

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

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

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单	梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)
上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征	高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)
京津冀地区主要排放源减排对 PM _{2.5} 污染改善贡献评估	吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)
北京冬季 PM _{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析	乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)
2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析	路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)
利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染来源	刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)
南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析	迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)
喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性	张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)
生物滴滤塔净化含硫混合废气	叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)
西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析	房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)
城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力	秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)
三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征	王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)
隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素	赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)
白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析	王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)
唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价	吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)
三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征	邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)
电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估	余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)
九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险	林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)
厦门筼筮湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价	杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)
龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价	李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)
碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村高铁锰地下水效能与机制	孙楠, 湛燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)
高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势	张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)
预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验	杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)
Cu-Al ₂ O ₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物	徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)
过硫酸钾氧化去除 Cu(CN) ₂ 中的氰污染物	王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)
微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能	全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)
桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征	李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)
基于 A ² /O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)
污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)
全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性	齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)
饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响	李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曙 (1109)
快速启动厌氧氨氧化工艺	闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)
一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式	完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)
侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响	马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)
厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究	陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)
有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响	戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)
过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制	白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)
不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果	董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)
全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤	杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)
纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应	衣俊, 程金平 (1173)
血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)
纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)
利用 <i>in vitro</i> 方法研究不同铁矿对土壤砷生物给性的影响	钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)
不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制	温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)
施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变	刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)
施氮和水管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究	王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)
模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响	陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)
土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO ₂ 浓度和温度升高的响应	刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)
岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)
板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响	宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)
酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响	姜继超, 尧倩 (1272)
《环境科学》征稿简则 (1092)	
《环境科学》征订启事 (1158)	
信息 (1166, 1261, 1271)	

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估

吴文景¹, 常兴¹, 邢佳¹, 王书肖^{1,2*}, 郝吉明^{1,2}

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

摘要: 研究选取 2012 年 1 月和 7 月作为冬夏两季代表时段, 利用 CMAQ/2D-VBS 模型分析了冬夏两季京津冀地区主要排放源减排 30% 对改善区域 PM_{2.5} 污染的效果。结果表明, 工业源对 PM_{2.5} 污染的贡献最大, 其次是民用源, 但工业源单位减排量贡献低于民用源, 交通源和电厂源的整体贡献和单位减排量贡献均较小。工业部门内贡献最大的为钢铁冶金行业, 其次是水泥、工业锅炉、炼焦、石灰砖瓦和化工行业。与各部门各物种排放量的比较反映出各排放源贡献大小与其一次 PM_{2.5} 排放水平高度相关。因京津冀地区冬季 NO_x 减排对 PM_{2.5} 形成的促进作用, 以及冬季较弱的大气垂直扩散作用, 各排放源夏季减排比冬季普遍更有效, 交通源、电厂源以及工业源中的水泥、工业锅炉和石灰砖瓦行业夏季减排效果相比冬季优势明显。民用源由于采暖季排放较高而冬季贡献更明显, 农业源因秸秆开放燃烧量大, 冬季单位减排量贡献十分显著。从同等幅度减排考虑, 应将工业源作为控制重点, 优先控制其一次 PM_{2.5} 排放, 在部门内进一步重点控制钢铁冶金行业的 NO_x 和 SO₂ 排放、水泥行业的夏季 NO_x 排放以及炼焦行业的 SO₂ 和 NMVOC 排放。民用源排放应着重在冬季采暖期控制。

关键词: PM_{2.5}; 京津冀地区; CMAQ/2D-VBS; 控制对策; 减排

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0867-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201607191

Assessment of PM_{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

WU Wen-jing¹, CHANG Xing¹, XING Jia¹, WANG Shu-xiao^{1,2*}, HAO Ji-ming^{1,2}

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

Abstract: This study chose two months (January and July) in 2012 which represent winter and summer respectively, to assess the effects of fine particle (PM_{2.5}) pollution elimination due to emission control from different sectors in the Beijing-Tianjin-Hebei region by using CMAQ/2D-VBS modeling system. The results showed that, industrial emissions contributed most to PM_{2.5} pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region, followed by domestic emissions, while the contribution of per ton emission reduced for industrial sectors subject to domestic sectors. The total contribution and contribution of per ton emission reduced for transportation and power plant were both at low level. Among industrial sectors, the iron, steel and metallurgical industry was the greatest contributor, followed by cement industry, industrial boiler, coking industry, lime and bricks industry and chemical industry. It was found that the contribution of each emission source had significant association with its primary PM_{2.5} emission level. The control of NO_x emissions would promote the formation of PM_{2.5}, and atmospheric vertical diffusion effect was weak during wintertime in the Beijing-Tianjin-Hebei region. As a result, emission control of various sectors was universally more effective for PM_{2.5} pollution mitigation in summer than in winter. Emission control in summer was significantly more effective for transportation, powerplant, cement industry, industrial boiler and lime and bricks industry. Due to considerable emissions in heating season, domestic emissions showed more contribution in winter. Agricultural sources showed greater contribution per emission reduction in winter by the reason of substantial emissions from straw open burning during this time. With respect to a certain reduction ratio of emission, future control strategies should pay more attention to industrial emissions, especially to the primary PM_{2.5} emissions. In details, priorities should be given to NO_x and SO₂ emission control for iron, steel and metallurgical industry, NO_x emission control for cement industry and SO₂ and NMVOC emission control for coking industry. Besides, domestic emission control should also be taken into consideration, and it will be more effective in winter.

Key words: PM_{2.5}; the Beijing-Tianjin-Hebei region; CMAQ/2D-VBS; control strategy; emissions reduction

PM_{2.5} 又称细颗粒物, 是指空气动力学当量直径小于等于 2.5 μm 的颗粒物。大气中的 PM_{2.5} 有诸多危害, 不仅能危害人体健康, 也会降低城市能见度, 甚至影响气候变化^[1,2]。随着我国社会经济的快速发展, 以 PM_{2.5} 污染为代表的区域复合大气污染问题逐渐显现并日益加剧, 这在京津冀地区尤为显著。根据

我国环境保护部公开的数据^[3], 2015 年京津冀地区

收稿日期: 2016-07-27; 修订日期: 2016-09-28

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409002); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05020300)

作者简介: 吴文景(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染数值模拟, E-mail: wuwj91@126.com

* 通信作者, E-mail: shxwang@tsinghua.edu.cn

PM_{2.5}年均观测浓度达到 77 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远超环境空气质量二级标准设定的 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的限制, 污染之严重程度位居我国三大经济圈(京津冀、长三角、珠三角)之首, 在全国 74 个新标准第一阶段监测实施城市中, 2015 年空气质量最差的 10 个城市中有 7 个位于京津冀地区^[3]. 由此可见, 京津冀地区大气污染状况十分恶劣, 治理该地区 PM_{2.5} 污染问题已迫在眉睫.

大气 PM_{2.5} 的形成涉及多种前体物, 且不同前体物对 PM_{2.5} 生成的贡献存在较大差异, 因此不同的排放组成下导致的 PM_{2.5} 生成量不同. 不仅如此, PM_{2.5} 污染是综合了各类复杂的物理化学作用的结果, 导致 PM_{2.5} 浓度与其前体物排放之间呈现显著的非线性关系^[4, 5]. 这主要体现在单位减排量带来 PM_{2.5} 浓度的减少与排放的物种组成、减排幅度以及排放的空间分布密切相关. 京津冀地区聚集众多产业, 且各行业排放的物种组成以及时空分布特征存在较大差异, 这导致地区内各行业部门对区域 PM_{2.5} 浓度的影响十分复杂. 因此, 如何量化评估不同行业部门减排对区域 PM_{2.5} 污染改善幅度的相对大小, 从而为京津冀地区 PM_{2.5} 污染治理制定有效的排放控制策略, 是当今决策者和管理者面临的重大科学问题.

现有研究中, 一般以部门来源解析结果来表征不同部门对大气污染贡献的相对大小. 目前, 对于行业部门来源解析最常用的是受体模型法^[6~14], 其原理是通过观测采样确定不同部门排放污染物以及目标区域大气污染的组成特征, 通过多种分析方法确定各部门对目标区域污染形成的贡献. 但由于该方法通常假设各化学组分间不发生化学反应, 并认为各地区污染物组成彼此线性无关, 导致对颗粒物二次生成的解析有所欠缺^[15], 并且无法反映排放的时空差异以及难以区分排放特征相近行业的贡献, 因此其解析结果具有较大不确定性. 以 CMAQ (community multi-scale air quality) 和 CAMx (comprehensive qir quality model with extensions) 为代表的三维空气质量模型源解析方法, 通过对大气污染过程的再现, 能够实现颗粒物二次组分及具有不同排放特征的来源进行更为可靠地解析. 由于模拟方案设置的灵活性, 三维空气质量模型可以反映出例如单位减排量贡献等更为细致的来源解析结果, 而这是受体模型方法所无法实现的. 近年来, 随着计算机运算能力的提升, 空气质量模型方法逐渐被用于颗粒物的部门来源解析, 但研究多针对个别城市开展^[16~20], 目前缺少针对排放特征复杂的城市群的研究.

本研究采用 CMAQ 模型, 定量分析了冬夏两季京津冀地区主要排放源减排对区域大气 PM_{2.5} 污染改善的贡献, 并结合单位减排量贡献大小, 识别出了冬夏两季对该地区 PM_{2.5} 浓度影响较为显著的部门, 以期优化京津冀地区 PM_{2.5} 污染治理的排放控制策略提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 CMAQ

本研究采用的模式系统包括两部分: WRFv3.7 (weather research and forecasting model) 和 CMAQ/2D-VBS (two-dimensional volatility basis set). WRF 是由美国国家大气研究中心 (NCAR) 开发的中尺度气象预报模型, 可为空气质量模型提供气象场输入数据. CMAQ 是美国第三代多尺度多污染物空气质量模式, 能够再现和模拟大气污染形成过程中的迁移、沉降等物理作用以及光化学反应、多相分配等化学过程, 是研究中应用最为普遍的空气质量模式. Zhao 等^[21]将二维挥发性区间模型嵌入到默认版本的 CMAQv5.0.1 模型中, 开发了 CMAQ/2D-VBS 模拟系统. 模拟结果表明^[22], 改进后的系统显著改善了对 PM_{2.5} 中有机组分低估的问题, 因而将比一般 CMAQ 模型表现出更高的准确性.

1.2 模型配置

本研究选择兰伯特投影坐标系, 模拟区域中心坐标为 (34°N, 110°E), WRF 采用三层网格嵌套, 网格分辨率分别为 36 km × 36 km、12 km × 12 km、4 km × 4 km, 第一层网格覆盖了中国的大部分, 第二层网格主要包括了京津冀、山西、河南、山东的全部行政区域以及内蒙古的一部分, 第三层网格覆盖了整个京津冀地区. 模型在垂直方向上将地面到对流层顶划分为 14 层, 方法同先前研究^[23]. 地形和地表类型数据采用美国地质调查局 (USGS) 提供的的数据, 第一初猜场选取美国国家环境预报中心 (NCEP) 的分析资料, 水平分辨率为 1° × 1°, 时间间隔为 6 h, 客观分析采用 NCEP ADP 地表和高空观测资料. 地表参数化方案采用 Pleim-Xiu, 边界层参数化方案采用 Mellor-Yamada-Janjic, 积云参数化方案采用 Kain-Fritsch, 辐射参数化方案采用 rrtmg, 微物理过程参数化方案采用 Morrison double-moment. CMAQ/2D-VBS 模型同样采用三层网格嵌套, 与 WRF 网格重合, 但四周各少 6 个网格. 图 1 给出了模拟采用的网格方案. CMAQ/2D-VBS 模型的气相化学机制为 SAPRC99, 气溶胶机制采用 AERO6, 气

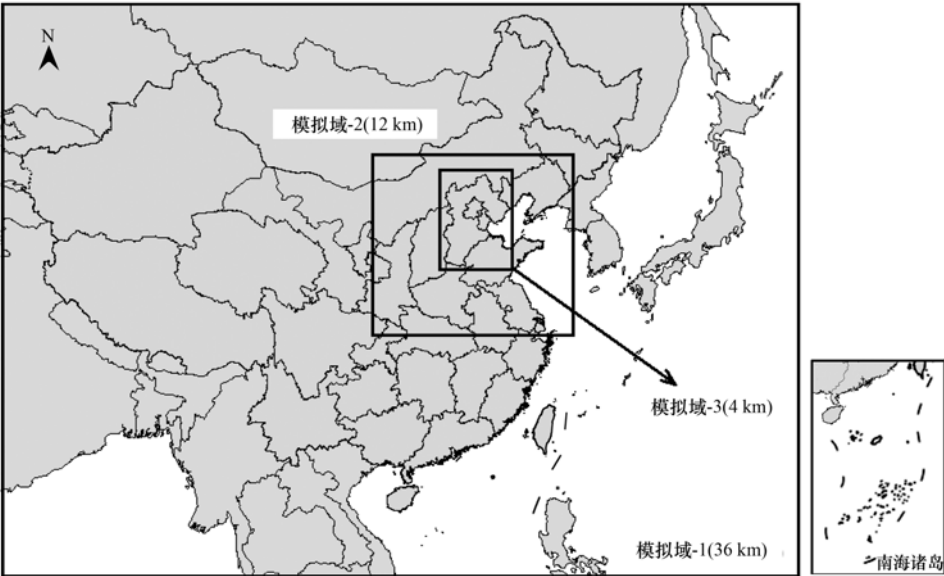


图1 本研究模拟区域示意

Fig. 1 A diagram of simulation domain in this study

溶胶热力学模型采用 ISORROPIA-II, 外层网格选择默认边界场。为消除初始条件的影响, 每个模拟时段提前 5 个模拟日开始。

1.3 数据来源

模型校验时采用的地面观测数据来自中国科学院大气物理研究所在北京市 (39.97°N, 116.37°E) 和河北省香河县 (39.76°N, 116.95°E) 建立的观测站, 两站点监测的污染物浓度水平分别作为城区和郊区的代表。

空气质量模型使用的排放清单由两套清单耦合嵌套形成, 首先是东亚地区背景排放清单, 采用分辨率为 0.25°×0.25°的 2010 年 MIX 清单^[24]; 其次, 在 MIX 清单基础上, 对我国清单进行细化, 数据来自于由本课题组采用先前研究^[25, 26]的方法建立的 2012 年全国 SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、NMVOC 和 NH₃ 的高时空分辨率排放清单, 其中面源排放采用“排放因子法”^[27]确定, 电厂、钢铁和水泥行业等大点源排放采用“排放单元法”^[27~29]确定。采用 MEGANv2.04(model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.04)^[30]计算自然源分物种的 NMVOC 排放量。

1.4 模拟方案

本研究选取了 2012 年 1 月和 7 月分别作为冬季和夏季的代表, 模拟分析冬夏两季京津冀地区主要排放源排放削减对区域 PM_{2.5} 浓度的影响。研究划分选取了工业、民用、交通、电厂和农业这 5 个较为重要的部门, 考虑到工业部门内涉及子部门较

多, 本研究进一步对工业部门进行了细分, 将其划分成钢铁冶炼、水泥、工业锅炉、炼焦、石灰砖瓦和化工这 6 个子部门。本研究采用情景分析法, 设置了 13 个不同的模拟情景, 如表 1 所示, 其中包括 1 个基准情景和 1 个所有部门排放同时削减的情景, 其余 11 个情景为对各排放部门或子部门单独减排的情景, 且假定减排幅度均为 30%。将各减排情景的区域 PM_{2.5} 浓度模拟结果与基准情景进行比较, 可以得到各排放部门减排对 PM_{2.5} 浓度下降的贡献。

Table 1 Configuration of simulation scenarios in this study		
情景编号	情景名称	情景设置
1	基准情景	各排放部门排放量保持基准不变
2	工业	工业部门排放削减 30%, 其他部门不变
3	民用	民用部门排放削减 30%, 其他部门不变
4	交通	交通部门排放削减 30%, 其他部门不变
5	电厂	电厂部门排放削减 30%, 其他部门不变
6	农业	农业部门排放削减 30%, 其他部门不变
7	工业-钢铁冶金	钢铁冶金部门排放削减 30%, 其他部门不变
8	工业-水泥	水泥部门排放削减 30%, 其他部门不变
9	工业-工业锅炉	工业锅炉部门排放削减 30%, 其他部门不变
10	工业-炼焦	炼焦部门排放削减 30%, 其他部门不变
11	工业-石灰砖瓦	石灰砖瓦生产部门排放削减 30%, 其他部门不变
12	工业-化工	化工部门排放削减 30%, 其他部门不变
13	全部	所有部门排放同时削减 30%

1.5 CMAQ/2D-VBS 验证

为检验空气质量模型结果的可靠性, 本研究根据两个地面观测站的同时期 PM_{2.5} 逐日观测数据, 对 CMAQ/2D-VBS 系统的基准情景进行了校验。从图

2 与表 2 的校验结果可以看出,空气质量模型能够较好地再现各站点各时段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势. 与观测浓度相比,模拟结果的标准平均偏差为 $-42.4\% \sim 4.5\%$,标准平均误差为 $35.0\% \sim 48.2\%$,平均分数偏差为 $-59.4\% \sim 7.5\%$,平均分数误差为 $37.0\% \sim 63.2\%$,相关系数为 $0.66 \sim 0.85$. 对照美国环保署发布的指导标准^[31],模型的误差水平可接受,模拟结果较为可靠,可以用于后续的情景分析.

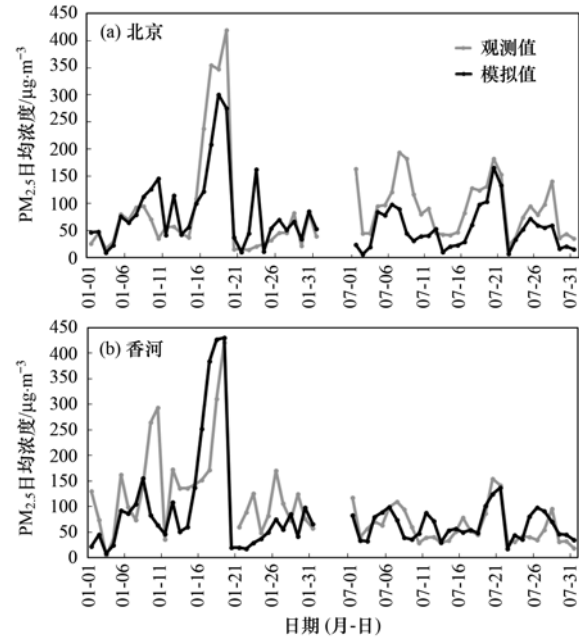


图2 CMAQ 模式 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度模拟结果与北京、
香河地面观测数据的比较

Fig. 2 Comparison between CMAQ simulation results and ground observation data for daily-averaged $\text{PM}_{2.5}$ concentration in Beijing site and Xianghe site

表 2 CMAQ 模式 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度模拟结果与
地面观测数据的比较统计指标¹⁾

Table 2 Statistical index of the comparison between CMAQ simulation results and ground observation data for daily-averaged $\text{PM}_{2.5}$ concentration

月份	统计指标	北京站	香河站	标准 ^[31]
1	NMB	-0.4%	-20.0%	—
	NME	41.7%	48.2%	—
	MFB	-13.9%	-28.5%	$\leq \pm 60\%$
	MFE	43.9%	63.2%	$\leq 75\%$
	相关系数	0.85	0.69	—
7	NMB	-42.4%	4.5%	—
	NME	42.9%	35.0%	—
	MFB	-59.4%	7.5%	$\leq \pm 60\%$
	MFE	62.4%	37.0%	$\leq 75\%$
	相关系数	0.69	0.66	—

1) NMB: normalized mean bias, 标准平均偏差; NME: normalized mean error, 标准平均误差; MFB: mean fractional bias, 平均分数偏差; MFE: mean fractional error, 平均分数误差

2 结果与讨论

2.1 京津冀地区主要排放源污染物排放量分析

对于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染形成的原因,通常认为气象是外因,排放是内因^[32]. 污染物排放的多少直接决定了区域内 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物总量的数量级. 因此在计算各类源对污染形成贡献大小之前,本研究首先对目标区域内主要排放源排放量进行分析. 图 3(a) 为京津冀地区主要排放源污染物排放量,可以看出不同部门之间的排放特征存在明显差异. 工业部门除氨外整体排放量高于其他部门,其中 SO_2 、NMVOC 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量更是超过其他部门之和. 民用部门各项污染物排放量较为均衡. 农业部门是区域内 NH_3 排放的主要来源(贡献 90% 以上). 交通部门的排放特征为较高的 NO_x 和 NMVOC 排放. 电力部门的排放则集中在 NO_x 和 SO_2 .

工业部门整体活动水平较高、部门内子部门种类复杂多样是其各类污染物排放量普遍较高的主要原因. 通过图 3(b) 对工业部门内各子部门排放量的分析可以发现,不同工业子部门的排放特征差异较大,各类污染物的最大排放量分散在不同子部门,例如工业锅炉贡献了最多的 NO_x 和 SO_2 排放,化工行业贡献了大多数的 NMVOC 排放,钢铁冶金行业的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放最为显著.

2.2 主要排放源减排 30% 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低效果的分析

本研究利用 WRF/CMAQ 模式分析了冬夏两季京津冀地区各主要排放源排放分别削减 30% 对区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响,结果如图 4 所示. 总的来说,各部门中工业部门减排对区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响最大,减排 30% 的贡献为所有部门贡献总和的三分之一左右. 其次贡献较多的是民用和农业部门,交通和电厂的减排效果总体不明显. 本研究识别出对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献最大两个部门分别是工业和民用部门,这与先前京津冀部分城市的部门解析研究结果^[13, 20]相吻合,但多数基于受体模型法的解析结果^[6~10, 14, 33, 34]表明,以燃煤为代表的民用部门排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献大于工业部门,这可能与工业部门排放组成在部门内部存在比较明显的差异化,从而导致受体模型方法对工业源的识别不够准确有关. 此外,由于扬尘排放清单的缺失,本研究未考虑扬尘排放的贡献,而受体模型法研究结果反映出扬尘排放的贡献十分重要^[6, 7, 13, 14, 33~35],因此在后续基于空气质量模型方法的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟研究中,应

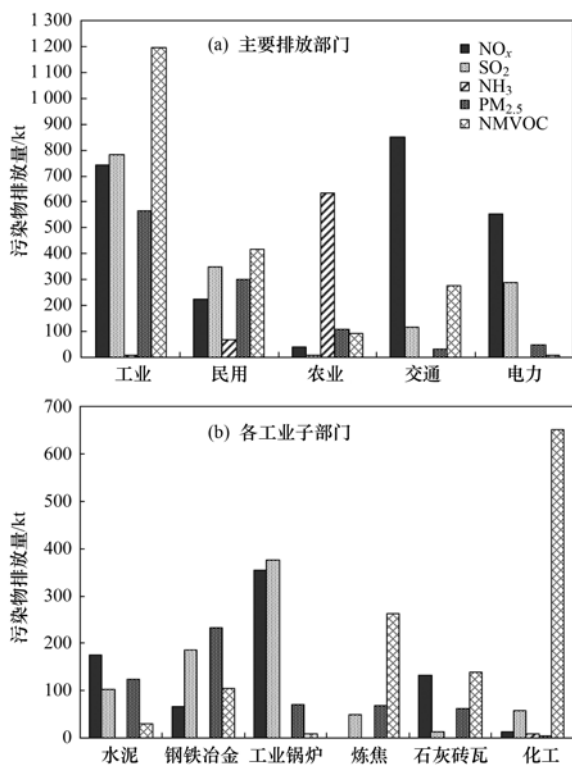


图3 2012年京津冀地区主要排放部门和
各工业子部门污染物排放量

Fig. 3 Emissions of pollutants from main emission sectors and industrial sub-sectors in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2012

对扬尘的模拟加以重视和考虑。

结合上一节各部门污染物排放量分析可以发现,各类排放源减排贡献排序结果与其一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量排序结果一致,且减排贡献大小与排放量在不同排放源间的变化呈现高度一致性,说明 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放最敏感。工业和民用部门减排贡

献较高主要因为其较高的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量。农业部门的减排效果主要取决于 NH_3 排放控制,但由于京津冀地区常年处于富氨状态^[36],因此农业部门控制效果不突出。交通部门虽然贡献了较多的 NO_x 和 VOC 排放,但研究表明^[37],京津冀地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对 NO_x 和 VOC 排放控制不敏感, NO_x 与 VOC 排放总量共同削减 50% 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响不超过 7.1%,而根据本研究计算,交通部门 NO_x 和 VOC 排放削减 30% 对各部门总排放量的贡献分别只有 10.6% 和 4.2%。由于污染过程中大气垂直方向扩散作用往往受气象条件抑制^[38],作为高架源的电厂源,其排放的污染物对近地面污染形成的影响很小,因此电厂部门减排效果不显著,这与先前研究^[39] 结论一致。

对比冬夏两季的减排效果,从浓度降低值来看,工业和农业部门在两季节效果相近。民用部门冬季减排效果明显优于夏季,为冬季贡献最大的部门,这与冬季采暖季民用部门排放量较高直接相关。交通和电厂部门的减排对改善污染的贡献几乎全部体现在夏季,在冬季几乎为零,这与其 NO_x 排放量较高有关。由于京津冀秋冬季整体处于 O_3 的 VOC 控制区, NO_x 小幅减排反而将导致 O_3 、 OH 等大气氧化剂浓度上升,进而促进 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的生成,因此对污染改善呈现负贡献。此外,比较冬夏两季减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度减少的比例可以发现,同样减少 30% 排放,夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低幅度高于冬季,说明夏季减排总体上相比冬季更有效。

针对贡献最大的工业排放源,研究进一步分析了其中各子部门的减排效果。如图 5 所示,钢铁冶

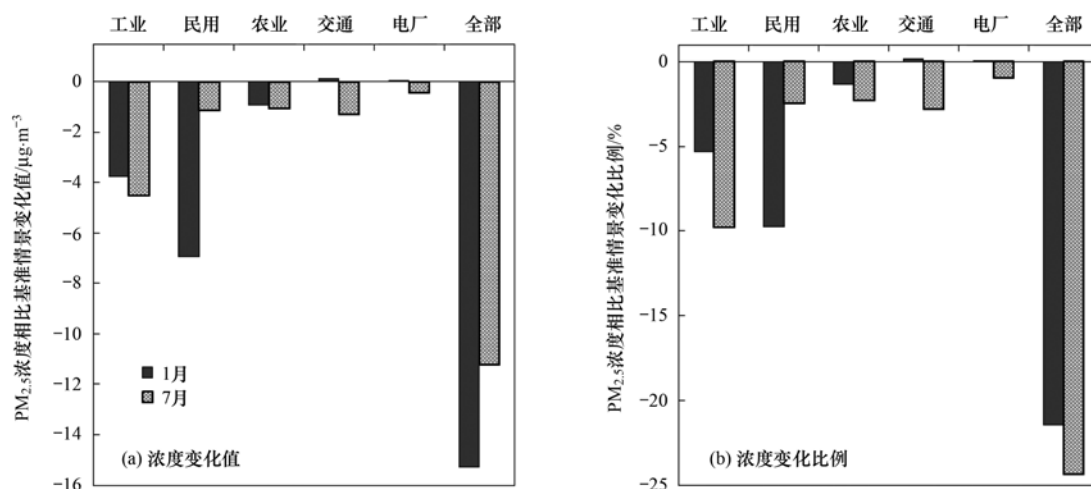


图4 京津冀地区主要排放源减排 30% 导致区域平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化值及变化比例

Fig. 4 Change and change ratio of regional-averaged $\text{PM}_{2.5}$ concentration due to 30% emission reductions from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region

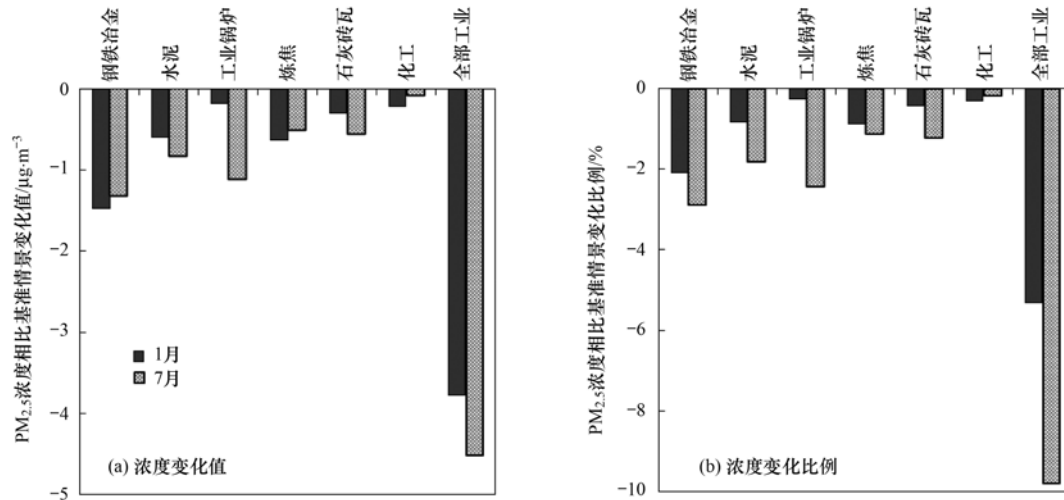


图5 不同工业子部门排放削减30%导致京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度变化值及变化比例

Fig. 5 Change and change ratio of regional-averaged $PM_{2.5}$ concentration due to 30% emission reductions from industrial sub-sectors in the Beijing-Tianjin-Hebei region

金行业减排效果最为明显,其贡献占整个工业部门的三分之一左右,其次是水泥行业、工业锅炉、炼焦和石灰砖瓦行业,化工行业减排效果不明显. 同样可以发现,各部门减排对 $PM_{2.5}$ 浓度降低的贡献大小与各部门一次 $PM_{2.5}$ 排放量高度相关,印证了前面的分析. 由于工业锅炉排放高度较高,具有和电厂类似的排放特征,因此夏季减排效果同样明显优于冬季. 各工业子部门减少相同比例排放在夏季使 $PM_{2.5}$ 浓度降低的幅度明显高于冬季,说明在夏季控制工业排放将比在冬季更有效.

分析不同排放源减少相同比例排放对 $PM_{2.5}$ 浓度影响的大小,仅能反映出每类排放源作为一个整体对污染形成的贡献,然而在决策中,决策者更关心

的是每类排放源减少相同排放量对应的污染改善程度大小,即单位减排量带来的环境效益. 图6为几类主要排放源以及各工业子部门单位减排量对区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响. 各类排放源单位减排量的贡献特征之间存在明显差异. 作为总贡献最大的工业源,其单位减排量略低于民用源,这与其气态前体物排放量较高有关,而工业部门内钢铁冶金、水泥和炼焦行业单位减排量较高,与总贡献排序结果基本一致. 工业源冬季单位减排量贡献小于夏季,其中水泥、工业锅炉和石灰砖瓦部门的冬季单位减排贡献明显小于夏季,这是由于这些部门的 NO_x 排放量较高,而 NO_x 排在冬季对 $PM_{2.5}$ 浓度的贡献为负,原因已在前文说明,工业锅炉近似高架源的性质也

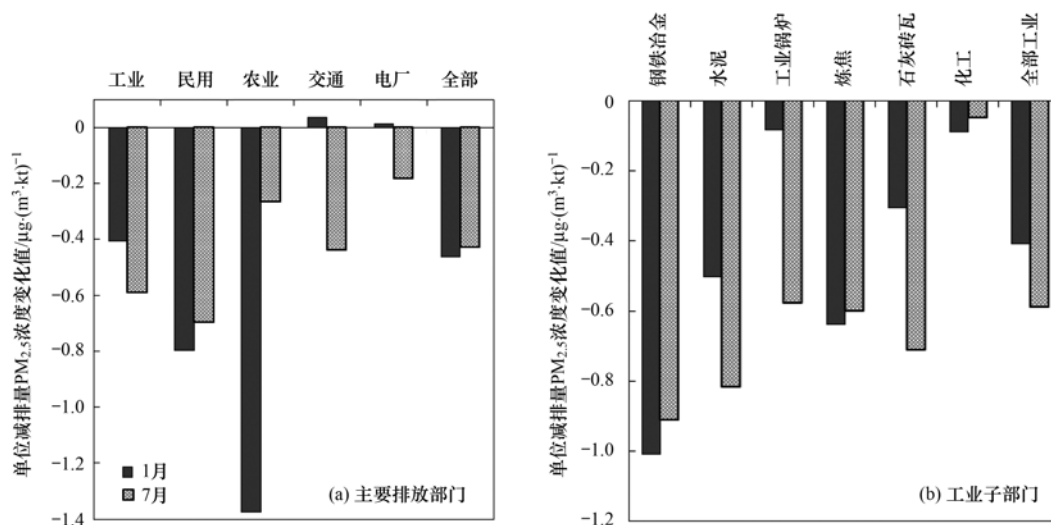


图6 京津冀地区主要排放源及工业子部门单位减排量的区域 $PM_{2.5}$ 浓度变化值

Fig. 6 Change of regional-averaged $PM_{2.5}$ concentration per ton emission reduced from main emission sources and industrial sub-sectors in the Beijing-Tianjin-Hebei region

使其冬季贡献明显较小. 农业源冬季单位减排量贡献高于夏季, 这是因为不同季节农业部门排放来源不同, 秋冬季以秸秆开放燃烧为主, 此时一次 $\text{PM}_{2.5}$ 为主要排放物种, 夏季则以化肥施用和畜禽养殖过程排放的 NH_3 为主. 因此, 农业部门单位减排量在冬夏两季的贡献差异主要来自于一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NH_3 的单位减排量贡献的差异. 由于排放较多 NO_x , 交通和电力部门在冬季呈现较低贡献甚至负贡献, 同时也与电力部门排放高度较高有关. 民用部门的单位减排量贡献在冬夏两季则较接近.

2.3 京津冀地区主要排放源减排潜力及排放控制对策建议

本研究评估主要排放源贡献的减排幅度为 30%, 然而从技术可行性以及减排成本的角度看, 很显然不同排放源减排 30% 的难易程度不同. 为了进一步探究具有操作性的减排对策, 研究估算了京津冀地区各主要排放源 2020 年相比 2012 年的各物种最大减排潜力. 最大减排潜力的确定方法是首先预测未来经济发展和服务量需求的增长潜力, 并假定将出台严苛的可持续能源政策, 预测出 2020 年的能源消费量, 其次假定现有效率最高的末端控制技术得到最大限度利用, 据此估算 2020 年各污染物排放量相对于 2012 年变化的百分比, 即得到各污染物的“最大减排潜力”. 图 7 为本研究推算的 2020 年主要排放源分物种最大减排潜力, 由于 NH_3 排放预测存在较大不确定性, 因此未将其考虑在内.

前文分析结果表明, 工业部门减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善的效果最明显, 故从削减同等幅度排放考虑, 应首先重点控制工业排放. 虽然减排潜力反映出 2020 年工业源 NMVOC 减排 30% 缺少一定可行性, 但 $\text{PM}_{2.5}$ 污染敏感排放物种为一次 $\text{PM}_{2.5}$, 一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要来源是工业源, 因此应将该物种作为工业源控制重点, 再辅以 NO_x 、 SO_2 和 NMVOC 的多种前体物协同控制. 具体到工业部门内, 钢铁冶金、水泥和炼焦行业同时具有较高的总贡献和单位减排量贡献. 结合减排潜力的估算, 工业源中应重点控制钢铁冶金行业的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 和 SO_2 排放、水泥行业的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_x 排放控制以及炼焦行业的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NMVOC 控制, 其中水泥行业 NO_x 排放应放在夏季控制. 除工业源外, 还应大力控制民用源排放. 与工业排放控制不同的是, 民用源应进行多污染物的协同减排, 且应将重点放在冬季采暖时期, 以期获得更好的减排效果.

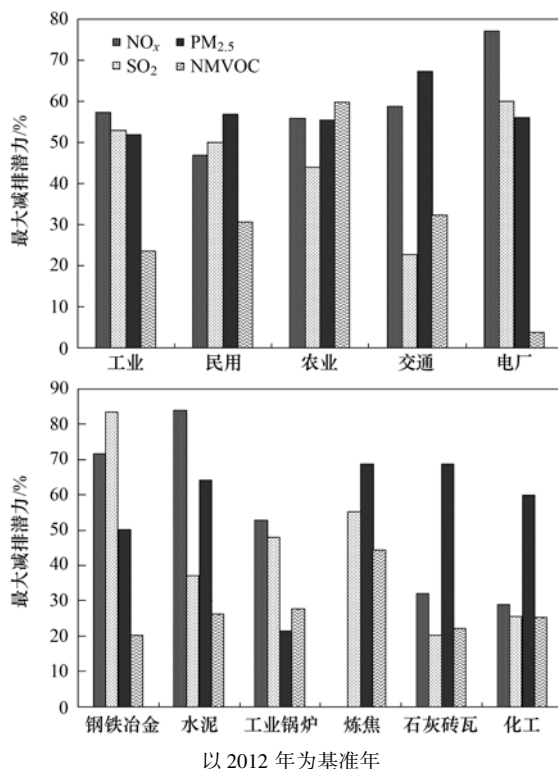


图 7 2020 年京津冀地区主要排放源分物种最大减排潜力

Fig. 7 Maximum emissions reduction potentials of main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2020

3 结论

(1) 研究利用 WRF/CMAQ 模式考察了冬夏两季京津冀地区主要排放源减排 30% 对改善区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的效果. 研究使用的排放清单和空气质量模型配置能够较好地模拟出地面监测站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度及其变化趋势, 模型误差符合要求, 模型的准确性和可靠性可接受.

(2) 工业源减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响最大, 其次是民用源和农业源, 交通源和电厂源贡献较小. 除民用源冬季减排效果明显好于夏季外, 各排放源夏季减排比冬季更有效, 交通源和电厂源冬季贡献可忽略不计. 工业部门内钢铁冶金行业减排效果最明显, 其次是水泥、工业锅炉、炼焦、石灰砖瓦和化工行业. 各排放源贡献大小与其一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放水平高度相关.

(3) 工业源单位减排量贡献低于民用源, 其中水泥、工业锅炉和石灰砖瓦行业其夏季贡献明显高于冬季. 农业源的单位减排量贡献在冬季十分显著. 交通和电厂源单位减排量贡献较小.

(4) 从同等幅度减排考虑, 应将工业源作为控制重点, 首先控制其一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放, 再进行 NO_x 、 SO_2 和 NMVOC 的协同控制. 具体而言, 应重点控制

钢铁冶金行业的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 和 SO_2 排放、水泥行业的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_x 排放控制以及炼焦行业的一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NMVOC 控制,水泥行业 NO_x 排放控制应放在夏季. 民用源排放应着重在冬季采暖期控制.

参考文献:

- [1] Lim S S, Vos T, Flaxman A D, *et al.* A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010; a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010 [J]. *The Lancet*, 2012, **380**(9859): 2224-2260.
- [2] Solomon S, Qin D H, Manning M, *et al.* Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年中国环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2016. 9-14.
- [4] Wang S X, Xing J, Jang C, *et al.* Impact assessment of ammonia emissions on inorganic aerosols in East China using response surface modeling technique [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(21): 9293-9300.
- [5] Zhao B, Wang S X, Xing J, *et al.* Assessing the nonlinear response of fine particles to precursor emissions: development and application of an extended response surface modeling technique v1.0[J]. *Geoscientific Model Development*, 2015, **8**(1): 115-128.
- [6] Song Y, Zhang Y H, Xie S D, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing by positive matrix factorization[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(8): 1526-1537.
- [7] Wang H L, Zhuang Y H, Wang Y, *et al.* Long-term monitoring and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ in Beijing, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(11): 1323-1327.
- [8] Yu L D, Wang G F, Zhang R J, *et al.* Characterization and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in an urban environment in Beijing [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(2): 574-583.
- [9] Zhang W, Guo J H, Sun Y L, *et al.* Source apportionment for urban PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in the Beijing area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(5): 608-615.
- [10] Tian Y Z, Chen G, Wang H T, *et al.* Source regional contributions to $\text{PM}_{2.5}$ in a megacity in China using an advanced source regional apportionment method[J]. *Chemosphere*, 2016, **147**: 256-263.
- [11] Li X R, Wang Y S, Guo X Q, *et al.* Seasonal variation and source apportionment of organic and inorganic compounds in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} particulates in Beijing, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, **25**(4): 741-750.
- [12] Wang G, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Source apportionment and seasonal variation of $\text{PM}_{2.5}$ carbonaceous aerosol in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(3): 143.
- [13] 陈曦, 杜鹃, 关清, 等. ICP-MS 和 ICP-AES 用于北京雾霾天气 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(6): 1724-1729.
- [14] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing: seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(14): 7053-7074.
- [15] Richards L W, Alcorn S H, McDade C, *et al.* Optical properties of the San Joaquin Valley aerosol collected during the 1995 integrated monitoring study [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(29): 4787-4795.
- [16] Pirovano G, Colombi C, Balzarini A, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ source apportionment in Lombardy (Italy): comparison of receptor and chemistry-transport modelling results [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 56-70.
- [17] Cheng S Y, Lang J L, Zhou Y, *et al.* A new monitoring-simulation-source apportionment approach for investigating the vehicular emission contribution to the $\text{PM}_{2.5}$ pollution in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 308-316.
- [18] Bove M C, Broto P, Cassola F, *et al.* An integrated $\text{PM}_{2.5}$ source apportionment study: positive matrix factorisation vs. the chemical transport model CAMx[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 274-286.
- [19] Zhang H L, Li J Y, Ying Q, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ nitrate and sulfate in China using a source-oriented chemical transport model[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **62**: 228-242.
- [20] Wang L T, Wei Z, Wei W, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in top polluted cities in Hebei, China using the CMAQ model [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 723-736.
- [21] Zhao B, Wang S X, Donahue N M, *et al.* Evaluation of one-dimensional and two-dimensional volatility basis sets in simulating the aging of secondary organic aerosol with smog-chamber experiments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(4): 2245-2254.
- [22] 赵斌. 细颗粒物化学组成及其对前体物排放响应的数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [23] Zhao B. Numerical simulation of the chemical components of fine particles and their response to precursor emissions[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [24] Wang S X, Zhao M, Xing J, *et al.* Quantifying the air pollutants emission reduction during the 2008 Olympic Games in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(7): 2490-2496.
- [25] Li M, Zhang Q, Kurokawa J, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2015, **15**(23): 34813-34869.
- [26] Zhao B, Wang S X, Dong X Y, *et al.* Environmental effects of the recent emission changes in China: implications for particulate matter pollution and soil acidification [J]. *Environmental Research Letters*, 2013, **8**(2): 024031.
- [27] Wang S X, Zhao B, Cai S Y, *et al.* Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(13): 6571-6603.
- [28] Wang S X, Xing J, Chatani S, *et al.* Verification of

- anthropogenic emissions of China by satellite and ground observations[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(35): 6347-6358.
- [28] Lei Y, Zhang Q, Nielsen C, *et al.* An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990-2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(1): 147-154.
- [29] Zhao Y, Wang S X, Duan L, *et al.* Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(36): 8442-8452.
- [30] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3181-3210.
- [31] US EPA. Guidance on the use of models and other analyses for demonstrating attainment of air quality goals for ozone, PM_{2.5}, and regional haze [EB/OL]. https://www3.epa.gov/ttn/naaqs/aqmguidance/collection/cp2_old/20070418_page_guidance_using_models.pdf.
- [32] 薛亦峰, 周震, 聂滕, 等. 2015 年 12 月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1593-1601.
- Xue Y F, Zhou Z, Nie T, *et al.* Exploring the severe haze in Beijing during December, 2015: pollution process and emissions variation [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1593-1601.
- [33] Wei Z, Wang L T, Chen M Z, *et al.* The 2013 severe haze over the Southern Hebei, China: PM_{2.5} composition and source apportionment [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2014, **5**(4): 759-768.
- [34] Jin X C, Xiao C J, Li J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing using positive matrix factorization [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, **307**(3): 2147-2154.
- [35] 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.
- [36] Fu X, Wang S X, Ran L M, *et al.* Estimating NH₃ emissions from agricultural fertilizer application in China using the bi-directional CMAQ model coupled to an agro-ecosystem model [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(12): 6637-6649.
- [37] 庞杨. 京津冀地区大气污染物分布和演变特征的模拟研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- Pang Y. Distribution and evolution of atmospheric pollutants over Beijing-Tianjin-Hebei region [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012.
- [38] 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 等. 北京地区冬夏季持续性雾霾发生的环境气象条件对比分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2031-2044.
- Liao X N, Zhang X L, Wang Y C, *et al.* Comparative analysis on meteorological condition for persistent haze cases in Summer and Winter in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2031-2044.
- [39] 杜晓惠, 徐峻, 刘厚凤, 等. 重污染天气下电力行业排放对京津冀地区 PM_{2.5} 的贡献[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(4): 475-482.
- Du X H, Xu J, Liu H F, *et al.* Contribution of power plant emissions to PM_{2.5} over Beijing-Tianjin-Hebei area during heavy pollution periods [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(4): 475-482.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-rui, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ²⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)