

春季积雪融化过程的模拟研究

汪楠, 褚越

哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年2月14日; 录用日期: 2022年3月16日; 发布日期: 2022年3月22日

摘要

为深入研究东北积雪在融化期融化速率、融雪水量及产流时积雪厚度的影响因素, 选取积雪厚度、积雪密度、风速、温度4个因素, 利用正交试验设计方法, 采用室内模拟融化试验, 对试验数据进行方差分析与线性回归分析, 得出积雪在不同厚度、密度、不同风速、温度条件下, 积雪融化速率、产流时刻雪深及融雪水量的影响规律。结果表明: 在整个试验过程中, 对积雪融化速率的影响为: 风速 > 积雪密度 > 温度 > 积雪厚度。温度是积雪融化外部能量的来源, 温度越高, 融化速率越快; 风速通过运输外部能量和加速水分运移影响着积雪融化的快慢; 自身的厚度与密度是积雪内部结构的基础, 影响着水分在雪层间的储存与运移, 从而影响积雪的融化速率。积雪融化前的初始厚度与密度对积雪产流时积雪厚度影响较大, 风速与温度只影响产流时间长短, 不影响产流时积雪厚度。积雪厚度、密度影响积雪融雪水量的多少, 风速与温度只影响融化快慢, 对融雪水量没有影响。

关键词

融化速率, 融雪产流, 融雪水量

Simulation Research on Snow Melting Process in Spring

Nan Wang, Yue Chu

Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Feb. 14th, 2022; accepted: Mar. 16th, 2022; published: Mar. 22nd, 2022

Abstract

In order to deeply study the influencing factors of the melting rate of snow in the northeast during the melting period, the amount of snow-melting water and the thickness of the snow during runoff, four factors, including snow thickness, snow density, wind speed and temperature, were se-

lected, and the orthogonal experimental design method was used. We simulate the melting test, carry out variance analysis and linear regression analysis on the test data, and obtain the influence law of snow melting rate, snow depth and snow melting water volume under different thickness, density, wind speed and temperature conditions. The results show that: in the whole test process, the influence on the snow melting rate is: wind speed > snow density > temperature > snow thickness. Temperature is the source of external energy for snow melting. The higher the temperature, the faster the melting rate; the wind speed affects the speed of snow melting by transporting external energy and accelerating water migration; its own thickness and density are the basis of the internal structure of snow. It affects the storage and transport of water between snow layers, thereby affecting the melting rate of snow cover. The initial thickness and density of snow before melting have a great influence on the snow thickness during runoff. The thickness and density of the snow cover affect the amount of snow-melting water. The wind speed and temperature only affect the melting speed and have no effect on the amount of snow-melting water.

Keywords

Melting Rate, Snowmelt Runoff, Snowmelt Water Volume

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

东北地区是我国降雪较多的地区[1], 全年降雪量占总降水量的 7%~25% [2], 积雪为东北重要的淡水资源, 在春季融雪期, 为土壤蓄水和农业灌溉提供用水量[3]。但是, 近百年东北增温 1.43℃, 远大于全球和全国的增温率[4], 冬季变暖比其他季节更明显[5], 在气候变暖的背景下, 中国东北地区成为积雪面积减少最显著的区域[6]。

春季回温是导致积雪融化的最关键因素, 积雪融化的过程中, 受自身特性及外界环境等多种因素的影响, 邱璧迎等[7] [8]通过试验得出气温增温 2℃和 4℃条件下, 积雪将提前 19 d 和 25 d 融化; 杨绍富[9]认为风会增大融雪期内的积雪消融速率; 车宗玺等[10]提出, 在不同坡度和坡向, 不同植被的影响下, 积雪的消融速率差异也很大; 李娜等[11]通过试验得出外部能量对积雪的融雪水量影响较小, 积雪深度是影响融水量的首要因素。近些年来, 对于融雪影响因素主要集中在大尺度空间上, 侧重于地形、植被、坡度、海拔等因素对于积雪融化的影响[12] [13] [14]。尽管较多学者对积雪融化过程及影响因素研究众多, 但对于风速这一影响因素还需深入探讨。

积雪从开始融化致产流到全部消融这一过程中, 温度、风速和积雪自身性质是影响其融化速率的重要因素, 而积雪本身具有的特性影响着产流时刻积雪的厚度和融雪水量。当外界温度升高后, 雪层内部结构不断发生变化, 固态雪转化成液态水逐渐向下移动并聚集到底部, 当雪层内容水量超过积雪的持水能力, 此时部分液态水流出, 即出现融雪径流[11], 这一时刻称为积雪产流时刻。综上所述, 东北地区春季平均气温比 80 年代上升了约 0.8℃ [15], 对积雪的提前融化有着很大影响; 而东北地区春季平均风速在 3.5 m/s 以上[16], 所以风速这一因素对积雪融化的影响不容忽视。本研究采用室内模拟试验, 分析积雪厚度、密度、风速及温度对积雪融化速率的影响以及融雪水量的多少, 为春季积雪融化过程及防汛工作提供更为科学的研究思路和方法。

2. 材料与方法

2.1. 试验设置

本试验在哈尔滨师范大学地理科学学院实验室进行。试验装置由盛雪箱、量杯、支架、融雪装置组成, 盛雪装置共有 3 种规格, 分别为 $40 \times 40 \times 5$ cm、 $40 \times 40 \times 10$ cm、 $40 \times 40 \times 15$ cm, 材料由铁皮制成, 用于雪样盛放; 融雪装置有白炽灯和支架组成, 为积雪融化提供热量。温度计测量融雪装置散发的温度, 风扇用于模拟春季室外风, 风速仪用于测量风扇的风速, Snow fork 用于积雪密度的测量, 量杯用于收集并测量融雪水。

2.2. 试验设计

本试验通过 SPSS 软件设计正交表, 采用 4 因素 3 水平的正交试验, 因素及水平设计见表 1。

Table 1. Test design factors and level results

表 1. 试验设计因素与水平结果

试验水平 Experimental level	试验因素 Experimental factor				
	积雪厚度/cm Snow thickness	积雪密度/g/cm ³ Snow density	风速/m/s Wind speed	温度/°C temperature	融化速/cm/min Melting rate
1	1 (5)	1 (0.1612)	1 (0)	1 (19)	0.01399
2	1	2 (0.2059)	2 (2.5)	2 (24)	0.03355
3	1	3 (0.2477)	3 (3.1)	3 (27)	0.04014
4	2 (10)	1	2	3	0.05965
5	2	2	3	1	0.03407
6	2	3	1	2	0.01535
7	3 (15)	1	3	2	0.06151
8	3	2	1	3	0.02702
9	3	3	2	1	0.03185
	0.02923	0.04505	0.01879	0.02664	
	0.03636	0.03155	0.04168	0.03680	
	0.04012	0.02911	0.04524	0.04227	

2.3. 试验步骤

1) 室外采集的积雪主要来自于无人践踏的自然积雪, 每次取雪时先盛放在雪筛中再均匀的筛入盛雪箱, 以保证雪样的初始密度相同, 根据试验要求在筛雪过程中用压雪板对雪样进行不同程度的压实处理, 已达到试验所需的积雪密度;

2) 雪箱盛满积雪后, 用 Snow fork 雪特性分析仪对雪样进行融化前的密度测量;

3) 雪样放置好后, 根据试验设置情况在每组雪样上方设置白炽灯, 用于加热, 雪样前方摆放风扇, 调制试验所需档位, 用于模拟春季室外风, 并用风速仪对风扇所出吹的风进行多次测量, 选取平均值;

4) 雪样下方放置烧杯, 用于融雪水的收集与测量;

5) 记录雪样开始融化时间、产流时间、全部融完时间, 观测产流时雪样高度, 并且每 30 min 测量一次雪样厚度;

6) 待积雪全部融化后, 用量筒测量每个雪样的融雪水量, 并记录。

3. 结果与分析

将试验所得的 9 组融雪速率做方差分析, 采用线性回归分析 4 个因素的影响趋势, 结果见表 2 和图 1。可以看出, 对积雪融化速率影响最大的是风速, 其次是积雪自身的密度和外界的温度, 积雪自身的厚度对融化速率也有一定的影响。积雪在融化过程中, 雪层中的水热运移对其影响很大, 积雪密度和厚度的变化影响雪内部的结构和能量的传递, 进而影响着积雪的融化速率; 风速影响着积雪上方的空气流动, 温度增加不断地向积雪内部传送能量, 从而影响着积雪的融化速率。

Table 2. Results of variance analysis of snow melting rate under different simulation conditions F

表 2. 不同模拟条件下积雪融化速率方差分析结果 F

影响因素 Influencing factor	积雪厚度/cm Snow thickness	积雪密度/g/cm ³ Snow density	风速/m/s Wind speed	温度/°C temperature
总融化速率 F Total melting rate F	114.227	274.916	768.489	234.701
显著性 P Significance P	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

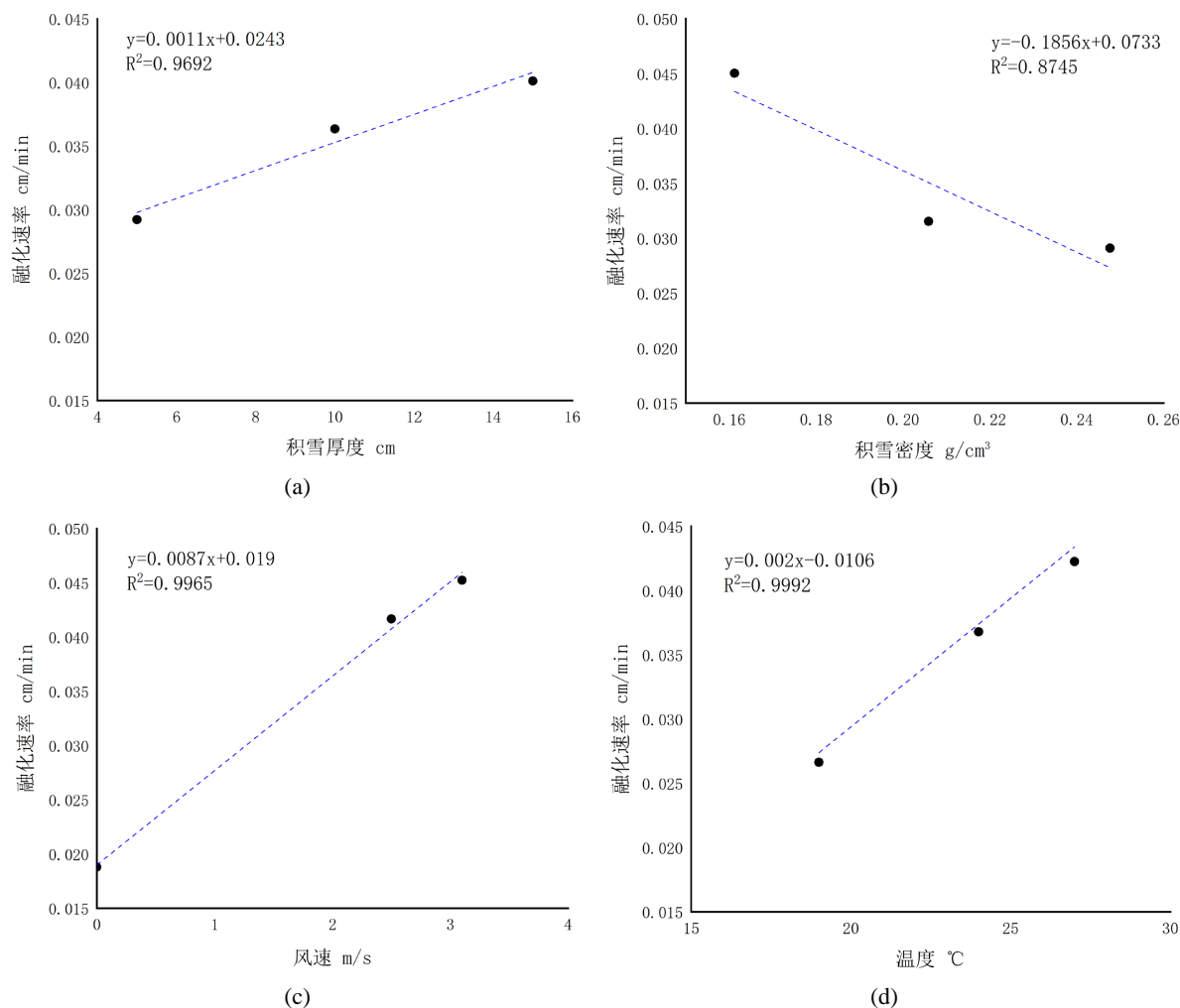


Figure 1. Relationship between various factors and snowmelt rate

图 1. 各因素与融雪速率之间的关系

3.1. 积雪厚度对积雪融化速率的影响

如图 1(a)所示, 积雪在融化的过程中, 积雪厚度为 5 cm 时, 融化速率 0.0298 cm/min, 当积雪厚度增大到 10 cm 时, 融化速率为 0.0353 cm/min, 融化速率增大了约 1.18 倍, 并且积雪的融化速率随积雪的厚度的增大呈显著递增的趋势($P < 0.01$)。表明积雪厚度越小, 积雪融化速率越慢, 积雪厚度越大, 积雪的融化速率越快。随着积雪厚度的增加, 雪层间的蓄水量逐渐变大。当积雪吸收热量融化成水分后, 沿着雪层间的空隙向下移动, 聚集到雪层底部的水量达到积雪持水能力的最大值时, 融雪水流出, 而积雪厚度的增大使积雪的持水能力下降[11], 所以厚度越大融雪水流出的速度越快, 从而加快积雪的融化速率。

3.2. 积雪密度对积雪融化速率的影响

如图 1(b)所示, 当积雪融化前的初始密度为 0.1612 g/cm³ 时, 融化速率约为 0.0434 cm/min, 当积雪融化前的初始密度达到 0.2059 g/cm³ 时, 融化速率减小到 0.0351 cm/min, 减小约 1.24 倍, 并且积雪融化速率随积雪密度的增加有显著减小的趋势($P < 0.01$)。表明积雪密度越小, 融化速率越快, 积雪密度越大, 融化速率越慢。积雪密度越小, 雪层间的孔隙度越大, 当积雪从外界吸收能量后, 积雪逐渐开始融化, 在积雪毛管力的作用下水分逐渐向下移动, 松软的雪层也随着能量的传递和重力的作用下变得密集, 雪层厚度明显减小。积雪融化前的初始密度越大, 吸收外界同等能量产生向下运移的水分相同, 但雪层间的孔隙度较小, 所以雪层融化后的厚度变化不明显, 融化速率较慢。

3.3. 风速对积雪融化速率的影响

如图 1(c)所示, 积雪开始融化后, 当风速为 0 m/s 时, 积雪的融化速率为 0.0190 cm/min, 当风速增大到 2.5 m/s 时, 积雪的融化速率增大到 0.0218 cm/min, 增大约 1.14 倍, 并且积雪融化速率随风速的增加有显著增加的趋势($P < 0.01$)。表明风速越小, 融化速率越慢, 风速越大, 融化速率越快。当积雪上层有风流动, 会加速积雪上方的空气流动, 促使周围暖空气不断的替换积雪上层的冷空气, 传递热量加速积雪的融化, 风也可以加速积雪内部水分向下运移的速度, 使水分沿着积雪毛管加速到达积雪底部, 加快水分聚集, 从而缩短积雪产流时间, 进而加快积雪融化速率。

3.4. 温度对积雪融化速率的影响

如图 1(d)所示, 积雪开始融化后, 当温度为 19℃ 时, 积雪的融化速率为 0.0274 cm/min, 当温度升高到 24℃ 时, 积雪的融化速率为 0.0374 cm/min, 增大约 1.36 倍, 并且积雪融化速率随温度的增加有显著增加的趋势($P < 0.01$)。表明温度越低, 融化速率越慢, 温度越高, 融化速率越快。积雪在外界温度的影响下, 固态雪吸收热能变成液态水, 逐渐被雪层吸收, 经过雪层间毛管力的作用下向下运移, 外界热量的增加会加速积雪的融化, 当顶层积雪融化的水分越来越多后, 向积雪内部输送的能量也会随之变大和加快, 进而加速积雪的融化速率。

3.5. 积雪特性对积雪产流时刻的影响

图 2 为 5、10、15 cm 厚度积雪分别在 0.1612、0.2059、0.2477 g/cm³ 三种密度下产流时雪样高度。积雪密度、初始融化厚度与产流时刻积雪厚度的关系为:

$$Y = 14.896X_1 + 0.587X_2 - 3.616 \quad (1)$$

Y 为产流时刻积雪厚度; X_1 为积雪初始密度; X_2 为积雪初始厚度。随着积雪初始密度和厚度的增加, 产流时刻的积雪厚度越大。积雪受热融化后, 固态雪转化成液态水, 随着融化时间的延长, 雪转化为水分越来越多, 受重力作用沿着孔隙向雪层下方移动。当初始密度增大后, 雪层间的孔隙变小, 持水能力

随之变小, 产流越快, 产流时积雪厚度越大。

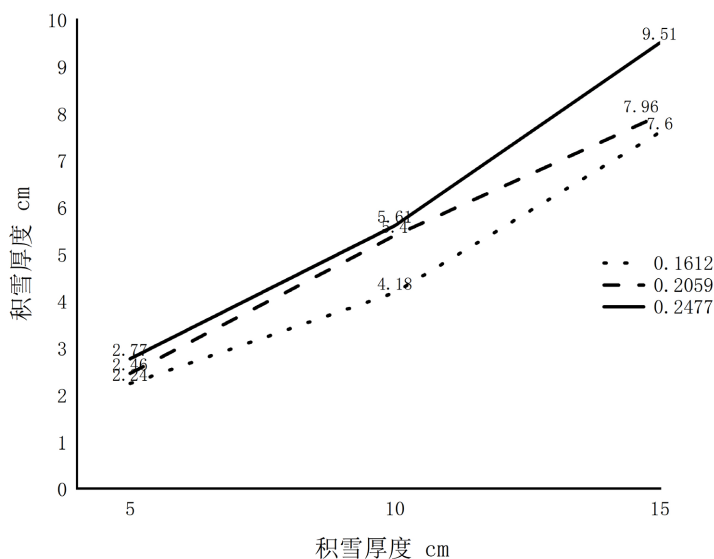


Figure 2. 5, 10, 15 cm thick snow at different densities at the time of runoff
图 2. 5、10、15 cm 厚度积雪在不同密度下产流时刻积雪厚度

3.6. 积雪特性对积雪融雪水量的影响

图 3 为 5、10、15 cm 厚度积雪分别在 0.1612、0.2059、0.2477 g/cm³ 三种密度下融化后的融雪水量。

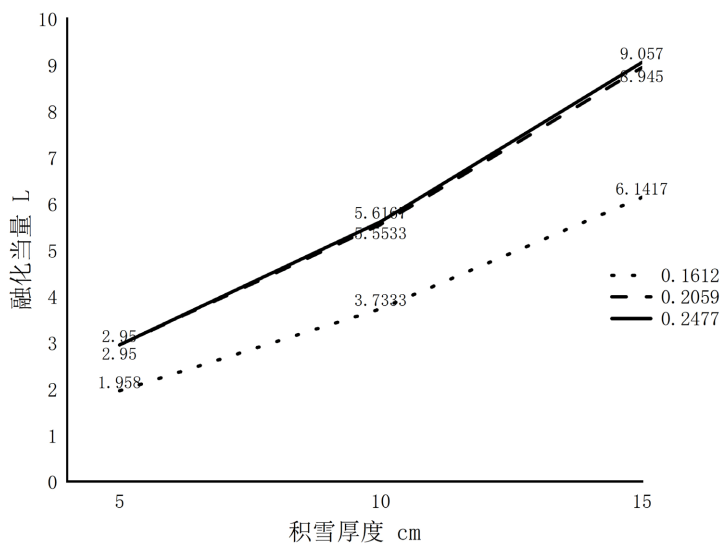


Figure 3. 5, 10, 15 cm thickness of snow under different densities of snow and snow melting water

图 3. 5、10、15 cm 厚度积雪在不同密度下积雪融雪水量

积雪密度、初始融化厚度与积雪融雪水量的关系为:

$$Y = 22.655X_1 + 0.542X_2 - 3.616 \quad (2)$$

Y 为积雪融雪水量; X_1 为积雪密度; X_2 为积雪厚度。随着积雪初始密度和厚度的增加, 积雪融雪水

量越来越大。积雪的初始密度越大, 雪层的孔隙越小, 积雪越密实, 融化后的雪水越多; 积雪初始厚度越高, 积雪体积越大, 所产生的融雪水量随之也就越大。

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本文研究结果表明, 影响积雪融化的首要因素是温度, 能量的传递是积雪融化的前提。而对积雪融化过程中影响最大的因素是风的强弱, 风速越大表层水分向下运移越快, 能量传递越快, 融化越迅速。积雪厚度越大积雪融化越快, 这是因为积雪越厚持水能力越强, 增加其内部能量聚集, 加快了融化。积雪初始融化密度的增加降低了积雪的持水能力, 增大产流时的积雪厚度和融雪水量; 积雪初始密度越大, 内部越紧实, 储水量小, 融化速率越慢。

4.2. 讨论

积雪的融化不仅受外界因素的影响, 自身的性质也影响着其融化的快慢。不同厚度的积雪对自身融化也有一定影响, 积雪层越厚, 对底部积雪的压实越大, 所以本文为了减少密度的差异, 积雪厚度最大设置为 15 cm。积雪的厚度决定了积雪毛管的长度, 积雪毛管越长, 水分到达底部的时间越长, 蓄水量越多, 传递到内部的能量越多, 融化越快。密度对融雪水的渗透能力影响很大[17], 初始密度对其融化影响不可忽视, 本文计量融化的依据是积雪厚度的变化, 雪层中融化的水分在密度不同的雪层中运移的速度和融水量各不相同; 积雪密度大持水能力弱, 积雪密度小持水能力强[11], 初始密度越大的积雪融化越慢, 这与张娜的研究结果相一致; 所以松软的积雪在内部结构发生变化后, 外部形态改变更加明显。而春季风在积雪融化过程中相当于推动力的作用, 不仅加速积雪上方的空气流动带来热源, 同时也加快水分在积雪毛管内的移动速度, 在重力作用下聚集雪层底部, 加速积雪融化。在融化的过程中, 热量是决定积雪融化的首要因素。外界输入的热量越多, 向雪层内部传递的能量越多, 进而改变积雪的内部结构, 加快积雪的融化速率; 这一结果与张娜研究的辐射能量越大, 积雪融化速率越快结论相一致。

致 谢

父母恩, 恩师情, 同窗谊, 拜谢。惟寄此情于心, 再启征程, 千帆归去, 归来依旧少年, 谨拜文以闻。

参考文献

- [1] 周琳. 中国气候丛书——东北气候[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 55.
- [2] 焦剑, 谢云, 林燕, 赵登峰. 东北地区融雪期径流及产沙特征分析[J]. 地理研究, 2009, 28(2): 333-344.
- [3] 刘俊峰, 陈仁升, 宋耀选. 中国积雪时空变化分析[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 364-371.
- [4] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化[J]. 气象, 1994(12): 19-26.
- [5] 张晶晶, 陈爽, 赵昕奕. 近 50 年中国气温变化的区域差异及其与全球气候变化的联系[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 1-6.
- [6] 张海军. 2000-2009 年东北地区积雪时空变化研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [7] 邱璧迎, 范昊明, 武敏, 周丽丽, 贾燕锋. 上坡融雪径流对下坡融雪影响的模拟试验[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(5): 72-76.
- [8] 郭玲鹏, 李兰海, 徐俊荣, 白磊, 李雪梅. 气温变化条件下融雪速率和土壤水分变化的同步观测试验[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 890-897.
- [9] 杨绍富. 融雪过程中水热耦合实验研究[D]: [硕士学位论文]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2009.
- [10] 车宗玺, 金铭, 张学龙, 张虎, 牛云, 董晓丽. 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.

- [11] 张娜, 范昊明, 许秀泉. 辐射能量对不同深度和密度积雪持水能力及融雪水量的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2017, 48(2): 250-255.
- [12] Marks, D., Dozier, J., Winstral, A.J. and Link, T. (1998) The Sensitivity of Snowmelt Processes to Climate Conditions and Forestcover during Rain-on-Snow: A Case Study of the 1996 Pacific Northwest Flood. *Hydrological Processes*, **12**, 1569-1587. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199808/09\)12:10/11%3C1569::AID-HYP682%3E3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199808/09)12:10/11%3C1569::AID-HYP682%3E3.0.CO;2-L)
- [13] 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.
- [14] Pomeroy, J.W., Bewley, D.S., Essery, R.L.H., Hedstrom, N.R., Link, T., Granger, R.J., *et al.* (2006) Shrub Tundra Snowmelt. *Hydrological Processes*, **20**, 923-941. <https://doi.org/10.1002/hyp.6124>
- [15] 薛双奕. 气候变化对东北三省气候生产力的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [16] 田莉. 中国北方地区地面风速变化特征及其影响因子研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [17] Oztas, T. and Fayetorbay, F. (2003) Effect of Freezing and Thawing Processes on Soil Aggregate Stability. *CATENA*, **52**, 1-8. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00177-7](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00177-7)