

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0070

WANG Kunyng, FENG Jinliang, PEI Lele, et al. Reconstruction of anomalously high lake level of Lake Nam Co on the Tibetan Plateau: a review and perspectives[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(3):930-939. [王琨莹, 冯金良, 裴乐乐, 等. 青藏高原纳木错异常高湖面重建工作研究进展与展望[J]. 冰川冻土, 2023, 45(3):930-939.]

青藏高原纳木错异常高湖面重建工作 研究进展与展望

王琨莹^{1,2}, 冯金良¹, 裴乐乐^{1,2}, 胡海平³, 陈 锋⁴,
林永崇⁵, 张继峰^{6,7}, 胡兆国⁸

(1. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013;
4. 山西财经大学 资源环境学院, 山西 太原 030006; 5. 闽南师范大学 历史地理学院, 福建 漳州 363500; 6. 西藏大学
青藏高原生物多样性与生态环境保护教育部重点实验室, 西藏 拉萨 850000; 7. 西藏大学 环境DNA与生态
安全实验室, 西藏 拉萨 850000; 8. 中国冶金地质总局 山东正元地质勘查院, 山东 济南 250013)

摘 要: 青藏高原的许多湖泊发育有湖岸线、侵蚀阶地和高湖面沉积物, 这些地貌和沉积单元是反映地质历史时期湖面变化的直接地貌和岩性证据。它们不仅反映了湖泊水文变化历史, 还可作为揭示区域乃至全球环境变化的重要载体。在青藏高原众多湖泊中, 纳木错最具典型性和代表性。纳木错湖岸最高古湖相沉积物位于现代湖面之上约150 m, 高出当今溢流垭口约123 m。至今, 有关纳木错异常高湖面的发育时代、湖侵-湖退过程、异常高湖面的形成机制、与其他湖泊之间的水文联系等科学问题仍不清楚或存在很大争议。本文以纳木错异常高湖面的特征、时代、期次和成因问题为主题, 综述了一个多世纪以来国内外学者对纳木错湖面变化重建的研究成果, 尤其对目前纳木错古湖面重建研究中存在的问题进行了总结, 并对未来的工作重点进行了展望。此外, 基于初步的调查结果, 认为纳木错高湖面沉积可能形成于全新世中晚期, 并指示了一次湖侵-湖退过程。南支槽的异常振荡及其导致的冬半年降水增加可能是引起湖面变化的主要驱动因素。

关键词: 青藏高原; 纳木错; 湖岸地貌; 高湖面沉积; 湖面变化

中图分类号: P931.78; P534.63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)03-0930-10

0 引言

湖泊水位的变化将影响湖泊中各种生物、水文、湖泊和沉积过程^[1]。因此, 湖面变化过程的重建成为地貌学、湖泊学、水文学、古气候学、盐湖资源、生态学、全球变化等多学科所共同关注的科学问题。青藏高原分布着全球海拔最高、数量最多、面积最大的内陆湖泊群。其中许多湖泊发育有古湖岸线(shoreline)、古湖岸堤(shore ridge)、古砂(砾石)滩(sand-gravel beach)、古湖岸侵蚀台地(wave-cut platform)、悬崖线(cliff line)、湖岸阶地(lake terrace)或高湖面沉积物(high-level sediment)。这些

地貌和岩性单元是地质历史时期湖面变化的实证。同时, 这些地貌和岩性直接证据亦蕴含着丰富的古水文、古气候和古环境信息。

有关青藏高原湖面变化的记录, 最早见于19世纪末和20世纪初西方探险者的著述中^[2-3]。譬如, 色林错最老的湖岸线高于当时湖面约50 m^[3-4]。中国学者对青藏高原的考察始于地貌学家徐近之先生1935年对纳木错湖岸线的考察和湖面变化的讨论^[5]。其后, 历经20世纪50年代初西藏工作队^[6]、70年代的第一次青藏科考等研究阶段^[7-17]。之后, 学者们开始关注湖岸地貌、湖岸残存的高湖面沉积物, 并

收稿日期: 2022-08-18; 修订日期: 2022-11-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(DA20070101)资助

作者简介: 王琨莹, 博士研究生, 主要从事湖泊沉积与古水文研究. E-mail: wangky@itpcas.ac.cn

通信作者: 冯金良, 研究员, 主要从事地貌过程与沉积研究. E-mail: fengjl@itpcas.ac.cn

开始了有关湖面变化历史的开创性研究工作^[18-56]。

在青藏高原众多湖泊及湖面变化研究中, 纳木错最具典型性和代表性[图 1(a)]。其主要表现在以下六个方面: (1) 纳木错是念青唐古拉山北麓的

构造断陷湖, 亦是西藏第二大湖泊; 其湖面面积为 1 920 km², 流域面积为 10 610 km²; 最大水深达 99 m, 蓄水量约为 768×10⁸ m³。(2) 流域内分布着念青唐古拉冰川, 冰川变化及冰融水对湖泊过程存在

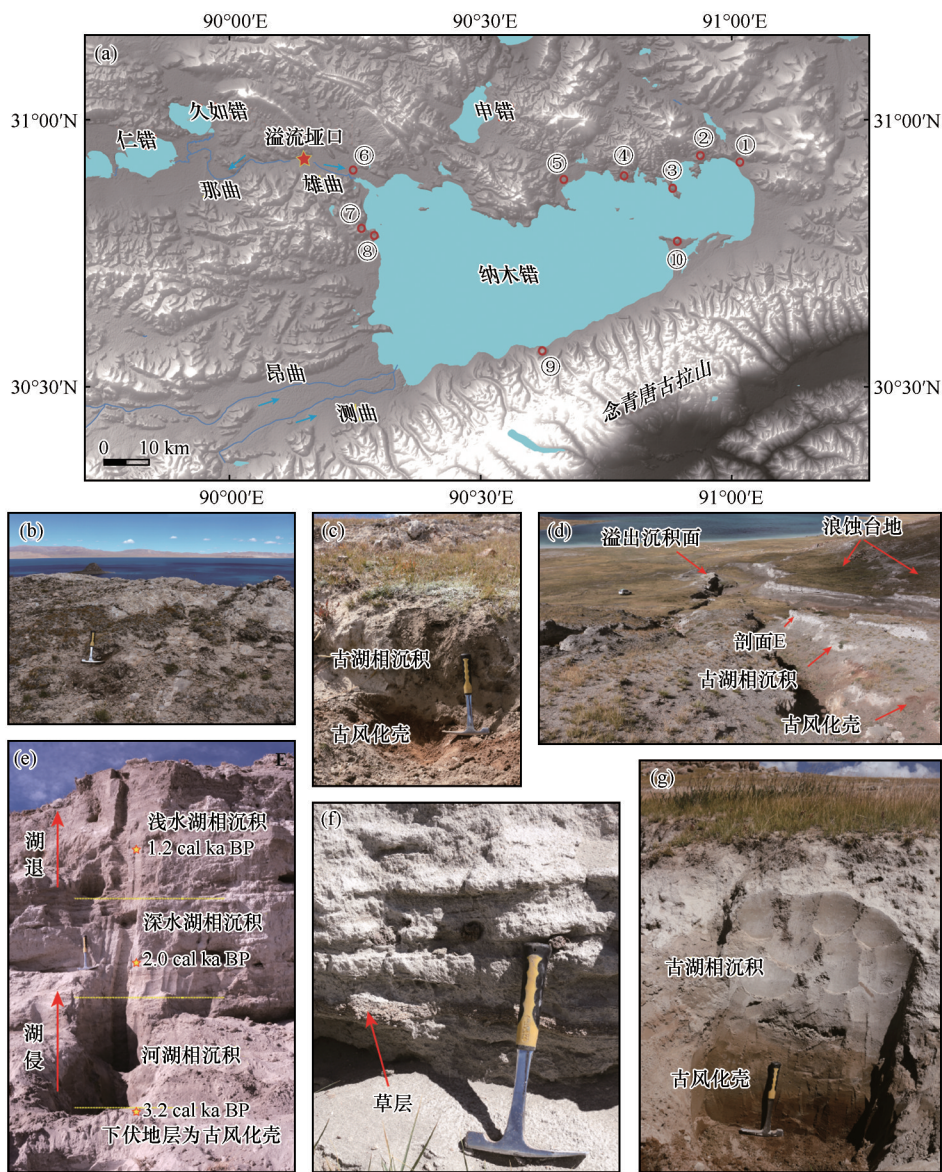


图1 纳木错流域地形及沿岸高湖面沉积物分布: 纳木错流域地貌简图及前人研究采样地点(a), 塔吉古日最高海拔 4 872 m (高出现今湖面 150 m) 古湖相沉积(b), 塔吉古日海拔 4 859 m (高出现今湖面 137 m) 古湖相沉积(c), 干玛弄地区残留的高湖面沉积(阶地状地貌下伏湖相地层的水平方向连续性指示其是浪蚀台地)(d), 干玛弄海拔 4 743 m (高出现今湖面 21 m) 低位古湖相沉积序列及其年代(e), 古湖相沉积中保存的草层(f), 干玛弄海拔 4 830 m (高出现今湖面 108 m) 古湖相沉积(g)

Fig. 1 Topography of Lake Nam Co basin and distribution of exposed lacustrine sediments around coast: sketch map of Lake Nam Co basin and the sampling sites studied by predecessors (a), abandoned highest high-level lacustrine sedimentary sequence with 4 872 m a. s. l. (150 m above the current lake level) at Tajiguri coast (b), abandoned high-level lacustrine sedimentary sequence with 4 859 m a. s. l. (137 m above the current lake level) at Tajiguri coast (Note: the lacustrine sediment overlaid the paleosols) (c), abandoned high-level lacustrine sediments at Ganmanong coast along Lake Nam Co (Note: the lacustrine sediment overlaid the paleosols) (d), abandoned high-level lacustrine sedimentary sequence with 4 743 m a. s. l. (21 m above the current lake level) at Ganmanong coast and its age (e), relics of aquatic plants within abandoned high-level lacustrine sediments (f), and abandoned high-level lacustrine sediments with 4 830 m a. s. l. (108 m above the current lake level) at Ganmanong coast (Note: the lacustrine sediment overlaid the paleosols) (g)

潜在的影响。(3)纳木错为高原中东部内流区湖面海拔最高的大型湖泊,因此其湖面变化不受其他湖泊注入的影响。(4)纳木错存在封闭-开放水文状态的转变。目前,纳木错是一个封闭湖,但其溢流垭口仅高于当前湖面约 27 m。(5)纳木错的高湖面及其潜在的外流特征,使其处在古水系的源头,并在青藏高原古水系演化和古大湖重建研究中起着关键的作用。(6)纳木错湖岸分布着基岩侵蚀和湖相沉积等各种类型的高湖面湖岸地貌单元,从而为古湖面变化过程的重建提供了可能。

目前,有关纳木错异常高湖面的发育时代、湖侵-湖退过程、异常高湖面的形成机制、与其他湖泊之间的水文联系等一系列科学问题仍不清楚或存在很大争议。在此,以纳木错为例,就目前湖面重建研究中存在的科学问题评述如下。

1 纳木错湖面变化重建中存在的主要问题

1.1 纳木错湖岸异常高湖面沉积物的证据是否确凿?

李璞^[6]指出纳木错东北角湖泊沉积阶地高出当时湖面 10 m。韩同林^[10]发现纳木错塔吉古日三级湖积阶地高于当时湖面 150 m。关志华等^[14]记录了纳木错古湖岸线高出现代湖面约 80 m。之后,赵希涛等^[24]、朱大岗等^[28]发现纳木错的最高位湖相沉积物高于现代湖面 139.2 m。笔者对前人发现的纳木错湖岸残留的高湖面沉积物亦做了初步的野外调查。这些灰色黏土质粉砂沉积物明显区别于纳木错湖岸的现代风沙沉积及坡积物,初步确认这类披覆于湖岸山坡上的沉积物应是高湖面时期的滨岸沉积。从而初步证实,纳木错确实存在高于现代湖面约 150 m 的高湖面沉积物[最高分布海拔 4 872 m,手持 GPS 测量;图 1(b)]。

1.2 纳木错最高基岩侵蚀地貌为何分布在同一高度?

虽然目前纳木错是一个封闭湖泊(现代湖面海拔 4 722 m),但纳木错流域与其西面相邻的仁错(湖面海拔 4 648 m)流域之间,仅由一个海拔约 4 749 m 低矮的分水岭(threshold level)所分割[图 1(a)]^[51]。也就是说,纳木错现代湖面上涨 27 m,就会出现溢流,从而由封闭湖泊转变为溢流湖泊(outlet lake)。综合前人和笔者已有的工作,可以发现,在纳木错的基岩岸坡,最高浪蚀基岩湖岸阶地^[24,51,55]、冰碛物侵蚀陡坎及基岩侵蚀悬崖线(cliff line)^[21,23,35]的高度

与纳木错—仁错分水垭口的高度齐平,即均高于现代湖面 29 m 左右。因此,笔者推测,溢流垭口的地貌临界点效应(topographic threshold effect)可能控制着侵蚀地貌单元的形成及其分布高度以及长期的湖岸地貌演变。基于 ^{10}Be 和 ^{26}Al 暴露年代,Zhou 等^[55]限定了纳木错基岩侵蚀阶地(T7~T4,高于现代湖面 29~18 m)的形成时代为 81.5—15.2 ka。这似乎意味着长期以来纳木错溢流垭口的海拔变化不大。

1.3 纳木错开放水文状态下为何发生大幅度的湖面波动?

封闭湖泊的湖面变化取决于流域降水、径流和蒸发量的平衡关系,这类湖泊的水位可以在很大范围内波动。而对于开放或溢流湖泊(open or outlet lakes),气候驱动的湖泊水位变化仅限于降水/蒸发(P/E)的变小,而入湖流量的增加(P/E 增加)是通过更大的流出量来补偿的^[1,57]。也就是说,开放湖泊最高湖面高度取决于流域周缘最低溢流垭口的高度(topographic threshold effect),类似于木桶效应(cask effect)。因此,通常情形下,开放湖泊的水位变化相对较小^[1,57]。然而,纳木错最高古湖相沉积物的分布海拔,竟然高于其现代最低溢流垭口约 123 m。由此推断,气候、水文、外溢河道或地貌(溢流垭口)等因素发生剧烈变化,以至于无法基于目前的湖泊状态来解释^[1]。但是,这一异常现象出现的具体原因目前还不清楚。

1.4 纳木错异常高湖面沉积物形成于何时?

基于地层对比或 U 系法测年、 ^{14}C 测年和 OSL 定年,许多学者提出或限定了纳木错不同高度高湖面沉积物的年代^[10,15-16,24,26,28-30]。最有代表性的认识是赵希涛等^[24]、朱大岗等^[28]提出的纳木错不同高度古湖相沉积物形成于不同时期(MIS 5、MIS 3 或全新世),并以不同时期的沉积阶地为特征;由高至低,湖相沉积阶地的年代为晚更新世至晚全新世^[24,28-30]。他们认为纳木错最高湖面应该发生在 MIS 5 期间^[24,28]。利用宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 定年方法,Kong 等^[40]限定了纳木错高湖面形成于 53—36 ka。基于同样的年代学方法,Zhou 等^[55]限定了纳木错北岸四个基岩侵蚀阶地(T7、T6、T5 和 T4)的年代,分别在(81.5±9.0) ka、(33.6±1.9) ka、(19.9±1.9) ka 和(15.2±0.4) ka。近期,基于纳木错古湖岸沉积物的 OSL 定年,Huang 等^[26]提出最高湖面高于现今湖面约 26 m,发育年代为 25 ka。由

此可以看出,纳木错不同高度古湖相沉积物的年代尚存在很大的不确定性(表1),尤其是不同高度古湖相沉积的形成时代及其与湖面变化过程之间的联系还未厘清。

表1 纳木错高湖面沉积、侵蚀阶地及湖岸堤的测年结果

Table 1 Dating results of high-level lake sediments, erosion terraces and shoreline deposits from Lake Nam Co

图1(a) 中区域	剖面地点与采样部位	采样点		测年方法	年龄	文献来源
		拔湖高度/m	海拔/m			
①	期波拉 16.8 m 湖岸堤上部	16.5	4 734.5	U 系测年法	29.3±2.7 ka	[24]
②	干玛弄拔湖 115.9 m 剖面上部	115.8	4 833.8	U 系测年法	86.5±5.9 ka	[29]
②	干玛弄拔湖 119.9 m 剖面上部	119.8	4 837.8	U 系测年法	101.7±9.7 ka	[29]
②	干玛弄拔湖 119.9 m 剖面上部	32.0	4 750.0	¹⁴ C 测年法	1 580±36 a BP	[37]
②	干玛弄拔湖 139.2 m 剖面上部	139.0	4 857.0	U 系测年法	115.9±12.1 ka	[29]
②	干玛弄拔湖 21 m 剖面 E 中部	21.0	4 743.0	¹⁴ C 测年法	2 000±30 a BP	本文
②	干玛弄古湖岸堤 S2 拔湖 22 m 剖面中部	22.0	4 751.0	OSL 定年法	2.5±0.1 ka	[26]
②	干玛弄古湖岸堤 S5 拔湖 11 m 剖面中部	11.0	4 740.0	OSL 定年法	0.7±0.1 ka	[26]
②	干玛弄西南 T4 中部	22.9	4 740.9	U 系测年法	36.1±2.2 ka	[29]
②	干玛弄西南 T5 上部	26.3	4 744.3	U 系测年法	39.5±3.0 ka	[24]
③	纳木错东北岸托仁洛布日剖面底部	2.0	4 720.0	OSL 定年法	2.2±0.31 ka	[50]
④	纳木错北岸基岩侵蚀阶地 T4	15.0	4 740.0	宇宙成因核素定年法	15.2±0.4 ka	[55]
④	纳木错北岸基岩侵蚀阶地 T5	18.0	4 743.0	宇宙成因核素定年法	19.9±1.9 ka	[55]
④	纳木错北岸基岩侵蚀阶地 T6	22.0	4 747.0	宇宙成因核素定年法	33.6±1.9 ka	[55]
④	纳木错北岸基岩侵蚀阶地 T7	26.0	4 751.0	宇宙成因核素定年法	81.5±9.0 ka	[55]
⑤	古湖岸堤 S1 拔湖 26 m 剖面下部	26.0	4 755.0	OSL 定年法	25.4±1.2 ka	[26]
⑤	古湖岸堤 S1 拔湖 26 m 剖面中部	26.0	4 755.0	OSL 定年法	25.1±1.2 ka	[26]
⑥	纳木错西北角岗牙桑曲入湖处剖面顶部	29.0	4 751.0	OSL 定年法	16.2±1.1 ka	[35]
⑥	纳木错西北角岗牙桑曲入湖处剖面上部	28.0	4 750.0	¹⁴ C 测年法	5 195±150 a BP	[39]
⑥	纳木错西北角岗牙桑曲入湖处剖面中部	22.0	4 744.0	¹⁴ C 测年法	6 590±155 a BP	[39]
⑦	扎弄淌东岸 T1 中部	1.2	4 719.2	U 系测年法	11.2±2.0 ka	[29]
⑦	扎弄淌东岸 T2 底部	8.0	4 726.0	U 系测年法	28.2±2.8 ka	[24,30]
⑦	扎弄淌东岸 T3 中部	16.1	4 734.1	U 系测年法	32.3±4.4 ka	[24,30]
⑧	塔吉古日拔湖 37 m 剖面底部	37.0	4 755.0	OSL 定年法	4.2±0.2 ka	[37]
⑧	塔吉古日拔湖 37 m 剖面中部	37.0	4 755.0	¹⁴ C 测年法	2 370±35 a BP	[37]
⑧	塔吉古日西南坡 T5 下部	27.0	4 745.0	U 系测年法	41.2±4.7 ka	[24,30]
⑧	塔吉古日西南坡 T6 中部	42.1	4 760.1	U 系测年法	53.7±5.2 ka	[24,30]
⑧	塔吉古日西南坡拔湖 128.1 m 剖面下部	128.0	4 846.0	U 系测年法	96.1±10.5 ka	[29]
⑧	塔吉古日西南坡拔湖 47.5 m 剖面下部	46.8	4 764.8	U 系测年法	71.8±8.5 ka	[24,30]
⑧	塔吉古日西南坡拔湖 68.9 m 剖面下部	68.4	4 786.4	U 系测年法	90.7±9.9 ka	[24,30]
⑧	塔吉古日西南坡拔湖 88.8 m 剖面下部	88.3	4 806.3	U 系测年法	78.5±4.2 ka	[24,30]
⑨	纳木错南岸巴日尼尔地区基岩	20.0	4 738.0	宇宙成因核素定年法	56.8±4.0 ka	[40]
⑨	纳木错南岸巴日尼尔地区基岩	1.0	4 719.0	宇宙成因核素定年法	17.5±1.2 ka	[40]
⑩	多青岛西北岸东溶洞底砂砾岩上部	20.5	4 738.5	U 系测年法	18.7±3.8 ka	[24]
⑩	多穷岛西南岸湖蚀台地基岩石缝中	15.4	4 733.4	U 系测年法	26.7±2.8 ka	[24]

1.5 纳木错湖面变化过程及其特征是什么?

Trotter^[2]记录了 Singh 在 1874 年发现纳格曲(现称雄曲)由纳木错西北角流出[图 1(a)]。但是,徐近之先生 1935 年野外调查时,并未发现纳木错外流^[4-5]。此外,徐近之^[5]指出“天湖地文之转变,曾经两度高涨,今之湖面为最低”。之后,研究者提出,

纳木错在 MIS 5 阶段^[13,24,28]、MIS 3 阶段^[23,38]或末次冰消期^[16,35,39]高湖面之后,湖面总体呈波动下降。Huang 等^[26]认为,25—2 ka 期间纳木错保持一个相对较高的湖面状态(高于现代湖面 22~26 m),但在 2 ka 左右湖面急剧下降。总之,前人的工作主要关注湖泊的收缩过程,而湖面上升过程和特征时段湖

面的变化速率仍是未知的。

1.6 纳木错古湖面变化的驱动机制是什么?

韩同林^[15]指出,全新世早、中期气温上升、冰雪融水和降水的增加导致高原出现“泛湖阶段”。陈志明^[16]、朱大岗等^[28]提出,亚洲夏季风的变化控制了纳木错湖面的波动。Chen等^[50]、Zhou等^[55]则认为,不同时期印度夏季风的增强是湖泊扩张的主要驱动因素。另外,Zhu等^[58]发现约20 ka cal BP西风带南移增强,导致纳木错的水位上升。由此可以看出,纳木错湖面变化的内在和外在控制因素、湖面变化如何响应和记录气候波动,以及是否存在外溢河道短暂的堰塞事件、流域之外是否存在地貌临界点等科学问题尚不清楚。

1.7 青藏高原存在古大湖吗?

郑绵平等^[7]最早提出青藏高原存在“大水湖期”。但他们认为其发育时代为更新世早中期。此后,MIS 5阶段大湖期或古羌塘湖^[24,28,54-55],MIS 3阶段大湖期/泛湖期或冈底斯带古大湖^[20,22,27],以及全新世中早期“泛湖阶段”^[15]等假说被相继提出。也有学者持相反意见,Shi等^[52]认为在MIS 5阶段并不存在有如此大规模的古大湖。纳木错(湖面海拔4 722 m)在高湖面期溢流状态下,可通过河谷通道与仁错(湖面海拔4 648 m)、错鄂(湖面海拔4 562.8 m)、色林错(湖面海拔4 542.5 m,西藏第一大湖)相连通。但是,青藏高原内流区是否存在纳木错—色林错等相互连通的古大湖?古大湖形成于何时?古大湖时期是内流区,还是外流区?若是外流区,溢流垭口位于何处?目前,由于直接证据的匮乏和可靠年代约束的缺失,从而导致对这些问题仍然没有确切和统一的认知。

综上所述,纳木错在开放状态下异常高湖面的发育时代、湖面变化历史、古水化学演变过程、湖面变化的内在和外驱动机制、湖岸地貌与湖芯沉积记录对比^[38,58-59],相邻流域湖面变化规律和溢流垭口(河道)特征^[18,25,31,36,41,52-53,60-62],以及与其他湖泊之间的水文联系等一系列科学问题仍不清楚或存在很大争议。

2 纳木错湖面变化重建工作重点

针对上述问题,未来工作应以纳木错湖岸地貌、高湖面沉积物及古生物学证据为主要研究对象,基于野外GPS测量、沉积物年代学、沉积物物理和地球化学参数^[62-63]、稳定同位素指标^[64-65]、萝卜螺

化石壳体地球化学等方法^[56,63],厘清不同高度高湖面沉积物之间的成因联系,限定高湖面沉积物的形成时代,建立纳木错湖面变化历史,揭示纳木错湖水水化学演化过程,进而阐明纳木错湖面变化的内在和外控制机制。最后,探讨青藏高原大湖期存在的可能性及其可能的时代和特征。

2.1 地貌、沉积与古生物学证据

2.1.1 纳木错湖岸侵蚀地貌

在未来工作中,应以纳木错—仁错之间分水岭(现代最低溢流垭口)、基岩湖岸侵蚀阶地、冰碛物侵蚀地貌为重点调查对象,采用差分GPS高精度测量方法,精确限定纳木错最低溢流垭口、湖岸基岩侵蚀阶地、悬崖线、冰碛物侵蚀陡坎的海拔。基于溢流垭口高度与基岩侵蚀阶地、断崖线高度的关系,探讨溢流垭口对湖岸侵蚀地貌的限制(地貌临界点效应)。进一步深入认识新构造运动可能导致的差异性抬升,以及载荷回弹可能引起的地貌变化,了解纳木错流域与相邻湖泊流域之间分水岭和潜在河道的地形、高度及水文联系的可能性。厘定古高湖面的出现是否与流域内溢流垭口高度的变化存在关联,了解流域之外的古溢流河道是否存在古堰塞坝,为合理解释纳木错开放水文状态下为何发生大幅度的湖面波动奠定基础。

2.1.2 纳木错古高湖面沉积物

在纳木错北岸的干玛弄和西岸的塔吉古日两个区域,高湖面沉积物保存较为完整[图1(a)中②⑧]。可采用高精度差分GPS对该区域高湖面沉积物的分布高程进行测量[图1(d)]。对区域内高湖面沉积物的地貌分布格局进行初步限定。调查不同坡度、各个地貌单元、不同海拔高湖面沉积物的厚度和分布特征。阐明高湖面沉积物的保存、分布及沉积物特征与基岩湖岸的地形、地貌和沉积物供给的关系。利用高湖面沉积物分布等实证,厘定最高湖面的海拔及其空间关系。基于阶地状沉积地貌空间分布的对比分析,结合阶地下伏基底地层、阶地后缘断面与基底地形的关系,识别阶地状地貌的成因,限定不同高度湖泊沉积物之间的成因关系[图1(d)]^[19,36,55,66-68]。

基于纳木错湖岸高湖面残留沉积物特征参数,建立不同海拔沉积序列。以高湖面沉积物中细粒自生碳酸盐碳、氧同位素演化规律及其之间的协变关系为基础,分析湖侵—湖退过程中不同湖面高度下,纳木错古水化学和古水文状态的演化过程^[62-63]。

利用沉积物特征及同位素指标在垂直剖面上的变化规律,厘定湖相沉积及下伏非湖相地层(主要是风化壳及坡积物)的接触关系,识别沉积旋回,划分湖侵-湖退层序[图 1(c), (e)]。由盆地内部向盆地边缘的斜坡带方向,利用沉积物特征及同位素指标在纵断面上的变化规律,建立退积(retrogradation)、进积(progradation)沉积过程。完善残留高湖面沉积物的层序地层划分和对比。分析沉积物的超覆(onlap)和退覆(offlap)与沉积物供给速率变化、基准面变化和气候变化之间可能存在的联系。

2.1.3 萝卜螺化石等古生物学证据

纳木错湖岸的高湖面沉积物中保存了萝卜螺(*Radix* sp.)、旋螺(*Gyraulus* sp.)等生物化石壳体^[50-51, 56, 69]。在未来工作中,应进一步开展萝卜螺等现代过程的监测研究,了解萝卜螺等的生境,定量建立现代萝卜螺壳体与其宿生水体水化学特征之间的关系(如 $\delta^{18}\text{O}$)。依此为基础,分析湖侵-湖退沉积物中萝卜螺壳体化石碳、氧同位素等指标($\delta^{13}\text{C}_{\text{shell}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{shell}}$ 、 $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{shell}}$ 等),定量重建不同湖面高度下,古湖水水化学特征指标($\delta^{18}\text{O}_{\text{palaco-water}}$ 、 $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{palaco-water}}$ 和 $\text{Sr}/\text{Ca}_{\text{palaco-water}}$ 等)^[56, 68]。探讨湖面变化与古水化学特征的关系。结合年代学研究结果,重建古水化学和古水文状态的演化过程^[70-71]。

2.2 纳木错高湖面的发育年代

限定不同高度古高湖面沉积的开始和结束时间是重建湖面变化过程的关键。利用宇宙成因核素 ^{10}Be 和 ^{26}Al 可以限定湖岸基岩侵蚀阶地的暴露年代^[40, 55]。但该方法仅适用于湖岸基岩侵蚀阶地,其适用性存在一定的局限。同时,此年代学方法亦无法完整约束湖面波动过程的年代序列。在前期调查中,前人^[24, 28, 40]及笔者研究团队均发现在纳木错古湖盆的连续沉积等剖面中发现多层草层,从而为采用 AMS ^{14}C 建立年代序列奠定了基础[图 1(f)]。此外,古高湖面沉积物中,常见萝卜螺壳体化石(或壳体碎片)。笔者对纳木错现代活体萝卜螺壳体 AMS ^{14}C 定年结果指示,其年龄为 558—507 cal a BP,碳库效应在可接受范围内。因此,在将来的研究中,可以采用萝卜螺无机碳 AMS ^{14}C 定年。结合萝卜螺等碳酸盐壳体 U-Th 测年、沉积物光释光(OSL)定年方法,确定纳木错高湖面沉积物的发育年代。尤其是,限定不同海拔高湖面沉积的开始和结束时间。建立特定高度沉积物精确年代框架,开展年代地层的空间对比分析。

2.3 湖面变化的驱动机制

应用地貌学、沉积学、层序地层学和生物地层学方法对纳木错高湖面沉积物进行特征高度垂直剖面及纵向断面测量,重建湖泊水位或湖泊深度的变化。基于不同海拔高湖面沉积的开始和结束时间,重建纳木错湖面上升和下降过程的历史,限定特征时段湖面变化过程的速率。追踪湖面随时间的变化过程及其相对应的古气候变化,以及可能的地貌临界点(溢流垭口或溢流河道堰塞坝)高程的变化,从而为湖面变化驱动机制的探索奠定基础。

在今后的工作中,应开展基于湖岸地貌和高湖面沉积物的湖面变化过程重建结果与纳木错湖芯湖面变化重建结果的对比研究。探讨高湖面沉积物实证重建结果与基于湖芯替代性指标重建结果之间的相似性和差异性。明确各类代用指标的湖面变化指示意义及可能存在的不确定性^[38, 58-59]。进而,对纳木错及可能与其存在水文联系湖泊的水位变化规律、幅度和时间进行整合分析,识别可能存在的同步性和差异性。阐明湖泊水位可能存在的广泛同步变化及其气候或地貌意义。深入了解湖面变化和极端水文事件的驱动机制。同时,在纳木错最高湖面海拔高度限定基础上,基于 DEM 和 GIS,了解纳木错与相邻流域的水文联系,研判纳木错流域之外的高溢流垭口或河道堰塞坝这一外在地貌限制因素。预测可能的古大湖范围,古大湖的溢流点位置,并探讨古大湖的解体过程和古水系的演化。

3 纳木错湖面变化过程的初步认识

基于初步的野外调查结果,对纳木错湖面变化过程提出如下三点初步的认识。并期待在今后的工作中,进一步验证、拓展和深化对纳木错湖面变化的认知。

3.1 不同高度残留高湖面沉积成因关系

纳木错湖岸高湖面沉积的保存及分布受基岩湖岸的地形所控制[图 1(a)~(e), (g)]。高湖面沉积的厚度受基底地形和海拔所控制。高湖面沉积最高分布海拔高于纳木错—仁错分水岭(海拔 4 749 m)约 123 m。纳木错湖岸残留高湖面沉积具有如下特征:(1)不同高度残留高湖面沉积均覆盖在类似的红色古风化壳之上[图 1(c), (d), (g)];(2)不同高度残留高湖面沉积序列均为连续沉积,缺乏可见的沉积间断[图 1(c), (e), (g)];(3)相邻

阶地状地貌下伏湖相沉积地层具有水平方向的沉积连续性[图 1(d)];(4)纳木错近岸低位、厚层、连续古湖相沉积仅由一个湖侵-湖退沉积旋回构成[图 1(e)]。因此,笔者初步认为湖相沉积物构成的阶地状地貌可能是湖面下降过程中短暂停滞期发育的浪蚀台地[图 1(d)],而非前人所认为的是不同时期(MIS 3 或 MIS 5)的沉积阶地^[24,28]。此外,前人的认识^[24,28]亦很难解释为何古老的湖相沉积物(MIS 5 或 MIS 3)仅在高海拔山坡残留,而近岸低位湖相沉积序列中缺乏同时代的沉积地层[图 1(e)]^[50-51]。

3.2 异常高湖面发育时代

对纳木错近岸低位湖相沉积物剖面中不同深度草层及下伏古土壤进行了初步的 AMS ¹⁴C 测年,结果分别为 1.2 ka、2.0 ka 及 3.2 ka 左右,这与前人^[26,37,40,50]的测年数据较为一致[图 1(e)]。基于前人^[26,37,40]研究结果和笔者研究团队^[50-51]初步调查结果,认为纳木错高湖面沉积物很可能形成于全新世中晚期,其是一次湖侵-湖退过程所形成的单一沉积体系[图 1(e)]。这一推测亦得到下列证据的支持:(1)尽管湖岸高湖面沉积遭受了后期侵蚀,但是古湖底扇的溢出沉积面(spill over)保存较为完好[图 1(d)],由此指示着古湖底扇形成时代较新,仅遭受了较短时间的后期侵蚀。(2)不同海拔古湖相沉积物表层的化学风化和成壤过程很弱,缺乏明显的化学风化标志(如红化现象)、淋溶淀积特征和可识别的土壤发育层次[图 1(c),(g)],意味着这些湖相沉积物暴露于气下风化过程的时间较短。因此,其不太可能是 MIS 5 或 MIS 3 阶段的沉积。

3.3 湖面变化驱动机制

气候变化、溢流基准调整、地壳运动、载荷回弹、河流改道(袭夺)、植被变化、土地利用变化和人类活动都会引起湖面波动^[1,19,32,41,57,62,66,70,72-73]。前人及笔者初步的调查结果表明,纳木错湖岸基岩侵蚀地貌的最高海拔几乎是齐平的,并可能受控于溢流垭口基准^[21,23,35,51,55]。这意味着长期以来纳木错流域内溢流基准的高度可能变化不大。同时,也反映出纳木错新构造运动造成的差异性抬升量可能很小^[41,45]。此外,湖水损失可引起载荷回弹,但形变主要发生在湖泊的中心部分,湖岸回弹一般不显著^[32]。纳木错处于高寒环境和半干旱地区,盆地周缘仅有季节性的小河分布,因此全新世期间发生河流袭夺的可能性很低,在高寒环境下植被变化和土

地利用变化对湖面变化的影响甚微。尤为重要的是,依据前人和笔者已有的调查结果,上述纳木错开放水文状态下异常高湖面现象在青藏高原并不是孤立存在的^[6,13,15,19,25,31]。这意味着,湖面变化的驱动因素可能不是单个湖泊流域内的局地因素,而可能是一个在更大范围内普遍存在的影响因素在起作用^[1,19,66,73-75]。由此推测,南支槽(India-Burma Trough)的异常振荡及其导致的冬半年降水增加可能是其内在驱动因素,而纳木错流域之外的某处高溢流垭口可能是高湖面形成的外在地貌限制因素。

对纳木错异常高湖面的特征、时代、期次和成因问题的认知,不仅对青藏高原湖泊和水系演化历史^[9,11-12,19,24,28-31]、气候变化及机制^[16,19,33-34,44,46,62]、降水/蒸发变化^[38,59]、水循环与水资源^[14,43]、盐湖资源成矿过程^[7,13,17]的研究有着重要的科学和实践意义,还可为深入理解全球变化背景下青藏高原的湖泊生态环境和湖面变化的趋势提供科学依据^[50,54]。

参考文献(References):

- [1] Harrison S P, Digerfeldt G. European lakes as palaeohydrological and palaeoclimatic indicators [J]. Quaternary Science Reviews, 1993, 12: 233-248.
- [2] Trotter H. Account of Pandit Nain Singh's journey from Leh in Ladakh to Lhasa, and his return to India via Assam 1873-74-75 [J]. Records of the Survey of India, 1915, 8(1): 1865-1879.
- [3] Hedin S A. Scientific results of a journey in Central Asia, 1899—1902 [M]. Stockholm, Sweden: Generalstabens Litografiska Anstalt, 1907: 35.
- [4] Xu Jinzhi. Qinghai-Tibet physical and geographical data: geoscience [M]. Beijing: Science Press, 1960. [徐近之. 青藏自然地理资料: 地文部分 [M]. 北京: 科学出版社, 1960.]
- [5] Xu Jinzhi. Nam Co in Tibet [J]. Acta Geographica Sinica, 1937, 4(1): 897-904. [徐近之. 西藏之大天湖 [J]. 地理学报, 1937, 4(1): 897-904.]
- [6] Li Pu. Introduction to the natural conditions and resources of the Kangzang Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 1954(2): 47-54. [李璞. 康藏高原自然情况和资源的介绍 [J]. 科学通报, 1954(2): 47-54.]
- [7] Zheng Mianping, Liu Wengao. Report on boron deposits in the salt lake of Tibet [R]. Beijing: Institute of Scientific and Technical Information of China, 1974. [郑绵平, 刘文高. 西藏盐湖硼矿研究报告 [R]. 北京: 中国科学技术情报研究所, 1974.]
- [8] Chen Zhiming. Approaches to the changes of ecological environment of lakes in Xizang based on the upheaval of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1981, 12(5): 402-411. [陈志明. 从青藏高原隆起探讨西藏湖泊生态环境的变迁 [J]. 海洋与湖沼, 1981, 12(5): 402-411.]
- [9] Li Bingyuan, Zhang Qingsong, Jing Ke, et al. Several problems of water system development in Tibet [M]// Geographical memoir: 13. Beijing: Science Press, 1981: 30-43. [李炳元, 张青松, 景可, 等. 西藏水系发育的几个问题 [M]// 地理集刊: 13. 北京: 科学出版社, 1981: 30-43.]

- [10] Han Tonglin. A discussion on the Cenozoic and its successions of northeast Xizang (Tibet) [M]// Contribution to the geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau; 6. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 255-266. [韩同林. 西藏东北部的新生界及其层序讨论[M]//青藏高原地质文集: 6. 北京: 地质出版社, 1983: 255-266.]
- [11] Li Bingyuan, Wang Fubao, Zhang Qingsong, et al. Quaternary geology of Tibet [M]. Beijing: Science Press, 1983. [李炳元, 王富葆, 张青松, 等. 西藏第四纪地质[M]. 北京: 科学出版社, 1983.]
- [12] Yang Yichou, Li Bingyuan, Yin Zesheng, et al. Tibetan geomorphology [M]. Beijing: Science Press, 1983. [杨逸畴, 李炳元, 尹泽生, 等. 西藏地貌[M]. 北京: 科学出版社, 1983.]
- [13] Zheng Mianping, Liu Wengao, Xiang Jun, et al. On saline lakes in Tibet, China [J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(2): 184-194. [郑绵平, 刘文高, 向军, 等. 论西藏的盐湖[J]. 地质学报, 1983, 57(2): 184-194.]
- [14] Guan Zhihua, Chen Chuanyou, Ou Yuxiong, et al. Rivers and lakes in Tibet [M]. Beijing: Science Press, 1984. [关志华, 陈传友, 区裕雄, 等. 西藏河流与湖泊[M]. 北京: 科学出版社, 1984.]
- [15] Han Tonglin. The characteristics of the geological structures of the Xainza-Baingoin area, Xizang (Tibet) [M]// Contribution to the geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau; 15. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 53-72. [韩同林. 西藏申扎—班戈一带地质构造分析[M]//青藏高原地质文集: 15. 北京: 地质出版社, 1984: 53-72.]
- [16] Chen Zhiming. Lake retreat in Qinghai-Xizang Plateau with additional reference to its climatic significance [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1986, 17(3): 207-216. [陈志明. 青藏高原湖泊退缩及其气候意义[J]. 海洋与湖沼, 1986, 17(3): 207-216.]
- [17] Zheng Xiyu, Tang Yuan, Xu Chang, et al. Tibet salt lake [M]. Beijing: Science Press, 1988. [郑喜玉, 唐渊, 徐昶, 等. 西藏盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [18] Gu Zhaoyan, Liu Jiaqi, Yuan Baoyin, et al. Monsoon variations of the Qinghai-Xizang Plateau during the last 12000 years: geochemical evidence from the sediments in the Siling Lake [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(7): 577-581.
- [19] Avouac J P, Dobremez J F, Bourjot L. Palaeoclimatic interpretation of a topographic profile across middle Holocene regressive shorelines of Longmu Co (western Tibet) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996, 120: 93-104.
- [20] Li Bingyuan. The last greatest lakes on the Xizang (Tibetan) Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2): 174-182. [李炳元. 青藏高原大湖期[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 174-182.]
- [21] Lehmkuhl F, Haselein F. Quaternary paleoenvironmental change on the Tibetan Plateau and adjacent areas (western China and western Mongolia) [J]. Quaternary International, 2000, 65: 121-145.
- [22] Zheng Mianping, Meng Yifeng, Wei Lejun. Evidence of the pan-lake stage in the period of 40—28 ka BP on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74: 266-272.
- [23] Lehmkuhl F, Klinge M, Lang A. Late Quaternary glacier advances, lake level fluctuations and aeolian sedimentation in southern Tibet [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 2002, 126 (Suppl): 183-218.
- [24] Zhao Xitao, Zhu Dagang, Wu Zhonghai, et al. The development of Nam Co Lake in Tibet since late Pleistocene [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(4): 329-334. [赵希涛, 朱大岗, 吴中海, 等. 西藏纳木错晚更新世以来的湖泊发育[J]. 地球学报, 2002, 23(4): 329-334.]
- [25] Jia Yulian, Wang Sumin, Wu Yanhong, et al. Preliminary study of lake evolution and precipitation of Zigetangco and Coe basins, central Qinghai-Xizang Plateau, since 24 ka B. P. [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(3): 283-294. [贾玉连, 王苏民, 吴艳宏, 等. 24 ka B. P. 以来青藏高原中部湖泊演化及古降水量研究: 以兹格塘错与错鄂为例[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 283-294.]
- [26] Huang Long, Chen Yiwei, Wu Yang, et al. Lake level changes of Nam Co since 25 ka as revealed by OSL dating of paleo-shorelines [J]. Quaternary Geochronology, 2022, 70: 101274.
- [27] Wang Liquan, Zhu Dicheng, Pan Guitang. Primary results and progress of regional geological survey (1: 250000): the south of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(5): 413-420. [王立全, 朱弟成, 潘桂棠. 青藏高原 1:25 万区域地质调查主要成果和进展综述(南区)[J]. 地质通报, 2004, 23(5): 413-420.]
- [28] Zhu Dagang, Meng Xiangang. On the Quaternary environmental evolution of the Nam Co area, Tibet [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. [朱大岗, 孟宪刚. 西藏纳木错地区第四纪环境演变[M]. 北京: 地质出版社, 2004.]
- [29] Zhao Xitao, Zhu Dagang, Yan Fuhua, et al. Climatic change and lake-level variation of Nam Co, Xizang since the last interglacial stage [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(1): 41-52. [赵希涛, 朱大岗, 严富华, 等. 西藏纳木错末次间冰期以来的气候变迁与湖面变化[J]. 第四纪研究, 2003, 23(1): 41-52.]
- [30] Ma Zhibang, Zhao Xitao, Zhu Dagang, et al. U-series chronology of lacustrine deposits from the Nam Co Lake, north Tibet Plateau [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(4): 311-316. [马志邦, 赵希涛, 朱大岗, 等. 西藏纳木错湖相沉积的铀系年代学研究[J]. 地球学报, 2002, 23(4): 311-316.]
- [31] Zhao Xitao, Wu Zhonghai, Hu Daogong, et al. The discovery of late Pleistocene highstand lacustrine sediments of the Co Ngoin Lake and adjacent areas, Tibet [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(4): 291-298. [赵希涛, 吴中海, 胡道功, 等. 西藏错鄂及邻区晚更新世高位湖相沉积的发现及其意义[J]. 地球学报, 2005, 26(4): 291-298.]
- [32] Cui Xiaojia, Shi Yaolin. Can lake-bottom deformation produced by water unloading be applied to the study of evolution of the ancient large lakes in Tibet? [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2006, 23(5): 681-685. [崔晓佳, 石耀霖. 利用载荷减少引起的湖底变形探讨西藏古大湖演变史[J]. 中国科学院研究生院学报, 2006, 23(5): 681-685.]
- [33] Kong Ping, Na Chunguang, Fink D, et al. Cosmogenic ¹⁰Be inferred lake-level changes in Sumxi Co basin, western Tibet [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29: 698-703.
- [34] Li Shijie, Zhang Hongliang, Shi Yafeng, et al. A high resolution MIS 3 environmental change record derived from lacustrine deposit of Tianshuihai Lake, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2008, 28(1): 122-131. [李世杰, 张宏亮, 施雅风, 等. 青藏高原甜水海盆地 MIS 3 阶段湖泊沉积与环境变化[J]. 第四纪研究, 2008, 28(1): 122-131.]
- [35] Schütt B, Berking J, Frechen M, et al. Late pleistocene lake level fluctuations of the Nam Co, Tibetan Plateau, China [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 2008, 52(Suppl): 57-75.
- [36] Li Dewen, Li Yingkui, Ma Baoqi, et al. Lake-level fluctuations since the Last Glaciation in Selin Co (Lake), Central Tibet, investigated using optically stimulated luminescence dating

- of beach ridges[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4: 045204.
- [37] Wang Liqiang, Yi Chaolu, Xu Xiangke, et al. Soil properties in two soil profiles from terraces of the Nam Co Lake in Tibet, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 6: 354-361.
- [38] Daut G, Mäusbacher R, Baade J, et al. Late Quaternary hydrological changes inferred from lake level fluctuations of Nam Co (Tibetan Plateau, China)[J]. *Quaternary International*, 2010, 218: 86-93.
- [39] Schütt B, Berking J, Frechen M, et al. Late Quaternary transition from lacustrine to a fluvio-lacustrine environment in the north-western Nam Co, Tibetan Plateau, China[J]. *Quaternary International*, 2010, 218: 104-117.
- [40] Kong Ping, Na Chunguang, Brown R, et al. Cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al dating of paleolake shorelines in Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 263-273.
- [41] Meng Kai, Shi Xuhua, Wang Erqi, et al. Geomorphic characteristics, spatial distribution of paleoshorelines around the Siling Co area, central Tibetan Plateau, and the lake evolution within the plateau[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2012, 47(3): 730-745. [孟恺, 石许华, 王二七, 等. 青藏高原中部色林错区域古湖滨线地貌特征、空间分布及高原湖泊演化[J]. *地质科学*, 2012, 47(3): 730-745.]
- [42] Pan Baolin, Yi Chaolu, Jiang Tao, et al. Holocene lake-level changes of Linggo Co in central Tibet[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 117-122.
- [43] Long Hao, Lai Zhongping, Frenzel P, et al. Holocene moist period recorded by the chronostratigraphy of a lake sedimentary sequence from Lake Tangra Yumco on the south Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 136-142.
- [44] Chen Yiwei, Zong Yongqiang, Li Bo, et al. Shrinking lakes in Tibet linked to the weakening Asian monsoon in the past 8.2 ka[J]. *Quaternary Research*, 2013, 80: 189-198.
- [45] England P C, Walker R T, Fu Bihong, et al. A bound on the viscosity of the Tibetan crust from the horizontality of palaeolake shorelines[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 375: 44-56.
- [46] Fan Qishun, Ma Haizhou, Wei Haicheng, et al. Holocene lake-level changes of Hurlig Lake on northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and possible forcing mechanism[J]. *The Holocene*, 2014, 24: 274-283.
- [47] Ahlborn M, Haberzettl T, Wang Junbo, et al. Holocene lake level history of the Tangra Yumco lake system, southern-central Tibetan Plateau[J]. *The Holocene*, 2016, 26(2): 176-187.
- [48] Hudson A M, Quade J, Huth T E, et al. Lake level reconstruction for 12.8—2.3 ka of the Ngangla Ring Tso closed-basin lake system, southwest Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 2015, 83: 66-79.
- [49] Wünnemann B, Yan Dada, Ci Ren. Morphodynamics and lake level variations at Paiku Co, southern Tibetan Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2015, 246: 489-501.
- [50] Chen Feng, Feng Jinliang, Hu Haiping, et al. Potential forcing mechanisms of Holocene lake-level changes at Nam Co, Tibetan Plateau: inferred from the stable isotopic composition of shells of the gastropod *Radix*[J]. *The Holocene*, 2017, 27: 594-604.
- [51] Chen Feng, Feng Jinliang, Hu Haiping, et al. Overflow of the lake Nam Co during its high level period: inferences from oxygen isotope of *radix* shells and geomorphological evidences[J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(2): 271-280. [陈锋, 冯金良, 胡海平, 等. 纳木错高湖面时期的溢流: 基于萝卜螺壳体氧同位素及地貌证据[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(2): 271-280.]
- [52] Shi Xuhua, Furlong K P, Kirby E, et al. Evaluating the size and extent of paleolakes in central Tibet during the late Pleistocene[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 5476-5485.
- [53] Shi Xuhua, Kirby E, Furlong K P, et al. Rapid and punctuated late Holocene recession of Siling Co, central Tibet[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 172: 15-31.
- [54] Yu Shiyong, Colman S M, Lai Zhongping. Late-Quaternary history of 'great lakes' on the Tibetan Plateau and palaeoclimatic implications: a review[J]. *Boreas*, 2019, 48: 1-19.
- [55] Zhou Jie, Zhou Weijian, Dong Guocheng, et al. Cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al exposure dating of Nam Co lake terraces since MIS 5, southern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 231: 106175.
- [56] Chen Feng, Feng Jinliang, Ban Fengmei, et al. Geochemistry of modern shells of the gastropod *Radix* in the Tibetan Plateau and its implications for palaeoenvironmental reconstruction[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2021, 251: 106703.
- [57] Cohen A S. *Paleolimnology: the history and evolution of lake systems*[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 2003.
- [58] Zhu Liping, Lu Xinmiao, Wang Junbo, et al. Climate change on the Tibetan Plateau in response to shifting atmospheric circulation since the LGM[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 13318.
- [59] Kasper T, Haberzettl T, Wang Junbo, et al. Hydrological variations on the central Tibetan Plateau since the Last Glacial Maximum and their teleconnection to inter-regional and hemispheric climate variations[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2015, 30: 70-78.
- [60] Shen Yongping, Xu Daoming. Fluctuations of lakes and their environments since Last Glaciation in Amdo area, Tibet[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(2): 173-180. [沈永平, 徐道明. 西藏安多的湖泊变化与环境[J]. *冰川冻土*, 1994, 16(2): 173-180.]
- [61] Li Shijie, Wuennemann B, Xia Weilan, et al. A preliminary study of the Holocene lake level changes and their causes derived from the sediment record of Zigetang Lake, Tibetan Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 162-167. [李世杰, Wuennemann B, 夏威岚, 等. 青藏高原兹格塘错沉积记录的全新世水位变化事件及其原因初步研究[J]. *地学前沿*, 2009, 16(6): 162-167.]
- [62] Gasse F, Arnold M, Fontes J C, et al. A 13,000-year climate record from western Tibet[J]. *Nature*, 1991, 353: 742-745.
- [63] Digerfeldt G. *Studies on past lake-level fluctuations*[M]// Berglund B E. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. New York: Wiley, 1986: 127-143.
- [64] Fontes J C, Gasse F, Gibert E. Holocene environmental changes in Lake Bangong basin (Western Tibet). Part 1: chronology and stable isotopes of carbonates of a Holocene lacustrine core[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 120: 25-47.
- [65] Talbot M R. A review of the palaeohydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates[J]. *Chemical Geology*, 1990, 80: 261-279.
- [66] Abbott M B, Anderson L. *Lake level fluctuations*[M]// Gornitz V. *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments*. Berlin: Springer, 2012: 489-492.
- [67] Oviatt C G, Sack D, Currey D R, et al. The Bonneville Basin, Quaternary, western United States[M]// Gierlowski-Kordesch E, Kelts K. *Global geologic record of lake basins*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994: 371-375.
- [68] Bookman R. *The Dead Sea and its deviation from natural condi-*

- tions[M]// Mischke S. Large Asian lakes in a changing world. Cham, Switzerland: Springer, 2020: 1-33.
- [69] Chen Feng, Feng Jinliang, Hu Haiping. Relationship between the shell geochemistry of the modern aquatic gastropod *Radix* and water chemistry of lakes of the Tibetan Plateau[J]. *Hydrobiologia*, 2016, 771: 239-254.
- [70] Dearing J A, Foster I D L. Lake sediments and palaeohydrological studies[M]// Berglund B E. Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology. New York: Wiley, 1986: 67-90.
- [71] Wrožyna C, Frenzel P, Daut G, et al. Holocene lake-level changes of Lake Nam Co, Tibetan Plateau, deduced from ostracod assemblages and $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ signatures of their valves[J]. *Developments in Quaternary Sciences*, 2012, 17: 281-295.
- [72] Teller J T, Last W M. Late Quaternary history of Lake Manitoba, Canada[J]. *Quaternary Research*, 1981, 16: 97-116.
- [73] Feng Jinliang, Wang Kunying, Hu Haiping, et al. Amplified and suppressed regional imprints of global warming events on the southeastern Tibetan Plateau during MIS 3—2[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2022, 294: 107736.
- [74] Lin Zhiqiang, Jiala, Xue Gaiping, et al. Spatial-temporal distribution and general circulation of heavy snow over Tibet Plateau in 1980—2000[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(4): 900-906. [林志强, 假拉, 薛改萍, 等. 1980—2010年西藏高原大到暴雪的时空分布和环流特征[J]. *高原气象*, 2014(4): 900-906.]
- [75] Li Xiuzhen, Wen Zhou. Modulation of the interannual variation of the India-Burma Trough on the winter moisture supply over Southwest China[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 46(1/2): 147-158.

Reconstruction of anomalously high lake level of Lake Nam Co on the Tibetan Plateau: a review and perspectives

WANG Kunying^{1,2}, FENG Jinliang¹, PEI Lele^{1,2}, HU Haiping³, CHEN Feng⁴,
LIN Yongchong⁵, ZHANG Jifeng^{6,7}, HU Zhaoguo⁸

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 4. School of Resources and Environment, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China; 5. School of History and Geography, Minnan Normal University, Zhangzhou 363500, Fujian, China; 6. Key Laboratory of Tibetan Plateau Biodiversity and Ecological Environment Protection, Ministry of Education, Tibet University, Lhasa 850000, China; 7. Laboratory of Environmental DNA and Ecological Security, Tibet University, Lhasa 850000, China; 8. Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, China Metallurgical Geology Bureau, Jinan 250013, China)

Abstract: In the Tibetan Plateau, many lakes have shoreline, erosion terraces and high-level lake sediments. These geomorphologic and sedimentary units are direct geomorphologic and lithologic evidence for the changes of lake surface in geological history. These landforms and sediments not only reflect the hydrological history of the lake, but also serve as important archives to reveal regional and global environmental changes. Lake Nam Co is the most typical and representative lake system on the Tibetan Plateau. The highest abandoned lacustrine sediments along Lake Nam Co coast lie about 150 m above the modern present lake level and 123 m above the present topographic threshold. A series of scientific issues, such as the times of the abnormally high lake-level, the transgression and regression processes of lake, the drivers of the extreme high-level events, and the hydrologic connection with other lakes, remain ambiguous or controversial. Here, we focus on the the abandoned high-level lacustrine sediments along Lake Nam Co coast. The issues of characteristics, ages, processes and driving mechanisms of lake-level changes at Nam Co were commented. Furthermore, the focuses of researches in future were presented. Finally, based on our preliminary investigations, we suggest that the high-level lake sediments around the Nam Co coast may be formed during the middle to late Holocene, indicating one transgression and regression process. The anomalous oscillation of the India-Burma Trough and relevant high snowfall may be the main driver of lake-level variation.

Key words: Tibetan Plateau; Lake Nam Co; coast landform; high-level sediments; lake-level change

(责任编辑: 王杰)