

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, 丁志健, 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, 李中泓, 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	古柏铭, 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)	

基于网格的长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 分布影响因素及交互效应

黄小刚^{1,2,3}, 赵景波^{2,3*}, 辛未冬¹

(1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041004; 2. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061; 3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 基于遥感反演数据,研究了2016年长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布特征,从气象因素、地形、植被和大气污染物排放清单等方面选取评价因子,以 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 网格为评价单元,利用 GAM 模型研究了长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布的影响因素及交互效应。结果表明:① 长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体呈北高南低、西高东低的分布态势,但以南北向差异为主。长三角南部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度多低于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 超标零星出现在城镇周围,呈孤岛状分布。北部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度多超过 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 污染多呈连片状分布。② 长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布具有显著的的正的空间自相关性,高高集聚区集中分布在长三角北部,低低集聚区集中分布在南部。③ GAM 模型分析表明,地形起伏度、气温和降水量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主要呈负向影响;污染物排放量主要呈正向影响;风速 $< 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时影响不显著,风速 $\geq 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后有显著的负向影响。地形起伏度、气温和降水量南高北低是造成长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 北高南低的重要原因,风速东高西低是造成长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度东西向差异的原因之一。④ 除地形起伏度- $\text{PM}_{2.5}$ 排放量外,其余因素两两间的交互项均通过了显著性检验,对 $\text{PM}_{2.5}$ 分布有显著的交互效应。

关键词: 网格; 长三角; $\text{PM}_{2.5}$; 空间分布; 影响因素; 交互效应

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3107-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012101

Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of $\text{PM}_{2.5}$ in the Yangtze River Delta Based on Grids

HUANG Xiao-gang^{1,2,3}, ZHAO Jing-bo^{2,3*}, XIN Wei-dong¹

(1. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China; 2. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Spatial features of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Yangtze River Delta in 2016 were analyzed using remote sensing data. Selecting factors among meteorology, topography, vegetation, and emission list of air pollutants, factors and their interaction effects on the spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration were studied based on GAM, with an evaluation unit of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ for the grid. It showed that: ① With a more significant difference between the north and south, $\text{PM}_{2.5}$ concentration was generally higher in the north and west but lower in the south and east. In the southern part of the delta, the concentration was mostly lower than $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with noncompliance of the $\text{PM}_{2.5}$ concentration scattered in urban areas like islands. Meanwhile, $\text{PM}_{2.5}$ concentration is generally over $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, and the pollution appeared like sheets. ② Besides, $\text{PM}_{2.5}$ concentration showed an apparent positive spatial autocorrelation with "High-High" $\text{PM}_{2.5}$ agglomeration areas in the north of the delta and "Low-Low" $\text{PM}_{2.5}$ agglomeration areas in the south. ③ Based on GAM, hypsography, temperature, and precipitation negatively affected $\text{PM}_{2.5}$ concentration, whereas pollutant emissions positively affected it. The effect of wind was minor when its speed $< 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and more negatively significant when its speed $\geq 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hypsography, temperature, and precipitation were higher in the southern part of the delta, but they were lower in the northern part, leading to a higher $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the northern parts and lower in the southern parts. A higher wind speed in the east and lower in the west also led to a concentration difference between them. ④ All factors had passed a significant pair interaction test, except for hypsography and $\text{PM}_{2.5}$ emission, and they all showed a significant interaction effect on the distribution of $\text{PM}_{2.5}$ in the Yangtze River Delta.

Key words: grid; Yangtze River Delta; $\text{PM}_{2.5}$; spatial distribution; factors; interaction effect

长江三角洲地区(长三角)是我国经济最活跃的区域,开发程度高,城市密度大,产业活动密集,污染物排放量大,是我国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的区域之一^[1]。2013年大气污染防治行动计划实施以来,长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度虽有明显下降^[2],但仍未获根本性改善,2018年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达 $44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[3],冬季大范围的、持续性的霾过程仍常有发生。在国家加快生态文明建设、推进区域高质量发展的背景下,深入研究长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布格局及影响因素,对加强

区域联防联控,打赢蓝天保卫战具有重要意义。

局地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度是自然因素和人为排放综合作用的结果^[4],不仅与污染物排放强度有关,气温、太阳辐射、降水、风速、相对湿度、植被和地形等自然因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 的二次生成、集聚、扩散和沉降等也有重

收稿日期: 2020-12-14; 修订日期: 2021-01-04

基金项目: 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室项目(KLACP1904); 国家自然科学基金项目(41701287)

作者简介: 黄小刚(1978~),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为生态环境评价与治理, E-mail: huangxg@sxnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhaobjb@snnu.edu.cn

要影响^[5~8],也深刻改变着局地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度. 为定量识别各因素对长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响,国内外学者通过 $\text{PM}_{2.5}$ 本地源解析^[9~11] 和空气质量模式模拟^[12,13] 等环境学方法,从不同时空尺度对本地源排放、气象条件和区域传输等对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响进行了广泛的研究. 由于源解析和模式模拟方法侧重于 $\text{PM}_{2.5}$ 的物理化学过程,主要关注某地区某一次污染过程,存在变量选择角度单一和易忽视具体影响因素等问题^[14,15],关于自然和人为因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 的综合影响的研究以统计学模型为主. 已有学者使用相关分析^[16,17]、空间计量模型^[18]、灰色关联模型^[19] 和岭回归方法^[20] 等模型对此进行过深入研究,取得了许多成果. 然而,现有研究受社会经济数据的统计单元所限,多以行政区划为评价单元,忽略了行政区划内部的空间异质性,难以满足区域联防联控和空气质量精细化管理的需求;采用的统计模型多基于自变量与因变量间为线性关系的假设,与其现实中复杂的非线性响应关系不符,研究结论易出现偏差;且现有研究较少关注到影响因素间的交互效应,实际上有些因子的作用是相互抵消或增强的^[1,21].

因此,本文以 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的空间网格为评价单元,从气象因素、地形、植被和污染物排放清单等方面选取评价因子,采用广义相加模型 (generalized additive models, GAM),旨在:①总结长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布趋势与集聚规律;②识别长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布的关键影响因素;③揭示自然因素与前体物排放对长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异的交互效应,以期对长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的综合治理与联防联控提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 评价指标及数据来源

$\text{PM}_{2.5}$ 主要来源于人为排放,按其形成过程可分为一次源和二次源^[22]. 一次源指化石燃料燃烧、交通运输、工业生产、生物质燃烧、建筑和道路扬尘等人类活动造成的直接排放源. 二次源指由氮氧化物 (NO_x)、挥发性有机物 (VOCs)、 SO_2 和 NH_3 等气态污染物经过复杂化学反应生成的二次颗粒物. 因此本文选取的污染物排放指标包括 $\text{PM}_{2.5}$ 及 NO_x 、VOCs、 SO_2 和 NH_3 等 4 种主要 $\text{PM}_{2.5}$ 前体物的排放量,分别表征 $\text{PM}_{2.5}$ 一次源和二次源的影响. 自然因素方面,参考文献^[5~8,16~20],选择了对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响较大的气温、降水量、相对湿度、平均风速、植被覆盖度和地形起伏度作为评价因子.

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据来源于大气成分分析组织 (ACAG) 发布的中国区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据集 (V4.

CH. 02) (http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140),该数据集首先利用基于遥感反演的大气气溶胶光学厚度 (AOD) 数据和 CEOS-Chem 化学传输模型相结合估算 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,再结合地面观测数据,利用地理加权回归模型 (GWR) 对估算结果进行校正^[23],精度较高,已有效应用于国家和地区尺度的 $\text{PM}_{2.5}$ 研究^[4,8,24]. 污染物排放数据来源于清华大学开发的中国多尺度排放清单模型 (MEIC) 网站 (<http://www.meicmodel.org/>),MEIC 是一套基于云计算平台开发的中国大气污染物和温室气体人为源排放模型,涵盖了电力、工业、民用、交通和农业等 5 类人为排放源^[25],在污染成因分析、空气质量预报预警和空气污染达标规划等方面已获得了较好的应用^[26]. MEIC 网格化排放清单最新公布的年份是 2016 年,因此本文设定的评价年份为 2016 年. 高程数据来源于 SRTM (<http://srtm.csi.cgiar.org/>),空间分辨率为 90 m. 气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 发布的中国地面气候资料年值数据集,原始数据已经过严格的质量控制和检查,数据较为可靠. 植被覆盖度用归一化植被指数 (NDVI) 表示,原始数据来自美国国家航空和宇航局 (NASA) (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). 所获原始数据的空间分布如图 1 所示.

由于获取的数据格式各不相同,投影和空间分辨率也不一致,因此建模前需要对数据进行插值、空间匹配和统计. 首先,将气象数据由点状插值成栅格. 为此,以 DEM 为协变量,利用 Anusplin 4.2 对气象数据进行插值,分辨率与 DEM 一致,均为 90 m. 其次,确定评价网格大小,生成评价网格图层. 在所获取的原始数据中,以 MEIC 排放清单的分辨率最低,为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,因此本文拟定的网格大小为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. 最后,将所有的栅格数据转换为地理坐标系,利用 ArcGIS 的分区统计功能统计各网格的评价指标值. 删除无数据的网格后实际评价的网格单元共 536 个.

1.2 研究方法

1.2.1 地形起伏度

地形起伏度是描述地形特征的常用的宏观性指标,由于不同领域的应用目的不同,地形起伏度提取方法存在一定的差异. 本文主要参考柏中强等^[27] 在人口分布影响因素背景下提出的提取方法,侧重于反映地形通过影响人口和产业分布来对 $\text{PM}_{2.5}$ 产生的间接影响,计算公式如下:

$$\text{RDLS} = \frac{\text{ALT}}{1000} + \frac{(H_{\max} - H_{\min})(1 - P_A)}{500} \quad (1)$$

式中, RDLS 为地形起伏度, ALT 为区域平均海拔,

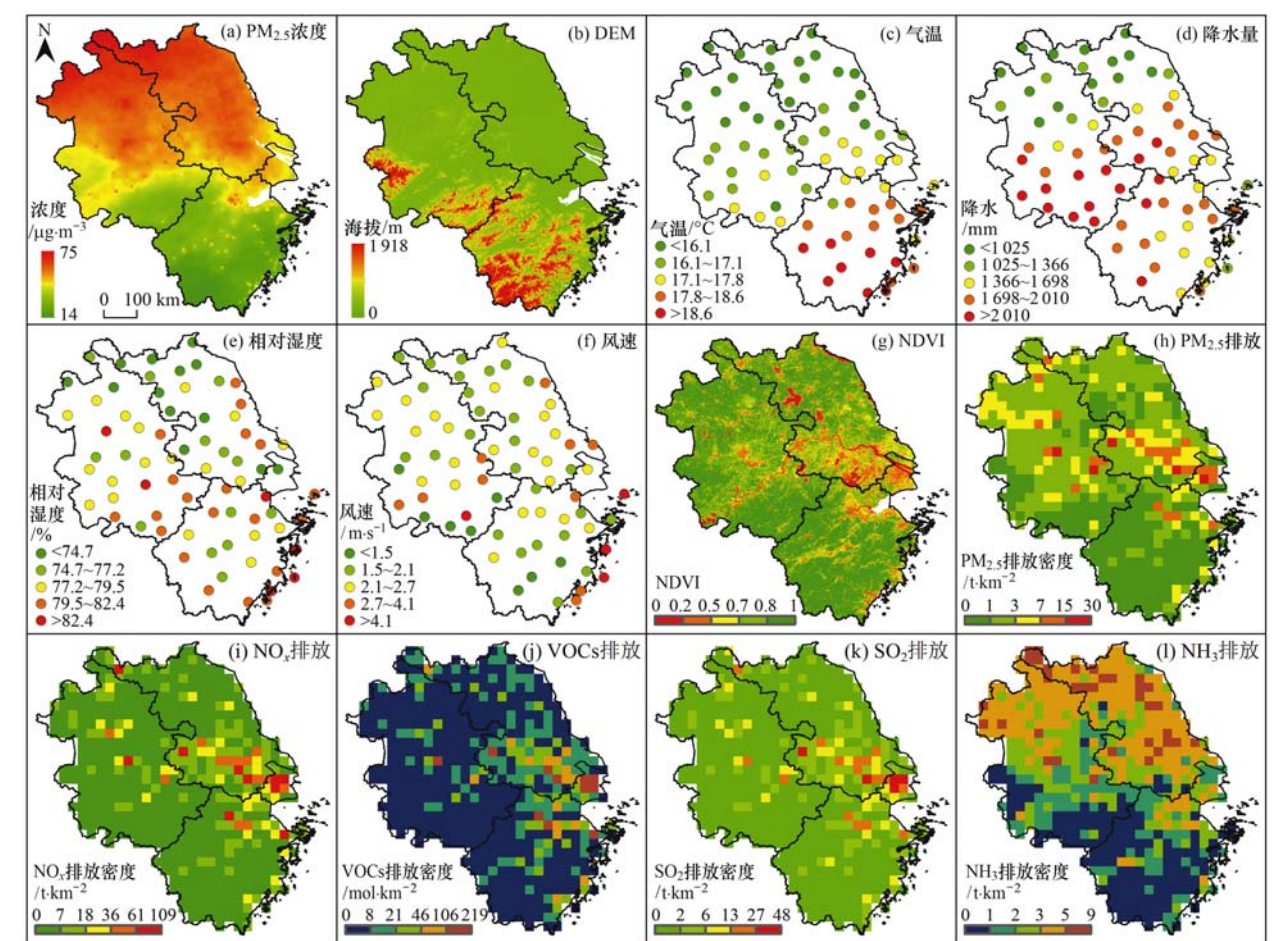


图 1 2016 年长三角 PM_{2.5} 浓度、自然因素和污染物排放空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of PM_{2.5} concentration, natural factors, and pollutant emissions in the Yangtze River Delta in 2016

$H_{\max}$ 和 $H_{\min}$ 分别为区域内最高和最低海拔 (m), P_A 为区域内平地面积的比例 (坡度 $\leq 5^\circ$). 地形起伏度借助 ArcGIS 10.2 空间分析模块进行计算, 以 $900\text{ m} \times 900\text{ m}$ 为基本评价单元.

1.2.2 空间自相关分析

受大气传输的影响, 相邻地区 PM_{2.5} 浓度易相互影响, 因此 PM_{2.5} 空间分布一般具有空间自相关性. 全局 Moran's I 是测度地理事物空间自相关性的常用指标, 公式如下^[28]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中, I 为全局 Moran's I ; x_i 和 y_i 为网格 i 和 j 上的 PM_{2.5} 浓度; n 为网格数量; W_{ij} 为空间权重矩阵, 相邻为 1, 否则为 0; $\bar{x}$ 为 PM_{2.5} 平均浓度. 采用 Queen 邻接规则构建权重矩阵, 即有公共边或公共点的网格单元视为相邻. $I \in [-1, 1]$, $I > 0$ 表示正相关, 即相似的 PM_{2.5} 浓度值趋于集聚; $I < 0$ 表示负相关, 即相似的 PM_{2.5} 浓度值趋于离散; $I = 0$ 表示不相关. $|I|$ 越大, 表示空间自相关性越强. I 的显著性采用

双侧 Z 检验法判断, 公式如下:

$$Z(I) = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (3)$$

式中, $E(I)$ 和 $\text{VAR}(I)$ 分别分为 I 的理论期望和理论方差.

全局 Moran's I 虽然可以反映 PM_{2.5} 在整个长三角分布的结构模式, 但不能识别集聚的具体区域. 局部空间自相关分析可以用来度量每个网格与周边网格之间的局部空间关联和空间差异程度, 公式如下^[29,30]:

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中, I_i 为局部 Moran's I ; 其余符号含义与公式 (2) 相同. $I_i > 0$ 表示网格 i 与其相邻网格呈正相关, 相似值趋于集聚分布 (高高集聚或低低集聚); $I_i < 0$ 表示网格 i 与其相邻网格呈负相关, 相似值趋于离散分布 (高低集聚或低高集聚); $I_i = 0$ 表示不相关. I_i 的显著性也采用双侧 Z 检验法判断. 空间自相关分析采用 GeoDa 1.14.0 计算, 结果用 Moran 散点图和局部空间关联指数图 (LISA) 表示. 其中, Moran 散

点图中的一、二、三和四象限的观测值分别表示高高集聚、低高集聚、低低集聚和高低集聚,其空间分布用 LISA 展示。

1.2.3 GAM

GAM 是广义线性模型 (GLM) 的非参数扩展形式,不需要预先设定参数模型,是由数据驱动而非统计分布模型驱动的非参数回归模型^[7]。模型结构是由数据的内在联系决定,可对部分解释变量进行线性拟合,对其余解释变量进行光滑函数拟合,适用于处理响应变量和解释变量间复杂非线性的关系^[31]。由于 GAM 模型的一系列优点,已在污染物影响因素的研究中获得了较好的应用^[7,32]。GAM 的基本形式为^[7]:

$$g[E(y)] = \alpha + \sum_{i=1}^p f_i(x) \quad (5)$$

式中, $g[E(y)]$ 为连接函数,由于 $PM_{2.5}$ 年均浓度近似正态分布,采用恒等联系函数(identity link)作为连接函数^[7]; $E(y)$ 为响应变量 y 的数学期望; α 为截距; p 为解释变量 x 个数; $f(\cdot)$ 为 x 的某种平滑函数,最常用的是光滑样条函数。 $f(\cdot)$ 的参数自由度 (DF) 通过迭代的方法,根据赤池信息准则 (AIC) 最小的原则确定。GAM 模型运算是在 R 3.6.3 语言环境下,借助 mgcv 包完成。

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布特征

利用 ArcGIS 趋势分析工具对 2016 年长三角

$PM_{2.5}$ 年均浓度做三维趋势分析,并将结果投影到东西向和南北向两个平面上 (图 2)。结果表明,2016 年长三角 $PM_{2.5}$ 浓度整体具有北高南低和西高东低的特征,但南北向差异显著大于东西向。南北向上, $PM_{2.5}$ 年均浓度由北向南梯度递减的趋势非常明显,由最北端的 $71 \mu g \cdot m^{-3}$ 递减至最南端的 $18 \mu g \cdot m^{-3}$,相差约 3.9 倍,且基本呈二次多项式曲线递减 [图 2 (a)],拟合度达 0.92。按照《环境空气质量标准 (GB 3095-2012)》规定的 15 和 $35 \mu g \cdot m^{-3}$ 分别为 $PM_{2.5}$ 年均浓度一级标准 (优) 和二级标准 (良) 限值计,2016 年长三角 $PM_{2.5}$ 年均浓度为优和良的栅格分别占有所有栅格的 0.3% 和 30.7%,集中分布在长三角的南部,包括安徽的长江以南地区和浙江的杭州湾以南地区。长三角南部 $PM_{2.5}$ 年均浓度超标的地区仅零星地出现在城镇周围,呈孤岛状分布。长三角北部,包括江苏、上海、浙江的杭州湾以北地区和安徽的长江以北地区, $PM_{2.5}$ 年均浓度普遍超过二级标准限值,越往北浓度越高,安徽北部和江苏北部普遍超过 $55 \mu g \cdot m^{-3}$,最北端的部分地区超过 $70 \mu g \cdot m^{-3}$, $PM_{2.5}$ 污染已呈连片状分布 [图 1 (a)]。东西向上, $PM_{2.5}$ 浓度虽有西高东低的分布趋势,但变化幅度小于南北向,由最西端的 $64 \mu g \cdot m^{-3}$ 降至最东端的 $23 \mu g \cdot m^{-3}$,相差约 2.8 倍。东西向变化也呈二次多项式曲线递减,但拟合度比南北向小 ($R^2 = 0.16$)。可见,长三角 $PM_{2.5}$ 年均浓度的空间差异以南北向为主。

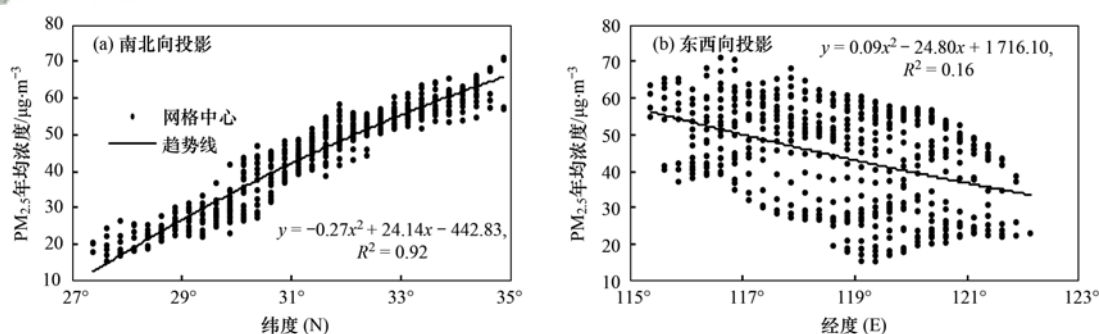


图 2 2016 年长三角 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布趋势

Fig. 2 Spatial trends of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River Delta in 2016

2016 年长三角 $PM_{2.5}$ 浓度的空间自相关分析结果显示 (图 3), 全局 Moran's I 为 0.937, 且在 0.001 置信水平上显著, 说明 $PM_{2.5}$ 浓度分布具有正的空间自相关性。Moran 散点图显示 [图 3 (a)], 观测值主要集中在第一和第三象限, 说明 $PM_{2.5}$ 浓度主要呈高高和 low-low 集聚。LISA 集聚图显示 [图 3 (b)], 通过显著性检验的高高集聚的网格共 238 个, 集中分布在长三角北部; 通过显著性检验的低低集聚的网格共 176 个, 集中分布在长三角南部; 通过显著性检验的

高低集聚的网格共 2 个, 分布在浙江北部; 集聚特征不明显的网格共 120 个, 分布在高高集聚和低低集聚的过渡地带; 未出现低高集聚的网格单元。空间自相关性分析进一步证实, 长三角北部已形成了连片的 $PM_{2.5}$ 高污染区域, 长三角南部 $PM_{2.5}$ 空气质量相对较好。

2.2 $PM_{2.5}$ 分布影响因素分析

2.2.1 单影响因子分析

每次选择一个评价因子作为解释变量, 以

PM_{2.5} 年均浓度为响应变量,构建单因子 GAM 模型,以获取有统计学意义的影响因子(表 1).表 1 显示,在单影响因子 GAM 模型里,所有因子都通过了 0.001 的显著性检验,对 PM_{2.5} 年均浓度分布都有显著影响,且所有因子的参考自由度都大于 1,说明所有因子与 PM_{2.5} 年均浓度都有复杂的

非线性关系.其中,地形起伏度的拟合效果最好, R^2 和方差解释率最大,分别为 0.746 和 75.5%;相对湿度和 NH₃ 排放量其次, R^2 分别为 0.693 和 0.690,方差解释率分别为 69.8% 和 69.1%;风速的拟合效果最差, R^2 和方差解释率最小,分别为 0.136 和 14.2%.

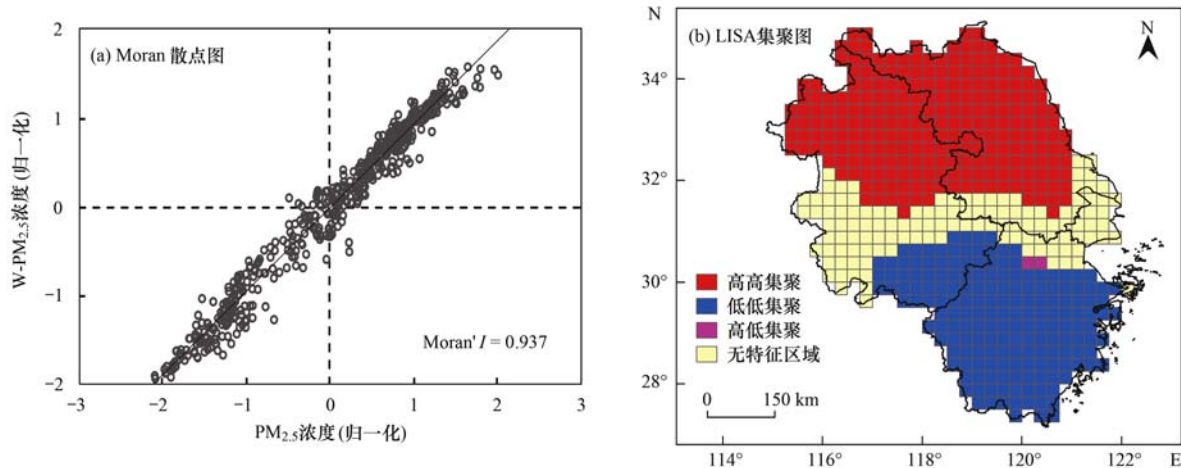


图 3 2016 年长三角 PM_{2.5} 浓度局部自相关分析

Fig. 3 Local spatial autocorrelation analysis of PM_{2.5} concentration in the Yangtze River Delta in 2016

表 1 单因子 GAM 模型拟合结果¹⁾

Table 1 GAM fitting results of a single influencing factor

平滑效应项	估计自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	调整判定系数(R^2)	方差解释率/%
<i>s</i> (气温)	8.68	9.61	19.71	<2E-16***	0.258	27.0
<i>s</i> (降水量)	8.71	9.62	66.49	<2E-16***	0.543	55.1
<i>s</i> (相对湿度)	9.63	10.61	114.30	<2E-16***	0.693	69.8
<i>s</i> (风速)	3.90	3.99	20.96	<2E-16***	0.136	14.2
<i>s</i> (地形起伏度)	18.51	19.71	80.29	<2E-16***	0.746	75.5
<i>s</i> (NDVI)	4.75	4.97	34.03	<2E-16***	0.241	24.8
<i>s</i> (PM _{2.5} 排放量)	6.88	6.99	79.50	<2E-16***	0.507	51.3
<i>s</i> (NO _x 排放量)	15.49	17.17	14.23	<2E-16***	0.309	32.9
<i>s</i> (VOCs 排放量)	12.57	12.96	13.40	<2E-16***	0.234	25.2
<i>s</i> (SO ₂ 排放量)	22.92	25.74	6.36	<2E-16***	0.223	25.6
<i>s</i> (NH ₃ 排放量)	2.75	2.96	402.20	<2E-16***	0.690	69.1

1) *** 表示通过了 0.001 水平的显著性检验

2.2.2 影响因子多重共线性诊断

由于影响因子之间可能存在多重共线性,会导致分析结果不稳定,进行多影响因子 GAM 建模前应将存在多重共性的因子剔除.本文采用方差膨胀因子(VIF)和相关分析相结合的方法对多重共线性进行诊断(表 2).表 2 显示,PM_{2.5}、NO_x、VOCs 和 SO₂ 排放量等 4 因子的 VIF 值均超过 5,表明这 4 个因子间可能存在多重共线性.进一步观察其相关系数矩阵,这 4 个因子间的相关系数均大于 0.8,说明这 4 种污染物的排放量具有高度的相关性,建模时选择其中 1 种作为代表即可.鉴于 PM_{2.5} 排放量在 4 个因子的单因子 GAM 模型里拟合效果最好(表 1),因此保留其作为评价因子,剔除其

余 3 个影响因子.剔除后再进行 VIF 分析,所有因子的 VIF 都小于 5.

2.2.3 多因子模型的建立

采用逐步回归的方法建立多因子回归模型.由于地形起伏度单因子模型的拟合效果最好(表 1),以此为基础,每次加入 1 个因子,按照 AIC 最小、 R^2 最大为最优模型的判别原则,确定双因子最优模型.依此类推,确定 3 因子最优模型、4 因子最优模型……,直至 AIC 不再变小、 R^2 不再增大为止.据此规则,依次加入模型的因子分别为气温、相对湿度、PM_{2.5}排放量、降水量和风速,此后再加入的 NDVI 和 NH₃ 排放量因子均未通过显著性检验. NDVI 和 NH₃ 排放量在单因子分析时通过了显著性验,但在

多因子 GAM 模型中未通过显著性检验,可能是因为这 2 个因子还与其余因子存在多重共线性^[7]. 因此,最终确定的评价因子为气温、相对湿度、

PM_{2.5}排放量、降水量和风速(表 3),模型 AIC 为 2 453. 974, R² 为 0. 971, 方差解释率为 97. 4%, 模型拟合效果较好.

表 2 影响因子相关系数矩阵和多重共线诊断结果¹⁾

Table 2 Correlation coefficient matrix and multicollinearity test of influencing factors											
	气温	降水量	相对湿度	风速	地形起伏度	NDVI	PM _{2.5} 排放量	NO _x 排放量	VOCs排放量	SO ₂ 排放量	NH ₃ 排放量
气温	—	0. 336 ***	0. 325 ***	0. 100 **	-0. 119 **	-0. 385 ***	0. 109 **	0. 233 ***	0. 280 ***	0. 242 ***	-0. 231 ***
降水量	0. 336 ***	—	0. 691 ***	0. 236 ***	0. 497 ***	0. 042	-0. 126 **	-0. 042	-0. 022	-0. 024	-0. 621 ***
相对湿度	0. 325 ***	0. 691 ***	—	0. 502 ***	0. 583 ***	0. 219 ***	-0. 193 ***	-0. 131 ***	-0. 088 *	-0. 106 ***	-0. 638 ***
风速	0. 100 **	0. 236 ***	0. 502 ***	—	-0. 007	-0. 161 ***	0. 041	0. 104 **	0. 099 *	0. 122 **	-0. 185 ***
地形起伏度	-0. 119 **	0. 497 ***	0. 583 ***	-0. 007	—	0. 515 ***	-0. 360 ***	-0. 272 ***	-0. 218 ***	-0. 225 **	-0. 671 ***
NDVI	-0. 385 ***	0. 042	0. 219 ***	-0. 161 ***	0. 515 ***	—	-0. 505 ***	-0. 579 ***	-0. 537 ***	-0. 564 ***	-0. 247 ***
PM _{2.5} 排放量	0. 109 **	-0. 126 **	-0. 193 ***	0. 041	-0. 360 ***	-0. 505 ***	—	0. 900 ***	0. 794 ***	0. 834 ***	0. 503 ***
NO _x 排放量	0. 233 ***	-0. 042	-0. 131 ***	0. 104 **	-0. 272 ***	-0. 579 ***	0. 900 ***	—	0. 938 ***	0. 975 ***	0. 336 ***
VOCs排放量	0. 280 ***	-0. 022	-0. 088 *	0. 099 *	-0. 218 ***	-0. 537 ***	0. 794 ***	0. 938 ***	—	0. 963 ***	0. 270 ***
SO ₂ 排放量	0. 242 ***	-0. 024	-0. 106 **	0. 122 **	-0. 225 ***	-0. 564 ***	0. 834 ***	0. 975 ***	0. 963 ***	—	0. 271 ***
NH ₃ 排放量	-0. 231 ***	-0. 621 ***	-0. 638 ***	-0. 185 ***	-0. 671 ***	-0. 247 ***	0. 503 ***	0. 336 ***	0. 270 ***	0. 271 ***	—
容差	0. 462	0. 418	0. 202	0. 468	0. 265	0. 415	0. 112	0. 024	0. 067	0. 025	0. 275
VIF	2. 165	2. 393	4. 952	2. 136	3. 780	2. 408	8. 934	42. 038	15. 014	39. 654	3. 634

1) *、**和***分别表示通过了0.05、0.01和0.001水平的显著性检验,下同

表 3 多因子 GAM 模型拟合结果

Table 3 GAM fitting result of multi-factor				
平滑效应项	估计自由度	参考自由度	F	P
s(地形起伏度)	7. 80	9. 65	86. 86	<2E-16 ***
s(气温)	9. 27	9. 86	63. 44	<2E-16 ***
s(相对湿度)	6. 16	7. 63	11. 31	3. 53E-14 ***
s(PM _{2.5} 排放量)	5. 53	6. 30	14. 07	2. 97E-15 ***
s(降水量)	8. 44	9. 45	17. 53	<2E-16 ***
s(风速)	3. 84	3. 98	20. 41	8. 48E-16 ***

2. 2. 4 多因子模型验证

利用 mgcv 程序包 gam. check () 函数评估多因子模型的拟合效果(图 4). 从模型残差 QQ 图来看,

点近似直线分布,从残差直方图来看,残差均值近于 0,频数分布以 0 为中心,越靠近 0 频数越高,且两侧基本对称,可见模型残差近似正态分布. 从残差与预测值散点图来看,点基本呈随机分布状态,说明残差与预测值不相关. 从观测值与拟合值散点图来看,两者基本呈 y = x 直线分布,表明模型拟合后的响应变量和拟合值的匹配程度较高. 综上分析可知,本文拟定的多因子模型拟合效果较好.

2. 2. 5 影响因素解析

根据拟定的最优多因子 GAM 模型,获得了 PM_{2.5}浓度分布影响因子的影响效应图(图 5). 由图

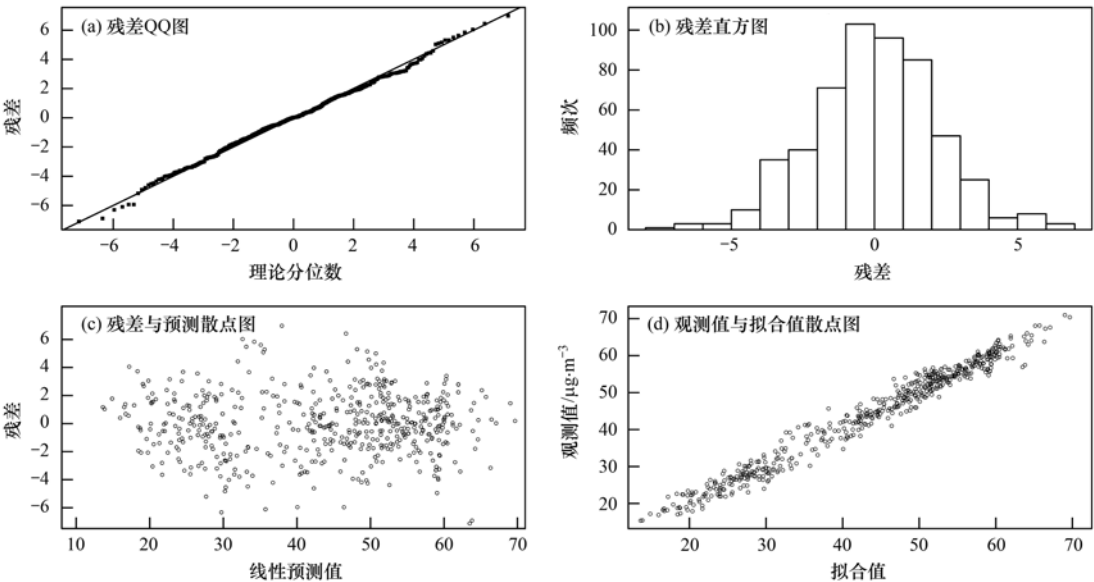
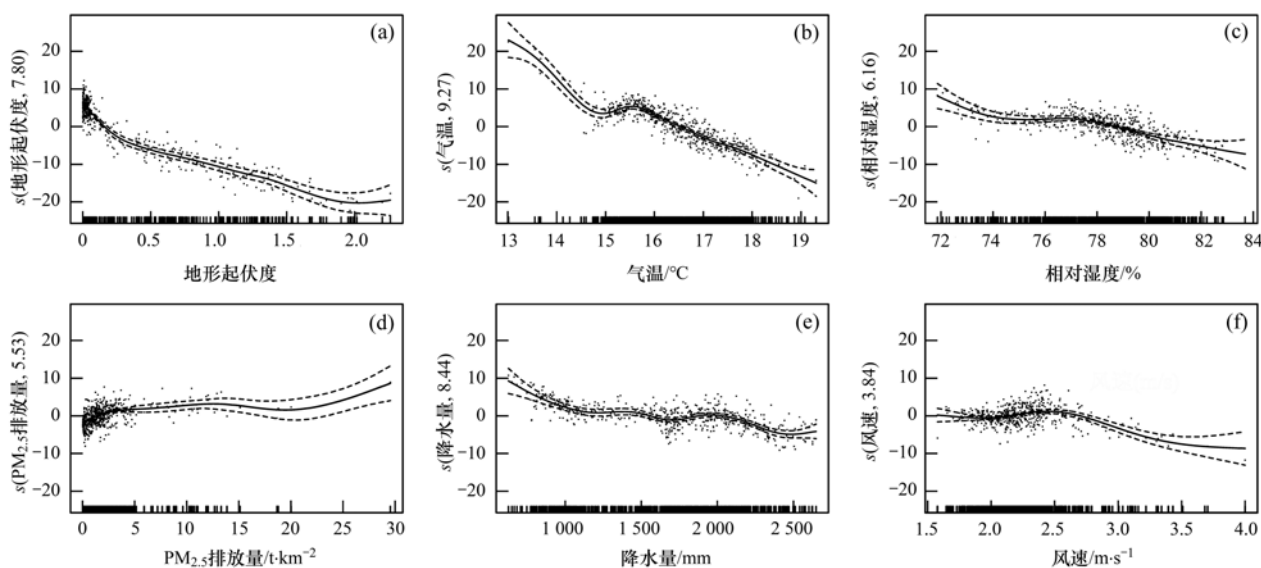


图 4 最优模型残差检验结果

Fig. 4 Residual test results of GAM

5 可知,选定因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 均有复杂的非线性关系。其中,地形起伏度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响主要呈负向[图 5(a)],地形起伏度 < 0.2 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随地形起伏度的增大而快速下降;地形起伏度 > 0.2 后, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降速度变缓。地形起伏度在单因子 GAM 模型中的拟合度最好(表 1),在多因子 GAM 模型中的 F 值最大(表 3),可见地形起伏度对长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布的影响力最大,这可能是因为地形起伏度对 $\text{PM}_{2.5}$ 的自然因子和人为排放因子都有影响造成的。一方面,地形是影响人口和产业分布的重要因素,人类主要生活在地形起伏度低的平原或低缓丘陵^[28],因而人类活动强度高、污染物排放量大, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较高。随着地形起伏度的增加,人类活动强度降低,污染物排放量呈下降趋势。另一方面,地形对风速、降水和植被等自然因素也有影响,地形起伏度一般随海拔的上升而上升^[27],海拔高的地区一般风速大、降水量大和植被覆盖度好,利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散和沉降。这是长三角南部,尤其是浙江中南部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低的原因之一,这里的地形以丘陵和山地为主[图 1(b)],地形起伏度大,经济发展水平较浙江北部低,污染物排放量相对较少。气温对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响也主要呈负向[图 5(b)],气温是影响大气污染物稀释和扩散能力的重要因素^[5,6],气温升高不仅能促使 $\text{PM}_{2.5}$ 布朗运动增强^[33],空气对流和湍流活动也相对活跃^[34],有利于大气污染物稀释和扩散,这是夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度普遍低于冬季的原因之一^[4]。长三角南北跨度大,年均气温相差约 5.0°C ,南部相对有利的大气扩散条件是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

相对较低的重要原因。一般而言,相对湿度的增加不仅有利于细气溶胶粒子吸湿增长,而且有助于细气溶胶通过运动达到过饱和状态活化为云雾的凝结核^[2];此外相对湿度的增加还会使气溶胶液相和非均相反应加强,引起气溶胶的浓度上升^[2],因而相对湿度一般与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有正相关关系^[35]。然而,从相对湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响效应来看[图 5(c)],相对湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响却主要呈负向。这可能与两方面的因素有关:一是与评价的空间尺度有关。从单个城市来看,相对湿度高确实更容易引发霾污染,尤其是霾污染最严重的冬季^[35]。但在多因素综合作用下,长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈北高南低的格局,而相对湿度总体上北低南高,其正向作用可能被其他因素抵消。二是已有研究表明,相对湿度并非一直与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈正相关关系,相对湿度超过一定阈值后,多利于 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降,引起 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降^[36]。长三角南部和沿海部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低,可能与相对湿度较高有关。 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有显著的正相关关系[图 5(d)],这是城镇 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于乡村的重要原因。由图 5(d) 可见,当 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量 $< 2 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随污染物排放量的增加快速上升; $\text{PM}_{2.5}$ 排放量 $\geq 2 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}$ 后, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随污染物排放量增加而上升的速度趋缓,这可能与大气的扩散和稀释有关。降水量对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响主要呈负向[图 5(e)], $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随降水量的增加波动下降。降水是大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 最有效的清除机制之一^[37],长三角降水量由南向北递度下降趋势明显[图 1(d)],这是长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度北高南低的重要原因。风速对



实线为解释变量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的平滑函数拟合;虚线为置信区间上下限;横坐标为解释变量观测值;

纵坐标为解释变量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的平滑函数拟合值

图 5 影响因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响效应

Fig. 5 Effect of influencing factors on the distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration

$\text{PM}_{2.5}$ 的影响可以分为两个阶段[图 5(f)], 风速 $< 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 风速对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响不大; 风速 $\geq 2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 随风速的下降而快速下降. 这可能是因为风速较小时, 风对污染物的稀释和扩散能力较弱^[7], 随着风速的增大, 风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著的负相关关系^[38]. 这可能是长三角东部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略小于西部的原因, 东部沿海地区不仅风速比西部相对更大[图 1(f)], 而且由海洋带来的洁净空气对污染物有重要的稀释作用.

2.3 影响因素的交互效应

长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 分布格局的形成是多因素共同作用的结果, 某一解释变量对 $\text{PM}_{2.5}$ 分布产生的影响可能取决于另一个解释变量的不同水平, 即解释变量间可能存在交互效应. 为厘清这种交互效应, 对影响因素两两间加入交互项, 采用逐步回归方法构建 GAM 模型. 鉴于相对湿度的影响可能被其他因子的

综合作用抵消, 本文仅探讨地形起伏度、气温、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量、降水量和风速间的交互效应. 建模结果显示, 除地形起伏度- $\text{PM}_{2.5}$ 排放量在建模过程中被剔除外, 其余交互项均通过了显著性检验. 将具有统计学意义的交互项可视化绘图(图 6), 用以分析 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在不同解释变量维度的分布变化特征. 图 6(a) 显示, 尽管地形起伏度和气温对 $\text{PM}_{2.5}$ 分布均有显著的负向影响, 但气温低的地区, 地形起伏度差异造成的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异更大, 气温较高的地区, 这种分异则相对较小. 地形起伏度小的地区, 气温差异引起的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异也更大, 地形起伏度大的地区, 这种分异也相对较小. 在二者都减小的情况下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度迅速上升, 尤其是在地形起伏度 < 0.6 、气温 $< 16^\circ\text{C}$ 后上升速度更快. 图 6(b) 显示, 在地形起伏度和降水量交互作用下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均随地形起伏度和降水量的增大而减小, 但在降水量小的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随地形起伏度的减小而增大的幅

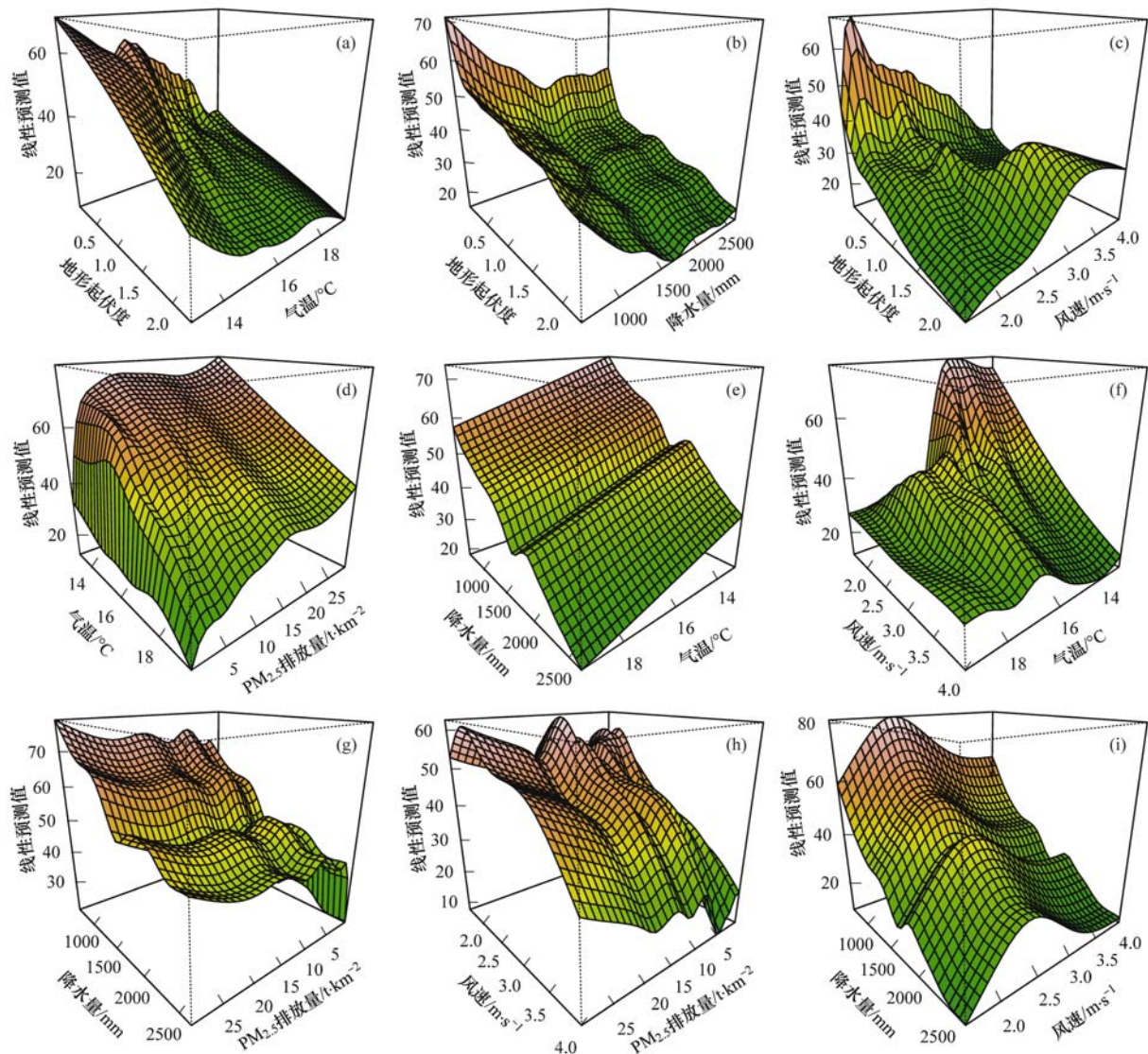


图 6 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布影响因素的三维效应

Fig. 6 Three-dimensional effect graph of influencing factors on the distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration

度较小;在降水量大的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 随地形起伏度的减小而增大的幅度更大.降水量 $>1600\text{mm}$ 时,地形起伏度相同的地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布对降水量变化不敏感, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的差异主要由地形起伏度引起;降水量 $\leq 1600\text{mm}$ 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随降水量减少而上升的同时,也随地形起伏度的减小而上升.图 6(c) 显示,地形起伏度较小的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随风速的增加主要呈下降趋势,地形起伏度较大的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随风速的增加而上升.这可能是因为,地形起伏度小的地区,人类活动强度大,是大气污染物输出地区,风速对区域 $\text{PM}_{2.5}$ 扩散和稀释有重要作用;而地形起伏度大的地区,人类活动强度小,是大气污染物的输入地区,风速大污染物输送能力强.图 6(d) 显示,气温低的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随污染物排放量的增大先快速上升,后趋于稳定;气温高的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随污染物排放量的增大呈平稳上升的态势.可能原因在于,气温低的地区污染物扩散能力弱, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对污染物排放量更敏感,而气温高的地区污染物扩散能力强,污染物排放量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响相对较小.图 6(e) 显示,降水量和气温对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布都有负向影响,且在气温相同的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 随降水量变化的趋势基本相同,在降水量相同的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 随气温变化的趋势也基本相同.但在二者同时减小时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升的趋势更明显.图 6(f) 显示,气温高的地区,风速对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响较小;随着气温降低,风速对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响逐渐加强, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随风速的增大而快速下降.风速较大的地区,气温对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响也不大;随着风速的减小, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随气温的减小而快速上升.图 6(g) 显示,降水量相同的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量的增加而波动上升, $\text{PM}_{2.5}$ 排放量相同的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随降水量的减少而波动上升.在降水量减少、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量增加的情况下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度波动上升的趋势更明显,叠加后二者对 $\text{PM}_{2.5}$ 分布的作用得到加强.图 6(h) 显示,在 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量较高的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随风速增加而递减的趋势明显低于 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量较低的地区;风速较高的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量的增加而上升的趋势也相对较缓.图 6(i) 显示,尽管降水量的变化未改变 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随风速的增加先升后降的变化特征,但在风速较小的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度基本随降水的增加而线性递减;风速较大的地区, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随降水量的增加呈波动下降趋势.可见,在风速较大的区域,由于风的稀释和扩散能力较强,降水对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除作用相对减弱.

3 结论

(1)2016 年长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度总体由北向南、由西向东以二次多项式曲线形式递减,但以南北向差异为主.长三角南部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较低, $\text{PM}_{2.5}$ 超标仅零星出现在城镇周围;北部相对较高, $\text{PM}_{2.5}$ 污染多呈连片状分布.

(2)气象因素、地形、植被和污染物排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布均有显著的非线性影响.其中,污染物排放量呈正向影响,是城镇 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对较高的主要原因;地形起伏度、气温和降水量主要呈负向影响,其南高北低的分布是造成长三角 $\text{PM}_{2.5}$ 北高南低的重要原因;风速 $< 2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时影响不大, $\geq 2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后有显著的负向影响,其东高西低的分布是造成 $\text{PM}_{2.5}$ 西高东低的重要原因.

(3)除地形起伏度- $\text{PM}_{2.5}$ 排放量外,其余因素两两间对 $\text{PM}_{2.5}$ 分布有显著的交互效应,某一解释变量的影响与另一个解释变量的不同水平有密切关系.

参考文献:

- [1] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [2] Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $\text{PM}_{2.5}$ mass reduction in key regions in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [3] 中国气象局. 大气环境气象公报(2018 年)[EB/OL]. <http://www.nmc.cn/userfiles/ueditor/userid/files/cms/article/2019/05/1557300207912.pdf? v = 1557300207986>, 2020-11-12.
- [4] 黄小刚,赵景波,曹军骥,等.长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 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 $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Yangtze River economic belt and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- [5] Guo J P, Xia F, Zhang Y, *et al.* Impact of diurnal variability and meteorological factors on the $\text{PM}_{2.5}$ -AOD relationship: Implications for $\text{PM}_{2.5}$ remote sensing[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **221**: 94-104.
- [6] Zhang Z Y, Zhang X L, Gong D Y, *et al.* Evolution of surface O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **108**: 67-75.
- [7] 贺祥,林振山.基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响[J]. *环境科学*, 2019, **38**(1): 22-32.
He X, Lin Z S. Interactive effects of the influencing factors on the changes of $\text{PM}_{2.5}$ concentration based on GAM model[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 22-32.
- [8] 黄小刚,邵天杰,赵景波,等.汾渭平原 $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [9] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing by PMF[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- [10] 陈刚, 刘佳媛, 皇甫延琦, 等. 合肥城区 PM₁₀ 及 PM_{2.5} 季节污染特征及来源解析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 1938-1946.
- Chen G, Liu J Y, Huangfu Y Q, *et al.* Seasonal variations and source apportionment of ambient PM₁₀ and PM_{2.5} at urban area of Hefei, China[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 1938-1946.
- [11] 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 等. 南京北郊冬季 PM_{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2436-2442.
- Zhang Y F, Ma Y, Qi L, *et al.* Determination and source apportionment of aromatic acids in PM_{2.5} from the northern suburb of Nanjing in winter[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2436-2442.
- [12] 贺瑶, 朱彬, 李锋, 等. 长江三角洲地区 PM_{2.5} 两种污染来源对比分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1213-1222.
- He Y, Zhu B, Li F, *et al.* Modeling study on the comparison of the impacts of two kinds of pollution source in a haze episode occurred over the Yangtze River Delta during late January, 2015 [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1213-1222.
- [13] Li L, An J Y, Zhou M, *et al.* Source apportionment of fine particles and its chemical components over the Yangtze River Delta, China during a heavy haze pollution episode [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 415-429.
- [14] Hadley O L. Background PM_{2.5} source apportionment in the remote Northwestern United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **167**: 298-308.
- [15] 屈超, 陈婷婷, 刘佳, 等. 中国典型城市 PM_{2.5} 浓度时空演变规律及影响因素分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(7): 1117-1125.
- Qu C, Chen T T, Liu J, *et al.* Spatio-Temporal characteristics of PM_{2.5} and influence factors in typical cities of China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(7): 1117-1125.
- [16] 毛婉柳, 徐建华, 卢德彬, 等. 2015 年长三角地区城市 PM_{2.5} 时空格局及影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(2): 264-272.
- Mao W L, Xu J H, Lu D B, *et al.* An analysis of the spatial-temporal pattern and influencing factors of PM_{2.5} in the Yangtze River Delta in 2015 [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2017, **26**(2): 264-272.
- [17] 孙丹丹, 杨书运, 王体健, 等. 长三角地区城市 O₃ 和 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析[J]. *气象科学*, 2019, **39**(2): 164-177.
- Sun D D, Yang S Y, Wang T J, *et al.* Characteristics of O₃ and PM_{2.5} and its impact factors in Yangtze River Delta[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2019, **39**(2): 164-177.
- [18] 汪聪聪, 王益澄, 马仁锋, 等. 经济集聚对雾霾污染影响的空间计量研究——以长江三角洲地区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(1): 1-11.
- Wang C C, Wang Y C, Ma R F, *et al.* Impact of economic agglomeration on pollution of smog based on spatial econometric model: the case study of Yangtze River Delta[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(1): 1-11.
- [19] 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.
- [20] 欧维新, 张振, 陶宇. 长三角城市土地利用格局与 PM_{2.5} 浓度的多尺度关联分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, **29**(7): 11-18.
- Ou W X, Zhang Z, Tao Y. Multi-scale correlation analysis of urban landscape pattern and PM_{2.5} concentration in the Yangtze River Delta[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, **29**(7): 11-18.
- [21] Pang X B, Mu Y J, Lee X Q, *et al.* Influences of characteristic meteorological conditions on atmospheric carbonyls in Beijing, China[J]. *Atmospheric Research*, 2009, **93**(4): 913-919.
- [22] Huang X F, Yun H, Gong Z H, *et al.* Source apportionment and secondary organic aerosol estimation of PM_{2.5} in an urban atmosphere in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(6): 1352-1362.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Liu F, Zhang Q, Tong D, *et al.* High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(13): 13299-13317.
- [26] 何斌, 梅士龙, 陆琛莉, 等. MEIC 排放清单在空气质量模式中的应用研究[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3658-3668.
- He B, Mei S L, Lu C L, *et al.* The application of MEIC emission inventory in air quality model[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3658-3668.
- [27] 柏中强, 王卷乐, 杨雅萍, 等. 基于乡镇尺度的中国 25 省区人口分布特征及影响因素[J]. *地理学报*, 2015, **70**(8): 1229-1242.
- Bai Z Q, Wang J L, Yang Y P, *et al.* Characterizing spatial patterns of population distribution at township level across the 25 provinces in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(8): 1229-1242.
- [28] Cliff A D, Ord J K. *Spatial processes: models and applications* [M]. London: Pion London, 1981.
- [29] Anselin L. Local indicators of spatial association-LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, **27**(2): 93-115.
- [30] Fang C L, Wang Z B, Xu G. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in China: a city-level perspective analysis[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, **26**(11): 1519-1532.
- [31] 张莹, 王式功, 贾旭伟, 等. 气温与 PM_{2.5} 协同作用对疾病急诊就诊人数的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(8): 3175-3182.
- Zhang Y, Wang S G, Jia X W, *et al.* Synergetic effect of mean temperature and PM_{2.5} on emergency room visits for different diseases[J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(8): 3175-3182.
- [32] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1535-

- 1543.
- Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Influencing factors of ozone concentration in Xi'an based on generalized additive models [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1535-1543.
- [33] Tallis M, Taylor G, Sinnett D, *et al.* Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, **103**(2): 129-138.
- [34] Li Z Q, Guo J P, Ding A J, *et al.* Aerosol and boundary-layer interactions and impact on air quality [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 810-833.
- [35] Guo L J, Guo X L, Fang C G, *et al.* Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, **58**(3): 329-344.
- [36] 王祎頔, 王真祥. 上海市 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征及其气象因子分析[J]. *干旱区地理*, 2018, **41**(5): 1088-1096.
- Wang Y D, Wang Z X. Characteristics of $PM_{2.5}$ concentration variability and its meteorological factors in Shanghai[J]. *Arid Land Geography*, 2018, **41**(5): 1088-1096.
- [37] Xu D H, Ge B Z, Wang Z F, *et al.* Below-cloud wet scavenging of soluble inorganic ions by rain in Beijing during the summer of 2014[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **230**: 963-973.
- [38] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Fine particulate ($PM_{2.5}$) dynamics during rapid urbanization in Beijing, 1973-2013[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep23604.



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)