

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



2019

Vol.40 No.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对APEC期间北京空气质量的影响

李颖若^{1,2}, 汪君霞³, 韩婷婷^{1,2}, 王垚^{1,2}, 何迪^{1,2}, 权维俊^{1,2}, 马志强^{1,2*}

(1. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 3. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100081)

摘要: 气象条件对大气污染物的扩散和传输有重要影响, 准确分离和定量气象因素对空气质量的影响是评估大气污染控制政策有效性的前提. 本研究利用 APEC 会议期间及前后 (2014-10-15 ~ 2014-11-30) 北京城区朝阳观测站点 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 以及气象因素的观测数据, 采用多元线性回归分析方法, 定量评估了气象条件和空气污染控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响. 在假定排放条件不变的情况下, 基于气象因素参数建立的预测污染物浓度的多元线性回归模型模拟效果较为理想, 决定系数 R^2 在 0.494 ~ 0.783 之间. 控制措施使得 APEC 控制期 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 浓度分别降低 48.3%、53.5%、18.7%、40.6%、3.6%、34.8%、28.8% 和 40.6%, 气象因素使得 APEC 控制期 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 浓度分别降低 1.7%、-2.8%、18.7%、4.5%、18.6%、27.5%、30.6% 和 35.6%. 气象因素和控制措施共同作用使得 APEC 控制期北京空气质量得到了明显改善. 控制措施对 SO_2 和氮氧化物浓度的下降起主导作用, 气象因素对 CO 浓度的下降起主导作用, 气象因素和控制措施对颗粒物浓度降低的贡献相当. 本研究还利用相对权重方法研究了气象因素对污染物浓度影响的贡献, 结果表明影响不同污染物浓度的决定性气象因素不同.

关键词: 多元线性回归方法; 相对权重方法; 气象条件; 控制措施; APEC 会议

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1024-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807044

Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014

LI Ying-ruo^{1,2}, WANG Jun-xia³, HAN Ting-ting^{1,2}, WANG Yao^{1,2}, HE Di^{1,2}, QUAN Wei-jun^{1,2}, MA Zhi-qiang^{1,2*}

(1. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100081, China)

Abstract: Meteorological conditions have important impact on the diffusion and transport of air pollutants, thus separating and quantifying the impact of meteorological factors is a prerequisite for evaluation of air pollution control measures. Using observation data on SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , CO , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 , and PM_{10} as well as meteorological factors at the Chaoyang site, an urban site in Beijing, we evaluated the impact of meteorological conditions and control measures on air quality in Beijing during APEC 2014 (from 15 October to 30 November, 2014) by the multiple linear regression method. The simulation performance of a multivariate linear regression model based on the parameters of meteorological factors for predicting pollutant concentration assuming constant emission conditions were ideal, produced a range of determination coefficient (R^2) of 0.494-0.783. Our results suggested that air pollution control measures reduced the concentration of SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , CO , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 , and PM_{10} by 48.3%, 53.5%, 18.7%, 40.6%, 3.6%, 34.8%, 28.8%, and 40.6%, while meteorological conditions reduced the concentration of SO_2 , NO , NO_2 , NO_x , CO , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1 , and PM_{10} by 1.7%, -2.8%, 18.7%, 4.5%, 18.6%, 27.5%, 30.6%, and 35.6%. The combination of meteorological factors and control measures has significantly improved the air quality in Beijing during the APEC period. Control measures played a leading role in the reduction of SO_2 and nitrogen oxides, and meteorological factors played a leading role in the reduction of CO . Meteorological factors and control measures made roughly equal contributions to the reduction of particulate matter. We also used the relative weight method to study the contribution of meteorological factors to the pollutant concentration. The results showed that the decisive meteorological factors on the concentrations of different pollutants were different.

Key words: multiple linear regression method; relative weight method; meteorological conditions; air pollution control measures; the APEC 2014 summit

收稿日期: 2018-07-06; 修订日期: 2018-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41475135, 41571130024, 91744101); 北京市科技新星计划项目 (xx2017079); 国家级气象科研院所基本科研业务费专项 (IUMKY201733)

作者简介: 李颖若 (1984 ~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为超大城市及区域空气污染, E-mail: lyr@pku.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zqma@ium.cn

北京是世界超大城市之一, 目前面临严峻的空气污染问题^[1~4]. 在大型活动期间, 为了保障良好的空气质量, 北京以及周边地区往往会执行一系列严格的空气污染控制措施^[5~11]. 这为评估空气污染控制措施的有效性提供了很好的实验机会. 准确定量评估大型活动期间空气污染控制措施的有效性, 对未来空气污染控制政策的制定具有十分重要的指导意义.

有研究表明气象条件对大气污染扩散和传输有重要影响^[12, 13], 准确评估控制政策有效性的挑战之一是分离和定量气象条件对空气质量的影响^[5, 14~18]. 已往一些研究采用定性比较, 模型模拟和统计分析等方法, 分离和定量气象条件和空气污染控制措施对空气质量的影响, 评估大气污染控制政策的效果^[5, 19~26]. 定性分析方法常借助气象因素观测数据或者天气系统图等资料, 进行不同气象条件类型分类, 通过比较相似气象条件下污染物浓度的变化剔除气象因素的影响, 对大气污染控制政策进行评估. 王占山等^[24]通过相邻时间段内(2014-11-08~2014-11-10和2014-11-18~2014-11-20)相似天气系统下污染物浓度的对比测算了 APEC (Asia-Pacific Economic Cooperation Forum) 期间减排措施的“净环境效益”, 发现减排措施使得 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别降低了 74.1%、48.0%、66.6% 和 64.7%. 由于该方法在短时间内可供比较的数据较少, 对短期污染控制措施的评估结果往往存在一定的不确定性. 模型模拟通常采用不同情境模拟污染物浓度, 通过不同情境之间差减获取气象条件和控制措施对空气质量的影响. Huang 等^[5]利用 WRF-CMAQ 模型研究发现, 在 2014 年南京青奥会期间, 气象因素使 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 浓度上升 17.5%、16.9%、18.5%、18.8% 和 7.8%, 控制措施使其下降 24.6%、12.1%、15.1%、8.1% 和 7.2%. 由于源排放清单以及气象输入场等的不确定性, 模型评估结果往往也存在较大误差.

由于定性对比方法存在多依赖主观判断的缺点, 而空气质量模型参数设定比较复杂、计算成本高、模拟不确定性较大. 许多研究利用统计模型的方法开展气象因素和控制措施效果评估的研究^[27~30]. 统计模型通常可以建立污染物浓度与气象因素之间的关系, 从而可以定量气象因素对污染物浓度的影响. 已经有许多研究采用统计模型, 包括多元线性回归模型、广义线性模型以及人工神经网络等方法建立污染物浓度与气象因素之间的关系^[27~30]. Liang 等^[29]利用广义线性回归模型的方

法, 建立了只基于气象因素参数的模型来预测控制期间的污染物浓度, 评估气象条件和污染控制措施对污染物浓度下降的贡献, 其研究发现 APEC 期间的气象条件和污染控制措施对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降分别贡献了 30% 和 28%; 阅兵期间的气象条件和污染控制措施对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降分别贡献了 38% 和 25%. 本研究采用的多元线性回归方法是统计分析中确定因变量和多个自变量相互依赖的定量关系的常用方法, 在分析多因素模型时, 更加简单和方便, 模型经过加入构造变量和变量变换后可很好地预测污染物浓度.

本研究利用 APEC 会议前后(2014-10-15~2014-11-30)北京朝阳大气成分观测站 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和气象因素风速(ws)、风向(wd)、温度(T)、露点温度(t_d)、气压(bp)、相对湿度(rh)和能见度(vis)观测数据, 采用多元线性回归分析的方法, 定量评估气象条件和空气污染控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响.

1 材料与方法

1.1 数据获取

污染物 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 PM_{10} 观测数据来自北京市朝阳区大气成分观测站(39.95°N, 116.50°E), 观测仪器的型号、检出限、精确度和时间分辨率等信息如表 1 所示. 所有污染物根据测定要求对仪器进行定期标定, 数据缺失主要由于电力中断和仪器故障. 气象因素观测数据来自北京南郊气象观测站(39.80°N, 116.47°E), 主要包括风速(ws)、风向(wd)、温度(T)、露点温度(t_d)、气压(bp)、相对湿度(rh)和能见度(vis). 本研究中将污染物和气象因素的观测数据处理成小时值. 边界层高度($pblh$)数据来自美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS, www.ready.arl.noaa.gov/READYamet.php). 从该同化资料中提取获得了朝阳观测站点每 3 h 的边界层高度数据, 并利用线性插值的方法获得了边界层高度的小时值.

1.2 研究方法

多元线性回归分析方法是确定因变量和多个自变量之间相互依赖的定量关系的统计分析方法^[31]. 假设因变量 Y 和 k 个自变量 $X_1, X_2, \dots, X_k$ 之间存在线性相关关系, Y 和 X 之间的函数关系可以表示为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

表 1 污染物观测仪器

Table 1 Measurement instruments used in this study

物种	仪器型号	检出限/%	精确度/%	时间分辨率/min
SO ₂	EC9850	0.5	0.5	5
NO-NO _x	EC9841	1	1	5
CO	EC9830	1	1	5
PM _{2.5} /PM ₁ /PM ₁₀	Grimm180		3	0.1

式中, β_0 为回归常数, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ 为回归系数, ε 为回归残差. 若对因变量进行 n 次观测, 其观测值为 $X_{11}, X_{12}, \dots, X_{ik}$, 其中 $i=1, 2, \dots, n$, 则 n 个观测值可以表示为:

$$\begin{cases} y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_{11} + \beta_2 X_{12} + \dots + \beta_k X_{1k} + \varepsilon_1 \\ y_2 = \beta_0 + \beta_1 X_{21} + \beta_2 X_{22} + \dots + \beta_k X_{2k} + \varepsilon_2 \\ \dots\dots\dots \\ y_n = \beta_0 + \beta_1 X_{n1} + \beta_2 X_{n2} + \dots + \beta_k X_{nk} + \varepsilon_n \end{cases}$$

式中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 为回归残差, 假定它们相互独立且服从同一正态分布 $N(0, \sigma^2)$.

多元线性回归分析就是通过回归拟合求解回归参数 β 的估计值, 建立多元线性回归方程, 并对建立的回归方程及其回归系数的显著性进行检验. 多元线性回归的数据通常需要满足以下统计假设: ①正态性: 对于固定的自变量取值, 因变量值呈正态分布; ②线性: 因变量和自变量之间线性相关; ③同方差性: 因变量的方差随自变量的水平不同而变化; ④独立性: 因变量之间相互独立, 不存在多重共线性.

本研究利用多元回归分析方法, 将污染物浓度作为因变量, 气象因素以及气象因素相关的构造变量作为自变量, 进行多元线性回归拟合. 气象因素包括风速(ws)、风向(wd)、温度(T)、露点温度(t_d)、气压(bp)、相对湿度(rh)、能见度(vis)和边界层高度(pblh), 为了建立污染物浓度和风向(wd)的线性关系, 根据不同风向污染物浓度水平, 对 wd 进行了分类, 转换为新的变量 wd_2. 设定静风条件下($ws < 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), $wd_2 = 3$; 设定非静风条件下, $11.25^\circ < wd \leq 236.25^\circ$ 时, $wd_2 = 2$; 其余情况下, $wd_2 = 1$. 由于污染物浓度和气象因素之间往往存在复杂的非线性关系, 为了满足多元线性回归模型的线性假设和同方差假设, 本研究在模型拟合时对污染物浓度进行了取对数变换和幂指数变换. 考虑到自变量和因变量的非线性关系以及气象因素对空气质量影响的滞后效应, 模型拟合时加入了气象因素相关的构造变量, 包括气象因素的对数变换项、二次项、一阶和二阶滞后项以及差分项. 多元回归拟合公式可以表示为:

$$\begin{aligned} [\lg(c_{ij})]^p = & \beta_0 + \sum_{k=1}^l \beta_{1k} X_k + \sum_{k=1}^{l'} \beta_{2k} (X_k)^2 + \\ & \sum_{k=1}^m \beta_{3k} \lg(X_k) + \sum_{k=1}^{m'} \beta_{4k} \lg(X_k, 1) + \\ & \sum_{k=1}^n \beta_{5k} \lg(X_k, 2) + \sum_{k=1}^{n'} \beta_{6k} \text{diff}(X_k, 1) + \varepsilon \end{aligned}$$

式中, c_{ij} 为第 i 种污染物浓度在第 j 小时的模拟浓度; p 为幂指数; l, l', m, m', n, n' 为进入模型的气象因素的个数; $(X_k)^2$ 为气象因素的二次项、 $\lg(X_k)$ 为气象因素的对数变换项、 $\text{diff}(X_k, 1)$ 为表征气象因素变率对污染物浓度影响的差分项、 $\lg(X_k, 1)$ 为表征 $j-1$ 时刻气象因素对污染物浓度影响的一阶滞后项、 $\lg(X_k, 2)$ 为表征 $j-2$ 时刻气象因素对污染物浓度影响的二阶滞后项. 本研究中多元线性回归模型的建立和验证采用 R 语言软件的 car 包完成.

相对权重方法是评价多元线性回归模型中自变量相对重要性的一种有应用前景的新方法. 该方法将自变量相对重要性看作每个自变量对 R^2 的贡献. 通过对所有可能子模型添加一个自变量, 计算其引起的 R^2 平均增加量获得. 本研究中利用 car 包的 relweights 函数计算自变量的相对权重.

1.3 APEC 期间空气污染控制措施

2014 年 11 月 5 ~ 11 日, APEC 会议在北京举行, 为了保障 APEC 会议期间的空气质量, 中国政府实施了一系列的空气污染控制措施^[32], 环保部制定并出台了《APEC 会议空气质量保障方案》. APEC 的空气污染控制措施执行区域覆盖了北京、天津、河北、山西、内蒙古、山东等地. 本研究根据空气污染控制措施将观测研究时间段分为: ①APEC 前期(2014-10-15 ~ 2014-11-02), 该时间段主要针对 APEC 期间可能出现的重污染天气制定了一系列的预测预警机制和应急方案, 并筹备加强 APEC 期间的空气质量监测, 交通和燃煤控制政策随着 APEC 会期的临近逐步推进; ②APEC 控制期(2014-11-02 ~ 2014-11-12), 该时间段为 APEC 空气污染控制措施全面执行时期, 政府针对工业排放、燃煤排放、机动车排放和扬尘排放制定了一系列的空气污染控制措施. 关停了北京及周边区域重污染企

业，采取了单双号限行的机动车限行政策，严格进行交通管控，安排在京中央国家机关、事业单位、社会团体于 2014 年 11 月 7 日至 12 日放假调休等；③APEC 后期（2014-11-13 ~ 2014-11-30），随着 APEC 会议的结束，关停企业和工厂逐步恢复生产，恢复正常的交通限行政策，自 2014 年 11 月 15 日以后开始进行冬季集中供暖。

2 结果与讨论

2.1 污染物浓度和气象因素时间序列

图 1 和表 2 表明，APEC 控制期的污染物浓度相比于 APEC 前期和 APEC 后期均明显下降。APEC

控制期 SO₂、NO、NO₂、NO_x、CO、PM_{2.5}、PM₁ 和 PM₁₀ 的浓度分别为 (7.5 ± 6.4)、(56.4 ± 58.3)、(45.3 ± 27.3)、(101.8 ± 75.7)、(1 349 ± 937)、(36.8 ± 27.1)、(34.6 ± 27.4) 和 (48.9 ± 29.5) μg·m⁻³，相比 APEC 前期降低 50%、50.1%、37.4%、45.1%、22.2%、62.3%、59.4% 和 66.2%，相比 APEC 后期降低 53.1%、65.9%、42.1%、58.2%、53.3%、69.5%、65.8% 和 79%。气象因素在 APEC 前期、控制期和后期也表现出明显的变化(表 2)。气象条件和控制措施的实施导致了污染物浓度的明显变化，在评估 APEC 期间空气污染控制政策的效果时要考虑气象因素的影响。

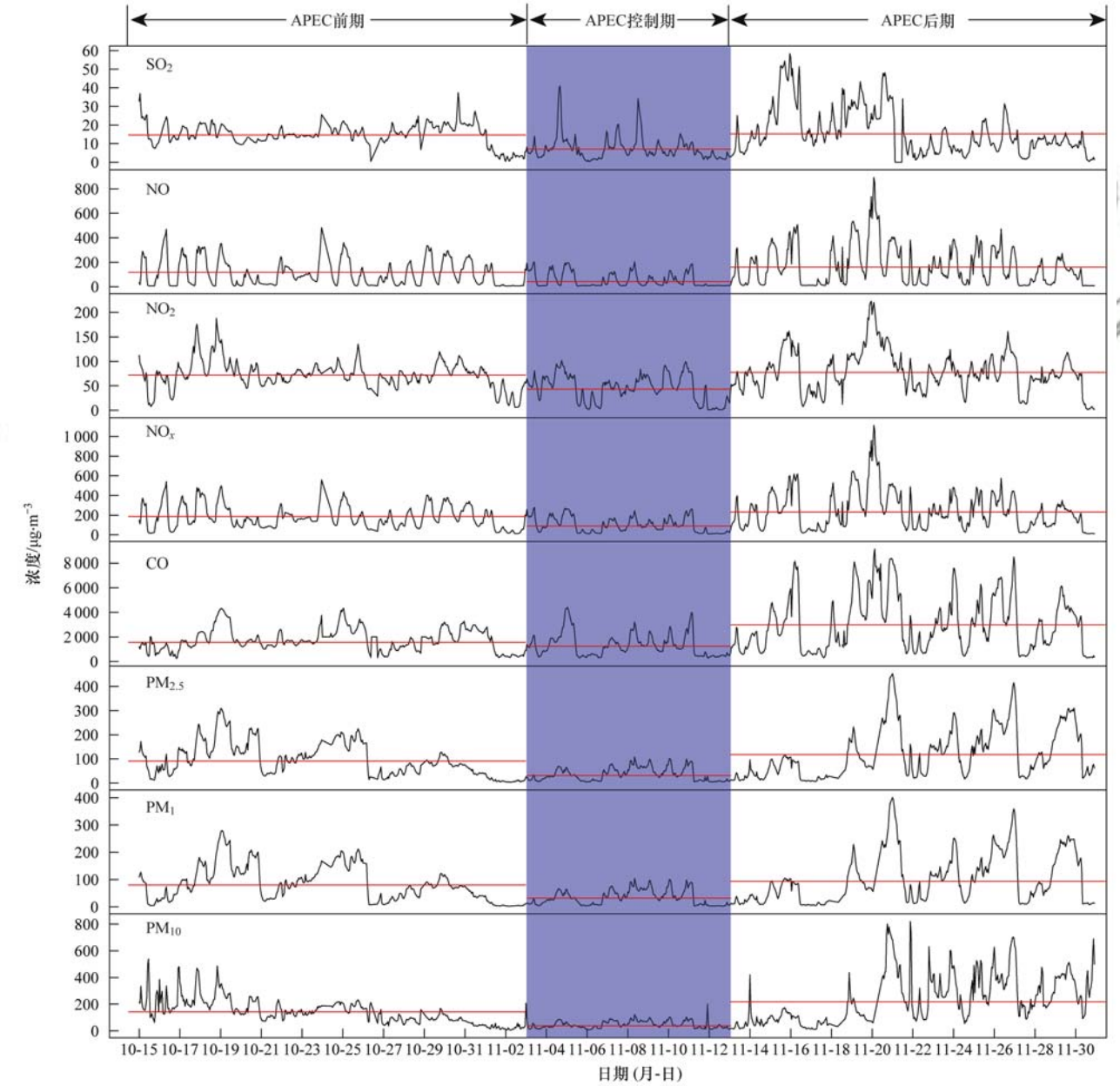


图 1 污染物浓度时间序列
Fig. 1 Time series of air pollutants

2.2 APEC 期间的天气条件分析

利用韩国气象厅的天气形势资料 (<http://222.195.136.24/forecast.html>)，对观测期间的天气形势进行了对比定性分析。APEC 前期、控制期和后

期的天气形势如表 3 所示. 从中可见, 受天气系统交替的影响, 北京地区有利于污染物扩散和不利于污染物扩散的天气条件交替出现, 污染物浓度时间序列也相应地表现出“锯齿形”的变化. 在 APEC 控制期, 11 月 4 日和 11 月 7~10 日出现了两次不利于污染物扩散的天气过程. 在污染控制政策评估时, 可以选取相似气象条件时间段的污染物浓度观测数据进行比对, 去除气象条件的影响, 评估空气污染措施的效果. 比较观测期间的天气形势图发现, APEC 前期 10 月 28~31 日和 APEC 控制期 11 月 7~10 日的气象条件较为相似, 500 hPa 主要受西北偏西和西南气流控制, 地面主要处于鞍型场或者受弱高压控制. 利

用这两个时间段的数据去除气象影响, 可以估算控制措施使 APEC 控制期 SO₂、NO、NO₂、NO_x、CO、PM_{2.5}、PM₁ 和 PM₁₀ 的浓度分别降低了 52.8%、57.0%、29.4%、46.0%、25.0%、19.6%、19.2% 和 22.9%, 和王占山等^[24]的结果有一定差别, 可能是选取研究时间段不同导致. 这种定性分析方法, 一方面在选择相似气象条件时间段时多根据主观判断, 很难找到完全等同的气象条件用于比较, 另外一方面在短时间段内可供比较的数据十分有限, 因此存在较大的不确定性和局限性. 有必要采用更为客观的方法定量气象条件对污染物浓度的影响, 实现空气污染控制政策的准确评估.

表 2 APEC 前期、控制期、后期污染浓度和气象因素的变化¹⁾

Table 2 Changes of pollutant concentrations and meteorological factors for the period before APEC, during APEC and after APEC						
项目	观测期间	APEC 前期	APEC 控制期	APEC 后期	C ₁ /%	C ₂ /%
SO ₂ /μg·m ⁻³	13.8±9.6	15±5.9	7.5±6.4	16±12.4	-50	-53.1
NO/μg·m ⁻³	121±130.7	113.1±109.4	56.4±58.3	165.2±160.6	-50.1	-65.9
NO ₂ /μg·m ⁻³	68.9±35.9	72.4±28	45.3±27.3	78.3±41.4	-37.4	-42.1
NO _x /μg·m ⁻³	189.9±154.6	185.5±120.7	101.8±75.7	243.5±191.6	-45.1	-58.2
CO/μg·m ⁻³	2 175±1 720	1 769±916	1 349±937	3 068±2 240	-22.2	-53.3
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	93.6±84.5	97.6±69	36.8±27.1	120.8±103.2	-62.3	-69.5
PM ₁ /μg·m ⁻³	80.6±75.3	85.3±64.7	34.6±27.4	101.3±91.3	-59.4	-65.8
PM ₁₀ /μg·m ⁻³	158.1±145.3	144.5±91.3	48.9±29.5	233.1±182.9	-66.2	-79
风速/m·s ⁻¹	1.8±1.3	1.7±1.3	2±1.6	1.7±1.2	17.6	17.6
温度/℃	8.9±5.4	13.2±3.8	8.1±4.8	4.9±3.5	-38.6	65.3
露点温度/℃	-1.6±5.5	3.5±7.5	-5.2±5.9	-5±6.6	-248.6	4
相对湿度/%	54.9±27	58.2±25.4	45.8±26.3	56.4±27.9	-21.3	-18.8
气压/hPa	1 022.4±5.4	1 020±5.6	1 023.6±5.5	1 024.2±4.1	0.4	-0.1
边界层高度/m	329.4±414.7	352.4±417	397.9±459.9	267.1±376.6	12.9	49

1) C₁ = (APEC 控制期 - APEC 前期)/APEC 前期; C₂ = (APEC 控制期 - APEC 后期)/APEC 后期

表 3 观测期间气象条件

Table 3 Meteorological conditions during the observation period		
项目	有利气象条件	不利气象条件
天气形势	500 hPa 主要受西北气流控制; 地面主要受高压控制	500 hPa 主要受平直西风气流或西北偏西气流控制, 有时受西南气流影响; 地面主要处于高压底部、弱高压前部、鞍型场或受弱高压、均压场控制
时间段	10 月 15~17 日, 21~22 日, 26~27 日; 11 月 1~3 日, 5~6 日, 11~14 日, 17~18 日, 21~24 日, 30 日	10 月 18~20 日, 23~25 日, 28~31 日; 11 月 4 日, 11 月 7~10 日, 15~16 日, 19~20 日, 25~19 日

2.3 控制措施和气象条件对 APEC 期间北京空气质量影响

2.3.1 模型描述

采用非控制期 2014-10-15~2014-11-02 和 2014-11-13~2014-11-15 时间段的数据进行多元线性回归拟合. 由于该时间段没有执行严格的控制措施且不受冬季集中供暖排放的影响, 假定该时间段的污染物排放保持不变, 污染物浓度变化只受气象因素的影响. 利用这部分数据建立基于气象因素预测污染物浓度的回归模型. 模型采用双向逐步回归的方法进行自变量的筛选, 并对进入模型的自变量

进行了显著性检验. 经过模型验证和自变量选择得到污染物的多元线性拟合公式列于表 4.

2.3.2 模型验证和评价

图 2 是污染物观测浓度和利用表 4 中的模型拟合公式模拟获得的污染物浓度的时间序列, 结果表明模型对于污染物浓度的模拟预测结果较为理想. 污染物观测浓度和模拟浓度的变化趋势较为一致, 除了对于一些极大值存在一定程度的低估, 模型模拟浓度能够较好地反映实际大气污染物的浓度水平. 为了进一步利用该模型分离气象因素和控制措施的影响, 进而评估 APEC 期间污染控制政策的有

表 4 污染物浓度多元线性回归模型拟合公式
Table 4 Multiple linear regression model fitting formula for pollutant concentrations

项目	模型拟合公式
SO ₂	$[lg(SO_2)]^2 = 41.6lg(bp) + 9.0 \times 10^{-2}lag(wd_2,1) - 8.4 \times 10^{-2}lag(ws,2) - 3.4 \times 10^{-5}lag(vis,2) + 2.2 \times 10^{-4}lag(pblh,2) - 1.9 \times 10^{-3}(t_d^2) + 9.5 \times 10^{-2}diff(T,1) + 2.4 \times 10^{-2}diff(rh,1) - 123.7$
NO	$[lg(NO)]^2 = -1.5lg(pblh) - 2.3 \times 10^{-1}lag(ws,2) - 2.3 \times 10^{-3}(t_d^2) - 9.8 \times 10^{-2}T - 5.1 \times 10^{-5}vis + 3.4 \times 10^{-1}diff(T,1) + 9.1$
NO ₂	$[lg(NO_2)]^3 = 4.2 \times 10^{-1}lg(vis) + 112.3lg(bp) + 5.1 \times 10^{-1}lg(pblh) - 5.7 \times 10^{-1}lag(ws,1) - 1.2 \times 10^{-3}lag(pblh,2) + 1.5 \times 10^{-1}lag(T,2) - 1.1 \times 10^{-4}vis - 1.9 \times 10^{-1}diff(t_d,1) - 333.7$
NO _x	$[lg(NO_x)]^3 = -1.1lg(pblh) + 1.6 \times 10^{-1}lag(wd_2,1) - 2.8 \times 10^{-1}lag(ws,2) - 5.1 \times 10^{-2}lag(T,2) - 5.0 \times 10^{-5}lag(vis,2) + 8.5$
CO	$[CO]^{1/4} = 9.0 \times 10^{-2}lag(wd_2,1) + 7.2 \times 10^{-2}lag(wd_2,2) - 2.3 \times 10^{-5}vis + 1.2$
PM _{2.5}	$[lg(PM_{2.5})]^2 = -230.5lg(bp) + 3.7 \times 10^{-1}lag(wd_2,1) - 1.9 \times 10^{-1}lag(ws,2) + 2.7 \times 10^{-1}lag(wd_2,2) - 5.9 \times 10^{-5}lag(vis,2) - 2.6 \times 10^{-5}diff(vis) + 696.5$
PM ₁	$[lg(PM_1)]^2 = -188.2lg(bp) + 2.5 \times 10^{-1}lag(wd_2,1) - 2.9 \times 10^{-1}lag(ws,2) - 6.4 \times 10^{-5}lag(vis,2) + 6.4 \times 10^{-1}wd_2 + 3.5 \times 10^{-2}T + 3.6 \times 10^{-1}diff(wd_2,1) + 1.2 \times 10^{-1}diff(t_d,1) + 568.5$
PM ₁₀	$[lg(PM_{10})]^2 = -187.7lg10(bp) - 6.9 \times 10^{-4}lag(pblh,1) + 3.8^2(ws^2) + 9.2 \times 0^{-1}wd_2 + 5.3 \times 10^{-2}T - 6.7 \times 10^{-5}vis + 4.4 \times 10^{-1}diff(wd_2,1) + 1.7 \times 10^{-1}rh + 568.2$

效性,本研究对该模型进行了严格的模型验证和模拟效果评价.

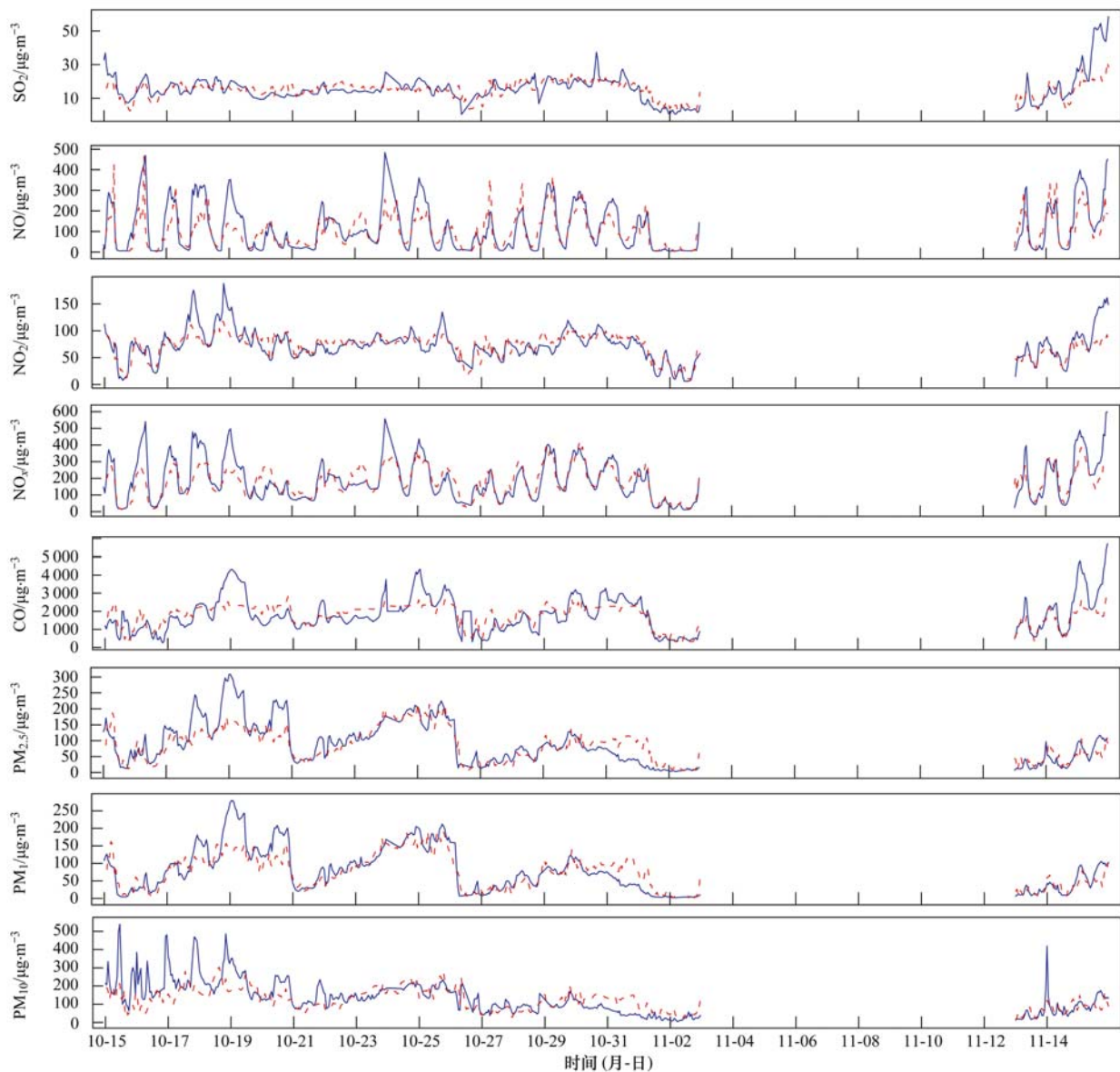
本研究主要对模型进行了正态性、线性、同方差性和独立性的统计假设检验,并利用决定系数(R^2)、校正复相关系数(Adj. R^2)等模型评价参数和交叉验证的方法进行了模型模拟效果的评估.从污染物多元线性回归模型残差正态性 $Q-Q$ 检验(图 3)可以看出,模型拟合残差的正态性检验的数据点呈直线分布且和第一象限平分线基本吻合,数据点大多数落在 95% 的置信区间范围内,说明模型满足正态性假设.图 4 以 $PM_{2.5}$ 为例给出了模型线性假设检验,可以看出,在对因变量(污染物浓度)和自变量(气象因素及其构造变量)进行了变换后,自变量和因变量之间存在明显的线性关系.在模型构建过程中,经过 p 次幂(Y^p)变换,使非恒定方差变得平稳.通过非恒定方差计分检测(NCV-test),发现污染物多元线性回归模型的计分检验不显著($P > 0.05$),说明模型满足方差不变假设(表 5).对于独立性,通过方差膨胀因子(VIF)检验自变量的多重共线性,一般如果 $VIF < 4$,认为因变量之间不存在多重共线性.

从表 5 可以看出,污染物拟合模型的方差膨胀因子均小于 4,说明模型满足独立性假设.

决定系数(R^2)、校正复相关系数(Adj. R^2)、 C_p 统计量、残差平方和(RSS)、赤池系数(AIC)和贝叶斯系数(BIC)是多元线性回归模型变量选择、模型优化和模型评价的重要参数. R^2 、Adj. R^2 越接近 1,回归方程的拟合效果越好;对于 C_p 统计量, p 为所选模型的变量个数,一般对应点(p, C_p)最接近第一象限角平分线,且 C_p 值小的模型具有较好的模拟能力;在回归拟合模型选择时,一般选择 RSS 值小, AIC 或者 BIC 值小的模型.基于上述统计量采用双向逐步筛选法对模型变量进行筛选,同时采用 F -检验和 t -检验的方法,保证进入模型的所有变量具有统计学意义.从表 5 可以看出, SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 的拟合模型的 R^2 在 0.494 ~ 0.783 之间,说明模型对于污染物浓度具有较好的预测能力. C_p 、RSS、AIC 和 BIC 值也满足上述选择标准.此外,将污染物模型拟合数据随机分为 10 组进行交叉验证(CV-test),结果表明,交叉验证时模型的 R^2 变化很小(< 0.025),说明污染物拟合模型具有很好的稳定性.

表 5 多元线性回归模型验证和评价
Table 5 Verification and evaluation of multiple linear regression model

项目	NCV-test	VIF	R^2	Adj. R^2	C_p	RSS	AIC	BIC	CV-test
SO ₂	0.69	1.1 ~ 2.9	0.553	0.546	9	64.8	411.3	-367.3	0.009
NO	0.8	1.0 ~ 2.7	0.67	0.666	7	659.4	1 627.6	-539.4	0.024
NO ₂	0.73	1.2 ~ 1.8	0.672	0.666	9	618.4	1 597.8	-530.1	0.01
NO _x	0.42	1.2 ~ 1.8	0.736	0.733	6	290.1	1 193.7	-662.5	0.012
CO	0.42	1.2 ~ 1.4	0.52	0.517	4	34.6	71.3	-360.8	0.005
PM _{2.5}	0.7	1.1 ~ 2.5	0.71	0.707	7	304.8	1 221.8	-607.3	0.011
PM ₁	0.67	1.1 ~ 2.7	0.783	0.78	9	256.8	1 135.5	-748.3	0.01
PM ₁₀	0.06	1.5 ~ 3.7	0.494	0.486	9	464.8	1 449.3	-302.4	0.02



蓝色实线:观测浓度,红色虚线:模型模拟浓度

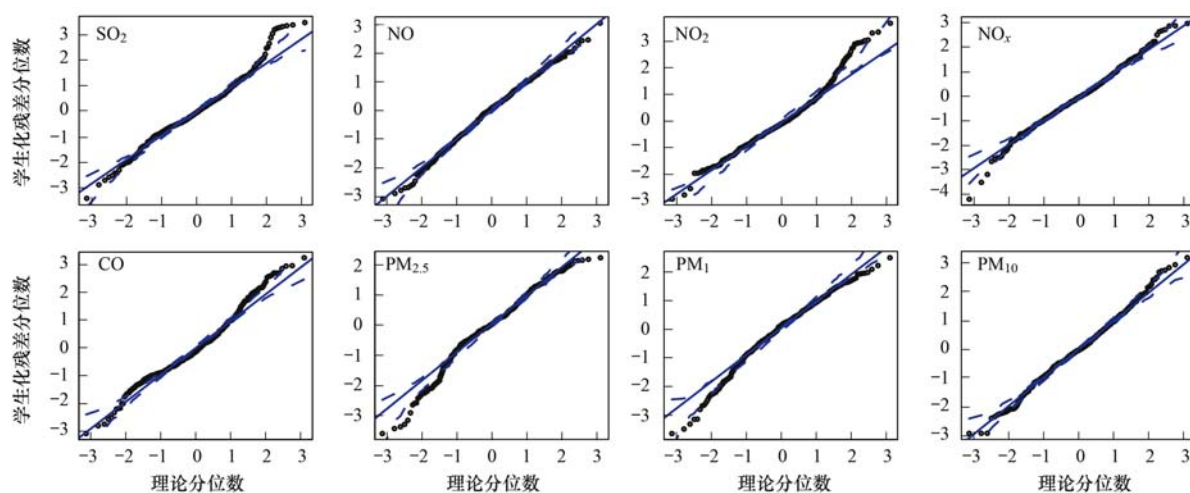
图2 污染物观测浓度和多元线性回归模型模拟污染物浓度时间序列

Fig. 2 Time series of observed pollutant concentrations and simulated pollutant concentrations by multiple linear regression model

2.3.3 APEC 期间大气污染政策评估

如上所述,经过模型验证和模型效果评估,可以发现利用多元线性回归方法构建的只基于气象因素的模型能够较好模拟预测污染物的浓度.因此可以利用该模型对 APEC 控制期的污染物浓度进行预测模拟,获得的模型模拟值为 APEC 控制期只考虑气象因素时的污染物浓度,观测浓度和模拟浓度的差值认为来自于控制措施的减排贡献.由此,可以对气象因素和控制措施的影响进行分离和定量,评估 APEC 期间的污染控制政策.表 6 给出了利用多元线性回归模型对 APEC 期间污染控制措施评估的结果,可以看出,模型模拟值对 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 浓度分别低估了 3.8%、11.6%、1.6%、5.8%、3.3%、7.4%、

5.5% 和 1.7%,除了 NO ,污染物模拟的不确定度在 10% 以内,进一步说明模型对大多数污染物浓度预测效果较为理想.利用多元线性回归模型只基于气象因素估算 APEC 期间 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 浓度分别为 (14.5 ± 6.8) 、 (121.2 ± 122.9) 、 (55.7 ± 22) 、 (171.5 ± 119) 、 (1400 ± 710) 、 (56.4 ± 45.2) 、 (48.6 ± 37.1) 和 $(82.1 \pm 49) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,说明在假定不采取空气污染控制措施的情况下,APEC 期间的污染物浓度会大幅上升.由此估算控制措施使得 APEC 控制期 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 浓度分别降低 48.3%、53.5%、18.7%、40.6%、3.6%、34.8%、28.8% 和 40.6%,气象因素使 APEC 控制期 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 浓



黑色空心圆点:模型拟合残差, 蓝色实线:残差线性拟合线, 蓝色虚线:线性拟合 95% 置信区间

图 3 多元线性回归模型残差正态性 $Q-Q$ 检验

Fig. 3 Normality $Q-Q$ test diagram of multiple linear regression model

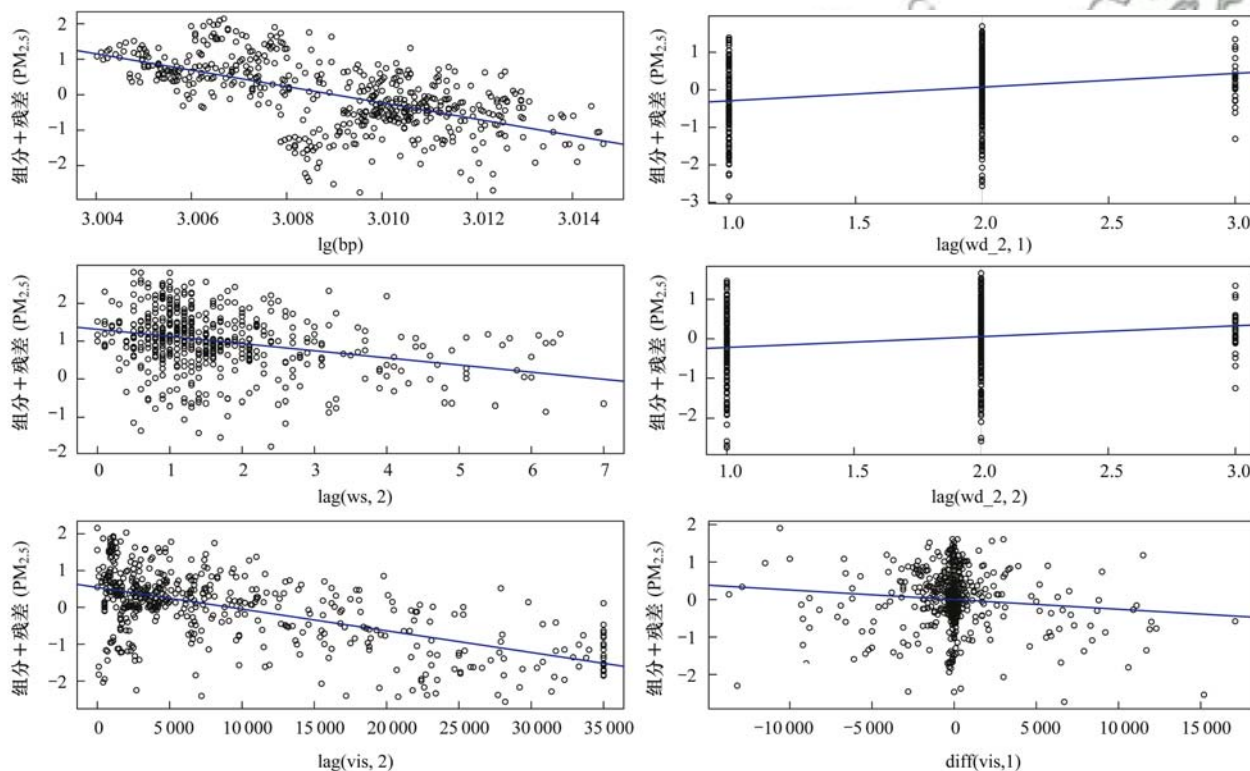


图 4 $PM_{2.5}$ 多元线性回归模型线性假设检验图

Fig. 4 Linear hypothesis test diagram of multiple linear regression model for $PM_{2.5}$

度分别降低 1.7%、-2.8%、18.7%、4.5%、18.6%、27.5%、30.6% 和 35.6%。本研究结果与 Liang 等^[29] 利用北大站点观测数据, 采用广义线性回归方法估算的结果类似 (APEC 期间控制措施使 SO_2 、 NO_x 和 $PM_{2.5}$ 分别下降了 50%、56% 和 28%)。污染物的来源和大气存在寿命的差异导致了气象条件和控制措施对于不同污染物减排效果的差异。对于气态污染物 SO_2 、 NO_x 和 CO 主要是燃烧源产生, 但是其来源不同。 SO_2 主要来源于工业锅炉燃煤, NO_x 主要来源于机动车尾气和工业燃煤, CO 主要

来自机动车尾气和生物质燃烧过程。CO 的大气存在时间为 20 ~ 30 d^[12], 较长的大气存在时间造成了 CO 受背景浓度累积的影响较大, 故控制措施对 CO 的减排贡献有限; 而 NO_x 和 SO_2 大气存在时间仅为数小时和 1 ~ 2 d^[12], 较短的大气存在时间使得污染物受气象条件影响有限。颗粒物的来源与气态物种不同, 除了一次排放, 二次转化对颗粒物的有着重要贡献。控制措施直接影响颗粒物的一次排放, 并通过影响颗粒物前体物浓度间接影响二次转化过程, 而气象因素主要影响颗粒物的

二次转化过程. PM_{10} 由于其粒径与可见光的波长范围接近, 具有最大的质量消光效率, 是霾天气形成的关键因素^[33]. 本研究观测发现, $\rho(PM_{10})/\rho(PM_{2.5})$ 在 APEC 前期、APEC 控制和 APEC 后期分别为 0.87、0.94 和 0.84, $\rho(PM_{2.5})/\rho(PM_{10})$ 在 APEC 前期、APEC 控制和 APEC 后期分别为 0.68、0.75 和 0.52, 在 APEC 控制期细颗粒和亚

微米细颗粒物的质量浓度占比上升(表 2). 多元线性回归模型结果显示, 控制措施对 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的贡献率分别为 28.8%、34.8% 和 40.6% (表 6). 上述结果说明针对交通、扬尘等粗颗粒物排放控制措施取得了明显的效果, 而对亚微米细颗粒物和细颗粒物的控制措施在未来的控制政策中仍然需要重点关注.

表 6 APEC 期间空气污染控制政策评估¹⁾

Table 6 Evaluation of air pollution control measures during APEC

项目	观测值 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	模拟值 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	不确定度 /%	APEC 控制期观测 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	APEC 控制期模拟 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	差异比例 /%	气象贡献 /%
SO ₂	15.7 ± 8.3	15.1 ± 5	-3.8	7.5 ± 6.4	14.5 ± 6.8	-48.3	-1.7
NO	118.6 ± 112.7	104.8 ± 78.7	-11.6	56.4 ± 58.3	121.2 ± 122.9	-53.5	2.8
NO ₂	72.9 ± 29.2	71.7 ± 21.5	-1.6	45.3 ± 27.3	55.7 ± 22	-18.7	-18.7
NO _x	191.5 ± 125.8	180.4 ± 91.6	-5.8	101.8 ± 75.7	171.5 ± 119	-40.6	-4.5
CO	1 820 ± 990	1 760 ± 610	-3.3	1 350 ± 940	1 400 ± 710	-3.6	-18.6
PM _{2.5}	90.8 ± 67.6	84.1 ± 51.8	-7.4	36.8 ± 27.1	56.4 ± 45.2	-34.8	-27.5
PM ₁₀	79.3 ± 63.1	74.9 ± 48.6	-5.5	34.6 ± 27.4	48.6 ± 37.1	-28.8	-30.6
PM ₁₀	135.6 ± 90.5	123.3 ± 58.6	-1.7	48.8 ± 29.5	82.1 ± 49	-40.6	-35.6

1) 观测值和模拟值利用 2014-10-15 ~ 2014-11-02 和 2014-11-13 ~ 2014-11-15 时间段数据计算获得; 不确定度 = (模拟值 - 观测值)/观测值; 差异比例 = (APEC 控制期观测 - APEC 控制期模拟)/APEC 控制期模拟; 气象贡献 = C_1 (表 2) - 差异比例

通过相对权重的方法计算了自变量对模型方差的解释率, 评估气象因素对污染物浓度影响的贡献, 认为对模型方差的解释率越高的自变量对污染物浓度影响的贡献越大. 以 $PM_{2.5}$ 为例, 自变量 $\text{lag}(\text{vis}, 2)$ 、 $\text{lg}(\text{bp})$ 、 $\text{lag}(\text{ws}, 2)$ 、 $\text{lag}(\text{wd}_2, 1)$ 、 $\text{lag}(\text{wd}_2, 2)$ 和 d_{vis} 对 R^2 (0.71) 的解释率分别为 35%、32%、16%、9%、7% 和 1%. 本研究中, 与 ws 相关的因变量可以一定程度表征风对污染物扩散和清除作用, 而与 wd_2 相关的因变量可以一定程度表征区域传输的贡献. 从图 5 可以看出, 对于 SO_2 、 CO 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 PM_{10} , 与 wd_2 相关

的因变量进入了模型, 并对模型方差解释有一定贡献, 说明对这些大气存在时间较长的污染物而言, 外来区域传输对北京地区污染物浓度有重要贡献. 而对于大气存在时间较短的氮氧化物而言, ws 对模型方差解释的贡献率超过 20%, 说明风对氮氧化物存在明显的扩散清除作用, 推测北京的氮氧化物排放对周边区域有重要贡献. 这一结果与 Li 等^[12] 利用北京榆堡站点对北京地区污染物区域输送的研究结果类似. 此外, 能见度、边界层高度和温度等气象因素对污染物的浓度也有重要影响.

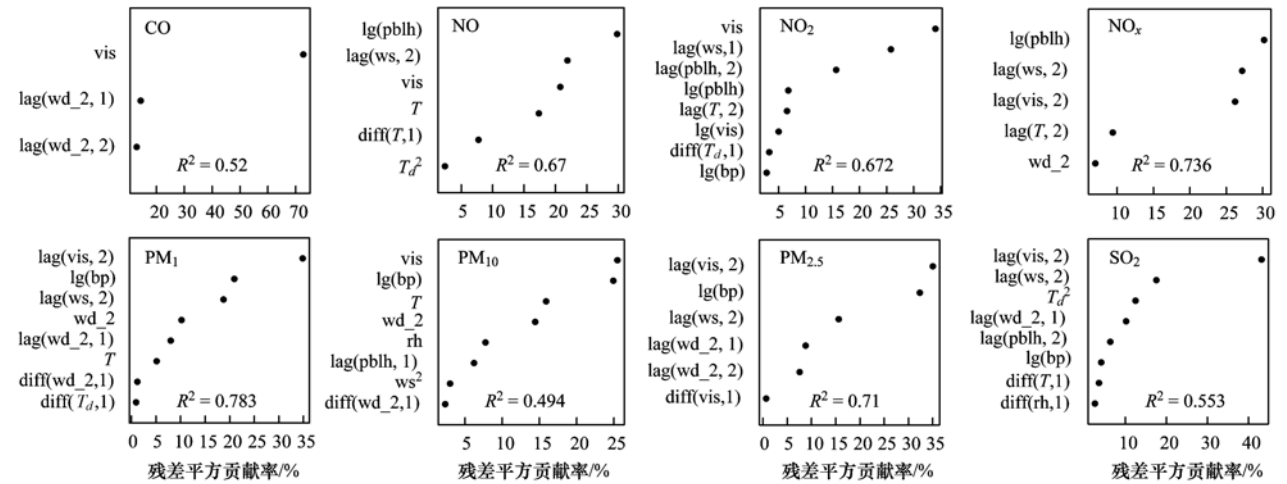


图 5 气象因素对污染物浓度影响贡献评估

Fig. 5 Contribution of meteorological factors to pollutant concentrations

3 结论

(1) 利用 APEC 会议期间及前后(2014-10-15 ~ 2014-11-30)在北京朝阳大气成分观测站点对 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 观测数据研究发现, APEC 控制期污染物浓度相比 APEC 前期和后期显著降低, 表明气象条件和污染控制措施共同作用使 APEC 期间空气质量明显提升。

(2) 利用 500 hPa 和地面天气形势, 选取 APEC 前期和 APEC 控制期气象条件较为相似两个时间段的观测数据进行比较, 去除气象影响, 估算控制措施使 APEC 控制期 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 的浓度分别降低了 52.8%、57.0%、29.4%、46.0%、25.0%、19.6%、19.2% 和 22.9%。鉴于该定性比较方法可供选取数据量少和不确定性高的局限性, 进一步利用多元线性回归的方法, 建立了基于气象因素预测污染物浓度的回归拟合模型。模型验证表明模型可以通过假设检验, 模型的决定系数 R^2 在 0.494 ~ 0.783 之间, 对污染物浓度预测能力较为理想。利用该拟合模型对 APEC 控制期的污染控制政策进行评估, 研究表明控制措施使得 APEC 控制期 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 浓度分别降低 48.3%、53.5%、18.7%、40.6%、3.6%、34.8%、28.8% 和 40.6%, 气象因素使 APEC 控制期污染物 SO_2 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_1 和 PM_{10} 浓度分别降低 1.7%、-2.8%、18.7%、4.5%、18.6%、27.5%、30.6% 和 35.6%。研究通过相对权重的方法评估了气象因素对污染物浓度影响的贡献, 表明影响不同污染物浓度的决定性气象因素不同。

(3) 在排放不变的情况下, 基于气象因素建立的多元线性回归模型可以较好地模拟污染物浓度。该方法经过变量的对数和幂指数变换, 可以考虑污染物浓度和气象因素之间的非线性关系, 同时将对污染物浓度有影响的构造变量加入模型, 可以充分考虑变量之间的非线性关系和滞后效应。同时利用相对权重的方法还可以分析气象因素对污染物浓度影响的相对重要性。该方法可以用于气象因素影响评价, 空气污染政策的评估, 以及空气污染质量预报。

参考文献:

- [1] Parrish D D, Zhu T. Clean air for megacities[J]. *Science*, 2009, **326**(5953): 674-675.
- [2] Liu J, Mauzerall D L, Chen Q, *et al.* Air pollutant emissions from Chinese households: a major and underappreciated ambient pollution source[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(28): 7756-7761.
- [3] Zhu Y, Zhang J P, Wang J X, *et al.* Distribution and sources of air pollutants in the North China Plain based on on-road mobile measurements[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(19): 12551-12565.
- [4] Dai T, Schutgens N A J, Goto D, *et al.* Improvement of aerosol optical properties modeling over Eastern Asia with MODIS AOD assimilation in a global non-hydrostatic icosahedral aerosol transport model[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **195**: 319-329.
- [5] Huang Q, Wang T J, Chen P L, *et al.* Impacts of emission reduction and meteorological conditions on air quality improvement during the 2014 Youth Olympic Games in Nanjing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(21): 13457-13471.
- [6] Li K, Li J L, Wang W G, *et al.* Evaluating the effectiveness of joint emission control policies on the reduction of ambient VOCs: implications from observation during the 2014 APEC summit in suburban Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **164**: 117-127.
- [7] Li X, Qiao Y B, Zhu J M, *et al.* The "APEC blue" endeavor: causal effects of air pollution regulation on air quality in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **168**: 1381-1388.
- [8] Wang M, Zhu T, Zhang J P, *et al.* Using a mobile laboratory to characterize the distribution and transport of sulfur dioxide in and around Beijing[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(22): 11631-11645.
- [9] Wang G, Cheng S Y, Wei W, *et al.* Characteristics and emission-reduction measures evaluation of $\text{PM}_{2.5}$ during the two major events: APEC and Parade[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **595**: 81-92.
- [10] Xu Z J, Shan W, Qi T, *et al.* Characteristics of individual particles in Beijing before, during and after the 2014 APEC meeting[J]. *Atmospheric Research*, 2018, **203**: 254-260.
- [11] Huang W, Fang D Q, Shang J, *et al.* Relative impact of short-term emissions controls on gas and particle-phase oxidative potential during the 2015 China Victory Day Parade in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **183**: 49-56.
- [12] Li Y R, Ye C X, Liu J, *et al.* Observation of regional air pollutant transport between the megacity Beijing and the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(22): 14265-14283.
- [13] Zhen Q, Deng Y, Wang Y Q, *et al.* Meteorological factors had more impact on airborne bacterial communities than air pollutants[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **601-602**: 703-712.
- [14] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 66-73.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Improvement of air quality during APEC in Beijing in 2014[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 66-73.
- [15] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013 ~ 2014 年北京大气重污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 27-35.
Li L J, Wang Z S, Zhang D W, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013 ~ 2014[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 27-35.
- [16] 王媛林, 王哲, 陈学舜, 等. 珠三角秋季典型气象条件对空气污染过程的影响分析[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(9): 3229-3239.
Wang Y L, Wang Z, Chen X S, *et al.* Impact of typical meteorological conditions on air pollution over Pearl River Delta

- in autumn[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(9): 3229-3239.
- [17] Gao M, Liu Z R, Wang Y S, *et al.* Distinguishing the roles of meteorology, emission control measures, regional transport, and co-benefits of reduced aerosol feedbacks in "APEC Blue" [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **167**: 476-486.
- [18] Liu H L, He J, Guo J P, *et al.* The blue skies in Beijing during APEC 2014: a quantitative assessment of emission control efficiency and meteorological influence [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **167**: 235-244.
- [19] 韩旸, 吴宇峰, 董海燕, 等. APEC 期间京津冀及周边城市 PM_{2.5} 中化学组分特征[J]. *环境科学与技术*, 2017, **40**(8): 134-138, 158.
- Han Y, Wu Y F, Dong H Y, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} and its chemical composition during the Asia-Pacific Economic Cooperation Summit in Beijing-Tianjin-Hebei region and surrounding cities[J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, **40**(8): 134-138, 158.
- [20] 聂滕, 李璇, 王占山, 等. APEC 期间北京市 PM_{2.5} 时空分布与过程分析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(2): 349-355.
- Nie T, Li X, Wang Z S, *et al.* Spatial and temporal distribution and process analysis of PM_{2.5} pollution over Beijing during APEC [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(2): 349-355.
- [21] 王浩, 李轶, 高健, 等. APEC 会议期间石家庄市大气污染特征及空气质量保障措施效果评估[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(2): 164-174.
- Wang H, Li Y, Gao J, *et al.* Characteristics of air pollution and evaluation of the effects of air quality assurance measures in Shijiazhuang city during the 2014 APEC meeting[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(2): 164-174.
- [22] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2014 年 APEC 前后北京城区 PM_{2.5} 中水溶性离子特征分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4325-4330.
- Yang D Y, Liu B X, Zhang D W, *et al.* Characterization of water-soluble ions in PM_{2.5} of Beijing During 2014 APEC [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4325-4330.
- [23] 张东旭, 樊守彬, 林雅妮, 等. APEC 会议期间北京市交通扬尘控制效果研究[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 684-689.
- Zhang D X, Fan S B, Lin Y N, *et al.* Evaluation of the effectiveness of road fugitive dust control measures during the APEC conference in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 684-689.
- [24] 王占山, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 APEC 会议期间北京市空气质量分析[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(2): 675-683.
- Wang Z S, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Analysis on air quality in Beijing during the 2014 APEC conference [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(2): 675-683.
- [25] 张礁石, 陆亦怀, 桂华侨, 等. APEC 会议前后北京地区 PM_{2.5} 污染特征及气象影响因素[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(5): 646-653.
- Zhang J S, Lu Y H, Gui H Q, *et al.* Variations of PM_{2.5} pollution and related meteorological factors before and after the 2014 APEC conference in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(5): 646-653.
- [26] 张裕芬, 朱坦, 冯银厂, 等. 大气污染控制有效性的评估模型及应用[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(3): 225-230.
- Zhang Y F, Zhu T, Feng Y C, *et al.* Evaluation model for the effectiveness of air pollution control and its application [J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(3): 225-230.
- [27] Liu Y, He K B, Li S S, *et al.* A statistical model to evaluate the effectiveness of PM_{2.5} emissions control during the Beijing 2008 Olympic Games[J]. *Environment International*, 2012, **44**: 100-105.
- [28] Nguyen T T N, Bui H Q, Pham H V, *et al.* Particulate matter concentration mapping from MODIS satellite data: a Vietnamese case study[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, **10**(9): 095016.
- [29] Liang P F, Zhu T, Fang Y H, *et al.* The role of meteorological conditions and pollution control strategies in reducing air pollution in Beijing during APEC 2014 and Victory Parade 2015 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(22): 13921-13940.
- [30] Diaz-Robles L A, Ortega J C, Fu J S, *et al.* A hybrid ARIMA and artificial neural networks model to forecast particulate matter in urban areas: The case of Temuco, Chile [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(35): 8331-8340.
- [31] Kabacoff R I. *R in action: data analysis and graphics with R* [M]. Shelter Island: Manning, 2011.
- [32] 樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 等. APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 74-81.
- Fan S B, Tian L D, Zhang D X, *et al.* Evaluation on the effectiveness of vehicle exhaust emission control measures during the APEC conference in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 74-81.
- [33] 李令军, 王英, 李金香, 等. 北京市冬春季大气颗粒物的粒径分布及消光作用[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(2): 90-94.
- Li L J, Wang Y, Li J X, *et al.* The characteristic of atmospheric particle size distribution and their light extinction effect in Beijing during winter and spring time [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(2): 90-94.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)