

云杉人工纯林中树木个体径向生长过程及林窗疏伐后的释放效应*

幸福^{1,2,3} 包维楷^{1,2**} 庞学勇^{1,2} 闫晓丽^{1,2} 刘鑫^{1,2,3}

(¹中国科学院成都生物研究所 成都 610041)

(²中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室 成都 610041)

(³中国科学院大学 北京 100049)

摘要 选择川西地区代表性云杉 (*Picea asperata*) 人工纯林, 研究了林分中不同生长状态云杉个体径向生长过程, 建立了树轮标准年表 (STD), 揭示了径向生长与气候因子的关系. 评估了林窗疏伐措施应用后的径向生长量释放效应. 结果表明: (1) 云杉个体径向生长过程可分为快速生长期 (1982-1993) 和生长减慢期 (1994-2005) 两个阶段, 优势木年平均径向生长量显著大于劣势木; (2) 云杉年轮指数与上一年10月平均气温、年蒸发量、年干燥度呈极显著负相关关系, 年蒸发量是制约其径向年生长量的关键因子; (3) 林窗模式疏伐措施显著促进了云杉个体径向生长, 且生长释放效应在林窗边缘强于林内, 优势木显著大于劣势木. 综合说明通过小强度林窗疏伐措施, 可有效改善林地环境, 促进云杉生长, 而优先疏伐被压的劣势木、最大限度保留优势木是优化小强度林窗疏伐方案的重要策略. 图5 表4 参50

关键词 人工纯林; 云杉; 径向生长过程; 气候影响; 林窗疏伐; 生长释放

CLC S791.180.2 : S753

Radial Growth Process of *Picea asperata* and Its Response to Gap Model Thinning Within the Single Spruce Plantation at the Western Sichuan, China*

XING Fu^{1,2,3}, BAO Weikai^{1,2**}, PANG Xueyong^{1,2}, YAN Xiaoli^{1,2} & LIU Xin^{1,2,3}

(¹Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

(²Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization, Chinese Academy of Sciences; Ecological Restoration Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

(³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In this study, we selected *Picea asperata* with various growth status within the single spruce plantation in the western Sichuan to investigate their radial growth dynamics in various growth periods and the relationships with different climatic factors. We also applied the technique of thinning by mimicing gap formation, to explore the release effect of radial growth after the gap creation. The results showed that (1) the radial growth process was divided into two phases: the fast-growing period (1982-1993) and the slow-down-growing period (1994-2005); in both phases the average annual radial growth increment of the dominant trees was significantly greater than that of the oppressed ones; (2) the tree-ring indices were related to climatic factors, including mean monthly temperature in previous October, annual evaporation and annual aridity index. This suggested that annual evaporation was the key factor to restricted radial growth; (3) the thinning by stimulating gap formation promoted the radial growth of spruce individuals. The release effect of growth at the gap fringe was stronger than that within stand canopy, and the effect of growth release was significantly stronger for dominant trees than the oppressed trees. We concluded that low intensity of thinning by mimicing gap formation can improve the forest environment quality and the individual ability in environmental resources utilization. Therefore, preferentially felling the oppressed trees and retaining the dominant trees within the single spruce plantation is suggested to be the key countermeasure to optimize the low intensity of gap model thinning and promote and retain growth release effect. Fig 5, Tab 4, Ref 50

Keywords single tree species plantation; *Picea asperata*; radial growth process; climate influence; gap model thinning; growth release effect

CLC S791.180.2 : S753

林木生长过程及其规律是揭示和评价森林结构与功

能、动态演替以及林木生产力的理论基础, 其研究可为森林可持续的经营管理提供理论依据. 人工林是全球森林的重要组成部分, 在全球木材供应与减缓全球变暖中扮演着不可替代的作用. 明确人工林中不同状态的林木个体生长过程及其在群体竞争状态下的生长规律, 对人工林生产力的优化和经营管理具有重要意义, 然而目前对人工林发展过程中林木生长过程的研究还相对较少.

收稿日期 Received: 2012-03-27 接受日期 Accepted: 2012-04-19

*中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05070306) 和“十二五”国家科技支撑计划课题 (2011BAC09B04-02) 共同资助 Supported by the Strategic Guide Science and Technology Special Project of Chinese Academy of Sciences (No. XDA05070306) and the National Science & Technology Pillar Program in “12th Five-year Plan” of China (No. 2011BAC09B04-02)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: baowk@cib.ac.cn)

森林中树木个体的生长过程与立地条件关系紧密,既受树种特性、群体结构影响,又受人为干扰与经营管理策略的左右。研究表明,小范围的采伐可以改善林内的光照和温度条件,有利于树木的生长^[1]。例如,Deal等人通过对阿拉斯加西南部北美铁杉林(*Tsuga heterophylla*)的研究发现,择伐能够明显地提高不同径级树木的生长率^[2],也可以促进树木生长量的增加^[3-4]。但是,长期不合理的采伐操作也会对树木的生长产生消极的影响^[5]。因为择伐让林内温度传导和空气流动增强,使土壤水分散失加速,最终导致树木在干旱胁迫下死亡或者出现生长衰退^[6]。择伐强度过高,树木生长量减少是不可逆转的^[7]。此外,择伐对树木生长的影响程度也会因地理条件的不同而异^[8]。显然,随着生长过程和砍伐强度的变化,林木对疏伐措施的反应也是随之变化的,因此,强化森林中林木生长过程和规律研究,评估其对森林经营管理措施的效应是必要的。

云杉(*Picea asperata*)是我国川西亚高山地区针叶林的典型代表树种,主要分布在岷江上游,海拔一般在2 500-3 400 m^[9],也是该区域森林资源的重要组成部分^[10]。云杉林占当地人工林面积的80%以上,林龄大多小于40年^[11-12]。目前,对云杉人工林研究主要集中在土壤养分、结实规律、天然更新以及人工林生态恢复过程等方面^[12-16],关于云杉人工纯林中个体径向生长过程变化、气候因子和疏伐管理措施对其生长的影响还缺乏深入的研究。

本文选择四川西部典型云杉人工纯林,以树轮生态学为理论基础,分析云杉径向生长过程,阐释其与气候因子的相关关系,以及研究林窗疏伐后的生长释放效应,目的是明确云杉径向生长过程,评估气候因子、林窗疏伐活动对其径向生长的影响,试图揭示:(1)人工林中云杉个体径向生长过程以及个体的差异性;(2)影响径向生长的关键气候因子;(3)林窗疏伐后云杉径向生长释放效应过程与强度的差异性。

1 研究区概况

研究区位于中国科学院茂县山地生态系统定位研究站(103°54' E, 31°42' N, 海拔1 826 m)附近,属岷江上游茂县大沟流域。区域地貌为高山峡谷类型,属暖温带季风气候,气温年较差小,日较差大,降水较充沛,干湿季明显,雨量分配不均,雨热同期,由于蒸发量大,表现为全年水分亏缺^[17]。年日照时数1 139.8 h,年均温9.4 °C,年降雨量805.2 mm,年蒸发

量1 052.5 mm,土壤类型主要为黄棕壤和棕壤^[18]。所研究的云杉林疏伐试验地位于该地段的土地岭西坡(103°53'34" E, 31°42'05" N),海拔2 030 m。20世纪80年代以前,由于长期的人为(伐木、樵采)干扰,该地区植被类型主要为大面积灌丛、少量草坡和人工针叶林。从20世纪70年代末80年代初开始,通过人工造林、封育及自然更新,经过近30多年的恢复,目前植被正处于演替的前期,在局部已经形成针叶林,针叶林林龄一般在30多年左右。但由于靠近公路及当地居民放牧、践踏等干扰存在,植被分布异质性较强^[18]。

本研究选择的云杉人工纯林样地为1982年造林,造林后3-5年内进行过苗木周围的杂灌草抚育以及死亡幼苗补植。调查取样选择的样地面积约0.5 hm²,林分郁闭度在0.85-0.92之间,林木密度2 400株/hm²^[19],平均胸径28.9 cm,平均高度14.0 m,树龄平均为30年。

2 材料与方

2.1 调查取样

调查取样选择的样地由于地区输电线路布设需安设高压电铁塔,于2006年带状砍伐形成了长方形、面积约600 m²(20 m×30 m)的大林窗,离地面20 cm伐除了所有的全木林木。野外采样工作于2010年11月进行,2011年3月进行了少量补充。采样以林窗边界木为对象进行,同时选择距边界约4-5 m处的林内树木作为对照。在选定的样地上分为林窗边缘、林内两种生境条件进行,随机选择22株云杉样株取样(林窗边缘15株,林内7株),进行测树调查和树木生长锥的样芯钻取。测树调查的主要指标是树高、枝下高、胸径等(表1)。树木样芯的采集遵循树木年轮学的基本规范^[20-21],于树干胸高处(1.3 m)且平行于等高线钻取,每棵树采集2个样芯。样芯预处理则采用Stokes和Smiley(1968)的方法^[22]进行:将采集到的样芯放置在平坦处晾干,后用白乳胶和细线固定在特制的样槽中,自然风干后用由粗到细不同粒径(160、320、600目)的砂纸打磨抛光,以待下一步数据的获取与测定。

2.2 交叉定年与轮宽测定

样芯预处理后的交叉定年、树轮宽度量测工作中科院成都生物研究所年轮实验室进行。首先在40倍体式显微镜下进行交叉定年^[20],从中找出伪轮和缺轮,对模糊不清无法标准定年的树木年轮打上标记。然后使用WinDendro软件^[23]配合扫描仪对年轮宽度进行逐年量测,并在量测时进

表1 四川茂县云杉人工纯林内不同状态的云杉样株基本信息

Table 1 The information of plant samples at various growth states within the single spruce plantation at Maoxian, Sichuan

树木类型 Growth state	树高 Height (H/m)	枝下高 Clear bole height (H/m)	疏伐前去皮胸径 Peeled DBH before thinning (D/cm)	疏伐后胸径增长量 DBH increase after thinning (D/cm)	生境 Habitat	总数 Total number (N)	株数 Plant number (n)
优势木 Dominant tree	15.8±0.8	10.5±1.0	29.53±0.25	3.63±0.29	林窗边缘 Gap fringe 林内 Within stand	7	4 3
平均木 Intermediate tree	13.4±0.5	8.1±0.4	25.12±0.45	2.83±0.21	林窗边缘 Gap fringe 林内 Within stand	12	10 2
劣势木 Oppressed tree	12.0±0.2	8.7±0.4	19.10±0.56	2.09±0.34	林窗边缘 Gap fringe 林内 Within stand	3	1 2

行伪轮删除和缺轮添加等处理,以进一步校正定年结果,该测量系统的精度可以达到0.001 mm.接着利用计算机程序COFECHA^[24]对样芯年轮宽度序列的定年和量测结果进行相关性检验,保证定年和量测的准确性,剔除那些效果较差、与主序列之间的相关系数达不到95%置信区间的样芯.最终,44根云杉样芯全部定年成功,可用来进行下一步的研究.

2.3 云杉的系统聚类分析

测树调查和轮宽量测获取的变量指标较多,包括树高、枝下高、胸径、基径等.结合研究目标,遵循R-型聚类原则,同时选择树高、疏伐前去皮胸径两个变量指标进行系统聚类分析(Hierarchical cluster analysis).在SPSS、Origin Lab软件的辅助下,Ward 离差平方和法(Sum of squares of deviation, Ward's minimum variance method)最终将22棵云杉样株聚类为3大类:优势木(7株)、平均木(12株)和劣势木(3株).具体系统聚类分析结果见表1.理论上,云杉人工林中优势木受种内竞争影响较平均木、劣势木弱,能较为纯粹地反映其生长动态和气候因子变化信息,而劣势木由于受到压迫,对疏伐后的生长释放表现应较为明显,所以本研究借助优势木来探讨云杉径向生长过程及其与气候因子的关系,重点对比优势木和劣势木,来揭示林窗疏伐后的释放效应.

2.4 气候资料收集

气候资料来源于距采样点最近(2 km)且可为研究提供准确可靠气象数据的中国科学院茂县山地生态系统定位站.气象数据区间为1989-2004年(16年),经均一性检验确认,这些气候资料数据真实可靠,没有明显的突变和随机波动变化,不同月份对应的降水、温度波动情况较为统一(图1),均一性好,可以用它来代表茂县土地岭地区的自然气候变化特征,进行相关分析.

由于气候变化对于树木年轮的影响具有“滞后效应”,前一年的气候状况会对当年的树木年轮生长造成影响^[25].考虑到茂县全年降雨量的最大值通常出现在夏季6-8月,选择的气候资料时间跨度为每月(前一年5月到当年10月)和全年两种指标.气候要素包括:月平均气温(℃)、月最高温(℃)、月最低温(℃)、月平均降水(mm)、月平均蒸发量(mm)、月平均干燥度、年平均温度(℃)、≥10℃积温(℃)、≥5℃积温(℃)、温暖指数(WI)^[26]、寒冷指数(CI)^[27]、温度年较差(ART)、年降雨量(mm)、年蒸发量(mm)、年均湿度、年干燥度.需要说明的是,本研究中的干燥度为G. N. Vyssotsky (1905)干燥度^[28],即:

$$K = \frac{P}{E_0}$$

式中, K 即G. N. Vyssotsky干燥度, P 为平均降水量(mm), E 为平均温度(℃).之所以选择此干燥度是因为其计算简单,数据易得,与植被和水分的对应性较强,生态学意义明确,克服了其他干燥度计算方法复杂,所需的气象要素多,数据不全致使无法计算等缺点.

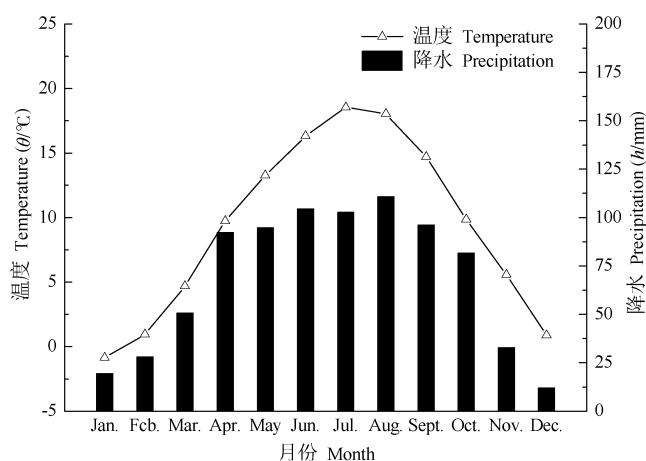


图1 茂县生态站月均温、月降水量变化(1989-2004年)

Fig. 1 Variations of mean monthly temperature (°C) and precipitation (mm) of Maoxian mountain ecosystem research station in western Sichuan (1989-2004)

3 结果与讨论

3.1 径向生长过程

云杉间伐前25年(1982-2006),林中优势木与劣势木个体径向生长总体趋势和生长过程的曲线拟合基本相同(图2),但优势木年均径向生长总体上显著高于劣势木[优势木(5.17±0.20) mm,劣势木(4.03±0.19) mm,见表1].单因素方差分析(LSD检验, $P<0.05$)显示,云杉优势木和劣势木径向生长过程均可被划分为两个阶段:快速生长期(1982-1993)和生长减慢期(1994-2005).在快速生长期,径向生长连续维持在较高的水平,而劣势木小于优势木;在生长减慢期,郁闭后(1994-2000)两者的差异不显著.随着林分的进一步分化,在生长减慢期后期(2001-2005),优势木径向生长于2000年出现适度的回升,劣势木继续保持下滑的趋势.

树木年径向生长量与生理年龄显著相关^[29],而云杉在10-30年间会有一个生长高峰^[30].本研究的云杉虽未出现显著生长高峰,但在1982-1988年,个体径向生长速度有所增加.优势木在快速生长期大规模的快速更新,其径向生长量在栽培后第5年(1987年)时达到最大绝对值(7.812 mm a⁻¹),此现象可解释为短暂的移栽缓苗恢复期后,云杉植株较小,个体间保持一定空间距离,使单株生境中水平和垂直空间的环境资源较丰富,种内竞争较弱.在生长减慢期,优势木径向生长先平稳发展,而后缓慢下降,但其绝对值仍维持在6.000 mm a⁻¹以上.导致这种平稳生长状态的原因是水平和垂直空间的环境资源在云杉个体间分配较均衡,但此状态持续时间并不长,随着林分郁闭,最终被渐强的竞争所打破,随之出现林木分化和生长下降^[31].与优势木相比,劣势木在快速生长期生长过程平缓,生长量在栽培后第4年(1986年)时绝对值达到最大(5.500 mm a⁻¹),除个别年存在轻微波动外(可能是气候变化造成),总体绝对值均维持在4.000 mm a⁻¹以上.优势木和劣势木在郁闭成林(1993-1994年)后的逐年生长量

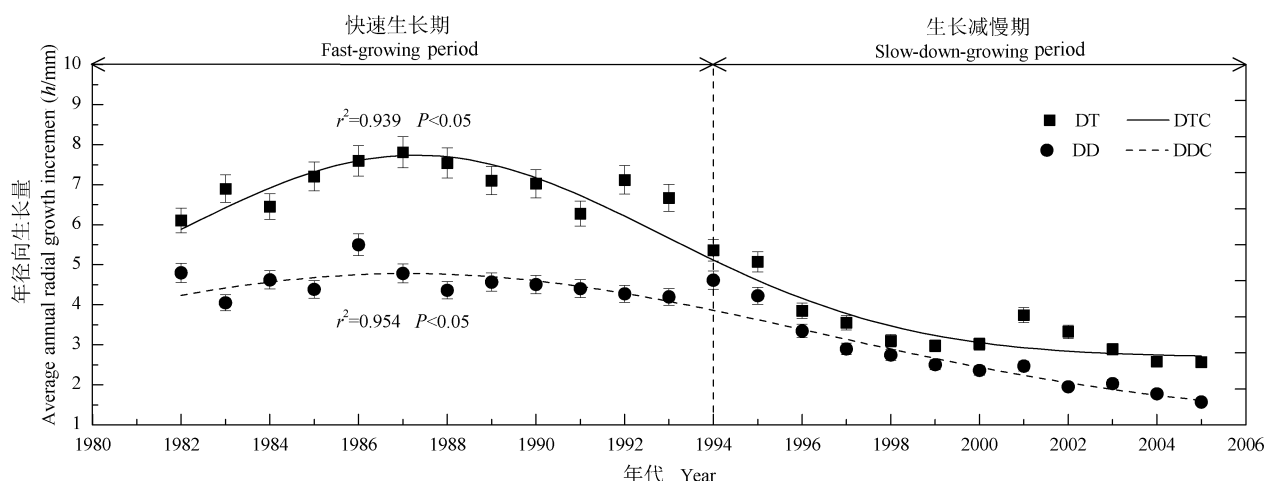


图2 茂县云杉人工纯林中优势木、劣势木的年径向生长量比较及其生长过程的拟合曲线

Fig. 2 The average annual radial growth increment and fitting curve of the dominant trees and the oppressed trees in the single spruce plantation at Maoxian, Sichuan

DT, 优势木; DD, 劣势木; DTC, 优势木拟合曲线; DDC, 劣势木拟合曲线

DT, dominant trees; DD, oppressed trees; DTC, fitting curve of the dominant trees; DDC, fitting curve of the oppressed trees

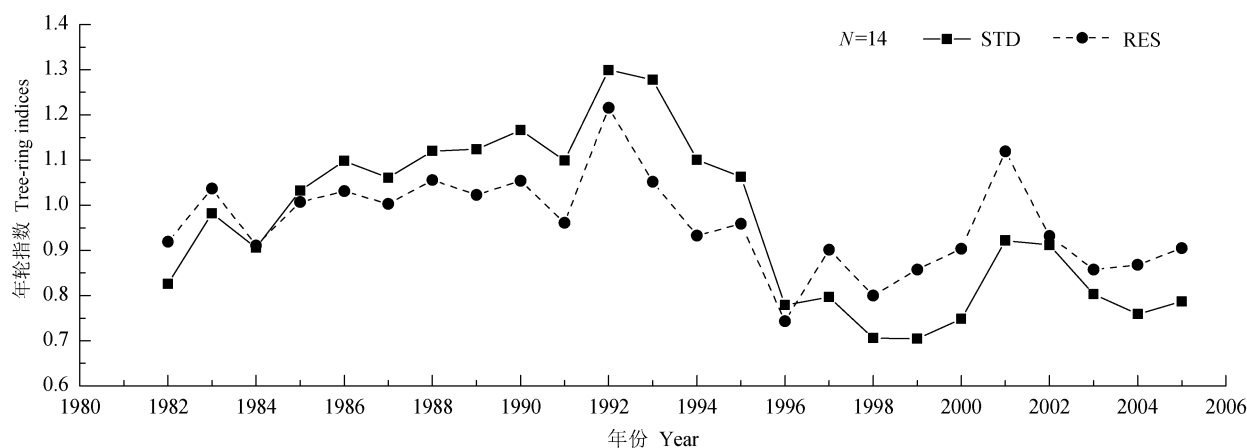


图3 茂县云杉人工纯林中优势木的标准年表和差值年表

Fig. 3 Standard tree-ring chronology and residual tree-ring chronology of the dominant trees within the single spruce plantation at Maoxian, Sichuan
STD, 标准年表序列; RES, 差值年表序列; N=14

STD, series of standard tree-ring chronology; RES, series of residual tree-ring chronology; N=14

均显著下降。由于对光资源的竞争加剧, 两者将更多的生物量投入到高生长, 而用于径向生长的投入减少。随着郁闭度的加大, 土壤总孔隙也会减少^[32], 影响云杉根部养分吸收, 促进生长量的下降。初步推测, 生长减慢应是随后发生自疏现象的前期反应。自疏将导致部分云杉生长缓慢甚至死亡, 加大植株间的距离, 种群内光、热、水、土等资源重新分配, 竞争性利用现象减弱。而自疏幸存个体的径向生长则会进一步增大, 而彼此间的竞争关系却逐渐减弱, 最终出现个体间的竞争强度将随着径级的增大而趋于减小的现象, 这符合树木生长的自然规律。此规律在对甜槠^[33]、黄果厚壳桂^[34]、珙桐^[35]和青冈栎^[36]等植物径向生长动态的研究中也得到了证实。总之, 优势木与劣势木生长过程与生长量变化规律相似, 这是由云杉的生物学特性决定的, 而生长量的显著差异则是由不同状态云杉资源利用能力的差异性、环境资源变化及其可利用性所决定的。因此, 从个体水平去研究云杉生长过程

和生长量变化的差异性, 综合反映出林分演替过程中, 立地条件、资源利用过程和效率的时空变化, 直观反映种内竞争和个体间相互作用, 这对了解云杉人工林种群结构功能以及发展动态具有重要的生态价值。

3.2 径向生长与气候因子的关系

3.2.1 优势木年表的基本统计特征 本研究选择国际通用的 ARSTAN^[21, 37]程序对优势木年轮宽度序列进行去趋势和标准化, 去掉由于树龄增长而产生的生长趋势以及由立地条件、人为活动、动物虫害等原因导致的生长扰动, 排除其中的非气候信息。我们选择负指数函数对逐个年轮宽度序列进行拟合以实现上述目的, 然后用树轮宽度序列和与之对应的生长趋势拟合曲线的比值, 对所得到的去趋势进行加权韧性平均 (Biweight robust mean)^[38], 合成了平均值为1、无量纲的树木年轮宽度年表 (图3)。

标准年表 (STD) 和差值年表 (RES) 统计特征量反映

表2 标准年表和差值年表主要统计特征量比较

Table 2 Chronology statistics of standard tree-ring chronology and residual tree-ring chronology

具体指标 Indicator	差值年表 Residual tree-ring chronology	标准年表 Standard tree-ring chronology
年表区间 Chronology interval	A.D. 1982-2005	A.D. 1982-2005
平均值 Mean	0.974	0.971
标准偏差 Standard deviation (SD)	0.171	0.237
平均敏感度 Mean sensitivity	0.131	0.119
一阶自相关 Autocorrelation order 1	0.350	0.443
样芯间相关系数 Mean inter-series correlation (Rbar)	0.341	0.430
信噪比 Signal-to-noise ratio (SNR)	6.993	10.345
样本总体代表性 Expressing population signal (EPS)	0.875	0.912

云杉生长的基本特征和年表不同频率信息量的多少(表2)。RES和STD年表的区间为A.D.1982-2005。样芯间的相关系数($P<0.01$)分别为0.341和0.430, RES<STD, 说明限制样芯逐年生长宽度的除气候因子外, 还有其他干扰因子。RES和STD年表的一阶自相关系数分别为0.350和0.443, 说明树木年轮前一年的生长状况对当年生长有一定的影响^[20]; 平均敏感度分别为0.131和0.119, 说明样芯资料具有较弱高频波动信号; 信噪比分别为6.993和10.345, 说明树木样芯保存有较多一致信号, 且相对应的噪音较少。此外, RES和STD年表的样芯总体代表性也达到可接受水平, 其值分别为0.875和0.912, 采集样芯量包含信号能够代表总体特征^[39]。综合分析, 土地岭云杉生长受相同环境因子影响, 具有较多共有信息, 适于进行年轮气候学研究, 选择未经自回归模型去除自相关的STD年表进行生长与气候的相关分析。

3.2.2 优势木径向生长与气候因子的关系 以月份为时间跨度, 依托Pearson相关分析法, 研究优势木径向生长与气候因子关系可知(图4): 云杉优势木径向生长与上一年10月平均气温达到极显著负相关关系($r=-0.654$), 与当年10月平均气温达到显著负相关关系($r=-0.575$); 与上一年10月($r=-0.593$)和当年10月($r=-0.528$)的月最高气温达到显著负相关关系; 与上一年10月和当年10月的月最低气温达到显著负相关关系, 相关系数 r 分别为-0.542和-0.548。总体上, 优势木径向生长与温度因子(月平均气温、月最高温、月最低温)的关系具较好的负相关一致性。较之温度, 径向生长与月平均降水、月平均干燥度的相关明显偏弱(图4): 仅与上一年6月降水($r=0.521$)呈显著正相关关系, 上一年6月的干燥度($r=0.517$)达到显著正相关。此外, 径向生长与上一年9、10月和当年秋季9月的月平均蒸发量的负相关关系也达到显著水平, r 值分别为-0.554, -0.516, -0.600。

以全年为时间跨度, 研究优势木径向生长与气候因子关系(表3)表明, 除与温度年较差($r=0.043$)、年降雨量($r=0.455$)呈正相关关系外, 径向生长均与其他气候指标呈负相关关系。其中, 径向生长与年均温($r=-0.539$)、 $\geq 5^{\circ}\text{C}$ 积温($r=-0.515$)和温暖指数($r=-0.516$)达到显著负相关关系。值得注意的是, 优势木径向生长与年蒸发量($r=-0.701$)和年干燥度($r=-0.655$)均达到极显著负相关, 说明温度和水分的作用可显著影响径向生长。进而逐步回归分析发现, 其中4项显著气候指标被排除, 仅年蒸发量保留, 证明年蒸发量是

制约云杉个体径向生长量的关键因子。

综合分析, 月份时间尺度上, 优势木径向生长与上一年10月、当年10月的月平均温度、月最高温和月最低温均呈现出显著负相关, 反应出温度对径向生长的影响及其“滞后效应”^[40]。土地岭地区降水的季节性分配极不均衡, 冬半年(11-次年4月)为旱季, 仅占全年降水的20%以下, 夏半年(5-10月)为雨季, 降水占全年降水的80%以上^[19]。10月恰为雨季和旱季的过渡期, 降水减少, 温度较高, 水分散失快, 温度通过影响蒸发量大小控制土壤湿度, 土壤湿度又直接关系到树木根系与主干对养分的吸收和输送^[41], 影响径向生长。这一影响机制在青藏高原横断山区中部^[41]、长白山北坡^[43]以及印度喜马拉雅山脉^[40]等地的树轮生态学研究中也得到了证实。同时, 上一年9、10月和当年9月的月平均蒸发量对径向生长的抑制作用也进一步补充说明了此影响机制。每年6、7月茂县降水量达到全年最大值, 水分作为干旱半干旱地区树木生长的限制因子, 解释了径向生长仅与上一年6月降水量达到显著正相关的原因。而上一年6月干燥度与径向生长的正相关关系, 则反映出降雨量、温度和蒸发量对树木径向生长的综合作用。综合考虑各气候因子, 茂县土地岭地区6月前后降水充足, 温度和蒸发量适中, 干燥度适宜, 如计划选择云杉进行生态植被重建工作, 当年6月前后是较好的造林时期。

全年时间尺度上, 年蒸发量是制约云杉个体径向生长的关键因子。从云杉自然分布区与生境适宜性可知, 云杉天然林广泛分布于温带、寒温带, 在川西地区的海拔分布范围为2 500-3 400 m, 降水丰沛, 云雾较多, 区域湿度大, 年均温约4-8 $^{\circ}\text{C}$ 。而土地岭人工林位于云杉自然分布区的海拔下限, 气候具暖温带性质, 降水季节性差异大, 冬季降雪量小, 相对较高的温度会导致较高蒸发量, 使云杉受到干旱胁迫, 不属于云杉的最佳栽培适宜区。此外, 较之岷江上游其它适宜区云杉(理县米亚罗、松潘、黑水, 海拔2 700-3 200 m^[44])栽培后的平均径向生长量, 本研究的径向生长总体偏小, 也比乡土阔叶树种(桦木、槭树等)径向生长速度慢。鉴于针阔混交林是土地岭该海拔的地带性植被, 建议种植落叶阔叶树种来推进森林恢复重建。

3.3 林窗疏伐后的径向生长释放效应及其强度差异性

在郁闭森林中, 树木将由资源竞争转为垂直空间的光资源竞争, 光照则成为树木生长的限制因子。而树种(个体)间就会表现为由光资源竞争衍生出的生长压制和释放。不耐荫

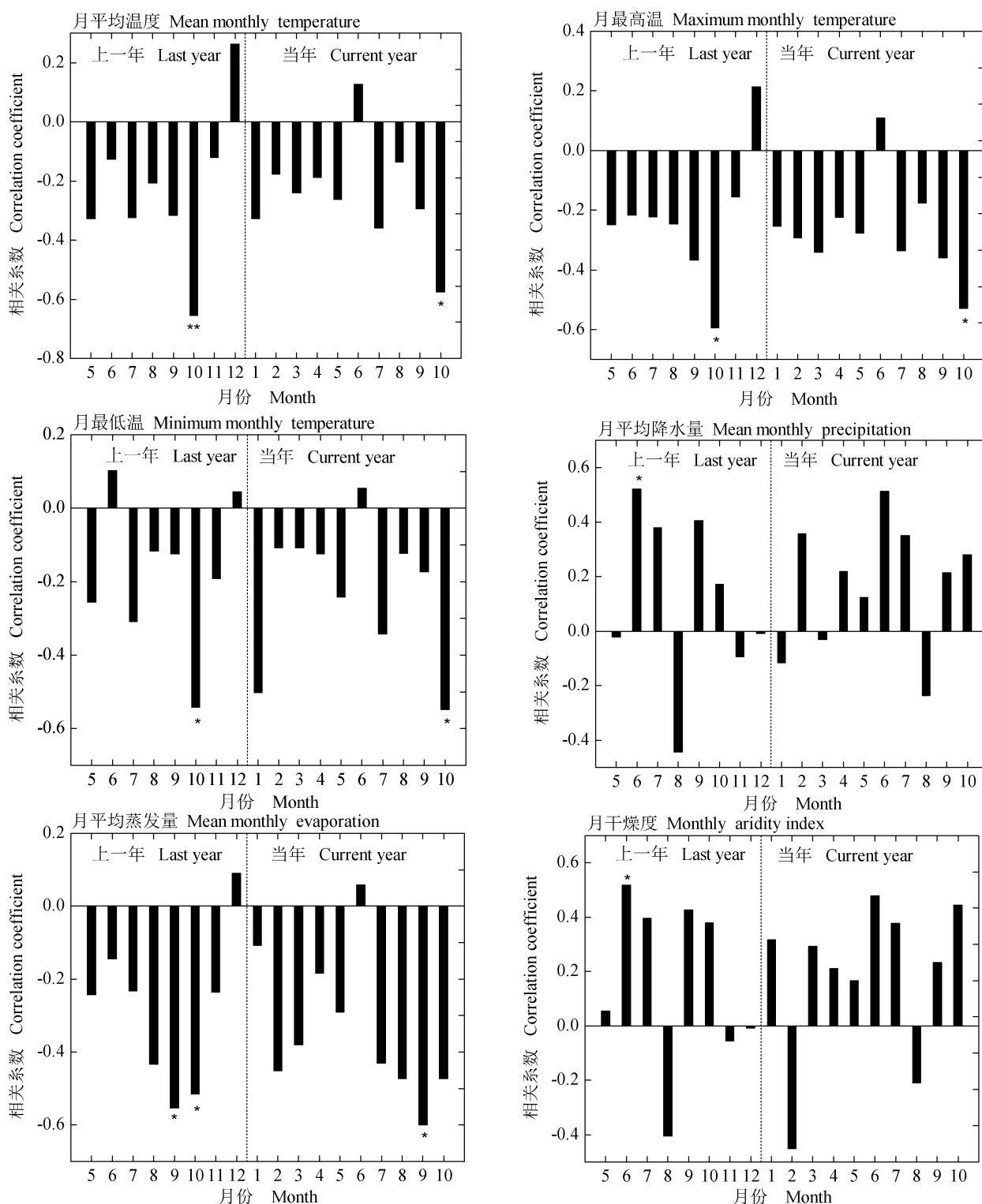


图4 茂县云杉人工纯林中优势木标准年表与气候因子的相关分析 (1989-2004, 以月份为时间跨度)

Fig. 4 Correlation analysis between climate and the standard tree-ring chronology of the dominant trees at Maoxian, Sichuan (1989-2004, month time span)

柱形图表示相关分析结果, *表示相关分析显著的月份 ($P < 0.05$, 二尾检验), **表示相关分析极显著的月份 ($P < 0.01$, 二尾检验)

Bar diagrams are the results of correlation analysis. The asterisks above columns represent significant effects ($P < 0.05$, 2-tailed) for correlation analysis; the double asterisks above columns represent highly significant effects ($P < 0.01$, 2-tailed) for correlation analysis

表3 茂县云杉人工纯林中优势木标准年表与气候因子的相关分析(1989-2004年,以全年为时间跨度;二尾检验)

Table 3 Correlation analysis between climate and the standard tree-ring chronology of the dominant trees at Maoxian, Sichuan (1989-2004, year time span; 2-tailed)

气候指标 Climate indicator	相关系数 Person correlation	Sig. (2-tailed)	N
年均温 Average annual temperature	-0.539*	0.031	14
≥10℃积温 Accumulated temperature ≥ 10℃	-0.397	0.128	14
≥5℃积温 Accumulated temperature ≥ 5℃	-0.515*	0.041	14
温暖指数 Warmth index (WI)	-0.516*	0.041	14
寒冷指数 Coldness index (CI)	-0.001	0.998	14
温度年较差 Annual range temperature (ART)	0.073	0.788	14
年降雨量 Annual rainfall	0.455	0.077	14
年蒸发量 Annual evaporation	-0.701**	0.002	14
年均湿度 Average humidity	-0.102	0.706	14
干燥度 Dryness	-0.655**	0.006	14

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$

表4 茂县云杉人工纯林林窗模式疏伐后生长释放的ME3YR方法判定结果

Table 4 The result of ME3YR method to determine the growth release effect within the single spruce plantation at Maoxian, Sichuan

年代 Year	优势木 Dominant trees		平均木 Intermediate trees		劣势木 Oppressed trees	
	林窗边缘 Gap fringe	林内 Within stand	林窗边缘 Gap fringe	林内 Within stand	林窗边缘 Gap fringe	林内 Within stand
2001	0.685	0.766	-1.540	0.040	0.134	-0.016
2002	-0.177	-0.731	3.310	-0.786	-0.235	1.059
2003	-0.312	-0.599	-2.130	0.416	-0.034	-0.222
2004	-0.214	-0.442	3.310	-0.387	0.013	1.639
2005	0.218	-0.317	-2.467	-0.140	-0.046	-0.555
2006 (疏伐 Gap model thinning)	-0.472	-0.584	3.226	-0.866	-0.047	1.141
2007	0.220	0.442	-2.383	0.410	0.118	-0.470
2008	0.889	0.086	3.310	-0.119	0.324	1.347
2009	0.721	0.090	-2.046	0.211	0.018	-0.557
2010	-0.338	-0.859	3.217	0.064	-0.062	1.246

当年轮宽-序列平均轮宽>0, 持续时间≥3年. 加粗数据表示存在生长释放现象

The bold data indicate the presence of growth release effect, which was defined as any three consecutive years of growth that exceeded the mean

树种在生长过程中尤其需要大林窗来使它们到达树冠顶层, 如果其沦为被压木, 生长就会减缓, 死亡率也会提高, 除非某个环境干扰能够将其从这种竞争状态中“释放”出来; 相反, 耐荫树种则可以在小林窗或者下木层生存, 因为它们对缺光胁迫有一定耐受性, 不过若光照增加, 它们的生长也会随之迅速增加^[45]. 理论上, 云杉在密闭林冠中生长, 若有中小林窗形成, 其生长会出现迅速而持续的增加, 即生长释放. 考虑到本研究云杉年轮的时间范围较短(1982-2010年), 不能采取常规的10年滑动平均生长释放标准曲线法^[46]来判定生长释放现象, 因此另选了ME3YR方法^[47-48]来判定. ME3YR方法定义的生长释放现象是: 任意连续3年或更长时间的年轮宽度大于宽度序列的平均值即为生长释放(当年轮宽-序列平均轮宽>0, 持续时间≥3年), 而生长释放现象的终止是: 连续2年或更长时间的年轮宽度值不超过宽度序列的平均值.

ME3YR方法的生长释放判定结果(表4)表明, 参考林窗干扰前的树轮平均宽度差值(2001-2005年), 林窗模式疏伐(2006年)后, 无论林窗边缘还是林内的优势木年轮宽度值都维持在序列平均轮宽以上(当年轮宽-序列平均轮宽>0, 持续时间≥3年), 表现出生长释放效应, 且林窗边缘劣势木也有类似反应. 平均木和林内劣势木则未表现出生长释放效应. 可见, 林窗疏伐措施改变了优势木径向生长量不增加以及被压劣势木径向生长量持续下降的趋势(对比图2), 促

进了林窗保留木的径向生长, 但这种释放效应也受到云杉自身生长状态的影响. 若单独以逐年树木年轮宽度变化为参考依据, 生长释放效应(图5)还表现为: 在林窗边缘, 伐前优势木在伐后4年内呈现出持续的增长响应, 而原来的平均木也持续了2-3年(2007-2009), 释放效应表现为优势木大于平均木, 明显大于劣势木. 林窗疏伐也对林内(距林窗4-5 m范围)原有的优势木、平均木径向生长有促进作用, 优势木生长释放效应特别明显, 处理后的2-3年持续增加, 明显大于平均木、劣势木. 综合比较, 林窗模式疏伐导致生长释放效应, 其强度表现为: 林窗边缘个体大于林内个体, 优势木大于被压劣势木.

上述现象初步印证了假设: 云杉在密闭林冠中生长, 若有中小林窗形成, 其生长会出现相应的生长释放. 因为林窗的产生导致光照增加, 而云杉在不同庇荫条件下的生长过程差异很大, 全光下生长迅速, 庇荫或半庇荫条件下生长不良^[49]. 林窗形成后, 光照增强, 地表温度和近地层温度等特征也发生了相应变化, 从而进一步导致土壤微生物活性、土壤理化性质、营养元素分解等的变化, 使得树间对环境资源竞争的激烈程度减弱, 最终使林窗边缘样株的径向生长或多或少表现出生长释放效应^[45, 50]. 此外, 尽管林窗的形成不同程度地改变了树木生长环境, 但生长仍然受制于林窗大小. 疏伐强度越大, 林窗越大, 对环境的改变也就越显著. 就

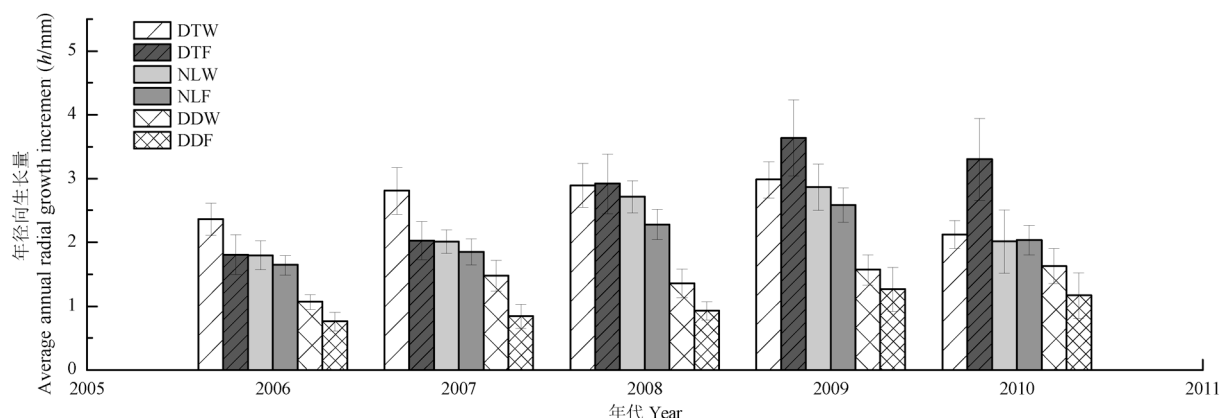


图5 茂县云杉人工纯林林窗模式疏伐处理后不同状态(优势木、平均木、劣势木)、不同位置(林窗边缘和林内)的云杉个体径向生长量动态变化

Fig. 5 Dynamics of average annual radial growth increment for various growth states (dominant, intermediate and oppressed trees) at different positions (gap fringe / within stand) after the gap model thinning treatment within the single spruce plantation at Maoxian, Sichuan

DTW, 林内优势木; DTF, 林窗边缘优势木; NLW, 林内平均木; NLF, 林窗边缘平均木; DDW, 林内劣势木; DDF, 林窗边缘劣势木

DTW, dominant trees within stand; DTF, dominant trees at the gap fringe; NLW, intermediate trees within stand; NLF, intermediate trees at the gap fringe; DDW, oppressed trees within stand; DDF, oppressed trees at the gap fringe

针叶林而言,特别是云、冷杉林,采伐强度超过40%时,便会加大风折、风倒和枯死的可能性^[5],但本研究的林窗疏伐强度,无论从个体数量还是蓄积量上都只在15%-30%之间,不足以引起明显的倒伏木出现,造成明显的森林健康伤害。可见,对云杉人工纯林采取小强度(≤30%)的林窗疏伐可改善林内环境条件,显著促进林分保留木的径向生长速度及其生长量。但观察不同生长状态林木个体对处理的响应过程与强度来看,林窗疏伐应注意优先选择被压的劣势木进行,同时最大限度地保留优势木和平均木,可取得更显著的林木生长释放效应。

4 结论

人工林生产力、生态功能的优化是当前全球森林持续管理的重要任务,但目前人工林内个体生长过程规律及其管理措施的效应的相关研究相对贫乏。本文选择川西地区代表性云杉人工纯林,通过研究林中不同生长状态的个体径向生长过程及其对林窗疏伐措施的动态反应,得出如下结论:

(1) 云杉人工林中发育过程优势木年平均径向生长量显著大于劣势木,但两者径向生长过程总体趋势基本相同,呈现持续稳定而后下降的趋势。林窗产生前(1982-2005),优势木和劣势木的径向生长过程都可分为两个明显发育阶段:快速生长期(1982-1993)和生长减慢期(1994-2005),但二者在这两个时期的径向生长过程又各自具有不同的特点。在快速生长期,优势木表现为大规模的快速生长更新,劣势木的表现则比较平缓,在生长减慢期,优势木径向生长于2000年出现适度的回升,劣势木继续保持下滑的趋势。且在整个生长过程中,劣势木的年径向生长量始终小于优势木。

(2) 逐月水平上,优势木径向生长与上一年10月、当年10月的月平均温度、月最高温和月最低温均呈现显著负相关,

上一年9、10月和当年9月的月平均蒸发量也对其径向生长的抑制作用。优势木径向生长与上一年6月降水量存在着显著的正相关关系,而与上一年6月的干燥度的正相关关系,则反映出降雨量、温度和蒸发量对树木径向生长的综合影响全年水平上,年均温、≥5℃积温、温暖指数、年蒸发量、干燥度与优势木STD年表呈显著负相关关系,年蒸发量是制约云杉个体径向生长量的关键因子。

(3) 林窗模式疏伐措施显著促进了云杉个体径向生长,且生长释放效应在林窗边缘强于林内,优势木显著强于劣势木。说明通过小强度林窗疏伐措施,可有效改善林地环境从而促进云杉的生长。而优先疏伐被压的劣势木、最大限度保留优势木是优化小强度林窗疏伐方案的重要策略。

参考文献 [References]

- 1 蒋子涵,金光泽. 择伐对阔叶红松林主要树种径向与纵向生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30 (21): 5843-5852 [Jiang ZH, Jin GZ. Effects of selection cutting on diameter growth and vertical growth among major tree species in the mixed broadleaved-Korean pine forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30 (21): 5843-5852]
- 2 Deal RL, Tappeiner JC. The effects of partial cutting on stand structure and growth of western hemlock-Sitka spruce stands in southeast Alaska [J]. *For Ecol Manage*, 2002, 159 (2): 173-186
- 3 Archambault L, Delisle C, Larocque GR. Forest regeneration 50 years following partial cutting in mixed wood ecosystems of southern Quebec, Canada [J]. *For Ecol Manage*, 2009, 257 (2): 703-711
- 4 Man R, Kayahara GJ, Rice JA, MacDonald GB. Eleven-year responses of a boreal mixed wood stand to partial harvesting light, vegetation, and regeneration dynamics [J]. *For Ecol Manage*, 2008, 255: 697-706
- 5 郝清玉,周玉萍,孙显林. 采伐作业产生的大林窗对阔叶林天然更新的影响[J]. 吉林林学院学报, 1998, 14 (2): 69-73 [Hao QY, Zhou YP, Sun

- XL. Effects of larger gaps caused by harvesting on natural regeneration in broad-leaved forest [J]. *J Jilin For Univ*, 1998, **14** (2): 69-73]
- 6 Matyssek R, Cermak J, Kucera J. Ursacheneingrenzung eines lokalen Buchensterbens mit einer Messmethode der Kronentranspiration [J]. *Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen*, 1991, **142**: 809-828
- 7 Staschel R, Greger O. Vergleich des Radialzuwachses einzeln und gruppiert stehenden Altkiefern in einem Buchengrundbestand [J]. *Forst und Holz*, 1993, **11**: 285-295
- 8 Bédard S, Brassard F. Les effets réels des coupes de jardinage dans les forêts publiques du Québec en 1995 et 1996 [A]. Gouvernement du Québec, Ministère des Ressources naturelles. Forestière et des Programmes Forestiers [C], Québec, 2002. 15
- 9 宿以明, 刘兴良. 不同立地条件对粗枝云杉人工林生长影响的初步研究[J]. 四川林业科技, 2001, **22** (1): 66-69 [Su YM, Liu XL. A preliminary study of the effect of different site conditions on the growth of artificial *Picea asperata* forest [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2001, **22** (1): 66-69]
- 10 刘兴良, 宿以明, 刘世荣, 马钦彦. 四川西部川西云杉人工林非同化器官营养元素含量与分布[J]. 生态学报, 2003, **23** (12): 2573-2578 [Liu XL, Su YM, Liu SR, Ma QY. Macronutrients and their allocations in non-photosynthetic organs in the *Picea balfouriana* in western Sichuan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (12): 2573-2578]
- 11 刘兴良, 宿以明, 刘世荣, 杨玉坡, 鄢武先, 马钦彦. 川西高山林区人工林生态学的研究——人工林分区与分类[J]. 四川林业科技, 2004, **25** (1): 1-9 [Liu XL, Su YM, Liu SR, Yang YP, Yan WX, Ma QY. Studies of ecology of plantations in alpine forest areas of western Sichuan: division and classification of plantations [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2004, **25** (1): 1-9]
- 12 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 吴彦, 林波, 何海. 人为干扰对川西高山针叶林土壤物理性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8** (6): 583-587 [Pang XY, Liu Q, Liu SQ, Wu Y, Lin B, He H. Effect of human-induced disturbance on soil physical properties of subalpine coniferous forests in western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2002, **8** (6): 583-587]
- 13 Zwiazek JJ. Cell wall changes in white spruce (*Picea glauca*) needles subjected to repeated drought stress [J]. *Physiol Plant*, 1991, **82** (4): 513-518
- 14 Bergha J, Lindera S, Lundmark B, Elfving B. The effect of water and nutrient availability on the productivity of Norway spruce in northern and southern Sweden [J]. *For Ecol Manage*, 1999, **119** (1-3): 51-62
- 15 Zhang YM, Zhou GY, Wu N, Bao WK. Soil enzyme activity changes in different-aged spruce forests of the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Pedosphere*, 2004, **14**: 305-312
- 16 吴彦, 刘庆, 何海, 林波. 亚高山针叶林人工恢复过程中物种多样性变化[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (8): 1301-1306 [Wu Y, Liu Q, He H, Lin B. Dynamics of species diversity in artificial restoration process of subalpine coniferous forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (8): 1301-1306]
- 17 雷波, 包维楷, 贾渝. 6种人工针叶幼林下地表苔藓植物层片的物种多样性与结构特征[J]. 植物生态学报, 2004, **28** (5): 594-600 [Lei B, Bao WK, Jia Y. Ground bryophyte composition and synusia structure under six types of young coniferous forest plantations in the upper Minjiang River [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2004, **28** (5): 594-600]
- 18 王永健, 陶建平, 张炜银, 臧润国, 王微, 李宗峰, 李媛. 茂县土地岭植被恢复过程中物种多样性动态特征[J]. 生态学报, 2006, **26** (4): 1028-1036 [Wang YJ, Tao JP, Zhang WY, Zang RG, Wang W, Li ZF, Li Y. Dynamics of species diversity in vegetation restoration on Tudiling of Mao County, Southwest China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (4): 1028-1036]
- 19 庞学勇, 包维楷, 吴宁. 岷江上游干旱河谷气候特征及成因[J]. 长江流域资源与环境, 2008, **17** (S1): 46-53 [Pang XY, Bao WK, Wu N. Reason of dry valley climate characteristic and its formation reason in upstream of Minjiang river [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2008, **17** (S1): 46-53]
- 20 Fritts HC. Tree Ring and Climatic [M]. New York: Academic Press, 1976
- 21 Cook ER, Kairiukstis LA. Methods of Dendrochronology [M]. New York: Springer, 1990
- 22 Stokes MA, Smiley TIJ. An Introduction to Tree-ring Dating [M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1968
- 23 何海. 使用WinDENDRO测量树轮宽度及交叉定年方法[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2005, **22** (4): 39-44 [He H. Measurement of tree-ring width with WinDENDRO and crossdating method [J]. *J Chongqing Norm Univ (Nat Sci Ed)*, 2005, **22** (4): 39-44]
- 24 Holmes RL. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement [J]. *Tree-Ring Bull*, 1983, **43**: 69-78
- 25 Schweingruber FH. Tree Rings and Environment of Dendroecology [M]. Bern: Paul Haupt Verlag, 1996
- 26 百度百科. 温暖指数 [EB/OL] <http://baike.baidu.com/view/3849797.htm>, 2012
- 27 百度百科. 寒冷指数 [EB/OL] <http://baike.baidu.com/view/3849798.htm>, 2012
- 28 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报, 2004, **28** (6): 853-861 [Meng M, Ni J, Zhang ZG. Aridity index and its applications in geo-ecological study [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2004, **28** (6): 853-861]
- 29 高露双, 王小明, 赵秀海. Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China [J]. 植物生态学报, 2011, **35** (1): 27-34 [Gao LS, Wang XM, Zhao XH. Response of *Pinus koraiensis* and *Picea jezoensis* var. *komarovii* to climate in the transition zone of Changbai Mountain, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35** (1): 27-34]
- 30 庞学勇, 胡泓, 乔永康, 潘开文, 刘世全, 陈庆恒, 刘庆. 川西高山云杉人工林与天然林养分分布和生物循环比较[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8** (1): 1-7 [Pang XY, Hu H, Qiao YK, Pan KW, Liu SQ, Chen QH, Liu Q. Nutrient distribution and cycling of artificial and natural subalpine spruce forests in Western Sichuan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2002, **8** (1): 1-7]
- 31 邹春静, 徐文铎. 沙地云杉种内、种间竞争的研究[J]. 植物生态学报, 1998, **22** (3): 269-274 [Zou CJ, Xu WD. Study on intraspecific and

- interspecific competition of *Picea mongolica* [J]. *Chin J Plant Ecol*, 1998, **22** (3): 269-274]
- 32 庞学勇, 刘庆, 刘世全, 吴彦, 林波, 何海, 张宗锦. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变[J]. 生态学报, 2004, **24** (2): 261-266 [Pang XY, Liu Q, Liu SQ, Wu Y, Lin B, He H, Zhang ZJ. Changes of soil fertility quality properties under subalpine spruce plantation in Western Sichuan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24** (2): 261-266]
 - 33 金则新, 朱小燕, 林恒琴. 浙江天台山甜槠种内与种间竞争研究[J]. 生态学报, 2004, **23** (2): 22-25 [Jin ZX, Zhu XY, Lin HQ. Intraspecific and interspecific competition in *Castanopsis eyrei* in Tiantai Mountain of Zhejiang Province [J]. *Chin J Ecol*, 2004, **23** (2): 22-25]
 - 34 张池, 黄忠良, 李炯, 史军辉, 李林. 黄果厚壳桂种内与种间竞争的数量关系[J]. 应用生态学报, 2006, **17** (1): 22-26 [Zhang C, Huang ZL, Li J, Shi JH, Li L. Quantitative relationships of intra- and interspecific competition in *Cryptocarya concinna* [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17** (1): 22-26]
 - 35 李尤, 苏智先, 张素兰, 胡进耀, 郭晓萍, 朱利君. 珙桐群落种内与种间竞争研究[J]. 云南植物研究, 2006, **28** (6): 625-630 [Li Y, Su ZX, Zhang SL, Hu JY, Guo XP, Zhu LJ. Intraspecific and interspecific competition in *Davidia involucre* (Davidiaceae) community [J]. *Acta Bot Yunnanica*, 2006, **28** (6): 625-630]
 - 36 胡刚, 梁士楚, 张忠华, 许为斌. 桂林岩溶石山青冈栎种内与种间竞争的数量关系[J]. 西北林学院学报, 2007, **22** (5): 32-36 [Hu G, Liang SC, Zhang ZH, Xu WB. Quantitative relationships of intraspecific and interspecific competition in *Cyclobalanopsis glauca* in Karst Hills in Guilin [J]. *J Northwest For Univ*, 2007, **22** (5): 32-36]
 - 37 Cook ER, Briffa KR, Jones PD. Spatial regression methods in dendroclimatology: a review and comparison of two techniques [J]. *Intern J Climatol*, 1994, **14**: 379-402
 - 38 李宗善, 刘国华, 张齐兵, 胡娟娟, 罗淑政, 刘兴良, 何飞. 利用树木年轮宽度资料重建川西卧龙地区过去159年夏季温度的变化[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (6): 628-641 [Li ZS, Liu GH, Zhang QB, Hu CQ, Luo SZ, Liu XL, He F. Tree ring reconstruction of summer temperature variations over the past 159 years in Wolong National Natural Reserve, western Sichuan, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (6): 628-641]
 - 39 Wigley TM, Briffa KR, Jones PD. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology [J]. *J Climate Appl Meteorol*, 1984, **23**: 201-213
 - 40 Singh J, Park WK, Yadav RR. Tree-ring-based hydrological records for Western Himalaya, India, since A.D. 1560 [J]. *Climate Dyn*, 2006, **26**: 295-303
 - 41 柴正礼, 姚孟春, 张小全, 朱建华, 侯振宏, 王晓春. 树木年轮对气候变化响应研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, **38** (2): 959-961 [Chai ZL, Yao MC, Zhang XQ, Zhu JH, Hou ZH, Wang XC. Advances in research on the response of tree ring to the climatic changes [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2010, **38** (2): 959-961]
 - 42 Fan ZX, Brauning A, Cao KF. Tree-ring based drought reconstruction in the central Hengduan Mountains region (China) since A.D. 1655 [J]. *Intern J Climatol*, 2008, **28**: 1879-1887
 - 43 王晓明, 赵秀海, 高露双, 姜庆彪. 长白山北坡不同年龄红松年表及其对气候的响应[J]. 生态学报, 2011, **31** (21): 6378-6387 [Wang XM, Zhao XH, Gao LS, Jiang QB. Age-dependent growth responses of *Pinus koraiensis* to climate in the north slope of Changbai Mountain, North-Eastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (21): 6378-6387]
 - 44 吴宁. 山地退化生态系统的恢复与重建——理论与岷江上游的实践[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2007 [Wu N. Restoration and Rehabilitation of Degraded Mountain Ecosystem on the Upper Minjiang River [M]. Chengdu: Sichuan Publishing House of Science & Technology, 2007]
 - 45 Patrick JB, Sarayudh B. Suppression, release and canopy recruitment in five tree species from a seasonal tropical forest in western Thailand [J]. *J Trop Ecol*, 2006, **22**: 521-529
 - 46 Nowacki GJ, Abrams MD. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from resettlement origin oaks [J]. *Ecol Monographs*, 1997, **67**: 225-249
 - 47 Schwartz MW, Hermann SM. Is slow growth of the endangered *Torreya taxifolia* (Arn.) normal [J]? *J Torrey Bot Soc*, 1999, **126**: 307-312
 - 48 Rubino DL, McCarthy BC. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events. *Dendroecologia*, 2004, **21** (3): 97-115
 - 49 杨玉坡, 李承彪. 四川森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992 [Yang YP, Li CB. The Forest of Sichuan [M]. Beijing: China Forestry Press, 1992]
 - 50 王晓春, 赵玉芳. 黑河胜山自然保护区红松和红皮云杉生长释放判定及解释[J]. 生态学报, 2011, **31** (5): 1230-1239 [Wang XC, Zhao YF. Growth release determination and interpretation of Korean pine and Koyama spruce in Shengshan National Nature Reserve, Heilongjiang Province, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31** (5): 1230-1239]