

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金

VOCs



制药



喷涂



橡胶

京津冀 •

• 长三角

珠三角 •

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期
Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策	孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)
长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征	代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)
经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征	陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)
近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析	马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)
电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系	柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)
焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析	顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)
典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟	孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)
多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析	曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)
龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析	王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)
基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例	李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)
造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估	张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郝明辉 (1131)
典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估	胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)
柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响	宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)
两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积	郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)
钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征	孙厚云, 卫晓峰, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)
盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)
水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响	汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)
壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响	杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)
铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响	于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)
研究报告	
COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析	赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)
2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟	刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)
南京北郊 PM _{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源	尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)
西安市大气棕碳污染特性及发色团种类	陈前, 陈庆彩 (1236)
淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价	郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓丽, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)
北京市控制 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	杜沛, 王建州 (1255)
西宁市大气污染来源和输送季节特征	刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)
青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征	袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)
基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征	王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)
山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析	刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)
兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献	王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛蒲萱, 马建民 (1315)
2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析	华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)
生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单	马占云, 姜昱聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)
长江口邻近海域表层沉积物中的细菌霍多醇及对低氧区的响应判别	尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)
鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估	徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)
衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析	刘巍巍, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)
丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征	潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)
金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价	黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)
汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响	李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)
苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征	白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)
娘子关泉群水化学特征及成因	唐春雷, 赵春红, 申豪勇, 梁永平, 王志恒 (1416)
过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用	徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)
亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向	王丽莎, 李希, 李裕元, 张满谔, 吴金水 (1433)
紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂	刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)
太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能	马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)
一步法 La@MgFe ₂ O ₄ 的制备及其吸附水中磷的性能	白润英, 宋博文, 张戎, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)
工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能	邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何品品 (1469)
ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制	毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)
不同季节城市污水处理厂微生物群落特性	贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)
麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学	殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)
内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价	王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)
广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素	马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)
超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响	方丹丹, 张立志, 王强 (1523)
水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响	陈佳, 赵秀兰 (1535)
四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性	王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)
地膜覆盖对菜地垄沟 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)
对比研究生物炭和秸秆对麦玉米轮作系统 N ₂ O 排放的影响	唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)
流域生态空间管控下生境监测方法概述	阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)
《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)	

兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献

王文鹏¹, 王占祥¹, 李继祥¹, 高宏^{1*}, 黄韬¹, 毛潇萱¹, 马建民²

(1. 兰州大学资源环境学院甘肃省环境污染预警与控制重点实验室, 兰州 730000; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘要: 甘肃兰-白城市群为我国西北地区重要的重工业基地, 大气污染物排放总量较大。研究高空间分辨率的污染物排放清单对于区域空气质量预报预警、减排方案模拟研究及大气污染防治等具有重要的科学意义。本文以兰州和白银为主要研究区域, 基于研究区域污染源排放及统计年鉴等数据资料, 建立了兰(2015年)-白(2016年)城市群7种(类)主要大气污染物网格化排放清单, 并对其空间排放特征以及排放源贡献进行了详尽地讨论分析。结果表明, 兰-白城市群7种主要污染物年排放量分别为: NO_x 2.22×10^5 t、 NH_3 4.53×10^4 t、 VOCs 7.74×10^4 t、 CO 5.62×10^5 t、 PM_{10} 4.95×10^5 t、 $\text{PM}_{2.5}$ 1.91×10^5 t 和 SO_2 1.37×10^5 t。其中 CO 的排放量最大, NH_3 的排放量最小。本清单与北大和清华 MEIC 清单对比结果表明, 交通源排放3个清单一致性较高, CO 排放总量和其工业源排放与北大和清华 MEIC 清单排放源相差 30%~40%, 推测原因主要为清单计算过程中排放因子、分辨率和数据年份的差异。本清单网格化空间分布显示除 NH_3 外的其他6种(类)污染物, 排放主要集中在市区, 排放源中工业非燃烧过程源均为最大贡献占比, NH_3 的主要贡献源是氮肥的施用及禽畜排放, 其污染分布受耕地分布等因素影响较大。因此, 减少工业非燃烧过程源、整合优质高效电力供应、使用清洁能源、严格控制工地扬尘、工业粉尘和做好城区绿化等, 能有效地降低兰-白城市群 NO_x 、 VOCs 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 这6种(类)主要污染物的排放。 NH_3 的减排则主要可从控制氮肥的使用及减少禽畜排放两方面考虑。本研究还利用蒙特卡洛法分析了排放清单的不确定性, NH_3 的不确定性最大为 -31%~30%, CO 的不确定性最小为 -18%~16%, 清单整体可信度较高。

关键词: 兰-白城市群; 主要大气污染物; 网格化清单; 来源贡献; 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)03-1315-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007131

Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China

WANG Wen-peng¹, WANG Zhan-xiang¹, LI Ji-xiang¹, GAO Hong^{1*}, HUANG Tao¹, MAO Xiao-xuan¹, MA Jian-min²

(1. Key Laboratory for Environmental Pollution Prediction and Control, Gansu Province, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Lan-Bai Metropolitan Area in Gansu province is an important heavy-industry base with the highest level of total air pollutant emissions in Northwest China. It is significant to study the high-resolution pollutant emission inventory to forecast regional air quality and to simulate pollutant emission reduction, as well as provide early warnings and forecasts, and to control air pollution. Taking Lanzhou and Baiyin as the main research areas, this study established the gridded emission inventories of seven major criteria air pollutants in the Lan-Bai Metropolitan Area based on emission data and statistical yearbooks of 2015-2016. The spatial pollution characteristics and emission source contributions were also studied. The results showed that the total annual emissions of seven major criteria air pollutants in the Lan-Bai Metropolitan Area were as followings: NO_x 2.22×10^5 t, NH_3 4.53×10^4 t, VOCs 7.74×10^4 t, CO 5.62×10^5 t, PM_{10} 4.95×10^5 t, $\text{PM}_{2.5}$ 1.91×10^5 t, and SO_2 1.37×10^5 t. Among them, annual CO emissions were the highest, while the annual emissions of NH_3 were the lowest. The comparison of this gridded emission inventories with the Peking and Tsinghua University's MEIC inventories, found that the consistency of the three inventories for traffic source was relatively high, but for the total emissions and industrial source emissions of CO , a 30%-40% difference was found when compared with emissions in the Peking and Tsinghua University's inventories. The main differences were from the collected emission factors and the different resolution and years for collected data. The industrial non-combustion process sources, accounting for the largest proportion, were mainly concentrated in urban areas for the other six major criteria air pollutants except for NH_3 . The main contributing sources of NH_3 were from the use of nitrogen fertilizers and livestock emissions, so its spatial pollution distribution was mainly affected by farmland distribution and other factors. It can be concluded that countermeasures, such as controlling industrial non-combustion process sources, integrating high-

收稿日期: 2020-07-13; 修订日期: 2020-10-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2020-kb23); 国家自然科学基金项目(41671460, 41877507); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41701582)

作者简介: 王文鹏(1994~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气污染源排放清单和大气污染数值模拟, E-mail: wangwp2018@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: honggao@lzu.edu.cn

quality and high-efficiency power supply, using clean energy, strict dust emission control on construction sites and industrial production facilities, as well as urban greening could effectively reduce the emissions of six major criteria air pollutants including NO_x , VOCs, CO, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, and SO_2 in the Lan-Bai Metropolitan Area. The reduction of NH_3 emission mainly depends on reducing the use of nitrogen fertilizer and controlling livestock emissions in the rural regions of Lan-Bai Metropolitan Area. This paper also used Monte Carlo uncertainty analysis to evaluate uncertainty in the gridded emission inventories, in which the maximum uncertainty was -31% - 30% for NH_3 , the uncertainty of CO at -18% - 16% was minimal. Therefore, the overall credibility was high for the established gridded emission inventories in this study.

Key words: Lan-Bai metropolitan area; major criteria air pollutants; gridded emission inventories; source contribution; uncertainty analysis

大气污染物排放清单是指污染源在一定时间跨度和空间区域内排放到大气中各种污染物的量的集^[1]. 大气污染物排放清单可为大气污染成因研究以及空气质量预报预警、减排方案模拟等提供重要的基本信息和基础数据. 近年来随着我国经济的快速发展、城市化的急剧进程和机动车保有量的迅猛增加, 大气污染日趋严重, 多区域大面积雾-霾等重污染天气现象频繁发生. 为了响应《先进的环境监测预警体系建设纲要(2010-2020年)》以及《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(国发[2018]22号文)等国家、地方对于改善大气环境质量的要求和目标, 提供更精确的空气质量预报预警等基础数据, 理清兰-白城市群主要大气污染物的排放量、空间排放特征及各个排放源的贡献是极其必要的. 白银市与兰州地域接壤, 兰-白城市群在《“十二五”重点区域大气污染联防联控规划》被确定为重点区域, 兰州市空气质量与白银市空气质量联防联控对于区域大气污染防治意义重大.

国外对于大气污染物排放清单的研究起步较早, 20世纪70年代美国环保署(environmental protection agency, EPA)就开始对主要大气污染物的排放因子进行研究, 并不断完善排放因子库^[2]. 自20世纪90年代美国环保署开始建立国家排放清单(national emissions inventory, NEI)^[3], 包括美国EPA监测范围内的所有大气污染物, 该清单每隔3a发布一次, 现已更新的最新国家排放清单NEI为NEI2017. 全新的NEI2017由美国环保署利用各个州、地方、航空机构以及排放清单系统(emissions inventory system, EIS)提供的数据构建. 欧洲借鉴美国排放清单发展的经验和方法, 于2000年7月开始实施污染物排放登记制度(european pollutant emission register, EPER)^[4], 根据EPER的规定, 成员国每3年提交一次报告包含50种必须上报的污染物种类, 欧洲环境保护署(european environment agency, EEA)负责不断完善欧洲污染物排放清单. 亚洲较为完整的污染物排放清单是日本国立环境研究院于2007年编制的亚洲排放(regional emission inventory in asia, REAS)清单, 近年来出现的全球网

格化人为排放的碳基硫清单^[5]等表明全球清单趋于不断细化的趋势.

我国研究者自20世纪90年代开始对大气污染物排放清单的研究, 2001年清华大学估算并分析了我国1995~1998年中国氮氧化物排放清单以及空间排放特征^[6]; 2006年有学者建立了一个自下而上的人为源大气污染物排放清单, MEIC和MIX清单即该团队的研究成果之一, MEIC和MIX清单公布以后使得国内污染物排放清单更加多元化, 提供了全国范围内网格化排放清单, 为科研机构以及全国环保机构的科研和预报预警提供了较可靠的清单数据. 在此基础上, 各区域排放清单也逐步完善, 郑君瑜等^[7]建立了珠三角地区包括 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 和VOCs这4种(类)大气污染物的排放清单; 2012年朱佳雷等^[8]建立了长三角地区秸秆燃烧排放清单; 2018年李莉莉等^[9]建立了黑龙江省秸秆露天焚烧污染物排放清单. 清单种类日趋丰富及多元化发展, 为我国区域大气污染来源解析和空气质量预报预警等大气污染防治工作提供了重要的科学基础数据.

兰州市是我国西北地区重要的重工业基地和交通枢纽, 地处黄河上游, 市区南北群山环抱, 具有带状河谷盆地型城市的特征, 由于其地理条件的特殊性导致兰州常年静风, 污染物排放后不易扩散. 兰州以石油化工、金属冶炼和制药等为主要产业, 工业排放较为严重, 干旱少雨, 缺乏大气污染清除机制, 冬季供暖期长, 导致兰州空气污染严重, 也是我国最早发现光化学烟雾的城市, 曾被列为中国 PM_{10} 污染最为严重的十座城市之一. 近年来兰州市大气污染防治卓有成效, 重污染天气逐年下降, 空气质量优良天数逐年提升, 但近年来机动车的迅猛增加, 兰州市大气污染类型逐步转变为以臭氧等二次污染为主要问题的复合型污染, 大气污染面临新的严峻考验.

白银市地处黄土高原和腾格里沙漠过渡地带, 南部与兰州市接壤, 目前被列为资源枯竭型城市. 由于存在一定规模的能源类、有色金属类为主导的工业排放源, 以及白银市干旱少雨的气候特征, 导致白

银市空气污染也较为严重。

构建兰-白城市群高分辨率大气污染物网格化排放清单,可为两市的大气污染成因研究、空气质量预报预警及区域减排联防联控提供更加精确的基础数据。本文基于张凯^[10]研究的兰州市 2009 年网格化排放清单和 2015 年《兰州市空气质量预警预报源清单更新》(未发表)中排放因子,利用 2015 年污染源排放相关数据对兰州大气污染物排放清单进行更新,并首次构建了 2016 年白银地区大气污染物网格化排放清单,以期对兰-白城市群地区更加精准的空气质量预报预警及城市群区域大气污染控制减排提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域及数据来源

本清单研究主要参考国家生态环境部正式发布的系列大气污染物排放清单编制技术指南^[11],所涉及到的区域包括兰州辖区内的城关区、七里河区、西固区、安宁区、红古区、永登县、皋兰县和榆中县。白银市辖区范围包括白银区、平川区、靖远县、景泰县以及会宁县。本清单研究需要的基础数据主要来自于文献^[12~21],以及 2015 年相关项目报告中的数据,由于兰州、白银在生产类型和工业水平等方面存在差异,因此兰州和白银采用不同的排放因子。

1.2 污染源分类及处理

1.2.1 污染源分类

依据文献^[11],本研究污染源分类主要有:工业面源燃烧源、工业非燃烧过程源、VOCs 逸散源、NH₃ 的人为排放源、扬尘源、生物质燃烧源、道路移动源和非道路移动源等。主要污染源具体包括^[22,23]:工业源面源燃烧源包括兰-白城市群地区工业燃烧煤炭、焦炭、汽油和柴油原料油等燃料所产生的大气污染。工业非燃烧过程源包括兰-白城市群地区酒精生产、塑料制造、水泥制造、炼钢和有色金属生产等工艺及流程过程中产生的大气污染。NH₃ 的人为排放源包括禽畜养殖、氮肥使用、污水处理和人体粪便等 NH₃ 的排放源。扬尘源包括工业堆场扬尘源和建筑工地扬尘源。生物质燃烧源包括小麦和玉米等当地作物秸秆燃烧排放。道路移动源包括轻型车、中型车、重型车、摩托车和出租车等的排放。非道路移动源包括农业机械、农业运输车和工程机械排放。

1.2.2 目标污染物

本清单所涉及的大气污染物包括 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃,共 7 种(类)主要大气污染物。

1.2.3 兰-白城市群主要大气污染物排放量的计算方法

1.2.3.1 排放量计算方法

大气污染物排放量计算主要有排放因子法和物料衡算法两种。

(1) 排放因子法 排放因子在相关材料中也称为排放系数,即污染源生产单位数目的产品或者指消耗单位原料所产生的大气污染物的平均值。排放因子法即在已知排放因子的情况下通过相关资料查找污染源的产品产量以及原料消耗量,再通过计算得出污染物的排放量的一种方法^[24]。在确定了污染源之后根据排放因子以及相关产量、能源消耗量数据等通过以下公式进行主要大气污染物排放量的估算^[23,25]:

$$E_i = \sum_{j,k} A_{j,k} \times EF_{j,k} \times (1 - \eta) \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中, E 表示兰-白城市群辖区内某种大气污染物的排放量,kg; i 表示大气污染物的种类, j 则表示大气污染源的种类; $A_{j,k}$ 为排放源活动水平,kg; $EF_{j,k}$ 表示排放因子, $g \cdot kg^{-1}$; η 表示污染物的去除率。

(2) 物料衡算法 所谓物料衡算法^[26]即对于产品生产过程中的各个部分即产品生产的工艺、管理和资源的综合利用详细而系统地进行一系列科学的计算,但该方法需要大量详实的企业内部资料,所以可操作性差。本研究该法主要用于 SO₂ 排放量的估算:

$$E_{SO_2} = \frac{64}{32} \times S \times W \times C(1 - \eta_{SO_2}) \times 10^3 \quad (2)$$

式中, E_{SO_2} 表示兰-白城市群辖区内 SO₂ 的排放量,kg; 64/32 表示 SO₂ 与 S 的相对分子质量之比; S 表示燃料的含硫率; W 表示燃料消耗量,t; C 表示燃料中硫的转化率, η_{SO_2} 表示所用脱硫设备的脱硫率。

1.2.3.2 白银辖区内排放因子及活动水平的获取

工业面源燃烧源指工业生产过程中燃烧产生的面源排放,其排放因子如表 1 所示,来源于文献^[10,11,25]。工业非燃烧过程源大气污染源指一些工艺环节的大气无组织排放源,主要包括酒精、炼焦、塑料制造和水泥制造行业等 10 类工业行业,其排放因子主要根据相关研究以及编制技术指南获得,如表 2 所示。

白银辖区内活动水平数据来源于文献^[12~16]。

民用燃烧源排放因子来源于文献^[10]。VOCs 逸散源排放因子主要来自于文献^[10,27]。氨(NH₃)的人为源排放主要包括农业排放如化肥施用

和生活排放如垃圾处理量等,其排放因子的数据主要来源于文献[10,28].扬尘源排放因子主要来自于文献[10,29].非道路移动源排放因子主要来自

于文献[25,30~32].道路移动源排放因子主要来自于文献[10,33].生物质燃烧源排放因子主要来自于文献[34,35],如表3所示.

表1 工业面源燃烧源大气主要污染物排放因子(白银)¹⁾

Table 1 Emission factors of major criteria air pollutants for industrial combustion sources (Baiying)

燃烧源类型	活动水平	NO _x	VOCs	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	NH ₃
焦炭	使用量	4.80	0.03	6.60	0.29	0.14	0.00
煤炭	使用量	4.00	0.03	15.00	1.61	0.74	0.01
原油	使用量	5.09	0.09	0.86	1.60	0.06	0.13
汽油	使用量	16.70	0.09	0.04	0.25	0.13	0.13
柴油	使用量	9.62	0.12	0.60	0.50	0.50	0.13
燃料油	使用量	5.84	0.09	0.78	0.10	0.31	0.13
天然气	使用量	1.76	0.29	0.35	0.24	0.17	0.00

1) 天然气排放因子单位为 g·m⁻³,其他燃烧源排放因子单位为 g·kg⁻¹

表2 工业非燃烧过程源大气主要污染物排放因子(白银)¹⁾

Table 2 Emission factors of major criteria air pollutants for industrial non-combustion sources (Baiying)

工艺过程	活动水平	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃
酒精	产量	—	—	—	—	—	218.25	—
炼焦	产量	2.01	0.02	0.64	8.77	5.20	2.96	—
塑料制造	产量	—	—	—	—	—	2.20	0.09
水泥制造	产量	—	—	—	42.63	12.86	0.18	2.10
炼钢	产量	—	—	9.00	14.68	10.50	0.20	—
铝制品	产量	—	—	—	2.63	2.08	—	—
硫酸生产	产量	7.00	—	—	—	—	—	—
铁合金生产	产量	—	—	—	3.61	2.79	—	—
合成橡胶	产量	—	—	—	—	—	7.17	—
有色金属生产	产量	48.32	—	—	—	—	—	—

1) 酒精排放因子单位为 kg·m⁻³,其他为 g·kg⁻¹; “—”表示该排放源不排放该类污染物

表3 生物质燃烧源大气主要污染物排放因子(白银)/g·kg⁻¹

Table 3 Emission factors of major criteria air pollutants for biomass combustion sources (Baiying)/g·kg⁻¹

燃烧方式	作物种类	活动水平	SO ₂	NO _x	NH ₃	CO	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}
室内燃烧	玉米	秸秆焚烧量	1.33	0.83	0.68	56.60	7.34	7.39	6.87
	小麦	秸秆焚烧量	2.36	0.51	0.37	171.70	9.37	8.86	8.24
露天燃烧	玉米	秸秆焚烧量	0.44	4.30	0.68	53.00	10.40	11.95	11.71
	小麦	秸秆焚烧量	0.85	3.31	0.37	59.60	7.48	7.73	7.58

1.2.3.3 兰州辖区内排放因子及活动水平的获取

工业如电力、热力生产和供应业以及制造业中 CO、VOCs 和 NO_x 排放因子主要参照相关技术手册,如表4所示,其中煤炭燃烧产生的 SO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 排放量根据物料衡算法进行计算,其余污染物排放因子见文献[27~29,32~33,35~36].民用源

各类污染物排放因子来自于文献[10],如表5所示.机动车尾气排放因子由基准排放因子结合实际情况修正获得,非道路移动源的排放因子参考相关技术手册,如表6所示.

兰州辖区内活动水平数据来自于文献[17~19].

表4 电力、热力生产和供应业燃烧大气主要污染物排放因子(兰州)¹⁾

Table 4 Emission factors of major criteria air pollutants for combustion sources in electric power and heat production supply industries (Lanzhou)

行业	燃料类型	活动水平	燃烧设备	CO	NO _x	SO ₂	VOCs	PM _{2.5}	PM ₁₀
电力生产	煤炭	使用量	煤粉炉	2.00	装机容量	物料衡算	0.04	物料衡算	物料衡算
	天然气	使用量	燃气锅炉	1.30	4.10	—	0.02	0.03	0.03
热力生产和供应	煤炭	使用量	煤粉炉	2.00	8.85	物料衡算	0.18	物料衡算	物料衡算
	天然气	使用量	燃气锅炉	1.30	4.10	—	0.18	—	—

1) NO_x 排放因子以 NO₂ 计,下同;电力生产和供应业 NO_x 排放因子与装机容量大小有关,≤100 MW 取 8.96,100~300 MW 取 8.19,≥300 MW 取 7.21;气体燃料天然气排放因子单位是 g·m⁻³,固体燃料煤炭单位为 g·kg⁻¹; “—”表示该类排放源不排放该类污染物

表 5 民用源燃烧大气主要污染物排放因子(兰州)¹⁾

Table 5 Emission factors of major criteria air pollutants for civil sources (Lanzhou)

燃料类型	活动水平	CO	NO _x	SO ₂	VOCs	PM ₁₀	PM _{2.5}	NH ₃
无烟煤	使用量	69.90	1.10	5.00 (St,d*)	1.80	2.20	1.40	0.820
烟煤	使用量	140.10	1.60	5.00 (St,d*)	4.00	13.50	10.80	0.820
天然气	使用量	1.30	1.46	0.18	0.088	0.24	0.24	0.321
液化石油气	使用量	0.42	0.88	0.18	0.088	0.17	0.17	—
柴油	使用量	—	3.21	3.00	0.093	0.50	0.50	0.143

1) SO₂ 的排放因子是以燃料的干燥基全硫分含量(St,d*)形式表示;“—”表示该排放源不排放该类污染物;天然气排放因子单位为g·m⁻³,其他燃烧源排放因子单位为g·kg⁻¹

表 6 非道路移动源大气主要污染物排放因子(兰州)

Table 6 Emission factors of major criteria air pollutants for non-road mobile sources (Lanzhou)

机械类型	活动水平	排放标准	功率/kW	单位	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs
工程机械和农业机械	保有量	国 II	<37	g·kg ⁻¹	30.00	26.00	3.80	3.61	5.20
		国 II	37~75	g·kg ⁻¹	30.40	21.70	1.74	1.65	5.65
		国 II	75~130	g·kg ⁻¹	28.60	23.80	1.43	1.36	4.76
		国 II	≥130	g·kg ⁻¹	30.00	17.50	1.00	0.95	5.00
农用运输车(三轮)	保有量	国 II		g·km ⁻¹	0.87	0.75	0.05	0.05	0.16
农用运输车(四轮)	保有量	国 II		g·km ⁻¹	3.14	2.06	0.13	0.12	0.75
铁路内燃机车	保有量	国 I 前		g·kg ⁻¹	55.74	8.29	2.07	1.97	3.11
飞机	保有量	国 I 前		g·kg ⁻¹	16.29	9.14	0.54	0.53	2.68

1.2.3.4 清单网格化

利用 ArcGIS 对兰-白(兰州和白银)城市群地区 7 种(类)大气污染物的排放量进行网格化处理,分别通过人口密度、夜间灯光和土地利用数据分别将生活源、工业源、农业源排放量分配到分辨率为 1 km×1 km 的网格中,其中人口密度数据和土地利用类型数据来源于 CIESIN(center for international earth science information network),夜间灯光数据来源于 NOAA (national oceanic and atmospheric

administration) 并分析其空间分布特征^[38,39].

2 结果与讨论

兰(2015 年)-白(2016 年)城市群年排放量计算结果如表 7,CO 排放量最大为 561 770.46 t, NH₃ 排放量最小为 45 292.16 t. 经过计算本次统计工业非燃烧过程源排放量最大,7 种(类)污染物一共为 586 205.95 t, VOCs 逸散源最小为 2 330.80 t, NH₃ 的人为面源排放源最大为 34 251.50 t.

表 7 兰(2015 年)-白(2016 年)城市群地区要大气污染物的年排放量¹⁾/t

Table 7 Emission amounts of major criteria air pollutants in Lan(2015)-Bai(2016) metropolitan area/t

一级排放源	二级排放源	NO _x	SO ₂	VOCs	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	NH ₃
点源	工业点源燃烧源	44 163.53	61 825.94	17 005.00	83 863.50	65 903.40	18648.20	55.88
	生活燃烧源	4 315.40	7 002.30	1 644.30	83 987.40	8 015.40	7 031.40	762.70
面源	工业面源燃烧源	44 071.17	26 569.40	1 084.45	45 603.00	18 156.59	8 027.88	295.03
	工业非燃烧过程源	95 451.70	37 646.80	31 057.65	126 198.20	211 256.80	75 792.8	8 802.00
	VOCs 逸散源	—	—	2 330.80	—	—	—	—
	NH ₃ 人为排放源	—	—	—	—	—	—	34 251.50
	扬尘源	—	—	—	—	183 830.40	74 497.45	—
线源	生物质燃烧源	1 157.41	1 004.73	6 541.89	59 882.34	6 609.19	4 784.93	500.05
	道路移动源	27 864.40	2 730.90	16 173.80	159 234.70	846.90	792.90	466.90
	非道路移动源	4 615.54	334.84	769.10	3 001.32	259.54	249.47	158.10
其他排放源		—	—	782.90	—	1 118.40	894.80	—
总计		221 639.15	137 114.91	77 389.89	561 770.46	495 996.62	190 719.83	45 292.16

1) “—”表示该类排放源不排放该类污染物

2.1 兰-白城市群网格化排放清单及其空间分布特征

图 1 为兰-白城市群网格化排放清单,从中可知,7 种(类)大气污染物中 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、PM₁₀、

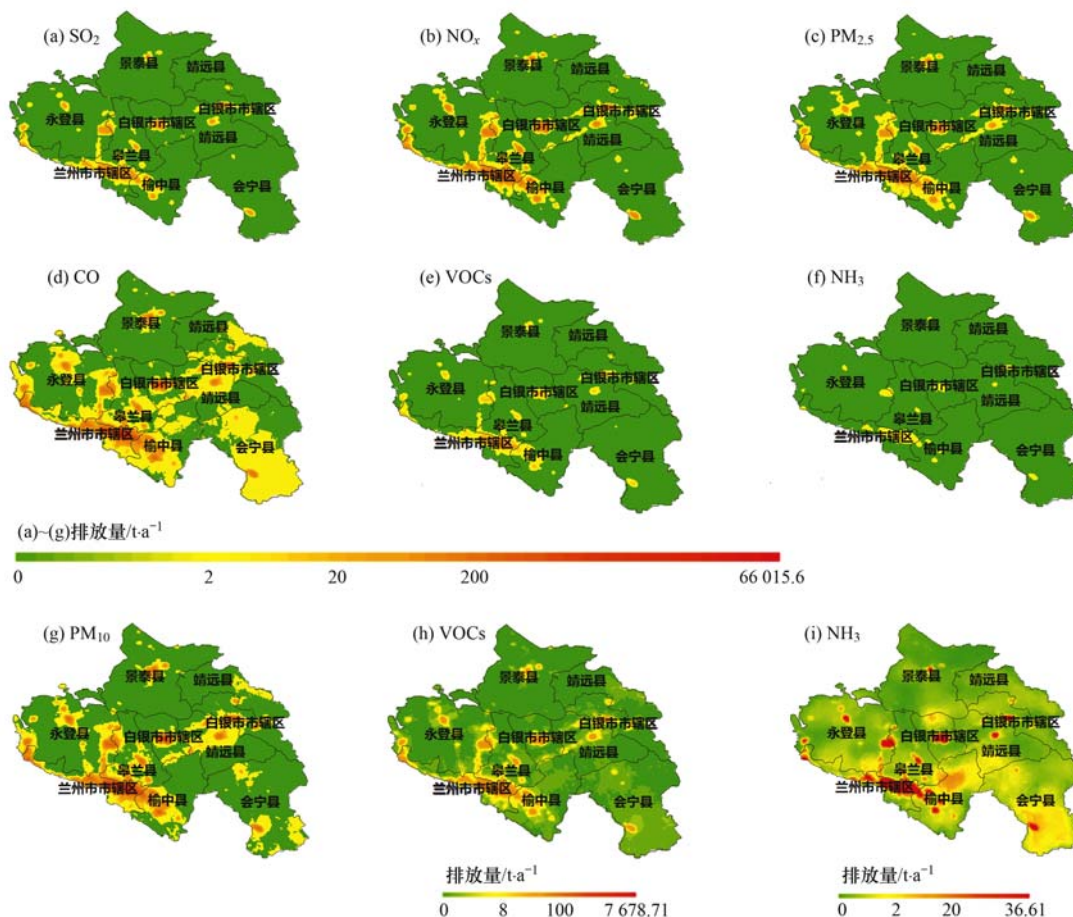
CO、VOCs 和 NH₃ 的排放大部分都集中在城区. 推测主要由于城区车流量较大、上下班高峰期间汽车制动停留时间较长,带来较严重的汽车尾气及行驶

过程中的扬尘排放. 根据甘肃省兰州生态环境监测中心近年的监测数据显示, 兰州市 PM_{10} 日均值多次高达到 $400 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 城区的高污染是由于城区人口聚集区分布有较多的人为源, 同时城区内存在一定规模的工业源. 兰州市城区地形较为特殊东西狭长, 南北两边被山脉围绕属于河谷地形, 而城关区、西固区、安宁区和七里河区属于河谷地形的中心, 盆地地形及常年静风逆温等不利的气象条件使得兰州城区排放的大气污染物难以经由大气扩散和稀释. 在红古区与永登县交界处及榆中县的部分地区也有较高的污染物排放, 推测与红古区分布有冶金企业的工业点源排放有关.

NH_3 的分布相较于其他常规大气污染物有所不同,

兰州城区内 NH_3 的分布仍较集中如西固区以及七里河区, 白银市城区内 NH_3 的排放量较其他大气污染物有明显下降. 白银区与景泰县的交界处、会宁县和兰州辖区内的榆中和永登等地区 NH_3 的分布较周边其他地区高, 这是由于 NH_3 的主要贡献源是氮肥施用和禽畜排放, 这些地区有大量耕地的存在, 带来较高的 NH_3 排放.

白银辖区内的靖远县北部由于地形较兰州辖区地势要开阔、工厂和车流量较小导致该区域 7 种 (类) 污染物排放都相对较小, 而白银辖区内的靖远县南部由于夹在白银市两大城区之间车流入流量均较大, 再之两大城区对其直接影响, 导致其较靖远县北部有较大的排放.



(a) ~ (g) 共用图例, (h) 和 (i) 分别为 (e) 和 (f) 缩小比例尺后的网格化清单

图1 兰(2015年)-白(2016年)城市群主要大气污染物网格化排放清单

Fig. 1 Gridded emission inventories of major criteria air pollutants in Lan(2015)-Bai(2016) metropolitan area

2.2 大气主要污染物排放源贡献占比及减排思路

2.2.1 兰-白城市群地区各类排放源的贡献占比及宏观减排建议

图2为兰(2015年)-白(2016年)城市群各类排放源贡献占比, 具体分析如下.

(1) NH_3 白银地区 NH_3 的主要贡献源是氮肥施用占 32.80%, 白银会宁县等地有大量的耕地, 这

些耕地的存在导致氮肥施用量较大; 第二, 牲畜养殖源占比为 31.68%, 白银地区牲畜养殖规模大, 根据 2016 年白银地区的数据羊年末存栏数为 189.41 万头, 禽类的年末存栏数为 480.93 万头, 规模较大禽畜养殖贡献了白银地区 NH_3 的较大排放. 兰州地区 NH_3 的主要贡献源为氮肥施用占 47.50%, 和白银地区类似兰州地区榆中县北部存在大量耕地, 使

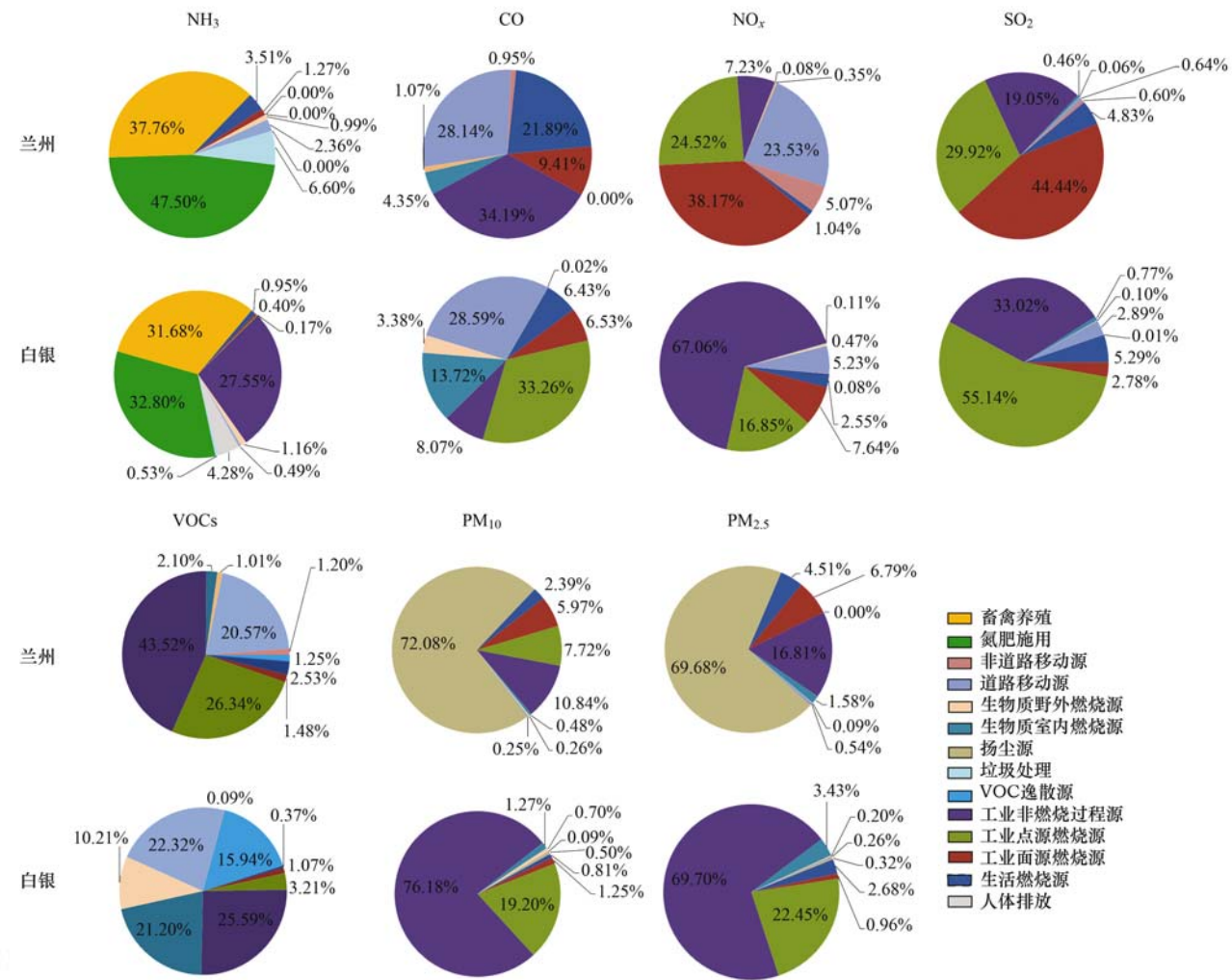


图2 兰(2015年)-白(2016年)城市群各类排放源贡献占比

Fig. 2 Contributions of major emission sources in Lan (2015)-Bai (2016) metropolitan area

氮肥施用成为 NH₃ 的主要贡献源,第二贡献源为禽畜养殖占 37.76%,整体来说兰-白城市群地区工业源对其贡献则相对较小,NH₃ 的防控无论是兰州市还是白银市都应重点做到合理高效使用氮肥及控制禽畜养殖过程中 NH₃ 的排放。

(2)CO 兰州地区与白银地区 CO 的主要贡献源不同,白银地区为工业点源燃烧源占 33.26%,兰州地区为工业非燃烧过程源为主要贡献源,占 34.19%。白银地区工业点源的比重较大主要体现在大量工业燃烧点源的存在,白银地区的工业点源燃烧源主要集中在热电行业。在白银地区占比第二、三位的分别是道路移动源 28.59% 和生物质室内燃烧源 13.72%。兰州地区 CO 占比第二的是道路移动源占 28.14%,兰州地区与白银地区相比,虽然道路移动源贡献占相差不大,但由于兰州整体 CO 排放量高于白银,因此兰州道路移动源的排放高于白银,推测与兰州地区车流量、汽车保有量都相对白银地区要大、近年来汽车保有量尤其是私家车保有量迅速增加密切相关。根据文献[40],2015 年兰州市机动

车总量就已达 797 948 辆,其中小型载客车 471 542 辆。白银 2016 年机动车总量达 375 764 辆其中小型客车 124 359 辆,大量机动车的存在使得高峰期堵车严重,导致较高的怠速排放。控制工业非燃烧过程源及机动车尾气源是兰州地区 CO 减排防控的重点,白银地区工业点源排放尤其是热电厂对于 CO 污染贡献较大存在一定的减排潜力,因此进一步控制点源有组织排放以及工艺过程排放,有效控制线源对于兰-白城市群 CO 污染防控有重要作用。

(3)NO_x 和 SO₂ 兰州地区 NO_x 和 SO₂ 的主要贡献源均为工业面源燃烧源,分别占到 38.17% 和 44.44%,其中电厂和热力生产行业占比较大。与兰州地区不同,白银地区 NO_x 和 SO₂ 的主要贡献源为工业非燃烧过程源和工业点源燃烧源分别占 67.06% 和 55.14%,由此可见白银地区 NO_x 的主要贡献来自该地区水泥制造、铝制品制造和硫酸工业工艺过程排放;而 SO₂ 则主要来自工业点源直接排放。兰州地区 NO_x 和 SO₂ 占比第二的贡献源均为工业点源分别占 24.52% 和 29.92%,白银地区 NO_x 第

二贡献源仍为工业点源燃烧源占 16.85%,而 SO_2 则为工业非燃烧过程源占 33.02%,对于两地来说,电力以及热力点源对于 NO_x 和 SO_2 排放贡献占比较高.所以整合电力供应不仅对于白银地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 有减排的作用,还对于兰-白城市群地区 NO_x 和 SO_2 的减排起着重要的作用.

从整体来看兰州与白银 7 种(类)污染物受工业非燃烧过程源以及工业面源燃烧源影响大,受生活燃烧源以及移动源影响相对较少,着力控制工业源是兰-白城市群大气污染联防联控工作的重点.

(4) VOCs 兰州地区 VOCs 的主要贡献源为工业非燃烧过程源占 43.52%,分析主要原因为兰州地区石油炼制、储存与加工、黑色金属冶炼、压延加工业、化学原料及化学制品制造业、橡胶及塑料制品业和纺织业等多个工业非燃烧过程都能产生 VOCs. 白银地区 VOCs 的贡献率分布相对均匀:主要贡献源除工业非燃烧过程源占 25.59% 外,还有道路移动源占 22.32%,可见对于白银汽车尾气导致的 VOCs 排放贡献也相对较大,推测白银地区汽车保有量的逐年上升导致道路移动源成为 VOCs 的主要贡献源之一.此外,白银地区生物质室内外燃烧源也分别达到了 21.20% 和 10.21%,说明玉米和小麦等秸秆燃烧以及其他室内外生物质燃烧源在白银地区对于 VOCs 的排放有较大贡献.由以上可见,兰州与白银地区的 VOCs 主要贡献源略有不同,因此两地区治理与减排 VOCs 侧重点也应不同,兰州地区应着重控制工业非燃烧过程源,而白银地区在控制工业非燃烧过程源的同时,还应考虑移动源的减排以及对生物质源燃烧的治理.

(5) $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 兰州地区 $\text{PM}_{2.5}$ (一次排放) 和 PM_{10} 的主要贡献源均来自扬尘源分别占 69.68% 和 72.08%,这不仅与该地区黄土高坡的地理环境及较干旱的气象条件相关,还和近年来城市化的快速进程导致的道路扬尘、施工扬尘有关,占比第二的均为工业非燃烧过程源分别占 16.81% 和 10.84%,所涉及的行业有黑色金属冶炼、有色金属冶炼、非金属矿物制品业以及农副产品加工业,这与兰州地区存在较多的冶炼企业以及其他相关工业面源有关.白银地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的主要贡献源为工业非燃烧过程源分别占到了 69.70% 和 76.18%,与兰州地区不同白银地区的非燃烧过程源主要来自炼焦、水泥制造行业.兰州地区 PM_{10} 第三贡献源(占 7.72%)与白银地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的第二贡献源(分别占 22.45% 和 19.20%)一样均为工业点源,其中兰州地区的铝业以及钢铁行业点源对于 PM_{10} 贡献较大,白银地区大型电厂对于 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放贡献较

大,这些电厂的长期存在,对于该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放的影响是长期性的,因此淘汰落后电厂,整合优质高效电力供应或能源结构改造、采用清洁能源也许是白银地区颗粒物减排及改善空气质量的最终出路.对于兰州地区除了整合优质电力,采用清洁能源外,还可通过人工干预措施如城市绿化、人工洒水等控制扬尘,以及减少工业排放是治理颗粒物的基本思路.

2.2.2 兰-白城市群地区重要排放源贡献差异及减排重点

图 3 为兰-白城市群与白银、兰州排放源贡献柱形堆积比较,以辅助分析排放源的贡献差异.对 NO_x 而言兰州地区工业非燃烧过程源较白银及兰-白城市群低,而工业面源燃烧源较兰-白城市群高,所以兰州市 NO_x 的防治重点在于工业面源燃烧源即煤炭、焦炭、原油和天然气的工业燃烧排放.而对于 SO_2 整个兰-白城市群地区应重点进行工业源点源、面源减排.对于 VOCs 白银地区生物质燃烧贡献明显高于兰州地区,因此白银地区 VOCs 的减排首先考虑对生物质燃烧源的管控,其次考虑工业非燃烧过程源和道路移动源的减排.而兰州则主要通过控制工业非燃烧过程源、工业点源及移动源来减排 VOCs.对于 CO ,白银地区受工业非燃烧过程源影响较小,但兰州地区受工业非燃烧过程源影响较大贡献源占比达到了 34.19%,这与兰州地区和白银地区工业类型以及工厂数目、规模有关.兰州地区 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 比白银明显受扬尘源影响,所以兰州地区 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 两类颗粒物防治应该严格管控工地扬尘及工业粉尘,并采取人工措施如绿化降低自然扬尘及通过机动车限行等管控降低尾气颗粒物排放.白银地区则主要应通过控制工业非燃烧过程源来防治 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 的污染.对于 NH_3 而言控制氮肥合理科学使用及治理禽畜养殖排放应为兰-白城市群地区 NH_3 防治的重点.

2.3 本清单与国内其他清单比较

2.3.1 本清单与清华 MEIC 清单比较

为了验证该清单的准确性以及有效性,将本清单与清华大学 2016 年 MEIC 清单数据进行了对比^[41~43](如图 4),在排放总量水平上,本清单 CO 与 MEIC 清单差异相对较小,相对偏差为 1.91%.其他大气污染物总量存在一定差异,VOCs 和 NH_3 相对偏差分别为 -14.19% 和 22.87%,其他污染物相对偏差在 30.10%~67.47% 之间.推断差异较大的原因除年际及分辨率差异外,没有使用本地化排放因子,以及活动水平数据存在偏差同样使两个清单个别污染物相对偏差较大. MEIC 清单的分辨率为

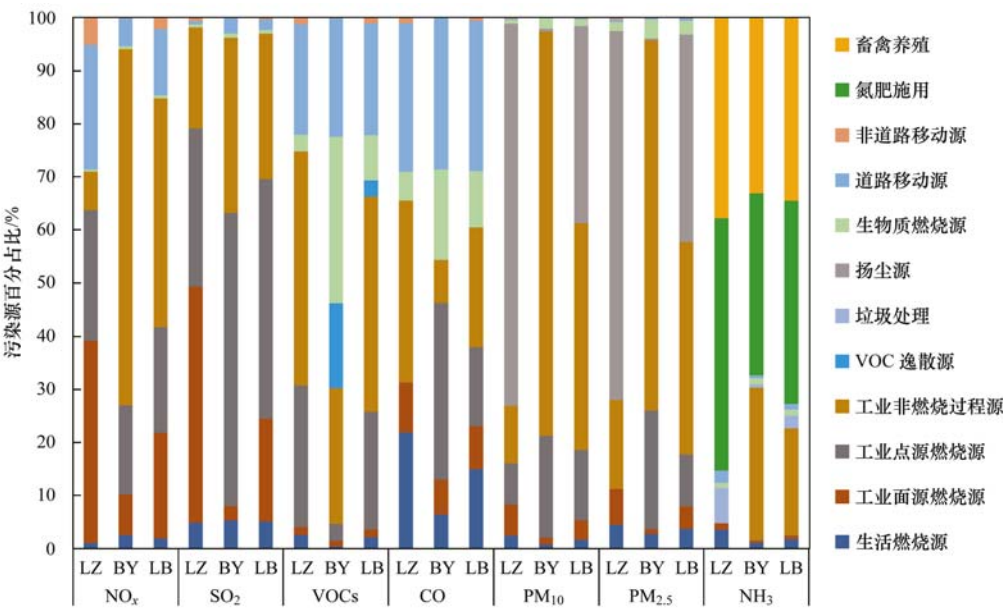
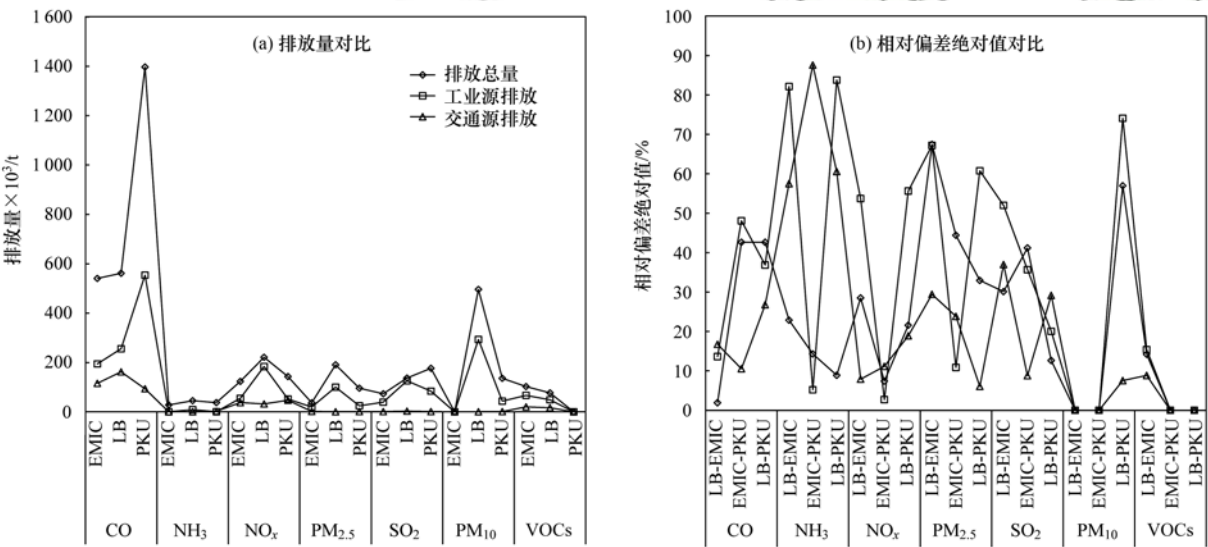


图3 兰州辖区 (LZ)、白银辖区 (BY) 及兰-白城市群 (LB) 排放源贡献占比比较
Fig. 3 Comparison of emission sources in Lanzhou District (LZ) with emission sources in Baiyng District (BY) and Lan-Bai metropolitan area (LB)



LB 代表本清单, MEIC 代表清华大学清单, PKU 代表北京大学清单

图4 本清单与北大、清华清单对比

Fig. 4 Comparing this inventory with the Peking and Tsinghua University's inventories

0.25°×0.25°即28 km×28 km, MEIC 团队经过相关验证得出该分辨率是现有算法下最科学的分辨率^[44], 但是对某一区域的 MEIC 清单尤其是较小的地区来讲, 由于 MEIC 清单网格较大, 对于边界不规则的区域, 总量的提取会有一些差异, 而本清单分辨率约为1 km×1 km, 两个清单存在分辨率差异. 此外, 还对工业源以及交通源进行了对比, 对于工业源: CO 和 VOCs 的相对偏差相对较小分别为13.63%和-15.38%, 其他污染物的工业源相对偏差较大, 其中 NH₃ 的差异达82.15%, 推断这与工业源计算过程中活动水平数据缺乏有直接关系. 对于交通源: VOCs 和 NO_x 与 MEIC 清单相比差异

较小, 相对偏差为-7.89%和-8.85%, CO 的相对偏差也较低为16.71%, 但 NH₃ 的相对偏差较大为57.48%, 对于 PM_{2.5} 工业源和交通源的排放总量, 本清单与 MEIC 清单相差较大, 分析与两清单的计算方法以及排放因子的差异有关. 清华 MEIC 清单由于没有可以直接获取的 PM₁₀ 数据, 所以 PM₁₀ 只与北大清单进行了比较, 从2.3.2节可知, 交通源排放两清单差异较小, 这与交通源数据较为公开有很大相关性.

2.3.2 本清单与北大清单对比

本清单与北大2014年清单数据对比见图4, 结果如下: 从排放总量看, CO 与本清单相差较大, 相

对偏差达 -42.64%,且对于 CO 的排放总量北大清单与清华清单同样相差较大,相对偏差为 44.18%。本清单与北大清单 PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的差异分别为 56.97% 和 32.94% 差距较大,工业源方面北大清单与本清单差异性较大, NH_3 和 NO_x 相对偏差均达到 50.00% 以上,尤其是 NH_3 达到了 83.76%,因此本清单与北大清单工业源排放 NH_3 相差较大,分析以上差异原因,推测是计算过程使用排放因子、计算方法以及分辨率综合作用的结果,交通源整体较接近,这与交通源算法固定,数据来源可靠有关。

由清单比较热图可见(图 5),对于 7 种(类)污染物排放量,CO 的 3 个排放清单之间相差较大; NO_x 、 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 和 NH_3 的 3 个排放清单之间则相差较小; PM_{10} 本清单排放量大于北大清单; $VOCs$ 本

清单与 MEIC 清单基本一致。其次,交通源方面,除 CO 略高于其他两类清单外 3 个清单之间偏差较小。最后,工业源方面,北大清单高于本清单及 MEIC 清单, PM_{10} 本清单高于北大清单,其他污染物 3 个排放清单之间偏差较小。经分析清单排放量的差异,主要原因有 3 个方面,首先本清单与其他两类清单存在年份差异,导致了年际变化带来的差异。其次,本清单与其他两类清单存在分辨率的差异,以本清单与 MEIC 清单比较为例分辨率相差将近 30 倍,在相对小尺度的兰州地区不确定性较大。最后,排放因子的差异也会导致 3 个清单排放量的差异,由于本研究热图采用比例尺区间较大,使得一些偏差较大的对比在热图中并不突出,这方面的工作将会在接下来的研究工作中进行改进。

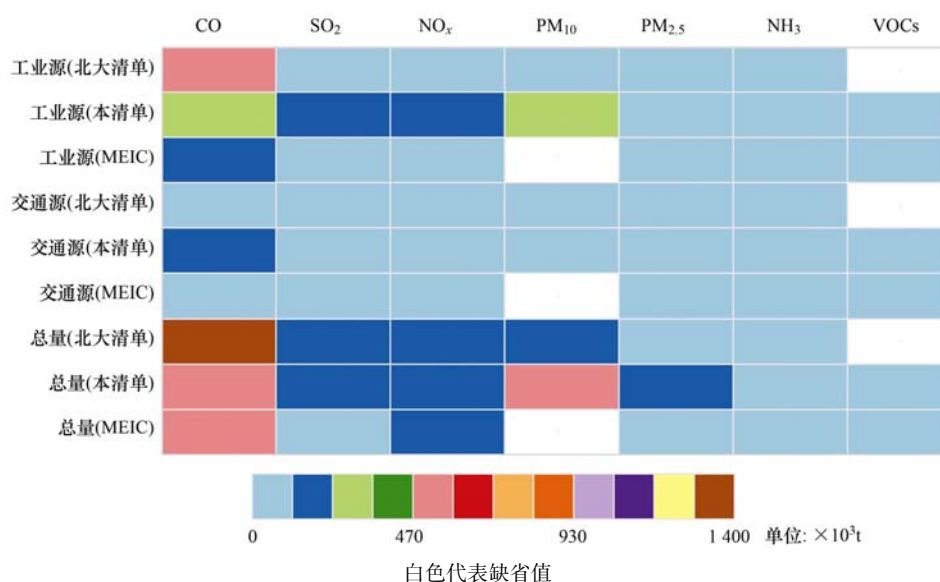


图 5 本清单与北大清单、清华 MEIC 清单的比较热图

Fig. 5 Compare heat map of this inventory with the Peking University inventory and Tsinghua MEIC inventory

2.4 不确定性分析

在清单的建立过程中,由于涉及排放量计算过程中各类数据来源的多样性、替代性以及没有本地化的排放因子等原因,所建立的清单会存在一定的不确定性^[45,46]。本研究利用蒙特卡洛方法对清单的不确定性进行了分析。此外还对导致不确定性的具体原因也进行了详细地讨论。

2.4.1 蒙特卡洛分析

利用蒙特卡洛方法分析不确定性,其置信区间设置为 95%,变异系数均设为 0.1 的情况下模拟 10 000 次,结果见图 6。7 种(类)污染物排放量均呈正态分布,具体分析如下。

利用蒙特卡洛方法^[47~49]模拟得到 CO、 NH_3 、 NO_x 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 $VOCs$ 的年排放总量范围分别为 462 960 ~ 649 390、31 130 ~ 58 640、173 410 ~ 264 090、371 830 ~ 613 310、146 370 ~ 231 080、

110 500 ~ 170 350 和 63 410 ~ 92 880 t。其中 NH_3 的不确定性最大为: -31% ~ 30%,其他污染物的不确定性从大到小依次为: PM_{10} - 25% ~ 24%, SO_2 - 19% ~ 24%, $PM_{2.5}$ - 23% ~ 21%, NO_x - 22% ~ 19%, $VOCs$ - 18% ~ 20%, CO - 18% ~ 16%。根据文献[20,21]得到兰(2015 年)-白(2016 年)城市群 NO_x 年排放量为 143 900 t,略低于模拟结果排放量范围, SO_2 排放量为 171 600 t 基本符合模拟结果,由此可见,蒙特卡洛模拟分析表明本清单整体可信度较高。

2.4.2 不确定性原因分析

(1)本清单的活动水平数据主要来自于年鉴以及发展公报,市级年鉴缺乏的相关数据是按照人口和耕地等比例对城市辖区内的数据进行分配的,这就使该类数据有一定的不确定性,从而带来清单的某些不确定性。

(2)由于点源数据公开度低,以及所获取数据

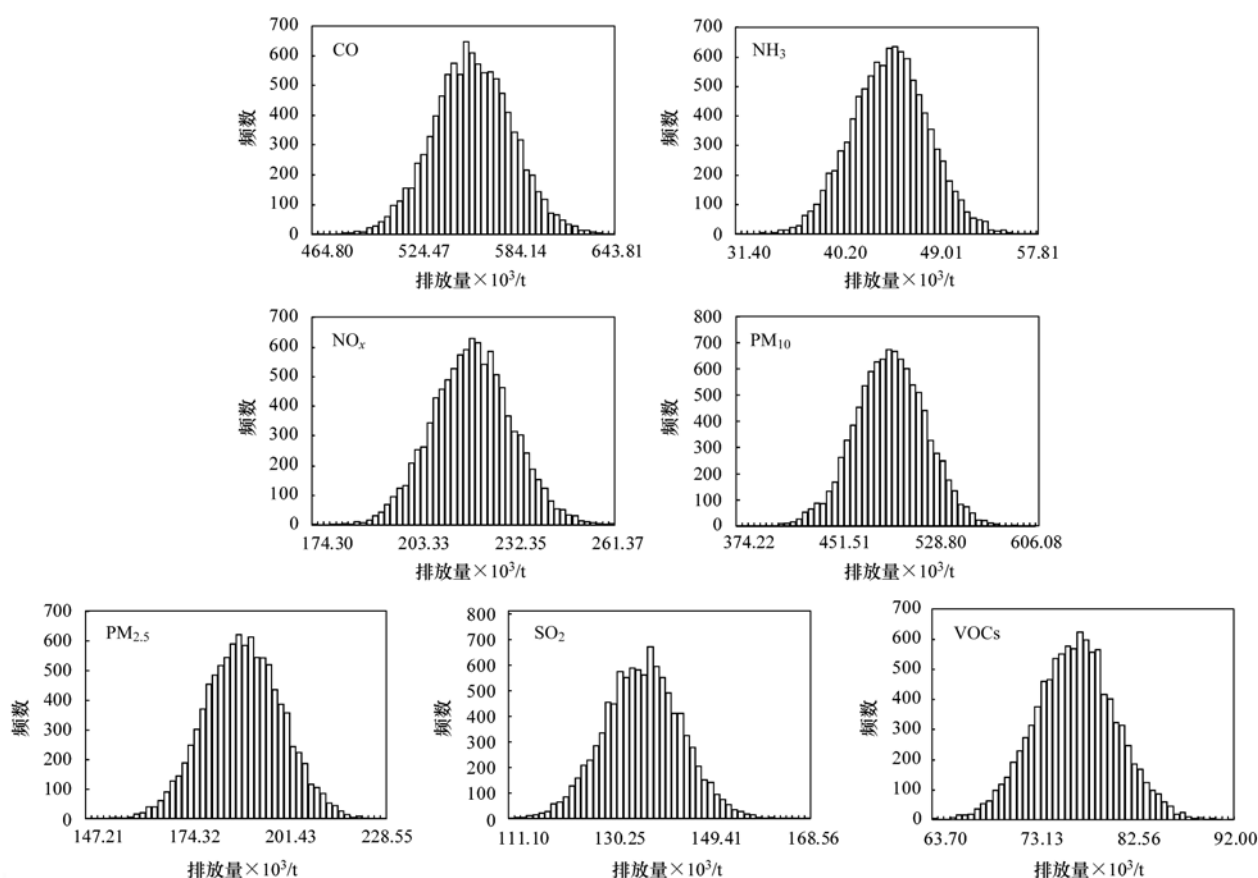


图 6 兰(2015 年)-白(2016 年)城市群大气污染物排放量频数分布

Fig. 6 Frequency distributions of emissions for major criteria air pollutants in Lan (2015)-Bai (2016) metropolitan area

和厂区地理位置对应关系的不确定性等因素导致了清单点源部分一定的不确定性。

(3) 本清单由于本地化排放因子的缺乏造成本清单所得某一类污染物或部分污染物的排放量与本地实际情况有所差异。

3 结论

(1) 兰(2015 年)-白(2016 年)城市群 7 种(类)主要大气污染物 NO_x 、 NH_3 、 VOCs 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的年排放总量分别为 2.22×10^5 、 4.53×10^4 、 7.74×10^4 、 5.62×10^5 、 4.95×10^5 、 1.91×10^5 和 1.37×10^5 t; 其中工业非燃烧过程源是 NO_x 、 VOCs 、 PM_{10} 、 CO 和 SO_2 的主要贡献源, 分析主要由炼焦、原煤生产、水泥制造、炼钢、铝制品制造和铁合金生产等产业在兰-白城市群辖区内较广泛地分布所贡献; PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 受扬尘源影响较大; NH_3 的排放源贡献中, 氮肥的施用贡献占比最高, 为 37.07%, 其次为禽畜养殖的贡献占 33.44%, 与其他 6 种(类)污染物不同的是工业源对于 NH_3 排放的贡献相对较小。

(2) 兰-白城市群网格化清单的空间分布特征表明, NO_x 、 VOCs 、 PM_{10} 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的分布主

要集中在城区以内, 主要原因分析如下: 首先城区人口较为集中导致人为排放源的集中排放, 也使得汽车尾气以及汽车所带来的扬尘污染增加。其次, 兰-白城市群属于工业老区, 市区分布工厂较多, 这也导致城区污染较为集中, 再者兰州位于河谷地形的中心, 市区的大气污染扩散、稀释较难。此外, 由于 NH_3 的主要贡献源是氮肥的使用及禽畜排放, 所以除了市区外, 存在大量耕地的榆中县北部以及会宁县南部同样排放一定量的 NH_3 。

(3) 经分析兰-白城市群 7(种)类污染物的防控重点及减排建议如下: 首先对于兰州控制工业非燃烧过程源及机动车尾气源是 VOCs 、 NO_x 和 CO 的防控重点。此外, 还应加强兰州地区热电工业面源燃烧排放的控制, 淘汰落后电厂, 整合优质高效电力供应以应对兰州地区 NO_x 和 SO_2 污染。严格控制工地扬尘, 工业粉尘, 做好市政绿化, 适当增加地面湿度对于兰州市颗粒物防治意义重大。其次, 白银地区同样应重点控制工业非燃烧过程源, 对工艺过程产生的污染物严格管控, 对于 VOCs 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_x 污染有明显的减排效果。该地区工业点源排放存在一定的减排潜力, 尤其是 CO 和 SO_2 污染。 NH_3 的防控对于兰-白城市群来说, 要做到合理高效使用氮肥及控制禽畜养殖过程中 NH_3 的排放。最后对于兰-白

城市群来说,受大气水平输送影响,兰-白城市群大气污染联防联控十分必要,兰州地区道路移动源对于该地区 CO 、 NO_x 和 VOCs 有相当贡献,分别为:28.14%、23.53% 和 20.57%,对于白银地区也有一定的贡献,相应比例为 28.59%、5.23% 和 22.32%。因此,应该着力推行“一厂一策”严格控制工业非燃烧过程污染以及道路移动源,继续推行热电行业整合,淘汰落后电厂,使用清洁能源从源头控制污染。

(4)本清单与北大清单、清华 MEIC 清单对比发现:除少数污染物如 NO_x 外,其他污染物与北大、清华清单相比存在一定偏差,主要与分辨率、计算方法、排放因子、年际差异等的不确定性有关。但本清单分辨率较高($1\text{ km} \times 1\text{ km}$),对清华 MEIC($28\text{ km} \times 28\text{ km}$)、北大清单($111\text{ km} \times 111\text{ km}$)中兰-白城市群区域网格的 7 种(类)污染物清单是一种补充。

(5)蒙特卡洛不确定性分析,将置信区间设置为 95%,变异系数均设为 0.1 的情况下模拟 10 000 次,结果显示, CO 的不确定性最小达到了 -18%~16%,不确定最大的 NH_3 为 -31%~30%,蒙特卡洛模拟结果表明本清单整体可信度较高。

参考文献:

- [1] 潘月云,李楠,郑君瑜,等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2655-2669.
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [2] 李贝睿. 长株潭区域大气污染物排放源清单研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2016.
Li B R. Pollution sources emission inventory research of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [3] 闫东杰,苏航,黄学敏,等. 西安市人为源挥发性有机物排放清单及研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(2): 446-452.
Yan D J, Su H, Hu X M, *et al.* VOCs emission inventory of anthropogenic sources in Xi'an [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(2): 446-452.
- [4] 徐萍. 扬州市大气污染源排放清单建设研究[D]. 扬州:扬州大学, 2016.
Xu P. The research of an air pollutant emission inventory for Yangzhou[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [5] Zumkehr A, Hilton T W, Whelan M, *et al.* Global gridded anthropogenic emissions inventory of carbonyl sulfide [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **183**: 11-19.
- [6] 田贺忠,郝吉明,陆永琪,等. 中国氮氧化物排放清单及分布特征[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(6): 493-497.
Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q, *et al.* Inventories and distribution characteristics of NO_x emissions in China [J]. *China Environmental Science*, 2001, **21**(6): 493-497.
- [7] 郑君瑜,张礼俊,钟流举,等. 珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(5): 455-460.
Zheng J Y, Zhang L J, Zhong L J, *et al.* Area source emission inventory of air pollutant and its spatial distribution characteristics in Pearl River Delta[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(5): 455-460.
- [8] 朱佳雷,王体健,邓君俊,等. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 3045-3055.
Zhu J L, Wang T J, Deng J J, *et al.* An emission inventory of air pollutants from crop residue burning in Yangtze River Delta Region and its application in simulation of a heavy haze weather process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 3045-3055.
- [9] 李莉莉,王琨,姜珺秋,等. 黑龙江省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(9): 3280-3287.
Li L L, Wang K, Jiang J Q, *et al.* Emission inventory and the temporal and spatial distribution of pollutant for open field straw burning in Heilongjiang province [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(9): 3280-3287.
- [10] 张凯. 中国西部兰州地区主要大气污染物网格化排放清单及其空间分布特征[D]. 兰州:兰州大学, 2017.
Zhang K. Gridded emission inventories and spatial distribution characteristics of major air pollutants in Lanzhou, western China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [11] 新一批大气污染源清单编制指南发布[J]. 化学工程师, 2015, **29**(1): 27.
- [12] 白银市统计局. 白银市统计年鉴 2017[M]. 白银:白银市统计局, 2017.
- [13] 《甘肃发展年鉴》编委会. 甘肃发展年鉴 2018[M]. 北京:中国统计出版社, 2018.
- [14] 《甘肃发展年鉴》编委会. 甘肃发展年鉴 2017[M]. 北京:中国统计出版社, 2017.
- [15] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2017[M]. 北京:中国统计出版社, 2017.
- [16] 中国机械工业年鉴编辑委员会,中国工程机械工业协会. 中国工程机械工业年鉴 2017[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.
- [17] 兰州市统计局. 兰州统计年鉴 2016[M]. 北京:中国统计出版社, 2016.
- [18] 《甘肃发展年鉴》编委会. 甘肃发展年鉴 2016[M]. 北京:中国统计出版社, 2016.
- [19] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2015[M]. 北京:中国统计出版社, 2015.
- [20] 兰州市环保局. 兰州市 2015 年环境状况公报[R]. 兰州:兰州市环保局, 2016.
- [21] 白银市环保局. 2016 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 白银:白银市统计局, 2017.
- [22] 张雪. 抚顺市大气污染物排放清单建立研究[D]. 沈阳:辽宁大学, 2018.
Zhang X. Establishment of emission inventory of air pollutant sources in Fushun[D]. Shenyang: Liaoning University, 2018.
- [23] 柯伯俊. 四川省大气污染源排放清单研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
Ke B J. Research of an air pollutant emission inventory for Sichuan[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [24] Li B J, Zhou S L, Wang T, *et al.* An improved gridded polycyclic aromatic hydrocarbon emission inventory for the lower reaches of the Yangtze River Delta region from 2001 to 2015 using satellite data[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, **360**: 329-339.
- [25] 张礼俊,郑君瑜,尹沙沙,等. 珠江三角洲非道路移动源排

- 放清单开发[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 886-891.
- Zhang L J, Zheng J Y, Yin S S, *et al.* Development of non-road mobile source emission inventory for the Pearl River Delta[J]. Environmental Science, 2010, **31**(4): 886-891.
- [26] Wang X Y, Yu L, Li Y, *et al.* A unit-based emission inventory of SO₂, NO_x and PM for the Chinese iron and steel industry from 2010 to 2015 [J]. Science of the Total Environment, 2019, **676**: 18-30.
- [27] 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)[R]. 北京: 环境保护部科技标准司, 2014.
- [28] 环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行)[R]. 北京: 环境保护部科技标准司, 2014.
- [29] 环境保护部. 扬尘源颗粒物排放清单编制技术指南(试行)[R]. 北京: 环境保护部科技标准司, 2014.
- [30] 卞雅慧, 范小莉, 李成, 等. 广东省非道路移动机械排放清单及不确定性研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(6): 2167-2178.
- [31] Wang F, Li Z, Zhang K S, *et al.* An overview of non-road equipment emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2016, **132**: 283-289.
- [32] 环境保护部. 非道路移动污染源排放清单编制技术指南(试行)[R]. 北京: 环境保护部科技标准司, 2014.
- [33] 环境保护部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[R]. 北京: 环境保护部科技标准司, 2014.
- [34] Yang S J, He H P, Lu S L, *et al.* Quantification of crop residue burning in the field and its influence on ambient air quality in Suqian, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(9): 1961-1969.
- [35] 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: 环境保护部科技标准司, 2014.
- [36] 童克难. 《大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南(试行)》等五项技术指南文件解读[N]. 中国环境报, 2015-01-13(002).
- [37] 贺克斌. 城市大气污染物排放清单编制技术手册[R]. 北京: 清华大学, 2015.
- [38] Liu H J, Tian H Z, Hao Y, *et al.* Atmospheric emission inventory of multiple pollutants from civil aviation in China: Temporal trend, spatial distribution characteristics and emission features analysis[J]. Science of the Total Environment, 2019, **648**: 871-879.
- [39] 韩向娣, 周艺, 王世新, 等. 夜间灯光遥感数据的 GDP 空间化处理方法[J]. 地球信息科学学报, 2012, **14**(1): 128-136.
- Han X D, Zhou Y, Wang S X, *et al.* GDP spatialization in China based on nighttime imagery [J]. Journal of Geo-Information Science, 2012, **14**(1): 128-136.
- [40] 兰州市公安局. 兰州市 2015 年机动车统计报表[R]. 兰州: 兰州市公安局, 2015.
- [41] 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.
- [42] Puliafito S E, Allende D G, Castesana P S, *et al.* High-resolution atmospheric emission inventory of the argentine energy sector. Comparison with edgar global emission database [J]. Heliyon, 2017, **3**(12), doi: 10.1016/j.heliyon.2017.e00489.
- [43] Dotse S Q, Dagar L, Petra M I, *et al.* Evaluation of national emissions inventories of anthropogenic air pollutants for Brunei Darussalam[J]. Atmospheric Environment, 2016, **133**: 81-92.
- [44] Li M, Zhang Q, Kurokawa J, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2015, **15**(23): 34813-34869.
- [45] Jiang W Y H, Huang T, Mao X X, *et al.* Gridded emission inventory of short-chain chlorinated paraffins and its validation in China[J]. Environmental Pollution, 2017, **220**: 132-141.
- [46] Yu X N, Li S, Hou X H, *et al.* High-resolution anthropogenic ammonia emission inventory for the Yangtze River Delta, China [J]. Chemosphere, 2020, **251**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126342.
- [47] Cai B F, Cui C, Zhang D, *et al.* China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis [J]. Applied Energy, 2019, **253**, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113579.
- [48] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 305-312.
- Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China[J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 305-312.
- [49] 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 等. 我国 PCDD/Fs 网格化大气排放清单[J]. 环境科学, 2020, **41**(2): 510-519.
- Chen L L, Huang T, Chen K J, *et al.* Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(2): 510-519.

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses: A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage Polymers to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinoide</i> s Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)