

天山哈密榆树沟冰川冰尘特征及其成因

许慧¹, 李忠勤^{1,2}, Nozomu Takeuchi³, 张晓宇¹, 洛书飞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, 千叶 263-8522)

摘要: 利用2011年8月在哈密榆树沟冰川采集的5个冰样, 通过石蜡切片技术、16SrRNA系统发育分析及无机颗粒粒度分析方法, 结合野外考察, 对榆树沟冰川冰尘(cryoconite)的结构特征及形成过程进行了分析研究。结果表明, 榆树沟冰川冰尘粒径为0.22~2.9 mm, 由有机部分(蓝藻、有机质)与无机部分(无机矿物颗粒)结合形成球状聚合体, 它的生长具有季节性并且具有生长、裂解交替循环的生命周期。通过核糖体DNA扩增片段限制性内切酶分析(Amplified Ribosomal DNA Restriction Analysis, ARDRA), 将蓝藻16SrRNA基因文库中的214个阳性克隆分为9个不同的操作分类单元(Operational Taxonomic Units, OTUs)。经过基因测序、BLAST比对及系统发育分析将9个OTUs归为: 颤藻目、色球藻目和未定类群, 其中颤藻目为冰尘中蓝藻的绝对优势类群。冰尘中无机矿物颗粒($d < 3.5 \mu\text{m}$)在数量上占绝对优势, 体积分布的粒径众数值为 $14 \mu\text{m}$, 较其它冰川而言, 粒径众数较大。经估算, 冰尘中有机部分所占比例明显大于无机颗粒, 故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。

关键词: 榆树沟冰川; 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

文章编号: 1000-6060(2014)03-0429-10(429~438)

DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.03.003

冰川在中国西北干旱区被喻为固体水库, 是维持生产、生活的主要水资源之一, 直接制约社会经济的发展^[1]。新疆地处中国西北内陆干旱区, 冰川水资源居全国第一, 在新疆水资源构成中占有重要地位, 然而最近30 a, 随着全球气候变暖, 冰川出现了加剧退缩的趋势^[2-7]。目前的研究表明, 新疆地区的1 800条冰川, 在过去26~44 a间, 总面积缩小了11.7%, 平均每条冰川缩小0.243 km², 末端退缩速率5.8 m/a。冰川在新疆不同区域的缩小比率为8.8%~34.2%, 单条冰川的平均缩小量为0.092~0.415 km², 末端平均后退3.5~10.5 m/a^[2, 8-10]。冰川加剧退缩这一变化引起了人们的普遍关注和忧虑。冰尘是冰川消融区表面的主要污化物质之一, 由有机物质、无机矿物颗粒及微生物聚合形成, 在冰川退缩过程

中起着十分重要的作用^[11-15]。根据李忠勤等的研究, 除了气温升高, 冰川加剧退缩的另一重要原因是冰川表面反照率的降低, 而冰尘作为冰川表面的主要污化物质之一, 对冰川表面反照率有显著影响。目前关于影响冰川反照率的研究主要集中在黑炭、粉尘等^[16-19], 而对冰尘的研究鲜见报道。因此研究冰川表面冰尘颗粒的结构特征与形成过程就显得极为重要。

2005年中日科学家在中国科学院天山冰川观测站进行了合作交流, 探讨了冰尘的形态结构、冰尘中蓝藻的种类等。本文基于之前的研究, 进一步分析了冰尘中无机矿物颗粒的粒度特征。综合分析冰尘的3种要素在冰尘中的构成比例, 讨论了影响冰川反照率的主要因素。

收稿日期: 2013-07-19; 修订日期: 2013-09-26

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(超级973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(51Y251B51)资助

作者简介: 许慧(1988-), 女, 甘肃金昌人, 硕士研究生, 研究方向为冰川冰芯与全球气候变化。Email: xuhui1988828@163.com

通讯作者: 李忠勤, 研究员, 博导, 主要从事冰川与环境方面的研究。Email: lizq@lzb.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

榆树沟冰川(43°04.46' N, 94°18.94' E)在中国冰川编目上为榆树沟6号冰川(编码为5Y822B6), 本文将其简称为榆树沟冰川。榆树沟冰川位于天山山脉东部喀尔里克山南坡, 哈密盆地以北, 西与故乡河流域为邻, 东接庙尔沟流域(图1)。冰川最高海拔4744 m, 冰舌末端海拔3610 m, 雪线海拔4170 m左右, 面积4.06 km², 长度4.3 km, 冰储量约为0.28 km³[20-21]。

1.2 样品采集

2011年8月, 在哈密榆树沟冰川东支消融区不同海拔共采集5个冰样, 样品采集海拔高度依次为3798 m、3816 m、3840 m、3851 m、3887 m。采样过程严格按照冰雪采样程序进行, 前人已有详述[22-23]。部分样品密封后在冷冻状态下运往日本千叶大学地球科学部门分析中心进行冰尘特征的研究及蓝藻种类的鉴别, 另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进行无机矿物颗粒的粒度测定。

1.3 研究方法

冰尘颗粒的外部特征在显微镜下进行观察, 内部结构分析利用石蜡切片技术[15-24]。冰尘中蓝藻种类的鉴定利用分子生物学技术手段[25-26], 大致实验步骤:(1)蓝藻DNA的提取与纯化;(2)PCR扩增蓝藻16SrRNA;(3)蓝藻16SrRNA基因克隆文库的构

建及阳性克隆的筛选;(4)克隆文库ARDRA分型及测序;(5)构建系统发育树。冰尘中无机颗粒粒度特征分析使用Accusizer 780A光学粒径检测仪, 该仪器测量微粒的范围是0.57~400 μm[27-28]。分析前在室温下将样品融化, 然后将冰尘置于30%的H₂O₂水中处理24 h, 此过程目的为提取冰尘中的无机矿物颗粒。实验从融化、取样、注样到分析整个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[28]。

2 结果与分析

2.1 冰尘(cryoconite)形成过程

冰尘是在冰川消融、有机质繁殖和无机颗粒的参与作用下共同形成的。在冰川消融期(5~10月)随着冰川消融区表面融水径流剧增, 蓝藻开始大量繁殖, 丝状蓝藻开始缠绕包裹附近的无机矿物颗粒, 将无机颗粒包裹其中进而形成黑色或棕色的球状颗粒, 此时的冰尘颗粒是冰尘的初始状态。同时, 丝状蓝藻开始进行光合作用而产生大量有机物质, 产生的有机物质也被丝状蓝藻包裹进入冰尘颗粒中, 此时形成了具有一般性结构的冰尘: 颗粒表面有丝状蓝藻包裹, 内部均匀分布无机颗粒和有机物质。到冬季(11~次年4月), 由于冰川上没有融水支持, 部分冰尘颗粒会进入休眠阶段而停止生长, 另一部分冰尘颗粒会发生裂解, 裂解形成的碎片在生长期重新发育成新的冰尘。冰尘的生长具

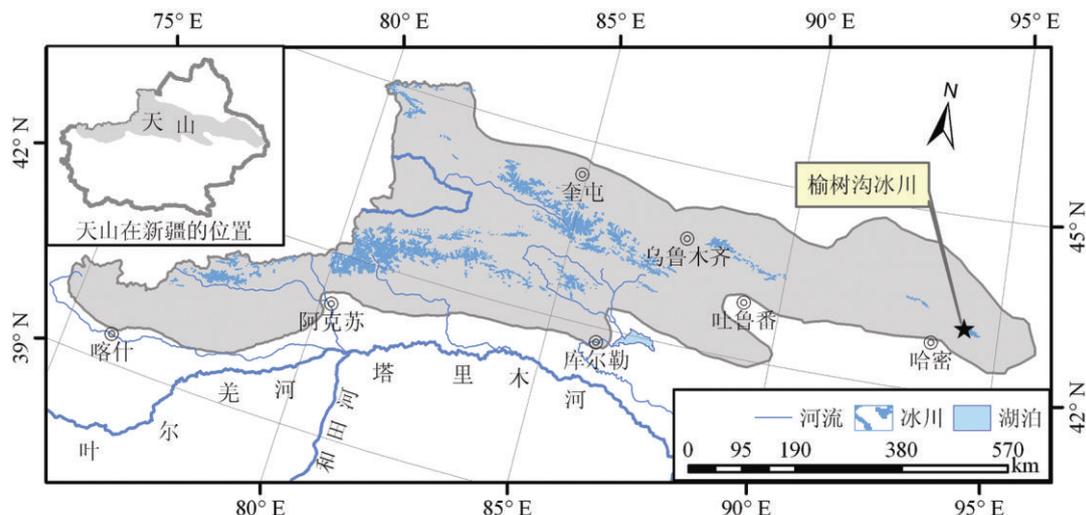


图1 哈密榆树沟冰川地理位置示意图

Fig.1 Geographic environment of Yushugou Glacier, HaMi

有季节性并且具有生长、裂解交替循环的生命周期。除了一般性结构的冰尘,还有同心层结构的冰尘,带有亚颗粒的冰尘和中心位置具有较大无机颗粒的冰尘。不同结构类型的冰尘颗粒在形成时所处外界环境条件不同。

哈密榆树沟冰川冰尘的粒径介于0.22~2.9 mm,平均值为1.0 mm,单颗粒体积平均为4.19 mm³,其中无机矿物颗粒的平均粒径仅为3.28 μm且从微观分析得出单个冰尘颗粒中所含的无机矿物颗粒的颗粒数较少。因此,该冰川冰尘中有机部分所占比例明显大于无机颗粒,这也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。

2.2 冰尘(cryoconite)中的有机部分 蓝藻 16SrRNA 基因序列的系统发育特征

表1和图2为哈密榆树沟冰川冰尘中蓝藻16SrRNA基因序列的比对结果及系统发育树。

可见,从蓝藻16SrRNA基因文库中筛选的214个阳性克隆可分为9个不同的操作分类单元(Operational Taxonomic Units, OTUs),且9个操作分类单元归为:颤藻目(6个操作分类单元,占整个基因克隆文库的95.8%),色球藻目(1个操作分类单元,占

整个克隆文库的0.47%),未定类群(2个操作分类单元,占整个克隆文库的3.73%)。蓝藻16SrRNA克隆文库中共有205个克隆(6个操作分类单元)属于颤藻目(Oscillatoriales),并且这一类群所有序列与公共数据库中的序列相似性都能达到96%~99%,其中大部分达到97%以上。在这6个操作分类单元中(以下操作分类单元1~9分别用YG CYA OTU1~9表示),YG CYA OTU3、YG CYA OTU4、YG CYA OTU7的克隆数在基因克隆文库中均已超过35个克隆,其中YG CYA OTU3的克隆数占总克隆数的51.4%,YG CYA OTU4的克隆数占总克隆数的17.8%,YG CYA OTU7的克隆数占总克隆数的22%,说明这3种藻类是颤藻目中的主要类群。另外,仅发现YG CYA OTU1(1个克隆数)属于色球藻目(Chroococcales),与亚球形管孢藻(*Chamaesiphon subglobosus* PCC7430)具有97%的相似性。未定种有2个操作分类单元(8个克隆数),YG CYA OTU8、YG CYA OUT 9与Uncultured bacterium 179b-45, Uncultured bacterium 1790-7的相似性分别为98%、96%。结果表明,颤藻目(Oscillatoriales)为榆树沟冰川冰尘中蓝藻的绝对优势类群。

表1 哈密榆树沟冰川冰尘中蓝藻16SrRNA基因序列比对结果

Tab.1 Blast search results of the 16SrRNA of cyanobacterial species detected in Yushugou Glacier sample

操作分类单元	相似序列	相似性/%	对应的蓝藻种类
YG CYA OTU1	<i>Chamaesiphon subglobosus</i> PCC7430	97	色球藻目
YG CYA OTU2	Uncultured cyanobacterium clone A206	98	颤藻目
	<i>Geitlerinema carotinosum</i> AICB37	98	颤藻目
YG CYA OTU3	Uncultured bacterium clone ANTLVI H06	99	颤藻目
	Uncultured cyanobacterium clone RD011	99	颤藻目
	<i>Pseudanabaena anstantiae</i> KM1c	97	颤藻目
YG CYA OTU4	<i>Phormidium</i> sp.Ant-Orange	99	颤藻目
	<i>Phormidium</i> sp.Ant-Lunch	99	颤藻目
	<i>Microcoleus vaginatus</i> SRS1-KK2	99	颤藻目
	<i>Microcoleus vaginatus</i> CJI-U2-KK2	99	颤藻目
YG CYA OTU5	同YG CYA OTU4		
YG CYA OTU6	<i>Phormidium</i> sp.E18	97	颤藻目
	<i>Limnothrix redekei</i> CCAP 1443/1	98	颤藻目
YG CYA OTU7	Uncultured cyanobacterium H-BO	96	颤藻目
	Uncultured Antarctic bacterium clone LMMI-4	97	颤藻目
	<i>Leptolyngbya</i> sp.SV1-MK-52	97	颤藻目
YG CYA OTU8	Uncultured bacterium 179b-45	98	未定类群
	Uncultured bacterium 1790-7	96	未定类群
YG CYA OTU9	同YG CYA OTU8		

注:操作分类单元1~9分别用YG CYA OTU1~9表示

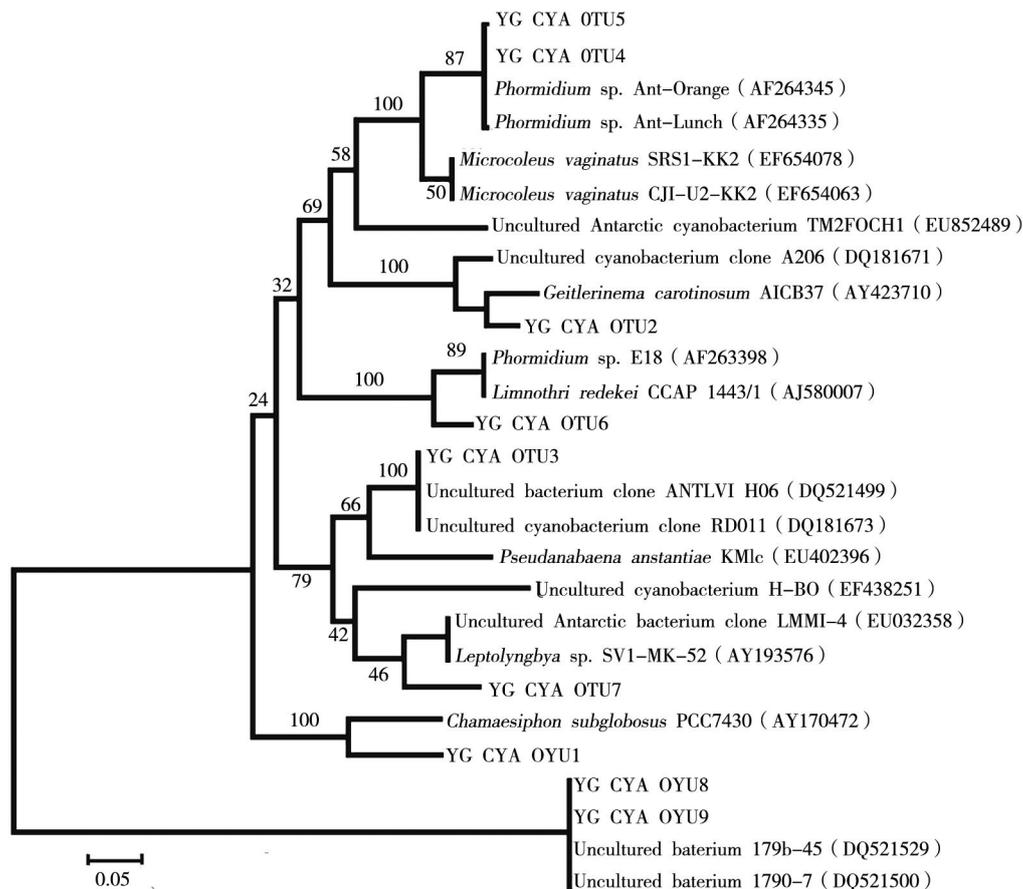


图2 邻接树法构建哈密榆树沟冰川冰尘中蓝藻 16SrRNA 基因克隆文库系统发育树
(注 操作分类单元 1~9 分别用 YG CYA OTU1~9 表示)

Fig.2 Phylogenetic relationships of the cyanobacterium 16SrRNA gene sequences obtained from the clone library of the Yushugou Glacier. Bootstrap values generated from 1 000 replicates using the neighbor-joining method are shown at the nodes
(Operational Taxonomic Unites 1~9 is expressed as YG CYA OTU1~9 respectively)

图3为冰尘中蓝藻的各操作分类单元在各采样点上的分布情况。从图中可见, YG CYA OTU1 仅存在于采样点 S1 处, YG CYA OTU2 存在于采样点 S1、S4 处且其克隆数所占比例均小于 10%, YG CYA OTU3 除 S5 外其余各点均有分布且克隆数所占比例均超过 30%, YG CYA OTU5、YG CYA OTU6 在各采样点处的克隆数都较少, YG CYA OTU7 的克隆数随着海拔的升高而逐渐减少, 表现出空间分布特征。YG CYA OTU8、YG CYA OTU9 仅存在于 S5 处, 且该处仅有这 2 种类型。

2.3 冰尘(cryoconite)中的无机部分 无机矿物颗粒的粒度特征

榆树沟冰川冰尘中无机矿物颗粒的整体粒径特征如图 4(a)所示, 该冰川冰尘中无机颗粒的粒径主要分布在 0.57~80 μm 之间, 89.5% 的无机颗

粒粒径集中分布在 0.6~3.5 μm 之间。图 4(b)是榆树沟冰川冰尘中无机颗粒数目-粒径分布与乌鲁木齐河源(以下简称乌源)1 号冰川、青冰滩 72 号冰川的比较, 可以看出榆树沟冰川冰尘中无机矿物颗粒 ($d < 3.5 \mu\text{m}$) 在数量上占绝对优势且细颗粒的数目介于乌源 1 号冰川与青冰滩 72 号冰川之间。图 4(c)是榆树沟冰川、青冰滩 72 号冰川及乌源 1 号冰川的体积粒径分布状况比较, 结果表明榆树沟冰川冰尘中无机矿物颗粒体积分布的粒径众数介于 3~25 μm , 分布是单一模式。在无机颗粒的粒径分布趋势上这 3 个冰川上极为相似, 但在体积-粒径分布的众数值有所差别, 哈密榆树沟冰川最大 (14 μm) 托木尔峰青冰滩 72 号冰川次之 (13 μm), 乌源 1 号冰川最小 (11 μm), 主要由周围物质来源及冰川消融程度不同造成的。

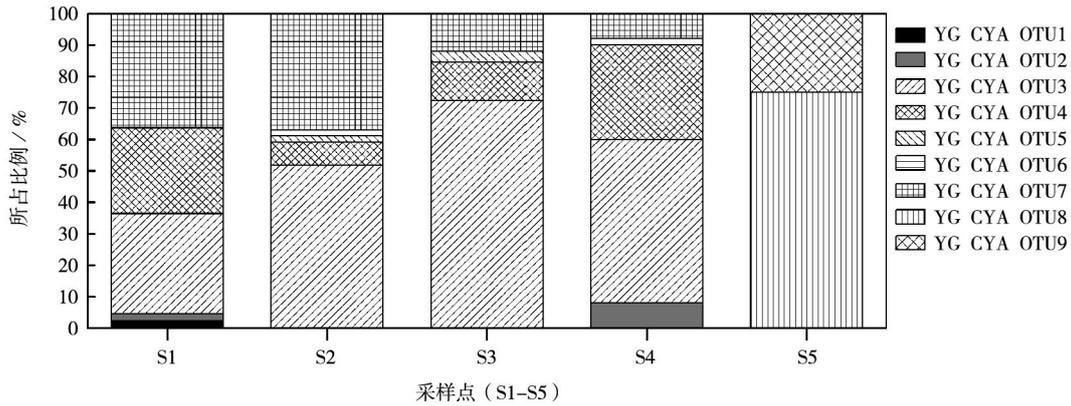


图3 榆树沟冰川上蓝藻种群中的各操作分类单元的克隆数在各采样点(S1-S5)上所占比例
(注 操作分类单元1~9分别用YG CYA OTU1~9表示)
Fig.3 Percentage abundance of OTUs in the cyanobacterial communities at S1-S5 on Yushugou Glacier
(Operational Taxonomic Unites1-9 is expressed as YG CYA OTU1-9 respectively)

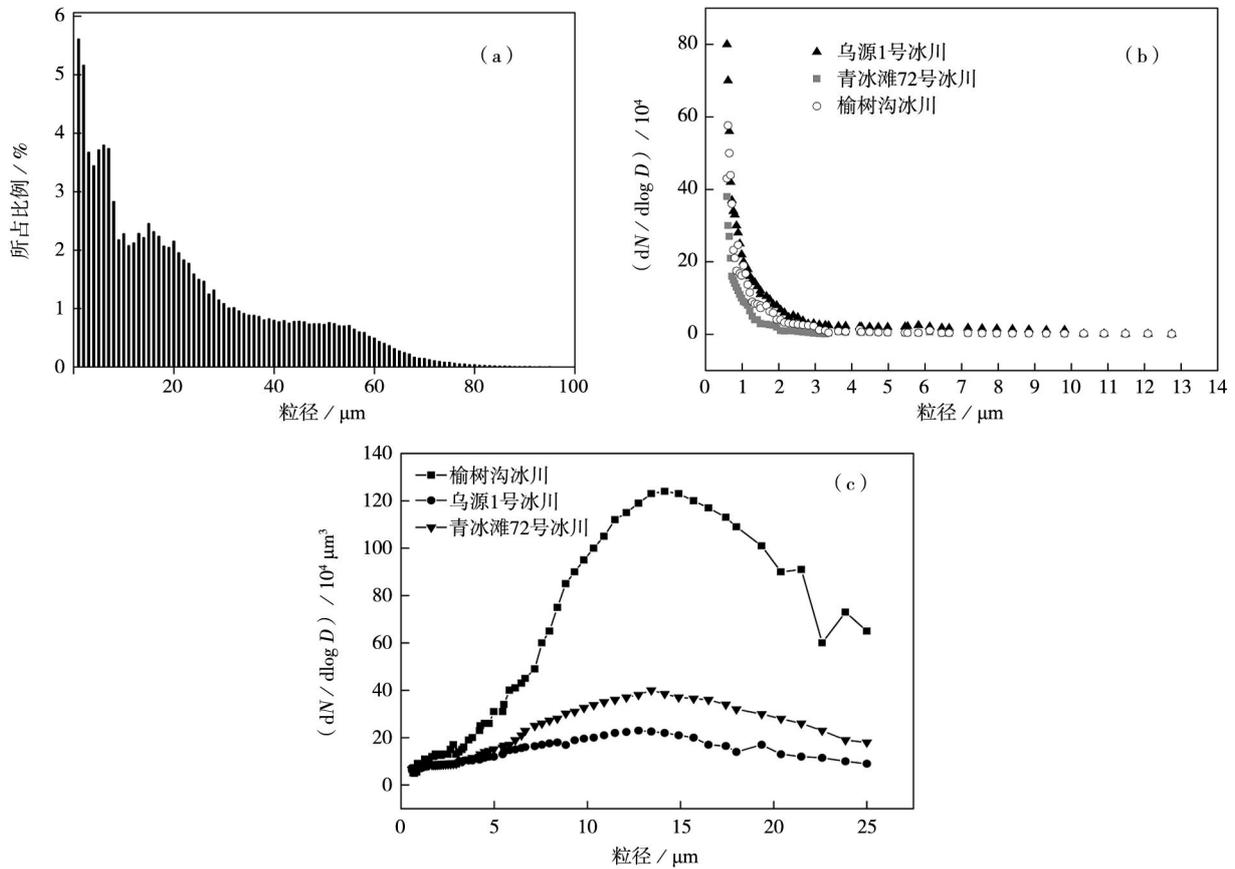


图4 榆树沟冰川无机矿物颗粒的分布(a)整体粒径分布 (b)数目粒径分布比较 (c)体积粒径分布比较
Fig.4 Distribution of mineral particles of Yushugou Glacier (a)Total size distribution ,
(b) Comparison of number-size (c) Comparison of volume-size

3 讨论

3.1 冰尘分布特征

冰尘主要通过改变冰川表面的反照率影响着

冰川的消融。将榆树沟冰川的冰尘数量及冰川表面反照率与其它地区的冰川进行比较(图5)^[11-15],可见冰尘数量与反照率之间存在明显的负相关关系,即冰尘越多,冰川表面反照率越低。同时还发现中

亚冰川上冰尘的数量明显多于其它地区冰川,如 AX010 冰川、萨姆巴冰川、雅拉冰川位于喜马拉雅山地区,榆树沟冰川和乌源1号冰川位于天山地区,2者均处于亚洲内陆的粉尘源区(我国塔克拉玛干沙漠、北方的蒙古沙漠、大戈壁),每年周边的粉尘源区会向这2个冰川区输入大量的不溶性微粒,与距离较远的北极地区的 Penny 冰帽、阿拉斯加地区的 Gulkana 冰川及巴塔哥尼亚地区的 Tyndall 冰川相比,这2个冰川区的粉尘浓度值较高。有研究表明,粉尘在随大气传输过程中,传输距离越远,粒度分选会越好,则雪中粉尘微粒的浓度和沉积通量值会越小^[23]。与北极地区相比,由于榆树沟所处的地理位置,大气的气溶胶微粒的传输、沉积经历途径较短,因此,榆树沟冰川表面的无机矿物颗粒表现为高浓度。根据 Takeuchi 等的研究,阿拉斯加和喜马拉雅冰川上蓝藻的平均生物量分别是 0.52 ml/m^2 、 0.42 ml/m^2 ,它们的生物量相差不大^[12]。作为冰尘形成过程中2个必不可少的元素(无机矿物颗粒和蓝藻),在蓝藻生物量相差不大的情况下,阿拉斯加冰川上冰尘的数量却远远小于喜马拉雅山冰川,说明无机矿物颗粒在冰尘形成过程中起着十分重要的作用。因此,中亚冰川上冰尘数量明显多于其它地区冰川冰尘的原因可能是中亚地区冰川上高浓度的无机矿物颗粒。

野外观测和冰尘的内部结构可以揭示出冰尘的形成过程,但蓝藻与无机矿物颗粒为何以此种形式结合成冰尘颗粒的机理尚不明确,有待进一步详细研究。

3.2 冰尘中蓝藻多样性分布及时空分布特征

蓝藻广泛分布于南北半球的冰川上,但它们在

各个冰川上的种类及生物量可能不同,这种冰川优势菌群的差异性反映了冰川上环境条件对蓝藻分布的影响^[29-30]。榆树沟冰川上蓝藻的种类包括颤藻目(Oscillatoriales)、色球藻目(Chroococcales)及未定类群,其中颤藻目为绝对优势类群,蓝藻种群结构的这种分布是与榆树沟冰川区气候环境条件相互作用相互适应的结果。冰川上蓝藻的分布除了具有区域差异性外,它的种类及生物量也随海拔的变化而变化。在本研究结果中,不同采样点处蓝藻的种类及克隆数不同。哈密榆树沟冰川上蓝藻群落呈现3个分布区域:冰川消融区末端(3798 m)主要分布有颤藻目和色球藻目。冰川消融区中段(3816~3851 m)主要分布有颤藻目,消融区上部(3887 m)分布有颤藻目和未定种。色球藻目仅存在于冰川消融区末端,这与冰川末端的微环境条件密不可分,可能是由于冰川末端的融水、温度等条件适宜该种蓝藻的生长。同时3个区域都有颤藻目蓝藻生长,说明颤藻目蓝藻对环境条件的耐受范围较宽,在冰川消融区的各个位置都可以生长。除此之外,研究还发现海拔越高,蓝藻群落种类越少,在本研究中采样点 S5 处仅分布有2个种类,可能是由于高海拔处气温较低、融水不充足,各种环境条件都不适宜大多数蓝藻的生长,只有少部分蓝藻可以生长。蓝藻是冰川上的初级生产者,主要靠大气粉尘向冰川输入,它能通过光合作用及固定大气中的游离氮来合成其它有机物,对冰川上有机物的积累起着重要作用^[31]。蓝藻为冰川上其它微生物及动物提供食物,所以在一定程度上可以认为蓝藻随环境的变化会导致其他生物也随之发生变化。本研究中,蓝藻对于冰尘形成的主要贡献为将有机物质

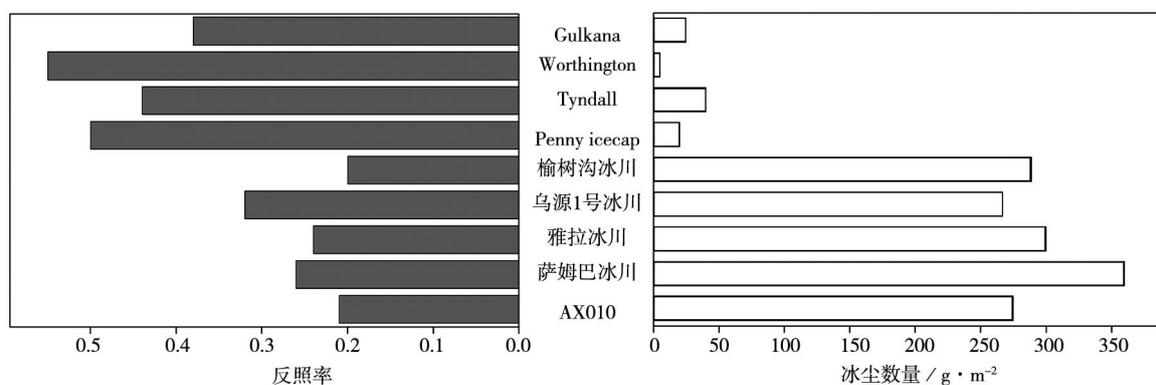


图5 几个冰川的冰尘数量及冰川表面反照率的比较

Fig.5 Comparison of the amount of cryoconite and albedo of glacier surface among some glaciers

及无机矿物颗粒缠绕包裹于其中,并且可以提供冰尘的一种组成成分-有机物质。蓝藻对于冰尘的形成具有十分重要的作用。

冰尘颗粒中除了蓝藻外,还存在其它的雪藻和微生物,其余的微生物还需进一步详细研究。

3.3 无机矿物颗粒的分布特征

本研究中通过无机矿物颗粒整体粒径分布特征和数目-粒径分布,发现榆树沟冰川冰尘中粒径 $<3.5\ \mu\text{m}$ 的无机矿物颗粒占绝对优势,说明榆树沟冰川上参与冰尘形成的无机矿物颗粒主要为粒径 $<3.5\ \mu\text{m}$ 的微粒。榆树沟冰川冰尘中无机颗粒与其它2个点微粒的数目-粒径比较,发现榆树沟冰川、青冰滩72号冰川上细颗粒的数目明显少于乌源1号冰川,可能是由于托木尔峰地区与哈密地区距离中亚沙尘源区较近所致。根据董志文等的研究,哈密庙尔沟平顶冰川上微粒的数目粒径主要集中在 $0.57\sim 3.5\ \mu\text{m}$ ^[16],哈密榆树沟冰川和哈密庙尔沟平顶冰川上微粒数目随粒径分布的范围较为相似,其原因为两者的地理位置接近。通过微粒体积-粒径众数分布的研究发现榆树沟冰川体积粒径众数值介于 $3\sim 25\ \mu\text{m}$ 之间,分别为单一模式。体积粒径分布反映了稳定状态时,大气气溶胶微粒的粒径组成,可以表现大气浮质状况,与大气环境有密切关系^[16-19]。颗粒粒径分布有单一模式和多结构模式,单一模式反映了来源的单一性,而多结构模式反映了来源的复杂性^[16-19],说明哈密榆树沟冰川冰尘中的无机颗粒主要来源于单一的沙尘源地。微粒的体积粒径分布在全球个冰川上都有研究。北极地区的Penny冰帽冰雪中的粉尘粒径众数值约为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ^[23],天山山区各冰川冰雪中的粉尘粒径众数值介于 $3\sim 25\ \mu\text{m}$ 之间。其中哈密榆树沟冰川冰雪中粉尘粒径众数值为 $14\ \mu\text{m}$,托木尔峰青冰滩72号冰川为 $13\ \mu\text{m}$,乌源1号冰川为 $11\ \mu\text{m}$ 。北极地区与天山山区各冰川冰雪中粉尘的粒径众数值表现出巨大的差别,其主要原因可能是北极地区与天山山区与粉尘源区的距离不同,北极地区远离粉尘源区,而天山山区位于中亚粉尘源区,其可能的粉尘源区为塔克拉玛干沙漠、柴达木盆地沙漠及蒙古沙漠大戈壁等。一般情况下,粒径众数较大的冰川一般更接近粉尘源区,所以粉尘源区对冰川的影响大小为:哈密榆树沟冰川>托木尔峰青冰滩72号冰川>乌源1号冰川。

4 结 论

通过对榆树沟冰川冰尘的结构特征及形成过程的分析研究可得出如下结论:

(1) 榆树沟冰川冰尘粒径介于 $0.22\sim 2.9\ \mu\text{m}$,成分为有机质、无机矿物颗粒及微生物,具有季节性并且具有生长、裂解交替循环的生命周期。

(2) 核糖体DNA扩增片段限制性内切酶分析(ARDRA)将蓝藻16SrRNA基因文库中的214个阳性克隆分为9个不同的操作分类单元(Operational Taxonomic Unites, OTUs)。经过基因测序、BLAST比对及系统发育分析将9个OTUs归为:颤藻目(6个OTUs,占整个基因克隆文库的95.8%),色球藻目(1个OTU,占整个克隆文库的0.47%),未定类群(2个OTUs,占整个克隆文库的3.73%),颤藻目为绝对优势类群。

(3) 冰尘中无机矿物颗粒($d < 3.5\ \mu\text{m}$)在数量上占绝对优势,体积分布的粒径众数值为 $14\ \mu\text{m}$ 。

(4) 在冰尘中,有机物质和微生物占了绝大多数,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] 李忠勤,沈永平,王飞腾,等.冰川消融对气候变化的响应——以乌鲁木齐河源1号冰川为例[J].冰川冻土,2007,29(3):333-342.[LI Zhongqin, SHEN Yongping, WANG Feiteng, et al. Response of glacier melting to climate change: take Urumqi Glacier No.1 as an example[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 333-342.]
- [2] 李忠勤,李开明,王林,等.新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J].第四纪研究,2010,30(1):96-106.[LI Zhongqin, LI Kaiming, WANG Lin, et al. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, North Western China[J]. Quaternary Science, 2010, 30(1): 96-106.]
- [3] HAEBERLI W, BARRY R, CILHIAR J. Glacier monitoring within the Global Climate Observing System[J]. Annals of Glaciology, 2000, 31: 241-246.
- [4] 孙美平,李忠勤,姚晓军,等.近50 a来乌鲁木齐河源区径流变化及其机理研究[J].干旱区地理,2012,35(3):430-437.[SUN Meiping, LI Zhongqin, YAO Xiaojun, et al. Runoff variation and mechanism at headwaters of Urumqi River in recent 50 years[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 430-437.]

- [5] 龙爱华, 邓铭江, 谢蕾, 等. 气候变化下新疆及咸海流域河川径流演变及适应性对策分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 378-387. [LONG Aihua, DENG Mingjiang, XIE Lei, et al. Exploring analysis on the adaptive countermeasures to water resources evolution under the climate change in Xinjiang and Aral Sea Basin [J]. Arid Land Geograph, 2012, 35(3): 378-387.]
- [6] 陈志升, 陈亚宁, 徐长春, 等. 近50 a来塔里木河干流径流量变化趋势及预测[J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 43-51. [CHEN Zhongsheng, CHEN Yaning, XU Changchun, et al. Change trend and prediction of annual runoff in mainstream area of the Tarim River in recent 50 years [J]. Arid Land Geograph, 2011, 34(1): 43-51.]
- [7] 李加强, 陈亚宁, 李卫红, 等. 天山北坡中小河川降水与径流变化特征-以精河为例[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 615-622. [LI Jiaqiang, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Variation features of precipitation and runoff of the middle- small river of northern piedmont of Tianshan Mountains: a case of Jinghe River [J]. Arid Land Geograph, 2010, 33(4): 615-622.]
- [8] 王璞玉, 李忠勤, 李慧林, 等. 气候变暖背景下典型冰川储量变化及其特征分析-以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1189-1198. [WANG Puyu, LI Zhongqin, LI Huilin, et al. Ice volume changes and their characteristics for representative glacier against the background of climatic warming: a case study of Urumqi Glacier No.1, Tianshan, China [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(7): 1189-1198.]
- [9] 王璞玉, 李忠勤, 李慧林, 等. 近期天山不同地区典型冰川厚度及储量变化分析[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 929-940. [WANG Puyu, LI Zhongqin, LI Huilin, et al. Changes of Ice-thickness and volume for representative glaciers in Tianshan Mountains in the past 50 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(7): 929-940.]
- [10] 白金中, 李忠勤, 张明军, 等. 1959-2008年新疆阿尔泰山友谊峰地区冰川变化特征[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 117-124. [BAI Jinzhong, LI Zhongqin, ZHANG Mingjun, et al. Glacier changes in Youyi Area in the Altay Mountains of Xinjiang during 1959-2008 [J]. Arid Land Geograph, 2012, 35(1): 117-124.]
- [11] TAKEUCHI N, KOHSHIMA S, SEKO K, et al. 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.
- [12] TAKEUCHI N, KOHSHIMA S. A snow algal community on Tyn-dall Glacier in the southern Patagonia Icefield, Chile [J]. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 2004, 36(1): 92-99.
- [13] 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.
- [14] TAKEUCHI N, LI Zhongqin. Characteristics of surface dust on Urumqi Glacier No.1 in the Tien Shan Mountains, China [J]. Arctic, Antarctic and Alpine Research, 2008, 40(4): 744-750.
- [15] TAKEUCHI N, NISHIYAMA H, LI Zhongqin. Structure and formation process of cryoconite granules on Urumqi glacier No.1, Tien Shan, China [J]. Annals of Glaciology, 2010, 51(56): 9-14.
- [16] 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山东部冰川积雪中大气粉尘的沉积特征[J]. 地理学报, 2008, 63(5): 544-552. [DONG Zhiwen, LI Zhongqin, WANG Feiteng, et al. Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of East Tianshan Mountains, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(5): 544-552.]
- [17] 董志文, 李忠勤, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源冰川积雪内不溶粉尘特征: 沙尘与沙尘活动季节的比较[J]. 环境科学, 2009, 30(6): 1819-1825. [DONG Zhiwen, LI Zhongqin, WANG Feiteng, et al. Characteristics of atmospheric dust deposited in snow on Urumqi Glacier No.1 of Eastern Tianshan, China: a comparison of measurements during asian dust period with non-dust period [J]. Environmental Science, 2009, 30(6): 1819-1825.]
- [18] 董志文, 李忠勤, 张明军, 等. 哈密庙尔沟平顶冰川积雪中粉尘微粒沉积特征[J]. 环境化学, 2010, 29(3): 353-357. [DONG Zhiwen, LI Zhongqin, ZHANG Mingjun, et al. Characteristics of water insoluble dust deposition in snow on the Miaogou glaciers in Tianshan, China [J]. Environmental Chemistry, 2010, 29(3): 353-357.]
- [19] 董志文, 秦大河, 任贾文, 等. 祁连山西段冰川积雪中大气粉尘沉积特征[J]. 地理学报, 2013, 68(1): 25-35. [DONG Zhiwen, QIN Dahe, REN Jiawen, et al. Characteristics of atmospheric dust deposition in snow on the glaciers of western Qilian Mountains, China [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(1): 25-35.]
- [20] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005. [SHI Yafeng. The concise glacier inventory of China [M]. Shanghai: Shanghai Science Popularization Press, 2005.]
- [21] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录()天山山区(东部散流内流区)[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 67-80. [Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences. Chinese Glacier Inventory (III) in the Tianshan Mountain (eastern sector flow stream) [M]. Beijing: Science Press, 1986: 67-80.]
- [22] KAZUO O, HAJIME I, MIZUKA K M, et al. Mineral dust layers in snow at Mount Tateyama, central Japan: Formation processes and characteristics [J]. Tellus, 2004, 56B: 382-392.
- [23] ZDANOWICZ C M, ZIELINSKI G A, WAKEC P, et al. Characteristics of modern atmospheric dust deposition in snow on the Penny Ice Cap, Baffin Island, Arctic Canada [J]. Tellus, 1998, 50B: 506-520.
- [24] 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. [YANG Jiepin. Improvement of traditional paraffin section preparation methods [J]. Journal of Biology, 2006, 23(1): 45-46.]

- [25] SEGAWA T ,TAKEUCHI N. Cyanobacterial communities on Qiye glacier ,Qilian Shan ,China[J]. *Annals of Glaciology* ,2010 ,51 (56) :153-162.
- [26] 刘玮琦 ,卯振川 ,杨宇红 ,等. 应用16SrRNA 基因文库技术分析土壤细菌群落的多样性[J]. *微生物学报* ,2008 ,48(10) :1344-1350.[LIU Weiqi ,MAO Zhenchuan ,YANG Yuhong ,et al. Analysis of soil bacterial diversity by using the 16S rRNA gene library [J]. *Acta Microbiologica Sinica* ,2008 ,48(10) :1344-1350.]
- [27] 尤晓妮 ,李忠勤 ,王飞腾 ,等. 乌鲁木齐河源1号冰川不溶性微粒的季节变化特征[J]. *地球科学进展* ,2006 ,21(11) :1164-1170.[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.]
- [28] 朱宇漫 ,李忠勤 ,尤晓妮. 利用光学粒径检测仪测定雪冰样品中的微粒[J]. *现代科学仪器* ,2006 ,(3) :81-84.[ZHU Yuman ,LI Zhongqin ,YOU Xiaoni. Application in glacier by AccuSizer 780A optical particle sizer [J]. *Modern Scientific Instruments* ,2006 ,(3) :81-84.]
- [29] BROADY P A ,WEINSTEIN R N. Alage ,lichens and fungi in La Gorce Mountains ,Antarctica[J]. *Antarctic Science* ,1998 ,10(4) :376-385.
- [30] 向述荣 ,姚檀栋 ,陈勇 ,等. 冰川微生物菌群分布的研究概况及其前景[J]. *生态学报* ,2006 ,26(9) :3098-3107.[XIANG Shurong ,YAO Tandong ,CHEN Yong ,et al. Progresses of community distribution of microorganisms in glacier[J]. *Acta Ecologica Sinica* ,2006 ,26(9) :3098-3107.]
- [31] 张威 ,章高森 ,刘光琇 ,等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川中真核微生物多样性多样性分布及时空变化研究[J]. *冰川冻土* ,2010 ,32(5) :907-913.[ZHANG Wei ,ZHANG Gaosen ,LIU Guangxiu ,et al. Diversity and its temporal-spatial characteristics of eukaryotic microorganisms on Glacier No.1 at Urumqi River Head ,Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,2010 ,32(5) :907-913.]

Characteristics and formation analysis of cryoconite granules of Yushugou Glacier

XU Hui¹ , LI Zhong-qin^{1,2} , Nozomu Takeuchi³ , ZHANG Xiao-yu¹ , LUO Shu-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 730000, Gansu, China; 2 College of Geography and Environment Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3 Department of Earth Sciences, Graduate School of Science, Chiba University, Chiba 263-8522, Japan)

Abstract : Cryoconite granules are dark-colored spherical aggregates of organic and inorganic material on glacier ice and are commonly observed on glaciers over the world. Cryoconite granules are the main impurities on glacier ,it can reduce the albedo of glacier surface markedly. 5 ice samples were taken from the Yushugou Glacier ,Hami Prefecture ,Xinjiang ,China ,in August 2011. By using the methods of paraffins section technology ,16SrRNA phylogenetic analysis and mineral particles analysis ,this paper studied the structure ,formation process of cryoconite and discussed the main factor(organic part or inorganic part in cryoconite) of low albedo on glacier. The results showed as follows :(1) cryoconite granules distributed over the entire ice surface of the ablation area or cryoconite holes , and the size ranged from 0.22 to 2.9 mm (mean 1.0 mm). The compositions of cryoconite granules are mineral particles ,organic matter and microbes (cyanobacteria is the main microbe). Cryoconite granules have four inner structures :Type 1 ,there are cryoconite granules that have no specific internal structure mineral particles and organic matter distributes uniformly in the cryoconite. This type may be the primary form of the cryoconite. Type 2 ,some granules contain two or more sub granules. This type comes from the combination of small cryoconite granules. Type 3 ,some cryoconite granules have concentric layers of dense organic matter. Type 4 ,some granules have relatively large mineral particles in their center. Cryoconites have seasonal growth and an annual cycle of growth and dissociation. (2) 214 positive clones were randomly selected from the clone library and these positive clones were screened

and grouped into 9 operational Taxonomic Units (OTUs) through ARDRA. 9 operational Taxonomic Units were divided into 3 phyla through sequences of gene ,blast analysis and phylogenetic analysis :Oscillatoriales ,Chroococcale and Unclassified. Oscillatoriales(95.8%) was the absolutely dominant group. (3) Mean mass concentration of mineral particles on the Yushugou Glacier was $d < 3.5 \mu\text{m}$,volume median diameters of volume size distributions of mineral particles was $13 \mu\text{m}$. Based on a comparison of the volume median diameters of volume size distributions of mineral particles between Urumqi Glacier No.1 and Qingbingtan Glacier No.72 ,the volume median diameters of mineral particles on the Yushugou Glacier is higher. (4) the size of cryoconite ranged from 0.22 to 2.9 mm (mean 1.0 mm) ,so the mean volume of single cryoconite granule is 4.13mm^3 . However ,the mean size of single mineral particle is only $3.28 \mu\text{m}$ and the number of mineral particles in single cryoconite granule is small. After estimation ,the proportion of organic matter is higher than that of mineral particles. The conclusion is that there are abundant organic matter and microbes in cryoconite ,so the main factor of lower albedo is organic part ,including organic matter and microbes. The previous researches mainly focus on the influence of mineral particles and black carbon on albedo of glacier ablation. Cryoconite granules as the crucial impurities on glacier can reduce the albedo of glacier surface markedly. However ,the characteristics and formation process of cryoconite were rarely studied in China. It is a new field in the glacier area. Thus it is important to study the cryoconite on glacier.

Key Words : the Yushugou Glacier ; cryoconite ; organic material ; cyanobacteria ; mineral particles ; albedo

中国科学院新疆生态与地理研究所在咸水灌溉对 沙漠公路防护林土壤演变和植物生长的影响获进展

水分是决定干旱区植物生存、生态系统结构与功能的关键因子,影响着生态系统生态过程的各个环节。在极端干旱的塔克拉玛干沙漠,咸水灌溉(其矿化度在 $2 \text{g/L} \sim 29.7 \text{g/L}$)是确保防护林植物正常生长的唯一水分来源。但是,长期的咸水灌溉,必将影响植物的正常生长,甚至对植物产生毒害,同时引起土壤的盐渍化。然而人工防护林的建立,降尘、灌溉等输送的物质对土壤质地变化的影响,以及植物对土壤的反馈作用,加速了土壤中各种物质的转化,从而改善了土壤的营养条件,其化学、物理、生物、形态和矿物等内外属性也发生相应变化,促使风沙土向成土方向的演变过程。

中科院新疆生态与地理研究所李从娟博士通过研究塔克拉玛干沙漠公路防护林建林8 a以来咸水灌溉对防护林土壤演变和植物生长的影响,结果表明:土壤表层($0 \sim 10 \text{cm}$)有显著的养分和盐分聚集(8mS/cm)现象,但是在根系分布最多的 $40 \sim 60 \text{cm}$ 土壤层,土壤盐分却不超过 1mS/cm ,这说明到目前为止,咸水灌溉并未对植物的生长产生盐害甚至毒害,这与植物自身的根系调节作用是分不开的。这些研究结果进一步揭示:地下咸水作为唯一的水资源为塔克拉玛干沙漠地区植物的生长提供了必备的水源,同时有利于防护林下土壤的演变和养分积累。

相关结果以 Effect of saline water irrigation on soil development and plant growth in the Taklimakan Desert Highway Shelterbelt 为题在线发表在 Soil and Tillage Research 上。