.

2.3 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布影响因子分析

2.3.1 $\text{PM}_{2.5}$ 与 NDVI 的灰色关联分析

植被对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有明显的影响作用,有研究表明,地表植被具有加速 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降与吸收和阻碍 $\text{PM}_{2.5}$ 传播等效果^[50]. 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度与 NDVI 的灰色关联分析结果显示(图 5),四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度与 NDVI 的关联度介于 0.442 ~ 0.985 之间,平均关联度为 0.686. 以灰色关联度 0.7 作为阈值将研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与 NDVI 灰色关联度分为高值区与低值区两部分. 高值区占四川盆地总面积的 40.24%,主要分布于川东北地区与重庆市,其中川东北地区平均灰色关联度为 0.706,高值区面积占比为 53.35%,重庆市平均灰色关联度为 0.695,高值区占比 47.47%,高值区内植被类型多为针叶林与阔叶灌丛. 低值区占四川盆地总面积的 59.75%,主要分布在盆地内川南地区与成都平原,川南地区平均灰色关联度仅为 0.644,低值区面积占比高达 90.11%,成都平原平均灰色关联度为 0.677,低值区面积占比 64.87%. 低值区植被类型多为培育植被与草地. 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与 NDVI 的灰色关联度低值区面积占比略高于高值区,高值区的针叶林分布明显多于低值区,而低值区内的主要植被类型为培育植被与草地,说明针叶林对 $\text{PM}_{2.5}$ 的削弱作用明显大于灌丛和草地等其他类型植被.

2.3.2 $\text{PM}_{2.5}$ 与气候因子的灰色关联分析

近 18 年四川盆地风速、气温、降水与日照时长总体呈上升趋势,气压与相对湿度总体呈下降趋势,除气压外,其它气象因子线性变化趋势不明显. 2000 ~ 2017 年四川盆地相对湿度、日照时长与相对气压没有明显的空间差异,分布较为均匀;降水呈东高西低空间分布,风速呈西高东低分布;而气温具有

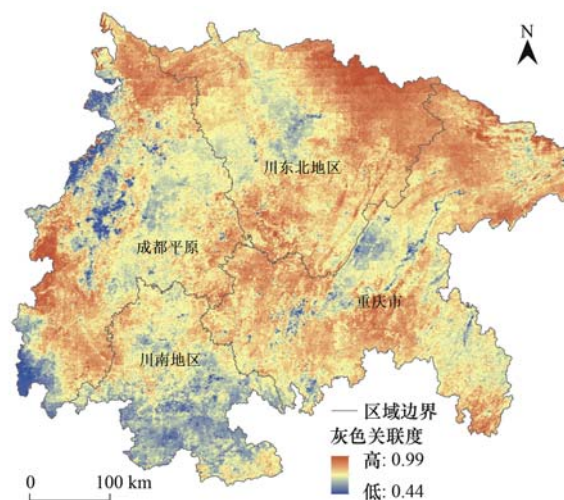


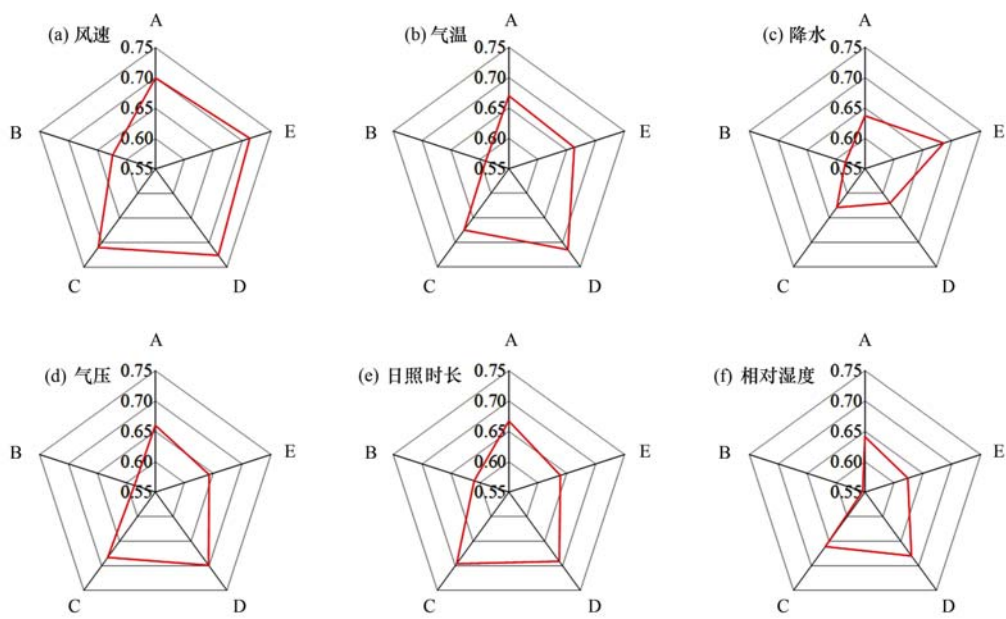
图 5 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与 NDVI 灰色关联度分布

Fig. 5 Distribution of grey correlation degrees between $\text{PM}_{2.5}$ concentration and NDVI in the Sichuan Basin

盆地内部高、盆地边缘低的空间分布特征.

2000 ~ 2017 年四川盆地各气象因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的灰色关联度(图 6)排序依次为:风速(0.70) > 气温(0.670) > 日照时长(0.667) > 气压(0.660) > 相对湿度(0.641) > 降水(0.637). 川东北地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与多个气象因子关联度高,区域内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与风速、气温、气压和相对湿度的灰色关联度为 4 个区域最高值,重庆市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与日照时长的灰色关联度略高于川东北地区,成都平原降水对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响较其他区域更为显著.

根据 2000 ~ 2017 年四川盆地气象因子灰色关联分析结果(图 7),以灰色关联度 0.7 将研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与气象因子灰色关联度分为高值区与低值区两部分. 各气象因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 灰色关联度高值区面积占比依次为:风速(61.97%) > 气温(29.29%) > 气压(24.95%) > 日照时长(23.23%) > 相对湿度(19.24%) > 降水(15.16%). 风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 灰色关联度高值区主要集中分布在成都平原与川东北地区,成都、资阳、遂宁、德阳、南充、广安和达州等市的高值区面积占比在 80% 以上. 川东北地区气温与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的灰色关联度高值区面积占比高达 59.72%,达州、广元和巴中等市高值区分布较广,重庆市气温与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的灰色关联度高值区面积占比为 28.26%,高值区集中在重庆市主城区及东北部中段万州、开阳和开州区. 降水与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度灰色关联度高值区主要分布在成都平原,其中成都与眉山等市高值区占比较大,绵阳、乐山以及德阳等市有部分高值区分布. 气压、相对湿度及日照时长的高值区分布格局较为相似,主要分布在川东北地区与重庆市,集中在广元市、巴中市、达



A 表示四川盆地, B 表示川南地区, C 表示重庆市, D 表示川东北地区, E 表示成都平原

图 6 四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度气象因子灰色关联度五维图

Fig. 6 Grey correlation degrees between meteorological factors and $PM_{2.5}$ concentration in the Sichuan Basin

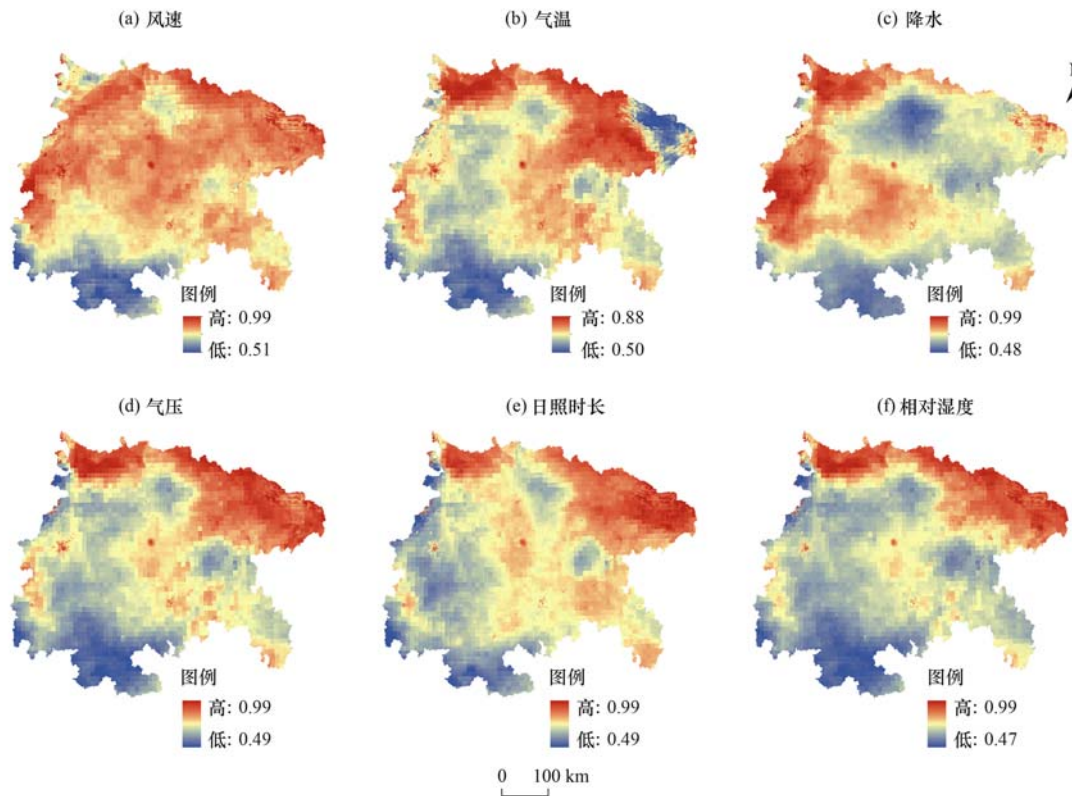


图 7 四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度与气象因子灰色关联度分布

Fig. 7 Distributions of grey correlation degrees between $PM_{2.5}$ concentration and meteorological factors in the Sichuan Basin

州市及重庆市东北部。

2.3.3 $PM_{2.5}$ 与人类活动的灰色关联分析

四川盆地各城市 $PM_{2.5}$ 浓度与人类活动因子灰色关联分析结果显示(表 3),各人类活动因子与 $PM_{2.5}$ 浓度灰色关联度从大到小依次是人口密度、地区生产总值、人均 GDP 和第二产业生产总值,其中

$PM_{2.5}$ 浓度与人口密度灰色关联度最高的城市是巴中市,成都市、重庆市和自贡市的 $PM_{2.5}$ 浓度与人口密度的灰色关联度相对较低;巴中市 $PM_{2.5}$ 浓度与地区生产总值及人均 GDP 的灰色关联度远高于其他城市,广元市、南充市以及泸州市略高于其他城市;巴中市、成都市、泸州市以及广安市的 $PM_{2.5}$ 浓度与第二产

业 GDP 的灰色关联度明显高于其他城市。

表 3 四川盆地 PM_{2.5} 浓度与人类活动因子灰色关联度

Table 3 Grey correlation degrees between PM_{2.5} concentration and human activity factors in the Sichuan Basin

	第二产业总值	人均 GDP	GDP	人口密度
四川盆地	0.664	0.719	0.731	0.898
成都平原	0.658	0.709	0.720	0.895
川东北地区	0.670	0.729	0.758	0.963
川南地区	0.666	0.698	0.724	0.850
重庆市	0.677	0.827	0.694	0.792

3 讨论

本文基于遥感反演数据对四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化格局进行分析,发现自 2006 年以后,四川盆地 PM_{2.5} 污染呈明显改善趋势.表明自国家环境保护“十一五”规划提出以后,四川盆地地区从重经济增长轻环境保护转变为保护环境与经济增长并重,不断推动资源可持续发展,同时环保部门加大整治环境污染力度,有效地控制了 PM_{2.5} 污染^[51].但在四川盆地局部地区仍有 PM_{2.5} 污染加剧的情况,主要出现在经济欠发达地区,这可能与当地大气防控投入以及当地产业结构有关.本文对四川盆地 PM_{2.5} 浓度进行了空间自相关分析,发现研究区内 PM_{2.5} 浓度存在明显的空间集聚效应,成都市至重庆市主城区的 PM_{2.5} 跨区域传输现象近年来呈现加重趋势,需将此地区作为四川盆地地区的大气治理联防联控的重点管控地区,以防未来出现稳定持续的 PM_{2.5} 连片污染区^[52].

PM_{2.5} 污染的加剧很大程度上与自然条件及人类活动影响密切相关,如何科学可靠地分析 PM_{2.5} 浓度影响因子是治理 PM_{2.5} 污染的关键^[53].本文基于灰色关联分析方法研究了各类影响因素对 PM_{2.5} 浓度的影响程度,分析结果表明,风速、植被与人口密度是对四川盆地 PM_{2.5} 浓度影响最大的 3 个因子,其中四川盆地的风速与 PM_{2.5} 浓度的影响最为显著.植被方面,本文发现不同区域的 NDVI 对 PM_{2.5} 浓度的影响存在空间差异,区域植被类型分布分析表明,NDVI 对 PM_{2.5} 浓度影响大的地区针叶林普遍占比较高,相关研究证实,针叶树等乔木相对于矮小的植物,有更高的去除气体污染物和颗粒污染物的能力^[54,55].包鹏威等^[56]在静风和恒温恒湿的条件下,研究了不同植被对 PM_{2.5}、PM₁₀ 的阻滞作用,认为乔木附着颗粒物能力大于灌木;王蕾等^[57]通过对 6 种针叶林叶面附着颗粒物能力的研究表明,针叶林凭借更小更密集叶子、更复杂的枝茎和全年的有叶期,比阔叶林有更好的颗粒物阻滞能力.四川盆地植被类型较为丰富,植被因素与 PM_{2.5} 浓度变化的关

系较为复杂,因此在研究大气污染与植被的关系时,应进一步考虑植被类型对 PM_{2.5} 浓度的影响,同时,在制定 PM_{2.5} 控制措施时,应进一步提高城市植被覆盖,特别是提高针叶林等乔木的种植比例,合理的城市绿化对提高四川盆地大气环境质量具有重要作用.

气象条件会改变 PM_{2.5} 浓度,例如相对湿度和温度与颗粒组成相关,并影响大气污染的排放和水平输送,而气压则影响大气稳定性和大气污染物的垂直扩散,降水会对 PM_{2.5} 具有冲洗作用^[58,59].风速与气温是影响四川盆地 PM_{2.5} 浓度的主要气象因素,赵秀娟等^[60]对北京 2011 年秋季雾-霾天气气象条件对 PM_{2.5} 污染的作用进行讨论,认为气象条件的不同造成了 PM_{2.5} 浓度的空间分布差异;冯小琼等^[61]对成都市 2019~2020 年间 3 次灰霾污染的研究发现,3 次污染过程中均出现在温度和相对湿度持续上升,风速和边界高度持续降低的不利气象条件下.同时,气象因子对 PM_{2.5} 浓度的影响明显受地形制约,四川盆地周缘山地 PM_{2.5} 浓度的气象因子敏感性明显大于平原地区,郭晓梅^[62]利用 WRF-Chem 模拟了四川盆地一次持续性的重霾过程,并进行了有无盆地地形的敏感性试验,结果表明地形作用使盆地内 PM_{2.5} 浓度偏高,地形影响贡献率约 70%,因此当地相关部门在制定大气污染治理措施时,需要充分地考虑到地形对 PM_{2.5} 浓度所带来的影响,因地制宜地提出大气污染治理政策.

人类活动方面,人口高密度聚集及当地经济发展水平是影响四川盆地 PM_{2.5} 浓度变化的主要因素,人口密度越高、人类活动越频繁,各种污染物排放量会随之增高,使得 PM_{2.5} 浓度上升^[24,63~65].第二产业 GDP 与 PM_{2.5} 的灰色关联度低于地区生产总值与 PM_{2.5} 的关联度,一方面,四川盆地第二产业以酒、饮料和精茶制造业、农副食品加工业以及计算机、通信和其他电子设备制造业等轻工业为主,以上产业对 PM_{2.5} 浓度的影响相对较弱;另一方面,四川盆地在经济高速发展过程中,并不只是第二产业对 PM_{2.5} 浓度产生影响,其他产业同样对四川盆地 PM_{2.5} 产生影响,例如第一产业中的农作物秸秆焚烧^[66]、第三产业的交通运输业与餐饮业同样会为 PM_{2.5} 浓度的增长做出贡献^[67].当前成都市及重庆市受人口密度影响较小,主要原因在于这两个城市的人口密度增加趋势趋缓,地区的空气治理力度加强^[24].巴中市 PM_{2.5} 浓度受人口密度及经济活动影响明显高于四川盆地其他城市,表明该城市的经济发展仍需以牺牲环境为代价,若想有效解决当地的大气污染问题,需优化本市产业结构,减少大气污染物排放,有效协

调当地经济发展与大气环境安全的关系。

4 结论

(1) 四川盆地 2000~2017 年 $PM_{2.5}$ 浓度总体呈现出“中间高,四周低”的空间格局,四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度在低海拔地区较高,越靠近盆地周边高海拔地区 $PM_{2.5}$ 浓度越低。高值区主要集中于各市主城区, $PM_{2.5}$ 污染最严重的地区为成都市金牛区与重庆市渝中区。从时间序列上看,近 18 年间四川盆地 $PM_{2.5}$ 年均浓度变化总体呈现出先升后降的趋势,少数年份略有波动。

(2) 四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度空间自相关分析结果表明,2000~2017 年四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著的空间聚集性;局部自相关分析结果表明,四川盆地高-高聚集区多集中在成都-重庆及其沿线城市, $PM_{2.5}$ 浓度较高的城市间空间自相关性强。而低-低聚集区主要集中分布在四川盆地边缘城市。

(3) 近 18 年,四川盆地 $PM_{2.5}$ 年均浓度受自然环境与人类活动的综合影响,自然因子中,植被、风速和气温对 $PM_{2.5}$ 浓度影响较大。人类活动方面,人口密度与经济规模对 $PM_{2.5}$ 浓度产生显著的影响。

参考文献:

- [1] Li R, Mei X, Chen L F, *et al.* Influence of spatial resolution and retrieval frequency on applicability of satellite-predicted $PM_{2.5}$ in northern China[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(4), doi: 10.3390/rs12040736.
- [2] 林瑜,叶芝祥,杨怀金,等.成都市西南郊区春季大气 $PM_{2.5}$ 的污染水平及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1629-1638.
Lin Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Pollution level and source apportionment of atmospheric particles $PM_{2.5}$ in southwest suburb of Chengdu in spring[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1629-1638.
- [3] 曹军骥. $PM_{2.5}$ 与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] Wu J S, Li J T, Zhou L G, *et al.* Impacts of AOD correction and spatial scale on the correlation between high-resolution AOD from Gaofen-1 Satellite and in Situ $PM_{2.5}$ measurements in Shenzhen City, China[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(19), doi: 10.3390/rs11192223.
- [5] Zhang K N, de Leeuw G, Yang Z Q, *et al.* Estimating spatio-temporal variations of $PM_{2.5}$ concentrations Using VIIRS-derived AOD in the Guanzhong Basin, China[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(22), doi: 10.3390/rs11222679.
- [6] Huang Y S, Ji Y X, Zhu Z M, *et al.* Satellite-based spatiotemporal trends of ambient $PM_{2.5}$ concentrations and influential factors in Hubei, Central China[J]. *Atmospheric Research*, 2020, **241**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104929.
- [7] Xue Y, Li Y, Guang J, *et al.* Hourly $PM_{2.5}$ estimation over central and eastern China based on Himawari-8 data[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(5), doi: 10.3390/rs12050855.
- [8] 周亮,周成虎,杨帆,等. 2000-2011 年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征及驱动因素解析[J]. *地理学报*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of $PM_{2.5}$ in China between 2000 and 2011[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [9] Tan H Y, Chen Y M, Wilson J P, *et al.* An eigenvector spatial filtering based spatially varying coefficient model for $PM_{2.5}$ concentration estimation: a case study in Yangtze River Delta region of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117205.
- [10] Xiao Q Y, Wang Y J, Chang H H, *et al.* Full-coverage high-resolution daily $PM_{2.5}$ estimation using MAIAC AOD in the Yangtze River Delta of China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **199**, doi: 10.1016/j.rse.2017.07.023.
- [11] 王桂林, 张伟. 中国城市扩张及空间特征变化对 $PM_{2.5}$ 污染的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
Wang G L, Zhang W. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on $PM_{2.5}$ pollution in China[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
- [12] 刘可可, 张红, 刘桂建. 合肥市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素组成特征及重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3415-3420.
Liu K K, Zhang H, Liu G J. Elemental composition characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} , and heavy pollution analysis in Hefei[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3415-3420.
- [13] 邱晨晨, 于兴娜, 丁铨, 等. 南京江北新区冬季 $PM_{2.5}$ 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 529-536.
Qiu C C, Yu X N, Ding C, *et al.* Diurnal variations and source apportionment of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ during winter in Nanjing Jiangbei new Area[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 529-536.
- [14] 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 郑州市 $PM_{2.5}$ 化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4813-4824.
Zhang J F, Jiang N, Duan S G, *et al.* Seasonal chemical composition characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4813-4824.
- [15] 南洋, 张倩倩, 张碧辉. 基于 GAM 模型分析中国典型区域网格化 $PM_{2.5}$ 长期变化影响因素[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 499-509.
Nan Y, Zhang Q Q, Zhang B H. Influencing factors of long-term variations on gridded $PM_{2.5}$ of typical regions in China based on GAM model[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 499-509.
- [16] 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 Q Q, 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.
- [17] 王振波, 梁龙武, 王旭静. 中国城市群地区 $PM_{2.5}$ 时空演变格局及其影响因素[J]. *地理学报*, 2019, **74**(12): 2614-2630.
Wang Z B, Liang L W, Wang X J. Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of $PM_{2.5}$ in Chinese urban agglomerations[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(12): 2614-2630.
- [18] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因素及空间溢出效应[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3539-3548.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Influence factors and

- spillover effect of PM_{2.5} concentration on Fen-wei Plain [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3539-3548.
- [19] Ji L, Zhang Q, Fu X W, *et al.* Feedback of airborne bacterial consortia to haze pollution with different PM_{2.5} levels in typical mountainous terrain of Jinan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133912.
- [20] Wang S J, Liu X P, Yang X, *et al.* Spatial variations of PM_{2.5} in Chinese cities for the joint impacts of human activities and natural conditions: a global and local regression perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **203**, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.249.
- [21] Pang Y J, Yu B, He M, *et al.* Radiocarbon characterization study of atmospheric PM_{2.5} in Beijing during the 2014 APEC Summit [J]. *Radiocarbon*, 2019, **61**(6): 1643-1652.
- [22] 肖致美, 徐虹, 李立伟, 等. 基于在线观测的天津市 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- Xiao Z M, Xu H, Li L W, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on the online observation in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4355-4363.
- [23] 刘威杰, 石明明, 程铨, 等. 夏季大气 PM_{2.5} 中元素特征及源解析: 以华中地区平顶山-随州-武汉为例 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 23-30.
- Liu W J, Shi M M, Cheng C, *et al.* Characteristics and sources of elements in PM_{2.5} during summer for three typical cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 23-30.
- [24] 王少剑, 高爽, 陈静. 基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究 [J]. *地理研究*, 2020, **39**(3): 651-668.
- Wang S J, Gao S, Chen J. Spatial heterogeneity of driving factors of urban haze pollution in China based on GWR model [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(3): 651-668.
- [25] 贺祥, 林振山, 刘会玉, 等. 基于灰色关联模型对江苏省 PM_{2.5} 浓度影响因素的分析 [J]. *地理学报*, 2016, **71**(7): 1119-1129.
- He X, Lin Z S, Liu H Y, *et al.* Analysis of the driving factors of PM_{2.5} in Jiangsu province based on grey correlation model [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(7): 1119-1129.
- [26] Xue W H, Zhang J, Zhong C, *et al.* Satellite-derived spatiotemporal PM_{2.5} concentrations and variations from 2006 to 2017 in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134577.
- [27] Fu D S, Song Z J, Zhang, X L, *et al.* Similarities and differences in the temporal variability of PM_{2.5} and AOD between urban and rural stations in Beijing [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(7), doi: 10.3390/rs12071193.
- [28] Wang X P, Sun W B, Zheng K N, *et al.* Estimating hourly PM_{2.5} concentrations using MODIS 3 km AOD and an improved spatiotemporal model over Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **222**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117089.
- [29] Zhang X Y, Hu H B. Combining data from multiple sources to evaluate spatial variations in the economic costs of PM_{2.5}-Related health conditions in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(20), doi: 10.3390/ijerph16203994.
- [30] 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 等. 珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶浓度谱方法 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 525-531.
- Li F, Tan H B, Deng X J, *et al.* A method of aerosol particle number size distribution inversed by PM_{2.5} mass concentration in PRD [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 525-531.
- [31] Huang X F, Zou B B, He L Y, *et al.* Exploration of PM_{2.5} sources on the regional scale in the Pearl River Delta based on ME-2 modeling [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(16): 11563-11580.
- [32] Chen Y A, Fung J C H, Chen D H, *et al.* Source and exposure apportionments of ambient PM_{2.5} under different synoptic patterns in the Pearl River Delta region [J]. *Chemosphere*, 2019, **236**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.06.236.
- [33] Wang H, Li J W, Gao Z Q, *et al.* High-Spatial-Resolution population exposure to PM_{2.5} pollution based on multi-satellite retrievals: a case study of seasonal variation in the Yangtze River Delta, China in 2013 [J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(23), doi: 10.3390/rs11232724.
- [34] She Q N, Choi M, Belle J H, *et al.* Satellite-based estimation of hourly PM_{2.5} levels during heavy winter pollution episodes in the Yangtze River Delta, China [J]. *Chemosphere*, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124678.
- [35] 宁贵财. 四川盆地西北部城市群冬季大气污染气象成因及其数值模拟研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [36] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(7): 3762-3772.
- [37] He C Y, Gao B, Huang Q X, *et al.* Environmental degradation in the urban areas of China: evidence from multi-source remote sensing data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **193**: 65-75.
- [38] Shi Y S, Matsunaga T, Yamaguchi Y, *et al.* Long-term trends and spatial patterns of satellite-retrieved PM_{2.5} concentrations in South and Southeast Asia from 1999 to 2014 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **615**: 177-186.
- [39] Xie R, Sabel C E, Lu X, *et al.* Long-term trend and spatial pattern of PM_{2.5} induced premature mortality in China [J]. *Environment International*, 2016, **97**: 180-186.
- [40] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 长江经济带 PM_{2.5} 分布格局演变及其影响因素 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Evolution of the distribution of PM_{2.5} concentration in the Yangtze River economic belt and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- [41] 四川省统计局, 国家统计局四川调查总队. 四川统计年鉴 (2001 年 ~ 2018 年) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2018.
- [42] 重庆市统计局, 国家统计局重庆调查总队. 重庆统计年鉴 (2001 年 ~ 2018 年) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2001-2018.
- [43] Jiang L, He S X, Zhou H F. Spatio-temporal characteristics and convergence trends of PM_{2.5} pollution: a case study of cities of air pollution transmission channel in Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120631.
- [44] Wang C, Wood J, Wang Y J, *et al.* CO₂ emission in transportation sector across 51 countries along the belt and road from 2000 to 2014 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122000.
- [45] Zhang D J, Ge W Y, Zhang Y. Evaluating the vegetation restoration sustainability of ecological projects: a case study of Wuqi County in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,

- 264, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121751.
- [46] He D, Yi G H, Zhang T B, *et al.* Temporal and spatial characteristics of EVI and Its response to climatic factors in recent 16 years based on grey relational analysis in Inner Mongolia Autonomous Region, China [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10** (6), doi: 10.3390/rs10060961.
- [47] Huang X L, Zhang T B, Yi G H, *et al.* Dynamic changes of NDVI in the growing season of the Tibetan Plateau during the past 17 years and Its response to climate change [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16** (18), doi: 10.3390/ijerph16183452.
- [48] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [49] WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, 世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则[S].
- [50] Dong T T T D, Stock W D, Callan A C. *et al.* Emission factors and composition of PM_{2.5} from laboratory combustion of five Western Australian vegetation types [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134796.
- [51] 郑保利, 梁流涛, 李明明. 1998~2016年中国地级以上城市PM_{2.5}污染时空格局[J]. *中国环境科学*, 2019, **39** (5): 1909-1919.
- Zheng B L, Liang L T, Li M M. Analysis of temporal and spatial patterns of PM_{2.5} in prefecture-level cities of China from 1998 to 2016 [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39** (5): 1909-1919.
- [52] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. *地理学报*, 2018, **73** (1): 177-191.
- Liu H M, Fang C L, Huang J J, *et al.* The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73** (1): 177-191.
- [53] 周敏丹, 匡耀求, 云国梁. 基于地理探测器的广州市大气PM_{2.5}浓度驱动因素分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33** (2): 271-279.
- Zhou M D, Kuang Y Q, Yun G L. Analysis of driving factors of atmospheric PM_{2.5} concentration in Guangzhou city based on geodetector [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33** (2): 271-279.
- [54] 吴海龙, 余新晓, 师忱, 等. PM_{2.5}特征及森林植被对其调控研究进展[J]. *中国水土保持科学*, 2012, **10** (6): 116-122.
- Wu H L, Yu X X, Shi C, *et al.* Advances in the study of PM_{2.5} characteristic and the regulation of forests to PM_{2.5} [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012, **10** (6): 116-122.
- [55] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 等. 2013~2014年北京地区PM_{2.5}时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究[J]. *生态环境学报*, 2016, **25** (1): 103-111.
- Wang Y R, Zhang X X, Zhao J Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and its relationship with vegetation coverage in Beijing during the period of 2013-2014 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25** (1): 103-111.
- [56] 包鹏威, 牛健植, 陈上杰. 室内模拟分析8种常绿景观植被对PM₁₀、PM_{2.5}的阻滞作用[J]. *水土保持学报*, 2015, **29** (6): 160-164, 171.
- Bao P W, Niu J Z, Chen S J. Analyzing blocking effects of 8 kinds of evergreen landscape vegetation on PM₁₀ and PM_{2.5} by indoor simulation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, **29** (6): 160-164, 171.
- [57] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 等. 北京市六种针叶树叶面附着颗粒物的理化特征[J]. *应用生态学报*, 2007, **18** (3): 487-492.
- Wang L, Ha S, Liu L Y, *et al.* Physico-chemical characteristics of ambient particles settling upon leaf surface of six conifers in Beijing [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18** (3): 487-492.
- [58] 李敏, 张文娟, 吕晨, 等. 济南市冬季一次典型重污染过程分析[J]. *环境科学研究*, 2018, **31** (11): 1867-1875.
- Li M, Zhang W J, Lü C, *et al.* Analysis of a typical heavy pollution event in winter in Jinan City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31** (11): 1867-1875.
- [59] 邓君俊. 长三角地区霾天气形成机理和预报方法研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
- [60] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天PM_{2.5}污染与气溶胶光学特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34** (2): 416-423.
- Zhao X J, Pu W W, Meng W, *et al.* PM_{2.5} pollution and aerosol optical properties in fog and haze days during autumn and winter in Beijing Area [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (2): 416-423.
- [61] 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 等. 成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2020, **41** (10): 4382-4391.
- Feng X Q, Chen J H, Yin H M, *et al.* Characteristics and formation mechanism of three haze pollution processes in Chengdu in winter [J]. *Environmental Science*, 2020, **41** (10): 4382-4391.
- [62] 郭晓梅. 四川盆地空气质量气候特征及其大地形影响效应的观测模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [63] 杨冕, 王银. 长江经济带PM_{2.5}时空特征及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, **27** (1): 91-100.
- Yang M, Wang Y. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27** (1): 91-100.
- [64] 许珊, 邹滨, 王敏, 等. PM_{2.5}浓度空间估算的神经网络与克里格方法对比[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, **45** (10): 1642-1650.
- Xu S, Zou B, Wang M, *et al.* Performance comparison of artificial neural network and Kriging in spatial estimation of PM_{2.5} concentration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, **45** (10): 1642-1650.
- [65] 徐建辉, 江洪. 长江三角洲PM_{2.5}质量浓度遥感估算与时空分布特征[J]. *环境科学*, 2015, **36** (9): 3119-3127.
- Xu J H, Jiang H. Estimation of PM_{2.5} concentration over the Yangtze Delta using remote sensing: analysis of spatial and temporal variations [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (9): 3119-3127.
- [66] 陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 等. 东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析[J]. *环境科学*, 2019, **40** (11): 4810-4823.
- Chen W W, Liu Y, Wu X W, *et al.* Spatial and temporal characteristics of air quality and cause analysis of heavy pollution in northeast China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (11): 4810-4823.
- [67] 齐园, 张永安. 北京三次产业演变与PM_{2.5}排放的动态关系研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, **25** (7): 15-23.
- Qi Y, Zhang Y A. Dynamic relationship between the evolution of three industries and PM_{2.5} emissions in Beijing [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, **25** (7): 15-23.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)