

季节性积雪区不同遮挡条件下深霜发育比较

洪 雯^{1,2}, 魏文寿³, 刘明哲^{1,4}, 陆 恒^{1,2}, 韩 茜^{1,2}

(1.中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2.中国科学院研究生院, 北京 100049; 3.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4.中国科学院天山积雪雪崩研究站, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:以中国科学院天山积雪雪崩研究站为研究区,在2009~2010年冬季观测期利用体视显微镜(XTZ-E)及拍照设备和雪特性分析仪(Snow Fork),对3种遮挡条件的开阔地(0遮挡)、树缘(50%遮挡)和树下(90%遮挡)的积雪深霜进行连续观测,比较和分析西北季节性积雪区不同遮挡条件下的深霜发育特征。研究表明:1)深霜发育主要受温度制约,其次是温度梯度。由不同遮挡条件引起积雪累积和太阳辐射差异而导致雪深不同,从而形成的温度环境差异,是深霜发育差异的根本原因。2)深霜发育厚度与雪深呈正相关关系,有开阔地(0遮挡)>树缘(50%遮挡)>树下(90%遮挡),融雪期深霜的消减速率为树下>开阔地>树缘。3)深霜冰晶粒径呈先减小(稳定累积期—过渡期)再增大(—融雪期)的变化,积雪稳定累积期后,深霜粒径开阔地>树缘>树下。4)2009~2010年冬季雪深大,因而圆角深霜(DHxr)和圆角刻面冰晶(FCxr)在深霜中发育最多,二者共占70%~80%。开阔地易发育杯型深霜(DHcp),树缘和树下则易发育柱状条纹深霜(DHla)、棱柱状深霜(DHpr)和刻面冰晶(FCso)。深霜中胶结态冰晶约占10%~30%,其比例在开阔地深霜中递减,而在树缘和树下处递增。

关键词:季节性积雪;深霜(DH);遮挡条件;冰晶粒径;晶型

中图分类号: P426

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2012)08-0979-07

季节性积雪对全球气候变化极为灵敏^[1-3],它也是内陆干旱区重要的淡水资源^[4,5]。与东北和西南地区在海洋性气候下形成的暖湿型积雪不同^[6,7],大陆性气候控制下的中国西北内陆区形成的干寒型积雪,其密度低、含水率小、深霜极发育。质地脆弱的深霜层易成为断裂或滑动面,从而造成雪崩等灾害。因此关于中国西北季节性积雪区深霜的研究对防治积雪灾害,保证交通运输线的畅通与安全具有重要意义^[8]。

近年来对深霜的形成原因,影响因素等已有较多试验研究^[9-11]。温度梯度是深霜发育的关键因素,同时积雪质地也有一定影响^[12-14]。研究表明在一定范围内深霜冰晶的重结晶率随温度梯度增大而增强^[15],随温度减小而减弱^[16],这种受双向因素制约的积雪变质过程,源于水汽对冰晶重结晶的决定性作用^[17]。在自然环境中,不同下垫面导致其上覆积雪特性存在较大差异,“雪—地”界面上的水热传输

性质决定了冰晶变质程度和深霜发育厚度^[18,19],而植被、地形和日照条件等也对积雪性质有很大影响^[20,21],但关于山区林地最普遍的遮挡条件下积雪结构的研究很少涉及。在不同的遮挡条件下,积雪累积和太阳辐射量不同,从而引起雪深、积雪温度环境和含水率的差异,进而导致深霜厚度、冰晶微结构等不同。因此本试验以中国西北季节性积雪区3种遮挡条件(开阔地、树缘和树下)的积雪为研究对象,在2009~2010年冬季对深霜的温度环境、发育厚度、体积含水率和密度进行连续观测,并特别从微观角度关注深霜冰晶粒径和晶型的发展和变化,以探讨不同遮挡条件下积雪深霜发育变化的特点。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

以中国科学院天山积雪雪崩研究站为本文研究区(43°16'N, 83°16'E, 海拔1 776 m),该区地处

收稿日期: 2011-08-29; **修订日期:** 2011-11-10

基金项目: 干旱内陆区冰雪资源动态监测与可持续利用评估研究(GYHY200706008)、新疆现代与历史暖湿化过程及对生态环境影响(2005DIB6J113)、新疆生态与地理研究所绿洲学者“博士”人才培养计划(0771021)、中国科学院“西部之光”人才培养计划(RCPY200902)项目、国家自然科学基金面上项目(41171066)资助。

作者简介: 洪 雯(1983-),女,新疆乌鲁木齐人,博士研究生,从事自然地理及气候环境变化研究。E-mail: platypusmanor@hotmail.com 或 platypus11.11@163.com

天山西段伊犁河谷上游,接受西风气流带来的湿润水汽,在地势抬升作用下形成整个西北干旱区最大的降水中心,也是中国西北季节性积雪区的典型代表。站区年平均气温 1.3°C ,1月平均气温 -14.4°C ,年平均降水量 867.3 mm ,其中冬季固态降水量占年降水量30%以上,多年平均最大积雪深度为 78 cm ,最大雪深为2000年的 152 cm ,平均稳定积雪日数为151 d。站区内林木草被覆盖度高达95%,雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)为该区主要树种^[22],地表草被主要为羽状短柄草(*Brachypodium pinnatum*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)、鸭茅(*Dactylis glomerata*)等^[23]。

1.2 试验方法

选择2010年1月12日~4月15日为观测期,根据积雪站的气温、积雪深度和融雪资料(图1),将试验期划分为4个时段:积雪稳定累积期(2月18日前)日均气温保持 0°C 以下,雪深稳步累积增大;过渡期(2月19日~3月12日)气温逐渐上升,但仍低于 0°C ,雪深开始缓慢减小;融雪前期(3月13日~4月1日)气温在 0°C 波动,雪深继续减小,开始出现持续的融雪径流;融雪后期(4月2日后)日均气温开始大于 0°C 并逐步上升、融雪径流量明显增大。

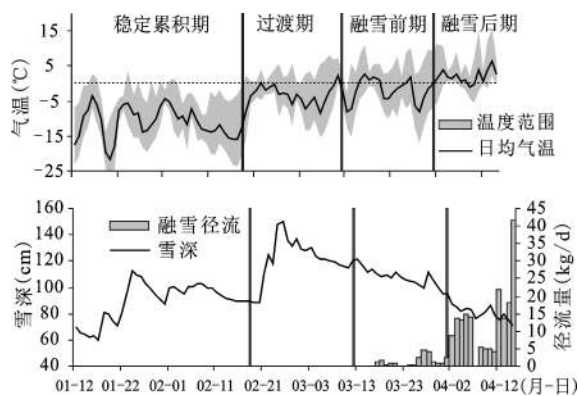


图1 观测期内积雪站气温、雪深和融雪径流的变化曲线
Fig. 1 Variations of air temperature, snow depth and snowmelt runoff in the observation period

选取站区内开阔地、树缘和树下3个观测点代表该区3种遮挡条件的自然下垫面。开阔地观测点位于积雪站的气象观测场,树缘和树下观测点位于站区内同一棵雪岭云杉的树冠下。该树高 25.5 m ,胸径 0.41 m ,冠幅 3 m ,覆盖度90%,树下观测点位于距树干 1 m 处,依据该树冠幅确定树缘观测点位于距离树干 3 m 处。3个观测点均地形平坦且基本处于同一高度,地表均为草本覆盖。设

定开阔地、树缘和树下观测点的遮挡程度分别为0%、50%和90%。

在3个观测点进行连续推进式挖掘雪坑剖面,每天日出前和日落后共2次。在雪坑剖面上对积雪分层,确定深霜层的上界,积雪深度及深霜厚度由直尺测量。应用Snow Fork雪特性分析仪(芬兰Toikka Engineering Ltd.)在积雪剖面上按 2 cm 间隔测量,并在合理参数范围内得到积雪含水率和密度的有效测量值。受野外实验条件的制约,在暴风雪天气或其他特殊原因影响下,深霜厚度、雪密度和含水率未能连续测量,特别是在距实验站一定路程的树缘和树下观测点,因此存在数据不连续的情况。积雪可看做是空气、冰和水组合而成的多孔介质,按照多孔介质中孔隙率的计算,并将水的体积考虑入内,即可得积雪的孔隙率(式1)。

$$P = 1 - \frac{\rho_{\text{雪}} - \theta \rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{冰}}} - \theta \quad (1)$$

式(1)中: $P(\%)$ 为积雪孔隙率;密度 $\rho_{\text{冰}}=0.917\text{ g/cm}^3$ 和 $\rho_{\text{水}}=1.0\text{ g/cm}^3$;雪的密度 $\rho_{\text{雪}}$ 和体积含水率 $\theta(\%)$ 均为仪器测得。

应用上海精创RC-30单通道和RC-500双通道温度自动记录仪测量雪层温度,并在深霜层的上下边界安置温度探头,仪器精度 0.1°C ,记录间隔 10 min 。由于仪器数量不足,因而仅对开阔地积雪温度进行观测,虽缺少与遮挡条件下雪温的比较,但仍可为深霜发育的热环境分析和讨论作参考。

当前立体测量技术是对冰晶粒径和晶型最理想的观测方法^[24],但鉴于野外条件限制,本试验采用在室外低温环境下应用XTZ-E型连续变倍体视显微镜观测冰晶并拍照,其后依据照片及刻度标尺记录深霜冰晶粒径及晶型。试验中对开阔地、树缘和树下3个观测点冰晶的观测共计8次,共统计深霜冰晶样本987个。其中积雪稳定累积期4次(1月28日,2月1日,2月4日,2月6日),过渡期1次(3月6日),融雪前期2次(3月15日,3月19日),融雪后期1次(3月29日)。由于融雪期气温较高,雪样极易融化,因而该期的冰晶观测次数较少,而4月后冰晶观测已无法进行,因此以最后一次很接近融雪后期的观测(3月29日)作为融雪后期深霜冰晶的代表。粒径以照片中冰晶颗粒投影的等面积圆直径表示,晶型数据是基于季节性积雪地面观测标准进行形态学分类^[25,26],统计而得的晶型百分比。

2 结果与分析

2.1 深霜发育强度

2.1.1 雪深

树木遮挡对雪深的影响体现为:一方面新降雪被树木枝条拦截,减少树冠下的积雪量,主要体现在稳定累积期和过渡期;另一方面树木遮挡减少了树冠下积雪接收的太阳辐射,融雪速度减慢,这主要体现在融雪期。整个观测期,除融雪后期树下积雪略大于树缘外,均有雪深在开阔地>树缘>树下,这与遮挡比例相对应(图2)。开阔地雪深在稳定累积期不断累积增加,至过渡期达到最大值,进入融雪期后开始逐渐减小,并在融雪后期达到最小值,树缘处雪深的变化类似。树下雪深在融雪期变化相对平缓,融雪前期由于温度回升,积存于树枝上的雪开始融化并掉落,使树下积雪深度缓慢增大。同时由于遮挡作用延缓了树下积雪的融化,因而在融雪后期其雪深略大于树缘处。

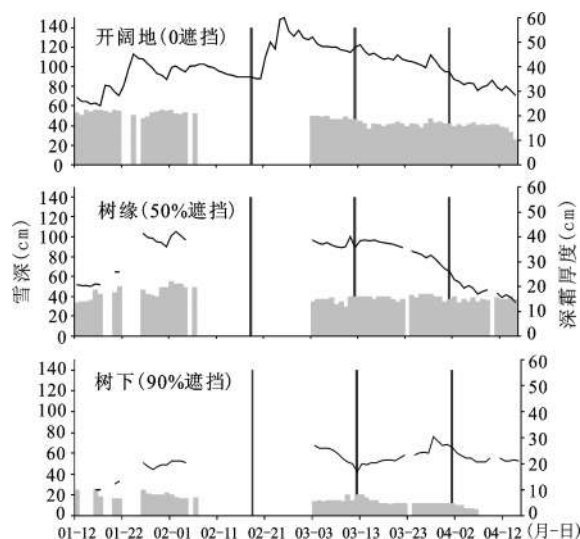


图2 雪深与深霜厚度的比较

Fig.2 Comparison of snow and DH (Depth Hoar) depth

2.1.2 深霜厚度

季节性积雪区深霜厚度变化较平缓,积雪期较大,融雪期内缓慢减小(图2)。在积雪稳定累积期深霜层厚度最大,开阔地、树缘和树下平均为21.5 cm、18 cm和8 cm。至过渡期雪深均达到最大,上覆积雪的压力致使深霜厚度略微减小,开阔地、树缘和树下平均为19 cm、14 cm和6 cm。这一时期雪温明显升高,但温度梯度进一步减小,已不

利于深霜继续向上发展。融雪期后雪层温度逐渐一致,深霜层温度梯度趋于0 °C/cm(图3),加之雪融水的淋滤,深霜厚度逐渐减小。至融雪后期开阔地、树缘和树下深霜平均厚度已减至15.5 cm、15 cm和3 cm。4月6日后树下深霜已基本消失,雪融水在底部聚集并冻结成2~3 cm厚的冰层。整个融雪期开阔地、树缘和树下深霜消减速率为-0.06 cm/d、-0.03 cm/d和-0.11 cm/d,即树下>开阔地>树缘。这是雪深和太阳辐射共同作用的结果:积雪较浅的树下受气温日变化波动的影响最大,不利于深霜维持;而开阔地接收的太阳辐射最多,所以其雪融水淋滤强于树缘处。

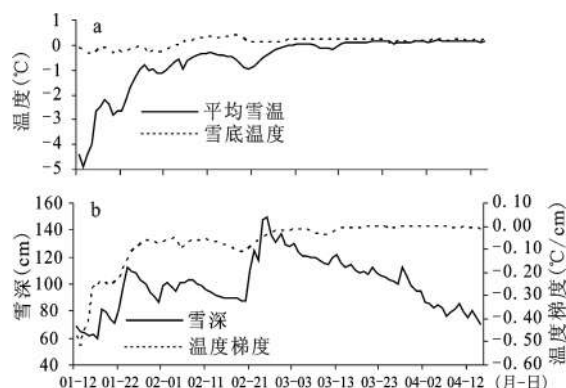


图3 开阔地深霜层雪温(a)与温度梯度(b)

Fig.3 The temperature and temperature gradient of DH in open ground

积雪是不良导热体,其保温作用强,已有研究表明在西北干寒型积雪中,短波辐射的穿透厚度仅为28 cm,更厚的雪层则可阻隔气温波动对地表温度的影响^[6],因此可以认为3个观测点的雪-地界面温度近似相同,且变化极为平缓(图3a)。而同一区域气温环境基本相同,所以在积雪上下表面温差近乎相等的情况下,雪深决定了温度梯度的大小。在开阔地雪温观测中可见,2010年1月22~24日和2月21日的2次大规模降雪后,深霜层温度梯度急剧减小(图3b),但其平均温度则有大幅抬升,水汽迁移更为活跃。雪深越大,温度梯度越小,积雪底部形成的高温区域就越大,水汽迁移的范围越广,因而深霜厚度也越大。因此深霜发育厚度与雪深呈正相关关系,深霜厚度开阔地>树缘>树下(图2)。

2.2 深霜冰晶发育

2.2.1 粒径

观测期内深霜冰晶粒径有先减小(稳定累积

期—过渡期)再增大(融雪期)变化(图4),这与融雪期冰晶粗粒化的规律一致^[27,28],是雪深变化及雪融水的共同作用结果。整个观测期开阔地深霜粒径均大于树缘和树下,且在融雪期更明显。

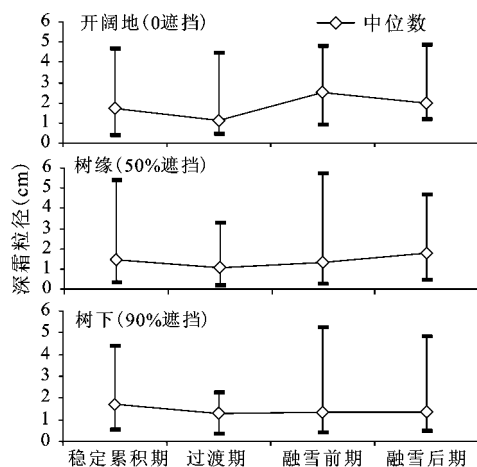


图4 深霜冰晶粒径的变化

Fig.4 Variation of grain size of DH

在气温较低的稳定累积期,3个观测点的深霜层含水率均维持在0.5%以下(图5a),水汽通量少,冰晶粒径近似。至雪深最大的过渡期,一方面减小的温度梯度减弱了深霜层内的水汽迁移,抑制冰晶的增长,深霜平均粒径均有减小;另一方面雪深越大底部高温区域越大,水汽越活跃,冰晶增长越大,因而开阔地深霜粒径最大。

融雪开始后,深霜层温度梯度迅速减小至 $0^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ (图3b),雪融水的进入明显增加了含水率,为冰晶增长提供了充沛的水汽源。这一时期冰晶开始进入棱角圆化、粒径迅速增长的湿雪变质阶段。融雪前期开阔地、树缘和树下深霜的含水率无太大差异,因而继续保持过渡期的粒径排序,其平均粒径为2.58 mm、1.66 mm和1.60 mm。同时树缘和树下深霜孔隙率迅速减小(图5b),抑制冰晶

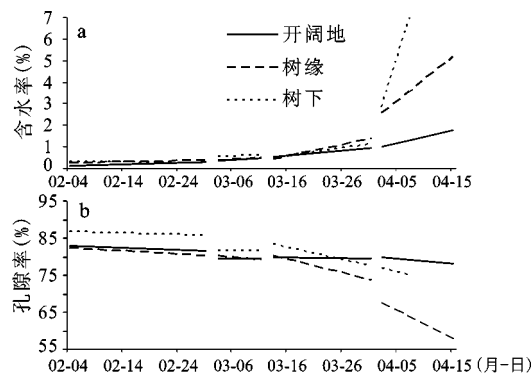


图5 深霜层平均含水率(a)和孔隙率(b)的变化趋势

Fig. 5 Variation of mean water content(a)、and porosity(b) of DH

增长,所以二者的粒径增速小于开阔地。至融雪后期,孔隙率持续减小,冰晶开始变小或勉强维持原状,但开阔地的粒径仍大于树缘和树下。

2.2.2 晶型

在西北季节性积雪区深霜内主要发育杯型深霜(DHcp)、棱柱状深霜(DHpr)、柱状条纹深霜(DHla)、圆角深霜(DHxr)、刻面冰晶(FCso)和圆角刻面冰晶(FCxr)(图6)。观测期内DHxr和FCxr最多,开阔地、树缘和树下深霜中两种晶型共占86%、75%和74%。这两种晶型均发育于减小的温度梯度环境中,因而与雪深有很好对应。在水汽充裕环境下冰晶间易粘连成胶结态,其比例占10%~30%。

积雪稳定累积期,不同遮挡条件下深霜晶型比例大致相同,DHla、DHxr和FCxr为最多的3种晶型(图7)。其中DHla和FCxr比例在3个观测点近似,平均为10.80%和40.27%。FCso发育于强温度梯度下,与DHxr的生长环境相反,因此相对于雪深较浅的树缘和树下,开阔地的DHxr多而FCso少。该期树下深霜孔隙率大,为DHpr提供了充裕的生长空间,其比例达7%。

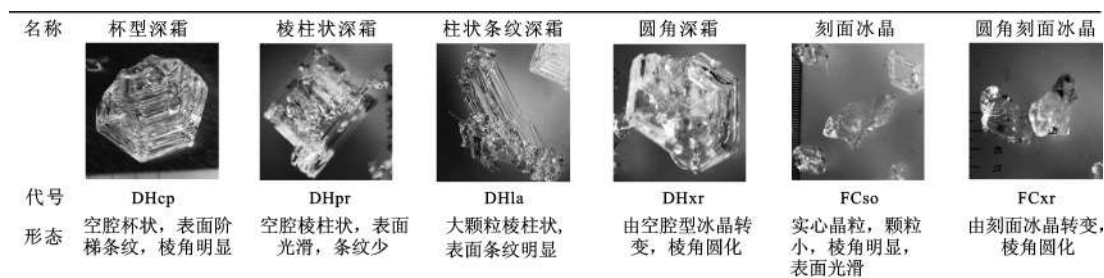


图6 研究区主要深霜晶型

Fig. 6 Main grain shapes of DH in study area

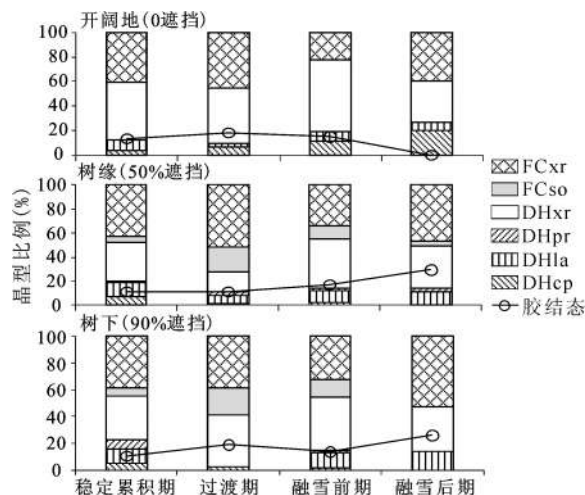


图7 深霜晶型比例的变化

Fig. 7 Proportion variation of grain shapes of DH

过渡期雪深均达到最大, 温度梯度减少导致FCxr增多。减小的孔隙率抑制大颗粒晶型(DHla和DHpr)发育, 取而代之的是开阔地略增的DHcp, 及树缘和树下深霜中大幅增多的小颗粒FCso。

进入融雪期, 温度梯度的急剧减小加速冰晶的圆化, DHxr增多, FCso显著减少。DHla随雪融水的进入相应增多, 且在树下和树缘较多, 并持续至融雪后期。开阔地DHcp继续增多, 但树缘和树下其比例低于2%。

至融雪后期, 维持在75%的孔隙率保证开阔地深霜中DHcp持续增多至20%, 而树缘和树下已观测不到。FCso和DHpr在不断增强的雪融水淋滤下转变为FCxr和DHxr。该期DHxr均有减少, 而FCxr增多, 二者的区别已不明显, 粒径也趋于统一。

不同遮挡条件导致积雪温度场、含水率和孔隙率等积雪物理性质的差异, 从而影响深霜冰晶形态。雪深不同导致的温度梯度差异, 是FCso更易发育于树缘和树下深霜中(温度梯度较大)的主要原因。由于生长空间的限制, DHpr更易于在质地疏松的树下深霜中发育(孔隙率较大)。开阔地较厚的积雪为DHcp发育提供了一个相对高温且稳定的温度梯度环境, 而在融雪期树缘和树下急剧减小的孔隙率是DHcp减少的原因。融雪之前深霜胶结态冰晶维持在10%~20%, 融雪后期树缘和树下该比例增至25%~30%, 而开阔地为减小。这源于融雪后期树缘和树下(45~50 cm)与开阔地(80 cm)巨大的雪深差异, 厚雪层对雪融水的阻碍致使开阔地深霜含水率小(图5a), 胶结冰晶也最少。

3 讨论

深霜是温度梯度下积雪动力变质的产物, 实质是形成水汽压梯度, 导致水汽运移, 冰晶重结晶。温度决定积雪孔隙内的水汽含量, 温度梯度控制水汽运移。高温时水汽充足且活跃, 可在温度梯度下由高温区(水汽压大)向低温区(水汽压小)运移, 形成深霜; 而低温环境水汽量极少, 温度梯度的影响很微弱。因此深霜生长的首要条件是温度, 其次才是温度梯度^[17], 这一观点现已逐渐被学界认同^[11]。王彦龙也指出较高的温度和稳定的温度梯度是深霜冰晶变质的有利条件, 尽管积雪表层温度梯度大, 但较低的雪温仍抑制了大粒雪晶生长^[29]。本试验对不同遮挡条件的积雪深霜的观测结果, 也从侧面验证了这一理论: 雪深最大的开阔地积雪温度梯度虽小, 但其下部高温区域大, 因而深霜厚度最大、冰晶颗粒最大、以及DHcp等典型的空腔型深霜晶型比例最多。

有研究表明雪深越大, 深霜越厚^[23], 这与本试验结果相同。在深霜生成的隆冬时期, 冰晶变质的热源主要来自土壤, 积雪厚度是冰晶能否有效利用地温进行变质的重要因素^[29]。积雪越薄, 土壤热量散失越多, 用于积雪变质的热量就越少, 因此深霜发育与积雪深度呈正相关关系。而在融雪期, 积雪进入湿雪变质阶段, 主要热源转变为太阳能, 融冻消减受气温控制, 因而深霜的消减速率存在树下>开阔地>树缘。

将深霜厚度占总雪深的比例作为深霜发育强度的指标, 观测期内开阔地、树缘和树下深霜平均发育强度为19%、21%和11%, 这与该区20世纪70年代初期观测到的深霜平均厚度约占雪深的60%~70%有很大差距^[23, 30, 31]。压力可影响积雪变质, 积雪越深, 深霜层上覆压力越大, 孔隙被压缩, 从而抑制深霜发育^[29]。以1970~1971年为例, 该年平均雪深为60 cm, 最大雪深仅为75 cm, 而2009~2010年平均雪深为78 cm, 最大雪深达150 cm^[30]。积雪累积速率大, 压实作用强, 阻碍水汽迁移, 不利于深霜发育, 这是本试验中深霜发育强度低的原因。而较大雪深导致的温度梯度小, 也是DHxr和FCxr晶型发育较多的直接原因。

4 结论

通过对西北季节性积雪区开阔地、树缘和树

下3种典型的不同的遮挡条件下的积雪深霜发育比较,得到以下结论:

1) 季节性积雪区深霜发育主要受温度制约,其次受温度梯度影响。不同遮挡条件引起积雪累积和太阳辐射的差异,导致雪深不同,从而形成不同的积雪温度环境,这是深霜发育差异的根本原因。此外压力作用、积雪含水率和孔隙率也是深霜发育的影响因素。

2) 季节性积雪区深霜发育厚度与雪深呈正相关关系,有开阔地(0遮挡)>树缘(50%遮挡)>树下(90%遮挡),融雪期深霜厚度消滅速率有树下>开阔地>树缘。

3) 季节性积雪区深霜冰晶粒径呈先减小(稳定累积期—过渡期)再增大(—融雪期)的变化。在积雪稳定累积期不同遮挡条件下的深霜冰晶粒径差异不明显,进入过渡期后深霜粒径排序与雪深对应,为开阔地>树缘>树下。

4) 由于2009~2010年积雪量较大,温度梯度小,因而深霜中圆角深霜(DHxr)和圆角刻面冰晶(FCxr)发育最多,二者比例共占70%~80%,且在开阔地深霜中比例最大。杯型深霜(DHcp)易于在开阔地上发育,其比例随时间不断增加,而树下和树缘发育有较多的柱状条纹深霜(DHla)、棱柱状深霜(DHpr)和刻面冰晶(FCso)。深霜中胶结态冰晶占10%~30%,其在开阔地深霜中呈减小趋势,而在树缘和树下呈递增趋势。

参考文献:

- [1] IPCC.Climate Change 2007:The Physical Science Basis[M]. Cambridge,UK:Cambridge University Press, 2007.
- [2] 秦大河,效存德,丁永建,等.国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J].应用气象学报,2006,17(6):649~656.
- [3] 庞洪喜,何元庆,卢爱刚,等.欧亚春季雪盖对印度洋偶极子的影响[J].地理科学,2006,26(6):682~686.
- [4] 李培基.1951~1997年中国西北地区积雪水资源的变化[J].中国科学(D辑:地球科学),1999,29(S1):63~69.
- [5] 车涛,李新.1993~2002年中国积雪水资源时空分布与变化特征[J].冰川冻土,2005,27(1):64~67.
- [6] 魏文寿,秦大河,刘明哲.中国西北地区季节性积雪的性质与结构[J].干旱区地理,2001,24(4):310~313.
- [7] 张丽旭,魏文寿.天山西部中山带积雪变化趋势与气温和降水的关系——以巩乃斯河谷为例[J].地理科学,2002,22(1):67~71.
- [8] 王彦龙.我国西部季节性深霜发育与雪崩关系[J].冰川冻土,1988,10(2):173~180.
- [9] Baunach T,Fierz C,Satyawali P K,et al.A model for kinetic grain growth[J].Annals of Glaciology,2001,32:1-6.
- [10] Sturm M,Benson C S.Vapor transport,grain growth and depth-hoar development in the Subarctic snow[J].Journal of Glaciology, 1997,43:7-12.
- [11] Sokratov S A. Parameters influencing the recrystallization rate of snow[J].Cold Regions Science and Technology, 2001,33: 263-274.
- [12] Akitaya E.Studies on depth hoar[C]//Snow Mechanics Symposium.Grindelwald,Switzerland:IAHS Press,1974:42-48.
- [13] Perla R,Ommanney C S L.Snow in strong or weak temperature gradients.Part I:Experiment and qualitative observations[J]. Cold Regions Science and Technology,1985,11:23-35.
- [14] Perla R.Snow in strong or weak temperature gradients.Part II: Sectionplane analysis[J].Cold Regions Science and Technology, 1985,11:181-186.
- [15] Fukuzawa T,Akitaya E.An experimental study on the growth rates of depth hoar crystals at high temperature gradients(I) [J]. Low Temperature Science.Series A,1991,50:9-14.
- [16] Marbouty D.An experimental study of temperature-gradient metamorphism[J].Journal of Glaciology,1980,26:303-312.
- [17] Kamata Y,Sokratov S,Sato A.Temperature and temperature gradient dependence of snow recrystallization in depth hoar snow [C].Advances in Cold-Region Thermal Engineering and Sciences,Darmstadt,Germany:Springer Press,1999,533:395-402.
- [18] 马正海.雪崩站区雪的若干物理力学性质的初步研究[C]//新疆维吾尔自治区科学技术委员会.山区公路雪害防治研究, 1974:118-145.
- [19] Arons E M,Colbeck S C,Gray J M N T.Depth-hoar growth rates near a rocky outcrop[J].Journal of Glaciology,1998,44:477-484.
- [20] 王金叶,常宗强,金博文,等.祁连山林区积雪分布规律调查[J].西北林学院学报,2001,1(增刊):14~16.
- [21] 车宗玺,金铭,张学龙,等.祁连山不同植被类型对积雪消融的影响[J].冰川冻土,2008,30(3):392~397.
- [22] 胡汝骥,马虹,姜逢清.中国天山积雪雪崩站区的地理环境[J].干旱区地理,1997,20(2):25~33.
- [23] 胡汝骥,姜逢清.中国天山雪崩与治理[M].北京:人民交通出版社,1989:58~59.
- [24] Painter,T H,Dozier J,Roberts D A.Retrieval of subpixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data[J]. Remote Sensing of Environment,2003,85:64-77.
- [25] Colbeck S,Akitaya E,Armstrong R,et al.The International Classification for Seasonal Snow on the Ground[M].Wallingford, Oxon:International Commission on Snow and Ice,IAHS-IGS, 1990:17-21.
- [26] Fierz C,Armstrong R L,Durand Y,et al.The International Classification for Seasonal Snow on the Ground[M].Paris: UNESCO-IHP,2009:16-17.
- [27] Wakahama G.The metamorphism of wet snow[J].International Association of Scientific Hydrology Publication,1968,79: 370-379.
- [28] Raymon C,Tusima K.Grain Coarsening of Water-Saturated

- Snow[J].Journal of Glaciology,1979,22(86):83-105.
- [29] 王彦龙.天山伊犁河上游季节性积雪的变质作用[J].冰川冻土, 1982,4(2):63~72.
- [30] 张祥松.雪崩站区雪的力学性质的试验研究[C]//新疆维吾尔自治区科学技术委员会.山区公路雪害防治研究,1974:167~185.
- [31] 谢自楚.1972-73年雪崩站区学的物理性质观察报告[C]//新疆维吾尔自治区科学技术委员会.山区公路雪害防治研究, 1974:146~166.

Depth Hoar Development Under Different Shading Conditions in Seasonal Snow Cover

HONG Wen^{1,2}, WEI Wen-shou³, LIU Ming-zhe^{1,4}, LU Heng^{1,2}, HAN Xi^{1,2}

(1.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Institute of

Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi, Xinjiang 830002, China;

4.Tianshan Station for Snow Cover and Avalanche Research, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: Depth hoar (DH) under different shading conditions in seasonal snow cover was studied in Tianshan Station Snow Cover and Avalanche Research Station in the winter of 2009-2010. Optical stereo microscope and the portable equipment Snow Fork were used to observe the grain size and shapes as well as water content and density of DH in the open ground (0 % shaded), canopy edge (50 % shaded) and canopied zone(90 % shaded). Results showed that: 1) DH growth primarily depends on temperature, and secondarily on temperature gradient. Temperature condition, caused by snow thickness depends on the snow accumulation and solar radiation, is the fundamental reason of DH's differences under different shading conditions. 2) Both the snow depth and DH thickness indicate a diminishing sequence of open ground>canopy edge>canopied zone. In the snowmelt period, the decreasing rate of DH thickness shows canopied zone>open ground>canopy edge. 3) The DH grain size shows a decreasing trend at first stage (stable accumulation period - transition period) and then increase at the following stage (-snowmelt period). The rank of grain size keeps in the order of open ground>canopy edge> canopied zone after the stable accumulation period. 4) Due to the large snow thickness in the winter of 2009-2010, rounding depth hoar(DHxr) and rounding faceted particles(FCxr) are the two predominant grain shapes in DH, which accounted for 70%-80%. Hollow cups (DHcp) prefer to develop at open ground, while large striated crystals(DHla), hollow prisms(DHpr) and faceted particles (FCso) incline to grow at canopy edge and canopied zone. There are approximately 10%-30% congregate crystals in DH. The ratio declines at open ground and rises at canopy edge and canopied zone along time scale.

Key words: seasonal snow cover; depth hoar (DH); shading conditions; grain size; grain shape