

文章编号: 1673-1719 (2009) 06-0328-08

中国西部雪冰中的黑碳及其辐射强迫

明 镜^{1,2}, 效存德^{2,3}, 杜振彩⁴, Mark Flanner⁵

(1 中国气象局国家气候中心, 北京 100081; 2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3 中国气象科学研究院, 北京 100081; 4 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 5 National Center for Atmospheric Research, Boulder 80307, CO, USA)

摘 要: 在中国西部的青藏高原和新疆地区的若干条冰川区域采集雪和冰芯样品, 分析了雪冰样品中的黑碳, 并模拟了雪冰黑碳产生的辐射强迫。我国西部雪冰黑碳的平均浓度为 63 ng/g, 高于北半球其他地区的实测结果。影响雪样黑碳浓度空间分布格局的主因是周边的排放源。模拟结果显示, 黑碳在中国西部冰川雪表的沉降产生的平均辐射强迫为 $(+4.0 \pm 2.0) \text{ W/m}^2$ 。喜马拉雅山中段的东绒布冰芯记录揭示黑碳主要来源于南亚, 经印度夏季风输送; 1951 年以来黑碳的平均浓度为 16 ng/g, 产生的月平均辐射强迫在 2001 年夏季超过了 $+4.5 \text{ W/m}^2$ 。南亚排放的黑碳可能抵达青藏高原南部腹地, 对青藏高原的冰川表面能量平衡有一定影响。

关键词: 黑碳; 辐射强迫; 冰芯; 雪

中图分类号: X16/P422

文献标识码: A

引 言

目前, 黑碳气溶胶沉降在冰雪表面产生的辐射强迫可加速冰雪消融并改变陆面反照率, 这是当前气候变化科学关注的热点之一。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的第四次气候变化评估报告显示, 1750—2005 年全球冰雪中的黑碳产生的平均辐射强迫为 $(+0.1 \pm 0.1) \text{ W/m}^2$ ^[1]。由于受黑碳排放的强弱及地形、大气环流等因素的影响, 该辐射强迫在全球不同地区差异很大。近期的一项研究显示, 1998 年北半球排放的黑碳经过长距离传输到达北极地区后沉降在冰雪表面产生的辐射强迫在 $+0.2 \sim 0.6 \text{ W/m}^2$ 之间; 然而, 在我国东北地区黑碳导致积雪反照率降低约 13%, 北半球该辐射强迫的最大区域位于我

国的青藏高原, 平均超过了 $+3.0 \text{ W/m}^2$ ^[2]。

全球黑碳排放清单^[3]显示, 我国西部地区自身的黑碳排放很微弱, 而周边地区, 如南亚的排放很强, 生成的“棕色云”悬浮于喜马拉雅山南坡^[4]。我国西部正处在南亚季风影响范围, 是冰川分布区。在季风和西风环流作用下, 南亚工业排放的污染物 (如硫酸盐^[5]、重金属^[6]、有机氯农药^[7]等) 可随气流爬升到喜马拉雅山脉中段的东绒布冰川并沉降于积雪, 而黑碳作为南亚棕色云中的重要吸光组分^[8], 沉降于喜马拉雅山脉的冰雪后可能会大大加速冰川的消融^[9]。

青藏高原和新疆地区是我国的重要积雪区, 而且分布着丰富的冰川资源。有研究指出南亚排放的污染物 (如 Zn、As 等) 可能影响到青藏高原腹地纳

收稿日期: 2009-05-15; 修订日期: 2009-07-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2007CB411503); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题 (SKLCS-ZZ-2008-01); 开放基金 (SKLCS07-05, SKLCS08-08) 资助

作者简介: 明镜 (1980—), 男, 工程师, 主要从事冰冻圈与环境方向研究. E-mail: mingji@cma.gov.cn

木错地区的大气环境^[10]，而南亚排放的黑碳也很可能进入青藏高原并沉降在冰雪表面，降低冰雪反照率，加速青藏高原的冰雪消融，并降低陆面反照率，影响陆面辐射平衡，进一步加速冰雪消融。西部地区的冰雪融水是发源于此的众多国际大河流的重要补给源，冰雪水资源安全对我国国民经济建设至关重要。目前，我国关于雪冰黑碳的实测资料尚不多^[11-13]，沉积在我国雪冰中的黑碳的浓度分布还不清楚，因此难以评估黑碳对我国雪冰表面辐射平衡的影响。本研究从中国西部区域采集雪冰样品（包括雪和冰芯样品），分析样品的黑碳浓度，并用模式计算了采样点雪冰黑碳的辐射强迫，给出了初步的评估结果。

1 资料及方法

1.1 样品的采集

采集的样品包括雪和冰芯：2004—2006年的夏秋季节，分别从青藏高原和新疆地区的9条冰川上采集了表层雪，雪层深度覆盖雪表面以下1~2个污化层，至少包含一个年层（表1），采样时穿脱尘服、戴手套和口罩，用不锈钢铲把样品装入洗净的玻璃瓶（实验室内用K₂Cr₂O₇溶液和18.2 MΩ超纯水处理），保存在冷冻环境中直至分析；另外，2002年夏季在喜马拉雅山中段珠穆朗玛峰惹普拉垭口的东绒布冰川积累区钻取了总长40 m的冰芯（钻孔上覆盖了1个年层的积雪），各节冰芯长度55~116 cm不等

（共44节），现场装入塑料袋中封好，同样保持冷冻状态直至分析。采样点大致由北向南分布：哈希勒根48号、乌鲁木齐河源1号和庙儿沟3号冰川分别位于天山的西、中和东段，老虎沟12号和七一冰川位于祁连山，煤矿冰川位于东昆仑山，拉弄和扎当冰川位于念青唐古拉山，东绒布冰川位于喜马拉雅山中段（图1）。

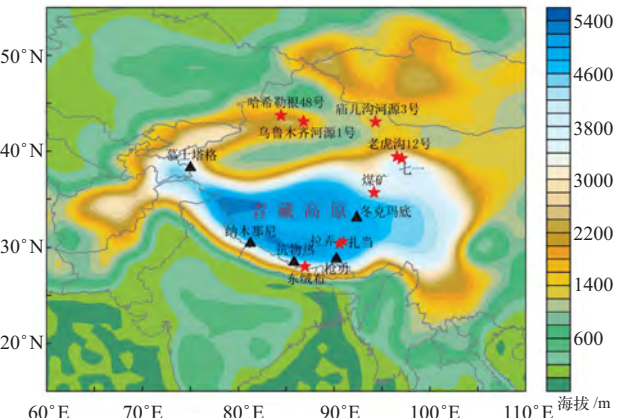


图1 中国西部采样冰川分布图（其中黑色三角代表文献[11]的采样冰川

Fig. 1 Map of sampling glaciers in west China, where black triangles are from the literature [11]

1.2 样品的预处理和黑碳分析

在100级超净工作间（18℃），穿脱尘服、戴口罩和手套，先用电动锯条将冰芯样品切割为143个样品，削除每个样品2~3 cm外层，用不锈钢手术刀刮除约1 cm中间层，再将样品的核心部分装入玻

表1 采样时间、地点及样品类型
Table 1 Time and sites of sampling, and types of samples

冰川名称	采样时间	经度(°E)	纬度(°N)	海拔/m	样品类型（数量）
东绒布	2004年10月	86.96	28.02	6500	表层雪（1）、40 m冰芯
老虎沟12号	2005年10月	96.56	39.43	5045	表层雪（2）
煤矿	2005年11月	94.18	35.67	5200	表层雪（2）
拉弄	2005年6月	90.57	30.42	5850	表层雪（3）
七一	2005年7月	97.06	39.23	4850	表层雪（2）
庙儿沟3号	2005年8月	94.32	43.06	4510	表层雪（3）
扎当	2006年7月	90.50	30.47	5802	表层雪（8）
哈希勒根48号	2006年10月	84.46	43.73	3755	表层雪（9）
乌鲁木齐河源1号	2006年11月	86.82	43.10	4050	表层雪（2）

璃瓶存储。在100级超净室过滤雪冰样品：将雪和冰芯置于室温环境下融化，时间控制在4 h以内（避免微生物滋生）；融化后用超声波振荡15 min左右，使颗粒物从瓶壁脱附；用量筒测量并记录样品溶液的体积后，用石英砂芯过滤器，使溶液通过Whatman石英质滤膜过滤，操作手动气泵加速过滤。滤膜预先在600℃下加热24 h去除碳质。过滤后移去气泵，在过滤漏斗中加入稀盐酸溶液（2%~4%）自然通过滤膜，持续时间为15~30 min，以去除滤膜上的碳酸盐，把载有样品的滤膜装入膜盒，置于工作台上晾干。样品瓶壁上吸附的颗粒物低于总量的5%，过滤效率优于97%^[14]。样品的黑碳分析全部在法国原子能委员会和法国国家科学研究院气候与环境实验室进行：样品膜置于（340±1）℃环境下，以O₂为载气加热2 h，除去有机碳以避免黑碳分析过程中因有机碳的炭化造成的干扰^[15]。分析黑碳前样品膜被置入保温箱20 min（70℃），以除去膜上可能粘附的水汽。由于样品黑碳含量各不相同，根据膜的灰度分为颜色较深和较浅的两批，前者用热学碳质氧化库仑计（Strohlein Coulomat 702C）分析，后者用热透射光碳质分析系统（Sunset）分析，分析误差在±5%以内^[14,16]。

2 中国西部雪样黑碳浓度的空间分布及其辐射强迫

有研究^[11]在2001—2004年从中国西部的部分冰川上采集了表层雪样并分析了其中的黑碳成分，这里引用了其中部分结果作比较。已调查的14条冰川按地理分布可分为5类：1) 慕士塔格冰川（帕米尔高原）；2) 哈希勒根48号、乌鲁木齐河源1号和庙儿沟河源3号冰川（天山地区）；3) 老虎沟12号和七一冰川（祁连山地区）；4) 煤矿、冬克玛底、拉弄和扎当冰川（青藏高原腹地）；5) 纳木那尼、抗物热、东绒布和枪勇冰川（喜马拉雅山地区）。粗略地排序，雪样的黑碳浓度水平呈现出“天山（112±

27）ng/g）>青藏高原腹地（88±25）ng/g）>帕米尔高原（52 ng/g）>祁连山（29±9）ng/g）>喜马拉雅山（22±16）ng/g”的分布格局（图2）。我国西部雪冰黑碳的平均浓度为63 ng/g，高于北半球其他地区的实测结果^[12]。影响雪样黑碳浓度空间分布格局的主因是周边的排放源。2006年东亚（不包括俄罗斯）和南亚部分地区黑碳排放的分布显示，中国西部及其周边主要有喜马拉雅山南坡及毗邻地区（包括印度北部、巴基斯坦、孟加拉国等）和四川盆地两个较强的排放区，帕米尔高原、天山、祁连山和青藏高原腹地等地区排放较弱，相对而言青藏高原的排放水平又低于帕米尔高原、天山以及祁连山（图3a）^①；相应地，2001—2006年该地区大气的平均气溶胶光学厚度显示，除沙漠地区外，南亚北部地区、四川盆地气溶胶光学厚度显著高于青藏高原地区，反映青藏高原上空大气较清洁而周边地区较“脏”的状况（图3b）^②。Ming等^[12]在解释青藏高原腹地部分雪样黑碳浓度反而高于高原周边地区时，提出青藏高原南部腹地部分冰川，如拉弄、扎当等冰川一方面在夏季风季节受到南亚排放的经长距离

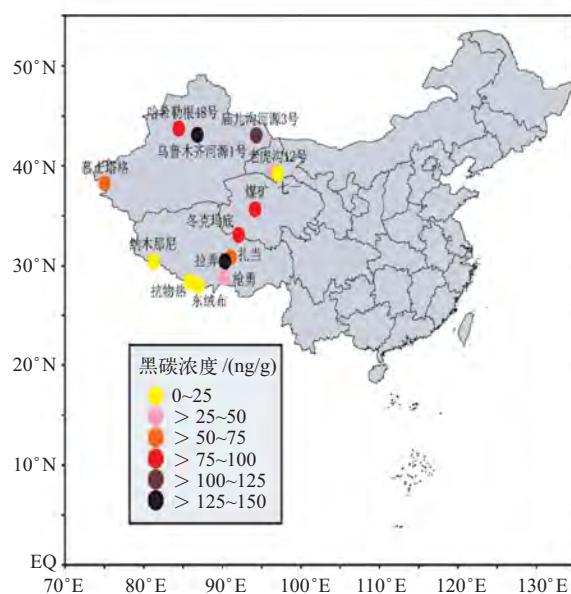


图2 中国西部冰川雪样黑碳浓度分布图

Fig. 2 Distribution of BC concentrations in snow sampled from the glaciers in west China

①资料来源：http://www.cgrer.uiowa.edu/EMISSION_DATA_new/index_16.html

②资料来源：<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

传输的黑碳沉降的影响；另一方面，春、夏季节冰川表面强烈的消融会使黑碳在雪表面沉积后在污化层产生“富集”现象，造成污化层的黑碳浓度较高。因此，图2所示黑碳深度分布格局是各条冰川周边黑碳排放源、大气传输以及在积雪表面沉积后再富集等因素综合作用的结果。

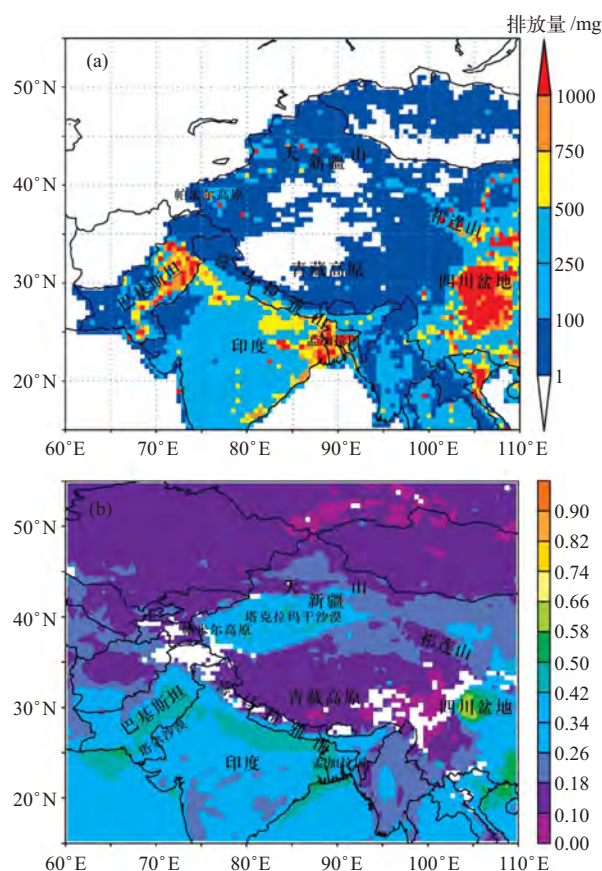


图3 2006年 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 东亚、南亚部分地区黑碳排放(a)及2001—2006年该地区大气平均气溶胶光学厚度(b)
Fig. 3 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ BC emission (Mg) of most East and South Asia in 2006 (a) and mean $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ AOD of East and South Asia during 2001–2006 (b)

为估算沉降在采样冰川表面的黑碳产生的辐射强迫，这里引入一个“雪/冰-气溶胶-辐射”(SNICAR)模式。该模式依据的原理是将雪颗粒抽象成球形，忽略颗粒之间的散射，用米散射近似计算单颗雪粒的散射^[17]，以及二流多层辐射近似^[18]，详细原理参见文献[2]。该模式曾被用于模拟北半球积雪表面沉降黑碳，从而计算全球积雪黑碳的辐射强迫，得出沉降于雪冰表面的黑碳造成的最大的辐射

强迫位于青藏高原地区^[2]；还被用于模拟格陵兰冰盖冰芯记录的黑碳所产生的辐射强迫，得到北美工业排放的黑碳显著改变了北极的辐射强迫，加速了北极海冰的消融等结论^[19]，引起较大关注。各采样点的黑碳浓度都代表1个年层以上的平均值，在保持黑碳浓度不变的情形下，各点模拟的辐射强迫代表年平均值。由于进行模拟除需黑碳浓度外，还需雪的有效光学粒径、密度等缺测参数，需要对初始的缺测参数作保守假设：雪的有效光学粒径（直径）取新降雪中间值 $300 \mu\text{m}$ ^[20]，而密度取新降雪密度的中间值 150 kg/m^3 ^[21]；实际上，中国西部冰川表面的新降雪老化后，上述两项参数都远大于假设值^[21]，对反照率的影响会超过保守假设^[17]，因而这里的模拟结果是保守估算值。

模拟结果显示，黑碳在雪表的沉降产生的年平均辐射强迫：青藏高原腹地 $(+5.8 \pm 1.3) \text{ W/m}^2$ > 天山 $(+5.6 \pm 1.0) \text{ W/m}^2$ > 帕米尔高原 $(+3.6 \text{ W/m}^2)$ > 祁连山 $(+2.2 \pm 0.6) \text{ W/m}^2$ > 喜马拉雅山 $(+2.0 \pm 1.3) \text{ W/m}^2$ （图4）。由于雪的有效光学粒径、密度参数取值相同，这种分布格局基本上与黑碳浓度分布相似，而相对新疆而言，青藏高原具有较强的太阳辐射，放大了这种强迫效应^[2]，从而使青藏高原冰川雪表面黑碳的辐射强迫反而超过了天山。根据

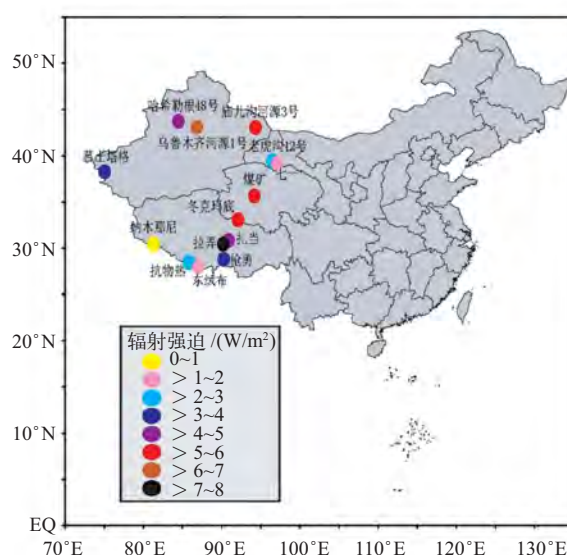


图4 中国西部冰川表面雪中黑碳辐射强迫
Fig. 4 Distribution of radiative forcing of BC deposits in the surface snow of the glaciers in west China

模拟结果计算,雪中的黑碳在中国西部冰川造成的年平均辐射强迫为 $(+4.0 \pm 2.0) \text{ W/m}^2$,强迫值超过了Flanner等^[2]利用黑碳排放清单模拟的结果。在全球变暖的大背景下,高亚洲冰川出现了全面退缩^[22],青藏高原可能是全球范围内受黑碳的雪上沉降因素影响最为敏感的区域^[2], $+4.0 \text{ W/m}^2$ 这一量级的辐射强迫究竟对高原上的冰川消融造成多大的影响,需要在整体调查高原冰川表面的能量辐射平衡后,作进一步的评估。应该指出,这里模拟的辐射强迫是点上的结果,而且冰川覆盖面积有限,有较大的不确定性,它不同于大气圈中温室气体所产生的辐射强迫,前者的影响更显著地表现为区域性,而后者是全球性的。

3 喜马拉雅山冰芯记录的黑碳及其辐射强迫

利用自喜马拉雅山中段东绒布冰川钻取的冰芯(以下简称“东绒布冰芯”),综合周边气象台站的降水量历史记录、稳定同位素比值 $\delta^{18}\text{O}$ 、 β 活化度以及粉尘指示离子 Ca^{2+} 浓度等因子定年,确定其年龄跨度为1951—2002年^[13]。冰芯记录的黑碳浓度随时间变化可分为3个阶段:1) 1951—1976年(样品数 $N=58$),黑碳浓度水平较高,平均浓度为 $(17 \pm 11) \text{ ng/g}$,黑碳浓度滑动平均值基本在总平均水平上下波动,而后半期(1966—1976年)黑碳的滑动平均浓度明显高于前半期(1951—1965年);2) 1977—1994年($N=47$),冰芯黑碳浓度滑动平均值水平整体较低而且较稳定,平均浓度为 $(12 \pm 5) \text{ ng/g}$;3) 1995—2002年($N=35$),冰芯记录的黑碳浓度滑动平均值呈快速上升趋势,平均值为 $(20 \pm 9) \text{ ng/g}$,而到2001年,黑碳浓度超过了 50 ng/g (图5a)。冰芯记录的50 a平均黑碳浓度为 $(16 \pm 9) \text{ ng/g}$,与东绒布冰川雪坑样品的黑碳浓度(18 ng/g)接近。

基于上述冰芯记录的黑碳浓度,用SNICAR模式模拟了1951年以来沉降在新降雪(有效光学粒径 $300 \mu\text{m}$ 、密度 150 kg/m^3)的黑碳的辐射强迫。1951—1965年平均辐射强迫基本在 $+1.0 \text{ W/m}^2$ 上下波动,1965—1975年平均辐射强迫一度逼近 $+2.0 \text{ W/m}^2$,1975—1990年平均辐射强迫恢复到 $+1.0 \text{ W/m}^2$ 上下

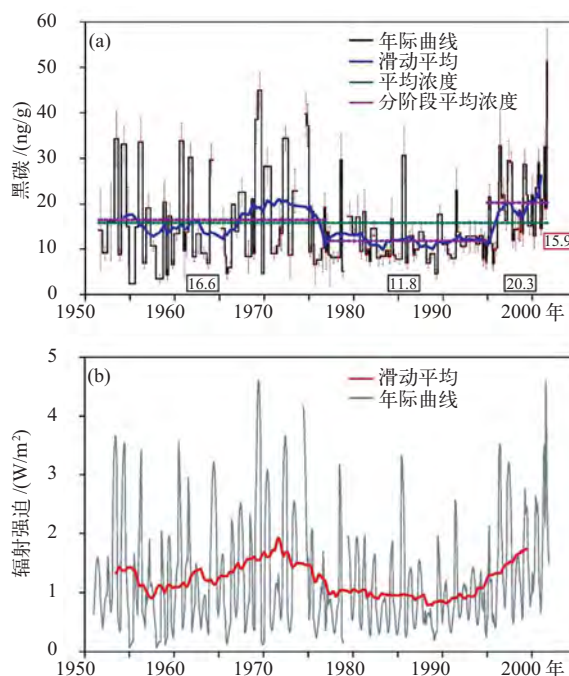


图5 东绒布冰芯记录的黑碳浓度

Fig. 5 BC concentrations recorded in an ice core of East Rongbuk glacier, where the blue curve is the running average, the green line is the average, and the purple dash lines are the means of three periods (a) and simulated radiative forcing, where the red line is the running average (b)

波动,而1990年以后,东绒布冰川表面黑碳的辐射强迫呈升高趋势,在2001年夏季单月平均超过了 $+4.5 \text{ W/m}^2$ (图5b)。

4 南亚的黑碳排放对青藏高原冰雪的潜在影响

1995—1999年的印度洋试验(INDOEX)揭示了“亚洲棕色云”的存在^[8],后续研究发现这种现象存在于全球多个区域,因而改称为“大气棕色云”^[23]。南亚棕色云是大气棕色云的一部分,常年悬浮在喜马拉雅山南坡海拔 $2000 \sim 5000 \text{ m}$ 的空间区域内,卫星观测气溶胶光学厚度最大区域出现在恒河盆地上空,且平均而言夏季高于冬季^[24];其呈现棕色主要是由人类活动产生的黑碳、飞灰等气溶胶的光吸收和散射作用造成^[25]。有研究指出南亚棕色云的加热作用很可能加速了喜马拉雅山南坡冰川的退缩^[9]。

南亚黑碳排放清单研究表明,1950—2000年南亚地区的黑碳排放呈持续增长趋势^[26](图6a),但与

东绒布冰芯的黑碳记录之间没有明显关系(图 6c), 这可能是由于喜马拉雅山(平均海拔 >5000 m)阻挡了大部分的污染物向高原腹地的输送。利用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)空气资源实验室(ARL)提供的 HYSPLIT 混合单颗粒拉格朗日集合轨迹模式计算了东绒布冰川自 1951 年以来的逐日后向气团轨迹。聚类分析结果表明, 逐年 365 条轨迹可分为西风 and 印度夏季风输送两类, 而后的输送与冰芯黑碳浓度呈现出显著正相关关系($R=0.433$, $N=51$, $\alpha=0.01$)(图 6b)^[13], 说明南亚排放的黑碳可在夏季风输送下到达并沉降于东绒布冰川的雪表面, 而且其产生的辐射强迫值较大。念青唐古拉山北坡纳木错湖边气象观测表明该地区夏季的天气受印度夏季风影响明显^[27], 气团轨迹模拟结果同样表明高

原腹地念青唐古拉山的冰川(拉弄、扎当等)表雪中的黑碳也很可能部分来源于南亚, 且黑碳的沉降对这些冰川表面的辐射平衡影响显著, 使其反照率降低达 5% 以上^[12]。

中国西部是中、低纬度最大的山地冰川分布区, 近 50 a 以来中国西部有 82% 的冰川处于退缩状态^[28]。已有研究指出, 升温 and 降水减少, 或者降水虽有增加但不及升温影响剧烈等是导致中国西部冰川总体处于退缩状态的主因^[28], 但没有给出定量结果。第 2 节分析显示, 中国冰雪表层黑碳的平均辐射强迫为 $(+4.0 \pm 2.0) \text{ W/m}^2$, 这对目前冰川表面辐射平衡有一定影响, 如果周边中亚、南亚等地区未来排放进一步增强, 这一强迫值可能更高, 可能成为影响中国冰川变化的另一因素。目前观测资料有限, 尚无法估算黑碳沉降对冰川长期变化趋势的定量影响。

5 结 论

中国西部冰川表面雪中的黑碳浓度呈现天山 $>$ 青藏高原腹地 $>$ 帕米尔高原 $>$ 祁连山 $>$ 喜马拉雅山的分布格局。我国西部雪冰黑碳平均浓度为 63 ng/g , 高于北半球其他中、高纬度地区的实测结果。影响雪样黑碳浓度空间分布格局的主因是周边的排放源。模拟结果显示, 黑碳在中国西部冰川雪表的沉降产生的平均辐射强迫为 $(+4.0 \pm 2.0) \text{ W/m}^2$ 。喜马拉雅山中段的东绒布冰芯记录揭示黑碳主要来源于南亚, 经印度夏季风输送; 1951 年以来黑碳的平均浓度为 16 ng/g , 产生的月平均辐射强迫在 2001 年夏季超过了 $+4.5 \text{ W/m}^2$ 。南亚排放的黑碳可能抵达青藏高原南部腹地, 并对青藏高原的冰川表面能量平衡产生一定影响。■

致 谢: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所蒲健辰、李真、王飞腾等在野外帮助采样, 王晓香在样品预处理时提供帮助, 法国国家科学研究院气候与环境实验室 Helene Cachier 在黑碳和数据分析等方面给予指导, 美国 NASA 提供气溶胶光学厚度数据, 爱荷华大学全球和区域环境研究中心的 David Streets 提供黑碳排放数据, 在此一并表示感谢。

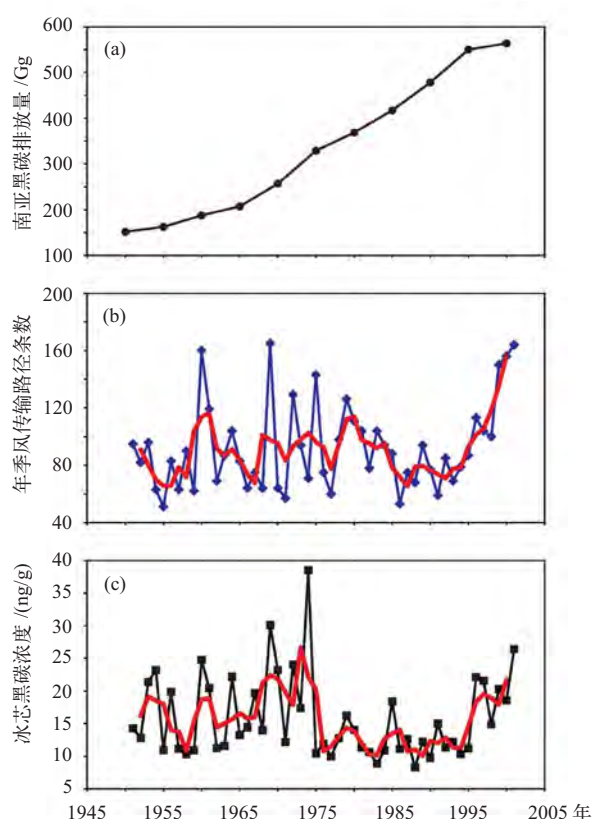


图 6 1950—2000 年南亚地区的黑碳排放变化 (a)^[26], 1951—2001 年逐年印度夏季风输送的气团轨迹条数 (b), 东绒布冰芯记录的黑碳浓度 (c) (红色曲线为滑动平均)

Fig. 6 BC emission of South Asia during 1950—2000 (a)^[26], annual air mass trajectories transported by Indian summer monsoon (b) and BC concentrations recorded by an ice core of the East Rongbuk glacier (c). The red curve in (b) and (c) is the running average

参考文献

- [1] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, *et al.* Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [M]// IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 129–234
- [2] Flanner M G, Zender C S, Randerson J T, *et al.* Present-day climate forcing and response from black carbon in snow [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112, D11202, doi:10.1029/2006JD008003
- [3] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, *et al.* A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, D14203, doi:10.1029/2003JD003697
- [4] Ramanathan V, Ramana M V. Persistent, widespread, and strongly absorbing haze over the Himalayan foothills and the Indo-Gangetic Plains [J]. Pure and Applied Geophysics, 2005, 162: 1609–1626
- [5] Ming J, Zhang D, Kang S, *et al.* Aerosol and fresh snow chemistry in the East Rongbuk Glacier on the northern slope of Mt. Qomolangma (Everest) [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112, D15307, doi:10.1029/2007JD008618
- [6] Lee K, Hur S D, Hou S, *et al.* Atmospheric pollution for trace elements in the remote high-altitude atmosphere in central Asia as recorded in snow from Mt. Qomolangma (Everest) of the Himalayas [J]. Science of the Total Environment, 2008, 404: 171–181
- [7] Wang F, Zhu T, Xu B, *et al.* Organochlorine pesticides in fresh-fallen snow on East Rongbuk Glacier of Mt. Qomolangma (Everest) [J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2007, 50 (7): 1097–1102
- [8] Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, *et al.* Indian Ocean experiment: an integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo-Asian haze [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (D22): 28371–28398
- [9] Ramanathan V, Ramana M V, Roberts G, *et al.* Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption [J]. Nature, 2007, 448: 575–579
- [10] Li C, Kang S, Cong Z. Elemental composition of aerosols collected in the glacier area on Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau, during summer monsoon season [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (24): 3436–3442
- [11] Xu B, Yao T, Liu X, *et al.* Elemental and organic carbon measurements with a two-step heating gas chromatography system in snow samples from the Tibetan Plateau [J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 257–263
- [12] Ming J, Xiao C, Cachier H, *et al.* Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos [J]. Atmospheric Research, 2009, 92 (1): 114–123
- [13] Ming J, Cachier H, Xiao C, *et al.* Black carbon record based on a shallow Himalayan ice core and its climatic implications [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8 (5): 1343–1352
- [14] Cachier H, Pertuisot M H. Particulate carbon in Arctic ice: ice archives in Antarctica and Greenland [J]. Analysis, 1994, 22 (7): 34–37
- [15] Cachier H, Bremond M P, Buat-Menard P. Determination of atmospheric soot carbon with a simple thermal method [J]. Tellus, 1989, 41B (3): 379–390
- [16] Birch M E. Elemental carbon (diesel particulate): method 5040 [M]// Cassinelli M E, O'Connor P F. NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM) (4th ed.). Government Printing Office, 1999: 1–9
- [17] Warren S G, Wiscombe W J. A model for the spectral albedo of snow II: snow containing atmospheric aerosols [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1980, 37 (12): 2734–2745
- [18] Toon O B, McKay C P, Ackerman T P, *et al.* Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres [J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94 (D13): 16287–16301
- [19] McConnell J R, Edwards R, Kok G L, *et al.* 20th-century industrial black carbon emissions altered Arctic climate forcing [J]. Science, 2007, 317: 1381–1384
- [20] Kay J E, Gillespie A R, Hansen G B, *et al.* Spatial relationships between snow contaminant content, grain size, and surface temperature from multispectral images of Mt. Rainier, Washington (USA) [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 86: 216–231
- [21] 曾群柱, 曹梅盛, 冯学智, 等. 我国西北若干种冰、雪及水体反射光谱特性的研究 [J]. 中国科学 (B 辑), 1984, 4: 370–377
- [22] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影 响 [J]. 中国科学 (D 辑), 2004, 34 (6): 535–543
- [23] Ramanathan V, Agrawal M, Akimoto H, *et al.* Atmospheric Brown Clouds: Regional Assessment Report with Focus on Asia [M]. Nairobi, Kenya: the United Nations Environment Programme, 2008: 1–39
- [24] Prasad A K, Singh R P. Comparison of MISR-MODIS aerosol optical

- depth over the Indo-Gangetic basin during the winter and summer seasons (2000–2005) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 107: 109–119
- [25] Ramanathan V, Ramana M V. Atmospheric Brown Clouds: Long-Range Transport and Climate Impacts [R]. EM, 2003: 28–33
- [26] Bond T C, Bhardwaj E, Dong R, *et al.* Historical emissions of black and organic carbon aerosol from energy-related combustion, 1850–2000 [J]. *Global Biogeochem Cycles*, 2007, 21, GB2018, doi:10.1029/2006GB002840
- [27] 游庆龙, 康世昌, 田克明, 等. 青藏高原念青唐古拉峰地区气候特征初步分析 [J]. *山地学报*, 2007, 25 (4): 497–504
- [28] 刘时银, 丁永建, 李晶, 等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26 (5): 762–771

Black Carbon in Snow/Ice of West China and Its Radiative Forcing

Ming Jing^{1,2}, Xiao Cunde^{2,3}, Du Zhencai⁴, Flanner Mark⁵

(1 *China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China*; 2 *State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*; 3 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*; 4 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*; 5 *National Center for Atmospheric Research, Boulder 80307, CO, USA*)

Abstract: Snow and ice core samples were collected from the glaciers located in the Tibetan Plateau (TP) and Xinjiang of west China. Black carbon (BC) was measured and its radiative forcing after deposition in snow was simulated. The average BC concentration in the snow of west China was about 63 ng/g, higher than the other measurements in the Northern Hemisphere; and its spatial distribution was primarily affected by surrounding emissions. The mean radiative forcing simulated by the BC deposits in snow was about $(+4.0 \pm 2.0)$ W/m². An ice core (aged 1951–2001) drilled in the middle Himalayas reveals that the black carbon was primarily transported from South Asia by Indian summer monsoon, causing a forcing over 4.5 W/m² in the summer of 2001. The BC emitted from South Asia could penetrate into the inland of TP and might have significant effects on the surface energy balance of the glaciers in the TP.

Key words: black carbon; radiative forcing; ice core; snow