

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌	(5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红	(5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉	(5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧	(5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东	(5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明	(5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲	(5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊	(5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波	(5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志	(5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平	(5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波	(5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标	(5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁	(5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄	(5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭	(5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天	(5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓	(5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博	(5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明	(5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心功, 刘玉荣, 李晶, 周志峰	(5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强	(5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏	(5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊	(5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐	(5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅	(5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫	(5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军	(5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学	(5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博	(5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清	(5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐	(5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军	(5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅	(5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹	(5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润	(5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳	(5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发	(5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源	(5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝	(5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强	(5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧	(5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正	(5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水	(5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水	(5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠	(5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲	(5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水	(5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠	(5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田	(5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录		(5740)
《环境科学》征订启事(5343)		
《环境科学》征稿简则(5439)		
信息(5595, 5619, 5638)		

四川省人为源大气污染物排放清单及特征

周子航^{1,2}, 邓也¹, 谭钦文¹, 吴柯颖¹, 杨欣悦¹, 周小玲¹

(1. 成都市环境保护科学研究院, 成都市大气科研重点实验室, 成都 610072; 2. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 在收集四川省各城市人为污染源活动水平数据基础上, 基于自下而上和自上而下结合的清单构建方法, 选取排放因子并结合 GIS 技术, 建立了该地区 2015 年 1 km × 1 km 人为源大气污染物排放清单。结果表明, 2015 年四川省人为源 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、VOCs 和 NH₃ 排放量分别为 444.9 × 10³、820.0 × 10³、3 773.1 × 10³、1 371.6 × 10³、537.5 × 10³、28.7 × 10³、53.1 × 10³、923.6 × 10³ 和 988.0 × 10³ t。电厂和工业锅炉等燃煤排放贡献了 95% 以上的 SO₂, 移动源、化石燃料燃烧源和工艺过程源分别贡献了 54%、23% 和 20% 的 NO_x, 以钢铁和建材制造为主的工艺过程源分别贡献了 20% 的 PM₁₀ 和 34% 的 PM_{2.5}, 以道路扬尘为主的扬尘源分别贡献了 60% 的 PM₁₀ 和 35% 的 PM_{2.5}, 生物质燃烧分别贡献了 33% 的 BC 和 51% 的 OC, 以机械加工、建筑装饰、电子设备制造、印刷和家具等行业为主的溶剂使用源贡献了 46% 的 VOCs, NH₃ 主要来自畜禽养殖和氮肥施用等农业部门排放, 分别占总排放量的 70% 和 25%。污染物空间分布结果显示, 四川省各项大气污染物主要集中分布于人口最为密集, 农业和工业均较为发达的四川盆地和攀枝花部分区域, 其中, 以成都、德阳和绵阳为代表的成都平原城市群为四川盆地内的主要排放高值区域。所建立的排放清单存在一定不确定性, 后续研究中应针对活动水平数据获取的不足开展数据收集工作, 加强排放贡献较大典型污染源的排放因子本地化研究工作, 逐步完善四川省大气污染物排放清单, 为四川省复合型大气污染研究和防治提供科学支撑。

关键词: 排放清单; 人为源; 四川省; 大气污染物; 排放特征; 空间分布

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5344-15 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804109

Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province

ZHOU Zi-hang^{1,2}, DENG Ye¹, TAN Qin-wen¹, WU Ke-ying¹, YANG Xin-yue¹, ZHOU Xiao-ling¹

(1. Chengdu Key Laboratory of Air Pollution Research, Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072, China;

2. College of Architecture & Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on anthropogenic source activity data and emission factors for the Sichuan Province, the 1 km × 1 km-gridded atmospheric air pollutant emission inventory of 2015 was developed in combination with GIS technology and the combined “bottom-up” and “top-down” construction method. The results show that the total emission of SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, PM_{2.5}, BC, OC, VOCs, and NH₃ in Chengdu is 444.9 × 10³, 820.0 × 10³, 3 773.1 × 10³, 1 371.6 × 10³, 537.5 × 10³, 28.7 × 10³, 53.1 × 10³, 923.6 × 10³, and 988.0 × 10³ t, respectively. Power plants and other industrial combustion boilers contribute more than 95% of the SO₂ emissions. Mobile, fossil fuel combustion, and industrial process sources contribute 54%, 23%, and 20% of the NO_x emissions, respectively. The industrial process of steel production and building materials manufacturing contribute 20% PM₁₀ of the emissions and take up 34% PM_{2.5} of the emissions. Fugitive dust and road fugitive dust contributes 60% PM₁₀ and 35% PM_{2.5} of the emissions, respectively. Biomass combustion contributes 33% BC and 51% OC of the emissions, respectively. The solvent use of mechanical processing, building decoration, electronic equipment manufacturing, and printing and furniture industry contribute 46% of the VOCs of the emissions. The NH₃ emissions mainly originate from the sources of livestock feeding and nitrogen fertilizers, accounting for 70% and 25% of the NH₃ emissions, respectively. The spatial distribution of the emissions shows that high emissions are mainly distributed in the most densely populated, agricultural, and industrial more developed areas in Panzhihua and the Sichuan Basin. The urban agglomerations of the Chengdu Plain, represented by Chengdu, Deyang, and Mianyang, are the areas with emission concentration in the Sichuan Basin. The emissions inventory in this study has uncertainties. More fundamental studies on activity data should be conducted and the emission factors of typical emission sources should be further localized to improve the emission inventory and prevention and control of complex air pollution in the Sichuan Province and provide scientific support.

Key words: emission inventory; anthropogenic sources; Sichuan Province; air pollutant; emission characteristics; spatial allocation

大气污染源排放清单是污染源在一定时间跨度和空间区域内排放到大气中的各种污染物的数量列表^[1]。在支持空气质量管理决策的技术体系中, 构建准确、完整和更新及时的大气污染物排放清单是识别污染来源的基础环节, 也是制订污

染控制策略的根本依据, 同时也对大气污染形成

收稿日期: 2018-04-14; 修订日期: 2018-05-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201506); 成都市大气专项重点项目(2016KY002)

作者简介: 周子航(1985~), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气污染源排放控制, E-mail: gorezhou@cdaes.cn

机制研究和污染控制措施评估等起着重要作用^[2~4]。随着四川盆地经济快速发展,频发的光化学烟雾和霾等大气复合型污染已成为四川省面临的首要环境问题^[5~7]。

作为大气污染防治和管理关键,大气污染源排放清单受到了政策制定者和研究人员的日益关注,美国 and 欧洲自 19 世纪 80 年代起开展排放源清单编制工作,并持续更新至今。近 20 年间,国内外研究人员逐步建立了一些多尺度的我国排放清单:Streets 等^[2]编制了亚洲部分地区 2000 年大气污染物排放清单 TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over the Pacific),用于帮助解译 TRACE-P 和 ACE-Asia 观测实验;Ohara 等^[8]建立了亚洲部分地区 2000 年大气污染物排放清单 REAS (Regional Emission Inventory in Asia),对 1980~2003 年的排放量进行了回顾;Zhang 等^[3]在 TRACE-P 清单的基础上对各国数据进行更新和技术改进,建立了 2006 年亚洲部分地区大气污染物排放清单,用于支持 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experience-Phase B) 计划,其中对中国部分做了大量方法学的改进,并且为化学传输模型的使用制作了挥发性有机物物种清单;Kurokawa 等^[9]在 REAS 的基础上,更新到 REAS2.1,结果表明中国和印度为排放贡献最大和排放量增长速率最快的国家;清华大学建立了 MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China),提供 0.25°、0.5° 和 1.0° 这 3 种空间分辨率的逐月网格化排放清单,并可按 CB05 等多种化学机制输出^[10~12]。此外,一些研究基于自下而上的方法建立了区域和城市尺度的排放清单^[4,13~18],工业点源等精细化活动水平数据的使用,极大地降低了清单的不确定性。同时,排放清单的研究也细化延伸到各个排放源分支,如工业源^[19,20]、移动源^[11,21]和其它排放源^[22,23]。

相对而言,四川省仍鲜有全面的人为源大气污染物排放清单研究,主要集中在典型排放源:何敏等^[24]基于“自下而上”的方法建立了 2010 年四川省固定源(包括电厂、工业锅炉、民用燃料燃烧和部分制造行业)排放清单;韩丽等^[25]基于四川省环境统计数据等资料,计算得到 2011 年四川省化石燃料燃烧源、工业过程源、溶剂使用源、生物质燃烧和汽油挥发等排放源的 VOCs 排放量;周子航等^[26]基于工况排放因子模型 IVE,建立了高时空分辨率的 2016 年成都市道路移动源排放清单。因此,本文建立了较为全面的四川省人为源大气污染物排放清

单,以期为四川省复合型大气污染研究和防治提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究范围

四川省位于中国大陆西南,共辖 21 个地级市,研究区域西起 97.35°E,东至 108.52°E,南抵 26.05°N,北达 34.32°N,本研究将研究区域划分为 573 225 个 1 km × 1 km 的网格。图 1 为本文的研究范围。

1.2 方法概述

基于环境保护部发布的清单编制技术指南方法,本文主要涉及与人为活动排放相关的部门,包括工业、交通、生活、油气储运和废弃物处理等,同时考虑到排放清单的完整性,将土壤扬尘一并纳入。因此,将排放源划分为化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、生物质燃烧源、储存运输源、废弃物处理源和其它排放源 10 类。关注的污染物为 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、VOCs 和 NH₃。

本研究基于 2015 年四川省活动水平数据(燃料消耗量、溶剂使用量、产品产量、机动车保有量和土地利用数据等)、污染源排放因子和排放控制末端治理技术,计算四川省各城市的大气污染物排放量,以“自下而上”为主,“自上而下”为辅的构建方法,建立四川省人为源大气污染物排放清单,并利用 GIS 软件完成 1 km × 1 km 的网格化分配。

1.3 污染源活动水平获取与定量表征方法

1.3.1 化石燃料固定燃烧源

化石燃料固定燃烧源主要包括电厂、工业锅炉和居民生活炉灶等燃烧设施。电厂、工业锅炉等企业排放,通过收集燃料消耗量等活动水平数据,采用“自下而上”的方法进行计算,即基于燃烧设备的技术类型、燃料消耗量和末端治理技术等,单独计算每个燃烧设施的污染物排放量进而得到企业排放量。工业部分活动水平数据来自于 2015 年四川省环境统计数据、四川省排污申报数据以及开展四川盆地城市群等大气污染物排放清单研究收集数据,收集内容包括企业基本情况、燃料和燃烧器、末端治理设施等。而居民生活炉灶等民用源的排放,则基于 2015 年四川省统计年鉴中能源消耗量。国内学者针对燃煤等燃料的 NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 排放因子开展了大量研究,因此本文根据四川省电厂、工业和民用各部门的燃烧设备技

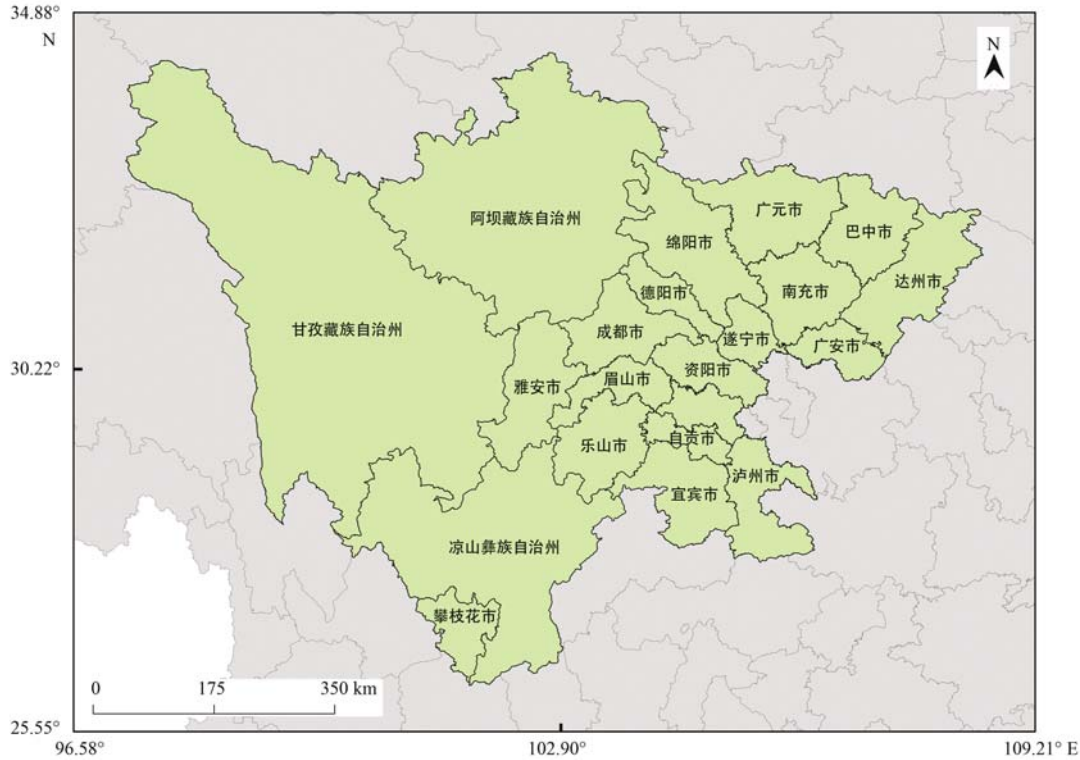


图 1 四川省研究区域示意

Fig. 1 Research domain in the Sichuan Province

术和规模、燃料类型和技术参数、控制措施去除效率和使用情况等现状,选取了适用于本地的国内研究成果,而燃料油和天然气等燃料研究较少,采用国外研究作为补充,选取排放因子见表 1 和 2.

污染物排放量计算方法见公式(1)~(3),其中 SO_2 排放因子采用公式(2)估算,BC 和 OC 排放因子采用公式(3)估算.

$$E_{i,j} = \sum_{j,k} A_{j,k} \times \text{EF}_{i,j,k} \times (1 - \eta_{i,j}) \quad (1)$$

式中, E 为污染源的大气污染物排放量(kg); i 、 j 、 k 分别表示污染物、污染源和燃烧设施技术类型; A 为排放源的活动水平(kg 或 m^3); EF 为排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); η 为控制措施去除效率.

SO_2 采用物料衡算法估算:

$$\text{EF}_{\text{SO}_2} = 2 \times S \times (1 - \text{sr}) \quad (2)$$

式中, EF_{SO_2} 为 SO_2 的排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); S 为平均燃煤收到基硫分; sr 为硫分进入底灰比例.

$$\text{EF}_i = \text{EF}_{i,\text{PM}_{2.5}} \times F_i \quad (3)$$

式中, EF_i 为 BC 或 OC 的排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); i 为 BC 或 OC; $\text{EF}_{i,\text{PM}_{2.5}}$ 为 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); F 为 BC 或 OC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的比例.

1.3.2 工艺过程源

工艺过程源主要包括钢铁、水泥、平板玻璃、

石油化工等工业生产和加工过程中造成排放的企业. 活动水平数据来自于 2015 年四川省环境统计数据、四川省排污申报数据以及开展四川盆地城市群等大气污染物排放清单研究收集数据,污染物排放量基于产品产量使用公式(1)和(3)进行计算. 工艺过程源排放来源复杂多样,国内研究较少难以覆盖全部工艺类型,因此本文根据四川省工艺技术等现状,在优先选用国内研究的基础上,炼钢和炼焦等工艺选取国外研究,选取排放因子见表 3.

1.3.3 移动源

移动源包括道路机动车、飞机、船舶、建筑机械和农用机械等. 本文中各城市机动车活动水平数据从各城市车管部门获取,均为 2015 年在册机动车登记信息,采用 IVE 模型(international vehicle emission model)基于本地化参数计算各车型排放因子和污染物排放量,建立基于路网建立道路移动源排放清单. 飞机排放清单基于完整的起飞着陆阶段(landing and take off, LTO)进行估算,本研究使用 Python 计算机语言从成都双流国际机场等官方网站获取每日公布的飞机进出港航班号、始发地、目的地等航班信息,基于国际民用航空组织(ICAO)发布的机场空气质量手册^[47]方法进行计算,道路移动源和飞机活动水平数据收集和计算方法参见已有

表 1 电厂燃烧污染物排放因子¹⁾

Table 1 Emission factors for power plants

污染物	燃料	燃烧技术	排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
NO_x	燃煤	煤粉炉/层燃炉	<100 MW, 有低氮燃烧技术
	燃煤	煤粉炉/层燃炉	100 ~ 300 MW, 无低氮燃烧技术
	燃煤	煤粉炉/层燃炉	100 ~ 300 MW, 有低氮燃烧技术
	燃煤	煤粉炉/层燃炉	>300 MW, 有低氮燃烧技术
	燃煤	循环流化床	—
	重油	—	—
	柴油	—	—
	天然气	—	—
CO	燃煤	煤粉炉	≥ 200 MW
	燃煤	煤粉炉	<200 MW
	燃煤	层燃炉	—
	燃煤	流化床	—
	燃油	—	—
	天然气	—	—
	—	—	—
$\text{PM}_{10}/\text{PM}_{2.5}$	燃煤	煤粉炉	无控制
	燃煤	煤粉炉	静电除尘
	燃煤	煤粉炉	湿式除尘
	燃煤	煤粉炉	布袋除尘
	燃煤	煤粉炉	静电除尘 + 湿式脱硫
	燃煤	层燃炉	无控制
	燃煤	层燃炉	静电除尘
	燃煤	层燃炉	湿式除尘
	燃煤	循环流化床	无控制
	燃煤	循环流化床	静电除尘
	重油	—	—
	柴油	—	—
	天然气	—	—
VOCs	燃煤	—	—
	重油	—	—
	柴油	—	—
	天然气	—	—
$F_{\text{BC}}/F_{\text{OC}}$	燃煤	煤粉炉	—
	燃煤	层燃炉	—
	柴油	—	—

1) A 为燃煤灰分；天然气排放因子单位为 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；“—”表示文章中没有内容或相关数据，下同

表 2 工业和民用燃烧排放因子¹⁾

Table 2 Emission factors of industrial and residential combustion

污染源	燃料类型	燃烧技术	排放因子/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$					F_{BC}	F_{OC}
			NO_x	CO	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	VOCs		
工业燃烧源	燃煤	煤粉炉/层燃炉	4.0 ^[27]	23.53 ^[34]	28.08/5.4 ^[34]	5.4/1.89 ^[34]	0.18 ^[35]	0.01/0.2 ^[41]	0/0.04 ^[41]
	重油	—	5.84 ^[29]	0.6 ^[33]	1.03 ^[34]	0.67 ^[34]	0.15 ^[35]	0.08 ^[41]	0.03 ^[41]
	柴油	—	9.62 ^[29]	0.6 ^[33]	0.5 ^[34]	0.5 ^[34]	0.12 ^[36]	0.3 ^[41]	0.09 ^[41]
	天然气	—	1.76 ^[30]	1.3 ^[33]	0.24 ^[30]	0.17 ^[30]	0.29 ^[30]	0.095 ^[41]	0.3 ^[41]
	焦炭	—	4.80 ^[30]	6.6 ^[33]	0.29 ^[33]	0.144 ^[33]	0.032 ^[30]	0.28 ^[41]	0.05 ^[41]
民用燃烧源	烟煤	蜂窝煤/块煤	1.88 ^[37]	75 ^[39]	10.83 ^[38]	8.0 ^[38]	0.032 ^[30]	0.07/2.44 ^[40]	2.99/4.4 ^[40]
	无烟煤	蜂窝煤/块煤	1.88 ^[37]	75 ^[39]	1.5 ^[38]	1.1 ^[38]	0.032 ^[30]	0.003/0.006 ^[40]	0.05/0.077 ^[40]
	汽油	—	16.7 ^[37]	0.6 ^[33]	0.25 ^[33]	0.125 ^[30]	0.087 ^[30]	—	—
	柴油	—	3.21 ^[29]	0.6 ^[33]	0.31 ^[30]	0.31 ^[33]	0.093 ^[30]	0.3 ^[41]	0.09 ^[41]
	煤油	—	2.49 ^[29]	0.6 ^[33]	0.9 ^[34]	0.9 ^[34]	0.15 ^[35]	0.13 ^[41]	0.1 ^[41]
	液化石油气	—	2.1 ^[30]	0.36 ^[33]	0.22 ^[30]	0.15 ^[30]	0.088 ^[33]	0.095 ^[41]	0.3 ^[41]
	天然气	—	1.76 ^[30]	0.35 ^[30]	0.24 ^[30]	0.10 ^[30]	0.088 ^[33]	—	—

1) F_{BC} 、 F_{OC} 为 BC、OC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的质量分数，无量纲

表 3 工艺过程源污染物排放因子¹⁾
Table 3 Emission factors for industrial processes

工艺过程	活动水平	排放因子/g·kg ⁻¹							
		SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	F _{BC}
炼铁	产品产量	0.30 ^[33]	0.09 ^[33]	40.50 ^[33]	0.72 ^[33]	0.45 ^[33]	—	—	0.28 ^[34]
炼钢	产品产量	—	—	9.0 ^[33]	0.67 ^[33]	0.60 ^[33]	0.06 ^[33]	—	0 ^[34]
炼焦	产品产量	2.01 ^[33]	0.02 ^[33]	0.64 ^[33]	2.75 ^[33]	1.75 ^[33]	2.10 ^[33]	0.09 ^[33]	0.48 ^[34]
钢铁加工	产品产量	—	—	—	3.58 ^[33]	1.70 ^[33]	—	—	—
铝制品	产品产量	—	—	—	2.63 ^[33]	2.08 ^[33]	—	—	—
水泥	产品产量	4.8 ^[42]	13.1 ^[42]	40.2 ^[42]	8.05 ^[43]	3.40 ^[43]	0.177 ^[35]	—	0.006 ^[34]
砖瓦制造	产品产量	—	—	—	0.13 ^[33]	0.04 ^[33]	—	—	0.5 ^[34]
平板玻璃	产品产量	—	—	—	0.576 ^[34]	0.546 ^[34]	3.15 ^[35]	—	0.0006 ^[34]
玻璃制品	产品产量	—	—	—	0.989 ^[34]	0.937 ^[34]	3.15 ^[35]	—	0.0006 ^[34]
原油加工	原油加工量	—	—	—	—	—	0.32 ^[44]	—	—
天然气生产	产品产量	—	—	—	—	—	0.34 ^[44]	—	—
涂料生产	产品产量	—	—	—	—	—	15.0 ^[44]	—	—
油墨生产	产品产量	—	—	—	—	—	30.0 ^[44]	—	—
塑料制造	产品产量	—	—	—	—	—	2.2 ^[35]	—	—
泡沫塑料	产品产量	—	—	—	—	—	770 ^[45]	—	—
合成纤维	产品产量	—	—	—	—	—	73.4 ^[35]	—	—
轮胎制造	产品产量	—	—	—	—	—	0.29 ^[44]	—	—
合成橡胶	产品产量	—	—	—	—	—	7.17 ^[35]	—	—
化学纤维	产品产量	—	—	—	—	—	73.4 ^[35]	—	—
合成氨	产品产量	0.03 ^[33]	—	7.90 ^[33]	—	—	4.72 ^[33]	2.10 ^[33]	—
硫酸	产品产量	7.0 ^[33]	—	—	—	—	—	—	—
尿素	产品产量	—	—	—	1.74 ^[33]	1.50 ^[33]	—	9.69 ^[33]	—
涂料	产品产量	—	—	—	—	—	15 ^[45]	—	—
胶粘剂	产品产量	—	—	—	—	—	30 ^[45]	—	—
人造板	胶粘剂使用量	—	—	—	—	—	90 ^[45]	—	—
化学原料药	产品产量	—	—	—	—	—	430 ^[45]	—	—
纸制品	产品产量	—	—	—	—	—	3.5 ^[44]	—	—
植物油炼制	产品产量	—	—	—	—	—	2.45 ^[33]	—	—
啤酒	产品产量	—	—	—	—	—	0.4 ^[45]	—	—
白酒	产品产量	—	—	—	—	—	25 ^[45]	—	—
红酒	产品产量	—	—	—	—	—	0.5 ^[45]	—	—
面包	产品产量	—	—	—	—	—	4.5 ^[44]	—	—
糕点和饼干	产品产量	—	—	—	—	—	1.0 ^[46]	—	—
制糖	产品产量	—	—	—	—	—	10.0 ^[46]	—	—

1) 轮胎制造排放因子单位为 kg·tyre⁻¹

研究成果^[26,48]。船舶排放估算参考杨静等^[49]的研究成果,基于燃油消耗量和船舶引擎功率等活动水平数据,使用排放因子进行估算,建筑机械、农用机械和农用运输车等非道路移动源,则基于燃油消耗量,采用张礼俊等^[50]的计算方法进行估算,建筑机械等非道路移动源柴油消耗量取自 2015 年中国能源统计年鉴和中国农业年鉴,根据各城市施工建筑面积占四川省的比例、农用机械和农用运输车柴油发动机总动力占四川省的比例对柴油消耗量进行分配。

1.3.4 溶剂使用源

溶剂使用源包括生产、使用有机溶剂的工业生产和生活部门,其中工业生产主要为印刷、制鞋、

汽车制造、家具制造和电子产品制造等行业,生活部门包括建筑装饰、干洗、汽修和医院。工业生产活动水平数据源于 2015 年四川省环境统计数据、四川省排污申报数据以及开展四川盆地城市群等大气污染物排放清单研究收集数据,建筑涂料使用量由 2015 年四川省统计年鉴中建筑竣工面积由经验换算系数计算后获取^[45],干洗、汽车修理和医院则通过抽样调查获取四川省不同城市的干洗溶剂用量、修补漆使用量、医用溶剂使用量后,由经验系数计算推估为全市使用量。污染物排放量使用公式(1)进行计算。国内外对溶剂使用源排放因子的研究较多,但为了选取与四川省现状相符的排放因子,主要参考文献[51~53],其中汽车制造排放因

子由部分大型汽车制造企业的涂料使用数据经过物料衡算得到。活动水平数据获取和排放量计算方法详见文献[18], 本文不再列出。

1.3.5 农业源

农业源包括氮肥施用、畜禽养殖、土壤本底、固氮植物、秸秆堆肥和人体排放等以氨排放为主的排放源, 由于氨排放强度主要受地理和气象等条件影响, 因此排放因子主要取自文献[54~56]。畜禽养殖存栏数、氮肥使用量和人口数量等为活动水平数据来源于各城市农业主管部门和 2015 年四川省统计数据。污染物排放量使用公式(1)进行计算。

1.3.6 扬尘源

本文扬尘源主要对道路扬尘和施工扬尘进行排放研究。道路扬尘排放量基于道路长度和车流量根据公式(4)进行计算, 道路扬尘排放因子基于 AP-42 方法根据公式(5)进行计算, 其中关键计算参数道路集尘负荷采用杨德容等^[57]对成都市的研究, 道路长度通过 GIS 软件提取, 道路车流量主要通过对不同城市典型路段抽样调查后加权计算处理; 施工扬尘基于施工面积根据公式(6)进行计算, 排放因子采用杨杨^[58]的研究成果, 施工面积等活动水平数据源自各城市建设主管部门和 2015 年四川省统计数据。

$$E_j = 24 \times 365 \times \sum_{i=1}^n (EF_{i,j} \times L_i \times V_i) \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中, E_j 为排放量(t); i 为道路类型, j 为污染物类型; $EF_{i,j}$ 为颗粒物排放因子($g \cdot VKT^{-1}$, grams per vehicle kilometer traveled, 即每辆汽车行驶 1 km 的颗粒物平均排放量); L_i 为道路长度(km); V_i 为道路车流量(辆 $\cdot h^{-1}$)。

$$EF = k \times \left(\frac{SL}{2}\right)^{0.65} \times \left(\frac{W}{3}\right)^{1.5} \times \left(1 - \frac{P}{4N}\right) \quad (5)$$

式中, k 为产生的扬尘中颗粒物的粒度乘数($g \cdot km^{-1}$); SL 为道路集尘负荷($g \cdot m^{-2}$); W 为平均车重(t); P 为超过 0.254 mm 的降水天数, N 为天数(取为 365 d)。

$$W_i = E_i \times A \times T \quad (6)$$

式中, W_i 为施工扬尘排放量(t); i 为污染物类型; E_i 为施工工地颗粒物平均排放系数[$t \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]; A 为施工面积(m^2); T 为工地施工月份数。

1.3.7 生物质燃烧源

生物质燃烧主要考虑生物质燃料家庭使用和秸秆露天焚烧两方面。家庭使用的生物质燃料量主要通过各城市抽样调查结果结合城市能源使用现状推

估得到, 秸秆露天焚烧量则基于农业部门获取的农作物产量, 结合谷草比和燃烧比例等计算参数估算得到。排放因子主要参考文献[59,60]的研究成果。污染物排放量使用公式(1)进行计算。

1.3.8 储存运输源

储存运输源指油气产品在收集、储存、运输和销售过程中涉及 VOCs 排放的污染源, 包括加油站、油库和运输环节, 其 VOCs 排放量基于汽、柴油吞吐量、运输量和油气回收控制效率等活动水平数据, 使用公式(1)进行计算。各加油站、油库的油品吞吐量等站点级活动水平数据主要通过现场调查和市级经信部门获取。由于相关排放因子研究较少, 且油气回收控制措施效率对排放因子的取值影响极大, 因此主要参考国内标准、AP-42 和专家咨询等, 排放因子和计算方法详见文献[18]。

1.3.9 废弃物处理源和餐饮油烟源

废弃物处理源包括废物焚烧、废物堆肥、废物填埋、废物脱硝和废水处理时造成排放, 其污染物排放量基于废弃物处理量使用公式(1)进行计算, 固体废弃物处理活动水平数据来源于各市环保部门, 废水处理相关数据来自于水务部门。餐饮油烟污染物排放量则主要基于食用油使用量使用公式(1)进行计算, 活动水平数据分为社会餐饮和居民生活两部分, 社会餐饮的餐馆位置、食用油使用量和位置等活动水平数据通过各城市抽样调查和食品管理部门统计数据整合后获取, 居民生活则主要通过 2015 年四川省统计数据年鉴获取人口数量。由于国内研究较少, 废弃物处理排放因子主要源于国外研究^[33,44,61~65], 其中废物填埋的 NH_3 排放因子, 参考 Roe 等^[64]和沈兴玲等^[65]基于填埋过程中甲烷排放量计算得到, 餐饮油烟则考虑到川菜较为独特的烹饪方式, 选择基于四川省餐饮企业实测的, 以用油量作为计算参数的排放因子^[66]。

1.4 排放量空间分配方法

针对不同污染源及其排放特征, 选用不同的空间分配方法, 使用 GIS 软件和相应地空间特征表征参数进行分配: 电厂、具备地理信息的工业企业、加油站/油库和废弃物处理企业等, 根据其经纬度信息, 视为点源采用“自下而上”方法, 分配到网格中; 不具备地理信息的工业企业和废弃物处理企业等, 视为面源, 分别计算各个区县面源污染物排放总量, 采用“自上而下”方法, 根据四川省 GDP 和土地利用数据, 将面源排放量分配到网格中, GDP 和土地利用分布数据来自全国 1km $\times$ 1km 分辨率分

布数据(数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,RESDC)^[67];道路机动车视为线源,首先分别计算不同类别道路的长度及其对应的车流量,从而得到各车型的行驶比例,由分车型排放量,结合其道路行驶比例,得到分区(市)县的各车型在不同道路的污染物排放量,进而得到 1 km 长度道路的不同车型污染物排放量,最终分配到网格中,路网数据来自于开源数据 Open Street Map(<http://www.openstreetmap.org/>);工程机械、农业机械、船舶、农业源和生物质燃烧源根据土地利用分布,分配到城镇用地、耕地和河流水系等;民用溶剂使用源和餐饮油烟源视为面源,根据人口和夜间灯光分布数

据(数据来源于 RESDC)^[67]进行分配;道路扬尘排放特征与道路机动车相似,亦采用路网数据进行分配,施工扬尘则采用土地利用分布数据进行分配。

2 结果与讨论

2.1 四川省 2015 年人为源排放清单

基于上述方法建立得到四川省人为源大气污染物排放清单列于表 4 中,2015 年 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、VOCs 和 NH₃ 排放量分别为 444.9 × 10³、820.0 × 10³、3 773.1 × 10³、1 371.6 × 10³、537.5 × 10³、28.7 × 10³、53.1 × 10³、923.6 × 10³ 和 988.0 × 10³ t。

表 4 四川省人为源污染物排放量 × 10³/t

Table 4 Emission inventory for the Sichuan Province × 10³/t

污染源	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	BC	OC	VOCs	NH ₃
化石燃料固定燃烧源	294.8	164.8	447.1	96.9	51.2	5.4	8.7	8.4	0.5
工艺过程源	134.8	190.4	1 331.7	271.1	184.9	4.5	3.7	184.3	19.9
移动源	8.9	442.4	1 099.1	28.9	26.6	8.9	4.3	205.9	11.6
溶剂使用源	—	—	—	—	—	—	—	422.6	—
农业源	—	—	—	—	—	—	—	—	941.1
扬尘源	—	—	—	819.8	187.9	—	—	—	—
生物质燃烧源	5.6	21.2	895.1	130.3	70.0	9.4	26.9	82.0	12.5
储存运输源	—	—	—	—	—	—	—	10.3	—
废弃物处置源	0.8	1.2	0.1	7.0	0.9	—	—	4.9	2.5
餐饮油烟排放源	—	—	—	17.7	16.1	0.5	9.4	5.3	—
合计	444.9	820.0	3 773.1	1 371.6	537.5	28.7	53.1	923.6	988.0

2.2 四川省人为源排放分担率

如图 2 所示,对于气态污染物,化石燃料固定燃烧源是 SO₂ 的最大排放源,主要源于电厂、工业锅炉的燃煤、天然气等化石燃料的燃烧排放,其中电厂和工业锅炉等燃煤排放贡献了 95% 以上的 SO₂,工艺过程源作为第二大 SO₂ 排放源,其排放主要来自于钢铁冶炼和建材的烧制环节;四川省由于工业燃料结构特点,化石燃料燃烧源和工艺过程源为 NO_x 排放的第二、三大排放源,其 NO_x 排放量分别占总排放量的 23% 和 20%,小于移动源的 54%,其中道路移动源占 NO_x 排放总量的 26%,工艺过程源中的建材行业占 19%,工业锅炉燃烧排放占 11%;CO 主要排放源为工艺过程源、移动源和生物质燃烧源,其排放主要源于燃料的不完全燃烧;VOCs 排放主要源于溶剂使用源、移动源和工艺过程源,分别占 VOCs 总排放量的 46%、22% 和 20%,溶剂使用源主要有机械加工、建筑装饰、电子设备制造、印刷和家具等排放源贡献,而工艺过程源则主要来自于化学原料和木材加工,这些行业均为四川省主要工业行业,其生产过程中使用的原

辅物料,以溶剂型涂料、油墨和胶粘剂等 VOCs 含量较高的有机溶剂为主,造成了 VOCs 的大量排放,此外随着汽车制造和石油加工等行业的逐渐积聚,其排放分担率亦逐渐上升,同时近年来四川省城镇化进程加速导致新建大量建设项目和机动车保有量飞速上升,造成大量建筑装饰涂料逸散和尾气排放;农业源对 NH₃ 排放有决定性贡献,主要有畜禽养殖和氮肥施用排放,其排放分担率分别为 66% 和 23%。

对于颗粒物排放,扬尘源和工艺过程源为首要的 PM₁₀ 排放贡献源,分别占总排放量的 60% 和 20%,这是由于道路交通高速发展和城市建设进程加速引起的道路和建筑扬尘排放,以及建材和钢铁行业等使用化石燃料时,由窑炉和高炉等燃烧或生产过程中造成的有组织和逸散排放;PM_{2.5} 的排放分担率主要由扬尘源、工艺过程源和化石燃料燃烧源构成,但与 PM₁₀ 不尽相同的是扬尘源排放分担率下降到 35%,工艺过程源上升到 34%,这是由于扬尘源以粗颗粒物为主,而钢铁等工艺过程源所排放颗粒物主要由细颗粒物构成,同时以电厂和工业锅

炉为主的化石燃料固定燃烧源 $PM_{2.5}$ 排放分担率为 10%；生物质燃烧源为 BC 和 OC 主要排放贡献源，

分别占总排放量的 33% 和 51%，这是由于薪柴在城镇以外区域仍然广泛作为燃料使用，同时四川省

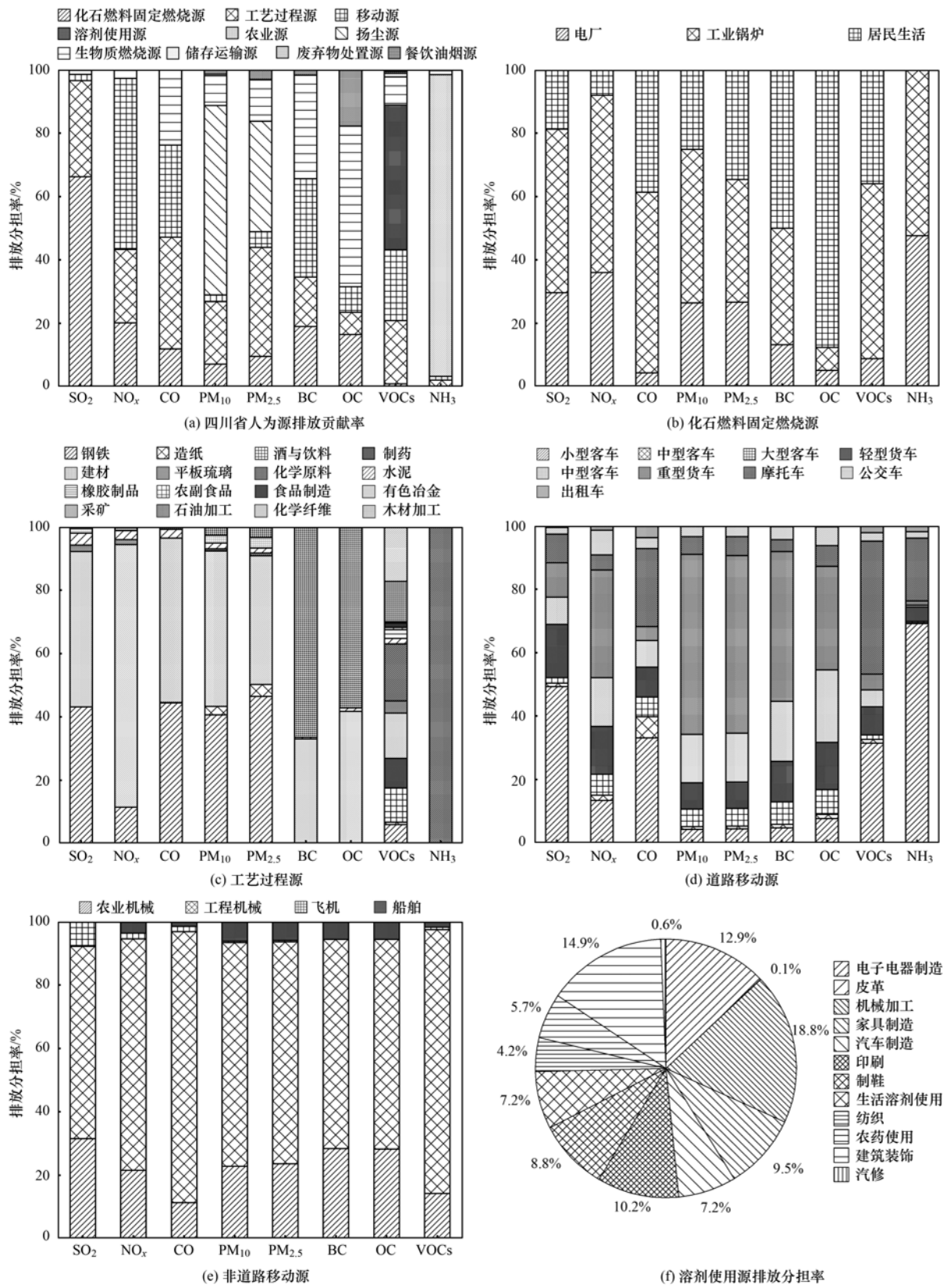


图2 四川省人为源污染物排放分担率

Fig. 2 Emission contributions of anthropogenic source categories in the Sichuan Province

农作物秸秆等生物质普遍存在露天焚烧现象,移动源和餐饮油烟源分别为第二大 BC、OC 排放贡献源,是因为载货汽车、工程机械和农业机械等柴油燃料为主的移动源,其柴油发动机难以将燃油和空气均匀混合,高温且缺氧条件下易形成碳烟,造成大量炭黑颗粒物排放,而餐饮油烟源则在食材烹饪过程中,高温条件下热分解产生大量有机碳含量较高的有机颗粒物。

2.3 四川省人为源城市排放特征

四川省各城市人为源污染物排放量见图 3。成都作为四川省中心城市,工业和人口最为集中,汽车保有量居全国第三,2015 年 GDP 占全省总 GDP 的 34%,而且近年来城市建设强度较大,因此除了表征农业排放的 NH_3 以外,其余各项污染物年排放量均位居四川省的前两位。宜宾、成都和乐山为 SO_2 排放量较大的 3 个城市,同时这 3 个城市的 NO_x 排放量亦较高,稍有区别的是对于 NO_x ,成都排放量远高于其它城市。这是由于宜宾和乐山涉及

燃煤等化石燃料排放的工业企业较多且能源消耗量较大,导致有较高的 SO_2 和 NO_x 排放,然而成都机动车保有量远高于其它城市,造成其 NO_x 排放量明显高于位于二、三位的乐山和宜宾。成都、凉山和攀枝花为 CO 排放量较大城市,且凉山和攀枝花均为四川省钢铁主要产地,由于烧结和高炉炼铁等工艺均排放大量的 CO,因此两个城市的 CO 主要来源于工艺过程源中的钢铁制造,此外凉山的化石燃料燃烧和生物质燃烧也有较大贡献。成都、凉山、乐山、攀枝花和达州为颗粒物排放贡献的主要城市,共占全省 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放总量的 34% 和 43%,各城市 PM_{10} 来源构成较为一致,主要来自于扬尘源和工艺过程源,成都由于机动车保有量较大使得移动源成为次要贡献源,南充和达州的生物质燃烧亦为主要贡献源。各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 排放贡献则不尽相同,成都移动源在总排放量的贡献中进一步提升,由 PM_{10} 的 11% 提升到 $\text{PM}_{2.5}$ 的 22%;攀枝花主要由钢铁制造构成的工艺过程源,在总排放量的贡献中,由

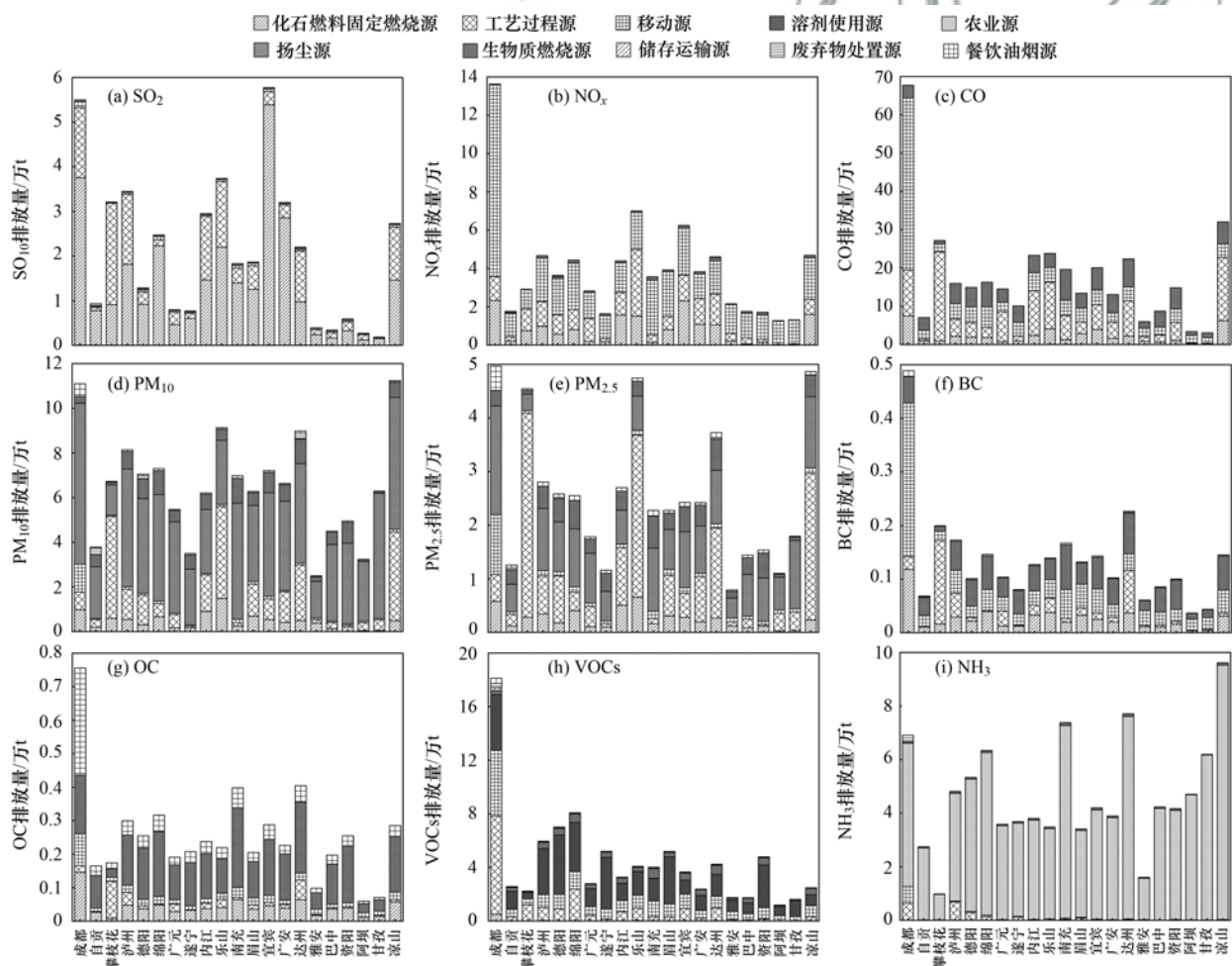


图 3 四川省各城市人为源污染物排放

Fig. 3 City-specific pollutant emissions from anthropogenic sources in the Sichuan Province

PM_{10} 的 68% 提升到 $PM_{2.5}$ 的 84%; 以钢铁制造和建材制造的内江、乐山、凉山、德阳、眉山和广安, 其排放贡献接近或超过了扬尘源。成都、达州和攀枝花为 BC 排放量较大城市, 共占全省 BC 排放总量的 32%, 其中成都主要由移动源排放, 占全市的 59%, 达州和攀枝花则主要来自于制焦。成都、达州和南充为 OC 排放量较大城市, 各城市的生物质燃烧均为 OC 主要排放贡献源, 其中成都由于人口众多和餐饮业发达, 餐饮油烟为最主要 OC 排放贡献源, 占全市的 42%; 攀枝花 OC 排放源则以炼焦为主, 占全市的 63%。成都、绵阳、德阳为 VOCs 排放量较大城市, 共占全省 VOCs 排放总量的 36%, 主要来自于溶剂使用源、工艺过程源和移动源。凉山、达州和南充为 NH_3 排放量较大城市, 共占全省 VOCs 排放总量的 25%, 成都仅列第四, 是由于这 3 个城市为四川省农牧业较为发达城市, 第一产业增加值位居全省前列, 畜禽养殖量较大, 且耕地面积较广导致氮肥施用量较大, NH_3 排放量较高。

2.4 人为源排放空间分布

将各类大气污染物排放量分配入建立的 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 网格中, 见图 4。四川省各项大气污染物主要集中分布于四川盆地(包括成都、绵阳、泸州、南充、自贡、德阳、广元、遂宁、内江、乐山、宜宾、广安、达州、雅安、巴中、眉山、资阳)、凉山和攀枝花部分地区, 该区域为人口最为密集, 农业和工业较为发达的区域。从各项大气污染物来看, SO_2 在成都、德阳和眉山有广泛的分布, 与这些城市工业布局较均匀有关, 而宜宾和乐山等城市则由于工业密集, 其 SO_2 分布亦较为集中; NO_x 除了集中分布在成都、宜宾、乐山等城市的工业区以外, 与道路呈现高度相关性, 路网较为发达的成都平原地区、各城市中心区域和四川省主要国道、省道等道路均有大量分布; CO 主要分布于成都、凉山和攀枝花工业区以及其它城市的建成区内, 其中成都由于机动车保有量较大, 机动车 CO 排放为首要贡献源, 因此主要分布于成都市交通路网区域, 呈现出沿道路网格分布特征, 其它城市也有类似特点, 而在凉山和攀枝花工业区域的分布则为块状分布特征; PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 由于排放贡献源相同, 呈现相似的空间分布特征, 均集中于路网密集和施工强度较大的建成区, 以及部分工业区内, 总体来看交通路网越密集、建成区面积越大的城市, 其排放量较大的网格数量就越多, 成都由于路网发达导致道路扬尘排放贡献较大, 其 $PM_{2.5}$ 排放量较大的网格数量显

著高于 PM_{10} , 几乎覆盖了成都市整个区域; 成都的 BC 排放分布呈现出以移动源为主的路网分布特征, 其它城市则以化石燃料燃烧、工艺过程、移动源和生物质燃烧为 BC 主要排放源, 没有体现出显著排放分布特征; OC 排放主要由民用燃料使用、移动源和餐饮油烟等居民生活相关排放源贡献, 因此其分布与人口和路网高度相关, 在人口密集的四川盆地较为集中, 同时在凉山和攀枝花两市的京昆高速沿线也有大量分布; VOCs 排放主要与路网、建成区、人口分布和工业区相关性较高, 集中分布在成都、绵阳、德阳和眉山等成都平原城市群中; NH_3 排放主要源于畜禽养殖和氮肥施用, 四川盆地作为全国主要的畜禽和粮食作物产地, 为 NH_3 排放主要分布区域, 凉山州由于畜牧业发达, 其 NH_3 排放分布亦相对较多, 此外受移动源排放影响, 四川省各主要道路也有较多分布。

2.5 排放清单比较

系统全面地建立了四川省人为源大气污染物排放清单的研究较少, 因此本文仅将所建立的排放清单与得到广泛应用和引用的 MEIC 清单进行比较。为了便于比较, 将此次建立排放清单基于 MEIC 清单分类体系作了一定调整, 比较结果见表 5。由于我国尚没有统一的源清单编制规范, 排放源分类、活动水平数据获取、排放因子选取和计算方法的不同均会影响到最终的排放清单计算结果。MEIC 清单主要考虑了火电、工业、交通、民用和农业这 5 个部门, 本研究则基于清单编制指南中的分类原则对污染源进行了细分, 增加了扬尘源和生物质燃烧源等多个污染源类别。本研究工业企业均为点源数据, 机动车、扬尘和居民生活等亦采用了“自下而上”的数据获取方法, 与本地情况更为相符。另外, 本研究排放因子与 MEIC 清单相似, 多采用国内外学者的研究成果, 但针对部分排放源采用了物料衡算(汽车涂装等)和基于本地化参数的模型计算方法(道路移动源使用 IVE 模型), 开展了一定的本地化工作。因此, 基于上述原因, 本研究与 MEIC 清单在 SO_2 、CO 和 PM_{10} 等污染物排放量上有一定差异, 但从污染源排放贡献来看, 本研究结果与 MEIC 较为一致, 工业部门为 SO_2 、CO、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 VOCs 主要排放源, 民用部门为 BC 和 OC 主要排放源, 农业部门为重要的 NH_3 排放源。而 NO_x 的排放贡献结果则存在差异, MEIC 清单认为工业部门为首要贡献源, 本研究则为移动源。总体来看, 本研究的计算结果能够较好地代表四川省人为源大气

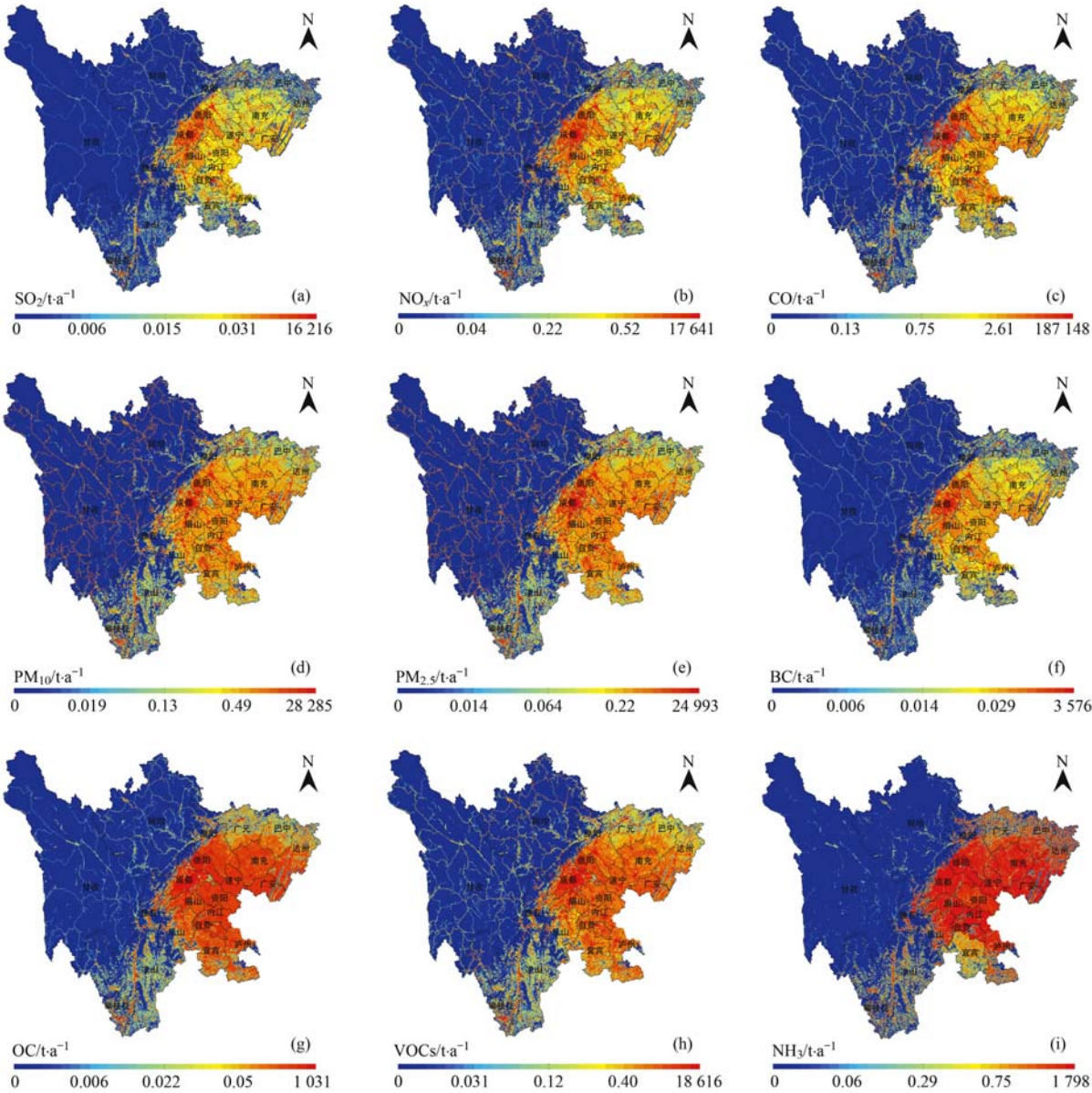


图4 四川省人为源大气污染物排放空间分布

Fig. 4 Spatial allocation of air pollutant emissions in the Sichuan Province

表5 四川省人为源大气污染物排放清单结果对比 $\times 10^3/t$

Table 5 Comparison of the Sichuan anthropogenic emission inventory with MEIC $\times 10^3/t$

数据来源	排放源	SO ₂	NO _x	CO	PM ₁₀	PM _{2.5}	BC	OC	VOCs	NH ₃
MEIC 清单	工业部门	591.1	411.0	2 099.1	274.7	173.1	17.8	16.4	930.9	22.7
	火电企业	101.7	74.2	47.2	18.2	11.2	—	—	0.7	—
	交通部门	12.6	299.6	1 395.2	15.8	15.5	8.5	3.3	258.7	1.9
	民用部门	47.1	52.4	3 724.6	256.8	243.8	38.9	150.1	347.0	29.4
	农业部门	—	—	—	—	—	—	—	—	732.8
	合计	752.4	837.3	7 266.2	565.5	443.6	65.2	169.8	1 537.3	786.8
本研究	工业部门 ¹⁾	287.0	282.7	1 586.7	318.0	204.7	6.5	4.3	402.5	20.1
	火电企业	87.4	59.3	19.4	25.6	13.6	0.7	0.5	0.7	0.2
	交通部门 ²⁾	8.9	442.4	1 099.1	28.9	26.6	8.9	4.3	205.9	11.6
	民用部门 ³⁾	60.8	34.4	1 067.8	440.0	161.1	12.6	44.0	290.8	12.5
	农业部门	—	—	—	—	—	—	—	16.9	941.1
	合计	444.1	818.8	3 772.9	812.4	406.1	28.7	53.1	916.8	985.5

1) 包括化石燃料固定燃烧源中的工业部分和工艺过程源; 2) 包括移动源; 3) 包括化石燃料固定燃烧源中的民用部分、生物质燃烧源和餐饮油烟源

污染物的排放现状。

2.6 不确定性分析

在大气污染物排放源清单的编制过程中,由于缺乏排放源信息及数据的代表性不足,不可避免地带来了不确定性^[68],排放清单不确定性分析方法主要包括定性分析方法和定量分析方法^[1],因本地实测研究较少,本文采用定性分析方法。

源排放清单不确定性主要来自于活动水平数据和排放因子选取两方面。本研究活动水平数据来源较多,逐一分析如下:电厂、工业企业活动水平数据来自环境统计数据、排污申报数据、企业备案数据和实地调查数据,数据来源较为可靠,不确定性较低;机动车保有量及其技术分布等数据由交管部门获取,飞机进出港航班数据由网络获取,较为可靠,不确定性较低;非道路移动源中农业和工业机械等活动水平数据基于四川省级层面统计数据,通过参数分配至各城市,存在一定不确定性;溶剂使用源民用部分和餐饮油烟源主要采用抽样调查和统计数据结合获取其活动水平数据,因为抽样的随机性,存在不确定性;其它污染源如农业、扬尘和固废处理等活动水平数据都来自于主管部门,不确定性较低。本研究所采用排放因子主要选取于国内外研究成果,逐一分析如下:电厂、工业锅炉和民用能源的排放因子主要使用国内研究成果,对于估算所需的含硫量、灰分和除尘脱硫效率等参数,采用调查数据和行业平均水平结合的方法,减小了因排放因子计算参数选择导致的不确定性;移动源和扬尘源均采用本地化参数计算得到排放因子,不确定性较低;工艺过程源、溶剂使用源等污染源由于工艺技术、溶剂类型和末端控制技术等差异,不同研究成果得到的排放因子相差较大,且研究区域主要集中在京津冀、长三角和珠三角等经济发达区域,和本地情况必然存在一定区别,导致较高不确定性。

3 结论

(1) 2015 年四川省人为源 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 BC 、 OC 、 VOCs 和 NH_3 排放量分别为 444.9×10^3 、 820.0×10^3 、 $3\,773.1 \times 10^3$ 、 $1\,371.6 \times 10^3$ 、 537.5×10^3 、 28.7×10^3 、 53.1×10^3 、 923.6×10^3 和 988.0×10^3 t。

(2) 从排放分担率来看,化石燃料固定燃烧源 SO_2 是最大排放源,移动源 NO_x 为最大贡献源,工艺过程源、移动源和生物质燃烧源 CO 是主要贡献

源,扬尘源和工艺过程源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 为主要贡献源, BC 和 OC 主要来源于生物质燃烧源, VOCs 主要来源于溶剂使用源,而畜禽养殖和氮肥施用是 NH_3 主要贡献源。

(3) 成都作为四川省中心城市,除了表征农业排放的 NH_3 ,其余各项污染物年排放量均位居四川省的前两位。此外,宜宾和乐山为 SO_2 和 NO_x 排放量较大城市,凉山、乐山和攀枝花为 CO 和颗粒物主要的排放贡献城市,达州和攀枝花为 BC 排放量较大城市, OC 排放集中于达州和南充,绵阳、德阳为 VOCs 排放量较大城市, NH_3 排放则主要分布在凉山、达州和南充。

(4) 四川省各项大气污染物主要集中分布于人口最为密集,农业和工业均较为发达的四川盆地和攀枝花部分区域,其中,以成都、德阳和绵阳为代表的成都平原城市群为四川盆地内的主要排放高值区域。

(5) 本研究建立的排放清单能够较好地代表四川省人为源大气污染物的排放现状,但仍存在一定不确定性,后续研究中应针对活动水平数据获取的不足开展数据收集工作,加强排放贡献较大典型污染源的排放因子本地化研究工作,逐步完善四川省大气污染物排放清单,以期为四川省复合型大气污染研究和防治提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 郑君瑜,王水胜,黄志炯,等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [2] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108** (D21): 8809.
- [3] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [4] Huang C, Chen C H, Li L, et al. Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [5] 宋丹林,陶俊,张普,等. 成都城区颗粒物消光系数特征及其与 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系[J]. *中国科学院大学学报*, 2013, **30**(6): 757-762.
Song D L, Tao J, Zhang P, et al. Seasonal characterization of particle extinction coefficient and its relation with $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration in Chengdu [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2013, **30**(6): 757-762.
- [6] Ning G C, Wang S G, Ma M J, et al. Characteristics of air pollution in different zones of Sichuan Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 975-984.
- [7] Zhao S P, Yu Y, Yin D Y, et al. Spatial patterns and temporal

- variations of six criteria air pollutants during 2015 to 2017 in the city clusters of Sichuan Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 540-557.
- [8] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980-2020[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(16): 4419-4444.
- [9] Kurokawa J, Ohara T, Morikawa T, *et al.* Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000-2008: regional Emission inventory in Asia (REAS) version 2 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (21): 11019-11058.
- [10] Li M, Zhang Q, Streets D G. Mapping Asian anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds to multiple chemical mechanisms[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(11): 5617-5638.
- [11] Zheng B, Huo H, Zhang Q, *et al.* High-resolution mapping of vehicle emissions in China in 2008[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(18): 9787-9805.
- [12] Liu F, Zhang Q, Tong D, *et al.* High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13299-13317.
- [13] 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.
- [14] Qi J, Zheng B, Li M, *et al.* A high-resolution air pollutants emission inventory in 2013 for the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **170**: 156-168.
- [15] Zhao Y, Mao P, Zhou Y D, *et al.* Improved provincial emission inventory and speciation profiles of anthropogenic non-methane volatile organic compounds: a case study for Jiangsu, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17** (12): 7733-7756.
- [16] Zhao Y, Qiu L P, Xu R Y, *et al.* Advantages of a city-scale emission inventory for urban air quality research and policy: the case of Nanjing, a typical industrial city in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (21): 12623-12644.
- [17] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [18] 周子航, 邓也, 陆成伟, 等. 成都市人为源挥发性有机物排放清单及特征[J]. *中国环境监测*, 2017, **33**(3): 39-48.
- Zhou Z H, Deng Y, Lu C W, *et al.* Emission inventory and characteristics of volatile organic compounds from anthropogenic sources in Chengdu [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(3): 39-48.
- [19] Liu K Y, Wang S X, Wu Q R, *et al.* A highly resolved mercury emission inventory of chinese coal-fired power plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52** (4): 2400-2408.
- [20] Tong D, Zhang Q, Davis S J, *et al.* Targeted emission reductions from global super-polluting power plant units [J]. *Nature Sustainability*, 2018, **1**(1): 59-68.
- [21] Liu H, Fu M L, Jin X X, *et al.* Health and climate impacts of ocean-going vessels in East Asia[J]. *Nature Climate Change*, 2016, **6**(11): 1037-1041.
- [22] Zhang Y S, Shao M, Lin Y, *et al.* Emission inventory of carbonaceous pollutants from biomass burning in the Pearl River Delta Region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 189-199.
- [23] Fu X, Liao H. Simulation of the interannual variations of biogenic emissions of volatile organic compounds in China: impacts on tropospheric ozone and secondary organic aerosol[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **59**: 170-185.
- [24] 何敏, 王幸锐, 韩丽. 四川省大气固定污染源排放清单及特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 3127-3137.
- He M, Wang X R, Han L. Air pollutant emission inventory and characteristics from stationary sources in Sichuan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(11): 3127-3137.
- [25] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- Han L, Wang X R, He M, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources in Sichuan Province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (12): 4535-4542.
- [26] 周子航, 邓也, 吴柯颖, 等. 成都市道路移动源排放清单与空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 79-91.
- Zhou Z H, Deng Y, Wu K Y, *et al.* On-road mobile source emission inventory and spatial distribution characteristics in Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 79-91.
- [27] Zhang Q, Streets D G, He K B, *et al.* NO_x emission trends for China, 1995-2004: the view from the ground and the view from space[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D22): D22306.
- [28] Zhao Y, Wang S X, Nielson 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.
- [29] 田贺忠. 中国氮氧化物排放现状、趋势及综合控制对策研究 [D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [30] 赵斌, 马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(2): 368-375.
- Zhao B, Ma J Z. Development of an air pollutant emission inventory for Tianjin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(2): 368-375.
- [31] Zhao Y, Nielsen C P, McElroy M B, *et al.* CO emissions in China: uncertainties and implications of improved energy efficiency and emission control [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **49**: 103-113.
- [32] Streets D G, Zhang Q, Wang L T, *et al.* Revisiting China's CO emissions after the Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) mission: synthesis of inventories, atmospheric modeling, and observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(D14): D14306.
- [33] U. S. Environmental Protection Agency (USEPA). Compilation of air pollutant emission Factors, AP-42, 5th ed [EB/OL].

- <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>, 2015-09-10.
- [34] 张强. 中国区域细颗粒物排放及模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [35] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(23): 7297-7316.
- [36] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in china[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(20): 4976-4988.
- [37] Kato N, Akimoto H. Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia; emission inventories[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(16): 2997-3017.
- [38] 刘源, 张元勋, 魏永杰, 等. 民用燃煤含碳颗粒物的排放因子测量[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(9): 1409-1416.
- Liu Y, Zhang Y X, Wei Y J, *et al.* Measurement of emission factors of carbonaceous aerosols from residential coal combustion [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(9): 1409-1416.
- [39] 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 中国大陆 CO 人为源排放清单[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(12): 1580-1585.
- Wang L T, Zhang Q, Hao J M, *et al.* Anthropogenic CO emission inventory of Mainland China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(12): 1580-1585.
- [40] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al.* Measurements of black and organic carbon emission factors for household coal combustion in China; implication for emission reduction[J]. *Environment Science & Technology*, 2009, **43**(24): 9495-9500.
- [41] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**(D14): D14203.
- [42] Lei Y, Zhang Q, Nielsen C, *et al.* An inventory of primary air pollutants and CO₂ emissions from cement production in China, 1990-2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(1): 147-154.
- [43] 雷宇, 贺克斌, 张强, 等. 基于技术的水泥工业大气颗粒物排放清单[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2366-2371.
- Lei Y, He K B, Zhang Q, *et al.* Technology-based emission inventory of particulate matters (PM) from cement industry[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(8): 2366-2371.
- [44] Klimont Z, Streets D G, Gupta S, *et al.* Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(8): 1309-1322.
- [45] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [46] 王丽涛. 北京地区空气质量模拟和控制情景研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [47] International Civil Aviation Organization. Airport air quality manual [EB/OL]. <http://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Publications/FINAL.Doc%209889.1st%20Edition.alltext.en.pdf>, 2012-01-30.
- [48] 周子航, 陆成伟, 谭钦文, 等. 成都双流国际机场大气污染物排放清单与时空分布特征[J]. *中国环境监测*, 2018, **34**(3): 75-83.
- Zhou Z H, Lu C W, Tan Q W, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of air pollutant emission inventory in Chengdu Shuangliu International Airport [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2018, **34**(3): 75-83.
- [49] 杨静, 尹佩玲, 叶斯琪, 等. 深圳市船舶排放清单与时空特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1217-1226.
- Yang J, Yin P L, Ye S Q, *et al.* Marine emission inventory and its temporal and spatial characteristics in the city of Shenzhen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1217-1226.
- [50] 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 Region [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 886-891.
- [51] 中华人民共和国环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.mep.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293705457.pdf>, 2014-08-20.
- [52] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测[J]. *环境科学*, 2009, **30**(10): 2809-2815.
- Wei W, Wang S X, Hao J M. Estimation and forecast of volatile organic compounds emitted from paint uses in China [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(10): 2809-2815.
- [53] Fu X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **70**: 39-50.
- [54] Zhang Y, Dore A J, Ma L, *et al.* Agricultural ammonia emissions inventory and spatial distribution in the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(2): 490-501.
- [55] 冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 等. 四川省 2005~2014 年农业源氨排放清单及分布特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2728-2737.
- Feng X Q, Chen J H, Jiang T, *et al.* Agricultural ammonia emission inventory and its spatial distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2728-2737.
- [56] 中华人民共和国环境保护部. 大气氨源排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201408/W020140828351293771578.pdf>, 2014-08-20.
- [57] 杨德容, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市铺装道路扬尘排放清单及空间分布特征研究[J]. *环境工程*, 2015, **33**(11): 83-87.
- Yang D R, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Emission inventory and spatial distribution of paved road fugitive dust in Chengdu in Sichuan Province [J]. *Environmental Engineering*, 2015, **33**(11): 83-87.
- [58] 杨杨. 珠三角地区建筑施工扬尘排放特征及防治措施研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [59] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 955-966.
- [60] Zhang J, Smith K R, Ma Y. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China; a database for emission factors[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(26): 4537-4549.
- [61] Atasoy E, Döğeroğlu T, Kara S. The estimation of NMVOC

- emissions from an urban-scale wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2004, **38**(14-15): 3265-3274.
- [62] European Commission. Integrated pollution prevention and control, reference document on the best available techniques for waste incineration[EB/OL]. http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf, 2016-07-26.
- [63] Sutton M A, Dragosits U, Tang Y S, *et al.* Ammonia emissions from non-agricultural sources in the UK [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(6): 855-869.
- [64] Roe S M, Spivey M D, Lindquist H C, *et al.* Estimating ammonia emissions from anthropogenic nonagricultural sources-Draft final report[R]. Washington: US Environmental Protection Agency, 2004.
- [65] 沈兴玲, 尹沙沙, 郑君瑜, 等. 广东省人为源氨排放清单及减排潜力研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(1): 43-53.
Shen X L, Yin S S, Zheng J Y, *et al.* Anthropogenic ammonia emission inventory and its mitigation potential in Guangdong Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 43-53.
- [66] 尹元畅, 蒋燕, 王波, 等. 成都餐饮源 PM_{2.5} 及 VOCs 排放因子的探索[J]. *环境监测管理和技术*, 2015, **27**(5): 63-67.
Yin Y C, Jiang Y, Wang B, *et al.* The study on fine particles and VOCs emission factor of cooking activities in Chengdu[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2015, **27**(5): 63-67.
- [67] 中国科学院资源环境科学数据中心 (RESDC). 中国土地利用数据、社会经济数据和全球夜间灯光数据[EB/OL]. <http://www.resdc.cn>, 2018-04-14.
- [68] He M, Zheng J Y, Yin S S, *et al.* Trend, temporal and spatial characteristics, and uncertainties in biomass burning emissions in the Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(24): 4051-4059.



CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)