2020, 33(2): 9-18
http://www.lykxyj.com

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.02.002

不同种源杉木树轮 α 纤维素 δ^{13}C 对年气候因子的响应

刘小英[1]，段爱国[1,2*]，张建国[1,2]，张雄清[1]，朱安明[3]

(1. 中国林业科学研究院林业研究所，国家林业和草原局林木培育重点实验室，北京 100091；2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心，江苏 南京 210000；3. 中国林业科学研究院林业科技信息研究所，北京 100091)

摘要:［**目的**］通过对不同地理种源杉木 α 纤维素中的稳定碳同位素（δ^{13}C）与气候因子的相关性分析，筛选出影响杉木树轮 δ^{13}C 的主导气候因子，解释不同种源差异性响应，为种源层面上区域杉木的培育提供理论参考。［**方法**］以广西柳州的杉木试验林场的 30 个种源为研究材料，提取并测量 α 纤维素中 δ^{13}C，利用相关分析和逐步回归分析方法，对杉木树轮 δ^{13}C 与当年、前 1 年、前 2 年的降水、平均温度、最低气温、最高气温、平均相对湿度、最小相对湿度、日照时数及湿润度指数进行分析。［**结果**］不同种源杉木（1987—2013）树轮 δ^{13}C 值的变幅为−20.997‰ ~ −25.910‰，表现出较强的一阶自相关，相关系数为 0.181 ~ 0.866。大部分种源杉木树轮的 δ^{13}C 与平均温度、最高气温、最低气温呈显著正相关（p<0.05），与日照时数呈不显著正相关，与平均相对湿度、最小相对湿度呈极显著负相关（p<0.01），而与降水及湿润度指数的相关性不统一。逐步回归分析结果发现，30 个杉木种源中有 26 个种源与当年最小相对湿度呈线性关系。［**结论**］最小相对湿度是影响不同种源杉木树轮 α 纤维素中 δ^{13}C 的主导气候因子，而对降水的依赖性很小。杉木不同种源树轮 δ^{13}C 对气候因子的响应存在明显的滞后效应。研究有效的填补了种源层面上树轮稳定碳同位素对气候响应研究的不足，也为杉木培育及经营管理提供了参考。

关键词: 杉木；种源；树轮；α 纤维素；δ^{13}C；气候因子

中图分类号: S716.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1001-1498(2020)02-0009-10

造林树种种源选择已成为人类应对气候的重要途径，探讨不同地理种源主要造林树种树轮指标对气候变化的响应及评价未来气候变化对林木种源生长的影响已成为亟待解决的重要科学问题。林木种源是指取得种子或其他繁殖材料的地理来源或原产地[1]。地理种源的变异是树木长期气候环境适应性进化的产物，从遗传角度看，不同地理种源经过自然选择基因型组成会发生变化，形成固有的遗传基础[2-4]，因此，在引种栽培时往往采取“就近原则”，选择同一种源或同一种源区的幼苗进行栽植[5]。然而，有研究者通过对不同种源山毛榉（*Fagus sylvatica* L.）应对气候变化的响应情况进行研究，发现不同种源山毛榉对异地（栽植地）的气候具有不同的响应特征，而最适宜种源并不满足“就近原则”[6-7]。

树轮稳定碳同位素（δ^{13}C）技术被广泛应用于生理生态、气候变化、水文等研究领域，现已逐步成为了解生物与其生存环境相互关系的工具；而树木是如何应对气候变化依旧被气候学家关注，与树轮宽度、木材密度相似，树轮稳定碳同位素指标

收稿日期：2018-04-04　　修回日期: 2020-01-10

基金项目：江西省林业厅林业科技创新专项“杉木高世代育种亲本选择和新品系创制（201702）；国家自然科学基金面上项目“杉木不同地理种源树轮对气候变化的响应（31370629）；国家“十二五”科技计划课题“杉木速生丰产林定向培育技术研究（2015BAD09B0101）”；国家“十三五”重点研发计划课题“杉木速生材高效培育技术研究（2016YFD0600302）”

* 通讯作者: 段爱国，研究员，博士生导师. 主要研究方向：人工林多目标培育. E-mail：duanag@caf.ac.cn

对不同尺度上气候变化的响应存在很大的差异[8]。目前，针对气候响应研究的气候因子主要有平均气温[9]、降水[10]、相对湿度[11-12]、最高气温、最低气温[13]、最小相对湿度及日照时数[6]。有研究表明，树轮稳定碳同位素比树轮宽度指标对气候变化的响应更灵敏。在种源层面上，树木种源对环境的影响具有差异性，研究发现，不同种源的白刺（*Nitraria tangutorum* Bobr.）对不同梯度的水分响应存在较大的区别[14]；不同种源的落叶松（*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen.）对原产地环境条件的响应也出现差异[15]。不同种源树木树轮的早材、晚材、整轮宽度对年平均气温和年最高气温较敏感[16]。杉木（*Cunninghamia lancealata*（Lamb.）Hook.）是我国重要的乡土针叶用材树种[17]，其生长呈现明显的地理纬度变异，针对杉木树轮指标在种源层面上响应气候变化的研究相对较少，而将高灵敏度的树轮稳定碳同位素指标引入不同种源树木生长对气候变化响应的研究国内外未见报道。

鉴于此，本研究选择设置于广西柳州的 34 年生杉木种源试验林中的 30 个代表性地理种源，探讨其树轮 α 纤维素中稳定碳同位素与年际气候因子间的关系，以期筛选出关键气候因子，为未来气候变化条件下种源层面上区域杉木的培育提供科学支撑。

1 研究区自然概况

杉木种源试验林位于广西柳州六峰山林场，由中国林科院林业研究所主持，全国杉木地理种源试验协作组于 20 世纪 70 年代末开展的第 2 次杉木全分布区种源试验时期布设[18]。依据杉木产区的划分，其属于杉木的中心产区。试验林于 1981 年春季，采用 1 年实生苗造林。种源试验林所处林地较平坦，随机区组设计。造林行间距 2 m×2 m，每个小区 4 株，重复 10 次，进行了 1 次疏伐，至 2013 年秋季，杉木种源试验林保留密度为 1 261 株·hm^{-2}，平均胸径 20.14 cm，平均树高 13.45 m。试验林地处桂中丘陵地区 (23°42′ N，109°50′ E)，年平均气温 21.1℃，年降水量 1 418.5 mm，年蒸发量 1 969.1 mm，相对湿度 76%，全年日照时数 1 823.7 h。

2 研究材料与方法

2.1 树轮资料

结合种源林商业采伐，对所有种源保留单株在 20 cm 高度处截取了圆盘，考虑地理分布的代表性及圆盘数量大于 10 个，选取贵州六枝（GZl）、湖南双牌（HNs）以及福建永安（FJy）等 30 个地理种源各 11 个单株，合计 330 个单株进行分析，其中，中心产区 10 个种源，一般产区 5 个种源，边缘产区 15 个种源。平均胸径 20.33 cm，平均树高 13.57 m。应用 LignoStation 年轮分析仪对不同种源各单株圆盘进行扫描，分别以树木的南、北 2 个方向进行测量，应用年轮分析仪自带软件进行年轮界线的划分，并量测树轮自髓心往外各年轮宽度，后借助交叉定年软件 COFECHA 程序对所有定好年的序列作检验。

2.2 α-纤维素提取

将树轮圆盘放在干净的玻璃板上，选择向阳的方位[19]，在显微镜下用大头针标注经交叉定年的树轮。考虑到 δ^{13}C 值会受到幼龄效应的影响[20]，在取样时去除前 6 年的树轮。利用干净的刻刀进行树轮的逐年剥离，将同一种源的 11 个圆盘同一年的年轮样品剥取后混合在一起，放入高速离心球磨仪将样品粉碎至过 60 目筛（300 μm）。按照有机溶剂（苯:无水乙醇=2∶1，丙酮 180 mL）萃取、漂白（次氯酸钠∶乙酸=3∶2）及碱化（10% 与 17% 的氢氧化钠依次处理）等步骤提取 α-纤维素[21-22]。用真空冷冻干燥机（−45℃）进行冻干处理，采用快速核酸提取仪进行 α-纤维素粉末的混合。

2.3 碳稳定同位素（δ^{13}C）的测量

采用仪器 Thermo Finnigan DELTA plus XP 气象同位素质谱仪测量杉木全木以及 α-纤维素的 δ^{13}C 的值，该过程在植被与变化国家重点实验室完成。用百万分之一天平（Starorius）称量粉末 α-纤维素（0.20±0.05）mg，用锡囊将样品包裹，卷好密封后上机测试，得到 ^{13}C/^{12}C 值（相对 VPDB 标准），即 δ^{13}C。整个碳同位素（δ^{13}C）测量精度≤0.15‰。

$$\delta^{13}\mathrm{C} = (R_{sample}/R_{standard} - 1) \times 1\,000$$

式中：R_{sample} 表示样品中的重轻同位素峰度之比，$R_{standard}$ 是国际通用标准的重轻同位素峰度之比[23]。

2.4 气候数据来源

本实验采用广西来宾气象站点的数据（图 1），该站点距离种源试验林场 100 km，中间无高山阻

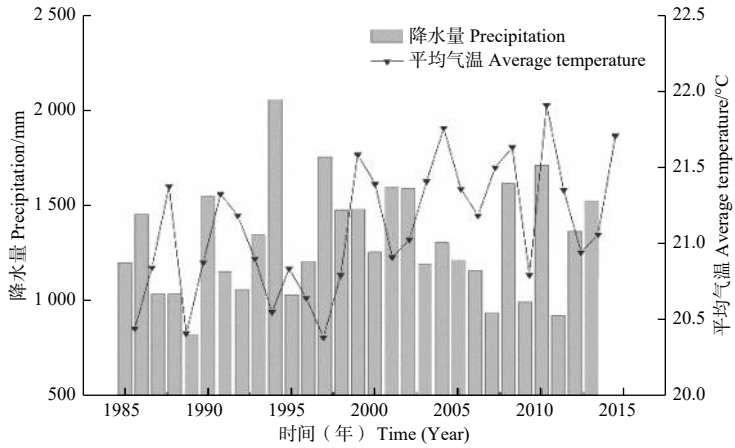


图 1　广西来宾气象站月平均温度与总降水量变化 (1985—2013)

Fig. 1　The change trend of the mean temperature and year total precipitation of each month of the climate station of Laibin, Guangxi (1985—2013)

隔。所用气象资料包括 1985—2013 年的年平均气温（T）、年最高气温（T_a）、年最低气温（T_i）、年降水量（P），年平均相对湿度（RH）、年最小相对湿度（RH_i）和日照时数（S）（气候资料来源于国家气象信息中心来宾气象站点的数据）。经检验，来宾站点气象数据可靠，无明显突变，该站点气候数据代表了当地气候变化趋势。

3　结果与分析

3.1　不同种源杉木 $\delta^{13}C$ 的统计特征

对 30 个种源交叉定年后，选用去除大气 CO_2 浓度的年表作为后续分析年表，年表统计特征包括各种源树轮 $\delta^{13}C$ 的最小值、最大值、平均值、标准差、一阶自相关系数、二阶自相关系数及平均敏感度。

从杉木树轮 α-纤维素 $\delta^{13}C$ 的测定结果可知：1987—2013 年杉木树轮 $\delta^{13}C$ 的变幅为−20.997‰ ~ −25.910‰（表 1）。$\delta^{13}C$ 序列随时间呈波动变化，所有种源的 $\delta^{13}C$ 平均值达−24.022‰，标准差变幅为 0.24‰ ~ 0.47‰。总体上，不同种源树轮样品 $\delta^{13}C$ 均值比较离散，为基于树轮稳定碳同位素探讨不同种源对气候变化的响应提供了必要条件。

通过对不同地理种源杉木年轮 α-纤维素 $\delta^{13}C$ 序列进行自相关分析（表 1）发现：不同地理种源杉木的一阶、二阶自相关系数较大，一阶自相关系数为 0.181 ~ 0.866，而二阶自相关系数为 0.044 ~ 0.749，且大部分种源的一阶和二阶自相关系数超过 0.4。由此可以说明，大部分种源杉木树轮 α-纤维素中 $\delta^{13}C$ 值在响应气候变化时存在明显“滞后效应”，故选择当年、前 1 年、前 2 年的气候因子进行相关分析。

3.2　不同种源杉木树轮 $\delta^{13}C$ 值与气候因子相关性分析

3.2.1　杉木树轮 $\delta^{13}C$ 与年气象因子的相关分析

从图 2 可看出：大部分杉木种源树轮 α-纤维素中 $\delta^{13}C$ 与年平均气温、年最高气温、年最低气温呈显著正相关，与年平均相对湿度、年最小相对湿度呈显著负相关，而与年降水、日照时数及湿润度指数不显著相关。这是因为树轮 α 纤维素中 $\delta^{13}C$ 的累积主要通过植物的光合作用进行，而温度的升高，有利于光合作用过程中酶活性的提高，能更有效的吸收大气中的 CO_2，有效促进光合作用，从而使树轮稳定碳同位素可以更灵敏的响应气候的变化。杉木生长需要的湿度相对较大，当植物叶片处于干燥的环境时，水分的减少导致气孔导度降低，限制了叶片中 CO_2 的供给，从而树轮 α 纤维素中 $\delta^{13}C$ 增大，致使树轮稳定碳同位素可以更灵敏的响应气候的变化。

不同产区杉木树轮的 $\delta^{13}C$ 对气候因子的响应灵敏程度存在差异。图 2 表明：对于湖南安化、福建南平、福建崇安、广西三江、广东乐昌、广西融水、湖南祁阳、江西遂川、湖南双牌、广东始兴等杉木种源而言，不同种源树轮的 $\delta^{13}C$ 与当年的最小相对湿度和前 2 年的平均温度、最低气温、最高气温及平均相对湿度的相关系数较高，其中，与前 2 年的平均相对湿度呈显著负相关（$p<0.05$），与当年的最小相对湿度呈极显著负相关（$p<0.01$）。对于四川汶川、浙江龙泉、江西修水、四川古蔺、

表 1 1987—2013 年不同种源杉木树轮稳定碳同位素（$\delta^{13}C$）序列的基本统计特征

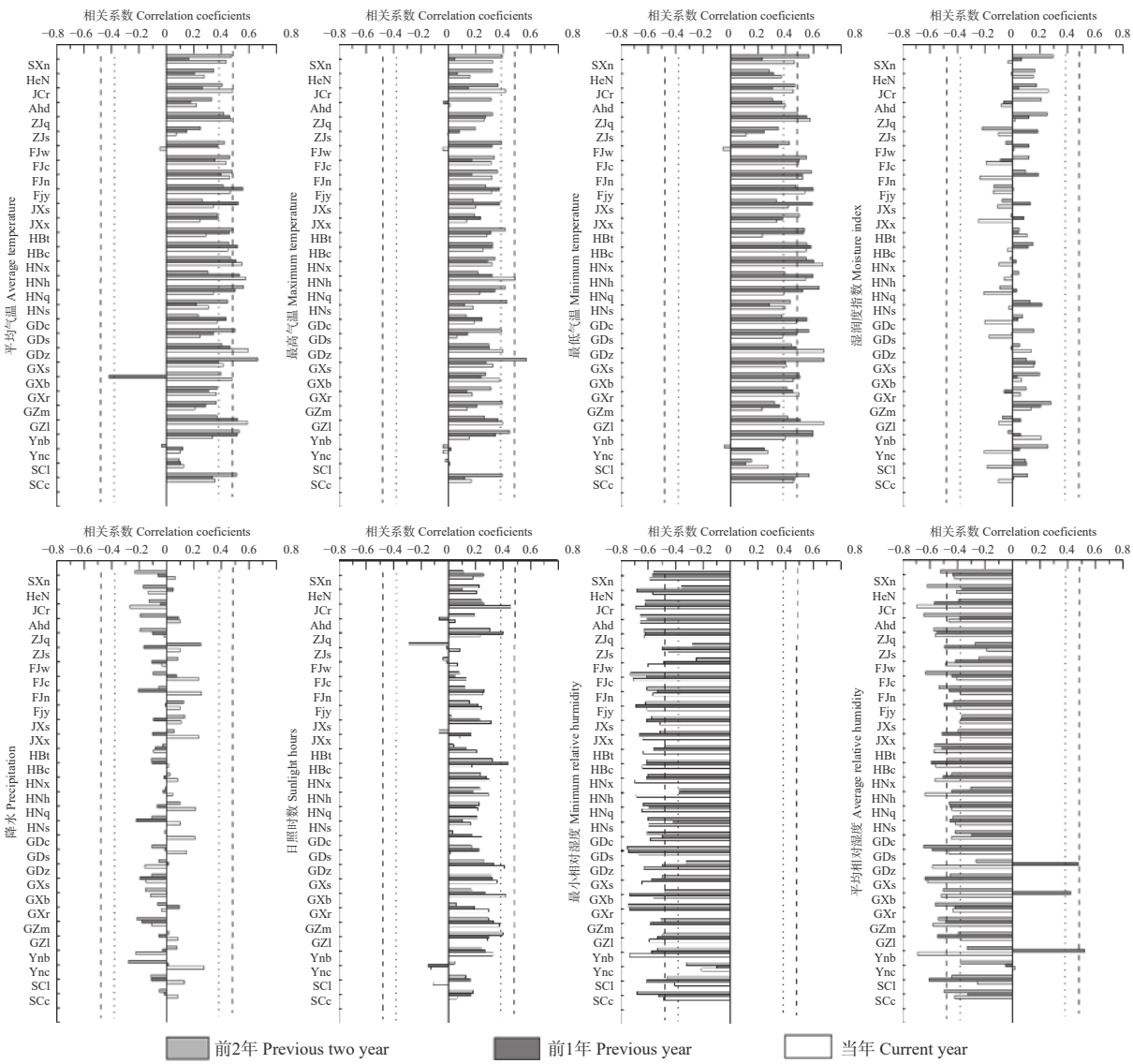
Table 1 Basic statistical characteristics of stable carbon isotope sequences of different tree provenances in China from 1987 to 2013

种源 Provenance	编号 No.	最小值 Minimum /‰	最大值 Maximum /‰	平均值 Average /‰	标准差 Standard deviation/‰	一阶自相关系数 First order autocorrelation coefficient	二阶自相关系数 Second order autocorrelation coefficient	平均敏感度 Sensitivity of standard chronology
广西三江	GXs	−24.290	−22.899	−23.787	0.36	0.743	0.583	0.037
广西融水	GXr	−25.208	−23.374	−23.665	0.40	0.786	0.704	0.036
广东乐昌	GDc	−24.157	−23.029	−24.095	0.28	0.667	0.489	0.037
福建南平	FJn	−24.391	−23.240	−24.096	0.30	0.780	0.503	0.036
福建崇安	FJc	−24.406	−22.830	−24.025	0.41	0.714	0.620	0.036
湖南安化	HNh	−24.545	−23.271	−24.141	0.28	0.511	0.252	0.037
湖南祁阳	HNq	−24.402	−23.335	−24.083	0.28	0.572	0.657	0.037
湖南双牌	HNs	−24.419	−22.651	−24.173	0.41	0.521	0.471	0.036
江西遂川	JXs	−24.385	−23.305	−24.062	0.24	0.583	0.546	0.037
广东始兴	GDs	−24.207	−23.110	−23.812	0.32	0.635	0.580	0.036
四川古蔺	SCl	−24.656	−23.417	−24.253	0.28	0.234	0.191	0.038
四川汶川	SCc	−24.693	−23.165	−24.183	0.40	0.545	0.554	0.036
云南西畴	Ync	−24.791	−23.311	−24.093	0.37	0.291	0.044	0.037
江西修水	JXx	−24.994	−23.527	−24.144	0.35	0.589	0.386	0.037
浙江龙泉	ZJq	−24.847	−23.884	−23.982	0.28	0.834	0.662	0.037
湖南新宁	HNx	−24.757	−23.378	−24.142	0.39	0.866	0.748	0.036
广东紫金	GDz	−24.804	−23.518	−23.981	0.30	0.705	0.567	0.038
福建永安	FJy	−25.597	−23.682	−24.070	0.47	0.808	0.749	0.037
河南商城	HeN	−25.910	−22.541	−24.253	0.47	0.500	0.561	0.037
湖北谷城	HBc	−24.106	−22.553	−24.139	0.40	0.755	0.623	0.036
贵州麻江	GZm	−25.266	−23.833	−23.750	0.36	0.667	0.522	0.037
江苏句容	JCr	−25.238	−22.020	−24.183	0.28	0.538	0.478	0.038
云南屏边	Ynb	−24.985	−24.018	−23.932	0.28	0.676	0.515	0.037
湖北罗田	HBt	−24.523	−23.360	−24.049	0.28	0.480	0.524	0.037
安徽东至	Ahd	−24.780	−20.997	−23.984	0.35	0.574	0.394	0.036
浙江丽水	ZJs	−25.002	−23.272	−24.033	0.45	0.181	0.115	0.037
贵州六枝	GZl	−24.764	−23.562	−24.057	0.24	0.692	0.657	0.038
广西博白	GXb	−24.418	−22.637	−23.942	0.46	0.394	0.459	0.037
福建武平	FJw	−24.903	−22.734	−23.920	0.45	0.452	0.324	0.037
陕西南郑	SXn	−25.878	−22.614	−24.093	0.42	0.639	0.415	0.036

云南西畴等杉木种源而言，不同种源树轮 $\delta^{13}C$ 与当年的最低气温、前 1 年的最小相对湿度、平均气温及前 2 年的平均相对湿度、最高气温的相关系数较高，其中，与前 1 年最小相对湿度呈极显著负相关（$p<0.01$），与当年的平均相对湿度呈显著负相关（$p<0.05$）；而广东紫金、贵州六枝、湖南新宁、江苏句容、广西博白、福建永安、湖北谷城、陕西南郑、云南屏边、湖北罗田、河南商城、安徽东至、贵州麻江、浙江丽水、福建武平的杉木种源，不同种源树轮 $\delta^{13}C$ 值与当年的最小相对湿度、平均相对湿度和前 2 年的平均气温、最低气温、最高气温的相关系数较大，其中，与当年的最小相对湿度和平均相对湿度呈极显著负相关（$p<0.01$），且与当年的最小相对湿度相关系数较

大。不同产区原产地的气候、地貌、土壤等立地条件均不相同，由于受到不同因素的影响，不同杉木种源的遗传基础出现差异，当将其引种到同一气候条件下进行栽培时，这种差异性导致了不同种源对栽植地气候因子的差异性响应。

不同地理种源杉木树轮的 $\delta^{13}C$ 与当年降水呈不显著相关（图 2）。种源 FJw 与当年最低气温呈现出负相关性，而大多数种源与当年、前 1 年及前 2 年最低气温呈显著或极显著正相关，相关系数最大达 0.677（$p<0.01$）。对最小相对湿度的相关性分析中发现，除种源 Ync 相关性不显著外，其余种源均与当年、前 1 年及前 2 年最小相对湿度呈显著或极显著负相关，相关系数最大达−0.744（$p<0.01$）。与日照时数的相关性分析中发现，仅少数种源与当年、前 1 年及前 2 年呈显著正相关，相关系数最大达 0.457（$p<0.01$）。不同地理种源杉木树轮 $\delta^{13}C$ 与平均气温的相关性分析中发现（图 2），大部分种源与当年、前 1 年及前 2 年呈显著或极显著正相关，而种源 GXb 与平均气温呈显著负相关，相关系数可达-0.418（$p<0.05$）。多数种源与当年、前 1 年及前 2 年平均相对湿度呈显著或极显著负相关，而种源 GDz、GXs及 Ynb 与前 1 年呈显著或极显著正相关。不同地理种源杉木树轮 $\delta^{13}C$ 与前 2 年最高气温的相关性分析中发现



注：图中 …… 表示差异显著 ($p<0.05$)，------表示差异极显著 ($p<0.01$)。

Notes: …… mean significant at the 0.05 level, ------ mean significant at the 0.01 level.

图 2　杉木树轮 $\delta^{13}C$ 与年际气候因子相关分析

Fig. 2　Correlation analysis between $\delta^{13}C$ and annual climatic factors of fir tree rings

（图 2），种源 GXs 与其呈现极显著正相关，相关系数 0.569（p<0.01），种源 SXn、FJw、HBt、HNq、HNs、GDs、GZm、Ynb、SCc 与最高气温呈现出显著的正相关关系，相关系数可达 0.447（p<0.05）。

3.2.2 不同地理种源杉木树轮 δ^{13}C 与当年气候因子相关性随经纬度的变化 从杉木地理种源树轮 δ^{13}C 与当年气候因子相关性随经度的变化趋势（图 3）可知：杉木种源树轮 δ^{13}C 与年降水的相关性受经度影响较小（r=0.028），与年平均气温、最低气温、最高气温、日照时数的相关性随经度的增加总体上呈先增强后减弱的变化规律，且在 110 ~ 115°E 间正相关性最强。杉木种源树轮 δ^{13}C 与平均相对湿度及最小相对湿度的负相关性随经度的增大总体呈先增强后减弱的趋势，且在 110 ~ 115° E 间呈现最强负相关性，δ^{13}C 与最小相对湿度的负相关性随经度的这种先增强后减弱的变动趋势可由二次多项式描述，且达显著水平（r=−0.462）。从稳定碳同位素与各年际气候因子的相关系数随纬度的变化趋势图（图 3）可以发现，杉木种源树轮 δ^{13}C 与年降水量的相关系数受种源所处纬度的影响较大，随纬度的增加呈先上升后下降的显著变化趋势（r=0.434），而不同种源树轮 δ^{13}C 与年平均气温、最低气温、最高气温、平均相对湿度、日照时数、最小相对湿度的相关关系则受纬度影响较小。

3.3 不同种源杉木树轮 α-纤维素中 δ^{13}C 与气候因子的多元回归分析

为了更深入地了解气候因子对不同种源杉木树轮 δ^{13}C 的影响情况，以树轮 α 纤维素 δ^{13}C 为因变

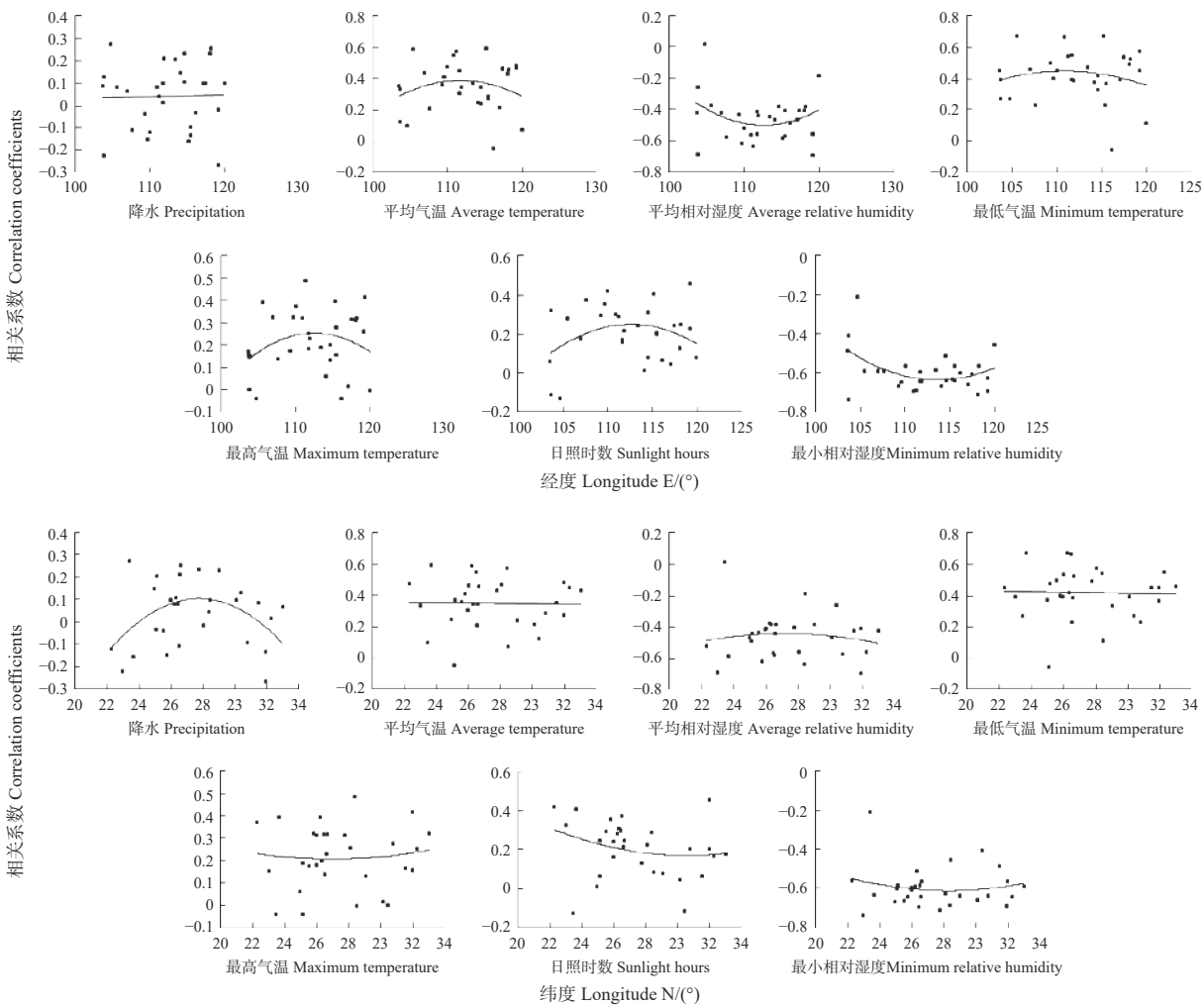


图 3 δ^{13}C 与当年各年际气候因子的相关系数随着经（纬）度的变化散点图

Fig. 3 Scatter diagram of correlation coefficients between the δ^{13}C value and inter-annual climate factors along with longitude and latitude of provenances

量，自变量选取相关性较强的当年最小相对湿度（X_1）及前 2 年的平均气温（X_2）、最低气温（X_3）、最高气温（X_4）和平均相对湿度（X_5），回归方法选择逐步回归法，置信度<0.05，输出结果见表 2。

从表中 2 中 α-纤维素 $\delta^{13}C$ 序列的逐步回归分析可知：在剔除了对 α-纤维素中 $\delta^{13}C$ 序列影响不显著的因子后，HNh、FJc、GXs、GDc、GXr、HNq、JXs、HNs、GDs、ZJq、JXx、GDz、GZl、HNx、JCr、FJy、HBc、SXn、Ynb、HBt、HeN、Ahd、GZm、ZJs、FJw 等 25 个种源树轮 α-纤维素 $\delta^{13}C$ 序列受气候因子当年最小相对湿度影响显著，

表 2　$\delta^{13}C$ 与年值气候因子多元回归分析模型

Table 2　Multiple regression analysis model between $\delta^{13}C$ values and yearly climate factors

种源 Provenance	回归方程 Regression Equation	校正R^2 Multiple R^2	标准估计的误差 Standard estimate error	P
HNh	$y=-13.203-8.001X_1$	0.449	0.325	0.000
FJn	$y=-19.370+0.556X_3-8.287X_5$	0.457	0.372	0.000
FJc	$y=-3.912-9.666X_1-11.060X_5$	0.627	0.403	0.000
GXs	$y=-24.243+0.589X_3-5.738X_1$	0.526	0.381	0.000
GDc	$y=-13.071-7.487X_1$	0.315	0.398	0.001
GXr	$y=-5.925-9.204X_1-9.309X_5$	0.517	0.453	0.000
HNq	$y=-22.641-5.643X_1+0.487X_3$	0.492	0.365	0.000
JXs	$y=-13.873-6.131X_1$	0.234	0.392	0.006
HNs	$y=-12.335-9.568X_1$	0.331	0.492	0.001
GDs	$y=-5.553-7.219X_1-10.052X_5$	0.594	0.351	0.002
SCc	$y=-20.888+0.664X_3-9.072X_5$	0.410	0.468	0.001
ZJq	$y=-8.027-6.541X_1-8.035X_5$	0.482	0.371	0.000
JXx	$y=-13.051-8.976X_1$	0.383	0.415	0.000
SCl	$y=-11.663-5.727X_5$	0.162	0.299	0.021
Ync	$y=-11.116-6.520X_5$	0.124	0.386	0.040
GDz	$y=-13.444-7.968X_1$	0.375	0.374	0.000
GZl	$y=-13.931-6.323X_1$	0.325	0.329	0.001
HNx	$y=-11.909-12.514X_1$	0.464	0.494	0.000
JCr	$y=-13.754-7.651X_1$	0.458	0.306	0.000
GXb	$y=-12.257-9.575X_2$	0.289	0.539	0.002
FJy	$y=-12.475-11.825X_1$	0.343	0.593	0.001
HBc	$y=-11.677-11.175X_1$	0.389	0.510	0.000
SXn	$y=-7.500-7.479X_1-8.622X_5$	0.407	0.474	0.001
Ynb	$y=-13.135-9.909X_1$	0.521	0.350	0.000
HBt	$y=-8.853-5.838X_1-6.735X_5$	0.489	0.318	0.000
HeN	$y=-4.711-12.392X_5-6.759X_1$	0.471	0.478	0.000
Ahd	$y=-5.969-7.017X_1-9.963X_5$	0.581	0.353	0.000
GZm	$y=-8.712-5.930X_1-7.279X_5$	0.417	0.377	0.001
ZJs	$y=-13.965-5.877X_1$	0.176	0.439	0.017
FJw	$y=-12.554-8.85X_1$	0.335	0.451	0.001

注：X_1表示当年最小相对湿度，X_2表示前2年平均气温，X_3表示前2年最低气温，X_4表示前2年最高气温，X_5表示前2年平均相对湿度。

Notes: X_1, X_2, X_3, X_4, X_5 represent the minimum relative humidity of the year, the average temperature of previous two years, the minimum temperature of previous two years, the maximum temperature of previous two years, the average relative humidity of previous two years.

其中，部分种源同时受到前 2 年平均相对湿度或前 2 年最低气温的显著影响，R^2 处于 0.176 ~ 0.627 之间，说明以当年最小相对湿度为主的气候因子对杉木不同地理种源树轮 α-纤维素中 $\delta^{13}C$ 序列的贡献量为 17.6% ~ 62.7%；而福建南平（FJn）和四川汶川（SCc）种源均分别与前 2 年的最低气温和平均相对湿度呈显著正线性及负线性相关，广西博白（GXb）种源与前 2 年平均气温呈显著负线性相关，云南西畴（Ync）、四川古蔺（SCl）种源与前 2 年平均相对湿度具显著负线性相关关系。

4 讨论

不同种源杉木（1987—2013）树轮 α 纤维素中稳定碳同位素（$\delta^{13}C$）的变幅为 −20.997‰ ~ −25.910‰，且表现出较强的一阶自相关，相关系数为 0.181 ~ 0.866，表明广西柳州不同种源杉木树轮 $\delta^{13}C$ 的年际变化相对稳定，能较好的呈现环境的变化，这与靳翔等[9] 对岷江冷杉树轮 $\delta^{13}C$ 变幅及年际变化的研究结果相一致。

本研究发现，大部分杉木种源 $\delta^{13}C$ 与年平均气温、最高气温、最低气温呈显著正相关，与最小相对湿度、平均相对湿度呈极显著负相关，而与年日照总时数呈不显著正相关。杉木不同种源树轮 $\delta^{13}C$ 与气候因子的这种正负相关性与对亚热带树种猴面包树[24] 及亚高山暗针叶林[25] 的研究相似。

研究还发现，不同种源的杉木对气候因子响应的灵敏度不同，可见，影响树轮中 $\delta^{13}C$值的因素并不单一，是多个因子的综合效应[26]。树轮 α 纤维素中 $\delta^{13}C$ 值与叶片气孔导度及环境温度相关[13]，而叶片是通过感知环境中水分多少来调节气孔导度，当叶片处于相对干燥的环境中，水分的减少导致气孔导度降低，限制了叶片 CO_2 的供给，最终导致树轮中 $\delta^{13}C$ 值增大[27]。温度是影响 CO_2 分馏的主要条件，当温度低于平均温度，且二者之间差值较大时，将会影响树轮中碳的固定[28]。通过对杉木树轮中 $\delta^{13}C$ 值与当年、前 1 年、前 2 年气候因子相关性的分析可以看出，17 个种源对前 2 年平均气温、15 个种源与前 2 年最低气温、21 个种源与前 2 年最高气温以及 11 个种源与前 2 年的平均相对湿度相关系数较大，而 14 个种源与当年最小相对湿度呈显著负相关性，除了广东紫金、贵州六枝和湖南新宁的 3 个种源树轮 $\delta^{13}C$ 值对气候因子的响应是即时效应外，其余的种源对气候因子的响应均存滞后效应。由此可以看出，各气候因子对杉木树轮中稳定碳同位素的影响是长期积累的结果，这与在低海拔地区树轮稳定碳同位素对年气候因子的响应出现明显滞后效应的结论一致[29]。

通过对相关系数较高的气候因子进行逐步回归分析，发现除了福建南平（FJn）种源与前 2 年的最低气温和平均相对湿度呈线性关系，广西博白（GXb）种源与前 2 年平均气温呈线性关系，云南西畴（Ync）、四川古蔺（SCl）种源与前 2 年平均相对湿度呈线性关系外，其余 26 个种源杉木树轮 α 纤维素中 $\delta^{13}C$ 值随当年最小相对湿度的增大而出现减小的趋势。因此，当年最小相对湿度可以作为影响杉木树轮 α 纤维素中 $\delta^{13}C$ 的主导气候因子。在湿度较大的环境中，杉木往往生长较好，其有机物的分馏作用越强，导致树轮中 $\delta^{13}C$ 减小[28]。

5 结论

中亚热带柳州地区不同地理种源杉木树轮 α-纤维素中 $\delta^{13}C$ 对同一气候因子的响应方向基本一致，大部分种源树轮 $\delta^{13}C$ 与平均相对湿度和最小相对湿度呈负相关，与平均气温、最高气温和最低气温呈显著正相关，与日照时数、降水和湿润度指数的相关性不大，且有 90% 的杉木种源树轮 $\delta^{13}C$ 对气候的响应存在明显滞后效应。不同地理种源杉木树轮 α-纤维素中 $\delta^{13}C$ 对最小相对湿度这一气候因子的响应较灵敏，从生物学基础上阐明了树轮稳定碳同位素的固定、分馏受到生长环境中最小相对湿度的影响较大，而对年降水量多少的依赖性较小。研究结果有效的填补了种源层面上树轮稳定碳同位素对气候响应研究的不足，也为未来气候变化条件下杉木人工林健康培育提供了依据。

参考文献：

［1］ 王明庥. 林木遗传育种学［M］. 北京: 中国林业出版社, 2001.

［2］ 李锡泉, 罗东湖. 马褂木属地理种源试验苗期初步研究［J］. 湖南林业科技, 1997，24(1)：4-7.

［3］ 欧建德. 观赏型南方红豆杉地理种源试验及优良地理种源的选择初步研究［J］. 西北林学院学报, 2012, 27(4)：134-140.

［4］ BSc N H. The role of plant provenance in restoration ecology under climate change［M］. Macquarie University: Department of Biological Sciences, Faculty of Science, 2012.

［5］ 叶晓霞, 徐肇友, 王帮顺, 等. 不同枫香种源造林实验及优良种源选择［J］. 浙江林业科技, 2013, 33(2)：71-74.

[6] Mátyás C, Božic G, Gömöry D, *et al*. Transfer analysis of provenance trials reveals macroclimatic adaptedness of European Beech (*Fagus sylvatica* L.)[J]. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica, 2009, 5: 47-62.

[7] Kóczán-Horváth A. Beech adaptation to climate change according to provenance trials in Europe[M]. Sopron: University of west Hungary faculty of forestry, 2016.

[8] Rohner B, Weber P, Thürig E. Bridging tree rings and forest inventories: How climate effects on spruce and beech growth aggregate over time[J]. Forest Ecology & Management, 2016, 360: 159-169.

[9] 靳　翔, 徐　庆, 刘世荣, 等. 川西亚高山森林岷江冷杉树轮碳稳定同位素对气候要素的响应[J]. 林业科学, 2013, 49(7)：10-15.

[10] Fang K, Makkonen R, Guo Z, *et al*. An increase in the biogenic aerosol concentration as a contributing factor to the recent wetting trend in Tibetan Plateau[J]. Scientific Reports, 2015, 5(5): 14628.

[11] Robertson I, Switsur V R, Carter A H C, *et al*. Signal strength and climate relationships in $^{13}C/^{12}C$ ratios of tree ring cellulose from oak in east England[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102(D16): 1487-1490.

[12] Liu Y, Ta W, Li Q, *et al*. Tree-ring stable carbon isotope-based April-June relative humidity reconstruction since ad 1648 in Mt. Tianmu, China[J]. Climate Dynamics, 2017, 50(5): 1-13.

[13] Naulier M, Savard M M, Bégin C, *et al*. A millennial summer temperature reconstruction for northeastern Canada using oxygen isotopes in subfossil trees[J]. Climate of the Past Discussions, 2015, 11(1): 521-553.

[14] 李清河, 张景波, 李慧卿, 等. 不同种源白刺幼苗生理生长对水分梯度的响应差[J]. 林业科学, 2008, 44(1)：52-56.

[15] 全先奎, 王传宽. 帽儿山17个种源落叶松针叶的水分利用效率比较[J]. 植物生态学报, 2015, 39(4)：352-361.

[16] 朱安明. 杉木不同地理种源树轮对气候变化的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.

[17] 吴中伦. 杉木[M]. 北京: 中国林业出版社, 1984.

[18] 全国杉木种源试验协作组. 杉木造林优良种源选择[J]. 林业科学研究, 1994, 7(专刊)：1-25.

[19] 王　建, 钱君龙, 梁　中, 等. 树轮稳定碳同位素分析的采样方法——以天目山柳杉为例[J]. 生态学报, 2008, 28(12)：6070-6078.

[20] Francey R J, Farquhar G D. An explanation of $^{13}C/^{12}C$ variations in tree rings[J]. Nature, 1982, 297(5861): 28-31.

[21] 刘晓宏, 刘　禹, 徐国保, 等. 树木年轮稳定同位素分析样品前处理方法探讨[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6)：1242-1250.

[22] Schollaen K, Baschek H, Heinrich I, *et al*. Technical Note: An improved guideline for rapid and precise sample preparation of tree-ring stable isotope analysis[J]. Biogeosciences Discussions, 2015, 12(14): 11587-11623.

[23] Coplen T B. Discontinuance of SMOW and PDB[J]. Nature, 1995, 375(6529): 285.

[24] Woodborne S, Hall G, Robertson I, *et al*. A 1000-year carbon isotope rainfall proxy record from South African baobab trees (*Adansonia digitata* L.)[J]. Plos One, 2015, 10(5): e0124202.

[25] Xu Q, Li H, Chen J, *et al*. Water use patterns of three species in subalpine forest, Southwest China: the deuterium isotope approach[J]. Ecohydrology, 2011, 4(2): 236-244.

[26] Young G H F, Demmler J C, Gunnarson B E, *et al*. Age trends in tree ring growth and isotopic archives: A case study of *Pinus sylvestris* L. from northwestern Norway[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2011, 25(2): 2020-2025.

[27] Brugnoli E, Hubick K T, Von S C, *et al*. Correlation between the carbon isotope discrimination in leaf starch and sugars of C_3 plants and the ratio of intercellular and atmospheric partial pressures of carbon dioxide[J]. Plant Physiology, 1988, 88(4): 1418-1424.

[28] Mccarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(7): 771-801.

[29] Jinchun Z, Tuo Y, Changzhong L, *et al*. Climate environmental change and stable carbon isotopes in age layers of Tamarix sand-hillocks in Kumtag desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 943-952.

Responses of δ^{13}C Value of Cellulose in Tree Ring of Chinese Fir Provenances to Annual Climate Factors

LIU Xiao-ying[1], *DUAN Ai-guo*[1,2], *ZHANG Jian-guo*[1,2], *ZHANG Xiong-qing*[1], *ZHU An-ming*[3]

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu. China; 3. Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [**Objective**] Trying to explain the response of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) provenances to various climatic factors by analyzing the correlation between stable carbon isotope value in the cellulose of Chinese fir and the climatic factors. [**Method**] The δ^{13}C value of cellulose of 30 provenances was extracted and measured from the experimental forest farm of Chinese fir in Liuzhou, Guangxi. The δ^{13}C value, the tree ring, the precipitation, the mean temperature, the minimum air temperature, the maximum air temperature, the mean relative humidity, the minimum relative humidity, the sunshine hours and the humidity index in the current year, the first year and the first two years were analyzed. [**Result**] The variation range of δ^{13}C value of tree ring of different Chinese fir provenances during 1987—2013 was -20.997‰ – -25.910‰, showing strong first-order autocorrelation, the correlation coefficient was 0.181-0.866. The δ^{13}C value of tree ring of different Chinese fir provenances was significantly and positively correlated with the mean temperature, the maximum temperature and the minimum temperature (p<0.05), and positively correlated with sunshine hours. There was a significantly negative correlation between the δ^{13}C value and the mean and minimum relative humidity (p<0.01), but no obvious correlation with the precipitation and wetness index. The results of stepwise regression analysis showed that 26 out of the 30 Chinese fir provenances had linear relationship with the minimum relative humidity of the current year. [**Conclusion**] The minimum relative humidity is the dominant climatic factor affecting the δ^{13}C value of cellulose in the tree ring of Chinese fir provenances, which has little dependence on the precipitation. The response of δ^{13}C in Chinese fir tree ring to climate factors has obvious lag effect. The study may provide reference for the cultivation and management of Chinese fir.

Keywords: *Cunninghamia lancealata*; provenance; tree-ring; α-cellulose; δ^{13}C value; climatic factor

（责任编辑：徐玉秀）