

祁连山青海云杉木材密度对气候变化的响应

徐金梅¹ 吕建雄¹ 鲍甫成¹ 黄荣凤¹ 刘贤德² Robert Evans³ 赵有科¹

(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 祁连山水源涵养林研究院 3 CSIRO Materials Science and Engineering)

摘要:为探明木材密度对气候变化的响应,以祁连山中部下限青海云杉为研究对象,利用 Silviscan-3 测定了青海云杉的木材密度,根据树木年轮气候学的标准方法建立了年轮密度、早材密度、晚材密度、最大密度、最小密度年表,分析了各个木材密度年表与月平均温度、最高温度、最低温度和月降雨量的关系。结果发现:木材密度与温度正相关,与降雨量负相关。年轮密度和早材密度与6、7、8、9月月均温度显著正相关,与6、7、9月月均最高温度显著正相关,与上年10月和当年7、9月月均最低温度显著正相关;最小密度与6、7、8月月均温度显著正相关,与6、7月月均最高温度显著正相关,与7月月均最低温度显著正相关;晚材密度和最大密度与温度不相关。年轮密度与3月月降雨量显著负相关,早材密度和最小密度与6月月降雨量显著负相关,晚材密度和最大密度与降雨量不相关,即晚材密度对气候的敏感性弱于早材密度。这表明温度对青海云杉木材密度有直接影响,降雨量有间接影响,夏季温度是影响青海云杉木材密度的主要气候因子。

关键词:青海云杉;年轮密度;早材密度;晚材密度;最大密度;最小密度;气候变化

中图分类号: S781.45 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2011)05-0115-07

XU Jin-mei¹; LÜ Jian-xiong¹; BAO Fu-cheng¹; HUANG Rong-feng¹; LIU Xian-de²; Robert Evans³; ZHAO You-ke¹. **Response of wood density of *Picea crassifolia* to climate change in Qilian Mountains of northwestern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2011) 33(5) 115-121 [Ch, 33 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 Academy of Water Resources Conservation Forests in Qilian Mountains of Gansu Province, Zhangye, 734000, P. R. China;

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

To investigate the response of wood density to climate change, wood density of *Picea crassifolia* trees at lower tree line in the middle Qilian Mountains, northwestern China was measured using Silviscan-3. Chronologies of annual, earlywood, latewood, maximum and minimum density were established by dendrochronological methods. Relationships of chronologies to monthly mean, maximum, minimum temperatures and monthly precipitation were analyzed. The results indicated that wood density of *P. crassifolia* trees positively correlated with temperatures and negatively correlated with precipitation. Annual and earlywood density significantly correlated with monthly mean temperatures in June to September, with monthly maximum temperatures in June, July and September, and with monthly minimum temperatures in October in previous year and in July and September in current year. Minimum density significantly correlated with temperature in June to August, with monthly maximum temperatures in June and July, and with monthly minimum temperatures in July. Annul density significantly correlated with precipitation in March. Earlywood and minimum density significantly correlated with precipitation in June. Latewood and maximum density did not show significant relationships with temperature and

收稿日期: 2010-01-18

基金项目: 林业公益性行业科研专项(200804001)、国家杰出青年科学基金(30825034)。

第一作者: 徐金梅, 博士。主要研究方向: 木材气候学。电话: 010-62889418 Email: xujinmei008@126.com 地址: 100091 北京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, 博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 木材物理。电话: 010-62889482 Email: jianxiong@caf.ac.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

precipitation, latewood density was less sensitive to climate than earlywood density. Those results indicate that temperature has directly influence and precipitation has indirectly impact on wood density, temperature in summer is main climate factor influencing wood density of *P. crassifolia* in Qilian Mountains, northwestern China.

Key words *Picea crassifolia*; annual density; earlywood density; latewood density; maximum density; minimum density; climate change

在一年又一年形成的木材内,往往记录着树木生长过程中有利或不利的因素^[1]。自20世纪树木年代学的基本原理和方法形成以来,年轮宽度一直是研究树木对气候变化响应的主要研究对象,旨在重建过去无气象站记录时期的气候资料^[2]。年轮宽度主要反映细胞个数和细胞尺寸^[3],而木材密度反映木材细胞壁物质,它记录了年轮宽度中未记录的气候信息^[4-5]。我国在木材密度对气候响应方面的研究时间不长,现有内蒙古油松(*Pinus tabulaeformis*)^[6]、秦岭油松^[7]和华山松(*Pinus armandii*)^[8]、漠河兴安落叶松(*Larix gmelini*)和樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)^[9]、川西高山松(*Pinus densata*)^[10]及北京侧柏(*Platycladus orientalis*)^[11]等木材密度对气候变化响应的报道。

我国幅员辽阔,自然地理复杂。祁连山是我国著名的高大山系之一,山体呈西北—东南走向,长约850 km,地处我国中纬度干旱—半干旱地区,位于季风的尾间地带,对全球气候变化敏感,被认为是我国树木年轮气候学研究很有潜力的地区之一^[12]。贾文雄等^[13]对祁连山区气候变化特征分析表明,祁连山区气温在20世纪80年代中后期持续升高,降雨无明显变化趋势。青海云杉(*Picea crassifolia*)林占祁连山林业用地的56%,对该地区水土保持和木材供给起着举足轻重的作用。王亚军等^[12]及勾晓华等^[14]就祁连山中部青海云杉年轮宽度对温度和降雨响应的研究表明,年轮宽度对春季降水敏感,呈显著正相关;夏季高温对树木生长不利,与年轮宽度呈负相关。青海云杉木材密度与气候的关系未见报道。

本文以祁连山中部西水林场下次生青海云杉为研究对象,研究了青海云杉木材的年轮密度、早材密度、晚材密度、最大密度、最小密度对温度和降雨的响应,旨在揭示青海云杉木材密度对气候变化的响应,为今后应对气候变化制定对策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样点概况及样本采集

青海云杉采样点位于祁连山中部西水林场排露沟流域,东经100°18′、北纬38°32′,海拔2 650 m,

坡度约15°。此地林分单一,青海云杉成片生长,分布于海拔2 500~3 300 m的阴坡和半阴坡。乔木层为青海云杉纯林,林分郁闭度为0.6,林下灌木稀少,主要是草本植物和苔藓植物,土壤为灰褐色壤土,有机质含量较高。于2009年9月在北坡挑选胸径大小一致的优势、健康树木40株作为样树。为尽可能保证所取样芯穿过树干的髓芯,以及样芯的年轮界限平行于样芯的端面,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。

此地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。据葛双兰等^[15]对西水林区气候的监测报道,林区年平均气温为0.5℃,年平均降雨量为368 mm,年降雨量290~467 mm,降雨量在年内分配不均,5—9月的降雨量占全年降雨量的83%。本文选取了与此林区温度、降雨、地理位置和海拔高度最接近的国家级祁连站的气象记录为气候资料(<http://cdc.cma.gov.cn>)。该站1957—2009年的月降雨量、月均温度、最高温度和最低温度如图1所示。从图1可知:仅4—10月的月均温度超过0℃,降雨量不仅年内分配不均,年际差异也较大。

1.2 木材密度的测定

待样本气干后,剔除有腐朽、变形、节子等的样芯,选取了30棵树,60个样本作木材密度的测试。测量仪器为澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)自主研发的木材性质快速测定仪(SilviScan-3)。

试样制作步骤如下:1)利用SilviScan专用的双锯片机,将圆形的样芯样本制作为从髓芯到树皮的径向条样本,尺寸为2 mm(L)×7 mm(T)×径向,并确保径向条样本的3个切面为木材的横面、径面和弦面;2)由于青海云杉木材细胞内含有抽提物,为避免抽提物对木材密度测定值准确性的影响,将制作好的径向条样本放入盛有有机纯丙酮溶液的索氏抽提器内,加热抽提48 h,取出径向条,晾干;3)利用不同等级的砂纸逐级打磨(逐级打磨使用的

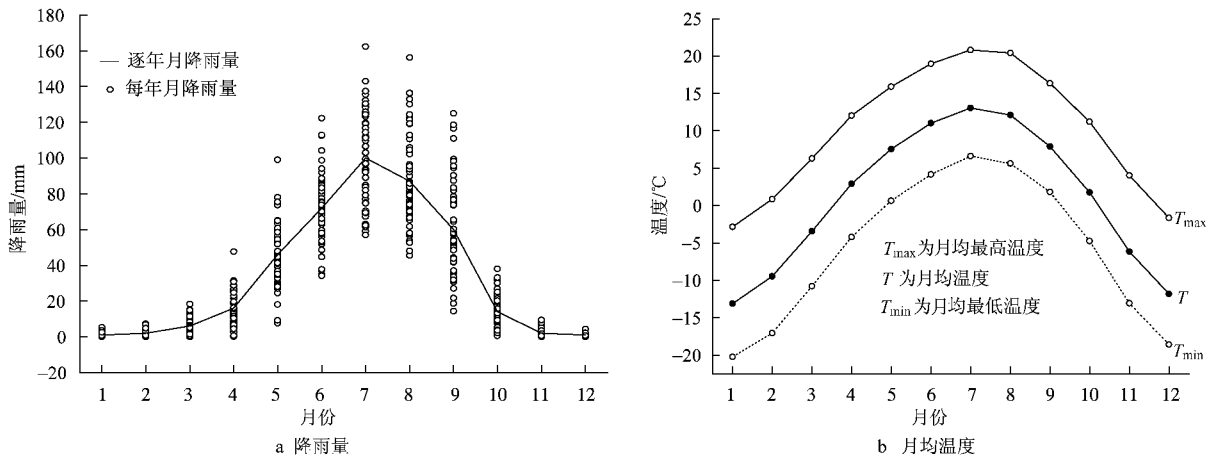


图 1 祁连站 1957—2009 年月降雨量和月均温度

Fig. 1 Monthly precipitation and average temperature of Qilian Meteorological Station in the period of 1957–2009

砂纸目数为 400、800、1 200、1 500 目),至木材细胞腔和细胞壁在 20 倍实体显微镜下清晰可见;4) 将制作好的试样置于恒温恒湿的环境下(温度为 20℃,相对湿度为 40%)放置 2 d,让试样含水率调整到平衡含水率(8%)。

木材密度测定步骤如下:1) 利用样本的质量、长度、厚度、宽度值,建立每个试样的基础数据库,即利用精度为 0.000 1 g 的天平称每个试样的质量,精度为 0.01mm 的游标卡尺测量其长度,精度为 0.000 1 mm 的螺旋测微仪测量其厚度和宽度;2) 利用 SilviScan-3 的图像测定系统,自髓芯到树皮测定每个年轮的偏转角度和年轮宽度,供木材密度测定

时,试样台根据每个年轮的偏转角度旋转,以保证测定方向总垂直于年轮界限;3) 利用 SilviScan-3 的微密度测定系统,以 0.01 mm 的分辨率自髓芯到树皮测定木材密度,即在 1 mm 的长度内测定 100 个木材密度值,测定方向总垂直于年轮界限的方向。

青海云杉木材年轮界限清晰,木材密度自早材到晚材逐渐增加,形成有规律的波谱状图形,利用木材密度图的变化特征及木材横切面图标记年轮界限(图 2)。取年轮内所有密度测定值的平均值作为年轮密度,年轮内最大密度值和最小密度值为最大密度和最小密度。根据 Pant 等^[16]和 Xiong 等^[17]报道的早晚材划分方法,取最大密度和最小密度的

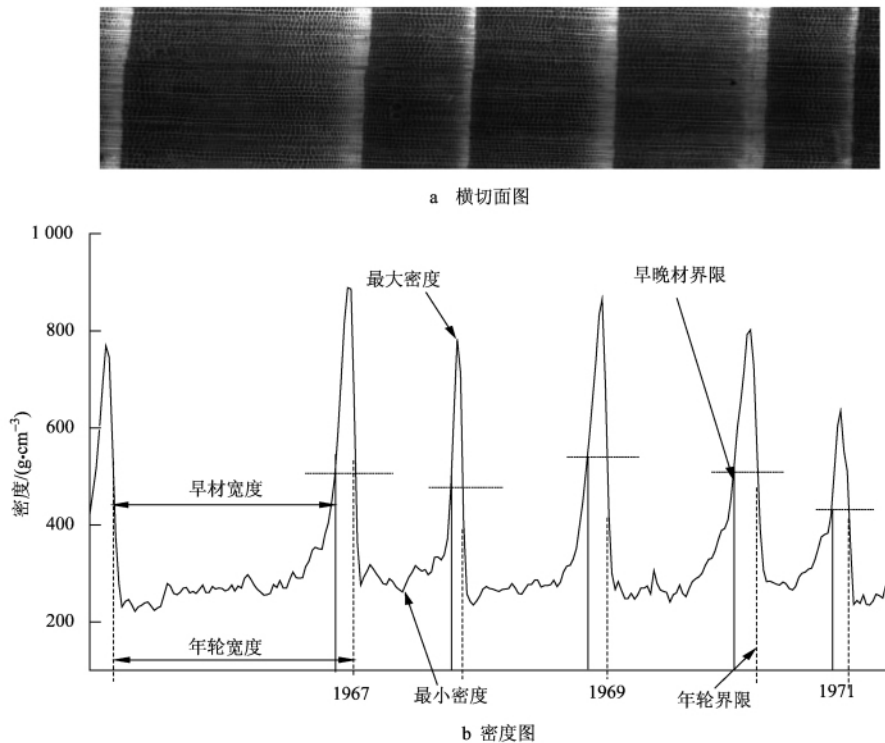


图 2 青海云杉木材横切面和密度图

Fig. 2 Cross section and wood density profile of *P. crassifolia*

中间值作为早晚材的分界限,分别取所有早材和晚材密度的平均值作为早材密度和晚材密度。

1.3 年表的建立

年轮界限标记完后,从 SilviScan-3 导出年轮宽度数据,运用 COFECHA 程序对其进行交叉定年^[2],确保每条序列年份无误后,再导出木材密度数据。同时,由于本研究中样本量较大,为建立更可靠的年表,根据 COFECHA 检验结果,剔除了与主序列关系不显著的 8 个半径样本,最终用于建年表的样本为 26 棵树的 26 个直径样芯,即 52 个半径试样,其树龄范围为 57~114 年。

交叉定年后,采用 ARSTAN 程序^[18]中的样条函数去除由遗传因素引起的生长趋势,并利用各个序列的自回归模型去除序列的自相关性,建立了标准化年表和差值年表,分析了两种年表在公共区间(1957—2008 年)内评价其可靠性的统计量。

1.4 年表与温度、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^[19],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^[20]进行了木材密度年表与温度、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^[21],考虑气候条件对树木生长可能产生“滞后效应”,本文分析了所有密度年表与上年 10 月至当年 10 月月均温度和月降雨量的关系。

2 结果与讨论

2.1 年表的基本统计量

祁连山青海云杉平均年轮密度为 0.39 g/cm^3 ,早材密度为 0.33 g/cm^3 ,晚材密度为 0.67 g/cm^3 ,最小密度为 0.25 g/cm^3 ,最大密度为 0.80 g/cm^3 (表 1)。年轮密度与车克钧等^[22]采用称重法测得的青海云杉木材密度(0.41 g/cm^3)接近。从表 1 可知:青海云杉木材密度较低。早材密度明显低于晚材密度,年轮密度略高于早材密度,大大低于晚材密度。这是因为青海云杉早材宽度占据了年轮宽度的 85%,早材密度对年轮密度起着决定性作用。

表 1 青海云杉木材密度值

Tab.1 Wood density of *P. crassifolia*

	年轮密度	早材密度	晚材密度	最小密度	最大密度
均值	0.39	0.33	0.67	0.25	0.8
标准差	0.05	0.03	0.07	0.03	0.09

年表质量可由平均敏感度(MS)、样本间相关系数(R_1 、 R_2 、 R_3)、第一主成分方差解释量(PC1)、信噪比(SNR)、样本总体代表性(EPS)等统计量来衡量^[2]。平均敏感度是衡量年轮宽度逐年变化的统计量。一般来说,平均敏感度越大,气候因子的限制作用越明显^[23]。样本间相关系数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^[19]。第一主成分方差解释量

和信噪比都是衡量年表包含公共信息多少的统计量,它们的值越大,包含的公共信息越多^[19]。样本总体代表性大于 0.85 时,建立的年表具有较好的样本总体代表性^[24]。从表 2 可知:标准化年表的统计量几乎都大于差值年表的。这说明标准化年表包含更多的气候信息。因此,本研究利用标准化年表进一步分析年轮密度、早材密度、晚材密度、最大密度、最小密度与气候因素的关系。

表 2 木材密度年表的基本统计量

Tab.2 Statistics of wood density chronologies

统计量	标准化年表					差值年表				
	年轮密度	早材密度	晚材密度	最大密度	最小密度	年轮密度	早材密度	晚材密度	最大密度	最小密度
MS	0.10	0.09	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.10	0.10	0.10
R_1	0.49	0.48	0.30	0.30	0.53	0.43	0.46	0.30	0.30	0.53
R_2	0.69	0.55	0.32	0.30	0.59	0.67	0.55	0.32	0.30	0.59
R_3	0.49	0.48	0.30	0.30	0.52	0.42	0.45	0.30	0.30	0.52
PC1	51.4	51.6	32.6	32.4	54.6	46.1	50.3	31.6	30.2	54.3
SNR	48.5	43.3	19.0	19.1	49.0	37.3	39.5	16.6	17.1	48.1
EPS	0.98	0.98	0.95	0.95	0.98	0.97	0.98	0.95	0.95	0.98

注: R_1 为所有样本的平均相关系数, R_2 为树木内部的平均相关系数, R_3 为树与树间的平均相关系数。

年轮密度、早材密度、晚材密度、最大密度、最小密度标准化年表如图 3 所示。

从表 2 标准化年表的统计量来看,各个年表的平均敏感度约为 0.1,与文献[25—26]报道的密度年

表的平均敏感度相当。样本间相关系数、第一主成分方差解释量、信噪比都较高,说明所建立的年表包含的气候信息较多。样本总体代表性均大于 0.95,说明本文所用样本足以代表总体。从评价年

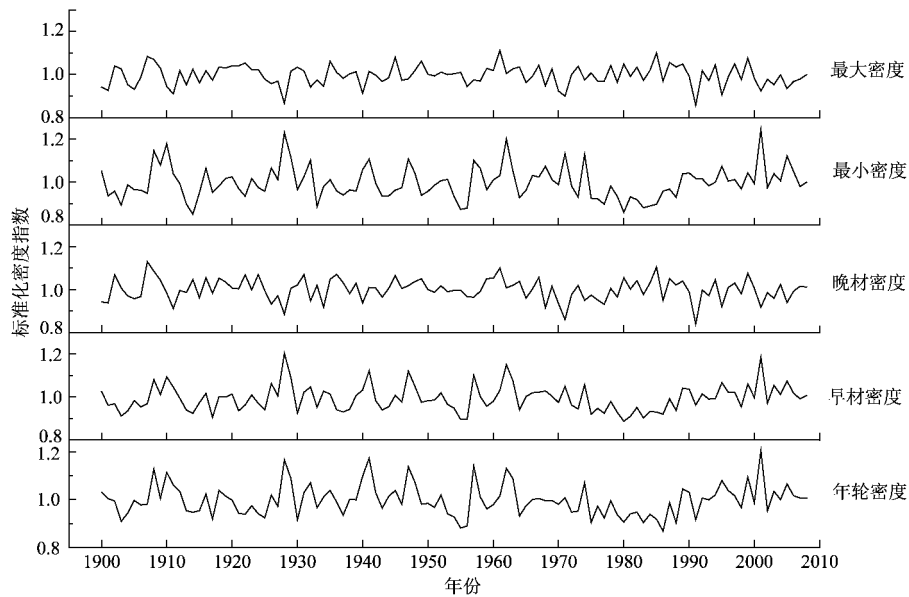


图 3 青海云杉木材密度标准化年表

Fig. 3 Standardized chronologies of wood density of *P. crassifolia*

表可靠性的统计量可见,所建立的年轮密度、早材密度、晚材密度、最大密度、最小密度年表质量很高,利用这样的年表去获得气候信息是可信的。

2.2 年表与温度、降雨量的相关分析

年轮密度、早材密度、晚材密度、最小密度、最大密度标准化年表与月均温度和降雨量的相关分析结果如表 3 所示。

从表 3 可知:年轮密度、早材密度与月均温度正相关,与月降雨量负相关。年轮密度和早材密度与 6—9 月月均温度显著正相关,最小密度与 6—8 月月均温度显著正相关,晚材密度和最大密度与温度不相关。年轮密度与 3 月月降雨量显著负相关,早材密度和最小密度与 6 月月降雨量显著负相关,晚

材密度和最大密度与降雨量不相关。黄荣凤等^[11]对北京侧柏(*P. orientalis*)的研究也表明,夏季温度对年轮密度有正影响,降雨有负影响。

为探明温度对青海云杉木材密度的影响,本文还进一步分析了年轮密度、早材密度、晚材密度、最小密度、最大密度标准化年表与上年 10 月至当年 10 月月均最高温度和最低温度的相关系数(见表 4)。从表 4 可知:年轮密度与 6、7、9 月月均最高温度显著正相关,与上年 10 月和当年 7、9 月月均最低温度显著正相关;早材密度与 6、7、9 月月均最高温度显著正相关,与上年 10 月和当年 7、9 月月均最低温度显著正相关;最小密度与 6、7 月月均最高温度显著正相关,与 7 月月均最低温度显著正相关;晚材

表 3 木材密度与上年 10 月至当年 10 月温度、降雨量的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients of wood density with monthly mean temperature and monthly precipitation from October in previous year to October in current year

月份	月均温度					月降雨量				
	年轮密度	早材密度	晚材密度	最大密度	最小密度	年轮密度	早材密度	晚材密度	最大密度	最小密度
上年 10 月	0.07	0.06	-0.19	-0.23	0	0.23	0.20	0.14	0.13	0.19
上年 11 月	-0.04	-0.09	0.06	-0.07	-0.07	0.18	0.21	0.01	0	0.17
上年 12 月	0.05	0.03	0.10	0.04	0.05	-0.05	-0.04	0.05	0.08	-0.03
1 月	-0.03	0.01	-0.07	-0.09	0.02	-0.09	-0.17	-0.11	-0.18	-0.15
2 月	0.17	0.09	-0.04	-0.14	0.08	-0.05	-0.02	0.14	0.14	-0.05
3 月	0.05	0.09	0.04	0.03	0.11	-0.28*	-0.22	0.15	0.17	-0.24
4 月	0.06	0.04	0.16	0.18	0.06	0.10	0.13	-0.08	-0.14	0.12
5 月	0.15	0.12	-0.02	-0.04	0.12	-0.26	-0.17	0.22	0.23	-0.20
6 月	0.32*	0.34*	-0.16	-0.19	0.39*	-0.26	-0.33*	0.21	0.21	-0.35*
7 月	0.35*	0.37*	-0.12	-0.20	0.46*	0.12	0.07	0.09	0.07	0.04
8 月	0.24*	0.24*	0.13	0.08	0.26*	-0.07	-0.11	-0.10	-0.18	-0.06
9 月	0.38*	0.34*	-0.02	-0.09	0.26	0.15	0.11	-0.26	-0.22	0.16
10 月	0.10	0.11	0.08	0.09	0.02	0.14	0.17	0.09	0.10	0.13

注: * 表示在 95% 置信度下显著。下同。

表4 木材密度与上年10月至当年10月最高温度和最低温度的相关系数
Tab.4 Correlation coefficients of wood density with monthly maximum and minimum temperature from October in previous year to October in current year

月份	月均最高温度					月均最低温度				
	年轮密度	早材密度	晚材密度	最大密度	最小密度	年轮密度	早材密度	晚材密度	最大密度	最小密度
上年10月	-0.20	-0.19	-0.18	-0.22	-0.21	0.23	0.23	-0.09	-0.11	0.18
上年11月	0.06	0.01	0.00	-0.12	0.02	-0.07	-0.12	0.10	-0.03	-0.16
上年12月	0.11	0.10	0.09	0.02	0.10	0.04	0.02	0.13	0.08	-0.01
1月	0.06	0.14	-0.09	-0.10	0.11	-0.04	-0.04	-0.03	-0.09	-0.05
2月	0.21	0.14	0.02	-0.12	0.03	0.11	0.03	-0.02	-0.11	-0.01
3月	0.07	0.12	-0.04	-0.07	0.00	0.01	0.01	0.13	0.13	-0.11
4月	0.10	0.10	0.09	0.15	0.02	0.04	0.02	0.17	0.13	-0.13
5月	0.15	0.11	-0.07	-0.09	0.18	0.00	0.04	0.12	0.07	-0.10
6月	0.42*	0.46*	-0.23	-0.26	0.51*	-0.01	-0.03	0.06	0.05	-0.02
7月	0.31*	0.33*	-0.05	-0.17	0.29*	0.33*	0.35*	-0.18	-0.13	0.32*
8月	0.18	0.23	0.21	0.20	0.10	0.16	0.11	0.05	-0.04	0.06
9月	0.29*	0.28*	0.08	0.01	0.01	0.30*	0.26	-0.15	-0.19	0.16
10月	0.03	0.01	0.08	0.08	-0.11	0.15	0.19	0.01	0.01	0.14

密度和最大密度与最高温度和最低温度不相关。

本研究中年轮密度和早材密度与6、7、8、9月月均温度显著正相关,与6、7、9月月均最高温度显著正相关,与上年10月和当年7、9月月均最低温度显著正相关;最小密度与6、7、8月月均温度显著正相关,与6、7月月均最高温度显著正相关,与7月月均最低温度显著正相关。年轮密度与3月月降雨量显著负相关,早材密度和最小密度与6月月降雨量显著负相关。说明温度对青海云杉木材密度有直接影响,降雨量有间接影响,夏季温度是影响青海云杉木材密度的主要气候因子。

木材密度表征着细胞壁物质的多少,细胞壁物质越多,细胞腔越小,木材密度越大;反之,细胞壁物质越少,细胞腔越大,木材密度越小。形成层活动是木材细胞形成的源泉,成熟木质部细胞的形成大致经历4个阶段:形成层细胞分裂、木质部细胞分化、木质部细胞体积增大、木质部细胞壁加厚和木质化^[27]。据 Deslauriers 等^[28]报道,温度对形成层活动的影响主要在于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,木材密度越大。Hansen 等^[29]认为,木材细胞壁物质的形成过程是一个碳汇的过程,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。由于采样点青海云杉的生长季节为5—9月^[22],光合作用在生长季结束后积累的物质可供来年树木生长所需,10月温度越高,光合作用越强,产生的营养物质就越多,有利于来年细胞的发育,因此上年10月温度越高,来年的木材密度也越大。

10~25℃通常是常绿针叶乔木最适宜的光合作用温度,温度过高或过低会影响植物体内参与光合作用的酶的活性,从而影响植物光合作用强度^[30]。

祁连山年均温度仅0.5℃,一年中仅4—10月的月平均温度在0℃以上(图1),10月平均最低温度为-5℃,平均温度为2℃,平均最高温度为11℃。在此温度条件下,温度越高,光合作用越强,形成的光合产物也就越多,有利于细胞壁物质的形成,增加木材密度,因而年轮密度与6、7、9月月均最高温度显著正相关。3月月降雨量对年轮密度的负作用以及6月月降雨量对早材密度和最小密度负影响的原因是,春季充足的降雨,会加快生长季初期细胞分裂的速度,延长细胞体积扩大阶段所需的时间,促进早材细胞的形成,从而增加年轮宽度,降低木材密度^[31]。

从上述结果可知,相对降雨而言,温度是影响祁连山青海云杉木材密度的主要气候因子。早材密度与6、7、8、9月月均温度显著正相关,最小密度与6、7、8月月均温度显著正相关,晚材密度和最大密度与温度不相关,说明早材的气候敏感性比晚材强。Pant 等^[16]对印度喜马拉雅山雪松(*Cedrus deodara*)研究发现,早材密度对温度和降雨的响应强于晚材密度,Xiong 等^[17]对新西兰黄松(*Halocarpus biformis*)的研究也得到了相似结论。但对生长于欧洲和北美树木的研究表明,晚材密度对气候的响应却比早材密度强^[32]。Cleaveland^[33]对生长于美国西南部花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)和美国黄松(*Pinus ponderosa*)的研究表明,早材密度和晚材密度对气候变化都有很强的响应,他认为早材和晚材所记录的气候信息的强弱与树种和树木生长的地理位置密切相关。

3 结 论

木材密度与温度正相关,与降雨量负相关。年轮密度和早材密度与6、7、8、9月月均温度显著正相关,与6、7、9月月均最高温度显著正相关,与上年10月和当年7、9月月均最低温度显著正相关;最小密度与6、7、8月月均温度显著正相关,与6、7月月均最高温度显著正相关,与7月月均最低温度显著正相关;晚材密度和最大密度与温度不相关。年轮密度与3月月降雨量显著负相关,早材密度和最小密度与6月月降雨量显著负相关,晚材密度和最大密度与降雨量不相关。晚材密度对气候的敏感性弱于早材密度。这表明温度对祁连山青海云杉木材密度有直接影响,降雨量有间接影响,夏季温度是影响青海云杉木材密度的主要气候因子。

参 考 文 献

- [1] DOWNES G M, WIMMER R, EVANS R. Understanding wood formation: Gains to commercial forestry through tree ring research [J]. *Dendrochronologia*, 2002, 20(1): 37-51.
- [2] FRITTS H C. *Tree rings and climate* [M]. London: Academic Press, 1976: 1-242.
- [3] GINDL W, GRANER M, WIMMER R. The influence of temperature on latewood lignin content in treeline Norway spruce compared with maximum density and ring width [J]. *Trees*, 2000, 14: 409-414.
- [4] PARKER M L, HENOCH W E S. The use of Engelmann spruce latewood density for dendrochronological purposes [J]. *Can J For Res*, 1971, 1: 90-98.
- [5] WIMMER R, GRABNER M. A comparison of tree-ring features in *Picea abies* as correlated with climate [J]. *IAWA Journal*, 2000, 21: 403-416.
- [6] 杨银科, 刘禹, 史江峰. 树木年轮密度实验方法及其在内蒙古准格尔旗树轮研究中的应用 [J]. *干旱区地理*, 2006, 29(5): 639-645.
- [7] 刘禹, 吴祥定, 邵雪梅, 等. 树轮密度、稳定同位素对过去100年陕西黄陵的季节性温度和降水的恢复 [J]. *中国科学(D)*, 1997, 27(3): 271-277.
- [8] 吴祥定, 邵雪梅. 中国秦岭地区树木年轮密度对气候响应的初步分析 [J]. *应用气象学报*, 1994, 5(2): 253-256.
- [9] 王丽丽, 邵雪梅, 黄磊, 等. 黑龙江漠河兴安落叶松与樟子松树轮生长特性及其对气候的响应 [J]. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 380-385.
- [10] 吴普, 王丽丽, 邵雪梅. 采用高山松最大密度重建川西高原近百年夏季气温 [J]. *地理学报*, 2005, 60(6): 998-1006.
- [11] 黄荣凤, 赵有科, 吕建雄, 等. 侧柏年轮宽度和年轮密度对气候变化的响应 [J]. *林业科学*, 2006, 42(7): 78-82.
- [12] 王亚军, 陈发虎, 勾晓华, 等. 祁连山中部树木年轮宽度与气候因子的响应关系及气候重建 [J]. *中国沙漠*, 2001, 21(2): 135-140.
- [13] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析 [J]. *地理学报*, 2008, 63(3): 257-269.
- [14] 勾晓华, 陈发虎, 杨梅学, 等. 祁连山中部地区树轮宽度年表特征随海拔高度的变化 [J]. *生态学报*, 2004, 24(1): 172-176.
- [15] 葛双兰, 王梅桂, 张立杰. 祁连山(北坡)林区气候特征分析 [J]. *甘肃林业科技*, 2005, 31(3): 1-3.
- [16] 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: 1127-1135.
- [17] 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: 566-573.
- [18] COOK E R, HOLMES R L. Guide for computer program ARSTAN // GRISSINO H D, HOLMES R L, FRITTS H C. *Laboratory of tree-ring research* [M]. Tucson, AZ, United States: University of Arizona, 1996: 75-87.
- [19] BLASING T J, DUVICK D N. Reconstruction of precipitation history in North American corn belt using tree rings [J]. *Nature*, 1984, 307: 143-145.
- [20] BIONDIA F, WAIKUL K. DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies [J]. *Computers & Geosciences*, 2004, 30: 303-311.
- [21] 刘兴聪. 青海云杉 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1992: 53-55.
- [22] 车克钧, 贺红元, 傅辉恩, 等. 青海云杉木材物理力学性质试验研究 [J]. *福建林学院学报*, 1991, 11(2): 219-223.
- [23] 吴祥定. 树木年轮与气候变化 [M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [24] 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: 201-213.
- [25] TUOVINEN M. Response of tree-ring width and density of *Pinus sylvestris* to climate beyond the continuous northern forest line in Finland [J]. *Dendrochronologia*, 2005, 22: 83-91.
- [26] 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: 651-660.
- [27] 崔克明. 植物发育生物学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [28] DESLAURIERS A, ANFODILLO T, CARRARA V, et al. Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes [J]. *Oecologia*, 2007, 152: 1-12.
- [29] HANSEN J, TURK R, VOGG G, et al. Conifer carbohydrate physiology: updating classical views // RENNENBERG H. *Trees: Contribution to modern tree physiology* [M]. Leiden, Netherlands: Backhuys Publisher, 1997: 97-108.
- [30] 张继. 植物生理学 [M]. 北京: 世界图书出版公司, 1999: 138.
- [31] DESLAURIERS A, MORIN H, BEGIN 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.
- [32] YASUE K, FUNADA R, KOBAYASHI O, et al. The effects of tracheid dimensions on variations in maximum density of *Picea glehnii* and relationships to climatic factors [J]. *Trees*, 2000, 14: 223-229.
- [33] CLEAVELAND M K. Climate response of densitometric properties in semiarid site tree rings [J]. *Tree-Ring Bull*, 1986, 46: 13-17.

(责任编辑 李文军)