

研究综述

北极黑碳气溶胶研究现状和展望

詹建琼 陈立奇 张远辉 杨绪林 李伟

(国家海洋局海洋大气化学与全球变化重点实验室, 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

提要 在过去的 100 年中, 北极温度升高的速率几乎是全球平均速率的两倍, 尽管人为长生命期的温室气体 (GHGs) 在气候系统辐射强迫中占主导地位, 黑碳气溶胶和其它短生命期的污染物却能很好地解释北极气候变暖较快的原因。因此, 减少人为黑碳气溶胶排放将成为缓解北极迅速变化的重要策略。介绍北极黑碳气溶胶研究现状, 讨论它在北极变暖中扮演的角色, 分析当前北极黑碳气溶胶研究中存在的问题, 展望深入开展黑碳气溶胶观测研究的必要性和紧迫性。

关键词 北极 黑碳气溶胶 气候变化

doi: 10.3724/SP.J.1084.2010.00056

0 引言

黑碳气溶胶 (BC) 是由含碳 (燃料) 物质不完全燃烧产生的一种无定型碳质, 是大气气溶胶中最主要的光学吸收成分, 对气候变化有重要影响。北极地区对黑碳气溶胶浓度变化尤为敏感, 经统计分析研究表明, 过去 30 多年来北极地表温度上升了 $1.5^{\circ}\text{C}^{[1]}$, 其中约 70% 的升温与硫酸盐气溶胶减少, 黑碳气溶胶增多有关^[2]。首先, 这是由于北极地区与欧洲、北美接近, 由这两个地区燃料/生质燃烧释放出来的黑碳气溶胶向北扩散, 在北极大气层中聚集, 由于北极地区降水较少, 不能有效地把黑碳气溶胶从大气中冲刷掉, 使得黑碳气溶胶在北极的生命期更长, 对北极气温影响很大; 其次, 黑碳气溶胶能降低冰雪反照率, 使得地表吸收更多的太阳辐射, 其所产生的辐射强迫可达 $(+0.10 \pm 0.10) \text{W} \cdot \text{m}^{-2[1]}$, 随着北极变暖, 经暖化的冰雪即使含有极少量的黑碳气溶胶 ($10 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 就能产生大的增暖效应。

Ramanathan 等^[3]在研究中指出黑碳气溶胶可能是造成全球变暖的第二大根源, 其作

[收稿日期] 2009 年 11 月收到来稿, 2010 年 3 月收到修改稿。

[基金项目] 国家自然科学基金 (40531007、40676062)、国家社会公益专项 (2004DIB5J178)、国际极地年中国行动计划专项资助。

[作者简介] 詹建琼, 女, 硕士研究生。

[通讯作者] 陈立奇, E-mail: Lqchen@soa.gov.cn。

用仅次于 CO_2 , 其所产生的直接辐射强迫可达 $0.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 是同期 CO_2 辐射强迫的 55%, 且大于其它温室气体, 如甲烷、氯氟烃、氧化亚氮以及臭氧的强迫值。尽管减少人为 CO_2 排放是减缓全球变暖的主要策略, 但因其生命期比较长(大约一百多年)^[3], 并不能有效地减缓当前北极地区春季海冰融化提早, 夏季海冰大面积消退, 而黑碳气溶胶仅在空气中存在几天到几周^[4], 减少黑碳气溶胶的排放可以在数周内减缓变暖, 这将有助于北极地区气候系统跨过一系列突然而不可逆转的气候变化的临界点^[5], 因此, 减少并控制黑碳气溶胶的排放是减缓北极变暖的最有效途径。然而, 目前关于北极黑碳气溶胶浓度、来源以及辐射强迫参数还存在很大不确定性, 使决策者不能针对北极变暖提出行之有效的调节和缓解措施, 这就使得观测研究黑碳气溶胶时空分布特征、来源及其辐射强迫成为必须。

1 北极黑碳气溶胶研究现状

1.1 黑碳气溶胶测量方法

从 20 世纪 80 年代末期开始, 国际上在北极地区开展了大量的黑碳气溶胶的观测研究, 而对于更长时间系列黑碳气溶胶浓度信息可由冰芯黑碳记录反演获得。格陵兰冰芯黑碳记录表明^[6], 工业革命以前, 冰芯中黑碳浓度仅为 $1.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 19 世纪工业革命期间, 由于人类大量使用生物燃料和化石燃料, 使得黑碳浓度从 $1.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 上升到 $20 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 其中, 工业革命期间工业释放增加的黑碳是工业革命以前的 7 倍, 19 世纪 40 年代由于燃料转型和森林大火的控制使得冰芯中黑碳浓度有所降低, 上个世纪 80 年代末至 90 年代初, 黑碳浓度有所降低, 这与前苏联工业衰落有关, 20 世纪后期亚洲经济的快速发展使得格陵兰岛黑碳浓度升高。

尽管冰芯记录能反映长时间尺度黑碳气溶胶的浓度变化情况^[6], 进一步评估黑碳气溶胶的可能来源、传输过程、清除过程, 则需要开展黑碳气溶胶的观测。目前黑碳气溶胶的测量方法主要有两种: 1) 从研究黑碳气溶胶气候强迫出发, 主要采用光学方法, 这一方法采用光强的衰减程度来反演空气中黑碳气溶胶的浓度。最常用的方法是基于滤膜采样, 通过测量透过滤膜的不同波长光的光学衰减, 来确定黑碳气溶胶的含量。目前普遍使用黑碳仪(AE, Aethalometer)和微粒碳吸收光度计(PSAP, Particle Soot Absorption Photometer)来测量气溶胶吸收系数, 这两种采样方法能实现实时多波段观测, 提供高时间分辨率的吸收、单向散射反照率谱信息, 且简单易操作, 被广泛应用于陆地或机载观测。但这两种方法因滤膜多向散射、滤膜中粒子散射以其它光吸收粒子吸收等所引起的光学衰减, 使得方法本身存在一定的误差。针对这一缺陷, 发展了声光法(PAS, Photoacoustic Spectrometer)和多向散射法(MAAP, Muti-Angle Absorption Photometry), 声光法是目前国际上认为能比较准确测量黑碳气溶胶吸收系数的方法, 多向散射法能准确地测量透射光强和后向散射光强, 这两种方法常被用来作为参比对照标准, 从而实现对滤膜采样误差的校正。光学方法能有效获取气溶胶散射、吸收系数, 由于黑碳气溶胶吸收特性与粒子的组分、尺度分布及混合方式有关, 同时其它气溶胶粒子也会造成光学衰减, 使得光吸收信号转换为黑碳气溶胶浓度并没有普遍使用的标准^[7]。2) 热学方法是通过加热和氧化采集

到石英膜上的气溶胶,通过测量释放出的碳来确定黑碳气溶胶的浓度,这一方法能准确测量大气气溶胶碳的含量,而大气气溶胶中黑碳与有机碳同时存在且难以分离,使得准确测量黑碳和有机碳有一定的难度,同时在热测量过程中有机物高温分解及其它气溶胶干扰也将带来误差。理论上两种测量方法应该有很好的相关性,但有一些研究结果表明两者存在很大的差异^[7,8],为此在比较分析各地黑碳气溶胶浓度,特别是在评估黑碳气溶胶的辐射效应时,应明确其测量技术及其实验过程采用的各种假设,以有效地比较分析黑碳气溶胶在不同时间不同地区的差异。除以上两种比较普遍的观测方法,目前还有遥感测量方法,这一方法能实现大范围实时同步、全天时、全天候多波段观测,能很好地弥补船基、站点观测的不足,获得长时间、大空间尺度的数据,但由于目前这个测量方法的反演精度不够高,同时实现黑碳气溶胶反演的设备要求比较高,使得这一方法还未得到广泛的认可。

1.2 北极黑碳气溶胶浓度时空分布特征

目前,北极地区的黑碳气溶胶观测研究已取得了重要进展并获得了重要结论(观测结果见表1)。Sharma等^[9]于1989—2003年期间在Barrow与Alert进行为期15年的黑碳气溶胶观测,结果表明黑碳气溶胶年平均浓度均为 $\sim 25 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,Eleftheriadis等^[10]根据1998—2007年期间黑碳气溶胶观测结果表明Zeppelin站(474 m asl)黑碳气溶胶浓度年平均为 $39 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,这个值比Sharma等观测到的值要高,而我国于2005—2008年黄河站夏季科考期间,在黄河站楼顶(Zeppelin站山脚)观测到夏季黑碳气溶胶平均浓度约为 $15 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,比Zeppelin站观测到的夏季平均值 $7 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 高出近1倍,这一方面是由于黄河站受站区人类活动的影响比较大,另一方面是由于夏季Zeppelin站受北极自由对流层影响^[11,12],而地面逆温、冰川下降风等均对黄河站黑碳气溶胶观测产生影响,目前由于缺乏垂直观测以及多点联测,还无法很好地解释这方面的差别;从已有的观测结果来看,北极地区黑碳气溶胶浓度比北半球其它地区要来得低^[13],而比南极海岸McMurdo($20 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[14]以及南极点($0.5\text{—}5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$)^[15]要高。表1中列出了北极各个地区黑碳气溶胶观测结果,从表中可以看出北极黑碳气溶胶浓度时空变化范围很大,即使是同一站点不同时间,不同高度也有量级的差别,这就需要对黑碳气溶胶组成、来源、物理化学性质等多方面做进一步的分析探讨^[10]。

同时,北极黑碳气溶胶体现明显的季节变化特征。无论是从冰芯黑碳记录^[6],还是从黑碳气溶胶直接观测^[9,10,23],均体现出夏季低,冬季高的特征,特别是在20世纪90年代,季节变化幅度范围可达3个量级,Zeppelin站夏季黑碳气溶胶低至 $\sim 0 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,而冬季浓度高达 $80 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[10]。研究表明季节差别与北极极峰的位置有关,夏季因北极极峰的位置偏北,阻碍环北极国家污染物向北输送,而在冬季北极极峰南移,其位置大约位于 50°N ,使得欧洲、俄罗斯和北美地区大量污染在北极聚集,北极黑碳气溶胶浓度升高^[11]。

另外,从20世纪90年代至今已有的观测数据表明黑碳气溶胶还体现出年际变化。从1998—2001年以及2001—2007年,Zeppelin站均出现 $19.7 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, $9.5 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 的减少^[10],Sharma等^[9]也于1989—1998年间在Alert和Barrow分别观测到不同程度的减少,其中Alert减少了近54%,Barrow减少了27%,Sharma等在研究中表明1989—1994年黑碳气溶胶浓度减少与前苏联解体,工业衰落有关,同时研究表明,北极黑碳气溶胶浓度变

化与北大西洋涛动有关,北大西洋涛动为正时,黑碳气溶胶浓度较高,而为负时,黑碳气溶胶则较低,其差别可高达 40%;北极黑碳气溶胶浓度分布时空多样性明显,在 1999—2003 年间,Zeppelin 站黑碳气溶胶浓度有所降低,而 Barrow 和 Alert 黑碳气溶胶浓度却出现上升,这表明北极黑碳气溶胶浓度分布存在时空多样性,为此有必要在不同的地区开展长期观测研究。

表 1 北极黑碳气溶胶观测结果
Table 1. Observations of black carbon aerosol in Arctic

观测地点	观测时间	观测方法	黑碳气溶胶浓度 ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$)	文献
Ny-Alesund(78.9°N,11.9°E;10 m asl)	Apr 1977—May 1979	ND	68 (3—174)	[16]
	1990—1992	ND	80	[17]
Yellow River Station, Ny-Alesund(78.9°N,11.9°E;10 m asl)	Summer, 2005—2008	Aethalometer (AE-31, $\sigma_{\text{Aeth}} = 19 \text{ m}^2/\text{g}$)	15	本文
		Aethalometer (1998.8—1999.7, AE-9, $\sigma_{\text{Aeth}} = 15.2 \text{ m}^2/\text{g}$; 2001.5, AE-31, $\sigma_{\text{Aeth}} = 15.9 \text{ m}^2/\text{g}$)	39 (0—80)	[10]
Norwegian part of the Arctic	Jul-Sep, 1980	ND	5	[18]
Barrow, Alaska, USA	Jan	ND	314	[19]
	Jul	ND	80	
	1988—1993	Aethalometer ($\sigma_{\text{Aeth}} = 19 \text{ m}^2/\text{g}$)	26 (1—300)	[20]
Barrow(71.2°N,156.6°W;8 m asl)	1989—2003	Aethalometer (AE-8, $\sigma_{\text{Aeth}} = 19 \text{ m}^2/\text{g}$)	20—40	[9]
	1986—1995	ND	10—5000	[21]
Alert(82.4°N, 62.3°W;210m asl)	Jan 1989—Dec 1990	Aethalometer (AE-6, Nov-Apr, $\sigma_{\text{Aeth}} = 19.8 \pm 0.9 \text{ m}^2/\text{g}$; May-Oct, $\sigma_{\text{Aeth}} = 28.8 \pm 2.5 \text{ m}^2/\text{g}$)	70 (16—320)	[22]
	1989—2002	Aethalometer (AE-6, Nov-Apr, $\sigma_{\text{Aeth}} = 19.8 \pm 0.9 \text{ m}^2/\text{g}$; May-Oct, $\sigma_{\text{Aeth}} = 28.8 \pm 2.5 \text{ m}^2/\text{g}$)	8—96	
	1989—2003	Aethalometer (AE-6, Nov-Apr, $\sigma_{\text{Aeth}} = 19.8 \pm 0.9 \text{ m}^2/\text{g}$; May-Oct, $\sigma_{\text{Aeth}} = 28.8 \pm 2.5 \text{ m}^2/\text{g}$)	25—73	[9]

注:ND 指的是采用化学分析方法分析滤膜样品得到的黑碳气溶胶浓度

1.3 北极黑碳气溶胶来源

从来源区域来看(见图 1),北美和欧洲曾经是北极黑碳气溶胶的主要源区,工业革命

时期,前苏联也在黑碳气溶胶排放中占有一席之地,随着苏联解体,经济出现衰退,其所排

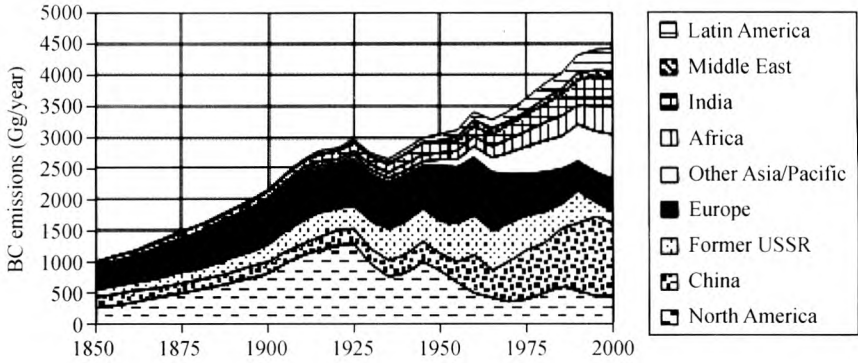


图 1 黑碳气溶胶来源区域^[31]
Fig. 1. Black carbon aerosol emitted from different region^[31]

放的黑碳气溶胶有所减少,到 20 世纪后半期,随着发展中国家经济的发展,亚洲逐渐成为北极黑碳气溶胶的重要源区。目前,由于黑碳气溶胶排放很难直接测定,化学输送模式存在数据来源及模式本身的误差,使得精确判别黑碳气溶胶来源具有一定的难度,特别是源自东亚、南亚的黑碳气溶胶所占比重,仍存在很大的不确定性。有研究认为^[6,24-26],北极黑碳气溶胶大部分来自北极以外的地区,其主要源区为北半球中高纬度地区,南亚地区次之。Dean 等^[27]采用 PMF(Positive Matrix Factorization)结合后轨迹分析了阿拉斯加、加拿大、格陵兰岛、俄罗斯和北冰洋 36 个站点雪黑碳的来源,结果显示尽管北极点黑碳体现为海盐特征,污染物对该点也有一定程度的影响。Eleftheriadis 等^[10]采用后向轨迹表明 Zeppelin 大气主要来自北极($>80^{\circ}\text{N}$)和俄罗斯($30^{\circ}-130^{\circ}\text{E}$),其中北极占 40%,俄罗斯占 31%;从簇分析来看,夏季 Zeppelin 主要受到苏格兰/爱尔兰、瑞典南部以及俄罗斯中部(科拉半岛和诺里尔斯克)的影响,而冬季主要受到俄罗斯中部(科拉半岛以及阿尔汉格尔斯客至克拉斯诺亚尔斯克一带)的影响,Sharma 等^[9]在 Alert 的研究结果与 Eleftheriadis 的结果基本一致,Barrow 则差别比较大,该站点主要受到源自西伯利亚和太平洋/亚洲污染物远距离输送的影响。Shindell 等^[2]估算表明:热带地区气溶胶将导致北极气温降低 0.3°C ,中纬度气溶胶将使北极温度升高 0.6°C ,而产生于北极地区的气溶胶将使本地区温度升高 0.8°C ,且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。Shindell 等^[28]采用 13 种模式系统评估北极黑碳气溶胶的来源以及沉降过程,从多模式平均估算结果来看,北极底层大气,黑碳气溶胶主要来自欧洲,对流层上层大气,黑碳气溶胶主要来自东亚,且随高度的增加,东亚排放的黑碳气溶胶所占的比重增大,对流层中层大气,东亚排放的比重与欧洲相当;同时,Shindell 在研究中指出北极(除格陵兰岛外)沉降在冰雪表面的黑碳主要来自欧洲,春季,来自东亚的黑碳气溶胶也占有一定的比重。格陵兰岛冰雪表面的黑碳主要来自欧洲和北美,东亚、南亚次之。Koch 等^[29]采用 GISS GCM 分析了黑碳气溶胶的来源,指出北极黑碳气溶胶大部分来自南亚和东南亚,东南亚通过中高层大气把黑碳气溶胶输送到北极地区。但吴润等^[30]采用 RegCM3 模拟东

亚黑碳气溶胶分布输送,结果却显示中国春季的输出量小于境外对中国的输入量,这与 Shindell 指出的春季源自东亚的黑碳气溶胶在北极冰雪中占有一定的比重有所出入。

从来源构成来看,不同时期黑碳气溶胶的组成有所差别。Bond 等^[31]指出 1850—2000 年间化石燃料和生物燃料燃烧释放出来的黑碳气溶胶几乎呈线性增长,不同时期黑碳气溶胶来源构成有所差别。工业革命以前,大气中的黑碳主要来自生质燃烧,工业革命以来,化石燃料和生物燃料燃烧所占的比重最大,其中 1880—1975 年间主要来自燃煤燃烧,19 世纪中期随着燃料转型,燃煤燃烧所占比重有所降低,柴油燃烧初见端倪,20 世纪 70 年代中期柴油燃烧所占比重逐渐加大(见图 2),据 Rananathan 等^[32]估算,目前黑碳气溶胶大约有 20% 来自生物燃料燃烧,40% 来自化石燃料,40% 来自室外生质燃烧。这一变化趋势在格陵兰岛冰芯黑碳记录也得到很好的体现^[6]。且已有研究表明^[25, 33],有 70%—90% 的北极黑碳气溶胶来自燃料燃烧,其年变化幅度与生质燃烧的强度、地理分布有关。在森林大火强盛的年份(如 1998 年),其比重将高达 50%^[33]。Dean 等^[27]采用 PMF(Positive Matrix Factorization)分析了阿拉斯加、加拿大、格陵兰岛、俄罗斯和北冰洋等 36 个站点雪中黑碳的组成,结果显示北极雪中黑碳主要来自俄罗斯生质燃烧、北美生质燃烧、污染物质以及海盐,前三者是北极雪中黑碳的主要来源,其中生质燃烧占总黑碳的 90% 以上;Elmqvist 等^[34]采用¹⁴C 分析北极 7 大河流中黑碳,表明北极河流中黑碳有 20% 来自生质燃烧,80% 来自化石燃料燃烧。Stohl 等^[35]研究发现 2004 年加拿大、阿拉斯加森林大火期间,全北极气溶胶光学吸收系数明显增大,格陵兰岛冰雪反照率也明显地降低。Generoso 等^[36]也在研究中发现 2003 年西伯利亚森林大火期间,气溶胶光学厚度增大了 19%—50%。

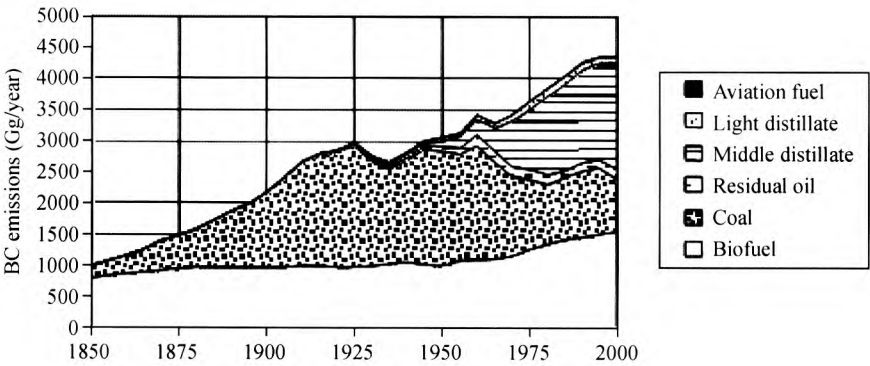


图2 黑碳气溶胶来源构成^[31]

Fig. 2. Black carbon aerosol emitted from different fuel types^[31]

2 北极黑碳气溶胶的气候效应

2.1 北极黑碳气溶胶影响地气辐射平衡

与 CO₂、CH₄、N₂O、O₃ 等温室气体相比,黑碳气溶胶有更宽的吸收波段,从紫外到红外都有吸收,与同样具有吸收特性的沙尘相比,黑碳气溶胶的吸收系数要高出 1 个量级,

黑碳气溶胶通过吸收太阳、地球大气的辐射影响地-气系统的能量收支,进而影响气候。燃料燃烧产生黑碳气溶胶的同时也释放出硫酸盐、硝酸盐、有机碳等散射性气溶胶,这些物质在气候变化中起到冷却的作用,为此燃料燃烧产生的气溶胶,其辐射效应与吸收性气溶胶和散射性气溶胶的混合比、混合方式有关。研究表明硫酸盐、有机碳等散射性气溶胶与黑碳气溶胶内部混合,能极大地改变黑碳气溶胶的光学特性,增大黑碳气溶胶的正辐射强迫^[37]。北极地区,由于黑碳气溶胶与北极冰雪表面形成强烈的反差,使得它能更有效地吸收太阳辐射,导致明显的正辐射强迫,研究表明北极黑碳气溶胶增暖效应比反射性气溶胶冷却效应要来得大,使得气溶胶成为北极地区的一个有效的增暖机制,特别是在冰雪消融的春夏季节,黑碳气溶胶对雪山、冰川的影响可能等同于 CO_2 ^[26]。

同时,在降水较少的冬春季节,北极大气相对稳定,地面逆温,使得从中高纬度迁移来的气溶胶在此聚集,形成北极雾霾^[38-42]。北极雾霾在具有高反射的冰雪表面吸收太阳辐射能,加热雾霾层以下的整层大气,尽管到达地球表面的太阳短波辐射减少,而大气长波辐射增多,使得地表增温,研究表明,在北极冬春季,由于雾霾,黑碳气溶胶浓度增大可导致表面 0.5°C 的升温^[26]。Pueschel 和 Kinne^[43] 在北极平流层实验中通过飞机观测 1.5 km 高度大气层,研究表明尽管在单向散射系数高达 0.98 的冰雪表面,黑碳气溶胶仍能加热地气系统。这种加热保温机制在北极夜间尤为重要,相对稳定的北极大气能有效地阻碍能量向平流层传输,大气温度与地表辐射直接相关,从而使得地表长波辐射是大气能量的主要来源,Ritter 等^[44] 在观测时也发现夜间北极雾霾层可以向下放出长波辐射,地气之间相互作用使得能量得以维持,对北极起到“温室效应”的作用。

2.2 北极黑碳气溶胶冰雪反照率反馈机制

沉降在冰雪表面的黑碳还有一个附加强迫机制^[45]。沉降在积雪或者海冰表面的黑碳气溶胶改变冰雪物理化学属性,使得冰雪表面吸收更多的太阳辐射能。由于北极地面逆温阻碍能量传输,累加在绝热极佳的冰雪表面,使得冰雪表面黑碳气溶胶加热底层大气的效果尤为突出。Flanner 等^[33] 主要采用 SNICAR 结合 NCAR CAM3 来估算冰雪表面黑碳气溶胶辐射强迫,模拟结果表明沉降在北极雪表面的黑碳气候强迫可达 $0.047 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。IPCC 第四次评估报告^[1] 第一次明确指出沉降在冰雪表面黑碳气溶胶辐射强迫约为 $0.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Hansen 等^[46] 研究表明黑碳气溶胶对北极冰雪全光谱反照率的改变为 1.5%。

同时沉降在冰雪表面的黑碳气溶胶吸收更多的太阳辐射能,在某种程度上将加速冰雪融化,冰雪春融提早,冰川融化^[25],从而使得原本被冰雪覆盖的地区,裸露出幽暗的苔原或海洋,从而激发一个更强的气候增暖机制,即冰雪反照率反馈机制。Hansen 等^[46] 指出黑碳气溶胶是导致北极冰川融化的重要因素,在北半球和北冰洋的中高纬度地区,冰雪反照率反馈导致的气候强迫值高达 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,在冰雪初融时期其辐射强迫达到最大,此时冰雪上黑碳气溶胶的升温效果比等量二氧化碳高三倍^[33]。

黑碳气溶胶产生的增暖效应比 CO_2 要来得集中,在稳定的北极大气底层及绝热且高反射的冰雪表面,黑碳气溶胶将比其它物质产生更强的辐射强迫^[26,33,47]。工业革命以前,冰雪表面黑碳气溶胶能使北极温度升高约 0.25°C ^[33],其中有 80% 是由来自干旱地区传输来的沙尘造成的,而黑碳气溶胶仅占 20%。随着各国经济的持续发展,燃料燃烧排放

增多,森林大火频发,黑碳气溶胶浓度上升,使得黑碳气溶胶气候效应日益显现。Shindell等^[2]研究表明,工业革命以来,燃料燃烧产生的黑碳气溶胶可使北极温度升高0.5—1.4℃。在全球变暖的大背景下,黑碳气溶胶使得气候系统对人类GHGs温室效应变得更加敏感。

2.3 北极黑碳气溶胶云气候效应机制

黑碳气溶胶可以作为云凝结核(CNN),改变云滴数量、云滴尺度分布,影响大气降水和云的寿命,间接影响地球与大气之间的辐射平衡,对区域乃至全球气候变化产生影响。黑碳气溶胶可直接影响太阳短波辐射,云中黑碳气溶胶能使云滴数量增多,粒径减小,从而增加云的短波反照率^[48];同时,黑碳气溶胶会影响长波辐射,云中液体水和黑碳相互作用也使云能更有效地捕获长波辐射,其产生的辐射强迫大约为 $3.3\text{--}5.2\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,这将使地表温度上升 $1\text{--}1.6^\circ\text{C}$ ^[49]。研究表明^[50],黑碳气溶胶存在于云内或云顶时,辐射强迫加强,在云下时,辐射强迫减弱;Hansen等^[51]运用GISS ModelE估算云-黑碳气溶胶气候强迫为 $0.1\text{ W}\cdot\text{m}^2\pm0.05$;Garrett等^[52]在Barrow近4年的观测表明,黑碳气溶胶能使底层云增厚,从而大气捕获更多的地表辐射能。

2.4 北极黑碳气溶胶辐射强迫估算

近年来,黑碳气溶胶辐射强迫研究已经取得了一些进展(见表2),Jacobson^[47]采用GATOR-GCMOM模式(Gas, Aerosol, Transport, Radiation, General Circulation, Mesoscale and Ocean Model)模拟气溶胶辐射强迫,模式中将黑碳排放、沉降以及云混合过程均考虑在内,并嵌套了气候系统多参数,考虑了冰雪反照率反馈机制,结果显示黑碳气溶胶和有机物质可导致全球 0.27°C 的升温。Shindell等^[2]采用GISS-RE模拟北极黑碳气溶胶气候效应,结果表明北极黑碳气溶胶将造成北极 $0.5\text{--}1.4^\circ\text{C}$ 的升温。IPCC^[1]集中了23个全球气候系统模式采用9种不同排放情景,采用多模式集合给出源自化石燃料排放的黑碳气溶胶的直接辐射强迫为 $0.2\text{ W}\cdot\text{m}^2\pm0.15$,并在此基础上第一次明确指出冰雪表面黑碳气溶胶辐射强迫为 $0.2\text{ W}\cdot\text{m}^2\pm0.15$ 。Ramanathan等^[3]通过总结先前的研究,表明以往的GCMs由于黑碳气溶胶与其他气溶胶混合方式、生质燃烧以及以往模式均假定地表黑碳浓度最高,而在实际观测中显示2 km高度黑碳气溶胶的值最大,这些因素都将导致估算值偏小,为此他在研究中采用大气化学传输模式与MODIS卫星观测值以及气溶胶自动观测网(AERONET)数据相结合的方法(GOCART-AERONET, aerosol transport model, aerosol robotic network),将黑碳气溶胶混合方式以及生质燃烧产生的效果考虑进来,经估算得到黑碳气溶胶的直接气候强迫为 $0.9\text{ W}\cdot\text{m}^2$ 。

当前,采用模式估算黑碳气溶胶及其辐射强迫是研究的一个关键问题,尽管科学家不断完善模式,但现有的模式结果仍不尽如人意。虽然Koch等^[29]采用GISS模型模拟Spitsbergen和Alaska地区黑碳浓度,结果显示模拟值与站点观测值没有明显差别,但是Shindell等^[28]采用13种模式对北极地区黑碳浓度进行模拟表明,采用模式模拟黑碳气溶胶浓度分布可行性不高,因模式之间在处理传输、光化学反应、沉降和排放之间的不同,使得模式模拟黑碳气溶胶浓度差别比较大,特别在黑碳气溶胶的寿命上,模式之间存在2个量级的差别;另一方面采用光学观测得到黑碳气溶胶浓度受观测方法本身的影响,使得观测结果本身就带有一定的误差,因此他们认为采用已有的观测数据来决定模式的适用性

是不可靠的。Quinn 等^[53]认为采用模式模拟得到的黑碳气溶胶浓度时空分布情况可大致说明模拟的可行性,其次可采用 CO₂ 加倍的方法来评估模式的敏感性,Quinn 利用此方法评估了 GISS ModelE GCM 模拟北极地区气溶胶辐射强迫结合 NCAR 估算冰雪表面黑碳气溶胶辐射强迫的敏感性,结果表明敏感值在地球气候模式的允许范围内。

表 2 黑碳气溶胶辐射强迫 ($W \cdot m^2$)
Table 2. Radiative forcing of black carbon aerosol

文献来源	直接强迫	间接强迫	云效应	冰雪反照反馈	总量	估算方法
IPCC ^[1]	0.2 ± 0.15	-	-	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.25	IPCC-AR4
Haywood ^[54]	0.50—0.86	-	-	-	-	R30 GFDL
Jacobson ^[47,55-57]	0.55	0.03	0.03	0.06	0.64	GATOR-GCMOM
Hansen ^[51,58,59]	0.2—0.6	0.3 ± 0.3	0.1 ± 0.05	0.2 ± 0.1	0.7 ± 0.2	GISS ModelE
Hansen ^[46]	-	-	-	0.3(全球) 1(北极)	-	GISS ModelE
Ramanathan ^[3]	0.9(0.4—1.2)	-	-	0.1—0.3	1.0—1.2	GOCART-AERONET
Chung ^[37]	0.22	-	-	-	0.51—0.8	GISS GCM II -prime
Shindell ^[28]	-	-	-	-	0.5—1.4°C (北极)	GISS-ER

注: * 单位为°C

3 北极黑碳气溶胶研究展望

3.1 存在问题

近年来国际及国内在观测和模式研究等方面均取得了重大的研究成果和研究进展。但就目前而言,黑碳气溶胶研究的不确定性仍然非常大。

黑碳气溶胶与温室气体不同,其生命期比较短,且浓度空间变化范围比较大,目前北极黑碳气溶胶观测研究主要集中在 Alert, Barrow 与 Ny-Ålesund 等三个地区,而在对北极地区有很深影响的俄罗斯地区,以及能体现北极地区黑碳气溶胶特征的北冰洋地区还缺乏长期的观测,对于黑碳气溶胶垂直分布方面至今未见相关结果,虽然卫星观测能弥补大面观测的不足,但目前其反演的精度还不够,为此在提高卫星反演技术的同时,有必要在北极地区开展常规大面、长期观测,以摸清黑碳气溶胶时空分布情况。

由于黑碳气溶胶辐射强迫机制复杂,仅仅了解黑碳气溶胶的浓度及其分布情况还远远不够。因为即使黑碳气溶胶的浓度相同,但因其他参数(如单次反照率、折射指数、黑碳气溶胶与其他气溶胶混合方式和混合状态等)不同,也将导致其辐射强迫效果显著差别,有时甚至是相反的结果。黑碳气溶胶的吸收特性根据它的来源和大气中的过程不同可以相差 2 倍或更多,黑碳气溶胶与其他气溶胶内、外不同的混合方式下,直接强迫分别为 0.54 $W \cdot m^2$ 和 0.27 $W \cdot m^2$ ^[57,60]。同时模式估算还需知道各种燃料的排放因子和排放清单,目前黑碳排放因子是通过实验室估算得到,并且估算的因子有限,这与实际燃料燃烧的排放因子差别很大,同时实际排放因子受到大气条件的影响,因此采用实验室估算得到的排放因子存在很大误差。

目前黑碳气溶胶云辐射强迫机制还处于初步研究阶段。由于黑碳气溶胶云气候强迫的物理过程和作用机制很复杂,云辐射强迫的模拟相当的复杂,云内部观测难度相当大,使得云模拟成为已有模式最重要的差异。

另外,评估冰雪表面黑碳辐射强迫,还需要知道雪融水清除过程,冰雪表面黑碳气溶胶的光学特性以及冰雪覆盖率,研究^[53]表明以上不确定性将使得冰雪表面黑碳辐射强迫在-87%—240%之间变化。

3.2 研究展望

北极气候对黑碳气溶胶非常敏感。黑碳气溶胶影响地气平衡、气溶胶云辐射强迫机制以及冰雪反照率反馈机制,这解释了黑碳气溶胶加热北极的原因。但目前对于黑碳气溶胶的研究还存在很大的不确定性,这就迫切需要我们加强观测和模式的研究,以期了解黑碳气溶胶辐射强迫机制,其中尤为重要是:

(1)黑碳气溶胶生命期比较短,浓度空间范围变化比较大,因此加大地面大面长期观测,提高卫星反演精度,开展垂直观测是必需的,这将有利于摸清黑碳气溶胶物理化学性质以及时空分布。

(2)云中黑碳气溶胶和云相互作用,使长波辐射加强,地表温度升高,增暖引起海冰融化的同时,激发更为有效的辐射强迫。为此结合观测和模式研究黑碳气溶胶物理化学属性以及源汇分布,同时结合站点观测研究气溶胶和云的属性以及底层云中冰形成机制将非常重要。

(3)黑碳气溶胶生命周期相对比较短,使得他们不能地很好全球扩散混合,因此有必要尽可能详细了解源区,以减少对北极的影响。

(4)采取恰当的调节缓解机制。每个污染源释放出多种物质,这其中包括加热效应物质以及冷却效应物质,这将使得调节机制的选择非常复杂,这就需要进一步完善模式,以理清各种非独立源的作用。

参考文献

- 1 IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- 2 Shindell D, Faluvegi G. Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geoscience*, 2009, 2: 294—300, doi:210.238/NGE0473.
- 3 Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, 2008, 1 (4): 221—227.
- 4 Cooke W F, Wilson J J N. A global black carbon aerosol model. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101 (D14): 19395—19409.
- 5 Lenton T M, Held H, Kriegler E, et al. Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(6): 1786—1793.
- 6 McConnell J R, Edwards R, Kok G L. 20th century industrial black carbon emissions altered Arctic climate forcing. *Science*, 2007, 317: 1381—1384.
- 7 Liousse C, Cachier H, Jennings S G. Optical and thermal measurements of black carbon aerosol content in different environments; variation of the specific attenuation cross-section, *Sigma. Atmospheric Environment*, 1993, 27(8): 1203—

1211.

- 8 Babich P, Davey M, Allen G, et al. Method comparisons for particulate nitrate, elemental carbon, and PM_{2.5} mass in seven U. S. cities. *The Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, 50(7): 1095—1105.
- 9 Sharma S, Andrews E, Barrie L A, et al. Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989—2003. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, D14208, doi:10.1029/2005JD006581.
- 10 Eleftheriadis K, Vratolis S, Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Alesund, Svalbard from 1998—2007. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L02809, doi:02810.01029/02008GL035741.
- 11 Treffeisen T, Herber A, Shiobara S M, et al. Interpretation of Arctic aerosol properties using cluster analysis applied to observations in the Svalbard area. *Tellus Series B*, 2004, 56: 457—476.
- 12 Nyeki S, Coulson G, Eleftheriadis K, et al. Overview of aerosol microphysics at arctic sunrise: Measurements during the NICE renoxification study. *Tellus Series B*, 2005, 57: 40—50.
- 13 Sharma S, Brook J R, Cachier H, et al. Light absorption and thermal measurements of black carbon in different regions of Canada. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D24): 4771, doi:4710.1029/2002JD002496.
- 14 Hansen A D A, Bodhaine B A, Dutton E G, et al. Aerosol black carbon measurements at the South Pole: initial results, 1986—1987. *Geophysical Research Letters*, 1988, 15(11): 1193—1196.
- 15 Hansen A D A. Measurement of combustion effluent aerosols from Amundsen Scott South Pole Station. *Antarctic Journal of the United States*, 1998, 32(5): 163—164.
- 16 Heintzenberg J. Size-segregated measurements of particulate elemental carbon and aerosol light absorption at remote Arctic locations. *Atmospheric Environment*, 1982, 16(10): 2461—2469.
- 17 Heintzenberg J, Ieak C. Seasonal variation of the atmospheric aerosol near the top of the marine boundary layer over Spitsbergen related to the Arctic sulphur cycle. *Tellus Series B*, 1994, 46: 52—67.
- 18 Lannefors H, Heintzenberg J, Hansson H-C. A comprehensive study of physical and chemical parameters of the Arctic summer aerosol; results from the Swedish expedition Ymer-80. *Tellus Series B*, 1983, 35: 40—54.
- 19 Rosen H, Hansen A D, Novakov T. Role of graphitic carbon particles in radiative transfer in the arctic haze. *Science of the Total Environment*, 1984, 36: 103—110.
- 20 Bodhaine B A. Aerosol absorption measurements at Barrow, Mauna Loa and the South Pole. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(D5): 8967—8975.
- 21 Pollissar A V, Hopke P K, Paatero P, et al. Atmospheric aerosol over Alaska: 2. Elemental composition and sources. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D15): 19045—19057.
- 22 Hopper J F, Worthy D E J, Barrie L A, et al. Atmospheric observations of aerosol black carbon, carbon dioxide, and methane in the high Arctic. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(18): 3047—3054.
- 23 Sharma S, Lavoue D, Cachier H, et al. Long-term trends of the black carbon concentrations in the Canadian Arctic. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, D15203, doi:15210.11029/12003JD004331.
- 24 Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. A technology - based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, D14203, doi:14210.11029/12003JD003697.
- 25 Koch D, Hansen J. Distant origins of Arctic black carbon: A Goddard Institute for Space Studies ModelE experiment. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D04204, doi:04210.01029/02004JD005296.
- 26 Quinn P K, Shaw G, Andrews E, et al. Arctic Haze: Current trends and knowledge gaps. *Tellus Series B*, 2007, 59: 99—114.
- 27 Dean A H, Stephen G W, Thomas C G, et al. Source attribution of black carbon in Arctic snow. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43: 4016—4021.
- 28 Shindell D T, Chin M, Dentener F, et al. A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8: 5353—5372.

- 29 Koch D, Bond T C, Streets D, et al. Global impacts of aerosols from particular source regions and sectors. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D02205, doi:02210.01029/02005JD007024.
- 30 吴润,符琮斌. 近五年来东亚春季黑碳气溶胶分布输送和辐射效应的模拟研究. *大气科学*, 2005, 29(1): 111—119.
- 31 Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, et al. Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850—2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21, GB2018, doi:2010.1029/2006GB002840.
- 32 Ramachandran S, Rajesh T A. Black carbon aerosol mass concentrations over Ahmedabad, an urban location in western India: Comparison with urban sites in Asia, Europe, Canada and the United States. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D06211, doi:06210.01029/02006JD007488.
- 33 Flanner M G, Zender C S, Randerson J T, et al. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D11202, doi:11210.11029/12006JD008003.
- 34 Elmquist M, Semiletov I, Guo L, et al. Pan-Arctic patterns in black carbon sources and fluvial discharges deduced from radiocarbon and PAH source apportionment markers in estuarine surface sediments. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22, GB2018, doi:2010.1029/2007/GB002994.
- 35 Stohl A, Andrews E, Burkhardt J F, et al. Pan-Arctic enhancements of light absorbing aerosol concentrations due to North American boreal forest fires during summer 2004. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, D22214, doi:22210.21029/22006JD007216.
- 36 Generoso S, Bey I, Attie J-L, et al. A satellite and model-based assessment of the 2003 Russian fires: Impact on the Arctic region. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, D15302, doi:15310.11029/12006JD008344.
- 37 Chung S H, Seinfeld J H. Global distribution and climate forcing of carbonaceous aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D19): 4407, doi:4410.1029/2001JD001397.
- 38 Hansen A D A, Rose H, Novakov T. The aethalometer—an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Science of the Total Environment*, 1984, 36: 191—196.
- 39 Barrie L A. Arctic air pollution: An overview of current knowledge. *Atmospheric Environment*, 1986, 20(4): 643—663.
- 40 Iversen T, Joranger E. Arctic air pollution and large scale atmospheric flows. *Atmospheric Environment*, 1995, 19(12): 2099—2108.
- 41 Barrie L A. Occurrence and trends of pollution in the Arctic troposphere// *Chemical Exchange Between the Atmosphere and Polar Snow*, NATO ASI Ser., New York, 1996, 93—130.
- 42 Klonecki A, Hess P, Emmons L, et al. Seasonal changes in the transport of pollutants into the Arctic troposphere-Model study. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D4): 8367, doi:8310.1029/2002JD002199.
- 43 Pueschel R F, Kinne S A. Physical and radiative properties of Arctic atmospheric aerosols. *Science of the Total Environment*, 1995, 161: 811—824.
- 44 Ritter C, Notholt J, Fisher J, et al. Direct thermal radiative forcing of tropospheric aerosol in the Arctic measured by ground based infrared spectrometry. *Geophysical Research Letters*, 2005, L23816, doi:10.1029/2005GL024331.
- 45 Clarke A D, Noone K J. Soot in the Arctic snow pack: a cause for perturbations in radiative transfer. *Atmospheric Environment*, 1985, 19: 2045—2053.
- 46 Hansen J, Nazarenko L. Soot Climate Forcing via Snow and Ice Albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(2): 423—428.
- 47 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. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, D21201, doi:21210.21029/22004JD004945.
- 48 Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1977, 34: 1149—1152.
- 49 Garrett T J, Zhao C. Increased Arctic cloud longwave emissivity associated with pollution from mid-latitudes. *Nature*, 2006, 440: 787—789.

- 50 IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Third Assessment Report, Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001.
- 51 Hansen J E, Makiko S. Trends of measured climate forcing agents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98(26): 14778—14783.
- 52 Garrett T J, Zhao C, Dong X, et al. Effects of varying aerosol regimes on low-level Arctic stratus. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L17105, doi:10.1029/2004GL019928.
- 53 Quinn P K, Bates T S, Baum E, et al. Short-lived pollutants in the Arctic: their climate impact and possible mitigation strategies. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8: 1723—1735.
- 54 Haywood J M, Ramaswamy V. Global sensitivity studies of the direct radiative forcing due to anthropogenic sulfate and black carbon aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D6): 6043—6058.
- 55 Jacobson M Z. Effects of Externally-Through-Internally-Mixed Soot Inclusions within Clouds and Precipitation on Global Climate. *Journal of Physics and Chemistry*, 2006, 110(21): 6860—6873.
- 56 Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107: 4410—4432.
- 57 Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*, 2001, 409:695—697, doi:10.1038/35055518.
- 58 J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, et al. Climate simulations for 1880—2003 with GISS modelE. *Climate Dynamics*, 2007, 29: 661—696, doi:10.1007/s00382-00007-00255-00388.
- 59 Hansen J, Sato M, Nazarenko L, et al. Efficacy of Climate forcings. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D18104, doi:10.1029/2005JD005776.
- 60 Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R, et al. The transport pathways and sources of PM10 pollution in Beijing during spring 2001, 2002, and 2003. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L14110, doi:10.1029/2004GL019732.

PROSPECT OF RESEARCH ON ARCTIC BLACK CARBON AEROSOL

Zhan Jianqiong, Chen Liqi, Zhang Yuanhui, Yang Xulin and Li Wei

(Key Laboratory of Marine Atmospheric Chemistry and Global Change, Third Institute of Oceanography,
SOA, Xiamen 361005, China)

Abstract

Over the past 100 years, the average temperature increasing rate in the Arctic is about twice as the global average temperature increasing rate. Although the anthropogenic long-lived greenhouse gases play a predominate role in radiation forces in weather system, the black carbon aerosol and other short-lived pollutants could also explain a significant fraction of the Arctic warming. Therefore, reducing the emission of black carbon aerosol into the atmosphere will cool the planet and make a negative feedback to Arctic warming. The research progress of black carbon aerosol in the Arctic and their impacts on the Arctic climate are reviewed.

Key words black carbon aerosol, climate change, the Arctic