

# 三峡库区上游马尾松生长及其 与气候变化的关系

雷静品<sup>1</sup> 肖文发<sup>2</sup> 黄志霖<sup>2</sup> 曾立雄<sup>2</sup> 王怀清<sup>3</sup> 李良俊<sup>3</sup>

1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091; 3. 重庆市云阳县林业局, 云阳 404500

**摘要** 运用相关函数及单年分析等树木年轮气候学方法, 研究三峡库区上游马尾松径向生长与气候变化的关系, 结果表明, 马尾松的生长对环境变化比较敏感, 不同海拔的马尾松对降雨和温度的响应明显不同, 海拔 600 m 处马尾松生长与 5、6 月份的降雨和湿润指数呈显著相关, 而海拔 900 m 处的马尾松与环境的关系相对复杂, 除受当年 5、6 月份温度影响外, 还受前一年 11 月份湿润指数的影响, 说明同一地区不同海拔梯度马尾松对气候的响应具有不同特征。

**关键词** 马尾松; 树木年轮; 气候变化; 三峡库区

**中图分类号** S 791.248.02

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-2421(2011)04-0426-06

早期研究证明, 在北半球高纬度和高海拔地区, 树木生长主要受大气温度的影响<sup>[1-2]</sup>, 但一些研究认为, 夏季降水比温度对树木生长的影响更大<sup>[3-4]</sup>。造成这种结果的原因可能是把对树木生长影响的气候因子过分简单化了<sup>[5-6]</sup>。

气候变化对不同物种的生长影响是不同的, 温度可能极大地影响某一种物种的生长, 却对另一物种影响不大<sup>[7]</sup>, 而且气候因子对生长不同环境梯度上的同一树种的影响有极大的差异<sup>[8]</sup>。

三峡地区的生态环境相对脆弱, 尤其在大坝蓄水后, 其环境变化对树木生长的影响成为关注的热点问题之一<sup>[9]</sup>, 马尾松是三峡库区的主要造林树种<sup>[10-11]</sup>, 占库区森林 34%, 在三峡库区发挥着重要作用<sup>[10]</sup>。

为了进一步研究马尾松在不同生境的生长状况及其与气候的关系, 本文试图通过建立生长在不同海拔的马尾松年轮宽度年表, 分析不同生境梯度马尾松生长与气候变化的关系, 探讨马尾松生长在不同海拔的生长特征及其制约因子, 为三峡库区植被恢复和森林健康研究提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点设在涪陵, 涪陵为重庆市直辖市之一, 位于 29°21'~30°01'N, 106°56'~107°43'E, 面积 2 941.46 km<sup>2</sup>, 涪陵地处三峡水库腹地, 四川盆地盆周山区, 武陵山脉西部, 长江与乌江交汇处, 为长江三峡工程库区的上部。全区海拔多在 200~900 m 之间, 属于中亚热带湿润季风气候, 其总的特点是: 四季分明, 热量充足, 降水丰沛, 季风影响突出。常年平均气温 18.1℃, 平均年降水量 1 072 mm, 无霜期 317 d, 日照 1 248 h, 属于全国日照低值区之一。受土壤母质、气候条件、自然植被分布和人类生产活动的影响, 形成区内大片紫色土, 土壤类型以黄壤为主, 另外还有紫色土壤、黄棕壤、潮土类、红壤土类和石灰岩土类等, 且土壤养分含量偏低。该区境植物以常绿植物为主。植物成分以亚热带植物为主体, 亦有温带的桦木、杨、柳、槭等植物。全区森林覆盖率 21%, 地带性植被以常绿阔叶林为主, 原生植被已经被破坏, 取而代之的是亚热带针叶林, 以人工林为主, 树种以马尾松为主, 此外还有阔叶林、竹林、灌

收稿日期: 2010-11-28

基金项目: 国家林业科技支撑计划(2006BA003A1303、2006BA003A07/01)、林业局公益项目(200804001)和中国林业科学研究院公益基金(CAFYBB2007010)

雷静品, 博士, 副研究员, 研究方向: 森林生态学, 树木年轮气候学. E-mail: leijp@caf.ac.cn

通讯作者: 肖文发, 研究员, 研究方向: 森林生态学. E-mail: xiaowenf@caf.ac.cn

丛、草地等几种类型。

## 1.2 资料来源

涪陵海拔多在 200~900 m 之间,由于涪陵地区马尾松在较低海拔很少分布,如有分布也受人为干扰比较严重,因此分别于 600、900 m 海拔设置 2 个样点,基于国际树木年轮库(ITRDB)的要求,分别采集样木 52 和 44 株,各取得树芯 104 和 96 个用于生成不同海拔高度生长年表。将采自野外的样本带回实验室后,进行加工处理,首先是样本固定、打磨,使样本达到光、滑、亮,轮界清晰分明,在 40 倍显微镜下可以看到清晰的细胞轮廓为止。

用 COFECHA<sup>[11]</sup> 程序对所有的树芯进行分析,采用 ARSTAN<sup>[12]</sup> 年表研制程序进行年表的研制,一般包括标准年表(STD)、差值年表(RES)2 种年表类型。

涪陵气候资料来自中国地面气候资料月值数据集涪陵站点的气候数据,即国家气象信息中心,时间跨度为 1953—2002 年,地理坐标为 29°45' N, 107°25' E,在响应分析之前,为了确定所采用的气象数据代表了自然界的变化,首先对气候数据进行均一性检验,一是采用 Mann-Kandell 方法<sup>[13]</sup>,对序列是否存在突变点进行了检验,另外还运用 Double-mass 分析<sup>[14]</sup>,检验序列是否有非随机趋势。通过检验表明,分析所采用的气象站温度和降水数据是相对均一的,代表了自然界的主要气候变化。

## 1.3 研究方法

1) 因子分析。树木生长不仅与当年的气候条件有关,而且也受前一年气象因子的影响,因此在生长与气候因子关系分析时选取上年秋、冬气候因子以及当年 4 个季度的气候因子与年表进行分析,为了反映温度和降水对树木生长的综合影响,用降水和温度的比值,即湿润指数作为反映气候的另外 1 个因子。在马尾松年表分析过程中,平均敏感度是度量年表(或年轮序列)包含气候信息多少的 1 个参数,它主要反映气候的短期变化或高频变化,多集中在 0.1~0.4 之间。

2) 数据分析。年表与气候的关系是通过 SPSS 程序完成的,单年分析是对每年的气候要素求距平,然后检查与其相应的年轮指数变化,以解释产生窄轮和宽轮的原因,并验证相关函数所得结论的稳定性。

利用去趋势法,对去趋势的序列以双重平均法合成标准年表(STD);对剔除与树木年龄相关的生长趋势和每株树所特有的低频波动的差值序列,以

同样的方法合成差值年表(RES),年表的生成是通过 ARSTAN 计算机程序完成的<sup>[15]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 年表的基本统计特征

海拔 900 和 600 m 分别为 1983—2006 年和 1980—2006 年的马尾松年表基本统计,表 1 结果表明,2 个海拔高度年轮序列间的平均相关系数为 0.319 和 0.305,说明在某一海拔高度各单株间年轮的径向生长较为一致。在树木年轮气候学研究中,信噪比(SNR)越大,表明分析样本生长记录的气候信息越多,本研究中海拔 900 和 600 m 的 SNR 最高可达 6,属于合格年表。

表 1 不同海拔马尾松树木年表的统计特征

Table 1 Statistics characters of *Pinus mussoniana* chronologies and common intervals analysis in different elevations

项目 Items	900 m		600 m	
	标准年表 STD	差值年表 RES	标准年表 STD	差值年表 RES
平均值 Mean	0.971	1.008	0.946	0.972
中值 Median	0.912	1.005	0.936	0.962
评价敏感度 Mean sensitivity	0.334	0.248	0.223	0.191
标准差 Standard deviation	0.412	0.301	0.430	0.178
自相关 Autocorrelation order 1	0.700	-0.068	0.485	0.054
信噪比(SNR) Signal-to-noise ratio	4.101	3.127	5.249	6.054
树间自相关 Autocorrelation order 1 between trees	0.319	0.305	0.288	0.318
总体代表 Expressing population signal	0.911	0.906	0.916	0.957

平均敏感度(MS)反映年轮指数气候信息的多少,涪陵为 0.19~0.33,都在年表所要求的 0.15~0.80 之间,从平均敏感度来讲,属于较好的年表,属于敏感系列范围,表明马尾松的生长对气候变化是敏感的,可以用来研究树木生长与环境因子的关系。第一主成分所占方差量 900 和 600 m 分别为 37.24% 和 38.16%,信噪比、总体代表性都比较高,可以用马尾松研究生长与气候的关系。

### 2.2 树木径向生长与环境因子的相关关系

从图 1 和图 2 可以看出,在 900 和 600 m 海拔,标准年表和差值年表表现的 trend 基本一致,且 2 种年表统计特征量的通体变化一致性标准年表要好于

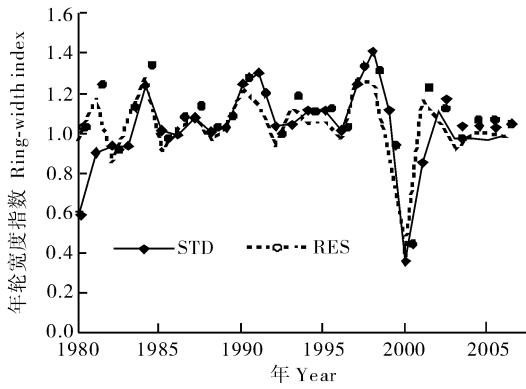


图 1 马尾松海拔 900 m 年轮宽度指数年表

Fig. 1 Tree-ring width chronologies for 900 m elevation

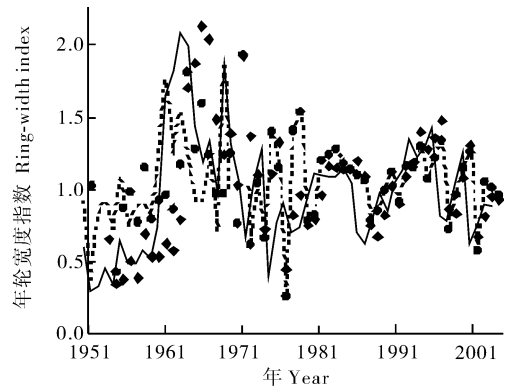


图 2 马尾松海拔 600 m 年轮宽度指数年表

Fig. 2 Tree-ring width chronologies for 600 m elevation

表 2 马尾松生长与季节变量的相关关系<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficient for STD chronology and seasonal meteorological data

季节 Season	海拔 600 m 600 m asl			海拔 900 m 900 m asl		
	温度 Temperature	降雨 Precipitation	湿润指数 RH index	温度 Temperature	降雨 Precipitation	湿润指数 RH index
上年秋 Last 3th quarter	0.236	-0.036	-0.051	0.071	0.026	0.009
上年冬 Last 4th quarter	-0.083	-0.381	-0.355	-0.088	0.208	0.220
当年春 Current 1th quarter	0.137	0.181	0.136	-0.002	-0.370	-0.035
当年夏 Current 2th quarter	0.145	0.447*	0.416*	0.065	0.049	0.038
当年秋 Current 3th quarter	0.272	0.187	0.150	0.005	0.229	0.212
当年冬 Current 4th quarter	-0.016	-0.186	-0.173	-0.076	0.114	0.129

1) \* 表示 0.05 水平上差异显著 Correlation is significant at the 0.05.

标准年表(表 2),因此本文直接使用标准年表来研究马尾松径向生长与环境因子的关系。

1)马尾松生长与季节变量的关系。通过分析年表与气候因子之间的相关关系来反映树木径向生长对气候要素的响应,首先选择季度气候因子与生长进行相关分析。

由表 2 可见,温度、降雨和湿润指数对马尾松相同海拔的生长影响不同,对温度而言,海拔 600 m 处和 900 m 处,不同季节的温度对马尾松不同海拔的生长均不存在显著影响,涪陵多年均温为 9℃,基本没有零下的记录,这种温度属于适合马尾松生长的温度范围。而降雨和湿润指数只在海拔 600 m 时对生长存在显著影响,即当年夏季的降雨和湿润指数对马尾松的径向生长成正相关,随着海拔升高,这种影响越不明显,海拔越高,温度随之降低,光照增强,这种综合作用削弱了降水、湿润指数所产生的影响。由于马尾松生长不仅受到季节气候因子的影响,可能还与某个月份的因子存在关系。

2)马尾松生长与月份变量的关系。结果表明,不同海拔马尾松生长与温度降水之间的关系是不同的。海拔 600 m 处的马尾松生长与温度关系不显

著,而与 5、6 月份的降水呈现显著和极显著的关系,涪陵地区 5、6 月份马尾松已经进入生长旺季,充足的水分能促进树木水分循环,增强养分吸收,从而促进营养物质的积累。而海拔 900 m 的马尾松生长不仅受当年 5、6 月份的温度的影响,还受上年 11 月份降水和湿润指数影响,在一定范围内 5、6 月份的温度增加可促进植物光合作用,从而促进植物生长;暖冬有利于促进马尾松冬芽的萌动,保持土壤水分和第 2 年树木的生长,11 月份马尾松基本停止生长,充足的降水,有利于保持土壤墒值,为第 2 年的快速生长提供保障。

### 2.3 单年分析

分析马尾松年表的年度变化情况,在海拔 900 m 于 1964 年和 1976 年出现了最宽年轮和最窄年轮,而海拔 600 m 处最宽年轮不明显,只在 2000 年表现出突出的窄轮。进一步对典型年份进行单年分析。影响海拔 900 m 马尾松径向生长的气候因子是 5、6 月份的温度和 11 月份的降雨。影响海拔 600 m 马尾松径向生长的气候因子是 5、6 月份的降雨。下面分别就典型年份对生长与气候因子之间的关系进一步分析。

表 3 马尾松年轮宽度指数与月份气候因子的相关关系<sup>1)</sup>

Table 3 Correlation coefficient for STD chronology and monthly meteorological data

月份 Month	海拔 600 m 600 m asl			海拔 900 m 900 m asl		
	温度 Temperature	降雨 Precipitation	湿润指数 RH index	温度 Temperature	降雨 Precipitation	湿润指数 RH index
7	0.072	0.203	0.194	0.083	-0.009	-0.017
8	0.269	-0.254	-0.240	0.045	0.113	0.088
9	0.116	-0.040	-0.069	0.029	-0.076	-0.073
10	-0.232	-0.396	-0.371	0.021	-0.036	-0.035
11	0.043	-0.027	-0.020	-0.085	0.350 *	0.349 *
12	0.025	-0.201	-0.220	-0.085	0.203	0.221
1	0.032	0.226	0.200	0.141	0.060	0.041
2	0.222	0.135	0.087	-0.068	0.019	-0.003
3	0.055	0.067	0.040	-0.032	-0.089	-0.083
4	0.317	0.010	-0.063	0.086	-0.013	-0.023
5	-0.207	0.441 *	0.440 *	0.321 *	-0.024	-0.069
6	0.085	0.487 * *	0.467 *	-0.293 *	0.126	0.167
7	-0.017	0.134	0.129	0.094	0.104	0.097
8	0.299	0.175	0.145	-0.060	0.213	0.199
9	0.244	0.022	-0.002	0.006	0.114	0.110
10	-0.115	-0.240	-0.232	0.083	-0.042	-0.057
11	0.119	-0.009	-0.015	-0.013	0.212	0.205
12	-0.053	0.067	0.058	-0.180	0.141	0.178

1) \* 表示 0.05 水平上差异显著 Correlation is significant at the 0.05 level; \* \* 表示 0.01 水平上差异显著 Correlation is significant at the 0.01 level.

1)海拔 900 m 的单年分析。马尾松生长与当年 5、6 月份的温度和上年 11 月份的降水呈显著正相关,1963 年 11 月份的降雨量为 110.9 mm,显著高于历史同期平均水平(54.4 mm),1964 年 5、6 月份的平均温度分别为 23.5℃和 25.2℃,高于历史同期的 21.9℃和 24.9℃,因此形成了 1964 年的最

宽年轮;1975 年 11 月份降雨仅为 58.2 mm,1976 年 5、6 月份温度为 21.0℃和 24.3℃,低于历史平均水平,形成 1976 年的窄轮,从图 3 可以清楚看出,1964 年温度距平为正,1976 年温度距平为负,进一步印证了年轮宽度指数与月份气象因子之间的关系。

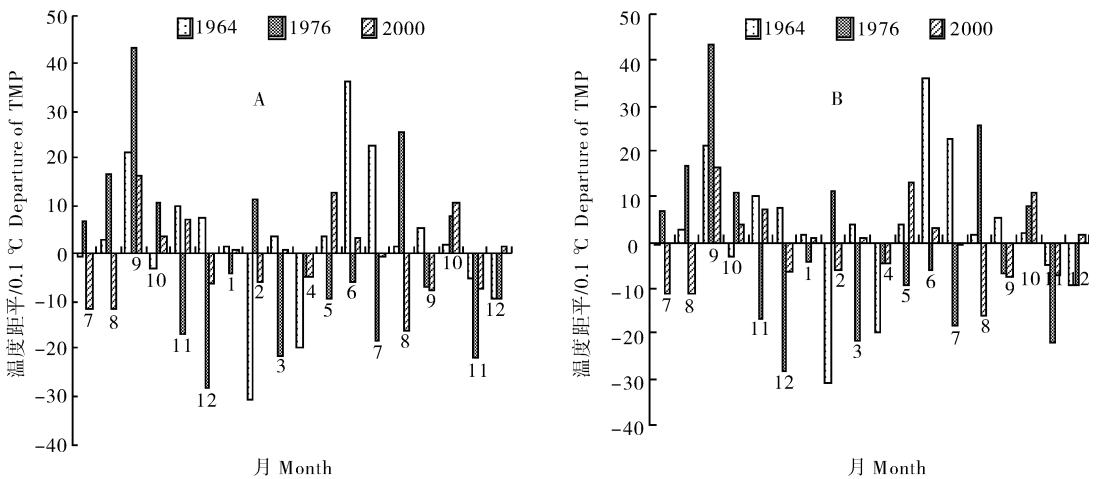


图 3 1964、1976 年和 2000 年的温度(A)和降雨量(B)距平

Fig. 3 Temperature(A) and precipitation(B) of single year analysis of monthly climatic factors in 1964,1976 and 2000

2)海拔 600 m 的单年分析。由图 4 可以看出,2000 年 5、6 月份的降雨显著低于历史平均水平,1999 年 8 月份降雨量大,温度低,形成了较高的湿

润指数,而在 1999 年 11 月份虽然温度并没有低于历史平均水平,但其降雨量显著高于历史平均水平,也形成了较高的湿润指数,进一步说明海拔 600 m



马尾松生长与 5、6 月份温度呈正相关,与前一年 8、11 月份的湿润指数呈负相关的关系,说明湿润指数对马尾松径向生长的影响,即与表 2 的结果相吻合。

#### 2.4 年轮指数与气候因子的关系模型

由于不同海拔马尾松生长是受不同气候因子的影响,因此采用多元回归模型描述年轮宽度指数与气候因子之间的关系,所得模型如下:

$$RWI_{600} = -3.298 + 0.036LNP_5 + 0.674LNP_6 + 0.037H_5 - 0.089H_6 \quad (r^2 = 0.494)$$

其中  $P_5$ 、 $P_6$ 、 $H_5$ 、 $H_6$  分别为 5、6 月份的降雨和湿润指数;

$$RWI_{900} = 1.118 + 0.009T_5 - 0.010T_6 + 0.069H_{-11} \quad (r^2 = 0.247)$$

其中  $T_5$ 、 $T_6$  为当年 5、6 月份温度,  $H_{-11}$  为上年 11 月份湿润指数。

从以上 2 个方程可以看出,不同海拔高度的马尾松与不同的环境因子相关,但主要受 5、6 月份的气候因子的影响,因此 5、6 月份对马尾松生长起到关键作用,经方差检验,2 个方程的模拟值与实测值都达到了显著相关水平,从图 4 可以看出 2 个海拔高度年轮宽度指数模拟值与实测值基本吻合,进一步说明了马尾松生长与环境因子之间的密切关系。

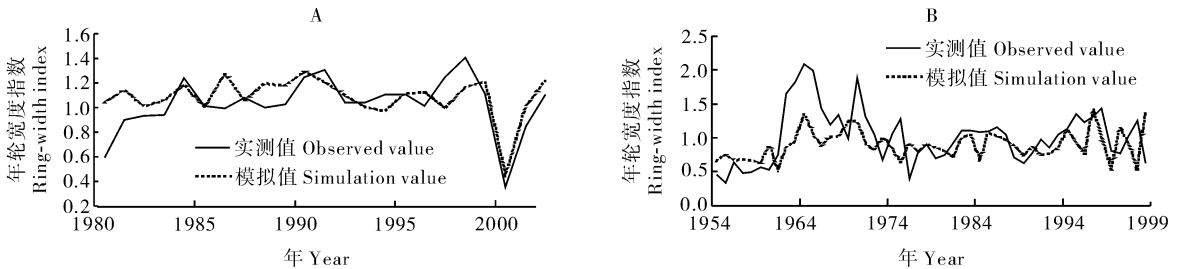


图 4 海拔 600 m (A) 和 900 m (B) 年轮宽度指数实测值与模拟值

Fig. 4 Observed values and simulation values of tree-ring width chronologies for 600 m (A) and 900 m (B) elevation

### 3 讨论

马尾松生长对气候变化响应敏感,因此可以用年轮气候学理论和研究方法,研究马尾松生长对气候的响应,在马尾松生长对气候因子关系模型中,海拔 600 m 的显著水平达到 0.012,海拔 900 m 的显著水平达到 0.005,结合年轮统计特征,说明高海拔马尾松在年轮气候学分析中比低海拔马尾松更适合。对三峡库区涪陵来讲,主要是低海拔地区人为活动频繁,马尾松生长受人为因素的干扰比高海拔要强,同时低海拔马尾松松林中群落结构复杂,灌木和草本种类明显高于高海拔马尾松林分,因此马尾松生长受其他树种竞争的干扰,削弱了马尾松对外界环境反应的敏感度,因此干扰了气候因子与马尾松生长的相关性。

不同海拔马尾松生长对气候的响应不同,对三峡库区涪陵马尾松生长影响最显著的是 5、6 月份的气候因子,主要是温度和降雨,同时还有上一年湿润指数也影响马尾松当年的生长。海拔 600 m 时,马尾松生长主要受 5、6 月份的降雨和 5、6 月份的湿润指数影响,而海拔 900 m 时受 5、6 月份温度和上年 11 月份降雨和湿润指数影响。湿润指数对马尾松

生长影响说明温度和降雨的综合作用。

马尾松生长对季节气候因子响应表现出的不同可能与不同海拔生长季节的长短有关。同时,由于三峡库区地形复杂,不同地形的水热变化较大,由此带来的气候对树木的综合影响会明显不同,本文仅就库区上游的涪陵为试区进行分析的,所分析的结论对库区其他地方的马尾松生长与气候的关系具有借鉴意义,但不能代表整个三峡库区马尾松生长与气候的关系,因此可以进一步选取其它地区,如库区中游和下游的马尾松进行进一步的对比分析,揭示三峡库区不同地形条件下马尾松生长与气候的关系,进一步从生理机制上探讨马尾松分布上界和下界。

**致谢** 在年轮样品的处理和分析过程中得到中国科学院植物研究所张奇兵研究员及其实验室人员的帮助,在此表示衷心感谢!

#### 参 考 文 献

- [1] 孙凡,钟章成.缙云山四川大头茶树木年轮生长动态与气候因子关系的研究[J].应用生态学报,1999,10(2):151-154.

- [2] 吴泽民,黄成林.黄山松年轮生长和气候的关系[J].应用生态学报,1999,10(2):147-150.
- [3] 吴祥定,邵雪梅.中国树木年轮学研究动态与展望[J].地球科学进展,1993,8(6):31-35.
- [4] LARSEN P S, MACDONALD C M. Relations between tree-ring widths, climate, and annual area burned in the boreal forest of Alberta[J]. Can J For Res, 1995, 25: 1746-1755.
- [5] DANG Q L, LIEFFERS V J. Climate and annual ring growth of black spruces in some Alberta peatlands[J]. Can J Bot, 1989, 67: 1885-1889.
- [6] BONAN G B, SIROI S. Air temperature, tree growth, and the northern and southern range limits to *Picea mariana* [J]. J Veg Sci, 1992, 3: 495-506.
- [7] DARRIGO R D, JACOBY G C. Secular trends in high northern latitude temperature reconstructions based on tree rings[J]. Climate Change, 1993, 25: 163-177.
- [8] BROOKS J R, FLANAGAN L B, EHLERINGER J R. Responses of boreal conifers to climate fluctuations: indications from tree-ring widths and carbon isotope analyses[J]. Can J For Res, 1998, 28: 524-533.
- [9] 肖运来,王斐,史玉虎,等. 兰陵溪小流域不同植被恢复模式生态功能研究[J]. 华中农业大学学报, 2009, (28)4: 476-482.
- [10] 邵雪梅,吴祥定. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化[J]. 第四纪研究, 1997(1): 76-85.
- [11] HOLMES R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement[J]. Tree-Ring Bulletin, 1983, 43: 69-75.
- [12] COOK E R, HOLEMS R L. Guide for computer program ARSTAN [M]//GRISSINO-MAYER H D, HOLEMS R L, FRITTS H C. The International Tree-Ring Data Bank program library version 2.0 user's manual. Arizona: University of Arizona, 1996: 75-87.
- [13] MANN H B. Non-parametric test against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13: 245-259.
- [14] KOHLER M A. On the use of double-mass analysis for testing the consistency for meteorological records and for making required adjustments[J]. Bull Amer Meteorol Soc, 1949, 30: 188-189.
- [15] HUGHES M K, BROWN P M. Drought frequency in central California since 101 B. C. recorded in Giant Sequoia tree rings [J]. Climate Dynamics, 1991(6): 161-167.

## Relationship between tree-ring chronology of *Pinus mussoniana* and climate change in the upstream of Three-gorges Reservoir Area

LEI Jing-pin<sup>1</sup> XIAO Wen-fa<sup>2</sup> HUANG Zhi-lin<sup>2</sup>  
ZENG Li-xiong<sup>2</sup> WANG Huai-qing<sup>3</sup> LI Liang-jun<sup>3</sup>

1. Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection,  
Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Forestry Bureau of Yunyang County, Chongqing, Yunyang 404500, China

**Abstract** The relationship of *Pinus mussoniana* radial growth with climate change in the upstream of Three-gorges Reservoir Area in China was assessed by dendrochronological techniques including correlation functions and single-years analysis. The results showed that *Pinus mussoniana* growth in the high and low elevations had a significantly different response to temperature and precipitation. In the low elevation, *Pinus mussoniana* growth was significant correlated with the mean precipitation and the humid indexes of May and June. But in the high elevation, it had a more complicated relationship with its environment. Besides the mean temperature of May and June, the humid index of last November was significantly correlated with the *Pinus mussoniana* tree-ring width. Therefore, the relationship of the same tree species with different environmental gradients was different.

**Key words** *Pinus mussoniana*; tree ring; climate change; Three-gorges Reservoir Area