

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.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟

谢放尖¹, 史之浩², 李婧祎^{2,3}, 郑新梅¹, 胡建林^{2,3*}, 刘春蕾¹, 杨峰¹

(1. 南京市生态环境保护科学研究院, 南京 210093; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 3. 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 以2030年南京市6项污染物达标为约束, 在2015年大气污染物排放清单基础上, 利用CMAQ模型分析了PM_{2.5}对南京本地不同前体物排放的敏感性, 通过情景分析预测排放清单, 模拟了4种减排情景的空气品质变化, 最终获得达标约束下大气污染物总量控制指标. 模拟结果显示, 减少一次颗粒物PPM (primary particulate matter) 排放对降低大气中的PM_{2.5}浓度最为有效; 在周边地区减排的基础上, 本地减少PPM排放对PM_{2.5}年均浓度下降的相对贡献可达88%, 其次为NH₃、NO_x、SO₂与VOCs减排, 其相对贡献分别为10.3%、5.5%、3.2%与0.5%; 相比2015年, 4种情景下南京市主要大气污染物减排比例在22%~53%, 未来控制活动水平对减排SO₂、NH₃与CO较有效, 而NO_x和VOCs末端治理方面还有较大空间; 将SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、CO、VOCs及NH₃的排放量分别控制在 2.43×10^4 、 8.47×10^4 、 9.42×10^4 、 3.74×10^4 、 0.19×10^4 、 0.30×10^4 、 26.56×10^4 、 13.08×10^4 及 1.50×10^4 t以内时, 预计南京市6项污染指标可以达到国家环境空气质量二级标准.

关键词: 达标情景; 情景分析; 排放清单; 模拟; 南京

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-2967-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201812194

Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing

XIE Fang-jian¹, SHI Zhi-hao², LI Jing-yi^{2,3}, ZHENG Xin-mei¹, HU Jian-lin^{2,3*}, LIU Chun-lei¹, YANG Feng¹

(1. Nanjing Municipal Academy of Ecology and Environment Protection Science, Nanjing 210093, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring & Pollution Control, Nanjing 210044, China)

Abstract: With the constraint that all six major pollutants in Nanjing must meet the air quality standards by 2030, on the basis of the 2015 emission inventory, the CMAQ air quality model was used to conduct PM_{2.5} sensitivity tests, and scenario analysis was used to predict the emission inventory and the air quality of four emission reduction scenarios were simulated. Finally, the total control index under the constraint of meeting the standards was obtained. The results show that primary particulate matter (PPM) reduction is the most effective at reducing the concentration of PM_{2.5} in the atmosphere, on the basis of emission reduction in surrounding areas, PPM emission reduction accounts for 88% of the total reduction of the annual average concentration of PM_{2.5}, followed by NH₃, NO_x, SO₂, and VOCs, which contribute to 10.3%, 5.5%, 3.2%, and 0.5%, respectively. Compared to 2015, the reduction ratios of the major pollutants are between 22% and 53%. Controlling the activity level is more effective for SO₂, NH₃ and CO emissions reduction, while there is still more opportunity for NO_x and VOCs end treatment. When the emissions of SO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, OC, CO, VOCs, and NH₃ are controlled to 2.43×10^4 , 8.47×10^4 , 9.42×10^4 , 3.74×10^4 , 0.19×10^4 , 0.30×10^4 , 26.56×10^4 , 13.08×10^4 , and 1.50×10^4 t, respectively, it is expected that the levels of the six pollutants in Nanjing can meet the national ambient air quality level 2 standards.

Key words: target scenario; scenario analysis; emission inventory; simulation; Nanjing

2012年新发布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)增加了PM_{2.5}、CO与O₃指标, 并收紧了PM₁₀、SO₂及NO₂标准限值. 按大气污染防治法要求, 未达标城市需在规定的期限内达到环境空气质量标准. 国务院《长江三角洲城市群发展规划》要求长三角城市2030年空气质量全面达标.

南京市是长三角的核心城市, 也是复合型污染较突出的城市之一^[1~4], 2015年仅SO₂与CO两项指标年均浓度达到GB 3095-2012的二级标准. 有研究显示, 空气质量状况与产业结构^[5], 机动车保有量及自然地理条件密切相关^[6]. 到2030年, 南

京市如何才能达到空气质量标准, 是城市空气质量管理的亟待回答的问题.

情景分析^[7]是开展空气质量达标研究常用的技术手段之一, 人们通过设置不同的发展情景, 对未来的空气质量做出定性或定量的预判. 鱼智霞等^[8]通过设置多个发展情景, 预测了2020和2030

收稿日期: 2018-12-25; 修订日期: 2019-01-31

基金项目: 江苏省环保科研项目(2017003); 南京市环保科研项目(201612)

作者简介: 谢放尖(1982~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为城市大气污染防治, E-mail: strong886@126.com

* 通信作者, E-mail: jianlinhu@nuist.edu.cn

年中国 SO₂ 和 NO_x 排放量;魏巍^[9]基于 2005 年排放清单,分别设置不同的活动水平与污染控制情景,预测了中国 2020 年人为源 VOCs 排放量;安文辉等^[10]以经济、政策、能源为驱动力,构建了 3 种发展情景,预测了 2020 年西安市 SO₂ 与 NO_x 排放量.然而,上述研究主要集中在排放量预测,未对空气质量做出模拟分析.尽管常嘉成等^[11]和薛文博等^[12]通过反复模拟计算获得了空气质量达标时的污染物允许排放总量,但其主要采用等比例削减即“一刀切”的方法来调整排放清单,由于现实中不同污染物减排空间差异较大,因此,该方法在计算上虽简便易行,但在操作层面其不合理的部分是显而易见的.中国清洁空气联盟结合情景预测与空气质量模拟,获得了京津冀与长三角区域 PM_{2.5} 达标约束下排放情景^[13, 14].但在城市尺度,以 6 项污染物达标为约束的情景模拟分析与研究还比较鲜见.

本研究以 2030 年南京市空气质量全面达标为

约束,在 2015 年排放清单的基础上,改变等比例削减的做法,采用情景分析法,对影响污染排放的关键因素设置梯度发展情景来调整排放清单,并利用 CMAQ 模型评估不同情景清单下空气质量改善情况,最终获得达标情景下的总量控制指标.

1 材料与方法

1.1 数据来源

南京市污染物排放数据采用文献[15]的研究成果.该清单以 2015 年为基准年,将污染源分为 10 类,即固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、扬尘源、生物质燃烧源、存储运输源、废弃物处理源与餐饮源;每类源按行业/部门、能源消费/产品产量、工艺/设备以及污染治理设施分为 4 级;污染物包括 SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、CO、VOCs、BC、OC 与 NH₃ 等 9 种,时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 1 km × 1 km.空气质量数据采用南京市 9 个国控点数据,表 1 给出了基准年达标差距.

表 1 主要污染物达标差距分析

Table 1 Attainment gap analysis for major pollutants

主要污染物	2015 年年均值 /μg·m ⁻³	国家二级标准年均值 /μg·m ⁻³	达标差距 /μg·m ⁻³	达标差距 百分比/%
SO ₂	19	60	-41	达标
NO ₂	50	40	10	25
PM _{2.5}	57	35	22	63
PM ₁₀	96	70	26	37
O ₃ -8h 90per	171	160	11	6.9
CO 95per/mg·m ⁻³	1.7	4	-2.3	达标

1.2 排放清单预测方法

1.2.1 排放清单的算法

大气污染物排放量与经济发展、能源消费、末端治理和技术政策等因素密切相关^[10].2015 年南京市大气污染物排放清单采用排放系数法^[16]进行估算,具体公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^n A_i \times EF_i \times (1 - \eta)$$

式中, E 为排放量, i 代表不同的源类别; A 为活动水平,其定义为影响污染物排放的各种活动量,如能源消耗量、产品产量、机动车行驶里程等; EF 为污染物产生系数,即单位活动水平的污染物产生量; η 为治理技术的去除效率.2030 年排放清单的估算,以 2015 年排放清单为基础来预测,期间假定污染物产生系数不变,通过情景设置获得 2030 年的活动水平与去除效率,并根据上述公式算法来调整 2015 年清单,即获得 2030 年排放清单.

1.2.2 情景设置

设置 2 种活动水平情景,分别为基础情景 BAU

(business as usual)与战略情景 SP(strategic planning).在此基础上,分别设置 2 种末端控制情景,两两组合获得 4 种综合情景,情景名称和内涵见表 2.

限于篇幅,表 3 仅列出部分活动水平的现状值与预测值;表 4 给出了部分行业污染物去除效率的现状值与预测值,未给出的污染物则维持 2015 年现状.

根据综合情景 BAU₁、BAU₂、SP₁ 与 SP₂ 对应的活动水平与去除效率,调整 2015 年排放清单,对应得到 BAU₁、BAU₂、SP₁ 与 SP₂ 共 4 套 2030 年排放清单.

1.3 模型设置

如图 1 所示,空气质量采用 CMAQ 模型进行 3 层区域嵌套模拟,最外层覆盖东亚地区,空间分辨率 36 km,网格数 197 × 127;第二层覆盖长江中下游地区,空间分辨率 12 km,网格数 80 × 89;最内层覆盖南京及其周边地区,空间分辨率 4 km,网格数 83 × 55.垂直方向包括 28 层,最顶层气压值为 50 hPa.模式使用的气象场由气象模式 WRF v3.7.1

表 2 情景设置				
Table 2 Scenario settings				
活动水平 情景名称	情景内涵	末端控制 情景名称	情景内涵	综合情景 名称
BAU 情景 (基础情景)	延续现有发展路径、政策及执行力, 活动水平参考各类已发布的规划文件, 并采用趋势外推法来确定	基准控制情景 (1)	延续现有污染控制政策与执行力, 治理水平在 2015 年现状水平上有所提升	BAU ₁
		强化控制情景 (2)	不断出台新政策, 不断提升治理技术, 可行技术充分利用	BAU ₂
SP 情景 (战略情景)	采取可持续的发展战略, 其中包括改变生产生活方式、优化工业与能源结构、提高能源利用效率等	基准控制情景 (1)	延续现有污染控制政策与执行力度, 治理水平在 2015 年现状水平上有所提升	SP ₁
		强化控制情景 (2)	不断出台新政策, 不断提升治理技术, 可行技术充分利用	SP ₂

表 3 主要活动水平预测						
Table 3 Forecast of major activity levels						
序号 项目	2015 年	BAU 情景		SP 情景 2030 年	BAU 情景描述	SP 情景描述
		2020 年	2030 年			
1 综合-GDP/亿元	9 720	14 000	28 854	27 540	2020 年依据南京市国民经济与社会发展“十三五”规划纲要, 2020 ~ 2030 年平均增速 7.5%	考虑到经济新常态, 经济规模越大后增速趋缓, 2020 ~ 2030 年平均增速 7%
2 综合-人口/万人	823	950	1 060	867	依据长江三角洲城市群发展规划(2015 ~ 2030 年)	按“十二五”平均人口增速估算
3 综合-城市化水平/%	81.40	83	86	86	依据南京市国民经济与社会发展“十三五”规划纲要	保持 BAU 情景水平
4 综合-煤炭消费总量/万 t	3 330	3 100	2 700	2 500	依据南京市“十三五”能源发展规划, 2020 ~ 2030 年再削减 400 万 t	进一步严格控制煤炭消费, 总量控制在 2 500 万 t 以内
5 固定燃烧源-电煤用量/万 t	2 000	1 878	1 630	1 174	根据省要求, 电煤消耗占比不低于 65%	大力发展天然气装机容量, 减少电煤使用
6 工艺过程源-钢铁产量/万 t	1 564	1 264	1 000	800	依据南京市环境总体规划纲要(2015 ~ 2030 年), 2030 年前压减到 1 000 万 t 以内	钢铁是目前最主要的大气污染源, 进一步加严产能规模, 按约压缩一半产能估算
7 工艺过程源-水泥熟料产量/万 t	957	500	500	450	依据南京市环境总体规划纲要(2015 ~ 2030 年), 约压减一半熟料产能	在 BAU 情景下再压减 10% 产能
8 工艺过程源-炼油量/万 t	2 788	2 788	2 788	2 500	南京市环境总体规划纲要(2015 ~ 2030 年) 未提出压缩产能要求, 保持现状产能	考虑国家石化基地布局战略, 在 BAU 情景下压减 10% 产能
9 移动源-机动车保有量/万辆	218	243	334	243	依据南京市城市总体规划(2011 ~ 2020)	实施机动车限牌政策, 控制在 2020 年水平
10 溶剂使用源-涂料产量/万 t	24	35	71	69	按人口与 GDP 的平均增长速率测算	按 2030 年与 2015 年 GDP 比值来测算
11 扬尘源-施工面积/万 m ²	11 515	11 906	11 000	10 000	2020 年按 201 ~ 2015 年均值, 2030 年下降 10%	在 BAU 情景基础上再减少 10%
12 扬尘源-道路长度/km	11 303	11 834	12 838	12 838	按 2011 ~ 2015 年趋势预测	保持 BAU 情景水平
13 生物质源-秸秆产量/万 t	150	150	150	150	近年来农业变化幅度较小, 保持现状	近年来农业变化幅度较小, 保持现状
14 废弃物处理源-垃圾处理量/万 t	323	373	416	340	按城镇人口数量与垃圾处理量比例	按城镇人口数量与垃圾处理量比例
15 废弃物处理源-污水处理量/万 t	70 814	81 742	91 206	74 600	按城镇人口数量与污水处理量比例关系	按城镇人口数量与污水处理量比例关系
16 农业源-农药使用量/t	1 698	1 176	135	120	按 2011 ~ 2015 趋势预测	在 BAU 情景上再压缩 10%
17 农业源-氮肥使用量/t	38 234	32 001	19 139	17 225	按 2011 ~ 2015 趋势预测	在 BAU 情景上再压缩 10%

和美国环境预报中心气象再分析数据(NCEP)模拟得到.

模式验证以 2015 年为基准, 其中 2015 年本地排放清单取自文献[15], 周边地区的清单则将 2012 年清华大学 MIX 排放清单^[17]降低 30% 使用, 空间分辨率为 0.25° × 0.25°. 模拟 2030 年空气质

量时, 本地排放采用情景预测得到的 BAU₁、BAU₂、SP₁ 与 SP₂ 这 4 套清单, 周边地区排放在 2015 年 MIX 清单基础上假设分别下降 60%、70%、60% 与 70%. 这一假设主要基于南京周边地区具有更大的减排潜力, 此数值仅作参考, 未来还需进行针对性研究.

表 4 主要行业/部门污染物去除效率设定¹⁾

Table 4 Pollutants removal efficiency setting for major industries/departments

行业/部门	污染物去除率/%		
	2015 年现状	基准控制情景	强化控制情景
固定燃烧源-燃煤电厂	NO _x :70	80	85
工艺工程源-钢铁	NO _x :0	30	40
工艺过程源-炼油	NO _x :15; VOCs:15	30; 60	40; 70
工艺过程源-水泥熟料	SO ₂ :0; NO _x :30	80; 50	85; 60
移动源-机动车	0	30	40
溶剂使用源-建筑涂料	0	10	15
溶剂使用源-其他涂料	0	30	40
扬尘源-道路扬尘	0	30	40
扬尘源-施工扬尘	0	30	40
生物质源	0	30	40
废弃物处理源-垃圾处理	0	30	40
废弃物处理源-污水处理	VOCs:0	30	40
农业源-畜禽养殖	NH ₃ :0	10	15
农业源-氮肥施用	NH ₃ :0	10	15
其他源	0	30	40

1) 部分现状去除效率用 0 表示, 作为污染控制起点, 不代表现状未进行治理, 仅为了计算方便

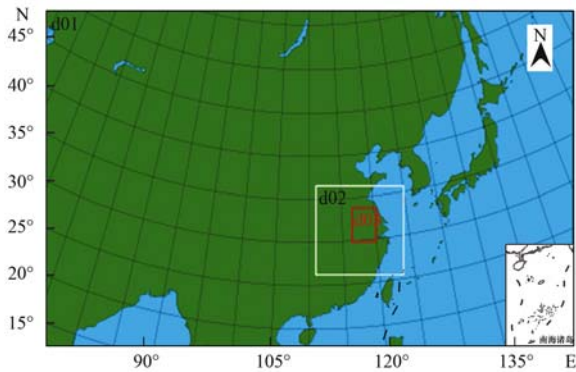


图 1 CMAQ 模式模拟区域设定

Fig. 1 CMAQ mode simulation area setting

2 结果与讨论

2.1 CMAQ 模型验证

图 2 给出了 2015 年 1、4、7 和 10 月期间 6 项污染物日均浓度模拟值与观测值的时间序列对比, 其中圆点为观测值, 曲线为模拟值. 从中可见, 模式较好地再现了 PM_{2.5} 的季节变化趋势, 即秋冬季浓度高、春夏季浓度低的基本规律. 模式对观测站点 PM_{2.5} 浓度有一定的高估, 特别是 1 月和 10 月浓度高估现象较明显. 从全年看, CMAQ 模拟的 PM_{2.5} 年均浓度为 66.5 μg·m⁻³, 比观测值 61.5 μg·m⁻³ 高 8%.

其它 5 项污染物中, PM₁₀ 除个别站点峰值高估外, 整体吻合较好; O₃ 在浓度较低的月吻合较好, 浓度高的月及峰值存在低估; SO₂ 除 7 月上旬有高估外, 整体吻合较好; NO₂ 在 7 月和 10 月模拟较好, 其他月存在低估; CO 在各个站点均存在低估, 这可能是由于排放清单的不确定性以及模式分辨率

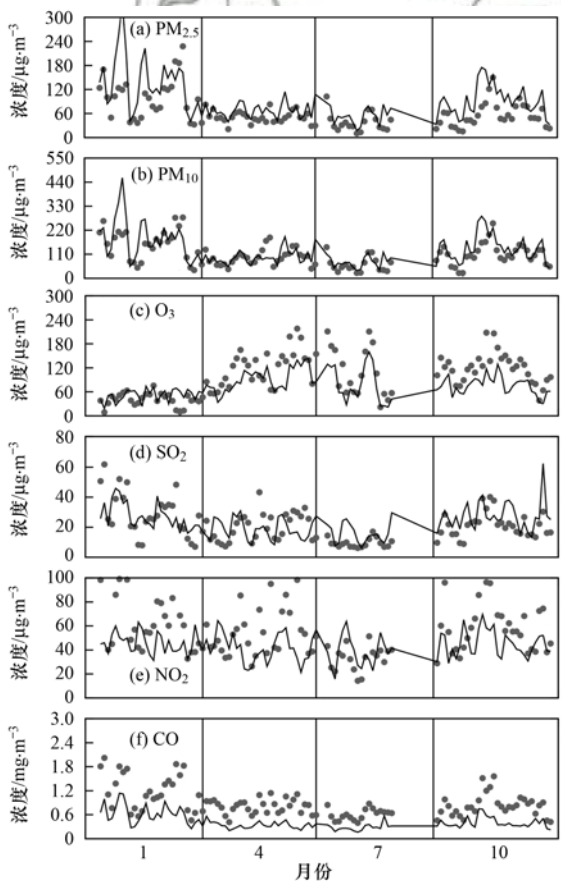


图 2 模拟-监测时间序列

Fig. 2 Simulation- monitoring time series

等原因造成的.

为进一步评估模型的精度, 利用平均相对偏差 (MFB) 和平均相对误差 (MFE) 对模型结果进行了评估, 具体计算方法如下:

$$MFB = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(C_p - C_o)}{(C_p + C_o)}$$

$$MFE = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|C_p - C_o|}{(C_p + C_o)}$$

式中， N 代表每个观测点的数据总数， C_p 和 C_o 分别是日平均模拟值和观测值。

图 3 给出了 $PM_{2.5}$ 模拟值的统计分析结果。从

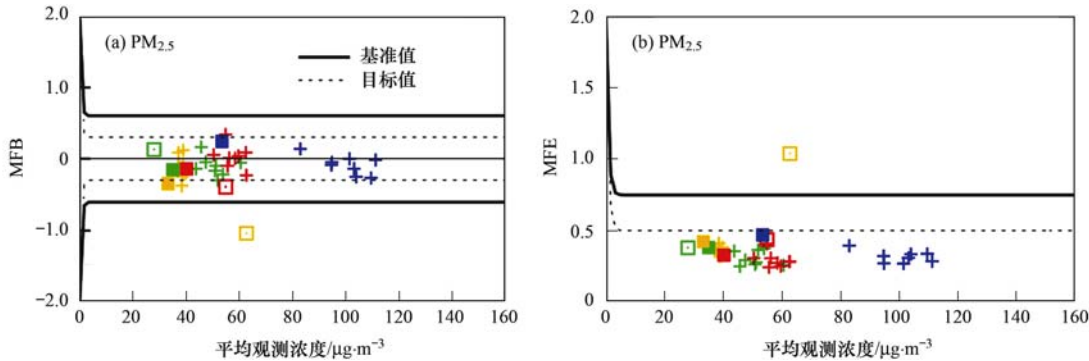


图 3 各观测点 $PM_{2.5}$ 模拟值的统计分析

Fig. 3 Statistical analysis of $PM_{2.5}$ simulation values at each observation site

2.2 $PM_{2.5}$ 敏感性试验

为了解南京本地何种污染物减排对控制 $PM_{2.5}$ 更为有效，设计了一系列敏感性试验。在周边地区所有大气污染物减排 70% 的基础上，分别考察：①本地源不减排；②所有大气污染物全部减排；③敏感物质单独减排。3 种情况下本地 $PM_{2.5}$ 浓度降低情况，具体试验方案设置见表 5。用相对贡献率来定量表征敏感性，计算公式如下：

$$S = \frac{c_o - c_i}{c_o - c_g} \times 100\%$$

式中， S 表示相对贡献率（%），指敏感物质单独减

中可见，各观测点各月的 MFB 基本小于 $\pm 30\%$ ，MFE 基本上小于 50%。参照 Li 等^[18] 提出的 MFB 和 MFE 的基准值和目标值（即模式模拟结果精确度的标准）对模型进行评价，结果表明模式模拟的 $PM_{2.5}$ 能够反映实际观测情况。

排时， $PM_{2.5}$ 浓度下降占有所有污染物全部减排时 $PM_{2.5}$ 浓度下降的贡献比值，比值越大说明减排该污染物对控制 $PM_{2.5}$ 越有效； c_o 表示本地无减排时 $PM_{2.5}$ 浓度（ $\mu g \cdot m^{-3}$ ）， c_i 为本地仅敏感物质 i 减排时 $PM_{2.5}$ 浓度， c_g 为本地所有污染物减排时 $PM_{2.5}$ 浓度（ $\mu g \cdot m^{-3}$ ）。

图 4 给出了敏感性试验结果。从中可见， $PM_{2.5}$ 对方案五（各部门 PPM 减排 70%）最为敏感，减排 PPM 每个季度 $PM_{2.5}$ 下降的相对贡献率均在 85% 以上，全年达到 88%，这与吴文景等^[19] 提出，京津冀地区 $PM_{2.5}$ 浓度对一次 $PM_{2.5}$ 排放最敏感的结论基本

表 5 敏感性试验方案设置

Table 5 Emission setting scheme of the sensitivity test

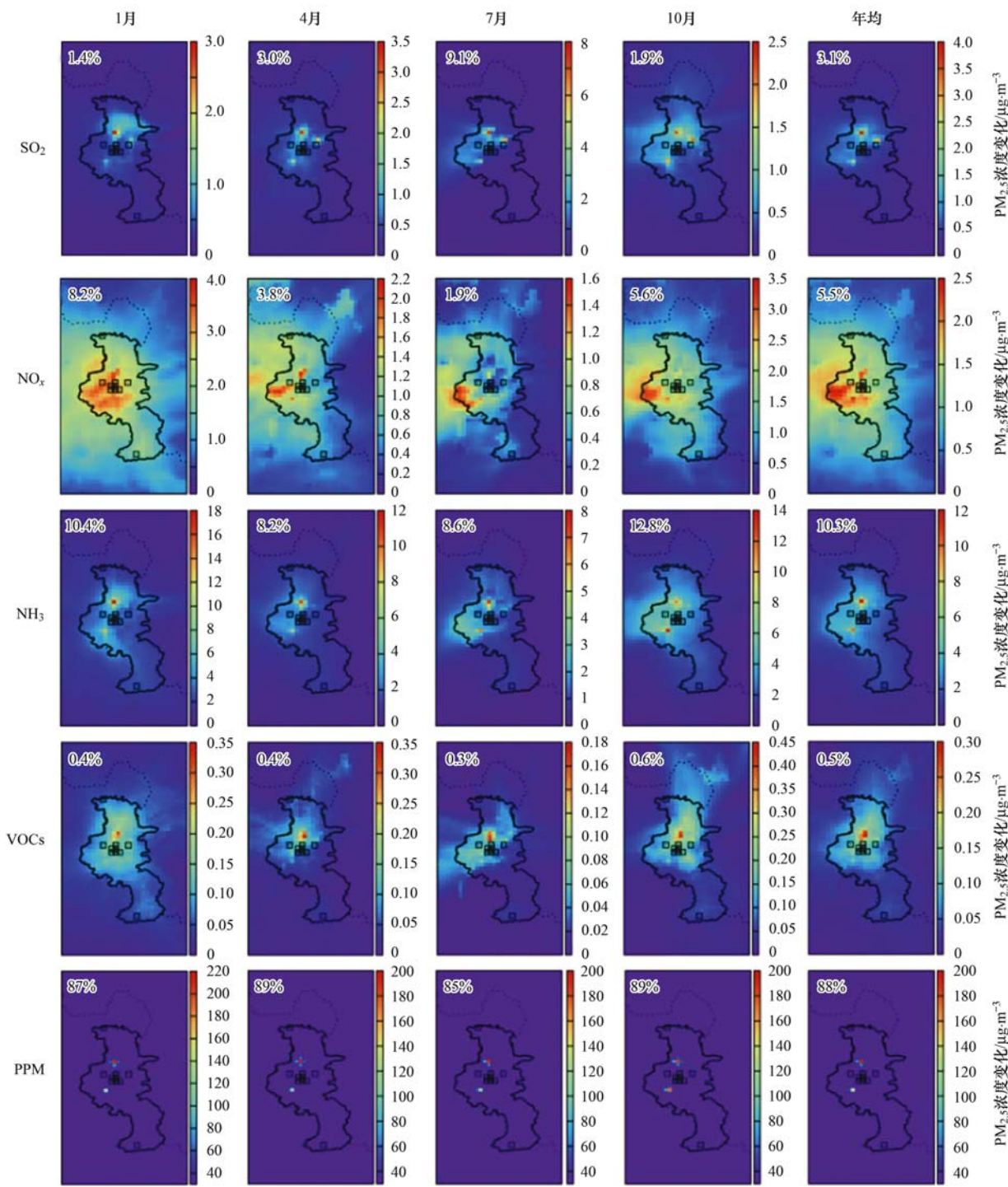
排放设置	零方案	全方案	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
本地	无减排	所有污染物 减排 70%	各部门 SO_2 减排 70%	各部门 NO_x 减排 70%	各部门 NH_3 减排 70%	各部门 VOCs 减排 70%	各部门 PPM 减排 70%
周边地区	2015 年 MIX 清单所有污染物减排 70%						

一致；其次是方案三（各部门 NH_3 减排 70%），年均贡献率达 10.3%；本地 NO_x 和 SO_2 单独减排 70%，分别在 1 月与 7 月最为有效，贡献率分别为 8.2% 与 9.1%，但全年贡献率仅为 5.5% 和 3.1%，这可能与 NO_x 和 SO_2 主要源于高架源有关，这与 Itahashi 等^[20] 发现北京、上海和重庆等地硫酸盐本地排放的贡献分别只占 4.0%、10.8% 和 9.2% 的结论基本一致；减少 VOCs 本地排放对降低 $PM_{2.5}$ 浓度没有明显效果。

值得注意的是，近年来各地二次气溶胶在 $PM_{2.5}$ 中占有较高比例^[21~23]。南京颗粒物源解析结果显示，二次气溶胶占比约 36%^[24]。庞杨^[25] 发现，

京津冀地区 PPM 排放量削减 50% 时， $PM_{2.5}$ 浓度下降 32.5% ~ 37.8%，但二次气溶胶下降仅约 10%，而 VOCs、 NH_3 、 SO_2 与 NO_x 排放量同时削减 50% 时， $PM_{2.5}$ 浓度下降 9.5% ~ 16.7%，但二次气溶胶下降达 48% ~ 68.4%。由此可见，减少气态前体物排放对降低二次气溶胶有较显著的效果。

因此，现阶段南京 $PM_{2.5}$ 的污染控制策略应以减排 PPM 为主，同时协同减排 NH_3 、 SO_2 、 NO_x 与 VOCs 等。由敏感试验结果可以看出，加强扬尘、钢铁等 PPM 排放大户的控制可有效降低环境空气中 $PM_{2.5}$ 浓度。由于污染排放与环境质量浓度之间存在复杂的非线性关系，本研究试验方案只采用了一



颜色表示本地无减排与单独减排敏感性物质时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)，百分数表示贡献度

图 4 南京市 $\text{PM}_{2.5}$ 对 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、VOCs 和 PPM 减排的敏感性

Fig. 4 Sensitivity of $\text{PM}_{2.5}$ in Nanjing to SO_2 , NO_x , NH_3 , VOCs, and PPM emissions reduction

种减排比例，未考虑多污染物协同减排等情景，相关结果有待进一步深入研究。

2.3 清单结果分析

表 6 给出了 4 种情景下排放量以及相比基准年的削减率，污染物总的排放量为 $\text{SP}_2 < \text{SP}_1 < \text{BAU}_2 < \text{BAU}_1$ (仅 VOCs 与 PM_{10} 的 $\text{SP}_1 > \text{BAU}_2$)，各类污染物的减排比例在 22% ~ 53%。各情景清单不同污染物减排比例差异较大，情景设置时，充分考虑了

各污染物减排空间的差异性，相比“一刀切”调整的方法，更贴近实际情况。图 5 给出了不同情景下各污染物排放量及其排放分担的情况。从中可见，由于情景设计时较少考虑关停企业等极端措施，因此不同情景下，清单的污染源构成以及各类污染物的来源一致。由图 5 还可以发现，活动水平情景相同时，不同末端控制情景下， SO_2 、 NH_3 、CO 排放量差异不大，原因是 SO_2 主要来源于燃煤电厂，“气十

条”实施以来主要电厂已完成超低排放改造，治理的空间有限；NH₃ 主要来源于农业面源，CO 属于惰性气体，可选择末端治理技术不多且治理难度较大。未来这 3 种污染物减排需从削减电煤、减少畜禽养殖、减少能源消耗等方面考虑。而其余污染物

末端治理技术减排空间较大，如 NO_x 已提出钢铁、水泥超低排放技术实践^[26, 27]，VOCs“十三五”才纳入强制减排，通过 LDAR、油气回收以及水性涂料替代等措施可有效实现减排，而颗粒物减排可通过加强工地扬尘、道路扬尘等无组织排放管理入手。

表 6 不同情景下大气污染物排放量

Table 6 Atmospheric pollutant emissions under different scenarios									
类别	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	BC	OC	CO	VOCs	NH ₃
2015 年排放量/万 t	4.55	17.93	6.35	15.15	0.32	0.54	45.20	23.75	2.57
BAU ₁	排放量/万 t	3.17	12.60	4.71	11.51	0.25	34.71	17.44	1.76
	减排比例/%	-30	-30	-26	-24	-22	-26	-23	-32
BAU ₂	排放量/万 t	3.06	10.48	4.25	10.28	0.22	32.93	14.44	1.74
	减排比例/%	-33	-42	-33	-32	-31	-35	-27	-32
SP ₁	排放量/万 t	2.52	10.13	4.18	10.61	0.21	27.94	15.85	1.51
	减排比例/%	-45	-44	-34	-30	-34	-38	-33	-41
SP ₂	排放量/万 t	2.43	8.47	3.74	9.42	0.19	26.56	13.08	1.50
	减排比例/%	-47	-53	-41	-38	-41	-44	-45	-42

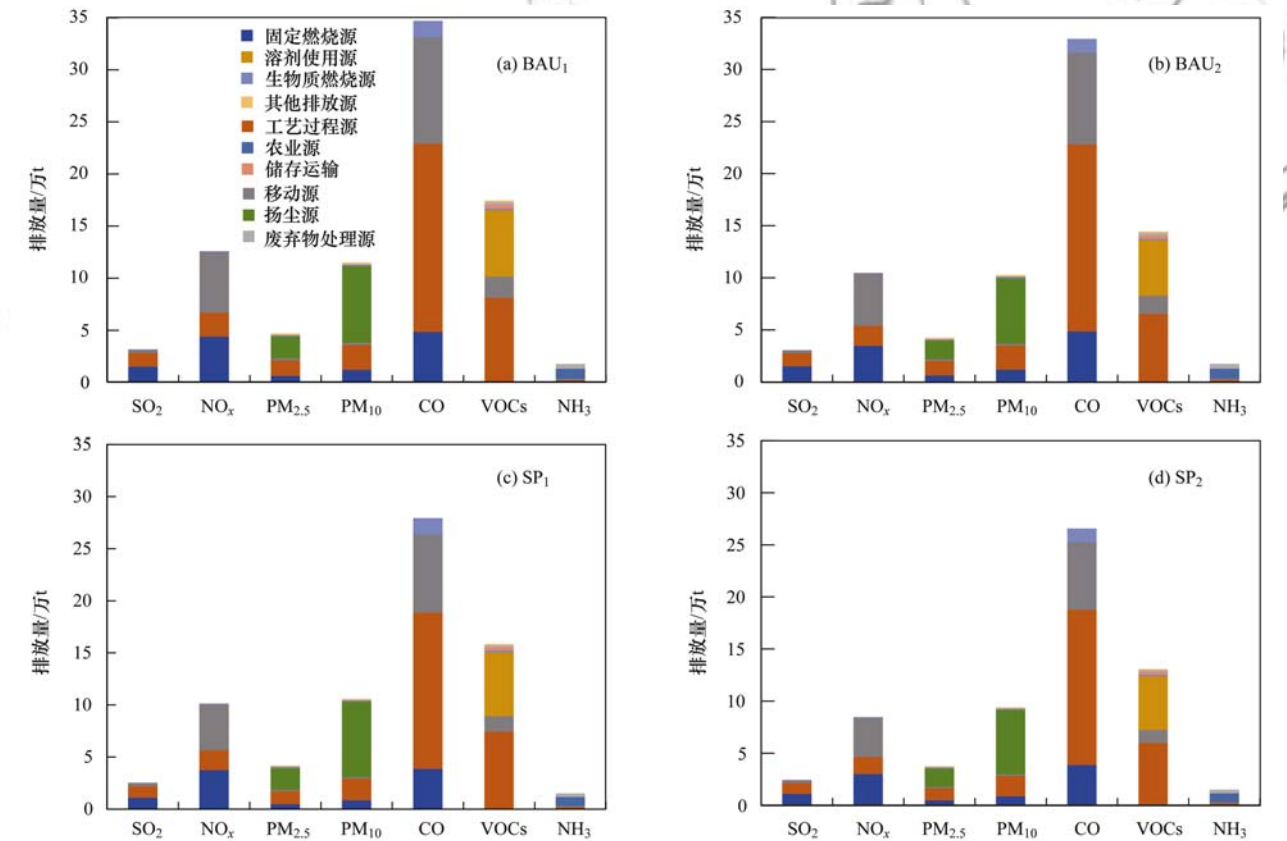


图 5 不同情景下各类源贡献率
Fig. 5 Contribution rates of various sources under different scenarios

2.4 模拟结果分析

2.4.1 代表月模拟分析

图 6 给出了不同情景下 6 项污染物各代表月的浓度值。从中可见，月度变化规律基本与 2015 年一致，PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂、SO₂ 和 CO 均在 1 月最高，其次是 10 月，7 月最低，这主要与气象因素有关。1 月扩散条件相对不利，且受污染输送影响较大。而

O₃ 则是 1 月最低，4、7 和 10 月均较高，这主要与这 3 个月温度较高、太阳辐射较强、适宜 O₃ 生成相关。

从各情景的比较来看，随着减排力度的加大，各月的 PM₁₀、PM_{2.5}、CO 和 SO₂ 浓度均值均明显低于 2015 年；NO₂ 浓度在 BAU₁ 情景下相比 2015 年略有上升，这与移动源 NO_x 排放增加有关。O₃ 浓度

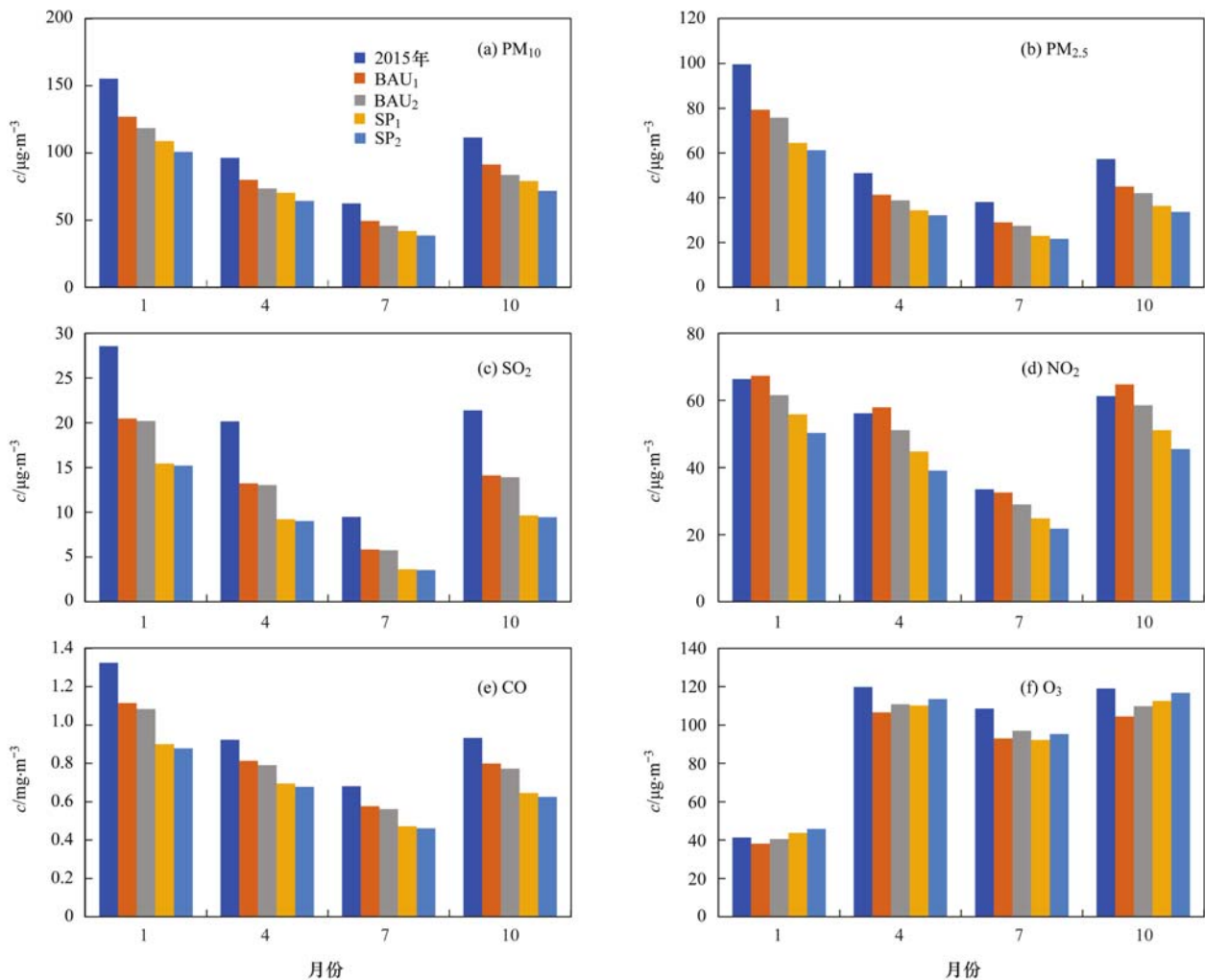


图6 不同情景下代表月月均浓度

Fig. 6 Monthly mean concentrations of various pollutants under different scenarios

总体呈现上升趋势,但均低于2015年,说明 NO_x 与VOCs等前体物大幅减排后, O_3 浓度也相应下降.

2.4.2 年均值模拟结果

图7给出了不同情景下2030年污染物年均值.从中可见,4种情景下各污染物年均浓度相比基准年都有所下降,仅 BAU_1 情景中 NO_2 年均浓度略有上升,这主要与 BAU 情景设置时,2030年机动车保有量直接采用城市总体规划的规划值,未考虑限牌、限号等措施,移动源 NO_x 排放有所增加有关;随着减排力度的增强, PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 SO_2 和 NO_2 浓度呈现梯度下降趋势,但 O_3 浓度呈现梯度上升趋势,这可能与其前体物VOCs及 NO_x 的减排比例有关.本研究中4种情景下VOCs与 NO_x 减排比例在1~1.28之间,而严茹莎等^[28]发现上海市在两者减排比例3:1时 O_3 浓度下降最明显.

表7列出了具体年均浓度模拟结果及达标情况.从中可见,在 BAU_1 情景下,只有 SO_2 、 CO 和 O_3 这3项污染物可以达标; BAU_2 情景下,增加了

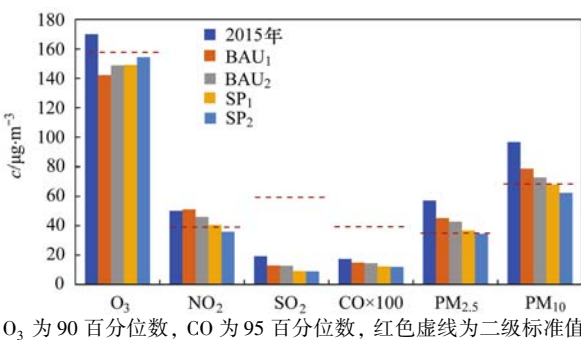


图7 不同情景下各污染物年均浓度

Fig. 7 Average annual concentrations of various pollutants under different scenarios

PM_{10} 共4项污染物可以达标; SP_1 情景下,达标的污染物虽未增加,但污染物浓度可进一步降低.表7所示进一步提示,南京市若要实现6项污染物全面达标,则需采取可持续发展战略,优化产业结构和能源结构,提高能源利用效率,并不断出台新政策,不断提升治理技术,即 SP_2 发展情景,这是未来南京市空气质量达标的关键.值得说明的是,本研究基于敏感性试验结果,通过设置梯度情景,多

次模拟逐步逼近目标的做法对于获取达标情景具备一定的可行性，但理论上达标情景可以有无数种，SP₂ 方案是否是最佳方案还需要综合考虑经济、技术等因素的影响，有待进一步论证。

表 7 各情景下 2030 年 6 项污染物达标情况/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 7 Compliance of six pollutants in 2030 under different scenarios/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$							
情景类别	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}	CO 95per/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	O ₃ -8h 90per	达标情况
BAU ₁	13	51	79	45	1.5	142	3 项达标
BAU ₂	13	46	73	43	1.4	149	4 项达标
SP ₁	9	41	68	37	1.2	149	4 项达标
SP ₂	9	36	62	35	1.2	154	6 项达标
评价标准	60	40	70	35	4	160	

3 结论

(1)2015 年，南京市 6 项污染物中年评价价值 SO₂ 和 CO 达标，NO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 年均值分别超标 25%、37% 和 63%，O₃8h 第 90 百分位数超标 7%。

(2)根据情景分析法预测，相比 2015 年，2030 年不同情景下排放清单主要污染物减排量在 22%~53%；南京市下一步减排 SO₂、CO 和 NH₃ 通过控制活动水平比较有效，而 NO_x 和 VOCs 等在末端治理方面有较大潜力。

(3)在敏感试验减排条件下，减排 PPM 对降低本地 PM_{2.5} 浓度最有效（88%），其次为 NH₃（10.3%）、NO_x（5.5%）、SO₂（3.2%）与 VOCs（0.5%）。现阶段在本地尺度上，南京 PM_{2.5} 控制宜采取 PPM 减排为主，同时需实施气态污染物协同减排。需要注意的是，区域尺度上，控制气态前体物对二次气溶胶的降低作用不容忽视。

(4)CMAQ 模拟结果显示，SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、CO、VOCs 及 NH₃ 的排放量控制在 2.43、8.47、9.42、3.47、0.19、0.30、26.56、13.08 与 1.50 万 t 以内时，南京市 6 项污染物指标均可达到国家环境空气质量二级标准。

致谢：衷心感谢上海市环境科学研究院原副总工程师、大气环境研究所所长陈长虹教授对论文的悉心指导。

参考文献：

[1] 郑龙飞. 南京地区细颗粒物污染特征及灰霾事件成因研究 [D]. 济南：山东大学，2016.
Zheng L F. Atmospheric fine particles and haze pollutions in Nanjing [D]. Ji'nan: Shandong University, 2016.

[2] 杨笑笑，汤莉莉，张运江，等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析 [J]. 环境科学，2016，37 (2)：443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, et al. Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district [J]. Environmental Science, 2016, 37 (2)：443-451.

[3] 康晖，朱彬，王红磊，等. 长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 [J]. 环境科学，2018，39 (3)：961-971.

Kang H, Zhu B, Wang H L, et al. Characterization and variation of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} during the winter in the Yangtze River Delta region, China [J]. Environmental Science, 2018, 39 (3)：961-971.

[4] 王博妮，濮梅娟，陈鹏，等. 南京城区冬季大气污染特征 [J]. 环境科学研究，2017，30 (9)：1335-1345.
Wang B N, Pu M J, Chen P, et al. Characteristic analysis of atmospheric pollutants in Nanjing urban area in winter [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30 (9)：1335-1345.

[5] 南京市统计局去产能与产业转型升级课题组. 去产能背景下南京市钢铁、化工等传统产业转型升级路径研究 [J]. 统计科学与实践，2017，(3)：37-40.

[6] 张予燕，芮冬梅，周灵辉. 南京钟山风景区对主城环境空气质量的影响 [J]. 环境监控与预警，2010，2 (1)：47-50.
Zhang Y Y, Rui D M, Zhou L H. Nanjing Zhongshan Mountain Scenic's influence on the air quality in main urban area [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2012, 2 (1)：47-50.

[7] 姜伟. 情景分析方法研究 [J]. 未来与发展，2012，35 (9)：17-26.
Lou W. The study on scenario analysis method [J]. Future and Development, 2012, 35 (9)：17-26.

[8] 鱼智霞，曹国良，安文辉，等. 中国区域 2020 和 2030 年的 SO₂ 和 NO_x 排放总量情景预测 [J]. 环境工程学报，2017，11 (4)：2355-2362.
Yu Z X, Cao G L, An W H, et al. Scenarios prediction for emissions of SO₂, NO_x in the year of 2020 and 2030 in China [J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 11 (4)：2355-2362.

[9] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势 [D]. 北京：清华大学，2009.
Wei W. Study on current and future anthropogenic emissions of volatile organic compounds in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.

[10] 安文辉，曹国良，蒙小波，等. 情景分析法预测西安市大气污染物排放总量 [J]. 环境工程，2016，34 (8)：99-103.
An W H, Cao G L, Meng X B, et al. Scenario analysis to predict the total emissions of air pollutants in Xi'an [J]. Environmental Engineering, 2016, 34 (8)：99-103.

[11] 常嘉成，赵天良，谭成好，等. 基于 WRF-Chem 模拟的玉溪市大气环境容量精细估算 [J]. 环境科学学报，2017，37 (10)：3876-3884.
Chang J C, Zhao T L, Tan C H, et al. An elaborative assessment of atmospheric environmental capacity in Yuxi based on WRF-Chem modeling [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37 (10)：3876-3884.

[12] 薛文博，付飞，王金南，等. 基于全国城市 PM_{2.5} 达标约束的大气环境容量模拟 [J]. 中国环境科学，2014，34 (10)：

- 2490-2496.
- Xue W B, Fu F, Wang J N, *et al.* Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by PM_{2.5} compliance of Chinese cities[J]. *Chinese Environmental Science*, 2014, **34**(10): 2490-2496.
- [13] 中国清洁空气联盟. 京津冀如何实现空气质量达标[EB/OL]. <http://www.cleanairchina.org/product/7532.html>, 2016-02-23.
- [14] 中国清洁空气联盟. 长三角如何实现空气质量达标?[EB/OL]. <http://www.cleanairchina.org/product/7751.html>, 2016-06-17.
- [15] 南京市环境保护局. 南京市大气污染物排放清单更新(2015年)[R]. 南京: 南京市环境保护局, 2016.
- [16] 环境保护部. 城市大气污染物排放清单编制工作手册[M]. 北京: 环境保护部, 2015.
- [17] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [18] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 935-963.
- [19] 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, Xin 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.
- [20] Itahashi S, Hayami H, Yumimoto K, *et al.* Chinese province-scale source apportionments for sulfate aerosol in 2005 evaluated by the tagged tracer method[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 1366-1375.
- [21] 刘童, 王晓军, 陈倩, 等. 烟台市环境受体PM_{2.5}四季污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
- Liu T, Wang X J, Chen Q, *et al.* Characteristic and source analysis of environmental receptor PM_{2.5} in four seasons in Yantai city[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
- [22] 刘素, 马彤, 杨艳, 等. 太原市冬季PM_{2.5}化学组分特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1537-1544.
- Liu S, Ma T, Yang Y, *et al.* Characterization and source analysis of PM_{2.5} chemical components in winter in Taiyuan city[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1537-1544.
- [23] 吴明, 吴丹, 夏俊荣, 等. 成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 76-85.
- Wu M, Wu D, Xia J R, *et al.* Analysis of pollution characteristics and sources of PM_{2.5} chemical components in Chengdu in Winter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 76-85.
- [24] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于PMF模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing by PMF[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- [25] 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.
- [26] 王天义. 钢铁企业烧结、焦化烟气超低排放治理技术的调研及建议[N]. *世界金属导报*, 2018-10-16(B12).
- [27] 彭长寿. 水泥行业烟气多种污染物“超低排放”整体解决方案[J]. *中国水泥*, 2017, (3): 88-97.
- [28] 严茹莎, 李莉, 安静宇, 等. 上海市夏季臭氧生成与其前体物控制模拟研究[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(1): 30-35, 40.
- Yan R S, Li L, An J Y, *et al.* Simulation study of ozone generation and its precursors control in Shanghai during summer time[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(1): 30-35, 40.

CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)