

## 内蒙古察干淖尔盐湖 29—8 ka 时段的湖面波动\*

斯琴毕力格<sup>1,2</sup>, 春 喜<sup>1,3\*\*</sup>, 宋 洁<sup>1,2</sup>, 白雪梅<sup>1,2</sup>

(1: 内蒙古师范大学蒙古高原环境与全球变化自治区重点实验室, 呼和浩特 010022)

(2: 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022)

(3: 内蒙古师范大学湿地环境与修复自治区工程实验室, 呼和浩特 010022)

**摘 要:** 以内蒙古锡林郭勒盟苏尼特右旗的察干淖尔盐湖为研究对象, 利用 OSL (Optically Stimulated Luminescence) 测年技术和 DEM (Digital Elevation Model) 数字高程模型, 重建湖面波动历史, 探讨湖泊形成与环境变化过程. 通过对察干淖尔盐湖周边大量的野外考察, 发现湖泊周围存在海拔高程为 1020、978 和 973 m 的三级古湖岸阶地, 其 OSL 测年结果分别为  $29.2 \pm 1.3$ 、 $18.4 \pm 0.8$  及  $8.2 - 8.0$  ka. 通过湖岸阶地高程恢复的上述 3 个时期的古湖面积分别为 3600、500 和 400 km<sup>2</sup>. 与现今的干旱盐湖景观迥然不同.

**关键词:** 季风边缘区; 湖泊演化; OSL 测年技术; DEM 模型; 察干淖尔盐湖

## Lake level fluctuation in Qehan Salt Lake during 29 – 8 ka, Inner Mongolia

SIQIN Bilige<sup>1,2</sup>, CHUN Xi<sup>1,3\*\*</sup>, SONG Jie<sup>1,2</sup> & BAI Xuemei<sup>1,2</sup>

(1: Key Laboratory of Mongolian Plateau Environment and Global Change, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P.R.China)

(2: College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P.R.China)

(3: Inner Mongolia Repair Engineering Laboratory of Wetland Eco-environment System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, P.R.China)

**Abstract:** Choosing Qehan Salt Lake in Inner Mongolia and using (Optically Stimulated Luminescence, OSL) dating techniques and digital elevation model (DEM), this research reconstructs the history of lake level fluctuation, and discusses the process of lake form and environment evolution. According to the field work in the area around Qehan Salt Lake and samples of lake sediment, the elevations of 3-level paleolake terraces are 1020 m, 978 m and 973 m. Using OSL dating techniques to detect the age of lake sediment and establish the time series of lake fluctuation, the ages of 3-level paleolake terraces are  $29.2 \pm 1.3$  ka,  $18.4 \pm 0.8$  ka and  $8.2 - 8.0$  ka. ArcGIS software was used to track 3-level terraces in the topographic map of 1:50000 and construct DEM, the scope and level of paleolake in every period. The spatial distribution pattern of the lake evolution has been reconstructed. The lake area was 3600 km<sup>2</sup>, 500 km<sup>2</sup> and 400 km<sup>2</sup>, respectively, which was very different from today's arid salt lake landscape.

**Keywords:** Monsoon marginal zone; lake evolution; OSL dating techniques; DEM model; Qehan Salt Lake

湖泊沉积在重建陆地古气候环境演化序列, 进行区域和全球对比研究中扮演着十分重要的角色<sup>[1]</sup>, 对其研究也已经成为过去全球变化的重要研究领域之一<sup>[2]</sup>. 内陆封闭湖泊沉积作为气候与环境变迁的忠实记录者, 记录了大量的环境变化信息, 因此湖泊演化研究备受关注<sup>[3-4]</sup>. 对此, 国内外众多学者已经进行了大量研究. 研究表明, 末次冰期期间 35—21 ka 以及全新世 8.5 ka 时期腾格里沙漠古湖泊曾出现过高湖面, 在 35—21 ka 阶段湖泊面积高达 20000~32000 km<sup>2</sup>, 形成巨大的“腾格里古湖泊”<sup>[5]</sup>. 极端干旱的巴丹吉林沙漠

\* 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (2012CB426508)、国家自然科学基金项目 (41261008) 和内蒙古草原英才项目 (CYC2013103) 联合资助. 2015-07-25 收稿; 2015-10-29 收修改稿. 斯琴毕力格 (1990~), 男, 硕士研究生; E-mail: 674475162@qq.com.

\*\* 通信作者; E-mail: chunxi@imnu.edu.cn.

在 MIS 3 阶段末期曾发育大面积的淡水湖泊<sup>[6-7]</sup>,在全新世 11 ka 时期该地区湖泊再次发育,出现次一级高湖面<sup>[8]</sup>,暗示存在大范围的湿润气候环境<sup>[9]</sup>. 19.1 ka 和 8.6—7.7 ka 时期乌兰布和沙漠腹地出现过高湖面,当时的乌兰布和存在与现在的沙漠截然不同的水域环境<sup>[10-11]</sup>. 在全新世早期位于季风边缘区的岱海<sup>[12-14]</sup>、黄旗海<sup>[15-17]</sup>以及呼伦湖<sup>[18]</sup>也曾出现过不同程度的高湖面现象. 同样是季风边缘区的察干淖尔盐湖是否存在过高湖面,何时出现高湖面是值得进一步研究的科学问题. 本文将以湖泊沉积物为研究对象,探讨察干淖尔盐湖 29 ka 以来的古气候古环境演化. 以此可为中国北方季风边缘区湖泊沉积研究提供一个有益的补充,这对区域环境演变也很有意义.

1 研究区概况

察干淖尔盐湖(43°13′~43°16′N, 112°50′~112°53′E)位于内蒙古自治区锡林郭勒盟苏尼特右旗,也处于著名的二连盆地的乌兰察布坳陷中部(图 1a). 根据 1951—2010 年苏尼特右旗气象站点的资料统计,其多年平均气温约为 4.5℃,日极端最高气温为 37.8℃,日极端最低气温达到-32.4℃,年平均降水量约 175.8 mm,年最大降水量为 342.9 mm,蒸发作用很强,年蒸发量为 2529.7~3046.6 mm.

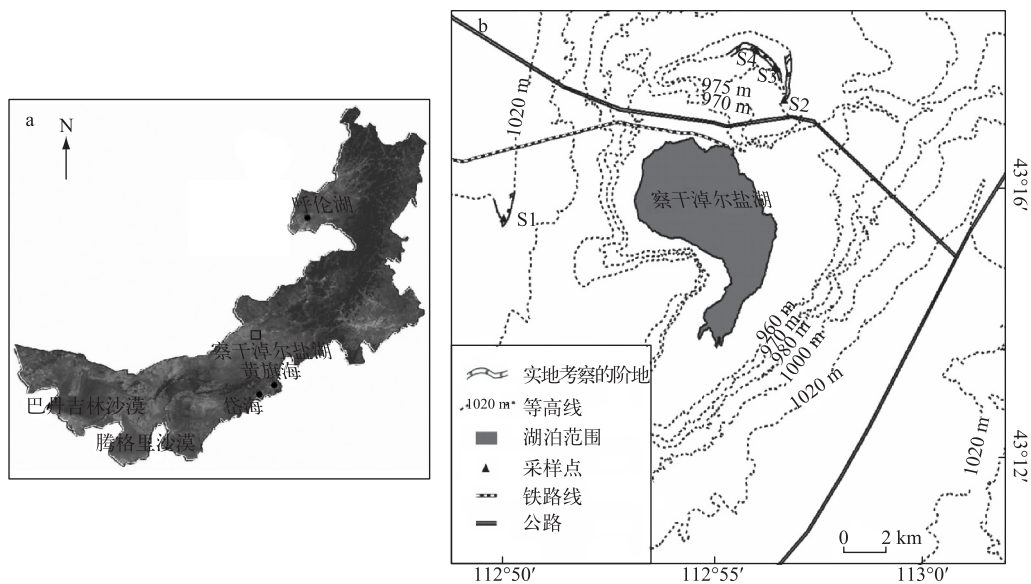


图 1 察干淖尔盐湖湖岸阶地分布(a:内蒙古位置;b:察干淖尔湖泊位置)  
Fig.1 Lake terraces' distribution of the Qehan Salt Lake

2 研究方法

对察干淖尔盐湖进行一系列实地考察,确认盐湖周围实际存在的湖岸阶地,采用研究区 1:50000 的地形图,判读高程,并结合 Google Earth 影像得到准确的阶地高程. 再从各级湖岸阶地采集 OSL 样品,样品采集选用直径 3 cm、长度 35 cm 的不锈钢钢管为样品采集器,确保避光采集、封存(图 2). 选择这些典型的湖岸阶地剖面样品(图 1b),通过 OSL 测年技术测出其年龄,建立湖面波动历史的时间序列.

2.1 OSL 测试

本文采用 OSL 定年技术测定样品年龄,样品制备和测试的整个过程依据祝嵩等<sup>[19]</sup>的方法,在装置有微弱红光灯的暗室里按规范的操作程序进行. 样品年龄测定在中国科学院青海盐湖研究所和中国科学院地质研究院光释光实验室完成,结果表明,湖岸阶地的年代序列从高到低逐渐变年轻,高低湖岸阶地和上下采样点之间的年龄没有发生倒转现象(表 1). 某种程度上表明湖滨沉积物 OSL 年代的可靠性.



图 2 湖岸阶地及贝壳体(a、b 为 1020 m 湖岸阶地,c 为 973 m 湖岸阶地,d 为贝壳体的照片)

Fig.2 Photos of lake terraces and the shell of the study area

2.2 DEM 的建立

DEM 以缩微的形式表现了地表形态起伏变化特征,具有形象、直观、精确等特点,是研究湖泊面积变化的重要方法,其应用可遍及整个地学领域<sup>[18,20]</sup>. 本文通过对察干淖尔盐湖周围进行一系列野外调查,确认其存在的各级湖岸阶地,在此基础上,使用 ArcGIS 软件,以研究区 1:50000 的地形图为底图,手动进行数字化,得出察干淖尔盐湖盆地的 DEM,以便于更直观地显示察干淖尔盐湖演化的空间格局. 通过与实地调查地形地貌情况对比可知,DEM 较好地模拟了真实的地面信息.

表 1 察干淖尔盐湖岸阶地沉积物 OSL 测年数据

Tab.1 OSL dating data of shoreline sediments in Qehan Salt Lake

采样点	高程/m	采样时间	OSL 年代/ka
S1	1020	2013 年	29.2±1.3
S3	978	2013 年	18.4±0.8
S4	978	2013 年	18.3±0.8
S2	973,970	2013 年	顶部 8.0±0.4,底部 8.2±0.5

3 湖岸阶地的分布

察干淖尔盐湖所在地周围存在海拔高程为三级古湖岸阶地,主要分布在盐湖的东北和西侧(图 1b). 这些在不同地点发育的湖岸阶地和湖滨沉积物是察干淖尔古湖面演化的重要证据,证明该湖 29 ka 以来的湖面波动,经历很大的萎缩过程.

T1 阶地:盐湖东西两侧间段分布着海拔高程为 1020 m 的湖岸阶地,其中盐湖西侧的沙嘴是最具有代表性的阶地,发育在 S1 采样点处(图 1). 该沙嘴呈南北走向,剖面点湖滨砂砾石沉积厚度达到 6 m,层理发育,并且砂砾石层中存在大量的贝壳体. 该层顶部的湖滨砂砾石的 OSL 年代为 29.2±1.3 ka. 这些都较好地证明了当时的湖面高度达到过此处.

T2 阶地:湖东北约 4 km 处发育呈东南—西北方向,表面平坦,受破坏程度较小.海拔高程为 978 m,阶地表

面分布着颗粒较小的砂砾石,最宽的部位有 30 m,长度大约 1 km. 在该阶地挖掘了 S3、S4 两个剖面(图 1). S3 剖面深度为 80 cm,由湖滨砂砾石组成,在 40 cm 深处采集 OSL 样品,其年代为  $18.4 \pm 0.8$  ka. S4 剖面深度为 120 cm,剖面上层 80 cm 为水平层理发育的湖滨砂砾石,下层为粉细砂层,从上层 40 cm 处采集样品,OSL 年龄为  $18.3 \pm 0.8$  ka. 据此推测 18 ka 前后该湖发育高湖面.

T3 阶地:该阶地是一个呈南北走向的沙嘴. 沙嘴长约 1 km,海拔高程为 973 m,最宽处有 35 m. S2 剖面点发育在沙嘴顶部(图 1). 该剖面上层以灰白色细砂为主,其 OSL 年代为  $8.0 \pm 0.4$  ka,下层为浅黄色细砂,OSL 年龄为  $8.2 \pm 0.5$  ka. 明显的层理发育也表明了察干淖尔盐湖在全新世中期也发育高湖面.

## 4 结果与讨论

### 4.1 时间序列

OSL 测年结果表明察干淖尔古湖于 29.2、18.4 以及 8.2 ka 时期发育高湖面.(1)位于盐湖西侧剖面点 S1 的顶部湖滨砂砾石的年代为 29.2 ka,应属 MIS3 晚期的高湖面,研究区气候较现代湿润,流域降水量大,湖泊水位比现在的湖面高出约 70 m,面积达  $3600 \text{ km}^2$ . (2)从 S3 和 S4 处采集的样品年龄可知,该阶地形成年代为 18.4 ka,属于冰消期高湖面.(3)从盐湖东北 S2 砂场处采取上、下 2 个样品,其剖面顶部 OSL 年代为 8.0 ka,底部为 8.2 ka,这时古湖泊形成了更次一级的早全新世高湖面.

在 MIS3 晚期,察干淖尔古湖水位较高,这与毗邻地区的湖泊水位变化具有一致性. 譬如黄旗海<sup>[16,21]</sup>、腾格里沙漠<sup>[22]</sup>和巴丹吉林沙漠<sup>[23]</sup>在此时段内均发育高湖面. 青藏高原亦是如此,在 47—20 ka 时段,青藏高原降水量普遍增加,甜水海高湖面从 45 ka 延续至 25 ka<sup>[24]</sup>,为淡水湖泊,降水量较多;班公错在约 29 ka 时期也存在高湖面<sup>[24]</sup>,但是 29 ka 以后因为补水减少,湖泊开始衰退;以及察尔汗湖在 38—28 ka 时段内湖泊范围巨大,为水质较淡的大湖泊<sup>[24]</sup>. 施雅风等的综合研究也表明 40—30 ka 中国全境出现比现在暖湿得多的气候环境,而且西部的增温与降水比东北部的更加强烈<sup>[25]</sup>. 甚至蒙古国的 Boon Tsagann Nuur、Tsagann Nuur 和 Orog Nuur 等湖泊在 MIS3 阶段水位普遍上涨<sup>[10]</sup>. 可以认为,当察干淖尔古湖在 29.2 ka 前后发育高湖面时,中国西北部甚至中亚干旱、半干旱区在此时均可能存在多个巨型淡水、深水古湖泊,其原因或动力很可能是岁差周期变化造成的日射值增加,从而加强西南和东南两个方向的夏季风和西方来的西风的吸引作用<sup>[25]</sup>.

T2 级阶地形成年龄为 18.4 ka,属于冰消期高湖面. 末次冰期总体干冷的气候条件下,察干淖尔古湖曾出现过高湖面,气候比较湿润的现象. 这与邻近地区相比较,只有巴丹吉林沙漠约在 20 ka 时期气候比较湿润,降水量多<sup>[23]</sup>. 但黄旗海<sup>[16,21]</sup>以及腾格里沙漠<sup>[22]</sup>等很多地区均表现为寒冷、干旱的特征(图 3). 察干淖尔盐湖在 18.4 ka 时期出现高湖面的可能原因是,尽管冬季风占主导地位,然而在短时期内夏季风也很强盛,其强度甚至超过现代<sup>[23]</sup>. 一定时期内该区域降水量可能达到过很高程度.

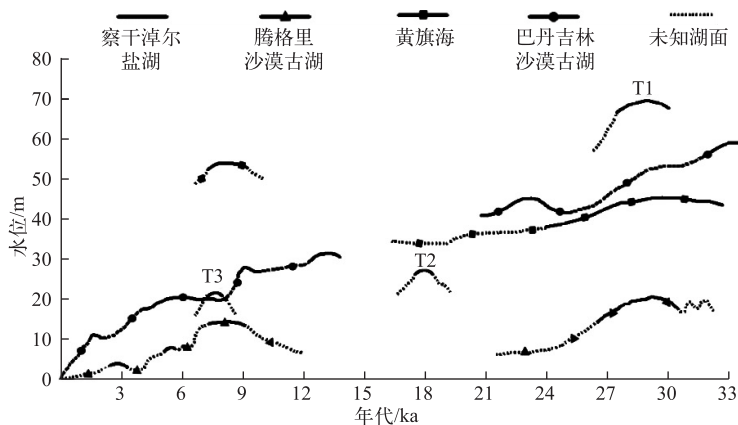


图 3 察干淖尔盐湖与邻近湖泊环境情况区域对比

Fig.3 Comparison of the environment between Qehan Salt Lake and the adjacent lakes



全新世 8.2—8.0 ka 时段的高湖面与西北地区东南部广泛存在的高湖面证据<sup>[28]</sup>相吻合,如季风边缘区的呼伦湖<sup>[27]</sup>、岱海<sup>[12-13,32]</sup>、腾格里沙漠渚野泽<sup>[28]</sup>和青土湖<sup>[29-30]</sup>都经历湖面扩张的大湖期。巴丹吉林沙漠中的湖泊早全新世水体盐度变低,水位普遍升高<sup>[31]</sup>。凡此均指示早全新世时期西北地区湖泊开始扩张的特征。不少研究印证该时期西北大部分地区气候湿润<sup>[33]</sup>。关于该时期气候湿润的原因,一些学者认为全新世初期夏季太阳辐射达到鼎盛,造成海陆温差加大,亚洲季风增强,冬夏季风相互作用的极锋位置显著北推<sup>[25]</sup>。数值模拟结果表明,在 9.3 ka 时期东亚季风盛行<sup>[33]</sup>,也在一定程度印证了这一观点。

4.2 空间分布格局

湖面波动是气候变化的环境响应,对气候变化的指示意义也比较直接<sup>[24]</sup>。察干淖尔盐湖周围存在的三级湖岸阶地以及湖泊沉积物是察干淖尔古湖存在和演化的重要证据,以此来反演察干淖尔古湖各时期的面积变化(图 4)。

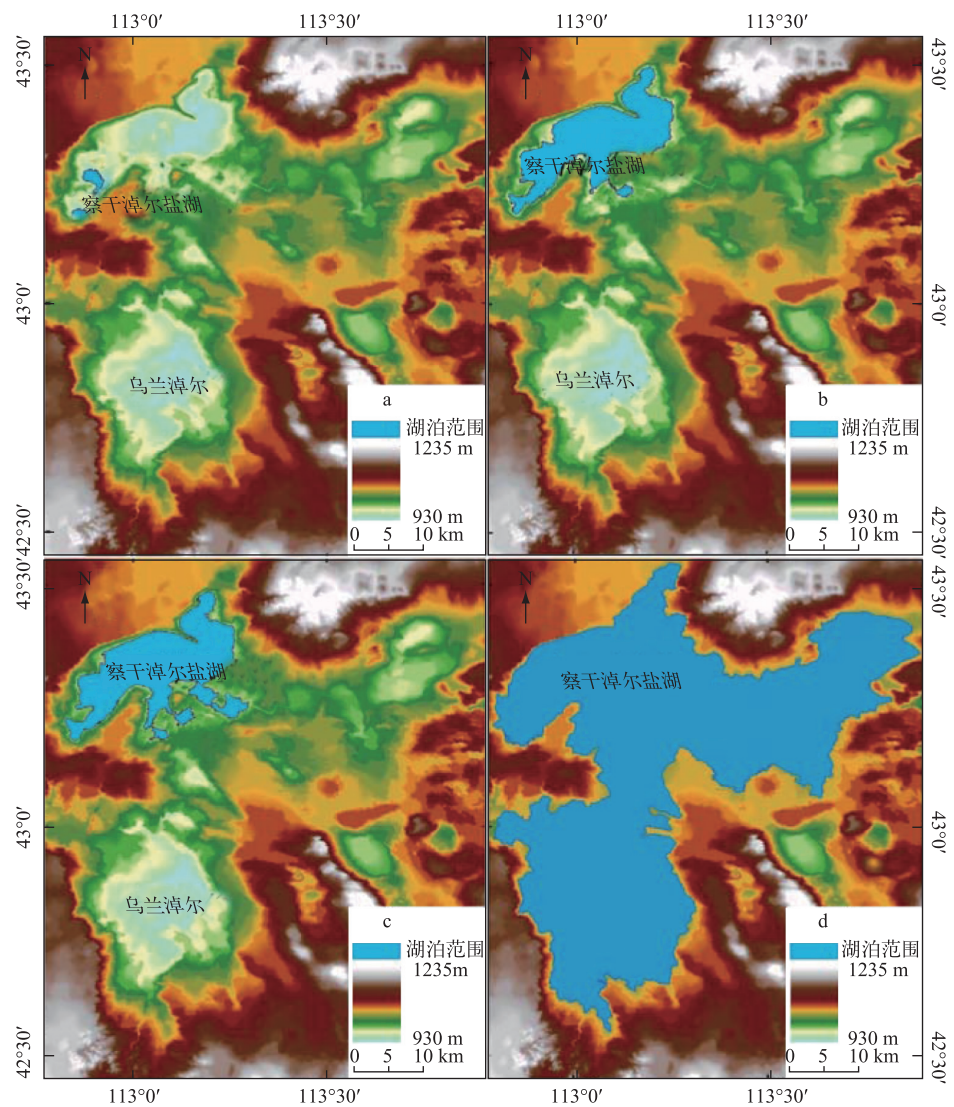


图 4 不同时期察干淖尔盐湖面积及周围 DEM 图  
(a: 现存盐湖;b: 8.2 ka 时期的古湖泊;c: 18.0 ka 时期的古湖泊;d: 29.0 ka 时期的古湖泊)  
Fig.4 Area of Qehan Salt Lake in different periods and DEM

根据 1020 m 的湖岸阶地进行高程推测得到古湖范围(图 4d). 该湖岸阶地连续性好, 在盐湖西侧和东侧均有良好的发育, 其沉积物的 OSL 年代为 29.2 ka. 此时的湖面包含研究区现存的盐湖、东北方向的呼和淖尔湖泊以及南边的查干淖尔、乌兰淖尔等湖泊群. 面积约达到 3600 km<sup>2</sup> 左右, 是 MIS3 晚期形成的巨大的古湖泊.

29.2 ka 时期的湖面, 由 978 m 湖岸阶地高程复原的湖泊面积为 500 km<sup>2</sup> (图 4c). 当时湖泊已经与南边的查干淖尔、乌兰淖尔等湖泊群解体, 只包含了现存的盐湖以及东北方向的呼和淖尔, 形成了次一级高湖面. 相比 29.2 ka 时期的古湖泊面积已大大缩小.

8.2—8.0 ka 时期的湖面, 追踪 973 m 的等高线得出其当时的湖泊面积为 400 km<sup>2</sup> (图 4b). 包含现存的盐湖以及东北方向的呼和淖尔湖泊, 形成了更次一级高湖面. 同时期的巴丹吉林沙漠<sup>[30]</sup> 和腾格里沙漠古湖<sup>[31]</sup> 发育了大范围湖相沉积. 在全新世 8.6—7.0 ka 时期盐海子、岱海和白碱湖以及河西走廊等地区均出现了高湖面, 指示了当时相对湿润的气候环境<sup>[32-33]</sup>. 因此, 在季风边缘区大范围的湿润环境背景下, 区域降水量增加可能是在 8.2—8.0 ka 阶段察干淖尔湖发育古湖泊和高湖面的重要原因.

## 5 结论

1) 通过野外考察发现, 在察干淖尔盐湖周围存在三级古湖岸阶地, 不仅是高湖面存在和发育的重要证据, 也是气候变化的重要标志, 能够反映区域环境变化过程.

2) 三级湖岸阶地的湖滨沉积物的 OSL 年代分别为 29.2±1.3、18.4±0.8 和 8.2 ka, 各时期的古湖泊面积分别为 3600、500 和 400 km<sup>2</sup>, 呈现逐渐萎缩的过程. 29.2 ka 时期察干淖尔古湖是与北部的呼和淖尔以及南部的查干淖尔、乌兰淖尔等湖泊群相连接的巨大的古湖泊. 在 18.4 ka 左右, 湖泊面积已极度缩小, 这时察干淖尔湖泊与南部的乌兰淖尔、查干淖尔等湖泊群已经解体. 到全新世 8.2 ka 时期, 湖泊进一步萎缩, 形成全新世更次一级高湖面, 之后逐渐演变为现在的湖泊格局.

3) 察干淖尔盐湖年代数据揭示的气候环境演化与周边区域环境变化记录基本一致, 较好地响应了区域环境气候变化.

## 6 参考文献

- [1] Zhou Jie, Shen Ji eds. Study on the environmental evolution process in the west China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2007: 79 (in Chinese). [周杰, 沈吉. 中国西部环境演变过程研究. 北京: 科学出版社, 2007: 79.]
- [2] Zhang Jiawu, He Jing, Chen Shuo *et al.* Applications of non-marine ostracods in quaternary paleoenvironment—Advances and problems in fossil assemblages. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(11): 1229-1237 (in Chinese with English abstract). [张家武, 何晶, 陈硕等. 第四纪湖相介形类壳体化石在古环境中的应用——种属组合研究进展与问题. 地球科学进展, 2009, **24**(11): 1229-1237.]
- [3] Chen FH, Fan YX, Chun X. Preliminary research on Megalake Jilantai-Hetao in the arid areas of China during the Late Quaternary. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(11): 1725-1739.
- [4] Liu Xingqi, Shen Ji, Wang Sumin *et al.* Pollen records since 16 ka and paleoclimatic paleoenvironmental evolution of the Qinghai Lake. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(17): 1351-1355 (in Chinese with English abstract). [刘兴起, 沈吉, 王苏民等. 青海湖 16 ka 以来的花粉记录及其古气候古环境演化. 科学通报, 2002, **47**(17): 1351-1355.]
- [5] Zhang HC, Peng JL, Ma YZ *et al.* Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, **211**: 45-58.
- [6] Yang XP, Liu TS, Xiao HL. Evolution of megadunes and lakes in the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China during the last 31000 years. *Quaternary International*, 2002, **104**: 92-102.
- [7] Guo YJ, Li BS, Wen XH. Holocene climate variation determined from rubidium and strontium contents and ratios of sediments collected from the Badain Jaran Desert, Inner Mongolia, China. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2014, **74**(4): 571-576.
- [8] Yang XP, Ma NM, Dong JF *et al.* Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China. *Quaternary Research*, 2010, **73**: 10-19.
- [9] Liu Ziting, Yang Xiaoping, Zhu Bingqi. Reinterpretation of the chronological data of palaeo-environmental records in the

- Badain Jaran Desert and reconstruction of the Holocene climatic changes. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(5): 926-933(in Chinese with English abstract). [刘子亭, 杨小平, 朱秉启. 巴丹吉林沙漠全新世环境记录的年代校正与古气候重建. 第四纪研究, 2010, **30**(5): 926-933.]
- [10] Chun Xi, Chen Fahu, Fan Yuxin *et al.* Evidence of palaeolake existence in Ulan Buh Desert and its environmental evolution. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(3): 340-348(in Chinese with English abstract). [春喜, 陈发虎, 范育新等. 乌兰布和沙漠腹地古湖存在的沙嘴证据及环境意义. 地理学报, 2009, **64**(3): 340-348.]
- [11] Chen FH, Li GQ, Zhao H *et al.* Landscape evolution of the Ulan Buh Desert in northern China during the Late Quaternary. *Quaternary Research*, 2014, **81**: 476-487.
- [12] Wang SM, Feng M. The relationship between environment change and SE monsoon strength, Daihai Lake Inner Mongolia. *Science in China: Series B*, 1992, **35**(6): 722-734.
- [13] Peng YJ, Xiao JL, Nakamura T *et al.* Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **233**: 467-479.
- [14] Liu Qingsi, Li Huazhang. The Holocene environmental evolution and its development utilization of Daihai Lake. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1989, **3**(3): 33-45(in Chinese with English abstract). [刘清泗, 李华章. 岱海湖盆全新世环境演变及其开发利用. 干旱区资源与环境, 1989, **3**(3): 33-45.]
- [15] Li Shuanke, Wang Tao. Study on fluctuations of closed lake level of Huangqihai Lake in Inner Mongolia since Holocene. *J Lake Sci*, 1993, **5**(4): 325-334(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/1993.0405. [李栓科, 王涛. 全新世内蒙南缘黄旗海湖面的波动. 湖泊科学, 1993, **5**(4): 325-334.]
- [16] Xu Jiajia, Jia Yulian, Lai Zhongping. Climate variations during early to Mid-Holocene in Huangqihai Lake in Northern China based on the lake deposit analysis. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, **30**(4): 732-739(in Chinese with English abstract). [徐佳佳, 贾玉连, 赖忠平等. 黄旗海湖泊沉积记录的早中全新世大湖期环境的差异性. 沉积学报, 2012, **30**(4): 732-739.]
- [17] Zhang JR, Lai ZP, Jia YL. Luminescence chronology for late Quaternary lake levels of enclosed Huangqihai Lake in East Asian monsoon marginal area in northern China. *Quaternary Geochronology*, 2010, **10**: 123-128.
- [18] Wang Sumin, Ji Lei. Sedimentology of Late Quaternary lacustrine deposits and history of lake level fluctuation in Hulun Lake. *J Lake Sci*, 1995, **7**(4): 298-306(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/1995.0402. [王苏民, 吉磊. 呼伦湖晚第四纪湖相地层沉积学及湖面波动历史. 湖泊科学, 1995, **7**(4): 298-306.]
- [19] Zhu Song, Wu Zhenhan, Zhao Xitao *et al.* The age of glacial dammed lakes in the Yarlung Zangbo River Grand Bend during Late Quaternary by OSL. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, **34**(2): 246-250(in Chinese with English abstract). [祝嵩, 吴珍汉, 赵希涛等. 用 OSL 方法确定雅鲁藏布江大拐弯第四纪晚期冰川堰塞湖年龄. 地球学报, 2013, **34**(2): 246-250.]
- [20] Xue B, Qu WC, Wang SM *et al.* Lake level changes documented by sediment properties and diatom of Hulun Lake, China since the late Glacial. *Hydrobiologia*, 2003, **498**(1/2/3): 133-141.
- [21] Shen Hongyuan, Jia Yulian, Wei Ling. Paleoprecipitation reconstruction during the Interstadial of the Last Glacial (40-22 ka BP) in Huangqihai Lake, Inner Mongolia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, **23**(3): 524-530(in Chinese with English abstract). [申洪源, 贾玉莲, 魏灵. 末次冰器间冰阶(40—22 kaBP)内蒙古黄旗海古降水量研究. 沉积学报, 2005, **23**(3): 524-530.]
- [22] Zhang Hucai, Wünnemann B. Preliminary study on the chronology of lacustrine deposits and determination of high palaeo-lake level in Tengger Desert since Late Pleistocene. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 1997, **33**(2): 87-91(in Chinese with English abstract). [张虎才, Wünnemann B. 腾格里沙漠晚更新世以来湖相沉积年代学及高湖面期的初步确定. 兰州大学学报: 自然科学版, 1997, **33**(2): 87-91.]
- [23] Yang Xiaoping. Landscape evolution and precipitation changes of Badan Jilin desert in recent 30 thousand years. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(4): 428-434(in Chinese with English abstract). [杨小平. 近 3 万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化. 科学通报, 2000, **45**(4): 428-434.]
- [24] Li Bingyuan. The last greatest lakes on the Xizang (Tibetan) Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(2): 175-182(in Chinese with English abstract). [李炳元. 青藏高原大湖期. 地理学报, 2000, **55**(2): 175-182.]
- [25] Shi Yafen, Liu Xiaodong, Li Bingyuan. Strong summer monsoon events and its relationship with the precession cycle in Xi-

- zang (Tibetan) Plateau about 40-30 ka. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(14): 1475-1480 (in Chinese with English abstract). [施雅风, 刘晓东, 李炳元. 距今 40—30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系. 科学通报, 1999, **44**(14): 1475-1480.]
- [26] Zhu Yan, Chen Fahu, Madsen BD. Pollen record and its environmental significance of Shiyang River Basin in the early Holocene. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(19): 1596-1602 (in Chinese with English abstract). [朱艳, 陈发虎, Madsen BD. 石羊河流域早全新世湖泊孢粉记录及其环境意义. 科学通报, 2001, **46**(19): 1596-1602.]
- [27] Zhang Zhen, Wang Sumin. Paleoclimate significance of lake level fluctuation, peat development and eolian sand-paleosol series in Hulun Lake Area during past 13 ka. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, **14**(3): 57-59 (in Chinese with English abstract). [张振, 王苏民. 13ka 以来呼伦湖湖面波动与泥炭发育、风沙—古土壤序列的比较及其古气候意义. 干旱区资源与环境, 2000, **14**(3): 57-59.]
- [28] Li Yu, Zhou Xuehua, Li Zhuolun *et al.* Relationship between pollen assemblages and organic geochemical proxies in the Zhuyeze palaeo-lacustrine basin sediments and its response to climate change. *Journal of Desert Research*, 2013, **33**(1): 88-93 (in Chinese with English abstract). [李育, 周雪花, 李卓仑等. 猪野泽沉积物有机地球化学指标与花粉组合的关系及其对环境变化的响应. 中国沙漠, 2013, **33**(1): 88-93.]
- [29] Wang Liyuan, Chengjie, Xin Wei *et al.* Changes of sedimentary environment since Late Middle Pleistocene of Qingtu Lake in northwestern margin of Tengger Desert. *Geoscience*, 2013, **27**(4): 950-958 (in Chinese with English abstract). [王丽媛, 程捷, 辛蔚等. 腾格里沙漠西北缘青土湖中更新世晚期以来沉积环境变迁. 现代地质, 2013, **27**(4): 950-958.]
- [30] Yan Mancun, Dong Guangrong, Li Baosheng *et al.* A preliminary study on the evolution of southeastern margin in Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 1998, **18**(2): 111-117 (in Chinese with English abstract). [阎满存, 董光荣, 李保生等. 腾格里沙漠东南缘沙漠演化的初步研究. 中国沙漠, 1998, **18**(2): 111-117.]
- [31] Dong Guangrong, Gao Quanzhou, Zou Xueyong *et al.* Climate change of south margin in Badan Jilin desert since Late Pleistocene. *Chinese Science Bulletin*, 1995, **40**(13): 1215-1218 (in Chinese with English abstract). [董光荣, 高全洲, 邹学勇等. 晚更新世以来巴丹吉林沙漠南缘气候变化. 科学通报, 1995, **40**(13): 1215-1218.]
- [32] Wang Sumin, Wu Ruijin, Jiang Xinhe. Environment evolution and palaeoclimate of Daihai Lake, Inner Mongolia since the Last Glaciation. *Quaternary Sciences*, 1990, **3**: 224-232 (in Chinese with English abstract). [王苏民, 吴瑞金, 蒋新禾. 内蒙古岱海末次冰期以来的环境变迁与古气候. 第四纪研究, 1990, **3**: 224-232.]
- [33] Yu Ge. Reviews of modelings of green-house climate and ice-age transformation in the Early Cenozoic. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(4): 370-375 (in Chinese with English abstract). [于革. 早新生代温室气候及冰期气候转型的模拟研究. 地球科学进展, 2007, **22**(4): 370-375.]