

# 天山北坡中段草地、林地积雪消融过程的定量化分析

张云云<sup>1</sup>, 张毓涛<sup>2</sup>, 师庆东<sup>1,3</sup>, 李吉玫<sup>2</sup>, 芦建江<sup>2</sup>

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆林业科学院森林生态研究所, 乌鲁木齐 830000; 3. 新疆大学教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 依托天山森林生态系统定位站, 选择典型区域设置林地、草地固定观测小区, 在积雪消融期对林地和草地积雪特性(雪深、雪密度、液态含水率、雪温)、产流量、侵蚀量以及常规气象指标进行定量化观测, 对比分析林地和草地的积雪消融过程。结果表明: 积雪消融期林地树冠对降雪的截留量约为 56.8%, 草地平均积雪深度是林地 2.5 倍; 因树冠截留雪受重力作用下降使融雪产流后期林地积雪深度下降速率大于草地; 林地融雪产流的时间比草地早, 产流期林地和草地积雪层密度、液态含水率的变化规律相似, “峰值”均在积雪中间层, 但林地积雪的平均雪密度和平均液态含水率分别为 0.48 g/cm<sup>3</sup>, 0.61%, 均大于草地 0.29 g/cm<sup>3</sup>, 0.52%; 林地雪温的“峰值”在积雪表层, 而草地在积雪底层, 林地平均雪温为 -0.032 °C, 低于草地 0.046 °C; 且雪液态含水率和积雪层温度呈正相关( $r=0.611$ ,  $p<0.05$ ); 草地径流小区的产流量和对地表的侵蚀量分别是林地的 2.6 倍; 林地、草地对地表的侵蚀量占总径流量百分比分别为 0.21%, 0.71%; 林地在融雪产流过程中对地表的冲刷作用小于草地, 体现了森林的固土作用。研究结果为小尺度探讨积雪消融过程提供理论依据和数据基础。

**关键词:** 积雪深度; 积雪密度; 液态含水率; 雪温; 径流量; 积雪消融; 天山北坡

**中图分类号:** S715      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2019)03-0108-07

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.017

## Quantitative Analysis of Snow Melting Process in Grassland and Forest Land on the Middle Section of Northern Slope of Tianshan Mountain

ZHANG Yunyun<sup>1</sup>, ZHANG Yutao<sup>2</sup>, SHI Qingdong<sup>1,3</sup>, LI Jimen<sup>2</sup>, LU Jianjiang<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University,

Urumqi 830046; 2. Institute of Forestry and Ecological Research, Xinjiang Forestry Academy,

Urumqi 830000; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046)

**Abstract:** Relying on the Tianshan Forest Ecosystem Positioning Station, fixed observation areas were set in the typical regional forest and grassland, and the snow cover characteristics (snow density, liquid water content and snow temperature), runoff yield, erosion amount and conventional meteorological indicators of the forest and grassland were monitored during the snow melting period, and the snow melting process of forest and grassland was compared and analyzed. The results showed that the interception of snowfall by canopy of forest was about 56.8% during snow melting period, the average snow cover depth of grassland was 2.5 times that of forest. The decline rate of snow depth in the forest was higher than that in grassland at the late stage of snowmelt runoff, which due to the snow intercepted by the canopy fell under gravity. The producing time of snowmelt runoff was earlier in forest than that in grassland, and the variation of snow cover density and liquid water content in forest and grassland was similar during the runoff period, and the peak value was in the middle layer of snow, however, the average snow density and average liquid water content of the snow in the forest were 0.48 g/cm<sup>3</sup> and 0.61%, which were both greater than those in the grassland (0.29 g/cm<sup>3</sup> and 0.52%). The peak value of the snow temperature in the forest was on the surface of the snow, while that in the grassland was on the bottom of the snow, the average snow temperature of the forest was -0.032 °C, which was lower than the grassland by 0.046 °C. And the liquid water content of the snow was significantly positively correlated with the temperature of the snow layer ( $r=0.611$ ,  $p<0.05$ ). The runoff yield

收稿日期: 2019-01-02

资助项目: 国家“十二五”农村领域国家科技计划项目(2015BAD07B0303)

第一作者: 张云云(1994-), 女, 硕士研究生, 主要从事森林水文研究。E-mail: yunzhang1102@163.com

通信作者: 张毓涛(1968-), 男, 研究员, 主要从事森林水文研究。E-mail: zyt218@163.com

and surface erosion of grassland runoff plot were twice and six times as much as those of forest. The percentage of surface erosion of forest and grassland to total runoff was 0.21% and 0.71%, respectively. The scouring effect of snowmelt runoff to the surface in forest is smaller than that in the grassland during the process of snowmelt runoff production, which reflected the soil consolidation of the forest. The research results provided theoretical basis and data basis for small-scale study of snow melting process.

**Keywords:** snow depth; snow density; liquid water content; snow temperature; runoff; snow melting; north slope of Tianshan Mountains

春季积雪消融过程产生的径流量是西北地区春季径流的重要补给来源,对缓解春旱具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>,不仅受到温度、太阳辐射、风速等气象因子的影响,也受到植被类型和覆盖度等下垫面因子的影响<sup>[3-4]</sup>。天山北坡冬季降雪周期长、年积雪量大,其春季融雪产生的径流量不仅对周围河流域的有重要补给作用,也会对区域水环境的水文特征造成影响<sup>[5]</sup>。林中积雪消融过程,由于植被的拦截作用,改变了林中积雪的累积情况,同时也对林中的微气候产生影响。王平等<sup>[6]</sup>通过对典型黑土区坡面、微型小流域和小流域3个尺度融雪监测,揭示不同尺度的融雪产流特征;张淑兰等<sup>[7]</sup>在小兴安岭丰林自然保护区以内3种典型林分为研究对象,得出不同林分之间的融雪过程具有明显的差异性。目前针对天山北坡积雪消融过程的研究,大多数基于流域尺度,以雪特性、融雪产流过程及融雪径流模拟等方面为主要研究方向<sup>[8-9]</sup>,在坡面尺度按照不同地表类型对融雪过程的影响的研究相对较少。王元等<sup>[10]</sup>通过观测天山北坡融雪期雪密度、雪层温度等雪物理特性数据,并与气象指标进行相关性分析,来定性分析整个融雪过程;王元<sup>[11]</sup>以天山北坡军塘湖流域为例,对融雪期雪特性规律进行研究,揭示河流域融雪径流特征及其影响因素;范昊明等<sup>[12]</sup>指出坡面融雪过程研究是未来融雪侵蚀研究中应重点解决的问题;周宏飞等<sup>[13]</sup>通过在天池自然保护区设置径流小区对不同土地利用类型春季积雪消融过程进行定位观测,总结出植被类型等因素都显著地影响着春季融雪径流量的大小。

因此,本文在坡面尺度上监测与分析林地、草地的积雪消融过程,通过监测积雪特性(雪深、雪密度、雪含水率、雪温)和气象要素指标(温度等)来定量化分析比较林地、草地积雪消融过程中产流量及对地表的侵蚀量,为在流域尺度上探讨积雪消融过程提供理论和数据基础,也为天山南北的水资源合理利用工作提供借鉴。

## 1 研究区概况

本文依托天山森林生态系统定位研究站,该站是国家林业局森林生态系统定位研究网络(CFERN)之一,研究区地处天山北坡中段,地理坐标为 $87^{\circ}27'28.5''$ —

$87^{\circ}28'47.7''$  E,  $43^{\circ}24'48.3''$ — $43^{\circ}26'17.9''$  N,海拔1 910~2 700 m,年平均气温 $2.1^{\circ}\text{C}$ ,年降水量约600 mm,其中冬季降雪量占20%以上,春季融雪观测期于2018年的3月开始监测到4月底结束,按天连续观测,日观测时间按照实际产流时间从11:00到18:00,雪特性(雪深、雪密度、雪含水率、雪温)、融雪径流量和对地表的侵蚀量的监测间隔时间为1 h。利用定位站内的HOBO U30 NRC气象观测站对观测场的温度进行自动监测(监测间隔5 min),融雪监测期逐日气温变化,见图1,其中在2018年3月15—28日监测期内气温均小于 $0^{\circ}\text{C}$ ,3月28日至4月15日的监测期内气温均大于 $0^{\circ}\text{C}$ ;整个监测期平均气温为 $0.04^{\circ}\text{C}$ ,最高气温为 $3.86^{\circ}\text{C}$ ,最低气温为 $-1.13^{\circ}\text{C}$ 。

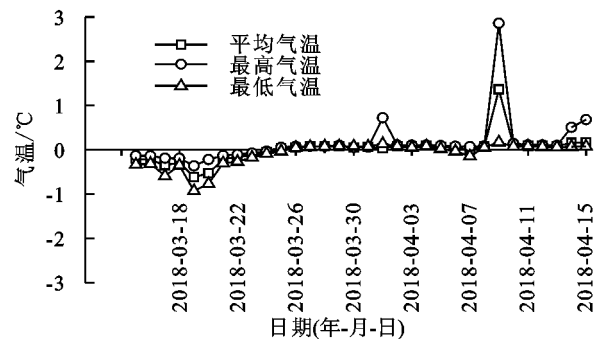


图1 融雪观测期内气温逐日变化

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

根据历年气象数据显示,天山北坡中段林地、草地融雪期从3月中旬开始到4月中旬结束,其中监测期不考虑冬季积雪全部融化后因春寒又骤降雪的情况。因受冬季野外监测条件的限制及考虑到海拔、坡度等因素对积雪影响,降雪前在海拔、坡度等因素基本一致条件下,选择天山北坡中段典型开阔地设置林地、草地 $5\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的固定积雪观测场各2个,作为代表林地、草地春季融雪产流和产沙的重要观测点。相比较林外草地,雪岭云杉林下存在不小于5 cm的凋落物层,其主要由雪岭云杉落叶、落枝、落皮、落果等组分组成。赵晓春等<sup>[14]</sup>提出云杉林下凋落物对降水(降雨和降雪)具有较大的持水性,具有良好的水源涵养功能,即在坡面融雪产流时,凋落物的存在会影响林下春季积雪消融的产流量和侵蚀量。为了在自然状态下观察林地、草地坡

面产流情况以及避免因破坏土壤的原状结构对积雪产流过程造成的影响,在观测场四周用边长为 1 m 的水泥板进行固定,其中高出地面的水泥板长度约为 40 cm,构筑这样的长方形区域的固定径流小区以便长期进行野外监测。观测场具体信息见表 1。

表 1 观测场信息

样地类型	树种组成	郁闭度	盖度	坡度/°	坡向	海拔/m
林地 1	云杉	0.7		18.7	阴坡	1916
林地 2	云杉	0.6		20.0	阴坡	1910
草地 1	小檗、蔷薇等		0.6	14.0	阴坡	1929
草地 2	小檗、蔷薇等		0.7	15.0	阴坡	1920

## 2.2 融雪数据的监测

雪深的测量:在林地、草地观测场附近距离地面高 2 m 处分别布置超声波雪深传感器对融雪期雪深度进行自动监测,每隔 1 h 监测 1 次,取平均值为 1 天的积雪深度,同时通过空气湿度对雪深观测的结果进行修正<sup>[15]</sup>。

雪密度、液态含水率、雪温的测量:从林地、草地积雪产流开始到结束按日监测,监测时间段为地方时 11:00—18:00,每间隔 1 h 监测 1 次。为防止因监测雪特性破坏雪的物理结构而干扰观测场中产流情况,在水平距观测场 50 cm 处使用不锈钢铲采用连续推进方式挖取长为 1 m 的积雪剖面,积雪观测剖面根据降雪雪深从积雪底层到表面每 5 cm 或 3 cm 分为 1 层,每层平行观测 5 次,取平均值作为该层的监测值,其中雪密度和液态含水率利用 Snow Fork 雪特性仪进行监测,监测之前对 Snow Fork 雪特性仪进行大气校正;雪层温度利用 2 个测量范围为 -50~70 °C 的 ST-3 温度计(精度±0.1 °C)对各个积雪层的雪温平行监测 5 次,取平均值为该层的雪温。

径流量、地表侵蚀量的测量:采用人工监测的方法,参照周宏飞等<sup>[13]</sup>径流桶收集法,利用承接桶、电子手提秤(精度为±10 g),从日产流开始到结束,按 1 h 为测量间隔,测定其产流量(kg)。同时将 1 h 内总径流量装入大桶中,通过将桶内径流泥沙搅匀。用收集瓶取 10 g 水沙混合样静置 24 h 后小心倾倒掉上部清水,将沉淀的泥沙混合样放置烧杯中,用烘箱(108 °C)烘干水分。差量法计算单位时间输出径流小区的泥沙量。

气象指标:依托天山森林生态系统定位研究站 HOBO 小气候气象观测站对观测场的气象因子进行自动监测,间隔时间 5 min,监测内容包括太阳辐射量、气温等。

## 3 结果与分析

### 3.1 融雪期林地、草地积雪深度特征分析

积雪深度作为表征降雪量、融雪径流量的重要参

数<sup>[16-17]</sup>,通过在春季融雪期对林地、草地积雪深度进行实时监测,对比分析林地、草积雪深度随时间的日变化。由图 2 可知,积雪消融前期(3 月 15—28 日),因气温低于 0 °C(图 1)林地、草地积雪深度的增加和减少主要受春季降雪和太阳辐射引起的雪面的蒸发影响,使积雪深度随时间的变化趋势相对比较平缓。其中 2018 年 3 月 19 日因降大雪,使得林地、草地平均积雪深度最大,分别为 25.5,11.8 cm;积雪消融期林地、草地积雪深度总体呈下降趋势,但草地积雪深度下降速率比较平缓,受降雪和太阳辐射的影响,呈“波浪形”上下波动;因树冠对降雪的截留作用,林地积雪深度上下波动的幅度小于草地,但积雪深度下降速率快,尤其在 4 月相比较草地积雪深度下降速率最大,出现这种情况的原因:一方面因为 4 月气温逐渐上升,太阳辐射增强,加快了积雪表面的蒸发以及积雪的产流量,导致在林地、草地积雪深度总体均呈下降的趋势;另一方面林地在积雪消融后期积雪深度下降较快,通过观察可知,在气温、太阳辐射增强的同时,林地雪岭云杉树冠的截留雪在光照下逐渐融化,形成小雨滴降落在林地表面,加速了林地积雪的融化,使积雪深度下降;整个积雪消融期林地、草地积平均深度分别为 8.06,18.67 cm,在不考虑风向、风速等因素的影响,相比较林外草地的积雪量,同一坡度、同一海拔处平均郁闭度约为 0.65 的林地树冠对降雪的截留量为 56.8%,可见林地积雪深度受林地树冠的截留作用较大,这与周宏飞等<sup>[13]</sup>提出雪岭云杉对降雪有较大的截留量的结论基本一致。

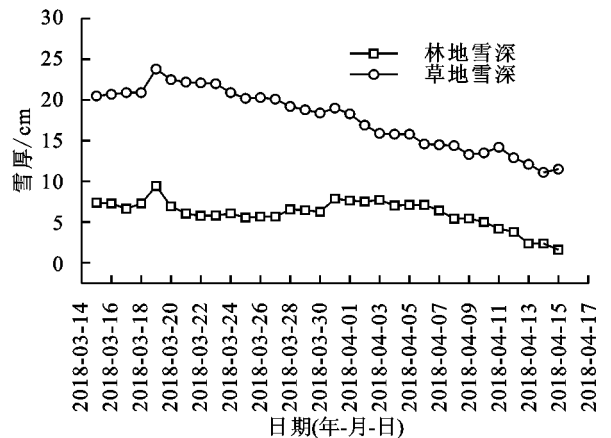


图 2 融雪期林地、草地积雪深度逐日变化

### 3.2 融雪期林地、草地积雪密度特征

融雪期林地、草地积雪密度的监测时间均从径流小区开始产流到产流停止。通过野外实际观察得知,林地产流时间早于草地,即林地产流是从 3 月 22 日开始到 3 月 27 日结束,约为 5 天;草地产流从 3 月 27 日开始监测到 4 月 6 日停止产流结束(其中 2018 年 4 月 1—4 日出现降温天气,同时出现雨夹雪天)约为 8 天。春季积雪

消融观测期林地、草地积雪密度在积雪垂直剖面的变化趋势基本一致,从积雪底层到表层呈先增大后减少的变化趋势,积雪中间层均出现“峰值”,由积雪深度的不同(图 3),草地“峰值”的大致范围为 10—15 cm 处,林地“峰值”的大致范围为 5—10 cm 处;积雪消融期同一积雪

层林地平均雪密度大于草地,在积雪底层 0—5 cm 处相差值最大,主要因林地树冠截留的降雪受重力的作用下降到地表,使林地底层积雪密实化,从而增大积雪底层的雪密度。在整个积雪消融观测期,林地、草地平均积雪密度分别为 0.48,0.29 g/cm<sup>3</sup>。

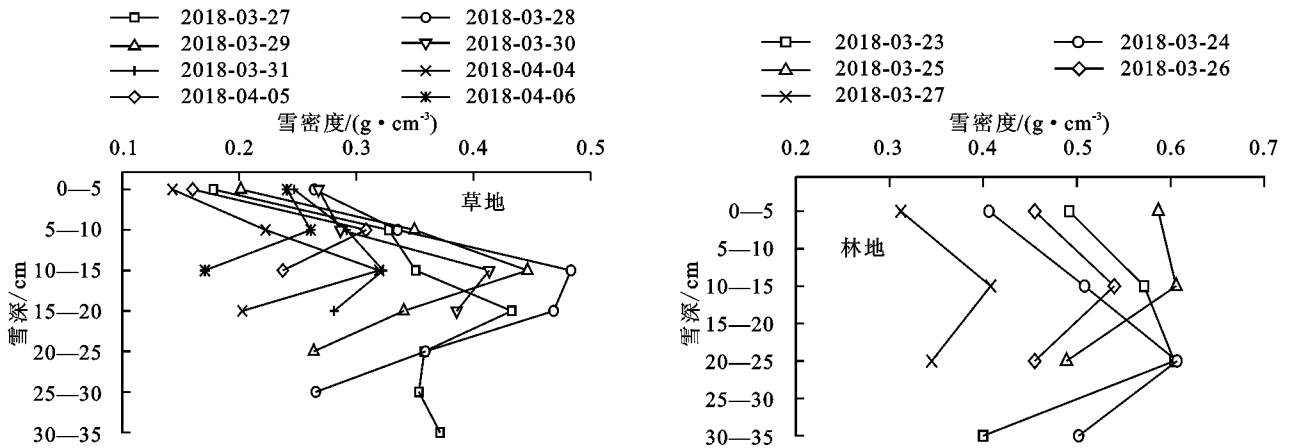


图 3 融雪期林地、草地雪密度逐日变化

### 3.3 融雪期林地、草地积雪液态含水率特征

由图 4 可知,草地积雪含水率从底层到表层随时间延长一般呈先增大后减小的变化趋势,在积雪中间层达到“峰值”,其变化规律与雪密度在垂直剖面的变化一致,但在 4 月 6 日,草地积雪垂直剖面液态含水率的变化规律出现反常,从积雪底层到表层液态含水率逐渐减小,表层达到最小值为 0.11%,这与马世伟等<sup>[18]</sup>提出雪温降低会造成积雪含水率减小的理论基本一致。由图 5 可知,4 月 6 日积雪层雪温均小于 0℃且呈下降趋势,同时对二者进行相关性分析( $r=0.611, p<0.05$ )呈正相关,即雪层温度降低可以抑制积雪消融。林地积雪液态

含水率从积雪底层到表层随时间的变化趋势一致均呈先增加后减小的变化趋势;在中间层 5—10 cm 处雪液态含水率达到“峰值”,主要因在融雪期气温逐渐升高,使得表层积雪经过太阳辐射、风等作用产生的积雪融水下渗到积雪层一定深度时,在缓慢流动的过程中遇冷冻结形成了硬度较大冰层<sup>[19]</sup>,在雪层中的冰层相当于一个特殊的“阻隔板”在一定程度上阻碍了上部热量、水分及其他物质向下部传输<sup>[20]</sup>;林地、草地积雪底层液态含水率均高,这一现象与土壤的热传导作用及地表植被增大积雪的孔隙率有关。整个积雪消融监测期,融雪期林地平均液态含水率为 0.61% 大于草地 0.52%。

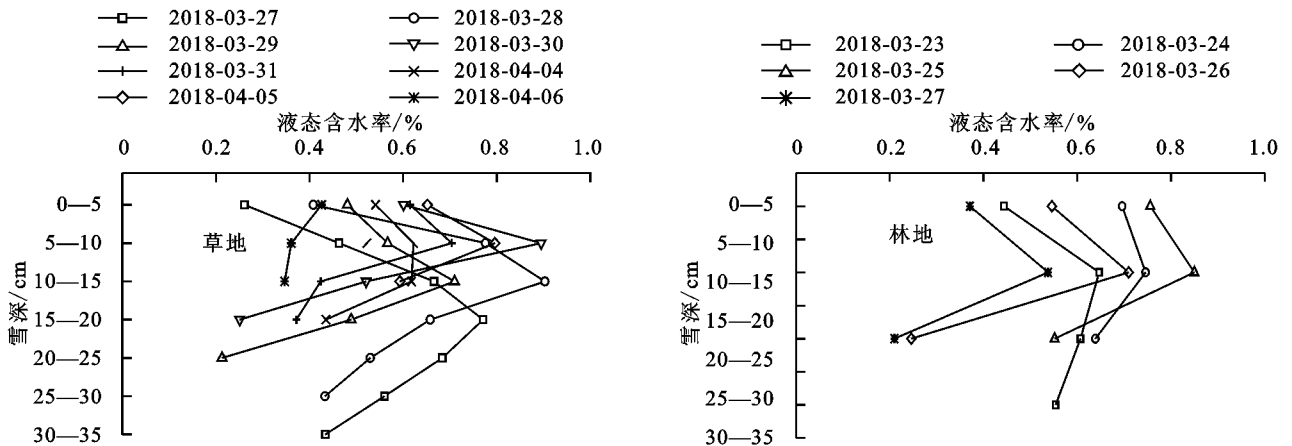


图 4 融雪期林地、草地积雪液态含水率逐日变化

### 3.4 融雪期林地、草地积雪层温度变化特征

由图 5 可知,除 4 月 6 日草地积雪垂直剖面各积雪层温度日变化呈下降变化,其他观测日草地积雪垂直剖面各积雪层温度日变化规律基本一致,从积雪底层到积雪表层,雪温呈先升高后降低的趋势,在中间层出现“峰值”其中在 3 月 30 日各积雪层雪温均在

0℃以上,且在 10—15 cm 处出现雪温层的最高值(0.55℃),而在 4 月 6 日林地积雪层雪温从积雪底层到表层出现下降的原因是由当日下午 13:00 左右出现晴转多云,气温降低,太阳辐射强度相对减弱;草地同一积雪层处雪温随着时间的累积,雪温呈增加的变化趋势;林地积雪垂直剖面各积雪层雪温日变化均

呈增加的变化趋势,且各个监测日中雪温的“峰值”均出现在积雪层的表层,在 3 月 25 日积雪层表面达到最大值(0.35 ℃)。同一积雪层的雪温随着时间累积

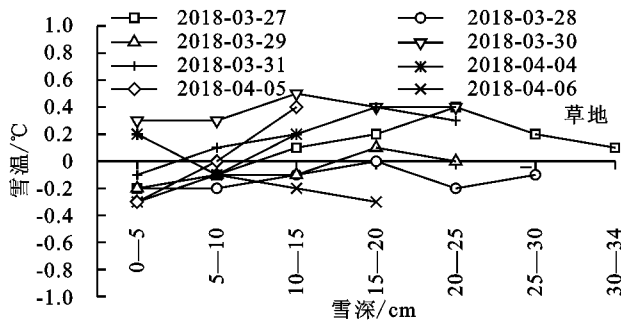


图 5 融雪期林地、草地积雪层雪温逐日变化

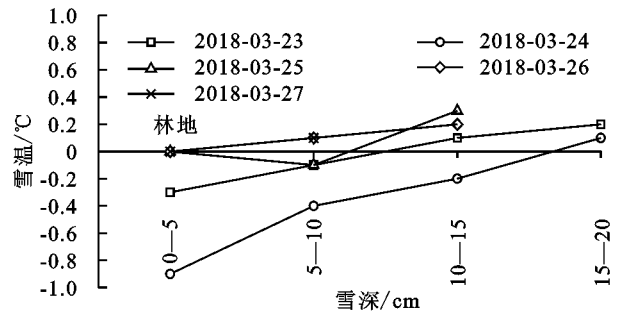
### 3.5 融雪期林地、草地产流量、侵蚀量定量分析

据数据显示,天山北坡积雪开始产流的时间一般从 3 月中旬开始到 4 月底<sup>[21]</sup>,通过野外实际观测,林地固定小区积雪产流时间比草地早 4 天,林地于 2018 年 3 月 23 日开始,草地于 2018 年 3 月 27 日开始。林地、草地径流量的监测时间范围为地方时 11:00—18:00,即白天从开始产流到产流结束按小时收集产生的径流量。由图 6 可知,处于阴坡的林地、草地大约在 12:00 左右开始产流,到 18:00 左右停止产流。融雪产流日监测中,草地产流量在 13:00—14:00,14:00—15:00 达到“峰值”,其中在 3 月 29 日 13:00—14:00 产流值最大,为 4.18 kg/h;林地产流量的“峰值”出现在 14:00—15:00 左右,其中在 3 月 25 日 14:00—15:00 产流值最大,为 1.23 kg/h,其主要因林地平均雪层温度低于草地(图 5)及林地积雪受树冠的影响接受的光合有辐射相对较少;产流期草地径流小区总产流量为 9.57 kg 是林地径流小区总产流量的 2 倍,一方面因林地地表覆盖有不小于 5 cm 的凋落物,增大了对径流的吸收量,减少了坡面产流;另一方面林地树冠对降雪的截留使得林地总积雪量相对草地少,即林地总的雪水当量小于草地。通过烘干法得到林地、草地积雪产流对地表的侵蚀量,与产流量呈正相关(图 6),即产流量越大,其对地表的侵蚀作用越大。整个产流期,草地对地表的侵蚀量为 68.17 g 是林地的 6 倍,可见融雪期林地地表产流量、侵蚀量均小于草地,体现了森林固土、涵养水源的作用。

## 4 讨论

已有研究<sup>[22-23]</sup>表明,融雪过程的复杂性,除季节变化是决定因素外,在小尺度受坡度、坡向、地表植被类型、海拔以及融雪期降雨等重要因素的影响。本文依托天山森林生态定位站在坡面尺度典型区设置林地、草地不同地表植被的融雪径流固定小区,径流小区的海拔高度、坡度基本一致。从积雪开始产流对各个小区的雪特性(雪深、雪密度、雪含水率、雪层温度)

的变化规律与草地消融期一致,也呈增加的趋势。在整个积雪消融监测期,草地积雪层平均温度(0.047 ℃)高于林地(-0.032 ℃)。



及产流量、侵蚀量进行定量监测,对比分析林地、草地融雪特征。

草地积雪融化前的厚度约是林地的 2.5 倍,不考虑风速等因素的影响,其主要影响因素是林地树冠对降雪的截留作用,相比较林外草地的降雪量,树冠对降雪的截留量为 56.8%。林地、草地积雪密度的“峰值”均出现在积雪中间层,这与融雪期底层积雪通过再结晶使雪层底部形成松散的、空隙率大的、颗粒较粗的深霜,使得雪密度相对较小<sup>[24]</sup>;积雪表层为新降雪,所以密度也较小;中部的积雪由于受到上覆积雪压实作用,使得中部积雪密度大于顶层和底层积雪密度,这与陆恒等<sup>[24]</sup>提出积雪稳定期即融雪前期雪密度的变化特征一致,但在整个观测期林地的雪密度大于草地,积雪底层相差最大,主要因林地树冠截留雪的下降,造成林地积雪密实化。林地、草地融雪期含水率的“峰值”出现在积雪中间层,一方面因为积雪液态含水率随着积雪层雪温的升高而增大,即积雪层雪温与液态含水率呈显著正相关<sup>[21]</sup>;另一方面因为积雪表层积雪下渗到一定深度形成“挡水层”,挡水层上的积雪层具有很高的含水率<sup>[22-24]</sup>。积雪液态含水率在积雪垂直剖面的变化规律与雪密度基本一致,对二者进行相关性分析,呈现显著正相关( $r=0.786, p<0.05$ ),主要是雪层密度越大,积雪颗粒小,从而孔隙率小,使得融雪水自由下渗受阻,含水率增大<sup>[21]</sup>。融雪期林地积雪层温度从底层到表层呈升高的变化趋势,在积雪表层为最大值;而草地积雪层雪温从底层到表层呈先增大后减小变化,在积雪中间层雪温达到“峰值”。同一积雪层随着时间延长雪温呈升高的趋势,其主要受气温升高的影响;整个产流期林地的平均雪层温度低于草地的雪层温度,造成此现象的原因可能是林地树冠对太阳光的遮挡作用,使到达地表的太阳辐射相对较少。融雪产流期通过定量化监测林地、草地产流量和对地表的侵蚀量,可知草地的产流量远大于林地,主要因草地积雪深度大于林地且林地地表的凋落物具有吸水性,

而侵蚀量与产流量成正相关,草地产流对地表的侵蚀

量远大于林地,是林地侵蚀量的6倍。

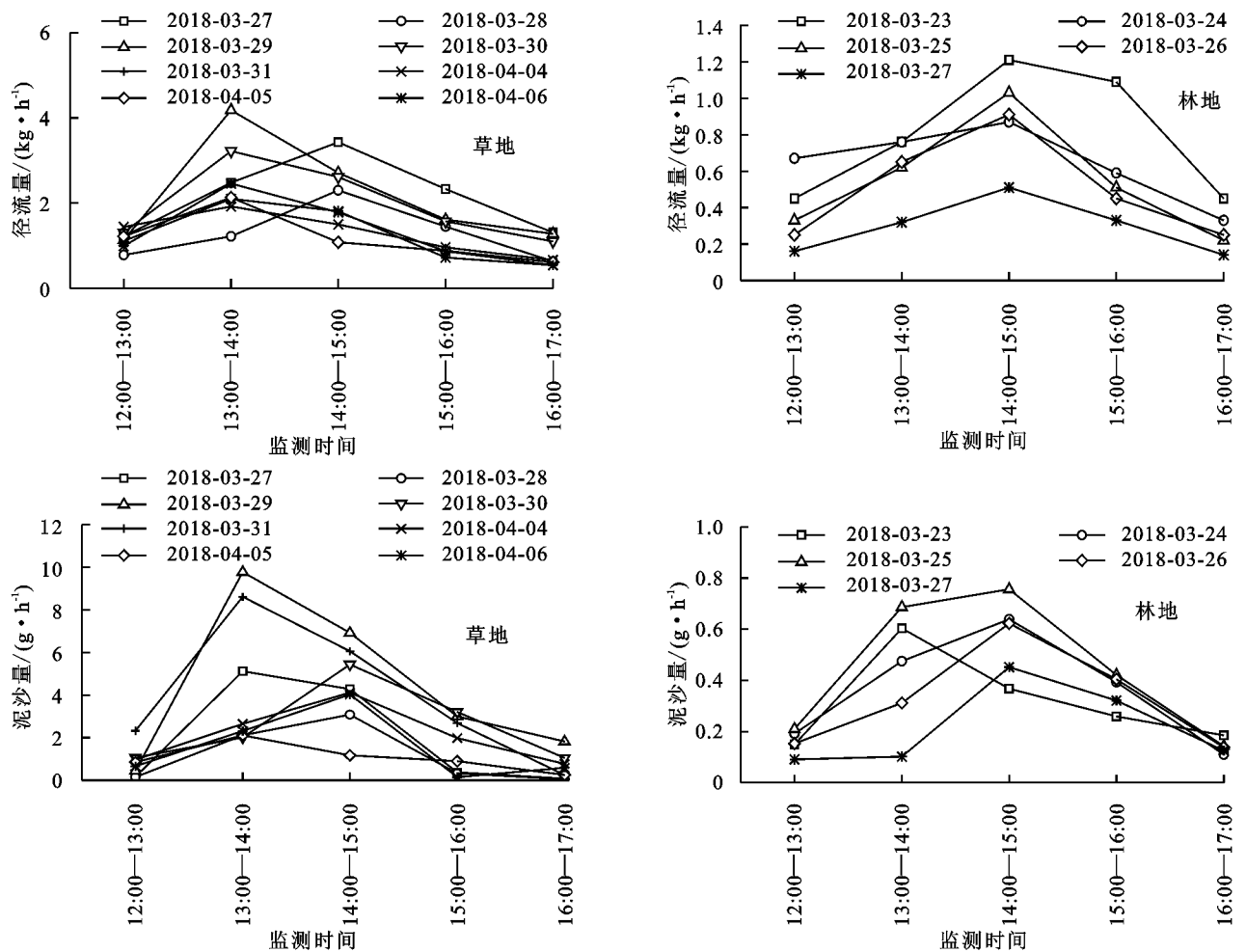


图6 草地、林地积雪产流量、侵蚀量逐日变化

## 5 结论

(1)林地和草地的积雪厚度存在较大的差异,草地的积雪深度约是林地的2.5倍,相比林外草地的积雪量,林地树冠对降雪截留量约为56.8%;积雪产流后期林地积雪深度下降速率远大于草地。

(2)林地和草地积雪从底层到表层雪密度呈先增大后减少变化,“峰值”均在积雪中间层;整个消融期林地平均积雪密度大于草地,分别为0.48,0.29 g/cm<sup>3</sup>,主要因林地树冠截留的降雪受重力作用落到地表,使地表积雪密实化。融雪期林地和草地积雪垂直剖面液态含水率的最大值均在积雪中间层,主要因积雪表层产生的融雪水下渗,在积雪中间层产生含水率较高的“挡水层”以及积雪液态含水率的变化与积雪层温度成显著正相关。在整个融雪观测期,林地积雪液态含水率大于草地,分别为0.61%,0.52%。

(3)融雪期草地积雪层雪温的最大值在积雪中间层10-20 cm处,积雪底层的雪温较小,其平均值为-0.1℃;受天气骤变降温的影响,4月6日雪温温度逐渐下降,均小于0℃。林地积雪层雪温呈逐渐增大的变化趋势,雪温的最小值也在积雪底层,取平均值

为-0.24℃。整个融雪观测期林地的雪层温度低于草地,分别为-0.032,0.047℃。

(4)径流小区内林地融雪产流的时间比草地早4天,在林地、草地融雪日产流均于12:00左右开始产流,且在13:00-15:00时间段内产流速率最快,产流量最大;比较产流量与侵蚀量随时间的变化曲线,可知积雪产流量与对地表的侵蚀量呈正比,即产流量越大相对应地表的侵蚀量也大。林地、草地整个产流观测期,草地总产流量是林地的2倍,侵蚀量是林地6倍;林地、草地融雪侵蚀量占总径流量百分比分别为0.21%,0.71%。

### 参考文献:

- [1] 刘海亮,蔡体久,闫丽,等.不同类型原始红松林对降雪融雪过程的影响[J].水土保持学报,2010,24(6):24-27.
- [2] 王晓辉.地形与林型影响春季融雪过程的量化研究[J].北京林业大学学报,2016,38(2):83-89.
- [3] 孙美平,姚晓军,李忠勤,等.天山东段冰雪消融与产汇流水文过程:以乌鲁木齐河源区为例[J].地理学报,2014,69(7):945-957.
- [4] Pomeroy J W, Gray D M, Shook K R, et al. An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surface modeling [J]. Hydrological Processes,

- 2015, 12(15): 2339-2367.
- [5] 席小康,朱仲元,宋小园,等. 锡林河流域融雪径流时间变化特征与成因分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 150-153.
- [6] 王平,李浩,陈强,等. 典型黑土区不同尺度观测场地融雪径流[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 244-247.
- [7] 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.
- [8] 高洁. 高山积雪的时空分布特征及融雪模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [9] Sade R, Rimmer A, Litaor M I, et al. Snow surface energy and mass balance in a warm temperate climate mountain [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 848-862.
- [10] 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.
- [11] 王元. 融雪期积雪特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
- [12] 范昊明,武敏,周丽丽,等. 融雪侵蚀研究进展[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 146-152.
- [13] 周宏飞,王大庆,马健,等. 新疆天池自然保护区春季融雪产流特征分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 68-71.
- [14] 赵晓春,刘建军,任军辉,等. 贺兰山 4 种典型森林类型凋落物持水性能研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 107-111.
- (上接第 107 页)
- [5] 史进纳,蒋代华,肖斌,等. 不同连栽代次桉树林土壤有机碳演变特征[J]. 热带作物学报, 2015, 36(4): 748-752.
- [6] 韩雪成,赵雨森,辛颖,等. 大兴安岭北部火烧迹地兴安落叶松人工林土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 183-188.
- [7] 邓羽松,丁树文,蔡崇法,等. 鄂东南崩岗洪积扇土壤物理性质空间分异特征[J]. 中国农业科学, 2014, 47(24): 4850-4857.
- [8] Yu F K, Huang X H, Duan C Q, et al. Impacts of *Agrotis adenophora* invasion on soil physical-chemical properties of *Eucalyptus* plantation and implications for constructing agro-forest ecosystem [J]. Ecological Engineering, 2014, 64: 130-135.
- [9] 杨金玲,张甘霖. 城市“土壤水库”库容的萎缩及其环境效应[J]. 土壤, 2008, 40(6): 992-996.
- [10] 刘月秀,李银,曹福亮. 广东桉树林土壤物理性质及其影响因子分析[J]. 林业工程学报, 2012, 26(4): 13-18.
- [11] Garten J C T. Soil carbon storage beneath recently established treeplantations in Tennessee and South Carolina, USA [J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 23: 93-102.
- [12] Lange B, Germann P F, Lüscher P. Significance of roots for soil water storage capacity of hydromorphic forest soils [J]. Schweizerische Zeitschrift Fur Forstwesen, 2010, 161(12): 510-516.
- [13] 杨钙仁. 桉树人工林对林区地表水的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [14] 刘艇,王继红. 不同植被覆盖土壤水库容特征及渗透速率[J]. 四川农业大学学报, 2010, 28(4): 92-96.
- [15] 伍海兵,周建强,方海兰. 上海中心城区绿地土壤水库特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(3): 966-974.
- [16] 王纪杰,张有郁,俞元春,等. 不同林龄尾巨桉人工林土壤的水土保持功能[J]. 福建农林大学学报, 2012, 41(1): 46-52.
- [17] 李灵,张玉,孔丽娜,等. 武夷山风景区不同林地类型土壤水分物理性质及土壤水库特性[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 60-65.
- [18] 韦东艳. 不同经营措施下桉树人工林林分特性与立地土壤状况研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [19] 时忠杰,张宁南,何常清,等. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1932-1939.
- [20] 明安刚,于浩龙,陈厚荣,等. 广西大青山米老排人工林土壤物理性质[J]. 林业科技开发, 2010, 24(5): 70-73.
- [21] 朱宏光,温远光,梁宏温,等. 广西桉树林取代马尾松林对植物多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2009, 31(6): 149-153.
- [22] 杨钙仁,苏晓琳,蔡德所,等. 植被变化对人工林地蓄水功能的影响[J]. 中国水土保持, 2012(3): 18-20.
- [15] 梁延伟,梁海河,王柏林. 超声波传感器雪深测量与人工观测对比试验分析[J]. 气象科技, 2012, 40(2): 198-202.
- [16] 陆恒. 中国天山西部巩乃斯河流域森林积雪过程研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [17] 王芹芹. 融雪期积雪深度变化影响因子分析及模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [18] 马世伟,周丽丽,马仁明,等. 东北低山丘陵区季节性积雪特性研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 332-336.
- [19] 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.
- [20] 张伟,沈永平,贺建桥,等. 额尔齐斯河源区森林对春季融雪过程的影响评估[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1260-1270.
- [21] 孟现勇,吉晓楠,孙志群,等. 天山北坡中段融雪径流敏感性分析: 以军塘湖流域为例[J]. 水土保持通报, 2014, 34(3): 277-282.
- [22] 刘海亮. 小兴安岭主要森林类型对降雪融雪过程的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [23] Marks D, Kimball J, Tingey D, et al. The sensitivity of snowmelt processes to climate conditions and forest cover during rain-on-snow: A case study of the 1996 Pacific Northwest flood [J]. Hydrological Processes, 2015, 12(10/11): 1569-1587.
- [24] 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.