

 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.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈革, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

长三角地区重点源减排对 PM_{2.5} 浓度的影响

于燕¹, 王泽华², 崔雪东³, 陈锋¹, 徐宏辉¹

(1. 浙江省气象科学研究所, 杭州 310008; 2. 浙江省环境保护科学设计研究院, 杭州 310007; 3. 浙江省气象安全技术中心, 杭州 310008)

摘要: 应用中尺度天气-化学预报模式(WRF-Chem), 基于重点源(八大重点行业与交通)一般与强化两组减排情景, 针对2013年开展长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度影响的模拟研究. 长三角地区SO₂、NO_x、PM_{2.5}和NMVOC排放一般在一般减排情景下分别减少36.3%、26.3%、32.0%、14.6%, 强化减排情景下分别减少51.4%、39.6%、37.6%、28.4%. 模拟结果表明, 两组减排情景下长三角地区国控点PM_{2.5}年均浓度分别下降1.4~26.7 μg·m⁻³和2.1~32.3 μg·m⁻³, 降幅分别为2.7%~23.1%和3.9%~27.5%, 二次无机盐中硝酸盐对年均PM_{2.5}浓度的降低贡献最大. PM_{2.5}及二次无机盐浓度变化的季节特征均体现为冬季降幅最小, 夏季降幅最大, 并且随着减排力度的增强, 夏季降幅的进一步降低程度最显著, 导致削减效果的季节差异增大. 重点源强化减排即可使得上海、江苏夏季PM_{2.5}浓度降低约20%. 对大气氧化性的进一步分析表明, 减排对四季大气氧化性均有不同程度的增强, 加大减排力度后, 大气氧化性进一步增强, 有利于二次PM_{2.5}的生成, 从而阻碍了PM_{2.5}浓度的降低. 其中, 冬季的阻碍作用最强, 导致PM_{2.5}污染改善效果最差. 夏季大气氧化性受减排影响较小, 从而使得PM_{2.5}污染改善在四季中最有效. 此外, 春、秋季的阻碍作用也不容忽视.

关键词: 减排; PM_{2.5}; 长三角地区; 中尺度天气-化学预报模式(WRF-Chem); 大气污染控制

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0011-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.201804105

Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM_{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta

YU Yan¹, WANG Ze-hua², CUI Xue-dong³, CHEN Feng¹, XU Hong-hui¹

(1. Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008, China; 2. Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China; 3. Zhejiang Meteorological Safety Technology Center, Hangzhou 310008, China)

Abstract: The effects of emission reductions of key sources (eight key industries and transportation) on the PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta (YRD) were investigated using the weather research forecast-chemistry (WRF-Chem) model in 2013 combined with two normal and enhanced emission reduction scenarios. The SO₂, NO_x, PM_{2.5}, and NMVOC emissions in the YRD decrease by 36.3%, 26.3%, 32.0%, and 14.6% and by 51.4%, 39.6%, 37.6%, and 28.4% under the normal and enhanced emission reduction scenarios, respectively. The simulation results show that the annual mean PM_{2.5} concentrations over the national environmental monitoring sites in the YRD decline by 1.4-26.7 μg·m⁻³ and 2.1-32.3 μg·m⁻³, reflecting a decrease of 2.7%-23.1% and 3.9%-27.5%, under the two emission reduction scenarios, respectively. The nitrate in secondary inorganic aerosols contributes the most to the reduction of the annual mean PM_{2.5} concentration. The seasonal variation characteristics of the PM_{2.5} and secondary inorganic aerosol concentrations reflect that the smallest and largest declining rates occur in winter and summer, respectively. With increasing emission reduction, the declining rates of PM_{2.5} and the secondary inorganic aerosol concentrations in summer increase more compared with those in other seasons, resulting in a greater seasonal variation of the rates. The PM_{2.5} concentrations decrease by ~20% in Shanghai and the Jiangsu Province under the enhanced emission scenario in summer. The analysis of the atmospheric oxidation shows that the atmospheric oxidation capacity is enhanced to different degrees by emission reductions of key sources in all seasons; it is further enhanced with increasing emission reduction. The enhanced oxidation capacity favors the formation of secondary PM_{2.5}, thereby hindering the reduction of the PM_{2.5} concentration. The strongest hindrance occurs in winter, resulting in the worst PM_{2.5} pollution improvement. The atmospheric oxidation capacity is less affected by emission reductions of key sources in summer, making PM_{2.5} pollution improvement most effective. Furthermore, the negative effects of the enhancement of the atmospheric oxidation capacity on the reduction of the PM_{2.5} concentration in spring and autumn cannot be ignored.

Key words: emission reduction; PM_{2.5}; Yangtze River Delta; weather research forecast-chemistry (WRF-Chem) model; air pollution control

近年来,随着我国社会经济的高速发展,能源消耗与日俱增,大气污染问题日益严峻^[1,2]. 其中,细颗粒物(PM_{2.5})污染一直是备受社会各界关注的焦点. 大气中的PM_{2.5}不仅降低城市能见度,并且危害公众健康,甚至影响气候变化^[3,4]. 随着对雾霾成因的深入研究,以PM_{2.5}为重点的大气复合型

收稿日期: 2018-04-13; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201900); 国家自然科学基金项目(91544229); 浙江省气象科技计划项目(2017ZD11-4); 浙江省科技计划项目(2018F10032); 中国气象局省级气象科研所科技创新发展项目(SSFZ201810)

作者简介: 于燕(1987~),女,高级工程师,主要研究方向为大气污染数值模拟, E-mail: yuyan321@126.com

污染愈发突出. 2016 年中国环境状况公报指出, 三大重点区域除珠三角外, $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的天数均占全年空气质量超标天数的首位, 京津冀和长三角分别为 63.1% 和 55.3%. 因此, $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治仍是改善环境空气质量, 解决区域环境问题的首要任务^[5-8].

目前, 不同的研究基于不同的减排对象设计减排方案, 从多种角度探讨减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响^[9-17]. 一些研究针对“十一五”和“十二五”期间 SO_2 、 NO_x 排放单独控制和联合控制开展数值模拟试验, 定量评估 SO_2 和 NO_x 减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 、硫酸盐、硝酸盐浓度的削减效果^[4, 6, 9, 10]. 其中 SO_2 和 NO_x 联合减排的模拟结果显示, 东部大部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降 3.2% ~ 13%^[10]. Dong 等^[11] 应用 CMAQ 模式针对长三角地区探讨交通、工业 NO_x 和 VOCs 以及电厂 NO_x 减排对硝酸盐浓度的影响, 研究指出, NO_x 减少导致硝酸盐浓度冬季增加, 其余季节降低. Wang 等^[12] 采用 WRF-Chem 模式对 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 以及 VOCs 减排的敏感性试验结果表明, 同时减少 30% 的排放, 使得 2013 年 1 月我国东部和南部大部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降 2% ~ 17%. 孟宁等^[13] 采用相同的模式针对关中地区冬季 4 种不利于污染物扩散的天气形势下, 探讨人为源减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响, 结果显示, 人为源需削减 30% ~ 60% 才能使关中地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达到国家环境空气质量二级标准. 吴文景等^[14] 应用 CMAQ 模式分析了京津冀地区主要排放源减排 30% 对区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的改善效果, 结果表明, 工业源对 $\text{PM}_{2.5}$ 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. 此外, 相关研究还指出, 京津冀乃至整个东部地区冬季减排使得大气氧化性增强, 有利于二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的形成, 导致减排效果较差^[10, 11, 15, 16]. 因此, 定量评估减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的削减效果, 并进一步分析主要组分以及大气氧化性的变化, 有助于深入理解区域复合型大气污染的形成机制, 对未来大气污染防治政策的制定有重要参考价值. 此外, 由于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与前体物排放之间存在明显的非线性关系, 单位减排量带来 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化与排放的物种组成、空间分布以及减排力度密切相关^[14], 需要针对不同的减排对象分别开展研究. 然而目前, 对以 $\text{PM}_{2.5}$ 污染为代表的区域大气复合污染问题最为突出的长三角地区研究仍然较少, 迫切需要加强对该地区的排放控制影响研究.

随着长三角地区社会经济的迅猛发展, 集聚的产业链和密集的交通网络已经给该地区带来了巨大的环境压力^[18]. 因此, 本研究利用中尺度天气-化学预报模式 (weather research forecast-chemistry, WRF-Chem) 开展长三角地区重点源 (八大重点行业和交通) 减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响研究, 量化重点源减排对各季节及年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的削减效果, 分析 $\text{PM}_{2.5}$ 中重要组分二次无机盐浓度变化, 并进一步探讨重点源减排对大气氧化性的影响, 以期长三角地区大气污染联防联控策略的制定提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 模式简介

本研究使用大气化学模式 WRF-Chem^[19], 其中化学模块包含了比较完善的物理化学过程, 如平流传输、扩散和对流过程、干湿沉降、气相化学反应、光化学过程、液态化学、气溶胶演变, 并且通过气溶胶的辐射反馈等反馈过程与天气模式 WRF 在时间与空间上紧密耦合, 从而更大程度上反映大气的真实状况, 已广泛应用于中国地区大气污染数值模拟的相关研究中, 如重污染过程模拟分析、参数化方案、人为源清单敏感性分析、以及减排效果评估等方面^[12, 13, 20-23].

WRF-Chem v3.6 版本应用于本研究中, 垂直方向从近地面至顶层气压 50 hPa 处共分为 36 层. 模式采用双层嵌套网格 [图 1(a)], 中心点经纬度为 118°E, 32°N, 外层区域覆盖中国中东部大部分地区, 水平分辨率为 27 km × 27 km, 内层区域覆盖三省一市 (上海、江苏、浙江、安徽) 及其周边地区, 水平分辨率为 9 km × 9 km. 气象场初始与侧边界条件使用 1° × 1° 全球再分析资料 NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction-Final Analysis). 化学场侧边界条件采用模式自带的理想廓线. 边界层参数化方案采用 YSU (Yonsei University), 积云对流参数化方案采用 Grell-3, 辐射参数化方案采用 RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model for GCM), 微物理过程参数化方案采用 Morrison double-moment. 气相与液相化学反应机制采用 CBM-Z (Carbon-Bond Mechanism version Z) 方案, 气溶胶机制采用 4 档 MOSAIC (Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry), 光解作用采用 Fast-J 方案. 生物排放由 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) 计算.

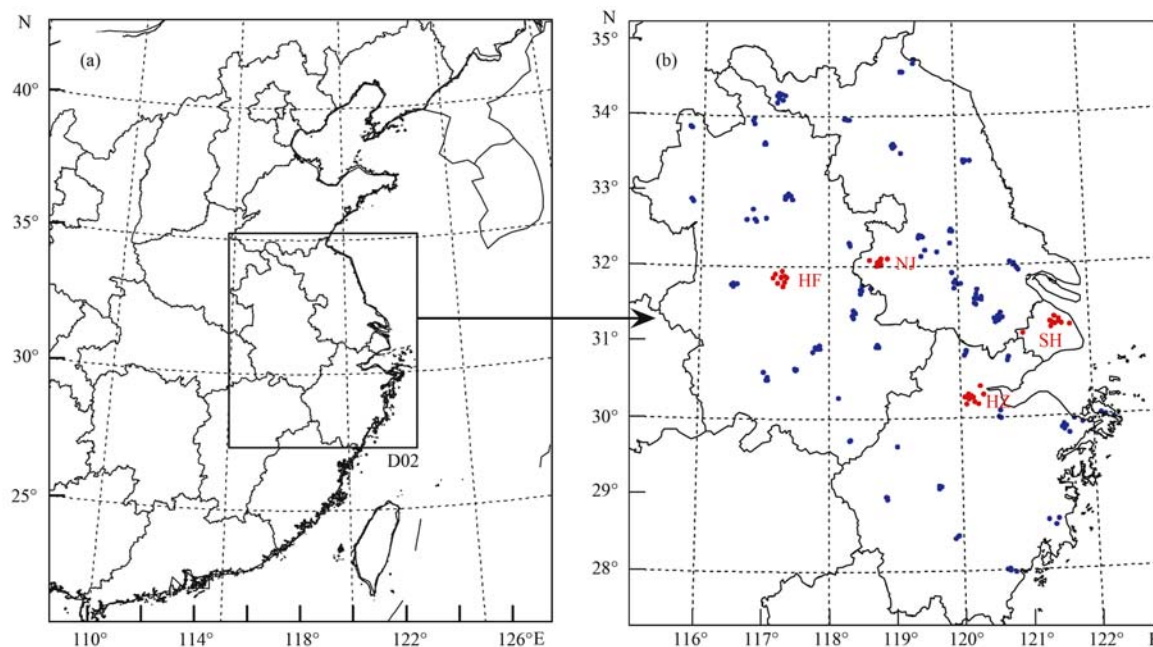
1.2 试验设计与观测数据

本次模拟除了基准情景试验以外, 为降低对削

减效果评估的不确定性, 设计两组减排试验, 分别为重点源一般减排以及强化减排情景试验. 以 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的 2013 年作为模拟年, 分别选取 1、4、7、10 月作为冬、春、夏、秋四季的代表月份进行模拟, 每月提前 6 d 运行, 作为模式初始化阶段. 4 个月的污染物浓度平均值作为年均值. 3 组试验除重点源排放数据不同, 其余排放源数据及模式设置均相同.

上海、南京、杭州、合肥在 2013 年 1、4、7、10 月的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 近地面浓度逐小时数据由浙江省环境保护科学设计研究院提供, 监测站点数分别为 10、9、10、10 个, 用于检验基准情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 模拟

值. 4 个大气气溶胶粒子(硫酸盐、硝酸盐、铵盐)采样点数据用于检验基准情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 中硫酸盐、硝酸盐和铵盐模拟值. 采样点分别位于杭州(30.23°N, 120.17°E)、临安(30.3°N, 119.73°E)、苏州(31.22°N, 120.38°E)、南京(32.21°N, 118.72°E), 采样时间为 2013 年 1 月 18~24 日, 4 月 9~15 日, 7 月 8~14 日, 其中苏州 1 月为 22~31 日, 南京 4 月为 10~19 日^[24, 25]. 此外, 为获取各行政区模拟浓度值, 采用监测站点所在网格平均方法对模拟结果进行空间统计^[15, 17]. 目前, 长三角地区国控站点共有 192 个, 上海、江苏、浙江、安徽各有 10、71、45、66 个. 站点位置如图 1(b) 所示.



SH: 上海, HZ: 杭州, NJ: 南京, HF: 合肥; 蓝点: 所有国控点, 红点: 获得观测数据的国控点

图 1 WRF-Chem 模式嵌套区域设置及长三角地区所有的和已获得观测数据的国控站点位置

Fig. 1 WRF-Chem modeling domains and locations of all national environmental monitoring sites in the Yangtze River Delta and sites at which $\text{PM}_{2.5}$ observation data have been obtained in this study

1.3 大气污染物排放清单简介

长三角地区大气污染物人为源排放清单由上海环境科学研究院提供, 包含江苏、浙江、安徽、上海三省一市工业、机动车、船舶以及无组织面源数据, 水平分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, 污染源排放年为 2014 年, 污染物物种包括 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 VOCs 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 . 中东部其他地区则采用 HTAP_v 2.2 排放清单^[26], 水平分辨率为 0.1° (纬度) $\times$ 0.1° (经度), 更新至 2010 年, 污染物物种除包括上述 7 种外还包括 OC 和 BC.

图 2 为 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、NMVOC 和 NH_3 这 5 种污染物 2014 年排放量的空间分布. 其中, SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NMVOC 的空间分布基本一致, 高排放区主要集中在经济发达的城市群一带, 包括安徽

合肥、芜湖、马鞍山, 江苏南京、无锡、常州、苏州, 浙江杭州、嘉兴、湖州以及上海等城市[图 2(a)~2(d)]. NH_3 主要来自农业部门的化肥施用和畜禽养殖, 高排放区主要分布在安徽北部、江苏沿海地区以及浙江嘉兴等地区[图 2(e)]. 长三角地区 2014 年 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、NMVOC 和 NH_3 平均排放强度分别为 6.8、8.7、1.9、8.1 和 $4.2 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$. 除 NH_3 外, 上海地区 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、NMVOC 的排放强度是长三角地区平均排放强度的 2~3 倍, 分别为 14.2、26.3、4.4 和 $31.0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$.

1.4 减排情景简介

重点源减排情景由浙江省环境保护科学设计研究院提供, 包括八大类重点行业和交通源. 其中八大类重点行业分别为工业锅炉、电力、钢铁、水泥、

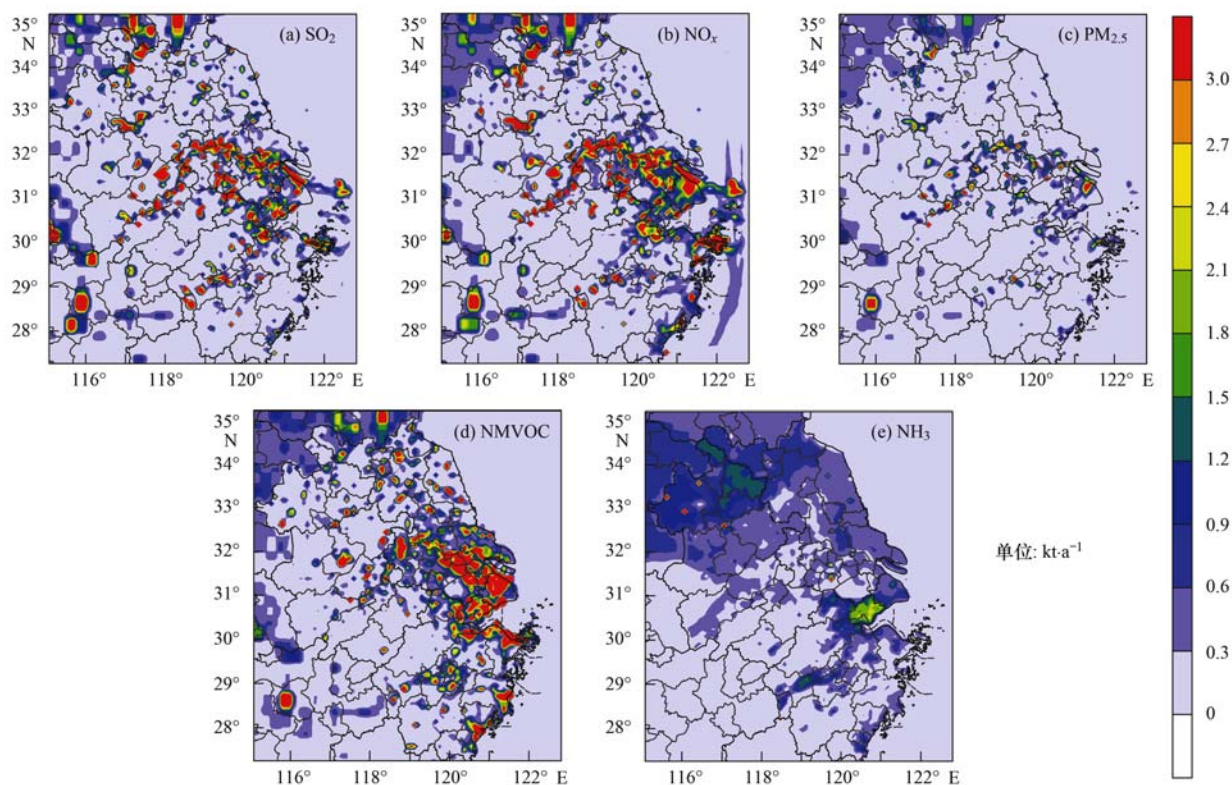


图2 长三角地区2014年大气污染物排放量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of anthropogenic pollutant emissions in the Yangtze River Delta in 2014

化工、石化、印染和喷涂,交通源包括机动车和船舶。重点行业方面考虑长三角地区产业结构调整和能源结构调整,主要包括燃煤小锅炉淘汰改造,“煤改电”和“煤改气”工程建设,增加集中供热建设,燃煤电厂超低排放改造,钢铁、水泥行业脱硫脱硝、除尘改造工程,化工、石化、印染、喷涂行业VOCs污染治理,以及改造提升各行业废气清洁排放技术,使得大气污染物排放分别达到各行业国家或地方标准制定的强制排放限值和特别排放限值。交通源方面主要考虑交通结构调整、提升燃油品质以及提高机动车船排放标准,主要包括淘汰黄标车、老旧车,增加清洁能源汽车,提升汽(柴)油机动车至国V、VI标准,提高船舶发动机排气污染物排放至第一、二阶段限值,使用低硫油和岸电,从而计算得到三省一市及整个长三角地区八大重点行业和交通一般减排量和强化减排量。由于本研究重点源中没有 NH_3 排放,因此未对 NH_3 进行减排控制。2014年长三角地区 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和NMVOC排放总量分别为3113.3、3997.3、880.5和3716.3kt,其中八大重点行业和交通源排放分别占91.2%、91.3%、63.9%和53.3%,可见重点源排放是大气污染物排放的主要来源。

图3给出了基准情景及两组减排情景下各行业 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和NMVOC排放量。长三角地区平均来看, SO_2 排放主要来自工业锅炉、电厂和水泥

行业,排放分担率分别为32.8%、22.7%和20.1%,而上海地区交通源(主要是船舶)是 SO_2 排放的第一贡献源(36.5%); NO_x 排放主要来自电厂和交通,排放分担率均约为30%,而安徽省的水泥行业 NO_x 排放量和电厂排放量比例相当(33.3%和34.1%);一次 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源于水泥、电厂和其他无组织排放源,排放分担率均在20%左右;NMVOC的主要排放源则是八大重点行业以外的其他工艺过程,如砖瓦建材、有色金属冶炼等,占NMVOC总排放的36.9%。由于本文未考虑对重点源以外无组织排放源和其他工艺过程的排放控制,因此一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和NMVOC减排力度有限。总体来看,一般减排情景下, SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和NMVOC排放分别削减36.3%、26.3%、32.0%和14.6%,强化减排情景下,分别削减51.4%、39.6%、37.6%和28.4%(削减比例为占基准情景中排放总量百分比)。

2 结果与讨论

2.1 模拟结果验证

首先,对WRF-Chem模式模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度进行检验评估。图4对比了1、4、7、10月基准试验模拟与观测的 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度和 O_3 每日12:00~18:00的平均浓度,表1给出了详细的统计值,包括观测平均值(OBS)、模拟平均值(SIM)、平均偏

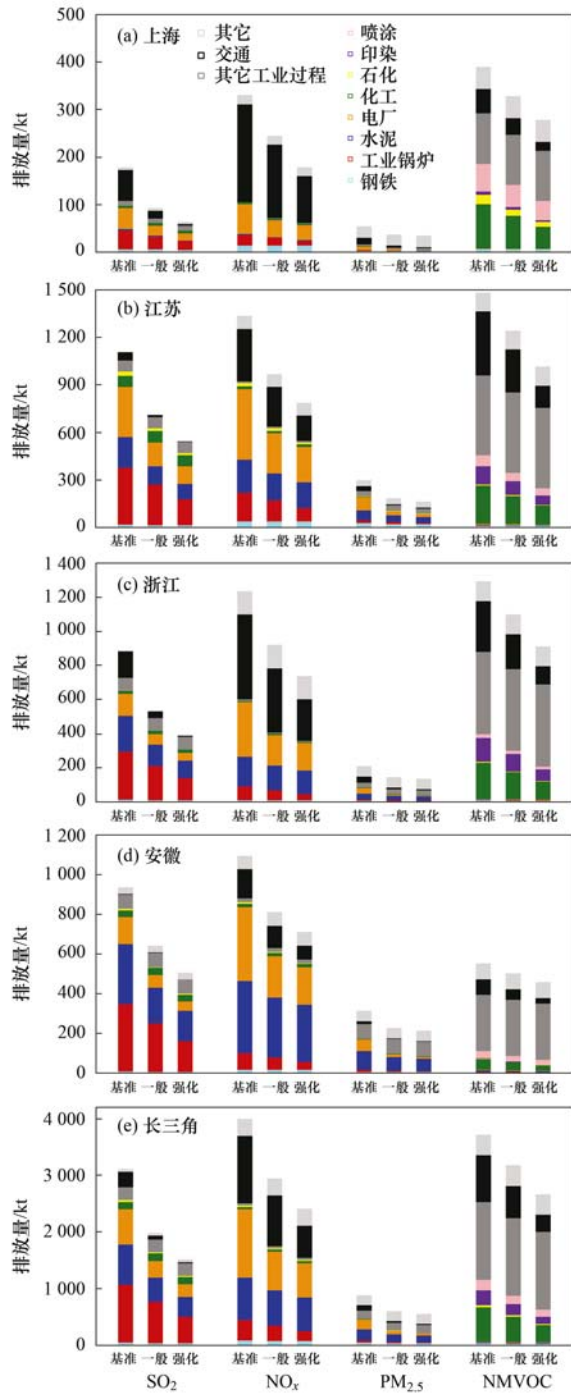


图3 基准情景、一般与强化两组减排情景下 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NMVOC 排放量

Fig. 3 Anthropogenic pollution emissions of SO_2 , NO_x , $\text{PM}_{2.5}$, and NMVOC under baseline, normal, and enhanced emission reduction scenarios

差(MB)、均一化平均偏差(NMB)、均一化平均误差(NME)、平均分数偏差(MFB)、平均分数误差(MFE)以及相关系数(CC)^[9,27]。从图4可以看出, WRF-Chem模式较好地重现了各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度四季变化和逐日变化特征,并且模式能够模拟出大部分观测峰值, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度时间相关系数分别在0.70~0.83和0.34~0.86范围。各城市 $\text{PM}_{2.5}$

浓度MFB和MFE分别在-32.0%~-0.2%和30.5%~41.0%范围, O_3 浓度MFB和MFE分别在-40.5%~19.3%和32.2%~43.6%范围。根据模式模拟性能的中等水平($\text{MFB} \leq \pm 60\%$ 和 $\text{MFE} \leq \pm 75\%$)和高水平($\text{MFB} \leq \pm 30\%$ 和 $\text{MFE} \leq \pm 50\%$)的标准^[28],本次模拟性能达到了中上等水平。由此可见,WRF-Chem模式对2013年1、4、7、10月 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度模拟较好,可作为大气污染物减排效果的评估工具。

进一步对比模拟和观测的硫酸盐、硝酸盐和铵盐浓度发现(图5),模式较好地反映出二次无机盐的季节变化特征,相比于硫酸盐和硝酸盐,铵盐的模拟更加接近观测。4个采样点1月硫酸盐模拟明显偏低,一方面由于 SO_2 对局地源排放更加敏感,排放清单对 SO_2 空间分布的描述存在很大不确定性^[9],另一方面由于模式化学机制的不完善造成 SO_2 过剩,从而低估了硫酸盐浓度^[23,29]。硫酸盐的低估一定程度上影响到硝酸盐浓度模拟值。因此WRF-Chem模式对硫酸盐的模拟仍有待改进。

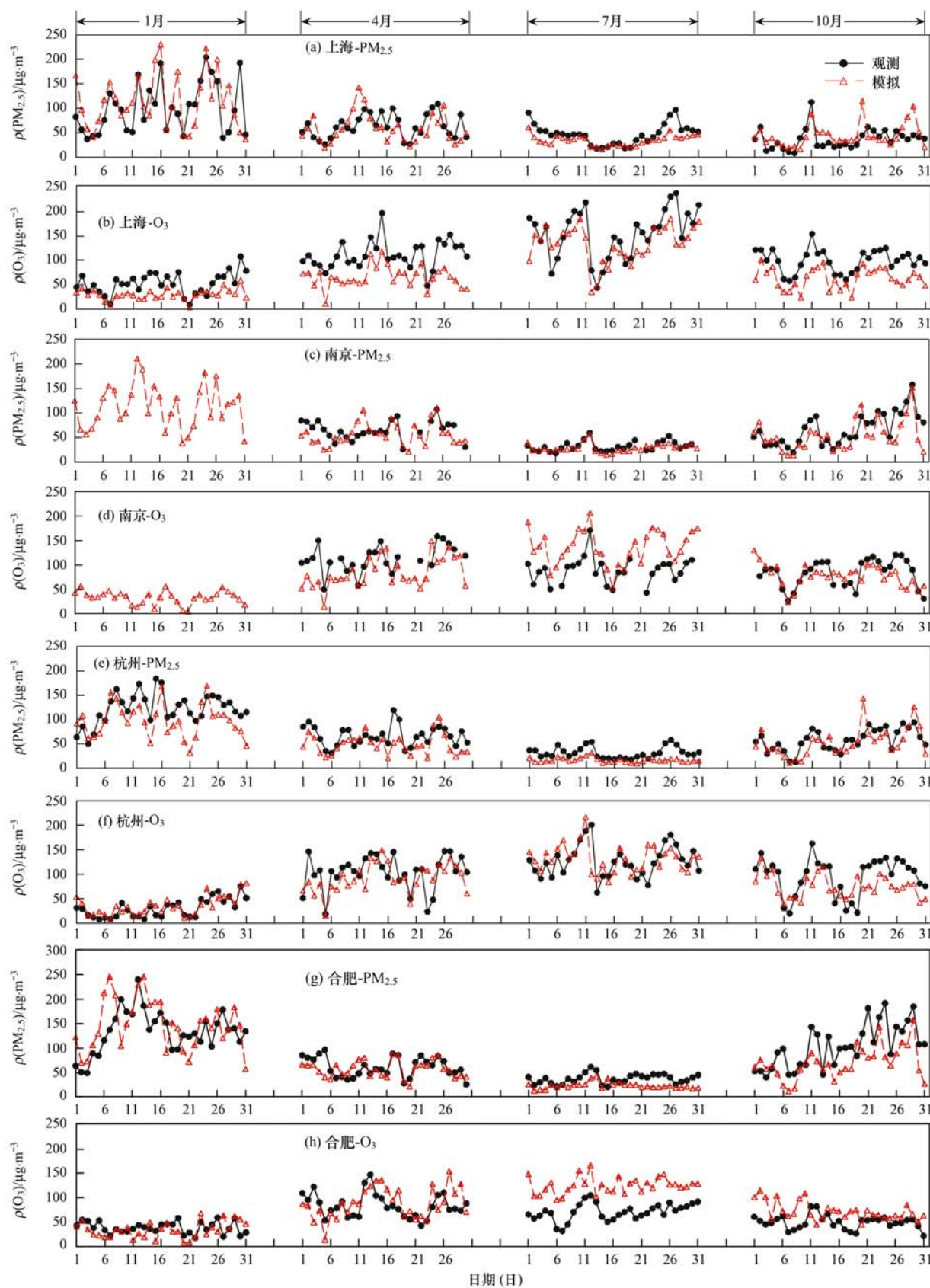
2.2 重点源减排对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响

图6给出了基准情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟值以及两组减排情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化值的空间分布,图7为相应地浓度变化率的空间分布。基准试验模拟结果显示,长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区位于城市群一带,与一次排放 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 以及NMVOC的高排放区基本吻合(图2)。两组减排情景下,长三角大部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 各季节及年均浓度成降低趋势,冬季高浓度对年均浓度影响较大,浓度下降大值区主要集中在江苏南部以及北部的徐州市、安徽中南部以及北部的淮南市、淮北市,相应的浓度下降率也呈现出相似的空间分布特征。随着减排力度的增加, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降值以及下降大值区范围(下降率以及降幅大值区范围)随之增大,强化减排情景下,夏季江苏中南部、上海、浙江嘉兴、杭州、宁波以及金衢盆地部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 降幅超过20%。

为了更直观地体现各国控点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的削减效果,图8给出了长三角地区国控点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值及两组减排情景下各季节及年均变化值及变化率的散点分布。一般与强化减排情景下, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分别下降1.4~26.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和2.1~32.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年均降幅分别为2.7%~23.1%和3.9%~27.5%。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越高,重点源减排导致的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降值越大,而下降率反之。随着减排力度的增大, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度削减效果的差异程度随之增大,两组减排情景下, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大下降值分别为41.1

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $50.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 出现在 1 月, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最大降幅分别为 27.4% 和 32.8%, 出现在 7 月。

表 2 统计了两组减排情景下三省一市及长三角地区平均 $\text{PM}_{2.5}$ 各季节及年均浓度变化值及变化率。



O_3 逐日浓度为 12:00 ~ 18:00 平均值

图 4 基准试验模拟与观测的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 逐日浓度对比

Fig. 4 Comparison of simulated daily $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 concentrations with observations

表 1 模拟与观测 PM _{2.5} 和 O ₃ 日均浓度统计结果 ¹⁾									
Table 1 Statistics of the daily PM _{2.5} and O ₃ concentrations from the baseline simulation in comparison with observations									
化学要素	城市	OBS / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SIM / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MB / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	NMB /%	NME /%	MFB /%	MFE /%	CC
PM _{2.5}	上海	61.2	62.3	1.1	1.8	38.0	-0.2	37.1	0.70
	南京	54.6	63.3	-7.4	-13.6	28.3	-15.0	30.5	0.74
	杭州	69.4	54.1	-15.2	-21.9	31.5	-32.0	41.0	0.83
	合肥	83.8	74.7	-9.1	-10.9	33.4	-20.0	39.2	0.78
O ₃	上海	104.3	73.4	-31.0	-29.7	32.1	-40.5	43.4	0.86
	南京	93.7	83.0	5.9	6.3	36.0	3.0	34.9	0.34
	杭州	88.6	83.4	-5.2	-5.9	26.9	-0.2	32.3	0.78
	合肥	60.7	80.0	19.6	32.3	50.1	19.3	43.6	0.58

1) O₃ 日均浓度为 12:00 ~ 18:00 平均值

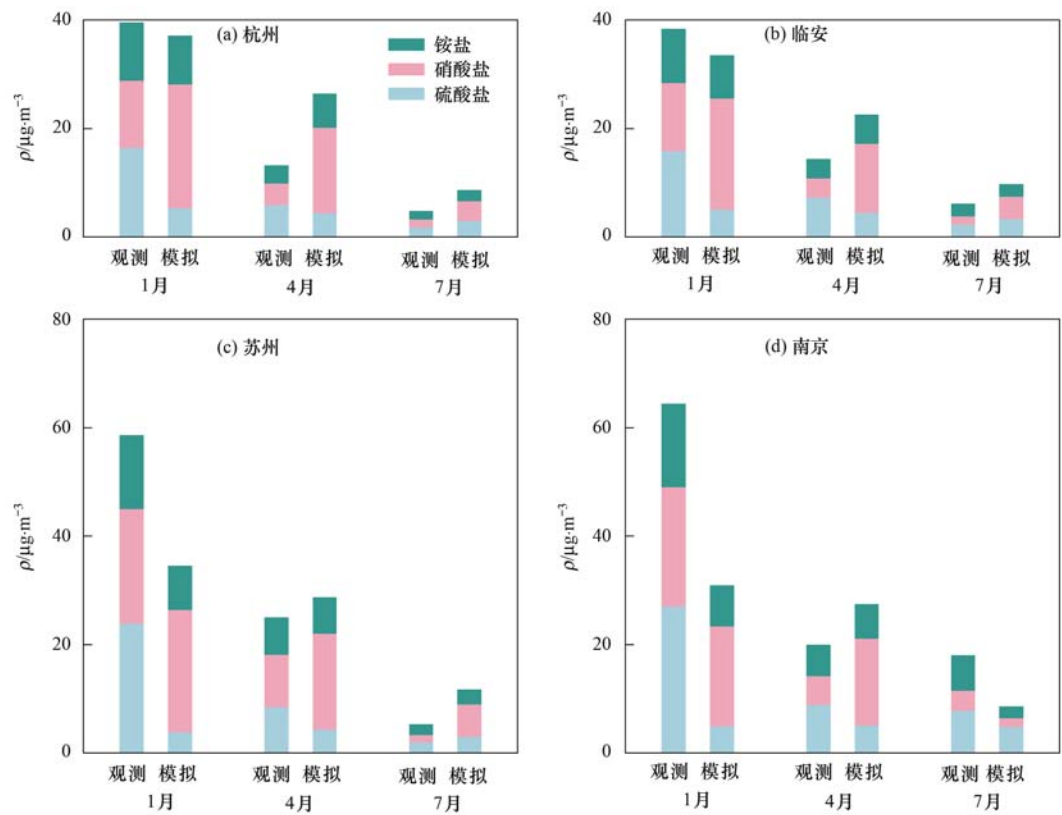


图 5 基准试验模拟与观测的硫酸盐、硝酸盐和铵盐浓度对比

Fig. 5 Comparison of simulated daily mean sulfate, nitrate, and ammonium concentrations with observations

区域平均结果显示，一般与强化两组减排情景下，三省一市 PM_{2.5} 年均浓度分别下降 3.8 ~ 7.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、5.0 ~ 8.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，降幅分别为 9.0% ~ 11.2%、11.8 ~ 13.9%。长三角地区 PM_{2.5} 年均浓度分别降低 6.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 7.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，降幅分别为 10.1% 和 12.6%。各情景下三省一市及长三角地区平均 PM_{2.5} 浓度四季削减效果均体现为冬季浓度值降低最大而降幅最小，夏季浓度值下降最小而降幅最大(除了强化减排情景下上海 10 月 PM_{2.5} 浓度降幅在四季中最小)，春、秋季 PM_{2.5} 浓度变化(变幅)基本一致。总体来看，长三角地区重点源减排在夏季最有效，而冬季效果最差。增大减排力度后，

PM_{2.5} 浓度降幅的季节差异更明显，主要体现在夏季降幅增加值是其余季节的 2 倍左右。强化减排可使得上海、江苏、浙江、安徽夏季 PM_{2.5} 浓度分别下降 22.1%、19.8%、17.1% 和 14.1%，其中，上海和江苏夏季只减排重点源即可基本达到 20% 的削减目标。因此，上海和江苏春、秋、冬季以及浙江和安徽四季需要重点源以外的其他源配合削减，才能达到 PM_{2.5} 浓度显著下降的效果。

2.3 重点源减排对无机盐组分的影响

作为二次无机盐气溶胶和臭氧的前体物，SO₂、NO_x、NMVOC 的减排对二次无机盐的生成有重要影响。表 3 统计了基准情景下长三角平均各月份及年均二次无机盐浓度值以及在两组减排情景下的浓

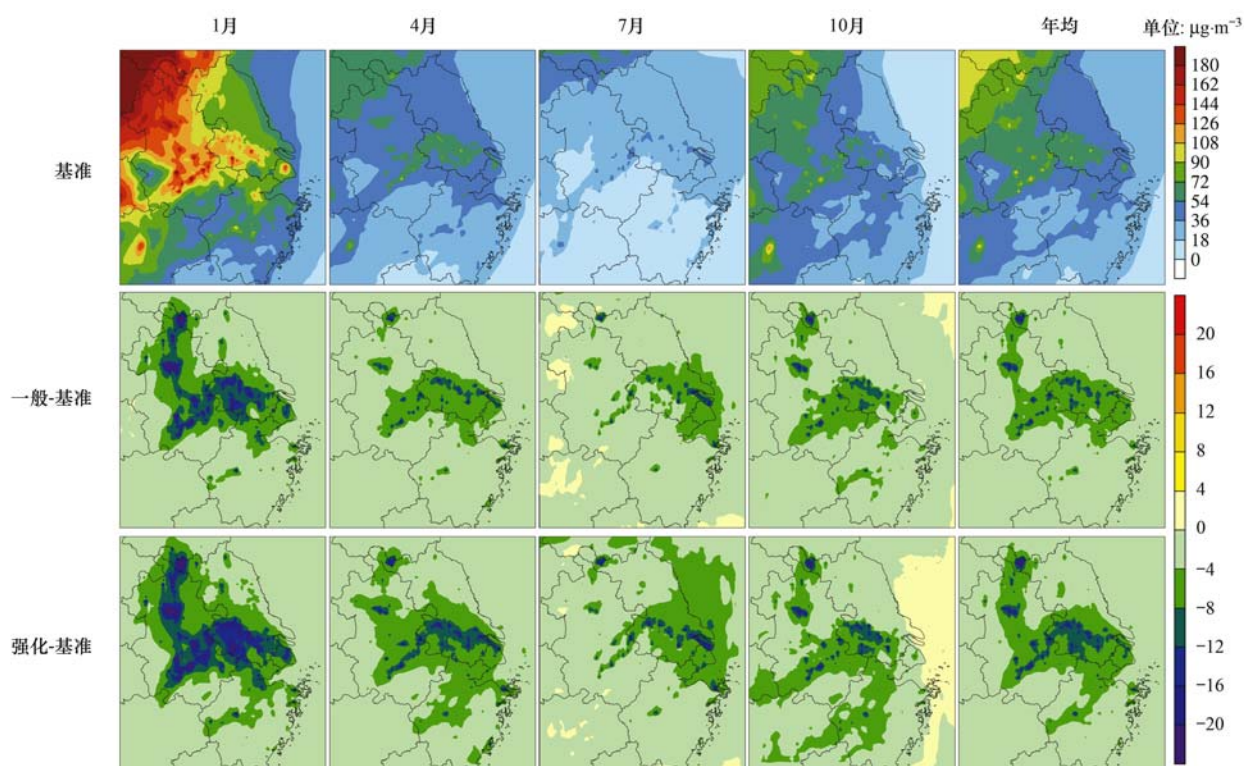
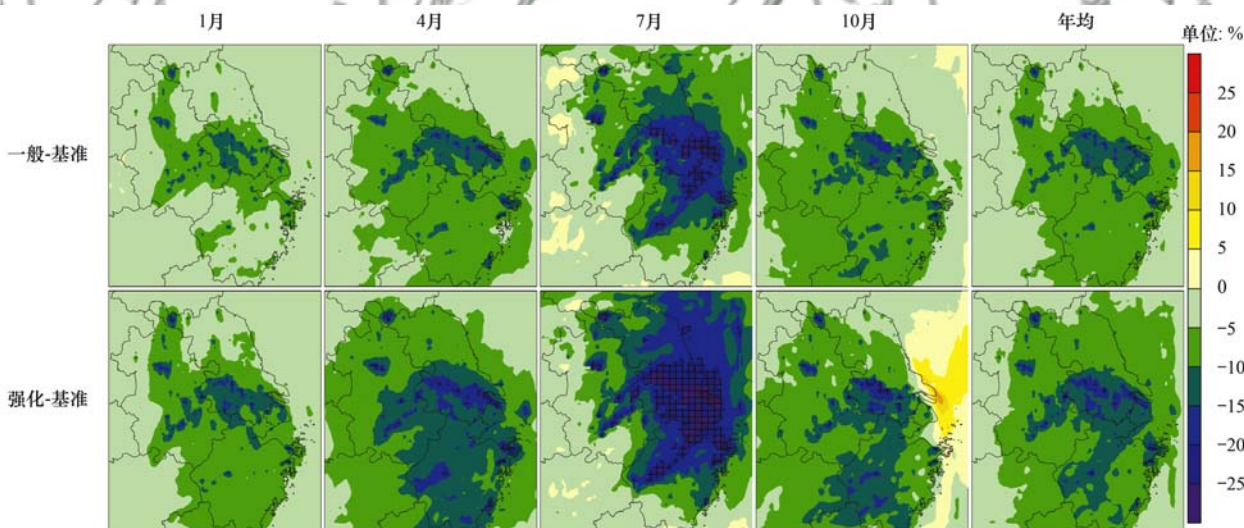


图 6 基准情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 各月份及年均浓度以及两组减排情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化值

Fig. 6 Spatial distribution of the monthly (January, April, July, and October) and annual mean $\text{PM}_{2.5}$ concentrations under the baseline scenario and the changes under normal and enhanced emission reduction scenarios



$\text{PM}_{2.5}$ 浓度降幅超过 20% 的地区由阴影标出

图 7 两组减排情景下 $\text{PM}_{2.5}$ 各月份及年均浓度变化率

Fig. 7 Spatial distributions of the percentage changes of the monthly and annual mean $\text{PM}_{2.5}$ concentrations under the two emission reduction scenarios

度变化值与变化率。从中可知,硝酸盐和铵盐浓度有明显的季节变化,体现为冬季最高,夏季最低,而硫酸盐浓度季节差异不明显。3 种无机盐总量在冬、春、夏、秋季分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 33.9%, 45.0%, 34.5% 和 42.9%。其中,硝酸盐浓度分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 22.7%、26.7%、12.7% 和 27.1%,冬、春、秋季超过了硫酸盐和铵盐的总和。因此,

硝酸盐浓度的变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响可能比硫酸盐和铵盐的影响更大。

一般与强化两组减排情景下,长三角地区国控点硝酸盐年均浓度分别下降 $0.0 \sim 0.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($0.6\% \sim 6.3\%$) 和 $0.2 \sim 1.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($2.0\% \sim 12.1\%$),硫酸盐浓度分别下降 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($1.7\% \sim 9.8\%$) 和 $0.1 \sim 0.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($2.9\% \sim$

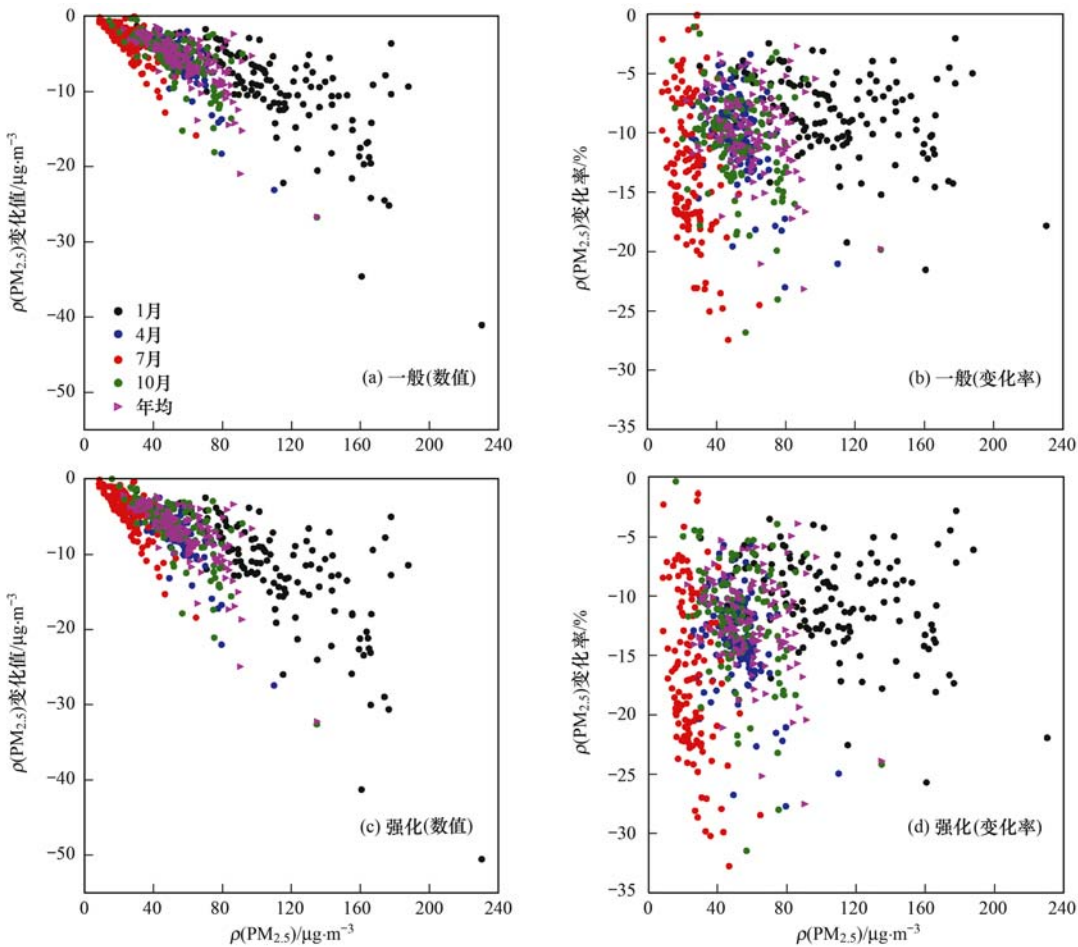


图8 长三角地区国控点 PM_{2.5} 浓度值及两组减排情景下各季节及年均变化值及变化率的散点分布

Fig. 8 Comparison of changes and percentage changes of the monthly and annual mean PM_{2.5} concentrations with the monthly and annual mean PM_{2.5} concentrations at the national environmental monitoring sites under the two emission reduction scenarios

表2 两组减排情景下三省一市及整个长三角地区 PM_{2.5} 浓度变化统计结果¹⁾

Table 2 Simulated monthly and annual mean PM_{2.5} concentration changes under the two emission reduction scenarios

项目	月份	上海	江苏	浙江	安徽	长三角
基准	1	112.5	107.1	72.5	143.8	108.6
	4	58.6	53.8	41.0	58.1	51.6
	7	33.9	27.9	17.7	28.0	25.2
	10	44.2	50.2	40.2	68.8	52.7
	年均	62.3	59.7	42.9	74.7	59.5
一般-基准	1	-9.3(-8.3)	-10.5(-9.8)	-5.2(-7.2)	-12.7(-8.8)	-9.6(-8.8)
	4	-6.4(-10.9)	-5.8(-10.8)	-3.9(-9.6)	-6.2(-10.7)	-5.4(-10.5)
	7	-6.0(-18.1)	-4.2(-15.2)	-2.4(-13.3)	-3.3(-11.7)	-3.5(-13.8)
	10	-4.3(-9.6)	-6.1(-12.2)	-3.9(-9.7)	-7.3(-10.6)	-5.7(-10.9)
	年均	-6.5(-10.5)	-6.7(-11.2)	-3.8(-9.0)	-7.4(-9.9)	-6.0(-10.1)
强化-基准	1	-11.8(-10.5)	-12.9(-12.1)	-6.7(-9.2)	-15.5(-10.7)	-11.8(-10.9)
	4	-7.7(-13.1)	-7.6(-14.1)	-5.6(-13.7)	-8.0(-13.7)	-7.1(-13.8)
	7	-7.5(-22.1)	-5.5(-19.8)	-3.0(-17.1)	-4.0(-14.1)	-4.4(-17.4)
	10	-3.7(-8.5)	-7.1(-14.1)	-4.8(-12.0)	-8.3(-12.1)	-6.6(-12.5)
	年均	-7.7(-12.3)	-8.3(-13.9)	-5.0(-11.8)	-8.9(-11.9)	-7.5(-12.6)

1) 括号外数值表示 PM_{2.5} 浓度变化值, 单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 括号内数值表示相应的变化率, 单位: %

13.9%), 铵盐浓度分别下降 0.1 ~ 0.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (1.2% ~ 6.1%) 和 0.1 ~ 0.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (2.2% ~ 11.6%). 与 PM_{2.5} 浓度降幅的季节差异特征相似,

重点源减排对无机盐浓度的影响也体现为冬季降幅最小, 夏季降幅最大, 并且由于强化减排使得夏季降幅明显增加, 从而使得无机盐浓度降幅的季节差

表 3 两组减排情景下长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和无机盐组分浓度变化统计结果¹⁾Table 3 Simulated monthly and annual mean $\text{PM}_{2.5}$, sulfate, nitrate, and ammonium concentration changes under the two emission reduction scenarios

项目	月份	$\text{PM}_{2.5}$	硫酸盐	硝酸盐	铵盐
基准	1	108.6	3.5	24.6	8.7
	4	51.6	4.0	13.8	5.4
	7	25.2	3.4	3.2	2.1
	10	52.7	3.1	14.3	5.2
	年均	59.5	3.5	14.0	5.4
一般-基准	1	-9.6(-8.8)	-0.1(-2.8)	0.1(0.5)	-0.0(-0.0)
	4	-5.4(-10.5)	-0.3(-6.6)	-0.5(-3.6)	-0.2(-4.6)
	7	-3.5(-13.8)	-0.3(-9.1)	-0.4(-12.9)	-0.2(-11.0)
	10	-5.7(-10.9)	-0.1(-4.8)	-0.5(-3.8)	-0.2(-4.0)
	年均	-6.0(-10.1)	-0.2(-5.8)	-0.3(-2.4)	-0.2(-3.3)
强化-基准	1	-11.8(-10.9)	-0.2(-4.6)	-0.2(-0.7)	-0.1(-1.3)
	4	-7.1(-13.8)	-0.4(-11.0)	-1.1(-8.0)	-0.5(-9.2)
	7	-4.4(-17.4)	-0.5(-13.5)	-0.7(-20.2)	-0.4(-16.8)
	10	-6.6(-12.5)	-0.2(-7.5)	-0.7(-4.8)	-0.3(-5.5)
	年均	-7.5(-12.6)	-0.3(-9.2)	-0.7(-4.7)	-0.3(-5.8)

1) 括号外数值表示 $\text{PM}_{2.5}$ 和二次无机盐组分浓度变化值, 单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 括号内数值表示相应的变化率, 单位: %

异更显著. 冬季无机盐浓度的下降值明显小于其他季节, 甚至在一般减排情景下硝酸盐浓度略有升高, 强化减排下冬季硝酸盐浓度有所降低, 可见冬季硝酸盐浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 前体物排放之间的非线性关系较硫酸盐和铵盐更强. 春、夏、秋季各无机盐浓度下降值相当, 其中强化减排使得春季硝酸盐浓度下降 $1.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 是一般减排情景下的 2 倍以上. 两组减排情景下夏季无机盐浓度降幅分别为 9.1% ~ 12.9% 和 13.5% ~ 20.2%, 与夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降幅基本一致. 由于重点源中未涉及 NH_3 的排放, 因此铵盐浓度的变化是与硫酸盐和硝酸盐的变化动态平衡的结果.

图 9 显示了两组减排情景下硫酸盐、硝酸盐和铵盐对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献值与贡献率. 从无机盐对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献率来看[图 9(b)], 随着对各前体物削减力度的增大, 二次无机盐对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献率也随之升高. 总贡献率在夏季最大, 一般与强化两组减排情景下分别为 25.7% 和

36.4%, 冬季最小, 均不超过 5%. 硝酸盐在春、夏、秋季贡献相当, 硫酸盐和铵盐的贡献则是春、夏季明显高于秋、冬季. 各情景各月份均显示硝酸盐对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献最大(除了一般减排情景下的 1 月), 并且硝酸盐在春、秋季的贡献超过了硫酸盐和铵盐的贡献之和, 此外, 增强减排力度使得冬季硝酸盐的负贡献转变为正贡献.

2.4 重点源减排对大气氧化性的影响

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度及二次无机盐浓度削减幅度与前体物减排幅度不一致, 这主要是由非线性的大气反应过程决定的. 考虑到硝酸盐的生成在富氨(NH_3 -rich)和贫氨(NH_3 -poor)状态下有明显差异, 首先, 应用调整气态比(AdjGR)来判断 2013 年长三角地区无机盐气溶胶对前体物的敏感性^[16, 30], 定义如下:

$$\text{AdjGR} = \frac{[\text{NH}_3] + [\text{NO}_3^-]}{[\text{NO}_3^-] + [\text{HNO}_3]} \quad (1)$$

各情景下 AdjGR 各月份及年均值的空间分布

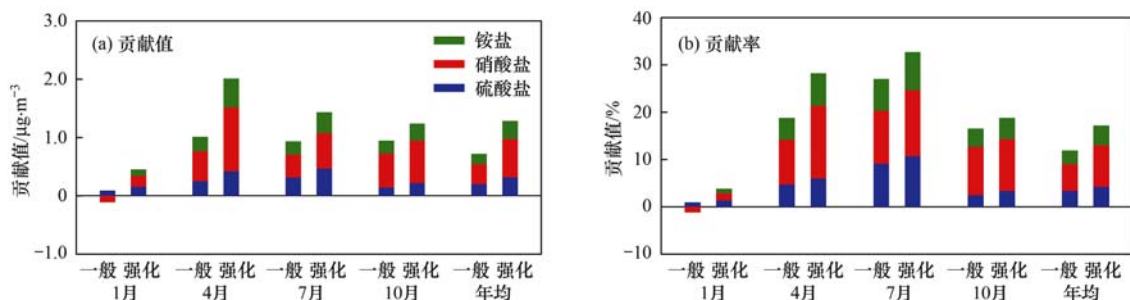
图 9 两组减排情景下硫酸盐、硝酸盐和铵盐对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献值和贡献率

Fig. 9 Monthly and annual mean sulfate, nitrate, and ammonium concentration reductions under the two emission reduction scenarios and corresponding percentages of $\text{PM}_{2.5}$ concentration reductions

如图 10 所示, 可以看出基准情景和两组减排情景下长三角地区四季都处于 NH_3 -rich ($\text{AdjGR} > 1$) 的

状态, 即二次无机盐生成对大气氧化性更加敏感^[15].

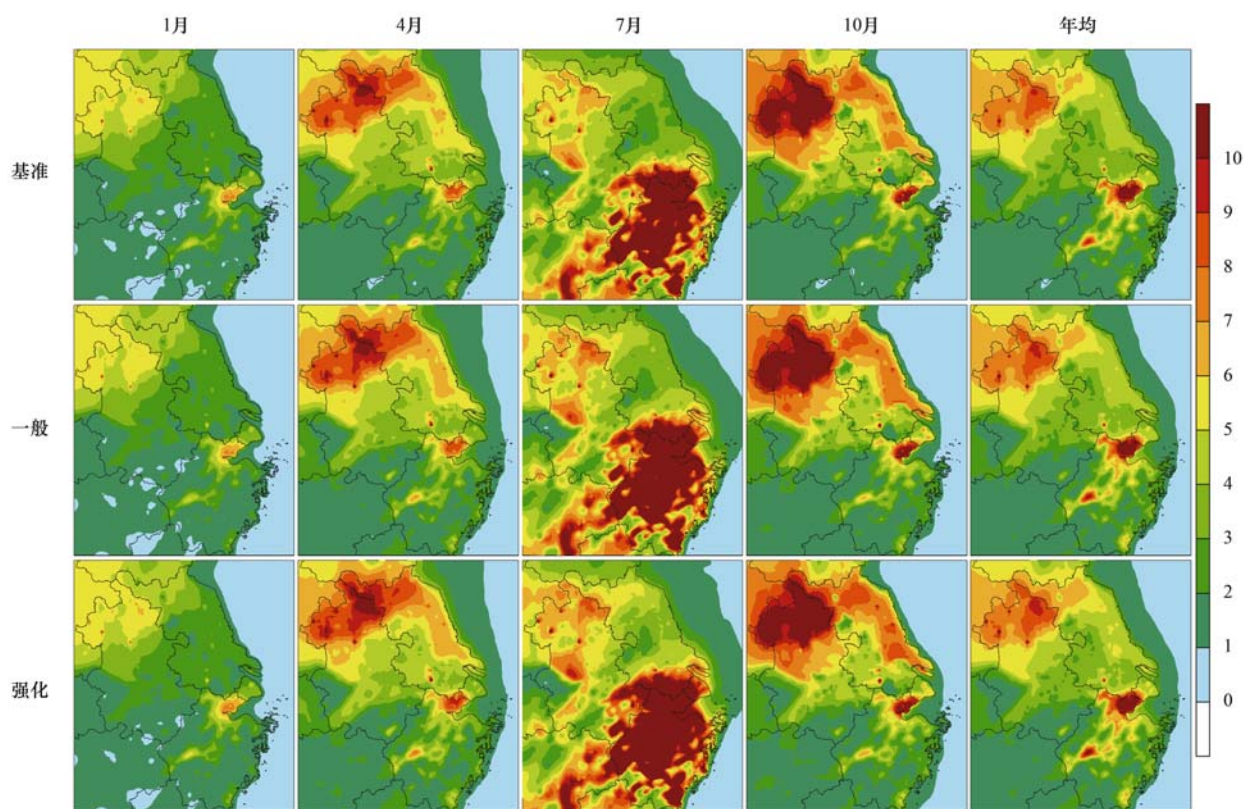


图 10 基准情景及两组减排情景下调整气态比 (AdjGR) 各月份及年均值空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of monthly and annual mean AdjGR factors under three different scenarios

图 11 给出了各情景各月份长三角地区平均臭氧 (O_3) 浓度和 HO_x ($\text{HO} + \text{HO}_2$) 浓度的日内变化. 由于长三角地区属于 O_3 的 VOCs 控制区, NO_x 排放的减少导致 O_3 浓度在四季有不同程度的升高. 一般与强化减排情景下冬季白天 (12:00 ~ 18:00)^[4] O_3 浓度平均升高分别为 $7.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $11.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增幅分别为 20.3% 和 31.5% [图 11(a)].

重点源减排对春秋季节 O_3 浓度影响较为一致, 增加量与冬季相当, 但增幅较弱, 两组减排情景下春季 O_3 浓度增幅分别为 9.5%、13.7%, 秋季分别为 11.3%、16.5% [图 11(b) 和 11(d)]. 重点源减排对夏季 O_3 浓度的影响与其他季节有明显差异, 主要体现为快速地光化学反应使得白天 O_3 浓度基本不受减排的影响, 甚至在强化减排情景下 O_3 浓度

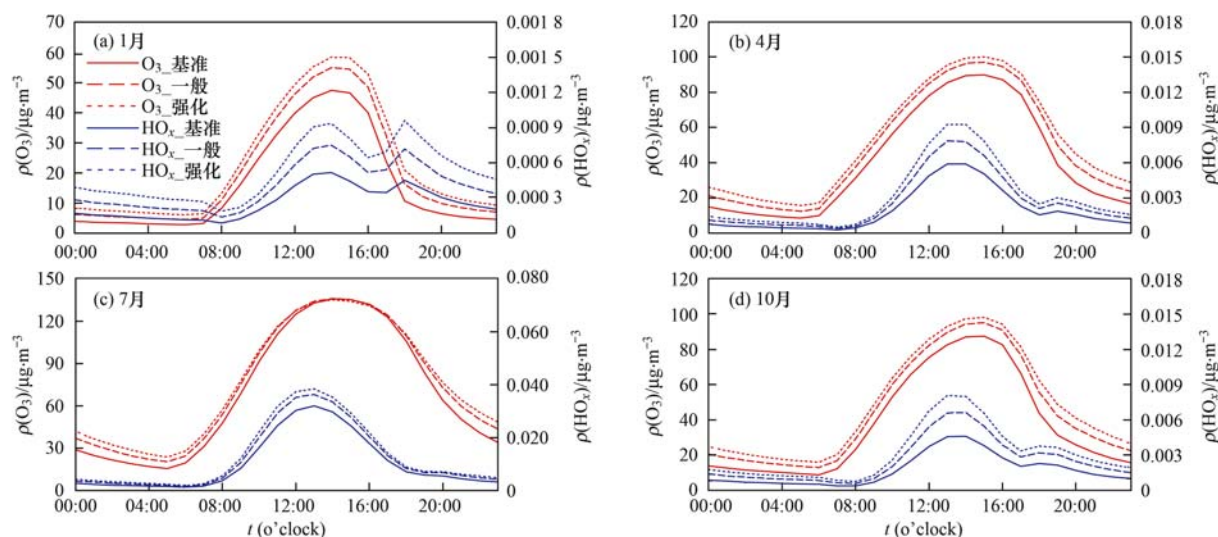


图 11 基准情景及两组减排情景下长三角地区 O_3 和 HO_x 浓度日内变化

Fig. 11 Monthly average diurnal profiles of O_3 (red lines) and HO_x (blue lines) in the Yangtze River Delta

在 14:00 ~ 16:00 还略有下降[图 11(c)]. 此外, 减排对 HO_x 自由基的影响也存在相似的季节变化特征, 即冬季增幅最大[图 11(a)], 夏季增幅最小[图 11(c)], 一般与强化减排情景下, HO_x 浓度 1、4、7、10 月白天分别增加 (48.8%、88.7%)、(32.3%、56.4%)、(14.3%、21.2%)、(42.6%、72.5%). 强化减排相比于一般减排, 冬、春、秋季 O_3 和 HO_x 浓度增加值分别继续升高约 44.6 ~ 55.2%、70.2% ~ 81.6%, 而夏季变化与其它季节有所不同, O_3 浓度增加值降低 39.4%, HO_x 浓度增加值升高 47.9%, 明显小于其他季节.

由此可见, 重点源减排对四季大气氧化性均有不同程度的增强, 有利于硫酸盐和硝酸盐的生成, 从而抑制了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降低. 冬季大气氧化性的显著增强部分抵消甚至超过了前体物减排对硫酸盐和硝酸盐的削减作用, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善效果最差, 甚至在一般减排情景下硝酸盐浓度有所升高, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降低有负贡献(图 9). 春、秋、冬季加大减排力度后大气氧化性进一步增强, 不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降低, 削弱了 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的进一步改善效果. 重点源减排对夏季大气氧化性影响不明显, 并且增强减排力度后对其影响相比其季节明显较弱, 因此, 夏季二次无机盐浓度的削减效果主要受到前体物减排的直接作用, 从而对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的改善在四季中最有效, 并且增强减排力度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降幅的提高在四季中最显著.

3 结论

(1) 一般与强化两组减排情景下, 长三角地区国控点 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分别下降 1.4 ~ 26.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 2.1 ~ 32.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 降幅分别为 2.7% ~ 23.1% 和 3.9% ~ 27.5%. 季节特征主要体现为冬季浓度值降低最大而降幅最小, 最大下降值可分别达到 41.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 50.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 夏季浓度值下降最小而降幅最大, 最大降幅可分别达到 27.4% 和 32.8%, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越高, 下降值越高, 而下降率反之. 此外, 减排力度越大, 降幅的季节差异越大. 上海、江苏夏季重点源强化减排即可使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低约 20%. 因此, 上海、江苏春、秋、冬季以及浙江和安徽四季需要配合重点源以外的其他源共同削减, 才能达到 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著下降的效果.

(2) 一般与强化两组减排情景下, 二次无机盐浓度降幅与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降幅的季节差异特征相似. 冬季硝酸盐浓度与 $\text{PM}_{2.5}$ 前体物排放之间的非线性关系较硫酸盐和铵盐更强. 各情景各季节硝酸盐在二次无机盐中对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献最大, 除了

一般减排情景下冬季硝酸盐为负贡献.

(3) 重点源减排对四季大气氧化性均有不同程度的增强, 有利于二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成, 从而阻碍了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降低. 加大减排力度后, 大气氧化性进一步增强, 阻碍了 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的进一步改善. 其中, 冬季的阻碍作用最强, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善效果最差, 夏季大气氧化性受减排影响较小, 使得 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善在四季中最有效, 考虑到冬季是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重的季节, 因此, 应在冬季实施更加全面的减排措施, 同时 $\text{PM}_{2.5}$ 前体物与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的非线性关系在春、秋季对减排的影响也不容忽视.

参考文献:

- [1] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(1): 1-42.
- [2] Jiang C, Wang H, Zhao T, *et al.* Modeling study of $\text{PM}_{2.5}$ pollutant transport across cities in China's Jing-Jin-Ji region during a severe haze episode in December 2013[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(10): 5803-5814.
- [3] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, *et al.* Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(2): 779-799.
- [4] Zhao B, Wang S X, Wang J D, *et al.* Impact of national NO_x and SO_2 control policies on particulate matter pollution in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 453-463.
- [5] Wang S X, Hao J M. Air quality management in China: Issues, challenges, and options[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(1): 2-13.
- [6] Wang S X, Xing J, Zhao B, *et al.* Effectiveness of national air pollution control policies on the air quality in metropolitan areas of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 13-22.
- [7] 刘红年, 胡荣章, 张美根. 城市灰霾数值预报模式的建立与应用[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(6): 631-636.
Liu H N, Hu R Z, Zhang M G. Development and application of urban haze numerical forecast model[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(6): 631-636.
- [8] 戴昭鑫, 张云芝, 胡云锋, 等. 基于地面监测数据的 2013 ~ 2015 年长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 时空特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, **25**(5): 813-821.
Dai Z X, Zhang Y Z, Hu Y F, *et al.* Spatial-temporal characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Yangtze River Delta (YRD) region based on the ground monitoring data from 2013- 2015[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(5): 813-821.
- [9] Wang L T, Jang C, Zhang Y, *et al.* Assessment of air quality benefits from national air pollution control policies in China. Part II: Evaluation of air quality predictions and air quality benefits assessment[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(28): 3449-3457.
- [10] 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.
- [11] Dong X Y, Li J, Fu J S, *et al.* Inorganic aerosols responses to emission changes in Yangtze River Delta, China[J]. *Science of*

- the Total Environment, 2014, **481**: 522-532.
- [12] Wang L T, Zhang Y, Wang K, *et al.* Application of weather research and forecasting model with chemistry (WRF/Chem) over northern China: Sensitivity study, comparative evaluation, and policy implications [J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**: 337-350.
- [13] 孟宁, 贝耐芳, 李国辉, 等. 关中地区冬季人为源减排对 PM_{2.5} 浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(5): 1646-1656.
- Meng N, Bei N F, Li G H, *et al.* Response of the wintertime PM_{2.5} level to anthropogenic emission mitigations in the Guanzhong basin [J]. China Environmental Science, 2017, **37**(5): 1646-1656.
- [14] 吴文景, 常兴, 邢佳, 等. 京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 867-875.
- Wu W J, Chang X, Xing J, *et al.* Assessment of PM_{2.5} pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 867-875.
- [15] 贺克斌, 张强, 洪朝鹏, 等. 京津冀能否实现 2017 年 PM_{2.5} 改善目标? 基于“大气十条”的京津冀地区细颗粒物污染防治政策效果评估 [EB/OL]. <http://www.efchina.org/Reports-zh/report-cemp-20140924-zh>, 2014-09-24.
- [16] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the “Air Pollution Prevention and Control Action Plan” on PM_{2.5} concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020 [J]. Science of the Total Environment, 2017, **580**: 197-209.
- [17] 李莉, 安静宇, 卢清. 清洁空气行动计划实施对长三角地区 PM_{2.5} 污染改善效果模拟评估[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(11): 1653-1661.
- Li L, An J Y, Lu Q. Modeling assessment of PM_{2.5} concentrations under implementation of clean air action plan in the Yangtze River Delta region [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(11): 1653-1661.
- [18] Li L, Chen C H, Fu J S, *et al.* Air quality and emissions in the Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(4): 1621-1639.
- [19] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, *et al.* Fully coupled “online” chemistry within the WRF model [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(37): 6957-6975.
- [20] Wang X Y, Liang X Z, Jiang W M, *et al.* WRF-Chem simulation of East Asian air quality: sensitivity to temporal and vertical emissions distributions [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(5): 660-669.
- [21] 庞杨, 韩志伟, 朱彬, 等. 利用 WRF-Chem 模拟研究京津冀地区夏季大气污染物的分布和演变 [J]. 大气科学学报, 2013, **36**(6): 674-682.
- Pang Y, Han Z W, Zhu B, *et al.* A model study on distribution and evolution of atmospheric pollutants over Beijing-Tianjin-Hebei region in summertime with WRF-Chem [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2013, **36**(6): 674-682.
- [22] 高怡, 张美根. 2013 年 1 月华北地区重雾霾过程及其成因的模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 2014, **19**(2): 140-152.
- Gao Y, Zhang M G. Numerical simulation of a heavy fog-haze episode over the North China Plain in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, **19**(2): 140-152.
- [23] 于燕, 廖礼, 崔雪东, 等. 不同人为源排放清单对大气污染物浓度数值模拟的影响: 以浙江省为例 [J]. 气候与环境研究, 2017, **22**(5): 519-537.
- Yu Y, Liao L, Cui X D, *et al.* Effects of different anthropogenic emission inventories on simulated air pollutants concentrations: a case study in Zhejiang Province [J]. Climatic and Environmental Research, 2017, **22**(5): 519-537.
- [24] Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in five sites in the Yangtze River Delta, China: size-fractionated, seasonal variations and sources [J]. Atmospheric Environment, 2015, **123**: 370-379.
- [25] Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* Regional characteristics of air pollutants during heavy haze events in the Yangtze River Delta, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2016, **16**(9): 2159-2171.
- [26] Janssens-Maenhout G, Crippa M, Guizzardi D, *et al.* HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(19): 11411-11432.
- [27] U. S. EPA. Guidance on the use of Models and other analyses for demonstrating attainment of air quality goals of Ozone, PM_{2.5}, and regional haze [R]. Research Triangle Park, NC: Office of Air and Radiation/Office of Air Quality Planning and Standards, 2007.
- [28] Morris R E, Koo B, McNally D, *et al.* Application of multiple models to simulation fine particulate in the southeastern US [A]. Presented at the National Regional Planning Organization Modeling Meeting [C]. Denver CO, USA, 2004.
- [29] Huang X, Song Y, Zhao C, *et al.* Pathways of sulfate enhancement by natural and anthropogenic mineral aerosols in China [J]. Journal of Geophysical Research, 2014, **119**(24): 14165-14179.
- [30] 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.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i>	(1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i>	(11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i>	(24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i>	(33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i>	(44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i>	(55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i>	(67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i>	(76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i>	(86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i>	(94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i>	(104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i>	(114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i>	(121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i>	(126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i>	(143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i>	(149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i>	(157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i>	(164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i>	(185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue	(192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i>	(200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i>	(211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i>	(219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i>	(228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan	(239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i>	(248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i>	(256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i>	(263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i>	(273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i>	(281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i>	(293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i>	(300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i>	(310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i>	(318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i>	(327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i>	(336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i>	(343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i>	(360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i>	(369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i>	(376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i>	(383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i>	(392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i>	(401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i>	(412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i>	(421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i>	(430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i>	(437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping	(445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i>	(453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong	(461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i>	(480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i>	(488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i>	(496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i>	(504)