

doi:10.7515/JEE201401002

利用黑松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 重建山东塔山地区近七十年来冬春季的平均气温

郑紫薇^{1,2}, 赵兴云^{2,3}, 商志远⁴, 王建⁴, 成瑞琴^{1,2}, 陈振举⁵

(1. 山东师范大学人口、资源与环境学院, 济南 250000; 2. 临沂大学资源环境学院, 临沂 276000;
3. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂 276000; 4. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;
5. 沈阳农业大学林学院, 沈阳 110866)

摘要: 对来自山东塔山的黑松 (*Pinus thunbergii* Parl) 树芯样本进行交叉定年后建立树轮稳定碳同位素序列 ($\delta^{13}\text{C}$ 序列)。将得到的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行校正以去除大气 CO_2 的影响, 提取其高频部分分析与气候要素的响应关系, 发现黑松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高频序列与对应年份平均气温的响应对降水量的响应显著。气温和降水对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响均有滞后效应, 即塔山地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 能记录冬季气候变化。在相关分析基础上用回归方程重建了山东塔山地区近七十年冬春季节 (即上年12月—当年5月) 的平均气温, 分析发现重建序列有明显的冷暖交替上升的变化趋势。

关键词: 塔山; 树轮; $\delta^{13}\text{C}$; 平均气温

中图分类号: P467 文献标志码: A 文章编号: 1674-9901(2014)01-0010-06

The winter and spring average temperature reconstruction based on tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in recent 70 years in Tashan, Shandong Province

ZHENG Zi-wei^{1,2}, ZHAO Xing-yun^{2,3}, SHANG Zhi-yuan⁴,
WANG Jian⁴, CHENG Rui-qin^{1,2}, CHEN Zhen-ju⁵

(1. College of Population, Resources and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250000, China;

2. College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, China;

3. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi 276000, China;

4. College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

5. Forestry College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China.)

Abstract: Tree-ring samples of *Pinus thunbergii* Parl at eastern Tashan in Shandong Province were collected to integrate the tree-ring stable carbon isotope series. In order to remove the influence of atmospheric CO_2 , extract the high frequency part of the tree ring $\delta^{13}\text{C}$. Analysis the response of tree ring $\delta^{13}\text{C}$ series and climate factors, found that the response between tree ring $\delta^{13}\text{C}$ and temperature is obvious than precipitation. There exists a lagging effect of the influence of both temperature and precipitation on tree-ring $\delta^{13}\text{C}$ in some extent. This results indicated that tree ring $\delta^{13}\text{C}$ in Tashan can record the winter climate change. On the basis of correlation analysis, utilize the regression equation to reconstruct near seventy years' average temperature in winter and spring season (i.e., from December last year to May current year). Analysis found that the rebuilding temperature series shows an obviously rise trend which cold and warm temperature change alternately.

Key words: Tashan; tree-ring; $\delta^{13}\text{C}$; average temperature

收稿日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41072139); 山东省自然科学基金项目 (Y2008E15)

通讯作者: 赵兴云, E-mail: synzxy@sina.com

塔山在气候区划上属于季风暖温带半湿润地区, 位于山东鲁南地区, 是亚热带与暖温带之间的过渡区, 地表过程复杂且多变, 树木生长对气候变化和人类活动非常敏感(高远等, 2011)。常年降雨量为 800~900 mm, 是山东南部暴雨多发区, 也是山东省旱涝灾害频繁发生的地区。然而截至目前, 鲁南地区关于树轮和气候变化的研究很少见, 只集中在少数几个地点并且利用单一的树轮宽度代用指标, 如沈长泗等(1998)利用树轮宽度资料重建了山东沂山地区 200 多年来的湿润指数; 刘禹等(2010)利用白皮松树轮宽度重建公元 1616 年以来山东于林年平均最低气温。利用树轮稳定碳同位素指标进行气候研究及对鲁南其他地区小尺度地域气候进行的研究则比较少见, 而气候要素本身就是一个区域差异很大的变量, 不同地域有各自的特点。

树轮稳定碳同位素作为一种高精度的气候变化代用指标, 已经成为树轮年代学研究的重要手段之一。本文利用鲁南地区山东塔山东坡的黑松树轮稳定碳同位素资料, 通过建立树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列, 提取出该地区高分辨率的气候变化信息, 选取冬春(上年 12 月—当年 5 月)平均气温作为重建因子, 重建了山东塔山近七十年来平均气温变化序列并作分析。对今后在此区域开展深入的树轮研究及气候变化重建提供一定的参考依据。

1 材料与方 法

本文研究选择在植被资源保存比较好的塔山

地区(35°26'~35°27'N, 118°02'E)采集黑松树芯样品。东坡采集 5 棵树, 南坡采集 6 棵树, 西坡采集 7 棵树。每棵树分别从 4 个正方位(即 N、E、S 和 W), 每个方位采集 2 个树芯, 共采集 18 棵树 144 个树芯。样本采集方法严格按照国际树轮数据库标准进行。通过 COFECHA 程序进行交叉定年检验, 确定最长年份的树为东坡采集的黑松(TSE5), 树龄为 73 年(1938—2010 年), 其他坡向采集的树木的生长年份均不超过 55 年。

选取东坡采集的生长年份最长的四个方位树芯进行综纤维素提取, 将测定的四个方位综纤维素值取相同时段的算术平均值, 得到一个最终塔山东坡黑松树轮的稳定碳同位素长序列。由于针叶树生长缓慢及受环境条件变化的影响, 有些年份轮宽特别窄, 有些年份甚至缺轮, 为了满足综纤维素提取所需样本量的要求, 参考王建等人(2008)和刘晓宏等人(2010)的方法, 采取相同坡向相同方位的树芯混合的方法进行剥取和装袋, 作为东坡某一方位某一年的待测样品。化学处理过程包括用苯-乙醇混合溶剂抽提, 去除脂类及类脂类物质和用冰醋酸将溶液以及亚氯酸钠来去除木质素两大步骤, 提取出树轮综纤维素。利用 Thermo Finnigan-Deltaplus XP 型同位素比例质谱仪测定样品的碳同位素 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 之比。测定结果相对于 PDB 标准表示为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, 简称为 $\delta^{13}\text{C}$, 表达式如 Saurer et al (1997) 文中所示:

$$\delta^{13}\text{C} = [({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{样品}})/({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{标准}}) - 1] \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

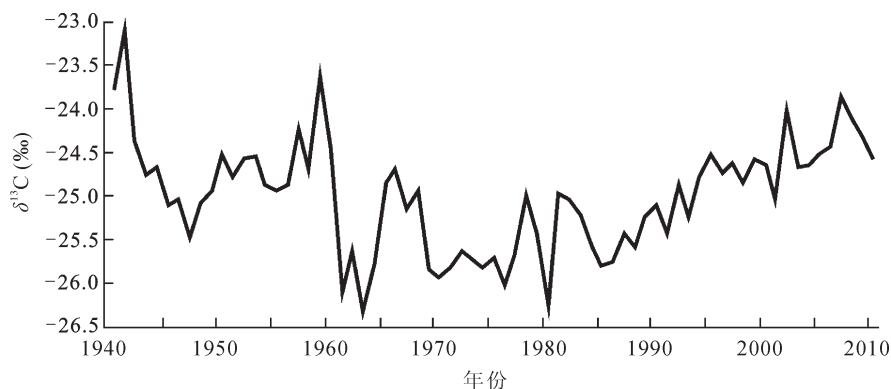


图 1 山东塔山黑松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 年序列

Fig. 1 Time series of the $\delta^{13}\text{C}$ in tree rings at Tashan Mountain, Shandong Province

整个流程分析误差 $\leq 0.15\text{‰}$ 。纤维素提取和质谱分析分别在南京师范大学树轮实验室和中国科学院沈阳应用生态研究所完成。树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 测定结果如图 1。

气象资料来自于费县气象站(35°01'~35°33'N, 117°36'~118°18'E), 气象站与采样点的直线距离 2.35 km, 海拔相差近 500 m。图 2 为该站多年各月平均气温和降水量的分布特征, 该站多年平均

气温 13.6℃，最高温度出现在 7 月，最低温度出现在 1 月。年平均降水量为 840 mm，降水季节分布不均，7—8 月的降水占全年降水量的近 53%，冬季降水较少。从图 2 中可以看出 7、8 月份的水热都比较充足，而 3—6 月份和 9、10 月份的温度下降平缓，而降水量则明显减少。

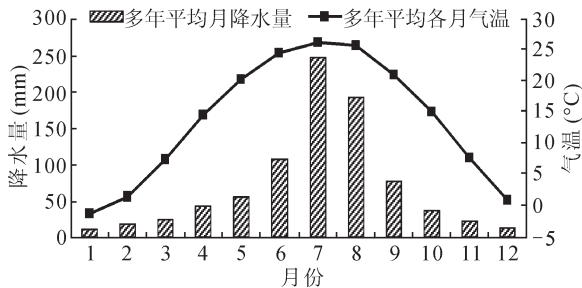


图 2 费县气象站月平均气温和月降水量的多年平均值 (1959—2010)

Fig 2 Normal value of accumulated year for monthly mean temperature and monthly rainfall from Fei county meteorological station(1959—2010)

2 树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 高序列的提取

由于影响树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列变化的因素主要有气

候因素，大气 CO_2 因素。因此在分析树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列对气候要素的响应之前，首先需要对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行校正，剔除大气 CO_2 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响，连续的校正参数可参照文献刘禹等 (1996) 和 Feng and Epstein (1995)。

本文利用下列公式 (刘禹等, 1996) 计算树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的残差值来消除大气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{air}}$ 的影响，得到树轮的高频变化序列：

$$\delta = (\delta^{13}\text{C}_{\text{air}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}) / (1 + \delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}) \quad (2)$$

式中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{air}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}$ 分别代表大气和树轮中稳定碳同位素比。为了计算 δ 的变化，需要知道大气中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{air}}$ 。本文用 Feng and Epstein (1995) 建立的方程：

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}} = -6.429 - 0.006 \exp[0.0217(t - 1740)] \quad (3)$$

(式中 t 是公元年份) 计算 $\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$ 。为了用 (3) 式计算树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 序列的残差 δ ，我们假定大气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{air}}$ 与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$ 相等，消除大气 CO_2 低频变化影响后的树轮 δ 序列，如图 3。

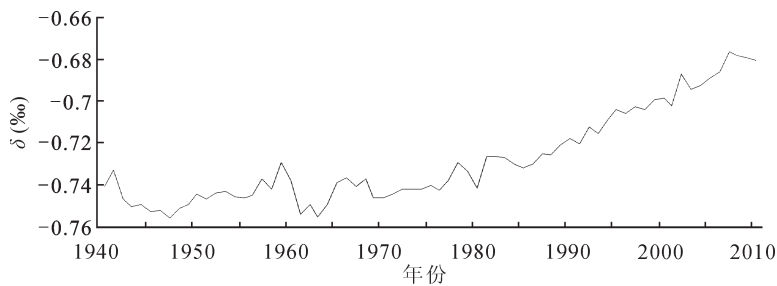
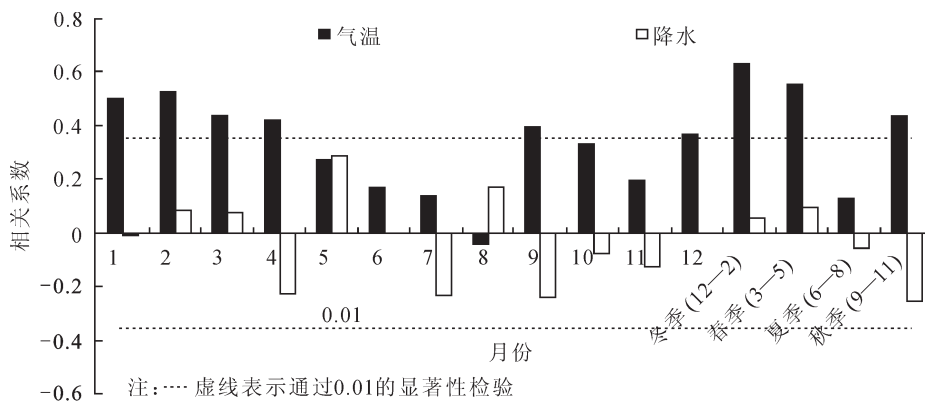


图 3 去除大气 CO_2 影响的树轮 δ 高频残差序列

Fig.3 Tree-ring δ high frequency residual series that has removed the influence of CO_2



注：……虚线表示通过 0.01 的显著性检验
Note: The dotted line means reached the significance test of 0.01

图 4 树轮 δ 与气象站各月不同气候要素的相关系数图

Fig.4 Correlation coefficients between tree ring δ and monthly different climate factors

3 与气候要素的相关分析

通过气候与生长响应关系分析, 来确定重建的气候要素, 为寻找最佳重建因子, 对逐月气候要素以及不同季节组合的气候要素与树轮 δ 序列分别做相关分析。塔山黑松树轮 δ 与气象站各月及月份组合不同气候要素的相关系数见图 4。

从图 4 响应分析结果可知, 塔山树轮 δ 与气温基本呈正相关、与降水量呈负相关并且与气温的相关性要明显好于与降水量的相关性。从与单个月份月平均气温的响应来看, 前 4 个月和 9 月份的平均气温对树轮 δ 的影响最为显著, 均通过了 0.01 的信度检验。从季节分析, 冬春季的气温对树轮 δ 的影响极为显著。这与研究区所处地理气候环境密切相关, 在暖温带地区, 一些树种的生长活动超出了生长季之外, 尤其是针叶树种, 即使在冬季, 只要有生长, 有树液的流动, 就会有树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的分馏 (钱君龙等, 2001)。因此冬春季树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 对气温的响应较为敏感, 而

夏秋季的月平均温度普遍较高, 且水分充足, 并不是树木生长期间的限制性因子, 因而相关程度并不如冬春季温度显著。这也进一步印证了很多学者研究表明的暖湿地区的树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 能记录冬季气温的变化 (钱君龙等, 2001; 赵兴云等, 2005)。树轮 δ 无论与单个月份或是季节降水量的相关系数均未通过信度检验, 但依旧可以看出树轮 δ 对降水量比较充足的月份响应效果较好。

为了选出最佳重建因子, 考虑到滞后效应, 将不同连续月份 (包括上一年 9 月以后的月份) 组合的月平均气温和降水量与树轮 δ 做相关分析, 选取相关系数较高和通过信度检验的代表性气候因子, 见表 1。发现与连续月份的气温和降水量的相关明显好于与单个月份的相关, 这说明, 无论是气温还是降水量, 对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响均是一个长期累积的过程。最后选择重建冬春季 (即上年 12 月—当年 5 月) 的平均气温 (相关系数 $r=0.757$), 通过 0.01 的信度检验。

表 1 树轮 δ 与不同月份组合的气温和降水量相关系数
Table 1 Correlation coefficients between tree ring δ and temperature and precipitation of different months combination

组合月份数	显著相关的气候要素及相关系数
1	$T_1(0.503^{**}), T_2(0.530^{**}), T_3(0.440^{**}), T_4(0.441^{**}), T_5(0.275^*), T_9(0.400^{**}), T_{10}(0.339^*), T_{12}(0.370^{**}), P_7(-0.234), P_9(-0.238)$
2	$T_{1-2}(0.613^{**}), T_{2-3}(0.584^{**}), T_{3-4}(0.522^{**}), T_{4-5}(0.458^{**}), T_{5-6}(0.295^*), T_{9-10}(0.471^{**}), T_{12-1}(0.567^{**}), P_{9-10}(-0.238)$
3	$T_{1-3}(0.653^{**}), T_{2-4}(0.638^{**}), T_{3-5}(0.555^{**}), T_{4-6}(0.434^{**}), T_{5-7}(0.303^*), T_{8-10}(0.382^{**}), T_{9-11}(0.437^{**}), T_{10-12}(0.460^{**}), T_{11-1}(0.549^{**}), T_{12-2}(0.669^{**}), P_{9-11}(-0.251)$
4	$T_{1-4}(0.691^{**}), T_{2-5}(0.659^{**}), T_{3-6}(0.524^{**}), T_{4-7}(0.420^{**}), T_{7-10}(0.362^{**}), T_{8-11}(0.392^{**}), T_{9-12}(0.514^{**}), T_{12-3}(0.712^{**}), T_{11-2}(0.666^{**}), T_{10-1}(0.593^{**}), P_{9-12}(-0.252)$
5	$T_{1-5}(0.702^{**}), T_{2-6}(0.653^{**}), T_{3-7}(0.505^{**}), T_{4-8}(0.360^{**}), T_{5-9}(0.345^*), T_{6-10}(0.373^{**}), T_{7-11}(0.374^{**}), T_{8-12}(0.498^{**}), T_{9-1}(0.615^{**}), T_{10-2}(0.674^{**}), P_{11-3}(0.713^{**}), T_{12-4}(0.747^{**}), P_{7-11}(-0.172), P_{9-1}(-0.277^*)$
6	$T_{1-6}(0.696^{**}), T_{2-7}(0.637^{**}), T_{3-8}(0.451^{**}), T_{4-9}(0.440^{**}), T_{5-10}(0.424^{**}), T_{6-11}(0.385^{**}), T_{7-12}(0.467^{**}), T_{12-5}(0.757^{**}), T_{11-4}(0.741^{**}), T_{10-3}(0.719^{**}), T_{9-2}(0.686^{**}), T_{8-1}(0.580^{**}), P_{7-12}(-0.171), P_{9-2}(-0.268)$
7	$T_{1-7}(0.684^{**}), T_{2-8}(0.594^{**}), T_{3-9}(0.505^{**}), T_{4-10}(0.505^{**}), T_{5-11}(0.431^{**}), T_{6-12}(0.475^{**}), T_{12-6}(0.752^{**}), T_{11-5}(0.752^{**}), T_{10-4}(0.747^{**}), T_{9-3}(0.724^{**}), T_{8-2}(0.665^{**}), P_{6-12}(-0.156), P_{9-3}(-0.274)$
8	$T_{1-8}(0.647^{**}), T_{2-9}(0.618^{**}), T_{3-10}(0.550^{**}), T_{4-11}(0.503^{**}), T_{5-12}(0.514^{**}), T_{12-7}(0.739^{**}), T_{11-6}(0.750^{**}), T_{10-5}(0.756^{**}), T_{9-4}(0.751^{**}), T_{8-3}(0.708^{**}), P_{4-11}(-0.135), P_{9-4}(-0.358^{**})$

注: T 代表平均气温; P 代表降水量。数字下标表示起止月份, 粗体数字下标表示上一年的某个月份; 括号内为相关系数, 其中 * 表示通过 0.05 的信度检验, ** 表示通过 0.01 的信度检验。

Note: T represents the mean temperature and P represents the precipitation. The subscripts represent the months of beginning and ending. The bold subscripts represent the months of previous year. The correlation coefficients inside the brackets marked with single asterisk and double asterisks are significant at 0.05 and 0.01 levels respectively.

4 气候重建

根据以上的响应分析,对上年12月—当年5月的平均气温,重建过程采用一元线性回归方法,建立的回归方程如下:

$$T_{-12-5}=26.992X+26.272 \quad (R^2=0.574, F=0.01) \quad (4)$$

式中, T_{-12-5} 代表上年12月—当年5月的平均气温重建值, X 代表树轮 δ 序列值, R^2 代表方

程拟合优度, F 为信度检验水平。重建方程稳定性较好,表明塔山地区冬春季节平均温度的变化确实是引起树轮综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 组成变化的一个重要因素,也说明了黑松树轮综纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 组成可以作为冬春季节月平均温度的一个替代性指标。平均气温重建值与实测值序列对比如图5。经检验,重建值序列在0.001的显著水平上无突变。

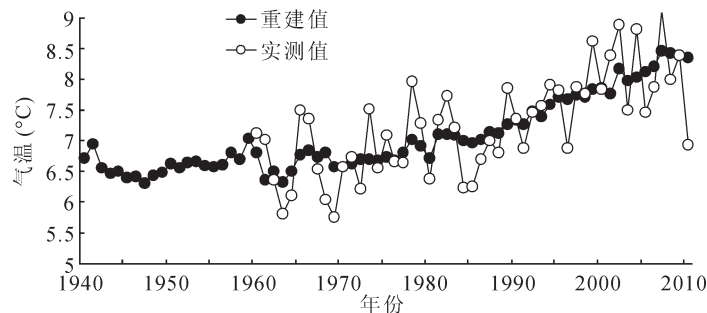


图5 上年12月—当年5月平均气温重建值与实测值对比图

Fig.5 Reconstruction values compared with observed values of -12 — 5 monthly average temperature

根据图5分析,气温的重建序列与实测序列均有缓慢波动上升趋势,除个别月份峰值和谷值的小波动略有1~2年的漂移外,实测值序列里波动较大的年份的峰值和谷值对应的年份都与重建值序列的相同。且在相同时段,冬春季节平均气温的重建序列与实测序列的相关系数为0.998,达到了0.001的信度水平。这进一步说明本文的重建结果是可信的,但不理想的地方是,重建值序列的波动幅度太小,与实际气温观测值有一定差距,这可能是冬春季节,除了气温,降水量对树轮 δ 的影响也不可小觑,上年冬天的积雪融化给树木生长提供了必要水分,从而在一定程度上影响着树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的分馏效应。

从重建序列曲线总的变化趋势来看,该地区的气温在1975年之前没有发生明显的增减变化,但是从1975年以后波动幅度减小、上升趋势明显。虽然上升幅度仅有1~2°C,仍经历了冷暖交替上升变化的过程,说明塔山地区冬春季节的平均气温在缓慢逐年升高。赵传集和林保暖(1990)提出十九世纪以来鲁南地区逐渐出现旱灾逐年增多的现象,有从偏涝型、旱涝交错型向偏旱型转变的趋势。气温升高必然导致蒸发量增大,如若降水量多少与常年无异,则必然气候趋于干旱,然而这一结论是否属实还有待于对降水量的进一步研究。

5 结论

本文通过分析山东塔山地区黑松树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的高频序列与气候要素做相关分析,发现树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 与平均气温呈显著正相关,与降水量呈负相关且对气温的响应好于对降水量的响应。连续月份的气温和降水量与树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关明显好于与单个月份的相关,说明气温和降水量对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响是一个长期累积的过程。上年冬季的气温和降水量对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 影响有滞后效应,即树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 能记录研究区冬季气候变化。冬春季节的月平均气温对树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响极其显著,可以考虑作为塔山地区的气候替代性指标。重建结果表明,塔山地区的气温在1975年之前没有发生明显的增减变化,但是从1975年以后有气温波动升高的特征。但由于上述结果的获得仅来自于一个序列,它的广泛应用还有待于进一步的研究。

参考文献

- 高远,陈玉峰,董恒,等. 2011. 50年来山东塔山植被与物种多样性的变化[J]. *生态学报*, 31(20): 5984-5991.
- [Gao Y, Chen Y F, Dong H, et al. 2011. Vegetation and species diversity change analysis in 50 years in Tashan Mountain, Shandong Province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(20): 5984-5991.]
- 刘晓宏,刘禹,徐国保,等. 2010. 树木年轮稳定同位素

- 分析样品前处理方法探讨 [J]. *冰川冻土*, 32(6): 1242–1250. [Liu X H, Liu Y, Xu G B, et al. 2010. Analyzing methods of pretreatment of tree-ring stable isotope sample [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 32(6): 1242–1250.]
- 刘禹, 雷莺, 宋慧明, 等. 2010. 以白皮松树轮宽度重建公元 1616 年以来山东于林年平均最低气温 [J]. *地球环境学报*, 1(1): 28–35. [Liu Y, Lei Y, Song H M, et al. 2010. The annual mean lowest temperature reconstruction based on *Pinus bungeanas* (Zucc.) ring width in the Yulin region, Shandong, China since AD 1616 [J]. *Journal of Earth Environment*, 1(1): 28–35.]
- 刘禹, 吴祥定, Leavitt S W, et al. 1996. 黄陵树木年轮稳定 C 同位素与气候变化 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 26(2): 125–130. [Liu Y, Wu X D, Leavitt S W, et al. 1996. Stable carbon isotope in tree rings from Huangling, China and climatic variation [J]. *Science in China (Series D)*, 26(2): 125–130.]
- 钱君龙, 吕军, 屠其璞, 等. 2001. 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)*, 31(4): 333–341. [Qian J L, Wang J, Tu Q P, et al. 2001. Utilizing tree ring $\delta^{13}\text{C}$ to reconstruct 160 years' climate at Tianmu Mountain [J]. *Science in China (Series D)*, 31(4): 333–341.]
- 沈长泗, 陈金敏, 张志华, 等. 1998. 利用树木年轮资料重建山东沂山地区 200 多年来的湿润指数 [J]. *地理研究*, 17(2): 150–156. [Shen C S, Chen J M, Zhang Z H, et al. 1998. Utilizing tree ring chronologies to reconstruct 200 years' moisture index in Yishan, Shandong Province [J]. *Geographical Research*, 17(2): 150–156.]
- 王建, 钱君龙, 梁中, 等. 2008. 树轮稳定碳同位素分析的采样方法——以天目山柳杉为例 [J]. *生态学报*, 28(12): 6070–6078. [Wang J, Qian J L, Liang Z, et al. 2008. Sampling strategy for carbon isotope analysis of tree rings: a case study of *Cryptomeria fortunei* from Mt. Tianmu, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(12): 6070–6078.]
- 赵传集, 林保暖. 1990. 山东鲁南地区旱涝灾害历史演变及农业生产发展问题探析 [J]. *古今农业*, 1: 123–135. [Zhao C J, Lin B N. 1990. Historical evolution of drought and flood disasters in Shandong southern regional and the development of agricultural production issues analysis [J]. *Ancient and Modern Agriculture*, 1: 123–135.]
- 赵兴云, 王建, 钱君龙, 等. 2005. 天目山地区树轮 $\delta^{13}\text{C}$ 记录的 300 多年的秋季气候变化 [J]. *山地学报*, 23(5): 540–549. [Zhao X Y, Wang J, Qian J L, et al. 2005. The climate change in autumn recorded in the $\delta^{13}\text{C}$ of tree rings in the past 300 years at Tianmu Mountain [J]. *Journal of Mountain Science*, 23(5): 540–549.]
- Feng X, Epstein S. 1995. Carbon isotopes of trees from arid environment and implications for reconstructing atmospheric CO_2 concentration [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(12): 2599–2609.
- Saurer M, Borella S, Schweingruber F, et al. 1997. Stable carbon isotopes in tree rings of beech: climatic versus site-related influences [J]. *Trees*, 11(5): 291–297.