

DOI: 10.5846/stxb201503050431

冯秋红, 刘兴良, 卢昌泰, 吴晓龙, 潘红丽, 马文宝, 刘世荣. 不同经营模式对川西亚高山天然次生林林地水文效应的影响. 生态学报, 2016, 36(17): - .

Feng Q H, Liu X L, Lu C T, Wu X L, Pan H L, Ma W B, Liu S R. Effects of different forest management regimes on woodland hydrological effects of natural secondary forests in a sub-alpine region of western Sichuan, China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): - .

不同经营模式对川西亚高山天然次生林林地水文效应的影响

冯秋红¹, 刘兴良^{1,*}, 卢昌泰³, 吴晓龙^{1,3}, 潘红丽¹, 马文宝¹, 刘世荣²

1 四川省林业科学研究院, 成都 610081

2 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

3 四川农业大学旅游学院, 都江堰 611830

摘要:天然次生林是川西亚高山林区经历大规模砍伐后形成的主要森林类型之一, 是我国西南林区水源涵养林的重要组成部分。本研究以不同经营模式(抚育经营、清林+补植经营以及封育经营)的川西亚高山次生桦木林和桦木-岷江冷杉混交林为研究对象, 通过样方取样法获取和分析了林地苔藓、枯落物和土壤的水文指标。结果表明, 与封山育林经营相比, 抚育经营下的两种林型的苔藓最大持水率均显著升高($F=8.147, P=0.010$; $F=15.525, P=0.006$)、桦木林的蓄积量显著降低($F=4.979, P=0.022$), 而苔藓最大持水量变化不显著; 混交林则均无显著变化。在清林+补植经营下, 混交林苔藓水文效应变化不显著($F=2.280, P=0.183$), 而桦木林虽然苔藓最大持水率无显著变化($F=4.072, P=0.098$), 但蓄积量的显著降低($F=3.536, P=0.044$)导致了其最大持水量的降低($F=3.782, P=0.042$)。两种经营方式基本上促进了天然林的枯落物最大持水率、降低了林下枯落物蓄积量; 其中抚育经营效果更显著, 但两种经营方式下枯落物最大持水量变化不显著。两种经营方式下, 桦木林和混交林的林下土壤容重均降低($F=10.715, P<0.01$; $F=5.148, P<0.05$), 以及桦木林土壤最大持水量的增加($F=4.499, P<0.05$), 其中抚育经营的影响程度更显著。从四年来的短期效应来看, 两种经营方式均对天然林的林地持水能力具有促进作用, 抚育经营较清林+补植经营更显著, 但这仅是短期的结果, 两种经营方式对于退化天然林水文以及其他生态功能恢复的长期影响还有待于进一步的观测研究。

关键词:森林经营模式; 天然次生林; 水文效应; 川西亚高山

Effects of different forest management regimes on woodland hydrological effects of natural secondary forests in a sub-alpine region of western Sichuan, China

FENG QiuHong¹, LIU XingLiang^{1,*}, LU ChangTai³, WU XiaoLong^{1,3}, PAN HongLi¹, MA WenBao¹, LIU ShiRong²

1 Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China

2 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory on Forest Ecology and Environmental Sciences of State Forestry Administration, Beijing 100091, China

3 The college of tourism of Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, China

Abstract: In the wake of the large-scale logging of its sub-alpine region, natural secondary forest is one of dominant forest types of western Sichuan, and plays an important role in water conservation in the forests of southwestern China. The moss, litter, and soil produced by different management regimes (e.g., clearing and pruning, clearing and replanting, and no disturbance) have been measured and sampled, and their hydrological effects on *Betula albo-sinensis* forests and mixed

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD22B0104); 四川省基本科研业务费(JB2015-04); 林业公益性行业专项(201104109-01)

收稿日期: 2015-03-05; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxingliang@126.com

forests with *Abies faxoniana* and *Betula albo-sinensis* have been analyzed. The results of this study revealed that the maximal water holding rate (MWHR) of moss from clearing and pruning was significantly higher than that from no disturbance, but the cumulated mass (CM) of moss from clearing and pruning was significantly lower than that from no disturbance, and the maximal water holding capacity (MWHC) of moss was no different between forest types or between clearing and pruning mode and no disturbance mode. In *Betula albo-sinensis* forests managed by clearing and replanting, the MWHR and CM of moss was lower, but not significantly so, while the MWHC of moss was significantly lower than that in the undisturbed plots of the same forest type. In addition, there was no significant difference between the hydrological effects of both mixed forests with *Abies faxoniana* and *Betula albo-sinensis*. Under the two regimes including active management, the MWHR of the litter and the soil water holding capacity both increased, the CM of the litter and soil bulk density decreased, but MWHC of litter was not significantly different between artificial mode and undisturbed mode. The performance of the clearing and pruning regime was more significantly better than that of clearing and replantation regime. From short-term effects for 4 years, the woodland's capacity to facilitate water conservation was increased by both the clearing and pruning regime and the clearing and replantation regime, in both *Betula albo-sinensis* forests and fixed forests with *Abies faxoniana* and *Betula albo-sinensis*. The performance of the clearing and pruning regime was more significant than those of the other management regimes. Over the long term, the hydrological and ecological effects of different management regimes on natural secondary forests requires further investigation.

Key Words: forest management regimes, natural secondary forest, hydrological effects, sub-alpine region of western Sichuan

川西亚高山森林是我国西南亚高山林区水源涵养林的重要组成部分,以冷杉为主的原始暗针叶林在经历大规模采伐利用后,天然次生林已成为该区域的主要森林类型^[1-2],如桦木林、桦木冷杉混交林等。前人对天然次生林的水文学研究也有了一定的基础,内容主要涉及地被物持水特征、森林蒸发散、土壤入渗以及不同海拔、林龄森林之间水文特征的比较等方面^[3-10]。但针对采伐后形成的不同演替阶段的代表森林类型、不同经营模式下的天然次生林林地水文效应研究鲜有报道。

随着社会经济的发展,森林生态系统对于社会生态环境的重要性也越来越被大众所接受,而森林植被与生态环境之间相互作用、相互影响的过程中,水文过程则是极为重要的一个方面^[11-12]。所以,森林与水的关系问题仍是当今生态学与水文学研究的中心议题之一^[13-15]。怎样的森林经营方式才能最大限度的利用森林资源,稳定森林生态功能的发挥,保障区域生态环境则是我们急需回答的问题。桦木林和冷杉、桦木混交林是川西亚高山林区的原始冷杉林遭砍伐后逐步自然演替所形成的次生林^[1]。自上世纪的采伐以来,森林的抚育工作也伴随着营造林在进行,抚育的主要对象是人工中幼林,具体包括割灌除草、透光伐、卫生抚育等,进而保证林木幼苗能顺利生长郁闭成林,只是人工造林的速度难以跟上大规模采伐的脚步,导致大量采伐迹地上桦木发展壮大,形成如今大面积的天然次生林^[16],而针对该类天然次生林,地方林业部门几乎未采取任何抚育措施。本文以天然次生桦木林和冷杉、桦木混交林为研究对象,研究抚育经营、清林+补植经营以及封育经营对天然桦木林和冷杉、桦木混交林的林地地被物(苔藓和枯落物)和土壤水文效益影响,其结果不仅对深入认识森林经营手段与林地水文的关系、确定岷江上游水源涵养林恢复与重建模式具有重要意义,也能为进一步完善该区域天然次生林经营管理方法和手段奠定数据基础。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省理县米亚罗林区,地理坐标 N31°24'—31°55', E102°35'—103°04'。该区位于青藏高原东缘褶皱带最外缘部分,具有典型的高山峡谷地貌。气候受着高原地形的决定性影响,属冬寒夏凉的高山气

候。以海拔 2760m 的米亚罗镇为例,年降水量 700—1000mm,年蒸发量 1000—1900mm,1 月均温 -8°C ,7 月均温 12.6°C ,年均温 3.0°C , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的年积温为 1200—1400 $^{\circ}\text{C}$ 。

米亚罗林区植被垂直成带明显,其类型和生境随海拔及坡向而分异^[17-18]。原生森林分布于海拔 2400—4200m 之间,以亚高山暗针叶林为主,主要优势树种为岷江冷杉(*Abies faxoniana*)。自上世纪 50 年代开始的大规模砍伐活动后,除部分伐区开展了以云杉为主的造林外,作为阳生树种,云杉在阳坡的表现明显优于阴坡,导致阳坡最终基本被云杉人工林所占据,而阴坡则大多以天然更新为主,采伐迹地演替过程:采伐后 1—10 年为灌丛阶段,以悬钩子为主;10—20 年进入以悬钩子、桦木为主的灌木、阔叶林阶段,针叶树种的天然更新开始出现;20—30 年为以桦木为主的阔叶林阶段,之后进入针阔混交林阶段,并逐步向暗针叶林阶段演替^[19-20]。该区成土母岩主要为千枚岩、板岩、白云岩等的残坡积风化物,极易风化,主要土壤类型为山地棕色森林土。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与群落调查

2014 年 8—9 月选择不同森林类型、不同经营模式的天然次生林为目标,选择试验样地进行群落调查,样地具体情况详见表 1,每一森林类型的每种处理方式均设置 20m×20m 的乔木样方 3 个,每个乔木样方内设置 2m×2m 的灌木样方 3 个,1m×1m 草本样方 3 个,即每个处理乔木样方 3 个,灌木和草本样方各 9 个。并对各类型研究对象进行了群落学调查(详见表 1),具体包括对各样方中的植物种类、数量、高度、盖度等性状进行记录。

此外,还对研究对象进行了水文指标的样品采集,即采集各类型林下苔藓、枯落物以及 0—20cm 和 20—40cm 的原状土壤,并对其进行相应的测量获取以下性状:苔藓蓄积量、苔藓最大持水量、苔藓最大持水率、枯落物蓄积量、枯落物最大持水量、枯落物最大持水率以及 0—20cm 和 20—40cm 土壤的容重、最大持水量、毛管持水量等。

表 1 米亚罗不同恢复阶段天然林样地基本情况

Table 1 Information for sample plots of natural forest in different vegetation restoration stages in Miyaluo

森林类型 Forest type	经营方式 Management regimes	海拔/m Elevation	优势树种 Dominance	林龄/a Age	坡向 Slope direction	坡度/($^{\circ}$) Gradient	郁闭度 Canopy density
桦木林	抚育	3280	红桦	50	NW	25—30	0.75
<i>Betula albo-sinensis</i> forests	清林+补植	3220	红桦	60	N	35—40	0.65
	对照	3200	红桦	60	N	30—35	0.7
桦木、冷杉混交林	抚育	3320	岷江冷杉、红桦	50	NW	40	0.85
Fixed forests with <i>Abies faxoniana</i> and <i>Betula albo-sinensis</i> .	清林+补植	3300	岷江冷杉、红桦	55	N	35	0.75
	对照	3300	岷江冷杉、红桦	55	N	25—30	0.65

抚育:2010 年,割灌除草辅以人工修枝抚育,具体为割除遮压目的树种的灌木以及有目的树种争水、肥的杂草,并将影响树木生长的枝条、死枝、枯枝和病虫害危害较重的枝条切除;清林+补植:2010 年,清除林中的杂灌和杂草,并进行云杉的补植,此外,还对林中的红桦大树进行环割,促进其死亡速率,环割比例,20%;对照:不做任何处理

1.2.2 苔藓、枯落物以及土壤样品的采集

苔藓、枯落物以及土壤样品的采集:在各样地所在林分每个乔木样方随机设置 1m×1m 的样方 3—5 个,分别收集地表的所有苔藓(包括苔藓假根部分)和枯落物(森林植物地上部分的凋落生物量,包括未分解和半分解的部分,但不包括割灌除草等清林作业所导致的植物残体),现场称重后,区分样品装布袋带回;挖 0—40cm 土壤剖面,用环刀分别 0—20cm,20—40cm 取两层原状土壤样本。

1.2.3 参数测定

苔藓、枯落物蓄积量及最大持水量的测定:从样方苔藓和枯落物样品中取两份,分别称重 m_1 和 m_2 (g), m_1 部分装入布袋并在清水中浸泡 24h 后称重 (m_3 , g), m_2 部分在 65°C 下烘干 24h 测定干重 (m_0 , g)。样品中最大

持水率(P)和单位林地面积苔藓/枯落物最大持水量($M, \text{t}/\text{hm}^2$)计算如下^[9]:

$$P = \left[\frac{m_3}{m_1} \times \frac{m_2}{m_0} - 1 \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$M = M_0 \times P = \frac{m_0}{m_2} \times M_1 \times P \quad (2)$$

式中, $M_0(\text{t}/\text{hm}^2)$ 为单位森林面积苔藓/枯落物干重。

土壤容重和持水量的测定:土壤容重和持水量使用环刀法进行一次取样连续测定。将装有原状土的环刀浸泡在水中 12h 后称重 $m_{s1}(\text{g})$,然后放在干砂上 2h,此时环刀中土壤的非毛管水已经流出,称重 $m_{s2}(\text{g})$,继续将其放于干砂上 24h,此时环刀中土壤的水分为毛管悬着水,称重 $m_{s3}(\text{g})$,最后对环刀中的土壤进行再次取样,放于铝盒中烘干,称得烘干土重 $m_{s0}(\text{g})$,土壤容重和土壤持水量的计算如下^[21]:

$$D = \frac{m_{s0}}{V} \quad (3)$$

$$C_{\max} = \frac{m_{s1} - m_{s0}}{V} \quad (4)$$

$$C_{\text{cap}} = \frac{m_{s2} - m_{s0}}{V} \quad (5)$$

$$C_{\min} = \frac{m_{s3} - m_{s0}}{V} \quad (6)$$

式中, $D(\text{g}/\text{cm}^3)$ 为土壤容重; $V(\text{cm}^3)$ 为环刀容积; C_{\max} 、 C_{cap} 、 $C_{\min}(\text{g}/\text{cm}^3)$ 分别为土壤最大持水量、毛管持水量和最小持水量; m_{s0} 、 m_{s1} 、 m_{s2} 、 $m_{s3}(\text{g})$ 分别为环刀内土壤干重、浸泡 12h 后的饱和重量、失去非毛管水后的重量和仅持有毛管悬着水的重量;换算后将各层累计可求出单位林地面积 0—40cm 土壤最大持水量(t/hm^2)。

1.2.4 数据处理

对各林型下不同经营方式下的林下地被物相关性状进行方差分析,对林下土壤相关性状进行 F 值检验和方差分析进而确定不同经营模式间的差异。所有数据处理和制图均通过 SPSS13.0 和 Excel2010 完成。

2 研究结果

2.1 不同经营模式对次生林优势种生长情况的影响

经营活动完成四年后,两种次生林优势树种的具体情况详见表 2。在经营活动后,两种次生林的优势种及其密度与经营前比较均无变化,与对照相比,两种次生林优势树种的胸径以及高度的增长速度均有不同程度的增加,但均未达到显著程度($F=4.038$, $P=0.078$)。

表 2 经营活动后不同类型次生林优势种情况

Table 2 Information of dominant species in sample plots of secondary forest after management regimes in Miyaluo

森林类型 Forest type	经营方式 Management regimes	海拔/m Elevation	优势树种 Dominance	密度 /(株/ hm^2) Density	胸径/cm DBH	高度/cm Height	胸高断 面积/ cm^2 Basal area
桦木林	抚育	3280	红桦	908	13.81	16.97	149.79
<i>Betula albo-sinensis</i> .	清林+补植	3220	红桦	863	14.42	17.39	163.31
forests	对照	3200	红桦	875	13.53	16.83	143.78
桦木、冷杉混交林	抚育	3320	岷江冷杉、红桦	1075	12.16	17.05	116.13
Fixed forests with <i>Abies faxoniana</i>	清林+补植	3300	岷江冷杉、红桦	1067	12.12	17.13	115.37
and <i>Betula albo-sinensis</i>	对照	3300	岷江冷杉、红桦	983	12.10	16.85	114.99

2.2 林地苔藓最大持水率、蓄积量和最大持水量

由图 1 可见,不同经营方式下林地苔藓的最大持水率、蓄积量均有所变化,抚育经营的天然次生林林地最大持水率显著高于对照组和清林+补植经营组,而后两者间无显著差异。桦木林林地苔藓的最大持水率 600%—1200%,混交林林地则为 600%—1400%,较前者大些;混交林林地苔藓的蓄积量在不同经营方式间无显著差异,而抚育经营下的桦木林林地蓄积量显著低于对照组,与清林、补植组无显著差异,清林、补植经营下的桦木林与对照间亦无显著差异。桦木林的苔藓蓄积量 1.30—2.00t/hm²,针阔混交林的为 1.50—2.75t/hm²,较前者大,但无显著差异。

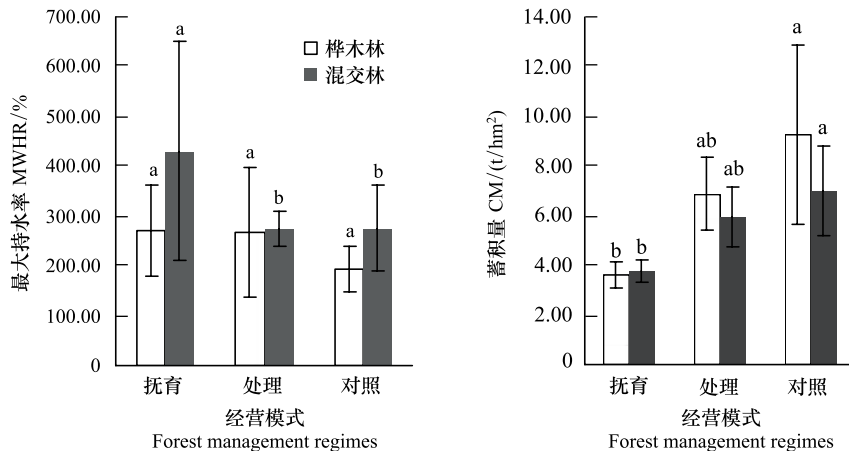


图 1 不同经营方式下天然次生林苔藓的最大持水率和蓄积量

Fig.1 The maximal water holding rate (MWHR), cumulated mass (CM) of moss from different forest management regimes

如表 3 所示,桦木林林地苔藓的最大持水量 9.30—19.20t/hm²之间,而混交林则介于 10.50—18.00t/hm²之间,两者差异不大。不同经营方式下的桦木林林地苔藓最大持水量有所差异,即清林、补植组显著小于对照组,而与抚育经营间无显著差异,而抚育经营与对照间亦无显著差异。

表 3 不同经营方式下天然次生林苔藓最大持水量 (t/hm²)

Table 3 The maximal water holding capacity (MWHC) of moss from different forest management regimes (t/hm²)

经营方式 Management regimes	桦木林 <i>Betula</i> spp. forests	桦木、冷杉混交林 Fixed forests with <i>Abies faxoniana</i> and <i>Betula</i> spp.
抚育 Clearing and pruning	12.20±2.73ab	17.98±3.11a
清林+补植 Clearing and replantation	9.31±4.05b	12.37±2.88a
对照 No disturbance	19.11±3.67a	10.75±4.47a

不同的小写字母表示同一列数据间差异显著: $P < 0.05$

2.3 枯枝落叶最大持水率、蓄积量和最大持水量

桦木林林地枯落物的最大持水率介于 190%—275%之间,而桦木、冷杉混交林则介于 270%—435%,大于前者,但不显著;桦木林枯落物的蓄积量介于 3.60—9.30t/hm²之间,而桦木、冷杉混交林则介于 3.75—7.00t/hm²之间,略小于前者。由图 2 可见,不同经营方式下林地枯落物的最大持水率、蓄积量均有所变化。桦木林枯落物的最大持水率在不同处理间无显著差异,而抚育经营下的桦木、冷杉混交林林地枯落物最大持水率显著大于清林、补植经营组和对照组,但后两者间无显著差异;两种林型的枯落物蓄积量均表现为,抚育经营显著低于对照,而与清林、补植经营间无显著差异,后两者间亦无显著差异。

如表 4 所示,桦木林林地枯落物的最大持水量 9.00—18.50t/hm²之间,而桦木、冷杉混交林则介于 15.40—20.00t/hm²之间,高于前者,但不显著。不同经营方式下的两种林型林地枯落物最大持水量均无显著差异。

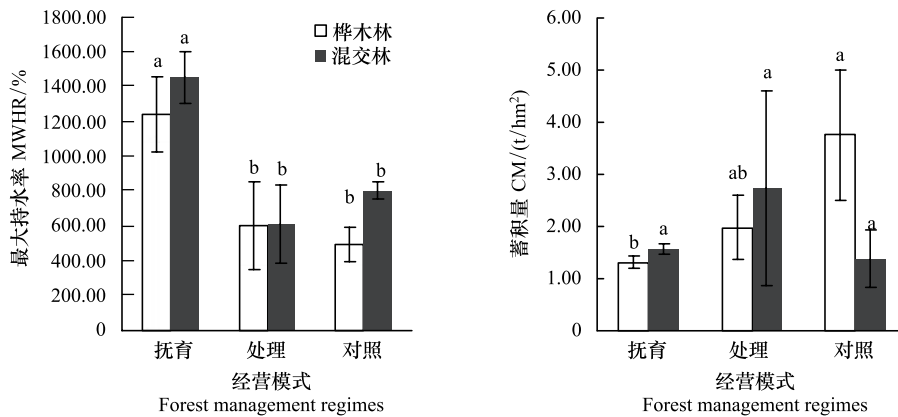


图 2 不同经营方式下天然次生林枯落物的最大持水率和蓄积量

Fig.2 The maximal water holding rate (MWHR), cumulated mass (CM) of litters from different forest management regimes

表 4 不同经营方式下天然次生林枯落物最大持水量 (t/hm²)

Table 4 The maximal water holding capacity (MWHC) of litters from different forest management regimes (t/hm²)

经营方式 Management regimes	桦木林 <i>Betula</i> spp. forests	桦木、冷杉混交林 Fixed forests with <i>Abies faxoniana</i> and <i>Betula</i> spp.
抚育 Clearing and pruning	9.07±2.19a	15.60±0.51a
清林+补植 Clearing and replantation	14.72±1.76a	15.43±3.37a
对照 No disturbance	18.54±5.24a	19.58±5.52a

2.4 土壤容重和持水量

如表 5 所示,桦木林的土壤容重和土壤最大持水量在不同土壤层次间以及不同经营模式间均存在一定的差异,而桦木、冷杉混交林则仅土壤容重存在显著差异。就土壤层次而言,随着土壤深度增加,土壤的容重增加,而最大持水量降低。

表 5 天然次生林林下土壤容重和持水量的双因素分析 (F 值)

Table 5 The ANOVA (F value) of Soil bulk density and water holding capacity of natural secondary forest

因素 Factors	桦木林 <i>Betula</i> spp. forests				桦木、冷杉混交林 Fixed forests with <i>Abies faxoniana</i> and <i>Betula</i> spp.			
	土壤容重/ (g/cm³)	毛管 持水量/ (g/cm³)	土壤最小 持水量/ (g/cm³)	土壤最大 持水量/ (g/cm³)	土壤容重/ (g/cm³)	毛管 持水量/ (g/cm³)	土壤最小 持水量/ (g/cm³)	土壤最大 持水量/ (g/cm³)
土壤层次 Soil depth	4.805 *	1.071	0.146	0.593	5.403 *	0.687	0.158	1.068
经营模式 Management regimes	10.715 **	1.051	1.093	4.499 *	5.148 *	2.085	2.406	2.779
交互作用 Interaction	0.049	0.259	0.371	0.751	0.431	0.784	1.026	0.615

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

如表 6 所示,与对照相比,两种经营模式的林下土壤容重均显著降低,就程度而言,抚育经营方式林下土壤容重降低更多,而土壤最大持水量也呈现相应的增加趋势;针对桦木、冷杉混交林而言,虽然两种经营模式的林下土壤容重均显著的降低,土壤的持水量也呈现上升的趋势,但趋势不显著。

3 讨论

经过四年的经营后,虽然两种次生林的优势树种的生长速度与对照间无显著差异,但林地水文效应则有所差异。苔藓的最大持水率是其持水能力的体现。本研究中,无干扰的桦木林苔藓最大持水率为 495%,冷

杉、桦木混交林为 805%, 显著高于前者 ($F=3.922, P=0.038$), 与前人研究结果相近^[22-23]。抚育经营下的两种林型的苔藓最大持水率均显著大于其他经营方式, 而清林+补植经营下的苔藓最大持水率与对照间无显著差异。前人研究表明, 林下苔藓主要包括三种类型, 即石生苔藓、木生苔藓和土生苔藓, 且饱和持水能力逐次降低; 相比之下, 抚育经营所独有的修枝抚育产生了更多的木质凋落物, 而这些又是木生苔藓的主要生存基质, 这导致木生苔藓种类增加, 且木生苔藓较土壤苔藓的饱和持水能力更强, 这可能是抚育经营下苔藓最大持水率更高的主要原因^[24-25]; 与此同时, 无干扰的桦木林苔藓蓄积量为 $3.75\text{t}/\text{hm}^2$, 冷杉、桦木混交林为 $1.38\text{t}/\text{hm}^2$, 比张远东等^[22]对岷江上游同种类型森林的相关研究结果较高, 这可能与林龄、林分结构的差异有关, 即本文研究的桦木林为 50—60 林龄, 比前人对不足 50 年该林型的蓄积量相比, 有所差异^[22]。经营方式对桦木林苔藓的蓄积量也产生了一定的影响, 与对照相比, 两种经营方式的苔藓蓄积量均有所降低, 其中抚育经营达到显著水平, 而清林+补植经营则不显著(见图 1)。两种经营中均存在的清林经营在一定程度上增加了林下的透光率, 研究表明, 光照会增加林下苔藓的多样性^[26], 以木生型苔藓居多, 同等盖度下, 该类型蓄积量小于土生型苔藓^[24-25]。最终, 导致清林+补植经营下桦木林的苔藓最大持水量显著低于对照组, 而抚育经营降低不显著, 混交林的变化不显著。

表 6 不同经营模式下天然次生林林地土壤容重和持水量方差分析

Table 6 The ANOVA of Soil bulk density and water holding capacity of natural secondary forests from different forest management regimes

森林类型 Forest type	经营模式 Management regimes	土壤容重 Bulk density/ (g/cm^3)	毛管持水量 CWHC/ (g/cm^3)	土壤最小持水量 LWHC/ (g/cm^3)	土壤最大持水量 MWHC/ (g/cm^3)
桦木林 <i>Betula</i> spp. forests	抚育	$0.76\pm 0.16\text{c}$	$0.65\pm 0.06\text{a}$	$0.62\pm 0.07\text{a}$	$0.71\pm 0.05\text{a}$
	清林+补植	$1.02\pm 0.26\text{b}$	$0.62\pm 0.09\text{a}$	$0.59\pm 0.10\text{a}$	$0.67\pm 0.07\text{ab}$
	对照	$1.18\pm 0.18\text{a}$	$0.59\pm 0.09\text{a}$	$0.56\pm 0.11\text{a}$	$0.60\pm 0.11\text{b}$
桦木、冷杉混交林 Fixed forests with <i>Abies faxoniana</i> and <i>Betula</i> spp.	抚育	$0.91\pm 0.19\text{b}$	$0.68\pm 0.08\text{a}$	$0.69\pm 0.08\text{a}$	$0.78\pm 0.08\text{a}$
	清林+补植 对照	$0.99\pm 0.29\text{b}$ $1.19\pm 0.14\text{a}$	$0.72\pm 0.13\text{a}$ $0.67\pm 0.10\text{a}$	$0.69\pm 0.13\text{a}$ $0.65\pm 0.10\text{a}$	$0.77\pm 0.13\text{a}$ $0.70\pm 0.10\text{a}$

CWHC: 毛管持水量 capillary water holding capacity; LWHC: 土壤最小持水量 least water holding capacity; MWHC: 土壤最大持水量 maximal water holding capacity; 同一列中不同的小写字母代表: $P<0.05$

作为地被物的重要组成部分, 枯落物对于森林林地水源涵养能力的贡献不可小视。本研究中, 无干扰的桦木林枯落物最大持水率为 194%, 冷杉、桦木混交林为 275%, 较桦木林更高, 这与前人相关研究结果一致^[22]。两种经营方式基本上促进了退化天然林的枯落物最大持水率, 但桦木林的差异不显著, 而桦木、冷杉混交林在抚育经营下的林地枯落物最大持水率显著高于对照组和清林+补植组, 而后两者间无显著差异(见图 2), 这可能是由于抚育经营(清林、修枝)改善了林下透光和通风情况, 加速了枯落物分解速率, 进而使其持水能力增加^[27]; 此外, 未受干扰的桦木林蓄积量为 $9.26\text{t}/\text{hm}^2$, 桦木、冷杉混交林为 $7.01\text{t}/\text{hm}^2$, 即桦木林较混交林更大些, 这与前人研究结果一致^[9, 22]。而两种经营模式均使得枯落物的蓄积量有所降低, 其中抚育经营的效果显著, 而清林+补植经营不显著。这可能是因为经营措施的清林作业在一定程度上影响了林地活生物量, 进而影响了枯落物的蓄积量。而在清林+补植组, 虽然进行了桦木大树的环割作业, 但效果不佳, 桦木极少因此死亡, 故影响不大。进而导致两种经营方式下林地最大持水量变化不显著。

土壤容重不但可以反映土壤的物理性质, 也是土壤紧实度、质量的一个重要指标, 反映了土壤透水性、通气性, 与土壤孔隙度和渗透率密切相关^[28]。天然次生林的土壤容重随着土壤深度的增加而增加, 而土壤最大持水量则降低, 这与前人的研究结果相同^[9, 22]。不同的经营模式下, 土壤容重和持水量也存在一定的差异。整体来说, 与清林+补植经营相比, 抚育经营在更大程度上促进了土壤容重的降低, 进而土壤最大持水量的增加, 这可能与不同人工处理带来的人为践踏强度有关。

综上所述, 从四年来的短期效应来看, 抚育经营对于两种退化天然林的影响较清林+补植经营方式更为明显, 如抚育经营的地被层最大持水率和蓄积量显著高于对照组, 而清林+补植经营则无显著变化(图 1、2)。

虽然两种经营方式均导致了土壤容重的降低,但相比之下,抚育经营的降低程度更大,进而土壤最大持水量上升更显著(表5);与此同时,不同类型退化天然林对于抚育经营的反应也有所差异。桦木林的苔藓水文效应的变化显著高于混交林(图1),且土壤容重降低、土壤最大持水量增加均较混交林更显著(表5),而混交林枯落物水文效应的变化显著高于桦木林(图2);可见,相比之下,抚育经营更显著的影响了退化天然林的林地水文效应,尤其是桦木林所受影响较混交林更显著,这可能与其演替等级较低^[19-20],系统的自我调节能力相对较差有关。两种经营方式均对退化天然林的林地持水能力具有促进作用,抚育经营较清林+补植更显著,但这仅是短期的结果,两种经营方式对于退化天然林水文以及其他生态功能恢复的长期影响还有待于进一步的观测研究。

参考文献(References):

- [1] 杨玉坡,李承彪. 四川森林. 北京:中国林业出版社,1992.
- [2] 周德彰,杨玉坡. 四川西部高山林区桦木更新特性的初步研究. 林业科学,1980,(2):154-156.
- [3] 潘紫重,杨文化,曲银鹏. 不同林分类型凋落物的蓄水功能. 东北林业大学学报,2002,30(5):19-21.
- [4] 张远东,刘世荣,罗传文,张国斌,马姜明. 川西亚高山林区不同土地利用与土地覆盖的地被物及土壤持水特征. 生态学报,2009,29(2):627-635.
- [5] 田野宏,满秀玲,李奕,盛后财,段亮亮. 大兴安岭北部天然次生林枯落物及土壤水文功能研究. 水土保持学报,2013,27(6):113-118,129.
- [6] 王波,张洪江,杜士才,李根平,古德洪,韩西远. 三峡库区天然次生林凋落物森林水文效应研究. 水土保持通报,2009,29(3):83-87.
- [7] 王小明,王刚,周本智,钟绍柱,孔维健,徐升华. 中亚热带天然次生常绿阔叶林水文生态效应研究. 水土保持通报,2011,31(1):11-15.
- [8] 张远东,刘世荣,顾峰雪. 西南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响. 生态学报,2011,31(24):7601-7608.
- [9] 张远东,刘世荣,马姜明,史作民,刘兴良. 川西亚高山桦木林的林地水文效应. 生态学报,2005,25(11):2939-2946.
- [10] 陶建平,王永建,李宗峰,张炜银,臧润国. 岷江上游大沟流域不同恢复阶段植被枯落物的水源涵养效应 // 自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(1). 重庆:中国科协,2009.
- [13] Buttle J M, Creed I F, Pomeroy J W. Advances in Canadian forest hydrology, 1995-1998. Hydrological Processes, 2000, 14(9): 1551-1578.
- [14] Hornbeck J W, Swank W T. Watershed ecosystem analysis as a basis for multiple-use management of eastern forests. Ecological Applications, 1992, 2(3): 238-247.
- [15] 孙向阳,王根绪,吴勇,柳林安,刘光生. 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应. 生态学报,2013,33(2):501-508.
- [16] 张远东,赵常明,刘世荣. 川西米亚罗林区森林恢复的影响因子分析. 林业科学,2005,41(4):189-193.
- [17] 蒋有绪. 川西亚高山暗针叶林的群落特点及其分类原则. 植物生态学与地植物学丛刊,1963,1(1/2):42-50.
- [18] 蒋有绪. 川西米亚罗、马尔康高山林区生境类型的初步研究. 林业科学,1963,8(4):321-335.
- [19] 史立新,王金夕,宿以明,侯广维. 川西米亚罗地区暗针叶林采伐迹地早期植被演替过程的研究. 植物生态学与地植物学学报,1988,12(4):306-313.
- [20] 缪宁,周珠丽,史作民,冯秋红. 岷江冷杉林皆伐后次生群落结构和物种多样性的演替动态. 生态学报,2014,34(13):3661-3671.
- [21] 张万儒,许本彤. 森林土壤定位研究方法. 北京:中国林业出版社,1986:30-36.
- [22] 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. 自然资源学报,2004,19(6):761-768.
- [23] 徐振峰,胡庭兴,张远彬,王开运,张力,鲜骏仁. 川西亚高山几种天然林下苔藓层的持水特性. 长江流域资源与环境,2008,17(Z1):112-116.
- [24] 张朝晖,王智慧. 贵州云台山喀斯特森林生态系统苔藓植物群落蓄水量研究. 贵州师范大学学报:自然科学版,2010,28(4):83-87.
- [25] 闫晓丽,包维楷. 亚高山次生桦木林地表苔藓组成与多样性. 生物多样性,2011,19(3):327-334.
- [26] Rambo T R, Muir P S. Forest floor bryophytes of *Pseudotsuga menziesii*-*Tsuga heterophylla* stands in Oregon: influences of substrate and overstory. The Bryologist, 1998, 101(1): 116-130.
- [27] 饶良懿,朱金兆,毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应. 北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.
- [28] 魏强,张秋良,代海燕,郭鑫. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报,2008,22(2):111-115.