

减少黑炭或许是减缓气候变化的最迅捷策略

IGSD/INECE 气候简报: 2008年8月29日

黑炭是潜在的气候强迫物质以及缓解气候变化的关键对象

减少黑炭可能是迅速缓解气候变化的最大希望。黑炭是一种潜在的气候强迫物质。据估计, 黑炭是造成全球变暖的仅次于二氧化碳的第二大根源。因为黑炭仅在空气中存在几周, 减少黑炭的排放可能是在短期内减缓气候变化的最迅捷途径。¹

解决黑炭问题有助于延迟突然而不可逆转的气候变化的临界点或引爆点的来临², 而这一临界点可能就在十年之后, 并将带来灾难性的后果³。解决黑炭问题也能够为决策者提供在中期或远期解决二氧化碳排放问题的关键性时间。

对黑炭的气候变化影响(包括直接和间接影响)的估计不一。联合国政府间气候变化专门委员会的估计是 $0.3\text{W/m}^2 \pm 0.25$,⁴而最近的估计值是 9W/m^2 (参看表1), 这一数值是“二氧化碳的影响值的55%, 并且大于其它温室气体, 例如甲烷, 氯氟烃, 一氧化二氮, 或者臭氧的影响值。”⁵

在有些地区, 例如喜马拉雅地区, 黑炭对雪山和冰川融化的影响可能等同于二氧化碳。⁶黑炭的排放还对北极冰川融化有重大影响。而这事关重大, 因为“ 0°C 作为冰和水——晶莹剔透的冰雪与幽暗吸热的海洋的分界, 是被最广泛阐述的‘临界点’。”⁷因此减少此类排放可能是“我们所知的减缓北极变暖的最有效途径。”⁸

自上个世纪50年代起, 很多国家开始有效减排黑炭, 尤其是来自化石燃料的排放, 主要目的是促进公共健康, 同时在全球各地都“不乏有效减排化石燃料产生的黑炭的技术。”⁹遵守和执行已有的规制黑炭排放的法律机制可以获得一些成效, 但为了实现进一步更迅速的减排, 尤其是在全球性的排放不断增加的背景下, 新的法律法规以及自愿的合作机制就成为必须。¹⁰

减少黑炭可能是减缓全球变暖的最迅捷途径

联合国政府间气候变化专门委员会在其2007年的报告中第一次估计, 源自化石燃料排放的黑炭的直接辐射强迫为 0.2W/m^2 , 黑炭通过对冰雪的表面反照率的影响带来的辐射强迫为 0.1W/m^2 。¹¹很多被联合国政府间气候变化专门委员会报告引用的科学家在单独的研究和公开证词中估计, 黑炭的排放是造成全球变暖的仅次于二氧化碳的第二大来源, 减少此类排放可能是减缓气候变化的最迅捷策略。¹²

黑炭是碳质气溶胶, 也就是使煤烟呈黑色的物质, 的强吸收成分。¹³黑炭是由化石燃料, 生物燃料和生物质的不完全燃烧产生的, 其存在于人为或自然产生的煤烟中。黑炭通过吸收太阳辐射再释放入空气以及在存储于冰雪中时减少反照率, 即反射太阳光的能力使得地球升温。黑炭在空气中存在几天到几周, 而二氧化碳在空气中可存在一百多年。¹⁴

考虑到黑炭的寿命较短, 减少黑炭的排放可以在数周内减缓变暖。斯坦福大学的Mark Jacobson博士指出, 在短期内控制黑炭, “尤其是源自化石燃料的部分很可能是减缓全球变暖的最迅捷手段”。他认为有效减少黑炭的排放可以将气候变化的影响减缓十到二十年,¹⁵从而给决策者更多时间来减少二氧化碳排放。¹⁶减少黑炭排放有助于避免气候系统跨过一系列突然的气候变化的临界点。这些气候变化包括格陵兰岛和/或北极冰层瓦解导致的海平面显著上升。¹⁷

V. Ramanathan博士和G. Carmichael博士指出 “黑炭是仅次于二氧化碳的造成全球变暖

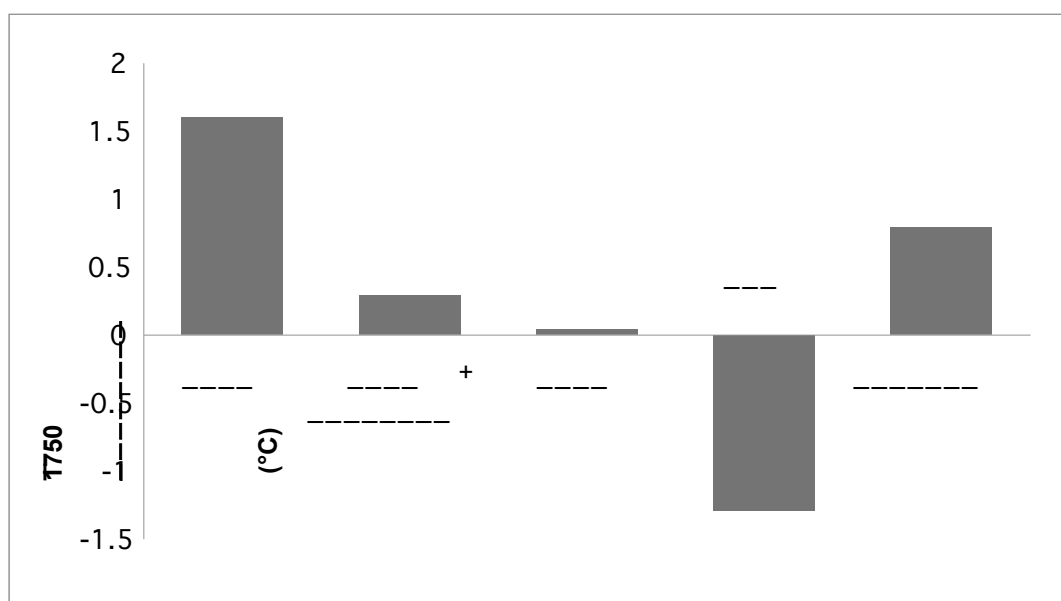
的第二大根源。”¹⁸他们计算出黑炭的直接气候强迫是 0.9 W/m^2 ，这一数值“是二氧化碳的强迫值的55%，且大于其它温室气体，例如甲烷，氯氟烃，一氧化二氮，或者臭氧的强迫值。”¹⁹由于不确定因素的影响，其他科学家对黑炭的直接强迫的估计在 0.2 至 0.6 W/m^2 。联合国政府间气候变化专门委员会估算的二氧化碳的气候强迫值为 1.66 W/m^2 ，甲烷为 0.48 W/m^2 。²⁰(参看表2)。这并没有包括黑炭对冰雪反照率的间接影响。后者使得黑炭对北半球和北极的温度升高的强迫相当于等量二氧化碳的二或三倍。²¹

Jacobson计算得出，减少化石燃料和生物燃料的煤烟颗粒可以减少可见的全球变暖的40%。²²(参看图1)除黑炭外，化石燃料和生物燃料的煤烟还含有气溶胶和颗粒物。后者可以通过反射太阳辐射来给地球降温。²³如果将气溶胶和颗粒物质的作用考虑在内，化石燃料和生物燃料的煤烟可导致温度升高 0.35°C 。²⁴

黑炭本身的20年全球升温潜能值高达4,470，而100年全球升温潜能值为1,055-2,240。²⁵由于与降温的气溶胶和颗粒物混合在一起，黑炭的20年全球升温潜能值为2,530，100年全球升温潜能值为840-1,280。²⁶

然而本世纪这些降温的气溶胶在空气中的数量预计会有所减少，其原因主要是二氧化硫排放量的减少。黑炭等其它介质的升温效果则会因帮助抵消升温效果的气溶胶的减少而明朗化。此外，按照联合国政府间气候变化专门委员会的A1B模式，黑炭的排放量未来将会翻一番，从而更加剧了其升温效果。²⁷因此，为了缓解黑炭增加带来的增温效果，以及与缓解黑炭现有的升温效果的气溶胶的减少保持步调一致，解决黑炭问题至关重要。²⁸

Figure 1²⁹



1750年至今全球模式下全球变暖的主要来源。化石燃料和生物燃料的煤烟的数值计算已将煤烟对冰雪反照率的影响以及与黑炭同时释放的降温成分和颗粒物考虑在内。

黑炭正在加速 Arctic Sea-Ice和喜马拉雅雪山的升温

联合国政府间气候变化专门委员会指出，“当黑炭出现在强反射的表面，例如冰雪或者云层表面时，可能导致明显的正面辐射强迫。”³⁰其还指出生物质燃烧的排放物通常是产生负面的强迫，³¹但是在类似喜马拉雅这样的雪域反而会起到正面的强迫作用。³²

黑炭是导致北极冰川融化的重要渊源，加州大学欧文分校的Charles Zender博士指出，减少黑炭排放可能是“救济我们所知的北极升温的最有效途径。”³³“在北半球和北冰洋的

中高纬度陆地地区，冰雪反照率的变化导致的气候强迫值高达 1.0 W/m^2 。”³⁴“煤烟对雪的反照率的影响可能导致了四分之一的全球变暖问题。”³⁵美国国家航空航天局的科学家James Hansen博士和Larissa Nazarenko博士指出：“煤烟加速了冰层表面的融化，而融水激发了多重辐射和动力反馈过程，而进一步加速了冰雪瓦解。³⁶由于这一反馈过程，“积雪上的黑炭的升温效果比等量的二氧化碳高出三倍。”³⁷当北极的黑炭含量在冬季和春季由于北极霾而增加时，表面温度会升高 0.5°C 。³⁸

北欧，北美和亚洲的黑炭排放对北极升温的绝对影响最大。³⁹然而，产生于北极的黑炭排放对北极升温的影响要大于源自其它地方的排放。⁴⁰随着北极冰川融化和航运活动的增加，预计源自北极的排放量会上升。⁴¹

在有些地区，例如喜马拉雅地区，黑炭对正在消融的雪山和冰层的影响可能等同于二氧化碳的影响。⁴²东亚和南亚地区的黑炭导致喜马拉雅地区的温度升高大约 0.6°C 。⁴³一项“对喜马拉雅北麓的温度趋向的分析显示自1950年以来温度上升已逾 1°C 。”⁴⁴这一明显的变暖趋势被认为是喜马拉雅冰川后退加剧的原因，⁴⁵其后果将会威胁到中国 and 印度的淡水供应和食物安全。⁴⁶

黑炭的主要来源

地区分布：发达国家曾经是黑炭的主要排放源。但是这一情况从上个世纪50年代开始随着污染控制技术在这些国家的采用而开始改变。⁴⁷尽管美国的二氧化碳排放量占世界排放量的21%，它排放的煤烟只占世界排放量的6.1%。⁴⁸美国和欧盟可以通过加速实施在2015或2020年生效的黑炭法规⁴⁹和采纳在议的国际海洋组织(IMO)的规范来减少它们的黑炭排放。⁵⁰还可以扩展现有的法规，增加清洁柴油和清洁煤炭技术的使用并开发第二代技术。

时至今日，黑炭排放主要是来源于发展中国家⁵¹而且这一趋势将日趋明显。⁵²黑炭的主要来源是亚洲，拉美和非洲。⁵³中国和印度的黑炭排放量占全球总量的25-35%。⁵⁴自2000至2006年间，中国的黑炭排放量翻了一番。⁵⁵发达国家现有的很多经过良好测试的技术，例如清洁柴油和清洁煤炭可以引入发展中国家以减少它们的排放量。⁵⁶

黑炭排放“在主要的来源区域达到顶峰，并因此形成了黑炭引发的空气日照加热的热点区域。”⁵⁷这样的热点地区包括“南亚的印度河-恒河平原、中国东部、东南亚大部分地区包括印度尼西亚、撒哈拉以南南非以北的非洲地区；墨西哥和中美洲，以及南美洲巴西和秘鲁的大部分地区。”⁵⁸大约有30亿人口居住在这些地区。⁵⁹

来源分布：根据Ramanathan的估算，大约20%的黑炭是由于燃烧生物燃料产生的，40%的来自化石燃料，另外40%来自室外燃烧生物质。⁶⁰无独有偶，伊利诺伊大学厄本那-香槟分校的Tami Bond博士对黑炭的来源做了如下估计：⁶¹

- 42% 室外燃烧生物质(燃烧森林和草原)
- 18% 居民使用传统技术燃烧生物燃料
- 14% 运输工具使用柴油发动机
- 10% 工业使用柴油发动机
- 10% 工业流程和发电，通常来自小锅炉
- 6.0% 居民使用传统技术燃煤⁶²

黑炭的来源因地域而异。例如，南亚的煤烟排放多是来自使用生物燃料做饭，而东亚则是用于工业和居民用途的燃煤占更大比重。

化石燃料和生物燃料煤烟中黑炭的比重远大于降温的气溶胶和颗粒物，因此减少此类来源是非常强有力的救济策略。例如，柴油发动机和航运船只的排放物中所含的黑炭就高于其它来源。⁶³规制柴油发动机和航运船只产生的黑炭是减缓黑炭的温室效应的绝佳机遇。

生物质燃烧所产生的降温的气溶胶和颗粒物要多于黑炭，因此短期内会有降温效应。⁶⁵然而，长远来看，如果将二氧化碳排放和森林退化考虑在内，生物质燃烧可能会导致总体上的升温效果。⁶⁶因此长远来看，减少生物质的排放可以缓解全球变暖并产生减少空气污染，二氧化碳排放和森林退化的伴随效应。康奈尔大学的Johannes Lehmann预测，如果将农业的砍伐并焚烧，即使用明火将生物质烧成灰烬，并在此过程中释放黑炭⁶⁷和温室气体⁶⁸，转变为砍伐后炭化，每年可以减少12%的因土地用途改变而人为释放的碳，⁶⁹这一数值大约为每年0.66 Gt CO₂-eq.,约占全球年均CO₂-eq 排放量的 2%。⁷⁰

季节分布: 黑炭带来的强迫的数值大小和温度反应可能会受到季节影响。尤其是在北极地区，那里的气候影响数值和机制受控于传输，日照，冰雪融化和沉积的相互作用。在冬季和早春，中纬度地区的污染物被有效地传输到了北极地区，加之大气运动有限，导致空气浓度较高。⁷¹夏季，当北半球森林燃烧的排放物到达北极时，也可能出现高浓度。⁷²

当黑炭覆盖在高反射率的冰雪表面时，就会降低其表面的反射率，并产生正面的表面强迫。最严重的强迫出现在早春季节，可能加速冰层的春融。⁷³

减排黑炭的技术现已存在

Ramanathan指出“从上个世纪50年代以来，发达国家已经将它们的源自化石燃料的黑炭排放量减少了5点甚至更多。因此，有效减少来自化石燃料的黑炭的技术已经存在。”⁷⁴

Jacobson则认为，“只要具备合适的条件和动机，煤烟污染的技术可以被迅速取代。在一些小规模的应用中（例如发展中国家的家庭做饭），当存在经济可靠的替代物时，健康和便捷的考虑可以实现这一转变。对于其它来源，例如车辆或者锅炉，也许需要规制措施来推动现有技术的转换或者新技术的研发。”⁷⁵

Hansen指出“可以通过技术大量减少煤烟，将雪的反照率恢复到接近最初的程度，同时对气候，人类健康，农业生产率和环境美观。在很多地区，来自煤炭的煤烟排放因小型用户转型为带有除尘器的发电站而正在减少。”⁷⁶

Jacobson建议进行如下转变，“将美国的交通工具从化石燃料转变为电力，插入式混合动力，或者氢燃料电池。其电力或者氢由某种可再生能源产生，例如风能、太阳能、地热、水力发电、波浪或潮汐能。这样的转变每年可以减少160Gg化石燃料煤烟，占美国排放量的24% (或世界排放量的1.5%)以及美国26%的二氧化碳排放（相当于世界排放量的5.5%）。”⁷⁷根据Jacobson的估算，这一计划每年可以减少1.63 GtCO₂-eq.的煤烟和二氧化碳排放。⁷⁸不过他指出，“减少碳氢化合物和氮氧化物也会减少一些降温的物质，并因此而将总体效应多达二分之一，但是有益人类健康，”对一个国家的一项政策而言是个巨大的减少。⁷⁹

现存还有一些针对柴油运输工具的行之有效的技术。柴油机氧化型催化转换器（DOCs）已经投入运用了30多年，它可被用于几乎任何柴油运输工具，并减少25-50%的颗粒物排放。⁸⁰新型的更高效的柴油微粒过滤器（DPFs）或者捕集器可以减少90%以上的黑炭排放，⁸¹但是这些设施需要超低硫燃料（ULSD）。为了确保新的在路和通用机动车遵守新的颗粒物规则，美国联邦环保署率先要求在全国范围内转变为超低硫燃料，从而使得柴油机动车可以使用柴油微粒过滤器来达到标准。

由于最近出台的联邦环保署法规，柴油机动车的黑炭排放预计会在2001年到2020年间减少70%。⁸²总体看来，“美国的黑炭排放预计会在2001到2020年间减少42%。”⁸³联邦环保署估计如果整个行业都遵守这些法规，每年将会减排239,000吨颗粒物。⁸⁴在美国之外的其他国家，常常可以使用柴油机氧化型催化转换器，而柴油微粒过滤器也会随着超低硫燃料的逐渐商业化而渐渐推广。此外，还出现了一种新型的滤芯，也被称为部分或通流式滤芯。这种滤芯并不会捕集颗粒物，而是使用一个弯曲的流程通过催化剂将其氧化。⁸⁵这些滤芯广受欢迎，因为它们不需要超低硫燃料且能够除去40-70%的颗粒物。⁸⁶

另一种减少柴油发动机的黑炭排放的技术是使用压缩天然气燃料。在印度新德里，法院命令所有的公共交通工具，包括公共汽车，出租车和人力车都转为使用压缩天然气。此举带来了气候收益，“很大程度上是由于减少了柴油公共汽车的黑炭排放。”⁸⁷总体上看来，机动车燃料转换减少的黑炭排放量足以带来10%的CO₂-eq总量减少，甚至可能高达30%。⁸⁸减量的主要来源是柴油公共汽车的CO₂-eq排放被减少了20%。⁸⁹一项关于此类减排的研究指出，“通过[联合国气候变化框架公约]清洁发展进行此类燃料转换项目从而实现减排的可能性非常巨大。”⁹⁰

目前仍在研发技术以减排每年航运产生的大约133,000公吨的颗粒物。⁹¹航海船只使用柴油发动机，目前正在试用类似于陆地交通工具所使用的过滤器的颗粒物过滤器。与现有的颗粒物过滤器一样，这些也要求船只使用超低硫燃料，但是如果实现了相应的减排，每年可以减排120,000公吨来自国际航运的颗粒物排放。⁹²其他方法也可以减少船只的黑炭排放，例如简单地减少这些船只的燃料消耗。通过减速或者在港口时使用岸边的电源而非通过船只的柴油发动机发电，船只都可以节约燃料和减少排放。

Ramanathan预计“提供替代的节能无烟厨具以及为小工业引进减排煤炭燃烧产生的煤烟的技术对于煤烟造成的辐射强迫有很大影响。”⁹³将东南亚地区用生物燃料做饭的方式改为不产生黑炭的方式（太阳能，生物能，和天然气）影响尤为巨大：南亚可减少黑炭升温的70-80%，在东亚可减少20-40%。⁹⁴

减排黑炭对公共健康和食品安全大有裨益

减排黑炭每年可以挽救三百万可能因（室内和室外）空气污染而丧生的人的生命，因此对公共健康大有益处。⁹⁵同时，它还可以减少对植物的损害，从而提高农作物产量，对农业也十分有利。⁹⁶

解决黑炭问题需要强有力的新举措

要解决黑炭问题，需要从国际到地方各个层面的强有力的新举措。从国际到区域层面的选择初步可以包括如下几项：

- 由联合国环境规划署拟定一项公约
- 扩大2012年后联合国气候公约的范围
- 由北极理事会拟定一个区域规划
- 建立特别保护区，限制在北极和其他对黑炭的反照率变化比较敏感的区域航运活动
- 扩大和加强政府间海事协商组织对航运活动的控制
- 扩大和加强国际民用航空机构对航空活动的控制
- 扩大和加强《长程越界空气污染公约》下对固定和移动污染源的控制

在下文有关守法的部分即将论述的现有国家法律的基础上，还有很多在国家和地方层面制定强有力的新法律来解决黑炭问题的选项。这些法律可以通过立法者组织，例如环球国际，也可以通过国家立法机关来推进。此外，其他一些机制也可用于迅速解决黑炭问题，其中包括：

- 利用世界银行气候投资基金来帮助减排黑炭
- 世界卫生组织减少室内空气污染和改善妇女儿童健康的努力与强调减少黑炭的气候收益及其他协同效应
- 强调黑炭对实现前年发展计划的重要性
- 在世界可持续发展首脑会议为低收入人群提供清洁能源的努力中突出减排黑炭的效益

世界可持续发展首脑会议的一个重要成果就是联合国环境规划署的清洁燃料和交通工具合作关系。这一合作关系曾为无铅燃料的转变提供条件，而目前则关注于推广超低硫柴油燃料。⁹⁷这种燃料不仅可以减少硫的排放，从而减少空气污染总量，也为最有效的颗粒物排放控制技术的使用提供了条件。

促进现有法律的遵守和实施可以减排黑炭

很多国家现有的法律就可以用以开始规范黑炭的排放，包括一些针对颗粒物排放的法律。例如：

- 禁止或规制刀耕火种式地清除森林和草原；
- 要求船只在港口时使用岸上能源及电力，规制在终点站空转，和对要求进港的船只规定燃料标准；
- 要求经常进行交通工具排放检测，替换或更新（例如，增加颗粒物捕集器⁹⁸），规定不遵守空气质量排放标准的处罚措施，以及对在路“过量排放”车辆的从重处罚；
- 禁止或规制某些燃料的销售且 / 或要求特定用途必须使用清洁燃料；
- 在城市以内和以外地区限制烟囱和其他形式的生物质的燃烧；
- 对运作工业发电和炼油设备实施许可制，并定期更新许可且 / 或改进设备；以及
- 要求现有的发电站采用过滤技术和高温燃烧（例如，超临界煤炭），并规制发电站的年排放量。

实施上述这些以及相关的现有法律，并佐以适当的守法协助，将会促进在近期内缓解气候变化，并带来很多附带效益。环境遵守与执行国际网络最近发表了一份《黑炭的气候遵守警报》。⁹⁹

表 1：黑炭气候（辐射）强迫效应估计

资料来源	黑炭辐射强迫(W/m ²)				
	直接强迫	半直接效应 ₁₀₀	乌云效应 ¹⁰¹	冰雪反照效应	总量
IPCC (2007) ¹⁰²	0.2 ± 0.15	-	-	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.25
Jacobson (2001, 2004, 及2006)	0.55 ¹⁰³	-	0.03 ¹⁰⁴	0.06 ¹⁰⁵	0.64 ¹⁰⁶
Hansen (2001, 2002, 2003, 2005, 及2007)	0.2 - 0.6 ¹⁰⁷	0.3 ± 0.3 ¹⁰⁸	0.1 ± 0.05 ¹⁰⁹	0.2 ± 0.1 ¹¹⁰	0.8 ± 0.4 (20 1.0 ± 0.5 (20 ≈0.7 ± 0.2 (20 0.8 (2005) ¹¹¹
Hansen & Nazarenko (2004) ¹¹²	-	-	-	~0.3 全球性 1.0 ¹¹³ 北极	-
Ramanathan (2007) ¹¹⁴	0.9	-	-	0.1 to 0.3	1.0 to 1.2

表II: 气候强迫估计表 (W/m²)

成分	IPCC (2007) ¹¹⁵	Hansen等(2005) ¹¹⁶
二氧化碳	1.66	1.50
黑炭	0.05-0.55	0.8
甲烷	0.48	0.55
臭氧	0.35	0.40
□□	0.34	0.30
一氧化二氮	0.16	0.15

¹ 参见Mark Jacobson, *Control of Fossil-Fuel Particulate Black Carbon and Organic Matter, Possibly the Most Effective Method of Slowing Global Warming*, 107 J. GEOPHYS. RES. D19 (2002).

² 突然的气候变化是指跨过一个临界点，之后不再需要任何输入，气候系统就会不可逆转地扩展到人类时序表的控制范围之外。Timothy Lenton, Hermann Held, Elmar Kriegler, Jim Hall, Wolfgang Lucht, Stefan Rahmstorf, and Hans Joachim Schellnhuber, *Tipping elements in the Earth's climate system*, 105 PROC. OF THE NAT'L ACAD. OF SCI. U.S.A. 6 (2008年2月12日) (古阿尔卑斯气候记录显示，过去的气候变化包括稳定的线性变化，以及突然的非线性变化，后者是指，一旦跨过某个临界点，微小的温度升高就会产生巨大的不可以逆转的影响，这包括冰层迅速消失造成海平面显著上升。未来仍然可能发生突然的气候变化。最为敏感的当属北极冰川融化和格陵兰岛冰床融化和瓦解的临界点。次之的是西部南极冰床融化的临界点，尽管后者仍存在很大的不确定性。其他的临界点还包括大西洋热盐环流、亚马逊雨林和北方针叶林，厄尔尼诺现象以及西非季风。) 参看James Hansen, *Scientific reticence and sea level rise*, ENVIRON. RES. LETT. 2 (2007); James Hansen, *Climate Catastrophe*, NEW SCIENTIST (2007年7月28日); Committee on Abrupt Climate Change, *Abrupt Climate Change: Inevitable Surprises*, National Academy Press, Washington, D.C., 2003 (“有关证据显示突然的气候变化不仅可能，而且未来很可能对生态系统和人类社会产生巨大影响”); 参看 Peter Schwartz & Doug Randall, *An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security* (2003) (发出警告：未经充分准备，一旦遭遇突然的气候变化，“地球环境的人类承载力可能会急剧下降”，包括食物和淡水短缺，旱涝灾害等，并可能导致地缘政

治的不稳定和“地区冲突，争斗甚至战争”），
<http://www.gbn.com/ArticleDisplayServlet.srv?aid=26231>; and Chris Abbott, Paul Rogers, and John Slobada, *Global Responses to Global Threats: Sustainable Security for the 21st Century*, Oxford Research Group, June 2006, http://www.oxfordresearchgroup.org.uk/publications/briefing_papers/globalthreats.php.

³ James Hansen最近估计，空气中二氧化碳浓度一旦超过350ppm就可能会带来灾难性影响，而事实上这一浓度已经被超过了。James Hansen, *Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim?*, at 11 (18 June 2008) (“根据古气候历史来判断，与如今的385ppm的二氧化碳相对应，海平面至少应上升几米。格陵兰岛和西部南极大陆的加速消融加深了对冰床稳定性的担忧。随着二氧化碳浓度对冰床平衡性的影响日益明显，已有建议要重新评估最初的350ppm的二氧化碳指标。”)(此处省略内部引注)

⁴ IPCC, *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, in CLIMATE CHANGE 2007: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 129, 132 (2007), <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>. (根据平均标准不确定性规则，将数值和不确定性相加)。

⁵ V. Ramanathan and G. Carmichael, *Global and regional climate changes due to black carbon*, 1 NATURE GEOSCIENCE 221-22 (2008年3月23日) (“黑炭的强迫值为0.9 W m⁻² (浮动范围为0.4-1.2 W m⁻²) ... 这一数值是二氧化碳强迫的55%，且大于其它温室气体，例如甲烷，氯氟烃，一氧化二氮，或者臭氧的强迫值。”)

⁶ 同上. 第221和224页.

⁷ Charles Zender, 为黑炭与气候变化听证会提供的书面证词，美国众议院监督和改革委员会 1 (2007年10月18日), <http://oversight.house.gov/documents/20071018110919.pdf> [下文简称Zender证词].

⁸ Zender证词,同上.第6页。(“尽快降低北极黑炭浓度是缓解北极变暖的最有效手段。”)

⁹ V. Ramanathan, 为黑炭与气候变化听证会提供的书面证词，美国众议院监督和改革委员会, 4 (2007年10月18日), <http://oversight.house.gov/story.asp?ID=1550> [下文简称Ramanathan 证词] (“从上个世纪50年代以来，发达国家已经将它们的源自化石燃料的黑炭排放量减少了5点甚至更多。因此，有效减少来自化石燃料的黑炭的技术已经存在。”); 反之Bond, T. C., E. Bhardwaj, R. Dong, R. Jogani, S. Jung, C. Roden, D. G. Streets, and N. M. Trautmann *Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000*, 21 GLOBAL BIOGEOCHEMICAL CYCLES GB2018 (2007) (之前的工作表明1950-2000年间全球黑炭排放量迅速增加，这一工作则说明1950-2000年间的增幅更为渐进和平缓。)

¹⁰ 参看 Bond, 同脚注 9。

¹¹ IPCC, *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing*, in CLIMATE CHANGE 2007: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 129, 136, 163 (2007), <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.

¹² 同上. 第164, 170, 174-76, 217-34页 (引用Ramanathan、Jacobson、Zender、Hansen和Bond的研究); 见上脚注7-8 (Zender证词和Ramanathan证词); 见下脚注16和51。(Jacobson证词和Bond证词)。

¹³ 参看Flanner, M.G., C.S. Zender, J.T. Randerson, and P.J. Rasch, *Present-day climate forcing and response from black carbon in snow*, 112 J. GEOPHYS. RES. D11202 (2007) (指出“黑炭是碳质气溶胶中的强吸收成分”)

¹⁴ V. Ramanathan & G. Carmichael, 见上脚注5, 第226页。

¹⁵ Ramanathan证词, 见上脚注9, 第3页。(“有效减少黑炭的排放可以将气候变化的影响减缓十到二十年。”)

¹⁶ Mark Z. Jacobson, 为黑炭与气候变化听证会提供的书面证词, 美国众议院监督和政府改革委员会, 12 (2007年10月18日), <http://oversight.house.gov/documents/20071018110606.pdf> [hereinafter Jacobson Testimony]; V. Ramanathan and G. Carmichael, 见上脚注5, 第226页 (斯克里普斯海洋研究所的V. Ramanathan博士和爱荷华大学的G. Carmichael博士指出, 减少未来的黑炭或煤烟排放“能为短期内减缓全球变暖的趋势提供机会”, 有效的气候救济主要源自黑炭“对全球辐射强迫的显著贡献”以及它“与二氧化碳(可存在一百多年)相比更短的变衰期(预计为一周。)”)

¹⁷ Timothy Lenton, Hermann Held, Elmar Kriegler, Jim Hall, Wolfgang Lucht, Stefan Rahmstorf, and Hans Joachim Schellnhuber, *Tipping elements in the Earth's climate system*, 105 PROC. OF THE NAT'L ACAD. OF SCI. 6 (2008年2月12日) (“最大的威胁是北极冰川和格陵兰岛冰床的临界点……”)J. Hansen, *Climate Catastrophe*, NEW SCIENTIST (2007年7月28日) (“...关键问题是全球变暖是否会严重到导致西部南极大陆或/和格陵兰岛的冰床开始以迅速地非线性方式瓦解。”)

¹⁸ V. Ramanathan和G. Carmichael, 见上脚注5, 第221页。(“...黑炭的排放是导致目前全球变暖的仅次于二氧化碳的第二大根源。”)很多科学家也通过计算得出黑炭是仅次于二氧化碳的导致全球变暖的第二大根源。参看Tami C. Bond & Haolin Sun, *Can Reducing Black Carbon Emissions Counteract Global Warming*, ENVIRON. SCI. TECHN. (2005), 第5921页 (“黑炭是仅次于二氧化碳和甲烷的第二大或第三大单独的升温介质。”) 以及J. Hansen, *A Brighter Future*, 53 CLIMATE CHANGE 435 (2002),http://pubs.giss.nasa.gov/docs/2002/2002_Hansen_1.pdf (计算得出黑炭的气候强迫值是 $1.0 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$)。

¹⁹ V. Ramanathan和G. Carmichael, 见上脚注5, 第222页。

²⁰ IPCC, *Technical Summary*, in CLIMATE CHANGE 2007: THE PHYSICAL SCIENCE BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 21 (2007) <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.

²¹ James Hansen & Larissa Nazarenko, *Soot Climate Forcing Via Snow and Ice Albedos*, 101 PROC. OF THE NAT'L ACAD. OF SCI. 423 (2004年1月13日) (“这一强迫的功效为 ≈ 2 (例如, 在相同的强迫值的情况下, 它对改变地球表面空气温度的效率为二氧化碳的两倍)”; 比较Zender证词, 见上脚注8, 第4页 (图表3); 参看J. Hansen & L. Nazarenko, 见上脚注21, 第426页。(“对北极冰雪反照率的改变的功效率是 >3 。在其他未包括在此的运算中, 我们还发现对南极反照率改变的功效率也是 >3 。”); 也可参看Flanner, M.G., C.S. Zender, J.T. Randerson,和P.J. Rasch, *Present-day climate forcing and response from black carbon in snow*, 112 J. GEOPHYS. RES. D11202 (2007) (“强迫值凑巧在冰雪初融时达到最大值, 导致在春季出现强烈的冰雪反照率回馈。因此, 黑炭的冰雪强迫的“功效”比二氧化碳高出三倍以上。”)

²² 总体的全球变暖应导致温度升高大约 2°C 。然而, 观测到的全球升温仅有 0.8°C , 因为降温物质抵消掉了大部分的升温。减少化石燃料和生物煤烟可以减少大约40%的可观测到的变暖以及16%的总体变暖。Jacobson证词, 见上脚注16, 第3页。(“数据资料还显示化石燃料以及生物燃料煤烟可能导致了约16%的总体全球变暖(由所有温室气体以及煤烟和热岛效应导致的升温), 但是对它的规制本身可以减少全球变暖总量的40%。”)

²³ Jacobson证词, 同上, 第4页。

²⁴ Jacobson证词, 同上。

²⁵ Jacobson证词, 同上。由于黑炭是一种气溶胶, 并没有计算它的全球变暖潜能的标准公式。然而, 经过尝试得出的100年全球变暖潜在在190 – 2240之间。Jacobson M Z, *Correction to 'Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing*

global warming,' 110 J. GEOPHYS. RES. D14105 (2005) (黑炭全球变暖潜能 – 190); Hansen, J., Mki. Sato, P. Kharecha, G. Russell, D.W. Lea和M. Siddall, *Climate change and trace gases*, PHIL. TRANS. ROYAL. SOC. A, 365, 1925 (2007) (黑炭全球变暖潜能– 500); Bond, T. and Haolin, Sun, “Can Reducing Black Carbon Emissions Counteract Global Warming?” ENVTL. SCI. & TECH., 5921 (2005年8月) (黑炭全球变暖潜能– 680); Jacobson证词, 见上脚注16, 第4页(黑炭全球变暖潜能– 2240)。

²⁶ Jacobson证词, 见上脚注16, 第4页。

²⁷ Levy, H. II, M.D., et. al., *Strong Sensitivity of late 21st century climate to projected change in short-lived air pollutants*, 113 J. GEOPHYS. RES. D06102, 2 (2008) (黑炭和OC被归入一氧化碳排放, 其排放量逐渐增加, 到2100年几乎翻一番); 同上。(“这些排放量是根据对直至2100年的技术改进, 经济发展, 人口增长和规制措施的预测而得出的。”)

²⁸ 同上, 第1页。(“然而, 到2100年, 预计硫酸盐气溶胶的减少(由全球二氧化硫排放量减少65%造成)和黑炭气溶胶的增加(它的全球排放量会增加100%)是A1B模拟的比之2000年的表面升温的重要原因之一。)

²⁹ Jacobson证词, 见上脚注16, 第3页。

³⁰ IPCC, *Radiative Forcing of Climate Change*, in CLIMATE CHANGE 2001: THE SCIENTIFIC BASIS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 351, 397. (“尽管辐射强迫总体来说是负面的, 在一些强反射的表面, 例如在北非沙漠地区和喜马拉雅雪域可能出现正面辐射强迫。”); J. Hansen & L. Nazarenko, 见上脚注21, 第425页。(“印度上空含有大量的化石燃料和生物燃料煤烟的灰雾可到达喜马拉雅地区。即使盛行风只是将这煤烟的一部分散落在冰川上, 其冰雪中的黑炭含量也可与阿尔卑斯山的含量不相上下。”)

³¹ J. Hansen, et al., *Efficacy of Climate Forcing*, 110 J. GEOPHYS. RES. D18104, 1 (2005), http://pubs.giss.nasa.gov/docs/2005/2005_Hansen_et_al_2.pdf (我们发现, 如果将强迫功效和通过冰雪反照率和云层变化带来的间接效应考虑在内, 化石燃料煤烟, 即黑炭和有机碳, 总体上会带来正面强迫。而生物质燃烧黑炭和有机碳则产生负面强迫。)

³² IPCC, 见上脚注30, 第397页。

³³ Zender证词, 见上脚注8, 第6页。

³⁴ J. Hansen & L. Nazarenko, 见上脚注21, 第425页。

³⁵ J. Hansen & L. Nazarenko, 同上, 第428页。

³⁶ J. Hansen & L. Nazarenko, 同上, 第425页。

³⁷ 见上脚注21。

³⁸ P.K. Quinn, T.S. Bates, E. Baum, N. Doubleday, A.M. Fiore, M. Flanner, A. Fridlind, T.J. Garrett, D. Koch, S. Menon, D. Shindell, A. Stohl, 和S.G. Warren. *Short-lived Pollutants in the Arctic: Their Climate Impact and Possible Mitigation Strategies*, 8 ATMOS. CHEM. PHYS. 1723, 1731 (2008); 参看David Shukman, *Vast Cracks Appear in Arctic Ice*, BBC NEWS (2008年5月23日), <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/7417123.stm> (加拿大的一个考察队最近证实了沃德亨特冰架上出现了一个长达10英里的裂缝。)

³⁹ P.K. Quinn, 见上脚注38, 第1732页。

⁴⁰ P.K. Quinn, 同上。

⁴¹ P.K. Quinn, 同上, 第1732页。J. Hansen & M. Sato, et al., *Dangerous Human-Made Interference with Climate: a GISS modelE Study 7* ATMOS. CHEM. PHYS. DISCUSS. 2287, 2287 (2007) (“我们认为北极的气候变化受到二氧化碳和污染物(臭氧, 它的母体甲烷和煤烟)的同等影响。因此减少污染物和减缓二氧化碳排放的双重努力有望将北极的变化最小化。”)

⁴² V. Ramanathan & G. Carmichael, 见上脚注5, 第221页。

⁴³ 同上, 第224页。

⁴⁴ 同上。

⁴⁵ 同上。

⁴⁶ Lester R. Brown, *Melting Mountain Glaciers Will Shrink Grain Harvests in China and India*, PLAN B UPDATE, Earth Policy Institute (2008年3月20日), <http://www.earth-policy.org/Updates/2008/Update71.htm> (正在消融的喜马拉雅冰川将会导致中国和印度的主要河流(恒河, 黄河, 长江)的水源供应减少。而这些河流是灌溉养育数亿人的农作物的源泉, 因此这一变化可能“会带来政治上无法控制的食物短缺。”)

⁴⁷ V. Ramanathan & G. Carmichael, 见上脚注5, 第221页 (“直到大约上个世纪50年代, 北美洲和西欧仍然是煤烟的主要来源, 但是目前热带和东亚发展中国家是主要的来源。”)

⁴⁸ Jacobson证词, 见上脚注16, 第4页。

⁴⁹ Clean Air Fine Particle Implementation Rule, 72 Fed. Reg. 20586, 20587 (2007年4月25日) (to be codified as 40 C.F.R. pt. 51), <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-AIR/2007/April/Day-25/a6347.pdf>, 新闻稿, European Union, Environment: Commission welcomes final adoption of the air quality directive, (2008年4月14日), <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/08/570&format=HTML&aged=0&language=EN&guiLanguage=en>.

⁵⁰ 政府间海事协商组织, 新闻稿, IMO Environment meeting Approves Revised Regulations on Ship Emissions, International Maritime Organization (2008年4月4日), http://www.imo.org/About/mainframe.asp?topic_id=1709&doc_id=9123 (政府间海事协商组织通过了《国际防止船舶造成污染公约》附则VI《防止船舶造成大气污染规则》的修正案, 将在2008年10月的会议上开放采纳。)

⁵¹ Tami Bond, 为黑炭与气候变化听证会提供的书面证词, 美国众议院监督和改革委员会2-3 (2007年10月18日), <http://oversight.house.gov/documents/20071018110647.pdf> [下文简称 Bond证词].

⁵² Jacobson证词, 见上脚注16, 第5页。

⁵³ Tami Bond, *Summary: Aerosols, Air Pollution as a Climate Forcing: A Workshop*, Honolulu, Hawaii, 2002年4月29日-5月3日, <http://www.giss.nasa.gov/meetings/pollution2002>.

⁵⁴ V. Ramanathan & G. Carmichael, 见上脚注5, 第226页。

⁵⁵ V. Ramanathan & G. Carmichael, 见上脚注5, 第226页。

⁵⁶ Ramanathan证词, 见上脚注9, 第4页。

⁵⁷ V. Ramanathan & G. Carmichael, 见上脚注5, 第221页。

⁵⁸ V. Ramanathan & G. Carmichael, 同上。

⁵⁹ V. Ramanathan & G. Carmichael, 同上。

⁶⁰ V. Ramanathan & G. Carmichael, 同上。

⁶¹ 参看Bond证词, 见上脚注51, 第2页(图表1)。

⁶² Bond证词, 同上, 第1-2页。

⁶³ Jacobson证词, 见上脚注16, 第5-6页。(说明船只排放的黑炭是POC的三倍以上, 而越野车辆产生的黑炭比POC多40%, 在路车辆产生的黑炭比POC多25-60%。

⁶⁴ 虽然船运产生的黑炭只占全球总量的1.7%, 考虑到在对黑炭极度敏感地区, 例如北极, 航运活动的上升趋势, 这仍然是减少黑炭的一个重要选择。Lack, D., B. Lerner, C. Granier, T. Baynard, E. Lovejoy, P. Massoli, A. R. Ravishankara, and E. Williams, Light absorbing carbon emissions from commercial shipping, 35 Geophysical Res. Letters L13815 (2008)。

⁶⁵ J. Hansen et al., *Efficacy of Climate Forcing*, 见上脚注31。

⁶⁶ Mark. Z. Jacobson, *The Short-Term Cooling but Long-Term Global Warming Due to Biomass Burning*, 17 J. OF CLIMATE 2909, 2923 (“... 虽然燃烧过程中释放的气溶胶在短期内会产生降温

效果，长期存在的温室气体可能会在几十年后导致升温（或将降温抵消）。因此，减少生物质燃烧虽然可能在短期内致暖，但能在长期内制冷或使温度不变。虽然最终的制冷可能多年不会出现，它在一百年后的数值可能高达0.6K”。)

⁶⁷ Surabi Menon, James Hansen, Larissa Nazarenko, & Yunfeng Luo, *Climate Effects of Black Carbon*, 297 SCIENCE 2250, 2250 (2002年9月27日) (黑炭是“煤炭，柴油发动机，生物燃料和室外生物质燃烧不完全的产物...”)

⁶⁸ 参看Lehmann, *et al.*, *Bio-Char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review*, 11 MITIGATION AND ADAPTATION STRATEGIES FOR GLOBAL CHANGE 403, at 403-07, 418 (Springer 2006), <http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/MitAdaptStratGlobChange%2011,%20403-427,%20Lehmann.%202006.pdf>; 参看同上, 第407页。(研究人员估计植物中大约38-84%的生物质碳是在燃烧过程中释放出来的, 然而如果通过简易的烘干技术将生物质转化为生物质能, 则可以将多于50%的碳封存在生物质能内。)

⁶⁹ 同上, 第407-08页。

⁷⁰ 参看Raupach, Michael, *et al.*, *Global and Regional Drivers of Accelerating CO₂ Emissions*, 104 PROC. OF THE NAT'L ACAD. OF SCI. 24, (背景数据, <http://www.pnas.org/cgi/content/full/0700609104/DC1>) (在2000-2005年间, 年均的土地使用排放是1.5 GtC (全球排放总量是8.7 GtC), 或5.5 Gt CO₂ eq. (全球排放总量为31.9 Gt CO₂ eq.), 占全球总量的17.25%。减少12%的土地使用排放就等于0.66 Gt CO₂ eq., 约占全球年均CO₂ eq.排放量的2%。Lehmann最初的估计是根据IPCC在2001年估计的土地用途改变, 从1.7 GtC中减少0.2GtC。)也可参看Lehmann, *et al.*, 见上脚注68, 第407-08页。(考虑到化石燃料的排放量增加到了8.4 GtC, 以及土地用途改变大约产生1.5 GtC, 2006年人为排放的总量为9.9 GtC。因此, 尽管总的CO₂ eq.排放量增加, 如果使用Lehmann最初的0.2 GtC的减量, 仍然可以将全球的CO₂ eq.排放量减少2%。参看Global Carbon Budget Team, *Recent Carbon Trends and the Global Carbon Budget*, the Global Carbon Project, (2007年11月15日), http://www.globalcarbonproject.org/global/pdf/GCP_CarbonCycleUpdate.pdf (提供了2006年全球碳排放估计值)。

⁷¹ 同上。

⁷² Stohl, A., E. Andrews, J. F. Burkhart, C. Forster, A. Herber, S. W. Hoch, D. Kowal, C. Lunder, T. Mefford, J. A. Ogren, S. Sharma, N. Spichtinger, K. Stebel, R. Stone, J. Ström, K. Tørseth, C. Wehrli, and K. E. Yttri, Pan-Arctic enhancements of light absorbing aerosol concentrations due to North American boreal forest fires during summer 2004, 111 J. GEOPHYS. RES. D22214, doi:10.1029/2006JD007216, 2006.

⁷³ Hansen, J., and L. Nazarenko, 2004: Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **101**, 423-428, doi:10.1073/pnas.2237157100.

⁷⁴ Ramanathan证词, 见上脚注9, 第4页。

⁷⁵ Jacobson证词, 见上脚注16, 第5页。

⁷⁶ J. Hansen & L. Nazarenko, 见上脚注21, 第428页。

⁷⁷ Jacobson证词, 见上脚注16, 第9页。

⁷⁸ Jacobson估计2005年美国的二氧化碳排放量是6270公吨。26%就是1630公吨。同上。

⁷⁹ Jacobson证词, 见上脚注16, 第9页。

⁸⁰ Manufacturers of Emission Controls Association (MECA), “Emission Control Technologies for Diesel-Powered Vehicles,” 9 (2007年12月) (“安装在车辆排气系统上的柴油机氧化型催化转换器通常能够减少颗粒物排放总量的25—50%以上, 这取决于释放的颗粒物质的成分。”),

<http://www.meca.org/galleries/default-file/MECA%20Diesel%20White%20Paper%2012-07-07%20final.pdf>.

⁸¹ 同上, (“柴油微粒过滤器在有些情况下可减排高于90%的颗粒物。高效的滤芯对于控制这些颗粒中的碳微粒十分有效,有些健康专家认为这一成分是颗粒物中最令人担忧的部分。)

⁸² 同上, 第5页, (“2001年,移动污染源的黑炭排放量约为234 Gg,占全国范围内436 Gg黑炭排放量的54%。在F模式下,移动污染源排放预计会减少到71 Gg,即减排163 Gg。”))

⁸³ Bahner, Mark A., Weitz, Keith A., Zapata, Alexandra and DeAngelo, Benjamin, Use of Black Carbon and Organic Carbon Inventories for Projections and Mitigation Analysis,” 1, (2007) <http://www.epa.gov/ttn/chieff/conference/ei16/session3/k.weitz.pdf>.

⁸⁴ EPA, Heavy-Duty Highway Diesel Program, <http://www.epa.gov/oms/highway-diesel/index.htm> (“一旦这一行动完全执行.....每年可以减排110,000吨煤烟或颗粒物。”); EPA, Clean Air Nonroad Diesel Rule—Facts and Figures, <http://www.epa.gov/nonroad-diesel/2004fr/420f04037.htm> (“至2030年更新所有旧的非在路发动机的环境效益:每年减少129,000吨细颗粒物(PM_{2.5})”))。

⁸⁵ Diesel Technology Forum, “Technology Definitions,” <http://www.dieselforum.org/meet-clean-diesel/what-is-clean-diesel/new-technologies/>

⁸⁶ 同上。

⁸⁷ Conor C. O. Reynolds & Milind Kandlikar, *Climate Impacts of Air Quality Policy: Switching to a Natural Gas-Fueled Public Transportation System in New Delhi*, ENVIRON. SCI. TECHNOL. (forthcoming 2008) (“如果将气溶胶的排放考虑在内,将燃料转变为压缩天然气会带来气候收益,主要是因为减少了柴油公共汽车发动机的黑炭排放。”)燃料转换政策在印度最高法院的协助下得以实施。参看Urvashi Narain and Ruth Greenspan Bell, *Who Changed Delhi's Air? The Roles of the Court and the Executive in Environmental Policymaking*, Resources for the Future Discussion Paper 05-48 (2005年12月) <http://www.rff.org/rff/documents/rff-dp-05-48.pdf> (“最高法院的主要作用是强迫政府执行之前公布的政策.....德里的改革经验为印度的其他城市以及周边国家提供了范例。”))

⁸⁸ Conor C. O. Reynolds & Milind Kandlikar, *Climate Impacts of Air Quality Policy: Switching to a Natural Gas-Fueled Public Transportation System in New Delhi*, ENVIRON. SCI. TECHNOL. (forthcoming 2008) (“然而,如果将气溶胶的排放考虑在我们的模型内,这一转变的整体效应估计为减少10%的CO₂(e),CO₂(e)的减排可能高达30%。”))

⁸⁹ 同上, Section 3.1 (“总体来看,CO₂(e)排放总量可减少10%,如果单独考虑公共汽车,CO₂(e)排放总量减少了20%。”))

⁹⁰ C. O. Reynolds & Milind Kandlikar, *Climate Impacts of Air Quality Policy: Switching to a Natural Gas-Fueled Public Transportation System in New Delhi*, 1, ENVIRON. SCI. TECHNOL. (forthcoming 2008).

⁹¹ Lack, D., B. Lerner, C. Granier, T. Baynard, E. Lovejoy, P. Massoli, A. R. Ravishankara, and E. Williams, Light absorbing carbon emissions from commercial shipping, , 35 Geophysical Res. Letters L13815 (2008).

⁹² 也就是说,如果数据显示颗粒物滤芯可以像在路上交通工具中一样,将船只的黑炭排放量减少90%,就可以避免目前133,000公吨的排放量中的120,000公吨。

⁹³ V. Ramanathan & G. Carmichael, 见上脚注5, 第226页。

⁹⁴ V. Ramanathan & G. Carmichael, 同上。

⁹⁵ 见上, 脚注1 (引用C. A. Pope III and D. W. Dockery, *Epidemiology of particle effects*, in S. T. Holgate, et al., eds., AIR POLLUTION AND HEALTH 673–705 (1999) 和世界卫生组织的统计数据)。

⁹⁶ 参看Mike Bergin, *The Influence of Aerosols on Plant Growth*, Day 4 of Air Pollution as a Climate Forcing: A Workshop (2002), http://www.giss.nasa.gov/meetings/pollution2002/d4_bergin.html.

⁹⁷ 参看<http://www.unep.org/pcfv/index.asp>.

⁹⁸ O. Boucher and M.S. Reddy, *Climate trade-off between black carbon and carbon dioxide emissions*, 36 ENERGY POLICY 193, 196-198 (2007) (柴油发动机上的颗粒物捕集器可以减少黑炭排放量和伴随的气候强迫,但其中一部分会被因此增加的燃料消耗和二氧化碳排放所抵消掉。如果燃料消耗是2-3%,假定黑炭的减排量是0.15-0.30 g/mile,二氧化碳排放量是1500-2000 g/mile,而黑炭的100年全球变暖潜能为680,减排黑炭在最初的28-68年间会带来正面的气候收益。由于黑炭对冰雪反照率的影响,在北部地区对气候的正面效益则会持续几个世纪。)

⁹⁹ 参看 http://inece.org/climate/INECEClimateComplianceAlert_BlackCarbon.pdf

¹⁰⁰ Mark Z. Jacobson, *Effects of Anthropogenic Aerosol Particles and Their Precursor Gases on California and South Coast Climate*, California Energy Commission, 6 (2004年11月), <http://www.stanford.edu/group/efmh/jacobson/CEC-500-2005-003.PDF> (黑炭的半直接效应是指当“低空云层吸收太阳光时,增加了云层下的稳定性,减少了垂直面上湿气混合于云层底部,使云层变薄。”)

¹⁰¹ *Carbon's Other Warming Role*, GEOTIMES (2001年5月), <http://www.geotimes.org/mar01/warming.html> (“黑炭会造成‘脏的云滴’,从而‘间接’地减少云的反射属性。”)

¹⁰² IPCC, 见上脚注4,第163-64,185页。(2007) (据估计,黑炭的直接辐射强迫为 $0.2 \text{ W/m}^2 + 0.15$,而黑炭对冰雪表面反照率的间接作用为 $0.1 \text{ W/m}^2 + 0.1$ 。)

¹⁰³ Mark Z. Jacobson, *Strong Radiative Heating Due to the Mixing State of Black Carbon in Atmospheric Aerosols*, NATURE, 409, 695-697 (2001) (“在图表3中,黑炭最终的年均直接强迫值在外混合,多层分布覆膜核和单独内混合,覆膜核分布情况下分别是0.31, 0.55 and 0.62 W m^{-2} 。多层分布的黑炭的直接强迫值(0.55)在甲烷的直接强迫值(0.47 W/m^2)和二氧化碳的直接强迫值(1.56 W/m^2)之间(来自IPCC [2001])。”)

¹⁰⁴ Mark Z. Jacobson, *Climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity*, 109 J. GEOPHYS. RES. D21201 (2004). (脏云效应值为.03 W m^{-2})。

¹⁰⁵ Mark Z. Jacobson, *Effects of Externally-Through-Internally-Mixed Soot Inclusions within Clouds and Precipitation on Global Climate*, 110 J. PHYS. CHEM. A. 6860-6873 (2006). (冰雪反照率效应值为.06 W m^{-2})。

¹⁰⁶ 这一数值是将Jacobson估计的黑炭的直接强迫和间接强迫相加得到的。参看见上,脚注77-79及其内容。

¹⁰⁷ James E. Hansen and Makiko Sato, Figure 1 in *Trends of Measures Climate Forcing Agents*, 98 PROC. OF THE NAT'L ACAD. OF SCI. 14778, 14779 (2001). (Hansen 2001年估计 - 直接强迫值 - 0.6 W/m^2 总强迫值 - $0.8 \pm 0.4 \text{ W/m}^2$); J. Hansen, 见上脚注12,第435页。(Hansen 2002年估计 - “我目前对黑炭造成的全球气候强迫值的估计为: (1) 直接效力是 $0.4 \pm 0.2 \text{ W/m}^2$, (2) 半直接效力(因黑炭致热而减少低空云层; Hansen et al., 1997)是 $0.3 \pm 0.3 \text{ W/m}^2$, (3) 由于黑炭飞沫核带来的“黑云”的效力为 $0.1 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$, (4) 冰雪由于黑炭而变黑的效力为 $0.2 \pm 0.1 \text{ W/m}^2$ 。...对不确定性的估计是完全主观的。黑炭强迫的总数值为 $1 + 0.5 \text{ W/m}^2$ 。”); J. Hansen, et al., *Climate Change and Trace Gases*, 365 PHIL. TRANS. R. SOC. 1925, 1942 (2007) (Hansen 2007年估计 - “化石燃料燃烧产生的煤烟,例如含有黑炭和有机碳的强吸收性的气溶胶据估计可造成全球气候强迫值为 0.22 W m^{-2} 。这一数值是对化石燃料黑炭强迫的保守估计.....因为它假定化石燃料中的有机碳/黑炭比率较高。此外,它将气溶胶的(导致降温的)间接效应的50%归结到煤烟(黑炭/有机碳)。)”)

¹⁰⁸ J. Hansen, 见上脚注21,第435页。

¹⁰⁹ 同上。

¹¹⁰ 同上。

¹¹¹ James E. Hansen and Makiko Sato, Figure 1 in *Trends of Measures Climate Forcing Agents*, 98 PROC. OF THE NAT'L ACAD. OF SCI. 14778, 14779 (2001). (Hansen 2001年估计- 直接强迫值- 0.6 W m⁻², 总强迫值- 0.8 + 0.4 W m⁻²); J. Hansen, 见上脚注12, 第435页 (Hansen 2002年估计 - “我目前估计黑炭的全球气候强迫值为: (1) 直接效力是 0.4 ± 0.2 W/m², (2) 半直接效力(因黑炭致热而减少低空云层; Hansen et al., 1997)是 0.3 ± 0.3 W/m², (3)由于黑炭飞沫核带来的“黑云”的效力为 0.1 ± 0.05 W/m², (4) 冰雪由于黑炭而变黑的效力为 0.2 ± 0.1 W/m²。...对不确定性的估计是完全主观的。黑炭强迫的总数值为 $1 + 0.5$ W/m²。”); Makiko Sato, James Hansen, Dorthy Koch, Andrew Lacis, Reto Ruedy, Oleg Dubovik, Brent Holben, Mian Chin, and Tica Novakov, *Global Atmospheric Black Carbon Inferred from AERONET*, 100 PROC. OF THE NAT'L ACAD. OF SCI. 6319, at 6323 (2003) (“... 我们估计人为造成的黑炭强迫值为 $\approx 0.7 \pm 0.2$ W/m²。”); J. Hansen, et al., *Climate Change and Trace Gases*, 365 PHIL. TRANS. R. SOC. 1925, 1942 (2007) (Hansen 2007年估计- 化石燃料燃烧产生的煤烟, 例如含有黑炭和有机碳的强吸收性的气溶胶据估计可造成全球气候强迫值为 0.22 W m⁻²。这一数值是对化石燃料黑炭强迫的保守估计.....因为它假定化石燃料中的有机碳/黑炭比率较高。此外, 它将气溶胶的(导致降温的)间接效应的50%归结到煤烟(黑炭/有机碳)。)

¹¹² J. Hansen & L. Nazarenko, 见上脚注21, 第426页。(“在最实际的例1和2种, 指定的冰雪反照率的有效强迫值在北半球为 $F_e \sim 0.6$ W/m², 在全球范围内为 $F_e \sim 0/3$ W/m²。”)

¹¹³ 同上, 第425页。(在北半球中高纬度的陆地和北冰洋地区, 由于冰雪反照率的改变而带来的气候强迫值达 1 W/m²。)

¹¹⁴ Ramanathan证词, 见上脚注9。

¹¹⁵ IPCC, 见上脚注4。

¹¹⁶ J. Hansen, et al., *Efficacy of Climate Forcing*, 见上脚注31。