

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)

兰州市煨炕污染物排放清单及其对PM_{2.5}浓度贡献 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)

北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)

郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)

菏泽市冬季PM_{2.5}中二元羧酸类SOA的昼夜变化特征 孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)

我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征 温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)

嘉兴市2015年人为源VOCs排放清单 郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)

上海某石化园区周边区域VOCs污染特征及健康风险 盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)

SBR工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)

太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应 石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)

巢湖2016年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)

蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)

三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)

纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响 白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)

澜沧江流域水体悬浮颗粒物δ¹⁵N空间差异及成因分析 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)

潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律 耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)

蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)

典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)

农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)

城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征 刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)

不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 葛德, 张守红 (5015)

四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用 王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)

厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)

光助-二茂铁/H₂O₂非均相体系降解磺胺二甲基嘧啶 张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)

基于同位素技术的短程硝化过程N₂O产生途径 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)

基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)

厌氧/好氧SPNDPR系统实现低C/N城市污水同步脱氮除磷的优化运行 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)

污水处理厂SNAD工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)

盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学 唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)

中试ANAMMOX-ASBR处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性 张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)

碳氮比对颗粒污泥CANON反应器脱氮性能和N₂O释放的冲击影响 付昆明, 姜姍, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)

污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析 房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)

重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)

韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布 刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)

有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)

纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的α-HCH 姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)

株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征 申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)

生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响 王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)

生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响 俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)

颗粒有机质对水稻稻吸收及转运的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

施肥对向日葵吸收积累Cd的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

不同水稻品种对重金属的积累特性 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄久如 (5198)

芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)

三峡库区典型河流水-气界面CO₂通量日变化观测及其影响因素分析 罗佳宸, 李思悦 (5217)

富营养化湖区CH₄排放特征及其影响因素 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)

短期放牧对半干旱草地生态系统CO₂和N₂O排放的影响 申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)

覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)

臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物(BVOCs)影响的研究进展 冯兆忠, 袁相洋 (5257)

地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)

污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素 张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)

《环境科学》征订启事(4848) 《环境科学》征稿简则(4990) 信息(5188, 5216, 5236)

兰州市煨炕污染物排放清单及其对 PM_{2.5} 浓度贡献

郭文凯¹, 刘晓¹, 朱玉凡¹, 陈强^{1*}, 杜永刚²

(1. 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; 2. 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250013)

摘要: 在考虑经济水平差异的基础上, 通过对典型区域的调查确定煨炕活动水平, 采用排放因子法建立了兰州市 2016 年煨炕大气污染物排放清单, 煨炕排放的 SO₂、NO_x、NH₃、CO、VOCs、PM₁₀、PM_{2.5}、OC 和 EC 的总量分别为 340.8、201.8、106.0、36 628.2、4 997.2、6 070.3、5 645.1、1 089.3 和 1 233.1 t·a⁻¹. 对污染物排放总量进行时空分配, 排放主要集中在 11 月至次年 4 月中旬; 排放量与区域经济水平密切相关, 且存在着明显的空间差异, 排放量大的区域主要集中在榆中东南部、永登中部和七里河南部. 利用 WRF-Chem 模式研究了采暖季煨炕对兰州市 PM_{2.5} 浓度的平均贡献, 引入煨炕污染物排放清单提高了模拟结果的准确性, 兰苑宾馆(位于城区)和榆中站(位于农村)的 PM_{2.5} 平均浓度在模拟期间分别升高了 32 μg·m⁻³ 和 34 μg·m⁻³, 贡献率分别为 37.6% 和 49.2%. 可见, 研究和制定科学的煨炕污染物防控对策对改善区域环境空气质量具有重要意义.

关键词: 煨炕; 排放清单; WRF-Chem 模式; PM_{2.5}; 贡献

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4849-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803177

Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM_{2.5} Pollution in Lanzhou City

GUO Wen-kai¹, LIU Xiao¹, ZHU Yu-fan¹, CHEN Qiang^{1*}, DU Yong-gang²

(1. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250013, China)

Abstract: Considering regional differences in economic development, the activity level of smoldering Chinese kang was confirmed by surveys in typical areas in Lanzhou City. An emissions inventory of smoldering Chinese kangs in Lanzhou City in 2016 was established using the emissions factor approach. The emissions amounts of SO₂, NO_x, NH₃, CO, volatile organic compounds (VOCs), PM₁₀, PM_{2.5}, organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) were 340.8, 201.8, 106.0, 36 628.2, 4 997.2, 6 070.3, 5 645.1, 1 089.3, and 1 233.1 t·a⁻¹, respectively. Emissions amounts were allocated by spatial and temporal characteristics. The emissions were concentrated from November to mid-April of the following year. Spatially, there were significant differences in emissions at different economic levels. The high value areas of emissions were mainly concentrated in the southern part of Yuzhong, central Yongdeng, and south of Qilihe. The weather research and forecasting with chemistry (WRF-Chem) model was used to determine the average contribution of smoldering Chinese kangs to PM_{2.5} concentration in Lanzhou City during the heating season. The simulation results were improved after applying the emissions inventory. The average PM_{2.5} concentration at Lanyuan Hotel (in the city) and Yuzhong Station (in the countryside) increased 32 μg·m⁻³ and 34 μg·m⁻³ in the simulation, respectively, and the corresponding rates of pollution contribution were 37.6% and 49.2%. Thus, researching and enacting scientific control measures for smoldering Chinese kang pollutants is significant to improving regional air quality.

Key words: smoldering Chinese kangs; emissions inventory; WRF-Chem; PM_{2.5}; source contribution

生物质燃烧源是大气污染物的重要来源之一, 产生的大量气态和颗粒态污染物对人体健康、大气环境质量和气候变化等有重要影响^[1,2], 目前, 我国已经建立了国家、区域等多尺度生物质燃烧源排放清单^[3,4]. 然而已有的清单并未考虑到煨炕排放的污染物, 煨炕是我国西北经济水平相对落后的农村地区特有的广泛采用的生物质采暖炉具, 不同于其他室内生物质燃烧源, 煨炕的排放口位于室外, 采取燃料阴燃的方式来加热炕体^[5]. 陇中黄土丘陵地区煨炕每年户均消耗秸秆和薪草 1 257.5 kg, 对

农村生态经济系统有重要影响^[6]. 近些年来由于改善大气环境质量的需要, 政府鼓励农民采用以电、天然气或煤炭为能源的采暖炉具代替煨炕, 然而, 电等能源相比生物质能源经济成本高, 位于西北内陆的大部分农村经济水平较低, 受能源经济成本的影响, 仍有较大比例的农户使用煨炕等生物质

收稿日期: 2018-03-26; 修订日期: 2018-05-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2017-kl02)

作者简介: 郭文凯(1993~), 男, 硕士, 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: chenqhq@lzu.edu.cn

炉具。

同时,目前关于生物质燃烧源对大气环境质量的影响研究以开放燃烧源居多,苏继峰等^[7]建立了长江三角洲秸秆露天燃烧排放清单,运用 CMAQ 模式分析了秸秆露天燃烧对一次典型污染过程的浓度贡献,钟方潜等^[8]利用 NCAR-FINN 火点排放资料运用 WRF-Chem 模式研究了一次秸秆露天燃烧过程对区域城市空气质量的影响。针对煨炕等室内生物质燃烧源对大气环境质量的影响研究较少,本研究以兰州市为例,在考虑经济水平差异的基础上调查确定活动水平,建立了 2016 年兰州市各乡镇煨炕大气污染物排放清单,分析兰州市煨炕污染物排放特征,依据本地时空特征表征数据^[9]将清单总量进一步分配,利用 WRF-Chem 模式分析煨炕排放源对采暖季兰州市 PM_{2.5} 浓度贡献的影响,通过完善我国西北地区生物质燃烧源排放清单,以期对采暖季空气质量的预报和改善提供基础信息。

1 材料与方法

1.1 研究区域与范围

以 2016 年为基准年,以经纬度范围为 E102.61 ~ 104.55° 和 N35.51 ~ 36.89° 内的 117 个乡镇街道为研究区域,以 30°N 和 60°N 为标准纬线进行 Lambert 投影,将研究区域在东西、南北方向划分为 58 和 52 个网格,分辨率为 3 km × 3 km,清单大气污染物包括 SO₂、NO_x、CO、NH₃、VOCs、PM₁₀、PM_{2.5}、OC 和 EC。

1.2 清单估算方法

采用“自下而上”的方式估算煨炕污染物排放清单,计算公式为:

$$E_i = \sum_{i,j} (A_{i,j} \times EF_{i,j}) / 1000 \quad (1)$$

式中, E_i 为大气污染物排放总量(t); A 为活动水平(t); EF 为污染物排放因子($g \cdot kg^{-1}$); i 为某一种大气污染物; j 为地区。

1.2.1 活动水平

生物质燃烧量受所处气候带、农村生活水平和秸秆产量等因素影响密切^[4,10],在兰州市农村实地调查发现,瓜蔬类作物经济价值高、秸秆产生量低,主要在城区周边经济较为富裕的地区种植,小麦等粮食作物经济价值相对较低、秸秆产生量大,主要在经济相对落后的地区种植,煨炕等室内生物质炉具的主要使用源地为经济水平较为落后、以种植小麦等粮食作物为主的农村地区,据此,本文首

次定义了生物质人为燃烧指数(α),以区分不同经济发展水平地区的煨炕活动水平。

$$\alpha_j = \frac{V_j}{W_j + M_j + O_j} \quad (2)$$

式中, V 为蔬菜产量(t); W 为小麦产量(t); M 为玉米产量(t); O 为油料产量(t); j 为地区。依据各县区统计年鉴计算乡镇 α 值,并将所有乡镇划分为 3 个水平,其中, $\alpha > 100$ 的富裕城郊,蔬菜产量是小麦、玉米、油料总产量的 100 倍,此部分乡镇离城区很近,经济水平发达,秸秆产生量低,秸秆处理方式主要为废弃或直接还田,基本不使用煨炕等生物质炉具; $100 > \alpha > 1$ 的一般经济水平乡镇,蔬菜产量高于小麦、玉米和油料的总产量,该地区内多种农作物混合种植,经济水平较高,秸秆处理方式主要为废弃和露天燃烧,较少地使用煨炕等生物质炉具; $\alpha < 1$ 的经济水平较低乡镇,蔬菜产量低于小麦、玉米、油料的总产量,经济水平较为落后,秸秆处理方式主要为炊事、采暖和饲养牲畜,煨炕是该类地区主要的采暖方式。所有城区街道划入 $\alpha > 100$ 所属范围,兰州市 117 个乡镇街道 α 水平如图 1 所示,本研究以 α 水平对各地区煨炕活动水平进行区分,对于未实际调查活动水平的地区,采用已调查的相近 α 水平的地区平均活动水平代替。

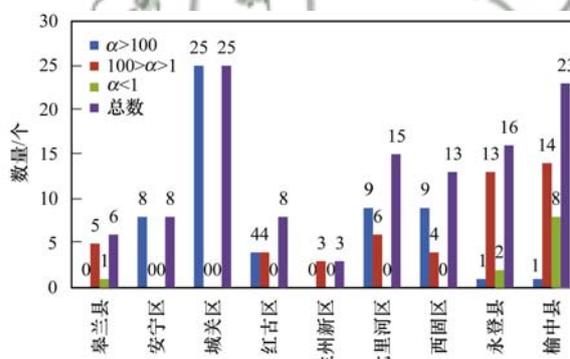


图 1 兰州市生物质人为燃烧指数

Fig. 1 Anthropogenic biomass burning index in Lanzhou City

煨炕的活动水平依据式(3)进行计算:

$$A_{j,m} = B_{j,m} \times T_j \times D_j \times R_j / 1000 \quad (3)$$

式中, A 表示活动水平; B 为每户日均采暖秸秆的用量($kg \cdot d^{-1}$); T 为各乡镇农村户口居民总户数; D 为农户年均采暖天数; R 为煨炕用户数占农村户口居民总户数的比例; j 为地区; m 为燃料类型。各乡镇农村户口居民户数(T_j)来自各县区统计年鉴,兰州市属于温带大陆性气候,冬季平均气温 $-2.5^\circ C$ ^[11],由于气温寒冷,农村采暖时间一般从

11 月到次年 4 月中旬, 年均采暖天数约为 165 d. 其他所需参数 ($B_{j,m}$, R_j) 通过入户抽样调查获得.

结合 α 水平和空间地理位置, 选取榆中县夏官营镇太平堡村、来紫堡乡骆驼巷村、甘草店镇克涝村、龙泉乡骡子滩村、永登县中堡镇汪家村、红古

区花庄镇煌兴村和皋兰县黑石镇黑石村作为典型样本入户抽样调查, 调查内容包括煨炕用户占总调查户数的比例、煨炕燃料种类、煨炕每户日均燃烧量等; 回收有效调查问卷 55 份, 具体抽样调查情况见表 1.

表 1 兰州市煨炕使用水平抽样调查情况

Table 1 Level of sampling survey of smoldering Chinese kang in Lanzhou City

项目	太平堡村 ($\alpha=20.3$)	骆驼巷村 ($\alpha=36.8$)	汪家村 ($\alpha=9.2$)	煌兴村 ($\alpha=52.1$)	黑石村 ($\alpha=0.9$)	克涝村 ($\alpha=0.5$)	骡子滩村 ($\alpha=0.8$)
煨炕用户占有比例/%	54	10	17	20	70	80	65
每户日均燃烧/kg·d ⁻¹	15	18	15	13	23	20	10
燃料种类	秸秆、薪草、 树叶	秸秆、树叶、 垃圾	秸秆、薪草、 树叶	秸秆、薪草、 树叶	秸秆、薪草、 树叶	秸秆、薪草、 树叶	秸秆、薪草、 树叶

从表 1 可知, 煨炕用户比例在不同调查地区存在明显的差异, 在 $\alpha < 1$ 的地区约占调查总户数的 70%, 在 $100 > \alpha > 1$ 的地区约占调查总户数的 20%, 不同地区煨炕日均燃烧量与经济水平和秸秆产量相关性不高, 平均约为 15 kg·d⁻¹, 煨炕的燃料比较混杂, 不仅有秸秆, 同时还包含薪草和树叶等其他生物质. 本次调查未涉及 $\alpha > 100$ 的地区, 认为此类地区已经基本不使用煨炕, 其活动水平为 0. 以调查得到的各村落平均活动水平代表所在乡镇的活动水平, 未调查乡镇的活动水平采用已调查的相同 α 水平的乡镇平均活动水平代替.

1.2.2 排放因子

目前国内外研究中均没有实测过煨炕的排放因子, 考虑到煨炕阴燃的特征, 不能直接将普通的生物质炉具排放因子用于煨炕. 秸秆完全燃烧主要产物为 CO₂, 未完全燃烧主要产物为 CO 和 VOCs^[12,13], 不同研究者测定的阴燃与明燃状态下污染物的排放因子存在较大差别. Aurell 等^[14] 的研

究表明 VOCs 排放因子随着燃烧效率降低而增加, Lee 等^[15] 研究了规定的森林燃烧, 甲苯、乙醇和丙烯等物种的排放因子阴燃状态约为明燃状态 3 倍; Miranda 等^[16] 的研究表明野火的 VOCs 排放浓度阴燃状态为明燃状态 2 倍; Liu 等^[17] 研究了家用煤炉的燃烧过程, VOCs 排放因子阴燃状态比明燃状态高出一个数量级; Lioussse 等^[18] 的研究表明典型秸秆阴燃状态下 PM_{2.5} 的排放因子约为明燃状态 3 倍左右; 洪蕾^[19] 的研究表明, 阴燃状态 OC 和 EC 在颗粒物中的占比与明燃状态相近; 王俊芳^[20] 的研究表明阴燃状态相比明燃状态小麦、玉米、稻谷中 SO_x、NO_x 排放因子变化不大, CO 排放约为 1.2 ~ 1.9 倍, PM_{2.5} 约为 2.8 ~ 5.2 倍. 基于上述学者研究成果, 以文献 [21, 22] 中生物质炉具的平均排放因子计算煨炕排放因子, CO 排放因子扩大 1.5 倍, VOCs、PM₁₀、PM_{2.5}、OC 和 EC 的排放因子扩大 3 倍代替煨炕排放因子, 具体如表 2 所示.

表 2 煨炕排放因子/g·kg⁻¹

Table 2 Emissions factors of smoldering Chinese kang/g·kg⁻¹

燃料类型	SO ₂	NO _x	NH ₃	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}	OC	EC	文献
小麦秸秆	2.36	0.51	0.37	171.7	9.37	8.86	8.24			[21]
小麦秸秆								2.27	2.64	[22]
玉米秸秆	1.33	0.83	0.68	56.6	7.34	7.39	6.87			[21]
玉米秸秆								1.36	1.11	[22]
油料秸秆	1.36	1.65	0.52	133.50	7.97	13.73	12.77			[21]
油料秸秆								1.75	2.34	[22]
平均	1.68	0.99	0.52	120.60	8.23	9.99	9.29	1.79	2.03	
煨炕	1.68	0.99	0.52	180.90	24.68	29.98	27.88	5.38	6.09	本研究

1.3 煨炕排放清单建立及其在 WRF-Chem 模式中的应用

排放清单运用于空气质量模式时, 通常需要将

年度排放源清单经过处理后转化为在时间尺度、空间分辨率和化学物种分类上与大气化学模型要求相一致的清单数据^[9], 新一代区域空气质量模式

WRF-Chem 实现了气象模式和化学模式完全在线耦合, 逐渐应用于空气质量模拟研究和预报业务^[23,24], 然而目前 WRF-Chem 模式仍缺少类似于 CMAQ 模式的前处理模块 SMOKE^[25], 多数区域排放清单应用于 WRF-Chem 模式时未依据适合本地的时空排放特征和源成分谱信息对清单总量进行进一步分配, 这为清单应用于 WRF-Chem 模式带来了误差. 本研究依据煨炕的排放特征, 对清单总量进一步时间分配处理、空间分配处理、垂直分配处理和物种分配处理, 其中, 煨炕排放源属于居民建筑外墙上的无组织面源, 高度假定为在模式最底层, 颗粒物物种分配采用模式自有的生物质燃烧源成分谱分配.

1.3.1 时空间分配方法

采暖季煨炕每天的燃烧量基本不变, 时间分配方式为 165 d(11 月 1 日~次年 4 月 13 日)平均分配, 空间分配以兰州市各乡镇的行政村居民分布点作为煨炕的空间特征表征数据^[9], 将污染物排放总量分配到 3 km × 3 km 的网格上.

表 3 兰州市 2016 年煨炕污染物排放清单/ $t \cdot a^{-1}$

Table 3 Emissions inventory of smoldering Chinese kang in Lanzhou City in 2016/ $t \cdot a^{-1}$

项目	SO ₂	NO _x	NH ₃	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}	OC	EC
煨炕	340.8	201.8	106.0	36 628.2	4 997.2	6 070.3	5 645.1	1 089.3	1 233.1

从表 3 中看出, 煨炕排放的主要污染物是 CO、PM₁₀、PM_{2.5} 和 VOCs, 其中 CO 和颗粒物为污染物总量贡献了 85.8%, 主要原因是煨炕阴燃增大了 CO、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 等不完全燃烧产物的排放因子, 依据兰州市 2009 年人为源大气污染物排放总量^[28], 煨炕排放的典型污染物 CO、PM₁₀、PM_{2.5} 和 VOCs 分别为人为源污染物排放总量贡献了 8.9%、6.3%、13.5% 和 11.7%.

2.2 空间分布特征

采用 1.3.1 节所述的分配方法, 得到兰州市 2016 年煨炕 3 km × 3 km 的网格化污染物排放清单, 以 PM_{2.5} 为例(图 2), 分析兰州市煨炕排放的污染物空间分布特征, 从图 2 中可以看出, 不同经济水平地区煨炕排放量差异较大, 煨炕排放的污染物主要集中在榆中东南部、永登中部和七里河南部, 空间分布主要受农村人口分布及经济水平的影响, 城区周边经济水平高, 永登南部农村人口较少, 因而排放量相对较小.

2.3 基于 RACM 的煨炕 VOCs 模型物种谱

煨炕模型物种谱(表 4)显示, 乙烯(ETE)为

1.3.2 基于 RACM 的煨炕 VOCs 模型物种谱确定

为了满足空气质量模式的输入要求, 需要依据大气化学机制对大气化学成分谱进行分类和归纳, WRF-Chem 模式模拟时选用区域大气化学机制^[26](regional atmospheric chemical mechanism, RACM), RACM 是应用较为广泛的大气化学机制之一^[27], RACM 将一次 VOCs 归纳为 16 个人为源物种和 3 个生物源物种, 参考国内外文献及 SPECIATE 4.5 数据库, 考虑到煨炕阴燃特征, 采用 SPECIATE 4.5 中编号为 95161 (Prescribed Burning-Smoldering Stage)的化学成分谱, 依据 RACM 对 VOCs 成分谱组分归纳整理, 建立基于 RACM 的煨炕 VOCs 模型物种谱.

2 结果与讨论

2.1 兰州市 2016 年煨炕排放清单

依据活动水平和表 2 列出的排放因子对各个乡镇排放总量进行估算, 兰州市 2016 年煨炕大气污染物排放总量如表 3 所示.

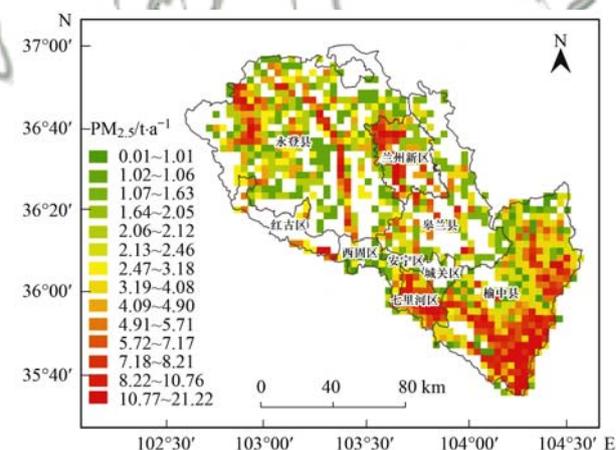


图 2 兰州市 2016 年煨炕 PM_{2.5} 排放量空间分布

Fig. 2 PM_{2.5} spatial distribution of smoldering Chinese kang in Lanzhou City in 2016

煨炕的首要贡献物种, 贡献百分比(质量分数)为 18.43%. 从物种类别来看, 烯烃类为煨炕首要贡献物种类别, 贡献百分比为 33.72%, 此外, 芳香烃、有机酸和烷烃类的贡献也不容忽视, 百分比分别为 16.65%、21.84% 和 19.66%. 由于缺乏煨炕的实测源成分谱, 选用的化学成分谱缺少含

有羰基的化学组分，导致模型物种谱中羰基物种质量分数为 0。

表 4 基于 RACM 的煨炕 VOCs 模型物种谱
Table 4 VOCs model-ready source profiles of smoldering
Chinese kangns under the RACM mechanism

类别	VOC 物种	质量分数/%
烷烃类	ETH	10.03
	HC3	8.92
	HC5	0.50
	HC8	0.21
烯烃类	ETE	18.43
	OLT	10.74
	OLI	0.97
	DIEN	3.58
稳定的生物烯烃	API	8.13
	TOL	10.60
芳香烃	XYL	6.05
	CSL	0.00
	HCHO	0.00
羰基物种	ALD	0.00
	KET	0.00
	ONIT	0.01
有机硝酸盐	ORA1	7.00
	ORA2	14.84

2.4 清单不确定性分析

在煨炕排放清单的建立过程中，不确定性主要来源于活动水平和排放因子的选取，其中，活动水平是基于实际调查得到的，可信度较高，由于缺乏实测的煨炕排放因子和源成分谱，排放因子和源成分谱参考了阴燃特征确定，因而，排放因子的选取为清单总量的估算带来了较大的不确定性，本文假定不同 α 水平地区调查得到的各项参数均为对数正态分布，概率密度函数的期望和标准差参考样本调查结果，基于蒙特卡洛不确定性传递，随机重复抽样 50 000 次，95% 的置信度下得到活动水平的不确定范围为 -46% ~ 150%。建议进一步研究中，通过实测煨炕各污染物排放因子提高源清单的准确性。

2.5 模拟个例研究

煨炕仅在采暖季使用，每天的燃烧量基本不变，本研究将经过时间分配、空间分配和物种分配后的煨炕排放清单应用于 WRF-Chem 3.6.1 中，选取天气过程较为稳定的 2016 年 1 月 1 ~ 15 日为模拟时段，分析采暖季煨炕排放对兰州市 PM_{2.5} 浓度的贡献。

2.5.1 模拟参数及个例的选取

模拟区域中心经纬度为 (103.82°E, 36.05°N)，投影方式为 Lambert 投影，标准纬线分别为 30°N 和 60°N，模式水平方向采用二层嵌套网格。第一层区域网格数为 120 × 114，分辨率为 9 km；第二层区域网格数为 58 × 52，分辨率为 3 km，第二层网格与已经建立的兰州市 3 km × 3 km 的煨炕网格化排放清单完全一致。具体模拟区域如图 3 所示。

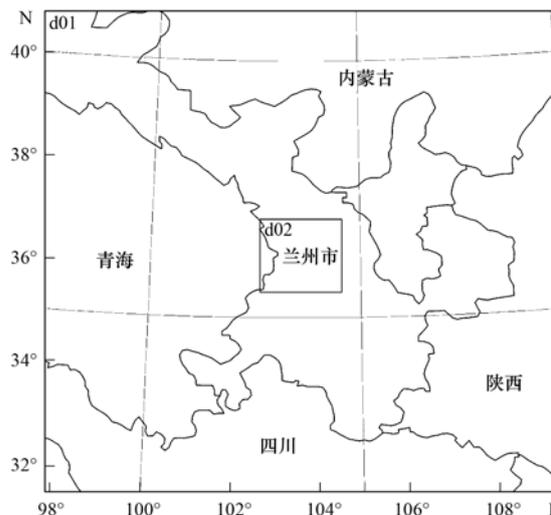


图 3 模拟区域范围

Fig. 3 Range of model domain

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，初始场及侧边界条件采用全球化学传输模式 MOZART-4/GEOS-5 的输出结果^[29]，地形数据采用 MODIS 反演数据，生物排放源采用 MEGAN 模型计算结果，人为排放清单采用 EDGAR-HTAP v2 全球排放清单^[30]，其在中国境内实际采用的是 MEIC 1.0 和北京大学 NH₃ 排放清单，其中 MEIC 1.0 包含了交通、民用、电力、工业和农业这 5 大类排放源，民用源中包含了居民以煤、秸秆、柴薪为燃料利用炉灶进行炊事和采暖的排放^[31]，未考虑到西北地区煨炕阴燃导致的排放，据此，本研究分别设计一个控制试验和敏感试验，具体方案设计如表 5 所示，模拟分析煨炕排放对采暖季兰州市 PM_{2.5} 污染贡献的影响。模拟选择的微物理参数化方案为 Lin 方案，短波辐射方案为 Dudhia 方案，长波辐射方案为 rrtm 方案，对流参数化方案为 Grell-Devenyi 集合方案，陆面过程方案为 Noah 方案，近地面层方案为 Monin-Obukhov 方案，边界层参数化方案为 YSU 方案，气相化学机制为

RACM 机制, 光解方案为 TUV 方案, 气溶胶方案为 GOCART 方案。

表 5 模拟试验方案设计

Table 5 Test plan of simulation

项目	采用的清单
控制试验: CASE1	MEGAN、EDGAR-HTAP v2
敏感试验: CASE2	MEGAN、EDGAR-HTAP v2、煨炕排放清单

2.5.2 模拟结果验证

模式结果的分析时间段选为 2016 年 1 月 2 日 08:00 至 15 日 08:00, 选择榆中站地面观测资料验

证模式气象场的模拟效果, 温度、风速和相对湿度小时平均模拟值与观测值的对比如图 4 所示, 从中可以看出, 温度、风速和相对湿度这 3 个气象要素的模拟值与观测值拟合较好, 小时变化趋势基本一致。温度和相对湿度的模拟值与观测值相关性较好, 相关系数分别为 0.88 和 0.65, 风速模拟值与观测值相关性相对较低, 相关系数为 0.26, 但是模式较好地捕捉到了 1 月 10 日和 1 月 11 日风速突然增大的过程, 相关性均通过了置信度为 0.99 的显著性检验。

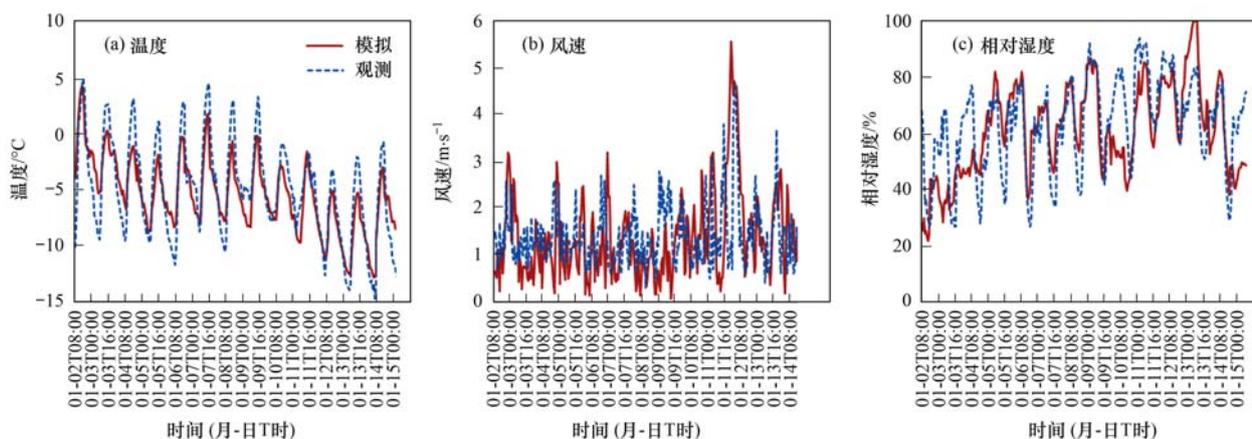


图 4 2016 年 1 月 2 ~ 15 日榆中站 2 m 温度、10 m 风速和 2 m 相对湿度小时平均模拟值与观测值对比

Fig. 4 Comparison of hourly average simulated values and observed values at 2 m temperature, 10 m wind speed, and 2 m relative humidity from January 2 to 15, 2016

本文选择位于兰州市西部主城区的兰苑宾馆和东部农村的榆中站作为环境污染物浓度验证监测点, 两个监测点处 $PM_{2.5}$ 模拟及监测小时浓度值变化情况如图 5 所示, 从中可以看出, CASE1 和 CASE2 在两个站点处均能较好地模拟出污染物小时浓度值随时间的变化趋势, 模拟值与监测值均处于同一浓度水平上。加入煨炕排放源后, 模拟的 $PM_{2.5}$ 浓度水平有了较大的提高, 其高值变化趋势更为贴近监测值, 榆中站相比于兰苑宾馆增量更大, 原因主要是兰苑宾馆位于西部主城区, 该地区的污染物主要以工业源贡献为主, 煨炕排放源的贡献相对较小; 而榆中站位于东部农村, 该地区的污染物主要以煨炕等民用排放源贡献为主。1 月 7 ~ 10 日, $PM_{2.5}$ 监测浓度值相对升高, 模式基本能反映出此次浓度的变化过程, 但是模拟浓度峰值出现时间偏早。选用标准偏差 (NMB) 和标准误差 (NME) 进一步检验加入煨炕排放源后的影响, NMB 反映各模拟值与监测值的平均偏离程度, NME 反映平均绝对误差, 计算公式见式 (4) 和式 (5), 式中, N 为监测值个数, $sim(i)$ 和 obs

(i) 表示模拟值和监测值。

$$NMB = \frac{\sum_{i=1}^N [sim(i) - obs(i)]}{\sum_{i=1}^N obs(i)} \quad (4)$$

$$NME = \frac{\sum_{i=1}^N |sim(i) - obs(i)|}{\sum_{i=1}^N obs(i)} \quad (5)$$

控制方案和敏感方案的评价见表 6, 从中可以看出, CASE1 的模拟值与监测值 NMB 和 NME 范围分别为 $-34.80\% \sim -32.64\%$ 和 $38.57\% \sim 41.23\%$, CASE2 的模拟值与监测值 NMB 和 NME 范围分别为 $6.31\% \sim 8.94\%$ 和 $33.91\% \sim 39.00\%$, CASE1 的 NMB 为负值, 说明了未加入煨炕排放源的原始清单对 $PM_{2.5}$ 的排放量估算偏低, CASE2 相比 CASE1, NMB 和 NME 均有所下降, 兰苑宾馆和榆中站 NME 分别减小了 2.23% 和 4.66%, 说明加入煨炕排放清单后, 模拟效果有一定地改进, 模拟结果能够更好地反映不同时段污染物实际浓度的变化情况。

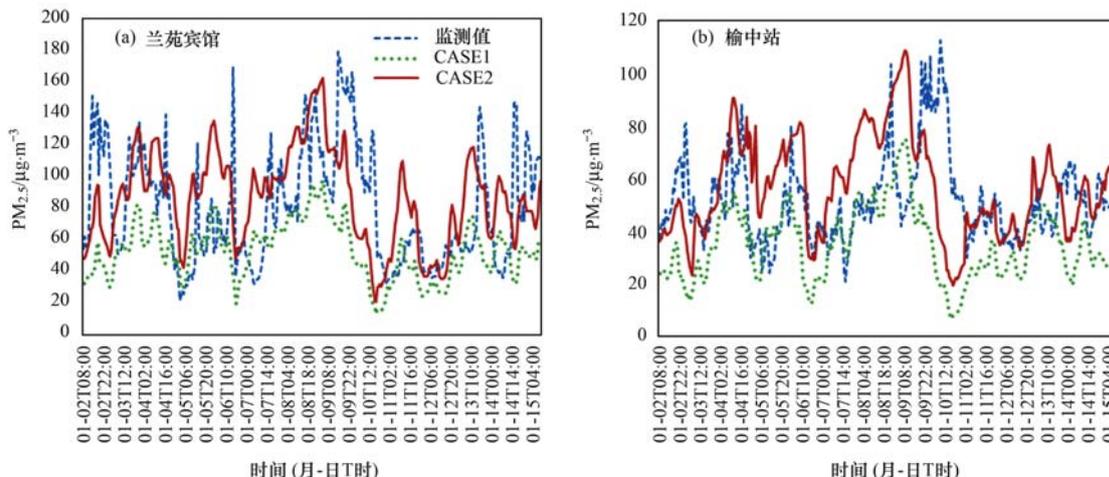


图 5 2016 年 1 月 2 ~ 15 日 PM_{2.5} 小时模拟值与监测值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and monitored values for PM_{2.5} from January 2 to 15, 2016

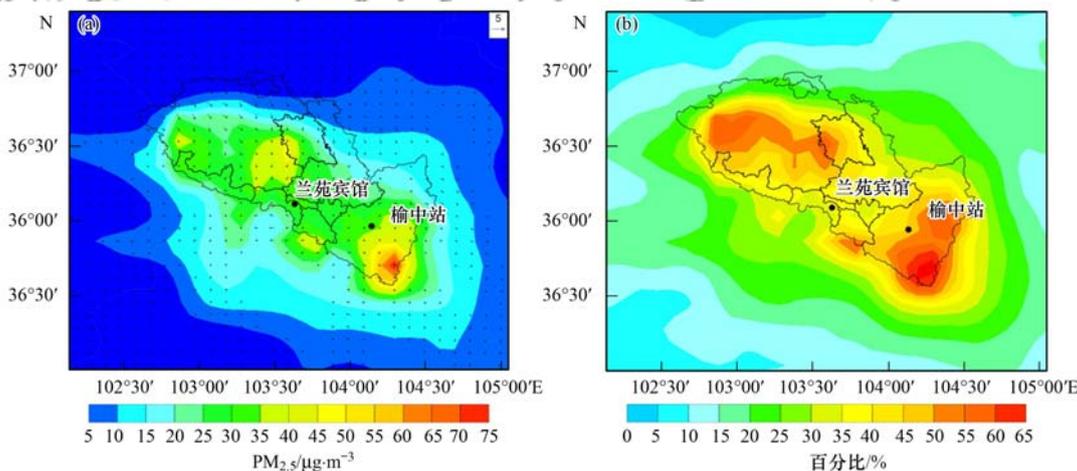
表 6 PM_{2.5} 小时浓度模拟结果评价/%

Table 6 Evaluation of simulation hour concentration of PM _{2.5} /%				
监测点	CASE1		CASE2	
	NMB	NME	NMB	NME
兰苑宾馆	-34.80	41.23	6.31	39.00
榆中校区	-32.64	38.57	8.94	33.91

2.5.3 煨炕排放对 PM_{2.5} 浓度贡献的影响

图 6(a) 为模拟期间加入煨炕排放源清单前后 PM_{2.5} 平均地面浓度差值及 10 m 处平均风场分布情况, 受模拟期间西北偏北风的影响, 煨炕排放的 PM_{2.5} 主要向东南偏南方向扩散, PM_{2.5} 的空间分布

主要受排放源地及风场的影响, 榆中东南部和永登中部是主要的高值浓度区. 图 6(b) 为模拟期间煨炕排放源对 PM_{2.5} 的相对贡献百分比, 相对浓度贡献的高值区与排放源地基本重合, 煨炕在榆中东南部的相对贡献最高可达到 60%. 1 月 2 日 08:00 至 15 日 08:00, 兰苑宾馆和榆中站受煨炕排放源的影响, PM_{2.5} 平均浓度分别升高了 32 µg·m⁻³ 和 34 µg·m⁻³, 煨炕对兰苑宾馆和榆中站的相对贡献分别达到了 37.6% 和 49.2%, 煨炕对农村的榆中站 PM_{2.5} 贡献相比主城区的兰苑宾馆更大.



(a) PM_{2.5} 平均地面浓度差值及 10 m 处平均风场分布; (b) PM_{2.5} 相对贡献百分比

图 6 2016 年 1 月 2 ~ 15 日煨炕排放对 PM_{2.5} 浓度贡献

Fig. 6 Contribution of smoldering Chinese kang to PM_{2.5} concentration from January 2 to 15, 2016

3 结论

(1) 在考虑经济水平差异的调查基础上, 建立了 2016 年兰州市煨炕大气污染物排放清单, 煨炕

排放的 SO₂、NO_x、NH₃、CO、VOCs、PM₁₀、PM_{2.5}、OC 和 EC 分别为 340.8、201.8、106.0、36 628.2、4 997.2、6 070.3、5 645.1、1 089.3 和 1 233.1 t·a⁻¹; 依据兰州市 2009 年大气污染物排放总量,

煨炕排放的 CO、PM₁₀、PM_{2.5} 和 VOCs 对人为源污染物排放总量的贡献分别为 8.9%、6.3%、13.5% 和 11.7%。

(2) 煨炕污染物的排放时间一般集中在 11 月到次年 4 月中旬, 不同经济水平地区煨炕的排放量差异较大, 污染物排放的高值区主要集中在榆中东南部、永登中部和七里河南部。

(3) 将建立的煨炕大气污染物排放清单应用于 WRF-Chem 模式后, 模拟效果比未考虑煨炕有一定的改善。模拟期间, 煨炕对兰苑宾馆和榆中站 PM_{2.5} 平均浓度分别贡献了 32 μg·m⁻³ 和 34 μg·m⁻³, 贡献率分别达到了 37.6% 和 49.2%, 煨炕对农村地区 PM_{2.5} 的贡献高于城区。

参考文献:

- [1] Andreae M O. Biomass burning: its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate [A]. In: Levin J S. Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1991. 3-21.
- [2] Jenkins B M, Jones A D, Turn S Q, *et al.* Particle concentrations, gas-particle partitioning, and species intercorrelations for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) emitted during biomass burning[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(22): 3825-3835.
- [3] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(2): 349-357.
Tian H Z, Zhao D, Wang Y. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(2): 349-357.
- [4] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(4): 389-393.
Cao G L, Zhang X Y, Wang D, *et al.* Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent [J]. China Environmental Science, 2005, **25**(4): 389-393.
- [5] 庄智. 中国炕的烟气流动与传热性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [6] 李国柱. 区域农村生活能源生态经济系统研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [7] 苏继峰, 朱彬, 康汉青, 等. 长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用[J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1418-1424.
Su J F, Zhu B, Kang H Q, *et al.* Applications of pollutants released from crop residues at open burning in Yangtze River Delta region in air quality model[J]. Environmental Science, 2012, **33**(5): 1418-1424.
- [8] 钟方潜, 苏琪骅, 周任君, 等. 秸秆焚烧对区域城市空气质量影响的模拟分析[J]. 气候与环境研究, 2017, **22**(2): 149-161.
Zhong F Q, Su Q H, Zhou R J, *et al.* Impact of crop straw burning on urban air quality based on WRF-Chem simulations [J]. Climatic and Environmental Research, 2017, **22**(2): 149-161.
- [9] 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, 2014. 162-187.
- [10] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(8): 1109-1118.
Peng L Q, Zhang Q, He K B. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(8): 1109-1118.
- [11] 林纾, 吴红. 全球气候变暖背景下兰州地面平均气温的变化[J]. 高原气象, 2005, **24**(5): 816-822.
Lin S, Wu H. Changes of surface average air temperature in Lanzhou under background of global warming [J]. Plateau Meteorology, 2005, **24**(5): 816-822.
- [12] Koppmann R, Von Czapiewski K, Reid J S. A review of biomass burning emissions, part I: gaseous emissions of carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**(5): 10455-10516.
- [13] 张鹤丰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [14] Aurell J, Gullett B K. Emission factors from aerial and ground measurements of field and laboratory forest burrs in the southeastern U.S.: PM_{2.5}, black and brown carbon, VOC, and PCDD/PCDF[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(15): 8443-8452.
- [15] Lee S, Baumann K, Schauer J J, *et al.* Gaseous and particulate emissions from prescribed burning in Georgia[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(23): 9049-9056.
- [16] Miranda A I, Ferreira J, Valente J, *et al.* Smoke measurements during Gestosa-2002 experimental field fires [J]. International Journal of Wildland Fire, 2005, **14**(1): 107-116.
- [17] Liu C T, Zhang C L, Mu Y J, *et al.* Emission of volatile organic compounds from domestic coal stove with the actual alternation of flaming and smoldering combustion processes[J]. Environmental Pollution, 2016, **221**: 385-391.
- [18] Liousse C, Penner J E, Chuang C, *et al.* A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, **101**(D14): 19411-19432.
- [19] 洪蕾. 秸秆焚烧烟尘中 OC/EC、水溶性离子及有机物的组成 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015.
- [20] 王俊芳. 生物质秸秆露天焚烧污染物排放特性及排放规模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [21] 环境保护部. 生物质燃烧源大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[R]. 北京: 环境保护部, 2014.
- [22] 沈国锋. 室内固体燃料燃烧产生的碳颗粒和多环芳烃的排放因子及影响因素[D]. 北京: 北京大学, 2012.
- [23] 杨雨灵, 谭吉华, 孙家仁, 等. 华北地区一次强灰霾污染的天气学效应[J]. 气候与环境研究, 2015, **20**(5): 555-570.
Yang Y L, Tan J H, Sun J R, *et al.* Synoptic effect of a heavy haze episode over North China[J]. Climatic and Environmental Research, 2015, **20**(5): 555-570.
- [24] 周广强, 谢英, 吴剑斌, 等. 基于 WRF-Chem 模式的华东区域 PM_{2.5} 预报及偏差原因[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2251-2259.
Zhou G Q, Xie Y, Wu J B, *et al.* WRF-Chem based PM_{2.5} forecast and bias analysis over the East China Region[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(8): 2251-2259.

- [25] 何斌, 梅士龙, 陆琛莉, 等. MEIC 排放清单在空气质量模式中的应用研究[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3658-3668.
He B, Mei S L, Lu C L, *et al.* The application of MEIC emission inventory in air quality model[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3658-3668.
- [26] Stockwell W R, Kirchner F, Kuhn M, *et al.* A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, **102**(D22): 25847-25879.
- [27] 石玉珍, 徐永福, 贾龙. 大气化学机理的发展及应用[J]. 气候与环境研究, 2012, **17**(1): 112-124.
Shi Y Z, Xu Y F, Jia L. Development and application of atmospheric chemical mechanisms [J]. Climatic and Environmental Research, 2012, **17**(1): 112-124.
- [28] 张凯, 于周锁, 高宏, 等. 兰州盆地人为源大气污染物网格化排放清单及其空间分布特征[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(4): 1227-1242.
Zhang K, Yu Z S, Gao H, *et al.* Gridded emission inventories and spatial distribution characteristics of anthropogenic atmospheric pollutants in Lanzhou valley [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(4): 1227-1242.
- [29] MOZART-4/GEOS-5 [EB/OL]. <https://www.acom.ucar.edu/wrf-chem/mozart.shtml>.
- [30] EDGAR-HTAP v2[EB/OL]. http://edgar.jrc.ec.europa.eu/htap_v2/index.php.
- [31] Lei Y, Zhang Q, He K B, *et al.* Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990-2005 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(3): 931-954.



CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshuitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)