

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.02.18

不同遮蔽条件下季节性积融雪过程差异规律对比研究

唐小雨, 高凡

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 寒旱区季节性积雪融雪水文过程对气候与环境变化高度敏感, 研究影响季节性积雪积累与融雪过程的关键因素并进行适应性调控, 对维护变化环境下流域水安全与水资源可持续利用具有重要意义。通过对新疆天山北坡乌鲁木齐河流域试验区 2017 年 12 月 - 2018 年 3 月不同遮蔽条件下(林冠下、开阔地)季节性积雪层分层物理特性进行试验观测, 分别分析积雪期、融雪期雪层分层物理特性及差异特征。结果表明: 积融雪期内, 林冠下积雪平均深度略小于开阔地, 分层积雪中深霜层与粗粒雪层深度比重较大; 积雪期内, 开阔地分层积雪液态含水率呈单峰型变化, 林冠下分层积雪液态含水率自上而下呈均匀递增趋势, 融雪期不同遮蔽条件下雪层液态含水率均随雪深垂直廓线变化呈单峰型, 峰值集中在细粒雪层; 积融雪期分层积雪密度垂直廓线变化特征基本一致, 均呈单峰型。

关键词: 季节性积融雪; 积雪深度; 积雪密度; 液态含水率; 差异规律; 林冠下; 开阔地

中图分类号: P426.635

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0121-08

Comparative study on the difference law of seasonal snowmelt process under different shading conditions

TANG Xiaoyu, GAO Fan

(College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Seasonal snow melting hydrological process in cold and arid regions is highly sensitive to climate and environmental changes. It is of great significance to study the key factors affecting seasonal snow accumulation and snow melting process and to adjust and control them adaptively for maintaining water security and sustainable utilization of water resources in the basin under changing environment. The physical characteristics of seasonal snow layers under different shelter conditions (under canopy and open land) in the Urumqi River Basin experimental area on the northern slope of Tianshan Mountains, Xinjiang from December 2017 to March 2018, were observed and tested. The physical characteristics and differences of snow layers during snow accumulation and melting periods were analyzed respectively. The results showed that during snow accumulation and melting period, the average depth of snow under canopy was less than that of open land, and the proportion of deep frost layer and coarse snow layers were larger than that of the other layers in stratified snow. During snow accumulation period, the liquid water content of snow cover in open land layer changed in a single peak pattern, and the liquid water content of snow cover under canopy layer increased uniformly from top to bottom. The liquid water content of snow layers changed in a single peak pattern with the vertical profile of snow depth in different shelter conditions in snowmelt period, and the peak value concentrated in fine snow layer. The variation characteristics of vertical profile of stratified snow density during snow accumulation and melting period were basically the same, showing a single peak pattern.

Key words: seasonal snowmelt; snow depth; snow density; liquid water content; difference law; under canopy; open land

收稿日期: 2019-07-21; 修回日期: 2019-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769036, 51569031); 新疆农业大学研究生科研创新项目(XJAU2018-006)

作者简介: 唐小雨(1993-), 女, 新疆沙湾人, 硕士研究生, 研究方向: 内陆干旱区水文过程及水资源利用。

通讯作者: 高凡(1980-), 女, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 长期从事水资源系统工程与河流生态保护研究工作。

1 研究背景

积雪是冰冻圈分布最广、季节变化最显著、具有多重属性的自然地表特征^[1-2]。寒旱区季节性积雪分布对气候变化与人类活动、地表辐射平衡与能量交换具有关键的反馈作用,是敏感且活跃的环境指示因子^[3-4]。全球气候变暖成为不争事实,不仅加速了冰冻圈积雪冻土融化,且导致了如北半球中纬度山区积雪重新分布^[5]、高海拔寒旱区季节性积雪持续时间缩短以及融雪径流峰值提前且流量增加等一系列现象^[6-7]。冰冻圈积雪水文过程对气候变化的高度敏感性使得以积雪为代表的冰雪水文过程研究成为该领域关注热点,该方面的研究不仅有助于理解大气-植被-积雪-冻土间水热耦合关系,并且对开展变化环境下水资源合理开发与可持续利用具有指导意义。

积雪深度、积雪密度、液态含水率等积雪物理特性是识别积雪累积与消融过程差异性规律的关键要素。已有研究证实,积雪累积与消融过程不仅受到空气温湿度、太阳辐射及风速风向等气象因素的影响^[8-10],同时也受到海拔高度、坡度坡向等下垫面因素的影响^[11-13],此外,在林雪关系中,由于植被类型及冠层截留的影响,不同遮蔽条件下特有的积雪分布与微气象条件^[14]导致林冠下雪表辐射收支平衡^[14-17]、积雪物理特性及雪层结构与开阔地积雪显著不同^[18-19]。Metcalf等^[20]和Bewley等^[21]研究发现当气候及地形条件一定时,林木空间分布会对积雪消融过程产生一定的影响,即林冠开阔度与融雪速率成正比。Pan等^[16]研究发现部分地区林冠下融雪速率仅为开阔地的1/3。国内学者围绕东北地区大、小兴安岭林区的野外观测试验结果表明^[22-23],郁闭度大小会影响太阳辐射面积,郁闭度较大的区域在积雪消融过程时间上长于郁闭度较小的区域,且林内的降雪和积雪密度大多均小于林外。目前,国内外已有研究成果中,针对不同遮蔽条件下的季节性积雪累积与消融过程的系统观测与差异性规律分析成果较少,需要针对不同流域开展基础观测试验研究,以揭示不同遮蔽条件对积雪累积及消融过程的差异性规律,用以更好地体现在融雪径流模型的参数异质化率定及分布式模拟模型的构建方面。基于此,本文通过对新疆天山北坡乌鲁木齐河流域下游城市段不同遮蔽条件下的试验观测样方开展长时间序列的积雪累积与消融过程观测研究,通过对影响积、融雪过程的逐项要素(如积雪深度、积

雪密度、积雪液态含水率等)进行连续观测分析,结合试验区同步长系列气象资料,试图发现并揭示不同遮蔽条件下的季节性积雪过程差异性规律,为进一步构建融雪径流模型提供异质性参数指标奠定理论基础。

2 试验样方与观测方案设计

2.1 试验样方设计

本文试验区位于新疆天山北坡乌鲁木齐河流域下游新疆农业大学校内的季节性积雪覆盖试验区(87°34'07"E,43°48'45"N),该试验区气候属于典型的中温带大陆性干旱气候,平均海拔830 m,主要表现为昼夜温差大、春秋两季较短,但冬季寒冷漫长,多年平均气温5~7℃,7、8月属最暖时段(平均气温为25.7℃),1月属最冷时段(平均气温为-15.2℃),同时伴随逆温层出现。降水稀少且随海拔高度增加呈递增趋势,多年平均降水量为263.4 mm,冬季降水量为32.4 mm,约占年降水量的12.3%。试验区冬季降雪频繁,积雪稳定而深厚,覆盖天数长,一般每年11月至次年3月为雪季,冬、春积雪覆盖天数约150 d,城市段多年平均积雪深度约为18.8 cm,高海拔区域融雪期可持续到每年6月份,最大积雪深度可达1 m以上^[24]。试验区主要树种类型以榆树(elm forest)为主,地表植被覆被类型以低地草甸为主。

试验观测选择在新疆农业大学校内季节性积雪覆盖试验区榆树林冠下(郁闭度大于90%,无直接太阳辐射)与林间开阔地两种遮蔽条件下同时进行。冬季降雪开始前在无直接太阳辐射的榆树林林冠下和林间开阔地各布设5 m×5 m表面平整且不受污染的天然积雪样方进行重复观测试验。试验期间,雪样需避免人为干扰及踩踏,同时为保证外侧积雪剖面物理特性不受升华及蒸发所影响及测量数据真实可靠,在每次试验观测前均需进行轻度推进式开挖。

2.2 试验观测时段、频次与观测项目

试验观测自2015年冬季积雪期开始至今已已连续观测4年。经课题组积雪研究团队历年观测研究所得,该试验区内积雪累积过程一般始于上年11月上旬前后,积雪累积深度于次年2月中下旬前后陆续达峰值,就北半球而言,该时段过后伴随太阳直射点北移,所获太阳高度角及其辐射逐渐增加,同时大气温度明显回升致使积雪开始产生消融过程^[25]。积雪累积与消融过程伴随外界环境变化具有明显反复波动且不连续的特点,因此确定积雪期阶段的

划分对野外观测试验起到不可忽视的作用。本文根据课题组积融雪研究团队近 4 年来观测经验,同时结合已有研究成果^[14-19,25],大多以观测期内日均气温和日最高气温作为积融雪阶段划分的主要参考依据。结合本次观测期内各阶段气温变化的不同特点,划分为积雪期、融雪波动期、融雪稳定期,具体划

分结果如表 1 所示。试验重点观测外界环境气象要素(如空气温度、相对湿度、太阳辐射等)和分层积雪物理特性要素(如积雪密度、雪温、雪深和积雪液态含水率等)见表 2。考虑气象条件的日变化特征,积雪要素观测时间依次分别选择在北京时间 09:00、12:00、17:00、20:00 共 4 个时间点进行。

表 1 试验观测积融雪阶段划分

阶段	时间/(年-月-日)	划分依据
积雪期	2017-12-29 - 2018-01-23	日均气温及日最高气温均持续低于 0℃
融雪波动期	2018-02-20 - 2018-03-06	日均气温及日最高气温基本高于 0℃,但存在较大波动
融雪稳定期	2018-03-07 - 2018-03-18	日均气温及日最高气温均持续高于 0℃

表 2 试验观测样地观测项目与仪器类型

观测项目	传感器类型	分辨率
空气温度		0.01℃
相对湿度		1%
气象要素	Onset HOBO 微型自动气象站	0.1m·s ⁻¹
风速		1°
风向		0.1mm
降水		
四分量辐射		
积雪深度	雪尺	1mm
积雪要素	TP3001 便携式温度计	0.1℃
积雪温度		0.1%
积雪含水率	SnowFork 雪特性分析仪	0.001g/cm ³
积雪密度		

2.3 试验数据获取方法

利用架设的 Onset HOBO 微型自动气象站同步观测收集试验区地表以上 1.5 m 处常规气象要素信息,数据记录器时间间隔设置为 15 min;利用 TP3001 便携式温度计同步测量积雪分层温度,测量方法为在雪盖处切垂直剖面,根据积雪分类标准^[26]将积雪剖面由上至下大致分为 5 层:新雪层(粒径范围 0.1~0.4 mm)、细粒雪层(粒径范围 0.5~1 mm)、中粒雪层(粒径范围 1~2 mm)、粗粒雪层(粒径范围 2~3 mm)和深霜层(粒径范围 3~6 mm)。每层水平测量 3~5 个样点,取其平均值作为此层垂直剖面温度;积雪密度与积雪含水率数据利用 SnowFork 雪特性分析仪进行观测,测量时,将 SnowFork 叉形探头插入积雪层,于雪盖处切出垂直剖面,每层水平测量 3~5 个样点,取其平均值作为该层的积雪密度值与积雪含水率值;测量积雪深度指标时,每块样地内设置 6 个均匀分布的积雪深度固定观测点,并利用 PVC 标杆作为标记,积雪深度每

日观测 4~6 次,用铁质直尺垂直插入观测点重复 3 次进行积雪深度测量,忽略微地形、地面异物和地表冰冻层对雪深测量的影响,取 3 次测量的平均值作为最终测量值。

3 结果与分析

3.1 不同遮蔽条件下分层积雪深度变化

对本次试验观测周期内积雪稳定期与融雪期各取一次典型降雪过程(积雪稳定期降雪时间自 2018 年 1 月 1 日约 08:00 时至次日约 07:00 停止,融雪期降雪时间自 2018 年 2 月 20 日约 12:00 至次日约 10:00 停止),分析积雪稳定期与融雪期该次降雪停止后 1 周内不同遮蔽条件下的分层积雪深度变化特征,结果见图 1。

由图 1 可看出,积雪稳定期一次降雪停止后,林冠下与开阔地积雪剖面深度分别达到 23.5 和 27.0 cm。取 1 周连续性观测时段,随时间变化及降雪停止后气温逐步下降,该时段内分层积雪深度变化特征归纳为:

(1)新雪层积雪深度变化显著且呈逐渐下降趋势,林冠下沉降速率(0.43 cm/d)明显小于开阔地(0.71 cm/d),林冠下深度占比由 17.02% 大幅降至 4.88%,开阔地深度占比由 22.22% 大幅降至 4.54%,林冠下新雪层降幅明显小于开阔地;

(2)除新雪层外,两种遮蔽条件下(林冠下与开阔地)其余各层积雪深度基本保持不变,细粒雪层深度占比分别为 11.25% 和 12.21%,中粒雪层深度占比分别为 13.50% 和 8.14%;

(3)各分层积雪剖面中,深霜层与粗粒雪层积雪深度较大,占全层雪深比例分别为 32.37% 和 31.70%,深霜层积雪厚度随雪坑位置稍有变化,主要归结为低地草甸微地形条件和测量误差的影响。

以上研究结果与陆恒等^[27]和高培等^[28]的观测分析结果基本一致。

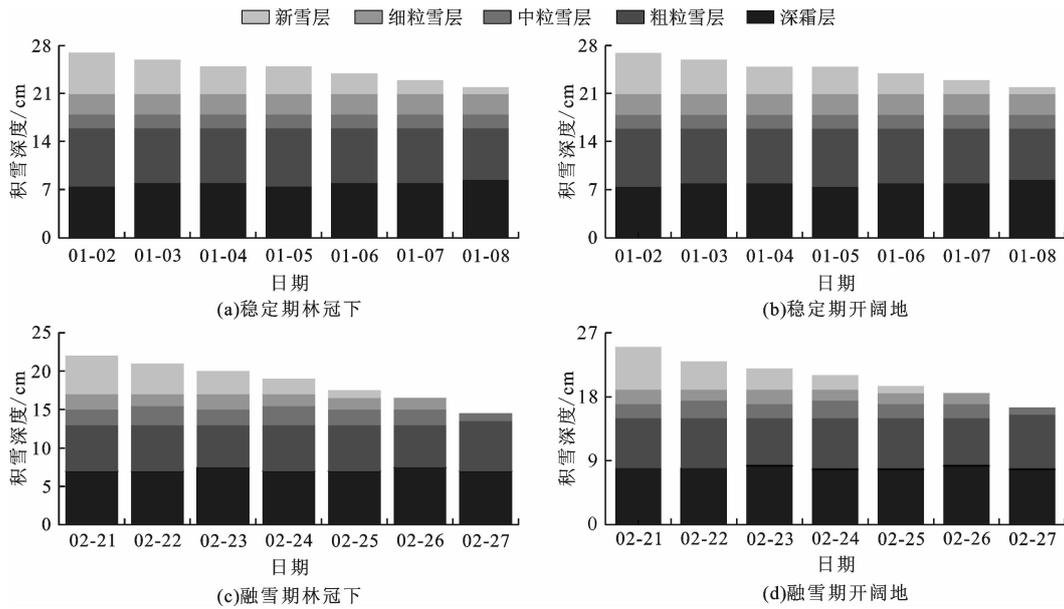


图1 2018年1次降雪过程后不同遮蔽条件下分层积雪深度变化

融雪期雪层深度变化幅度大于积雪稳定期,主要体现在上层积雪消融,深度变化较为明显(图1(c)、1(d))。2月21日降雪停止后,林冠下与开阔地积雪剖面深度分别达到22和25 cm,随时间变化及降雪停止后气温逐步上升,该时段内分层积雪深度变化特征为:(1)本次降雪停止后次日新雪层厚度均为4 cm,沉降速率均为1 cm/d,此后林冠下与开阔地新雪层平均沉降速率分别为0.8和1.0 cm/d,仍然大于积雪稳定期,而林冠下深度占比由22.73%大幅降至0,开阔地深度占比由24.10%大幅降至0,林冠下新雪层降幅略小于开阔地;(2)细粒雪层也具有明显沉降趋势,平均占比由9.10%降至0,由于该时段内气温逐步上升,2月27日粗粒雪层以上积雪层逐步消融与其合并为一层,导致该层积雪深度增加,占比呈增加趋势,由27.27%增加至44.83%;(3)其余雪层厚度基本保持不变,积雪剖面底部深霜层积雪厚度随雪坑位置稍有变化,呈小幅度上下起伏逐渐减小趋势,但占积雪剖面的比例略大于积雪稳定期,为38.74%。

3.2 不同遮蔽条件下积雪密度变化

本文积雪密度分类依据参考日本学者黑岩大助研究成果^[29]。该试验区积雪稳定期及融雪期全层积雪密度均属低密度积雪,变化范围区间在0.05~0.26 g/cm³(积雪稳定期)和0.05~0.35 g/cm³(融雪期)(见图2)。积雪稳定期内的林冠下与开阔地两种遮蔽条件下,分层积雪密度垂直廓线呈单峰型

变化特征,可以归纳为:(1)林冠下积雪密度均值为0.1516 g/cm³,随积雪稳定期内气温降低而呈减小趋势。各层积雪密度分布特征表现为积雪剖面表层(新雪层)与底部(深霜层)积雪密度较小,中部(细粒雪层、中粒雪层、粗粒雪层)积雪密度较大,中粒雪层积雪密度最大(见图2(a))。林冠下雪层密度以中粒雪层(0.1899 g/cm³)为界限,上下两层积雪密度基本呈对称均匀速率变化趋势,即雪层积雪密度自新雪层至中粒雪层呈匀速上升趋势,中粒雪层至深霜层呈匀速下降趋势;(2)开阔地积雪密度均值为0.1772 g/cm³,随积雪稳定期内气温降低而呈减小趋势。各层积雪密度分布特征表现为开阔地雪层积雪密度自新雪层至粗粒雪层均匀增加,峰值出现在粗粒雪层(0.2463 g/cm³),后至深霜层积雪密度大幅度减小降至0.1318 g/cm³(见图2(b))。究其原因可能为,雪层剖面中部密度由于受到上覆积雪压力作用、温度梯度变化及粒间水分迁移等相关要素影响,形成雪层剖面密度最大区域^[30],且积雪稳定期内林冠截留降雪及树荫遮蔽作用减缓了降雪速率,致使林冠下新雪层疏松度及孔隙率均大于开阔地,因此林冠下积雪密度明显小于开阔地,这与陆恒等^[30]、郝晓华等^[31]和高培等^[28]的研究结果基本一致。

融雪期开阔地与林冠下两种遮蔽条件下,积雪密度垂直廓线变化趋势基本一致,均表现为雪层中间密度较大,表层与底层密度较小特征(见图2(c)、

图 2(d)),融雪期雪层密度高于积雪稳定期雪层密度,融雪期分层积雪密度变化特征为:(1)开阔地与林冠下全层积雪密度随融雪期气温波动上升呈增加趋势,平均值分别为 0.2677 和 0.2712 g/cm³; (2)林冠下与开阔地分层积雪密度垂直廓线变化特征基本一致,雪层密度从新雪层向下逐渐增大,至中粒雪层(0.3406 g/cm³;林冠下)与细粒雪层(0.3224 g/cm³;开阔地)达峰值。究其原因可能为,融雪期积雪密度变化过程中,融雪水起主导作用,同时与雪层内对流、冷凝、辐射和热传导等因素引起的热量交换相互制约^[18,32]。而林冠条件下积雪表面残留的枯枝落叶等大量杂质在新雪层融化后逐步出露,该污化条件在一定程度上加速了雪层融化^[30],致使林冠下全层积雪密度略大于开阔地,同时中部雪层处形成的冰壳层在一定程度上阻隔了上部积雪水下渗,中层融雪水聚集,使融雪期开阔地与林冠下中部积雪密度达峰值。

3.3 不同遮蔽条件下积雪液态含水率变化

积雪液态含水率一定程度上会直接支配积雪层内物质与能量迁移^[33]。由于试验观测期内积雪由数次非连续性降雪构成,雪内形成明显层状结构,同时伴随气温大幅波动上升与下降,致使分层积雪密度、雪层持水能力、粒径及孔隙率等均存有明显差

异^[18]。积融雪期内雪层液态体积含水率垂直廓线变化趋势见图 3。积雪稳定期雪层液态含水率变化特征为:(1)林冠下与开阔地全层液态含水率随积雪稳定期气温逐步降低均呈减小趋势,平均值分别为 0.536% 和 0.637%; (2)林冠下雪层液态含水率自表层至下部呈均匀上升趋势,最大值与最小值分别出现在深霜层和新雪层,分别为 0.787% 和 0.215%; (3)开阔地雪层液态含水率随积雪深度变化呈单峰型,雪层含水率自新雪层至下部雪层匀速增加,至粗粒雪层含水率达峰值,为 0.950%,后至深霜层含水率大幅度减小降至 0.498%。究其原因可能为,开阔地外部环境状况通过雪-气界面使新雪层获得更多的太阳辐射,使雪层内温度升高,进而融水下渗,同时积雪期经过长时间的积雪压实变质作用,出现雪花向粒雪和冰转化的现象并伴随水汽游移,使得积雪期开阔地含水率最大值出现在粗雪粒层^[30]。由于林冠下微气象条件较开阔地更为稳定,其太阳辐射量及大气温度均小于开阔地,进而致使林冠下新雪层融化量及雪深均小于开阔地,同时林冠下深霜层主要受到上部雪层水汽迁移的影响,因此液态含水率在此层达峰值。林冠下深霜层含水率略大于开阔地,这可能是由于林冠下表层土温略大于开阔地所致。

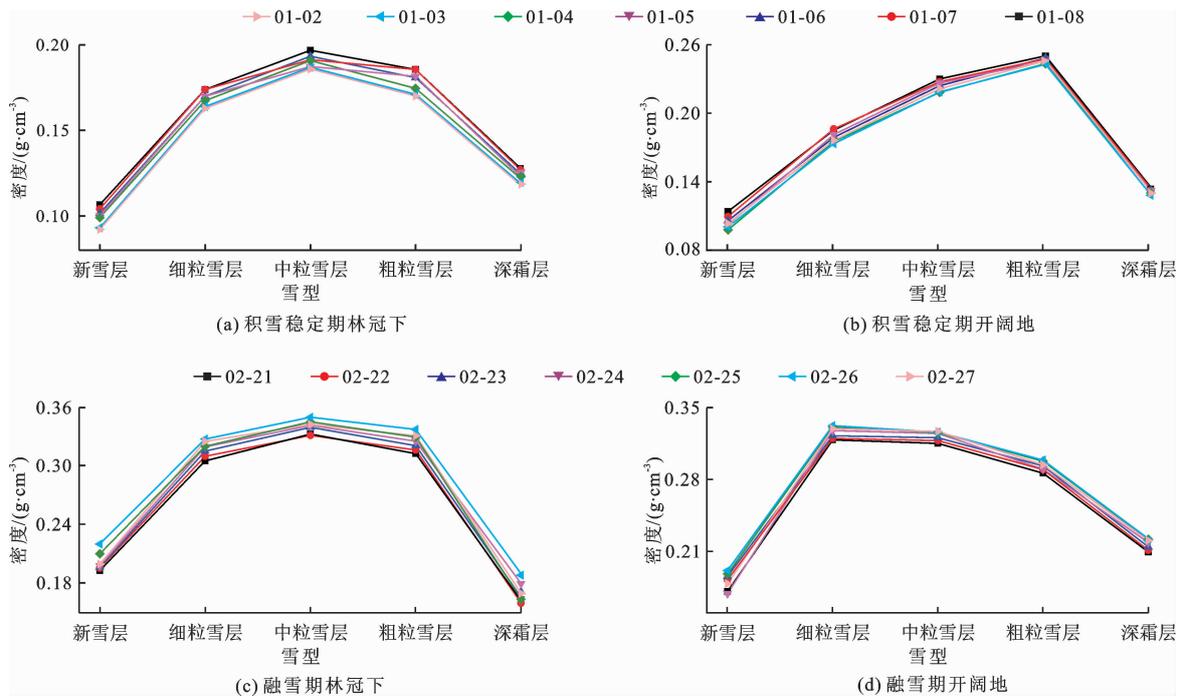


图 2 2018 年 1 次降雪过程后不同遮蔽条件下分层积雪密度变化

融雪期林冠下与开阔地雪层含水率垂直廓线变化趋势基本一致,均随积雪深度变化呈单峰型,即积

雪剖面表层与底部含水率较小,中部较大(见图 3(c)、3(d))。该时段内分层积雪含水率变化特征

为:(1)林冠下与开阔地全层液态含水率随气温逐步上升均呈增加趋势,平均值分别为 1.097% 和 1.157%;(2)林冠下与开阔地雪层液态含水率峰值均集中在细粒雪层,分别为 1.415% 和 2.110%。此时积雪属于潮雪^[33],由冰、空气及自由水分构成^[35]。主要原因可能为新雪层接收太阳辐射量较

大,致使融雪水下渗到一定深度后,由于外界环境风的作用及内部积雪变质等作用受阻而沿水平方向缓慢流动形成硬度较大的冰壳层^[36-37],大致位于雪层剖面细粒雪层处,在一定程度上阻挡了上部融雪水下渗,同时也阻挡了热量及其他物质向下部传输^[28],因此在细粒雪层处含水率达到峰值。

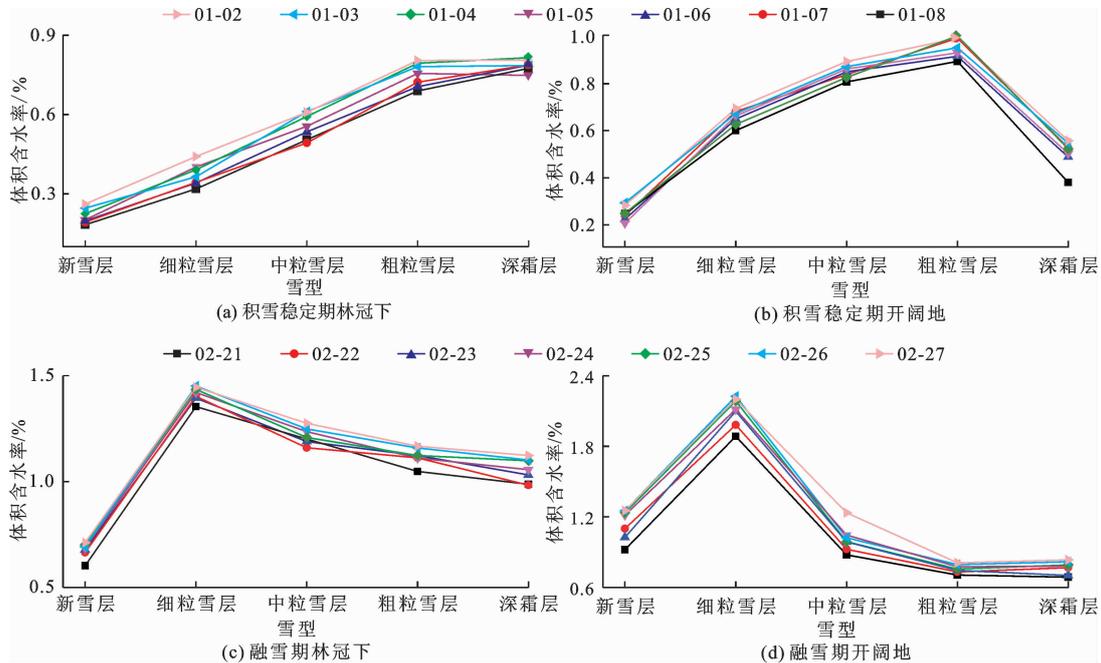


图3 一次降雪过程后分层积雪含水率变化

4 讨论

根据试验结果统计出不同遮蔽条件下各层积雪物理特性的相关特征值(表3和4)并结合图1,可以看出,积融雪期内一次降雪停止后新雪层厚度随气温及时间变化逐渐减小,究其原因,可能为积雪稳定期内的降雪输入使降落至原积雪层表面的新雪层较为松散,初始的新雪密度主要由冰晶的类型和结晶量决定,一般为 40 ~ 100 kg/m³^[34],雪粒间空隙较大,伴随积雪稳定期气温的变化,新雪黏结,空隙减小,新雪层厚度逐渐减小,积雪剖面高度逐渐下降,

原积雪表层受到上覆积雪压力的作用致使密实化过程逐渐加强^[27],但由于积雪稳定期气温整体较低,且太阳辐射较弱,积雪主要依靠自身重力发生密实化作用,该时期积雪密实化作用是一种缓慢的过程^[28]。而融雪期雪层深度变化幅度及深霜层深度均大于积雪稳定期,这是由于融雪期内雪面接收太阳辐射量较多,同时由于积雪具有高反射率^[32],短波辐射作用深度浅,影响表层较大,雪表融化变质,因此深度变化显著。积雪剖面中层与底层由于地温回升及上层融雪水下渗,雪层易于压实,导致积雪底层厚度逐渐减小^[28,38]。

表3 研究区积雪期内分层积雪物理特性特征值

监测雪层	林冠下			开阔地		
	积雪深度/cm	积雪密度/(g·cm ⁻³)	积雪含水率/%	积雪深度/cm	积雪密度/(g·cm ⁻³)	积雪含水率/%
新雪层	2.71	0.0991	0.215	3.57	0.1048	0.243
细粒雪层	2.50	0.1684	0.337	3.17	0.1795	0.650
中粒雪层	3.14	0.1899	0.541	2.15	0.2238	0.845
粗粒雪层	6.79	0.1781	0.552	8.07	0.2463	0.950
深霜层	7.21	0.1224	0.677	7.93	0.1318	0.498

表4 研究区融雪期内分层积雪物理特性特征值

监测雪层	林冠下			开阔地		
	积雪深度/cm	积雪密度/($g \cdot cm^{-3}$)	积雪含水率/%	积雪深度/cm	积雪密度/($g \cdot cm^{-3}$)	积雪含水率/%
新雪层	2.14	0.2022	0.677	2.29	0.1808	1.143
细粒雪层	1.43	0.3178	1.415	1.43	0.3259	2.099
中粒雪层	2.50	0.3406	1.217	2.16	0.3224	1.012
粗粒雪层	5.93	0.3250	1.121	6.93	0.2928	0.761
深霜层	7.14	0.1703	1.055	8.14	0.2168	0.769

在大陆性气候条件下,我国西北地区季节性积雪呈厚度较浅、气温偏低等特征^[29-30,39],该区域气候有利于积雪深霜层的发育,伴随积雪稳定期气温逐步下降,地温影响及温度梯度同时作用下致使雪层内变质与再结晶作用加剧^[39],进而在雪层底部形成粒径较大、孔隙率较高且较为疏松的深霜层,因此雪层剖面底部密度较小。在变质时间、冰晶类型与结晶量共同制约下,由新降雪构成的新雪层密度一般要小于深霜层。

在野外观测试验数据获取过程中发现,新雪层液态含水率较小,且含水率为0的频率较高,国际冰雪分类委员会按照液态含水率不同将积雪划分为干雪(0)、潮雪(0~3%)、湿雪(3%~8%)、很湿雪(8%~15%)和雪粥(>15%)^[28,31,34],因此该研究区稳定期新雪层属于干雪。究其原因可能为,新雪层主要由冰与空气构成^[35],其含水率主要取决于冰晶类型与结晶量^[34]。融雪期新雪层液态含水率数值大多为0,可能由于冻融作用及昼夜温差较大,且雪-气界面热量交换弱,使新雪层温度远低于外界空气温度,雪内液态水冻结所致^[18,28]。深霜层含水率较大,可能原因为融雪期温度逐渐升高,土壤热传导作用加剧致使积雪底部受热进而使液态含水率发生变化^[28]。

5 结 论

(1)积雪期内,降雪停止后新雪层厚度随气温及时间变化逐渐减小,其余各层厚度基本保持不变,其中深霜层与粗粒雪层深度比重较大;融雪期雪层深度变化幅度大于积雪稳定期,主要体现在上层积雪消融,深度变化较为明显。

(2)积雪期内,开阔地分层积雪液态含水率自上而下先增加后减少,呈单峰型,峰值出现在粗粒雪层,林冠下分层积雪液态含水率自上而下呈均匀递增趋势,峰值出现在深霜层;融雪期不同遮蔽条件下

雪层含水率均随雪深垂直廓线变化呈单峰型,峰值集中在细粒雪层。

(3)不同遮蔽条件下积雪期分层积雪密度垂直廓线变化特征基本一致,雪层密度从新雪层向下逐渐增大,至粗雪层(开阔地)与中粒雪层(林冠下)达到峰值;融雪期均呈现中间密度较大,表层与底层密度较小的趋势。

参考文献:

- [1] 李培基. 中国西部积雪变化特征[J]. 地理学报, 1993, 60(6): 505-515.
- [2] 彭亮, 郑淑文, 何英, 等. 基于MODIS的积雪时空变化与CMADS气象因子相关性研究——以塔什库尔干河流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(4): 53-62.
- [3] 高卫东, 魏文寿, 张丽旭. 近30a来天山西部积雪与气候变化——以天山积雪雪崩研究站为例[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 68-73.
- [4] 璩向宁, 汪一鸣. 近一千年来贺兰山积雪和气候变化[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 35-42.
- [5] RANGO A, MARTINE J. Revisiting the degree-day method for snowmelt computations [J]. Water Resources Bulletin, 1995, 31(4): 657-669.
- [6] 李杨, 顾建丽, 张璞, 等. 准噶尔盆地积雪储量的遥感反演及变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2010, 33(4): 623-629.
- [7] 户元涛. 1996-2012年欧亚大陆积雪与气候变化的相互关系[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [8] KARL T R, GROISMAN P Y, KNIGHT R W, et al. Recent variations of snow cover and snowfall in North America and their relation to precipitation and temperature variations [J]. Journal of Climate, 1993, 6(7): 1327-1344.
- [9] DÉRY S J, BROWN R D. Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(22): L22504.
- [10] 王鹏, 穆振侠. KM河流域融雪径流与积雪面积-气温关系分析[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 28

- 31 + 36.
- [11] ANDERTON S P, WHITE S M, ALYERA B. Evaluation of spatial variability in snow water equivalent for a high mountain catchment [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(3): 435 - 453.
- [12] POMEROY J W, PARYIAINEN J, HEDSTROM N, et al. Coupled modelling of forest snow interception and sublimation [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(15): 2317 - 2337.
- [13] 邢坤, 雷晓云, 雷晓辉, 等. 分布式水文模型 EasyDHM 在玛纳斯河流域径流模拟中的应用[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(4): 20 - 23.
- [14] 陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 中国天山西部山区森林积雪消融过程观测分析——以巩乃斯河谷为例[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(5): 936 - 947.
- [15] SCHNEIDERMAN E M, MATONSE A H, ZION M S, et al. Comparison of approaches for snowpack estimation in New York City watersheds [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 27(21): 3050 - 3060.
- [16] PAN Y, BIRDSEY R A, PHILLIPS O L, et al. The structure, distribution, and biomass of the world's forests [J]. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2013, 44(1): 593 - 622.
- [17] RAYNOLDS M K, COMISO J C, WALKER D A, et al. Relationship between satellite - derived land surface temperatures, arctic vegetation types and NDVI [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(4): 1884 - 1894.
- [18] 陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 季节性森林积雪融雪期雪层含水率垂直廓线与时间变化特征[J]. *地理研究*, 2011, 30(7): 1244 - 1253.
- [19] 刘海亮, 蔡体久, 满秀玲, 等. 小兴安岭主要森林类型对降雪、积雪和融雪过程的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(2): 20 - 25.
- [20] METCALFE R, BUTTLE J. A statistical model of spatially distributed snowmelt rates in a boreal forest basin [J]. *Hydrological Processes*, 1998, 12(10 - 11): 1701 - 1722.
- [21] BEWLEY D, ESSERY R, POMEROY J, et al. Measurements and modelling of snowmelt and turbulent heat fluxes over shrub tundra [J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2010, 14(7): 1331 - 1340.
- [22] 陈卫东, 张波, 霸广忠. 春雪消融产生的森林径流特征及其影响[J]. *黑龙江水利科技*, 2001, 29(3): 54 - 55.
- [23] 张淑兰, 肖洋, 张海军, 等. 丰林自然保护区 3 种典型森林类型对降雪、积融雪过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 37 - 41.
- [24] 李小兰, 姜逢清, 王少平, 等. 2011 - 2013 年乌鲁木齐城 - 郊冬季积雪深度与密度空间分布特征[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1168 - 1177.
- [25] 段斌斌. 融雪期冻土水热状况及积雪特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2018.
- [26] 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.
- [27] 陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 天山季节性积雪稳定期雪密度与积累速率的观测分析[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(2): 374 - 380.
- [28] 高培, 魏文寿, 刘明哲, 等. 天山西部季节性积雪密度及含水率的特性分析[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(4): 786 - 793.
- [29] 王彦龙. 中国雪崩研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [30] 陆恒, 魏文寿, 刘明哲, 等. 中国天山西部季节性森林积雪物理特性[J]. *地理科学进展*, 2011, 30(11): 1403 - 1409.
- [31] 郝晓华, 王建, 车涛, 等. 祁连山区冰沟流域积雪分布特征及其属性观测分析[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(2): 284 - 292.
- [32] 王元, 刘志辉, 陈冲. 天山北坡融雪期雪层含水率、密度和雪层温度研究[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(5): 803 - 811.
- [33] 马世伟. 东北低山丘陵区季节性积雪特性研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [34] 丁永健. 寒区水文导论[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [35] KANTO E. Snow characteristics in Dronning Maud Land [D]. Helsinki: Academic Dissertation in Geophysics, 2006: 15 - 16.
- [36] 温家洪, 康建成, 汪大立, 等. 东南极伊利莎白公主地 LGB65 点的雪层密度与剖面特征[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(2): 156 - 163.
- [37] 王飞腾, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区表面雪层演化成冰过程的观测研究[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(1): 45 - 53.
- [38] 周石研, 中尾正义, 桥本重将, 等. 湿雪的密实化与颗粒粗化过程研究[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 275 - 281.
- [39] 张志忠, 刘正兴. 天山巩乃斯河谷季节积雪变质作用因素分析[J]. *冰川冻土*, 1987, 9(S1): 27 - 33.