

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12  
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分 ..... 闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启(5215)

2015~2018年我国PM<sub>2.5</sub>健康损害价值的动态评估 ..... 李惠娟, 周德群, 魏永杰(5225)

2011~2017年中国PM<sub>2.5</sub>多尺度时空分异特征分析 ..... 杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮(5236)

关中地区PM<sub>2.5</sub>时空演化及人口暴露风险 ..... 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨(5245)

中原城市冬季两次重污染形成机制及来源 ..... 贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉(5256)

西北工业城市冬季PM<sub>2.5</sub>污染特征及理化性质 ..... 杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽(5267)

基于PMF模型的PM<sub>2.5</sub>中金属元素污染及来源的区域特征分析 ..... 邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向铎鹏(5276)

重庆主城大气降尘中重金属污染特征及评价 ..... 张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达(5288)

鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析 ..... 孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞锋, 许彩琴(5295)

杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性 ..... 景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽(5306)

成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏(5316)

石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析 ..... 王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷(5325)

厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析 ..... 吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕(5336)

建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单 ..... 梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国(5345)

我国西北工业城市大气多氯联苯来源及健康风险 ..... 毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民(5352)

基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征 ..... 黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏(5362)

新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析 ..... 卓海华, 娄保锋, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静(5371)

三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征 ..... 钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠(5381)

衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价 ..... 张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮(5389)

宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征 ..... 崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌(5400)

梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析 ..... 江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀(5410)

汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子 ..... 赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发(5419)

山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险 ..... 王世亮, 曹雪雅(5428)

太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析 ..... 吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建(5438)

岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价 ..... 叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕(5448)

澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素 ..... 孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生(5458)

白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性 ..... 申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升(5470)

生物质粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响 ..... 王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠(5480)

Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>异质结构催化降解四环素-铜复合物 ..... 黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍(5488)

超滤膜负载UiO-66@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制 ..... 尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭(5500)

低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试 ..... 廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳(5509)

盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响 ..... 高京, 张少华, 王锐, 金鹏康(5518)

限NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和限NO<sub>2</sub><sup>-</sup>厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征 ..... 宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(5527)

厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性 ..... 闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送(5535)

二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能 ..... 毕薇薇, 阮书瑜, 陈吴傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖(5544)

中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析 ..... 赵靛, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫(5552)

我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术 ..... 窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明(5562)

晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明(5571)

广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价 ..... 叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章(5579)

胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果 ..... 王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊(5589)

毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能 ..... 赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩(5600)

大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解 ..... 杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5609)

1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性 ..... 韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍(5617)

铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征 ..... 贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏(5628)

生物质炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响 ..... 崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰(5636)

废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响 ..... 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姍, 杨林章(5648)

基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析 ..... 夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣驥(5656)

氮肥和秸秆还田方式对麦玉米轮作土壤N<sub>2</sub>O排放的影响 ..... 许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪(5668)

《环境科学》第41卷(2020年)总目录 ..... (5677)

《环境科学》征订启事(5344) 《环境科学》征稿简则(5361) 信息(5287, 5499, 5508)

## 2011 ~ 2017 年中国 PM<sub>2.5</sub> 多尺度时空分异特征分析

杨文涛<sup>1,2</sup>, 譙鹏<sup>2</sup>, 刘贤赵<sup>2</sup>, 雷雨亮<sup>3</sup>

(1. 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方联合工程实验室, 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院, 湘潭 411201; 3. 湖南农业大学经济学院, 长沙 410082)

**摘要:** PM<sub>2.5</sub> 时空分异特征认知对大气污染联防联控意义重大, 本文从空间多尺度的视角出发, 利用空间模式分析方法与地理探测器, 对 2011 ~ 2017 年中国大陆地区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度时空分布格局及成因进行探究, 从而揭示 PM<sub>2.5</sub> 多尺度时空分异特征。结果表明: ① 2011 ~ 2017 年 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度相对稳定, 无明显趋势, 国家与区域尺度 PM<sub>2.5</sub> 变化特征基本一致, 呈现“W”型变化, 整体上看, 污染程度由高到低依次为: 中部、东部、西部与东北。② 由空间模式分析结果可知, 高值聚集区主要位于中国的东部、中部以及新疆的西南地区, 低值聚集区则集中在青藏、云贵高原以及大兴安岭地区。③ 地理探测器分析结果证实: 城市化因素中人口密度是国家与区域尺度上 PM<sub>2.5</sub> 时空分异的主导因素, 同时, 产业、能耗与交通因素对 PM<sub>2.5</sub> 分布格局存在不同程度影响。在区域尺度上, 除了人口密度因素之外, 工业用电量与公车总量对中部地区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度影响较大, 东部地区是工业烟尘排放量与道路面积, 东北地区则为第二产业产值占比与城市绿地率, 社会经济因素对西部地区的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度影响不显著。

**关键词:** 大气污染; PM<sub>2.5</sub>; 时空分异; 地理探测器; 局部自相关

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5236-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005110

## Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM<sub>2.5</sub> in China from 2011 to 2017

YANG Wen-tao<sup>1,2</sup>, QIAO Peng<sup>2</sup>, LIU Xian-zhao<sup>2</sup>, LEI Yu-liang<sup>3</sup>

(1. National-Local Joint Engineering Laboratory of Geo-Spatial Information Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 2. School of Resource & Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Economic College, Hunan Agricultural University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** It is of great significance for joint prevention and control of air pollution to understand the spatial and temporal differentiation characteristics and regional driving factors of PM<sub>2.5</sub> in China. In this study, from a multi-scale perspective, the spatial pattern analysis and geographical detectors are used to explore the spatial and temporal distribution pattern and causes of PM<sub>2.5</sub> pollution in China mainland from 2011 to 2017. The results show that: ① the annual average PM<sub>2.5</sub> concentration is relatively stable from 2011 to 2017, and there is no obvious trend. The change characteristics of regional PM<sub>2.5</sub> are similar to those of national PM<sub>2.5</sub>, showing a “W” shaped fluctuation. Overall, the order of pollution degree from high to low is: central, eastern, western, and northeastern. ② From the spatial pattern analysis results, we can see that the high-value cluster mainly appears in east China, middle China, and southwest of Xinjiang, while the low-value cluster appears in Qinghai-Tibet, Yunnan, Guizhou, Plateau, and Daxinganling regions. ③ The results of geographic detector analysis show that the population factor is the leading factor nationally; meanwhile, the industrial, energy consumption, and traffic factors all contribute to the distribution pattern of PM<sub>2.5</sub> in varying degrees. Regionally, besides the population factor, the proportion of secondary production and urban green space rate have the greatest impact on the northeast, the industrial smoke and dust and road area in the east, and the total industrial electricity and buses in the central area. The impact of social and economic factors does not significantly affect the PM<sub>2.5</sub> in the western region.

**Key words:** air pollutant; PM<sub>2.5</sub>; spatio-temporal differentiation; geographical detector; local autocorrelation

当前,中国空气污染形势依旧严峻,由耶鲁大学等单位联合发布的《2018 全球环境绩效指数报告》可知,中国空气质量绩效较低,尤其是 PM<sub>2.5</sub> 暴露平均值与超标率指标成绩排名靠后,导致中国的环境绩效指数在全球 180 个国家与地区中位居 120 位,直接影响着中国经济由高速增长向高质量发展转型<sup>[1-3]</sup>,同时,频发的空气污染事件也已严重威胁到公民健康<sup>[4-6]</sup>。中国政府历来对生态环境问题保持高度重视,党的十九大报告中明确提出,“在经济的发展过程中完成污染物治理,将污染防治列为决胜全

面建成小康社会的三大攻坚战之一”<sup>[7]</sup>。因此,为切实改善当前中国空气污染严峻的形势,破解以 PM<sub>2.5</sub> 为主要特征的区域性大气污染难题,势必需要清楚掌握 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征与成因,进而为大气污染区域联防联控提供科学的决策信息支撑。

中国地域辽阔,由于社会经济与自然要素在时

收稿日期: 2020-05-12; 修订日期: 2020-06-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801311); 湖南省社会科学基金项目(18YBQ050, 18YBA151)

作者简介: 杨文涛(1988 ~),男,博士,讲师,主要研究方向为地理时空数据分析与挖掘, E-mail: yangwentao8868@126.com



地方之一,该区域的污染特征具有代表性,因此,利用辐射阈值法从夜间灯光遥感数据中提取城市建成区<sup>[29]</sup>,并以建成区包含格网中 PM<sub>2.5</sub> 浓度值作为该地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度值;④ 2011~2017 年中国社会经济数据,来源于《中国城市统计年鉴》,参考相关研究选取的变量包括:人口密度、城市建成区占比、城市绿地率、第二产业产值占比、第三产业从业人数、工业烟粉尘排放量、工业用电量、年末道路面积与年末公车总量(城市公交车与出租车的数量),缺失数据由地方统计数据填补,最终收集到 288 个城市完整数据集。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 空间自相关分析

本文利用局部 Moran's *I* 指数来分析 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度的局部空间自相关性,实现空间聚集模式识别<sup>[30]</sup>. 空间单元位置 *i* 对应的局部 Moran's *I* 指数可表示为:

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

式中,*n* 为研究区包含空间单元(本文为地级市)的数量;*x<sub>i</sub>* 与 *x<sub>j</sub>* 分别表示空间单元 *i* 与 *j* 中 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度值;是所有单元的平均值;*W<sub>ij</sub>* 为空间权重系数,若空间单元 *i* 与 *j* 存在空间邻近关系,则 *W<sub>ij</sub>* = 1, 否则 *W<sub>ij</sub>* = 0. 局部 Moran's *I* 指数的显著性水平可以用 *Z* 统计量来衡量,其表达式为:

$$Z(I_i) = \frac{[I_i - E(I_i)]}{\sqrt{\text{Var}(I_i)}} \quad (2)$$

式中,*E(I<sub>i</sub>)* 与 *Var(I<sub>i</sub>)* 分别为局部 Moran's *I* 指数的数学期望与方差. 通过 *I<sub>i</sub>* 的符号及 *Z(I<sub>i</sub>)* 的大小,可将空间单元划分两类空间聚集模式:若 *I<sub>i</sub>* 为正并且 *Z(I<sub>i</sub>)* > 1.96 (显著性水平设置为 0.05),空间单元 *i* 为“高-高”聚集类型,该单元和邻近单元 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度值均相对较高,为“热点”聚集区域;若 *I<sub>i</sub>* 为正并且 *Z(I<sub>i</sub>)* < -1.96,空间单元 *i* 为“低-低”类型,该单元和邻近单元 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度值均相对较低,为“冷点”聚集区域。

### 1.2.2 地理探测器分析

地理探测器是探查空间分异及揭示其背后驱动力的一组空间统计学方法体系,被广泛应用于社会经济、生态环境等领域中<sup>[31]</sup>. 其因子探测器可探测因变量 *Y* 的空间分异,以及某因子 *X* 多大程度上解释了 *Y* 的空间分异,表达式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2 \quad (3)$$

式中,*q* 为因子对变量 *Y* 的解释力;*i* = 1, 2, ..., *L* 表示因子或变量的分层(类/区);*σ<sub>i</sub><sup>2</sup>* 与 *σ<sup>2</sup>* 分别为第 *i* 层与全区 *Y* 值的方差;*N<sub>i</sub>* 与 *N* 分别表示 *i* 层与全区的样本个数. 若分层由变量 *Y* 生成,则 *q* 数值越大,表明变量 *Y* 的空间分异越明显;若分层由因子 *X* 产生,则 *q* 数值越大,表明该因子对变量 *Y* 的解释程度越高,可由 100 × *q*% 度量. *q* 的取值范围为 0 ~ 1, *q* 值为 0, 表示该因子与变量 *Y* 无关, *q* 值为 1, 表示该因子可以完全解释变量 *Y* 的空间分异. 进一步,通过非中心的 *F* 分布定义 *p* 值对 *q* 统计量进行显著性检验,若 *p* 值小于预设的显著性水平(0.05),则拒绝原假设(分层条件下 *Y* 变量呈现随机分布),而接受备选假设(分层条件下 *Y* 呈现空间聚集分布),否则, *q* 值不显著,没有充分的证据拒绝原假设。

## 2 中国 PM<sub>2.5</sub> 多尺度时空分异特征分析

### 2.1 中国 PM<sub>2.5</sub> 多尺度时空演化特征分析

依据 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度时间序列可知(图 2), 2011~2017 中国大陆城市整体 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度值在 40 μg·m<sup>-3</sup> 附近波动,年均浓度高于空气质量标准(GB 3095-2012)中城市浓度限值(35 μg·m<sup>-3</sup>),表现为“下降-上升-下降-上升”的“W”型演化特征. 各区域年平均浓度所处的水平存在明显的不同,按照整体水平由高到低依次为:中部、东部、西部与东北,各区域的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度变化特征与全国整体情况类似,亦为“W”型变化. 除东北地区外,各区域年平均浓度变化较为平稳,东北地区在 2012~2015 年间有较大幅度的上升。

基于空气质量标准(GB 3095-2012)中 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度一级(15 μg·m<sup>-3</sup>)与二级(35 μg·m<sup>-3</sup>)限值,将整个研究区分为低、中和高三类, 2011、2013、2015 以及 2017 年 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度空间分布如图 3

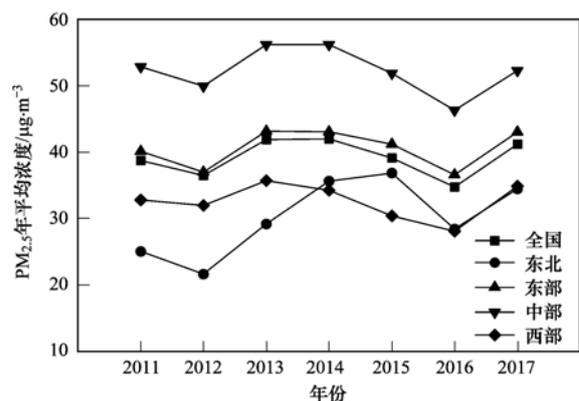


图 2 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度变化曲线

Fig. 2 Chang curve of the average mean concentration of PM<sub>2.5</sub>

所示,可以发现:中国 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度分布格局较为稳定,随时间变化不大. 其中,东部地区以长江下游近似为边界分为两类区域,以北的城市多为高浓度区,以南的城市多为中浓度区,珠三角部分地区表现为 PM<sub>2.5</sub> 高浓度聚集;中部城市多为 PM<sub>2.5</sub> 高浓度

区;东北地区的高浓度区域主要集中在哈尔滨、长春以及沈阳等省会城市及其周边,且从 2011 年开始有向外扩张的趋势,低浓度区域逐年减少;西部地区 PM<sub>2.5</sub> 高浓度聚集区主要位于成渝城市群,新疆、青海、甘肃与内蒙古交界处.

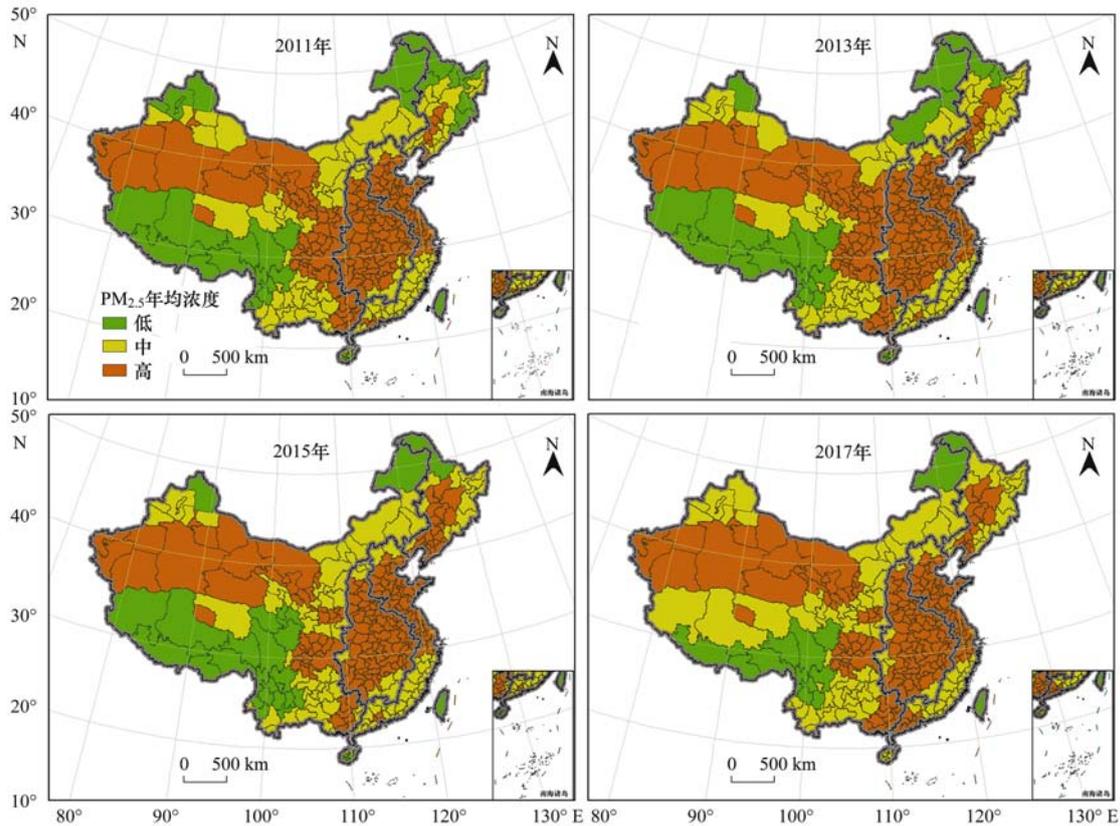


图3 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual average concentration of PM<sub>2.5</sub> in China

## 2.2 时空聚集模式分析

基于局部空间自相关分析 2011、2013、2015 与 2017 年 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度空间聚集模式分布,结果如图 4 所示. 中国 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度高值聚集区(“高-高”类型)主要位于东部、中部以及新疆西南地区;低值聚集区(“低-低”类型)主要出现在东北三省、青藏高原、云贵川地区以及中国南部沿海地区. 在区域尺度上,2011~2017 年东、中部地区的高值聚集区逐渐收缩,西部地区的高值聚集区则有扩张趋势,东北地区的低值聚集区范围逐渐减少,而西部的广西、贵州地区低值聚集区范围有所增加.

## 3 中国 PM<sub>2.5</sub> 污染多尺度成因分析

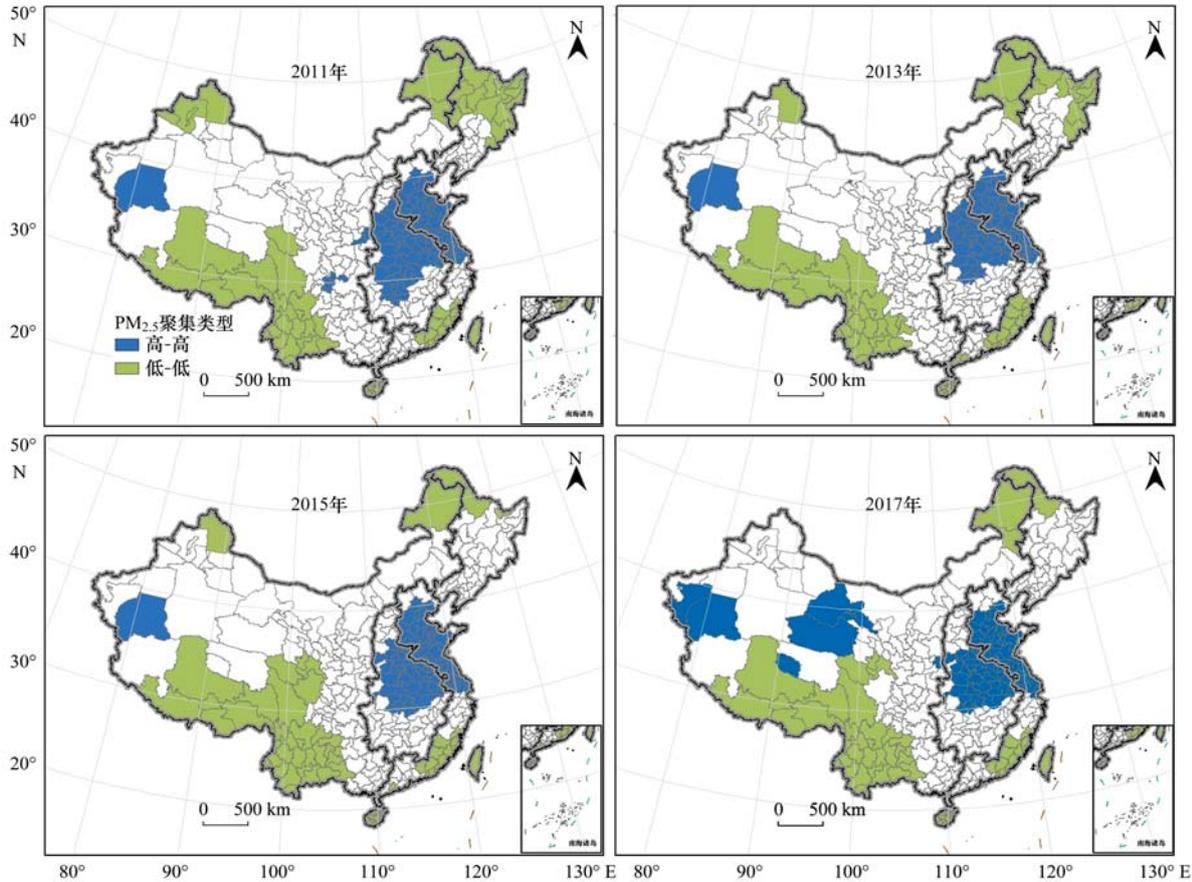
### 3.1 国家尺度 PM<sub>2.5</sub> 时空分异的成因分析

以 2011、2013、2015 与 2017 各年 288 个地级市的社会经济截面数据为分析对象,通过等频离散法对各因子分区离散化(4~5 类),利用地理探测器分析国家尺度上各因子对 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度空间分异

的影响程度, $q$  统计量及其对应的  $p$  值列于表 1.

(1) 城市化因素驱动 城市人口密度的  $q$  值分别为 40.34%、35.05%、33.35% 与 45.02%,呈“U”型变化,由于在所有因素中人口密度的  $q$  值是最大的,其对 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度的影响最大;城市建成区占比对 PM<sub>2.5</sub> 的影响程度仅次于人口密度,贡献度分别为 13.65%、13.87%、17.85% 与 17.61%,且随着城市建设的加快有明显上升趋势;城市绿地率的探测结果分别为 11.67%、13.40%、17.66% 与 18.42%,呈现上升趋势,由于植被的阻滞吸收作用对大气颗粒物移除存在积极影响<sup>[32]</sup>,故对 PM<sub>2.5</sub> 污染具有一定的缓解作用.

(2) 产业与能耗因素驱动 第二产业产值占比的  $q$  值分别为 4.87%、5.78%、7.45% 与 6.89%,第二产业对 PM<sub>2.5</sub> 的影响较为稳定,而第三产业从业人数对 PM<sub>2.5</sub> 的贡献度分别为 9.57%、7.84%、10.84% 与 13.22%,有一定的提升. 工业用电量的  $q$  值分别为 6.15%、6.13%、8.56% 与 7.59%,工业用

图 4  $PM_{2.5}$  空间聚集模式分布Fig. 4 Spatial aggregation distribution of  $PM_{2.5}$ 

电量的贡献度较为稳定,工业烟粉尘排放量的贡献度分别为 8.43%、3.91%、5.93% (不显著) 以及 1.12% (不显著),对  $PM_{2.5}$  浓度的影响减弱。其原因可能是,在 2011~2015 年的第十二个五年计划中包括了工业转型升级规划,明确提出以科学发展为主题,大力发展新型技术,推动工业转型升级,由此在一定程度上提高了生产效率,减少了工业污染的产生。

(3) 交通因素驱动 年末道路面积的  $q$  值分别为 12.24%、9.82%、15.31% 以及 14.43%,城市公

车总量的  $q$  分别为 5.60%、7.65%、12.5% 与 8.15%,年末道路面积与城市道路面积大致可以反映城市公共交通的情况,自 2011 到 2015 年该指标对  $PM_{2.5}$  浓度的贡献度保持着上升的趋势,但到 2017 年,又有了一定幅度的下降,而事实上,到 2016 年底,全国新能源公交车的使用已经较为普及,其总量已经超过了 16 万辆,新能源出租车的数量也在逐渐增加,随着新能源公交车与出租车的推广,该因子对  $PM_{2.5}$  的影响或许还会进一步下降。

表 1 中国  $PM_{2.5}$  污染成因全局探测结果Table 1 Results of global detection of the causes of  $PM_{2.5}$  pollution in China

类型(中国)	探测因子	2011 年		2013 年		2015 年		2017 年	
		$q$ 值	$p$ 值						
城市化因素	人口密度	0.403 4	0.000 0	0.350 5	0.000 0	0.333 5	0.000 0	0.450 2	0.000 0
	城市建成区占比	0.136 5	0.000 0	0.138 7	0.000 0	0.178 5	0.000 0	0.176 1	0.000 0
	城市绿地率	0.116 7	0.000 0	0.134 0	0.000 0	0.176 6	0.000 0	0.184 2	0.000 0
产业与能耗因素	第二产业产值占比	0.048 7	0.012 6	0.057 8	0.004 2	0.074 5	0.000 0	0.068 9	0.004 2
	第三产业从业人数	0.095 7	0.000 0	0.078 4	0.000 0	0.108 4	0.000 0	0.132 2	0.000 0
	工业烟粉尘排放量	0.084 3	0.000 0	0.039 1	0.033 4	0.059 3	0.006 5	0.011 2	0.634 9
交通因素	工业用电量	0.061 5	0.003 0	0.061 3	0.003 1	0.085 6	0.000 0	0.075 9	0.000 0
	年末道路面积	0.122 4	0.000 0	0.098 2	0.000 0	0.153 1	0.000 0	0.144 3	0.000 0
	年末公车总量	0.056 0	0.005 1	0.076 5	0.000 0	0.125 0	0.000 0	0.081 5	0.000 0

### 3.2 区域尺度 PM<sub>2.5</sub> 时空分异的成因分析

为进一步揭示中国 PM<sub>2.5</sub> 年均污染的空间分异特征, 本文对东北、东部、中部以及西部地区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度分别进行空间分异因子探测, 以此对 PM<sub>2.5</sub> 的分区管控提出针对性的建议。

(1) 东北地区 由因子探测结果可知(表 2), 2011 年满足显著性水平要求的因素包括: 人口密度、建成区占比与绿地率、第二产业产值占比、工业烟粉尘排放量与工业用电量六项指标, 其  $q$  值分别为 76.54%、63.19%、41.76%、29.85%、27.04% 与 26.27%。人口密度的贡献度远高于其它各项贡献度, 建成区占比与绿地率的贡献度也相对较

高, 能耗相关的两项指标  $q$  值虽不及这三项指标, 但对 PM<sub>2.5</sub> 浓度仍有一定的影响, 第二产业产值占比与第三产从业人数的影响变化较大, 表明其产业结构正在调整优化。2011 年之后, 建成区占比与工业烟粉尘排放量的影响持续下降, 建成区占比与工业烟粉尘排放量分别从 2011 年的 63.19% 和 27.04% 降低到 2017 年的 21.22% 和 2.13%, 而道路面积与工业用电量的影响则有所提, 对该地区来说, 优化工业结构, 提升技术创造性, 建设现代化工业是管控 PM<sub>2.5</sub> 有效的措施之一, 同时, 在城市建设中, 加强绿化建设的力度可能也会取得良好的控制效果。

表 2 东北地区 PM<sub>2.5</sub> 污染成因局部探测结果

Table 2 Results of local detection of the causes of PM<sub>2.5</sub> pollution in northeast China

类型(东北)	探测因子	2011 年		2013 年		2015 年		2017 年	
		$q$ 值	$p$ 值						
城市化因素	人口密度	0.765 4	0.000 0	0.733 9	0.000 0	0.575 8	0.002 0	0.615 1	0.000 0
	城市建成区占比	0.631 9	0.000 0	0.564 0	0.000 0	0.547 1	0.000 0	0.212 2	0.061 1
	城市绿地率	0.417 6	0.003 7	0.461 2	0.002 8	0.283 7	0.047 9	0.423 4	0.002 4
产业与能耗因素	第二产业产值占比	0.298 5	0.021 9	0.369 7	0.010 8	0.363 7	0.022 4	0.218 7	0.048 4
	第三产业从业人数	0.131 1	0.182 9	0.348 2	0.018 4	0.602 5	0.000 0	0.252 9	0.133 5
	工业烟粉尘排放量	0.274 0	0.024 8	0.120 0	0.247 1	0.340 3	0.036 2	0.021 3	0.767 9
	工业用电量	0.262 7	0.031 0	0.180 2	0.138 2	0.309 3	0.055 1	0.395 6	0.007 1
交通因素	年末道路面积	0.235 6	0.055 8	0.264 4	0.055 4	0.437 9	0.008 3	0.440 3	0.003 1
	年末公车总量	0.188 5	0.085 7	0.151 3	0.178 2	0.402 4	0.025 8	0.212 4	0.116 9

(2) 东部地区 由表 3 中列出的因子探测结果可知, 大多数探测因子都对 PM<sub>2.5</sub> 空间分异有一定程度的贡献。人口密度 ( $q$  值为 19.00%、22.77%、14.39% 与 21.82%) 与工业烟粉尘排放量 ( $q$  值为 24.36%、19.80% 与 18.50%, 2017 年不显著) 是 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度时空分异的主要影响因

素, 公车总量与道路面积也有较大的贡献度。与东北地区不同的是, 人口密度的贡献度只有 20% 左右, 远小于其对东北地区 PM<sub>2.5</sub> 的影响程度, 可见东部地区 PM<sub>2.5</sub> 的成因要复杂得多, 故该区域 PM<sub>2.5</sub> 的防控应有针对性加快产业转型, 提高第三产业的发展力度。

表 3 东部地区 PM<sub>2.5</sub> 污染成因局部探测结果

Table 3 Results of local detection of the causes of PM<sub>2.5</sub> pollution in eastern China

类型(东部)	探测因子	2011 年		2013 年		2015 年		2017 年	
		$q$ 值	$p$ 值						
城市化因素	人口密度	0.190 0	0.000 0	0.227 7	0.000 0	0.143 9	0.006 3	0.218 2	0.000 0
	城市建成区占比	0.039 0	0.214 4	0.087 8	0.036 0	0.041 6	0.204 7	0.127 3	0.011 6
	城市绿地率	0.073 7	0.062 8	0.118 6	0.011 2	0.063 5	0.093 0	0.098 6	0.043 1
产业与能耗因素	第二产业产值占比	0.124 0	0.010 3	0.114 7	0.014 3	0.054 7	0.132 3	0.037 7	0.294 6
	第三产业从业人数	0.098 1	0.024 1	0.114 2	0.013 8	0.057 9	0.117 8	0.128 7	0.017 6
	工业烟粉尘排放量	0.243 6	0.000 0	0.198 0	0.000 0	0.185 0	0.000 0	0.056 2	0.164 3
	工业用电量	0.094 9	0.029 2	0.158 1	0.003 0	0.087 1	0.044 7	0.182 0	0.002 7
交通因素	年末道路面积	0.138 0	0.006 3	0.144 5	0.004 6	0.135 3	0.008 6	0.187 7	0.002 7
	年末公车总量	0.162 1	0.002 4	0.138 3	0.005 7	0.072 8	0.064 9	0.249 1	0.000 0

(3) 中部地区 由因子探测结果可知(表 4), 中部地区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度空间分异的关联因子不多, 满足显著水平要求的因素有人口密度、公车总量与工业用电量。人口密度依旧处于主导地位,  $q$  值分别为 53.81%、57.09%、58.24% 与 68.32%, 各年均达到 50% 以上, 公车总量与工业用电量次之。随着时

间的推移, 人口因素和城市建成区的影响逐渐上升, 城市的扩张会带来更多的人口, 人口的增多又会加快城市的扩张, 这是一个相互促进的过程, 但带给环境的负担可能是双倍的, 因此, 在城市扩张的同时也必须进一步增加城市绿化, 还需制定合理的人口政策, 让人口增长与城市的发展相适应。

表 4 中部地区 PM<sub>2.5</sub> 污染成因局部探测结果Table 4 Results of local detection of the causes of PM<sub>2.5</sub> pollution in central China

类型(中部)	探测因子	2011年		2013年		2015年		2017年	
		q 值	p 值	q 值	p 值	q 值	p 值	q 值	p 值
城市化因素	人口密度	0.538 1	0.000 0	0.570 9	0.000 0	0.582 4	0.000 0	0.683 2	0.000 0
	城市建成区占比	0.064 8	0.093 0	0.081 7	0.055 5	0.082 0	0.086 3	0.243 0	0.000 0
	城市绿地率	0.030 8	0.310 0	0.056 2	0.123 6	0.049 4	0.219 7	0.137 7	0.010 2
产业与能耗因素	第二产业产值占比	0.051 4	0.154 5	0.029 0	0.342 9	0.011 2	0.671 6	0.112 1	0.0259
	第三产业从业人数	0.037 4	0.256 4	0.024 8	0.398 0	0.038 0	0.270 5	0.021 7	0.481 9
	工业烟粉尘排放量	0.042 2	0.204 5	0.005 8	0.800 4	0.025 0	0.416 6	0.060 7	0.161 2
	工业用电量	0.101 3	0.028 0	0.143 8	0.006 3	0.117 4	0.021 5	0.038 3	0.324 6
交通因素	年末道路面积	0.037 6	0.253 1	0.011 6	0.645 4	0.021 6	0.506 4	0.048 1	0.202 3
	年末公车总量	0.191 8	0.000 0	0.121 4	0.013 9	0.080 7	0.085 8	0.118 1	0.027 1

(4) 西部地区 由表 5 所给出的探测结果可知,仅有人口密度(*q* 值为 28.07%、20.70% 与 19.55%, 2017 年不显著)能够解释 PM<sub>2.5</sub> 的空间分异,其它因子都无显著贡献。西部地广人稀,土地面积占全国的 71.4%,人口却仅占 26.92%,由于气候、

地理因素,西部发展落后,社会经济水平远低于其他区域,社会经济因素对西北地区污染影响较低,自然因素(如:沙尘)可能占主导作用,该区域应该加强沙漠化治理,在发展经济的同时更要注重环境的保护,否则其空气污染的加剧只会比其他区域更快。

表 5 西部地区 PM<sub>2.5</sub> 污染成因局部探测结果Table 5 Results of local detection of the causes of PM<sub>2.5</sub> pollution in western China

类型(西部)	探测因子	2011年		2013年		2015年		2017年	
		q 值	p 值	q 值	p 值	q 值	p 值	q 值	p 值
城市化因素	人口密度	0.280 7	0.000 0	0.207 0	0.000 0	0.195 5	0.000 0	0.100 4	0.075 3
	城市建成区占比	0.038 6	0.233 7	0.054 4	0.126 2	0.046 8	0.181 5	0.002 1	0.936 3
	城市绿地率	0.041 3	0.214 9	0.021 0	0.441 6	0.051 8	0.161 9	0.018 5	0.574 3
产业与能耗因素	第二产业产值占比	0.043 2	0.198 0	0.038 2	0.225 3	0.036 4	0.252 2	0.019 2	0.550 2
	第三产业从业人数	0.015 4	0.559 5	0.000 6	0.975 6	0.020 8	0.473 6	0.049 7	0.214 7
	工业烟粉尘排放量	0.037 3	0.265 6	0.065 2	0.084 5	0.009 9	0.688 7	0.023 1	0.484 5
	工业用电量	0.009 5	0.702 3	0.000 9	0.965 5	0.010 3	0.676 1	0.022 9	0.503 5
交通因素	年末道路面积	0.029 8	0.337 2	0.018 0	0.496 4	0.041 4	0.225 0	0.021 9	0.512 5
	年末公车总量	0.088 7	0.064 0	0.021 1	0.435 3	0.040 8	0.227 2	0.004 9	0.863 9

#### 4 结论

(1) 中国大陆地区 2011 ~ 2017 年间 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度呈平稳变化特征,但其值仍高于《空气质量标准(GB 3095-2012)》中 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度 II 级限值,各区域 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度变化与全国变化基本保持一致,但是,污染程度存在明显的空间分异,由高到低依次为:中部、东部、西部以及东北部。

(2) 中国大陆地区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度呈现显著正向空间自相关,高值聚类区则主要位于东部、中部以及新疆西南地区,低值聚类区主要出现在东北三省、青藏高原、云贵川地区以及中国最南部地区,总体来说,高值与低值聚集区相对稳定,但高值聚集范围有所增加,而低值聚集类型城市数量有所减少。

(3) 城市化因素是国家尺度上 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分异的主导因素,且城市化与产业结构因素的影响程度逐年增加,工业能耗则呈现相反趋势。在区域尺度上,人口因素是 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度的强相关因素,在各区域的占主导地位,第二产业产值占比与城市

绿地率对东北地区影响较大,东部地区是工业烟粉尘排放量与道路面积,中部地区则是工业用电量与公车总量,西部地区社会经济因素对 PM<sub>2.5</sub> 影响并不显著。

#### 参考文献:

- [1] Wendling Z, Emerson D, Emerson J, et al. 2018 environmental performance index [R]. New Haven, CT: Yale Center for Environmental Law and Policy, 2018.
- [2] 董战峰,郝春旭,王婷,等. 中国省级区域环境绩效评价方法研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(2): 86-90.  
Dong Z F, Hao C X, Wang T, et al. Provincial regional environmental performance assessment method of China [J]. Environmental Pollution & Control, 2016, 38(2): 86-90.
- [3] 董战峰,郝春旭,李红祥,等. 2018 年全球环境绩效指数报告分析[J]. 环境保护, 2018, 46(7): 64-69.  
Dong Z F, Hao C X, Li H X, et al. Analysis on the 2018 global environmental performance index report [J]. Environmental Protection, 2018, 46(7): 64-69.
- [4] 王文朋,沈惠平,黄云彪,等. 大气 PM<sub>2.5</sub> 细颗粒物污染状况及对人体健康的影响[J]. 上海预防医学, 2015, 27(5): 290-294, 297.  
Wang W P, Shen H P, Huang Y B, et al. Pollution status of atmospheric PM<sub>2.5</sub> and its impact on human health [J]. Shanghai

- Journal of Preventive Medicine, 2015, **27**(5): 290-294, 297.
- [ 5 ] 索丹凤, 曾三武. 空气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 对人体各系统危害的研究[J]. 医学信息, 2019, **32**(18): 32-34.
- Suo D F, Zeng S W. Research on the harm of air fine particulate matter PM<sub>2.5</sub> to various human systems[J]. Medical Information, 2019, **32**(18): 32-34.
- [ 6 ] Weichenthal S, Hoppin J A, Reeves F. Obesity and the cardiovascular health effects of fine particulate air pollution[J]. Obesity, 2014, **22**(7): 1580-1589.
- [ 7 ] 宋弘, 孙雅洁, 陈登科. 政府空气污染治理效应评估——来自中国“低碳城市”建设的经验研究[J]. 管理世界, 2019, **35**(6): 95-108, 195.
- Song H, Sun Y J, Chen D K. Assessment for the effect of government air pollution control policy: Empirical evidence from “low-carbon city” construction in China[J]. Management World, 2019, **35**(6): 95-108, 195.
- [ 8 ] 周静, 张岳军, 相栋, 等. 太原市 PM<sub>2.5</sub> 周期性特征及其成因分析[J]. 生态环境学报, 2018, **27**(3): 527-532.
- Zhou J, Zhang Y J, Xiang D, et al. The periodicity and cause analysis of PM<sub>2.5</sub> in Taiyuan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(3): 527-532.
- [ 9 ] 陆平, 赵雪艳, 殷宝辉, 等. 临沂市 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中元素分布特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2036-2043.
- Lu P, Zhao X Y, Yin B H, et al. Distribution characteristics and source apportionment of elements bonded with PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Linyi[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2036-2043.
- [ 10 ] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014 年中国城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2017, **74**(11): 1720-1734.
- Wang Z B, Fang C L, Xu G, et al. Spatial-temporal characteristics of the PM<sub>2.5</sub> in China in 2014 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **74**(11): 1720-1734.
- [ 11 ] 杨文涛, 姚诗琪, 邓敏, 等. 北京市 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征及其与 PM<sub>10</sub> 关系的时空变异特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 684-690.
- Yang W T, Yao S Q, Deng M, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and spatio-temporal variation characteristics of the relationship between PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Beijing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 684-690.
- [ 12 ] 蔡坤, 郑泰皓, 陈良富, 等. 河南省 2005 ~ 2015 年 NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 时空变化遥感解析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(12): 4417-4427.
- Cai K, Zheng T H, Chen L F, et al. Remote sensing analysis of spatio-temporal variation of NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> during 2005 throughout 2015 over Henan province[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(12): 4417-4427.
- [ 13 ] 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 等. 2014 ~ 2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- Yin X M, Li Z M, Xiong Y J, et al. Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing during 2014-2017 [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] 李明燕, 杨文, 魏敏, 等. 典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1550-1560.
- Li M Y, Yang W, Wei M, et al. Characteristics and sources apportionment of fine particulate matter in a typical coastal city during the heating period[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1550-1560.
- [ 16 ] 付宏臣, 孙艳玲, 陈莉, 等. 基于 AOD 数据与 GWR 模型的 2016 年新疆地区 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 27-35.
- Fu H C, Sun Y L, Chen L, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Xinjiang region in 2016 based on AOD data and GWR model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(1): 27-35.
- [ 17 ] 杨文涛, 黄慧坤, 魏东升, 等. 大气污染联合治理分区视角下的中国 PM<sub>2.5</sub> 关联关系时空变异特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2066-2074.
- Yang W T, Huang H K, Wei D S, et al. Spatio-temporal variation of PM<sub>2.5</sub> related relationships in China from the perspective of air pollution regional linkage control and prevention [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2066-2074.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 周亮, 周成虎, 杨帆. 2000-2011 年中国 PM<sub>2.5</sub> 时空演化特征及驱动因素解析[J]. 地理学报, 2017, **72**(17): 2079-2092.
- Zhou L, Zhou C H, Yang F, et al. Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM<sub>2.5</sub> in China between 2000 and 2011 [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(17): 2079-2092.
- [ 20 ] 周敏丹, 匡耀求, 云国梁. 基于地理探测器的广州市大气 PM<sub>2.5</sub> 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<sub>2.5</sub> concentration in Guangzhou city based on Geo-detector[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(2): 271-279.
- [ 21 ] 周磊, 武建军, 贾瑞静, 等. 京津冀 PM<sub>2.5</sub> 时空分布特征及其污染风险因素[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(4): 483-493.
- Zhou L, Wu J J, Jia R J, et al. Investigation of temporal-spatial characteristics and underlying risk factors of PM<sub>2.5</sub> pollution in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(4): 483-493.
- [ 22 ] 刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 等. 常州夏季 PM<sub>2.5</sub> 中无机组分昼夜变化特征与来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 980-989.
- Liu J S, Gu Y, Ma S S, et al. Day-night differences and source apportionment of inorganic components of PM<sub>2.5</sub> during summer-winter in Changzhou city[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 980-989.
- [ 23 ] 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 等. 兰州市燃煤污染物排放清单及其对 PM<sub>2.5</sub> 浓度贡献[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 4849-4857.
- Guo W K, Liu X, Zhu Y F, et al. Emissions inventory of smoldering Chinese Kangs and their contribution to PM<sub>2.5</sub> pollution in Lanzhou city[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 4849-4857.
- [ 24 ] 黄俊, 王超群, 周宝琴. 广州 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及与气象因子

- 的关系分析[J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(2): 176-181, 186.
- Huang J, Wang C Q, Zhou B Q, *et al.* Characteristics of PM<sub>2.5</sub> pollution and its relationship with meteorological factors in Guangzhou[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, **42**(2): 176-181, 186.
- [25] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时间特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2017, **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, 2017, **73**(1): 177-191.
- [26] 薛婕, 罗宏, 吕连宏, 等. 中国主要大气污染物和温室气体的排放特征与关联性[J]. 资源科学, 2012, **34**(8): 1452-1460.
- Xue J, Luo H, Lv L H, *et al.* Emission characteristics and correlation of main air pollutant and greenhouse gas in China[J]. Resources Science, 2012, **34**(8): 1452-1460.
- [27] 许菁. 我国区域碳排放影响因素研究[J]. 统计与决策, 2014, (8): 92-94.
- Xu J. Research on influencing factors of regional carbon in China [J]. Statistics and Decision, 2014, (8): 92-94.
- [28] 高雪莲, 王佳琪, 张迁, 等. 环境管制是否促进了城市产业结构优化? ——基于“两控区”政策的准自然实验[J]. 经济地理, 2019, **39**(9): 122-128, 137.
- Gao X L, Wang J Q, Zhang Q, *et al.* Could environmental control optimize urban industrial structure? Evidence from a quasi-natural experiment of “two control zones” policy in China [J]. Economic Geography, 2019, **39**(9): 122-128, 137.
- [29] 汪韬阳, 张过, 李沛然, 等. 基于 DMSP/OLS 夜光遥感影像的城市扩张政策驱动因素分析[J]. 测绘学报, 2018, **47**(11): 1466-1473.
- Wang T Y, Zhang G, Li P R, *et al.* Analysis on the driving factors of urban expansion policy based on DMSP/OLS remote sensing image [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, **47**(11): 1466-1473.
- [30] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. Geographical Analysis, 1995, **27**(2): 93-115.
- [31] 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.
- [32] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(8): 2203-2210.
- Zhao C X, Wang Y J, Wang Y Q, *et al.* Interactions between fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) and vegetation: a review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, **32**(8): 2203-2210.



## CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China .....	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM <sub>2.5</sub> Health Damage Value in China from 2015 to 2018 .....	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in China from 2011 to 2017 .....	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM <sub>2.5</sub> in the Guanzhong Area .....	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City .....	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM <sub>2.5</sub> in a Northwest Industrial City .....	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM <sub>2.5</sub> and Its Sources Based on the PMF Model .....	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing .....	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China .....	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu .....	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O <sub>3</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen .....	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives .....	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China .....	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower .....	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions .....	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area .....	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City .....	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin .....	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin .....	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province .....	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake .....	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater .....	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers .....	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake .....	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar .....	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi <sub>2</sub> MoO <sub>6</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Heterojunction .....	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @UiO-66 .....	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons .....	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW .....	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems .....	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria .....	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide .....	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China .....	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China .....	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong .....	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils .....	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils .....	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota .....	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium .....	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings .....	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach ( <i>Ipomoea aquatica</i> Forss.) Irrigated with Reclaimed Water .....	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake .....	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model .....	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N <sub>2</sub> O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils .....	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)