

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 ..... 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM<sub>2.5</sub>区域来源解析 ..... 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 ..... 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM<sub>10</sub>中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 ..... 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM<sub>2.5</sub>中硫酸盐来源 ..... 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 ..... 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>2.5-10</sub>中水溶性无机离子特征 ..... 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 ..... 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 ..... 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 ..... 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 ..... 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 ..... 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 ..... 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 ..... 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 ..... 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 ..... 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 ..... 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 ..... 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 ..... 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 ..... 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 ..... 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 ..... 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 ..... 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 ..... 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 ..... 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 ..... 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 ..... 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 ..... 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面HNO<sub>3</sub>的光解 ..... 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 ..... 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 ..... 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 ..... 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 ..... 李静,李文英(1385)

Fe<sup>3+</sup>对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N<sub>2</sub>O释放的影响 ..... 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 ..... 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 ..... 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD<sub>5</sub>/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 ..... 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 ..... 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 ..... 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 ..... 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 ..... 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 ..... 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 ..... 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 ..... 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 ..... 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼钨交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 ..... 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 ..... 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 ..... 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 ..... 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 ..... 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

# 四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征

何敏, 王幸锐\*, 韩丽, 冯小琼, 毛雪

(四川省环境保护科学研究院, 成都 610041)

**摘要:** 根据收集的活动水平数据, 采用排放因子法建立了四川省 2012 年秸秆露天焚烧污染物排放清单, 并分析了污染排放的时空分布特征. 结果表明, 2012 年四川省秸秆露天焚烧共排放 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、CH<sub>4</sub>、NMVOC、CO、PM<sub>2.5</sub>、EC 以及 OC 分别为 1 210、12 185、2 827、20 659、40 463、292 671、39 277、1 984 以及 10 215 t; 水稻、小麦、玉米、油菜是四大主要的焚烧作物秸秆, 对污染物的总贡献率约为 88%~94%; 秸秆露天焚烧受农作收获的影响, 全年的排放主要集中在 7~8 月, 而 5 月是上半年的一个排放小高峰; 秸秆焚烧排放的高值地区主要分布在成都平原、川北地区以及川南地区, 川西地区排放分布相对较少; 本清单的不确定性主要来自排放因子及秸秆焚烧量.

**关键词:** 排放清单; 秸秆露天焚烧; 时间分布; 空间分布; 四川省

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1208-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.04.010

## Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province

HE Min, WANG Xing-rui\*, HAN Li, FENG Xiao-qiong, MAO Xue

(Sichuan Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Based on the collected activity data, the 2012 emission inventory of crop residues field burning in Sichuan province was developed through the emission factor approach. Besides, the temporal and spatial distribution of pollutant emissions was also analysed in this paper. The results showed that the total emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, NMVOC, CO, PM<sub>2.5</sub>, EC and OC from crop residues field burning in Sichuan province in the year of 2012 were 1 210, 12 185, 2 827, 20 659, 40 463, 292 671, 39 277, 1 984 and 10 215 t, respectively; The rice straw, wheat straw, corn straw and oil rape straw were four major contributors to pollutant emissions, with a total contribution about 88%-94%; Crop residues field burning emissions were affected by agricultural harvesting. Temporally, the emissions were concentrated in July and August with a small peak in May; Spatially, the Chengdu plain, the Northern area and the Eastern area of Sichuan province were the highest emission areas, while the Western area had relatively low emissions; The key uncertain sources included emission factors and parameters used for estimating crop burning amounts.

**Key words:** emission inventory; crop residues field burning; temporal distribution; spatial distribution; Sichuan province

秸秆露天焚烧是生物质燃烧的一种重要形式<sup>[1]</sup>, 排放大量气态和颗粒态污染物, 对大气环境、气候变化以及生态系统有重要影响<sup>[2,3]</sup>. 随着农村经济水平的不断提高以及能源结构的改变, 作物秸秆逐渐失去作为能源原料和牲畜饲料的作用<sup>[4]</sup>, 出于抢农时、保持土壤肥效等需要, 农民往往就地焚烧<sup>[5]</sup>. 秸秆的大量焚烧不仅浪费宝贵的生物资源, 而且引起严重的环境污染, 已成为公众密切关注的社会、环境问题. 近年来, 秸秆露天焚烧导致的区域大气污染事件屡见不鲜<sup>[6-8]</sup>, 例如, Chen 等<sup>[6]</sup>通过加密观测研究了成都地区秸秆露天焚烧导致的一次重污染天气的特征及形成机制; 朱彬等<sup>[7]</sup>综合利用地面空气污染监测资料、卫星遥感火点资料、气象观测和 NCAR/NCEP 再分析资料及气流后向轨迹模拟, 分析了秸秆焚烧所导致的南京及周边地区一次严重空气污染过程.

四川省是一个农业大省, 耕地面积约占全国的

5%<sup>[9]</sup>, 秸秆资源丰富, 其焚烧污染问题不容忽视. 曹国良等<sup>[10]</sup>建立的 2003 年全国各省市秸秆露天焚烧排放清单中, 四川省排放量约占全国的 5.4%. 张强等<sup>[11]</sup>估算的 2001 年颗粒物排放清单中, 四川省生物质开放燃烧(包括秸秆露天焚烧、草原火灾、森林火灾)的 PM<sub>2.5</sub> 排放量约占全省 PM<sub>2.5</sub> 总量的 5%. 排放源清单是环境空气质量管理工作的重要基础数据<sup>[12]</sup>, 而时空分布信息对空气质量模型模拟尤为重要<sup>[13,14]</sup>, 其准确性将直接影响到模型的准确性<sup>[15]</sup>. 四川省在清单的研究上起步较晚, 基于地级市编制秸秆焚烧排放清单鲜有研究案例. 虽然可从一些文献中获得全省秸秆焚烧的排放情况<sup>[16-18]</sup>, 然而仅能获知污染物总量, 缺少详细的排放信息, 且时

收稿日期: 2014-08-21; 修订日期: 2014-11-16

作者简介: 何敏(1989~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气环境污染与控制, E-mail: hemin210@gmail.com

\* 通讯联系人, E-mail: 894644145@qq.com

空分辨率较低,给秸秆焚烧导致的区域灰霾模拟及空气质量管理带来一定的困难。

基于此,本研究利用四川省各市的农作物产量建立了 2012 年秸秆焚烧大气污染物排放清单,利用 GIS 工具,结合土地利用面积以及卫星遥感监测的火点数据,对排放进行时空分配,以期为本地区空气质量模拟提供更为准确的基础数据,并为推进秸秆焚烧导致的灰霾污染研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与对象

本研究以 2012 年为基准年,以四川省 21 个地市(州)为研究区域,利用 Lambert 投影,以  $95.827^{\circ} \sim 110.353^{\circ}E$  和  $25.190^{\circ} \sim 34.980^{\circ}N$  为模型域,应用 GIS 建立了  $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$  的网格,模型域内共包含 16 820 个网格。研究的大气污染物包括  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $NH_3$ 、 $CH_4$ 、 $NNM VOC$ 、 $CO$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $EC$  以及  $OC$ 。

### 1.2 清单估算方法

秸秆露天焚烧污染物排放量估算采用基于秸秆焚烧量的排放因子法。基本计算公式为:

$$E_p = \sum 10^{-3} \times A \times EF_p \quad (1)$$

式中, $p$  为污染物种类; $E$  为污染物年排放量, $t$ ;  $A$  为秸秆露天焚烧量, $t$ ;  $EF$  为排放因子, $g \cdot kg^{-1}$ 。

#### 1.2.1 秸秆露天焚烧量

由于缺少废弃秸秆的露天焚烧量统计信息,本研究参考文献[19],采用公式(2)进行估算:

$$A = \sum_j P_j \times C_j \times R_j \times D \times F_j \quad (2)$$

式中, $j$  为作物种类; $A$  为秸秆露天焚烧量, $t$ ;  $P$  为作物产量, $t$ ;  $C$  为作物的谷草比; $R$  为谷草干燥比; $D$  为废弃秸秆焚烧比例; $F_j$  为燃烧效率。

根据四川省统计年鉴分类口径,同时结合本地种植概况,确定主要作物种类包括:水稻、小麦、玉米、大豆、其他豆类、棉花、甘蔗、花生、油菜、薯类、黄红麻、高粱、烟叶等几类。

作物产量数据来自四川省统计年鉴[20]以及各市(州)统计年鉴;谷草比又称秸秆系数,定义为秸秆产量与作物产量的比值[21];谷草干燥比为秸秆中干物质所占比例;露天焚烧比例不确定性较大,国内研究者大多采用专家判断或问卷抽样调查等方式获得数据;秸秆燃烧效率与燃烧方式以及作物种类有关,目前有关研究报道较少。本研究通过大量文献资料的搜集和整理,在类比相关数据的基础上,最终选取的估算参数见表 1。

表 1 秸秆露天焚烧量计算参数  
Table 1 Parameters used in the calculation of crop residues burning amounts

农作物	谷草比	谷草干燥比	燃烧效率
水稻	0.9 <sup>[22]</sup>	0.89 <sup>[23]</sup>	0.93 <sup>[25]</sup>
小麦	1.1 <sup>[22]</sup>	0.89 <sup>[23]</sup>	0.92 <sup>[25]</sup>
玉米	1.2 <sup>[22]</sup>	0.87 <sup>[23]</sup>	0.92 <sup>[25]</sup>
大豆	1.6 <sup>[22]</sup>	0.91 <sup>[23]</sup>	0.68 <sup>[26]</sup>
其他豆类	2.0 <sup>[22]</sup>	0.9 <sup>[23]</sup>	0.68 <sup>[26]</sup>
棉花	9.2 <sup>[22]</sup>	0.83 <sup>2)</sup>	0.804 <sup>3)</sup>
甘蔗	0.3 <sup>1)[22]</sup>	—	0.68 <sup>[26]</sup>
花生	0.8 <sup>[22]</sup>	0.94 <sup>[23]</sup>	0.82 <sup>[26]</sup>
油菜	1.5 <sup>[22]</sup>	0.83 <sup>[24]</sup>	0.804 <sup>3)</sup>
薯类	0.5 <sup>[22]</sup>	0.45 <sup>[24]</sup>	0.68 <sup>[26]</sup>
黄红麻	1.9 <sup>[22]</sup>	0.83 <sup>[24]</sup>	0.804 <sup>3)</sup>
烟叶	1.6 <sup>[22]</sup>	0.83 <sup>[24]</sup>	0.804 <sup>3)</sup>
高粱	1.6 <sup>[22]</sup>	0.89 <sup>[23]</sup>	0.804 <sup>3)</sup>

1) 甘蔗的谷草比为基于干物质的数值; 2) 棉花的谷草干燥比根据其特性,取与黄红麻、油菜相同数值; 3) 燃烧效率取其他作物的平均值

秸秆露天焚烧量由各地所处气候带、农村生活水平、植被覆盖现状和各农作物产量等因素决定<sup>[27]</sup>。各地秸秆露天焚烧的比例,与农民的收入水平、秸秆利用成本相关性较高<sup>[28]</sup>。有关四川秸秆露天焚烧比例的报道主要有:张楚莹等<sup>[16]</sup>的 10.7%; Cao 等<sup>[17]</sup>的 10%~20%; 田贺忠等<sup>[29]</sup>的 20%。随着经济的发展,秸秆作为家用燃料的比例可能呈下降趋势,而田间焚烧比例将有所增加,从区域内历年 MODIS 火点数据变化也可看出这一事实,如图 1 所示,上半年、下半年两个焚烧季的火点均呈增长趋势。然而秸秆焚烧受综合利用以及政府监管等多方面因素的影响,该比例的不确定性较大。综合上述,本研究确定四川省的焚烧比例为 20%。同时,参考文献[28],以农村居民人均纯收入作为权重分配参数,获得各市的焚烧比例,如表 2 所示。其中,成都市作为省会城市,其秸秆监管力度较大,综合利用情况相对较好,焚烧比例调整为 10%。由于当前可获数据的限制,在估算秸秆焚烧排放时,所有作物均采用同一焚烧比例。

表 2 四川省各市秸秆露天焚烧比例  
Table 2 City burning ratio of crop residues in Sichuan province

城市	焚烧比例/%	城市	焚烧比例/%	城市	焚烧比例/%
成都	10.0	遂宁	20.2	达州	19.0
自贡	21.5	内江	20.5	雅安	19.4
攀枝花	23.6	乐山	20.9	巴中	14.6
泸州	20.2	南充	18.2	资阳	20.8
德阳	24.2	眉山	22.3	阿坝	15.6
绵阳	22.2	宜宾	21.0	甘孜	12.5
广元	15.3	广安	20.2	凉山	17.3

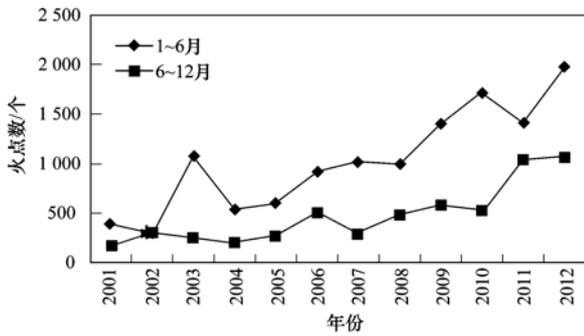


图1 四川省2001~2012年MODIS火点  
Fig. 1 Fire counts in Sichuan province from the year of 2001 to 2012

1.2.2 排放因子

排放因子是影响污染物排放定量表征的关键参数<sup>[30]</sup>. 国内有关秸秆露天焚烧的排放测试相对较少,近年来,随着对大气污染认识的逐步深入,排放源的测试工作也逐渐受到学者们的关注<sup>[31,32]</sup>. 通过搜集现有的排放测试成果,取平均值作为本研究的排放因子,针对无排放系数的作物类型,则采用其他秸秆的平均值. 具体如表3所示.

1.3 空间分配方法

秸秆焚烧涉及范围广、分散性高,通过传统的监测手段难以识别其时空分布特征,而卫星遥感数据具有时效性强、分辨率高、覆盖范围广等特点,

表3 秸秆露天焚烧排放因子/ $g \cdot kg^{-1}$

Table 3 Emission factors of crop residues field burning/ $g \cdot kg^{-1}$

秸秆类型	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	NMVOC	CO	PM <sub>2.5</sub>	EC	OC	排放因子来源	
水稻秸秆	0.147	3.52				72.4		0.52	1.96	[17]	
		1.81				64.2				[33]	
		1.42				27.7	3.03	0.11	0.75	[31]	
						44.12					[34]
小麦秸秆	0.147	3.83				53.2	12.1			[32]	
		2.65	0.53	3.9	6.05	52.32	7.57	0.32	1.36	本研究	
		0.049	2.59			65.5		0.52	3.83	[17]	
		0.85	3.3	0.37	3.4	7.5	60	7.6	0.49	2.7	[35]
玉米秸秆	0.45	1.12				141.2				[33]	
		1.19				20.6	2.39	0.12	0.97	[31]	
						22.19					[34]
		1.28				114.7					[33]
棉花秸秆	0.23	43.25				43.25				[34]	
		1.34	0.37	3.4	7.50	61.90	5.00	0.38	2.50	本研究	
		0.026	3.36			70.2		0.78	2.21	[17]	
		0.44	4.3	0.68	4.4	10	53	11.7	0.35	3.9	[35]
油菜秸秆	0.002	1.28				114.7				[33]	
						43.25					[34]
		2.98	0.68	4.4	10	70.29	11.70	0.57	3.06	本研究	
		0.002	2.68			111.8		0.82	1.83	[17]	
大豆秸秆	0.002	24.88				24.88				[34]	
		2.68	0.53	3.9	8.64	68.34	5.76	0.82	1.83	本研究	
		1.12				34.3	3.32	0.23	1.08	[31]	
						32.61					[34]
甘蔗秸秆	0.25	33.46				33.46				[34]	
		1.12	0.53	3.9	8.64	33.46	3.32	0.23	1.08	本研究	
		1.08				32.3	1.84	0.13	1.05	[31]	
						29.41					[34]
其他秸秆	0.25	30.86				30.86				[34]	
		1.08	0.53	3.9	8.64	30.86	1.84	0.13	1.05	本研究	
		2.01				40.08	4.12				[32]
		2.01	0.53	3.9	11.02	40.08	4.12	0.41	2.03	本研究	

多被应用于时空分配研究上<sup>[27,36,37]</sup>. 然而,火点监测受气象、监测时段等因素的影响,多云天气时的效果并不理想. 尤其对全年日照相对较少的四川盆地而言,可监测到的火点数偏少,影响分配结果. 此外,由于秸秆焚烧多发生在耕地上,也有学者<sup>[14]</sup>以

耕地面积作为权重参数进行网格化分配,该方法虽可覆盖秸秆焚烧的发生区域,却无法具体到某一点位,空间分辨率相对较低.

综合上述,本研究分别采用基于MODIS卫星火点以及基于土地利用的方法对四川省秸秆露天焚烧

进行网格化分配,在具体应用于空气质量模型模拟时,可将两种分配结果结合起来. 根据作物的生长特点,水稻秸秆露天焚烧以水田的火点数量作为代用权重,而其他作物秸秆则以旱地的火点数量为权重. 所采用的 MODIS 卫星火点来自于美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space

Administration, NASA) 下属 Fire Information for Resource Management System (FIRM) 提供的亚洲地区 1 km 分辨率数据,火点文件的属性包括 9 个字段,依次为经度、纬度、中红外波段亮度温度、扫描方向、沿轨方向像元大小、获取日期、获取时间、卫星信号、可信度. 具体分配步骤如图 2 所示.

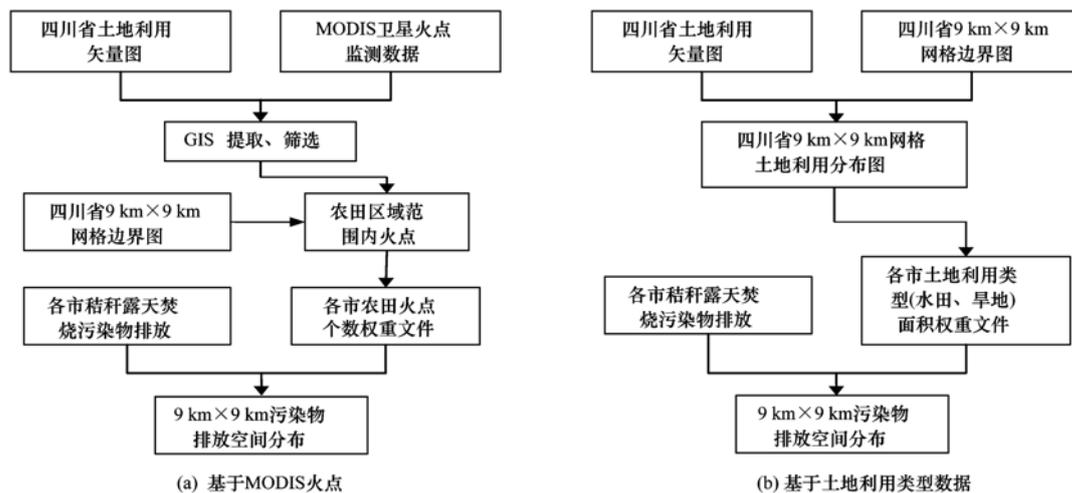


图 2 基于 GIS 的秸秆露天焚烧排放空间分配流程

Fig. 2 GIS-based spatial distribution flow of crop residues burning emissions

以基于 MODIS 火点分配为例,首先将各市土地利用合并得到全省土地利用矢量图,结合土地利用类型代码挑选出矢量图的农田(水田、旱地)类型部分,并利用 GIS 提取、筛选出农田区域内的火点,根据公式(3)获得各网格的空间权重.

$$E_i = \frac{FC_i}{FC_k} \quad (3)$$

式中, $i$  为农田区域内第  $i$  个网格, $E_i$  为  $i$  网格的分配权重, $FC_i$  为  $i$  网格的火点数, $FC_k$  为  $k$  城市总火点数. 根据各城市秸秆露天焚烧排放总量,结合上述权重比例得到基于 MODIS 火点污染物网格化清单.

## 2 结果与讨论

### 2.1 四川省 2012 年秸秆露天焚烧排放清单

根据 2012 年四川省作物秸秆焚烧量,结合表 3 所列出的排放因子,得到各市(州)秸秆露天焚烧  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、 $NH_3$ 、 $CH_4$ 、 $NMVOC$ 、 $CO$ 、 $PM_{2.5}$ 、 $EC$  及  $OC$  的排放量,见表 4. 污染物排放量较高的地区主要集中在绵阳、南充、德阳、资阳、达州、宜宾等城市,这些地区耕地面积大,作物秸秆资源量大,且农村人均收入相对较高,这些地区有着较高的秸秆焚烧比例,从而使得各污染物的排放量也较高. 此外,

攀枝花、阿坝、甘孜、雅安等地作物秸秆资源量较小,污染物排放量相对其他城市较低.

图 3 展示了各作物秸秆焚烧的排放贡献. 从中可知,水稻、小麦、玉米、油菜是四大主要的贡献作物秸秆,对污染物的排放贡献分别为 27% ~ 42%、8% ~ 30%、25% ~ 38% 以及 4% ~ 9%. 对不同污染物而言,秸秆的贡献情况略有差异. 其中,小麦对  $SO_2$  的贡献相对较高,玉米对  $EC$  及  $OC$  的排放贡献较高,主要是因为所取的排放系数相比其他类型秸秆高的缘故. 事实上,受耕作制度、秸秆特性等因素的影响,不同类型作物秸秆,其焚烧比例有一定差异. 相关研究表明,成都平原地区小麦、油菜秸秆多被用作燃料或在地头焚烧,还田量很少,而水稻秸秆则有部分还田,露天焚烧比例相对前两种小春作物低<sup>[38]</sup>. 这一事实在芮雯奕等<sup>[39]</sup>针对江苏省的秸秆利用调查研究成果中也有所体现. 然而,由于相关数据的限制,本研究暂时无法区分各作物秸秆的焚烧比例,而本文所估算的小麦、油菜秸秆焚烧排放极有可能是低估了.

### 2.2 时间变化特征

秸秆露天焚烧与农作生产有关,具有较强的季节性,然而受人为活动和自然因素的影响,其时间变化特征较难把握. 综合目前国内外研究成果,本研

表 4 四川省 2012 年秸秆露天焚烧排放清单/t·a<sup>-1</sup>

Table 4 Emission inventory of crop residues field burning for Sichuan province in 2012/t·a<sup>-1</sup>

城市	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	NMVOG	CO	PM <sub>2.5</sub>	EC	OC
成都	48	481	111	834	1 551	11 445	1 487	73	370
自贡	49	519	117	861	1 620	12 126	1 621	79	404
攀枝花	9	110	25	175	349	2 393	337	17	84
泸州	66	774	169	1 242	2 312	17 405	2 341	115	567
德阳	106	908	213	1 610	3 107	23 133	2 906	151	794
绵阳	123	1 030	248	1 849	3 698	26 604	3 393	179	952
广元	54	452	108	800	1 634	11 762	1 520	81	435
遂宁	73	592	145	1 077	2 225	15 815	1 956	111	580
内江	61	596	139	1 010	2 006	14 570	1 969	99	523
乐山	34	455	101	723	1 349	9 890	1 435	67	325
南充	123	968	236	1 772	3 587	25 674	3 183	172	930
眉山	41	551	122	883	1 614	11 903	1 708	79	377
宜宾	77	901	201	1 460	2 771	20 399	2 777	137	682
广安	66	723	163	1 195	2 255	16 775	2 299	111	562
达州	84	1 019	237	1 675	3 300	22 831	3 285	160	795
雅安	14	171	39	276	545	3 820	569	27	136
巴中	35	452	103	718	1 421	10 114	1 519	72	363
资阳	98	884	211	1 535	3 142	22 419	3 009	156	832
阿坝	4	40	10	69	156	997	147	8	42
甘孜	2	19	5	33	73	465	70	4	19
凉山	44	539	123	860	1 748	12 131	1 745	87	443
总量	1 210	12 185	2 827	20 659	40 463	292 671	39 277	1 984	10 215



图 3 不同作物秸秆类型对污染物的贡献

Fig. 3 Contribution of different crop residues to pollutant emissions

究以 MODIS 卫星火点监测数据为代用时间特征参数,判断秸秆露天焚烧的月变化特征. 通过 GIS 软件处理、提取,结合四川省土地利用数据,得到 2006~2012 年农田区域内每个月的平均火点数量. 考虑不同作物的生长特征,同时结合四川省的实际情况,将小麦、油菜两种小春作物焚烧排放分布在上半年,其他豆类及薯类分布在全年,剩余的其他作物则主要分布在下半年. 本研究以 PM<sub>2.5</sub> 为例分析秸秆焚烧污染物排放的时间变化,具体如图 4 所示.

由图 4 可以看出,火点数主要集中在 5~8 月,

5 月为全年的最高峰. 与火点变化类似,秸秆焚烧排放也主要集中在 5~8 月,下半年的秸秆焚烧排放高于上半年,主要由于大多数作物多在下半年收获的缘故. 上半年于 5 月出现高峰,主要原因在于 5 月是油菜、小麦等初夏小春作物的收获季节,进入中旬后,大多数地区开始大量焚烧秸秆. 下半年于 8 月出现峰值,该时段主要属于水稻等大春作物的焚烧期.

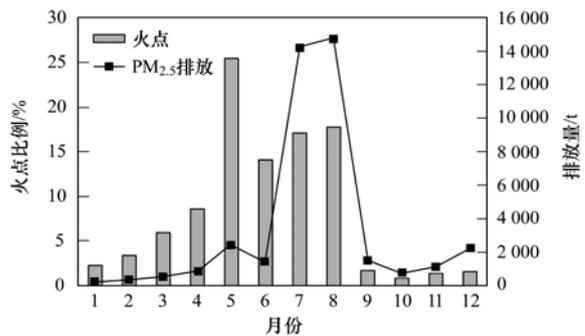


图 4 2006~2012 年平均火点及 PM<sub>2.5</sub> 排放月际变化

Fig. 4 Monthly average fire counts from 2006 to 2012 and PM<sub>2.5</sub> emissions

### 2.3 空间分布特征

以 2012 年四川省秸秆露天焚烧排放清单为基础,以 PM<sub>2.5</sub> 为例,应用 1.3 节所述的两种方法进行空间分配,结果见图 5 及图 6.

图 5 为根据土地利用面积所得的秸秆焚烧空间分布特征. 从图 5 (a) 可以看出, 水稻秸秆焚烧  $PM_{2.5}$  排放量高的地区分布在成都、德阳以及川南地区的宜宾、内江、泸州 3 个城市的交界区域, 在资阳、广安、达州等地也有高值网格的分布. 从图 5 (b) 可以看出, 其他秸秆露天焚烧污染物主要分布在成都、绵阳、德阳、资阳地带, 此外在广元、南

充、遂宁等城市也有高值分布. 对总秸秆露天焚烧分布而言, 高值地区仍主要分布在成都平原, 川南地区以及川北地区等地, 川西地区的污染排放分布相对较少.

图 6 展示的是基于 MODIS 火点的空间分配结果. 其中, 水稻秸秆露天焚烧在成都、德阳、绵阳南部形成片状的高值区, 除甘孜、阿坝以外, 在其他城

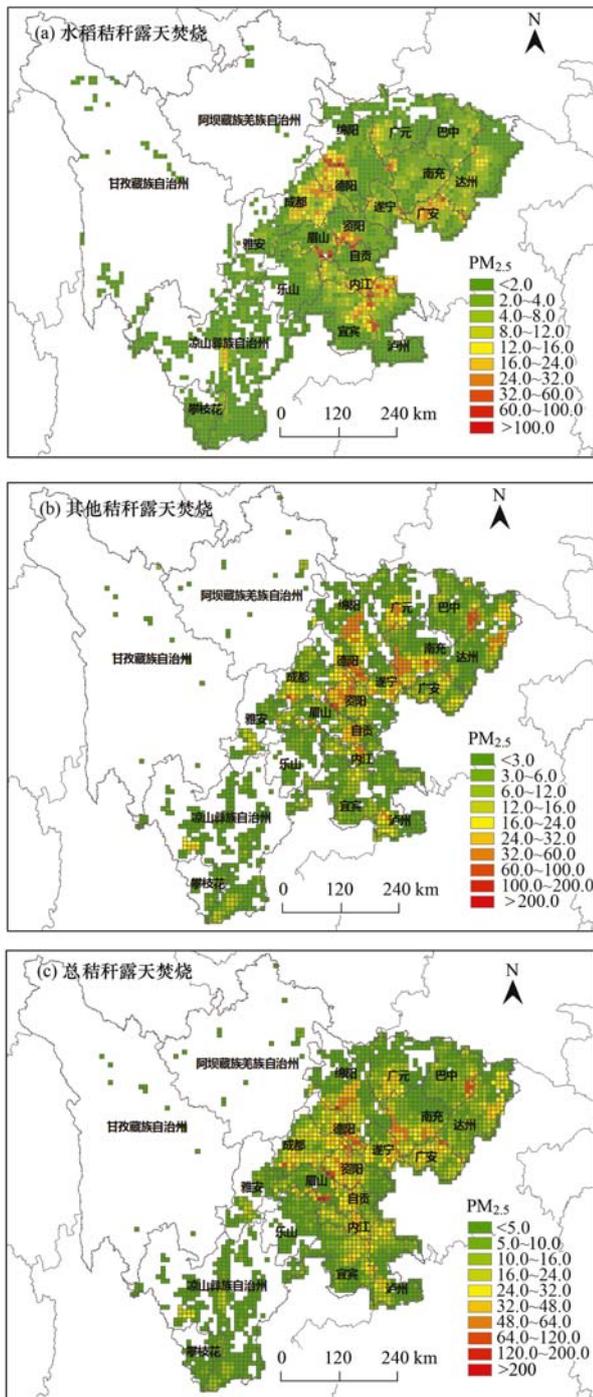


图 5 基于土地利用类型面积分配的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of emissions based on land-use data

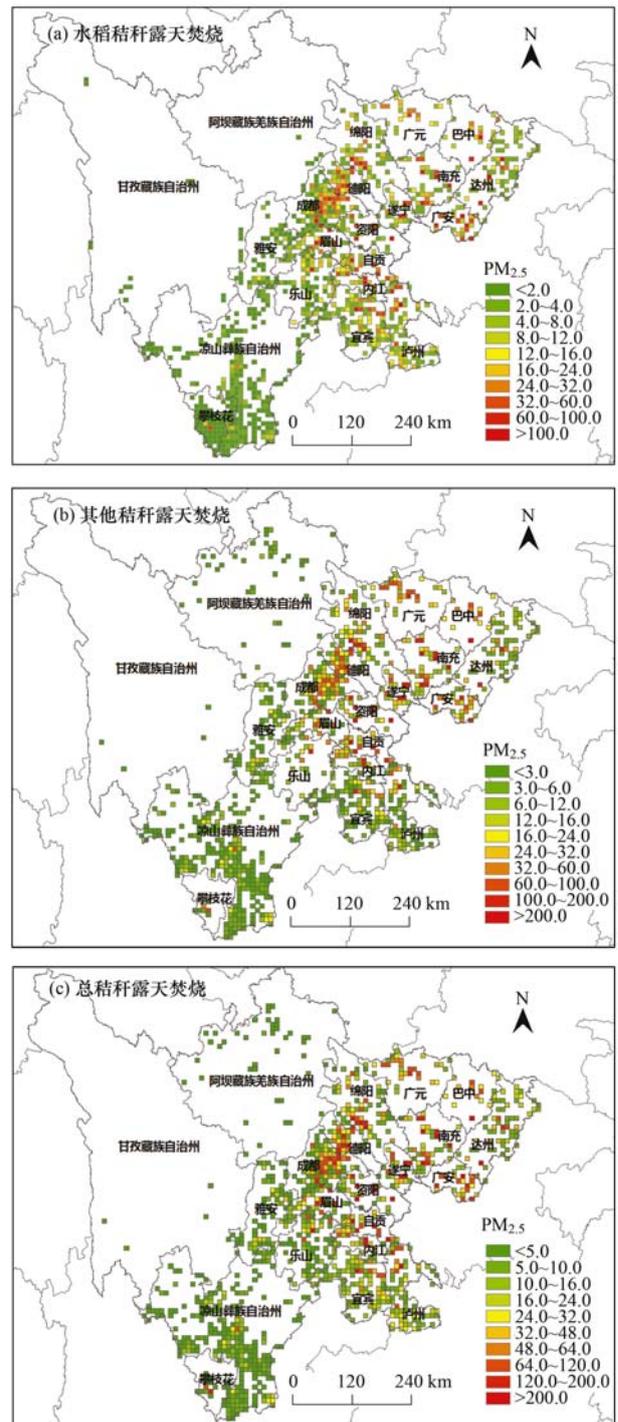


图 6 基于火点分配的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of emissions based on MODIS fire counts

市均有高值点分布. 对其他秸秆焚烧而言,除了成都平原的高值区以外,川南地区的高值点相对减少,在川北、攀西等区域均有高值网格点分布. 总秸秆露天焚烧更为接近于其他作物秸秆的空间分布趋势,高值区域仍集中在成都平原,相应的川北、川南以及攀西地区也有所分布. 对阿坝、甘孜而言,农作物秸秆主要是青稞秸、玉米秸秆、油菜秸秆等. 与其他地区相比,川西地区的秸秆资源量较少,再加上农村人均收入相对低,秸秆多被用作牲畜饲料、农家肥还田或家用燃料,田间焚烧相对较少,相应所监测到的耕地上的火点也较少.

将两种分配结果对比,可以看出基于火点分配相比基于耕地面积分配具有更为显著的点源特征,且高值网格的分布更为分散. 此外,部分耕地面积分配的高值区域在火点分配结果中并没有体现,主要因为秸秆田间焚烧受农户家庭兼业程度、种植面积、农户收入等多方面因素的影响,耕地面积大的

地区并不意味着更多的田间焚烧. 因此,单纯地将污染物分配到耕地面积大的地区可能与实际情况有一定差异. 而 MODIS 火点监测本身的局限,仅仅利用 MODIS 火点进行分配也无法覆盖所有的焚烧区域. 综合上述,在应用到空气质量模拟时,应结合两种方法的结果,为模型提供更为合理的基础数据.

### 3 清单可靠性分析

将本研究所开发的排放清单与其他学者的类似清单进行比较,如表 5 所示. 总体而言,本研究的结果与张楚莹等<sup>[16]</sup>的结果较为类似,CH<sub>4</sub> 以及 NMVOC 的排放量相对差异稍大. 与其他学者的估算结果相比,大部分污染物具有一定的可比性. CO、EC、OC 的估算值远低于 Cao 等<sup>[17]</sup>的结果. 可以推断,本研究所建立的秸秆露天焚烧排放清单在排放基数上基本合理,与其他学者的结果差异主要源于研究年份的不同,以及活动水平和排放系数的差异.

表 5 与其他学者结果对比  $\times 10^3/t$

Table 5 Comparison with other studies  $\times 10^3/t$

基准年	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	NMVOC	CO	PM <sub>2.5</sub>	EC	OC	文献
2006	1.9	11.1	2.6	11.6	26.9	225	67	1.5	14.8	[16]
2000	0.5	17.7	8.6	10.5		370.1		4.8	14.8	[17]
2007	1.6	12.0		24.1	31.3	488.8		4.8		[29]
2000	2.4	22.9	7.7	16.1	93.6	548.4	23.3	4.1	19.7	[1]
2004		7.2				516.9				[33]
2012	1.2	12.2	2.8	20.7	40.5	292.7	39.3	2.0	10.2	本研究

本研究建立的排放清单多采用国内学者的实测排放系数值,然而排放源测试受样本、测试条件等因素影响,不同学者的研究成果也有一定差异,进而影响清单结果. 此外,秸秆种类不同,排放特征也有所不同,而由于研究数据的缺少,部分作物秸秆的排放系数只能采用其他作物的平均值,亦导致本次估算的不确定性. 秸秆露天焚烧量的确定是清单建立过程中另一个重要的不确定性来源. 作物产量、谷草比的选取、露天焚烧比例的确定以及燃烧效率的选取均会带来不确定性. 不同类型作物秸秆产量不同、收获时期不同,其焚烧比例也应有所差别,然而当前大多研究均采用同一焚烧比例,给清单结果带来一定影响. 未来可通过问卷调查、统计分析等方法研究本地区秸秆焚烧情况,确定分区域,分秸秆类型的焚烧比例,提高结果的可靠性.

## 4 结论

(1)采用基于焚烧量的排放因子法建立了 2012 年四川省秸秆露天焚烧大气污染物排放清单,排放

的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>、CH<sub>4</sub>、NMVOC、CO、PM<sub>2.5</sub>、EC 以及 OC 分别为 1 210、12 185、2 827、20 659、40 463、292 671、39 277、1 984 以及 10 215 t.

(2)水稻、小麦、玉米、油菜是四大主要焚烧作物秸秆,四类秸秆对污染物的总贡献率约为 88%~94%.

(3)受农作收获的影响,秸秆焚烧具有显著的季节变化,呈现双峰变化,排放主要集中在 5~8 月.

(4)分别采用基于火点和基于土地利用两种方法进行清单的空间分配. 污染物的高值地区主要分布在成都平原、川北地区以及川南地区等地;广大的川西地区排放量分布较少.

(5)与其他学者的估算结果相比,本研究所建立的清单在排放基数上基本合理,清单不确定性主要来自排放因子以及秸秆焚烧量的确定.

### 参考文献:

- [1] Yan X Y, Ohara T, Akimoto H. Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(27): 5262-5273.

- [ 2 ] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning [ J ]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, **15**(4): 955-966.
- [ 3 ] Yang H H, Tsai C H, Chao M R, *et al.* Source identification and size distribution of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons during rice straw burning period [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(7): 1266-1274.
- [ 4 ] 刘丽华, 蒋静艳, 宗良纲. 秸秆燃烧比例时空变化与影响因素——以江苏省为例 [ J ]. *自然资源学报*, 2011, **26**(9): 1535-1545.
- [ 5 ] Huang X, Li M M, Li J F, *et al.* A high-resolution emission inventory of crop burning in fields in China based on MODIS Thermal Anomalies/Fire products [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 9-15.
- [ 6 ] Chen Y, Xie S D. Characteristics and formation mechanism of a heavy air pollution episode caused by biomass burning in Chengdu, Southwest China [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2014, **473-474**: 507-517.
- [ 7 ] 朱彬, 苏继峰, 韩志伟, 等. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析 [ J ]. *中国环境科学*, 2010, **30**(5): 585-592.
- [ 8 ] Wang X P, Chen Y J, Tian C G, *et al.* Impact of agricultural waste burning in the Shandong Peninsula on carbonaceous aerosols in the Bohai Rim, China [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2014, **481**: 311-316.
- [ 9 ] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2013 [ M ]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [ 10 ] 曹国良, 张小曳, 王丹, 等. 秸秆露天焚烧排放的 TSP 等污染物清单 [ J ]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(4): 800-804.
- [ 11 ] 张强, Klimont Z, Streets D G, 等. 中国人为源颗粒物排放模型及 2001 年排放清单估算 [ J ]. *自然科学进展*, 2006, **16**(2): 223-231.
- [ 12 ] 郑君瑜, 王水胜, 黄志炯, 等. 区域高分辨率大气排放源清单建立的技术方法与应用 [ M ]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [ 13 ] Hao W M, Liu M H. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning [ J ]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**(4): 495-503.
- [ 14 ] He M, Zheng J Y, Yin S S, *et al.* Trends, temporal and spatial characteristics, and uncertainties in biomass burning emissions in the Pearl River Delta, China [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(24): 4051-4059.
- [ 15 ] Dong Y K, Jung W K. Development of a speciated, hourly, and gridded air pollutants emission modeling system-A case study on the precursors of photochemical smog in the Seoul Metropolitan area, Korea [ J ]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(3): 340-347.
- [ 16 ] 张楚莹, 王书肖. 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.
- [ 17 ] Cao G L, 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.
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 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), doi: 10.1029/2003GB002040.
- [ 20 ] 四川省统计局, 国家统计局四川调查总队. 四川省统计年鉴 2013 [ M ]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [ 21 ] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况 [ J ]. *农业工程学报*, 2009, **25**(7): 173-179.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] National Greenhouse Gas Inventories Programme. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [ R ]. IGES, Japan; IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2006.
- [ 24 ] 广东省环境保护监测中心站, 香港特别行政区政府环境保护署. 珠江三角洲地区空气污染物排放清单编制手册 [ R ]. 广州: 广东省环境保护局, 2005.
- [ 25 ] 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室模拟 [ D ]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [ 26 ] Koopmans A, Koppejan J. Agricultural and forest residues, generation, utilization and availability, paper presented at the Regional Consultation on Modern Applications of Biomass energy [ R ]. Kuala Lumpur, Malaysia: Regional Consultation on Modern Application of Biomass Energy, 1997.
- [ 27 ] 何立明, 王文杰, 王桥, 等. 中国秸秆焚烧的遥感监测与分析 [ J ]. *中国环境监测*, 2007, **23**(1): 42-49.
- [ 28 ] 兰春剑. 长三角地区秸秆焚烧所引起的黑碳气溶胶排放及环境影响研究 [ D ]. 杭州: 浙江农林大学, 2012.
- [ 29 ] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单 [ J ]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 349-357.
- [ 30 ] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [ 31 ] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 [ J ]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1623-1632.
- [ 32 ] 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.
- [ 33 ] Zhang H F, Ye X N, 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.
- [ 34 ] 刘丽华, 蒋静艳, 宗良纲. 农业残留物燃烧温室气体排放清单研究: 以江苏省为例 [ J ]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1242-1248.

- [35] 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]. *Environment Science & Technology*, 2007, **41** (17): 6052-6058.
- [36] McCarty J L, Korontzi S, Justice C O, *et al.* The spatial and temporal distribution of crop residue burning in the contiguous United States [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407** (21): 5701-5712.
- [37] 胡梅, 齐述华, 舒晓波, 等. 华北平原秸秆焚烧火点的 MODIS 影像识别监测 [J]. *地球信息科学*, 2008, **10** (6): 802-807.
- [38] 廖薇. 气候变化与农户农业生产行为演变——以四川省什邡市农户秸秆利用行为为例 [J]. *农业技术经济*, 2010, (4): 49-56.
- [39] 芮雯奕, 周博, 张卫健. 江苏省农户秸秆还田的影响因素分析 [J]. *生态环境学报*, 2009, **18** (5): 1971-1975.

## 欢迎订阅 2015 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2015 年为 16 开本,120 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

## CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America .....	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Beijing in January 2013 .....	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai .....	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM <sub>10</sub> -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen .....	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes .....	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014 .....	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>2.5-10</sub> in Mountain Background Region of East China in Spring .....	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves .....	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province .....	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen .....	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes .....	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards .....	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen .....	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport .....	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary .....	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season .....	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event .....	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources .....	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period .....	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary .....	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake .....	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond .....	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer .....	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study .....	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using $\gamma$ Irradiation .....	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony .....	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation .....	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol .....	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO <sub>3</sub> on the $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Films Under 308 nm UV Light .....	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode .....	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis .....	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i> .....	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water .....	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process .....	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System .....	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD <sub>5</sub> /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor .....	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing .....	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province .....	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain .....	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil .....	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions .....	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County .....	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure .....	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead .....	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling .....	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content .....	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area .....	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase .....	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs .....	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

# 《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行