中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算

曹国良[①②] 张小曳[②] 王亚强[②] 郑方成[①]

(① 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; ② 中国气象局大气成分观测与服务中心, 北京 100081.
E-mail: caogl@cams.cma.gov.cn)

摘要 计算了中国区域农田秸秆露天焚烧排放的各种污染物的量. 由于秸秆被大量露天焚烧, 已在中国一些地区引起了严重的环境问题. 根据有关政府部门对 2000～2003 年全国粮食作物和经济作物产量的县级统计资料, 结合谷草比, 估算的秸秆年产生量约 6 亿吨/年, 其中水稻、小麦、玉米秸秆共占 76%左右. 依据农村生活水平等基础资料, 得到了秸秆被露天焚烧比例的县级数据, 估算出了被焚烧的总量, 约 1.4 亿吨/年. 结合采用了公开发表文献和试验得到的排放因子, 估算了秸秆露天焚烧PM, SO_2, NO_x, NH_3, CH_4, BC, OC, VOC, CO, CO_2 的排放总量和地区排放量. 其中的一些污染物排放量, 如BC, VOC, OC, CO, CO_2, 对全国总排放量的贡献已经非常明显. 以 2003 年PM的排放为例, 用 0.2°×0.2°的网格图显示了排放的地区分布. 结果表明, 排放在地区间的分布极不均衡, 单位面积排放量较高的地区主要来自东部地区、东北地区, 从东北至华东呈带状分布. 最后, 给出了估算排放量的误差分析.

关键词 中国 秸秆 露天焚烧 排放清单

中国是农业大国之一, 20 纪 70 年代以前, 农业秸秆主要用作生活燃料和大牲畜的饲料, 由于作物单产水平较低, 秸秆产量也极为有限, 秸杆总量供应紧缺. 20 世纪 80 年代以来, 随着农作物单产提高, 农业秸秆总量迅速增加, 而直接作为生活燃料和饲料的比例大幅度减少, 广大农民为赶农时, 抢播种, 图省事, 多数地区就开始出现秸秆露天焚烧现象, 并越来越严重. 大面积焚烧农业秸杆不仅造成了严重的环境污染问题 [1~3], 影响能见度 [4], 而且浪费了宝贵的生物资源, 已成为引起公众密切关注的社会-环境问题 [1,5]. 中国政府部门出台有关规定明令禁止这种行为, 并在农作物收获季节通过卫星来监控秸秆的露天焚烧现象, 但似乎成效不大 [6].

有关文献中关于中国区域气溶胶和气态污染物的排放清单中, 已经表明了生物质燃烧排放的重要性 [7~9]. 以前的一些排放清单中 [7,9~12]也已经涉及到秸秆的露天焚烧问题, 但使用的基础数据已极为陈旧. 由于缺乏对中国实际情况, 尤其是农村的深入了解, 这些排放清单的不确定性很高; 用于进行排放空间分配的人口分布数据, 都还是 1980~1990 的, 急需进行更新; 所使用的排放因子, 基本是国外的, 并附加了很多假设条件, 而有关中国地区的试验数据则极少.

为满足精细中国区域数值气候模拟所需的气溶胶和气态污染物排放清单的准确性, 本文将根据政府部门 2000~2003 年农业统计资料, 结合相应的排放因子, 来估算各年份中国区域秸秆露天焚烧排放的污染物总量.

1 方法

本文所计算的排放量, 包括全国的 31 个省市(不含港、澳、台). 每个省份一般分为若干个县(13~170), 而县级资料是本文所有统计数据的最细水平. 排放清单是通过秸秆被露天焚烧的量, 结合相应的排放因子估算出来的. 估算的排放量包括 10 种气溶胶和气体污染物: PM (颗粒物), SO_2, NO_x, NH_3, CH_4, BC(黑碳), OC(有机碳), VOC (挥发性有机物), CO 和 CO_2.

估算秸秆露天焚烧排放量的基本方法见图 1. 通过每个地区(县级)秸秆的产出量 [13,14]、谷草比 [15]和秸秆被露天焚烧的比例、各种污染物的排放因子, 来估算秸秆露天焚烧的排放量. 为适应排放空间分布(网格)对数值模拟的数据输入和分析的要求, 我们利用地理信息系统(GIS)来进行排放的空间分配, 以满足“中国大气气溶胶及其气候效应的研究”项目的要求.

2 数据源

农业秸杆露天焚烧主要发生在在如下 3 种地区:

2007-04-02 收稿, 2007-05-24 接受
国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB403700)资助项目

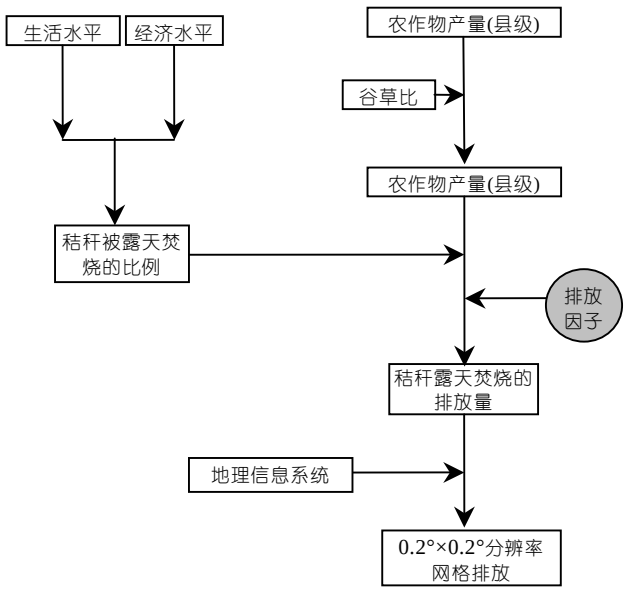


图 1 具有空间分布的农田秸秆露天焚烧排放量的估算方法

(ⅰ) 地广人稀的产粮区: 如吉林、黑龙江省, 大量的秸秆被剩余而焚烧; (ⅱ) 富裕地区: 随着农民生活水平的提高, 直接燃烧秸秆的方式逐渐被商品能源取代, 成为农民提高生活质量的首选目标. 江苏、浙江等省农民生活用能的商品化率已超过 90%, 有 50%左右的农业秸秆被焚烧; (ⅲ) 能源产区: 在一些能源产地如山西、陕西等, 由于农民很容易获得廉价的商品能源, 因而也有大量的秸秆剩余. 关于被露天焚烧掉的农业秸秆的总量, 我国基本没有这方面的统计资料.

从国家统计局 [14]、农业部 [13]得到的有关农作物(水稻、小麦、玉米)及经济作物(棉花、豆类、薯类、油料等)的播种面积、产量 [13](县级数据), 结合谷草比 [15], 可估算各地区的秸秆产出量.

农田秸秆露天焚烧具有很强的季节性, 其燃烧量由各地区所处气候带、农村生活水平、植被覆盖现状和各种农作物的产量等因素决定. 遗憾的是, 目前我国尚没有这方面的综合统计资料, 相关的研究也较少. 有限的统计资料中, 各地秸秆被露天焚烧的比例, 从15.2%～60%的都有 [2,16~20], 相差极大. 尽管Yevich等人 [21]曾得到 1985 年中国只有 1%的秸秆被露天焚烧的比例, 但这个数值显然已经过时了.

综合了所能查到的资料, 我们推断, 各地秸秆被露天焚烧的比例, 应主要由农民的收入水平、农民的秸秆利用成本所决定; 我们计算的农民收入水平与秸秆被露天焚烧比例的相关系数达到了 0.81, 而这个推论已被陈新锋 [22]在河南省的抽样调查所证实. 源于政府部门 [13,14]的 2000～2003 年农村居民年平均收入的资料, 结合各地区秸秆的谷草比 [15]、秸秆产生量, 来估算各地区秸秆被露天焚烧的量.

3 排放因子

一般而言, 秸秆露天焚烧排放污染物的量和秸秆的有机质含量、含水率、燃烧温度和环境风速、温度等自然环境状况有关 [23,24]. 目前关于秸秆露天焚烧各种污染物排放因子的测试很少 [23,25], 尤其是在中国. 而已得到的排放因子则是相差较大, 使得估算的排放量的差别也很大. 有关中国地区的实验工作急需展开.

我们在实验室设计了一个燃烧塔, 模拟秸秆露天焚烧的状况. 燃烧塔呈倒置的漏斗形状, 在有关实验的文章中有详细描述 [1)]. 实验所用的秸秆是从全国各个有代表性的区域收集来, 包括麦秸秆、稻秸秆、玉米杆、棉花杆, 代表了收集地区农村最普通的秸秆类型. 实验共进行 33 次: 稻秸秆 14 次, 麦秸秆 8 次, 玉米杆 9 次, 棉花杆 2 次. 实验中测量了 PM, SO_2, NO_x, BC, OC, CO, CO_2 的排放因子. 除 SO_2 外, 测算出的排放因子和文献 [1)]中报道的值非常接近, 所以在本文中, 将使用这些实验测算出的排放因子.

表 1 汇总了秸秆露天焚烧的排放因子. 在汇总时将秸秆分成 5 个种类分别进行, 但没有找到有关NH_3和VOC排放因子的更多信息. 除了SO_2 外, 我们将使用相应类别排放因子的平均值. 由于大量含硫很低或不含硫的高浓度化肥如磷铵、尿素等的施用, 使我国土壤中的硫供需平衡出现失衡, 硫分处于亏损状态 [26], 从而使得秸秆中的硫分含量也相对较低, 因此, 我们将只使用实验得到的排放因子.

4 结果及讨论

2000~2003 年全国秸秆的产出量估算结果见表 2. 可见, 近些年我国的农业秸秆总产出量变化不大, 在 6 亿吨左右, 和相关文献中的值非常接近(6.05 [5], 6.04[16], 5.65[30]及 6.55 亿吨 [17]). 稻谷、小麦、玉米 3 种粮食作物由于播种面积占总播种面积的 50%, 所

1) Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C, et al. Experimental investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residues burning. J Environ Sci, 2007, in press

表 1 农田秸秆露天焚烧的排放因子汇总

秸秆类型	排放因子/g·kg^{-1}									
	PM	SO_2	NO_x	NH_3	CH_4	BC	OC	VOC	CO	CO_2
水稻秸秆	6.04[a)], 5.3[12], 3.49[23], 2.28[29]	0.147[a)], 0.62[23], 0.53[29]	3.52[a], 2.84[23], 2.66[29]		0.72[23]	0.52[a)], 0.86[12], 0.5[29]	1.96[a)], 0.94[29]		72.4[a)], 31.39[23], 25.2[29]	1757.6[a)], 1162.15[23], 1019.9[29]
麦秸秆	9.64[a)], 12[12], 5.82[23]	0.049[a)], 0.47[23]	2.59[a)], 2.33[23]		1.82[23]	0.52[a)], 1.2[12], 0.8[29]	3.83[a)], 2.2[29]		65.5[a)], 66.69[23]	1483.6[a)], 1194.88[23]
玉米秸秆	5.26[a)], 12[12], 6.31[23]	0.026[a)], 0.2[23]	3.36[a)], 1.82[23]		1.75[23]	0.78[a)], 0.96[12], 0.75[29]	2.21[a)], 1.8[29]		70.2[a)], 38.78[23]	2200.2[a)], 1313.61[23]
棉花秸秆	4.53[a)]	0.002[a)]	2.68[a)]		2.7[b)]	0.82[a)]	1.83[a)]		111.8[a)]	1453.4[a)]
未区分	13[27], 11[24]	0.08[b)]	2.5[27], 2.7[29]	1.3[27]	2.7[27], 2.7[24], 2.27[29]	0.69[27], 0.47[28]	3.3[27], 2.67[28]	15.7[7], 8.5[11]	92[27], 58[24], 47.6[29]	1515[27], 1246.7[29]

a) 试验数据; b) 没有相关信息, 为估计值

表 2 我国主要农作物秸秆产量

作物类型	作物产量/10^4 t				秸秆产量/10^4 t			
	2000	2001	2002	2003	2000	2001	2002	2003
稻谷	18791	17758	17454	16065	11707	11063	10874	10008
小麦	9964	9388	9029	8649	13611	12823	12334	11814
玉米	10600	11409	12131	11583	21200	22818	24262	23166
其他杂粮	1177	1093	1185	1132	1177	1093	1185	1132
豆类	2010	2053	2241	2128	3015	3079	3362	3191
薯类	3685	3563	3666	3513	1843	1782	1833	1757
油料	2955	2865	2897	2811	5910	5730	5794	5622
棉花	442	532	492	486	1326	1597	1475	1458
麻类	53	68	96	85	90	116	164	145
糖料	7635	8655	10293	9642	764	866	1029	96
合计					60643	60967	62311	59257

产生的秸秆量也就占了总量的 76%左右.

2000~2003 年全国秸秆被露天焚烧的总量约 1.36~1.43 亿吨(表 3), 占秸秆总产出量的 23%左右; 这些数值比Streets等人[7]估算的 1.05 亿吨要高 40%左右. 山东省的焚烧量最高, 其次为河南、江苏、河北、黑龙江等省, 这主要是因为华东地区的农村经济较发达, 而东北地区是地广人稀的产粮区, 使得秸秆剩余量较大. 焚烧量最低的是西部地区和内蒙古, 主要原因是较低的生活水平和较低的农村人口密度.

2000~2003 年秸秆露天焚烧各污染物的排放总量见表 4. 由于近些年秸秆被露天焚烧的总量变化不大, 使得各污染物排放总量的年度变化也相应的较小.

2000 年全国 31 个省市(不含港、澳、台)农业秸秆露天焚烧排放的污染物清单见表 5. 根据国家环保总局(http://www.zhb.gov.cn/plan/zkgb/2000/)的统计资料, 2000 年全国 PM 和 SO_2 的排放总量分别为 1165.45 和 1743.6 万吨(不包含秸秆露天焚烧). 由此可见, 秸秆露天焚烧排放的PM(110.71 万吨)会对全国PM的排放总量有很大的贡献(11.5%), 而SO_2 对全国排放总量的贡献则很小(0.04%). Tsinghua University等[31]曾估算 2000 年全国CO_2 和CH_4 的排放量分别为 31.12 和 0.6 亿吨, 而EDGAR的排放清单对 1995 年中国相应的数值为 37.5 和 0.46 亿吨[32], 但Streets等人[33]认为, 随着中国加大能源体制改革以及能源密集型企业技术的进步等因素, 2000 年CO_2 和CH_4 的排放量已分别下降到 26.9 及 0.33 亿吨. 结合关于中国排放的最新文献[7], 在 2000 年, 本文估算出的源于农田秸秆焚烧排放的污染物占总排放量的比例分别为: BC 11.17%, VOC10.78%, OC10.37%, CO7.71%, CO_2 6.13%, NO_x 3.63%, NH_3 1.49%, CH_4 0.68%, SO_2 0.05%, 其中BC, VOC, OC, CO和CO_2 对总排放量的贡献已经非常明显.

表 3 各省市秸秆被露天焚烧的量

省份(市)	秸秆产量/10^4 t				露天焚烧量/10^4 t			
	2000	2001	2002	2003	2000	2001	2002	2003
北京	360	362	370	352	163	164	167	159
天津	282	284	290	276	114	115	117	112
河北	4735	4760	4865	4626	1146	1152	1177	1120
山西	1478	1485	1518	1444	310	312	319	303
内蒙古	2218	2230	2279	2167	472	475	485	461
辽宁	2278	2290	2341	2226	480	483	493	469
吉林	4013	4035	4124	3922	842	846	865	823
黑龙江	4455	4479	4578	4353	999	1004	1026	976
上海	160	161	164	156	78	78	80	76
江苏	3437	3456	3532	3359	1175	1181	1207	1148
浙江	1053	1059	1082	1029	449	451	461	438
安徽	3010	3026	3093	2942	562	565	577	549
福建	651	654	669	636	212	213	218	207
江西	1263	1270	1298	1235	274	275	282	268
山东	6938	6976	7129	6780	1841	1850	1891	1798
河南	5806	5837	5966	5674	1143	1149	1174	1116
湖北	2465	2478	2533	2408	576	580	592	563
湖南	1947	1957	2001	1902	434	436	446	424
广东	1375	1382	1413	1344	501	504	515	490
广西	1452	1459	1492	1418	243	244	249	237
海南	152	153	156	149	46	47	48	45
重庆	1099	1105	1129	1074	213	214	219	208
四川	3309	3326	3400	3233	659	662	677	644
贵州	995	1001	1023	973	149	150	154	146
云南	1395	1403	1434	1363	160	161	164	156
西藏	48	48	49	47	4	4	4	4
陕西	1607	1616	1651	1570	238	239	245	233
甘肃	998	1003	1025	975	166	166	170	162
青海	151	152	155	148	15	15	16	15
宁夏	321	323	330	314	65	65	67	63
新疆	1191	1197	1223	1163	228	229	235	223
合计	60643	60967	62311	59257	13956	1403	1434	13637

表 4 2000~2003 年秸秆露天焚烧各污染物排放量汇总(单位: 10^4 t)

年份	PM	SO_2	NO_x	NH_3	CH_4	BC	OC	VOC	CO	CO_2
2000	110.7	0.89	37.0	18.1	23.5	10.5	31.5	168.9	802.0	21020
2001	111.3	0.9	37.2	18.2	23.6	10.6	31.7	169.8	806.3	21140
2002	113.8	0.92	38.0	18.6	24.1	10.8	32.4	173.5	824.1	21600
2003	108.2	0.87	36.2	17.7	22.9	10.3	30.8	165.0	783.7	20540

图 2 给出了以 0.2°×0.2°(约 20 km×20 km)的网格法处理的 2003 年全国秸秆露天焚烧排放的 PM 分布(其他污染物的分布与此图类似). 结果表明, 地区间的分布极不均衡, 单位面积排放量较高(>100 kg/km^2)的地区主要来自东部地区、东北地区, 如河北、山东、江苏等省; 单位面积排放量较低(<10 kg/km^2)的地区是西部地区和内蒙古, 主要是由于这些地区的农村人口密度较低, 经济发展水平也较低. 全国单位面积排放量较高的地区从东北至华东呈带状分布.

5 误差估算

下列几个因素对排放的估算有着直接的影响: 排放因子、统计数据、各地农村的经济活动水平等. 很明显, 对排放的估算依赖于从有限的统计信息中得到的有关经济活动水平和秸秆被露天焚烧比例之间有相关关系的推论、由公开发表文献中搜索到的排

表 5 2000 年各省市秸秆露天焚烧排放的污染物的量(单位: 10^4 t)

省份(市)	PM	SO_2	NO_x	NH_3	CH_4	BC	OC	VOC	CO	CO_2
北京	1.35	0.01	0.42	0.21	0.29	0.13	0.38	1.97	9.53	260
天津	0.93	0.01	0.3	0.15	0.2	0.09	0.27	1.38	6.68	180
河北	9.83	0.05	2.93	1.49	2.11	0.93	2.78	13.86	68.85	1800
山西	2.68	0.01	0.79	0.4	0.58	0.25	0.74	3.75	18.57	490
内蒙古	4.15	0.02	1.21	0.61	0.89	0.37	1.12	5.71	27.73	750
辽宁	3.7	0.02	1.26	0.62	0.81	0.38	0.97	5.81	26.03	810
吉林	6.62	0.03	2.2	1.09	1.46	0.68	1.7	10.19	45.86	1450
黑龙江	8.24	0.04	2.61	1.3	1.79	0.78	2.15	12.09	55.83	1650
上海	0.54	0.01	0.22	0.1	0.11	0.05	0.16	0.94	4.11	110
江苏	8.84	0.09	3.16	1.53	1.85	0.86	2.71	14.21	69.07	1640
浙江	2.7	0.06	1.29	0.58	0.52	0.29	0.83	5.43	22.45	600
安徽	4.5	0.04	1.5	0.73	0.94	0.41	1.34	6.8	33.24	790
福建	1.4	0.03	0.61	0.28	0.27	0.13	0.41	2.57	10.64	280
江西	1.65	0.03	0.8	0.36	0.32	0.17	0.5	3.32	13.72	370
山东	16.21	0.08	4.69	2.39	3.47	1.47	4.6	22.27	112.14	2840
河南	10.01	0.05	2.91	1.49	2.17	0.91	2.94	13.83	72.41	1700
湖北	4.16	0.05	1.59	0.75	0.88	0.4	1.25	6.98	33.07	800
湖南	2.52	0.05	1.26	0.56	0.5	0.28	0.77	5.25	21.52	580
广东	3.31	0.06	1.44	0.65	0.64	0.31	0.96	6.07	25.04	680
广西	1.75	0.03	0.68	0.32	0.35	0.16	0.49	2.94	12.58	340
海南	0.34	0.01	0.13	0.06	0.07	0.03	0.1	0.56	2.43	60
重庆	1.63	0.02	0.58	0.28	0.34	0.15	0.46	2.58	11.68	320
四川	5.08	0.05	1.77	0.86	1.05	0.48	1.48	7.97	37.01	960
贵州	1.18	0.01	0.4	0.19	0.25	0.11	0.32	1.81	8.24	230
云南	1.29	0.01	0.43	0.21	0.27	0.12	0.36	1.94	8.94	240
西藏	0.04	0	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.05	0.28	10
陕西	2.04	0.01	0.61	0.31	0.43	0.19	0.57	2.88	14.13	370
甘肃	1.49	0.01	0.42	0.22	0.32	0.13	0.43	2	10.27	250
青海	0.16	0	0.04	0.02	0.03	0.01	0.05	0.18	1	20
宁夏	0.53	0	0.17	0.08	0.11	0.05	0.15	0.78	3.72	100
新疆	1.86	0.01	0.59	0.3	0.44	0.18	0.55	2.76	15.24	350
合计	110.71	0.89	37	18.14	23.47	10.53	31.54	168.87	802.01	21020

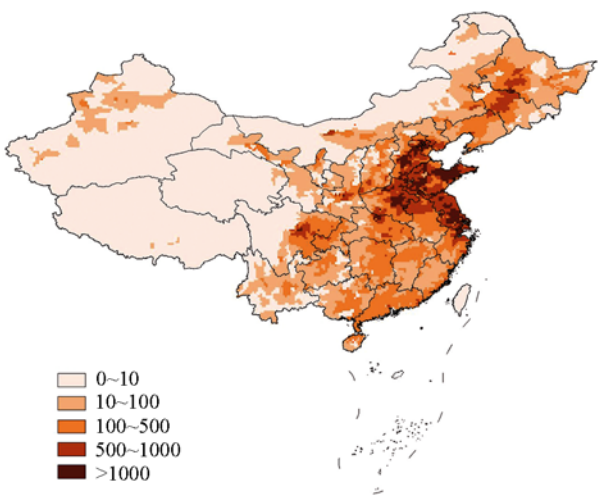


图 2 2003 年秸秆露天焚烧排放 PM 的网格分布图 (0.2°×0.2°, 单位: kg/km^2)

放因子的值. 我们使用CV(Coefficients of Variation, 相对标准偏差或变异系数)来估算各影响因子的误差, 并组合这些CV来估算最终排放量的误差; 这种处理方法和Streets等人[7]采用的方法相同; 如果某些统计数据的误差无法确定, 则使用专家判断法. 排放量的95%置信区间是CV的 1.96 倍.

政府部门统计数据的准确性不容置疑, CV可取比较低的值±10%; 我们计算的各污染物排放因子的CV分别是: PM ± 34.8%, NO_x ± 21.3%, BC ± 30.3%, OC ± 31.5%, CO ± 37.3%, CO_2 ± 25.9%. 由于SO_2, NH_3, CH_4 和VOC的排放因子较少, 我们假设其CV为± 100%, 则最后计算的源于农田秸秆焚烧排放污染物量的 95%置信区间分别为: PM ± 68.3%, SO_2 ± 197.0%, NO_x ± 41.7%, NH_3 ± 197.0%, CH_4 ± 197.0%, BC ± 59.4%, OC ± 61.6%, VOC ± 197.0%, CO ± 73.1%, CO_2

± 50.8%; 这些误差估算的值和Streets等人[7]的估算值非常接近.

6 结论

本文估算了中国区域秸秆露天焚烧排放的各种污染物的量. 文中采用了一些最新的关于经济活动水平和排放因子的资料. 有关政府部门对全国粮食作物和经济作物产量的县级统计资料、源于公开发表文献和实验得到的排放因子被仔细分析, 估算了全国和各地区源于秸秆露天焚烧排放的总量, 并以2003年PM的排放为例, 用0.2°×0.2°的网格图显示了排放的地区分布. 估算的秸秆年产量约6亿吨/年, 其中约23% (1.6亿吨)被露天焚烧掉. 排放的一些污染物, 如BC, VOC, OC, CO, CO_2, 对全国总排放量的贡献非常明显. 排放在地区间的分布极不均衡, 单位面积排放量较高的地区主要来自东部地区、东北地区, 单位面积排放量较低的地区是西部地区和内蒙古.

致谢 感谢中国气象局大气成分观测与服务中心全体成员以及中国海洋大学的屈文军博士对实验工作的支持.

参 考 文 献

1 杭维琦, 陈建江. 野外燃烧秸秆对环境质量的影响与防治. 环境监测管理与技术, 2000, 12(2): 36—37
2 邬莉, 陈静, 朱晓东, 等. 农村秸秆焚烧的原因及对策研究. 中国人口·资源与环境, 2001, 11: 110—112
3 Duan F K, Liu X D, Yu T. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing. Atmos Environ, 2004, 38(9): 1275—1282[DOI]
4 Chan Y C, Simpson R W, Mctainsh G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression technique. Atmos Environ, 1999, 33: 3237—3250[DOI]
5 刘娅. 农作物秸秆治理与综合利用. 辽宁农业科学, 2003, (1): 18—23
6 何立明, 王文杰, 王桥, 等. 中国秸杆焚烧的遥感监测与分析. 中国环境监测, 2007, 23(1): 42—50
7 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 Geophys Res, 2003, 108(D21), 8809, doi: 10.1029/2002JD003093
8 Guo H, Wang T, Simpson I J, et al. Source contributions to ambient VOCs and CO at a rural site in eastern China. Atmos Environ, 2004, 38(27): 4551—4560[DOI]
9 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 Geophys Res, 2004, 109, D14203[DOI]
10 Streets D G, Gupta S, Waldho S T, et al. Black carbon emissions in China. Atmos Environ, 2001, 35: 4281—4296[DOI]
11 Klimonta Z, Streets D G, Gupta S, et al. Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China. Atmos Environ, 2002, 36(8): 1309—1322[DOI]
12 Liousse C, Penner J E, Chuang C, et al. A global three-dimensional model study of carbonaceous aerosols. J Geophys Res, 1996, 101: 19411—19422[DOI]
13 国家农业部. 中国农业年鉴(2001/2002/2003/2004). 北京: 中国农业出版社
14 国家统计局. 中国统计年鉴(2001/2002/2003/2004). 北京: 中国统计出版社
15 王孟杰, 鲁楠, 顾树华, 等. 中国生物能开发利用与战略思考. 北京: 中国农村能源行业协会. 2000. 1—61
16 胡代泽. 我国农作物秸秆资源的利用现状与前景. 资源开发与市场, 2000, 16(1): 19—20
17 瓮伟, 杨继涛, 赵青玲. 我国秸秆资源化技术现状及其发展方向. 中国资源综合利用, 2004, (7): 18—21
18 林日强, 宋丹丽. 广东省作物秸秆的利用现状及问题. 土壤与环境, 2002, 11(1): 110
19 余臻. 福州市农作物秸秆资源化处理发展趋势. 福建环境, 2003, 20(5): 31—32
20 姚政, 王树红, 蒋小华, 等. 上海郊区秸秆还田现状与对策初探. 农业环境与发展, 2001, (3): 40—41
21 Yevich R, Logan J A. An assessment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world. Global Biogeochem Cycle, 2003, 17(4): 1095, doi: 10.1029/2002GB001952
22 陈新锋. 对我国农村焚烧秸秆污染及其治理的经济学分析. 中国农村经济, 2001, (2): 47—52
23 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, Volume 1. California State Air Resources Board, (NTIS PB97-133037), 1996
24 U.S. Environmental Protection Agency, (U.S.EPA). Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Chapter 2.5: Open burning, Fifth Edition. NC, USA: U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Rark, 2004. 1—19
25 Turn S Q, Jenkins B M, Chow J C, et al. Element characterization of particulate matter emitted from biomass burning: Wind tunnel derived source profiles for herbaceous and wood fuels. J Geophys Res, 1997, 102(D3): 3683—3699[DOI]
26 崔岩山, 王庆仁. 土壤与大气环境中硫行为及其对植物的影响. 中国生态农业学报, 2002, 10(3): 80—82
27 Andreae M O, Merlet P. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning. Global Biogeochem Cycle, 2001, 15(4): 955—966[DOI]
28 Reddy M S, Venkataraman C. Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India: Part Ⅱ-biomass combustion. Atmos Environ, 2002, 36: 699—712[DOI]
29 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Greenhouse Gas Inventory Reference Manual. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. IPCC/OECD/IES, UK Meteorological Office, Bracknell, UK, 1997
30 张无敌, 刘士清, 周斌, 等. 我国农村有机废弃物资源及沼气潜力. 自然资源, 1997, 1: 67—71
31 Tsinghua University, et al. China Climate Change Country Study. Beijing: Tsinghua University Press, 1999
32 Olivier J G J, Bouwman A F, vander Maas C W M, et al. Description of EDGAR Version 2.0. A set of global emission inventories of greenhouse gases and ozone-depleting substances for all anthropogenic and most natural sources on a per country basis and on a 1°×1° degree grid. RIVM Report 7710600 002/TNO-MEP report R96/119, National Institute of Public Health and the Environment, Bilthoven, Netherlands, 1996
33 Streets D G, Jiang K, Hu X, et al. Recent reductions in China's greenhouse gas emissions. Science, 2001, 294: 1835—1836[DOI]