

# 小兴安岭云冷杉红松林和白桦林对雪水文过程的影响

乔锋<sup>1</sup>, 肖洋<sup>2</sup>, 赵淑苹<sup>3</sup>

(1. 山合林(北京)水土保持技术有限公司, 北京 100038; 2. 黑龙江大学农业资源与环境学院, 农业资源利用与环境安全重点实验室, 哈尔滨 150080; 3. 东北林业大学工程技术学院, 哈尔滨 150040)

**摘要:** 为了阐明天然森林植被对雪水文过程的影响, 于 2014 年秋季至 2015 年春季在积雪期和融雪期采用积雪层特性调查法分别对小兴安岭典型天然林下积雪层的雪深、雪密度和雪水量进行了测定。结果表明: 云冷杉红松林和林外草地间的雪深和雪水量差异显著, 而云冷杉红松林的雪水量异质性程度要高于白桦林和林外草地; 与林外草地相比, 云冷杉红松林和白桦林的最大雪积累量分别减少了 26.08% 和 5.43%。云冷杉红松林和白桦林及林外草地的积雪层密度无显著差异。云冷杉红松林和白桦林的融雪速率分别为 1.52, 2.05 mm/d, 均小于林外草地, 但差异性并不显著。云冷杉红松林和白桦林分别截留降雪量达 24.02 (占总降雪量的 27.27%), 5.43 mm (占总降雪量的 6.16%), 且云冷杉红松林截留降雪量明显高于白桦林, 这表明云冷杉红松林对于积雪和截雪过程的影响更为显著。

**关键词:** 森林雪水文; 积雪; 融雪; 截留

中图分类号: S71 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2018)05-0104-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.05.017

## The Effects of a Mixed Spruce-fir Korean Pine Forest and a White Birch Forest on Snow Hydrological Processes in Xiaoxing'an Mountains, China

QIAO Feng<sup>1</sup>, XIAO Yang<sup>2</sup>, ZHAO Shuping<sup>3</sup>

(1. Shan helin (Beijing) Soil and Water Conservation Technology Co., Ltd., Beijing 100038; 2. College of Agricultural Resources and Environment, Key Laboratory of Agricultural Resources Utilization and Environmental Security, Heilongjiang University, Harbin 150080; 3. Collgeg of Engineering and Technology Northeast Forestry University, Harbin 150040)

**Abstract:** Many factors such as the types of forests influence snow processes in forest ecosystems, but the effects of forest cover on snow hydrology are not well defined in Xiaoxing'an Mountains of northeastern China. The objective of this study was to investigate the effects of forest types on snowpack properties by measuring snow depth, snow density and snow water equivalence (SWE) during snowpack accumulation and snowmelt. The results indicated that the noticeable differences in the mean snow depth and the mean SWE were found between the mixed spruce-fir Korean pine forest and the opening site. The degree of heterogeneity in SWE variations in the mixed spruce-fir Korean pine forest was higher than the white birch forest and the opening. The Maximum snow water equivalence (MSWE) was reduced by 26.08% in the mixed coniferous forest and 5.43% in the white birch forest compared with the opening site. The mean ground snow densities in the three sites were not significantly different. The mean ablation rate was 1.52 mm SWE/day (76% of the opening) in the mixed coniferous forest and 2.05 mm SWE/day (94% of the opening) in the white birch forest. But, the differences of the mean daily melt in the three sites were not significant. The mixed coniferous forest and the white birch forest intercepted 24.02 mm SWE / 27.27% of snowfall and 5.43 mm SWE / 6.16% snowfall, respectively. The mean interception in the mixed coniferous forest was significantly greater than the white birch forest. Our results demonstrated that the mixed coniferous forest cover could have a remarkable effect on snow accumulation and interception.

**Keywords:** forest snow hydrology; snow accumulation; snow ablation; interception

收稿日期: 2018-03-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41301027); 黑龙江省自然科学基金项目(D201411); 国家林业局小兴安岭森林定位站资助项目

第一作者: 乔锋(1978—), 男, 山西临汾人, 工程师, 硕士, 主要从事水土保持研究。E-mail: qiao2002\_78@126.com

通信作者: 肖洋(1978—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 主要从事森林水文生态研究。E-mail: xiaoyang@hlju.edu.cn

雪在寒区森林生态系统水分循环中占有重要地位,是陆地水资源的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>,不仅具有防止冬季森林火灾、抑制森林病虫害发生的作用,而且有利于林木的早春生长和化学营养元素的富集<sup>[3-4]</sup>。在小兴安岭林区,每年积雪时间超过5个月,降雪量占总降水量的10%~20%,融雪径流占春季河道径流总量的20%~30%,这对于增加枯水期河流流量、缓解春季农业灌溉用水的短缺和防止水土流失具有重要的作用<sup>[5-7]</sup>,而该区域的典型天然森林植被云冷杉(*Picea koraiensis*, *Abies nephrolepis*)红松林(*Pinus koraiensis*)和天然次生白桦林(*Betula platyphylla*)对于雪水文过程具有重要的调控作用<sup>[8-9]</sup>。深入开展不同天然森林植被的雪水文过程研究,对准确认识森林植被与雪之间的关系及其对区域水循环的影响具有重要的科学意义。目前,国内外在不同常绿针叶林对雪水文过程的影响研究方面取得了丰富的成果,相关研究<sup>[10]</sup>表明,不同林龄和郁闭度的针叶林对于雪水文过程有重要的影响,而对于中国东北小兴安岭地区的常绿针叶林和落叶阔叶林影响积雪、融雪和截雪过程的机理性对比研究很少。本文以小兴安岭伊春丰林自然保护区的云冷杉红松林和天然次生白桦林为研究对象,探索该区域的典型地带性天然森林植被对雪水文过程的调控机制以及差异性机理,为寒区森林生态系统经营和森林流域水资源优化管理以及雪水文模型的构建提供基础数据和科学依据。

## 1 研究区概况

丰林自然保护区位于黑龙江省伊春市五营区境内(128°59'—129°15' E, 48°02'—48°12' N),属小兴安岭山脉

的中段,总面积为18 165 hm<sup>2</sup>,森林面积为17 398 hm<sup>2</sup>。保护区具有典型的低山丘陵地貌,海拔285~688 m,山地平均坡度为10°~25°。属北温带大陆性季风气候,夏季高温多雨;冬季严寒干燥而多风雪;春秋两季气候多变,春季多大风,降水量小,易发生干旱;秋季降温急剧,多出现早霜。年平均气温-0.5℃,极端最高气温34.9℃,极端最低气温-44.5℃;无霜期100~110 d;年降水量680~750 mm;降雨多集中在7—8月,降雪量占年总降水量的10%~20%,积雪期130~150 d,年平均湿度78%,2月下旬或3月初积雪量达到最大。地带性土壤为暗棕色森林土,占保护区总面积的79%,通常土层较厚,一般在50 cm以上。森林覆被率95.8%,森林蓄积量460.71 m<sup>3</sup>。保护区具有较多的森林植被类型,主要有椴树(*Tilia amurensis*)红松林、枫桦(*Betula costata*)红松林、云冷杉红松林、云冷杉林、白桦林和兴安落叶松(*Larix gmelini*)林等<sup>[11]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 建立固定样地和调查

本研究中,样地的选择是采用标准为:(1)为了积雪、融雪和截雪过程具有代表性,不同样地间要能够经历相同的降雪事件;(2)为了限制邻近林分对雪水文过程的影响,样地面积要超过1 hm<sup>2</sup>;(3)为了减少地形的影响,应尽量选择地形平坦的样地。

在2014年秋季,为了确保积雪层采样点的代表性,每个大样地内网格状均匀布设49个间隔15 m×15 m的PVC杆雪深采样点,同时以PVC杆雪深采样点为中心的5 m半径范围内采用常规方法调查树种、树高、胸径、坡度和坡向。样地基本情况见表1。

表1 样地特征

样地	样地号	林龄/ a	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	胸径/ cm	树高/ m	坡度/ (°)	坡向	面积/ hm <sup>2</sup>
白桦林	A	84	976	13.1	15.1	2~3	南坡	1.1
云冷杉红松林	B	190	1032	36.5	26.2	0~6	南坡	1.1
草地	C					0	南坡	1.1

### 2.2 积雪层雪深和雪密度观测

在2014年秋季和2015年春季的积雪期和融雪期,大样地内以PVC杆雪深采样点为中心的1 m半径范围内重复5次用铁直尺调查积雪层的深度。沿着大样地的对角线间隔20 m的距离设置7个雪密度采样点,在每个雪密度采样点用已知重量半径为4.5 cm的PVC管垂直插入雪中重复3次抽取雪柱,野外用高精度弹簧秤直接量测已知体积的雪柱重量获得积雪层雪密度。积雪期每隔7~14天进行观测,融雪期每隔3~5天进行观测。同时在林外空地设置自动气象站,同步观测整个冬季的气象状况。

### 2.3 林冠截留降雪的观测

在大样地内同样沿着对角线间隔20 m的距离设置7个1 m×1 m的木制截雪槽,截雪槽放置在距离地面1 m的木架上。沿着截雪槽对角线间隔0.3 m的距离重复4次观测雪深,同时用PVC管抽取雪柱观测雪密度。为了消除风的影响,在每次降雪后尽量快速观测采样。林外降雪量用在林外草地内布设的截雪槽获得。

### 2.4 计算方法

雪水量计算公式<sup>[12]</sup>为:

$$\text{雪水量(mm)} = (\text{平均雪深(cm)} \times \text{平均雪密度(g/cm}^3\text{)} \times 100) / \text{水密度(g/cm}^3\text{)} \quad (1)$$

林冠截留雪量用林外降雪量减去林内截雪槽的积雪量计算<sup>[13]</sup>。融雪速度计算公式为：

$$\text{融雪速度}(\text{mm}/\text{d}) = \text{积雪层最大雪水量}(\text{mm}) / \text{融雪历时}(\text{d}) \quad (2)$$

### 2.5 数据统计

采用 Excel 2003 对数据进行统计整理,应用 SPSS 20.0 软件对试验数据进行显著性分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同林分的截雪特征

云冷杉红松林和白桦林的冠层形态特征的差异对雪的截留有显著影响。在整个降雪期间,云冷杉红松林和白桦林分别截留了 27.27% 和 6.16% 的降雪,平均截留率分别为 31.5% 和 8.53% (表 2)。在降雪量为 21 mm 的降雪期间,云冷杉红松林和白桦林达到了最大截留雪量,分别为 6.76 (32.6% 的截留率), 1.46 mm (7% 的截留率)。方差分析表明,云冷杉红松林截留雪量显著高于白桦林 ( $P < 0.05$ )。

表 2 总截留率和平均截留率

样地	累积截留雪量/mm	林外降雪量/mm	总截留率/%	平均截留率/%
A	5.43	88.1	6.16	8.53
B	24.02	88.1	27.27	31.50

### 3.2 森林对积雪特征的影响

3.2.1 不同样地的雪深特征 由图 1 可知,在 2014 年 11 月 13 日至 2015 年 3 月 31 观测期间,2015 年 2 月 4 日观测到了最大雪深。在积雪期,林外草地有最大的雪深,而云冷杉红松林有最低的雪深。林外草地的雪深分别是云冷杉红松林和白桦林的 1.34, 1.06 倍。就最大雪深而言,云冷杉红松林和白桦林分别占林外草地的 76.98%, 95.53%。方差分析表明,林外草地的平均雪深与白桦林的差异并不显著 ( $P > 0.05$ ),但与云冷杉红松林相比差异显著 ( $P < 0.05$ ),而白桦林和云冷杉红松林的平均雪深差异并不显著 ( $P > 0.05$ )。

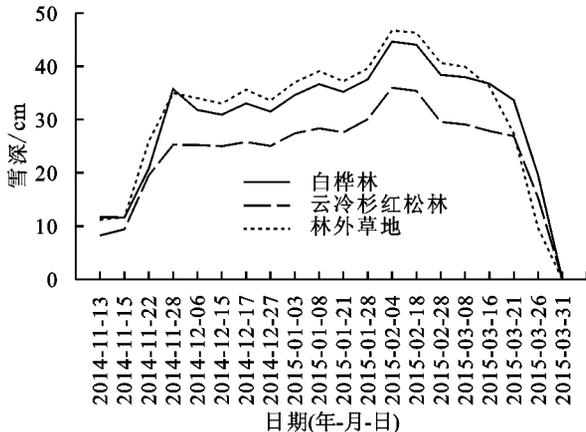


图 1 不同样地的雪深变化

3.2.2 不同样地的雪密度特征 由图 2 可知,在雪季早期和中期的雪密度要低于雪季末期的。从 2014 年 11

月 13 日至 2015 年 2 月 4 日雪密度较低 (118~181 kg/m<sup>3</sup>)。在 3 月末期,观测到了较高的雪密度,这反映了积雪层的变质作用。相关性分析表明 (图 3), 3 个样地的雪密度均与大气温度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 然而, 3 个样地的平均雪密度差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

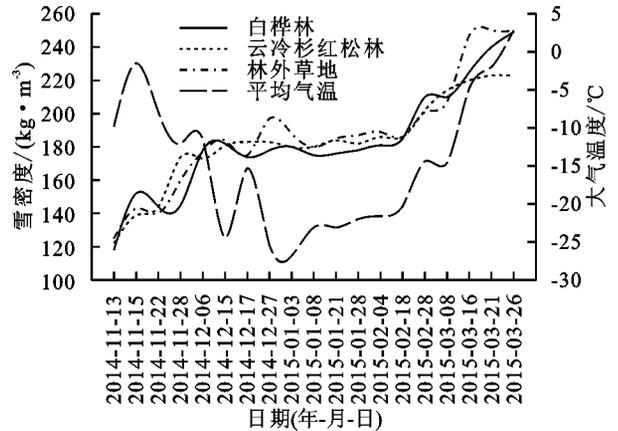


图 2 不同样地间的雪密度特征

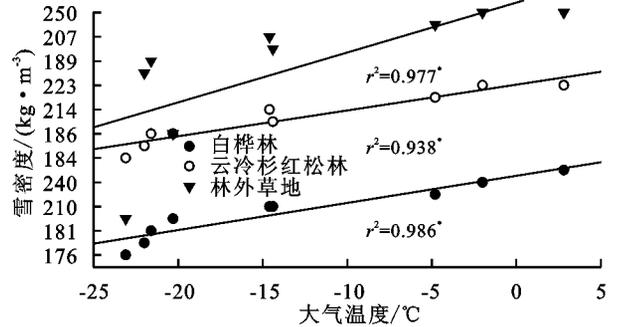
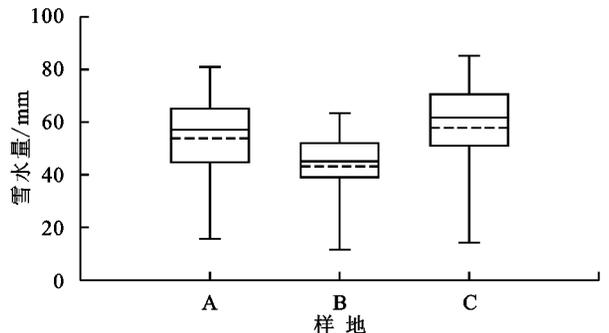


图 3 雪密度与大气温度间的相关性分析

3.2.3 不同样地的雪积累特征 由图 4 可知,雪季期间的最大雪水量在 2015 年 2 月 18 日获得。样地 A 有最大雪水量 (86.2 mm), 样地 B 雪水量最小 (63.7 mm)。样地 C 和样地 B 间最大雪水量差异达到 26.08%, 这是因为样地 B 较低的积雪层深度。与样地 C 相比, 样地 A 最大雪水量减少了 5.43%。样地 C 平均雪水量与样地 A 的差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 样地 A 和样地 B 平均雪水量差异也不显著 ( $P > 0.05$ )。但是, 样地 B 与样地 C 平均雪水量差异显著 ( $P < 0.05$ )。



注: — 表示中值; - - 表示平均值; 位于柱形图上方的一表示最大雪水量, 位于柱形图下方的一表示最小雪水量。

图 4 不同样地的雪水量特征

CV 反映了雪季期间不同天然林对雪水量异质

性的影响。由图5可知,在雪季初期(1~10天)和雪季末期(108~134天)的雪水量变异性程度较高,而在雪季的其他时间段内3个样地的雪水量异质性较低。白桦林和林外草地的雪水量异质性程度较为相似,均较低;而云冷杉红松林的雪水量异质性则较高。

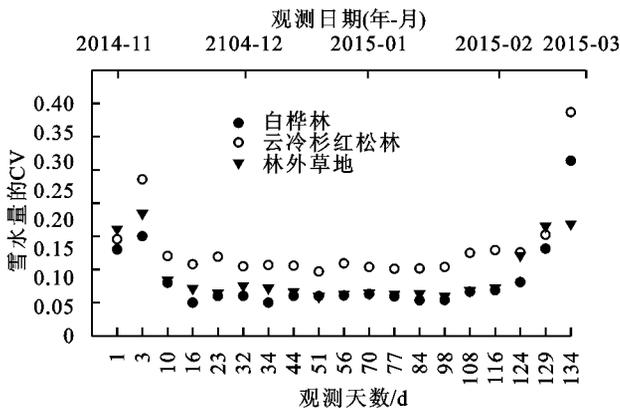


图5 不同样地的雪水量变异特征

### 3.3 森林对融雪特征的影响

积雪从2月18日开始融化,在42天的融雪期间,与样地A和样地B相比,样地C有最高的融雪速度,为2.05 mm/d。样地B有最低的融雪速度,为1.52 mm/d。然而,样地A、B、C间的融雪速度差异并不显著( $P>0.05$ ),都在同一天内完全融化(表3)。

表3 观测期间的融雪特征

样地	最大雪水量/mm	与林外草地		融雪开始期	融雪结束期	融雪历时/d	融雪速度/(mm·d <sup>-1</sup> )
		最大雪水量的比值	融雪				
A	81.49±1.45	0.95	融雪	2月18日	3月31日	42	1.94
B	63.70±1.01	0.74	融雪	2月18日	3月31日	42	1.52
C	86.17±2.88	1.00	融雪	2月18日	3月31日	42	2.05

注:最大雪水量数据为平均值±标准误差。

## 4 讨论

### 4.1 云冷杉红松林和白桦林对积雪的影响

研究表明,不同的天然林对于雪的积累和融化过程产生了重要影响。与林外草地相比,云冷杉红松林和白桦林的最大积雪量分别减少了26.08%和5.43%。其中,云冷杉红松林减少的26.08%的最大积雪量与北美和欧洲等地区报道的最大积雪量减少范围(20%~50%)较为一致<sup>[14-15]</sup>。林外草地的雪积累量高于云冷杉红松林和白桦林,且林外草地的雪深和雪密度均显著高于云冷杉红松林。林外草地与云冷杉红松林的雪深和雪密度间的显著差异主要是由于云冷杉红松林的截留降雪作用的结果,已有研究<sup>[16]</sup>表明,针叶林冠层能够贮存60%的降雪,导致30%~40%的积雪损失,因此针叶林对降雪的截留作用非常显著。与白桦林相比,林外草地的雪深和雪水

量分别增加了1.06倍和6.92%,一些学者<sup>[17]</sup>在阔叶林与林外空地的积雪分布对比研究中也表现出相似趋势。但白桦林与林外草地的雪深和雪水量的差异性并不显著,这是由于白桦林冬季稀疏的冠层对于降雪再分配的作用较小。而针叶林冠层对于积雪的空间变异性影响较大,因此与相对同质性的林外草地和白桦林相比,云冷杉红松林的雪水量更具变异性,这与Winkler等<sup>[10]</sup>的研究结果较为一致。

### 4.2 云冷杉红松林和白桦林对融雪的影响

与白桦林和云冷杉红松林相比,林外草地的融雪速度较高,但差异性并不显著,这主要是因为融雪后期温度上升较快和融雪历时较短所致。从3月21—31日的短短11天内,林外草地、白桦林和云冷杉红松林的最大积雪量分别融化了79.46%,90.9%,94.17%。这表明温度对于融雪的影响比森林植被类型和结构更为重要。与林外草地相比,白桦林和云冷杉红松林的平均融雪速度分别降低了3%和24%;而相关的研究中,森林可减少25%~40%的融雪速度。森林对积雪消融过程的影响是非常复杂的<sup>[18]</sup>,森林主要通过冠层影响积雪表面的能量平衡而引起积雪消融过程的差异,森林冠层致使短波辐射减小,长波辐射增加<sup>[19]</sup>;同时,通过影响风速和风向进而改变林下雪层表面的感热和潜热。而到达积雪表面的净辐射是积雪消融的主要能量来源,总体上,森林的出现可有效降低到达积雪层的净辐射,从而不利于积雪的消融过程。

## 5 结论

本研究评价了云冷杉红松林和白桦林对于积雪、融雪和截雪过程的影响。与白桦林和林外草地相比,由于云冷杉红松林较高的截留率导致了平均雪深和最大雪水量的减少。但白桦林和林外草地平均雪深和最大雪水量差异并不显著。在雪季初期地表雪密度较低,而在雪季末期地表雪密度则较高。与白桦林和林外草地相比,云冷杉红松林雪水量变异性程度较高。云冷杉红松林融雪速度最低,这主要是由于林冠层减少了到达积雪层的辐射。云冷杉红松林截留率显著高于白桦林。本研究表明,森林对于积雪和融雪过程的影响主要依赖于森林冠层的降雪再分配作用。

### 参考文献:

- [1] Bernhardt M, Schulz K, Liston G E, et al. The influence of lateral snow redistribution processes on snow melt and sublimation in alpine regions [J]. Journal of Hydrology, 2012, 424: 196-206.
- [2] Jost G, Moore R D, Smith R, et al. Distributed tem-

- perature-index snowmelt modelling for forested catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 420: 87-101.
- [3] Tim H, Samuel R. Does forest stand structure impact the dynamics of snow on winter grazing grounds of reindeer [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 291: 162-171.
- [4] Duan K, Xu B, Wu G J. Snow accumulation variability at altitude of 7 010 m a. s. l. in Muztag Ata Mountain in Pamir Plateau during 1958—2002 [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 531: 912-918.
- [5] 任青山,魏晓华,葛剑平,等. 黑龙江省东部森林中雪的水位效益的初步研究[J]. *东北林业大学学报*, 1994, 22(2): 11-16.
- [6] 张庆费,周晓峰,蔡体久. 黑龙江省中部地区森林对融雪径流的影响[J]. *植物资源与环境*, 1994, 3(3): 36-40.
- [7] 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.
- [8] 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): 24-31.
- [9] 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.
- [10] Winkler R, Spittlehouse D, Golding D. Measured differences in snow accumulation and melt among clearcut, juvenile, and mature forests in southern British Columbia [J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(1): 51-62.
- [11] 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.
- [12] 李辉东,关德新,金昌杰,等. 森林积雪蒸发测算方法及研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3603-3609
- [13] Lundberg A, Koivusalo H. Estimating winter evaporation in boreal forests with operational snow course data [J]. *Hydrological processes*, 2003, 17(8): 1479-1493.
- [14] Lundberg A, Nakai Y, Thunehed H, et al. Snow accumulation in forests from ground and remote-sensing data [J]. *Hydrological Processes*, 2004, 18(10): 1941-1955.
- [15] Niu G Y, Yang Z L. Effects of vegetation canopy processes on snow surface energy and mass balances [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D23): 1-15.
- [16] Strasser U, Warscher M, Liston G E. Modeling snow-canopy processes on an Idealized Mountain [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2011, 12(4): 663-677.
- [17] Murray C D, Buttler J M. Impacts of clearcut harvesting on snow accumulation and melt in a northern hardwood forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 271(1/4): 197-212.
- [18] Varhola A, Coops N C, Weiler M, et al. Forest canopy effects on snow accumulation and ablation: An integrative review of empirical results [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 392(3/4): 219-233.
- [19] Essery R, Pomeroy J, Parviainen J, et al. Sublimation of snow from coniferous forests in a climate model [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(11): 1855-1864.
- [19] 及模拟[J]. *岩土力学*, 2014, 35(7): 1885-1891.
- [19] Wijaya M, Leong E C, Rahardjo H. Effect of shrinkage on air-entry value of soils [J]. *Soils and Foundations*, 2015, 55(1): 166-180.
- [20] Mohammed Y F, Nahla M S, Entesar J I. Determination of the soil-water characteristic curve of unsaturated bentonite-sand mixtures [J]. *Environmental Earth Science*, 2017, 76(5): 1-12.
- [21] 林丹,靳孟贵,马斌,等. 包气带增厚区土壤水力参数及其对入渗补给的影响[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2014, 39(6): 760-768.
- [22] 徐晓敏,吴淑芳,康倍铭,等. 5 种天然土壤改良剂的养分与保水性研究及评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 85-89.

(上接第 103 页)

- [14] Gardner W R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. *Soil Science*, 1958, 85(4): 228-232.
- [15] Leong E C, Rahardjo H. Permeability function for unsaturated soils [J]. *Journal Geotechnical Geo-environmental Engineering*, 1997, 123(12): 1118-1126.
- [16] 查元源,周发超,杨金忠. 一种由土壤剖面含水率估算土壤水力参数的方法[J]. *水利学报*, 2011, 42(8): 883-891.
- [17] Wang Y, Li J H, Zhang L M. Measuring water retention curves for rough joints with random apertures [J]. *Geotechnical Test*, 2013, 6(36): 1-10.
- [18] 陈东霞,龚晓南. 非饱和残积土的土—水特征曲线试验