

# 多元地球化学指标指示的 32 ~ 9 ka B. P. 罗布泊地区环境及其对全球变化的响应

罗 超<sup>1</sup>, 彭子成<sup>1\*</sup>, 杨 东<sup>2</sup>, 刘卫国<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. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;  
3. 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 710075; 4. 中国科学院 青海盐湖研究所 (二部),  
陕西 西安 710043)

**摘 要:** 对位于新疆罗布泊地区罗北洼地的 CK-2 钻孔柱样, 自距顶 0.94 m 到 10.35 m 部分, 以 5 cm 间距采样 6 个样的质谱 - 铀系法年龄为 32 ~ 9 ka B. P., 用仪器 - 化学分析法得到了样品中 Na、K、Ca、Mg、Fe、Cu、Hg、Zn、Mn、Sr、As、Pb、P、Cl 和 TOC 共 15 种元素的含量。通过对元素含量变化和主成分序列分析, 探讨了罗布泊地区在 32 ~ 9 ka B. P. 期间, 经历的从未次盛冰期(阶段 I)、暖干期(阶段 II)、末次冰期晚期(阶段 III), 到全新世早期(阶段 IV)的不同程度冷湿与暖干的变化阶段。与格陵兰冰芯 (GISP2) 和深海沉积物氧同位素序列对比结果表明, 罗布泊地区经历了 MIS3 晚期、MIS2 和早 MIS1 早期。在罗布泊环境演化序列中也出现了发生在北大西洋冰漂碎屑的 Heinrich 事件 (H3、H2 和 H1) 和新仙女木 (YD) 事件, 以及快速回暖的 D/O 事件 (IS4、IS3、IS2 和 IS1)。这表明高纬度的大气环流影响到中纬度西风带的强度、相位和位移, 制约了我国西北干旱化地区气候环境变化的格局。为此, 罗布泊地区的湖相沉积环境不仅记录了受到西风带、青藏高原隆升以及远离东亚和南亚季风影响所具有区域性的冷湿与暖干的水热配置特点, 并且还具有全球变化的印迹。

**关键词:** 地球化学指标; 环境变化序列; 区域和全球特征; 罗布泊

中图分类号: P595; P597; P532 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2008)02-0139-10

## Paleoclimate of Lop Nur and the response to global change by geochemical elements multi-analysis

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

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. Geography and Environmental Science College, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;
3. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China;
4. Second Branch of Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710043, China

**Abstract:** A record of climatic and environmental changes is presented inferred from the geochemistry of sediment core (CK-2) from the Luobei billabong, Lop Nur, Xinjiang, NW China. The samples that were sampled at intervals of 5 cm of the core were analyzed for 15 elements, including Na, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Hg, Zn, Mn, Sr, As, Pb, P, Cl and TOC, by atomic absorption spectrophotometer, atomic fluorescence spectrometer and some chemical methods. The chronology is provided by 6 uranium/thorium disequilibrium ages. The results suggest four paleoclimatic stages during 32 - 9 ka B. P., the characteristics of which were cold-humid and warm-arid environment, corresponding to Late Glacial Maximum (LGM), Interglacial, Late Glacial and early Holocene.

收稿日期 (Received): 2007-06-26; 改回日期 (Revised): 2007-10-04; 接受日期 (Accepted): 2007-12-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2004CB720208); 国家自然科学基金 (40473006, 40599424); 高校博士学科点基金 (20050358006)

作者简介: 罗超 (1982-), 男, 博士研究生, 第四纪环境学专业。

\* 通讯作者 (Corresponding author): PENG Zi-cheng, E-mail: pzc@ustc.edu.cn, Tel: +86-551-3602271

LUO Chao et al.: Paleoclimate of Lop Nur and the response to global change

According to the comparison with Greenland ice core (GISP2) and marine isotope stage (MIS), the climate evolution of Lop Nur district experienced late MIS3, MIS2 and early MIS1. Some climate events, such as Heinrich Events and Younger Dryas in North Atlantic and Dansgaard/Oeschger Oscillations (D/O), were also investigated in Core CK-2. It is concluded that the climate variability of this district was restricted by the global change. High latitude atmosphere circumfluence influenced the climate evolution of the arid NW China by influencing the strength and cycle of middle latitude westerlies. The lacustrine sediments in Lop Nur have recorded the characteristics of regional precipitation and temperature, which were influenced by westerlies and the uplift of Qinghai-Xizang Plateau, and beyond the impact of east and south Asian Monsoon.

**Key words:** geochemical proxy; environmental sequence; local and global characteristics; Lop Nur

## 0 引言

最近 30 ka B. P. 以来,全球气候经历了激烈的变化,从末次冰期经过盛冰期、冰后期,进入全新世的温暖期。高纬度北大西洋地区出现了突发的冰漂碎屑 Heinrich 事件和新仙女木 (YD) 冷事件,以及在 这些事件期间,又出现了短促转暖的 D-O 旋回 (间冰阶)。寻找这些气候事件在各种古气候载体中的反映,是当前第四纪研究中的一个热点。

2005 年香山科学会议第 254 次学术讨论会上刘东生曾强调,干旱 (半干旱、半湿润) 地区过去是、现在是、将来仍是人类发展的基础和后方。我们需要对西部干旱区的干旱环境获得足够认识,因此在该地区中寻找有效的环境代用指标,通过对其高精度的测定,定量提取气候-环境信息,重建过去该地区的环境变化序列,是一项重要工作。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,而且湖泊的地理覆盖面广,超过冰芯、黄土的分布<sup>[1]</sup>。曾经发育过大湖,而现今极度干旱和荒漠化的罗布泊地区,正是这样一个生态-环境-地质的天然实验室<sup>[2]</sup>。高纬度的气候变化是否会在我国西北的罗布泊地区找到映像,这是本文想探索的问题。

前人曾利用沉积物中的元素地球化学信息,重建了古气候变化序列,并取得了诸多的成果<sup>[3-8]</sup>。基于罗布泊湖相沉积物的工作也取得了很多进展,王永等用热释光 (TL) 法对罗布泊八一泉剖面的上下部地层年龄进行了测定,结果为  $(107.1 \pm 8.1)$  ka B. P. 和  $(125.0 \pm 9.9)$  ka B. P.<sup>[9]</sup>。阎顺等对罗布泊湖盆的 K1 钻孔的 100.2 m 沉积剖面进行了研究,划分出 16 个沉积旋回和 15 个孢粉组合带。由此得出如下的结论:该地区早更新世曾发育过森林-草原植被,早更新世末期出现过强烈的构造活动,中更新世该区被荒漠和荒漠-草原更替,地层中有大量膏

质泥岩和石膏的存在;晚更新世以来,主要受到干旱气候控制,植被以荒漠为主,在盛冰期为荒漠草原;全新世以来发育着典型的荒漠植被<sup>[10]</sup>。我们曾用磁化率、粒度、色度、碳酸盐含量、pH 值、有机质含量等环境指标,研究过罗布泊地区罗北洼地自 30 ka B. P. 以来所经历的冷湿与暖干变化的 4 个阶段,并揭示了罗布泊地区的干旱化属于以自然变率为主旋律的过程<sup>[11]</sup>。在此工作的基础上,我们又对该地区开展了 15 种化学元素环境地球化学指标的研究,反演过去气候-环境演化的特点,与高、中纬度冰芯和深海沉积物氧同位素变化的对比,拟探求该地区最近 30 ka B. P. 来对全球气候激烈变化所产生的响应的印迹。

## 1 样品采集与分析

1997 年 10 月中国科学院青海盐湖研究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 的岩芯样品 (CK-2 孔)。钻孔位置为  $91^{\circ}03'E$   $40^{\circ}47'N$  (图 1)。CK-2 孔沉积物主要由粉砂、粘土、硫酸盐和氯化物组成 (图 2)。粉砂、粘土沉积在盐湖或湖盆形成过程中处于相对湿润的环境,沉积厚度 13.06 m,占岩芯全长的 26.1%。盐类在盐湖形成的后期阶段沉积,其中钙芒硝沉积占岩芯全长的 54.3% 继而石膏沉积,占 16.6%,最后为石盐沉积,分布在 4.9 m 以上,占 2.3%<sup>[8]</sup>。本文研究 CK-2 钻孔自顶部 0.94 m 到 10.35 m 的样品 (0~0.9 m 的样品已经耗尽),岩性分析见图 2。从柱状样品的岩性变化可明显看出,其化学沉积环境处于盐湖形成演化的后期,气候环境有冷暖和干湿的变化,但是总体趋势是朝着干旱化的过程发展。此外,岩性鉴定没有发现有大量风沙沉积,湖相沉积连续<sup>[11-12]</sup>。

样品的地质年龄用质谱-铀系法测定<sup>[13]</sup>,测定年龄在 0.94 m 处为  $(9063 \pm 130)$  a B. P., 4.0 m 处

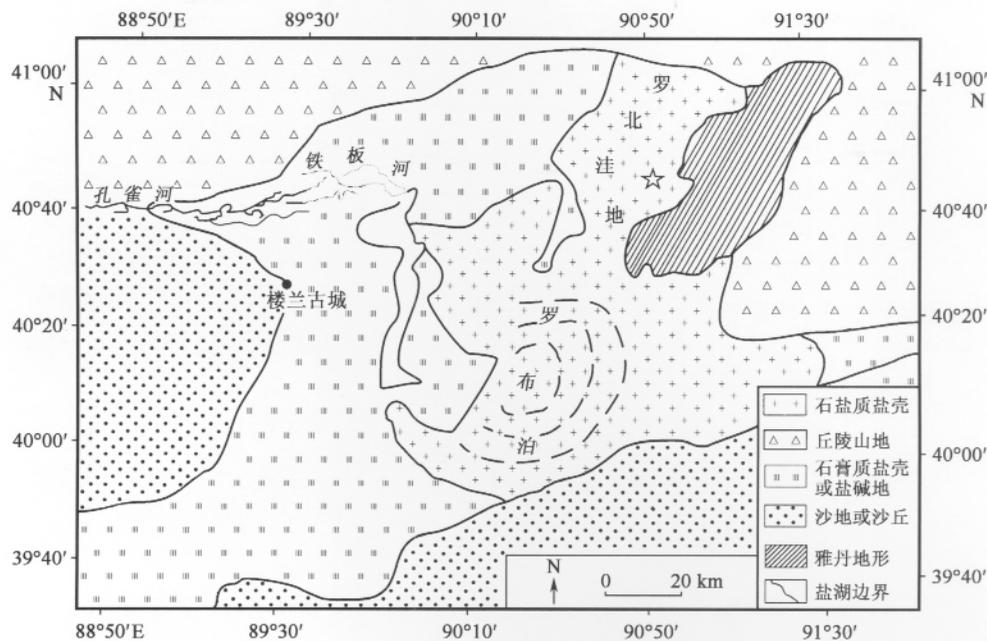


图 1 新疆罗布泊地区罗北洼地沉积环境和 CK-2 钻孔位置(☆)示意图

Fig. 1 Sketch map of sedimentary environment in Luobei billabong, Lop Nur, Xinjiang, also showing the position of Core CK-2 (☆)

为  $(12850 \pm 210)$  a B. P., 5.5 m 处为  $(14038 \pm 240)$  a B. P., 6.73 m 处为  $(19010 \pm 230)$  a B. P., 10.35 m 处为  $(31980 \pm 640)$  a B. P., 41.86 m 处为  $(144.9 \pm 6.3)$  a B. P., 49.15 m 处为  $(153.2 \pm 7.2)$  a B. P.。然后根据分段回归插值法,建立了 CK-2 岩芯自 10.35 m 到顶部样品的年龄序列,其深度与年龄值的对应情况如图 2 所示。

对柱样的沉积剖面按 5 cm 间隔取样,用于 K、Na、Ca、Mg、Zn、Fe、Mn、Cu、Sr、Hg、As 和 Pb 等 12 种金属元素,Cl、P 和 TOC(总有机碳)等 3 种非金属元素的测定。样品经研磨,并过 120 目筛网。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;元素 P 由 UV-VIS 型双光束紫外-可见分光光度计测定;Cl 和 TOC 采用容量法测定。样品的消化和测试均在中国科技大学极地实验室完成。主元素(含量为 mg/g 级)测试的相对标准误差为  $\pm 1\% \sim \pm 4\%$ ,而微量元素(含量为小于等于  $\mu\text{g/g}$  级)为  $\pm 3\% \sim \pm 12\%$ 。15 种地球化学元素的含量自 32~9 ka B.P. 以来的变化序列如图 2 所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 元素地球化学的环境指示特征

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。运用沉积物中的地球化学元素含量的变化特征,提取有效的气候环境信息,重建过去沉积环境的变化序列,这是研究地球环境系统的常用方法之一。然而,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和重建环境变化序列。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<sup>[14-15]</sup>。另一方面利用数学地质中的主成分分析等统计方法对数千、甚至近万个数据进行回归,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,由果及因理出客观的成因线索,提供序列变化的趋势,以导出合理的古环境重建的推论<sup>[16]</sup>。

本文应用 SPSS 10.0 软件对 15 种元素测定结果进行了多元统计主成分分析,得到了前 3 个主成分的累积贡献率为 75.8%,其中主成分  $F_1$  随深度与年龄的变化曲线如图 3A 所示。该分析的可行性变量 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy) 值为 0.830,说明罗布泊沉积物的多元地球化学特征有可信的指示意义。

CK-2 剖面的主成分与原变量之间的相关系数列于表 1。从表 1 可看出,主成分  $F_1$  与 Fe、K、Mg、P、As、Zn、Mn、Cu、Sr 和 Pb 具有强的正相关关系 ( $r > 0.5$ )。主成分  $F_1$  表征了罗布泊沉积物的化学

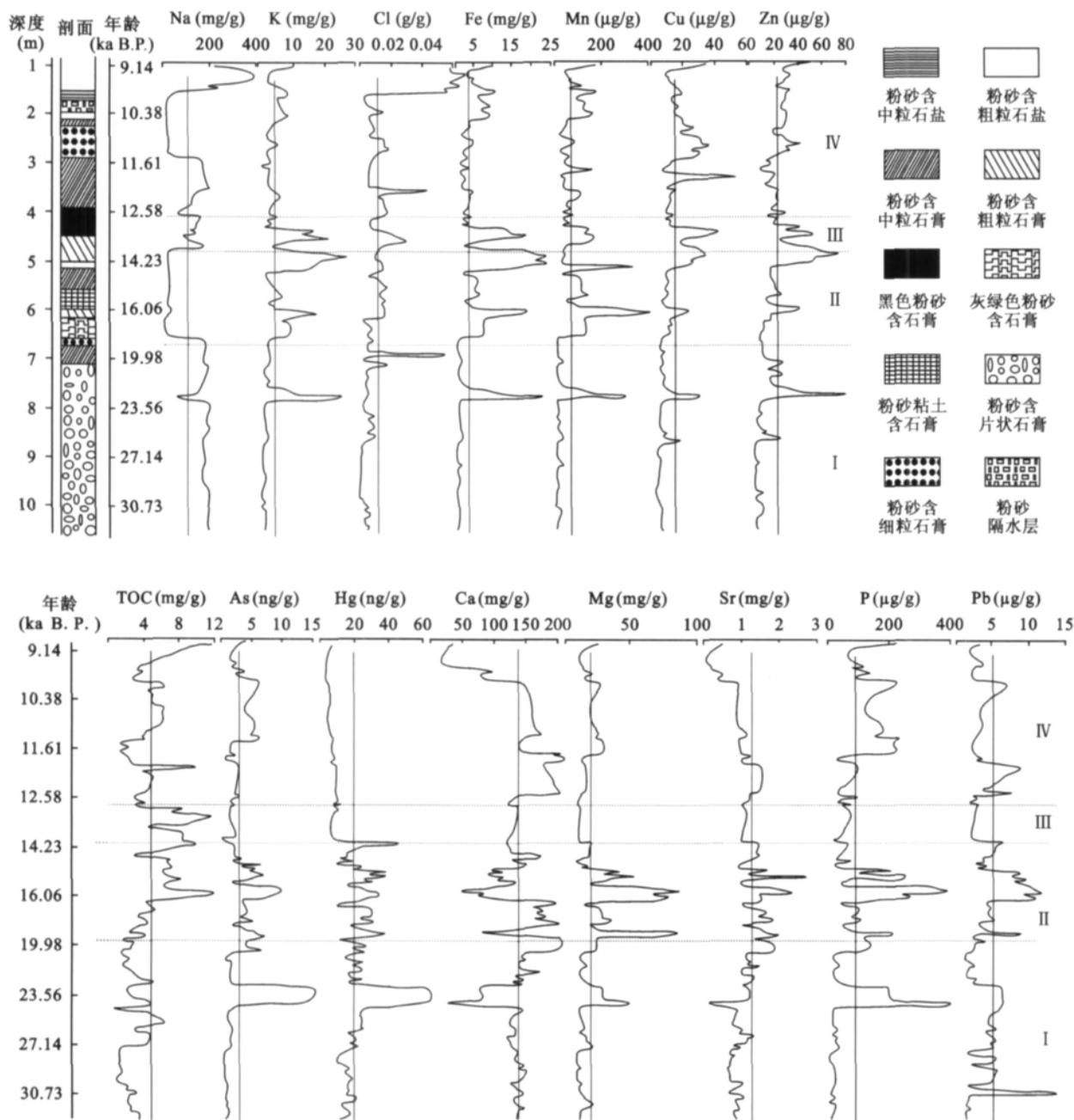


图2 罗布泊地区 CK-2 柱样中 15 种地球化学指标的变化序列

Fig. 2 Sediment geochemical records in Core CK-2 from Lop Nur

I、II、III 和 IV 为环境演化 4 个阶段，相应年代依次为 31.98 ~ 19.26 ka B. P.、19.26 ~ 13.53 ka B. P.、13.53 ~ 12.73 ka B. P. 和 12.73 ~ 9.00 ka B. P.；各指标单元的纵向实线表示平均值。

I, II, III and IV represent the 4 stages of the sequence, and the corresponding ages were 31.98 ~ 19.26 ka B. P., 19.26 ~ 13.53 ka B. P., 13.53 ~ 12.73 ka B. P. and 12.73 ~ 9.00 ka B. P., respectively. And the vertical solid lines represent the average value of each element.

元素在风化与淋滤过程中的行为。如图 2 所示，在冷湿环境中（阶段 I 和阶段 III），这类元素往往随着径流进入湖区，并主要以溶解态形式存在于相对低盐度的湖水中，所以在沉积物中呈现低值，而在暖干的环境下（图 2 阶段 II 和阶段 IV），蒸发加强，湖面降低，盐度增大，促成该类元素以盐类形式沉淀，反映在沉积物中出现了较高的含量。其中的地球化学

元素 K、Zn 和 Cu 还与生物过程有密切关系<sup>[17]</sup>。当环境温度高时，生物量大，这些元素含量在沉积物中增高，反之，则减少。在主成分 F<sub>1</sub> 的表征中还有变价元素，如 Fe 和 Mn。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，又以氧化的高价态（Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 MnO<sub>2</sub>）存在于沉积物中，使化学含量增

表 1 多元地球化学指标统计主成分分析  $F$  值与元素变量的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the principal components of multivariate statistical analysis and the geochemistry elements

主成分	Hg	As	Cl	Cu	Zn
$F_1$	0.495	0.844	0.170	0.638	0.840
$F_2$	-0.168	-0.022	0.794	0.125	0.283
$F_3$	-0.698	-0.138	0.301	0.403	0.137
主成分	Na	K	Fe	Mn	Ca
$F_1$	-0.553	0.963	0.964	0.699	-0.273
$F_2$	0.676	0.068	0.113	0.046	-0.830
$F_3$	-0.352	-0.081	-0.029	0.125	0.380
主成分	Mg	Sr	P	Pb	TOC
$F_1$	0.924	0.568	0.909	0.547	0.115
$F_2$	-0.011	-0.571	0.148	-0.028	0.884
$F_3$	-0.112	0.041	0.077	-0.331	0.265

高<sup>[19]</sup>。此外,化学元素 P 主要来源于含磷矿物,以及陆生和水生的生物体物质。在冷湿环境下,湖面水体增加,pH 值降低,磷酸盐类转化为偏磷酸盐类,又加上腐败作用的减弱,造成在沉积物中含量的减少;与此相反,在暖干环境下,湖面降低,pH 值增加,沉积物中 P 含量增加,如图 2 所示。所以化学元素 P 是指示湖面升/降和 pH 值低/高的环境指标<sup>[17]</sup>。

表 1 显示,主成分  $F_2$  与 TOC、Cl 和 Na 具有显著的正相关关系,与 Ca、Sr 具有显著的负相关关系。主成分  $F_2$  表征了罗布泊盐湖的干旱化程度。化学元素 Cl 和 Na 是盐湖演化、趋向成熟阶段的重要指标。在冷湿环境下,该类元素易溶于水,而在沉积物中含量降低。而 Na 元素还有一个特性。当湖水中盐度增加时(大量其他成盐元素的溶解),Na 又容易产生盐析效应,在湖泊沉积物中沉淀下来(如图 2 阶段 I 和阶段 III);随着罗布泊地区干旱化程度的加剧,即从 32 ka B. P. 发展到 9 ka B. P.,湖面逐渐萎缩,成盐作用加强,沉积物中 Cl、Na 含量升高(见图 2 阶段 IV)。总有机碳 TOC 含量的指标与前者的变化趋势相似。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;而在增暖和相对偏干环境下生产力和腐蚀作用加强,在沉积物中的含量升高。对于  $F_2$  指示反相关作用的 Ca 和 Sr 元素,其中 Ca 元素在成盐过程中也是盐湖演化的重要标志物。在冷湿环境下,溶解度增加,沉淀减少;而在暖干环境中沉淀加强<sup>[4, 19]</sup>。Sr 是 Ca 的类质同像元素,有相似的环境指示的性质。在湖泊成盐过程中先是碳酸钙沉淀,继而是石膏沉淀,最后为石盐沉淀。由于罗布泊地区的干旱

化程度在不断加剧,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,以石盐沉积为主,石膏显得很少,这与图 2 曲线和柱样的岩性鉴定相一致<sup>[12]</sup>。

主成分  $F_3$  与 Hg 具有显著的负相关关系。主成分  $F_3$  标识的是易流动和易挥发的 Hg 元素。虽然常态下 Hg 与其他物质,尤其是金属物质容易形成汞齐,但是易于挥发仍是该主成分  $F_3$  的环境指示标志。从图 2 的 Hg 变化序列看出,在冷湿期内,由于低温和相对丰水,使得其挥发减少,呈现在沉积物中的含量较高。而在气候环境趋向暖干时,尤其在全新世暖期的前后,由于温度升高,挥发加强,造成汞在沉积物中的含量显著地减少。

上述表明,多元统计分析有效地把 15 个变量元素、近 2000 个数据,经过权重相关压缩,转化成 3 个(左右)有代表性的相关变量,反映出不同的个别或组合元素所具备的环境指示特性。

在下节,我们将主成分  $F_1$  序列(图 3A)所对应的每个环境阶段的平均值定义为气候环境的暖干指数(Warm-Dry Index, WDI):当 WDI 值偏正,且偏高,代表当时气候环境的主要特征为暖干;反之,当 WDI 值偏负,且偏低,代表环境为冷湿。这种模拟量的引入,可以增加对重建环境变化程度的量化认识。

## 2.2 末次冰期晚期以来罗布泊地区的环境演化

从图 2 和图 3A 的变化序列中可以看出,从 32 ka B. P. 到 9 ka B. P. 期间,罗布泊地区的环境变化经历了以下 4 个主要阶段。

第一阶段为末次冰期晚期的强冷湿期(柱深为 10.35~6.80 m,年代为 31.98~19.26 ka B. P.):各环境指示元素的含量大多处于低值。如 Mn、K、Fe、Cl、P 和 TOC 等,明显地低于全阶段的平均值。从图 3A 的序列数据计算得到,该阶段的统计平均值,即暖干指数 WDI 值为 -0.7535,这是全阶段的最低值,此与本阶段经历了全球的末次盛冰期(23~19 ka B. P.)相对应<sup>[20]</sup>。它们表征了当时的气候环境强冷、偏湿、湖水淡化、湖面升高,相应于指示环境元素在沉积物中含量降低。中国西部(包括青藏高原西部)的古湖泊统计结果显示,在 30~20 ka B. P. 时段,湖泊基本上处于中高湖面。当时的西风环流增强,并向南迁移,导致西部环境的湿度增加,冰川扩展和积雪加厚<sup>[21]</sup>。应当指出,多元指标的变化序列(图 2 和图 3A)还揭示了在 27.1 ka B. P.、26.1 ka

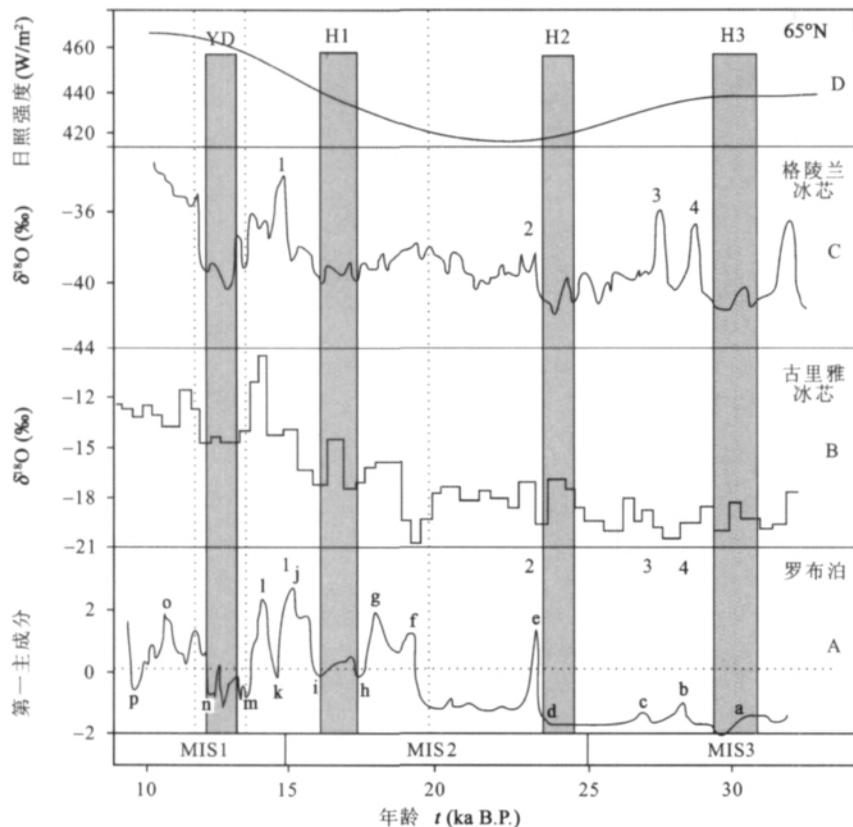


图3 罗布泊地区多元地球化学指标主成分统计序列(A)与大洋深海沉积物氧同位素阶段(MIS3、MIS2和MIS1)、古里雅冰芯氧同位素曲线(B)、格陵兰冰芯(GISP2)氧同位素曲线(C)以及太阳辐射变化曲线(D)之间的比较

Fig. 3 Comparison of the first principal component of multivariate statistical analysis for the geochemistry elements proxies in Core CK-2 in Lop Nur region (A), isotope records of the Guliya ice core (B) and the Greenland ice core (D) and the 65°N June insolation (D) H3、H2、H1 和 YD 分别表示 Heinrich 和 Younger Dryas 冷事件; 4、3、2 和 1 分别表示 D-O 旋回的 IS4、IS3、IS2 和 IS1 暖事件; a、b、c、d、e、f、g、h、i、j、k、l、m、n、o 和 p 分别对应的年龄值为 30.5 ka B. P.、27.1 ka B. P.、26.1 ka B. P.、24.1 ka B. P.、23.7 ka B. P.、20.8 ka B. P.、18.8 ka B. P.、17.4 ka B. P.、16.5 ka B. P.、15.5 ka B. P.、14.9 ka B. P.、14.2 ka B. P.、13.2 ka B. P.、12.8 ka B. P.、11.3 ka B. P. 和 9.3 ka B. P.。

The hatching represents Younger Dryas and Heinrich events. The arabic numerals represent stadials of four D/O cycles and the broken line for 65°N June insolation.

B. P.、23.7 ka B. P. 时期出现了突发转暖事件(图 3A 之 b、c、e),这表明本阶段的气候-环境变化存在激烈的波动因素。

第二阶段为末次冰期晚期的暖干期(柱深为 6.80~4.85 m,相应的年代为 19.26~13.53 ka B. P.)。该阶段的多元地球化学指标,如 Fe、Mn、K、As、Mg、Sr、TOC、P 和 Pb 等,出现了与第一阶段相反的变化趋势(图 2),其含量高于全阶段的平均值。与此相应,该阶段的 WDI 值为 +0.6935(图 3A),远高于前阶段的 -0.7535,这表明当时的环境处于暖干阶段。氧化作用加强,生物(水生和陆生)的生长量加大,有机碳物质增加;蒸发加强,湖面降低,盐度增高,无机和有机的化学沉淀量加大。此外,这个阶段的地球化学指标变化也非常剧烈,在 20.8 ka B. P.、18.8 ka B. P.、15.5 ka B. P. 和 14.2 ka B. P. 时段出现了峰值(图 3A 之 f、g、j 和 l),而

在 17.4 ka B. P.、16.5 ka B. P.、14.9 ka B. P. 时段(图 3A 之 h、i 和 k)又呈现出谷值。这些千年尺度的气候波动事件,表明了环境变化的复杂性。

第三阶段为末次冰期晚期的冷湿期(柱深为 4.85~3.90 m,相应年代为 13.53~12.73 ka B. P.)。我们研究的磁化率、粒度、色度、有机质含量的变化与第二阶段有明显不同,气候-环境转以冷湿为特征<sup>[11]</sup>。本文的元素地球化学指标表明,在该阶段的湖泊沉积物内含量减少,并低于全阶段的平均值,如 As、Hg、Mg、Ca、Sr、K、Cl、Fe、Mn、Zn、P 和 Pb 等。与此相应,该阶段的 WDI 值为 -0.1091,其比第二阶段的 0.6935 值低,而比第一阶段的 -0.7535 值要高。这显示本阶段的气候环境比第二阶段偏冷湿,但却没有第一阶段那么严酷(末次盛冰期 LGM),如同我们早期研究磁化率、粒度、色度、有机质含量的变化阶段一致<sup>[11]</sup>。在 12.8~13.2 ka B. P. 时段

(图 3A 之 m 和 n) 出现了明显的冷湿低谷。这是一个短暂的冷湿期,是本地区从未次冰期转向全新世暖期(间冰期)前的一个过渡期。

第四阶段为全新世暖期的早期(柱深为 3.90~0.9 m,相应年代为 12.73~9.00 ka B. P.)。该阶段的许多地球化学指标值显著增加,如 Na、Cl、K、Fe、Mn、Zn、Cu、TOC、As、Ca、Mg、P 和 Pb 等。本阶段的 WDI 值为 +0.8003,是本地区整个环境演化阶段出现的最高值,表征了气候环境进入了更为暖干时期。该阶段的蒸发加强、湖面萎缩,无机和有机的化学沉淀量增加。在罗布泊盐湖的演化进程中已到了成熟阶段,出现了大量的石盐析出,从柱样的岩性分析得到证实(图 2)。而 Ca、Sr 和 Mg 的成盐作用,由于前期的优先沉积而逐步减少;Hg 盐或汞齐的易挥发特性,也使其在更为暖干的环境下沉淀量减少。在本阶段的环境变化序列中,在 11.3 ka B. P. 附近出现峰值(图 3A 之 o),在 9.3 ka B. P. (图 3A 之 p) 前后出现谷值,这表明在全新世的早期,气候环境也存在波动。在 11 ka B. P. 前后罗布泊地区出现了冰后期最早的转暖期,在 9.3 ka B. P. 前后又经历了一个极端的冷事件,其后开始全面地进入全新世的温暖期。在 9.3 ka B. P. 前后出现的冷干期,在青海湖的环境变化中有明显的响应。在此期间,出现了喜冷干的唐松草在及 C、N 含量的降低都显示该时期气候变冷<sup>[15]</sup>。

### 2.3 与冰芯和深海沉积物记录的对比

当前,国内外学者已对大洋深海沉积物<sup>[22]</sup>、极地<sup>[23]</sup>和高原<sup>[24]</sup>冰芯进行了大量、综合、定量的环境指标研究,并联系到海洋-大气-陆地间的相互作用,重建了过去气候-环境的演化序列,揭示了不同历史阶段的重要冷暖事件的变化特征、周期以及相关的驱动因素,为探索区域环境演化与全球变化的潜在联系打下了基础。

如前所述,本文研究的柱样时段为 32~9 ka B. P.,包括末次冰期间冰阶(MIS3)晚期、末次盛冰期(LGM)和冰后期。该地区气候变化的多旋回特征十分明显,这一特征与高、中纬度的冰芯揭示的环境变化有相似之处。

图 3A 与图 3B 和图 3D 展示了罗布泊地区的气候变化序列与古里雅冰芯和太阳辐射量的对比<sup>[21,24]</sup>。从图中可看出古里雅冰芯和深海氧同位素的 MIS2—MIS1 阶的记录一致。深海氧同位素记录的 2 阶对应了末次冰期的盛冰期所处的冷阶段,太

阳辐射量处于低值,冰芯的氧同位素为极负值。造成的原因是气候寒冷,促使西风环流增强和南移,导致西部地区蒸发量减少,湿度增加,湖面呈现中高位置。本文所研究的罗布泊地区,其环境演化的第一阶段与此相对应,为极度冷湿期,其暖干指数为 -0.7535,为本文讨论的 4 个阶段的最低值。然而,在上节讨论中可以看出,罗布泊地区在 32~12 ka B. P. 时段,由多元地球化学指标和统计权重指标(WDI)还记录了短暂的第二(暖干)和第三阶段(冷湿)的环境变化,这可能与实验测试达到 150 年(0.15 ka B. P.),约 1% 的较高时间分辨率,以及 15 种多元指标综合地提高了对环境响应的灵敏度有关。从 11 ka B. P. 开始,古里雅冰芯进入了全新世暖期。气候转暖,融冰加快,偏负的融水优先流失,造成冰芯的氧同位素偏正<sup>[24]</sup>。罗布泊地区的环境演化的第四阶段,多元指标显示当时的气候环境进入了以暖为特征的全新世间冰期,这与古里雅在该阶段的氧同位素变正的趋势一致。

1988 年 Heinrich<sup>[25]</sup> 首先发现了北大西洋有大规模的冰川漂移,继而引发了快速的突冷事件,称为 Heinrich 事件。末次冰期(75~16 ka B. P.)以来共发生了 6 次 Heinrich 事件。此外,根据格陵兰冰芯的氧同位素记录,末次间冰期(115~14 ka B. P.)以来还出现了 24 次快速转暖事件(间冰阶),即称为 Dansgaard-Oeschger (D-O) 旋回<sup>[26]</sup>。

图 3A 和图 3C 显示,罗布泊地区在 30.51 ka B. P.、24.10 ka B. P.、16.54 ka B. P. 和 13.20~12.78 ka B. P. 时段出现了与格陵兰冰芯所对应的 H3、H2、H1 和 H0 (Younger Dryas, YD) 事件。在此时段内,罗布泊地区的统计 WDI 指数显示为负值(低值),与冰芯对应的氧同位素负值反映的气候寒冷相一致。此外,图 3A 还揭示,在罗布泊的环境变化序列中,在 27.07 ka B. P.、26.07 ka B. P.、23.74 ka B. P. 和 15.53 ka B. P. 时段,出现了突发的转暖事件,这与格陵兰冰芯记录的 IS4、IS3、IS2、IS1 的间冰阶,即 D-O 旋回的暖事件相对应<sup>[27]</sup>。

沈吉等在研究晚冰期以来青海湖的古气候演化时指出<sup>[15]</sup>,在 16.0~15.4 ka B. P.、14.1~13.7 ka B. P.、12.9~12.1 ka B. P. 时段出现了老仙女木 (Oldest Dryas)、中仙女木 (Older Dryas) 和新仙女木 (Younger Dryas) 冷期,而在 15.4~14.1 ka B. P. 和 13.7~12.9 ka B. P. 时段出现了短暂的暖期,与博令 (Bölling) 和阿勒罗得 (Allerød) 事件相对应。从罗布泊地区的环境演化序列(图 3A)可看出,在 17.4~

16.5 ka B. P.、14.9 ka B. P. 和 13.2 ~ 12.8 ka B. P. 时段出现了冷事件的低谷,与 Oldest Dryas、Older Dryas 和 Younger Dryas 对应;而在 15.5 ka B. P. 和 14.2 ka B. P. 时段出现的暖期,可能与博令(Bölling)和阿勒罗得(Allerød)事件相对应。Alley *et al.* [28] 曾指出老仙女木事件和 H1 事件发生的时间大致相同,前者出现在 14.6 ~ 17.5 ka B. P. 时期,而后者发生在 16.5 ka B. P. 时期。为此,可以把 H1 事件看成是老仙女木事件中的一次幕(episode),是对当时高纬度变冷事件作出的响应。此外,博令和阿勒罗德暖事件也与 IS1 的 D-O 暖事件相对应。

李吉均 [29] 和陈发虎等 [30] 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,新疆地区服从西风带的一般规律,冰期与雨期同步,即冰川前进与气候冷湿、湖面上升的时期相当。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。由于受到青藏高原隆升的影响,西风环流得到加强。在冰期,随着冰雪带的扩张,西伯利亚高压导致冬季风盛行,将夏季风控制的锋面雨带推向南方,使得甘肃、青海等地干冷,黄土堆积盛行;而在新疆地区,随着冰盖的扩张、西风带南移,将极地锋面雨带推向南方,给该地区带来较大的雨量。而在间冰期,西风环流北移。但是,受到青藏高原隆升的影响,太平洋和印度洋的夏季风难以涉足内陆地区,加之冰期间内陆湖水的蒸发量远高于降水量(见引言部分),造成了罗布泊地区暖干的环境格局。冯文等 [31] 认为我国西北地区地势较高,处于中纬度,受到西风带控制。无论冬夏在大尺度上主要盛行的均是西风,它是气候变化重要因素。此区降水稀少,是北半球最显著的中纬度干旱区。罗布泊地区的水热配置关系与典型的受到海洋水汽影响的季风区不同,构成了气候-环境的区域特征。

在北半球高纬度地区发生的突发冷-暖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,凸显出地球是一个完整的气候-环境系统。安芷生 [32] 指出高纬度的大气环流,可以影响到西风带的强度、位移、相位,并直接影响到我国西北地区的气候-环境变化,使其在冰期与间冰期,冷阶与暖阶得到同步的响应。同时,高纬度的大气环流,还可以南下影响到东亚季风带,并穿过赤道,影响到南半球的气候-环境格局。汪永进等 [33-34] 的研究表明,受到地球轨道的岁差驱动,

造成太阳辐射量的周期变化(图 3D)是造成全球冰期/间冰期,冷期/暖期交替变化的主要动力因素。此外,北大西洋地区出现的高频突发的冷事件(H)和暖事件(D-O),其时间尺度在数千年到数百年之间,McIntyre *et al.* [35] 用温盐环流的气候模式对此进行了解释。他们认为从墨西哥湾的表层低盐暖流北上,到达高纬度的北大西洋地区,使其变冷,成为高盐的深层海流(北大西洋深层流,NADW)向南返回,形成了全球大洋传送带。一旦当低纬度的热量传送到高纬度地区,造成大量的冰盖融化,冰漂碎屑形成,海水淡化,阻止了深层海流的形成,大洋传送带即中断。由此,低纬度的热量难以传送到高纬度地区,大气降温,环境转冷。冰盖加厚,溶冰减少,温盐环流又重新启动。这种由海洋-大气-陆地的相互作用,起到了气候高频冷/暖轮回的开关作用。这种发生在高纬度地区的气候变化,可以通过大气环流的动力过程,影响波及到全球,尤其会引发很多地方气温和降雨的大幅度变化。事实上,Heinrich 冷事件和 D-O 暖事件已影响到东亚和印度洋季风变化 [33, 34, 36],在我国高原冰川 [37],热带湖泊和南海沉积物 [38],贵州洞穴沉积物 [39-40] 中也找到了印迹。本研究从新疆罗布泊地区对高纬度突发的冷/暖事件的响应,又一次证实了 H 和 D-O 事件的全球性。

### 3 结 语

根据对罗布泊 CK-2 钻孔 0.94 ~ 10.35 m 柱样中的 15 种元素的含量测定,以及对其进行主成分的统计分析,结合质谱-铀系法定年,重建了罗布泊地区 32 ~ 9 ka B. P. 时段的环境变化序列。该序列经历了末次冰期的盛冰期所对应的强冷湿期(阶段 I)、短暂的暖干期(阶段 II)和冷湿期(阶段 III),进入了全新世的暖期(阶段 IV)。本文引入的暖干指数(WDI)值对应于阶段 I、II、III 和 IV 分别为 -0.7535、+0.6935、-0.1091 和 +0.8003,显示了罗布泊地区在不同的环境阶段所呈现的强冷湿、暖干、冷湿、到更为暖干的指数值揭示进入到全新世早期的总趋势。实测数据表明,罗布泊地区的干旱化(32 ~ 9 ka B. P.) 是以自然变率为主要特征的过程,与我们早期用磁化率、粒度、色度、碳酸盐等环境指标的研究工作结果一致 [11]。

罗布泊地区多元指标的环境序列显示,它们正处于全球末次冰期的冰盛期,经过冰后期,到全新变暖期。与深海沉积物的氧同位素阶段比较,其对应

于 MIS3 暖阶的晚期,经过 MIS2 冷阶,到 MIS1 暖阶的早期。在与高纬度格陵兰冰芯对比时发现,罗布泊地区的环境变化序列,也出现有在末次冰期间大量冰山碎屑涌入北大西洋的 Heinrich 冷事件 H3、H2、H1、以及 H0 (YD),和短尺度的 D-O 旋回暖事件 IS4、IS3、IS2 和 IS1 (间冰阶)。罗布泊沉积环境序列所对应高纬度冷事件的谷位,其暖干指数 WDI 均小于 0,而对应暖事件的峰位,WDI 指数均大于 0。在北半球高纬度地区发生的突发冷-暖事件在新疆罗布泊沉积物的记录中得到响应,表明我国西北干旱化地区的环境变化,除了具有水热配置的区域特点外,在千年—百年尺度上的环境变化也同样受到全球变化的制约。

### 参考文献 (References):

- 王苏民. 湖泊沉积的信息原理与研究趋势 [M] // 张兰生. 中国生存环境历史演变规律研究. 北京: 海洋出版社, 1993: 22-31.  
Wang Su-min. Information principle and research trend of lacustrine sediments [M] // Zhang Lan-sheng. Historical Evolution of Existence Environment in China. Beijing: China Ocean Press, 1993: 22-31 (in Chinese).
- 赵生才. 罗布泊地区环境变迁和西部干旱区未来发展 [J]. 地球科学进展, 2005, 20(8): 920-923.  
Zhao Sheng-cai. Environment evolvement of Lop Nur and the development of western arid district, China [J]. Adv Earth Sci, 2005, 20(8): 920-923 (in Chinese).
- 李红春, 朱照宇. 美国西部 Owens 湖地球化学记录及其古气候意义 [J]. 第四纪研究, 2002, 22(6): 578-588.  
Li Hong-chun, Zhu Zhao-yu. Geochemical records and their paleoclimate significance of Owens Lake, western USA [J]. Quatern Sci, 2002, 22(6): 578-588 (in Chinese with English abstract).
- 王永, 赵振宏, 林景星. 罗布泊 AK1 孔沉积物地球化学组成与古气候 [J]. 地球学报, 2004, 25(6): 653-658.  
Wang Yong, Zhao Zhen-hong, Lin Jing-xing. Paleoclimate and Geochemical composition of AK-1 core sediments in Lop Nur, Xinjiang [J]. Acta Geosci Sinica, 2004, 25(6): 653-658 (in Chinese with English abstract).
- Yang S Y, Li C X, Cai J G. Geochemical compositions of core sediments in eastern China: Implication for Late Cenozoic palaeo-environmental changes [J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2006, 229(4): 287-302.
- 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 朱育新, 孙庆义. 近四十年来山东四湖环境演化的元素地球化学记录 [J]. 地球化学, 2003, 32(5): 453-460.  
Yang Li-yuan, Shen Ji, Zhang Zu-lu, Zhu Yu-xin, Sun Qing-yi. A 40-year element Geochemical record and its environmental implication in Lake Nansihu, Shandong Province [J]. Geochimica, 2003, 32(5): 453-460 (in Chinese with English abstract).
- 刘安娜, 庞奖励, 黄春长, 王利军. 甘肃庄浪全新世黄土-古土壤序列元素分布特征及意义 [J]. 地球化学, 2006, 35(4): 453-458.  
Liu An-na, Pang Jiang-li, Huang Chun-chang, Wang Li-jun. Element distributions of the Zhuanglang Holocene loess-paleosol sequence, Gansu Province and its significance [J]. Geochimica, 2006, 35(4): 453-458 (in Chinese with English abstract).
- 杨守业, Jung Hoi-Soo, 李从先, Lim Dong-Il. 黄河、长江与韩国 Keum, Yeongsan 江沉积物常量元素地球化学特征 [J]. 地球化学, 2004, 33(1): 99-105.  
Yang Shou-ye, Jung Hoi-Soo, Li Cong-xian, Lim Dong-Il. Major element geochemistry of sediments from Chinese and Korean rivers [J]. Geochimica, 2004, 33(1): 99-105 (in Chinese with English abstract).
- 王永, 赵振宏, 严富华, 林景星, 李清海, 侯光才. 罗布泊八一泉剖面孢粉组合及意义 [J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 112-115.  
Wang Yong, Zhao Zhen-hong, Yan Fu-hua, Lin Jing-xing, Li Qing-hai, Hou Guang-cai. The spore-pollen assemblage and its significance of Baiquan profile in Lop Nur, Xinjiang [J]. Arid Land Geogr, 2000, 23(2): 112-115 (in Chinese with English abstract).
- Yan Shun, Mu Gui-jin, Xu Ying-qin. Quaternary environmental evolution of the Lop Nur region, NW China [J]. Acta Micropalaeontol Sinica, 2000, 17(2): 165-169.
- 罗超, 杨东, 彭子成, 张兆峰, 刘卫国, 贺剑峰, 张彭熹. 新疆罗布泊地区近 3.2 万年沉积物的气候环境记录 [J]. 第四纪研究, 2007, 27(1): 114-121.  
Luo Chao, Yang Dong, Peng Zi-cheng, Zhang Zhao-feng, Liu Weiguo, He Jian-feng, Zhang Peng-xi. Climatic and environmental records in the sediment of the Luobei hillabong in Lop-Nur, Xinjiang in recent 32 ka [J]. Quatern Sci, 2007, 27(1): 114-121 (in Chinese with English abstract).
- 高东林, 李秉孝, 山发寿. 新疆罗布泊罗北洼地 CK-2 孔盐类沉积特征 [J]. 盐湖研究, 2001, 19(1): 53-54, 52.  
Gao Dong-lin, Li Bing-xiao, Shan Fa-shou. Sedimentary features of minerals of the CK-2 drill in the north of Luobupo salt lake, Xinjiang province [J]. J Salt Lake Res, 2001, 19(1): 53-54, 52 (in Chinese with English abstract).
- 彭子成, 刘卫国, 张彭熹, 张兆峰, 周杰. 罗布泊湖相沉积石膏的热电离质谱-铀系定年 [J]. 科学通报, 2001, 46(9): 767-770.  
Peng Zicheng, Liu Weiguo, Zhang Pengxi, Zhang Zhaofeng, Zhou Jie. Precise timing of Lacustrine gypsum in Luobubuo, Xinjiang using the thermal ionization mass spectrometry U-series method [J]. Chinese Sci Bull, 2001, 46(18): 1538-1541.
- 吕玉晓, 李保生, 靳鹤龄, Zhang David Dian, 余雪飞. 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 [J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 136-143.  
Lü Yu-xiao, Li Bao-sheng, Jin He-ling, Zhang David Dian, Yu Xue-fei. Major element record in Salawusu river valley responding to global change during last interglacial period [J]. J Desert Res, 2004, 24(2): 136-143 (in Chinese with English abstract).
- 沈吉, 刘兴起, Matsumoto R, 王苏民, 羊向东. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化 [J]. 中国科学 (D 辑), 2004, 34(6): 582-589.  
Shen Ji, Liu Xingqi, Matsumoto R, Wang Sumin, Yang Xiangdong. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake [J]. Sci China (D), 2005, 48(6): 742-751.
- 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 黄荣贵. 洱海沉积物化学元素与古气候演化 [J]. 地球化学, 1999, 28(6): 562-570.  
Chen Jing-an, Wan Guo-jiang, Chen Zhen-lou, Huang Rong-gui. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and paleoclimate evolution [J]. Geochimica, 1999, 28(6): 562-560 (in Chinese with English abstract).
- 周启星, 黄国宏. 磷的生物地球化学循环 [M] // 周启星, 黄国宏. 环境生物地球化学及全球环境变化. 北京: 科学出版社,

- 2000: 96 - 105.
- Zhou Qi-xing, Huang Guo-hong. The biogeochemical cycle of phosphor [M] // Zhou Qi-xing, Huang Guo-hong. Environmental Biogeochemistry and Global Environmental Changes. Beijing: Science Press, 2000: 96 - 105 (in Chinese).
- [18] Wersin P, Höhener P, Giovanoli R, Stumm W. Early diagenetic influences on iron transformations in a freshwater lake sediment [J]. Chem Geol, 1991, 90(3/4): 233 - 252.
- [19] 马春梅, 朱诚, 朱光耀, 王吉怀, 黄润, 顾维玮. 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[J]. 地层学杂志, 2006, 30(2): 124 - 130.
- Ma Chun-mei, Zhu Cheng, Zhu Guang-yao, Wang Ji-huai, Huang Run, Gu Wei-wei. Magnetic susceptibility and elemental geochemistry analysis of the archaeological strata at Yuchisi site, Anhui [J]. J Stratigr, 2006, 30(2): 124 - 130 (in Chinese with English abstract).
- [20] Montaggioni L F. History of Indo-Pacific coral reef systems since the last glaciation: Development patterns and controlling factors [J]. Earth Sci Rev, 2005, 71(1/2): 1 - 75.
- [21] 邬光剑, 姚檀栋, Thompson L G, 李忠勤. 末次间冰期以来古里雅冰芯微粒记录与极地冰芯的对比[J]. 科学通报, 2004, 49(5): 475 - 479.
- Wu Guangjian, Yao Tandong, Thompson L G, Li Zhongqin. Microparticle record in the Guliya ice core and its comparison with polar records since the last interglacial [J]. Chinese Sci Bull, 2004, 49(6): 607 - 611.
- [22] Sarnthein M, Winn K, Jungs J A, Duplessy J-C, Labeyrie L, Erlenkeuser H, Ganssen G. Changes in east Atlantic deepwater circulation over the last 30000 years: Eight time slice reconstructions [J]. Paleoceanography, 1994, 9(2): 209 - 267.
- [23] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I, Barnola J-M, Basile I, Bender M, Chappellaz J, Davis M, Delaygue G, Delmotte M, Kotlyakov V M, Legrand M, Lipenkov V Y, Lorius C, Pépin L, Ritz C, Saltzman E, Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica [J]. Nature, 1999, 399(6735): 429 - 436.
- [24] Thompson L G, Yao T D, Davis M E, Henderson K A, Mosley-Thompson E, Lin P N, Beer J, Synal H A, Cole-Dai J, Bolzan J F. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core [J]. Science, 1997, 276(5320): 1821 - 1825.
- [25] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in Northeast Atlantic Ocean during the past 130000 years [J]. Quatern Res, 1988, 29(2): 142 - 152.
- [26] Dansgaard W, Clausen H B, Gunderstrup N, Hammer C U, Johnsen S F, Kristinsdottir P M, Reeh N. A new Greenland deep ice core [J]. Science, 1982, 218(4579): 1273 - 1277.
- [27] 王绍武, 谢志辉. 千年尺度气候变率的研究 [J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 143 - 153.
- Wang Shao-wu, Xie Zhi-hui. Climate variability at millennial time scales [J]. Earth Sci Front, 2002, 9(1): 143 - 153 (in Chinese with English abstract).
- [28] Alley R B, Meese D A, Shuman C A, Gow A J, Taylor K C, Grootes P M, White J W C, Ram M, Waddington E D, Mayewski P A, Zielinski G A. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event [J]. Nature, 1993, 362(6420): 527 - 529.
- [29] 李吉均. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式[J]. 第四纪研究, 1990, 10(3): 197 - 204.
- Li Ji-jun. The patterns of environmental changes since late pleistocene in northwestern China [J]. Quatern Sci, 1990, 10(3): 197 - 204 (in Chinese with English abstract).
- [30] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 杨勋林, 范育新, 赵晖. 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 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(6): 881 - 887.
- Chen Fa-hu, Huang Xiao-zhong, Yang Mei-lin, Yang Xun-lin, Fan Yu-xin, Zhao Hui. Westerly dominated Holocene climate model in arid Central Asia—Case study on Bosten Lake, Xinjiang, China [J]. Quatern Sci, 2006, 26(6): 881 - 887 (in Chinese with English abstract).
- [31] 冯文, 王可丽, 江灏. 夏季区域西风指数对中国西北地区水汽场特征影响的对比分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 271 - 275.
- Feng Wen, Wang Ke-li, Jiang Hao. Influence of westerly wind interannual change on water vapor transport over northwest China summer [J]. Plateau Meteorol, 2004, 23(2): 271 - 275 (in Chinese with English abstract).
- [32] An Z S. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate [J]. Quatern Sci Rev [J]. 2000, 19(1 - 5): 171 - 187.
- [33] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, An Z S, Wu J Y, Shen C C, Dorale J A. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China [J]. Science, 2001, 249(5550): 2345 - 2348.
- [34] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, He Y Q, Kong X G, An Z S, Wu J Y, Kelly M J, Dykoski C A, Li X D. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and north Atlantic climate [J]. Science, 2005, 308(5723): 854 - 857.
- [35] McIntyre A, Molino B. Forcing of Atlantic equatorial and subpolar millennial cycles by precession [J]. Science, 1996, 274(5294): 1867 - 1870.
- [36] Schultz H, von Rad U, Erlenkeuser H, von Rad U. Correlation between Arabian Sea and Greenland climate oscillations of the past 110 000 years [J]. Nature, 1998, 393(6680): 54 - 57.
- [37] 姚檀栋. 末次冰期青藏高原的气候突变——古里雅冰芯与格陵兰 GRIP 冰芯对比研究[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(2): 175 - 184.
- Yao Tandong. Abrupt climatic changes on the Tibetan Plateau during the Last Ice Age—Comparative study of the Guliya ice core with the Greenland GRIP ice core [J]. Sci China (D), 1999, 42(4): 358 - 368.
- [38] 秦蕴珊, 李铁刚, 苍树溪. 末次间冰期以来地球气候系统的突变[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 243 - 250.
- Qin Yun-shan, Li Tie-gang, Cang Shu-xi. Abrupt changes in Earth's climate system since last interglacial [J]. Adv Earth Sci, 2000, 15(3): 243 - 250 (in Chinese with English abstract).
- [39] 彭子成, 张兆峰, 蔡演军, 张美良, 林玉石, 刘桂建. 贵州七星洞晚更新世晚期石笋的古气候环境记录 [J]. 第四纪研究, 2002, 22(3): 273 - 282.
- Peng Zi-cheng, Zhang Zhao-feng, Cai Yan-jun, Zhang Mei-liang, Lin Yu-shi, Liu Gui-jian. The paleoclimatic records from the late Pleistocene stalagmite in Guizhou Qixing cave [J]. Quatern Sci, 2002, 22(3): 273 - 282 (in Chinese with English abstract).
- [40] 张美良, 程海, 林玉石, 覃嘉铭, 张会领, 涂琳玲, 王华, 冯玉梅. 贵州荔波 1.5 万年以来石笋高分辨率古气候环境记录 [J]. 地球化学, 2004, 33(1): 65 - 74.
- Zhang Mei-liang, Cheng Hai, Lin Yu-shi, Qin Jia-ming, Zhang Hui-ling, Tu Lin-ling, Wang Hua, Feng Yu-mei. High resolution paleoclimatic environmental records from a stalagmite of Dongge Cave since 15000 a in Libo, Guizhou Province, China [J]. Geochimica, 2004, 33(1): 65 - 74 (in Chinese with English abstract).