

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机胺的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铖, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 小莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地区地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)

基于 GAM 模型分析中国典型区域网格化 PM_{2.5} 长期变化影响因素

南洋¹, 张倩倩², 张碧辉^{1*}

(1. 国家气象中心, 北京 100081; 2. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 为探究中国典型区域地表 PM_{2.5} 浓度长期时空变化及其影响因素, 运用广义可加模型 (GAM) 对 1998 ~ 2016 年均 0.01° × 0.01° 地表 PM_{2.5} 浓度网格化数据进行分析。典型区域多年平均 PM_{2.5} 浓度从高到低: 华东华中地区 (40.5 μg·m⁻³) > 华北地区 (37.4 μg·m⁻³) > 华南地区 (27.8 μg·m⁻³) > 东北地区 (23.7 μg·m⁻³) > 四川盆地 (22.4 μg·m⁻³)。东北地区 PM_{2.5} 年际变化呈现明显上升趋势; 其他地区 1998 ~ 2007 年呈上升趋势, 2008 ~ 2016 年出现下降趋势。在典型区域 PM_{2.5} 浓度空间分布上, PM_{2.5} 浓度分布呈现显著的空间差异, 多年来各区域 PM_{2.5} 浓度高值分布相对稳定。PM_{2.5} 浓度变化的单因素 GAM 模型中, 所有影响因素均通过显著性检验, 典型区域中对 PM_{2.5} 浓度变化影响解释率较高的各个影响因素顺序有所不同。PM_{2.5} 浓度变化的多因素 GAM 模型中, 均呈现非线性关系, 典型区域方差解释率为 87.5% ~ 92% (平均 89.0%), 模型拟合度较高, 对其变化有显著性影响。典型区域 YEAR 和 LON-LAT 均对 PM_{2.5} 浓度变化影响最为显著。除此之外, 气象因子对 PM_{2.5} 的影响大小在各个区域存在不同。东北地区影响 PM_{2.5} 最重要的 3 个气象因子排序为: $tp > v_{10} > ssr$; 华北地区为: $temp > tp > msl$; 华东华中地区为: $temp > tp > ssr$; 华南地区为: $temp > RH > blh$; 四川盆地为: $tp > temp > u_{10}$ 。结果表明, 运用 GAM 模型, 能够定量分析区域 PM_{2.5} 浓度长期变化的影响因素, 对 PM_{2.5} 污染评估具有重要意义。

关键词: PM_{2.5}; 典型区域; 时空变化; GAM 模型; 影响因素

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0499-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201905090

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM_{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model

NAN Yang¹, ZHANG Qian-qian², ZHANG Bi-hui^{1*}

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: This study investigates annually-averaged surface PM_{2.5} concentrations with the spatial resolution of 0.01° × 0.01° to explore spatio-temporal variations and influencing factors of annual PM_{2.5} over typical regions in China during the period of 1998-2016, applying the generalized additive model (GAM). Regionally-averaged PM_{2.5} concentrations of five typical regions are ranked from high to low as follows: East China (40.5 μg·m⁻³) > North China (37.4 μg·m⁻³) > South China (27.8 μg·m⁻³) > Northeast China (23.7 μg·m⁻³) > Sichuan Basin (22.4 μg·m⁻³). The PM_{2.5} over Northeast China showed a linear increasing trend, while in other regions, PM_{2.5} tended to increase from 1998 to 2007 and decrease after 2007. PM_{2.5} concentrations over typical regions were all stably distributed which clearly exhibited areas with high PM_{2.5} values. For the single influencing factor GAM model of PM_{2.5} concentration, all influencing factors passed the significance test. The most influential factors with regard to the variations in the PM_{2.5} concentration differed among typical regions. In the multiple-influencing-factors-GAM model of PM_{2.5} concentration, all factors exhibited a non-linear relationship with PM_{2.5}, and they accounted for 87.5% - 92% (average 89.0%) of variations in the PM_{2.5} concentration, suggesting a good model fit. The most significant influencing factors on PM_{2.5} concentrations were YEAR and LON-LAT in all typical regions. Meteorological factors have different impacts on PM_{2.5} concentrations among the typical regions. The three most influential meteorological factors in the five typical regions ranked from high to low are as follows: $tp > v_{10} > ssr$ for Northeast China; $temp > tp > msl$ for North China; $temp > tp > ssr$ for East and Central China; $temp > RH > blh$ for South China; $tp > temp > u_{10}$ for the Sichuan Basin. Our results demonstrated that the GAM model could quantitatively analyze influencing factors in long-term variations of the regional PM_{2.5} concentration, which is important for the assessment of PM_{2.5} pollution.

Key words: PM_{2.5}; typical regions; spatio-temporal variations; GAM model; influencing factors

PM_{2.5}是指大气中空气动力学直径小于或等于 2.5 μm 的颗粒物。它能显著降低大气能见度,是影响我国空气质量的主要污染物。有研究表明 PM_{2.5} 会直达人体肺部从而对人体健康产生较大危害^[1]。随着中国经济迅速发展,污染排放的迅速增长, PM_{2.5} 污染逐渐成为热点环境问题。对此,国内外有大量对 PM_{2.5} 浓度变化的研究,主要包括 PM_{2.5} 污染

源、扩散与传输^[2~4]、污染等级评价^[5,6]、PM_{2.5} 模型模拟^[7~9], PM_{2.5} 对健康的影响^[10~12]、PM_{2.5} 与其

收稿日期: 2019-05-13; 修订日期: 2019-10-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0203301); 国家自然科学基金项目 (41805008)

作者简介: 南洋 (1989 ~), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为大气化学和环境气象, E-mail: nanyang@cma.gov.cn

* 通信作者, E-mail: zhangbh@cma.gov.cn

他空气污染物和气象要素的相关性^[13], $\text{PM}_{2.5}$ 时空变化特征^[14~16]等多方面。

地表 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响因素研究一直是比较热门的话题. 很多学者^[17~26]从 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源、扩散与稀释、气象环境因素、应用地理信息系统软件、土地利用回归和贝叶斯数据模型等多种方法, 分析了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空变化的影响因素, 主要研究 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化与影响因素之间的线性相关性. 但 $\text{PM}_{2.5}$ 的组分和来源较为复杂, 气象因素的影响包括复杂的物理化学过程, 因此需要考虑各种影响因素和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的非线性关系. 目前越来越多研究运用非线性模型和方法探讨影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的因素, 而广义可加模型 (generalized additive model, GAM) 就是其中之一。

目前 GAM 模型已经逐渐应用于处理复杂的非线性空气污染问题. Barmpadimos 等^[27]使用 GAM 模型分析欧洲地区气象因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响, 发现最重要的气象影响因素为风速、风向、边界层高度、降水和温度. 贺祥等^[28]基于 GAM 模型分析了 SO_2 与 CO 、气压与相对湿度的交互作用对南京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的影响. Zhang 等^[29]使用 GAM 模型讨论武汉市气象因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响, 风速增加和降水增加伴随着 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低. Zou 等^[30]利用 GAM 模型多元非线性特性, 综合卫星数据、气象数据、污染源数据、道路信息、地表利用、地形和人口, 反向推算 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的遥感信息. 以上这些使用 GAM 模型的研究主要针对少数站点观测数据, 针对典型区域的研究开展较少。

本研究利用 GAM 模型, 基于 1998 ~ 2016 年中国 5 个典型区域网格化 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度长期变化与影响因素, 构建非线性模型, 从而探究和比较气象因素对中国不同典型区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度长期变化的影响特征, 以期后续深入研究中国区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响因素提供支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

本研究使用的地表 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度来自 Van Donkelaar 等^[31]的计算数据集. 该数据集使用地理加权回归 (geographically weighted regression, GWR) 方法集成、校正和重采样包括 MODIS (twin MODerate resolution imaging spectroradiometer)、MISR (multi-angle imaging spectroradiometer)、SeaWiFS (sea-viewing wide field-of-view sensor) 和 CALIOP (cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization) 等卫星 AOD 数据和 GEOS-Chem 大气化

学传输模型结果, 融合多源数据生成全球 1998 ~ 2016 年均网格化地表 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据 (单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 但其中不包含沙尘和海盐颗粒物. 该网格数据是卫星融合的环境指标 (satellite-derived environmental indicators, SDEI) 之一, 水平分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。

中国西北部和北部 (包括新疆、内蒙古、甘肃和青海等) 由于存在或接近沙漠沙地, 导致地表 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度升高, 小时浓度可以高达几百至上千 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[32,33]. 但是由于 SDEI 数据不包含沙尘, 故中国西北部 SDEI 地表 $\text{PM}_{2.5}$ 为低值 ($< 20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 本研究关注的典型区域包括东北区域 ($120^\circ \sim 130^\circ\text{E}$, $40^\circ \sim 48^\circ\text{N}$)、华北地区 ($110^\circ \sim 120^\circ\text{E}$, $34^\circ \sim 42^\circ\text{N}$)、华东华中地区 ($111^\circ \sim 122^\circ\text{E}$, $27^\circ \sim 34^\circ\text{N}$)、华南地区 ($109^\circ \sim 119^\circ\text{E}$, $21^\circ \sim 26^\circ\text{N}$)、四川盆地 ($101^\circ \sim 110^\circ\text{E}$, $28^\circ \sim 34^\circ\text{N}$), 这些区域包含经济发达和人口密集的城市群, $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征明显。

本研究用生态环境部 (Ministry of Ecological Environment, MEE) 发布的 2015 ~ 2016 年全国 1 497 个地面站点监测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对 SDEI 地表 $\text{PM}_{2.5}$ 数据集进行比较验证. 为了方便比较, 将 MEE 站点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度平均落到相同的 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 水平分辨率网格内, 产生 1 490 个 SDEI-MEE 匹配网格. 由于 MEE 均是城市站点观测, 监测点分布集中, 造成监测点以外的广大地区数据缺失, 形成监测盲区。

为了更好地比较 MEE 站点观测与 SDEI 对应网格 $\text{PM}_{2.5}$, 图 1 展示了 2015 ~ 2016 年典型区域 (东北地区、华北地区、华东华中地区、华南地区、四川盆地) 和其他区域 SDEI (x 轴) 和 MEE (y 轴) 地表 $\text{PM}_{2.5}$ 散点密度分布. 典型区域 SDEI 数据与 MEE 数据之间线性拟合度较好 ($R = 0.74$), 数据分布高频区 (红色区域) 集中在拟合直线附近, 同时均方根差 ($\text{RMSE} = 13.02$)、平均绝对误差 ($\text{MAE} = 9.94$) 和偏差 ($\text{bias} = -7.5\%$) 较小, 且对应网格数 ($N = 1\,074$) 较多, 通过显著性检验. 中国其他区域 [图 1 (b)] SDEI 数据与 MEE 数据之间线性拟合度较差 ($R = 0.34$), 同时均方根差 ($\text{RMSE} = 21.62$)、平均绝对误差 ($\text{MAE} = 14.85$) 和偏差 ($\text{bias} = -28.7\%$) 较典型区域更大, 对应网格数 ($N = 416$) 较少, 且 $\text{PM}_{2.5}$ 低估, 这和 SDEI 的 $\text{PM}_{2.5}$ 不包含沙尘有关. 这说明 SDEI 数据在典型区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 与 MEE 数据之间线性相关较好, 能够捕捉到实际 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化规律. 虽然有个别网格 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与地面观测相比有些差距 [图 1 (a) 中深蓝色点], 但由于直接使用 MEE 站点观测平均到网格与 SDEI 网格数据对比存在系统误差, 同时本研究使用 SDEI 数据进行空间

大尺度统计的研究, 不适宜少数站点进行比较^[4]. 因此, 可以使用 SDEI 数据对中国典型区域地表 PM_{2.5} 浓度进行长时间时空变化特征分析.

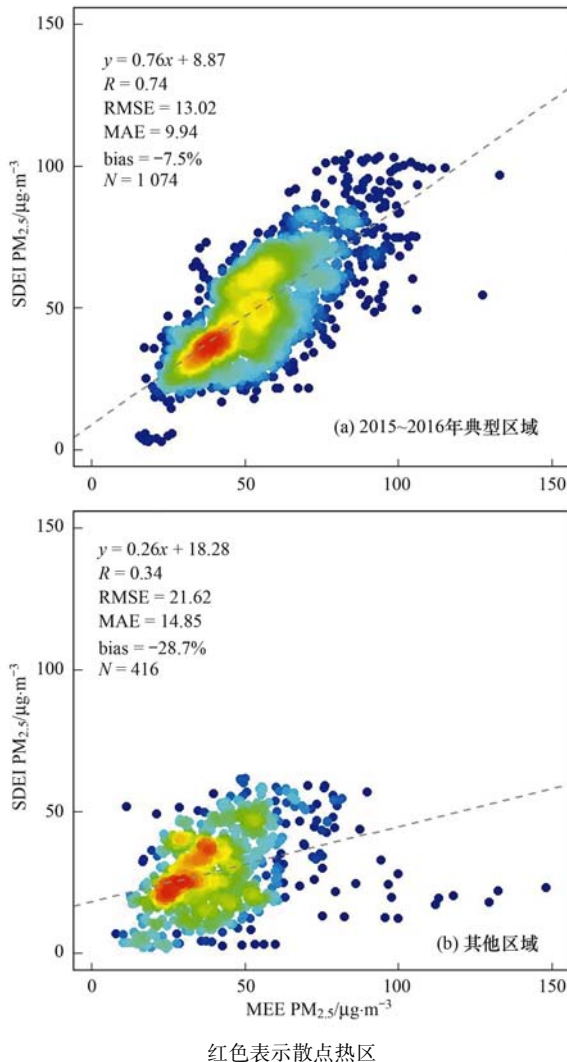


图1 2015~2016年典型区域和其他区域 MEE 和 SDEI 地表 PM_{2.5} 散点密度分布

Fig. 1 Scatter density plots of MEE and SDEI PM_{2.5} during 2015-2016 over the typical regions and the rest regions of China

气象资料采用的是欧洲中期天气预报中心 (WCMWF) 的 ERA-Interim 月均 0.125° × 0.125° 水平分辨率气象再分析资料^[34], 数据包括 10 m 经向和纬向风 (u_{10} 和 v_{10} , m·s⁻¹)、平均海平面气压 (msl, Pa)、边界层高度 (blh, m)、2 m 露点温度、地表净太阳辐射 (ssr, J·m⁻²)、2 m 温度 (temp, K) 和总降水 (tp, m). 再用 2 m 露点温度推算 2 m 相对湿度 (RH, %)

1.2 分析方法

GAM 模型是广义可加模型的简称, 是由数据驱动而非统计分布模型驱动的非参数回归模型, 可同时对部分解释变量线性拟合, 且对其他解释变量进行光滑函数拟合. 模型不需要预先设定参数模型,

模型通过解释变量的平滑函数建立, 能够自动选择并拟合出合适的多项式. 在构建 GAM 模型中, 使用 R 语言的 mgcv 库中的 gam 函数. 方程为:

$$g(c_{i,j}) = \beta_0 + s(\text{YEAR}) + s(\text{LON}, \text{LAT}) + s(u_{10,i,j}) + s(v_{10,i,j}) + s(\text{msl}_{i,j}) + s(\text{blh}_{i,j}) + s(\text{RH}_{i,j}) + s(\text{ssr}_{i,j}) + s(\text{temp}_{i,j}) + s(\text{tp}_{i,j}) + \varepsilon$$

式中, i 和 j 是表示网格经度和纬度, $c_{i,j}$ 为网格 PM_{2.5} 浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), $g(c_{i,j})$ 是连接函数; s 是针对变量光滑函数, 其中变量有年 (YEAR)、经纬度 (LON、LAT)、10m 风 (u_{10} 和 v_{10})、平均海平面气压 (msl)、边界层高度 (blh)、相对湿度 (RH)、地表净太阳辐射 (ssr)、2 m 气温 (temp) 和总降水 (tp); 经纬度同时表示空间分布特征, 故将 LON 和 LAT 综合到一个光滑函数中; ε 表示残差, β_0 表示全部平均响应. 由于气象数据空间分辨率为 0.125° × 0.125°, 为了能与气象数据匹配, 故将 SDEI 的 PM_{2.5} 数据平均到 0.125° × 0.125° 的空间分辨率. 在时间分辨率上, 将气象资料平均到年均时间分辨率, 以与 SDEI 的年均 PM_{2.5} 数据匹配.

利用 GAM 模型, 通过 F 统计值可以判断对 PM_{2.5} 影响最重要的因子^[35,36]. 各因子的 F 统计值越大, 其相对重要性越大. P 值是用来判断假设检验结果的另一参数, P 值越小, 表明结果越显著. 调整判定系数 (R^2) 为回归平方和与总离差平方和的比值, 调整判定系数越大越好, 模型越精确, 回归效果越显著. 0 ≤ 调整判定系数 ≤ 1, 且调整判定系数越接近 1, 回归拟合效果越好. 当自由度值为 1 时, 函数为线性方程, 表明影响因素与应变量 PM_{2.5} 间具有某种线性关系; 当自由度大于 1, 表示函数是非线性曲线方程, 影响因素与 PM_{2.5} 浓度变化间具有某种非线性关系, 且值越大, 非线性关系越显著.

2 结果与讨论

2.1 时空变化分析

2.1.1 区域长期整体变化分析

图 2 表示典型区域 1998~2016 年 SDEI 地表 PM_{2.5} 浓度长期分布箱, 表述各地区 PM_{2.5} 浓度统计比较. 按照 PM_{2.5} 浓度均值从高到低排序为: 华东华中地区 ($40.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 华北地区 ($37.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 华南地区 ($27.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 东北地区 ($23.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 四川盆地 ($22.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); 中位数从高到低排序为: 华东华中地区 ($40.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 华北地区 ($31.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 华南地区 ($27.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 四川盆地 ($23.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) > 东北地区 (21.9

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);上四分位数从高到低排序为:华北地区($56.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>华东华中地区($50.6\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>华南地区($34.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>四川盆地($30.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>东北地区($30.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);下四分位数从高到低排序为:华东华中地区($30.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>华南地区($21.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>华北地区($19.4\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>东北地区($15.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>四川盆地($11.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);四分位距从高到低排序为:华北地区($36.7\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>华东华中地区($20.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>四川盆地($19.7\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>东北地区($15.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>华南地区($13.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);标准差从高到低的排序为:华北地区($21.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>华东华中地区($13.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>四川盆地($12.8\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>东北地区($11.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>华南地区($8.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。以上结果表明,华东华中地区多年平均浓度最高但离散度第三;华北地区多年平均浓度第二但离散度最高;华南地区多年平均浓度第三但离散度最低;东北地区和四川盆地平均浓度最低。

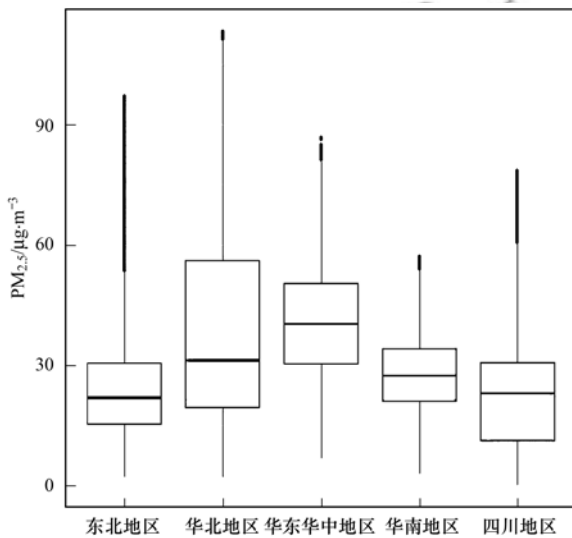


图2 典型地区 SDEI 地表 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度长期分布箱

Fig. 2 Long-term box plot of SDEI $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in typical regions

图3表示5个典型区域1998~2016年每年SDEI地表 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值时间序列。东北地区、华北地区、华东华中地区、华南地区和四川盆地1998~2016年年均浓度变化分别为0.62、1.01、0.67、0.55和0.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年均浓度变化百分比为4.54%、4.26%、2.59%、3.78%和1.01%。拟合结果显示东北地区线性拟合较好($R=0.81$),呈现上升趋势。而其他地区线性拟合相关系数较小(华北地区 $R=0.71$,华东华中地区 $R=0.69$,华南地区 $R=0.60$),其中四川盆地线性相关系数最小($R=0.26$)。其他地区变化趋势为从1998年年均最低开始逐年上升,在2007年附近达到高值后出现下降。

分段变化趋势为,1998~2007年东北地区、华北地区、华东华中地区、华南地区和四川盆地年均浓度变化分别为0.82、2.77、2.54、2.16和0.78 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年均浓度变化百分比为5.49%、9.71%、7.58%、10.64%和5.19%;2008~2016年东北地区、华北地区、华东华中地区、华南地区和四川盆地年均浓度变化分别为0.42、-0.75、-1.20、-1.06和-0.75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年均浓度变化百分比为3.59%、-1.17%、-2.59%、-3.08%和-3.18%。

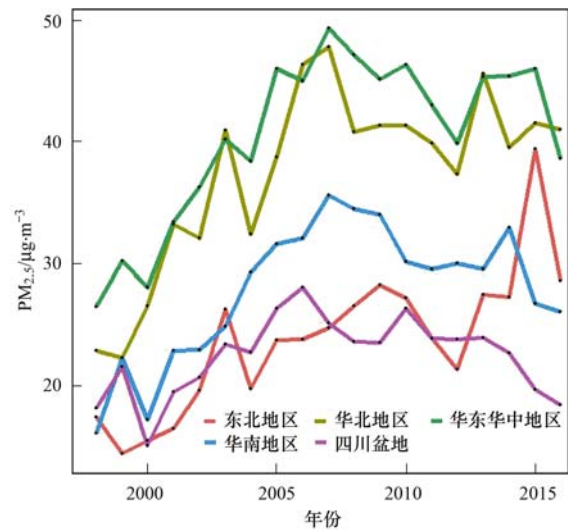


图3 各个地区每年 SDEI 地表 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度时间序列

Fig. 3 Time series of annual regional-mean SDEI $\text{PM}_{2.5}$ in typical regions

2.1.2 区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布变化

为了更加清楚表征各区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布变化特征,图4展示了典型区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值多年平均空间分布, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布呈现显著的空间差异,多年来各区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值分布相对稳定。

东北地区,可以看出“哈尔滨-长春-沈阳”城市及附近出现 $\text{PM}_{2.5}$ 高值,其余地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度递减。1998~2002年 $\text{PM}_{2.5}$ 高值在40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右且分布范围较少;2003~2007年,哈尔滨及其以南地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增长到45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,且“哈尔滨-长春-沈阳”城市及附近增长到40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右;2008~2012年,哈尔滨、长春和沈阳 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均上升到50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右;2013~2016年,哈尔滨及其以南地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进一步上升到60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,“哈尔滨-长春-沈阳”城市及附近增长到50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。这样的增长趋势与图3中东北地区年均浓度时间序列变化一致。华北地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布表现出区域高低值差异明显的总体趋势。可以看出1998~2002年整体 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低,高值区(60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右)在北京、天津和河北沧州附近。2003~2007年起,

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度快速上升, 高值区从北京、天津和河北南部延伸到河南北部和山东西北部, 大范围地区维持在 $80 \sim 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 这样的高值分布在 2008 ~ 2012 年和 2013 ~ 2016 年均保持. 这与图 3 中华北地区平均浓度时间序列变化一致. 华东华中地区在 1998 ~ 2002 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏低, 2003 ~ 2007、2008 ~ 2012 和 2013 ~ 2016 年保持在高值. 高值区分布也较为稳定, 集中在河南南部、安徽、江苏、上海、湖北东部和湖南北部, 1998 ~ 2002 年最高值在 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 2003 ~ 2007 年起最高值在 $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右. 华南地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值在典型区域中较低, 1998 ~ 2002 年最高值在 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右, 2003 ~ 2007 年起最高值在 $45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右. 四川盆地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区分布在“成都-重庆”之间, 特别

是成都附近高于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 四川盆地平均浓度分布变化显示, 仅在 2003 ~ 2007 年出现最高值 ($60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右), 其余年均较低.

2.1.3 与相关研究结果比较分析

本研究时空分析结果 (图 4) 与罗毅等^[15] 在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值分布和年际变化的研究结果类似. 罗毅等^[15] 的研究表明: 京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度呈现从西北向东南逐渐升高, 南北差异明显的总体趋势. 2000 年, 京津冀东南部的的主要区域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度在 $45 \sim 55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内, 在 2004 ~ 2010 年期间, 大部分京津冀区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 $65 \sim 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 东三省 $\text{PM}_{2.5}$ 高值区集中在吉林中部, 2000 ~ 2010 年, 中部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度在 $60 \sim 70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内, 2012 ~ 2016 年东三省东北部区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓

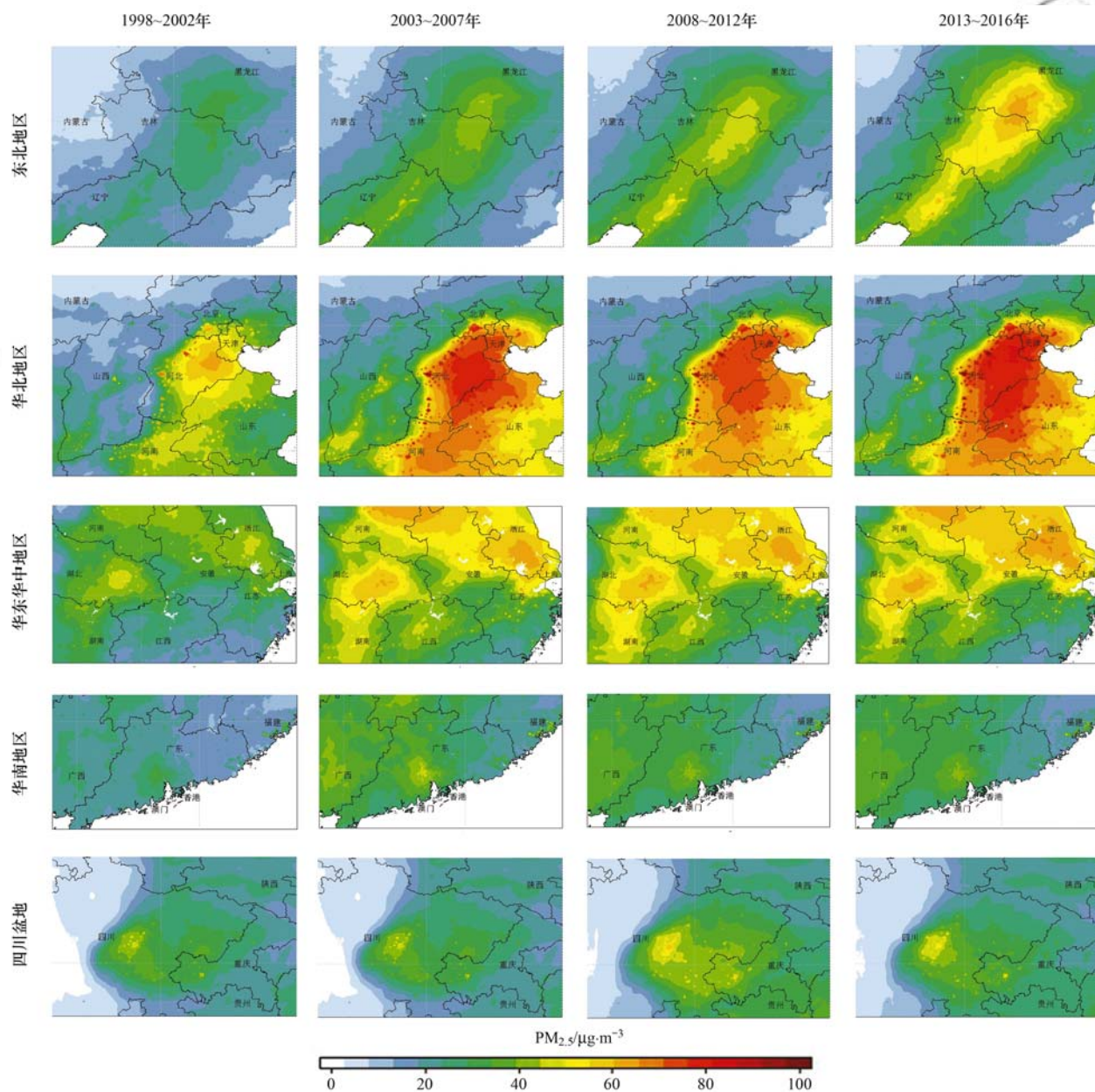


图 4 1998 ~ 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 多年平均浓度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of multi-year mean $\text{PM}_{2.5}$ concentrations from 1998-2016

度由 50 ~ 55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到 45 ~ 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 长三角地区 2000 ~ 2010 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体呈现北高南低. 珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度均低于 55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

本研究时空变化与罗毅等^[15]的研究结果仍然存在一些差异,主要原因有:①不同数据源的误差. 本研究数据是卫星 AOD 与大气化学模式融合数据集;罗毅等^[15]使用地面站点监测和 AOD,使用 BP 人工神经网络和支持向量回归机两种算法相结合,构建组合模拟模型;②时空研究范围差别. 本研究是 1998 ~ 2016 年中国 5 个典型区域矩形划分,而罗毅等^[15]是 2000 ~ 2016 年典型区域分省划分.

2.2 GAM 模式的构建与验证

2.2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 与单影响因素的 GAM 模型分析

将 YEAR、LON、LAT、 u_{10} 、 v_{10} 、msl、blh、RH、ssr、temp 和 tp 共 11 个影响因素作为解释变量,每次选择 1 个影响因素作为解释变量, $\text{PM}_{2.5}$ 作为响应变量,采用平滑函数分别构建模型,分别分析每个典型区域内每个解释变量对响应变量的影响显著性及模型的拟合度(表 1 ~ 5). 结果表明,所有影响因素均在 $P < 0.001$ 水平下对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响显著,表明各影响因素单独作为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化解释变量具有统计学意义;所有影响因素的自由度均远大于 1,表明各影响因素与 $\text{PM}_{2.5}$ 间具有非常显著的非线性关系;所有典型区域均显示联合 LON 和 LAT 为一个综合影响因素(44.1% ~ 81.3%)比 LON、LAT 各自作为一个影响因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响的模型解释率(由模型解释的零偏差的比例)之和(33.1% ~ 68%)更高,这也验证了 1.2 节中 LON 和 LAT 综合到一个光滑函数中的处理;5 个区域中对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响解释率较高的各个影响因素顺

序有所不同. 东北地区 LON-LAT 和 v_{10} 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响的模型解释率较高(44.6% ~ 65.4%),调整判定系数较大(0.446 ~ 0.654),表明这 2 个影响因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化构建模型方程的拟合度较优;其他影响因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的解释率较低(1.52% ~ 19.9%),调整判定系数值也较低(0.015 1 ~ 0.199),表明它们单独对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响的模型拟合度较差,模型对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化解释能力也较差. 华北地区 LON-LAT、temp、 u_{10} 、ssr、msl 和 blh 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响的模型解释率较高(32.5% ~ 79%),调整判定系数较大(0.325 ~ 0.79);华东华中地区 LON-LAT、RH 和 YEAR 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响的模型解释率较高(25.2% ~ 58.5%),调整判定系数较大(0.251 ~ 0.584);华南地区 LON-LAT 和 YEAR 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响的模型解释率较高(39.7% ~ 44.1%),调整判定系数较大(0.397 ~ 0.441);四川盆地 LON-LAT、temp 和 v_{10} 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响的模型解释率较高(37.2% ~ 81.3%),调整判定系数较大(0.372 ~ 0.441). 结果显示,5 个典型区域对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响较大的单因素种类和排序均有所不同. 虽然有部分影响因素独立构建对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响的模型方差拟合度较差,解释率较低,但它们均通过显著性检验,均具有统计学意义.

GAM 单因子分析研究结果表明, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与期限因素之间均表现出非线性关系,且 5 个典型区域变化影响较大的单因素种类和排序均有不同,所有影响因素均通过显著性检验,具有统计学意义. 因此,采用 GAM 模型可以较好分析多种影响因素与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度间的非线性关系.

表 1 东北地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与单影响因素的 GAM 模型假设检验结果¹⁾

Table 1 GAM model hypothesis test results showing relationship between $\text{PM}_{2.5}$ concentration and single influencing factors in Northeast China

平滑效应项	估计自由度	参考自由度	F	P	方差解释率/%	调整判定系数(R^2)
YEAR	8.993	9	2 565	<2e-16 ***	19.9	0.199
LON-LAT	28.96	29	6 044	<2e-16 ***	65.4	0.654
LON	8.851	8.993	3 354	<2e-16 ***	24.5	0.245
LAT	8.443	8.913	981.6	<2e-16 ***	8.63	0.086 2
u_{10}	8.664	8.968	877.7	<2e-16 ***	7.84	0.078 3
v_{10}	8.684	8.972	8 321	<2e-16 ***	44.6	0.446
msl	8.924	8.998	158.3	<2e-16 ***	1.52	0.015 1
blh	8.802	8.989	1 719	<2e-16 ***	14.3	0.143
RH	8.731	8.98	1 113	<2e-16 ***	9.73	0.097 2
ssr	8.977	9	1 065	<2e-16 ***	9.37	0.093 6
temp	8.858	8.994	1820	<2e-16 ***	15	0.15
tp	8.993	9	980.1	<2e-16 ***	8.69	0.086 8

1) * * * 表示在 0.001 水平下变量是显著的,下同

表 2 华北地区 PM_{2.5} 浓度与单影响因素的 GAM 模型假设检验结果

Table 2 GAM model hypothesis test results showing relationship between PM_{2.5} concentration and single influencing factors in North China

平滑效应项	估计自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	方差解释率/%	调整判定系数 (<i>R</i> ²)
YEAR	8.977	9	1 038	<2e-16 ***	9.43	0.094 3
LON-LAT	28.96	29	11 602	<2e-16 ***	79	0.79
LON	8.858	8.994	5 309	<2e-16 ***	34.7	0.347
LAT	8.901	8.997	4 686	<2e-16 ***	32	0.32
<i>u</i> ₁₀	8.992	9	12 918	<2e-16 ***	56.5	0.564
<i>v</i> ₁₀	8.622	8.96	3 370	<2e-16 ***	25.2	0.252
msl	8.968	9	5 922	<2e-16 ***	37.3	0.373
blh	8.7	8.974	4 818	<2e-16 ***	32.5	0.325
RH	8.711	8.976	1 753	<2e-16 ***	14.9	0.149
ssr	8.965	9	7 525	<2e-16 ***	43	0.43
temp	8.96	9	23 076	<2e-16 ***	69.8	0.698
tp	8.982	9	1 972	<2e-16 ***	16.5	0.165

表 3 华东华中地区 PM_{2.5} 浓度与单影响因素的 GAM 模型假设检验结果

Table 3 GAM model hypothesis test results showing relationship between PM_{2.5} concentration and single influencing factors in East and Central China

平滑效应项	估计自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	方差解释率/%	调整判定系数 (<i>R</i> ²)
YEAR	8.989	9	3 185	<2e-16 ***	25.2	0.251
LON-LAT	28.96	29	4 137	<2e-16 ***	58.5	0.584
LON	8.931	8.999	804.6	<2e-16 ***	7.83	0.078 2
LAT	8.841	8.992	3 397	<2e-16 ***	26.4	0.264
<i>u</i> ₁₀	8.926	8.998	952.9	<2e-16 ***	7.97	0.079 6
<i>v</i> ₁₀	8.921	8.998	433.3	<2e-16 ***	4.38	0.043 7
msl	8.88	8.996	1 399	<2e-16 ***	12.9	0.129
blh	8.89	8.996	337.8	<2e-16 ***	3.45	0.034 4
RH	8.911	8.998	4 743	<2e-16 ***	33.3	0.333
ssr	8.67	8.969	698.2	<2e-16 ***	6.85	0.068 4
temp	8.876	8.996	1 041	<2e-16 ***	9.9	0.098 9
tp	8.949	8.999	1 163	<2e-16 ***	10.9	0.109

表 4 华南地区 PM_{2.5} 浓度与单影响因素的 GAM 模型假设检验结果

Table 4 GAM model hypothesis test results showing relationship between PM_{2.5} concentration and single influencing factors in South China

平滑效应项	估计自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>	方差解释率/%	调整判定系数 (<i>R</i> ²)
YEAR	8.969	9	3 200	<2e-16 ***	39.7	0.397
LON-LAT	28.83	29	1 188	<2e-16 ***	44.1	0.441
LON	8.826	8.991	2 923	<2e-16 ***	37.6	0.376
LAT	8.258	8.838	310.3	<2e-16 ***	5.92	0.059
<i>u</i> ₁₀	8.942	8.999	673.2	<2e-16 ***	12.2	0.122
<i>v</i> ₁₀	8.959	9	261.6	<2e-16 ***	5.12	0.051
msl	8.693	8.974	317.9	<2e-16 ***	6.14	0.061 2
blh	8.899	8.997	488.4	<2e-16 ***	9.15	0.091 3
RH	8.673	8.97	589.6	<2e-16 ***	10.8	0.108
ssr	8.791	8.988	213.6	<2e-16 ***	4.22	0.042
temp	8.329	8.88	205.5	<2e-16 ***	4.04	0.040 2
tp	8.844	8.993	150.4	<2e-16 ***	3.01	0.029 9

2.2.2 多影响因素 GAM 模型分析

将单因素分析中有统计意义和经过显著性检验的 YEAR、LON-LAT、*u*₁₀、*v*₁₀、msl、blh、RH、ssr、temp 和 tp 影响因素作为解释变量,将 PM_{2.5} 作为响应变量,拟合多影响因素与 PM_{2.5} 浓度之间的关系,模型平滑回归项采用样条平滑函数,5 个典型区域使用 GAM 模型拟合结果分别如表 6~10 所示。

东北地区模型调整判定系数为 0.88,方差解释率 88.1%。华北地区模型调整的 *R*² 为 0.919,方差解释率 92%。华东华中地区模型调整判定系数为 0.875,方差解释率 87.5%。华南地区模型调整判定系数为 0.876,方差解释率 87.6%。四川盆地模型调整判定系数为 0.899,方差解释率 89.9%。典型区域 GAM 模型平均模型调整判定系数为 0.89,平

均方差解释率为 89.0%,各区域 GAM 模型拟合度均较高. 从表 6~10 可以看出所有影响因素的自由度均大于 1,表明所有影响因素与 $PM_{2.5}$ 浓度变化均是非线性关系;截距项和所有影响因素 P 值均小于 0.001($P < 2e - 16$),具有显著性水平统计学意义.

说明此 GAM 模型拟合较好,综合 YEAR 和 LON-LAT 这 2 个时空相关因子,以及 u_{10} 、 v_{10} 、msl、blh、RH、ssr、temp 和 tp 这 8 个气象因子与 $PM_{2.5}$ 浓度之间的相关性较强,均对 $PM_{2.5}$ 浓度变化具有显著影响的非线性关系.

表 5 四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度与单影响因素的 GAM 模型假设检验结果

Table 5 GAM model hypothesis test results showing relationship between $PM_{2.5}$ concentration and single influencing factors in Sichuan Basin						
平滑效应项	估计自由度	参考自由度	F	P	方差解释率/%	调整判定系数(R^2)
YEAR	8.923	8.998	350.2	$<2e - 16^{***}$	4.74	0.0473
LON-LAT	28.98	29	9471	$<2e - 16^{***}$	81.3	0.812
LON	8.867	8.995	8333	$<2e - 16^{***}$	54.2	0.542
LAT	8.838	8.992	1131	$<2e - 16^{***}$	13.8	0.138
u_{10}	8.969	9	1832	$<2e - 16^{***}$	20.6	0.206
v_{10}	8.79	8.987	4171	$<2e - 16^{***}$	37.2	0.372
msl	8.807	8.989	262.9	$<2e - 16^{***}$	3.6	0.0359
blh	8.888	8.996	2787	$<2e - 16^{***}$	28.3	0.283
RH	8.89	8.997	1508	$<2e - 16^{***}$	17.6	0.176
ssr	8.817	8.991	386	$<2e - 16^{***}$	5.2	0.0518
temp	8.943	8.999	19264	$<2e - 16^{***}$	73.2	0.732
tp	8.979	9	257.3	$<2e - 16^{***}$	3.54	0.0352

通过 GAM 模型拟合的 F 值比较,发现典型区域间影响最显著的气象因素有所不同. 典型区域 GAM 模型拟合结果均显示 YEAR 和 LON-LAT 的 F 值远高于气象因子影响,说明以网格化产品做 GAM 模型拟合分析,其时空相关因子对 $PM_{2.5}$ 影响是最大的,这些变量与 $PM_{2.5}$ 排放源的年际变化和空间分布密切相关. 除此之外,气象因子对 $PM_{2.5}$ 的影响大小在各个区域存在不同. 东北地区影响 $PM_{2.5}$ 的最重要的 3 个气象因子排序为: $tp > v_{10} > ssr$; 华北地区为: $temp > tp > msl$; 华东华中地区为: $temp > tp > ssr$; 华南地区为: $temp > RH > blh$; 四川盆地为: $tp > temp > u_{10}$. 典型区域主要影响气象因子中出现次数最多的是 tp 和 $temp$,即降水和温度对 $PM_{2.5}$ 浓度影响最显著.

表 6 东北地区 $PM_{2.5}$ 浓度和多影响因素的 GAM 模型拟合结果

Table 6 GAM fitting results of $PM_{2.5}$ concentration and multiple influencing factors in Northeast China				
指标	估计自由度	参考自由度	F	P
YEAR	8.998	9.000	9716.82	$<2e - 16^{***}$
LON-LAT	29.000	29.000	1634.90	$<2e - 16^{***}$
u_{10}	8.761	8.984	52.87	$<2e - 16^{***}$
v_{10}	8.938	8.999	250.48	$<2e - 16^{***}$
msl	8.940	8.999	134.01	$<2e - 16^{***}$
blh	8.370	8.897	80.99	$<2e - 16^{***}$
RH	8.510	8.940	192.94	$<2e - 16^{***}$
ssr	8.851	8.994	230.11	$<2e - 16^{***}$
temp	8.742	8.982	147.13	$<2e - 16^{***}$
tp	8.958	8.999	631.04	$<2e - 16^{***}$

根据 5 个典型区域的 GAM 模型拟合结果,得到典型地区 3 个重要气象因素对 $PM_{2.5}$ 浓度影响效应如图 5 所示,以此分析重要气象因素对 $PM_{2.5}$ 浓度的具体影响. 从中可以得出,典型区域 3 个重要气象因子均与 $PM_{2.5}$ 呈现非线性关系. 东北地区 $PM_{2.5}$ 浓度随着 tp 增加波动下降,随着 v_{10} 增加波动上升,随着 ssr 增加下降; 华北地区 $PM_{2.5}$ 浓度随着 $temp$ 增加波动上升,随着 tp 增加波动上升,随着 msl 增加先显著下降后波动稳定; 华东华中地区 $PM_{2.5}$ 浓度随着 $temp$ 增加上升,随着 tp 增加波动上升,随着 ssr 增加下降; 华南地区 $PM_{2.5}$ 浓度随着 $temp$ 增加波动,随着 RH 增加下降,随着 blh 增加波动下降; 四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度随着 tp 增加先显著下降后波动稳定,随着 $temp$ 增加波动上升,随着 u_{10} 增加波动下降. 从响应

表 7 华北地区 $PM_{2.5}$ 浓度和多影响因素的 GAM 模型拟合结果

Table 7 GAM fitting results of $PM_{2.5}$ concentration and multiple influencing factors in North China				
指标	估计自由度	参考自由度	F	P
YEAR	8.994	9.000	6040.57	$<2e - 16^{***}$
LON-LAT	28.951	29.000	1565.74	$<2e - 16^{***}$
u_{10}	8.973	9.000	255.85	$<2e - 16^{***}$
v_{10}	8.609	8.959	494.84	$<2e - 16^{***}$
msl	8.988	9.000	535.93	$<2e - 16^{***}$
blh	8.695	8.974	233.40	$<2e - 16^{***}$
RH	8.884	8.996	37.74	$<2e - 16^{***}$
ssr	8.762	8.968	154.83	$<2e - 16^{***}$
temp	8.935	8.999	987.27	$<2e - 16^{***}$
tp	8.989	9.00	957.21	$<2e - 16^{***}$

表 8 华东华中地区 PM_{2.5} 浓度和多影响因素的 GAM 模型拟合结果

Table 8 GAM fitting results of PM _{2.5} concentration and multiple influencing factors in East and Central China				
指标	估计自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
YEAR	8.986	9.000	5 754.87	<2e-16 ***
LON-LAT	28.983	29.000	4 996.20	<2e-16 ***
<i>u</i> ₁₀	8.456	8.925	282.86	<2e-16 ***
<i>v</i> ₁₀	8.875	8.995	151.56	<2e-16 ***
msl	8.944	8.999	236.56	<2e-16 ***
blh	8.926	8.998	83.46	<2e-16 ***
RH	8.877	8.996	159.15	<2e-16 ***
ssr	8.828	8.992	332.79	<2e-16 ***
temp	8.928	8.999	751.72	<2e-16 ***
tp	8.992	9.000	418.20	<2e-16 ***

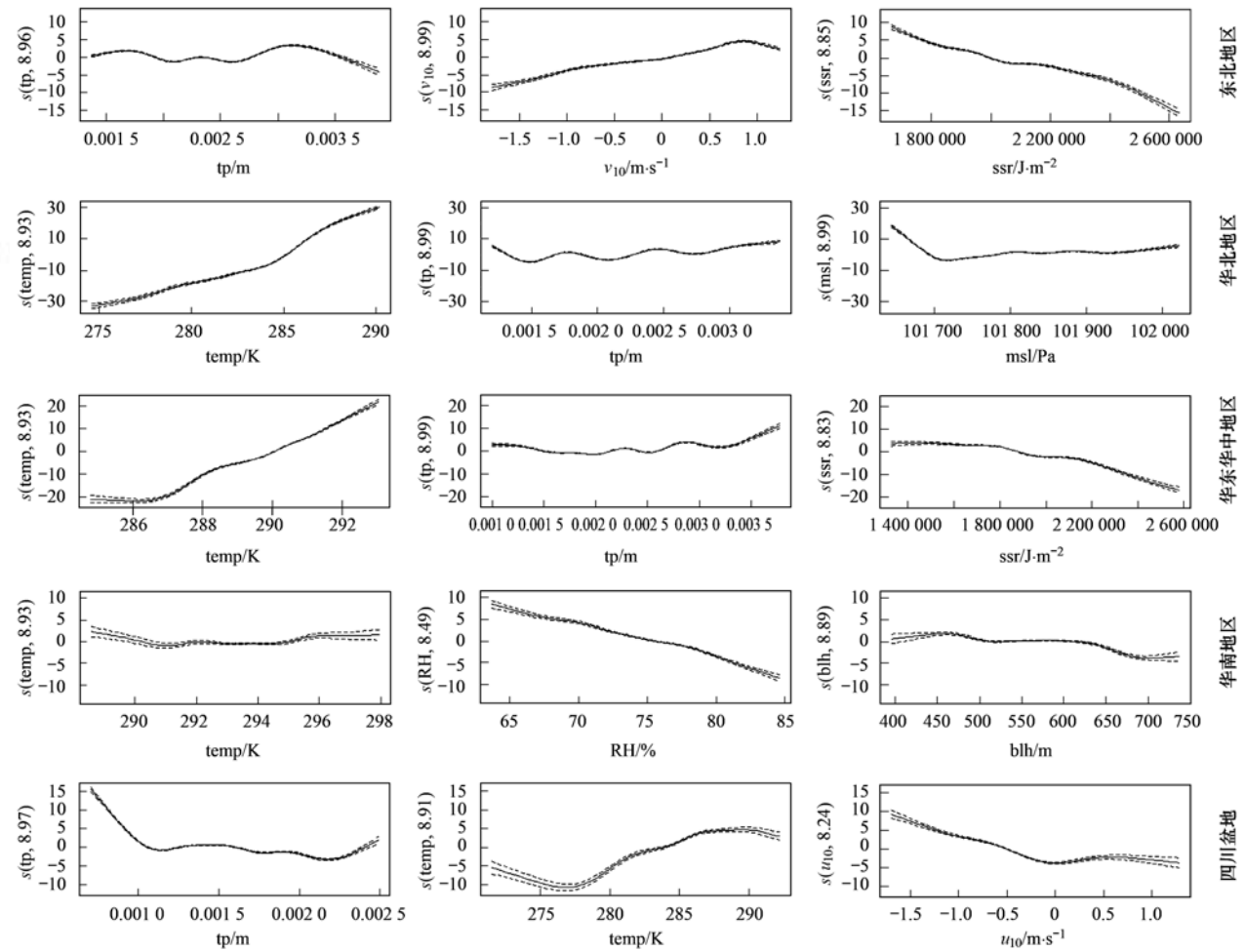
效应图得出,相同气象因子在不同典型区域对 PM_{2.5} 影响效应曲线也有所不同,例如 tp 和 temp.

本研究中使用 GAM 模型进行影响因素分析存在一定局限性:①PM_{2.5} 浓度是年均浓度,没法像日

表 9 华南地区 PM_{2.5} 浓度和多影响因素的 GAM 模型拟合结果

Table 9 GAM fitting results of PM _{2.5} concentration and multiple influencing factors in South China				
指标	估计自由度	参考自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
YEAR	8.994	9.000	4798.45	<2e-16 ***
LON-LAT	28.954	29.000	807.96	<2e-16 ***
<i>u</i> ₁₀	8.833	8.993	81.03	<2e-16 ***
<i>v</i> ₁₀	8.571	8.951	26.24	<2e-16 ***
msl	8.828	8.992	110.97	<2e-16 ***
blh	8.888	8.996	134.39	<2e-16 ***
RH	8.491	8.931	141.24	<2e-16 ***
ssr	8.860	8.995	80.00	<2e-16 ***
temp	8.928	8.999	56.05	<2e-16 ***
tp	8.940	8.999	211.29	<2e-16 ***

均 PM_{2.5} 浓度分析一样有效表征和讨论前一天的浓度滞后效应和周围网格短期传输效应的影响.同时 GAM 模型也表现出分析区域网格化产品的潜力,未来可以提取特定时间特定区域(省、市和平原等)的网格化产品,分析评估影响区域的短期空气质量的因



虚线表示拟合可加函数的逐点标准差(即置信区间的上、下限);实线则代表解释变量对 PM_{2.5} 浓度的平滑拟合;

横坐标为解释变量的观测值,纵坐标为解释变量对 PM_{2.5} 浓度的平滑拟合值,

纵坐标括号中则代表估计自由度(见表 6~10)

图 5 典型区域 3 个重要影响气象因素对 PM_{2.5} 浓度变化的影响效应

Fig. 5 Effect of three significant meteorological influencing factors on variation of PM_{2.5} concentration in five typical regions

素;②YEAR 和 LON-LAT 因素涉及 PM_{2.5} 相关排放、聚集、扩散和年际变化等影响密切相关,较难有效筛选区分,未来需要综合其他研究手段进一步探究。

表 10 四川盆地 PM_{2.5} 浓度和多影响因素的 GAM 模型拟合结果

Table 10 GAM fitting results of PM_{2.5} concentration and multiple influencing factors in Sichuan Basin

指标	估计自由度	参考自由度	F	P
YEAR	9.000	9.000	2 632.14	<2e-16 ***
LON-LAT	28.983	29.000	1 279.78	<2e-16 ***
u ₁₀	8.244	8.868	224.41	<2e-16 ***
v ₁₀	8.922	8.998	119.85	<2e-16 ***
msl	8.936	8.999	150.39	<2e-16 ***
blh	8.984	9.000	131.31	<2e-16 ***
RH	8.759	8.984	75.94	<2e-16 ***
ssr	8.754	8.984	205.99	<2e-16 ***
temp	8.915	8.998	266.77	<2e-16 ***
tp	8.966	9.000	677.29	<2e-16 ***

3 结论

(1)中国 5 个典型区域地表 PM_{2.5} 浓度长期平均浓度均值从高到低排序为:华东华中地区(40.5 μg·m⁻³) > 华北地区(37.4 μg·m⁻³) > 华南地区(27.8 μg·m⁻³) > 东北地区(23.7 μg·m⁻³) > 四川盆地(22.4 μg·m⁻³)。1998 ~ 2016 年际变化显示,东北地区呈现明显上升趋势;其他地区从 1998 ~ 2007 年呈现上升趋势,2008 ~ 2016 年呈现下降的趋势。

(2)使用 GAM 模型,分别对典型区域中每个影响因素(即 YEAR、LON-LAT、u₁₀、v₁₀、msl、blh、RH、ssr、temp 和 tp)与 PM_{2.5} 浓度间进行拟合,均通过 P < 0.001 水平下显著性检验,具有统计学意义。5 个区域中对 PM_{2.5} 浓度变化影响解释率较高的单一影响因素有所不同,东北地区为 LON-LAT 和 v₁₀,华北地区为 LON-LAT、temp、u₁₀、ssr、msl 和 blh,华东华中地区为 LON-LAT、RH 和 YEAR,华南地区为 LON-LAT 和 YEAR,四川盆地为 LON-LAT、temp 和 v₁₀。

(4)将所有影响因素作为解释变量,PM_{2.5} 为响应变量构建综合模型,均呈现非线性关系,均通过 P < 0.001 水平下显著性检验,具有统计学意义。典型区域 GAM 模型调整判定系数为 0.875 ~ 0.919(平均 0.89),方差解释率为 87.5% ~ 92%(平均 89.0%),各区域模型拟合度较高。气象因子对 PM_{2.5} 的影响大小在各个区域存在不同。东北地区影响 PM_{2.5} 的最重要的 3 个气象因子排序为:tp > v₁₀ > ssr;华北地区为:temp > tp > msl;华东华中地区为:temp > tp > ssr;华南地区为:temp > RH > blh;四川盆地为:tp > temp > u₁₀。

参考文献:

[1] Chowdhury S, Dey S, Smith K R. Ambient PM_{2.5} exposure and expected premature mortality to 2100 in India under climate change scenarios[J]. Nature Communications, 2018, 9: 318.

[2] 张丽,李磊,张立杰,等. 深圳市局地 PM_{2.5} 污染事件的时空特征及典型背景环流分析[J]. 环境科学学报, 2018, 38(1): 41-51.

Zhang L, Li L, Zhang L J, et al. Spatial-temporal characteristics of the local PM_{2.5} pollution episodes in Shenzhen and analysis on background circulation of typical samples[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(1): 41-51.

[3] 刘佳澍,顾远,马帅帅,等. 常州夏冬季 PM_{2.5} 中无机组分昼夜变化特征与来源解析[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 980-989.

Liu J S, Gu Y, Ma S S, et al. Day-night differences and source apportionment of inorganic components of PM_{2.5} during summer-winter in Changzhou city[J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 980-989.

[4] 段文娇,郎建垒,程水源,等. 京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM_{2.5} 影响[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1445-1454.

Duan W J, Lang J L, Cheng S Y, et al. Air pollutant emission inventory from iron and steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its impact on PM_{2.5} [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1445-1454.

[5] 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.

[6] 吕喆,魏巍,周颖,等. 2015 ~ 2016 年北京市 3 次空气重污染红色预警 PM_{2.5} 成因分析及效果评估[J]. 环境科学, 2019, 40(1): 1-10.

Lü Z, Wei W, Zhou Y, et al. Cause and effect evaluation of PM_{2.5} during three red alerts in Beijing from 2015 to 2016[J]. Environmental Science, 2019, 40(1): 1-10.

[7] Yu M F, Zhu Y, Lin C J, et al. Effects of air pollution control measures on air quality improvement in Guangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 244: 127-137.

[8] Shen L, Jacob D J, Mickley L J, et al. Insignificant effect of climate change on winter haze pollution in Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(23): 17489-17496.

[9] 郝静,孙成,郭兴宇,等. 京津冀内陆平原区 PM_{2.5} 浓度时空变化定量模拟[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1455-1465.

Hao J, Sun C, Guo X Y, et al. Simulation of the spatio-temporally resolved PM_{2.5} aerosol mass concentration over the inland plain of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science, 2018, 39(4): 1455-1465.

[10] Sahu S K, Zhang H L, Guo H, et al. Health risk associated with potential source regions of PM_{2.5} in Indian cities [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2019, 12(3): 327-340.

[11] 郭墨霞,耿红,张晋宏,等. 山西省武乡县城大气 PM_{2.5} 痕量重金属的生态和健康风险分析[J]. 环境科学, 2018, 39(3): 1004-1013.

Guo Z X, Geng H, Zhang J H, et al. Ecological and health risks of trace heavy metals in atmospheric PM_{2.5} collected in Wuxiang Town, Shanxi province[J]. Environmental Science, 2018, 39(3): 1004-1013.

- [12] 李惠娟, 周德群, 魏永杰. 我国城市 PM_{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3467-3475.
Li H J, Zhou D Q, Wei Y J. An assessment of PM_{2.5}-related health risks and associated economic losses in Chinese cities[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3467-3475.
- [13] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 418-427.
Zhao C X, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution status and the correlation of particulate matters and meteorological factors during winter and spring in Beijing[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 418-427.
- [14] 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红. 基于 LUR 模型的中国 PM_{2.5} 时空变化分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5296-5307.
Liu B J, Peng X M, Li J H. Analysis of the temporal and spatial variation of PM_{2.5} in China based on the LUR model[J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5296-5307.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Querol X, Alastuey A, Rodriguez S, et al. Monitoring of PM₁₀ and PM_{2.5} around primary particulate anthropogenic emission sources[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(5): 845-858.
- [18] 苗蕾, 廖晓农, 王迎春. 基于长时间序列的北京 PM_{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2836-2846.
Miao L, Liao X N, Wang Y C. Diurnal variation of PM_{2.5} mass concentration in Beijing and influence of meteorological factors based on long term data[J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2836-2846.
- [19] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013 年北京市 PM_{2.5} 的时空分布[J]. 地理学报, 2015, **70**(1): 110-120.
Wang Z S, Li Y T, Chen T, et al. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in Beijing in 2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, **70**(1): 110-120.
- [20] 林巧莺, 陈永山. 我国城市冬季 PM_{2.5} 空间特征及其人为影响因子[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(4): 460-465.
Lin Q Y, Chen Y S. Spatial variation of PM_{2.5} in cities in winter and anthropogenic influencing factors in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, **31**(4): 460-465.
- [21] 吴健生, 廖星, 彭建, 等. 重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 759-767.
Wu J S, Liao X, Peng J, et al. Simulation and influencing factors of spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in Chongqing[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 759-767.
- [22] Christakos G, Serre M L. BME analysis of spatiotemporal particulate matter distributions in North Carolina[J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(20): 3393-3406.
- [23] Miskell G, Salmond J, Longley I, et al. A novel approach in quantifying the effect of urban design features on local-scale air pollution in central urban areas[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(15): 9004-9011.
- [24] 安芳, 翟亮, 桑会勇, 等. 基于地理国情数据的 PM_{2.5} 因子多元回归分析[J]. 测绘科学, 2015, **40**(7): 58-63.
An F, Zhai L, Sang H Y, et al. Multiple regression analysis on PM_{2.5} impact factors based on geographic conditions monitoring data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, **40**(7): 58-63.
- [25] 刘金培, 汪官镇, 陈华友, 等. 基于 VAR 模型的 PM_{2.5} 与其影响因素动态关系研究——以西安市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2016, **30**(5): 78-84.
Liu J P, Wang G Z, Chen H Y, et al. Dynamic relationship between PM_{2.5} and its influence factors in Xi'an city based on the VAR model[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, **30**(5): 78-84.
- [26] 顾凯华, 史红仙, 张帅, 等. 上海崇明岛近三年 PM_{2.5} 浓度变化特征与气象条件的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(12): 2108-2116.
Gu K H, Shi H X, Zhang S, et al. Variation characteristics of PM_{2.5} levels and the influence of meteorological conditions on Chongming island in Shanghai[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, **24**(12): 2108-2116.
- [27] Barmapadimos I, Keller J, Oderbolz D, et al. One decade of parallel fine (PM_{2.5}) and coarse (PM_{10-PM2.5}) particulate matter measurements in Europe: trends and variability[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(7): 3189-3203.
- [28] 贺祥, 林振山. 基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 22-32.
He X, Lin Z A. Interactive effects of the influencing factors on the changes of PM_{2.5} concentration based on GAM model[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 22-32.
- [29] Zhang BE, Jiao LM, Xu G, et al. Influences of wind and precipitation on different-sized particulate matter concentrations (PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5-10}) [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2018, **130**(3): 383-392.
- [30] Zou B, Chen J W, Zhai L, et al. Satellite based mapping of ground PM_{2.5} concentration using generalized additive modeling[J]. Remote Sensing, 2017, **9**(1): 1, doi: 10.3390/rs9010001.
- [31] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, et al. Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors[J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(7): 3762-3772.
- [32] Nan Y, Wang Y X. Observational evidence for direct uptake of ozone in China by Asian dust in springtime[J]. Atmospheric Environment, 2018, **186**: 45-55.
- [33] Nan Y, Wang Y X. De-coupling interannual variations of vertical dust extinction over the Taklimakan Desert during 2007-2016 using CALIOP[J]. Science of the Total Environment, 2018, **633**: 608-617.
- [34] Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al. The era-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, **137**(656): 553-597.
- [35] Wood S N, Pya N, Säfken B. Smoothing parameter and model selection for general smooth models[J]. Journal of the American Statistical Association, 2016, **111**(516): 1548-1563.
- [36] Camalier L, Cox W, Dolwick P. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(33): 7127-7137.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)