

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. [Wang Jian, Zhao Yesi, Shang Zhiyuan et al. Diverse Stable Carbon Isotope Ratios in Tree-ring Components of *Pinus massoniana* with Their Climate Sensitivities. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(8): 1261-1268.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.08.018

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

王建¹, 赵业思^{1,2}, 商志远¹, 白世彪¹, 陈振举³, 张志刚¹

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 3. 沈阳农业大学林学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 比较了中国东南地区九岭山和九连山两地马尾松(*Pinus massoniana*)树轮不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化响应的敏感性, 结果表明: α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 和综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 在均数方面较全木 $\delta^{13}\text{C}$ 分别偏正 $1.170\text{‰} \pm 0.168\text{‰}$ 和 $1.211\text{‰} \pm 0.121\text{‰}$; 3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 年际变化序列显著正相关($p < 0.001$); 两地生长季中晚期水分状况是制约马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要因子, 3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与此时段的气候要素相关性均达到显著水平($p < 0.05$), 3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化响应的敏感性没有显著差异。

关键词: 稳定碳同位素; 树轮; 气候响应; 组分; 马尾松

中图分类号: P932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2016)08-1261-08

树木年轮由于其分辨率高、样品分布广泛, 在全球气候变化研究中发挥着重要的不可替代的作用。但在温暖湿润的气候地区, 温度、降水对树木生长的限制作用较弱, 树轮宽度等指标对于气候变化的敏感性减弱, 利用树轮宽度等指标恢复古气候受到很大的限制^[1,2]。相比宽度, 树轮稳定碳同位素比率($\delta^{13}\text{C}$)所受的气候作用机制更为明确, 气候主要是通过影响叶片的气孔导度和光合作用速率来影响树轮中 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的^[3-7], 因而在暖湿地区, 利用树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 研究气候变化具有更大的优势与潜力。

然而, 树轮中包含多种次级组分, 究竟利用什么组分进行 $\delta^{13}\text{C}$ 分析可以更好地提取气候变化信息, 还存在着不同的意见, 成为目前研究的一个热点和难点^[8-13], 也成为限制树轮稳定碳同位素气候学继续发展的急需解决的关键问题。纵观有关树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对于气候变化的响应问题的研究,

大都针对不同地区的不同树种, 如美国的道格拉斯杉(*Pseudotsuga menziesii*)、西黄松(*Pinus ponderosa*)^[9,14-17]; 欧洲的夏栎(*Quercus robur*)、无梗花栎(*Quercus petraea*)^[11,18,19]; 澳大利亚的辐射松(*Pinus radiata*)、海岸松(*Pinus pinaster*)、粉绿澳柏(*Callitris glaucophylla*)^[13,20]等; 亚洲的油松(*Pinus tabulaeformis*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)^[12,21]。因此, 产生意见分歧的原因, 可能与研究的地点不同、树种不同有关。可是究竟是由于树种的不同还是由于地点的不同而导致的意见分歧, 还缺乏系统的研究。如果能够对不同地点同一个树种的树轮的不同组分稳定碳同位素对于气候的响应异同进行研究, 就有可能对于这个问题的解决提供新的线索。

马尾松(*Pinus massoniana*)是中国东部亚热带湿润地区分布最广、资源最丰富的针叶树种^[22]。它分布在淮河以南的广大地区, 北起秦岭淮河, 南至广西十万大山、雷州半岛, 西到四川盆地西缘、贵

收稿日期: 2015-08-25; **修订日期:** 2015-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271204), 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心和江苏高校优势学科建设工程项目(164320H116)资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41271204), Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Key Project for Leading Disciplines of Jiangsu High Learning Institutions (164320H116).]

作者简介: 王建(1962-), 男, 山东昌邑人, 教授, 博士, 主要从事地表过程和环境变迁研究。E-mail: jwang169@vip.sina.com

通讯作者: 赵业思。E-mail: 15050583173@126.com

州乌蒙山,东到海滨^[23]。其分布区域是被西南地区的云南松、华北地区的油松和华中东部的黄山松所包围,在中国的松属中是分布最广的一种,在数量上也是最多的一种^[24],南北跨越了北亚热带、中亚热带、南亚热带与边缘热带。分布区的年均温变幅达到9~10℃,年降水量的区域差异达到1 000 mm。因此,马尾松是研究中国中东部区域空间差异影响的最理想的树种之一。

对中国不同地点的马尾松树轮不同组分稳定碳同位素对于气候的响应的敏感性进行系统的研究,试图回答以下几个问题:①在中国中东部气候限制作用相对较弱的地区,树轮的全木、综纤维素和 α 纤维素哪种成分的 $\delta^{13}\text{C}$ 更适合于气候的重建?②不同地点同一树种 $\delta^{13}\text{C}$ 对于气候的响应有何不同?③同一地点同一树种不同个体的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对于气候的响应是否一致?从而为平息何种组分能够更准确地提取气候信息的争论提供例证与依据,为树轮稳定碳同位素更好地应用于气候变化研究提供分析方法的支撑。本文试图以马尾松分布区南界附近的九连山和中心地带的九岭山为例,探究不同组分树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对于气候响应的敏感性。

1 资料与方法

1.1 研究地点

九岭山(JLN)地处江西省西北部,大致为马尾松的分布中心区(图1)。该区气候属中亚热带

湿润季风气候,年均气温15.6℃,年降水量1 653 mm,年均日照时数1 872.6 h,年均蒸发量1 053.3 mm,空气年平均相对湿度为79%^[25]。九岭山树轮样品采自海拔介于600~1 000 m的武陵岩(WLY)和五梅山(WMS)2个样点。2样点水平距离约为65 km,平均坡度32°,坡向多为南坡和西南坡,土壤类型为山地黄壤。样品所采的马尾松林为原始林,平均树龄为65 a。九连山(JLA)地处江西省和广东省交界处,接近马尾松分布南界(图1)。气候属中亚热带与南亚热带过渡地带,年均气温16.4℃,年降水量2 155.6 mm,多年平均蒸发量790.2 mm,空气年均相对湿度85%,相对九岭山干湿季明显,2~9月为雨季,10~1月为旱季^[26]。九连山样区包括九连山北坡的枹头(JT)、山坑(SK)和南坡板岭下(BLX)、路下(LX)4个采样点,样点海拔介于300~600 m之间,平均坡度21°,坡向多为东坡或东南坡,土壤类型为山地红壤。该地马尾松林均为天然次生林,平均树龄为46 a。

1.2 树轮资料

使用直径5.15 mm的树轮生长锥在树干胸径高度处(约1.3 m)沿坡面走向从马尾松树杆两侧分别钻取1支细树芯,以用于交叉定年分析。在采样现场,大致对树芯的年轮数初步判读,挑选树龄相对较长的马尾松个体,使用直径12 mm的生长锥沿坡面走向,在树杆两侧分别钻取2支粗树芯,以用于 $\delta^{13}\text{C}$ 测定。在九岭山采集了37株树,120支树芯,在九连山采集了36株树,106支树芯。

将采集的样品装在纸筒里带至实验室内晾干,用白乳胶将细芯粘贴在样品槽内,用特制的样品夹将粗芯夹住,使用120~3 000目的干砂纸逐级打磨至年轮清晰可辨。先利用骨架图进行样芯之间的交叉定年,尽可能辨别出伪轮和缺轮,然后在体式显微镜下,利用AcuRite年轮宽度仪的Measure J2X年轮宽度测量系统(测量精度0.001 mm)读取年轮宽度,并使用COFECHA程序进行交叉定年与质量检验,从而确定各树芯每一年轮的真实年份。

1.3 纤维素提取与纯度检测

选取九岭山WLY16、WLY17、WMS01、WMS06和九连山JT08、JT22、BLX04、BLX05共8株树的样芯用于 $\delta^{13}\text{C}$ 测定。选择上述样品的理由是这8株树在各林分中树龄相对较长,且年轮相对较宽(表1),不存在腐心、伤疤等问题。由于九岭山的马尾松年轮宽度自1993年后宽度值较窄,为

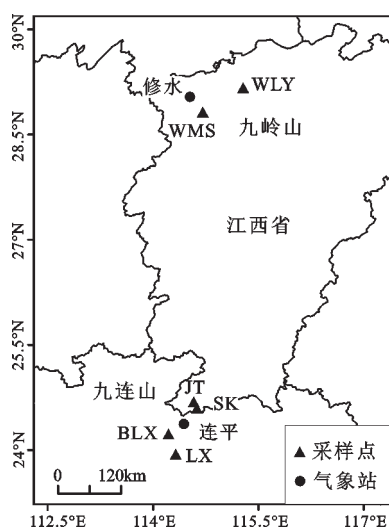


图1 采样点与气象站位置

Fig.1 Location of sampling sites and meteorological stations

表1 用于 $\delta^{13}\text{C}$ 测试的马尾松对应树龄与平均年轮宽度

| Table 1 The age and mean tree-ring width of <i>Pinus massoniana</i> used for $\delta^{13}\text{C}$ measurement | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| 样芯编号 | WLY16 | WLY17 | WMS01 | WMS06 | JT08 | JT22 | BLX04 | BLX05 |
| 树龄(a) | 75 | 70 | 84 | 74 | 47 | 58 | 44 | 47 |
| 年轮平均宽度(mm) | 2.27 | 2.93 | 3.27 | 2.34 | 3.17 | 3.12 | 3.95 | 2.69 |

避免样品量不足,选取1964~1993年作为研究时段,九连山样品选取1982~2011年的时段。

将树芯放在干净的玻璃板上,借助体式显微镜,找到年轮的分界线,利用洁净的手术刀截取每一年轮。将每株马尾松的4根粗芯同一年轮样品截取后混合在一起,并用干净的牛皮纸袋封装,并做好对应编号。所有样品截取完成后,放入行星式球磨机进行研磨,并过100目筛,以使样品充分混合均匀。留取一部分样品作全木 $\delta^{13}\text{C}$ 测定,剩余样品用于纤维素提取。

综纤维素和 α 纤维素的提取方法见参考文献[27]。

1.4 $\delta^{13}\text{C}$ 测定与合成 $\delta^{13}\text{C}$ 序列建立

在百万分天平(Starorius)上称取样品(0.20 ± 0.05)mg装入锡杯,卷好密封,保持锡杯内部真空。在中科院沈阳应用生态研究所 ThermoFinnigan-Deltaplus XP 同位素比例质谱仪上进行 $\delta^{13}\text{C}$ 测定(相对VPDB标准),随机抽取36个平行样本对 $\delta^{13}\text{C}$ 测量精度进行校验,整个系统误差 $\leq 0.15\text{‰}$ 。Leavitt等指出同一地域4株树的混合 $\delta^{13}\text{C}$ 序列能够较好的代表区域树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势与绝对值^[26],因此分别计算九岭山与九连山2个样点的4株马尾松 $\delta^{13}\text{C}$ 算术平均值序列,记为JLN和JLA,用于树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化的响应分析(图2)。

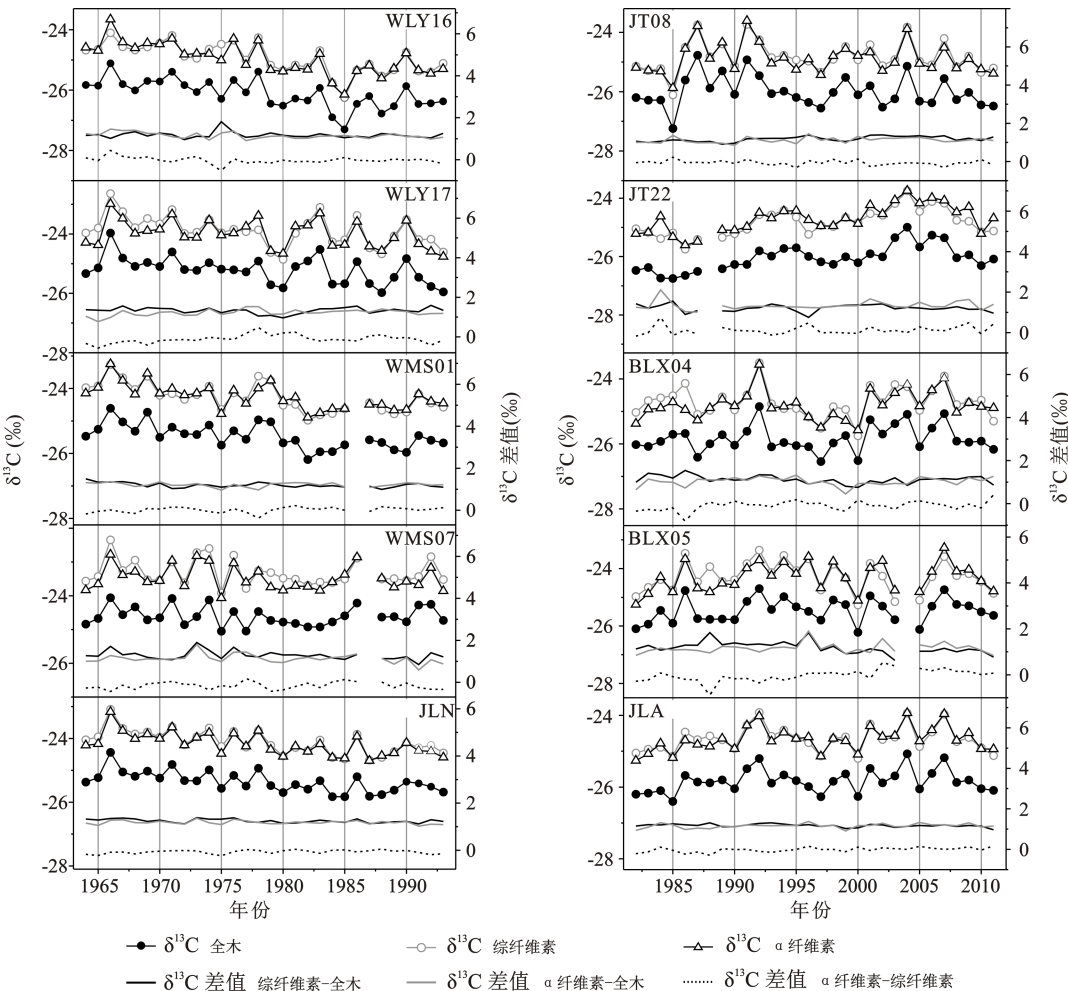


图2 马尾松树轮不同组分的单体 $\delta^{13}\text{C}$ 序列、区域平均 $\delta^{13}\text{C}$ 序列及对应差值序列

Fig.2 Individual and regional averaged $\delta^{13}\text{C}$ series of different tree-ring components in *Pinus massoniana* with their $\delta^{13}\text{C}$ difference

1.5 气候资料

距离九岭山和九连山2个样区较近的气象站分别为修水县气象站(29°02'N, 114°34'E)和连平县气象站(24°22'N, 114°29'E)。选取两地的月平均温度、降水量、月平均相对湿度和日照时数4个气候要素进行分析(图3)。气象数据来源于中国气象数据网。

2 结果与分析

2.1 同一个体不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 的统计特征

如表2所示,从平均值、中位值、最大值和最小值4个指标来看,全木 $\delta^{13}\text{C}$ 相对综纤维素和 α 纤维素明显偏负。以平均值为例,全木 $\delta^{13}\text{C}$ 相对综纤维

素和 α 纤维素分别偏负 $(1.211\pm 0.121)\text{‰}$ 和 $(1.170\pm 0.168)\text{‰}$;此外,综纤维素和 α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 相比全木 $\delta^{13}\text{C}$ 具有更大的离散程度。具体表现为,除JT08以外的其他7株马尾松综纤维素和 α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 的标准差均大于全木 $\delta^{13}\text{C}$,所有个体综纤维素和 α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 的变异系数绝对值均大于全木 $\delta^{13}\text{C}$ 。

综纤维素与 α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 差异不显著,在不同个体中两者大小关系并不一致。在每个个体中,综纤维素和 α 纤维素两者间的 $\delta^{13}\text{C}$ 差值时正时负,并未表现出单一的正负性。

2.2 不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 间的一元线性回归分析

尽管全木、综纤维素和 α 纤维素三者 $\delta^{13}\text{C}$ 存在绝对值差异,但树轮不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化响应

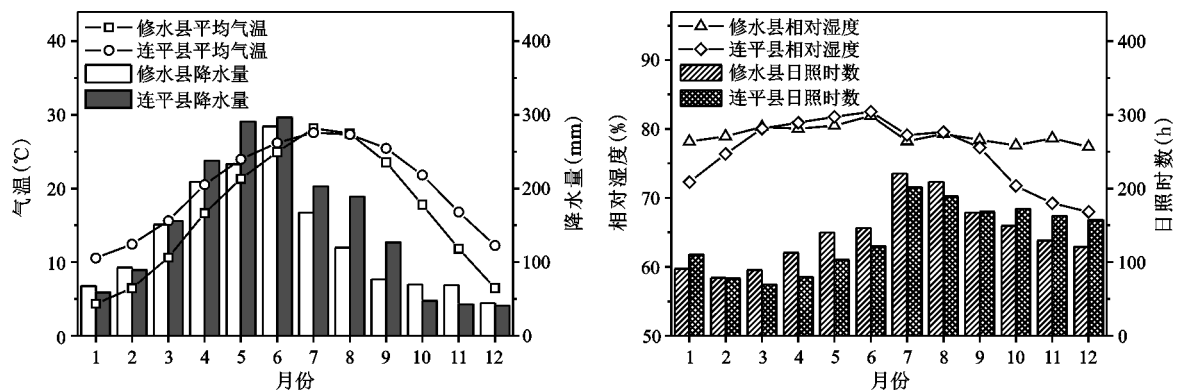


图3 修水县(九岭山)和连平县(九连山)气候要素月平均变化

Fig. 3 Monthly variations of climate factors in Xiushui (JLN) and Lianping County (JLA)

表2 马尾松树轮不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的统计参数

Table 2 Statistic parameters of the $\delta^{13}\text{C}$ series in different tree-ring components of *Pinus massoniana*

| 九岭山 | WLY16 | | | WLY17 | | | WMS01 | | | WMS06 | | |
|---------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|---------|---------|--------------|
| | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 |
| 平均值(‰) | -26.108 | -24.933 | -24.956 | -25.215 | -23.883 | -23.993 | -25.466 | -24.269 | -24.252 | -24.606 | -23.318 | -23.475 |
| 中位值(‰) | -26.066 | -24.912 | -24.915 | -25.190 | -23.932 | -24.012 | -25.505 | -24.334 | -24.202 | -24.653 | -23.493 | -23.595 |
| 最大值(‰) | -25.112 | -24.098 | -23.652 | -23.966 | -22.638 | -22.987 | -24.610 | -23.265 | -23.248 | -24.060 | -22.343 | -22.780 |
| 最小值(‰) | -27.301 | -26.248 | -26.145 | -25.974 | -24.855 | -24.764 | -26.188 | -24.977 | -24.892 | -25.052 | -23.919 | -24.069 |
| 标准差(‰) | 0.477 | 0.495 | 0.530 | 0.454 | 0.503 | 0.467 | 0.375 | 0.429 | 0.386 | 0.281 | 0.385 | 0.357 |
| 变异系数(%) | -1.828 | -1.986 | -2.122 | -1.801 | -2.107 | -1.944 | -1.473 | -1.767 | -1.593 | -1.141 | -1.653 | -1.519 |
| 九连山 | JT08 | | | JT22 | | | BLX04 | | | BLX05 | | |
| | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 |
| 平均值(‰) | -26.001 | -24.819 | -24.881 | -26.041 | -24.828 | -24.703 | -25.833 | -24.711 | -24.803 | -25.465 | -24.281 | -24.306 |
| 中位值(‰) | -26.097 | -24.923 | -24.966 | -26.040 | -24.842 | -24.686 | -25.934 | -24.747 | -24.851 | -25.458 | -24.284 | -24.297 |
| 最大值(‰) | -24.773 | -23.731 | -23.611 | -24.993 | -23.748 | -23.741 | -24.848 | -23.505 | -23.560 | -24.699 | -23.356 | -23.274 |
| 最小值(‰) | -27.241 | -26.109 | -25.874 | -26.748 | -25.746 | -25.610 | -26.541 | -25.753 | -25.575 | -26.219 | -25.268 | -25.255 |
| 标准差(‰) | 0.530 | 0.523 | 0.514 | 0.438 | 0.457 | 0.474 | 0.405 | 0.468 | 0.437 | 0.421 | 0.522 | 0.507 |
| 变异系数(%) | -2.037 | -2.105 | -2.067 | -1.682 | -1.840 | -1.920 | -1.569 | -1.894 | -1.763 | -1.652 | -2.149 | -2.085 |

敏感性的研究关注的是组分 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势与气候要素变化趋势的差异,因而各组分 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势的差异大小是判断各组分可否相互替代的重要依据。在此使用一元线性回归分析衡量组分 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势的相似性,拟合结果如表3所示。

同一马尾松个体3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 序列两两间一元线性回归校正 R^2 算术平均值为0.842,中位值0.849(标准差 $SD=0.085$,样本量 $N=24$);概率 P 值均小于0.001;斜率 K 值介于0.822和1.161之间,接近 $K=1$,说明3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 的年际变化序列具有极为一致的变化趋势,3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 之间存在极其显著的正相关性。

2.3 不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候要素的相关系数

通过比较不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候要素的Pearson相关系数大小,可以判定不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候响应敏感性的强弱差异^[11,13,28]。由表4可以看出,气候因素对两地马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的影响主要集中在马尾松生长季的中晚期,其中最为显著的是响应

关系是九岭山和九连山分别与所在区域8~9月和9~11月相对湿度显著负相关。此外,九岭山马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 还与8月气温,8~9月日照时数显著正相关,与8月降水亦接近显著负相关水平。九连山马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 则还与10月日照时数显著正相关。但就3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与上述气候要素的响应关系而言,3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与这些时段的气候要素的相关关系绝大多数均达到显著水平,相关系数间的差异微小。

3 讨论

3.1 不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 间的大小关系

全木与纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 存在显著差异的原因主要是因为叶片合成的初级光合产物通过树干韧皮部进入木质部时,将进一步合成转化为其他次级组分,而不同组分的生化合成过程伴随着不同程度的稳定碳同位素分馏,进而导致纤维素和全木相对初级的光合产物具有不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。本文研究

| 表3 马尾松树轮不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 两两间一元线性回归分析结果 | | | | | | | |
|--|--|----------|--------|-------|--|----------|--------|
| Table 3 Results of simple linear regression for the $\delta^{13}\text{C}$ between every two kinds of tree-ring components in <i>Pinus massoniana</i> | | | | | | | |
| 样本 | 回归方程 | 校正 R^2 | P 值 | 样本 | 回归方程 | 校正 R^2 | P 值 |
| WLY16 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}=0.988\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+0.854$ | 0.933 | <0.001 | JT08 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}=0.954\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}-0.019$ | 0.904 | <0.001 |
| | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=1.072\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+1.400$ | 0.924 | <0.001 | | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.935\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}-0.579$ | 0.932 | <0.001 |
| | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=1.02\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}+0.482$ | 0.937 | <0.001 | | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.954\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}-1.202$ | 0.907 | <0.001 |
| WLY17 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}=1.06\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+2.839$ | 0.853 | <0.001 | JT22 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}=0.967\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+0.342$ | 0.912 | <0.001 |
| | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.966\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+0.353$ | 0.792 | <0.001 | | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.968\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+0.504$ | 0.880 | <0.001 |
| | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.84\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}-3.935$ | 0.789 | <0.001 | | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.927\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}-1.696$ | 0.815 | <0.001 |
| WMS01 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}=1.106\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+3.906$ | 0.844 | <0.001 | BLX04 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}=1.064\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+2.782$ | 0.934 | <0.001 |
| | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.993\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+1.036$ | 0.796 | <0.001 | | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.967\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+0.177$ | 0.927 | <0.001 |
| | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.863\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}-3.319$ | 0.766 | <0.001 | | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.822\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}-4.484$ | 0.913 | <0.001 |
| WMS06 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}=1.161\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+5.258$ | 0.758 | <0.001 | BLX05 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}=1.086\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+3.372$ | 0.704 | <0.001 |
| | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=1.016\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+0.147$ | 0.814 | <0.001 | | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=1.092\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{全木}}+3.491$ | 0.627 | <0.001 |
| | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.832\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}-4.078$ | 0.738 | <0.001 | | $\delta^{13}\text{C}_{\alpha\text{纤维素}}=0.839\cdot\delta^{13}\text{C}_{\text{综纤维素}}-3.922$ | 0.801 | <0.001 |

| 表4 马尾松树轮不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与限制性气候因子间的相关系数 | | | | | | | | | |
|---|---------------|---------------|---------------|-------|----------|---------------|---------------|---------------|-------|
| Table 4 Correlation coefficients between $\delta^{13}\text{C}$ of different tree-ring components in <i>Pinus massoniana</i> and dominated climate factors | | | | | | | | | |
| 九岭山(JLN) | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 | 极差 | 九连山(JLA) | 全木 | 综纤维素 | α 纤维素 | 极差 |
| 8月相对湿度 | -0.645 | <u>-0.663</u> | <u>-0.693</u> | 0.048 | 9月相对湿度 | <u>-0.453</u> | -0.383 | <u>-0.478</u> | 0.095 |
| 9月相对湿度 | <u>-0.585</u> | <u>-0.574</u> | -0.558 | 0.027 | 10月相对湿度 | <u>-0.666</u> | -0.659 | <u>-0.727</u> | 0.068 |
| 8月平均气温 | 0.443 | <u>0.458</u> | <u>0.499</u> | 0.056 | 11月相对湿度 | -0.491 | <u>-0.526</u> | <u>-0.537</u> | 0.046 |
| 8月日照时数 | 0.506 | <u>0.528</u> | <u>0.559</u> | 0.053 | 10月日照时数 | 0.433 | <u>0.505</u> | <u>0.518</u> | 0.085 |
| 9月日照时数 | <u>0.440</u> | <u>0.443</u> | 0.377 | 0.066 | | | | | |

注:双下划线代表响应敏感性最高,单下划线其次,无下划线表示响应敏感性最低。

结果表明全木较纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负1.2‰左右,与其他关于松属的研究结果处于同一范围。如法国科西嘉岛的欧洲黑松(*Pinus nigra*)全木相对综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负 $(1.2\pm 0.5)\text{‰}$ ^[29];中国西北祁连山油松(*Pinus tabulaeformis*)全木相对综纤维素和 α 纤维素分别偏负1.06‰和1.28‰^[30];西班牙东北部的阿勒颇松(*Pinus halepensis*)全木相对综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负1.2‰^[31]。

关于综纤维素和 α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 的大小关系一直存在较大争议,部分研究表明 α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 相对综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 稳定偏负^[13,32],而有关针对橡树和雪松的研究表明 α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 要比综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 稳定偏正^[33]。本文发现 α 纤维素与综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 差值在不同个体不同年份中的正负关系并不一致,变化范围介于-0.883‰~0.763‰间,这可能与 α 纤维素中残留的半纤维素有关^[34]。 α 纤维素是指综纤维素在经浓度为17.5%的NaOH溶液浸泡后不溶的部分,实验过程中温度、处理时长的微小变化均有可能影响到NaOH溶液浓度的变化,进而导致综纤维素在转化为 α 纤维素的过程中存在少量半纤维素残留,影响到两者间 $\delta^{13}\text{C}$ 大小关系。

3.2 不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化的响应敏感性

两地马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与生长季中晚期相对湿度显著负相关,可能是因为此时温度较高而降水较少,空气湿度相对较低,正值生长季的马尾松为减小水分蒸腾,缩小气孔导度,导致叶肉细胞对 ^{13}C 与 ^{12}C 的判识力降低,从而导致 $\delta^{13}\text{C}$ 上升。根据表4所呈现的3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与这一时段气候要素的相关系数与极差,可以发现3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 气候敏感性存在如下2个特点:

1) 3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 所显著响应的气候要素虽然一致,但三者对这些气候要素响应敏感性的强弱程度具有变动性。首先,随着响应的气候要素不同,三者气候敏感性强弱关系亦随之发生变化。例如九岭山的3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与8月相对湿度的相关性表现为 α 纤维素>综纤维素>全木,而与9月相对湿度的相关性则表现为全木>综纤维素> α 纤维素。其次,即使是同一气候要素,三者的气候敏感性强弱关系还存在地域差异。例如九岭山的3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与9月相对湿度的相关性表现为全木>综纤维素> α 纤维素,但在九连山中却表现为 α 纤维素>全木>综纤维素。事实上,以往部分研究也表明,并不存在某种组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 与任一气候要素的相关

性均高于其他组分 $\delta^{13}\text{C}$ 的情形。例如有研究指出全木 $\delta^{13}\text{C}$ 与气温的相关性要高于纤维素 $\delta^{13}\text{C}$,而纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 与降水的相关性则高于全木 $\delta^{13}\text{C}$ ^[28,30]。

2) 3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 对应的相关系数极差较小,最大值仅为0.095。相比马利民等的研究结果计算^[30],其3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与6~8月的平均气温和2~7月的降水量相关系数极差分别高达0.676和0.761,本文研究所得两地马尾松树轮不同组分 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候响应敏感性差异极小,可以忽略。

总体来看,3种组分 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候要素间的相关系数差异较小,并不存在某种组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 与任一气候要素的相关性均高于其他组分的情况,因而认为中国东南地区马尾松全木、综纤维素和 α 纤维素三者 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化响应敏感性相近,不存在显著差异。

4 结论

1) 两地生长季中晚期水分状况是制约马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要因子。其中九岭山马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与8~9月相对湿度显著负相关,九连山马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与10月相对湿度显著负相关。

2) α 纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 、综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 和全木 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化响应的敏感性没有显著差异。

3) 在利用两地马尾松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建区域年际及更长时间尺度气候变化时,使用全木 $\delta^{13}\text{C}$ 即可,无需提取综纤维素或 α 纤维素。

参考文献(References):

- [1] Gagen M, Mccarroll D, Loader N J et al. Exorcising the 'segment length curse': Summer temperature Reconstruction since AD 1640 using non-detrended stable Carbon isotope ratios from pine trees in northern Finland[J]. Holocene, 2007, 17(4): 435-446.
- [2] Loader N J, Mccarroll D, Gagen M et al. Extracting climatic information from stable isotopes in tree rings[J]. Terrestrial Ecology, 2007, 1(1): 25-48.
- [3] Liu Xiaohong, Shao Xuemei, Wang Lili et al. Climatic significance of the stable Carbon isotope composition of tree-ring cellulose: Comparison of Chinese hemlock (*Tsuga chinensis* Pritz) and alpine pine (*Pinus densata* Mast) in a temperate-moist region of China[J]. Science in China Series D-earth Sciences, 2007, 50(7): 1076-1085.
- [4] Loader N J, Santillo P M, Woodman-Ralph J P et al. Multiple stable isotopes from oak trees in southwestern Scotland and the potential for stable isotope dendroclimatology in maritime climatic regions[J]. Chemical Geology, 2008, 252(1/2): 62-71.
- [5] Cernusak L A, English N B. Beyond tree-ring widths: stable iso-

- topes sharpen the focus on climate responses of temperate forest trees[J]. *Tree Physiology*, 2015, 35(1): 1-3.
- [6] 赵兴云, 王建, 商志远, 等. 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值方位分布及年际变化的普遍性研究——以中国东部亚热带地区为例[J]. *地理科学*, 2012, 32(2): 193-198. [Zhao Xingyun, Wang Jian, Shang Zhiyuan, et al. The universality of Azimuth distribution and inter-annual variation of $\delta^{13}\text{C}$ in tree rings—A case study in eastern subtropics areas of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(2): 193-198.]
- [7] 赵兴云, 王建, 商志远, 等. 钱君龙天目山柳杉树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列所反映的植物水分利用率对大气 CO_2 浓度变化的生理响应[J]. *地理科学*, 2008, 28(5): 698-702. [Zhao Xingyun, Wang Jian, Shang Zhiyuan et al. Foliage physiological response to increase of atmospheric CO_2 concentration reflected by $\delta^{13}\text{C}$ series of tree ring in Tianmu Mountains. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(5): 698-702.]
- [8] Wilson A, Grinsted M. $12\text{C}/13\text{C}$ in cellulose and lignin as palaeothermometers[J]. *Nature*, 1977, 265: 133-135.
- [9] Mazany T, Lerman J C, Long A. Carbon-13 in tree-ring cellulose as an indicator of past climates[J]. *Nature*, 1980, 287: 432-435.
- [10] Borella S, Leuenberger M, Saurer M et al. Reducing uncertainties in $\delta^{13}\text{C}$ analysis of tree rings: Pooling, milling, and cellulose extraction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103(D16): 19519-19526.
- [11] Loader N J, Robertson I, Mccarroll D. Comparison of stable Carbon isotope ratios in the whole wood, cellulose and lignin of oak tree-rings[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 196(3): 395-407.
- [12] 商志远, 王建, 崔明星, 等. 樟子松树轮不同组分的稳定碳同位素分析[J]. *生态学报*, 2011, 31(18): 5148-5158. [Shang Zhiyuan, Wang Jian, Cui Mingxing et al. Analysis of stable Carbon isotopes in different components of tree rings of *Pinus sylvestris* var. *mongolica*. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5148-5158.]
- [13] Cullen L E, Grierson P F. Is cellulose extraction necessary for developing stable Carbon and Oxygen isotopes chronologies from *Callitris glaucophylla*?[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 236(3): 206-216.
- [14] Taylor A M, Brooks J R, Lachenbruch B et al. Radial patterns of Carbon isotopes in the xylem extractives and cellulose of Douglas-fir[J]. *Tree Physiology*, 2007, 27(6): 921-927.
- [15] Taylor A M, Brooks J R, Lachenbruch B A et al. Correlation of Carbon isotope ratios in the cellulose and wood extractives of Douglas-fir[J]. *Dendrochronologia*, 2008, 26(2): 125-131.
- [16] Ares A, Harrington C A, Terry T A. Vegetation control effects on untreated wood, crude cellulose and holocellulose $\delta^{13}\text{C}$ of early and latewood in 3- to 5-year-old rings of Douglas-fir[J]. *Trees-Structure and Function*, 2008, 22(5): 603-609.
- [17] English N B, McDowell N G, Allen C D et al. The effects of α -cellulose extraction and blue-stain fungus on retrospective studies of Carbon and Oxygen isotope variation in live and dead trees[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry : RCM*, 2011, 25(20): 3083-3090.
- [18] Eglin T, Maunoury-Danger F, Fresneau C et al. Biochemical composition is not the main factor influencing variability in Carbon isotope composition of tree rings[J]. *Tree Physiology*, 2008, 28(11): 1619-1628.
- [19] Roussel M, Dreyer E, Montpied P et al. The diversity of $(13)\text{C}$ isotope discrimination in a *Quercus robur* full-sib family is associated with differences in intrinsic water use efficiency, transpiration efficiency, and stomatal conductance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(8): 2419-2431.
- [20] Warren C R, Mcgrath J F, Adams M A. Water availability and Carbon isotope discrimination in conifers[J]. *Oecologia*, 2001, 127(4): 476-486.
- [21] Ma Linmin, Duolikun R, Jianfu Z, et al. The environmental signals of stable Carbon isotope in various tree-ring components of *Pinus tabulaeformis*[J]. *Trees*, 2011, 25(3): 435-442.
- [22] 秦国峰. 马尾松地理起源及进化繁衍规律的探讨[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(4): 406-412. [Qin Guofeng. Geographical origin and evolution of Masson Pine. *Forest Research*, 2002, 15(4): 406-412.]
- [23] 周政贤. 中国马尾松[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001. [Zhou Zhengxian. *Masson pine in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2001.]
- [24] 刘元本, 蒋建平, 张玉祥. 河南省马尾松、杉木的分布与生长[J]. *林业科学*, 1960, (1): 24-43. [Liu Yuanben, Jiang Jianping, Zhang Yuxiang. The growth and distribution of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* in Honan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 1960, (1): 24-43.]
- [25] 李振基, 吴小平, 陈小麟, 等. 江西九岭山自然保护区综合科学考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 2009. [Li Zhenji, Wu Xiaoping, Chen Xiaolin et al. Report of scientific survey on Jiulingshan Reserve of Jiangxi. Beijing: Science Press, 2009.]
- [26] 刘信中, 肖忠优, 马建华. 江西九连山自然保护区科学考察与森林生态系统研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002. [Liu Xinzong, Xiao Zhongyou, Ma Jianhua. Scientific survey and study on the forest ecosystem in Jiangxi Jiulianshan Nature Reserve. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002.]
- [27] 钱君龙, 王苏民, 吕军, 等. 用树轮 α -纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 重建天目山地区近160年气候[J]. *中国科学D辑*, 2001, 31(4): 333-341. [Qian Junlong, Wang Sumin, Lv Jun et al. Reconstruction of the climate in the Tianmu Mountain area, Zhejiang Province, in the last 160 years by $\delta^{13}\text{C}$ sequence of tree ring α -cellulose. *Science in China*, 2001, 31(4): 333-341.]
- [28] Leavitt S W, Long A. Sampling strategy for stable Carbon isotope analysis of tree rings in pine[J]. *Nature*, 1984, 311(5982): 145-147.
- [29] Szymczak S, Joachimski M M, Braeuning A et al. Comparison of whole wood and cellulose Carbon and Oxygen isotope series from *Pinus nigra* ssp *laricio* (Corsica/France)[J]. *Dendrochronology*

- logia, 2011, 29(4): 219-226.
- [30] 马利民, 刘禹, 赵建夫, 等. 树木年轮中不同组分稳定碳同位素含量对气候的响应[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2607-2613. [Ma Limin, Liu Yu, Zhao Jianfu et al. Response of stable-carbon isotope composition of different tree-ring compounds to climatic change. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(12): 2607-2613.]
- [31] Ferrio J V J, oxygen isotope ratios in wood constituents of *Pinus halepensis* as indicators of precipitation. Temperature and vapour pressure deficit[J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 2005, 57(2): 164-173.
- [32] Au R, Tardif J C. Chemical pretreatment of *Thuja occidentalis* tree rings: implications for dendroisotopic studies[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(9): 1777-1784.
- [33] Hoper S T, McCormac F G, Hogg A G et al. Evaluation of wood pretreatments on oak and cedar[J]. Radiocarbon, 1998, 40(1, 1, SI): 45-50.
- [34] Boettger T, Haupt M, Knöller K et al. Wood cellulose preparation methods and mass spectrometric analyses of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, and nonexchangeable $\delta^2\text{H}$ values in cellulose, sugar, and starch: an interlaboratory comparison[J]. Analytical Chemistry, 2007, 79(12): 4603-4612.

Diverse Stable Carbon Isotope Ratios in Tree-ring Components of *Pinus massoniana* with Their Climate Sensitivities

Wang Jian¹, Zhao Yesi^{1,2}, Shang Zhiyuan¹, Bai Shibiao¹, Chen Zhenju³, Zhang Zhigang¹

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 3. College of Forestry, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, Liaoning, China)

Abstract: It has been proved that stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) of tree-ring is an excellent physical proxy for climatic reconstruction in warm and moist regions. However, since wholewood, the raw material of tree-ring, is composed by different chemical components and it is still uncertain which component contains the most stronger climate signal in its $\delta^{13}\text{C}$. In this study, climate sensitivities of $\delta^{13}\text{C}$ in wholewood, holocellulose and α -cellulose were compared in *Pinus massoniana* from mountains of Jiuling and Jiulian in southeastern China. Results indicated that $\delta^{13}\text{C}$ of α -cellulose and holocellulose were enriched by $1.211 \pm 0.121\text{‰}$ and $1.170\text{‰} \pm 0.168\text{‰}$ compared with the whole wood respectively; $\delta^{13}\text{C}$ series of the three components demonstrated high coherence with significant positive correlation coefficients ($p < 0.001$); Hydroclimatic conditions during the middle to late growing season were both the dominated climatic factors limiting $\delta^{13}\text{C}$ variations in the two study areas and $\delta^{13}\text{C}$ of the three components all significantly correlated with these climatic factors ($p < 0.05$) without obviously differences. Therefore, it can be concluded that $\delta^{13}\text{C}$ of tree-ring whole wood in *Pinus massoniana* is good enough to be used in the climatic reconstruction at an annual or even longer time scale and holocellulose or α -cellulose extraction unnecessary during the studies about stable isotopes in tree-ring of *Pinus massoniana*.

Key words: stable carbon isotope; tree-ring; climate sensitivity; component; *Pinus massoniana*