

神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的气候指示意义

张芳芳¹, 郑永宏^{1*}, 潘国艳², 袁 帅¹, 孔繁希¹, 起永东¹, 王 丹¹

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072)

摘 要:通过对湖北省神农架巴山冷杉(*Abies forrestii*)树轮纤维素氧同位素的分析,建立了1790–2011时段的年分辨率的 $\delta^{18}\text{O}$ 年表。将树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与邻近的巴东气象站记录的气候数据、大气环流数据以及南海海温进行对比分析,研究了树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列对气候要素的响应。结果表明,神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与该地区气候要素密切相关:与当年6–7月降水量呈负相关、与当年3–4月温度呈正相关,与当年6–7月相对湿度呈负相关。同时,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与当年2–3月北半球副高面积指数(5E–360)、9月南海副高面积指数(100E–120E)、1月太平洋极涡面积指数(Zone 2, 150E–120W)及4–5月南海海温(SST)呈显著正相关;与当年1月南方涛动指数(SOI)呈负相关。表明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列在一定程度上记录了大尺度的大气环流信息。该研究有助于进一步认知神农架地区树轮稳定氧同位素在过去气候变化研究中的潜在价值,为进一步气候重建研究提供科学依据。

关键词:树轮;稳定氧同位素;降水;南海海温;环流指数

1 引言

树轮同位素具有生理解释性强、反映环境参数多、精确度高等优点(Loader et al, 2003; Helle et al, 2004; 吴绍洪等, 2006; Liu et al, 2007),越来越多地应用于气候变化研究,且取得了较多研究成果(Liu et al, 2003; Liu et al, 2009; 王建等, 2016)。相关研究表明,树轮纤维素中氧同位素组成来源于植物利用的环境水,响应于温度、湿度以及降水的变化(Burk et al, 1981; Liu Y et al, 2008; 陈瑶等, 2017)。因此,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值可反映环境气候信息,在古气候重建方面(Wynn et al, 2014; Laverigne et al, 2017; Loader et al, 2017)具有很大潜力,在其他方面的应用(Bose et al, 2016; Duffy et al, 2017)也越来越多。

神农架为南水北调中线工程重要水源涵养地以及三峡库区天然绿色屏障,对该地区树轮–气候之间关系的充分认知具有重要的理论意义和实践价值。基于神农架地区树轮宽度的研究表明,巴山冷杉树轮宽度主要响应温度变化(Dang et al, 2013;

Dang et al, 2014; Hou et al, 2015; 陈秋艳等, 2015),并据此进行了2–5月温度重建(Zheng et al, 2016)。但同时也发现,树轮宽度与气候要素虽然在低频上一致性较高,但在高频上的一致性较差,限制了对该地区过去气候变化的理解,亟待进一步挖掘新的树轮指标弥补当前研究的短板。本文拟基于神农架地区巴山冷杉样本进行树轮氧同位素分析,探讨树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列对气候要素、大气环流指数以及南海海温的响应,挖掘该地区树轮氧同位素在气候变化研究中的潜力。

2 研究区域和研究方法

2.1 采样点概况

神农架林区(31°15′~31°57′N, 109°56′~110°58′E)总面积3253 km²,位于中国湖北省西部。据中国地貌单元的划分,该区属于中国大陆第二台阶,系大巴山山脉东部延伸部分,为湖北境内汉水和长江的分水岭。神农架地区多数山峰海拔高度在1500 m以

收稿日期:2017-11-12;修订日期:2018-03-07。

基金项目:国家自然科学基金项目(41771227) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771227]。

作者简介:张芳芳(1991–),女,河南焦作人,硕士研究生,主要从事树轮气候学研究,E-mail: zffang0803@163.com。

通讯作者:郑永宏(1978–),男,河北唐山人,副教授,主要从事树轮气候学以及全球变化研究,E-mail: zhengyh@whu.edu.cn。

引用格式: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.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.07.008

上,最高峰达3105 m,植被具有明显的垂直地带性,随海拔由低到高,从常绿阔叶林、落叶阔叶林、针叶和落叶阔叶林逐渐过渡到亚高山针叶林(包括亚高山灌木和草甸)。神农架地区有非常丰富的植物资源,有高等植物 3479 种(除苔藓植物除外),包括 1010 个属和 20 个科。林区年均温度 11.0~12.2℃,年均降水量 1170.2 mm,9 月-翌年 4 月是霜冻期,降雪主要集中在 9 月-翌年 3 月(Hou et al, 2015)。在海拔 2300~3100 m 的山地上,森林群落主要是由巴山冷杉(*Abies forrestii*)组成的单优暗针叶林,植被覆盖率高达 68%,坡度大约 30°左右,下垫面主要是山地棕壤夹杂砾石。

2.2 样芯采集和纤维素提取

树轮样品采集于神农谷(31°26'N, 110°16'E, 2772 m)(图 1),用生长锥在树干的胸高处取样,一颗树采集 2 根样芯,共采集巴山冷杉活树 55 棵树(110 根样芯)。样芯风干后进行交叉定年并建立宽度年表(表 1),用 COFECHA 程序检验定年质量。在准确定年的基础上,选择树龄较长、无缺年、边界清楚、生长无异样的样芯逐年剥离,考虑到可能存在幼龄化效应的影响,舍去靠近树心 10 年左右树轮。诸如 1970、1971 等年轮宽极窄,为保证实验需求,持续增加样本数量,直至剥离 23 个样芯(18 棵树)才达到实验需求。将不同样芯的同一年样品混合并低温烘干,用球磨仪将样品磨至 100 目左右,再将样品包裹

在滤布中,进行有机溶剂萃取;随后漂白,清洗后碱化,再用盐酸中和,最后利用超声波细胞破碎仪使样品进一步均一化,真空冻干后干燥保存即得 α -纤维素。用 5 mm 的银杯逐年将 α -纤维素包样,送入高温裂解元素分析仪连接气体稳定同位素质谱仪 MAT-253(系统误差 $<0.2\text{‰}$)测定树轮稳定氧同位素比率变化,建立稳定氧同位素年表。 α -纤维素提取过程在中国科学院西北生态环境资源研究院进行,同位素的测定工作在武汉大学完成。树轮氧同位素分析结果以 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 表示,其标准物质为 SMOW(标准平均海洋水)。其计算公式表示为:

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{R_{\text{样品}}}{R_{\text{标准}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰} \tag{1}$$

式中: $R=^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$,正值表示样品中特定同位素丰度高于标准样品,负值表示样品中特定的同位素丰度低于标准样品。

2.3 资料与方法

本文利用邻近的巴东气象站(图 1, 31°01'N, 110°13'E, 334 m)1953–2011 年月平均温度、月平均降水量、月平均相对湿度数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。巴东气象站年平均温度是 17.4℃,年降水量 1090 mm,4–9 月降水量占全年降水量的 89%左右,年均相对湿度为 70.3%(图 2)。4 月中下旬温度进入快速回升阶段,巴东气象站 4 月下旬平均温度可达 21℃左右。

此外,还选择了 1953–2011 年逐月北半球副高面积指数(NHSA, 5E–360)、南海副高面积指数(SS-SA, 100E–120E)、太平洋极涡面积指数(PVA, 2 区; 150E–120W)、太平洋区涡强度指数(PVI, 2 区; 150E–120W)、南方涛动指数(SOI)以及 1982–2011 年的南海海温(SST)数据。上述 5 个环流指数来源于 <http://cmdp.ncc-cma.net>,南海海温(SST)数据来源

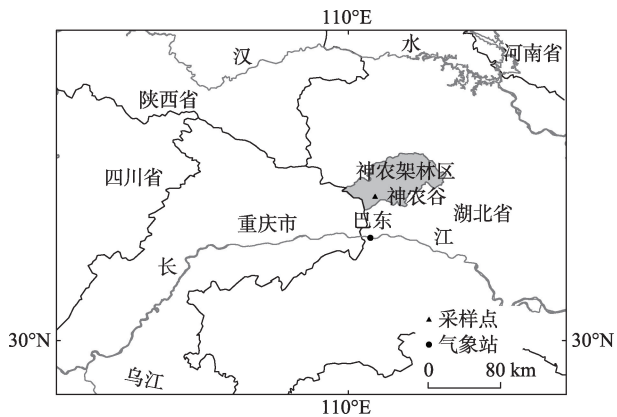


图 1 神农架树轮采样点以及气象站分布图
Fig.1 Location of the tree-ring sampling sites in Mt. Shennongjia and meteorological stations

表 1 树轮标准宽度年表参数

Tab. 1 Statistics of tree-ring width standard chronology

年表时段	相关系数	信噪比	样本对总体代表性	平均敏感度	自相关系数	标准差	第一主成分
1778–2011	0.371	7.674	0.885	0.134	0.031	0.185	0.426

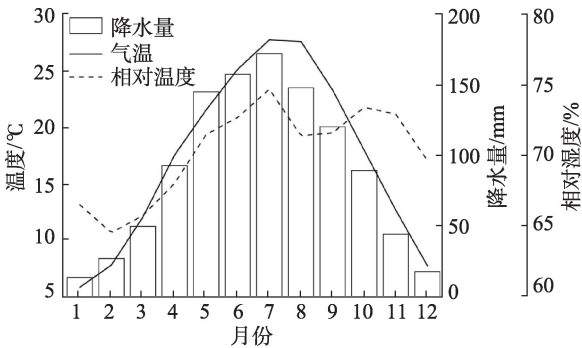


图 2 巴东气象站各月温度、降水、相对湿度分布图
Fig.2 Monthly temperature, precipitation and relative humidity at the meteorological station in Badong

于<http://climexp.knmi.nl/registerform.cgi>。

采用 Pearson 相关分析探究树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列对气候要素及大尺度环流指数的响应。考虑到上年气候条件可能对当年树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在影响,在进行相关分析时考虑了上年气候条件的影响。采用功率谱分析对树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列进行周期分析。

3 结果与分析

3.1 树轮稳定同位素序列及特征

图3为巴山冷杉树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列,序列长度为222年(1790–2011年)。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列变化范围为20.89‰~26.09‰。表2为神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的统计特征值,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的标准差和变异系数均较小,一阶自相关系数为0.326,说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列在一定程度上受到上年气候要素的影响。从树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列及其11年滑动平均曲线可以看出,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 相对富集的时段为:1790–1797年、1854–1863年、1899–1911年、1923–1941年、1960–2011年;树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 相对亏损的时段为:1798–1853年、1864–1898年、1912–1922年、1942–1959年。功率谱分析结果(图4)发现树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列存在2个显著周期,分别为7.8 a和23.3 a。

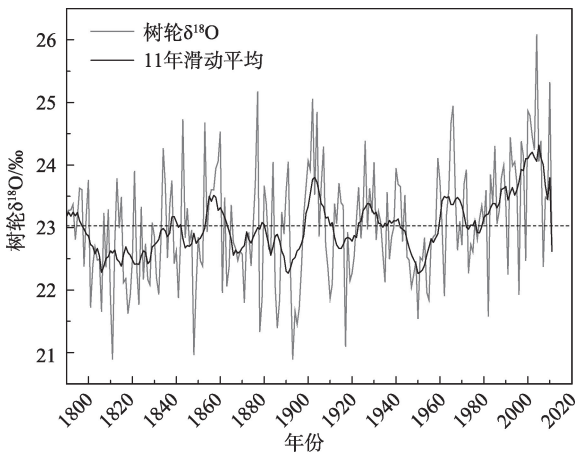


图3 神农架地区巴山冷杉树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列(1790–2011年)

Fig.3 $\delta^{18}\text{O}$ value in tree rings of *Abies forrestii*, 1790–2011

表2 神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列统计特征值

Tab.2 Main characteristic values of tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ in Mt. Shennongjia

统计值	一阶自 相关系数	样本数	均值/‰	方差	变异系 数/%	峰度
	0.326	222	23.03	0.80	3.80	0.15

3.2 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列对气候要素的响应

3.2.1 对降水量的响应

树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与月平均降水量的相关分析结果(图5a、6a)表明,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列仅与当年6月降水达到0.05的显著性水平($r=-0.332$, $N=59$),二者分别一阶差分后相关性仍达到了0.05的显著性水平。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与当年6–7月降水量的相关系数达到 -0.370 ($P<0.01$, $N=59$),二者分别一阶差分后相关仍达到0.05的显著性水平。说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含了当年6月及6–7月降水变化信号。

3.2.2 对温度的响应

树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与月平均温度的相关分析结果(图5b、6b)表明,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与上年8月及当年1月平均温度达到0.05的显著性水平,但一阶差分序列相关性均未达到0.05的显著性水平。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与当年3–4月平均温度相关系数达到0.269 ($P<0.05$, $N=59$),二者分别一阶差分后相关仍达到0.05的显著性水平。说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含了当年3–4月平均温度变化信号。

3.2.3 对相对湿度的响应

树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与月平均相对湿度的相关分析结果(图5c、6c)表明,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列仅与当年7月平均相对湿度呈显著负相关($r=-0.312$, $P<0.05$, $N=59$);二者分别一阶差分后相关系数提高到 -0.337 ($P<0.05$, $N=58$)。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与当年6–7月平均湿度相关性达到0.260 ($P<0.05$, $N=59$),二者分别一阶差分后相关仍达到0.05的显著性水平。说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含了当年7月及6–7月平均湿度变化信号。

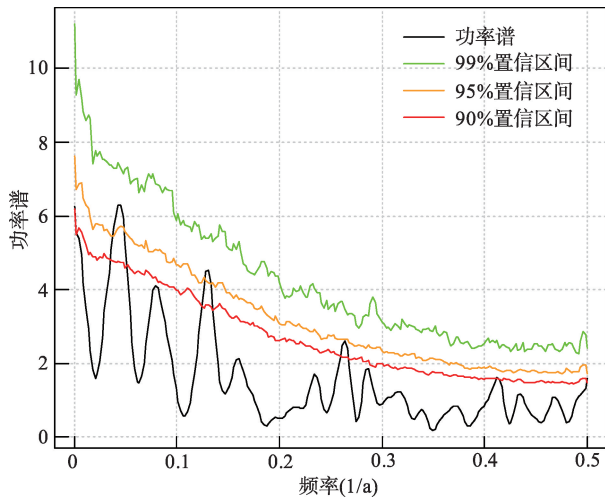


图4 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的功率谱分析

Fig.4 Spectral analysis for tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology

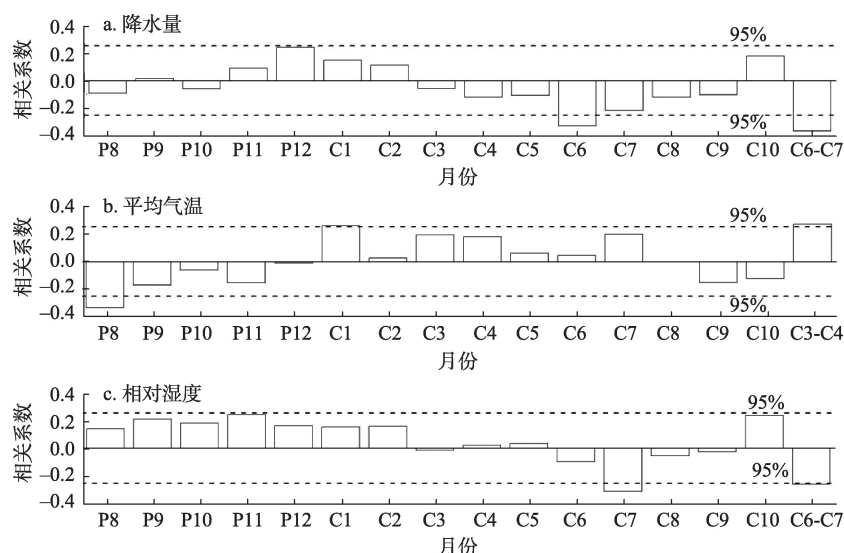


图5 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与降水量、平均温度和相对湿度的相关分析结果(“P”表示上年,“C”表示当年)

Fig.5 Correlation analysis between tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology and monthly mean precipitation, monthly mean temperature, and monthly mean relative humidity (“P” represents the last year and “C” represents the current year)

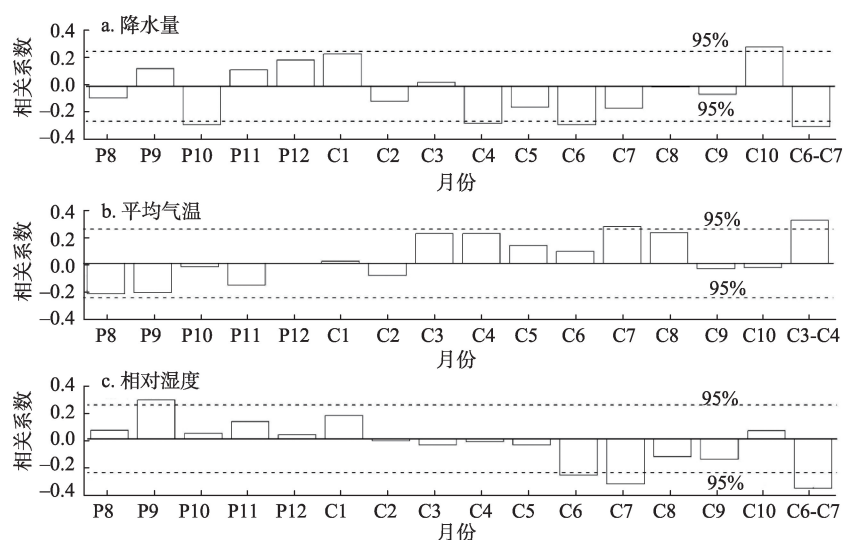


图6 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与降水量、平均温度和相对湿度一阶差分序列的相关分析结果(“P”表示上年,“C”表示当年)

Fig.6 Correlation analysis between tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology and monthly mean precipitation, monthly mean temperature, and monthly mean relative humidity after the first order differential treatment (“P” represents the last year and “C” represents the current year)

3.3 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与大气环流指数的关系

如图7-8所示,在1953–2011年,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值与当年2月、3月、6月、8月和10月北半球副高面积指数(NHSA, 5E–360)呈显著的正相关,与当年2月、3月的相关性最显著,相关系数分别为0.400($P<0.01$, $N=59$)、0.370($P<0.01$, $N=59$)。将2月、3月北半球副高面积指数平均后,相关系数提至0.409($P<0.01$, $N=59$)。二者分别一阶差分后,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列和2–3月北半球副高面积指数的相关性仍达到0.01的显著性水平。说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含了当年2月、3月

及2–3月平均北半球副高面积指数变化信号。

树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值与当年7月、8月、9月和10月南海副高面积指数(SSSA, 100E–120E)呈显著正相关,与当年9月的相关性最高($r=0.415$, $P<0.01$, $N=59$)。二者分别一阶差分后,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列和9月南海副高面积指数序列的相关性仍达到0.01的显著性水平。说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含了当年9月南海副高面积指数变化信号。

树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值与当年1月太平洋极涡面积指数(PVA, 2区; 150E–120W)呈显著的正相关($r=0.348$,

$P < 0.01$, $N = 59$), 与当年5月太平洋极涡面积指数(PVA, 2区; 150E-120W)呈显著的正相关($r = -0.264$, $P < 0.05$, $N = 59$); 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值与5月太平洋区涡强度指数(PVI, 2区; 150E-120W)显著负相关($r = -0.317$, $P < 0.05$, $N = 59$)。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列和太平洋极涡面积、强度指数序列分别一阶差分后, 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值序列仅与1月太平洋极涡面积指数相关性达到0.01的显著性水平。说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含了当年1月太平洋极涡面积指数变化信号。

树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值与当年1月($r = -0.312$, $P < 0.05$, $N = 59$)、6月($r = -0.345$, $P < 0.01$, $N = 59$)南方涛动指数(SOI)呈显著的负相关。二者分别一阶差分后, 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列和1月南方涛动序列的相关性仍达到0.05的显著性水平, 6月相关性未达到0.05的显著性水平。说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含了当年1月南方涛动指数变化信号。

3.4 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与南海海温的关系

在有海温基础数据的1982-2011年, 神农架树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与当年4月($r = 0.464$, $P < 0.01$, $N = 30$)、5月($r = 0.554$, $P < 0.01$, $N = 30$)南海海温(SST)呈显著正相关($r = 0.554$, $P < 0.01$, $N = 30$)。4、5月平均后相关性提高到0.609($P < 0.01$, $N = 30$)。二者分别一阶差分后, 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列和4月、5月、4-5月南海海温序列的相关性仍达到0.05的显著性水平。说明树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含了当年4月、5月、4-5月平均南海海温变化信号。

4 讨论

由于巴山冷杉是浅根系植物, 主要吸收利用土壤水形成纤维素, 在此过程中经历一系列的分馏过

程(安文玲等, 2009)。一般认为, 植物根系吸收水分的过程不存在分馏, 氧同位素的分馏主要发生在叶片的蒸腾作用及有机物形成纤维素的过程中, 而植物纤维素的形成过程中发生的分馏是由植物本身的特性决定。因此, 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要受到2个因素的控制: 一是源水的氧同位素组成, 温度、降水是影响源水氧同位素的主要因子; 二是蒸腾作用过程叶片的氧同位素富集, 此过程中相对湿度是最重要的影响因子。

根据Liu Z F等(2008)提出的中国地区降水 $\delta^{18}\text{O}$ 计算式(式(2))来计算神农架地区降水中的 $\delta^{18}\text{O}_s$ 值:

$$\delta^{18}\text{O}_s = -0.0073\text{LAT}^2 + 0.326\text{LAT} + 9.7776 - 0.0015\text{ALT} \quad (2)$$

式中: LAT 为纬度; ALT 为海拔高程。计算得到神农架地区降水的 $\delta^{18}\text{O}_s$ 为 -10.91‰ 。这与史婷婷等(2012)在湖北宜昌香溪河(发源于神农架, 注入长江)流域地表水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值(-10.09‰)很接近。

将式(2)的结果代入Waterhouse等(2002)植物纤维素氧同位素的经验公式中:

$$\delta^{18}\text{O}_t = (1 - f_0)[\delta^{18}\text{O}_s + (\varepsilon_c + \varepsilon_k)(1 - h) + \varepsilon_0] + f_0(\delta^{18}\text{O}_s + \varepsilon_0) \quad (3)$$

式中: f_0 是与木质部水交换的氧原子分馏系数; $\delta^{18}\text{O}_s$ 为源水的同位素比值; ε_c 是平衡分馏系数, ε_k 是动力分馏系数; h 为相对湿度; ε_0 是氧的生物分馏系数。方程各参数取经验值(Epstein et al, 1977; Roden et al, 2000)为: $f_0 = 0.42$, $\varepsilon_c = 9.5\text{‰}$, $\varepsilon_k = 28.5\text{‰}$, $\varepsilon_0 = 27\text{‰}$ 。

得出:

$$\delta^{18}\text{O}_t = 16.09\text{‰} + 0.58 \times 38\text{‰} \times (1 - h) \quad (4)$$

将研究区的年均相对湿度 h (约为70%)代入式(4), 可得研究区的树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列在 22.70‰ 左右, 这

	树轮形成当年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月		
NHSA (1953-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.1/-0.1
SSSA (1953-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.2/-0.2
PVA (1953-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.3/-0.3
PVI (1953-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.4/-0.4
SOI (1953-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.5/-0.5
SST (1982-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.6/-0.6

注: “●”代表正相关, “○”代表负相关。符号大小代表相关性高低, 灰色阴影代表达到0.05的显著水平。

图7 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与大气环流指数及南海海温的相关分析结果

Fig.7 Correlation between the tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology and the atmospheric circulation index and surface temperature of the South China Sea

	树轮形成当年											
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月		
NHSA (1954-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.1/-0.1
SSSA (1954-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.2/-0.2
PVA (1954-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.3/-0.3
PVI (1954-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.4/-0.4
SOI (1954-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.5/-0.5
SST (1983-2011)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	0.6/-0.6

注: “●”代表正相关, “○”代表负相关。符号大小代表相关性高低, 灰色阴影代表达到0.05的显著水平。

图8 大气环流指数及南海海温与树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 一阶差序列的相关结果

Fig.8 Correlation between the tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology and the atmospheric circulation index and surface temperature of the South China Sea after the first order differential treatment

与本文的树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列均值(22.99‰)十分接近,表明本文树轮氧同位素的实验结果较为可靠。发现的神农架树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列蕴含降水和海温信号,与福建长汀地区树轮氧同位素研究结果(Xu et al, 2016)比较一致。

树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与6月、7月、8月平均相对湿度呈负相关,仅在7月达到0.05的显著性水平。这是由于6月、7月、8月平均温度相差无几,而7月降水量明显高于6月和8月,7月可能是树木生长最旺盛的时期,利用的降水较多,“降水量效应”致使树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 重同位素的相对亏损。

温度、降水量等气候要素通过影响当地源水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的含量以及相对湿度影响树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值。福建地区的研究(Xu et al, 2013)表明,冬季降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高于夏季,本文发现神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与当年3-4月的温度呈显著正相关,这是由于春季提早升温致使树木生长期提前,树木更多地利用了冬雪融水(巴东气象站4月下旬平均温度可达21℃左右,按照0.6℃/100 m递减率来计算,采样点的温度可达到5℃以上),从而使得树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值也随之偏正。神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与降水量的关系表明,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的变化主要响应于当年6-7月的降水,此时正处于夏季风期间,海洋的暖湿气流带来大量降水,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值就偏低,体现了树轮同位素研究中的“降水量效应”。神农架树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与气候要素的关系表明,在温暖湿润的气候条件下,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的变化受到多种气候要素的共同影响,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列主要响应于当年6-7月的降水量、当年3-4月的温度和当年6-7月的相对湿度。

长江流域汛期水汽来源有2支,分别为来自孟加拉湾的西南气流和南海季风,这两支气流在长江流域上空交汇(平凡等, 2014)。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与大气环流指数及南海海温数据的相关关系,说明神农架树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列在一定程度上记录了大气环流信息。副高对中国季风区的温度、降水有重要影响,当副高势力偏强且位置偏北,长江中下游地区降水相对减少,导致神农架树轮中 $\delta^{18}\text{O}$ 重同位素相对富集(Xu et al, 2016)。研究发现,与极涡强度指数相比,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与1月极涡面积指数的相关系数更大,这是由于极涡面积指数对降水的影响更大(黄嘉佑等, 2004);而冬季极涡指数与中国长江流域以南地区的降水呈负相关,导致神农架树轮中重同位素相对富集(Liu et al, 2009)。树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与1月南方涛动(SOI)指数呈负相关,南方涛动减弱,

夏季风偏弱,季风雨带偏南,长江中下游地区降水偏多,树轮中重同位素相对亏损,树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏低(Liu Y et al, 2008; Liu et al, 2014)。研究发现,神农架树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与4-5月南海大部分地区的海温呈显著正相关(图9),表明南海海温可能对神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列有重要影响。

研究发现,神农架树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列存在7.8 a和23.3 a周期。23.3 a周期对应太阳黑子活动准22年周期,表明太阳黑子活动对神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列有一定影响。由于树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列与南海海温呈显著正相关,本文推测南海海温变化可能存在7.8 a周期。

5 结论

本文基于树轮气候学方法,以神农架地区树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 作为研究指标,分析了其对气候的指示意义,主要结论如下:

(1) 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列能在一定程度上记录气候要素的变化,较好响应了6-7月降水、3-4月温度和6-7月相对湿度的变化。

(2) 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列能在一定程度上记录大尺度环流信号,对2-3月北半球副高面积指数、9月南海副高面积指数、1月太平洋极涡面积指数,以及1月南方涛动指数的变化具有较好响应。

(3) 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列能够较好记录海温变化信号,对4-5月南海海温的变化具有很好响应。

相较于神农架地区以往基于树轮宽度的研究,本文发现树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 序列不仅能反映气候的低频变化还能反映高频变化,表明具有较高的气候重建价值。本文是亚热带地区树轮同位素研究的有益尝

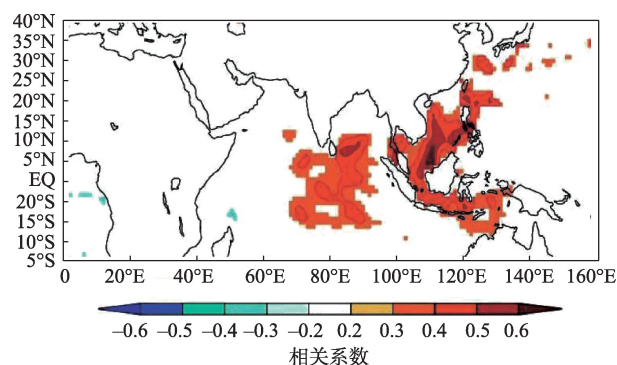


图9 树轮 $\delta^{18}\text{O}$ 年表与4-5月海温空间相关图(1982-2011)
Fig.9 Spatial correlation pattern of tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology with the gridded NECP OI v2 database for April-May sea surface temperature (SST), 1982-2011

试,可为亚热带地区进一步的树轮同位素气候重建研究提供参考和依据。

致谢:感谢中国科学院西北生态环境资源研究院刘晓宏研究员和徐国保老师在提取树轮纤维素过程中提供的帮助,感谢武汉大学肖洋博士在树轮氧同位素的测定实验过程中提供的帮助。同时,还要感谢张雨叶、刘子川及赵雨潇同学在树轮定年、宽度量取以及 α -纤维素提取实验过程中所作的工作。

参考文献(References)

- 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. Atmosphere circulation information recorded in tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ at Lijiang, Yunnan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 64(9), 1103-1112.]
- 陈秋艳, 勾晓华, 张军周, 等. 2015. 树轮宽度指示的神农架地区过去 172 年的冬春季温度变化[J]. 第四纪研究, 35(5): 1145-1154. [Chen Q Y, Gou X H, Zhang J Z, et al. 2015. Tree-ring indicated of winter-spring temperature in Shennongjia Mountain area of central China over the past 172 years[J]. Quaternary Sciences, 35(5): 1145-1154.]
- 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.]
- 黄嘉佑, 刘舸, 赵昕奕. 2004. 副高、极涡因子对我国夏季降水的影响[J]. 大气科学, 28(4), 517-526. [Huang J Y, Liu G, Zhao X Y. 2004. The influence of subtropical high index and polar vortex index on the summertime precipitation in China[J]. Chinese Journal of Atmosphere Science, 28(4), 517-526.]
- 平凡, 唐细坝, 高守亨, 等. 2014. 长江和淮河流域汛期洪涝大气环流特征的比较[J]. 中国科学: 地球科学, 44(4): 766-782. [Ping F, Tang X B, Gao S T, et al. 2014. A comparative study of the atmospheric circulations associated with rainy-season floods between the Yangtze and Huaihe River Basins[J]. Science China: Earth Sciences, 44(4): 766-782.]
- 史婷婷, 陈植华, 张卫. 2012. 湖北宜昌香溪河流域环境同位素特征及其水循环意义[J]. 地质科技情报, 31(6): 161-167. [Shi T T, Chen Z H, Zhang W. 2012. Characteristics of environmental isotopes in Xiangxi River Basin of Yichang Hubei Province and its significance for hydrological cycle[J]. Geological Science and Technology Information, 31(6): 161-167.]
- 王建, 赵业思, 商志远, 等. 2016. 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, 36(8): 1261-1268. [Wang J, Zhao Y S, Shang Z Y, et al. 2016. Diverse stable carbon isotope ratios in tree-ring components of *Pinus massoniana* with their climate sensitivities[J]. Scientia Geographica Sinica, 36(8): 1261-1268.]
- 吴绍洪, 潘韬, 戴尔阜. 2006. 植物稳定同位素研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 25(3): 1-11. [Wu S H, Pan T, Dai E F. 2006. The progress and prospect of stable isotopes in plants[J]. Progress in Geography, 25(3): 1-11.]
- Bose T, Sengupta S, Chakraborty S, et al. 2016. Reconstruction of soil water oxygen isotope values from tree ring cellulose and its implications for paleoclimate studies[J]. Quaternary International, 425: 387-398.
- Burk R L, Stuiver M. 1981. Oxygen isotope ratios in trees reflect mean annual temperature and humidity[J]. Science, 211: 1417-1419.
- Dang H S, Zhang Y J, Zhang K R, et al. 2013. Climate-growth relationships of subalpine fir (*Abies fargesii*) across the altitudinal range in the Shennongjia Mountains, central China[J]. Climatic Change, 117(4): 903-917.
- Dang H S, Zhang Y J, Zhang K R, et al. 2014. Disturbance dynamics and history of an old-growth subalpine fir (*Abies fargesii*) forest in central China[J]. Plant Ecology, 215(10): 1111-1121.
- Duffy J E, McCarroll D, Barnes A, et al. 2017. Short-lived juvenile effects observed in stable carbon and oxygen isotopes of UK oak trees and historic building timbers[J]. Chemical Geology, 472, 1-7.
- Epstein S, Thompson P, Yapp C J. 1977. Oxygen and Hydrogen Isotopic Ratios in Plant Cellulose[J]. Science, 198: 1209-1215.
- Helle G, Schleser G H. 2004. Interpreting climate proxies from tree-rings[M]//Fischer H, Kumke T, Lohmann G et al. The climate in historical times: Towards a synthesis of holocene proxy data and climate models. Berlin, Germany: Springer: 129-148.
- Hou X Y, Shi J F, Li L L, et al. 2015. Growth responses of *Abies fargesii* to climate in Shennongjia Mount of Hubei Province, southeastern China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 26(3): 689-696.
- Lavergne A, Daux V, Villalba R, et al. 2017. Improvement of isotope-based climate reconstructions in Patagonia through a better understanding of climate influences on isotopic fractionation in tree rings[J]. Earth and Planetary Science Letters, 459: 372-380.
- Liu X H, Qin D H, Shao X M, et al. 2003. Variation and abrupt change of precipitation in Nyingchi Prefecture of Tibet Autonomous Region in past 350 years[J]. Journal of Glaciology & Geocryology, 25(4): 375-379.
- Liu X H, Shao X M, Liang E Y, et al. 2009. Climatic significance of tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ in the Qilian Mountains, northwestern China and its relationship to atmospheric circulation patterns[J]. Chemical Geology, 268(1): 147-154.
- Liu X H, Shao X M, Wang L L, et al. 2007. 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: Earth Sciences*, 50(7): 1076-1085.
- Liu X H, Xu G B, Griebinger J, et al. 2014. A shift in cloud cover over the southeastern Tibetan Plateau since 1600: Evidence from regional tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ and its linkages to tropical oceans[J]. *Quaternary Science Reviews*, 88: 55-68.
- Liu Y, Cai Q F, Liu W G, et al. 2008. Monsoon precipitation variation recorded by tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ in arid Northwest China since AD 1878[J]. *Chemical Geology*, 252(1): 56-61.
- Liu Z F, Tian L D, Chai X R, et al. 2008. A model-based determination of spatial variation of precipitation $\delta^{18}\text{O}$ over China[J]. *Chemical Geology*, 249(1): 203-212.
- Loader N J, Mccarroll D, Barker S, et al. 2017. Inter-annual carbon isotope analysis of tree-rings by laser ablation[J]. *Chemical Geology*, 466: 323-326.
- Loader N J, Robertson I, Mccarroll D. 2003. Comparison of stable carbon isotope ratios in the whole wood, cellulose and lignin of oak tree-rings[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 196(3): 395-407.
- Roden J S, Lin G H, Ehleringer J R. 2000. A mechanistic model for interpretation of hydrogen and oxygen isotope ratios in tree-ring cellulose[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 21-35.
- Waterhouse J S, Switsur V R, Barker A C, et al. 2002. Oxygen and hydrogen isotope ratios in tree rings: How well do models predict observed values[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 201(2): 421-430.
- Wynn P M, Loader N J, Fairchild I J. 2014. Interrogating trees for isotopic archives of atmospheric sulphur deposition and comparison to speleothem records[J]. *Environmental Pollution*, 187 (8): 98-105.
- Xu C X, Zheng H Z, Nakatsuka T, et al. 2013. Oxygen isotope signatures preserved in tree ring cellulose as a proxy for April-September precipitation in Fujian, the subtropical region of southeast China[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(23): 12805-12815.
- 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.
- Zheng Y H, Shao X M, Lu F, et al. 2016. February-May temperature reconstruction based on tree-ring widths of *Abies fargesii* from the Shennongjia area in central China[J]. *International Journal of Biometeorology*, 60(8), 1175-1181.

Climatic significance of tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ in Shennongjia Mountain

ZHANG Fangfang¹, ZHENG Yonghong^{1*}, PAN Guoyan², YUAN Shuai¹, KONG Fanxi¹,
QI Yongdong¹, WANG Dan¹

(1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this study, a stable oxygen isotope chronology from tree-ring cellulose ($\delta^{18}\text{O}$) in Bashan fir (*Abies forrestii*) from Mt. Shennongjia in Hubei Province was correlated with meteorology records of the Badong meteorological station, circulation index data, and sea surface temperature of the South China Sea (SST). The chronology spans the time period of 1790–2011. The results indicate that the tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology is closely correlated with local climate factors. The tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology has a significantly positive correlation with March to April monthly mean temperature, has a significantly negative correlation with June to July monthly mean precipitation and June to July monthly mean relative humidity. Meanwhile, the tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology has a significantly positive correlation with February to March area index of the northern hemisphere subtropical high (5E-360), September area index of the South China Sea subtropical high (100E-120E), January polar vortex area index of the Pacific Ocean (Zone 2, 150E-120W), and April to May sea surface temperature of the South China Sea (SST). A significantly negative correlation was found between the tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology and January southern oscillation index (SOI). These indicate that the tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ chronology records at a large scale of atmospheric circulation information. This study is helpful to further understand the potential value of tree ring stable oxygen isotopes in the past climate change studies in Mt. Shennongjia, and provide a scientific basis for further research on climate reconstruction.

Key words: tree-ring; stable oxygen isotope; precipitation; sea surface temperature of the South China Sea (SST); circulation index