

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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)
重庆主城区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, 李瑞峰, 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)
我国西北工业区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, 姜保峰, 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, 曹雪稚 (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)
生物炭粒径对负载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 ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 异质结光催化降解四环素-铜复合物	黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍 (5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe ₃ O ₄ @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 ₄ ⁺ 和限NO ₂ ⁻ 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, 陈昊傲啸, 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	赵靓, 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, 余嫒, 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, 李鸣骥 (5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N ₂ 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)	

关中地区 PM_{2.5} 时空演化及人口暴露风险

黄晓军^{1,2,3}, 祁明月¹, 李艳雨¹, 王森^{1,2,3}, 黄馨⁴

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 3. 陕西西安城市生态系统定位观测研究站, 西安 710127; 4. 长安大学土地工程学院, 西安 710054)

摘要: 近年来以细颗粒物 PM_{2.5} 为代表的大气污染已给人体健康带来严重风险. 基于 PM_{2.5} 遥感反演数据和人口格网分布数据, 测度关中地区人口暴露于 PM_{2.5} 的风险程度, 并采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验和空间自相关分析等方法, 探索 2000~2016 年关中地区 PM_{2.5} 及人口暴露风险的时空演化过程. 结果表明: ①2006、2007 和 2013 年关中地区污染重且范围广, 这 3 a 在 40% 以上区域 PM_{2.5} 年均质量浓度超过了 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的限值, 2000~2016 年关中地区 PM_{2.5} 空间分布范围不断扩大, 形成了自中部向东北部的连续带状集中分布区; ②2000~2016 年, 关中地区几乎每年都有超过 60% 的人口暴露在 PM_{2.5} 年均 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 质量浓度限值以上, 且人口暴露风险不断加剧, 尤其是 2011 年后, 人口暴露的高风险区范围持续增加; ③2000~2016 年关中地区 PM_{2.5} 人口暴露风险格局大体相似, 较高等级以上风险区主要集中在关中地区中部, 东西方向上形成连续的带状分布区, 高值区集中在几个主要城市的中心城区, 低值区则主要分布在关中地区周边广大区域.

关键词: PM_{2.5}; 时空演化; 人口暴露风险; 关中地区; Theil-Sen 趋势分析

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2020)12-5245-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202004189

Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM_{2.5} in the Guanzhong Area

HUANG Xiao-jun^{1,2,3}, QI Ming-yue¹, LI Yan-yu¹, WANG Sen^{1,2,3}, HUANG Xin⁴

(1. College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 3. Shaanxi Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, Xi'an 710127, China; 4. College of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: In recent years, atmospheric pollution represented by fine particulate matter PM_{2.5} pollution has seriously threatened human health. Therefore, it is important to identify the risk level of population exposure to PM_{2.5}. Based on PM_{2.5} remote sensing inversion data and population distribution, this study measured the risk level of population exposure to PM_{2.5} in the Guanzhong area. Furthermore, the methods of Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall test, and geo-spatial analysis were used to reveal the temporal and spatial characteristics of population exposures risk to PM_{2.5} in the Guanzhong area from 2000 to 2016. The results show that: ①The years with heavy pollution and wide range in the Guanzhong area are 2006, 2007, and 2013, and the annual average concentration of PM_{2.5} exceeded 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in more than 40% of the Guanzhong area. From 2000 to 2016, the spatial distribution range of PM_{2.5} in the Guanzhong area continued to expand, forming a continuous belt-shaped concentrated distribution area from the center to the northeast. ②More than 60% of the population in the Guanzhong area was exposed in the areas with annual average concentration of PM_{2.5} above 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ from 2000 to 2016, and the population exposure risk continued to increase, especially after 2011, the range of the high-risk area expanded dramatically. ③The pattern of population exposure risk to PM_{2.5} in the Guanzhong area was generally similar from 2000 to 2016. The areas with higher risk levels were mainly concentrated in the central Guanzhong area, forming a continuous belt-shaped distribution area from west to east. The areas with the highest value were distributed in the urban areas of several major cities, while the areas with the lowest value were mainly concentrated in the surrounding areas of Guanzhong.

Key words: PM_{2.5}; spatial and temporal evolution; population exposure risk; Guanzhong area; Theil-Sen Median trend analysis

改革开放以来,中国社会经济实现了快速发展,工业化和城市化水平不断提高,随之也产生了许多环境问题,特别是近年来各地频繁出现的灰霾天气,给中国空气质量带来严峻挑战,也引发了社会的广泛关注. 颗粒物是我国城市大气污染的主要污染物^[1],其中细颗粒物(PM_{2.5})浓度的增加不仅导致大气能见度下降^[2,3],长期暴露还会增加心血管病、呼吸道疾病以及肺癌的发病率和死亡率^[4-9],给人体健康带来严重风险. 有研究显示,2010年中国约有130万人因PM_{2.5}的长期暴露而死亡^[10]. 然而,受地

形因素、气象条件、排放强度和人口分布等因素的影响,PM_{2.5}的时空分布以及人口暴露风险具有显著的时空变异性^[11,12]. 因此,探索PM_{2.5}的时空演化,评估人口暴露风险对正确认识PM_{2.5}的发展变化规律,制定有针对性的防控对策具有重要意义.

目前,在不同空间尺度上的PM_{2.5}时空分布与演

收稿日期: 2020-04-22; 修订日期: 2020-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971178); 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室开放基金项目(SKLESS201807); 西安市社会科学规划基金世界城地组织专项(cds01)

作者简介: 黄晓军(1983~),男,副教授,博士生导师,主要研究方向为环境-社会系统脆弱性, E-mail: huangxj@nwu.edu.cn

化研究方面已有较好基础. 相关研究多采用空气质量监测数据在全国^[13,14]、区域(如长三角、珠三角和京津冀等地区)^[15~18]、省域^[19,20]以及城市^[21~23]等不同尺度开展了广泛的 $\text{PM}_{2.5}$ 时序变化和空间格局研究. 空气质量监测数据是进行 $\text{PM}_{2.5}$ 研究最直接的数据源,该类数据时间分辨率高,可以揭示日、月、季和年等不同时间尺度的 $\text{PM}_{2.5}$ 变化特征. 但是,由于区域监测站点分布数量十分有限,其难以提供 $\text{PM}_{2.5}$ 在空间分布上的连续信息. 而卫星遥感数据中的气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)与地面观测的颗粒物浓度之间具有较好的相关性^[24~26],可利用线性回归模型^[27,28]、广义可加模型^[29]、地理加权模型^[30]、BP神经网络模型^[31]和支持向量机模型^[32]等多种模型,构建遥感反演 AOD 数据与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的关系,进行 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的估算,由此得到的数据空间连续性较好,成为弥补监测数据空间精度不足的有效手段^[33,34]. 目前,该类型数据已广泛用于 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空格局演化研究^[35~38]. 在分析 $\text{PM}_{2.5}$ 时空变化的同时,也有学者对 $\text{PM}_{2.5}$ 组成成分^[39]及其与气象、地形和植被等自然条件和人口分布、城市化、能源利用等社会经济活动之间的关系进行研究,以此对 $\text{PM}_{2.5}$ 来源以及变化原因进行解析^[17,40~42]. 随着人们对 $\text{PM}_{2.5}$ 及其危害性的认识逐步加深, $\text{PM}_{2.5}$ 研究开始逐渐延伸至人口健康领域,但这些研究大多集中在特定群体(如老年人和儿童)^[43,44],或微观视角的个体暴露和健康风险评价^[45,46],缺乏宏观层面的人口暴露风险评价及其时空变化规律研究.

受地形因素、气象条件、煤炭燃烧、工业污染和机动车尾气排放等多方面因素影响,关中地区长期以来都是我国空气污染最严重的区域之一,大气环境问题突出, $\text{PM}_{2.5}$ 年均质量浓度长期超过国家年均值二级标准($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)以上,是国家大气污染重点控制区域. 严重的空气污染已给关中地区社会经济发展和居民身体健康带来极大危害. 基于此,本文以关中地区为研究对象,整合 2000~2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 遥感反演数据和人口分布数据,构建人口暴露风险指数模型,对关中地区 $\text{PM}_{2.5}$ 人口暴露风险进行分析,并采用时间序列分析和空间自相关分析方法,揭示关中地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及人口暴露风险的时空演化规律.

1 材料与方法

1.1 研究区域

关中地区位于陕西省中部,是陕西省三大地理单元(黄土高原、关中盆地和秦巴山区)之一,同时

也是关中平原国家级城市群和关中—天水国家级经济区的核心区域. 关中地区包括西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南和商洛这 6 个地级市和 1 个杨凌农业高新技术产业示范区,共辖 60 个县(区、县级市),见图 1. 区域总面积 7.5 万 km^2 , 2018 年,关中地区常住人口 2 686 万人,地区生产总值 16 062 亿元,分别占陕西省常住人口和地区生产总值的 69.5% 和 65.7%. 关中地区属于暖温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年均温 6~13℃,年降雨量 500~800 mm,主要集中在夏秋季的 7~9 月,全年盛行东北风,年平均风速 $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

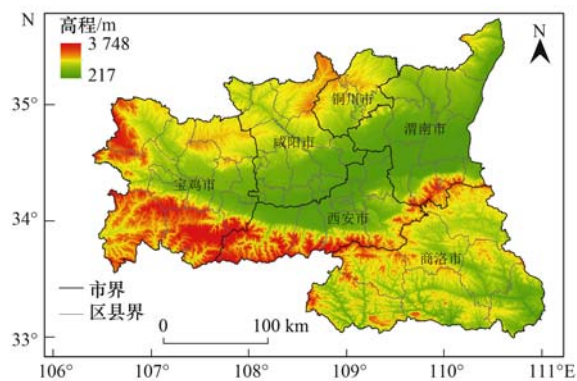


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of study area

1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据、人口数据和关中地区行政边界矢量数据. 其中, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据来源于美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和哥伦比亚大学联合创立的社会经济数据应用中心(Socioeconomic Data and Applications Center, <https://sedac.ciesin.columbia.edu/>). 该数据是基于 MODIS/MISR 和 SeaWiFS 气溶胶光学厚度得到的全球逐年 $\text{PM}_{2.5}$ 遥感反演栅格数据,数据的时间范围为 2000~2016 年,空间分辨率为 0.01° . 该产品是利用卫星数据、模拟数据和地面监测数据,通过地理加权回归(GWR)来估计全球细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的质量浓度,交叉验证显示,最终的 $\text{PM}_{2.5}$ 估计值与来自监测器的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度高度一致($R^2=0.81$)^[47],该数据已在国内相关研究中得到广泛使用^[48,49]. 本文利用中国环境监测总站提供的 2014、2015 和 2016 年关中地区 $\text{PM}_{2.5}$ 地表监测数据,以各市区为统计单元,与遥感反演所得的各市区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据进行线性拟合. 结果显示,三年的拟合优度值(R^2)均在 0.7 以上,表明遥感反演的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度数据精度良好,可用其进行相关研究. 人口数据来源于 LandScan 全球人口

格网分布数据 (<https://landscan.ornl.gov>), 数据的空间分辨率约 1 km, 是当前精度最高的全球人口格网数据. 关中地区行政边界矢量数据来源于国家基础地理信息中心提供的 1:100 万中国基础地理数据库.

1.3 研究方法

1.3.1 人口暴露风险

引入人口暴露风险指数计算模型^[48,50], 量化关中地区人口暴露于 PM_{2.5} 污染的风险程度, 其计算公式如下:

$$R_i = \frac{\text{POP}_i \times c_i}{\sum_{i=1}^n \text{POP}_i \times \frac{c_i}{n}} \quad (1)$$

式中, R_i 为格网 i 的 PM_{2.5} 人口暴露风险指数; POP_i 表示格网 i 的人口数; c_i 为格网 i 内的 PM_{2.5} 质量浓度值; n 为研究区域的格网数量.

1.3.2 Theil-Sen Median 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计趋势计算方法^[51], 可以减少数据异常值的影响, 可用来反映 PM_{2.5} 质量浓度和人口暴露风险的长时间序列演化趋势, 其计算公式如下:

$$S_V = \text{Median} \left(\frac{V_j - V_i}{j - i} \right) \quad (2)$$

(2000 ≤ i ≤ j ≤ 2016)

式中, V_i 和 V_j 分别代表第 i 年和第 j 年的 PM_{2.5} 质量浓度值或人口暴露风险指数值; S_V 是指计算 $n(n-1)/2$ 个数据组合的斜率的中位数, 用以量化单调趋势 ($n=17$, 为时间序列的长度). 当 $S_V > 0$ 时, 表示这一时间序列的变量呈增长趋势; 反之, 则为减少趋势.

1.3.3 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验为非参数检验方法, 其结构简单, 计算方便, 且不需要样本服从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰^[52]. Mann-Kendall 检验方法已在水文、气象的时间序列趋势分析和变异检验中得到广泛应用^[53,54]. 文中主要使用 Mann-Kendall 趋势检验对 PM_{2.5} 以及人口暴露风险进行时间序列趋势分析.

定义一组时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其标准化的检验统计量公式为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & (S > 0), \\ 0 & (S = 0), \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & (S < 0). \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0), \\ 0 & (x_j - x_i = 0), \\ -1 & (x_j - x_i < 0). \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中, x_i 和 x_j 分别表示像元第 i 年和第 j 年的像元值 (PM_{2.5} 质量浓度值或人口暴露风险指数值); n 表示时间序列的长度; sgn 为符号函数, 统计量 Z 的取值范围为 $(-\infty, +\infty)$. 在给定显著性水平 α 下, 当 $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 时, 表明研究序列在 α 水平上存在显著变化. 本文取 $\alpha = 0.05$, 即判断在 0.05 置信水平上 PM_{2.5} 浓度和人口暴露风险时间序列变化趋势的显著性. 对检验结果进行分级, 按照显著性可分为极显著变化 ($|Z| > 2.58$)、显著变化 ($1.96 < |Z| \leq 2.58$)、弱显著变化 ($1.65 < |Z| \leq 1.96$) 和无显著变化 ($0 < |Z| \leq 1.65$) 4 个等级^[55].

1.3.4 空间自相关分析

空间自相关可根据空间位置和属性的相似性测度变量的空间分布模式, 进而分析变量的空间集聚和变化趋势. 空间自相关分为全局空间自相关和局部空间自相关, 全局空间自相关可识别变量整体的空间分布是集聚或分散, 一般用全局 Moran's I 指数表示. 本文采用全局 Moran's I 指数来判断邻近空间单元 PM_{2.5} 浓度和人口暴露风险的平均相似程度, 计算公式如下:

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_i \sum_j w_{ij} \right) \sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中, I 为全局空间自相关指数; x_i 和 x_j 分别为空间单元 i 和 j 的 PM_{2.5} 质量浓度值或人口暴露风险值; N 为空间单元数量; w_{ij} 为空间权重矩阵. I 值介于 $-1 \sim 1$ 之间, 当 $I > 0$ 时表明空间单元之间具有正相关性, 越接近于 1, 单元属性值之间关系越密切; 当 $I < 0$ 时表明空间单元之间具有负相关性, 越接近 -1 , 单元之间属性值差异越大; 当 $I = 0$ 时表示空间单元之间不具有相关性.

局部空间自相关可检验变量在局部地区的相似性, 本文采用局部 Moran's I 指数来判断 PM_{2.5} 质量浓度和人口暴露风险在局域上的关联程度. 计算公式为:

$$I_i = \frac{N(x_i - \bar{x}) \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中, I_i 为局部空间自相关指数; x_i 和 x_j 分别为空间单元 i 和 j 的 PM_{2.5} 浓度值或人口暴露风险值; N 为空间单元数量; w_{ij} 为空间权重矩阵. 当 $I_i > 0$ 时,

表示一个高值被高值所包围(高-高),或是一个低值被低值所包围(低-低);当 $I_i < 0$ 时,表示一个高值被低值所包围(高-低),或是一个低值被高值所包围(低-高). 本文中的空间权重是基于距离来定义的,具体采用的是以距离的倒数为权重的计算方法.

2 结果与分析

2.1 关中地区 $PM_{2.5}$ 时空演化

2.1.1 关中地区 $PM_{2.5}$ 时序变化

2000~2016 年关中地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度年均变化具有一定的波动性,但总体相对比较稳定,最低值为 2004 年的 $25.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最高值为 2006 年的 $36.38 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2000~2003 年, $PM_{2.5}$ 质量浓度年均变化较小,阶段均值为 $28.81 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2004~2007 年, $PM_{2.5}$ 年均质量浓度呈现明显增长趋势,阶段均值为 $32.51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 2008~2016 年期间,除 2013 年达到较高的 $36.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以外,其他年份相对平稳,阶段均值为 $30.06 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 2).

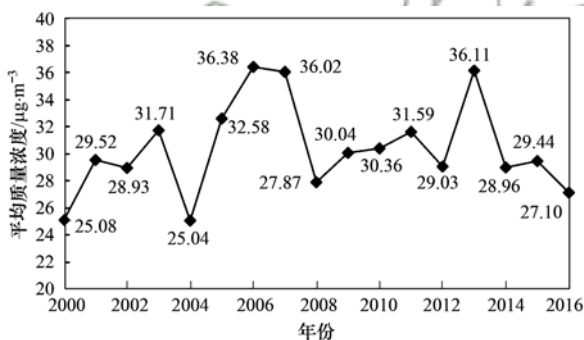


图 2 2000~2016 年关中地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化

Fig. 2 Changes in $PM_{2.5}$ annual concentration in the Guanzhong region from 2000 to 2016

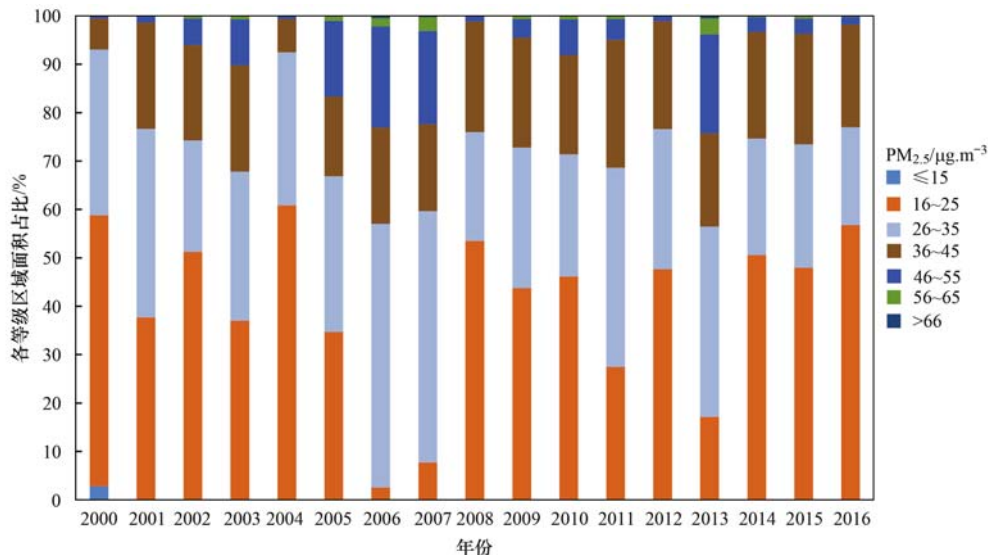


图 3 2000~2016 年关中地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度分区间面积变化

Fig. 3 Changes of $PM_{2.5}$ annual concentration by range in the Guanzhong region from 2000 to 2016

根据世界卫生组织 2005 年发布的《空气质量准则》中的 3 个目标值(年均均为 15 、 25 和 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)以及中国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度限值($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),将 2000~2016 年关中地区 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度值划分为 7 个区间(图 3),分析不同区间面积占比情况(图 3). 结果显示:①仅在 2000 年存在 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度低于 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的区域(占区域总面积的 2.84%), 2001~2016 年关中各地区 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度均在 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上;②2006、2007 和 2013 年 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度高于 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的面积比例均较大, 2006 年和 2007 年超过了 90%, 2013 年达到 82.8%,表明这 3 a 在关中大部分地区污染水平较高;③以中国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)提出的 $PM_{2.5}$ 年平均 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的浓度限值(二类区)为衡量标准, 2000 年和 2004 年超过该限值区域所占面积比例小于 10%,其他年份超过该限值区域面积占比均在 20% 以上(2006、2007 和 2013 年这一比例更是超过了 40%),表明除 2000 年和 2004 年外,其他各年关中地区均有 1/5 以上的区域 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度超过国家二类区标准限值(关中地区还包括较大面积的秦岭自然生态保护区和风景名胜区,这些属于一类区的年平均质量浓度限值为 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);④2006、2007 和 2013 年关中地区超过 20% 的区域 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度高于 $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,进一步说明了这 3 a 的高污染性.

整合 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验方法,将计算得到的 $PM_{2.5}$ 浓度的 S_V 值与 $|Z|$ 值进行叠加分类,得出关中地区 $PM_{2.5}$ 年均质量浓度的 8 种类型变化趋势,包括极显著增加、极显

著减少、显著增加、显著减少、无显著增加、无显著减少、弱显著增加和弱显著减少(图4)。结果显示:①研究区域内没有出现极显著减少和显著减少类型区,表明2000~2016年关中地区的PM_{2.5}污染情况一直比较突出,未呈现好转趋势;②研究区以无显著增加和无显著减少类型为主,极显著增加和显著增加类型区相对较少,表明尽管关中地区PM_{2.5}污染情况未见好转,但也没有大范围地持续恶化。

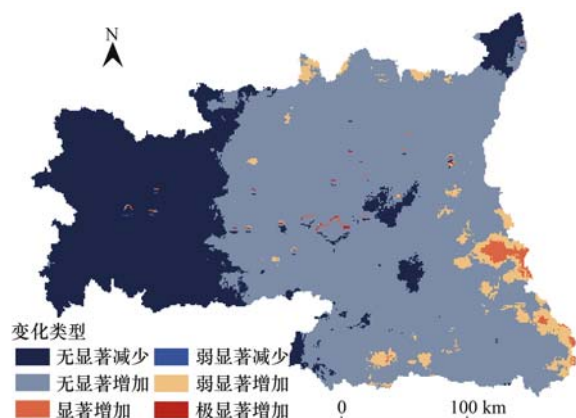


图4 2000~2016年关中地区PM_{2.5}质量浓度变化趋势类型

Fig. 4 Trends of PM_{2.5} annual concentration by types in the Guanzhong region from 2000 to 2016

2.1.2 关中地区PM_{2.5}空间格局

按照上述PM_{2.5}年均质量浓度值划分的7个区间,对2000~2016年关中地区PM_{2.5}质量浓度空间分布进行等级分类,受篇幅所限,这里展示间隔4 a的空间格局变化结果(图5)。可以发现:①2000年和2004年关中地区PM_{2.5}空间分布格局大体类似,高于二类区限制的区域(PM_{2.5}年均质量浓度值在35 μg·m⁻³以上)主要集中在关中地区中部,特别是

集中在西安、咸阳和渭南这3个城市的主城区范围;②2008、2012和2016年的PM_{2.5}空间分布格局大体类似,与2000年和2004年相比,高于二类区限制的区域范围明显扩大,在原有基础上向东北方向延伸,形成了连接西安、咸阳和渭南多个县区的连续带状集中分布区;③PM_{2.5}质量浓度超过45 μg·m⁻³的区域持续增加,范围逐渐扩大,空间上主要仍集中在西安和咸阳主城区。

采用ArcGIS软件对2000~2016年关中地区PM_{2.5}年均质量浓度值进行空间自相关检验,计算得出的全局Moran's I指数结果显示,各年度全局Moran's I指数均为正值,且均通过显著性检验($P = 0.05$),表明历年PM_{2.5}年均质量浓度在空间上呈现出显著的正自相关,空间集聚特征明显。

通过进一步地局部空间自相关分析,检验PM_{2.5}质量浓度在局域上的关联程度,得出2000、2004、2008、2012和2016年PM_{2.5}质量浓度的空间关联类型(图6)。结果显示,上述5个年份的空间自相关分析结果只有3种类型,不存在“高-低”类型;2000~2016年“高-高”类型(即PM_{2.5}年均质量浓度高值集聚区)的空间范围不断扩大,并由以西安市为中心逐渐向东北方向扩展,形成连续的带状分布区;“低-低”类型(即PM_{2.5}年均质量浓度低值集聚区)则主要分布在关中地区西部和南部,这里主要是秦岭自然保护区集中分布地带。

2.2 关中地区PM_{2.5}人口暴露风险时空格局

2.2.1 PM_{2.5}人口暴露风险变化趋势

根据上文对关中地区PM_{2.5}年均质量浓度值划分的7个区间,统计各年份不同区间人口暴露数量占比情况(图7)。可以发现,仅在2000年,关中市

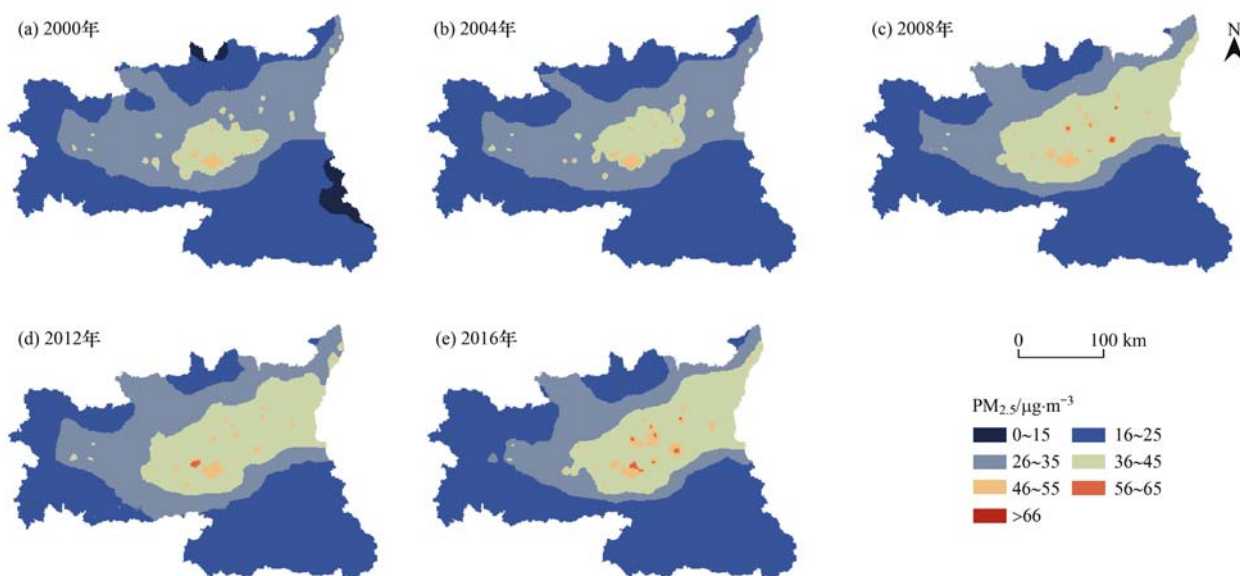


图5 2000~2016年关中地区PM_{2.5}质量浓度空间分布变化

Fig. 5 Spatial distribution of PM_{2.5} annual concentration in the Guanzhong region from 2000 to 2016

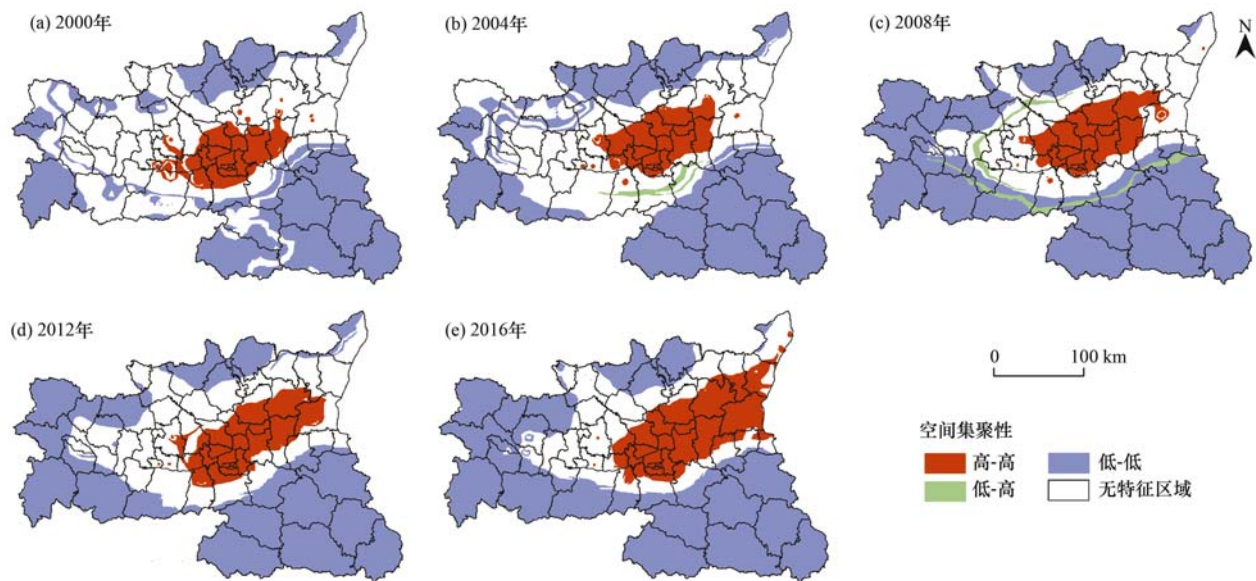


图 6 2000 ~ 2016 年关中地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度空间集聚特征

Fig. 6 Spatial clusters of $\text{PM}_{2.5}$ annual concentration in the Guanzhong region from 2000 to 2016

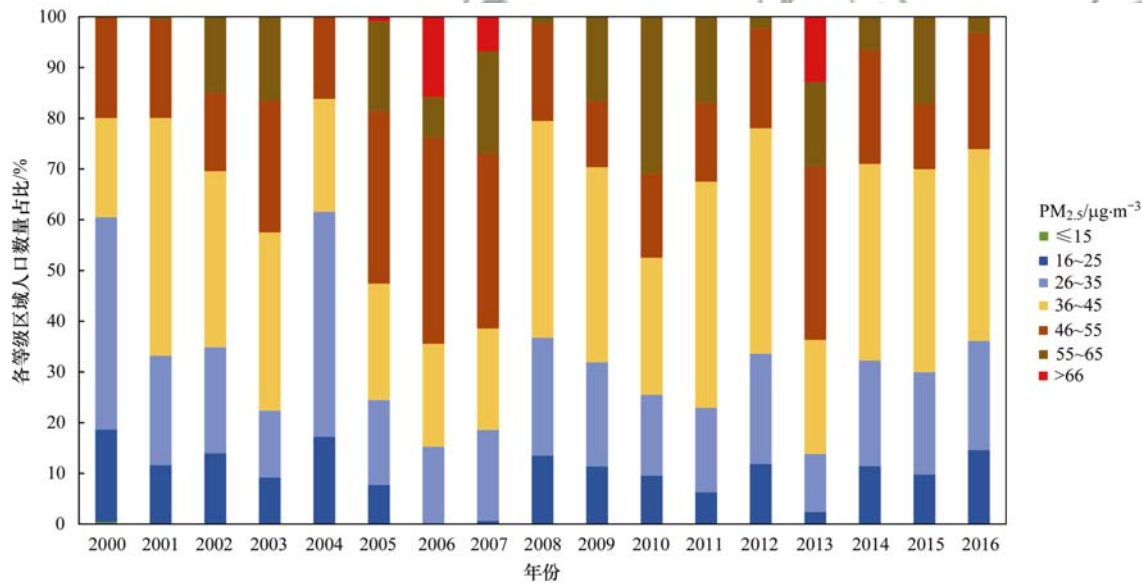


图 7 2000 ~ 2016 年关中地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分区间人口暴露变化

Fig. 7 Changes in population exposure risk to $\text{PM}_{2.5}$ in the Guanzhong region from 2000 to 2016

区有 0.45% 的人口暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 质量浓度以下, 其他年份所有人口均暴露于 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的年均质量浓度值; 2000 ~ 2016 年, 关中地区暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 质量浓度限值以上的人口规模非常大, 除 2000 年和 2004 年外, 其他年份均有超过 60% 以上的人口暴露于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上区域, 其中 2013 年最高, 达到 86.18%; 实际上, 除 2004 年外, 其他 16 年中, 每年关中地区都有超过 1/5 以上人口暴露在年平均 $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度中. 这一结果表明, 尽管 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 质量浓度限值以下区域分布较广, 但人口主要集中在 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 质量浓度限值以上的区域, 导致关中地区呈现突出的高密度人

口集聚在高污染区.

采用公式 (1) 计算关中地区各年度 $\text{PM}_{2.5}$ 人口暴露风险指数, 参考相关研究^[56], 将人口暴露风险划分为 6 个等级, 包括极低风险 ($R_i = 0$)、低风险 ($0 < R_i \leq 1$)、较低风险 ($1 < R_i \leq 2$)、较高风险 ($2 < R_i \leq 3$)、高风险 ($3 < R_i \leq 5$) 和极高风险 ($R_i > 5$). 统计各等级面积占比, 可以发现, 2000 ~ 2010 年, 低等级风险区 ($R_i \leq 2$) 和高等级风险区 ($R_i > 2$) 所占面积比例相对比较稳定, 高等级风险区面积占比一直在 6% ~ 8% 之间, 变化并不十分明显; 然而, 从 2011 年开始, 低等级风险区面积占比开始下降, 而高等级风险区面积占比不断上升, 2011 ~ 2016 年, 高等级风险区面积占比始终在 10% 以上 (图 8).

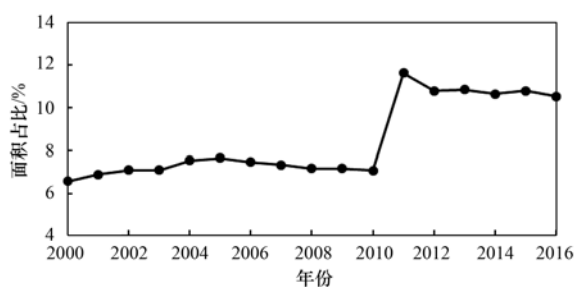


图 8 2000 ~ 2016 年关中地区 PM_{2.5} 人口暴露
高级风险区面积占比变化

Fig. 8 Changes in population exposure risk to PM_{2.5} by range
in the Guanzhong region from 2000 to 2016

整合 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验方法, 将计算得到的 PM_{2.5} 人口暴露风险指数的 S_v 值与 $|Z|$ 值进行叠加分类, 得出关中地区 PM_{2.5} 人口暴露风险的 8 种类型变化趋势, 包括极显著增加、极显著减少、显著增加、显著减少、无显著增加、无显著减少、弱显著增加和弱显著减少 (图 9)。可以发现, 2000 ~ 2016 年关中地区 PM_{2.5} 人口暴露风险中增加趋势类型所占比例较大, 特别是存在大量的极显著增加和显著增加类型, 这些类型主要位于关中地区中部, 尤其是东西方向上形成连续的极显著增加或显著增加类型区, 此外, 在关中地区北部、东北部以及东南部也出现了多个极显著增加或显著增加类型区。

2.2.2 PM_{2.5} 人口暴露风险的空间格局

基于关中地区 2000 ~ 2016 各年度 PM_{2.5} 人口暴露风险指数, 求取多年平均值, 得出 2000 ~ 2016 年

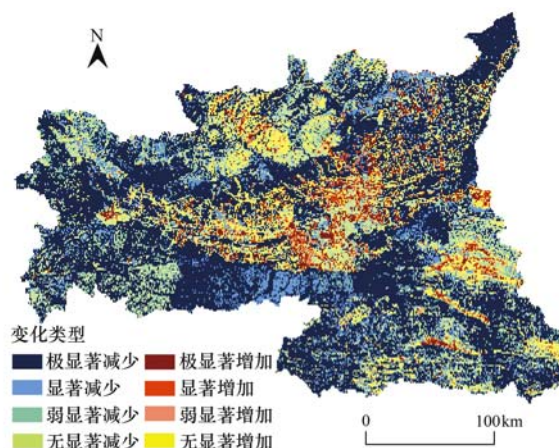


图 9 2000 ~ 2016 年关中地区 PM_{2.5} 人口暴露风险变化趋势类型

Fig. 9 Trends of population exposure risk to PM_{2.5} by types
in the Guanzhong region from 2000 to 2016

关中地区 PM_{2.5} 人口暴露风险分布的总体格局 (图 10)。结果显示: ① 关中地区 2000 ~ 2016 各年度 PM_{2.5} 人口暴露风险分布格局大体相似, 较高等级以上风险区主要集中在关中地区中部, 呈“蜘蛛网”状分布, 并在东西方向上形成连续的带状分布区; ② 在上述带状分布区内, 形成了若干个“团块”状高风险区和极高风险区, 这些地区大多是人口密集的城市或县城中心城区, 其中, 在西安和咸阳主城区形成了较大面积的极高风险区, 且空间范围不断扩大; ③ 相对而言, 极低风险区和低风险区范围也较广, 分布在关中地区北部和南部, 这些地区地势起伏较大, 人口分布稀疏, 北部以黄土高原丘陵沟壑为主, 南部则多为秦岭山区。

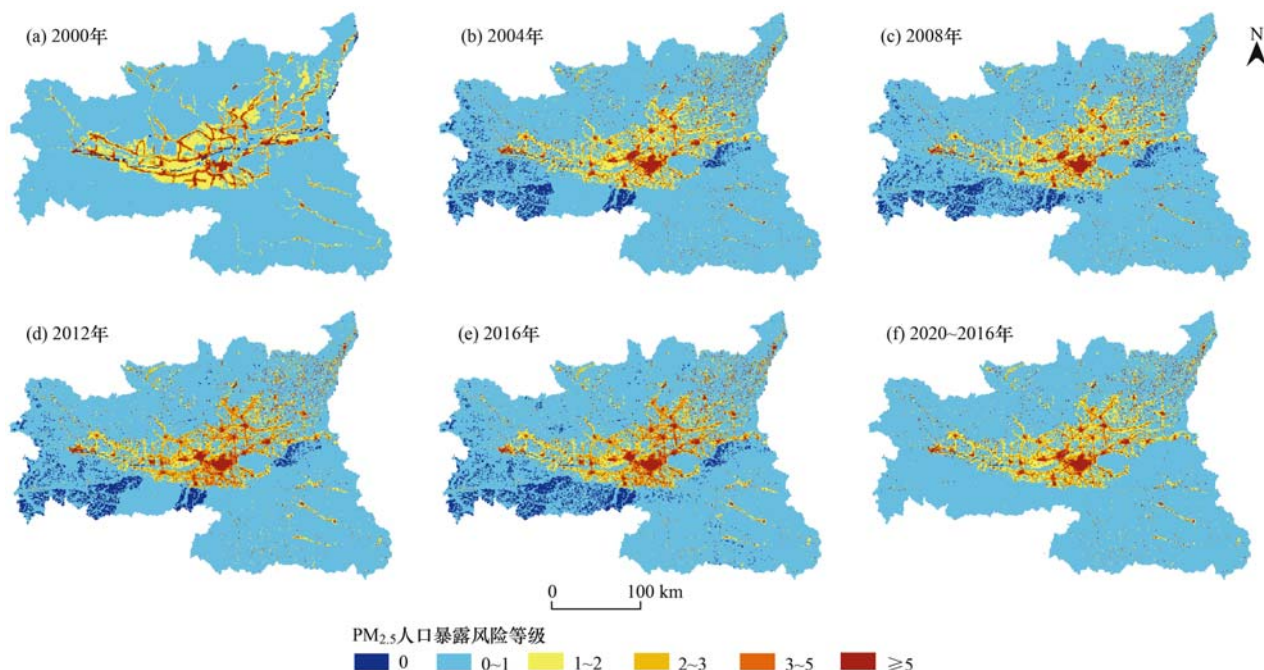


图 10 2000 ~ 2016 年关中地区 PM_{2.5} 人口暴露风险格局

Fig. 10 Spatial pattern of population exposure risk to PM_{2.5} in the Guanzhong region from 2000 to 2016

采用 ArcGIS 软件对 2000 ~ 2016 年关中地区 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险进行空间自相关检验, 计算得出的全局 Moran's I 指数结果显示, 各年度人口暴露风险的全局 Moran's I 指数均为正值, 且均通过显著性检验 ($P=0.05$), 表明历年 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险在空间上呈现出显著的正自相关, 空间集聚特征明显。

通过进一步的局部空间自相关分析, 检验 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险在局域上的关联程度, 得出 2000、2004、2008、2012 和 2016 年 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险的空间关联类型 (图 11)。结果显示, 研究时段内只有“高-高”和“低-低”两种空间关联类型, 而未出现“高-低”和“低-高”类型, 表明关中地区 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险呈现出较强的局部空间正相关特征; 2000 ~

2016 年关中地区局部空间自相关格局大体类似, “高-高”类型 (即 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险高值集聚区) 的空间范围稍有扩大, 但主要仍集中西安、宝鸡、咸阳、渭南和铜川这 5 个城市的中心城区内, 表明城市中心仍是 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险的高值区。城市中心内人口密集, 在消耗能源增多的同时, 也造成了污染物排放源增多, 使自身暴露在了 $PM_{2.5}$ 浓度较高的区域内。“低-低”类型 (即 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险低值集聚区) 则主要分布在关中地区周边广大区域, 这与关中地区周边区域地形起伏较大, 人口分布较为分散有关。且关中地区周边区域工业水平较低, 能源消耗较小, $PM_{2.5}$ 浓度长期较低且变化较小, 也使该地区的 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险长期处于低值状态。

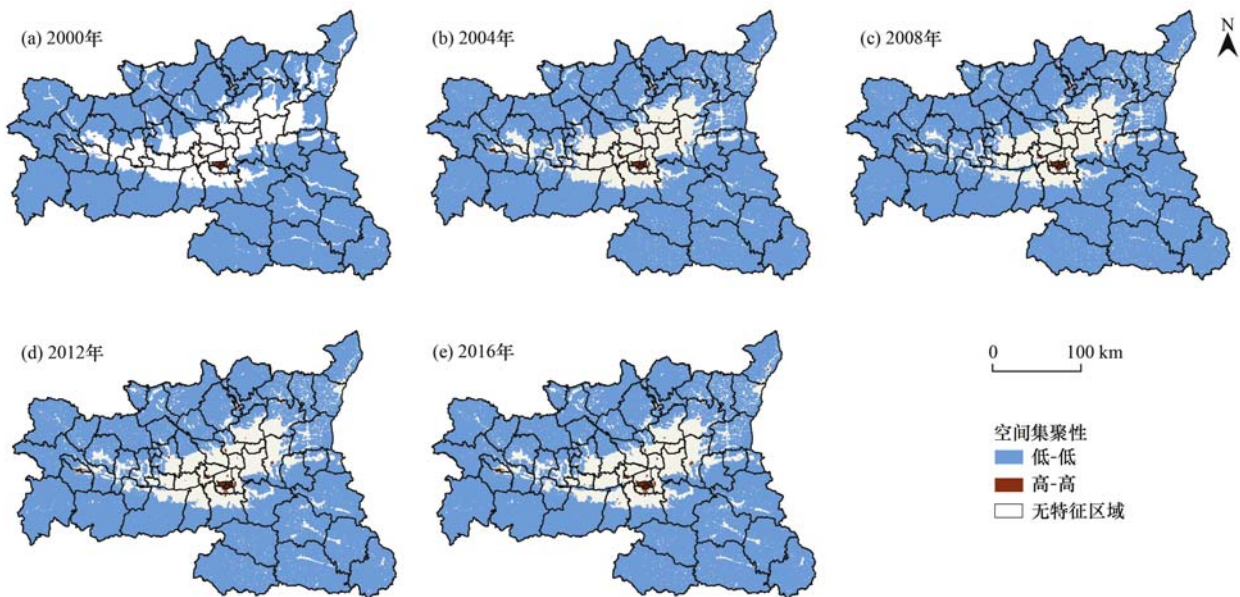


图 11 2000 ~ 2016 年关中地区 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险空间集聚特征

Fig. 11 Spatial clusters of population exposure risk to $PM_{2.5}$ in the Guanzhong region from 2000 to 2016

3 讨论

2013 年, 中国政府发布《大气污染防治行动计划》, 开始实施严格的大气污染防控措施, 国内许多地区空气质量有所改善。然而对于关中地区而言, 改善效果并不十分显著, 甚至局部地区还有恶化趋势。同时, 伴随着城市化水平的持续提高和人口的不断集聚, 诸如西安、咸阳、渭南和宝鸡等城市中心地区的人口暴露风险反而在上升。高密度人口集聚区和高浓度 $PM_{2.5}$ 分布区在时空耦合上呈现的长期连续性和空间一致性是关中地区 $PM_{2.5}$ 人口暴露风险的主要演化规律。这一时空演化特征形成的原因主要在于以下 3 个方面: ① 气候与地形条件。关中地区地处秦巴山地与陕北黄土高原之间, 南北较高、西窄东宽的地形非常不利于污染物的扩散^[57], 且该地区常年主导风向为东北风, 使外来污染物能够借

助风力输送到西北部地区^[58], 易进难出; 此外, 冬季气候寒冷干燥, 静风频率高达 45%, 易形成逆温现象, 更使污染物容易集聚且难以扩散。② 工业污染与能源消费。关中地区工业发达, 重化工企业较多, 特别是晋陕交界地区是煤炭、钢铁等重化工业集中分布区, 工业排放导致整个汾渭平原 $PM_{2.5}$ 浓度长期居高不下; 同时, 冬季采暖燃烧大量煤炭, 进一步加剧了 $PM_{2.5}$ 的污染浓度。③ 快速城市化下人口向大中城市的集聚。随着关中平原城市群、西安国家中心城市以及西咸一体化的建设和发展, 包括西安、咸阳和渭南等在内的大中城市的人口和经济等要素的集聚能力不断提升, 在吸引大量人口集聚的同时, 也加剧了相关污染物的排放, 并使得更多的常住人口长期暴露在高污染区域内。

对此, 在无法改善地形、气候等自然条件情况下, 调整优化产业结构、能源消费结构和交通运输结

构是根治大气污染的主要手段,但是考虑到经济发展的阶段性、大气污染物的复杂性以及治理的长期性,在当前无法实现根治的情况下,如何进行标本兼治,在减缓大气污染的同时,降低人口暴露风险,保护公众健康是现阶段必须考虑的现实问题. 2018 年中国发布了《打赢蓝天保卫战三年行动计划(2018-2020)》,陕西省和西安市作为备受关注的区域,也随之制定了相应的行动方案,重点从污染物来源方面提出了大气污染的治理措施,但尚未涉及人口健康方面的举措. 本文认为,除源头防治外,针对本研究中 PM_{2.5} 的高人口暴露风险区,还应在空气污染风险的公众认知、健康风险评估、重污染日健康预警、医疗系统应急响应和特殊群体健康保护等方面制定相应的对策.

4 结论

(1)2000~2016 年关中地区 PM_{2.5} 质量浓度年均变化具有一定的波动性,但总体相对稳定,PM_{2.5} 污染情况一直比较突出,未呈现好转趋势,但也没有大范围地持续恶化;2006、2007 和 2013 年关中地区大气污染严重且范围广,这 3 a 在关中地区 40% 以上区域 PM_{2.5} 年均质量浓度超过了 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的限值.

(2)2000~2016 年关中地区 PM_{2.5} 空间分布范围明显扩大,从关中地区中部不断向东北方向延伸,从集中在少数几个城市的主城区向大面积的连续带状集中分布区转变;历年 PM_{2.5} 年均质量浓度在空间分布上均呈现明显的集聚特征,高值区集中在西安市主城区并不断向东北方向扩展,低值区则主要分布在关中地区西部和南部.

(3)2000~2016 年,关中地区每年都有超过 60% 的人口(以 2016 年人口计算约为 1444 万)暴露在 PM_{2.5} 年平均 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 浓度限值以上,形成突出的高密度人口集聚在高污染区;2000~2016 年关中地区 PM_{2.5} 人口暴露风险不断加剧,尤其是从 2011 年开始,PM_{2.5} 人口暴露的高风险区范围不断增加,高风险区面积占比始终在 10% 以上.

(4)2000~2016 年关中地区 PM_{2.5} 人口暴露风险格局大体相似,较高等级以上风险区主要集中在关中地区中部,呈“蜘蛛网”状分布,并在东西方向上形成连续的带状分布区;历年 PM_{2.5} 人口暴露风险在空间分布上均呈现出明显的空间集聚性,高值区集中在几个主要城市的中心城区,低值区则主要分布在关中地区周边广大区域.

参考文献:

[1] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J].

Atmospheric Environment, 2008, 42(1): 1-42.

[2] Molnár A, Mészáros E. On the relation between the size and chemical composition of aerosol particles and their optical properties[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(30): 5053-5058.

[3] Watson J G. Visibility: science and regulation[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(6): 628-713.

[4] Kan H D, Chen R J, Tong S L. Ambient air pollution, climate change, and population health in China[J]. Environment International, 2012, 42: 10-19.

[5] Cao J J, Xu H M, Xu Q, et al. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily polluted Chinese city[J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(3): 373-378.

[6] Guan D B, Su X, Zhang Q, et al. The socioeconomic drivers of China's primary PM_{2.5} emissions[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(2): 024010.

[7] Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(14): 2375-2377.

[8] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. JAMA, 2002, 287(9): 1132-1141.

[9] 郭新彪,魏红英. 大气 PM_{2.5} 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1171-1177.

Guo X B, Wei H Y. Progress on the health effects of ambient PM_{2.5} pollution[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1171-1177.

[10] 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.

[11] Hu M G, Jia L, Wang J F, et al. Spatial and temporal characteristics of particulate matter in Beijing, China using the empirical mode decomposition method[J]. Science of the Total Environment, 2013, 458-460: 70-80.

[12] 王振波,方创琳,许光,等. 2014 年中国城市 PM_{2.5} 浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1720-1734.

Wang Z B, Fang C L, Xu G, et al. Spatial-temporal characteristics of the PM_{2.5} in China in 2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1720-1734.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 宓科娜,庄汝龙,梁龙武,等. 长三角 PM_{2.5} 时空格局演变与特征——基于 2013-2016 年实时监测数据[J]. 地理研究, 2018, 37(8): 1641-1654.

Mi K N, Zhuang R L, Liang L W, et al. Spatio-temporal evolution and characteristics of PM_{2.5} in the Yangtze River Delta based on real-time monitoring data during 2013-2016[J].

- Geographical Research, 2018, **37**(8): 1641-1654.
- [16] 李珊珊, 程念亮, 徐峻, 等. 2014 年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布及来源模拟[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(10): 2908-2916.
- Li S S, Cheng N L, Xu J, *et al.* Spatial and temporal distributions and source simulation of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(10): 2908-2916.
- [17] 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.
- [18] 徐伟嘉, 何芳芳, 李红霞, 等. 珠三角区域 $PM_{2.5}$ 时空变异特征[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(9): 951-957.
- Xu W J, He F F, Li H X, *et al.* Spatial and temporal variations of $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(9): 951-957.
- [19] 刘鹏姣, 那晓东, 李光辉. 2015—2016 年东北三省 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, **41**(2): 72-76.
- Liu P J, Na X D, Li G H. Spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ in Northeast China, 2015—2016[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2018, **41**(2): 72-76.
- [20] 王华杰, 张波, 胡昊, 等. 安徽省大气污染物时空分布特征及演化规律[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(4): 628-641.
- Wang H J, Zhang B, Hu H, *et al.* Evolution characteristics and spatial-temporal pattern of air pollutants in Anhui province[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(4): 628-641.
- [21] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013 年北京市 $PM_{2.5}$ 的时空分布[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 110-120.
- Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing in 2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(1): 110-120.
- [22] 孟丽红, 蔡子颖, 李英华, 等. 天津市 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布特征及重污染过程来源模拟分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(1): 9-17.
- Meng L H, Cai Z Y, Li Y H, *et al.* Spatial and temporal distributions and source simulation during heavy pollution of $PM_{2.5}$ in Tianjin city[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(1): 9-17.
- [23] 赵卉伊褶, 周卫健, 牛振川, 等. 西安市 2013-2017 年大气 $PM_{2.5}$ 的时空变化特征及影响因素分析[J]. 地球环境学报, 2019, **10**(3): 248-256.
- Zhao H Y Z, Zhou W J, Niu Z C, *et al.* Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes of atmospheric $PM_{2.5}$ and its influencing factors in Xi'an from 2013 to 2017[J]. Journal of Earth Environment, 2019, **10**(3): 248-256.
- [24] Lau K H, Li C C, Mao J T, *et al.* A new way of using MODIS data to study air pollution over Hong Kong and the Pearl River Delta[A]. In: Proceedings of SPIE Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds III [C]. Hangzhou: SPIE, 2003. 105-114.
- [25] Strawa A W, Chatfield R B, Legg M, *et al.* Improving retrievals of regional fine particulate matter concentrations from moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) and ozone monitoring instrument (OMI) multisatellite observations [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013, **63**(12): 1434-1446.
- [26] Strandgren J, Mei L, Vountas M, *et al.* Study of satellite retrieved aerosol optical depth spatial resolution effect on particulate matter concentration prediction [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(18): 25869-25899.
- [27] 林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 827-834.
- Lin H F, Xin J Y, Zhang W Y, *et al.* Comparison of atmospheric particulate matter and aerosol optical depth in Beijing city[J]. Environmental Science, 2013, **34**(3): 827-834.
- [28] Gupta P, Christopher S A. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products; 2. A neural network approach [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, **114**(D20): D20205.
- [29] Tian J, Chen D M. A semi-empirical model for predicting hourly ground-level fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentration in southern Ontario from satellite remote sensing and ground-based meteorological measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, **114**(2): 221-229.
- [30] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: development and application [J]. Environmental Health Perspectives, 2010, **118**(6): 847-855.
- [31] Vlachogianni A, Kassomenos P, Karppinen A, *et al.* Evaluation of a multiple regression model for the forecasting of the concentrations of NO_x and PM_{10} in Athens and Helsinki [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(8): 1559-1571.
- [32] Yeganeh B, Mollagh M S P, Rashidi Y, *et al.* Prediction of CO concentrations based on a hybrid partial least square and support vector machine model[J]. Atmospheric Environment, 2012, **55**: 357-365.
- [33] 亢红霞, 那晓东, 臧淑英. 基于卫星遥感数据(AOD)估算 $PM_{2.5}$ 的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2016, **41**(2): 30-34.
- Kang H X, Na X D, Zang S Y. Advance in ground-level $PM_{2.5}$ prediction using remote sensing data (AOD)[J]. Environmental Science and Management, 2016, **41**(2): 30-34.
- [34] 薛文博, 武卫玲, 付飞, 等. 中国 2013 年 1 月 $PM_{2.5}$ 重污染过程卫星反演研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 794-800.
- Xue W B, Wu W L, Fu F, *et al.* Satellite retrieval of a heavy pollution process in January 2013 in China[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 794-800.
- [35] Van Donkelaar A, Martin R V, Levy R C, *et al.* Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events; A case study of the Moscow fires in 2010 [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(34): 6225-6232.
- [36] 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.
- [37] 陈优芳, 周一敏, 赵昕奕. 基于卫星遥感 AOD 的华北地区 2003-2014 年 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布特征[J]. 热带气象学报, 2019, **35**(6): 822-830.
- Chen Y F, Zhou Y M, Zhao X Y. The characteristics of spatiotemporal distribution of haze weather in North China during 2003-2014[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2019, **35**(6): 822-830.
- [38] 卢德彬, 毛婉柳, 杨东阳, 等. 基于多源遥感数据的中国

- PM_{2.5}变化趋势与影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, **28**(3): 651-660.
- Lu D B, Mao W L, Yang D Y, *et al.* Analysis on the trend and influencing factors of PM_{2.5} in China based on multi-source remote sensing data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, **28**(3): 651-660.
- [39] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 PM_{2.5} 成分谱研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 4043-4052.
- Ma Z H, Liang Y P, Zhang J, *et al.* PM_{2.5} profiles of typical sources in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(12): 4043-4052.
- [40] 杨昆, 杨玉莲, 朱彦辉, 等. 中国 PM_{2.5} 污染与社会经济的空间关系及成因[J]. 地理研究, 2016, **35**(6): 1051-1060.
- Yang K, Yang Y L, Zhu Y H, *et al.* Social and economic drivers of PM_{2.5} and their spatial relationship in China[J]. Geographical Research, 2016, **35**(6): 1051-1060.
- [41] 罗毅, 邓琼飞, 杨昆, 等. 近 20 年来中国典型区域 PM_{2.5} 时空演变过程[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3003-3013.
- Luo Y, Deng Q F, Yang K, *et al.* Spatial-temporal change evolution of PM_{2.5} in typical regions of China in recent 20 Years [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3003-3013.
- [42] 杜彦彦, 黄青. 河南省 PM_{2.5} 时空分布特征及其与植被覆盖度的关系[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(11): 2257-2265.
- Du Y Y, Huang Q. Spatial and temporal variation characteristics of PM_{2.5} and its relationship with vegetation fraction in Henan province[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(11): 2257-2265.
- [43] 王钊, 韩斌, 倪天茹, 等. 天津市某社区老年人 PM_{2.5} 暴露痕量元素健康风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(8): 913-918.
- Wang Z, Han B, Ni T R, *et al.* Health risk assessment of trace elements of PM_{2.5} exposure for the elderly subpopulation in Tianjin, China[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(8): 913-918.
- [44] 柯钊跃, 王佳, 郑君瑜, 等. 广州市学龄儿童在校期间 PM_{2.5} 暴露水平评价[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(10): 1618-1624.
- Ke Z Y, Wang J, Zheng J Y, *et al.* PM_{2.5} exposure assessment of school children at a primary school in Guangzhou, China[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(10): 1618-1624.
- [45] 李友平, 范忠雨, 李坤, 等. 不同出行方式 PM_{2.5} 个体暴露及其影响因素[J]. 环境化学, 2015, **34**(8): 1408-1416.
- Li Y P, Fan Z Y, Li K, *et al.* Commuter exposure to PM_{2.5} and its influencing factors in different commuting modes [J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(8): 1408-1416.
- [46] 邓芙蓉, 王欣, 苏会娟, 等. 北京市某城区儿童大气 PM_{2.5} 个体暴露水平及影响因素研究[J]. 环境与健康杂志, 2009, **26**(9): 762-765.
- Deng F R, Wang X, Su H J, *et al.* Personal exposure to PM_{2.5} of children living near traffic road and the influencing factors in Beijing[J]. Journal of Environment and Health, 2009, **26**(9): 762-765.
- [47] 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.
- [48] 张亮林, 潘竞虎. 中国 PM_{2.5} 人口暴露风险时空格局[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(1): 1-12.
- Zhang L L, Pan J H. Spatial-temporal pattern of population exposure risk to PM_{2.5} in China [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(1): 1-12.
- [49] 江佳, 邹滨, 陈璟雯. 中国大陆 1998 年以来 PM_{2.5} 浓度时空分异规律[J]. 遥感信息, 2017, **32**(1): 28-34.
- Jiang J, Zou B, Chen J W. Spatial-temporal distribution of PM_{2.5} concentrations in mainland China since 1998[J]. Remote Sensing Information, 2017, **32**(1): 28-34.
- [50] 邹滨, 彭芬, 焦利民, 等. 高分辨率人口空气污染暴露 GIS 空间区划研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, **38**(3): 334-338.
- Zou B, Peng F, Jiao L M, *et al.* GIS aided spatial zoning of high-resolution population exposure to air pollution [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, **38**(3): 334-338.
- [51] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, *et al.* Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin [J]. Ecological Indicators, 2015, **51**: 117-126.
- [52] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, **259**(1-4): 254-271.
- [53] 刘兆飞, 王翊晨, 姚治君, 等. 太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析[J]. 自然资源学报, 2011, **26**(9): 1575-1584.
- Liu Z F, Wang Y C, Yao Z J, *et al.* Trend and periodicity of precipitation, air temperature and runoff in the Taihu lake basin [J]. Journal of Natural Resources, 2011, **26**(9): 1575-1584.
- [54] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, **37**(9): 2994-3008.
- Deng X Y, Liu Y, Liu Z H, *et al.* Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(9): 2994-3008.
- [55] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. (第三版). 北京: 高等教育出版社, 2017.
- [56] 张西雅, 扈海波. 基于多源数据的北京地区 PM_{2.5} 暴露风险评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018, **54**(5): 1103-1113.
- Zhang X Y, Hu H B. Risk assessment of exposure to PM_{2.5} in Beijing using multi-source data[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2018, **54**(5): 1103-1113.
- [57] 王睿哲, 胡荣明, 李朋飞, 等. 基于 LUR 模型的 PM_{2.5} 浓度空间分布监测及分析[J]. 环境工程学报, 2020, **14**(10): 2831-2840.
- Wang R Z, Hu R M, Li P F, *et al.* Monitor analysis of PM_{2.5} concentration space distribution based on LUR model [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, **14**(10): 2831-2840.
- [58] 李会霞, 史兴民. 西安市 PM_{2.5} 时空分布特征及气象成因[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(2): 266-271.
- Li H X, Shi X M. Temporal and spatial distribution, meteorological factors of PM_{2.5} in Xi'an City[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(2): 266-271.

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 ₃ 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 ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 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 ₃ O ₄ @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 α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /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> Forssk.) 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 ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)