ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 12 期
2018 年 12 月 15 日

目 次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征…… 秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 $PM_{2.5}$ 时空变化分析 …… 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制 …… 黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析 …… 杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征 …… 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成 …… 李霞, 苏伟健, 黎碧霞,龙淼, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征 …… 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征 …… 王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征 …… 王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征 …… 李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响 …… 斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N_2O 间接排放特征 …… 田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N_2O 浓度、释放通量与排放系数 …… 王淼, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析:以会仙湿地为例 …… 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 $\delta^{18}O$ 时空分布特征:以重庆市中梁山岩溶槽谷为例 …… 吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析 …… 刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响 …… 廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征 …… 周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价 …… 张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律 …… 郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南瓮河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响 …… 周心劝, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯淹水释放特征 …… 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化 …… 王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析 …… 江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响 …… 王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱孢藻(*Cylindrospermopsis raciborskii*)的分布特征及影响因子分析 …… 雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸 …… 尤雯, 刘海成, 曹家炜, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果 …… 兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能 …… 顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性 …… 刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应 …… 王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制 …… 王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程 …… 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响 …… 高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁 …… 付昆明, 付巢, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性 …… 陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文烨, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能 …… 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险 …… 吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险 …… 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型砷渣场地土壤 As 污染特征及生态风险评价 …… 刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系 …… 辛胜林,梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析 …… 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响 … 李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响 …… 柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响 … 马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系 …… 乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解 …… 刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO_2 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征 …… 唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价 …… 许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力 …… 刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录 …… (5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)

基于 LUR 模型的中国 $PM_{2.5}$ 时空变化分析

刘炳杰[1], 彭晓敏[2], 李继红[1]*

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023)

摘要: 土地利用回归(LUR)模型是模拟大气污染物浓度时空分异最主要、最体系化的方法之一, 为了探索 LUR 模型在中国国家尺度空气污染物模拟的适应性, 挖掘中国 2015 年空气细颗粒物($PM_{2.5}$)的时空变化特征及其与不同地理要素相关关系, 以 2015 年国家控制监测站点 $PM_{2.5}$ 数据为因变量, 土地利用类型、地形地貌、人口、道路交通与气象要素等影响因素为自变量, 构建基于地理加权的 LUR 模型, 通过模型回归制图得到 2015 年全国月均与年均 $PM_{2.5}$ 浓度分布图, 以胡焕庸线为参考线分析中国 2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化特征. 结果表明, 引入地理加权算法的 LUR 模型残差 Moran's Ⅰ显著降低, 残差空间自相关性明显减弱, 判别系数 R^2 明显提高, 更好地揭示出 $PM_{2.5}$ 空间分布和各影响因子间的复杂关系; 耕地、林地、草地和城镇居民工矿用地以及气象要素、主干道路对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响比较显著. 不同地理要素的不同空间分布对 $PM_{2.5}$ 影响作用不同; 胡焕庸线两侧 $PM_{2.5}$ 表现出明显的时空差异, 人口规模大、工业化水平高的发达城市 $PM_{2.5}$ 浓度较高; $PM_{2.5}$ 浓度在冬季月份较高, 秋季、春季、夏季月份污染情况逐渐减弱.

关键词: $PM_{2.5}$; 土地利用回归(LUR); 地理加权; 时空分布; 大气污染

中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)12-5296-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201805051

Analysis of the Temporal and Spatial Variation of $PM_{2.5}$ in China Based on the LUR Model

LIU Bing-jie[1], PENG Xiao-min[2], LI Ji-hong[1]*

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The land use regression (LUR) model is one of the most important systematic methods to simulate the temporal and spatial differentiation of the atmospheric pollutant concentration. To explore the adaptability of the LUR model to the simulation of air pollutants at the national scale in China and the temporal and spatial variation characteristics of fine air particulate matter ($PM_{2.5}$) in China in 2015 and its correlation with different geographical elements, we built a LUR model. The LUR model is based on a geographically weighted algorithm using $PM_{2.5}$ data acquired from the national control monitoring site in 2015 as the dependent variable and applying factors such as the type of land use, altitude, population, road traffic, and meteorological elements as independent variables. Based on model regression mapping, we obtained the distributions of monthly and annual $PM_{2.5}$ concentrations nationwide in 2015 and analyzed the temporal and spatial variation characteristics of $PM_{2.5}$ concentrations using the Hu line as a reference line. The results indicate that introducing the geographically weighted algorithm can significantly reduce the residual Moran's Ⅰ of the LUR model, weaken the spatial autocorrelation of residuals, and improve the coefficient of determination R^2, which is better to reveal the complex relationship between the spatial distribution and impact factors of $PM_{2.5}$. Cropland, forest, grass and urban industrial and residential land, and meteorological elements and major roads noticeably impact the $PM_{2.5}$ concentration. Different spatial distributions of different geographical elements have distinct effects on $PM_{2.5}$. The $PM_{2.5}$ shows distinct temporal and spatial differences on both sides of the Hu line. The $PM_{2.5}$ concentration is relatively high in developed cities with a large population and high industrialization levels. The concentration of $PM_{2.5}$ is higher in winter and gradually decreases in autumn, spring, and summer.

Key words: $PM_{2.5}$; land use regression(LUR); geographically weighted; temporal and spatial distribution; air pollution

随着中国工业化与城市化发展进程的不断加快、能源消耗的不断攀升, 大气中的细颗粒物($PM_{2.5}$)大量增加, 中国面临着严峻的大气污染问题. 中国从 2013 年开始逐步建立和完善 $PM_{2.5}$ 监测体系, 目前关于 $PM_{2.5}$ 的研究主要集中在化学组成和来源[1~3]、影响扩散传输的气象要素[4,5]、区域传输特征模拟[6~8]等方面. $PM_{2.5}$ 时空分布变化特征的研究也受到关注, 但相关研究主要集中针对观测条件较好地区, 全国尺度 $PM_{2.5}$ 时空分布的研究主要采用普通插值[9]与空间分析[10~12]的方法, 研究局限在重点城市[12~15]、城市群[12,16,17]或者以省级行政区划为分析对象[10,18,19].

目前国内外模拟大空间尺度污染物浓度表面的

收稿日期: 2018-05-04; **修订日期**: 2018-06-07

基金项目: 黑龙江省博士后科学基金项目(LBH-Z10279); 中央高校基本科研业务费专项(2572014CB20); 哈尔滨市应用技术研究与开发项目(2015RQQXJ071)

作者简介: 刘炳杰(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为时空数据分析与建模, E-mail: liubj@escience.cn

* 通信作者, E-mail: jhlee@nefu.edu.cn

方法主要有：空间插值、气溶胶反演、大气扩散模拟和土地利用回归模型等，前 3 种方法分别受到监测站点少、遥感影像的成像时间质量精度、过分依赖准确的输入参数等问题限制，难以精细刻画污染物时空分布特征. 时空数据分析与建模技术的发展为高分辨率、大时空尺度污染物浓度模拟提供了技术手段，结合空间分析技术的土地利用回归(land use regression，LUR)模型被引入空气污染物空间分布状况模拟，弥补了这些缺陷[20,21]. 但是传统的 LUR 模型作为一种线性回归分析方法难以满足大空间尺度污染物浓度与不同地理要素相互关系与建模的需求，地理加权回归方法能较好地解决研究对象的空间异质性问题，现已被广泛应用于区域间非平稳性关系的各类研究.

本文以中国为研究区域，在传统土地利用回归、地理加权回归建模思想的指导下，进行时空数据的分析与建模，构建基于地理加权回归的 LUR 模型，评价模型建模效果，综合分析各种地理空间要素对 $PM_{2.5}$浓度分布的影响，以胡焕庸线为参考线分析中国 2015 年 $PM_{2.5}$浓度的时空分布特征，为国家尺度 $PM_{2.5}$污染预警做出科学参考. 考虑到不同地区排放 $PM_{2.5}$颗粒物的污染源不尽相同，以及不同季节与月份 $PM_{2.5}$污染物浓度的主要影响因素存在差异，分别建立 12 个月均值模型与 1 个年均值模型进行回归制图研究.

1　材料与方法

1.1　数据来源

本研究使用的 $PM_{2.5}$浓度数据来源于全国城市空气质量实时发布平台(http://106.37.208.233:20035/)，数据发布单位是中国环境监测总站. 选取 2015 年 1 月 1 日至 12 月 31 日全国 1497 个 $PM_{2.5}$监测站点每小时监测数据，覆盖全国 31 个省份的 367 个城市(香港、澳门、台湾资料暂缺)(图 1). 根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)标准对日均值、月均值、年均值的定义，以及对污染物浓度数据有效性控制的最低要求，对 $PM_{2.5}$数据进行筛选，汇总并计算得到每个站点日均值、月均值与年均值. 同时结合《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)规定的空气质量分指数及对应的污染物($PM_{2.5}$)浓度限值、空气质量指数级别，将 $PM_{2.5}$浓度划分为 1～6 级，污染等级描述为优、良、轻度污染、中度污染、重度污染、严重污染，对应浓度范围分别为：0～35、35～75、75～115、115～150、150～250、250 μg·m^{-3}以上.

土地利用类型数据采用中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)发布的中国 2015 年土地利用现状遥感监测数据，按照中国科学院土地利用遥感监测分类系统，分为耕地(cropland)、林地(forest)、草地(grass)、水域(water)、城乡工矿居民地(industrial and residential)和未利用土地(seminatural)6 个一级类型以及 25 个二级类型. 地形地貌使用 AW3D(ALOS World 3D)数据，AW3D 是由日本宇宙航空研究开发机构(http://www.eorc.jaxa.jp)和日本遥感技术中心联合研制并于 2014 年开始逐步释放的全新一代高分辨率 DEM，空间分辨率为 30 m. 人口密度数据使用哥伦比亚大学社会经济数据应用中心

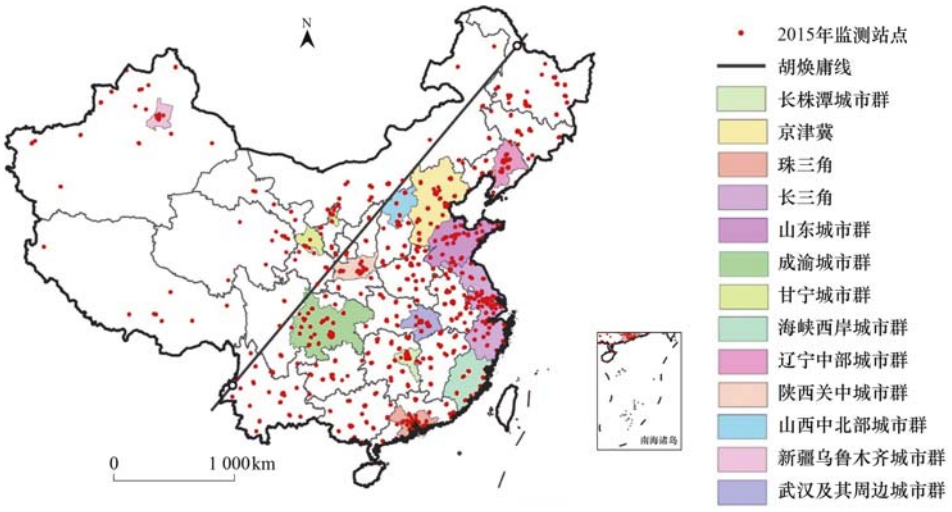


图 1　2015 年中国空气质量监测站的空间分布和大气污染重点防控区

Fig. 1　Spatial distribution of air quality monitoring sites in 2015 and key region for air pollution prevention and control in China

网站(http://beta.sedac.ciesin.columbia.edu)发布的 Gridded Population of the World(GPW)数据集中2015 年全球人口密度栅格数据作为本研究人口数据,空间分辨率为 30 s(约 1 km). 道路交通网络用来刻画机动车污染情况,道路交通数据来源于 2017 年 OpenStreetMap(http://www.openstreetmap.org)发布的全球道路矢量数据. 气象要素的变化对 $PM_{2.5}$ 的扩散、转化、沉降都有着巨大的影响,本研究使用的气象监测数据包括 0cm 地表温度(℃)、日照时数(h)、气压(hPa)、气温(℃)、相对湿度(%)、降水(mm)、风速($m \cdot s^{-1}$)等,来自于中国气象数据共享服务系统(http://data.cma.cn/)发布的 2015 年 1 月 1 日至 12 月 31 日的日均值气象数据.

1.2 模型构建

LUR 模型最初是 1997 年由 Briggs 等[22]进行的 SAVIAH(small area variations in air quality and health)研究计划引入,应用于空气污染制图. 模型基于监测数据和监测点一定半径内的土地利用信息、道路交通特征和其他相关地理变量构建回归方程,利用回归方程模拟未监测位置的大气污染物浓度. 大气污染物浓度的空间分布具有统计学规律,并与污染源、地形、地表覆盖、土地利用等地理空间要素存在相关性. 以全国国控监测站点 $PM_{2.5}$ 浓度月均值和年均值为因变量,提取相应的预测因子作为自变量,建立多元线性回归模型,模型的表达形式为:

$$y_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^{p} \beta_k \cdot X_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中,y_i 为因变量,表示第 i 站点的 $PM_{2.5}$ 浓度,β_0 为截距项,β_k 为变量系数,X_{ik} 为自变量,ε_i 为误差项.

地学空间分析研究中,全局空间回归模型假定回归参数与样本数据的地理位置没有关系,在全局内保持稳定性,传统的 LUR 模型就是一种全局空间回归模型,是典型的最小二乘回归模型. 但在全国尺度上,污染物分布广泛,不同区域的污染物浓度变化受到区域特定气候以及其不同地理环境要素的影响,回归参数不可能在全局上保持一致. 因此,在大范围空间尺度问题中,将地理加权的思想考虑到模型的构建中,构建区域回归模型,能够有效地表达不同区域污染物浓度真实的空间分布.

在大范围空间尺度问题的研究中,Brunsdon 等[23]提出了基于非参数建模思想的地理加权回归(geographical weighted regression, GWR)模型,将地理位置参与到建模中,把局部特征作为权重,构建空间权重矩阵来表征局部区域的空间非平稳性,实现局部参数估计,探索空间异质性,有效揭示污染物浓度变化的空间非平稳性与空间依赖性. 在预测要素空间自相关性不可忽视的时候,GWR 模型可以更好地揭示出 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布与不同影响因子间复杂的关系和空间依赖性[10].

本研究在传统 LUR 建模思想的指导下,引入地理加权回归算法作为建模的算法,构建不同地理空间要素影响的 2015 年中国 $PM_{2.5}$ 浓度分布模拟模型. GWR 模型构建过程中,模型类型选择为 Gaussian,选择地理核函数 Adaptive bi-square 计算权重,使用 Golden section search 方法自动确定最佳带宽大小,模型的选择指标为更正后的 Akaike 信息准则 AICc,模型的函数形式为:

$$y_i = \beta_{i0}(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^{p} \beta_{ik}(u_i, v_i) \cdot X_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中,y_i 为因变量,(u_i, v_i) 代表第 i 个监测站点的经纬度坐标,$\beta_{i0}(u_i, v_i)$ 为第 i 个站点的截距,$\beta_{ik}(u_i, v_i)$ 为第 i 个站点上第 k 个回归系数,ε_i 为第 i 个站点的误差项.

1.2.1 模型变量

模型的自变量共有 5 大类 291 个因子,分别表征土地利用、地形地貌、人口密度、道路交通以及不同气象要素等对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响. 土地类型用缓冲区内不同地类占比表示,地形地貌用监测站点所处的海拔高度表示,人口密度用监测站点位置处人口栅格值表示,道路交通用缓冲区内不同类型道路的长度表示,气象要素用监测站点处气象栅格值表示,自变量分类与表述如表 1 所示.

1.2.2 模型构建与检验

使用逐步回归(stepwise regression)的方法筛选多元线性回归模型的变量,可以有效避免多重共线性现象,具体的思路是:① 计算所有自变量与因变量的相关系数,按绝对值大小排序;②每个子类别变量中确定相关系数最高的,并将与该类别相关系数大于 0.6 的子类别删除;③ 对其余自变量与因变量进行逐步回归;④ 剔除不满足 T 检验、模型先验假定的变量;⑤ 引入方程膨胀因子(variance inflation factor, VIF)检查各要素之间的多重共线性,剔除 VIF > 7.5 的变量;⑥ 删去对 R^2 贡献小于 1% 的自变量;⑦ 重复步骤③④⑤⑥,使模型收敛. 完成多元线性回归模型的构建之后,使用 GWR 4 软件,将通过筛选的变量进行地理加权回归建模.

诊断检验包括模型 T 检验、共线性检验、残差的正态分布以及空间自相关性检验，来评估模型的预测精度与稳定性；模型的精度评价采用 K 折交叉验证（K-fold cross validation）的方法，得到 K 次平均价结果的单一估测，对模型的精度进行评价.

1.2.3　回归映射

在建立地理加权回归模型之后，将回归系数插值为栅格面，利用 ArcGIS 10.5 软件创建全国范围内 20km × 20km 格网点，使用提取分析工具提取回归系数面的值，同时获取相应自变量在格网点的值，进行模型运算求得格网点因变量 $PM_{2.5}$ 浓度预测值. 回归映射能够从机制上模拟污染物浓度空间分布，为了更好地呈现污染物浓度分布与变化趋势，将回归映射结果进行插值和再分类，得到污染物浓度分布图. 在回归制图的实际结果中，通常会出现异常值即存在过高或过低估计值，根据吴健生等[24]的相关研究，对回归结果范围进行控制.

表 1　变量分类与描述

Table 1　Classification and description of independent variables

变量类型	变量名称	单位	作用方向	变量描述	缓冲区/km
土地类型	cro_X[1)]	%	+/−	耕地（cropland）	1.5；2；2.5；3；3.5；4；4.5；5；6；8；10
	for_X	%	−	林地（forest）	1.5；2；2.5；3；3.5；4；4.5；5；6；8；10
	gra_X	%	−	草地（grass）	1.5；2；2.5；3；3.5；4；4.5；5；6；8；10
	wat_X	%	+/−	水域（water）	1.5；2；2.5；3；3.5；4；4.5；5；6；8；10
	ind_X	%	+	工矿居民地（industrial and residential）	1.5；2；2.5；3；3.5；4；4.5；5；6；8；10
	sem_X	%	+/−	未利用土地（seminatural）	1.5；2；2.5；3；3.5；4；4.5；5；6；8；10
地形地貌	altitude	m	−	监测站点海拔（altitude）	—[2)]
人口	pop	人	+	监测站点处人口数	—
道路交通	hig_X	m	+	高速公路（high way）	0.1；0.2；0.3；0.4；0.5；0.6；0.7；0.8；1；1.2；1.5；1.8；2；2.5；3；4；5；6；8；10
	maj_X	m	+	主干道（major road）	0.1；0.2；0.3；0.4；0.5；0.6；0.7；0.8；1；1.2；1.5；1.8；2；2.5；3；4；5；6；8；10
	hm_X	m	+	高速公路与主干道之和	0.1；0.2；0.3；0.4；0.5；0.6；0.7；0.8；1；1.2；1.5；1.8；2；2.5；3；4；5；6；8；10
	min_X	m	+	次级道路（minor road）	0.1；0.2；0.3；0.4；0.5；0.6；0.7；0.8；1；1.2；1.5；1.8；2；2.5；3；4；5；6；8；10
气象要素	GST	℃	—	0cm 地表温度	—
	SSD	h	—	日照时数	—
	PRS	hPa	—	气压	—
	TEM	℃	—	气温	—
	RHU	%	—	相对湿度	—
	PRE	mm	—	降水	—
	WIN	$m \cdot s^{-1}$	—	风速	—

1）使用缓冲区的大小取代后缀 X 得到完整的变量名；2）“—”表示文章中没有相关数据

2　结果与分析

2.1　模型分析

2.1.1　变量相关性分析

计算自变量与因变量 $PM_{2.5}$ 的相关性系数，针对土地利用类型与道路交通数据不同的子类型，按照建模步骤筛选之后，得到每个子类中不同缓冲区范围与 $PM_{2.5}$ 相关性最强的变量（表 2）. 由表 2 看出，耕地在 10 km 范围内、城乡工矿居民地在 4 ~ 6 km 范围相关性最强，均对污染物的浓度变化起到了一定的促进作用；未利用土地 5 ~ 10 km 范围、林地 10 km 范围、草地 5 ~ 10 km 范围与污染物相关性最强，起到了一定的抑制作用；水域相关性最强的缓冲区范围集中在 2 km 左右，主要对污染物变化起到抑制的作用；道路交通各自变量与因变量相关性最强的缓冲区范围为 8 ~ 10 km，主要体现出了对污染物浓度的促进作用. 土地利用子类中，耕地、林地、草地与城乡工矿居民地对 $PM_{2.5}$ 浓度变化均有较强的影响，道路交通数据中高速公路与主要干道对 $PM_{2.5}$ 浓度变化影响较强.

经过完整的变量筛选与建模步骤，得到分别满足所有模型条件的自变量（表 3）. 所有的建模变量均在 $\alpha = 0.01$ 水平下显著，都通过了变量显著性检验. 其中地形地貌、林地、草地、未利用土

地与 $PM_{2.5}$ 浓度保持负相关关系，道路交通、城乡工矿居民地与 $PM_{2.5}$ 浓度保持正相关关系，其他自变量在不同月份与年均的模型中表现出了不同的正负相关性. 因时间尺度的不同，各模型参与建模的预测变量存在一定的差异. 不同地理要素对区域内 $PM_{2.5}$ 浓度影响的范围及污染贡献的差异程度不同，不同时间粒度对应的空间尺度也有所差异. 从表中可以看出进入到各模型的自变量不尽相同，但其中进入不同模型的自变量都包含了不少于 3 种气象要素，相对湿度(RHU)出现在了所有模型当中，这与阳海鸥等[25]的研究结果一致；土地利用子类中，耕地与城乡工矿居民地也基本出现在了所有模型中，并且相关系数相对较高即对污染物浓度变化影响显著.

表 2 每个子类中与 $PM_{2.5}$ 相关性最强的变量[1)]

Table 2 Variables with the strongest correlation to $PM_{2.5}$ in each subclass

月份	变量子类	土地利用类型/km						道路交通/km			
		cro_(+)	for_(−)	gra_(−)	wat_(+/−)	ind_(+)	sem_(−)	hig_(+)	hm_(+)	maj_(+)	min_(+)
1	变量	10	10	10	2	6	8	10	10	8	10
	相关系数	0.314	−0.262	−0.376	−0.014	0.275	−0.142	0.147	0.220	0.203	0.158
2	变量	10	10	6	2	6	8	10	10	8	10
	相关系数	0.295	−0.281	−0.385	−0.034	0.330	−0.126	0.073	0.189	0.183	0.163
3	变量	10	10	5	10	6	5	10	10	8	10
	相关系数	0.290	−0.340	−0.263	−0.080	0.314	−0.073	0.050	0.209	0.212	0.171
4	变量	10	10	10	1.5	6	5	10	10	8	10
	相关系数	0.262	−0.254	−0.409	−0.016	0.345	−0.111	0.092	0.277	0.274	0.216
5	变量	10	10	10	8	4	10	10	6	6	10
	相关系数	0.250	−0.251	−0.255	0.072	0.230	−0.081	0.023	0.189	0.199	0.076
6	变量	10	10	8	1.5	5	8	10	6	6	10
	相关系数	0.295	−0.400	−0.226	−0.057	0.336	−0.044	0.036	0.252	0.263	0.180
7	变量	10	10	5	10	6	4.5	10	10	8	10
	相关系数	0.313	−0.350	−0.206	−0.099	0.268	−0.058	0.074	0.183	0.186	0.116
8	变量	10	10	10	1.5	6	5	10	10	8	10
	相关系数	0.265	−0.292	−0.303	−0.035	0.296	−0.063	0.055	0.216	0.220	0.146
9	变量	10	10	10	10	5	6	10	10	8	10
	相关系数	0.190	−0.139	−0.316	0.040	0.251	−0.139	0.107	0.215	0.216	0.126
10	变量	10	10	10	1.5	6	5	10	10	8	10
	相关系数	0.278	−0.278	−0.382	−0.023	0.330	−0.127	0.047	0.255	0.264	0.211
11	变量	10	10	5	2	6	8	5	10	10	10
	相关系数	0.230	−0.366	−0.230	−0.128	0.362	−0.030	−0.085	0.153	0.194	0.211
12	变量	10	10	4.5	4	6	8	10	10	8	10
	相关系数	0.323	−0.454	−0.232	−0.076	0.353	−0.095	0.031	0.230	0.237	0.180
年均	变量	10	10	6	1.5	6	10	4	10	8	10
	相关系数	0.343	−0.379	−0.299	−0.059	0.322	−0.134	−0.084	0.177	0.187	0.125

1) 将土地利用类型与道路交通子类变量与因变量相关性排序，绝对值最大的变量

2.1.2 模型结果与评价

本研究得到传统 LUR 模型与 GWR 模型的对比结果(表 4)，表中给出了逐步回归结果、OLS 模型与 GWR 模型的评价指标，从逐步回归与 OLS 回归的结果看出模型在整体上是显著的，同时 GWR 模型的拟合值、残差分布均表现出良好的评价效果. 12 个月均值模型的调整后 R^2 变动均值为 0.05，其中 6、9、11、12 月与年均 5 个 OLS 模型的调整后 R^2 值表明对应模型的解释与预测能力比较好，但是整体上来看全国尺度的 OLS 模型调整后 R^2 偏低. 使用 GWR 4 软件进行地理加权回归之后，得到 OLS 模型与 GWR 模型残差的方差分析表，通过 F 检验的判断，两者存在显著性差异，GWR 模型在 $\alpha=0.01$ 水平下显著成立. 全国尺度的污染物浓度分布研究中，OLS 模型残差 Moran's Ⅰ指数、残差 Z 值都很高，污染物浓度存在着强烈的空间自相关性，相较于 GWR 模型，OLS 模型刻画能力明显不足，GWR 模型残差 Moran's Ⅰ指数绝对值、残差 Z

值绝对值均明显降低，所以用 GWR 模型来模拟预测污染物浓度的空间分布更为合适. GWR 模型在统计结果上非常显著，其调整后 R^2 比 OLS 模型提高近一倍，赤池信息准则(AIC)降低，回归结果残差空间自相关性显著降低，整体模拟效率和精度显著提高，可以回归得到更加准确的 $PM_{2.5}$ 浓度分布模拟结果，更好地解释了 $PM_{2.5}$ 浓度分布与各地理要素因变量之间的依赖性与空间非平稳性.

表 3　因变量与建模自变量相关性

Table 3　Correlation between dependent variables and modeling independent variables

自变量	与 $PM_{2.5}$ 浓度相关性系数												
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	年均
altitude	-0.316	-0.382	-0.220	—	-0.242	—	—	—	—	—	—	-0.250	—
GST	—	—	—	—	0.075	-0.062	—	—	0.237	—	—	-0.385	—
WIN	—	—	0.056	-0.009	-0.169	—	-0.152	-0.099	-0.240	-0.102	—	-0.020	0.015
PRE	0.069	0.063	-0.276	0.177	-0.139	—	-0.273	-0.244	-0.176	-0.141	—	-0.499	-0.346
TEM	0.069	0.061	—	—	—	-0.038	—	0.273	0.282	—	-0.571	—	—
PRS	—	—	—	0.400	—	0.223	0.145	—	—	0.374	0.240	—	0.302
SSD	0.068	0.062	—	—	—	-0.130	0.035	0.079	-0.155	—	-0.113	0.195	0.018
RHU	0.069	0.062	-0.294	0.062	0.011	-0.310	-0.206	-0.055	0.048	-0.046	-0.241	-0.293	-0.215
hig_10	—	—	—	0.092	—	—	—	0.055	—	—	—	—	—
hm_10	—	0.189	—	—	—	—	—	0.216	—	—	—	—	—
maj_8	—	0.183	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
maj_6	—	—	—	—	0.200	—	—	—	—	—	—	—	—
min_10	—	—	—	—	0.076	—	—	0.146	—	—	—	—	—
for_10	—	—	—	-0.254	-0.251	—	—	-0.292	-0.140	—	—	—	—
gra_10	—	—	—	-0.409	-0.256	—	—	-0.303	-0.316	—	—	—	—
cro_10	0.314	0.295	0.289	—	—	—	0.313	—	—	0.278	0.230	0.323	0.343
cro_1.5	—	—	—	—	-0.092	—	—	-0.070	—	—	—	—	—
wat_8	0.012	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
wat_6	—	—	—	—	—	-0.048	—	-0.026	—	—	—	—	—
wat_10	—	—	—	0.014	—	—	—	—	—	—	—	—	-0.057
ind_6	0.275	0.330	0.314	0.345	—	—	0.268	—	—	0.330	0.363	0.353	0.322
ind_5	—	—	—	—	—	0.336	—	—	0.251	—	—	—	—
sem_8	—	—	—	—	—	-0.044	—	—	—	—	—	—	—
sem_10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	-0.134

表 4　OLS 与 GWR 模型结果比较与评价

Table 4　Comparison and evaluation of the results of the OLS and GWR models

月份	逐步回归结果		OLS 模型					GWR 模型				
	R^2	R^2_{adj}	R^2	R^2_{adj}	AICc	Moran's Ⅰ	残差 Z	R^2	R^2_{adj}	AICc	Moran's Ⅰ	残差 Z
1	0.424	0.415	0.404	0.400	10752	0.481	43.369	0.872	0.813	9804	0.008	0.787
2	0.400	0.391	0.378	0.373	12018	0.514	50.025	0.889	0.836	10679	-0.045	-4.265
3	0.448	0.442	0.412	0.410	12278	0.493	49.966	0.865	0.818	10914	-0.043	-4.250
4	0.364	0.355	0.340	0.336	12155	0.427	43.344	0.790	0.716	11271	-0.011	-1.019
5	0.349	0.338	0.333	0.327	8950	0.601	52.363	0.893	0.839	7802	-0.034	-2.873
6	0.587	0.582	0.571	0.569	11198	0.337	34.125	0.782	0.749	10531	0.019	1.992
7	0.447	0.441	0.423	0.420	11453	0.337	34.152	0.836	0.776	10463	-0.057	-5.682
8	0.352	0.343	0.330	0.325	11197	0.407	41.208	0.772	0.705	10265	-0.011	-1.051
9	0.472	0.465	0.453	0.450	10888	0.399	40.332	0.839	0.782	9909	-0.054	-5.383
10	0.410	0.404	0.376	0.374	12118	0.449	45.426	0.825	0.766	11037	-0.039	-3.875
11	0.596	0.592	0.573	0.571	12813	0.466	47.170	0.892	0.858	11528	-0.010	-0.973
12	0.638	0.632	0.613	0.610	11383	0.438	44.288	0.923	0.887	10313	-0.006	-0.511
年均	0.578	0.574	0.573	0.569	7871	0.448	37.892	0.887	0.853	6979	0.004	0.435

2.1.3　年均模型变量系数分析

对用于年均 $PM_{2.5}$ 浓度回归制图的各自变量的系数进行分析，图 2 表达的是回归制图格网点变量系数，分别表示的变量是风速、降水、气压、日照时数、相对湿度、缓冲区半径为 10 km 的耕地面积、缓冲区半径为 10 km 的水域面积、缓冲区半径为 6

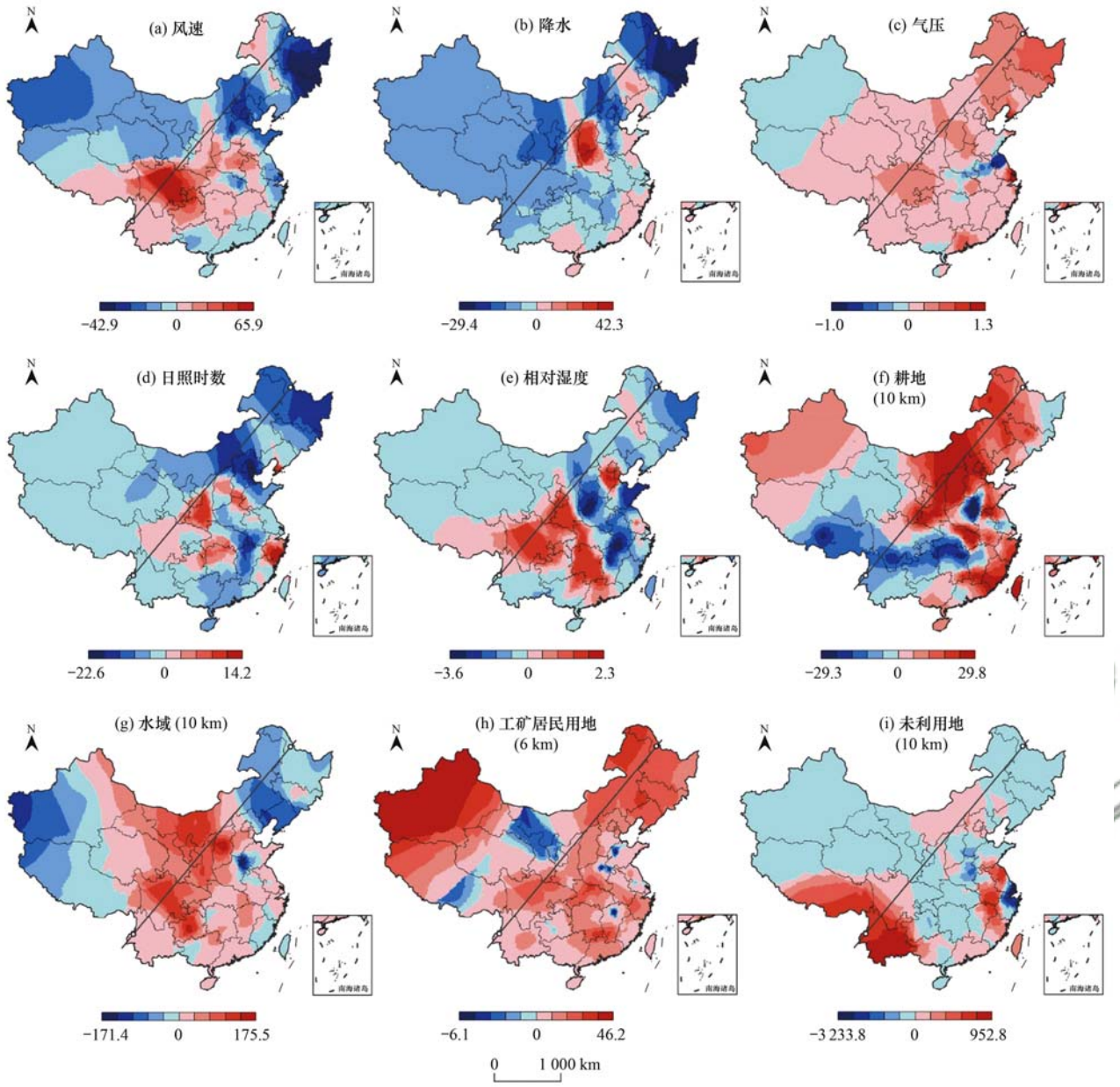


图 2 年均 GWR 模型变量系数

Fig. 2 Variable coefficient of the annual GWR model

km 的工矿居民用地面积以及缓冲区半径为 10 km 的未利用地面积. 从中可以看出沿海地区以及西部高海拔地区风速对 $PM_{2.5}$ 的影响是抑制作用，中部地区则表现为促进作用；降水、日照时数、相对湿度以及未利用地面积对 $PM_{2.5}$ 的影响基本表现为抑制作用，这些因素均会减轻 $PM_{2.5}$ 在空气中的附着程度；气压、10 km 范围内的耕地对 $PM_{2.5}$ 的增加起到了促进作用，为 $PM_{2.5}$ 在空气中的传播有一定的抑制作用，使得 $PM_{2.5}$ 出现聚集、升高的情况；6 km 范围内的工矿居民用地主要表现为促进作用，工矿居民用地不仅是 $PM_{2.5}$ 产生的重要区域，同时也不利于污染物的扩散与减弱.

2.2 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布格局

2.2.1 2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度逐月时空分布

根据 GWR 模型模拟结果进行污染物浓度的回归制图，得到 2015 年中国 $PM_{2.5}$ 浓度月均时空分布(图 3)，图 3 中分别表示了 12 个月 $PM_{2.5}$ 浓度分布情况，其中 1 ~ 12 月 $PM_{2.5}$ 月均浓度变化范围分别为：7 ~ 258、5 ~ 212、9 ~ 183、4 ~ 135、4 ~ 142、2 ~ 132、5 ~ 119、2 ~ 113、1 ~ 107、4 ~ 213、4 ~ 166、4 ~ 216 $\mu g \cdot m^{-3}$.

从 $PM_{2.5}$ 浓度月均值时空分布模拟的结果可以看出，胡焕庸线两侧污染程度反差较为明显，不同季节月份呈现明显的空间分布特征.

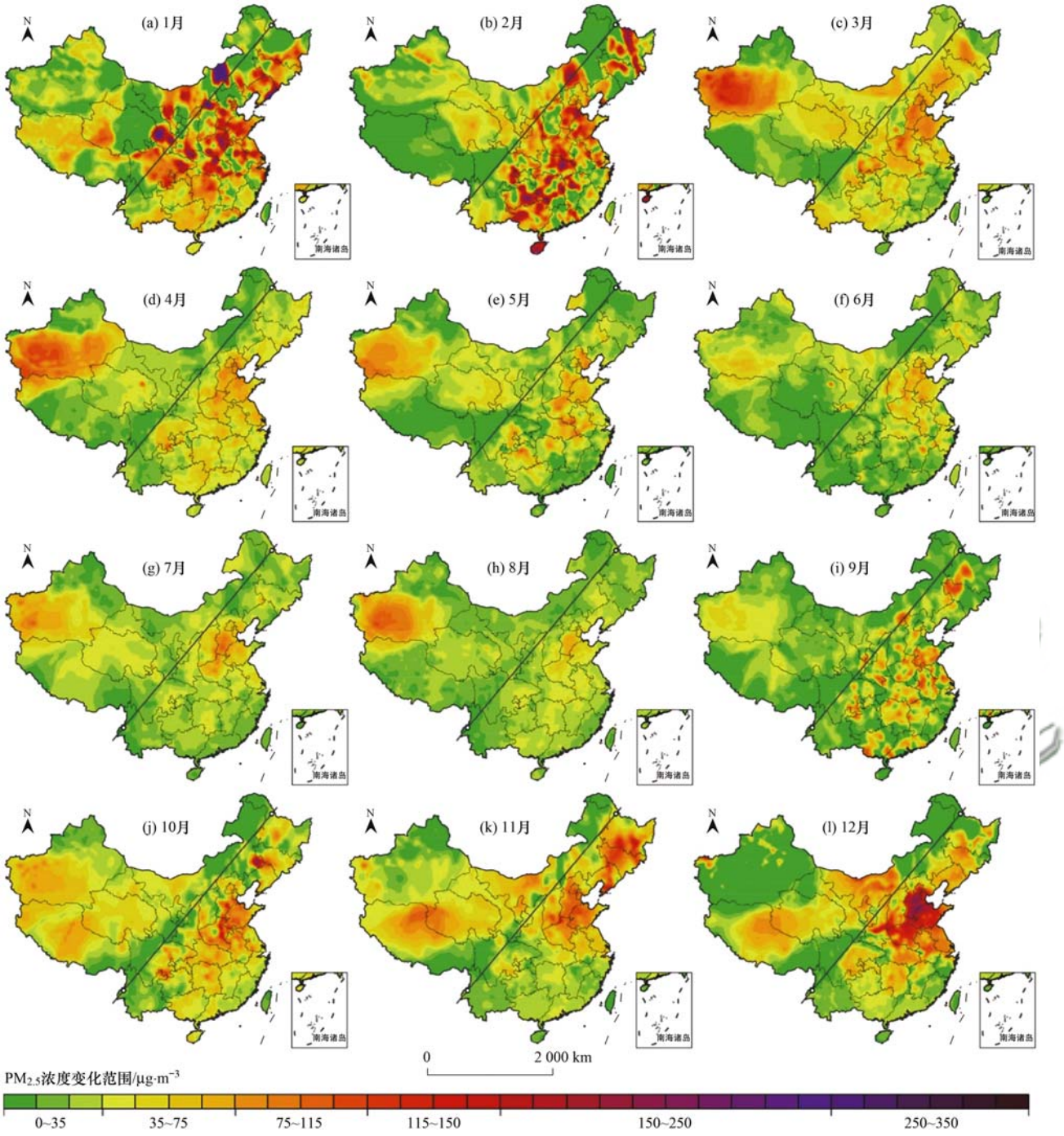


图 3　基于 GWR 模型的 $PM_{2.5}$ 浓度模拟月均分布

Fig. 3　Spatial distribution of monthly average $PM_{2.5}$ concentrations estimated by the GWR model

1、2、12 月污染程度最为严重，$PM_{2.5}$ 浓度最高值均达到 200 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以上，出现了达到重度污染等级的区域. 作为冬季的 3 个月，1 月污染范围广、强度大，2 月污染范围与 1 月较为相似，胡焕庸线东南侧污染均达到中度污染等级，西藏地区污染物浓度明显下降. 1 月内蒙北部锡林格勒盟、山西北部朔州、宁夏南部、陕西南部安康市、河北保定、河南开封周口南阳、重庆、湖北武汉随州等地污染最为严重，均达到严重污染等级；在胡焕庸线东南部，华中、华东、华北、东北南部污染浓度均达到轻度污染及以上，西北部除青海玉树地区出现轻度污染之外其余地区污染物浓度等级均为优、良. 2 月污染情况有所减弱，但在空间上发生了向东、向南的移动，污染物浓度在胡焕庸线西北部保持优、良及小部轻度等级；华中、东南地区的湖南、湖北、贵州等地主要发达城市污染物浓度呈现高值聚集，

东北地区辽宁东南部丹东地区 $PM_{2.5}$浓度明显下降，黑龙江伊春、牡丹江 $PM_{2.5}$浓度变高，分布呈现条带状.

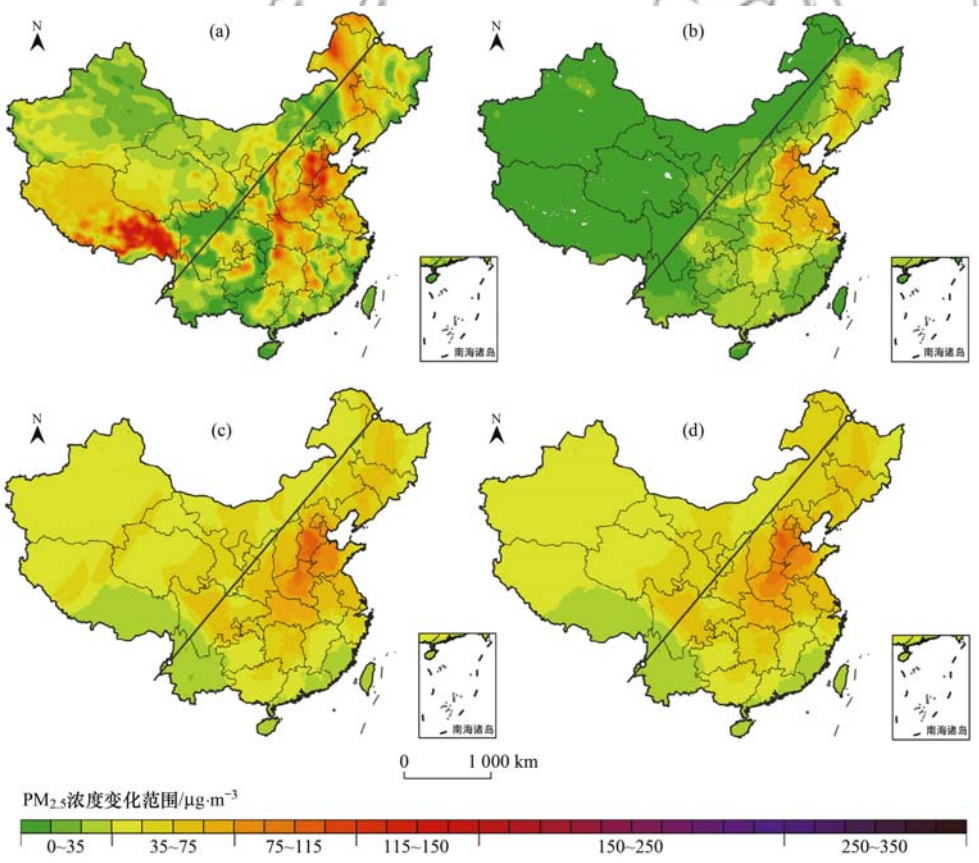
3～8 月春夏两季污染物浓度主要保持优、良与小部地区轻度污染等级. 胡焕庸线西北部新疆和田地区保持在良与轻度污染等级范围，随着时间的推移污染状况逐渐改善；华中、华东、华北等地 $PM_{2.5}$浓度等级普遍为优、良，典型的以京津冀为中心及其往南部分地区存在污染情况，表现为轻度污染.

9 月入秋以后，$PM_{2.5}$浓度上升趋势明显，污染情况逐渐开始加深，胡焕庸线东南部主要人口与工业聚集城市开始出现污染物浓度聚集升高的情况. 秋季典型城市与地区污染物达到中度污染等级，其周边辐射地区主要表现为轻度污染和良好等级. 东北地区哈尔滨、长春及其以北，华北地区张家口西北部、保定、晋中，山东、河南大部，西北地区渭南、安康、六安等城市，宜宾、昭通、南宁南部、茂名等城市开始出现污染物的聚集升高. 10 月、11 月污染范围逐渐转移与扩大，东北部辽宁沈阳、吉林、黑龙江哈尔滨出现明显的污染加剧情况，京津冀、华东大部、华中地区北部均出现污染物浓度升高的情况，西部西藏与青海相接的海西蒙古族自治州出现污染物聚集升高.

冬季 12 月污染物聚集更加显著，京津冀地区 $PM_{2.5}$浓度高，污染达到重度污染等级. 以京津冀地区为核心向南进一步呈现辐射状态，华北主要城市与华东地区、华中地区南部污染情况达到中度及其以上污染等级，$PM_{2.5}$浓度上升明显. 西北地区、华中地区南部和华南地区 $PM_{2.5}$浓度较低，污染等级主要表现为优和良.

2.2.2 2015 年 $PM_{2.5}$浓度年均时空分布

图 4(a)为基于地理加权 LUR 模型回归制图得到的 $PM_{2.5}$浓度年均分布，年均 $PM_{2.5}$浓度变化范围在 8～138 $\mu g \cdot m^{-3}$，图中显示中国内蒙东北部与东北三省、山西、河南、湖北、京津冀地区、西藏东南部林芝与昌都地区等地出现一定程度的 $PM_{2.5}$高值聚集，达到轻度和中度污染等级，与周围地区呈现



(a)基于地理加权 LUR 模型的 $PM_{2.5}$年均分布；(b)基于 AOD 的全球 $PM_{2.5}$年均分布(中国部分)；(c)站点监测值 Kriging 插值的 $PM_{2.5}$年均分布；(d)GWR 拟合值 Kriging 插值的 $PM_{2.5}$年均分布

图 4 $PM_{2.5}$浓度模拟年均分布

Fig. 4 Spatial distribution of estimated annual average $PM_{2.5}$ concentrations

辐射状. 河南安阳、湖北宜昌、湖南常德 $PM_{2.5}$分布呈南北带状向东部和南部地区呈辐射状.

图 4(c)、4(d)为使用普通 Kriging 方法插值得到的 $PM_{2.5}$年均分布，其中图 4(c)使用的是监测站点实际监测值计算得到的年均值即 $PM_{2.5}$年均真值，图 4(d)使用的是各监测站点经过 GWR 模型模拟后的年均拟合值. 从插值的 $PM_{2.5}$浓度大小与分布的结果可以看出年均真值与模型拟合值保持一致，也进一步说明模型拟合优度高，适应性强.

2018 年 3 月美国航空航天局的地球观测系统数据和信息系统社会经济数据和应用中心(http://sedac.ciesin.columbia.edu/)出版了 Donkelaar 等[26]基于 GWR 方法使用 MODIS，MISR 和 SeaWiFS 气溶胶光学厚度得到的全球年度 $PM_{2.5}$网格数据，图 4(b)为该数据的中国部分. 从图 4 中可以看出气溶胶光学厚度估计的 $PM_{2.5}$浓度值在中国地区明显偏低，在胡焕庸线东南部分 $PM_{2.5}$分布趋势大体保持一致，在京津冀及其南部华中、华东地区出现 $PM_{2.5}$浓度高值聚集，东北地区以沈阳、长春、哈尔滨为中心呈现高值聚集带状分布. 胡焕庸线西北部完全表现为优、良等级，部分地区存在白点即缺失值.

3　讨论

将传统 LUR 建模的地理要素作为自变量，引进地理加权回归的思想，构建得到的地理加权 LUR 模型，在全国大空间尺度上，模型精度更高，有着更好的拟合优度，与段杰雄等[10]关于 GWR 模型分析结果一致，本研究更突出关于不同站点的地理加权建模. 其中气象要素作为参与模型回归的自变量对 $PM_{2.5}$浓度的影响关系比较显著，不同气象要素对不同月份、不同区域的 $PM_{2.5}$浓度影响不同，与张淑平等[13]关于冬季气象因素对 $PM_{2.5}$浓度影响研究结论基本一致，本研究更侧重分析了全年不同季节气象因素与 $PM_{2.5}$之间的相关关系.

本研究所构建的模型中，2～10 月对应的部分模型，残差 Moran's Ⅰ指数与 Z 值绝对值出现偏高的现象，这表明 GWR 模型残差仍然呈现出一定程度的空间自相关，但是对应指数相比传统线性回归模型有了很大的降低，本实验现象与吴健生等[24]关于京津冀地区空间分异模型的研究结果一致，研究表明使用 GWR 方法构建的土地利用回归模型其残差空间自相关性有显著下降. 分析得出，出现这一现象的原因可能是春夏季产生 $PM_{2.5}$的相关因素明显减少，$PM_{2.5}$浓度总体保持在比较低的范围，所以与对应地理要素的相关性有所减弱，尤其在全国大尺度范围内，$PM_{2.5}$浓度与不同地理要素在不同区域的相互关系表现得更为复杂.

对比图 4(a)、4(c)、4(d)，同时与王振波等[9]和李沈鑫等[16]利用普通 Kriging 插值方法得到的污染物浓度分布进行相比，两种方法得到的结果显示 $PM_{2.5}$浓度分布趋势一致，基于地理加权的 LUR 模型模拟的 $PM_{2.5}$浓度分布图 4(a)突出了更多的 $PM_{2.5}$浓度高值聚集现象，刻画更加精细，表达更加具体准确. 地理加权回归制图得到的 $PM_{2.5}$浓度分布能够很好地刻画低值区域，普通插值方法往往由于高值权重的影响掩盖了部分低值.

对比图 4(b)，发现其 $PM_{2.5}$浓度较图 4(a)整体偏低，并且在胡焕庸线西北部基本上没有表现 $PM_{2.5}$浓度变化的趋势. 图 4(b)作为 Donkelaar 等[26]通过多种传感器获得的气溶胶光学厚度反演得到的全球 $PM_{2.5}$浓度分布结果，研究范围广，所用 AOD 数据精度均在 10km 以上，通过与本文对比，其研究结果在亚洲、非洲地区及其他部分地区出现了对 $PM_{2.5}$浓度的低估现象，也进一步印证了其文献中表述的不足. 吴健生等[24]通过对京津冀地区 VIIRS AOD 的研究，发现不论该变量是否加入，LUR 模型都能较好地表达 $PM_{2.5}$浓度的空间分布. 通过对比发现，全球尺度的 $PM_{2.5}$遥感反演结果，在一定程度低估了中国地区的 $PM_{2.5}$浓度，本研究所构建模型更为精细准确地刻画了 $PM_{2.5}$浓度的空间分布. 同时得到启发，在全国大尺度范围内有必要在基于传统 LUR 建模地理要素的基础上，结合 AOD 变量进行更加深入的 $PM_{2.5}$浓度回归模拟研究.

4　结论

(1)本研究以中国为研究区域，将地理加权算法引入到土地利用回归模型中，所构建的 GWR 模型 R^2 大于 0.7，其中 10 个模型 R^2 大于 0.8，模型残差 Moran's Ⅰ指数、残差 Z 值都明显降低，比普通线性回归模型在国家尺度拟合结果更好，回归效果显著，模型精度得到提高，更好地解释了影响 $PM_{2.5}$浓度变化各变量之间的相互关系、空间非平稳性与空间依赖性，表现出了较强的相关性与很好的适应性.

(2)通过对建模变量的对比分析，不同变量在不同空间区域的影响有显著不同，不同的土地利用

类型尤其是耕地、林地、草地和城镇居民工矿用地以及气象要素、主干道路对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响比较显著.

(3)本研究分析了 2015 年全国逐月及年均 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布变化的情况,结果显示 $PM_{2.5}$ 浓度有明显的时空差异性. 空间上,污染物胡焕庸线东南部在人口规模大、工业化水平高的发达地区浓度较高,并且呈现出高值聚集的情况;时间上,$PM_{2.5}$ 浓度在冬季月份较高,秋季、春季、夏季月份污染物浓度呈现逐渐减弱的趋势.

参考文献:

[1] Han B, Zhang R, Yang W, *et al*. Heavy haze episodes in Beijing during january 2013: inorganic ion chemistry and source analysis using highly time-resolved measurements from an urban site[J]. Science of the Total Environment, 2016, **544**: 319-329.

[2] Yang Y R, Liu X G, Qu Y, *et al*. Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the megacity Beijing, China, in january 2013[J]. Atmospheric Research, 2015, **155**: 192-203.

[3] Wu J, Xu C, Wang Q Z, *et al*. Potential sources and formations of the $PM_{2.5}$ pollution in urban Hangzhou[J]. Atmosphere, 2016, **7**(8): 100.

[4] 吕效谱, 成海容, 王祖武, 等. 中国大范围雾霾期间大气污染特征分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2013, **28**(3): 104-110.
Lv X P, Chen H R, Wang Z W, *et al*. Analysis of a wide range haze pollution in China[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2013, **28**(3): 104-110.

[5] Wang H L, Qiao L P, Lou S R, *et al*. Chemical composition of $PM_{2.5}$ and meteorological impact among three years in urban Shanghai, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **112**: 1302-1311.

[6] 王文丁, 陈焕盛, 吴其重, 等. 珠三角冬季 $PM_{2.5}$ 重污染区域输送特征数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2741-2751.
Wang W D, Chen H S, Wu Q Z, *et al*. Numerical study of $PM_{2.5}$ regional transport over Pearl River delta during a winter heavy haze event[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2741-2751.

[7] Wang Z S, Zhang D W, Li X, *et al*. Multi-method observation and numerical simulation of a $PM_{2.5}$ pollution episode in Beijing in october, 2014[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, **16**(6): 1403-1415.

[8] Fu X, Cheng Z, Wang S X, *et al*. Local and regional contributions to fine particle pollution in winter of the Yangtze River delta, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, **16**(4): 1067-1080.

[9] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014 年中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化规律[J]. 地理学报, 2015, **70**(11): 1720-1734.
Wang Z B, Fang C L, Xu G, *et al*. Spatial-temporal characteristics of the $PM_{2.5}$ in China in 2014[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(11): 1720-1734.

[10] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2498-2504.
Duan J X, Zhai W X, Cheng C Q, *et al*. Socio-economic factors influencing the spatial distribution of $PM_{2.5}$ concentrations in China: an exploratory analysis[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2498-2504.

[11] 熊欢欢, 梁龙武, 曾赠, 等. 中国城市 $PM_{2.5}$ 时空分布的动态比较分析[J]. 资源科学, 2017, **39**(1): 136-146.
Xiong H H, Liang L W, Zeng Z, *et al*. Dynamic analysis of $PM_{2.5}$ spatial-temporal characteristics in China[J]. Resources Science, 2017, **39**(1): 136-146.

[12] 李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市 $PM_{2.5}$ 污染时空分布规律[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(3): 641-650.
Li M S, Ren X X, Yu Y, *et al*. Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter ($PM_{2.5}$) pollution in mainland China[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(3): 641-650.

[13] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 冬季 $PM_{2.5}$ 的气象影响因素解析[J]. 生态学报, 2016, **36**(24): 7897-7907.
Zhang S P, Han L J, Zhou W Q, *et al*. Relationships between fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and meteorological factors in winter at typical Chinese cities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(24): 7897-7907.

[14] 张殷俊, 陈曦, 谢高地, 等. 中国细颗粒物($PM_{2.5}$)污染状况和空间分布[J]. 资源科学, 2015, **37**(7): 1339-1346.
Zhang Y J, Chen X, Xie G D, *et al*. Pollution status and spatial distribution of $PM_{2.5}$ in China[J]. Resources Science, 2015, **37**(7): 1339-1346.

[15] Xu G, Jiao L M, Zhang B E, *et al*. Spatial and temporal variability of the $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio in Wuhan, Central China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, **17**(3): 741-751.

[16] 李沈鑫, 邹滨, 刘兴权, 等. 2013-2015 年中国 $PM_{2.5}$ 污染状况时空变化[J]. 环境科学研究, 2017, **30**(5): 678-687.
Li S X, Zou B, Liu X Q, *et al*. Pollution status and spatial-temporal variations of $PM_{2.5}$ in China during 2013-2015[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, **30**(5): 678-687.

[17] 邹滨, 许珊, 张静. 土地利用视角空气污染空间分异的地理分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, **42**(2): 216-221.
Zou B, Xu S, Zhang J. Spatial variation analysis of urban air pollution using GIS: a land use perspective[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, **42**(2): 216-221.

[18] 张生玲, 王雨涵, 李跃, 等. 中国雾霾空间分布特征及影响因素分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, **27**(9): 15-22.
Zhang S L, Wang Y H, Li Y, *et al*. Spatial distribution of haze pollution and its influencing factors[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, **27**(9): 15-22.

[19] 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.

[20] Hoek G, Beelen R, de Hoogh K, *et al*. A review of land-use

regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(33): 7561-7578.

[21] 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.

[22] Briggs D J, Collins S, Elliott P, *et al*. Mapping urban air pollution using GIS: a regression-based approach [J]. International Journal of Geographical Information Science, 1997, **11**(7): 699-718.

[23] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 1996, **28**(4): 281-298.

[24] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 等. $PM_{2.5}$ 浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2191-2201.
Wu J S, Wang X, Li J C, *et al*. Comparison of models on spatial variation of $PM_{2.5}$ concentration: a case of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2191-2201.

[25] 阳海鸥, 陈文波, 梁照凤. LUR 模型模拟的南昌市 $PM_{2.5}$ 浓度与土地利用类型的关系[J]. 农业工程学报, 2017, **33**(6): 232-239.
Yang H O, Chen W B, Liang Z F. Relationship of $PM_{2.5}$ concentration and land use type in nanchang city based on LUR simulation[J].
Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, **33**(6): 232-239.

[26] NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Global annual $PM_{2.5}$ grids from MODIS, MISR and SeaWiFS aerosol optical depth (AOD) with GWR, 1998-2016[EB/OL]. https://doi.org/10.7927/H4ZK5DQS. 2018-03-16.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 12

Dec. 15, 2018

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants ····· QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, *et al.* (5289)

Analysis of the Temporal and Spatial Variation of $PM_{2.5}$ in China Based on the LUR Model ····· LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)

Physiochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta ····· HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, *et al.* (5308)

Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing ····· YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, *et al.* (5315)

Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn ····· DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, *et al.* (5323)

Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China ····· LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, *et al.* (5334)

Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province ····· ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, *et al.* (5344)

Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process ····· WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, *et al.* (5359)

Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments ····· WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, *et al.* (5365)

Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China ····· LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, *et al.* (5375)

Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer ····· SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, *et al.* (5383)

Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River ····· TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)

Concentration, Flux, and Emission Factor of N_2O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features ····· WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, *et al.* (5400)

Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland ····· PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, *et al.* (5410)

Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City ····· WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, *et al.* (5418)

Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River ····· LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, *et al.* (5428)

Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River ····· LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, *et al.* (5440)

Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir ····· ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, *et al.* (5451)

Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir ····· ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, *et al.* (5464)

Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains ····· GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, *et al.* (5473)

Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains ····· ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, *et al.* (5480)

Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding ····· YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, *et al.* (5487)

Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plans in a Typical Tourism City ····· WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, *et al.* (5494)

Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions ····· JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, *et al.* (5503)

Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of *Conticribra weissflogii* ····· WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)

Distribution and Factors Affecting *Cylindrospermopsis raciborskii* in Guangdong Reservoirs ····· LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, *et al.* (5523)

Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide ····· YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, *et al.* (5532)

Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region ····· LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, *et al.* (5541)

Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process ····· GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, *et al.* (5550)

Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process ··· LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, *et al.* (5558)

Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions ····· WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, *et al.* (5565)

Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process ····· WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, *et al.* (5572)

High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitritation-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions ····· LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, *et al.* (5580)

Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria ····· GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, *et al.* (5587)

Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community ····· FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, *et al.* (5596)

Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process ····· CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, *et al.* (5605)

Characterization of a Newly Isolated Strain *Pseudomonas* sp. N3 for Denitrification at Low Temperature ····· LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)

Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments ····· WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, *et al.* (5620)

Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health ····· LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, *et al.* (5628)

Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site ····· LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, *et al.* (5639)

Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir ····· XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, *et al.* (5647)

Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions ····· LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, *et al.* (5657)

Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland ····· LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, *et al.* (5665)

Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO_2-Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field ····· BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, *et al.* (5672)

Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil ····· MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-ling, *et al.* (5680)

Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region ····· QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, *et al.* (5687)

Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill ····· LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, *et al.* (5699)

Effect of CO_2 Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios ····· TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, *et al.* (5708)

Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP ····· XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, *et al.* (5717)

Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China ····· LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)