炭黑

驱动气候变化的黑客

近几十年来，延缓全球气候变暖的措施主要局限于限制可吸收热量的CO_2排放。现在，科学家开始关注其他的他们认为控制全球气温必需要关注的致热因素。作为“短期气候推进因素”（short-lived climate forcings，SLCFs）的炭黑颗粒物、甲烷、氢氟碳化物以及对流层臭氧等就其致热潜力而言比CO_2更强。但这些物质在大气中存留的时间比可在大气中存留成百上千年的CO_2要短的多[1]。

皮尤研究中心（Pew Center）全球气候变化部政策分析方面的副主任Steve Seidel认为，目前对SLCFs的重视体现了在气候变化政策方面的新思索。“我们曾认为《京都协议书》及随后的几份协议能让我们达到目标，但这些政策没有发挥出我们希望的作用，”他说道，“因此我们放宽了讨论的范围，拓展了新的前进道路。”

由于人类无节制地大量排放，很多气候学家认为CO_2有一天会成为导致气候变化的主要推手。但在目前，斯克里普斯海洋学研究所（The Scripps Institute of Oceanography）的教授Veerabhadran Ramanathan认为，CO_2和SLCFs在改变气候方面的作用几乎相等。

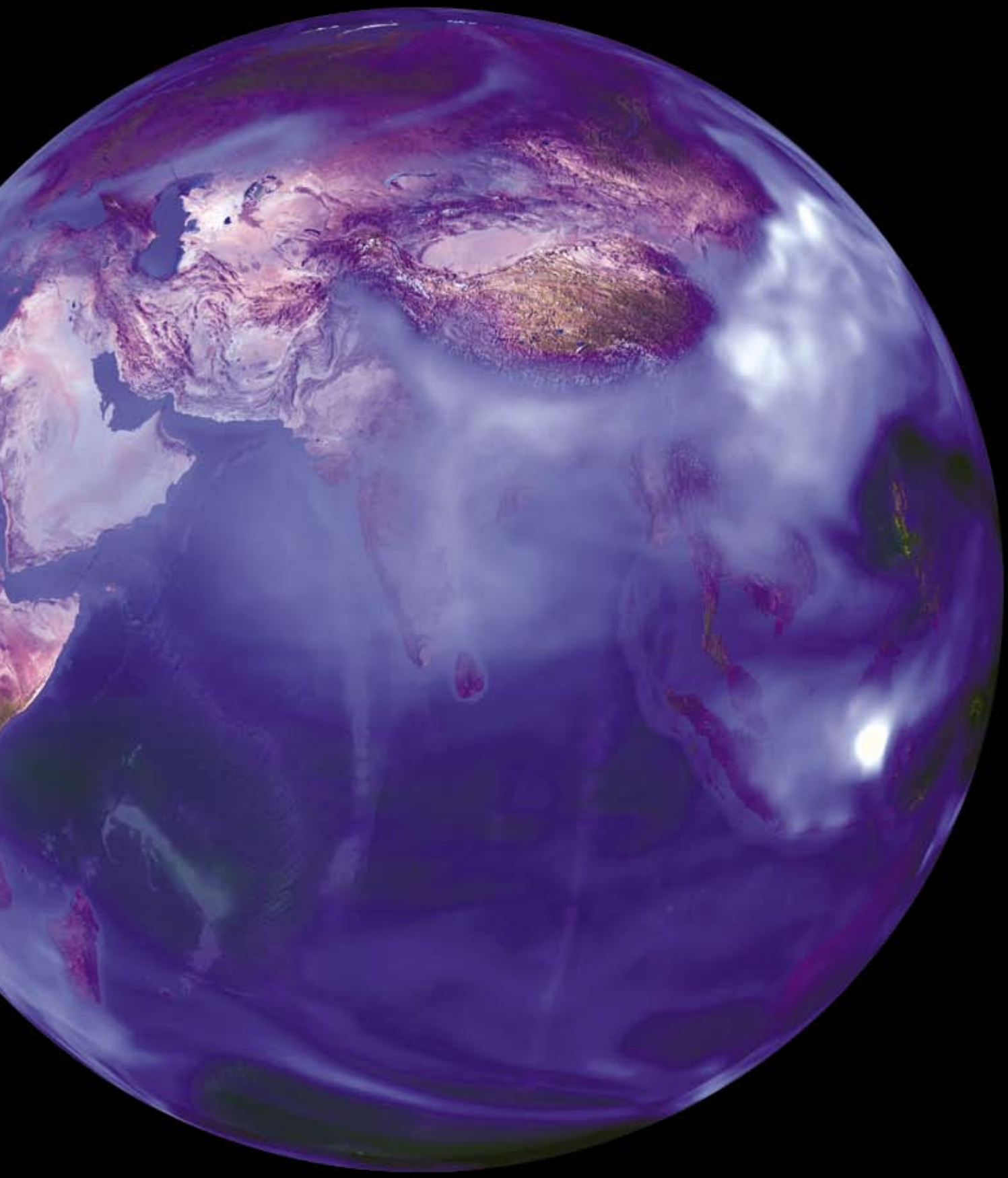
在2011年2月的一篇报道中，联合国环境规划署（United Nations Environment Programme，UNEP）号召人们重视SLCFs，要求削减CO_2排放的同时削减SLCFs的排放，以防止全球温度突破危险阈值[2]。UNEP指出这样做还有益于健康，因为SLCFs也是有毒的空气污染物。内燃机排放的颗粒物（炭黑的主要来源之一）与肺部和心脏疾病以及癌症相关[3]。Seidel认为，要将CO_2的排放降低到足以影响气候的程度，需要能源部门的改革（几十年内万亿美元的成本[1]），而通过削减SLCFs达到相似的目的只需要运用目前的技术在现行合适的政策框架内实施，例如清洁空气条例。

炭黑为何物？

斯坦福大学能源资源工程部（Stanford University Department of Energy Resources Engineering）教授Mark Jacobson认为，在SLCFs中，炭黑受到的关注最多，因为其引起的气候及健康效应大于其他因素。至少在20世纪90年代已有证据证明了炭黑的气候效应，当时Ramanathan及其同事Paul Cruzan（Max Planck化学研究所的一位获得诺贝尔奖的大气化学家），第一次阐明了承载黑色颗粒

全球超过四分之三的炭黑被认为来自发展中国家，产自于炉灶、开放式燃烧以及老式的内燃机。这一图谱化的数据采用了来自美国国家航空和宇宙航行局（NASA）的GEOS-5戈达德化学气溶胶传输（Goddard Chemistry Aerosol and Transport，GOCART）气候模型的资料来显示2009年9月26日大气中炭黑的浓度。气溶胶的光学厚度呈现出由0.002（透明）至0.02（紫色）再到0.2（白色）的非线性变动。全球黑色烟灰大气传输的动画演示可从以下网址获得：http://tinyurl.com/64nbykb 及http://tinyurl.com/69w9s6z。

NASA



“棕色云团”影响了南亚的气候模式，这一假设在进一步的研究中得到了支持[4]。

美国国家航空与航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）戈达德太空研究所（Goddard Institute for Space Studies）的科学家Drew Shindell领导的一个工作小组通过UNEP发布了新的研究报告，他们认为炭黑影响气候的方式十分微妙难以研究。直到最近这方面的研究才开始走向成熟，发展到了能在气候领域提出限制排放政策的阶段。Seidel说道：“我们目前从UNEP的文件以及其他研究报告中所得到的是试图形成炭黑气候效应的首次拼合图象及其阐述方法。”

伊利诺大学厄本那—香槟分校（University of Illinois at Urbana-Champaign）的大气科学系的兼职教授Tami Bond解释说，通过内燃机引擎、肮脏的炉灶以及露天焚烧排放到大气中的炭黑在燃烧时产生橙色光芒。“你所看到的是炭黑在火焰中发光。”Bond还说到，从火焰中散发到空气中去的是由几乎纯净的炭形成的团块状颗粒物，其大小是人类头发宽度的几千分之一。

这些颗粒物在其所有的波长上吸收阳光并将其热量传递给大气。携带热量的能力大约是CO_2一百万倍的炭黑能在气流中运行很远的距离[5]。如果炭黑随着降雪飘落在积雪或冰面上，将通过干扰白色物质反射太阳光的形式吸收热量并加速积雪或积冰的溶解[6]。

但是炭黑也和其他反射太阳光的量超过其吸收阳光量的颗粒物一起排放。那些有机物和灰烬颗粒物具有净冷却效应，这时燃烧释放物对空气的加热与炭黑的含量有关。据Jacobson所言，排在气候变暖能力名单首位的是内燃机的排放物，其排放物的有机物与炭黑颗粒物的比例大概是1:1[7]。

固体燃料燃烧的释放物——也就是燃烧动物粪便、木柴及其他各种农业废弃物的烹调炉灶的排放物——其排放的有机物与炭黑颗粒物的比例大概是4:1。Jacobson认为，开放式壁炉会闷烧并产生大量能反射太阳光的烟灰颗粒物，即使如此，其最终发挥的是对大气的净加温效应。在另一方面，森林大火燃烧的排放物，其有机物与炭黑颗粒物的比例是8:1，在短期内冷却了大气，但随后由于CO_2的大量排放导致气温升高。

对气候的影响

据Seidel介绍，全球每年排放的炭黑估计有800万吨，其中大约77%来自于发展中国家，主要来自于炉灶、露天焚烧以及老式内燃机的排放[8]。这意味着对大气进行清洁的大部分责任落到了贫穷国家，发达国家可能会提供财政和技术方面的支持。另一方面，像美国等更富有的国家，由于排放的炭黑较少，内燃机的排放物占据了绝大部分的比例[8]。

Shindell认为，落到格陵兰岛冰面上的炭黑主要来自于北美的排放，而北极圈中其余的炭黑来自于欧洲的排放。他说：“北美和欧洲最大的炭黑来源是内燃机，因此我可以有把握地说内燃机是这些国家炭黑来源的最大贡献者。”

至于北半球工业化国家在炭黑排放方面的其他贡献——已知北极圈冰层最可能受到北纬40度以北地区炭黑排放的影响[8]——Shindell还引证了森林大火、燃烧木材的炉灶及壁炉等例子。但是他强调炭黑在北极圈融化中的作用还不完全清楚，目前认为是温室气体导致了大部分的冰山消失[9]。

“我们认为北半球国家的炭黑是导致北极圈冰雪变黑的最主要因素，这至少承担了导致融解的部分责任，”他说道，“这很难确定，因为最近几十年北极圈的融化大大加速，而炭黑排放并没有大量增加的趋势——实际上炭黑的排放相当平缓——但我们仅有西半球的数据，而且这些数据也相当稀少。”

不像温室气体那样能长时间地漂浮在地球周围，炭黑在大气中被冲洗干净前[2]只能停留1周或10天。因此炭黑的效应为局部性而非全球性，其对气候的影响来自于辐射性的加热效应以及对云的形成和降雨的干扰[5]。

耶路撒冷希伯来大学（Hebrew University of Jerusalem）大气科学的教授Daniel Rosenfeld认为，关于炭黑对气候的影响很多方面尚未可知。他解释到，一般来说，空中悬浮的颗粒物形成了云，但炭黑颗粒物能热到蒸发水分，从根本上阻止云的形成。Jacobson补充说，云量减少导致了地面的升温，这样便降低了地面上的大气压力，使空气从高气压地区流向低气压地区，导致了更高的风速。

但是这依赖于一系列的条件，包括污染物的组成、地表的地形学特征等。排放的颗粒物也能进入由特殊的小水滴组成的云。Rosenfeld解释到，这些云团不会相互结合形成降雨。结果与通常情况相比，云量更多而雨水偏少，从而对水的供应及农业生产造成相应的影响[10]。

这些影响表明需要对此进行深入的研究，与此同时，地球正义组织的律师Erika Rosenthal认为，南亚的雨季比以往提早了大约2至3周时间，可能是该地区严重的空气污染所致[11]。她说道：“这对当地的农民非常重要，他们需要养活四分之一的世界人口。”

Rosenfeld警示说该领域仍在不断发展。“科学界难以弄清楚这些效应，”他说到。“我们设法在除去空气污染对云层、降水及蒸发作用的效应，对颗粒物吸收太阳光线和辐射效应进行区别。这是该研究领域的一大挑战。”

政策的影响

炭黑引起的人们对气候的担忧会怎么影响政策的制定有待于观察。SLCFs 的政策制定在某些方面已进入紧锣密鼓阶段。

UNEP在2011年的报告中提出了16项政策以阻止SLCFs排入大气层，其中包括限制工农业的甲烷排放量，禁止在空旷地燃烧农作物残渣，不允许陈旧的内燃机车辆上路，在发展中国家使用更清洁的方式取代传统的燃烧农业废弃物的烹调炉灶。UNEP声称，如果在20年内这些政策取得成功，在本世纪中期可期望将气候变化的速率减半，这样可以避免大约70～460万例因空气质量不佳导致的早产死亡[2]。

同时，由北极地区国家的政府间论坛—北极圈理事会（Arctic Council）召集的一个工作小组正在研究如何减少SLCFs的排放，他们的重点是降低近期冰层融化的速度[12]。具体的措施将会呈现在2011年5月12日在格林兰岛的Nuuk召开的理事会的下一次部长级会上提交的报告中。美国环保署（EPA）将在2011年4月向国会递交一份报告，详细说明炭黑的来源以及减少其对健康和气候影响的最经济有效的方法。EPA的官员在报告公布前拒绝评论。

Seidel认为，联合国气候变化框架公约（United Nations Framework Convention on Climate Change）并不适合商议炭黑的问题。他说道："你很可能会看到其将转移到关注空气质量的区域框架中去。"他举了个例子，蒙特利尔协议成功地淘汰了可破坏臭氧层的氯氟烃的使用。

在美国，减少炭黑的重点主要在内燃机标准，为了健康的需要，该标准从20世纪70年代已经十分严格。加利福尼亚州空气资源委员会（California Air Resources Board，CARB）率先行动，在20世纪80年代后期发布了第一份适用于全州的重型卡车内燃机排放的条例。之后，加利福尼亚州不断加强控制[13]，随后，EPA也参照了这一条例[14]。

2006年，EPA要求上路的车辆都使用超低硫燃料，硫排放标准从500 ppm降至15 ppm。目前EPA正扩展这一条例以覆盖更多的交通工具，包括非公路行驶车辆、火车以及轮船。超低硫燃料降低了炭黑的排放，因为他们允许使用颗粒物排气过滤器，而硫酸盐会"毒害"（导致无效率）这一装置。从2007年起，EPA要求所有新上路的车辆配备先进的排放控制装置，它需要更清洁的内燃机燃料才能正常运转。

Ramanathan团队最近发布的研究结果显示，1989至2008年期间加利福尼亚州的炭黑排放量下降了50%[15]（以加州环境保护多部门监测项目组在22个监测点的测量数据为基础）。该研究结果还表明排放量的下降伴随着全加州炭黑的加温效应（或更明确地说即"辐射力"）相应降低了50%。

然而CARB研究部门主任Bart Croes宣称，目前还没有计划进一步收紧内燃机条例以应对气候变化。"公众健康是条例的最大推动力，这些条例也会降低对气候的影响，"他说到，"因此我们不必为了气候（特定）去修订条例，我们为了健康所做的也正是我们应该为气候所做的。"

目前加州要求对2007年前上路的卡车和公交车进行改装以符合现行的颗粒物排放条例。据CARB的计算，2010年，这些陈旧车辆的内燃机颗粒物排放量占全加州上路卡车和公交车排放总量的95%。2012至2025年全州范围内对这些车辆进行改装所需的成本估计为22亿美元[16]。显而易见，全国范围内估计其成本将会更高：皮尤研究中心全球气候变化部2009年发布的一份炭黑报告中引用的数据显示，对美国境内大约540万辆内燃机重型车辆中的54%进行改装，需要耗费320亿美元[5]。

这是很大的一笔钱。但是考虑到美国90%的炭黑排放来自于交通运输，主要是内燃机车辆，这也仅是国家为了达到UNEP的计划为公路及非公路车辆安装颗粒物过滤器以及淘汰高排放公路或非公路车辆这2项政策所需付出的一部分，这2项政策属于UNEP在报告中确定的16条政策[2]。

与此同时，为了寻求削减预算，奥巴马总统砍去了2012年降低内燃机排放物项目（Diesel Emissions Reduction Program）的资金，这一项目赋予EPA基金和借贷权以资助对现有的内燃机车辆进行改装或替换。其替代的方案是，不要求强制性改装，直接将旧车报废。

但这引起人们的疑问：如果——就像加州的例子——美国不愿意或不太可能进一步收紧内燃机条例以应对气候变化，那么炭黑这一备受关注的焦点将如何影响环境政策？Seidel认为，暂且不论其经济效益，我们没有证据表明美国如果使用清洁的内燃机将对减缓北极圈的升温有巨大作用。然而，Rosenthal反驳道，美国在北极圈炭黑污染中的贡献使其有必要加快清洁内燃机的排放物。

但发展中国家有更多降低排放的空间，她补充到，这些国家的内燃机标准并不严格，而且这些国家的烹调炉灶和露天焚烧是主要的环境污染问题。"将科学融入政策是复杂的，"Rosenthal说到，"但我们现在必须对此做出决定。"

Charles W. Schmidt，硕士，来自缅因州波特兰市的一位获奖科普作家，为《探索杂志》（*Discover Magazine*）、《科学》（*Science*）和《自然医学》（*Nature Medicine*）撰稿。

译自 *EHP* 119(4):A172−A175 (2011)

翻译：钱海雷

***本文参考文献请浏览英文原文**

原文链接

http://ehponline.org/article/info:doi/10.1289/ehp.119-a172