

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

2000 ~ 2020 年中国典型经济区 $PM_{2.5}$ 时空变化及其与植被景观格局的关系

徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉

(桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541006)

摘要: 探究典型经济区 $PM_{2.5}$ 时空变化特征及其与植被景观格局的关系, 对区域 $PM_{2.5}$ 污染治理和大气环境保护具有重要意义. 基于 $PM_{2.5}$ 数据和 MODIS NDVI 数据集, 采用像元二分模型、Getis-Ord G_i^* 分析、Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验、皮尔逊相关分析和复相关分析等方法, 探究中国三大经济区 $PM_{2.5}$ 空间聚集性、时空变化特征及其与植被景观格局指数的相关性. 结果表明, 2000 ~ 2020 年环渤海地区 $PM_{2.5}$ 主要表现为热点区扩张, 冷点区缩减; 长江三角洲地区冷点区和热点区面积占比无显著变化; 珠江三角洲地区冷点区和热点区均发生扩张. 2000 ~ 2020 年三大经济区 $PM_{2.5}$ 整体表现为下降趋势, 改善程度由高到低依次是: 珠江三角洲地区、长江三角洲地区和环渤海地区. 2000 ~ 2020 年三大经济区不同植被覆盖度等级下 $PM_{2.5}$ 均表现为下降趋势, 三大经济区 $PM_{2.5}$ 均在极低植被覆盖度区域改善最为显著. 在景观尺度下, 与环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 相关性最强的植被景观格局指数分别是聚集度指数 (AI)、最大斑块指数 (LPI) 和香农多样性指数 (SHDI). 在类型尺度下, 与环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 相关性最强的景观格局指数分别是聚集度指数 (AI)、斑块形状指数 (LSI) 和类型斑块面积比 (PLAND). 植被景观格局指数对 $PM_{2.5}$ 的综合影响强于单个植被景观格局指数的影响. 综上所述, 2000 ~ 2020 年三大经济区 $PM_{2.5}$ 空间聚集性均发生了改变. 在研究时段内, 三大经济区 $PM_{2.5}$ 整体表现为下降趋势. 在景观尺度和类型尺度下, 三大经济区 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数的关系均表现出明显差异.

关键词: 典型经济区; $PM_{2.5}$; 植被景观格局; 时空变化; Getis-Ord G_i^* 分析法

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-1852-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205283

Spatio-temporal Variation in $PM_{2.5}$ Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020

XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, GUO Zhen-dong, PAN Yu-chun, ZHENG Zhi-wei, DAI Qiang-yu

(College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: This study explored the temporal and spatial variation in $PM_{2.5}$ concentration and its relationship with the vegetation landscape pattern in three typical economic zones in China, which is of great significance for regional $PM_{2.5}$ pollution control and atmospheric environmental protection. In this study, the pixel binary model, Getis-Ord G_i^* analysis, Theil-Sen Median analysis, Mann-Kendall significance test, Pearson correlation analysis, and multiple correlation analysis were used to explore the spatial cluster and spatio-temporal variation in $PM_{2.5}$ and its correlation with the vegetation landscape index in the three economic zones of China on the basis of $PM_{2.5}$ concentration data and MODIS NDVI data set. The results showed that $PM_{2.5}$ in the Bohai Economic Rim was mainly dominated by the expansion of hot spots and the reduction in cold spots from 2000 to 2020. The proportion of cold spots and hot spots in the Yangtze River Delta showed insignificant changes. Both cold and hot spots in the Pearl River Delta had expanded. $PM_{2.5}$ showed a downward trend in the three major economic zones from 2000 to 2020, and the magnitudes of increasing rates were higher in the Pearl River Delta, followed by those in the Yangtze River Delta and Bohai Economic Rim. From 2000 to 2020, $PM_{2.5}$ exhibited a downward trend in the context of all vegetation coverage grades, and $PM_{2.5}$ had most significantly improved within extremely low vegetation coverage in the three economic zones. On the landscape scale, $PM_{2.5}$ values were mostly correlated with aggregation index in the Bohai Economic Rim, with the largest patch index in the Yangtze River Delta and Shannon's diversity in the Pearl River Delta, respectively. Under the context of different vegetation coverage levels, $PM_{2.5}$ showed the highest correlation with aggregation index in the Bohai Economic Rim, landscape shape index in the Yangtze River Delta, and percent of landscape in the Pearl River Delta, respectively. $PM_{2.5}$ showed significant differences with vegetation landscape indices in the three economic zones. The combined effect of multiple vegetation landscape pattern indices on $PM_{2.5}$ was stronger than that of the single vegetation landscape pattern index. The above results indicated that the spatial cluster of $PM_{2.5}$ in the three major economic zones had changed, and $PM_{2.5}$ showed a decreasing trend in the three economic zones during the study period. The relationship between $PM_{2.5}$ and vegetation landscape indices exhibited obvious spatial heterogeneity in the three economic zones.

Key words: typical economic zone; $PM_{2.5}$; vegetation landscape pattern; spatio-temporal variation; Getis-Ord G_i^* analysis

$PM_{2.5}$ 是指大气环境空气中动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu\text{g}$ 的颗粒物, 具有直径小, 污染范围广, 滞留时间长, 易吸附有害物质等特点^[1~3]. 有研究表明, 大气环境中 $PM_{2.5}$ 浓度超标, 不仅会引起雾-霾恶劣天气, 还会威胁人类的免疫系统, 诱发呼吸道疾病^[4~6]. 近年来, $PM_{2.5}$ 时空分布特征及其影响因素已成为学术界的热点. Lim 等^[7] 研究表明在全

球范围内中国和印度属于 $PM_{2.5}$ 高风险区, 欧洲、澳

收稿日期: 2022-05-25; 修订日期: 2022-07-06

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD21220133); 国家自然科学基金项目(42061059, 42161028); 广西空间信息与测绘重点实验室项目(191851016); 大学生创新创业训练计划项目(202210596388)

作者简介: 徐勇(1988~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境遥感、气候变化和植被覆盖反演, E-mail: yongxu@glut.edu.cn

大利亚和北美属于 PM_{2.5}减少区. 发达国家在保持绿度的情况下进行了城市扩张,但仍然减少了 PM_{2.5}排放,而发展中国家随着 PM_{2.5}浓度的上升,绿度呈下降趋势. 慕航等^[8]研究了 1999 ~ 2016 年“一带一路”沿线 65 个城市 PM_{2.5}时空变化趋势,结果表明 PM_{2.5}浓度空间分布存在明显的区域差异,且在研究时段内 65 个城市的年均 PM_{2.5}浓度从 12.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加到了 14.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 周亮等^[9]研究表明 2001 ~ 2011 年中国 PM_{2.5}污染呈现先快速上升后趋于稳定的变化趋势,地理条件、人口密度、交通运输、工业烟尘和秸秆燃烧是影响中国 PM_{2.5}变化的主要因素. Zhang 等^[10]研究发现节能减排等 PM_{2.5}污染治理措施的顺利实施,是 2013 ~ 2017 年中国 PM_{2.5}污染改善的最主要原因.

随着研究的不断深入,植被对 PM_{2.5}污染的净化作用逐渐引起了国内外学者的重视. Zhang 等^[11]研究发现在植被茂密的中国南方地区,植被季节周期对 PM_{2.5}削减更加显著. 与非城市地区相比,城市地区的植被季节周期的削弱效应较弱. Lee 等^[12]研究表明韩国首尔市林地的 PM_{2.5}浓度低于城市地区的 PM_{2.5}浓度,证明了城市森林可能是改善城市空气质量的一种潜在方式. Lu 等^[13]分析了土地利用和景观格局对长江三角洲 PM_{2.5}污染的影响,研究结果表明林地和草地两种植被覆盖度较高的土地利用类型与 PM_{2.5}浓度呈显著负相关. Qiu 等^[14]在对宝鸡市不同绿化覆盖率城市空间空气颗粒物浓度差异的研究中发现,提高城市绿地覆盖率有助于提高绿地对 PM_{2.5}等空气颗粒物浓度的净化能力;反之,如果城市绿地覆盖率降低,绿地自身对 PM_{2.5}等大气污染物的净化能力也会减弱. 杜彦彦等^[15]对河南省 PM_{2.5}时空分布特征与植被覆盖度的关系展开研究发现,PM_{2.5}与植被覆盖度之间有较强的相关性,提高植被覆盖度,扩大绿地面积对 PM_{2.5}改善有积极作用. 以上研究侧重

探究不同土地利用类型或植被覆盖度对 PM_{2.5}变化的影响,而忽略了不同植被覆盖度等级下 PM_{2.5}的时空演变特征和植被景观格局对 PM_{2.5}变化的影响.

环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区是中国三大典型经济区,经济发展快,人口密度大,工农业发达,PM_{2.5}污染问题比较严重^[16~18]. 因此,开展三大典型经济区 PM_{2.5}浓度时空变化及其与景观格局的关系研究十分必要. 本文基于 2000 ~ 2020 年 MODIS NDVI 数据和 PM_{2.5}浓度数据集,首先,利用热点分析揭示 2000 年和 2020 年三大典型经济区 PM_{2.5}冷热点空间分布特征;然后,采用趋势分析探究 2000 ~ 2020 年中国三大典型经济区不同植被覆盖度等级下 PM_{2.5}时空变化特征;最后,在景观尺度和类型尺度下,探究植被景观格局对 PM_{2.5}时空分布特征的影响. 本研究旨在为环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区制定科学合理的 PM_{2.5}污染治理政策提供理论依据.

1 研究区概况

环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区(图 1)是我国三大典型经济区,主要气候类型为温带季风气候和亚热带季风气候,地形以平原和山地为主,自然条件优越,工农业基础牢固,科技创新实力强,城市化程度高,是我国经济、政治和文化发展的战略要地. 环渤海地区位于我国北部沿海地区,地理范围在 34°22' ~ 43°28'N, 113°26' ~ 125°52'E 之间,行政区上包括北京市、天津市、河北省、辽宁省和山东省. 长江三角洲地区位于我国东部沿海,地理范围在 29°20' ~ 32°34'N, 115°46' ~ 123°25'E 之间,行政区上包括上海市、江苏省、浙江省和安徽省. 珠江三角洲地区位于我国南部沿海,地理范围在 21°48' ~ 24°24'N, 111°54' ~ 115°24'E 之间,包括广州、佛山、肇庆、深圳、东莞、惠州、珠海、中山和

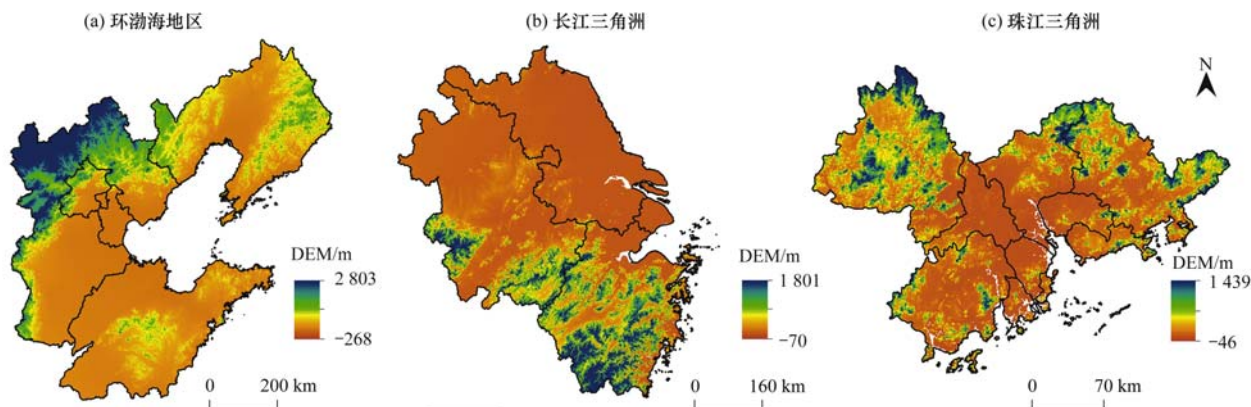


图 1 研究区示意

Fig. 1 Location of the study area

江门这 9 个城市.

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

本研究所使用 PM_{2.5}数据集 (V5. GL. 02) 由美国圣路易斯华盛顿大学大气成分分析组织发布 (<https://sites.wustl.edu/acag/datasets/>), 数据时间分辨率为每年, 空间分辨率为 0.01° × 0.01°, 时间跨度为 2000 ~ 2020 年, 该数据集是基于 NASA MODIS、MISR 和 SeaWIFS 等遥感产品的气溶胶光学厚度数据 (AOD), 通过 GEOS-Chem 化学传输模型进行浓度值估算, 并使用地理加权回归 (GWR) 进行校准后得到的^[19]. 本文对原始数据进行投影、镶嵌、重采样和裁剪后得到空间分辨率为 1 km 的三大经济区 PM_{2.5}数据集.

本研究所使用的 NDVI 数据集 (MOD13A3) 来源美国国家航天局发布植被指数产品 (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 数据时间分辨率为每月, 空间分辨率为 1 km, 时间跨度为 2000 年 2 月至 2020 年 12 月. 为了保证影像质量, 避免 2000 年 1 月植被 NDVI 数据缺失带来的影响, 本文对获取的 MODIS NDVI 数据集进行了影像镶嵌、重采样、投影转换、裁剪和最大值合成等预处理, 得到三大经济区 2000 ~ 2020 年 NDVI 年最大值数据集.

2.2 研究方法

2.2.1 像元二分模型

NDVI 作为表征区域植被覆盖的重要指标, 与植被覆盖度之间具有良好的正相关关系. 因此, 因此, 本文将 MODIS NDVI 数据与像元二分模型相结合, 反演得到三大经济区植被覆盖度^[20,21], 计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \quad (1)$$

式中, NDVI 表示像元的 NDVI 值; NDVI_{soil} 表示无植被覆盖的裸土信息; NDVI_{veg} 表示纯植被信息. 本文选取累计概率为 5% 的 NDVI 值为 NDVI_{soil}, 累计概率为 95% 的 NDVI 值为 NDVI_{veg}.

如表 1 所示, 根据 FVC 计算结果, 将三大经济区植被覆盖度分为 5 个等级^[22].

表 1 植被覆盖度等级对应表

Table 1 Corresponding table of fractional vegetation cover grades

植被覆盖度/%	植被覆盖度等级
0 ≤ FVC < 10	极低植被覆盖度
10 ≤ FVC < 30	低植被覆盖度
30 ≤ FVC < 50	中植被覆盖度
50 ≤ FVC < 70	中高植被覆盖度
70 ≤ FVC ≤ 100	高植被覆盖度

2.2.2 热点分析

本文基于 PM_{2.5}时间序列, 运用 Getis-Ord G_i^* 分析方法进行热点分析, 揭示 2000 年和 2020 年 PM_{2.5} 聚集性高值区 (热点区) 和聚集性低值区 (冷点区) 分布特征, 对比分析三大经济区 PM_{2.5} 空间聚集性变化情况^[23]. G_i^* 计算公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n W_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n W_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n W_{ij} \right)^2}{n-1}}} \quad (2)$$

式中, x_j 表示任意点 j 的 PM_{2.5} 浓度值; W_{ij} 表示点 i 和 j 的空间权重矩阵; $\bar{x}$ 表示 x_j 的平均值; S 表示标准差. 当 $G_i^* > 0$ 时, G_i^* 值越大, PM_{2.5} 高值空间聚集性越紧密; 当 $G_i^* < 0$ 时, G_i^* 值越小, PM_{2.5} 低值空间聚集性越紧密. 根据 G_i^* 的计算结果进行重分类, 将研究区划分为冷点区、次冷点区、热点区、次热点区和无显著性区域.

2.2.3 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验法

Theil-Sen Median 非参数估计法具有计算效率高, 不受数据异常值干扰等优点, 被广泛应用于长时间序列变化趋势计算中^[24]. 其计算公式为:

$$\beta_{slope} = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall j > i \quad (3)$$

式中, x_i 和 x_j 表示第 i 和第 j 年的 PM_{2.5} 浓度值, 其中 i 或 $j = 1, 2, 3, \dots, n$; Median 表示取中值函数. 当 $\beta_{slope} > 0$ 时, 表示在研究时段内该区域 PM_{2.5} 浓度呈上升趋势, PM_{2.5} 污染加重; 当 $\beta_{slope} = 0$ 时, 表示在研究时段内该区域 PM_{2.5} 浓度基本保持不变; 当 $\beta_{slope} < 0$ 时, 表示在研究时段内该地区 PM_{2.5} 浓度呈下降趋势, PM_{2.5} 污染得到改善.

Mann-Kendall 检验法可以用来检验变量在时间序列上变化的显著性^[25]. 对于给定的显著性水平 α , 当 $|Z| < Z_{1-\alpha/2}$ 时, 表明该区域 PM_{2.5} 在研究时段内发生了显著变化, 反之则为轻微变化. 本文定义变化趋势在 0.01 置信水平上为极显著变化, 在 0.05 的置信水平上为显著变化. 由此可将 PM_{2.5} 变化趋势分为: 极显著变化 ($|Z| > 2.58$)、显著变化 ($1.96 < |Z| \leq 2.58$) 和轻微变化 ($|Z| \leq 1.96$) 这 3 个等级.

2.2.4 景观格局指数

本文选取的景观格局指数包括: 斑块数量 (number of patches, NP)、最大斑块指数 (largest patch index, LPI)、斑块形状指数 (landscape shape index, LSI)、聚集度指数 (aggregation index, AI)、香

农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)和类型斑块面积占比(percent of landscape, PLAND). 在景观尺度下,求取 NP、LPI、LSI、AI 和 SHDI 共 5 个景观格局指数,反映研究区整体的植被景观格局;

在类型尺度下,求取 NP、LPI、LSI、AI 和 PLAND 共 5 个景观格局指数,反映研究区植被覆盖度等级区域的植被景观格局. 各景观格局指数的意义如表 2 所示^[26,27].

表 2 植被景观格局指数说明

Table 2 Description of fractional vegetation cover landscape index

景观格局指数	研究尺度	意义
NP	景观-类型	反映景观尺度和类型尺度下斑块的破碎程度, NP 越大,破碎程度越高
LPI	景观-类型	可用于识别景观尺度和类型尺度下占优势的斑块
LSI	景观-类型	反映景观尺度和类型尺度下斑块形状的复杂程度, LSI 越大,斑块形状越复杂
AI	景观-类型	反映景观尺度和类型尺度下斑块的复杂程度, AI 越大,斑块内部越复杂
SHDI	景观	反映景观尺度下斑块多样性, SHDI 越大,表明各个类型斑块发展越均衡
PLAND	类型	反映类型尺度下,各个等级植被覆盖度斑块占研究区总面积的比例

2.2.5 皮尔逊相关分析

本文运用皮尔逊相关分析法计算 2000 ~ 2020 年研究区 PM_{2.5}与景观尺度和类型尺度植被景观格局指数的相关性^[28]. 计算公式如下:

$$\rho_{x,y} = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sqrt{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2} \sqrt{N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i\right)^2}} \quad (4)$$

式中, x_i 和 y_i 分别表示 PM_{2.5} 年均值浓度数据集和植被景观格局指数数据集中的第 i 个变量; N 表示样本个数. 当相关系数在 0.05 的置信水平上显著时,则称 PM_{2.5} 年均值浓度与该植被景观格局指数显著相关,否则为不显著相关. 依据计算结果将 PM_{2.5} 年均值浓度与植被景观格局指数的相关关系划分为 3 个等级:不显著相关($P < 0.1$)、显著相关($P < 0.05$)和极显著相关($P < 0.01$).

2.2.6 复相关分析

本文运用复相关分析法研究景观尺度和类型尺度下 5 个植被景观格局指数对三大经济区 PM_{2.5} 的综合影响^[29],复相关系数的计算公式为:

$$R_{x, yz \cdots z_g} = [1 - (1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz, y}^2) \cdots (1 - r_{xz_g, yz \cdots z_{(g-1)}}^2)]^{1/2} \quad (5)$$

式中, $r_{xz_g, yz \cdots z_g}$ 表示 PM_{2.5} 与植被景观指数的复相关系数. 复相关系数越大, PM_{2.5} 与植被景观格局指数之间的线性相关程度越密切. 依据计算出的复相关系数将 PM_{2.5} 与植被格局景观的相关程度划分为不显著相关($P < 0.1$)、显著相关($P < 0.05$)和极显著相关($P < 0.01$)这 3 个等级.

3 结果与分析

3.1 PM_{2.5} 空间聚集性

由图 2(a) 和表 3 可知, 2000 年环渤海地区

PM_{2.5} 热点区占该区总面积的 35.50%, 主要分布在京津冀地区中部和南部, 山东省西部; PM_{2.5} 冷点区占该区总面积的 59.77%, 主要分布在京津冀地区北部, 山东省东部和辽宁省. 由图 2(d) 可知, 2020 年 PM_{2.5} 热点区占该区总面积的 40.45%, 相较于 2000 年增加了 4.95%, 增加区域主要位于山东省北部和辽宁省中部; 冷点区占该区总面积的 53.30%, 相较于 2000 年下降了 6.47%.

由图 2(b) 和表 3 可知, 2000 年长江三角洲地区 PM_{2.5} 热点区占该区总面积的 45.44%, 主要分布在安徽省中部和北部, 江苏省西部和南部, 浙江省北部; PM_{2.5} 冷点区占该区总面积的 47.54%, 主要分布在安徽省西南部, 江苏省东部, 浙江省中部和南部. 由图 2(e) 可知, 2020 年长江三角洲地区 PM_{2.5} 热点区和冷点区分别占该区总面积的 45.31% 和 47.84%, 面积占比与 2000 年相比均无明显变化, 但热点区在江苏省境内表现出向北部和东部扩张趋势, 而在安徽省中部、西部和南部、上海市南部、浙江省北部、中部和东南沿海地区的热点区均出现了一定程度的缩减或消失, 被冷点区替代.

由图 2(c) 和表 3 可知, 2000 年珠江三角洲地区 PM_{2.5} 热点区占该区总面积的 22.79%, 主要分布在珠江三角洲中部; PM_{2.5} 冷点区占该区总面积的 31.26%, 主要分布在珠江三角洲东北部和西北部. 由图 2(f) 可知, 2020 年珠江三角洲地区 PM_{2.5} 热点区面积占比相比 2000 年上升 2.53%, 2020 年珠江三角洲中部和东南沿海地带的热点区面积有明显扩张; PM_{2.5} 冷点区面积占比相比于 2000 年上升了 2.78%, 增加区域主要位于珠江三角洲东北部, 该区域的冷点区面积明显扩大.

整体上, 2000 ~ 2020 年三大经济区 PM_{2.5} 空间聚集性均发生了显著变化. 2000 年和 2020 年长江三角洲地区的热点区和冷点区面积占比均最高, 其次是环渤海地区, 珠江三角洲地区最少. 就面积占比

变化情况而言,21 a 来环渤海地区热点区面积上升,冷点区面积下降;长江三角洲地区冷热点区面积占比均上升.

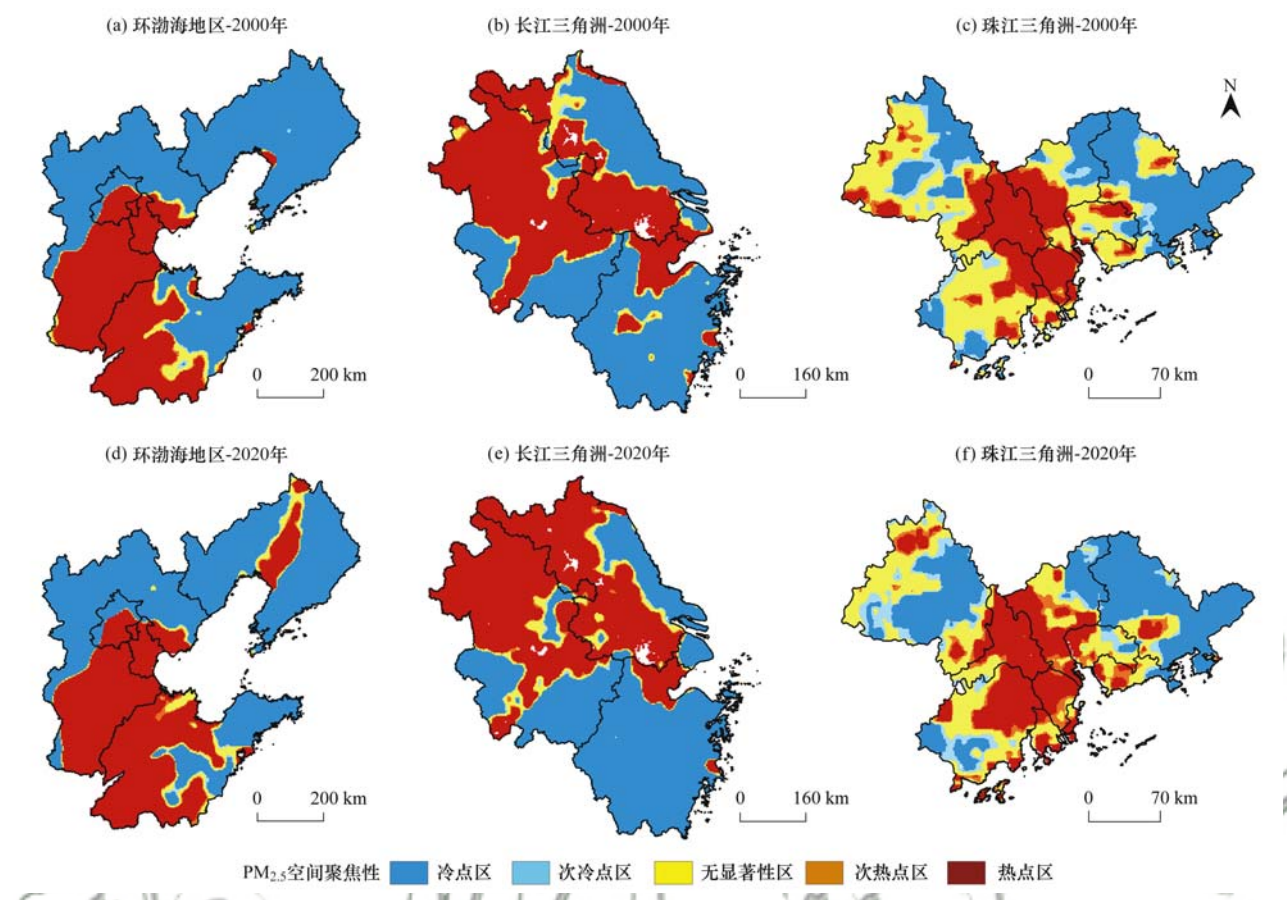


图2 三大经济区PM_{2.5}冷热点区空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of PM_{2.5} cold hot spots in the three economic zones

表3 三大经济区PM_{2.5}冷热点区面积占比统计/%

Table 3 Statistics on the proportion of PM _{2.5} hot and cold areas in the three economic zones/%						
研究区	年份	冷点区	次冷点区	无显著性区	次热点区	热点区
环渤海地区	2000	59.77	0.56	3.61	0.56	35.50
	2020	53.30	0.70	4.63	0.92	40.45
长江三角洲	2000	47.54	0.79	5.56	0.67	45.44
	2020	47.84	0.75	5.22	0.87	45.31
珠江三角洲	2000	31.26	7.82	32.40	5.73	22.79
	2020	34.04	8.72	25.80	6.12	25.32

3.2 PM_{2.5}浓度时空变化特征

3.2.1 研究区尺度下PM_{2.5}时间变化特征

如图3所示,2000~2020年环渤海地区PM_{2.5}整体呈波动下降趋势,变化斜率为-0.0377 μg·(m³·a)⁻¹.变化趋势可为3个阶段,第一个阶段为2000~2013年,PM_{2.5}年平均值呈现波动上升趋势,并在2013年达到21 a中的最大值14.14 μg·m⁻³;第二阶段为2013~2018年,PM_{2.5}年平均值呈快速下降趋势,并在2018年达到21 a中的最小值9.14 μg·m⁻³;第三阶段为2018~2020年,PM_{2.5}年平均值变化趋势不显著,2019年相较于2018年有轻微上升,2019与2020年则基本保持

不变.

长江三角洲地区PM_{2.5}年平均值变化趋势整体表现下降趋势,变化斜率为-0.0591 μg·(m³·a)⁻¹.变化趋势可分为2个阶段.第一个阶段为2000~2014年,PM_{2.5}年平均值呈现波动上升趋势,并在2014年达到21 a中最大值11.75 μg·m⁻³;第二阶段为2014~2020年,PM_{2.5}年平均值整体呈现下降趋势,并在2018年达到21 a中最小值8.1 μg·m⁻³.

珠江三角洲地区PM_{2.5}年平均值变化趋势同样表现下降趋势,变化斜率为-0.0977 μg·(m³·a)⁻¹.变化趋势可分为3个阶段.第一阶段

为 2000 ~ 2006 年, PM_{2.5} 年平均值呈波动上升趋势; 第二阶段为 2006 ~ 2011 年, PM_{2.5} 年平均值变化曲线为 U 型, 2006 ~ 2010 年呈下降趋势, 2010 ~ 2011 年呈现上升趋势, 并在 2011 年达到 21 a 中的最大值 10.80 μg·m⁻³; 第三阶段为 2011 ~ 2020 年, PM_{2.5} 呈现波动下降趋势, 2018 年和 2020 年平均值均达到 21 a 中的最小值 7.17 μg·m⁻³.

综合可知, 2000 ~ 2020 年环渤海地区 PM_{2.5} 年平均值最高, 其次是长江三角洲地区, 珠江三角洲地区最低. 在研究时段内, 三大经济区 PM_{2.5} 年平均值均呈下降趋势. 其中, 珠江三角洲地区 PM_{2.5} 下降趋势最为显著, 其次是长江三角洲地区, 最后是环渤海地区.

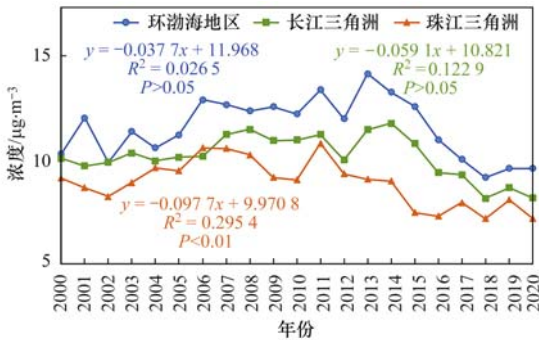


图3 2000 ~ 2020 年三大经济区 PM_{2.5} 时间变化趋势

Fig. 3 Temporal variation trend of PM_{2.5} in the three economic zones from 2000 to 2020

3.2.2 三大经济区尺度下 PM_{2.5} 空间变化特征

由图 4 (a) 可知, 2000 ~ 2020 年环渤海地区 PM_{2.5} 变化斜率在 -0.96 ~ 0.58 μg·(m³·a)⁻¹ 之间. 由图 4(d) 和表 4 可知, 环渤海地区 PM_{2.5} 呈下降趋势的面积远大于呈上升趋势的面积. PM_{2.5} 呈下降趋势的区域面积占该研究区总面积的 69.34%, 其中,

呈极显著下降和显著下降的区域面积占 7.52%, 主要分布在河北省中部, 辽宁省东南部和西南部. PM_{2.5} 呈上升趋势的面积占总面积的 30.66%, 其中, 呈极显著上升和显著上升的区域面积仅占 0.45%, 分布于河北省南部和山东省境内.

由图 4(b) 可知, 2000 ~ 2020 年长江三角洲地区 PM_{2.5} 变化斜率在 -0.52 ~ 0.48 μg·(m³·a)⁻¹ 之间. 由图 4(e) 和表 4 可知, 长江三角洲地区 PM_{2.5} 呈下降趋势的区域面积占长江三角洲总面积的 82.15%. 其中, 呈极显著下降和显著下降的区域面积占 28.12%, 主要分布在浙江省, 安徽省东南部和江苏省西南部. PM_{2.5} 呈上升趋势的面积占长江三角洲地区总面积的 17.85%. 其中, 呈极显著上升和显著上升的区域面积仅占 0.86%, 零星分布于江苏省西北部和安徽省西北部.

由图 4(c) 可知, 2000 ~ 2020 年珠江三角洲地区 PM_{2.5} 变化斜率在 -0.26 ~ 0.01 μg·(m³·a)⁻¹ 之间. 由图 4(f) 和表 4 可知, PM_{2.5} 呈下降趋势的区域面积占珠江三角洲地区总面积的 99.93%, 其中, 呈极显著下降和显著下降的区域面积占 58.53%, 主要分在该区西部、南部和东北部. PM_{2.5} 呈上升趋势的面积仅占珠江三角洲地区总面积的 0.07%, 无极显著上升和显著上升区域.

整体上, 2000 ~ 2020 年三大经济区 PM_{2.5} 呈下降趋势的面积占比均大于呈上升趋势的面积占比. 其中, 下降趋势占比最大的是珠江三角洲地区, 其次是长江三角洲地区, 环渤海地区占比最小. 综上所述可知, 珠江三角地区 PM_{2.5} 改善态势最为良好, 其次是长江三角洲地区, 环渤海地区相较于其他两个经济区 PM_{2.5} 改善情况较差.

表 4 2000 ~ 2020 年三大经济区 PM_{2.5} 变化趋势显著性统计/%

Table 4 Statistical results of significance of PM_{2.5} change trend in the three economic zones from 2000 to 2020/%

研究区	变化趋势显著性					
	极显著下降	显著下降	轻微下降	轻微上升	显著上升	极显著上升
环渤海地区	1.74	5.78	61.82	30.21	0.41	0.04
长江三角洲	15.44	12.68	54.03	16.99	0.62	0.24
珠江三角洲	18.02	40.51	41.40	0.07	0.00	0.00

3.2.3 植被覆盖度等级区域 PM_{2.5} 变化特征

如图 5 和表 5 所示, 在研究时段内, 三大经济区植被覆盖度均以高植被覆盖度为主.

如图 6(a) 所示, 在不同的植被覆盖度等级上, 环渤海地区 PM_{2.5} 均呈下降趋势. 随植被覆盖度升高, PM_{2.5} 多年平均值变化趋势表现为先升高, 再下降, 后基本保持不变. 在低植被覆盖度区域 PM_{2.5} 多年平均值最高, 且呈下降趋势区域面积占比最小, 在中高植被覆盖度区域最低. 综合可知, 在 21 a 中环

渤海地区 PM_{2.5} 在极低植被覆盖度区域下降趋势最为显著; 低植被覆盖度区域 PM_{2.5} 呈轻微下降, 极显著下降和显著下降区域占比最小.

如图 6(b) 所示, 长江三角洲地区 PM_{2.5} 在 5 个植被覆盖度等级区域上变化趋势趋于一致, 均表现为下降趋势. PM_{2.5} 多年平均值随植被覆盖度升高表现出先上升后下降的变化趋势, 低植被覆盖度区域 PM_{2.5} 多年平均值最高, 高植被覆盖度区域最低. 由上可知, 2000 ~ 2020 年间长江三角洲地区 PM_{2.5} 在

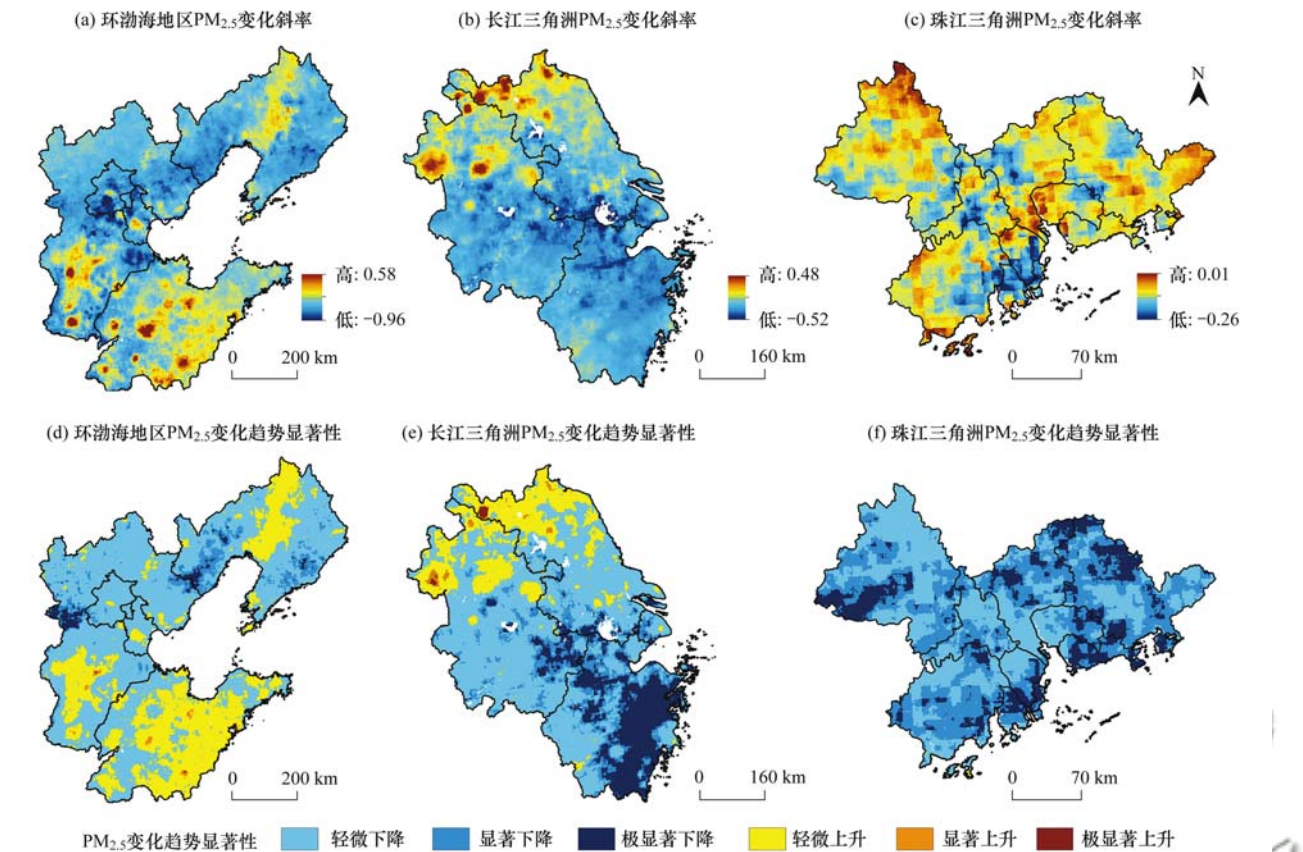
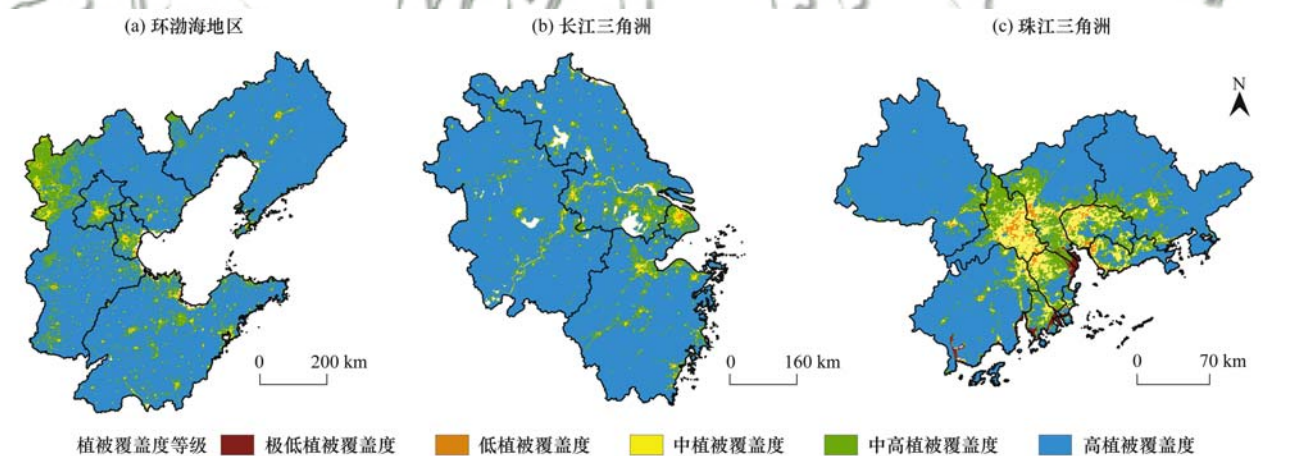
图4 三大经济区 $PM_{2.5}$ 变化趋势及其显著性检验Fig. 4 $PM_{2.5}$ change trend and significance test in three economic zones

图5 三大经济区植被覆盖度空间分布

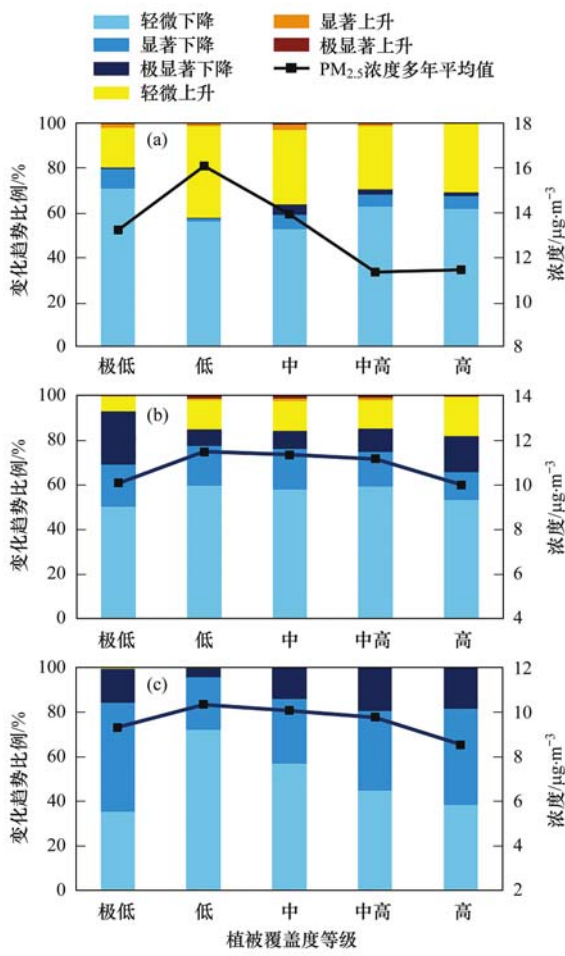
Fig. 5 Spatial distribution of fractional vegetation cover in the three economic zones

不同植被覆盖度等级区域呈现出良好的改善态势,其中,极低植被覆盖度区域呈下降趋势的面积占比最大,极显著下降和显著下降区域面积占比同样超过了其他分区, $PM_{2.5}$ 污染改善程度最佳。

如图6(c)所示,在不同的植被覆盖度等级上,珠江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 变化趋势均以下降为主。 $PM_{2.5}$ 多年平均值随植被覆盖度升高表现出先上升后下降的变化趋势,低植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 多年平均值最高,高植被覆盖度区域最低。综上所述,珠江

三角洲地区 21 a 内 $PM_{2.5}$ 改善态势良好,5 个植被覆盖度等级区域内的绝大部分区域均表现为下降趋势。就极显著下降和显著下降的区域占比来看, $PM_{2.5}$ 在极低植被覆盖度区域改善态势最佳,在低植被覆盖度区域改善态势较差。

整体上,环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 在不同植被覆盖度区域的变化趋势与其整体变化趋势保持一致, $PM_{2.5}$ 均呈现下降趋势。且珠江三角洲地区不同植被覆盖度分区 $PM_{2.5}$ 改



(a)环渤海地区, (b)长江三角洲, (c)珠江三角洲
图6 三大经济区不同植被覆盖度等级区域 PM_{2.5} 变化趋势及其显著性检验

Fig. 6 PM_{2.5} change trend and significance test in the three economic zones with different vegetation coverage levels

善态势最佳,其次是长江三角洲地区,环渤海地区不同植被覆盖度分区 PM_{2.5}改善态势较差.就三大经济区不同植被覆盖度等级区域呈下降趋势的面积占比而言,3 个地区极低植被覆盖区域的 PM_{2.5}均表现出了最高的改善程度.环渤海地区、珠江三角洲地区低植被覆盖度区域和长江三角洲地区高植被覆盖度区域 PM_{2.5}改善程度最差.就不同植被覆盖度等级区域 PM_{2.5}多年平均值变化趋势来看,三大经济区低植被覆盖度区域 PM_{2.5}多年平均值均最高,环渤海地区中高植被覆盖度区域、长江三角洲地区和珠江三角洲地区高植被覆盖度区域 PM_{2.5}多年平均值最低.

表5 三大经济区植被覆盖等级面积占比统计/%

Table 5 Proportion of fractional vegetation cover in the three economic zones/%

研究区	植被覆盖度等级				
	极低	低	中	中高	高
环渤海地区	0.21	0.33	2.27	11.34	85.85
长江三角洲	0.23	0.25	2.05	8.29	89.18
珠江三角洲	1.52	1.30	9.04	14.71	73.43

3.3 PM_{2.5}与植被景观格局指数相关性分析

3.3.1 景观尺度下 PM_{2.5}与植被景观格局指数相关性

如图7所示,除环渤海地区 PM_{2.5}与 LPI 的相关系数外,其余相关系数均通过了 0.1 置信水平显著性检验.其中,NP 与环渤海地区和长江三角洲地区 PM_{2.5}呈不显著负相关($P < 0.1$),与珠江三角洲地区 PM_{2.5}呈显著正相关($P < 0.05$); LPI 在长江三角洲与 PM_{2.5}呈显著正相关($P < 0.01$)、在珠江三角洲地区与 PM_{2.5}呈不显著负相关($P < 0.1$); LSI 在环渤海地区与 PM_{2.5}年均值呈不显著负相关($P < 0.1$),在长江三角洲呈显著负相关($P < 0.05$),在珠江三角洲呈显著正相关($P < 0.05$); AI 在环渤海地区和珠江三角洲地区与 PM_{2.5}呈显著负相关($P < 0.05$)关系,在长江三角洲地区呈显著正相关($P < 0.05$); SHDI 在环渤海地区与 PM_{2.5}呈不显著正相关($P < 0.1$),在长江三角洲呈不显著负相关($P < 0.1$),在珠江三角洲地区呈极显著正相关($P < 0.01$).

综上所述,三大经济区 PM_{2.5}与各植被景观格局指数的相关关系存在显著差异.环渤海地区与 AI 相关性最强,长江三角洲地区与 LPI 相关性最强,珠江三角洲地区与 SHDI 相关性最强.整体上,珠江三角洲地区 PM_{2.5}与植被景观格局指数相关性最强,环渤海地区最弱.

	不显著相关 ($P<0.1$)	显著相关 ($P<0.05$)	极显著相关 ($P<0.01$)		
环渤海地区	-0.411	0.295	-0.378	-0.438	0.378
长江三角洲	-0.412	0.501	-0.474	0.482	-0.431
珠江三角洲	0.477	-0.396	0.501	-0.501	0.633
	NP	LPI	LSI	AI	SHDI

图7 景观尺度下的 PM_{2.5}与植被景观格局指数的相关系数

Fig. 7 Correlation coefficient between PM_{2.5} and vegetation landscape pattern index at landscape scale

3.3.2 类型尺度下 PM_{2.5}与植被景观格局指数相关性

如图8(a)所示,整体上,环渤海地区中植被覆盖区域 PM_{2.5}与各植被景观格局指数的相关关系最强,与 LPI、LSI 和 AI 这3 个植被景观格局指数均表现为极显著相关($P < 0.01$);低植被覆盖度区域 PM_{2.5}与植被景观格局指数的相关关系最弱,与所有植被景观格局指数均不相关. AI 与中、中高和高植被覆盖度区域均表现出相关性,是与环渤海地区不同植被覆盖度等级区域 PM_{2.5}相关性最强的植被景观格局指数.如图8(b)所示,长江三角洲地区极低植被覆盖度区域 PM_{2.5}与植被景观格局指数相关性

最强,与所有植被景观格局指数均表现出了相关性,与 NP、LPI、AI 和 PLAND 呈极显著相关 ($P < 0.01$),与 LSI 呈显著相关 ($P < 0.05$),是与植被景观格局指数相关性最强的区域. 低植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 与所有植被景观格局指数均不相关,是相关性最弱的区域. NP 和 LSI 与长江三角洲地区大部分植被覆盖度分区 $PM_{2.5}$ 均表现较强的相关性,其中,LSI 与中植被覆盖度区域表现为不显著负相关 ($P < 0.1$),与极低、中高和高植被覆盖度区域表现为显著相关 ($P < 0.05$),是与长江三角洲地区不同植被覆盖度等级区域 $PM_{2.5}$ 相关性最强的植被景观格局指数. 如图 8(c) 所示,珠江三角洲地区中高植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数相关性最强,低植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数相关性最弱. PLAND 与中植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 呈显著相关 ($P < 0.05$),与极低、高植被覆盖

度等级区域 $PM_{2.5}$ 呈极显著相关 ($P < 0.01$),是与珠江三角洲 $PM_{2.5}$ 相关性最强的植被景观格局指数.

在类型尺度下,三大经济区不同植被覆盖度分区 $PM_{2.5}$ 与植被覆盖度景观格局指数的相关关系表现出明显的差异. 其中,环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区不同植被覆盖度等级区域 $PM_{2.5}$ 相关性最强的景观格局指数分别是 AI、LSI 和 PLAND. 长江三角洲地区各植被覆盖度等级区域 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数的相关性最强,环渤海地区和珠江三角洲地区较弱. 环渤海地区中植被度区域、长江三角洲地区极低植被覆盖度区域和珠江三角洲地区中高植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数相关性最强,三大经济区低植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数相关性均最弱.

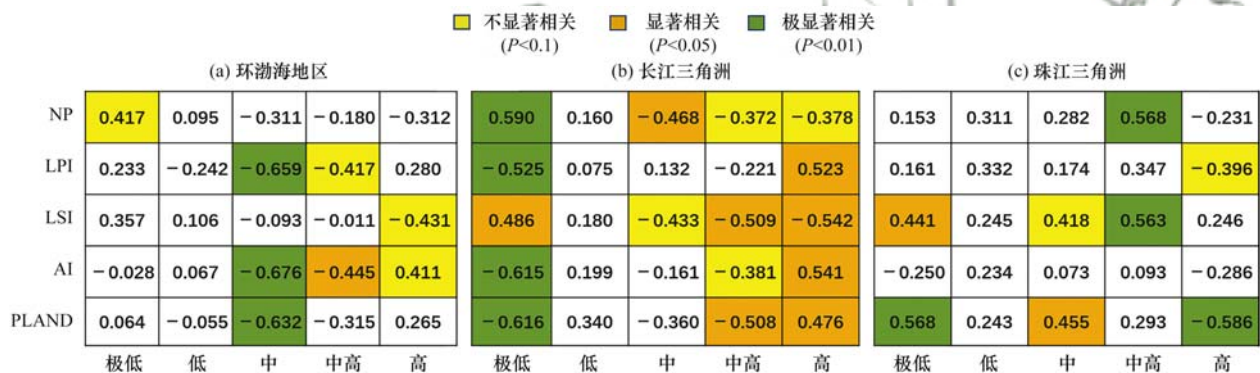


图 8 类型尺度下的 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数的相关系数

Fig. 8 Correlation coefficient between $PM_{2.5}$ and vegetation landscape pattern index at the type scale

3.3.3 景观尺度和类型尺度下 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数复相关关系

如图 9 所示,在景观尺度下,三大经济区 $PM_{2.5}$ 与 NP、LPI、LSI、AI 和 SHDI 这 5 个植被景观格局

指数的复相关系数均通过了置信水平 0.01 的显著性检验,表现为极显著正相关关系 ($P < 0.01$). 在类型尺度下,环渤海地区极低覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 与 NP、LPI、LSI、AI 和 PLAND 这 5 个植被景观格局指数呈显著正相关关系 ($P < 0.05$),与低、中、中高和高植被覆盖度等级区域呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$); 长江三角洲地区极低、低、中、中高和高植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数的复相关关系均为极显著正相关 ($P < 0.01$); 珠江三角洲地区不同的植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数的复相关关系均为极显著正相关 ($P < 0.01$). 综上所述,在景观尺度和类型尺度下,植被景观格局指数对 $PM_{2.5}$ 的复相关关系强于单个植被景观格局指数对 $PM_{2.5}$ 的相关关系.



图 9 景观尺度和类型尺度下的 $PM_{2.5}$ 与植被景观格局指数的复相关系数

Fig. 9 Multiple correlation coefficient between $PM_{2.5}$ and vegetation landscape pattern index at landscape scale and type scale

4 讨论

4.1 $PM_{2.5}$ 空间聚集性

2000 年和 2020 年环渤海地区 $PM_{2.5}$ 热点区在

京津冀地区中南部,山东省西部均有大面积分布.究其原因,一是受政治经济等因素影响,京津冀地区中南部和山东省西部人口密度大,人类活动频繁,传统重工业发达,大气污染物排放量大;二是京津冀地区中南部和山东省西部同属于华北平原内陆地区,地势平坦,又四面环山,空气流动性差, $PM_{2.5}$ 等大气污染物难以向外扩散,聚集在这些地区形成热点区^[30,31]. 2000 ~ 2020 年热点区面积占比上升,在山东省和辽宁省境内 $PM_{2.5}$ 热点区均发生了一定程度的扩张,这可能与山东省和辽宁省中部地区人口增长,城市迅速发展,区域工业压力增大有关^[32~34]. 2000 ~ 2020 年环渤海地区 $PM_{2.5}$ 冷点区面积占比下降,但其在京津冀地区的分布面积有轻微扩展,原因可能是“大气十条”等大气污染治理措施在该地区已一定成效^[35].

2000 年和 2020 年长江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 热点区在安徽省中部和北部,江苏省西部和南部,浙江省北部均有大面积集中分布.主要原因是这些地区处在城市化、工业化高速发展阶段,能源密集型产业、人类生活排放和机动车尾气带来的大气污染物,促使了该地区 $PM_{2.5}$ 聚集程度热点区的形成^[36]. 2020 年长江三角洲地区冷热点区面积占比与 2000 年基本持平,但江苏省境内的热点区分布有向东部扩展的趋势.造成这种变化的原因有二:一是因为江苏省北部地区传统工业在其产业结构中占比较高,污染物排放量大;二是该地区与山东省南部接壤,易受山东省大气污染影响,山东省内 $PM_{2.5}$ 热点区的扩张,势必会影响江苏省境内 $PM_{2.5}$ 空间聚集性^[37]. 同时,安徽省中部,西部及南部,上海市南部,浙江省北部,中部及东南沿海地区的热点区均出现了一定程度的缩减或消失,被冷点区替代.这可能与这些地区产业结构升级,“高污染,高能耗”的产业逐渐转移,以及“美丽长三角”和“双碳目标”等相关环境治理政策的实施有关^[38].

2020 年珠江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 热点区分布与 2000 年相比出现了两处变化显著的区域,一是中部地区的热点区面积扩大了,这与该区域的地形条件、产业类型和人口数量有关.中部地区属于珠江三角洲经济发展的核心区域,制造业发达,人口数量大,人类生产生活产生的空气污染物大量排放到空气中,地形条件又不利于污染物扩散,易形成 $PM_{2.5}$ 聚集^[39].二是沿海地区的热点区面积增加了,这可能与沿海地区人口密度增大,船舶大量排放污染物有关.

4.2 $PM_{2.5}$ 时空变化特征

由三大经济区 $PM_{2.5}$ 年均值变化趋势可知,整体上,环渤海地区 $PM_{2.5}$ 污染情况最为严重,其次是长

江三角洲地区,珠江三角洲地区的污染程度整体低于其他两个经济区,这与 3 个经济区的产业结构有关,冶金、化工等污染密集型产业在环渤海地区和长江三角洲地区产业结构中占比较大,大量污染物排放到空气中导致 $PM_{2.5}$ 浓度升高^[40,41]. 2000 ~ 2020 年间,环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 整体呈先上升,后下降的变化趋势,下降的拐点分别出现在 2013、2014 和 2011 年,这与已有研究的结果相符^[42~44]. 进入 21 世纪后,以破坏生态为代价的经济发展模式弊端逐渐显现, $PM_{2.5}$ 污染问题日益严重.自 2011 年我国颁布首个 $PM_{2.5}$ 测定规范起,一系列有关 $PM_{2.5}$ 防治的政策相继出台,三大经济区的 $PM_{2.5}$ 污染情况伴随着污染治理工作的顺利开展逐渐好转.

2000 ~ 2020 年三大经济区 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈下降趋势,珠江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 污染改善程度最大,其次是长江三角洲地区,最后是环渤海地区.虽然我国 $PM_{2.5}$ 污染治理工作取得了一定成效,但环渤海地区和长江三角洲地区长期以来以能源密集型产业为主的产业结构短时间内难以改变,同时随着交通设施的不断完善,机动车辆尾气中的细微颗粒物已成为治理工作新难点^[45,46]. 环渤海地区呈极显著下降和显著下降的区域主要集中在河北省中部、辽宁省东南部和西南部,这些区域人口密度较低,工农业分布不集中,人类活动产生的污染物较少;其次地势较高,不易受其他地区 $PM_{2.5}$ 污染的影响;加之以上区域植被覆盖度高,能够有效净化空气中的 $PM_{2.5}$,多种因素共同作用下,以上地区的 $PM_{2.5}$ 污染情况得到了明显改善^[47]. 长江三角洲地区呈极显著下降和显著下降的区域主要集中分布在浙江省东南部,主要原因是该地区人类活动强度低, $PM_{2.5}$ 排放量低,森林覆盖面积大,对 $PM_{2.5}$ 起到了一定程度的吸附沉降作用^[48]. 珠江三角洲地区是三大经济区中 $PM_{2.5}$ 污染改善态势最为良好的地区,呈极显著下降和显著下降的区域在该地区全境内均有分布,这与该地区产业结构调整和实施的一系列节能减排措施取得成效有关^[49].

2000 ~ 2020 年三大经济区不同植被覆盖度等级区域的 $PM_{2.5}$ 污染均呈现改善态势.其中,三大经济区极低植被覆盖度区域 $PM_{2.5}$ 污染改善程度最高,该区域植被覆盖度极低,土地贫瘠,受人类活动影响较小,因此在三大经济区 $PM_{2.5}$ 均呈现下降趋势的背景下, $PM_{2.5}$ 污染改善最为显著.环渤海地区和珠江三角洲地区低植被覆盖度区域污染改善程度较差,该区域的土地利用类型多为城市和建设用地,分布着居民区和工厂等 $PM_{2.5}$ 主要来源,污染物排放量大,植被覆盖度

低,PM_{2.5}污染问题在短时间内难以得到显著改善;长江三角洲地区高植被覆盖度区域改善程度较差,这是因为植被对PM_{2.5}污染的改善程度是有限的。

4.3 PM_{2.5}与植被景观格局指数相关性分析

在景观尺度下,三大经济区的PM_{2.5}年均值浓度与植被覆盖度的关系差异显著,不同研究区与同一植被景观格局指数的关系并不一致。环渤海地区PM_{2.5}与AI的相关性最强,呈显著负相关关系,说明环渤海地区植被斑块之间的距离减小,能够显著改善PM_{2.5}污染情况。长江三角洲地区PM_{2.5}与LPI相关性最强,呈显著正相关关系,LPI能够反映植被斑块内部的优势种丰富度,说明在利用植被覆盖改善长江三角洲地区整体PM_{2.5}污染情况时,应当优先考虑调节植被斑块内部的优势种个数。珠江三角洲地区PM_{2.5}与SHDI相关性最强,呈极显著正相关关系,说明在珠江三角洲地区,适当降低区域植被景观多样性有利于缓解PM_{2.5}污染。

类型尺度下,PM_{2.5}年均值浓度与植被覆盖度的关系同样差异显著,三大经济区不同植被覆盖度等级区域PM_{2.5}年均值浓度与植被景观格局指数关系呈现出较大差异。在环渤海地区,AI对不同植被覆盖度等级区域的影响最为显著,说明调节斑块之间的聚集程度对中植被覆盖度区域PM_{2.5}污染的改善有积极作用。长江三角洲不同植被覆盖度等级区域与LSI相关性最强,说明通过改变植被斑块复杂程度能够有效缓解长江三角洲不同植被覆盖度等级区域PM_{2.5}污染问题。珠江三角洲地区不同植被覆盖度等级区域与PLAND相关性最强,说明适当提高或降低与PLAND相关的植被覆盖度区域的占比对治理PM_{2.5}污染有促进作用。三大经济区低植被覆盖度区域与植被覆盖度景观格局指数的相关性最弱。环渤海地区中植被覆盖区域、长江三角洲地区极低植被覆盖度区域和珠江三角洲地区中高植被覆盖度区域PM_{2.5}与植被景观格局指数的相关关系最强,说明植被景观格局对改善这些区域PM_{2.5}污染有重要作用。在景观尺度下和类型尺度下,植被景观格局指数对三大经济区不同植被覆盖度等级区域的综合影响强于单个景观指数对PM_{2.5}的影响,说明在利用植被景观改善PM_{2.5}污染时,同时考虑植被景观格局的斑块特征、空间特性和多样性等多种属性对PM_{2.5}的综合影响可能会取得更好的效果。

5 结论

(1)2000~2020年三大经济区PM_{2.5}空间聚集性均发生了改变。环渤海地区PM_{2.5}空间聚集性变化主要表现为热点区扩张,冷点区缩减;长江三角洲

地区冷点区和热点区面积占比无显著变化,空间分布变化显著;珠江三角洲地区冷点区和热点区面积均发生扩张。

(2)2000~2020年三个经济区的PM_{2.5}变化具有阶段性特征,但整体上呈现下降趋势。环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区呈下降趋势的面积分别占其总面积的69.34%、82.15%和99.93%,改善程度从高到低依次是:珠江三角洲地区、长江三角洲地区、环渤海地区。

(3)2000~2020年三大经济区不同植被覆盖度等级区域PM_{2.5}变化主要表现为下降趋势。三大经济区PM_{2.5}在极低植被覆盖度区域改善程度最高,环渤海地区和珠江三角洲地区PM_{2.5}在低植被覆盖度区域改善程度较差,长江三角洲地区PM_{2.5}在高植被覆盖度区域改善程度较差。

(4)在景观尺度下,与环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区PM_{2.5}相关性最强的植被景观格局指数分别是AI、LPI和SHDI。在类型尺度下,环渤海地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区不同植被覆盖度等级区域PM_{2.5}相关性最强的植被景观格局指数分别是AI、LSI和PLAND。在景观尺度和类型尺度下,PM_{2.5}与植被景观格局指数的关系均表现出明显差异,植被景观格局指数对PM_{2.5}的复相关关系强于单个植被景观格局指数对PM_{2.5}的相关关系。合理利用PM_{2.5}与植被景观格局的关系,构建适宜的植被景观格局,有助于改善PM_{2.5}污染,提高空气质量,减少大气污染带来的风险。

参考文献:

- [1] Guo X H, Wang Y F, Mei S Q, *et al.* Monitoring and modelling of PM_{2.5} concentration at subway station construction based on IoT and LSTM algorithm optimization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, **360**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132179.
- [2] Thao N N L, Pimonsree S, Prueksakorn K, *et al.* Public health and economic impact assessment of PM_{2.5} from open biomass burning over countries in mainland Southeast Asia during the smog episode[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, **13** (6), doi: 10.1016/j.apr.2022.101418.
- [3] Zhang L L, Wilson J P, MacDonald B, *et al.* The changing PM_{2.5} dynamics of global megacities based on long-term remotely sensed observations[J]. *Environment International*, 2020, **142**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105862.
- [4] Shamsollahi H R, Yunesian M, Kharrazi S, *et al.* Characterization of persistent materials of deposited PM_{2.5} in the human lung[J]. *Chemosphere*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134774.
- [5] Wu Y Y, Zhang T, Wang Y Y, *et al.* Spatial heterogeneity in health risks of illness-related absenteeism associated with PM_{2.5} exposure for elementary students[J]. *Environmental Research*, 2022, **212**, doi: 10.1016/j.envres.2022.113473.
- [6] Bu X, Xie Z L, Liu J, *et al.* Global PM_{2.5}-attributable health burden from 1990 to 2017: estimates from the global burden of disease study 2017[J]. *Environmental Research*, 2021, **197**,

- doi: 10.1016/j.envres.2021.111123.
- [7] Lim C H, Ryu J, Choi Y, *et al.* Understanding global PM_{2.5} concentrations and their drivers in recent decades (1998-2016) [J]. *Environment International*, 2020, **144**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106011.
- [8] 慕航, 何超, 阮秋明, 等. “一带一路”沿线国家 PM_{2.5} 污染与人口暴露风险的时空分布特征[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(6): 2229-2240.
- Mu H, He C, ThuMinh N, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics and population exposure risks to PM_{2.5} in countries along the Belt and Road [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(6): 2229-2240.
- [9] 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.
- [10] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [11] Zhang L, He J J, Gong S L, *et al.* Effect of vegetation seasonal cycle alterations to aerosol dry deposition on PM_{2.5} concentrations in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **828**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.154211.
- [12] Lee A, Jeong S, Joo J, *et al.* Potential role of urban forest in removing PM_{2.5}: a case study in Seoul by deep learning with satellite data [J]. *Urban Climate*, 2021, **36**, doi: 10.1016/j.uclim.2021.100795.
- [13] Lu D B, Mao W L, Yang D Y, *et al.* Effects of land use and landscape pattern on PM_{2.5} in Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, **9**(4): 705-713.
- [14] Qiu L, Liu F, Zhang X, *et al.* Difference of airborne particulate matter concentration in urban space with different green coverage rates in Baoji, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(8), doi: 10.3390/ijerph16081465.
- [15] 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 Environment Sciences*, 2019, **28**(11): 2257-2265.
- [16] 刘跃, 陈俊峰, 田玉军, 等. 环渤海经济区海域船舶大气污染物排放特征[J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(3): 523-530.
- Liu Y, Chen J F, Tian Y J, *et al.* Emission characteristics of atmospheric pollutants from ships in sea area around circum-Bohai sea economic zone [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(3): 523-530.
- [17] 余钟奇, 瞿元昊, 周广强, 等. 2018 年秋冬季长江三角洲区域 PM_{2.5} 污染来源数值研究[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4237-4246.
- Yu Z Q, Qu Y H, Zhou G Q, *et al.* Numerical simulations of PM_{2.5} pollution source in the Yangtze River Delta region in fall and winter in 2018 [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4237-4246.
- [18] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 97-105.
- Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006-2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [19] 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 等. 长三角地区 PM_{2.5} 浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1201-1211.
- Zhou L X, Wu T, Jiang G J, *et al.* Spatial heterogeneity of PM_{2.5} concentration in response to land use/cover conversion in the Yangtze River Delta region [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1201-1211.
- [20] Li J, Wang J L, Zhang J, *et al.* Growing-season vegetation coverage patterns and driving factors in the China-Myanmar Economic Corridor based on Google Earth Engine and geographic detector [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **136**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108620.
- [21] Liu C X, Zhang X D, Wang T, *et al.* Detection of vegetation coverage changes in the Yellow River Basin from 2003 to 2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **138**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108818.
- [22] 高鹏文, 阿里木江·卡斯木, 赵永玉, 等. 1988-2018 年哈密绿洲植被覆盖度时空变化及其驱动力[J]. *水土保持通报*, 2020, **40**(6): 273-280, 287.
- Gao P W, Kasim · Alimujiang, Zhao Y Y, *et al.* Spatial and temporal changes and driving forces of vegetation coverage in Hami Oasis During 1988-2018 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, **40**(6): 273-280, 287.
- [23] Zhang H R, Tripathi N K. Geospatial hot spot analysis of lung cancer patients correlated to fine particulate matter (PM_{2.5}) and industrial wind in Eastern Thailand [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **170**: 407-424.
- [24] Wang X G, Li T X, Ikhumhen H O, *et al.* Spatio-temporal variability and persistence of PM_{2.5} concentrations in China using trend analysis methods and Hurst exponent [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, **13**(1), doi: 10.1016/j.apr.2021.101274.
- [25] Wang J Y, Wang S J, Li S J. Examining the spatially varying effects of factors on PM_{2.5} concentrations in Chinese cities using geographically weighted regression modeling [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **248**: 792-803.
- [26] Chen L W, Zhang H, Xie Z L, *et al.* The temporal response of dissolved heavy metals to landscape indices in the Le'an river, China [J]. *Environmental Research*, 2022, **210**, doi: 10.1016/j.envres.2022.112941.
- [27] 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 等. 1998~2016 年中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5100-5108.
- Yang Y L, Yang K, Luo Y, *et al.* Effect of vegetation coverage on the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} concentration in China's eight major economic regions from 1998 to 2016 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5100-5108.
- [28] 高龙, 唐力, 侯浩然, 等. 深圳市大气污染时空分布及其与景观格局的关系[J]. *生态学报*, 2021, **41**(22): 8758-8770.
- Gao L, Tang L, Hou H R, *et al.* The spatial-temporal distribution of air pollution and its relationship with landscape pattern in Shenzhen [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(22): 8758-8770.
- [29] 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 等. 2000~2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 3230-3240.
- Xu Y, Huang W T, Dou S Q, *et al.* Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*,

- 2022, **43**(6): 3230-3240.
- [30] 吴妍. 京津冀协同发展视角下 PM_{2.5} 治理及其对经济影响的研究[D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2017.
- Wu Y. Research on PM_{2.5} control and its impact on economy in the perspective of coordinated development of Jing-Jin-Ji region [D]. Beijing: University of International Business and Economics, 2017.
- [31] 魏文静, 谢炳庚, 周楷淳, 等. 2013-2018 年山东省大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染时空变化及其影响因素[J]. 环境工程, 2020, **38**(12): 103-111.
- Wei W J, Xie B G, Zhou K C, *et al.* Research on temporal and spatial variations of atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ and the influencing factors in Shandong, China during 2013—2018[J]. Environmental Engineering, 2020, **38**(12): 103-111.
- [32] 周睿智, 闫才青, 崔敏, 等. 山东省大气细颗粒物来源解析的研究现状与展望[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(7): 3029-3042.
- Zhou R Z, Yan C Q, Cui M, *et al.* Research status and prospects on source apportionment of atmospheric fine particulate matter in Shandong Province[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(7): 3029-3042.
- [33] 杨雨尤, 王建舜, 王雪岩. 辽宁省 PM_{2.5} 时空分布特征分析[J]. 农业灾害研究, 2021, **11**(7): 121-122.
- Yang Y Y, Wang J S, Wang X Y. Spatiotemporal distribution characteristics of PM_{2.5} in Liaoning Province[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2021, **11**(7): 121-122.
- [34] 王娟, 蔺雪芹, 周笑, 等. 环渤海地区工业资源环境压力时空演化特征及影响因素[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(7): 915-920.
- Wang J, Lin X Q, Zhou X, *et al.* Spatial and temporal evolution and influencing factors of industrial resource and environmental pressure in Bohai Rim region[J]. Environmental Pollution & Control, 2021, **43**(7): 915-920.
- [35] 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013~2017 年气象条件变化对中国重点地区 PM_{2.5} 质量浓度下降的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(4): 483-500.
- Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China[J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(12): 1885-1902.
- [36] 王昭, 严小兵. 长江三角洲城市群 PM_{2.5} 时空演变及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(7): 1497-1506.
- Wang Z, Yan X B. Temporal-spatial evolution of PM_{2.5} and driving factors in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, **29**(7): 1497-1506.
- [37] 高振翔, 叶剑, 周红根, 等. 江苏省 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 时空变化特征及其与气象因子的关系[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(7): 51-58.
- Gao Z X, Ye J, Zhou H G, *et al.* The spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ and their relationships with meteorological factors in Jiangsu Province[J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(7): 51-58.
- [38] 刘笑杰, 王丽丽, 何博汶, 等. 长江经济带 PM_{2.5} 时空演变及影响因素分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(3): 647-658.
- Liu X J, Wang L L, He B W, *et al.* Spatiotemporal evolution and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(3): 647-658.
- [39] 蔡清楠, 车扬子, 孙凌瑜, 等. 珠三角地区 PM_{2.5} 浓度估算及其健康效应评估[J]. 生态学报, 2021, **41**(22): 8977-8990.
- Cai Q N, Che Y Z, Sun L Y, *et al.* PM_{2.5} concentration prediction and its health effect in the Pearl River Delta of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(22): 8977-8990.
- [40] Xi Y L, Yan D, Zhang J, *et al.* Decoupling analysis of the industrial growth and environmental pollution in the Circum-Bohai-Sea region in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(15): 19079-19093.
- [41] 邹辉, 段学军, 赵海霞, 等. 长三角地区污染密集型产业空间演变及其对污染排放格局的影响[J]. 中国科学院大学学报, 2016, **33**(5): 703-710.
- Zou H, Duan X J, Zhao H X, *et al.* Spatial evolution of pollution-intensive industries and its effects on pollution emissions in Yangtze River Delta[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016, **33**(5): 703-710.
- [42] Hao T Y, Cai Z Y, Chen S C, *et al.* Transport pathways and potential source regions of PM_{2.5} on the west coast of Bohai Bay during 2009-2018[J]. Atmosphere, 2019, **10**(6), doi: 10.3390/atmos10060345.
- [43] 孙涵, 胡雪原, 聂飞飞. 空气污染物的时空演化及社会经济驱动因素研究——以长江三角洲地区为例[J]. 中国环境管理, 2019, **11**(4): 71-78.
- Sun H, Hu X Y, Nie F F. Spatio-temporal evolution and socio-economic drivers of primary air pollutants from energy consumption in the Yangtze River Delta[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, **11**(4): 71-78.
- [44] Lin C Q, Li Y, Lau A K H, *et al.* 15-year PM_{2.5} trends in the Pearl River Delta region and Hong Kong from satellite observation[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, **18**(9): 2355-2362.
- [45] 刘雨华, 郑小慎. 环渤海地区气溶胶光学厚度数据选取及时空特征分析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(5): 1621-1628.
- Liu Y H, Zheng X S. Analysis of temporal and spatial characteristics and data selection of aerosol optical depth in the Bohai Rim Region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(5): 1621-1628.
- [46] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 长江经济带 PM_{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1190-1200.
- Wang L L, Liu X J, Li D, *et al.* Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River economic belt[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1190-1200.
- [47] 龙凌波, 余倩楠, 孟紫琪, 等. 中国沿海地区大气污染特征及其聚类分析[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(12): 2063-2072.
- Long L B, She Q N, Meng Z Q, *et al.* Characteristics and cluster analysis of air pollution in coastal areas of China[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(12): 2063-2072.
- [48] 陈兵红, 靳全锋, 柴红玲, 等. 浙江省大气 PM_{2.5} 时空分布及相关因子分析[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(3): 817-829.
- Chen B H, Jin Q F, Chai H L, *et al.* Spatiotemporal distribution and correlation factors of PM_{2.5} concentrations in Zhejiang Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(3): 817-829.
- [49] Lu X C, Chen Y A, Huang Y Q, *et al.* Exposure and mortality apportionment of PM_{2.5} between 2006 and 2015 over the Pearl River Delta region in southern China[J]. Atmospheric Environment, 2020, **231**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117512.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO _x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)