

目次

- 中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)
- 交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)
- 基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)
- 基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)
- 高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)
- 北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)
- 碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)
- 中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良苏, 张天娇 (1938)
- 2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)
- 疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)
- 苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)
- 湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琰, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)
- 邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建奎, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)
- 聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)
- 高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)
- 北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海林, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)
- 高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)
- 水环境中抗病毒药物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)
- 黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)
- 藏东多曲河流域锑富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)
- 西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)
- 基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)
- 丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)
- 金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)
- 德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王橹橹 (2129)
- 典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)
- 抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)
- 过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲予, 李大鹏, 黄勇 (2160)
- 矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张勇 (2171)
- 生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)
- 微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠华, 陈波 (2195)
- 紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)
- 土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)
- 鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)
- 典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琮, 周瑞娟, 李霖 (2233)
- 污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)
- 宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)
- 大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)
- 基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)
- 秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林权 (2292)
- 长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)
- 土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)
- 基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)
- 基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)
- 防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)
- 长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)
- 冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)
- 辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)
- 高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)
- 生物炭与不同类型氮肥配施对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)
- 太岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)
- 基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 邹允兵 (2417)
- 基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)
- 西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)
- 重庆某铁矿区周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)
- 金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)
- 赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)
- 施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析

李江苏, 段良荣*, 张天娇

(河南大学黄河文明与可持续发展研究中心暨黄河文明省部共建协同创新中心, 开封 475001)

摘要: PM_{2.5}和PM₁₀浓度超标引发的空气质量问题严重影响公众健康, 研究PM_{2.5}和PM₁₀浓度对制定有效的污染防控和治理措施具有重要意义. 运用时空分析法, 分析2018年季度PM_{2.5}和PM₁₀浓度时空分布, 并用GWR探究浓度差异的原因. 结果表明: ①PM_{2.5}和PM₁₀的浓度均呈冬春高、夏秋低的季节性规律; 四季污染物浓度在胡焕庸线两侧存在显著差异, 该线以东地区高浓度聚集在京津冀地区, 该线以西地区高浓度聚集在新疆中南部. ②PM_{2.5}和PM₁₀浓度的Moran's I在四季均为正, 且均在冬季增至最大值; PM_{2.5}和PM₁₀的分布格局基本一致, “高-高”类和“低-低”类集中分布现象明显. ③各因素对PM_{2.5}和PM₁₀浓度的影响存在较大空间异质性. 温度和坡度对PM_{2.5}和PM₁₀浓度的影响均表现为南部地区呈负相关, 北部地区呈正相关. 降水和风速对大部分地区PM_{2.5}和PM₁₀浓度的影响呈负相关, 且夏季负相关的范围均较小. 人类活动强度、二产占比和能源消耗总量对地区PM_{2.5}和PM₁₀浓度的影响在大部分地区呈正相关, 各季度的正相关高值区也存在差异.

关键词: PM_{2.5}浓度; PM₁₀浓度; 时空分布; 地理加权回归(GWR); 影响因素

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-1938-12 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202305037

Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM_{2.5} and PM₁₀ in Chinese Cities

LI Jiang-su, DUAN Liang-rong*, ZHANG Tian-jiao

(Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development & Collaborative Innovation Center of Yellow River Civilization Provincial Co-construction, Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: In recent years, the air quality problems caused by extreme haze events have become increasingly serious in China, especially those caused by fine particulate matter (PM_{2.5}), which has become the main component of haze. The air quality problems caused by excessive concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ have seriously affected the public health of Chinese cities. Studying the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ is of great significance for formulating effective pollution prevention and control measures. This study selected seven pollutant concentration impact factors, including four natural factors (temperature, precipitation, wind speed, and slope) and three socio-economic factors (human activity intensity index, the proportion of secondary industry, and total energy consumption). This study used the spatio-temporal analysis method to analyze the spatio-temporal distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations throughout the year and quarter in 2018 and used GWR to explore the factors that caused the concentration difference. The results showed that: ① the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ were higher in winter and spring than in summer and autumn. Pollutant concentrations differed significantly on both sides of the Hu Huanyong line in all four seasons, with high concentrations in the east gathering in Beijing, Tianjin, and Hebei and concentrations in the west gathering in south-central Xinjiang. ② The Moran indexes of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were positive in all four seasons and reached the maximum in winter; the distribution pattern of PM_{2.5} and PM₁₀ was basically the same, and the concentrated distribution of high-high and low-low categories was relatively obvious. ③ The effects of various factors on PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations showed great spatial heterogeneity. The influence of temperature and slope on PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations was negative in the south and positive in the north, and their distribution was not identical. Precipitation and wind speed had a negative correlation effect on PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in most areas, and the negative impact range in summer was smaller. The effects of human activity intensity, secondary production proportion, and total energy consumption on regional PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were positively correlated in most regions, and there were also differences in the positively correlated high value areas from quarter to quarter.

Key words: concentration of PM_{2.5}; concentration of PM₁₀; spatio-temporal distribution; geographically weighted regression (GWR); influencing factors

伴随着我国经济和城市化快速发展, 大气环境面临着人口增长和经济发展的双重压力, 环境问题已经成为社会公众关注的焦点^[1,2]. 对大气污染物的关注主要集中于PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂、O₃和CO₂等^[3,4], 特别是由PM_{2.5}和PM₁₀浓度超标引发的空气质量恶化, 成为了公众和社会舆论关注的热点问题^[4,5]. 根据空气动力学, 将大气颗粒物分为总悬浮颗粒物(TSP)、可吸入颗粒物(PM₁₀)和细颗粒物(PM_{2.5}), 由于PM_{2.5}和PM₁₀粒径小、吸附性强, 对人体心血管系统产生严重危害, 同时对肺癌发生率和死亡率有直接关系^[6]. 根据《危险的呼吸2: 大气PM_{2.5}对中国城市公众健康效应研究》^[7], 2013年大气PM_{2.5}

污染导致全国31座省会或直辖市中25.7万人超额死亡, 空气污染已成为威胁全球人类健康的第四大因素. 习近平总书记在中国共产党第二十次全国代表大会中指出, 深入推进环境污染防治, 持续深入打好蓝天、碧水 and 净土保卫战, 基本消除重污染天气. 在此背景下, 研究全国地级市PM_{2.5}和PM₁₀浓度

收稿日期: 2023-05-05; 修订日期: 2023-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(42271192); 国家社会科学基金重大项目(23ZDA106); 教育部人文社科项目(20YJCZH166); 河南省高等学校重点科研项目(23A170002); 河南省高等学校智库研究项目(2022ZKYJ05)

作者简介: 李江苏(1983~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为城市发展与大气环境遥感, E-mail: lijs.09b@ignrr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: 104753211575@henu.edu.cn

的时空分布特征,分析其影响因素并对其空间异质性进行解释,对各区域有效制定污染防控和环境治理措施具有较大的借鉴意义,对城市的生态文明建设具有重要的指导意义。

国内外学者对PM_{2.5}和PM₁₀的研究,主要从PM_{2.5}和PM₁₀浓度的时空演化特征、相关性研究和影响因素等方面进行探究。在时间尺度上,已有研究得出污染物浓度“U”型逐月变化规律和周期性“U-脉冲”型逐日变化规律^[8,9];也有学者利用2013年后公开的站点数据估算其他年份污染物浓度,研究近10年污染物浓度逐年增减趋势^[9,10]。在空间尺度上,不少学者选择某一代表性城市为研究对象^[11];也有学者以城市群^[12]为研究对象,如京津冀^[13]、长三角^[14,15]和辽中南^[16,17]等城市群。在研究方法上,使用多元回归^[18]、空间计量^[19,20]、地理探测器^[18,21]和地理加权回归^[21~23]。大多研究采用空间计量模型,假定影响因素对PM_{2.5}和PM₁₀在不同空间位置的影响一致,忽略了局部影响的空间差异。然而不同区域大气污染物具有明显的差异,不同的自然条件和社会经济因素对其影响存在空间差异,故本研究拟采用地理加权的方法,分析不同区域受各因素影响的区域差异。

综上所述,大部分学者多研究单一城市或区域单一污染物,部分研究将PM_{2.5}和PM₁₀进行比较,发现PM_{2.5}和PM₁₀表现出很强的相关性^[24,25]。研究方法也多采用统计方法,忽略了空间差异。鉴于此,本文运用空间自相关和地理加权回归(GWR),对全国范围内的PM_{2.5}和PM₁₀的季节变化及其影响因素的空间异质性进行研究。已有研究表明自然因素中的气温、降水、风速、坡度、气压和相对湿度等^[26]对PM_{2.5}和PM₁₀浓度产生较大影响,社会经济因子中人口密度、人均GDP、能源消耗和第二产业占比等^[27]因素对PM_{2.5}有显著的影响。基于文献的梳理、数据精度和数据可获得性,本文选取了污染物的影响因子,自然因子为:气温(X1)、降水(X2)、风速(X3)和坡度(X4);社会经济因子的选取,不局限于单一视角,一方面从土地利用视角,借鉴徐勇^[28]的人类活动强度指数,以建设用地当量为度量单位,计算各区域的人类活动强度(X5);另一方面,考虑到工业发展和取暖对污染的影响,选取第二产业占比(X6)和能源消耗总量(X7)。以2018年季度PM_{2.5}和PM₁₀浓度为变量,定量分析自然因素和社会因素对城市大气污染物浓度的影响,揭示影响因素的空间异质性,以期对PM_{2.5}和PM₁₀污染治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究涉及的数据有:①2018年全国363个地级市城市的PM_{2.5}和PM₁₀季度数据,用城市边界统计城市内所有监测站点值,计算年均值和四季均值,用24 h数据计算日均值、用日均值计算月均值,进而计算四季均值,四季时段划分为:春(2018年3~5月)、夏(2018年6~8月)、秋(2018年9~11月)和冬(2018年12月至2019年2月),数据来源于中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/>)。②气温、降水和风速的季度数据,数据处理方法与大气污染数据处理方法一致,对于少数城市其边界内无气象站点,选择距离该城市最近的站点提取该城市气象数据,该数据来源于美国国家气候数据中心(National Climatic Data Center)的开放数据(<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/isd-lite/>)。③中国DEM数据,空间分辨率为30 m×30 m,用于计算坡度。④2018年中国土地利用/土地覆盖遥感监测数据库(LUCC),空间分辨率为30 m×30 m,用于计算人类活动强度。数据③和④来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。⑤全国263个城市的第二产业占GDP比重和能源消耗数据均来源于2019年《中国城市统计年鉴》。在上述数据中,数据①~④包含中国香港和澳门;数据⑤暂缺中国香港、澳门和台湾数据。在影响因素分析中,均对变量和自变量数据进行了标准化。

1.2 研究方法

1.2.1 人类活动强度

人类活动强度(human activity intensity of land surface, HAILS)是根据土地利用类型来判断人类活动对生态环境干扰程度的指标。不同的人类活动强度对大气污染的影响程度不同,本文借鉴徐勇^[28]的人类活动强度测度方法,测度中国城市人类活动强度。利用2018年中国大陆的土地利用类型数据,以建设用地当量(construction land equivalent, CLE)为度量单位,将所有土地利用类型按照其对应的建设用地当量折算系数(conversion index of construction land equivalent, CI)换算成建设用地当量(表1),区域内建设用地当量面积占区域总面积的百分比即为该区域的人类活动强度。计算公式为:

$$HAILS = \frac{S_{CLE}}{S} \times 100\% \quad (1)$$

$$S_{CLE} = \sum_{i=1}^n (SL_i \cdot CI_i) \quad (2)$$

式中,HAILS为人类活动强度; S_{CLE} 为区域内建设用

表 1 不同土地利用类型的建设用地当量折算系数

Table 1 Conversion index of construction land equivalent for different land use types

类型	土地利用类型	特征标志说明	CI _i
耕地	旱地/水田	表层自然覆被改变,种植1年生作物	0.200
林地	有林地/灌林地/疏林地	表层自然覆被未改变且未被利用	0.000
	未成林造林地/苗圃/各类园地	表层自然覆被改变,种植多年生植物	0.133
草地	天然/改良牧草地	表层自然覆被未改变但被利用	0.067
建设用地	城镇用地/农村居民点/独立工矿/交通用地/特殊用地	表层有人工隔层,水分、养分、空气和热量交换阻滞	1.000
水域	河渠/湖泊/滩涂/滩地/永久性冰川雪地	表层自然覆被未改变且未被利用	0.000
	水库坑塘	表层自然覆被改变,空气和热量交换阻滞	0.600
未利用地	沙地/戈壁/盐碱地/沼泽/裸土地	表层自然覆被未改变且未被利用	0.000

地当量面积; S 为区域总面积; SL_i 为第 i 种土地利用类型的面积; CI_i 为第 i 种土地利用类型的建设用地当量折算系数; n 为土地利用类型的总数。

1.2.2 空间自相关方法

空间自相关 (spatial autocorrelation) 用于反映某一区域中的某种现象与邻近区域同一现象的相关程度, 揭示现象之间潜在的相互依赖性。通常分为全局空间自相关与局部空间自相关两大类, 计算公式为:

$$\text{Moran's } I = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{S^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij}} \quad (3)$$

式中, y_i 为城市 i 大气污染程度; $\bar{y}$ 和 S^2 分别为城市大气污染程度平均值和方差; N 为城市总数; W_{ij} 为空间权重矩阵。Moran's I 取值范围为 $(-1, 1)$, 若其值高于 0, 表明大气污染程度之间具有空间正相关性。另外, 采用标准统计量 Z 来检验 Moran's I 的显著性水平, 计算公式为:

$$Z(\text{Moran's } I) = \frac{\text{Moran's } I - E(\text{Moran's } I)}{\sqrt{\text{VAR}}} \quad (4)$$

$$E(\text{Moran's } I) = -\frac{1}{n-1} \quad (5)$$

1.2.3 普通最小二乘法

普通最小二乘 (ordinary least squares, OLS) 模型是用来解释因变量 Y_i 与自变量 X_i 之间关系的多元线性函数, 计算公式为:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_i \beta_i X_i + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中, β_0 为常数项; β_i 为回归系数; ε_i 为随机误差项。

1.2.4 地理加权回归

地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 是 Fotheringham 等在传统最小二乘法 (ordinary least squares, OLS) 模型的基础上将数据地理位置加入回归参数中, 同时考虑相邻点的空间权重, 允许局部参数估计的地学统计方法^[29]。本研究采用 GWR

揭示大气污染物 ($PM_{2.5}$ 和 PM_{10}) 影响因素的空间异质性, 计算公式为:

$$Y_i = \beta_0(\mu_i, \theta_i) + \sum_k \beta_k(\mu_i, \theta_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (7)$$

式中, Y_i 为 i 城市的因变量解释值, (μ_i, θ_i) 为城市 i 的地理坐标; X_{ik} 为城市 i 的自变量解释值, 本文中包括 4 个自然因子和 3 个人文因子; $\beta_k(\mu_i, \theta_i)$ 为研究单元 i 区域质心 (μ_i, θ_i) 处的回归参数; ε_i 为随机误差项。

2 结果与分析

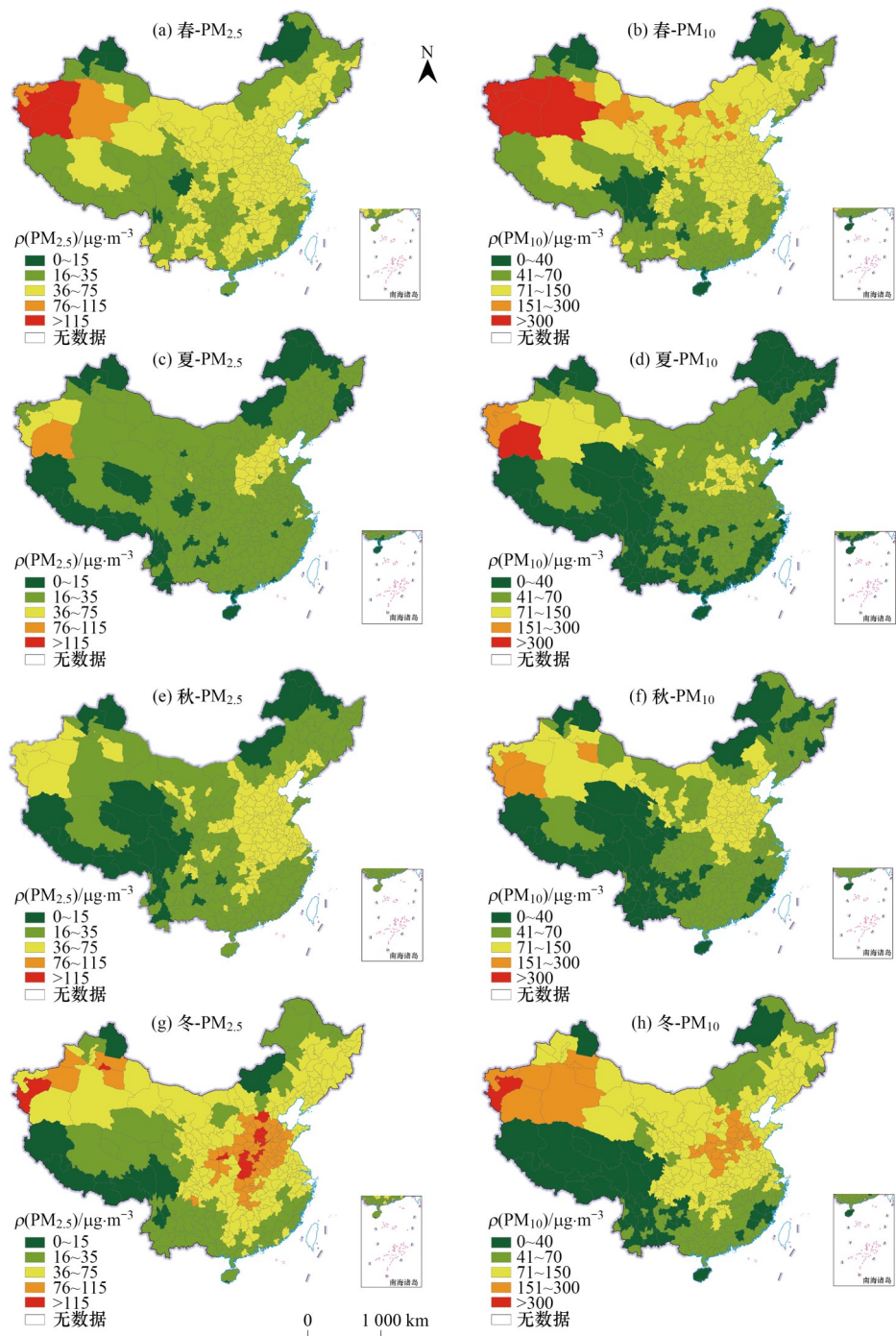
2.1 中国 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的时空变化特征

2.1.1 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 季节变化特征

基于中国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中污染物浓度标准, 将 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度值划分为 5 个区间 (表 2 和表 3), 分析研究时段内各区间浓度的城市数量。结果表明: ① 中国 $PM_{2.5}$ 浓度总体呈冬春高、夏秋低的季节性规律, 具体表现为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, $\rho(PM_{2.5})$ 均值从大到小依次为 55.20、41.03、32.79 和 24.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 这与已有研究的结果基本一致^[30]。根据二类环境空气质量功能区 (居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区) 的浓度标准, 这类区域 $\rho(PM_{2.5})$ 应低于 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 按此浓度标准, 冬春两季均不符合浓度标准, 仅夏秋两季符合浓度标准; 四季符合浓度标准的城市数量分别占 36.09%、89.81%、59.50% 和 30.03%。② PM_{10} 浓度表现为冬春高, 夏季低, 春夏秋冬的 $\rho(PM_{10})$ 均值分别为 91.08、50.01、62.90 和 88.13 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 这与已有研究的结果较为一致^[31]。根据二类环境空气质量功能区的浓度标准, $\rho(PM_{10})$ 应低于 70 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 按此浓度标准, 冬春两季不符合浓度标准, 仅夏秋两季符合浓度标准; 四季符合浓度标准的城市数量分别占 40.50%、87.61%、71.07% 和 39.12%。

2.1.2 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 空间变化特征

中国季度 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度空间格局演化呈现的



基于自然资源部审图号为GS(2020)4632的标准地图制作,底图无修改,下同

图1 2018年各季度PM_{2.5}和PM₁₀浓度分布

Fig. 1 PM_{2.5} and PM₁₀ concentration distribution by quarter in 2018

PM₁₀四季分别有2、7、2和4个城市呈现“高-低”和“低-低”类,表明大部分城市污染浓度在空间上集聚(表5). 总体来看,大部分城市属于“高-高”呈集聚特征,即PM_{2.5}和PM₁₀两者浓度较高或较低的

表5 PM_{2.5}和PM₁₀浓度集聚各类型城市数量

Table 5 Number of cities with PM_{2.5} and PM₁₀ concentration clusters of various types

季节	PM _{2.5}				PM ₁₀			
	H-H	H-L	L-H	L-L	H-H	H-L	L-H	L-L
春	90	6	12	106	77	2	2	154
夏	100	10	19	115	78	7	7	151
秋	107	3	16	93	155	2	13	146
冬	111	1	14	120	104	4	11	128

城市在空间上集中分布。

2.2 影响因素分析

2.2.1 OLS和GWR模型对比分析

对比 GWR 和 OLS 模型运算结果，各季度 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的影响因素均呈现 GWR 模型拟合效果优于 OLS(表 6)。GWR 模型的调整 R^2 高于 OLS，AICc 和 -2 倍的对数似然值低于 OLS。各季度 GWR 模型的拟合效果存在显著差异，其中 PM_{2.5} 在秋冬季节拟合效果较好，调整 R^2 高于 0.75，夏季调整 R^2 为 0.59，拟合效果差于其他季节。PM₁₀ 调整 R^2 在四季均高于 0.72，也表现出秋冬三季的拟合效果优于夏季。夏季拟合效果差的原因可能在于：受数据制约，部分对夏季影响较大的指标未能纳入回归模型，该类指标如太阳高度角大小。夏季太阳直射北半球，太阳高度角在四季中最大，太阳直射导致强烈的光化学反应会使部分一次污染物生成大量的二次颗粒，且夏季逆温弱、边界层不稳定等特点会造成污染物不同程度的扩散^[23,33]。

表 6 OLS 和 GWR 模型输出结果对比

Table 6 Comparison of output results between OLS and GWR models			
因变量	模型输出结果	OLS	GWR
春-PM _{2.5}	AICc	-200.325	-354.856
	-2 倍对数似然值	-219.036	-478.623
	调整 R^2	0.267	0.653
夏-PM _{2.5}	AICc	-259.471	-394.659
	-2 倍对数似然值	-278.182	-516.566
	调整 R^2	0.198	0.591
秋-PM _{2.5}	AICc	-226.787	-395.233
	-2 倍对数似然值	-245.499	-570.179
	调整 R^2	0.390	0.751
冬-PM _{2.5}	AICc	-142.276	-371.954
	-2 倍对数似然值	-160.987	-543.112
	调整 R^2	0.318	0.778
春-PM ₁₀	AICc	-332.129	-627.775
	-2 倍对数似然值	-350.841	-800.839
	调整 R^2	0.229	0.805
夏-PM ₁₀	AICc	-131.336	-355.206
	-2 倍对数似然值	-150.047	-510.289
	调整 R^2	0.189	0.723
秋-PM ₁₀	AICc	-306.876	-541.031
	-2 倍对数似然值	-325.588	-768.892
	调整 R^2	0.361	0.818
冬-PM ₁₀	AICc	-341.635	-595.848
	-2 倍对数似然值	-360.347	-764.226
	调整 R^2	0.412	0.825

2.2.2 GWR 模型影响因素的空间异质性分析

本文采用 ArcGIS 对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的影响因素进行地理加权回归分析，并将回归结果进行可视化，进而分析各影响因素时空差异。

(1)温度 温度(X1)对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度影响均呈两极分化的空间格局，总体上呈南负北正。四季存在明显差距，负效应范围大小排序：冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季，其中夏季的拟合效果远不如其他季节(表 6)。负影响的高值区由春季珠三角向夏秋冬季逐渐北移到长三角和山东半岛地区；正效应范围大小排序：夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季，在此排序下正效应强度逐渐增大，高值区由东北部地区逐渐过渡到京津冀地区。夏季温度对 PM_{2.5} 负效应最强的地区集中在以南阳和驻马店为中心的中部地区，以及东南沿海的宁德、福州和温州等地区，负相关系数达到 -0.20，意味着温度每增加 1，PM_{2.5} 浓度可降低 0.20；正效应最强的地区集中分布东北部地区，其中黑河、哈尔滨、牡丹江和呼和浩特等正相关系数均高于 0.40，意味着温度每增加 1，PM_{2.5} 可增高 0.40。夏季温度对 PM₁₀ 负效应最强的地区也分布在南阳和驻马店地区，连云港和盐城也有分布，负相关系数均达到 -0.50。

温度对中国污染物浓度的影响呈南负北正的空间差异^[34]，造成这种分布格局的原因与地区气温特点密切相关，受经纬度和季风的影响，北方地区年均气温普遍低于南方地区，南方地区气温越高对流活动越频繁，其引发的对流雨对污染物有清除作用。北方地区正效应主要受冬季特殊气象条件影响，冷空气活动是影响大气污染物累积和消散的主要气象条件之一。在温度较高的晴朗天，冷空气活动较弱，容易产生静温或逆温现象^[35]，进而导致大气污染积聚，空气污染加重；但是冬季东北地区受到来自蒙古北部寒冷空气的低温影响，冷空气活动强，不易发生逆温现象^[36]，污染物浓度会相对降低。

(2)降雨 降雨(X2)对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的影响在大部分地区呈现负效应，PM₁₀ 负效应范围更大。降雨对 PM_{2.5} 的负效应范围在春夏秋冬分别是 95.81%、61.98%、70.34% 和 64.26%；对 PM₁₀ 负效应范围在四季分别是 90.87%、71.86%、68.82% 和 80.99%，表明充沛的降水对我国大部分地区的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度有降低作用，与已有研究的结论一致^[37]。不同季节之间具有明显的空间差异，负影响的高值区由中西部地区向东部地区偏移。在春夏秋三季中，黄河中上游地区污染物浓度受降水影响呈显著负效应，且负相关程度较强。酒泉、金昌和张掖等地区的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 负相关系数分别达到 0.30 和 0.50，表明降水量每增长 1，PM_{2.5} 浓度可降低 0.30，PM₁₀ 浓度可降低 0.50。然而，冬季黄河中上游地区降水对污染物浓度呈正效应，正相关系数达到 0.70，表明降水量每增长 1，PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度均可增加 0.70。

降水可以捕获大气中的颗粒物和气溶胶粒子,使之从大气中清除,同时对地表扬尘有一定的抑制作用.秋季华北地区降雨较多,导致山东半岛及京津冀地区的污染物浓度降低.然而,冬季甘肃和宁夏等大部分地区降水对 $PM_{2.5}$ 的影响呈现正效应,主要是因为冬季甘肃、宁夏等地风速较大,其北部阿拉善盟和巴彦淖尔的平均风速可达3.64级,而全国均值仅为2.54级,加之以上地区地表植被覆盖率低,地表细小颗粒物易被扬起,造成空气中细小颗粒物浓度增大.

(3)风速 风速(X3)对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响主要呈负相关,风速对 $PM_{2.5}$ 的影响范围在春夏秋冬分别是70.72%、73.76%、57.80%和69.96%;风速对 PM_{10} 的影响范围在春夏秋冬分别是72.62%、70.34%、60.08%和79.47%.负相关影响范围主要分布在东北三省及东南沿海地区.负相关显著的东北部地区相关系数最高可达到-0.60,意味着风速每增大1, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度可降低0.60.然而,在四季,风速对陕西、甘肃等地区污染物浓度呈正效应^[23];在夏秋两季,风速对四川盆地也呈现正效应.

风速对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度主要呈负效应,这与已有研究的结果一致^[37].北方地区的负影响程度高于南方地区,由于北方地势平坦,为大气污染物提供了良好的扩散条件,风速的增大有利于污染物的扩散,从而改善空气质量,尤其对相关系数最高的东北平原更为显著.但风速对陕西、甘肃等地区的污染物浓度均具有正效应,原因是该地区地处黄土高原,土质较为疏松,当风速达到一定程度时,虽然有利于空气中细颗粒的扩散,但同时也会卷起地面粉尘,加重了大气污染^[23].夏秋两季风速对四川盆地的污染物呈正相关,原因是该地区地形封闭,年均风速低且气流难以扩散,易导致污染物聚集;且夏季气温偏高时,光化学反应速率加快,增加硫酸盐和硝酸盐颗粒,污染物二次来源增多.

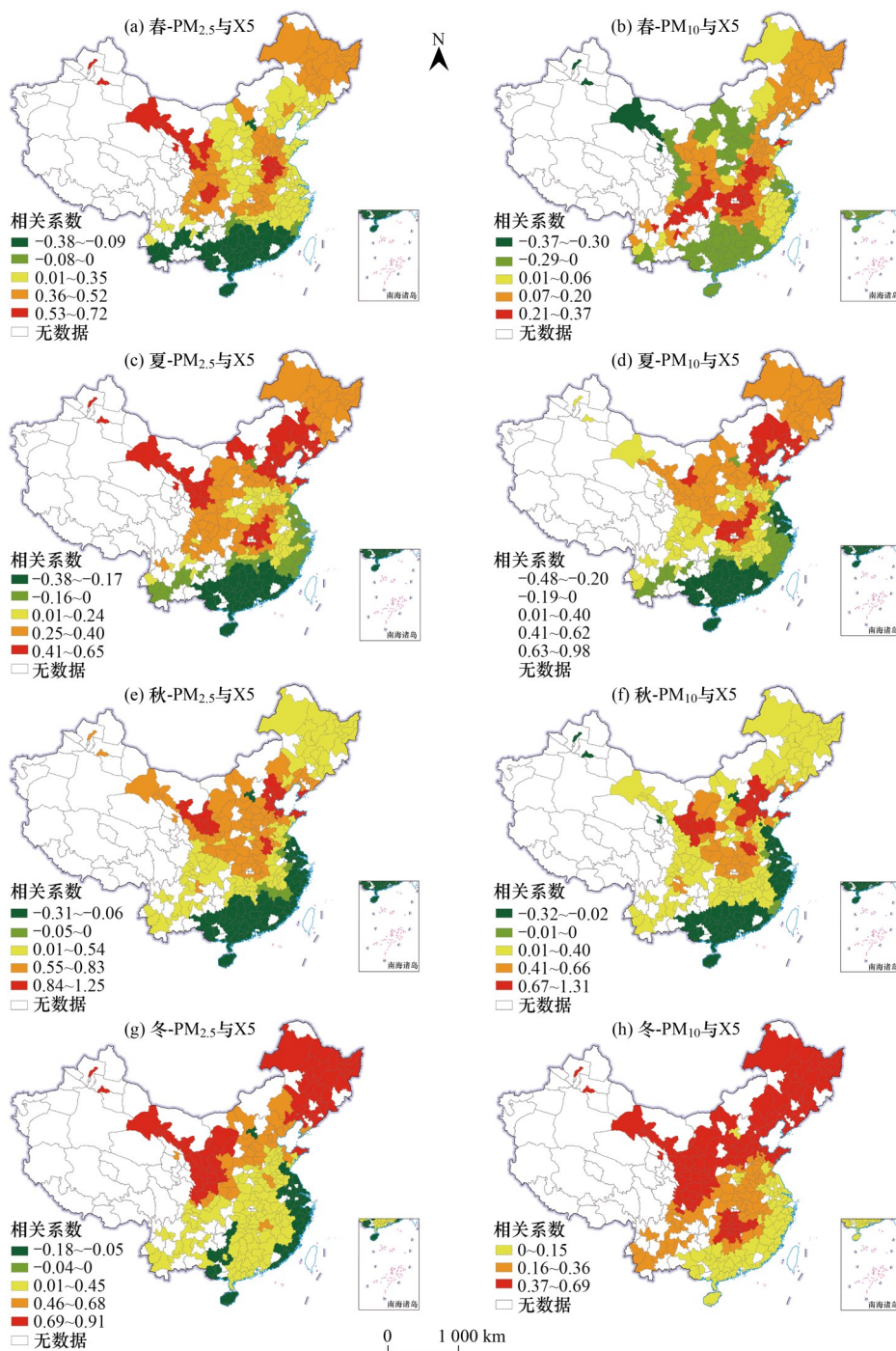
(4)坡度 坡度(X4)对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响存在显著的空间差异.东南部大部分地区呈现负相关,即坡度越大, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度越小;东北部地区呈正相关,即坡度越大, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度越大.不同季节存在显著差异,春季负影响范围最大,冬季最小.由春季到冬季,负影响的高值区逐渐由长三角地区南移到珠三角地区;正影响的高值区逐渐由京津冀地区北移到东北地区.夏秋两季坡度对污染物负影响强度远高于春冬两季,秋季 $PM_{2.5}$ 的负影响高值区主要集中在长三角地区,负相关系数达到-1.20,意味着坡度每增加1,污染物浓度将下降1.20.

西南大部分地区坡度对污染物浓度影响呈显著负效应.四川、云南和重庆等地空气污染主要集中在坡度较小的盆地,盆地外围山脉对气流形成阻挡效应,导致气流无法快速扩散,加重了空气污染程度.然而,东北平原和华北平原,地形平坦,坡度小,有利于污染物扩散,所以局部地区的污染物浓度较低.黄河“几”字湾北部的鄂尔多斯和榆林,其地形对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度呈显著正效应,原因是太行山、阴山和贺兰山将以上地区包围,受高大山脉的阻挡,导致气流在此处难以扩散,加剧污染程度.

(5)人类活动强度 人类活动强度(X5)对地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响在大部分地区呈现正相关,即人类活动强度越大, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度越大(图2).在春夏秋冬四季 $PM_{2.5}$ 正相关影响范围占比分别是78.33%、68.06%、70.72%和86.70%, PM_{10} 正相关影响范围分别是65.02%、67.30%、70.72%和100%.人类活动强度对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度影响呈负相关的地区主要分布在长三角和珠三角地区.从春到冬正相关的范围逐渐扩大;正效应高值区逐渐向北移动. $PM_{2.5}$ 浓度正效应高值区主要集中在中原城市群、山东半岛城市群、京津冀城市群、长江中游和西南地区. PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 浓度正效应高值区分布格局基本相似,也主要集中在中原城市群和东北部等地区.

本文借鉴徐勇等^[28]提出的人类活动强度计算方法,从土地利用类型的视角来判断人类活动对大气环境的干扰程度.人类活动强度对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响较大,这与已有研究中其他社会因素对大气污染产生较大影响一致^[30, 37].西南地区的宜宾、攀枝花和重庆等地区工业较为发达.2018年宜宾市工业增加值比上年增长9.80%,其中火电比上年增长27.30%;2018年重庆电力、热力、燃气及水生产和供应业增长8%,黑色金属冶炼和压延加工业增长43%.可见,西南地区工业快速发展尤其是火电和黑色金属冶炼等高耗能产业的快速增长加大该地区的污染物浓度.中原城市群和山东半岛城市群的人口密集、工业生产规模大,生活生产排放的污染源较多,导致人类活动与污染物呈正相关.负值区域主要分布在东南沿海地区,该地区受东南季风的影响,季风带来海洋水汽,形成丰富的降水,对污染物有冲刷作用,气象因素对东南沿海的影响程度远高于人文因素.

(6)二产占比 二产占比(X6)对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响呈正相关,即二产占比越大, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度越大.不同季节二产占比对污染物浓度的影响存在显著差异. $PM_{2.5}$ 的正效应高值区,由春夏向秋冬季,从西南地区转变为京津冀地区; PM_{10} 的正效应

图2 人类活动对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度影响回归结果Fig. 2 Regression results of the effect of human activities on $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations

高值区, 夏季主要集聚在西南地区, 春秋冬三季主要分布在京津冀地区(图3). 夏季西南地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的正相关系数可达到0.25和0.34, 表示二产占比每增加1, 污染物浓度将分别上升0.25和0.34.

二产占比与污染物浓度成正比这一结论与已有研究结果一致^[37-39]. 工业生产过程直接或间接向大气环境排放 $PM_{2.5}$. $PM_{2.5}$ 的直接排放源中, 贡献较大的工业部门主要为冶金、建材和化工, 特别是炼焦、钢铁、水泥和砖瓦等行业. 以上工业部门排放

$PM_{2.5}$ 的多少与其工艺水平和管理水平密切相关. $PM_{2.5}$ 也会由硫和氮的氧化物转化而成, 以上污染物主要来自化石燃料和垃圾的燃烧. PM_{10} 一方面来自污染源的直接排放, 如烟囱与车辆、工业生产中材料的破碎碾磨; 另一方面来自硫氧化物、氮氧化物和挥发性有机化合物等互相作用形成的细小颗粒物. 工业比重提高, “三废”及烟粉尘等污染物加重, 导致地区的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度上升.

(7) 能源消耗总量 能源消耗总量(X7)对 $PM_{2.5}$

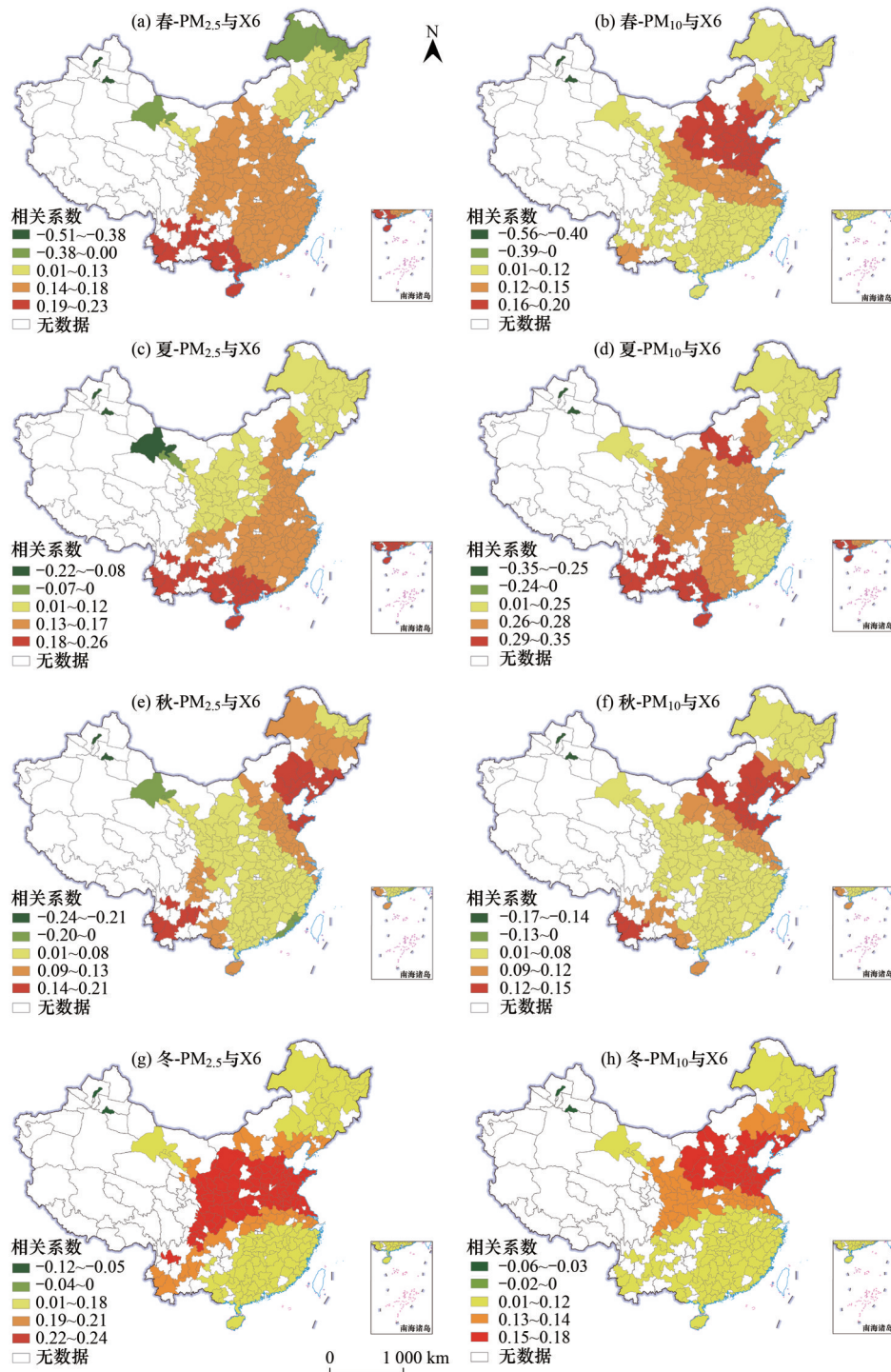


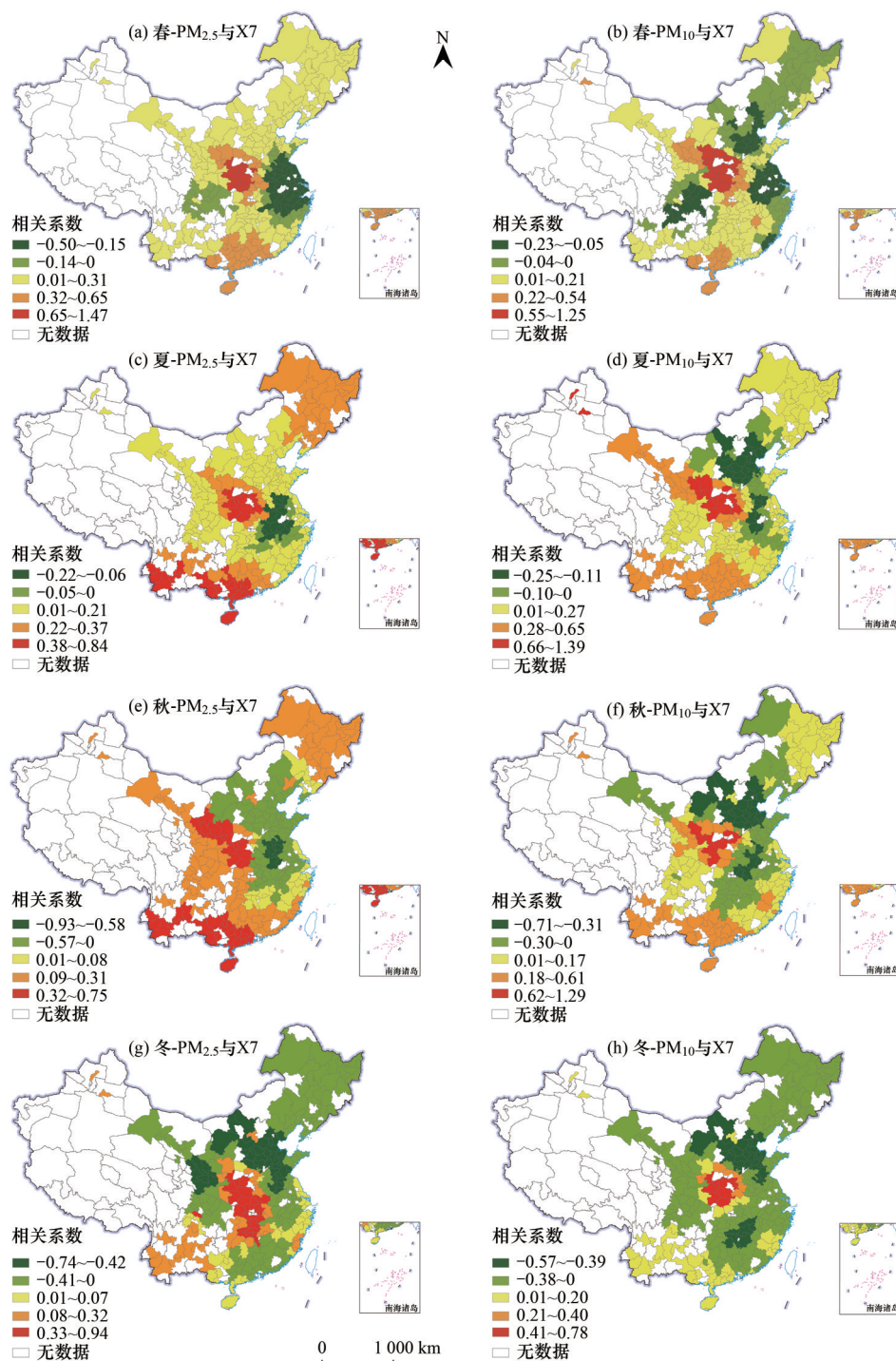
图3 二产占比对PM_{2.5}和PM₁₀浓度影响回归结果

Fig. 3 Regression results of the effect of the proportion of secondary production on PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations

和PM₁₀浓度的影响在大部分地区呈正相关,即能源消耗总量越大,PM_{2.5}和PM₁₀浓度越大(图4).春夏秋三季污染物受能源消耗总量的正向影响更显著,春夏秋冬PM_{2.5}正相关影响范围占比分别是72.24%、86.69%、65.78%和38.03%,PM₁₀正相关影响范围分别是51.71%、74.91%、58.17%和25.48%.秋冬两季京津冀、山东半岛的PM_{2.5}和PM₁₀浓度回归系数呈负值,这与京津冀地区交通限行、发展新能源车及大

气污染防治等政策影响有关.

秋冬两季京津冀、山东半岛的PM_{2.5}和PM₁₀浓度回归系数呈负值,这与2017年以来这些地区的污染防治政策密切相关.自2017年北京陆续淘汰国一、国二和国三机动车,积极发展新能源车,优化交通结构;实施了《京津冀及周边地区2017-2018年秋季冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》北京市细化落实方案》;采取“煤改电、气”的方式调整能源

图4 能源消耗总量对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度影响回归结果Fig. 4 Regression results of the effect of total energy consumption on $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentrations

结构,降低能源消耗对大气环境的影响;2017年,将北京、天津及河北、山西、山东和河南的26个城市(“2+26”城市)确定为京津冀大气污染传输通道,作为区域大气污染治理的重点;京津冀、山东半岛和东北老工业基地工业发展历史悠久,集中处理工业污染效果良好,可有效降低能源消耗对大气环境的影响.东南沿海部分地区污染物浓度相关系数也呈负值,但该地区的模型拟合效果较差,说明能源消耗不是该地区大气环境污染的主要因素.

3 讨论

大气污染物浓度受自然环境和人类社会经济活动共同影响,不同季节、不同地区各类自然环境和人类社会经济活动对大气污染物浓度的作用方向、影响程度和范围不尽相同.研究中需要从自然地理环境因素和人文经济社会因素综合构建影响因素体系.已有研究更多关注自然要素对大气污染物浓度的影响,这些要素主要包括气温、降水、风速和坡

度等.本研究除了上述自然要素之外,一方面观测基于土地利用类型的人类活动强度对大气污染物浓度的影响,另一方面观测工业发展、能源消耗对大气污染物浓度的影响.事实上,量化人类社会经济活动的指标有很多,诸如人口密度、经济发展水平和城镇化水平等.本研究尝试把上述所有表征人类社会经济活动的指标纳入回归模型,然而人口密度、经济发展水平和城镇化水平等指标拟合效果差.这说明区域大气污染浓度的主要社会因子并非人口密度、经济发展水平和城镇化率,举例来说,两个人口密度或经济发展水平相近的地区,却存在大气污染浓度差距,这种差距的成因可能主要来自于自然要素或人类社会经济活动中的工业发展、能源消耗和人类活动强度差距.

本研究发现具体影响因子在不同时段、不同地区的影响程度不尽相同,由于本研究的时段较短(仅为一年四季),今后的研究有待拉长时间尺度,充分考虑各因子的时间演进规律和地域差异,为 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染防治提供因地制宜的防治措施.本研究发现,京津冀地区、中原城市群等人口密集区域受二产占比影响较大,未来 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染治理应优化产业结构,促进产业转型升级.甘肃和宁夏的部分城市,受地表扬尘的影响,需在重点时节做好提前防控,如风速较大时,限制部分工业材料碾磨.对于北方冬季易发生逆温天气的区域,需在逆温天气时减少工业生产活动.

4 结论

(1) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度均呈现冬春高、夏秋低的季节性规律. PM_{10} 的季节性空间差异明显,冬季黄河中下游地区、京津冀、新疆中南部和华中地区浓度较高;春季浓度较高的地区主要位于新疆、甘肃和宁夏等地;夏季 PM_{10} 浓度最低,尤其是长江中下游和东南沿海地区的颗粒物浓度较低.

(2) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的Moran's I 在四季均为正,且均在冬季增至峰值,说明城市间两类污染物浓度差距在冬季最大. $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的分布格局基本一致,“高-高”类主要分布在华北、京津冀、黄河中下游和新疆部分地区,“低-低”类主要分布在长江以南、西南地区、东北部的呼伦贝尔和齐齐哈尔等,“高-高”类和“低-低”类集中分布现象明显.

(3)用GWR、OLS对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度影响因素分析发现,GWR模型拟合效果优于OLS, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 拟合效果基本一致,均表现为春秋冬三季的拟合效果好,夏季效果差,模型的显著性水平依次是冬>秋>春>夏.

(4)四季各影响因子对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度变化存在较大空间异质性.自然因素中温度和坡度对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的影响基本一致,既存在正影响也存在负影响,呈南北分化的格局.降水和风速对大部分地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度呈负相关.人类活动强度、二产占比和能源消耗总量对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响在大部分地区呈正相关.

参考文献:

- [1] 邵帅,李欣,曹建华,等.中国雾霾污染治理的经济政策选择——基于空间溢出效应的视角[J].经济研究,2016,51(9): 73-88.
Shao S, Li X, Cao J H, et al. China's economic policy choices for governing smog pollution based on spatial spillover effects [J]. Economic Research Journal, 2016, 51(9): 73-88.
- [2] 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.
- [3] Han L J, Zhou W Q, Pickett S T, et al. Multicontaminant air pollution in Chinese cities [J]. Bulletin of the World Health Organization, 2018, 96(4): 233-242E.
- [4] Zhao Q Y, Shen G F, Li L, et al. Ambient particles (PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_{10}) and $PM_{2.5}$ chemical components in western Yangtze River Delta (YRD): an overview of data from 1-year online continuous monitoring at Nanjing [J]. Aerosol Science and Engineering, 2017, 1(3): 107-118.
- [5] 陈辉,厉青,李营,等.京津冀及周边地区 $PM_{2.5}$ 时空变化特征遥感监测分析[J].环境科学,2019,40(1): 33-43.
Chen H, Li Q, Li Y, et al. Monitoring and analysis of the spatio-temporal change characteristics of the $PM_{2.5}$ concentration over Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions based on remote sensing [J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 33-43.
- [6] Baccarelli A, Martinelli I, Zanobetti A, et al. Exposure to particulate air pollution and risk of deep vein thrombosis [J]. Archives of Internal Medicine, 2008, 168(9): 920-927.
- [7] 潘小川,刘立群,张思奇.危险的呼吸2:大气 $PM_{2.5}$ 对中国城市公众健康效应研究[M].北京:科学出版社,2016.1-54.
- [8] Wang Z B, Liang L W, Wang X J. Spatiotemporal evolution of $PM_{2.5}$ concentrations in urban agglomerations of China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2021, 31(6): 878-898.
- [9] 夏晓圣,汪军红,宋伟东,等.2000~2019年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征[J].环境科学,2020,41(11): 4832-4843.
Xia X S, Wang J H, Song W D, et al. Spatio-temporal evolution of $PM_{2.5}$ concentration during 2000-2019 in China [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4832-4843.
- [10] 时燕,刘瑞梅,罗毅,等.近20年来中国 $PM_{2.5}$ 污染演变的时空过程[J].环境科学,2020,41(1): 1-13.
Shi Y, Liu R M, Luo Y, et al. Spatiotemporal variations of $PM_{2.5}$ pollution evolution in China in recent 20 years [J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 1-13.
- [11] 武晓红,宋丽红,李秋玲,等.太原市城区大气 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 时空分布特征[J].生态环境学报,2021,30(4): 756-762.
Wu X H, Song L H, Li Q L, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of atmospheric $PM_{2.5}$ and PM_{10} in urban Taiyuan, China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(4): 756-762.
- [12] 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.
- [13] 刘兆东,王宏,沈新勇,等.京津冀及周边地区冬季能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度和环境湿度的多元回归分析[J].气象学报,2020,78(4): 679-690.
Liu Z D, Wang H, Shen X Y, et al. Multiple regression analysis of

- winter visibility, PM_{2.5} concentration and humidity in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2020, **78**(4): 679-690.
- [14] 黄鑫宇, 王雷, 潘虹, 等. 长三角城市群的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 演变趋势及空间效应分析 [J]. *环境污染与防治*, 2021, **43**(10): 1309-1315.
- Huang X Y, Wang L, Pan H, *et al.* Evolution trend and spatial differentiation characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2021, **43**(10): 1309-1315.
- [15] 康晖, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 961-971.
- Kang H, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characterization and variation of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} during the winter in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 961-971.
- [16] 付丹丹. 辽宁中部城市群冬季空气 PM₁₀ 输送路径及传输贡献分析 [J]. *环境生态学*, 2021, **3**(7): 84-88.
- Fu D D. Analysis of PM₁₀ transport path and contribution in winter in central Liaoning urban agglomeration [J]. *Environmental Ecology*, 2021, **3**(7): 84-88.
- [17] Li X L, Hu X M, Shi S Y, *et al.* Spatiotemporal variations and regional transport of air pollutants in two urban agglomerations in Northeast China Plain [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, **29**(6): 917-933.
- [18] 陈兵红, 靳全峰, 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.
- [19] 韩峰, 余泳泽, 谢锐. 土地资源错配如何影响雾霾污染? ——基于土地市场交易价格和 PM_{2.5} 数据的空间计量分析 [J]. *经济科学*, 2021, **43**(4): 68-83.
- Han F, Yu Y Z, Xie R. How does misallocation of land resources affect smog pollution? —spatial econometric analysis of land market transaction price and PM_{2.5} data [J]. *Economic Science*, 2021, **43**(4): 68-83.
- [20] 刘晓红, 江可申. 中国城市 PM_{2.5} 的时空分异及影响因素分析——基于 161 个城市的实证研究 [J]. *调研世界*, 2018, (1): 25-34.
- [21] 赵锐, 詹梨苹, 周亮, 等. 地理探测联合地理加权岭回归的 PM_{2.5} 驱动因素分析 [J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(2): 307-317.
- Zhao R, Zhan L P, Zhou L, *et al.* Identification of driving factors of PM_{2.5} based on geographic detector combined with geographically weighted ridge regression [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, **31**(2): 307-317.
- [22] 易唯, 杨东, 李茜荣. 基于 GWR 模型的天山北坡经济带 PM_{2.5} 浓度反演及时空特征分析 [J]. *地球与环境*, 2021, **49**(1): 51-58.
- Yi W, Yang D, Li R Q. Inversion of PM_{2.5} concentration in the economic zone of northern Tianshan mountain slope based on the GWR model and the temporal and spatial characteristics [J]. *Earth and Environment*, 2021, **49**(1): 51-58.
- [23] 王少剑, 高爽, 陈静. 基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究 [J]. *地理研究*, 2020, **39**(3): 651-668.
- Wang S J, Gao S, Chen J. Spatial heterogeneity of driving factors of urban haze pollution in China based on GWR model [J]. *Geographical Research*, 2020, **39**(3): 651-668.
- [24] 杨文涛, 姚诗琪, 邓敏, 等. 北京市 PM_{2.5} 时空分布特征及其与 PM₁₀ 关系的时空变异特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 684-690.
- Yang W T, Yao S Q, Deng M, *et al.* Spatio-temporal distribution characteristics of PM_{2.5} and spatio-temporal variation characteristics of the relationship between PM_{2.5} and PM₁₀ in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 684-690.
- [25] Filonchik M, Yan H W, Yang S W, *et al.* A study of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in the atmosphere of large cities in Gansu province, China, in summer period [J]. *Journal of Earth System Science*, 2016, **125**(6): 1175-1187.
- [26] Filonchik M, Yan H W, Li X J. Temporal and spatial variation of particulate matter and its correlation with other criteria of air pollutants in Lanzhou, China, in spring-summer periods [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, **9**(6): 1100-1110.
- [27] 杨冕, 王银. 长江经济带 PM_{2.5} 时空特征及影响因素研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, **27**(1): 91-100.
- Yang M, Wang Y. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in the Yangtze river economic belt [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27**(1): 91-100.
- [28] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用 [J]. *地理学报*, 2015, **70**(7): 1068-1079.
- Xu Y, Sun X Y, Tang Q. Human activity intensity of land surface: concept, method and application in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(7): 1068-1079.
- [29] 薛瑞晖, 于晓平, 李东群, 等. 基于地理加权回归模型探究环境异质性和秦岭大熊猫空间利用的影响 [J]. *生态学报*, 2020, **40**(8): 2647-2654.
- Xue R H, Yu X P, Li D Q, *et al.* Using geographically weighted regression to explore the effects of environmental heterogeneity on the space use by giant pandas in Qinling mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(8): 2647-2654.
- [30] Chen G B, Li S S, Knibbs L D, *et al.* A machine learning method to estimate PM_{2.5} concentrations across China with remote sensing, meteorological and land use information [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **636**: 52-60.
- [31] Zhao X L, Zhou W Q, Han L J, *et al.* Spatiotemporal variation in PM_{2.5} concentrations and their relationship with socioeconomic factors in China's major cities [J]. *Environment International*, 2019, **133**, doi: 10.1016/j.envint.2019.105145.
- [32] 符传博, 徐文帅, 丹利, 等. 2015~2020 年海南岛大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的时空分布特征 [J]. *环境化学*, 2023, **42**(2): 522-531.
- Fu C B, Xu W S, Dan L, *et al.* Characteristics of temporal and spatial distribution of atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ in Hainan island, Hainan province from 2015 to 2020 [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, **42**(2): 522-531.
- [33] 李新, 贾秋容, 于晓茵, 等. 环境空气 PM_{2.5}、PM₁₀ 相关性及其污染水平研究 [J]. *工业安全与环保*, 2014, **40**(11): 71-73.
- Li X, Jia Q R, Yu X H, *et al.* Study on correlation and pollution level of PM_{2.5} and PM₁₀ in ambient air [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2014, **40**(11): 71-73.
- [34] 周志凌, 程先富. 基于 MGWR 模型的中国城市 PM_{2.5} 影响因素空间异质性 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(6): 2552-2561.
- Zhou Z L, Cheng X F. Spatial heterogeneity of influencing factors of PM_{2.5} in Chinese cities based on MGWR model [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(6): 2552-2561.
- [35] 张玉治, 杨迎春, 李杰, 等. 东南亚生物质燃烧对我国春季 PM_{2.5} 质量浓度影响的数值模拟 [J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(7): 952-962.
- Zhang Y Q, Yang Y C, Li J, *et al.* Modeling the impacts of biomass burning in Southeast Asia on PM_{2.5} over China in spring [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(7): 952-962.
- [36] 张忠地, 邵天杰, 黄小刚, 等. 2017 年京津冀地区 PM_{2.5} 污染特征及潜在来源分析 [J]. *环境工程*, 2020, **38**(2): 99-106, 134.
- Zhang Z D, Shao T J, Huang X G, *et al.* Characteristics and potential sources of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2017 [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(2): 99-106, 134.
- [37] 韩婧, 代志光, 李文韬. 西安市灰霾天气下 PM_{2.5} 浓度与气象条件分析 [J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(2): 52-56.
- Han J, Dai Z G, Li W T. Analysis of PM_{2.5} concentration and meteorological conditions in haze weather of Xi'an city [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, **36**(2): 52-56.
- [38] 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.
- [39] 李光勤, 秦佳虹, 何仁伟. 中国大气 PM_{2.5} 污染演变及其影响因素 [J]. *经济地理*, 2018, **38**(8): 11-18.
- Li G Q, Qin J H, He R W. Spatial-temporal evolution and influencing factors of China's PM_{2.5} pollution [J]. *Economic geography*, 2018, **38**(8): 11-18.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shangdong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yu, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohe River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chen, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seeding Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)