

天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究

王圣杰¹, 张明军^{1,2*}, 王飞腾², 李忠勤^{1,2}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 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/天山冰川站, 兰州 730000)

摘要: 根据2002年与2004年在天山乌鲁木齐河源1号冰川与奎屯河哈希勒根51号冰川采集的粒雪与冰川冰样品, 利用热/光反射法(TOR)分析得到有机碳(OC)与元素碳(EC)的浓度, 并探讨了天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度的时空特征与环境意义。结果表明, 总碳(TC)浓度从高到低依次为: 乌鲁木齐河源1号冰川西支雪坑($1\,943\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 乌鲁木齐河源1号冰川东支雪坑($989\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 奎屯河哈希勒根51号冰川雪坑($150\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > 乌鲁木齐河源1号冰川东支冰川冰($77\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)。OC和EC的浓度序列也较为类似; 天山冰川区雪层中OC浓度平均值为 $557\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, EC浓度平均值为 $188\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。不同冰川积累区雪层剖面的中下部污化层附近一般都会出现碳质气溶胶浓度峰值, 但某些突发性事件会使得表层雪也产生浓度峰值; 在季节性碳排放(如居民采暖、农业活动等)与碳传输(如大气环流等)的影响下, 雪层中碳质气溶胶浓度在7~11月间总体呈波动下降的趋势; 冰川冰与粒雪间碳质气溶胶浓度可能存在着数量级的差异, 这主要受到冰川所在环境、雪冰采样时空条件等因素影响; 雪层表面是否存在EC对反照率有很大影响, 模拟显示在波长为300~700 nm范围内反照率平均降低0.22。

关键词: 天山; 冰川; 雪层; 碳质气溶胶; 有机碳(OC); 元素碳(EC)

中图分类号: X142 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)03-0679-08

Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains

WANG Sheng-jie¹, ZHANG Ming-jun^{1,2}, WANG Fei-teng², LI Zhong-qin^{1,2}

(1. College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The snow and ice samples, collected at Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River (UG1) and Glacier No. 51 at Haxilegen of Kuytun River (HG51) in 2002 and 2004, were analyzed for organic carbon (OC) and element carbon (EC) by thermal/optical reflectance (TOR). The spatio-temporal characteristics and environmental significance of OC and EC concentration were discussed in details. The concentration order of total carbon (TC) was: snowpack of west branch on UG1 ($1\,943\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > snowpack of east branch on UG1 ($989\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > snowpack of HG51 ($150\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > glacier ice of east branch on UG1 ($77\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$), and the concentration order of OC and EC lay similar as TC. The concentration of OC and EC in snowpack of Tianshan Mountains were $557\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ and $188\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. Concentration peak of carbonaceous aerosol usually appeared near the dust layer at the bottom section of snowpack, but the some sudden events could increase the concentration in the surface snow. Because of the seasonality of carbon emission (e. g. heating and agricultural activities) and transportation (e. g. atmospheric circulation), the concentration of carbonaceous aerosol increased from July to November with fluctuations. Difference on the order of magnitude might exist between the concentration in snow (firm) and glacier ice, which was influenced by the glacier surroundings, sampling situation and other factors. EC on the surface snow affected the albedo significantly, and an average albedo reduction of 0.22 in the wavelength of 300–700 nm was simulated by SNICAR (snow, ice, and aerosol radiative) model.

Key words: Tianshan Mountains; glacier; snowpack; carbonaceous aerosol; organic carbon (OC); element carbon (EC)

碳质气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 主要包括有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(element carbon, EC); 其中, 元素碳是基于热学性质测试方法的概念, 若根据其光学性质测试则被称为黑碳(black carbon, BC)。碳质气溶胶可以改变地-气系统的能量收支, 通过吸收太阳辐射、加强地面反照率、影响云量等途径影响气候变化^[1~4]。然而, 对于现代大气中碳质气溶胶的监测仍十分有限, 要获

取大区域及长时间序列的资料需要借助其他手

收稿日期: 2011-04-17; 修订日期: 2011-05-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB951003); 国家自然科学基金项目(41161012, 41171057); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-311); 冰冻圈科学国家重点实验室项目(SKLCSS-ZZ-2010-04); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0019)

作者简介: 王圣杰(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化与环境化学, E-mail: geowang@126.com

* 通讯联系人, E-mail: mjzhang2004@163.com

段^[5]. 研究发现, 雪冰中碳质气溶胶记录可以指示全球或区域的环境变化与人类活动信息^[4, 6-9]. 我国在雪冰碳质气溶胶方面的研究近年来才刚刚起步. 就雪层中碳质气溶胶记录而言, 刘先勤^[10]、Xu^[11]等分析了青藏高原雪冰样品中 OC 和 EC 的浓度, 首次探讨了青藏高原碳质气溶胶浓度的空间分布特征; 之后, 明镜等^[12, 13]分析了整个中国西部冰川区雪冰中 BC 的浓度, 并模拟了 BC 产生的辐射强迫. 与此同时, 冰芯记录的研究也在青藏高原(西昆仑山^[14]、喜马拉雅山^[15]、唐古拉山^[16]、岗日嘎布山^[17]等) 逐渐开展起来.

天山山脉地处中亚内陆, 一方面碳质气溶胶排放量存在着明显的空间差异^[18, 19], 另一方面在周边城市也监测到了碳质气溶胶浓度的时间变化^[20, 21]. 尽管中国天山山脉分布有冰川 9 035 条, 冰川面积 9 225 km², 冰储量 1 011 km³^[22], 但是有关天山冰川雪冰中碳质气溶胶记录的研究却很有限. 仅有明镜等^[12, 13]研究过乌鲁木齐河源 1 号冰川、奎屯河哈希勒根 48 号冰川和庙儿沟 3 号冰川的 14 个表层雪样品中 BC 的浓度及其环境意义, 而样品数量仍相对较少, 对于长时间的雪坑连续观测更鲜有报道. 因此, 本研究结合之前的历史资料, 以乌鲁木齐河源 1 号冰川(东、西支)与奎屯河哈希勒根 51 号冰川为例, 综合讨论天山冰川雪冰中碳质气溶胶的浓度特征与环境意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究选取乌鲁木齐河源 1 号冰川(43°06'N, 86°49'E)及奎屯河哈希勒根 51 号冰川(43°43'N, 84°24'E)作为天山代表性冰川, 先后于 2002 年和 2004 年共采集了 60 个雪冰样品(图 1). 其中, 2002 年 7 月同时在乌鲁木齐河源 1 号冰川东支积累区(采样点海拔 4 100 m, 雪层深度 80 cm)与西支积累区(采样点海拔 4 200 m, 雪层深度为 200 cm)、奎屯河哈希勒根 51 号冰川积累区(采样点海拔 4 000 m, 雪层深度为 180 cm)采集了完整的粒雪坑样品, 并在乌鲁木齐河源 1 号冰川东支冰舌区(采样点海拔 3 750 m)采集了冰川冰样品; 2004 年 7~11 月逐月在乌鲁木齐河源 1 号冰川东支积累区(采样点海拔 4 100 m)又采集了 5 组粒雪坑样品, 雪层平均深度为 155 cm. 采样时工作人员穿特制的工作服, 并使用面罩与一次性塑料手套等用具. 粒雪样品自雪坑纵剖面顶部以下依次采集, 一般直至雪坑底部冰层

附近为止. 采用玻璃质容器进行采样, 样品在冷冻状态下保存.

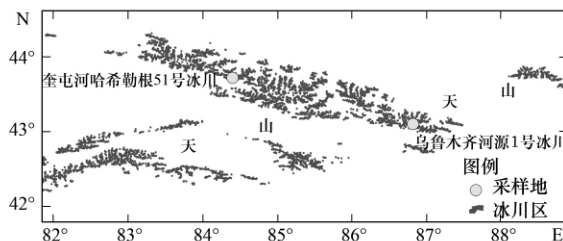


图 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川与奎屯河哈希勒根 51 号冰川的位置

Fig. 1 Location of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumi River and Glacier No. 51 at Haxilegen of Kuytun River

1.2 样品分析

分析工作在美国沙漠研究所(desert research institute, DRI)使用热/光碳分析仪(DRI Model 2001 thermal/optical carbon analyzer, Atmoslytic Inc., Calabasas, CA, USA)进行. 分析前, 采用微波炉加热的方法加速样品融化以防止因微生物繁殖造成的影响. 融化后, 采用石英质滤膜对样品进行过滤. 测试遵循 IMPROVE(interagency monitoring of protected visual environments)分析协议规定的热/光反射法(thermal optical reflectance, TOR). 具体分析过程为, 先在纯 He 环境下逐级升温, 当温度为 120、250、450 和 550℃ 时, 分别得到 OC1、OC2、OC3 和 OC4, OC 释放进入氧化炉被氧化为 CO₂; 之后, 在 He 环境中充入 2% 的 O₂ 并逐级升温, 当温度为 550、700 和 800℃ 时, 分别得到 EC1、EC2 和 EC3. 此时样品中的 EC 释放被氧化为 CO₂. 上述各个温度梯度下产生的 CO₂, 分别在还原炉中转化为可通过火焰离子检测器检测的 CH₄. 整个过程都有 He-Ne 激光($\lambda = 633 \text{ nm}$)打在石英质滤膜上, 利用反光强度的变化可以指示出 EC 氧化的起始点. 在 OC 碳化过程中, 转化为 EC 的这部分 OC 被称为光学裂解碳(optical pyrolyzed carbon, OPC). IMPROVE 分析协议将 OC 定义为 OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC, 将 EC 定义为 EC1 + EC2 + EC3 - OPC. 具体的分析流程前人已有介绍^[23-25]. 该方法已被广泛运用于碳质气溶胶研究^[26-28], 特别是雪冰中碳质气溶胶^[17, 29]的研究.

2 结果

在本研究实测的雪冰样品之中, 总碳(total carbon, TC)浓度从高到低依次为乌鲁木齐河源 1 号冰川西支雪坑(1 943 ng·g⁻¹) > 乌鲁木齐河源 1 号冰川东支雪坑(989 ng·g⁻¹) > 奎屯河哈希勒根 51

号冰川 ($150 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 乌鲁木齐河源 1 号冰川东支冰川冰 ($77 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) (表 1). 其中, 乌鲁木齐河源 1 号冰川东、西支雪坑中 TC 浓度比奎屯河哈希勒根

51 号冰川高出 1 个数量级, 比 1 号冰川东支冰川冰甚至高出 2 个数量级. OC 和 EC 的浓度也表现出类似的特征.

表 1 天山冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度对比

Table 1 Comparison of carbonaceous aerosols concentration in snow and ice of glaciers over Tianshan Mountains

研究区	样品介质	样品数量	采样时间	海拔/m	$c/\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$		
					OC	EC	TC
乌鲁木齐河源 1 号冰川东支	雪坑	9	2002 年 7 月	4 100	417	231	648
乌鲁木齐河源 1 号冰川东支	雪坑	37	2002 年 7 月, 2004 年 7 ~ 11 月	4 100	784	205	989
乌鲁木齐河源 1 号冰川东支	冰川冰	2	2002 年 7 月	3 750	45	32	77
乌鲁木齐河源 1 号冰川西支	雪坑	11	2002 年 7 月	4 200	1 332	612	1 943
奎屯河哈希勒根 51 号冰川	雪坑	10	2002 年 7 月	3 900	104	46	150

关于天山地区雪冰中碳质气溶胶浓度背景值的报道一直十分有限, 之前有研究表明天山冰川表层雪中 BC 平均浓度为 (112 ± 27) $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$ [12]. 而基于本研究采集的 58 个雪样 (不含冰川冰), 天山地区雪层中 OC 浓度平均值为 $557 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, EC 浓度平均值为 $188 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 其中, EC 浓度与之前的报道 [12] 没有数量级的差异. 考虑到采样时空条件的差异, 加之测试方法不同也会对测试结果产生影响, 这一差异是合理的. 由此可见, 本研究基本反映了天山地区雪冰中碳质气溶胶浓度的一般水平.

3 讨论

3.1 雪坑中碳质气溶胶浓度剖面特征

图 2 展示的是同一时期天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东、西支与奎屯河哈希勒根 51 号冰川积累区雪

坑中碳质气溶胶浓度剖面. 雪坑剖面中碳质气溶胶浓度存在着显著的波动, 最大值与最小值存在 1 ~ 2 个数量级的差异, 且碳质气溶胶浓度较高的层位与污化层存在着较好的对应性. 湿季强烈的淋溶作用使得沉积于雪层中的碳质气溶胶在不溶微粒较为丰富的污化层附近产生富集, 从而导致碳质气溶胶浓度剖面变化明显. 之前在青藏高原一些冰川的雪坑 [11, 13] 中也发现污化层附近碳质气溶胶浓度普遍偏高.

具体来说, 乌鲁木齐河源 1 号冰川东支 [图 2 (a)] 表层雪中碳质气溶胶的浓度相对较高, OC、EC 浓度分别为 $636 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $407 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, EC/OC 的比值为 0.64; 20 ~ 50 cm 深度间, OC 和 EC 的浓度都较低; 之后进入污化层, 二者浓度突然升高, 在 70 cm 处出现最大值, OC、EC 浓度分别为 $1 976 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$

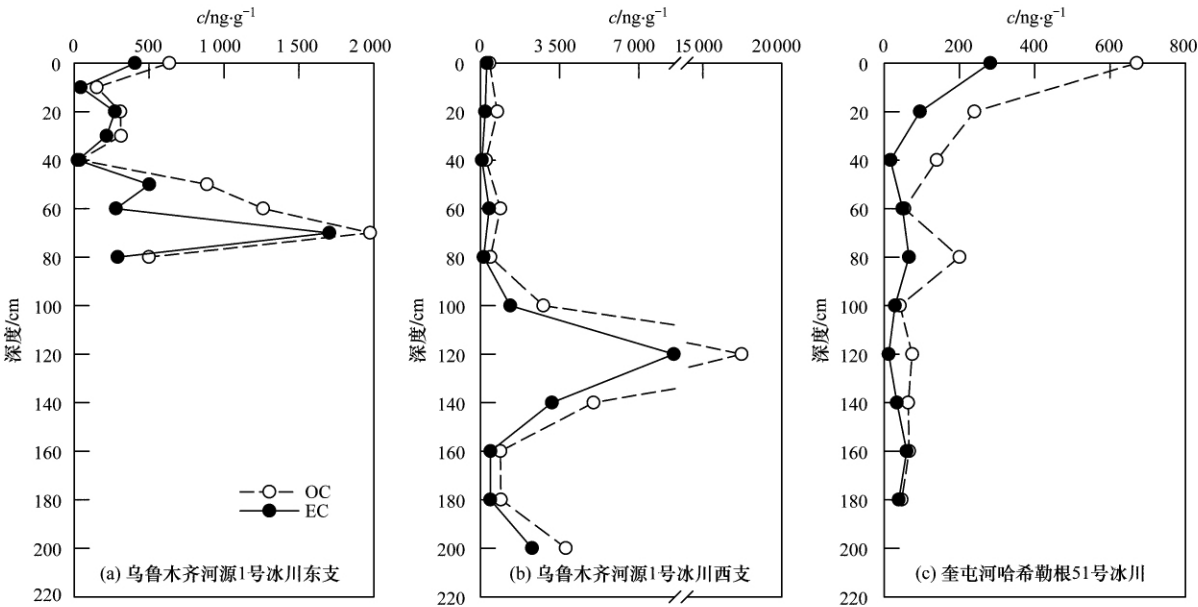


图 2 2002 年 7 月不同采样点雪坑中碳质气溶胶浓度剖面

Fig. 2 Vertical profiles of carbonaceous aerosol concentration in snowpack at the three sampling sites in July 2002

和 $1704 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, EC/OC 的比值为 0.86. 乌鲁木齐河源 1 号冰川西支 [图 2(b)] 表层雪中碳质气溶胶的浓度较低, OC、EC 浓度分别为 $407 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $279 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, EC/OC 的比值为 0.69; 从表层到 100 cm 间, OC、EC 的浓度亦保持较低的状态; 100 ~ 150 cm 之间, 也就是污化层所在的位置, 二者的浓度突然升高, 且在 120 cm 处达到最大值, 此时, OC、EC 浓度分别为 $17464 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $8547 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 远高于该雪坑其它深度的浓度, EC/OC 的比值为 0.49; 150 ~ 180 cm 之间, 二者的浓度开始降低; 雪坑底部 (200 cm 处) 二者的浓度又有所升高.

奎屯河哈希勒根 51 号冰川 [图 2(c)] 雪坑中 OC、EC 的最大值出现在表层雪处, OC、EC 浓度分别为 $671 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $282 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, EC/OC 的比值为 0.42. 这说明表层雪中 OC 所占的比例相对较大, 这与乌鲁木齐河源 1 号冰川明显不同; 自表层雪向下, OC、EC 的浓度逐渐下降, 到雪坑底部其浓度分别为 $47 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $39 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 但是根据 Ming 等^[13]在该冰川临近的哈希勒根 48 号冰川的研究, 在其他时段雪坑底部污化层附近仍可表现出 BC 浓度较高的情况. 实际上, 2 次采样之间新疆碳质气溶胶的总体排放强度变化可能并不大, 2000 年新疆的 OC 排放量为 $5.8 \times 10^4 \text{ t}$, BC 排放量为 $2.3 \times 10^4 \text{ t}$ ^[18], 而 2007 年新疆的 OC 排放量为 $4.9 \times 10^4 \text{ t}$, BC 排放量为 $2.3 \times 10^4 \text{ t}$ ^[19]. 因此不同年份的报道仍具有一定的参考价值.

3.2 不同季节雪坑中碳质气溶胶浓度变化

根据 2004 年 7 ~ 11 月雪坑内碳质气溶胶的逐月浓度变化 (图 3) 可以发现, 不同季节雪层中的碳质气溶胶浓度存在着一定的变化, 这反映了碳排放与传输的季节性差异. 雪坑中的 OC 与 EC 浓度在 7 ~ 11 月间总体均呈波动下降趋势. 在新疆慕士塔格冰川区^[26]的大气气溶胶中, OC 与 EC 浓度的季节序列为夏季 > 秋季 > 冬季 > 春季, 这与本研究的趋势是类似的.

从碳排放的季节性差异来讲, 近源的居民采暖、农业活动 (如秸秆焚烧、施用化肥) 等都可能产生季节性影响^[19]. 实际上, 无论是在新疆典型城市 (乌鲁木齐^[30]、塔中^[21]) 的大气气溶胶 BC 浓度监测, 还是对整个中国^[19]的 BC 与 OC 排放量估算结果, 都表明碳排放存在着季节性. 然而, 在青藏高原开展的冰芯研究均表明, 气团输送对碳质气溶胶 (如 BC^[15]、EC^[17]) 浓度存在着重要的影响. 这里采用美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 空气资源实验室

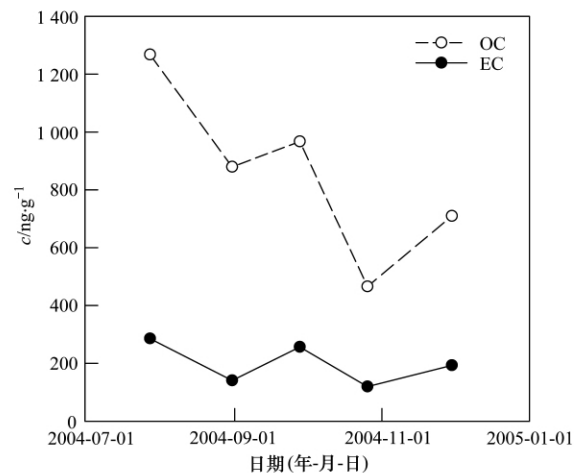


图 3 2004 年 7 ~ 11 月乌鲁木齐河源 1 号冰川雪坑中碳质气溶胶浓度变化

Fig. 3 Variation of carbonaceous aerosol concentration in snowpack of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River from July to November 2004

(ARL) 的 HYSPLIT 模式来模拟 2004 年乌鲁木齐河源 1 号冰川东支积累区的气团后向轨迹 (4 日回溯), 并对轨迹进行聚类分析 (图 4). 虽然碳质气溶胶的沉降受到多方面的影响, 但利用后向轨迹模拟来源仍是一种较为常见有效的方法^[13~15, 26]. 从图 4 可以发现, 乌鲁木齐河源区受到不同尺度的远源气团影响, 气团后向轨迹被聚类为 2 个主要的方向, 即中亚南部 (T1) 与欧洲东部 (T2) [图 4(a)]. 这 2 个方向存在着一定的季节性差异, 夏季受中亚南部的影响相对更为明显 (T1), 而冬季源自东欧的气团也可能在较短的时间内经哈萨克斯坦传输至我国境内 (T2) [图 4(b)]. 考虑到燃烧事件对碳质气溶胶的显著影响, 图 4(a) 中还叠加了欧洲空间局 (ESA) 发布的 2004 年 7 ~ 11 月火点时空分布资料. 聚类后的气团轨迹 T1 与 T2 附近均广泛分布着火点. 统计该时段内与我国较为临近的中亚五国火点燃烧记录可以发现, 主要的地表覆盖类型为裸地、草本植物或灌木、耕地等, 燃烧必然产生大量的碳质气溶胶. 之前的研究也发现, 中亚夏秋季节生物质燃烧的产物可以短期地改变天山乌鲁木齐河源区雪冰的化学成分^[31, 32]. 如果再考虑到中亚城市群的碳排放情况, 其碳传输量必然更加可观. 由此可见, 远源的碳排放可以在适宜条件下对天山冰川雪冰中的碳质气溶胶浓度产生深远的影响.

3.3 雪坑与冰川冰中碳质气溶胶浓度差异

成冰过程中蕴含着一系列的物理和化学变化, 这在一定程度上会改变雪冰中记载的原始信息^[33].

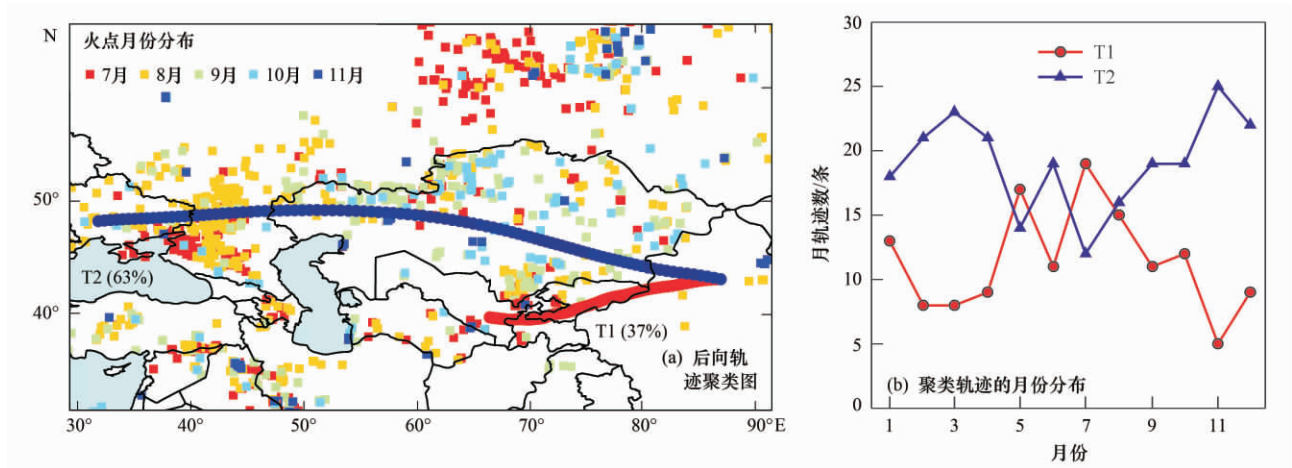


图4 2004年乌鲁木齐河源1号冰川气团后向轨迹聚类分析结果

Fig. 4 Cluster of backward trajectory from Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River in 2004

近年来冰芯中碳质气溶胶浓度的研究逐渐丰富, 认识到不同介质中碳质气溶胶的差异性并估算其在气-雪-冰过程中的转化率有助于科学解读冰芯中的环境记录^[26, 34]. 为了考察粒雪与冰川冰之间碳质气溶胶浓度的差异, 本研究对比了2002年7月在1号冰川东支粒雪与冰川冰样品中碳质气溶胶浓度(图5).

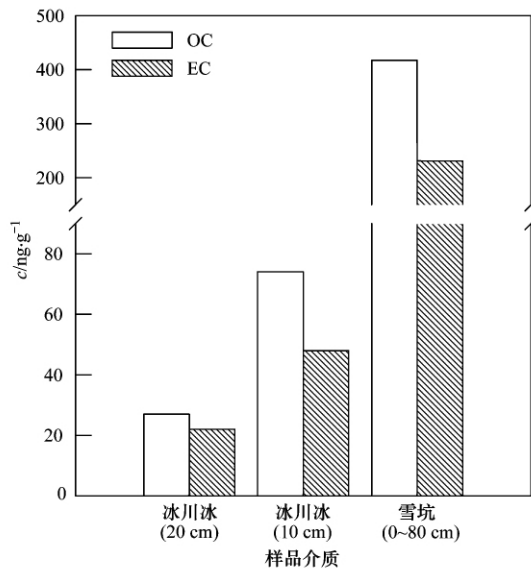


图5 2002年7月乌鲁木齐河源1号冰川不同介质中碳质气溶胶浓度

Fig. 5 Carbonaceous aerosol concentration in the snow and ice at Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River in July 2002

从图5中可以发现, 与雪坑相比, 乌鲁木齐河源1号冰川东支的冰川冰中碳质气溶胶浓度较低, OC、EC最高浓度仅为74 ng·g⁻¹和48 ng·g⁻¹. 在不同的介质(粒雪与冰川冰)中, 碳质气溶胶浓度差异达到

了1个数量级. 虽然这里不能对冰川冰样品进一步定年分析, 但之前在该冰川消融区的冰芯^[35]研究表明, 该区域受成冰环境影响很小, 冰芯所对应20 m处的冰龄超过500 a. 因此, 本研究中采集的冰川冰可能代表了这一区域冰层中的碳质气溶胶水平. 然而, 在喜马拉雅山东绒布冰川^[12, 13]采集的雪冰样品则显示, 雪坑中的BC浓度与长尺度冰芯(1951~2002年层)中BC浓度十分接近. 在极地^[36]也有类似报道显示, 邻近的雪坑与冰芯中碳质气溶胶浓度可能没有数量级的差异. 由此可见, 不同区域的冰川冰与粒雪样品内碳质气溶胶浓度相对关系可能存在着一定的差异. 这种差异的产生主要有如下几种原因: ①雪层中的物质受到后沉积作用的长期影响, 因而使得雪冰中的物质分布状况被强烈改造^[32, 33]. ②雪坑记录受物质输入的影响较大, 不同季节下的输入量是有差异的^[19], 雪坑受采样时空条件的影响比冰芯要大. ③冰川冰中的碳质气溶胶浓度也并非均质, 本研究中乌鲁木齐河源1号冰川的冰川冰样品相对较少, 与长序列冰芯记录的代表性可能有差异.

3.4 碳质气溶胶对雪反照率的影响

碳质气溶胶(特别是EC或BC)沉积在冰川表面, 会改变其反照率, 加速冰川的消融. 为估算雪冰中EC对反照率的影响, 这里采用了SNICAR(snow, ice and aerosol radiative)模型, 为雪反照率模拟工具(snow albedo simulator, SAS)^[8, 9, 37]. 本研究根据2004年7~11月在乌鲁木齐河源1号冰川东支采集的5组雪坑样品, 分别利用SNICAR模型的工具模拟了有无EC情况下雪反照率的差异. 由于各雪坑反射光谱曲线趋势类似, 这里选取其中一个

典型雪坑(2004年7月)的模拟结果作为代表[图6(a)].显然,雪层中EC的存在对于反照率的影响十分显著.其作用范围主要是在波长为300~700 nm范围内(反照率之差的平均值0.22),当波长为455 nm时,有无EC的差异最大,反照率相差了0.27.当波长>1000 nm以后EC所起到的作用则很小,反照率相差不足0.01.含有EC的曲线,其反照率最大

值为0.7(波长为605 nm),在波长为300~605 nm时反射率呈增大趋势,在波长>605 nm时,反射率开始递减,波长为1025 nm时形成波谷,经过短暂回升后在波长为1095 nm时反照率达到0.27,之后反照率维持低值.与早期研究之中天山地区积雪反射光谱曲线^[38]相比,模拟情况符合实测结果.可以看出,雪层中EC的存在对反照率的影响是较大的.

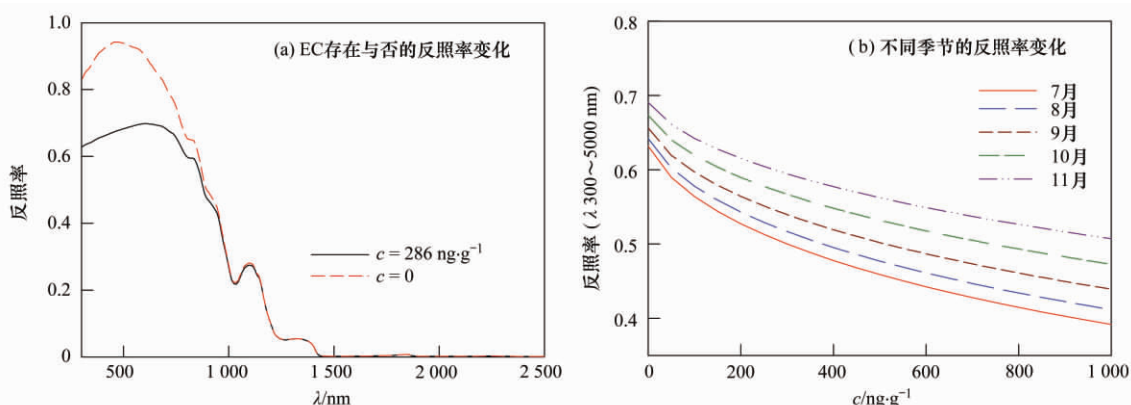


图6 基于SNICAR模型不同条件下反照率的模拟结果

Fig. 6 Simulation of albedo in different situations based on the SNICAR model

上述结果仅根据单时段的雪坑资料模拟而来,实际上,由于太阳天顶角、雪层物理结构等因素的影响,不同季节EC浓度对反照率的影响也是有差异的.这里同样根据2004年7~11月实际观测的雪密度、有效粒径等参数,模拟不同时段不同EC浓度条件下的反照率情况[图6(b)].可以发现,不同时段雪层均表现出EC浓度越大时反照率越小的特征,且夏季比冬季变化更为显著.也就是说,在同样的EC浓度条件下,夏季的反照率更小.Flanner等^[37]基于SNICAR模型对南极雪冰样品进行了模拟,也发现雪层中BC浓度越大时反照率越小,且雪粒径越大这一变化越显著.但是,根据实地观测记录判断,图6(b)中模拟出的季节变化显然不仅是由雪的光学有效粒径造成的,太阳辐射的季节性变化可能是更为直接的原因.中国西北地区冬季总辐射最少,夏季最多,春季多于秋季^[39],而中国西部大多数冰川积累和消融同时发生在夏季^[22],这种季节性差异可能会加速冰川的消融.明镜等^[12]估计了BC在中国不同冰川表面沉降产生的辐射强迫,发现天山冰川区的辐射强迫仅次于青藏高原腹地.近几十年来天山冰川正经历着显著的退缩^[40],碳质气溶胶对冰川消融的影响是不可忽视的.

4 结论

(1) 在实测的雪冰样品之中,TC浓度从高到低

依次为乌鲁木齐河源1号冰川西支雪坑>乌鲁木齐河源1号冰川东支雪坑>奎屯河哈希勒根51号冰川>乌鲁木齐河源1号冰川东支冰川冰,OC和EC的浓度序列也较为类似.天山冰川区雪层中OC浓度平均值为 $557 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,EC浓度平均值为 $188 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$.

(2) 天山地区不同冰川积累区雪层剖面存在着较大的相似性,剖面中下部的污化层附近一般都会出现碳质气溶胶浓度峰值.但是,某些突发性事件也可能使得雪层上部(特别是表层雪)产生碳质气溶胶浓度峰值.

(3) 从夏季到冬季,雪层中碳质气溶胶的浓度呈波动下降趋势.由于碳排放(如居民采暖、农业活动等)与碳传输(如大气环流、局地山谷风等)都存在着明显的季节性差异,这使得雪层中碳质气溶胶浓度往往也表现出季节性变化趋势.

(4) 冰川冰与粒雪中碳质气溶胶浓度间是否存在数量级的差异,与冰川所在环境、雪冰采样时空条件、样品的代表性都有着密切的关系.

(5) 雪层表面是否存在EC对反照率影响显著,反照率之差最大可达0.27.不同时段雪层均表现出EC浓度越大时反照率越小,且夏季比冬季变化更为显著.在当前天山地区气候暖湿化的背景下,天山地区冰川雪冰中碳质气溶胶将对冰川消融起到促

进作用。

致谢: 本项研究是中国科学院天山冰川观测站开展的雪冰现代过程研究项目的一部分, 谨此对参加本项研究的每一个观测和研究人员表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221–227.
- [2] Meehl G A, Arblaster J M, Collins W D. Effects of black carbon aerosols on the Indian monsoon [J]. *Journal of Climate*, 2008, **21**(12): 2869–2882.
- [3] Ramachandran S, Kedia S. Black carbon aerosols over an urban region: radiative forcing and climate impact [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: D10202, doi: 10.1029/2009JD013560.
- [4] Skeie R B, Bernsten T, Myhre G, *et al.* Black carbon in the atmosphere and snow, from pre-industrial times until present [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2011, **11**(3): 7469–7534.
- [5] 何跃, 张甘霖, 杨金玲, 等. 城市化过程中黑碳的土壤记录及其环境指示意义 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2369–2375.
- [6] 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.
- [7] Thevenon F, Anselmetti F S, Bernasconi S M, *et al.* Mineral dust and elemental black carbon records from an Alpine ice core (Colle Gnifetti glacier) over the last millennium [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**: D17102, doi: 10.1029/2008JD011490.
- [8] Flanner M G, Zender C S, Hess P G, *et al.* Springtime warming and reduced snow cover from carbonaceous particles [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(7): 2481–2497.
- [9] Yasunari T J, Koster R D, Lau K M, *et al.* Influence of dust and black carbon on the snow albedo in the NASA Goddard Earth Observing System version 5 land surface model [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, **116**: D02210, doi: 10.1029/2010JD014861.
- [10] 刘先勤, 王宁练, 姚檀栋, 等. 青藏高原雪冰中碳质气溶胶含量变化 [J]. *地学前缘*, 2006, **13**(5): 335–341.
- [11] Xu B Q, Yao T D, Liu X Q, *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**(1): 257–263.
- [12] 明镜, 效存德, 杜振彩, 等. 中国西部雪冰中的黑碳及其辐射强迫 [J]. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(6): 328–335.
- [13] Ming J, Xiao C D, 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.
- [14] Liu X Q, Xu B Q, Yao T D, *et al.* Carbonaceous particles in Muztagh Ata ice core, West Kunlun Mountains, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(21): 3379–3386.
- [15] 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.
- [16] Xu B Q, Cao J J, Hansen J, *et al.* Black soot and the survival of Tibetan glaciers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(52): 22114–22118.
- [17] 王莱, 徐柏青, 邬光剑, 等. 碳质气溶胶在藏东南冰芯中的记录 [J]. *气候变化研究进展*, 2010, **6**(3): 175–180.
- [18] Cao G L, Zhang X Y, Zheng F C. Inventory of black carbon and organic carbon emissions from China [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(34): 6516–6527.
- [19] Cao G L, Zhang X Y, Gong S L, *et al.* Emission inventories of primary particles and pollutant gases for China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(8): 781–788.
- [20] Li J, Zhuang G S, Huang K, *et al.* Characteristics and sources of air-borne particulate in Urumqi, China, the upstream area of Asia dust [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(4): 776–787.
- [21] Li J, Huang K, Wang Q Z, *et al.* Characteristics and source of black carbon aerosol over Taklimakan Desert [J]. *Science China Chemistry*, 2010, **53**(5): 1202–1209.
- [22] Shi Y F. *Glaciers and related environments in China* [M]. Beijing: Science Press, 2008. 16–94.
- [23] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U. S. air quality studies [J]. *Atmospheric Environment (Part A: General Topics)*, 1993, **27**(8): 1185–1201.
- [24] Chow J C, Watson J G, Lu Z, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079–2112.
- [25] Chow J C, Watson J G. PM_{2.5} carbonate concentrations at regionally representative Interagency Monitoring of Protected Visual Environment sites [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, **107**(D21): 8344, doi: 10.1029/2001JD000574.
- [26] Cao J J, Xu B Q, He J Q, *et al.* Concentrations, seasonal variations, and transport of carbonaceous aerosols at a remote Mountainous region in western China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(29): 4444–4452.
- [27] Ming J, Xiao C D, Sun J Y, *et al.* Carbonaceous particles in the atmosphere and precipitation of the Nam Co region, central Tibet [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(11): 1748–1756.
- [28] 李杏茹, 王英锋, 郭雪清, 等. 2008 年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 313–318.
- [29] Xu B Q, Wang M, Joswiak D R, *et al.* Deposition of anthropogenic aerosols in a southeastern Tibetan glacier [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**: D17209, doi:

10. 1029/2008JD011510.
- [30] 李娟. 中亚地区沙尘气溶胶的理化特性、来源、长途传输及其对全球变化的可能影响[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
- [31] Zhao Z P, Li Z Q, Edwards R, *et al.* Atmosphere-to-snow-to-firm transfer of NO_3^- on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**(1): 239–244.
- [32] 王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等. 天山东部雪冰中硝酸根浓度对中亚生物质燃烧的响应研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 338–344.
- [33] Li Z Q, Edwards R, Mosley-Thompson E, *et al.* Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firm packs at the PGPI site on Ürümqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**(1): 250–256.
- [34] Davidson C I, Jaffrezo J L, Mosher B W, *et al.* Chemical constituents in the air and snow at Dye 3, Greenland: II. Analysis of Episodes in April 1989 [J]. *Atmospheric Environment (Part A: General Topics)*, 1993, **27**(17–18): 2723–2737.
- [35] 王林, 李忠勤, 王飞腾, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川冰芯剖面物理特征及其形成机理研究[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(1): 11–18.
- [36] Chylek P, Johnson B, Damiano P A, *et al.* Biomass burning record and black carbon in the GISP2 ice core[J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, **22**(2): 89–92.
- [37] 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.
- [38] 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, **14**(4): 370–377.
- [39] 陈少勇, 邢晓宾, 张康林, 等. 中国西北地区太阳总辐射的气候特征[J]. *资源科学*, 2010, **32**(8): 1444–1451.
- [40] Wang S J, Zhang M J, Li Z Q, *et al.* Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960 [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, **21**(2): 263–273.