

川西高山峡谷区6种森林枯落物的持水与失水特性

刘一霖¹, 温娅檬¹, 李巧玉³, 陈娟³, 张小晶³, 吴福忠¹, 杨万勤², 谭波¹

(1.长江上游林业生态工程四川省重点实验室,四川农业大学生态林业研究所,成都 611130;

2.台州学院生命科学学院,浙江 台州 318000;3.三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400715)

摘要:川西高山峡谷区森林较高的地表枯落物储量可能具有较好的水文生态效益,但缺乏研究关注。以川西高山峡谷区6种森林为对象,在雨季调查了不同森林地表枯落物的持水和失水特性。结果表明:(1)川西高山峡谷区林地枯落物蓄积量与最大持水量和有效拦蓄量呈显著正相关,林地枯落物蓄积量为 $6.90 \sim 17.49 \text{ t/hm}^2$,最大持水量为 $1.64 \sim 5.42 \text{ mm}$,最大持水率为 $138.18\% \sim 330.09\%$,有效拦蓄量为 $0.53 \sim 3.33 \text{ mm}$,有效拦蓄率为 $77.57\% \sim 203.02\%$ 。(2)相对其他森林,亮叶桦(*Betula luminifera*)—青麸杨(*Rhus potaninii*)林枯落物的持水性能最好,榿子栎(*Quercus baronii*)—白刺花(*Sophora davidii*)—黄栌(*Cotinus coggygria*)林枯落物的持水性能最差。(3)林地枯落物的累积持水量和累积失水量分别随浸泡时间和失水时间的增加呈对数形式变化,但枯落物吸水速率和失水速率分别与浸泡时间和失水时间呈显著的幂函数关系。川西高山峡谷区森林枯落物在雨季具有明显吸持拦蓄降雨的功能,且以亮叶桦—青麸杨林最好,研究结果为该区森林生态建设和生态效益评价提供了参考依据。

关键词:高山峡谷区;林地枯落物;持水能力;失水特性

中图分类号:S715.7;S718.56

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)05-0151-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.05.022

Water-holding and Water-loss Characteristics of Six Types of Forest Litter in the Alpine Gorge Region of Western Sichuan

LIU Yilin¹, WEN Yameng¹, LI Qiaoyu³, CHEN Juan³,

ZHANG Xiaojing³, WU Fuzhong¹, YANG Wanqin², TAN Bo¹

(1.Sichuan Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in the Upper Reaches of

Yangtze River, Institute of Forestry & Ecology, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130;

2.School of Life Science, Taizhou University, Taizhou, Zhejiang 318000; 3.Key Laboratory

of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715)

Abstract: Forests in the alpine gorge area of western Sichuan may have higher hydrological ecological benefits due to the higher reserves of forest litter, but scant research is available. Therefore, the water-holding and water-loss characteristics of the forest litter in six types of forests in this region were investigated during the rainy season. The results showed that: (1) The forest litter storage had a significant positive correlation with the maximum water-holding capacity and modified interception amount in the alpine gorge region of western Sichuan. The forest litter storage, maximum water-holding capacity, maximum water-holding rate, modified interception amount and modified interception rate were $6.90 \sim 17.49 \text{ t/hm}^2$, $1.64 \sim 5.42 \text{ mm}$, $138.18\% \sim 330.09\%$, $0.53 \sim 3.33 \text{ mm}$ and $77.57\% \sim 203.02\%$, respectively. (2) Compared with other forests, the litter of *Betula luminifera*-*Rhus potaninii* forest had the best water holding characteristic, while the litter of *Quercus baronii*-*Sophora davidii*-*Cotinus coggygria* forest had the worst. (3) The cumulative water-holding capacity and cumulative water loss capacity of forest litter varied logarithmically with increasing soaking time and water loss time, respectively. But the water absorption rate and water loss rate showed a remarkable power function relationship with soaking time and water loss time, respectively. The forest litter in the alpine gorge area of western Sichuan had obvious function of absorbing and intercepting rainfall during the rainy season, and the best one was *B. luminifera*-*R. potaninii* forest in this region. These results provided

收稿日期:2019-04-16

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505003,2017YFC0503906);四川省重点研发项目(2018SZDZX0030)

第一作者:刘一霖(1995—),女,硕士研究生,主要从事森林生态研究。E-mail:1052884523@qq.com

通信作者:杨万勤(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事森林生态与全球变化、土壤生态与水土保持、恢复生态研究。E-mail:scyangwq@163.com

谭波(1984—),男,博士,硕士生导师,主要从事森林生态及土壤生态研究。E-mail:bobotan1984@163.com

reference basis for forest ecological construction and the ecological benefit evaluation in the alpine gorge area of western Sichuan.

Keywords: alpine gorge; forest litter; water-holding capacity; water-loss characteristic

森林枯落物层水文生态效应显著,在截持降雨、阻延地表径流、抑制土壤蒸发、促进土壤入渗及减少水土流失等方面发挥着重要作用,是森林生态系统健康监测和评价的重要内容^[1-3]。枯落物层作为实现森林涵养水源、保持水土的主要作用层^[4],其最大持水量可达 10 mm 以上^[5],甚至可显著高于林冠最大持水量^[6]。一般来说,混交林地枯落物持水能力高于纯林^[7],针叶林低于阔叶林^[8]。然而受气候条件、海拔、坡向和坡度等^[3,9-10]影响,不同类型森林枯落物水源涵养效应存在差异。同时,枯落物高峰期往往发生在春季和秋季,而地表枯落物在降雨季节(夏季)的持水和拦蓄能力更重要,但已有研究多关注单独的枯落物生产过程或持水特征,对枯落物水源涵养能力的认识并不完整。

地处长江上游和青藏高原东缘的川西亚高山/高山林区是长江流域的重要水源地^[11]。20 世纪 50—80 年代,该区原始暗针叶林被大面积采伐,但在近 20 余年来实施天然林保护工程后,森林逐渐得到恢复,只是频繁的地质灾害和常年低温阻碍了森林正常演替,现在的森林正由灌丛逐渐向次生阔叶林、针阔混交林和暗针叶林阶段恢复^[12]。这些森林地表通常具有较高的枯落物量,可能具有较高的持水能力,但缺乏定量研究。因此,基于前期调查,选取川西高山峡谷区 6 种不同类型的典型森林研究其地表枯落物在雨季的持水拦蓄等水源涵养特性,以期充分认识区域森林水源涵养特征,为该区森林可持续经营管理和生态效益评价提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县

(31°11′—31°54′N,102°36′—103°30′E),研究样地海拔 2 000~3 500 m,分布于干旱河谷边缘至高山林线以下,具有典型的高山峡谷地貌。年均气温 6~12 ℃,年均降水量 500~1 100 mm,年均蒸发量 1 000~1 900 mm。森林的乔木层主要有糙皮桦(*Betula utilis*)、岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、青扦(*Picea wilsonii*)、陕甘花楸(*Sorbus koehneana*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、云杉(*Picea asperata*)、白桦(*Betula platyphylla*)、榿子栎(*Quercus baronii*)、青麸杨(*Rhus potaninii*)、川滇长尾槭(*Acer caudatum* var. *prattii*)、亮叶桦(*Betula luminifera*)和华山松(*Pinus armandii*)等;林下灌木主要有箭竹(*Fargesia spathacea*)、绢毛蔷薇(*Rosa sericea*)、泡叶栒子(*Cotoneaster bullatus*)、黄栌(*Cotinus coggygria*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)、白刺花(*Sophora davidii*)、杯腺柳(*Salix cupularis*)和西南栒子(*Cotoneaster franchetii*)等;草本植物主要有华蟹甲(*Sinacalia tangutica*)、甘西鼠尾草(*Salvia przewalskii*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium* var. *sibiricum*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris*)和槲蕨(*Drynaria roosii*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与调查 于 2018 年雨季(8 月初)在川西高山峡谷区选择 6 种森林(糙皮桦—岷江冷杉林、落叶松林、白桦—云杉—川滇长尾槭林、亮叶桦—青麸杨林、榿子栎林和榿子栎—白刺花—黄栌林),各自布设 3 个坡度和坡向相似的大小为 20 m×20 m 的标准地,调查林分特征(表 1)。

表 1 不同森林的样地概况

森林类型	经纬度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	郁闭度	密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m
糙皮桦—岷江冷杉林	31°50′N,102°41′E	3483	NE	28	0.80	958	15.40	9.36
落叶松林	31°50′N,102°41′E	3450	SE	31	0.85	1308	19.88	10.10
白桦—云杉—川滇长尾槭林	31°40′N,102°46′E	3067	NE	28	0.80	1275	15.50	8.11
亮叶桦—青麸杨林	31°31′N,102°55′E	2393	NE	29	0.80	975	14.71	7.63
榿子栎林	31°32′N,102°54′E	2460	SW	24	0.85	2233	12.96	6.76
榿子栎—白刺花—黄栌林	31°27′N,103°10′E	2087	SW	32	0.90	5633	2.02	0.86

1.2.2 枯落物持水及失水过程测定 在每个标准地内设置 3 个 50 cm×50 cm 的小样方,测定小样方内的枯落物层厚度并收集枯落物样品混合后带回室内,称其全部鲜重,用四分法取部分烘干(65 ℃)测定蓄积量,部分自然风干测定持水特性。将自然风干^[13]的枯落物装入 0.1 mm 孔径的尼龙袋中完全浸水,分别于

0.25,0.5,1,2,4,7,12,24 h 后取出,悬置至不滴水立即称重。在枯落物浸水 24 h 后,取出悬挂以自然失水(室温 25 ℃),分别于 0.25,0.5,1,2,4,7,12,24 h 后称重,最后烘干(65 ℃)称重。相关计算公式^[14]为:

$$R_0 = [(G_0 - G_d) / G_d] \times 100\%$$
 (1)

$$R_{\text{hmax}} = [(G_{24} - G_d) / G_d] \times 100\%$$
 (2)

$$W_{h\max}=R_{h\max}\times M/10\tag{3}$$
$$R_{sv}=0.85R_{h\max}-R_0\tag{4}$$
$$W_{sv}=R_{sv}\times M/10\tag{5}$$
$$Q_i=[(Q_{ij}-G_{ad})/G_{ad}]\times 1000\tag{6}$$
$$Q_l=[(Q_{i24}-Q_{ij})/G_{ad}]\times 1000\tag{7}$$

式中: G_0 、 G_d 、 G_{24} 、 G_{ad} 分别为枯落物样品自然状态的质量、烘干状态质量、浸水24 h后的质量和风干状态质量(g); R_0 、 $R_{h\max}$ 、 R_{sv} 分别为枯落物的自然含水率、最大持水率和有效拦蓄率(%); M 为枯落物的蓄积量(t/hm^2); $W_{h\max}$ 、 W_{sv} 分别为最大持水量和有效拦蓄量(mm);0.85为有效拦蓄系数; Q_{ij} 、 Q_{i24} 、 Q_{lj} 分别为枯落物浸泡 j h后的质量,浸泡24 h后的质量和失水 j h后的质量(g); Q_i 、 Q_l 分别为不同浸泡时间下枯落物的累积持水量和不同失水时间下枯落物的累积失水量(g/kg);1 000为单位换算系数。基于此, $(j+1)$ 时间下枯落物的吸水或失水速率($\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$)= $(j+1)-j$ 时间段的持水量或失水量(g/kg) $\div$ 相应的间隔时间(h)。

1.3 数据处理

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计

表2 川西高山峡谷区不同森林枯落物的蓄积量、最大持水量及有效拦蓄量

森林类型	枯落物厚度/cm	蓄积量/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	最大持水量/mm	有效拦蓄量/mm
糙皮桦—岷江冷杉林	$0.4\pm0.1\text{c}$	$8.41\pm2.16\text{c}$	$2.28\pm0.51\text{c}$	$0.86\pm0.19\text{c}$
落叶松林	$7.2\pm0.4\text{a}$	$17.49\pm0.94\text{a}$	$4.35\pm0.41\text{ab}$	$1.32\pm0.30\text{c}$
白桦—云杉—川滇长尾槭林	$1.9\pm0.2\text{bc}$	$6.90\pm1.25\text{c}$	$1.73\pm0.34\text{c}$	$0.53\pm0.04\text{c}$
亮叶桦—青麸杨林	$8.7\pm1.3\text{a}$	$16.73\pm1.85\text{ab}$	$5.42\pm0.62\text{a}$	$3.33\pm0.34\text{a}$
榿子栎林	$3.2\pm0.7\text{b}$	$16.63\pm1.84\text{ab}$	$3.14\pm0.14\text{bc}$	$2.32\pm0.09\text{b}$
榿子栎—白刺花—黄栌林	$3.0\pm0.3\text{b}$	$11.07\pm2.58\text{bc}$	$1.64\pm0.57\text{c}$	$1.13\pm0.42\text{c}$

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准差;同列数据不同小写字母表示不同森林间各指标差异显著($P<0.05$)。

2.2 枯落物持水性能

川西高山峡谷区不同类型林地枯落物层最大持水量变化在1.64~5.42 mm(表2)。具有较高蓄积量的亮叶桦—青麸杨林、落叶松林和榿子栎林的最大持水量较高,分别为5.42、4.35、3.14 mm,糙皮桦—岷江冷杉林、白桦—云杉—川滇长尾槭林和榿子栎—白刺花—黄栌林的最大持水量较低,分别为2.28、1.73、1.64 mm。这6种森林的枯落物层最多可吸持自身重量1.38~3.30倍的雨水,最大持水率为亮叶桦—青麸杨林最高(330.09%),其次是糙皮桦—岷江冷杉林(279.24%)、白桦—云杉—川滇长尾槭林(249.01%)、落叶松林(248.80%)和榿子栎林(192.03%),榿子栎—白刺花—黄栌林的最大持水率最小,为138.18%(图1)。

2.3 枯落物有效拦蓄能力

由图2可知,川西高山峡谷区不同类型林地枯落物层的有效拦蓄量变化在0.53~3.33 mm,其中亮叶桦—青麸杨林和榿子栎林显著高于其他林分,分别为3.33、2.32 mm;落叶松林、榿子栎—白刺花—黄栌林、糙皮桦—岷江冷杉林和白桦—云杉—川滇长尾槭

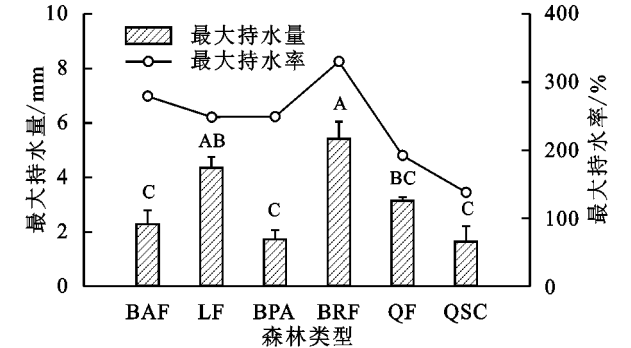
分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著法(LSD)检验组间差异显著性,用 Pearson 相关性系数检验各指标的相关性。通过拟合枯落物累积持水重、失水重与时间的多元回归关系经统计学检验得到拟合度参数 R^2 ,并在 $P<0.05$ 水平检验相关系数的显著性。采用 SigmaPlot 12.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 枯落物蓄积量

川西高山峡谷区不同类型林地枯落物层厚度变动为0.4~8.7 cm。枯落物的蓄积量与其厚度显著正相关($r=0.713$, $P<0.01$),变化范围为6.90~17.49 t/hm^2 。其中,落叶松林、亮叶桦—青麸杨林和榿子栎林的枯落物蓄积量较高,分别为17.49、16.73、16.63 t/hm^2 ;榿子栎—白刺花—黄栌林、糙皮桦—岷江冷杉林和白桦—云杉—川滇长尾槭林的枯落物蓄积量较低,分别为11.07、8.41、6.90 t/hm^2 (表2)。此外,枯落物蓄积量与最大持水量($r=0.793$, $P<0.01$)和有效拦蓄量($r=0.690$, $P<0.01$)呈显著正相关,影响着不同类型林地的水源涵养能力。

林的有效拦蓄量较小,分别为1.32、1.13、0.86、0.53 mm。枯落物的有效拦蓄率变化在77.57%~203.02%,表现为亮叶桦—青麸杨林(203.02%)>榿子栎林(141.70%)>糙皮桦—岷江冷杉林(108.95%)>榿子栎—白刺花—黄栌林(93.69%)>白桦—云杉—川滇长尾槭林(81.04%)>落叶松林(77.57%)。



注:不同大写字母表示不同林地枯落物间的差异显著($P<0.05$);BAF为糙皮桦—岷江冷杉林;LF为落叶松林;BPA为白桦—云杉—川滇长尾槭林;BRP为亮叶桦—青麸杨林;QF为榿子栎林;QSC为榿子栎—白刺花—黄栌林。下同。

图1 川西高山峡谷区不同森林枯落物层的最大持水能力

2.4 枯落物的持水动态

川西高山峡谷区不同类型林地枯落物的持水量随浸泡时间增加而增大。浸泡初期,各林地枯落物持水量迅速增加,在 0~2 h 增加最快,之后增长减缓,12 h 后趋于饱和。由图 3 可知,亮叶桦—青麸杨林在各时段的持水量明显优于其他森林,而槲子栎林则明显较低,槲子栎—白刺花—黄栌林最低。枯落物持水量与吸水速率密切相关,枯落物浸泡 0.25 h 的吸水速率最快,此时亮叶桦—青麸杨林枯落物的吸水速率最大,槲子栎林较小,槲子栎—白刺花—黄栌林最小。随着时间增长,枯落物的吸水速率迅速降低,在 2 h 后趋于稳定。不同类型林地枯落物的累积持水量、

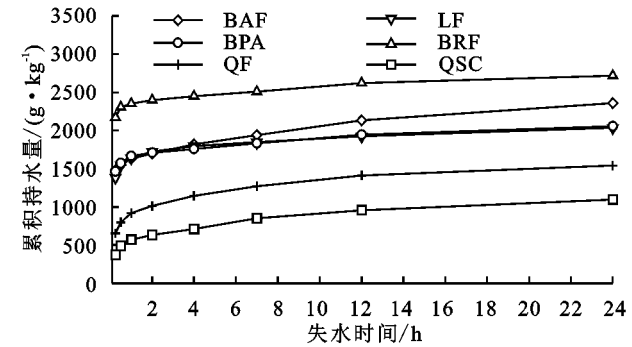


图 3 川西高山峡谷区不同森林枯落物的累积持水量、吸水速率与浸泡时间的关系

表 3 川西高山峡谷区不同森林枯落物的累积持水量、吸水速率与浸泡时间的关系

森林类型	持水量 Q_i 与浸泡时间 t_i 的关系		吸水速率 V_i 与浸泡时间 t_i 的关系	
	关系式	R^2	关系式	R^2
糙皮桦—岷江冷杉林	$Q_i = 191.63 \ln t_i + 1637.77$	0.948 **	$V_i = 340.87 t_i^{-1.064}$	0.841 **
落叶松林	$Q_i = 131.51 \ln t_i + 1613.82$	0.985 **	$V_i = 322.87 t_i^{-1.324}$	0.930 **
白桦—云杉—川滇长尾槭林	$Q_i = 120.05 \ln t_i + 1636.50$	0.976 **	$V_i = 275.24 t_i^{-1.241}$	0.867 **
亮叶桦—青麸杨林	$Q_i = 108.73 \ln t_i + 2337.58$	0.966 **	$V_i = 280.67 t_i^{-1.307}$	0.834 **
槲子栎林	$Q_i = 192.47 \ln t_i + 911.40$	0.995 **	$V_i = 324.15 t_i^{-1.094}$	0.966 **
槲子栎—白刺花—黄栌林	$Q_i = 152.59 \ln t_i + 563.75$	0.977 **	$V_i = 222.74 t_i^{-0.992}$	0.943 **

注: Q_i 为累积持水量(g/kg); V_i 为吸水速率($\text{g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$); t_i 为浸水时间(h); ** 表示 $P < 0.01$ 。

2.5 枯落物的失水动态

吸水过程可体现枯落物的吸水蓄水能力,失水过程则体现了其保水能力。不同类型林地枯落物失水量随失水时间增加而增加。枯落物累积失水量在失水初期较小,随失水时间逐渐增加,但本试验中 24 h 内并未达稳定。在失水 2~24 h,亮叶桦—青麸杨林和糙皮桦—岷江冷杉林的失水量较高,其次为落叶松林和白桦—云杉—川滇长尾槭林,槲子栎林和槲子栎—白刺花—黄栌林的失水量较小且增幅较小。不同类型森林枯落物在 0~2 h 的失水速率急速下降,并随失水时间增长而减缓,在 12 h 后较为平稳。失水 2~24 h,各林分失水速率的规律与失水量表现一致(图 4)。枯落物的累积失水量、失水速率与失水时间的方程拟合表明:累积失水量与失水时间呈显著对数关系,失水速率与失水时间呈显著幂函数关系(表 4)。

吸水速率与浸水时间的方程拟合结果表明:累积持水量与浸水时间呈显著对数关系,吸水速率与浸泡时间呈显著幂函数关系(表 3)。

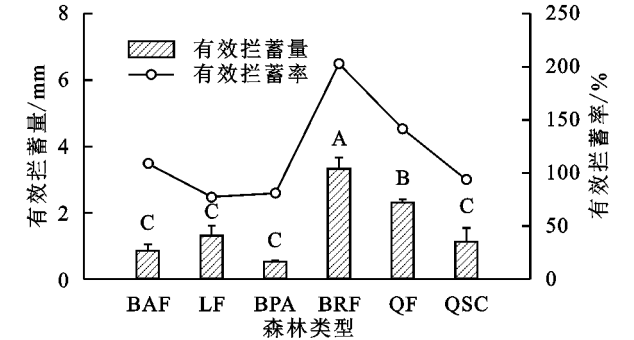
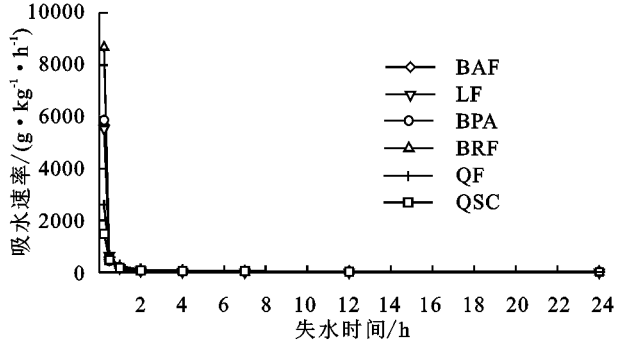


图 2 川西高山峡谷区不同森林枯落物层的有效拦蓄能力



3 讨论

枯枝落叶层是控制林冠下大气与土壤间水分和能量转移的重要水文作用层^[15],其水源涵养能力与枯落物蓄积量密切相关^[16]。受林分类型、密度、枯落物输入量、分解速度等多种因素影响^[4,17-18],川西高山峡谷区不同类型森林枯落物蓄积量在雨季表现出明显差异。其中,糙皮桦—岷江冷杉林和白桦—云杉—川滇长尾槭林枯落物的蓄积量较低,可能是由于该林分密度低于其他林分(表 1),从而减少了枯落物产量^[4]。然而,尽管槲子栎—白刺花—黄栌林的林分密度远高于其他林分,其蓄积量并不突出,这是因为该林分以灌木为主,其林冠层不如乔木发达,地上生物量较小,因此枯落物输入量低于乔木。落叶松林、亮叶桦—青麸杨林和槲子栎林由于其落叶量大而具

有较高的蓄积量。不同地区各森林类型的枯落物蓄积量在雨季也有差异(表 5)。川西高山峡谷区(本文)与太行山、辽西低山丘陵区 and 祁连山地区不同森林枯落物蓄积量的变化范围相差不大,分别为 6.90~

17.49, 9.25~17.08, 8.44~17.75, 6.08~17.80 t/hm²;但砭砂岩区森林枯落物的蓄积量明显较低,为 3.61~7.89 t/hm²,这与其林分组成、林龄、环境水热条件^[3]等密切相关。

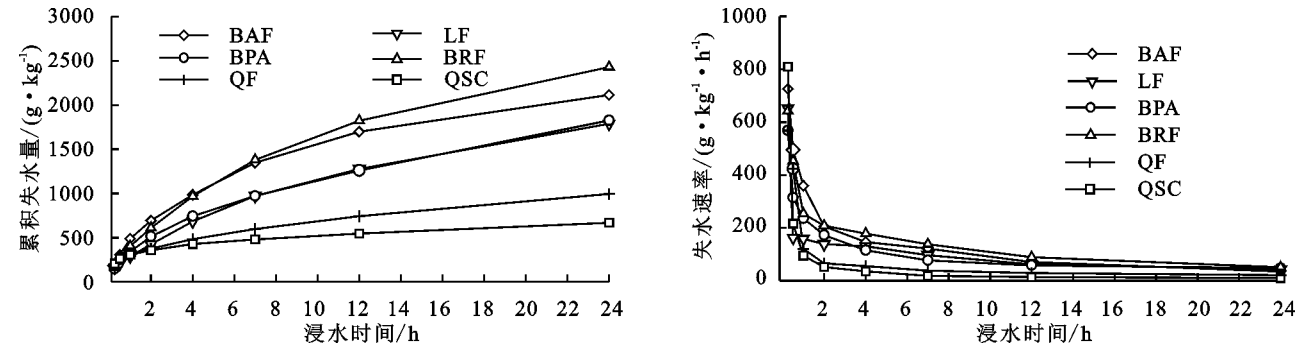


图 4 川西高山峡谷区不同森林枯落物累积失水量、失水速率与失水时间的关系

表 4 川西高山峡谷区不同森林枯落物累积失水量、失水速率与失水时间的关系

森林类型	失水量 Q_j 与失水时间 t_j 的关系		失水速率 V_j 与失水时间 t_j 的关系	
	关系式	R^2	关系式	R^2
糙皮桦—岷江冷杉林	$Q_j = 426.49 \ln t_j + 570.66$	0.954 **	$V_j = 331.54 t_j^{-0.636}$	0.982 **
落叶松林	$Q_j = 346.72 \ln t_j + 394.17$	0.893 **	$V_j = 201.66 t_j^{-0.470}$	0.847 **
白桦—云杉—川滇长尾槭林	$Q_j = 348.07 \ln t_j + 420.26$	0.912 **	$V_j = 240.26 t_j^{-0.546}$	0.991 **
亮叶桦—青麸杨林	$Q_j = 489.84 \ln t_j + 539.50$	0.918 **	$V_j = 309.43 t_j^{-0.513}$	0.971 **
榧子栎林	$Q_j = 171.60 \ln t_j + 322.56$	0.936 **	$V_j = 169.56 t_j^{-0.743}$	0.942 **
榧子栎—白刺花—黄栌林	$Q_j = 96.90 \ln t_j + 312.15$	0.973 **	$V_j = 129.96 t_j^{-0.924}$	0.957 **

注: Q_j 为累积失水量(g/kg); V_j 为失水速率(g/(kg·h)); t_j 为失水时间(h); * * 表示 $P < 0.01$ 。

表 5 不同地区不同森林类型枯落物的持水拦蓄能力

地区	森林类型	采样时间	枯落物蓄积量/(t·hm ⁻²)	最大持水量/mm	最大持水率/%	有效拦蓄量/mm	有效拦蓄率/%	文献
川西高山峡谷区	糙皮桦—岷江冷杉林	8 月	8.41	2.28	279.24	0.86	108.95	本文
	落叶松林		17.49	4.35	248.80	1.32	77.57	
	白桦—云杉—川滇长尾槭林		6.90	1.73	249.01	0.53	81.04	
	亮叶桦—青麸杨林		16.73	5.42	330.09	3.33	203.02	
	榧子栎林		16.63	3.14	192.03	2.32	141.70	
	榧子栎—白刺花—黄栌林		11.07	1.64	138.18	1.13	93.69	
太行山	混交林	8 月	14.23	1.14	82.39	1.12	75.74	[19]
	阔叶林		13.00	1.37	108.30	1.29	94.31	
	针叶林		17.08	1.40	115.32	1.60	101.30	
	灌丛		9.25	0.94	67.70	0.80	47.53	
辽西低山丘陵区	红松林	8 月	15.92		143.35	1.95	117.89	[20]
	油松林		14.65		155.85	1.97	127.95	
	兴安落叶松林		17.75		163.68	2.56	136.49	
	紫椴林		16.92		156.28	2.20	129.64	
	榆树林		8.44		148.11	1.06	121.67	
	山杨林		12.25		145.18	1.45	118.77	
砭砂岩区	沙棘林	7 月	3.61	0.62	170.96	0.49		[21]
	青杨林		6.73	1.89	281.26	1.44		
	油松林		7.89	1.71	217.14	1.30		
	侧柏林		7.51	1.51	201.05	1.15		
祁连山	灌丛林	7—8 月	15.50	1.97	289.18	1.81	140.89	[16]
	青海云杉林		17.80	3.03	240.89	2.74	189.19	
	祁连圆柏林		6.08	1.03	212.46	0.89	167.72	

枯落物蓄水量取决于枯落物的质与量。枯落物蓄积量决定了持水贮水有效空间大小^[22],蓄积量越大时,持水拦蓄量越大。因此,具有较高蓄积量的亮叶桦—青麸杨林、落叶松林和榿子栎林的持水拦蓄量较高。枯落物的分解程度、质地等特性决定了枯落物的持水拦蓄能力。针叶因含有较多油脂不易分解且表面较阔叶不易浸湿,其持水拦蓄能力往往低于阔叶树种^[8,15]。在本研究中,亮叶桦—青麸杨林的持水拦蓄能力较其他林分强,具有较多针叶树的糙皮桦—岷江冷杉林、落叶松林和白桦—云杉—川滇长尾槭林拦蓄能力较差。然而,以榿子栎为主的林分(榿子栎林和榿子栎—白刺花—黄栌林)持水能力较差,可能是榿子栎革质的表面使其吸水速度较慢^[23]导致持水力差。在雨季,川西高山峡谷区森林枯落物最大持水量和有效拦蓄量分别变化在 1.64~5.42、0.53~3.33 mm;太行山、砭砂岩区和祁连山地区森林枯落物最大持水量分别为 0.94~1.40、0.62~1.89、1.03~3.03 mm,太行山、辽西低山丘陵区、砭砂岩区和祁连山地区枯落物有效拦蓄量分别为 0.80~1.60、1.06~2.56、0.49~1.44、0.89~2.74 mm。相比之下,川西高山峡谷区森林枯落物在雨季的持水拦蓄量更大,整体上呈现较好的持水拦蓄能力(表 5),这对保持区域水土、涵养水源具有重要意义。

枯落物的吸失水过程是反映枯落物水源涵养能力的重要内容。本研究中各类型森林枯落物累积持水量、累积失水量分别与浸水时间和失水时间呈较好的对数关系,吸水速率、失水速率分别与浸水时间和失水时间呈较好的幂函数关系,这与多数研究^[9,22,24]结果一致。在枯落物浸泡初期,枯落物从风干状态浸入水中后,枯落物残余枝叶表面的水势较低,吸水速率高^[25];随浸泡时间增加,水势差减小,吸水速率逐渐降低,持水量接近饱和^[17]。枯落物浸泡初期迅速吸水的过程能迅速涵蓄林内降雨,延缓短历时高强度降雨产生的地表径流^[13],尤其在雨季。枯落物吸持水分后的失水速率体现了枯落物的保水能力。在失水初期,枯落物释放的水分较多,失水速率高,之后随着可释放水量减少而降低^[22]。以榿子栎为主的林分,由于其枯落物叶片的革质特性,在不同时段的持水量明显低于其他林分,因而在 2~24 h 失水量也明显较低。在本研究中,枯落物失水 24 h 并未达到稳定,与许文盛等^[24]的研究结果一致,且失水过程比吸水过程进行的更缓慢,达到稳定所需的时间更长,这表明枯落物具有良好的水分调蓄及保水能力,而较慢的失水速率对蒸发量较高的高山峡谷区而言有利于保持林地水分,涵养水源。

4 结论

川西高山峡谷区森林枯落物在雨季有明显吸持拦

蓄降雨的作用,最多可吸持 1.64~5.42 mm,可有效拦蓄 0.53~3.33 mm,起到了良好的水源涵养效益,但随森林类型、枯落物蓄积量及其本身特性等不同而变化。森林地表枯落物的蓄积量越高,可吸持拦蓄的雨水越多。但就枯落物本身特性而言,以榿子栎为主的榿子栎林和榿子栎—白刺花—黄栌林枯落物持水能力较低,其最大持水率分别为 192.03%和 138.18%,亮叶桦—青麸杨林枯落物的持水拦蓄能力最好,最大持水率和有效拦蓄率分别为 330.09%和 203.02%。本研究结果可为深入认识研究区域的森林水源涵养效益及指导森林可持续经营提供科学依据。

参考文献:

- [1] Park A, Friesen P, Serrud A A S. Comparative water fluxes through leaf litter of tropical plantation trees and the invasive grass *Saccharum spontaneum* in the Republic of Panama [J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3): 167-178.
- [2] Putuhena W M, Cordery I. Estimation of interception capacity of the forest floor [J]. Journal of Hydrology, 1996, 180(1/4): 283-299.
- [3] 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.
- [4] 白英辰,江朱,程小琴,等.密度调控对华北落叶松人工林枯落物水文特征的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):128-133.
- [5] 吕刚,傅昕阳,李叶鑫,等.露天煤矿排土场复垦区不同植被类型枯落物持水特性研究[J].水土保持学报,2017,31(1):146-152.
- [6] 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.
- [7] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(2):357-363.
- [8] 胡静霞,杨新兵,朱辰光,等.冀西北地区 4 种纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持研究,2017,24(4):304-310.
- [9] 张引,黄永梅,周光亮,等.冀北山地 5 个海拔梯度油松林枯落物与土壤水源涵养功能研究[J].水土保持研究,2019,26(2):126-131.
- [10] 潘刚,任毅华,边巴多吉,等.西藏色季拉山急尖长苞冷杉林枯枝落叶及苔藓层的生物量与持水性能[J].水土保持研究,2008,15(5):81-83.
- [11] Yang W Q, Wang K Y, Kellomki S, et al. Litter dynamics of three subalpine forests in Western Sichuan [J]. Pedosphere, 2005, 15(5): 653-659.
- [12] 刘洋,张健,杨万勤,等.自然恢复过程中川西亚高山林草交错带地被物储量及持水性能研究[J].水土保持学报,2009,23(3):173-178.

- [6] 冯爱青,张民,李成亮,等.秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及棕壤酶活性的影响[J].生态学报,2015,35(15):5269-5277.
- [7] 高德才,张蕾,刘强,等.生物黑炭对旱地土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放及其环境效益的影响[J].生态学报,2015,35(11):3615-3624.
- [8] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 436-442.
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社, 2000:81-83.
- [10] Dick R P. Methods of soil enzymology [M]. Madison: Soil Science Society of America, 2011:163-168.
- [11] 孙媛媛,孙友宝,盖荣银,等.二乙烯三胺五乙酸(DT-PA)提取 ICP-AES 法测定土壤中有效态元素[J].环境化学,2015,34(8):1578-1579.
- [12] 王莉峰,熊黑钢,靳彦华,等.干旱区施不同浓度硝酸钾对后各耕地土壤水盐的影响[J].水土保持学报,2013, 27(4):191-195.
- [13] Pereira P, Übeda X, Martin D, et al. Wildfire effects on extractable elements in ash from a *Pinus pinaster* forest in Portugal [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(11):3681-3690.
- [14] 孔健健,张亨宇,荆爽.大兴安岭火后演替初期森林土壤磷的动态变化特征[J].生态学杂志,2017,36(6): 1515-1523.
- [15] 曾晓敏,高金涛,范跃新,等.中亚热带森林转换对土壤磷积累的影响[J].生态学报,2018,38(13):4879-4887.
- [16] 张茂增,辛颖,赵雨森.火烧对大兴安岭樟子松天然林土壤有机碳组分的影响[J].水土保持学报,2016,30 (5):322-326.
- [17] Inbar A, Lado M, Sternberg M, et al. Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region [J]. *Geoderma*, 2014, 221/222: 131-138.
- [18] 陈季,乔沐.佳木斯市主要土壤微量元素含量评价及相关分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2004,22 (2):264-266.
- [19] Sara P. Soil aggregation response to a long- and short-term differences in the rainfall amount under arid and Mediterranean climate conditions [J]. *Geomorphology*, 2005,70:1-11.
- [20] Francos M, Pereira P, Alcañiz M, et al. Impact of an intense rainfall event on soil properties following a wildfire in a Mediterranean environment (North-East Spain) [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 572:1353-1362.
- [21] 叶丽丽,王翠红,周虎,等.添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J].土壤,2012,44(1):62-66.
- [22] 李力,刘娅,陆宇超,等.生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J].环境化学,2011,30(8):1411-1421.
- (上接第 156 页)
- [13] 周祥,赵一鹤,张洪江,等.云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J].生态环境学报,2011,20(2):248-252.
- [14] 吕刚,曹小平,卢慧,等.辽西海棠山森林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J].水土保持学报,2010,24(3): 203-208.
- [15] Sato Y, Kumagai T O, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers-the effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 18(16):3007-3018.
- [16] 袁杰,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡不同植被类型枯落物及其土壤持水特性分析[J].生态科学,2018,37 (5):183-193.
- [17] 胡晓聪,金亮,黄乾亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.
- [18] 汪建芳,王兵,王忠禹,等.黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J].水土保持学报,2018,32(4): 139-144.
- [19] 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.
- [20] 吕刚,王磊,李叶鑫,等.辽西低山丘陵区针叶林与阔叶林枯落物持水性对比[J].中国水土保持科学,2017,15 (4):51-59.
- [21] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砭砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J].水土保持学报,2017,31 (3):118-122.
- [22] 喻阳华,李光容,严令斌,等.赤水河上游主要树种枯落物调蓄水分效应[J].中国水土保持科学,2015,13(3): 39-44.
- [23] 刘硕.青海省大通县主要造林树种枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2008,15(6):105-107.
- [25] 刘建立,王彦辉,管伟,等.宁南山区华北落叶松林枯落物水文特征研究[J].水土保持通报,2009,29(6):20-23.
- [24] 许文盛,王一峰,童晓霞,等.紫鹊界梯田区植被凋落物水资源调配特性[J].水土保持学报,2013,27(4):130-135.