

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

序	郝郑平 (4503)
南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征	安俊琳, 朱彬, 李用宇 (4504)
天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析	翟增秀, 邹克华, 李伟芳, 王亘, 翟友存 (4513)
南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析	杨辉, 朱彬, 高晋徽, 李用宇, 夏丽 (4519)
上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算	崔虎雄 (4529)
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	韩丽, 王幸锐, 何敏, 郭卫广 (4535)
武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策	黄碧捷 (4543)
北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究	段菁春, 彭艳春, 谭吉华, 郝吉明, 柴发合 (4552)
广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价	李雷, 李红, 王学中, 张新民, 温冲 (4558)
天津某家具城挥发性有机物健康风险评估	张银, 王秀艳, 高爽 (4565)
废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究	王浙明, 徐志荣, 叶红玉, 许明珠, 王晓星 (4571)
农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险	谭冰, 王铁宇, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (4577)
电子产品加工制造企业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征	崔如, 马永亮 (4585)
汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价	曾培源, 李建军, 廖东奇, 涂翔, 许玫英, 孙国萍 (4592)
载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价	陈小开, 程赫明, 罗会龙 (4599)
基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究	何万清, 聂磊, 田刚, 李靖, 邵霞, 王敏燕 (4605)
VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价	房增强, 甘平, 杨乐, 戴子瑜, 祁世鸿, 贾建丽, 何绪文 (4612)
挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征	甘平, 杨乐巍, 房增强, 郭淑倩, 于妍, 贾建丽 (4619)
土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究	杜平, 王世杰, 赵欢欢, 伍斌, 韩春媚, 房吉敦, 李慧颖, 细见正明, 李发生 (4627)
土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响	胡林, 邱兆富, 何龙, 宴颖, 吕树光, 隋倩, 林匡飞 (4635)
自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律	陈锡超, 罗茜, 陈虎, 魏孜, 王子健, 许科文 (4642)
杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价	陈峰, 徐建芬, 唐访良, 张明, 阮东德 (4649)
维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性	郭斌, 律国黎, 任爱玲, 杜昭, 邢志贤, 韩鹏, 高博, 刘淑娅 (4654)
新型生物滴滤填料性能评价	梅瑜, 成卓韦, 王家德, 活泼 (4661)
微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究	张超, 赵梦升, 张丽丽, 陈建孟 (4669)
BF 和 BTF 工艺去除 DCM 性能比较	潘维龙, 於建明, 成卓韦, 蔡文吉 (4675)
改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究	王家德, 郑亮巍, 朱润晔, 俞云锋 (4684)
转轮吸附法处理有机废气的研究	朱润晔, 郑亮巍, 毛玉波, 王家德 (4689)
活性炭吸附有机蒸气性能的研究	蔡道飞, 黄维秋, 王丹莉, 张琳, 杨光 (4694)
UV-生物过滤联合降解苯乙炔废气的研究	沙昊雷, 杨国靖, 夏静芬 (4701)
蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究	杜娟, 栾志强, 解强, 叶平伟, 李凯, 王喜芹 (4706)
内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析	吴宏章, 黄维秋, 杨光, 赵晨露, 王英霞, 蔡道飞 (4712)
基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究	李靖, 王敏燕, 张健, 何万清, 聂磊, 邵霞 (4718)
铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学	陈长伟, 于艳科, 陈进生, 何焜 (4724)
KrBr ⁺ 准分子灯直接光解一甲胺气体	赵洁, 刘玉海, 韦连梅, 叶招莲, 张善端 (4734)
异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究	颜鲁春, 刘杰民, 付慧婷, 孙媛, 林文辉 (4743)
挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究	江梅, 张国宁, 任春, 邹兰, 魏玉霞 (4747)
挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善	江梅, 张国宁, 邹兰, 魏玉霞, 张明慧 (4751)
我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究	王铁宇, 李奇锋, 吕永龙 (4756)
固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究	王强, 周刚, 钟琪, 赵金宝, 杨凯 (4764)
石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估	牟桂芹, 隋立华, 郭亚逢, 马传军, 杨文玉, 高阳 (4771)
植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展	谢军飞, 李延明 (4779)
基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究	刘昌新, 王宇飞, 郝郑平, 王铮 (4787)
《环境科学》第34卷(2013年)总目录	(4792)
《环境科学》征订启事 (4717) 《环境科学》征稿简则 (4742) 信息 (4528, 4626, 4693, 4700)	

武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策

黄碧捷

(江汉大学化学与环境工程学院, 工业烟尘污染控制湖北省重点实验室, 武汉 430056)

摘要: 秸秆燃烧是我国人为源挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)排放的重要来源之一, 其排放对气候变化和人体健康都有很大影响. 对该来源 VOCs 排放量的可靠估算是在区域或城市范围内进行排放效应分析和污染控制的重要前提. 根据 2005~2011 年武汉市农作物的总产量, 采用排放因子分析法估算了武汉市及主要 6 个农作物产区的秸秆燃烧 VOCs 的排放量, 并分别计算其耕地排放强度(I_c)和区域排放强度(I_r). 结果表明, 武汉市 2005~2011 年年均秸秆燃烧 VOCs 排放量约为 $(3\,163 \pm 139)\text{t}$, I_c 和 I_r 分别为 $(1.52 \pm 0.06)\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ 和 $(0.37 \pm 0.02)\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$. 粮食类和油料类农作物秸秆燃烧是主要的排放源, 需优先控制 7 大类 21 种 VOCs 物质. 武汉市分区 VOCs 排放量从大到小排序依次为黄陂区、新洲区、江夏区、蔡甸区、汉南区、东西湖区, 前 4 个区的排放总量占到武汉市的近九成. 江夏区、汉南区、黄陂区和新洲区应作为秸秆燃烧 VOCs 排放的优先控制区, 尤其是能作为全国代表性的江夏区, 应引起高度重视. 在进行区域或城市范围的秸秆燃烧产生污染物质的生态风险评价时, 该污染物的 I_c 和 I_r 都是需要考虑的重要基础数据. 最后, 提出大力发展农村秸秆资源综合循环经济利用是解决区域或城市范围内秸秆燃烧产生环境问题的可行之径.

关键词: 武汉市; 挥发性有机污染物; 排放清单; 秸秆燃烧; 管理对策

中图分类号: X321; X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4543-09

Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City

HUANG Bi-jie

(Hubei Key Laboratory of Industrial Fume and Dust Pollution Control, School of Chemical and Environmental Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: Straw combustion is an important anthropogenic source of volatile organic compounds (VOCs) in China. Emissions of VOCs from straw combustion significantly affect climate forcing and human health. A reliable estimation of VOCs emission from the source is the important prerequisite for emission impact assessment and control strategy in the urban or regional areas. VOCs emissions from straw combustion in Wuhan City and the districts were estimated by factor analysis method, which was based on the yield of major farm crops in the period of 2005-2011. Moreover, Cultivated-land Emission Intensity (I_c) and Regional Emission Intensity (I_r) were also calculated. VOCs Emissions from straw combustion in Wuhan City were $(3\,163 \pm 139)\text{t}$ in the period of 2005-2011; I_c and I_r was $(1.52 \pm 0.06)\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ and $(0.37 \pm 0.02)\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$, respectively; Straw combustion of grain and oilseed crops was the main source of the emissions; 21 kinds of VOCs should be listed as the priority control pollutants for straw combustion in Wuhan City. The order of successively decreasing VOCs emission of districts in Wuhan City was Huangpi District, Xinzhou District, Jiangxia District, Caidian District, Hannan District, and Dongxihu District, the former 4 districts contributed to almost 90% VOCs emissions of the Wuhan City. Huangpi District, Xinzhou District, Jiangxia District, and Hannan District should be regarded as priority control areas of VOCs emission from straw combustion in Wuhan City. Much attention should be paid to Jiangxia District, which was nationally representative. I_c and I_r are important basic data for ecological risk assessment of some kind of pollutants emitted from straw combustion in the urban or regional areas. Furthermore, straw utilization model according to agricultural cyclic economy is a feasible way to cope with the environmental problem of straw combustion.

Key words: Wuhan City; volatile organic compounds(VOCs); emission inventory; straw combustion; management countermeasure

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)是一类有机化合物的统称, 通常指常压下沸点在 $50\sim 260^\circ\text{C}$ 、常温时饱和蒸气压大于 133.32Pa 的有机化合物^[1]. 大气 VOCs 成分复杂、种类繁多, 有数百种物质归入 VOCs 行列. 按化学结构, VOCs 可分为烷烃(直链烷烃和环烷烃)、烯烃、炔烃、苯系物、醇类、醛类、醚类、酮类、酸类、酯类、卤代烃及其他, 共 12 类物种^[2]. VOCs 的大量排放将直

接危害周边居民的身体健康, 促进城市光化学烟雾和霾的生成, 影响区域大气环境质量^[3]. 我国 VOCs 主要来源于机动车排放、固定源燃烧和工业活动

收稿日期: 2013-06-04; 修订日期: 2013-08-08

基金项目: 武汉东湖高新区第四批 3551 高层次人才基金项目(武新管[2011]140 号); 国土资源公益性行业科研专项(201411001)

作者简介: 黄碧捷(1982~), 男, 博士, 副教授, 高级工程师, 主要研究方向为工业烟尘处理及环境生物学, E-mail: huangbijie1982@163.com

等^[4]. 固定燃烧源是我国第一大 VOCs 人为源^[5, 6], 其中生物质燃烧的排放贡献最大,王海林等^[4]认为接近 80% 的 VOCs 来自生物质燃烧. 魏巍^[2]的研究结果表明,2005 年生物质燃烧 VOCs 排放量占固定源燃烧总排放的 85%,约为 465 万 t. 另外,生物质燃烧产生大量的其他气态及颗粒态组分,均可对全球气候系统、大气环境以及生态系统产生重要影响,是推动全球气候变化的重要因素^[7, 8]. 在我国广大农村地区,燃料秸秆、柴薪及秸秆露天焚烧等是生物质燃烧排放污染物的主要源类^[9]. 据统计,2000~2003 年全国秸秆露天焚烧的总量约 1.32~1.39 亿 t^[10]. 可见,我国秸秆燃烧排放的 VOCs 总量非常可观. 武汉市是我国六大区域之一的中西部地区第一大城市,中国十大城市之一,中三角(长江中游城市群)核心城市,是我国传统的工、农业基地. 本研究考察了武汉市秸秆燃烧 VOCs 的排放情况,分析了污染物的地区分布特征,以期对武汉市区域空气质量和气候变化等模型研究提供基础数据,为武汉市制定相关大气污染控制对策提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 基础数据

来自 2010~2012 年武汉市统计年鉴;2005~2012 年武汉市环境状况公报.

1.2 计算方法

1.2.1 秸秆燃烧 VOCs 排放量

秸秆燃烧 VOCs 排放量用式(1)计算:

$$Q = P \cdot N \cdot B \cdot F \cdot E \quad (1)$$

式中, Q 为秸秆燃烧 VOCs 的排放量; P 为作物总产量; N 为作物的秸秆系数; B 为秸秆燃烧比例; F 为秸秆燃烧效率; E 为秸秆燃烧 VOCs 排放系数.

作物总产量(P)数据来自武汉市统计年鉴中全市及分区农作物总产量对应的数据表. 按统计年鉴中划分的 13 种各类作物统计武汉市 VOCs 排放量,按粮食类、棉花类、油料类、麻类和糖类统计武汉市主要的 6 个农作物种植区的 VOCs 排放量.

作物的秸秆系数(N)取我国各类作物秸秆系数研究领域的最新文献[11, 12]中的数据,其中有湖北省单列数据的按文献中的数据,没有湖北省单列数据的取全国平均值,列于表 1. 统计 2009~2011 年武汉市主要的 6 个农作物种植区秸秆系数时,粮食类、油料类秸秆系数由当年武汉市其类别下的各种作物加权平均计算得到,棉花、麻类和糖类按表 1

中数据计算,汇总于表 2.

由于目前还没有对各省、市、区的秸秆燃烧比例(B)进行准确统计,关于秸秆燃烧比例数值的确定均由研究者各自估算或抽样调查得到. 魏巍^[2]通过问卷调查的方式估计湖北省秸秆燃烧比例为 14%;王书肖等^[13]结合分层抽样及相应的统计方法确定我国农村平均秸秆焚烧比例为 18.59%(最高的超过 30%,最低仅有 10%),湖北省为 $(10.7 \pm 3.34)\%$;Hao 等^[14]和 Streets 等^[15]均认为全国秸秆露天燃烧量为秸秆总产量的 17%;曹国良等^[16]取值 25% 进行计算. 本研究取值 16.5% 为武汉市平均秸秆燃烧比例.

秸秆燃烧效率(F)与其燃烧方式有很大联系,与当地农民的燃烧习惯、作物种类也有关系^[13],张鹤峰^[17]对我国水稻、小麦和玉米等 3 种作物秸秆的燃烧效率进行测试,得到结果为 92%~93%;Streets 等^[15]和 Zárate 等^[18]的研究中均取秸秆的燃烧效率为 80%;陆炳等^[9]取 92.5% 进行研究;本研究依据实际测定和文献资料,取 84.5% 计算.

国内、外对秸秆燃烧 VOCs 排放系数(E)的确

表 1 各类农作物的秸秆系数

Table 1 Ratios of dry residue to production

作物种类	秸秆系数/kg·kg ⁻¹
稻谷	0.960
小麦	1.390
蚕豌豆	1.520
薯类	0.520
其他杂粮	2.320
玉米	0.980
大豆	1.520
棉花	4.090
油菜籽	3.170
花生	1.140
芝麻	2.230
麻类	1.730
糖类	0.430

表 2 2009~2011 年区域各类农作物秸秆系数¹⁾

Table 2 Ratios of dry residue to production for different kinds of crops in 2009-2011

类别	秸秆系数/kg·kg ⁻¹		
	2009 年	2010 年	2011 年
粮食类	0.998	0.994	0.999
棉花类	4.090	4.090	4.090
油料类	2.619	2.584	2.543
麻类	1.730	1.730	1.730
糖类	0.430	0.430	0.430

1) 粮食类、油料类秸秆系数由当年武汉市其类别下的各种作物加权平均计算得到

定都是根据当地秸秆燃烧具体状况测定或借鉴前人文献去估算,存在很大的不确定性,已有研究用到的排放系数在 $8.5 \sim 15.7 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ [9, 18~21]; 本研究借鉴以上文献和实地调查情况,取 $11.5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 计算。

1.2.2 秸秆燃烧 VOCs 排放强度

秸秆燃烧 VOCs 排放强度用式(2)计算:

$$I = Q/A \quad (2)$$

式中, I 为秸秆燃烧 VOCs 排放强度; Q 为秸秆燃烧 VOCs 的排放量; A 为土地面积。

本研究选取耕地排放强度 (cultivated-land emission intensity, I_c) 和区域排放强度 (regional emission intensity, I_r) 表征武汉市及其主要农作物种植区的秸秆燃烧 VOCs 排放强度。 I_c 用于估量单位耕地面积的秸秆燃烧 VOCs 排放情况,也可视为单位耕地污染物的潜在排放系数; I_r 用于表征区域面积范围内的秸秆燃烧 VOCs 排放情况,适用于污染物区域分布特征的界定,为制定区域污染物控制规划和治理措施提供依据。 I_c 、 I_r 分别按照式(2)由武汉市及其主要农作物种植区秸秆燃烧 VOCs 排放总量除以对应的耕地面积、区域面积计算得到。

1.3 数据处理与不确定性分析

用 Microsoft Excel 2003 及 SPSS 13.0 软件进行各项数据计算及分析。数据以平均值 (Mean $\pm$ Std) 表示。采用排放因子分析法计算 VOCs 的排放量的最大不确定性就在于各项因子的选择上。目前,我国尚缺乏权威性的秸秆燃烧 VOCs 相关排放因子的测量工作,而且同一城市的不同区(县)、不同村、甚至不同家庭单位的排污情况都存在很大的差异性,不可避免地会导致排放量估算的不确定性,通过因子算法仅能从整体上反映污染物的排放情况。本研究用于计算 VOCs 排放量的各项因子均来源于参考不同的学者对我国实际排污情况的分析统计,尽量选取了与武汉市相关的最新的研究结果。总体来说,数据能大致反映武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放的现状,具有一定的参考意义。

2 结果与分析

2.1 秸秆燃烧 VOCs 排放量及排放强度

将 2005~2011 年武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放量数据绘于图 1。7 a 间武汉市年均秸秆燃烧 VOCs 排放量约为 $(3163 \pm 139) \text{ t}$ 。VOCs 排放量最小的 2011 年相比于最大的 2007 年, VOCs 年均排放量下降 12.2%。

图 2 列出了 2005~2011 年武汉市秸秆燃烧

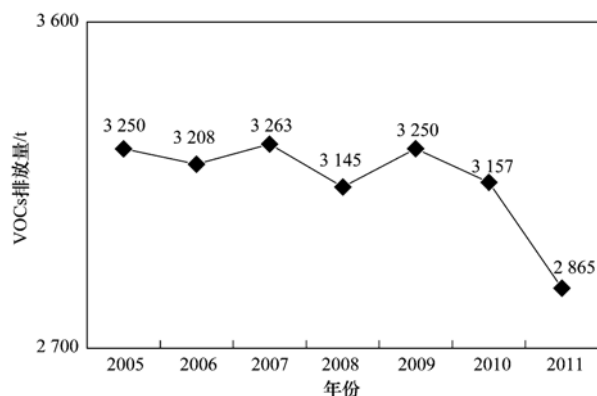


图 1 2005~2011 年武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放量

Fig. 1 VOCs emission of straw combustion in Wuhan City in 2005-2011

VOCs 的耕地排放强度 (I_c) 和区域排放强度 (I_r)。7 a 间武汉市年均秸秆燃烧 VOCs 的 I_c 和 I_r 分别为 (1.52 ± 0.06) 和 $(0.37 \pm 0.02) \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。武汉市秸秆燃烧 VOCs 的 I_c 最大值出现在 2005 年,而 I_r 最大值出现在 2007 年,以上两者在 2011 年均均为最小值。2011 年武汉市秸秆燃烧 VOCs 的 I_c 和 I_r 值较最大值分别降低 11.3% 和 12.2%。

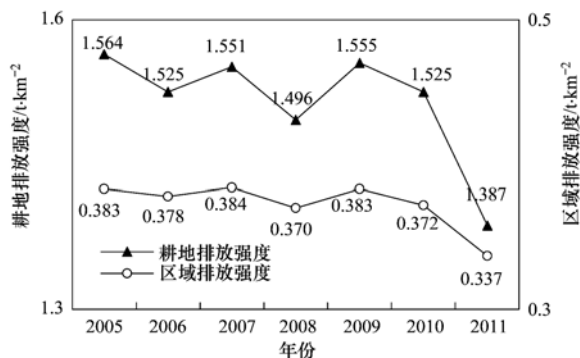


图 2 2005~2011 年武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放强度

Fig. 2 VOCs emission intensity of straw combustion in Wuhan City in 2005-2011

2.2 秸秆燃烧 VOCs 排放源清单

将 2005~2011 年武汉市来自五类主要农作物秸秆燃烧 VOCs 排放数据列于表 3。这 7 a 间武汉市粮食、棉花、油料、麻类、糖类农作物年均秸秆燃烧 VOCs 排放量分别为 (2135 ± 97) 、 (191 ± 37) 、 (776 ± 28) 、 (10.3 ± 1.4) 和 $(50.7 \pm 2.9) \text{ t}$; 分别占到排放总量的 67.51%、6.04%、24.52%、0.33% 和 1.60%; 武汉市超过九成的秸秆燃烧 VOCs 排放来自粮食类和油料类农作物。

2.3 秸秆燃烧 VOCs 分区排放量及排放强度

将 2009~2011 年武汉市主要的 6 个农作物种植区的秸秆燃烧 VOCs 排放量数据绘于图 3。3 a

表 3 2005 ~ 2011 年武汉市五类农作物秸秆燃烧 VOCs 排放量
Table 3 VOCs emission from the straw combustion of five crops in Wuhan City in 2005-2011

年份	秸秆燃烧 VOCs 排放量/t				
	粮食类	棉花类	油料类	麻类	糖类
2005	2 205.2	181.8	803.1	10.2	49.4
2006	2 170.3	201.4	770.4	9.8	56.0
2007	2 201.4	225.4	777.1	9.0	50.5
2008	2 081.6	231.3	771.6	11.5	49.5
2009	2 173.6	211.4	800.2	11.6	53.0
2010	2 178.3	132.1	787.5	11.6	47.9
2011	1 935.8	154.0	718.3	8.1	48.4

间武汉市年均秸秆燃烧 VOCs 排放量约为(3 091 ± 201)t. 主要的农作物种植区东西湖、汉南、蔡甸、江夏、黄陂和新洲区平均年排放量分别为:(73.5 ± 15.9)、(141.9 ± 47.5)、(324.2 ± 50.2)、(642.8 ± 32.7)、(1 001 ± 23.3)和(780.5 ± 47.8)t; 分别占到武汉市排放总量的 2.38%、4.59%、10.49%、20.80%、32.38% 和 25.26%. 武汉市超过 95% 的秸秆燃烧 VOCs 排放来自于以上 6 区,近 90% 的排放来自江夏、蔡甸、黄陂和新洲这 4 区.

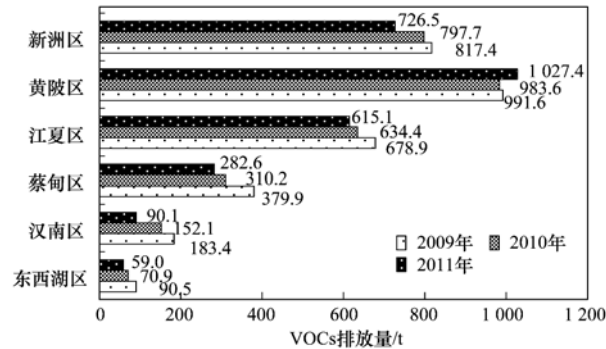


图 3 2009 ~ 2011 年武汉市分区农作物秸秆燃烧 VOCs 排放量
Fig. 3 Regional VOCs emission of straw combustion in Wuhan City in 2009-2011

2010 年武汉市分区区域面积排序为:黄陂区(2 261 km²) > 江夏区(2 010 km²) > 新洲区(1 500 km²) > 蔡甸区(1 108 km²) > 东西湖区(439.2 km²) > 汉南区(287.7 km²); 2010 年武汉市分区耕地面积排序:黄陂区(535.8 km²) > 新洲区(487.8 km²) > 江夏区(356.5 km²) > 蔡甸区(257.2 km²) > 东西湖区(134.3 km²) > 汉南区(104.6 km²); 2010 年武汉市分区耕地面积占区域面积百分比排序为:汉南区(36.4%) > 新洲区(32.5%) > 东西湖区(30.6%) > 蔡甸区(23.2%) > 黄陂区(23.7%) > 江夏区(17.7%).

将 2009 ~ 2011 年武汉市主要的 6 个农作物

植区的秸秆燃烧 VOCs 耕地排放强度数据绘于图 4. 3 a 间武汉市年平均秸秆燃烧 VOCs 的 I_c 值为(1.49 ± 0.09) t·km⁻². 东西湖、汉南、蔡甸、江夏、黄陂和新洲区 I_c 值分别为:(0.54 ± 0.09)、(1.36 ± 0.45)、(1.26 ± 0.19)、(1.73 ± 0.05)、(1.87 ± 0.06) 和(1.59 ± 0.12) t·km⁻². 江夏、黄陂和新洲区高于武汉市的平均水平.

将 2009 ~ 2011 年武汉市主要的 6 个农作物植区的秸秆燃烧 VOCs 区域排放强度数据绘于图 5.

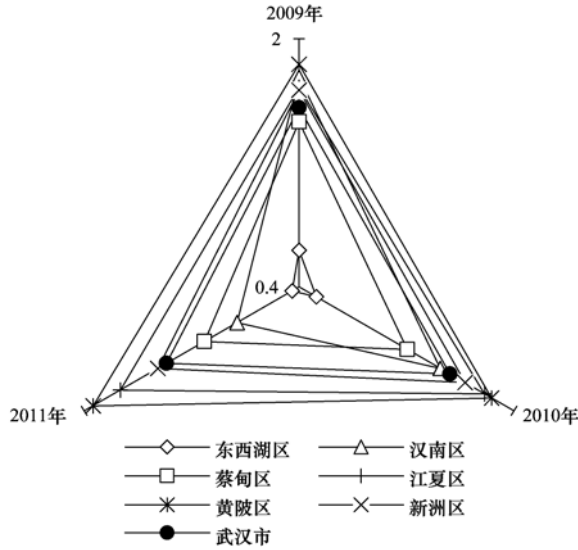


图 4 2009 ~ 2011 年武汉市分区农作物秸秆燃烧 VOCs 耕地排放强度(I_c)

Fig. 4 Cultivated land VOCs emission intensity of straw combustion in Wuhan City in 2009-2011

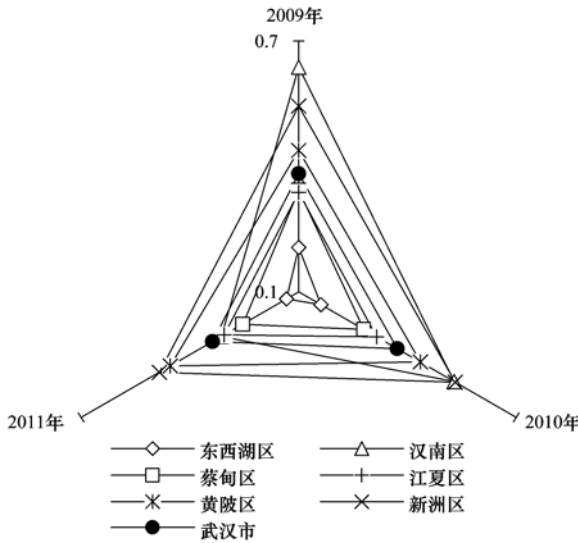


图 5 2009 ~ 2011 年武汉市分区农作物秸秆燃烧 VOCs 区域排放强度(I_r)

Fig. 5 Regional VOCs emission intensity of straw combustion in Wuhan City in 2009-2011

3 a 间武汉市年平均秸秆燃烧 VOCs 的 I_r 值为 $(0.36 \pm 0.02) \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。东西湖、汉南、蔡甸、江夏、黄陂和新洲区 I_r 值分别为: (0.17 ± 0.04) 、 (0.49 ± 0.17) 、 (0.29 ± 0.05) 、 (0.32 ± 0.02) 、 (0.44 ± 0.01) 和 $(0.52 \pm 0.03) \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。汉南、黄陂和新洲区高于武汉市的平均水平。

3 讨论

3.1 秸秆燃烧的危害及 VOCs 毒性效应

农作物光合作用的产物有一半以上存在于收获籽实后的秸秆中,我国作为农业大国,秸秆资源丰富,2009 年我国作物秸秆总量约 6.98 亿 t,稻谷、小麦和玉米秸秆是主要秸秆类型,农作物秸秆产量的分布呈现由西北向东南逐渐增加的趋势,湖北省是中产(0.2~0.4 亿 t)地区^[22],武汉市五类主要的农作物年产量超 150 万 t,每年产生农作物秸秆约 200 万 t。武汉市秸秆燃烧第一个高峰出现在 6 月中旬至 7 月上旬,第二个高峰出现在 10 月。

随着我国农民生活水平的提高及能源结构的改变,农作物秸秆逐渐不再作为能源原料和牲畜饲料,秸秆露天焚烧现象不断恶化。焚烧秸秆时,能直接烧死、烫死土壤中的有益微生物,使土壤的自然肥力和保水性能大大下降,土壤板结不耐旱,更为严重的是释放大量的颗粒物及 SO_2 、 NO_x 、VOCs 等有毒有害气体。秸秆焚烧污染物排放导致大气中 PM_{10} 、CO 浓度升高 30% 以上,是导致城市雾霾污染事件的直接因素之一^[23]。目前,以武汉市为首的中部地区城市群,雾霾天气频发^[24]。2012 年 6 月中旬,包括武汉市在内的我国部分地区出现大范围雾霾天气。武汉市出现了能见度小于 1 km,黄色有明显异味的重度雾霾天气,这一环境事件最后被确定与周边及北方地区农作物秸秆野外焚烧直接相关。2013 年 1 月,武汉市又出现了超过半月的连续性轻、中度雾霾天气。大气细粒子污染和灰霾的高发季节,也是大气 VOCs 浓度较高的时段^[25]。同时,VOCs 是对流层臭氧和二次有机气溶胶的重要前体物,其光化学氧化过程对城市大气灰霾污染的形成至关重要^[26~28]。

大气颗粒物作为气体污染物的载体或反应床,使部分气体污染物转化为有害颗粒物或使某些污染物毒性增强^[29]。VOCs 具有毒性、刺激性及致癌作用,可直接导致人体出现头痛、恶心、昏迷、抽搐等诸多不适症状,并对人体的肝、肾脏、大脑和神经系统造成伤害,尤其是苯、甲苯及甲醛对人体健康

危害最大^[30]。大气颗粒物载 VOCs 诱发的疾病多表现为上呼吸道感染、哮喘、结膜炎、支气管炎、皮疹、心血管系统紊乱等,同时,还会对人体健康产生间接影响,如影响维生素 D 的合成,导致小儿佝偻病高发,使空气中传染性病菌的活性增强等,还会使人产生压抑、悲观等不良情绪,影响心理健康。

3.2 秸秆燃烧 VOCs 排放量及排放种类

秸秆燃烧能产生多种 VOCs 物质,除直接以气态物质进入大气环境以外,还主要附着在燃烧颗粒物及未燃尽的飞灰中。由于秸秆种类和燃烧方式的不同,其产生的 VOCs 种类繁多。连进军等^[31]认为:每年约有 6.5 亿 t 的多环芳烃及其烷基衍生物经秸秆燃烧释放到大气中,其中萘和烷基萘等低分子量的化合物占多数。小麦和水稻秸秆燃烧释放的多环芳烃类物质在气相中较多,而玉米秸秆颗粒物中的多环芳烃及其衍生物要高于气相的量,这种差别主要在于萘的生成量,玉米秸秆燃烧释放的萘类化合物要远少于水稻和小麦。Yang^[32]的研究发现,在台湾,水稻秸秆燃烧是多环芳烃的重要来源,特别是细颗粒物多环芳烃。陆豪等^[33]发现秸秆烟气中多环芳烃含量远大于原质和灰烬中的含量(高 2~3 个数量级),水稻和大豆秸秆燃烧时 PAHs 生成量随温度的上升而增大,在 16 种优控 PAHs 中,萘的生成量最多,分别为 $9.29 \sim 23.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $3.13 \sim 49.9 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; 其次是菲,生成量分别为 $2.67 \sim 5.30 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.40 \sim 8.07 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。张鹤丰^[17]研究表明:水稻(检出 16 种 PAHs,简称为 16 种,下同)、玉米(11 种)和小麦(10 种)秸秆燃烧排放的颗粒物中的 PAHs 总量分别为 568.2、224.1 和 $123.4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$;而在气相中,水稻(14 种)、玉米(11 种)和小麦(11 种)秸秆燃烧排放的 PAHs 总量分别为 109.6、39.1 和 $25.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。段佐亮^[34]预测我国农作物秸秆燃烧的甲烷排放量从 1990 年的 163.6 万 t 到 2020 年将达到 213.8 万 t。已有文献中关于我国城市秸秆燃烧 VOCs 排放情况是:2006 年北京市、上海市和天津市秸秆露天燃烧排放 NMVOC 分别约为 0.20、0.26 和 0.27 万 t^[13];2007 年沈阳市秸秆燃烧 VOCs 排放约为 0.63 万 t^[35]。本研究估算武汉市农作物年秸秆直接燃烧总的 VOCs 排放量近 0.3 万 t,武汉市排放情况与以上有文献资料报道的我国其他城市相当。

众多学者对我国区域和城市大气环境中 VOCs 排放做过清单研究和源解析,然而秸秆燃烧源排放量及污染物分布在其他城市尚鲜见报道。这是由于

相比于大气颗粒物和其他气体污染物,来自秸秆燃烧的 VOCs 排放具有季节性、随机性和不确定性,排放量只能通过估算得到,同时,秸秆燃烧 VOCs 排放种类的决定因素较为复杂,目前尚缺乏公认的秸秆燃烧源 VOCs 排放的定性和定量分析的标准方法。

已有文献关于生物质燃烧 VOCs 排放种类的研究包括:冯小琼等^[36]研究发现香港地区 2005~2010 年 VOCs 污染来源中生物质/生物燃料燃烧排放的主要物质是 CO、苯和甲苯,微量物质是正丁烷、丙烯、正戊烷和 1,3-丁二烯。曹文文等^[37]在天津和沈阳城市大气中共检出 108 种 VOCs;在天津市检测到的 VOCs 中醛酯占 56.9%,卤代烷烃占 13.4%,烷烃占 13.1%,苯系物占 12.9%,烯烃和卤代烯烃占到 2.5% 和 1.1%;沈阳市醛酯占 49.3%,卤代烷烃占 17.8%,烷烃占 11.8%,苯系物占 10.3%,卤代烯烃和烯烃分别占 7.8% 和 2.9%。然而,研究结果并没有区分来自秸秆燃烧源的 VOCs 排放情况。魏巍^[2]研究发现生物质燃烧烟气中 VOCs 成分复杂,约 190 余个物种被检出,其中有 62 个重要物种,体积分数之和占到 95% 以上。不同燃烧条件下的 VOCs 排放浓度差异很大,但其化学组分却具有相似性,以不饱和烃(13%~28%)、苯系物(28%~45%)、醛类(6%~12%)和酮类(9%~20%)为主。李兴华等^[38]对 4 种典型秸秆燃烧 VOCs 排放特征进行了系统性研究,研究结果表明水稻、玉米、小麦和高粱 4 种生物质秸秆燃烧总的 VOCs 排放系数为 $(4.37 \pm 2.23) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;芳香烃和醛类是秸秆生物质燃烧排放 VOCs 中最为丰富的物种,含量均在 25% 以上;秸秆燃烧 VOCs 排放总的臭氧生成潜势比较高的物种依次为:醛类、芳香烃和烯烃/炔烃,其中醛类贡献在 50% 以上。水稻秸秆燃烧排放系数从大到小前 12 位的 VOCs 种类依次为:苯、甲醛、乙醛、甲苯、氯甲烷、丙醛、丙酮、异丁烯醛+正丁醛、乙醇、邻二甲苯、苯甲醛、1-丁烯;除此之外,苯乙烯、戊醛、乙酸甲酯在小麦秸秆燃烧时排放系数相对较高,也应引起重视。李锦菊等^[39]认为上海大气面源 VOCs 排放来自秸秆燃烧的贡献率为 2.5%,乙醛、1-己烯和乙炔是来自秸秆燃烧的主要成分。

综合已有研究成果和武汉市实地调查情况(另文发表),确定武汉市农作物秸秆燃烧需优先控制的 VOCs 种类为:芳香烃类(苯、甲苯、邻二甲苯、苯乙烯);醛、酮类(甲醛、乙醛、丙醛、戊醛、丙

酮);烯、炔烃类(正丁烷、1-丁烯、丙烯、1,3-丁二烯);PAHs 类(萘、菲);卤代烃及烷烃类(氯甲烷、甲烷、庚烷);醇、酯类(乙醇、乙酸甲酯)及其他类(乙腈、苯并呋喃),共 7 大类 21 种物质。

3.3 秸秆燃烧 VOCs 耕地排放强度和区域排放强度

在进行区域范围的某种污染物的生态风险评价时,污染物的区域排放强度(污染物排放量与区域面积的比值)是重要的基础数据来源。针对农村区域 VOCs 的排放潜势,确定优先控制的区域是即将进行的 VOCs 污染控制工作的必由之路。然而,对于农村行政区域面积和待开发荒地或非农用地面积相对较大,耕地面积较为集中的地区,仅仅以污染物区域排放强度为参考标准可能会低估了其真实的风险性。尤其在逐步实施农村土地置换,城镇化建设的时代背景下,耕地面积将不断相对集中,并且某一特定污染在一定的区域范围内有更为集中和加强排放的趋势。本研究引入耕地排放强度的概念是为了更有利于全面评估秸秆燃烧 VOCs 在典型区域的总量排放情况,也有利于在典型区域开展农田 VOCs 污染控制。

武汉市区域排放强度(I_r)的排序为:新洲区>汉南区>黄陂区>武汉市平均>江夏区>蔡甸区>东西湖区;而耕地排放强度(I_g)的排序是:黄陂区>江夏区>新洲区>武汉市平均>汉南区>蔡甸区>东西湖区。

黄陂区和新洲区作为武汉最大的两个农作物产区,无论从区域还是耕地排放强度上看都应作为秸秆燃烧 VOCs 排放的优先控制区。汉南区区域排放强度较高,而耕地排放强度低于武汉市的平均水平,这与汉南区的区域面积有关,汉南区的地域面积最小,仅为区域面积最大的黄陂区面积的 12.7%,而耕地面积占区域面积的比值位于武汉市第一位。从区域规划环境治理的角度,汉南区应该优先考虑农作物秸秆燃烧污染问题,以区域高度减少农田单位排放量。对于江夏区,其区域排放强度低于武汉市平均水平,从区域规划的角度,农作物秸秆燃烧污染情况似乎并不严重,这与其耕地面积占区域面积比例较小紧密相关。然而,从单位耕地排放的 VOCs 角度上看,应作为典型治理地区。并且,江夏区作为武汉市土地流转置换,城镇新区建设和工业、科技高新区发展情况较好的区域,在全国都有很强的代表性。这类区域依然以农业生产作为主导,若仅从区域污染物排放系数的角度并不是最严重的地区,但随着这类区域城镇和人口的相对集中,耕地和农

田污染情况将更为集中,应引起高度重视。

4 武汉市秸秆燃烧 VOCs 控制对策建议

4.1 秸秆燃烧 VOCs 的排放清单相关理论及实地调查研究

确定优先控制秸秆燃烧 VOCs 排放种类,纳入地方甚至国家标准指标中。对排放量和排放种类的监测工作,是农田 VOCs 排放控制的基础,按照统一的指标体系才能使数据具有针对性、可比性和代表性。应明确秸秆燃烧 VOCs 的优先控制种类,检测分析方法,排放量核算体系,纳入到地方或国家指标体系之中。

推进秸秆燃烧 VOCs 排放清单的实地研究,进行典型区域排放控制案例应用。以人体及生态健康的角度,选取典型区域(区县、村)范围内进行秸秆燃烧比例、燃烧效率和排放系数的实地研究,以及相关检测、源解析和污染控制技术的研究开发和工程应用。

展开生物质电厂等生物质能源燃烧利用 VOCs 排放特性研究。随着秸秆禁烧工作的全面铺开和资源节约循环利用措施的发展,秸秆生物质发电将成为重要的秸秆燃烧利用的形式。依据前期调研结果:每发 1 kW·h 电力,煤燃烧源大约排放 0.5 ~ 0.7 g 各类 VOCs 物质,而采用秸秆为原料的生物质燃烧源则排放 5.5 ~ 6.2 g,按目前全国生物质发电规模 330 亿 kW·h 容量折算为燃煤发电,则相比于燃煤源,生物质发电额外带来了 16.5 ~ 18.2 万 t 各类 VOCs 的排放。国家规划到“十二五”末,生物质发电规模将达 780 亿 kW·h,这将相比燃煤额外带来 39 ~ 43 万 t 各类 VOCs 的排放。武汉市拥有很好的生物质发电产业基础,有知名的生物质电厂龙头企业,在武汉市开展生物质电厂燃烧条件下 VOCs 的排放特征及污染控制研究将极具现实意义,笔者也正在进行这方面相关的理论和应用研究。

4.2 农业秸秆源头控制及清洁利用

武汉市各级尤其是农村基层组织应落实具体领导和部门负责宣传教育工作。在进入夏、秋收季节前,利用广播、板报、传单、宣传栏、主题村大会等形式开展多渠道的宣传教育工作,重点宣传各项政策法规,焚烧秸秆的危害、秸秆还田和综合利用的优势等,以减少、杜绝农作物秸秆大面积直接燃烧的现象。同时,也应认识到仅约束农民群体去处理数量巨大的秸秆资源是不可能实现的,完全将秸秆直接燃烧归罪于农民群体也是不公平的。

武汉市应加强通过科技手段找到秸秆处理的出路,以工业化方式对秸秆进行深度开发利用。如用于生物质发电,秸秆化机浆造纸,秸秆制气,秸秆饲料深加工等。科技手段是秸秆资源化利用的基础和保障。

武汉市应利用经济手段鼓励农民、企业和资本的社会化参与,如配套相应的对农民秸秆处理的经济补贴,政府购进机械对秸秆进行深埋、犁耕、预加工,制定秸秆资源化利用产业扶持政策、培育秸秆资源化利用企业等。让所有参与秸秆资源化利用和清洁处理的主体都能得到可期与实际的经济效益,促进其积极性、参与性和主动性。

武汉市应加强通过法律,法规手段对农田秸秆的统计、督查和管理工作,如新增除常规农作物总量之外的秸秆总量及其利用率的统计指标,制定地方性法规强制性或指导性约束农田秸秆禁烧工作。

通过多种措施和手段,从农业秸秆产生的源头控制焚烧秸秆的现象,减少秸秆燃烧带来的 VOCs 及其他污染物的排放。

4.3 秸秆生物质资源循环经济发展模式

近年来,国家已开始部署和实施农作物秸秆(生物质)资源循环经济利用相关工作。

2008 年,国务院办公厅发布《关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见》,要求将秸秆综合利用列入国家产业结构调整和资源综合利用鼓励与扶持的范围,针对秸秆综合利用的环节和用途,制定完善的税收优惠政策。

2011 年底,国家财政部和国家税务总局联合下发的《关于调整完善资源综合利用产品及劳务增值税政策的通知》,对以玉米芯为原料的生物乙醇 100% 退增值税,并且未来国家将对二代燃料乙醇实施进一步的优惠补贴政策,同时明确限制粮食乙醇。

2012 年底,国家农业部开始推进秸秆循环农业发展,加大补贴力度,实行税收优惠,建立多渠道资金筹措机制,把培育龙头企业作为发展秸秆循环农业的重要举措,加大科技创新投入,让秸秆循环农业发展始终运行在科技支撑、科技推动和科技引领的轨道上。

国家发改委先后在 2011 年和 2013 年发布《“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案》和《关于加强农作物秸秆综合利用和禁烧工作的通知》,要求到 2013 年秸秆综合利用率达到 75%,到 2015 年力争超过 80%,其中,秸秆能源化利用率达到 13%;加大对农作物收获及秸秆还田收集一体化农机的补贴

力度,提高还田和收集率,扩大秸秆养畜、保护性耕作、秸秆代木、能源化利用等秸秆综合利用支持规模;研究秸秆收储运体系建设激励措施;探索秸秆综合利用重点区域支持政策。

农作物秸秆是农村发展循环经济的重要生物质

资源基础,综合利用各类秸秆资源是繁荣农村经济和增加农民收入的必然选择。秸秆资源循环经济利用能使农业生产实现低消耗、低排放、高效率的目标。针对武汉市农业经济发展的实际,提出武汉市农村秸秆资源循环经济利用模式,如图6所示。

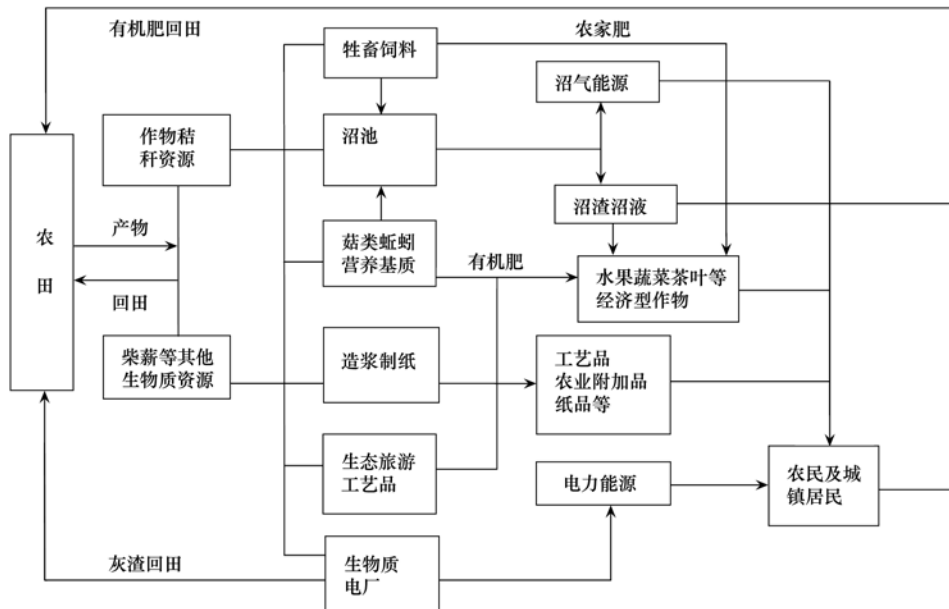


图6 武汉市农村秸秆资源循环经济利用模式

Fig. 6 Straw utilization models according to agricultural cyclic economy

5 结论

(1)近年来,武汉市年均秸秆燃烧 VOCs 排放量约为0.3万t,其中超过九成排放来自粮食类和油料类农作物秸秆。黄陂区、新洲区、江夏区和蔡甸区是武汉市秸秆燃烧 VOCs 最主要的排放区域。

(2)武汉市年均秸秆燃烧 VOCs 的耕地排放强度和区域排放强度分别为 $(1.52 \pm 0.06) \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $(0.37 \pm 0.02) \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。江夏、汉南、黄陂和新洲区应作为秸秆燃烧 VOCs 排放的优先控制区,尤其是能作为全国代表性的江夏区,应引起高度重视。

(3)在进行区域范围的秸秆燃烧产生污染物质的生态风险评价时,该污染物的区域排放强度和耕地排放强度都是需要考虑的重要基础数据。大力发展农村秸秆资源综合循环经济利用是解决区域或城市范围内秸秆燃烧产生环境问题的可行之径。

参考文献:

- [1] WHO. Air quality guidelines for Europe[S]. Geneva: WHO Regional Publication, 1999.
- [2] 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. 91-95.
- [3] 席劲瑛, 武俊良, 胡洪营, 等. 工业 VOCs 气体处理技术应用

状况调查分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 1955-1960.

- [4] 王海林, 张国宁, 聂磊, 等. 我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3462-3468.
- [5] 刘金凤, 赵静, 李湉湉, 等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. 中国环境科学, 2008, 28(6): 496-500.
- [6] 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.
- [7] Crutzen P J, Andreae M O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles[J]. Science, 1990, 250(4988): 1669-1678.
- [8] Levine J S, Cofer W R, Cahoon D R. Biomass Burning: a driver for global change[J]. Environmental Science and Technology, 1995, 29(3): 120-125.
- [9] 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.
- [10] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 9-13.
- [11] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 9-17.
- [12] 王晓玉, 薛帅, 谢光辉. 大田作物秸秆量评估中秸秆系数取值研究[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(1): 1-8.

- [13] 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.
- [14] Hao W M, Liu M H. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**(4): 495-503.
- [15] Streets D G, Yarber K F, Woo J H, *et al.* Biomass burning in Asia: annual and seasonal estimates and atmospheric Emissions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**(4): 1099-1119.
- [16] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 中国大陆生物质燃烧排放的污染物清单[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(4): 389-393.
- [17] 张鹤峰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009. 50-54.
- [18] Zárate O D, Ezcurra A, Lacaux J P, *et al.* Pollution by cereal waste burning in Spain[J]. *Atmospheric Research*, 2005, **73**(1-2): 161-170.
- [19] Turn S Q, Jenkins B M, Chow J C, *et al.* Elemental characterization of particulate matter emitted from biomass burning: wind tunnel derived source profiles for herbaceous and wood fuels[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**(3): 3683-3699.
- [20] 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**(21): 1-23.
- [21] 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.
- [22] 朱建春, 李荣华, 杨香云, 等. 近 30 年来中国农作物秸秆资源量的时空分布[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, **40**(4): 139-145.
- [23] 朱佳雷, 王体健, 邓君俊, 等. 长三角地区秸秆焚烧污染物排放清单及其在重霾污染天气模拟中的应用[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(12): 3045-3055.
- [24] 周家斌, 王磊, 钱佳, 等. 武汉市冬夏季大气 PM_{2.5} 浓度及其烃类化合物的变化特征[J]. 环境污染与防治, 2013, **35**(1): 1-5.
- [25] 陈长虹, 苏雷燕, 王红丽, 等. 上海市城区 VOCs 的年变化特征及其关键活性组分[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 367-376.
- [26] Batterman S A, Peng C Y, James B, *et al.* Levels and composition of volatile organic compounds on commuting routes in Detroit, Michigan[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(39-40): 6015-6030.
- [27] Chiang H L, Tsai J H, Chen S Y, *et al.* VOC concentration profiles in an ozone non-attainment area: a case study in an urban and industrial complex metroplex in southern Taiwan[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(9): 1848-1860.
- [28] Hatfield M L, Huff Hartz K E. Secondary organic aerosol from biogenic volatile organic compound mixtures[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(13): 2211-2219.
- [29] 于国光, 王铁冠, 吴大鹏. 薪柴燃烧源和燃煤源中多环芳烃的成分谱研究[J]. 生态环境, 2007, **16**(2): 285-289.
- [30] 马超, 薛志钢, 李树文, 等. VOCs 排放、污染以及控制对策[J]. 环境工程技术学报, 2012, **2**(2): 103-109.
- [31] 连进军, 叶兴南, 张鹤丰, 等. 秸秆燃烧释放的多环芳烃及其烷基衍生物[A]. 见: 中国化学会. 持久性有机污染物论坛 2008 暨第三届持久性有机污染物全国学术研讨会论文集[C]. 北京: 清华大学, 2008. 214-215.
- [32] Yang H H. Source identification and size distribution of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons during rice straw burning period[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(7): 1266-1274.
- [33] 陆豪, 朱利中. 秸秆烟气中多环芳烃的排放系数及燃烧贡献率[A]. 见: 中国化学会. 第五届全国环境化学大会摘要集[C]. 大连: 大连理工大学, 2009. 49.
- [34] 段佐亮. 我国作物秸秆燃烧甲烷、氧化亚氮排放量变化趋势预测(1990~2020)[J]. 农业环境保护, 1995, **14**(3): 111-116.
- [35] 马奇涛, 王宝庆, 李涛, 等. 沈阳市固定燃烧源挥发性有机化合物 2007 年排放清单研究[J]. 环境污染与防治, 2011, **33**(9): 29-32.
- [36] 冯小琼, 彭康, 凌镇浩, 等. 香港地区 2005~2010 年 VOCs 污染来源解析及特征研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 173-180.
- [37] 曹文文, 史建武, 韩斌, 等. 我国北方典型城市大气中 VOCs 的组成及分布特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(2): 200-206.
- [38] 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, **31**(12): 3515-3521.
- [39] 李锦菊, 伏晴艳, 吴迺名, 等. 上海大气面源 VOCs 排放特征及其对 O₃ 的影响[J]. 环境监测管理与技术, 2009, **21**(5): 54-57.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (4503)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China	AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)
Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown	ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)
Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer	YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)
Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring	CUI Hu-xiong (4529)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province	HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)
Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City	HUANG Bi-jie (4543)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing	DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China	LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)
Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin	ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry	WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory	CUI Ru, MA Yong-liang (4585)
Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings	ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)
Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers	CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)
Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS	HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)
Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site	FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site	GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)
Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics	DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)
Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil	HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)
Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes	CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)
Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City	CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production	GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)
Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)
Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation	ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)
Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter	PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675)
Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves	WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)
Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor	ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)
Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons	CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)
Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration	SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)
Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve	DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)
Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank	WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)
Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model	LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)
Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO _x Composite Oxides	CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)
Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr [*] Excilamp	ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)
Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture	YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)
Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)
Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)
Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China	WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)
Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources	WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)
Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry	MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)
Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants	XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)
Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行