

# 新仙女木事件在罗布泊湖相沉积物中的记录

罗超<sup>1</sup>, 彭子成<sup>1</sup>, 刘卫国<sup>2</sup>, 张兆峰<sup>3</sup>, 贺剑峰<sup>1</sup>, 刘桂建<sup>1</sup>, 张彭熹<sup>4</sup>

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026

2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室, 陕西西安 710054

3. Department of Geology, University of Illinois-Urbana Champaign, Urbana, IL 61801, USA

4. 中国科学院青海盐湖研究所, 陕西西安 710043

**摘要:** 通过对罗布泊 CK-2 钻孔湖相沉积物磁化率、粒度、碳酸盐和有机质含量的测定以及地球化学元素的多元统计分析, 探讨了我国西北极端干旱区域的环境对全球气候变化的响应。结果显示各代用指标均一致揭示了发生在 12.8~11.6 ka BP 间非常明显的低温期, 且降温幅度大, 变化迅速。这次冷事件在时间坐标以及发生特点上都与格陵兰冰心记录的末次冰消期中的新仙女木事件相对应, 为新仙女木事件的全球性特征提供了新的证据。这说明在我国新疆的极端干旱区, 其气候与环境的变化也与北半球高纬度地区有着密切的联系; 由主成分分析结果, 揭示了我国西北地区的西风气候区有别于东南季风气候区的水热配置特点, 即冷期湿润, 暖期干旱, 并提出了该事件信号从北大西洋传送到罗布泊地区的潜在机制。

**关键词:** 罗布泊地区; 湖相沉积物; 环境代用指标; 主因子分析; 新仙女木事件。

中图分类号: P534.63

文章编号: 1000-2383(2008)02-0190-07

收稿日期: 2007-07-16

## Evidence from the Lacustrine Sediments of Lop-Nur Lake, Northwest China for the Younger Dryas Event

LUO Chao<sup>1</sup>, PENG Zi-cheng<sup>1</sup>, LIU Wei-guo<sup>2</sup>, ZHANG Zhao-feng<sup>3</sup>,  
HE Jian-feng<sup>1</sup>, LIU Gui-jian<sup>1</sup>, ZHANG Peng-xi<sup>4</sup>

1. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710054, China

3. Department of Geology, University of Illinois-Urbana Champaign, Urbana, IL 61801, USA

4. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710043, China

**Abstract** The environmental proxies of the susceptibility, particle size, and the contents of carbonate and organic carbon in the lacustrine sediments of the CK-2 core from Lop-Nur Lake, Xinjiang, Northwest China are determined in this study. The core section corresponds to the 0.94–5.50 m and 9–14 kaBP. The reconstructed records in Xinjiang, NW China fully demonstrate that the Younger Dryas event occurred within 12.8–11.6 ka BP synchronously with that record in Greenland ice core, and its climate appeared to be cool and humid. These results suggest the rapid response of westerly climate system in the NW China to the climate variability in northern high latitudes in short time. A mechanism involving immigration of westerly winds and the intensity change of the westerly is tentatively proposed to account for this synchronicity.

**Key words:** Lop-Nur region; lacustrine sediments; environmental proxies; principle component analysis; Younger Dryas event.

新仙女木事件(Younger Dryas, 以下简称 YD) 后, 气候在已经回暖的过程中, 大约于 12.5~11.5 是指在末次冰盛期(Late Glacial Maximum, LGM) kaBP 的再次变冷, 这次变化的开始与结束均以突

发性为特征,而且降温幅度大,有研究表明当时格陵兰降温达 7 °C(Talor *et al.*, 1993),北半球大部分地区经历了不同程度的环境灾变.近十多年来,YD 的研究一直是学术界关注的热点,因为它发生在全球的广大空间,是气候变化轨道驱动理论的一个显著例外,同时,它还提示了人类要警惕全球变暖趋势下突变性寒冷灾变事件的发生.因而,对 YD 的研究无论在理论上还是在实际中都有着重大的意义(王文远和刘嘉麒,2001).在中国很多地区,如北方和中部黄土高原(An *et al.*, 1993; 周卫健等,1996)以及西太平洋边缘海(汪品先等,1996)等都发现了这一事件的存在,但是我国西部地区,特别是新疆等极端干旱区,关于 YD 明确的报道却为数不多.

湖泊系统对于环境的变化非常敏感,湖泊沉积物具有沉积连续、沉积速率大、分辨率高、信息量大的特点,其中蕴涵众多的古环境和古气候的代用指标,如磁化率、粒度、碳酸盐含量以及地球化学元素含量和比值等(Engstrom and Wright, 1984).近年基于孢粉、硅藻属和介形亚纲动物等古生物体的研究(Davis *et al.*, 2003; Heiri *et al.*, 2003; Mezquita *et al.*, 2005)使湖泊沉积物成为古环境重建最有效的载体之一.本文以具有较高沉积速率的罗布泊湖相沉积物为材料,分析沉积物中磁化率、粒度、碳酸盐和有机质含量以及 Ca、Mg、TOC 等 9 种

元素的含量,结合统计学的方法,分析罗布泊地区自末次盛冰期末期至全新世早期的气候变化过程,进而提供新仙女木事件在我国新疆地区存在的证据.

### 1 研究区概况

罗布泊及其邻近地区,位于新疆塔里木盆地的东部(如图 1 所示),面积约  $1 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,地理位置为东经  $90^\circ 09' 55'' \sim 92^\circ 10' 30''$ ,北纬  $39^\circ 45' 10'' \sim 40^\circ 45' 40''$ ;年均降雨量为 22 mm,蒸发量为 3 000 mm.每年 100 多天有 6 级以上大风,夏季最高气温达  $40 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,是我国西部最干旱的地区之一.地表的自然景观呈现为戈壁、沙漠、盐漠、风蚀残丘,自然环境极其恶劣.历史上该地区曾经是河流交错、湖泊密布的泽国,有着 4000 年前的土著人活动,还有史书记载的西域重镇—楼兰,孕育了上千年的楼兰文明,但至公元 330 年以后即销声匿迹了,随后罗布泊的植被也逐渐衰亡,直至发展到现今的状况.

罗布泊地区是典型的中亚干旱区之一,由纯的西风环流所控制,是连接中低纬度亚洲季风环流与高纬北大西洋海洋环流的枢纽地区.另外它还是气候变化的敏感区,因此揭示该地区的气候变化,能够建立起低纬度亚洲季风区与高纬北大西洋之间的桥梁,有助于北半球大气环流的整体研究.

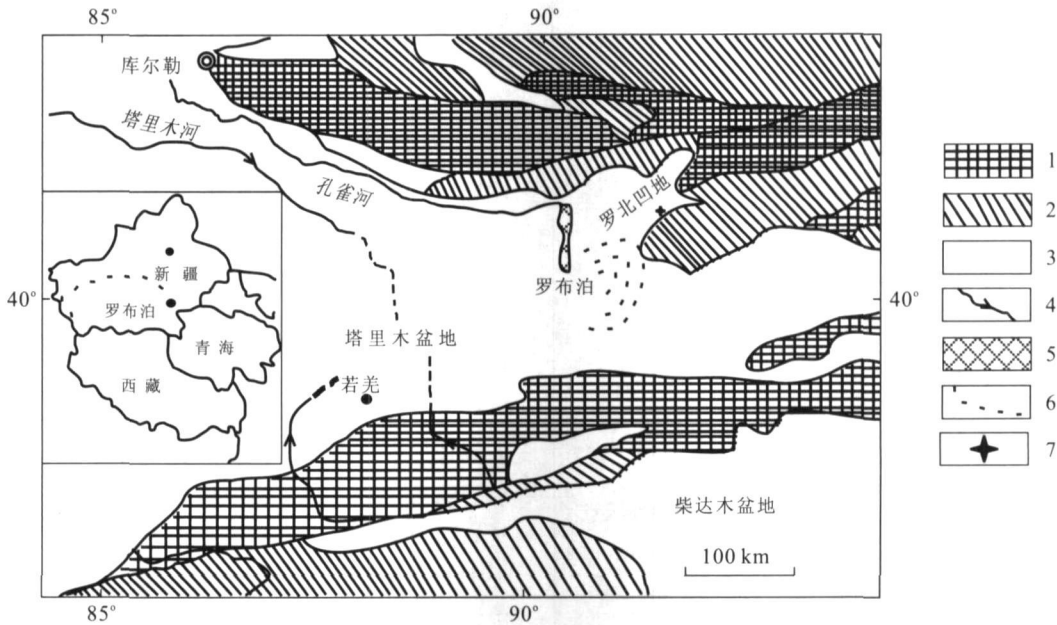


图 1 罗布泊地理位置及周边地区地质简图

Fig. 1 The location of Lop Nur Lake, Xinjiang, Northwest China and the circumjacent regions

1. 前寒武纪地层; 2. 古生代地层; 3. 新生代盆地; 4. 河流; 5. 湖泊; 6. 古湖岸线; 7. 钻孔位置

## 2 材料和方法

1997 年 10 月中国科学院青海盐湖所组织了罗布泊科学考察队,在罗北洼地进行了钻探,取得了全长为 50.14 m 的岩心样品(CK-2 孔),钻孔位置为东经 91°03',北纬 40°47'。本文研究取自 CK-2 钻孔自 0.94 m 到 5.50 m 的样品。

剖面沉积物主要以不同粒径和颜色的粉砂为主,其中富含分选良好的原生石盐和石膏矿物(沉积剖面如图 2 所示)。沉积物年代序列来自于 4 个石盐和石膏矿物的质谱—铀系年龄(Peng *et al.*, 2001; Alexander *et al.*, 2004)。图 2 中给出了 4 个年龄的测定结果,稍后根据分段回归插值法,建立了 CK-2 岩心自 5.50 m 到顶部 0.94 m 样品的年龄序列,其深度与年龄值的对应如图 2 所示。

对柱状的沉积剖面按照 5 cm 间隔取样,每个样品分成 3 份:一份原样用于磁化率和粒度的测定,在兰州大学完成;一份研磨并过 100 目筛,用于碳酸盐和有机质含量的测定;第 3 份研磨并过 120 目筛,用于 K、Na、Ca、Mg、Sr、Fe、Mn、As、TOC(总有机碳

量)等 9 种元素的测定。金属元素由 AFS-930 型全自动进样双道原子荧光光度计和原子吸收光谱仪测定;TOC 采用容量法测定。样品的前处理和测试均在中国科技大学极地实验室完成。常量元素(含量为 mg/g 级)测试的相对标准误差为 ±(1%~4%),微量元素(含量为 μg/g 级)为 ±(3%~12%)。

## 3 结果和讨论

沉积物的磁化率、粒度以及碳酸盐和有机质含量具有较为明显的气候与环境的指示意义(陈敬安等, 2003; 吴艳宏和李世杰, 2004; 张玉芬等, 2005),是古环境和古气候研究中常用并且有效的代用指标;图 3 给出了 CK-2 孔 0.94~5.50 m 部分这几种代用指标随深度变化的曲线。从图中可以看出,CK-2 孔 4.0~3.1 m 部分,磁化率,小颗粒百分含量和碳酸盐含量出现了谷值,而大颗粒百分含量和有机质含量均出现峰值。磁化率的低值说明沉积物中磁性矿物(主要是磁铁矿)的减少,指示了较弱的氧化作用,进而说明了当时较低的温度;而粗颗粒的增加和细颗粒的减少,说明有较强的水动力条件将粗颗粒带至钻孔位置沉积下来;沉积物碳酸盐含量的减少,一方面可能由于低温导致生物作用的减弱,湖水 CO<sub>2</sub> 浓度增加,水体 pH 值降低,不利于碳酸盐的沉淀,一方面则可能是水量较丰沛导致碳酸盐大量溶解于水体。因此较低的温度和丰沛的水量是这一阶段罗布泊地区气候的主要特征。对应图 2,可以知道这次冷事件发生于 12.8~11.6 ka BP 间。

运用沉积物地球化学元素含量波动特征来提取环境演变信息是环境演变研究中另一常用的手段(陈敬安和万国江, 1999; Adrian *et al.*, 2006; 韦桃源等, 2006)。CK-2 孔地球化学元素的分析结果表明,罗布泊地区自 14 ka 以来,沉积物中多数元素的氧化物含量波动并不明显,这可能与稳定的表生环境有关;另一方面化学元素的溶解、迁移、分散和聚集规律是一个复杂的地球化学过程,它一方面与元素的赋存状态、固有的地球化学行为有关,另一方面又与沉积环境的物理化学条件相关。仅简单地通过个别元素的变化趋势,有时很难准确地分析复杂的沉积过程,以及对环境变化序列的重建。目前普遍采用的办法是通过元素含量或比值的组合,去放大其指标对气候变化的响应,并从中削弱各种扰动因素的影响(吕玉晓等, 2004; Shen *et al.*, 2005);另

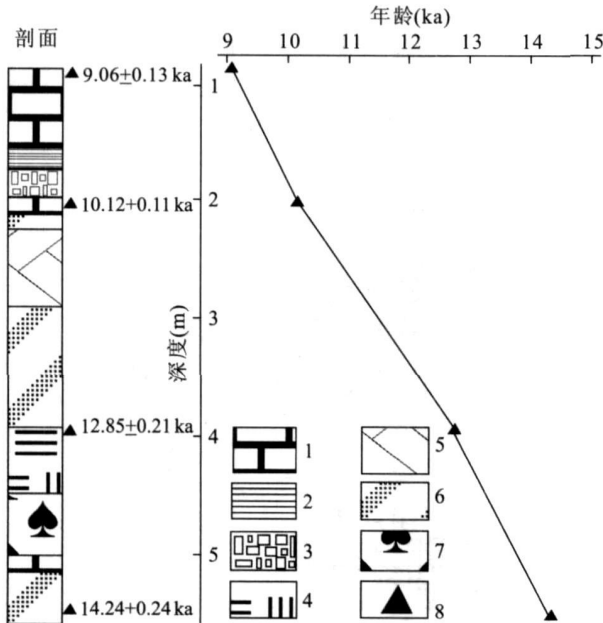


图 2 CK-2 孔沉积剖面(部分)及深度—年龄对应关系示意图  
Fig. 2 Detailed stratigraphic column and age/depth correlation of CK-2 core. Triangle represents the result of U/Th dating

- 1. 粉砂含粗粒石盐; 2. 粉砂含中粒石盐; 3. 粉砂隔水层; 4. 黑色粉砂含石膏; 5. 粉砂含细粒石膏; 6. 粉砂含中粒石膏; 7. 粉砂含粒石膏;
- 8. U-Th 年龄

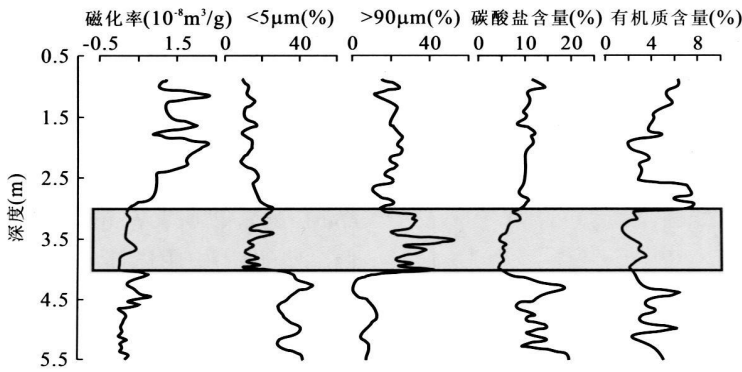


图 3 K-2 孔磁化率、粒度、碳酸盐和有机质含量的变化序列

Fig. 3 The susceptibility/ granularity/ content of organic matter and carbonate sequences of CK-2 core

表 1 统计分析结果中主成分 1 和 2 与各金属元素之间的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between the first and second principal components of multivariate statistical analysis and the geochemistry elements

元素	相关系数	
	PR12	PR11
K	0.938	—
Fe	0.936	—
Mg	0.892	—
Mn	0.840	—
As	0.825	—
Ca	—	-0.949
TOC	—	0.923
Na	—	0.872
Sr	—	-0.840

一方面利用主成分分析等统计方法对数据进行处理, 将庞杂的元素地球化学数据按数量、行为、特征上的联系进行归纳, 由果及因地理出比较客观的成因线索, 提供序列变化的趋势, 以导出合理的古环境重建的推论(黄国洪, 2000; 杨丽原等, 2003). 故本文未对每个元素的含量变化曲线进行图示和说明, 而是采用 SPSS10.0 软件对 9 种元素测定结果进行了多元统计主成分分析(Principle Component Analysis)和主因子分析(Factor Analysis). 表 1 给出了“载荷”矩阵主成分 1 和 2 与各金属元素之间的相关系数. 从表 1 中看出, 主成分 F1 与 Fe、K、Mg、As、Mn 具有强的正相关性; 根据对元素的地球化学性质的分析, F1 集合中的元素在湿润的气候条件下, 随着径流进入湖区后, 此时湖水盐度较低, 故该类元素主要呈现溶解态, 沉积物中含量就偏低; 而在暖干的环境下, 由于蒸发加强, 湖面减低, 盐度增大, 该类

元素就与湖水中达到一定浓度的阴离子结合, 以盐类形式沉淀下来, 反映在沉积物中出现了较高的含量. 在主成分 F1 的表征中还有如 Fe 和 Mn 这样的变价元素, 其低价态的离子形成的盐溶解度较大, 因此在罗布泊地区的冷湿环境下, 它们往往以低价态赋存于水相中, 在沉积物中含量减少; 随着环境向暖趋干变化, 相应的氧化条件较强, 此时相应的低价态离子被氧化, 形成了溶解度相对较低的高价态化合物(如 Fe(OH)<sub>3</sub>)出现于沉积物中, 同时磁化率也升高. 而主成分 F2 与 TOC、Na 具有强的正相关性, 与 Ca、Sr 具有强的负相关性, 可推断 F2 表征了罗布泊盐湖的干旱化程度. 元素 Na 是盐湖演化、趋向成熟阶段的一个重要指示性元素. 在冷湿环境下, 它易溶于水, 而在沉积物中含量降低. 而 Na 元素还有一个特性, 即容易产生盐析效应, 当其他元素的阳离子在湖水中浓度增大时, Na 在湖泊沉积物中的含量增大; 随着罗布泊地区干旱化程度的加剧, 湖面逐渐萎缩, 成盐作用加强, 沉积物中 Na 含量大幅升高. 对于总有机碳(TOC)含量的指标, 则由湖周陆生以及水生植物决定. 在冷湿的环境下, 周边植被或水生植物的生产力和腐败作用减弱, 在沉积物中的含量变小; 而在增暖 and 相对偏干环境下生产力和腐败作用加强, 在沉积物中的含量升高. 在 F2 的元素集合中, Ca 和 Sr 与主成分的数值呈反相关, 其中 Ca 在成盐过程中也是盐湖演化的重要标志性元素, 在湖泊成盐过程中相对是先以碳酸钙沉淀, 继而石膏沉淀, 最后为石盐沉淀. 而在冷湿环境下, 由于溶解度增加, 沉淀减少(马春梅等, 2006). Sr 与 Ca 有着几乎相同的性质, 对环境的指示特征也极为相似.

主成分分析的结果显示罗布泊地区的干旱化程

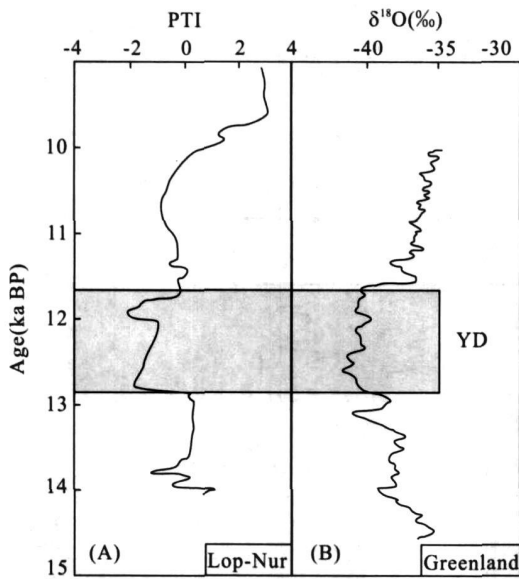


图 4 罗布泊地区 14~9 kaBP 古温度指数序列与 Greenland 冰心(B) 氧同位素记录的对比

Fig. 4 Comparison of the paleo-temperature index sequence of Lop-Nur region and isotope record of Greenland ice core during 14-9 ka

度在不断加剧, 盐类沉积的矿物种类也在相应变化. 在柱样早期, 主要以石膏沉积为主; 到了全新世的干涸期, 主要以石盐为主的沉淀, 石膏含量则相对减少, 这与图 2 曲线和柱样的岩性鉴定一致. 在罗布泊特殊的水热配置条件下, 上述讨论赋予了  $F_1$  和  $F_2$  直接的古气候和古环境的指示意义; 在冷湿环境中,  $F_1$  的低值表示较弱的氧化条件, 直接反映了较低的温度, 而  $F_2$  中包含的元素随着径流进入湖区, 并主要以溶解态存在于相对低盐度的湖水中, 所以也在沉积物中呈现低值; 而在暖干的环境下, 一方面较高的温度造成环境中氧化条件的加强,  $F_1$  增大; 另一方面由于蒸发加强, 湖面减低, 盐度增大, 促成  $F_2$  中元素以盐类形式沉淀, 反映在沉积物中出现了较高的含量. 利用主成分所包含的化学元素集合与环境条件这种良好的对应, 可以将第一主成分序列所对应的值定义为古环境温度的指数 (Paleo-temperature Index, PTI), 当 PTI 值偏高, 代表当时的古温度偏高; 反之则代表低温时期. 通过这种模拟的数值引入, 可以直观的表达气候和环境的变化程度.

按照这样的定义, 建立了 14~9 ka BP 以来罗布泊地区的古温度指数变化序列 (如图 4 中 A 所示), 从图 4 中可以观察到 12.8~11.6 ka BP 期间 PTI 值明显低于沉积序列的平均值, 说明了罗布泊

地区此间环境温度偏低特征. 这样定义的 PTI 值变化曲线就与之前的磁化率、粒度、碳酸盐和有机质含量的分析完全吻合.

从时间上来看, 这个时期正好对应于各种沉积记录 (Thompson *et al.*, 1997; 黄俊华等, 2000; Thomas and Brook, 2001; Wang *et al.*, 2001) 中的新仙女木低温期 (图 4 中阴影部分所示). 另外, 从此次事件边界上 PTI 值的变化情况来看, 其开始和结束都具有突发的特点. 此阶段之前的相对暖期代表了末次盛冰期之后的短暂转暖, 而之后的暖干趋势则代表了全新世暖期的开始. 从时间坐标的对应和事件发生特点来看, 这次冷事件都可以与广泛认知的新仙女木事件对应. 在北半球高纬度地区发生的突发性冷事件在新疆罗布泊沉积物的记录中得到响应, 这表明全球大气—海洋—陆地的相互作用, 突显出地球是一个完整的气候—环境系统, 笔者认为海—气的相互作用应当是全球气候系统的关键所在, 不同气候带之间通过大气环流建立了相互之间的耦合关系, 所以要想解决 YD 的成因和机制以及其全球性特征, 应将大气中  $\text{CO}_2$  浓度同大洋环流联系起来, 抓住  $\text{CO}_2$  的源和汇同大洋能量传送带间的作用关系, 进而讨论全球气候系统的调整 and 相互影响. 对于罗布泊同北半球高纬度地区, 这种耦合关系很可能是通过西风带的位置和强度的变化来实现的. 在冷期, 随着冰盖的扩张, 西伯利亚和蒙古高压向南移动, 将极地锋面雨带推向南方, 给该地区带来较大的雨量; 受这两个气团的影响, 西风带的位置和强度均发生变化, 从而影响罗布泊地区的温度和降水.

## 4 结语

自 20 世纪 30 年代新仙女木事件被发现以来, 就一直是古气候研究中的热点. 对于我国区域气候对这一事件的响应, 大多数的研究 (Thompson *et al.*, 1989; 王苏民, 1996; 周卫建等, 1996) 认为在中国不同地区新仙女木事件均表现为明显的降温效应. 在罗布泊地区, 此事件又表现出了新的特点, 即在大幅度突发性降温的同时, 伴随了湖相的发展期, 这说明了我国不同的气候带复杂的气候响应模式. 李吉均 (1990) 和陈发虎等 (2006) 在讨论亚洲中部, 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式时曾指出, 冰川前进与气候冷湿、湖面上升的时期相当, 是西风带气候变化的一般规律. 从本实验结果的数值

分析表明, 罗布泊地区遵从了这一气候—环境的模式: 其水热配置与甘肃、青海等黄土分布区有显著的不同. 尽管在水热配置上有区别于中低纬度亚洲季风区的特点, 但如 YD 这种千年尺度气候突变事件在罗布泊地区的发现, 说明该地区在亚轨道尺度上的气候变化, 同样受到全球变化的制约. 当然如 YD 这样的突发性气候事件在中国的影响程度、表现形式以及空间分布仍需要长期的工作和大量的资料来充实. 另外它如何影响到全球的广大空间, 特别是如罗布泊这样的非季风和极端干旱地区, 还需要更多关于动力学机制的研究. 将这些经典代用指标的记录结合太阳辐射曲线建立更为精确的年代标尺(田军等, 2005), 以及寻求其更深层的物理和环境学意义(黄维等, 2003)等, 这些思路可能会带来古环境学研究方面的新认识.

## References

- Adrian, G. P., Adrew, S. G., Stephen, S., et al., 2006. A record of Holocene climate change from lake geochemical analyses in southeastern Arabia. *Quaternary Research*, 66: 465—476.
- Alexander, H. S., Steven, L. G., Mordechai, S., 2004. U-Th dating of lake Lisan (Late Pleistocene Dead Sea) aragonite and implications for glacial East Mediterranean climate change. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 985—1005.
- An, Z. S., Porter, S. C., Zhou, W. J., et al., 1993. Episode of strengthened summer monsoon climate of Younger Dryas age on the loess plateau of Central China. *Quaternary Research*, 39: 45—54.
- Chen, F. H., Huang, X. Z., Yang, M. L., et al., 2006. Westerly dominated Holocene climate model in Arid Central Asia—Case study on Bosten Lake Xinjiang, China. *Quaternary Sciences* 26(6): 881—887 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. A., Wan, G. J., 1999. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and palaeoclimate evolution. *Geochemica* 25(5): 562—570 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. A., Wan, G. J., Zhang, F., et al., 2003. The environmental record of lake sediment in different time scale—The granularity of lake sediment, for example. *Science in China (Series D)*, 33(6): 563—568 (in Chinese).
- Davis, B. A. S., Brewer, S., Stevenson, A. C., et al., 2003. The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews* 22: 1701—1716.
- Engstrom, D. R., Wright, H. E., 1984. Chemical stratigraphy of lake sediments as a record of environmental change. In: Haworth, E. Y., Lund, J. W. G., eds., *Lake sediment and environmental history*. University of Minnesota Press Minneapolis, 1—68.
- Heiri, O., Birks, H. J. B., Brooks, S. J., et al., 2003. Effects of within-lake variability of fossil assemblages on quantitative chironomid-inferred temperature reconstruction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 199: 95—106.
- Huang, G. H., 2000. Environmental biogeochemistry and global environmental change. Science Press, Beijing, 96—105 (in Chinese).
- Huang, J. H., Hu, C. Y., Zhou, Q. F., 2000. High-resolution carbon and oxygen isotope records from stalagmite and palaeoclimate in Heshangdong cave, Qingjiang, Hubei Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(5): 505—509 (in Chinese with English abstract).
- Huang, W., Liu, Z. F., Chen, X. L., et al., 2003. Searching physical indicator of carbonate contents of deep sea sediments. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(2): 157—162 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. J., 1990. The pattern of environmental change in NW China since the Late Pleistocene. *Quaternary Sciences*, 10(3): 197—203 (in Chinese with English abstract).
- Lü, Y. X., Li, B. S., Jin, H. L., et al., 2004. Major element record in Salawusu river valley responding to global change during last interglacial period. *Journal of Desert Research*, 24(2): 137—143 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C. M., Zhu, C., Zhu, G. Y., et al., 2006. Magnetic susceptibility and elemental geochemistry analysis of the archaeological strata at the Yuchisi Site, Anhui. *Journal of Stratigraphy*, 30(2): 96—105 (in Chinese with English abstract).
- Mezquita, F., Roca, J. R., Reed, J. M., et al., 2005. Quantifying species-environment relationships in non-marine Ostracoda for ecological and palaeoecological studies: Examples using Iberian data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 225: 93—117.
- Peng, Z. C., Liu, W. G., Zhang, P. X., et al., 2001. Precise timing of lacustrine gypsum in Luobubo, Xinjiang: Using the thermal ionization mass spectrometry U-series method. *Chinese Science Bulletin*, 46: 1538—1541.
- Shen, J., Liu, X. Q., Ryo, M., et al., 2005. A high-resolution climatic change since the late glacial age inferred from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake. *Science in China (Series D)*, 48: 742—751.
- Talbot, K. C., Lamorey, G. W., Doyle, G. A., et al., 1993. The flickering switch of late Pleistocene climate change. *Nature* 361: 432—436.
- Thomas, B., Brook, E., 2001. Timing of millennial scale cli-

- mate change in Antarctica and Greenland during the last glacial period. *Science*, 291: 109–112.
- Thompson, L. G., Thompson, E. M., Davis, M. E., et al., 1989. Holocene Late Pleistocene climatic ice-core records from Qinghai-Tibet plateau. *Science* 246: 332–335.
- Thompson, L. G., Yao, T., Davis, M. E., et al., 1997. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. *Science*, 276: 1821–1825.
- Tian, J., Wang, P. X., Chen, X. R., et al., 2005. Astronomically tuned time scale 12 Ma to 18.3 Ma, ODP Site 1148, northern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 513–518 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Bian, Y. H., Li, B. H., et al., 1996. The Younger Dryas in the West Pacific marginal seas. *Science in China (Series D)*, 26(5): 452–460 (in Chinese).
- Wang, S. M., 1996. Environmental change of Gucheng Lake of Jiangsu in the past 15 ka and its relation to palaeomonsoon. *Science in China (Series D)*, 26(2): 137–141 (in Chinese).
- Wang, W. Y., Liu, J. Q., 2001. New evidence from the sediments of Huguangyan Maar Lake, southern China for the Younger Dryas event. *Scientia Geographica Sinica*, 21(1): 94–96 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Cheng, H., Edwards, R. L., et al., 2001. A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu cave. *Science*, 294: 2345–2348.
- Wei, T. Y., Chen, Z. Y., Wei, Z. X., et al., 2006. The distribution of geochemical trace elements in the Quaternary sediments of the Changjiang River Mouth and the paleoenvironmental implications. *Quaternary Sciences*, 26(3): 397–405 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. H., Li, S. J., 2004. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation. *Advances in Earth Science*, 19(5): 789–792 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L. Y., Shen, J., Zhang, Z. L., et al., 2003. A 40 year element geochemical record and its environment implication in Lake Nansihu Shandong Province. *Geochemica*, 32(5): 453–460 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. F., Li, C. A., Chen, G. J., 2005. Characteristic and paleodimatic significance of magnetic susceptibility and stable organic carbon isotopes from a bore in Zhoulaotown, Jiangnan plain. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 114–120 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W. J., Li, X. Q., Dong, G. R., et al., 1996. The high resolution of peat records in desert/loess transitional region during Younger Dryas. *Science in China (Series D)*, 26(2): 118–124 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等, 2006. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式——以新疆博斯腾湖为例. 第四纪研究, 26(6): 881–887.
- 陈敬安, 万国江, 1999. 洱海沉积物化学元素与古气候演化. 地球化学, 25(5): 562–570.
- 陈敬安, 万国江, 张峰, 等, 2003. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例. 中国科学(D辑), 33(6): 563–568.
- 黄国洪, 2000. 环境生物地球化学及全球环境变化. 北京: 科学出版社, 96–105.
- 黄俊华, 胡超涌, 周群峰, 2000. 湖北清江和尚洞石笋的高分辨率碳氧同位素及古气候研究. 地球科学——中国地质大学学报, 25(5): 505–509.
- 黄维, 刘志飞, 陈晓良, 等, 2003. 寻求深海碳酸盐沉积含量的物理标志. 地球科学——中国地质大学学报, 28(2): 157–162.
- 李吉均, 1990. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式. 第四纪研究, 10(3): 197–203.
- 吕玉晓, 李保生, 靳鹤龄, 等, 2004. 萨拉乌苏河流末次间冰期全球变化区域响应的主元素记录. 中国沙漠, 24(2): 137–143.
- 马春梅, 朱诚, 朱光耀, 等, 2006. 安徽蒙城尉迟寺遗址地层的磁化率与元素地球化学记录研究. 地层学杂志, 30(2): 124–130.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等, 2005. 南海 ODP1148 站中中新世(12~18.3 Ma)天文调谐的年代标尺. 地球科学——中国地质大学学报, 30(5): 513–518.
- 汪品先, 卞云华, 李保华, 等, 1996. 西太平洋边缘海的“新仙女木”事件. 中国科学(D辑), 26(5): 452–460.
- 王苏民, 1996. 江苏固城湖 15 ka 来的环境变迁与古季风关系探讨. 中国科学(D辑), 26(2): 137–141.
- 王文远, 刘嘉麒, 2001. 新仙女木事件在热带湖光岩玛珥湖的记录. 地理科学, 21(1): 94–96.
- 韦桃源, 陈中原, 魏子新, 等, 2006. 长江河口区第四纪沉积物中的地球化学元素分布特征及其古环境意义. 第四纪研究, 26(3): 397–405.
- 吴艳宏, 李世杰, 2004. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用. 地球科学进展, 19(5): 789–792.
- 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等, 2003. 近四十年来山东四湖环境演化的元素地球化学记录. 地球化学, 32(5): 453–460.
- 张玉芬, 李长安, 陈国金, 等, 2005. 江汉平原湖区周老镇钻孔磁化率和有机碳稳定同位素特征及其古气候意义. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 114–120.
- 周卫建, 李小强, 董光荣, 等, 1996. 新仙女木期沙漠/黄土过渡带高分辨率泥炭记录——东亚季风气候颤动的实例. 中国科学(D辑), 26(2): 118–124.