

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化	姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)
海西城市群 PM _{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价	陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)
峨边地区大气 PM _{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系	程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)
泰山夏季 PM _{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源	孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)
南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估	张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)
长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响	尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)
南京城市交通甲烷排放特征	张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)
2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析	张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)
基于增强回归树的城市 PM _{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例	葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)
重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量	张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)
几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响	付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)
养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征	高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)
百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征	吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)
岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)
三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素	张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)
分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应	邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)
淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响	林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)
湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根	蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)
高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制	王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)
改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制	吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)
几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用	姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)
模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学	何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)
TiO ₂ /膨润土复合材料对 Hg ²⁺ 的吸附性能研究	唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)
氨氮及 H ₂ O ₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响	王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)
配水管网细菌活性影响因素	王晓丹, 赵新华 (622)
施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复	朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)
臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制	侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)
单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N ₂ O 的产生特性	郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)
有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能	管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)
完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析	王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)
颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)
游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响	戴晓虎, 何进, 严寒, 李宇, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)
利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻	顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)
零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响	魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)
沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价	王静, 刘明丽, 张士超, 鲁根涛, 姚宏 (703)
河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险	陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)
外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用	杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)
微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应	叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)
沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响	罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)
再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响	邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭逍宇 (743)
矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响	贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)
稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征	刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)
复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响	聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)
秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析	成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)
1 株氨基高效降解菌的分离鉴定及降解特性	叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)
1 株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性	谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)
连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响	孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)
施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响	陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)
长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体增殖与生物转化的影响	李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)
不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用	马锋锋, 赵保卫 (837)
《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)	

基于增强回归树的城市 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值变化分析：以常州为例

葛跃, 王明新*, 孙向武, 齐今笛

(常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164)

摘要: 利用 2014 年 12 月至 2015 年 11 月常州市区 6 个国控监测站空气污染物浓度逐时数据, 分析了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度季节变化特征, 采用增强回归树模拟分析了 PM_{10} 、4 种气态污染物和 7 个气象因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日变化的贡献。结果表明, 常州市区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染季节差异明显, 冬季污染严重且持续时间长, 夏季污染较轻。四季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 空间分布特征存在一定差异, 但各季内不同监测站差异较小。增强回归树对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值进行模拟和验证得到, 训练数据的相关性为 0.981, 交叉验证的相关性为 0.957。此外, 模拟值与实测值的标准化平均偏差为 1.80%, 标准化平均误差为 10.41%, 可见模型拟合效果较好。 PM_{10} 、气态污染物、气象因子和区域输送及扩散这 4 种影响类型对全年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异的贡献率分别为 23.4%、28%、36.2% 和 12.6%, 表明在对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异的影响上, 气象因子 > 二次形成 > 一次源 > 区域输送及扩散。在对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异贡献率大于 5% 的因子中, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值与 PM_{10} 、相对湿度、CO 和 O_3 正相关, 与温度、 SO_2 和混合层高度负相关, 与大气压和 NO_2 关系较复杂。区域输送及扩散方面, 东南风向、偏西风向和偏北风向等上风向周边城市的污染物输送对常州市区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染存在较大的负面影响。

关键词: 常州市区; $\text{PM}_{2.5}$; 季节变化; 增强回归树; 模拟; 验证; 贡献率

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0485-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607067

Variation Analysis of Daily $\text{PM}_{2.5}$ Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou

GE Yue, WANG Ming-xin*, SUN Xiang-wu, QI Jin-di

(College of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Based on hourly concentration data from six state-controlled air quality monitoring stations in urban area of Changzhou from December 2014 to November 2015, the seasonal variation of $\text{PM}_{2.5}$ pollution was analyzed, and the contributions of PM_{10} , four kinds of gaseous pollutants and seven meteorological factors to daily changes of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ were quantified by boosted regression tree (BRT). The results showed that: the seasonal differences of $\text{PM}_{2.5}$ pollution were significant, the pollution was serious in winter and the pollution duration was long, while the pollution was light in summer. The spatial distribution of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in four seasons was different, but the six monitoring stations showed similar trends in each season. Daily average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ was simulated and verified by BRT. The correlation coefficient of the training data was 0.981, and the cross-validation correlation coefficient was 0.957. In addition, the mean deviation between the simulated values and the measured values was 1.80%, and the standardized mean error was 10.41%, which showed that the model fitted well. The contribution percentages of four kinds of impact types (PM_{10} , gaseous pollutants, meteorological factors and regional transport and diffusion) to daily average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ changes of four seasons were 23.4%, 28%, 36.2% and 12.6%, respectively. So, the most significant affecting factor was meteorological condition, followed by secondary formation, primary emission, and regional transport and diffusion. In the factors with contribution percentages of more than 5%, the daily average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ was positively associated with PM_{10} , relative humidity, CO and O_3 , and was negatively correlated with temperature, SO_2 and mixed layer high. In addition, the daily average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ had complex relationships with atmospheric pressure and NO_2 . For regional transport and diffusion, the polluted air flow from southeast, west and north had a relatively great negative impact on $\text{PM}_{2.5}$ pollution of urban area in Changzhou.

Key words: urban area in Changzhou; $\text{PM}_{2.5}$; seasonal changes; boosted regression tree (BRT); simulation; verification; contribution percentage

伴随着工业化和城市化程度的加剧, 环境污染被大量排放且污染范围不断扩大。以 $\text{PM}_{2.5}$ 为主要污染物的城市大气环境日益恶化, 已经成为不容忽视的重大环境问题。它不仅能直接进入人体呼吸器官, 危害到人类健康^[1,2], 还对城市大气能见度等环境造成巨大影响^[3,4]。 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组成和物理属性较

为复杂的特征决定了其来源广泛, 既有污染源的一

收稿日期: 2016-07-09; 修订日期: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41641032); 江苏省高校“青蓝工程”项目; 江苏省研究生培养创新工程项目(KYLX15-1123)

作者简介: 葛跃(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: 982820592@qq.com

* 通信作者, E-mail: wmxcau@163.com

次排放,也有气-粒转化形成的二次颗粒物^[5~8]. 它们是 $\text{PM}_{2.5}$ 产生的根源,不利的气象因素则是 $\text{PM}_{2.5}$ 产生的诱因. 在污染源一定的条件下,污染物的扩散、稀释、积累和清除主要取决于气象条件^[9~13].

国内关于 $\text{PM}_{2.5}$ 的研究主要集中在京津冀、长三角和珠三角地区^[14~17],这些研究侧重于关注区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及其影响因素,很少分析各因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的相对贡献率. 本文选择常州市作为研究对象,利用2014年12月至2015年11月常州市区6个国控监测站(安家、常工院、城建学院、市监测站、潞城和武进监测站)的大气污染物浓度数据,探讨常州市区四季空气 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征,引入相对湿度、温度、大气压、风速、混合层高度、风向等气象因子,通过建立增强回归树模型,对空气 $\text{PM}_{2.5}$ 含量进行模拟和验证,分析 PM_{10} 、气态污染物、气象因子和区域输送及扩散对全年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响特征和贡献率,以为城市大气污染治理提供科学依据和决策参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

常州(31°09'N ~ 32°04'N, 119°08'E ~ 120°12'E)地处长江中下游平原. 地势以平原和丘陵为主. 位于中纬度欧亚大陆东岸,气候属于典型的北亚热带海洋性气候,春末夏初时多有梅雨发生,夏季炎热多雨,冬季湿润阴冷,常年主导风向为东南偏东风向. 常州作为长三角经济圈中的重要组成城市,经济发达,城市工业化率达到70%左右^[18],汽车保有量居全国前列. 常州空气质量方面较差,大气环境污染问题较为严重.

1.2 数据来源与处理

常州市区6个国控空气质量监测站的污染物浓度逐时数据来自于 [www. pm25. in](http://www.pm25.in),通过在线云采集平台获取. 数据收集时间范围为2014年12月至2015年11月. 各监测站位置分布见图1. 安家位于新北区安山镇郊区,靠近江宜高速公路;常工院位于飞龙中路东段,所在位置裸地较多;城建学校位于怀德中路和长江中路交界处,附近居民区众多;市监测站位于劳动中路、丽华北路、中吴大道和青洋中路所围区域,工厂企业较多;潞城位于龙城大道和大明路交界处,靠近丁塘河湿地公园,周围也遍布一定数量的工厂企业;武进监测站位于淹城春秋乐园内,周围人口机动车流量稠密. 地面气象3 h 间隔监测数据(温度、相对湿度、大气压、风速、风向

和降雨量)从 [www. rp5. ru](http://www.rp5.ru) 得到. 混合层高度和太阳辐射强度利用 NOAA/ARL 开发的 HYSPLIT 4.9 模型计算得到.



图1 常州市区国控空气质量监测站分布示意

Fig. 1 Distribution of state-controlled air quality monitoring stations in urban area of Changzhou

1.3 研究方法

在分析 $\text{PM}_{2.5}$ 与气态污染物和气象因子等影响因素关系方面,一般采用主成分分析、相关性分析等多元统计分析方法^[19,20],但是这些方法往往会忽略自变量之间多重共线性以及因变量和自变量之间可能存在复杂关系的问题,导致模型误差变大,分析结果也很难解释.

增强回归树(boosted regression tress, BRT)是构建于传统的分类回归树算法(CART)基础之上,能够通过不断地随机选择和自学习方法产生多重回归树,进而提高模型的稳定性和预测精度^[21~23]. 在运算过程中多次重复迭代随机抽取一定量的数据,分析自变量对因变量的影响程度,剩余数据用来对拟合结果进行交叉验证,最后对生成的多重回归树取均值并输出^[24]. 其可以在其他自变量取均值或不变的情况下,计算该自变量与因变量的相互关系^[25]. BRT最大的优势在于不必要考虑自变量之间的交互作用,数据可以存在缺省值且数据类型灵活多样,输出的自变量贡献度和反应曲线比较直观^[26],易于解释,还可以作为预测模型,而传统的线性或非线性

回归模型在预测方面相对较差^[27]. 目前 BRT 已在大气污染上有了一定的应用^[28,29], 取得了较好的结果.

将大气污染物浓度数据与地面气象数据按时间进行匹配, 分别探讨不同因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响差异. 模型拟合使用 R 语言中的 gbm 包^[30]以及 Elith 编写的 BRT 方程包^[22]. 设置学习速率为 0.005, 每

次抽取 50% 的数据进行分析, 50% 用于训练, 并进行 10 次交叉验证. BRT 模型包含 13 种变量类型 (表 1), 其中, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为因变量, 其余均为自变量. 风向采用风频表示, 分为 16 个风向和静风的频率数据, 限于篇幅, 这里不再表示. 通过建立增强回归树模型, 得出各因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的作用特征及贡献大小, 找出影响其变化的内在因素.

表 1 BRT 模型中的变量信息

Table 1 Variables used to develop the BRT model

变量	定义	类型	均值 $\pm$ 标准差	范围
$\rho(\text{PM}_{2.5})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	因变量	数值	57.14 $\pm$ 35.47	4.67 ~ 239.88
$\rho(\text{PM}_{10})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	自变量	数值	100.78 $\pm$ 48.79	7.70 ~ 312.06
$\rho(\text{SO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	自变量	数值	30.80 $\pm$ 15.09	8.42 ~ 103.00
$\rho(\text{NO}_2)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	自变量	数值	44.90 $\pm$ 17.95	9.32 ~ 113.68
$\rho(\text{O}_3)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	自变量	数值	57.35 $\pm$ 27.59	9.27 ~ 163.60
$\rho(\text{CO})/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	自变量	数值	1.07 $\pm$ 0.35	0.40 ~ 2.57
温度/ $^{\circ}\text{C}$	自变量	数值	16.66 $\pm$ 8.65	0.51 ~ 33.83
大气压 $\times 133.3/\text{Pa}$	自变量	数值	762.20 $\pm$ 7.08	747.74 ~ 777.10
相对湿度/%	自变量	数值	74.25 $\pm$ 13.16	36.50 ~ 96.13
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	自变量	数值	1.82 $\pm$ 0.74	0.25 ~ 5.00
混合层高度/m	自变量	数值	391.20 $\pm$ 206.03	30.40 ~ 1 255.00
太阳辐射强度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	自变量	数值	45.91 $\pm$ 38.55	0.00 ~ 136.00
风向/%	自变量	数值	—	—

在对 PM_{2.5} 影响因子分析之前, 先对 BRT 模型拟合效果进行评估. 验证数据集为 2015 年 12 月和 2016 年 1 月常州市 PM_{2.5} 污染及影响因子数据. 采用标准化平均偏差 (NMB) 与标准化平均误差 (NME) 评估模拟结果与观测值的吻合程度, 定义如下:

$$\text{NMB} = \frac{\sum_{i=1}^N (C_m - C_o)}{\sum_{i=1}^N C_o} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{NMF} = \frac{\sum_{i=1}^N |C_m - C_o|}{\sum_{i=1}^N C_o} \times 100\% \quad (2)$$

式中, C_m 是模拟值, C_o 是观测值.

NMB 反映的是各模拟值与观测值的平均偏差程度, NME 反映的是平均绝对误差, 是两个没有量纲的统计量, 它们越接近 0, 表明模拟效果越好, 一般情况下, 如果二者均小于 50%, 则认为模型拟合效果较好^[31,32]. 同时, 使用相关系数 R 来表征模拟结果与观测值之间相关的程度, 其越接近 1, 表明模拟效果越好.

2 结果与讨论

2.1 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 污染特征

2.1.1 时间变化特征

常州冬、春、夏和秋四季的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值分别为 89.44、57.06、38.51、45.03 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值季节变化特征显著 (图 2), 冬季 (1 ~ 2 月、12 月) PM_{2.5} 污染最严重, 高浓度污染持续时间较长且整体变化幅度较大, 春季和秋季次之, 夏季污染物浓度相对较低. 分析原因是常州冬季会消耗掉大量的化石燃料, 本地污染物排放增多, 随着冷空气的过境, 冷高压控制的本地大气层结较为稳定, 往往会形成逆温层, 不利于空气中污染物的扩散和稀释, 导致污染突出; 夏季通常伴随着高温、强烈的大气对流活动以及较多的降雨量等气象过程, 有助于污染物的清除^[33]. 从 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的分布 (图 2) 可以看出, 一年中 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较多集中于 0 ~ 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 占到了总天数的 79%. 超过 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数较少, 只占到了总天数的 3%, 持续较高的小时 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 有可能使得 PM_{2.5} 日平均浓度严重超标.

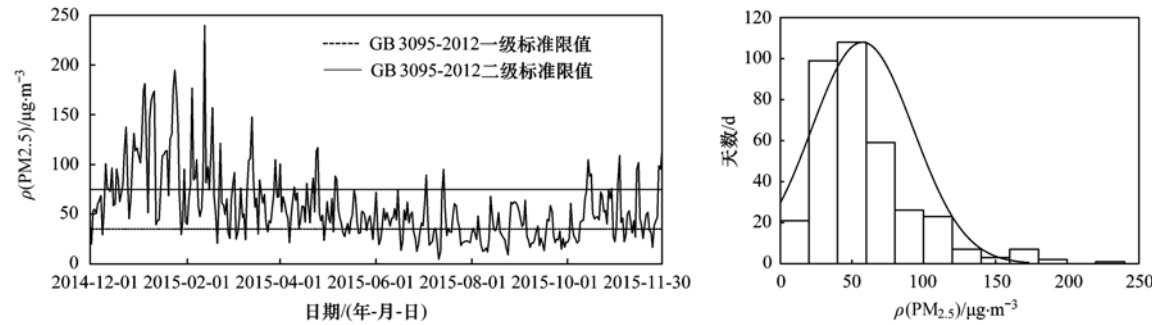


图2 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的逐日变化及 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分布
Fig. 2 Daily variation and distribution of $\rho(\text{PM}_{2.5})$

2.1.2 空间变化特征

图3为常州市区6个国控监测站的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 各季分布趋势,不同季节不同监测站的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 存在差异,冬季各监测站的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日分布范围与其他季节相比较广,这可能与各监测站周围污染源情况及各季污染物扩散程度不同有关.整体 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分布情况为:冬季,市监测站>常工院>潞城>武进监测站>城建学校>安家;春季,常工院>潞城>武进监测站>城建学校>安家>市监测站;夏季,武进监测站>潞城>市监测站>常工院>安家>城建学校;秋季,潞城>武进监测站>城建学校>常工院>市监测站>安家.

安家监测站位于郊区农田区域附近,周围无明显

污染源,因此四季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较低;市监测站冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较高,这是因为附近存在大面积裸地,容易引起灰尘,北部和东部方向分布有化工厂等污染源,在主导风向作用下(图4),污染物会扩散至此;常工院监测站所处位置同样为裸地,冬季和春季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 受灰尘影响较大,而夏季降雨较多,可以缓解这一情况,故 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较低;位于居民文教区的城建学校监测站周围污染源较少, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 相对较低;潞城监测站位于常州市经济开发区,污染企业众多,四季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 相对较高;武进监测站设在淹城春秋乐园内,虽然植被覆被较高,但其隶属于商业、交通、居民和文教混合区,且南面有工业园区,污染物排放较多,四季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染均较为严重,另外

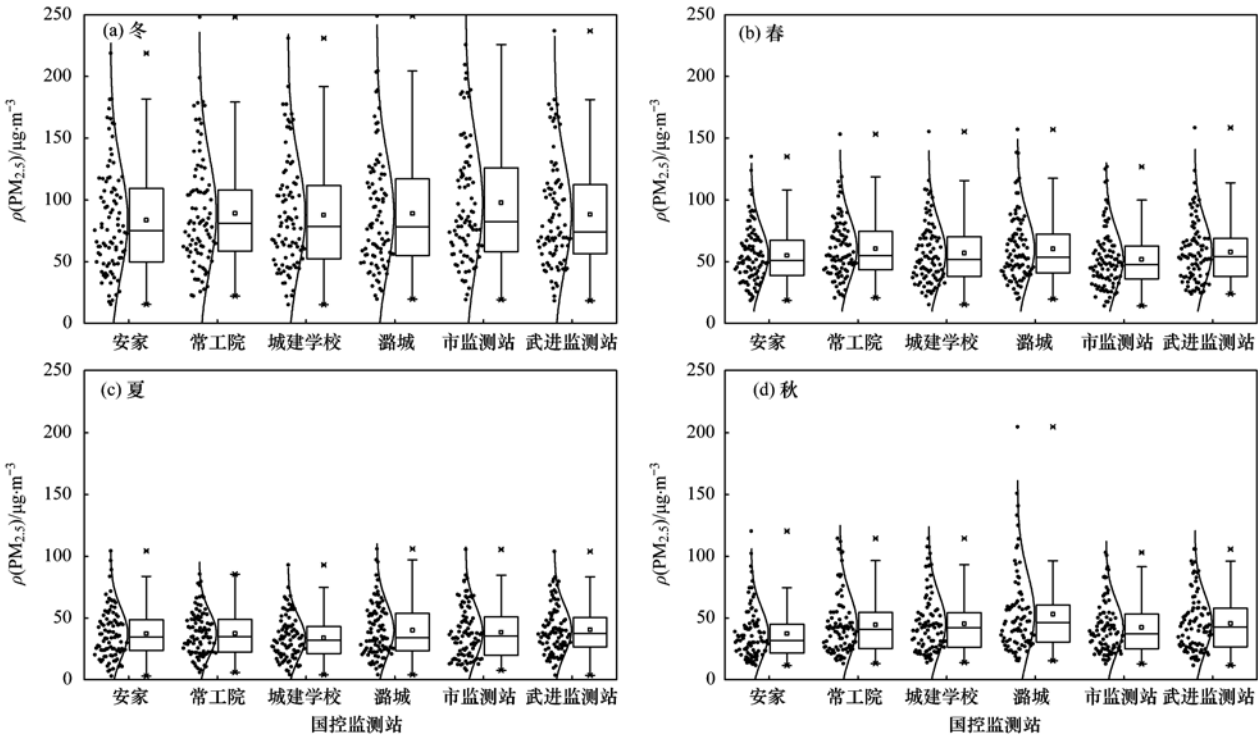


图3 常州各监测站 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in each monitoring station of Changzhou

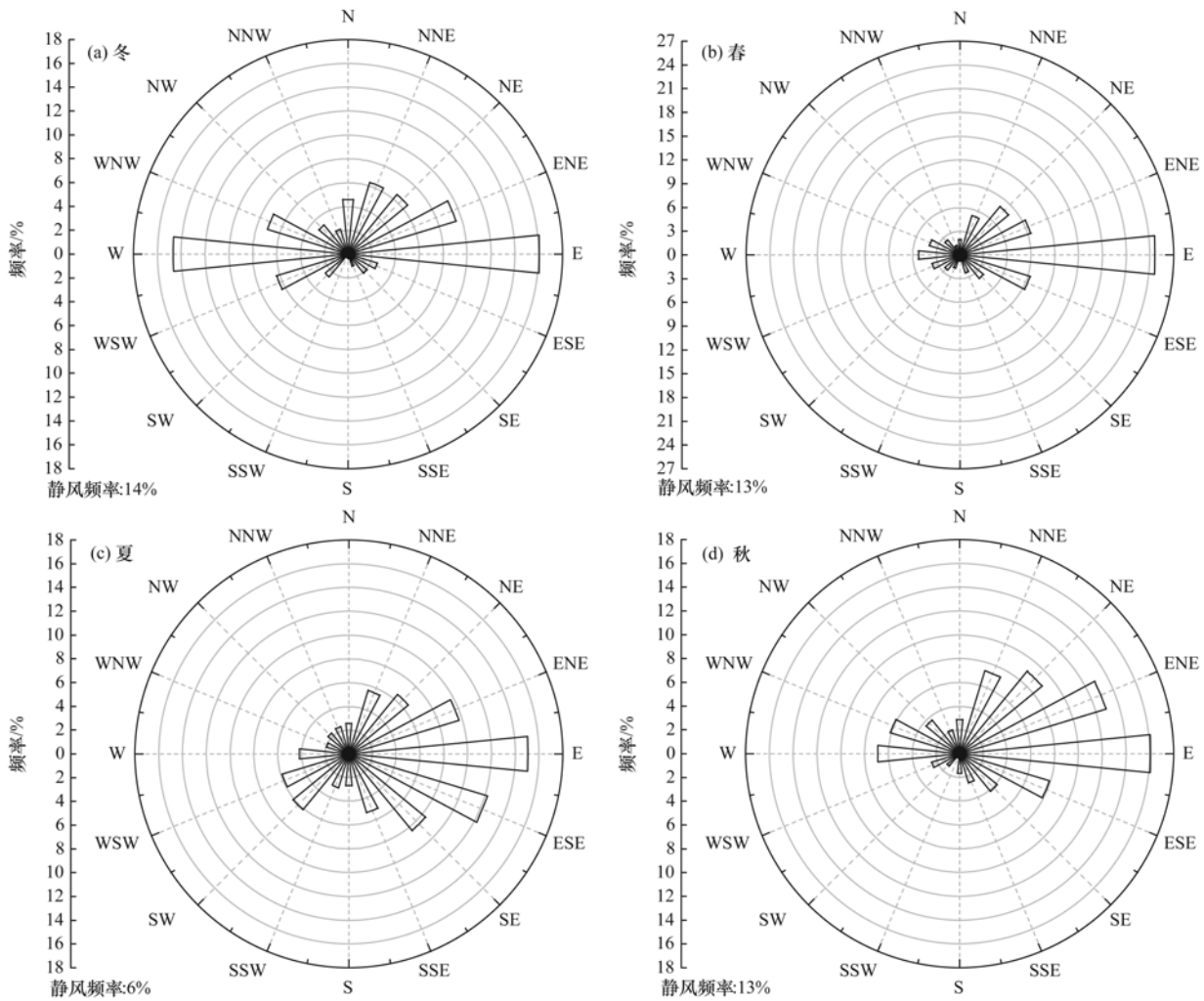


图 4 2014 年 12 月至 2015 年 11 月四季风频

Fig. 4 Wind frequency diagram of different seasons in Changzhou from December 2014 to November 2015

夏季偏南风较多(图 4),容易受到来自工业园区的污染物影响,这也是该监测站夏季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最高的主要原因.

2.2 模型拟合效果分析

BRT 模型在 R 中经过 5 150 次运算达到最优. 训练数据的相关性为 0.981,交叉验证的相关性为 0.957. 基于验证数据集的模拟结果也发现,模拟值与观测值(图 5)的相关性达 0.967,标准化平均偏差(NMB)为 1.80%,标准化平均误差(NME)为 10.41%. 可见基于 BRT 的拟合与验证效果较好.

2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化影响因子分析

运用 BRT 分析了各类影响因子对常州市区全年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异的相对贡献率(图 6),图形上面给出了各因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异的贡献率,曲线表示各因子在其它因子取均值时, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 与该因子的数量关系. 由于不同类别因子

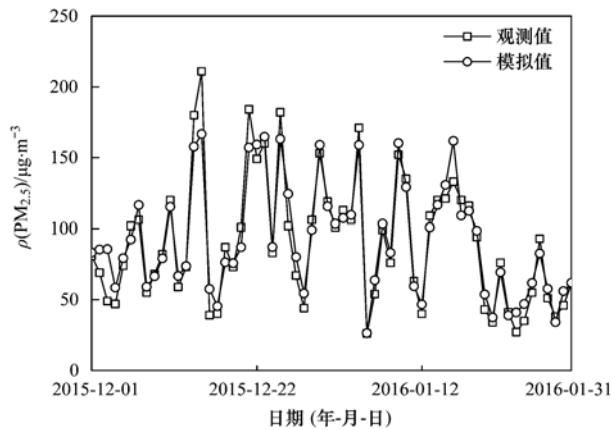


图 5 日均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 模拟值与观测值对比

Fig. 5 Comparisons of predicted values and observed values of daily mean $\rho(\text{PM}_{2.5})$

对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的贡献存在很大的差异,为了能够整体上分析影响 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的成因,本文依据因子之间不同的属性特征,将它们分成四类,分别对四类影

响因子以及类别内各因子的贡献率差异进行对比和分析。

2.3.1 PM_{10}

对常州市区 $\rho(PM_{2.5})$ 日均值差异贡献率最大的影响因子是 PM_{10} (23.4%),且呈正相关。 PM_{10} 主要来自于自然过程和人类活动中的一次排放,表明一次排放的波动性对研究区空气 $PM_{2.5}$ 污染日变化的影响最大。

2.3.2 气态污染物

CO对 $PM_{2.5}$ 污染贡献率居气态污染物之首(8.8%),相关研究也发现CO与 $PM_{2.5}$ 具有很强的相关性^[34],由于CO主要来自于汽车尾气以及化石燃料的不充分燃烧,说明这些排放源是 $PM_{2.5}$ 的重要来源之一。 O_3 对 $PM_{2.5}$ 的贡献率相对较高(7.2%)且呈正相关,这是因为 O_3 是光化学反应的主要产物,这一反应过程中大气氧化性较强,有利于二次颗粒物的形成,尤其是夏季。 SO_2 和 NO_2 对 $PM_{2.5}$ 污染的贡献率分别为6.2%和5.8%, SO_2 与 NO_2 等气态污染物是 $PM_{2.5}$ 的重要前体物,它们二次形成的气溶胶也是造成 $PM_{2.5}$ 污染严重的重要原因,从图6中发现,它们与 $\rho(PM_{2.5})$ 的数量曲线波动性均较大,关系较为复杂。

2.3.3 气象因子

温度对 $PM_{2.5}$ 污染的影响在气象因子中最大,贡献率达到9.8%。随着温度的升高, $\rho(PM_{2.5})$ 整体呈下降趋势,但是在5℃和10℃之间有一个峰值,另外还发现其与 $\rho(PM_{2.5})$ 的数量曲线变化特征和 SO_2 的较为类似。这是因为温度对不同污染物之间的转化和二次污染物的形成起到主导作用^[35]。当温度升高到10℃左右时,大气垂直对流作用会加剧,有利于污染物扩散和稀释,因此 $\rho(PM_{2.5})$ 开始下降。

大气压对 $\rho(PM_{2.5})$ 的贡献率为6.7%,随着气压的升高, $\rho(PM_{2.5})$ 呈现先上升再下降的趋势。气压的大小与天气情况有着密切的关系,地面上高气压地区一般为天气晴朗,风速较大,并伴有空气的上升运动,颗粒物扩散和稀释能力增强,因子 $\rho(PM_{2.5})$ 相对较低,地面上低气压地区一般为阴雨天,大气湿度较大,空气有下降运动^[36],不利于污染物向上扩散, $\rho(PM_{2.5})$ 相对较高。

相对湿度对 $PM_{2.5}$ 的贡献率为6.8%,呈正相关。当相对湿度在50%~70%之间时, $\rho(PM_{2.5})$ 随着相对湿度的增大而明显升高,在相对湿度达到80%时, $\rho(PM_{2.5})$ 达到最大值,之后 $\rho(PM_{2.5})$ 有所下降,这是由于当相对湿度较小时,污染物表面吸附

力不足,不易凝聚沉降,相对湿度增大使得污染物表面富含水分,有利于颗粒物粒径增大并在空气中滞留(若不发生沉降)^[12], $\rho(PM_{2.5})$ 增大。当相对湿度大于80%时,通常是雨天,颗粒物容易被降雨冲刷下洗而大量沉降,相对湿度对颗粒物呈清除作用^[35]。

混合层高度对 $\rho(PM_{2.5})$ 的影响在气象因子中相对较大(5.8%),且呈负相关,其与温度对 $\rho(PM_{2.5})$ 的数量曲线具有极其相似的变化规律。这是因为混合层高度是湍流特征不连续界面的高度^[37],即空气污染物可以上升的最大高度,它表征了污染物在垂直方向被热力湍流稀释的范围,与温度等气象因子密切相关^[38]。混合层高度越大,污染物越容易在垂直方向上稀释;反之,混合层高度越大,污染物容易聚集在近地层,导致污染物浓度上升。

太阳辐射强度对 $\rho(PM_{2.5})$ 的贡献率为3.9%,太阳辐射强度越大, $\rho(PM_{2.5})$ 越低。这是因为当太阳辐射强度逐渐增大时,地表温度上升也相对较快,近地表空气随之加热,温度层结是递减的,此时的大气处于不稳定状态,污染物可以随着气流的运动被扩散出去,这种情况通常出现在夏季,而当地面辐射冷却时,近地表气温会下降,形成逆温层,大气处于稳定状态^[36],非常不利于污染物的扩散,尤其是冬季。

2.3.4 区域输送及扩散

风速和风向反映区域输送及扩散对 $\rho(PM_{2.5})$ 日变化的影响。本研究中风速对 $\rho(PM_{2.5})$ 日变化的贡献率为3.2%,整体呈负相关,风速越大, $\rho(PM_{2.5})$ 越低。风速主要影响污染物水平扩散和稀释的速度。当风速较大时,大气流动加强,扩散加快,可以有效稀释并降低大气污染物浓度,而静风或者风速小时,大气水平流动能力减弱,大气污染物容易聚积^[39,40]。

风向对 $\rho(PM_{2.5})$ 的总贡献率为12.6%,表明外来污染物对研究地区 $\rho(PM_{2.5})$ 有较大的贡献。图7为全年16种风向和静风状态下对应的 $\rho(PM_{2.5})$ 。E、ENE、ESE、NNE、NW、NNW、SSW和S风向频率与 $\rho(PM_{2.5})$ 呈负相关,E、ENE、ESE和NNE风向为常州全年的几个主要风向(图4),这些风向的气流多来自海洋,较为清洁,有利于污染物的稀释,对应的 $\rho(PM_{2.5})$ 相对较低(图7);NW、NNW、SSW和S风向频率较低(图4),气流携带的污染物较少,本身的扩散作用可能更为明显。NE、WNW、SSE、SE、W、SW、WSW和N风向频率与 $\rho(PM_{2.5})$ 呈负相关,

NE、WNW、W、SW、WSW 和 N 风向的气流可能会将江苏北部、安徽南部及南京等地区的污染物携带至此,加剧研究地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染, SSE 和 SE 对应的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 较高(图 7),表明无锡、苏州及浙江境内的外源输送影响也相对较大. 静风(C)对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的贡献率为 0.6%,数量关系曲线呈正相关. 静风天气下,污染物不易扩散,其频率越高, $\text{PM}_{2.5}$ 污染越严重. 冬、春和秋四季静风频率分别占到了 14%、13% 和 13%(图 4),比例相对较高,另外全年静风状态下的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值为所有风向中的最高,达到 $67.95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明本地污染源的影响也较为严重.

综上所述,常州市区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况是多因子共同作用的结果. 一次源是常州市区 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源. 气态污染物作为 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物,也在一定程度上影响常州市区的空气质量. 不同气象因子对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的影响特征和贡献率差异显著. PM_{10} 、气态污染物、气象因子和区域输送及扩散 4 种影响类型对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异的贡献率分别为 23.4%、28%、36.2% 和 12.6%,可见在对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异的影响上,气象因子 > 二次形成 > 一次源 > 区域输送及扩散. 区域输送及扩散方面,东南风向、偏西风向和偏北风向等上风向周边城市的污染物输送会对研究地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况产生较大的负面影响. 此外,本地源污染对 $\text{PM}_{2.5}$ 影响相对也较为严重.

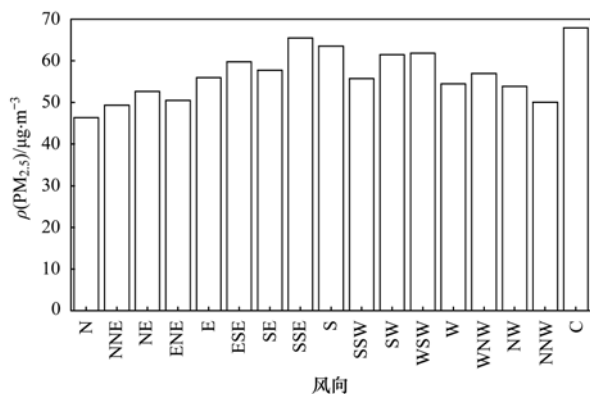


图 7 不同主导风向条件下 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 比较

Fig. 7 The $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in different prevalent wind directions

3 结论

(1) 常州市区各监测点 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值具有明显的季节变化规律,冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最为严重且持续时间较长,夏季污染最轻. $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 集中在 $0 \sim 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间的天数占到了全年的 79%,超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数只占到了 3%.

(2) 采用增强回归树分析方法模拟了研究区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值与 PM_{10} 、气态污染物和气象因子之间的关系,取得了较好的验证效果. 研究区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异主要受到气象因子变化的影响,一次源、二次形成和区域输送及扩散也有着显著的影响.

(3) 对 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值差异贡献率大于 5% 的因子从大到小依次为 PM_{10} 、温度、 CO 、 O_3 、相对湿度、大气压、 SO_2 、 NO_2 、混合层高度. 总体上, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 日均值与 PM_{10} 、相对湿度、 CO 和 O_3 正相关,与温度、混合层高度和 SO_2 负相关,与大气压和 NO_2 关系较复杂.

(4) 在区域输送及扩散方面,东南风向、偏西风向和偏北风向等上风向的气流输送会促进 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 升高,从而加剧 $\text{PM}_{2.5}$ 污染;偏东风向等上风向的气流输送则有助于 $\text{PM}_{2.5}$ 的稀释和扩散,从而缓解 $\text{PM}_{2.5}$ 污染. 此外,静风条件下,本地源对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况影响较为严重.

参考文献:

- [1] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *JAMA*, 2002, **287** (9): 1132-1141.
- [2] 胡伟, 魏复盛. 儿童呼吸健康与颗粒物中元素浓度的关联分析[J]. *安全与环境学报*, 2003, **3** (1): 8-12.
Hu W, Wei F S. A correlated analysis of children's respiratory morbidity with the pollutant elements in the air [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2003, **3** (1): 8-12.
- [3] Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, *et al.* Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33** (19): 3237-3250.
- [4] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. *环境科学学报*, 2003, **23** (4): 468-471.
Song Y, Tang X Y, Fang C, *et al.* Relationship between the visibility degradation and particle pollution in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, **23** (4): 468-471.
- [5] 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 等. 朔州市市区 $\text{PM}_{2.5}$ 中元素碳、有机碳的分布特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (3): 787-793.
Liu F X, Peng L, Bai H L, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in $\text{PM}_{2.5}$ in Shuozhou City [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (3): 787-793.
- [6] Dominici F, Peng R D, Bell M L, *et al.* Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases [J]. *JAMA*, 2006, **295** (10): 1127-1134.
- [7] Shaddick G, Wakefield J. Modelling daily multivariate pollutant data at multiple sites [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 2002, **51** (3): 351-372.
- [8] 吴剑斌, 王茜, 王自发. 上海市夏季颗粒物污染过程数值模拟研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35** (7): 1982-1992.
Wu J B, Wang Q, Wang Z F. Modeling study of particulate matter pollution episode on summertime in Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35** (7): 1982-1992.

- [9] DeGaetano A T, Doherty O M. Temporal, spatial and meteorological variations in hourly PM_{2.5} concentration extremes in New York City[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(11): 1547-1558.
- [10] 郭利, 张艳昆, 刘树华, 等. 北京地区 PM₁₀ 质量浓度与边界层气象要素相关性分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, **47**(4): 607-612.
- Guo L, Zhang Y K, Liu S H, *et al.* Correlation analysis between PM₁₀ mass concentration and meteorological elements of atmospheric boundary layer in Beijing area[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, **47**(4): 607-612.
- [11] 周兆媛, 张时煌, 高庆先, 等. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. *资源科学*, 2014, **36**(1): 191-199.
- Zhou Z Y, Zhang S H, Gao Q X, *et al.* The impact of meteorological factors on air quality in the Beijing-Tianjin-Hebei region and trend analysis[J]. *Resources Science*, 2014, **36**(1): 191-199.
- [12] 刘大猛, 黄杰, 高少鹏, 等. 北京市区春季交通源大气颗粒物污染水平及其影响因素[J]. *地学前缘*, 2006, **13**(2): 228-233.
- Liu D M, Huang J, Gao S P, *et al.* The pollution level and influencing factors of atmospheric particulates from traffic in Beijing city during spring[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, **13**(2): 228-233.
- [13] 王珊, 廖婷婷, 王莉莉, 等. 西安一次霾重污染过程大气环境特征及气象条件影响分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3452-3462.
- Wang S, Liao T T, Wang L L, *et al.* Atmospheric characteristics of a serious haze episode in Xi'an and the influence of meteorological conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3452-3462.
- [14] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of PM_{2.5}, in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [15] 潘月鹏, 王跃思, 胡波, 等. 北京奥运时段河北香河大气污染观测研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 1-9.
- Pan Y P, Wang Y S, Hu B, *et al.* Observation on atmospheric pollution in Xianghe during Beijing 2008 olympic games[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 1-9.
- [16] 魏玉香, 童尧青, 银燕, 等. 南京 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 变化特征及其与气象条件的关系[J]. *大气科学学报*, 2009, **32**(3): 451-457.
- Wei Y X, Tong Y Q, Yin Y, *et al.* The variety of main air pollutants concentration and its relationship with meteorological condition in Nanjing City[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2009, **32**(3): 451-457.
- [17] 朱李华, 陶俊, 张仁健, 等. 冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O₃ 和气象条件的关联[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(10): 1942-1949.
- Zhu L H, Tao J, Zhang R J, *et al.* Characteristics of the carbonaceous aerosol in PM_{2.5} and its relation to O₃ and meteorological conditions in the urban Guangzhou area in winter and summer[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(10): 1942-1949.
- [18] 高飞, 王勇, 陈清祥, 等. 基于 GIS 的苏锡常地区 PM_{2.5} 分布模拟[J]. *地理空间信息*, 2015, **13**(6): 103-107.
- Gao F, Wang Y, Chen Q X, *et al.* PM_{2.5}'s distribution simulation in Suzhou-Wuxi-Changzhou area based on GIS[J]. *Geospatial Information*, 2015, **13**(6): 103-107.
- [19] 史宇, 张建辉, 罗海江, 等. 北京市 2012-2013 年秋冬季大气颗粒物污染特征分析[J]. *生态环境学报*, 2013, **22**(9): 1571-1577.
- Shi Y, Zhang J H, Luo H J, *et al.* Analysis of characteristics of atmospheric particulate matter pollution in Beijing during the fall and winter of 2012 to 2013[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(9): 1571-1577.
- [20] 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等. 青年奥林匹克运动会期间南京市主要大气污染物浓度变化与分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(5): 824-831.
- Zhao H, Zheng Y F, Wu X Y, *et al.* Variation and analysis of air pollutants concentration in Nanjing during the Youth Olympic Games[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(5): 824-831.
- [21] Franklin J, McCullough P, Gray C. Terrain variables used for predictive mapping of vegetation communities in Southern California[A]. In: Wilson J P, Gallant J C (Eds.). *Terrain Analysis: Principles and Applications*[M]. New York: Wiley & Sons, 2000. 331-353.
- [22] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, **77**(4): 802-813.
- [23] Prasad A M, Iverson L R, Liaw A. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction[J]. *Ecosystems*, 2006, **9**(2): 181-199.
- [24] 赵芳, 欧阳勋志. 飞播马尾松林土壤有机碳空间分布及其影响因子[J]. *生态学报*, 2016, **36**(9): 2637-2645.
- Zhao F, Ouyang X Z. Assessing relative contributions of various influencing factors to soil organic carbon in aerially-seeded *Pinus massoniana* plantations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(9): 2637-2645.
- [25] 蔡文华, 杨健, 刘志华, 等. 黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子[J]. *生态学报*, 2012, **32**(11): 3303-3312.
- Cai W H, Yang J, Liu Z H, *et al.* Controls of post-fire tree recruitment in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(11): 3303-3312.
- [26] 刘昆. 发热伴血小板减少综合征流行病学特征和传播风险预测研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2015.
- Liu K. Epidemiological characteristics and transmission risk prediction of severe fever with thrombocytopenia syndrome[D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, 2015.
- [27] De'ath G. Boosted trees for ecological modeling and prediction[J]. *Ecology*, 2007, **88**(1): 243-251.
- [28] Carslaw D C, Taylor P J. Analysis of air pollution data at a mixed source location using boosted regression trees[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(22-23): 3563-3570.
- [29] Sayegh A, Tate J E, Ropkins K. Understanding how roadside concentrations of NO_x are influenced by the background levels, traffic density, and meteorological conditions using Boosted Regression Trees[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **127**: 163-175.
- [30] Ridgeway G. GBM: generalized boosted regression models. R package version 1.6 [EB/OL]. <http://CRAN.R-project.org/package=gbm>, 2010.

- [31] Eder B, Yu S C. A performance evaluation of the 2004 release of Models-3 CMAQ [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40** (26): 4811-4824.
- [32] Kang D W, Eder B K, Mathur R, *et al.* An Operational Evaluation of ETA-CMAQ Air Quality Forecast Model [A]. In: Borrego C, Norman A L (Eds.). *Air Pollution Modeling and Its Application XVII* [M]. US: Springer, 2007: 590-598.
- [33] 胡敏, 张静, 吴志军. 北京降水化学组成特征及其对大气颗粒物的去除作用[J]. *中国科学 B 辑 化学*, 2005, **35** (2): 169-176.
- [34] 龙连芳, 王新明, 冯宝志, 等. 广州市区公交车站 $PM_{2.5}$ 与 CO 暴露水平研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, **33** (9): 140-145.
- Long L F, Wang X M, Feng B Z, *et al.* Exposure levels of $PM_{2.5}$ and CO at bus stations in urban Guangzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **33** (9): 140-145.
- [35] 张振华. $PM_{2.5}$ 浓度时空变化特性、影响因素及来源解析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Zhang Z H. Research on spatial and temporal variation characteristics, factors, and source apportionment of $PM_{2.5}$ [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [36] 李新令. 西安城市气候年变化特征及其与 PM_{10} 污染特征的相关分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.
- Li X L. Characteristic of meteorological annual variety in Xi'an city and the relevant analysis of PM_{10} pollution characteristic [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [37] 杨龙. 西安市南郊夏季 PM_{10} 浓度时空变化与影响因素研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2014.
- [38] 朱敏, 王体健, 卢兆民. 一次持续空气污染过程的气象条件分析[J]. *气象科学*, 2008, **28** (6): 673-677.
- Zhu M, Wang T J, Lu Z M. Analysis on weather conditions during sustained heavy air pollution episode [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2008, **28** (6): 673-677.
- [39] 林俊, 刘卫, 李燕, 等. 大气气溶胶粒径分布特征与气象条件的相关性分析[J]. *气象与环境学报*, 2009, **25** (1): 1-5.
- Lin J, Liu W, Li Y, *et al.* Relationship between meteorological conditions and particle size distribution of atmospheric aerosols [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2009, **25** (1): 1-5.
- [40] 任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 重庆主城区大气 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. *环境科学研究*, 2014, **27** (12): 1387-1394.
- Ren L H, Zhou Z E, Zhao X Y, *et al.* Source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in urban areas of Chongqing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27** (12): 1387-1394.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Mineralization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodopseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, <i>et al.</i> (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人

ISSN 0250-3301



9 770250 330172