

川西亚高山桦木林的林地水文效应

张远东¹, 刘世荣^{1*}, 马姜明¹, 史作民¹, 刘兴良²

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 2. 四川省林业科学研究院, 成都 610081)

摘要: 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, 原生的亚高山暗针叶林在经历大规模采伐利用后, 天然更新的次生桦木林已成为该区域的主要森林类型之一。前人对原始暗针叶林水文学的研究已相当丰富, 内容涉及冠层截留、地被物持水特征、森林蒸发散、土壤入渗、根土作用层等诸多方面; 而对于采伐后人工林和天然次生林的研究较少, 仅有的结论也以人工林为主。通过对林地苔藓、枯落物和土壤的野外调查与室内实验, 分析了川西亚高山次生桦木林在不同林龄和海拔梯度间的林地水文效应, 这对于丰富亚高山森林水文学的研究、确定长江上游水源涵养林的恢复与重建模式, 都具有重要的意义。研究表明: 桦木林苔藓蓄积量及最大持水量在不同林龄间差异显著, 随林龄增大而显著增加; 而在不同海拔间差异不显著。枯落物蓄积量及最大持水量在不同林龄及海拔间均差异显著, 随林龄的增大而增加; 在林龄相同的条件下, 在中海拔(3200m、3400m)较高, 在较高(3600m)、较低(3000m)海拔偏低。苔藓最大持水率平均为 945%, 在林龄和海拔间差异不显著; 枯落物最大持水率平均 573%, 在林龄和海拔间均差异显著。各林龄和海拔梯度上的桦木林, 随土壤深度的增加土壤容重均显著增大, 最大持水量显著下降, 但毛管持水量和最小持水量仅在部分类型下降显著。土壤 0~40cm 最大持水量在不同林龄间差异不显著, 而在不同海拔间差异显著; 这种差异主要表现在林龄 10~25a 的林分, 随海拔升高土壤 0~40cm 最大持水量增大。在大规模采伐后, 苔藓层的恢复是一个长期过程, 可以作为次生林地水文效应向原始暗针叶林恢复程度的一个指标。

关键词: 桦木林; 苔藓; 枯落物; 土壤; 最大持水量

文章编号: 1000-0933(2005)11-2939-08 中图分类号: S715.3 文献标识码: A

Woodland hydrological effects of birch forests in sub-alpine region of western Sichuan, China

ZHANG Yuan-Dong¹, LIU Shi-Rong^{1*}, MA Jiang-Ming¹, SHI Zuo-Min¹, LIU Xing-Liang² (1. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2939~2946

Abstract Rainfall interception of moss and litters, along with soil water-storage capacity, has important effect on hydrological process in sub-alpine forest in western Sichuan, China. The physical characteristics of water for moss, litters and soil have been studied extensively in primary coniferous forests; however, very few were reported for natural secondary birch forests, which become dominant after overexploitation of coniferous forests from 1950s to 1980s. We measured the cumulated mass (CM, t/hm²) of moss and litters, along with their maximal water holding capacity (MWHC, t/hm²) and maximal water holding rate (MWHR, %), in birch stands with different stand ages at different elevations. The physical characteristics of water in the soil included soil bulk density, MWHC, capillary water holding capacity (CWHC) and least water holding capacity (LWHC). They were also measured by soaking and discharging experiments with samples of soil from different soil depths in

基金项目: 国家基础研究重点规划资助项目(2002CB111504); 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(30125036); 国家“十五”科技攻关资助项目(2001BA510B06); 国家林业局 948 资助项目(2004-4-66); 第 35 批中国博士后科学基金资助项目(20040350374)

收稿日期: 2004-12-18; **修订日期:** 2005-05-26

作者简介: 张远东(1973~), 男, 新疆霍城人, 博士, 副研究员, 主要从事森林生态系统经营管理和景观生态学研究 E-mail: zyd@forestry.ac.cn

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: liusr@forestry.ac.cn

Foundation item: National Key Project for Basic Research (No. 2002CB111504); National Key Project for the Tenth Five Year Plan (No. 2002CB111504); SFA 948 Program (No. 2004-4-66); China Postdoctoral Science Foundation (No. 20040350374)

Received date: 2004-12-18; **Accepted date:** 2005-05-26

Biography: ZHANG Yuan-Dong, Associate professor, mainly engaged in forest ecosystem management and landscape ecology. E-mail: zyd@forestry.ac.cn

all studied stands. The result showed that CM and MWHC increased significantly with increasing stand age. For stands from different elevations, however, the CM and MWHC displayed differently for litters and insignificantly for moss. In the stands with same age, CM and MWHC of litters were higher at middle elevations (3200m & 3400m) than that at a higher (3600m) and lower (3000) elevations. The mean MWHC of moss was 945% and there was no significant difference among stands with different ages and located at different elevations. The mean MWHC of litters was 573%, but significant difference were found among stands with different ages and located at different elevations. Soil bulk density increased and MWHC decreased significantly with the increasing soil depth in all stands, but capillary water holding capacity (CWHC) and least water holding capacity (LWHC) decreased significantly only in some of stands. The MWHC in 0~40cm of soil was not significantly different among stands with different ages, however, significant difference was found among the stands located at different elevations. The difference appeared mainly among the stands from 10 to 25 years of age - they increased with increasing elevation in the 0~40cm of soil. The moss needs a long period to restore after large scale logging. During this process, the CM and MWHC can serve as an index to reflect the restoration degree towards primary coniferous forests.

Key words: birch forest; moss; litters; soil; maximal water holding capacity

地处青藏高原东南缘的川西亚高山林区,地形复杂,新构造运动活跃,岩体松散,地震频繁,是一个生态环境非常脆弱的地区。亚高山暗针叶林是该区原有的主要森林类型,这些森林集中分布于金沙江、雅砻江、岷江、大渡河流域,是我国西南亚高山林区水源涵养林的重要组成部分。随着20世纪50~80年代川西亚高山森林的大规模开发利用,以冷杉为主要优势树种的原始暗针叶林被大面积采伐,随后进行了以云杉为主要树种的人工更新^[1];同时,桦木等阔叶先锋树种的天然更新也普遍而大量的发生,形成大面积的天然次生林^[2]。目前,次生桦木林已成为川西亚高山林区的主要森林类型之一。

对于川西亚高山森林水文学的研究,原始暗针叶林一直是重点,内容涉及冠层截留、地被物持水特征、森林蒸发散、土壤入渗、根土作用层等诸多方面^[3-12]。已有结果表明:川西亚高山森林在调节水分、涵养水源方面作用巨大,增加年径流量、减缓洪峰、减少水分无效蒸发等效能显著,这是由于它具有浓密的林冠层,较厚的苔藓、枯枝落叶层和蓄水性能良好的森林土壤^[13,14];森林采伐虽尚不足以引起普遍的严重的土壤冲刷^[15],但是已经使林地苔藓层衰退,枯落物与有机质加速分解,表土层变薄、变干,蓄水效能降低^[16],径流量和枯水流量下降^[13]。

对于暗针叶林采伐后人工林和天然次生林的水文效应,已有研究相对较少,仅有的结论也以人工林为主,包括人为干扰引起川西亚高山人工林土壤持水性能下降^[17];人工云杉林地水文效应的增强快于自然恢复过程,主要表现在人工云杉林苔藓与枯落物蓄积量及最大持水量的增加快于自然恢复过程等^[18]。本文既以川西亚高山桦木林为研究对象,分析其不同林龄和海海拔梯度上林地水文效应变化,这对深入认识森林与水的关系、确定长江上游水源涵养林恢复与重建模式,都具有重要意义。

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N 31°24'~31°35', E 102°35'~103°4'。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,全年降水量700~1000mm,年蒸发量1000~1900mm,1月均温-8,7月均温12.6,10月的年积温为1200~1400。

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^[19,20]。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*)。1950~1978年间进行过大规模采伐,之后采伐量逐年减少,至1998年停采封育。伐区主要位于2800~3600m之间,迹地初期多形成悬钩子(*Rubus* spp.)或箭竹(*Sinarundinaria nitida*)灌丛。1955年以后,迹地上陆续开展了以粗枝云杉(*Picea asperata*)为主的人工更新。同时,以桦木为主的次生阔叶树种的天然更新也普遍而大量的发生,形成大面积的次生阔叶林。这类林分具有同龄单层的特征,以红桦(*Betula albo-sinensis*)、糙皮桦(*B. utilis*)为优势树种,并混生有槭树(*Acer* spp)、椴树(*Tilia chinensis*),以及许多较高的灌木,如野樱桃(*Prunus* spp.)、花楸(*Sorbus* spp.)等;原生针叶树种的更新均处于更新层、演替层,或是刚开始发生。次生桦木林主要分布在阴坡、半阴坡,采伐前是亚高山原始冷杉林的集中分布区。

2 研究方法

2.1 样地选设

在复杂的高山峡谷地形条件下,为便于采伐运输,川西亚高山林区实行沿沟槽采伐,并设有林线保留带。分别选择20世

纪 50、60、70、80 年代采伐的沟槽, 沿阴坡在海拔 3000、3200、3400 和 3600m 附近选择坡度相近的桦木林, 设置 $20 \times 20 \text{m}^2$ 样地进行群落调查; 并在林线保留带 3800m 附近选择同样坡度的原始林, 设置 $30 \times 40 \text{m}^2$ 样地调查。

20 世纪 50、60 年代多沿主沟采伐, 以便水运木材。主沟起使海拔低, 可选择 3000、3200、3400、3600m 和 3800m 五个梯度。20 世纪 70、80 年代主沟采伐完毕, 伐区向支沟、尾沟推移, 起使海拔升高。20 世纪 70 年代采伐坡面选择 3200、3400、3600m 和 3800m 四个梯度; 80 年代仅能选择 3400、3600m 和 3800m 三个梯度。各年代伐区均选择 3 个沟槽进行调查, 以使同一林龄和海拔的林分至少有 3 个重复。

表 1 米亚罗桦木林各类型及原始林的基本情况

Table 1 Outline of *Betula* spp forests and primitive forest in Mialuo, west Sichuan

采伐时间 Cutting time	海拔(m) Elevation	优势树种 Dominance species	林龄(a) Age	坡向 Slope direction	坡度(°) Gradient	平均树高(m) Tree mean height	郁闭度 Canopy density
1980's	3350~ 3450	<i>B. albo-sinensis</i>	12~ 16	N, NW	25~ 40	4~ 5	0.8~ 0.9
1980's	3550~ 3650	<i>B. utilis</i>	12~ 16	N, NW	25~ 40	4~ 5	0.7~ 0.8
1970's	3150~ 3250	<i>B. albo-sinensis</i>	21~ 25	N, NW	25~ 40	8~ 10	0.8~ 0.9
1970's	3350~ 3450	<i>B. albo-sinensis</i>	21~ 25	N, NW	25~ 40	7~ 9	0.8~ 0.9
1970's	3550~ 3650	<i>B. albo-sinensis</i> <i>B. utilis</i>	21~ 25	NE, N, NW	25~ 40	6~ 8	0.7~ 0.8
1960's	2950~ 3050	<i>B. albo-sinensis</i> <i>A. laxiflorum</i>	32~ 36	NE, N	25~ 40	12~ 14	0.7~ 0.8
1960's	3150~ 3250	<i>B. albo-sinensis</i> <i>A. laxiflorum</i>	32~ 36	NE, N	25~ 40	13~ 16	0.8~ 0.9
1960's	3350~ 3450	<i>B. albo-sinensis</i> <i>B. utilis</i>	32~ 36	NE, N, NW	25~ 40	13~ 16	0.8~ 0.9
1960's	3550~ 3650	<i>B. utilis</i>	32~ 36	NE, N, NW	25~ 40	13~ 14	0.7~ 0.9
1950's	2950~ 3050	<i>B. albo-sinensis</i> <i>A. spp</i>	42~ 47	NE, N, NW	25~ 40	15~ 20	0.6~ 0.8
1950's	3150~ 3250	<i>B. albo-sinensis</i> <i>B. utilis</i> <i>A. laxiflorum</i>	42~ 47	NE, N, NW	25~ 40	18~ 20	0.6~ 0.9
1950's	3350~ 3450	<i>B. albo-sinensis</i> <i>B. utilis</i>	42~ 47	NE, N, NW	25~ 40	15~ 20	0.7~ 0.9
1950's	3550~ 3650	<i>B. albo-sinensis</i> <i>B. utilis</i>	42~ 47	NE, N, NW	25~ 40	15~ 18	0.7~ 0.9
未采伐 No cutting	3750~ 3850	<i>A. bisfaxoniana</i>	160~ 200	NE, N, NW	25~ 40	18~ 22	0.5~ 0.8

2.2 苔藓、枯落物及土壤样本的采集

在各样地所在林分上部、下部各设 2 个、中部设 1 个 $1 \times 1 \text{m}^2$ 的样方, 分别收集地表苔藓和枯落物, 现场称量并换算成单位林地面积鲜重 ($M_1, \text{t}/\text{hm}^2$), 同时用密封袋取样带回。考虑到该区域林木根系集中分布于 0~ 40cm 土层, 在各林分相同位置各挖一个土壤剖面, 用环刀分别 0~ 20、10~ 20、20~ 30、30~ 40cm 取 4 层原状土壤样本。

2.3 苔藓、枯落物蓄积量及最大持水量测定

从各样方苔藓及枯落物样品中取出一部分称重 (m_1, g), 装入布袋后在清水中浸泡 24h 称重 (m_2, g); 同时另取一部分 (m_3, g) 在 65 °C 条件下烘干 24h 测定干重 (m_0, g), 计算样品最大持水率 (P) 和单位林地面积苔藓 (枯落物) 最大持水量 ($M, \text{t}/\text{hm}^2$)。计算公式如下:

$$P = \left[\frac{m_2}{m_1} \times \frac{m_3}{m_0} - 1 \right] \times 100\%; M = M_0 \times P = \frac{m_0}{m_3} \times M_1 \times P$$

式中, $M_0 (\text{t}/\text{hm}^2)$ 表示单位林地面积苔藓 (枯落物) 干重。

2.4 土壤容重和持水量测定

土壤容重和持水量使用环刀法一次取样连续测定, 将装有原状土壤的环刀在水中浸泡 12h 称重 (m_{s1}, g), 计算最大持水量 ($C_{\text{min}}, \text{g}/\text{cm}^3$); 然后放于干砂上 2h, 此时环刀中土壤的非毛管水已全部流出, 称重 (m_{s2}, g) 计算毛管持水量 ($C_{\text{cap}}, \text{g}/\text{cm}^3$); 再将其

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} , g) 计算最小持水量 (C_{min} , g/cm^3); 最后对环刀中土壤再次取样, 放入铝盒中烘干, 将环刀中的湿土质量转换成烘干土质量 (m_{s0} , g)。该方法详见《森林土壤定位研究方法》^[21]。容重与持水量的计算公式如下:

$$D = \frac{m_{s0}}{V}; C_{max} = \frac{m_{s1} - m_{s0}}{V}; C_{cap} = \frac{m_{s2} - m_{s0}}{V}; C_{min} = \frac{m_{s3} - m_{s0}}{V}$$

式中, m_{s0} , m_{s1} , m_{s2} , m_{s3} (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; D (g/cm^3) 为土壤容重; V (cm^3) 为环刀容积; C_{max} , C_{cap} , C_{min} (g/cm^3) 分别为土壤最大持水量、毛管持水量和最小持水量。单位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)。

3 结果分析

3.1 林地苔藓蓄积量和最大持水量

从图 1 可以看出, 随着林龄的增加, 柞木林苔藓蓄积量及最大持水量显著增加 (表 2), 但林龄 42~47a 的林分还未及原始林的一半。这表明苔藓层虽处于不断的恢复之中, 但其完全恢复仍需一个漫长的过程。林龄相同的林分, 苔藓蓄积量及最大持水量在不同海拔间的差异并不显著。林地苔藓的最大持水率在 695%~1250% 之间 (图 2), 平均 945%, 在不同海拔及林龄间差异不显著 (表 2), 这说明苔藓的恢复只是蓄积量的问题, 其水物理性质并没有显著变化。

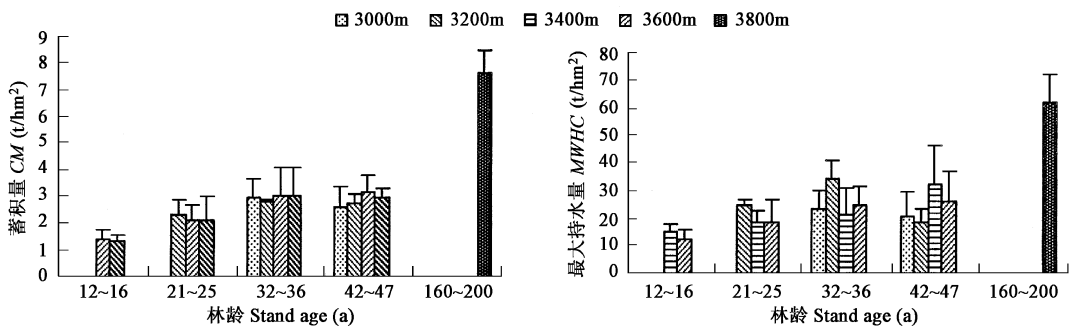


图 1 林地苔藓蓄积量及最大持水量

Fig. 1 The cumulated mass (CM) and the maximal water holding capacity (MWHC) of moss

3.2 枯落物蓄积量与最大持水量

从图 3 可以看出, 不同林龄间枯落物蓄积量及最大持水量差异显著, 随林龄增加而显著增大 (表 2), 经过近 50a 的恢复, 其枯落物蓄积量及最大持水量已接近 3800m 处的原始林水平。在恢复时间相同的条件下, 不同海拔的枯落物蓄积量及其最大持水量也差异显著, 较高海拔 (3600m) 和较低海拔 (3000m) 处蓄积量较低, 中海拔 (3200, 3400m) 蓄积量较高, 最大持水量也具有相同的趋势。这可能是由于在低海拔处热量条件好, 枯落物分解与循环较快; 而海拔过高, 则又导致林分生长缓慢, 年凋落物量下降, 从而出现了枯落物蓄积量在中海拔 (3200~3400m) 较高的现象。从表 1 中可以看出, 林龄相同的次生林分, 在海拔高处平均树高均有所下降, 这也表明热量的减少引起了林分生长的降低。

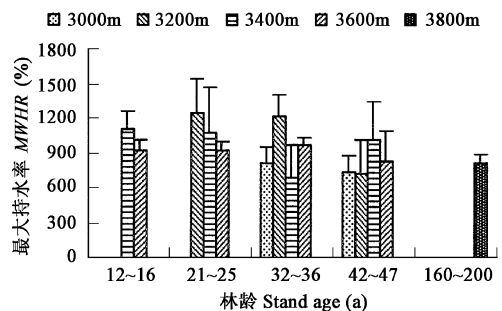


图 2 林地苔藓最大持水率

Fig. 2 The maximal water holding rate (MWHR) of moss

林地枯落物的最大持水率在 354%~857% 之间, 平均 573%, 远比苔藓的最大持水率要低。其在不同林龄及海拔间均差异显著, 但和恢复时间不呈线性关系, 并不随林龄增加而增大或减少; 林龄相同的林分, 最大持水率多随海拔的升高而增大 (图 4)。这表明在恢复过程中, 枯落物水分性质变异性较大, 并和热量条件有关, 海拔 3800m 的原始林枯落物以针叶为主, 最大持水率为 511%, 低于次生林平均水平。

3.3 土壤容重和持水量

从表 3 可以看出, 不同林龄和海拔的柞木林随土壤深度的增加, 土壤容重均显著增大, 最大持水量显著下降, 但毛管持水量和最小持水量仅在部分类型显著下降。这与高山峡谷区土层浅薄, 土壤有机质, 土壤动物形成的孔隙, 植物根系, 死亡根系形成的根孔都随深度而降低有关。这种降低应当主要表现在容纳重力水的土壤大孔隙上, 而毛管孔隙则仅在部分类型受到影响。柞

木林土壤 0~ 40cm 最大持水量在不同林龄间差异不显著,而在不同海拔间差异显著(表 2)。海拔上的这种差异主要表现在恢复初期的 10~ 25a,随海拔升高土壤 0~ 40cm 最大持水量增大(图 5)。这可能与采伐或集材方式有关,由于采伐时坡下部的土壤受损较为严重,导致森林恢复初期土壤也表现出恢复所致。

表 2 栎木林苔藓、枯落物和土壤指标的双因素方差分析(F 值)

Table 2 The ANOVA (F value) of moss, litters and soil index of natural secondary forest

因素 Factors	苔藓 Moss			枯落物 Litters			土壤 0~ 40cm 最大 持水量 Soil 0~ 40cm MWHC
	蓄积量 CM	最大持水量 MWHC	最大持水率 MWHR	蓄积量 CM	最大持水量 MWHC	最大持水率 MWHR	
林龄 Stand age	7.129**	3.471*	1.709	7.337**	5.768**	5.569**	8.370**
海拔 Altitude	0.211	0.670	1.407	3.395*	3.520*	10.663**	3.034*
林龄×海拔交互作用 Interaction	0.976	1.529	1.708	0.330	0.241	1.655	5.748**

CM, Cumulated mass; MWHC, Maximal water holding capacity; MWHR, Maximal water holding rate; 下同 the same below; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

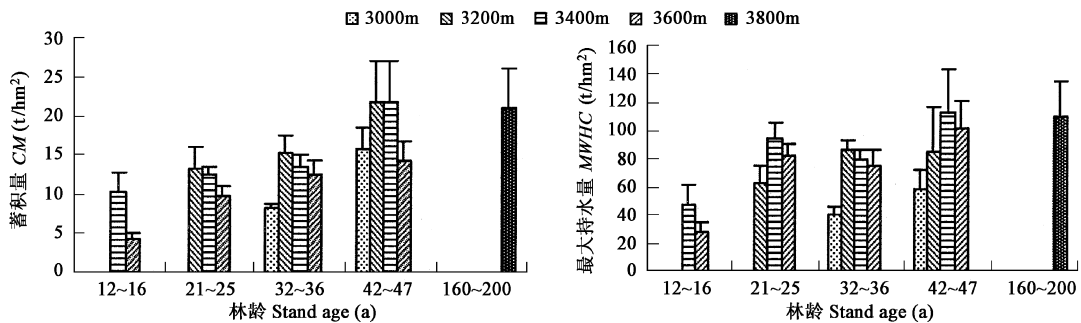


图 3 枯落物蓄积量及最大持水量

Fig. 3 The cumulated mass (CM) and the maximal water holding capacity (MWHC) of litters

4 结论与讨论

经过 20 世纪后半叶近 50a 的采伐与更新,川西亚高山森林目前正处于大规模的人工及自然恢复之中,次生栎木林已成为该区域的主要森林类型之一。与人工更新的云杉林相比,对天然更新的栎木林的研究十分匮乏,仅有其更新特性方面的结论^[2]。栎木林在生长过程中生态系统服务功能如何变化,尤其是森林水文效应有何变化规律,这是一个极具科学意义和实践价值的问题。本文既以米亚罗林区为例,对林地苔藓、枯落物和土壤持水性进行了分析,得出了次生栎木林地水文效应方面的一些初步结论。

栎木林苔藓蓄积量及最大持水量在不同林龄间差异显著,

随林龄增大而显著增加;而在不同海拔间差异不显著。枯落物蓄积量及最大持水量在不同林龄及海拔间均差异显著,随林龄的增大而增加;在林龄相同的条件下,在中海拔(3200m、3400m)较高,在较高(3600m)、较低(3000m)海拔偏低。苔藓最大持水率平均为 945%,在林龄和海拔间差异不显著;枯落物最大持水率平均 573%,在林龄和海拔间均差异显著。各林龄和海拔梯度上的栎木林,随土壤深度的增加土壤容重均显著增大,最大持水量显著下降,但毛管持水量和最小持水量仅在部分类型下降显著。土壤 0~ 40cm 最大持水量在不同林龄间差异不显著,而在不同海拔间差异显著。这种差异主要表现在林龄 10~ 25a 的林分,随海拔升高土壤 0~ 40cm 最大持水量增大。

前人对采伐后 1~ 30a 的迹地调查显示,其首先为喜光草本覆盖,4a 后出现栎木幼苗,10a 后开始进入栎木林阶段,而原生针叶树种的更新则在 15a 后开始出现;并做出初步推断,川西亚高山森林采伐后,如不再继续受到人为干扰,依靠自身的反馈系统,将经过草本、灌木、阔叶林、针阔混交林阶段向暗针叶林自然恢复^[22]。亚高山林区糙皮栎、红栎寿命可达 160a 以上,根据岷

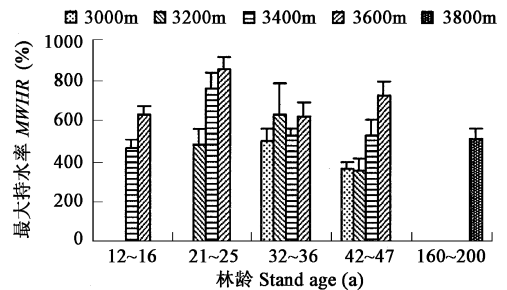


图 4 枯落物最大持水率

Fig. 4 The maximal water holding rate (MWHR) of litters

表 3 土壤容重、持水量及其在不同土层间差异显著性检验(F 值)

指标 Index	林龄 Stand age(a)														
	12~15			21~25			32~36			42~47			160~200		
depth (cm)	3400 m	3600 m	3800 m	3400 m	3600 m	3800 m	3200 m	3400 m	3600 m	3800 m	3200 m	3400 m	3600 m	3800 m	
容重	0~10	0.46±0.14	0.53±0.06	0.53±0.11	0.27±0.08	0.46±0.15	0.45±0.09	0.37±0.12	0.42±0.09	0.34±0.07	0.23±0.04	0.28±0.09	0.27±0.09	0.31±0.09	0.65±0.10
Bulk density (g/cm ³)	10~20	0.72±0.12	0.61±0.08	0.68±0.10	0.47±0.14	0.65±0.11	0.69±0.11	0.72±0.08	0.69±0.01	0.69±0.05	0.31±0.05	0.47±0.10	0.43±0.11	0.59±0.09	0.88±0.07
	20~30	0.92±0.10	0.70±0.10	0.78±0.06	0.65±0.04	0.76±0.09	0.88±0.08	0.85±0.03	0.85±0.02	0.93±0.05	0.47±0.06	0.53±0.12	0.50±0.11	0.67±0.09	1.03±0.11
	30~40	0.96±0.12	0.80±0.11	0.79±0.05	0.87±0.02	0.72±0.02	0.90±0.13	0.88±0.07	0.95±0.02	1.04±0.04	0.49±0.08	0.61±0.15	0.57±0.10	0.70±0.07	1.04±0.07
F value		0.010**	0.186	0.047*	0.025*	0.031*	0.013*	0.041*	0.031*	0.000**	0.006**	0.012*	0.000**	0.000**	0.000**
最大	0~10	0.73±0.08	0.69±0.05	0.75±0.05	0.61±0.03	0.71±0.08	0.77±0.04	0.75±0.03	0.70±0.03	0.78±0.03	0.71±0.02	0.70±0.03	0.68±0.04	0.67±0.03	0.65±0.03
持水量	10~20	0.60±0.04	0.66±0.03	0.66±0.04	0.66±0.07	0.66±0.10	0.64±0.04	0.59±0.02	0.64±0.02	0.64±0.02	0.67±0.03	0.67±0.05	0.65±0.04	0.59±0.04	0.57±0.03
	20~30	0.52±0.06	0.62±0.03	0.56±0.02	0.61±0.03	0.61±0.02	0.58±0.02	0.54±0.02	0.60±0.01	0.57±0.02	0.59±0.03	0.62±0.01	0.62±0.04	0.55±0.03	0.59±0.04
	30~40	0.51±0.06	0.50±0.03	0.57±0.05	0.49±0.02	0.54±0.04	0.53±0.04	0.56±0.01	0.54±0.01	0.50±0.02	0.51±0.01	0.60±0.05	0.58±0.03	0.56±0.02	0.48±0.03
F value		0.008**	0.156	0.013*	0.046*	0.044*	0.001**	0.044*	0.012*	0.000**	0.016*	0.037*	0.000**	0.000**	0.000**
毛管持水量	0~10	0.61±0.12	0.59±0.07	0.55±0.10	0.36±0.01	0.58±0.05	0.69±0.06	0.55±0.04	0.57±0.04	0.57±0.06	0.54±0.05	0.57±0.04	0.50±0.04	0.51±0.05	0.49±0.06
CWHC (g/cm ³)	10~20	0.43±0.06	0.55±0.03	0.50±0.12	0.42±0.06	0.49±0.04	0.53±0.05	0.38±0.04	0.43±0.05	0.50±0.05	0.52±0.06	0.60±0.05	0.59±0.05	0.51±0.05	0.46±0.03
	20~30	0.40±0.06	0.53±0.08	0.41±0.06	0.44±0.03	0.48±0.07	0.49±0.07	0.30±0.01	0.49±0.05	0.45±0.07	0.46±0.03	0.56±0.06	0.53±0.05	0.46±0.05	0.40±0.04
	30~40	0.38±0.06	0.44±0.05	0.38±0.04	0.29±0.02	0.45±0.05	0.40±0.08	0.35±0.03	0.44±0.01	0.42±0.06	0.51±0.08	0.56±0.05	0.51±0.04	0.48±0.03	0.36±0.03
F value		0.042*	0.919	0.056*	0.150	0.368	0.034*	0.129	0.577	0.633*	0.680	0.902	0.578	0.027*	0.027*
最小持水量	0~10	0.30±0.06	0.28±0.07	0.38±0.10	0.13±0.01	0.31±0.02	0.39±0.06	0.33±0.04	0.36±0.05	0.38±0.04	0.31±0.05	0.37±0.05	0.33±0.02	0.36±0.05	0.28±0.03
LWHC (g/cm ³)	10~20	0.15±0.04	0.26±0.01	0.32±0.10	0.20±0.02	0.19±0.02	0.27±0.08	0.21±0.03	0.23±0.03	0.31±0.03	0.27±0.05	0.39±0.06	0.32±0.04	0.32±0.04	0.29±0.04
	20~30	0.15±0.02	0.23±0.07	0.24±0.06	0.14±0.01	0.26±0.06	0.23±0.05	0.16±0.01	0.26±0.03	0.27±0.05	0.21±0.05	0.36±0.06	0.36±0.05	0.30±0.04	0.25±0.06
	30~40	0.16±0.06	0.18±0.05	0.22±0.06	0.10±0.02	0.20±0.05	0.17±0.08	0.20±0.02	0.24±0.01	0.24±0.04	0.28±0.07	0.36±0.05	0.33±0.05	0.32±0.02	0.21±0.07
F value		0.835	0.094	0.717	0.398	0.042*	0.257	0.236	0.058*	0.573	0.924	0.812	0.431	0.094	0.094

CWHC: capillary water holding capacity; LWHC: least water holding capacity; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

江冷杉与栎木幼苗出现的时间顺序及各自的生长方程^[1], 采伐 120a 后冷杉树高才能追上栎木, 因而向暗针叶林的恢复是一个漫长的演替过程, 至少应当在 100a 以上。

在调查的样地中, 针叶幼树均处于更新层、演替层, 甚至刚开始出现。经过近 50a 的恢复, 次生栎木林枯落物蓄积量及最大持水量就已达到原始林的水平, 但在恢复过程中伴随着水分物理性质的变化, 并与热量条件的变化有关, 这说明枯落物的恢复虽然很快, 但却是一个相对复杂的过程, 与养分循环密切相连, 这方面的研究有待进一步深入。林地土壤持水性能在不同林龄间没有显著差异, 森林采伐与恢复过程对其没有显著的影响, 只有经常性的人为干扰才会引起川西亚高山人工林土壤持水性能下降^[17]。而经过近 50a 的恢复, 苔藓蓄积量仅接近原始林的一半; 与暗针叶林的恢复一样, 苔藓层的恢复也是一个长期的过程; 并且其最大持水率在不同林龄和海拔间差异不显著, 因而可以作为次生林地水文效应向原始暗针叶林恢复程度的一个指标。

References

- [1] Yang Y P, Li C B. *Forest in Sichuan*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1992
- [2] Zhou D Z, Yang Y P. The primary study on regeneration characteristic of birch of sub-alpine forest region in west Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1980, **16**(2): 154~ 156
- [3] Xie C H, Guan W B, Wu J A, et al. Interception capability of dark coniferous forest ecosystem in Gongga Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(4): 68~ 71.
- [4] Cheng J H, Zhang H J, Yu X X, et al. Water holding capacity characteristic of ground cover and soil under pure *Abies fabri* forest on the Gongga Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(3): 45~ 49.
- [5] Zhao Y T, Yu X X, Zhang Z Q, et al. Study on water transport in interface of litters and moss in *Abies fabri* forest of upper reach of Yangtze River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(3): 118~ 121.
- [6] Gao J R, Yi J, Niu J Z, et al. Hydrological effects of forestland in sub-alpine dark coniferous forests of the upper reaches of Yangtze River. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(4): 74~ 79.
- [7] Yu X X, Cheng G W, Zhao Y T, et al. Evapotranspiration calculation of dark coniferous forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(5): 14~ 16
- [8] Cheng G W, Yu X X, Zhao Y T, et al. Evapotranspiration simulation of subalpine forest area in Gongga Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2003, **25**(1): 23~ 27.
- [9] Yu X X, Zhao Y T, Zhang Z Q, et al. Characteristics of soil water infiltration in sub-alpine dark coniferous ecosystem of upper reaches of Yangtze River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, **14**(1): 15~ 19.
- [10] Zhang B H, He Y R, Zhou H Y, et al. Structural property and water effect of soils from different subalpine forests in the upper reach of Yangtze River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, **16**(4): 127~ 129.
- [11] Zu Q K, Chen L H, Zhang D S, et al. Mechanisms of soil-reinforcement by roots in forest ecological systems in Gongga Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(4): 64~ 67.
- [12] Liu S R, Sun P S, Wang J X, et al. Hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5): 451~ 456
- [13] Huang L L. Preliminary studies on water conservative functions of alpine forest in western Sichuan. In: Li C B ed. *Ecological Research of Sichuan Forest*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1990: 87~ 99.
- [14] Jiang Y X. Phytocenological role of forest floor in subalpine fir forests in west Sichuan province. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1981, **5**(2): 89~ 98
- [15] Ma X H. Cutting and soil & water conservation of alpine dark coniferous forest in west Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1963, **8**(2): 149 ~ 158
- [16] Forest Research institute of Sichuan Province. The change of ecological conditions on the cutting areas in the west subalpine area of Sichuan province. *Scientia Silvae Sinicae*, 1984, **20**(2): 132~ 138
- [17] Pang X Y, Liu Q, Liu S Q, et al. Effect of human-induced disturbance on soil physical properties of subalpine coniferous forests in

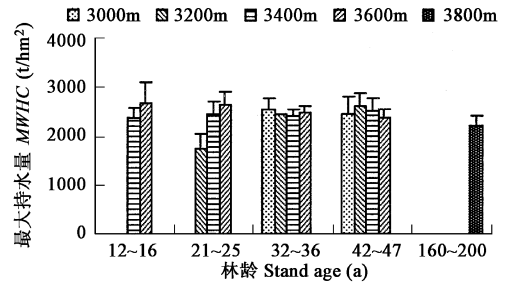


图 5 土壤 0~ 40cm 最大持水量

Fig 5 Maximal water holding capacity (MWHC) of soil in 0~ 40 cm depth

- western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2002, **8**(6): 583~ 587.
- [18] Zhang Y D, Zhao C M, Liu S R. Woodland hydrological effects of spruce plantations and natural secondary series in sub-alpine region of western Sichuan. *Journal of Natural Resources*, 2004, **19**(6): 713~ 719.
- [19] Jiang Y X. Community characteristic and classification principle of alpine dark coniferous forest in Miyalu, west Sichuan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1963, **1**(1): 42~ 50.
- [20] Jiang Y X. The primary study on habitat type of alpine forest in Miyalu and Markang, west Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1963, **8**(4): 321~ 335.
- [21] Zhang W R, Xu B T. *The Method of Long-term Research on Forest Soil*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1986. 30~ 36.
- [22] Shi L X, Wang J X, Xu Y M, et al. The early succession process of vegetation at cut-over area of dark coniferous forest in Miyalu, west Sichuan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1988, **12**(4): 306~ 313.

参考文献:

- [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, **16**(2): 154~ 156.
- [3] 谢春华, 关文彬, 吴建安, 等. 贡嘎山暗针叶林生态系统林冠截留特征研究. *北京林业大学学报*, 2002, **24**(4): 68~ 71.
- [4] 程金花, 张洪江, 余新晓, 等. 贡嘎山冷杉纯林地被物及土壤持水特性. *北京林业大学学报*, 2002, **24**(3): 45~ 49.
- [5] 赵玉涛, 余新晓, 张志强, 等. 长江上游亚高山峨眉冷杉林地被物层界面水分传输规律研究. *水土保持学报*, 2002, **16**(3): 118~ 121.
- [6] 高甲荣, 尹婧, 牛健植, 等. 长江上游亚高山暗针叶林林地水文作用初探. *北京林业大学学报*, 2002, **24**(4): 74~ 79.
- [7] 余新晓, 程根伟, 赵玉涛, 等. 长江上游暗针叶林生态系统蒸散计算. *水土保持学报*, 2002, **16**(5): 14~ 16.
- [8] 程根伟, 余新晓, 赵玉涛, 等. 贡嘎山亚高山森林带蒸散特征模拟研究. *北京林业大学学报*, 2003, **25**(1): 23~ 27.
- [9] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究. *应用生态学报*, 2003, **14**(1): 15~ 19.
- [10] 张保华, 何毓蓉, 周红艺, 等. 长江上游典型区亚高山不同林型土壤的结构性与水分效应. *水土保持学报*, 2002, **16**(4): 127~ 129.
- [11] 朱清科, 陈丽华, 张东升, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究. *北京林业大学学报*, 2002, **24**(4): 64~ 67.
- [12] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 等. 长江上游森林植被水文功能研究. *自然资源学报*, 2001, **16**(5): 451~ 456.
- [13] 黄礼隆. 川西高山林区森林水源涵养性能的初步研究. 见: 李承彪主编. *四川森林生态研究*, 成都: 四川科学技术出版社, 1990. 87~ 99.
- [14] 蒋有绪. 川西高山冷杉林枯枝落叶层的群落学作用. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1981, **5**(2): 89~ 98.
- [15] 马雪华. 川西高山暗针叶林区的采伐与水土保持. *林业科学*, 1963, **8**(2): 149~ 158.
- [16] 四川省林业科学研究所. 川西高山云冷杉林采伐迹地生态因子的变化. *林业科学*, 1984, **20**(2): 132~ 138.
- [17] 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 等. 人为干扰对川西高山针叶林土壤物理性质的影响. *应用与环境生物学报*, 2002, **8**(6): 583~ 587.
- [18] 张远东, 赵常明, 刘世荣. 川西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): 713~ 719.
- [19] 蒋有绪. 川西米罗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): 42~ 50.
- [20] 蒋有绪. 川西米罗、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.
- [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] 史立新, 王金锡, 宿以明, 等. 川西米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.