

## 黑炭气候科学和相关排放控制策略的政策综述

2010年1月

.....



国际清洁交通委员会

.....

国际清洁交通委员会的目标是通过大幅改善客、货车、船只、飞机等交通工具及支持其运作的运输体系的效率和环境影响，来保护和改善公共健康、环境和生活品质。领导该组织的是一个来自全球主要汽车市场的政府官员和专家组成的委员会，他们以个人身份加入组织，并在空气质量和运输事务方面具有丰富经验。

## 以下国际清洁交通委员会（ICCT）的成员批签了此文件\*

**Michael Walsh**

国际交通顾问  
美国

**Mary Nichols**

加州空气资源理事会主席  
美国

**Adrian Fernandez Bremauntz 博士**

国家生态研究院院长  
墨西哥

**Leonora Rojas Bracho 博士**

国家生态研究院  
城市与区域污染研究总干事  
墨西哥

**Martin Williams 博士**

环境、食品及农业事务部  
大气质量和工业污染项目主任英国

**Axel Friedrich 博士**

联邦环境署  
环境、交通与噪音部前主任  
德国

**Alan Lloyd 博士**

国际清洁交通委员会主席  
美国

**Dan Greenbaum**

健康影响研究所所长  
美国

**Jiro Hanyu**

日本国际交通研究所所长  
日本

汤大刚

环境保护部  
车辆排污监控中心主任  
中国

**Yasuhiro Daisho 博士**

早稻田大学工程教授日本

**Mario Molina 博士**

圣地亚哥加州大学  
生物化学系教授  
和  
Mario Molina 中心总裁  
墨西哥

© 2010 国际清洁交通委员会

本文件并不一定代表 ICCT 成员所代表的组织或政府机构的观点。他们对本文件的支持是基于他们在空气质量和交通事务方面的丰富经验。

以下人员参加了于 1 月 5 号至 6 号在英国伦敦举行的 2009 黑炭国际研讨会。此文件咨询了 2009 有关黑炭的伦敦国际研讨会以及研讨会参与者随后的讨论。

Alan Lloyd 博士	国际清洁交通委员会	美国
Anumita Roy Chowdhury	科学与环境中心	印度
Axel Friedrich 博士	国际顾问	德国
Bart Croes	加州空气资源理事会	美国
Ben DeAngelo	美国环保署	美国
Bruce Hill 博士	清洁空气任务小组	美国
Catherine Witherspoon	气候工作基金会顾问	美国
David Fahey 博士	国家海洋和大气管理署	美国
David Lee 博士	曼彻斯特城市大学	英国
David Warrilow 博士	环境、食品及农业事务部	英国
Dennis Clare	治理与可持续发展研究所	美国
Drew Shindell 博士	哥伦比亚大学	美国
Elisa Dumitrescu	联合国环境计划署	肯尼亚
Ellen Baum	清洁空气任务小组	美国
贺克斌博士	中国清华大学	中国
James Corbett 博士	德拉维尔大学	美国
Jan Fuglestad 博士	国际气候与环境研究中心	挪威
John Guy	美国环保署	美国
Kate Blumberg	国际清洁交通委员会	美国
Keith Shine 博士	雷丁大学	英国
Richard Mills 博士	全球大气污染论坛	英国
Kirk Smith 博士	伯克利加州大学公共健康学院	美国
Leonora Rojas Bracho 博士	墨西哥生态委员会	墨西哥
Mark Jacobson 博士	斯坦福大学	美国
Martin Green	Johnson Matthey 公司	英国
Martin Rocholl 博士	欧洲气候基金会	德国
Martin Williams 博士	环境、食品及农业事务部	英国
Michael Walsh	国际顾问	美国
Olivier Boucher 博士	气象局哈德利中心	英国
Piers Forster 博士	利兹大学	英国
Ray Minjares	国际清洁交通委员会	美国
Tami Bond 博士	伊利诺大学香槟分校	美国
Tim Williamson	环境、食品及农业事务部	英国
V Ramanathan 博士	斯克里普斯海洋研究所	美国

\*所有在英国国际研讨会上展示的报告和材料都可在 <http://www.theicct.org> 上查到。

参加国际研讨会并不表示一定支持此文件。ICCT 对其内容负有所有责任。

## 总论

本文件提供了有关黑炭的政策指导。其包含的内容与政府间气候变化专门委员会于2007年发表的第四次评估报告相一致，并且咨询了2009年有关黑炭的伦敦国际研讨会以及研讨会参与者随后的讨论。

**黑炭是在不完全燃烧过程中产生的一种固体颗粒。**所有从一个燃烧源中排放出的颗粒被泛称为颗粒物(PM)并通常通过其大小来描述，即小于10微米(PM10)或小于2.5微米(PM2.5)。黑炭是PM2.5中的固体部分，具有强吸光性并能将该能量转化为热能。当黑炭被排放到大气和堆积在冰或雪上，它可以引起全球温度变化，融化雪和冰，并导致降水形式的变化。

**交通运输中的石油燃烧、住宅取暖和烹饪中的生物燃料燃烧、来自森林火灾以及计划性农业燃烧是全球85%的黑炭排放的源头。**2030年可行的最大减排量可以达到2.8百万吨/每年，即从正常排放量中减少60%。随之排放的污染物和排放活动地点将决定黑炭控制对策对气候的净影响。

**公共健康保护已经成为控制黑炭措施的一个有力论据。**每年因暴露于颗粒物而造成全球成千上万的人丧生。降低颗粒物的行动例如要求使用低硫燃油的同时进行尾气后处理，替换燃油，减少燃油消耗等能大幅度降低黑炭排放量。纵然不谈气候保护方面的益处，这些行动仅对保护公共健康方面益处已十分有力。

**黑炭带来的气候影响进一步加强了为保护公共健康而控制颗粒物排放的有关措施的需要。**根据政府间气候变化专门委员会，黑炭是导致气候变化<sup>2</sup>的正辐射强迫的第三大贡献者。根据政府间气候变化专门委员会的非官方估计，一千克黑炭的影响比等量二氧化碳在100年时间范围内强460倍，在20年时间范围内比其强1600倍。政府间气候变化专门委员会关于辐射强迫的估计与其他文献的估计相比是比较保守的。

**对黑炭的控制能产生迅速的区域和全球气候收益。**与所有气溶胶颗粒一样，黑炭在距其源头几千公里的范围内会被冲刷掉，因此它仅产生短暂的辐射强迫。此强迫能造成强烈的区域气候影响，该影响能跨越该辐射强迫区，延伸到全球范围。总体来说，这些区域影响是一个全球问题。一个包含短暂强迫物质例如黑炭的气候变化减缓策略可更迅速地降低引起气候变化的正

辐射强迫，特别是当需要迅速采取行动以避免大规模影响的引爆点，例如北极夏季海冰、喜马拉雅-西藏冰川、和格陵兰冰层的消失。

**降低黑炭的行动可补充但不能取代控制二氧化碳和其他温室气体的行动。**减缓气候变化的一个重点是减少所有的正辐射强迫，而二氧化碳是最大的正强迫物质，因此任何延迟降低二氧化碳排放的行为将扩大其对气候的影响范围。同时降低黑炭和二氧化碳排放将更有效地降低整体正辐射强迫。

**对黑炭的控制将同时减少正、负辐射强迫，因此针对气候变化而采取行动的决策应关注其净效应。**黑炭是与其他反光和抵消其正强迫的污染物一起排出的。它们包括一次有机碳和二次有机碳、硫酸盐以及硝酸盐，其排放量取决于燃烧方式和燃料类型的不同。排放源的净效应因其排放到冰雪上的黑炭的堆积和移动情况而改变，因此在大气中产生负强迫的主要排放源仍然可能成为净正强迫的制造者，前提是它们是否在北极或山地冰川上堆积了足够的黑炭。

**完全从减缓气候变化的角度来看，最首要目标是引起净正辐射强迫的源头，例如低硫化石燃油的燃烧和黑炭在冰雪表面的堆积。**公路运输重型柴油车辆、非公路运输农用和建筑设备、民用煤燃烧、和工业砖窑一般都是正强迫制造者。露天农业烧荒、民用生物燃料燃烧和商业海运可以是负强迫制造者，但如果导致有黑炭堆积在雪和冰上，其负强迫可能被抵消。

## 科学评估

人类行为不断影响着地球气候的变化。这些变化中最重要的就是温室气体和强吸光气溶胶对吸收长波红外线辐射而造成全球平均温度的上升。大气科学家将这种改变称为一种正辐射强迫。能量反射是一种负强迫，可带来的是降温作用。据政府间气候变化专门委员会估计，自 1750 年起，人类行为就与总计  $1.6 \text{ Wm}^{-2}$  [0.6 至 2.4] 的净正辐射强迫相关，这导致了自 19 世纪末期起全球温度平均增加了  $0.8^\circ\text{C}$  [ $\pm 0.2$ ]。

黑炭所指的是任何数量的强吸光燃烧颗粒，其中最具吸光性的是煤烟<sup>4</sup>。这些颗粒的尺寸各不相同但基本上它们都比  $\text{PM}_{2.5}$  小得多，可能不到  $\text{PM}_{0.1}$  的大小。黑炭总是从燃烧源排放出的颗粒物中的一部分，但其排放量随着所采用的燃料类型、燃烧过程、和任何排放控制技术的成效而变化。

黑炭在大气中存留约一个星期，但根据燃烧过程和排放地点<sup>5</sup>，这个时间上的差异可高达其三倍。另一方面，二氧化碳的影响长期存在，大多数现在排放出的  $\text{CO}_2$  将会对将来 30 至 100 年内的气候产生影响，有些甚至会产生更长远的影响。

黑炭是引起气候变化的正辐射强迫的一个重要因素。其绝大部分的强迫作用来自于其对大气中光能的直接吸收。据政府间气候变化专门委员会估计，因为此吸光作用，黑炭约产生了全球平均辐射强迫<sup>6</sup> 的  $0.34 \text{ Wm}^{-2}$  [ $\pm 0.25$ ]。政府间气候变化专门委员会报告中引用的研究表明当黑炭颗粒被包含在（或混合于）其他散射光能颗粒（例如硫酸盐<sup>7</sup>）等中时，此变暖效应在将会被放大，但政府间气候变化专门委员会采用的多数气候模式中并未考虑此放大因素。因此此评估值可能过低。

此直接辐射强迫的部分影响不仅包括温度升高，还包括降雨和地面能见度的变化。排放流会抑制对流，使大气稳定下来，这就阻碍了正常的降雨模式。它们使地球表面变得暗淡无光，减弱蒸发作用，使云难以形成。

黑炭也会通过改变雪、冰等明亮表面的反射率或反照率，从而产生正辐射强迫。在初始状态下，冰雪表面会将很大一部分太阳能反射到太空中，但是黏附在这些表面上或浮于这些表面上方的黑炭微粒会吸收此能量中的很大一部分，并以太阳热能的形式散发出去。这不但减少了被反射的太阳能，而且还会使云蒸发，也使冰雪融

化。这种冰雪表面积减少造成了恶性循环，使增温和融化现象加剧。据政府间气候变化专门委员会估计，黑炭的全球雪反照率影响为  $0.1 \text{ Wm}^{-2}$  [ $\pm 0.1$ ]。

根据政府间气候变化专门委员会估计的直接辐射强迫和雪反照率影响，黑炭的总辐射强迫估计达到  $0.44 \text{ Wm}^{-2}$  [ $\pm 0.35$ ]。这就使黑炭成为仅次于二氧化碳和甲烷的第三大气候强迫因素。

政府间气候变化专门委员会对黑炭的指导方针似乎比较保守。例如，其采用的定义是广义的，而有关辐射强迫的估计是可能范围内的下限。这是由于当前黑炭气候科学正迅速发展，而科学界过滤、讨论、和强化此新知识的脚步却是缓慢的。

政府间气候变化专门委员会没有计算黑炭对云的降温效应造成的影响，而这会降低其总辐射强迫的估计值。大多数的模型也没有把内部混合考虑进来，而这会提高估计值。对黑炭内部混合及其对云的影响进一步认识应会反映到政府间气候变化专门委员会将于 2013 年发布的下一份报告。

## 战略价值

黑炭的减少将带来巨大的公共健康收益，这些收益本身就能作为降低排放的有力理由。很显然，黑炭是与过早死亡、残疾、和慢性疾病密切相关的颗粒物排放的一部分。黑炭可以被归为超细颗粒或  $\text{PM}_{0.1}$  的范围，能造成极大的健康危害。这些细小颗粒主要是从燃烧源中排出的。世界卫生组织估计在 2000 年，城市空气污染造成了 800,000 起过早死亡，来自固体燃料的室内烟尘造成了 160 万起过早死亡。这些大多发生在发展中国家。

降低黑炭也会比仅注重于降低二氧化碳的策略获得更迅速的气候收益。黑炭是一小部分寿命短暂的气候强迫物质之一，因此持续控制其排放量将使其在大气中的浓度较快地降低。气候保护战略可以利用这点迅速降低引起气候变化的辐射强迫。此战略可协助减缓全球气候变化的速度及抑制已经造成的全球变暖。并且它也有利于延迟及可能避免一些最严重的区域气候引爆点，例如北极夏季海冰、喜马拉雅-西藏冰川的消失。它们的消失速度日益加快，但鉴于这些区域黑炭带来的强辐射强迫，黑炭排放控制能获得卓越效果。

政策制定者们应小心不因控制黑炭的措施

而忽略控制二氧化碳的措施。这两种物质都能产生引起气候变化的正辐射强迫，对两者都采取措施是降低辐射强迫以达到气候目标所必需的。降低影响最大的正辐射强迫的措施是最理想的措施，因此同时降低黑炭和二氧化碳的政策可能比仅针对其中之一更见成效。

降低黑炭可能需要抵消其他短暂的强迫物质排放量的减少。例如正在进行的对二氧化硫排放的控制。由于实施了燃油硫含量控制，二氧化硫的全球排放量正在迅速降低。毫无疑问这些措施对于降低对公共健康的不利影响是必要的。因为硫酸盐具有强反光性，这些控制措施降低了负辐射强迫，也就相当于（造成了）正辐射强迫。因为硫酸盐前体存留时间很短，此正强迫的出现相对迅速。但黑炭减排能在同样迅速的时间范围内降低正辐射强迫。而且，很多降低黑炭的必要控制措施，如那些在运输中采用的措施，也是降低硫排放量的政策所要求的。

## 全球变暖潜能值

对于相信黑炭控制科学和其战略重要性的政策制定者，通常下一步是将全球变暖潜能值(GWP)应用到总排放量的统计、评估多种污染物组成的一篮子排放的二氧化碳当量减排潜力、和最具成本效益的控制策略的分析。黑炭使这一系列过程变得更加复杂，并需要首先回答一些基础性问题：整体政策目标是什么？有必要将黑炭加入一篮子多种污染物排放中吗？如果是，应如何设计度量标准来比较各种温室气体排放呢？有此方针后才可解答应用权重因子时的选择问题。

GWP 是用来表示某种温室气体排放的整合辐射强迫相比与二氧化碳辐射强迫的比例的一个权重因子。整合辐射强迫就是指一种温室气体排放在一个选定的时间范围内所产生的辐射强迫的总和。例如，政府间气候变化专门委员会在其第四份评估报告中将甲烷的100年GWP定为25。这就是说，甲烷的脉冲排放<sup>8</sup>所产生的100年累计辐射强迫量相当于二氧化碳 当量100年强迫量的25倍。

政府间气候变化专门委员会提供每种主要温室气体 20年，100年和500年的GWP值。每次应用 GWP 时，此时间范围的选择都是必要的。对于黑炭，此选择看似比较困难，因为其时间范围的不同会使 GWP 值产生较大变化。此差异来源于短

期和长期存留的强迫物质取决于时间长短带来的影响之间的差异。对于黑炭而言，使用较短时间范围如 20年可以反映其全部辐射强迫，但对于存留期较长的物质，如二氧化碳，则仅能反映其部分辐射强迫量。使用更长的时间范围如 100年，则既可以反映黑炭能产生的全部强迫量，也能反映二氧化碳会产生的大部分强迫量，因此它们总强迫量之间的区别随时间范围的延长而变小。这解释了为什么黑炭的 100年 GWP 远低于 20年的GWP 值。

但时间范围的选择不应取决于被评估的温室排放气体，而应取决于整体政策目标。如果目标是避免 100年内产生的全球影响，则 100年 GWP (GWP100) 是合适标准。如果期望控制 20年内的全球影响，则需要 20年 GWP (GWP20)。签署京都协议的各方选择主要使用 100年的时间标准来计算他们的总排放量统计，这表明他们倾向于关注长期影响，因此也比较关注能长期存留的温室气体。采用更短的20年时间标准将意味着更关注短期性气候影响，更加强调黑炭及其他短期存在的强迫因素。

根据黑炭的 GWP 值，它是一个有巨大影响的气候强迫因素。尽管政府间气候变化专门委员会从未明确提供黑炭的 GWP 值，但第四次评估报告的信息内在图 2.22 中提供了有关此 GWP 值的图表，该图位于 Forster et al (2007) 的第 206 页。另外该报告 164 页表 2.5 也提供了评估此值的必要信息。在 210 页上提供了如下所示的计算 GWP 值的公式：

$$GWP_i = \frac{\int_0^{TH} RF_i(t) dt}{\int_0^{TH} RF_r(t) dt} = \frac{\int_0^{TH} a_i \cdot [C_i(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [C_r(t)] dt}$$

其中 GWP<sub>i</sub> 是 1 千克混合物 i 的脉冲排放的累积时间的全球平均辐射强迫与同量参考气体 CO<sub>2</sub> 的辐射强迫之比。TH 是时间范围，a<sub>i</sub> 是混合物 i 的辐射效率，[C<sub>i</sub>(t)]是混合物 i 因随时间改变的丰度。分子和分母均被称为绝对全球变暖潜能值(AGWP)。在报告的 211 页上列有二氧化碳的 20年、100年、和 500年 AGWP 值。

由于黑炭的平均寿命少于 1 年，其年度平均辐射强迫等于任何时间范围内 (20、100 或 500 年) 的整合辐射强迫。如果知道了任何平均辐射强迫估计值的年

度排放量，则两者之比能表示每千克排放物的整合辐射强迫，这与 AGWP 相等。此方法被应用于表 2.5 中展示的各气溶胶模式比较研究 (AEROCOM) 中以计算出一个单独的 GWP 值，然后所有这些 GWP 值计算出平均值。表 1 中列出了结果。此方法比较保守，因为它仅提供了黑炭直接效应的 GWP 值，而没有包含其半直接、间接或雪反照率的效应。应用该 GWP 值

**表 1. 从政府间气候变化专门委员会第 4 次评估报告中获得的全球变暖潜能值 (GWP)**

	GWP20	GWP100	GWP500
黑炭	1600	460	140
甲烷	72	25	7.6
一氧化二氮	289	298	153
氧化硫	-140	-40	-12
有机碳	-240	-69	-21
二氧化碳	1	1	1

注意：用于黑炭的方法也被应用于有机碳和氧化硫。黑炭、有机碳和氧化硫的值未经政府间气候变化专门委员会公布，为非官方估计。

的前提是假定被对比的排放物产生的辐射强迫是平均分布在地球上的，所以任何两种排放物均产生相等的辐射强迫，无论其地点在哪里。但因为黑炭寿命短，其辐射强迫是区域性集中的，此假设对其不成立。寿命短的气溶胶在短距离内移动，产生强烈的区域性辐射强迫，该辐射强迫有时被称为“热点”。此辐射强迫的地点和持续时间会因随当地情况对其寿命和移动的影响而变化。因此，即使 GWP 等值的两个黑炭排放物也不会产生相等的辐射强迫。这表明用 GWP 为权重衡量的黑炭排放量不一定代表二氧化碳当量值。

政府间气候变化专门委员会在其 2007 年报告中承认了 GWP 对于寿命短的强迫因素的应用限制，并号召为寿命短的排放物制定一个新测量标准。它说道“为评估寿命短的气体类型可能造成的气候影响，和将其与 LLGHG（寿命长的温室气体）的影响对比，需要一个测量标准。”<sup>9</sup> 在 2009 年它再次确认 GWP 为标准测量方法，但为其将在 2013 年发表的第五次评估报告中采用另类测量方法开辟了道路。

尽管如此，黑炭的区域辐射强迫带来的气候影响对区域和全球范围均有作用。辐射强迫造成了延伸到强迫区域外的变暖情况。总体来说，这些强迫影响区域就是一个全球问题。

除 GWP 外的另一个测量方法是全球温度变化潜能值(GTP)。它是气候改变物质的脉

冲排放与二氧化碳的脉冲排放造成的温度改变之间的比值。以 GTP 加权衡量的排放量相等的污染物不论寿命长或短都将在一个选定年份中产生相等的全球平均温度影响。这就是说 GTP 比 GWP 能更精确说明黑炭的二氧化碳等量气候影响。但是，决策者们仍然需要选择计算相应度量值的时间范围<sup>11</sup>。

政府间气候变化专门委员会在其最新的报告中提到了 GTP，但没有提供具体值。一篇由起草了部分政府间气候变化专门委员会报告的领头科学家们共同编写的最新论文中提供了表 2 中的估计值。

**表 2. 黑炭与其他污染物的全球温度变化潜能值 (GTP)**

	GTP20	GTP100
黑炭	470	64
甲烷	57	4
一氧化二氮	303	265
有机碳	-71	-10
氧化硫	-41	-5.7
二氧化碳	1	1

出处：Fuglestedt, J., K. Shine, T. Berntsen, et al. (2009) 交通对大气与气候的影响：度量标准。大气环境出版社。

GTP 使用了一个位于因果链更深层次的、更接近社会影响的影响参数，但是同时也增加了不确定因素：其取决于对气候敏感度和气候响应时间的估计。随着这些估计值的改进，特定排放物的GTP就应该重新计算。

如GWP一样，GTP也会因背景条件的不同而异，并且也没有对降雨量或融雪影响进行量化，而这对于黑炭气溶胶的分析是非常重要的。尽管如此，GTP是一种有可能成为GWP替代物的度量办法。

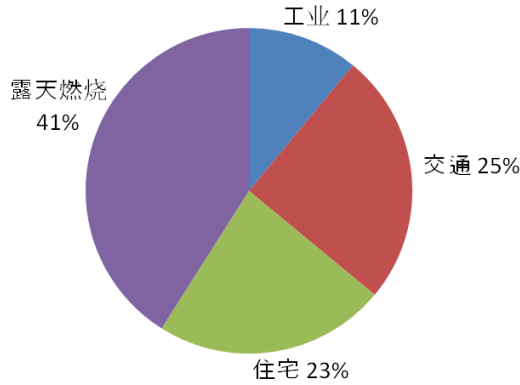
如果没有一个共同尺度来比较寿命短和长的气候影响因素，有一个选择可以是将黑炭从多种污染物分析中排除，为其减排建立单独的目标。

## 源头与目标

最新的统计数据显示，主要的黑炭源头包括工厂、电厂、交通运输和住宅中燃烧的化石燃料。民用生物燃料燃烧、农业烧荒和森林火灾也是重要源头。

由于黑炭总是与一系列气溶胶一起排出，

图 1. 2000 年来自所有源头的全球黑炭排放比例



出处：Bond, T.(2009) 黑炭：排放来源与相对重要性在 2009 国际黑炭研讨会上提出。英国伦敦，2009 年 1 月 5 号- 6 号。

包括一些反光气溶胶，在确定目标的轻重缓急时，不仅要考虑各污染物的存量，也需考虑它们的净吸收作用和反射作用及这些作用的强度。有机碳和硫酸盐具反光性，因此对于某一排放源，这些复合物相对于黑炭排放量的比例越小，其造成的正辐射强迫就越大。这些分析也应考虑到黑炭的转移和在冰雪上的沉降。令更多黑炭黏附在冰雪表面的排放物会造成冰雪表面更大的正辐射强迫。界定各主要排放源由负到正辐射强迫的临界值还在研究之中。

根据我们所了解的黑炭主要源头的排放的成分，燃烧低硫化石燃料会造成净正辐射

表 3. 缓解黑炭的气候影响的“无悔”目标

I. 以下各项中的柴油燃烧

- A. 公路运输重型车辆
- B. 非公路运输农业、建筑及其他车辆

II. 以下各项中靠近北极的排放

- C. 来自森林火灾和计划性农业燃烧
- D. 商业海运中的柴油燃烧

III. 以下各项中靠近冰川的排放

- E. 住宅取暖和做饭中的生物燃料燃烧

IV. 以下各项中低硫煤炭燃烧

- F. 住宅取暖和做饭
- G. 工业砖窑

强迫，而民用生物燃料燃烧、高硫化石燃料燃烧和露天燃烧可造成净负强迫；但是，当这些源头靠近冰和雪时，它们可以造成局部正强迫，其强度还不为人知，但这可能会抵消全部或部分负强迫。表 3 说明了根据此方法确定的黑炭优先源头的目标，表 4 提供了根据主要源头类别估计的可行的最大降低量。

表 4. 2030 年对比基准排放量评估的最大可行减排量

	黑碳	有机碳	氧化硫
工业	621	502	457
露天燃烧	373	1.177	166
交通	1.032	397	1.95
住宅	750	2.404	2.043
总计	2.776	4.48	4.616

出处：改编自国际应用系统分析研究所(IASA)的评估；Michael Walsh，国际顾问，和 Corbett 及 Winebrake，能源与环境研究协会 (EERA)。

注意：对碳当量排放量的评估需要一个如 GWP 或 GTP 的权重因子。例如，使用 20 年 GWP 值的二氧化碳当量黑炭排放量为

## 减排战略

### 公路运输

高度机动化、工业化国家如美国和欧盟的严格排放控制措施降低了全球运输中的黑炭排放量，但是全球车辆在 2050 年将达到现在的 3 倍。<sup>12</sup> 如果不采取行动，则预计这些排放量将再次升高，并在 2050 年达到比 2000 年高出 20% 的水平。在此时间范围内，预计高污染重型柴油车辆将仍然是运输相关黑炭排放量的主要源头，但摩托车、轻型汽油车辆和轻型柴油车辆也应是控制对象。

首要的、最有效的减排战略是在柴油车辆上安装壁流过滤器（也称为柴油微粒过滤器）。当使用 15 (ppm) 或更低的超低硫燃料时，这可以切实地消除黑炭排放，而且在安装该装置后就能立即获得效益。

适当的政策干预可以包括在新车排放标准中要求加入柴油微粒过滤器和使用低硫燃油；鼓励或要求改装现有车辆来加装微粒过滤器的措施；有效的核实及实施体制；以及提早报销高污染的旧型车辆。几个国家已成功实施了以上战略，它们会大大改善当地空气质量和公共健康状况。

同样值得考虑的措施是那些能同步降低黑



炭和二氧化碳排放的方法。这些包括低碳燃料、更效率的发动机、更轻型和更符合空气动力学设计的车辆，以及甚至零碳模式。对于同步有效地降低黑炭和二氧化碳的措施，重要的是要迅速向先进排放控制技术过渡和在所有领域都促进可再生资源的使用以减少权衡取舍并达到所有区域的气候目标。改变运输需求和交通行为以降低污染活动也十分重要。这些措施的实施需要对基础设施进行投资以支持使用公共交通、自行车、步行、远程办公和其他替代交通的方式。这也需要调整土地使用方式和经济政策以鼓励和促进这些转变，并且不会以交通出行的便利性为代价或阻碍经济发展。所有这些方法使运输系统能变得更有效率、降低成本并减少排放量。

## 非公路运输

海洋运输、火车、农用车辆、建筑设备以及其它商用非公路车辆属于非公路运输类。这些源头的排放不太明确，并且管制可能没有对公路运输那么严格。非公路运输燃油的质量通常比公路用柴油更低。控制非公路运输排放控制策略与公路运输相似，包括使用低硫燃油加微粒过滤器等后处理技术。对船舶排放的策略还可以包括操作性措施，例如限制速度、港口的岸电充电等等。海上船舶用油的硫含量比公路运输用油更高，但是最近实施的法规准备在2020年之前将其硫含量降低80%以上。随着目前降硫政策导致的燃油质量的提高，黑炭的相应减排尤为必要，以抵消硫酸盐减少可能产生的任何潜在的增温影响。

## 住宅煤炭和生物燃料

从公共健康角度来看，全球的住宅煤炭和生物燃料炉是需要控制的无悔对象，而其排放的潜在气候影响增强了使用更清洁燃料的需要。更高效率并且使用更清洁燃料的燃料炉正在被开发。但针对此类排放源的控制策略面临着—项挑战，那就是如何使用适当科技从现有燃料资源中满足当地取暖和烹饪需求。清洁先进的可再生资源在长期对于在家用能源领域避免化石燃料的管道网扩张是特别重要的。

## 特定工业排放源

不幸的是，由于没有健全在现场测量机制，工业黑炭排放是全球排放量统计中最弱的部分之一。但专家已提出鉴于砖窑主要使用煤炭，因此它们是最重要的工业黑炭源。柴油发电机的黑炭排放属于全球排放量中的非公路运输类，但其在工业活动

中的角色也需要认清。实现排放控制可以从使用其他技术来替换这些高排放砖窑着手。

## 靠近冰雪的露天生物质燃烧

露天燃烧是有机碳的高排放源，因此其直接效应可能是降温；但是，在冰雪融化时接触冰雪表面的黑炭排放会产生强烈的地区性变暖和融化效应。防止上述效应的策略包括对农业烧荒的季节性禁燃令和其它的燃烧控制措施。

## 研究需求

### 总量测量

对黑炭总排放量的估计值（如政府间气候变化专门委员会第四次年度报告中的估计值）具有很强不确定性。目前关于某些排放源的子类别的相关信息还很不足。正在进行的改善总排放量数据的措施包括改善行为数据和有针对性的目标测量以确认气溶胶成分和数量。这将有助于优化减排目标选择和分析。

### 全球变暖潜能值

需要研究度量方法的设计与制定气候政策的关系。也需要研究的是将多气体政策扩展至包含短期存在物质的可能性，无论是归入长期存在的强迫因素“篮子”，还是作为独立系列。

### 控制策略对气候的影响

与单个污染物造成的影响相比，污染源排放的多种气溶胶的控制策略所造成的净气候影响是更附有政策制定参考价值。需要对控制策略的净影响进行源头分析与地理位置分析方可强化其实施论据。

### 辐射强迫的不确定性

政府间气候变化专门委员会提供的自前工业时期的辐射强迫估计和在经过同行评议的文献中的最新估计相差三倍。有关此差异的解释和对相关值的共识将深化我们对黑炭对全球气候变化的相应影响的理解。

## 鸣谢

感谢在伦敦国际研讨会上各发言者的贡献，此文件编写于2009年1月开始。从中我们对政府间气候变化专门委员会第四次评估报告进行了全面评审，并确认了所有有关黑炭的所有记载。所有报告中的相关信息已被提取并纳入到本文中。在有关GWP和度量方法方面，我们也获得了Jan Fuglested

和 Terje Berntsen 的很多帮助与指导。Tami Bond 非常有耐心并花费了大量时间为我们多份草案审稿并评论。第一稿及随后的草稿都足足经过了三轮评论过程, 数量多达 18 组追踪修订的评论。它们包括来自 Martin Williams, Alan Lloyd, Michael Walsh, Tami Bond, Catherine Witherspoon, Mark Jacobson, Olivier Boucher, Ellen Baum, John Guy, Jan Fuglestedt, Drew Shindell, Elisa Dumitrescu, 和联合国环境规划署职员, Anumita Roy Chowdhury, Ben DeAngelo, 和 Kate Blumberg 的评论。在此对他们表示衷心感谢。

## 注释

<sup>1</sup>2009 国际黑炭研讨会由国际清洁交通委员会 (ICCT) 组织, 于 1 月 5 号-6 号在英国伦敦召开。在 <http://www.theicct.org> 上可以看到会议日程、发言者清单、和报告。

<sup>2</sup>指自前工业时期(1750-2005)起的全球累积辐射强迫。对气候的影响是辐射强迫造成的。

<sup>3</sup>指整合辐射强迫, 也被称为全球变暖潜能值 (GWP), 它是根据各种前瞻性时间范围来评估的。政府间气候变化专门委员会没有公布黑炭 GWP 值, 并号召为短期存在的气候强迫因素制定另外的度量标准。但它公布了导出 GWP 值所需要的数据, 本文件中计算了该值。本文也对全球变暖潜能值进行了全面讨论。

<sup>4</sup>政府间气候变化专门委员会将黑炭定义为包含煤烟、木炭、和难降解有机物质, 但最后两者比煤烟的吸光性小 5 至 10 倍, 因而其 GWP 值较低。

<sup>5</sup>在 Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, et al 中的表 2.5. (2007) 大气成分和辐射强迫中的变化。在 2007 气候变化报告中: 自然科学基础。政府间气候变化专门委员会第四次评估报告第一工作组撰写。剑桥大学出版社, 英国剑桥, 美国纽约。

<sup>6</sup>同上, 207 页中的表 2.13。

<sup>7</sup>黑炭的辐射属性取决于其混合状态。混合状态描述的是黑炭是被其他颗粒包含在内部 (内部混合) 还是与它们相分离 (外部混合)。模拟模型和实验室研究显示黑炭主要是内部混合的, 这比外部混合具有更大正辐射强迫。

<sup>8</sup>脉冲排放能立即增加大气中的气候强迫气体或气溶胶的浓度。

<sup>9</sup>Forster et al (2007) 第 211 页

<sup>10</sup>2009 年 3 月 18 至 20 号政府间气候变化专门委员会在挪威奥斯陆举行的替代测量标准科学专家会议的总结报告。

<sup>11</sup>时间范围应根据政策目标而定, 如欧盟避免气温升高超过 2 摄氏度或避免如北极夏季海冰消失的引爆点等大规模影响的目标。

<sup>12</sup>2008 国际能源署能源科技展望报告。在 <http://www.iea.org/Textbase/techno/etp/index.asp> 上可查看此报告。