

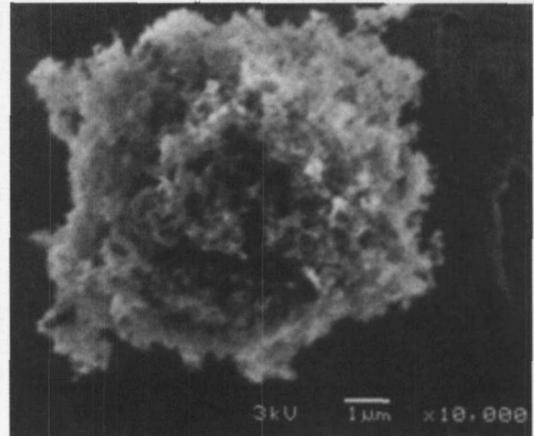
文章编号: 1673-1719 (2006) 05-0238-04

## 雪冰黑碳的气候效应研究

### Climate Forcing of Black Carbon in Snow and Ice

明 镜<sup>1,2,3</sup>, 效存德<sup>2,3</sup>, 秦大河<sup>2,3</sup>, Helene Cachier<sup>4</sup>

(1 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3 中国气象科学研究院, 北京 100081; 4 Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif sur Yvette 91198, France)



**摘要:** 黑碳气溶胶沉降到雪冰表面后, 使雪冰反照率降低从而导致气候增暖的效应日益引起人们的关注。首先提出了雪冰黑碳的气候效应问题, 然后介绍了国际上相关研究的进展, 并提出加强此项研究对提高中国区域气候认识的意义。

**关键词:** 雪冰黑碳; 反照率; 气候效应

**中图分类号:** P461/X16 **文献标识码:** A

## 引言

黑碳 (black carbon) 是化石燃料和生物质不充分燃烧 (如森林大火, 生活和农业生产燃烧) 的产物, 多呈黑色颗粒或由颗粒凝结而成的絮状物质 (见图: 显微镜下的黑碳, 由美国丹佛大学 D. M. Smith 提供)。燃烧的热力作用使黑碳升腾并悬浮于大气对流层, 成为一种气溶胶, 其大气寿命平均为 6~10 d<sup>[1]</sup>。大气中汇集的黑碳气溶胶会产生区域性气候效应, 一方面, 黑碳颗粒可以强烈地吸收包括红外和可见光波段的太阳辐射, 对其周围的空气加热, 从而对大气有增温效应; 另一方面, 黑碳颗粒物与其他固体气溶胶一样会对太阳辐射有反射作用, 在一定程度上减少到达地表的太阳辐射, 从而对地表有冷却效应。

当黑碳沉降到积雪或者海冰表面时, 通过强烈吸收太阳能, 其加热作用会加速雪冰的融化, 减小雪冰的存留时间和面积; 雪冰存留时间和面积的改变与黑碳的存在都将改变区域能量收支, 从而对气候系统形成反馈。该反馈作用究竟有多大量级, 是目前学术界争论的焦点。事实上, 自 20 世纪 80 年代以来, 已有诸多关于雪冰介质中黑碳的研究, 大体可以分成以下几类: 1) 实测积雪和海冰中黑碳的浓度<sup>[2-9]</sup>; 2) 观测雪冰表面的光谱反照率<sup>[10-13]</sup>; 3) 模拟在改变雪冰表面黑碳浓度的条件下, 雪冰表面光谱反照率的改变所引发的气候效应<sup>[14-15]</sup>。其中, 前两类研究提供了大量实测数据, 为后一类研究奠定了基础。虽然影响雪冰表面光谱反照率的其他物理参数还有很多, 如雪层密度和含水量, 雪晶粒径和形状, 深色矿物的含量等等, 本文仅对因

收稿日期: 2006-02-10; 修订日期: 2006-04-04

基金项目: 科技部国际合作重点项目 (2005DFA20930); 中国气象局气候变化专项 (CCSF2006-3); 中国科学院“百人计划”项目; 中国科学院冰冻圈与环境联合重点实验室开放基金项目资助

作者简介: 明镜 (1980-), 男, 博士研究生, 主要从事雪冰介质中黑碳气溶胶的研究。E-mail: mingjing@mail.igccas.ac.cn

雪冰黑碳因素造成的气候效应进行阐述。

## 1 雪冰黑碳气候效应问题的发现及早期的研究

20世纪80年代以前,前人设计了几个模拟雪冰光谱反照率的模式<sup>[16-18]</sup>,但没有一个考虑到雪冰黑碳对反照率的影响。Wiscombe *et al.*<sup>[10]</sup>和Warren *et al.*<sup>[11]</sup>首先注意到雪冰中的黑碳可能对反照率造成影响,并把问题延伸到雪冰黑碳与气候效应的关系上。在总结了前人的研究成果之后,他们提出了计算纯净雪冰表面光谱反照率的模式<sup>[10-11]</sup>。1978年,Kuhn *et al.*<sup>[19]</sup>在南极点附近对雪冰表面(黑碳浓度仅0.2 ng/g,近似于“纯净”的雪)的光谱反照率进行了观测,得到了各个波长的直接入射光线反照率,显示在近紫外光和可见光波段雪冰表面的反照率非常高(80%~90%),但在0.8~1.5 μm波段的近红外范围内开始迅速降低,并在更长的波段内保持很低。Wiscombe *et al.*<sup>[10]</sup>和Warren *et al.*<sup>[11]</sup>在模式中把南极表层雪粒的半径参数设定为100 μm<sup>[20]</sup>,计算结果与Kuhn *et al.*<sup>[19]</sup>的实际观测结果之间有一定的差异,在<0.8 μm的可见光波段内,观测值往往小于模式计算值,其差值高达10%以上,而在更长的波段上,模式计算结果与观测结果较吻合。研究表明<sup>[20]</sup>,在波长>0.9 μm的波段,雪冰自身就成为光谱的强吸收体,黑碳颗粒在此波段的吸光效应并不占优势,Wiscombe *et al.*<sup>[10]</sup>和Warren *et al.*<sup>[11]</sup>认为那10%的差异正好可以用雪冰中存在的黑碳颗粒物的吸光特性来解释。除此之外,他们还应用自己的模式对不同黑碳浓度情景下的雪冰表面光谱反照率进行了计算,得出了不同谱图。后来Grenfell<sup>[21]</sup>对美国卡斯凯德山脉中积雪的光谱反照率及其中的黑碳浓度进行了观测,基本上证实了模拟结果。

发现因黑碳的存在造成雪冰反照率衰减的问题后,不同研究者在小区域积雪场开展了试验研究(不代表全球尺度),得出几项代表性结果:1) Wiscombe *et al.*<sup>[10]</sup>和Warren *et al.*<sup>[11]</sup>估算,如果雪盖黑碳浓度为15 ng/g时,会造成反照率比纯净雪降低约1%;2) Light *et al.*<sup>[22]</sup>估算,海冰表层

黑碳浓度为150 ng/g时,将大大降低海冰的光谱反照率,最大可达30%;3) Twohy *et al.*<sup>[23]</sup>估算,假设反照率降低水平相同,云中需要的黑碳浓度约为雪冰的1000倍。

## 2 近期国际相关研究进展和影响评估

1997年《京都议定书》签署之后,与化石燃料相关的温室气体排放导致的气候变化与各国的政治与经济利益密切相关,因此黑碳的气候效应也日益受到国际社会的关注。除了对大气黑碳气溶胶的相关研究之外,在雪冰高反照率波段(波长<0.9 μm),黑碳颗粒对反照率的影响导致的气候效应亦引起了研究者的重视。其中,如何准确计算雪冰黑碳的辐射强迫问题,尤其是在全球尺度上估算雪冰黑碳的气候效应等问题是研究的关键。

Hansen *et al.*<sup>[14]</sup>归纳了全球范围内主要的大面积积雪区雪冰中的黑碳浓度,并用Clarke *et al.*<sup>[4]</sup>的黑碳气-雪清除比例常数估算并补充了其他地区表层降雪中黑碳的浓度,从而对雪冰黑碳因素造成的反照率衰减进行了计算。用GISSME模式(Goddard Institute for Space Studies Model E)模拟了全球雪冰黑碳的气候效应,结果认为1880-2002年雪冰黑碳可能造成的全球增温贡献值约为0.17 K。Hansen *et al.*<sup>[14]</sup>的工作是根据全球范围内测到的大气黑碳浓度估算出雪冰中相应的黑碳浓度,再计算这一因素引起的光谱反照率衰减,然后进行模式计算。虽然Hansen *et al.*<sup>[14]</sup>的工作比较粗糙,例如模式计算中的一些参数是预先设定的,实测数据不充分等等,但其结果至少让我们第一次对这个问题的理解有了初步认识,如雪冰黑碳的吸光效应同样会使表面空气增温,对增温的响应速度大约是同一量级CO<sub>2</sub>贡献的两倍,雪冰黑碳会加速冰冻圈组分如积雪和海冰等的退缩,等等。IPCC第三次评估报告认为,1861-2000年全球平均地表气温升高了(0.6 ± 0.2)℃<sup>[24]</sup>,如果依照Hansen *et al.*<sup>[14]</sup>的计算结果,仅雪冰黑碳这一因素就要对约25%的全球增暖总量负责。

Jacobson<sup>[15]</sup>用GATOR-GCMOM模式(Gas, Aerosol, Transport, Radiation, General Circulation,

Mesoscale and Ocean Model)重新模拟了雪冰黑碳的气候效应,并对 GISSME 模式作了几点改进:1) GATOR-GCMOM 把黑碳循环(包括黑碳排放、凝结、黑碳与云的混合以及沉降等)均考虑在内;2)积雪和海冰的光谱反照率是预测的(不是预先设定的),这取决于计算所得的雪冰黑碳浓度;3)考虑了许多气候反馈因素(包括雪冰黑碳会加速雪冰的融化),嵌套了气候系统各参数(辐射、海冰和积雪等)相互作用过程,从而使得该模式计算更合理。结果表明,全球积雪和海冰中的黑碳平均浓度为5 ng/g,这一浓度水平的黑碳可使全球雪冰光谱反照率减小约0.4%,对全球地表增温贡献值约为0.06 K/10 a。这一结果为减少化石燃料和其他生物质燃料(如木材、柴草及动物粪便等)燃烧排放而减缓全球变暖提供了又一个证据。

### 3 讨论

IPCC第三次评估报告没有把雪冰黑碳的反照率产生的气候效应收录进去,说明该问题当时未受到足够重视或认识不足。然而, Hansen *et al.*<sup>[14]</sup> 的研究说明雪冰中黑碳造成的气候效应可能要対现今所观测到的全球变暖总量的25%负责,仅从这个量级上看,显然不应也无法忽视其气候效应。

南亚和东亚是世界上黑碳气溶胶排放较重的两个地区,中国雪冰覆盖区主要位于青藏高原,正好处于这两个地区之间,受季风影响,西部雪冰表面的光谱反照率无疑会受到来自上述两地区的黑碳气溶胶的影响。目前,国际上针对中国西部冰川的雪冰黑碳研究尚未见报道,其气候效应的研究更未涉及。关于雪冰黑碳的研究在我国刚刚起步<sup>[25-27]</sup>,基础薄弱,因此需要选择典型地区进行集中研究。加强中国雪冰黑碳光谱反照率及其气候效应的研究,对于预测中国冰川进退,模拟区域水循环、大气环境和区域气候变化,补充全球雪冰反照率数据库,加深全球变暖的理解以及制定相应的减缓对策等方面都具有重要意义。 ■

### 参考文献

- [1] Cooke W F, Wilson J J N. A global black carbon aerosol model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101 (D14): 19395-19409.
- [2] Warren S G. Optical properties of snow [J]. *Reviews of Geophysics*, 1982, 20: 67-89.
- [3] Warren S G. Impurities in snow: Effects on albedo and snowmelt [J]. *Annals of Glaciology*, 1984, 5: 177-179.
- [4] Clarke A D, Noone K J. Soot in the Arctic snowpack: A cause for perturbations in radiative transfer [J]. *Atmospheric Environment*, 1985, 19: 2045-2053.
- [5] Chylek P, Srivastava V, Pinnick R G, *et al.* Aerosol and graphitic carbon content of snow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 9801-9809.
- [6] Noone K J, Clarke A D. Soot scavenging measurements in Arctic snowfall [J]. *Atmospheric Environment*, 1988, 22: 2773-2778.
- [7] Warren S G, Clarke A D. Soot in the atmosphere and snow surface of Antarctica [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95: 1811-1816.
- [8] Grenfell T C, Warren S G, Mullen P C. Reflection of solar radiation by the Antarctic snow surface at ultraviolet, visible and near-infrared wavelengths [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99: 18669-18684.
- [9] Grenfell T C, Light B, Sturm M. Spatial distribution and radiative effects of soot in the snow and sea ice during the SHEBA experiment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (C10): 8032.
- [10] Wiscombe W J, Warren S G. A model for the spectral albedo of snow I: Pure snow [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, 37: 2712-2733.
- [11] Warren S G, Wiscombe W J. A model for the spectral albedo of snow II: Snow containing atmospheric aerosols [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1980, 37: 2734-2745.
- [12] Warren S G, Wiscombe W J. Dirty snow after nuclear war [J]. *Nature*, 1985, 313: 467-470.
- [13] Aoki Teruo, Aoki Tadao, Fukabori Masashi, *et al.* Effects of snow physical parameters on spectral albedo and bi-directional reflectance of snow surface [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D8): 10219-10236.
- [14] Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101 (2): 423-428. doi:10.1073/pnas.2237157100.

- [15] Jacobson M Z. The climate response of fossil fuel and biofuel soot, accounting for soot's feedback to snow and sea ice albedo and emissivity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, D21201, doi:10.1029/2004JD004945.
- [16] Dunkle R V, Bevens J T. An approximate analysis of the solar reflectance and transmittance of a snow cover [J]. *Journal of Meteorology*, 1956, 13: 212-216.
- [17] Giddings J C, LaChapelle E R. Diffusion theory applied to radiant energy distribution and albedo of snow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1961, 66: 181-189.
- [18] Bohren C F, Barkstrom B R. Theory of the optical properties of snow [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1974, 79: 4527-4535.
- [19] Kuhn M, Siogas L. Spectroscopic studies at McMurdo, South Pole and Siple Stations during the austral summer 1977-1978 [J]. *Antarctic J. U. S.*, 1978, 13: 178-179.
- [20] Stephenson P J. Some considerations of snow metamorphism in the Antarctic ice sheet in the light of ice crystal studies [C]// *Physics of snow and ice, Proceedings of the International Conference on Low Temperature Sciences*. Sapporo, Japan: Bunyendo Printing Company, 1967: 725-740.
- [21] Grenfell T C. A visible and near-infrared scanning photometer for field measurements of spectral albedo and irradiance under polar conditions [J]. *Journal of Glaciology*, 1981, 27: 476-481.
- [22] Light B, Eicken H, Maykut G A, *et al.* The effect of included particulates on the spectral albedo of sea ice [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (C12): 27739-27752.
- [23] Twohy C H, Clarke A D, Warren S G, *et al.* Light-absorbing material extracted from cloud droplets and its effect on cloud albedo [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 8623-8631.
- [24] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D J, *et al.* *Climate Change 2001: The Scientific Basis* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [25] 刘先勤, 王宁练, 徐柏青. 雪冰中碳质气溶胶含量的测试方法 [J]. *冰川冻土*, 2005, 27(2): 249-253.
- [26] 明镜, 秦大河, 效存德. 雪冰中的黑碳记录研究的历史回顾 [J]. *冰川冻土*, 2005, 27(4): 539-544.
- [27] 明镜, 效存德, 孙俊英. 雪冰中黑碳的测试分析方法综述 [J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(3): 859-863.



## 欢迎参加亚洲碳博览会

Welcome to CARBON EXPO ASIA- Carbon Market Trade Fair and Conference

2006年10月26-27日

北京 中国大饭店

消息

随着全球碳减排交易市场的迅速发展, 中国作为清洁发展机制(CDM)项目潜力最大的发展中国家, 市场前景非常广阔。为了促进中国 CDM 项目的快速发展, 广泛提高相关企业、地方政府部门参与全球碳减排市场的国际合作能力, 中国科技部、国家发展和改革委员会及中国财政部联合主办的亚洲碳博览会将于2006年10月26-27日在北京举办。本次博览会由世界银行、国际排放贸易协会和科隆国际展览公司共同组织, 并与亚洲开发银行、日本国际协力银行和意大利环境、国土和海洋部合作, 委托中国21世纪议程管理中心作为博览会中方秘书处。

博览会将采取展览、主题论坛、研讨会与商务洽谈会结合的形式, 宣传介绍我国温室气体减排的政策、市

场、技术与资金需求等现状, 并对 CDM 项目管理、工业发展、可再生能源等主题展开研讨, 研究促进 CDM 项目开发、碳贸易、能力建设、财政资助等内容, 同时在 CDM 项目合作方之间开展项目洽谈会。

欢迎国内 CDM 项目投资商、项目业主、开发商、政府官员和专家学者届时参展参会!

博览会详细信息请登陆 <http://www.carbonexpo-asia.cn> 或请联系大会中方秘书处: 中国 21 世纪议程管理中心  
清洁技术发展处

电话: +86-10-8263 6607

传真: +86-10-8263 6017