

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM_{2.5}时空演变过程 罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)

西安市PM_{2.5}健康损害价值评估 魏国茹,史兴民 (3014)

河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析 江琪,王飞,孙业乐 (3022)

南京北郊秋季PM_{2.5}碳质组分污染特征及来源分析 徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)

临安夏季霾和清洁天气PM_{2.5}化学组成特征比较 梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)

盘锦市秋冬季节PM_{2.5}中碳组分特征及来源解析 张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)

南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应 黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)

夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量 李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)

太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源 叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)

杭州地区大气CO₂体积分数变化特征及影响因素 浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)

典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征 景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)

地级市域工业VOCs排放源排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例 胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)

青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价 郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)

轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究 黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)

南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金凤,李慧明 (3118)

西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析 石栋奇,卢新卫 (3126)

三峡库区主要河流秋季pCO₂及其影响因素 罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)

泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素 寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)

生物滞留对城市地表径流磷的去除途径 李立青,刘雨情,杨佳敏,王娟 (3150)

淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系 杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)

抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系 李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)

蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响 王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)

生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响 徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)

Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能 张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)

Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制 李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)

铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制 康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)

铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验 蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)

制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法 仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)

电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响 陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)

不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求 李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)

基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响 张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)

采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除 付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)

间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性 高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)

基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析 洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)

纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响 苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)

气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响 张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)

活性污泥胞外多聚物提取方法的比较 孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)

耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性 蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)

PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性 赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)

采油井场土壤微生物群落结构分布 蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)

铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征 王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)

广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险 郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)

邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析 杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)

成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素 李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性 赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)

塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系 安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)

高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制 唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)

施硼对水稻幼苗吸收和分泌硼的影响 朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)

不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)

南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估 赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)

三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析 程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)

人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性 时红蕾,王晓昌,李倩 (3434)

COD/SO₄²⁻对青霉素菌渣厌氧消化影响 强虹,李玉友,裴梦富 (3443)

果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征 何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)

曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH₃挥发的影响 庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)

《环境科学》征订启事(3141) 《环境科学》征稿简则(3202) 信息(3229, 3433, 3451)

近 20 年来中国典型区域 PM_{2.5} 时空演变过程

罗毅^{1,2}, 邓琼飞^{1,2}, 杨昆^{1,2*}, 杨扬^{1,2}, 商春雪³, 喻臻钰^{1,2}

(1. 云南师范大学信息学院, 昆明 650500; 2. 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 昆明 650500; 3. 云南师范大学教务处, 昆明 650500)

摘要: 近 20 年来 PM_{2.5} 污染严重制约了中国可持续发展. 长时间序列历史监测数据的缺失阻碍了相关研究. 为此, 本文以四大典型区域 2013~2016 年的 PM_{2.5} 浓度监测值和 2000~2016 年 MODIS AOD 数据、边界层高度、温度等气象数据作为基础数据, 将反向人工神经网络和支持向量回归两种算法相结合, 构建组合模拟模型, 并利用地理空间分析技术实现近 20 年来 PM_{2.5} 浓度历史变化过程的情景再现. 研究结果表明, 组合模型具有较低的误差和更高的泛化能力; 时空分析结果表明, 2000~2010 年京津冀和东三省 PM_{2.5} 浓度持续增长, 珠三角 PM_{2.5} 浓度缓慢下降, 3 个研究区 PM_{2.5} 污染范围呈扩大趋势, 长三角 PM_{2.5} 浓度值及污染范围基本保持稳定. 2012 年 4 个研究区 PM_{2.5} 浓度值降低且污染范围缩小, 但 2013~2016 年 PM_{2.5} 浓度略微上升后又下降, 高污染范围缩小, 这与国家采取 PM_{2.5} 区域联防等治理措施有关.

关键词: PM_{2.5}; 人工神经网络; 支持向量机; 地理空间分析; 四大典型区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3003-11 DOI: 10.13227/j.hjcx.201709174

Spatial-Temporal Change Evolution of PM_{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years

LUO Yi^{1,2}, DENG Qiong-fei^{1,2}, YANG Kun^{1,2*}, YANG Yang^{1,2}, SHANG Chun-xue³, YU Zhen-yu^{1,2}

(1. School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Engineering Research Center of GIS Technology in Western China of Ministry of Education, Kunming 650500, China; 3. Academic Affairs Office, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Two decades of PM_{2.5} pollution has seriously hindered China's sustainable development. However, relevant research of PM_{2.5} has been hindered because of the lack of long-term historical monitoring data. Therefore, ground observations of PM_{2.5} concentration from 2013 to 2016 in four typical regions of China and the MODIS aerosol optical thickness data, boundary layer height, temperature, and other meteorological data from 2000 to 2016 were used as the basic data. A combined simulation model was constructed by combining the two algorithms of backward artificial neural network and support vector regression and obtains the PM_{2.5} concentration history for the past 20 years using geospatial analysis technology. The results demonstrate that the combination model is better than the single model, with lower error and higher generalization ability. The spatial-temporal analysis results show that the concentration of PM_{2.5} continued to increase in the Beijing-Tianjin-Hebei region and in the three northeastern provinces of China, the PM_{2.5} concentration decreased slowly in the Pearl River Delta, the pollution range of PM_{2.5} in three of the research areas showed an expanding trend, and the PM_{2.5} concentration and pollution range remained stable in the Yangtze River Delta. In 2012, the concentration of PM_{2.5} in the four study areas decreased and the pollution range narrowed, but the PM_{2.5} concentration rose slightly after that decline and the high pollution range narrowed during 2013-2016, which with the country to take PM_{2.5} regional defense and other governance measures.

Key words: PM_{2.5}; backward artificial neural network; support vector regression; geospatial analysis; four typical regions

颗粒污染是一个严重的环境问题,影响着空气质量、区域和全球的气候以及人类的健康^[1-3]. 随着中国经济的快速发展,工业化、城市化进程的加剧,严重的 PM_{2.5} 污染受到广泛关注^[4-6]. 掌握 PM_{2.5} 浓度演变的时空过程是控制空气污染、改善区域大气环境、调整产业结构的基础. 2012-02 国务院发布新修订的《环境空气质量标准》,增加了 PM_{2.5} 监测指标,新标准在 2016-01 起在全国范围内实施同时还发布 PM_{2.5} 实时监测数据,在这之前只有一些重点城市和区域执行. 2015-01-01 起全国 338

个地市及以上城市共 1 436 个监测站点全面开展空气质量新标准监测并向社会发布实时数据.

PM_{2.5} 最直接和传统的监测方式是利用地面监测站点和原位传感器获取 PM_{2.5} 数据. Wang 等基于地面监测数据,通过空间统计模型分别揭示了 2014

收稿日期: 2017-09-19; 修订日期: 2017-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761084); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA121402); 云南省自然科学基金青年项目(2016FD020)

作者简介: 罗毅(1986~),男,博士,副教授,主要研究方向为环境监测与评价,地理信息系统, E-mail: luoyi861030@163.com

* 通信作者, E-mail: kmdcynu@163.com

年环渤海区域^[7]和全国^[8]PM_{2.5}浓度的时空变化; Xu等^[9]利用2013-04~2014-03期间的站点监测数据分析了我国178个城市PM_{2.5}浓度的时间趋势和污染区域分布格局. Batterman等^[10]基于北京2012-10~2013-09间35个固定监测点的PM_{2.5}浓度小时数据,探讨了交通和城市背景下PM_{2.5}的日间和季节特征及不同污染水平的空间趋势. 尽管地面观测PM_{2.5}浓度的方法具有更高的精度和稳定性,但地面布设站点覆盖范围有限,其在空间连续性方面具有较大的局限性. 国外, Liu^[11]和 Kloog等^[12]的研究结果表明,卫星遥感在区域环境空气质量监测中作为地面监测网络的延伸有巨大的潜力. Van Donkelaar等^[13]使用卫星遥感AOD进行1998~2012年全球PM_{2.5}浓度的估计,并通过北美地区季节平均PM_{2.5}观测值进行验证,拟合度达到0.81. 国内, Wu等^[14]使用Bayesian正则化训练的反向传播神经网络(BPANN)算法,结合AOD和地面监测PM_{2.5}数据,以估计中国东部的PM_{2.5},表现出较好的拟合精度.

有关颗粒物浓度值估算方法的研究,国外文献[15~17]通过化学传输模型、地理加权回归模型等找到PM_{2.5}与AOD的关系(相关性达到80%及以上)后利用AOD数据对PM_{2.5}进行反演. 国内, Li等^[18]通过化学传输模型、地理加权回归模型等找到PM_{2.5}与AOD的关系,研究结果表明,PM₁₀与AOD间的相关性显著. 回归模型在气象和大气污染物预报领域是一种有效的方法,神经网络能较好地解决非线性问题,其中反向神经网络及径向基函数近年来被广泛应用于PM_{2.5}浓度估算,如 Vlachogianni等^[19]针对NO₂、O₃、PM_{2.5}和PM₁₀等多种污染物建立多元线性回归模型(MLR)和神经网络模型(ANN)并将二者进行对比得出ANN模型的估算结果比MLR的略好. 支持向量机(SVM)

是机器学习领域的算法,已成功应用于大气污染物的预报. Yeganeh等^[20]使用单一的支持向量机模型(SVM)和基于支持向量机和最小二乘法的混合模型(PLS-SVM)进行CO浓度的估算,结果表明混合模型PLS-SVM具有更好的准确性和更快的估算能力.

综上所述,本文在前期研究成果的基础上^[21~25],以2013~2016年我国四大典型区域京津冀、东三省、长三角和珠三角共308个监测站点、51个城市的PM_{2.5}历史监测数据,2000~2016年的MODIS AOD及风向、风速、湿度、边界层高度和湿度等多种气象数据为基础数据,将BP神经网络与支持向量回归机相结合,构建了PM_{2.5}浓度的组合模拟模型,对研究区2000~2016年PM_{2.5}历史浓度值变化过程进行分析,并利用地理空间分析手段实现PM_{2.5}浓度值时空变化过程的模型,以期客观认识研究区PM_{2.5}污染规律和趋势、制定有效的空气污染控制策略提供理论依据和技术支撑.

1 研究区与数据源

1.1 研究区概述

我国颗粒污染主要集中在经济发达和人口密集的城市群,PM_{2.5}污染区域特征明显. 为此本文选取了京津冀(BTH)、东三省(TNPC)、长江三角(YRD)、珠江三角(PRD)4个典型区域,探索近20年来4个研究区PM_{2.5}时空演变过程和变化特征. 研究区区位及监测站点位置如图1所示.

京津冀是我国政治、经济、文化中心,位于中国北方,包括两市(北京和天津)一省(河北),是中国最有活力的经济圈之一. 虽然面积只占中国领土的2.20%,但是2016年创造了我国国内生产总值的9.25%,常住人口占2016年全国人口的7.23%. 该地区处于环渤海地区和东北亚的核心重要区域,有太行山脉和燕山山脉纵横做屏障,属温带季风气候

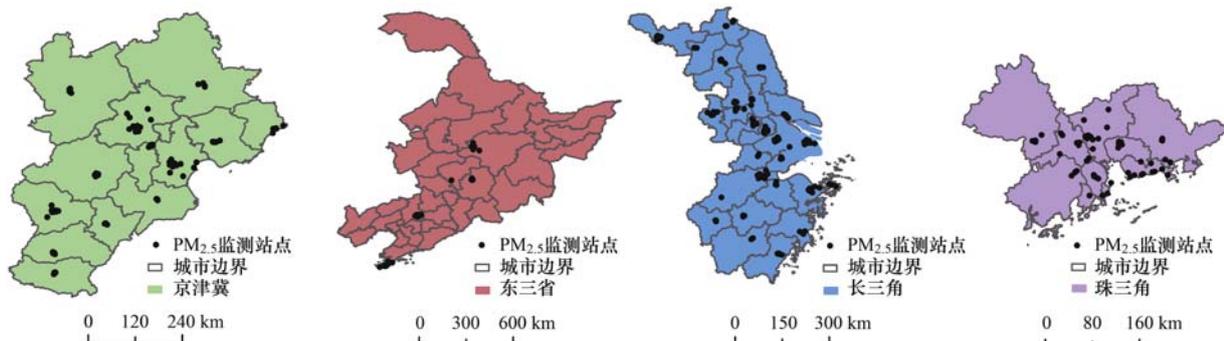


图1 研究区域空气质量监测站点分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of ground PM_{2.5} monitoring sites in the study area

候,四季分明,冬季干燥寒冷,夏季高温多雨。

东三省包括吉林、辽宁、黑龙江,地处中国最北方,占地面积 78.73 万 km², 2016 年有 1.09 亿人口,分别占我国的 8.20%、7.89%。东北三省冬季漫长,雨量集中于夏季,属温带季风气候,煤炭和石油等资源储备量位于我国的前列,输出量巨大。东三省是我国最早一批老工业基地,经济发展主要依靠第二产业,能源消耗较大,2016 年国内生产总值为 52 310.20 亿元,占我国总量的 7.03%。

长江三角包括上海、江苏和浙江,位于长江入海之前的冲积平原,属亚热带季风气候,温暖湿润,雨热同期,是太平洋西岸最大的工业和农业生产区之一,是中国城市化和工业化程度最高、经济增长最快的地区,国内生产总值、面积和人口分别占我国的 20.16%、2.19%、11.57%,是一带一路的核心区。

珠江三角位于广东省的中心,包括广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门、肇庆共 9 个城市,占地面积 24 437 km², 8 068.70 万人口,密集度较高,是我国四大工业基地之一,2016 创造了 GDP 92 000 亿元人民币,分别占我国的 0.58%、5.83% 和 12.36%。四大典型区域凭借其独特的地理位置,已经成为中国经济增长的重要引擎,但区域内资源环境压力日益突出,其经济发展和环境问题备受瞩目,开展该区域 PM_{2.5} 的相关研究具有重要意义。

1.2 数据来源

本文中所使用的数据包括 PM_{2.5} 实时监测数据、MODIS AOD 数据和气象数据。2013-04 ~ 2016-12 的 PM_{2.5} 地面监测数据从全国城市空气质量实时发布平台获得,包括 51 个城市 308 个监测站点。2000-01 ~ 2016-12 的温度、相对湿度、边界层高度、风速和风向等月平均气象数据从欧洲中期天气预报中心 (European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 获取。2000-03 ~ 2016-12 的 MODIS AOD 数据来源于 LAADS DAAC 网站提供的 3 级格点产品 MOD08,其分辨率为 1° × 1°。

2 研究方法

2.1 BP 神经网络

BP 神经网络又称误差逆向传播神经网络 (Back Propagation Artificial Neural Network),由一个输入层、若干隐含层和一个输出层组成。其基本思想是梯度下降法,利用梯度搜索技术,通过反向传播不断调整网络权值和阈值,使网络的误差平方

和最小^[26]。BP 神经网络的工作原理为:前向传播中,输入信号通过隐含层作用于输出节点,若其实际输出与期望输出不同,则进行反向传播,根据模拟误差调整权值和阈值,使网络的模拟输出不断逼近期望输出。重复训练网络,直到误差达到期望。

设一个 3 层神经网络输入层的节点个数为 n , 隐含层的节点个数为 l , 输出层的节点个数为 M 。输入层到隐含层的权重 W_{ij} , 隐含层到输出层的权重为 W_{jk} , 输入层到隐含层的偏置为 a_j , 隐含层到输出层的偏置为 b_k , 隐含层和输出层各单元的期望输出为 θ_j 和 θ_i , 输出层结点的期望输出为 t_1 , 激励函数为 $f(x)$ 取 Sigmoid 函数,形式为:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

隐含层的输出 H_j 为:

$$H_j = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + a_j\right) \quad (2)$$

输出层的输出 O_k 为:

$$O_k = \sum_{j=1}^l H_j W_{jk} + b_k \quad (3)$$

输出层结点阈值调整公式为:

$$\theta_i(k+1) = \theta_i(k) + \mu\delta_i \quad (4)$$

$$\delta_i = O_k(t_1 - O_k)(1 - O_k) \quad (5)$$

式中, k 为迭代次数, δ_i 是输出层的反向传递误差, μ 为学习率, t_1 为输出层结点的期望输出。隐含层结点阈值调整公式为:

$$\theta_j(k+1) = \theta_j(k) + \mu\theta_j \quad (6)$$

$$\mu\theta_j = H_j(1 - H_j) \sum_l \delta_l w_{jl} \quad (7)$$

式中, θ_j 是隐含层的反向传递误差。

2.2 ε -支持向量回归

支持向量回归 (ε -Support Vector Regression) 基于统计学习理论,其基本思想是实现结构风险最小化,它将实际问题转化为高维空间中的线性回归问题,可归结为合适参数的选择,以得到全局最优解,并保证较好的推广能力及克服过学习问题和非线性及维数灾难问题。

设已知训练集 $T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i)\} \in (x \times y)'$, 其中 $x_i \in R^n, y_i \in R^n, i = 1, 2, \dots, n$ 。选择恰当的正数 ε 和 C ; 选择恰当的核 (x, x'), 构造并求解最优化问题:

$$\min \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (a_i^* - a_i)(a_j^* - a_j)K(x_i, x_j) + \varepsilon \sum_{i=1}^n (a_i^* + a_i) - \sum_{i=1}^n y_i(a_i^* - a_i), a^* \in R^{2n} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) = 0$$

$$0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* \leq \frac{c}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

得到最优解 $\bar{\alpha} = (\bar{\alpha}, \bar{\alpha}^*, \dots, \bar{\alpha}, \bar{\alpha}^*)^T$. 构造决策函数:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\bar{a}_i^* - \bar{a}_i) K(x_i, x) + \bar{b} \quad (9)$$

式中, \bar{b} 按照以下公式计算, \bar{a}_j, \bar{a}_k^* 都不为零, 若选择 \bar{a}_j , 则使用:

$$\bar{b} = y_j - \sum_{i=1}^n (\bar{a}_i^* - \bar{a}_i) \left[K(x_i, x_j) + \frac{1}{c} \delta_{ij} \right] + \varepsilon \quad (10)$$

若选择 \bar{a}_k^* 则使用:

$$\bar{b} = y_k - \sum_{i=1}^n (\bar{a}_i^* - \bar{a}_i) \left[K(x_i, x_j) + \frac{1}{c} \delta_{ij} \right] - \varepsilon \quad (11)$$

2.3 BPANN & ε -SVR 组合模型构建

不同的估算方法在建模过程中表现出不同的特点, 运用单一模型进行估算和预测往往具有一定的片面性. BP 神经网络收敛速度快, 同时学习规则简单, 但采用经验最小化原则容易出现过拟合现象. 支持向量回归的泛化和逼近能力优于 BP 神经网络, 但在训练样本量较大时计算和存储核函数将耗费大量的机器内存和运算时间. 综合这两种方法的优势, 构建基于 BPANN & ε -SVR 的组合模拟模型, 组合模型通过估算精度和误差动态调整输入参数的权重, 实现 $PM_{2.5}$ 的估算, 组合模型不仅能够提高估算精度, 又能保证误差的稳定性, 提高模型的可靠性, 模型构建原理如图 2 所示, 构建过程如下.

(1) 数据的获取与整理 相关研究成果表

表 1 多重共线性检验结果

Table 1 Multicollinearity test results

变量	BTH		NTPC		YRD		PRD	
	VIF	TV	VIF	TV	VIF	TV	VIF	TV
AOD	1.88	0.54	2.03	0.55	1.25	0.80	4.34	0.28
BLH	1.62	0.62	1.62	0.63	1.21	0.82	2.51	0.46
RH	1.78	0.57	2.18	0.52	1.21	0.82	2.87	0.41
T	1.93	0.52	1.82	0.61	1.29	0.77	3.64	0.37
U	1.62	0.64	1.93	0.59	1.21	0.82	3.29	0.42
V	1.63	0.61	1.28	0.78	1.18	0.85	3.72	0.32

(3) 数据的归一化处理 由于模型输入数据来源多样, 且数据单位不统一, 为了消除量纲的影响, 本文采用 mapminmax 函数对 $PM_{2.5}$ 地面监测值、MODIS AOD 和气象数据进行归一化处理.

明^[27~30], $PM_{2.5}$ 的浓度与 AOD、边界层高度、温度、相对湿度、风速及风向呈现较高的相关关系, 故本研究将上述参数作为模型的输入. 根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 对 $PM_{2.5}$ 浓度值进行筛选, 剔除异常值. 为了匹配模型输入数据, 将 AOD 和气象因子按分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 来进行月平均数据收集, 并对 AOD 缺失值进行克里金插值.

(2) 数据的多重共线性检验 共线性的存在会影响回归模型的准确性, 通过方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 和容忍度 (tolerance value, TV) 可判定数据是否存在多重共线性问题, 如果 $VIF < 10$ 且 $0.1 < TV < 1$, 则表明变量间不存在共线性, 由表 1 可知模型构建所有输入变量的 VIF 远比 10 小且 $0.1 < TV < 1$, 变量间不存在共线性, 他们只影响因变量 $PM_{2.5}$, 并不相互影响.

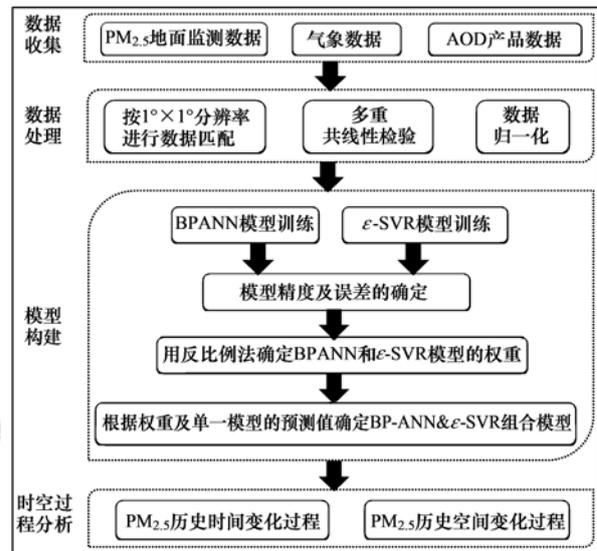


图 2 组合模拟模型的原理

Fig. 2 Schematic diagram of combinatorial simulation model

(4) BPANN 和 ε -SVR 单一模型模拟 由于不同区域 $PM_{2.5}$ 、MODIS AOD 和各个气象要素的相关性不同且相同区域不同季节之间也不同, 本文对研究区分开建模, 京津冀、长三角和珠三角各自建立

季度模拟模型,东三省监测数据较少进行月度模拟模型的构建. 进行 BPANN 和 ε -SVR 建模,分别模拟得到 BP 神经网络和支持向量回归对 PM_{2.5} 浓度的估算值 T_1 和 T_2 .

(5) 估算结果的融合 依据单一模拟模型的估算误差和估算值进行加权分析,得到组合模拟模型的结果 T_3 ,其计算公式为 $T_3 = w_1 T_1 + w_2 T_2$,式中 w_1 和 w_2 分别表示 BP 神经网络和支持向量回归的权重.

(6) 组合模型的权重确定 在组合模型的估算中权重起着重要的作用,不同的模型训练样本时产生的误差不同,根据误差对权重进行动态调整,样本估算误差定义为:

$$E_i(k) = \frac{1}{k} [E_{s,i}(k) + E_{s,i}(k-1) + \dots + E_{s,i}(A-n)] \quad (12)$$

式中, $E_i(k)$ 表示模拟模型对于 k 个模型样本点的估算误差, $i=1, 2$ 分别对应 BPANN 和 ε -SVR 方法, n 表示样本点累积数, $E_{s,i}(k)$ 表示第 k 个训练样本点处模型 i 估算得到的相对误差的绝对值,计算公式为:

$$E_{s,i}(k) = \left| \frac{T_k - T_k^i}{T_k} \right| \quad (13)$$

式中, T_k 表示样本点 k 的 PM_{2.5} 实测数据, T_k^i 表示方法 i 对样本点 k 的 PM_{2.5} 模拟数据.

在获得 BPANN 和 ε -SVR 两种模拟方法的估算误差值的基础上,可通过反比例法得到各自在组合模拟模型中的权重,反比例法应用的条件是权重与估算误差呈现反比例的关系,初始权重为:

$$w_k^i = \frac{1}{E_{s,i}(k)} \quad (14)$$

两种模拟模型在组合模拟模型中的权重为:

$$w_k = \frac{w_k^i}{\sum_{i=1}^2 w_k^i} \quad (15)$$

3 结果与讨论

3.1 组合模拟模型的精度验证

京津冀、长三角和珠三角以 2013-04 ~ 2016-12 的 PM_{2.5} 地面监测数据、MODIS AOD 和边界层高度、相对湿度、温度、风速和风向的季度均值为原始数据,分别用 225、330 和 90 组数据构建了以季度(春、夏、秋、冬)为时间尺度的模拟模型,最终获得 PM_{2.5} 季度模拟值. 东三省采用上述 3 个研究区一致的月均值原始数据构建了以月时间尺度的模

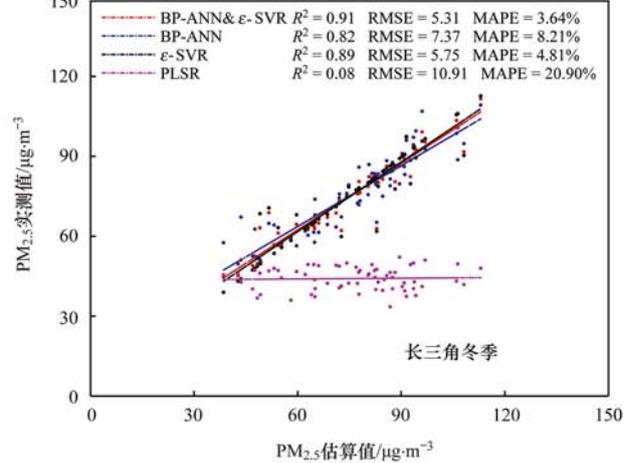
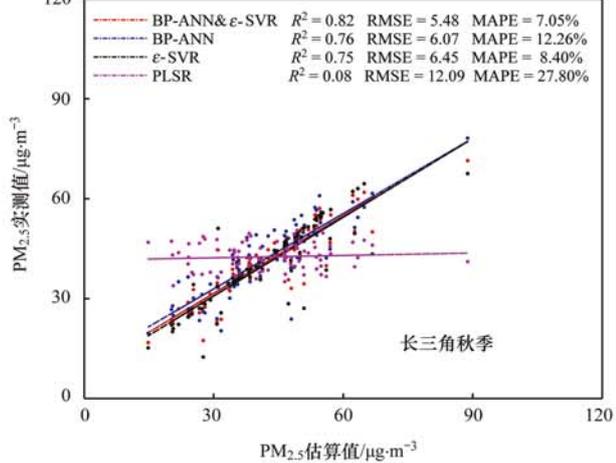
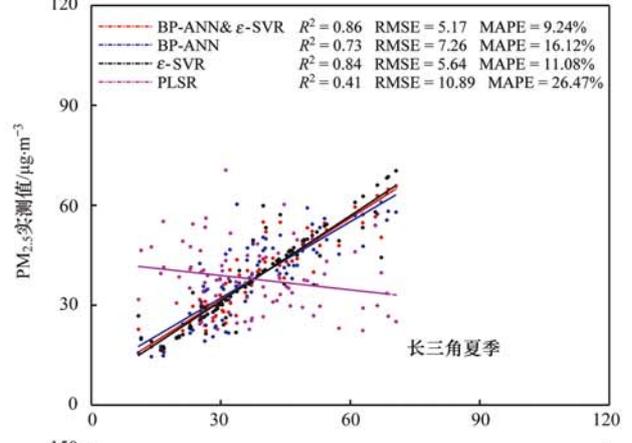
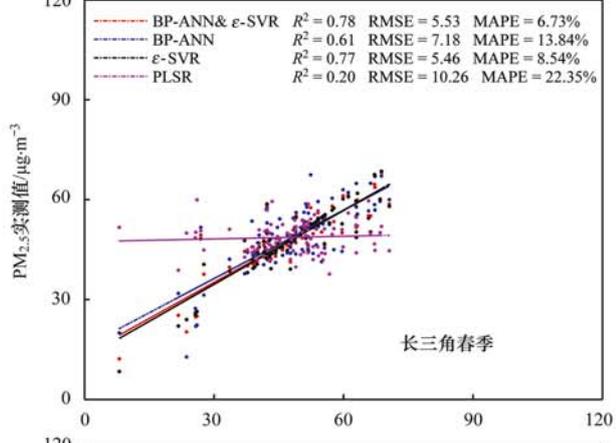
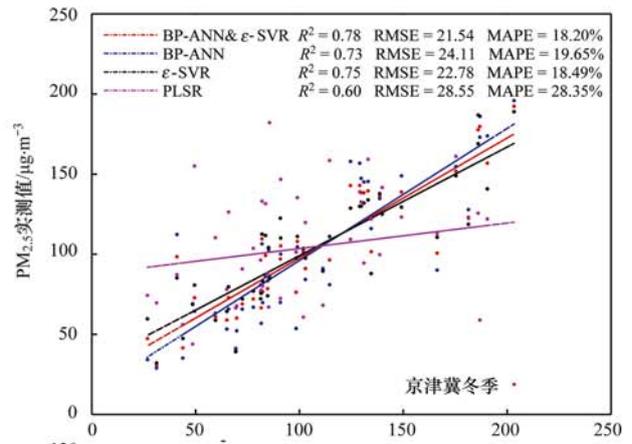
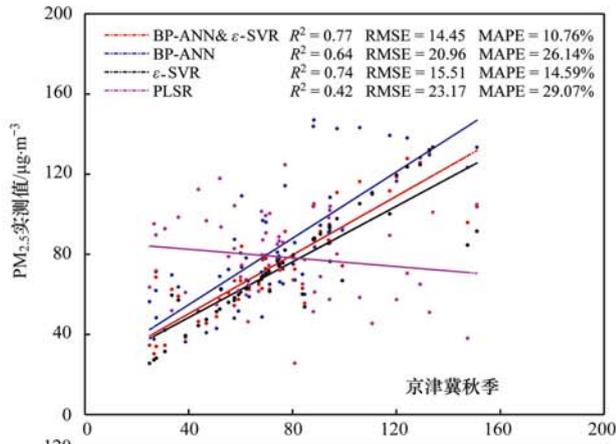
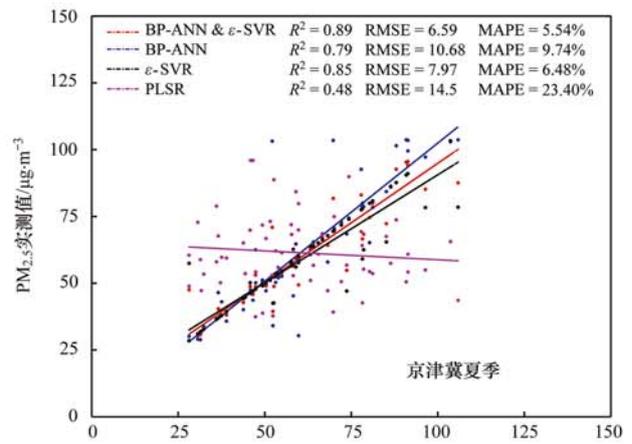
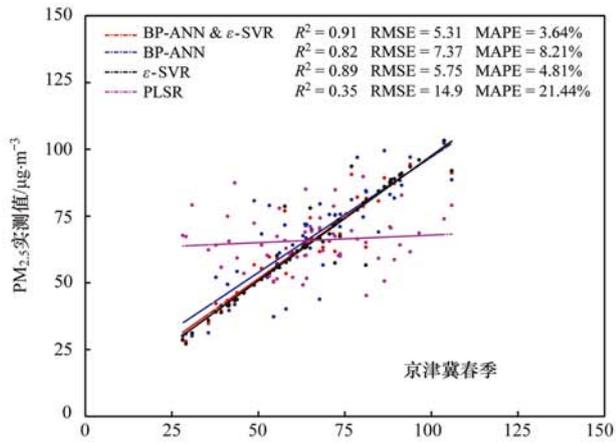
拟模型,从而获得 PM_{2.5} 月度模拟值.

图 3 为本文提出的组合模拟模型与其他模拟模型的精度比较. 紫红、蓝色、黑色、红色分别表示偏最小二乘回归 (partial least squares regression, PLSR)、BPANN、 ε -SVR 和 BPANN & ε -SVR 组合模拟模型的 PM_{2.5} 估算值与监测值的线性回归分析结果. 采用均方根误差 (RMSE)、平均绝对百分比误差 (MAPE)、拟合度 (R^2) 衡量模拟模型的性能.

长三角地区 PLSR、BPANN、 ε -SVR 和 BPANN & ε -SVR 这种模型的 R^2 分别为 0.33、0.72、0.83、0.85, RMSE 分别为 10.25、6.72、5.96、5.33, MAPE 分别 23.42%、12.17%、7.95%、6.44%. 京津冀地区 4 种模型的 R^2 分别为 0.48、0.72、0.82、0.84, RMSE 分别 20.39、16.69、14.27、13.40, MAPE 分别 24.56%、17.94%、11.47%、10.99%. 珠三角地区 4 种模型的 R^2 分别为 0.64、0.87、0.86、0.91, RMSE 分别 5.81、4.16、3.33、2.92, MAPE 分别为 12.14%、7.51%、5.12%、4.27% 之间. 东三省地区 4 种模型的 R^2 分别 0.49、0.75、0.69、0.77, RMSE 分别 20.15、14.38、16、13.76, MAPE 分别 32.72%、21.42%、19.35%、19%. 分析结果表明,组合模型的 R^2 比 PLSR、BPANN 和 ε -SVR 模型平均高出 0.16 ~ 0.33、0.02 ~ 0.15 和 0.01 ~ 0.07; RMSE 比 PLSR、BPANN 和 ε -SVR 模型平均小 3.54 ~ 5.57、0.90 ~ 3.97 和 0.20 ~ 0.63; MAPE 比 PLSR、BPANN 和 ε -SVR 模型平均小 8.64 ~ 12.28、1.22% ~ 7.65% 和 0.16% ~ 1.84%. 实验结果表明,本文提出的 BPANN & ε -SVR 组合模拟模型性能最优,能够客观真实反映我国四大典型区域 PM_{2.5} 浓度值的变化.

3.2 PM_{2.5} 浓度的时间变化规律

图 4 为 2000 ~ 2016 年 PM_{2.5} 年均浓度值的时间变化. 分析结果表明,2000 ~ 2010 年期间,京津冀地区 PM_{2.5} 浓度增长速度最快(每年 2.87 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); 东三省以每年 0.10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的速度增长; 而珠三角地区则逐渐下降(每年以 0.095 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的速率下降),珠三角多个年份 PM_{2.5} 浓度符合国家 GB 3095-2012 年均限值 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 标准; 长三角 PM_{2.5} 浓度保持稳定,在 47.90 ~ 52 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 2000 ~ 2010 年期间 4 个地区 PM_{2.5} 年均浓度变化率分别为 12.37%、-25.20%、-5.31%、-16.04%. 2012 年京津冀、东三省、长三角和珠三角 PM_{2.5} 浓度值降到最低,分别为 68.14、55.56、45.18 和 30.98 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2012 ~ 2014 年,京津冀、东三省、长三角



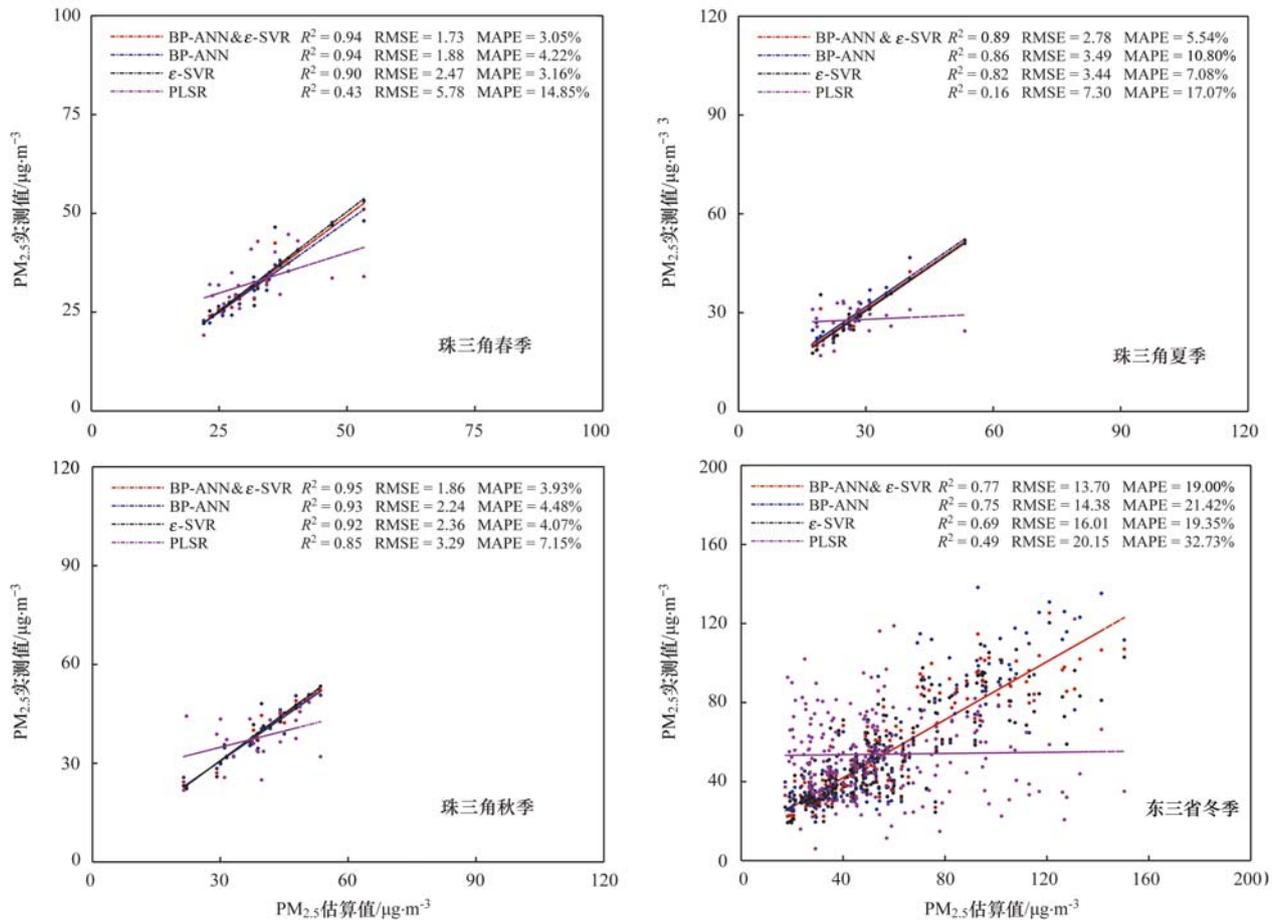


图 3 4 种模拟模型的 PM_{2.5} 估算值和监测值的线性回归

Fig. 3 Scatterplots of PM_{2.5} concentrations measured and calculated by different prediction models

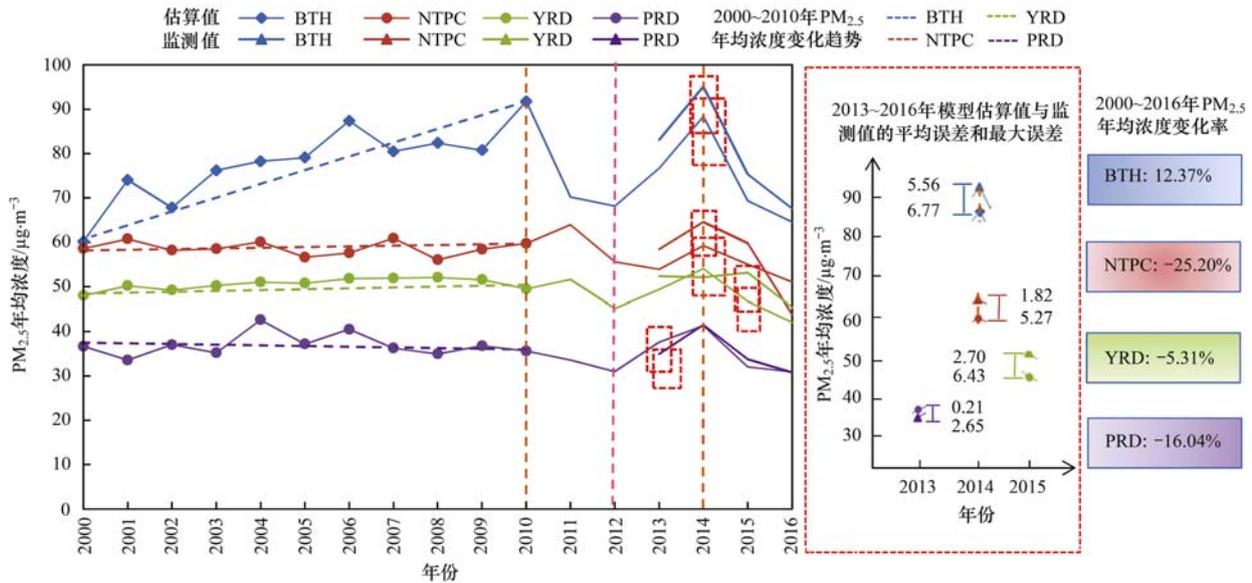
和珠三角 PM_{2.5} 浓度分别以每年 8.99、2.99、2.30 和 3.51 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的速度增长; 2015 年开始, 4 个研究区的 PM_{2.5} 浓度又有所下降. 2013 ~ 2016 年期间京津冀、东三省、长三角和珠三角组合模型估算值和监测值的最大误差分别为 6.77、5.27、6.43、2.65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均误差分别为 5.56、1.82、2.70 和 0.21 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

本研究结果表明, 4 个研究区近 20 年来 PM_{2.5} 浓度季节性变化显著. 冬季是 PM_{2.5} 污染最严重的时段, 京津冀、东三省、长三角和珠三角近 20 年冬季 PM_{2.5} 平均浓度分别为 103.67、87.81、78.45 和 51.35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 夏季是空气质量最好的季节, PM_{2.5} 浓度平均值分别为 57.01、33.50、36.85 和 27.23 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

一个城市的 PM_{2.5} 与其人口规模、气温、大气污染物数量和附近城市的排放量呈正相关, 与降水和风速呈负相关^[31]. 从图 4 可知, 2009 ~ 2010 年, 京津冀和东三省的 PM_{2.5} 浓度大幅增加, 这与 2010 年我国北方大部分地区大旱降水偏少(2010 年冬季

降水在 50 mm 以下, 与往年同期相比偏少 50% ~ 90%), 屡现沙尘天气(2010 年共出现 15 次, 北方大范围受影响)等气候因素有关.

京津冀地区粗放型经济的迅速增长伴随巨大的能源消耗, 汽车保有量激增带来的尾气排放, 周边区域如山东等地空气污染物的流入等综合因素使得 2000 ~ 2010 年期间京津冀地区 PM_{2.5} 浓度显著上升, PM_{2.5} 浓度增长率分别为 30.12% (2000 ~ 2004 年) 和 5.23% (2004 ~ 2008 年). 我国的重工业基地和粮食主产区东三省以高投入、高耗能、高污染的重工业为主的产业结构使得该区域 2000 ~ 2011 年 PM_{2.5} 浓度以每年 0.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的速度增长, 其中 2000 ~ 2004 年 PM_{2.5} 浓度增长率为 2.63%, 2004 ~ 2008 年 PM_{2.5} 浓度增长率为 -6.75%. 长三角地区在经济高速增长和城市化加速的同时也经历了 PM_{2.5} 污染问题, 其 PM_{2.5} 主要来自汽车尾气的排放和生物质的燃烧^[32]. 另外, 气候对长三角地区 PM_{2.5} 污染的影响也不可忽视, 沿海地区受亚热带季风气候的影响, 区域间空气污染物的传输和相互影

图4 四大典型区域2000~2016年PM_{2.5}年均浓度值Fig. 4 PM_{2.5} annual mean concentration from 2000 to 2016 in the four typical areas

响时常发生^[33]. 在2000~2010年期间长三角地区持续稳定的气候条件使得PM_{2.5}浓度处于相对平稳的状态. 人口密集且以制造业为主的珠三角PM_{2.5}污染的主要来源为当地排放源^[34]. 珠三角产业结构以轻工业为主, 其PM_{2.5}浓度由2000年的36.64 μg·m⁻³下降到2016年的30.76 μg·m⁻³, 这与Wan等^[35]得出的“2001~2008年期间, 珠三角PM₁₀表现出稳定的下降趋势”的研究结果一致. 2012年我国气候年景正常, 降水总体偏多(东北和华北地区的降水较常年分别偏多27.40%和10%); 台风登陆时间集中, 影响范围广, 8月中3个台风一周内连续登陆我国, 影响15个省), 北上的台风数量和影响东北地区的台风数量均为历史之最. 受降水和台风的影响, 2012年京津冀、东三省、长三角和珠三角PM_{2.5}浓度较2008年降低, 降幅分别为17.30%、0.85%、13.23%和11.38%. 2013年霾波及我国25个省份, 全国平均霾天数为4.7 d, 达25年之最. 2014和2015年受厄尔尼诺事件的影响, 全球极端事件多发. 2014年, 冷空气势力总体偏弱, 大气环境容量持续偏低, 致使大气污染物不断聚集, 造成霾天气多发, 在2012~2014年期间, 京津冀、东三省、长三角和珠三角地区PM_{2.5}分别以每年13.48、4.48、3.45和5.26 μg·m⁻³的速度增长. 我国多个区域在经历严重且持续的霾事件后, 国务院发布《大气污染防治行动计划》并采取了持续的大气污染措施之后, PM_{2.5}浓度开始进入慢慢的减缓状态. 2014~2016年京津冀、东三省、长三角和珠三角地区空气

污染状况均有所改善, PM_{2.5}浓度值大幅度下降.

3.3 PM_{2.5}浓度的空间变化规律

图5为四大典型区域PM_{2.5}浓度值空间分布. 分析结果表明, 在不同空间区位、产业结构、能源结构和人类活动等多种因素的共同作用下, PM_{2.5}浓度呈现显著的空间差异.

京津冀地区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. 其中河北省高能耗产业占比大, 能耗增长快, 工业源、民用燃烧源以及交通源等使得河北省南部PM_{2.5}浓度值最高(主要包括石家庄、保定、邯郸和邢台), 霾最为严重^[36,37]. 近年来汽车数量的大幅增长使得汽车尾气在北京PM_{2.5}排放中占据较大比重, 天津冬季燃煤供暖排放的PM_{2.5}占其总量的50%以上, 贡献最大. 在2000年, 只有邯郸的少部分地区PM_{2.5}年均浓度达65~75 μg·m⁻³, 京津冀东南部的的主要区域在45~55 μg·m⁻³范围内, 在2004~2010年期间, 大部分区域PM_{2.5}浓度在65~75 μg·m⁻³之间.

以重工业为主的东三省, 产业结构调整困难, 其PM_{2.5}高值污染区主要集中在沈阳、铁岭、长春和白城等以重工业为主、人口稠密且处于不利于污染物排放的内陆城市带, 而葫芦岛、盘锦、大连和丹东一带受海洋气候的影响空气质量相对较好. 在2000~2010年期间, 以铁岭和长春为中心的中部地区PM_{2.5}年均浓度在60~70 μg·m⁻³范围内. 2012年, 长白山高原地形的抬升作用, 使来自海洋的暖湿空气沿迎风坡爬升, 形成一定程度的地形雨, 增加了降

水量,有利于污染物扩散的条件,加之吉林省 GDP 增速减缓使得吉林大气污染范围暂时低于黑龙江和辽宁. 2012~2016 年东三省东北部区域 PM_{2.5} 浓度由 50~55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降到了 45~50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

长三角地区长期受海洋性气候的影响,污染物易扩散且空气湿度大,颗粒物易于沉积. 2000~2010 年期间,PM_{2.5} 污染的空间变化不明显. 长三角 PM_{2.5} 浓度总体呈现北高南低,局部略有突出的空间格局. 其中,江苏省 PM_{2.5} 年均浓度最高(研究期间均在 55~65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间),污染最严重. 这种空间格局特征产生的主要原因是长三角地区南部植被覆盖较好且降水丰富,而北部人为活动比较强烈,工

业、机动车尾气及人类生活排放导致北部城市群大气颗粒物浓度较高.

4 个研究区中,珠三角地区 PM_{2.5} 污染程度最小. 研究期间内,PM_{2.5} 年均浓度值均低于 55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其 PM_{2.5} 高值污染区集中在西部和远离海岸不利于污染物扩散的中部地区,但污染核心区由肇庆、惠州、广州向佛山扩散. 2004 年广东省气候及其异常,主要特点为高温日数特别多、影响及登陆台风少、干旱少雨严重、珠三角霾日数居高不下. 2012 年在有利于污染物扩散的气候条件影响下,京津冀、长三角、东三省和珠三角地区 PM_{2.5} 浓度值相对往年较低. 2013~2015 年受极端天气的影

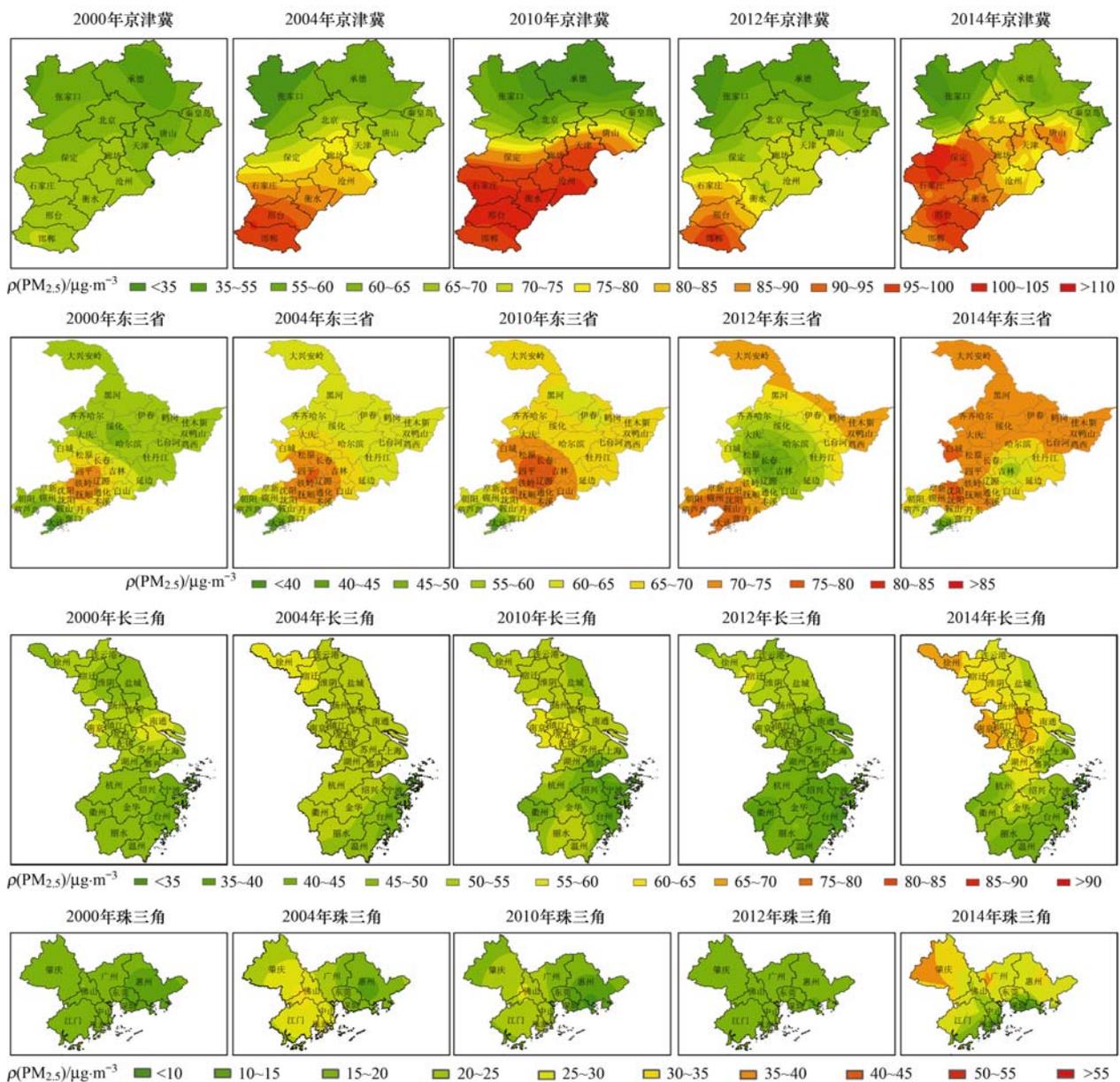


图 5 2000~2016 年 PM_{2.5} 年均浓度值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of PM_{2.5} means concentrations from 2000 to 2016

响, 4 个研究区 $PM_{2.5}$ 污染范围有所扩大, 2016 年又有所降低。

4 结论

(1) 本文提出将 BPANN、 ε -SVR 两种算法进行组合, 构建 $PM_{2.5}$ 浓度值的模拟模型, 以京津冀、东三省、长三角和珠三角 4 个地区 2013-04 ~ 2016-12 以来的地面 $PM_{2.5}$ 监测数据和 2000 ~ 2016 年的 MODIS AOD 及边界层高度、相对湿度、温度、风速和风向等气象因子作为样本空间, 实现 2000 ~ 2012 年期间 $PM_{2.5}$ 浓度值的估算, 并利用地理空间分析技术实现 2000 ~ 2016 年 $PM_{2.5}$ 时空变化过程的模拟和分析。

(2) 研究结果表明, 受不同产业结构、能源结构和气候条件的影响, 4 个区域 $PM_{2.5}$ 浓度呈现不同的空间分布。京津冀地区 $PM_{2.5}$ 污染程度位于四大研究区之首。2000 ~ 2010 年期间, 经济发展迅速、煤炭资源消耗巨大、汽车数量激增使得京津冀地区 $PM_{2.5}$ 年均浓度总体呈上升趋势, 污染范围逐渐扩大。东三省 $PM_{2.5}$ 年均浓度也呈现一定的增长趋势。长三角 $PM_{2.5}$ 浓度整体保持平稳, 污染范围变化不显著。珠三角污染程度最小。2011 和 2012 年, 在有利于污染物扩散的条件, 如台风和丰富降水的作用下 4 个研究区 $PM_{2.5}$ 浓度略微下降, 污染范围略微缩小。2014 年 4 个研究区受厄尔尼诺事件的影响 $PM_{2.5}$ 污染程度和污染范围均达到最高峰, 2015 和 2016 年 $PM_{2.5}$ 浓度有所下降, 这与国家采取的一系列空气污染治理措施有关。以计划经济为发展驱动力的东三省地区主要以重工业为主, 其产业结构转型困难, 短期内难以解决 $PM_{2.5}$ 污染问题; 以市场经济为发展驱动力的长三角和珠三角地区主要以轻工业和服务业为主, 其产业结构调整灵活, 应对 $PM_{2.5}$ 污染能力较强。

参考文献:

- [1] Xing Y F, Xu Y H, Shi M H, *et al.* The impact of $PM_{2.5}$ on the human respiratory system [J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2016, **8**(1): E69-E74.
- [2] Hyslop N P. Impaired visibility: the air pollution people see [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 182-195.
- [3] Chung Y, Dominici F, Wang Y, *et al.* Associations between long-term exposure to chemical constituents of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and mortality in Medicare enrollees in the Eastern United States [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, **123**(5): 467-474.
- [4] Li G, Fang C, Wang S, *et al.* The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentrations in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(21): 11452-11459.
- [5] Xu P, Chen Y F, Ye X J. Haze, air pollution, and health in China [J]. *The Lancet*, 2013, **382**(9910): 2067.
- [6] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Formation mechanism of a serious pollution event in January 2013 in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1154-1163.
- [7] Wang Z B, Fang C L. Spatial-temporal characteristics and determinants of $PM_{2.5}$ in the Bohai Rim Urban Agglomeration [J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 148-162.
- [8] 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.
- [9] Xu L Z, Batterman S, Chen F, *et al.* Spatiotemporal characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at urban and corresponding background sites in 23 cities in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 2074-2084.
- [10] Batterman S, Xu L Z, Chen F, *et al.* Characteristics of $PM_{2.5}$ concentrations across Beijing during 2013-2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **145**: 104-114.
- [11] Liu Y, Sarnat J A, Kilaru V, *et al.* Estimating ground-level $PM_{2.5}$ in the eastern United States using satellite remote sensing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(9): 3269-3278.
- [12] Kloog I, Chudnovsky A A, Just A C, *et al.* A new hybrid Spatio-temporal model for estimating daily multi-year $PM_{2.5}$ concentrations across northeastern USA using high resolution aerosol optical depth data [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **95**: 581-590.
- [13] Van Donkelaar A, Martin R V, Levy R C, *et al.* Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: a case study of the Moscow fires in 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6225-6232.
- [14] Wu Y R, Guo J P, Zhang X Y, *et al.* Synergy of satellite and ground based observations in estimation of particulate matter in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **433**: 20-30.
- [15] Van Donkelaar A, Martin R V, Pasch A N, *et al.* Improving the accuracy of daily satellite-derived ground-level fine aerosol concentration estimates for North America [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(21): 11971-11978.
- [16] Trang N H, Tripathi N K. Spatial correlation analysis between particulate matter 10 (PM_{10}) hazard and respiratory diseases in Chiang Mai Province, Thailand [A]. In: *Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [C]. Hyderabad, India: ISPRS, 2014, **XL-8**: 185-191.
- [17] Zhang H F, Wang Z Z, Zhang W Z. Exploring spatiotemporal patterns of $PM_{2.5}$ in China based on ground-level observations for 190 cities [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 559-567.
- [18] Li L L, Yang J X, Wang Y P. Retrieval of high-resolution atmospheric particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical thickness over the Pearl River Delta Area, China [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(6): 7914-7937.

- [19] Vlachogianni A, Kassomenos P, Karppinen A, *et al.* Evaluation of a multiple regression model for the forecasting of the concentrations of NO_x and PM₁₀ in Athens and Helsinki [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409** (8): 1559-1571.
- [20] Yeganeh B, Motlagh M S P, Rashidi Y, *et al.* Prediction of CO concentrations based on a hybrid Partial Least Square and Support Vector Machine model [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 357-365.
- [21] Luo Y, Yang K, Yu Z Y, *et al.* Dynamic monitoring and prediction of Dianchi Lake cyanobacteria outbreaks in the context of rapid urbanization [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24** (6): 5335-5348.
- [22] 杨昆, 陈俊屹, 罗毅, 等. 滇池流域不透水表面扩张监测与时空过程分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2016, **37** (12): 2717-2727.
Yang K, Chen J Y, Luo Y, *et al.* Monitoring and spatial-temporal process analysis of Dianchi basin impervious surface expansion [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, **37** (12): 2717-2727.
- [23] 杨昆, 罗毅, 徐玉妃, 等. 基于无线传感器网络与 GIS 的蓝藻水华爆发动态监测与模拟 [J]. *农业工程学报*, 2016, **32** (24): 197-205.
Yang K, Luo Y, Xu Y F, *et al.* Dynamic monitoring and simulation of cyanobacteria bloom based on wireless sensor network and GIS [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32** (24): 197-205.
- [24] 杨昆, 王桂林, 杨扬, 等. 昆明市不透水表面扩张与 PM_{2.5} 质量浓度变化相关性分析 [J]. *环境科学研究*, 2017, **30** (4): 499-509.
Yang K, Wang G L, Yang Y, *et al.* Association between impervious surface and PM_{2.5} concentrations in Kunming, China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30** (4): 499-509.
- [25] 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.
- [26] Li J, Cheng J H, Shi J Y, *et al.* Brief introduction of back propagation (BP) neural network algorithm and its improvement [A]. In: Jin D, Lin S (Eds.). *Advances in Computer Science and Information Engineering* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. 553-558.
- [27] Leng C P, Duan J Y, Xu C, *et al.* Insights into a historic severe haze event in Shanghai: synoptic situation, boundary layer and pollutants [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16** (14): 9221-9234.
- [28] Wang L L, Zhang N, Liu Z R, *et al.* The influence of climate factors, meteorological conditions, and boundary-layer structure on severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region during January 2013 [J]. *Advances in Meteorology*, 2015, **2014**: 685971.
- [29] Quan J N, Gao Y, Zhang Q, *et al.* Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations [J]. *Particology*, 2013, **11** (1): 34-40.
- [30] Sun S Z, Cao P H, Chan K P, *et al.* Temperature as a modifier of the effects of fine particulate matter on acute mortality in Hong Kong [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **205**: 357-364.
- [31] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Fine particulate (PM_{2.5}) dynamics during rapid urbanization in Beijing, 1973-2013 [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 23604.
- [32] Hua Y, Cheng Z, Wang S X, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM_{2.5} during a fall heavy haze episode in the Yangtze River Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 380-391.
- [33] Xiao H, Huang Z W, Zhang J J, *et al.* Identifying the impacts of climate on the regional transport of haze pollution and inter-cities correspondence within the Yangtze River Delta [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **228**: 26-34.
- [34] Wang W, Ren L H, Zhang Y H, *et al.* Aircraft measurements of gaseous pollutants and particulate matter over Pearl River Delta in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (25): 6187-6202.
- [35] Wan J M, Lin M, Chan C Y, *et al.* Change of air quality and its impact on atmospheric visibility in central-western Pearl River Delta [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, **172** (1-4): 339-351.
- [36] 赵秀娟, 姜华, 王丽涛, 等. 应用 CMAQ 模型解析河北南部城市的霾污染来源 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32** (10): 2559-2567.
Zhao X J, Jiang H, Wang L T, *et al.* Quantifying the source of haze pollution in southern Hebei cities using CMAQ model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32** (10): 2559-2567.
- [37] Wang L T, Xu J, Yang J, *et al.* Understanding haze pollution over the southern Hebei area of China using the CMAQ model [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **56**: 69-79.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i> (3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min (3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le (3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i> (3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i> (3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun (3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i> (3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i> (3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City .....	..... HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can (3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i> (3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun (3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i> (3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qí, LU Xin-wei (3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue (3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i> (3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i> (3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai .....	..... YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i> (3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i> (3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i> (3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i> (3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i> (3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i> (3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i> (3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i> (3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i> (3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor .....	..... FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i> (3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i> (3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i> (3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion .....	..... SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang (3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process .....	..... ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i> (3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping (3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i> (3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil .....	..... ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i> (3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i> (3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i> (3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i> (3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin .....	..... ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin .....	..... AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i> (3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland .....	..... HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i> (3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i> (3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian (3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-yu, PEI Meng-fu (3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i> (3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure .....	..... PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i> (3460)