

doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0126

Xu Hui, Li Zhongqin, Takeuchi N, *et al.* Characteristics and formation analysis of the cryoconite granules: Take the Ürümqi Glacier No. 1 as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1118–1125. [许慧, 李忠勤, Takeuchi N, 等. 冰尘结构特征及形成分析——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1118–1125.]

冰尘结构特征及形成分析 ——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例

许 慧¹, 李忠勤^{1,2}, Nozomu Takeuchi³, 张晓宇¹, 张国飞²

(1. 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, 甘肃 兰州 730000; 2. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 日本千叶大学理学研究科地球科学科, 日本 千叶 263-8522)

摘 要: 利用 2007–2010 年夏季在乌鲁木齐河源 1 号冰川采集的 5 个冰样, 对冰样中冰尘的特征、冰尘中蓝藻的种类及冰尘中无机矿物颗粒的粒度特征进行了分析研究. 研究表明: 冰尘为棕色球状聚集体, 粒径为 0.27~3.5 mm, 分布在冰川消融区表面, 其组成成分为有机质、无机矿物颗粒和微生物. 冰尘有 4 种主要的内部结构: 类型 I, 具有同心层结构的冰尘; 类型 II, 带有亚颗粒的冰尘; 类型 III, 内部无明显结构的冰尘; 类型 IV, 中心位置处具有较大无机颗粒的冰尘. 冰尘中无机矿物颗粒的数量主要分布在 $d < 3.5 \mu\text{m}$ 的范围内, 且体积分布的粒径众数介于 3~25 μm 之间. 同时, 对冰尘中的蓝藻进行了 16S rRNA 基因序列的系统发育分析, 共从蓝藻 16S rRNA 基因文库中筛选了 247 个阳性克隆, RFLP 分型得到 10 个不同的 OTUs. BLAST 比对, 系统发育分析将这 10 个 OTUs 归为颤藻目(Oscillatoriales)、色球藻目(Chroococcales)、未定种(Unclassified). 颤藻目为绝对优势类群, 占整个基因克隆文库的 91%. 经估算, 冰尘中存在大量的有机物质和微生物, 无机矿物颗粒只占了很小的比例, 表明影响冰川消融区表面反照率的主要因素为冰尘中的有机部分, 包括有机物质和微生物.

关键词: 冰尘; 有机物质; 蓝藻; 无机矿物颗粒; 冰川反照率

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

冰尘是由有机物质、无机矿物颗粒及微生物结合形成的黑色或棕色球状聚集体, 存在于冰川消融区表面, 有两种形成方式: 其一是在冰川消融区的冰尘孔中形成; 其二是在冰川消融区表面形成^[1-6]. 冰尘能够降低冰川表面的反照率, 从而加速冰川消融. 20 世纪以来随着气候变暖, 全球多数山岳冰川出现退缩, 最近 20 a 这一退缩现象又出现了加剧的趋势^[7]. 冰川的加剧退缩在中国亦十分显著, 尤其在西北地区, 表现为冰川融水径流剧增, 面积缩小, 末端后退, 雪线升高, 许多小冰川已接近消亡的边缘. 冰川在西北干旱区被喻为固体水

库, 绿洲的摇篮, 是维持流域生产、生活的主要水资源之一^[8]. 冰川的这一变化引起了人们的普遍关注和忧虑. 根据李忠勤等^[8]的研究, 冰川反照率减弱是冰川加速消融的重要机理之一, 而冰川反照率减弱的一个重要原因便是冰川表面存在着大量的冰尘. 因此, 作为冰川物质平衡的一个重要因素, 研究冰尘的特征就显得极为重要. 而无机矿物颗粒的粒度特征可以用于源区以及大气本底值的研究^[9-10], 故研究冰尘中无机矿物颗粒的粒度特征具有重要意义. 除此之外, 蓝藻种类的鉴别对于认识冰川生态系统具有一定作用. 2005 年进行了中日合作, 探讨了冰尘的形态结构、冰尘中蓝藻的种类及冰尘对冰川反照率的影响. 本文基于之前的研

收稿日期: 2013-01-03; 修订日期: 2013-06-23

基金项目: 国家重大科学研究计划(超级 973 计划)项目(2013CBA01801); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年人才基金项目(51Y251B51); 冰冻圈科学国家重点实验室项目(SKLCSS-ZZ-2012-01-01); 国家自然科学基金项目(41201065; 41001040; 41171057; 41261017; 41101066)资助

作者简介: 许慧(1988—), 女, 甘肃金昌人, 2011 年毕业于鲁东大学, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所读硕士研究生, 主要从事冰川有机质对冰川消融的影响研究. E-mail: xuhui1988828@163.com

究,进一步分析了冰尘中无机矿物颗粒的粒度特征等,讨论了影响冰川反照率的主要因素.

1 样品采集与分析

乌鲁木齐河源 1 号冰川(43°06' N, 86° 50' E)(以下简称 1 号冰川)位于新疆维吾尔自治区天山东段,是乌鲁木齐河的发源地. 2007—2010 年 7—9 月,在 1 号冰川东支消融区不同海拔共采集 5 个冰样(图 1). 采样过程严格按照冰雪采样程序进行,采样时穿洁净的工作服、戴面罩、聚乙烯手套,使用预先清洁的不锈钢钢铲等^[11-14]. 一部分样品在冰冻状态下运往中国科学院冰冻圈科学国家重点实验室,分析无机矿物颗粒的粒度特征;另一部分样品密封后在冰冻状态下运往日本千叶大学理学研究科地球科学科分析中心进行冰尘特征的研究及蓝藻种类的鉴别. 同时,在各采样点处利用 FZ-A 型辐照计对 1 号冰川消融区表面的反照率进行测量,辐照计传感器探头向上测量太阳辐射能量,向下测量地表辐射能量,测量的波段范围在 400~1 050 nm 之间,辐照度测量范围是 0.1~1.999×10⁵ uw·cm⁻². 测量完成后计算反照率. 在观测中,仪表安装按观测规范要求离地面 1.5 m 且水平安装^[15-17].

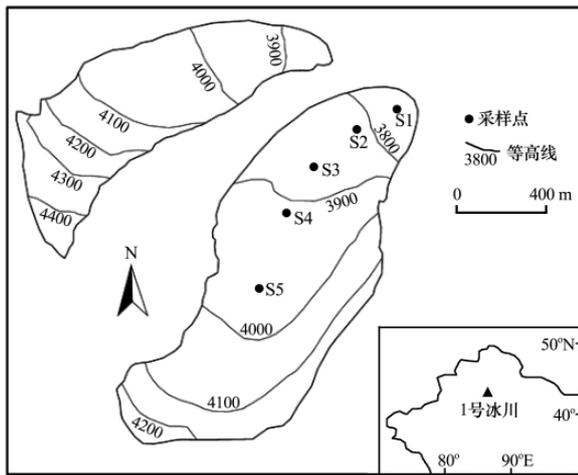


图 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川采样点示意图

Fig. 1 Map showing the sampling sites on the Ürümqi Glacier No. 1

冰尘中无机颗粒的粒度分析使用 Accusizer 780A 光学粒径检测仪,可测量微粒的范围是 0.57~400 μm. 分析前先提取冰尘中的无机颗粒. 整个实验过程都在洁净等级设计标准为 100 级的超净工作台内完成,微粒分析和测量的精度在 5% 以内^[18]. 冰尘颗粒的外部特征在普通显微镜及荧光

显微镜下观察得到,内部结构分析利用石蜡切片技术^[19]. 冰尘中蓝藻种类的鉴定利用分子生物学技术手段^[20-22],具体实验步骤:1)提取冰尘中的蓝藻,并对其 DNA 进行提取与纯化;2)PCR 扩增蓝藻 16S rRNA;3)蓝藻 16S rRNA 基因克隆文库的构建及阳性克隆的筛选;4)克隆文库 RFLP 分型及测序;5)构建系统发育树;6)分析蓝藻的组成.

2 结果与讨论

2.1 冰尘与反照率的关系

通过对 1 号冰川的野外观测,发现冰尘数量与冰川消融区表面反照率之间存在显著的负相关关系($R^2=0.927, P=0.009<0.01, n=5$),表明冰川表面的冰尘对反照率存在显著影响(图 2、图 3).

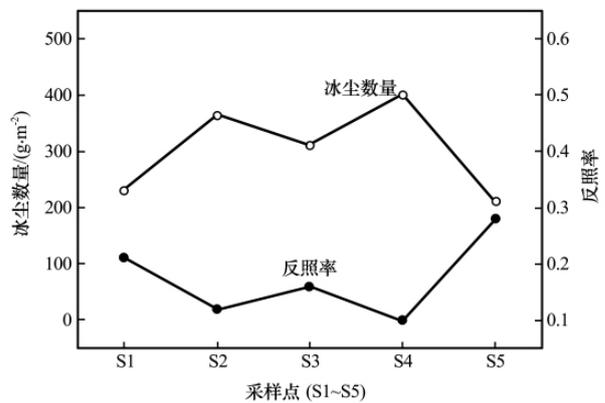


图 2 乌鲁木齐河源 1 号冰川各采样点冰尘的数量与反照率之间的关系

Fig. 2 The amount of cryoconite and albedo at the sampling sites on the Ürümqi Glacier No. 1

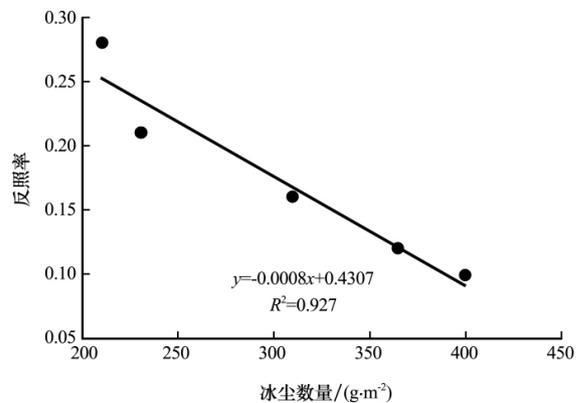


图 3 乌鲁木齐河源 1 号冰川冰尘数量与反照率的相关性
Fig. 3 Correlation between cryoconite amount and albedo on the Ürümqi Glacier No. 1

2.2 冰尘的特征及形成分析

2.2.1 冰尘的整体特征及形成分析

冰尘的主要组成成分为有机质、无机矿物颗粒

及微生物, 其中微生物又包括蓝藻、细菌及其他雪藻, 这些组成成分聚合形成棕色或黑色球状体. 在光学和荧光显微镜下观察发现, 丝状蓝藻紧密地缠绕在冰尘颗粒表面, 并将无机矿物颗粒和有机物质固定在其中. 冰尘的粒径为 0.27~3.5 mm(平均 1.1 mm, $SD=0.39$). 大多数冰尘的粒径集中在 1.0~1.2 mm 之间. 冰尘的内部结构主要包括以下

4 种类型: 类型 I, 大多数冰尘颗粒内部具有同心层结构, 同心层的主要成分为有机质, 这种结构的冰尘是多年生长的结果; 类型 II, 带有亚颗粒的冰尘, 此种结构的冰尘通常粒径较大, 是多个小冰尘颗粒相结合的结果; 类型 III, 内部无明显结构的冰尘, 此结构的冰尘颗粒内部无机颗粒与有机质均匀混合存在; 类型 IV, 中心位置处具有较大无机颗粒的冰尘. 4 种结构类型冰尘的颗粒数在各采样点上所占比例不同(图 4).

将 1 号冰川上冰尘的形态特征与祁连山七一冰

表 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川与七一冰川、雅拉冰川冰尘形态特征的比较

Table 1 Comparison of the features of the cryoconite granules among the Ürümqi Glacier No. 1, Qiyi Glacier and Yala Glacier

研究位置 (冰川)	颜色	粒径范围 /mm	冰尘数量 / ($g \cdot m^{-2}$)	资料来源
1 号冰川	棕色	0.27~3.5	86~1113	文献[1-2]、本文
七一冰川	棕色	0.13~2.7	30.4~879	文献[3]
雅拉冰川	黑色	0.1~3.0		文献[4]

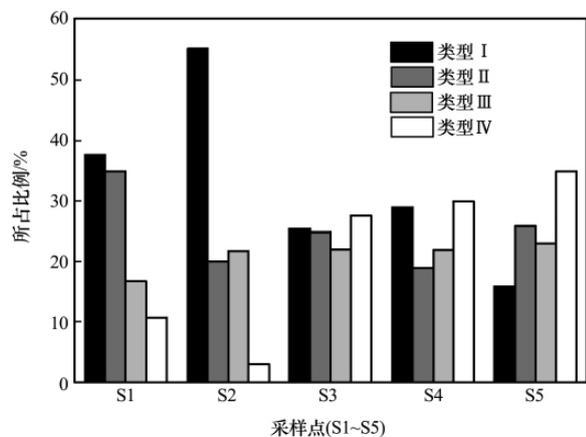


图 4 不同类型的冰尘在各采样点所占比例

Fig. 4 The proportions of different types of cryoconite at sample sites

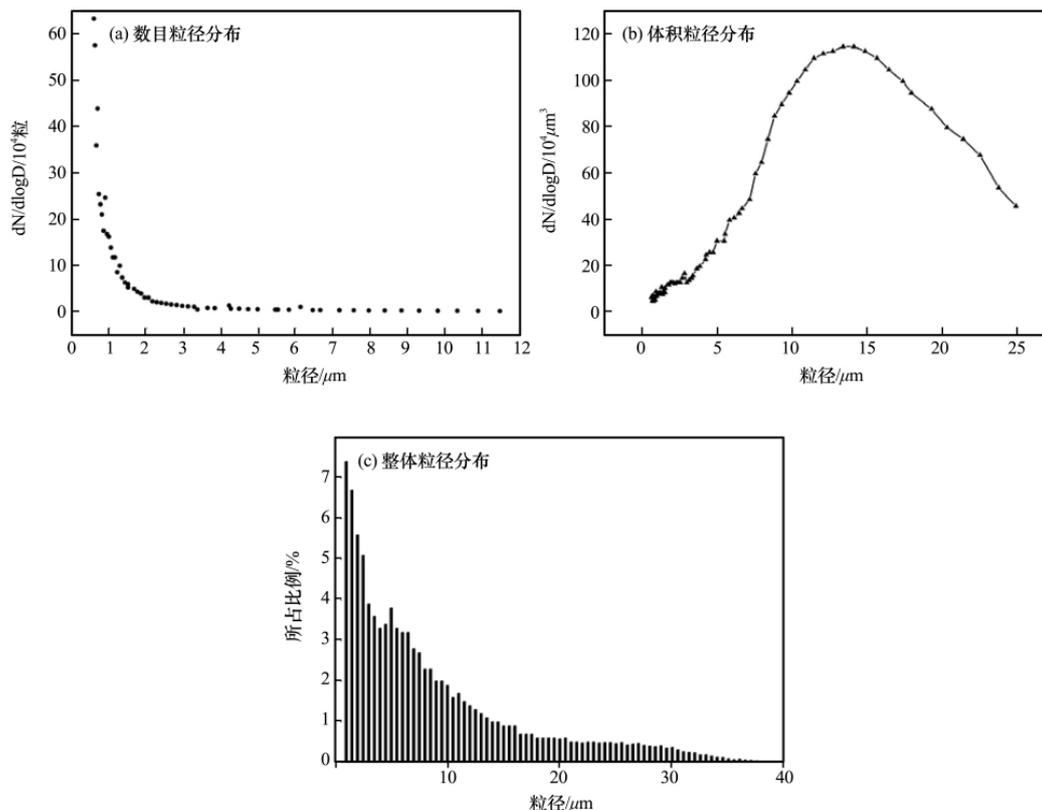


图 5 乌鲁木齐河源 1 号冰川无机矿物颗粒的分布

Fig. 5 Distribution of mineral particles of the Ürümqi Glacier No. 1

川和喜马拉雅山的雅拉冰川进行比较(表 1), 发现 1 号冰川上冰尘颗粒的粒径较大, 而其他两个冰川上冰尘颗粒略小. 同时, 1 号冰川和七一冰川上冰尘的颜色为棕色而雅拉冰川上冰尘为黑色. 表明不同的冰川上冰尘的形态特征有所差异, 原因可能是不同的冰尘当中所含有的无机矿物颗粒的粒径、种类, 以及蓝藻等微生物的种类不同所造成的.

冰尘多样性的结构揭示了其生命周期. 每年的冰川消融期(一般是 5—10 月)冰尘开始生长, 到冬季(11 月至翌年 4 月)由于冰川上没有融水支持, 冰尘会进入休眠阶段而停止生长. 在丝状蓝藻的作用下, 冰尘每年的生长都会形成一层有机质层. 较小的冰尘颗粒之间相互结合进而形成更大的冰尘颗粒. 当冰尘颗粒大小超过一定限度, 它就会裂解成小碎片, 小碎片会重新生长成新的冰尘. 冰尘表现出重复生长和裂解这一生命周期.

2.2.2 冰尘中的有机物质

冰尘中存在大量的有机物质, 但有机物质的成分、组成还需要进一步详细研究. 目前的研究表明有机物质的来源主要有: 1) 自养型微生物的有机产物; 2) 冰川上的生物残体; 3) 由风携带来的土壤中的有机物质^[1-6].

2.2.3 冰尘中的无机颗粒的粒度特征

图 5(a)和图 5(b)显示了冰尘中无机矿物颗粒的数目粒径和体积粒径分布. 从数目来看, 无机矿物颗粒数量主要分布在 $d < 3.5 \mu\text{m}$ 的范围内(图 5a). 1 号冰川冰尘中无机矿物颗粒体积分布的粒径

众数介于 $3 \sim 25 \mu\text{m}$ 之间(图 5b), 分布结构是一种单一模式. 1 号冰川上无机矿物颗粒的整体粒径特征如图 5(c). 颗粒的粒径主要分布在 $0.57 \sim 30 \mu\text{m}$ 之间, 其中粒径小于 $5 \mu\text{m}$ 的颗粒($\text{PM}_{2.5}$)约占总颗粒数的 89.9%, 粒径分布在 $0.6 \sim 3.5 \mu\text{m}$ 之间的颗粒数约占 85.8%, $>30 \mu\text{m}$ 的颗粒所占的比例很小, 而 $>40 \mu\text{m}$ 的颗粒几乎没有. 冰尘中的无机矿物颗粒为浅棕色、白色或透明. 经鉴定, 无机矿物颗粒为石英、长石、云母、黏土和方解石.

2.2.4 冰尘中的微生物

2.2.4.1 冰尘蓝藻 16S rRNA 基因序列的系统发育分析

共从蓝藻 16S rRNA 基因文库中筛选了 247 个阳性克隆, RFLP 分型得到 10 个不同的操作分类单元(Operational Taxonomic Unites, OTUs). 通过 BLAST 比对和系统发育分析, 将这 10 个 OTUs 归为: 颤藻目(8 个 OTUs, 占整个基因克隆文库的 91%), 色球藻目(1 个 OTU, 占整个克隆文库的 8.6%), 未定类群(1 个 OTU, 占整个克隆文库的 0.3%).

颤藻目共包括 8 个 OTUs(图 6, 表 2), No. 1 CYA OTU1 与 *Phormidium* sp. Ant-orange、*Phormidium* sp. Ant-lunch 有 99% 的相似性. No. 1 CYA OTU2 与 *Phormidium* sp. E18 有 97% 的相似性. No. 1 CYA OTU3 与 *Phormidium* sp. Ant-orange、*Phormidium* sp. Ant-lunch 有 99% 的相似性. No. 1 CYA OTU5 与 *Microcoleus Vaginatus*

表 2 乌鲁木齐河源 1 号冰川蓝藻 16S rRNA 基因序列比对结果

Table 2 BLAST search results of the 16S rRNA of cyanobacterial species detected in Ürümqi Glacier No. 1 samples

分类单元	相似序列	相似性/ %	对应物种
No. 1 CYA OTU1	<i>Phormidium</i> sp. Ant-orange	99.0	颤藻目
	<i>Phormidium</i> sp. Ant-lunch	99.0	颤藻目
No. 1 CYA OTU2	<i>Phormidium</i> sp. E18	97.0	颤藻目
No. 1 CYA OTU3	<i>Phormidium</i> sp. Ant-orange	99.0	颤藻目
	<i>Phormidium</i> sp. Ant-lunch	99.0	颤藻目
No. 1 CYA OTU4	<i>Geitlerinema carotinosum</i> AICB	96.0	色球藻目
No. 1 CYA OTU5	<i>Microcoleus Vaginatus</i>	99.0	颤藻目
No. 1 CYA OTU6	<i>Leptolyngbya</i> sp. SV1-MK-52	97.0	颤藻目
No. 1 CYA OTU7	<i>Pseudanabaena anstantiae</i> KMIC	92.0	颤藻目
No. 1 CYA OTU8	<i>Leptolyngbya</i> sp. SV1-MK-52	90.0	颤藻目
No. 1 CYA OTU9	<i>Leptolyngbya</i> sp. SV1-MK-52	90.0	颤藻目
No. 1 CYA OTU10	Uncultured bacterium 179b-45	98.0	未定类群
	Uncultured bacterium 1790-7	97.5	未定类群

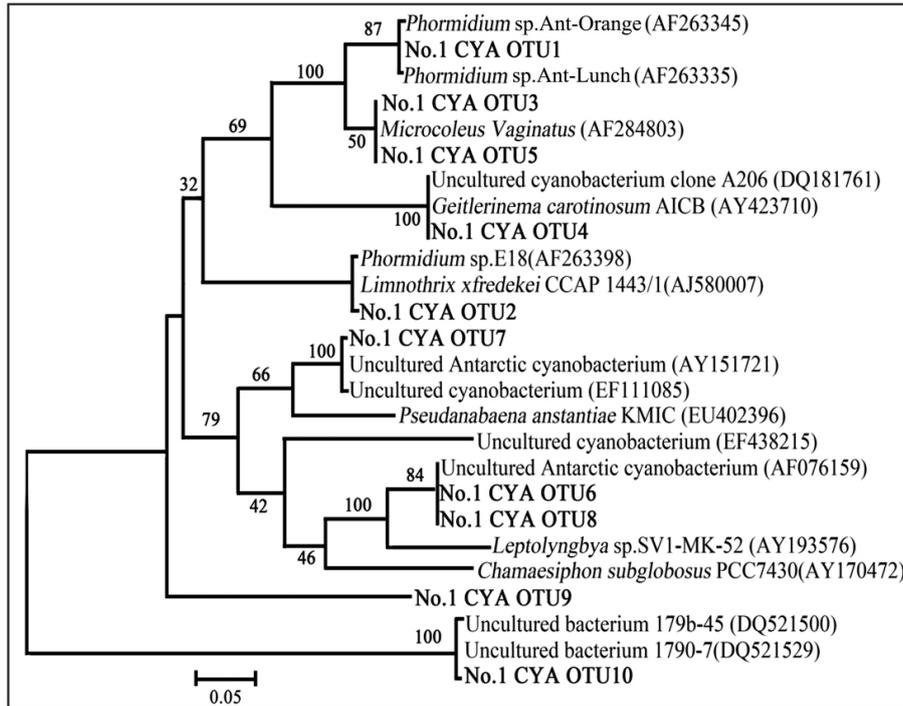


图 6 邻接树法构建乌鲁木齐河源 1 号冰川蓝藻 16S rRNA 基因克隆文库系统发育树

Fig. 6 Phylogenetic relationships of the cyanobacterium 16S rRNA gene sequences obtained from the clone library of the Ürümqi Glacier No. 1 (Bootstrap values generated from 1 000 replicates using the neighbor-joining method are shown at the nodes)

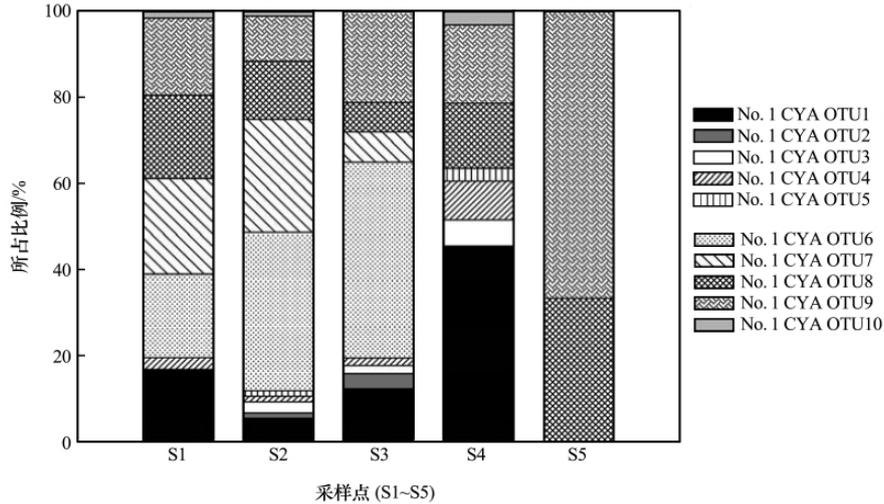


图 7 乌鲁木齐河源 1 号冰川蓝藻种群中的各操作分类单元的克隆数在各采样点所占比例

Fig. 7 Percentage abundances of OTUs in the cyanobacterial communities at the sampling sites on the Ürümqi Glacier No. 1

具有 99% 的相似性. No. 1 CYA OTU6、No. 1 CYA OTU8、No. 1 CYA OTU9 与 *Leptolyngbya* sp. SV1-MK-52 的相似性分别为 97%、90%、90%. No. 1 CYA OTU7 与 *Pseudanabaena anstantiae* KMIC 有 92% 的相似性. 色球藻目有 1 个 OTU, No. 1 CYA OTU4 与 *Geitlerinema carotinosum* AICB 具有 96% 的相似性. 未定种有 1 个

OTU, No. 1 CYA OTU10 与 *Uncultured bacterium* 179b-45、*Uncultured bacterium* 1790-7 的相似性分别为 98%、97.5%. 从上述分析结果中可以看出, 颤藻目为绝对优势类群, 占整个蓝藻基因克隆文库的 91%.

No. 1 CYA OTU1、No. 1 CYA OTU6、No. 1 CYA OTU7、No. 1 CYA OTU8 和 No. 1 CYA

OTU9 都属于颤藻目且它们的克隆数在基因克隆文库中均已超过 10 个克隆, 其中 No. 1 CYA OTU6 的克隆数占总克隆数的 28%, No. 1 CYA OTU9 克隆数占总克隆数的 18.2%, 说明它们是冰川表面蓝藻的主要类型。另外, No. 1 CYA OTU2、No. 1 CYA OTU3 和 No. 1 CYA OTU10 的克隆数较少, 仅有 1~3 个克隆。

基因文库的覆盖率 $C=75\% \sim 100\%$, 这个结果说明 247 个蓝藻克隆子文库已基本涵盖了各采样点上绝大多数的蓝藻类群。在 5 个采样点上, 采样点 3 上的 OTUs 的数量最多, 达到 10 个 OTUs(图 7)。

根据 Takeuchi 等^[2]之前的研究, 根据植物形态学的分类方法, 将 1 号冰川的蓝藻分为 3 类: Osci. L, Osci. S, Chro. 而根据分子生物学的方法, 可将 1 号冰川上蓝藻分为 10 个 OTUs, 这可能是由于基因多样性造成的, 即不同的基因序列最终表达为同一性状。

2.2.4.2 冰尘中的其他微生物

冰尘中除了蓝藻外, 还存在其他微生物, 还需进一步详细研究。

2.3 冰尘中有机部分与无机部分的比较

冰尘的粒径为 0.27~3.5 mm, 平均为 1.1 mm, 大多数冰尘的粒径集中在 1.0~1.2 mm 之间, 故单个冰尘颗粒的体积平均为 3.13 mm³。而冰尘中无机矿物颗粒的平均粒径仅为 2.18 μm, 且从微观角度分析单个冰尘颗粒中所含的无机矿物颗粒的颗粒数较少。经过估算, 在单个冰尘中无机矿物颗粒的总体积占该冰尘颗粒体积的比例较小, 而有机物质和微生物所占比例达到 70%~80%, 所占比例较大。另外, 从冰尘的 4 种主要内部结构可以看出, 冰尘中含有丰富的有机物质和大量的微生物, 而无机矿物颗粒只占了很小的部分, 无机矿物颗粒仅在类型 4 中含量较为丰富且粒径较大, 但这种类型的冰尘只占了冰尘总颗粒数的 15%。再者, 无机矿物颗粒的颜色为浅棕色、白色或是透明, 故冰尘的颜色主要是由有机物质和微生物所呈现的。由此可见, 在冰尘中, 有机物质和微生物占了绝大多数, 而无机矿物颗粒所占比例较少。因此, 影响冰川反照率的主要因素是冰尘中的有机部分, 包括有机物质和微生物。

3 结论

通过对 1 号冰川上冰尘的整体特征、冰尘中蓝

藻种类和冰尘中无机矿物颗粒的粒度特征的分析研究, 可得出如下结论:

(1) 冰尘数量与冰川消融区表面反照率之间存在明显的负相关关系, 说明冰尘对反照率具有显著的影响。

(2) 冰尘为棕色球状的聚合体, 粒径为 0.27~3.5 mm, 分布在冰川消融区表面, 其组成成分为有机质、无机矿物颗粒和微生物。冰尘颗粒有 4 种主要的内部结构: 类型 I, 具有同心层结构的冰尘; 类型 II, 带有亚颗粒的冰尘; 类型 III, 内部无明显结构的冰尘; 类型 IV, 中心位置处具有较大无机矿物颗粒的冰尘。

(3) 对冰尘中的蓝藻进行了 16S rRNA 基因序列的系统发育分析。结果表明, 共从蓝藻 16S rRNA 基因文库中筛选了 247 个阳性克隆, RFLP 分型得到 10 个不同的 OTUs。BLAST 比对, 系统发育分析将这 10 个 OTUs 归为: 颤藻目(Oscillatoriales)、色球藻目(Chroococcales)、未定种(Unclassified)。颤藻目为绝对优势类群, 占整个基因克隆文库的 91%。

(4) 冰尘中无机矿物颗粒的数量主要分布在 $d < 3.5 \mu\text{m}$ 的范围内, 且体积分布的粒径众数介于 3~25 μm。

(5) 在冰尘中, 有机物质和微生物占了绝大多数, 所占比例高达 70%~80%, 而无机矿物微粒所占比例较少。因此, 影响冰川反照率的主要因素是冰尘中的有机部分, 包括有机物质和微生物。

参考文献(References):

- [1] Takeuchi N, Li Zhongqin. Characteristics of surface dust on Ürümqi Glacier No. 1 in the Tien Shan Mountains, China[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2008, 40(4): 744-750.
- [2] Takeuchi N, Nishiyama H, Li Zhongqin. Structure and formation process of cryoconite granules on Ürümqi Glacier No. 1, Tien Shan, China[J]. Annals of Glaciology, 2010, 51(56): 9-14.
- [3] Takeuchi N, Matsude Y, Sakai A, et al. A large amount of biogenic surface dust (cryoconite) on a glacier in the Qilian Mountains, China [J]. Bulletin of Glaciological Research, 2005, 22: 1-8.
- [4] Takeuchi N, Kohshima S, Seko K. Structure, formation, and darkening process of albedo-reducing material (cryoconite) on a Himalayan glacier: A granular algal mat growing on the glacier[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2001, 33(2): 115-122.
- [5] Wharton R A, Jr., McKay C P, Simmons G M, Jr., et al.

- Cryoconite holes on glaciers[J]. *BioScience*, 1985, **35**(8): 499—503.
- [6] Takeuchi N, Kohshima S, Yoshimura Y, *et al.* Characteristics of cryoconite holes on a Himalayan glacier, Yala Glacier Central Nepal[J]. *Bulletin of Glaciological Research*, 2000, **17**: 51—59.
- [7] Haeberli W, Cihlar J, Barry R G. Glacier monitoring within the Global Climate Observing System[J]. *Annals of Glaciology*, 2000, **31**: 241—246.
- [8] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, *et al.* Response of melting ice to climate change in the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River, Tianshan Mountain[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, **3**(3): 132—137. [李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融对气候变化的响应[J]. *气候变化研究进展*, 2007, **3**(3): 132—137.]
- [9] Wei Lijia, Li Yuansheng, Tan Dejun, *et al.* Review of research on insoluble microparticles in the polar cores[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, **20**(2): 216—222. [韦丽佳, 李院生, 谭德军, 等. 极地冰芯不溶性微粒研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, **20**(2): 216—222.]
- [10] Wu Guangjian, Yao Tandong. Progress in studies on insoluble microparticle in ice cores[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(4): 528—538. [邬光剑, 姚檀栋. 冰芯中不溶微粒的研究进展[J]. *冰川冻土*, 2005, **27**(4): 528—538.]
- [11] You Xiaoni, Li Zhongqin, Wang Feiteng, *et al.* Seasonal evolution of insoluble microparticles stratigraphy in Glacier No. 1 percolation zone, eastern Tianshan, China[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(11): 1164—1170. [尤晓妮, 李忠勤, 王飞腾, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川不溶微粒的季节变化特征[J]. *地球科学进展*, 2006, **21**(11): 1164—1170.]
- [12] Dong Zhiwen, Ren Jiawen, Qin Dahe, *et al.* Chemistry characteristics and environmental significance of snow deposited on the Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(2): 327—335. [董志文, 任贾文, 秦大河, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积雪化学特征及环境意义[J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(2): 327—335.]
- [13] Zhang Kun, Li Zhongqin, Wang Feiteng, *et al.* Soluble mineral dusts in aerosol and surface snow on the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River, East Tianshan Mountains: Characteristics and their interrelation—taking calcium and magnesium as an example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(1): 113—118. [张坤, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积雪区气溶胶和表层雪中可溶性矿物粉尘的变化特征及相互关系——以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为例[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(1): 113—118.]
- [14] Gong Xiaoqian, Wu Guangjian, Zhang Chenglong, *et al.* Dust change over the Tibetan Plateau in recent years using ice core records and satellite remote sensing data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(2): 257—266. [宫晓倩, 邬光剑, 张成龙, 等. 基于冰芯记录与遥感数据的近期青藏高原粉尘变化研究[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(2): 257—266.]
- [15] Yang Junhua, Qin Xiang, Wu Jinkui, *et al.* Distribution and variation of spring snow cover in Laohugou watershed of the Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(5): 1091—1098. [杨俊华, 秦翔, 吴锦奎, 等. 祁连山老虎沟流域春季积雪属性的分布及变化特征[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(5): 1091—1098.]
- [16] Wang Jie, He Xiaobo, Ye Baisheng, *et al.* Variation of albedo on the Dongkemadi Glacier, Tanggula Range[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(1): 21—28. [王杰, 何晓波, 叶柏生, 等. 唐古拉山冬克玛底冰川反照率变化特征研究[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(1): 21—28.]
- [17] Yang Xingguo, Qin Dahe, Qin Xiang. Progress in the study of interaction between ice/snow and atmosphere[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(2): 392—402. [杨兴国, 秦大河, 秦翔. 冰川/积雪-大气相互作用研究进展[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(2): 392—402.]
- [18] Zhu Yuman, Li Zhongqin, You Xiaoni. Application in glacier by AccuSizer 780A optical particle sizer[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2006(3): 81—84. [朱宇漫, 李忠勤, 尤晓妮. AccuSizer 780A 光学粒径检测仪在冰川微粒研究中的应用[J]. *现代科学仪器*, 2006(3): 81—84.]
- [19] Yang Jiepin. Improvement of traditional paraffin section preparation methods[J]. *Journal of Biology*, 2006, **23**(1): 45—46. [杨婕频. 常用石蜡切片方法的改良[J]. *生物学杂志*, 2006, **23**(1): 45—46.]
- [20] Yan Peiying, Hou Shugui, Chen Tuo, *et al.* Comparison of methods for total DNA extraction of microorganisms in glacier surface snow [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(2): 478—484. [闫沛迎, 侯书贵, 陈拓, 等. 冰川表层雪样中微生物总 DNA 几种提取方法的比较研究[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(2): 478—484.]
- [21] Ma Xiaojun, Liu Wei, Hou Shugui, *et al.* Culturable bacteria in snow pits of different type glaciers: Diversity and relationship with environment[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(3): 483—489. [马晓军, 刘炜, 侯书贵, 等. 不同类型冰川雪中可培养细菌多样性变化及其与环境因子关系研究[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(3): 483—489.]
- [22] Segawa T, Takeuchi N. Cyanobacterial communities on Qiyi Glacier, Qilian Shan, China[J]. *Annals of Glaciology*, 2010, **51**(56): 153—162.

Characteristics and Formation Analysis of Cryoconite Granules: Take the Ürümqi Glacier No. 1 as an Example

XU Hui¹, LI Zhong-qin^{1,2}, Nozomu Takeuchi³, ZHANG Xiao-yu¹, ZHANG Guo-fei²

(1. *State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China*; 2. *College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China*;
3. *Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan*)

Abstract: 5 ice samples were taken from the Ürümqi Glacier No. 1, Tian Shan, China from July 2007 to June 2010. The samples were analyzed for the structure, formation process of cryoconite granules, cyanobacteria species and characteristics of mineral particles in cryoconite. It is found that granules were distributed over the entire ice surface of the ablation area, and ranged in size from 0.26 to 3.5 mm (mean 1.1 mm). It mainly consisted of organic matter, mineral particles and microbes. Microscopy of a thin section revealed four inner structures. Type I, most granules had concentric layers of dense organic matter, which are probably derived from annual growth of the granules by the activity of cyanobacteria. Type II, some granules contained two or more sub granules. Type III, there were also granules that had no specific internal structure. Type IV, some granules had relatively large mineral particles at their center. The 16S rRNA genes were amplified

from the total DNA by PCR with bacteria-specific primers and constructed a clone library. Positive clones were randomly selected from the library and identified by restriction fragment length polymorphism (RFLP). The unique RFLP pattern corresponded sequences were sequenced, BLAST and then constructed phylogenetic tree. In total, 247 positive clones were screened and grouped into 10 Operational Taxonomic Units (OTUs). 10 OTUs were divided into 3 phyla with Blast analysis and RDP classifier: Oscillatoriales, Chroococcales, Unclassified. Oscillatoriales (91%) was the absolutely dominant group. Mean mass concentration of mineral particles is $d < 3.5 \mu\text{m}$. Volume size distributions of mineral particles showed single-modal structures having volume median diameters from 3 to 25 μm . There have abundant organic matter and microbe in cryoconite. Thus, the main factor of lower albedo is organic part, include organic matter and microbes.

Key words: cryoconite; organic material; cyanobacteria; mineral particles; albedo