

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0144

YANG Junjun, HE Zhibin, LIN Pengfei. Study on the relationship between water holding capacity and sampling methods of forest understory in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(2):610-617. [杨军军, 何志斌, 蔺鹏飞. 祁连山地区林下地被物持水量与采样方法的关系研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(2):610-617.]

## 祁连山地区林下地被物持水量 与采样方法的关系研究

杨军军<sup>1</sup>, 何志斌<sup>2</sup>, 蔺鹏飞<sup>2</sup>

(1. 咸阳师范学院, 陕西 咸阳 712000; 2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 中国生态系统研究网络  
内陆河流域研究站/内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 林下地被物持水量的准确计算对生态环境脆弱的寒区水文功能的模拟和预测尤为关键。本研究以青藏高原北麓的祁连山典型流域为研究区, 对原状和散状两种采样方法下, 青海云杉林下苔枯层(苔藓与枯落物形成的层状结构)持水特征参数的差异进行分析, 探讨不同采样方法在林下苔枯层水文特征研究时的影响。本研究中原状样本采用PVC管取样, 散状样本采用尼龙网袋取样, 获得2 596个实验数据。研究发现平均厚度为14.3 cm的原状苔藓与苔枯样本最大持水量分别为 $2.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 与 $5.42 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 最大持水率分别为2 071%与890%, 散状苔藓最大持水率为610%。苔枯层与苔藓层的最大持水量差异显著, 苔枯层相比苔藓层具有更好的保水功能, 林下地被物水文特征量化时应区别对待; 相比于原状样本, 散状采样方法下苔藓层的最大持水率被低估近70.5%, 即在散状采样方法下, 林下苔藓层的最大持水率会被严重低估; 地被物脱湿曲线为幂函数, 蒸发时长为4.8~5.6 h, 关键参数的估算对于地被物水分蒸发过程的模拟和预测具有重要参考价值。不同采样方法对地被物持水量的估算差异显著, 实践中应根据实验目的和研究对象, 选择合适的采样方法。

**关键词:** 寒区水文; 最大持水量; 地被物; 苔藓; 祁连山

**中图分类号:** S76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)02-0610-08

### 0 引言

地处西北半干旱区祁连山中部北坡的青海云杉林(*Picea crassifolia*)具有良好的生态系统结构, 以苔枯层为主的林下地被物层发育完整。苔枯层具有疏松多孔介质特征<sup>[1]</sup>, 具备强大的表面能和海绵物的力学特性, 使其在寒区森林生态系统水分再分配过程的降水截持、动能消减和地表产流调节中发挥重要作用<sup>[2-4]</sup>, 近期研究还发现其对青海云杉林生态系统的呼吸同样起着重要作用<sup>[5]</sup>。苔枯结构分为上层的苔藓层和下层的枯落物层, 根据研究, 苔枯层对降水的截持能力受雨型、降雨量和降雨强度等诸多因素影响<sup>[6]</sup>, 不同降雨事件有不同的截留量, 特别是降雨量与雨强较小的降雨事件, 该截持作用

更加突出<sup>[7]</sup>, 因此, 寒区森林地表苔枯层的持水能力与流域产、汇流形成过程间关系密切。

陈邦杰等<sup>[8-9]</sup>、高谦等<sup>[10-11]</sup>前辈开创并奠定了我国苔藓研究的基础, 总结已有关于苔藓水文特性的研究, 发现存在以下两方面问题。其一, 已有研究主要关注苔藓或枯落物层的最大持水量<sup>[12-13]</sup>, 且多独立对两者进行研究, 苔藓和枯落物层的持水特征经常被分别量化<sup>[14-15]</sup>, 该做法能否真实评价林下地被层的水文特征有待进一步验证, 苔枯层作为一整体与剥离开独立计算其间的区别有待进一步分析; 其二, 已有关于苔藓的研究中, 苔藓样本的采集和运输大多以采样袋(尼龙网袋或密封袋)散装(简称为散状采样)运输并进行实验<sup>[16-17]</sup>, 研究结果间差异显著可对比性差<sup>[18]</sup>, 鲜有研究采用基于PVC的原状

收稿日期: 2019-10-31; 修订日期: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41901050;41522102); 咸阳师范学院专项科研项目(XSYK18055)资助

作者简介: 杨军军, 副教授, 主要从事寒区旱区森林水文研究. E-mail: junjun\_yang@126.com

采样法(简称为原状采样),散状与原状两种采样方法对苔藓水文特征量化究竟会产生多大差异目前尚不清楚。为了更为科学、准确地获取林下地被物水文特征参数<sup>[19]</sup>,我们亟需对这些内容展开深入研究。

针对以上两方面问题,本研究以青藏高原北麓祁连山青海云杉林地地被物为研究对象,拟探讨以下两个问题。第一,量化并对比苔枯层、苔藓层两种地被物的持水特征,实现对林下地被物生态水文功能的客观分析;第二,量化并对比基于尼龙网袋的散状苔藓与基于PVC管的原状苔藓间的水文特征差异,探讨不同采样方法对苔藓水文特征参数量化的影响。祁连山青海云杉林面积占当地水源涵养林约21.7%,而林下苔藓覆盖率高达99.3%<sup>[20]</sup>,是流域水文功能实现的重要组成成分,因此对林下地被物持水特征的研究,为典型寒区林地水文功能的认识具有一定理论意义,研究结果能够为青海云杉林地地被物水分传输过程和机理的研究提供重要的参数和理论支持。

## 1 研究区概况

研究区位于青藏高原北麓祁连山中段北坡的西水林场自然保护区,排露沟流域(100°17'6"~100°18'26" E, 38°31'26"~38°33'37" N)海拔在2700~3300 m,该区属于大陆性高寒半湿润山地森林草原气候。据1994—2015年地面气象站记录,2700 m处年均气温为0.5℃,最低温为-27.6℃,最高温25.6℃,水热同期。年均降水量为376 mm,根据何志斌等<sup>[21]</sup>对流域不同海拔降雨量的统计发现,随海拔升高降水量先呈增加趋势,最大值出现在3600 m处,随后趋于减小,海拔每升高100 m降水量增加约4.3%。降水量年内分配不均匀,约60%的降水集中在每年7—9月之间。年均蒸发量为1005 mm,干旱指数为2.7。相对湿度为60%,流域平均产流系数为0.22。研究区植被和土壤类型随海拔和地形变化呈明显的垂直分带,2700~3200 m阴坡半阴坡以郁闭度为0.6~0.8的青海云杉林为主,林下地被物以苔藓为主,山羽藓(*Abietinella abietina*)为优势种,平均盖度达85%以上,人为干扰少的区域,盖度为100%。观测样地中苔藓层平均厚度为14.3 cm,平均苔藓层生物量为1.86 kg·m<sup>-2</sup>,土壤类型以森林灰褐土为主,土壤厚度在40~60 cm之间。

## 2 研究方法与数据指标

### 2.1 野外采样

本研究以基于PVC管的原状和基于尼龙网袋的散状两种方法对林下地被物进行采集和实验。其中苔枯样本由上层的苔藓层和下层的枯落物层组成,原状苔藓和散状苔藓仅为苔藓层,样本结构示意图见图1。根据流域苔藓的空间分布,分别在3200 m、3100 m、3000 m、2900 m、2800 m和2700 m共6个海拔梯度样地进行取样。每个样地内随机设置3个5 m×5 m的样方,每个样方内分别以原状和散状两种方法分别收集3个直径为20 cm的圆柱形苔枯样本和3个散状苔藓样本,研究区共取得54个原状样本和54个散状样本,实验进行中共获得2596个测量数据。样本收集时,为了保证苔枯结构不被破坏,取样时将直径为20 cm的PVC管垂直轻置于苔藓样本表面,用快刀沿PVC管外壁进行垂直切割,同时轻摁PVC管至切割层底部,重复以上过程直到取出完整的苔枯样本,取样过程逐层进行,原状样本采集时,取样深度直到枯落物底部。为了降低对原状样本结构的损坏,单次切割深度不超过5 cm,PVC管高度根据原状样本厚度的不同而不同,一般在15~30 cm之间,原状样本取样见图2。

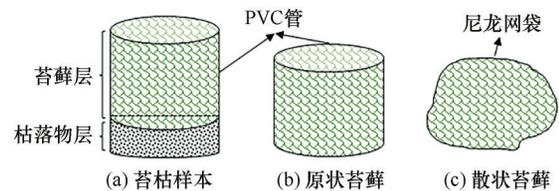
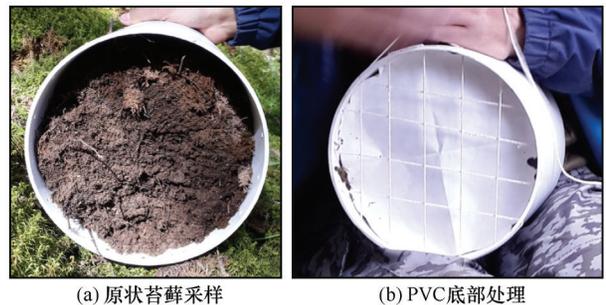


图1 苔枯样本的两种取样方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two sampling methods for moss samples



(a) 原状苔藓采样 (b) PVC底部处理

图2 原状样本采集与PVC底部处理  
Fig. 2 Undisturbed sample collection and the PVC bottom treatment

原状样本在完成取样后,首先对样本底部进行平整处理。其次,在样本底部加垫一张与PVC管径大小一致的圆形滤纸,再用麻绳以井字形在距PVC管底部1 cm处进行封底处理,以避免样本底部枯落物层的散落,保证样本结构完整。完成封底后,通过PVC管底部与地面的轻触使样本底部与底部缝线间接触良好,完成取样过

程(图2)。

散状样本只取苔藓层,采样时将散状样本装入尼龙网袋中称重,记录样本鲜重,再对网袋进行封口。为了计算样地苔藓平均厚度,在每个样地上按照X型样线分布,随机取15个样点测量苔藓厚度,取平均值为该海拔样地的苔藓厚度。调查样地基本情况见表1。

表1 祁连山区森林苔藓样地基本情况

Table 1 Basic situation of the moss sampling in the Qilian forests

海拔/m	苔藓平均厚度/cm	年均温/°C	年降水/mm	平均林龄/a	叶面积	树高/m	立木度/(stem·ha <sup>-1</sup> )	地被层量/(Mg·ha <sup>-1</sup> )
3 200	11.7	2.00	451	60	1.83	7.4	2 433	8.3
3 100	12.5	1.45	486	50	1.86	5.6	4 533	9.4
3 000	14.1	0.67	535	54	1.88	5.6	3 100	10.5
2 900	18.4	0.64	537	60	1.92	7.1	3 311	8.8
2 800	16.0	-0.58	614	65	1.94	6.2	1 211	12.2
2 700	13.1	-0.73	623	73	2.11	7.4	1 078	13.6

## 2.2 实验控制及测量指标

样本室内实验主要包括吸水和脱湿两个过程。为了排除在脱湿过程中苔藓表面距离PVC管顶高度的不同而引起的蒸发差异,实验前对样本顶部多余部分进行切割,保证苔藓层顶部距离PVC管高度统一为2 cm。实验过程中,首先寻找一平整的试验场地,大小约1 m×5 m。再利用砖块在地面搭建一高度为10 cm,大小为1 m×5 m的蓄水池,在水池底部铺垫双层塑料薄膜进行隔水,向水池蓄水使两种样本形成等压的水环境(图3)。

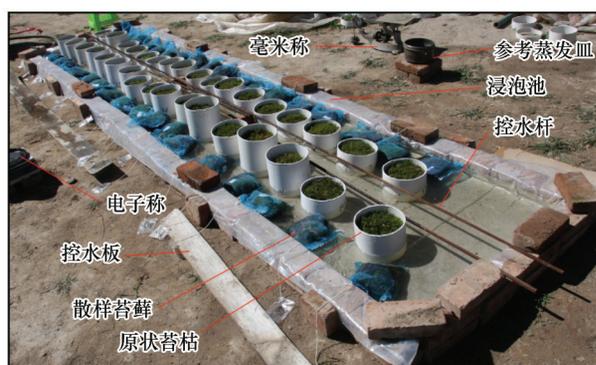


图3 原状和散状苔藓实验布置

Fig. 3 Experiment layout of original and scattered moss

吸水实验中,首先在水池中注入刚好浸没散状苔藓的水层,将所有样本放入蓄水池中浸泡,原状样本保证苔藓位于上部,散状样本按照常规方法均匀放入(图3)。吸水实验中,浸泡时间间隔依次为20、40、60、90、120、180和720 min,每次浸泡结束时

先将样本放置在控水杆或控水板上,静置3~5 min至样本没有明显滴水现象,再进行称重记录,前后两次浸泡结果间样本的重量差为浸泡时段样本的吸水重。吸水实验结束后开始进行脱湿实验,将实验样本放置在实验水池上方搭建的两根控水杆上,或者放置在水池侧面的控水板进行自然蒸发。蒸发时间间隔依次为20、40、60、90、120、180、240、240、240、240、240、240和240 min,在每个时段结束记录样本的重量,将前后两次的记录之差作为该时段的样本蒸发量,样本质量的变化通过精度为0.001 kg的电子秤测量获得。

实验样本吸脱湿实验完成后,完全晾干苔藓样本,从苔藓层底部分离出枯落物层,继续对上层的原状苔藓进行吸脱湿实验,实验过程同上文。将分离出来的枯落物层以65 °C在烘箱烘干24 h,测量枯落物干物质量并记录。

本文主要针对寒区林下地被物(苔藓和枯落物)持水特征的两个指标,单位面积最大持水量和最大持水率进行分析。单位面积最大持水量 $W_a$  ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )指,苔藓层或苔藓样本的最大蓄水量与样本面积的比值;最大持水率 $P$  (%)指,单位质量干样本所能存储的最大含水量百分比。

$$W_a = \frac{W_w}{A_p} \quad (1)$$

$$P = \frac{W_w}{W_{dm}} \times 100 \quad (2)$$

式中: $W_w$ 为干样本的最大蓄水量(kg); $A_p$ 为样本面

积( $m^2$ );  $W_{dm}$  为干样本自重(kg)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 最大持水量

随着海拔增加, 苔枯层的最大持水量在 2 900~3 100 m 之间呈不显著增加趋势, 高海拔(3 200 m)最大持水量有所降低, 沿海拔梯度的空间变异规律不显著, 原状苔藓也同样在不同海拔间没有显著变化(图 4), 该结论与陈甲瑞和王小兰<sup>[3]</sup>对西藏林地苔藓层持水特征的研究结论一致, 与王瑾等<sup>[22]</sup>在祁连山大野口的发现一致。因此, 无论是苔枯层还是原状苔藓, 最大持水量随海拔并没有显著变化趋势, 因此后文的研究中, 只关注流域平均值(以所有海拔的

平均值作为流域的平均值), 不再对海拔间差异进行探讨。结果分析显示, 苔枯层的最大持水量为  $(5.42 \pm 0.86) kg \cdot m^{-2}$ , 原状苔藓的最大持水量为  $(2.29 \pm 0.32) kg \cdot m^{-2}$ , 苔枯层是原状苔藓的 2.4 倍。即在林下地被物拦蓄降水、增加土壤水分入渗、减少地表径流和防止水土流失的过程中, 苔枯结构的拦蓄能力显著大于苔藓层, 苔枯层是寒区地被物实现其水文功能的主要物质, 苔藓层的持水能力并不能代表林下地被物的持水能力。该结果为我们关于寒区林下地被物水文特征的量化提出了严格要求, 即如果要量化林下地被物的最大持水量, 应该以苔枯层为研究对象, 反之亦然, 如果仅需测量苔藓的水文特征, 地被物底层的枯落物层则需要提前被清理掉。

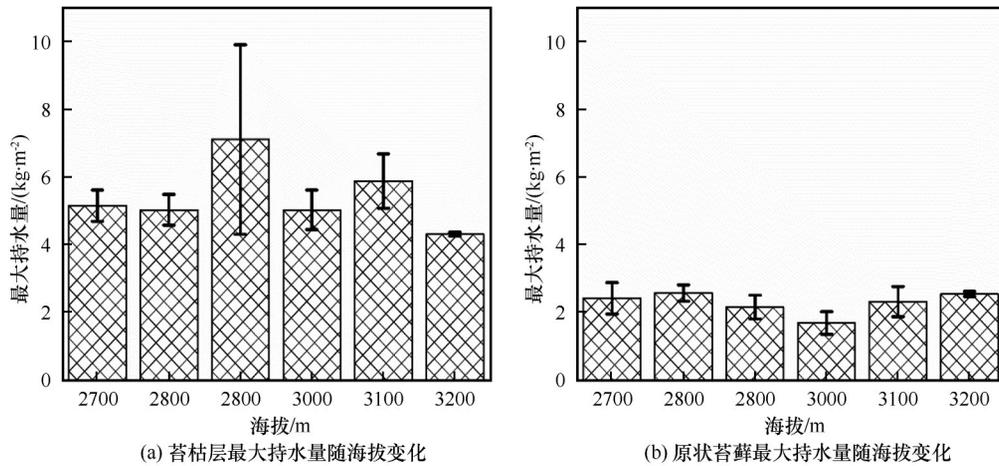


图 4 苔枯层与原状苔藓的最大持水量  
Fig. 4 Water holding capacity of moss-litter and original moss sampling

#### 3.2 最大持水率

最大持水率属于无量纲指标, 相对于最大持水

量, 该指标在不同研究间具有更好的可对比性<sup>[23]</sup>。由图 5 统计发现, 苔枯层、原状苔藓和散状苔藓的平

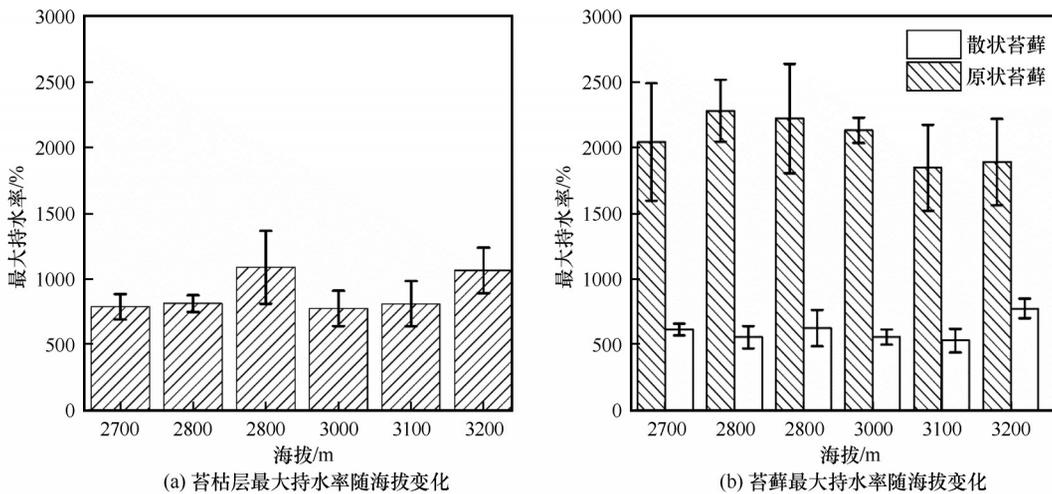


图 5 苔枯层、原状苔藓和散状苔藓最大持水率对比  
Fig. 5 Water holding rate of moss-litter, original and scattered moss sampling

均最大持水率分别为  $890\% \pm 153\%$ 、 $2\,071\% \pm 309\%$  和  $610\% \pm 82\%$ , 最大持水率关系由大到小依次为原状苔藓、苔枯层和散状苔藓。其中, 原状苔藓最大持水率是苔枯层的 2.3 倍, 是散状苔藓的 3.4 倍, 不同处理间最大持水率差异显著, 基于尼龙网袋的散样最大持水率最小。

### 3.3 脱湿特征曲线

苔枯层和苔藓层的水文功能除表现在拦蓄产汇流、改变地面产流过程、削减洪峰之外<sup>[3]</sup>, 减缓和降低地表土壤水分蒸发也是一项重要的生态水文

功能<sup>[4]</sup>。图 6 为苔枯层和原状苔藓在达到最大持水量后的自然脱湿过程曲线, 苔枯层和原状苔藓在经过近 5 h 的快速脱湿后, 蒸发比率趋于稳定。经过导数拐点分析发现, 苔枯层达到稳定蒸发的时间为 5.6 h, 苔藓层为 4.8 h, 即在降雨入渗和水分蒸发的过程中, 相比苔藓层, 苔枯层能够为降雨入渗提供更长的入渗时间, 同时能一定程度上减缓水分的自然蒸发过程, 从而更为有效地起到调节产汇流过程和削减洪峰的作用, 对寒区坡面稳定产流过程的形成影响较大。

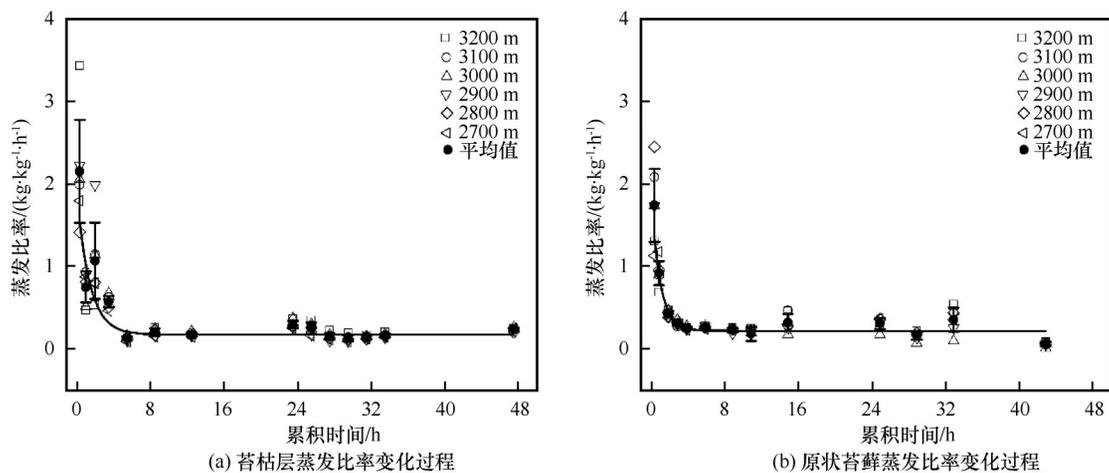


图 6 苔枯层与原状苔藓的脱湿特征曲线

Fig. 6 The soil water characteristic curve of drying of the moss-litter and origin moss layers

为了进一步量化两种结构的脱湿过程, 实验对脱湿前期 4 h 的蒸发比率进行分析, 苔枯层和原状苔藓的蒸发比率分别为  $(0.37 \pm 0.17) \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $(0.94 \pm 0.42) \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。这一结果说明, 同等外部环境下, 苔藓层蒸发比率是苔枯层的 2.6 倍, 即苔枯层不但在降水过程中有利于水分的“存储”, 而且在降雨结束后的蒸发过程中能更有效地减小地面水分耗散, 是寒区地表水分保持和流域稳定产流形成的重要保障, 有可能成为抵御气候变化背景下地表蒸散增大<sup>[24]</sup>的有力措施之一。

## 4 讨论

### 4.1 最大持水量估算

近年来, 随着全球极端气象事件的增加<sup>[25]</sup>, 由于极端气象事件而引发的次生灾害也在不断增加, 尤其是寒区、半干旱等生态环境脆弱地区, 地质灾害、水土流失和山体滑坡等自然灾害频发<sup>[26-27]</sup>。因此, 开展具有生态保护效应的地被物持水特征的研究, 对于高寒山地灾害的防治和预测具有重要价值。

最大持水量是林地水文过程的重要评价指标<sup>[26,28]</sup>, 本研究中苔枯层和原状苔藓最大持水量差异显著<sup>[27]</sup>。其中, 苔枯层的最大持水量为  $(5.42 \pm 0.86) \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 张远东等<sup>[14]</sup>对地被物量化的研究结果为  $2.0 \sim 6.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  之间, 阈值区间比本研究结果稍大, 本研究结果的确定性和一致性更好。这一方面可能来自于研究区苔枯样本的一致性差异, 但也有可能来自采样方法的差异, 张远东等<sup>[14]</sup>用密封袋采集实验样本(即本研究中的散状样本), 相比散样, 基于 PVC 管的原状样本能更好的体现地被物的结构特征和物理性质, 而张远东等<sup>[14]</sup>所采用的密封袋, 无论在样本收集还是运输过程中, 对样本层状结构的破坏都较大且影响不一, 最终导致样本测量结果的离散性较大。原状苔藓的最大持水量为  $2.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , 与张远东等<sup>[14]</sup>在川西亚高山地区 3 000 m 处采伐的人工林和天然次生林的测量结果  $2.1 \sim 2.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  基本一致, 该结果首先说明了本研究结果的准确性, 同时也说明两种采样方法对于苔藓最大持水量的影响不显著, 这可能是由于苔藓层

本身属于近似各向同质的材料,因此实验的采样方法和样本形状对该指标的影响不显著。对比苔枯层和苔藓层最大持水量可知,苔枯层的最大持水量显著大于苔藓层,这可能是由于苔枯层上松下紧(上部为蓬松的苔藓层,而下部为相对紧实的枯落物层)的结构所致,在蓄水过程中,该结构上部水分入渗迅速下部相对滞水,具有“容器”的效应,从而表现出较强的持水能力。

根据已有研究,苔藓最大持水量跟林分林龄<sup>[13]</sup>和苔藓厚度<sup>[23]</sup>存在显著正相关,因此,本文也将从以下两方面对本研究结果与已有研究结果进行对比分析。赵锦梅等<sup>[17]</sup>对祁连山东段高寒灌丛苔藓的研究发现,苔藓最大持水量为 $1.7\sim 5.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间。张远东等<sup>[14]</sup>发现川西亚高山森林苔藓层的最大持水量为 $1.3\sim 3.4\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,且随林龄增加苔藓层的最大持水量呈增加趋势,70 a 人工云杉林苔藓最大持水量为 $5.5\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[15]</sup>。本研究中平均林龄为85 a 的天然次生云杉林苔藓最大持水量为 $(2.29\pm 0.32)\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ,与前人结果相比略小,这一差异显然并非来自林龄。另一方面,对比苔藓厚度发现,祁连山平均厚度为3.7 cm 的高山灌丛苔藓,平均最大持水量为 $13.8\sim 19.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[16]</sup>,研究结果远高于本研究中平均厚度为14.31 cm 苔藓的最大持水量,由此可见,苔藓厚度也不是造成本研究最大持水量区别于其他研究的原因。排除以上两种因素,不同研究间采样方法的不同最有可能是关键因素,即采样方法能够很大程度上影响苔藓的最大持水量,因此在高寒山地苔藓最大持水量估算时,苔藓样本的采样方法应被慎重选择,以更为科学、准确地进行参数估算。

#### 4.2 最大持水率估算

散状苔藓最大持水率为 $610\%\pm 82\%$ ,比王金叶<sup>[12]</sup>在该区域的研究结果 $300\%\sim 500\%$ 略大,在刘章文等<sup>[16]</sup>对祁连山南坡高寒灌丛苔藓的研究结果 $386\%\sim 782\%$ 之内,比张远东等<sup>[14]</sup>在青藏高原东缘褶皱带对桦木林苔藓的研究结果 $945\%$ 小约35%,对比不同研究结果可知本研究结果基本可靠,但基于散状采样方法的不同研究结果间差异显著,不便于水文过程模拟中的参数量化。本研究中散状苔藓的采样方法和已有研究没有明显区别,最大持水率由苔藓质量计算获得,排除了样本间苔藓厚度可能引起的差异,因此研究结果间的差异可能主要来自苔藓种类和实验中的人为干预。

与散状苔藓最大持水率形成鲜明对比的是,本

研究中原状苔藓的最大持水率 $2071\%\pm 309\%$ ,是散状样本的3.4倍,远大于散状苔藓的结果,该结果与刘润等<sup>[29]</sup>对美灰藓的研究结果 $1627.8\%\pm 4.7\%$ 较为接近,考虑到刘润等的研究样本是模拟室外苔藓的原状特征,结果值可能偏小,因此本研究的结果具有良好的科学性和可信度。研究结果提醒我们,在苔藓最大持水率的估算中,今后的研究需要慎重考虑苔藓的采样方法,以排除采样方法对苔藓最大持水率估算带来严重偏差。

#### 4.3 脱湿特征曲线分析

苔枯层和原状苔藓的脱湿过程均呈典型的幂函数曲线,即随着蒸发时间的延长,地被物在前期5 h 内快速脱水,随后很快趋于稳定(图6),该过程说明苔枯层和苔藓层并不利于水分的长期保存。地被物层在降水垂向的时间再分配时长为4.8~5.6 h,这一时长是林地水分循环过程估算和模拟的关键参数,结合脱湿过程的幂函数关系和水分蒸发比率,可以对高寒山地地被物的水分再分配过程形成更为精确的模拟和预测。

## 5 结论

本文以青海云杉林下地被物为研究对象,通过对比基于PVC管的原状采样方法与基于尼龙网袋的散状采样方法下地被物的持水量差异,为高寒山地林下地被物水文特征参数量化和实验方法选择提供参考和借鉴。从实验结果看,不同采样方法间持水量差异显著,相比苔藓层,苔枯层具有更强的持水功能,是寒区林下地被物水文功能实现的主要载体。苔枯层最大持水率为 $890\%\pm 153\%$ ,原状苔藓为 $2071\%\pm 309\%$ ,苔藓持水率表现尤为显著,散状采样相对于原状采样,苔藓最大持水率被低估约70.5%,对于最大持水率的估算,必须根据实验的目的和研究对象,选择最合适的采样方法,保证测量结果的正确性和准确性。地被物脱湿特征曲线函数、蒸发时长以及蒸发速率为降水过程中的地被物水分蒸发过程的模拟和预测提供了重要借鉴和科学依据。

**致谢:** 本文试验的进行和数据的收集得到了中国科学院临泽国家实验站工作人员马芳、中国科学院西北生态环境资源研究院朱喜等老师们的帮助,在此深表感谢。

#### 参考文献(References):

- [1] Fu Ying, Bai Xueliang, Zhang Le, et al. The effect of bryophytes on nutrient accumulation in surface soil in the Wudalian-

- chi volcanic area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(10): 3288-3297. [福英, 白学良, 张乐, 等. 五大连池火山熔岩地貌苔藓植物对土壤养分积累的作用[J]. *生态学报*, 2015, 35(10): 3288-3297.]
- [2] Ye Ji, Hao Zhanqing, Yu Deyong, et al. Research advances in bryophyte ecological function. *Chinese[J]. Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1939-1942. [叶吉, 郝占庆, 于德永, 等. 苔藓植物生态功能的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1939-1942.]
- [3] Chen Jiarui, Wang Xiaolan. Water-holding capacity of bryophyte in two coniferous forests at different altitudes in eastern slope of Mountain Shergyla, Tibet[J]. *Journal of forest and environment*, 2019, 39(6): 1-8. [陈甲瑞, 王小兰. 色季拉山东坡不同海拔两种针叶林下苔藓层持水特性[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(6): 1-8.]
- [4] Voortman B R, Barthoomeus R P, Bodegom P M, et al. Unsaturated hydraulic properties of xerophilous mosses: towards implementation of moss covered soils in hydrological models[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(26): 6251-6264.
- [5] Xie Huanhuan, Ma Wenying, Zhao Chanyan, et al. Effects of litter and moss on soil respiration in a spruce forest in the Qilian Mountains. *Qinghai[J]. Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5): 1379-1390. [解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 等. 苔藓和凋落物对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(5): 1379-1390.]
- [6] Jin Bowen, Wang Jinye, Chang Zongqiang, et al. A study of hydrologic function of canopy of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(Suppl 1): 39-42. [金博文, 王金叶, 常宗强, 等. 祁连山青海云杉林冠层水文功能研究[J]. *西北林学院学报* 2001, 16(增刊1): 39-42.]
- [7] Wang Shunli, Wang Jinye, Zhang Xuelong, et al. Distribution of withered litters of moss and hydrographic characteristics in the *Picea crassifolia* forestry on Qilian Mountain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(5): 156-159. [王顺利, 王金叶, 张学龙, 等. 祁连山青海云杉林苔藓枯落物分布与水文特性[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(5): 156-159.]
- [8] Chen Bangjie, Wan Zongling, Gao Qian, et al. *Chinese moss genera plantarum (the first volume)* [M]. Beijing: Science Press, 1963. [陈邦杰, 万宗玲, 高谦, 等. *中国藓类植物属志(上册)*[M]. 北京: 科学出版社, 1963.]
- [9] Chen Bangjie, Wan Zongling, Gao Qian, et al. *Chinese moss genera plantarum (the second volume)* [M]. Beijing: Science Press, 1978. [陈邦杰, 万宗玲, 高谦, 等. *中国藓类植物属志(下册)*[M]. 北京: 科学出版社, 1978.]
- [10] Gao Qian. *Bryophytes in China (the first volume)* [M]. 1994, Beijing: Science Press. [高谦. *中国苔藓植物志(第一卷)* [M]. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [11] Gao Qian. *Bryophytes in China (the second volume)* [M]. 1994, Beijing: Science Press. [高谦. *中国苔藓植物志(第二卷)*[M]. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [12] Wang Jinye. Study of mechanism and process of water transmission on water resource conservation forests ecosystem in Qilian Mountains[D]. Changsha: Central south university of forestry and technology, 2006. [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.]
- [13] Liu Xingming, Liu Xiande, Che Zongxi, et al. Eco-hydrological functions of the moss layer in *Picea crassifolia* forest of Qilian Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(6): 962-967. [刘兴明, 刘贤德, 车宗玺, 等. 祁连山青海云杉林区苔藓层对流域水文的影响[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(6): 962-967.]
- [14] Zhang Yuandong, Liu Shirong, Ma Jiangming, et al. Woodland hydrological effects of birch forests in sub-alpine region of western Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 147-154. [张远东, 刘世荣, 马姜明, 等. 川西亚高山桦木林的林地水文效应[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 147-154.]
- [15] Zhang Yuandong, Zhao Changming, Liu Shirong. Woodland hydrological effects of spruce plantations and natural secondary series in sub-alpine region of western Sichuan[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 761-768. [张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西亚高山人工云杉林和自然恢复演替系列的林地水文效应[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 761-768.]
- [16] Liu Zhangwen, Chen Rensheng, Song Yaoyuan, et al. Water holding capacity of mosses under alpine shrubs in Qilian Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(4): 696-703. [刘章文, 陈仁升, 宋耀选, 等. 祁连山高寒灌丛苔藓持水性能[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(4): 696-703.]
- [17] Zhao Jinmei, Xu Changlin, Ma Yaping, et al. Surface cover and soil hydrological characteristics of alpine shrub in eastern Qilian Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(10): 146-151. [赵锦梅, 徐长林, 马亚萍, 等. 祁连山东段高寒灌丛地被物与土壤的水文特征[J]. *林业科学*, 2014, 50(10): 146-151.]
- [18] Li Juan, Zhang Hua, Hou Rong, et al. Bryophytes water holding capacity of ancient stone river periglacial topography in eastern mountain area of Liaoning [J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2019(10): 8-10. [李娟, 张华, 侯荣, 等. 辽东山区古石河冰缘地貌苔藓植物的持水特性[J]. *绿色科技*, 2019(10): 8-10.]
- [19] Zhao Yi, Nan Zhuotong, Li Xiangfei, et al. On applicability of a fully distributed hydrological model in the cold and alpine watershed of Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 147-157. [赵奕, 南卓铜, 李祥飞, 等. 分布式水文模型DHSVM在西北高寒山区流域的适用性研究[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(1): 147-157.]
- [20] Wang Jinye, Zhang Xuelong, Zhang Hu, et al. Analysis of productivity and composition structure of water resources conservation forest in Qilian Mountains [J]. *Journal of northwest forestry college*, 2001, 16(Suppl 1): 4-7. [王金叶, 张学龙, 张虎等. 祁连山水源涵养林组成结构及生长状况[J]. *西北林学院学报*, 2001, 16(增刊1): 4-7.]
- [21] He Z B, Zhao W Z, Liu H, et al. Effect of forest on annual water yield in the mountains of an arid inland river basin: a case study in the Pailugou catchment on northwestern China's Qilian Mountains [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(4): 613-621.
- [22] Wang Jin, Wen Yali, Liu Sirui, et al. Feature analysis on water and temperature of moss litter and soil of *Picea crassifolia* in Dayekou basin of Qilian Mountains [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2014, 49(6): 107-113. [王瑾, 温娅丽, 刘思瑞, 等. 祁连山大野口流域青海云杉林苔藓枯落物及其土壤水热特征分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(6): 107-113.]
- [23] Che Zongxi, Liu Xiande, Jing Wenmao, et al. Vertical distribution characteristics and hydrological function of bryophytes in Qilian Mountains forests areas [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 71-74. [车宗玺, 刘贤德, 敬文茂, 等. 祁连山林区苔藓垂直分布特征与水文功能分析[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 71-74.]
- [24] Wang Lihui, He Xiaobo, Ding Yongjian. Characteristics and

- influence factors of the evapotranspiration from alpine meadow in central Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 801-808. [王利辉, 何晓波, 丁永建. 青藏高原中部高寒草甸蒸散发特征及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 801-808.]
- [25] Watts N, Amann M, Ayeb-Karlsson S, et al. The Lancet Countdown on health and climate change: From 25 years of inaction to a global transformation for public health[J]. *Lancet*, 2018, 391: 10-16.
- [26] Kong Xiangwei, Tao Jianhong. Change of extreme temperature and precipitation events in Gansu Province in summer in recent 51 years[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(6): 965-971. [孔祥伟, 陶健红. 近 51 年甘肃夏季气温和降水极端事件变化[J]. 干旱区研究, 2012, 29(6): 965-971.]
- [27] Wang Baolong, Zhang Mingjun, Wei Junlin, et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over Northwest China in recent 50 years[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1720-1733. [汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近 50 年气温和降水极端事件的变化特征[J]. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1720-1733.]
- [28] Zhu Ruiliang, Wang Youfang, Xiong Lihu. Progress in bryological research I. Status and prospects of bryological research in China[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(2): 236-243. [朱瑞良, 王幼芳, 熊李虎. 苔藓植物研究进展 I. 我国苔藓植物研究现状与展望[J]. 西北植物学报, 2002, 22(2): 236-243.]
- [29] Liu Run, Shen Jiachen, Zhang Zhaohui. Study on the significance of ecological restoration of four bryophytes in karst rocky desertification area[J]. *Journal of soil and water conservation*, 2018, 32(6): 141-148. [刘润, 申家琛, 张朝晖. 4 种苔藓植物在喀斯特石漠化地区的生态修复意义[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 141-148.]

## Study on the relationship between water holding capacity and sampling methods of forest understory in the Qilian Mountains

YANG Junjun<sup>1</sup>, HE Zhibin<sup>2</sup>, LIN Pengfei<sup>2</sup>

(1. Xianyang Normal University, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 2. Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network / Key Laboratory of Inland River Basin Ecohydrology, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The accurate calculation of the water holding capacity of forest understory is especially critical for the simulation and prediction of the hydrological functions in the cold region with fragile ecological environment. In this study, the typical watershed of the Qilian Mountains in the northern foot of the Qinghai-Tibet Plateau was taken as the study area, the hydrological characteristics parameter differences of the original and scattered moss sampling methods were used to find out the effect of the sampling methods of the moss-litter hydrological parameters quantification, the undistributed moss sampled with PVC tubes, the scattered moss sampled with nylon bags and 2 596 data was obtained. The main results and conclusions were obtained as follows, the maximum water holding capacity of the undisturbed moss with an average thickness of 14.3 cm and moss-litter were 2.29 kg·m<sup>-2</sup> and 5.42 kg·m<sup>-2</sup>, the water holding rate was 2 071% and 890%, and the water holding rate of the scattered moss was 610%. The moss-litter layer showed a significantly better water retention function than the moss layer, so it should be treated differently when we calculating the hydrological characteristic parameters. Compared with the undisturbed sample, the maximum water holding capacity of the moss layer was underestimated as much as 70.5% with a scattered sampling, that is, under the scattered sampling method, the maximum water holding capacity of the moss layer under the forest will be seriously underestimated. The soil water characteristic curve of drying conformed to a power function and the evaporation duration was 4.8~5.6 h, these key parameters will be important reference value for the modelling and forecasting of the moisture evaporation process of the forest understory. In summary, different sampling methods have significant differences in the estimation of ground cover water holding capacity. In practice, the sampling methods should be determined according to the experimental purpose and research object.

**Key words:** cold region hydrology; maximum water holding capacity; understory; moss; Qilian Mountains

(责任编辑: 陈拓; 编辑: 庞瑜, 周成林)