



# 我国民用燃煤的黑碳排放及控制减排

陈颖军<sup>①\*</sup>, 姜晓华<sup>①</sup>, 支国瑞<sup>②</sup>, 冯艳丽<sup>③</sup>, 盛国英<sup>③④</sup>, 傅家谟<sup>③④</sup>

① 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003;

② 中国气象科学研究院, 北京 100081;

③ 上海大学环境污染与健康研究所, 上海 200072;

④ 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

\* E-mail: yjchen@yic.ac.cn

收稿日期: 2009-07-24; 接受日期: 2009-08-26

国家自然科学基金(批准号: 40605033, 40773047, 40590392)和山东省科技发展计划(编号: 2007GG2QT06018, 2006GG2205033)资助

**摘要** 我国被认为是最大的黑碳排放国, 其中民用燃煤可能是最重要的排放源. 由于黑碳排放因子( $EF_{BC}$ )的匮乏造成了我国黑碳排放量估算的巨大不确定性. 在系列实验中, 我们对 13 个不同成熟度的煤种分别以蜂窝煤和块煤散烧形式在相应炉灶中燃烧所产生的黑碳进行了研究. 在此基础上, 综合提出了一套关于民用燃煤的  $EF_{BC}$  数据. 其中, 无烟煤以蜂窝煤和块煤形式的  $EF_{BC}$  分别为  $0.004$  和  $0.007 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 烟煤则分别为  $0.09$  和  $3.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 在各种影响因素中, 煤的成熟度对  $EF_{BC}$  的影响最显著, 尤其是中等挥发份烟煤(MVB)明显高于其他煤种; 燃烧形式的改进(即块煤的蜂窝煤化)可以将烟煤的  $EF_{BC}$  平均降低 35 倍. 据此计算我国 2000 年民用燃煤的黑碳排放量为 94 千吨, 明显低于前人的估算结果; 其中烟煤的块状散烧贡献最大, 占 90% 以上. 从控制减排的角度, 如果禁止 MVB 作为民用燃料, 并进一步普及使用蜂窝煤, 民用燃煤的黑碳排放量可减少 80% 以上, 我国的黑碳排放问题在很大程度上得以控制.

## 关键词

民用燃煤  
黑碳  
排放因子  
排放量估算  
减排措施

黑碳气溶胶(black carbon, BC)是当前国内外气候和环境等领域共同关注的热点, 涉及到气候变化<sup>[1,2]</sup>、碳循环<sup>[3,4]</sup>、环境影响<sup>[5,6]</sup>、健康危害<sup>[7,8]</sup>等诸多问题. 我国被认为是最大的黑碳排放国, 每年约有 1.1~1.7 百万吨排放进入大气中, 占全球排放量的约 20%<sup>[9~14]</sup>. 大量的黑碳排放不仅显著影响了我国的区域气候和环境健康<sup>[15~19]</sup>, 而且通过在自由大气层的长距离迁移而影响下游的国家和地区, 如韩国、日本、甚至北美地区<sup>[20,21]</sup>, 进而使我国在国际环境争端中倍受责难<sup>[22,23]</sup>. 此外, 黑碳可能是仅次于  $\text{CO}_2$  的重要致暖因子<sup>[24]</sup>, 在减缓全球变暖的要求下, 黑碳的控

制排放将会是继温室气体减排之后的另一个重要议题<sup>[25]</sup>, 这也势必会增加我国碳排放的压力. 然而迄今为止, 我国还没有建立起细致可靠的黑碳排放清单, 这不仅不利于合理地估算黑碳对我国气候与环境的影响并制定相应的控制与减排措施, 也使我国在国际环境谈判(如碳排放权分配)中处于被动.

作为我国的主导能源, 煤炭占一次能源消费量的 70%, 而源于煤炭直接燃烧的黑碳被认为是我国排放清单的重要部分. 据曹国良等人<sup>[26]</sup>的估算, 燃煤产生的黑碳约占我国黑碳排放总量的 68%. 与工业和发电用煤相比, 民用煤在消费总量中仅占 5%, 但

引用格式: Chen Y J, Jiang X H, Zhi G R, et al. Black carbon emissions from residential coal combustion and reduction strategy (in Chinese). Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 39(11): 1554—1559

民用炉灶的黑碳排放因子( $EF_{BC}$ )比工业锅炉高出 3 个数量级<sup>[14,27]</sup>, 而且缺乏有效的烟气除尘装置, 造成民用燃煤成为我国黑碳的最大排放源, 可能高达 45%<sup>[14]</sup>. 然而由于排放因子的实测数据非常匮乏, 国内外学者对源自民用燃煤的黑碳排放量的估算相差甚远, 与我国黑碳排放总量的巨大差异相似<sup>[9-14,26]</sup>. 事实上, 关于民用燃煤, 我国的情形非常复杂: (1) 煤种十分丰富, 包括各种地质成熟度(或工业牌号)的烟煤和无烟煤; (2) 燃烧形式多样, 有原煤块的直接散烧和掺杂黏合剂(如黏土)后压制成蜂窝煤、煤球等型煤; (3) 炉灶千差万别, 从体积较小的普通炊事炉到热效率较高的民用取暖炉. 这就决定了我国民用燃煤的黑碳排放因子需要通过系统的实验测量才能获得.

在系列实验中, 我们通过一套全流稀释烟气采样装置对成熟度不同的 13 个煤种进行了研究, 对它们分别以散块煤和蜂窝煤形式在 3 个炉灶类型中燃烧产生的烟气进行采样和分析, 初步获取了关于我国民用燃煤的  $EF_{BC}$  实测数据<sup>[28-31]</sup>. 在此基础上, 本文综合提出了一套相关的  $EF_{BC}$ , 并详细比较影响黑碳排放的诸多因素, 着重探讨它们对我国黑碳控制减排的指示意义.

## 1 实验

(i) 煤种及炉灶的选择. 实验所用的 13 个煤种覆盖了较宽的地质成熟度范围: 干燥无灰基的挥发分含量( $V_{daf}$ )为 7.4%~39.8%, 镜质组反射率( $R_o$ )为 0.52%~2.50%, 而且分布均匀<sup>[28-31]</sup>. 炉灶类型有 3 种: 第一种是体积较小的简易煤炉, 呈圆柱状, 没有烟囱和炉盖, 热效率较低<sup>[32]</sup>; 第二种是高效蜂煤炉, 呈长方体形, 炉体中有循环水管可供采暖, 炉口有封火圈和炉盖; 第三种是高效块煤炉, 炉体与高效蜂煤炉相似, 但炉膛呈上小下大的梯形, 有利于供风和聚热<sup>[30]</sup>. 煤样分别以散块煤和蜂窝煤两种形式在相应的炉灶中燃烧, 前者直径为 3~5 cm, 后者是高 6 cm、直径 9.5 cm、12 孔的圆柱体. 实验共研究了 38 种煤种/燃烧形式/炉灶类型的组合情况.

(ii) 样品采集与分析. 实验所用的烟气采样系统组成如下<sup>[30,32]</sup>: 收集煤烟和稀释空气的集气罩; 用于冷却烟气的组合钢筒; 尾端抽气泵; 用于将部分烟

气导入采样器的分流管; 烟气颗粒物采样器(收集到石英纤维滤膜上); 两个分别监测抽气泵和采样器的流量计, 用于记录采样分流比. 烟气采样过程<sup>[32]</sup>: 用少量木炭预热煤炉和点燃煤样(原煤块或蜂窝煤), 令其自然燃烧; 采样从煤样放入煤炉开始, 持续到燃烧完全结束. 煤样燃烧前后均进行称重, 计算实际燃煤重量. 滤膜样品的黑碳测定通过热光碳分析仪(Sunset Laboratory Inc., USA)完成<sup>[33]</sup>. 实验中样品的采集与分析均执行严格的质量保证与质量控制(QA/QC)体系.

## 2 结果与讨论

### 2.1 黑碳排放因子及变化特征

根据滤膜样品的黑碳含量, 结合烟气采样分流比和实际燃煤重量, 计算出每个煤样的黑碳排放因子( $EF_{BC}$ ). 根据实测结果<sup>[26-29]</sup>, 民用燃煤的  $EF_{BC}$  具有很宽的变化范围(图 1), 从最低的  $0.001 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (安阳无烟煤/蜂窝煤形式/高效蜂窝煤炉)到最高的  $28.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (磁县烟煤/散块煤/高效块煤炉), 差别达到 4 个数量级以上; 就平均值而言, 烟煤的  $EF_{BC}$  比无烟煤高近 3 个数量级; 而不同燃烧形式的烟煤之间也有近两个数量级的差别, 如烟煤在高效块煤炉和蜂煤炉中燃烧的  $EF_{BC}$  分别为  $4.34$  和  $0.048 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 这说明对我国民用燃煤的  $EF_{BC}$  进行估算并非易事, 需要结合煤的成熟度和燃烧方式进行详细分析.

表 1 给出了各种煤种/燃烧形式组合的  $EF_{BC}$  平均值, 即无烟煤以蜂窝煤和散块煤形式的  $EF_{BC}$  分别为

表 1 本文及其他研究得到的相关黑碳排放因子

$EF_{BC}/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	说明	来源
0.004	无烟煤平均, 蜂窝煤	本文
0.007	无烟煤平均, 煤块	
0.087	烟煤平均, 蜂窝煤	
3.05	烟煤平均, 煤块	
0.051	烟煤剔除 MVB 平均, 蜂窝煤	
1.46	烟煤剔除 MVB 平均, 煤块	
0.02~3.51	煤块	刘源等 <sup>[34]</sup>
0.03~0.32	蜂窝煤	
0.028	无烟煤	Zhang 等 <sup>[27]</sup>
2.75	烟煤	
0.095	煤球	
0.12	无烟煤/煤球(计算值)	Streets 等 <sup>[14]</sup>
3.7	烟煤(计算值)	

0.004 和 0.007  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 烟煤的总体平均值分别为 0.087 和 3.05  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 作为比较, 表 1 列出了国内外其他研究的相关数据<sup>[14,27,34]</sup>, 如以常被引用的 Streets 等<sup>[14]</sup>的计算数据(非源于直接的实验测量), 即块煤的  $\text{EF}_{\text{BC}}$  为 3.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 型煤则为 0.12  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 由于没有细致考虑我国民用燃煤过程中煤种和燃烧形式等带来的显著影响, 这些  $\text{EF}_{\text{BC}}$  比本文结果有一定程度的偏高, 这将对我国的黑碳排放估算造成较大的影响.

## 2.2 各种影响因素的比较.

从图 1 可以看出, 煤的成熟度、燃烧形式和炉灶类型对民用燃煤的黑碳排放因子均有影响, 但重要性有显著差异. 首先, 煤的成熟度是至关重要: (1) 当煤的  $V_{\text{daf}}$  约为 30% 或者  $R_o$  接近 1.0%(中等挥发份烟煤, MVB)时  $\text{EF}_{\text{BC}}$  最高,  $V_{\text{daf}}$  增高和减少时  $\text{EF}_{\text{BC}}$  均迅速降低, 呈现明显的“钟型”分布; 而燃烧形式的改变(即把煤块粉碎后掺入黏土压制成蜂窝煤)和炉灶效率的相对提高(从简易炉到高效炉)没有改变该趋势. 无烟煤的  $\text{EF}_{\text{BC}}$  远低于烟煤. 以高效蜂窝煤燃烧为例, 安阳煤为 0.002  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而磁县煤为 12.7  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 相差 6300 倍. 不同成熟度的烟煤之间也存在很大的差别. 例如, 在高效块煤炉中磁县煤(MVB, 28.5  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )比焦坪煤(高挥发份烟煤, 0.13  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )高 220 倍, 比长治煤(低挥发份烟煤, 1.48  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )高 20 倍. 这与煤成烃有机地球化学中的“生油窗”理论吻合, 即在这种成熟度的煤热解时能产生最丰富的煤焦油<sup>[35]</sup>; 而煤焦油正

是黑碳形成的重要前体物<sup>[36]</sup>; (2) 如果考虑 MVB (包括焦煤和肥煤等)在我国较少作为民用消费(多为冶金行业炼焦或配焦使用)而将它们从烟煤系列中剔除, 烟煤在各种燃烧形式下的  $\text{EF}_{\text{BC}}$  平均值将降低 50% 以上. 例如, 烟煤蜂窝煤在简易炉的  $\text{EF}_{\text{BC}}$  平均值在剔除 MVB 前后分别为 0.215 和 0.078  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 这说明, 从黑碳排放的角度来看, 在我国民用煤的消费结构中应尽量提高无烟煤的使用比例; 另一方面, 由于烟煤在我国的原煤结构中占主导地位, 而且在很多山区和农村受地理和交通条件的限制, 烟煤作为民用燃料不可避免, 但应最大程度地减少 MVB 的直接燃烧.

其次, 煤的燃烧形式对  $\text{EF}_{\text{BC}}$  也有较大的影响. 当煤从散块变成蜂窝煤后, 无烟煤的  $\text{EF}_{\text{BC}}$  平均值减少了 43%, 而烟煤则降低了 35 倍(表 1). 这充分说明, 民用蜂窝煤的推广使用能较好地改善污染物的产生和排放.

第三, 虽然炉灶类型是与煤的燃烧形式相配合的, 但从图 1 可以看出, 单独就炉灶效率的提高而言, 它对民用燃煤的  $\text{EF}_{\text{BC}}$  影响相对较小. 例如, 当烟煤以蜂窝煤形式燃烧时, 高效蜂煤炉比简易炉的黑碳排放降低了约 4 倍( $\text{EF}_{\text{BC}}$  平均值分别为 0.048 和 0.215  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 但在以块煤散烧时高效炉没有表现出预想的优势: 烟煤的  $\text{EF}_{\text{BC}}$  值在高效炉和简易炉分别为 4.34 和 3.34  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 对于这种情况的解释, 可能在高效炉的设计中为了追求较高的热交换效率而在一定程度上牺牲了煤的燃烧效率. Zhang 等<sup>[37]</sup>在比较民用

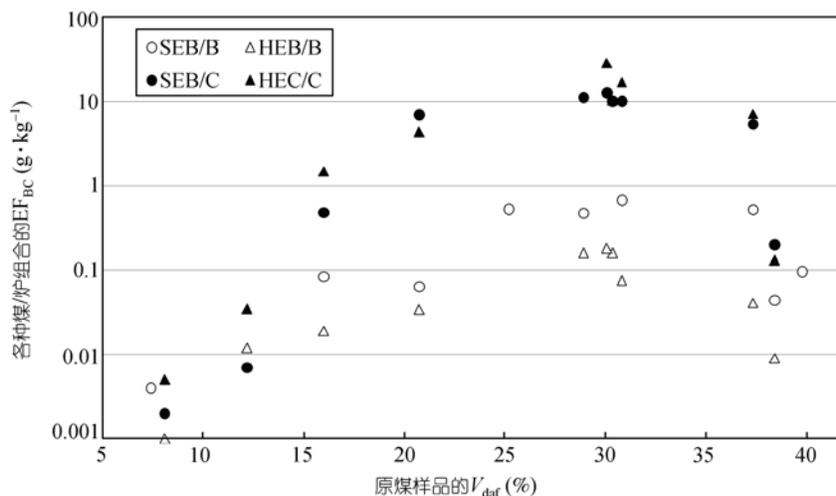


图 1 民用煤燃烧组合的黑碳排放因子( $\text{EF}_{\text{BC}}$ )与煤的挥发份含量( $V_{\text{daf}}$ )的关系  
SEB 为简易煤炉, HEB 为高效蜂煤炉, HEC 为高效块煤炉, B 为蜂窝煤, C 为散块煤

燃料在不同炉灶中燃烧排放一氧化碳(与黑碳同属不完全燃烧产物)也发现了类似现象. 这说明在炉灶的设计和改进行程中不仅要考虑提高它的热交换效率, 还需重视燃料的燃烧效率问题, 包括进气补给、炉膛温度和燃烧时间等.

### 2.3 民用燃煤的黑碳排放量估算

根据本文给出的  $EF_{BC}$  数据, 结合我国每年的民用煤消费总量、消费结构以及蜂窝煤所占的比例等, 可以对民用燃煤的黑碳排放量进行估算. 如表 2, 我们计算了 2000 年的结果并就 2020 年的情况进行了预测. 以下是各项统计数据的说明:

(1) 近年来我国的能源紧张使得我国的煤炭消费量逐年增长, 从 2000 年的 13.2 亿吨增加到 2006 年的 23.9 亿吨. 但是, 民用消费量则相应地从 7.9 到 8.4 千万吨, 维持在 8 千万吨左右<sup>[38]</sup>, 因此我们预计 2020 年时我国民用煤消费量为 8 千万吨.

(2) 在我国的煤炭生产结构中, 烟煤占 78.1%, 无烟煤占 17.6%, 褐煤仅占不足 5% (<http://www.cct.org.cn>). 由于褐煤极少直接作为民用燃料, 因此我们估计在民用煤消费结构中, 烟煤占 80%, 无烟煤 20%.

(3) 在选择  $EF_{BC}$  时, 2000 年为全部烟煤的平均值, 而 2020 年则将中等挥发分烟煤(MVB)剔除. 此外, 表 1 给出的  $EF_{BC}$  没有考虑煤中灰分含量和燃烧效率等问题. 事实上, 实验煤种所含灰分平均约为 10%, 而且煤样燃烧后约有 10% 没有燃尽. 因此, 在表 2 的  $EF_{BC}$  中, 2000 年时两者均被考虑进去, 2020 年则只考虑了灰分含量, 即分别下降 20% 和 10%.

(4) 蜂窝煤作为一种民用洁净煤技术在近 20 年来得到了较好的推广和普及, 但目前还缺乏合理的关于蜂窝煤使用比例的统计数据<sup>[39,40]</sup>. 本文采用先

前的估计数据<sup>[28]</sup>, 即 2000 年平均为 40%, 并将在 2020 年达到 80%.

从表 2 可以看出, 我国民用燃煤的黑碳排放量在 2000 和 2020 年分别为 94 和 19 千吨, 两者相差 5 倍, 主要源于中等挥发份烟煤的剔除以及蜂窝煤使用比例的提高. Streets 等<sup>[14]</sup>估算的结果是: 605 千吨(1995 年)和 535 千吨(2020 年); 曹国良等<sup>[26]</sup>的结果为 521 千吨(2000 年); Ohara 等<sup>[10]</sup>为 465 千吨(2000 年). 如果与我国的黑碳排放总量(例如 2000 年为 1499.4 千吨<sup>[26]</sup>, 并扣除民用燃煤排放量差异值 427 千吨)相比, 本文计算的民用燃煤的贡献不到 10%, 可能低于生物质燃料燃烧的贡献<sup>[41]</sup>. 这说明, 前人估算的关于我国黑碳的排放总量以及来自民用燃煤的部分均可能偏高, 其中最重要的原因就是他们没有细致考虑民用燃煤的复杂因素.

在我们的计算结果中(表 2), 烟煤的块状散烧是民用燃煤的最大黑碳排放源, 在 2000 和 2020 年分别占 98% 和 87%, 因而成为黑碳排放控制的最大目标. 具体的控制减排手段包括: 减少烟煤的使用(即加大无烟煤的比例), 排除中等挥发份烟煤(MVB)的直接燃烧, 以及提高蜂窝煤的使用比例等. 根据本文数据推算, 禁止使用 MVB 作为民用燃料可使民用燃煤的黑碳排放量减少 50% 以上, 如果进一步控制块煤的使用而大力普及蜂窝煤则可使黑碳排放减少 80% 以上.

### 3 结论与建议

对我国不同产地的 13 个煤种以蜂窝煤和散块煤形式在相应炉灶中燃烧产生的黑碳进行测试, 得到一套系统的关于民用燃煤的黑碳排放因子( $EF_{BC}$ ). 其中, 无烟煤以蜂窝煤和块煤形式的  $EF_{BC}$  平均值分别为 0.004 和 0.007  $g \cdot kg^{-1}$ , 而烟煤分别为 0.087 和 3.05

表 2 我国民用燃煤的黑碳排放量估算

		烟煤		无烟煤		总计
		蜂窝煤	原煤块	蜂窝煤	原煤块	
2000 年	煤消费量(百万吨)	25.30	37.95	6.33	9.49	79.07
	黑碳排放因子/ $g \cdot kg^{-1}$	0.070	2.44	0.003	0.006	
	黑碳排放量(千吨)	1.77	92.61	0.02	0.06	94.45
2020 年	煤消费量(百万吨)	51.20	12.80	12.80	3.20	80.00
	黑碳排放因子/ $g \cdot kg^{-1}$	0.046	1.31	0.004	0.006	
	黑碳排放量(千吨)	2.36	16.77	0.05	0.02	19.19

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 剔除中等挥发份烟煤(MVB)后的烟煤平均值则分别为 0.051 和  $1.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 在影响民用燃煤的  $\text{EF}_{\text{BC}}$  的各种因素中, 煤的地质成熟度起决定作用, 其次是燃烧形式的改进(即煤块的蜂窝煤化), 炉灶效率

的影响相对较小. 如果国家严格控制 MVB 的直接燃烧, 进一步推广和普及使用蜂窝煤, 民用燃煤的黑碳排放量将减少 80% 以上, 从而使我国的黑碳排放问题可在很大程度上得到控制.

致谢 感谢审稿专家提出宝贵建议.

## 参考文献

- 1 Seinfeld J. Atmospheric science: black carbon and brown clouds. *Nature Geosci*, 2008, 1: 15—16
- 2 Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geosci*, 2008, 1: 221—227
- 3 韩永明, 曹军骥. 环境中的黑碳及其全球生物地球化学循环. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(1): 125—132
- 4 Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle. *Science*, 1998, 280: 1903—1904
- 5 罗云峰, 吕达仁, 李维亮, 等. 近 30 年来中国地区大气气溶胶光学厚度的变化特征. *科学通报*, 2003, 45(5): 549—554
- 6 Andreae M O. The dark side of aerosols. *Nature*, 2001, 409: 671—672
- 7 Koelmans A A, Jonker M T O, Cornelissen G, et al. Black carbon: the reverse of its dark side. *Chemosphere*, 2006, 63: 365—377
- 8 Nel A. Air pollution-related illness: effects of particles. *Science*, 2005, 308: 804—806
- 9 Zhang Q, Streets D G, He K B, et al. Major components of China's anthropogenic primary particulate emissions. *Environ Res Lett*, 2007, 2: 045027
- 10 Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980—2020. *Atmos Chem Phys*, 2007, 7: 4419—4444
- 11 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
- 12 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
- 13 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
- 14 Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. Black carbon emission in China. *Atmos Environ*, 2001, 35: 4281—4296
- 15 Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, 297: 2250—2253
- 16 Qiu J H, Yang L Q. Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depths and visibility in North China during 1980—1994. *Atmos Environ*, 2000, 34: 603—609
- 17 Chameides W L, Yu H, Liu S C, et al. Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: an opportunity to enhance crop yields in China through emission controls? *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, 96: 13623—13633
- 18 吴兑, 毛节泰, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(11): 1542—1553
- 19 Tie X X, Wu D, Brasseur G. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guanzhou, China. *Atmos Environ*, 2009, 43: 2375—2377
- 20 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(D23): 8633
- 21 Jacob D J, Crawford J H, Kleb M M, et al. Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) aircraft mission: design, execution, and first results. *J Geophys Res*, 2003, 108(D20): 9000
- 22 Akimoto H. Global air quality and pollution. *Science*, 2003, 302: 1716—1719
- 23 Wilkening K E, Barrie L A, Engle M. Trans-Pacific air pollution. *Science*, 2000, 290: 65—67
- 24 Hansen J, Sato M, Nazarenko L, et al. Climate forcings in Goddard Institute for Space Studies SI2000 simulations. *J Geophys Res*, 2002, 107(D18): 4347
- 25 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(D19): 4410
- 26 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国大陆黑碳气溶胶排放清单. *气候变化研究进展*, 2006, 2(6): 259—264

- 27 Zhang Y X, Schauer J J, Zhang Y H, et al. Characteristics of particulate carbon emissions from real-world Chinese coal combustion. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 5068—5073
- 28 Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, et al. Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic hydrocarbons from residential coal combustion in China. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 1861—1867
- 29 Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, et al. Measurements of emission factors for carbonaceous particles from residential raw-coal-chunk combustion in China. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L20815
- 30 Zhi G R, Chen Y J, Feng Y L, et al. Emission characteristics of carbonaceous particles from various residential coal-stoves in China. *Environ Sci Technol*, 2008, 42: 3310—3315
- 31 Zhi G R, Peng C H, Chen Y J, et al. Deployment of coal briquettes and improved stoves: possibly an option for both environment and climate. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 5586—5591
- 32 Chen Y J, Bi X H, Mai B X, et al. Emission characterization of particulate/gaseous phases and size association for polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion. *Fuel*, 2004, 83: 781—790
- 33 Birch M E, Cary R A. Elemental carbon-based methods for monitoring occupational exposures to particulate diesel exhaust. *Aerosol Sci Technol*, 1996, 25: 221—241
- 34 刘源, 张元勋, 魏永杰, 等. 民用燃煤含碳颗粒物的排放因子测量. *环境科学学报*, 2007, 27(9): 1409—1416
- 35 Radke M, Schaefer R G, Leythaeuser D, et al. Composition of soluble organic matter in coals: relation to rank and liptinite fluorescence. *Geochim Cosmochim Acta*, 1980, 44: 1787—1800
- 36 Richter H, Howard J B. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons and their growth to soot—a review of chemical reaction pathways. *Prog Energy Combust Sci*, 2000, 26: 565—608
- 37 Zhang J, Smith K R, Uma R, et al. Carbon monoxide from cookstoves in developing countries: 1. Emission factors. *Chemosphere*, 1999, 1: 353—366
- 38 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 2007. 北京: 中国统计出版社, 2008
- 39 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
- 40 陈贵锋, 俞珠峰, 成玉琪. 中国煤炭加工技术发展的思考. *洁净煤技术*, 2001, 7(1): 9—13
- 41 Li X H, Wang S X, Duan L, et al. Carbonaceous aerosol emissions from household biofuel combustion in China. *Environ Sci Technol*, 2009, 43: 6076—6081