

# 樟子松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的年内变化特征及其对气候要素的响应

商志远<sup>1\*</sup> 王 建<sup>1</sup> 崔明星<sup>2</sup> 陈振举<sup>3</sup>

<sup>1</sup>南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; <sup>2</sup>中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; <sup>3</sup>中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

**摘 要** 对大兴安岭北部两株樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)树轮样品的年内稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ )进行测定, 结果表明: 樟子松树轮年内 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同生长阶段总体表现出每年生长季中期最高、早期次之、晚期最低的变化特征。 $\delta^{13}\text{C}$ 的年内变化趋势在幼龄期至速生期变化剧烈, 成熟期至衰老期相对平缓。从幼龄期至衰老期的整个生长阶段, 同时期内 $\delta^{13}\text{C}$ 的变动幅度基本为晚材大于早材。幼龄期年内晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 一直明显高于早材, 而成熟期年内早晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 的差别逐渐减小, 至衰老期年内晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 已低于早材且无显著差别。树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的年内变化主要体现在生长季中后期, 即早晚材之间的过渡段至晚材。年内不同时期的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与同时段的宽度去除生长趋势序列(去趋势序列)之间的相关性随生长季节的推移而逐渐降低。当年早材宽度与前一年晚材宽度显著正相关, 当年早材 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与前一年晚材宽度和当年早材宽度的去趋势合并序列呈现较显著的负相关性, 与前一年晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 序列或宽度去趋势序列之间均未表现出显著的相关性。分析结果表明: 早材的形成很可能来源于前一年光合作用的产物, 在利用树轮年内不同材质宽度或 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行气候环境重建时需要考虑这一点。年内早材、过渡段和晚材三个时段的 $\delta^{13}\text{C}$ 分别对应于4月下旬至6月中旬土壤湿度较大、温度上升较快的时期, 6月下旬至7月中旬降水增加、温度达到最高而相对湿度降低的时期, 以及7月下旬至9月中旬降水增加、温度下降而相对湿度较大的时期。

**关键词** 大兴安岭, 早材, 晚材, 樟子松, 稳定碳同位素, 树轮

## Intra-annual variation in $\delta^{13}\text{C}$ from tree rings of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and its response to climatic factors

SHANG Zhi-Yuan<sup>1\*</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, CUI Ming-Xing<sup>2</sup>, and CHEN Zhen-Ju<sup>3</sup>

<sup>1</sup>College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; <sup>2</sup>Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; and <sup>3</sup>Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

### Abstract

**Aims** We assess the relationship among the carbon isotopic signatures of earlywood (EW), transitional wood (TW) and latewood (LW) from tree rings. Our aims were to investigate variation in the intra-annual stable carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and determine the relationship between them and homologous ring width.

**Methods** Based on two tree discs of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* sampled from the northern part of Daxing'an Mountains in China, the EW, TW and LW were obtained with different stripping and pooling programs. After performing ring widths measurement and cross-dating, the periods analyzed were the maximum growth periods for one sample and different growth periods for the other. The holocellulose fractions were extracted and the intra-annual  $\delta^{13}\text{C}$  of samples were measured.

**Important findings** In general, the  $\delta^{13}\text{C}$  values of TW are the highest, EW come second and LW are the lowest. The intra-annual trend of  $\delta^{13}\text{C}$  is fluctuating prominently from the juvenile period to the fast-growing period and is smoother from the maturation period to the senescence period. The variation amplitude of LW is almost greater than EW at the same period. The  $\delta^{13}\text{C}$  of LW is always prominently higher than EW for the juvenile period. The difference between EW and LW is indistinctive for the maturation period and is negligible for the senescence period. The intra-annual variability of  $\delta^{13}\text{C}$  concentrates on the middle and later phase of the growing season. The correlation relationship between the intra-annual  $\delta^{13}\text{C}$  sequences and homologous detrended ring width sequences (dRWS) decreases with the seasons, which implies that environmental factors play a dominant role in cell formation and carbon fractionation during the middle and later phase of the growing season in each year. The ring width

of EW of the current year is positively correlated with LW of the previous year (pLW). Also the  $\delta^{13}\text{C}$  of EW is negative correlated with the incorporative dRWS of EW + pLW. But the correlation between  $\delta^{13}\text{C}$  of EW and  $\delta^{13}\text{C}$  or dRWS of pLW is statistically insignificant. The growing season could be divided as: EW (from late April to middle June, with greater soil moisture and rapidly increasing temperature), TW (from late June to middle July, with lower soil moisture and maximum temperature) and LW (from late July to middle September, with greater soil moisture and decreased temperature).

**Key words** Daxing'an Mountains, earlywood, latewood, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*, stable carbon isotope, tree rings

树轮稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ )与气候密切相关,是可靠的古气候重建的替代性指标(McCarroll & Loader, 2004)。随着研究技术的不断完善和深入,许多研究发现树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 在年内有显著的变化(Leavitt *et al.*, 2002; Eilmann *et al.*, 2010),这种变化可能是由于局地小环境的气象条件改变(Leavitt, 1993; Livingston & Spittlehouse, 1996; Barbour *et al.*, 2002; Schulze *et al.*, 2004),或早材形成时利用了前一年光合作用的产物(Smith & Paul, 1988; Damesin & Lelarge, 2003; Robertson *et al.*, 2004)而产生的。鉴于此,有学者认为:与当年晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 相比,当年早材的 $\delta^{13}\text{C}$ 与前一年晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 关系更为密切(Hill *et al.*, 1995; Porté & Loustau, 2001)。尽管一些研究发现针叶树的早材富集碳,但有学者认为针叶树并非依赖前一年的碳储量(Barbour *et al.*, 2002; Helle & Schleser, 2004),其早材的形成仅利用了当年光合作用的产物,使得在获取年际分辨率的过程中没有必要进行早晚材分离工作;而有些学者建议利用晚材进行气候重建较为理想(McCarroll & Loader, 2004)。截至目前,对全球各地气候重建所利用的树轮材质并未达成共识:Kagawa等(2006)强调利用北方树种的窄轮进行气候重建时早晚材分离的必要性;而Weigl等(2008)认为各种材质(早材、晚材和全轮)均适合于气候重建;Kress等(2009)提出利用全轮可能比单独利用早材或晚材更适于重建生长季温度。总体而言,树轮年内早晚材之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 存在差异已基本形成共识,但树木不同生长阶段其年内 $\delta^{13}\text{C}$ 变化特征是否一致,年内不同材质的 $\delta^{13}\text{C}$ 和对应的宽度指标之间的关系,以及年内 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候要素如何响应等问题仍需要深入研究。

大兴安岭北麓地处我国唯一的寒温带,同时也是400 mm等降水量线的北段,属于东亚季风区与西部干旱区的干湿过渡地带,对温度和降水变化的响应相对敏感。该区域的寒温带针叶林属于北方针

叶林在我国境内的南延部分,也是我国纬度分布最高的森林植被。在此区域开展典型优势树种树轮年轮学的相关研究,可以为全球中高纬度地区气候环境变化研究提供参考依据。本文作者对该区域采集的两株樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)样本生长成熟期综纤维素的年内早材(EW)、过渡段(TW)和晚材(LW)三部分进行了 $\delta^{13}\text{C}$ 测定;此外,对其中一个样本的其余生长阶段(幼龄期、青年期和老龄期)分年内早晚材两部分进行了 $\delta^{13}\text{C}$ 测定。用上述方案分析树木不同生长阶段 $\delta^{13}\text{C}$ 年内变化特征及其与树木自身生长量之间的关系,并探讨树木生长过程中引起不同材质 $\delta^{13}\text{C}$ 差异的原因,为今后树轮年内 $\delta^{13}\text{C}$ 的深入研究提供依据,并为利用稳定同位素指标在该区域开展气候或环境重建工作提供基础数据。

## 1 材料和方法

### 1.1 采样点概况

采样点位于黑龙江省大兴安岭地区新林林业局的碧洲林场,地处大兴安岭伊勒呼里山北坡(51°57'–52°00' N, 124°13'–124°36' E),平均海拔670 m,属寒温带大陆性季风气候区。据新林气象站1972年建站以来的气象数据,该区年平均气温-2.54 °C,1月平均气温-25.5 °C,7月平均气温18.1 °C,年降水量519.4 mm,降水多集中在6月下旬至9月中旬,年日照时数2 383.6 h,无霜期90–100天。年总辐射量4 200 MJ·m<sup>-2</sup>,年蒸发量952.7 mm,≥10 °C积温1 430 °C。主要土壤为山地棕色针叶林土和沼泽土。

### 1.2 样品采集及处理

樟子松是欧亚温带广布的欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)的东方变种,为当地典型优势树种之一,喜光耐寒抗旱,适应性强,主要集中分布在大兴安岭北部海拔300–900 m之间坡度较陡的阳坡或半阳坡

上, 多生长在接近山脊线附近, 一般为小块纯林或零星散生, 并伴有少量落叶松(*Larix gmelinii*)混生(赵兴梁和李万英, 1963)。选取林场下辖大青山十支线的樟子松树盘(样本编号SZX01-08)和林场后山的樟子松树盘(样本编号BZ4-10-1.2)为研究对象(样品信息见表1)。另在林场后山采集31株樟子松的71根树芯用于交叉定年。树盘样本采集时通过罗盘标明南北方向, 运回实验室后晾干, 用200–600目粒级干砂纸逐级打磨表面至年轮早晚材界线清晰可见。利用年轮宽度仪(AcuRite, VoorTech Consulting, Holderness, USA)的Measure J2X量测系统对两样盘不同方位早晚材宽度进行测量, 测量精度为0.001 mm, 并用COFECHA程序进行交叉定年检验, 判定两株树最外一轮材质分别为2004年晚材(SZX01-08)和2008年早材(BZ4-10-1.2)。

对两样盘的轮宽数据进行高次多项式拟合, 并对整体趋势线函数求极值和分时段求导, 来确定各自生长量的特征时期(幼龄期、速生期、成熟期、下降期和衰老期)所在年份。BZ4-10-1.2的6个测定时期分别为: 幼龄期I (1897–1901年, 生长速率迅速减小)、幼龄期II (1902–1906年, 生长速率位于谷值)、速生期(1912–1916年, 生长速率迅速增加)、成熟期(1930–1944年, 生长速率峰值时段, 趋于稳定)、下降期(1955–1959年, 生长速率再次迅速减小)和衰老期(1998–2002年, 生长速率缓慢减小至趋于稳定)。而SZX01-08由于成熟期(1904–1948年)较长, 将其进一步细化为成熟阶段初期(1904–1908年)、中期(1924–1928年)和末期(1944–1948年)。为满足树轮年内 $\delta^{13}\text{C}$ 分析的纤维素提取对样本量的要求, 且尽可能全面分析样本各生长时期的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化特征, 同时为便于数理统计分析, 确定样本剥取方案如下: 对SZX01-08的生长成熟期分初期、中期和末期三个时期进行早材、早晚材之间的过渡段和晚材剥取;

对BZ4-10-1.2的成熟期(1930–1944年)进行连续的早材、过渡段和晚材剥取, 而对其余生长时期分早材和晚材剥取(时段划分参考图1)。

判断两树盘各方位的生长特征, 以髓心为中心, 从正北(N)方向开始, 用直尺和量角器按22.5°间隔将两样本顺时针划分为16个方位, 并用钢针依次做好标记, 左右两侧均以2.5°–5°标记好取样范围, 用钢锯沿标记的两侧边界小心锯开。为避免方位一致对分析造成干扰, 同时考虑样本年内 $\delta^{13}\text{C}$ 分析对纤维素提取样本量的要求, 参考王建等(2008)文献确定混合方案为: SZX01-08按东(E)、南(S)和西(W)三个方向剥取并混合均匀; BZ4-10-1.2按东北东(ENE)和西(W)两个方向剥取并混合均匀。样本剥取前, 按各自标记方向逐年测量年轮早晚材宽度(SZX01-08按E、S和W三个方向测量并取平均值; BZ4-10-1.2按ENE和W两个方向测量并取平均值)。剥取时, 用手术刀沿各方位在标记好的范围内逐年切削木质样, 并在METTLER TOLEDO电子天平(AB265-S, 精度0.01 mg)上称重。对于轮内细分切削, 通常遵循的是按宽度或质量等量均分的原则, 但由于树轮年内的生长速率很可能并非连续, 因而细分的每个部分难以代表对应的等量时间间隔(Leavitt & Long, 1991)。本研究中, 包含过渡段的剥取范围以体式显微镜下观测到的早晚材界线为基准, 按宽度分别向前后两侧各划分50%作为过渡时段进行切割, 而每年其余的部分分别作为年内早材和晚材, 以满足纤维素提取对样本量的要求为前提(不少于0.2 g)。剥取称量过程严格规范操作步骤, 防止样品相互混淆及外来杂质的混入。

对剥取好的样品进行干燥、研磨并过筛混合均匀, 然后进行综纤维素提取、纯度检测(傅里叶变换红外光谱仪(FTIR NEXUS670, Nicolet, Madison, USA)) and  $\delta^{13}\text{C}$ 测定(稳定同位素比例质谱仪(Thermo-

表1 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 样品基本信息

Table 1 Basic information of the tree ring  $\delta^{13}\text{C}$  samples

样本编号 Sample No.	树龄 Tree age (a)	分析年份 Analyzing period	剥取方案 Stripping program
SZX01-08	231	1904–1908, 1924–1928, 1944–1948	分早材、过渡段和晚材3段 Subdivided into three segments: earlywood (EW), transitional wood (TW) and latewood (LW) for each ring
BZ4-10-1.2	117	I: 1897–1901, 902–1906, 1912–1916, 1955–1959, 1998–2002; II: 1930–1944	I: 分早材和晚材 Subdivided into earlywood (EW) and latewood (LW) for each ring; II: 分早材、过渡段和晚材3段 Subdivided into three segments: earlywood (EW), transitional wood (TW) and latewood (LW) for each ring

Finnigan-DeltaplusXP, ThermoFinnigan, Silicon Valley, USA), 具体细节详见商志远等(2011)的文章。整个流程分析误差 $\leq 0.15\%$ 。

## 2 结果和分析

### 2.1 样本早晚材宽度的长期变化趋势

结合 $\delta^{13}\text{C}$ 测定的混合方案, 分别对两个样本按剥取方向逐年测量年轮早晚材宽度并取平均值, 测量结果见图1, 并利用高次多项式进行拟合。由图1可知, 两样本的年轮早材和晚材宽度总体变化趋势均为随树龄增加先迅速减至谷值, 然后逐渐增加, 达到生长量最大值后逐渐减小并趋于稳定的特征, 这一点与其他地区针叶树种的研究类似。对于单独样本而言, 早晚材的变化相位基本一致, 并且早材的变化特征较晚材更为显著, 变化幅度也较晚材更为剧烈, 从而也导致样本年轮总宽度基本呈现与早材相关性更密切的变化趋势。

### 2.2 样本 $\delta^{13}\text{C}$ 的统计结果及长期变化趋势

两树盘合计综纤维素样本共140个。两样本分早晚材及过渡段的 $\delta^{13}\text{C}$ 统计结果见表2。样本 $\delta^{13}\text{C}$ 的

原始值统计结果表明, SZX01-08在3个时段(1904–1908, 1924–1928, 1944–1948)年内 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 $0.319\%$ – $1.645\%$ , 平均值为 $0.870\%$ , 标准偏差( $SD$ )变化范围为 $0.423\%$  (早材)– $0.519\%$  (过渡段); 在BZ4-10-1.2连续时段(1930–1944)中, 由于1932年的最低值为 $0.135\%$ , 接近分析误差, 剔除该值后其余年内 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化范围为 $0.262\%$ – $1.573\%$ , 平均值为 $0.669\%$ ,  $SD$ 变化范围为 $0.340\%$  (早材)– $0.415\%$  (晚材)。总体上, 在各个生长时期, 早材 $\delta^{13}\text{C}$ 相对较高, 晚材较低, 在细分过渡段的年份, 年内过渡段的 $\delta^{13}\text{C}$ 最高, 早材次之, 晚材最低。

由统计结果可以看出: 对于SZX01-08样本, 年内过渡段的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 与早材无明显差异, 而早材平均比晚材高 $0.537\%$ , 且无论早材、过渡段还是晚材, 其标准差均在成熟期的初期—中期—末期呈现先增大后减小的趋势; 对于BZ4-10-1.2样本, 过渡段的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均比早材高 $0.700\%$ , 早材平均比晚材低 $0.240\%$ , 其 $\delta^{13}\text{C}$ 长期变化趋势呈现幼龄期至速生期变幅剧烈而成熟期至衰老期变幅平缓的趋势, 无论是年内早材还是晚材, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的5年统计标准

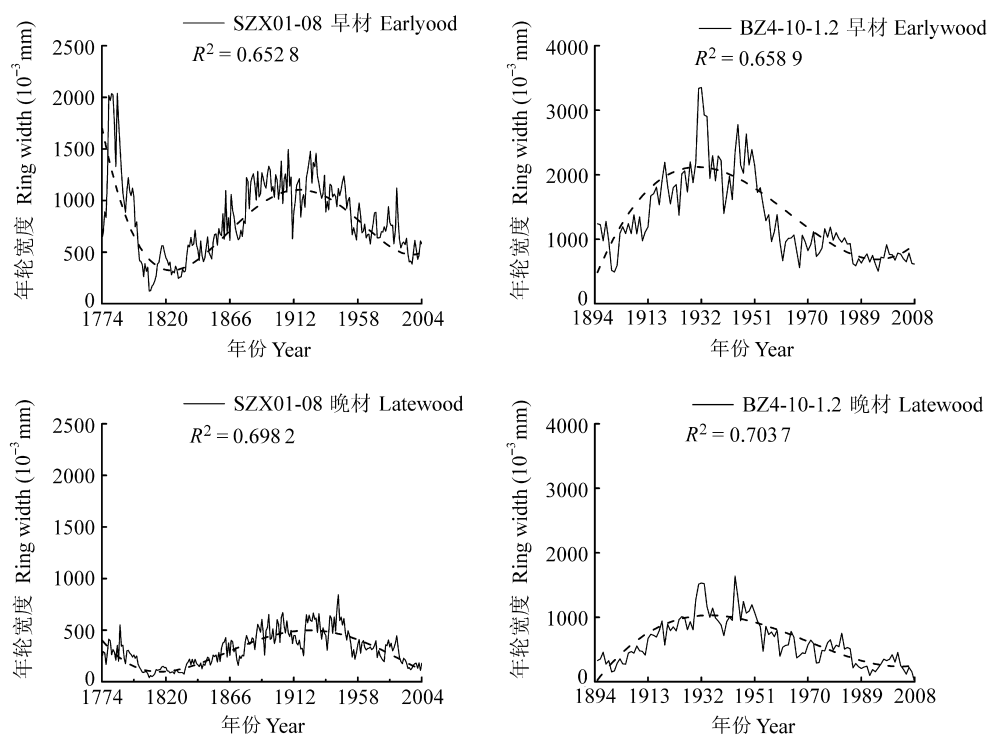


图1 SZX01-08和BZ4-10-1.2两样本早、晚材年轮宽度原始值。虚线为六次多项式拟合趋势线。

Fig. 1 Original value of ring width of earlywood (EW) and latewood (LW) in SZX01-08 and BZ4-10-1.2 samples. Dotted lines show 6-degree polynomial fitting.

表2 SZX01-08和BZ4-10-1.2两样本年内 $\delta^{13}\text{C}$ 序列统计结果(‰)Table 2 Statistical results of the intra-annual  $\delta^{13}\text{C}$  sequences in SZX01-08 and BZ4-10-1.2 samples (‰)

样本编号 Sample No.	时间 Time	材质 Material	最大值 Max	最小值 Min	平均值 Mean	标准偏差 Standard deviation
SZX01-08	1904–1908	早材 Earlywood	-24.347	-25.239	-24.784	0.371
		过渡段 Transitional wood	-23.841	-25.294	-24.696	0.529
		晚材 Latewood	-25.037	-25.516	-25.343	0.198
	1924–1928	早材 Earlywood	-24.394	-25.495	-24.957	0.464
		过渡段 Transitional wood	-23.446	-24.954	-24.549	0.628
		晚材 Latewood	-24.460	-25.970	-25.291	0.596
	1944–1948	早材 Earlywood	-24.574	-25.780	-25.097	0.459
		过渡段 Transitional wood	-24.667	-25.370	-25.063	0.302
		晚材 Latewood	-24.486	-26.219	-25.816	0.491
BZ4-10-1.2	1897–1906	早材 Earlywood	-24.176	-26.322	-25.276	0.741
		晚材 Latewood	-23.533	-26.972	-24.612	1.032
	1912–1916	早材 Earlywood	-25.044	-26.224	-25.735	0.453
		晚材 Latewood	-23.851	-25.856	-25.185	0.796
	1930–1944	早材 Earlywood	-24.483	-25.682	-25.097	0.340
		过渡段 Transitional wood	-24.095	-25.275	-24.630	0.387
		晚材 Latewood	-24.460	-25.675	-25.093	0.415
	1955–1959	早材 Earlywood	-24.968	-25.784	-25.431	0.355
		晚材 Latewood	-25.114	-25.749	-25.456	0.243
	1998–2002	早材 Earlywood	-25.307	-25.904	-25.630	0.268
		晚材 Latewood	-25.138	-26.078	-25.574	0.359

差均呈现随树龄增大而减小的趋势,分别由幼龄期的0.741和1.032减小到衰老期的0.268和0.359,且晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 变动幅度在整个生长序列中基本上一直大于早材。

### 2.3 样本不同材质的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势对比

两样本不同材质的 $\delta^{13}\text{C}$ 对比分析见图2。以BZ4-10-1.2而言,其生长幼龄期,晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 一直明显高于早材且呈同步变化趋势,待成熟期年内早晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 差别逐渐不再显著,而稳定期晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现低于早材的趋势,但早晚材的差别已较幼龄期减小,特别地,对于成熟期的生长峰值时段(1930–1944年),方差分析结果显示年内早材和晚材的15年序列两者之间不存在显著差别(均方差( $MS$ ) $< 0.001$ ,  $F = 0.001$ ,  $p = 0.978$ )。而这一点在SZX01-08的生长峰值时段有更加细微的体现:由峰值时段的初期至中期再至末期的过程中, $MS$ 和 $F$ 值是先减少后增大( $MS$ 由0.780减至0.279再增至1.290;  $F$ 值由8.799减至0.979再增至5.709),而 $p$ 值为先增大后减

小(由0.018增至0.351再减至0.044)。综合BZ4-10-1.2和SZX01-08两样本的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列可以看出,随着树龄增加,早晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 差别由显著逐渐变为趋近生长峰值时段的不显著,峰值时段后又逐渐变为显著,即生长量最高的区域差别最不显著,而向两侧愈远离生长峰值区差别愈显著。

对两样本不同阶段的年内 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行总体方差分析,结果表明不同材质之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列差异基本上都是显著的:SZX01-08成熟期的早材、过渡段和晚材的 $MS$ 为2.072,  $F$ 值为9.025,  $p$ 值为0.001; BZ4-10-1.2 1930–1944年连续15年的早材、过渡段和晚材的 $MS$ 为1.080,  $F$ 值为7.403,  $p$ 值为0.002,而其余时段的早晚材两种材质的 $MS$ 为1.821,  $F$ 值为3.574,  $p$ 值为0.065。特别是年内细分过渡段后,明显增加了差异的显著程度。

利用Student-Newman-Keuls (S-N-K)方法对早材、过渡段和晚材三种材质进行了同类子集分析,结果表明:对于SZX01-08,过渡段的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与早

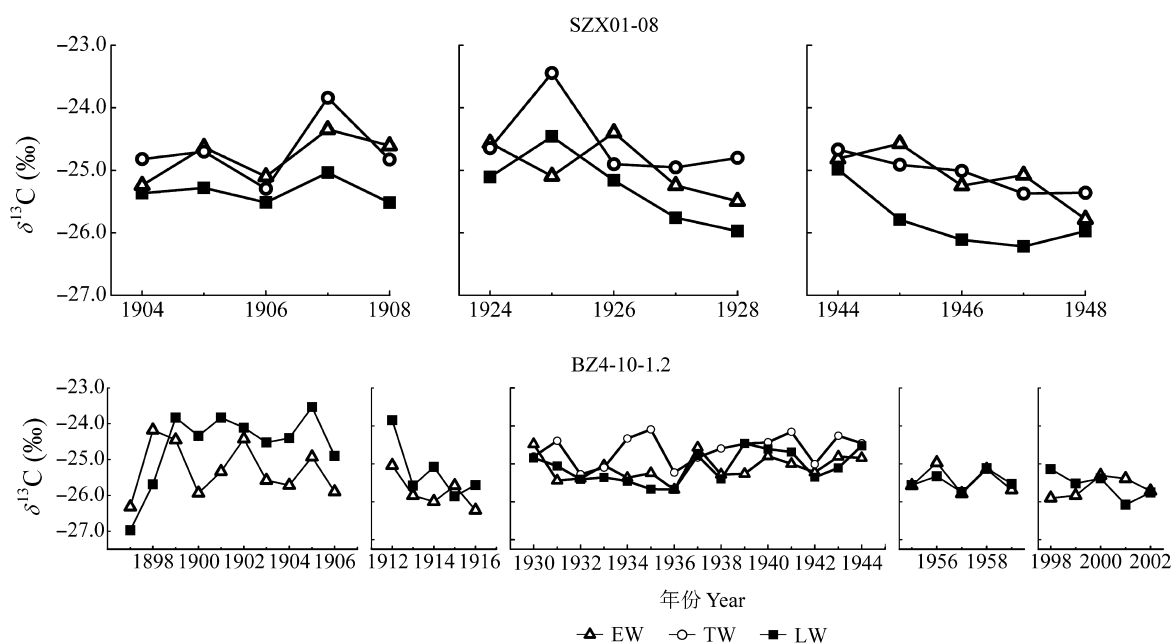


图2 SZX01-08和BZ4-10-1.2两样本早材(EW)、过渡段(TW)和晚材(LW)的 $\delta^{13}\text{C}$ 对比。  
 Fig. 2 Intercomparison of  $\delta^{13}\text{C}$  of earlywood (EW), transitional wood (TW) and latewood (LW) between SZX01-08 and BZ4-10-1.2 samples.

表3 年内不同时段 $\delta^{13}\text{C}$ 序列之间的相关系数  
 Table 3 Correlation coefficients of the  $\delta^{13}\text{C}$  sequences between different intra-annual phases

样本编号 Sample No.	早材与过渡段 Earlywood vs. transitional wood	过渡段与晚材 Transitional wood vs. latewood	早材与晚材 Earlywood vs. latewood
SZX01-08	0.361	0.797**	0.501
BZ4-10-1.2	0.178	0.324	0.613*

\*,  $p < 0.05$ , \*\*,  $p < 0.01$ . BZ4-10-1.2, 1930–1944年的连续序列; SZX01-08, 1904–1908年、1924–1928年和1944–1948年三时段的合成序列。  
 BZ4-10-1.2, continuous sequence during 1930–1944; SZX01-08, incorporative sequence of three time intervals (1904–1908, 1924–1928 and 1944–1948).

材更为相似, 而与晚材差异较为显著(平均值分别为: 早材  $-24.946\%$ , 过渡段  $-24.770\%$ , 晚材  $-25.483\%$ ); 对于BZ4-10-1.2, 早晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列较为相似, 而与过渡段的差异较为显著(平均值分别为: 早材  $-25.097\%$ , 过渡段  $-24.630\%$ , 晚材  $-25.093\%$ )。两样本总体上均表现出过渡段到晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 差异最为显著, 也意味着树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的年内变化主要体现在生长季中期之后。

#### 2.4 年内不同时段 $\delta^{13}\text{C}$ 序列及对应宽度序列的相关分析

对两样本年内不同时段 $\delta^{13}\text{C}$ 序列求相关系数(表3), 结果显示: SZX01-08样本的过渡段与晚材之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势显著相关, 而BZ4-10-1.2样本早晚材之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势较为显著, 两样本的早材

至过渡段之间 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势均不呈现显著相关性, 且相关系数也最低。

对于BZ4-10-1.2样本, 1930–1944年连续15年的早晚材宽度序列采用高次多项式拟合, 并计算原始序列与拟合序列的差值以形成早晚材各自宽度的去除生长趋势序列(去趋势序列)。根据切削方案, 过渡段宽度假定为早晚材各自宽度的1/2之和, 即可认为是全年轮宽的1/2, 同理得出过渡段宽度的去趋势序列。分别做如下序列之间的相关分析: 不同时段 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与各自时段的宽度去趋势序列, 当年早材宽度的原始序列与前一年晚材宽度的原始序列和 $\delta^{13}\text{C}$ 序列, 当年早材 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与前一年晚材宽度的去趋势序列和 $\delta^{13}\text{C}$ 序列, 结果列于表4。由表4可以看出: 从年内不同时段 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与同时段

表4 BZ4-10-1.2样本在年内不同时期的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列和树轮宽度序列的相关系数Table 4 Correlation coefficients between the  $\delta^{13}\text{C}$  sequences of different phases and ring width sequences for BZ4-10-1.2 sample

参数 Parameter	相关系数 Correlation coefficient	参数 Parameter	相关系数 Correlation coefficient
$\delta^{13}\text{C}$ (EW)-dRWS (EW)	-0.626 <sup>*</sup>	RWS (EW)-RWS (pLW)	0.794 <sup>**</sup>
$\delta^{13}\text{C}$ (TW)-dRWS (TW)	-0.416	RWS (EW)- $\delta^{13}\text{C}$ (pLW)	-0.224
$\delta^{13}\text{C}$ (LW)-dRWS (LW)	-0.245	$\delta^{13}\text{C}$ (EW)-dRWS (pLW)	-0.296
$\delta^{13}\text{C}$ (EW)- $\delta^{13}\text{C}$ (pLW)	0.075	$\delta^{13}\text{C}$ (EW)-dRWS (pLW+EW)	-0.540 <sup>*</sup>

$\delta^{13}\text{C}$  (EW)、 $\delta^{13}\text{C}$  (TW)和 $\delta^{13}\text{C}$  (LW)分别为早材、过渡段和晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列(1930–1944年); dRWS(EW)、dRWS(TW)和dRWS(LW)分别为早材、过渡段和晚材宽度去趋势序列(1930–1944年); RWS (EW)和 $\delta^{13}\text{C}$  (EW)分别为当年早材宽度原始序列和 $\delta^{13}\text{C}$ 序列(1931–1944年); RWS (pLW)、dRWS (pLW)和 $\delta^{13}\text{C}$  (pLW)分别为前一年晚材宽度原始序列、宽度去趋势序列和 $\delta^{13}\text{C}$ 序列(1930–1943年); dRWS (pLW+EW)为前一年晚材宽度去趋势序列(1930–1943年)与当年早材宽度去趋势序列(1931–1944年)的合并序列。

$\delta^{13}\text{C}$  (EW),  $\delta^{13}\text{C}$  (TW) and  $\delta^{13}\text{C}$  (LW) are the  $\delta^{13}\text{C}$  sequence (1930–1944) of earlywood, transitional wood and latewood, respectively; dRWS (EW), dRWS (TW) and dRWS (LW) are the detrended ring width sequence (1930–1944) of earlywood, transitional wood and latewood, respectively; RWS (EW) and  $\delta^{13}\text{C}$  (EW) are the initial ring width sequence and the  $\delta^{13}\text{C}$  sequence (1931–1944) of earlywood for current year, respectively; RWS (pLW), dRWS (pLW) and  $\delta^{13}\text{C}$  (pLW) are the initial ring width sequence, detrended ring width sequence and the  $\delta^{13}\text{C}$  sequence (1930–1943) of latewood for previous year, respectively; dRWS (pLW+EW) is the incorporative sequence with detrended ring width sequence of latewood for previous year (1930–1943) and detrended ring width sequence (1931–1944) of earlywood for current year.

的宽度去趋势序列的相关程度来看,三个时段二者之间均呈现负相关关系,表明某时段的树轮宽度越宽,对应的该时段 $\delta^{13}\text{C}$ 就越低,但其中仅早材的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与早材宽度去趋势序列之间的相关性达到了0.05的显著性水平。而随着时间的推移,相关性逐渐降低(由早材的-0.626到过渡段的-0.416再到晚材的-0.245);此外,当年早材的宽度序列与上一年晚材的宽度序列呈现极显著的正相关关系,与上一年晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 无明显相关性,而当年早材 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与前一年晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 序列或宽度去趋势序列之间均未表现出显著的相关性。值得注意的是,将前一年晚材宽度去趋势序列与当年早材宽度去趋势序列合并后,当年早材的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与该合并序列仍然呈现较为显著的负相关性。

### 3 讨论

#### 3.1 樟子松树轮年内 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化幅度和变化特征

Wilson和Grinsted (1977)通过对新西兰辐射松(*Pinus radiata*)的分析,发现其树轮纤维素年内的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在1‰–2‰的幅度变化,晚材显著低于早材。本研究的年内 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围基本在0.3‰–1.5‰之间,且大多数年份晚材也显著低于早材(图2)。Livingston和Spittlehouse (1996)对北美黄杉(*Pseudotsuga menziesii*)的早晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 分析发现,同时段早材 $\delta^{13}\text{C}$ 的波动显著小于晚材,在1962–1981年的20年中,早材 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为-24.37‰,标准差为0.54‰,与之对应的晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值为-24.12‰,标准差却达到1.63‰。本研究的结果(表

2)与其有类似之处,反映了年内生长季中后期 $\delta^{13}\text{C}$ 对外界变化的响应较年内早期敏感。Leavitt和Long (1991)测定了北美花旗松(*Pseudotsuga menziesii*)树轮样本1907–1917年的全木和纤维素年内细分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,结果显示绝大多数样本年内 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现先升后降的变化特征,且半数样本的 $\delta^{13}\text{C}$ 逐年变化并非连续。Li等(2005)对中国陕西黄陵地区的两株油松(*Pinus tabulaeformis*)进行1978–1990年年内细分测定 $\delta^{13}\text{C}$ ,发现多数年份年内 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现先增加后下降的变化趋势,且年内中后期的变幅较大。Michelot等(2011)对8株无梗花栎(*Quercus petraea*) 2006年的早材、早晚材之间过渡段和晚材三阶段的 $\delta^{13}\text{C}$ 研究发现,多数个体呈现由早材至过渡段 $\delta^{13}\text{C}$ 上升而过渡段至晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 下降的变化趋势。这种年内变化特征在阔叶树中也有类似体现(Helle & Schleser, 2004)。统计显示本研究的两样本成熟期半数以上年份的年内 $\delta^{13}\text{C}$ 序列都表现出先增加后下降的变化趋势,分别占各自样本数的53.3% (SZX01-08)和80% (BZ4-10-1.2),与上述研究结果高度一致。Francey和Farquhar (1982)通过对新西兰辐射松的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 分析发现,树轮生长季节早期(每年轮宽的前1/6段)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高,中期(中间4/6段)存在不同程度的下降,而在晚材部位(后1/6段)具有非常低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,这个现象在纤维素和木质素中均被发现,进而证实了 $\text{CO}_2$ 同化作用的机制。本研究中早材至过渡段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变幅绝对值大多小于过渡段至晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变幅绝对值,即年内 $\delta^{13}\text{C}$ 一般呈现先缓慢增加而后显著下降的趋势,与其研究结果相近。

许多研究认为, 每年早材形成期间主要利用了前一年生长储存的碳, 其中主要是淀粉(Smith & Paul, 1988; Lacoite *et al.*, 1993; Hoch *et al.*, 2003; Kagawa *et al.*, 2006)。而通常淀粉中的 $^{13}\text{C}$ 相对于树木营养器官的可溶性糖类更为富集(约高3%) (Brugnoli *et al.*, 1988; Damesin & Lelarge, 2003; Eglin *et al.*, 2008), 年内早期的 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加可能是由于淀粉合成中的分馏过程或前一个生长季的不同时段合成的淀粉层之间的 $^{13}\text{C}$ 梯度所导致(Lacoite *et al.*, 1993)。因而早材的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要反映了前一年的环境条件及内在水分利用率的变化, 而晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 才主要反映当年的环境条件变化(Porté & Loustau, 2001; Jäggi *et al.*, 2002)。年内中后期 $\delta^{13}\text{C}$ 的下降可能与生长基质从前一年的碳存储到当年的光合作用产物的变化有关, 由于新吸收的营养物质较树体早期存储的碳整体上更贫 $^{13}\text{C}$ , 从而导致这一现象的发生(Michelot *et al.*, 2011)。此外, 这也可能与此阶段树体形成的富 $^{13}\text{C}$ 的淀粉有关, 导致木材本身的 $\delta^{13}\text{C}$ 相对较低(Helle & Schleser, 2004)。至于本研究两样本显示的结果略有不同(SZX01-08样本过渡段 $\delta^{13}\text{C}$ 与早材更相似, 与晚材差异较显著; BZ4-10-1.2样本早晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 较相似, 与过渡段差异较显著), 应与各自的局地环境条件等因素有关。

### 3.2 樟子松树轮年内不同时段 $\delta^{13}\text{C}$ 之间及与对应宽度之间的关系

Porté和Loustau (2001)对法国沙地海岸松(*Pinus pinaster*)早晚材纤维素的 $\delta^{13}\text{C}$ 进行了测定, 认为树龄并不能解释树木年内及年际间的同位素差异, 年际碳同位素分馏与气候因子(如年降水、夏季温度和水汽压亏缺等)变化有关, 而早材 $\delta^{13}\text{C}$ 与前一年晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现正相关, 显示了树体内碳储量随年份流动的状况。Skomarkova等(2006)对欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)树轮的季节性 $\delta^{13}\text{C}$ 研究表明, 木质部 $\delta^{13}\text{C}$ 与同化物 $\delta^{13}\text{C}$ 之间的季节变化差异显著, 与碳水化合物的存储相互影响, 并认为二者之间的差异应该出现在木质部形成时期而非运输阶段。相对于树轮宽度和密度而言, 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与树木自身水分状况的季节性动态更为相关。Kress等(2009)对挪威北部的欧洲赤松和瑞士南部的欧洲落叶松(*Larix decidua*)年轮早晚材 $\alpha$ 纤维素的 $\delta^{13}\text{C}$ 研究发现, 两个树种的年轮早材与当年晚材之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 均呈现非常显著的正相关关系, 而与前一年晚材之间无显著相关性。

他们认为相对于树种而言, 早晚材之间 $\delta^{13}\text{C}$ 的显著一致性与环境条件和树体内部碳收支的关系更为密切。由于两个树种均生长在温度限制性因子地区, 他们认为较高的流通速率和较小的碳存储量是导致早晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 显著一致的原因, 因而阻止了前一年存储物质的流动。实际上, 如果这类树种利用了前一年的碳存储, 那么早材与前一年晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 之间应当呈现正相关性, 而这种情况并未被研究结果所证实。本研究结果(表3和表4)表明: 当年早材宽度与前一年晚材宽度呈现显著的正相关, 当年早材的 $\delta^{13}\text{C}$ 与前一年晚材宽度和当年早材宽度去趋势的合并序列呈现显著的负相关, 这表明早材的形成确实可能利用了前一年光合作用的产物。而当年早材的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与前一年晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列或宽度去趋势序列之间均未表现出明显的相关性, 这并不能充分说明树木自身没有利用前一年生长季末期的碳存储, 很可能只是由于树木在前一年生长季末期剩余营养物质的存储以及当年生长季初期碳流动和水分运输等各方面因素的相互影响及其复杂性, 使得上述指标之间并未呈现显著相关性。生长季早期的宽度与同时期的 $\delta^{13}\text{C}$ 关系更为密切, 表明这两个指标的影响因素很可能是共同的, 或者说影响机理的表现形式相对一致。而随着生长季节的向后推移,  $\delta^{13}\text{C}$ 与对应时段宽度去趋势序列的相关性逐渐降低, 表明生长季中后期宽度和 $\delta^{13}\text{C}$ 指标的影响因素很可能不再相同, 或者两指标对影响因素的反馈机制可能发生改变。不同地区的树木显示的早材 $\delta^{13}\text{C}$ 与前一年晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 相关性不一, 这应该与具体树种以及所处的具体环境条件有关。

上述分析表明, 早材的年轮宽度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 指标的影响因素复杂, 不仅可能受前一年树木自身水势及营养物质存储状况的影响, 还应与当年生长季初期水分及营养物质传输的动态密切相关, 从而在一定程度上干扰了早材宽度或碳同位素指标对气候或环境要素响应的及时性和精确性, 使得利用此两项指标进行气候或环境重建时需要特别审慎地分析判断。另外, Weigl等(2008)对奥地利维也纳地区无梗花栎全木的研究认为, 树轮年内宽度内部指标之间(如早材宽度、晚材宽度或全轮宽度)以及 $\delta^{13}\text{C}$ 内部指标之间(如早材 $\delta^{13}\text{C}$ 、晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 或全轮 $\delta^{13}\text{C}$ )的相关性要较此两个指标之间的相关性显著得多。本研究的结果与其有类似之处, 这一现象产生的原因

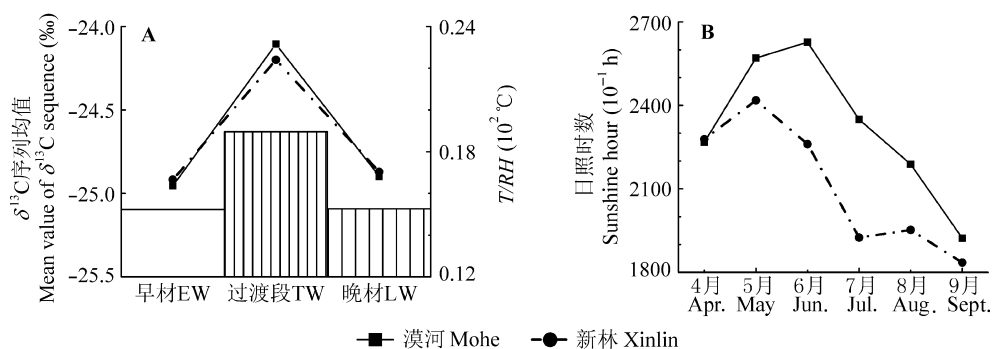


值得进一步分析探讨。

### 3.3 樟子松树轮年内 $\delta^{13}\text{C}$ 的多年平均变化对气候要素的响应

树木生长受气候和环境等条件影响,其中气候因子本身有长期的低频变化趋势和短期的高频变化趋势。虽然BZ4-10-1.2样本在生长高值区的1930–1944年当地并无实际气象数据对应,但可以认为逐月(或旬)的气象指标多年滑动平均值的均值序列大体可以代表该站点该指标的逐月(或旬)变化趋势。选取采样点邻近的新林和漠河两气象站多年气候指标(1972–2007年)进行15年滑动平均,结果表明,该地区旬平均最高气温高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时间通常为每年4月上旬至10月上旬。对此时期内19个旬段的各类气象指标分析发现,分别选取4月下旬至6月中旬、6月下旬至7月中旬和7月下旬至9月中旬3个旬段的旬相对湿度15年滑动平均值( $RH$ )的各旬段均值为分母,旬均温15年滑动平均值( $T$ )的各旬段均值为分子,计算两站各自的 $T/RH$ 指标,与BZ4-10-1.2样本1930–1944年连续15年的年内早材、过渡段和晚材3种材质的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值显示相对最为一致的对应关系(图3)。Loader等(1995)对无梗花栎树轮在1921–1922年的 $\delta^{13}\text{C}$ 进行细分测定,发现碳同位素曲线与相对湿度记录显示比平均气温更显著的相关性,同时也观测到早材生长与气候趋势之间无明显关系。本研究结果与之相似。

Leavitt (1993)对美国威斯康辛州东南地区的北美乔松(*Pinus strobus*)和银槭(*Acer saccharinum*)树轮研究表明,不同树种间和不同局地小环境间的树轮季节性 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势非常相似,1985–1987年间年内 $\delta^{13}\text{C}$ 值在生长季末期之前达到最大值,大致对应于生长季中期的水分胁迫。Barbour等(2002)发现几乎所有研究点的新西兰辐射松树轮纤维素均显示了年内 $\delta^{13}\text{C}$ 于夏末达到峰值。Eilmann等(2010)发现欧洲赤松早材和晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 分别与2–6月和4–9月的季节性干旱指数显著相关,其研究的控制组和灌溉组两组样树的 $\delta^{13}\text{C}$ 峰值分别在年内气候最干热的时节前后出现,他们认为这是由于水汽压亏缺的下降和生长季第二阶段相对湿度增加所导致的。McCarroll和Pawellek (2001)、McCarroll等(2003)研究了夏季日照时数与树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的关系,发现日照时数与 $\delta^{13}\text{C}$ 值两者呈正相关。光照时间延长,光合作用时间加长,而且在适宜的光合温度范围内,温度升高,酶的活性增强,有利于加快植物对 $\text{CO}_2$ 的固定,降低植物叶内的 $\text{CO}_2$ 浓度,因而植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高(O' Leary, 1981)。本研究中,尽管新林与漠河两个气象站的日照时数指标在7–8月变化趋势存在一定差异,但樟子松年内不同时段 $\delta^{13}\text{C}$ 多年平均值与日照时数月平均值对比(图3B)总体仍明显反映出年内 $\delta^{13}\text{C}$ 值对生长季光照条件逐月变化的显著响应。王晓春等(2011)对邻近的漠河、塔河和满



**图3** BZ4-10-1.2样本在1930–1944年年内早材、过渡段和晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的均值和漠河、新林两气象站1972–2007年年内3个旬段的 $T/RH$  (A)以及漠河新林两气象站1972–2007年4–9月平均日照时数(B)。T, 旬平均温度15年滑动平均值的各旬段均值; RH, 旬相对湿度15年滑动平均值的各旬段均值。3个旬段分别为: 4月下旬–6月中旬、6月下旬–7月中旬和7月下旬–9月中旬。

**Fig. 3** Mean values of the intra-annual  $\delta^{13}\text{C}$  sequences (1930–1944) for earlywood (EW), transitional wood (TW) and latewood (LW) from BZ4-10-1.2 sample, and intra-annual  $T/RH$  for three ten-days of two meteorological stations (Mohe and Xinlin) during 1972–2007 (A), as well as mean sunshine hours from April to September of 1972–2007 at two meteorological stations (B). T, mean values of 15-year moving average of ten-day mean temperature; RH, mean values of 15-year moving average of ten-day relative humidity. Three ten-days are: from late April to middle June, from late June to middle July and from late July to middle September, respectively.

归地区的樟子松年轮宽度年表进行了分析, 结果显示当年6月气温与前一年10月气温对大兴安岭北部地区的樟子松生长较为重要。他们认为6月气温直接影响光合作用并间接调节呼吸和蒸腾作用。对新林和漠河两个气象站点多年月平均气象指标分析的结果表明, 该研究区的月平均气温通常在每年4月下旬即可达到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上水平, 5–6月日平均气温上升迅速, 土壤融雪补给在6月下旬基本消耗完毕, 一般7月中旬日平均气温达到年内最高值, 而此时降水增加并不如温度显著, 反而在7月下旬开始日平均气温显著下降时才达到较高水平, 此时蒸发量也随之降低, 空气相对湿度比7月份之前相对要高, 这表明温度成为此时期生长的限制性因子。可以认为, 该地区4月下旬开始平均月最低气温已经达到樟子松高向生长开始的水平, 即使该时段树木生长受到降水缺少的限制, 也可由前一年冬季降雪的融雪所汇成的地表径流来补给, 使得年内早期材质的形成能够充分利用前年生长季末期的养分积累和土壤融雪的水分, 因而一般会形成相对较低的 $\delta^{13}\text{C}$ ; 从6月下旬至7月中旬, 日照时数仍然维持在较高水平, 月平均气温已经达到足够高的水平, 但此时的降水并不能保证土壤足够的相对湿度, 同时由于白天的最高气温较高, 而通常因午后蒸腾作用强烈导致气孔关闭, 从而降低叶片的气孔导度, 导致过渡段部分较高的 $\delta^{13}\text{C}$ ; 而在7月下旬至9月中旬, 日照时数和日平均气温均显著下降, 但是降水并未显著减少, 且大气相对湿度明显增大, 导致轮内晚期材质通常在较湿润的气候条件下形成, 而此时树木生长速率降低, 光合作用减弱, 对稳定 $^{13}\text{C}$ 的分馏相对增加, 从而导致较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 。

#### 4 结论

樟子松树轮在生长的各个阶段总体表现出年内 $\delta^{13}\text{C}$ 值早材相对较高, 晚材较低的特征。对成熟期的年轮细分轮内早材、过渡段和晚材的结果显示过渡段 $\delta^{13}\text{C}$ 值最高、早材次之、晚材最低的特征。多数年份的年内 $\delta^{13}\text{C}$ 序列表现出由早材至过渡段再至晚材先缓慢增加后显著下降的趋势, 方差分析显示树轮年内 $\delta^{13}\text{C}$ 变化主要表现在生长季的中期以后。 $\delta^{13}\text{C}$ 的年内变化趋势在幼龄期至速生期相对剧烈, 而成熟期至衰老期相对平缓。整个生长阶段同时期年内晚材的 $\delta^{13}\text{C}$ 变动幅度基本上大于早材。幼

龄期年内晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 一直明显高于早材, 且呈同步变化趋势, 成熟期年内早晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 的差别逐渐减弱, 至衰老期年内晚材 $\delta^{13}\text{C}$ 已低于早材且无显著差别。通过与邻近气象站点相关气象指标分析, 可将研究区樟子松年内不同材质的生长时段大致划分为: 早材4月下旬至6月中旬, 过渡段6月下旬至7月中旬, 晚材7月下旬至9月中旬。

本文利用统计分析方法, 研究了大兴安岭北部樟子松树轮纤维素年内不同材质的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化特征及其与对应宽度之间的关系, 探讨了树木生长过程中年内不同材质 $\delta^{13}\text{C}$ 差异的原因, 进而指出气候环境重建中考虑不同生长阶段年内不同材质 $\delta^{13}\text{C}$ 差异的必要性, 为今后树轮稳定碳同位素更高时间分辨率研究提供分析依据。有关树轮年内 $\delta^{13}\text{C}$ 对短时间尺度(月、旬甚至日)的气候要素或环境条件变化响应的问题, 还需要今后结合树木其他组织器官(如叶片、细枝)的 $\delta^{13}\text{C}$ 、光合作用参数和土壤相对湿度等指标进行深入研究。

**致谢** 国家自然科学基金(41271204)和教育部长江学者创新团队基金(YST2006-006)资助。感谢碧洲林场副场长刘丰及作业人员徐平富、沈明国等在野外采样中给予的支持和帮助。

#### 参考文献

- Barbour MM, Walcroft AS, Farquhar GD (2002). Seasonal variation in  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of cellulose from growth rings of *Pinus radiata*. *Plant, Cell & Environment*, 25, 1483–1499.
- Brugnoli E, Hubick KT, von Caemmerer S, Wong SC, Farquhar GD (1988). Correlation between the carbon isotope discrimination in leaf starch and sugars of  $\text{C}_3$  plants and the ratio of intercellular and atmospheric partial pressures of carbon dioxide. *Plant Physiology*, 88, 1418–1424.
- Damesin C, Lelarge C (2003). Carbon isotope composition of current-year shoots from *Fagus sylvatica* in relation to growth, respiration and use of reserves. *Plant, Cell & Environment*, 26, 207–219.
- Eglin T, Maunoury-Danger F, Fresneau C, Lelarge C, Pollet B, Lapierre C, Francois C, Damesin C (2008). Biochemical composition is not the main factor influencing variability in carbon isotope composition of tree rings. *Tree Physiology*, 28, 1619–1628.
- Eilmann B, Buchmann N, Siegwolf R, Saurer M, Cherubini P, Rigling A (2010). Fast response of Scots pine to improved water availability reflected in tree-ring width and  $\delta^{13}\text{C}$ .

- Plant, Cell & Environment*, 33, 1351–1360.
- Francey RJ, Farquhar GD (1982). An explanation of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  variations in tree rings. *Nature*, 297(5861), 28–31.
- Helle G, Schleser GH (2004). Beyond  $\text{CO}_2$ -fixation by Rubisco—an interpretation of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  variations in tree rings from novel intra-seasonal studies on broad-leaf trees. *Plant, Cell & Environment*, 27, 367–380.
- Hill SA, Waterhouse JS, Field EM, Switsur VR, Ap Rees T (1995). Rapid recycling of triose phosphates in oak stem tissue. *Plant, Cell & Environment*, 18, 931–936.
- Hoch G, Richter A, Körner C (2003). Non-structural carbon compounds in temperate forest trees. *Plant, Cell & Environment*, 26, 1067–1081.
- Jäggi M, Saurer M, Fuhrer J, Siegwolf R (2002). The relationship between the stable carbon isotope composition of needle bulk material, starch, and tree rings in *Picea abies*. *Oecologia*, 131, 325–332.
- Kagawa A, Sugimoto A, Maximov TC (2006).  $^{13}\text{CO}_2$  pulse-labelling of photoassimilates reveals carbon allocation within and between tree rings. *Plant, Cell & Environment*, 29, 1571–1584.
- Kress A, Young GHF, Saurer M, Loader NJ, Siegwolf RTW, McCarroll D (2009). Stable isotope coherence in the earlywood and latewood of tree-line conifers. *Chemical Geology*, 268, 52–57.
- Lacointe A, Kajji A, Daudet FA, Archer P, Frossard JS (1993). Mobilization of carbon reserves in young walnut trees. *Acta Botanica Gallica*, 140, 435–441.
- Leavitt SW (1993). Seasonal  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  changes in tree rings: species and site coherence, and a possible drought influence. *Canadian Journal Forest Research*, 23, 210–218.
- Leavitt SW, Long A (1991). Seasonal stable-carbon isotope variability in tree rings: possible paleoenvironmental signals. *Chemical Geology*, 87, 59–70.
- Leavitt SW, Wright WE, Long A (2002). Spatial expression of ENSO, drought, and summer monsoon in seasonal  $\delta^{13}\text{C}$  of ponderosa pine tree rings in southern Arizona and New Mexico. *Journal Geophysical Research*, 107(D18), 4349.
- Li ZH, Leavitt SW, Mora CI, Liu RM (2005). Influence of earlywood-latewood size and isotope differences on long-term tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  trends. *Chemical Geology*, 216, 191–201.
- Livingston NJ, Spittlehouse DL (1996). Carbon isotope fractionation in tree ring early and late wood in relation to intra-growing season water balance. *Plant, Cell & Environment*, 19, 768–774.
- Loader NJ, Switsur VR, Field EM (1995). High-resolution stable isotope analysis of tree rings: implications of ‘microdendroclimatology’ for palaeoenvironmental research. *The Holocene*, 5, 457–460.
- McCarroll D, Jalkanen R, Hicks S, Tuovinen M, Gagen M, Pawellek F, Eckstein D, Schmitt U, Autio J, Heikkinen O (2003). Multiproxy dendroclimatology: a pilot study in northern Finland. *The Holocene*, 13, 829–838.
- McCarroll D, Loader NJ (2004). Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23, 771–801.
- McCarroll D, Pawellek F (2001). Stable carbon isotope ratios of *Pinus sylvestris* from northern Finland and the potential for extracting a climate signal from long Fennoscandian chronologies. *The Holocene*, 11, 517–526.
- Michelot A, Eglin T, Dufrêne E, Lelarge-Trouverie C, Damesin C (2011). Comparison of seasonal variations in water-use efficiency calculated from the carbon isotope composition of tree rings and flux data in a temperate forest. *Plant, Cell & Environment*, 34, 230–244.
- O’Leary MH (1981). Carbon isotope fractionation in plants. *Phytochemistry*, 20, 553–567.
- Porté A, Loustau D (2001). Seasonal and interannual variations in carbon isotope discrimination in a maritime pine (*Pinus pinaster*) stand assessed from the isotopic composition of cellulose in annual rings. *Tree Physiology*, 21, 861–868.
- Robertson I, Loader NJ, McCarroll D, Carter AHC, Cheng L, Leavitt SW (2004).  $\delta^{13}\text{C}$  of tree-ring lignin as an indirect measure of climate change. *Water, Air, and Soil Pollution*, 4, 531–544.
- Schulze B, Wirth C, Linke P, Brand WA, Kuhlmann I, Horna V, Schulze ED (2004). Laser ablation-combustion-GC-IRMS — a new method for online analysis of intra-annual variation of  $\delta^{13}\text{C}$  in tree rings. *Tree Physiology*, 24, 1193–1201.
- Shang ZY (商志远), Wang J (王建), Cui MX (崔明星), Chen ZJ (陈振举), Wang ZJ (王志军), Liu F (刘丰), Qian JL (钱君龙) (2011). Analysis of stable carbon isotopes in different components of tree rings of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 31, 5148–5158. (in Chinese with English abstract)
- Skomarkova MV, Vaganov EA, Mund M, Knohl A, Linke P, Boerner A, Schulze ED (2006). Inter-annual and seasonal variability of radial growth, wood density and carbon isotope ratios in tree rings of beech (*Fagus sylvatica*) growing in Germany and Italy. *Trees*, 20, 571–586.
- Smith JL, Paul EA (1988). Use of an *in situ* labeling technique for the determination of seasonal  $^{14}\text{C}$  distribution in Ponderosa pine. *Plant and Soil*, 106, 221–229.

- Wang J (王建), Qian JL (钱君龙), Liang Z (梁中), Zhao XY (赵兴云), Shang ZY (商志远), Chen X (陈霞), Lu XM (陆小明) (2008). Sampling strategy for carbon isotope analysis of tree rings: a case study of *Cryptomeria fortunei* from Mt. Tianmu, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 28, 6070–6078. (in Chinese with English abstract)
- Wang XC (王晓春), Song LP (宋来萍), Zhang YD (张远东) (2011). Climate-tree growth relationships of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the northern Daxing'an Mountains, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 35, 294–302. (in Chinese with English abstract)
- Weigl M, Grabner M, Helle G, Schleser GH, Wimmer R (2008). Characteristics of radial growth and stable isotopes in a single oak tree to be used in climate studies. *Science of the Total Environment*, 393, 154–161.
- Wilson AT, Grinsted JM (1977).  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  in cellulose and lignin as palaeothermometers. *Nature*, 265, 133–135.
- Zhao XL (赵兴梁), Li WY (李万英) (1963). *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv (樟子松). China Agricultural Publishing House, Beijing. 9–10. (in Chinese)

责任编辑: 朱教君 责任编辑: 王 葳