

# 喀纳斯湖植物残体碳同位素记录的温度波动

王玉慧, 黄小忠\*, 彭卫, 周刚平, 张军, 杜璇

兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000

\* 联系人, E-mail: xzhuang@lzu.edu.cn

2017-05-15 收稿, 2017-06-16 修回, 2017-06-16 接受, 2017-08-15 网络版发表

国家自然科学基金(41571182)和国家重点研发计划(2017YFA0603400)资助

**摘要** 喀纳斯湖位于阿尔泰山脉南坡, 区域森林植被茂盛, 气候相对湿润。目前, 阿尔泰山脉南坡的古温度记录主要来自于树轮宽度及短时间序列的树轮同位素, 从结果来看, 最近100多年来似乎没有表现出明显的增温趋势。在全球大部分地区(尤其是北半球中高纬度地区)普遍增温的情况下, 是否这一区域因为某些特殊原因对全球气候变暖没有响应, 抑或是该区域的树轮对长期趋势表现不明显? 本文基于喀纳斯湖湖滨29 m水深处获得的81 cm岩芯, 在陆生植物残体AMS  $^{14}\text{C}$ 定年的基础上, 利用陆生 $\text{C}_3$ 植物残体 $\delta^{13}\text{C}$ 序列经过大气 $\text{CO}_2$ 浓度校正, 探讨过去近600年区域温度对全球气候变化的响应。本文 $\delta^{13}\text{C}$ 序列很好地记录了阿尔泰山脉南坡对气候变暖的响应。19世纪前期以来温度在冷暖波动中持续上升; 20世纪是近600年来最暖的一个世纪。这种温度变化特征与俄罗斯阿尔泰地区的冰芯、湖泊沉积物和树轮重建的温度记录以及周边地区的温度记录表现出比较一致的趋势, 与北半球中高纬度地区多代用指标集成重建温度也表现出很好的一致性。此外, 岩芯顶部的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列表现出降温的趋势, 这与近十几年来北半球许多地区出现的增温停滞现象以及喀纳斯湖邻近气象站的器测资料中表现明显的降温趋势相互印证。

**关键词** 陆生  $\text{C}_3$  植物残体, 有机碳同位素, 全球变暖, 增温停滞, 喀纳斯湖

亚洲内陆干旱区地域广阔, 降水稀少, 生态脆弱, 人类的生存和发展受自然环境制约。对这一区域气候和环境变化历史的认识不仅对理解全球气候变化具有重要意义, 而且对区域的持续发展至关重要。对该区域过去不同时间尺度上降水和湿度的认识, 前人已做了大量的工作, 得到了比较深入的认识<sup>[1~9]</sup>, 但是对温度的重建还比较欠缺。尤其是在全球气候变暖的背景下, 不同区域对气候变暖的响应不尽相同。阿尔泰山脉位于亚洲中部, 山区气候低温湿润。在湖泊周边, 受到山坡上部降水的下渗作用以及湖面水分的蒸发, 土壤和空气水分充足, 植被生态对温度的响应更加敏感。但就目前的记录来看, 阿尔泰山脉南坡现有的古温度记录指标比较单一(以树轮宽度

及短时间序列的树轮同位素为主)。在对气候变暖的响应上, 阿尔泰山脉南坡中国段的近几百年的树轮记录似乎没有表现出明显的增温趋势, 这一现象与阿尔泰山脉北坡以及周边地区的古温度重建记录存在较大差异。是由于区域环境的特殊性导致本区气候对全球气候变暖没有响应, 还是本区的树轮记录对长周期的变化不敏感造成的, 目前尚不清楚。因此, 有必要获得更多的代用资料, 从更长的时间尺度上来理解这一问题。

另外, 当人们正在为“全球变暖已成为不争的事实”而忧心忡忡时, 许多地区自1998年以来出现了增温速度变缓或者暂停的现象, 即增温停滞现象<sup>[10~12]</sup>, 而另外一些地区仍在持续地快速增温, 这无疑为未

**引用格式:** 王玉慧, 黄小忠, 彭卫, 等. 喀纳斯湖植物残体碳同位素记录的温度波动. 科学通报, 2017, 62: 2829–2839

Wang Y H, Huang X Z, Peng W, et al. Temperature variations over the past 600 years documented by a  $\delta^{13}\text{C}$  record from terrestrial plant remains from Kanas Lake, Altai Mountains, Northwestern China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 2829–2839, doi: 10.1360/N972017-00380

来气候变化的走势又增加了更多的不确定性. 本文利用湖泊沉积物中保存的植物残体获得的570多年来的稳定碳同位素组成序列, 来讨论阿尔泰山脉南坡在这一时段在全球气候变化中的表现, 意在加深人们对这一区域温度变化的理解, 为古气候研究以及未来气候预测提供更多的证据.

## 1 研究区概况

阿尔泰山脉位于亚洲中部, 呈西北-东南走向, 横亘于俄罗斯、蒙古、中国和哈萨克斯坦四国之间, 山脉南坡中段位于我国境内, 在行政区划上属于新疆阿勒泰地区. 喀纳斯湖(48°03'~48°14'N, 86°59'~87°07'E)是位于阿勒泰地区西北部靠近四国边界的一个高山淡水湖, 是我国的第二深水湖和最深的冰碛堰塞湖, 四周植被覆盖良好, 森林资源丰富. 湖面海拔1370 m, 长24 km, 宽1.2~2.55 km, 平均水深120.1 m, 最深处接近200 m, 湖岸地形陡峭, 湖滨几乎没有浅水区. 喀纳斯自然保护区年平均气温-1℃, 月平均气温低于0℃的时间达6个月之久, 最热月7月平均气温15.9℃, 最冷月1月平均气温-16℃. 年降水量780~1114 mm, 5~8月为降雨的集中时期, 降雨量占全年总降水量的一半左右, 1~4月及9~12月以降雪为主, 降雪量占全年总降水量的40%左右. 相对湿度一般为60%~90%, 植被稀疏空旷处相对湿度约为60%, 茂密的森林内可达80%<sup>[13,14]</sup>. 整体上气候湿润、水分充足、冬季漫长而寒冷、春秋相连、基本无夏季. 来自大西洋及北冰洋的气流自额尔齐斯河谷入内, 在山地的抬升作用下, 使该区域降水丰富<sup>[15]</sup>. 山地阴坡、半阴坡和河谷地带广泛分布森林; 阳坡、半阳坡草甸发育; 山涧洼地和河湖沿岸有沼泽植被发育. 森林既有西伯利亚落叶松、云杉、红松等针叶树种与疣枝桦、欧洲山杨等阔叶树种组成的混交林, 也有集中成片的纯林分布<sup>[14]</sup>.

## 2 材料与方法

### 2.1 样品处理与同位素分析

本研究所用的沉积物样品来自2015年1月获得的一支喀纳斯湖湖滨位置的81 cm短钻岩芯KNS15E(图1). 岩芯包含大量陆生植物残体. 将岩芯以冷冻状态运回实验室, 1 cm间隔分样, 共获得81个沉积物样品. 将样品用蒸馏水冲洗、湿筛后, 在体视显微镜

下挑出仔细甄别过的陆生C<sub>3</sub>植物残体树皮、小树枝和少量木屑以及顶部25 cm的针叶并进一步洗去其上的附着物(图2). 由于条件的限制, 没有对植物残体进行细胞学上的鉴定, 但是对研究区的植被状况进行了调查, 并把植物残体和现生植物样品在显微镜下进行了仔细地对比, 基本可以确定所选用的植物残体为研究区广泛存在, 并在研究点附近生长的疣枝桦. 酸洗样品(HCL, 1 mol/L)以去除碳酸盐, 洗至中性后碱洗样品(NaOH, 1%)以去除有机酸, 后洗至中性并在50℃下烘干. 用球磨机将植物残体粉碎, 称取0.09~0.1 mg待测. 稳定碳同位素测试在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成, 采用MAT-253型稳定同位素质谱仪进行测试. 每隔7个样品加入一个已知 $\delta^{13}\text{C}$ 值的标准样品进行测试质量控制, 测量误差小于0.1‰. 碳同位素值采用国际VPDB标准, 千分比

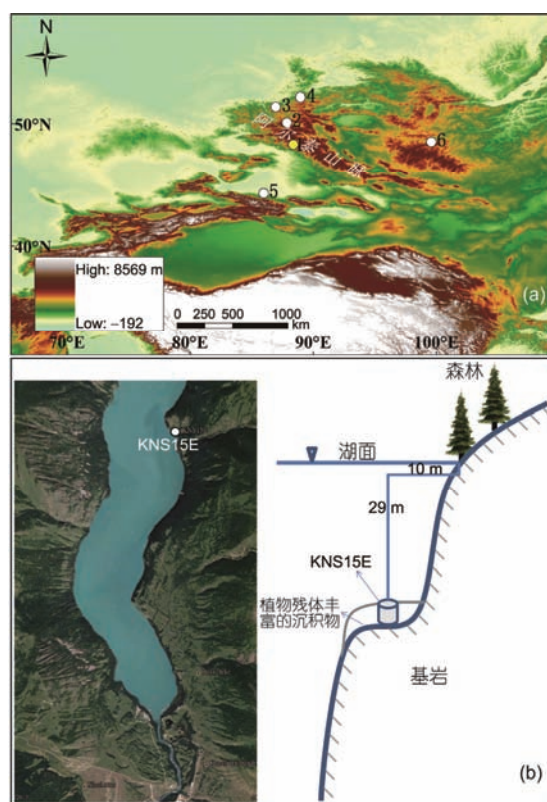


图1 喀纳斯湖与文中引用的其他古气候研究点位置(a)和钻孔位置(b). 1, 喀纳斯湖; 2, 俄罗斯Belukha冰芯; 3, 俄罗斯阿尔泰山树轮采样点; 4, 俄罗斯Teletskoe湖; 5, 玛纳斯湖; 6, 蒙古中西部树轮采样点

Figure 1 Locations of Kanas Lake and the palaeoclimatic sites referenced in this study (a) and Core KNS15E site (b). 1, Kanas Lake; 2, Belukha ice core in Russian Altai; 3, tree-ring sampling site in Russian Altai; 4, Teletskoe Lake in Russian Altai; 5, Manas Lake; 6, tree-ring sampling site in Mongolia

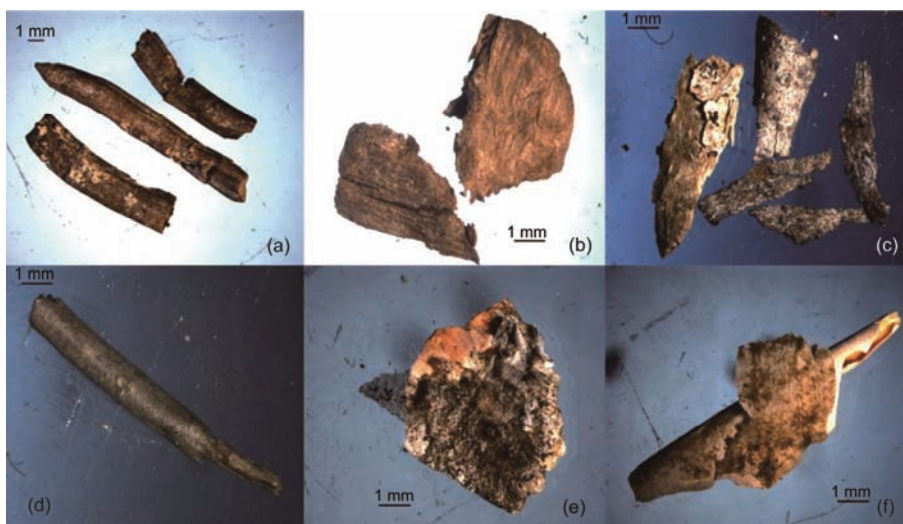


图2 (网络版彩色) 沉积物中的植物残体((a)~(d))和研究点现生疣枝桦树皮((e), (f))

**Figure 2** (Color online) Photographs of  $C_3$  terrestrial plant remains in Kanas Lake sediment core ((a)~(d)) and modern tree skin samples of *Betula pendula* in the study area ((e), (f))

(‰)表示。测试结果如图3所示。

## 2.2 碳同位素的二氧化碳校正

在世界工业化浪潮的影响下, 由于化石燃料的燃烧和土地利用方式的改变等<sup>[16]</sup>, 大气 $CO_2$ 浓度持续上升, 其 $\delta^{13}C$ 值持续降低。全球平均 $CO_2$ 浓度在工业革命前约为280 ppm (parts per million, 1 ppm=1  $\mu L/L$ , 余同), 1850年约为285 ppm, 2015年上升至399.4 ppm, 且2013年9月5日在夏威夷Mauna Loa测得的 $CO_2$ 浓度就已超过400 ppm (<https://www.climate.gov/>, <https://www.co2.earth/>)。大气 $CO_2$ 浓度和 $\delta^{13}C$ 值的这种变化使植物 $\delta^{13}C$ 值自1850年以来表现出持续下降的趋势, 近几十年来的下降幅度更大。为了更好地从植物残体 $\delta^{13}C$ 值的变化中获取气候信息, 有必要对1850年以来的 $\delta^{13}C$ 值进行校正, 以去除大气 $CO_2$ 变化对其造成的影响。本文采取两种方法进行校正, 一种是McCarroll等人<sup>[17,18]</sup>2004和2009年提供的方法, 另一种是来自Schubert和Jahren<sup>[19,20]</sup>的方法。

植物的稳定碳同位素组成是源 $CO_2$ 同位素组成和叶片生理过程的函数,  $C_3$ 植物的碳同位素分馏模式可用以下公式描述:

$$\Delta \approx a + (b - a)(ci/ca),$$

$$\delta_{plant} = \delta_{atm} - a - (b - a)(ci/ca),$$

式中,  $\Delta$ 表示 $C_3$ 植物的碳同位素分馏值;  $a$ ,  $b$ 均为常量,  $a$ 表示 $CO_2$ 由周围空气向叶片内部扩散时的分馏系数,

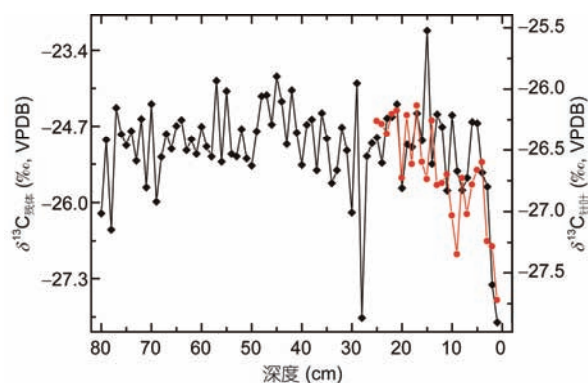


图3 (网络版彩色) 喀纳斯湖KNS15E岩芯植物残体 $\delta^{13}C$ 原始序列。残体原始碳同位素值(方块实线); 顶部 25 cm 针叶原始碳同位素值(圆点实线)

**Figure 3** (Color online) The original  $\delta^{13}C$  values of  $C_3$  terrestrial plant remains of core KNS15E. The solid line with squares represents the  $\delta^{13}C$  values of wooden materials and the solid line with dots represents the  $\delta^{13}C$  values of tree needles

其值约为4.4‰,  $b$ 表示羧化作用过程中产生的分馏系数, 其值约为27‰;  $ci$ 和 $ca$ 分别表示胞间 $CO_2$ 浓度和周围大气的 $CO_2$ 浓度;  $\delta_{plant}$ 和 $\delta_{atm}$ 分别表示 $C_3$ 植物和大气 $CO_2$ 的稳定碳同位素组成值<sup>[21]</sup>。

本文所采用的两种校正方法基于 $C_3$ 植物的碳同位素分馏机制而建立, 既考虑了大气二氧化碳 $\delta^{13}C$ 值的降低对植物 $\delta^{13}C$ 值的影响, 又考虑了 $C_3$ 植物对二氧化碳浓度升高的生理响应, 并且很好地保留了碳同位素序列的低频的、长期的气候信号<sup>[17~20]</sup>。McCarroll等人<sup>[17,18]</sup>2004和2009年提供的方法在北半



球中高纬度地区包括阿尔泰山脉地区的树轮同位素研究中得到了广泛的应用<sup>[16,19~21]</sup>. Schubert 和 Jahren<sup>[19,20]</sup>的方法是在C<sub>3</sub>植物碳同位素分馏机制的基础上, 结合控制实验而建立, 在长尺度的沉积物植物残体和有机质碳同位素中得到应用和验证<sup>[20]</sup>, 也被应用于树轮碳同位素研究.

2.3 钻孔年代模式

岩芯KNS15E取自喀纳斯湖三道湾附近湖滨处, 取样点水深29 m, 岩芯长81 cm, 其下为基岩, 岸坡上为茂密的森林. 岩芯呈植物残体的灰黑色, 沉积颗粒以粉砂质砂为主, 顶部2~5, 52~53, 78~81 cm为颗粒较细的黏土质砂, 73~76 cm为颗粒较粗的砂. 岩芯中含有丰富的陆生植物残体, 其中黏土质砂中所含植物残体相对较少, 最底部1 cm几乎没有植物残体.

挑选6个层位的陆生植物残体进行AMS <sup>14</sup>C年龄测试, 其中2个在美国Beta放射性碳测年实验室完成,

4个在兰州大学西部环境教育部重点实验室制靶, 北京大学加速器实验室测试(表1). 利用R软件(<https://www.r-project.org/>)调用贝叶斯年龄-深度模型<sup>[22]</sup>软件包Bacon2.2, 计算得到岩芯的年龄-深度模式(图4). <sup>14</sup>C年龄校正曲线采用Intcal13校正曲线. 30 cm处测得的年龄明显偏老, 可能取样中受到了不明原因的污染, 在年龄计算中去除.

表1 喀纳斯湖KNS15E岩芯AMS <sup>14</sup>C年代测试结果  
Table 1 Results of AMS <sup>14</sup>C test of core KNS15E from Kanas Lake

| 实验室编号       | 深度 (cm) | 测试材料 | <sup>14</sup> C年龄 (a BP) | 误差 (±a) |
|-------------|---------|------|--------------------------|---------|
| LZU15143    | 20      | 植物残体 | 115                      | 25      |
| LZU15144    | 30      | 植物残体 | 575                      | 20      |
| Beta-427985 | 37      | 植物残体 | 80                       | 30      |
| LZU15146    | 62      | 植物残体 | 205                      | 25      |
| Beta-427986 | 71      | 植物残体 | 390                      | 30      |
| LZU15147    | 77      | 植物残体 | 405                      | 25      |

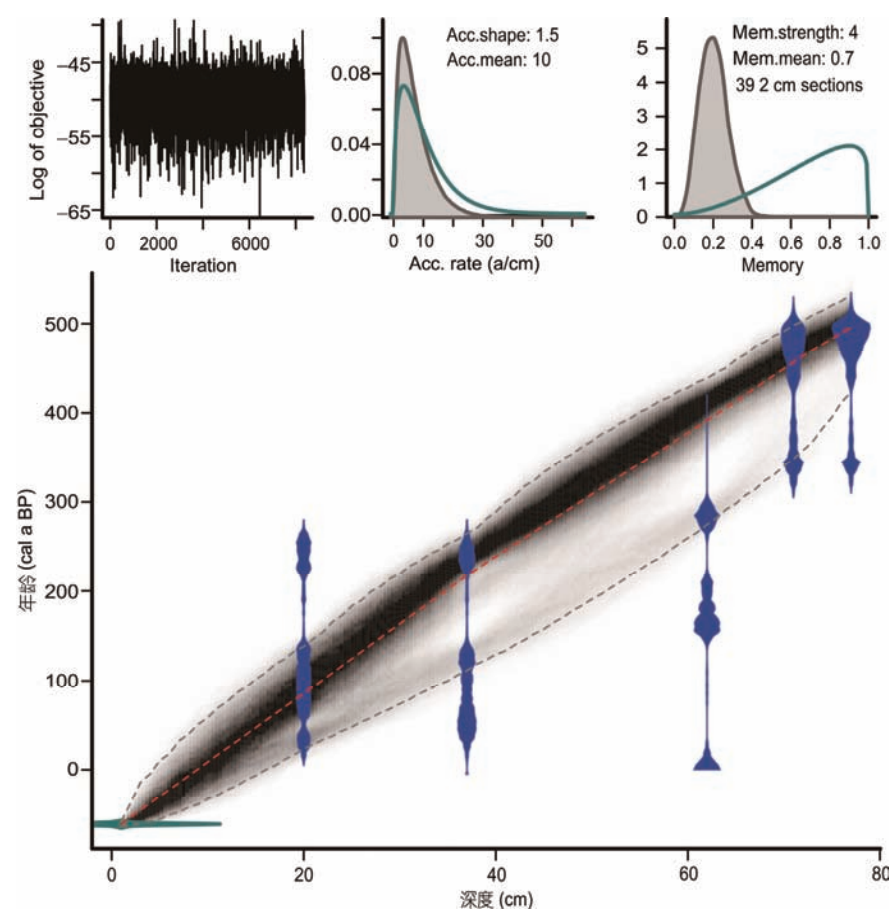


图4 (网络版彩色)喀纳斯湖KNS15E岩芯年代-深度模式  
Figure 4 (Color online) The Bayesian age model of core KNS15E from Kanas Lake

### 3 结果与讨论

#### 3.1 碳同位素分析结果

碳同位素校正结果如图5所示。从校正结果来看, 本文采用两种校正方法得到的结果基本一致, 在后文的讨论中我们采用其平均值序列。本文 $\text{CO}_2$ 校正所使用的大气 $\text{CO}_2$ 浓度和 $\delta^{13}\text{C}$ 值数据来自文献[17,18]和大气实际测量值, 也可从上文提到的网址查阅。

校正后的植物残体 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 $-27.96\text{‰}$ ~ $-22.69\text{‰}$ , 高低相差 $5.27\text{‰}$ , 平均值为 $-24.79\text{‰}$ ; 最低值 $-27.96\text{‰}$ 出现于1802 AD左右, 最高值 $-22.69\text{‰}$ 出现于1903 AD左右; 1435~1899 AD之间 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-24.96\text{‰}$ , 1900~2011 AD之间 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 $-24.01\text{‰}$ , 20世纪以来 $\delta^{13}\text{C}$ 值比之前460多年整体上偏正 $0.95\text{‰}$ 。

#### 3.2 碳同位素的环境意义

植物稳定碳同位素组成可以反映地质历史时期植物生长所处的环境信息, 包括温度、湿度、降水量、大气成分和土壤组成等<sup>[23~27]</sup>, 其中影响较大的环境因素主要是大气 $\text{CO}_2$ 、温度和降水等<sup>[26]</sup>。 $\text{C}_3$ 植物的碳同位素分馏与植物叶片胞间 $\text{CO}_2$ 浓度相关<sup>[21]</sup>。胞间 $\text{CO}_2$ 浓度又受到叶片气孔导度和光合速率两者对比

关系的影响( $P_i=P_a-A/g$ ,  $P_i$ 和 $P_a$ 分别为植物叶片内外 $\text{CO}_2$ 的分压力或者浓度,  $A$ 表示植物光合速率,  $g$ 表示叶片气孔导度)<sup>[21]</sup>。环境因素影响 $\text{C}_3$ 植物叶片气孔导度和光合速率的对比关系进而影响碳同位素分馏从而影响植物碳同位素组成。除去 $\text{CO}_2$ 的影响, 在干旱环境中或者树木扎根浅且土壤排水良好的条件下, 在气孔导度和光合速率的对比关系中气孔导度占主导, 碳同位素组成主要受控于相对湿度、降水量和土壤水分状况等环境因素; 在湿润环境以及树木生长很少受水分胁迫的环境下, 光合速率占主导, 碳同位素组成主要受控于夏季光照和温度等环境因素<sup>[17,18]</sup>。从本研究区的环境条件来看, 如前文所述, 特殊的地理位置、地形条件和西风、北冰洋气流的影响使这里成为亚州中部的一个“湿岛”<sup>[27]</sup>。该区域降水丰富, 且湖滨森林受到山地降水、积雪融水下渗形成地下水补给、湖面蒸发等过程影响, 相对湿度大, 水分条件优良, 植物生长几乎不受水分胁迫, 所以植物对水分的敏感度不高; 夏季气温不高, 热量不足, 所以植物对温度变化比水分要敏感得多。在低温高湿的环境条件下, 气温升高时光合速率和气孔导度都增大, 但是光合速率的增大幅度或者速度比气孔导度大得多, 故植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏正。反之, 气温降低时光合速率下降幅度更大, 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负。所以, 从植物碳同位素的分馏机制和本研究区的环境条件来看, 植物残体 $\delta^{13}\text{C}$ 值与夏季温度正相关。

从阿尔泰山脉南坡植物碳同位素的现代过程研究来看, 黄超<sup>[28]</sup>在阿尔泰山脉南坡哈拉沙子泥炭地开展的现代过程研究结果表明, 该泥炭地优势植物莎草的纤维素碳同位素无论在时间序列还是在海拔梯度上都与夏季温度变化存在较好的正相关关系; 泥炭地附近获得的树轮纤维素碳同位素与6~8月的平均气温存在显著的正相关关系。从前人所做的树轮研究来看, 有研究者指出阿尔泰山地区上树线的树木对气候变化非常敏感, 非常适合于重建夏季温度<sup>[29]</sup>。查阅了大量的树轮记录后发现, 不论是南坡还是北坡, 不论是树轮宽度、密度, 还是碳同位素序列, 上树线的树轮记录几乎都以反映夏季温度为主<sup>[16,29~38]</sup>。另有研究表明阿尔泰山脉南坡中国段沿山体自东南向西北(喀纳斯湖方向), 温度对上树线树轮宽度的影响逐渐增强<sup>[39]</sup>。

基于本研究区的环境条件、植物稳定碳同位素现代过程的研究以及该区域的树轮记录, 认为本文

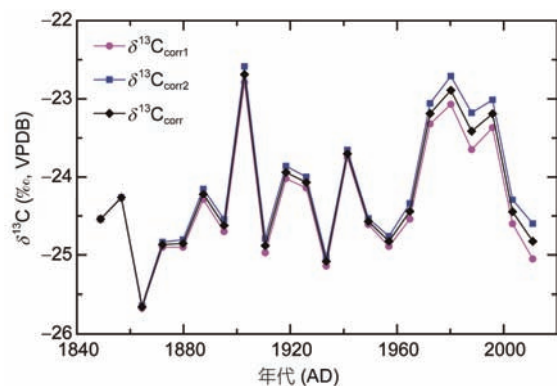


图5 (网络版彩色)植物残体 $\delta^{13}\text{C}$ 值校正结果。曲线 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr1}}$ 采用McCarroll等人<sup>[17,18]</sup>2004, 2009年的方法; 曲线 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr2}}$ 采用Schubert和Jahren<sup>[19,20]</sup>2012, 2015年的方法; 曲线 $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$ 为本文所采用的上述两种校正结果的平均值曲线

**Figure 5** The correction results of  $\delta^{13}\text{C}$  values for changes in  $\delta^{13}\text{C}$  values and concentration of atmospheric  $\text{CO}_2$ .  $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr1}}$  represents the results using the methods from McCarroll et al.<sup>[17,18]</sup> of 2004, 2009;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr2}}$  represents the results using the methods from Schubert and Jahren<sup>[19,20]</sup> of 2012, 2015;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr}}$  represents the average values of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr1}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{corr2}}$  and it is used in this study

$\delta^{13}\text{C}$ 序列是温度信号的反映,与夏季温度呈正相关。

### 3.3 现代温暖期的记录与近年来的降温

从本文 $\delta^{13}\text{C}$ 序列来看(图6(h)),存在明显的小冰期(Little Ice Age)和现代暖期(Current Warm Period)的特征。19世纪前期以来温度在冷暖波动中持续上升;20世纪是570年来最暖的一个世纪(1900年以来的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值比之前460多年整体上偏正0.95‰)。把本文的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与周边区域的其他古温度记录对比,可以看到不同记录对气候变暖的响应在百年尺度上表现得比较一致,都显现出长期的增温趋势。同时,可以看出在年代际尺度上也存在一定的差异,这与不同区域的环境本身存在一定的差异有关,与指标之间的差异以及年代精度等也有关系。对温度来说,区域之间的差异在所难免,但是在长期的变化趋势以及大的空间尺度上,具有比较好的可比性。从阿尔泰山脉地区的古气候记录来看,俄罗斯阿尔泰山地区的Belukha冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 重建温度<sup>[40]</sup>、树轮重建的6~7月温度<sup>[36]</sup>和Teletskoe湖泊沉积物重建的年平均温度<sup>[41]</sup>在近100多年来升温态势明显。从阿尔泰山脉的周边区域来看,Briffa等人<sup>[42]</sup>树轮重建的北西伯利亚夏季温度、蒙古中西部树轮重建的6~7月温度<sup>[43]</sup>和玛纳斯湖湖泊沉积物长链烯酮不饱和度指标 $\text{U}_{\text{K}}^{37}$ 序列<sup>[6]</sup>也表现出明显的温度上升。从北半球中高纬度地区多代用指标集成重建的温度序列<sup>[44]</sup>来看,近600年中,也存在明显的小冰期和现代暖期,20世纪以来的温度明显比之前高。近50年来的冰川监测数据也可以反映当地的气候变化。阿尔泰山脉冰川对气候变化非常敏感<sup>[45,46]</sup>。从冰川面积变化来看,阿尔泰山脉南坡中国段的冰川面积在1959~2000年间减少了31.3%,友谊峰冰川面积从1959年的214.04 km<sup>2</sup>减少到2008年的148.94 km<sup>2</sup>,减少了30.4%,主要原因为气候变暖<sup>[45,46]</sup>。因此,本文 $\delta^{13}\text{C}$ 序列很好地记录了阿尔泰山脉南坡对气候变暖的响应,这与阿尔泰山脉南坡中国段的树轮宽度记录有所不同,但是与周边区域的记录表现出很好的一致性,这进一步说明多指标结合对于加深对过去气候和环境变化的理解具有重要意义。阿尔泰山脉南坡中国段的树轮宽度记录没有表现出低频的、长期的增温趋势,可能与去除生长趋势的方法有关<sup>[16~18]</sup>,也可能与报道的近几十年来的树轮宽度与气温之间存在分异的现象有关<sup>[47,48]</sup>,抑或与可选择的树种有关。

近十几年来的增温停滞现象,在全球不同区域的表现也存在差异,部分区域仍在快速升温,部分区域增温趋缓,也有的区域出现降温。虽然对于造成增温停滞这种现象的原因,学界仍存在很大的争论<sup>[11,49]</sup>,但是对这种现象本身的认识及其在不同区域的表现无疑对人们预估未来气候变化的走势非常重要。据Huang等人<sup>[50]</sup>的研究,亚洲中部的降温非常显著,对增温停滞的贡献很大。从本研究区来看,喀纳斯湖邻近的哈巴河气象站的气象资料(1958~2014年)显示,夏季平均气温在1998年达到最高,之后在波动中下降(图7(a));喀纳斯地区1979~2012年的冬季温度数据<sup>[51]</sup>也显示了近些年来的降温明显,而且降温持续的时间更长(图7(b))。这种降温现象在本文的 $\delta^{13}\text{C}$ 序列中得到了反映,表现为碳同位素值的偏负变化(图7(c))。关于增温停滞的原因,Guan等人<sup>[11]</sup>把近地面气温分离成动力强迫温度和辐射强迫等非动力因素引起的温度变化,指出动力冷却作用是出现增温停滞现象的直接原因,更进一步地控制因素是气候的年代际自然变率。

## 4 结论

本文从喀纳斯湖中部湖滨29 m水深处获得的81 cm岩芯,在可靠<sup>14</sup>C定年的基础上,利用陆生 $\text{C}_3$ 植物残体 $\delta^{13}\text{C}$ 序列,探讨区域在全球气候变暖中的表现。由于化石燃料的燃烧和土地利用方式的改变等造成大气二氧化碳浓度持续升高、 $\delta^{13}\text{C}$ 值持续偏负,使1850年以来的同位素序列逐渐偏负,近几十年来更加明显,所以为了去除这部分影响,使植物残体 $\delta^{13}\text{C}$ 序列更好地反映出气候信息,需要对原始 $\delta^{13}\text{C}$ 序列进行二氧化碳校正。考虑到不同的校正方法可能会造成结果的差异,本文采用两种校正方法进行校正。结果显示两种方法得到的校正结果差异不大,采用其平均值作为最终校正结果。本文 $\delta^{13}\text{C}$ 序列很好地记录了阿尔泰山脉南坡对气候变暖的响应。19世纪前期以来温度在冷暖波动中持续上升;20世纪是570年中最暖的一个世纪。这种增温特征与俄罗斯阿尔泰山地区的冰芯、湖泊沉积物和树轮重建温度表现出很好的一致性;与周边的蒙古中西部、北西伯利亚和西天山的树轮重建温度,玛纳斯湖湖泊沉积物长链烯酮不饱和度指标 $\text{U}_{\text{K}}^{37}$ 记录以及北半球中高纬地区多代用指标集成重建的温度序列也表现出很好的一致性。此外,从器测资料来看,增温停滞现象在这一区域有很明显的表现,在本文 $\delta^{13}\text{C}$ 序列中也有较好的反映。



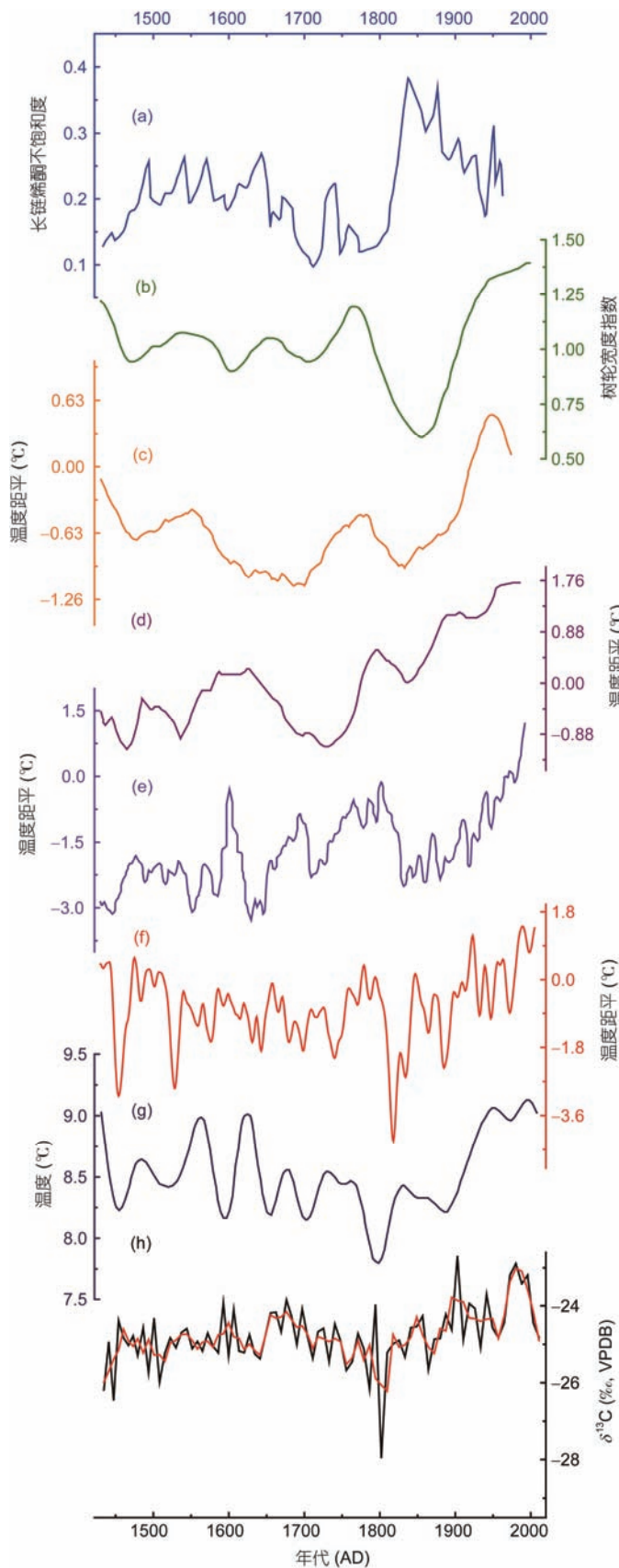


图6 (网络版彩色)喀纳斯湖植物残体 $\delta^{13}\text{C}$ 序列与周边地区古气候记录对比。(a) 玛纳斯湖湖泊沉积物长链烯酮不饱和度指标 $U_K^{37}$ 序列<sup>[6]</sup>;(b) 蒙古中西部树轮宽度指数<sup>[43]</sup>;(c) 北半球中高纬度地区多代用指标集成重建温度<sup>[44]</sup>;(d) 俄罗斯阿尔泰山地区Belukha冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 重建温度<sup>[40]</sup>;(e) 俄罗斯阿尔泰山地区Teletskoe湖湖泊沉积物重建温度<sup>[41]</sup>;(f) 北西伯利亚树轮宽度重建温度<sup>[42]</sup>;(g) 俄罗斯阿尔泰山地区树轮重建温度<sup>[36]</sup>;(h) 本文植物残体 $\delta^{13}\text{C}$ 序列及5点平滑曲线

Figure 6 (Color online) Comparison of  $\delta^{13}\text{C}$  series in this study and paleoclimate reconstruction records. (a)  $U_K^{37}$  temperature proxy from Manas Lake<sup>[6]</sup>; (b) tree-ring width chronology from Mongolia<sup>[43]</sup>; (c) reconstruction sequence of the extratropical NH mean temperature<sup>[44]</sup>; (d) temperature reconstruction record from Belukha ice core<sup>[40]</sup>; (e) temperature reconstruction record from Teletskoe Lake<sup>[41]</sup>; (f) temperature reconstruction record based on tree-ring width from Russian Altai<sup>[42]</sup>; (g) temperature reconstruction record from northwest Siberia<sup>[36]</sup>; (h)  $\delta^{13}\text{C}$  sequence in this study and the result of a five point smoothing using a Savitzky-Golay filter

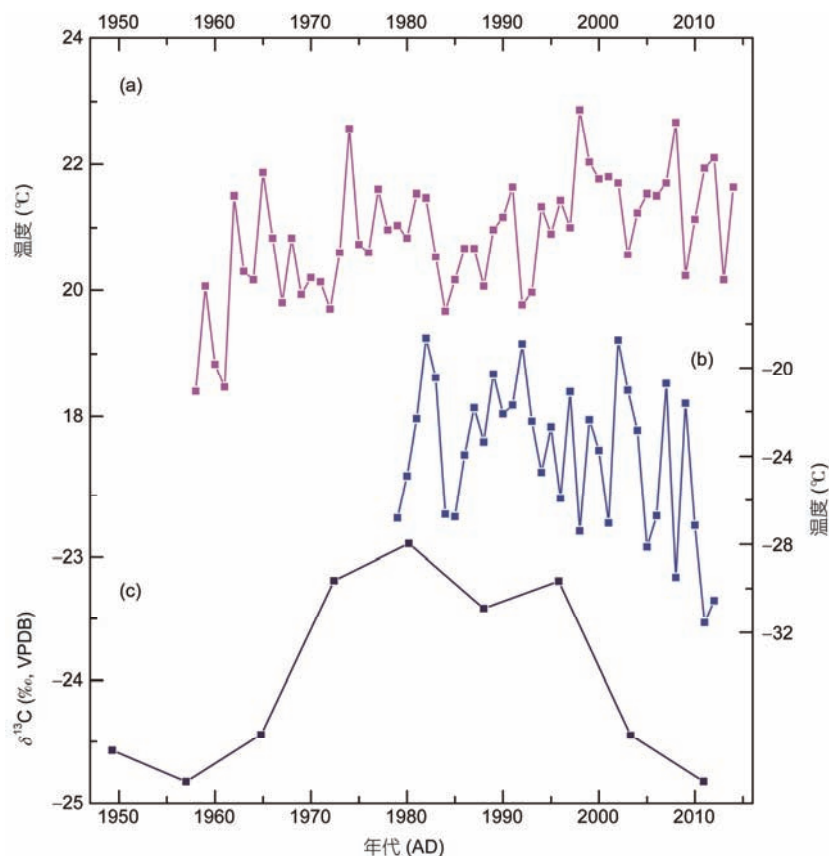


图7 (网络版彩色)植物残体碳同位素序列与哈巴河夏季温度以及喀纳斯地区冬季温度对比。(a) 哈巴河气象站 1958~2014 年夏季气温; (b) 喀纳斯地区 1979~2012 年冬季温度数据<sup>[51]</sup>; (c) 植物残体  $\delta^{13}\text{C}$  序列

Figure 7 (Color online) Comparison of  $\delta^{13}\text{C}$  sequence in this study and temperature data. (a) Summer temperature data from Habahe meteorological station (1958–2014); (b) winter temperature data of Kanas region<sup>[51]</sup> (1979–2012); (c)  $\delta^{13}\text{C}$  series in this study

**致谢** 喀纳斯景区管理委员会对本研究的野外采样工作给予了大力支持, 兰州大学张平宇老师和郭文康对同位素测试提供了具体指导, 审稿专家提出了许多建设性的修改意见和建议, 在此一并致谢。

## 参考文献

- 1 Wang T, Yang B, Braeuning A, et al. Decadal-scale precipitation variations in arid and semi-arid zones of northern China during the last 500 years. *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 842–848
- 2 Yin H. Precipitation series over the past 1000 years are preliminarily reconstructed and analysed in the north-west of China (in Chinese). Master Dissertation. Nanjing: Nanjing University of Information and Science Technology, 2006. 21–52 [尹红. 西北地区过去千年降水序列的初步重建及变化特征分析. 硕士学位论文. 南京: 南京信息工程大学, 2006. 21–52]
- 3 Chen F H, Huang X Z, Zhang J W, et al. Humid Little Ice Age in arid central Asia documented by Bosten Lake, Xinjiang, China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2006, 49: 1280–1290
- 4 Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 351–364
- 5 Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region. *Quat Sci Rev*, 2010, 29: 1055–1068
- 6 Song M, Zhou A F, Zhang X N, et al. Solar imprints on Asian inland moisture fluctuations over the last millennium. *Holocene*, 2015, 25: 1935–1943
- 7 Chen J H, Chen F H, Feng S, et al. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval Climate Anomaly and Little



- Ice Age: Spatial patterns and possible mechanisms. *Quat Sci Rev*, 2015, 107: 98–111
- 8 Chen F H, Jia J, Chen J H, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China. *Quat Sci Rev*, 2016, 146: 134–146
- 9 Li Y, Qiang M R, Zhang J W, et al. Hydroclimatic changes over the past 900 years documented by the sediments of Tietai Lake, Altai Mountains, Northwestern China. *Quat Int*, 2016, doi: 10.1016/j.quaint.2016.07.053
- 10 England M H, McGregor S, Spence P, et al. Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus. *Nat Clim Change*, 2014, 4: 222–227
- 11 Guan X D, Huang J P, Guo R X, et al. The role of dynamically induced variability in the recent warming trend slowdown over the Northern Hemisphere. *Sci Rep*, 2015, 5: 12669
- 12 Karl T R, Arguez A, Huang B, et al. Possible artifacts of data biases in the recent global surface warming hiatus. *Science*, 2015, 348: 1469–1472
- 13 Local Chronicles Compiling Commission of Altay Prefecture, Kanas Scenic Area Administration Committee of Altay Prefecture. *Chronicles of Kanas Region* (in Chinese). Urumqi: Xinjiang People's Press, 2006. 5–145 [阿勒泰地区地方志编纂委员会, 阿勒泰地区喀纳斯景区管委会. 喀纳斯志. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2006. 5–145]
- 14 Yang G. Research on landscape characteristics and genesis analysis and development model of geological heritages of Kanas national geopark of Xinjiang Uygur Autonomous Region (in Chinese). Doctor Dissertation. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006. 22–30 [杨更. 新疆喀纳斯国家地质公园地质遗迹景观特征、成因分析及发展模式研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2013. 22–30]
- 15 Feng M, Ren M L. *Scientific Expedition of Kanas Lake in Xinjiang* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1990. 1–100 [冯敏, 任慕莲. 新疆喀纳斯湖科学考察. 北京: 科学出版社, 1990. 1–100]
- 16 Sidorova O V, Saurer M, Myglan V S, et al. A multi-proxy approach for revealing recent climatic changes in the Russian Altai. *Clim Dyn*, 2012, 38: 175–188
- 17 McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings. *Quat Sci Rev*, 2004, 23: 771–801
- 18 McCarroll D, Gagen M H, Loader N J, et al. Correction of tree ring stable carbon isotope chronologies for changes in the carbon dioxide content of the atmosphere. *Geochim Cosmochim Acta*, 2009, 73: 1539–1547
- 19 Schubert B A, Jahren A H. The effect of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on carbon isotope fractionation in C<sub>3</sub> land plants. *Geochim Cosmochim Acta*, 2012, 96: 29–43
- 20 Schubert B A, Jahren A H. Global increase in plant carbon isotope fractionation following the Last Glacial Maximum caused by increase in atmospheric pCO<sub>2</sub>. *Geology*, 2015, 43: 435–438
- 21 Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Aust J Plant Physiol*, 1982, 9: 121–137
- 22 Blaauw M, Christen J A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Anal*, 2011, 6: 457–474
- 23 Goñi M A, Rittenberg K C, Eglinton T I. Sources and contribution of terrigenous organic carbon to surface sediments in the Gulf of Mexico. *Nature*, 1997, 389: 275–278
- 24 Cayet C, Lichtfouse E.  $\delta^{13}\text{C}$  of plant-derived *n*-alkanes in soil particle-size fractions. *Org Geochem*, 2001, 32: 253–258
- 25 Wang G A, Han J M, Liu T S. The carbon isotope composition of C<sub>3</sub> herbaceous plants in loess area of Northern China. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2003, 46: 1069–1076
- 26 Zhang H W. Variation in organic carbon isotope composition values of plant and surface soil along an altitude gradient in the Tianshan Mountains (in Chinese). Doctor Dissertation. Lanzhou: Lanzhou University, 2010. 13–36 [张慧文. 天山现代植物和表土有机稳定碳同位素组成的海拔响应特征. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2010. 13–36]
- 27 Gulzat H, Zhao J B. Analysis on climate change in recent 50 years in Altay Prefecture, Xinjiang (in Chinese). *Arid Zone Res*, 2011, 28: 268–274 [古丽扎提·哈布肯, 赵景波. 近 50 年来新疆阿勒泰地区的气候变化. 干旱区研究, 2011, 28: 268–274]
- 28 Huang C. Peat cellulose carbon isotopic record and possible driving mechanisms during the past 11.5 ka in Altay, Northern Xinjiang (in Chinese). Master Dissertation. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. 31–37 [黄超. 过去 11.5 ka 以来的北疆阿勒泰泥炭纤维素碳同位素记录及其可能的驱动机制. 硕士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2015. 31–37]
- 29 Loader N J, Helle G, Los S O, et al. Twentieth-century summer temperature variability in the southern Altai Mountains: A carbon and oxygen isotope study of tree-rings. *Holocene*, 2010, 20: 1149–1156
- 30 Ovtchinnikov D, Adamenko M, Panushkina I A. 1105-year tree-ring chronology in Altai Region and its application for reconstruction of summer temperatures. *Geolines*, 2000, 11: 121–122
- 31 Zhang T W, Wei W S, Yuan Y J, et al. Analysis of the tree-ring chronological characteristics in the west of Altay (in Chinese). *J Desert Res*, 2007, 27: 1040–1047 [张同文, 魏文寿, 袁玉江, 等. 阿勒泰西部树轮年表特征分析. 中国沙漠, 2007, 27: 1040–1047]

- 32 Zhang T W, Yuan Y J, Yu S L, et al. Development of two tree-ring width chronologies of the samples collected from the Baluntai region (in Chinese). *Arid Zone Res*, 2008, 25: 288–294 [张同文, 袁玉江, 喻树龙, 等. 用树木年轮重建阿勒泰西部 5~9 月 365 年来的月平均气温序列. *干旱区研究*, 2008, 25: 288–294]
- 33 Myglan V S, Oidupaa O C, Kirdyanov A V, et al. 1929-year tree-ring chronology for the Altai-Sayan region (western Tuva). *Archaeol Ethnol Anthropol Eurasia*, 2008, 36: 25–31
- 34 Shang H M, Wei W S, Yuan Y J, et al. The mean June temperature history of 436 a in Altay reconstructed from tree ring (in Chinese). *J Arid Land Resour Environ*, 2010, 24: 116–121 [尚华明, 魏文寿, 袁玉江, 等. 树木年轮记录的阿勒泰 436 a 来 6 月温度变化. *干旱区资源与环境*, 2010, 24: 116–121]
- 35 Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. Tree ring density-based summer temperature reconstruction for Zajsan Lake area, East Kazakhstan. *Int J Climatol*, 2012, 32: 1089–1097
- 36 Myglan V S, Oidupaa O C, Vaganov E A. A 2367-year tree-ring chronology for the Altai-Sayan region (Mongun-Taiga Mountain Massif). *Archaeol Ethnol Anthropol Eurasia*, 2012, 40: 76–83
- 37 Zhang R B, Shang H M, Wei W S, et al. Summer temperature history in Altay during the last 160 years recorded by  $\delta^{13}\text{C}$  in tree rings (in Chinese). *Desert Oasis Meteorol*, 2014, 2: 34–40 [张瑞波, 尚华明, 魏文寿, 等. 树轮  $\delta^{13}\text{C}$  记录的阿勒泰地区近 160 a 夏季气温变化. *沙漠与绿洲气象*, 2014, 2: 34–40]
- 38 Zhang T W, Yuan Y J, Hu Y C, et al. Early summer temperature changes in the southern Altai Mountains of Central Asia during the past 300 years. *Quat Int*, 2015, 358: 68–76
- 39 Cui Y. Climate response and early summer temperature reconstruction of tree-ring width in the Altay region (in Chinese). Master Dissertation. Urumqi: Xinjiang University, 2014. 19–52 [崔宇. 阿勒泰地区树轮宽度年表对气候的响应及初夏温度重建. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014. 19–52]
- 40 Eichler A, Olivier S, Henderson K, et al. Temperature response in the Altai region lags solar forcing. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: 276–284
- 41 Kalugin I A, Daryin A V, Babich V V. Reconstruction of annual air temperatures for three thousand years in Altai region by lithological and geochemical indicators in Teletskoe Lake sediments. *Dokl Earth Sci*, 2009, 426: 681–684
- 42 Briffa K R, Melvin T M, Osborn T J, et al. Reassessing the evidence for tree-growth and inferred temperature change during the Common Era in Yamalia, northwest Siberia. *Quat Sci Rev*, 2013, 72: 83–107
- 43 D'Arrigo R, Jacoby G, Frank D, et al. 1738 years of Mongolian temperature variability inferred from a tree-ring width chronology of Siberian pine. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 543–546
- 44 Christiansen B, Ljungqvist F C. Reconstruction of the extratropical NH mean temperature over the last millennium with a method that preserves low-frequency variability. *J Clim*, 2011, 24: 6013–6034
- 45 Wang S H, Xie Z C, Dai Y N, et al. Structure, change and its tendency of glacier systems in Altay Mountains (in Chinese). *Arid Land Geogr*, 2011, 34: 115–123 [王淑红, 谢自楚, 戴亚南, 等. 阿尔泰山冰川系统结构、近期变化及趋势预测. *干旱区地理*, 2011, 34: 115–123]
- 46 Wang P Y, Li Z Q, Luo S F, et al. Five decades of changes in the glaciers on the Friendship Peak in the Altai Mountains, China: Changes in area and ice surface elevation. *Cold Reg Sci Technol*, 2015, 116: 24–31
- 47 Briffa K R, Schweingruber F H, Jones P D, et al. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 1998, 391: 678–682
- 48 D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B, et al. On the 'divergence problem' in northern forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Glob Planet Change*, 2008, 60: 289–305
- 49 Guemas V, Doblas-Reyes F J, Andreu-Burillo I, et al. Retrospective prediction of the global warming slowdown in the past decade. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 649–653
- 50 Huang J P, Xie Y K, Guan X D, et al. The dynamics of the warming hiatus over the Northern Hemisphere. *Clim Dyn*, 2017, 48: 429–446
- 51 Chen Y Y, Yang K, He J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *J Geophys Res*, 2011, 116: D20104

Summary for “喀纳斯湖植物残体碳同位素记录的温度波动”

## Temperature variations over the past 600 years documented by a $\delta^{13}\text{C}$ record from terrestrial plant remains from Kanas Lake, Altai Mountains, Northwestern China

WANG YuHui, HUANG XiaoZhong\*, PENG Wei, ZHOU GangPing, ZHANG Jun & DU Xuan

MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

\* Corresponding author, E-mail: xzhuang@lzu.edu.cn

Arid central Asia (ACA) is characterized by relatively dry climates and fragile ecosystems, which restrict the survival and development of human beings. A full understanding of the climatic and environmental evolution in the region is not only significant for the thorough understanding of global climate change, but is of importance for the sustainable development of the area as well, especially in the context of ongoing global warming. The Altai Mountains are located in the central part of the ACA and numerous lakes are distributed in the Mountains. Kanas Lake, one of the largest lake in the Altai Mountains of Northwestern China, is surrounded by dense forests. The climate of the area is characterized by relatively abundant precipitation and cold temperatures and the vegetations are very sensitive to climate changes. Recent temperature reconstructions based on the width and short-term series of carbon isotopes of tree-rings from the area did not exhibit an obvious warming trend during the past century. This result is unexpected in the context of ongoing global warming, but it remains uncertain whether the regional climate did not response to global warming due to complex unknown processes, or whether the tree-ring data did not record the signal of long-term warming. A 81-cm-long sediment core (KNS15E) was recovered from a water depth of 29 m near the lakeside of Kanas Lake using a modified piston corer. Here we present the results of stable carbon isotope analysis of a sequence of  $\text{C}_3$  terrestrial plant remains from core KNS15E. A chronology is constructed from five AMS  $^{14}\text{C}$  dates from wood fragments (twigs) and it reveals that the whole core spans the past 570 years. From the context of the sampling site, the soil of the adjacent forest would have been well-supplied with water from rainfall and snowmelt from the mountains which would have been supplied to site as ground water. In addition, based on the previous studies of carbon isotopes of tree-rings and of  $\alpha$ -cellulose of sedge plants, the  $\delta^{13}\text{C}$  variations are likely to be mainly related to temperature changes. The raw  $\delta^{13}\text{C}$  values are corrected to pre-industrial values to account for changes in the  $\delta^{13}\text{C}$  value of atmospheric  $\text{CO}_2$  and for changes in  $\text{CO}_2$  concentration. The stable carbon isotope record provides a record of temperature changes over the last 570 years which can be clearly divided into the Little Ice Age and the Current Warm Period. The temperature increased continuously since the early 19th century and the 20th century was the warmest period in the sequence. The temperature variations revealed in our study are consistent with temperature reconstructions from ice cores, tree-rings and from Teletskoe Lake in the Russian Altai, as well as with the extratropical NH mean temperature record. In addition, a trend of decreasing temperature is indicated by the decreasing stable carbon isotope ratios of both bulk plant remains and conifer needles in the upper part of the core, which corresponds with the widely-reported phenomenon of a hiatus in global warming in central Asia and with meteorological data from the study region.

**$\text{C}_3$  terrestrial plant remains, organic carbon isotopes, global warming, global warming hiatus, Kanas Lake**

doi: 10.1360/N972017-00380