

北亚热带生长期温度对马尾松径向生长的影响*

封晓辉¹ 程瑞梅^{1*} 肖文发¹ 王瑞丽¹ 王晓荣^{1,2} 高宝庆³

(¹ 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

² 湖北省林业科学研究院, 武汉 470039; ³ 陕西省南郑县林业局, 陕西汉中 723011)

摘要 近几十年由于温度升高导致的植物生长期的延长已经得到了证实, 虽然生长期的长短变化会引起树木生产力变化, 但不同起始温度的生长期对树木径向生长的影响尚不明确。为了探索不同起始温度的生长期变化对马尾松生长的影响, 找出马尾松生长的敏感温度, 本研究选择北亚热带西北边缘汉中地区的老龄马尾松为对象, 应用树木年轮学的方法得到了马尾松从 1945 年到 2009 年的年轮宽度指数; 同时利用汉中气象站的日均温度, 计算每一年不同温度的初日、终日、持续时间以及生长期活动积温; 分析生长期的变化规律和不同温度生长期对马尾松生长的影响。结果表明: 6.0 °C ~ 7.5 °C 的开始时间对年轮宽度有负影响, 6.0 °C 的初日对马尾松的生长最明显, 10.5 °C 的终日时间对生长有显著促进作用; 10.0 °C 和 10.5 °C 的生长期与马尾松生长正相关最为显著, 生长期活动积温对生长的影响也较为显著。这些敏感温度分别对应马尾松春季开始萌动、针叶出现以及秋季形成层活动停止时的温度, 说明温度的变化导致物候期的变化进而影响植物的年生长量。

关键词 马尾松; 年轮; 温度; 活动积温; 生长期

中图分类号 S716.3, S792 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)4-0650-06

Effects of air temperature in growth season on Masson pine (*Pinus massoniana*) radial growth in north subtropical region of China. FENG Xiao-hui¹, CHENG Rui-mei¹, XIAO Wen-fa¹, WANG Rui-li¹, WANG Xiao-rong^{1,2}, GAO Bao-qing³ (¹Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, the State Forestry Administration; Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; ²Hubei Forestry Academy, Wuhan 470039, China; ³Forestry Administration of Nanzheng County, Hanzhong 723011, Shannxi, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(4): 650-655.

Abstract: Longer growth season has been confirmed due to the elevated temperature in recent decades. Though the changes in the duration of growth season could affect tree productivity, it's unclear how the growth season with different initiating temperature affects the radial growth of tree. In order to investigate the effects of growth season's variability in temperature to the radial growth of Masson pine (*Pinus massoniana*) and search for the sensitive temperature to the growth, old Masson pine stands in Hanzhong, the northwest margin of north subtropical region, were chosen as test objects, with their tree ring width index chronology from 1945 to 2009 measured by dendrochronology method. The air temperatures on the first day, last day, and in the whole growth season as well as the active accumulative temperature during growth season were determined based on the daily mean temperature of Hanzhong, and the relationships between the temperatures and chronology were analyzed. The results showed that the growth season with initiating temperature 6.0 °C-7.5 °C had negative effects on the tree ring width index chronology, with 6.0 °C being most significant. 10.5 °C on the last day had significant positive effects on tree ring growth. 10.0 °C and 10.5 °C in growth season were significantly positively correlated with the tree ring growth, and the active accumulative temperature during growth season was also significantly positively correlated with the growth. These sensitive temperatures were respectively

* 国家林业局林业公益性科研专项(200804001)和中国林科院森林生态环境与保护研究所专项(CAFREP201006)资助。

** 通讯作者 E-mail: chengrm@caf.ac.cn

收稿日期: 2010-10-21 接受日期: 2010-12-25

corresponding to the onset of photosynthesis, needle emergence in spring, and shutting down of cambium activity in autumn. Our study suggested that elevated temperature led to the changes in phenophase, and thereby, affected the radial growth of *P. massoniana* in Hanzhong.

Key words: Masson pine (*Pinus massoniana*); tree ring; temperature; active accumulated temperature; growth season.

近 100 年来全球年平均气温上升了 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而我国的升温幅度为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (国家气候变化评估报告编辑委员会, 2007), 20 世纪 80 年代以后, 我国大部分地区的 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的生长期增加了 4.2 天 (柏秦凤等, 2008), 物候观测和遥感监测也证实了温度的升高提早了展叶期延迟了落叶期进而延长了植物的生长期 (Zheng *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2005), 而生长期的延长会显著的影响树木的径向生长 (Hasenauer *et al.*, 1999)。研究证明, 生长期积温对树木的高生长和树冠生长有重要的作用 (Jones *et al.*, 1991; Guan *et al.*, 2009), 同时生长期积温与树木径向生长的相关性已经在干旱地区的研究中得到证明 (袁玉江等, 2005)。树木年轮是树木自身生长历史的记录, 年轮的宽度和密度与外界环境的变化密切相关 (Fritts, 1976; Smith, 2008), 主要包括降雨和温度等气候因子。马尾松 (*Pinus massoniana*) 是亚热带地区分布最广泛的造林针叶树种, 在我国南方地区的林业中有重要的地位 (周政贤, 2000), 以往的研究证明, 其年轮宽度与气候存在密切的关系 (侯爱敏等, 2003; 雷静品等, 2009)。马尾松径向生长的与生长期温度的关系尚不明确。

本研究主要着眼于不同温度对生长的影响, 尝试在长期变化的复杂气候因子中提取温度对径向生长影响的信息, 并确认最敏感的温度, 从温度的角度解释马尾松径向生长与气候变化的关系, 这在理解树木生长对全球变暖的响应, 探索马尾松生长与气候变化的关系, 以及我国林业应对气候变化中有重要的意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地区概况

陕西省南郑县位于汉中盆地, 平均海拔 550 m 以上, 该地区地处秦岭和巴山山脉中间, 是北亚热带向暖温带过渡的边缘地带, 全年气候温暖湿润, 夏无酷暑, 冬无严寒, 四季分明 (曹厚光等, 1996); 年均的降水量为 907.7 mm, 温度年变化较大, 1 月温度最低, 累年平均为 $2.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 7 月温度最高, 累年平均

为 $25.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 活动积温平均为 4605 $^{\circ}\text{C}$, 近几十年中气温有逐渐升高的趋势, 生长期也显著延长 (苏俊辉和王国栋, 2007)。该地区地带性土壤为黄棕壤, 是马尾松自然分布的西北边缘, 马尾松大量分布在海拔 1000 m 以下的低山丘陵区, 接近北亚热带地区垂直分布的上限。该地区在建国后营造了大面积的次生林, 人为干扰较少, 是研究马尾松生长对温度响应的理想地点。采样点选择在红寺湖景区, ($32.45^{\circ}\text{N}, 106.25^{\circ}\text{E}$), 平均海拔 630 m。林分内平均树高 22 m, 平均胸径为 20.5 cm, 林下灌木主要有油茶 (*Camellia oleifera*)、榿木 (*Loropetalum chinense*) 和白栎 (*Quercus fabri*) 等。

1.2 年表的建立

在马尾松林中选择处于林冠层的优势马尾松, 用生长锥在胸高处十字交叉钻取树芯, 共取 87 棵树的 208 根树芯, 将树芯用塑料管保存, 在实验室中将树芯放置于木槽中室温条件下干燥 1 周, 然后用硅胶将树芯固定在木槽中, 再用不同径级的砂纸从粗到细逐级打磨, 直到表面光滑平整, 年轮间界限清楚。利用 LINTAB 年轮分析系统测量年轮的宽度 (精确到 0.01 mm)。将得到的年轮宽度序列用 COFECHA 软件交叉定年 (Holmes, 1983), 剔除存在的伪轮, 缺失以及由于生长突然变化而与主序列相关性较低的年轮宽度序列, 最终有 84 棵树的 198 个年轮宽度序列合格, 进行年表的建立。交叉定年后的宽度序列用 ARSTAN 软件去趋势, 剔除由于树木,

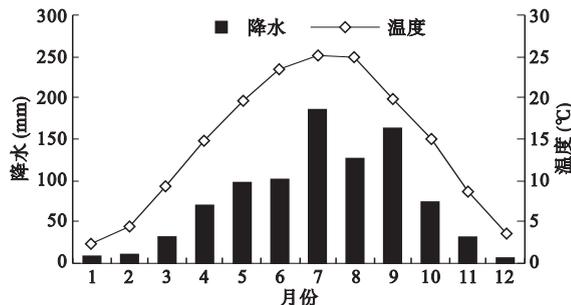


图 1 汉中气象站的月平均气温和降水

Fig. 1 Monthly mean precipitation and temperature of Hanzhong meteorological station

的年龄和环境的波动造成的生长变化,最后得到汉中的马尾松生长的年表,包括标准年表 STD、差值年表 RES 和自回归年表 AST (Cook & Kairiukstis, 1990)。通过年轮宽度的标准化剔除与树龄有关的生长趋势,得到年轮指数,最后采用双权重平均法合并得到标准年表。差值年表是在标准化年表的基础上,去掉树木个体特有的和由前期生理条件对后期生长造成的持续性影响而建立的一种新年表,它只含有群体共有的高频变化。自回归年表则是估计采样点树木群体所共有的持续性造成的生长量,再将其加回到差值年表上得到的,因此它既含有群体共有的高频变化,又含有群体共有的低频变化。常规标准化年表除此之外,还含有少量的树木个体持续性变化造成的低频分量。

1.3 气象资料

在国家气象局申请得到汉中 (33.04° N, 107.02° E, 海拔 509 m) 的日值温度资料,利用日值的温度数据采用 5 日滑动平均法确定 1951—2009 年不同起始温度的初日和终日,并确定初日和终日在一年中的位序(忽略闰年的影响),计算不同温度的持续时间及活动积温。起始温度从 5.0 °C 每间隔 0.5 °C 计算 1 次一直到 15.0 °C。其中 1968 年的气候数据 4—7 月的气候数据缺失,故 1968 年的活动积温缺失。

1.4 相关性分析

将 STD 和 RES 年表与不同起始温度的初日、终日、生长期和活动积温做相关分析(由于自回归年表和标准年表的相关性为 0.988,所以进行标准年表和差值年表的气候分析),探寻在马尾松分布北界的最高界影响马尾松生长的最敏感温度。采用移动相关方法找出积温与年轮指数相关最高的温度。

2 结果与分析

2.1 年表的统计特征

年表的长度为 62 年,由 84 棵树 198 个年轮宽度序列建立。所有的年轮宽度平均为 2.167 mm,平均敏感度为 0.302,所有序列的相关系数 0.290。共同区间 1961—2008 年的分析表明年轮宽度序列和去趋势序列的样本群体代表性分别为 0.977 和 0.981,具有较高的代表性,性噪比较高分别为 42.248 和 51.746,第一主成分的方差解释率达到 0.580 和 0.587。各项统计特征表明,汉中的年表包

表 1 年轮宽度和年轮指数序列的统计特征

Table 1 Descriptive statistic of Masson pine tree-ring chronology

	统计特征	
	宽度序列	去趋势序列
时间范围	1946—2008	
树/芯	84/198	
平均宽度	2.167±0.515	
敏感度	0.302	
所有宽度序列的相关度	0.290	
共同区间分析	1961—2008 (48/90)	
序列间相关度	0.319	0.365
树内相关	0.748	0.774
树间相关	0.313	0.359
敏感度	0.310	0.310
性噪比	42.248	51.746
样本群体代表性	0.977	0.981
第一主成分的方差	0.587	0.580

含了较多的气候信息,是合格的年表,能够进行气候分析(图 2,表 1)。

2.2 汉中地区的生长期和积温的年变化

从 1951 年汉中地区有气象记录以来,温度呈现逐年增高的趋势,10 °C 的初日时间逐渐提早,终日时间延迟,≥10 °C 生长期和有效积温呈波动增加的趋势。10.0 °C 的生长期平均为 234.2 d,最大为 2006 年 265 d,最小 1996 年 214 d。≥10 °C 活动积温平均 4605.5 °C,最高 2006 年为 5256 °C 最低 1976 年 4297 °C。从 5 年的滑动平均可以看出,1980 年以后生长期和活动积温都有较快的升高(图 3)。

2.3 年表与温度的相关

2.3.1 不同温度的起始时间与年表的关系 如表 3 所示,春季温度的初日在一年中的位置对年轮的影响主要是负影响,6.0 °C 到 7.5 °C 的初日与 STD 年表的负相关系数较明显,初日时间越早 4 生长量就越大,反而如果温度的初日较迟则生长的开始时间越晚当年的生长量就越小。RES 年表的相关系数较标准年表的相关系数较低,未达到显著水平。

2.3.2 不同温度的终日与年表的关系 生长温度的终日决定了生长的停止,结果表明,不同温度的终日时间与 2 种年表存在正相关,其中 10.5 °C 和 10.0 °C 的终日时间与差值年表正相关最大,分别为 0.243 和 0.251 ($P < 0.05$),达到了显著相关水平,表明 10 °C 是生长的结束温度。但不同的终日时间与生长量的相关性不明显。

2.3.3 不同温度的生长期长短与年表的关系 不同温度的生长期与 2 个年表都表现为正相关,其中

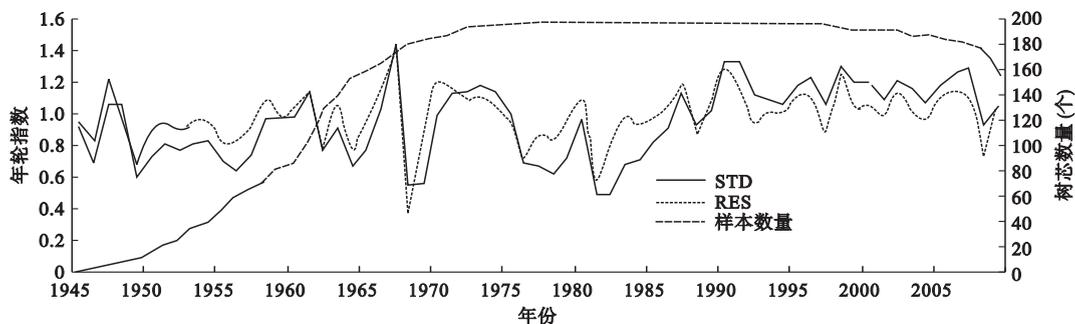


图2 汉中马尾松的STD和RES年表
Fig.2 STD and RES chronology of Masson pine in Hanzhong

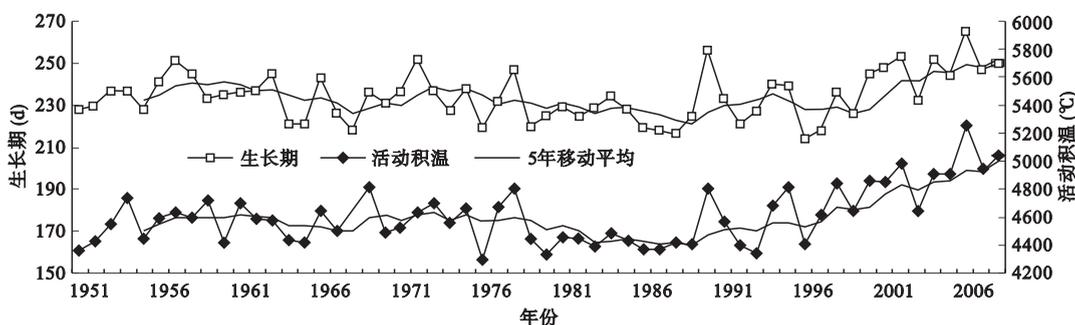


图3 汉中1951年到2008年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的生长期和活动积温
Fig.3 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ growing season length and active accumulated temperature of Hanzhong during 1951-2008

表2 年表和不同生长起始生长温度初日、终日、生长期和活动积温的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between chronologies and different temperatures growing starting date, ending date, length of growing season and active accumulated temperature

起始温度 ($^{\circ}\text{C}$)	初日与年表的相关系数		终日与年表的相关系数		生长期与年表的相关系数		活动积温与年表的相关系数	
	STD	RES	STD	RES	STD	RES	STD	RES
5.0	-0.186	-0.006	0.160	0.001	0.219 *	0.006	0.390 **	0.152
5.5	-0.149	0.054	0.183	0.012	0.203	-0.029	0.386 **	0.144
6.0	-0.258 *	-0.125	-0.037	-0.117	0.202	0.044	0.376 **	0.171
6.5	-0.232 *	-0.109	-0.027	-0.104	0.181	0.037	0.365 **	0.163
7.0	-0.217 *	-0.047	-0.071	-0.093	0.146	-0.010	0.356 **	0.160
7.5	-0.227 *	-0.042	-0.070	-0.102	0.154	-0.019	0.353 **	0.152
8.0	-0.031	0.048	-0.118	-0.202	-0.043	-0.154	0.305 *	0.134
8.5	-0.026	0.037	-0.043	-0.114	-0.006	-0.098	0.332 **	0.163
9.0	0.056	0.033	0.142	0.191	0.041	0.089	0.323 **	0.175
9.5	-0.005	0.017	0.118	0.193	0.079	0.104	0.340 **	0.187
10.0	-0.217 *	-0.151	0.153	0.243 *	0.267 *	0.264 *	0.375 **	0.199
10.5	-0.198	-0.132	0.156	0.251 *	0.258 *	0.261 *	0.372 **	0.191
11.0	-0.127	-0.071	0.146	0.108	0.197	0.126	0.340 **	0.146
11.5	-0.118	-0.059	0.157	0.116	0.198	0.124	0.330 **	0.134
12.0	-0.149	-0.020	0.074	0.042	0.159	0.039	0.321 **	0.127
12.5	-0.156	-0.031	0.084	0.055	0.169	0.055	0.321 **	0.136
13.0	-0.209	-0.008	0.068	0.133	0.201	0.086	0.293 *	0.077
13.5	-0.181	-0.007	0.122	0.140	0.215	0.09	0.290 *	0.081
14.0	0.002	0.049	0.072	0.212	0.046	0.097	0.209	0.106
14.5	-0.099	0.039	0.034	0.147	0.105	0.061	0.266 *	0.117
15.0	-0.111	0.072	-0.053	-0.033	0.049	-0.073	0.230 *	0.036

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

$\geq 10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 生长期的相关系数最高,都达到了显著相关,STD年表和 $\geq 10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $\geq 10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的生长期相关系数分别为0.267和0.258,SER年表分别为0.264和0.261。表明汉中的马尾松生长受到生长期长短的显著影响,超过一定温度的持续时间越长马尾松的生长量越大,其中以 $\geq 10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的生长期最为突出。显著性最高的 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的初日和 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的终日持续时间与STD和SER年表的相关系数为0.310和0.238达到了极显著相关和显著相关的水平,高于同一个温度的所有持续时间的相关系数,说明早春生长的起始温度要低于晚秋生长结束的温度。

2.3.4 生长期活动积温与年表的关系 生长期活动积温对2个年表的影响相似,都表现为正相关,对标准年表的影响几乎都达到了显著水平,其中 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活动积温与STD年表相关性最高;RES年表的相关系数在 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最高,但没有达到显著水平。与STD年表的相关性比RES年表的显著性较低,都未达到显著水平。

2.3.5 2种年表的对比 对比2种年表的结果可以发现STD年表对初日的温度有2个较敏感的温度 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 而RES年表对初日的温度变化不敏感,未达到显著水平,而对于不同温度的终日结果却相反,RES年表对 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 较敏感而STD年表却没有较敏感的温度。但是2个年表都对高于 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续时间存在显著相关。STD对生物学零度从 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活动积温显著相关而RES年表只对 $15.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的活动积温较敏感。存在这种差异是由于RES是去掉了由前期的生理条件对后期生长造成的持续影响而建立的差值年表,而STD保存了这种影响。

3 讨论

3.1 不同起始温度的初日时间与生长的关系

不同温度的初日时间与年轮指数表现为负相关, $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的初日时间负相关最明显,表明在春季达到一定温度的时间越早,当年的生长量就越大,而 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是春季生长开始期最敏感的温度。一般认为, $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是植物光合作用的最低温度,但光合作用的最低温度会随着不同的树种和地区而发生变化,研究发现马尾松的光合起始温度为 $5.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (周政贤,2000)。马尾松是常绿针叶树种,春季温度超过了一定温度之后树液开始流动(Turcotte *et al.*, 2009),并开始光合作用,树干的形成层开始活动,

$6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可能是春季开始生理活动的起始温度,可以将其看作是马尾松的生物学零度。这与新疆乌鲁木齐的研究 $5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是最敏感的温度相近(袁玉江,2005),与欧洲黑云杉(*Picea mariana*)的木质部形成的最低温度相近(Rossi *et al.*, 2011)。 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 也有一定的负相关,但相关度要小于 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的初日时间。物候观测表明,北亚热带春季马尾松的新叶出现和径向生长开始于3月中旬,此时的平均温度为 $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此在温度超过 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后,新叶开始出现,光合作用会增强,木质部开始形成, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 成为敏感温度。这与地中海松的春季针叶萌发温度相同(Avraham,1989)。研究表明,春季树木停止休眠后树液开始流动,形成层开始活动,在一定时间后新叶开始出现,光合作用逐渐增强木质部开始形成(Čufar *et al.*, 2008)。德国中部春季树木的物候期与温度关系的研究也有类似结果,树木春季的物候期与 $5.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的初日存在显著负相关,而与 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 初日相关性不大(陈效速,2000),说明不同纬度上的树木生长的敏感温度存在差异。

3.2 不同起始温度的终日时间与生长的关系

不同温度的终日时间与生长表现为正相关,一定温度的结束时间迟,会延长生长期,因此表现为正相关,而 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的终日时间与生长的相关系数最高。物候观测表明,北亚热带的马尾松秋季2年生的针叶落叶时间在10月中下旬(温度为 $14.1\text{ }^{\circ}\text{C}$),说明2年生针叶的脱落对生长的影响不大。可以推断,低于 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 马尾松的形成层活动逐渐停止。生长期结束的敏感温度要高于生长开始的敏感温度,这可能是由于 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是树内液体开始流动光合作用开始的温度,而 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是马尾松木质部形成层活动的敏感温度。这与加拿大北方针叶林的树种的敏感温度相似(Rossi *et al.*, 2008),树木的形成层活动停止的温度要高于开始活动的温度,在亚热带树种上得到了证明。

3.3 不同起始温度的生长期与生长的关系

$10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续时间与生长量的正相关最高,这是由于 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是形成层加速活动木质部开始形成的敏感温度,春季温度高于 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后光合作用逐渐增强,形成层活动开始加速,秋季温度低于 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之后形成层活动停止,径向生长停止。 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的初日和 $10.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的终日的持续时间分析表明,其相关系数要高于单一初终日温度持续时间的相关系数。说明马尾松生长活动主要在春季高于

6.0 °C 和秋季高于 10.0 °C 的生长期内进行。全球变暖会导致生长期的提前和结束期的延迟进而促进年生产力的增加,在树木年轮学中得到了证实。以前的研究主要从物候期的变化期研究生长期的变化 (Chen *et al.*, 2005), 在本研究中年轮资料和物候期的变化相互印证了气候变化对树木生长的影响,进一步证明了气候变化对树木生长影响的机制。

3.4 不同起始温度的活动积温与生长的关系

活动积温与 STD 年表的相关性较高,并且大部分的达到了显著水平,说明生长期内的温度的升高对马尾松的生长有促进作用。有研究表明,树木的发芽(常兆丰等,2010)和木质部的开始形成(Begum *et al.*, 2010)主要和活动积温相关。10.0 °C 的活动积温与生长量关系最明显,该温度与生长期的敏感温度相同,也再次印证了 10.0 °C 是木质部形成的最低温度,是整个生长期内最敏感的温度。由于不同温度的生长期与活动积温存在较高的相关性,活动积温是由生长期内的温度计算得到的,活动期越长从而生长期越长,可以看出,在 80 年代以后不同起始温度的生长期和活动积温都有显著的上升,而年轮的宽度指数也较大。如果温度持续增高则活动积温会更高,将会进一步促进生产力的增加。

4 结论

汉中盆地处于马尾松地理分布的西北边缘,温度的升高对马尾松生长有促进作用。其径向生长对春季 6.0 °C 和 10.0 °C 以及秋季的 10.5 °C 较敏感,对 ≥ 10.0 °C 的生长期和积温也较敏感。这是由于春季温度超过了 6.0 °C 之后树液开始流动,光合作用开始;温度超过 10.0 °C 之后,树干的形成层活动加速,木质部开始形成,径向生长开始;秋季 10.0 °C 是形成层活动的最低温度。虽然这些敏感温度可能受到气象站和林地之间环境差异的影响,进而使敏感温度存在一定的误差,但是随着全球温度的逐渐升高,春季温度的初日时间提早和秋季的终日时间延迟导致生长期增长,生长期内的活动积温也增加,在水分条件较好的汉中盆地必然使马尾松年生长量增加。

参考文献

柏秦凤, 霍志国, 李世奎, 等. 2008. 1978 年前、后中国 ≥ 10 °C 年积温对比. 应用生态学报, **19**(8): 1810-1816.
曹厚光, 武佐民, 余汉章. 1996. 汉中盆地的自然条件与农业. 西北大学学报(自然科学版), **26**(4): 349-354.
常兆丰, 韩福贵, 仲生年. 2010. 民勤荒漠区 16 种植物物候持续日数及其积温变化. 生态学杂志, **29**(2): 193-200.

陈效述. 2000. 论树木物候生长季节与气温生长季节的关系——以德国中部 Taunus 山区为例. 气象科学, **58**(6): 726-737.
国家气候变化评估报告编辑委员会. 2007. 国家气候变化评估报. 北京: 科学出版社.
侯爱敏, 周国逸, 彭少麟. 2003. 鼎湖山马尾松径向生长动态与气候因子的关系. 应用生态学报, **14**(4): 637-639.
雷静品, 肖文发, 黄志霖, 等. 2009. 三峡库区秭归县不同海拔马尾松径向生长对气候的响应. 林业科学, **45**(2): 33-39.
苏俊辉, 王国栋. 2007. 汉中盆地近 45 年气温变化特征. 陕西气象, (4): 19-22.
袁玉江, 邵雪梅, 魏文寿, 等. 2005. 乌鲁木齐河山区树木年轮-积温关系及 ≥ 5.7 °C 积温的重建. 生态学报, **25**(4): 756-762.
周政贤. 2000. 中国马尾松. 北京: 中国林业出版社.
Avraham W. 1989. Phenology of *Pinus halepensis* at two sites in Israel. *Forest Ecology and Management*, **26**: 305-309.
Begum S, Nakaba S, Oribe Y, *et al.* 2010. Cambial sensitivity to rising temperatures by natural condition and artificial heating from late winter to early spring in the evergreen conifer *Cryptomeria japonica*. *Trees: Structure and Function*, **24**: 43-52.
Chen X, Hu B, Yu R. 2005. Spatial and temporal variation of phenological growing season and climate change impacts in temperate eastern China. *Global Change Biology*, **11**: 1118-1130.
Cook E, Kairiukstis L. 1990. Methods of Dendrochronology: Applications in Environmental Science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 104-162.
Cufar K, Prislan P, de Luis M, *et al.* 2008. Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe. *Trees: Structure and Function*, **22**: 749-758.
Fritts HC. 1976. Tree Rings and Climate. Caldwell, NJ: The Blackburn Press.
Guan BT, Chung C, Lin S, *et al.* 2009. Quantifying height growth and monthly growing degree days relationship of plantation Taiwan spruce. *Forest Ecology and Management*, **257**: 2207-2276.
Hasenauer H, Nemani RR, Schadauer K, *et al.* 1999. Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. *Forest Ecology and Management*, **122**: 209-219.
Holmes RL. 1983. Computer assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, **43**: 69-78.
Jones EA, Reed DD, Cattelino PJ, *et al.* 1991. Seasonal shoot growth of planted red pine predicted from air temperature degree days and soil water potential. *Forest Ecology and Management*, **46**: 201-214.
Rossi S, Deslauriers A, Gritiar J, *et al.* 2008. Critical temperatures for xylogenesis in conifers of cold climates. *Global Ecology and Biogeography*, **17**: 696-707.
Rossi S, Morin H, Deslauriers A, *et al.* 2011. Predicting xylem phenology in black spruce under climate warming. *Global Change Biology*, **17**: 614-625.
Smith KT. 2008. An organismal view of dendrochronology. *Dendrochronologia*, **26**: 185-193.
Turcotte A, Morin H, Krause C, *et al.* 2009. The timing of spring rehydration and its relation with the onset of wood formation in black spruce. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**: 1403-1409.
Zheng J, Ge Q, Hao Z, *et al.* 2004. Spring phenophases in recent decades over eastern china and its possible link to climate changes. *Climatic Change*, **77**: 449-462.

作者简介 封晓辉,男,1984 年 5 月,硕士,主要从事气候变化对森林的影响研究。E-mail: fengxiaohui0524@yaho.com.cn
责任编辑 王伟