

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷 (1013)
《环境科学》征订启事	(522)
《环境科学》征稿简则	(722)
信息	(748, 899, 924)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在 WRF-Chem 中应用评估

郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强*

(兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 城市尺度高分辨率人为源大气污染物排放清单是城市空气质量预报预警、污染成因分析和减排措施制定的重要基础数据, 目前我国西部地区城市尺度的人为源排放清单研究仍然相对薄弱, 能对接于空气质量模式的排放清单更为缺乏。本文整合已发表的清单文献, 建立了可对接于空气质量模式的 2016 年兰州市城市尺度的人为源清单模型 (HEI-LZ16), 将之应用于 WRF-Chem 模式, 评估 HEI-LZ16 的准确性和适用性。结果表明: 兰州市 2016 年人为源排放的 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 NH_3 、 VOCs 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 BC 和 OC 总量分别为 25 642、53 998、319 003、10 475、35 289、49 250、19 822、2 476 和 1 482 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在模拟时间内, HEI-LZ16 相比于 MEIC, O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的 NME 值分别减小了 140.2% 和 28.8%, HEI-LZ16 更加准确适用。分析了 HEI-LZ16 情景下模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 时空分布, 兰州市臭氧 MDA8 呈现冬春季城区低而郊区高, 夏秋季河谷城区西部及其下风向地区高的分布特征, 夏秋季高浓度区的分布受偏东风和光化学反应的共同影响, 冬季城区 O_3 浓度受 NO_x 排放的抑制作用浓度反而降低。 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的高值区主要集中在黄河河谷盆地, 本研究表明沿白银—兰州黄河河谷盆地走向的西侧存在一个污染物传输通道, 其对兰州市环境空气质量具有较大的影响。

关键词: 人为源排放清单; WRF-Chem 模式; 臭氧 (O_3); $\text{PM}_{2.5}$; 时空分布

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0634-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007088

Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou

GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, XIA Jia-qi, ZHANG Rui-xin, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, CHEN Qiang*

(Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: City-scale high-resolution anthropogenic emission inventories are an important tool for ambient air quality forecasting and early warning, the analysis of underlying causes, and policy making. At present, city-scale anthropogenic emissions inventories for use in air quality models are scarce for West China. By studying the literature on emission inventories, this paper establishes a city-scale anthropogenic emission inventory for Lanzhou (HEI-LZ16) as the basis for an air quality model. The weather research and forecasting with chemistry (WRF-Chem) model was used to evaluate the applicability of the emission inventory at different resolutions in Lanzhou. The results showed that the emission amounts of SO_2 , NO_x , CO , NH_3 , VOCs , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, BC , and OC in Lanzhou were 25 642, 53 998, 319 003, 10 475, 35 289, 49 250, 19 822, 2 476, and 1 482 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$ in 2016, respectively. Compared with the simulation scenario of multi-resolution emission inventory for China (MEIC), normalized mean error (NME) of O_3 and $\text{PM}_{2.5}$ under the HEI-LZ16 scenario decreased by 140.2% and 28.8%, respectively. The HEI-LZ16 inventory is more suitable for application in air pollution research in Lanzhou, which was verified by the WRF-Chem model and the observational data. The spatiotemporal distributions of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 were also analyzed using the HEI-LZ16 scenario. The ozone concentration of the maximum daily 8-h average (MDA8) in Lanzhou was low in urban areas and high in the suburbs during winter and spring, and high in the west of the urban valley and its downwind areas during summer and autumn. MDA8 in summer and autumn was influenced by easterly winds and photochemical reactions. In winter, ozone concentrations in urban areas are suppressed by NO_x emissions but the concentration decreases. High $\text{PM}_{2.5}$ concentrations are mainly concentrated within the Yellow River Valley. This study shows that there is a pollutant transmission channel along the western side of the Baiyin-Lanzhou Yellow River Valley, which has a greater impact on the ambient air quality in Lanzhou.

Key words: anthropogenic emission inventory; WRF-Chem model; O_3 ; $\text{PM}_{2.5}$; spatiotemporal distribution

目前我国大气污染形势严峻, $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 等二次污染问题日渐突出, 对空气质量模式模拟和预报预警结果的准确性要求日益严苛, 而排放清单是空气质量模式模拟不确定性的重要来源。大气污染物排放清单指污染源在一定时间跨度和空间区域内排放到大气中的各种污染物的量的集合^[1], 准确、更新及时和高分辨率的排放清单对于污染物来源解

析、空气质量预报预警、重污染天气应急方案制订及效果评估、污染物总量减排核查核算、空气质量达标规划等工作都起着基础数据支撑的作用^[2]。目前对

收稿日期: 2020-07-09; 修订日期: 2020-08-18

作者简介: 郭文凯(1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: guowk17@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chenqih@lzu.edu.cn

排放清单的研究以全国尺度或者区域尺度的清单研究居多^[3],清华大学开发的中国多尺度排放清单模型(multi-resolution emission inventory for China, MEIC)^[4],包含电力^[5]、工业^[6]、交通^[7]、居民^[8]和农业排放源,10种污染物,可以直接对接空气质量模型,简便快捷地对污染物时空变化和污染趋势进行模拟^[9],但是当被分配至城市尺度高分辨率网格时,会存在较大的不确定性^[10]。在国内城市空气质量预报预警系统中,以城市尺度本地清单为基础,外围地区处理融合 MEIC,再与空气质量模式对接成为了主流选择,如:中山市^[11]和成都市^[12]空气质量多模式预报系统。

对于城市尺度排放清单,研究多限制于单个部门或几种污染物^[3],如:王红丽等^[13]建立了上海市餐饮源 PM_{2.5}排放清单,赵庆炎等^[14]建立了郑州市工业窑炉 PM_{2.5}排放清单,且研究区域集中在东部地区和重点城市,西部地区的研究相对薄弱^[9],能对接于空气质量模式的的城市尺度排放清单更为缺乏。

兰州市是我国西部重要工业型城市,兼受本地工业源、区域传输、复杂河谷地形及不利气象条件等因素影响,近年来,兰州市年平均臭氧日最大 8 h 浓度(MDA8)不断攀升^[15],PM_{2.5}年平均浓度虽呈现下降趋势,但仍然超过环境空气质量二级标准限值^[16],目前兰州市已经建立了 2009 年和 2016 年部分行业人为源排放清单,如:刘晓等^[17]建立的移动源 VOCs 清单,刘镇等^[18, 19]建立的化石燃料源排放清单,栗世学等^[20]建立的农牧业源氨排放清单等,但仍未将清单进一步整合对接应用于空气质量模式,本研究在已发表的兰州市各行业人为源排放清单的基础上,进一步完善和分配(时间、空间和物种),建立了可对接于空气质量模式的 2016 年兰州市高分辨率人为源排放清单模型(high-resolution anthropogenic emission inventory for Lanzhou in 2016, HEI-LZ16),选择 1、4、7 和 9 月,利用 WRF-Chem 模式验证评估,以评估 HEI-LZ16 在兰州市的适用性,分析兰州市不同月份 PM_{2.5}和 O₃ 时空分布特征,以期为兰州市大气污染强化监测点位布设、大气污染成因分析、防控措施的制定及空气质量预报预警提供基础支撑。

1 材料与方法

1.1 兰州市人为源高分辨率排放清单建立方法

大气污染源排放清单建立的重要作用之一就是为空气质量模式或气候模式提供输入数据,主要的空气质量模式(CMAQ、CAMx 和 WRF-Chem 等)均对排放清单的时间、空间和化学物种分辨率有很高

的要求,因此,采用“系数法”构建的某地区大气污染物排放清单,只有分配成具有时间、空间和化学物种分布的网格化排放清单才能满足空气质量模式的要求。本研究构建的兰州市高分辨率人为源排放清单,以 2016 年为基准年,包含 10 大类排放源 9 种污染物,分别是生物质燃烧源、溶剂使用源、移动源、化石燃料燃烧源、石油化工源、工艺过程源、农业源、废弃物处置源、油气储运源和道路扬尘源,包含的污染物有 SO₂、NO_x、CO、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC,其中,生物质燃烧源仅包含居民燃烧部分(煨炕^[21]、秸秆和柴薪炉具^[22]),不包含生物质开放燃烧,考虑到石油化工行业对兰州市环境空气质量具有重要影响,因此本文将中国石油兰州石化公司及其附属子公司排放的污染物单独作为石油化工源,化石燃料燃烧和工艺过程源不再包含石油化工源的排放,其他污染源详细清单建立方法详见文献[17~20]。

空间分配上,生物质燃烧及畜禽养殖、农药及氮肥施用、建筑涂料及工程机械、居民生活消费分别以农村居民点、耕地面积分布、建筑面积分布和人口分布作为空间特征表征数据,其他化石燃料燃烧、溶剂使用源、石油化工源、工艺过程源和餐饮源均以具体的企业及个体户经纬度坐标进行空间分配,道路移动源以实际路网分布进行空间分配。

时间分配上,依据月变化系数将年排放量分配到各月,其中,煨炕及供暖行业为实际调查得到的兰州市采暖日期,电力、石油化工、建筑涂料使用、纺织印染、金属制造、非金属制造、其他工艺过程源分别以兰州市 2016 年逐月发电量、原油加工量、房屋竣工面积、毛机织物产量、黑色有色金属冶炼及压延工业标准煤消耗量、非金属矿物制品业标准煤消耗量和工业用电量为时间表征数据,归一化后表征月变化系数。然后,依据小时变化系数逐时分配,其中,生物质燃烧源和餐饮源采用实际调查的小时变化系数,道路移动源采用实际车流量表征小时变化系数,电力行业采用在线监测的污染物浓度表征小时变化系数,其他污染源主要参考文献[23]进行小时分配。

VOCs 物种分配上,石化行业和油漆制造行业采用兰州市实际监测的结果^[24],其他行业主要参考国内外相关研究及 SPECIATE 4.5 数据库^[25],并进一步将实际物种映射到 MOZART^[26]化学机制,以便直接对接 WRF-Chem 模式。

1.2 WRF-Chem 配置及试验设计

目前的模式研究中,多以 1、4、7 和 10 月分别代表冬春夏秋季进行模拟^[27,28],由于基准年 10 月

监测数据相对缺失较多,且因局地扬尘源强变化,导致颗粒物小时浓度值变化幅度较大,为更加客观合理地评估 HEI-LZ16 的适用性,本研究选取了 1、4、7 和 9 月分别代表冬春夏秋季进行模拟,模拟方案设计及兰州区域采用的人为源排放清单如表 1 所示,兰州区域以外的中国人为源采用基准年为 2016 年的 MEIC,MEIC 可以直接与空气质量模式对接,被广泛用于污染成因分析、空气质量预报预警和空气污染达标规划等方面的工作,MEIC 是中国目前采用的最广泛的人为源排放源数据集,也是目前亚洲地区比较重要的排放清单模型^[9]. 中国之外采用基准年为 2010 年的 HTAP_v2 (hemispheric transport of air pollution version 2)^[29],HTAP_v2 是 EDGAR 团队等联合开发的全球大气污染物排放清单,适用于

全球^[30]及区域^[31]尺度数值模拟研究. 生物排放源采用 MEGAN 模型计算结果.

表 1 模拟试验方案设计

Table 1 Test plan of simulation	
兰州市人为源排放数据	模拟月份
HEI-LZ16	1、4、7 和 9
MEIC	1、4、7 和 9

模拟区域中心经纬度为 (104. 327°E, 35. 428°N), 投影方式为 Lambert 投影,标准纬线分别为 30°N 和 60°N,模式水平方向采用三层嵌套网格. 第一层区域网格数为 120 × 108,分辨率为 27 km; 第二层区域网格数为 76 × 64,分辨率为 9 km,第二层区域网格数为 61 × 55,分辨率为 3 km. 具体模拟区域如图 1 所示.

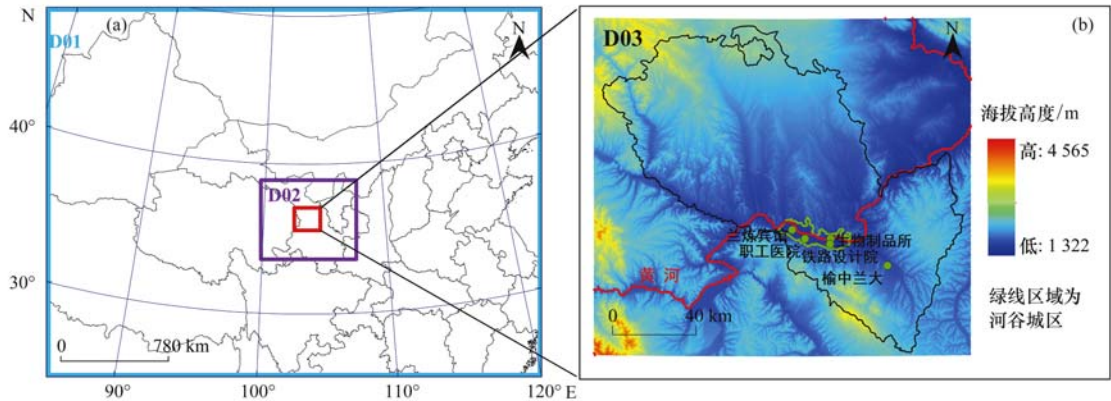


图 1 WRF-Chem 三重网格区域、兰州市国控点和河谷城区

Fig. 1 Three nested domain for WRF-Chem, national ambient air monitoring sites, and urban valley of Lanzhou

模式垂直方向共有 30 层,模式层顶大气压强为 50 hPa. 气象场输入数据采用 NCEP (1° × 1°) FNL 资料,化学初始及侧边界条件采用全球化学传输模式 CAM-Chem 的输出结果^[32],地形数据采用 MODIS 反演数据. 模拟选择的各物理化学参数化方案如表 2 所示.

表 2 WRF-Chem 模式物理化学参数化方案

Table 2 WRF-Chem model physical and chemical parameterization scheme

内容	模式参数配置
微物理参数化方案	Lin 方案
短波辐射方案	RRTM 方案
长波辐射方案	Dudhia 方案
积云对流参数化方案	New Grell scheme 方案
边界层参数化方案	YSU 方案
近地面层方案	Monin-Obukhov 方案
陆面过程	Noah land-surface 方案
气相化学机制	MOZART 机制
光解方案	TUV 方案
气溶胶方案	GOCART 方案

1.3 观测数据

2016 年 PM_{2.5} 和 O₃ 小时浓度监测数据来自全

国城市空气质量实时发布平台 ([http://106. 37. 208. 233:20035/](http://106.37.208.233:20035/)). 2016 年兰州市共有 5 个国控点,其中兰炼宾馆、生物制品研究所、铁路设计院和职工医院为国控城市点,榆中兰大为背景点,国控点(国控城市点和背景点)位置及河谷城区位置见图 1 (b).

2 结果与讨论

2.1 兰州市人为源排放特征

利用兰州市行政边界[图 1(b)],提取边界内 MEIC 网格 (0. 25° × 0. 25°) 的排放总量,并与 HEI-LZ16 进行比较(表 3),各子源排放贡献占比如图 2 所示. HEI-LZ16 中,SO₂、NO_x、CO、NH₃、VOCs、PM₁₀、PM_{2.5}、BC 和 OC 的总量分别为 25 642、53 998、319 003、10 475、35 289、49 250、19 822、2 476 和 1 482 t · a⁻¹,从各污染源排放占比来看[图 2 (a)],SO₂ 和 CO 排放最大的子源为化石燃料燃烧,贡献率分别为 84. 1% 和 45. 9%,NO_x 排放最大的子源为移动源 (54. 0%),NH₃ 排放最大的子源为农业

源(89.3%), VOCs 排放最大的子源为石油化工源(25.3%), PM₁₀和 PM_{2.5}排放最大的子源为道路扬尘源,贡献率分别为 56.4%和 33.9%, BC 和 OC 排放最大的子源为生物质燃烧,贡献率分别为 59.7%和 78.9%。在 MEIC 中, SO₂ (58.7%)、NO_x (47.9%)、CO (41.1%)、VOCs (67.3%)、PM₁₀ (65.3%)和 PM_{2.5} (61.3%) 贡献最大的子源均为工业源[图 2(b)]。HEI-LZ16 相比 MEIC, NH₃ 的排放总量较为接近, PM₁₀ 的排放总量更高, 原因是 HEI-LZ16 中考虑了道路扬尘源, 而 MEIC 中并未包含该子源, HEI-LZ16 中 SO₂、NO_x、VOCs、CO 和 PM_{2.5} 的排放总量较 MEIC 更低, 原因主要来自工业源污染物总量的差异, 将 HEI-LZ16 中工艺过程源、化石燃料燃烧(工业)、石油化工源求和与 MEIC 中工业源总量进行相减(表 3), 二者工业源排放的 SO₂、NO_x、CO、VOCs、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 差异高达 22 185、

20 351、98 835、35 669、12 686 和 11 435 t·a⁻¹, MEIC 采用分省的活动水平和全国平均因子估算工业源排放, 会对污染防治较好的城市排放量有一定的高估, “十二五”期间, 兰州市主城区燃煤供热锅炉实施“凡煤必改、应改尽改”的“换血式”煤改气工程, 改造主城区燃煤锅炉 1 901 台, 8 240 蒸吨, 原煤散烧供热锅炉退出主城区供热历史, 全市火电、化工、钢铁、水泥和砖瓦等主要高排放的 210 家企业实施深度治理, 全市火电机组完成了脱硫、脱硝和除尘改造, 颗粒物排放浓度均达到国家火电行业特别排放限值要求, 六大燃煤电厂和西北铁合金重点工业企业的烟气深度治理, 2015 年 12 月, 兰州作为全国唯一的非低碳试点城市应邀参加巴黎世界气候大会, 并荣获“今日变革进步奖”^[33], 因此, MEIC 以全国平均排放因子可能对兰州市 2016 年工业源排放有所高估。

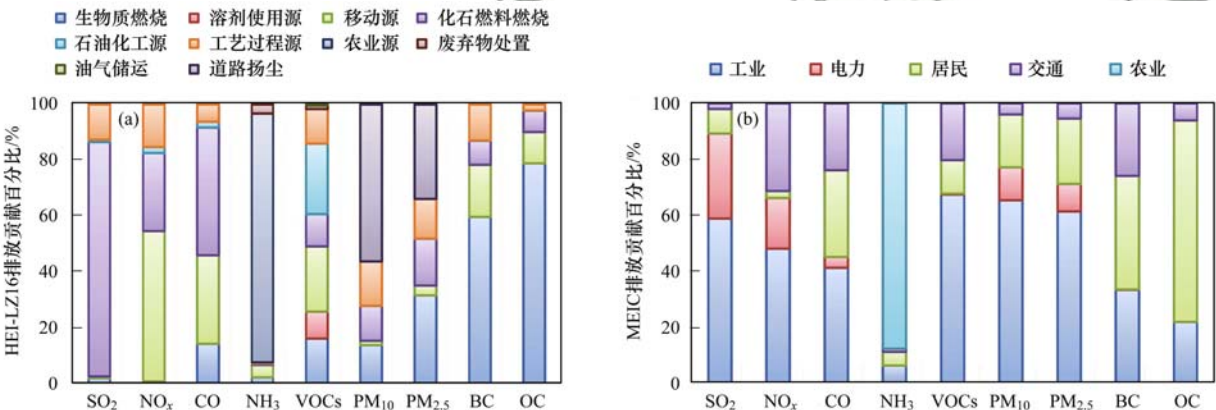


图 2 HEI-LZ16 和 MEIC 中子源排放贡献百分比

Fig. 2 Emission source contribution percentages in HEI-LZ16 and MEIC

表 3 2016 年兰州市人为源排放清单/t·a⁻¹

Table 3 Anthropogenic emission inventory for Lanzhou in 2016/t·a⁻¹

项目	源类	SO ₂	NO _x	CO	NH ₃	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}	BC	OC
HEI-LZ16	生物质燃烧	459	298	44 864	213	5 627	6 710	6 240	1 477	1 169
	溶剂使用源	0	0	0	0	3 435	0	0	0	0
	移动源	155	29 170	101 394	470	8 235	755	700	463	166
	化石燃料燃烧	21 571	15 136	146 304	45	4 116	6 162	3 327	213	114
	石油化工源	230	1 144	6 705	1	8 922	32	17	3	1
	工艺过程源	3 228	8 251	19 737	48	4 392	7 832	2 822	320	32
	农业源	0	0	0	9 357	0	0	0	0	0
	废弃物处置	0	0	0	340	430	0	0	0	0
	油气储运	0	0	0	0	133	0	0	0	0
	道路扬尘	0	0	0	0	0	27 758	6 716	0	0
	总计	25 642	53 998	319 003	10 475	35 289	49 250	19 822	2 476	1 482
MEIC	总计	51 599	88 293	359 883	11 264	74 198	34 971	24 706	3 011	4 356
工业源差异		-22 185	-20 351	-98 835	-591	-35 669	-12 686	-11 435	-512	-800

此外, MEIC 以经济指标或人口密度为空间表征数据进行分配, 在城市尺度高分辨率网格时, 存在较大的不确定性^[10], 造成工业源污染物多集中在城

区^[34], 这也是 MEIC 较 HEI-LZ16 的工业源排放量更高的原因之一。HEI-LZ16 工业源清单建立过程中, 实地调研了相关部门和各个企业, 获取了相关活

动水平及工业企业位置,对部分全国平均排放因子进行了校准,采用物料衡算、排放因子等多种方法^[19],计算得到的城市污染物排放总量相对更为客观合理,2.2节将进一步利用环境空气监测数据和WRF-Chem模式对HEI-LZ16和MEIC的准确性及适用性进行评估校验。

兰州市各污染源及污染物的月变化系数如图3所示,从各污染源月变化来看,煨炕和供暖锅炉仅在11月~次年的3月的采暖季有排放,氮肥的氨排放主要集中在3~7月和9月^[20],其它污染源月变化系数相对差异不大;从各污染物月变化来看,NH₃与其他污染物的月变化特征明显不同,排放量主要集中在温度最高的6~8月(54.2%),受移动源排放影响,NO_x的月排放量差异不大,其他污染物的

排放主要集中在采暖季,SO₂、CO、VOCs、PM₁₀、PM_{2.5}、BC和OC采暖季排放占全年总量的百分比为52.6%、54.1%、57.4%、71.4%、59.8%、79.9%和88.3%。从空间排放特征上来看,NO_x的排放高值区集中在河谷城区及兰州新区、红古区西部的大型热电企业和永登县西北部的水泥企业[图4(a)];VOCs的排放高值区集中在河谷城区西部的石油化工园区和城区道路[图4(b)],此外榆中县冬季煨炕采暖的比例较大^[21],其也是冬季VOCs排放高值区。PM_{2.5}贡献较大的子源是道路扬尘源和生物质燃烧源,排放高值区集中在道路和经济欠发达的榆中县农村,此外永登县的水泥企业、榆中县的钢铁、水泥和建材企业排放的PM_{2.5}同样不容忽视[图4(c)]。

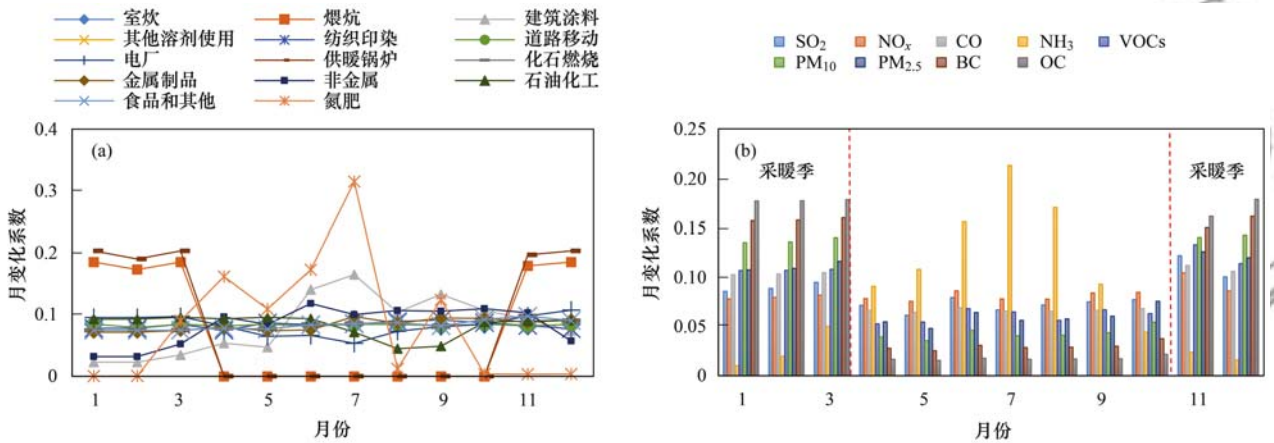


图3 污染源和污染物的月变化
Fig. 3 Monthly changes in emission sources and pollutants

2.2 模拟结果评估

为量化评估HEI-LZ16与MEIC在兰州市的适用性,采用的统计分析参数包括相关系数(*R*)、均方根误差(RMSE)、标准平均偏差(NMB)和标准平均误差(NME)进行评估,*R*反映了模拟值和监测值的一致性,RMSE是用来衡量模拟值同监测值

之间的偏差,NMB反映各模拟值与监测值的平均偏离程度,NME反映了平均绝对误差,评估时采用第3层的PM_{2.5}和O₃的小时浓度模拟值,每月的前3d作为模式的spin-up时间,兰州市国控城市点的小时平均模拟值与监测值对比结果如表4所示。

表4 兰州市国控城市点的小时平均模拟值与监测值对比结果¹⁾

项目		1月		4月		7月		9月	
		MEIC	HEI-LZ16	MEIC	HEI-LZ16	MEIC	HEI-LZ16	MEIC	HEI-LZ16
O ₃	<i>R</i>	0.54	0.45	0.68	0.72 ↑	0.60	0.62 ↑	0.61	0.82 ↑
	RMSE	164.7	39.1 ↑	109.7	43.5 ↑	166.3	49.0 ↑	197.9	34.5 ↑
	NMB%	282.7	29.8 ↑	36.7	-45.9	112.0	19.3 ↑	164.2	5.2 ↑
	NME%	336.6	90.9 ↑	103.8	52.2 ↑	149.5	51.4 ↑	209.2	43.7 ↑
PM _{2.5}	<i>R</i>	0.42	0.51 ↑	0.30	0.30	0.43	0.30	0.24	0.31 ↑
	RMSE	56.6	32.7 ↑	33.7	27.7 ↑	41.6	22.0 ↑	50.4	18.8 ↑
	NMB%	40.9	-9.1 ↑	20.4	-65.9	72.1	-7.7 ↑	70.0	-33.9 ↑
	NME%	68.6	39.0 ↑	66.1	66.0 ↑	87.9	53.2 ↑	87.2	36.6 ↑

1) ↑表示HEI-LZ16的模拟效果较MEIC有所改善;相关性均通过了置信度为95%的显著性检验

从表4中可以看出,两套清单均能较好地模拟O₃的小时变化规律,HEI-LZ16在4、7和9月模拟

的小时O₃相关系数优于MEIC,在MEIC模拟中,O₃的NMB值均大于0,甚至在1、7和9月超过了

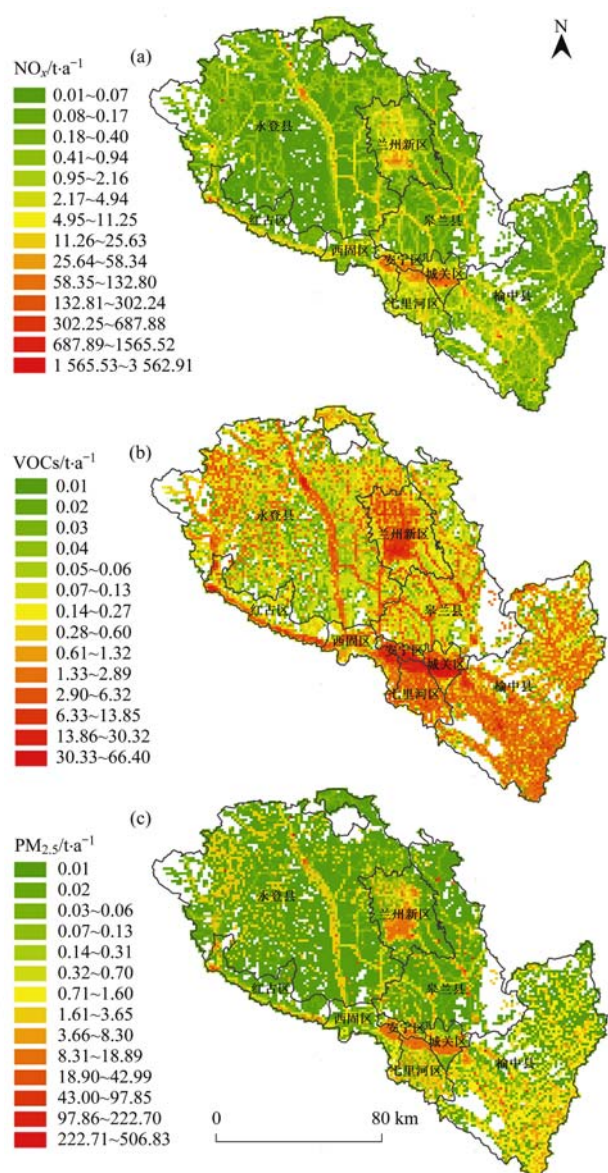


图4 NO_x 、VOCs 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量的 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 空间分布

Fig. 4 The $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ spatial distribution of NO_x , VOCs, and $\text{PM}_{2.5}$ emissions

100%. 表明 MEIC 可能对兰州市 O_3 前体物排放量有一定的高估, HEI-LZ16 在所有模拟时间段, O_3 的平均 NME 值较 MEIC 减小了 140.2%, 表明 HEI-LZ16 中 O_3 前体物排放量较 MEIC 更为合理. 本研究考虑计算时, 采用了更加简单高效的 GOCART 气溶胶方案, 该方案并未考虑二次有机气溶胶过程, 导致两套清单在所有模拟时间段 $\text{PM}_{2.5}$ 模拟值与观测值的相关系数相对较低. MEIC 在所有模拟时间段, $\text{PM}_{2.5}$ 的 NMB 值均大于 0, 表明 MEIC 可能对兰州市 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量同样存在一定的高估, HEI-LZ16 清单中 $\text{PM}_{2.5}$ 的 NMB 值均小于 0, 4 月的 NMB 值低至 -65.9%, 4 月兰州市浮尘、扬沙天气现象频发, 模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较观测值明显偏低, 可能是由于 HEI-LZ16 中对于土壤扬尘等扬尘源清单仍考虑不足所

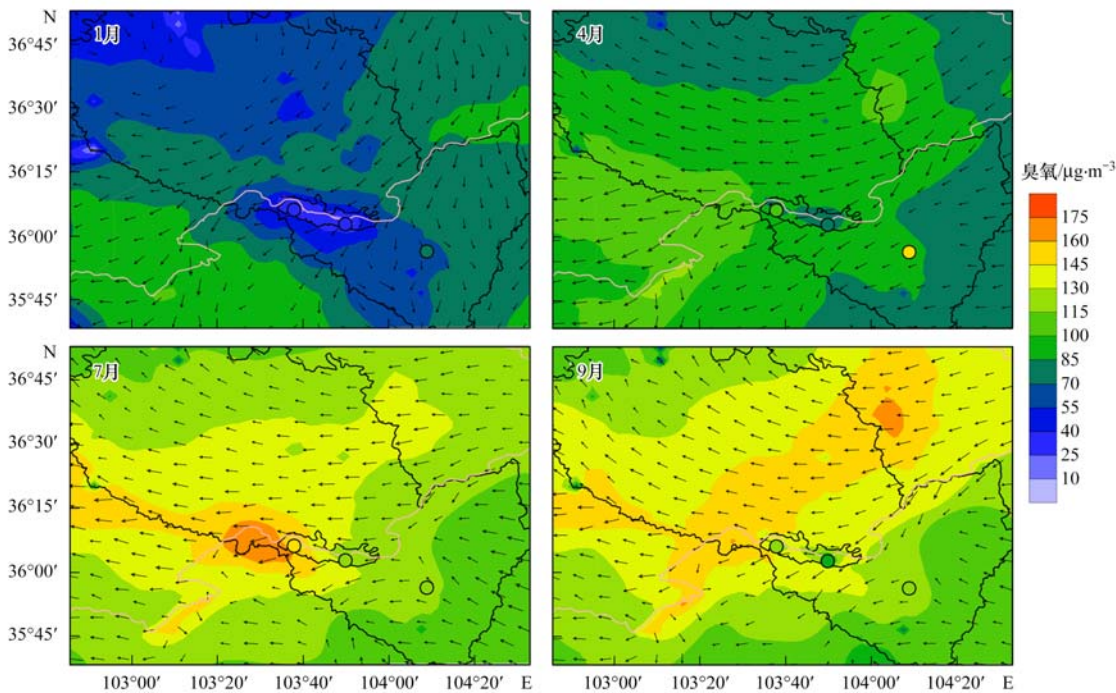
致, 未考虑二次有机气溶胶生成导致了其他月份 $\text{PM}_{2.5}$ 同样被低估. HEI-LZ16 在所有模拟时间段, $\text{PM}_{2.5}$ 的平均 NME 值较 MEIC 减小了 28.8%, 表明 HEI-LZ16 中 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量较 MEIC 更为合理, HEI-LZ16 清单较 MEIC 在兰州市更加准确适用.

2.3 兰州市臭氧 MDA8 时空分布特征

空气质量模式模拟结果较站点监测的优势之一, 是能够反映污染物浓度空间上的连续分布特征, 模式模拟结果可以为监测点布设提供科学依据. 本研究以 HEI-LZ16 的模拟结果来分析兰州市近地面月平均臭氧 MDA8 和月平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的分布特征, 2016 年 1、4、7 和 9 月的月平均臭氧 MDA8 空间浓度如图 5 所示. 从中可以看出, 河谷城区 (内层黑线) 7 月和 9 月的月平均臭氧 MDA8 高于 1 月和 4 月, 不同月份的臭氧 MDA8 高值区位置有较大差别, 1 月份臭氧 MDA8 呈现河谷城区低, 郊区及农村高的分布特征, 兰州市西部及西北部大型热力电厂及水泥制造企业位置同样出现了 O_3 低值区, 臭氧 MDA8 低浓度分布区与 NO_x 高值排放区 [图 4(a)] 对应, 由于“NO 滴定作用”, 冬季臭氧 MDA8 受到 NO_x 排放的抑制作用反而浓度降低, 4 月臭氧 MDA8 分布特征同样呈现河谷城区低、外围地区浓度相对较高的分布特征, 说明春季兰州市河谷城区仍然以消耗 O_3 为主, 但在河谷城区下风向郊区也出现了高值区, 说明春季兰州市河谷城区对下风向地区 O_3 生成有较大的贡献. 7 月臭氧 MDA8 分布特征与 1 月和 4 月有明显不同, 河谷城区西部及其下风向地区的臭氧 MDA8 明显高于其他地区, 从监测值来看, 城区西部浓度值同样高于城区东部浓度值, 兰州市的石油化工园区主要集中在城区的西部, 其排放的 VOCs 占兰州市 VOCs 总量的 25.3%, 加之城区东部移动源排放的大量 NO_x 在偏东风的传输下, 致使在城区西部及其下风向地区大量生成了 O_3 , 因此兰州市河谷城区西部夏季臭氧 MDA8 高, 不仅与石油化工园区位于西部有关, 同样与偏东风的传输有关, 夏季河谷城区西部及其下风向郊区臭氧 MDA8 的高值受偏东风和光化学反应的共同影响. 与 7 月相比, 9 月东北-西南走向的臭氧 MDA8 的高值区更加明显, 兰州市的东北方向是被誉为中国“铜城”的白银市, 有色金属产业发达, 东北-西南高值区与风向的吻合性很好, 说明了沿着白银—兰州黄河河谷盆地走向的西侧存在一个 O_3 传输通道.

2.4 兰州市 $\text{PM}_{2.5}$ 时空分布特征

2016 年 1、4、7 和 9 月的月平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度如图 6 所示, 从中可以看出, 不同月份的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区位置差别不大, 浓度高值区主要位于地势较低



圆圈为监测值(自左向右分别为兰炼宾馆、铁路设计院和榆中兰大),箭头代表相同时间内平均风向和风速,粉色线为黄河,内层黑线为兰州市河谷城区,下同

图 5 1、4、7 和 9 月月平均臭氧 MDA8

Fig. 5 Spatial distribution of monthly averaged ozone MDA8 in January, April, July, and September

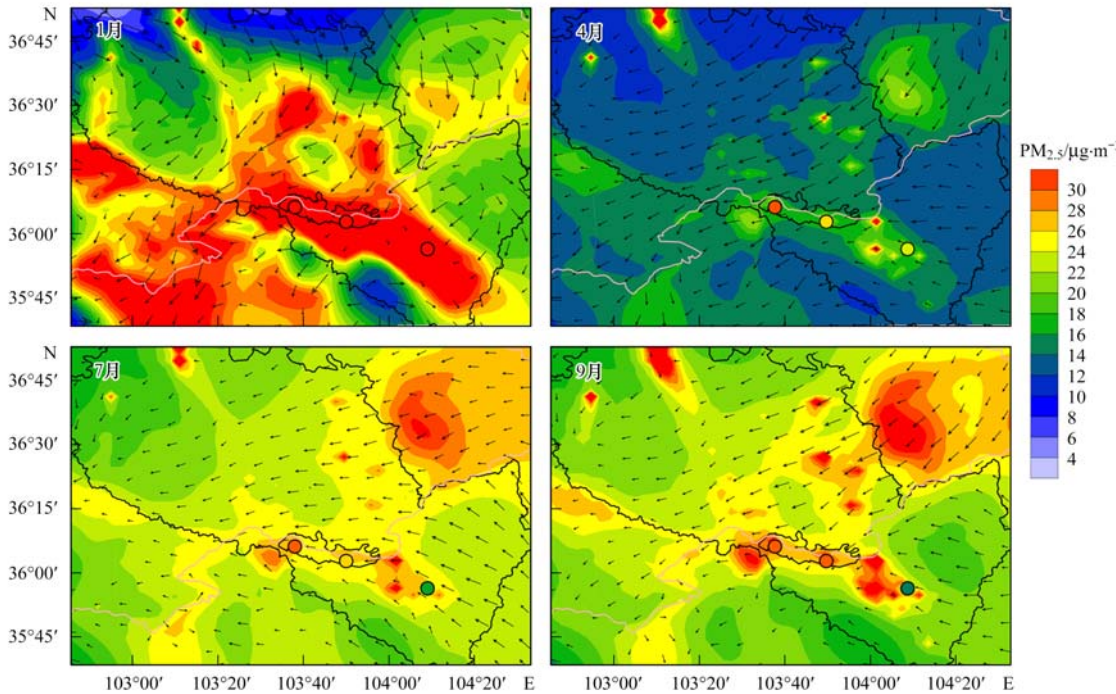


图 6 1、4、7 和 9 月 PM_{2.5} 浓度

Fig. 6 Spatial distribution of monthly averaged PM_{2.5} concentrations in January, April, July and September.

的黄河河谷盆地[图 1(b)],兰州市西北方向的大型水泥制造企业,东部的大型钢铁及水泥制造企业周围 PM_{2.5} 浓度同样很高,PM_{2.5} 浓度高值区和排放高值区位置基本吻合. 1 月的月平均 PM_{2.5} 浓度明显高于其他月份,主要原因是 1 月正值兰州市的采暖

期,采暖期的排放的 PM_{2.5} 占全年排放总量的 59.8%, 4 月相比于其他月份,PM_{2.5} 模拟浓度偏低,但空间分布特征基本相似,2016 年 4 月的工业源时间表征数据相比于 7 月和 9 月偏低,致使归一化后月变化系数偏低,工业污染源的排放偏低是 4 月

PM_{2.5} 模拟浓度相比 7 月和 9 月偏低的主要原因。从月平均风向来看,1 月兰州市的近地面主导风向是偏北风,4、7 和 9 月黄河河谷以北主导风向为东北风,黄河河谷以南为东南风,沿着白银—兰州黄河河谷盆地走向的西侧同样存在一个 PM_{2.5} 的传输通道,这点与刘镇^[19]运用后向轨迹模式得到的结论相似。

3 结论与展望

(1) HEI-LZ16 中 SO₂、NO_x、CO、NH₃、VOCs、PM₁₀、PM_{2.5}、BC 和 OC 的总量分别为 25 642、53 998、319 003、10 475、35 289、49 250、19 822、2 476 和 1 482 t·a⁻¹, SO₂ 和 CO 排放最大的子源为化石燃料燃烧,贡献率分别为 84.1% 和 45.9%, NO_x 排放最大的子源为移动源(54.0%), NH₃ 排放最大的子源为农业源(89.3%), VOCs 排放最大的子源为石油化工源(25.3%), PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放最大的子源为道路扬尘源,贡献率分别为 56.4% 和 33.9%, BC 和 OC 排放最大的子源为生物质燃烧,贡献率分别为 59.7% 和 78.9%。

(2) 在模拟时间内, HEI-LZ16 相比于 MEIC, O₃ 和 PM_{2.5} 的 NME 值分别减小了 140.2% 和 28.8%, HEI-LZ16 更能反映实际排放特征,且能明显改善模拟效果,但 PM_{2.5} 模拟浓度仍然偏低,未来仍有必要更新本地 VOCs 和颗粒物源成分谱,改进扬尘源排放清单等进一步优化 HEI-LZ16 模型。

(3) 兰州市近地面臭氧 MDA8 呈现冬春季城区低而郊区高、夏秋季河谷城区西部及其下风向地区高的分布特征。冬季兰州市河谷城区 O₃ 浓度受到 NO_x 排放的抑制作用反而浓度降低,春季兰州市河谷城区仍然以消耗 O₃ 为主,但对下风向地区 O₃ 生成仍有较大的贡献,夏季 O₃ 高值区分布受偏东风和光化学反应的共同影响,沿白银—兰州黄河河谷盆地走向的西侧存在一个 O₃ 传输通道。

(4) 兰州市不同月份的 PM_{2.5} 浓度均呈现黄河河谷盆地高的分布特征,且浓度高值区和 PM_{2.5} 排放高值区位置基本对应,1 月兰州市的近地面主导风向是偏北风,4、7 和 9 月黄河河谷以北主导风向为东北风,黄河河谷以南为东南风,沿着白银—兰州黄河河谷盆地走向的西侧同样存在一个 PM_{2.5} 的传输通道。

参考文献:

[1] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 162-187.

[2] 杨文夷, 李杰, 朱莉莉, 等. 我国空气污染物人为源排放清单对比[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7): 703-711.

Yang W Y, Li J, Zhu L L, et al. Comparison of anthropogenic

emission inventories of China mainland[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(7): 703-711.

[3] 王书肖, 邱雄辉, 张强, 等. 我国人为源大气污染物排放清单编制技术进展及展望[J]. 环境保护, 2017, 45(21): 21-26.

Wang S X, Qiu X H, Zhang Q, et al. Developing anthropogenic air pollutant emission inventory in China: progress and outlook[J]. Environmental Protection, 2017, 45(21): 21-26.

[4] Zhang Q. Study on regional fine PM emissions and modeling in China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.

[5] Liu F, Zhang Q, Tong D, et al. High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(23): 13299-13317.

[6] 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.

[7] Zheng B, Huo H, Zhang Q, et al. High-resolution mapping of vehicle emissions in China in 2008[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(18): 9787-9805.

[8] Peng L Q, Zhang Q, Yao Z L, et al. Underreported coal in statistics: a survey-based solid fuel consumption and emission inventory for the rural residential sector in China[J]. Applied Energy, 2019, 235: 1169-1182.

[9] 张恺, 骆春会, 陈旭峰, 等. 中国不同尺度大气污染物排放清单编制工作综述[J]. 中国环境监测, 2019, 35(3): 59-68.

Zhang K, Luo C H, Chen X F, et al. Review of atmospheric pollutant inventories at different scales in China[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35(3): 59-68.

[10] Wang L T, Wei Z, Yang J, et al. The 2013 severe haze over southern Hebei, China: model evaluation, source apportionment, and policy implications[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(6): 3151-3173.

[11] 蒋争明, 徐迅宇, 陈吟晖, 等. 空气质量多模式预报系统在中山市的应用[J]. 中国环境监测, 2018, 34(4): 34-43.

Jiang Z M, Xu X Y, Chen Y H, et al. Application of air quality multi-model forecasting system in Zhongshan[J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(4): 34-43.

[12] 张恬月, 杨欣悦, 谭钦文, 等. 成都市空气质量预报系统的应用及预报效果评估[J]. 四川环境, 2019, 38(3): 96-105.

Zhang T Y, Yang X Y, Tan Q W, et al. Application of Chengdu air quality forecast system and evaluation of forecast effect[J]. Sichuan Environment, 2019, 38(3): 96-105.

[13] 王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 等. 餐饮行业细颗粒物(PM_{2.5})排放测算方法: 以上海市为例[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 1971-1977.

Wang H L, Jing S A, Lou S R, et al. Estimation of fine particle (PM_{2.5}) emission inventory from cooking: case study for Shanghai[J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 1971-1977.

[14] 赵庆炎, 韩士杰, 张轶舜, 等. 郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2052-2061.

Zhao Q Y, Han S J, Zhang Y S, et al. Emission characteristics and list of inorganic elements in fine particles of typical industrial kilns in Zhengzhou City[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2052-2061.

[15] Wang W N, Cheng T H, Gu X F, et al. Assessing spatial and temporal patterns of observed ground-level ozone in China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1), doi: 10.1038/s41598-017-

- 03929-w.
- [16] 杨雪玲. 兰州市重污染天气过程环流形势与气象条件研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [17] 刘晓, 陈强, 郭文凯, 等. 移动源排放 VOCs 特征及臭氧生成潜势研究——以兰州市为例 [J]. 环境科学学报, 2018, **38** (8): 3220-3228.
- Liu X, Chen Q, Guo W K, *et al.* Emission characteristics and ozone formation potential of VOCs from mobile sources: a pilot study in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38** (8): 3220-3228.
- [18] 刘镇, 朱玉凡, 郭文凯, 等. 兰州市化石燃料燃烧源排放 VOCs 的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势 [J]. 环境科学, 2019, **40** (5): 2069-2077.
- Liu Z, Zhu Y F, Guo W K, *et al.* Formation potential of ozone and secondary organic aerosol of VOCs from fossil fuel combustion in Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (5): 2069-2077.
- [19] 刘镇. 基于源模式的兰州市冬季细颗粒物源解析及“煤改气”政策实施效果评估研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [20] 栗世学, 郭文凯, 何昕, 等. 兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征 [J]. 环境科学, 2019, **40** (3): 1172-1178.
- Li S X, Guo W K, He X, *et al.* Inventory and spatiotemporal distribution of ammonia emission from agriculture and animal husbandry in Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (3): 1172-1178.
- [21] 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 等. 兰州市煨炕污染物排放清单及其对 PM_{2.5} 浓度贡献 [J]. 环境科学, 2018, **39** (11): 4849-4857.
- Guo W K, Liu X, Zhu Y F, *et al.* Emissions inventory of smoldering Chinese Kangs and their contribution to PM_{2.5} pollution in Lanzhou City [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (11): 4849-4857.
- [22] 郭文凯, 刘镇, 刘文博, 等. 兰州生物质燃烧 VOCs 排放特征及其大气环境影响 [J]. 中国环境科学, 2019, **39** (1): 40-49.
- Guo W K, Liu Z, Liu W B, *et al.* The characteristics of VOCs emission from biomass burning and its influence on atmospheric environment in Lanzhou City [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39** (1): 40-49.
- [23] 贺克斌. 城市大气污染物排放清单编制技术手册 [R]. 北京: 清华大学环境学院, 2017.
- [24] 吴亚君, 胡君, 张鹤丰, 等. 兰州市典型企业 VOCs 排放特征及反应活性分析 [J]. 环境科学研究, 2019, **32** (5): 802-812.
- Wu Y J, Hu J, Zhang H F, *et al.* Characteristics and chemical reactivity of fugitive volatile organic compounds from typical industries in Lanzhou City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32** (5): 802-812.
- [25] EPA. SPECIATE 5.1 [EB/OL]. <https://www.epa.gov/air-emissions-modeling/speciate>, 2020-08-10.
- [26] Emmons L K, Walters S, Hess P G, *et al.* Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2010, **3** (1): 43-67.
- [27] 张妍. 基于在线监测的燃煤电厂排放清单优化、验证及排放控制效益研究 [D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [28] 卢怡, 赵雪芬, 赵瑜. 不同模式版本对长三角区域大气污染物模拟结果对比评估 [J]. 环境监控与预警, 2020, **12** (3): 5-14.
- Lu Y, Zhao X F, Zhao Y. The comparison and evaluation of air pollutant simulation for the Yangtze River Delta Region with different versions of air quality model [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2020, **12** (3): 5-14.
- [29] HTAP_V2 [EB/OL]. http://edgar.jrc.ec.europa.eu/htap_v2/index.php, 2020-08-10.
- [30] Liang C K, West J J, Silva R A, *et al.* HTAP2 multi-model estimates of premature human mortality due to intercontinental transport of air pollution and emission sectors [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18** (14): 10497-10520.
- [31] Sharma A, Ojha N, Pozzer A, *et al.* WRF-Chem simulated surface ozone over south Asia during the pre-monsoon: effects of emission inventories and chemical mechanisms [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17** (23): 14393-14413.
- [32] CAM-Chem [EB/OL]. <https://www.acom.ucar.edu/cam-chem/cam-chem.shtml>, 2020-08-10.
- [33] 兰州市生态环境局. 兰州市“十三五”环境保护规划 [EB/OL]. <http://sthjj.lanzhou.gov.cn/col/col5743/index.html>, 2020-08-10.
- [34] 周亚端. 江苏省高精度大气污染物排放清单的建立及空气质量模拟评估 [D]. 南京: 南京大学, 2016.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)