

河南省夏季秸秆焚烧污染物排放量的估算与分析

郑有飞¹, 田宏伟^{1,2,3}, 陈怀亮^{2,3}, 刘忠阳^{2,3}, 邓 伟^{2,3}

(1.南京信息工程大学, 南京 210044; 2.河南省气象科学研究所, 郑州 450003; 3.中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003)

摘 要:基于 2007 年夏季秸秆焚烧卫星遥感监测资料, 结合粮食产量、谷草比、排放因子等, 估算了河南省秸秆焚烧各污染物的排放量。结果表明, 2007 年夏季河南省秸秆焚烧共排放: PM_{2.5} 30 433.9 t、SO₂ 1 586.2 t、NO_x 12.2 t、NH₃ 76.1 t、CH₄ 39.6 t、VOC 82.2 t、CO 477.8 t、CO₂ 2 799.9 t。秸秆焚烧污染物排放量空间分布受小麦种植面积影响较大, 中东部多于西部, 其中周口、驻马店和南阳排放量最多; 夏季秸秆焚烧较为集中, PM_{2.5} 的排放多集中在 5 月下旬和 6 月上旬, 且与郑州市 PM_{2.5} 日均浓度有较好的相关性。

关键词:夏收; 秸秆露天焚烧; 排放清单; 环境影响

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2010)08-1590-05

Estimation of Pollutants Emission from Straw Burning in Summer in Henan Province

ZHENG You-fei¹, TIAN Hong-wei^{1,2,3}, CHEN Huai-liang^{2,3}, LIU Zhong-yang^{2,3}, DENG Wei^{2,3}

(1.Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou 450003, China; 3.Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Techniques, CMA, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Emission of various pollutants from straw burning in the summer of 2007 was estimated according to remote sensing data combined with data of winter wheat yields, grain-straw ratio and emission factors, etc. The data showed that emissions of PM_{2.5} and SO₂ were estimated at 30 433.9 t and 1 586.2 t, respectively. Meanwhile, other pollutants included NO_x 12.2 t, NH₃ 76.1 t, CH₄ 39.6 t, VOC 82.2 t, CO 477.8 t, and CO₂ 2 799.9 t. Pollutant emission was higher in the central and eastern regions of Henan than that in the western, especially in Zhoukou, Zhumadian and Nanyang. This result indicated a strong correlation between pollutant emission and distribution of winter wheat planting area. As straw burning usually occurs in summer, PM_{2.5} emission was mainly emitted in late May and early June, which has a good correlation with average daily PM_{2.5} concentration in Zhengzhou.

Keywords: summer harvest; straw burning; emission inventory; environmental impact

近年来,随着我国农村生活能源结构的变化与集约化生产的发展,秸秆逐步失去传统的农业原料的作用,于是很多地区出现了秸秆露天焚烧的现象,并日趋严重。据估算,2003 年我国共产生秸秆 5.9×10^8 t,其中露天焚烧 1.3×10^8 t^[1]。秸秆焚烧不但造成严重的资源浪费,而且排放大量污染物,造成严重的环境问题。同时,秸秆焚烧容易引发火灾,造成重大财产损失,产生的烟尘能明显降低能见度,影响高速公路和民航的正常运营^[2]。经实验测定秸秆焚烧可排放出 CO、CO₂、NO₂、SO₂、NH₃、非甲烷烃和粉尘等污染物^[3]。据估算,

2006 年我国秸秆焚烧排放大气污染物 PM_{2.5} 217 万 t, BC 4.9 万 t, OC 48 万 t, SO₂ 6.0 万 t, NO_x 36 万 t, NMVOC 87 万 t, CO 731 万 t, CO₂ 15450 万 t, CH₄ 37.4 万 t, NH₃ 8.4 万 t^[4]。

目前秸秆焚烧的卫星监测技术已经相当成熟^[5-6],且各地监测工作已开展多年。厉青、张丽娟等^[7]基于卫星遥感监测结果,通过相关分析表明 700、800 km 范围内火点能够明显影响空气污染指数。伍德侠等^[8]通过采样监测,发现合肥市秸秆焚烧期间焚烧活动是黑炭气溶胶的主要来源;李金香等^[9]发现,在一定气象条件下,秸秆焚烧污染物可以持续很长时间。郑州由于特殊的地形条件,受华北地区秸秆焚烧影响严重^[10]。目前,对于秸秆焚烧污染物排放量的研究,一方面是基于室内实验得出某种作物秸秆的排放因子,另一方面是通过调查或按一定比例折算得出焚烧量,再由现

收稿日期: 2010-02-22

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906022)

作者简介: 郑有飞(1959—),男,江苏无锡人,博士,教授,博士生导师,主要从事应用气象和大气环境变化研究。

E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

通讯作者: 田宏伟 E-mail: thwenigma@yahoo.com.cn

有的排放因子估算排放量^[1]。而基于遥感监测资料进行估算的研究还较少,本文基于秸秆焚烧遥感监测结果,结合现有排放因子,估算河南省夏季小麦收获季节秸秆焚烧污染物排放量,以便更加全面和客观地评价秸秆焚烧活动。

1 资料与方法

秸秆焚烧的监测基于极轨气象卫星 (MODIS 系列、风云系列) 红外通道数据,根据维恩定律,温度越高,辐射能量峰值波长越向短波方向移动。常温地球辐射能量最大峰值在 11 μm , 秸秆焚烧温度一般在 600~800 K,其辐射峰值波长在 3.5 μm 左右,极轨卫星相应波段通道能有效判别地面焚烧火点。另外,根据火点经纬度坐标,再结合土地利用资料将火点区分为森林火点、秸秆焚烧火点及城市热点等类型,从而将秸秆焚烧火点区分出来^[6,12]。

秸秆焚烧监测结果来源于河南省气象科学研究所和 12369 中国环保热线网站 http://www.12369.gov.cn/jgrsinfo/jgrsinfo_2007.asp。基于卫星遥感秸秆焚烧监测资料,结合精确到河南省各县 2007 年平均小麦产量,利用小麦谷草比计算单位面积秸秆产量,再结合秸秆焚烧污染物排放因子估算每一个火点污染物排放量,计算公式为:

$$Q_i = S_i \times Y_i \times R \times EF_i$$

式中: Q_i 为某火点 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量; S_i 为该火点面积,由焚烧区域的像元数、卫星分辨率和卫星到火点的倾角决定; Y_i 为火点所在地单位面积粮食产量; R 为谷草比,以 1.366 计^[1]; EF_i 为某污染物排放因子。

秸秆焚烧过程中污染物的排放因子受秸秆湿度、空气湿度、风速等多方面因素的影响。目前对于排放因子的研究主要还是通过实验室燃烧实验测定其排放因子,国内外学者测定的小麦秸秆焚烧气态污染物排放因子见表 1。

河南省小麦秸秆样本在明火和焖火燃烧状态下 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放因子分别为 $(39.0 \pm 4.8) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(104.6 \pm 5.4) \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[22]。考虑到实际燃烧过程,将明火和焖火秸

秆焚烧的质量比例设为 80:20,按照这个比例对排放因子进行加权平均后排放因子调整为 $52.12 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。气态污染物的排放因子取自被引用较多的 Streets D G 等的研究结果^[14]: SO_2 为 $0.4 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 NO_x 为 $2.5 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 NH_3 为 $1.3 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 CH_4 为 $2.7 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 VOC 为 $15.7 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 CO 为 $92 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 CO_2 为 $1\,515 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 污染物排放总量清单

根据 2007 年夏季秸秆焚烧卫星遥感监测到的火点信息,结合各县粮食产量资料和各因子的排放系数,估算出 2007 年夏季秸秆焚烧各污染物排放清单见表 2。

由表 2 可见,2007 年夏季,河南省小麦秸秆露天焚烧共排放: $\text{PM}_{2.5}$ 30 433.92 t、 SO_2 1 586.22 t、 NO_x 12.17 t、 NH_3 76.08 t、 CH_4 39.56 t、 VOC 82.17 t、 CO 477.81 t、 CO_2 2 799.92 t。受小麦种植面积和产量等因素的影响,河南省各地秸秆焚烧量差距较大。其中以周口市排放量最大, $\text{PM}_{2.5}$ 为 4 695.11 t,占全省排放量的 15%;其次为驻马店、南阳和漯河, $\text{PM}_{2.5}$ 排放量分别为 4 611.03、4 045.21 t 和 3 825.9 t。周口、驻马店、南阳和漯河 4 市排放量占全省的 56%。除这 4 市以外,平顶山和商丘排放量也较大,6 市占全省排放量的 75%。由于河南省耕地主要种植冬小麦且夏季是冬小麦收获季节,各地小麦秸秆焚烧污染物排放量受小麦种植面积影响最大,2007 年河南省小麦种植面积前 3 位为南阳、驻马店和周口,而这 3 市也是排放量的前 3 位,小麦种植面积第 4 的商丘市排放量位于全省第 6 位。

2.2 排放量时空分布分析

河南省 2007 年夏季秸秆焚烧 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量空间分布见图 1。由图可见,河南省秸秆焚烧 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量有几个明显的高值区。首先周口驻马店交界地区、漯河、许昌一带有一个全省最大的西北东南向的高值带,且向周口东部延伸到与安徽交界地区,中部向平顶山东南部延伸,这与周口、驻马店、漯河、许昌等市

表 1 小麦秸秆焚烧气态污染物排放因子汇总表($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Gaseous pollutants emission factors of wheat straw burning($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

污染物	SO_2	NO_x	NH_3	CH_4	VOC	CO	CO_2
排放因子		2.33 ^[13] , 2.5 ^[14]		1.82 ^[13]		66.69 ^[13] , 92 ^[14]	1 194.68 ^[13] , 1 515 ^[14]
	0.47 ^[13]					56.4 ^[15] , 141.2 ^[16]	1 557.9 ^[16] , 1 787 ^[18]
	0.4 ^[14]	1.12 ^[16] , 1.7 ^[18]	1.3 ^[14]	2.7 ^[14]	15.7 ^[14]	52.9 ^[17] , 99.9 ^[19] ,	1 225 ^[19] , 1 540 ^[20] ,
		0.89 ^[19] , 3.3 ^[21]		1.68 ^[15]		53 ^[21]	1 470 ^[21]

表 2 2007 年夏季河南省各市小麦秸秆焚烧污染物排放清单(t)

Table 2 City inventory of pollutants from wheat straw burning of Henan Province in summer 2007(t)								
城市	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	NH ₃	CH ₄	VOC	CO	CO ₂
鹤壁	29.50	1.54	0.01	0.07	0.04	0.08	0.46	2.71
济源	33.24	1.73	0.01	0.08	0.04	0.09	0.52	3.06
三门峡	172.17	8.97	0.07	0.43	0.22	0.46	2.70	15.84
郑州	190.68	9.94	0.08	0.48	0.25	0.51	2.99	17.54
濮阳	389.17	20.28	0.16	0.97	0.51	1.05	6.11	35.80
安阳	456.19	23.78	0.18	1.14	0.59	1.23	7.16	41.97
开封	475.57	24.79	0.19	1.19	0.62	1.28	7.47	43.75
焦作	571.05	29.76	0.23	1.43	0.74	1.54	8.97	52.54
新乡	905.08	47.17	0.36	2.26	1.18	2.44	14.21	83.27
信阳	1 056.18	55.05	0.42	2.64	1.37	2.85	16.58	97.17
洛阳	1 654.18	86.22	0.66	4.14	2.15	4.47	25.97	152.18
许昌	1 717.17	89.50	0.69	4.29	2.23	4.64	26.96	157.98
商丘	2 474.24	128.96	0.99	6.19	3.22	6.68	38.85	227.63
平顶山	3 123.24	162.78	1.25	7.81	4.06	8.43	49.03	287.34
漯河	3 825.90	199.41	1.53	9.56	4.97	10.33	60.07	351.98
南阳	4 054.21	211.31	1.62	10.14	5.27	10.95	63.65	372.99
驻马店	4 611.03	240.33	1.84	11.53	5.99	12.45	72.39	424.22
周口	4 695.11	244.71	1.88	11.74	6.10	12.68	73.71	431.95
总计	30 433.92	1 586.22	12.17	76.08	39.56	82.17	477.81	2 799.92

PM_{2.5} 排放量较多的结果相符。南阳市虽然排放量也较大,但排放地点比较松散,没有形成大的片状区域。商丘地区秸秆焚烧污染物排放主要集中在东部和西部,中部较少。焦作一带也有一片区域排放量较大,且延伸到新乡西部。安阳中部也有一片区域排放量较大,且涵盖了鹤壁北部。此外,三门峡西部也有较大的一块区域排放量较大,洛阳有零星的高值区域。整体上,河南省秸秆焚烧 PM_{2.5} 排放量以中东部平原较多,西部由于山地较多,耕地较少,排放量也较少。

2007 年夏季河南省秸秆焚烧 PM_{2.5} 排放时间分布和郑州市 PM_{2.5} 日均浓度变化见图 2。河南省夏季秸秆焚烧主要集中在 5 月下旬和 6 月上旬,焚烧期间有两个大峰值,分别在 5 月 28 日和 6 月 6 日,这两天 PM_{2.5} 排放量分别达到 246.8 t 和 290.2 t。2007 年夏季,从 5 月 19 日就开始出现零星秸秆焚烧活动,到 25 日以后即开始出现大范围焚烧,月末由于出现阴雨天气,卫星监测受影响很大,监测到的焚烧活动有所减少,31 日全省出现较大范围降水,未监测到焚烧活动发生。6 月 6 日以前 PM_{2.5} 排放量呈逐日上升趋势,到 6 日达到最大值,而后迅速下降,8 日到 12 日有所波动。8 日为监测期间排放量较小,只有 1.6 t,这主要是由于当日只在中午有一次卫星过境,且全省多数地区多云,监测到的火点较少。秸秆焚烧 PM_{2.5} 排放

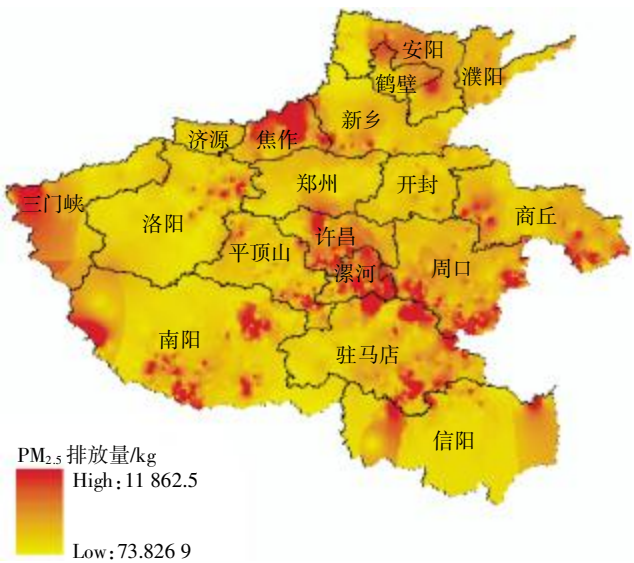


图 1 河南省 2007 年夏季秸秆焚烧 PM_{2.5} 排放量空间分布图
Figure 1 Spatial distribution of PM_{2.5} emission from straw burning of Henan Province in 2007 summer

量的时间分布主要受小麦收获季节和天气的影响,河南省小麦收割主要集中在 5 月末和 6 月初,6 月中旬便开始进行大豆及玉米作物的抢种。随着收割的进行,焚烧活动开始增多,6 月上旬即可收割完毕,焚烧活动达到最大值。6 月上旬最后几日受到天气、卫星次数等因素的影响,排放量随监测点数而波动,11 日

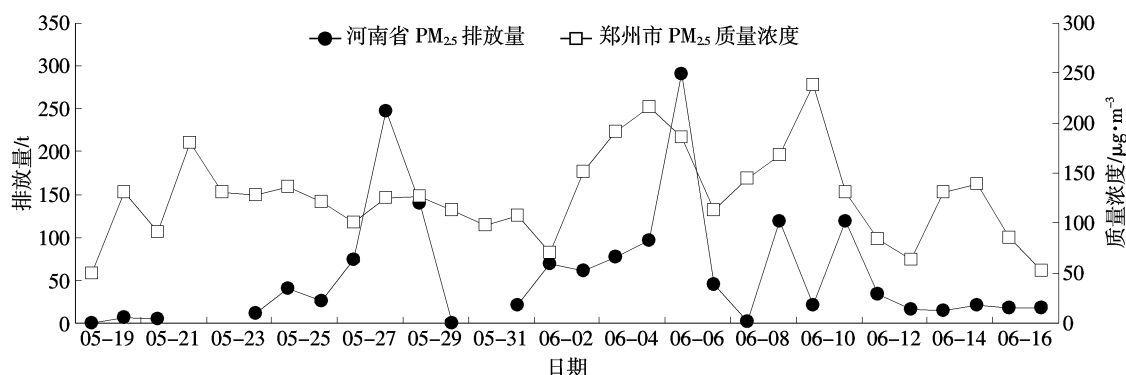
图2 2007年夏季河南省秸秆焚烧PM_{2.5}排放时间分布和郑州市PM_{2.5}日均浓度

Figure 2 Temporal distribution of PM_{2.5} emission from straw burning of Henan Province and daily average concentration of PM_{2.5} in Zhengzhou

以后,秸秆焚烧现象只有零星出现。

由图2可以看出,河南省夏季焚烧秸秆PM_{2.5}排放量与郑州市PM_{2.5}日均浓度有较好的相关性,秸秆焚烧期间郑州市PM_{2.5}日均浓度要高于非焚烧期间。6月2日至6日,秸秆焚烧PM_{2.5}排放量和郑州市PM_{2.5}日均浓度均呈上升趋势,两者分别在6日和5日达到一个峰值。8日至10日,河南省大部分为多云天气,受云层覆盖影响,监测到的秸秆焚烧活动较少,两者相关性较差。11日以后,秸秆焚烧活动大量减少,PM_{2.5}排放量也逐渐减少,郑州市PM_{2.5}日均浓度也逐渐下降。郑州市PM_{2.5}日均浓度在6月10日达到最高值,当日郑州市风速中等,但主要是东南风,多云天气,对流扩散差,有利于污染物从河南省东南部向郑州输送,虽然监测到的火点较少,但仍然是污染最严重的一日。

3 讨论

3.1 估算方法的局限性

2007年,河南省小麦种植面积为510万hm²,共产小麦3031万t,以谷草比1.366计算,共产生秸秆4140万t。2007年,卫星遥感共监测到秸秆焚烧面积0.38万hm²,估计共焚烧秸秆3.03万t,无论焚烧面积还是焚烧量,焚烧的比例远小于很多学者使用的数值。由于卫星遥感只能监测到正在焚烧的火点,而且卫星过境时间间隔较长,卫星遥感只能监测到很少一部分秸秆焚烧活动,导致基于卫星遥感监测的秸秆焚烧污染物排放量偏小。但遥感监测可以提供秸秆焚烧火点位置、时间、温度等要素,可以用来研究污染物排放的时空分布和传输扩散等。此外,本文提出了基于遥感监测的秸秆焚烧污染物排放量的一种方法,如果有一种算法可以识别焚烧后的区域,就可以精确计算出焚烧面积,进而更加准确地估算排放量。

3.2 减少秸秆焚烧的建议

秸秆焚烧活动会引起诸多环境问题和社会问题,并且会破坏农田生态系统,必须加大力度尽早杜绝此类活动。但光靠立法制止等“堵”的措施是远远不够的,更要注重于疏导。财政部门、农业部门和环保部门尽快开发秸秆综合利用技术,建立合理的秸秆回收利用机制,让废弃的秸秆产生客观的经济效益,才是解决秸秆焚烧问题的根本之道,可采用如下秸秆的回收利用途径。

- (1)作为能源:包括制沼气、秸秆气化、秸秆发电、生物炼油和秸秆蜂窝煤等。
- (2)作为肥料:包括直接秸秆粉碎还田、堆肥发酵后还田和秸秆无氧高温热解还田^[23]等。
- (3)作为饲料:秸秆加工成饲料,为畜牧业提供饲料。
- (4)作为培养基:发展菌类养殖。
- (5)其他用途:如提取化学制品和制造建材、轻工和纺织材料等。

4 结论

- (1)2007年夏季,河南省秸秆焚烧共排放:PM_{2.5} 30433.92 t、SO₂ 1586.22 t、NO_x 12.17 t、NH₃ 76.08 t、CH₄ 39.56 t、VOC 82.17 t、CO 477.81 t、CO₂ 2799.92 t。
- (2)河南省夏收季节秸秆焚烧污染物排放量受小麦种植面积影响较大,周口、驻马店和南阳排放量分列前3位,全省以中东部较多,西部北部较少。受夏收季节和天气的影响,河南省夏收季节秸秆焚烧PM_{2.5}排放主要集中在5月下旬和6月上旬。
- (3)河南省秸秆焚烧PM_{2.5}排放量与郑州市PM_{2.5}日均浓度有较好的相关性,但在多云的日子里,遥感监测到的火点较少,相关性较差。
- (4)秸秆焚烧的监测受天气影响较大,在云量较

多的时候,其准确度有待提高,其次,秸秆焚烧活动持续时间较短,往往只能监测到一部分,因此,基于卫星遥感监测的秸秆焚烧污染物排放量会偏小,如果有一种算法能区别焚烧后的土地和焚烧前的土地,便可更全面地监测焚烧的量,也可以提高污染物排放量的估算准确性。

参考文献:

- [1] 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.
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, ZHENG Fang-cheng, et al. Estimating the crop residues burnt in open field in China[J]. *Resources Science*, 2006, 28(1): 9-13.
- [2] 毕于运, 王亚静, 高春雨. 我国秸秆焚烧的现状危害与禁烧管理对策[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(27): 13181-13184.
BI Yu-yun, WANG Ya-jing, GAO Chun-yu. Problems of burning straw and its management countermeasures in China[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2009, 37(27): 13181-13184.
- [3] Delmas R, Lacaux J P, Brocard D. Determination of biomass burning emission factors: Methods and results[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1995, 38: 181-204.
- [4] 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 Shu-xiao, ZHANG Chu-ying. Spatial and temporal distribution of air pollutants emission from open burning of crop residues in China[J]. *Sciencepaper Online*, 2008, 3(5): 329-333.
- [5] 王子峰, 陈良富, 顾行发. 基于 MODIS 数据的华北地区秸秆焚烧监测[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(6): 611-617.
WANG Zi-feng, CHEN Liang-fu, GU Xing-fa. Monitoring of crop residue burning in north China on the basis of MODIS data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(6): 611-617.
- [6] 邹春辉, 赵学斌, 刘忠阳, 等. 卫星遥感技术在秸秆焚烧监测业务中的应用[J]. 河南气象, 2005, 3: 24-26.
ZOU Chun-hui, ZHAO Xue-bin, LIU Zhong-yang, et al. Application of remote sensing monitoring of crop straw burning by the meteorological satellite[J]. *Henan Meteorology*, 2005, 3: 24-26.
- [7] 历青, 张丽娟, 吴传庆, 等. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(1): 32-37.
LI Qing, ZHANG Li-juan, WU Chuan-qing, et al. Satellite remote sensing based monitoring of straw burning and analysis of its impact on air quality[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(1): 32-37.
- [8] 伍德侠, 魏庆农, 魏健俐, 等. 秸秆焚烧期的黑炭气溶胶观测及研究[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3304-3309.
WU De-xia, WEI Qing-nong, WEI Jian-li, et al. Observational study of black carbon aerosol during straw burning period[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3304-3309.
- [9] 李金香, 赵越, 李令军, 等. 秸秆焚烧导致的北京市大气污染时空分布和化学组成特征分析[J]. 环境科学学报, 2008, 28(9): 1904-1909.
LI Jin-xiang, ZHAO Yue, LI Ling-jun, et al. Characterization of ambient air pollution in Beijing caused by agricultural burning[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(9): 1904-1909.
- [10] 张红, 邱明燕, 黄勇. 一次由秸秆焚烧引起的霾天气分析[J]. 气象, 2008, 34(11): 96-100.
ZHANG Hong, QIU Ming-yan, HUANG Yong. Analysis on the case of smoke haze[J]. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(11): 96-100.
- [11] 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.
CAO Guo-liang, ZHANG Xiao-ye, WANG Dan, et al. Inventory of emission of pollutants from open burning crop residue[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4): 800-804.
- [12] 赵文化, 单海滨, 钟儒祥. MODIS 遥感数据格式及使用方法综合分析[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(1): 44-48.
ZHAO Wen-hua, SHAN Hai-bin, ZHONG Ru-xiang. An overview of MODIS data format and application algorithm[J]. *Meteorological and Environmental Science*, 2007, 30(1): 44-48.
- [13] Jenkins B M, Turn S Q, Williams R B, et al. Atmospheric pollutants emission factors from open burning of agricultural and forest biomass by wind tunnel simulations[R]. Volume 1. California State Air Resources Board, (NTIS PB97-133037), 1996.
- [14] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D21): 8809, 1-23.
- [15] U. S. EPA. Emissions Factors & AP 42[PEB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>.
- [16] 张鹤丰. 中国农作物秸秆焚烧排放气态、颗粒物态污染物排放特征的实验室模拟[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
ZHANG He-feng. A laboratory study on emission characteristics of gaseous and particulate pollutants emitted from agricultural crop residue burning in China[D]. Shanghai: Fudan University, 2009.
- [17] Dhammapala R, Claiborn C, Corkill J, et al. Particulate emission from wheat and Kentucky blue grass stubble burning in eastern Washington and northern Idaho[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 1007-1015.
- [18] Sahai S, Sharma C, Singh D P, et al. A study for development of emission factors for trace gases and carbonaceous particulate species from in situ burning of wheat straw in agricultural fields in India[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 9173-9186.
- [19] Zhang J, Smith K R, Ma Y, et al. Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: A database for emission factors[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 4537-4549.
- [20] ASI (Air Science Inc.), 2003. Final Report: Cereal grain crop open field burning emission study, Project 152-02. Available at http://www.ecy.wa.gov/programs/air/pdfs/FinalWheat_081303.pdf.
- [21] Li X H, Wang S X, Duan L, et al. Particulate and trace gas emissions from open burning of wheat straw and corn stoves in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41: 6052-6058.
- [22] 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 Bin, ZHU Xian-lei, ZHANG Yuan-xun, et al. Emission factor of PM_{2.5} from crop burning[J]. *Research of Environmental Science*, 2005, 18(2): 29-33.
- [23] 张阿凤, 潘根兴, 李恋卿. 生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2459-2463.
ZHANG A-feng, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2459-2463.