

# 不同海拔青海云杉木材细胞结构对气候因子的响应

徐金梅<sup>1</sup> 张冉<sup>1</sup> 吕建雄<sup>1</sup> Robert Evans<sup>2</sup>

(1 中国林业科学研究院木材工业研究所, 国家林业局木材科学与技术重点实验室

2 澳大利亚联邦科学与工业研究院材料科学与工程研究所)

**摘要:**为探明木材细胞结构对气候因子的响应,以祁连山中部3个海拔高度的青海云杉为研究对象,利用 Silviscan-3 测定了青海云杉的木材细胞结构参数(管胞径向直径、管胞个数、管胞壁厚);在掌握木材细胞结构随海拔高度和年际变化的基础上,借鉴树木年轮气候学研究方法,建立木材细胞结构差值年表,分析木材细胞结构与月均温度和降雨量的关系。结果表明:管胞径向直径随海拔的增加而增加,管胞个数随海拔的增加而减少,管胞壁厚在3个海拔上无明显的变化规律。管胞径向直径与温度呈负相关,与降雨量呈正相关。管胞个数与温度呈正相关,与降雨量呈负相关;温度和降雨量对管胞个数的影响时间段与管胞径向直径相似,均与6、7月温度显著相关,与5、6月降雨量显著相关。管胞壁厚与温度呈正相关,与降雨量呈负相关,与温度显著相关的月份明显多于与降雨量显著相关的月份,表明温度对管胞壁厚的影响比降雨量强。温度对管胞径向直径、个数和壁厚的影响在3个海拔上没有明显变化;而与降雨量的关系随海拔的增加而减弱,甚至在高海拔处,管胞径向直径、个数、壁厚与降雨量的相关性均不显著。这表明温度不是限制祁连山青海云杉海拔分布的主要因子,而降雨量是限制其分布的主要因子。

**关键词:**管胞径向直径;管胞个数;管胞壁厚;年轮;气候变化

中图分类号:S781.45 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)07-0102-07

XU Jin-mei<sup>1</sup>; ZHANG Ran<sup>1</sup>; LÜ Jian-xiong<sup>1</sup>; Robert Evans<sup>2</sup>. **Climate response in cell characteristics of *Picea crassifolia* along elevation gradient in Qilian Mountains, northwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015) **37**(7) 102-108 [Ch, 36 ref.]

1 Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China;

2 CSIRO Materials Science and Engineering, Private Bag 10, Clayton South, Victoria, 3169, Australia.

In order to investigate the climate response of wood cell characteristics of *Picea crassifolia* at three elevations in the Qilian Mountains, northwestern China, we measured radial diameter, number and wall thickness of tracheids of *P. crassifolia* using Silviscan-3. Residual chronologies of radial diameter, number and wall thickness of tracheids were established by dendrochronological methods based on variation of cell characteristics with elevation and calendar year. Relationships between cell characteristics and monthly mean temperature and monthly total precipitation were analyzed. The results indicated that radial diameter of tracheids increased but the number of tracheids decreased with the rise of elevation; there was no obvious change in wall thickness at three elevations. Radial diameter of tracheids was negatively correlated with temperature, but positively associated with precipitation. The number of tracheids was positively correlated with temperature, but negatively with precipitation. Temperature in June and July, and precipitation in May and June had a significant influence on radial diameter and number of tracheids. Tracheid wall thickness was positively correlated with temperature, but negatively with precipitation. Temperature had a stronger effect on tracheid wall thickness than precipitation. Effect of temperature on cell characteristics was consistent at three elevations, while the impact of precipitation

收稿日期:2014-12-01 修回日期:2014-12-24

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(31300478)、中国林业科学研究院基本科研业务专项(CAFYBB2014QB010)。

第一作者:徐金梅,博士。主要研究方向:木材气候学。Email: xujinmei008@126.com 地址:100091北京市颐和园后中国林业科学研究院木材工业研究所。

责任作者:吕建雄,研究员,博士生导师。主要研究方向:木材物理。Email: jianxiong@caf.ac.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

decreased with the rise of elevation. Our findings suggest that precipitation, instead of temperature, is the main factor restricting the distribution of *P. crossifolia* along elevation gradient.

**Key words** radial diameter of tracheid; number of tracheids; tracheid wall thickness; tree-ring; climate change

树木作为寿命较长的生物体,在其生长轮内往往记录了生长过程中的环境变化信息。由于年轮宽度容易测量,自20世纪70年代广泛用作气候代用资料来重建古气候。随着先进仪器设备的出现,其他木材性质指标越来越受到关注。例如年轮密度包含了丰富的、甚至强于年轮宽度包含的气候信息<sup>[1-3]</sup>。年轮宽度、年轮密度是不同个数、尺寸和壁厚等木材细胞结构的综合表现,气候因素对年轮宽度和密度的影响包含在木材细胞结构中。近年来,随着计算机图像处理技术的发展,木材细胞结构中包含的气候信息开始受到关注。例如生长在热带地区的树木由于生长无明显的周期可言,利用常规的定年方法很难定年,无法开展年轮宽度的研究,但是其细胞结构特征却具有一定的周期性规律,对阔叶材导管特性(导管面积、个数、尺寸)的研究表明,导管特性对气候变化非常敏感,特别是对降雨量的响应十分强烈,是很好的气候代用资料<sup>[4-7]</sup>。但是,对于针叶材,其细胞结构包含了怎样的气候信息呢? Wang等<sup>[8]</sup>对加拿大黑云杉(*Picea marianna*)研究表明,管胞壁厚度与夏季温度显著正相关。Panyushkina等<sup>[9]</sup>对西伯利亚落叶松(*Larix cajanderi*)管胞个数和管胞壁厚研究表明,年轮管胞个数能可靠地重建6月的平均温度,晚材管胞壁厚能有效重建7—9月的平均温度。在我们的前期研究中,Xu等<sup>[10-11]</sup>、徐金梅等<sup>[12-13]</sup>对青海云杉年轮宽度、年轮密度、木材微纤丝角及木材细胞结构对气候因子的响应研究发现,木材细胞结构中包含了比年轮宽度更强的气候信息。因此,本文以青海云杉木材细胞结构为研究对象,分析主要气候因子(温度和降雨量)与木材细胞结构的关系,以揭示木材细胞结构中蕴含的气候信息,为气候变化对树木生长和木材形成的影响提供科学解释。

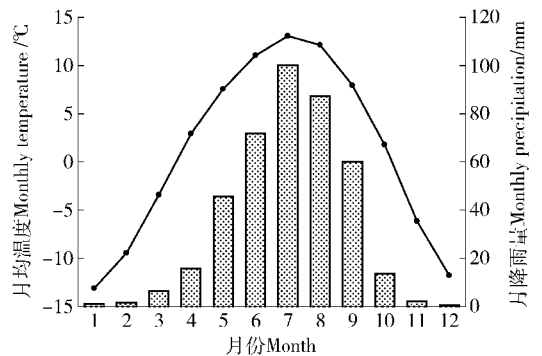
## 1 材料与方法

### 1.1 采样点概况及样本采集

采样点位于祁连山中部西水林场排露沟流域,此地青海云杉(*Picea crassifolia*)成片生长,林分单一,分布于海拔2 500~3 300 m的阴坡和半阴坡,林分郁闭度为0.6~0.7,林下灌木稀少,主要是草本和苔藓类植物。自青海云杉林下限,海拔每隔200 m设1个采样点,即2 600、2 800、3 000 m 3个采样点,记为A、B、

C,其坡度分别为28°~35°、10°~12°、15°~17°。在每个采样点挑选40株胸径大小一致的优势、健康树木作为样树,利用内径为12 mm生长锥取样器在胸高处(1.3 m)自南向北(垂直于山体坡面)取一个直径为12 mm的样芯(树皮到树皮),即包含南北的2个半径(髓芯到树皮)样芯,将样芯编号后放入防止样芯变形的木槽内,带回实验室气干。

采样点属于温带高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候,气候状况受青藏高原和沙漠气候影响较大。本文选取与采样点温度、降雨、地理位置最接近的国家级祁连站的气象记录为气候资料。其月均温度和降雨量如图1所示,仅4—10月的月均温度超过0℃,5—9月降雨量占全年降雨量的80%以上。



折线为月均温度,柱形为月降雨量。Fold line represents monthly temperature, and bars stands for monthly precipitation.

图1 祁连站台 1957—2009 年月均温度和月降雨量

Fig. 1 Climatic data from the Qilian meteorological station for the period 1957—2009

### 1.2 木材细胞结构的测定

将圆形的样芯制作成径向条样本(2 mm(L) × 7 mm(T) × 径向),并利用丙酮加热去除细胞内的有机物,经晾干后,利用不同等级的砂纸逐级打磨,至木材细胞腔和细胞壁在20倍实体显微镜下清晰可见。将制作好的样本置于恒温恒湿的环境下(温度20℃,相对湿度40%)放置2 d,让样本含水率调整到平衡含水率(8%)。测定样本的质量、长度、厚度、宽度值,建立每个样本的基础数据库后,利用澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)的木材性质快速测定仪(SilviScan-3)的图像测定系统,自髓芯到树皮在50倍放大的条件下以额定步长0.025 mm的速度、0.025 mm × 1.3 mm的测定面积测定每个年轮内的木材细胞结构值。根据木材细胞结构图

划分年轮界限,得到木材细胞结构的年轮平均值;细胞个数为年轮宽度 $\times 1.3\text{ mm}$ 面积内的细胞个数值;细胞直径包括细胞径向直径和弦向直径,由于弦向直径包含的气候信息非常弱,所以本研究仅采用细胞径向直径作为细胞直径;细胞壁厚为细胞双壁厚的平均值。

### 1.3 年表的建立

为确保标记年份是其生长年份,利用COFECHA程序对年轮细胞结构值进行交叉定年<sup>[14]</sup>。采用ASTAN程序<sup>[15]</sup>的线性函数( $y = ax + b$ )拟合各木材细胞结构序列,去除各序列随树龄变化的生长趋势,得到标准化序列。在标准化序列的基础上,利用管胞径向直径、个数和壁厚序列的自相关模型去除它们的自相关性,得到差值序列,将各差值序列平均,得到差值年表(RES),并计算在公共区(1958—2008年)内评价年表可靠性的统计量。年表质量可由样本间相关系数( $R$ )、信噪比(SNR)、样本总体代表性(EPS)<sup>[16-17]</sup>来衡量。 $R$ 是度量不同序列间年轮宽度变化同步性的统计量,相关性越高,样本序列间相似度高<sup>[18]</sup>。SNR是衡量年表包含公共信息多少的统计量,它的值越大,包含的公共信息越多<sup>[19]</sup>。EPS大于0.85时,说明所取的样本数足够代表总体<sup>[20]</sup>。

### 1.4 年表与温度和降雨量的相关分析

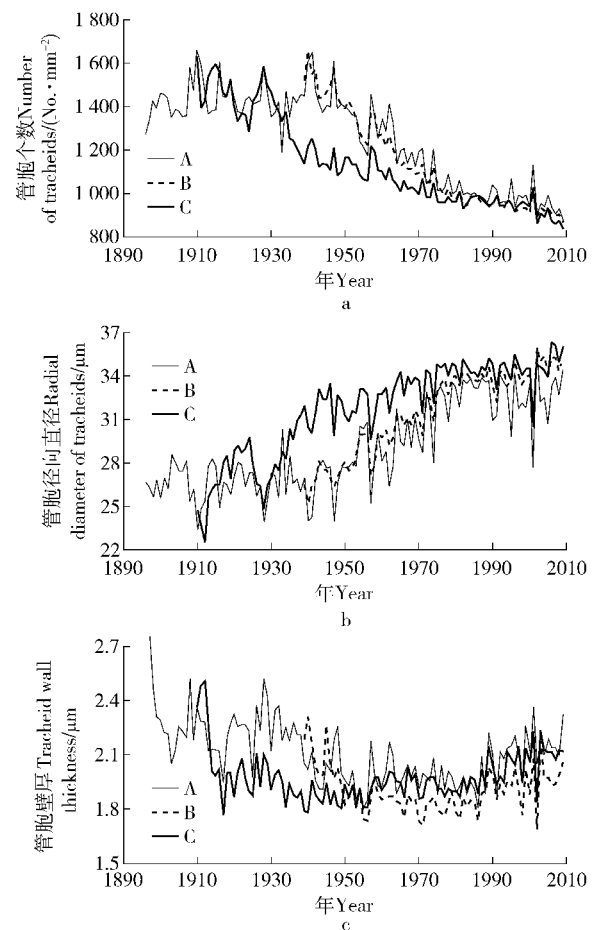
在树木年轮与气候关系的研究中,最常用的方法是相关分析<sup>[21]</sup>,它以大小和正负表示树木生长与各个气候要素的关系程度。本文利用Dendroclim2002程序<sup>[22]</sup>进行木材细胞结构年表与月均温度、月降雨量的相关分析。据报道,5—9月是采样点青海云杉的生长季节<sup>[19]</sup>,考虑气候条件对树木生长可能产生“滞后效应”,本文分析了所有细胞结构年表与上年10月至当年9月月均温度、月降雨量(22个气候要素)的关系。

## 2 结果与讨论

### 2.1 木材细胞结构年表

从图2可知:管胞径向直径随海拔和树龄增加有增大的趋势;管胞个数随海拔和树龄的增加有减小的趋势;管胞壁厚度随海拔和树龄没有明显的变化规律。管胞径向直径和管胞个数在1940—1978年间递增趋势明显,这种随树龄增加的趋势应该是青海云杉的生长趋势,不是气候因子引起的趋势,在研究木材细胞结构与气候因子的关系时,这种趋势是干扰信息,需去除。3个海拔木材细胞结构的一阶自相关系数为0.33~0.76,均在0.05水平下显著,说明木材细胞结构各个序列具有明显的自相关

性,建年表时应去除其自相关性。



A 为海拔 2 600 m, B 为海拔 2 800 m, C 为海拔 3 000 m。下同。A means 2 600 m asl, B means 2 800 m asl, C means 3 000 m asl. The same below.

图2 3个海拔木材细胞结构的原始年表

Fig. 2 Raw chronologies of cell characteristics at three elevations

去除生长趋势和自相关性后建立的木材细胞结构差值年表如图3所示,年表统计量见表1。

从表1可见:木材细胞结构序列具有显著的自相关性,说明前些年的生长条件对当年木材细胞结构的生长具有显著影响。样本间相关系数( $R$ )、信噪比(SNR)都较高,样本总体代表性(EPS)均大于0.85,说明所建立的差值年表比较可靠,具有一定的气候信息。但是,年表中气候信息的高低并不能简单的从年表统计量来推断。在利用年轮宽度研究气候信息时,通常树间相关系数和年表信噪比越高,气候对树木生长的影响越强<sup>[18]</sup>。根据这些统计量的高低,可以选择合适的年表进行气候信息分析,或者用于比较来自不同树种或采样地的年表特性;然而这些统计量并不适合于比较不同参数所建立的年表。比如,Lebourgeois<sup>[23]</sup>研究生长于法国15个采样点的欧洲水青冈(*Fagus sylvatica*)的早材和晚材宽度年表时,早材宽度年表的信噪比高于晚材宽度年

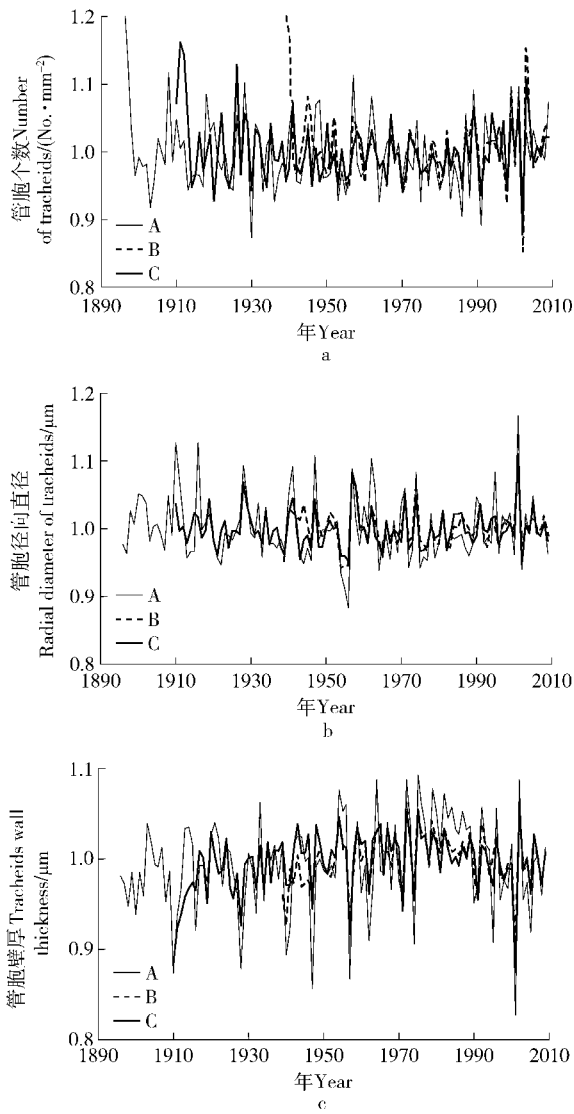


图3 3个海拔木材细胞结构的差值年表

Fig.3 Residual chronologies of cell characteristics at three elevations

材宽度年表对气候响应敏感。Xu 等<sup>[10-11]</sup>、徐金梅等<sup>[12-13]</sup>研究祁连山青海云杉木材年轮微纤丝角、木材细胞结构和年轮宽度对气候响应时发现,尽管微纤丝角年表和木材细胞结构年表的统计量均低于年轮宽度年表,但是微纤丝角年表和木材细胞结构年表响应函数的方差解释量却显著高于年轮宽度年表。类似特征在密度年表中也存在,如 Xiong 等<sup>[24]</sup>、Pant 等<sup>[25]</sup>在研究年轮密度和年轮宽度时发现,密度年表的平均敏感度和信噪比均低于年轮宽度年表,但密度年表与月均温度、月降雨量显著相关的月份数多于宽度年表。

### 2.2 木材细胞结构与气候因子的关系

从表2可见:管胞径向直径与温度呈负相关,与降雨量呈正相关;管胞个数和管胞壁厚与温度呈正相关,与降雨量呈负相关。3个海拔的管胞径向直径均与6、7月平均温度显著负相关;海拔2600m处的木材管胞径向直径与5、6月降雨量显著正相关,2800m处与6月降雨量显著正相关,3000m处与月降雨量的相关性不显著。3个海拔的管胞个数均与6、7月平均温度显著正相关;海拔2600m处的木材管胞个数与5、6月降雨量显著负相关,2800m处与3月降雨量呈负相关,3000m处与月降雨量相关性不显著。3个海拔的木材管胞壁厚与月平均温度的关系不同,海拔2600m处的管胞壁厚与8、9月平均温度显著正相关,2800和3000m处与上年12月、8月、9月平均温度显著正相关;3个海拔的管胞壁厚与月降雨量的关系较弱,海拔2600m处与3月降雨量显著负相关,2800m处与1月降雨量显著负相关,3000m处与降雨量相关性不显著。

从木材细胞形成和发育的角度来看,一个细胞

表,年表与气候因素分析结果为早材宽度年表比晚

表1 3个海拔木材细胞结构年表的基本统计量

Tab.1 Statistics of cell characteristic chronologies at three elevations

木材细胞结构 Cell characteristics	海拔 Elevation/m	均值(标准差) Mean(SD)	AC <sub>1</sub>	R	SNR	EPS
管胞个数 Tracheid population/(No·mm <sup>-2</sup> )	2600	1074(152)	0.63**	0.51	45.15	0.98
	2800	1043(142)	0.76**	0.28	6.80	0.87
	3000	983(96)	0.59**	0.29	22.11	0.96
管胞径向直径 Radial diameter of tracheids/μm	2600	31.49(2.54)	0.34*	0.77	139.30	0.99
	2800	32.63(2.17)	0.65**	0.58	32.81	0.97
	3000	34.09(1.71)	0.33*	0.61	82.09	0.99
管胞壁厚 Tracheid wall thickness/μm	2600	2.07(0.20)	0.38**	0.59	23.15	0.96
	2800	1.90(0.16)	0.36**	0.40	13.89	0.93
	3000	2.02(0.17)	0.39**	0.32	22.91	0.96

注:AC<sub>1</sub>为一阶自相关系数,R为样本间相关系数,SNR为信噪比,EPS为样本总体代表性;\*为P<0.05;\*\*为P<0.01。下同。Notes:AC<sub>1</sub> means the first autocorrelation, R correlation coefficient between trees, SNR signal-to-noise ratio, and EPS expressed population signal; \* means P<0.05, and \*\* means P<0.01. The same below.



表2 木材细胞结构与月平均温度、月降雨量的相关系数

Tab.2 Correlation coefficients of cell characteristics residual chronologies to monthly mean temperature and precipitation

		管胞径向直径			管胞个数			管胞壁厚		
		Radial diameter of tracheids			Tracheid population			Tracheid wall thickness		
		2 600 m	2 800 m	3 000 m	2 600 m	2 800 m	3 000 m	2 600 m	2 800 m	3 000 m
月平均温度 Monthly temperature	上年10月 Previous Oct	-0.11	-0.04	-0.04	0.07	-0.08	-0.13	0.02	-0.25	-0.13
	上年11月 Previous Nov	0.07	0.03	-0.16	-0.12	0.10	0.16	-0.06	0.03	0.03
	上年12月 Previous Dec	0.05	0.02	-0.11	-0.09	0.11	0.16	0.09	0.26*	0.29*
	1月 Jan	0.03	0.06	0.03	-0.15	-0.05	-0.07	0.02	0.08	0.06
	2月 Feb	-0.13	-0.16	-0.16	0.08	0.10	0.07	0.17	-0.11	-0.05
	3月 Mar	-0.03	-0.05	0.04	-0.05	0.06	-0.01	-0.04	0.03	-0.04
	4月 Apr	0.01	-0.07	-0.07	-0.14	0.17	0.08	0.04	0.04	-0.01
	5月 May	-0.17	-0.18	-0.15	0.09	0.12	0.03	0.10	0.16	0.11
	6月 Jun	-0.45*	-0.38*	-0.43*	0.36*	0.43*	0.33*	0.18	0.07	0.04
	7月 Jul	-0.45*	-0.46*	-0.43*	0.36*	0.48*	0.36*	0.09	0.01	-0.11
月降雨量 Monthly precipitation	上年10月 Previous Oct	-0.11	-0.09	-0.01	0.03	0.02	-0.10	0.12	0.18	0.10
	上年11月 Previous Nov	-0.22	-0.11	0.05	0.18	-0.07	-0.14	0.03	0.05	-0.14
	上年12月 Previous Dec	0.13	0.15	0.08	-0.07	0.04	0.01	0.14	0.19	0.21
	1月 Jan	0.09	0.08	-0.04	-0.11	-0.11	-0.06	-0.19	-0.27*	-0.17
	2月 Feb	0.01	0.03	0.04	-0.10	-0.08	-0.08	-0.04	-0.01	-0.05
	3月 Mar	0.15	0.16	0.20	-0.20	-0.26*	-0.25	-0.29*	-0.20	-0.19
	4月 Apr	-0.11	-0.05	-0.08	0.02	-0.03	-0.03	0.00	-0.10	-0.06
	5月 May	0.29*	0.23	0.23	-0.41*	-0.23	-0.22	-0.22	-0.13	-0.11
	6月 Jun	0.32*	0.26*	0.18	-0.34*	-0.18	-0.15	-0.12	-0.03	-0.02
	7月 Jul	-0.11	-0.06	-0.06	0.10	-0.06	-0.02	0.10	0.16	0.14
8月 Aug	0.07	-0.02	-0.03	-0.04	-0.01	0.03	-0.04	0.07	0.22	
9月 Sep	-0.21	-0.17	-0.21	0.21	0.25	0.18	0.11	0.11	0.14	

的成熟需要3个阶段:细胞分裂、细胞体积增大、细胞壁加厚。这3个阶段对于单个细胞的发育来说是阶段性的,有时间先后顺序;但是对多个细胞来说,形成层活动一旦开始,在形成层活动期内就会不断地有新细胞产生,当有些细胞处于细胞体积增大阶段时,有些细胞则处于细胞壁增厚阶段;然而在形成层活动末期,不再有新细胞产生,这时的细胞发育主要是细胞壁加厚<sup>[26]</sup>。据 Deslauriers 等<sup>[27]</sup>报道,温度对形成层活动从休眠期恢复极为重要,原因在于温度控制形成层分裂和木质部分化起止时间的早晚及细胞分裂的速度。温度越高,形成层活动开始得越早,细胞分裂速度越快,形成的木材细胞越多,细胞壁物质越多,细胞壁也就越厚。Mäkinen 等<sup>[28]</sup>对欧洲云杉(*Picea abies*)研究表明,管胞分裂起于6月止于8月,7月分裂速度最快,分裂速度与温度关系显著。形成层活动对温度的响应非常迅速,平均温

度和最高温度对细胞分裂速率的影响低于最低温度对细胞分裂速度的影响,最低温是细胞分裂速度的限制因子<sup>[29]</sup>。本研究发现细胞径向直径和管胞个数与6、7月平均温度显著正相关,管胞壁厚与6—9月平均温度的相关系数都较高,管胞个数、管胞径向直径、管胞壁厚与温度显著正相关的时间段与细胞发育的3个阶段基本吻合,说明6—9月是采样点青海云杉树干形成层活动的主要时期,6—7月是细胞分裂的主要时段。

管胞径向直径与温度呈负相关,与降雨量呈正相关,说明温度对管胞径向直径有间接影响,降雨量对管胞径向直径有直接影响。正如 Fritts<sup>[14]</sup>、Tardif 等<sup>[30]</sup>认为,当水分成为树木生长的限制因子时,其生长往往与降水量正相关;当水分充足或过多时,树木生长与降雨量无关或负相关。据 Aloni<sup>[31]</sup>报道,植物体内水分含量越高,植物激素浓度愈低,植物激

素的浓度对形成层细胞的分裂分化和扩大有直接影响,植物激素浓度高,则细胞分裂速度快,细胞扩大阶段的时间短,形成的细胞小;植物激素浓度低,则细胞分裂速度慢,细胞在次生壁加厚前有足够的时间扩大生长,因此形成的细胞大。在本研究中,管胞径向直径与5、6月降雨量具有很强的关系,说明5、6月降雨量对细胞体积的增大非常重要,因为此时形成层活动刚刚开始,形成的细胞为早材细胞,对水分和养分的输送非常重要,细胞越大,其疏导能力越强。因为管胞是针叶树水分和养分的通道,尽管针叶树靠近树皮5年左右的细胞都具有很强的生理活性,起着输送水分和养分的功能,但是当年形成的新细胞的生理活性远比前几年形成的细胞活性强<sup>[32]</sup>。7月是采样点一年中温度最高的月份,树木的蒸腾作用很强,管胞径向直径与温度的负相关可能是对水分亏缺的间接反映,这也可从管胞径向直径与7月平均最高温度和最低温度的显著负相关推断出来。管胞壁厚与温度呈正相关,与降雨量呈负相关,并且与温度相关性显著的月份大大多于与降雨量显著相关的月份,表明温度对管胞壁厚的影响比降雨量强。Hansen等<sup>[33]</sup>认为,木材细胞壁物质的形成过程是一个碳汇积累的过程,细胞壁物质的形成对树木保持碳平衡非常重要,在细胞壁加厚时,树木分配更多的光合产物供次生壁上纤维素微纤丝的形成和木质素的沉积。从图2可以看出,1985年后树木管胞壁厚有明显的增加趋势。据文献<sup>[34]</sup>报告,近年来全球温度的增加主要是由于CO<sub>2</sub>等温室气体排量的增加。大气中CO<sub>2</sub>含量越高,树木光合作用吸收了更多的CO<sub>2</sub>,通过光合作用等将CO<sub>2</sub>转化为纤维素等碳水化合物,固定在木材的细胞壁中,致使木材细胞壁增加。

温度对3个海拔管胞径向直径的影响没有区别,而降雨量对管胞径向直径的影响随海拔的增加而减弱,甚至在高海拔处,二者的相关性不显著。说明在3个海拔中,生长于下限(2 600 m)的青海云杉对降雨量最敏感,这可能与祁连山区的降雨量分布特征有关。汤懋苍<sup>[35]</sup>指出,祁连山区降雨量具有随海拔的增加而增加的特点。Qiang等<sup>[36]</sup>分析了祁连山青海云杉针叶上的气孔密度和针叶干重等生物学指标随海拔的变化,发现气孔密度和针叶干重随海拔变化呈抛物线变化;海拔2 600 m处的气孔密度和针叶干重最低,生长条件最差;气孔密度和针叶干重峰值出现在海拔3 000 m处,因而认为海拔3 000 m附近最适宜青海云杉的生长。由此可见,随着海拔的增加,降雨量越多,细胞直径越大,说明随着海拔高度的增加,降雨量对青海云杉生长的限制作用

越来越弱。

### 3 结 论

祁连山青海云杉的管胞径向直径随海拔的增加而增加,海拔2 600 m处管胞径向直径为31.49 μm,3 000 m处管胞径向直径为34.09 μm;管胞个数随海拔的增加而减少,2 600 m处管胞个数为1 074个,3 000 m处管胞个数为983个;管胞壁厚在3个海拔上无明显变化规律。管胞径向直径与温度呈负相关,与降雨量呈正相关;管胞个数与温度呈正相关,与降雨量呈负相关;温度和降雨量对管胞个数的影响时间段与管胞径向直径相似,均与6、7月温度显著相关,与5、6月降雨量显著相关。管胞壁厚与温度呈正相关,与降雨量呈负相关,与温度相关性显著的月份明显多于与降雨量显著相关的月份,表明温度对管胞壁厚的影响比降雨量强。温度对管胞径向直径、个数和壁厚的影响在3个海拔上没有明显的变化,而与降雨量的关系随海拔的增加而减弱,甚至在高海拔处,管胞径向直径、个数和壁厚与降雨量的相关性均不显著。表明温度不是限制祁连山青海云杉海拔分布的主要因子,而降雨量是限制其分布的主要因子。

### 参 考 文 献

- [1] PARKER M L, HENOCH W E S. The use of *Engelmann spruce* latewood density for dendrochronological purposes [J]. *Can J For Res*, 1971, 1(2): 90-98.
- [2] WIMMER R, GRABNER M. A comparison of tree-ring features in *Picea abies* as correlated with climate [J]. *IAWA Journal*, 2000, 21(4): 403-416.
- [3] BOURIAND O, LENAN J M, BERT D, et al. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of *Norway spruce* [J]. *Tree Physiology*, 2005, 25(6): 651-660.
- [4] SASS U, ECKSTEIN D. The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its ecophysiological interpretation [J]. *Trees*, 1995, 9(5): 247-252.
- [5] FONTI P, GARCÍA-GONZÁLEZ I. Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies [J]. *New Phytol*, 2004, 163(1): 77-86.
- [6] TARDIF J C, CONCIATORI F. Influence of climate on tree ring and vessel features in red oak and white oak growing near their northern distribution limit, southwestern Quebec, Canada [J]. *Can J For Res*, 2006, 36(9): 2317-2330.
- [7] GIANTOMASI M A, ROIG-JUNENT F, VILLAGRA P E, et al. Annual variation and influence of climate on the ring width and wood hydrosystem of *Prosopis flexuosa* DC trees using image analysis [J]. *Trees*, 2009, 23(1): 117-126.
- [8] WANG L, PAYETTE S, BÉGIN Y. Relationships between anatomical and densitometric characteristics of black spruce and summer temperature at tree line in northern Quebec [J]. *Can J*

- For Res, 2002, 32(3):477-486.
- [9] PANYUSHKINA P, HUGHES M, VAGANOV E, et al. Summer temperature in northeastern Siberia since 1642 reconstructed from tracheid dimensions and cell numbers of *Larix cajanderi* [J]. Can J For Res, 2003, 33(10):1905-1914.
- [10] XU J M, LU J X, BAO F C, et al. Climate response of cell characteristics in tree rings of *Picea crassifolia* [J]. Holzforschung, 2013, 67(2):217-225.
- [11] XU J M, LU J X, BAO F C, et al. Cellulose microfibril angle variation in *Picea crassifolia* tree rings improves climate signals on the Tibetan plateau [J]. Trees, 2012, 26(3):1007-1016.
- [12] 徐金梅, 鲍甫成, 吕建雄, 等. 祁连山青海云杉径向生长对气候的响应[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(2):1-6.  
XU J M, BAO F C, LÜ J X, et al. Climate response of radial growth of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2012, 34(2):1-6.
- [13] 徐金梅, 鲍甫成, 吕建雄, 等. 祁连山青海云杉木材密度对气候变化的响应[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5):115-121.  
XU J M, BAO F C, LÜ J X, et al. Response of wood density of *Picea crassifolia* to climate change in Qilian Mountains of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2011, 33(5):115-121.
- [14] FRITTS H C. Tree rings and climate [M]. London: Academic Press, 1976.
- [15] COOK E R, HOLMES R L. Guide for computer program ARSTAN [M]//GRISSINO H D. The international tree ring data bank program library version 2.0 user's manual, laboratory of tree-ring research. Tucson: University of Arizona, 1996:75-87.
- [16] BRIFFA K, JONES P D. Basic chronology statistics and assessment [M]//COOK E, KAIRIUKSTIS L. Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences. Dordrecht; the Netherlands Kluwer, 1990:137-152.
- [17] FRITTS H C. Tree rings and climate [M]. Caldwell, NJ, USA: Blackburn Press, 2001.
- [18] COOK E R, KAIRIUKSTIS L A. Methods of dendrochronology: application in environmental sciences [M]. Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 1990.
- [19] 梁尔源. 白栎的树木年轮生态学[D]. 北京:中国科学院植物研究所, 2001.  
LIANG E Y. A dendroecological study of *Picea meyeri* [D]. Beijing: Institute of Botany Chinese Academy of Science, 2001.
- [20] WIGLEY T M, BRIFFA K R, JONES P D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology[J]. J Clim Appl Meteor, 1984, 23(2):201-213.
- [21] 吴祥定. 树木年轮与气候变化[M]. 北京:气象出版社, 1990.  
WU X D. Tree-ring and climate change [M]. Beijing: Meteorological Press, 1990.
- [22] BIONDIA F, WAIKUL K. DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies [J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(3):303-311.
- [23] LEBOURGEOIS F. Climatic signals in earlywood, latewood and total ring width of Corsican pine from western France [J]. Ann For Sci, 2000, 57(2):155-164.
- [24] XIONG L, OKADA N, FUJIWARA T, et al. Chronology development and climate response analysis of different New Zealand pink pine (*Halocarpus biformis*) tree-ring parameters [J]. Can J For Res, 1998, 28(4):566-573.
- [25] PANT G B, KUMAR R K, BORGAONKAR H P, et al. Climatic response of *Cedrus deodara* tree-ring parameters from two sites in the western Himalaya [J]. Can J For Res, 2000, 30(7):1127-1135.
- [26] ROSSI S, SIMARD S, RATHGEBER C B K. Effects of a 20-day-long dry period on cambial and apical meristem growth in *Abies balsamea* seedlings [J]. Trees, 2009, 23(1):85-93.
- [27] DESLAURIERS A, MORIN H, YVES Y. Cellular phenology of annual ring formation of *Abies balsamea* in the Quebec boreal forest (Canada) [J]. Can J For Res, 2003, 33(2):190-200.
- [28] MÄKINEN H, NÖJD P, SARANPÄÄ P. Seasonal changes in stem radius and production of new tracheids in Norway spruce [J]. Tree Physiol, 2003, 23(14):959-968.
- [29] DESLAURIERS A, MORIN H. Intra-annual tracheid production in balsam fir stems and the effect of meteorological variables [J]. Trees, 2005, 19(4):402-408.
- [30] TARDIF J, BERGERON Y. Comparative dendroclimatological analysis of two black ash and two white cedar populations from contrasting sites in the Lake Duparquet region, northwestern Quebec [J]. Can J For Res, 1997, 27(1):108-116.
- [31] ALONI R. Foliar and axial aspects of vascular differentiation: hypothesis and evidence [J]. J Plant Growth Regul, 2001, 20(1):22-34.
- [32] EILMANN B, ZWEIFEL R, BUCHMANN N, et al. Drought induced adaptation of xylem in Scots pine and pubescent oak [J]. Tree Physiol, 2009, 29(8):1011-1020.
- [33] HANSEN J, TÜRK R, VOGG G, et al. Conifer carbohydrate physiology: updating classical views [M]//RENNENBERG H. Trees: contribution to modern tree physiology. Leiden: Backhuys Publisher, 1997:97-108.
- [34] The Report of IPCC Climate Change. The physical basis climate [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [35] 汤懋苍. 祁连山区降水的地理分布特征[J]. 地理学报, 1985, 40(2):323-332.  
TANG M C. Rainfall distribution characteristics in Qilian mountain area [J]. Journal of Geographical, 1985, 40(2):323-332.
- [36] QIANG W Y, WANG X N, CHEN T, et al. Variations of stomatal density and carbon isotope values of *Picea crassifolia* at different elevations in the Qilian mountains [J]. Trees, 2003, 17(3):258-262.

(责任编辑 李文军  
责任编辑 赵广杰)