

东北低山丘陵区季节性积雪特性研究

马世伟¹, 周丽丽¹, 马仁明¹, 曹湘英¹, 王宇²

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳天功园林工程有限公司, 沈阳 110013)

摘要: 为探究东北低山丘陵区冬季积雪物理特性变化过程, 利用超声雪深监测仪和 Snow Fork 雪特性分析仪采集积雪物理特性(积雪深度、积雪密度、液态含水率)数据, 分析积雪深度、密度和液态含水率随时间的变化特征及其在垂直剖面上的变化过程。结果表明: 主要积雪期为 11 月下旬至翌年 2 月中下旬, 积雪深度与雪层温度、气温呈显著负相关关系, 与降雪量呈正相关关系。积雪消融主要集中在 10:00—18:00 之间, 且积雪消融相对于气温表现出滞后性, 滞后时间约为 4 h。积雪初(12 月 1 日观测), 雪底层密度为 0.198 g/cm³, 表层为 0.126 g/cm³, 从底层至表层呈逐渐减小趋势。随着雪底层形成深霜, 中间层 5—10 cm 的积雪密度大于表层和底层。积雪 0—5、5—10、10—15 cm 层平均液态含水率分别为 0.308%、0.319% 和 0.205%, 中间层最高, 整体表现为单峰型。积雪液态含水率与积雪密度呈显著正相关关系($r=0.866$, $p<0.05$)。研究结果将为融雪径流形成、融雪侵蚀防治以及季节性积雪区生态系统功能评估提供基础数据。

关键词: 积雪深度; 积雪密度; 液态含水率; 东北低山丘陵区

中图分类号: P426.63

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0332-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.055

Research on the Characteristic of Seasonal Snow at Low Hill Area in Northeast

MA Shiwei¹, ZHOU Lili¹, MA Renming¹, CAO Xiangying¹, WANG Yu²

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110866;

2. Shenyang Tiangong Landscape Architect Co., Ltd, Shenyang 110013)

Abstract: In this study, we aimed to investigate the characteristic of seasonal snow at low hill area in Northeast. The time serials of snow parameters (snow depth, snow density and liquid water content) were discussed, based on the date collected by Snow Fork and ultrasonic snow deep sensor. The results showed that: The main period of snow cover was from mid to late November to late February, and the correlative analysis showed that snow depth had a negative correlation with snow temperature and air temperature, while there was a positive correlation between it and snowfall. Most part of snow was melting at the period of 10:00 to 18:00. The snow depth had distinct positive relation to the snow temperature four hours ahead. At the beginning of snow covering (December 1st), the snow density of the bottom layer and the surface layer was 0.198 g/cm³ and 0.126 g/cm³ respectively. It decreased gradually from the bottom layer to the surface one, and the snow cover density of middle 5—10 cm layer was greater than the surface and bottom ones when the depth hoar was appeared within bottom snow layer. The average of snow liquid water content within 0—5 cm, 5—10 cm and 10—15 cm layer was 0.308%, 0.319% and 0.205% respectively. The liquid water content of snow cover, which showed a single-peak type with the variation of depth in each snow cover layer, within middle 5—10 cm layer was the highest. There was a positive correlation between the liquid water content of snow cover and its density ($r=0.866$, $p<0.05$). This study could provide fundamental data for the generation of snowmelt runoff, snowmelt erosion prevention and the assessment of ecosystem function in the area of seasonal snow cover.

Keywords: snow depth; snow density; liquid water content; low hill area in Northeast

收稿日期: 2016-09-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41471225); 辽宁省农业领域青年科技创新人才培养计划项目(2014054); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LJQ2013074)

第一作者: 马世伟(1991—), 男, 汉族, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀规律研究。E-mail: 624773173@qq.com

通信作者: 周丽丽(1979—), 女, 汉族, 黑龙江宾县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀和流域治理研究。E-mail: zhoulilia@163.com

雪是我国东北地区冬季降水的主要形式,冬季积雪可以有效缓解春旱,是重要的淡水资源,也是春季融雪侵蚀的先决条件。积雪物理特性是研究融雪规律、融雪径流形成和融雪侵蚀过程的基础,包括积雪深度、积雪密度、液态含水率等。积雪深度和积雪密度是估算雪水当量、研究流域水量平衡和模拟春季融雪径流的重要参数^[1]。雪层液态水也叫自由水,对理解融雪机制有重要作用^[2]。Creight 等^[3]研究表明积雪密度和雪深在短时间(10 d)呈负相关,在长时间(90 d)呈正相关;Chen 等^[4]对天山积雪进行分析,表明 40 cm 处土温是积雪密度增加的主要因素,新雪密度与雪黏度呈显著正相关;车宗玺等^[5]在祁连山研究表明气温是影响积雪液态含水率的主要原因;陆恒等^[6]研究认为融雪期雪层含水率随气温呈指数变化;王元等^[7]研究了天山阴、阳坡积雪温度、密度以及液态含水率的差异。国内积雪物理特性研究主要集中在西部地区,而东北地区主要是关于森林积雪的研究^[8-9]。东北地区季节性积雪融水占河川年径流总量的 10%~15%^[10],融雪期输沙模数占全年输沙模数比例达 5.8%~27.7%^[11]。目前关于东北低山丘陵区积雪研究较少,更没有分层探究其物理特性。因此,本研究测得雪深数据、积雪密度、液态含水率数据,结合气象站收集的气象资料,对积雪物理特性进行分析,旨在为季节性积雪区生态系统评估和融雪侵蚀防治提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在吉林省梅河口市吉乐乡吉祥村水土保持监测场内(125°28'13" E, 42°10'26" N)进行,该地为东北地区典型低山丘陵区,属北温带大陆性季风气候,多年平均气温 4.02 °C,多年平均降水量为 713 mm,其中冬季降雪量占 20%以上。观测时间为 2015 年 11 月 1 日至 2016 年 3 月 31 日,其逐日气温变化见图 1,平均气温为 -8.8 °C,最高气温为 3 月 31 日的 21.4 °C,最低温度为 12 月 27 日的 -32.1 °C。

1.2 试验方法

降雪之前在水土保持监测场的裸地选定一点为积雪深度观测点,此点周围避免有树干等遮挡。同时挖取 10 cm 深的土壤剖面,在距地表 5, 10 cm 处插入温度传感器探头,用来监测土壤温度变化,每层布设 2 个温度传感器探头作为重复。同时在距离地面 2 m 高处布设超声波雪深传感器,通过超声脉冲来监测雪深变化,并通过空气温、湿度进行结果修正^[12]。降雪大于 5 cm 后,在雪底层和雪层中间插入温度传感器,随着降雪累积,雪层中间的温度探头取出重新插入,并记录时间。监测间隔为 30 min。

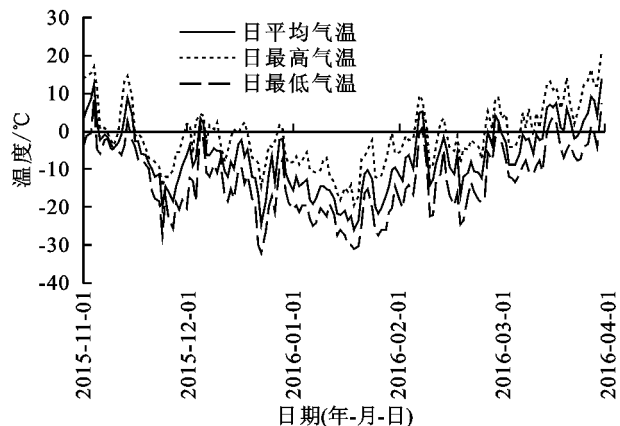


图1 监测时段内气温逐日变化

在积雪深度观测点附近的宽阔地布设 10 m×10 m 积雪观测场。每月的月初和月中使用不锈钢铲采用连续推进方式挖取剖面,每隔 2 m 取 1 点,共取 5 点。利用 Snow Fork 雪特性分析仪测量积雪密度和液态含水率。积雪观测剖面从雪底到雪面每 5 cm 为 1 层,每层平行观测 5 次,取平均值作为该层的观测值,观测最低深度为 5 cm。

2 结果与分析

2.1 积雪深度变化过程

积雪深度是积雪消融表征变量,观测期内积雪深度的变化过程见图 2。2015 年 11 月 1 日至 2016 年 3 月 15 日共降雪 14 次。2015 年 11 月 7 月第 1 次降雪,雪深为 1.7 cm,11 月 9 日第 2 次降雪后雪深达到 4.8 cm,随气温升高 2 次累积的降雪于 11 月 13 日消融完毕。11 月 19 日为第 3 次降雪,雪深 5.5 cm,降雪至此开始累积,12 月 2 日降雪后积雪累积深度达到最大,为 16.8 cm,2016 年 3 月 4 日积雪消融完毕,在此期间共降雪 11 次。3 月 8 日再次降雪,雪深为 5.0 cm,并于 7 日后消融完毕。2015 年 12 月 9 日和 2016 年 2 月 11 日雪深出现 2 次大幅下降,这主要是在 12 月 9 日出现降雨,致使积雪深度由 15.6 cm 下降到 10.0 cm;而 2 月 11 日气温升高,最高气温为 9.3 °C,雪深由 11.3 cm 下降到 2.5 cm。可见,主要积雪时间为 2015 年 11 月中下旬至 2016 年 2 月下旬。

将日积雪深度与日平均气温、平均雪层温度和土壤温度等因素进行相关性分析,结果显示,积雪深度与气温、雪层温度以及降雪量均达到显著相关。其中积雪深度与雪层温度相关程度最高($r = -0.488, p < 0.01$),这是因为雪层温度是积雪能量大小的表现,影响着积雪消融,当雪层温度达到一定值时积雪开始消融,宏观表现为积雪深度的降低。积雪深度与气温之间呈极显著负相关($r = -0.474, p < 0.01$),气温升高,太阳辐射增强,积雪深度开始下降。在雪—气界面的空气首先接受热量,当空气热量超过雪层热量后开始向雪层传输,积雪

开始消融,雪深下降。将气温与雪层温度进行相关性分析,二者呈极显著正相关($r=0.823, p<0.01$),说明雪层温度受气温的影响较大。土壤 0,5,10 cm 处温度与雪深相关性均未达到显著水平,整个积雪过程中土壤温度多数处于 0℃之下,并未对积雪消融产生显著影响。降雪输入是雪深累积的直接因素,降雪量与雪深为显著正相关($r=0.239, p<0.01$)。

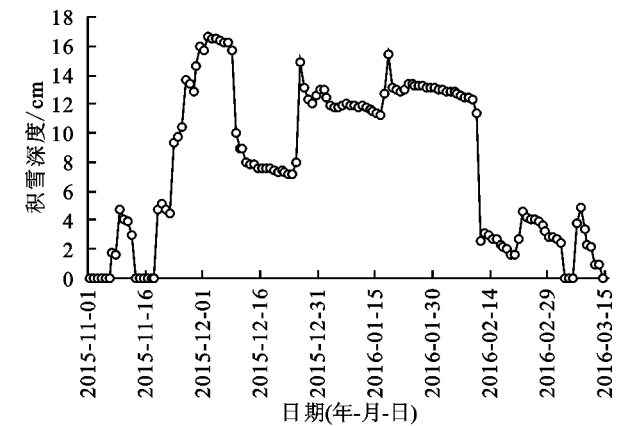


图 2 积雪深度变化

2016 年 2 月 10-11 日是积雪集中消融时期,此阶段雪深和气温的变化过程见图 3。10 日上午 10:00 开始气温达到 0℃,14:00 左右达到最大值后开始下降。11 日 0:00—8:00 气温在 0℃左右,变化相对稳定,之后气温开始上升,在 14:00 达到最高气温 9.3℃后开始下降。雪深曲线在短时间存在波动,这是由于气流扰动超声波的传输速度所致,但不会影响雪深整体变化趋势。雪深 2 日内由 13.1 cm 下降到 2.9 cm,消融量分别为 3.5 cm 和 6.7 cm,且雪深在 10:00—18:00 之间产生剧烈下降,消融量分别为 2.4 cm 和 5.8 cm,占全天的 66.7%和 86.6%。对积雪深度与气温进行回归分析(表 1),发现雪深与提前 4 h 的气温相关程度最高,表明积雪消融具有滞后效应,因此可以运用积雪深度与气温的关系式,输入较易获取的气温数据来推算雪深的变化。

2.2 积雪密度分布特征

积雪密度即单位体积雪的质量,影响积雪的稳定性和雪内的热量传输。积雪密度在雪层垂直剖面上的分

表 2 积雪密度分布						单位: g/cm ³
雪层/cm	2015-12-1	2015-12-16	2016-1-1	2016-1-16	2016-2-1	2016-2-15
>15	0.126±0.05b					
10—15	0.175±0.01c		0.178±0.01b	0.110±0.04b	0.111±0.02c	
5—10	0.191±0.01a	0.334±0.06a	0.306±0.02a	0.278±0.08a	0.238±0.05a	
0—5	0.198±0.01a	0.242±0.04b	0.298±0.04a	0.268±0.05a	0.226±0.02b	0.243±0.03

注:0—5 cm 为积雪层底部到积雪中雪层深度,“±”表示标准偏差,同一列不同字母表示积雪密度达到显著差异($p<0.05$)。下同。

2.3 积雪液态含水率分布特征

积雪液态含水率是指单位体积雪中液态水的含量,其大小直接支配着积雪层内物质和能量的迁移交换。

布见表 2。2015 年 12 月初观测积雪深度最大,从底层到表层积雪密度逐渐减小,表层为 0.126 g/cm³,底层 0—5 cm 为 0.198 g/cm³,这主要是下层积雪受到上覆积雪压力而引起的积雪密实化作用所致;另一原因是从底层至表层积雪留存的时间越来越短,表层为新雪,所以底层积雪密度大于表层。12 月 9 日出现降雨,使得雪深由 15.6 cm 下降到 10.0 cm。降雨过程中雨滴打击以及雨水下渗作用加大了积雪密实化,12 月中旬观测的雪密度较 12 月初有所增加,且上层大于下层,差异显著。12 月 30 日新降雪补充使雪层加深,由于上层为新雪,所以 1 月初积雪表层 10—15 cm 较下层密度小,且达显著性差异,但中层和底层未产生显著差异。随着积雪时间延长,中间层 5—10 cm 积雪密度大于表层和底层(表 2,1 月 16 日和 2 月 1 日观测值),但整体积雪密度呈减小趋势,平均积雪密度分别为 0.218 g/cm³ 和 0.192 g/cm³,这是因为 1 月进入隆冬期,1 月初至 2 月初气温整体较低,雪层液态水含量少,雪粒间主要以空气为主,所以积雪密度较低;2 月中旬气温开始回升,积雪密度较月初有所增加。

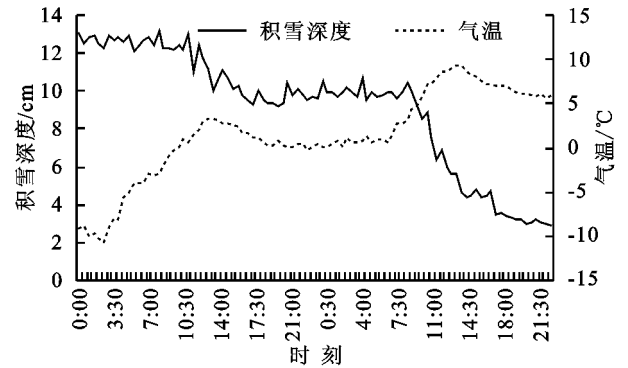


图 3 2 月 10-11 日雪深和气温的变化过程

表 1 雪深与气温回归方程

时刻	方程	R ²	显著性
同时刻	$H=-0.515T+9.915$	0.645	0.00
提前 1 h	$H=-0.534T+9.817$	0.702	0.00
提前 2 h	$H=-0.547T+9.698$	0.746	0.00
提前 3 h	$H=-0.556T+9.577$	0.778	0.00
提前 4 h	$H=-0.558T+9.427$	0.793	0.00
提前 5 h	$H=-0.552T+9.256$	0.778	0.00

注:H 为积雪深度(cm);T 为气温(℃)。

积雪垂直剖面上液态含水率变化见表 3。12 月 1 日积雪液态含水率从雪表层至底层逐渐增大,表层液态含水率为 0.201%,底层为 0.297%,这是因为 12 月初观测时

表层土壤温度较高,为-0.1℃左右,积雪层底部受到土壤中热流的影响而产生消融,同时液态水下渗至底层,所以底层液态含水率最大。积雪含水率是积雪雪温升高的表现^[13],对二者进行相关性分析,达到显著正相关($r=0.638, p<0.05$),即雪层温度升高促进积雪消融,液态含水率增大。12月中旬气温回升,液态含水率较12月初有所增大。随着积雪时间延长,积雪各层液态含水率随深度变化呈单峰型,5—10,0—5,10—15 cm层平均含水率分别为0.319%,0.308%,0.205%,中

间5—10 cm层大于表层和底层,形成了液态水较多的“挡水层”。这是因为随着积雪中间层密度增加(表2),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^[14],对融水产生阻滞效应。由于新降雪补充,表层液态含水率整体较小,并与下层产生显著性差异。积雪液态含水率变化规律与密度相似,二者呈显著正相关($r=0.886, p<0.05$),这主要是雪层密度是积雪孔隙大小的体现,影响热量交换以及水分的运移,雪密度大则孔隙小,自由水下渗受阻,含水率增大。

表 3 液态含水率分布						单位: %
雪层/cm	2015-12-1	2015-12-16	2016-1-1	2016-1-16	2016-2-1	2016-2-15
>15	0.201±0.03b					
10—15	0.268±0.03a		0.238±0.02b	0.110±0.04b	0.202±0.02c	
5—10	0.285±0.01a	0.339±0.01a	0.356±0.02a	0.328±0.03a	0.287±0.03a	
0—5	0.297±0.02a	0.343±0.01a	0.346±0.01a	0.310±0.04a	0.243±0.01b	0.286±0.01

3 讨论

从2015年11月7日第1场降雪到2016年3月14日积雪消融完毕,雪层深度变化可分为3个阶段,第一阶段为11月7日—11月13日,经历了2次降雪,积雪深度最高为4.8cm;第二阶段为11月19日—次年3月4日,最大积雪深度为16.8cm;第三阶段为3月8日—3月15日,积雪深度最高为5.0cm。由此可知主要积雪时间为2015年11月中期至2016年2月。

积雪密度随时间变化明显。2015年12月初积雪密度从底层到表层逐渐减小,主要是动力压实和能量转化作用^[15]。降雪开始累积,各层积雪密度首先受到上覆积雪压力的作用,随积雪厚度的不断增大,积雪密实化过程逐渐加强;其次是受积雪与空气以及不同雪层之间热量交换和水汽蒸凝过程的影响,使积雪密度随深度发生变化^[16]。2015年12月初至2016年2月初,雪底层0—5 cm密度从降雪累积开始逐渐增大,在1月初达到最大值0.298 g/cm³后开始下降,这是因为降雪后底层积雪首先受到上层新降雪压力而密实化,积雪密度逐渐增大,随着积雪时间延长,底层积雪发育形成松散的、孔隙率大的、颗粒较粗的深霜,积雪密度逐渐减小。5—10 cm层积雪由于在密实化作用期间没有形成深霜,而表层有新雪补充,所以中层的雪密度大于表层和底层;另一原因是积雪层在达到一定深度后开始产生温度梯度,雪层中水汽由雪底层的高温层向上层迁移,并在上层晶粒表面遇冷凝华^[16],从而在深霜层上部形成密度较大的雪层。雪表层由于新雪补充,积雪密度都要小于下层积雪,且都达到显著差异。积雪密度在雪层垂直剖面上呈现出中间层大于表层和底层的趋势。这与郝晓华

等^[17]的研究结果相似。

积雪液态含水率与积雪密度呈显著正相关,这与王元等^[7]在天山北坡的研究结果相似,积雪密度包含单位体积冰、水和空气的重量,由于水的密度高于雪粒和空气,所以雪层液态含水率增大使得积雪密度也随之增大,同时积雪密度也会影响雪层中热量传输以及积雪液态持水量等。

利用超声波连续在线监测雪深以及雪特性仪监测积雪密度和液态含水率,代替传统雪尺测量法、称重法和温度换算法,可以更加方便、准确、连续的了解积雪特性变化过程,为更好利用春季融雪水资源和防治融雪侵蚀提供理论基础。

4 结论

(1)11月中下旬至翌年2月下旬为主要积雪期,积雪深度与雪层温度和气温呈显著负相关,与降雪量呈正相关。积雪消融主要集中在10:00—18:00之间,且积雪消融对气温有滞后性,气温与雪深回归方程的建立可以用于预测积雪消融期雪深的变化。

(2)降雪累积初期,积雪在自身重力作用下从雪底层至表层雪密度逐渐减小,随着积雪底层深霜形成,积雪密度在雪层垂直剖面上的变化规律为中间层5—10 cm大于表层和底层;雪底层积雪密度受上层积雪压力和后期深霜的形成呈先增大后减小的趋势。

(3)积雪初期,雪层液态含水率从底层至表层逐渐减小,随着积雪时间延长,积雪各层液态含水率随深度变化呈单峰型,中间层5—10 cm的液态含水率大于表层和底层,形成“挡水层”。积雪液态含水率与密度和雪层温度均呈显著正相关。

参考文献:

[1] 王秋香,魏文寿,王金民.新疆北疆最大积雪深度 EOF 展开

- 场的时间变化规律[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 244-249.
- [2] 李志军, 赵海清. 北极夏季海冰表面积雪层内水分含量的时空分布[J]. 水科学进展, 2007, 18(1): 24-28.
- [3] Creight J L, Small E E. Modeling bulk density and snow water equivalent using daily snow depth observations [J]. The Cryosphere, 2014, 8(2): 521-536.
- [4] Chen X, Wei W S, Liu M Z. Change in fresh snow density in Tianshan Mountains, China[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(1): 36-47.
- [5] 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): 24-28.
- [6] 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随时间变化特征[J]. 地理研究, 2011, 30(7): 1244-1253.
- [7] 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.
- [8] 任喜珍, 胡春元, 左合君, 等. 阿尔山地区积雪消融对土壤温度的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(8): 122-125.
- [9] 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): 27-31.
- [10] 杨倩. 东北地区积雪时空分布及其融雪径流模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [11] 焦剑, 谢云, 林燕, 等. 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.
- [12] 胡汝骥. 中国积雪与雪灾防治[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 50-51.
- [13] Michael A, Raw L, Kyle C, et al. Remote sensing of snow thaw at the pan-Arctic scale using the Sea Winds Sea thermometer[J]. Journal of Hydrology, 2005, 312(1/4): 294-311.
- [14] 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.
- [15] 魏玥, 陈蜀江, 陈霞. 新疆北部地区季节性积雪密度变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(3): 519-523.
- [16] 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.
- [17] 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.

(上接第 331 页)

- [4] 龙天渝, 卢齐齐, 王玉霞. 人工模拟暴雨条件下紫色土坡耕地入渗过程研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(2): 76-78, 81.
- [5] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 871-878.
- [6] Arriaga F J, Kornecki T S, Balkcom K S, et al. A method for automating data collection from a double-ring infiltrometer under falling head conditions[J]. Soil Use and Management, 2010, 26(1): 61-67.
- [7] Wang Y, Gao Z, Wen J, et al. Effect of a thermokarst lake on soil physical properties and infiltration processes in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(10): 2357-2365.
- [8] Prima S D, Lassabatere L, Bagarello V, et al. Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments[J]. Geoderma, 2016, 262(5): 20-34.
- [9] Moret-Fernández D, González-Cebollada C, Latorre B, et al. A modified hood infiltrometer to estimate the soil hydraulic properties from the transient water flow measurements[J]. Journal of Hydrology, 2015, 530(11): 554-560.
- [10] 朱良君, 张光辉, 任宗萍. 4 种土壤入渗测定方法的比较[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 163-167.
- [11] Lai J, Ren L. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(6): 1667-1675.
- [12] 来剑斌, 罗毅, 任理. 双环入渗仪的缓冲指标对测定土壤饱和和导水率的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1): 19-25.
- [13] 李海光, 余新晓, 张满良, 等. 黄土高原丘陵沟壑第三副区小流域土壤渗透特性研究[J]. 水土保持通报, 2010, 17(2): 75-79, 85.
- [14] 汤英, 周宏飞, 徐利岗. 荒漠植被影响下的沙地稳定入渗率变化特征[J]. 土壤通报, 2009, 40(2): 235-239.
- [15] 牛赞, 刘贤德, 杨道虎, 等. 祁连山北坡与坡前走廊降水和气温变化差异对比分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(9): 89-95, 103.
- [16] Jačková L, Pavlásek J, Kuráz V, et al. A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols[J]. Geoderma, 2014, 219/220(3): 82-88.