北京市碳黑气溶胶排放清单估算及预测

刘源 邵敏*

(环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京大学环境学院, 北京 100871. * 联系人, E-mail: mshao@pku.edu.cn)

摘要 碳黑气溶胶是含碳燃料不完全燃烧的产物, 能够改变大气辐射性质, 并能危害人体健康. 北京是以煤炭为主要能源的特大城市, 目前正在调整能源结构、减少污染排放以达到绿色奥运的目标. 使用2000年的北京市能源统计数据, 结合碳黑排放因子, 计算北京市的碳黑气溶胶排放清单, 排放总量估算为7.77 Gg. 焦炭、原煤、非商品能源秸秆是北京碳黑排放清单中最重要的排放源. 根据北京奥运能源规划, 预计2008年北京排放碳黑气溶胶2.97 Gg(不包括非商品能源). 如果2008年农村非商品能源的碳黑排放量保持2004年水平不变, 农村非商品能源将是2008年北京碳黑的最大排放源.

关键词 碳黑气溶胶 排放清单 北京

碳黑气溶胶是含碳燃料不完全燃烧的产物^[1], 是大气颗粒物的重要组分. 作为颗粒物中主要的吸光性物质^[2], 碳黑在大气中的存在能够改变大气辐射性质^[3], 影响区域太阳辐射, 甚至引起地区性降水变化^[4]. 同时, 碳黑颗粒物比表面很大, 能够吸附大量的有毒有害物质, 通过呼吸系统进入人体, 危害人体健康^[5].

据报道, 中国碳黑排放量初步估计为全球碳黑排放总量的1/4, 占世界第一位, 源于煤炭的碳黑排放占了中国碳黑排放总量的60%^[6,7]. 北京作为中国的首都, 煤炭在城市能源结构中占据重要地位, 以2000年为例, 煤炭占全市一次能源消费的58.8%^[8]. 一般认为, 大气颗粒物的吸光性, 主要是由碳黑颗粒物引起的^[2]. 1999年7月, Bergin等人^[9]研究北京颗粒物性质时, 发现北京颗粒物的吸光系数是同期亚特兰大的6倍多, 碳黑环境浓度严重影响了城市能见度. 作为2008年奥运会举办地, 为了成功举办绿色奥运, 北京已经开始调整煤炭为主的能源结构, 相应的碳黑污染源排放量的变化趋势值得关注.

排放清单是研究污染物来源最直观的方法, 有利于寻找污染源中最主要的组成部分, 并识别污染排放控制的重点. 排放清单常采用各类能源消耗量, 与相应的污染物排放因子(单位质量能源消耗伴随的污染物的生成量)乘积的加和得到^[6]:

$$Q_{BC} = \sum Q_{ij} EF_{ij} \quad (1)$$

其中 Q_{BC} 为碳黑气溶胶排放总量; Q_{ij} 为第 i 种能源在

第 j 项利用途径中的消耗量; EF_{ij} 为第 i 种能源在第 j 项利用途径中的碳黑排放因子.

国内外关于北京碳黑源清单的工作较少, Streets等人^[6,10]的工作中曾有涉及. Streets等人^[6]利用中国国家发展和改革委员会能源研究所为RAINS-Asia V8.0版本模型提供的1995年的全国省级能源统计数据, 综合从文献中获得的碳黑排放因子, 估算了1995年中国碳黑排放情况, 其中北京排放碳黑的最佳估计为27.9 Gg(最大值可高于该值的8倍). 随后Streets等人^[10]以Sinton等人^[11]的中国能源研究估计结果, 采用第一次工作所建立的碳黑排放因子库, 获得2000年的碳黑排放清单, 估算北京的碳黑排放量9.4 Gg(表1).

两次统算工作中排放因子并没有大的调整^[10], 但是两次清单工作排放总量相差3倍, 尤其是民用煤炭的碳黑排放量相差高达10倍. 统算差距主要来自于能源使用量和技术水平参数取值, Streets等人^[10]认为这是中国能源效率提高造成的. 影响排放清单最终结果的因素, 包括能源统计数据和对应的排放因子. 我们认为由于两次工作中使用的能源清单来源不一样, 尤其2000年能源清单更是预测结果, 这些

表1 Streets等估算北京碳黑排放量(单位: Gg)

年份	焦炭	民用 煤炭	民用 生物质	油类 燃料	野外 燃烧	其他	总量
1995 ^[6]		20.5	1.8		0.6	5.0	27.9
2000 ^[10]	3.1	1.7	1.6	1.0	0.2	1.8	9.4

可能会造成估算结果的不确定性偏大。

本项研究在评估和选择适宜北京市的碳黑排放因子的基础上,通过深入的北京市能源使用状况调查,建立以 2000 年为基准年的北京市碳黑排放源清单,研究北京碳黑的排放源组成,同时结合北京奥运能源规划对 2008 年北京碳黑排放量的变化趋势进行预测和分析,为相关大气污染控制对策提供科学依据。

1 北京能源现况与奥运能源规划

碳黑是含碳燃料不完全燃烧产生的,化石燃料和生物质燃料是能源现状研究重点。统算工作包含以下能源类型:

- 1) 煤炭类能源: 原煤、洗精煤、其他洗煤、型煤、焦炭、其他焦化产品;
- 2) 石油类能源: 原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气、其他石油制品;
- 3) 气体类能源: 焦炉煤气、其他煤气、炼厂干气、天然气;
- 4) 生物质能源: 秸秆、薪材、沼气。

根据 2000 年北京市能源平衡表以及农村非商品能源数据^[8],获得北京能源使用现况信息。能源使用分为能源转化和终端应用两方面,碳能源转化部分,2000 年生产焦炭 400 t,冶炼原油 6944 kt。终端能源使用中,原煤和焦炭在北京能源中占据主要地位,分别占终端能源的 53%和 16%。煤油主要是应用于航空运输^[12]。从行业分类上看,工业用能在北京市为用能首位,占终端用能的 42%(图 1)。

能源统计年鉴显示,煤炭生活消费以原煤为主,

图 1 2000 年北京能源终端利用情况

型煤只占生活消费 10%。但从北京煤炭节约办公室的资料显示,生活消费方面到 1990 年底,北京民用蜂窝煤化率城区已达 88%,远郊县城 85%以上,1995 年农村能源综合建设县的蜂窝煤化率达到 80%^[13]。我们认为北京地区 1995 年以后城镇生活消费中煤炭的 90%是蜂窝煤消费,乡村生活消费 80%是蜂窝煤消费,余下的部分以散煤燃烧。对于散煤燃烧按烟煤、无烟煤各一半的比例进行估算。

秸秆野外焚烧,根据国家农业技术推广服务中心的 2000 年度土壤肥料专业统计数据^[14],全国秸秆资源总量中燃料部分占 23.7%,露天焚烧量为 6.6%,假设北京露天焚烧量为全国平均水平,按照比例,根据北京非商品能源中的秸秆为 1828 kt^[8],我们认为北京野外焚烧秸秆量为 509 kt。天然源排放如森林火灾、草原火灾等没有纳入统计。

2008 年的能源状况的预测来源于《北京奥运行动规划能源建设和结构调整专项规划(征求意见稿)》¹⁾。规划中以 2000 年能源结构为基础,进行能源结构调整,减少煤炭类燃料的使用比例,采用天然气、地热、电能等燃料替代煤炭,减少污染排放。

2 排放因子

碳黑是不完全燃烧的产物。燃烧条件对于碳黑排放量有很大影响,尤其是低技术燃烧,燃烧参数的改变,会造成排放因子的很大差异^[7]。

碳黑的污染源排放因子直接测量较少,通常是利用排放源的颗粒物排放因子与颗粒物中碳黑的含量估算出碳黑排放因子。Streets 等人^[6,10]总结了大量的实验研究数据,间接计算碳黑排放因子。Bond 等人^[7]分析了各类污染源碳黑排放因子的不确定性。Reddy 等人^[15,16]在估计印度的化石燃料和生物质燃料的碳黑排放时,利用部分文献测量结果。颗粒物排放因子和颗粒物中碳黑含量可能来自不同的实验,与直接测量的碳黑排放因子相比,通过颗粒物及碳黑含量获得的排放因子不确定性很大^[17]。

排放因子的确定涉及行业技术水平的相关指标,如燃烧器燃烧效率,除尘装置的减排效率等。由于现阶段我国各类燃烧源的碳黑排放因子的直接测量较少,为了提高排放因子的代表性,在确定排放因子的取值上,分两种情况:

- 1) 国内没有相关行业的排放因子实测结果,在

1) <http://en.beijing2008.com/61/80/column211718061.shtml>

Streets等人^[6]和Bond等人^[7]总结的碳黑排放因子的基础上,分析北京各行业能源利用的技术水平,估计相应的碳黑排放因子;

2) 如果国内有碳黑排放因子直接测定的结果,采用国内测量的排放因子.

2.1 煤炭类燃料

() 炼焦. 是否安装污染控制设施是焦炭生产使用过程中碳黑排放的主要影响因素. 炼焦可分无控制的土法炼焦,和能够进行污染控制的机械化炼焦. 国内焦炭生产现状技术为相对落后的土焦和现代化机焦共存. Streets等人^[6]对中国焦炭的生产和使用过程中的碳黑排放因子取值为 0.60 g/kg,同时估计了高排放情况下排放因子为 1.6 g/kg. Bond等人^[7]对焦炭生产过程中燃料部分煤炭的排放因子取值为 0.97 g/kg(有控制措施), 4.8 g/kg(无控制措施),在工业生产中焦炭排放因子为 0.0125 g/kg.

北京的焦炭生产主要为北京焦化厂,属于大型机械化炼焦,技术水平与国际平均水平基本相当,因此其排放因子取值为 0.60 g/kg.

() 火力发电. 燃烧器种类和烟尘减排装置都会影响最终的碳黑排放因子. 由于没有找到北京火力发电锅炉分类和减排设备的数据,本文使用Streets等人^[6]从RAINS Asian软件中获得的 1995 年中国火力发电的信息估计得到的分类状况. 煤炭发电碳黑排放因子采用按使用比例综合后的排放因子 0.00285 g/kg(表 2).

表 2 火力发电行业碳黑排放因子^[6](单位: g · kg⁻¹)

燃烧状况	除尘状况	使用比例	最终排放因子	行业排放因子
粉煤	布袋除尘	0	0.0002	0.00285
粉煤	电除尘	0.5	0.0001	
粉煤	洗刷除尘	0.35	0.0008	
粉煤	旋风除尘	0.1	0.0002	
块煤	洗刷除尘	0.02	0.077	
块煤	旋风除尘	0.03	0.032	

() 供热, 工业. 供热和工业的煤炭燃烧技术和排烟除尘水平较电力差,这一部分的碳黑排放缺乏国内实测数据,使用Streets等人^[6]采用的工业排放因子,根据燃料类别和除尘状况按比例综合取值 0.0662 g/kg(表 3).

() 生活消费. 煤炭生活消费中,煤炭种类是碳黑排放因子的主要决定因素^[18],烟煤、无烟煤和型煤间的碳黑排放因子相差很大.

表 3 供热和工业碳黑排放因子^[6](单位: g · kg⁻¹)

燃烧状况	除尘状况	使用比例	最终排放因子	行业排放因子
粉煤	电除尘	0	0.0001	0.066
粉煤	洗刷除尘	0.15	0.0008	
块煤	洗刷除尘	0.25	0.13	
块煤	旋风除尘	0.55	0.032	
块煤	无控制	0.05	0.32	

Chen等人^[17]实测了不同成熟度的煤炭制作蜂窝煤后的排放因子,烟煤蜂窝煤排放因子为 0.283 g/kg,无烟煤蜂窝煤为 0.004 g/kg. Streets等人^[6]给出烟煤散煤排放因子 3.7 g/kg,无烟煤散煤排放因子 0.12 g/kg.

根据调研得到的民用煤炭使用状况比例,城镇生活消费中煤炭的 90%是蜂窝煤消费,乡村 80%是蜂窝煤消费,余下的部分按烟煤、无烟煤各一半的比例估算. 城镇煤炭生活消费的排放因子为 0.32 g/kg,乡村煤炭生活消费为 0.497g/kg.

其他行业在煤炭终端能源使用的排放因子类比于煤炭工业类应用.

2.2 石油类燃料

() 火力发电, 供热, 工业. 工业用油类燃料的排放因子的结果差异很大. Streets等人^[6]对重油燃烧过程中的碳黑排放因子取值,由于没有考虑污染控制的因素而高达 0.36 g/kg; Reddy等人^[15]得出工业应用燃料油的排放因子仅为 0.01 g/kg; Bond等人^[7]引用美国环保署(USEPA)认证的重油综合排放因子取值为 0.0396 g/kg. 在能源使用统计中,重油和燃料油的区分并不严格. 北京市对工业锅炉排放控制严格,所以认为Streets等人^[6]的排放因子取值过高. 因此,根据美国同期的平均水平,采用 0.0396 g/kg^[7]. 原油使用的排放因子类比重油.

() 生活消费. 为便于估算,生活消费部分的汽油和柴油主要考虑为机动车使用. 由于技术水平的差异,机动车的颗粒物污染排放差别很大^[19],北京市机动车也存在这种情况^[20]. 从现有机动车排放标准,以及在珠江三角洲的测量结果^[21],北京市机动车排放的控制技术水平与美国大约有 10 a左右的差距,因此采用Street等人^[6]的估计,即汽油车和柴油车的碳黑排放因子分别取值 0.08 和 1.1 g/kg,可能会在一定程度上低估北京市来自机动车的碳黑排放因子.

2.3 气体类燃料

气体类燃料由于燃烧完全,其碳黑排放量很小,在一些排放清单中没有计算^[6]. 在排放量计算中,由

于现有排放因子都是以燃料质量为基础, 需要涉及能源统计的体积单位到质量单位的换算, 为了不低估这一部分的排放量, 研究中假设气体类燃料的气体分子量为 50 g/mol, 其排放因子取值 0.0001 g/kg^[7].

2.4 生物质燃料

生物质燃料包括统计的农村非商品能源秸秆、薪材、沼气等. 沼气和天然气性质类似, 按气体类燃料计算. 目前研究工作对生物质燃烧的碳黑排放因子的结果相对一致, Bond等人^[7]对此进行了归纳, 非商品能源的秸秆利用取值 1g/kg, 秸秆野外烧荒碳黑排放因子取值 0.69 g/kg, 薪材取值 0.75 g/kg (0.3~1.4 g/kg平均). Streets等人^[6]对于生物质燃料的燃烧碳黑排放因子平均 1 g/kg.

通过上述的分析, 将本研究使用的各类燃烧源的碳黑排放因子综合列于表 4 中.

3 结果与讨论

3.1 2000 年北京碳黑排放状况

利用本工作调查得到的北京市能源利用基础资料 and 表 4 中所列的各类燃烧源碳黑排放因子, 根据式 (1), 计算了北京 2000 年碳黑排放量. 结果显示 2000 年北京市碳黑排放总量为 7.77 Gg, 其中焦炭生产和

使用过程中排放碳黑 2.59 Gg, 占碳黑排放总量的 33%, 居首位. 秸秆排放碳黑量为 2.18 Gg, 占总量 28%, 包括生活消费和野外烧荒排放. 原煤排放碳黑 1.87 Gg, 占总量 24%. 焦炭、秸秆、原煤三者排放总和已经超过排放总量的 80%; 再加上柴油和薪材, 五种能源的排放总和占碳黑排放总量的 95%.

从行业分析, 生活消费中的碳黑排放量为 3.45 Gg, 占排放总量的 44%(其中乡村生活消费排放 38%, 城镇生活消费排放 6%). 工业排放碳黑 3.07 Gg, 占排放总量 39%. 生活消费和工业排放加上交通运输, 三者排放量超过排放总量的 85%(图 2).

与Streets等人^[10]估算的 2000 年北京碳黑排放清单

图 2 2000 年北京碳黑排放量

表 4 各类排放源的碳黑排放因子汇总^{a)}

排放因子	火力发电	供热	农、林、牧、渔业	工业	建筑业	交通运输	第三产业	城镇生活消费	乡村生活消费
原煤	0.0029	0.0662	0.0662	0.0662	0.0662	0.0662	0.0662	0.3200	0.4970
洗精煤				0.0662					
其他洗煤	0.0029	0.0662		0.0662					
焦炭				0.60	0.60	0.60			
其他焦化产品				0.60					
原油	0.0396	0.0396		0.0396					
汽油			0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
煤油				0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
柴油	0.026	0.026	1.1	0.026	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
燃料油	0.0396	0.0396	0.0396	0.0396	0.0396	0.0396			
液化石油气		0.067		0.067	0.067	0.067	0.067	0.067	0.067
其他石油制品				0.0396	0.0396				
炼厂干气	0.0001	0.0001		0.0001					
天然气			0.0001		0.0001		0.0001	0.0001	0.0001
焦炉煤气	0.0001	0.0001		0.0001		0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
其他煤气	0.0001			0.0001				0.0001	0.0001
秸秆									1
薪材									0.75
沼气									0.0001

a) 没有标注排放因子的栏目为统计年鉴中没有能源应用, 单位为 g/kg^[1360/csb2007-52-4-470]

比较(图3), 本工作估算的排放总量低 1.6 Gg, 其中焦炭行业造成碳黑排放相差-0.5 Gg, 由于排放因子取值相同, 故认为主要是能源基础数据的差异导致; 民用煤炭排放量相差-0.5 Gg, 由于烟煤和无烟煤及蜂窝煤排放因子相差很大, 这里的差距和民用煤炭能源应用的详细分类有关。还有-1.1 Gg 的碳黑排放差异, 由于能源分类差异很难找到准确的原因。

图3 本研究与Street等人^[10]对北京市2000年的碳黑排放估算结果比较

结合能源统计资料^[8,22,23], 使用相同的清单统计方法, 获得2000~2004年北京碳黑排放量(图4)。由于没有考虑具体的能源利用技术的进步, 可能引入部分误差。2004年的碳黑排放量为7.03 Gg, 由于焦炭和秸秆的能源用量减少, 碳黑排放分别减少0.74 Gg, 0.54 Gg。柴油部分的排放量由于能源使用量不断增加, 排放量从2000年的0.58 Gg增加到0.90 Gg。

图4 2000~2004北京市碳黑排放量

3.2 2000年最大可能排放量分析

碳黑排放源清单估算的误差来源于排放因子和能源利用统计两方面。很多文献只是计算由于排放因子造成的不确定性, 但是中国能源统计的不确定

性同样值得关注。基于以上观点, 本研究对占2000年北京碳黑排放量80%的焦炭、生物质和煤炭等三个最大的排放源估算了最大可能排放量。

焦炭的生产和使用均产生碳黑排放。2000年北京消耗焦炭4450 kt, 其中4020 kt为北京本地生产, 余下430 kt依靠外省运入。由于焦炭的排放因子使用了Streets等人^[6]采用的排放因子, 合并计算焦炭在生产过程和使用过程的排放, 对于外省运入的焦炭在生产过程中的排放是统算在北京的清单源清单里面的, 这里会部分高估焦炭的排放量。参考前文对焦炭的排放因子分析, 如果采用Streets等人^[6]估计的最高排放因子1.6 g/kg, 那么焦炭排放最大可能排放6.9 Gg。

非商品能源秸秆的碳黑排放估算时, 生物质燃烧的排放因子取值为1 g/kg, 在一些文献中, 这一值的最高可达10 g/kg^[6], 如果使用这样的排放因子, 生物质燃烧的排放量将达到18.3 Gg。同时这一部分能源的使用量误差较大, 而且非能源利用部分如野外焚烧等没有纳入国家统计的范畴, 而大量文献对于秸秆野外焚烧比例的估算差异很大^[6,24-26], 因此生物质燃料对碳黑排放的贡献可能还要大, 是碳黑源清单中不确定性最大的因素之一。

原煤的生活消费由于使用形式多样, 导致排放因子变化范围很大。以烟煤为例, 如果以散煤的方式燃烧, 其排放因子取值为3.7 g/kg^[6], 如果型煤燃烧(蜂窝煤), 排放因子为0.283 g/kg^[17]。无烟煤的散烧和型煤燃烧排放因子分别是0.12^[6]和0.004 g/kg^[17]。由于煤种和燃烧方式的不同造成的排放因子的差异大于10倍。由于缺乏有关2003年北京民用煤炭燃烧方式的资料, 在燃烧方式分类时使用的是1994年的统计数据。为了更准确的统计清单, 民用煤炭能源的使用途径必须细化。如果按照能源清单中原煤和型煤的比例, 同时原煤按照全部都是烟煤散烧, 排放因子为3.7 g/kg, 那么排放量可达10.7 Gg。这仅仅是由于能源利用资料造成的不确定性, 如果取Streets等人^[10]认为民用排放因子最高估计在20 g/kg, 那么排放量最高可达57.7 Gg, 与本项工作中的原煤生活消费排放估计1.2 Gg相差约50倍。

三类碳黑的主要排放源, 最大可能排放量为82.9 Gg, 不确定范围有77.2 Gg。要减少源排放清单的估算不确定性, 需要获取更详细的这三类排放源的能源利用数据, 以及北京地区实测的排放因子。

3.3 2008 年碳黑排放预测

根据奥运能源规划,北京终端煤炭用量从 2000 年的 12780 kt 削减到 2008 年的 4000 kt; 炼焦制气用煤将从 2000 年的 5500 kt, 下降到 2008 年 1300 kt. 增加 1150 kt 液化石油气和轻柴油用于替代 2920 kt 终端煤炭消费. 如果不考虑能源利用水平及污染控制措施的提高, 使用不变的排放因子, 逐项分析能源结构改变对碳黑排放的影响(表 5).

2008 年北京碳黑排放为 2.97 Gg(不包括农村非商品能源的排放与秸秆野外烧荒). 与 2000 年碳黑排放量比较(图 5), 焦炭产业碳黑量排放下降 1.99 Gg, 原煤使用碳黑排放下降 0.83 Gg, 但是柴油排放量增加 0.50 Gg. 需要指出, 能源规划中没有对增加柴油的用途以及具体用量进行说明, 研究中按照 2000 年的液化石油气和柴油在各行业使用情况的相对比例进行计算, 结果可能会和详细的规划有一定的差距; 对于轻柴油的排放因子是按照普通柴油等同对待, 实际排放因子可能会有差异. 关于北京市柴油使用及相应的碳黑排放变化需要更深入的研究.

由于能源规划中没有提及农村非商品能源, 在对 2008 年碳黑排放量估算中没有纳入这一部分的碳黑排放. 2000~2004 年, 非商品化能源(秸秆、薪材)碳黑排放量从 2.13 Gg 下降到 1.71 Gg. 如果维持 2004 年的排放量, 2008 年非商品能源将成为碳黑污染最大的排放源. 若野外秸秆焚烧比例按照 1999 年考虑, 2008 年秸秆焚烧向大气中贡献碳黑约 0.26 Gg, 这样农村非商品能源和野外焚烧造成的碳黑排放总量和 1.97 Gg, 占 2008 年碳黑排放量的 40%. 生物质是十分重要的碳黑排放源, 是非常值得关注的关键源类.

图 5 2008 年碳黑排放量与 2000 年比较
不包括生物质燃料

4 结论

2000 年北京碳黑排放量为 7.77 Gg. 从能源种类分析, 焦炭、原煤、秸秆、柴油、薪材, 五种能源的排放总和占排放总量的 95%. 从行业分析, 工业、乡村生活消费、城镇生活消费、交通运输等四个行业的排放总和, 超过排放总量的 85%. 考虑碳黑排放量最大的三项能源的排放因子以及能源使用统计数据的不确定性, 北京市 2000 年最大碳黑排放可能高达 85.0 Gg, 合计不确定范围为 77.2 Gg.

2008 年北京经过能源结构调整, 降低煤炭在能源结构中的比重, 有效控制了碳黑的排放, 不考虑包括非商品能源和野外烧荒, 届时北京市的碳黑预测排放量为 2.97 Gg. 2000 年碳黑排放清单中, 农村非商品能源所排放的碳黑超过总量 20%. 经过北京能源结构调整, 源于焦炭和煤炭的碳黑排放得到削减后, 如果非商品能源以及秸秆野外烧荒的碳黑排放保持在 2004 年水平, 这一部分将在碳黑排放总量中贡献率达 40%. 如果不加以控制, 这一排放将占据 2008 年碳黑排放总量的首位.

表 5 能源结构改变对北京市 2008 年碳黑排放的影响

能源改变	变化量	碳黑排放量变化/Gg
发电用煤	7090 kt 下降到 6100 kt	-0.00
热力用煤	1710 kt 增加到 2400 kt	+0.05
炼焦制气	5500 kt 下降到 1300 kt	-1.99
天然气替煤	500 kt 炊事用煤采暖和工业用煤 5600 kt	-0.16
电替煤	采暖用煤量 1320 kt	-0.37
地热及水源热泵采暖替煤	采暖用煤量 340 kt	-0.42
液化石油气和轻柴油	1150 kt 替煤量 2920 kt	-0.11
合计		+0.31
		-2.70

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2007-52-4-470>

致谢 感谢付琳琳在工作初期基础资料收集时提供的帮助.

参 考 文 献

- 1 Kuhlbusch T. Black carbon and the carbon cycle. *Science*, 1998, 280: 1903—1904[DOI]
- 2 Horvath H. Atmospheric light absorption—a review. *Atmos Environ*, 1993, 27(3): 293—317
- 3 IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 4 Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297: 2250—2252[DOI]
- 5 Lighty J S, Veranth J M, Sarofim A F. Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health. *J Air Waste Manage Assoc*, 2000, 50(9): 1565—1618
- 6 Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. Black carbon emissions in China. *Atmos Environ*, 2001, 35: 4281—4296[DOI]
- 7 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-Atmos*, 2004, 109, D14203, doi: 10.1029/2003JD003697[DOI]
- 8 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. *中国能源统计年鉴 2000-2002*. 北京: 中国统计出版社, 2004
- 9 Bergin M H, Cass G R, Xu J, et al. Aerosol radiative, physical, and chemical properties in Beijing during June 1999. *J Geophys Res-Atmos*, 2001, 106(D16): 17969—17980[DOI]
- 10 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-Atmos*, 2003, 108(D21): 8809[DOI]
- 11 Sinton J E, Fridley D G. What goes up: recent trends in China's energy consumption. *Energy Policy*, 2000, 28(10): 671—687[DOI]
- 12 中国民用航空总局计划司. *从统计看民航 2001*. 北京: 中国民航出版社, 2001
- 13 北京市煤炭节约办公室. 全市民用煤蜂窝煤建设取得巨大进展. *北京节能*, 1994, (5): 30
- 14 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析. *华中农业大学学报*, 2002, 21(3): 242—247
- 15 Reddy M S, Venkataraman C. Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India: I-Fossil fuel combustion. *Atmos Environ*, 2002, 36(4): 677—697[DOI]
- 16 Reddy M S, Venkataraman C. Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II-Biomass combustion. *Atmos Environ* 2002, 36(4): 699—712[DOI]
- 17 Chen Y, Sheng G, Bi X, et al. Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China. *Environ Sci Tech*, 2005, 39: 1861—1867[DOI]
- 18 Bond T C, Covert D S, Kramlich J C, et al. Primary particle emissions from residential coal burning: optical properties and size distributions. *J Geophys Res-Atmos*, 2002, 107(D21): 8347[DOI]
- 19 Cohen J T, Hammitt J K, Levy J I. Fuels for urban transit buses: a cost-effectiveness analysis. *Environ Sci Tech*, 2003, 37(8): 1477—1484[DOI]
- 20 胡京南, 郝吉明, 傅立新. 应用燃气汽车对北京市机动车排放的影响. *清华大学学报(自然科学版)*, 2006, 46(3): 350—354
- 21 付琳琳, 邵敏, 刘源, 等. 机动车 VOCs 排放特征和排放因子的隧道测试研究. *环境科学学报*, 2005, 25(7): 879—885
- 22 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. *中国能源统计年鉴 2003*. 北京: 中国统计出版社, 2004
- 23 国家统计局工业交通统计司, 国家发展和改革委员会能源局. *中国能源统计年鉴 2004*. 北京: 中国统计出版社, 2005
- 24 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. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4): 800—804
- 25 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. *中国环境科学*, 2005, 25(4): 389—393
- 26 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. *资源科学*, 2006, 28(1): 9—13