

川西山地主要人工林种群根系生物量与生产力

刘兴良^{1,2}, 马钦彦^{1*}, 杨冬生⁵, 史作民³, 宿以明², 周世强⁴, 刘世荣³, 杨玉坡²

(1. 北京林业大学资源与环境学院, 北京 100083; 2. 四川省林业科学研究院, 成都 610081; 3. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 4. 中国大熊猫保护与研究中心, 四川汶川 623005; 5. 四川省林业厅, 成都 610082)

摘要:采用标准地法, 对四川西部山地主要人工林的根系进行了研究, 结果表明: (1) 用 $D^2 H$ 估测单株林木根系生物量的适合模型均以幂函数模型为最佳, 所筛选统计模型的相关系数较高, 在 0.94 ~ 0.99 之间; (2) 根系总生物量大小排序为日本落叶松 > 峨眉冷杉 > 四川红杉 > 川西云杉, 分别为 37.832、24.907、18.320 t/hm² 和 15.982 t/hm², 各级根的生物量占总根量的比例各不相同; (3) 根系生物量集中在分布土层 0.00 ~ 40.00 cm, 川西云杉占 97.88%, 四川红杉占 96.78%, 峨眉冷杉占 95.65%, 日本落叶松占 99.72%; 尤其在 0.00 ~ 20.00 cm 土层分布的根最多, 分别占 77.13%, 77.13%, 65.02% 和 80.66%; 在 0.00 ~ 20.00 cm, 20.00 ~ 40.00 cm 和 40.00 ~ 60.00 cm 的各层根系生物量分配比例, 川西云杉为 34:12:1, 四川红杉为 24:6:1, 峨眉冷杉为 15:7:1, 日本落叶松为 63:14:1; (4) 川西云杉、四川红杉、峨眉冷杉和日本落叶松人工林种群根系的生物量密度分别为 10.782 t/(hm²·m), 8.230 t/(hm²·m), 14.546 t/(hm²·m) 和 13.211 t/(hm²·m); (5) 川西云杉、四川红杉、峨眉冷杉和日本落叶松人工林种群根系生产力分别为 0.57、0.83、0.71 t/(hm²·a) 和 1.64 t/(hm²·a)。

关键词: 川西云杉; 四川红杉; 峨眉冷杉; 日本落叶松; 生物量密度; 净生产量; 生产力**文章编号:** 1000-0933(2006)02-0542-10 **中图分类号:** Q143, Q948, S718.5 **文献标识码:** A

Studies on root biomass and productivity in dominant plantation populations in the mountainous land in western Sichuan

LIU Xing-Liang^{1,2}, MA Qin-Yan^{1*}, YANG Dong-Sheng⁵, SHI Zuo-Min³, SU Yi-Ming², ZHOU Shi-Qiang⁴, LIU Si-Rong³, YANG Yu-Po² (1. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu, Sichuan 610081, China; 2. Environment and Resources College of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, The Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4. China WWF Research and Conservation Centre for the Giant Panda, Sichuan 623005, China; 5. Sichuan Forestry Department, Chengdu 610082, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 542 ~ 551.

Abstract: This study investigated root biomass and productivity in dominant plantation populations in western Sichuan, China. A total of 4 plots (*Picea balfouriana* plantation population for 28 age in Maerkang, 9 trees, mean DBH of population for 10.4 cm and height for 10.5 m; *Larix maxteriana* plantation for 22 age in Wolong, 9 trees, mean DBH of population for 17.0 cm and height for 13.8 m; *Abies fabri* plantation for 35 age in Ebian, 18 trees, mean DBH of population for 14.1 cm and height for 11.9 m; *Larix kaempferi* plantation for 23 age in Miyaluo, 8 trees, mean DBH of population for 17.4 cm and height for 14.5 m; a 20 m ×

基金项目: 四川省杰出青年学科带头人培养基金资助项目(2001026); 国家林业局“十五”重点资助项目(2001010); 国家“十五”攻关资助项目(2001BA510B06); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111504); 国家林业局四川森林生态与资源环境重点实验室开放课题资助项目

收稿日期: 2004-08-21; **修订日期:** 2005-11-07

作者简介: 刘兴良(1963 ~), 男, 重庆市江津市人, 博士生, 研究员, 从事川西高山森林生态系统结构与功能、恢复生态学及地植物学研究。E-mail: liu881005@yahoo.com.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: maqinyan@bjfu.edu.cn

Foundation item: The project was supported by the Foundation Training the Outstanding Youth Lead of Subject of Sichuan (No: 2001026); Science and Technology Program of China Bureau of Forestry (No: 2001010); Science and Technology Program of China (No: 2001BA510B06); Project of the China National Major Fundamental Science Program (No: 2002CB111504); The project of its opened-up of the key laboratory in forest ecology, environment and resources of China Bureau of Forestry

Received date: 2004-08-21; **Accepted date:** 2005-11-07

Biography: LIU Xing-Liang (1963 ~), Ph. D. candidate, Professor, mainly engaged in structure and function in forest ecosystem, restoration ecology and geobotany. E-mail: liu881005@yahoo.com.cn

25 m plot located on each of the 4 types in western Sichuan, China) were randomly selected and excavated to a depth of 60 cm for each of the 4 plantation population types. To estimate the root biomass of an individual tree using $D^2 H$, an exponential model was selected with the highest coefficient ranging from 0.94 to 0.99. The total root biomass per hm^2 varied among plantation population types following the order: *Larix kaempferi* ($37.832 \text{ t}/\text{hm}^2$) > *Abies fabri* ($24.907 \text{ t}/\text{hm}^2$) > *Larix maxteriana* ($18.320 \text{ t}/\text{hm}^2$) > *Picea balfouriana* population ($15.982 \text{ t}/\text{hm}^2$). The biomass fractions of a given root size class compared to the total root biomass differed among plantation population types. For all 4 studied plantation types, the majority of the roots were distributed in the top 40 cm of soil, e. g. 97.88% for *Picea balfouriana* population, 96.78% for *Larix maxteriana*, 95.65% for *Abies fabri*, and 99.72% for *Larix kaempferi* population. The root biomass fractions distributed in the top 20 cm of soil were 77.13% for *Picea balfouriana*, 77.13% for *Larix maxteriana*, 65.02% for *Abies fabri* and 80.66% for *Larix kaempferi*, respectively. The root allocation in the 0 ~ 20, 20 ~ 40, and 40 ~ 60 cm soil layers gave ratios of 34:12:1 for *Picea balfouriana*, 24:6:1 for *Larix maxteriana*, 15:7:1 for *Abies fabri*, and 64:4:1 for *Larix kaempferi* populations. The root biomass density of dominant plantation population was $10.782 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$ (for *Picea balfouriana*), $8.230 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$ (for *Larix maxteriana*), $14.546 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$ (for *Larix maxteriana*), $13.211 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{m})$ (*Larix kaempferi* population), respectively. The root biomass productivity was found to be $0.57 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (for *Picea balfouriana*), $0.83 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (for *Larix maxteriana*), $0.71 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (for *Abies fabri*) and $1.64 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (*Larix kaempferi* population), respectively.

Key words: biomass; mountainous region in western Sichuan; plantation population; biomass density; productivity; root system; *Picea balfouriana*; *Larix maxteriana*; *Abies fabri*; *Larix kaempferi*

根系在土壤中吸收水和矿物质,合成和储存有机物,且根际微生物、根系残体以及根系死亡后的孔穴在转化无机氮和土壤有机物等方面有着重要的作用。细根生物量仅占总生物量的 5% 左右,但其生长量可占森林初级生产力的 50% ~ 75%^[1,2],通过根系死亡归还到土壤中的 N 素比地上凋落物多 18% ~ 58%^[3,4],根系的活动,直接影响植物的生长和代谢过程,根系对土壤的结构也有一定的改良作用。因而,早在 20 世纪 70 年代根系研究领域越来越趋于专门化^[5,6],近 30 多年来,细根的研究已成为国际性研究热点之一^[3,4,7~13]。20 世纪 90 年代以来,我国对根系的研究有不少报道^[14~24],但较为集中在细根研究方面^[25],目前主要森林生态系统细根生产和周转及其在能流和物流中的作用、不同细根测定方法的比较研究以及与全球变化有关的森林细根研究等已成为重要的研究方向^[26,27]。

由于根系研究烦琐费时且结果不太准确^[5],根系研究的基础资料仍然需要积累^[5,28,29]。随着川西高山林区人工林郁闭成林,竞争日渐激烈,人工林树种单一及树种错位现象带来的人工林退化和病虫害时有发生^[30,31],因此,作为川西山地人工林生态学的系列研究^[30,32~34],系统研究川西山地主要人工林根系分布状况及生物量积累,不仅对了解森林生态系统中的营养积累与分布、水分动态、树种混交效益和根系竞争都有重要的意义,而且可以为评价生态系统功能,特别对计测人工林 C 储量提供基础资料。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

川西高山林区地貌以高山峡谷为主,海拔 2500 ~ 4500 m 相对高差 1000 m。由于受地形的影响,水热的重新分配和组合,该区亚热带特征不明显,具有十分显著的垂直地带性。从 20 世纪 60 年代起开始进行了大面积的人工更新造林,截止 2000 年已完成人工造林 73.07 万 hm^2 ,郁闭成林面积约 58.37 万 hm^2 ,蓄积达 3051.71 万 m^3 ,已成为川西高山林区主要后续资源^[30,31]。岷江冷杉(*Abies faxoniana*)、紫果云杉(*Picea purpurea*)原始林采伐后形成以川西云杉(*Picea balfouriana*)、粗枝云杉(*P. asperata*)为建群种的人工林;长苞冷杉(*A. georgei*)、丽江云杉(*P. likiangensis*)原始林采伐后形成丽江云杉人工林;由于峨眉冷杉(*A. fabri*)、油麦吊杉(*P. brachytyla* var. *complanat*)原始林采伐后阴湿生境条件变化不大,形成峨眉冷杉、油麦吊杉为主的人工林;另外,也有四川红杉(*Larix maxteriana*)、日本落叶松(*Larix kaempferi*)人工林,自然条件及林分特征见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 标准地设置及调查 在四川西部各自然区域选主要的人工林设置 20m × 25m 标准地,对其林木进行每木调查,计测林分因子及其参数。

1.2.2 根系生物量测定方法 在标准地内以 2.0cm 为径级选择标准木,每个径级 1 株,分别测定胸径、树高、冠幅、枝下高及相邻木位置每个径级 1 株,伐倒标准木,采用“分层切割法”^[35-37],实测干、皮、枝、叶地上部分鲜重,同时对各器官取样。

所选样木地下部分按不同土壤层次(20cm 划分 1 层)挖出全部根系,并将根桩、粗根($D_R > 2.0\text{cm}$)、中根($1.0\text{cm} < D_R \leq 2.0\text{cm}$)、细根($D_R \leq 1.0\text{cm}$)分层分级称其鲜重^[38]。同时,测量灌木层、草木层及枯落物层生物量并取样。

1.2.3 室内分析与建模 将野外样品在实验室烘箱中 90℃ 烘 2 h 后,85℃ 烘至恒重。用电子天平称样品恒重,求样品干鲜重比,将各器官鲜重换算成干重,根据样方资料换算单位面积干重生物量。

将实测的根系生物量,分析自变量参数与各器官生物量的相关性,根据“相对生长法则”^[39]建立相应的统计模型,计算全林根系生物量。

1.2.4 根系生产力计算 根系生产力是指单位土地面积上,单位时间内有机物的净生产量。净生产量(ΔP_N)应为 $T_1 \sim T_2$ 时间内植物生长量(ΔY_N),枯损量(ΔL_N),被动物吃掉的损失量(ΔG_N) 3 个分量之和。由于测定 ΔL_N 和 ΔG_N 困难,故本研究设 ΔP_N 仅为 ΔY_N 。根系生产力采用公式^[35,37] 计算:

$$\Delta P_N = W/a$$

(1)

式中, ΔP_N 为平均净生产量(表示生产力); W 为根系生物量; a 为种群年龄。

表 1 川西山地主要人工林林分特征

Table 1 Characteristics of the investigation forest ~ stand in Mountainous region in western Sichuan

人工林类型及地点 Plantation type and site	地形 地貌 LP	海拔 Al (m)	气候指标 Index of climate				林分特征 Characteristics of stand				
			年均 气温 MAT (℃)	1 月 均温 MTJan (℃)	7 月 均温 MTJ (℃)	降雨量 MAR (mm)	林龄 A	密度 (株/hm ²)	郁闭度 (%)	平均 胸径 MDBH (cm)	平均 树高 MH (m)
川西云杉人工林,四川马尔康,28 年 Pb plantation for 28 age in Maerkang, Sichuan	高山 峡谷 AC	2700	8.6	- 1.0	16.5	753.0	28	3460	0.9	10.4	10.5
四川红杉人工林,四川卧龙,22a Lm plantation for 22 age in Wolong, Sichuan	高山 峡谷 AC	2200	10.9	2.5	22.5	1100.0	22	1359	0.7	17.0	13.8
峨眉冷杉人工林,四川峨边,35a Af plantation for 35 age in Ebian, Sichuan	高山 峡谷 AC	2300	16.4	6.3	23.6	825.0	35	2834	0.7	14.1	11.9
日本落叶松人工林,四川米亚罗,23a Lk plantation for 23 age in Miyaluo, Sichuan	高山 峡谷 AC	2950	4.7	- 6.0	13.0	1193.5	23	1940	0.9	17.4	14.5

LP, Landform and physiognomy; Al, Altitudes; MAT, Mean annual temperature; MTJan, Mean temperature in January; MTJ, Mean temperature in July; MAR, Mean annual rainfall; Pb, *Picea balfouriana*; Af, *Abies fabri*; Lm, *Larix maxteriana*; Lk, *Larix kaempferi*; AC, Alpine and canyon; MBS, Mountain brown soil; MCS, Mountain cinnamon soil; MBPS, Mountain brown podzolic soil; A, Age of forest; MD, Mean diameter; MH, Height of tree; 下同 the same below

1.2.5 地上部与根部关系系数计算 评价植物地上部和地下部生长关系的常见参数是地上部与根部的比率,也是区别植物地上部与根系之间干物质重的一种尺度。采用 Boonstra 提出的地上部与根部关系系数^[40],用公式计算:

$$RC = W_{AB}/W_{RB}$$

(2)

式中, RC 为地上部与根部关系系数, W_{AB} 为地上生物量(kg/hm²), W_{RB} 为根系生物量(kg/hm²)

1.2.6 生物量密度的计算 地上生物量密度(Aboveground Biomass Density,缩写 *ABD*)表示单位高度生物量的大小,根系生物量密度(Root Biomass Density,缩写 *RBD*)表示单位根系深度生物量的大小,均是种群结构与功能的重要测度指标。地上生物量密度和根系生物量密度分别用公式(3)和(4)计算^[41]:

$$ABD = W_t/H$$

(3)

$$RBD = W_r/D_r$$

(4)

式中,*ABD* 为地上生物量密度(kg/(hm²·m)),*W_t* 为地上生物量(kg/hm²),*H* 为树高(m),*RBD* 为根系生物量密度(kg/(hm²·m)),*W_r* 为根系生物量(kg/hm²)和 *D_r* 为根系深度(m)。

2 研究结果

2.1 根系生物量预测模型的建立与选择

生物量模型的建立与选择应建立在自变量参数与各器官生物量具有显著相关关系基础上,依据相对生长法,用人工林各径级个体胸径、树高与各器官生物量进行相关显著性分析表明,个体胸径、树高与各器官生物量间具有显著的相关关系,而且个体胸径、高度、以及干、皮、枝、叶、总生物量等两两间的相关均达到极显著水平。再以生物量(*W*)为因变量,地径(*D*)、树高(*H*)、*D*²*H* 为自变量,采用 *Y* = *aX^b*, *Y* = *ae^b*, *Y* = *aX* + *b*, *Y* = 1/(*u* + *ab^x*), *Y* = *a* + *b*ln*X* 等数学模型进行回归拟合,求出相应参数 *a*, *b* 的值。

经筛选建立了估测单株器官生物量的统计模型(表 2),从筛选建立的单株器官生物量的统计模型来看,用 *D*²*H* 估测单株林木器官生物量的适合模型均以指数模型为最佳,所筛选统计模型的相关系数较高,在 0.94~0.99 之间,达到极显著水平,而且剩余回归标准差较小,说明估测值与实测值的拟合度高,估测误差小,可依据情况在实际中应用。

表 2 川西山地主要人工林种群根系生物量优化模型

Table 2 Optimal models of biomass for root of dominant plantation population in mountain land in western Sichuan									
树种 Tree species	模型 Modle	因变量 DV (Y)	自变量 IV (X)	a	b	相关系 数 CC	标准误 差 SE	自由度 SS(n)	实用范围 Range of practicality
川西云杉 Pb	<i>Y</i> = <i>aX^b</i>	生物量(<i>W_r</i>)	<i>D</i> ² <i>H</i>	0.9316	-2.1143	0.9923	0.0969	9	<i>D</i> : 2.0 cm ~ 19.0cm; <i>H</i> : 5.0 m ~ 11.0m
四川红杉 Lm	<i>Y</i> = <i>aX^b</i>	生物量(<i>W_r</i>)	<i>D</i> ² <i>H</i>	0.0010	1.0755	0.9425	0.0404	9	<i>D</i> : 8.0 cm ~ 24.0cm; <i>H</i> : 12.1 m ~ 18.0m
峨眉冷杉 Af	<i>Y</i> = <i>aX^b</i>	生物量(<i>W_r</i>)	<i>D</i> ² <i>H</i>	0.1530	0.5208	0.9891	0.1414	18	<i>D</i> : 6.2 cm ~ 29.1cm; <i>H</i> : 7.7 m ~ 25.8m
日本落叶松 Lk	<i>Y</i> = <i>aX^b</i>	生物量(<i>W_r</i>)	<i>D</i> ² <i>H</i>	0.0019	1.0951	0.9948	0.0829	8	<i>D</i> : 10.5 cm ~ 23.7cm; <i>H</i> : 12.5 m ~ 16.2m

DV, dependent variable; IV, independent variable; CC, correlation coefficient; SE, Standard Error; SS, Sample size; WR, Biomass for root; 以下同 the same below

2.2 根系生物量及其分配

对根生物量研究结果表明(表 3),根系总生物量大小排序为日本落叶松>峨眉冷杉>四川红杉>川西云杉,分别为 37.832、24.907、18.320t/hm² 和 15.982 t/hm²;4 种人工林树种各级根的生物量大小排序为根桩>粗根>中根>细根,各级根的生物量占总根量的比例各不相同。川西云杉各级根系的生物量分别为 8.742、5.770、0.831t/hm² 和 0.639 t/hm²,占根系总生物量的百分率分别 54.70%、36.10%、5.20%和 4.00%;四川红杉各级根系的生物量分别为 8.000、8.120、1.540t/hm² 和 0.660 t/hm²,占根系总生物量的百分率分别 43.67%、44.32%、8.41%和 3.60%;各级根系的生物量分别为 9.132、10.710、2.159t/hm² 和 2.906 t/hm²,占根系总生物量的百分率分别 36.76%、43.00%、8.70%和 11.60%;日本落叶松各级根系的生物量分别为 10.077、22.984、2.302t/hm² 和 2.469 t/hm²,占根系总生物量的百分率分别 26.64%、60.75%、6.08%和 6.53%。

支撑根(起支持树体地上部分的根桩和粗根,下同)的生物量占根总生物量的百分率较为接近,川西云杉为 90.80%,四川红杉为 87.99%,峨眉冷杉为 79.70%,日本落叶松为 87.39%;而营养根(起吸收水分和营养物质功能的中根和细根,下同)生物量占根总生物量的百分率以峨眉冷杉最高,为 20.30%,其它较为一致,川

西云杉为 9.20%,四川红杉为 12.01%,日本落叶松为 12.61%。从两者的垂直分布来看,支撑根的生物量,营养根的生物量,以及根系总生物量都集中分布在 0.0~40.0cm 层,其百分率分别为 88.00%~90.00%,96.00%~100.00%和 95.00%~98%(图 1)。

2.3 根系生物量垂直分布

研究表明(图 2),根系主要分布在土层 0.00~40.00cm 左右,尤其在 0.00~20.00cm 土层分布的根最多;在 0.00~20.00cm,0.00~40.00cm 和 40.00~60.00cm 的各层根系生物量分配比例,川西云杉为 34:12:1,四川红杉为 24:6:1,峨眉冷杉为 15:7:1,日本落叶松为 63:14:1。在土层 0.00~40.00cm 和 0.00~20.00cm 分布的根系生物量,川西云杉占 97.88%和 77.13%,四川红杉占 96.78%和 77.13%,峨眉冷杉占 95.65%和 65.02%,日本落叶松占 99.72%和 80.66%。支撑根(根桩和粗根)的生物量,川西云杉为 14.51t/hm²,占总根量的 90.80%,四川红杉为 16.12t/hm²,占总根量的 87.99%,峨眉冷杉为 8.06t/hm²,占总根量的 79.64%,日本落叶松为 17.03t/hm²,占总根量的 87.38%。营养根(中根和细根)的生物量,川西云杉为 1.47t/hm²,占总根量的 9.20%,四川红杉为 2.20t/hm²,占总根量的 12.01%,峨眉冷杉为 2.06t/hm²,占总根量的 20.36%,日本落叶松为 1.29t/hm²,占总根量的 12.62%。从营养根生物量、层总根生物量的垂直分布和营养根占层总根生物量的百分率比较看,三者都随土层深度的增加而减少,呈倒金字塔型。

表 3 川西山地主要人工林种群根系生物量

森林类型,地点及林龄 Forest type, site and age of forest	生物量及其分配 Biomass and biomass distribution(t/hm ²)				
	根桩 Stump	粗根 Thick root	中根 Middle root	细根 Fine root	合计 Total
川西云杉人工林,四川马尔康, 28a Pb plantation for 28 age in Maerkang, Sichuan	8.742 (54.70)	5.770 (36.10)	0.831 (5.20)	0.639 (4.00)	15.982 (100.00)
四川红杉人工林,四川卧龙,22a Lm plantation for 22 age in Wolong, Sichuan	8.000 (43.67)	8.120 (44.32)	1.540 (8.41)	0.660 (3.60)	18.32 (100.00)
峨眉冷杉人工林,四川峨边,35a Af plantation for 35 age in Ebian, Sichuan	9.132 (36.70)	10.710 (43.00)	2.159 (8.70)	2.906 (11.60)	24.907 (100.00)
日本落叶松人工林,四川米亚罗,23a Lk plantation for 23 age in Miyaluo, Sichuan	10.077 (26.64)	22.984 (60.75)	2.302 (6.08)	2.469 (6.53)	37.832 (100.00)

括号内数字为占同一群落类型生物量的百分比 Values in the parenthesis are percentage of the total root biomass of the same population type

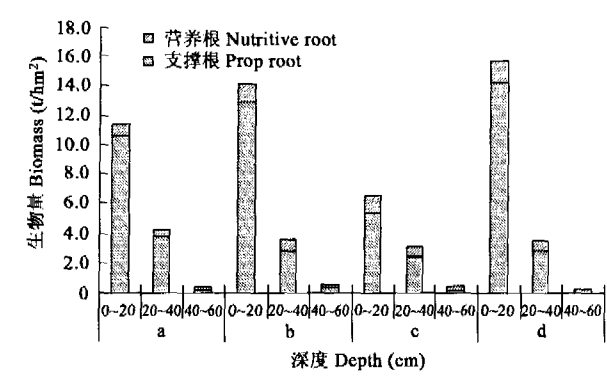


图 1 支撑根和营养根生物量的垂直布局

Fig.1 Vertical distribution pattern of biomass in prop root and nutritive root
树种 Tree species; a. 川西云杉 Pb;b. 四川红杉 Lm;c. 峨眉冷杉 Af;d.
日本落叶松 Lk;下同 the same below

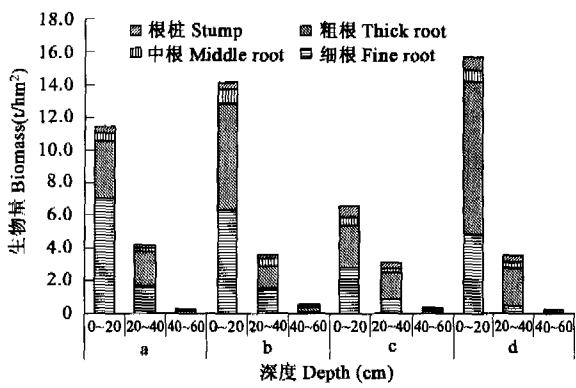


图 2 川西山地主要人工林种群根系生物量的垂直布局

Fig.2 Vertical biomass distribution of dominant plantation population
mountain land in western Sichuan

2.4 根系生物量与同化器官生物量的关系

研究表明(表 4),川西山地主要人工林种群根系生物量与地上生物量、同化器官生物量没有明显的相关

关系,但地上部与根部关系系数、同化器官生物量却有明显的规律,分为两类:常绿针叶树种地上部与根部关系系数大于 6.7,落叶针叶树种地上部与根部关系系数在 5.0~6.2 之间;云冷杉属树种同化器官生物量大于落叶松属树种同化器官生物量的 2~3 倍,前者在 14.0~15.0 t/hm² 之间,后者为 4.0 t/hm²。根系生物量与同化器官生物量的比例,川西云杉约为 1:1.1,四川红杉约为 1:4.6,峨眉冷杉约为 1:1.7,日本落叶松约为 1:9.2。说明云冷杉属树种需要更多的光合器官来维持其生长。

表 4 川西山地主要人工林种群根系生物量与地上及同化器官生物量的关系

Table 4 Relationship between root biomass and aboveground biomass and biomass for assimilation organ of dominant plantation population in mountain land in western Sichuan

树种 Tree species	川西云杉 Pb	四川红杉 Ln	峨眉冷杉 Af	日本落叶松 Lk
地上生物量 AB(t/hm ²)	107.818	113.57	173.10	191.559
根系生物量 RB(t/hm ²)	15.982	18.32	24.907	37.832
同化器官生物量 AOB(t/hm ²)	14.234	3.97	15.059	4.103
地上部与根部关系系数 RC	6.746	6.199	6.950	5.063

AB, Aboveground biomass; RB, Root biomass; RC, Modulus of relationship coefficient between aboveground biomass and root biomass; AOB, assimilation organ biomass

2.5 根系生物生产力

对川西山地主要人工林种群根系生物生产力比较分析表明(表 5),根系年平均净生产量、占净生产量的百分率和根系年平均净同化率具有落叶松属树种大于云冷杉属树种的趋势。引进树种日本落叶松根系年平均净生产量为川西云杉的 2.88 倍,四川红杉的 1.96 倍,峨眉冷杉 2.34 倍。而且其根系年平均净同化率也高于乡土树种,为川西云杉的 2.26 倍,四川红杉的 1.96 倍,峨眉冷杉 2.93 倍。川西山地主要人工林种群根系生产力的大小排序为日本落叶松>四川红杉>峨眉冷杉>川西云杉,分别为 1.64 t/(hm²·a)、0.83 t/(hm²·a)、0.71 t/(hm²·a)和 0.57 t/(hm²·a)。

表 5 川西山地主要人工林种群根系年平均净生产量和年平均净同化率

Table 5 Mean annual net production and mean annual net assimilation efficiency of root of dominant plantation population in mountain land in western Sichuan

森林类型,地点及林龄 Forest type, site and age of forest	年平均净生 产量 MANP (kg/(hm ² ·a))	占净生产 量的百分 率 P(%)	年平均净同 化率 MANAE (g/(m ² ·a))	生产力 P (t/(hm ² ·a))
川西云杉人工林,四川马尔康,28a Pb plantation for 28 age in Maerkang, Sichuan	570.8	7.5	3.9	0.57
四川红杉人工林,四川卧龙,22 年 Ln plantation for 22 age in Wolong, Sichuan	832.73	9.30	6.7	0.83
峨眉冷杉人工林,四川峨边,35 年 Af plantation for 35 age in Ebian, Sichuan	703.6	8.3	3.0	0.71
日本落叶松人工林,四川米亚罗,23 年 Lk plantation for 23 age in Miyaluo, Sichuan	1644.85	13.42	8.8	1.64

MANP, Mean annual net production; MANAE, Mean annual net assimilation efficiency; P, Productivity

通过对森林根系生物量与生产力的比较表明(表 6),四川马尔康 28 年川西云杉人工林根系生物量比四川松潘 41~50a 紫果云杉林^[38]、云南中甸 200a 长苞冷杉天然林^[42]、新疆昌吉地区 200a 天山云杉天然林^[43]、青海祁连山 120~210a 青海云杉天然林^[14]及黑龙江绥棱地区 30a 红皮云杉人工林^[44]低,比云南中甸 50~150a 油麦吊云杉天然林^[45,46]及黑龙江绥棱地区 25a 红皮云杉人工林高^[44]。四川卧龙 22a 四川红杉人工林根系生物量比四川松潘 41~50a 紫果云杉林^[38]、云南中甸 200a 长苞冷杉天然林^[42]、新疆昌吉地区 200a 天山云杉天然林^[43]及青海祁连山 120~210a 青海云杉天然林低^[14],比云南中甸 50~150a 油麦吊云杉天然林^[45,46]及黑龙江绥棱地区 25~30a 红皮云杉人工林^[44]高。四川峨边 35a 峨眉冷杉人工林根系生物量比四川松潘 41~50a 紫果云杉林^[38]、云南中甸 200a 长苞冷杉天然林^[42]、新疆昌吉地区 200a 天山云杉天然林^[42]及青海祁连山 120~210a 青海云杉天然林^[14]低,比云南中甸 50~150a 油麦吊云杉天然林^[45,46]及黑龙江绥棱地区 25~30a 红皮云杉人工林^[44]高。四川米亚罗 23a 日本落叶松人工林比云南中甸 200a 长苞冷杉天然林^[42]、新疆昌吉地区 200a 天山云杉天然林^[43]及青海祁连山 120~210a 青海云杉天然林^[14]低,比四川松潘 41~50a 紫果云杉林^[38]、云南

中甸 50~150a 油麦吊云杉天然林^[45,46]及黑龙江绥棱地区 25~30a 红皮云杉人工林^[44]高。而生产力则为四川马尔康 28a 川西云杉人工林、卧龙 22a 四川红杉人工林和峨边 35a 峨眉冷杉人工林根系生产力比云南中甸 200a 长苞冷杉天然林^[42]、新疆昌吉地区 200a 天山云杉天然林^[43]、青海祁连山 120~210a 青海云杉天然林^[14]、黑龙江绥棱地区 30a 红皮云杉人工林^[44]、云南中甸 50~150a 油麦吊云杉天然林^[45,46]及黑龙江绥棱地区 25a 红皮云杉人工林^[44]低,与四川松潘 41~50a 紫果云杉林^[38]较为接近;而四川米亚罗 23a 日本落叶松人工林比新疆昌吉地区 200a 天山云杉天然林^[43]及青海祁连山 120~210a 青海云杉天然林^[14]低,比其它类型森林^[38,42,44~46]都高。

表 6 与其他地区森林根系生物量与生产力的比较

Table 6 Comparison of root biomass of different forests in other region

森林类型,地点及林龄 Forest type, site and age of forest	根系生物量 RB (t/hm ²)	生产力 P (t/(hm ² ·a))	资料来源 Reference
紫果云杉天然林,四川松潘,41~50a <i>Picea purpurea</i> natural forest for 41 to 50 age in Songpan, Sichuan	26.076	0.56	[38]
长苞冷杉天然林,云南中甸,200a <i>Abies georgei</i> natural forest for 200 age in Zhongdian, Yunnan	49.570	1.55	[42]
油麦吊云杉天然林,云南中甸,50a <i>Picea brachyla</i> var. <i>complanata</i> natural forest for 50 age in Zhongdian, Yunnan	8.343	0.94	[45,46]
油麦吊云杉天然林,云南中甸,150a <i>Picea brachyla</i> var. <i>complanata</i> natural forest for 150 age in in Zhongdian, Yunnan	15.164	1.46	[45,46]
天山云杉天然林,新疆昌吉地区,200a <i>Picea schrenkiana</i> var. <i>tianshanica</i> natural forest for 200 age in Changjie, Xinjiang	40.206	3.40	[43]
红皮云杉人工林,黑龙江绥棱地区,30a <i>Picea koraiensis</i> plantation for 30 age in Changjie, Xinjiang	16.620	1.53	[44]
红皮云杉人工林,黑龙江绥棱地区,25a <i>Picea koraiensis</i> plantation for 25 age in Changjie, Xinjiang	6.812	0.99	[44]
青海云杉天然林,青海祁连山,120~210a <i>Picea crassifolia</i> natural forest for 120 to 210 age in Qilian mountain, Qihai	54.270	3.41	[14]
川西云杉人工林,四川马尔康,28a <i>Picea balfouriana</i> plantation for 28 age in Maerkang, Sichuan	15.982	0.57	This study
四川红杉人工林,四川卧龙,22a <i>Larix masteriana</i> plantation for 22 age in Wolong, Sichuan	18.320	0.83	This study
峨眉冷杉人工林,四川峨边,35a <i>Abies fabric</i> plantation for 35 age in Ebian, Sichuan	24.907	0.71	This study
日本落叶松人工林,四川米亚罗,23a <i>Larix kaempferi</i> plantation for 23 age in Miyaluo, Sichuan	37.832	1.64	This study

2.6 根系生物量密度

研究表明(表 7),川西山地主要人工林根系生物量密度的大小排序为峨眉冷杉>日本落叶松>川西云杉>四川红杉,分别为 14.546 t/(hm²·m)、13.211 t/(hm²·m)、10.782 t/(hm²·m)和 8.230 t/(hm²·m)。地上生物量密度的大小排序为日本落叶松>峨眉冷杉>四川红杉>川西云杉,分别为 63.053 t/(hm²·m)、41.512 t/(hm²·m)、30.533 t/(hm²·m)和 26.637 t/(hm²·m)。川西山地主要人工林种群生物量密度与种群的上层高不存在相关关系与其它研究结论一致^[41,47],但地上生物量密度差异较大,在 26.0~63.0 t/(hm²·m)之间,根系生物量密度差异较小,在 8.0~14.0 t/(hm²·m)之间,与一般生长郁闭的群落地上生物量密度(10.0~15.0 t/(hm²·m)^[47],7~11 t/(hm²·m)^[41])比较,川西山地人工林种群地上生物量密度为这一研究结果的 2~4 倍左右,根系生物量密度与油松的地上生物量密度接近^[41]。

3 结语

用 D²H 估测川西山地人工林单株林木根系生物量的适合模型均以幂函数模型为最佳,所筛选统计模型的相关系数较高,在 0.94~0.99 之间,说明估测值与实测值的拟合度高。

根系总生物量大小排序为日本落叶松>峨眉冷杉>四川红杉>川西云杉,分别为 37.832、24.907、18.320t/hm² 和 15.982 t/hm²,各级根的生物量占总根量的比例各不相同。

表 7 川西山地主要人工林种群根系生物量密度与地上生物量密度的关系

Table 7 Relation between root biomass density and aboveground biomass density of dominant plantation population in mountain land in western Sichuan

人工林类型 Plantation type	根系生物量 密度 RBD (t/(hm ² ·m))	地上生物量 密度 ABD (t/(hm ² ·m))
川西云杉人工林 <i>Picea balfouriana</i> plantation	10.782	26.637
四川红杉人工林 <i>Larix masteriana</i> plantation	8.230	30.533
峨眉冷杉人工林 <i>Abies fabric</i> plantation	14.546	41.512
日本落叶松人工林 <i>Larix kaempferi</i> plantation	13.211	63.053

RBD, Aboveground Biomass Density; ABD, Root Biomass Density

根系生物量集中在分布土层 0.00~40.00cm,占 96.00%以上,在 0.00~20.00cm,20.00~40.00cm 和 40.00~60.00cm 的各层根系生物量分配比例,川西云杉为 34:12:1,四川红杉为 24:6:1,峨眉冷杉为 15:7:1,日本落叶松为 63:14:1。

引进树种日本落叶松根系年平均净生产量为川西云杉的 2.88 倍,四川红杉的 1.96 倍,峨眉冷杉 2.34 倍。而且其根系年平均净同化率也高于乡土树种,为川西云杉的 2.26 倍,四川红杉的 1.96 倍,峨眉冷杉 2.93 倍。川西山地主要人工林种群根系生产力的大小排序为日本落叶松>四川红杉>峨眉冷杉>川西云杉,分别为 1.64 t/(hm²·a)、0.83 t/(hm²·a)、0.71 t/(hm²·a)和 0.57 t/(hm²·a)。

References:

- [1] Hendrick R L, Pregitzer K S. The demography of fine root in the northern hardwood forest, *Ecology*, 1992, 73: 1094~1104.
- [2] Nadelhoffer K J, Raich J W. Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forestry ecosystem. *Ecology*, 1992, 73:1139~1147.
- [3] McClaugherty C A, Aber J D & Melillo J M. The role of fine root in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystem. *Ecology*, 1982, 63: 1481~1490.
- [4] Vogt K A, Gerier C C & Vogt D J. Production, turnover and nutrient dynamics of above-and below-ground detritus of world forest. *Adv. Ecol. Res.*, 1986, 15:303~330.
- [5] Böhm W, Köpke U. Comparative root investigation with two profile wall methods. *Z. Acker-Pflanzenbau*, 1977, 144, 297~303.
- [6] Hoffmann G, *et al.* Ökologie und physiologie des wurzelwachstums II. *Int. Symp. Potsdam*, 1971, Berlin: Akademie-Verlag, 1974.
- [7] Goldfarb D, Hendrick R & Pregitzer K. Seasonal nitrogen and carbon concentration in whitw, brown and woody fine roots of sugar maple (*Acer saccharum*). *Plant and Soil*, 1990, 126: 144~148.
- [8] Persson H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant and Soil*, 1983,71:87~101.
- [9] Robinson C H, Kirkham J B & Littlewood R. Decomposition of root mixtures from high arctic plants: a microcosm study. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31: 1101~1108.
- [10] Roy S, Singh J S. Seasonal and spatial dynamics of plant——available N and P pools and N-mineralization in relation to fine roots in a dry tropical forestry habitat. *Soil Biol. Biochem.*, 1995, 27:33~40.
- [11] Ruess R. W, Cleve K, Yarie J, *et al.* Contribution of fine root production and turnover to the carbon and nitrogen cycling in taiga forestry of the Alaskan interior. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1996, 26: 1326~1336.
- [12] Santantonio D, Grace J C. Estimating fine-root production and turnover from biomass and decomposition data: a compartment-flow model. *Canadian Journal of Forestry Research*, 1987, 17: 900~908.
- [13] Thorup-Kristina K, Riki B. Temporal and spatial root development of cauliflower (*Brassica oleracea* var. *botrytis*). *Plant and Soil*, 1998, 201:37~47.
- [14] Chang X X, Che K J & Song C F. Preliminary studies on the biomass of *Picea crassifolia* forest community in Qihai Mountains. *Journal of Northwest Forestry University*, 1996,11(1): 19~23.
- [15] Chen J L,X J Xu, Jia Y Zh, *et al.* Studies on the turnover of fine roots in the secondary oak forest of Kongqing Hill. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1999, 23(1): 6~10.
- [16] Cui L J, Liang Z S, Han R L. Biomass, soil and root sysstem distribution characteristics of *Seabuckthorn* × *Poplar* mixed forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, 39(6):1~7.
- [17] Han Y Z, Liang S F. A research on the root distribution and biomass of North-China larch. *Shanxi Forestry Sicence and Techology*,1997, 3: 36~40.
- [18] Li H L, Dong Z, Wang H L, *et al.* Study on the root distribution characteristic and biomass of *Ulmus pumila* in Hunshandake Sands. *Journal of Arid land Resources and Enviroment*, 2002,16(4): 99~105.
- [19] Liao L P, Yang Y J, Wang S L, *et al.* Distribution, decomposition and nutrient return of the fine root in pure *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* and mixed plantations. *Acta Ecologica Sinica*, 1999,19(3): 342~246.
- [20] Liao L P, Gao H, Yu X J. Nutrient retranslocation in fine roots of *Cunninghamia lanceolata*, *Alnus cremastogyne* and *Kalopanax septemlobum* in the mixed plantation——a pilot study. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000,11(2):161~164.
- [21] Shan J P, Tao D L, Wang M *et al.* Fine roots tuover in a broad-leaved *Korean pine* forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1993, 4(3): 241~245.
- [22] Shi P L, Zhong Z C & Li X G. A study on root system of alder and cypress mixed plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 1996,16(6): 623~631.
- [23] Wen D Z, Wei P, Kong G H, *et al.* Production and turnover rate of fine roots in two lower subtropical forest sites at Dinghushan. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, 23(4): 361~369.

- [24] Zhai M P, Jiang S N & Jia L M. Fine-root dynamics in mixed plantation of poplar and black locust. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(5/6): 39 ~ 44.
- [25] Yang Y S, Chen G S Lin R Y, *et al.* Dynamics of energy for fir roots in mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(1): 31 ~ 34.
- [26] Janssens I A, Crookshanks M, Ceulemans R. Elevated atmospheric CO₂ increases fine root production, respiration, rhizo sphere respiration and soil CO₂ efflux in Scots pine seedlings. *Global Change Biology*, 1998, 4 (8) : 871 ~ 878.
- [27] Zhang X Q, Wu K H. Fine-root production and turnover for forest ecosystems. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(3): 126 ~ 137.
- [28] Böhm W, Maduakor H & Taylor H M. Comparison of five methods for characterizing soybean rooting density and development. *Agron. J.* 1977, 69, 415 ~ 419.
- [29] Böhm W. *Methods of studying root systems*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1979.
- [30] Liu X L, Su Y M, Liu Sh R, *et al.* Studies of ecology of plantation in alpine forest areas of western Sichuan: division and classification of plantation. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2004, 25(1): 1 ~ 9.
- [31] Yang Y P, Li C B, *et al.* *Forests in Sichuan*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1992. 1189 ~ 1372.
- [32] Liu X L, Su Y M, *et al.* Researches on competitive laws of artificial *Picea balfouriana* forest populations. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 1998, 19(2): 14 ~ 21.
- [33] Liu X L, Wang M, Su Y M, *et al.* Studies of ecology of plantation in alpine forest areas of western Sichuan: population structure. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2003, 23(3): 1 ~ 9.
- [34] Liu X L, Su Y M, Liu Sh R, *et al.* Macronutrients and Their Allocations in Non - photosynthetic Organs in the *Picea balfouriana* in Western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(12): 2573 ~ 2578.
- [35] Feng Z W, Chen C Y, Zhang J W, *et al.* Biological productivity of two forest communities in Huitong county of Hu'nan Province. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1982, 6(4): 257 ~ 267.
- [36] Fujimori T, Kawanabe S, Saito H, Grier C C & Shidei T. Biomass and primary production in forests of three major vegetation zones of the Northwestern United States. *Journal of Japan Forest Society*, 1976, 58 (10): 360 ~ 373.
- [37] Monsi M. Mathematical models of plant communities. In: Eckardt F E ed. *Functioning of terrestrial ecosystems at the primary production level (Proceeding Copenhagen Symposium)*, 1965. Natural Resources Research, Paris: UNESCO, 1968, 5: 349 ~ 358.
- [38] Jiang H. A study on the biomass and production of *Picea purpurea* forest communities. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1986, 10(2): 146 ~ 152.
- [39] Huxley J S. Notes on differential growth. *America Nature*, 1931, 65: 289 ~ 315.
- [40] Boonstra A E. *Pflanzenzüchtung und Pflanzenphysiologie*. Züchter, 1931, 3: 345 ~ 352.
- [41] Fang, J Y, Liu G H & Zhang S H. Growth characteristics of *Pinus tabulaeformis* populations in the western limit of its distribution. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17(4): 305 ~ 316.
- [42] Dang C L, Wu Z L, Wang C Y, *et al.* Studies biomass and net primary production of *Abies georgei* community. *Journal of Yunnan University*, 1994, 16 (3): 214 ~ 219.
- [43] Wang Y, Zhao S D. Biomass and net productivity of *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(4): 389 ~ 391.
- [44] Mu L Q, Zhang J, Liu X J, *et al.* Study on the tree layer biomass of *Picea koraiensis* artificial forests. *Bulletinn Botanical Research*, 1995, 15(4): 551 ~ 557.
- [45] Wu Z L, Dang C L, He Z R, *et al.* A preliminary studies on biomass of *Picea brachytyla* var. *complanata* forests in Northwest Yunnan Province, China. *Journal of Yunnan University*, 1994a, 16(3): 230 ~ 234.
- [46] Wu Z L, Dang C L, He Zh R, *et al.* A preliminary studies on net production of *Picea brachytyla* var. *complanata* forests in Northwest Yunnan Province, China. *Journal of Yunnan University*, 1994b, 16(3): 241 ~ 244.
- [47] Kira T & Shidei A. Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the western palific, *Japan Journal of Ecology*, 1967, 17(2): 70 ~ 87.

参考文献:

- [14] 常学向, 车克钧, 宋彩福. 祁连山林区青海云杉群落生物量的初步研究. *西北林学院学报*, 1996, 11(1): 19 ~ 23.
- [15] 陈金林, 许新健, 姜志林, 等. 空青山次生栎林细根周转. *南京林业大学学报*, 1999, 23(1): 6 ~ 10.
- [16] 崔浪军, 梁宗锁, 韩蕊莲, 等. 沙棘~杨树混交林生物量、林地土壤特性及其根系分布特征研究. *林业科学*, 2003, 39(6): 1 ~ 7.
- [17] 韩有志, 梁胜发. 华北落叶松人工林根系分布及根系生物量研究. *山西林业科技*, 1997, 3(3): 36 ~ 40.

- [18] 李红丽,董智,王林和,等.浑善达克沙地榆树根系分布特征及生物量研究.干旱区资源与环境,2002,16(4):99~105.
- [19] 廖利平,杨跃军,汪思龙,等.杉木火力楠纯林及其混交林细根分布、分解及养分归还.生态学报,1999,19(3):342~346.
- [20] 廖利平,高洪,于小军,等.人工混交林中杉木、桉木和刺楸细根养分迁移的初步研究.应用生态学报,2000,11(2):161~164.
- [21] 单建平,陶大立,王森,等.长白山阔叶红松林细根周转的研究.应用生态学报,1993,4(3):241~245.
- [22] 石培礼,钟章成,李旭光.桉柏混交林根系的研究.生态学报,1996,16(6):623~631.
- [23] 温达志,魏平,孔国辉,等.鼎湖山亚热带森林细根生产力与周转.植物生态学报,1999,23(4):361~369.
- [24] 翟明普,蒋三乃,贾黎明.沙地杨树刺槐混交林细根动态.北京林业大学学报,2002,24(5/6):39~44.
- [25] 杨玉盛,陈光水,林端余,等.杉木、观光木混交林群落细根能量动态变化.北京林业大学学报,2002,24(1):31~34.
- [27] 张小全,吴可红.森林细根生产和周转研究.林业科学,2001,37(3):126~137.
- [30] 刘兴良,宿以明,刘世荣,等.川西高山林区人工林生态学研究-人工林分布与经营分区.四川林业科技,2004,25(1):1~9.
- [31] 杨玉坡,李承彪,等.四川森林.北京:中国林业出版社,1992.
- [32] 刘兴良,宿以明,等.川西云杉人工林竞争规律的初步研究.四川林业科技,1998,19(2):14~21.
- [33] 刘兴良,汪明,宿以明,等.川西高山林区人工林生态学研究——种群结构.四川林业科技,2003,24(3):1~9.
- [34] 刘兴良,宿以明,刘世荣,等.四川西部川西云杉人工林非同化器官营养元素含量及分布.生态学报,2003,23(12):2573~2578.
- [35] 冯宗炜,陈楚莹,等.湖南会同县两个森林群落的生物生产力.植物生态学与地植物学学报,1982,6(4):257~267.
- [38] 江洪,紫果云杉天然中龄林分生物量和生产力的研究.植物生态学与地植物学学报,1986,10(2):146~152.
- [41] 方精云,刘国华,张舒寰.分布区西缘油松种群生长特征.植物生态学与地植物学学报,1993,17(4):305~316.
- [42] 党承林,吴兆录,王崇云,等.云南中甸长苞冷杉群落的生物量和净生产量研究.云南大学学报(自然科学版),1994,16(3):214~219.
- [43] 王燕,赵世洞.天山云杉林生物量和生产力的研究.应用生态学报,1999,10(4):389~391.
- [44] 穆丽嵩,张捷,刘祥君,等.红皮云杉人工林乔木层生物量的研究.植物研究,1995,15(4):551~557.
- [45] 吴兆录,党承林,和兆荣,等.滇西北油麦吊云杉林生物量的初步研究.云南大学学报(自然科学版),1994,16(3):230~234.
- [46] 吴兆录,党承林,和兆荣,等.滇西北油麦吊云杉林净第一性生产力的初步研究.云南大学学报(自然科学版),1994,16(3):241~244.