

西双版纳思茅松 (*Pinus kesiya*) 年轮宽度和早晚材稳定氧同位素对气候因子的响应

牛 颖^{1,2}, 杨绕琼^{1,2}, 付培立^{1,3}, 赵 凡¹, 范泽鑫^{1,3,4}

1. 中国科学院西双版纳热带植物园 热带森林生态学重点实验室, 西双版纳 666303

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 云南哀牢山森林生态系统国家野外科学观测研究站, 普洱 676209

4. 中国科学院核心植物园, 西双版纳 666303

摘 要: 由于热带地区大部分树木缺乏清晰的年轮, 因此树木年轮的研究相对较为薄弱。树轮稳定同位素较树轮宽度能更好地记录环境变化的信息, 特别是研究年内稳定同位素可以提供气候变化的季节动态信息。本研究以西双版纳地区的思茅松 (*Pinus kesiya* Royle ex Gordon) 为研究材料, 建立了 1985—2018 年的思茅松年轮宽度、早材和晚材稳定氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$) 年表, 分析了树轮宽度、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 年表与温度、降水和标准化降水蒸散指数 (SPEI) 等气候要素的相关关系, 并研究了思茅松 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 记录的降水、SPEI 变化以及与大尺度季风环流的关系。结果表明: 西双版纳地区思茅松树轮 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 的均值接近, 并且均呈下降趋势, 这种下降趋势可能与西双版纳地区的雾日减少有关。树轮宽度对气候因子响应不敏感, 仅与上一年 7 月的温度呈显著负相关关系, 与上一年 7 月降水呈显著正相关关系。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 主要记录了生长季早期 (4 月和 5 月) 的降水和 SPEI 信号, 而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 主要记录了生长季末期 (8 月) 的降水和 SPEI 信号。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 分别能很好地代表区域 5 月和 8 月的干湿变化。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 也受到了 ENSO 的影响, 其中树轮 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与 3—12 月厄尔尼诺呈显著正相关关系, 树轮 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与 9—12 月厄尔尼诺呈显著正相关关系 ($p < 0.05$)。该研究表明西双版纳地区的思茅松树轮早晚材 $\delta^{18}\text{O}$ 具有重建区域干湿变化的潜力。

关键词: 亚洲热带; 稳定氧同位素; 早材和晚材; 气候响应; 空间相关

Climate responses of tree-ring widths and stable oxygen isotopes of *Pinus kesiya* in Xishuangbanna, southwestern China

NIU Ying^{1,2}, YANG Raoqiong^{1,2}, FU Peili^{1,3}, ZHAO Fan¹, FAN Zexin^{1,3,4}

收稿日期: 2020-02-20; 录用日期: 2020-05-13; 网络出版: 2020-05-21

Received Date: 2020-02-20; Accepted Date: 2020-05-13; Online first: 2020-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31870591, 31770533); 中国科学院东南亚中心项目 (Y4ZK111B01); 中国科学院版纳植物园“135 项目”突破一项目 (2017XTBG-T01)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (31870591, 31770533); Southeast Asia Center Program of Chinese Academy of Sciences (Y4ZK111B01); “Program 135” breakthrough I (2017XTBG-T01) of Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences

通信作者: 付培立, E-mail: fpl@xtbg.org.cn

Corresponding Author: FU Peili, E-mail: fpl@xtbg.org.cn

引用格式: 牛 颖, 杨绕琼, 付培立, 等. 2020. 西双版纳思茅松 (*Pinus kesiya*) 年轮宽度和早晚材稳定氧同位素对气候因子的响应 [J]. 地球环境学报, 11(6): 595–605.

Citation: Niu Y, Yang R Q, Fu P L, et al. 2020. Climate responses of tree-ring widths and stable oxygen isotopes of *Pinus kesiya* in Xishuangbanna, southwestern China [J]. *Journal of Earth Environment*, 11(6): 595–605.

1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Xishuangbanna 666303, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Ailaoshan Station of Subtropical Forest Ecosystem Studies, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Pu'er 676209, China
4. Center for Plant Ecology, Core Botanical Gardens, Chinese Academy of Sciences, Xishuangbanna 666303, China

Abstract: Background, aim, and scope Due to the lack of clear ring boundaries in most tropical tree species, tree ring studies in tropical region are still rare. Tree ring stable isotopes variations generally record stronger climatic signals compared with ring width, thus have great potential in dendroclimatic study in tropical region. Moreover, intra-annual variations of tree ring stable isotopes could provide seasonal climatic information. The present study aims to investigate the potential of tree ring width and stable oxygen isotope variations of a tropical pine species in Xishuangbanna, southwestern China. **Materials and Methods** The present study developed tree ring-width and stable oxygen isotope chronologies in earlywood ($\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$) and latewood ($\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$) of *Pinus kesiya* Royle ex Gordon (Simao pine) in Xishuangbanna. We performed correlation analyses between tree ring width, $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ and climatic factors such as monthly mean temperature, monthly precipitation and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) during the period 1985—2018. Spatial representatives were investigated by correlating $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ with regional precipitation. The relationships between tree ring oxygen isotope and El Niño-Southern Oscillation (ENSO) were also investigated. **Results** The mean values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ were 23.08‰ and 23.83‰, respectively, and both $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ showed decreasing trends. Tree ring-width chronology of *P. kesiya* in Xishuangbanna correlated negatively with the temperature and positively with precipitation in July of the previous year. $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ chronology were negatively correlated with precipitation in the early growing season (May), whereas $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ mainly recorded precipitation signal at the end of the growing season (August). $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ was positively correlated with SPEI in April, and negatively correlated with SPEI in May, whereas $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ was negatively correlated with SPEI in August. Both $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ were positively correlated with El Niño and negatively correlated with Southern Oscillation Index. **Discussion** Our study showed that tree growth of *P. kesiya* in Xishuangbanna is not sensitive to climate variables. The mean value of $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ (23.08‰) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ (23.83‰) is similar, which may due to the low variability of rainfall $\delta^{18}\text{O}$ during the growing season. The decreasing trends of both $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ could be related to the decreasing of the contribution of fog water to the tree water use in Xishuangbanna. $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ were negatively correlated with regional precipitation in May and August, respectively. Strong correlation between tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ and regional precipitation confirmed that tree ring $\delta^{18}\text{O}$ has the potential to reconstruct regional precipitation variability in the tropical regions. Moreover, tree ring $\delta^{18}\text{O}$ showed high correlation with ENSO index, which implies that ENSO has an important influence on the hydro-climate in the study region. **Conclusions** Tree ring $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ mainly records precipitation signal in May of the early growing season, while $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ mainly records precipitation signal in August at the end of the growing season (latewood formation period). The $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ can represent the regional precipitation patterns in May and August, respectively. Tree-ring was $\delta^{18}\text{O}$ mainly positively correlated with El Niño and negative correlation with the Southern Oscillation Index. **Recommendations and Perspectives** This study indicates that earlywood and latewood $\delta^{18}\text{O}$ of *P. kesiya* in this region have high potential to reconstruct hydro-climate history in different seasons.

Key words: Asian tropics; stable oxygen isotope; earlywood and latewood; climate response; spatial correlation

树木年轮具有定年准确、分辨率高、连续性好等特点,能够长期、定量、准确地记录树木生长时期的气候信息(Fritts, 1976; 吴祥定, 1990)。然而在热带地区,由于树木生长限制因子不明显、

年轮界限不清晰、交叉定年难度大等问题,树木年轮气候学的研究较为薄弱(方克艳等, 2014; Pumijumnon, 2013; Xu et al, 2016)与树木年轮宽度指标相比,树轮稳定同位素具

有对气象因子的响应更敏感、精确度高以及受年龄效应影响小等特点 (McCarroll and Loader, 2004; Loader et al, 2007; 冀春雷等, 2010; 刘晓宏等, 2015)。树轮稳定氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 对气候变化的敏感性高于树木年轮宽度, 尤其在湿润的热带和亚热带地区, 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 较好地记录了区域气候的水分信号 (Evans and Schrag, 2004; Shi et al, 2011)。影响树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 比率的因素主要包括源水信号、叶片的蒸发富集和木质部水的交换 (McCarroll and Loader, 2004)。土壤水分在植物根系吸收以及在木质部运输过程中不会发生同位素分馏, 因此, 植物木质部水分的氧同位素比率主要受降水和土壤氧同位素比率的影响。在热带季风区, 由于年际温度波动较小, 降水氧同位素比率主要受雨量效应以及水汽来源信号的影响 (Wei et al, 2018)。树轮的早材和晚材形成于不同的时期, 受控于生长季不同阶段的环境条件, 因而可能记录相应季节的气候信息 (陈瑶等, 2017)。树轮年内 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究能够较好地反演降水氧同位素的季节变化 (Zeng et al, 2016; Xu et al, 2016)。在中国西南地区, 树轮早材 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映了生长季早期 (春夏季) 的降水和相对湿度信号, 而晚材 $\delta^{18}\text{O}$ 主要反映生长季晚期 (秋季) 的降水和相对湿度信号 (An et al, 2012; Fu et al, 2017)。

思茅松 (*Pinus kesiya* Royle ex Gordon) 在东南亚地区又被称为卡西亚松, 属于暖热型松类 (李淡清, 1990)。思茅松是云南重要的造林树种之

一, 自然分布于相对湿润的云南中南部和西南部 (吴兆录和党承林, 1992; 孙雪莲等, 2015; 龙廷位和施俊美, 2019)。思茅松的年轮早材和晚材界限清晰, 适合用于树木年轮年内稳定氧同位素变化的研究 (Fu et al, 2017)。西双版纳地区位于亚洲热带北缘, 属于热带季风气候, 分为干湿两季, 具有雨热同期的气候特点 (黄玮和刘瑜, 2012; 朱华等, 2015)。本文拟通过研究西双版纳地区思茅松的年轮宽度, 早材和晚材氧同位素的年际间变化, 探究: (1) 西双版纳地区思茅松树轮宽度指数、早、晚材稳定氧同位素比率变化与气候因子关系; (2) 树轮早、晚材氧同位素比率与区域降水的空间相关关系; (3) 树轮早材和晚材氧同位素比率与海气过程的联系。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

采样点位于西双版纳傣族自治州勐腊县易武保护区内 ($22^{\circ}04'12''\text{N}$, $101^{\circ}31'48''\text{E}$, 海拔 1357 m) (图 1)。采样点的森林类型为次生林, 南向坡向, 坡度为 50° 。研究所用的气象数据来自于勐腊气象站 ($21^{\circ}28'48''\text{N}$, $101^{\circ}34'12''\text{E}$, 海拔 631.9 m)。根据 1985—2018 年的数据资料, 该区域的年总降雨量为 1520 mm, 降水主要集中在 5—9 月, 占全年降水量的 77%。年平均气温 21.9°C , 月均温最低的月份为 1 月 (16.6°C), 月均温最高的月份为 6 月 (25.5°C) (图 2)。

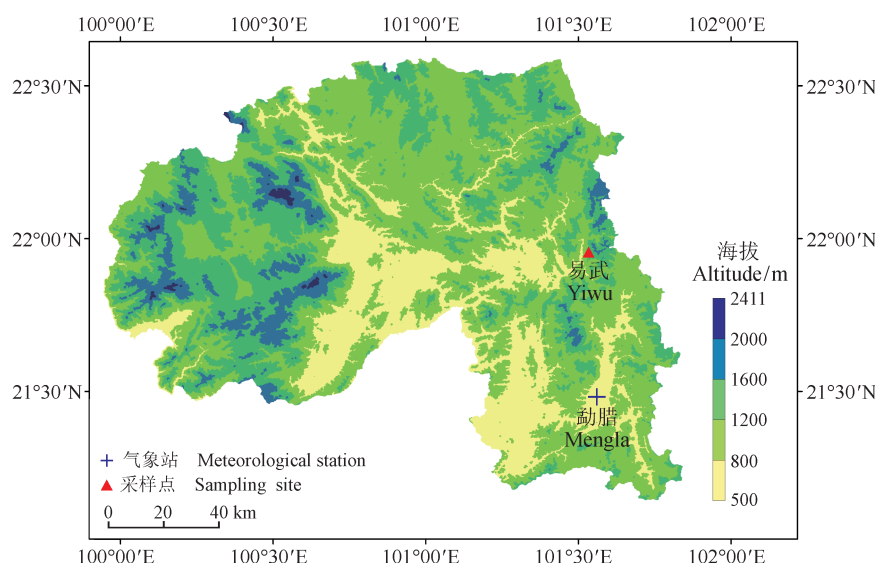


图 1 易武思茅松树轮采样点以及气象站分布图

Fig.1 Location of sampling site of *Pinus kesiya* and meteorological station in Mengla County

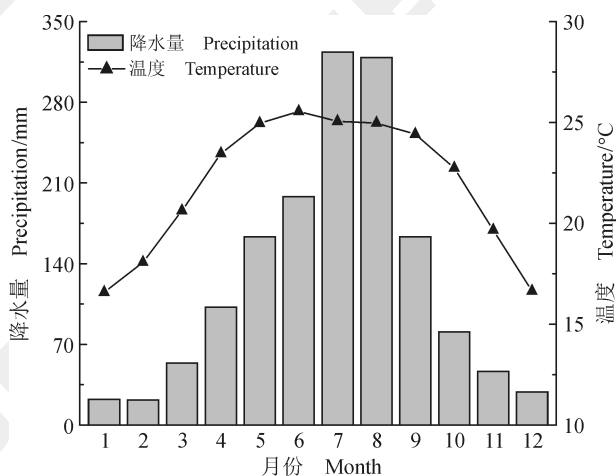


图 2 勐腊气象站 1985—2018 年
多年平均温度和降水量分布图

Fig.2 Monthly mean temperature (blue triangle line) and precipitation (grey bar) over the period 1985—2018 in the Mengla meteorological station

1.2 样品采集和 α -纤维素提取

思茅松树轮样品采集于 2019 年 3 月。在采样点中选择胸径较大、未采割过松脂的植株，用直径为 5.5 mm 的生长锥在胸高处取样，共采集 26 棵树（52 根样芯）。将采集好的样品带回实验室，样芯风干后使用颗粒度从低到高的砂纸将年轮界限打磨清晰光滑，用树木年轮分析仪（LINTAB 6, Rinntech, 德国）测定年轮宽度，利用 TSAP-Win 软件进行交叉定年，利用 ARSTAN 软件的负指数去趋势方法建立思茅松年轮宽度标准年表（Cook and Holmes, 1986）。

从样品中选择与主年表匹配度高、定年准确的 4 根样芯（来自于 4 棵树）进行年轮氧同位素的分析。年轮同位素样品分析的时间跨度为 1985—2018 年。为研究氧同位素的季节变化，对 4 根样芯的早材和晚材进行剥离，其中早材只选取前半部分，这是由于前半部分的早材较好地记录了生长季早期的气候信号（Szejner et al, 2016）。为降低氧同位素的测定成本，将 4 根样芯相应年份的早材和晚材样品进行了混合。根据前人研究，混合样芯的方法在降低成本的同时也较好地保留了不同样芯所携带的气候信号（Foroozan et al, 2019）。用刀片将样品切碎，包裹在滤袋（ANKOM Technology, Macedon, 美国）中用次氯酸钠-氢氧化钠法提取 α -纤维素（Wieloch et al, 2011），然后用超声波细胞破碎仪（Bioruptor-UCD-200, Diagenode, 比利时）将样品均质化。最后用真空

冷冻干燥机（上海比朗仪器制造有限公司，中国）干燥后，利用中国科学院西双版纳热带植物园中心实验室的稳定同位素质谱仪（Delt V advantage, ThermofisherScientific, 德国）测定树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值，样品包裹在银杯中，在测定过程中，选用的标准样品为云杉木粉（Cat. No. B2213, Certificate No. 222545）， $^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 23.87\text{‰}$ ， $\sigma = 0.2\text{‰}$ 。质谱仪的测量精度为 0.3‰。

1.3 气象数据

气象数据选择离采样点最近的勐腊县气象站，从中国气象科学数据共享数据网（<http://data.cma.cn/site/index.html/>）上获得。气象资料的时间跨度为 1985—2018 年，气象要素包括月平均降水量（PRE）、月平均气温（MT）。研究区域的厄尔尼诺指数（NINO3.4）和南方涛动指数（SOI），从荷兰皇家气象研究所的数据共享网（https://climexp.knmi.nl/data/ihadisst1_nino3.4a.dat/和 <https://climexp.knmi.nl/data/isoi.dat/>）上获取。

1.4 数据分析

采用 Pearson 相关分析方法来分析树木年轮宽度指数和树轮早、晚材 $\delta^{18}\text{O}$ 序列对不同气象因子以及大尺度环流指数（NINO3.4 和 SOI）的响应。由于上一年的气候条件可能会对当年的树木年轮宽度指数和树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的值产生影响（Fritts, 1976），所以选取前一年 7 月到当年 12 月（共 18 个月）的气象因子进行分析。还将不同月份的气象资料进行了组合（3—5 月作为春季，6—8 月作为夏季，9—11 月作为秋季以及上一年 12 月—当年 2 月作为冬季），计算不同季节的气象数据与年轮宽度指数及树轮早、晚材 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的关系。标准化降水蒸散指数（SPEI）主要通过使用勐腊气象站月均温与降水的关系，在 R 语言中使用“SPEI”程序包进行计算（Vicente-Serrano et al, 2010）。在计算过程中，通过 Thornthwaite 的方法计算潜在蒸散发（Thornthwaite, 1948），并通过降水和标准蒸发散的差值计算月平均 SPEI。采用 CRU 格点数据网对树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列进行与降雨量的空间分析，空间分析是通过 KNMI Climate Explorer 网站完成（<http://climexp.knmi.nl/start.cgi/>）。

2 结果

2.1 标准年轮宽度年表和树轮氧同位素序列的特征分析

采样点思茅松的年代跨度为 1955—2018 年，

平均生长速率为 $4.07 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 样本总体代表性 (EPS) 为 0.96 (表 1), 说明采样点的树轮样品能够代表该地区的样本。

本研究中, 思茅松树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的时间范围为 1985—2018 年 (图 3)。树轮晚材氧同位素序列 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$) 的标准差 (1.47‰) 比树轮早材氧同位素序列 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$) (1.76‰) 的小, 说明 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$

的离散程度更小。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 序列的平均值接近, 其中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 变化范围为 20.83‰ — 28.45‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 变化范围为 20.71‰ — 26.88‰ 。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 呈显著正相关关系 ($r=0.36$, $p<0.05$), $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和上一年 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 相关性不显著 ($r=0.26$, $p>0.05$) (表 2)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 在 1985—2018 年均呈下降趋势 (图 3)。

表 1 思茅松树轮宽度标准年表统计参数
Tab.1 Statistics of tree ring-width standard chronologies of *Pinus kesiya*

样品名 Sample name	样本量 (树/芯) Sample size (tree/core)	时间范围 Chronology span	平均生长 速率 Average growth rate /($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)	序列间 平均相关系数 Mean inter- series correlation	一阶线性自 相关 1st order auto correlation	样本总体代表性 Expressed population signal	平均 敏感度 Mean sensitivity	标准差 Standard deviation
PKYW	26/47	1955—2018	4.07	0.52	0.26	0.96	0.33	0.38

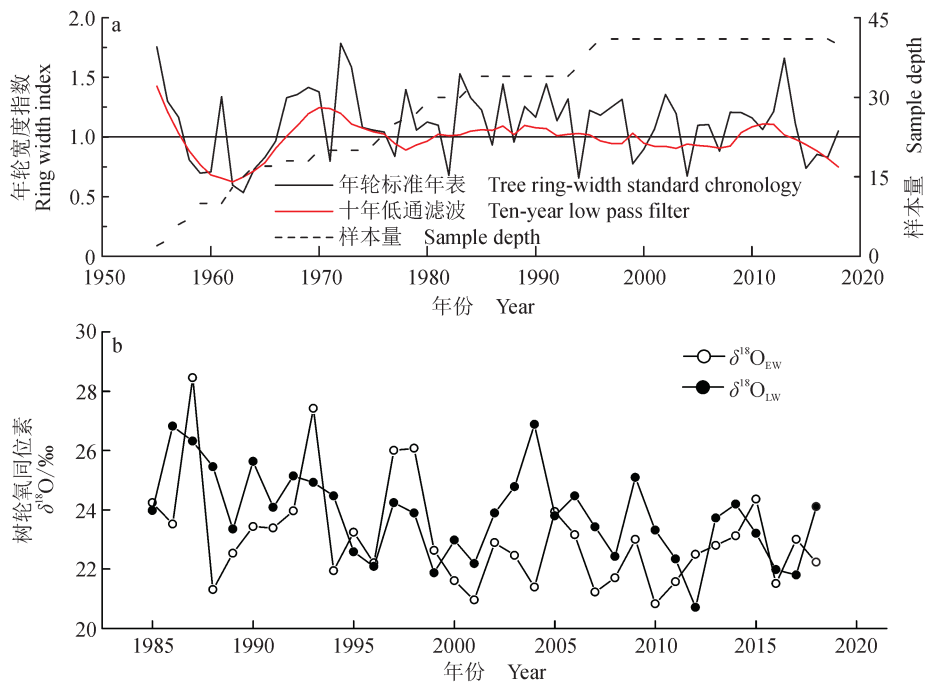


图 3 思茅松树轮宽度年表 (a) 和树轮早晚材 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素年表 (b)

Fig.3 Tree ring-width standard chronology (a) and tree-ring earlywood and latewood $\delta^{18}\text{O}$ chronologies (b) of *Pinus kesiya*

表 2 思茅松树轮早材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和晚材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 序列统计特征值
Tab.2 Statistical characteristics of the earlywood ($\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$) and latewood ($\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$) stable oxygen isotope variations of *Pinus kesiya*

氧同位素年表 Oxygen isotope chronologies	均值 Mean value/‰	最大值 Maximum value/‰	最小值 Minimum value/‰	标准差 Standard deviation	$r(\text{EW to LW})$	$r(\text{EW}_y \text{ to LW}_{y-1})$
$\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$	23.08	28.45	20.83	1.76	0.36	0.26
$\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$	23.83	26.88	20.71	1.47		

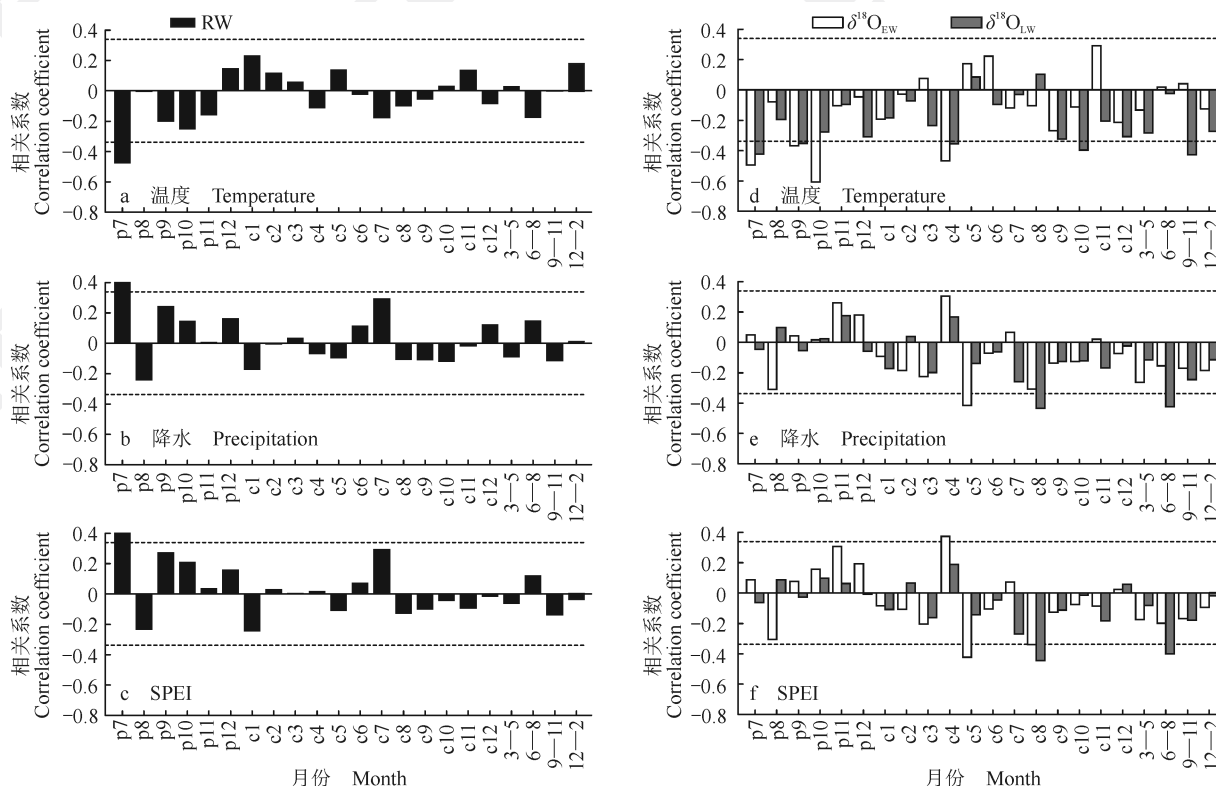
$r(\text{EW to LW})$ 代表早材氧同位素序列与晚材氧同位素序列的相关系数, $r(\text{EW}_y \text{ to LW}_{y-1})$ 代表当年早材的氧同位素序列与上一年晚材氧同位素序列的相关系数。

$r(\text{EW to LW})$: correlation coefficient between $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$; $r(\text{EW}_y \text{ to LW}_{y-1})$: correlation coefficient between current year's $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and previous year's $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$.

2.2 年轮宽度标准年表和同位素序列与气象因子的关系

对比年轮宽度标准年表和树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列对气象因子的响应关系可以看出, 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列对气象因子的响应更敏感。年轮宽度标准年表仅与上一年 7 月的温度呈显著负相关, 与上一年 7 月的降水量和 SPEI 呈显著正相关 (图 4a—c)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与上一年 7 月、9 月、10 月和当年 4 月的温度均

呈显著负相关关系, $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与上一年 7 月、9 月和当年 4 月、10 月还有秋季 (9—11 月) 的温度均呈显著负相关关系 (图 4d)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与 5 月降水量呈显著负相关, $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与 8 月和夏季 (6—8 月) 的降水量呈显著负相关关系 (图 4e)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与 4 月 SPEI 呈显著正相关, $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 分别与 5 月、8 月及夏季 (6—8 月) 的 SPEI 呈显著负相关关系 (图 4f)。



RW 为年轮宽度指数; $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 为早材氧同位素, $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 为晚材氧同位素; 横坐标中 p7—p12 代表上一年 7 月到上一年 12 月; c1—c12 代表当年 1 月至当年 12 月; 3—5 月代表春季, 6—8 月代表夏季, 9—11 月代表秋季, 12—2 为上一年 12 月到当年 2 月, 代表冬季。虚线代表相关系数 95% 的置信区间 ($p < 0.05$)。

RW is the ring-width index; $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ are earlywood and latewood $\delta^{18}\text{O}$ chronologies, respectively; p7 to p12 represent months from previous year's July to previous year's December, whereas c1 to c12 represent months of the current year; 3—5 represents spring (March to May), 6—8 represents summer (June to August), 9—11 represents autumn (September to November), 12—2 represents winter (previous year's December to current year's February). The dashed line represents a significance level at $p < 0.05$.

图 4 思茅松树年轮宽度标准年表 (a、b、c) 和树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列 (d、e、f) 与温度、降水量、标准化降水蒸散指数 (SPEI) 的相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between tree-ring-width standard chronology (a, b, c) and tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronologies (d, e, f) of *Pinus kesiya* and monthly mean air temperature, monthly mean precipitation and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

2.3 同位素序列与区域降雨的空间相关

由于 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 分别与当年 5 月和 8 月的降水量呈显著负相关关系, 进而分析了 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与当年 5 月和 8 月区域降水的空间格局 (图 5), 发现: $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与青藏高原南部、云南西南部、缅甸东部大部分地区、泰国北部、老

挝北部、越南西北部等区域 5 月降水量呈显著负相关关系, $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与云南西南部部分地区、海南南部、缅甸北部、泰国北部、老挝北部、越南北部的 8 月区域降水都呈负相关关系; 与越南和老挝南部的 8 月区域降水呈显著正相关关系。其中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与区域降水的空间相关性高于 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 。

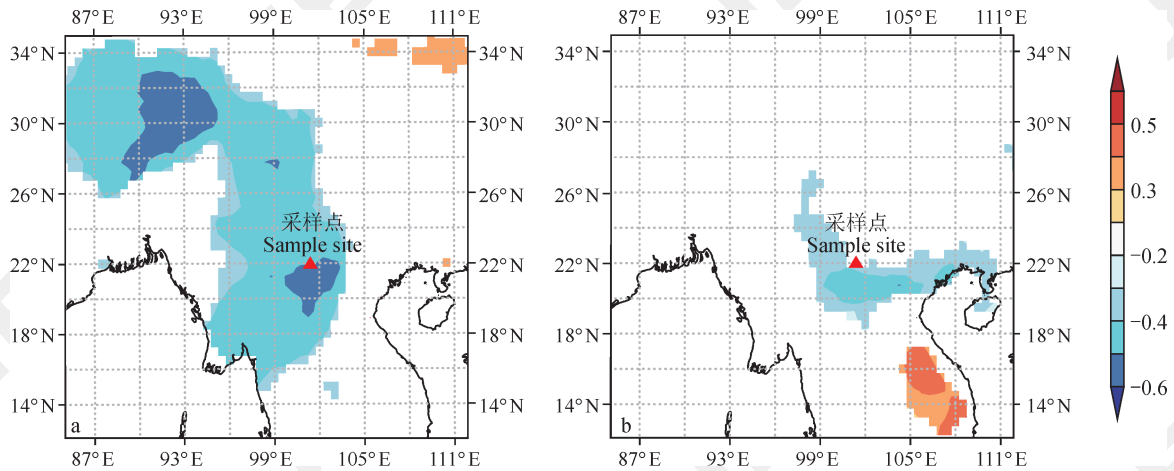


图5 树轮早材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与 5 月降水空间相关关系 (a), 树轮晚材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与 8 月降水空间相关关系 (b)

Fig.5 Spatial correlation coefficients between tree ring earlywood $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ and May precipitation (a), and between tree ring latewood $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ and August precipitation (b)

2.4 同位素序列与 ENSO 的关系

$\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与 3—12 月份的厄尔尼诺指数均呈显著正相关关系, 而与 3—11 月的南方涛动指数均呈显著负相关关系 (图 6a)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与 9—12 月份的厄尔尼诺指数均呈显著正相关关系; 与 3、

9、11 月的南方涛动指数均呈显著负相关关系 (图 6b)。其中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 序列与厄尔尼诺和南方涛动指数的相关系数总体上高于 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$, 但 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与 12 月厄尔尼诺指数以及 11 月厄尔尼诺指数的相关系数高于 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 。

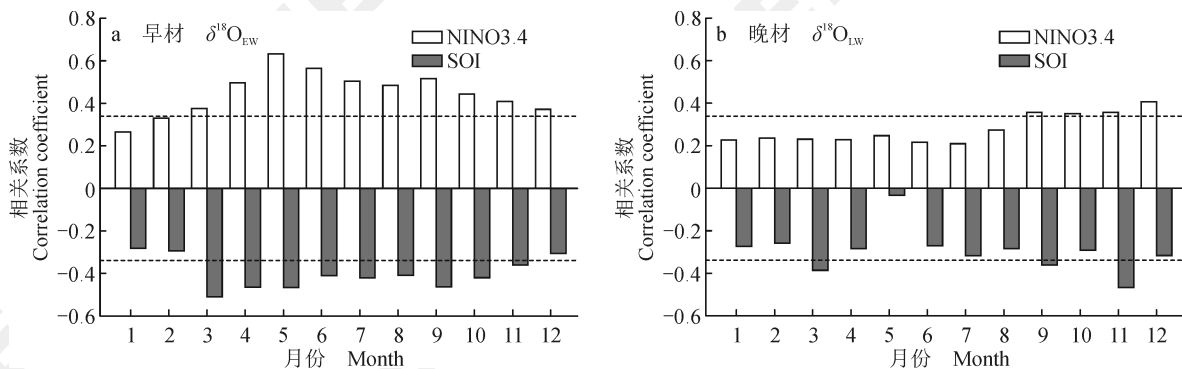


图6 树轮早材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ (a) 和晚材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ (b) 与厄尔尼诺和南方涛动指数的相关关系

Fig.6 Correlation coefficients between stable oxygen isotope variations in earlywood ($\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$, a), latewood ($\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$, b) and the average sea surface temperature anomaly in the Niño 3.4 region (5°N — 5°S , 120°W — 170°W) (NINO 3.4) and Southern Oscillation Index (SOI)

3 讨论

3.1 早材和晚材氧同位素特征及变化趋势

易武地区思茅松的树轮早材稳定氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$) 均值为 23.08‰, 晚材稳定氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$) 均值为 23.83‰, 两者的差值小于云南哀牢山地区的华山松 (3.68‰) (Fu et al, 2017) 和滇西北地区的丽江云杉 (8.76‰) (An et al, 2012), 而与哀牢山地区的思茅松早、晚材氧同位素的差值接近 (0.54‰) (Fu et al, 2017)。树

轮中 $\delta^{18}\text{O}$ 的年内波动受降水 $\delta^{18}\text{O}$ 季节波动的影响 (Yu et al, 2016), 同时还与植物根系深度和生长季的长短有关, 因此可能在不同样点和不同树种间存在差异 (Xu et al, 2014)。易武地区思茅松树轮 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ ($r=0.37$, $p<0.05$) 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ ($r=0.49$, $p<0.01$) 序列均呈下降趋势, 其中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 的下降速率为 $0.66\text{‰}\cdot(10\text{a})^{-1}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 的下降速率为 $0.74\text{‰}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。Zhu et al (2012) 发现泰国北部地区卡西亚松 (*P. kesiya*) $\delta^{18}\text{O}$ 的年内最大值 (类

似于本研究中的早材)在 20 世纪下降了 3.5‰ (下降速率为 $0.35\text{‰} \cdot (10\text{a})^{-1}$), 这种下降趋势主要与研究区域的雾水(氧同位素比率高于降水)随气温升高和森林覆盖率降低而不断减少有关, 雾水对树木水分利用贡献减少造成了年轮氧同位素比率的降低。西双版纳地区每年 11 月到次年 3 月存在着较浓的辐射雾(Liu et al, 2004), 在干季, 雾水对该区域的树木起到了补充水分的重要作用(Fu et al, 2016)。由于植被减少和城市热岛效应, 干季的雾日、雾时和雾露降水总量也呈逐年减少趋势(宫世贤和凌升海, 1996)。因此, 干季雾水的减少可能是西双版纳地区思茅松树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 逐年降低的原因, 但雾水减少对树轮氧同位素影响的生理生态过程还需要进一步研究。

3.2 年轮宽度和树轮氧同位素特征及其与气象因子的关系

从年轮宽度指数与气象因子的关系来看, 思茅松的径向生长仅与上一年 7 月的温度和降雨呈显著相关关系(图 4a)。可能由于采样点位于热带湿润地区, 树木生长的环境条件适宜, 温度、降水和 SPEI 的变化没有对该地区思茅的生长起到限制作用。这与 Xu et al (2011) 在老挝的研究结果相同, 树轮宽度指数在热带地区对气候响应的敏感程度较小, 相关性并未达到显著水平。思茅松径向生长仅受上一年 7 月的温度和降雨影响, 可能由于生长“滞后效应”, 7 月是思茅松生长较为旺盛的时期, 7 月份的高温可能限制树木生长, 而 7 月份的降水量增加将促进思茅松的生长。

通过树轮氧同位素序列与温度的相关分析发现, 树轮早材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和树轮晚材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 均与温度呈显著负相关关系, 与 Xu et al (2011) 和 An et al (2012) 的研究结果相反。本研究中所发现的树轮氧同位素与温度负相关可能主要由树轮氧同位素呈逐年下降趋势造成的, 而在 Xu et al (2011) 和 An et al (2012) 的研究中树轮氧同位素呈逐年上升趋势。树轮早材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与当年 5 月降水、树轮晚材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与 8 月降水均呈显著负相关关系, 可能是由于“降雨量效应”引起的(陈拓等, 1998)。在热带季风区, 树轮氧同位素主要受到源水信号的影响, 而叶片蒸发分馏过程对树轮氧同位素比率的贡献较小(Schubert and Jahren, 2015)。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 与降雨量的相关关系与前人的结果一致(安文玲等, 2009; An et al,

2012; 李强等, 2017; Fu et al, 2017; 张芳芳等, 2018), 早材氧同位素主要代表了季风早期的降水和空气相对湿度信号, 而晚材氧同位素则代表季风后期的降水信号。在本研究中, 还比较了树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 与相对湿度的相关关系, 但发现树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 与相对湿度并没有达到显著相关水平, 可能是研究区域叶片蒸发分馏过程对树轮氧同位素比率的贡献较小导致的。SPEI 是衡量干旱强度以及干旱持续时间的一个较好的参数(Vicente-Serrano et al, 2010)。本研究中, SPEI 和树轮同位素的关系基本上与降水和树轮氧同位素的关系一致(图 4e), 说明 SPEI 指数在该区域主要受降水的影响。

3.3 树轮氧同位素与区域气候的关系

易武地区位于东亚季风和南亚季风的叠加影响区域, 水汽主要来源于太平洋和印度洋(黄玮和刘瑜, 2012)。由图 5 可以看出树轮早材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和树轮晚材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 分别与区域 5 月和区域 8 月的降水呈显著负相关关系, 可能是研究样点与附近相关区域的水汽来源相同, 说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 具有代表区域降水的潜力。

厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)是热带海洋和大气相互作用的结果(许武成等, 2005)。ENSO 主要通过影响温度和降水来影响树木的生长和代谢活动, 进而影响了树轮中的 $\delta^{18}\text{O}$ (陈宝君等, 2002)。易武地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 与 EINO3.4 呈正相关关系(图 6), 这与前人的研究结果一致(马利民等, 2001; 张芳芳等, 2018; Zhao et al, 2019), 说明易武树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 可以反映区域 ENSO 的变化趋势。其中, 树轮 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 对 ENSO 的响应比树轮 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 要更敏感, 可能由于 ENSO 通常形成于春季(刘永强和丁一汇, 1995), 与树轮早材形成时期相同, 因此 ENSO 变化就更好地记录在了树轮早材 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 中。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 变化与大规模的夏季大气环流有关(Nagavciuc et al, 2019), 本研究结果说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 具有重建 ENSO 等大气环流的潜力。

4 结论

本文研究了西双版纳地区思茅松的径向生长和年轮早材($\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$)、晚材($\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$)稳定氧同位素及其与气象因子的关系, 结果表明: 思茅松 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 与 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 的年平均值接近, 并呈显著下降

趋势, 这种下降趋势可能与西双版纳地区雾日的减少有关。年轮宽度与气象因子的相关关系不显著, 而 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 较好地记录了生长季早期 (5 月) 的降水和 SPEI 信号, $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 主要记录了生长季晚期 (8 月) 的降水和 SPEI 信号。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{EW}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{LW}}$ 分别能很好地代表区域 5 月和 8 月的降水变化, 说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 具有重建区域降水变化的潜力。西双版纳地区的树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列还能在一定程度上记录下大尺度环流 ENSO 的信号, 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 主要与厄尔尼诺指数呈正相关关系, 因此树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 还具有重建 ENSO 变化的潜力。本文为热带地区利用树轮氧同位素重建气候变化的研究提供了参考依据。

致谢: 感谢谭美毅和马宏协助野外采样。感谢西双版纳易武州级自然保护区管护所何在新和邓建林对本研究的支持。感谢中国科学院西双版纳热带植物园公共技术服务中心测定树轮纤维素氧同位素。

参考文献

- 安文玲, 刘晓宏, 陈 拓, 等. 2009. 云南丽江树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的大气环流变化信息 [J]. *地理学报*, 64(9): 1103–1112. [An W L, Liu X H, Chen T, et al. 2009. Atmospheric circulation information recorded in tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ at Lijiang, Yunnan Province [J]. *Acta Geographica Sinica*, 64(9): 1103–1112.]
- 陈宝君, 钱君龙, 濮培民. 2002. ENSO 对天目山柳杉树轮同位素的影响 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 22(4): 53–58. [Chen B J, Qian J L, Pu P M. 2002. Relationship between ENSO and tree-ring stable isotopes of *Cryptomeria fortunei* from Tianmu Mountain area in east China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 22(4): 53–58.]
- 陈 拓, 秦大河, 康兴成, 等. 1998. 树轮氢、氧同位素研究进展 [J]. *地球科学进展*, 13(4): 382–386. [Chen T, Qin D H, Kang X C, et al. 1998. Progress in tree-ring hydrogen and oxygen isotope research [J]. *Advance in Earth Sciences*, 13(4): 382–386.]
- 陈 瑶, 勾晓华, 刘文火, 等. 2017. 亚洲树轮稳定氧同位素研究进展 [J]. *冰川冻土*, 39(2): 308–316. [Chen Y, Gou X H, Liu W H, et al. 2017. Advances in tree-ring stable oxygen isotope study in Asia [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 39(2): 308–316.]
- 方克艳, 陈秋艳, 刘昶智, 等. 2014. 树木年代学的研究进展 [J]. *应用生态学报*, 25(7): 1879–1888. [Fang K Y, Chen Q Y, Liu C Z, et al. 2014. Research advances in dendrochronology [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(7): 1879–1888.]
- 宫世贤, 凌升海. 1996. 西双版纳雾在减少 [J]. *气象*, 22(11): 10–14. [Gong S X, Ling S H. 1996. Fog decreasing in Xishuangbanna region [J]. *Meteorological Monthly*, 22(11): 10–14.]
- 黄 玮, 刘 瑜. 2012. 云南雨季开始期的时空变化特征及其与季风的关系 [J]. *中国农业气象*, 33(3): 348–354. [Huang W, Liu Y. 2012. Temporal and spatial feature of the beginning date of rainy season in Yunnan Province and its relationship with monsoon [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 33(3): 348–354.]
- 冀春雷, 徐 庆, 靳 翔, 等. 2010. 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*, 46(7): 129–135. [Ji C L, Xu Q, Jin X, et al. 2010. Application of the tree-ring stable isotopes in study on the global climate change [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 46(7): 129–135.]
- 李淡清. 1990. 思茅松定名质疑 [J]. *植物研究*, 10(4): 87–92. [Li D Q. 1990. The doubt about nomenclature of Simao pine [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 10(4): 87–92.]
- 李 强, 刘 禹, Takeshi Nakatsuka, 等. 2017. 西藏亚东地区铁杉树轮样本稳定氧同位素的气候响应 [J]. *地球环境学报*, 8(1): 6–14. [Li Q, Liu Y, Nakatsuka T, et al. 2017. Climate responses of tree-ring stable oxygen isotopes from Yadong County, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Earth Environment*, 8(1): 6–14.]
- 刘晓宏, 徐国保, 王文志, 等. 2015. 树轮稳定同位素记录: 进展、问题及展望 [J]. *第四纪研究*, 35(5): 1245–1260. [Liu X H, Xu G B, Wang W Z, et al. 2015. Tree-ring stable isotopes proxies: progress, problems and prospects [J]. *Quaternary Sciences*, 35(5): 1245–1260.]
- 刘永强, 丁一汇. 1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响 [J]. *大气科学*, 19(2): 200–208. [Liu Y Q, Ding Y H. 1995. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 19(2): 200–208.]
- 龙廷位, 施俊美. 2019. 云南省思茅松林碳储量动态变化研究 [J]. *林业调查规划*, 44(4): 7–13. [Long T W, Shi J M. 2019. Dynamic changes of carbon storage in *Pinus kesiya* var. *langbianensis* forest in Yunnan Province [J]. *Forest Inventory and Planning*, 44(4): 7–13.]

- 马利民, 刘禹, 安芷生. 2001. 秦岭树轮记录中的 ENSO 事件 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 21(3): 93–98. [Ma L M, Liu Y, An Z S. 2001. ENSO events from tree ring width in Qinling mountain [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(3): 93–98.]
- 孙雪莲, 舒清态, 欧光龙, 等. 2015. 基于随机森林回归模型的思茅松人工林生物量遥感估测 [J]. *林业资源管理*, (1): 71–76. [Sun X L, Shu Q T, Ou G L, et al. 2015. Remote sensing estimation of the biomass of artificial Simao pine forest based on random forest regression [J]. *Forest Resources Management*, (1): 71–76.]
- 吴祥定. 1990. 树木年轮与气候变化 [M]. 北京: 气象出版社. [Wu X D. 1990. Tree rings and climate change [M]. Beijing: China Meteorological Press.]
- 吴兆录, 党承林. 1992. 云南普洱地区思茅松林的生物量 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 14(2): 119–127. [Wu Z L, Dang C L. 1992. The biomass of *Pinus kesiya* var *langbianensis* stands in Puer District, Yunnan [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences)*, 14(2): 119–127.]
- 许武成, 马劲松, 王文. 2005. 关于 ENSO 事件及其对中国气候影响研究的综述 [J]. *气象科学*, 25(2): 212–220. [Xu W C, Ma J S, Wang W. 2005. A review of studies on the influence of ENSO events on the climate in China [J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 25(2): 212–220.]
- 张芳芳, 郑永宏, 潘国艳, 等. 2018. 神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的气候指示意义 [J]. *地理科学进展*, 37(7): 946–953. [Zhang F F, Zheng Y H, Pan G Y, et al. 2018. Climatic significance of tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ in Shennongjia Mountain [J]. *Progress in Geography*, 37(7): 946–953.]
- 朱华, 王洪, 李保贵, 等. 2015. 西双版纳森林植被研究 [J]. *植物科学学报*, 33(5): 641–726. [Zhu H, Wang H, Li B G, et al. 2015. Studies on the forest vegetation of Xishuangbanna [J]. *Plant Science Journal*, 33(5): 641–726.]
- An W L, Liu X H, Leavitt S W, et al. 2012. Specific climatic signals recorded in earlywood and latewood $\delta^{18}\text{O}$ of tree rings in southwestern China [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 64(1). DOI: 10.3402/tellusb.v64i0.18703.
- Cook E R, Holmes R L. 1986. Users manual for program ARSTAN [K]. Laboratory of Tree-Ring Research. Tucson, USA: University of Arizona.
- Evans M N, Schrag D P. 2004. A stable isotope-based approach to tropical dendroclimatology [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(16): 3295–3305.
- Foroozan Z, Griebinger J, Pourtahmasi K, et al. 2019. Evaluation of different pooling methods to establish a multi-century $\delta^{18}\text{O}$ chronology for paleoclimate reconstruction [J]. *Geosciences*, 9(6). DOI: 10.3390/geosciences9060270.
- Fritts H C. 1976. Tree rings and climate [M]. New York: Academic Press.
- Fu P L, Griebinger J, Gebrekirstos A, et al. 2017. Earlywood and latewood stable carbon and oxygen isotope variations in two pine species in southwestern China during the recent decades [J]. *Frontiers in Plant Science*, 7: 2050. DOI: 10.3389/fpls.2016.02050.
- Fu P L, Liu W J, Fan Z X, et al. 2016. Is fog an important water source for woody plants in an Asian tropical karst forest during the dry season? [J]. *Ecohydrology*, 9(6): 964–972.
- Liu W J, Meng F R, Zhang Y P, et al. 2004. Water input from fog drip in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, South-West China [J]. *Journal of Tropical Ecology*, 20(5): 517–524.
- Loader N J, McCarroll D, Gagen M, et al. 2007. Extracting climatic information from stable isotopes in tree rings [J]. *Terrestrial Ecology*, 1: 25–48.
- McCarroll D, Loader N J. 2004. Stable isotopes in tree rings [J]. *Quaternary Science Reviews*, 23(7/8): 771–801.
- Nagavciuc V, Ionita M, Perşoiu A, et al. 2019. Stable oxygen isotopes in Romanian oak tree rings record summer droughts and associated large-scale circulation patterns over Europe [J]. *Climate Dynamics*, 52(11): 6557–6568.
- Pumijumnong N. 2013. Dendrochronology in southeast Asia [J]. *Trees*, 27(2): 343–358.
- Schubert B A, Jahren A H. 2015. Seasonal temperature and precipitation recorded in the intra-annual oxygen isotope pattern of meteoric water and tree-ring cellulose [J]. *Quaternary Science Reviews*, 125: 1–14.
- Shi C M, Masson-Delmotte V, Risi C, et al. 2011. Sampling strategy and climatic implications of tree-ring stable isotopes on the southeast Tibetan Plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1/2): 307–316.
- Szejner P, Wright W E, Babst F, et al. 2016. Latitudinal gradients in tree ring stable carbon and oxygen isotopes reveal differential climate influences of the North

- American Monsoon System [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 121(7): 1978–1991.
- Thornthwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate [J]. *Geographical Review*, 38(1): 55–94.
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 23(7): 1696–1718.
- Wei Z W, Lee X, Liu Z F, et al. 2018. Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 488: 181–192.
- Wieloch T, Helle G, Heinrich I, et al. 2011. A novel device for batch-wise isolation of α -cellulose from small-amount wholewood samples [J]. *Dendrochronologia*, 29(2): 115–117.
- Xu C X, Sano M, Nakatsuka T. 2011. Tree ring cellulose $\delta^{18}\text{O}$ of *Fokienia hodginsii* in northern Laos: a promising proxy to reconstruct ENSO? [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D24). DOI: 10.1029/2011JD016694.
- Xu C X, Sano M, Yoshimura K, et al. 2014. Oxygen isotopes as a valuable tool for measuring annual growth in tropical trees that lack distinct annual rings [J]. *Geochemical Journal*, 48(4): 371–378.
- Xu C X, Zheng H Z, Nakatsuka T, et al. 2016. Inter- and intra-annual tree-ring cellulose oxygen isotope variability in response to precipitation in Southeast China [J]. *Trees*, 30(3): 785–794.
- Yu W S, Wei F L, Ma Y M, et al. 2016. Stable isotope variations in precipitation over Deqin on the southeastern margin of the Tibetan Plateau during different seasons related to various meteorological factors and moisture sources [J]. *Atmospheric Research*, 170: 123–130.
- Zeng X M, Liu X H, Evans M N, et al. 2016. Seasonal incursion of Indian Monsoon humidity and precipitation into the southeastern Qinghai-Tibetan Plateau inferred from tree ring $\delta^{18}\text{O}$ values with intra-seasonal resolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 443: 9–19.
- Zhao F, Fan Z X, Su T, et al. 2019. Tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ inferred spring drought variability over the past 200 years in the Hengduan Mountains, Southwest China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 518: 22–33.
- Zhu M F, Stott L, Buckley B, et al. 2012. 20th century seasonal moisture balance in Southeast Asian montane forests from tree cellulose $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Climatic Change*, 115(3/4): 505–517.