

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4

第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态	于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)
西安市 PM _{2.5} 中碳质气溶胶污染特征	牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)
太原市冬季 PM _{2.5} 化学组分特征与来源解析	刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析	闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)
珠海市郊区大气 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响	金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)
基于 SOA 转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟	高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析	孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算	赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性	齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征	高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程 PAN 和 O ₃ 分析	邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化	胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)
南昌市扬尘 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评价	于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用	樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)
现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析	马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性	杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估	赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用	苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的 PHEV 二氧化碳排放分析	郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险	刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估	彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)
生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例	马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)	李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析	谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)
基于 RZWQM 模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律	郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征	程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘德富, 马骏(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征	何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)
尾水受纳河流中 PhACs 在传统水相中的分布及环境风险	王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价	李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味	孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)
金属有机框架 MIL-53(Fe)可见光催化还原水中 U(VI)	闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异	龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)
氢氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能	许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果	陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 王洪廷, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对 Cd 的吸附、回收与再生	李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制	黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性	马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)
生活污水预沉淀-SNAD 颗粒污泥工艺小试	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能	周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)
异养硝化细菌 <i>Pseudomonas putida</i> YH 的脱氮特性及降解动力学	汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 鄯丹(1892)
污泥龄及 pH 值对反硝化除磷工艺效能的影响	韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)
盐度条件下 ANAMMOX-EGSB 反应器颗粒污泥微生物群落	王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)
内源碳 PHA 的贮存对混合菌耐低温特性的影响	杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布	王超, 刘清伟, 耿音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价	王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N ₂ O)浓度特征及影响因素	田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤 CH ₄ 吸收规律	杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应	王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响	徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素	覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律	孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)
生物发酵制药 VOCs 与臭味治理技术研究与进展	王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)
《环境科学》征订启事(1612)	《环境科学》征稿简则(1787)
信息(1663, 1796, 1833)	

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势

周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲

(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)

摘要: 基于调研文献测试数据, 对不含含氧有机物 (oxygenated volatile organic compounds, OVOCs) 组分的源成分谱进行修订和重构, 得到归一化的 VOCs 源成分谱, 根据 2015 年四川省大气污染源排放清单建立了基于源成分谱的 1 km × 1 km VOCs 组分排放清单, 并估算其臭氧生成潜势以评估对臭氧生成的影响. 所建立的 VOCs 源成分谱库包括 45 个源成分谱和 519 种组分, 由于针对富含 OVOCs 的生物质燃烧和汽车排放等源类进行了修订和重构, 因此所建立的源成分谱库对于 VOCs 组分清单构建和源解析具有更好地应用性. VOCs 组分清单结果表明, 四川省人为源 VOCs 总排放量为 773.8 kt, 其中烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、OVOCs、卤代烃和其它 VOCs 分别占 VOCs 总排放量的 21.6%、10.0%、1.7%、28.0%、26.2%、4.2% 和 8.3%, 总臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 为 2 584.9 kt, 上述各类 VOCs 分别占总 OFP 的 6.9%、26.1%、0.5%、42.3%、23.2%、0.4% 和 0.5%. 四川省各城市 VOCs 排放组分均以芳香烃、OVOCs 和烷烃为主, 但亦存在显著差异: 成都、雅安、阿坝、甘孜和凉山机动车排放贡献较大, 烷烃排放量占 VOCs 排放总量的比例较高; 攀枝花为工艺过程源贡献较大的重工业城市, 烷烃排放量占比较高; 德阳、眉山、遂宁和资阳溶剂使用源排放较大, OVOCs 排放量占比较高. 四川省 VOCs 排放量和 OFP 较大的组分主要集中分布于人口和工业较为密集和发达的四川盆地以及凉山和攀枝花的部分地区, 其中间-二甲苯和甲苯主要贡献源为溶剂使用源, 导致其在城市建成区的分布更为集中, 生物质燃烧对乙烯和甲醛排放有大量贡献, 造成其在农业发达的川东和川南的耕地区域有大量分布.

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 含氧有机物 (OVOCs); 四川省; 源成分谱; 组分清单; 臭氧生成潜势 (OFP)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1613-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.201809080

Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province

ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, WU Ke-ying, SONG Dan-lin, HUANG Feng-xia, ZHOU Xiao-ling
(Chengdu Key Laboratory of Air Pollution Research, Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on the measured data in the literature, VOCs (volatile organic compounds) source profiles were revised and reconstructed without OVOCs (oxygenated volatile organic compounds) species to obtain the normalized VOCs source profiles. Using the 2015 Sichuan emission inventory, source profiles based on the 1 km × 1 km gridded speciated VOCs emission inventory were developed, and the ozone formation potentials of the species were estimated to assess the environmental impact on ozone formation. The established VOCs source profile database consists of 45 source profiles and 519 species. Since the source profiles were established based on the revision and reconstruction of pollution sources, such as biomass burning and transportation, that are rich in OVOCs, the source profile database is better applicable to establishing the speciated VOCs emission inventory and source apportionment. The speciated VOCs emission inventory showed that the total anthropogenic emission of VOCs in Sichuan Province was 773.8 kt, of which the emissions of alkanes, olefins, alkynes, aromatics, OVOCs, halohydrocarbons, and other VOCs accounted for 21.6%, 10.0%, 1.7%, 28.0%, 26.2%, 4.2%, and 8.3% of the total respectively. The total OFP (Ozone formation potential) was 2 584.9 kt, of which the OFPs of the VOCs groups mentioned above accounted for 6.9%, 26.1%, 0.5%, 42.3%, 23.2%, 0.4%, and 0.5% respectively. The main VOCs species emitted in all cities of Sichuan Province were aromatics, OVOCs, and alkanes; however, there were some significant regional differences: transportation in Chengdu, Ya'an, Aba, Ganzi, and Liangshan made a greater contribution to VOCs emissions, with alkane emissions accounting for a higher proportion in the total VOCs emission. As a heavy industrial city, Panzhihua suffered most from emissions from industrial processes, which contain a relatively high proportion of alkanes. Solvent use in Deyang, Meishan, Suining, and Ziyang made a great contribution to the VOCs emissions, and the OVOCs emission was relatively high. Emissions of VOCs and species with relatively high OFPs in Sichuan Province were mainly distributed in the Sichuan Basin, which has a dense population and highly developed industry, as well as some areas in Liangshan and Panzhihua. The main source of *m*-xylene and toluene was solvent use; therefore, *m*-xylene and toluene were relatively concentrated in developed urban areas. In addition, biomass burning contributed greatly to the emissions of ethene and formaldehyde; therefore, ethene and formaldehyde were mainly distributed in the cultivated areas of agriculturally advanced Eastern Sichuan and Southern Sichuan.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); oxygenated volatile organic compounds (OVOCs); Sichuan Province; source profiles; speciated emission inventory; ozone formation potential (OFP)

收稿日期: 2018-09-14; 修订日期: 2018-10-22

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, 工程师, 主要研究方向为大气污染源排放控制, E-mail: gorezhou@cdaes.cn

挥发性有机物(VOCs)通常包括 $C_2 \sim C_{12}$ 非甲烷碳氢化合物、 $C_{10} \sim C_{20}$ 高碳烃、含氧有机物(oxygenated volatile organic compounds, OVOCs)、卤代烃和其它有机物^[1], 其主要排放于生物质燃烧、天然源和人为源^[2~4], 虽然天然源在全球尺度排放上占统治地位^[5,6], 但随着人类活动增强, 在经济发达的地区和城市人为源排放贡献有大幅上升^[7~9]. 不同的 VOCs 组分对于近地面 O_3 和二次气溶胶(SOA)的生成有着不同的影响^[10~12], 大量研究表明, 我国大部分地区近地面 O_3 的生成主要受 VOCs 控制^[13~15], 同时 VOCs 对 SOA 生成具有重要贡献, 我国经济发达地区 $PM_{2.5}$ 中 SOA 所占比例较高^[16~18]. 由于人为源 VOCs 组分清单存在着较高的不确定性, 增加了从排放清单角度理解二次污染物生成机理的难度, 并对制定 VOCs 最优控制比例所需相应措施形成了干扰.

国内已开展了大量大气污染物源排放清单工作, 其中针对 VOCs 组分清单研究较少^[19,20], 且主要集中在京津冀、长三角和珠三角等经济发达区域^[7,21,22], 但是受体模型和化学传输模型需要详尽的各个污染源的 VOCs 组分信息和排放量作为模型输入数据. 污染源成分谱为每个 VOCs 组分相对于总排放量的质量分数, 是将 VOCs 总排放量分离为组分排放量的必要条件^[1,23]. 从 20 世纪 80 年代开始, 欧美等国家和地区已经开展了大量 VOCs 源成分谱研究^[24~27], 美国环保署开始对国内和加拿大的 VOCs 源排放成分谱研究进行收集, 建立了 SPECIATE 数据库, 现在已更新到了 Version 4.5^[28], 该数据库经过多年更新和调整, 已成为目前源类别、化学组分最全面的成分谱数据库, 在最新的版本中, 包括 2 175 个 VOCs 成分谱、2 602 个化学物种、34 个涉及 VOCs 排放源. 欧洲也编制了类似的源成分谱数据库^[29,30]. 从 21 世纪开始, 源成分谱测试工作逐渐得到重视, 一些研究团队开展了大量样品采集和分析工作, 主要针对燃料燃烧^[31,32]、工艺过程^[33,34]、溶剂使用^[35]、机动车^[36,37]和其它污染源^[38,39].

虽然对 VOCs 源成分谱开展了大量研究, 但在应用于 VOCs 组分清单开发时仍然主要存在以下 4 方面的问题: 首先, 这些研究成果所含物种差异较大, 因此可比性较差, 以往的研究结果显示生物质燃烧和柴油汽车所排放 VOCs 中具有较高含量的 OVOCs, 特别是柴油汽车可达 20% ~ 70%^[40,41], 但在上述国内研究中被忽视; 其次, 中国工业污染源涉及行业较多且复杂, 已有测试研究的对象比较单一, 主要聚焦在某些典型行业和工艺环节中开展研

究, 导致大量行业没有或少有相应国内测试数据; 然后, 单个源成分谱分配给相应排放源时, 可能会由于源成分谱的局限性, 降低排放源的计算精确度^[42], 例如燃烧源含有多种燃料和燃烧技术类型, 单一源成分谱难以代表其所有排放特征; 最后, 同一类污染源的源成分谱, 其数据质量难以量化判断, 在应用时源成分谱的选择可能会导致难以预估的不确定性^[43]. 因此, 需要对中国现有研究成果进行总结, 建立一个较为完整和系统的 VOCs 源成分谱数据库, 用于 VOCs 组分排放计算和源解析.

随着四川盆地经济快速发展, 频发的光化学烟雾和雾-霾等大气复合型污染已成为四川省面临的首要环境问题^[44~46], 在采取了控制电厂、工业和生活燃煤使用等一系列措施以减少一次颗粒物和二次颗粒前体物(NO_x 和 SO_2)的排放后, 随着环境空气中 $PM_{2.5}$ 浓度逐渐下降, O_3 污染成为了空气质量改善的首要问题, 深入认识和控制 VOCs 排放成为迫切需求. 为了减少由于上述问题所造成的 VOCs 组分清单建立时存在的不确定性, 本文以四川省为例, 对收集的源成分谱进行必要的调整和重构, 建立了源成分谱数据库和高分辨率的人为源 VOCs 组分排放清单, 应用于复合型大气污染研究、污染源 VOCs 活性组分识别和控制以及重污染天气应急等精细化管理中.

1 材料与方法

VOCs 组分清单的计算主要是使用 VOCs 排放量乘以相应污染源的源成分谱, 方法流程见图 1. 本文采用文献调研方式获取 VOCs 源成分谱, 并将污染源分为 10 类污染源分别进行收集整理, 对于其中不含 OVOCs 源成分谱进行修订, 在完成重构后得到归一化的 VOCs 源成分谱, 根据 2015 年四川省大气污染源排放清单中 VOCs 排放量数据^[47], 建立基于 VOCs 源成分谱的 VOCs 组分排放清单, 并估算其臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP), 以评估其对臭氧生成的影响, 最后基于不同空间分配参数完成 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ VOCs 组分排放清单网格化分配.

1.1 四川省人为源 VOCs 排放清单

根据环保部发布的清单编制技术指南方法和四川省大气污染源排放清单中 VOCs 排放部分, 识别涉及人为活动的 VOCs 排放源, 包括工业、交通、生活、油气储运和废弃物处理等, 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、生物质燃烧源、储存运输源、废弃物处理源和餐饮油烟源 8 类. 关于四川省大气污染源

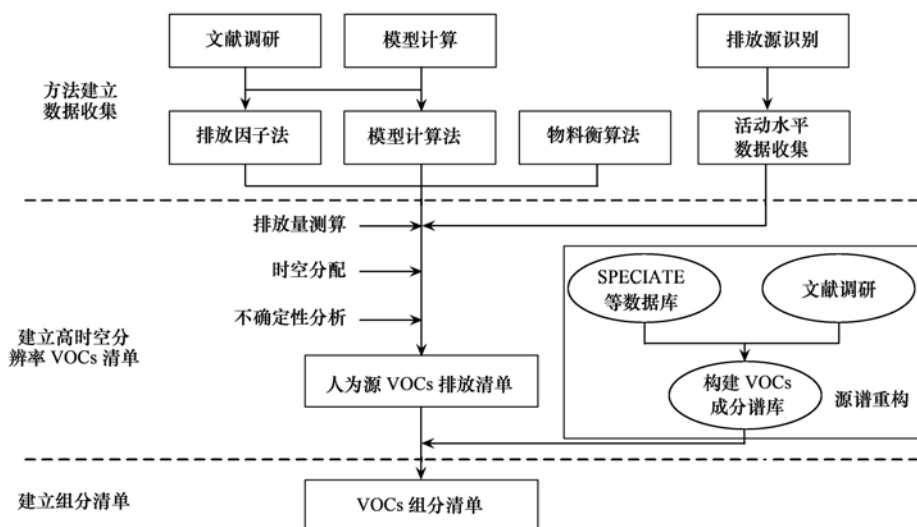


图1 技术路线示意

Fig. 1 Schematic of the technical procedure

排放清单 VOCs 排放计算部分的活动水平和排放因子等细节见已有研究^[48].

1.2 VOCs 源成分谱库编制

1.2.1 源成分谱的来源

源成分谱的选择主要按照如下 3 个步骤：首先对本地化的测试结果进行收集，由于四川省测试数据较少且代表性较差，因此本研究主要基于国内测试数据。其次，对于测试样品较少或缺失 OVOCs 组分信息的污染源，也采用了国外测试数据进行补充。最后，VOCs 排放源种类多样，对于现有研究结果没有覆盖的，使用 SPECIATE 数据库 v. 4.5 作为补充。由于部分研究所报道的结果，存在没有列出详细数据、测试信息模糊和测量组分较少等情况，因此基于前述源步骤，挑选出数据可得、测试条件和方法阐述充分、合理，以及测量组分具有代表性的源谱。各污染源 VOCs 源成分谱来源描述如下。

我国化石燃料固定燃烧源的源成分谱测试总体较少，本文收集的源成分谱主要包括：Shi 等^[32]采用稀释通道采样方法，对火电厂、热电站和其它工艺过程源排气烟道进行了测试，得到了 107 种 $C_2 \sim C_{12}$ VOCs 组分；Liu 等^[48]对工业燃煤和生活燃煤排气烟道采集了 VOCs 样品，构建了 92 种 VOCs 组分的工业制造燃煤和民用源燃煤成分谱；Tsai 等^[31]对包括燃煤、LPG、煤气和天然气的 16 种炉型或燃料类型民用锅炉、窑炉开展了源成分谱测试，构建基于 54 种组分的农村地区燃料使用 VOCs 源成分谱数据库；Wang 等^[49]使用 5 个不同产地燃煤进行模拟农村炉灶燃烧并测试，获取了其 NMHCs 和 OVOCs 排放特征。此外，收集了 Wei 等^[20]和 SPECIATE 源成分谱^[28]作为电力和工业制造源等成分谱的补充。

工艺过程源包括的行业众多，其污染源 VOCs 排放环节和特征差异较大，目前国内研究主要针对石化和钢铁制造等我国典型污染源，化工等 VOCs 排放强度较大行业的源成分谱研究极其匮乏。本研究收集的源成分谱主要包括：Liu 等^[48]分别在广东省石化企业炼油区、化工区的减压蒸馏、催化裂化等装置处采集 VOCs 环境空气样品，以此表征石化行业源成分谱特征，此外在北京也开展了类似工作；Tsai 等^[33]在台湾省对钢铁制造企业的炼焦、烧结、热成型和冷成型 4 个工艺环节开展测试；Shi 等^[32]在辽宁省也对钢铁制造企业开展了类似测试工作，但采用了稀释通道的样品采集方法，构建了钢铁行业的源成分谱；Hsu 等^[50]在台湾省化工厂，对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯聚合物和聚苯乙烯等化工制品的工艺排放进行了测试，建立了部分化工产品的 VOCs 源成分谱。此外，还有其它研究建立了涂料和聚氨酯等工艺过程源成分谱^[41,51]，由于国内研究的缺失，收集了 SPECIATE 源成分谱作为补充^[28]。

移动源包括机动车等道路移动源和农用车等非道路移动源，其中国内研究主要集中在道路移动源上，因此本研究将汽油汽车和柴油汽车的源成分谱划分开。陆思华等^[52]在国内较早开展机动车 VOCs 源成分谱研究，初步建立了包括 60 种碳氢化合物 (NMHCs) 组分的机动车源成分谱。有研究基于罐采样和 GC/MS 分析方法^[36, 48, 53~56]，对机动车 VOCs 的 NMHCs 组分进行了分析，建立了汽油车行驶排放、热浸挥发和摩托车源成分谱。Dong 等^[57]开展了机动车基于机动车排污控制中心 (VECC) 和世界瞬态车辆循环 (WTVC) 等不同行驶工况下的排放测试，同时使用 DNPH 衍生化的方法分析了羰基

化合物,建立了包含 OVOCs 的源成分谱.文献[37,58,59]开展了柴油车和农用车排放研究,分析了其 NMHCs 和 OVOCs 排放特征,建立较为全面的源成分谱.考虑到机动车属于全球化制造产品,其全球排放特征较为相似,因此收集了国外研究成果^[28,60-62],由于国内没有飞机排放相关测试研究,所以参考了 SPECIATE 中收录的飞机 VOCs 排放源成分谱^[28].

溶剂使用作为 VOCs 主要排放源,国内有较多研究,主要集中在汽车涂装、家具喷涂和印刷等行业中,由于溶剂使用工艺中无组织排放逸散严重,对无组织排放源成分谱的测试也较多.本研究收集的源成分谱主要包括:Zheng 等^[41]在珠三角区域建立了金属表面喷涂、家具喷涂和制鞋等行业的源成分谱,其中将印刷工艺分为平板、凸版和凹版分别进行测试分析;莫梓伟等^[63]建立了上海市汽车涂装、造船喷涂、集装箱喷涂和木器喷涂等具有典型地域特点的源成分谱;Wang 等^[64]在开展工业 VOCs 源成分谱的同时,分别建立国产和进口建筑涂料源成分谱,Huang 等^[65]对生活用溶剂进行了测试,建立了地板和厨房清洁等溶剂使用的源成分谱.此外,将国内外其它相关研究也纳入到谱库中^[28,35,53,66].

化石燃料燃烧、工业和交通源以外其它排放源的国内源成分谱研究相对较少,主要集中在生物质燃烧源.Wang 等^[67]使用模拟燃烧方法,测量了我国北方农村地区炉灶和炕以薪柴和秸秆作为燃料时的 VOCs 源成分谱,Tsai 等^[31]通过分析我国上世纪 90 年代主要居民燃料类型,以实地测试和模拟厨房相结合,建立了生物质成型燃料和秸秆源成分谱.张春洋等^[39]基于北京市主要餐饮类别,采集油烟中 NMHC 组分,建立了部分餐饮类型的源成分谱.同时对其它关于生物质燃料燃烧、储存运输和固废处理的源成分谱进行了收集^[28,40,49,53,68,69].

1.2.2 不含 OVOCs 源成分谱的修订

所调研 VOCs 源成分谱中,部分没有包含 OVOCs 组分,但对于机动车和生物质燃烧等富含 OVOCs 的排放源,其 OVOCs 中的醛酮类等组分占有重要的地位,因此需对不含 OVOCs 源成分谱进行修订.这里以移动源中的汽油车和柴油车为例,对修订方法进行举例阐述,图 2 为修订过程示意.

修订方法为从备选的 VOCs 源成分谱中挑选出包含有 OVOCs 组分的源成分谱,计算其 OVOCs 组分的平均质量分数,并将此质量分数视为该类源成分谱中 OVOCs 的平均质量分数,然后将此质量分数扩展到该类源中其它未包括 OVOCs 的源成分谱中,见计算公式(1).

$$\text{Pre}_{i,j} = \frac{\text{Pori}_{i,j}}{\sum_{j=1}^n \text{Pori}_{i,j}} \times (1 - \overline{\text{Povocs}_{i,j}}) \quad (1)$$

式中, i 为排放源; j 为 VOCs 组分; n 为 VOCs 组分数量; $\text{Pre}_{i,j}$ 为未包括 OVOCs 组分的排放源 i 经过修订计算后,其 j 组分的质量分数; $\text{Pori}_{i,j}$ 为未包括 OVOCs 组分的排放源 i 中 j 组分的质量分数; $\text{Povocs}_{i,j}$ 为包含有 OVOCs 组分的源成分谱中, i 组分的质量分数; $\overline{\text{Povocs}_{i,j}}$ 为包含有 OVOCs 组分的多个源成分谱中, i 组分的平均质量分数.

由图 2 可见,汽油车备选源成分谱中,文献[28,36,54,60]中含有 OVOCs 组分的源成分谱中 OVOCs 组分质量分数的平均值为 3.08%,即以此为汽油车 VOCs 源成分谱中 OVOCs 的平均质量分数,利用公式(1)对其它 3 个未含有 OVOCs 组分的源成分谱进行计算,使这 3 个源成分谱中原有各组分的质量分数降为 96.92%,新增的 OVOCs 组分质量分数为 3.08%.柴油车的计算也为同一方法,文献[37,58,62]所建立的含有 OVOCs 组分源成分谱中的 OVOCs 组分的平均质量分数为 36.58%,修订后其它未包含 OVOCs 组分的源成分谱中原有各项组分质量分数降为 63.42%,新增的 OVOCs 组分质量分数为 36.58%.

1.2.3 VOCs 源成分谱重构

在完成修订后,开始 VOCs 源成分谱重构.以上述汽油车源成分谱为例,得到 7 个包含 OVOCs 的源成分谱后,为减少异常样本和测量值而产生的误差,对这 7 个源成分谱中的各组分取中位值,然后将得到的各组分中位值按照公式(2),使所有组分中位值加和为 100%,即得到重构后的 VOCs 源成分谱.需要强调的是重构前没有包含 OVOCs 组分的 3 个源成分谱,其被修订的 OVOCs 组分,视为缺失值,不纳入到计算中,仅对原有成分谱中包含 OVOCs 组分的进行中值计算.柴油汽车使用相同方法计算.

$$R_{i,j} = \frac{\text{Rmed}_{i,j}}{\sum_{j=1}^n \text{Rmed}_{i,j}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, i 为排放源; j 为 VOCs 组分; n 为 VOCs 组分数量; $R_{i,j}$ 为排放源 i 修订后的源成分谱中, j 组分经过重构后的质量分数; $\text{Rmed}_{i,j}$ 为排放源 i 修订后的源成分谱中 j 组分的中值.

重构后的 VOCs 成分谱见图 3 中的 R1(汽油车)和 R2(柴油车),甲烷为汽油车 VOCs 源成分谱重构后质量分数最大的组分,达到 10.97%,然后为乙烯的 10.07%和甲苯的 7.30%.柴油车源成分谱中占比较大的组分依次为甲醛的 13.89%、苯乙

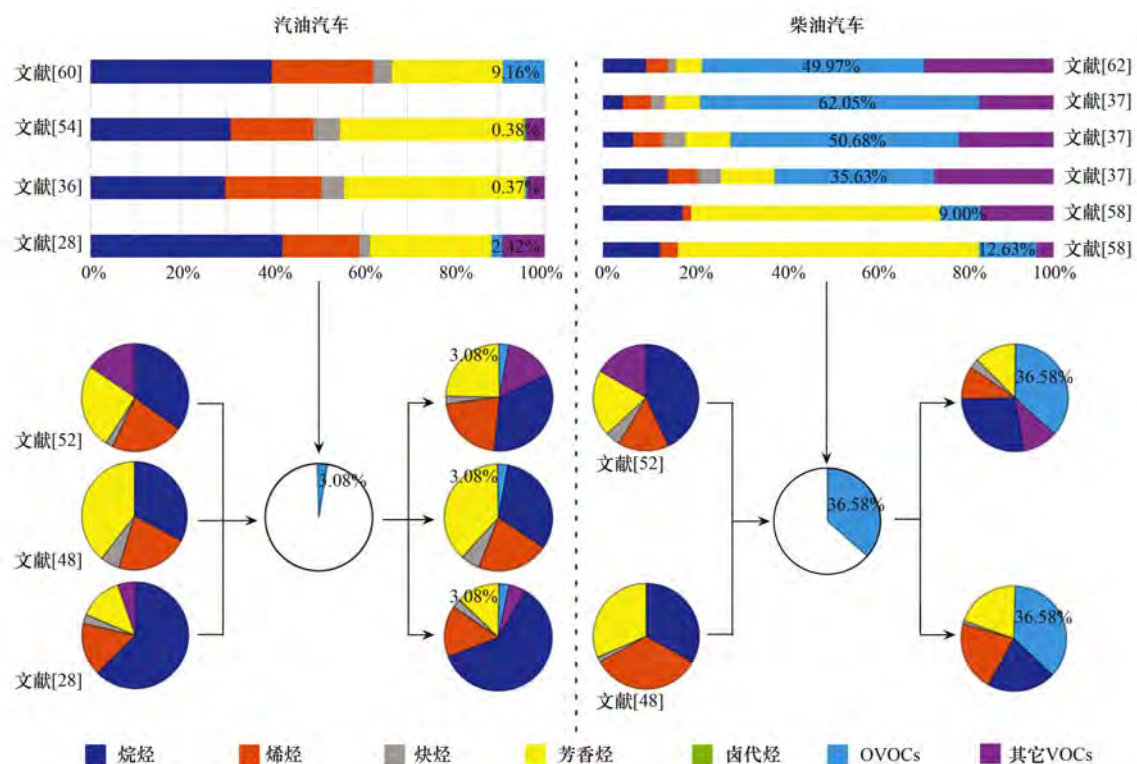


图2 汽油车和柴油车源成分谱修订过程

Fig. 2 Process of revising the source profiles of gasoline vehicles and diesel vehicles

烯的 10.77% 和乙醛的 10.49% .

依据此方法，对收录的所有 VOCs 成分谱按照不同排放源子类，分别进行重构，最终得到重构后的源成分谱，用于下一步计算.

1.2.4 组分排放量和 OFP 计算

大气污染源 VOCs 排放量基于各污染源

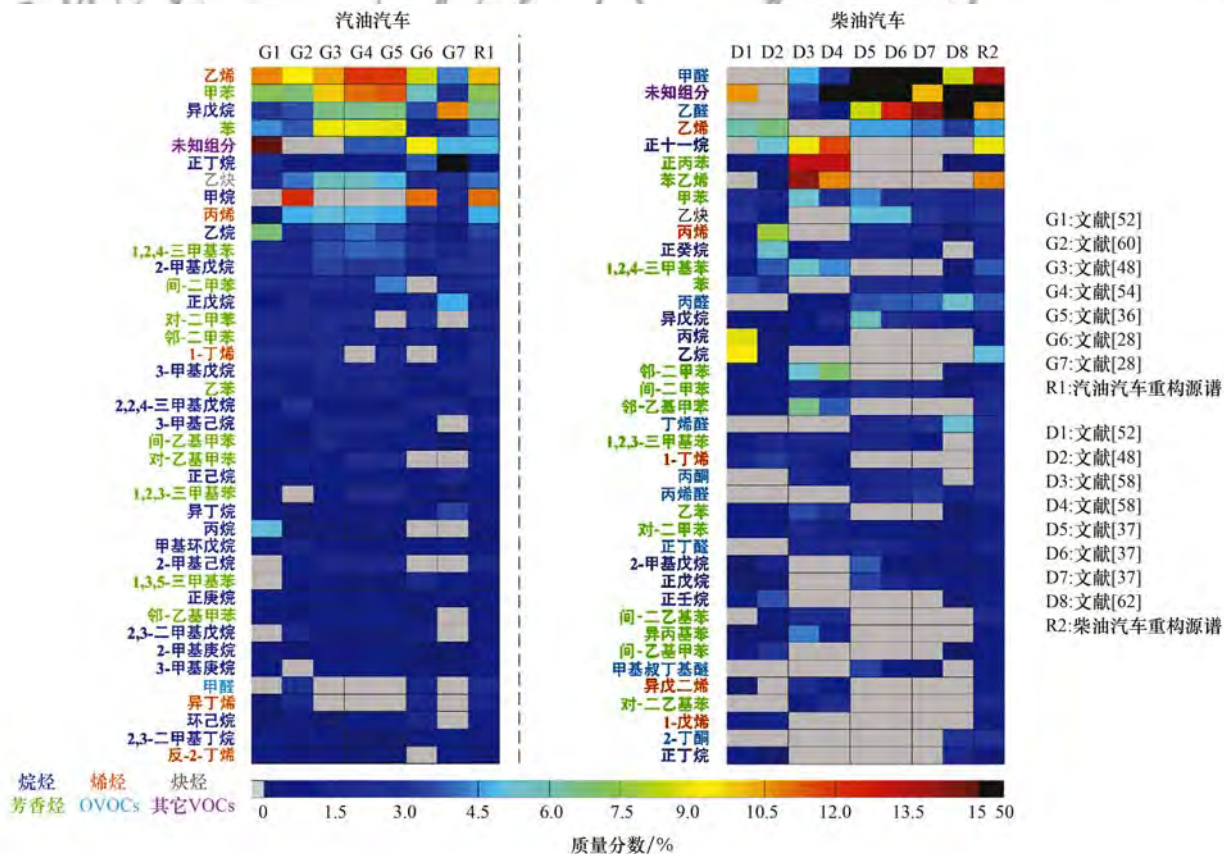


图3 重构后 VOCs 成分谱中质量分数前 40 位的组分

Fig. 3 Top 40 species of the reconstructed source profiles of gasoline vehicles and diesel vehicles

VOCs 成分谱, 可得到组分排放量, 为进一步表征 VOCs 组分排放对二次污染生成贡献, 本文采用 OFP 对 VOCs 活性进行定量评估. 源成分谱为重构后建立的归一化成分谱. VOCs 组分排放量基于各污染源总 VOCs 排放量, 分配其相应的源成分谱, 进而计算单一组分排放量, 计算方法见公式(3).

$$E_{i,j} = E_i \times f_{i,j} \quad (3)$$

式中, $E_{i,j}$ 为污染源 i 中 VOCs 组分 j 的排放量; E_i 为污染源 i 的 VOCs 排放量; $f_{i,j}$ 为污染源 i 中组分 j 相对于总 VOCs 的质量分数.

至于 OFP 计算则采用应用最为广泛的增量反应活性 (maximum incremental reactivity, MIR) 来估算 VOCs 对臭氧生成的贡献, 通过加和污染源各组分排放的 OFP, 最终得到该污染源的 OFP 总量, 计算方法见公式(4).

$$\text{OFP}_i = \sum_{j=1} E_{i,j} \times \text{MIR}_j \quad (4)$$

式中, OFP_i 为污染源 i 的臭氧生成潜势; i 为污染源类型; j 为物种组分; $E_{i,j}$ 为污染源 i 中 VOCs 组分

j 的排放量; MIR_j 为 VOCs 组分 j 的最大增量反应活性, 其系数取自文献[70].

1.3 空间分配

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 软件和空间特征表征参数 (主要为经纬度、GDP、人口、灯光分布、土地利用分布、路网和车流量等) 进行分配, 参数主要来源于中国科学院资源环境科学数据中心等开源数据^[71], 详见文献[47].

2 结果与讨论

2.1 VOCs 源成分谱库的建立

基于对所调研文献测试数据的修订和重构, 建立了 VOCs 源成分谱库, 主要分为化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源和其它源 5 类, 共计 45 个源成分谱, 见图 4. 民用燃料、机动车和生物质燃烧等污染源, 基于不同燃料、车型和生物质类型, 均有大量测试研究并获取了多个源成分谱, 但为了便于实际应用, 简化了其分类, 减少了源成分谱数量.

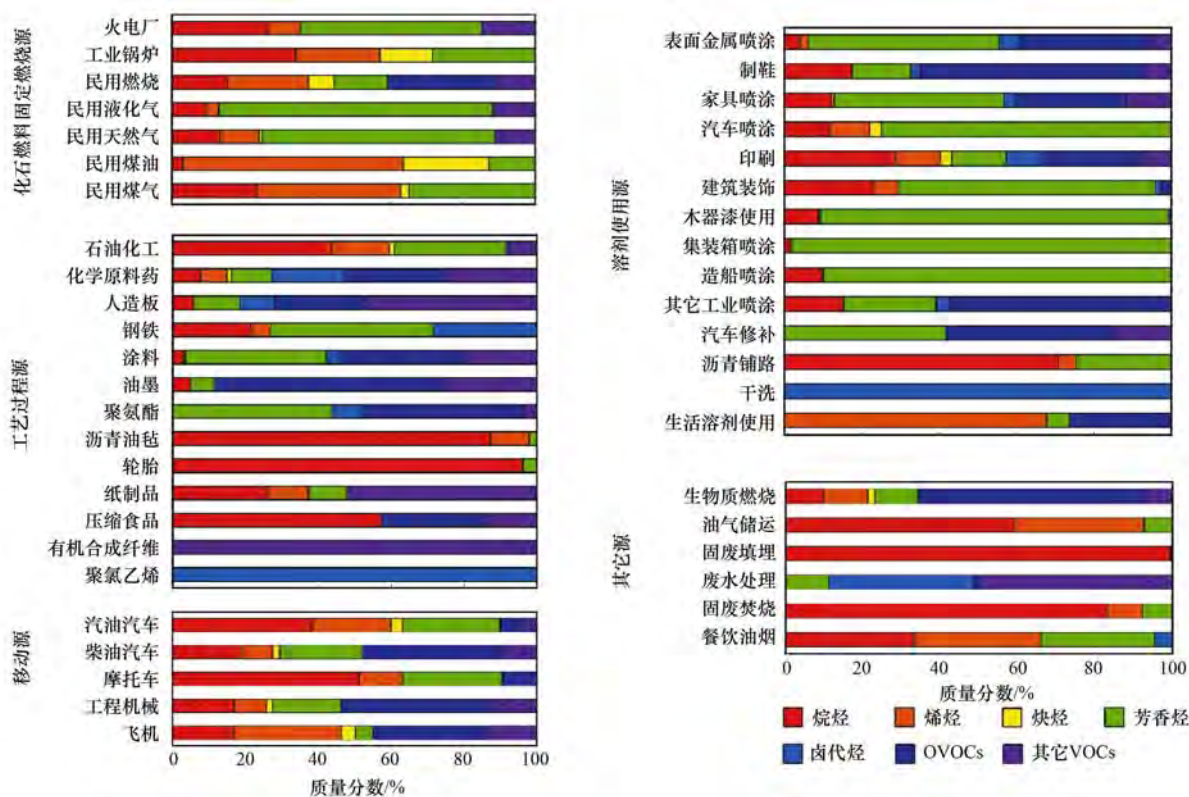


图 4 VOCs 源成分谱的建立

Fig. 4 Establishment of the VOCs source profiles

表 1 列出了国内外建立的部分 VOCs 源成分谱数据库及比较. SPECIATE 数据库 v. 4.5 为目前综合性最好的 VOCs 源成分谱库, 包含 2 175 种源谱, 囊括了绝大部分污染源, 同时包含了 2 000 余种组

分. Theloke 等^[29]建立的欧洲 VOCs 源成分谱则包括 87 种源谱和 306 种组分. 从国内来看, Wei 等^[34]基于国内实测研究和 SPECIATE 数据库, 建立了包括 42 种源谱和 33 种组分的源成分谱库; Mo

等^[23]则基于大量国内实测研究,编制了包含 75 种组分的源成分谱库;Li 等^[43]以 SPECIATE 数据库为主,同时收集国内实测数据,通过统计方法,建立了综合性的包含 700 种组分的源成分谱库. 本文源成分谱主要基于国内测试数据,通过 SPECIATE 等对国内没有实测或研究较少的部分源类进行补充,同时针对富含 OVOCs 组分的生物质燃烧和汽车排放等源类进行了修订,并最终完成了重构,因此本文所建立的 VOCs 源成分谱数据库对于 VOCs 组分清单构建和源解析具有更好的应用性.

表 1 国内外 VOCs 源成分谱库比较

Table 1 Comparison of the VOCs source profile databases of the US, Europe, and China

源成分谱来源	源成分谱数量	所含组分	应用地区	文献
美国和加拿大实测研究	2 175	~2 000	美国	[28]
主要为英国和德国实测研究	87	306	欧洲	[29]
国内实测研究和 SPECIATE 数据库	42	33	中国	[34]
国内实测研究和 SPECIATE 数据库	55	~700	中国	[43]
国内实测研究	85	75	中国	[23]
国内实测研究和 SPECIATE 数据库	45	519	四川	本研究

由图 4 可见,本文所建立 VOCs 源成分谱,OVOCs 为柴油汽车和生物质燃烧最主要的组分类型. 不同研究中柴油汽车和生物质燃烧排放 VOCs 组分和其类型的贡献比较见表 2 和表 3. 由表 2 可见,从 OVOCs 在 VOCs 中所占质量分数来看,Tsai 等^[58]的研究结果明显低于其它研究,同时该研究中芳香烃在 VOCs 中的质量分数也与其它研究有较大差异,本文中 OVOCs 和芳香烃的质量分数则介于这些研究之间. 从组分来看,本文所建立柴油汽车源谱中质量分数排名前 10 组分,与其它研究较为一致,均为甲醛、苯乙烯和乙醛等柴油汽车特征

组分. 由表 3 可见,不同生物质燃烧研究中,OVOCs 在 VOCs 中所占质量分数均较高,本文达到了 50% 以上,介于其它两项研究之间,由于 Andreae 等^[40]的研究中包括了多种生物质燃料类型,因此其不同种类在 VOCs 中所占质量分数的波动较大,Mo 等^[23]的研究结果也与此类似. 总体来看,由于本文所建立的重构源成分谱基于其它研究,因此建立的 VOCs 源成分谱库为不同研究的综合,在实际应用时,可有效降低因不同研究中实测过程、对象、方法和测试组分等差异,而在源成分谱选择时引入的不确定性.

表 2 柴油汽车排放 VOCs 组分和种类贡献比较/%

Table 2 Comparison of the species and chemical group contributions for diesel vehicle exhaust/%

本研究		文献[37] ¹⁾		文献[58] ²⁾		文献[62]	
物种	质量分数	物种	质量分数	物种	质量分数	物种	质量分数
甲醛	9.0	甲醛	19.3~40.2	正丙苯	13.4	乙醛	15.9
苯乙烯	7.0	乙醛	8.4~14.3	苯乙烯	10.8~14.1	甲醛	8.5
乙醛	6.8	乙烯	4.3~4.6	正十一烷	9.0~11.7	丙醛	5.3
正十一烷	5.8	乙炔	3.1~5.0	邻-二甲苯	5.2~7.0	丁烯醛	5.1
乙烷	3.2	丙醛	3.7~3.9	邻-乙基甲苯	3.9~6.6	乙烯	3.3
乙烯	2.9	异戊烷	1.8~5.8	1,2,4-三甲基苯	4.5~5.5	2-丁酮	2.9
1,2,4-三甲基苯	2.5	甲苯	2.6~4.5	甲苯	2.6~5.3	苯乙酮	1.9
丙醛	2.4	丙烯醛	1.8~3.2	甲醛	2.9~4.7	乙炔	1.8
乙炔	1.9	丁烯醛	1.9~2.9	乙苯	2.8~3.5	壬醛	1.7
2-丁酮	1.8	间-二甲苯	1.7~2.6	异丙基苯	1.2~4.4	2-甲基丙烯醛	1.5
前十物种总和	43.4	前十物种总和	57.6~78.0	前十物种总和	60.7~71.6	前十物种总和	48.0
烷烃	19.1	烷烃	4.5~14.6	烷烃	12.7~17.7	烷烃	9.6
烯烃	8.3	烯烃	6.3~6.7	烯烃	2.0~4.1	烯烃	4.9
炔烃	1.9	炔烃	3.1~5.0	炔烃	—	炔烃	1.8
芳香烃	22.9	芳香烃	7.8~11.8	芳香烃	55.4~66.8	芳香烃	5.9
卤代烃	—	卤代烃	—	卤代烃	—	卤代烃	—
OVOCs	37.7	OVOCs	42.4~68.3	OVOCs	9.0~12.6	OVOCs	57.2
其它 VOCs	10.1	其它 VOCs	10.1~19.5	其它 VOCs	3.7~16.0	其它 VOCs	20.7

1)综合考虑了轻型、中型和重型柴油汽车的测试结果;2)综合考虑了两种行驶工况的测试结果

表 3 生物质燃烧排放 VOCs 种类贡献比较/%

Table 3 Comparison of the species and chemical group contributions for biomass burning/%

本研究		文献[40]		文献[23]	
物种	质量分数	物种	质量分数	物种	质量分数
烷烃	9.7	烷烃	4.8~6.0	烷烃	0.2~1.0
烯烃	11.4	烯烃	4.1~28.9	烯烃	10.6~23.2
炔烃	1.9	炔烃	0.2~3.8	炔烃	—
芳香烃	11.1	芳香烃	1.6~25.0	芳香烃	25.0~45.5
卤代烃	0.5	卤代烃	0.1~1.7	卤代烃	0.8~1.7
OVOCs	58.8	OVOCs	28.9~87.9	OVOCs	22.3~43.6
其它 VOCs	6.5	其它 VOCs	1.0~1.5	其它 VOCs	4.1~5.9

2.2 四川省人为源 VOCs 组分排放分担率

基于 2.1 节中建立的 VOCs 成分谱库(没有直接给出的源类采用相似源类代替),建立了 2015 年四川省人为源 519 种 VOCs 组分及 OFP 排放清单. 各类 VOCs 组分的排放量及其 OFP 见图 5, 四川省人为源 VOCs 总排放量为 773.8 kt, 其中烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、OVOCs、卤代烃和其它组分分别占 VOCs 总排放量的 21.6%、10.0%、1.7%、28.0%、26.2%、4.2% 和 8.3%, OFP 总排放量为 2 584.9 kt, 上述各类 VOCs 组分分别占 OFP 总排放量的 6.9%、26.1%、0.5%、42.3%、23.2%、0.4% 和 0.5%. 综上所述, 四川省各类 VOCs 组分的 OFP 贡献差异较大, 大气化学反应活性较强的烯烃和芳香烃均贡献了其 VOCs 排放比例 1 倍以上的 OFP, OVOCs 贡献了约等于其 VOCs 排放比例的 OFP, 而活性较弱且排放量较大的烷烃则仅贡献了 6.9% 的 OFP, 因此烯烃、芳香烃和 OVOCs 是四川省 VOCs 排放中对生成臭氧最重要的组分, 控制该类组分的排放对于减少臭氧的生成具有关键作用.

图 5 同时给出了各类 VOCs 组分的排放源贡献率, 烷烃和烯烃的首要贡献源为移动源, 分别占其总排放量的 45% 和 37%; 芳香烃、OVOCs 和卤代烃的首要排放源为溶剂使用源, 分别占其总排放量的 46%、42% 和 60%; 炔烃和卤代烃的重要排放源为工艺过程源, 分别占其总排放量的 44% 和 37%;

OVOCs 的主要贡献源也包括生物质燃烧源, 占其总排放量的 24%. 总体来看, 工艺过程源、移动源、溶剂使用源和生物质燃烧源作为烯烃、芳香烃和 OVOCs 的主要贡献源, 应着重对其采取控制措施, 其中工艺过程源和溶剂使用源由于排放毒性较强的卤代烃, 亟需对其加强管理.

由于工艺过程源、移动源和溶剂使用源 OFP 较大且来源复杂, 因此图 6 分别给出了 3 个污染源和四川省人为源的 20 种 OFP 最高 VOCs 组分的排放量及其污染源排放贡献以作分析. 这 20 种组分贡献了上述源中 31%~43% 的 VOCs 排放量和 67%~75% 的 OFP, 其中由于部分 VOCs 成分谱的缺失和不精确以及排放源遗漏等, 计算结果存在较高不确定性.

图 6 可见, VOCs 组分化学反应活性, 即 MIR 的差异, 导致 OFP 最高的 20 种组分和其对应的排放量的大小顺序有显著变化, 特别是具有较高 MIR 的芳香烃、烯烃和 OVOCs 类组分. 部分 OVOCs 如乙二醛和丙酮醛由于其极高的化学反应活性, 在排放量较低的情况下却有较高的 OFP, 而烷烃(正己烷和异戊烷)、乙炔和部分 OVOCs(乙酸乙酯和 2-丁酮)因为较低的化学反应活性, 相对于排放量其 OFP 则较小.

同时, 从图 6(a)可以看出:除了部分 OVOCs 组分主要排放源为生物质燃烧源以外(乙二醛为

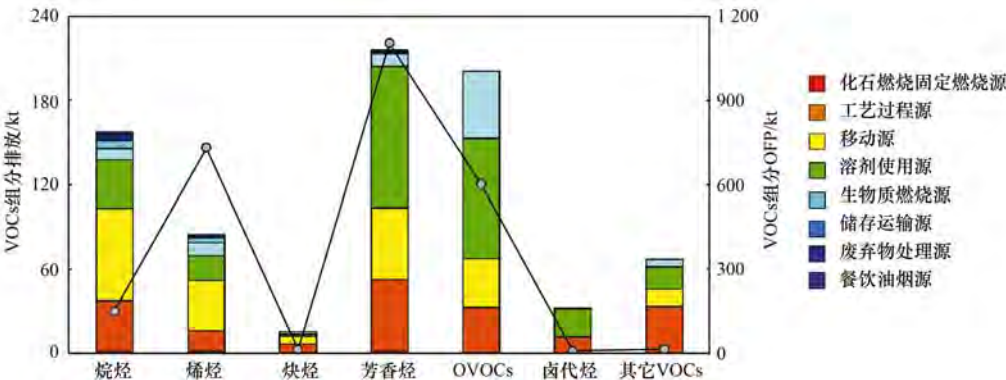


图 5 四川省人为源对各类 VOCs 组分的贡献

Fig. 5 Emission contributions to the VOCs groups by anthropogenic source category in Sichuan Province

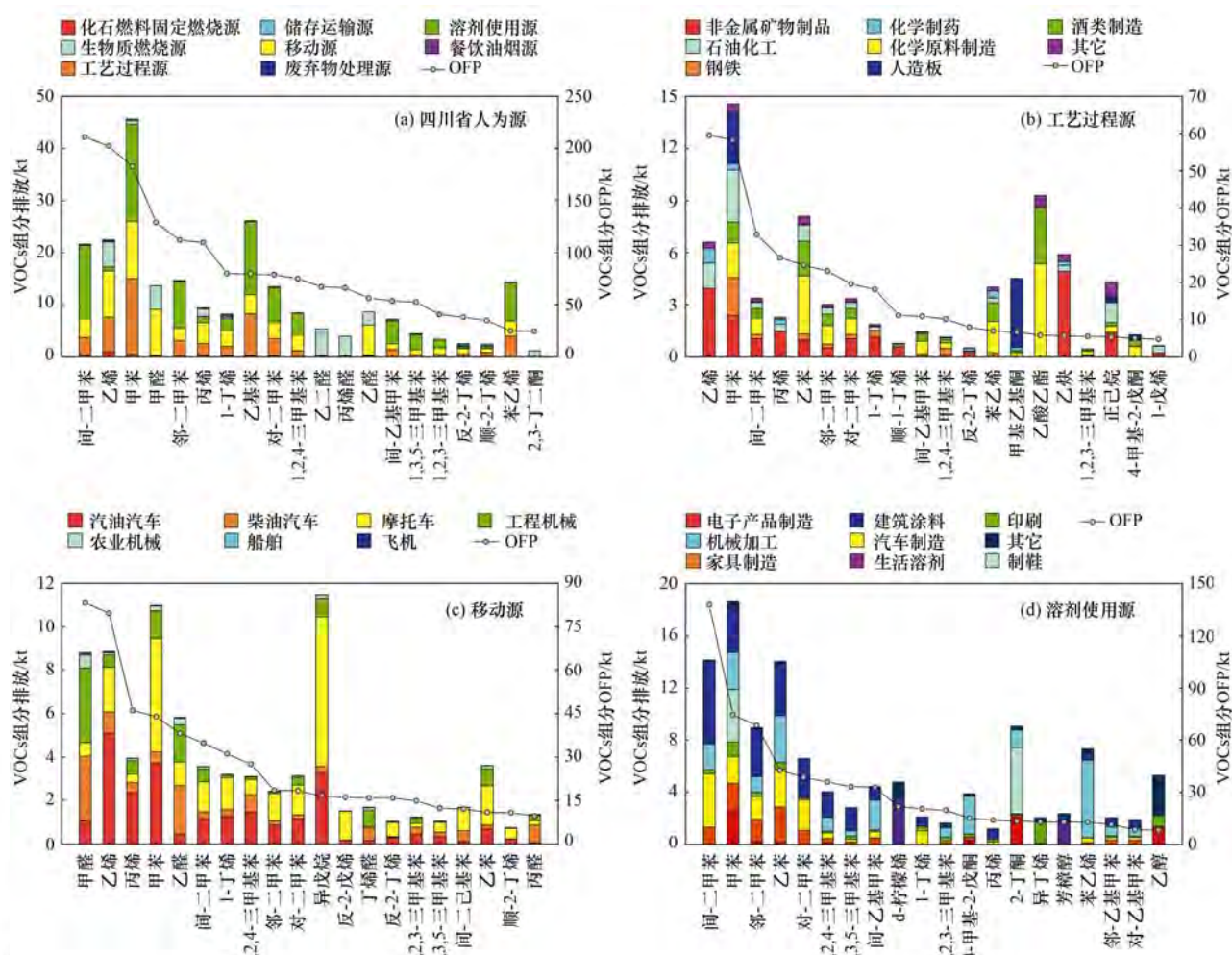


图6 不同排放源中 OFP 排放量前 20 的 VOCs 组分及其子排放源

Fig. 6 Top 20 species of OFP by sources category and sub-sources

96%, 丙酮醛为 96%, 2,3-丁二酮为 94%), 溶剂使用源、工艺过程源和移动源为四川省 VOCs 排放组分的主要贡献源; 间-二甲苯作为 VOCs 排放量第四的组分, 对 OFP 贡献最大, 其排放主要来源于溶剂使用源 (65%)、移动源 (17%) 和工艺过程源 (16%), 其它芳香烃如甲苯、邻-二甲苯和乙基苯等亦有较高的 OFP 贡献和相似的排放贡献源; 主要的烯烃类臭氧前体物包括乙烯、丙烯、1-丁烯、反-2-丁烯和顺-2-丁烯, 其中乙烯为 OFP 第二贡献源。由图 6(b) 可以看出工艺过程源中各组分排放贡献源差异较大; 烯烃主要来源于非金属矿物制品 (主要为水泥、玻璃和砖瓦制造), 其中石油化工也为 1-戊烯主要排放源; 芳香烃主要排放源为非金属矿物制品和化学原料制造; OVOCs 组分则主要来源于人造板制造和化学原料; 乙炔亦主要由非金属矿物制品贡献。移动源排放贡献源主要为汽油汽车、柴油汽车、摩托车和工程机械, 其中 OVOCs 组分主要来源于以柴油燃料为主汽车和工程机械。由图 6(d) 可见: 溶剂使用源中 OFP 较大的组分均为芳香

烃, 其主要排放源均为家具制造、汽车制造、机械加工和建筑涂料等以涂装和涂料使用为主的行业; 除柠檬烯主要来源于生活溶剂使用外, 其余烯烃类组分主要排放于汽车制造、印刷和建筑涂料; 电子产品制造、机械加工、制鞋和生活溶剂为 OVOCs 主要排放源。

2.3 四川省城市人为源 VOCs 排放特征

图 7 为四川省城市 VOCs 组分排放特征。各城市排放的 VOCs 组分均以芳香烃、OVOCs 和烷烃为主, 和四川省总体情况一致。但不同城市亦存在一些差异: 成都机动车排放贡献较大, 烷烃排放量占 VOCs 排放总量的比例较高; 攀枝花为工艺过程源 (VOCs 主要为焦炭制造排放) 贡献较大的传统重工业城市, 因此其烷烃排放量占比较高; 德阳 (电子设备制造)、眉山 (纺织和设备涂装)、遂宁 (电子设备和家具制造) 和资阳 (制鞋) 溶剂使用源排放较大, 导致其 OVOCs 排放量占比较高; 雅安、阿坝、甘孜和凉山主要由机动车排放贡献, 其中阿坝和甘孜工业发展程度较差, 机动车排放量占其 VOCs 排

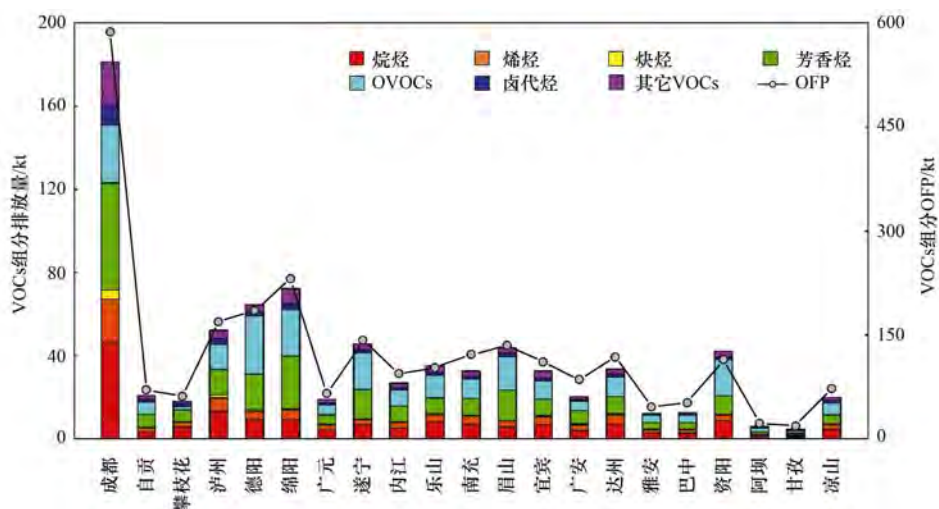


图7 四川省城市 VOCs 组分排放特征

Fig. 7 Characteristics the VOCs emissions for the cities in Sichuan Province

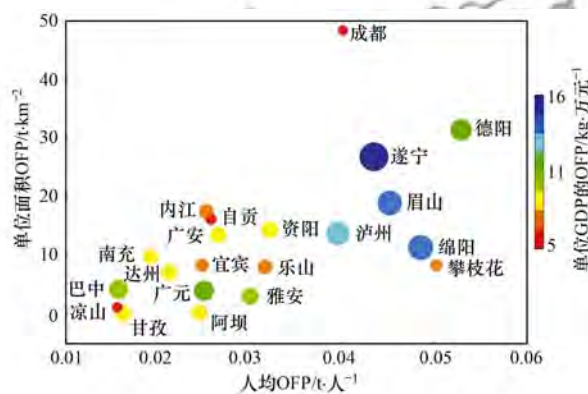
量比例达到 65% 以上, 因此其烷烃排放量占比亦较高。

图 8 为四川省各城市 OFP 的单位 GDP 排放、单位面积排放和人均排放的关系。四川省平均单位 GDP 的 OFP 为 $9.3 \text{ kg} \cdot \text{万元}^{-1}$, 不同城市的单位 GDP 的 OFP 范围为 $5.4 \sim 15.6 \text{ kg} \cdot \text{万元}^{-1}$, 差异较为显著。这些差异来源于城市间发展程度、工业结构、产业结构和人口等因素。成都市单位 GDP 的 OFP 最低, 但 OFP 总量远高于其它城市, 这是由于成都市 OFP 主要由工业和机动车贡献, 成都市作为西部中心城市, 其 GDP 中第三产业占比达到 53%, 同时其 GDP 占四川省的 34%, 因此在 GDP 总量较大且工业增加值占比较小的情况下, 造成其单位 GDP 的 OFP 最低。除成都以外, 其余城市则是工业化程度较高的其单位 GDP 的 OFP 较高, 如绵阳和眉山等成都平原城市群的城市。

此外, 成都、德阳等成都平原地区城市市域较小, 但人口高度集中, 导致其单位面积 OFP 显著高于其它城市。值得注意的是工业和经济较为发达的成都平原地区也是人均 OFP 较高的区域, 这与该区域机动车和建筑溶剂使用的排放量较大有关。

2.4 四川省人为源 VOCs 组分排放空间分布

图 9 显示了 4 个排放量和 OFP 较大 VOCs 组分 (间-二甲苯、乙烯、甲苯和甲醛) 的 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 分辨率的空间分布, 500 余种 VOCs 组分排放量均使用 1.3 节中方法分配为同一分辨率的网格排放。VOCs 组分排放量的空间分布数据有助于将排放源有所排放数据与在线测量结果相比较, 或用于 VOCs 源解析。当选用不同的源成分谱时, 部分组分的排放量可能会有数量级的差异, 因此使用组



气泡颜色和大小不同均代表单位 GDP 的 OFP 的差异

图8 四川省城市单位 GDP 的 OFP、单位面积 OFP 和人均 OFP

Fig. 8 OFP per GDP, OFP per unit area, and OFP per capita of cities in Sichuan Province

分排放量对在线测量结果进行解释时, 应谨慎使用 VOCs 组分排放量。从图 9 可以看出, 4 个组分的排放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), 以及凉山和攀枝花的部分地区, 是由于这些组分主要来源于工业、机动车和建筑装饰排放, 上述区域为四川省人口和工业较为密集和发达的区域, 各组分的排在成都全域均有较多分布, 其它城市的中心区域亦较有大量分布。4 个组分中移动源均有重要贡献, 因此均有显著道路排放特征, 但其它主要贡献源有所不同, 其分布亦存在一定差异: 间-二甲苯和甲苯主要贡献源包括溶剂使用源, 导致其在城市建成区的分布更为集中; 而生物质燃烧对乙烯和甲醛排放有大量贡献, 造成其在农业发达的川东和川南的耕地区域也有大量分布。

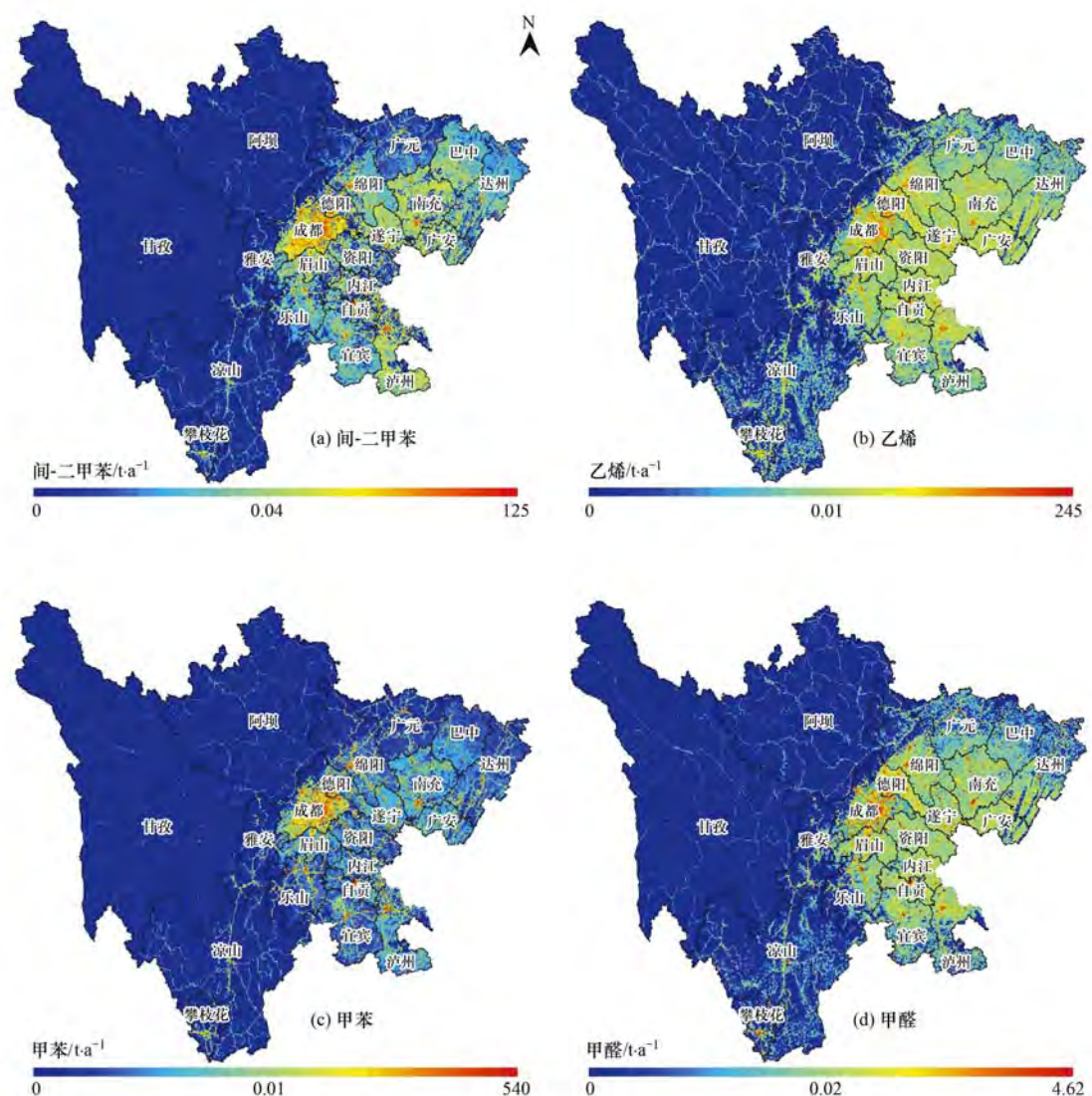


图9 四川省典型 VOCs 组分排放空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of typical VOCs species in Sichuan Province

3 结论

(1) 基于调研文献测试数据的修订和重构，建立了 VOCs 源成分谱库，主要分为化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源和其它源 5 类，共计 45 个源成分谱，519 种组分。

(2) 所建立的源成分谱库主要基于国内测试数据，通过 SPECIATE 等对部分国内没有实测或研究较少的源类进行补充，同时针对富含 OVOCs 组分的生物质燃烧和汽车排放等源类进行修订和重构，对于 VOCs 组分清单构建和源解析具有更好的应用性。

(3) 四川省人为源 VOCs 总排放量为 773.8 kt，其中烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、OVOCs、卤代烃和其它组分分别占 VOCs 总排放量的 21.6%、10.0%、1.7%、28.0%、26.2%、4.2% 和 8.3%，OFP 总排放量为 2 584.9 kt，上述各类 VOCs 组分分

别占 OFP 总排放量的 6.9%、26.1%、0.5%、42.3%、23.2%、0.4% 和 0.5%。

(4) 四川省各城市 VOCs 排放组分均以芳香烃、OVOCs 和烷烃为主，但亦存在显著差异：成都、雅安、阿坝、甘孜和凉山机动车排放贡献较大，烷烃排放量占 VOCs 排放总量的比例较高；攀枝花为工艺过程源贡献较大的重工业城市，烷烃排放量占比较高；德阳、眉山、遂宁和资阳溶剂使用源排放较大，OVOCs 排放量占比较高。

(5) 四川省 VOCs 排放量和 OFP 较大的组分（间-二甲苯、乙烯、甲苯和甲醛）主要集中分布于人口和工业较为密集和发达的四川盆地区域以及凉山和攀枝花的部分地区，其中间-二甲苯和甲苯主要贡献源为溶剂使用源，导致其在城市建成区的分布更为集中，生物质燃烧对乙烯和甲醛排放有大量贡献，造成其在农业发达的川东和川南的耕地区域有大量分布。

参考文献:

- [1] Watson J G, Chow J C, Fujita E M. Review of volatile organic compound source apportionment by chemical mass balance[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(9): 1567-1584.
- [2] Guenther A B, Jiang X, Heald C L, *et al.* The model of emissions of gases and aerosols from nature version 2.1 (MEGAN2.1): an extended and updated framework for modeling biogenic emissions [J]. *Geoscientific Model Development*, 2012, **5**(6): 1471-1492.
- [3] Piccot S D, Watson J J, Jones J W. A global inventory of volatile organic compound emissions from anthropogenic sources [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D9): 9897-9912.
- [4] Van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, *et al.* Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997-2009) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(23): 11707-11735.
- [5] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, *et al.* A global model of natural volatile organic compound emissions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(D5): 8873-8892.
- [6] Müller J F. Geographical distribution and seasonal variation of surface emissions and deposition velocities of atmospheric trace gases[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D4): 3787-3804.
- [7] 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.
- [8] Klinger L F, Li Q J, Guenther A B, *et al.* Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D21): 4603.
- [9] 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.
- [10] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [11] Derwent R G, Jenkin M E, Utembe S R, *et al.* Secondary organic aerosol formation from a large number of reactive man-made organic compounds[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3374-3381.
- [12] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, *et al.* Secondary organic aerosol formation and transport[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1992, **26**(13): 2269-2282.
- [13] Shao M, Lu S H, Liu Y, *et al.* Volatile organic compounds measured in summer in Beijing and their role in ground - level ozone formation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D2): D00G06.
- [14] Tang G, Wang Y, Li X, *et al.* Spatial-temporal variations in surface ozone in Northern China as observed during 2009-2010 and possible implications for future air quality control strategies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(5): 2757-2776.
- [15] Xue L K, Wang T, Gao J, *et al.* Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(23): 13175-13188.
- [16] Chan K L, Wang S S, Liu C, *et al.* On the summertime air quality and related photochemical processes in the megacity Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 974-983.
- [17] Ming L L, Jin L, Li J, *et al.* PM_{2.5} in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 200-212.
- [18] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Fang X K, Shao M, Stohl A, *et al.* Top-down estimates of benzene and toluene emissions in the Pearl River Delta and Hong Kong, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(5): 3369-3382.
- [23] Mo Z W, Shao M, Lu S H. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **143**: 209-217.
- [24] Wadden R A, Uno I, Wakamatsu S. Source discrimination of short-term hydrocarbon samples measured aloft [J]. *Environmental Science & Technology*, 1986, **20**(5): 473-483.
- [25] Scheff P A, Wadden R A. Receptor modeling of volatile organic compounds. 1. Emission inventory and validation [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(4): 617-625.
- [26] Fujita E M, Watson J G, Chow J C, *et al.* Receptor model and emissions inventory source apportionments of nonmethane organic gases in California's San Joaquin valley and San Francisco bay area[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(21): 3019-3035.
- [27] Doskey P V, Fukui Y, Sultan M, *et al.* Source profiles for nonmethane organic compounds in the atmosphere of Cairo, Egypt [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1999, **49**(7): 814-822.
- [28] Hsu Y, Divita F, Dorn J. SPECIATE 4.5, database development documentation, final report[R]. EPA/600/R-16/294. Triangle Park, NC: Environmental Protection Agency, 2016.
- [29] Theloke J, Friedrich R. Compilation of a database on the composition of anthropogenic VOC emissions for atmospheric modeling in Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(19): 4148-4160.
- [30] Laurent A, Hauschild M Z. Impacts of NMVOC emissions on human health in European countries for 2000-2010: use of sector-specific substance profiles[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **85**: 247-255.
- [31] Tsai S M, Zhang J F, Smith K R, *et al.* Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from various cookstoves used in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(13): 2869-2877.
- [32] Shi J W, Deng H, Bai Z P, *et al.* Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **515-516**: 101-108.
- [33] Tsai J H, Lin K H, Chen C Y, *et al.* Volatile organic compound

- constituents from an integrated iron and steel facility[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **157**(2-3): 569-578.
- [34] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 358-366.
- [35] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(15): 1919-1926.
- [36] Wang J, Jin L M, Gao J H, *et al.* Investigation of speciated VOC in gasoline vehicular exhaust under ECE and EUDC test cycles [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **445-446**: 110-116.
- [37] Yao Z L, Shen X B, Ye Y, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 87-93.
- [38] Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, *et al.* Species profiles and normalized reactivity of volatile organic compounds from gasoline evaporation in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 110-118.
- [39] 张春洋, 马永亮. 中式餐饮业油烟中非甲烷碳氢化合物排放特征研究[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(8): 1768-1774.
- Zhang C Y, Ma Y L. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from Chinese cooking[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(8): 1768-1774.
- [40] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 955-966.
- [41] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, *et al.* Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 127-136.
- [42] Reff A, Bhawe P V, Simon H, *et al.* Emissions inventory of PM_{2.5} trace elements across the United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(15): 5790-5796.
- [43] Li M, Zhang Q, Streets D G, *et al.* Mapping Asian anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds to multiple chemical mechanisms [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(11): 5617-5638.
- [44] 宋丹林, 陶俊, 张普, 等. 成都城区颗粒物消光系数特征及其与 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 PM_{2.5} mass concentration in Chengdu[J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2013, **30**(6): 757-762.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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 Sichuan Province[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- [48] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: Part I[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [49] Wang Q, Geng C M, Lu S H, *et al.* Emission factors of gaseous carbonaceous species from residential combustion of coal and crop residue briquettes [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2013, **7**(1): 66-76.
- [50] Hsu Y C, Chen S K, Tsai J H, *et al.* Determination of volatile organic profiles and photochemical potentials from chemical manufacture process vents [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(6): 698-704.
- [51] 王伯光, 冯志诚, 周炎, 等. 聚氨酯合成革厂空气中挥发性有机物的成分谱[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(9): 914-918.
- Wang B G, Feng Z C, Zhou Y, *et al.* VOC components in the air caused by the local polyurethane synthetic leather industries in the Pearl River Delta region[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(9): 914-918.
- [52] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 机动车排放及汽油中 VOCs 成分谱特征的研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, **39**(4): 507-511.
- Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Study on the characteristics of VOCs source profiles of vehicle exhaust and gasoline emission [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, **39**(4): 507-511.
- [53] 刘莹. 北京和珠江三角洲大气挥发性有机物活性和来源研究[D]. 北京: 北京大学, 2007.
- Liu Y. The chemical reactivity and source of ambient volatile organic compounds in Beijing and Pearl River Delta [D]. Beijing: Peking University, 2007.
- [54] 高爽, 金亮茂, 史建武, 等. 轻型汽油车 VOCs 排放特征和排放因子台架测试研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(3): 397-405.
- Gao S, Jin L M, Shi J W, *et al.* VOCs emission characteristics and emission factors of light-duty gasoline vehicles with bench test [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(3): 397-405.
- [55] 乔月珍, 王红丽, 黄成, 等. 机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- Qiao Y Z, Wang H L, Huang C, *et al.* Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds from vehicle exhaust [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- [56] Yao Y C, Tsai J H, Wang I T. Emissions of gaseous pollutant from motorcycle powered by ethanol - gasoline blend [J]. *Applied Energy*, 2013, **102**: 93-100.
- [57] Dong D, Shao M, Li Y, *et al.* Carbonyl emissions from heavy-duty diesel vehicle exhaust in China and the contribution to ozone formation potential [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 122-128.
- [58] Tsai J H, Chang S Y, Chiang H L. Volatile organic compounds from the exhaust of light-duty diesel vehicles[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **61**: 499-506.
- [59] Yao Z L, Wu B B, Shen X B, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from rural vehicles and their ozone formation potential in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **105**: 91-96.
- [60] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁-C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [61] Sigbsby J E, Tejada S, Ray W, *et al.* Volatile organic compound

- emissions from 46 in-use passenger cars [J]. *Environmental Science & Technology*, 1987, **21**(5): 466-475.
- [62] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C₁ through C₃₀ organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [63] 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 等. 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- Mo Z W, Niu H, Lu S H, *et al.* Process-based emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from paint Industry in the Yangtze River Delta, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- [64] Wang H L, Qiao Y Z, Chen C H, *et al.* Source profiles and chemical reactivity of volatile organic compounds from solvent use in Shanghai, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, **14**(1): 301-310.
- [65] Huang Y, Ho S S H, Ho K F, *et al.* Characterization of biogenic volatile organic compounds (BVOCs) in cleaning reagents and air fresheners in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(34): 6191-6196.
- [66] 乔月珍. 上海市机动车和涂料 VOCs 源成分谱及其大气反应活性研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- Qiao Y Z. Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds (VOCs) from vehicle exhaust and paints [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2012.
- [67] Wang S X, Wei W, Du L, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(27): 4148-4154.
- [68] 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.
- [69] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物 (VOCs) 的人为来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(5): 757-763.
- Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(5): 757-763.
- [70] Carter W P L. Development of a condensed SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5336-5345.
- [71] 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.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)