

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期

Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力 李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培(5563)

汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平(5574)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单 高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益(5585)

新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析 陈军辉, 冯小球, 李媛, 王书肖(5594)

基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM_{2.5} 浓度估算 吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪(5602)

《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思(5616)

洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析 孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(5624)

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素 曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭(5633)

天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析 王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂(5644)

沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性 杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜(5656)

典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析 葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正(5663)

南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估 张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟(5673)

基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征:以郑州市高新区为例 任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄(5687)

我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响 高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小拴(5698)

VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析 王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿(5713)

山东省 O₃ 时空分布及影响因素分析 张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨(5723)

2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政(5736)

基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建 郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇(5747)

三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析 张凯, 吴凤平, 成长春(5757)

长江流域总氮排放量预测 丁肇慰, 郑华(5768)

1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征 姚梦雅, 胡敏娟, 陈丁江(5777)

黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布 韩语, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明(5786)

基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源 邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅(5796)

水源水库真核微生物种群结构季相演替特征 张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容(5804)

达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异 李文宝, 郭鑫, 张博亮, 杜蕾, 田雅楠(5814)

尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制 王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞(5826)

武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估 张坤锋, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军(5836)

上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系 徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮(5848)

曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素 李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇(5857)

水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除 赵伟, 范增增, 杨新萍(5865)

木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响 孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报(5876)

黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮 魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英(5884)

玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响 南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒(5896)

饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径 周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉(5905)

污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势 曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高(5912)

阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应 高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕(5921)

典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 李强, 曹莹, 何连生, 王耀锋, 龚成, 何书涵(5930)

我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价 王耀锋, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健(5938)

浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险 王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜霓雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军(5949)

北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探 管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华(5958)

典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价 强瑛, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫(5967)

雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应 周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌(5977)

铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划 朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波(5988)

干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响 黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧(5997)

铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除 王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郜红建, 叶新新(6006)

稻田灌溉河流 CH₄ 和 N₂O 排放特征及影响因素 吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文(6014)

节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房(6025)

有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N₂O 的排放特征及微生物特性 王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年(6038)

不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响 孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖(6047)

氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响 杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧(6058)

化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响 向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明(6067)

浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量 王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛(6078)

《环境科学》第42卷(2021年)总目录 (6091)

《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)

西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单

高玉宗^{1,2}, 姬亚芹^{1,2*}, 林孜^{1,2}, 林宇^{1,2}, 杨益^{1,2}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350)

摘要: 本研究根据调查的西宁市生物质燃烧源活动水平数据, 采用排放因子方法, 建立了2018年西宁市生物质燃烧源9种大气污染物的排放清单, 并分析了清单的时空分布特征和不确定性。结果表明, 西宁市2018年生物质燃烧源CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC和OC的排放量分别为11 718.34、604.41、167.80、209.72、1 617.97、2 054.04、2 135.04、281.07和1 224.78 t。秸秆露天焚烧CO、NO_x、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC和OC的排放对生物质燃烧源的排放贡献率最高; 其中, 秸秆露天焚烧NO_x、VOCs和CO的贡献率分别为72.35%、63.94%和53.18%。户用生物质炉NH₃和SO₂的排放对生物质燃烧源的贡献率最大, 分别为41.49%和42.05%。生物质燃烧源大气污染物排放地区分布不均衡, 主要集中于大通县和湟中区。生物质燃烧源9项污染物的排放量在1、2、3、10、11和12月较大, 占比在5%~33%。蒙特卡罗模拟结果表明, 在95%置信区间下, 不确定度最高的是森林和草原火灾的PM_{2.5}排放, 不确定度为-26.71%~29.78%。

关键词: 生物质燃烧源; 大气污染物; 排放清单; 西宁市; 不确定性分析

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2021)12-5585-09 **DOI:** 10.13227/j.hjkk.202104074

Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City

GAO Yu-zong^{1,2}, JI Ya-qin^{1,2*}, LIN Zi^{1,2}, LIN Yu^{1,2}, YANG Yi^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, Tianjin 300350, China)

Abstract: Based on the data of biomass combustion source activity level collected in Xining City and the emission factors, emission inventories of nine air pollutants from biomass combustion sources were established in Xining City in 2018, after which the temporal and spatial distribution characteristics and uncertainties of the inventory were analyzed. The results indicated that the total emissions of CO, NO_x, SO₂, NH₃, VOCs, PM_{2.5}, PM₁₀, BC, and OC from biomass combustion sources in Xining City in 2018 were 11 718.34, 604.41, 167.80, 209.72, 1 617.97, 2 054.04, 2 135.04, 281.07, and 1 224.78 t, respectively. The emission contributions of CO, NO_x, VOCs, PM_{2.5}, PM₁₀, BC, and OC from straw open burning were the highest for biomass combustion sources. Among them, the contributions of NO_x, VOCs, and CO from straw open burning were 72.35%, 63.94%, and 53.18%, respectively, and the contributions of NH₃ and SO₂ from household biomass furnaces were the largest, 41.49% and 42.05%, respectively. The spatial distribution from biomass combustion sources was not balanced; the air pollutants were mainly concentrated in Datong County and Huangzhong District. The temporal distributions from biomass combustion sources in Xining City were relatively large in January, February, March, October, November, and December, accounting for 5%~33%. The Monte Carlo simulation results showed that, under the 95% confidence interval, the PM_{2.5} emissions from forest and grassland fires had the highest uncertainty, with the uncertainty ranging from -26.71%~29.78%.

Key words: biomass combustion source; air pollutants; emission inventory; Xining City; uncertainty analysis

精准的大气污染源排放清单可以为识别污染来源提供基础信息, 并指导大气污染控制的决策^[1]。大气污染源排放清单涵盖的排放源包括工艺过程源^[2~4]、移动源^[5,6]、扬尘源^[7~11]、农业源^[12,13]、生物质燃烧源^[14~17]和化石燃料固定燃烧源^[18,19]等; 清单研究内容包括排放因子的本地化^[7,20]、时空分配方法^[21,22]、模型模拟^[23]和不确定性分析^[24]等。

在发展中国家, 燃烧生物质是能源利用的一个重要途径^[25], 但同时还会产生一些严重的环境污染问题。通常, 大面积的秸秆露天焚烧、森林和草原火灾, 以及大量的生物质能源燃烧等所产生的污染物会影响气候变化和空气质量。徐敬等^[26]的研究发现, 2017年5月河南、山东和天津等地的秸秆燃烧在合适风场的作用下可导致北京丰台及通州等地 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 小时浓度上升超过 $17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 上升幅度

超过40%; 胡海清等^[27]估算了大兴安岭1965~2010年46年间森林火灾年均排放含CO₂气体量为 $2.22 \times 10^6 \text{ t}$, 对大气碳平衡乃至全球气候变化产生重要影响。我国是农业大国, 秸秆资源丰富, 尽管政府自1999年开始实施了禁止秸秆露天焚烧的政策, 但秸秆综合利用率和秸秆露天燃烧现象仍时有发生。同时, 我国森林覆盖率逐年上升, 森林火灾频发, 短时间、大面积和高强度集中燃烧释放出较高浓度颗粒物、气态污染物和温室气体, 影响区域生态环境和林区居民身心健康^[28]。近年来针对中国地区的生物质开放燃烧排放研究也表明, 生物质开放燃烧过程中CO、PM_{2.5}、BC和OC的排放量约占人为源排

收稿日期: 2021-04-08; 修订日期: 2021-05-14

作者简介: 高玉宗(1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境污染防治技术与理论, E-mail: 1090936765@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiyaqin@nankai.edu.cn

放的 10%~20%^[29-31]。何向东等^[32]对焦作市人为源挥发性有机物排放清单的研究结果表明,生物质燃烧源(生物质露天燃烧和燃料燃烧)占 2016 年焦作市 VOCs 排放总量的 10.23%;周子航等^[33]对四川省人为源大气污染物排放清单的研究中发现,生物质燃烧贡献了 33%的 BC 和 51%的 OC;张立斌等^[34]在监利县的大气污染源排放清单研究中发现,CO、VOCs、BC 和 OC 主要来自生物质燃烧源;陈国磊等^[35]的研究建立了承德市大气污染源排放清单,结果表明生物质燃烧占 CO 排放量的贡献率为 8.6%;陈东等^[36]在广安市大气污染源排放清单研究中发现,露天秸秆焚烧是 PM_{2.5}和 PM₁₀的主要来源之一;陈军等^[37]的研究建立了长沙市人为源大气污染物排放清单,结果表明生物质燃烧源是最大的 OC 贡献源。可见虽然各地区生物质燃烧源排放的污染物的贡献率不同,但都对地区环境造成了一定的污染。

西宁市是兰西城市群中心城市,是西部大开发重要工业基地、资源开发基地和交通网络枢纽^[38]。随着城市经济带的融合、工农业发展,大气污染问题也备受关注。目前已有学者针对西宁市的大气污染问题进行了研究^[39-41],但针对具体源类的排放清单研究还不充分。基于此,本研究统计调查了西宁市 2018 年各区县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 和蒙特卡罗方法进行空间分配和不确定性分析。

1 材料与方法

本研究调查了西宁市城东区、城中区、城西区、城北区、湟中区、大通回族土族自治县(大通县)和湟源县,共计 7 个区县的生物质燃烧源的活动水平数据。根据文献[42]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、森林

和草原火灾及秸秆露天焚烧的 9 项大气污染物 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 的排放量。

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。

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

式中, A 为排放源活动水平, t; EF 为排放因子, $g \cdot kg^{-1}$; i 为某一种大气污染物; j 为西宁市各区县; k 为生物质燃烧类型(森林火灾、草原火灾、秸秆露天焚烧和户用生物质炉具); m 为植被带/草地/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, %。

活动水平数据主要包括生物质燃料种类、生物质燃料消耗量、森林或草原火灾过火面积、秸秆农作物产量和秸秆露天焚烧量占比等。本次源清单编制过程中,活动水平来源于企业逐家单位填报、部门填报、社区/村庄填报和网上火点等方式获取,其不确定性均较低。为了确保数据的准确性和完整性,填报之前开展全方位培训,解释填报表格中每个参数的具体含义、填报注意事项和各项问题解决的办法,并建立微信和 QQ 群,网上 24 h 答疑,且经过 3 级数据审核、现场抽查复核、电话复核、与二污普数据及排污许可证数据比对和与统计年鉴数据比对等多种方式审核校验数据,尤其关注填报的活动水平数据的单位,确保不出现数量级的差异,确保数据真实有效。在本次源清单的编制过程中,生物质燃烧源活动水平调查内容和获取途径详见表 1。

本次清单编制中排放因子的选取主要参考文献[42],见表 2。

表 1 生物质燃烧源活动水平调查内容及数据获取途径

Table 1 Survey content of activity level for biomass combustion sources and ways of data acquisition

| 污染源类 | 具体调查内容 | 数据获取来源 |
|---------|--|--------------------|
| 生物质锅炉 | 企事业单位名称、锅炉(排气筒)经纬度、生物质成型燃料消费量和控制措施等 | 市场监管局/生态环境局提供,企业填报 |
| 户用生物质炉具 | 社区/村庄名称以及经纬度、生物质燃料类型、居民采暖季和非采暖季户均生物质燃料年使用量、使用生物质的户数和户用生物质炉具类型等 | 社区/村庄调查问卷 |
| 森林和草原火灾 | 森林和草原火灾地理位置、火灾类型、火灾中心点经纬度、火灾过火面积和火灾发生时间等 | 森林草原局及网上火点信息 |
| 秸秆露天焚烧 | 作物种类、作物种植面积、作物秸秆单产量、秸秆野外焚烧量占比和秸秆野外焚烧日期等 | 农业农村局,社区/村庄调查问卷 |

表 2 生物质燃烧源排放因子/g·kg⁻¹

Table 2 Emission factors of biomass combustion sources/g·kg⁻¹

| 一级源 | 二级源 | 三级源 | 四级源 | CO | NO _x | SO ₂ | NH ₃ | VOCs | PM _{2.5} | PM ₁₀ | BC | OC | |
|--------|---------|---------|--------|------|-----------------|-----------------|-----------------|------|-------------------|------------------|-------|------|-------|
| 生物质燃烧源 | 生物质锅炉 | 生物质成型燃料 | 未分类 | 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 | 户用生物质炉具 | 秸秆 | 未分类 | 57.00 | 0.83 | 1.33 | 0.68 | 7.34 | 6.87 | 7.39 | 0.92 | 3.92 |
| | | | 秸秆 | 其它秸秆 | 57.00 | 0.83 | 1.33 | 0.68 | 7.34 | 6.87 | 7.39 | 0.92 | 3.92 |
| | | | 秸秆 | 玉米秸秆 | 57.00 | 0.83 | 1.33 | 0.68 | 7.34 | 6.87 | 7.39 | 0.92 | 3.92 |
| | | | 秸秆 | 小麦秸秆 | 172.00 | 0.51 | 2.36 | 0.37 | 9.37 | 8.24 | 8.86 | 1.10 | 4.70 |
| | | | 秸秆 | 水稻秸秆 | 68.00 | 0.43 | 0.48 | 0.52 | 8.40 | 6.40 | 6.88 | 1.85 | 3.65 |
| | | | 薪柴 | 未分类 | 29.00 | 0.97 | 0.40 | 1.30 | 3.13 | 3.24 | 3.48 | 0.53 | 2.59 |
| | 生物质开放燃烧 | 生物质开放燃烧 | 牲畜粪便 | 未分类 | 20.00 | 0.58 | 0.28 | 1.30 | 3.13 | 8.22 | 8.84 | 1.10 | 4.69 |
| | | | 秸秆露天焚烧 | 未分类 | 53.00 | 4.30 | 0.44 | 0.68 | 10.40 | 11.71 | 11.95 | 1.55 | 6.68 |
| | | | 秸秆露天焚烧 | 其它秸秆 | 53.00 | 4.30 | 0.44 | 0.68 | 10.40 | 11.71 | 11.95 | 1.55 | 6.68 |
| | | | 秸秆露天焚烧 | 玉米秸秆 | 53.00 | 4.30 | 0.44 | 0.68 | 10.40 | 11.71 | 11.95 | 1.55 | 6.68 |
| | | | 秸秆露天焚烧 | 小麦秸秆 | 60.00 | 3.31 | 0.85 | 0.37 | 7.48 | 7.58 | 7.73 | 1.01 | 4.32 |
| | | | 秸秆露天焚烧 | 水稻秸秆 | 28.00 | 1.42 | 0.53 | 0.53 | 8.45 | 5.67 | 5.78 | 0.75 | 3.23 |
| | | | 森林火灾 | 未分类 | 107.00 | 3.00 | 1.00 | 2.90 | 5.70 | 13.00 | 13.27 | 2.13 | 10.39 |
| | | | 草原火灾 | 未分类 | 65.00 | 3.90 | 0.35 | 0.70 | 3.40 | 5.40 | 5.51 | 0.72 | 3.14 |

2 结果与讨论

2.1 2018 年西宁市生物质燃烧大气污染物排放清单分析

西宁市 2018 年生物质燃烧大气污染物排放清单和各二级源类的贡献率见表 3 和图 1。

表 3 和图 1 表明,西宁市 2018 年生物质燃烧源 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 污染物的总排放量分别为 11 718.34、604.41、167.80、209.72、1 617.97、2 054.04、2 135.04、281.07 和 1 224.78 t; 秸秆露天焚烧 CO、NO_x、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 的排放贡献率最高,

表 3 生物质燃烧源排放清单/t

Table 3 Emission inventory for biomass combustion sources/t

| 生物质燃烧源 | CO | NO _x | SO ₂ | NH ₃ | VOCs | PM _{2.5} | PM ₁₀ | BC | OC |
|---------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-------------------|------------------|--------|----------|
| 生物质锅炉 | 107.25 | 48.11 | 12.06 | 4.14 | 19.48 | 16.25 | 19.13 | 2.22 | 9.24 |
| 户用生物质炉具 | 3 351.34 | 62.15 | 69.63 | 88.19 | 455.86 | 663.40 | 713.52 | 88.88 | 379.12 |
| 森林和草原火灾 | 2 028.00 | 56.86 | 18.95 | 54.96 | 108.03 | 246.39 | 251.51 | 40.37 | 193.13 |
| 秸秆露天焚烧 | 6 231.75 | 437.29 | 67.16 | 62.43 | 1 034.60 | 1 128.00 | 1 150.88 | 149.60 | 643.29 |
| 合计 | 11 718.34 | 604.41 | 167.80 | 209.72 | 1 617.97 | 2 054.04 | 2 135.04 | 281.07 | 1 224.78 |

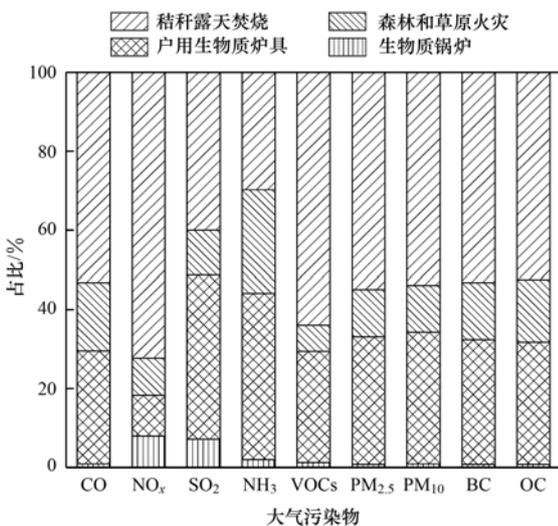


图 1 生物质燃烧源排放贡献

Fig. 1 Emission contributions of biomass combustion sources

分别为 53.18%、72.35%、63.94%、54.92%、53.90%、53.23% 和 52.52%；户用生物质炉具 NH₃ 和 SO₂ 的排放量贡献率最大,分别为 41.49% 和 42.05%。这与其他一些城市的研究结果相一致。如卢轩等^[43]的研究发现,郑州市秸秆家用和露天焚烧分别占生物质燃烧源排放 VOCs 的 43.8% 和 41.2%；刘湛等^[44]的研究建立了 2012 年长株潭区域生物质开放燃烧大气污染物排放清单,结果表明秸秆露天焚烧排放量所占生物质燃烧源排放污染物量比例均大于 90%,为主要排放源。

2.2 空间分布特征

表 4 和图 2 分别为西宁市 2018 年生物质燃烧源 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 这 9 项污染物不同区县排放量及贡献率。根据生物质燃烧源的地理位置,建立空间分配权重因子,将

清单排放总量分配到与模拟网格相一致的空间网格中(将其分配在 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的网格中),利用空间分析工具 Arcgis,得到生物质燃烧源大气污染物排放空间分布如图 3 所示.

表 4、图 2 和图 3 表明,西宁市生物质燃烧源 CO 、 NO_x 、 SO_2 、 NH_3 、 VOCs 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 BC 和 OC 这 9 项污染物的源排放区域主要集中于大通县和湟中区.这主要是因为,大通县和湟中区的生物质锅炉和户用生物质炉具的燃料消费量均较高,且 2018 年这两个区县的森林或草原火灾过火

面积也远大于其它区县.湟中区对 CO 、 NO_x 、 VOCs 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 BC 和 OC 排放的贡献率最大,分别达到了 54.31%、60.71%、55.57%、53.92%、53.25%、54.08% 和 54.35%,其次是大通县,分别为 40.19%、28.99%、40.40%、41.38%、41.92%、40.88% 和 40.46%. SO_2 排放的空间贡献率区县排序为:大通县(46.28%) > 湟中区(42.34%) > 湟源县(10.60%); NH_3 排放的空间贡献率为湟中区大于大通县,分别为 47.05% 和 44.37%.

表 4 生物质燃烧源各污染物不同区县排放量/t

Table 4 Emissions of pollutants from biomass combustion sources in different districts/t

| 区县名称 | CO | NO _x | SO ₂ | NH ₃ | VOCs | PM _{2.5} | PM ₁₀ | BC | OC |
|------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|-------------------|------------------|--------|----------|
| 城东区 | 89.92 | 2.52 | 0.84 | 2.44 | 4.79 | 10.92 | 11.15 | 1.79 | 8.56 |
| 城中区 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 城西区 | 18.39 | 0.52 | 0.17 | 0.50 | 0.98 | 2.23 | 2.28 | 0.37 | 1.75 |
| 城北区 | 31.41 | 0.88 | 0.29 | 0.85 | 1.67 | 3.82 | 3.90 | 0.63 | 2.99 |
| 大通县 | 4 709.49 | 175.24 | 77.66 | 93.05 | 653.67 | 849.92 | 895.03 | 114.9 | 495.54 |
| 湟中区 | 6 363.70 | 366.94 | 71.05 | 98.67 | 899.04 | 1 107.54 | 1 136.91 | 151.99 | 665.66 |
| 湟源县 | 505.43 | 58.31 | 17.79 | 14.21 | 57.82 | 79.61 | 85.77 | 11.39 | 50.28 |
| 合计 | 11 718.34 | 604.41 | 167.80 | 209.72 | 1 617.97 | 2 054.04 | 2 135.04 | 281.07 | 1 224.78 |

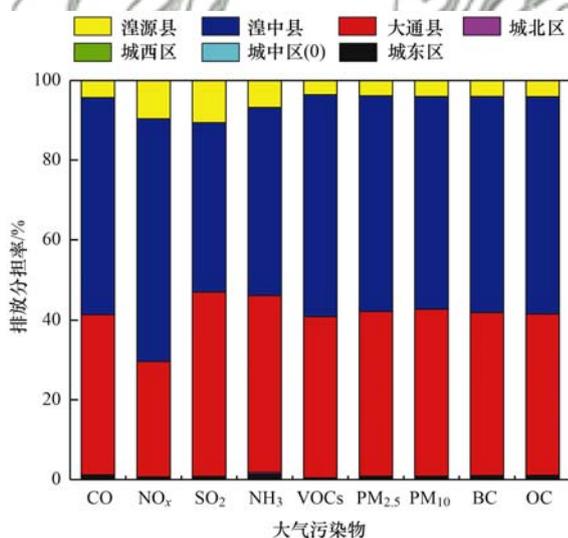


图 2 生物质燃烧源不同区县大气污染物排放贡献

Fig. 2 Emission contributions of different districts to biomass combustion sources

2.3 时间分布特征

根据生物质锅炉、户用生物质炉具、森林和草原火灾、秸秆露天燃烧的污染物月排放量占年排放量的比值来确定月分配系数,根据活动水平数据的小时变化来确定小时分配系数.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;户用生物质炉具月排放量与采暖季和非采暖季月份变化相一致,采暖季 10~4 月的各污染物排放量高于非采暖季 5~9 月的排放;森林和草原火灾

多发生在 2 月和 3 月,其次是 1、4、11 和 12 月,其他月份均未发现森林和草原火灾;秸秆露天焚烧月排放量变化明显,多集中在 9~11 月和 3 月.②从生物质燃烧源小时分配系数可见(图 5),生物质锅炉和秸秆露天燃烧在每日 07:00~08:00 及 18:00~21:00,各污染源的排放量逐渐达到最大;森林和草原火灾多集中在 14:00~17:00;户用生物质炉具在 07:00~09:00 以及 19:00~21:00 排放量较大,此时正值人们炊事时间.

2.4 不确定性分析

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,可采用蒙特卡罗方法评估排放总量的置信区间.本文采用蒙特卡罗方法,使用 Oracle Crystal Ball 软件,量化分析西宁市 2018 年生物质燃烧源排放清单的不确定性.本次清单编制中排放因子的选取主要参考文献[42],在西宁市的适用性上存在不确定性.设定随机抽样次数 10 000 次,置信度 95%,得到生物质锅炉、户用生物质炉具、森林和草原火灾和秸秆露天燃烧这 4 种生物质燃烧源污染物排放量的不确定性范围,结果如表 5 所示.从中可知,污染物排放量的计算值与模拟均值较接近.森林和草原火灾的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的不确定度最高,为 -26.71%~29.78%.秸秆露天焚烧的 SO_2 排放不确定度最低,为 -18.52%~20.11%.

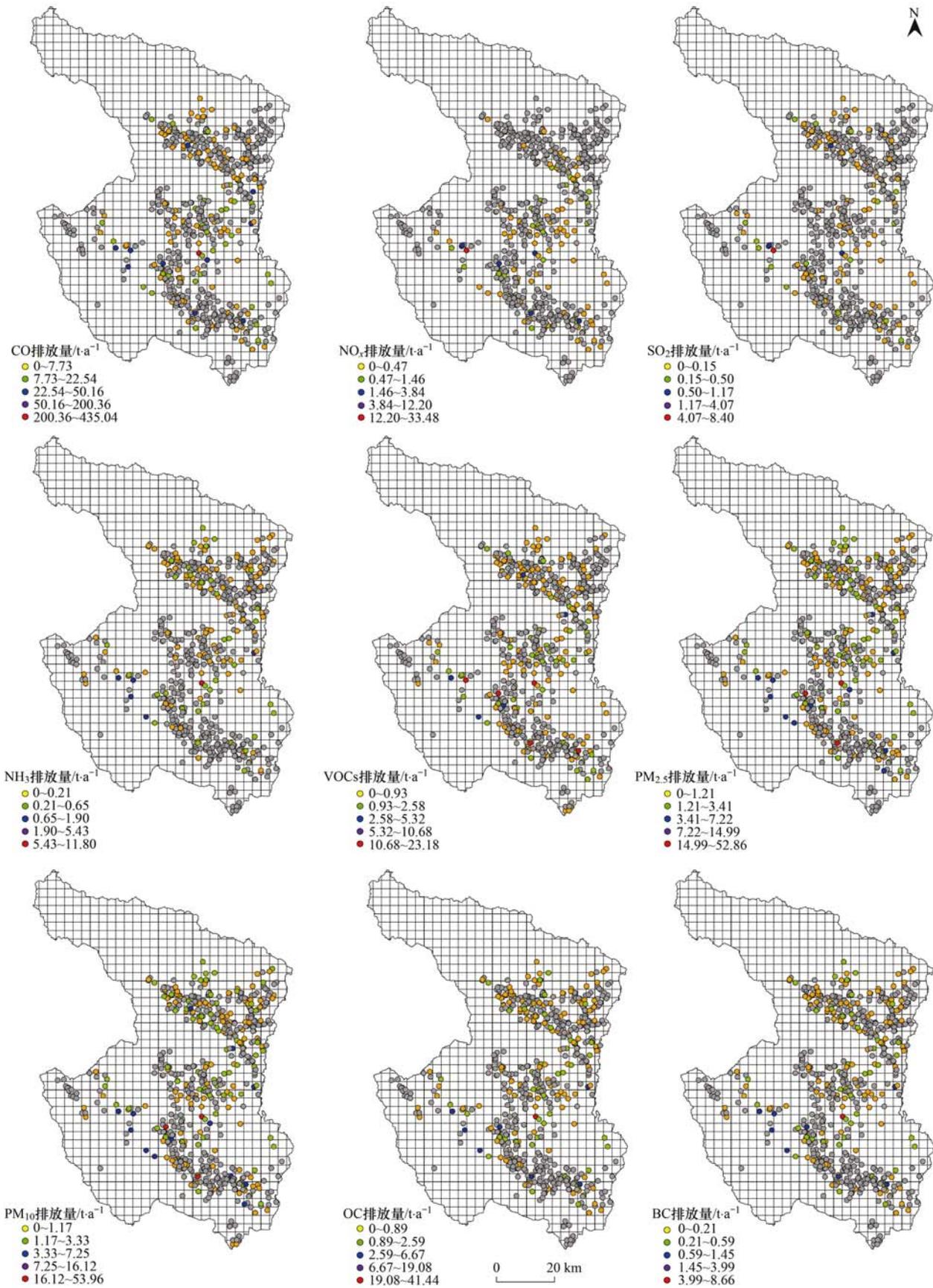


图3 生物质燃烧源排放空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of biomass combustion sources

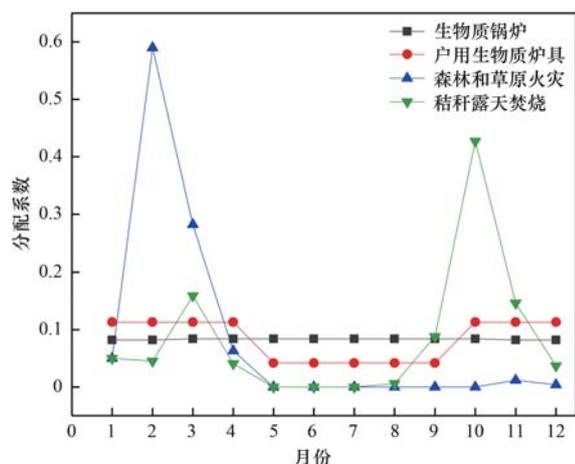


图4 生物质燃烧源排放月分配系数

Fig. 4 Monthly emission distribution coefficient of biomass combustion sources

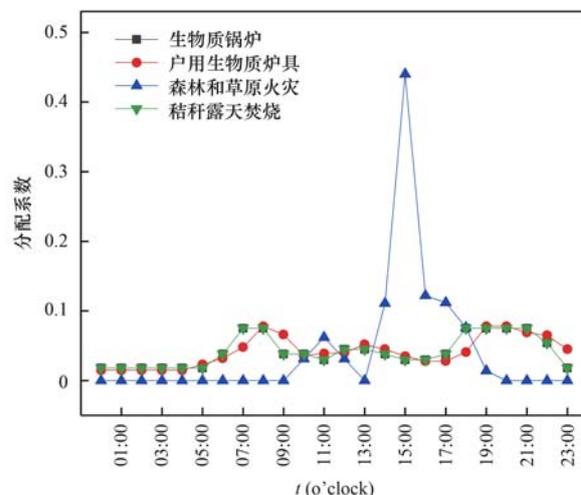


图5 生物质燃烧源排放小时分配系数

Fig. 5 Hourly emission distribution coefficient of biomass combustion sources

表5 排放清单的不确定性

Table 5 Uncertainty of emission inventory

| 二级源 | 污染物 | 中位值/t | 平均值/t | 95% 置信区间/t | 不确定性/% |
|-------------------|-------------------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 生物质锅炉 | CO | 106.51 | 107.10 | [79.60 ~ 138.15] | -25.68 ~ 28.99 |
| | NO _x | 47.75 | 47.99 | [35.24 ~ 61.90] | -26.57 ~ 28.99 |
| | SO ₂ | 11.97 | 12.04 | [8.90 ~ 15.51] | -26.08 ~ 28.82 |
| | NH ₃ | 4.11 | 4.13 | [3.07 ~ 5.31] | -25.67 ~ 28.57 |
| | VOCs | 19.34 | 19.45 | [14.40 ~ 25.18] | -25.96 ~ 29.46 |
| | PM _{2.5} | 16.15 | 16.21 | [11.95 ~ 20.94] | -26.28 ~ 29.18 |
| | PM ₁₀ | 18.95 | 19.08 | [14.09 ~ 24.65] | -26.15 ~ 29.19 |
| | BC | 2.22 | 2.23 | [1.64 ~ 2.88] | -26.46 ~ 29.15 |
| | OC | 9.19 | 9.24 | [6.79 ~ 11.88] | -26.52 ~ 28.57 |
| | 户用生物质炉具 | CO | 3 335.54 | 3 345.94 | [2 664.66 ~ 4 088.47] |
| NO _x | | 62.01 | 62.10 | [50.17 ~ 74.60] | -19.21 ~ 20.13 |
| SO ₂ | | 69.39 | 69.57 | [54.14 ~ 86.27] | -22.18 ~ 24.00 |
| NH ₃ | | 87.75 | 88.20 | [70.73 ~ 107.36] | -19.81 ~ 21.72 |
| VOCs | | 454.31 | 455.28 | [364.22 ~ 552.45] | -20.00 ~ 21.34 |
| PM _{2.5} | | 660.62 | 662.77 | [536.53 ~ 800.14] | -19.05 ~ 20.73 |
| PM ₁₀ | | 710.27 | 712.42 | [577.05 ~ 855.71] | -19.00 ~ 20.11 |
| BC | | 88.64 | 88.99 | [72.05 ~ 107.07] | -19.04 ~ 20.32 |
| OC | | 377.93 | 379.05 | [307.20 ~ 454.85] | -18.96 ~ 20.00 |
| 森林和草原火灾 | CO | 2 022.48 | 2 030.46 | [1 491.52 ~ 2 620.89] | -26.54 ~ 29.08 |
| | NO _x | 56.63 | 56.92 | [41.95 ~ 73.32] | -26.30 ~ 28.81 |
| | SO ₂ | 18.84 | 18.92 | [13.89 ~ 24.44] | -26.59 ~ 29.18 |
| | NH ₃ | 54.68 | 54.94 | [40.75 ~ 70.8] | -25.83 ~ 28.94 |
| | VOCs | 107.13 | 107.93 | [79.81 ~ 139.25] | -26.05 ~ 29.02 |
| | PM _{2.5} | 245.03 | 246.16 | [180.41 ~ 319.46] | -26.71 ~ 29.78 |
| | PM ₁₀ | 250.40 | 251.42 | [185.56 ~ 325.58] | -26.20 ~ 29.50 |
| | OC | 196.09 | 196.97 | [145.16 ~ 254.23] | -26.30 ~ 29.07 |
| 秸秆露天焚烧 | CO | 6 211.51 | 6 229.27 | [5 039.57 ~ 7 493.98] | -19.10 ~ 20.30 |
| | NO _x | 435.43 | 437.03 | [351.81 ~ 531.92] | -19.50 ~ 21.71 |
| | SO ₂ | 67.07 | 67.24 | [54.79 ~ 80.76] | -18.52 ~ 20.11 |
| | NH ₃ | 62.18 | 62.45 | [49.36 ~ 76.97] | -20.96 ~ 23.25 |
| | VOCs | 1 031.89 | 1 034.44 | [825.20 ~ 1 259.17] | -20.23 ~ 21.72 |
| | PM _{2.5} | 1 123.07 | 1 128.16 | [899.61 ~ 1 377.31] | -20.26 ~ 22.08 |
| | PM ₁₀ | 1 147.15 | 1 152.31 | [915.80 ~ 1 405.35] | -20.52 ~ 21.96 |
| | OC | 149.12 | 149.58 | [118.82 ~ 183.15] | -20.56 ~ 22.44 |

3 结论

(1) 2018 年西宁市生物质燃烧排放的 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 分别为 11 718.34、604.41、167.80、209.72、1 617.97、2 054.04、2 135.04、281.07 和 1 224.78 t。其中, 秸秆露天焚烧 CO、NO_x、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 的排放贡献率最高, 分别为 53.18%、72.35%、63.94%、54.92%、53.90%、53.23% 和 52.52%。户用生物质炉 NH₃ 和 SO₂ 的排放量贡献率最大, 分别为 41.49% 和 42.05%。

(2) 2018 年西宁市生物质燃烧源 CO、NO_x、SO₂、NH₃、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 9 项污染物的源排放区域主要集中于大通县和湟中区。湟中区对 CO、NO_x、VOCs、PM_{2.5}、PM₁₀、BC 和 OC 排放的贡献率最大, 均超过了 50%; 其次是大通县, 分别为 40.19%、28.99%、40.40%、41.38%、41.92%、40.88% 和 40.46%。

(3) 生物质锅炉月排放量较平均; 户用生物质炉具采暖季(10~4月)排放高于非采暖季(5~9月); 森林和草原火灾多发生在2月和3月; 秸秆露天焚烧多集中在9~11月和3月。生物质锅炉和秸秆露天燃烧在07:00~08:00及18:00~21:00的排放量较大; 森林和草原火灾多集中在14:00~17:00; 户用生物质炉具在07:00~09:00以及19:00~21:00排放量较大。

(4) 蒙特卡罗模拟得出在95%置信区间下, 森林和草原火灾的PM_{2.5}排放不确定度最高, 秸秆露天焚烧的SO₂排放不确定度最低。

参考文献:

- [1] Zhou Y, Cheng S Y, Chen D S, *et al.* A new statistical approach for establishing high-resolution emission inventory of primary gaseous air pollutants[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 392-401.
- [2] Zhao Y, Wang S X, Nielsen C P, *et al.* Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(12): 1515-1523.
- [3] 黄薇薇. 我国工业源挥发性有机化合物排放特征及其控制技术评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [4] 梁小明, 孙西勃, 徐建铁, 等. 中国工业源挥发性有机物排放清单[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 4767-4775.
Liang X M, Sun X B, Xu J T, *et al.* Industrial volatile organic compounds (VOCs) emission inventory in China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 4767-4775.
- [5] 李明月. 移动污染源排放清单研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [6] 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 等. 天津市2017年移动源高空分辨率排放清单[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4470-4481.
Liu G, Sun S D, Sun L N, *et al.* Mobile source emission inventory with high spatiotemporal resolution in Tianjin in 2017 [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4470-4481.
- [7] 李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 等. 北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2609-2616.
Li B B, Huang Y H, Bi X H, *et al.* Localization of soil wind erosion dust emission factor in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2609-2616.
- [8] 林孜, 姬亚芹, 林宇, 等. 鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3918-3923.
Lin Z, Ji Y Q, Lin Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of carbon components in road dust in Anshan [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3918-3923.
- [9] 秦建新, 朱柯颖, 吴涛, 等. 长沙市城区施工扬尘和土壤扬尘污染时空特征研究[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(4): 69-79.
Qin J X, Zhu K Y, Wu T, *et al.* Study on spatial and temporal characteristics of construction dust and soil dust pollution sources in urban areas of Changsha [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(4): 69-79.
- [10] 王社扣, 王体健, 石睿, 等. 南京市不同类型扬尘源排放清单估计[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, **31**(3): 351-359.
Wang S K, Wang T J, Shi R, *et al.* Estimation of different fugitive dust emission inventory in Nanjing [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, **31**(3): 351-359.
- [11] 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 等. 基于样方法的天津市春季道路扬尘PM_{2.5}中水溶性离子特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 1994-1999.
Zhao J Q, Ji Y Q, Zhang L, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in road dust PM_{2.5} during spring in Tianjin using the quadrat sampling method [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 1994-1999.
- [12] 李瑞敏, 童全松, 陈卫卫, 等. 东北地区农业源一次颗粒物排放清单研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1601-1609.
Li R M, Tong Q S, Chen W W, *et al.* Primary particulate matter (PM) emission inventory from agricultural activities in northeastern China [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1601-1609.
- [13] 张灿, 翟崇治, 周志恩, 等. 重庆市主城区农业源氨排放研究[J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(3): 90-96.
Zhang C, Zhai C Z, Zhou Z E, *et al.* Research on ammonia emission from agricultural sources in Chongqing urban city [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(3): 90-96.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 丁青青, 魏伟, 沈群, 等. 长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算[J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2389-2394.
Ding Q Q, Wei W, Shen Q, *et al.* Major air pollutant emissions of coal-fired power plant in Yangtze River Delta [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2389-2394.
- [19] 屈加豹, 王鹏, 伯鑫, 等. 超低改造下中国火电排放清单及分布特征[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3969-3975.
Qu J B, Wang P, Bo X, *et al.* Inventory and distribution characteristics of China's thermal power emissions under ultra-low reconstruction [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3969-3975.
- [20] 陈军辉, 范武波, 钱骏, 等. 利用 IVE 模型建立成都市轻型汽油客车排放清单[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(7): 2016-2024.
Chen J H, Fan W B, Qian J, *et al.* Establishment of the light-duty gasoline vehicle emission inventory in Chengdu by the international vehicle emission model [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(7): 2016-2024.
- [21] Xue Y F, Tian H Z, Yan J, *et al.* Temporal trends and spatial variation characteristics of primary air pollutants emissions from coal-fired industrial boilers in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **213**: 717-726.
- [22] 毛红梅, 张凯山, 第宝锋, 等. 成都市大气污染物排放清单高分辨率的时空分配[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(1): 23-33.
Mao H M, Zhang K S, Di B F, *et al.* The high-resolution temporal and spatial allocation of emission inventory for Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(1): 23-33.
- [23] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 935-963.
- [24] 潘涛, 薛亦峰, 钟连红, 等. 民用燃煤大气污染物排放清单的建立方法及应用[J]. *环境保护*, 2016, **44**(6): 20-24.
Pan T, Xue Y F, Zhong L H, *et al.* The methodology for air pollutants emission inventory from residential coal combustion and its application [J]. *Environmental Protection*, 2016, **44**(6): 20-24.
- [25] 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.
- [26] 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): 587-595.
- [27] 胡海清, 魏书精, 孙龙. 1965-2010 年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究[J]. *植物生态学报*, 2012, **36**(7): 629-644.
Hu H Q, Wei S J, Sun L. Estimation of carbon emissions due to forest fire in Daxing'an Mountains from 1965 to 2010 [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(7): 629-644.
- [28] 苏立娟, 何友均, 陈绍志. 1950-2010 年中国森林火灾时空特征及风险分析[J]. *林业科学*, 2015, **51**(1): 88-96.
Su L J, He Y J, Chen S Z. Temporal and spatial characteristics and risk analysis of forest fires in China from 1950 to 2010 [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(1): 88-96.
- [29] Li C L, Hu Y J, Zhang F, *et al.* Multi-pollutant emissions from the burning of major agricultural residues in China and the related health-economic effects[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(8): 4957-4988.
- [30] Qiu X H, Duan L, Chai F H, *et al.* Deriving high-resolution emission inventory of open biomass burning in China based on satellite observations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(21): 11779-11786.
- [31] 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.
- [32] 何向东, 黄兴宇, 张传兵, 等. 焦作市人为源挥发性有机物排放清单[J]. *环境化学*, 2019, **38**(9): 1998-2007.
He X D, Huang X Y, Zhang C B, *et al.* Emission inventories of anthropogenic VOCs in Jiaozuo City [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(9): 1998-2007.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 陈国磊, 周颖, 程水源, 等. 承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM_{2.5} 的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4069-2. 54079.
Chen G L, Zhou Y, Chen S Y, *et al.* Air pollutant emission inventory and impact of typical industries on PM_{2.5} in Chengde [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4069-4079.
- [36] 陈东, 陈军辉, 何敏, 等. 广安市大气污染源排放清单研究[J]. *四川环境*, 2019, **38**(3): 106-113.
Chen D, Chen J H, He M, *et al.* Research on air pollutant emission inventory in Guang'an [J]. *Sichuan Environment*, 2019, **38**(3): 106-113.
- [37] 陈军, 李楠, 谭菊, 等. 长沙市人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(3): 833-843.
Chen J, Li N, Tan J, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Changsha [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(3): 833-843.
- [38] 刘娜, 余晔, 马学谦. 西宁市大气污染源和输送季节特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1268-1279.
Liu N, Yu Y, Ma X Q. Seasonal characteristics of air pollutant sources and transport pathways in Xining City [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1268-1279.
- [39] 窦筱艳, 许嘉, 韩德辉, 等. 西宁市典型污染日 PM₁₀ 输送规律研究[J]. *气象与环境学报*, 2012, **28**(2): 85-90.
Dou X Y, Xu J, Han D H, *et al.* Transportation characteristics of PM₁₀ in the typical pollution weather in Xining [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2012, **28**(2): 85-90.
- [40] 窦筱艳, 赵雪艳, 徐珣, 等. 应用化学质量平衡模型解析西宁大气 PM_{2.5} 的来源[J]. *中国环境监测*, 2016, **32**(4): 7-14.
Dou X Y, Zhao X Y, Xu X, *et al.* Source apportionment of

- PM_{2.5} in Xining by the chemical mass balance [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, **32**(4): 7-14.
- [41] 胡晓峰, 赵露, 李佳, 等. 西宁取暖季 PM_{2.5} 水溶性离子的污染特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(1): 95-100.
Hu X F, Zhao L, Li J, *et al.* Research on pollution characteristics of water-soluble ions in PM_{2.5} during heating season in Xining [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2019, **41**(1): 95-100.
- [42] 贺克斌, 王书肖, 张强. 城市大气污染物排放清单编制技术手册[R]. 北京: 清华大学, 2015.
- [43] 卢轩, 张瑞芹, 韩跃刚. 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.
- [44] 刘湛, 李贝睿, 尤翔宇, 等. 长株潭区域生物质开放燃烧的大气污染物排放清单及不确定性分析[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(1): 23-29.
Liu Z, Li B R, You X Y, *et al.* Emission inventories of atmospheric pollutants from biomass open-burning and its uncertainty analysis in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan district [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016, **38**(1): 23-29.

欢迎订阅 2022 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发刊,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA); Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS); Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios | LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563) |
| Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China; Emission, Management, Purification, and Policy | WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574) |
| Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City | GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585) |
| Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak | CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594) |
| Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest | WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602) |
| Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan | LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616) |
| Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang | SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624) |
| Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing | CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633) |
| Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer | WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644) |
| Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang | DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656) |
| Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones | GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663) |
| Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter | ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673) |
| Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone | REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687) |
| VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China | GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698) |
| WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies | WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713) |
| Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province | ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723) |
| Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020 | QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736) |
| Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement | HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747) |
| Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity | ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757) |
| Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin | DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768) |
| Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015 | YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777) |
| Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River | HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786) |
| Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values | XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796) |
| Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir | ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804) |
| Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake | LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814) |
| Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River | WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826) |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan | ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836) |
| Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China | XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848) |
| Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland | LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857) |
| Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands | ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865) |
| Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil | MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876) |
| Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers | WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884) |
| Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sizozem | NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896) |
| Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants | ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905) |
| Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis | CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912) |
| Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge | GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921) |
| Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites | LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930) |
| Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China | WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938) |
| Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province | WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949) |
| Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China | GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958) |
| Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area | QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967) |
| Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District | ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977) |
| Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren | ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988) |
| Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar | HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997) |
| Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L. | WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006) |
| Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China | WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014) |
| Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field | WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025) |
| Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid | WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038) |
| Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil | KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047) |
| Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland | YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058) |
| Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils | XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067) |
| Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower | WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078) |