

# 马尾松年轮稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ ) 变化特征及影响因子分析

张 振<sup>1</sup>, 金国庆<sup>1,①</sup>, 丰忠平<sup>2</sup>, 孙林山<sup>3</sup>, 周志春<sup>1</sup>

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所 浙江省林木育种技术研究重点实验室 国家林业局马尾松工程技术研究中心, 浙江 杭州 311400;  
2. 淳安县姥山林场, 浙江 淳安 311700; 3. 湖北省太子山林场管理局, 湖北 京山 431822)

**摘要:**以浙江省淳安县姥山林场(S1)和湖北省太子山林场管理局石龙林场(S2)2个试验点内10个相同种源的马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)植株为研究对象,对其长期生长过程中年轮宽度、早材宽度、晚材宽度和年轮稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ )的变化以及年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的种源间差异进行了比较,并对年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响因子进行了分析。结果表明:随着年轮增长,2个试验点马尾松的年轮宽度总体上先降低后略升高;S1试验点的早材和晚材宽度均先降低后略升高,而S2试验点的早材和晚材宽度则缓慢降低;2个试验点马尾松的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈“升高—降低—升高—降低”的趋势。S1和S2试验点各年轮段 $\delta^{13}\text{C}$ 值的均值分别为 $-26.48\text{‰}$ ~ $-25.19\text{‰}$ 和 $-25.71\text{‰}$ ~ $-25.05\text{‰}$ ,且S2试验点各年轮段 $\delta^{13}\text{C}$ 值的均值高于S1试验点。方差分析结果表明:马尾松各年轮段 $\delta^{13}\text{C}$ 值的均值在种源间差异极显著( $P<0.01$ );总体上看,高纬度地区种源各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值依次高于中纬度和低纬度地区种源。相关性分析结果表明:2个试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与种源地的纬度和干燥度指数呈显著( $P<0.05$ )正相关,与种源地的年均温、年降水量、5月至9月降水量和 $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 年积温以及种源地和试验点间纬度差值呈显著负相关,与年轮宽度和早材宽度呈显著或极显著负相关,与晚材宽度呈不显著负相关。研究结果显示:马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在种源间变异丰富,这是其对种源地环境长期适应的结果;立地环境和径向生长对马尾松固碳过程中碳同位素的分馏有一定影响。

**关键词:** 马尾松; 年轮; 稳定碳同位素比率; 种源; 相关性分析

中图分类号: Q945.3; S791.248 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2019)04-0024-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2019.04.03

**Analyses on variation characteristics and influence factors of ring stable carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of *Pinus massoniana*** ZHANG Zhen<sup>1</sup>, JIN Guoqing<sup>1,①</sup>, FENG Zhongping<sup>2</sup>, SUN Linshan<sup>3</sup>, ZHOU Zhichun<sup>1</sup> (1. Key Laboratory of Tree Breeding of Zhejiang Province, Engineering Research Center of Masson Pine of State Forestry Administration, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; 2. Laoshan Forest Farm of Chun'an County, Chun'an 311700, China; 3. Taizishan Forest Farm Administration of Hubei Province, Jingshan 431822, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2019, 28(4): 24-31

**Abstract:** Taking plants of *Pinus massoniana* Lamb. from ten identical provenances in two test sites of Laoshan Forest Farm in Chun'an County of Zhejiang Province (S1) and Shilong Forest Farm in Taizishan Forest Farm Administration of Hubei Province (S2) as research objects, the variations of ring width, early wood width, late wood width and ring stable carbon isotope ratio ( $\delta^{13}\text{C}$ ) value during its long-term growth process and the differences in ring  $\delta^{13}\text{C}$  value among provenances were compared, and the factors affecting ring  $\delta^{13}\text{C}$  value were analyzed. The results show that with the increase of ring, ring width of *P. massoniana* in two test sites firstly decreases and then increases slightly in general; early and late wood widths in S1 test site both firstly decrease and then increase slightly, while those in S2 test site

收稿日期: 2019-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31600533); “十三五”浙江省林木育种专项(2016C02056-4)

作者简介: 张 振(1986—),男,山东菏泽人,博士,助理研究员,主要从事林木遗传改良研究。

①通信作者 E-mail: jgqin@163.com

decrease slowly; ring  $\delta^{13}\text{C}$  value of *P. massoniana* in two test sites shows a tendency of “increase–decrease–increase–decrease”. The means of  $\delta^{13}\text{C}$  value of different ring segments in S1 and S2 test sites are  $-26.48\text{‰}$  –  $-25.19\text{‰}$  and  $-25.71\text{‰}$  –  $-25.05\text{‰}$ , respectively, and the mean of  $\delta^{13}\text{C}$  value of different ring segments in S2 test site is higher than that in S1 test site. The variance analysis result shows that there are extremely significant ( $P < 0.01$ ) differences in means of  $\delta^{13}\text{C}$  value of different ring segments of *P. massoniana* among provenances; overall,  $\delta^{13}\text{C}$  value of different ring segments from provenances in high latitude area is successively higher than that from provenances in middle and low latitude areas. The correlation analysis result shows that ring  $\delta^{13}\text{C}$  value of *P. massoniana* in two test sites shows significant ( $P < 0.05$ ) positive correlations with latitude and aridity index of provenance locality, significant negative correlations with annual mean temperature, annual precipitation, precipitation from May to September and  $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$  annual accumulated temperature and latitude difference between provenance locality and test site, significant or extremely significant negative correlations with ring width and early wood width, and insignificant negative correlation with late wood width. It is suggested that the variation of ring  $\delta^{13}\text{C}$  value of *P. massoniana* among different provenances is rich, which is a result of long-term adaption to environment of provenance locality. Site environment and radial growth both have some effects on fractionation of carbon isotope during nitrogen fixation process of *P. massoniana*.

**Key words:** *Pinus massoniana* Lamb.; ring; stable carbon isotope ratio; provenance; correlation analysis

树木年轮变化是其自身遗传特性与生长环境综合作用的结果。纤维素不会在树木的年轮间发生转移,其在年内及年际间的变化信息均被保存在年轮中。稳定碳同位素比率( $\delta^{13}\text{C}$ )能够反映树木长期生长的变化规律<sup>[1-2]</sup>,树木年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在年内或年际间变化显著<sup>[3-4]</sup>,且这种变化可能由树木生长条件差异或木材形成过程中光合产物利用差异所致<sup>[5-6]</sup>。生长条件既影响树木生长又影响树木光合作用过程中碳同位素的分馏,因此,年轮碳同位素组成与年轮宽度存在一定的相关关系<sup>[7-8]</sup>。已有研究<sup>[9-12]</sup>表明:不同阶段树木年轮的生长发育特性存在明显差异,并且,林木径向变异规律研究已经从树种或个体的年轮间转变为年轮内不同生长阶段。有研究者认为,未来森林的适应性取决于树木基因型对快速环境变化的响应及适应机制<sup>[13-15]</sup>,但在树木长期生长过程中,其年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变异规律以及纬向梯度上 $\delta^{13}\text{C}$ 值的种源间差异仍不清楚<sup>[16-18]</sup>,因此,开展树木种源间年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的评价及变化规律研究有助于深入认识树木的生长和固碳规律,亦能揭示树木对环境变化的响应和适应机制。

马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)是中国南方的主要造林树种之一,分布于北纬 $21^\circ 41' \sim 33^\circ 56'$ 、东经 $102^\circ 10' \sim 123^\circ 14'$ ,其生长性状呈典型的纬向变异模式,即南方种源的树高和胸径生长量显著高于北方种源<sup>[19-20]</sup>。目前,关于马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的种源间差异和变异规律及其与植株生长的关系均不清楚,不利

于马尾松的推广种植。

鉴于此,作者选取浙江省淳安县姥山林场和湖北省太子山林场管理局石龙林场为试验点,以2个林场内均已达到轮伐期的10个相同种源的马尾松植株为研究对象,对其长期生长过程中年轮宽度、早材宽度、晚材宽度和年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化以及年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值种源间差异进行了比较,并对影响其年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的因子进行了分析,以期揭示不同水热条件下马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的径向变异规律及影响因子,并为不同区域马尾松适宜推广应用种源的筛选提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

供试的2个试验点分别为浙江省淳安县姥山林场(简称浙江淳安,编号S1)和湖北省太子山林场管理局石龙林场(简称湖北太子山,编号S2),均属于中亚热带季风气候,水热资源差距较大。参考刘青华等<sup>[20]</sup>关于马尾松种源生长变异和种源区划的研究结果,以2个林场内1984年春种植的10个相同种源的马尾松植株(均利用1年生裸根苗栽培种植)为研究对象,包括低纬度地区[北纬 $24.5^\circ \sim 26.5^\circ$ (含 $26.5^\circ$ )]种源P1、P2、P3和P4,中纬度地区[北纬 $26.5^\circ \sim 28.5^\circ$ (含 $28.5^\circ$ )]种源P5、P6和P7以及高纬度地区(高于北纬 $28.5^\circ$ )种源P8、P9和P10。2个试验点的试验林均采用完全随机区组设计,每个小区

均包含上述 10 个种源。其中, S1 试验点有 8 个小区, 小区内植株呈 8 株双行排列, 初始株距和行距均为 2 m, 造林后连续抚育 3 a, 直至幼林郁闭; S2 试验点有 9 个小区, 小区内植株呈 4 株单行排列, 初始株

距和行距也均为 2 m。供试 10 个种源地及 2 个试验点的地理位置和气候因子见表 1, 其中, 各气候因子数据为中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 提供的 1986 年至 2016 年统计数据的均值。

表 1 供试 10 个种源地及 2 个试验点的地理位置和气候因子

Table 1 Geographical location and climatic factors of ten provenance localities and two test sites tested

地点 <sup>1)</sup> Place <sup>1)</sup>	纬度 Latitude	经度 Longitude	年均温/°C Annual mean temperature	年降水量/mm Annual precipitation	5 月至 9 月降水量/mm Precipitation from May to September	干燥度指数 Aridity index	≥10 °C 年积温/°C ≥10 °C annual accumulated temperature
P1	N24. 78°	E113. 27°	20. 4	1 622	936	0. 88	6 497
P2	N24. 83°	E110. 82°	19. 6	1 740	1 078	0. 76	6 388
P3	N25. 33°	E117. 67°	18. 1	1 865	1 053	0. 78	5 620
P4	N26. 23°	E109. 15°	16. 6	1 461	866	0. 71	4 665
P5	N27. 08°	E114. 92°	18. 7	1 563	812	0. 84	5 659
P6	N27. 62°	E119. 07°	16. 4	1 469	850	0. 92	5 522
P7	N28. 47°	E111. 30°	16. 4	1 705	998	0. 94	5 049
P8	N29. 60°	E114. 38°	17. 1	1 514	853	1. 06	5 154
P9	N29. 72°	E118. 28°	16. 7	1 774	986	0. 65	5 151
P10	N32. 35°	E106. 83°	16. 8	1 122	828	1. 20	5 075
S1	N29. 62°	E119. 05°	17. 2	1 530	825	0. 83	5 410
S2	N30. 30°	E114. 28°	16. 4	1 094	789	1. 02	5 050

<sup>1)</sup> P1: 广东乳源 Ruyuan of Guangdong; P2: 广西恭城 Gongcheng of Guangxi; P3: 福建永定 Yongding of Fujian; P4: 贵州黎平 Liping of Guizhou; P5: 江西吉安 Ji'an of Jiangxi; P6: 浙江庆元 Qingyuan of Zhejiang; P7: 湖南安化 Anhua of Hu'nan; P8: 湖北通山 Tongshan of Hubei; P9: 安徽屯溪 Tunxi of Anhui; P10: 四川南江 Nanjiang of Sichuan; S1: 浙江淳安 Chun'an of Zhejiang; S2: 湖北太子山 Taizishan of Hubei.

## 1.2 研究方法

1.2.1 取样方法 于 2016 年 11 月, 在每个试验点各选取 6 个小区, 每个小区各种源选择 2 株样株(胸径大于其他植株), 在距地面 1.3 m 处用生长锥(直径 5.15 mm)钻取髓心至树皮的木芯(完整无疵、年轮清晰、缺轮较少), 每株 2 个木芯; 同株木芯置于同一玻璃试管中保存。每个小区视为 1 个重复。

1.2.2 径向生长指标测定 将木芯打磨至年轮界限清晰, 参照文献[21], 采用骨架示意图法进行初步交叉定年, 并采用树木年代学法对木芯自树皮向髓心标年。采用 COFECHA 程序检验交叉定年的结果, 消除定年和宽度测量错误[22]。选择 1987 年至 2016 年(即生长 4~33 a)进行分析, 每年对应 1 个年轮。用 WinDENDRO 年轮分析系统(加拿大 Regent 公司)进行扫描, 并测量各年轮早材和晚材的宽度, 计算各年轮的宽度(即该年轮早材和晚材宽度的总和)。

1.2.3 样品处理及  $\delta^{13}\text{C}$  值测定 在没有碳污染的通风橱中, 将木芯置于 SteREO Discovery V20 体视显微镜(德国 Carl Zeiss 公司)下, 沿年轮线分离各年轮的木芯; 将每个小区同一种源的木芯放在同一玻璃瓶内, 按年编号; 用去离子水冲洗样品 2 次, 将样品置于

80 °C 烘箱中干燥 72 h, 粉碎后过 80 目筛, 备用。

将样品粉末置于  $V(\text{苯}):V(\text{乙醇})=2:1$  混合溶液中抽提 24 h, 除去树脂、树蜡及单宁类等有机物。采用 DELTA V Advantage 稳定同位素质谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific 公司)测定  $\delta^{13}\text{C}$  值[23]。

## 1.3 数据处理及分析

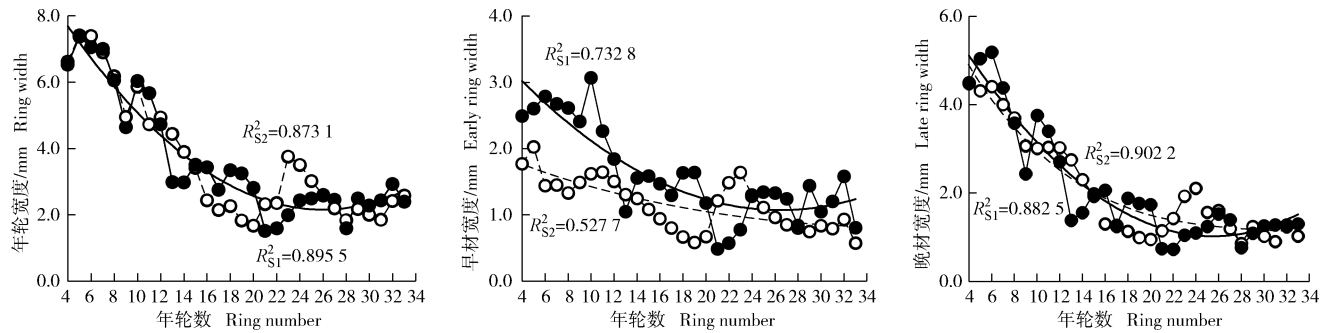
采用 SAS/STAT 8.0 软件中的 GLM 程序对相关数据进行方差分析, 分析前对所有数据进行方差齐性检验和正态分布检验。方差分析的线性统计模型为  $Y_{ijkl} = \mu + S_i + B_{ij} + P_k + PS_{ik} + PB_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$ , 式中,  $Y_{ijkl}$  为第  $i$  个试验点内第  $j$  小区第  $k$  种源第  $l$  株的观察值,  $\mu$  为总体平均值,  $S_i$  为第  $i$  个试验点的固定效应,  $B_{ij}$  为第  $i$  个试验点内第  $j$  小区的随机效应,  $P_k$  为第  $k$  种源的固定效应,  $PS_{ik}$  为第  $i$  个试验点与第  $k$  种源的随机互作效应,  $PB_{ijk}$  为第  $i$  个试验点第  $j$  小区与第  $k$  种源的随机互作效应,  $\varepsilon_{ijkl}$  为随机误差效应。选用高阶多项式模型“ $y = ax^n + bx^{n-1} + \dots + cx + d$ ”拟合马尾松种源径向生长和年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值随年轮增长的总体变化趋势, 式中,  $y$  为共同生长时间内各年轮或年轮段(年轮数分别为 4~5、6~10、11~15、16~20、21~25、26~30 和 31~33)的宽度或者各年轮或年轮段早材或晚材的宽

度,  $x$  为共同生长时间内各年轮或年轮段距髓心的平均年轮数,  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  为回归常数,  $n$  为拟合介数。为了确保研究结果的科学性, 按照 McCarroll 等<sup>[1]</sup> 和孙守家等<sup>[23]</sup> 的方法校正年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值, 以剔除大气  $\text{CO}_2$  浓度升高对年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响。此外, 还采用 DPS 14.0 软件对 2 个试验点马尾松年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值与其径向生长指标进行了相关性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征

2.1.1 年轮宽度变化特征 分别对 2 个试验点马尾松各年轮的宽度及早材和晚材的宽度进行高阶多项式模型拟合, 结果见图 1。



—●—: S1 试验点观测值 Observation value of S1 test site; -○-: S2 试验点观测值 Observation value of S2 test site; —: S1 试验点拟合曲线 Fitting curve of S1 test site; - - - -: S2 试验点拟合曲线 Fitting curve of S2 test site.

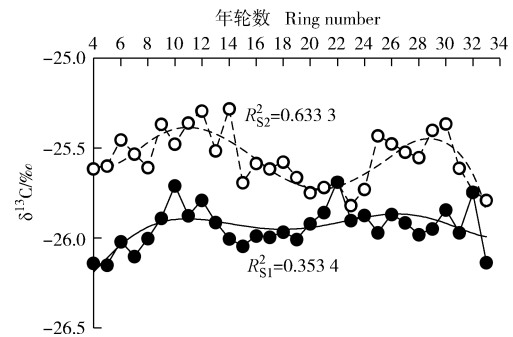
图 1 浙江淳安 (S1) 和湖北太子山 (S2) 试验点马尾松年轮宽度的变化特征  
Fig. 1 Variation characteristics of ring width of *Pinus massoniana* Lamb. in test sites of Chun'an of Zhejiang (S1) and Taizishan of Hubei (S2)

由图 1 可见: 随着年轮增长, 2 个试验点马尾松的年轮宽度变化趋势基本一致, 总体上先降低后略升高, 且 2 个试验点各年轮宽度的拟合值极为接近; 2 个试验点马尾松的早材和晚材宽度变化趋势略有差异, 浙江淳安 (S1) 试验点的早材和晚材宽度均先降低后略升高, 而湖北太子山 (S2) 试验点的早材和晚材宽度均缓慢降低, 且 S1 试验点各年轮早材宽度的拟合值均高于 S2 试验点。经计算, S1 试验点马尾松的年轮宽度、早材宽度和晚材宽度的均值均高于 S2 试验点, 分别较 S2 试验点高 6.83%、5.11% 和 8.90%。

2.1.2 年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值变化特征 对 2 个试验点马尾松各年轮的  $\delta^{13}\text{C}$  值进行高阶多项式模型拟合, 结果 (图 2) 表明: 随着年轮增长, 2 个试验点马尾松年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化趋势相似, 均呈“升高—降低—升高—降低”的趋势, 但 S1 试验点各年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化幅度和拟合值均低于 S2 试验点。

对 2 个试验点马尾松不同年轮段  $\delta^{13}\text{C}$  值进行方差分析和变异分析, 结果 (表 2) 表明: 从试验点、种源及试验点  $\times$  种源看, 不同年轮段  $\delta^{13}\text{C}$  值的均方均达到极显著 ( $P < 0.01$ ) 水平。S1 和 S2 试验点各年轮段

$\delta^{13}\text{C}$  值的均值分别为  $-26.48\text{‰} \sim -25.19\text{‰}$  和  $-25.71\text{‰} \sim -25.05\text{‰}$ , S1 和 S2 试验点各年轮段  $\delta^{13}\text{C}$  值均值的最大值均在 V 段 (年轮数为 21~25), 最小值分别在 I 段 (年轮数为 4~5) 和 VII 段 (年轮数为 31~



—●—: S1 试验点观测值 Observation value of S1 test site; -○-: S2 试验点观测值 Observation value of S2 test site; —: S1 试验点拟合曲线 Fitting curve of S1 test site; - - - -: S2 试验点拟合曲线 Fitting curve of S2 test site.

图 2 浙江淳安 (S1) 和湖北太子山 (S2) 试验点马尾松年轮  $\delta^{13}\text{C}$  值的变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of ring  $\delta^{13}\text{C}$  value of *Pinus massoniana* Lamb. in test sites of Chun'an of Zhejiang (S1) and Taizishan of Hubei (S2)

表2 浙江淳安(S1)和湖北太子山(S2)试验点马尾松不同年轮段 $\delta^{13}\text{C}$ 值的方差分析和变异分析结果<sup>1)</sup>Table 2 Analysis results of variance and variation of  $\delta^{13}\text{C}$  value of different ring segments of *Pinus massoniana* Lamb. in test sites of Chun'an of Zhejiang (S1) and Taizishan of Hubei (S2)<sup>1)</sup>

编号 No.	年轮数 Ring number	均方 Mean square			均值/‰ Mean		变异系数/% Coefficient of variation	
		A	B	A×B	S1	S2	S1	S2
I	4-5	11.641**	0.906**	0.432**	-26.48	-25.66	3.07	3.16
II	6-10	3.627**	0.726**	0.600**	-25.99	-25.50	3.08	3.12
III	11-15	2.675**	0.554**	0.374**	-25.82	-25.44	3.25	3.18
IV	16-20	2.186**	0.900**	0.324**	-25.98	-25.60	3.45	3.71
V	21-25	1.699**	1.053**	0.432**	-25.19	-25.05	3.44	3.41
VI	26-30	3.250**	0.818**	0.225**	-25.91	-25.44	3.70	3.92
VII	31-33	0.821**	0.806**	0.587**	-25.94	-25.71	5.06	5.61
均值 Mean		3.160**	0.666**	0.240**	-25.90	-25.49	3.58	3.73

<sup>1)</sup> A: 试验点 Test site; B: 种源 Provenance. \*\*:  $P < 0.01$ .

33); S1 试验点各年轮段 $\delta^{13}\text{C}$ 值的均值低于 S2 试验点。S1 和 S2 试验点各年轮段 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值的变异系数分别为 3.07%~5.06% 和 3.12%~5.61%, S1 和 S2 试验点 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值的变异系数最大值均在 VII 段, 最小值分别在 I 段和 II 段(年轮数为 6~10)。

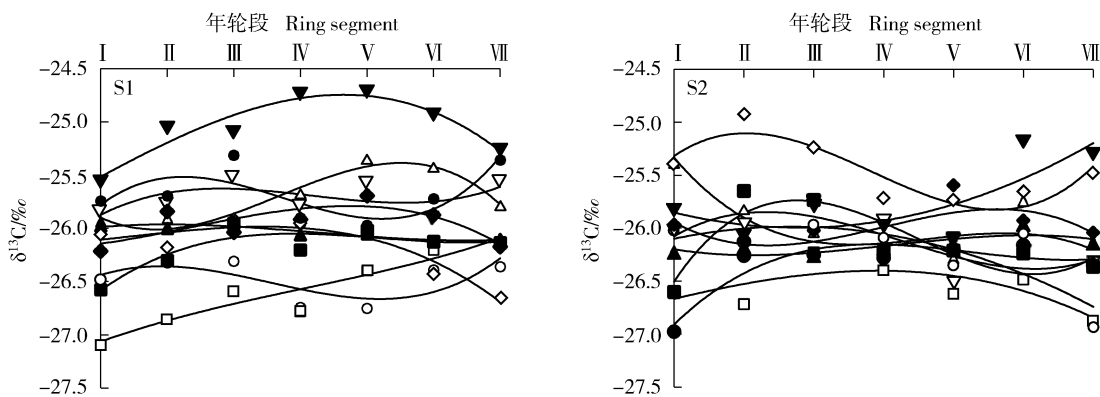
2.1.3 年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值种源间差异分析 对 2 个试验点不同种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行高阶多项式模型拟合, 结果见图 3。

由图 3 可见: 总体来看, 在 S1 试验点, 广东乳源、广西恭城和福建永定 3 个种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值

较低, 而四川南江种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高; 在 S2 试验点, 广西恭城种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低, 而江西吉安种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高。总体来看, 高纬度地区种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高, 中纬度地区种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值居中, 而低纬度地区种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低。

## 2.2 马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响因子分析

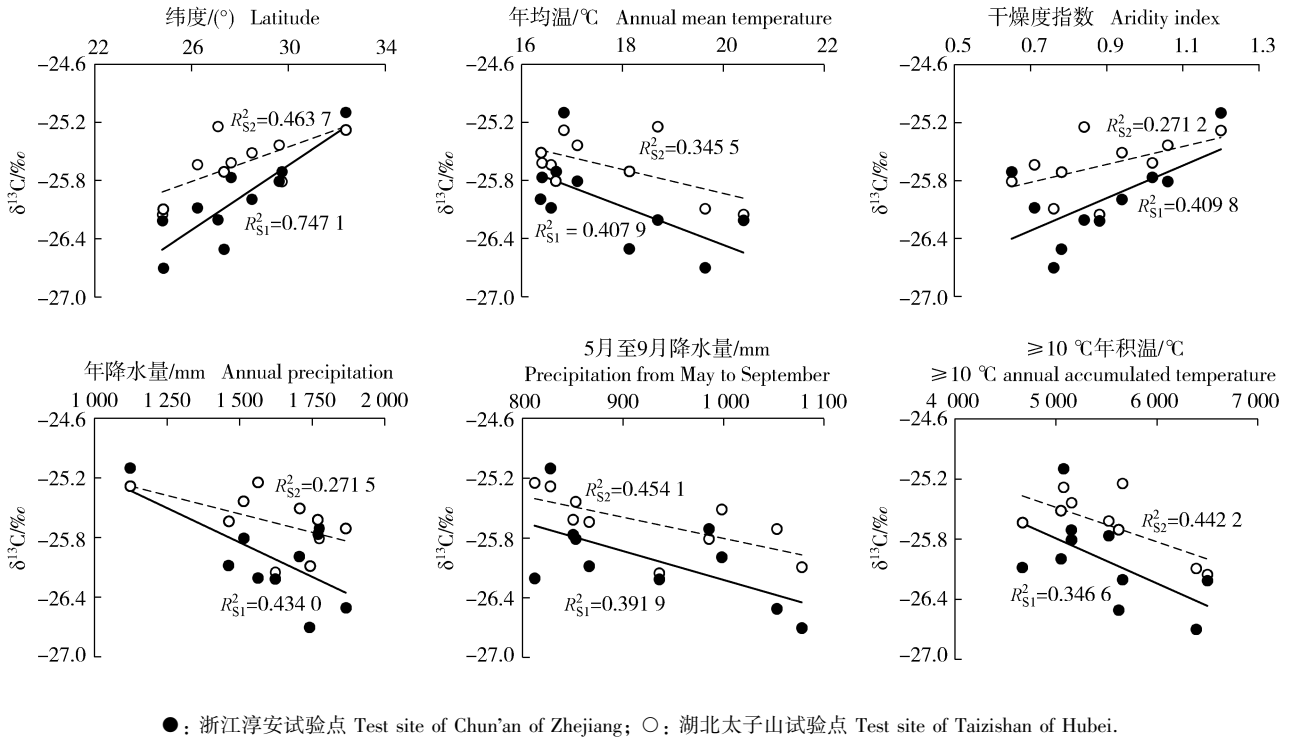
2.2.1 种源地主要环境因子的影响 对 2 个试验点供试 10 个种源马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与种源地 6 个主要环境因子进行回归分析, 结果见图 4。



I: 年轮数为 4~5 Ring number of 4~5; II: 年轮数为 6~10 Ring number of 6~10; III: 年轮数为 11~15 Ring number of 11~15; IV: 年轮数为 16~20 Ring number of 16~20; V: 年轮数为 21~25 Ring number of 21~25; VI: 年轮数为 26~30 Ring number of 26~30; VII: 年轮数为 31~33 Ring number of 31~33.

●: 安徽屯溪 Tunxi of Anhui; ○: 福建永定 Yongding of Fujian; ■: 广东乳源 Ruyuan of Guangdong; □: 广西恭城 Gongcheng of Guangxi; ▲: 贵州黎平 Liping of Guizhou; △: 湖北通山 Tongshan of Hubei; ◆: 湖南安化 Anhua of Hu'nan; ◇: 江西吉安 Ji'an of Jiangxi; ▼: 四川南江 Nanjiang of Sichuan; ▽: 浙江庆元 Qingyuan of Zhejiang.

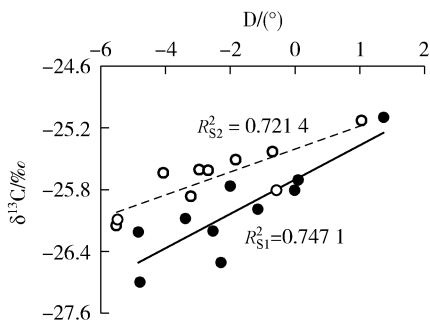
图3 浙江淳安(S1)和湖北太子山(S2)试验点不同种源马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的径向变化Fig. 3 Radial change of ring  $\delta^{13}\text{C}$  value of *Pinus massoniana* Lamb. from different provenances in test sites of Chun'an of Zhejiang (S1) and Taizishan of Hubei (S2)



●: 浙江淳安试验点 Test site of Chun'an of Zhejiang; ○: 湖北太子山试验点 Test site of Taizishan of Hubei.  
 Fig. 4 Regression analysis on ring  $\delta^{13}\text{C}$  value of *Pinus massoniana* Lamb. and main environmental factors of provenance locality

结果表明:浙江淳安(S1)和湖北太子山(S2)试验点的马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与种源地的纬度和干燥度指数显著( $P < 0.05$ )正相关,与种源地的年均温、年降水量、5月至9月降水量和 $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 年积温显著负相关。

2.2.2 种源地和试验点间纬度差值的影响 对2个试验点供试10个种源马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与种源地和试验点间纬度差值进行回归分析,结果见图5。结果



●: 浙江淳安试验点 Test site of Chun'an of Zhejiang; ○: 湖北太子山试验点 Test site of Taizishan of Hubei.

图5 马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与种源地和试验点间纬度差值(D)回归分析  
 Fig. 5 Regression analysis on ring  $\delta^{13}\text{C}$  value of *Pinus massoniana* Lamb. and latitude difference (D) between provenance locality and test site

表明:2个试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与种源地和试验点间纬度差值呈显著负相关,说明较高纬度地区种源马尾松的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值高于较低纬度地区种源。

2.2.3 径向生长的影响 对2个试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其径向生长指标进行相关性分析,结果见表3。结果表明:2个试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年轮宽度呈显著负相关,说明年轮宽度越大,年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值越低;S1和S2试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与早材宽度分别呈极显著( $P < 0.01$ )和显著负相关,与晚材宽度呈不显著负相关。

表3 浙江淳安(S1)和湖北太子山(S2)试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其径向生长指标的相关性分析<sup>1)</sup>

Table 3 Analysis on correlation of ring  $\delta^{13}\text{C}$  value of *Pinus massoniana* Lamb. in test sites of Chun'an of Zhejiang (S1) and Taizishan of Hubei (S2) with its radial growth indexes<sup>1)</sup>

试验点 Test site	与年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的相关系数 Correlation coefficient with ring $\delta^{13}\text{C}$ value		
	年轮宽度 Ring width	早材宽度 Early wood width	晚材宽度 Late wood width
S1	-0.133*	-0.188**	-0.092
S2	-0.119*	-0.148*	-0.112

<sup>1)</sup> \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

### 3 讨论和结论

研究表明:不同种源马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在丰富的变异,并且高纬度地区种源马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值依次高于中纬度和低纬度地区种源,推测其种源间差异可能与种源地水热条件有关<sup>[15,24]</sup>。相关性分析结果表明:马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与种源地的年均温、年降水量、5月至9月降水量和 $\geq 10\text{ }^\circ\text{C}$ 年积温及干燥度指数均呈显著( $P < 0.05$ )相关性,进一步说明不同种源马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异是马尾松对种源地环境长期适应的结果<sup>[25-26]</sup>。本研究结果还表明:马尾松各年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在极显著( $P < 0.01$ )差异,并且浙江淳安(S1)试验点马尾松各年轮段 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值的变异系数变化幅度(3.07%~5.06%)小于湖北太子山(S2)试验点(3.12%~5.61%),I段(年轮数为4~5)和II段(年轮数为6~10) $\delta^{13}\text{C}$ 值均值的变异系数小于III段(年轮数为11~15)至VII段(年轮数为31~33);总体来看,马尾松各年轮段 $\delta^{13}\text{C}$ 值均值的变异系数随年轮段的增大而升高,说明马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值随树龄增长而升高。

立地环境对植物年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响较大<sup>[27]</sup>。Francey等<sup>[28]</sup>认为,植物年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与大气 $\text{CO}_2$ 浓度、植物同化速率和叶片气孔导度有关,而植物同化速率和叶片气孔导度与温度、湿度、降水、光照及风等气候因子有关;干旱年份形成的年轮宽度较小,年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值较大,相反,雨水充沛年份形成的年轮宽度较大,年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小。本研究中,S1试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体较低,该试验点位于千岛湖区域,水热资源丰富,年降水量和5月至9月降水量均高于S2试验点,而S2试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较高,该试验点位于中国中西部地区,土壤相对干旱,干燥度指数较高,这可能是因为S2试验点马尾松的水分利用效率较高,具体原因有待进一步研究。方差分析结果表明:马尾松不同年轮段的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均存在极显著的试验点 $\times$ 种源互作效应,说明马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值受种源和试验点(即立地环境)的互作影响较大。比较发现,在不同立地环境中,部分种源马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对缺乏稳定性或存在秩次效应,例如:在I段至IV段(年轮数为16~20),江西吉安种源的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在S1试验点居中,而在S2试验点最高;四川南江种源的年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在S1试验点最高,而在S2试验点居

中[在I段至V段(年轮数为21~25)]。另外,部分种源(如广西恭城种源)马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值较稳定,并一直处于相对低值。事实上,在生长早期或幼龄阶段,马尾松植株受株间竞争和环境因子的影响相对较小,其年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对稳定;然而,随着树木的生长发育,不同种源马尾松对生长环境的光周期和水分等的需求差异较大,其年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出种源间差异,因此,需根据不同育种目标开展马尾松适生种源筛选<sup>[14,29]</sup>。

马利民等<sup>[7]</sup>认为,植物生长量与其固碳量显著相关,植物的固碳能力直接影响其在固碳过程中碳同位素的分馏;当外界环境适宜或植物生命活动较强时,植物的光合作用和固碳能力较强,说明植物生长与年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在一定的关系。林磊等<sup>[30]</sup>认为,木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)速生种源的水分利用效率较低;商志远等<sup>[8]</sup>认为,樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)的早材宽度和年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响因子很可能相同或影响机制的表现形式相对一致。本研究中,2个试验点马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值与各径向生长指标均呈负相关,并且,其与年轮宽度和早材宽度的相关性达到显著水平,说明马尾松树干生长越快,其年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值越低;这种负相关关系可能与种源有一定关系,通常南方种源的生长季长,生长量和生物量等显著高于北方种源,将南方种源引种到北方后,南方种源的早材生长时间较长,年轮宽度较大,根系发达<sup>[31]</sup>,因此,在干旱胁迫下,南方种源能够利用更多的地下水,表现出更强的耐旱性。

综上所述,马尾松年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值在种源间变异丰富,这是其对种源地环境长期适应的结果;总体表现为种源地的纬度越高、年均温越低、干燥度指数越大,年轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值越大;并且,立地环境和径向生长对马尾松固碳过程中碳同位素的分馏有一定影响。

#### 参考文献:

- [1] MCCARROLL D, LOADER N J. Stable isotopes in tree rings [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 771-801.
- [2] DODD J P, PATTERSON W P, HOLMDEN C, et al. Robotic micromilling of tree-rings: a new tool for obtaining subseasonal environmental isotope records [J]. *Chemical Geology*, 2008, 252: 21-30.
- [3] 王建, 赵业思, 商志远, 等. 马尾松树轮不同组分稳定碳同位素的差异及其对气候变化响应的初步研究 [J]. *地理科学*, 2016, 36(8): 1261-1268.
- [4] EILMANN B, BUCHMANN N, SIEGWOLF R, et al. Fast response

- of Scots pine to improved water availability reflected in tree-ring width and  $\delta^{13}\text{C}$  [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2010, 33: 1351–1360.
- [5] DAMESIN C, LELARGE C. Carbon isotope composition of current-year shoots from *Fagus sylvatica* in relation to growth, respiration and use of reserves[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2003, 26: 207–219.
- [6] ROBERTSON I, LOADER N J, MCCARROLL D, et al.  $\delta^{13}\text{C}$  of tree-ring lignin as an indirect measure of climate change [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 4: 531–544.
- [7] 马利民, 刘禹, 赵建夫. 贺兰山油松年轮中稳定碳同位素含量和环境的关系[J]. *环境科学*, 2003, 24(5): 49–53.
- [8] 商志远, 王建, 崔明星, 等. 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[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(12): 1256–1267.
- [9] CLIMENT J, CHAMBEL M R, PÉREZ E, et al. Relationship between heartwood radius and early radial growth, tree age, and climate in *Pinus canariensis* [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32: 103–111.
- [10] WU H X, IVKOVIĆ M, GAPARE W J, et al. Breeding for wood quality and profit in *Pinus radiata*: a review of genetic parameter estimates and implications for breeding and deployment[J]. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2008, 38: 56–87.
- [11] 鄂文峰, 王传宽, 杨传平, 等. 兴安落叶松边材材材生长特征的种源效应[J]. *林业科学*, 2009, 45(6): 109–115.
- [12] KLEIN T, MATTEO G D, ROTENBERG E, et al. Differential ecophysiological response of a major Mediterranean pine species across a climatic gradient [J]. *Tree Physiology*, 2013, 33: 26–36.
- [13] SCHREIBER S G, DING C, HAMANN A, et al. Frost hardiness vs. growth performance in trembling aspen: an experimental test of assisted migration [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2011, 50: 939–949.
- [14] GAPARE W J, IVKOVIĆ M, LIEPE K J, et al. Drivers of genotype by environment interaction in radiata pine as indicated by multivariate regression trees[J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 353: 21–29.
- [15] 刘建锋, 张玉婷, 倪妍妍, 等. 栓皮栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的纬向趋势及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1373–1380.
- [16] 赵凤君, 高荣孚, 沈应柏, 等. 水分胁迫下美洲黑杨不同无性系间叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率的研究[J]. *林业科学*, 2005, 41(1): 36–41.
- [17] 尹伟伦, 万雪琴, 夏新莉. 杨树稳定碳同位素分辨率与水分利用效率和生长的关系[J]. *林业科学*, 2007, 43(8): 15–22.
- [18] BALTUNIS B S, MARTIN T A, HUBER D A, et al. Inheritance of foliar stable carbon isotope discrimination and third-year height in *Pinus taeda* clones on contrasting sites in Florida and Georgia [J]. *Tree Genetics and Genomes*, 2008, 4: 797–807.
- [19] 刘青华, 张蕊, 金国庆, 等. 马尾松年轮宽度和木材基本密度的种源变异及早期选择[J]. *林业科学*, 2010, 46(5): 49–54.
- [20] 刘青华, 金国庆, 张蕊, 等. 24年生马尾松生长、形质和木材基本密度的种源变异与种源区划[J]. *林业科学*, 2009, 45(10): 55–61.
- [21] 刘敏, 毛子军, 厉悦, 等. 不同径级红松径向生长对气候变化的响应[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11): 3530–3540.
- [22] 沈吉, 陈毅风. 南京地区近二十年来雪松树轮的稳定碳同位素与气候重建[J]. *植物资源与环境学报*, 2000, 9(3): 34–37.
- [23] 孙守家, 李春友, 何春霞, 等. 基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(7): 2119–2127.
- [24] 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.
- [25] DE MIGUEL M, SÁNCHEZ-GÓMEZ D, CERVERA M T, et al. Functional and genetic characterization of gas exchange and intrinsic water use efficiency in a full-sib family of *Pinus pinaster* Ait. in response to drought[J]. *Tree Physiology*, 2012, 32: 94–103.
- [26] ROBSON T M, SÁNCHEZ-GÓMEZ D, CANO F J, et al. Variation in functional leaf traits among beech provenances during a Spanish summer reflects the differences in their origin [J]. *Tree Genetics and Genomes*, 2012, 8: 1111–1121.
- [27] 冀春雷, 徐庆, 靳翔, 等. 树木年轮碳氢氧稳定同位素在全球气候变化研究中的应用[J]. *林业科学*, 2010, 46(7): 129–135.
- [28] FRANCEY R J, FARQUHAR G D. An explanation of  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  variations in tree rings[J]. *Nature*, 1982, 297: 28–31.
- [29] ZHU Q, JIANG H, PENG C, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated  $\text{CO}_2$  on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222: 2414–2429.
- [30] 林磊, 周志春, 范辉华, 等. 木荷稳定碳同位素分辨率的种源差异[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 741–746.
- [31] JÄGGI M, SAURER M, FUHRER J, et al. The relationship between the stable carbon isotope composition of needle bulk material, starch, and tree rings in *Picea abies* [J]. *Oecologia*, 2002, 131: 325–332.

(责任编辑: 佟金凤)