

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

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

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝化型水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征订简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单

孙西勃^{1,2,3}, 廖程浩^{1,2,3}, 曾武涛^{1,2,3}, 张永波^{1,2,3}, 梁小明⁴, 叶代启⁵

(1. 广东省环境科学研究院, 广州 510045; 2. 广东省环境保护大气环境管理与政策模拟重点实验室, 广州 510045; 3. 广东省区域大气环境质量科学研究中心, 广州 510045; 4. 中山大学工学院, 广州 510006; 5. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

摘要: 基于广东省粮食产量的统计年鉴, 建立了广东省 2008 ~ 2016 年秸秆燃烧污染物排放清单和 2016 年广东省秸秆燃烧 VOCs 物种清单, 并对 VOCs 臭氧生成潜势进行评估。结果表明, 2013 ~ 2016 年广东省秸秆燃烧各大气污染物排放量较 2008 ~ 2012 年有所降低。这主要是由于禁止秸秆露天燃烧政策的出台及农村生活水平的提高降低了秸秆燃烧比例。2016 年各类大气污染物 SO₂、NO_x、NH₃、CH₄、EC、OC、NMVOC、CO 和 PM_{2.5} 的排放量依次为 2 443.7、16 187.9、6 943.8、29 174.4、3 625.5、14 830.7、65 612.6、591 613.9 和 49 463.0 t。稻谷秸秆燃烧是最主要的秸秆燃烧污染物来源, 占据了污染物总排放量的约 68.55%。污染物贡献最大的 5 个市分别为湛江、茂名、梅州、肇庆和韶关, 约占总排放量的 58.63%。2016 年广东省秸秆燃烧 VOCs 物种排放清单中, 排放量贡献前 10 的物种分别为: 乙烯、乙醛、甲醛、苯、乙炔、丙烯、乙烷、甲苯、正丙烷和丙醛, 占总 VOCs 量的 67.91%。在 VOCs 物种清单的基础上估算了其臭氧生成潜势 (OFP), OFP 贡献前 10 VOCs 物种分别为: 乙烯、甲醛、乙醛、丙烯、1-丁烯、丙醛、甲苯、丙烯醛、异戊二烯和丁烯醛, 占总 OFP 量的 80.83%。

关键词: 广东省; 秸秆燃烧; 大气污染物; 挥发性有机物; 排放清单

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-3995-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802076

Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province

SUN Xi-bo^{1,2,3}, LIAO Cheng-hao^{1,2,3}, ZENG Wu-tao^{1,2,3}, ZHANG Yong-bo^{1,2,3}, LIANG Xiao-ming⁴, YE Dai-qi⁵

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 2. Guangdong Provincial Environmental Protection Key Laboratory of Atmospheric Environment Management and Policy Simulation, Guangzhou 510045, China; 3. Guangdong Provincial Regional Atmospheric Environmental Quality Research Center, Guangzhou 510045, China; 4. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 5. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: An emission inventory of atmospheric pollutants from crop residue burning in Guangdong for the period 2008-2016 was developed, based on crop yield data. Emissions of species of volatile organic compounds (VOCs) and corresponding ozone formation potential (OFP) in 2016 were also estimated. Results showed that emissions of atmospheric pollutants from crop residue burning in 2013-2016 were lower than in 2008-2012. This was mainly due to the policy of prohibiting open burning of straw and to improvement of rural living standards, which reduced the proportion of straw burning. In 2016, emissions of SO₂, NO_x, NH₃, CH₄, EC, OC, NMVOC, CO, and PM_{2.5} were 2 443.7, 16 187.9, 6 943.8, 29 174.4, 3 625.5, 14 830.7, 65 612.6, 591 613.9, and 49 463.0 t, respectively. Rice straw burning was the main source of pollutants, accounting for about 68.55% of total pollutant emissions. The five municipalities with highest atmospheric pollutant emissions were Zhanjiang, Maoming, Meizhou, Zhaoqing, and Shaoguan, together accounting for about 58.63% of total emissions. The top 10 VOC species for mass-based emissions consisted of ethylene, acetaldehyde, formaldehyde, benzene, ethyne, propylene, ethane, toluene, propane, and propionaldehyde, together contributing 67.91% to total emissions. The top ten OFP-based VOC species were ethylene, formaldehyde, acetaldehyde, propylene, 1-butylene, propionaldehyde, toluene, acrolein, isoprene, and crotonaldehyde, accounting for 80.83% of total OFP.

Key words: Guangdong Province; crop residue burning; atmospheric pollutants; volatile organic compounds (VOCs); emission inventory

生物质是重要的能量来源, 是超过世界一半人口的生活能源。但生物质燃烧同样是大气污染物的重要来源, 其排放到大气中的一次颗粒物和黑炭分别占全球总排放量的 26% ~ 73% 和 33% ~ 41%^[1,2]。生物质燃烧排放的颗粒物可直接影响人类健康和区域的能见度, 其排放的痕量污染物(氮

氧化物和非甲烷有机物)是促使大气臭氧形成的重要前驱物^[3]。对于生物质燃烧的污染物排放研究已经在世界范围内广泛开展^[4,5], 然而不同国家气

收稿日期: 2018-02-09; 修订日期: 2018-03-20

基金项目: 2017 年中央大气污染防治专项(粤环[2016]69 号)

作者简介: 孙西勃 (1990 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气污染控制技术与管理, E-mail: hjsxb@foxmail.com

候、经济水平存在很大差异,国外研究者编制的排放清单不能准确体现我国生物质燃烧的特点^[6,7].近年来,研究者们针对我国生物质燃烧开展了大量污染物排放清单研究工作^[8~10].但现有污染物排放清单普遍存在分辨率低的缺点,并且不同排放清单之间存在较大的差异,不能清晰地体现广东省生物质燃烧污染物排放的特点.

广东省是中国经济最发达的区域之一,快速的经济发展伴随着自然环境的恶化,灰霾天气频发^[11].近年来,广东省加强对工业源、交通源空气污染物的排放控制力度,空气质量明显好转.在工业源与交通源得以严格控制的背景下,生物质燃烧污染得到研究者的广泛关注^[12].对于广东省的生物质燃烧排放清单工作,已经有研究者们做出了很大的努力.但是,以往的研究工作仍然存在较大改进的空间,如:以往广东省生物质燃烧污染物排放估算较为粗糙,未详细调查广东省各类生物质燃烧情况及比例;现有排放清单研究工作基于多年前的调研工作,各类生物质燃烧情况随经济快速发展已发生较大改变,需要制定出反映当前生物质燃烧水平的污染物排放清单.

本研究针对广东省秸秆燃烧污染源进行研究,调查了广东省 21 个地级市 2008~2016 年的秸秆燃烧大气污染物排放状况,对燃烧产生的 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、 CH_4 、 EC 、 OC 、 NMVOC 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等主要污染物进行排放量估算.另外,建立了秸秆燃烧 VOCs 物种排放清单,并对燃烧产生的各类 VOCs 的臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)做了进一步研究.通过对秸秆燃烧排放污染物的时间和空间分布特征的分析,以期为广东省区域空气质量和气候变化等模型研究提供基础数据,并为广东省秸秆燃烧污染控制对策提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 研究方法

1.1.1 大气污染物排放定量表征方法

利用可用秸秆燃烧量和对应的排放因子估算秸秆燃烧大气污染物排放量,公式如下:

$$E_{i,j}(y) = \sum [10^{-3} \times A_{i,j}(y) \times \text{EF}_j]$$

式中, i 为某区域; j 为作物类型; y 为年份; $E_{i,j}(y)$ 为区域 i 的作物 j 在第 y 年的污染物排放量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); $A_{i,j}(y)$ 为区域 i 的作物 j 在第 y 年的燃烧消耗的生物量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); EF_j 为作物 j 的污染物排放

因子 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

$$A_{i,j}(y) = \sum [P_{i,j}(y) \times N_j \times D_j \times B_i \times \eta]$$

式中, $P_{i,j}(y)$ 为区域 i 的作物 j 在第 y 年的产量; N_j 为作物 j 的秸秆量与作物产量之比(谷草比); D_j 为作物 j 的干物质比例; B_i 为区域 i 的秸秆焚烧的比例; η 为燃烧效率.

1.1.2 VOCs 物种排放定量表征方法

个体 VOCs 物种排放量通过以下公式计算:

$$E_m = \sum_n E_n \times R_{mn}$$

式中, m 为特定的 VOCs 物种; n 为污染源; E_m 为物种 m 的总排放量; E_n 为污染源 n 的总排放量; R_{mn} 是物种 m 在污染源 n 中的质量百分比.

1.1.3 臭氧生成潜势(OFP)定量表征方法

在物种清单建立的基础上,以臭氧生成潜势(OFP)为本研究中反应性的指标,其可通过物种排放量与其对应的 MIR 值的乘积得出^[13~15].个体物种的 OFP 计算公式如下:

$$\text{OFP}_m = \sum_n E_{mn} \times \text{MIR}_m$$

式中, m 为特定的 VOCs 物种; n 为污染源; OFP_m 为物种 m 的总 OFP 值; E_{mn} 为物种 m 在污染源 n 中的排放量; MIR_m 为物种 m 的最大增量反应活性值(maximum incremental reactivity).

1.2 数据来源

1.2.1 活动水平的确定

广东省各地区农作物产量数据来自《广东省统计年鉴》(2009~2016 年),谷草比参考毕于运等^[16]的研究工作;农作物秸秆干物质含量参考 2003 年广东-香港空气污染物排放清单^[17]和温室气体清单手册^[18];秸秆燃烧效率参考 Koopmans 等^[19]和 Zhang 等^[20]的研究.各类参数具体取值情况见表 1.

表 1 农作物秸秆燃烧相关参数

Table 1 Parameters of crop residue burning

作物种类	稻谷	大豆	甘蔗	花生	薯类
谷草比	0.90	1.60	0.30	0.80	0.50
干物质分数	0.89	0.91	/	0.94	0.45
燃烧效率	0.93	0.68	0.68	0.82	0.68

秸秆作为民用燃料燃烧及露天燃烧的比例,主要由研究者们根据《中国能源统计年鉴》以及各地农业、气候、地域和农村居民生活水平来估算或抽样调查得到.王书肖等^[21]使用分层抽样及相应的统计方法确定了 2006 年中国各个地区秸秆民用

燃烧和露天燃烧比例；彭立群等^[22]分别在 2010 年和 2015 年进行了农村能源消费情况问卷调查，统计了各地秸秆露天燃烧比例。彭立群等^[22]的研究结果显示，2013 年国家发展和改革委员会发布的《关于加强农作物综合利用和禁烧工作的通知》及后续国务院将“秸秆禁烧”纳入各省区人民政府工作考核范围等政策，对于减少秸秆露天燃烧行为效果明显。本研究将 2008 ~ 2016 年分为两个阶段，期间秸秆露天燃烧的比例分别参考彭立群等^[22]在 2010 年和 2015 年的调查结果。由于国家及广东省未对秸秆民用燃烧行为进行约束，秸秆民用燃烧的比例主要受农民生活水平和农业发展水平影响。根据广东省统计年鉴中农村家庭炊用能源状况及农村居民家庭燃料消费支出情况，基

于王书肖等^[21]的研究结果，估算了广东省 2008 ~ 2016 年秸秆民用燃烧的比例。秸秆用于民用燃烧和露天燃烧的比例见表 2。

表 2 农村秸秆的燃烧比例		
Table 2 Ratios of crop residue burning		
秸秆燃烧分类	年份	
	2008 ~ 2012	2013 ~ 2016
民用	0.419	0.336
露天	0.382	0.285

1.2.2 排放因子的确定

秸秆燃烧大气污染物的排放因子的选取主要来自本土化或国内最新的测试研究结果，少量国内排放因子缺失的子源选取国外研究成果。综合确定秸秆燃烧污染物排放因子，如表 3 所示。

表 3 秸秆燃烧大气污染物排放因子/g·kg ⁻¹									
Table 3 Emission factors of crop residue burning/g·kg ⁻¹									
污染源	燃烧排放因子								
	SO ₂	NO _x	NH ₃	CH ₄	EC	OC	NMVOC	CO	PM _{2.5}
民用燃烧	0.48 ^[23]	0.83 ^[24]	1.30 ^[25]	6.74 ^[24]	0.43 ^[26]	1.93 ^[26]	8.27 ^[27]	82.18 ^[28]	4.43 ^[26]
露天燃烧	0.16 ^[29]	3.83 ^[29]	0.53 ^[30]	0.72 ^[31]	0.57 ^[29]	2.13 ^[29]	9.74 ^[27]	78.85 ^[29]	9.47 ^[32]

1.2.3 秸秆燃烧成分谱的确定

秸秆燃烧产生 VOCs 的成分谱，已在多篇研究中报道。本研究中，秸秆民用燃烧源的 VOCs 成分谱参考 Wu 等^[33]的研究成果，露天燃烧源 VOCs 成分谱综合参考了国内相关研究成果^[34~36]。VOCs 物种的 MIR 值参考 Carter^[37]的最新研究成果。

2 结果与讨论

2.1 大气污染物排放总量及其排放趋势

本研究估算了 2008 ~ 2016 年广东省秸秆燃烧各类大气污染物排放情况，如表 4 所示。2016 年各

类污染物 SO₂、NO_x、NH₃、CH₄、EC、OC、NMVOC、CO 和 PM_{2.5} 的排放量依次为 2 443.7、16 187.9、6 943.8、29 174.4、3 625.5、14 830.6、65 612.6、591 613.9 和 49 463.0 t。从污染物排放总量变化情况可以看出，虽然近年来广东省的粮食产量逐年上升，但 2013 ~ 2016 年各污染物排放量较 2008 ~ 2012 年有所降低，这主要是由于国家出台的一系列禁止露天燃烧的政策措施，大大减少了秸秆露天燃烧行为。并且随着农村居民生活水平提高，农村生活燃料使用秸秆的比例也有所降低。

表 4 2008 ~ 2016 年广东省秸秆燃烧大气污染物排放特征									
Table 4 Emission characteristics of air pollutants from crop residue burning in Guangdong Province, 2008-2016									
年份	排放量/t								
	SO ₂	NO _x	NH ₃	CH ₄	EC	OC	NMVOC	CO	PM _{2.5}
2008	2 765.6	19 096.8	7 879.5	32 682.7	4 196.3	17 108.9	75 780.7	680 780.1	57 725.1
2009	2 902.6	20 043.0	8 269.9	34 302.2	4 404.2	17 956.6	79 535.6	714 512.7	60 585.4
2010	2 922.9	20 183.4	8 327.8	34 542.4	4 435.1	18 082.4	80 092.6	719 516.2	61 009.6
2011	3 039.2	20 986.5	8 659.1	35 916.8	4 611.5	18 801.9	83 279.3	748 144.4	63 437.1
2012	3 146.4	21 726.5	8 964.5	37 183.2	4 774.2	19 464.8	86 215.9	774 525.2	65 674.0
2013	2 396.4	15 874.2	6 809.3	28 609.0	3 555.3	14 543.2	64 341.1	580 149.2	48 504.5
2014	2 453.4	16 251.9	6 971.3	29 289.8	3 639.9	14 889.3	65 872.2	593 954.1	49 658.7
2015	2 431.6	16 107.8	6 909.5	29 030.1	3 607.6	14 757.3	65 288.0	588 687.0	49 218.3
2016	2 443.7	16 187.9	6 943.8	29 174.4	3 625.5	14 830.6	65 612.6	591 613.9	49 463.0

2.2 分污染源及城市污染物排放特征

表 5 为 2016 年广东省 5 类秸秆作物民用燃料

燃烧和露天燃烧污染物排放情况。对于 SO₂、NH₃、CH₄、OC、NMVOC 和 CO 污染物的排放，秸秆作为

民用燃料燃烧的贡献比露天燃烧大. 对于 NO_x 、EC 和 $\text{PM}_{2.5}$, 秸秆露天燃烧贡献大于民用燃料燃烧. 无论是秸秆燃烧总排放量, 还是两类子源(民用燃料燃烧和露天燃烧), 各类污染物的排放贡献依次均为: 稻谷 > 甘蔗 > 花生 > 薯类 > 大豆. 其中, 稻谷秸秆作物的燃烧贡献了污染物排放量的 68.55%. 各类作物排放贡献与广东省饮食需求及其他生活习惯带来的作物种植差异及秸秆使用差异相关.

表 6 为 2016 年广东省秸秆燃烧分城市各污染物排放情况. 由于所处地理位置与气候条件的不同, 经济发展水平、人口分布密集程度及农村/城市人口比例等方面的巨大差异, 使得不同地区秸秆燃料

的消耗量及其所导致的各类大气污染物排放量有所差异. 其中, 污染物贡献最大的 5 个城市分别为湛江、茂名、梅州、肇庆和韶关, 其各类污染物排放量约占对应总量约 58.63%. 这主要是因为这些地区农村人口密度高, 对农作物秸秆、薪柴等燃料的依赖程度很高, 是广东省秸秆燃烧污染控制的重点城市. 秸秆焚烧污染物排放贡献最小 5 个城市依次为深圳、东莞、中山、珠海和佛山, 这 5 个城市各污染物排放总量仅占广东省排放总量的 0.78%, 秸秆燃烧污染物贡献率极低, 主要是由于这些地区工业化和城市化飞速发展, 农作物种植面积及产量少.

表 5 2016 年广东省秸秆燃烧分污染源污染物排放特征

Table 5 Emission characteristics of air pollutants from crop residue burning by source in Guangdong Province, 2016

污染物	民用燃料燃烧排放量/t						露天燃烧排放量/t					
	稻谷	大豆	甘蔗	花生	薯类	合计	稻谷	大豆	甘蔗	花生	薯类	合计
SO_2	1 306.0	27.2	418.4	111.3	42.1	1 905.1	369.3	7.7	118.3	31.5	11.9	538.6
NO_x	2 258.3	47.1	723.5	192.5	72.9	3 294.2	8 839.2	184.2	2 831.7	753.4	285.2	12 893.7
NH_3	3 537.1	73.7	1 133.2	301.5	114.1	5 159.6	1 223.2	25.5	391.9	104.3	39.5	1 784.2
CH_4	18 338.7	382.1	5 875.0	1 563.1	591.6	26 750.5	1 661.7	34.6	532.3	141.6	53.6	2 423.9
EC	1 170.0	24.4	374.8	99.7	37.7	1 706.6	1 315.5	27.4	421.4	112.1	42.4	1 918.9
OC	5 251.3	109.4	1 682.3	447.6	169.4	7 660.0	4 915.8	102.4	1 574.8	419.0	158.6	7 170.6
NMVOC	22 501.6	468.8	7 208.7	1 917.9	725.9	32 823.0	22 478.8	468.3	7 201.4	1 916.0	725.2	32 789.7
CO	223 601.3	4 658.5	71 633.4	19 058.8	7 213.8	326 165.8	181 976.6	3 791.3	58 298.4	15 510.9	5 870.9	265 448.1
$\text{PM}_{2.5}$	12 053.5	251.1	3 861.5	1 027.4	388.9	17 582.3	21 855.7	455.3	7 001.7	1 862.9	705.1	31 880.7

表 6 2016 年广东省秸秆燃烧分城市污染物排放特征

Table 6 Emission characteristics of air pollutants from crop residue burning by district in Guangdong Province, 2016

地区	排放量/t								
	SO ₂	NO _x	NH ₃	CH ₄	EC	OC	NM VOC	CO	PM _{2.5}
广州	50.1	331.6	142.2	597.6	74.3	303.8	1 344.0	12 118.6	1 013.2
深圳	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
珠海	4.4	29.2	12.5	52.6	6.5	26.7	118.3	1 067.1	89.2
汕头	51.0	337.5	144.8	608.3	75.6	309.2	1 368.1	12 336.3	1 031.4
佛山	8.7	57.9	24.8	104.4	13.0	53.1	234.7	2 116.3	176.9
顺德	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0
韶关	152.6	1 010.7	433.5	1 821.5	226.4	926.0	4 096.5	36 937.6	3 088.2
河源	144.7	958.4	411.1	1 727.2	214.6	878.0	3 884.4	35 025.1	2 928.3
梅州	179.7	1 190.6	510.7	2 145.7	266.6	1 090.8	4 825.6	43 511.8	3 637.9
惠州	76.7	508.1	217.9	915.7	113.8	465.5	2 059.4	18 569.0	1 552.5
汕尾	57.2	379.1	162.6	683.3	84.9	347.3	1 536.7	13 856.0	1 158.5
东莞	0.6	4.1	1.7	7.3	0.9	3.7	16.4	148.2	12.4
中山	5.2	34.6	14.9	62.4	7.8	31.7	140.4	1 265.9	105.8
江门	151.2	1 001.6	429.7	1 805.2	224.3	917.7	4 059.8	36 606.6	3 060.6
阳江	101.2	670.4	287.6	1 208.3	150.2	614.2	2 717.4	24 501.8	2 048.5
湛江	695.4	4 606.2	1 975.9	8 301.5	1 031.6	4 220.0	18 669.9	168 342.4	14 074.6
茂名	227.1	1 504.3	645.3	2 711.0	336.9	1 378.1	6 097.0	54 975.5	4 596.3
肇庆	177.9	1 178.5	505.5	2 123.9	263.9	1 079.6	4 776.5	43 068.6	3 600.8
清远	133.8	886.6	380.3	1 597.8	198.6	812.2	3 593.4	32 400.8	2 708.9
潮州	34.0	225.1	96.6	405.8	50.4	206.3	912.5	8 228.0	687.9
揭阳	79.6	527.1	226.1	950.0	118.1	482.9	2 136.6	19 265.3	1 610.7
云浮	112.7	746.2	320.1	1 344.9	167.1	683.7	3 024.7	27 272.8	2 280.2

2.3 VOCs 物种排放量及其 OFP 值

2016 年广东省秸秆燃烧产生的 VOCs 总量和 OFP 分别为 65 612.3 t 和 344 396.7 t. 各类 VOCs 排放量分别为 23 440.3 t (含氧有机物)、18 986.0 t (烯炔烃)、11 490.4 t (芳香烃)、7 696.1 t (烷烃)、2 021.9 t (卤代烃). OFP 值分别为 155 821.5 t (含氧有机物)、152 670.8 t (烯炔烃)、29 777.6 t (芳香烃)、5 977.2 t (烷烃)、149.6 t (卤代烃). 图 1 中列出了 2016 年广东省秸秆燃烧产生的烷烃、烯炔烃、芳香烃、卤代烃及含氧有机物在总 VOCs 中的排放量占比及 OFP 占比. 如图所示, 含氧有机物和烯炔烃是秸秆燃烧 VOCs 排放量贡献最大的两类组分, 占比分别为 35.73% 和 28.94%. 经过计算, 含氧有机物和烯炔烃在总 OFP 中的占比分别达到 45.24% 和 44.33%, 相对于总量比例大幅提高. 然而芳香烃、烷烃和卤代烃的 OFP 占比 8.65%、1.74% 和 0.04% 较总量占比 17.51%、11.73% 和 3.01% 均有所降低. 因此, 在开展广东省秸秆燃烧 VOCs 减排工作时应优先对含氧有机物和烯炔烃类有机物进行控制.

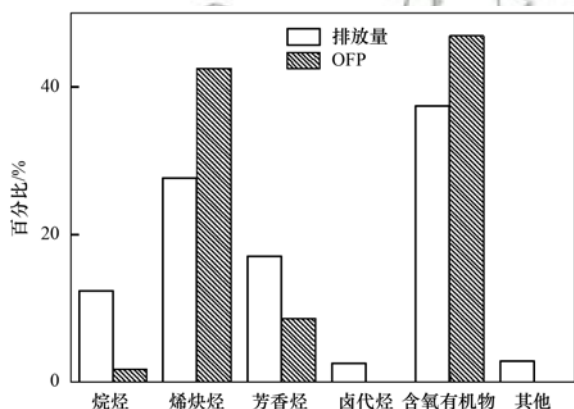


图 1 2016 年广东省秸秆燃烧 VOCs 物种排放量与 OFP 特征

Fig. 1 Speciated characteristics of anthropogenic emission and OFP in Guangdong Province, 2016

不同物种的 MIR 值差异是各类 VOCs 排放量与 OFP 贡献出现较大差异的原因. 图 2(a) 为排放量前 10 种物种的排放量占比和 MIR 值; 图 2(b) 是 OFP 值前 10 种物种的 OFP 占比、排放量占比及其对应的 MIR 值. 从中可知, 排放量贡献最大的前 10 种 VOCs 占比为: 13.01% (乙烯)、11.69% (乙醛)、10.29% (甲醛)、10.13% (苯)、6.17% (乙炔)、4.38% (丙烯)、4.17% (乙烷)、3.62% (甲苯)、2.19% (正丙烷) 和 2.18% (丙醛), 占据总排放量的 67.91%. OFP 值前 10 种 VOCs 为: 乙烯 (22.47%)、甲醛 (18.54%)、乙醛 (14.56%)、丙

烯 (9.73%)、1-丁烯 (3.76%)、丙醛 (2.94%)、甲苯 (2.76%)、丙烯醛 (2.39%)、异戊二烯 (1.87%) 和丁烯醛 (1.82%). OFP 值前 10 的 VOCs 占总 OFP 量的 80.83%, 然而其排放量只占 VOCs 总量的 50.91%. 另外, OFP 值前 10 种物质中的 1-丁烯、丙烯醛、异戊二烯和丁烯醛排放量占比均不在前 10 之列; 相反苯、乙炔、乙烷和正丙烷排放量在前 10 之内, 但其 OFP 值较小. 因此, 物质 MIR 值的大小对 OFP 值影响非常明显, 在开展 VOCs 减排工作时应综合考虑物种排放量和 MIR 值两种因素进行针对性控制.

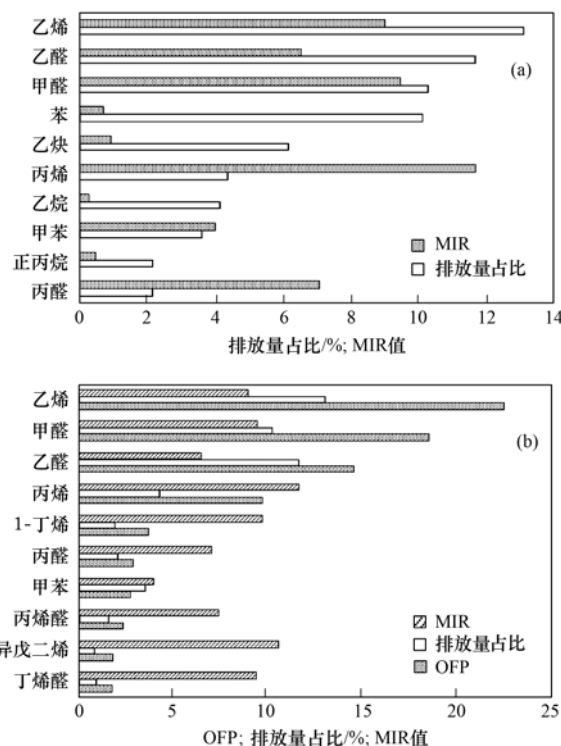


图 2 2016 年广东省秸秆燃烧 VOCs 排放量和 OFP 贡献前十种物质

Fig. 2 Key contributing species to VOCs mass-based emissions and OFP in Guangdong Province, 2016

2.4 不确定性分析

秸秆燃烧排放清单的不确定性同秸秆作物的消耗水平、燃烧效率、排放因子等诸多因素有关. 研究中, 各城市的农作物产量资料来源于广东省统计局等部门的年度统计资料, 具有较高的可信度. 农作物秸秆作为农村居民家用燃料和露天焚烧的比例, 不同地区不同年份存在一定差异, 经济发展水平, 地理气候条件, 作物产量, 地方秸秆综合利用政策的引导和扶持力度等均影响农户对秸秆处置方式的最终选择. 对于秸秆的各项使用比例由于没有具体的统计资料, 数据主要来自于研究者的调查

结果以及根据统计年鉴农村家庭炊用能源状况、农村居民家庭燃料消费支出情况进行估算,是清单不确定性的来源之一。另外,作物焚烧效率研究选取了不同作物燃烧效率的研究成果,具有一定的可靠性。研究中,不同农作物产生的同类污染物排放选取了相同的排放因子,给清单带来了较高的不确定性。

3 结论

(1)本研究建立了广东省 2008~2016 年秸秆燃烧污染物排放清单。结果表明 2013~2016 年各污染物排放量较 2008~2012 年有所降低。秸秆民用燃烧排放的 SO_2 、 NH_3 、 CH_4 、OC、NMVOC 和 CO 较露天燃烧排放量大,而 NO_x 、EC 和 $\text{PM}_{2.5}$, 秸秆露天燃烧贡献大于民用燃料燃烧。不同秸秆燃烧产生的污染物贡献排序为:稻谷>甘蔗>花生>薯类>大豆。其中,稻谷秸秆作物的燃烧贡献了污染物排放量的 68.55%。

(2)2016 年各类污染物 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、 CH_4 、EC、OC、NMVOC、CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量依次为 2 443.7、16 187.9、6 943.8、29 174.4、3 625.5、14 830.7、65 612.6、591 613.9 和 49 463.0 t。其中,污染物贡献最大的 5 个城市分别为湛江、茂名、梅州、肇庆和韶关,其各类污染物排放量占对应总量的 58.63%;秸秆焚烧污染物排放贡献最小 5 个城市依次为深圳、东莞、珠海、中山和佛山,这 5 个城市各污染物排放量仅占对应污染物的 0.78%。

(3)2016 年广东省秸秆燃烧产生的 VOCs 总量和总 OFP 分别为 65 612.3 t 和 344 396.7 t。其中,含氧有机物和烯炔烃是秸秆燃烧排放最多的两类 VOCs,总量占比分别为 35.73% 和 28.94%;含氧有机物和烯炔烃在总 OFP 中的占比分别达到 45.24% 和 44.33%。排放量贡献前 10 VOCs 物种分别为:乙烯、乙醛、甲醛、苯、乙炔、丙烯、乙烷、甲苯、正丙烷和丙醛,占总 VOCs 量的 67.91%。OFP 贡献前 10 VOCs 物种分别为:乙烯、甲醛、乙醛、丙烯、1-丁烯、丙醛、甲苯、丙烯醛、异戊二烯和丁烯醛,占总 OFP 量的 80.83%。

(4)本研究建立的排放清单和 VOCs 反应性估算具有一定的不确定性,后续应加强典型污染源排放因子及成分谱实测与规范工作,加强广东省不同地区秸秆露天和民用燃烧比例的调查研究,同时加强 VOCs 反应性排放估算不确定性的定量分析,以进一步完善研究工作。

参考文献:

- [1] 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, doi: 10.1029/2003JD003697.
- [2] Andreae M O, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols[J]. *Earth-Science Reviews*, 2008, **89**(1-2): 13-41.
- [3] Langmann B, Duncan B, Textor C, *et al.* Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 107-116.
- [4] Mieville A, Granier C, Liousse C, *et al.* Emissions of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and an historical reconstruction[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(11): 1469-1477.
- [5] Ito A, Penner J E. Global estimates of biomass burning emissions based on satellite imagery for the year 2000[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109** (D14): D14S05, doi: 10.1029/2003JD004423.
- [6] Zhao Y, Nielsen C P, Lei Y, *et al.* Quantifying the uncertainties of a bottom-up emission inventory of anthropogenic atmospheric pollutants in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(5): 2295-2308.
- [7] Yan X Y, Ohara T, Akimoto H. Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(27): 5262-5273.
- [8] 陆炳,孔少飞,韩斌,等. 2007 年中国大陆地区生物质燃烧排放污染物清单[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 186-194.
Lu B, Kong S F, Han B, *et al.* Inventory of atmospheric pollutants discharged from biomass burning in China continent in 2007[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(2): 186-194.
- [9] Cao G Y, Zhang X Y, Gong S L, *et al.* Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residue burning[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(1): 50-55.
- [10] Shen G F, Yang Y F, Wang W, *et al.* Emission factors of particulate matter and elemental carbon for crop residues and coals burned in typical household stoves in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(18): 7157-7162.
- [11] Zheng M, Wang F, Hagler G S W, *et al.* Sources of excess urban carbonaceous aerosol in the Pearl River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(5): 1175-1182.
- [12] Guo H, Cheng H R, Ling Z H, *et al.* Which emission sources are responsible for the volatile organic compounds in the atmosphere of Pearl River Delta? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **188**(1-3): 116-124.
- [13] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [14] 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.
- [15] Ou J M, Zheng J Y, Li R R, *et al.* Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based

- ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **530-531**: 393-402.
- [16] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(12): 211-217.
- Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, *et al.* Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, **25**(12): 211-217.
- [17] Hong Kong-Guangdong Joint Working Group on Sustainable Development and Environmental Protection (HG-JWGSDEP). Air emission inventory handbook for Pearl River Delta region [R]. Hong Kong: CH2M-INDC Hong Kong Ltd., 2005.
- [18] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Bracknell, UK: IPCC/OECD/IES, 2007.
- [19] Koopmans A, Koppejan J. Agricultural and forest fires, generation, Utilization and Availability//Paper Presented at the Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy. Malaysia, Kuala Lumpur: FAO, 1997.
- [20] Zhang H F, Ye X G, Cheng T T, *et al.* A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: emission factors and emission inventory[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(36): 8432-8441.
- [21] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布[J]. 中国科技论文在线, 2008, **3**(5): 329-333.
- Wang S X, Zhang C Y. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China [J]. Sciencepaper Online, 2008, **3**(5): 329-333.
- [22] 彭立群, 张强, 贺克斌. 基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(8): 1109-1118.
- Peng L Q, Zhang Q, He K B. Emissions inventory of atmospheric pollutants from open burning of crop residues in China based on a national questionnaire [J]. Research of Environmental Science, 2016, **29**(8): 1109-1118.
- [23] Reddy M S, Venkataraman C. Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II-biomass combustion[J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(4): 699-712.
- [24] 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.
- [25] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, **15**(4): 955-966.
- [26] Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* Carbonaceous aerosol emissions from household biofuel combustion in China [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(15): 6076-6081.
- [27] 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.
- [28] Li X H, Duan L, Wang S X, *et al.* Emission characteristics of particulate matter from rural household biofuel combustion in China[J]. Energy Fuels, 2007, **21**(2): 845-851.
- [29] Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, *et al.* Estimation of emissions from field burning of crop straw in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, **53**(5): 784-790.
- [30] Li X H, Wang S X, Duan L, *et al.* Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stover in China[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **41**(17): 6052-6508.
- [31] Jenkins B M, Turn S Q, Williams R B, *et al.* Atmospheric pollutant emission factors from open burning of agricultural and forest Biomass by wind tunnel simulations[R]. PB-97-132369/XAB, California: California University, 1996.
- [32] 祝斌, 朱先磊, 张元勋, 等. 农作物秸秆燃烧 $PM_{2.5}$ 排放因子的研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 29-33.
- Zhu B, Zhu X L, Zhang Y X, *et al.* Emission Factor of $PM_{2.5}$ from crop straw burning [J]. Research of Environmental Sciences, 2005, **18**(2): 29-33.
- [33] Wu R R, Xie S D. Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(5): 2574-2583.
- [34] 李兴华, 王书肖, 郝吉明. 民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3515-3521.
- Li X H, Wang S X, Hao J M. Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from biofuel combustion in China [J]. Environmental Science, 2011, **32**(12): 3515-3521.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. Reported to California Air Resources Board Contract 07-339, Riverside, CA: University of California, 2010.

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)