

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.02.017

西藏羊八井七弄沟地区全新世温度变化的泥炭汞记录

王琳, 牛蕊, 孟庆浩, 孙诚诚, 郑祥民, 周立旻

(华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要:分析了青藏高原东南部羊八井七弄沟(QNG)地区泥炭中汞浓度含量指示温度变化的意义,通过与其他气候代用指标对比分析,发现泥炭汞能作为气候代用指标反映地区温度。QNG 泥炭汞浓度变化记录了七弄沟地区全新世时期 9.1~3.5 kaBP 的温度变化趋势,主要包括 3 个阶段:第 I 阶段(约 9.1~7.2 kaBP),处于全新世大暖期,温度较高,波动下降;第 II 阶段(约 7.2~5.6 kaBP),温度波动剧烈,存在 5.9 和 6.3 kaBP 两个冷期;第 III 阶段(约 5.6~3.5 kaBP),在频繁剧烈波动中温度下降。3 个阶段分别反映了 3 次北大西洋浮冰事件(IRD)(8.2、5.9 和 4.2 kaBP 事件)。此外,在 7.5、6.3、4.7 kaBP 左右也出现了变冷事件。利用 REDFIT 对 QNG 泥炭汞浓度进行红色噪声谱分析,发现其存在 1 100、650、450、310 以及 110 a 周期,反映了青藏高原地区对不同等级太阳活动变化的响应。

关键词:泥炭汞;气候代用指标;全新世;青藏高原

中图分类号:P532

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2017)02-0169-08

汞作为唯一主要以气相形式存在于大气的重金属元素,具有低水溶性、低干沉降速率、化学形态稳定等特点,在大气中的滞留时间约为 0.5~2 a,可以参与全球大气循环^[1-4],并可以经过植物叶片进入植物体内^[5]。泥炭是由植物残体在厌氧环境下经微生物分解后形成的具有时间层次的第四纪沉积物,以其连续性好、分辨率高、环境信息丰富、测年准确等优点成为古气候学研究的重要材料^[6]。泥炭植物在特殊沼泽环境下,直接从当时外界大气中获取养分,记录当时大气汞含量信息^[7]。泥炭地低温和适当的 pH 环境对汞的保存十分有利^[8]。前人利用泥炭汞含量在古环境研究中做了大量工作,Martine Cortizas A 等通过对西班牙泥炭的研究获得了 4 000 年来大气汞的累积状况,并分离出自然状态和人类影响状态下不同热稳定性汞的沉积特点,进而反映气候变化信息^[9]。F Roos Barraclough 等通过对 EGR2A 泥炭柱样的分析,认为雨养型泥炭的汞浓度不受地下水和母质影响,并通过汞沉积速率捕捉到新仙女木和火山爆发期的强烈信号,认为泥炭汞浓度可以作为一种新的气候代用指标来反映气候变化^[10]。通过泥炭中汞含量的研究可以反演泥炭形

成时期周围大气的汞信息,从而推断当地气候的冷暖情况,对全新世气候环境变化具有重要参考意义。

青藏高原全新世气候变化一直以来都备受古气候研究学者关注,通过对高原冰川、高原湖泊沉积物等的研究已经取得了丰富的研究成果;姚檀栋等通过对敦德冰心和古里雅冰心的研究建立了过去 2 kaBP 和过去 125 kaBP 的连续时间序列^[11];Broxton W Bird 等通过对帕鲁错湖泊沉积物叶蜡长链烷烃(δD_{wax})的氢同位素测定反映了 11 kaBP 以来印度洋季风对青藏高原东南地区的影响^[12]。泥炭方面,徐海、洪业汤等对红原泥炭纤维素氧同位素的测定反演了 6 kaBP 以来温度变化^[13];周卫建等通过对红原泥炭中孢粉记录的分析得到了青藏高原东北缘 13 500 年以来高山湿地生态系统的变化历史^[14];侍文芳、冯新斌等测定了 150 年以来红原泥炭中汞的沉积记录^[15]。本文通过对西藏七弄沟地区过去 9 100~3 500 年的泥炭汞含量温度代用指标序列分析,反映青藏高原东南地区温度演变特征。研究发现,七弄沟气温在研究时期内气温总趋势与中国其他地区以及北大西洋、格陵兰等地存在一致性;汞浓度曲线对全球性气候事件有比较明显的响应;通过周期分析发现该地区气温与太阳活动周期上的一致性,为深入认识该地区的历史气候演变提供参考依据。

1 区域概况及实验方法

七弄沟位于西藏自治区拉萨市当雄县羊八井

基金项目:国家自然科学基金项目(41271054,41571040)

作者简介:王琳(1990—),女,硕士研究生,研究方向为第四纪环境演变,E-mail:51143901062@stu.ecnu.edu.cn

通讯作者:周立旻(1976—),男,教授,E-mail:lmzhou@geo.ecnu.edu.cn

收稿日期:2016-11-18;**改回日期:**2017-01-28 文凤英编辑

镇,念青唐古拉山脉东南麓。该区域属于大陆性高原寒温带季风型气候,多年平均温度 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$;长冬无夏,春秋短促,七月平均温度 $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;冬春季节风雪大,气候干燥严寒,一月平均温度为 $-10.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,大地霜冻,封冻期 150 天(11 月至翌年 3 月),全年无霜期仅 62 天,夏秋季气候暖和湿润,多雨多雹,年均降水量 476.8 mm ^[16]。七弄沟泥炭层发育在晚更新世沉积物所在的山间低洼谷地上^[17],厚度约为 1.5 m,采样地点为 30.1°N 、 90.6°E ,海拔 4 270 m(图 1)。

样品采于 2014 年,采用剖面取样法。挖取新鲜泥炭剖面,除去顶部扰动层后,最终泥炭柱样长 1.25 m,自地表向下可分为 6 层:①0~13 cm 为黑褐色泥炭层,植物残体多,含水量高;②14~31 cm 为黑褐色草本泥炭层,植物残体较多,含一定的水分,较紧实;③32~56 cm 为褐色泥炭层,基本看不到植物残体,质地紧实;④57~86 cm 为褐色含砂泥

炭层,植物残体较多,在 68 和 79 cm 左右处出现白色钙质结核;⑤87~100 cm 为黑褐色草本泥炭层,植物残体明显增多;⑥101~200 cm 为黑褐色泥炭层,植物分解完全,质地紧实,含水量少(图 2)。柱样按 0.5 m 每段进行分段采样,并固定密封冷冻保存。前处理阶段剔除泥炭柱样表层后,按照 1 cm 间距进行分割,共获得 125 个样本,部分样品送至美国 Beta 放射性碳同位素测年实验室进行年代测定,结果见表 1。样品 ^{14}C 放射年龄为 $8\,200\sim3\,260\text{ aBP}$,经树轮校正后获得其日历年龄跨度为 $9\,150\sim3\,510\text{ aBP}$ 。

根据 2σ 日历年龄结果,结合泥炭柱样,通过线性内插的方法获得未测年样品年代,根据 $r=h/t$ 分别计算得到各段的沉积速率。其中 0~46 cm 段的沉积速率为 $0.262\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,47~83 cm 段的沉积速率最大,为 $0.337\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$,84~125 cm 段的沉积速率最小,为 $0.150\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

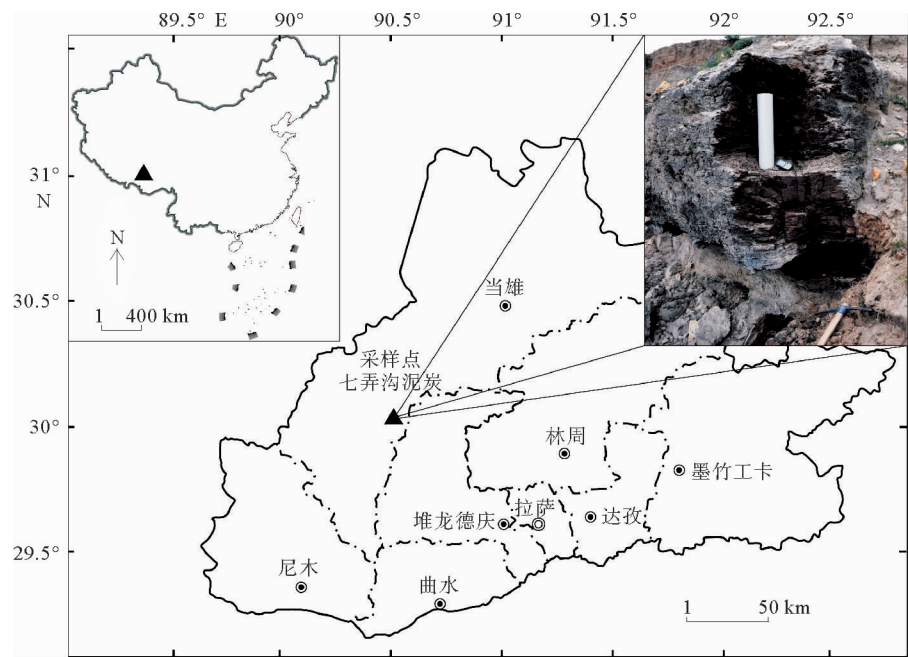


图 1 西藏羊八井七弄沟泥炭地位置示意图
Fig. 1 The location of QNG peat

表 1 QNG 泥炭样品年代测试结果
Table 1 The age of the QNG peat

样品号	样品深度/cm	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}/\text{‰}$	^{14}C 放射年龄/aBP	日历年龄 2σ /cal. aBP
QNG-01	0~1	-25.9	$3\,260\pm30$	$3\,505\pm60$
QNG-02	46~47	-26.5	$4\,530\pm30$	$5\,260\pm50$
QNG-03	83~84	-27.8	$5\,590\pm30$	$6\,358\pm53$
QNG-04	124~125	-25.9	$8\,200\pm30$	$9\,150\pm120$

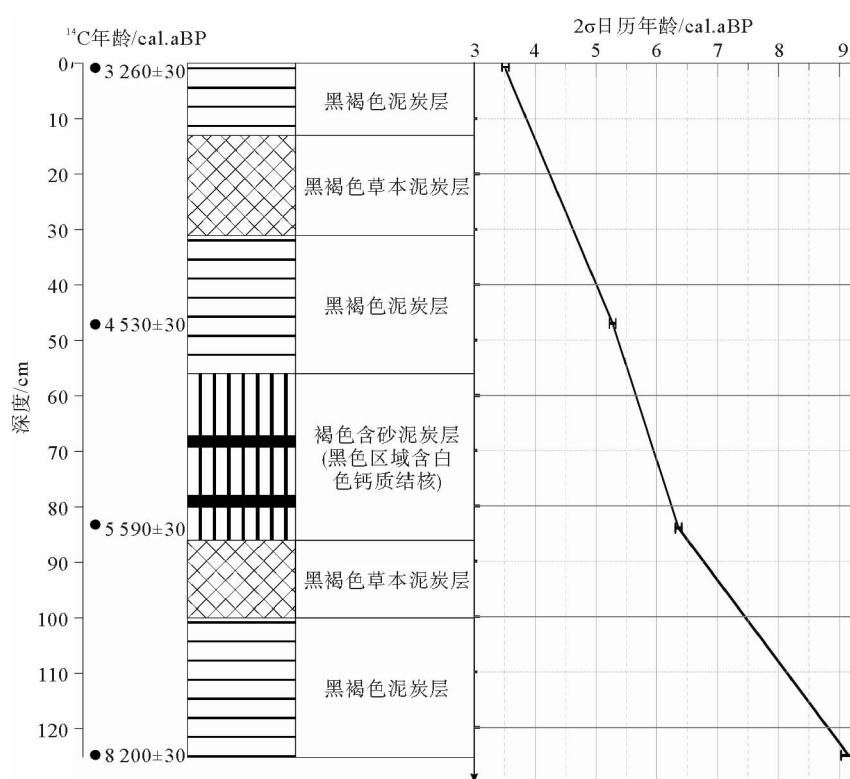


图 2 西藏羊八井七弄沟泥炭剖面岩性及年龄

Fig. 2 Lithology of QNG section and chronology

对其他样品进行前处理,样品的存放、干燥条件和干燥程度、研磨工具、空气中的暴露时间以及测量过程中分解时间的设定都能对测试结果产生影响。样品采用真空冷冻干燥($T < -50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P < 15\text{ Pa}$),以防止低稳定性汞在高温条件下释放^[14]及在开放干燥环境下发生汞交换。干燥后样品经石英研钵研磨后密闭冷冻封存。汞含量检测采用原子吸收光谱法(atomic absorption spectroscopy, AAS),通过汞的基态原子蒸汽对特征辐射的吸收对汞含量进行定量分析。使用 Leco AMA 254 测汞仪测试样品中的总汞含量,采用美国环境保护署(Environmental Protection Agency, EPA)第 7473 号检测方法^[18]。该测汞仪的检测分辨率为 0.01 ng Hg ,检测范围为 $0.05\sim 600\text{ ng Hg}$,与重检值之差小于被测值的 1.5% 。采用推荐设置程序:30 s(干燥)、125 s(分解)、45 s(等待)。标准样品(浓度为 $100\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)测定的 $\text{RSD} \leq 0.78\%$,加标回收率为 $92\%\sim 108\%$ 。

2 结果与讨论

Martine Cortizas A 等对西班牙西北部泥炭汞含量研究表明,在人类工业活动以前自然条件下泥炭中汞浓度约为 $30\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[9],这与 F Roos Barraclough 等在瑞士 EGR2A 泥炭得到的汞浓度相

近^[10]。而位于中国吉林的哈尼泥炭其汞含量平均浓度约为 $45\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[19]。

如图 3 所示,QNG 泥炭中汞浓度范围为 $11.14\sim 97.95\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,最高值 $97.95\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 出现在 $56\sim 57\text{ cm}$ 处(约 $5\,350\text{ aBP}$),最低值 $11.14\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 出现在 $69\sim 70\text{ cm}$ 处(约 $5\,770\text{ aBP}$),平均值 $53.77\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。从 QNG 泥炭汞浓度时间变化序列来看,共记录了 6 次变冷事件,依次发生在 $8\,700$ 、 $8\,100$ 、 $7\,600$ 、 $6\,200$ 、 $4\,600$ 、 $3\,900\text{ cal. aBP}$ 。从整体趋势来讲,泥炭汞浓度含量变化可分为 3 个阶段:

第 I 阶段(约 $9.1\sim 7.2\text{ kaBP}$),温度较高,波动下降。 $9.1\sim 7.2\text{ kaBP}$ 期间 QNG 泥炭汞含量处于整个剖面的较高值,平均汞浓度为 $80.15\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,高于总平均值,并在波动中显示出下降趋势,表明气候渐冷,其中发生 3 次变冷事件,时间分别为 8.8 、 8.1 、 7.6 kaBP ,其中 8.8 kaBP 为第一次降温事件,此次事件在 3 次降温事件中幅度最小、时间最长(约 0.5 ka)。之后气温出现上升并恢复到起始水平,在图 3 中表现为一次上升峰。 8.1 kaBP 左右发生了第二次降温事件,特点表现为降温迅速,持续时间短,此次事件在格陵兰冰心 GISP2 钻孔中表现更为剧烈,称其为“ 8.2 ka 事件”^[20],相比而言 QNG 泥炭汞所反映的变冷幅度更小且在忽略测年误差情况下发生时间略早。 7.6 kaBP 左右发生了此阶段中最

为剧烈的一次降温,汞含量显示其下降幅度大、持续时间较长,汞浓度值达到此阶段最低,约为 $40 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,指示该地区在此时间段内经历了大幅度的降温事件和长时间的寒冷时期。总体而言,第 I 阶段的泥炭汞含量处于较高水平,但从变化趋势来看三次降温事件逐次加强,呈现变冷趋势。

第 II 阶段(约 $7.2 \sim 5.6 \text{ kaBP}$),温度波动剧烈。本阶段在汞浓度值上表现为很大的起伏,表明这一阶段的外界环境温度波动剧烈。相对于第 I 阶段末期的低温,在 7.2 kaBP 后气温略有升高,并在 6.4 kaBP 左右达到峰值,汞浓度约为 $75 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,之后在 $6.2 \sim 5.6 \text{ kaBP}$,便迎来了该泥炭记录温度最低、时间最长的一次降温事件,该事件中有两次明显的低值分别出现在 6.1 和 5.8 kaBP ,其中 5.8 kaBP 泥炭汞浓度值低至 $11.14 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,这与全新世著名变冷事件“ 5.9 ka 事件”时间契合度良好,证明在 5.8 kaBP 左右七弄沟地区也发生过一次变冷事件。从汞浓度指标来看,第 II 阶段的变化量约 $60 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,波动范围较大,表明此阶段该地区的温度变化剧烈,幅度较大。

第 III 阶段(约 $5.6 \sim 3.5 \text{ kaBP}$),温度下降、波动频繁。第 II 阶段结束后七弄沟地区经历了由冷期迅速转暖的过程,并在 5.3 kaBP 左右达到最高值,随后进入波动下降阶段。 $5.2 \sim 4.2 \text{ kaBP}$ 波动频繁,呈明显的下降趋势。 4.1 kaBP 出现了比较明显的峰值,表征气候短时间迅速转暖,但随后又迅速下降,进入 QNG 泥炭汞浓度记录的最后一次变冷事件,起始时间约为 4.0 kaBP ,这与我国中部龙山文化的消亡时间相吻合,是“ 4.2 ka 事件”在中国的体现^[21]。总之,第 III 阶段汞浓度指标表明在约 $5.6 \sim 3.5 \text{ kaBP}$ 七弄沟地区的温度在频繁波动中逐渐下降,并进入冷期。

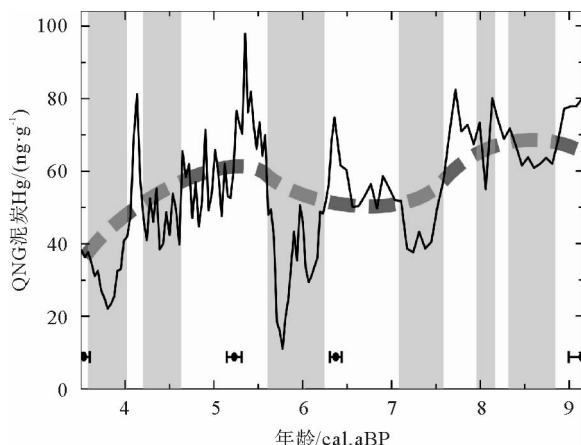


图3 西藏羊八井七弄沟泥炭汞浓度时间序列

Fig. 3 The time series of Hg concentration in peat

为进一步了解 QNG 泥炭样品汞浓度与全球温度变化的对应关系,将 QNG 泥炭汞浓度(图 4a)与青藏地区其他气候代用指标(图 4b、c)以及世界范围内著名气候代用指标(图 4d、e、f)进行对比。QNG 泥炭记录跨越了全新世以来的 10 次北大西洋浮冰事件(IRD)中的 3 次,分别为 8.2 、 5.9 和 4.2 ka 事件^[22]。QNG 泥炭对 8.2 ka 事件的响应与红原泥炭(如图 4c)、董哥洞 $\delta^{18}\text{O}$ (如图 4d)基本一致,与格陵兰冰心 GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ (如图 4e)相比响应速度略慢,程度小。这与其他地区如 Hoti 洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ ^[23]、阿拉伯海有孔虫记录^[24]相似; 5.9 ka 事件是 QNG 泥炭汞含量响应最大的一次变冷事件,从其他对比指标来看,此次事件在青藏地区以及董哥洞石笋 D4 $\delta^{18}\text{O}$ 中的响应都很剧烈,但是在格陵兰冰心以及北大西洋地区表现并不明显,从一定程度上反映了 5.9 ka 事件对青藏高原及中国其他地区气温产生了极大的影响。 4.2 ka 事件是 QNG 泥炭记录的最后一次变冷事件,也是全球普遍存在的一次干冷事件。QNG 泥炭汞响应的时间约为 4.0 ka 左右,持续时间较长,此次事件与董哥洞石笋 D4 $\delta^{18}\text{O}$ 的记录较为一致。目前在北非^[25]、中东^[26]、红海^[27]、印度^[28]和北美^[29]地区都发现了此次降温记录。 4.2 ka 事件在气候记录里的发生时间约为 $3.6 \sim 4.4 \text{ ka}$,时间跨度可达 0.6 ka ,可能是人类文明出现以来第一次遭遇全球范围内的自然灾变事件^[22],若干研究表明它与西亚卡拉丁王国解体^[26]、希腊和埃及早期古代文明以及位于印度河谷的哈拉潘文明的衰落^[28]、中国中部新石器文化消亡^[30],东部洪水泛滥,龙山文化和良渚文化迅速衰退^[30]有很大关联。

除去 3 次 IRD 事件之外,QNG 汞浓度指标还分别在 7.5 、 6.3 、 4.7 kaBP 出现明显的谷值。 7.5 kaBP 处于早全新世晚期,此时亚洲季风极盛期($8.0 \sim 7.8 \text{ kaBP}$)逐渐衰退,进入极盛期后的寒冷期,气候偏干冷^[31],此次事件在董哥洞石笋(图 4d)、格陵兰冰心(图 4e)的 $\delta^{18}\text{O}$ 中都有响应,另外在祁连山的敦德冰心 $\delta^{18}\text{O}$ ^[32]、太湖硬黏土沉积物化学元素、南屯泥炭化学元素^[33]、哈尼泥炭汞浓度^[19]指标中均有体现。 6.3 kaBP 左右出现的变冷事件目前在中国地区的各种气候代用指标中信号较为强烈。在 QNG 泥炭汞含量指标中 6.3 ka 事件强度远大于 8.0 ka 事件,在红原泥炭的灰分指标也体现出此特点;此外普若岗日冰心 $\delta^{18}\text{O}$ 中(图 4b)对 6.3 ka 事件信号响应也十分明显。 4.7 ka 事件的响应时间较短,程度有限,但从其他代用指标尤其是红原泥

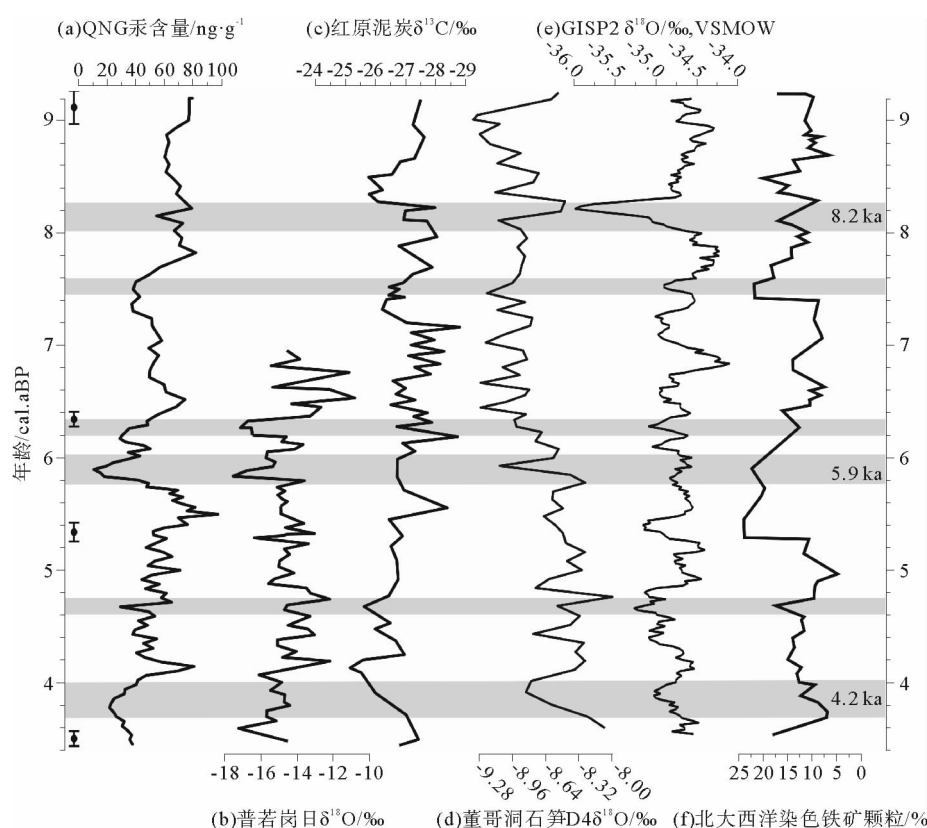


图 4 西藏羊八井七弄沟泥炭汞浓度与其他气候代用指标对比

Fig. 4 Comparison with other climatic proxies

炭 $\delta^{13}\text{C}$ 、董哥洞石笋、格陵兰冰心的 $\delta^{18}\text{O}$ 以及 IRD 等指标来看,同一时期在世界其他地区依然有很好的响应。

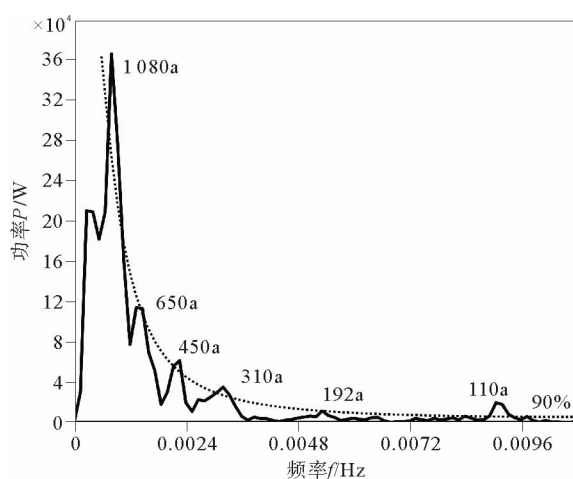


图 5 西藏羊八井七弄沟泥炭汞浓度序列红色噪声谱分析

Fig. 5 The red noise spectrum analysis of QNG mercury concentration

影响地球气候变化的诸多因素都具有周期性,如太阳轨道变化周期 33 Ma^[34],米兰科维奇周期为 96 ka^[35],40~41 ka 的黄赤交角周期^[36]和 19~23 ka 的岁差周期^[37]以及太阳活动的 11 a 周期^[38]等。

对 QNG 泥炭汞浓度用 PAST3 中的 REDFIT 进行周期分析发现,其所反映的周期有 1 100、650、450、310、192 以及 110 a(如图 5)。1 100 a 周期接近树木年轮中 ^{14}C 含量变化重建太阳黑子数序列发现的太阳活动千年准周期^[39]。650 a 周期可能对应太阳活动第 6 级周期(704 a)。450 a 周期目前还没有合理解释,但在红原泥炭总有机碳以及纤维素氧同位素中分别含 427 和 444 a 的周期^[13,40]。310 a 周期与太阳活动第四级周期变化非常吻合。192 a 周期的置信水平不高,但明显呈现峰值,与全新世太阳黑子波动周期(220 a)和董哥洞氧同位素周期(210 a)^[41]十分接近。110 a 在红原泥炭^[40]、金川泥炭^[42]以及福建北部山地泥炭^[43]中都有出现,被公认为与太阳活动的调制作用以及太阳活动的 Gleissberg 周期有关^[44]。由此可见 QNG 泥炭浓度能够很好地响应太阳活动变化。

3 结论

(1)青藏高原东南部地区泥炭中汞浓度含量指示了温度的变化,汞浓度高则温度高,汞浓度低则温度低。

(2)QNG 泥炭汞浓度变化记录了七弄沟地区

9 100~3 500 aBP 的温度变化趋势,主要包括以下阶段:第Ⅰ阶段(约 9.1~7.2 kaBP),温度较高,波动下降;第Ⅱ阶段(约 7.2~5.6 kaBP),温度波动剧烈;第Ⅲ阶段(约 5.6~3.5 kaBP),温度下降、波动频繁。3 个阶段分别反映了 3 次北大西洋浮冰事件(IRD)(8.2 ka 事件、5.9 ka 事件和 4.2 ka 事件)。此外,在 7.5、6.3、4.7 kaBP 左右也出现了变冷事件。

(3)利用 REDFIT 对 QNG 泥炭汞浓度进行红色噪声谱分析发现其存在 1 100、650、450、310 以及 110 a 周期,反映了青藏高原地区对太阳活动变化的响应。

参考文献 (References)

- [1] Fitzgerald W, Seigneur C. A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition[J]. *Ambio*, 2007, 36(1):19-32.
- [2] Sheu G R, Mason R P. An examination of methods for the measurements of reactive gaseous mercury in the atmosphere. [J]. *Environmental Science and Technology*, 2001, 35(6): 1209-1216.
- [3] Fitzgerald W F. Is mercury increasing in the atmosphere? The need for an atmospheric mercury network (AMNET)[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1995, 80(1):245-254.
- [4] Lamborg C H, Fitzgerald W F, O'Donnell J, et al. A non-steady-state compartmental model of global-scale mercury biogeochemistry with interhemispheric atmospheric gradients[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(7):1105-1118.
- [5] Zhang L, Wright L P, Blanchard P. A review of current knowledge concerning dry deposition of atmospheric mercury [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(37):5853-5864.
- [6] 柴岫. 泥炭地学[M]. 地质出版社, 1990. [CHAI Xiu. *Peatland* [M]. Geological Publishing House, 1990.]
- [7] 白光润, 王升忠. 草本泥炭形成的生物环境机制[J]. *地理学报*, 1999, 54(3): 247-254. [BAI Guangrun, WANG Shengzhong. Bio-environmental mechanism of herbaceous peat forming [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(3):247-254.]
- [8] 邵志国, 王起超, 刘汝海, 等. 汞在泥炭上的吸附动力学研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3):183-185. [SHAO Zhiguo, WANG Qichao, LIU Ruhai, et al. Study on kinetics of adsorption and desorption of mercury on Peat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(3):183-185.]
- [9] Martinez cortizas A, Pontevedrapombal X, Garciarodeja E, et al. Mercury in a Spanish peat bog: archive of climate change and atmospheric metal deposition[J]. *Science*, 1999, 284(5416):939-942.
- [10] Roos-Barracough F, Martinez-Cortizas A, Garcia-Rodeja E, et al. A 14 500 year record of the accumulation of atmospheric mercury in peat: volcanic signals, anthropogenic influences and a correlation to bromine accumulation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202(2):435-451.
- [11] 姚檀栋. 青藏高原冰芯研究[J]. *冰川冻土*, 1998, 12(3): 233-237. [YAO Tandong. Ice core study of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 12(3):233-237.]
- [12] Bird B W, Polisar P J, Lei Y, et al. A Tibetan lake sediment record of Holocene Indian summer monsoon variability [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 399(3):92-102.
- [13] 徐海, 洪业汤, 林庆华, 等. 红原泥炭纤维素氧同位素指示的距今 6ka 温度变化[J]. *科学通报*, 2002, 47(15):1181-1186. [XU Hai, HONG Yetang, LIN Qinghua, et al. Holocene peat cellulose oxygen isotope instructions about 6 ka temperature changes in Hongyuan [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(15):1181-1186.]
- [14] 周卫健, 刘钊, 王浩, 等. 13 500 年以来青藏高原红原泥炭沉积的孢粉记录[J]. *地球环境学报*, 2011(5):605-612. [ZHOU Weijian, LIU Zhao, WANG Hao, et al. The pollen record from the Hongyuan peatland in the Tibetan Plateau since 13 500 year [J]. *Journal of Earth Environment*, 2011(5):605-612.]
- [15] 侍文芳, 冯新斌, 张干, 等. 150 年以来红原雨养型泥炭中高分辨的汞同位素沉积记录[J]. *科学通报*, 2011(8):583-588. [SHI Wenfang, FENG Xinbin, ZHANG Gan, et al. Holocene peat high resolution of mercury isotope sedimentary records since 150 year [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011(8): 583-588.]
- [16] 中华人民共和国. 中国统计年鉴 2014[M]. 中国统计出版社, 2014. [People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2014*[M]. China Statistics Press, 2014.]
- [17] 吴中海, 赵希涛, 吴珍汉, 等. 西藏当雄-羊八井盆地的第四纪地质与断裂活动研究[J]. *地质力学学报*, 2006, 12(3): 305-316. [WU Zhonghai, ZHAO Xitao, WU Zhenhan, et al. Quaternary geology and faulting in the Damxung-Yangba-jing Basin, southern Tibet [J]. *Journal of Geomechanics*, 2006, 12(3):305-316.]
- [18] Roos Barraclough F, Givélet N, Martinez-Cortizas A, et al. An analytical protocol for the determination of total mercury concentrations in solid peat samples[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 292(1-2):129-39.
- [19] 高宝金. 吉林哈尼地区 16 000 年来的环境演变研究[D]. 华东师范大学, 2015. [GAO Baojin. The environmental evolution research since 16 000 in Jilin Hani[D]. East China Normal University, 2015.]
- [20] Thomas E R, Wolff E W, Mulvaney R, et al. The 8.2 ka event from Greenland ice cores[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(1-2):70-81.
- [21] Liu Y H, Sun X, Guo C Q. Records of 4.2 kaBP Holocene event from China and its impact on ancient civilizations[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013.
- [22] 王绍武. 全新世北大西洋冷事件[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(6):389-390. [WANG Shaowu. Holocene cold events in the north Atlantic [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(6):389-390.]

- [23] Burns S J, Fleitmann D, Matter A, et al. Speleothem evidence from Oman for continental pluvial events during interglacial periods[J]. *Geology*, 2001, 29(7):623.
- [24] Kroop D. Onset of monsoonal related upwelling in the western arabian Sea as revealed by planktonic foraminifers[J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1991, 117:257-263.
- [25] Gasse F, Campo E V. Abrupt post-glacial climate events in West Asia and North Africa monsoon domains[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126(4):435-456.
- [26] Bar-Matthews M, Ayalon A, Kaufman A. Late Quaternary paleoclimate in the eastern Mediterranean region from stable isotope analysis of speleothems at Soreq Cave, Israel [J]. *Quaternary Research*, 1997, 47(2):155-168.
- [27] Arz H W, Lamy F, Pätzold J. A pronounced dry event recorded around 4.2 ka in brine sediments from the northern Red Sea[J]. *Quaternary Research*, 2006, 66(3):432-441.
- [28] Staubwasser M, Sirocko F, Grootes P M, et al. Climate change at the 4.2 kaBP termination of the Indus valley civilization and Holocene south Asian monsoon variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(8):635.
- [29] Booth R K, Jackson S T, Forman S L, et al. A severe centennial-scale drought in midcontinental North America 4 200 years ago and apparent global linkages[J]. *Holocene*, 2005, 15(3):321-328.
- [30] Wu W, Liu T. Possible role of the "Holocene Event 3" on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain of China[J]. *Quaternary International*, 2004, 117(1):153-166.
- [31] 熊尚发, 丁仲礼, 刘东生. 第四纪气候变化机制研究的进展与问题[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(3):265-272. [XIONG Shangfa, DING Zhongli, LIU Dongsheng. The problems and progress in the studies of mechanisms for Quaternary climate changes [J]. *Advances in Earth Sciences*, 1998, 13 (3):265-272.]
- [32] 卫克勤, 林瑞芬. 祁连山敦德冰芯氧同位素剖面的古气候信息探究[J]. *地球化学*, 1994(4):311-320. [WEI Kequn, LIN Ruifen. An enquiry into paleo-climatic information from oxygen isotopic profile of Dunde Ice core in Qilianshan [J]. *Geochimica*, 1994(4):311-320.]
- [33] 吴永红, 郑祥民, 周立旻. 中国全新世气候变迁相位差与亚洲季风及西风带的联系[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(1):27-32. [WU Yonghong, ZHENG Xiangmin, ZHOU Limin. The asynchronous nature of Holocene climate variability in China and its linkage to Asian monsoon and the westerly[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(1):27-32.]
- [34] Fairbridge R W. Solar cycle[J]. *Encyclopedia of Earth Science*, 1999:575-576.
- [35] Asahara Y. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ variation in north pacific sediments: a record of the Milankovitch cycle in the past 3 million years 1 [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171(3):453-464.
- [36] Greve R. Waxing and waning of the perennial north Polar H_2O Ice cap of mars over obliquity cycles[J]. *Icarus*, 2000, 144(2):419-431.
- [37] McIntyre A, Molino B. Forcing of Atlantic equatorial and subpolar millennial cycles by precession[J]. *Science*, 1997, 274(5294):1867-1870.
- [38] Andrews M, Knight J. A simulated lagged response of the NAO to the solar cycle over the period 1960-2009[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 55(5):321-378.
- [39] Benestad R E. A review of the solar cycle length estimates [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(15):291-310.
- [40] 王华, 洪业汤, 朱咏煊, 等. 红原泥炭腐殖化度记录的全新世气候变化[J]. *地球与环境*, 2003, 31(2):51-56. [WANG Hua, HONG Yetang, ZHU Yongxuan, et al. The Paleoclimate significance of the peat humification in the Qinghai Tibet plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 31(2):51-56.]
- [41] 苏志华, 杨小强, 王建华, 等. 基于中国南方石笋记录的古气候周期探讨[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2012, 51(3):114-120. [SU Zhihua, YANG Xiaoqiang, WANG Jianhua, et al. Periodical climate deduced from stalagmite oxygen isotope in southern China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsevi*, 2012, 51(3):114-120.]
- [42] 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等. 近 5ka 温度的金川泥炭 $\delta^{18}\text{O}$ 记录[J]. *中国科学 D 辑*, 1997(6):525-530. [HONG Yetang, JIANG Hongbo, TAO Faxiang, et al. The temperature of $\delta^{18}\text{O}$ in Jinchuan peat since 5ka [J]. *Science in China (Series D)*, 1997(6):525-530.]
- [43] 胡凡根, 李志忠, 姜修洋, 等. 福建屏南天湖山泥炭腐殖化度记录的早全新世以来气候变化[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2011, 6(3):31-39. [HU Fangen, LI Zhizhong, JIANG Xiuyang, et al. Holocene climate change recorded in peat humification on Tianhu mountain in northern Fujian Province[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2011, 6 (3):31-39.]
- [44] Garcia A, Mouradian Z. The gleissberg cycle of minima[J]. *Solar Physics*, 1998, 180(1):495-498.

HOLOCENE CLIMATE CHANGES RECORDED BY MERCURY CONCENTRATION IN PEAT: A CASE FROM QINONGGOU OF YANGBAJING, TIBETAN PLATEAU

WANG Lin, NIU Rui, MENG Qinghao, SUN Chengcheng, ZHENG Xiangmin, ZHOU Limin

(Key Laboratory of Geographic Information Science, Education Ministry, East China Normal University, Shanghai 200241)

Abstract: We tried in this endeavor to rebuild the time series of temperature changes in Qinonggou(QNG) of Yangbajing in the southeast of the Tibetan Plateau. It is found that the mercury concentration in peat is a kind of good climatic proxy to monitor the regional temperature changes. The QNG peat recorded the variation in temperature from 9.1 kaBP to 3.5 kaBP in Holocene and could be divided into three phases: The Phase I (about 9.1 ~ 7.2 kaBP) was in the Holocene Megathermal stage of high temperature, but started dropping. The Phase II (about 7.2 ~ 5.6 kaBP), was the stage with fluctuated temperature changes. There occurred two large cold events happened in 5.9 kaBP and 6.3 kaBP respectively. The Phase III (about 5.6 ~ 3.5 kaBP), was a stage showing a falling pattern with violent and frequent fluctuations. They may be correlated with the three events of ice rafted debris(IRD) in the North Atlantic Ocean, i. e. the 8.2, 5.9 and 4.2 ka events. In addition to them, there were also some cold events in 7.5 kaBP, 6.3 kaBP and 4.7 kaBP respectively. Using REDFIT to make red noise spectrum analysis, we observed from the peat mercury concentration some cycles in aquasi-periods of 1100, 650, 450, 310 and 110 a, as a response to different scales of solar activities, suggesting that the region is much sensitive to the climatic changes caused by solar activities.

Key words: peat mercury concentration; climatic proxy; Holocene climate; Tibetan Plateau