

黑碳气溶胶排放量测算及空间分布研究

付加锋¹, 齐蒙², 刘倩¹, 王红梅¹

1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2. 河北大学经济学院, 保定 071000

摘要 基于统计学方法计算了中国大陆省域2012年黑碳气溶胶排放清单。研究表明, 2012年中国大陆黑碳排放总量为 188.676×10^4 t, 其中居民生活源排放量为 81.800×10^4 t, 占黑碳排放总量的43.3%, 位居首位。工业在生产和最终消费中排放黑碳 80.914×10^4 t, 占全国排放的42.9%, 工业源和居民生活源排放量占总量的86.2%, 是中国黑碳最主要的排放源。交通运输和生物质燃烧排放量分别为 17.809×10^4 和 6.667×10^4 t, 分别占总量的9.4%和3.5%。火电和供暖行业排放量较小, 仅占到排放总量的0.8%。从能源类型看, 黑碳主要来源于煤炭和生物燃料燃烧, 分别占54%和31.6%。黑碳排放省域空间分布不均匀, 呈东高西低的趋势, 与区域经济发展情况和农村人口密度一致; 从各个地区来看, 山西省在全国黑碳排放量中位居首位, 河北、山东、河南、内蒙古依次位列前5, 这5个省份贡献了全国约37%的排放量。山西省的主要排放源来自工业, 占全省排放的82.4%。山西是煤炭大省, 炼焦行业发达, 煤炭的大量使用造成该省较高的黑碳排放。河北、山东的排放源主要贡献也来自工业, 分别占本省排放量的61.5%和57.5%, 同时居民消费也占有一定比例。河南省农村人口密度较高, 居民生活源黑碳排放占总量的50%, 内蒙古则由工业源和生活源共同贡献, 两者贡献比例各占45%左右。

关键词 黑碳; 排放因子; 空间分布; 排放清单

黑碳气溶胶主要是由富含碳的物质(化石燃料、生物质燃料等)不完全燃烧而产生的, 中国是煤炭和生物质使用较大的国家, 黑碳气溶胶排放造成的大气污染不可忽视。由于黑碳在大气中的停留时间较短, 因此减少黑碳的排放量可在短期内降低大气中黑碳气溶胶的含量, 可更为有效地减缓全球变暖趋势。

中国当前大部分黑碳排放研究大都是国外学者在建立全球排放模式时考虑进去的, 在建立全球或亚洲

的排放清单时所采用的排放因子并不全面或者是存在高度不确定性, 如ohara等^[1]、Junker and Lioussé^[2]分别讨论了1980—2020年和1860—1997年亚洲及全球的黑碳排放, 在计算中国地区时并没有考虑生物质的露天焚烧; Streets等^[3]特别考虑了减少排放的控制装置, 预计中国在1995和2020年黑碳排放量分别为134.2和122.4万t; 曹国良等^[4]采用最新的中国燃料消耗数据, 估计2000年中国黑碳排放为149.9万t; 显然, 这些结果

收稿日期: 2017-11-15; 修回日期: 2017-11-25

作者简介: 付加锋, 研究员, 研究方向为气候变化, 电子信箱: fujiafeng@163.com; 刘倩(通信作者), 研究助理, 研究方向为气候经济, 电子信箱: 1247790562@qq.com

引用格式: 付加锋, 齐蒙, 刘倩, 等. 黑碳气溶胶排放量测算及空间分布研究[J]. 科技导报, 2018, 36(2): 38-46; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.02.004

之间存在较大的差异。最近几年的文献中,黑碳排放研究也有了新的进展,张楠等^[5]结合当年排放数据,并采用更符合中国实情的机动车排放因子模型计算了中国2008年黑碳排放清单;Qin等^[6]采用相同方法估计了中国1980—2009年的黑碳排放。

不断更新的黑碳气溶胶排放清单和空间分布对中国相关碳减排政策的制定和实施,以及在国际谈判中占据主动具有重要意义。本文通过收集整理黑碳排放活动水平数据,筛选并建立符合中国实际情况的排放因子数据库,计算中国大陆2010年黑碳气溶胶排放清单,并根据GDP、人口等基础数据建立县域黑碳空间分布图。

1 研究方法

黑碳气溶胶排放量的计算是通过各地区、各类型排放源的综合估算而得到的。本文将黑碳排放按行业分为工业、火电供暖、居民生活消费、生物质燃烧以及交通运输5种行业源;居民生活消费又细分为化石燃料和生物燃料排放,生物质燃烧分为秸秆露天焚烧和森林草原火灾。

1.1 排放量估计

排放清单的计算是通过排放因子法综合估算而得到,各类型的黑碳排放量的计算方法参照了Qin等^[6-10]的公式。除了生物质燃烧和交通源,其他来源排放量的估算基于有关活动的排放、根据排放因子计算得出,计算式为

$$Q_{m,o} = \sum_i \sum_j EF_{i,j} \cdot C_{i,j,m} \cdot (1 - \eta_{i,j}) \quad (1)$$

式中, $Q_{m,o}$ 为除生物质燃烧和机动车之外的黑碳排放量, 10^4 t; C 为燃料消费, 10^4 t; η 为去除效率,%; EF 为排放因子; i,j,m 分别为燃料种类、分类部门和地区。

机动车的排放估计需要对车型和能源进行分类,并根据排放标准的差异进行计算,计算式为

$$Q_{m,v} = \sum_{i,m,k} (EF_{i,m,k} \cdot VP_{i,m,k} \cdot VMT_i) \quad (2)$$

式中, $Q_{m,v}$ 为全国机动车黑碳排放总量, 10^4 t; VP 为机动车保有量, 10^4 辆; VMT 为行驶里程,km; EF 为排放因子; i,m,k 分别为机动车类型、地区和排放标准。

生物质燃烧的排放量分为秸秆露天焚烧和森林草原火灾排放,结合王书肖等^[11]和陆炳等^[12]的计算方法,计算式为

$$Q_{m,b} = \sum_{m,i} (EF_i \cdot P_{m,i} \cdot N_i \cdot B_m \cdot F) + \sum_{m,j} (EF_j \cdot L_{j,m} \cdot A_{j,m} \cdot \delta_j) \quad (3)$$

式中, $Q_{m,b}$ 为生物质燃烧的黑碳排放总量, 10^4 t; P 为作物产量, 10^4 t; N 为作物的秸秆量与作物产量之比,%; B 为秸秆露天燃烧比例,%; F 为露天秸秆的燃烧效率,%; L 为生物量载量,t/hm²; A 为火场燃烧面积,hm²; δ 为燃烧效率,%; EF 为排放因子; i,j,m 分别代表作物种类、燃料类型和地区。

1.2 排放因子

针对黑碳气溶胶排放因子直接测量研究工作较少,通常是利用排放源的颗粒物排放因子与颗粒物中的黑碳含量估算出黑碳排放因子。国外有关颗粒物和污染气体的排放因子的实测数据较多,但有关中国区域的实验工作目前相对较少。本文引用中国近期的实验成果,在中国数据缺乏或不精准时主要引用国内外已有研究成果。如民用煤炭的燃烧采用陈颖军等^[13]的实测结果,居民生物质燃烧和秸秆露天焚烧选用曹国良^[14]的实测排放因子整理计算得出。工业源、火电供暖行业的排放因子主要参考Streets等^[10]和Bond等^[15]的研究成果,并基于1995年和2020年数据^[13]线性推算得出2012年煤炭燃烧除尘设备的除尘率和使用比例,除尘后的排放因子根据Qin等^[9]的公式进行计算。机动车的排放因子参考蔡皓等^[16]利用COPERTTIV模型确定的中国不同排放标准下机动车颗粒物的排放因子,结合Qin等^[6]的研究得到各车型不同排放准下的排放因子。各种行业源的排放因子见表1。

2 活动数据

2.1 化石燃料

化石燃料消费数据取自《中国能源统计年鉴》^[24]。煤炭是最主要的能源消耗,2012年煤炭占全国能源消费总量的67%,石油占全国能源消费总量的18.8%,天然气仅占到消费总量的5.2%。工业、火电、供暖行业的主要能源消费为煤炭,分别为 16.03×10^8 t、 17.85×10^8 t和 2.03×10^8 t。居民生活消费分为城镇居民消费和农村居民消费,主要消耗的化石燃料也是煤炭;城镇居民和农村居民生活消费燃煤量分别为 0.15×10^8 和 0.76×10^8 t。在估计民用煤的消费结构时,采用陈颖军等^[13]的估计,取用烟煤比例为80%。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,刘源等^[25]研究发现土法炼焦排放因子远高于机械炼焦。

表1 排放因子汇总

Table 1 A summary of emission factors

排放源	燃料类型	相关排放因子	本文排放因子
工业源/(g·kg ⁻¹)	原煤	0.32 ^[10]	0.043 ^{a)}
	型煤	0.003 ^[10]	0.0004 ^{a)}
	石油类	0.00012~0.117 ^[15]	0.00012~0.117
	气体类	0.00012 ^[15]	0.00012
	焦炭	0.03136 ^[15]	0.03136
	土法炼焦	3.8 ^[23] 4.8 ^[15]	3.8
	机械炼焦	0.97 ^[15]	0.97
火电 ^{b)} /(g·kg ⁻¹)	原煤	0.32 ^[10]	0.016 ^{a)}
	型煤	0.003 ^[10]	0.00015 ^{a)}
供暖 ^{b)} /(g·kg ⁻¹)	原煤	0.32 ^[10]	0.043 ^{a)}
	型煤	0.003 ^[10]	0.0004 ^{a)}
居民生活源化石燃料/(g·kg ⁻¹)	原煤-烟煤	3.05 ^[13] , 3.7 ^[10] , 2.750 ^[17] , 3.81 ^[18]	3.05
	原煤-无烟煤	0.007 ^[13] , 0.12 ^[10] , 0.028 ^[17] , 0.007 ^[18]	0.007
	型煤-烟煤	0.09 ^[13]	0.09
	型煤-无烟煤	0.004 ^[13]	0.004
	石油类	0.068~0.12 ^[10]	0.07, 0.12, 0.25, 0.068
居民生活源生物燃料/(g·kg ⁻¹)	天然气	0.00012 ^[10]	0.00012
	秸秆	0.67 ^[19] , 0.43 ^[20] , 1.38 ^[21]	0.74 ^{c)}
	薪柴	1.49 ^[20]	1.49
生物质燃烧/(g·kg ⁻¹)	沼气	0.0001 ^[10]	0.0001
	小麦秸秆	0.52 ^[16] , 0.49 ^[20]	0.50 ^{c)}
	水稻秸秆	0.52 ^[16] , 0.43 ^[22]	0.47 ^{c)}
	玉米秸秆	0.78 ^[16] , 0.35 ^[20]	0.52 ^{c)}
	豆类秸秆	0.69 ^[23]	0.69
	薯类秸秆	0.69 ^[23]	0.69
	棉花秸秆	0.82 ^[16]	0.82
	其他秸秆	0.69 ^[23]	0.69
	森林火灾	0.56 ^[23] , 0.99 ^[6]	0.99
	草原火灾	0.48 ^[23]	0.48
	移动源 ^{b)} /(g·kg ⁻¹)	大型汽油客车	Euro IV: 0.0208
大型柴油客车		Euro IV: 0.0568	0.0568
小型汽油客车		Euro IV: 0.0058	0.0058
小型柴油客车		Euro IV: 0.0454	0.0454
重型汽油货车		Euro IV: 0.0208	0.0208
重型柴油货车		Euro IV: 0.0568	0.0568
其他汽油货车		Euro IV: 0.0116	0.0116
其他柴油货车		Euro IV: 0.0982	0.0982
摩托车		Euro IV: 0.0010, 0.0005	0.0007 ^{c)}

注:a) 根据原始排放因子、除尘效率、除尘器比例计算得到的最终排放因子。b) 火电及供暖行业石油类和气体类燃料的排放因子与工业源相同。

c) 相关排放因子的几何均值。d) 移动源的排放因子根据参考文献[16]计算得出。

2.2 生物燃料

居民生物燃料主要包括秸秆、薪柴以及作为农村能源的沼气排放。2012年农村秸秆和薪柴的消费量分别为 3.54×10^8 t和 1.87×10^8 t, 由于当年统计数据缺失, 基于历史年份数据采用线性或非线性回归计算得到。

沼气和天然气性质类似, 按气体类燃料计算。

2.3 生物质燃烧

生物质燃烧包括露天秸秆焚烧、森林火灾和草原火灾。露天秸秆焚烧按作物种类进行分类计算, 中国2012年各省农作物产量数据来自中国农村统计年

鉴^[26]。目前还没有露天燃烧比例的统计资料, Hao^[27]、Streets 等^[28]研究假设全国的秸秆露天燃烧量为秸秆总产量的 17%, 曹国良^[29]则按田间被废弃的秸秆量的 1/2 进行计算, 约为 25%。王书肖等^[11]通过问卷调查, 结合分层抽样和模型将中国秸秆露天焚烧比例分成 6 个不同的区域, 计算得到露天燃烧比例 11%~33%, 张楠等延用了此数值。本研究采用王书肖等^[11]的研究结果, 燃烧效率采用 De Zúrate 等^[30]通过对 32 个谷类秸秆样本的实地测量测得平均的燃烧效率为 80%; 谷草比采用王书肖等^[11]的研究。

森林草原平均生物量和燃烧效率沿用陆炳等^[12]的研究, 其中森林生物量按各气候带类型加以划分。森林火灾过火面积来自《中国农业统计年鉴》^[31], 草原火灾过火面积来自《中国畜牧业年鉴》^[32], 草原火灾活动水平数据以 2011 年数据替代。

2.4 机动车油耗

交通运输部分的汽油和柴油消耗主要考虑为机动车使用。机动车按类型分为载客汽车、载货汽车和摩托车。载客、载货汽车可分为大型客车、其他客车、重型货车和其他货车, 并结合汽油、柴油使用情况进一步细分。各类型机动车的保有量来自中国汽车市场年鉴, 每种车辆类别柴油车的比例被认为近似等于每年的特定车辆类别按燃料类型分类的汽车销售数据的比例^[6], 也是从中国汽车市场年鉴获得。统计发现中国 2012 年民用载客汽车、载货汽车和摩托车保有量分别为 8943.01 万辆、1894.75 万辆和 4553.49 万辆。没有官方的统计记录每年车辆的行驶里程数, 蔡皓等^[14]需要通过相关文献合理地假设确定不同车型的年总里程。大型客车的行驶里程参考^[6]的方法, 其计算式为

$$VMT_i = Q_i / (\alpha_i \cdot VP_i \cdot T) \quad (5)$$

式中, VMT 为大型客车年行驶里程, km; Q 为旅客周转量, 人公里; α 为载客汽车实载率, %; VP 为客车保有量, 万辆; T 为大型客车平均座位数, 个; i 为年份。

载货汽车、其他客车和摩托车的行驶里程采用 Qin 等^[6]的方法, 通过公式计算或基于历史数据的线性回归得出。

3 计算结果分析

3.1 黑碳排放量

2012 年全国和各地区黑碳排放量的计算结果见表 2。全国黑碳排放总量为 188.676×10^4 t, 其中居民生活

源排放量为 81.800×10^4 t, 占黑碳排放总量的 43.3%, 位居首位。工业在生产和最终消费中排放黑碳总量为 80.914×10^4 t, 占全国排放的 42.9%。

表 2 2010 年中国大陆各省市黑碳排放量

Table 2 Black carbon emissions from China's provinces in 2010

省市	排放量/(10 ⁴ t)					合计
	工业	火电 供暖	居民 生活	生物质 燃烧	交通	
北京	0.066	0.026	0.933	0.014	0.639	1.678
天津	0.465	0.048	0.335	0.019	0.315	1.183
河北	10.317	0.076	4.729	0.381	1.261	16.764
山西	14.295	0.055	2.306	0.155	0.538	17.349
内蒙古	4.840	0.127	4.643	0.232	0.437	10.279
辽宁	3.736	0.123	2.854	0.188	0.708	7.609
吉林	1.019	0.080	1.728	0.300	0.343	3.470
黑龙江	1.947	0.092	3.379	0.442	0.454	6.314
上海	1.217	0.019	0.125	0.017	0.301	1.680
江苏	3.691	0.150	2.475	0.529	1.182	8.027
浙江	0.698	0.109	0.418	0.128	1.178	2.531
安徽	1.684	0.027	3.478	0.584	0.557	6.329
福建	0.489	0.018	1.491	0.106	0.481	2.586
江西	1.388	0.006	1.708	0.107	0.360	3.569
山东	7.568	0.183	3.247	0.534	1.622	13.155
河南	4.272	0.064	5.960	0.612	0.977	11.885
湖北	1.852	0.024	3.757	0.166	0.507	6.307
湖南	1.320	0.017	2.760	0.540	0.518	5.155
广东	0.689	0.047	4.417	0.235	1.659	7.048
广西	0.885	0.026	6.054	0.254	0.402	7.620
海南	0.047	0.001	0.289	0.032	0.094	0.463
重庆	0.715	0.012	2.330	0.073	0.270	3.400
四川	2.486	0.010	6.097	0.224	0.795	9.612
贵州	1.494	0.007	5.675	0.080	0.287	7.543
云南	3.115	0.007	2.787	0.140	0.586	6.635
西藏	0.000	0.000	0.049	0.010	0.050	0.108
陕西	5.489	0.024	2.374	0.139	0.454	8.480
甘肃	0.666	0.024	2.320	0.127	0.244	3.381
青海	0.415	0.001	0.408	0.016	0.088	0.928
宁夏	1.149	0.022	0.307	0.039	0.129	1.647
新疆	2.899	0.059	2.364	0.244	0.374	5.940
合计	80.914	1.486	81.800	6.667	17.809	188.676

工业源和居民生活源排放量占总量的 86.2%, 是中国黑碳最主要的排放源(图 1)。交通运输排和生物质燃烧排放量分别为 17.809×10^4 t 和 6.667×10^4 t, 分别占总量的 9.4% 和 3.5%。火电和供暖行业排放量较小, 仅占到排放总量的 0.8%。

从能源类型看(图 2), 煤炭是最主要的能源消耗, 排放量为 101.820×10^4 t, 对黑碳排放的贡献达到 54%。

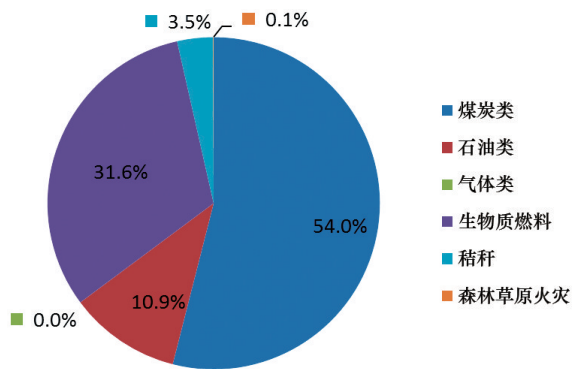


图1 能源贡献分布

Fig. 1 Energy distribution

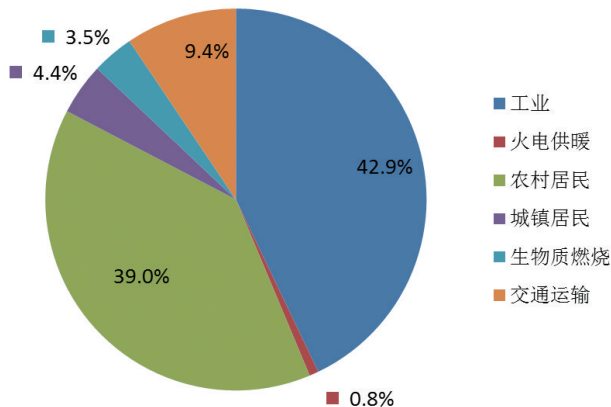


图2 黑碳排放行业

Fig. 2 Black carbon emission industries

其次是生物质燃烧,排放量为 59.710×10^4 t, 占总量的 31.6%。石油类燃料的贡献约为 10.9%, 主要贡献来自机动车的汽油和柴油消耗, 气体类燃料黑碳排放量很小。与人为源相比, 森林火灾和草原火灾产生的黑碳排放可以忽略不计, 仅有 0.095×10^4 t。

全国各省市不同排放源的黑碳贡献如图3所示。从地区看, 山西省在全国黑碳排放量中位居首位, 河北、山东、河南、内蒙古依次位列前5, 这5个省份贡献了全国约 37% 的排放量。山西省的主要排放源来自工业, 占全省排放的 82.4%。山西是煤炭大省, 炼焦行业发达, 煤炭的大量使用造成该省较高的黑碳排放。河北、山东的排放源主要贡献也来自工业, 分别占本省排放量的 61.5% 和 57.5%, 同时居民消费也占有一定比例。河南省农村人口密度较高, 居民生活源黑碳排放占总量的 50%, 内蒙古则为工业源和生活源共同贡献,

二者贡献比例各占约 45%。

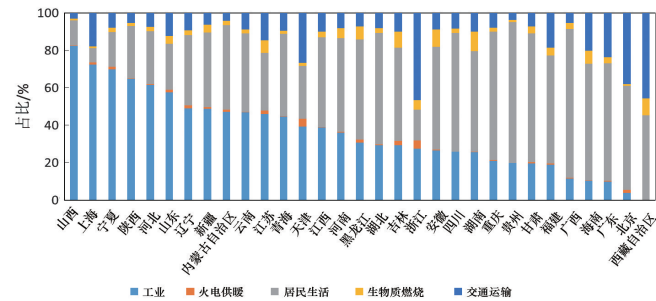


图3 各个地区主要排放源

Fig. 3 Main sources of emissions in each region

从各个行业源看(图3), 5种排放源在全国各地区的贡献比重也大不相同。山西、河北、山东、陕西、上海、宁夏地区主要排放贡献来自工业, 其比重均占总量的 55% 以上。山西、河北等地区工业发达, 钢铁、煤炭产业为其工业主导产业, 造成较大的排放黑碳; 上海作为直辖市农村居民消耗燃料较低, 居民生活源贡献较少, 工业贡献比重因而较高。四川、广西、贵州、甘肃等地区工业发展水平不高、农村人口密度较大, 居民生活源是其最主要的黑碳排放源。还有一些地区, 如河南、内蒙古、云南等, 工业源与居民生活源的黑碳排放贡献大体相当。西藏地区工业源与居民生活源水平较低, 交通源成为最主要贡献源; 浙江省交通源的黑碳排放(46.5%)也超过工业源(27.6%)和居民消费源(16.5%), 成为该省最主要的黑碳排放贡献。

对于居民生活消费, 各类能源的贡献比重如图4所示。城镇居民化石燃料、农村居民化石燃料、居民生活生物燃料消耗的黑碳排放量分别为 8.256×10^4 、 13.834×10^4 及 59.710×10^4 t。可见, 生物燃料消费是最主要的居民黑碳排放源, 城镇和化石燃料的消耗也占有一定比例。秸秆和薪柴作为农村烹饪和取暖能源将产生大量黑碳气溶胶, 是黑碳排放的主要贡献者。这些燃料绝大部分是在没有任何排放控制的小煤炉、灶内被燃烧, 具有非常大的细粒子排放, 因此排放因子和排放量比用于工业或发电时高得多。张楠等^[9]对生物量排放的计算结果为 52.649×10^4 t, 与本文的差异主要来自消费量的年际变化。中国大部分地区, 如浙江、江西、广东、海南等南部省份薪柴燃烧是最主要的黑碳居民排放; 另一部分地区, 如吉林、黑龙江、江苏、安徽等地区则是以秸秆燃烧为最主要的黑碳排放。沼气的排放量很小, 仅为 1.125 t, 可以忽略不计。

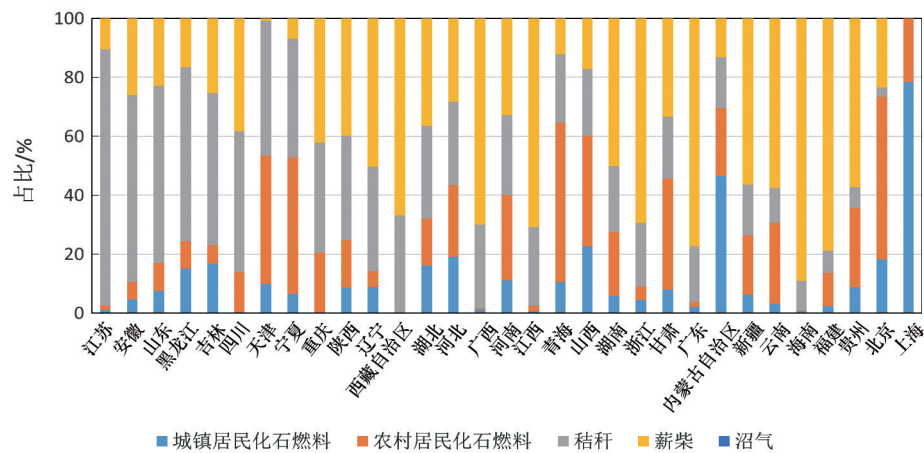


图4 各类居民生活源对黑碳排放的贡献

Fig. 4 Contributions of various types of residents to black carbon emissions

2012年全国机动车黑碳排放为 17.809×10^4 t,其中柴油车的排放为 17.585×10^4 t,占整个移动源的98.7%,不同地区各种车型的排放贡献率由图5给出。柴油车又可以分为柴油货车和柴油客车,其黑碳排放量分别为 7.155×10^4 和 10.430×10^4 t,占移动源排放的比例为40.2%和58.6%。排放量最大的省份为广东,往下依次

是山东、河北、江苏、浙江,这些地区机动车保有量较大,黑碳排放量因而较高。从图中可以看出大部分地区的主要排放贡献来自柴油客车,汽油车的贡献比重很小。摩托车排放贡献也很小,基本可以不计,仅在广西、湖南、重庆等地区占有一定比例。

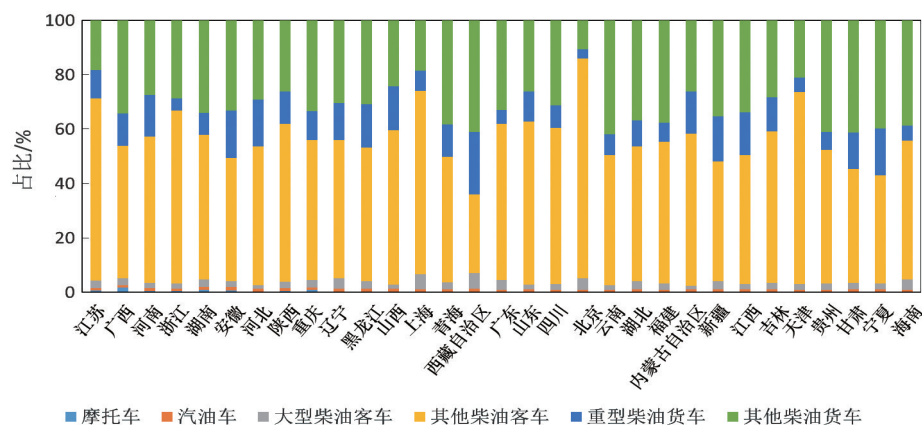


图5 各类交通运输源对黑碳排放的贡献

Fig. 5 Contribution of various transportation sources to black carbon emissions

3.2 与其他排放清单的比较

本文计算的黑碳排放清单和与前几年的清单相比大体相当,部分排放有所改善。一方面该本文引用了最新的政府统计数据——能源消费、保有量和技术现状等,分类方法和计算方法有所改进;另一方面部分排放因子,如交通工具的排放,采用了最新的中国机动车排放标准。国内外学者核算的黑碳排放量与本文的对比见表3。

从表3可以看出,本文的计算结果与其他研究相

比,各行业源的排放比重大体一致,但具体的排放量则不尽相同。Ohara等^[1]、Zhang等^[22]在计算时没有考虑生物质燃烧的消耗。本文工业源的排放相对较高,由于将炼焦单独计算,又将其分为土法炼焦和工业炼焦,而土法炼焦的技术比较落后,排放因子较高,因而工业排放量较大;与Qin等^[9]的结果相比,工业排放因子取值相同,排放的差异主要来自于能源基础数据的不同。Zhang等^[22]也考虑了工艺影响,对焦炭生产和砖窑采用了单独的排放因子计算,但其对炼焦行业索取排放因

表3 黑碳排放量对比

Table 3 Comparison of black carbon emission inventory comparison

排放清单	年份	排放量/(10 ⁴ t)					合计
		工业	火电供暖	居民生活	生物质燃烧	交通	
本文	2012	80.91	1.49	81.8	6.67	17.81	188.68
Qin等 ^[9]	2009	73.46	1.13	77.74	11.66	24.12	188.10
张楠等 ^[5]	2008	69.5	1.16	63.6	6.77	19.46	160.49
Lu等 ^[12]	2008	51.0	1.9	88.8	11.0	25.9	178.7
曹国良等 ^[14]	2007	52.9	1.3	65.1	10.4	10.3	139.9
Wang等 ^[11]	2007	64.6	5.07	98.8	7.77	18.8	195.7
Zhang等 ^[22]	2006	57.5	3.6	100.2	—	19.8	181.1
Streets等 ^[28]	2000	8.89	0.68	78.07	11.24	5.98	104.86
Ohara等 ^[1]	2000	9.9	1.8	93.8	—	3.8	109.3

子较低,计算结果也比本文偏低。居民生活消费的排放烟煤和无烟煤的排放因子相差很大,这里的差距和民用煤炭能源应用的详细分类有关。张楠等^[5]按线性比例估计了原煤和蜂窝煤的比例,本文采用平衡表中原煤和型煤的实测数据,对烟煤的使用比例进行了假设,造成了排放量的差异。王书肖等^[11]没有进行烟煤和无烟煤的区分,对原煤使用比例和排放因子的估计较大,由此居民生活消费的排放结果也较高。交通源排放较已有较新的排放清单,张楠等^[5]、Qin等^[9]相比本文计算的排放量较低,这里的差距主要来自机动车排放标准的不同。中国机动车排放标准自1999年起不断更新,至2008年经历了4种标准的变革,2010年以后全国采用的机动车排放近似为欧IV标准,排放因子较之前变低,使得本文计算结果偏低。

4 结论

基于统计学方法计算了中国大陆省域2012年黑碳气溶胶排放清单,2012年中国大陆黑碳排放总量为 188.676×10^4 t,其中居民生活源排放量为 81.800×10^4 t,占黑碳排放总量的43.3%,位居首位。工业在生产和最终消费中排放黑碳 80.914×10^4 t,占全国排放的42.9%,工业源和居民生活源排放量占总量的86.2%,是中国黑碳最主要的排放源。交通运输排和生物质燃烧排放量分别为 17.809×10^4 t和 6.667×10^4 t,分别占总量的9.4%和3.5%。火电和供暖行业排放量较小,仅占排放总量的0.8%。从能源类型看,黑碳主要来源于煤炭和生物燃料燃烧,分别占54%和31.6%。黑碳排放省域空间分布不均匀,呈东高西低的趋势,与区域经济发展情况和农村人口密度一致;从各个地区看,山西省在全国黑碳排

放量中位居首位,河北、山东、河南、内蒙古依次位列前五,这5个省份贡献了全国约37%的排放量。山西省的主要排放源来自工业,占全省排放的82.4%。山西是煤炭大省,炼焦行业发达,煤炭的大量使用造成该省较高的黑碳排放。河北、山东的排放源主要贡献也来自工业,分别占本省排放量的61.5%和57.5%,同时居民消费也占一定比例。河南省农村人口密度较高,居民生活源黑碳排放占总量的50%,内蒙古则由工业源和生活源共同贡献,二者贡献比例各占45%左右。基于排放清单,中国需对工业源、居民生活源、交通运输源等多个排放源进行控制减弱黑碳的排放量,与此同时,需要更加关注黑碳排放的重点地区,根据不同地区的经济、人口等特点采取有效的控制措施。

参考文献(References)

- [1] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for period 1980—2020[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007, 7(3): 4419—4444.
- [2] Junker C, Lioussé C. A global emission inventory of carbonaceous aerosol from historic records of fossil fuel and biofuel consumption for the period 1860—1997[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8(3): 1195.
- [3] David G, Streets S G. Black carbon emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(25): 4281—4296.
- [4] 曹国良, 张小曳, 王亚强. 中国大陆黑碳气溶胶排放清单[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(6): 259—264.
Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Yaqiang. Inventory of black carbon emission from China[J]. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(6): 259—264.
- [5] 张楠, 覃栋, 谢绍东. 中国黑碳气溶胶排放量及其空间分布

- [J]. 科学通报, 2013, 58(19): 1855-1864.
- Zhang Nan, Qin Yue, Xie Shaodong. Spatial distribution of black carbon emissions in China[J]. China Science Bulletin, 2013, 58(19): 1855-1864.
- [6] Qin Y, Xie S D. Spatial and temporal variation of anthropogenic black carbon emissions in China for the period 1980-2009 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12: 4825-4841.
- [7] Wang R, Tao S, Wang W T, et al. Black carbon emissions in China from 1949 to 2050[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46: 7595-7603.
- [8] 谢绍东, 宋翔宇, 申新华. 应用 COPERT III 模型计算中国机动车排放因子[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 415-419.
- Xie Shaodong, Song Xiangyu, Shen Xinhua. Calculating vehicular emission factors with coper (III) mode in China[J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 415-419.
- [9] Qin Y, Xie S D. Estimation of county-level black carbon emissions and its spatial distribution in China in 2000[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(39): 6995-7004.
- [10] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. Black carbon emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35: 4281-4296.
- [11] 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 Shuxiao, Zhang Chuying. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China[J]. Science Paper Online, 2008, 3(5): 329-333.
- [12] 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(2): 186-194.
- Lu Bing, Kong Shaofei, Han Bin, et al. 2007 list of contaminated emissions from biomass combustion in Mainland China [J]. China Environmental Science, 2011(2): 186-194.
- [13] 陈颖军, 姜晓华, 支国瑞, 等. 我国民用燃煤的黑碳排放及控制减排[J]. 中国科学(地球科学), 2009, 39(11): 1554-1559.
- Chen Yingjun, Jiang Xiaohua, Zhi Guorui, et al. Black carbon emissions from residential coal combustion and reduction strategy[J]. Scientia Sinica Terrae, 2009, 39(11): 1554-1559.
- [14] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估计[J]. 科学通报, 2007, 52(15): 1826-1831.
- Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Yaqiang, et al. Experimental investigation on emission factors of particulate matter and gaseous pollutants from crop residues burning[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(15): 1826-1831.
- [15] 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]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109. doi: 10.1029/2003JD003697.
- [16] 蔡皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010(3): 319-326.
- Cai Hao, Xie Shaodong. Determination of emission factors from motor vehicles under different emission standards in China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010(3): 319-326.
- [17] Zhang Y X, Schauer J J, Zhang Y H, et al. Characteristics of particulate carbon emissions from real-world Chinese coal combustion[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(14): 5068-5073.
- [18] Zhi G R, Chen Y G, Feng Y L, et al. Emission characteristics of carbonaceous particles from various residential coal-stoves in China[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(9): 3310-3315.
- [19] 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 Science-China, 2008, 20: 50-55.
- [20] Li X H, Wang S X, Duan L, et al. Carbonaceous aerosol emissions from household biofuel combustion in China[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43(15): 6076-6081.
- [21] Shen G F, Yang Y F, Wang W, et al. Emission factors of particulate matter and elemental carbon for crop residues and coals burned in typical household stoves in China[J]. Environmental science and technology, 2010, 44(18): 7157-7162.
- [22] 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, doi:10.1016/j.atmosenv.2012.05.055.
- [23] Andreae M O, Merlet P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning[J]. Glob Biogeochem Cycle, 2001, 15(4): 955-966.
- [24] 中华人民共和国国家统计局. 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- National Bureau of Statistics of China. China energy statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [25] 刘源, 邵敏. 北京市碳黑气溶胶排放清单估算及预测[J]. 科学通报, 2007, 52(4): 470-476.
- Liu Yuan, Shao Min. Estimation and prediction of carbon black aerosol emissions in Beijing[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(4): 470-476.
- [26] 中华人民共和国国家统计局. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China rural statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [27] Hao W M, Liu M H. Spatial and temporal distribution of tropical biomass burning[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(4): 495-503.
- [28] 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): 1099–1119.
- [29] 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.
- Gao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Dan, et al. Inventory of emissions of pollutants from open burning crop residue[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4): 800–804.
- [30] De Zárate I, Ezcurra A, Lacaux J P, et al. Pollution by cereal-waste burning in Spain[J]. *Atmospheric Research*, 2005, 73(1/2): 161–170.
- [31] 中华人民共和国国家统计局. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- Editorial Committee of China Agricultural Yearbook. *China Yearbook of Agricultural Sciences*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2013.
- [32] 中华人民共和国国家统计局. 中国畜牧业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- National Bureau of Statistics of People's Republic of China. *Yearbook of China animal husbandry*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2013.

The emission estimation and spatial distribution of black carbon aerosol

FU Jiafeng¹, QI Meng², LIU Qian¹, WANG Hongmei¹

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
2. School of Economics, Hebei University, Baoding 071000, China

Abstract By using statistical methods, the emission inventory of black carbon aerosol in China in 2012 is calculated, and the spatial distribution map of black carbon emissions in the county area is constructed. It is shown that the total amount of black carbon emissions in China in 2012 is 188.676×10^4 t, among which the residents' living source emissions are 81.800×10^4 t, accounting for 43.3% of the total black carbon emissions, ranking first. Those of the industrial production and the final consumption are 80.914×10^4 t, accounting for 42.9% of the national emissions, and the total emissions of the industrial sources and the residents' living sources account for 86.2%, and are the main sources of black carbon emissions in China. The emissions of the transportation and the biomass combustion are 17.809×10^4 t and 6.667×10^4 t, respectively, accounting for 9.4 percent and 3.5 percent, respectively. The thermal and heating emissions are small, accounting for just 0.8% of the total emissions. With regard to the energy type, the black carbon is mainly from the coal and biofuel combustion, accounting for 54% and 31.6%, respectively. The spatial distribution of the black carbon emission is uneven, which shows the trend that it is high in east and low in west, as is consistent with the regional economic development and the rural population density. Regionally, the area of the highest black carbon emissions in the country includes Shanxi, Hebei, Shandong, Henan, and Inner Mongolia, as the top five, contributing about 37% of the country's emissions. The main source of the emissions in Shanxi is from industrial productions, accounting for 82.4% of the province's emissions. Shanxi is a big coal production province, the coking industry, and the heavy use of coal, make the higher black carbon emissions in the province. The main sources of emissions in Hebei and Shandong are also the industries, accounting for 61.5 percent and 57.5 percent of the province's emissions, and the residents' consumption also takes up a percentage. In Henan province, the rural population density is high, the resident living source of the black carbon accounts for 50% of the total amount, and in Inner Mongolia, the industrial source and the life source, both contribute about 45%.

Keywords black carbon; emission factor; spatial distribution; emission inventory ●



(责任编辑 祝叶华)