

祁连山不同海拔梯度下青海云杉林积雪消融过程研究

李海生¹, 李广^{1*}, 刘贤德^{1,2*}, 王顺利², 赵永宏¹

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 甘肃 张掖 734000)

摘要:积雪消融是北方地表重要的水文过程,与森林植被有着极其紧密的关系。以祁连山大野口流域不同海拔梯度下青海云杉林内积雪为研究对象,在积雪消融期选择典型样地作为观测点,通过野外实测降雪量、积雪厚度、空气温度、土壤温度、郁闭度等观测指标,系统研究了积雪消融与温度、海拔高度和郁闭度等之间的关系。结果表明:1)积雪消融主要发生在10月到翌年4月,并随青海云杉林内温度和土壤温度先降低后增大,积雪消融速率呈“V”字形变化模式,在1月最小,不同海拔高度平均为 $0.51 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。2)积雪密度、降雪量、积雪厚度和雪水当量都随海拔的升高而呈现递增的趋势,积雪厚度与雪水当量、郁闭度、差异极显著($P < 0.01$),与降雪量差异显著($P < 0.05$)。3)在同一海拔不同坡位的青海云杉林,积雪厚度大小为下坡>上坡>中坡,雪消融速率为下坡>中坡>上坡;不同坡向,积雪消融速率为半阳坡>半阴坡>阴坡。4)2700 m林缘和林内的积雪消融速率都呈现先减后增的变化趋势,1月份消融速率最小,林缘积雪消融值为 $1.35 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,林内积雪消融值为 $1.22 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;4月份消融速率最大,林缘消融值为 $12.03 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,林内消融值为 $9.01 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

关键词:青海云杉林;积雪消融;海拔梯度;坡位;坡向;祁连山

中图分类号:S791.189 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)04-0001-06

Snowmelt Process in *Picea crassifolia* Forest Land at Different Elevations in Qilian Mountains

LI Hai-sheng¹, LI Guang^{1*}, LIU Xian-de^{1,2*}, WANG Shun-li², ZHAO Yong-hong¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract: Snowmelt is an important hydrological process in northern China, which has very close relationship with forest vegetation. Snows occurred in Qinghai spruce forest under different elevations in the Dayekou basin of the Qilian Mountains were taken as research object, the typical sampling sites were chosen as the observation points during the snowmelt period. Indices such as snowfall, snow thickness, air temperature, soil temperature, and canopy density were measured in these sites. The relationship between snowmelt and temperature, altitude and canopy density was systematically studied. The results indicated that 1) snowmelt occurred during October to April of next year. The rate of snowmelt decreased and then increased with forest interior temperature and soil temperature, showing a “V-type” curve. The minimum rate occurred in January ($0.51 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$). 2) Snow density, snowfall, snow cover thickness and snow water equivalent were all progressively increased with the increase of elevation. Very significant differences were found between the thickness of the snow cover and the factors such as snow water equivalent and canopy density ($P < 0.01$). Differences between the thickness and snowfall were significant ($P < 0.05$). 3) The

收稿日期:2016-11-12 修回日期:2017-02-09

基金项目:国家自然科学基金项目(91225302, 91425301, 31360201)。

作者简介:李海生,男,在读研究生,研究方向:森林生态。E-mail:18419060785@163.com

*通信作者:李广,男,教授,博士,研究方向:农业信息技术。E-mail:lig@gau.edu.cn

刘贤德,男,研究员,博导,研究方向:森林生态。E-mail:liuxiande666@163.com

rank of snow cover thickness at the same elevation but different slope positions was down-slope > up-slope > mid-slope. The rank of snowmelt rate at the same elevation but different slope positions was down-slope > mid-slope > up-slope. 4) The snowmelt rate in inferior forest and edge 2 700 m above the sea level decreased first and then increased, and the minimum rate occurred in January: $1.35 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ for forest edge and $1.22 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ for the inferior forest. The maximum rates were found in April: $12.03 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ for the forest edge and $9.01 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ for the inferior forest.

Key words: *Picea crassifolia*; snowmelt rate; altitude; slope position; slope direction; Qilian Mountain

积雪是我国北方地区特有的水文现象,是对降水季节变化规律的进一步调整^[1]。在积雪消融过程中,随着冷空气的入侵所造成的降雪及吹雪搬运与堆积形成,呈现冬季累积春季集中融化的降水形式,是一类特殊而重要的下垫面^[2]。国内外已有大量积雪与气候效应的深入研究,表明了积雪在全球气候变化中的重要价值^[3]。尽管从20世纪80年代中期开始,北半球冬末至夏初的积雪面积呈现萎缩的趋势^[4],但是,在广大北部山区,冬季贮存的积雪仍为春季河川径流提供大量的水资源^[5]。已有研究认为在青藏高原、东北和内蒙古等北方地区春季融雪径流量占河川年径流量的15%~50%^[6]。积雪消融有效地缓解了北方流域因春季少雨而形成的枯水期,减少了各河流域下游地区春季灌溉高峰与降水少的矛盾^[7]。王兴^[7]研究了基于卫星遥感的祁连山区积雪特征,祁连山积雪资源丰富,以高反射率、低导热率以及融雪水文效应对地球能量和辐射平衡以及水分循环产生深刻的影响;高洁^[8]利用融雪模型研究了高山积雪的时空分布特征;王计平^[9]等研究了森林植被对积雪分配及其消融的影响。祁连山水源涵养林研究院开展了不同流域、不同过程、不同尺度的积雪消融研究^[10-13]。以上这些主要基于地理信息系统、模型、雪面感热通量等从宏观上研究积雪消融,以及积雪消融引起的一些局部效应。

祁连山积雪自古以来被认为是河西走廊的生命之源,祁连山积雪融水不仅为干旱的河西绿洲提供了大量的水资源,而且是河西走廊社会经济发展的基础,所以定位监测、研究不同海拔下积雪消融过程对于西北干旱地区的河西走廊显得更为重要。本研究利用祁连山森林生态站多年的长期固定监测数据,根据不同海拔青海云杉林的自身特点,从青海云杉林郁闭度、空气温度、积雪密度及坡位等微观层面研究积雪消融的规律和特点。通过祁连山地区积雪消融规律及特征研究,有利于分析生态系统稳定和平衡以及水分循环的生态水文功能,进一步为不同尺度流域空间分布式融雪模型的构建提供参数指标。

1 研究区概况

研究区位于祁连山西水林区大野口流域($100^{\circ}17' - 100^{\circ}18'E$, $38^{\circ}32' - 38^{\circ}34'N$),海拔 $2\ 500\text{ m} \sim 3\ 800\text{ m}$,属于温带高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候。年平均气温 $-0.6\sim2.0^{\circ}\text{C}$,年均降水量为 433.6 mm ,年均蒸发量为 $1\ 081.7\text{ mm}$,年平均相对湿度为60%,流域总面积为 68 km^2 ^[11]。流域内阳坡为山地草原,阴坡为森林景观,以藓类青海云杉为主,在海拔 $3\ 000\sim3\ 300\text{ m}$ 有灌木云杉分布,海拔 $3\ 300\text{ m}$ 以亚高山湿性灌木为主^[12]。乔木以青海云杉(*Picea crassifolia*)为主,零星分布着祁连圆柏(*Sabina przewalskii*),建群种青海云杉呈斑块状或条状分布在试验区海拔 $2\ 500\sim3\ 300\text{ m}$ 阴坡和半阴坡地带,与阳坡草地犬齿交错分布。土壤类型依次为山地栗钙土、山地灰褐土、亚高山灌丛草甸土、高山寒漠土。在各类土壤中山地灰褐土和亚高山灌丛草甸土是生长森林的土壤,山地灰褐土分布在海拔 $2\ 500\sim3\ 300\text{ m}$ 地带,是乔木林的主要分布带,亚高山灌丛草甸土分布在海拔 $3\ 300\sim3\ 800\text{ m}$ 地带,是湿性灌木林的主要分布带。

2 材料与方法

2.1 样地布设

观测点选在不同海拔的青海云杉林固定样地($2\ 500\sim3\ 300\text{ m}$),根据不同海拔梯度共布设7个监测样地,按照林内、林缘及不同坡位共设置24个观测点,每个类型2个重复。各个监测点用GPS定位,用罗盘仪测定坡度、坡向等(表1)。

2.2 降雪消融值监测与计算方法

野外试验监测于2014年10月—2015年4月。监测点选择青海云杉固定样地内,依靠不同海拔气象观测数据及积雪厚度变化、雪水当量、雪密度等来分析积雪消融过程。观测积雪厚度用2根长约50cm的小铁棒插入地面约15cm左右(以保持稳定为原则),而铁棒之间用1根弹性较小的细线相连接,与地面保持平行,且使2根铁棒之间的距离保持约40cm。用黑色墨水在细线上均匀地做10个标记,

作为积雪深度观测标记点,用钢卷尺依次测量细线上的黑点在垂直于地面方向到地面(雪面)的距离,以10个数据的平均值为该监测点的积雪深度。第1次和第2次观测差值的平均值为该监测点的积雪消融值,其计算公式为

$$S_h = Lh_2 - Lh_1 \quad (1)$$

式中: S_h 表示积雪消融值, Lh_2 为本次细线到雪面距离的观测值, Lh_1 为上次细线到雪面距离的观测值,单位均为cm。

2.3 降雪密度的调查和计算方法

在每个监测样点选取具有代表性的区域,采用

表1 青海云杉林积雪消融观测点基本信息

Table 1 Basic information sampling sites of *Picea crassifolia*

观测点	经度	纬度	海拔/m	坡位	坡度/(°)	郁闭度
2 500 m	100°17'29.2"E	38°34'49.4"N	2 510	下坡	30	0.55
2 600 m	100°17'23.6"E	38°34'03.2"N	2 610	中部	32	0.65
2 700 m	100°17'5.1"E	38°32'13.6"N	2 750	中下坡	20	0.70
2 800 m	100°17'37"E	38°33'05"N	2 837	下坡	16	0.81
2 900 m	100°18'0.4"E	38°32'36.2"N	2 931	下坡	18	0.75
3 100 m	100°18'12.8"E	38°32'32.6"N	3 100	下坡	18	0.60
3 300 m	100°18'15.4"E	38°32'8.7"N	3 283	上坡	28	0.42

3 结果与分析

3.1 积雪消融速率随季节温度的变化规律

祁连山大野口流域在5—9月份为雨季,而10月到翌年的4月为雪季^[11]。积雪的形成和消融主要发生在雪季,积雪的消融主要依靠太阳的短波辐射来提高地面(雪面)的温度,从而加快分子之间的无规则运动来实现^[15]。如图1所示,从整个雪季积雪消融对气温变化的响应来看,10月到翌年1月青海云杉林内温度和土壤温度逐渐降低,但从1月到4月温度逐渐升高^[17],呈“V”字形变化。在试验期间,林内空气温度和土壤空气温度的变化趋势与积雪消融速率的变化趋势相同,冬季林内温度和土壤温度逐渐降低,积雪消融速率减小;春季温度逐渐上升,积雪消融速率则增大。同时对积雪消融速率与林内温度和土壤温度进行线性回归分析,得到回归方程为:

$$y = 3.330 + 0.096x_1 + 0.13x_2 \quad (R^2 = 0.725, P < 0.01) \quad (3)$$

式中: y 表示积雪消融速率, x_1 表示林内温度, x_2 表示土壤温度,从通径系数我们可以看出 x_1 和 x_2 分别对 y 的直接作用为: $P_{1y} = 0.379, P_{2y} = 0.486$ 。

青海云杉林内积雪的消融速率很大程度取决于所处环境温度的高低,由于青海云杉林冠幅大、林木高,又加上云杉林地处阴坡,形成了独特的林内小气

体积量雪器进行测量,取满雪后用电子秤进行称重,然后减去体积量雪器的重量,计算出雪密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。计算公式为

$$(M - m)/V \quad (2)$$

式中: M 为体积量雪器和雪的总质量, m 为体积量雪器的质量, V 是体积量雪器的体积。在每次降雪之后及时取样,每隔5 d观测1次,测定积雪密度。

2.4 雪水当量的计算方法

利用雪深和雪密度直接计算,得到雪水当量 L , $L = p * d$,单位 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$,其中 P 为积雪密度, d 为积雪厚度。

表1 青海云杉林积雪消融观测点基本信息

Table 1 Basic information sampling sites of *Picea crassifolia*

候,温度低、风速小^[13]。所以在整个雪季观测林内温度、土壤温度及冻土厚度对林内积雪消融情况具有重要的意义。

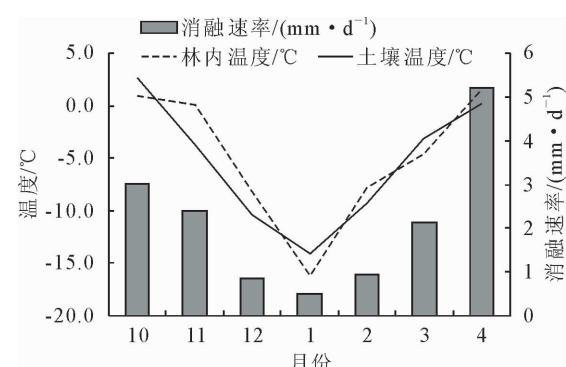


图1 祁连山积雪消融速率、林内温度和土壤温度随月份的变化规律

Fig. 1 Monthly variations of snowmelt rate, forest temperature and soil temperature in Qilian Mountains

3.2 温度和降雪量随海拔梯度的变化规律

图2结果表明,从2014年10月到2015年4月,研究区青海云杉林内平均空气温度随海拔升高而降低,海拔2 500 m处的平均温度最高,为2.12°C,海拔3 300 m处的平均温度最低,为-0.46°C。海拔和温度之间的总体规律为:海拔升高100 m,温度降低约0.58°C,这与王金叶^[12]等的研究结果是基本一致的。从图2可知,研究区降雪量随海拔升高而升高,海拔2 500 m处的平均降雪

量最小,为2.38 mm,海拔3 300 m处的平均降雪量最大,为5.13 mm,二者相差2.2倍。研究区降雪量和海拔之间的关系符合二次函数 $y=0.051x^2+0.0924x+2.16(R^2=0.9768)$ 。

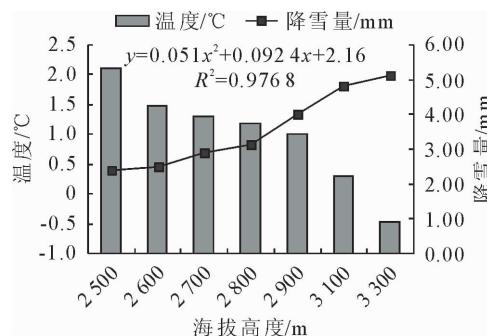


图2 祁连山温度和降雪量随海拔梯度的变化规律

Fig. 2 The variation of temperature and snowfall with altitude in Qilian Mountains

3.3 青海云杉林积雪消融随海拔变化规律

青海云杉作为祁连山主要建群种,在海拔2 300~3 400 m阴坡、半阴坡都有分布。随着海拔高度的升高,降雪量、积雪厚度、积雪密度和积雪当量均呈增大的趋势;其中,在海拔3 300 m处,四者均出现最大值,其值分别为5.13 mm、19.01 cm、0.27 g·cm⁻³和4.40 g·cm⁻²。但积雪消融速率随着海拔高度的升高,呈逐渐减小的趋势,在海拔2 500 m处最大,为2.45 mm·d⁻¹,由表2可见,随着海拔梯度的增大,青海云杉林的郁闭度先增大后减少,郁闭度对积雪消融过程也有一定的影响,郁闭度大,加强了冠幅对降雪的截留,所以导致林内积雪厚度减小^[16],所以尽管海拔2 800 m处的降雪量>海拔2 700 m处,但是郁闭度较大,冠幅对积雪截留的影响较大,导致林内积雪较少,因此海拔2 800 m积雪厚度略<海拔2 700 m;同时每个海拔梯度的青海云杉林内的积雪消融速率都有差异,并且随海拔的增高积雪消融速率减少,2 500 m海拔的青海云杉林积雪消融速率是3 300 m海拔的1.8倍。

如表3所示,对外界客观因子与积雪消融相关要素进行相关性分析。青海云杉林内积雪消融速率与海拔高度、雪水当量和降雪量均呈负相关,与郁闭度呈正相关性;积雪厚度与雪水当量、郁闭度和降雪量呈正相关,与海拔高度呈负相关;而积雪密度与海拔高度、雪水当量和降雪量均呈正相关,与郁闭度呈负相关。其中,降雪量和海拔高度对积雪消融速率影响最为显著,即相对系数 R^2 最大;雪水当量影响较为显著;郁闭度影响不显著,即相对系数 R^2 最小。因此根据相关系数绝对值的大小,对积雪消融速率影响的显著程度:海拔高度>降雪量>雪水当

量>郁闭度。

表2 不同海拔下降雪量、积雪厚度、积雪密度、郁闭度、雪水当量和消融速率的变化情况

Table 2 The variation of canopy density, snow equivalent and ablation rate at different altitudes

海拔 /m	降雪量 /mm	积雪厚度 /cm	积雪密度 /(g·cm ⁻³)	郁闭度	消融速率 /(mm·d ⁻¹)	雪水当量 /(g·cm ⁻²)
2 500	2.38	4.08	0.24	0.55	2.45	0.66
2 600	2.49	3.67	0.15	0.65	2.35	0.57
2 700	2.90	4.09	0.24	0.7	2.02	0.77
2 800	3.13	3.6	0.21	0.81	1.88	1.04
2 900	4.01	10.2	0.25	0.75	1.65	3.06
3 100	4.81	16.76	0.26	0.6	1.54	3.84
3 300	5.13	19.01	0.27	0.4	1.4	4.4

表3 积雪消融速率、厚度和密度与外界客观因子的相关性分析

Table 3 The correlation between snowmelt rate and snow water equivalent, and canopy density altitude

因子	海拔高度	雪水当量	郁闭度	降雪量
积雪消融速率	-0.959**	-0.823**	0.455*	-0.956**
积雪厚度	-0.823**	0.984**	0.901**	0.946*
积雪密度	0.620*	0.759**	-0.398	0.685

注: * 和 ** 分别表示该值在0.01和0.05水平上差异显著。

3.4 坡位对积雪消融的影响

坡位对青海云杉林内积雪消融有很大的影响。试验选择在2 600 m青海云杉林上坡、中坡、下坡布设监测点。从2014—2015年的监测数据来看(图3),由于林缘效应的原因,下坡的积雪厚度最大,上坡的年均积雪厚度为10.2 cm,中坡为8.1 cm,下坡为11.0 cm。但是在积雪消融方面,与坡位成反比,下坡积雪消融速率最高,为2.8 mm·d⁻¹,中坡的年均积雪消融速率次之,为2.5 mm·d⁻¹,上坡消融速率最小,为2.4 mm·d⁻¹,坡位和降雪量之间的拟合模型为 $y=0.1x^2-0.2x+2.5,R^2=1$ 。所以从图中可以看出同一植被类型在同一垂直地带上,从上到下,积雪消融速率呈现递增的趋势。

不同坡向的青海云杉林由于受到的太阳辐射强度不同以及郁闭度的差异,其积雪消融速率也有所不同。以2 900 m海拔青海云杉林2014年3月20日观测数据为例(表4),阴坡、半阴坡和半阳坡的青海云杉林郁闭度分别为0.8、0.75和0.4,这是因为郁闭度越大,光照对林内地面积雪的辐射强度越小,林内温度提升速率减慢,因此积雪消融程度缓慢。不同坡向积雪消融速率表现为:半阳坡>半阴坡>阴坡;由于半阳坡青海云杉林内积雪消融速率快,加上随处位置光照强度大,所以林内积雪消融程度大,因此林内积雪厚度:半阳坡>半阴坡>阴坡。

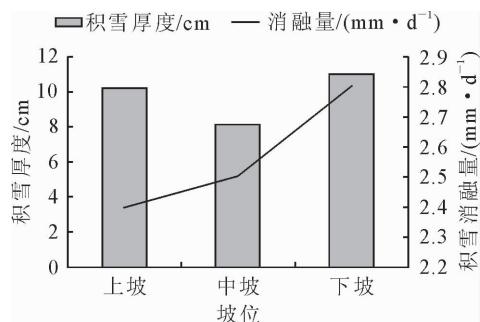


图3 祁连山积雪厚度和积雪消融速率随坡位的变化规律

Fig. 3 The variation of snow thickness and snowmelt rate with slope position in Qilian Mountains

表4 不同坡向对青海云杉林积雪消融速率和积雪厚度的影响

Table 4 Snowmelt rate and the thickness of snow cover in different slope positions

项目	郁闭度	积雪厚度/cm	积雪消融量/mm
2 900 m 阴坡青海云杉	0.8	12.8	5.7
2 900 m 半阴坡青海云杉	0.75	12.5	6.4
2 900 m 半阳坡青海云杉	0.4	6.8	8.6

3.5 林缘的积雪效应

由于青海云杉林大多分布在阴坡和半阴坡,所以在冬季和春季流域内盛行西风,因此阴坡和半阴坡更有利于积雪的积累^[9]。再加上云杉林属于高大乔木,可以通过树体自身改变风向和遮荫,从而实现对积雪分布的影响,使林缘附近产生大量的积雪,同时形成独特的积雪小环境,因此林外积雪比林内积雪较多,迎风面林缘积雪厚度是林内积雪的10倍以上^[12]。同时林内和林缘附近积雪消融也存在很大差异。

基于2 700 m 海拔青海云杉林的监测数据分析(图4),从2014年12月—2015年4月,青海云杉林的林缘和林内积雪消融速率都略呈现先减后增的变化趋势。林缘附近积雪消融速率从12月的1.80 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 减到1月的1.35 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$;林内的积雪消融速率从12月的1.34 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 减到1月的1.22 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,所以此时积雪消融1月之后随着气温的升高。林缘附近的积雪消融速率从2月的8.82 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到4月的12.03 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,林内的积雪消融速率从2月的4.24 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到4月的9.01 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。所以,林缘附近积雪消融速率略>林内的积雪消融速率(由于雪季林内蒸发几乎为零,所以积雪变化不考虑蒸发的影响),但是林内积雪厚度<林缘积雪,所以林内积雪比林缘消融得早。

4 结论与讨论

温度是影响积雪消融的主要因素,祁连山积雪

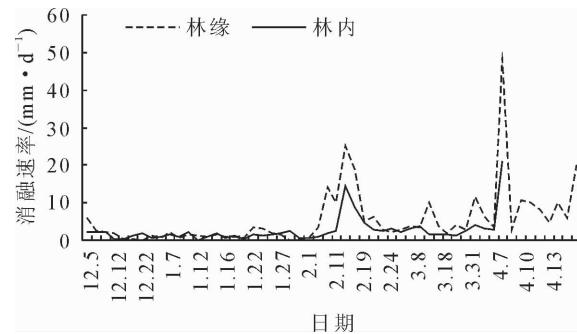


图4 海拔2 700 m 林缘和林内积雪消融速率变化规律

Fig. 4 Variation of snowmelt rate in forest edge and forest inferior in Qilian Mountains

的形成和消融过程主要发生在当年10月到翌年4月,随着青海云杉林内温度和土壤温度的季节变化,积雪消融速率呈“V”字形变化趋势。

随着海拔高度的升高,降雪量、积雪厚度、积雪密度和积雪当量均呈增大的趋势;其中,在海拔3 300 m处,均出现最大值,其值分别为5.13 mm、19.01 cm、0.27 g·cm⁻³和4.40 g·cm⁻²。积雪消融速率随着海拔高度的升高呈逐渐减小的趋势,在海拔2 500 m处最大,为2.45 mm·d⁻¹。随着海拔梯度的增大,青海云杉林的郁闭度先增大后减少,郁闭度对积雪消融过程也有一定的影响,郁闭度大加强了冠幅对降雪的截留,导致林内积雪厚度减小。

同一海拔不同坡位的青海云杉林,积雪厚度大小为下坡>上坡>中坡;积雪消融速率为下坡>中坡>上坡;在同一海拔不同坡向的青海云杉林,积雪消融速率:半阳坡>半阴坡>阴坡,积雪厚度:半阳坡>半阴坡>阴坡。

由于林内温度略<林外温度,林缘和林内的积雪消融速率略都呈现先减后增的变化趋势,所以林缘附近积雪消融速率略>林内的积雪消融速率,同时在4月份消融速率最大,林缘消融速率为12.03 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,林内消融速率为9.01 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,在1月份最小,林缘消融速率为1.351 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,林内消融速率为1.22 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,但是林内积雪厚度<林缘积雪,所以林内积雪比林缘消融得早。

参考文献:

- 王金叶.祁连山水源涵养林生态系统水分传输过程与机理研究[D].长沙:中南林业科技大学,2006.
- YEH T C, WETHERALD R, MANABE S. Model study of the short-term climatic and hydrologic effects of sudden snow covers re-removal[J]. Mon. Wea. Rev., 1983, 111(5): 1013-1024.
- YASUNARI T, KITOH A, T OKIOKA T. Local and remote responses to excessive snow mass over Eurasia appearing in the northern spring and summer climate—a study with the MRI GCM[J]. J. Meteor Soc. Japan, 1991, 69(4): 473-487.

- [4] CESS R D ,POTTER G L,ZHANG M H ,*et al* . Interpretation of snow climate feedback as produced by 17 general circulation models[J]. Science,1991,5022:888-892.
- [5] WILLIAMS J. The influence of snow cover on the atmospheric circulation and its role in climatic change:an analysis based on results from the NCAR global circulation model[J]. J. Appl. Meteor,1975,14(2):137-152.
- [6] BROWN R D,ROBINSON D A. Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922—2010 including an assessment of uncertainty[J]. The Cryosphere,2011,5:219-229.
- [7] 王兴. 基于卫星遥感的祁连山区积雪特征研究[D]. 北京:中国气象科学研究院,2008.
- [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] 王计平,蔚奴平,丁易,等. 森林植被对积雪分配及其消融影响研究综述[J]. 自然资源学报,2013,28(10):1808-1816.
WANG J P,WEI N P,DIN Y,*et al*. Study on the effects of forest vegetation on snow distribution and its ablation [J]. Journal of Natural Resources,2013,28 (10):1808 -1816. (in Chinese)
- [10] 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):783-786.
CHE Z X,JIN M,ZHANG X L,*et al* . Effects of different vegetation types on snow melt in Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2008,30 (3):783-786. (in Chinese)
- [11] 刘思敏,余新晓. 祁连山大野口流域降雪消融与融水径流分析[J]. 中南林业科技大学学报,2013,20(5):579-586.
LIU S M,YU X X. Floodfall analysis and meltwater runoff analysis in Pailugou watershed of Qilian Mountains [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2013,20 (5):579-586. (in Chinese)
- [12] 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,2001,16(Supp. 1):14-16.
WANG J Y,CHANG Z Q,JIN B W,*et al*. Study on distribution regularity of snow in Qilian Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University,2001,16(Supp. 1):14 -16. (in Chinese)
- [13] 任璐,王顺利. 祁连山2种植被下冻土的季节变化及数值模拟[J]. 林业科学研究,2016,29(4):596-602.
REN L,WANG S L. Seasonal changeand numerical simulation of the frozen soil under two types of vegetation in Qilian Mountains[J]. Forestry Research,2016,29 (4):596-602. (in Chinese)
- [14] 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.
ZHANG W,SHEN Y P,HE J P,*et al*. Evaluation of the influence of forest on spring snow melting process in the Irtysh region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014, 36 (5):1260-1270. (in Chinese)
- [15] HOCK R. Temperature index melt modelling in mountain areas[J]. Journal of Hydrology,2003,282(1-4):104-115.
- [16] 李宏毅,王建,郝晓华,等. 祁连山区风吹雪现象对积雪质能过程的影响[J]. 冰川冻土,2012,34(5):56-60.
LI H Y,WANG J,HAO X H,*et al*. Effects of wind - blown snow on snow quality process in Qilian Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34 (5):56-60. (in Chinese)
- [17] 魏振侠,姜卉芳. 新疆阿克苏河流域昆马力克河积雪消融规律对气候变化的响应[J]. 冰川冻土,2012,34(6):124-132.
WEI Z X,JIANG H F. Study on the response of the melting of snow to the climate change in the kumalik river, Xinjiang Aksu River Basin [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2012,34 (6):124-132. (in Chinese)