科学通报 2011 年 第 56 卷 第 3 期：261 ~ 268
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单

曹国良[①], 张小曳[②], 龚山陵[③], 安兴琴[②], 王亚强[②]

① 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055;
② 中国气象科学研究院, 北京 100081;
③ Air Quality Research Division, Environment Canada, Toronto M3H 5T4, Canada
E-mail: caoguoliang@xauat.edu.cn

2010-05-13 收稿, 2010-10-11 接受
国家重点基础研究发展计划(2006CB403700)和中国气象局公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706036)资助项目

摘要 利用政府部门公布的最新数据, 包括社会-经济数据、化石燃料和生物质燃料消耗数据等, 同时采用一些新的、中国特有的排放因子, 计算了中国大陆 2007 年高时空分辨率的颗粒物及污染气体的排放源清单. 计算的年排放量分别是: $PM_{2.5}$ 1321.2 万吨, BC 139.9 万吨, OC 294.6 万吨, SO_2 3158.4 万吨, NO_x 2324.8 万吨, NH_3 1601.7.0 万吨, CO 16485.6 万吨, VOCs 3546.4 万吨. 计算出的全国和各地区的排放量采用 0.5°×0.5°的网格来图示, 表明沿海地区及部分中部地区的排放强度明显高于西部地区; 部分污染物的排放具有较强的季节性, 主要是由于自然因素及居民采暖、农业秸秆的露天焚烧的季节性等所致. 分析对比表明, 本文计算的排放结果与其他清单基本相当, 但在不同污染物分类别的排放量上则不尽相同; 估算误差相对以往清单小.

关键词
中国大陆
颗粒物
污染气体
排放清单
季节性

准确地描述中国区域排放的颗粒物及污染气体的时空分布特征, 在区域环境质量模拟和污染防治、环境政策制定、气候效应研究等方面均有重要的作用[1~3]. 由于对人体的毒害、直接和间接的气候效应、影响降水酸度、改变平流层臭氧和光化学烟雾、参与全球生物地球化学循环、降低能见度、影响生态系统等, 大气中的颗粒物及污染气体越来越受到科学家的关注[4~6]. SO_2, NO_x, NH_3 则是形成酸沉降的最关键的反应性气体[7~9], 它们和 CO, VOCs 一起也是大气中形成二次气溶胶粒子的重要前体物, 并且对区域的能见度下降和灰霾的形成都有重要影响. VOCs, CO, NO_x 还是生成 O_3 和形成光化学污染的最主要的前体物[10].

PM(particulate matter), BC(black carbon), OC(organic carbon), SO_2, NO_x 和 CO 主要来源于燃烧过程, 尤其是煤和生物质的燃烧, 其中约 97%的 $PM_{2.5}$, 90%的 SO_2, 70%的 NO_x 和 32%的 CO 来自煤的燃烧[11~17]; 而 NH_3 主要来源于农业过程(约 20%~33%)和动物排放的有机质的分解(约 50%~60%)[18,19]; VOCs 的排放源则更为复杂, 主要源于交通、溶剂挥发、废物处置等[12,20]. 中国地处东亚地区, 面积广大, 由于经济水平相对落后和生活习惯原因, 大量使用煤和生物质作燃料, 同时, 大量饲养家禽、家畜, 且饲养方法及废物处置方式落后, 被认为是排放颗粒物及污染气体的大户[3,17,21~24], 而且由于其独特的地理位置及社会、经济的快速发展, 使其排放量的变化(如年变化、季变化、月变化等)较大, 很难准确地确定.

20 世纪 90 年代, 一些国外学者较系统地研究了东亚地区, 其中主要是中国的排放情况[3,17,23~28], 但这些研究因其对中国资料的缺乏和不详细, 以及缺乏有中国地域特点的关键排放因子的实验而不确定性很大; 一些模拟和实测研究都表明, 包括 Streets 在内的这些估算可能偏低了 50%以上[29]. 特别由于缺乏对中国农村及乡镇工业的了解, 使得已有排放清单的不确定性更大. 此外, 一些排放清单没有考虑季节的变化, 尤其是中国农村的生物质燃烧. 另外, 由

英文版见: Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, et al. Emission inventories of primary particles and pollutant gases for China. Chinese Sci Bull, 2011, 56, doi: 10.1007/s11434-011-4373-7

于颗粒物、酸雨问题在中国的严重性, 国内一些学者也开始关注颗粒物及污染气体排放源清单的编制工作; 一些学者通过自主研究得到了较早年份零星的成果[11,13,15,16,18,19,30~34], 以上这些研究部分不具备较好的系统性, 且有些没有给出时空分布, 很难满足进行数值模拟所需的时空分辨率.

就排放源编制技术而言, 很多学者做了大量开创性的工作[3,20,35]. 目前国内的排放清单编制技术已着重于基于技术和设备信息的更细化的分类方法[12], 同时, 由于有更多的国内实测排放数据, 使得清单的不确定性也趋于降低.

本文计算了中国各省份(不含港、澳、台)颗粒物 $PM_{2.5}$, BC, OC 及污染气体 SO_2, NO_x, NH_3, CO, VOCs 的排放源清单, 并给出其排放的时空分布特征.

1 研究方法

排放清单的计算是通过各地区、各类型排放源的综合估算而得到的. $PM_{2.5}$, BC, OC, SO_2, NO_x, CO, VOCs 的计算方法参照了 Klimont[20]的公式, 即

$$E=\sum_j\sum_k\sum_l A_{j,k,l}EF_{j,k,l}(1-\eta_{j,k,l}),$$

其中, E 为排放量, A 为燃料或产品消费量, η为去除效率, EF 为排放因子, j, k, l 分别为地区、分类部门、燃料种类.

森林和草地火灾的排放计算公式为

$$E=\sum_j A_jB_jC_jEF_j,$$

其中, E 为排放量, A 为燃烧面积, B 为燃料载荷, C 为燃烧效率, EF 为排放因子, j 为地区.

NH_3 的计算使用如下的公式, 即

$$E_i=\sum_j L_jEf_{i,j}+\sum_k(Ef_{i,k}FC_{i,k}+Ef_{i,k}FP_{i,k})+\sum_l FL_lEf_{i,l},$$

其中, L 为家禽或家畜头数, FC 为化肥消费量, FP 为化肥生产量, Ef 为排放因子, FL 为燃料消费量, i,j,k,l 分别为地区、家禽或家畜类别、化肥种类、燃料种类.

(ⅰ) 排放源类型. 本文计算所分类的排放源类型有生物质燃烧(包括秸秆的露天焚烧、森林和草地火灾)、居民生活、发电、工业生产、交通运输、家禽家畜的饲养和化肥的施用、废物处理、溶剂的使用、轻工产品的生产等. 排放源被分为两个主要种类: 点源和面源.

我们共统计了 383 个大的点源, 主要是发电能力大于 6.0 MW 的 285 个发电厂和热电厂[36](小电厂、将要拆除或改造的电厂未纳入统计), 主要位于东部地区, 煤炭是其主要原料; 98 家化肥制造企业(http://www.chinafuhefei.com/), 也主要位于东部地区; 年加工能力500万吨以上的23家石化生产企业(http:// www.cpcic.com.cn/html/). 每个点源都输入了经纬度的地址标识. 面源则包括所有非点源的排放源.

本文计算的基准年为 2007 年.

(ⅱ) 排放因子. 在大多数情况下, 排放因子只是在可接受条件下能得到的数据的简单平均, 所以它们并不能推荐作为任何源的排放标准或限值. 国外有关颗粒物和污染气体的排放因子有很多实测数据, 但有关中国区域的实验工作目前还较少. 由于所用的排放因子过于庞杂, 仅 VOCs 的因子就有 100 多个, 故文中未能一一列出. 本文的排放因子主要引用国内外已有的研究成果[3,11,12,15~18,20~22,31,32,35,37~41], 同时也引用了国内较新的实验成果[13,42~49], 尤其是在计算生物质燃料燃烧、机动车排放及 VOCs 排放清单的过程中. 国内煤、油料的含硫量及燃烧时转化为 SO_2 的比例见罗陨飞等人[50]和 Arndt 等人[51]的研究成果.

(ⅲ) 基础资料. 一些用来估算排放的基础数据, 如人口、面积、GDP、工业产值、燃料消耗和植被覆盖情况、气象数据、土壤酸碱度等, 来源于国家统计局和其他相关政府机构的公布数据, 大都是县级水平. 化石燃料包括煤、油、天然气和液化气等, 而煤是中国的主要能源燃料[52]; 生物质燃料包括秸秆和薪柴两类, 在农村主要被用于烹饪和采暖[53]; 秸秆的露天焚烧估算引用相关研究成果[54]; 对森林火灾[55]和草地火灾[56]的排放量估算, 其燃料载荷[57]、燃烧效率[57,58]引用有关数据; 各地区家禽家畜的存栏量[56]、农田化肥施用量[56]、各种日用产品的生产量、机动车保有量、废物处置等数据, 均源于国家统计部门的公开数据[52].

2 结果与讨论

2.1 总排放量和各地区的排放量

2007 年全国和各地区关键颗粒物及污染气体排放量的计算结果见表 1. 各类污染物排放量较大的省份是山东、河北、山西、河南、四川等省份, 主要是

表 1　2007 年各省、自治区、直辖市的排放源清单(单位：万吨)

	$PM_{2.5}$	BC	OC	SO_2	NO_x	NH_3	CO	VOCs
北京	16.2	2.3	4.2	17.2	43.7	11.7	199.8	74.4
天津	15.1	1.5	3.0	26.3	33.7	10.2	162.5	46.7
河北	117.2	11.2	23.5	231.8	163.4	99.4	1266.9	232.7
山西	116.0	9.3	17.9	219.0	116.9	40.0	1319.3	161.7
内蒙古	46.1	5.6	12.2	104.7	115.9	50.8	520.4	95.5
辽宁	58.3	6.2	11.6	123.6	108.7	62.4	675.5	201.0
吉林	32.1	4.3	9.2	33.2	56.2	60.1	445.5	89.2
黑龙江	38.6	4.8	11.9	26.4	69.1	40.0	570.3	157.5
上海	20.6	1.9	2.9	54.9	50.9	8.3	193.0	99.0
江苏	69.0	6.0	15.3	137.9	162.3	88.8	801.0	240.9
浙江	34.2	3.3	5.8	87.1	107.6	30.3	421.8	153.6
安徽	51.4	5.9	14.6	90.6	75.7	70.0	732.7	102.6
福建	26.2	2.4	4.2	51.6	55.4	27.7	305.6	96.0
江西	26.2	2.6	5.0	87.5	40.5	39.2	309.3	112.2
山东	118.5	11.3	26.2	347.3	210.7	161.8	1398.9	279.1
河南	93.2	9.6	22.4	234.2	147.1	138.5	1149.3	183.4
湖北	62.5	6.4	13.7	98.4	85.1	64.9	748.7	101.4
湖南	52.6	5.7	10.8	165.1	72.1	64.7	653.6	94.4
广东	47.3	5.5	8.4	153.6	153.6	77.7	665.5	279.0
广西	36.1	4.5	8.9	182.6	51.5	66.0	609.4	117.9
海南	4.1	0.5	0.7	9.6	11.3	9.9	44.9	10.9
重庆	16.0	2.1	4.3	109.8	30.4	26.6	263.5	45.3
四川	55.7	7.3	18.5	91.5	80.7	106.8	865.4	168.9
贵州	38.1	5.6	9.9	178.8	63.9	44.5	539.5	84.2
云南	34.1	3.7	6.9	56.5	55.4	58.0	466.4	94.0
西藏	6.8	0.4	0.7	18.5	9.9	19.8	13.5	2.9
陕西	33.9	3.7	7.9	104.4	54.6	34.3	463.5	82.5
甘肃	22.3	2.6	6.2	28.8	31.6	30.7	252.9	60.8
青海	4.5	0.5	1.2	3.4	7.9	16.2	53.2	6.5
宁夏	9.0	0.8	1.8	52.7	24.0	10.1	108.7	18.6
新疆	19.5	2.3	4.9	31.5	35.1	32.6	265.5	53.5
合计	1321.2	139.9	294.6	3158.4	2324.8	1601.7	16485.6	3546.4

因为上述地区的煤炭使用量较高、农村人口密度较高的缘故; 煤炭的大量使用, 尤其是在除尘、脱硫设备较落后的乡镇企业的使用, 使得各污染物的排放量很大, 而农村人口密度较高, 使得源于秸秆焚烧、生活燃煤的排放也就较高. 而西部地区(青海、甘肃、西藏等地)及内蒙古, 由于燃煤量较小, 同时人口密度也很小, 各类污染物的排放量也就相对较小.

图 1 则是利用 GIS 系统图示了颗粒物及污染气体排放的 0.5°×0.5°空间分布(以 BC 和 NH_3 为例, 其他图形类似). 由于大部分基础数据都是在县级水平, 因此能将排放分配到分辨率较高的电子地图中. 当缺乏某些县级水平数据时(有省级数据), 就使用一些社会-经济学指标来进行合理分配, 如人口、面积、工业产值、农作物播种面积、林地草地面积、各种粮食作物的产量、人均年收入、生产总值、第一第二产业产值、各种化肥的施用量、牲畜存栏数等; 这种分配方法已被很多学者使用[3,12,33]. 由图 1 可见, 排放强度(单位面积排放量)较高的省份是河北、山东、河南、山西、江苏等地, 由东北至华东沿中国的主要农业产区和工业发达地区呈镰状分布, 而面积广大的西部地区及内蒙古则因为地广人稀、工业不发达的缘故, 排放强度较低.

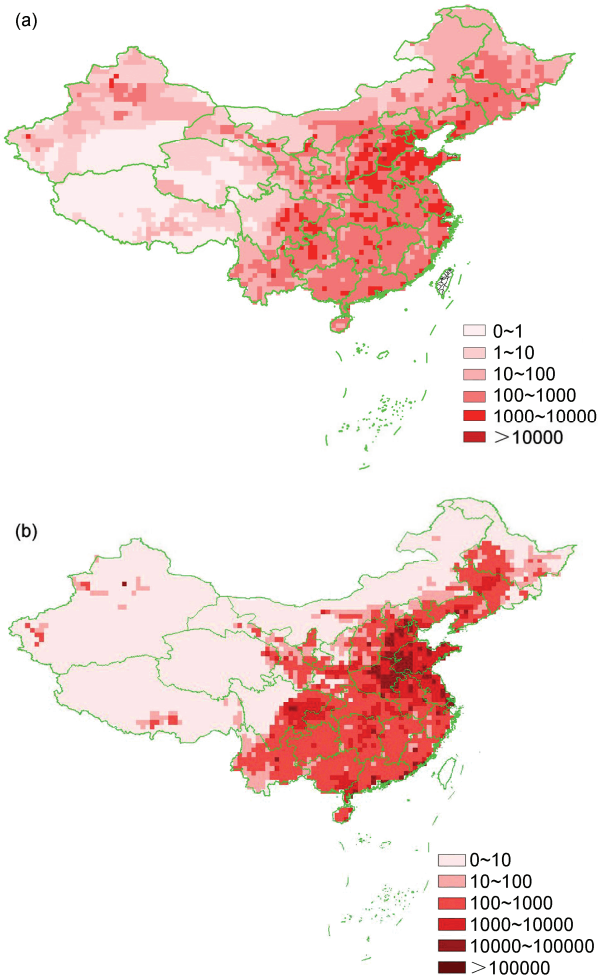

图 1 中国区域 2007 年排放的网格图

0.5°×0.5°, 单位: t/网格. (a) BC; (b) NH_3

2.2 分类别排放清单

表 2 是各类污染物分排放类别的清单统计结果. 可见, 工业源和居民生活源对 $PM_{2.5}$, BC, OC, CO 的排放量贡献较大, 而源于燃煤发电的排放则对 SO_2 和 NO_x 的贡献较大; NH_3 主要产生于家禽(畜)、人的废物处置过程、包括使用化肥产生排放的农业过程等; VOCs 则主要是源于秸秆焚烧、工业生活垃圾焚烧等废物处置过程、油漆挥发、印刷过程中溶剂的使用等.

2.3 与其他排放清单的比较

本文计算的颗粒物及污染气体排放清单和以前的清单相比, 有一些明显的改善. 首先, 该清单引用了最新的政府统计数据——燃料消费、人口和技术现状等; 其次, 部分排放因子, 如有关生物质燃烧、居民生活燃煤和交通工具的排放等, 有最新的中国区域的实验成果.

有学者曾做过中国区域较早年份排放清单的比较[12,28]. 本文计算的清单与较新文献中清单的比较见表 3 中, 可见, 本文计算的排放清单除 NH_3, VOCs 外和其他作者[12,28,59]的结果基本相当, 但在不同污染物分类别的排放量上则不尽相同, 如 NO_x 的清单和 Zhang 等人[12]相比, 分类别的计算值之比分别是: 发电(1.02)、交通(0.50)、工业(1.65)、生活源(2.08), 主要是因为对排放源的归类方法不同所致. 同时应该注意到, 部分排放源排放的量, 如乡镇企业、居民生活、露天焚烧等, 以前被低估了; 关于这一点, Wang 等人[33]在计算山东省的排放时, 也发现了类似的情况. 当然, 由于本文采用了最新的政府统计数据和中国特有排放因子的实验结果, 也使得估算的排放量不尽相同. 本文计算的各排放清单的主要分类的比例和已有较新的排放清单[3,12,28,35]基本一致, 而且通过 GIS 处理的排放强度的地理分布情况(图 1)也和较

表 2 2007 年各污染物分类别的排放清单(单位: 万吨)

污染物	生物质燃烧	发电	交通源	工业源	居民生活		合计
$PM_{2.5}$	66.7	18.6	59.9	905.9	270.1		1321.2
BC	10.4	1.3	10.3	52.9	65.1		139.9
OC	43.3	1.7	14.5	80.5	154.6		294.6
SO_2	1.4	961.6	41.1	1995.2	159.1		3158.4
NO_x	50.5	939.3	256.7	886.0	192.5		2324.8
CO	1227.0	2905.4	1405.1	5532.8	5415.3		16485.6
	废物处置	农业过程	工业过程	化肥生产			
NH_3	957.6	362.3	248.0	33.8			1601.7
	交通源	溶剂使用	工业源	生活源	石化、化工生产	废物处置	
VOCs	409.9	865.3	266.8	575.3	443.7	985.4	3546.4

新的排放清单基本一致.

2.4 排放的季节性

显然, 颗粒物和污染气体的排放是有季节性差异的[3,34]. 这是因为(1) 北方的居民需要使用煤或生物质进行采暖, 而在南方的居民则不需要; (2) 源于家禽、家畜废物处置的排放量和环境温度有较强的关系; (3) 秸秆的露天焚烧只是在收获季节才会发生; (4) 化肥的施用和农时、物候息息相关. 综合考虑以上因素, 表 4 列出了各污染物在 2007 年各月份的排放量, 其中 $PM_{2.5}$, BC, OC, CO, NH_3, VOCs 等的排放有较强的季节性变化; 由于对温度变化更具敏感性, NH_3 的季节性变化幅度最大, 7 月份的排放量是 12 月份的 4.5 倍. 关于部分污染物季节性变化的观测资料, 文献[62,63]做过详细的讨论.

3 排放估算的不确定性分析

一般来说, 排放清单的不确定性是典型排放源的排放因子及相应活动水平数据不确定性的综合体现. 目前, 已有一些研究探讨排放源清单中的不确定性的量化方法[64,65], 但不确定性分析在我国排放源清单开发中的使用和研究不多.

本文使用 IPCC[64]的估算方法进行分析, 并使用误差传播公式来估算最终误差. IPCC 提供了两种方便的规则可以根据加法和乘法来合并互不相关的不确定性; 当不确定量由加法合并时, 总和的标准偏差为相加量的标准偏差的平方之和的平方根, 即

$$U_{\text{total}}=\frac{\sqrt{(u_1\cdot x_1)^2+(u_2\cdot x_2)^2+\cdots+(u_n\cdot x_n)^2}}{x_1+x_2+\cdots+x_n},$$

其中, U_{total} 为所有量的总和的百分比不确定性, x_i 和 U_i 分别表示不确定量及其相关的百分比不确定性.

当不确定性量用乘法合并时, 应用同一规则, 但标准偏差都必须表示为适当平均值的分数, 即

$$U_{\text{total}}=\sqrt{U_1^2+U_2^2+\cdots+U_n^2},$$

其中, U_{total} 为所有量的乘积的百分比不确定性, U_i 为与每个量相关的百分比不确定性.

本文估算清单的不确定性时, 作了以下假定: (1) 统计资料、活动水平数据均源于国家统计局或其他政府部门公开数据[52,55,56], 其误差不超过 5%; (2) 若排放因子来源较单一, 或者某类型排放源的排放因子仅有一个, 则统一设其误差为 200%; Streets 等人[3]曾认为排放因子的误差为±5%~500%[3], 远高于本文, 这应该是作者估算的是整个亚洲的排放量, 所以排放因子的适用性显得较差一些. 由于活动水平数据的来源相对准确, 及排放因子的实验数据较多, 源于电厂、工业源、交通源的误差相对较小, 而源于生物质燃烧、居民生活的误差就较高.

本文估算的各类排放清单的误差分析见表 5. 为

表 3 排放清单的比较

排放清单	计算年份	排放量(万吨)							
		$PM_{2.5}$	BC	OC	SO_2	NO_x	CO	NH_3	VOCs
本文	2007	1321.2	139.9	294.6	3158.4	2324.8	16485.6	1601.7	3546.4
Zhang 等人[12]	2006	1326.6	181.1	321.7	3102.0	2083.0	16688.9		2324.7
Ohara[28]	2003		114	262	3660	1450	15800		
Wei 等人[59]	2005								2010
Klimont 等人[60]	2005		136.6	281.2	3436.4	1692.6			
Lu[61]	2007				3232.3				

表 4 颗粒物和污染气体在不同月份的排放量(单位: 万吨)

污染物	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$PM_{2.5}$	110.7	109.7	108.9	102.9	118.3	111.0	100.5	102.9	117.5	119.2	108.7	110.8
BC	12.3	12.1	11.8	10.2	12.6	11.3	9.8	10.1	12.5	13.2	11.7	12.2
OC	24.5	23.9	23.5	20.1	30.1	25.4	18.7	20.2	29.6	30.7	23.4	24.6
SO_2	267.7	267.1	266.2	260.9	260.8	260.4	260.1	260.2	260.7	261.1	265.7	267.5
NO_x	191.6	191.1	190.7	189.2	202.4	195.1	188.2	189.8	201.8	202.9	190.6	191.4
CO	1348.0	1336.7	1317.3	1256.2	1559.9	1397.6	1218.9	1261.2	1545.9	1585.7	1315.6	1342.6
NH_3	67.3	64.4	89.5	109.3	208.5	201.5	221.7	179.1	150.0	200.3	61.3	48.7
VOCs	284.4	284.4	284.4	284.0	322.2	302.7	284.0	288.6	321.1	321.9	284.3	284.4

表 5 排放源估算的误差分析

排放清单	不确定性, ±%							
	$PM_{2.5}$	BC	OC	SO_2	NO_x	CO	NH_3	VOCs
本文	70.3	76.2	66.6	12.0	33.4	36.8	36.6	51.6
Streets 等人[3]		360	450	16	37	185	72	130
Zhang 等人[12]	130	208	258	12	31	70		68

方便比较, 将 Streets 等人[3]、Zhang 等人[12]估算的排放量的不确定性也一并列出. 可见, 本文估算的误差相对要小一些, 尤其 BC, OC, CO 的误差, 原因就是选取的活动水平和排放因子的假设误差不同, 特别是排放因子的假设误差值相对小一些, 同时, 由于本文引用了一些较新的国内实测排放因子, 使得排放因子的计算误差也就相对较小.

4 结论

本文根据政府部门公布的国民经济统计数据、燃料消耗数据、环境统计数据等, 结合部分特有排放因子的实验数据, 计算了中国大陆 2007 年高时空分辨率的关键颗粒物及污染气体的排放源清单. 计算结果通过 GIS 系统分配到 0.5°×0.5°的网格中. 计算的总排放量分别是: $PM_{2.5}$ 1321.2 万吨, BC 139.9 万吨, OC 294.6 万吨, SO_2 3158.4 万吨, NO_x 2324.8 万吨, NH_3 1601.7.0 万吨, CO 16485.6 万吨, VOCs 3546.4 万吨. 工业源和居民生活源对 $PM_{2.5}$, BC, OC, CO 的排放量贡献较大, 而源于燃煤发电的排放则对 SO_2, NO*x* 的贡献较大; NH_3 主要产生于家禽(畜)、人的废物处置过程、包括使用化肥而排放的农业过程等; VOCs 则主要是源于秸秆焚烧、工业生活垃圾焚烧等废物处置过程、油漆、印刷过程中溶剂的使用等. 排放强度较高的地区由东北至华东沿中国的主要农业产区和工业发达地区呈镰状分布, 而面积广大的西部地区及内蒙古则因为地广人稀、工业不发达的缘故, 排放强度较低.

本文计算的排放清单除 NH_3, VOCs 外和其他作者的结果基本相当, 但在不同污染物分类别的排放量上则不尽相同. 颗粒物和污染气体的排放具有较强的季节性, 主要是由于自然因素及居民采暖、农业秸秆的露天焚烧的季节性、化肥施用的时间等因素所致. 本文对清单估算的不确定性比以往的清单要小.

参考文献

1 张小曳. 中国大气气溶胶及其气候效应的研究. 地球科学进展, 2007, 22: 12–16
2 Huebert B J, Bates T, Russell P B, et al. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts. J Geophys Res, 2003, 108: 8633
3 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: 8809
4 Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. Nature, 2001, 409: 695–697
5 Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. J Geophys Res, 2002, 107: 4410
6 Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. Science, 2002, 297: 2250–2253
7 任仁. 中国酸雨的过去、现在和将来. 北京工业大学学报, 1997, 23: 128–132
8 Wang T J, Jin L S, Li Z K, et al. A modeling study on acid rain and recommended emission control strategies in China. Atmos Environ, 2000, 34: 4467–4477
9 Terada H, Ueda H, Wang Z. Trend of acid rain and neutralization by yellow sand in east Asia—A numerical study. Atmos Environ, 2002, 36: 503–509
10 张远航, 邵可声, 唐孝炎. 中国城市光化学烟雾污染研究. 北京大学学报, 1998, 34: 392–400
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. 自然科学进展, 2006, 16: 223–231
12 Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. Atmos Chem Phys Discuss, 2009, 9: 4081–4139
13 孙庆贺, 陆永琪, 傅立新, 等. 我国氮氧化物排放因子的修正和排放量计算: 2000 年. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5: 90–94
14 杨宏伟, 胡秀莲. 建立中国二氧化硫排放清单体系的方法学研究. 能源环境保护, 2004, 18: 10–15
15 王丽涛, 张强, 郝吉明. 中国大陆 CO 人为源排放清单. 环境科学学报, 2005, 25: 1580–1585
16 王文兴, 王玮, 张婉华. 我国 SO_2 和 NO_x 排放强度地理分布和历史趋势. 中国环境科学, 1996, 16: 161–166
17 Kato N, Akimoto H. Anthropogenic emission of SO_2 and NO_x in Asia: Emission inventories. Atmos Environ, 1992, 26: 2997–3017

18 孙庆瑞, 王美蓉. 我国氨的排放量和时空分布. 大气科学, 1997, 21: 590–598
19 王文兴, 卢筱凤, 庞燕波, 等. 中国氨的排放强度地理分布. 环境科学学报, 1997, 17: 2–7
20 Klimont Z, Streets D G, Gupta S, et al. Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China. Atmos Environ, 2002, 36: 1309–1322
21 Bouwman A F, Lee D S, Asman W A H, et al. A global high resolution emission inventory for ammonia. Glob Biogeochem Cycle, 1997, 11: 561–587
22 Aardenne J A, Carmichael G R, Levy H. Anthropogenic NO_x emissionsin Asian in the period 1990–2020. Atmos Environ, 1999, 33: 633–646
23 Streets D G, Bond T C, Lee T, et al. On the future of carbonaceous aerosol emissions. J Geophys Res, 2004, 109: D24212
24 Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO_2, NO_x and CO. Atmos Environ, 2000, 34: 363–374
25 Tonooka Y, Kannari A, Higashino H, et al. NMVOCs and CO emission inventory in East Asia. Water Air Soil Pollut, 2001, 130: 199–204
26 Streets D G, Gupta S, Waldho S T, et al. Black carbon emissions in China. Atmos Environ, 2001, 35: 4281–4296
27 Streets D G, Tsai N Y, Akimoto H, et al. Sulfur dioxide emissions in Asia in the period 1985–1997. Atmos Environ, 2000, 34: 4413–4424
28 Ohara T A H K. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020. Atmos Chem Phys, 2007, 7: 4419–4444
29 Tan Q, Chameides W L, Streets D, et al. An evaluation of TRACE-P emission inventories from China using a regional model and chemical measurements. J Geophys Res, 2004, 109: D22305
30 白乃彬. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响(一). 北京: 气象出版社, 1996. 145–150
31 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪. 中国氮氧化物排放清单及分布特征. 中国环境科学, 2001, 21: 493–497
32 Zhao D, Wang A. Estimation of anthropogenic ammonia emissions in Asia. Atmos Environ, 1994, 28: 689–694
33 Wang X P, Mauzerall D L, Hu Y T, et al. A high-resolution emission inventory for eastern China in 2000 and three scenarios for 2020. Atmos Environ, 2005, 39: 5917–5933
34 Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China. Atmos Environ, 2006, 40: 6516–6527
35 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
36 中国电力年鉴编辑委员会. 中国电力年鉴 2008. 北京: 中国电力出版社, 2008
37 Cooke W F, Liousse C, Cachier H, et al. Construction of a 1°×1° fossil fuel emission data set for carbonaceous aerosol and implementation and radiative impact in the ECHAM4 model. J Geophys Res, 1999, 104: 22137
38 Reddy M S, Venkataraman C. Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India: I-Fossil fuel combustion. Atmos Environ, 2002, 36: 677–697
39 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
40 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: 3683–3699
41 Andreae M O, Merlet P. Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning. Glob Biogeochem Cycle, 2001, 15: 955–966
42 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. Atmos Environ, 2000, 34: 4537–4549
43 朱松丽. 发展中国家农村民用炉灶的温室气体和污染物排放因子研究. 研究与试验, 2004, 2: 16–19
44 杜青, 杨延相, 郑伟, 等. 机动车实际道路排放特性及若干影响因素的研究. 内燃机学报, 2002, 20: 297–302
45 李伟, 傅立新, 郝吉明, 等. 中国道路机动车 10 种污染物的排放量. 城市环境与城市生态, 2003, 16: 36–38
46 沈旻嘉, 郝吉明, 王丽涛. 中国加油站 VOC 排放污染现状及控制. 环境科学, 2006, 27: 1473–1478
47 Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, et al. Investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residues burning. J Environ Sci, 2008, 20: 501–555
48 王英. 北京地区机动车排放颗粒物的污染特征研究. 博士毕业论文. 长春: 吉林大学, 2002
49 Chen Y J, Shen G Y, Bi X H, et al. Emission factors of carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China. Environ Sci Tech, 2005, 39: 1861–1867
50 罗陨飞, 李文华, 姜英, 等. 中国煤中硫的分布特征研究. 煤炭转化, 2005, 28: 14–18
51 Arndt R L, Carmichael G R, Streets D G, et al. Sulfur dioxide emissions and sectorial contributions to sulfur deposition in Asia. Atmos Environ, 1997, 31: 1553–1572
52 国家统计局. 中国统计年鉴 2008. 北京: 中国统计出版社, 2008
53 中国农村能源年鉴编辑委员会. 中国农村能源年鉴 2000–2008. 北京: 中国农业出版社, 2008

54 曹国良, 张小曳, 郑方成, 等. 我国大陆秸秆露天焚烧的量的估算. 资源科学, 2006, 28: 9–13
55 国家林业局. 中国林业统计年鉴 2008. 北京: 中国林业出版社, 2008
56 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴 2008. 北京: 中国农业出版社, 2008
57 田晓瑞, 舒立副, 王明玉. 1991~2000 年中国森林火灾直接释放碳量估算. 火灾科学, 2003, 12: 6–10
58 Shea R, Shea B, Kauffman J, et al. Fuel biomass and combustion factors associated with fires in savanna ecosystems of South Africa and Zambia. J Geophys Res, 1996, 101: 23551–23568
59 Wei W, Wang S, Chatani S, et al. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China. Atmos Environ, 2008, 42: 4976–4988
60 Klimont Z, Cofala J, Xing J, et al. Projections of SO_2, NO_x and carbonaceous aerosols emissions in Asia. Tellus B, 2009, 61: 602–617
61 Lu Z, Streets D G, Zhang Q, et al. Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000. Atmos Chem Phys Discuss, 2010, 10: 8657–8715
62 Zhang X Y, Wang Y Q, Zhang X C, et al. Carbonaceous aerosol composition over various regions of China during 2006. J Geophys Res, 2008, 113: D14111
63 Lin W L, Xu X B, Ge B, et al. Characteristics of gaseous pollutants at Gucheng, a rural site southwest of Beijing. J Geophys Res, 2009, 114: D00G14
64 IPCC. Quantifying Uncertainties in Practice, Chapter 6. In: Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Bracknell: IES, IPCC, OECD, 1997
65 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究. 环境科学研究, 2007, 20: 15–20