

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生长期草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)	

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单

王艳妮^{1,2}, 杨敬婷², 黄贤峰², 程燕¹, 陆标³, 顾兆林^{1*}

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 西安 710054; 2. 贵州省环境科学研究设计院, 贵阳 550081; 3. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 为准确掌握贵州省生物质燃烧源大气污染物的排放状况, 基于收集资料和实地调查结合的方式获取活动水平, 引用文献和本地实测数据相结合的方式选取排放系数, 采用排放系数法结合 GIS 技术, 建立了贵州省 2019 年 3 km × 3 km 生物质燃烧源 9 种大气污染物排放清单。结果表明: ①全省生物质燃烧源 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 的排放量分别为: 293 505.53、14 781.19、4 146.11、8 501.07、45 025.70、39 463.58、41 879.31、6 832.33 和 15 134.74 t。户用生物质炉具 CO、SO₂、NH₃ 和 BC 的排放量贡献率最大, 秸秆露天焚烧 NO_x、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 OC 的排放量贡献率最大。②各市(州)生物质燃烧源排放的大气污染物分布不均衡, 主要集中于黔东南苗族侗族自治州。各二级源污染物排放量变化特征不同, 月排放集中在 2、3、4 和 12 月, 小时排放集中在每日 14:00~15:00 最大。③排放清单仍具有一定不确定性, 后续研究中应进一步提升活动水平数据获取的准确性, 继续开展更细分的排放系数本地化实测, 完善贵州省生物质燃烧源排放清单, 为大气污染协同治理提供科学依据。

关键词: 生物质燃烧源; 大气污染物; 排放清单; 贵州省; 不确定性分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3130-12 DOI: 10.13227/j.hjks.202207040

Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province

WANG Yan-ni^{1,2}, YANG Jing-ting², HUANG Xian-feng², CHENG Yan¹, LU Biao³, GU Zhao-lin^{1*}

(1. School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China; 2. Guizhou Institute of Environmental Sciences Research and Design, Guiyang 550081, China; 3. College of Resources and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: With the objective to ascertain the emissions of biomass combustion in Guizhou, the activity levels were measured through data collection and field surveys, and the emission factors were acquired using actual monitoring data and data cited from previous literature. A 3 km × 3 km-gridded emission inventory of nine air pollutants from biomass combustion sources in Guizhou Province in 2019 was developed in combination with GIS technology. The results showed that the total emissions of CO, NO_x, SO₂, NH₃, VOCs, PM_{2.5}, PM₁₀, BC, and OC in Guizhou were estimated to be 293 505.53, 14 781.19, 4 146.11, 8 501.07, 45 025.70, 39 463.58, 41 879.31, 6 832.33, and 15 134.74 t, respectively. The distribution of atmospheric pollutants emitted by biomass combustion sources in different cities was noticeably uneven, being mainly concentrated in Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture. The analysis of variation characteristics of emissions indicated that the monthly emissions were concentrated in February, March, April, and December, and the hourly emissions peaked daily from 14:00 to 15:00. Some uncertainty remained in the emission inventory. It is necessary to perform in-depth analyses of the accuracy of obtaining activity-level data, localize the emission factors through more combustion experiments in subsequent research for improving the emission inventory of air pollutants from biomass combustion in Guizhou Province, and provide a basis for the cooperative governance of the atmospheric environment.

Key words: biomass combustion; air pollutants; emission inventory; Guizhou Province; uncertainly analysis

在发展中国家, 燃烧生物质是能源利用的一个重要途径^[1], 但同时会产生大量污染物, 是主要大气污染来源之一^[2~5], 这些污染物对气候变化、区域空气质量和人类健康的影响日益受到关注^[6~13], 中国也不例外, 如杨光义^[14]对东北地区生物质露天燃烧源排放进行大气环境影响评估, 2015 年秋季和春季 PM_{2.5} 浓度的贡献率分别为 52.0% 和 24.6%, 是东北地区两次重污染事件的一个重要原因; 徐敬等^[15]模拟结果显示秸秆燃烧导致华北地区 PM_{2.5} 浓度月平均值上升幅度普遍超过 3 μg·m⁻³; 河南、山东和天津等地的秸秆燃烧在合适风场的作用下会严重影响北京, 可导致丰台及通州等地 PM_{2.5} 小时浓度上升超过 17 μg·m⁻³。

与煤炭、石油和天然气等化石能源燃烧以集中

燃烧排放为主不同, 生物质燃烧源具有分散性、隐蔽性和开放性等特点, 调查难度远高于化石能源, 制定全面和详细的反映区域生物质燃烧现状的排放清单对于大气污染防治具有重要的价值。近些年针对中国省域或城市大气污染源排放清单研究表明, 生物质燃烧源排放大气污染物占人为源的比例不容忽视, 鄂州市^[16]、嘉兴市^[17]、天水市^[18]、鹤壁市^[19]、济南市^[20]、兰州市^[21]、资阳市^[22]、山东省^[23] 和四

收稿日期: 2022-07-04; 修订日期: 2022-08-19

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(黔科中引地[2022]4056); 贵州省基础研究计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 239)

作者简介: 王艳妮(1982~), 女, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染源排放清单, E-mail: 215521519@qq.com

* 通信作者, E-mail: guzhaolin@mail.xjtu.edu.cn

川省^[24]的 CO、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 排放量约占 5.07%~78.88%。对于我国生物质燃烧源的排放特征, Shi 等^[25]估算了东北地区 2001~2017 年生物质开放燃烧 CO₂ 排放量, 秸秆露天焚烧贡献最大(68%), 其次是森林火灾和草原火灾; Zhao 等^[26]基于卫星观测核算了东北地区生物质燃烧排放的温室气体和气溶胶, 秸秆露天焚烧是其主要来源, 每年的农作物收获后和种植前排放达到峰值; Wu 等^[27,28]编制了大陆地区生物质燃烧排放左旋葡聚糖(LG)排放清单, 2014 年排放量贡献率为 39.20%, 并实测了玉米芯本地化排放情况; Cui 等^[29]的研究可知大陆地区秸秆露天焚烧亚硝酸(HONO)排放主要集中在华北和东北地区, 在 3、4、6 和 10 月达到峰值。目前没有针对贵州省的生物质燃烧排放核算, 田贺忠等^[3]研究了中国生物质燃烧大气污染物排放清单, 其中贵州省的活动水平数据来源于统计年鉴、排放因子来源于已有研究成果的平均值, 而“已有研究结果”不包含贵州本地化研究结果。其他学者核算中国生物质燃烧排放时包含贵州省也未开展大样本、实地详细调查^[2,4,5,30~34], 无本地化实测数据, 对于贵州省生物质排放源的核算较为粗略, 未见在不确定性方面的敏感度分析, 从时间上基准年最新仅为 2017 年。

优良生态环境是贵州在新时代西部大开发上闯新路最大的发展优势和竞争优势, 截至 2022 年 3 月, 全省 9 个中心城市环境空气质量平均优良天数比率为 96.8%^[35]。然而, 贵州是一个喀斯特地貌典型发育的山区省份, 非煤炭产区的广大农村地区尤其是喀斯特地区的能源消费以传统生物质能为主^[36~42], 秸秆供能占农村生活用能的 30.00%~35.00%^[40], 另外还有相当一部分就地焚烧, 生物质燃烧源排放的大气污染物不容小觑。贵州省 2015 年大气污染源排放清单^[43]表明生物质燃烧源排放污染物在人为源中占比较大, CO、VOCs、PM_{2.5}、BC 和 OC 高达 26.56%、30.10%、23.16%、36.47% 和 47.45%。目前尚未见针对贵州省的生物质燃烧源排放研究的报道, 因此, 本研究统计调查了贵州省 2019 年各市(州)生物质燃烧的活动水平数据, 计算建立了 9 种大气污染物 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 的排放清单, 利用 ArcGIS 和蒙特卡洛方法进行空间分配和不确定性分析。

1 材料与方法

本文以 2019 年为基准年, 以贵州省 9 个市州(贵阳市、安顺市、黔东南苗族侗族自治州、黔南布

依族苗族自治州、铜仁市、黔西南布依族苗族自治州、毕节市、六盘水市和遵义市)为研究区域。根据文献[44,45]中推荐的生物质燃烧源计算方法, 估算得到了生物质锅炉、户用生物质炉具(秸秆、薪柴)和生物质开放燃烧(森林火灾、草原火灾、秸秆露天焚烧)的 9 项大气污染物 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 排放量。

采用公式(1)计算生物质燃烧产生某一种大气污染物的排放量(E_i)。

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

式中, A 为排放源活动水平, t; EF 为排放系数, $g \cdot kg^{-1}$; i 为某一种大气污染物; j 为贵州省各市(州); k 为生物质燃烧类型(生物质锅炉、户用生物质炉具、森林火灾、草原火灾和秸秆露天焚烧); m 为燃料、植被带、草地或秸秆类型。

对于生物质锅炉, 在安装除尘器等污染控制设施情况下, 排放系数 EF 由公式(2)计算得到:

$$EF = EF_0 \times (1 - \eta) \quad (2)$$

式中, EF_0 为污染物产生系数, $g \cdot kg^{-1}$; η 为污染控制设施的去除效率, %。

生物质锅炉活动水平包括生物质锅炉的地理位置、所用生物质燃料类型、生物质燃料年消费量和污染控制设施的去除效率。户用生物质炉具活动水平主要包括常住人口户数、生物质燃烧用户比例、秸秆及薪柴用户比例、不同类型秸秆比例和生物质燃料户均消费量等。生物质开放燃烧活动水平包括森林火灾受灾面积、草原火灾受灾面积、植被带森林类型、草地类型和农作物产量等。本次源清单编制过程中, 活动水平来源于社区或村庄填报、研究人员抽样入户调查、MODIS 火点数据、统计年鉴、环境统计和其他统计数据等, 其具体调查内容和获取途径见表 1。由于六盘水市、毕节市、黔西南布依族苗族自治州和遵义市的煤炭资源储量约占贵州省已发现总资源储量的 95.51%^[46], 这些市(州)为全省主要产煤区, 居民生活能源以煤炭为主, 因此选择非主要产煤市(州)贵阳市、安顺市、黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州和铜仁市作为社区或村庄填报范围来调查生物质使用情况, 填报之前开展培训, 并建立工作群通过网络答疑。选择生物质燃烧用户数占比前两位的黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州和省会贵阳市作为研究人员抽样入户调查范围, 采用分层随机抽样, 即样本散布在市(州), 以区(市、县)作为调查样本单元, 以户为单位进行调查。活动水平数据质量控制包括正确性、一致性和完整性检

验,经过多级数据审核、利用 SPSS 软件分析抽样效果、与宏观数据对比等多种方式,确保数据真实有效。

本次清单编制中,除户用生物质炉具薪柴、辣

椒、大豆和玉米秸秆的 BC 和 OC 排放系数来自笔者实验室的本地化实测结果(未发表的数据),各二级源类各污染物排放系数的选取主要来自已有研究,见表 2。

表 1 生物质燃烧源活动水平调查内容和数据获取途径

Table 1 Survey of activity level for biomass combustion and data acquiring method

污染源类	具体调查内容	调查范围	数据获取途径
生物质锅炉	生物质锅炉基本信息、生物质锅炉的地理位置、所用生物质燃料类型、生物质燃料年消费量和污染控制设施的去除效率	全省各市(州)	环境统计 ^[47]
户用生物质炉具 (秸秆和薪柴)	社区或村庄基本信息、住户基本信息、是否生物质燃烧用户和户均燃烧量等	贵阳市、安顺市、黔东南苗族侗族自治州、黔南布依族苗族自治州和铜仁市	社区或村庄填报
	住户基本信息、家庭人数、建筑面积、采暖面积、生物质炉具类型、燃料获取渠道、采暖时段、房屋层数、燃料类别、燃烧用途和逐月燃烧量等	贵阳市、黔东南苗族侗族自治州和黔南布依族苗族自治州	研究人员抽样入户调查
	常住人口数、户均常住人口数、农作物类别和产量	全省各市(州)	统计年鉴 ^[48-57]
森林和草原火灾	森林火灾受灾或过火面积、草原火灾受灾或过火面积、植被带森林类型、草地类型、火灾发生的地理位置和时间等	全省各市(州)	其他统计数据 ^[58-62] 和 MODIS 火点数据 ^[63]
秸秆露天焚烧	农作物类别和产量、秸秆露天焚烧的地理位置和时间等	全省各市(州)	统计年鉴 ^[48-57] 和 MODIS 火点数据 ^[63]

表 2 生物质燃烧源排放系数/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Emission factors for biomass combustion/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

第一级分类	第二级分类	第三级分类	CO	NO _x	SO ₂	NH ₃	VOCs	PM _{2.5}	PM ₁₀	BC	OC
生物质锅炉	生物质成型燃料 ^[44]	—	6.22	2.79	0.70	0.24	1.13	0.95	1.12	0.13	0.54
户用生物质炉具	秸秆	辣椒秸秆	85.20 ^[45]	0.72 ^[45]	1.36 ^[45]	0.52 ^[45]	7.97 ^[45]	7.15 ^[45]	7.69 ^[45]	1.80	5.10
		水稻秸秆	67.70 ^[45]	0.43 ^[45]	0.48 ^[45]	0.52 ^[45]	8.40 ^[45]	6.40 ^[45]	6.88 ^[45]	1.85 ^[44]	3.65 ^[44]
		大豆秸秆	85.20 ^[45]	0.72 ^[45]	1.36 ^[45]	0.52 ^[45]	7.97 ^[45]	7.15 ^[45]	7.69 ^[45]	0.17	2.00
		玉米秸秆	56.60 ^[45]	0.83 ^[45]	1.33 ^[45]	0.68 ^[45]	7.34 ^[45]	6.87 ^[45]	7.39 ^[45]	0.68	3.40
		小麦秸秆	171.70 ^[45]	0.51 ^[45]	2.36 ^[45]	0.37 ^[45]	9.37 ^[45]	8.24 ^[45]	8.86 ^[45]	1.10 ^[44]	4.70 ^[44]
		高粱秸秆	44.90 ^[45]	1.12 ^[45]	1.25 ^[45]	0.52 ^[45]	1.61 ^[45]	7.10 ^[45]	7.63 ^[45]	0.95 ^[44]	4.05 ^[44]
		油菜秸秆	133.50 ^[45]	1.65 ^[45]	1.36 ^[45]	0.52 ^[45]	7.97 ^[45]	12.77 ^[45]	13.73 ^[45]	1.70 ^[44]	7.29 ^[44]
	薪柴	薪柴	29.00 ^[45]	0.97 ^[45]	0.40 ^[45]	1.30 ^[45]	3.13 ^[45]	3.24 ^[45]	3.48 ^[45]	0.77	0.57
	森林火灾	中亚热带森林 ^[44]	104.00	1.60	0.57	2.90	8.10	9.10	9.29	1.49	7.27
		北亚热带森林 ^[44]	104.00	1.60	0.57	2.90	8.10	9.10	9.29	1.49	7.27
		暖温带森林 ^[44]	107.00	3.00	1.00	2.90	5.70	13.00	13.27	2.13	10.39
生物质开放 燃烧	草原火灾	山地草甸 ^[44]	65.00	3.90	0.35	0.70	3.40	5.40	5.51	0.72	3.14
		暖性草丛 ^[44]	65.00	3.90	0.35	0.70	3.40	5.40	5.51	0.72	3.14
		热性草丛 ^[44]	65.00	3.90	0.35	0.70	3.40	5.40	5.51	0.72	3.14
	秸秆露天焚烧	辣椒秸秆	49.9 ^[45]	2.92 ^[45]	0.53 ^[45]	0.53 ^[45]	8.45 ^[45]	6.79 ^[45]	6.93 ^[45]	0.75 ^[44]	3.23 ^[44]
		水稻秸秆 ^[44]	28.00	1.42	0.53	0.53	8.45	5.67	5.78	0.75	3.23
		大豆秸秆	32.3 ^[64]	1.08 ^[64]	0.25 ^[65]	0.53 ^[65]	8.64 ^[65]	3.32 ^[65]	6.93 ^[45]	0.44 ^[66]	1.08 ^[65]
		玉米秸秆 ^[44]	53.00	4.30	0.44	0.68	10.40	11.71	11.95	1.55	6.68
		小麦秸秆 ^[44]	60.00	3.31	0.85	0.37	7.48	7.58	7.73	1.01	4.32
		高粱秸秆	49.9 ^[45]	2.92 ^[45]	0.53 ^[45]	0.53 ^[45]	8.45 ^[45]	6.79 ^[45]	6.93 ^[45]	0.75 ^[44]	3.23 ^[44]
		油菜秸秆	34.3 ^[64]	1.12 ^[64]	0.002 ^[65]	0.53 ^[65]	8.64 ^[65]	4.41 ^[67]	6.93 ^[45]	0.57 ^[65]	1.83 ^[65]

2 结果与讨论

2.1 2019 年贵州省生物质燃烧大气污染物排放清单分析

根据排放系数法核算,建立 2019 年贵州省生物质燃烧大气污染物排放清单(表 3)。2019 年贵州省生物质燃烧源 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、

PM₁₀、BC 和 OC 污染物的总排放量分别为 293 505.53、14 781.19、4 146.11、8 501.07、45 025.70、39 463.58、41 879.31、6 832.33 和 15 134.74 t。目前没有针对贵州省生物质燃烧源大气污染物的排放核算,有学者核算中国生物质燃烧排放时包含贵州省^[2-5,30-34],本研究与其他研究结果在污染物排放量上有一定差异(表 4),这与采用

的研究方法、活动水平的数据来源和排放系数的选取途径等有关,但总体上具有一定可比性. 笔者核算贵州省 2015 年排放清单时包含生物质燃烧源^[43], 本研究结果与该生物质燃烧源 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 排放量(分别为 508 567.98、17 232.09、6 993.25、5 772.5、64 619.6、65 538.92、67 988.72、10 088.40 和 26 143.51 t) 的比值分别是 0.58、0.86、0.59、1.47、0.70、0.60、0.62、0.68 和 0.58,主要原因是 2019 年排放清单开展了生物质用户比例和户均生物质燃烧量等实地调查,降低了参与计算的总生物质燃烧量,户用生物质炉具秸秆和薪柴的使用情况更为精准,以及森林和草原火灾受灾面积比 2015 年大幅度减少.

表 3 2019 年贵州省生物质燃烧源排放清单/t
Table 3 Emission inventory of Guizhou Province in 2019/t

第一级分类	第二级分类	CO	NO _x	SO ₂	NH ₃	VOCs	PM _{2.5}	PM ₁₀	BC	OC
生物质锅炉	生物质成型燃料	4 150.15	1 861.56	467.06	160.13	753.97	24.74	29.17	3.39	14.06
户用生物质炉具	秸秆	10 423.05	91.95	143.21	70.62	1 037.13	946.34	1 017.64	203.13	574.96
	薪柴	145 933.62	4 881.23	2 012.88	6 541.85	15 750.77	16 304.31	17 512.03	3874.79	2 868.35
生物质开放燃烧	森林和草原火灾	135.57	2.12	0.75	3.78	10.49	11.95	12.20	1.96	9.55
	秸秆露天焚烧	132 863.13	7 944.33	1 522.20	1 724.68	27 473.34	22 176.24	23 308.27	2 749.06	11 667.81
合计		293 505.53	14 781.19	4 146.11	8 501.07	45 025.70	39 463.58	41 879.31	6 832.33	15 134.74

表 4 贵州省生物质燃烧排放结果对比/t
Table 4 Comparison of results of biomass combustion emission in Guizhou Province/t

基准年	CO	NO _x	SO ₂	NH ₃	VOCs	PM _{2.5}	PM ₁₀	BC	OC	文献
1998	—	7 096.00	4 880.00	—	—	—	—	—	—	[2]
2000	763 511.00	21 901.00	1 642.00	15 858.00	234 396.00(VOC)	—	—	4 972.00(EC)	15 527.00	[30]
2007	2 056 307.00	38 941.00	6 876.00	—	79 744.00(NMHC)	109 838.00(PM)	—	16 878.00	—	[3]
2007	2 048 100.00	28 000.00	11 100.00	27 800.00	104 600.00(NMVOC)	15 300.00	192 600.00	8 300.00(EC)	16 600.00	[4]
2012	67 900.00	19 500.00	6 400.00	10 400.00	62 900.00(NMVOC)	70 100.00	74 700.00	10 800.00(EC)	19 800.00	[5]
2014	192 100.00	5 700.00	1 700.00	1 400.00	20 700.00(NMVOC)	19 000.00	22 600.00	1 500.00	7 300.00	[31]
2015	5 665.00	290.00	108.00	208.00	1 728.00	1 159.00	1 182.00	—	—	[34]
2003~2017	126 100.00	5 500.00	800.00	1 800.00	21 800.00(NMHC)	14 500.00	16 600.00	1 000.00	8 200.00	[32]
2017	193 000.00	6 000.00	2 000.00	1 000.00	21 000.00(NMVOC)	18 000.00	23 000.00	2 000.00	7 000.00	[33]
2019	293 505.53	14 781.19	4 146.11	8 501.07	45 025.70	39 463.58	41 879.31	6 832.33	15 134.74	本研究

1) “—”表示文章中没有相关数据

2019 年贵州省生物质燃烧源各二级源类的排放量贡献率见图 1,户用生物质炉具 CO、SO₂、NH₃ 和 BC 的排放量贡献率最高,分别为 53.27%、52.00%、77.78% 和 59.69%; 秸秆露天焚烧 NO_x、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 OC 的排放量贡献率最大,分别为 53.75%、61.02%、56.22%、55.66% 和 77.16%. 这与其他城市的研究结果一致,如卢轩等^[68]的研究发现,郑州市秸秆家用和秸秆露天焚烧分别占生物质燃烧源 VOCs 的 43.79% 和 41.24%; 张立斌等^[69]的研究发现监利县生物质开放燃烧 VOCs、NH₃、PM₁₀、PM_{2.5} 和 OC 的排放量贡献率最高,生物质炉灶 CO 和 BC 的排放量贡献率最高; 高玉宗等^[70]的研究建立了 2018 年西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单,结果表明秸秆露天焚烧 CO、NO_x、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 的排放量贡献率最高,户用生物质 NH₃ 和 SO₂ 的排放量贡献率最大; 刘春蕾等^[71]在 2015 年南京市生物质燃烧源大气污染物排放清单中指出户用生物质炉具

PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、CO、VOCs 和 NH₃ 的排放量贡献率最高.

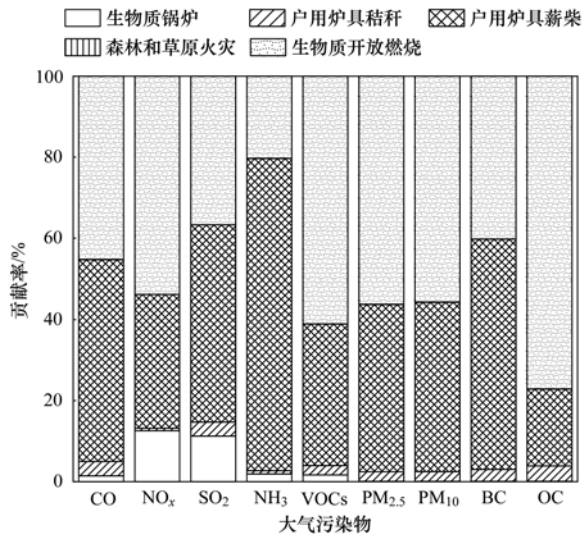


图 1 生物质燃烧源大气污染物各二级源排放量贡献率
Fig. 1 Contribution rate of emissions from secondary sources of air pollutants from biomass combustion sources

2.2 空间分布特征

表 5 和图 2 分别为 2019 年贵州省生物质燃烧源 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 这 9 项污染物不同市(州)的排放量和贡献率. 对于生物质锅炉, 根据排污设施经纬度将大气污染物排放量直接定位到相应网格; 对于户用生物质炉具, 由农村人口矢量数据计算出各市(州)农村人口数, 进而计算出各市(州)单位农村人口数对应的大气污染物排放量, 最后与网格化后 3 km × 3 km 分辨率的行政区划数据连接计算, 得到相应网格的户用生物质炉具排放; 同理, 由森林、草原受灾矢量数据和旱地矢量数据计算, 分别得到相应网格的森林、草原火灾排放和秸秆露天焚烧排放; 将各网格中各二级源大气污染物排放量叠加, 利用地理信息系统 ArcGIS 工具^[72], 得到贵州省生物质燃烧源大气污染物排放空间分布如图 3 所示.

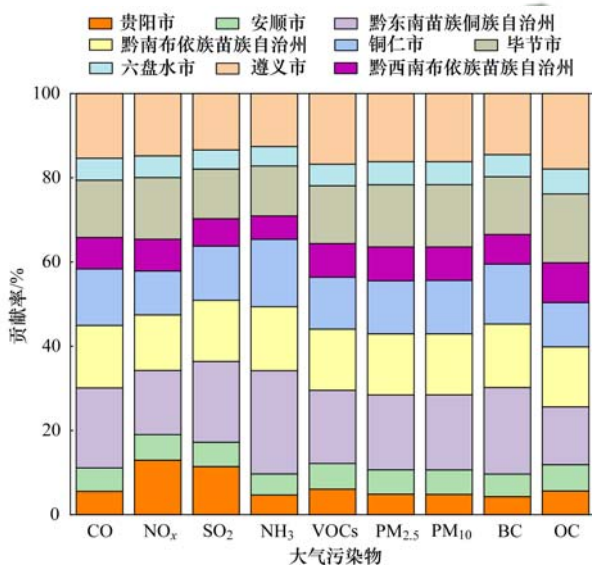


图2 生物质燃烧源大气污染物不同市(州)排放量贡献率

Fig. 2 Emission contributions of air pollutants from biomass combustion sources in different cities

表 5、图 2 和图 3 表明, 2019 年贵州省生物质燃烧源排放区域主要集中在黔东南苗族侗族自治州, CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 BC 的排放量贡献率最大. 这是因为, 黔东南苗族侗族自治州的户用生物质炉具的薪柴消费量 (143.97×10^4 t), 远大于其他市(州)的薪柴消费量 (13.48×10^4 t ~ 91.71×10^4 t). 而对于 OC 的排放量贡献率是遵义市最大, 原因是其户用生物质炉具的高粱秸秆消费量、秸秆露天焚烧的高粱、油菜和辣椒秸秆消费量比其他市(州)大, 分别为 0.12×10^4 、 24.35×10^4 、 27.06×10^4 和 152.47×10^4 t. 各污染物排放的空间贡献率市(州)排序略有区别, 具体如下. ①CO: 黔东南苗族侗族自治州 (19.02%) > 遵义市

(15.39%) > 黔南布依族苗族自治州 (14.84%) > 毕节市 (13.60%) > 铜仁市 (13.40%) > 黔西南布依族苗族自治州 (7.47%) > 贵阳市 (5.54%) > 安顺市 (5.54%) > 六盘水市 (5.21%); ②NO_x: 黔东南苗族侗族自治州 (15.22%) > 遵义市 (14.83%) > 毕节市 (14.61%) > 黔南布依族苗族自治州 (13.18%) > 贵阳市 (12.94%) > 铜仁市 (10.45%) > 黔西南布依族苗族自治州 (7.55%) > 安顺市 (6.08%) > 六盘水市 (5.14%); ③SO₂: 黔东南苗族侗族自治州 (19.19%) > 黔南布依族苗族自治州 (14.53%) > 遵义市 (13.40%) > 铜仁市 (12.88%) > 毕节市 (11.80%) > 贵阳市 (11.42%) > 黔西南布依族苗族自治州 (6.48%) > 安顺市 (5.77%) > 六盘水市 (4.53%); ④NH₃: 黔东南苗族侗族自治州 (24.54%) > 铜仁市 (16.02%) > 黔南布依族苗族自治州 (15.17%) > 遵义市 (12.59%) > 毕节市 (11.85%) > 黔西南布依族苗族自治州 (5.53%) > 安顺市 (5.01%) > 贵阳市 (4.66%) > 六盘水市 (4.64%); ⑤VOCs: 黔东南苗族侗族自治州 (17.37%) > 遵义市 (16.78%) > 黔南布依族苗族自治州 (14.55%) > 毕节市 (13.76%) > 铜仁市 (12.31%) > 黔西南布依族苗族自治州 (7.97%) > 安顺市 (6.11%) > 贵阳市 (6.04%) > 六盘水市 (5.10%); ⑥PM_{2.5}: 黔东南苗族侗族自治州 (17.79%) > 遵义市 (16.18%) > 毕节市 (14.75%) > 黔南布依族苗族自治州 (14.52%) > 铜仁市 (12.60%) > 黔西南布依族苗族自治州 (8.05%) > 安顺市 (5.75%) > 六盘水市 (5.49%) > 贵阳市 (4.87%); ⑦PM₁₀: 黔东南苗族侗族自治州 (17.84%) > 遵义市 (16.17%) > 毕节市 (14.81%) > 黔南布依族苗族自治州 (14.50%) > 铜仁市 (12.68%) > 黔西南布依族苗族自治州 (7.95%) > 安顺市 (5.78%) > 六盘水市 (5.45%) > 贵阳市 (4.82%); ⑧BC: 黔东南苗族侗族自治州 (20.55%) > 黔南布依族苗族自治州 (15.06%) > 遵义市 (14.51%) > 铜仁市 (14.24%) > 毕节市 (13.72%) > 黔西南布依族苗族自治州 (7.05%) > 安顺市 (5.40%) > 六盘水市 (5.22%) > 贵阳市 (4.26%); ⑨OC: 遵义市 (17.91%) > 毕节市 (16.35%) > 黔南布依族苗族自治州 (14.24%) > 黔东南苗族侗族自治州 (13.71%) > 铜仁市 (10.51%) > 黔西南布依族苗族自治州 (9.46%) > 安顺市 (6.27%) > 六盘水市 (5.92%) > 贵阳市 (5.62%).

2.3 时间分布特征

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放时间分配

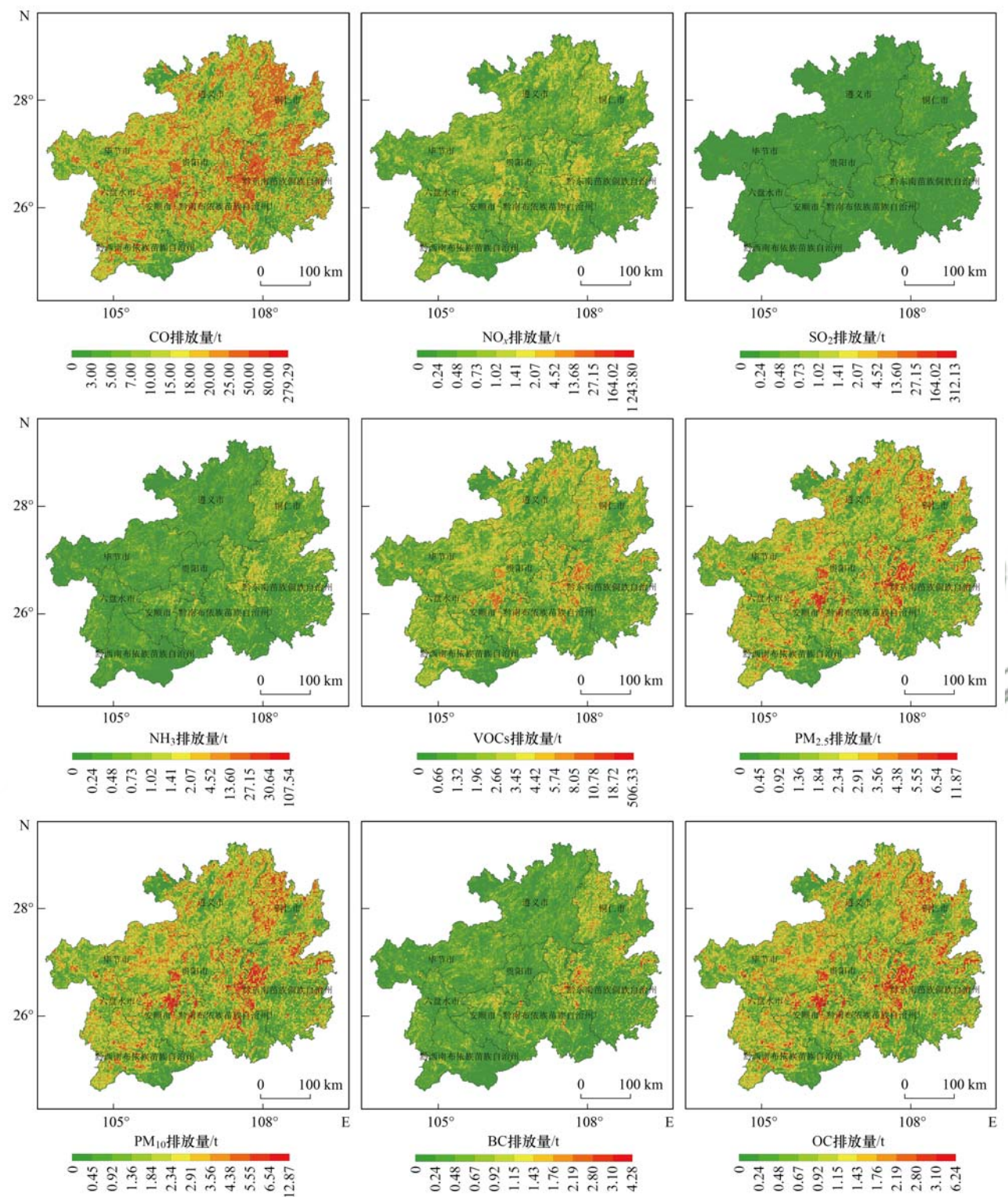


图3 2019年贵州省生物质燃烧源大气污染物空间分布

Fig. 3 Space distribution characteristics of biomass combustion in Guizhou Province in 2019

方法见表6,其分配结果具体为:①从生物质燃烧源排放月分配系数可见(图4),生物质锅炉月排放量较平均,可以看出企业基本处于常年稳定生产状态;户用生物质炉具(秸秆和薪柴)大气污染物排放具有明显的季节性变化特征,采暖季12月至次年2月的各污染物排放量高于非采暖季4~10月的排放,主要是因为采暖季供暖加大了对户用生物质燃烧的

需求量,从而增加了污染物的排放量,3月和11月属于采暖季和非采暖季的交替季;森林和草原火灾多发生在3月,其次是2、4、8和12月,其他月份的分配系数之和仅为0.2;秸秆露天焚烧月排放量变化明显,多集中在2~4月,其分配系数合计为0.6,其次是8月和12月,其他月份的分配系数之和仅为0.2,这与农作生产有关,具有较强的季节性^[67]. ②从生物质

燃烧源小时分配系数可见(图5),生物质锅炉在每日06:00~07:00和17:00~20:00的排放量逐渐达到最大;户用生物质炉具(秸秆和薪柴)在07:00~09:00和18:00~20:00排放量较大,与当地居民炊事习惯

一致;森林和草原火灾主要集中在14:00~15:00,对应的分配系数合计为0.5;秸秆露天焚烧多集中在11:00~12:00和14:00~15:00,其分配系数合计为0.7,这与农民劳作时段有关。

表5 生物质燃烧源大气污染物不同市(州)排放量/t

Table 5 Emission inventory of biomass combustion in different cities or prefectures/t

市(州)名称	CO	NO _x	SO ₂	NH ₃	VOCs	PM _{2.5}	PM ₁₀	BC	OC
贵阳市	16 271.10	1 912.25	473.45	395.78	2 719.15	1 921.77	2 018.03	290.97	851.14
安顺市	16 262.93	898.72	239.43	425.75	2 750.28	2 270.21	2 422.32	368.76	948.57
黔东南苗族侗族自治州	55 810.80	2 249.83	795.70	2 085.94	7 820.12	7 021.07	7 470.27	1 404.38	2 074.75
黔南布依族苗族自治州	43 555.35	1 948.37	602.33	1 289.79	6 552.61	5 730.04	6 073.01	1 028.75	2 155.76
铜仁市	39 325.08	1 545.27	533.98	1 361.77	5 542.66	4 972.62	5 309.11	972.61	1 591.05
黔西南布依族苗族自治州	21 916.49	1 115.29	268.87	469.79	3 590.69	3 175.72	3 329.70	481.71	1 432.15
毕节市	39 904.44	2 159.82	489.23	1 007.04	6 195.35	5 822.77	6 200.72	937.25	2 474.00
六盘水市	15 280.88	760.32	187.75	394.58	2 297.66	2 165.54	2 283.10	356.36	896.34
遵义市	45 178.46	2 191.32	555.38	1 070.62	7 557.18	6 383.84	6 773.05	991.54	2 710.97
合计	293 505.53	14 781.19	4 146.11	8 501.07	45 025.70	39 463.58	41 879.31	6 832.33	15 134.74

表6 生物质燃烧源大气污染物排放时间分配方法

Table 6 Time distribution method of atmospheric pollutant emissions from biomass combustion sources

第一级分类	第二级分类	月分配系数	小时分配系数
生物质锅炉	生物质成型燃料	将大气污染物月排放量占年排放量的比值确定月分配系数	小时分配系数取自文献[44]
户用生物质炉具	秸秆和薪柴	在调查获得的生物质月消费量基础上,计算出大气污染物月排放量,进而根据月排放量占全年排放量的比例得到月分配系数	由调查获得的炊事时间和文献[70]来确定小时分配系数
生物质开放燃烧	森林和草原火灾	由火灾受灾面积和火灾发生时间,计算出污染物月排放量,从而得到月分配系数	由火灾发生在每天发生的时刻,统计出小时分配系数
	秸秆露天焚烧	由焚烧发生的时间,统计出月分配系数	由焚烧发生的时间,统计出小时分配系数

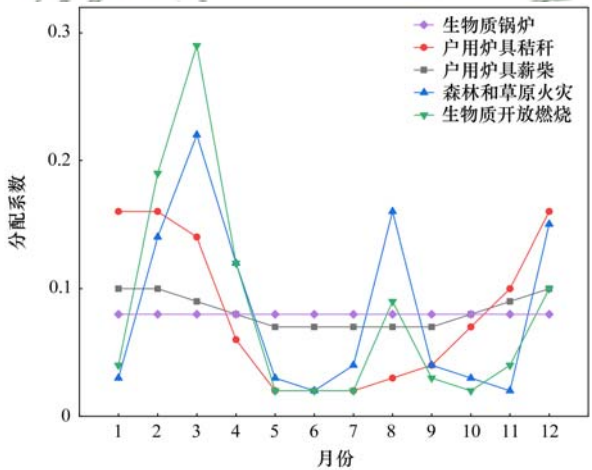


图4 生物质燃烧源排放月分配系数

Fig. 4 Monthly emission coefficient of biomass combustion

2.4 不确定性分析

在排放清单的定量估算中,不确定性来源于活动水平和排放系数的选取.不确定性分析可用于重要污染源信息的甄别,评估排放清单的可靠性^[69].本研究采用蒙特卡洛方法评估排放总量的置信区间,量化分析2019年贵州省生物质燃烧源排放清单的不确定性.使用Excel软件中的Oracle Crystal Ball

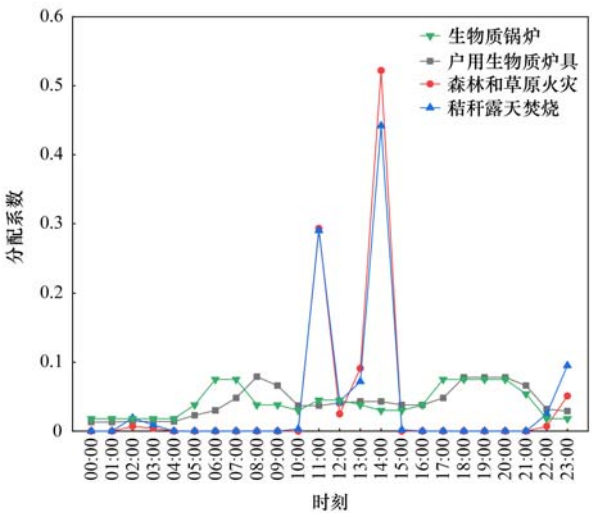


图5 生物质燃烧源排放小时分配系数

Fig. 5 Hourly emission coefficient of biomass combustion

插件进行蒙特卡洛随机模拟抽样,在输入量定义假设中,定义户用生物质炉具(秸秆和薪柴)的活动水平为正态分布,其他燃烧源的活动水平为均匀分布;主要来源是本地实测的户用生物质炉具薪柴、辣椒、大豆和玉米秸秆的BC和OC排放系数为正态分布,来源是指南或文献的其他燃烧源各污染物排

放系数为均匀分布. 污染物排放量设为输出量, 建立拟计算, 获得输出量概率分布在 95% 置信区间的不同输出量和输入量之间的变量关系, 通过 10 000 次模拟确定性范围(表 7).

表 7 排放清单的不确定性

Table 7 Uncertainty of emission inventory					
二级源	污染物	排放量的 95% 置信区间/t	不确定性/%	活动水平的敏感度/%	排放系数的敏感度/%
生物质锅炉	CO	[1 985. 73, 6 905. 99]	-52. 15 ~ 66. 40	18. 00	82. 0
	NO _x	[894. 06, 3 109. 02]	-51. 97 ~ 67. 01	17. 80	82. 2
	SO ₂	[224. 14, 782. 15]	-52. 01 ~ 67. 46	16. 20	83. 8
	NH ₃	[75. 67, 266. 86]	-52. 75 ~ 66. 65	17. 50	82. 5
	VOCs	[356. 24, 1 260. 71]	-52. 75 ~ 67. 21	18. 50	81. 5
	PM _{2.5}	[10. 08, 46. 24]	-59. 25 ~ 86. 92	41. 50	58. 5
	PM ₁₀	[11. 73, 54. 6]	-59. 78 ~ 87. 21	41. 60	58. 4
	BC	[1. 35, 6. 27]	-60. 12 ~ 85. 21	41. 70	58. 3
	OC	[5. 60, 26. 17]	-60. 18 ~ 86. 11	41. 60	58. 4
户用生物质炉具秸秆	CO	[6 637. 29, 19 210. 03]	-36. 32 ~ 84. 30	70. 1	29. 9
	NO _x	[59. 90, 165. 05]	-34. 85 ~ 79. 51	69. 5	30. 5
	SO ₂	[91. 29, 255. 79]	-37. 06 ~ 85. 28	64. 7	35. 3
	NH ₃	[44. 45, 130. 84]	-37. 06 ~ 85. 28	68. 3	31. 7
	VOCs	[647. 85, 1 916. 80]	-37. 53 ~ 84. 82	69. 1	30. 9
	PM _{2.5}	[609. 74, 1 710. 84]	-35. 57 ~ 80. 78	70. 4	29. 6
	PM ₁₀	[653. 07, 1 867. 05]	-35. 83 ~ 83. 47	70. 30	29. 7
	BC	[126. 69, 322. 88]	-37. 63 ~ 58. 95	89. 4	10. 6
	OC	[366. 71, 895. 63]	-36. 22 ~ 55. 77	92. 5	7. 5
户用生物质炉具薪柴	CO	[75 471. 77, 356 422. 73]	-48. 28 ~ 144. 24	40. 4	59. 6
	NO _x	[2 561. 17, 11 845. 63]	-47. 53 ~ 142. 68	39. 6	60. 4
	SO ₂	[1 053. 96, 4 905. 74]	-47. 64 ~ 143. 72	40. 3	59. 7
	NH ₃	[3 409. 58, 16 005. 89]	-47. 88 ~ 144. 67	39. 1	60. 9
	VOCs	[8 139. 26, 38 469. 6]	-48. 32 ~ 144. 24	40. 4	59. 6
	PM _{2.5}	[8491. 49, 39 683. 45]	-47. 92 ~ 143. 39	40. 1	59. 9
	PM ₁₀	[9 152. 28, 42 823. 37]	-47. 74 ~ 144. 54	40. 4	59. 6
	BC	[2 261. 10, 6 820. 02]	-41. 65 ~ 76. 01	85. 5	14. 5
	OC	[1 510. 89, 7 020. 02]	-47. 33 ~ 59. 14	88. 3	11. 7
森林和草原火灾	CO	[61. 09, 245. 08]	-54. 94 ~ 80. 78	31. 7	68. 3
	NO _x	[0. 96, 3. 81]	-54. 71 ~ 79. 76	32. 6	67. 4
	SO ₂	[0. 35, 1. 35]	-53. 54 ~ 79. 20	32. 7	67. 3
	NH ₃	[1. 67, 6. 80]	-55. 80 ~ 79. 98	32. 3	67. 7
	VOCs	[4. 63, 19. 09]	-55. 88 ~ 81. 93	32. 0	68. 0
	PM _{2.5}	[5. 30, 21. 61]	-55. 66 ~ 80. 79	32. 0	68. 0
	PM ₁₀	[5. 42, 21. 86]	-55. 58 ~ 79. 14	32. 5	67. 5
	BC	[0. 88, 3. 48]	-55. 04 ~ 77. 80	32. 0	68. 0
	OC	[4. 30, 17. 07]	-54. 97 ~ 78. 75	32. 2	67. 8
秸秆露天焚烧	CO	[75 244. 52, 210 585. 48]	-43. 37 ~ 58. 50	64. 10	35. 90
	NO _x	[4 564. 50, 12 760. 65]	-42. 54 ~ 60. 63	63. 90	36. 10
	SO ₂	[854. 68, 2 426. 77]	-43. 85 ~ 59. 42	62. 80	37. 2
	NH ₃	[989. 26, 2 736. 26]	-42. 64 ~ 58. 65	65. 20	34. 8
	VOCs	[15 858. 60, 43 667. 89]	-42. 28 ~ 58. 95	65. 50	34. 5
	PM _{2.5}	[12 682. 65, 34 912. 23]	-42. 81 ~ 57. 43	64. 90	35. 1
	PM ₁₀	[13 356. 54, 36 804. 41]	-42. 70 ~ 57. 90	66. 30	33. 7
	BC	[1 581. 48, 4 346. 45]	-42. 47 ~ 58. 11	66. 20	33. 8
	OC	[6 679. 05, 18 466. 11]	-42. 76 ~ 58. 27	66. 10	33. 9

由表 7 可知,2019 年贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单的不确定性总体范围为 -60. 18% ~ 144. 67%, 主要由活动水平和排放系数的不确定性共同导致, 其中, 户用生物质炉具薪柴的 VOCs 排放的不确定性范围最大, 为 -48. 32% ~ 144. 24%; 户用生物质炉具薪柴的 NO_x 排放的不确定性范围最小, 为 -34. 85% ~ 79. 51%. 对于生物锅炉排放清单, 由于活动水平来自环境统计调查^[47], 可信度较高, 活动水平对不确定性的敏感度比排放系数低, 其中涉及去除效率的污染物(如 PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC)活动水平敏感度比其他污染物(如 CO、NO_x、SO₂、NH₃ 和 VOCs)高, 这是因为活动水平的变量

(即去除效率)增加,导致不确定性范围变大.对于户用生物质炉具排放清单,薪柴、辣椒、大豆和玉米秸秆的 BC 和 OC 排放系数来源为本地实测数据,有效降低了其不确定性,对应的排放系数敏感度也显著降低.对于森林和草原火灾,活动水平主要来自政府部门提供的数据^[58,59],活动水平对不确定性的敏感度比排放系数低,而对于秸秆露天焚烧,由于排放系数细化到不同类型的秸秆,降低了排放系数对不确定性的敏感度,且低于活动水平的敏感度.

3 结论

(1) 2019 年贵州省生物质燃烧源 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 的排放量分别为: 293 505.53、14 781.19、4 146.11、8 501.07、45 025.70、39 463.58、41 879.31、6 832.33 和 15 134.74 t.从排放量贡献率来看,户用生物质炉具的 CO、SO₂、NH₃ 和 BC 最大,分别为: 53.27%、52.00%、77.78% 和 59.59%; 秸秆露天焚烧的 NO_x、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 OC 最大,分别为: 53.75%、61.02%、56.22%、55.66% 和 77.16%.

(2) 各市(州)排放的污染物分布不均衡,主要集中于黔东南苗族侗族自治州,CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀ 和 BC 的排放量贡献率最大,分别为: 19.02%、15.22%、19.19%、24.54%、17.37%、17.79%、17.84% 和 20.55%. OC 的排放量贡献率则是遵义市最大(17.91%).

(3) 各二级源污染物排放量变化特征不同.生物质锅炉月排放量较平均;户用生物质炉具呈现出明显的季节性变化,采暖季污染物排放量远高于非采暖季;森林和草原火灾多发生在 3 月,其次是 2、4、8 和 12 月;秸秆露天焚烧集中在 2~4 月.生物质锅炉在 06:00~07:00 和 17:00~20:00 的排放量较大;户用生物质炉具在 07:00~09:00 和 18:00~20:00 的排放量较大;森林和草原火灾集中在 14:00~15:00;秸秆露天焚烧集中在 11:00~12:00 和 14:00~15:00.

(4) 本研究建立的排放清单能够较好地代表贵州省生物质燃烧源大气污染物的排放现状,但仍然存在一定不确定性(-60.18%~144.67%),主要由活动水平和排放系数的不确定性共同导致.后续研究中应进一步提升活动水平数据获取的准确性,继续开展排放更细分的系数本地化实测,从而降低不确定性,完善贵州省生物质燃烧源排放清单,为贵州省大气污染协同治理提供科学依据.

参考文献:

- [1] Demirbas A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2005, **31**(2): 171-192.
- [2] 田贺忠,郝吉明,陆永琪,等. 中国生物质燃烧排放 SO₂、NO_x 量的估算[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(2): 204-208.
- Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q, *et al.* Evaluation of SO₂ and NO_x emissions resulted from biomass fuels utilization in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, **22**(2): 204-208.
- [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] 陆炳,孔少飞,韩斌,等. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 186-194.
- Lu B, Kong S F, Han B, *et al.* Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent in 2007[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(2): 186-194.
- [5] Zhou Y, Xing X F, Lang J L, *et al.* A comprehensive biomass burning emission inventory with high spatial and temporal resolution in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(4): 2839-2864.
- [6] Takami K, Shimadera H, Uanishi K, *et al.* Impacts of biomass burning emission inventories and atmospheric reanalyses on simulated PM₁₀ over Indochina[J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(2), doi: 10.3390/atmos11020160.
- [7] Puliafito S E, Bolaño-Ortiz T, Berná L, *et al.* High resolution inventory of atmospheric emissions from livestock production, agriculture, and biomass burning sectors of Argentina[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117248.
- [8] Mataveli G A V, de Oliveira G, Seixas H T, *et al.* Relationship between biomass burning emissions and deforestation in Amazonia over the last two decades[J]. *Forests*, 2021, **12**(9), doi: 10.3390/F12091217.
- [9] Sahu S K, Mangaraj P, Beig G, *et al.* Quantifying the high resolution seasonal emission of air pollutants from crop residue burning in India[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117165.
- [10] Le H A, Phuong D M, Linh L T. Emission inventories of rice straw open burning in the Red River Delta of Vietnam; evaluation of the potential of satellite data[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.113972.
- [11] Le H A, Khoi N Q, Mallick J. Integrated emission inventory and modelling to assess the distribution of particulate matters from rice straw open burning in Hanoi, Vietnam[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, **13**(5), doi: 10.1016/j.apr.2022.101416.
- [12] Das B, Bhavé P V, Puppala S P, *et al.* A model-ready emission inventory for crop residue open burning in the context of Nepal[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **266**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115069.
- [13] Pino-Cortés E, Carrasco S, Díaz-Robles L A, *et al.* Emission inventory processing of biomass burning from a global dataset for air quality modeling[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2022, **15**(4): 721-729.
- [14] 杨光义. 东北地区生物质露天燃烧源排放及其对大气环境的影响与评估[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2020.

- Yang G Y. Emissions of open biomass burning and its impacts on atmospheric environment in the Northeastern China [D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [15] 徐敬, 寇星霞, 李梓铭. 秸秆燃烧排放对北京及其周边地区 PM_{2.5} 浓度影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2018, **23**(5): 587-595.
- Xu J, Kou X X, Li Z M. Modeling the impact of emissions from crop residue burning on PM_{2.5} concentration in Beijing and its surrounding areas [J]. Climatic and Environmental Research, 2018, **23**(5): 587-985.
- [16] 倪紫琳, 周亚端, 张银菊, 等. 鄂州市高时空分辨率大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学与技术, 2021, **44**(2): 90-96.
- Ni Z L, Zhou Y D, Zhang Y J, *et al.* Establishment of high resolution atmospheric emission inventory in Ezhou city [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **44**(2): 90-96.
- [17] 马强, 宫密秘, 杨晓霞, 等. 嘉兴市人为源大气污染物排放清单研究[J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(6): 660-665.
- Ma Q, Gong M M, Yang X X, *et al.* Air pollutants emission inventory of anthropogenic sources in Jiaxing [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, **42**(6): 660-665.
- [18] 庞可, 张芊, 马彩云, 等. 天水市人为源挥发性有机物排放清单及特征研究[J]. 环境科学与管理, 2021, **46**(10): 101-106.
- Pang K, Zhang Q, Ma C Y, *et al.* Emission inventory and characteristic analysis of anthropogenic volatile organic compounds in Tianshui City [J]. Environmental Science and Management, 2021, **46**(10): 101-106.
- [19] 范西彩, 张新民, 张晓红, 等. 鹤壁市大气挥发性有机物源排放清单研究[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(2): 558-565.
- Fan X C, Zhang X M, Zhang X H, *et al.* Research on the emission inventory of volatile organic compounds in Hebi City, Henan Province [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(2): 558-565.
- [20] 高素莲, 闫学军, 张荣荣, 等. 济南市人为源挥发性有机物排放清单及特征[J]. 环境科学与技术, 2021, **44**(S1): 191-198.
- Gao S L, Yan X J, Zhang R R, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic volatile organic compounds in Jinan [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **44**(S1): 191-198.
- [21] 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 等. 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[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 634-642.
- Guo W K, Li G Y, Chen B, *et al.* Establishment of a high-resolution anthropogenic emission inventory and its evaluation using the WRF-Chem Model for Lanzhou [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 634-642.
- [22] 陈东, 陈军辉, 钱骏, 等. 资阳市大气污染源排放清单研究[J]. 四川环境, 2021, **40**(1): 68-75.
- Chen D, Chen J H, Qian J, *et al.* Research on air pollutant emission inventory in Zi Yang City [J]. Sichuan Environment, 2021, **40**(1): 68-75.
- [23] 江沛玉, 陈晓玲, 李玲玉. 山东省高分辨率大气颗粒物排放清单[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(9): 1124-1132.
- Jiang P Y, Chen X L, Li Y L. High-resolution emission inventory of atmospheric particulate matter in Shandong [J]. Environmental Pollution & Control, 2021, **43**(9): 1124-1132.
- [24] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province [J]. Environmental Science, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- [25] Shi Y S, Gong S Y, Zang S Y, *et al.* High-resolution and multi-year estimation of emissions from open biomass burning in Northeast China during 2001-2017 [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **310**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127496.
- [26] Zhao H M, Yang G Y, Tong D Q, *et al.* Interannual and seasonal variability of greenhouse gases and aerosol emissions from biomass burning in Northeastern China constrained by satellite observations [J]. Remote Sensing, 2021, **13**(5), doi: 10.3390/rs13051005.
- [27] Wu J, Kong S F, Zeng X, *et al.* First high-resolution emission inventory of levoglucosan for biomass burning and non-biomass burning sources in China [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(3): 1497-1507.
- [28] Wu J, Kong S F, Yan Y Y, *et al.* Neglected biomass burning emissions of air pollutants in China-views from the corn cob burning test, emission estimation, and simulations [J]. Atmospheric Environment, 2022, **278**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119082.
- [29] Cui L L, Li R, Fu H B, *et al.* Nitrous acid emission from open burning of major crop residues in mainland China [J]. Atmospheric Environment, 2021, **244**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117950.
- [30] 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.
- [31] Zhang X H, Lu Y, Wang Q G, *et al.* A high-resolution inventory of air pollutant emissions from crop residue burning in China [J]. Atmospheric Environment, 2019, **213**: 207-214.
- [32] Yin L F, Du P, Zhang M S, *et al.* Estimation of emissions from biomass burning in China (2003-2017) based on MODIS fire radiative energy data [J]. Biogeosciences, 2019, **16**(7): 1629-1640.
- [33] 张晓芸. 中国秸秆焚烧大气污染物高分辨率排放特征研究 [D]. 南京: 南京大学, 2019.
- Zhang X H. High-resolution characteristics of air pollutant emissions from crop residue burning in China [D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [34] Li R M, Chen W W, Zhao H M, *et al.* Inventory of atmospheric pollutant emissions from burning of crop residues in China based on satellite-retrieved farmland data [J]. Chinese Geographical Science, 2020, **30**(2): 266-278.
- [35] 贵州省生态环境厅. 贵州省生态环境质量月报 (2022 年 3 月) [EB/OL]. https://sthj.guizhou.gov.cn/hjsj/hjzlsjzx_5802731/hjzlyb_5802733/202204/P020220428544739326382.pdf, 2022-04-28.
- [36] 蔡景行, 陆海, 贾田, 等. 贵阳市主要农作物秸秆资源空间分布与利用 [J]. 农技服务, 2020, **37**(12): 104-106.
- [37] 王璐, 严如江. 贵州省兴仁市农作物秸秆利用情况调查分析 [J]. 贵州农业科学, 2019, **47**(12): 134-137.
- Wang L, Yan R J. Survey and analysis of crop straw utilization in Xingren City, Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Science, 2019, **47**(12): 134-137.
- [38] 郭应军, 熊康宁, 安裕伦, 等. 中国西南石漠化地区农村能源消费结构研究 [J]. 农业工程学报, 2019, **35**(3): 226-

234.
Guo Y J, Xiong K N, An Y L, *et al.* Study on rural household energy consumption structure in rocky desertification region of Southwest China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(3): 226-234.
- [39] 王琦, 熊康宁, 盈斌, 等. 喀斯特地区农村能源消费特征及影响因素[J]. 中国农业资源与区划, 2019, **40**(3): 146-157.
Wang Q, Xiong K N, Ying B, *et al.* Consumption characteristics of rural energies in Karst Area and their influencing factors [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, **40**(3): 146-157.
- [40] 张雅蓉, 李渝, 蒋太明, 等. 贵州主要农作物秸秆资源分布及综合利用现状[J]. 贵州农业科学, 2015, **43**(8): 262-267.
Zhang Y R, Li Y, Jiang T M, *et al.* Distribution and comprehensive utilization of straw resources of main crops in Guizhou [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2015, **43**(8): 262-267.
- [41] 陈志楨, 黄瑞, 黄光谋, 等. 罗甸县农作物秸秆资源调查与应用展望[J]. 当代畜牧, 2015, (33): 23-24.
- [42] 唐亮, 刘肇军, 熊康宁, 等. 喀斯特地区农村家庭能源消费结构及效应分析——以贵州毕节撒拉溪示范区为例[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2013, **31**(2): 96-102.
Tang L, Liu Z J, Xiong K N, *et al.* Study on structure and effects of rural household energy in rocky desertification area-A case in salaxi of Guizhou [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2013, **31**(2): 96-102.
- [43] 贵州省环境科学研究设计院. 贵州省大气污染源排放清单成果汇总报告[R]. 贵阳: 贵州省环境科学研究设计院, 2017. 273-290.
- [44] 贺克斌. 城市大气污染源排放清单编制技术手册[EB/OL]. <https://max.book118.com/html/2018/11/16/8107025055001133.shtm>, 2018-11-16.
- [45] 环境保护部. 关于发布《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等5项技术指南的公告[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2014-12-31.
- [46] 贵州省环境监测中心站调查研究项目组. 贵州省典型地区村镇散煤燃烧调查与空气质量影响研究[R]. 贵阳: 贵州省环境监测中心站, 2019. 13-14.
- [47] 贵州省生态环境厅. 2019 贵州环境统计[R]. 贵阳: 贵州省生态环境厅, 2019.
- [48] 贵阳市统计局, 国家统计局贵阳调查队. 贵阳统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Bureau of Statistics of Guiyang, NBS Survey Office in Guiyang. Guiyang statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [49] 六盘水市统计局. 六盘水 2020 年统计年鉴[EB/OL]. http://tjj.gzlp.gov.cn/bmxxgk/zfxgk/fdzlgnr/zdly/tjnj_5712553/202106/t20210615_68512543.html, 2021-06-15.
- [50] 遵义市统计局, 国家统计局遵义调查队. 2020 年遵义统计年鉴 [EB/OL]. http://www.zunyi.gov.cn/sjfb/tjxx/tjnj_5860125/202011/t20201106_68833238.html, 2020-11-06.
- [51] 安顺市统计局, 国家统计局安顺调查队. 2020 年安顺统计年鉴 [EB/OL]. http://www.anshun.gov.cn/zfsj/tjnj/202112/t20211207_71948788.html, 2021-12-07.
- [52] 毕节市统计局, 国家统计局毕节调查队. 毕节统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [53] 铜仁市统计局. 2020 年铜仁统计年鉴 [EB/OL]. http://www.trsn.gov.cn/zfsj/tjnj/202106/t20210602_68376344.html, 2021-06-02.
- [54] 黔东南州统计局, 国家统计局黔东南调查队. 2019 年黔东南统计年鉴 [EB/OL]. http://www.qxn.gov.cn/zwgk/zfjg/zjnj_5135341/bmxxgkml_5135344/tjgb_5135353/202108/t20210825_69768473.html, 2021-08-25.
- [55] 黔东南州统计局. 2019 年黔东南统计年鉴 [EB/OL]. http://tjj.qdn.gov.cn/tjsj/sjcx_57102/qdntjnj/202203/t20220316_73006053.html, 2022-03-16.
- [56] 黔南州统计局. 黔南统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Qiannan Autonomous Prefectural Bureau of Statistics. Qiannan statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [57] 贵州省统计局, 国家统计局贵州调查总队. 贵州统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
Guizhou Province Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Guizhou. Guizhou statistical yearbook 2020 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [58] 贵州省林业局. 2019 年贵州林业年鉴 [EB/OL]. https://www.guizhou.gov.cn/dcgz/stgz/lynj/202109/t20210915_70433528.html, 2021-09-15.
- [59] 贵州省应急厅. 贵州省森林火灾过火面积统计表 [R]. 2022.
- [60] GB/T 17297-1998, 中国气候区划名称与代码气候带和气候大区[S].
- [61] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴 2020 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2021.
- [62] 贵州省第三次全国国土调查领导小组办公室, 贵州省自然资源厅, 贵州省统计局. 贵州省第三次全国国土调查主要数据公报 [EB/OL]. https://zrzy.guizhou.gov.cn/wzgb/zwgk/zdlyxxgk/zrzy/dcjz/202201/t20220121_72378280.html, 2021-12-28.
- [63] NASA. Fire information for resource management system [EB/OL]. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>, 2019-12-31.
- [64] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1623-1632.
Tang X B, Huang C, Lou S R, *et al.* Emission factors and PM chemical composition study of biomass burning in the Yangtze River delta region [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1623-1632.
- [65] 何敏, 王幸锐, 韩丽, 等. 四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1208-1216.
He M, Wang X R, Han L, *et al.* Emission inventory of crop residues field burning and its temporal and spatial distribution in Sichuan Province [J]. Environment Science, 2015, **36**(4): 1208-1216.
- [66] 王文杰, 田杰, 张勇, 等. 我国典型秸秆露天燃烧黑碳的高时间分辨率排放特征及其排放清单[J]. 地球环境学报, 2019, **10**(2): 190-200.
Wang W J, Tian J, Zhang Y, *et al.* High time resolution emission characteristics and emission inventory of black carbon in typical crop residues burning in China [J]. Journal of Earth Environment, 2019, **10**(2): 190-200.
- [67] 杨夏捷, 马远帆, 鞠园华, 等. 华南农产品主产区 2005—2014 年秸秆露天燃烧污染物排放估算及时空分布[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(2): 358-368.
Yang X J, Ma Y F, Ju Y H, *et al.* Temporal and spatial distribution of air pollutants emitted from field burning of straw

- crops in Southern China during 2005-2014[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2018, **37**(2): 358-368.
- [68] 卢轩, 张瑞芹, 韩踪铜. 郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4426-4435.
- Lu X, Zhang R Q, Han L K. Emission inventory of VOCs components in Zhengzhou and their ozone formation potential[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4426-4435.
- [69] 张立斌, 黄凡, 张银菊, 等. 监利县大气污染源排放清单及特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(9): 182-189.
- Zhang L B, Huang F, Zhang Y J, *et al.* Emission inventory and characteristics of atmospheric pollution sources in Jianli County [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(9): 182-189.
- [70] 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 等. 西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5585-5593.
- Gao Y Z, Ji Y Q, Lin Z, *et al.* Pollutant emission inventory of biomass combustion sources in Xining City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5585-5593.
- [71] 刘春蕾, 杨峰. 南京市生物质燃烧源大气污染物排放清单及其特征[J]. *安徽农学通报*, 2017, **23**(16): 95-97.
- Liu C L, Yang F. Emission inventories of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in Nanjing City [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, **23**(16): 95-97.
- [72] 王艳妮, 秦俊虎, 杨敬婷, 等. 基于入户调查的贵阳市生活燃煤排放清单[J]. *环境科学学报*, 2021, **41**(5): 1809-1817.
- Wang Y N, Qin J H, Yang J T, *et al.* Household survey based study on emission inventory of residential coal burning in city of Guiyang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, **41**(5): 1809-1817.

环境科学

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)