

引用格式: 范金花, 谢汶天, 曹球铤, 王根绪, 孙守琴. 川西亚高山森林苔藓与枯落物持水特征[J]. 山地学报, 2024, 42(1): 1-13.

FAN Jinhua, XIE Wentian, CAO Qiuyao, WANG Genxu, SUN Shouqin. Water holding capacity of bryophytes and litter in subalpine forest in western Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(1): 1-13.

川西亚高山森林苔藓与枯落物持水特征

范金花^{a, b}, 谢汶天^{a, b}, 曹球铤^b, 王根绪^{a, b}, 孙守琴^{a, b*}

(四川大学 a. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室; b. 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 森林苔藓和枯落物在水土保持、水分涵养方面具备重要作用,但现有研究多单一关注苔藓或枯落物,对苔藓-枯落物层的整体效应的认识较少,尤其针对高海拔西南森林林下的苔藓-枯落物层,更为鲜见。本文以川西贡嘎山针叶林和阔叶林地被层(苔藓-枯落物)为研究对象,通过野外调查、采样瓶取样浸水试验,分析了单一苔藓、单一枯落物及苔藓-枯落物整体的持水特征。结果表明:(1)贡嘎山苔藓和枯落物最大持水率为 327.9%~432.6%,最大持水量为 16.6~79.4 t/hm²,有效拦蓄量为 7.1~34.2 t/hm²。针叶林比阔叶林具有更大的持水能力和水分拦蓄能力。(2)不同地被组分中,苔藓-枯落物层持水率、有效拦蓄率、持水量和拦蓄量最大,苔藓显著提高了针叶林地被层的水源涵养能力;(3)地被层持水量与时间呈对数关系,吸水速率与时间呈幂函数关系,不同组分持水量和持水率均在 0~2 h 内迅速增长,2~12 h 内缓慢增长,12 h 时几乎达到饱和状态。(4)与单一苔藓或枯落物层相比,苔藓-枯落物整体的吸水速率更快,具有更高效的短期降水拦蓄能力。本研究结果可为亚高山森林水源涵养和生态水文研究与保护提供参考和理论基础。

关键词: 亚高山森林; 枯落物; 苔藓; 持水特征; 贡嘎山

中图分类号: S715.7

文献标志码: A

森林生态系统具有涵养水源、调节气候、固碳释氧等功能^[1]。苔藓和枯落物是森林生态系统的重要组成部分,也是森林土壤与大气之间的媒介^[2]。苔藓单个个体小,但常连片生长,枝叶交错形成大量空隙;枯落物由植被的落叶、枝条、落皮等组成,结构疏松。由于这些独特的组成和结构特征,苔藓-枯落物层一方面能截持降水、消减雨滴动能、防止土壤侵蚀,进而发挥保持水土的功能;另一方面能增加地表粗糙度、改变水分路径、减小水流速度、增强水分下渗、隔绝太阳直射、抑制土壤蒸发,从而起到涵养水源的作用^[3-5]。

目前关于森林苔藓和枯落物水文功能的研究已

经涉及林分^[6]、分解程度^[7]、坡位^[8]、林龄^[9-10]、林分密度^[10]、海拔^[11]差异的影响等多个方面。苔藓层覆盖生长于森林地表,具有很强的水分吸持能力,有研究表明,其吸持水量高达自身重量的 5 倍^[12],远大于枯落物。在自然森林生态系统中,枯落物分解为苔藓提供养分,苔藓的根茎嵌入枯落物中形成支撑架构,而新近坠落的枯落物陆续覆盖苔藓表面,增加了苔藓-枯落物层厚度,苔藓和枯落物交杂重叠、持续生长,形成了完整有机体,很难对苔藓-枯落物层共生结构进行物理分离。在森林生态或森林水文的相关研究中,大多单独针对苔藓或者枯落物^[13],将苔藓-枯落物层作为生态系统的主体

收稿日期(Received date): 2023-09-12;改回日期(Accepted date): 2024-02-09

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(42273081)。[National Natural Science Foundation of China (42273081)]

作者简介(Biography): 范金花(1998-),女,四川广元人,硕士研究生,主要研究方向:生态水文。[FAN Jinhua(1998-), female, born in Guangyuan, Sichuan province, M. Sc. candidate, research on eco-hydrology] E-mail: fanjinhua@stu.scu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 孙守琴(1980-),女,博士,教授。研究方向:生态水文。[SUN Shouqin(1980-), female, Ph. D., professor, research on eco-hydrology] E-mail: shouqinsun@scu.edu.cn

进行研究,研究区域局限于中国东北^[12]和西北^[14]林地,而对于高海拔林下覆盖丰富苔藓的西南林地,研究处于空白。

川西亚高山森林是长江上游重要的生态屏障,肩负着水源涵养、水土保持和生物多样性保育等重要生态功能^[15-17]。贡嘎山亚高山森林林下苔藓发育,枯落物大量蓄积,是研究苔藓-枯落物层综合水文效应、揭示川西亚高山森林水源涵养效应和变化机制的理想观测样地。本文以林下苔藓、枯落物及苔藓-枯落物共生层为对象,基于野外调查、采样瓶取样浸水试验,探讨苔藓和不同林分、分解程度、厚度枯落物及苔藓-枯落物层整体的持水特征,研究结果为亚高山森林水源涵养和生态水文研究与保护提供参考。

1 研究区概况

研究区位于四川省西部贡嘎山东坡,属四川盆地向青藏高原过渡带大雪山的中段,主峰海拔 7556 m。地理坐标为 29°20′~30°00′N、101°30′~102°10′E^[18]。贡嘎山受东南季风影响,气候温暖湿润,为亚热带山地湿润性季风气候。根据中国科学院贡嘎山气象站长期监测,海拔 3000 m 年平均降雨量 1947.7 mm,年平均气温 4.2℃(1988—2010 年);海拔 1600 m 年平均降雨量 1050.3 mm,年平均气温 12.7℃(1992—2010 年),一般 5 月至 10 月为湿季,11 月至次年 4 月为干季。贡嘎山针叶林和阔叶林穿透雨量占林外降雨 71% 和 57%。针叶林位于海拔 2800~3600 m,冠层优势物种为峨眉冷杉(*Abies fabri*),地被植物以苔藓为主,包括锦丝藓(*Actinotuidium hookeri*),塔藓(*Hylocomium splendens*),赤茎藓(*Pleurozium schreberi*)等;阔叶林位于海拔 1900~2400 m,优势物种为包槲柯(*Lithocarpus cieistocarpus*)、香桦(*Betula msigms*)和

扇叶槭(*Acer flabellatum*)等。

2 研究方法

2.1 野外调查

2021 年 12 月开展实地调查后,分别在针叶林和阔叶林设置 20 m×20 m 的样地,在每个样地内按照正方形对角取样法设置 5 个小样方,其尺寸为 50 cm×50 cm,样地的基本情况见表 1。在 2021 年 12 月和 2022 年 7 月进行两次采样,表征贡嘎山针、阔叶林冬季和夏季枯落物状况。为了消除第一次采样的影响,第二次采样时将小样方的位置向右平移 1 m。按照枯落物外部形态分为未分解层(Un-decomposed layer, UL)、半分解层(Semi-decomposed layer, SL)、全分解层(Decompose layer, DL)。未分解是指保有原本的形态和颜色,没有明显分解痕迹的新鲜枯落物;半分解是指没有完整轮廓,部分叶肉被分解成碎屑的枯落物;全分解是指叶肉被完全分解,无法看出原状,颜色变黑的枯落物^[19],由于贡嘎山未分解层和半分解层枯落物难于分离,本研究将未分解层和半分解层(Un-decomposed and Semi-decomposed layer, USL)一起处理。此外,贡嘎山阔叶林相比于针叶林海拔低、温度高,林下几乎没有苔藓,但枯落物丰富,所以苔藓及苔藓-枯落物层持水性能研究只针对针叶林开展。

采样时在小样方内随机选取 5 个样点,用钢尺测定样方内枯落物未半分解层、全分解层和针叶林林下苔藓的厚度。将小样方内的苔藓和不同分解程度枯落物分别采集装入塑封袋内,带回室内迅速称其新鲜重量。随后将苔藓和枯落物于 70℃ 烘干至恒重并再次称重,计算苔藓和枯落物的蓄积量^[20]。相关计算公式如下:

$$R_0 = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

表 1 样地基本情况

Tab. 1 Information of sample plots

林分类型	地理位置	海拔/m	土壤类型	林分起源	优势物种
阔叶林	102°3'E, 29°35'N	2250	黄棕壤	天然林	包槲柯(<i>Lithocarpus cieistocarpus</i>)、香桦(<i>Betula msigms</i>)、扇叶槭(<i>Acer flabellatum</i>)
针叶林	101°59'E, 29°34'N	3100	暗棕土	天然林	峨眉冷杉(<i>Abies fabri</i>)

$$M = \frac{m_0}{s \times 100} \quad (2)$$

式中, R_0 为苔藓或枯落物自然含水率 (%); m_0 为烘干后苔藓或枯落物的干质量 (g); m_t 为自然状态下苔藓或枯落物质量 (g); M 为苔藓或枯落物的蓄积量 (t/hm^2); s 为小样方面积 (m^2)。

2.2 持水能力测定

定量分析苔藓和枯落物持水量常用室内浸水法^[21], 该方法是将风干后的样品浸泡在清水中一定时间后沥干称重, 记录样品重量, 最终计算苔藓和枯落物的持水量变化过程。但是传统的浸水法常使用尼龙网装样进行浸泡, 这样容易破坏苔藓和枯落物的原状结构, 难以反应野外环境下苔藓和枯落物真实持水能力。本研究对传统的浸水方法进行改进, 采用采样瓶取样浸水, 最大可能保持苔藓-枯落物层的原始结构, 以反映其真实的持水效果。采样瓶取样法是将采样瓶垂直轻置于森林地表, 用灰刀沿采样瓶外壁进行垂直切割, 同时轻按采样瓶直至切割到底部, 重复以上过程直到取出完整的样本, 取出后仔细去除底层的土壤^[22]。采样完成后将样品轻轻推移至采样瓶瓶底, 用气泡膜填满瓶中空隙后盖上瓶盖, 防止样品在运输过程发生移位, 样本结构见图 1。

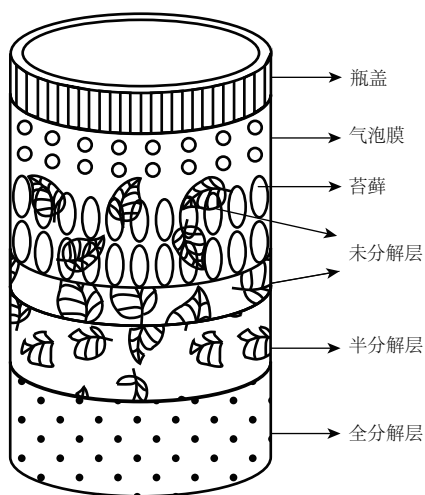


图 1 苔藓-枯落物层样本的取样方法

Fig. 1 Sampling method of bryophyte-litter layer

试验于 2022 年 7 月在中国科学院贡嘎山高山生态系统观测试验站进行, 苔藓和枯落物样品风干 48 h 后, 去掉采样瓶的底部和瓶盖, 用 200 目的尼龙布^[23]包裹两端, 然后将样品完全浸入水中。分别浸

水 5 min、10 min、20 min、30 min、45 min 以及 1 h、2 h、3 h、5 h、8 h、10 h、12 h、17 h、24 h 后取出, 置在铁架上沥干, 沥干至样品不滴水 (沥干时停表) 测量湿重, 一般认为浸水 24 h 的苔藓和枯落物达到饱和状态^[24]。本试验设置苔藓、苔藓-枯落物层、分解程度组 (包括针叶林和阔叶林未半分解层、全分解层)、厚度组 (包括针叶林和阔叶林 0.5 倍、1 倍、1.5 倍、2 倍枯落物层), 共 14 种处理, 每种处理设置 3 组重复。浸水完成后将样品于 70 °C 烘干至恒重, 称量样品干重, 计算苔藓和枯落物的持水量、持水率和拦蓄率。有研究表明当降雨量为 20 ~ 30 mm 时, 枯落物的有效拦蓄量是最大持水率的 85%^[25-26]。相关计算公式如下^[27]:

$$R_t = \frac{m_t - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$R_{av} = 0.85 \times R_m - R_0 \quad (4)$$

$$W_m = R_m \times M \quad (5)$$

$$W_{av} = R_{av} \times M \quad (6)$$

$$h_{av} = 0.1 \times W_{av} \quad (7)$$

式中, R_t 为 t 时样品的持水率 (%); m_t 为浸水 t 时样品质量 (g); R_{av} 为有效拦蓄率 (%); R_m 为时间 24 h 时样品的持水率, 即最大持水率 (%); W_m 为最大持水量 (t/hm^2); W_{av} 为有效拦蓄量 (t/hm^2); h_{av} 为有效拦蓄深 (mm)。

2.3 数据处理

使用 Excel 2019 计算苔藓和枯落物厚度、蓄积量、持水量、蓄水量等水文参数, 运用 SPSS 27 对持水量、吸水速率和时间因子进行拟合, 建立苔藓和枯落物持水动态过程和吸水速率函数。采用 Origin 2021 和 Adobe illustrator 2021 绘制数据分析图和示意图。

3 结果与分析

3.1 苔藓、枯落物厚度和蓄积量

贡嘎山针、阔叶林枯落物厚度和蓄积量见表 2。不同季节和不同植被类型枯落物厚度、蓄积量均有差异。夏季针叶林和阔叶林枯落物厚度分别为 5.54 cm 和 7.68 cm, 蓄积量分别为 13.66 t/hm^2 和 11.19 t/hm^2 。其中, 针叶林未半分解层和全分解层厚度分别为 3.14 cm 和 2.40 cm, 占整个枯落物层厚度的 56.7% 和 43.3%; 蓄积量分别为 8.28 t/hm^2 和

5.38 t/hm², 占总蓄积量的 60.6% 和 39.4%。阔叶林未半分解层和全分解层厚度分别为 5.36 cm 和 2.32 cm, 占整个枯落物层厚度的 69.8% 和 30.2%; 蓄积量分别为 7.36 t/hm² 和 3.83 t/hm², 占枯落物总蓄积量的 65.8% 和 34.2%。与夏季相比, 冬季枯落物厚度和蓄积量偏低, 针叶林枯落物的厚度和蓄积量分别为 4.31 cm 和 12.80 t/hm², 阔叶林枯落物的厚度和蓄积量分别为 6.12 cm 和 8.16 t/hm²。未半分解层和枯落物层厚度阔叶林均大于针叶林, 全分解层厚度阔叶林小于针叶林。针叶林苔藓厚度和蓄积量分别为 4.18 cm 和 5.90 t/hm², 以锦丝藓、山羽藓和赤茎藓为主, 调查中发现还有少量的圆叶毛灯藓 (*Rhizomnium nudum*)、塔藓等。

3.2 苔藓和枯落物持水能力分析

3.2.1 苔藓和枯落物持水特征

贡嘎山针、阔叶林枯落物持水特征见表 3。针、阔叶林各组分自然含水率范围为 115.2% ~ 217.9%, 全分解层自然含水率大于未半分解层, 其中最小的是苔藓, 最大的是针叶林全分解层枯落物。针叶林各组分最大持水率范围为 368.5% ~ 431.5%, 最大持水量范围为 22.2 ~ 79.4 t/hm², 从大到小依次为苔藓-枯落物层、枯落物层、未半分解层、苔藓、全分解层; 有效拦蓄率范围为 132.1% ~ 251.5%, 有效拦蓄量范围为 7.1 ~ 34.2 t/hm², 从大到小依次为苔藓-枯落物层、枯落物层、苔藓、未半分解层、全分解层, 与最大持水量规律相似。苔藓 + 枯落物层是苔藓和枯落物层样品测量结果相加得到, 最大持水量

表 2 贡嘎山针、阔叶林枯落物厚度和蓄积量

Tab.2 Thickness and accumulation volume of coniferous and broad-leaved forest of litter layer in the Gongga Mountain

季节	地被层	地被层厚度/cm		地被层蓄积量/(t · hm ⁻²)	
		针叶林	阔叶林	针叶林	阔叶林
冬季	LL	4.31 ± 1.06	6.12 ± 1.84	12.80 ± 3.99	8.16 ± 1.58
	B	4.18 ± 0.37	—	5.90 ± 0.82	—
夏季	USL	3.14 ± 0.39	5.36 ± 0.76	8.28 ± 1.39	7.36 ± 1.69
	DL	2.40 ± 0.21	2.32 ± 0.61	5.38 ± 1.97	3.83 ± 0.74
	LL	5.54 ± 0.55	7.68 ± 1.29	13.66 ± 2.04	11.19 ± 2.25

注: 表内数据为平均值 ± 标准差。LL 为枯落物层 (Litter layer); B 为苔藓 (Bryophyte); USL 为未半分解层 (Un-decomposed and Semi-decomposed layer); DL 为全分解层 (Decompose layer)。

表 3 贡嘎山针、阔叶林枯落物持水特征

Tab.3 Water holding characteristics of coniferous and broad-leaved forest of litter layer in the Gongga Mountain

林分类型	地被层	自然含水率/%	最大持水率/%	最大持水量/ (t · hm ⁻²)	有效拦蓄率/%	有效拦蓄量/ (t · hm ⁻²)	有效拦蓄深/ mm
针叶林	B	115.2 ± 17.4	431.5 ± 26.0	25.5 ± 1.5	251.5 ± 19.4	14.8 ± 1.1	1.5 ± 0.1
	USL	164.6 ± 6.8	368.5 ± 15.8	30.5 ± 1.3	148.6 ± 11.3	12.3 ± 0.9	1.2 ± 0.1
	DL	217.9 ± 6.3	411.8 ± 13.4	22.2 ± 0.7	132.1 ± 5.9	7.1 ± 0.3	0.7 ± 0.0
	LL	193.1 ± 0.2	392.0 ± 13.3	53.5 ± 1.8	140.1 ± 11.4	19.1 ± 1.6	1.9 ± 0.2
	B + LL	169.6 ± 5.2	403.9 ± 12.6	79.0 ± 2.5	173.7 ± 5.7	34.0 ± 1.1	3.4 ± 0.1
	BLL	170.2 ± 6.7	405.8 ± 9.0	79.4 ± 1.8	174.8 ± 9.28	34.2 ± 1.8	3.4 ± 0.2
阔叶林	USL	156.9 ± 21.5	327.9 ± 13.1	24.1 ± 1.0	121.8 ± 12.9	9.0 ± 1.0	0.9 ± 0.1
	DL	176.2 ± 2.2	432.6 ± 21.9	16.6 ± 1.6	191.6 ± 34.4	7.3 ± 1.3	0.7 ± 0.1
	LL	168.3 ± 30.0	351.9 ± 17.3	39.4 ± 8.6	130.8 ± 39.5	14.6 ± 4.4	1.5 ± 0.4

注: 表内数据为平均值 ± 标准差。B + LL 为苔藓与枯落物层之和; BLL 为苔藓-枯落物层 (bryophyte-litter layer)。

和有效持水量分别为79.0 t/hm²、34.0 t/hm²,均略小于苔藓-枯落物层。

阔叶林枯落物最大持水率范围 327.9% ~ 432.6%,最大持水量范围为 16.6 ~ 39.4 t/hm²,从大到小依次为枯落物层、未半分解层、全分解层;有效拦蓄率范围为 121.8% ~ 191.6%,有效拦蓄量范围为 7.3 ~ 14.6 t/hm²,从大到小依次为枯落物层、未半分解层、全分解层,与最大持水量规律一致。从不同林分来看,针叶林枯落物层的持水能力大于阔叶林,并且针叶林苔藓-枯落物层的持水能力远大于阔叶林枯落物层,是阔叶林的 2.7 倍。从分解程度来看,针叶林和阔叶林未半分解层的持水能力均大于全分解层。

3.2.2 苔藓和枯落物持水动态变化过程

针、阔叶林不同组分持水量与时间呈对数关系,方程表达式见表 4。针、阔叶林不同分解程度枯落物持水量和持水率在 0 ~ 2 h 内迅速增长,2 ~ 12 h 内缓慢增长,12 h 时几乎达到饱和状态,24 h 后持水量和持水率达到最大,见图 2。与之不同,苔藓持水量和持水率在 12 h 后仍继续增长,17 h 后才达到饱和;同时苔藓持水率在前 3 h 内的上升速度明显

大于枯落物。由图 2e 可知,苔藓-枯落物层持水量在 6 h 左右达到饱和,17 h 内苔藓 + 枯落物层累计持水量小于苔藓-枯落物层,差距最大可达 10%,17 h 后持水量趋于一致,在 24 h 时几乎相等。

不同厚度枯落物的持水动态规律不一致,不同厚度枯落物持水量和持水率在 0 ~ 2 h 内迅速增长,并且厚度越大,持水量和持水率越大,见图 3。不同林分枯落物持水率与厚度的关系不同,当针叶林枯落物层厚度减小 50% 时,最大持水量和最大持水率分别减小 50.3% 和 0.6%;厚度增加 50% 时,分别增加 60.1% 和 6.7%;厚度增加 1 倍时,分别增加 104.9% 和 2.5%;持水率从大到小依次为 1.5 倍、2 倍、1 倍、0.5 倍,针叶林枯落物持水率随着厚度增加先增大后减小。与之不同,当阔叶林枯落物层厚度减小 50% 时,最大持水量和最大持水率分别减小 49.2% 和 1.6%;厚度增加 50% 时,最大持水量增加 47.6%,持水率无显著变化;枯落物厚度增加 1 倍时,分别增加 122.9% 和 11.4%,持水率从大到小依次为 2 倍、1.5 倍(约等于 1 倍)、0.5 倍,阔叶林枯落物持水率随着厚度增加而增大。

表 4 贡嘎山针、阔叶林枯落物持水量和吸水速率与时间的回归方程

Tab. 4 Regression equation of water holding capacity and water holding rate of coniferous and broad-leaved forest of litter layer in the Gongga Mountain

林分类型	地被层	持水量方程	$Q^2(W)$	吸水速率方程	$Q^2(V)$
针叶林	B	$W = 1.40 \ln t + 20.74$	0.904	$V = 20.57t - 0.933$	0.998
	USL	$W = 1.31 \ln t + 27.43$	0.885	$V = 27.29t - 0.951$	0.998
	DL	$W = 0.54 \ln t + 20.74$	0.904	$V = 20.71t - 0.974$	0.999
	LL	$W = 1.67 \ln t + 49.17$	0.971	$V = 49.07t - 0.966$	0.999
	BLL	$W = 2.23 \ln t + 73.95$	0.947	$V = 73.84t - 0.970$	0.997
	0.5LL	$W = 0.71 \ln t + 24.54$	0.978	$V = 24.51t - 0.971$	0.999
	1.5LL	$W = 2.81 \ln t + 78.44$	0.970	$V = 78.28t - 0.964$	0.985
	2LL	$W = 2.82 \ln t + 101.84$	0.984	$V = 81.17t - 0.973$	0.996
阔叶林	USL	$W = 1.08 \ln t + 21.22$	0.944	$V = 21.12t - 0.949$	0.998
	DL	$W = 0.59 \ln t + 15.16$	0.890	$V = 15.11t - 0.961$	0.999
	LL	$W = 0.57 \ln t + 37.76$	0.948	$V = 37.76t - 0.985$	0.999
	0.5LL	$W = 0.45 \ln t + 18.68$	0.931	$V = 18.66t - 0.976$	0.997
	1.5LL	$W = 1.51 \ln t + 53.64$	0.948	$V = 53.58t - 0.972$	0.994
	2LL	$W = 2.25 \ln t + 81.26$	0.979	$V = 81.16t - 0.973$	0.985

注:0.5LL 为 0.5 倍厚度的枯落物层;1.5LL 为 1.5 倍厚度的枯落物层;2LL 为双倍厚度的枯落物层。 W 为持水量 ($t \cdot hm^{-2}$); V 为吸水速率 ($t \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}$); t 为时间 (h); $Q^2(W)$ 持水量方程决定系数; $Q^2(V)$ 为吸水速率方程决定系数。

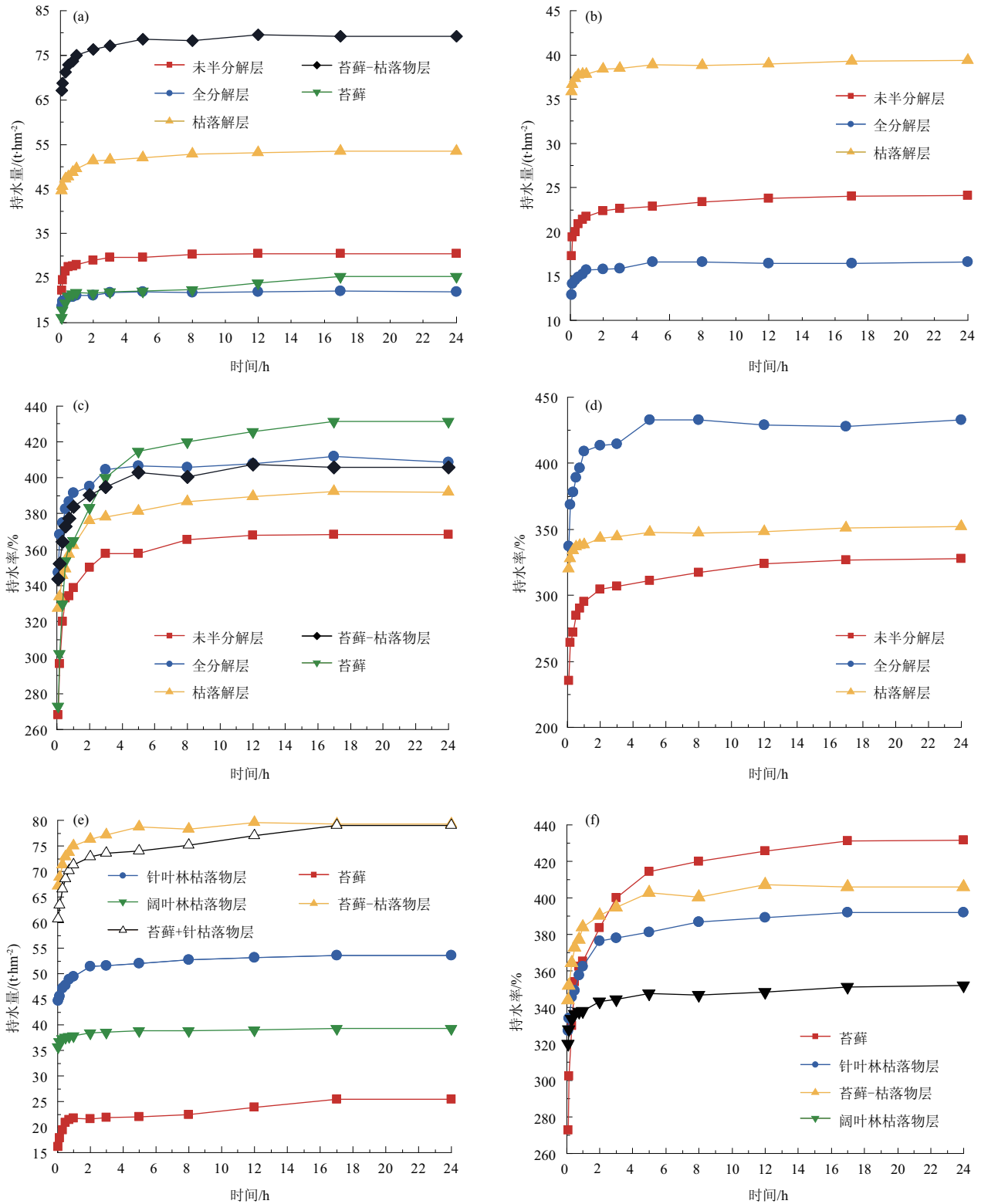


图2 针、阔叶林苔藓和不同分解程度枯落物持水量和持水率动态变化过程:

(a) 针叶林持水量; (b) 阔叶林持水量; (c) 针叶林持水率; (d) 阔叶林持水率; (e) 针、阔叶林持水量; (f) 针、阔叶林持水率

Fig. 2 Dynamic changes of water retention and water retention rate of litter in coniferous and broad-leaved forest bryophyte and different decomposition layer: (a) water holding capacity of coniferous forest; (b) water holding capacity of broad-leaved forest; (c) water retention of coniferous forest; (d) water retention of broad-leaved forest; (e) water holding capacity of coniferous and broad-leaved forest; (f) water retention rate of coniferous and broad-leaved forest

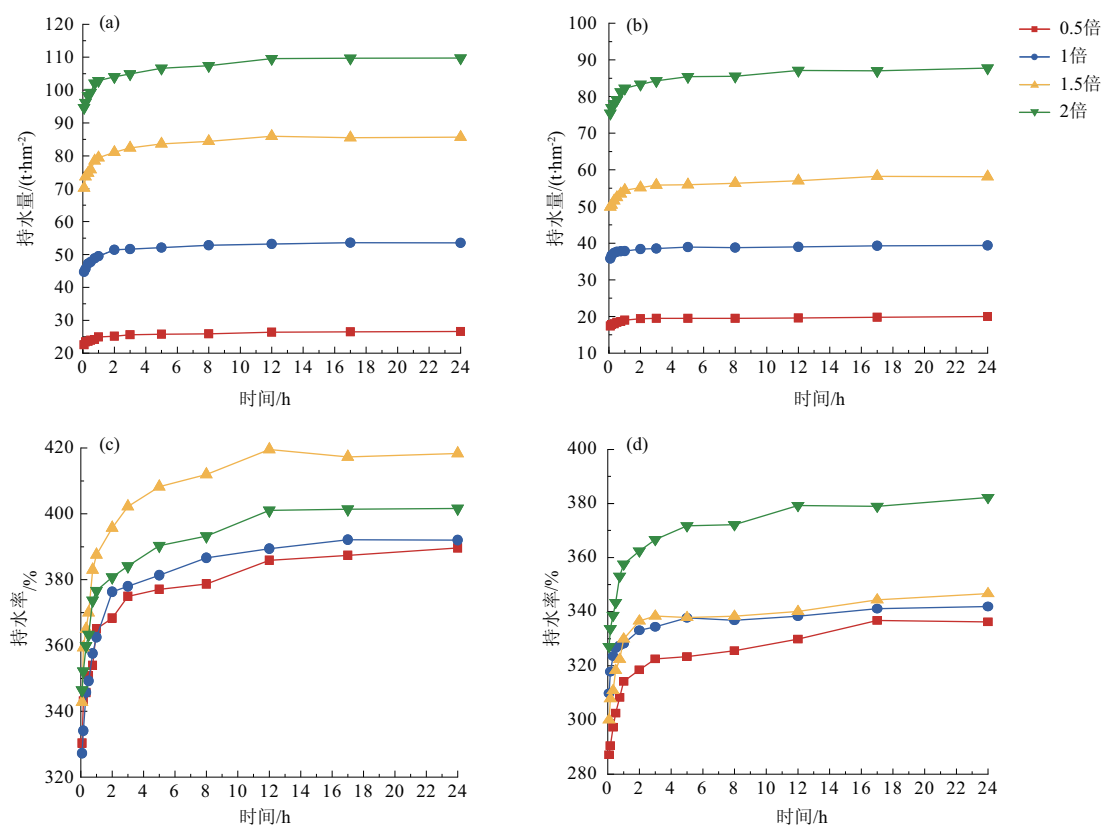


图3 针、阔叶林不同厚度枯落物持水量和持水率动态过程:

(a) 针叶林持水量; (b) 阔叶林持水量; (c) 针叶林持水率; (d) 阔叶林持水率

Fig. 3 Dynamic processes of water retention and water retention of litter with different thickness in coniferous and broad-leaved forest:

(a) water holding capacity of coniferous forest; (b) water holding capacity of broad-leaved forest;

(c) water retention of coniferous forest; (d) water retention of broad-leaved forest

3.2.3 苔藓和枯落物吸水速率变化过程

苔藓和枯落物吸水速率与浸泡时间的关系见图4和图5, 针、阔叶林不同组分吸水速率随时间的变化趋势大致相同, 吸水速率在1小时内急剧下降, 与时间呈幂函数关系, 方程表达式见表4。针叶林地被层吸水速率从大到小依次为苔藓-枯落物层、枯落物层、未半分解层、全分解层、苔藓; 阔叶林吸水速率从大到小依次为枯落物层、未半分解层、全分解层。针、阔叶林不同厚度枯落物吸水速率变化规律一致, 从大到小依次为2倍、1.5倍、1倍、0.5倍, 说明枯落物厚度越厚, 吸水速率越大, 在降雨初期涵养水分效果越好。

4 讨论

4.1 贡嘎山苔藓、枯落物的厚度和蓄积量

贡嘎山峨眉冷杉林苔藓平均厚度4.18 cm, 平

均蓄积量5.90 t/hm², 显著高于西北兴隆山青杆林^[28], 低于西藏色季拉山急尖长苞冷杉林^[29]。形成差异的主要原因是气候和森林类型不同。通常情况下, 海拔越高, 降水越多, 森林郁闭度越高, 林下光照越少, 苔藓的蓄积量越大, 潮湿、阴暗的环境更适合苔藓生长。贡嘎山针叶林和阔叶林枯落物蓄积量夏季高于冬季, 这与丁咸庆^[30]等结论一致。因为夏季森林进入生长季, 树木生长出大量新叶, 由于养分不足, 老叶开始大量脱落; 冬季森林进入休眠期, 树木生长滞缓, 枯落物输入量变少。结合羊留冬^[31]等对贡嘎山枯落物多年研究, 贡嘎山针叶林近20年枯落物蓄积量呈上升趋势, 2022年枯落物蓄积量(未半分解, 8.28 t/hm²)相比于2006年(3.77 t/hm²)增长了119.6%, 林龄越大枯落物蓄积量越大, 这与刘燕平^[32]等的结论一致。贡嘎山针叶林枯落物层厚5.54 cm, 蓄积量13.66 t/hm², 低于祁连山青海云杉林^[33]、滇中高原的滇油杉林^[34]; 阔叶林枯落物层厚

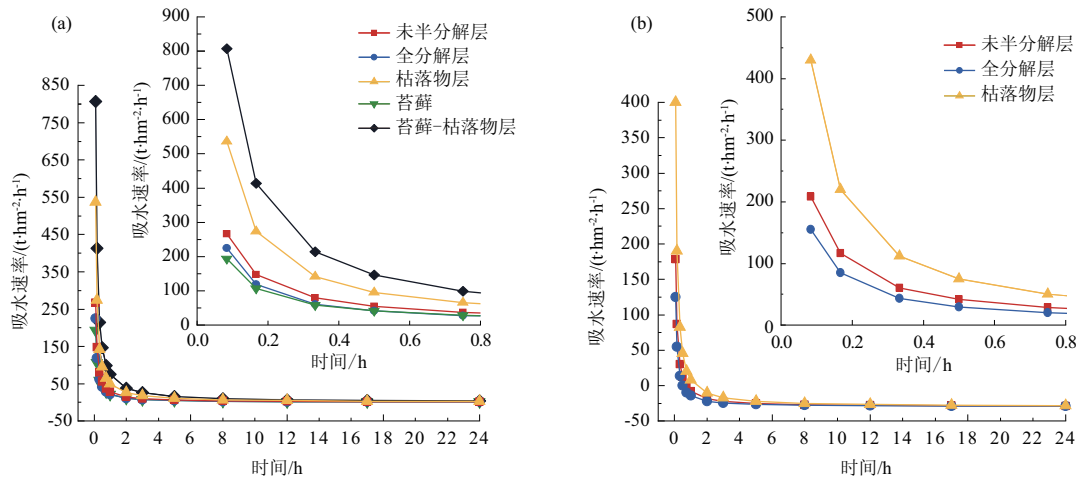


图 4 针、阔叶林苔藓和不同分解层枯落物吸水速率与浸泡时间关系: (a) 针叶林; (b) 阔叶林

Fig. 4 Relationship between water absorption rate and soaking time of litter in coniferous and broad-leaved forest bryophyte and different decomposition layer: (a) coniferous forest; (b) broad-leaved forest

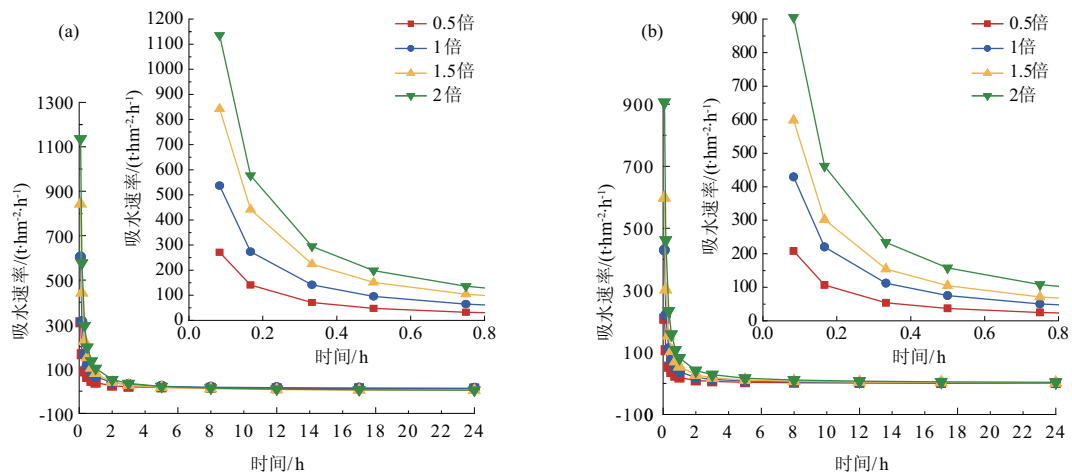


图 5 针、阔叶林不同厚度枯落物吸水速率与浸泡时间关系: (a) 针叶林; (b) 阔叶林

Fig. 5 Relationship between water absorption rate and soaking time of litter with different thickness in coniferous and broad-leaved forest: (a) coniferous forest; (b) broad-leaved forest

7.68 cm, 蓄积量 11.19 t/hm^2 , 与北京松山蒙古栎、山杨林^[35], 太行山刺槐林^[6]相当。针叶林枯落物层厚度小于阔叶林, 但蓄积量却大于阔叶林。因为针叶和阔叶的形状存在差异, 阔叶的叶表面积大, 叶片从枝干脱落后水分耗散, 叶片弯曲变形, 所以阔叶林枯落物间空隙更大, 枯落物厚度也越大。蓄积量消除了这种影响, 能更客观评价枯落物的积累情况, 所以贡嘎山针叶林枯落物比阔叶林更丰富。

贡嘎山针叶林枯落物全分解层蓄积量占比 39.4%, 比祁连山^[33] 青海云杉林 (32.9%) 和吉林金沟岭^[36] 针叶林 (30.4%) 的枯落物分解程度高。阔叶林枯落物全分解层蓄积量占比 34.2%, 略低于针

叶林。理论上针叶林枯落物含有较多的酚类物质和萜类物质, 不易分解^[35]; 阔叶林枯落物含有更多的钾和磷, 木质素较少, 阔叶比针叶枯落物更容易分解^[37], 这与本研究的结果相悖。其原因是阔叶林枯落物中有较多枝条、果实等, 其密度高, 未半分解层质量占比大, 所以阔叶林全分解层蓄积量占比比针叶林小。

结合众多学者和本文的研究, 探析枯落物蓄积量的影响因素, 发现枯落物的蓄积量与林分、郁闭度^[10]、植被组成^[14, 28]、季节^[30]和林龄^[38-39]等因素有关。一般郁闭度越高, 森林树木越多, 森林植被组成越丰富, 叶片生产量越大, 蓄积量就越大。季节变

化伴随气温、降水变化,一方面影响植被的生产和叶片的脱落,另一方面影响枯落物的含水量、微生物群落,进而影响枯落物的分解速率。林龄越大,森林生态系统越成熟,物质循环良好,枯落物蓄积量越大。

4.2 贡嘎山苔藓-枯落物的持水蓄水能力

贡嘎山针叶林苔藓-枯落物层的最大持水率高于枯落物层,因为苔藓和枯落物形成一个上松下紧,类似一个容器的结构^[22],能更有效的吸收容纳水分。针、阔叶林地被物自然含水率随深度增加而增大,针叶林从大到小依次为苔藓、未半分解层、全分解层;阔叶林从大到小依次为未半分解层、全分解层。因为下层能避免太阳直射,阻隔空气流动,减小水分蒸发。针叶林枯落物自然含水率比阔叶林高15%,而苔藓-枯落物层自然含水率几乎相同。针、阔叶林枯落物最大持水率全分解层大于未半分解层,因为分解程度越高,叶片更破碎,接触水分表面积越大,持水效果更好,这与赵娜^[35]、孙向阳^[40]等的结论一致。但全分解层的持水量小于未半分解层,因为全分解层的蓄积量小于未半分解层,而蓄积量是影响持水量最主要的因素,而枯落物分解程度对最大持水量的影响不显著,这与刘燕平^[32]的结论一致。

由图2持水量变化过程可知,针叶林枯落物的持水能力大于阔叶林。苔藓-枯落物层的持水能力最强,在前17 h,苔藓-枯落物层的持水量大于苔藓+枯落物持水量,说明完整的苔藓-枯落物层结构有利于水分涵养。17 h后两者趋于相等是因为通过长时间浸泡,苔藓和枯落物的空隙被水分几乎完全填充,达到饱和状态。最大持水量和最大持水率是表征理想情况下苔藓和枯落物的持水能力,但森林地被层不会一直浸在水中,有效拦蓄率和有效拦蓄量则考虑了枯落物的自然含水率、坡度和降雨等因素,更能体现森林枯落物实际涵养水源的能力。不同地区针叶林有效拦蓄量不同,贡嘎山峨眉冷杉林枯落物有效拦蓄量只有19.1 t/hm²,苔藓-枯落物层为34.2 t/hm²,兰州侧柏林枯落物有效拦蓄量高达46.58 t/hm²^[41]。其原因是贡嘎山夏季降雨频繁,水分充沛,枯落物的自然含水率很高,是兰州侧柏林的10倍,苔藓-枯落物层已被占用了部分储水空间,所以贡嘎山地被层的有效拦蓄量偏低,这也表明贡嘎山林下苔藓和枯落物正发挥着涵养水源,保持水土重要功能。

苔藓和枯落物持水量随浸泡时间呈对数增长,吸水速率随浸泡时间呈幂函数下降。因为浸水起始苔藓和枯落物表面与自由水的水势差大,但随着水势差快速减小,吸水速率也快速下降。苔藓的持水率和吸水速率特征与枯落物具有明显差异,枯落物持水率12 h几乎达到饱和,苔藓17 h才几乎达到饱和,苔藓持水率持续增长时间比枯落物长5 h,所以苔藓比枯落物更难达到最大持水能力的状态。其原因是苔藓和枯落物吸水原理不同,苔藓枝茎疏松交织,根系连成一片,具有很强的毛细作用^[42],能持久吸收水分,缓慢释放。

研究不同厚度枯落物持水率发现,针叶林枯落物厚度达到8.31 cm(1.5倍)时,持水率最大。由上文可知贡嘎山针叶林枯落物呈逐年增长的趋势,所以能推测未来一段时间贡嘎山针叶林枯落物的蓄积量和持水能力都会增长。但是枯落物蓄积量不会随着林龄一直增长,所以枯落物持水能力的年际变化还需要长期的观测和试验。阔叶林枯落物厚度为15.36 cm(2倍)时,持水率最大,当枯落物厚度增加1倍时,最大持水量增加122.9%,比针叶林增强效果好,表明阔叶林枯落物累积能显著增强地被层持水蓄水能力。总之,贡嘎山针叶林枯落物比阔叶林枯落物具有更强的持水蓄水能力,尤其是针叶林下苔藓和枯落物形成一个有机的苔藓-枯落物层整体,增强了持水效果,有效拦蓄量是阔叶林枯落物的2.3倍。贡嘎山针、阔叶林枯落物涵养水源的能力会随着蓄积量逐年增长而增大,而阔叶林枯落物的增大效果更显著。

本试验还有几个方面需要进一步加强和改进。其一是可在浸水试验之后可继续观测苔藓和枯落物的退水过程,模拟森林降水后苔藓和枯落物的持水量变化过程。其二是本试验在研究不同厚度枯落物中,各样品未半分解层和全分解层厚度之比均相同,但实际森林枯落物的组成会不断变化,可根据森林枯落物观测数据进一步细化试验。此外,森林枯落物蓄积量和持水能力影响因素众多,时间和空间上的异质性强,需要多区域长期稳定监测和试验来探讨枯落物的生态水文效应。

5 结论

(1)贡嘎山针叶林枯落物厚度小于阔叶林,蓄

积量大于阔叶林,针、阔叶林枯落物蓄积量夏季大于冬季。针叶林下苔藓丰富,蓄积量为 5.90 t/hm^2 ,优势种为锦丝藓、山羽藓和赤茎藓。

(2)贡嘎山针叶林枯落物的持水能力和拦蓄能力大于阔叶林,苔藓显著提高了针叶林苔藓-枯落物层的拦蓄能力,是阔叶林枯落物的 2.3 倍。未半分解层枯落物持水能力和拦蓄能力大于全分解层。

(3)针、阔叶林不同组分持水量与时间呈对数关系,吸水速率与时间呈幂函数关系,持水量和持水率可分为快速增长、缓慢增长、饱和三个阶段。持水量和吸水速率与枯落物厚度呈正相关关系。针叶林枯落物持水率随厚度增加先增大后减小,阔叶林随厚度增加而增大。苔藓持水量、持水率以及吸水速率的变化趋势与枯落物明显不同,苔藓的吸水速率更小,达到饱和时间更长。

参考文献 (References)

- [1] 李凯,王根绪,孙向阳,等. 西南地区森林生态系统水源涵养评价[J]. 地理科学, 2023, **43**(12): 2217–2227. [LI Kai, WANG Genxu, SUN Xiangyang, et al. Evaluation of water conservation function of forest ecosystem in southwest China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, **43**(12): 2217–2227] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.12.015
- [2] 冷海楠,张玉,崔福星,等. 森林凋落物研究进展[J]. 国土与自然资源研究, 2016, **6**(26): 87–89. [LENG Hainan, ZHANG Yu, CUI Fuxing, et al. A review of researches on forest litterfall [J]. Territory and Natural Resources Study, 2016, **6**(26): 87–89] DOI: 10.16202/j.cnki.tnrs.2016.06.028
- [3] GABARRÓN-GALEOTE M A, MARTÍNEZ-MURILLO J F, RUIZ-SINOJA J D. Relevant effects of vegetal cover and litter on the soil hydrological response of two contrasting mediterranean hillslopes at the end of the dry season (south of Spain) [J]. Hydrological Processes, 2012, **26**(11): 1729–1738. DOI: 10.1002/hyp.8254
- [4] 朱金兆,刘建军,朱清科,等. 森林凋落物层水文生态功能研究[J]. 北京林业大学学报, 2002, **24**(5–6): 30–34. [ZHU Jinzhao, LIU Jianjun, ZHU Qingke, et al. Hydro-ecological functions of forest litter layers [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, **24**(5–6): 30–34] DOI: 0.13332/j.1000–1522.2002.zl.007
- [5] 孙拥康,汤景明,王怡. 亚热带日本落叶松人工林枯落物及土壤层水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2021, **43**(8): 60–69. [SUN Yongkang, TANG Jingming, WANG Yi. Hydrological effects of litter and soil layers of *Larix kaempferi* plantation in subtropical regions [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, **43**(8): 60–69] DOI: 10.12171/j.1000–1522.20200259
- [6] 王会京,王红霞,谢宇光. 太行山不同林型枯落物持水性及生态水文效应研究[J]. 水土保持研究, 2016, **23**(6): 135–139+144. [WANG Huijing, WANG Hongxia, XIE Yuguang. Hydrology functions and water holding capacity of forest litter in Taihangshan Scenic Area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, **23**(6): 135–139+144] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.06.016
- [7] 葛晓敏,唐罗忠,王瑞华,等. 杨树人工林生态系统凋落物生物量及其分解特征[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(9): 1457–1464. [GE Xiaomin, TANG Luozhong, WANG Ruihua, et al. Litterfall biomass and decomposition characteristics in a poplar plantation ecosystem [J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, **26**(9): 1457–1464] DOI: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2017.09.001
- [8] 贺万鹏,周晓雷,解婷婷,等. 青藏高原东北边缘云杉属—冷杉属林火烧迹地枯落物持水特征[J]. 水土保持学报, 2023, **37**(1): 204–210+219. [HE Wanpeng, ZHOU Xiaolei, XIE Tingting, et al. Water retention characteristics of litter in fire-burned land of spruce and abies forests on the northeastern margin of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, **37**(1): 204–210+219] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2023.01.027
- [9] 杜晨曦,史常青,杨建英,等. 小五台山典型林分枯落物持水恢复能力研究[J]. 水土保持学报, 2021, **35**(3): 236–243. [DU Chenxi, SHI Changqing, YANG Jianying, et al. Recovery characteristics of water-holding capacity of litter in typical stands of Xiaowutai Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, **35**(3): 236–243] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.03.033
- [10] 彭云莲,金兆梁,吕刚,等. 浑河源头水源涵养林枯落物持水能力研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2018, **49**(5): 613–620. [PENG Yunlian, JIN Zhaoliang, LYU Gang, et al. Water holding capacity of litter in water conservation forests at the source area of Hun River in eastern Liaoning province [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2018, **49**(5): 613–620] DOI: 10.3969/j.issn.1000–1700.2018.05.014
- [11] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等. 北京山地不同海拔人工油松林枯落物及其土壤水文效应[J]. 水土保持研究, 2013, **20**(6): 54–58. [LU Shaowei, CHEN Bo, PAN Qinghua, et al. Hydrological effects of forest litters and soil in *Pinus tabulaeformis* plantations at the different altitudes of mountains of Beijing [J]. Soil and Water Conservation Research, 2013, **20**(6): 54–58]
- [12] 叶吉,郝占庆,姜萍. 长白山暗针叶林苔藓枯落物层的降雨截留过程[J]. 生态学报, 2004, **24**(12): 2859–2862. [YE Ji, HAO Zhanqing, JIANG Ping. Studies on rainfall holding process of the bryophyte and litter layer in coniferous forest of Changbai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, **24**(12): 2859–2862]
- [13] 陈奇伯,张洪江,解明曙. 森林枯落物及其苔藓层阻延径流速度研究[J]. 北京林业大学学报, 1996, **18**(1): 2–6. [CHEN

- Qibo, ZHANG Hongjinag, XIE Mingshu. Study on runoff velocity retardation by forest litter and moss [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1996, **18**(1): 2 – 6] DOI: 10.13332/j.1000-1522.1996.01.001
- [14] 李国林, 魏强, 凌雷, 等. 甘肃省兴隆山天然林下苔藓凋落物蓄积量及持水特性[J]. 水土保持通报, 2014, **34**(3): 300 – 304. [LI Guolin, WEI Qiang, LING Lei, et al. Water-holding characteristics and accumulation amount of moss and litters under two natural forests in Xinglong Mountains of Gansu province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, **34**(3): 300 – 304] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.03.059
- [15] 党毅, 王维, 余新晓, 等. 北京西山典型人工林分枯落物层生态水文效应[J]. 北京林业大学学报, 2022, **44**(12): 72 – 87. [DANG Yi, WANG Wei, YU Xinxiao, et al. Eco-hydrological effects of litter layer in typical artificial forest stands in Xishan Mountain of Beijing [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, **44**(12): 72 – 87] DOI: 10.12171/j.1000-1522.20220040
- [16] 赵广东, 陈健, 史作民, 等. 川西亚高山暗针叶林土壤温度和水分动态及其与气象因子的关系[J]. 山地学报, 2021, **39**(2): 183 – 193. [ZHAO Guangdong, CHEN Jian, SHI Zuomin, et al. Soil temperature and moisture dynamics and their relationship with meteorological factors of subalpine dark coniferous forest in western Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2021, **39**(2): 183 – 193] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000586
- [17] 朱万泽, 盛哲良, 舒树森, 等. 川西亚高山天然次生林生态功能恢复综合评价[J]. 应用与环境生物学报, 2021, **27**(3): 694 – 704. [ZHU Wanze, SHENG Zheliang, SHU Shumiao, et al. Comprehensive evaluation of ecological function restoration of the natural secondary forests in a subalpine region of western Sichuan [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, **27**(3): 694 – 704] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.02029
- [18] 彭阿辉, 王根绪, 罗辑, 等. 贡嘎山常绿落叶阔叶混交林主要树种叶功能性状[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(10): 2599 – 2605. [PENG Ahui, WANG Genxu, LUO Ji, et al. Leaf functional traits of main plants in a mixed evergreen and deciduous broad-leaved forest in Mt. Gongga [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, **35**(10): 2599 – 2605] DOI: 10.13292/j.1000-4890.201610.035
- [19] 熊壮, 叶文, 张树斌, 等. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林凋落物的持水特性[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(6): 1054 – 1061. [XIONG Zhuang, YE Wen, ZHANG Shubin, et al. Water-holding capacity in forest litter of a seasonal tropical rainforest and a rubber plantation of Xishuangbanna in southwest China [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2018, **35**(6): 1054 – 1061] DOI: 10.11833/j.issn.2095-0756.2018.06.008
- [20] 张振明, 余新晓, 牛健植, 等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(3): 139 – 143. [ZHANG Zhenming, YU Xinxiao, NIU Jianzhi, et al. Ecohydrological functions of litter on different forest stands [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, **19**(3): 139 – 143] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2005.03.034
- [21] 王玲, 赵广亮, 周红娟, 等. 八达岭林场不同密度油松人工林枯落物水文效应[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(9): 1767 – 1775. [WANG Ling, ZHAO Guangliang, ZHOU Hongjuan, et al. Hydrological characteristics of litter in a pinus tabulaeformis plantation with different densities in Badaling forest farm [J]. Ecology and Environment Sciences, 2019, **28**(9): 1767 – 1775] DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.09.007
- [22] 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. [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] DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0022
- [23] 耿琦. 云冷杉针阔混交林枯落物持水特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020: 17. [GENG Qi. Water-holding characteristics of litter in spruce-fir mixed forest [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020: 17] DOI: 10.26949/d.cnki.gbllyu.2020.000207
- [24] 林阳, 李媛媛, 余欣然, 等. 川西高山森林生态系统演替动态的长期模拟[J]. 应用与环境生物学报, 2023, **29**(4): 891 – 897. [LIN Yang, LI Yuanyuan, YU Xinran, et al. Long-term simulation of succession dynamics of alpine forest ecosystems in western Sichuan [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023, **29**(4): 891 – 897] DOI: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2022.05012
- [25] 林立文, 邓羽松, 李佩琦, 等. 桂北地区不同密度杉木林枯落物与土壤水文效应[J]. 水土保持学报, 2020, **34**(5): 200 – 207 + 215. [LIN Liwen, DENG Yusong, LI Peiqi, et al. Study on the effects of litter and soil hydrology of different density cunninghamia lanceolata forests in northern Guangxi [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, **34**(5): 200 – 207 + 215] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2020.05.028
- [26] 盛后财. 大兴安岭北部兴安落叶松林生态水文特征研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021: 49. [SHENG Houcai. Ecohydrological characteristics of larix gmelinii forest in the north of Daxing'an Mountains [D]. Haibin: Northeast Forestry University, 2021: 49] DOI: 10.27009/d.cnki.gdblu.2021.000875
- [27] 陈家琦, 翟畅, 包广道, 等. 东北地区城市森林常见树种凋落物累积量及其水文效应[J]. 生态学杂志, 2023, **42**(6): 1339 – 1347. [CHEN Jiaqi, ZHAI Chang, BAO Guangdao, et al. Litter accumulation and hydrological effects of common tree species in urban forest of northeast China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, **42**(6): 1339 – 1347] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202306.012

- [28] 陶继新, 魏强, 凌雷, 等. 甘肃兴隆山天然林苔藓凋落物自然持水特性[J]. 林业科技通讯, 2017(3): 22–28. [TAO Jixin, WEI Qiang, LING Lei, et al. Natural water-holding characteristics of moss and litter under two natural forests in Xinglong Mountain of Gansu [J]. Practical Forestry Technology, 2017(3): 22–28] DOI: 10.13456/j.cnki.lykt.2017.03.004
- [29] 向巴曲珍, 葛立雯, 王瑞红, 等. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉林下苔藓持水性能研究[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 298–301. [XIANGBA Quzhen, GE Liwen, WANG Ruihong, et al. Water holding capacity of bryophyte in understory of Mount Sejila in Tibet [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3): 298–301] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.03.057
- [30] 丁咸庆, 常月, 柏菁, 等. 亚热带不同次生林地凋落物持水特性及季节变化[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3190–3200. [DING Xianqing, CHANG Yue, BAI Jing, et al. Seasonal changes of litter water-holding characteristics under different secondary forests in subtropical area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 3190–3200] DOI: 10.5846/stxb201907161500
- [31] 羊留冬, 王根绪, 杨燕, 等. 贡嘎山峨眉冷杉成熟林凋落物量动态研究[J]. 江西农业大学学报, 2010, 32(6): 1163–1167 + 1174. [YANG Liudong, WANG Genxu, YANG Yan, et al. Dynamics of litter fall in Abies fabric mature forest at Gongga Mountain [J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2010, 32(6): 1163–1167 + 1174] DOI: 10.13836/j.jjau.2010202
- [32] 刘燕平, 王根绪, 胡兆永, 等. 西南山区典型森林枯落物储量及持水能力[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2113–2120. [LIU Yanping, WANG Genxu, HU Zhaoyong, et al. Litter storage and water-holding capacity of typical forests in mountainous area of southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8): 2113–2120] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202208.014
- [33] 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. [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]
- [34] 彭邦晓, 孙煜镞, 黎建强, 等. 滇中高原磨盘山典型森林类型枯落物持水性能研究[J]. 森林工程, 2022, 38(6): 45–52 + 60. [PENG Bangxiao, SUN Yurong, LI Jianqiang, et al. Study on litter water-holding capacity of typical forests in Mopan Mountain in central Yunnan Plateau [J]. Forest Engineering, 2022, 38(6): 45–52 + 60] DOI: 10.3969/j.issn.1006–8023.2022.06.006
- [35] 赵娜, 王俊博, 李少宁, 等. 北京松山 4 种典型林分枯落物持水特征研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1139–1147. [ZHAO Na, WANG Junbo, LI Shaoning, et al. Study on water holding characteristics of four typical forest litter in Songshan, Beijing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(6): 1139–1147] DOI: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2021.06.004
- [36] 杜雪, 王海燕, 耿琦, 等. 云冷杉针阔混交林枯落物持水性能[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 361–368. [DU Xue, WANG Haiyan, GENG Qi, et al. Water holding capacity of litter in spruce-fir coniferous and broad-leaved mixed forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 361–368] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.02.048
- [37] GOSZ J R, LIKENS G E, BORMANN F H. Nutrient release from decomposing leaf and branch litter in the Hubbard Brook Forest, New Hampshire [J]. Ecological Monographs, 1973, 43(2): 173–191. DOI: 10.2307/1942193
- [38] ZHU Xiai, LIU Wenjie, CHEN Hui, et al. Effects of forest transition on litterfall, standing litter and related nutrient returns: Implications for forest management in tropical China [J]. Geoderma, 2019, 333: 123–134. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.07.023
- [39] 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. [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] DOI: 10.3321/j.issn:1000–3037.2004.06.011
- [40] 孙向阳, 王根绪, 吴勇, 等. 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 501–508. [SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al. Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of western Sichuan, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 501–508] DOI: 10.5846/stxb201111301828
- [41] 刘小娥, 苏世平. 兰州市南北两山 5 种典型人工林凋落物的水文功能[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2574–2582. [LIU Xiao'e, SU Shiping. Hydrological functions of litters under five typical plantations in southern and northern mountains of Lanzhou city, northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2574–2582] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202008.019
- [42] 肖玖金, 马海燕, 张晓庆, 等. 四川盆周西缘山地典型人工林下苔藓和凋落物的持水特性[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(9): 62–65. [XIAO Jiu Jin, MA Haiyan, ZHANG Xiaoqing, et al. Water holding capacities of bryophyte and litter layer under typical artificial stands of western Sichuan Basin border [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(9): 62–65] DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.20140721.004

Water Holding Capacity of Bryophytes and Litter in Subalpine Forest in Western Sichuan, China

FAN Jinhua^{a, b}, XIE Wentian^{a, b}, CAO Qiuyao^b, WANG Genxu^{a, b}, SUN Shouqin^{a, b*}

(*a. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering;*

b. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Forest bryophyte and litter jointly plays an important ecological role in soil and water conservation. Most of previous studies paid attention to bryophyte or litter alone on its eco-hydrological role, but neglected the comprehensive function of bryophyte-litter layer as a coupling component of forest ecosystem; especially for the bryophyte-litter layer in some high-altitude southwest forest of China, the related research was rare. Forest in the Gongga Mountain is a type of alpine ecosystem with rich coniferous and broad-leaved vegetation in western Sichuan of China, enriched by an abundance of bryophyte and litter under forest canopy. Examining the hydrological impact of the bryophyte-litter layer can provide valuable insights into the water conservation capacity of the forest floor.

This study aimed to investigate the water-holding capacity of bryophyte and litter on the forest floors of the Gongga Mountain, which has coniferous and broad-leaved vegetation cover. The study was conducted through field research and immersion tests using sampling bottles.

The study revealed following facts: (1) The maximum water-holding capacity of bryophyte and litter in the Gongga Mountain ranged from 327.9% to 432.6%, with a maximum water retention capacity of 16.6 – 79.4 t/hm² and an effective interception capacity of 7.1 – 34.2 t/hm². As compared with broad-leaved forests, coniferous forests exhibited more significant water-holding and interception capabilities. (2) Among the ground layer components, bryophyte and bryophyte-litter layer demonstrated the highest water retention capacity and effective interception rate, and hence the bryophyte-litter and litter layer displayed the highest water holding and interception capacities. Bryophyte significantly enhanced the water conservation capacity of the ground layer in coniferous forests. (3) The water-holding capacity of the ground layer exhibited a logarithmic relationship with time, and the water absorption rate indicated a power function relationship with time. The water-holding capacity and absorption rate of different ground layer components increased rapidly within 0 – 2 h, followed by a slow increase within 2 – 12 h, and then nearly reached saturation after 12 h. (4) The overall water-holding capacity of the bryophyte-litter layer was equivalent to the sum of the water holding capacities of the bryophyte and litter layer. However, the water absorption rate of the bryophyte-litter layer was higher, rendering it more efficient in intercepting short-term precipitation.

Our findings provide reference and a theoretical basis for further research and practices related to water conservation and ecological hydrology in subalpine forests.

Key words: subalpine forest; litter; bryophyte; water holding capacity; the Gongga Mountain

(责任编辑 钟雨倩)