

泥炭纤维素同位素:全新世气候环境变化的敏感记录

洪业汤,朱詠煊,姜洪波,林庆华,洪冰,王羽

中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550002

摘要:本文简述了笔者与科研组在过去十余年间,在探索和开拓泥炭纤维素氧、碳同位素组成作为全新世气候代用指标方面所取得的研究成果。这些成果已被 *Nature* 等国际著名学术杂志上发表的研究论文多次引用,或受到国际同行专题文章的评论。由于泥炭纤维素氧、碳同位素时间序列对气候变化有很敏感的响应,使它能以高的时间分辨率揭示出重要的全球变化现象,成为全球变化研究的有力工具。

关键词:泥炭纤维;全新世;气候环境变化;碳同位素;氧同位素

泥炭是一种松软的富含有机质的堆积物,储存有古环境古气候变化的信息。相对于其他的环境档案,泥炭有若干难得的优势,因而日益引起环境学界的重视:它在全球有广泛的分布,利于在不同区域进行大范围研究对比;相对易于采集、运输、保存;泥炭中的孢粉、植物化石、同位素、微量元素、矿物、有机质等都可能携带古气候环境变化的信息,利于综合提取,综合对比;易于获得高的时间分辨率,通常 1 cm 间距的泥炭序列可获得约 20~30 a 的时间分辨率;易于获得连续的、距今 10 ka 左右的泥炭剖面,因而特别适合全新世气候环境变化研究所用。

自 19 世纪以来,国际学术界就已对泥炭进行了研究,主要集中在从泥炭中的孢粉、植物化石、腐殖化度等提取古气候信息。到 20 世纪晚期,生物大分子、小分子、单体分子的同位素组成与环境变化关系的研究,逐渐发展成为地球科学的前沿领域。泥炭中的植物纤维素是一种多糖类的天然有机大分子化合物,构成葡萄糖碳链的碳,以及结合在葡萄糖碳链上的氢、氧元素的同位素组成,能否用作环境变化的代用指标,成为国际学术界关注的问题。因此,从 20 世纪 80 年代起,我们开始探索利用泥炭沉积来研究过去全球环境变化,重点放在泥炭中植物残体纤维素的同位素组成上。

我们的研究在以下两方面取得一些新的成果。

1 研究方法方面

(1)1982 年 C. A. M. Brenninkmeijer 等人发表了题为“泥炭纤维素中同位素 D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比值的变化的”论文^[1],报道他们对一段距今约 3100~2400 a (^{14}C 年龄)、厚约 56 cm 的隆起型泥炭的研究成果。他们以 1 cm 间距采样,提取泥炭纤维素,测定了泥炭纤维素样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值,并与泥炭中的孢粉资料进行对比。研究发现,在 700 a 期间,泥炭的孢粉序列记录到一次相当于前北方期至前大西洋期的气候变冷;而泥炭的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也明显变小,两者“定性地吻合”。泥炭地上生长的 11 种植物的纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 值测定的结果表明, $\delta^{18}\text{O}$ 值很离散,因而指出将对泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 序列的气候信号带来很大影响。该项研究的基本结论是:泥炭纤维素的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 用作气候代用记录的有效性还需通过分析测定更多的剖面来进一步评定^[1]。

由于这个研究的结论的不确定性,国际学术界说它实际上是认为“目前不可能从中分离出气候信号”^[2];加上纤维素氧同位素组成的测定工作技术要求高,难度大,因此,该论文发表后的 18 a 期间,没有见到泥炭纤维素氧同位素序列用作古气候代用记录的论文,在国际全球变化研究中也并没有同类气候代用记录类型。

直至 2000 年,我们发表了“Response of climate to solar forcing recorded in a 6000-year $\delta^{18}\text{O}$ time

series of Chinese peat cellulose”一文^[3],才结束了这一状况。我们与 Brenninkmeijer 等人的研究不同之处在于:以地球表面分布更广泛的地毯式泥炭作为研究对象,提升了实用价值;选择一个古火山口湖或旱玛珥湖发育的吉林金川泥炭作为研究点,使之具有稳定的沉积环境。金川泥炭厚约 6 m,时间跨度为距今 0 至约 6000 a (^{14}C 年龄),远超过 Brenninkmeijer 等人研究的 56 cm 厚和约 700 a 的时间跨度,有利于提取更多的气候信号;发展并应用了更精良的测定纤维素中氧同位素的技术,即改进的高温镍管热解技术,分析精度达 $\pm 0.3\%$ 。

所获得的新结论突破了国际上长期以来认为从泥炭的氧同位素组成中不可能提取出气候变化信号和用作古气候代用记录的概念,提出并重复证明^[4],在广泛分布的泥炭纤维素氧同位素时间序列中包含有丰富的全新世气候变化信息,从而创新开拓出一种新的、高分辨率的古气候代用记录类型。

(2)国内外已将泥炭的 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列用作环境湿度或降雨的代用指标。对其代用指标的原理,通常认为是降雨量的变化导致泥炭中 C3 和 C4 两类植物残体相对组成变化,因而引起泥炭的 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列变化。较干旱的气候 C4 型植物较多,泥炭的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏大;较湿气候 C3 型植物较多,泥炭的 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏小。我们工作的新贡献有两方面:一是根据生长在泥炭沼泽区现代植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值测定,发现它们基本上都是 C3 型植物,极少见 C4 型植物。因此,我们认为一般泥炭沼泽的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化不大可能是由 C3 和 C4 两类植物残体相对组成变化所引起,更准确的解释可能是相对湿度或降雨的变化直接影

响了 C3 型植物利用 CO_2 过程中的碳同位素分馏的结果。我们^[5]创新提出泥炭 C3 类型植物的碳同位素时间序列是降水变化灵敏的代用指标,其原理可用气候变化对 C3 型植物的碳同位素分馏效应的影响来解释,发展和完善了泥炭碳同位素记录用于全球变化研究的理论。二是我们首次获得了泥炭中单一植物——木里苔草(*Carex mulieensis*)纤维素的碳同位素时间序列,并证明泥炭纤维素的 $\delta^{13}\text{C}$ 时间序列是亚洲季风强度变化的敏感代用指标^[6]。

(3)改进了高温镍管热裂解测定有机氧同位素组成的装置,建立了国内第一条高温镍管热裂解测定有机氧同位素组成的分析测试系统。我们还建立了一套连续流质谱仪的前处理实验流程,实现了批量准确、稳定的纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 测定。为适应从大批量泥炭样品中提取 α -纤维素的需要,研发了从大批量泥炭样品中提取高纯度 α -纤维素的技术。

2 提取过去全球变化信息方面

(1)金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列较好地指示了过去 6000 a 温度演变的一般历史:记录了全新世大暖期,中全新世变冷,中世纪温暖期,小冰期,近代升温期等重要的气候阶段,揭示了全新世气候的自然波动现象,指出近代气温升高在历史上并不是唯一的,以及气候的自然波动背景对研究现代气候变化的重要性^[3];定性地描述了自新石器时代晚期以来,中国历史上各个朝代气温变化的历史(图 1),提供了研究气候环境变化与人文历史的关系及人类对气候变化适应性的资料^[7]。

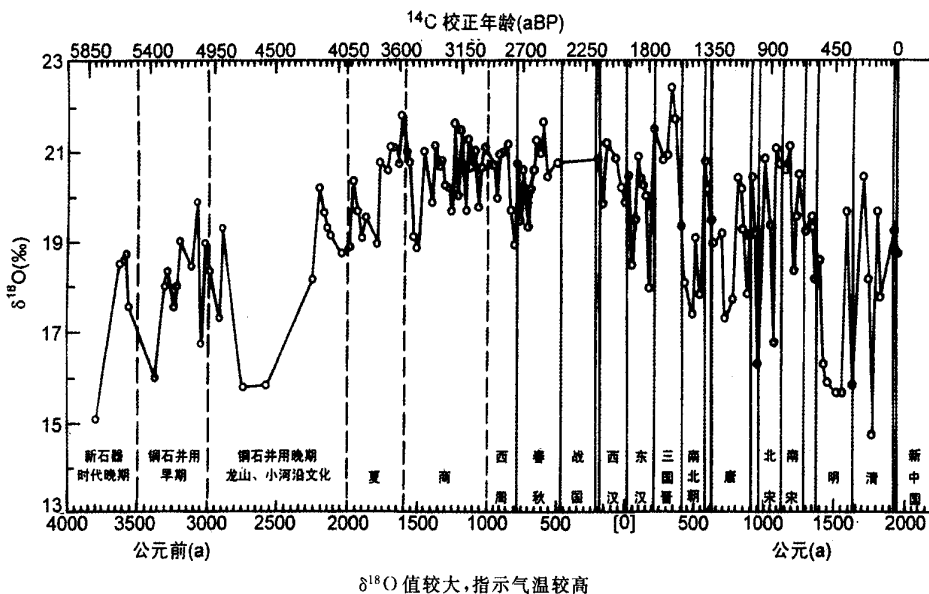
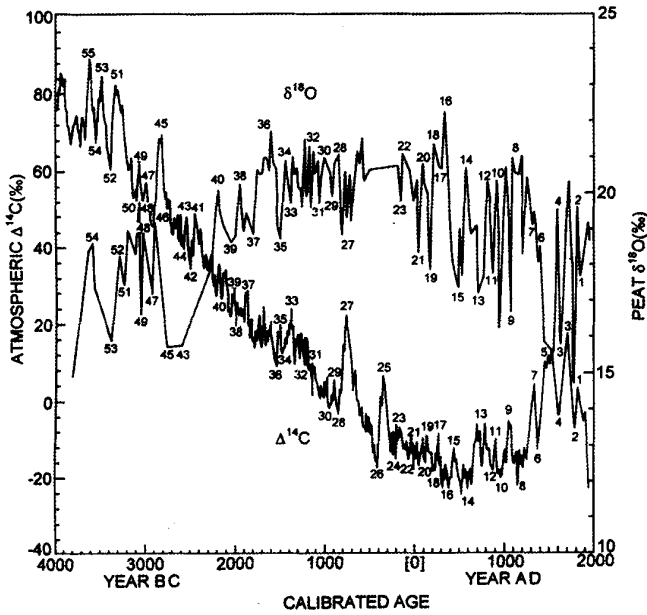
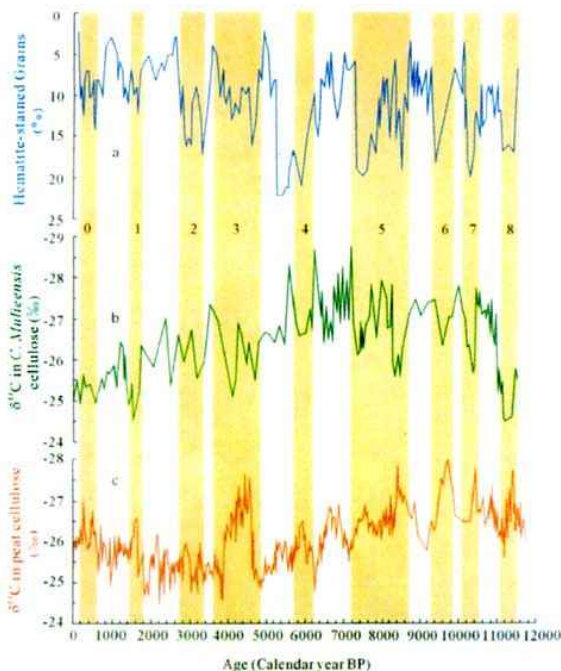


图 1 金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列指示的全新世气温变化历史。



大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 值愈大, 指示太阳活动愈弱;
泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 值愈小, 指示气温愈低

图2 金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 时间序列与大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 的对比



曲线 a 为染赤铁矿颗粒指示的北大西洋浮冰记录, 其含量愈多, 指示北大西洋区域温度愈低。曲线 b 和 c 分别为四川红原泥炭中木里苔草 (*C. muliensis*) 残体纤维素和吉林哈尼泥炭纤维素的 $\delta^{13}\text{C}$ 值指示的印度季风和东亚季风记录, $\delta^{13}\text{C}$ 值较小, 指示气候较湿, 季风较强, 反之, $\delta^{13}\text{C}$ 值较大指示气候较干, 季风较弱。图中数字 0~8 指示北大西洋的 9 次强的浮冰事件

图3 东亚季风与印度季风强度的反相变化
及其与北大西洋气候的遥相关系

(2) 我们的研究为太阳活动作为全新世百年至千年尺度气候变化的重要影响因素的假说提供了新的科学证据。由图 2 可见, 指示温度变化的金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与指示太阳活动变化的大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录间有几乎对应的相关性; $\Delta^{14}\text{C}$ 值增大, 指示太阳活动减弱, 相应于金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 减小, 指示温度降低; 反之亦然。小冰期时太阳活动明显减弱, 而中世纪温暖期时太阳活动明显增强^[3]。

金川泥炭纤维素 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的谱分析表明, 存在 86、93、101、111、127、132、140、155、207、245、311、377、480、590、820 和 1046 等 16 个温度变化周期^[3,8,9]。Fairbridge^[10], 对这些温度变化周期与平均太阳黑子周期 (SSC)、准双振动周期 (QBO)、月球潮汐周期-轨道脉动频率 (LBF) 等的关系分析表明, 它们之间惊人的一致性说明全新世的气候变化与太阳活动等天体状况有密切关系。指出我们的研究是“导向第三个千年研究工作的一条极好的路子”。“构成了一个完全独立于其他的全新世代用记录, 如冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 、树轮 ^{14}C 和天文计时的代用资料基础”^[10]。

(3) 亚洲夏季风系统由东亚季风和印度季风 (或西南季风) 组成, 它们带来的降雨量变化影响占全球总人口近 60% 居民的生活和生产活动。因此深入地了解季风活动的规律, 提高预报季风变化的能力非常重要。中国大陆的夏季降雨既受东亚季风的影响, 也受印度季风的控制, 使中国大陆的季风研究复杂化, 也为研究两种季风的的关系提供了天然的区位优势。

我们的工作发现 (图 3), 在多种时间尺度上, 东亚季风与印度季风的强度变化均呈反相变化关系。在轨道时间尺度上, 全新世的前半段 (约 11 000~6 000 cal aBP), 当哈尼泥炭记录指示的东亚季风在波动中逐渐减弱时, 四川红原泥炭记录指示的印度季风强度则在波动中逐渐增强; 在全新世的后半段则相反, 东亚季风逐渐增强, 而印度季风则逐渐减弱。叠加在这一总的反相变化趋势之上, 还有一系列的数百年至千年尺度的突然的反相变化, 东亚季风突

然增强而印度季风则突然减弱^[11]。

亚洲季风间的反相变化关系表明了影响中国大陆降雨因素的复杂性。当试图预测未来降雨和干旱的演变时,对中国大陆尺度来说,仅考虑一种季风的影响是不够的,至少要综合考虑东亚和印度季风的不同贡献;对区域尺度来说,应当阐明是何种季风过程在起控制作用,必须仔细考虑不同时间尺度上不同的驱动因素对两种季风的的不同影响。

(4) 亚洲两季风年际尺度上的不同步变化,起因于两季风区域海陆分布格局所造成的两种季风不同的空间结构,以及它们对厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)驱动的不同响应。因此,我们认为亚洲季风与 ENSO 间有某种结构上的紧密联系,提示古季风与古 ENSO 间可能存在类似年际尺度上的关系。图 3 中 9 次千年尺度东亚季风突然增强而印度季风突然减弱的现象,可能指示末次冰消期以来,在热带太平洋出现过 9 次千年尺度的类厄尔尼诺状态。它们与 9 次北大西洋浮冰事件一一对应,显示了北半球高纬度与赤道低纬度间气候变化的紧密关联,显示了热带太平洋的类 ENSO 暖事件,亚洲季风反相变化,北大西洋气候突然变冷之间紧密的关联^[11]。这一重要的全球变化现象有待通过更多的气候代用记录,特别是全新世敏感的高分辨率的海表面温度记录和模拟研究来证实。

(5) 新仙女木事件、8200 a 事件和 4200 a 事件是上述 9 个全球变化事件中引人注意的三个重要事件,但只有 4200 a 事件发生在人类文明的早期,并可能对亚洲古文明的发展有重要影响。当时,受印度季风影响的区域,如青藏高原及其以西的印度区域、西亚和东非,季风降雨明显减少,气候干旱;而东亚季风区降雨增加,长江和黄河出现大洪水;北美洲大陆中部明显干旱;高纬度北大西洋区域气候变冷。与新仙女木事件和 8200 a 事件不同的是,4200 a 事件发生在人类文明早期,对人类文明的影响已可辨识。已有若干研究指出,4200 a 事件时印度季风区持续严重的干旱可能与西亚阿卡丁王国的解体,希腊和埃及早期古代文明,以及印度河谷的哈拉潘文明的衰落有关;相反,同一时期东亚季风区发生的大洪水则可能对中国龙山文化和良渚文化的衰落有重要影响。根据季风与 ENSO 的关系,我们认为 4200 a 事件可能是全球变化历史上的一次“超级厄尔尼诺事件”^[11],并提出一个概念模型来说明热带太平洋类厄尔尼诺事件、亚洲季风反相变化和北大西洋

气候突然变冷之间紧密关联的动力学联系^[11]。

参考文献:

- [1] Brenninkmeijer C A M, Van Geel B, Mook W G. Variations in the D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ratios in cellulose extracted from a peat bog cove[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1982, 61: 283-290.
- [2] Blackford J J. Palaeoclimatic records from peat bogs[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2000, 15(5): 193-197.
- [3] Hong Y T, Jiang H B, Li T S, Zhou L P, Beer J, Li H D, Leng X T, Hong B, Qin X G. Response of climate to solar forcing recorded in a 6000-year $\delta^{18}\text{O}$ time-series of Chinese peat cellulose[J]. *The Holocene*, 2000, 10: 1-7.
- [4] Xu Hai, Hong Yetang, Lin Qinghua, Zhu Yongxuan, Hong Bing, Jiang Hongbo. Temperature responses to quasi-100-yr solar variability during the past 6000 years based on $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose in Hongyuan, eastern Qinghai-Tibet plateau, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 230: 155-164.
- [5] Hong Y T, Wang Z G, Jiang H B, Lin Q H, Hong B, Zhu Y X, Wang Y, Xu L S, Leng X T, Li H D. A 6000-year record of changes in aridity and precipitation in northeastern China based on a $\delta^{13}\text{C}$ time-series from peat cellulose[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 185: 111-119.
- [6] Hong Y T, Hong B, Lin Q H, Zhu Y X, Shibata Yasuyuki, Hirota Masashi, Uchida Masao, Leng X T, Jiang H B, Xu H, Wang H, Yi L. Correlation between Indian Ocean summer monsoon and North Atlantic climate during the Holocene[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 211: 369-378.
- [7] 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 洪冰, 曾毅强, 李汉鼎, 冷雪天. 近 5 ka 温度的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. *中国科学(D 辑)*, 1997, 27(6): 525-530.
- [8] Hong Yetang, Liu Tongsheng, Jiang Hongbo, Zhou Liping, Hong Bing, Zhu Yongxuan, Li Handing, Leng Xuetian, Qin Xiaoqiang, Wang Yu, Lin Qinghua, Zeng Yiqiang. Evidence for solar forcing of climate variation from $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose[J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(2): 217-224.
- [9] 洪业汤, 姜洪波, 洪冰, 朱咏焯, 林庆华, 曾毅强, 王羽. 近 5000 a 的气候波动与太阳变化[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(6): 491-497.
- [10] Fairbridge R W. Six millennia in Chinese peats, relating to planetary-solar-luniterrestrial periodicities: A comment on Hong, Jiang, Liu, Zhou, Beer, Li, Leng, Hong and Qin[J]. *The Holocene*, 2001, 11(1): 121-125.
- [11] Hong Y T, Hong B, Lin Q H, Shibata Yasuyuki, Hirota Masashi, Zhu Y X, Leng X T, Wang Y, Wang H, Yi L. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-El Niño[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231(3-4): 377-346.