

中国盐湖沉积年代学研究进展

曾方明

(中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘要:盐湖沉积记录了区域气候和水文变化,是重要的古气候研究对象。年代学是盐湖古气候研究最重要的一项内容,是后续工作的基础。盐湖沉积最常用的定年方法有 ^{14}C 定年、铀系定年、光释光(OSL)定年、古地磁定年。受各种定年方法自身局限性以及盐湖沉积特殊性的制约,存在不同方法测出的年龄差异较大的现象。准确测定盐湖沉积的年代还较为困难,一定程度限制了盐湖古气候研究的发展。最新研究表明,由于盐湖沉积有机质含量低,易受现代碳的污染, ^{14}C 测年中存在复杂的碳库效应,其 ^{14}C 年代老于30 cal ka BP时,测出的年龄可能被低估,需谨慎对待。未来需要加强铀系定年和光释光定年等方法在盐湖沉积中的基础研究,并开发新的更好的测年方法,提高盐湖沉积测年的准确度,为深入开展盐湖古气候变化及成盐成矿规律研究提供坚实基础。

关键词:盐湖;年代学;盐湖演化;古气候

中图分类号:P532;P534.63

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2016)02-0037-07

1 引言

盐湖是含盐度较高的湖泊。广义盐湖的含盐度下限为0.3%;狭义盐湖的含盐度下限为3.5%^[1]。盐湖由淡水湖、咸水湖演变而成,其发展形成的各个阶段都记录了周围气候变化的信息,其沉积物是开展古气候以及地貌演化研究的重要对象^[2-7]。

盐湖的形成演化主要受湖盆构造、盐类物质来源、气候变化等因素影响。“干化深盆”学说较好地解释了古地中海巨型盐矿的成因^[8]。“高山深盆”和气候极端干旱化被认为是柴达木盆地盐湖的成因^[9-10]。新疆盐湖虽然存在温泉热液补给,但主要是在干旱气候条件下湖水通过强烈蒸发而成^[11]。因此,盐湖的形成演化与气候变化密不可分。对盐湖沉积开展古气候研究,提取温度、降水等气候信息,可为研究

极端干旱事件发生的方式和规律提供证据。

重建盐湖沉积记录的古气候演化,首要任务就是要准确建立盐湖沉积的年代标尺。在可靠年代标尺的基础上,运用各种古气候替代指标获得盐湖沉积记录的古气候信息,探讨不同时间尺度上气候变化的规律,对丰富古气候学具有重要意义。如果不能准确建立盐湖沉积的年代标尺,准确重建盐湖沉积记录的古气候变化就会受到限制。因此,年代学是盐湖古气候研究最关键的内容,是后续几乎所有工作的基础。

学者们通过各种方法对盐湖沉积的年代学进行了研究,取得了一系列重要进展。目前最常用的测年方法有 ^{14}C 定年^[12-13]、铀系定年^[14-15]、光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)定年^[7,16-18]和古地磁定年^[19-20]。本文基于前人的研究成果,简要综述了盐湖沉积的年代学研究方法及其进展,以期对将来盐

收稿日期:2015-12-16;修回日期:2016-02-11

基金项目:中国科学院青海盐湖研究所青年引导基金(Y460261051)

作者简介:曾方明(1982-),男,博士,副研究员,主要从事第四纪地质研究。Email:fmzeng@163.com。

湖沉积的古气候研究能起到抛砖引玉的作用。

2 盐湖沉积的定年方法和应用

2.1 ^{14}C 定年

受气候干湿波动影响,盐湖钻孔沉积通常由碎屑沉积(砂、粘土等)和盐类沉积(石盐、石膏等)的互层所组成。对于钻孔中的碎屑沉积,可以采用 ^{14}C 方法进行定年。由于盐湖沉积物中通常缺乏植物残体和碳屑等较好的测年材料,一般选用全岩有机质^[21-22]甚至无机碳酸盐^[12]作为测年材料。 ^{14}C 测年的上限一般为40~50 ka BP^[23-24],该法可测定年轻盐湖沉积的年龄。

学者们对青藏高原和柴达木盆地盐湖的多个钻孔进行了 ^{14}C 年代的测定^[4,12,25]。随着加速器质谱(Accelerator Mass Spectrometry) ^{14}C (简称AMS ^{14}C)测年技术的发展,其测年结果比常规 ^{14}C 测年精度更高。IntCal13曲线可以用来校正AMS ^{14}C 测定的年代^[26],校正后的年代用cal ka BP表示。最近,AMS ^{14}C 测年技术

被运用到察尔汗盐湖 ISL-1A 钻孔上部 54.44 m 沉积物的年代学研究^[21,27]。西藏扎布耶盐湖 SZK-02 钻孔的 ^{14}C 年代在 30.75 cal ka BP 之后出现年代倒转^[4]。兴凯湖(淡水湖)钻孔的 AMS ^{14}C 年代^[28]和新疆伊犁黄土的 AMS ^{14}C 年代^[29]大于 30 cal ka BP 时, ^{14}C 年代将不随地层深度变老甚至出现倒转。产生上述现象的原因被认为是现代碳的污染导致 ^{14}C 年代在 30 cal ka BP 时趋近饱和^[29]。上述研究结果表明,盐湖沉积的 ^{14}C 年代老于 30 cal ka BP 时,测出的年龄可能被低估,需要谨慎对待。

和其它湖泊沉积一样,盐湖沉积的 ^{14}C 测年也存在复杂的碳库效应^[30](表 1)。研究表明,茶卡盐湖的碳库效应为 1 700 a^[31],扎布耶盐湖的碳库效应为 2 000 a^[32]。青藏高原湖泊的碳库效应在空间上和时间上都存在变化^[30]。对于盐湖沉积的碳库效应,目前通常的做法是对整套沉积的 ^{14}C 年代统一减去碳库年龄。然而,单个盐湖沉积在不同深度的碳库效应很可能不同。因此,准确评估盐湖沉积的碳库效应是利用 ^{14}C 测年方法建立准确年代标尺需要考虑的问题。

表 1 盐湖沉积 ^{14}C 测年的碳库效应

Table 1 Reservoir ages from salt lakes

盐湖	沉积物	测年材料	^{14}C 库效应/a	获取碳库年龄方法	文献来源
茶卡盐湖	CKL-2004 钻孔	总有机碳	1 700	线性外推法	[31]
扎布耶盐湖	剖面沉积	无机碳	2 000	线性外推法	[32]
察尔汗盐湖	ISL-1A 钻孔	总有机碳	2 370	比较平均法	[21]

综上所述, ^{14}C 测年技术虽然在盐湖沉积中被广泛运用,但由于盐湖沉积中有机质稀少,且受碳库效应和现代碳污染等因素影响,尤其是当 ^{14}C 年代老于 30 cal ka BP 时需要谨慎。采用其它测年方法与 ^{14}C 测年结果相互检验,是准确获得盐湖沉积年代的有效手段。

2.2 铀系定年

依据 ^{238}U 放射性同位素衰变规律, $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 方法建立 U 进入样品后同位素时钟启动的时间^[33],适用于盐湖沉积的年龄测

定^[14]。铀系定年所选样品的测年矿物需要基本满足 U、Th 地球化学处于封闭的条件,确保所获年龄数据的可信度。与 ^{14}C 测年方法相比,铀系测年上限更高,可达 500 ka^[34-35]。

铀系定年是盐湖沉积测年的常用方法^[7,21,36]。盐湖沉积中的碳酸盐粘土^[14]、含粉砂泥岩和含粉砂石盐^[36-37]、石盐^[21]、石膏和石盐^[7,38]都可以作为铀系定年的材料。

基于西藏扎布耶盐湖 SZK-02 孔的铀系年代学结果^[4],粒度指标难以区分出深海氧同位素(MIS,marine isotope stage)4 阶段和 5 阶段

分别所代表的冰期和间冰期^[39],表明该钻孔的铀系年代可能存在一定的问题。察尔汗盐湖 ISL-1A 钻孔的铀系年代揭示出钻孔 51.1 m 深处盐层的年代为 ~ 51.5 ka^[21],与基于 3 个 AMS ^{14}C 年代线性外推得出的 ~ 80 ka 的年代存在差异^[27]。该差异主要与不同的测年方法有关。

铀系定年的测年上限比 ^{14}C 测年要高,而且盐湖沉积中存在可供开展铀系年代测定的材料。但是铀系测年需要基本满足 U、Th 地球化学处于封闭的条件,对测年材料有严格的要求。

2.3 OSL 定年

OSL 测年是通过测定沉积物埋藏之后接受的总辐射剂量(即等效剂量),并利用沉积物的 U、Th、K 含量以及宇宙射线提供的辐射剂量估算单位时间接收的剂量(即剂量率),从而获得沉积物的埋藏年代^[40]。成熟的石英单片再生剂量法 OSL 测年^[41]被广泛证实可以用于测定距今约 100 ka 以来的多种类型沉积物^[28,42-44],另外也有其它一些新的方法被初步证实能够测定超越晚更新世的沉积物,譬如回授 OSL (ReOSL)被明确证实可以测量约 800 ka 以来的中国黄土沉积^[42,45]。

OSL 测年要求石英等颗粒在沉积前要充分曝光,将释光信号归零。由于风成沉积在从源区到堆积区的搬运过程中,经历了足够长的曝光时间,致使用于测年的光释光信号在沉积之前归零,从而 OSL 测年方法能准确测出风成沉积的年代^[42,46-47]。近年来,OSL 测年技术被运用到了包括盐湖在内的湖相沉积的年代测定中^[7,16,18,22,28,48-51]。

新疆罗布泊盐湖 5.7 m 深探坑(YKD0301)的光释光年代为 $0.5 \sim 9.4$ ka^[18]。柴达木盆地西部 SG-1 孔顶部 $0.5 \sim 1.9$ m 的光释光年代为 $77.8 \sim 92.9$ ka^[7]。柴达木盆地西台吉乃尔盐湖沉积剖面 0.4 m 和 1.9 m 深处的 OSL 年代分别为 57.9 ka 和 69.1 ka^[22]。罗布泊盐湖 ZKD0012 孔芒硝层段的 OSL 年代为 19.83 ka,对应末次盛冰期的年代^[17]。

2.4 古地磁定年

古地磁定年可以建立过去 167 Ma 以来的

地层年代^[52],能够确定长尺度钻孔沉积的年代^[53-57]。对于盐湖区长序列的钻孔,目前主要依靠古地磁定年手段来测年。依据古地磁定年,对柴达木盆地盐湖多个钻孔进行了古地磁定年^[19,37,58]。

古地磁年代学结果显示,柴达木盆地西部的成盐历史(大浪滩最早的盐层年代 > 3.90 Ma,昆特依地区最早的盐层年代约为 1.18 Ma)远远早于东部地区(察尔汗盐湖最早的盐层出现年代为 $54 \sim 24$ ka)^[58],造成上述差异的主要原因是构造运动导致柴达木盆地西部隆升,从而引起沉积中心由西向东迁移^[59]。柴达木盆地大浪滩梁 ZK05 孔底部 330 m 的古地磁年代约为 2 Ma^[60],大浪滩梁 ZK02 孔底部 1 000 m 处的古地磁年代估计为 $2.5 \sim 2.6$ Ma^[61]。柴达木盆地 SG-1 孔千米钻底部的古地磁年代为 ~ 2.77 Ma^[20]。上述钻孔的古地磁年代为研究柴达木盆地晚新生代以来的构造和沉积演化提供了重要的年代学证据。

值得一提的是,上述钻孔由于缺少可提供相对年代的古生物化石证据,古地磁定年结果带有不确定性。此外,由于柴达木盆地晚新生代沉积的复杂性,构造运动导致地层因遭受侵蚀而缺失,会给古地磁定年带来难度。

3 存在的问题

3.1 不同测年方法的结果不一致

盐湖沉积年代学研究中,对于同一钻孔,不同测年方法得出的年代存在不一致现象。例如,柴达木盆地察尔汗盐湖 CK88-01 孔^[25]和 ISL-1A 孔^[21]的 ^{14}C 年代和铀系年代不一致。CK88-01 钻孔 ~ 24 m 以上地层的 ^{14}C 年龄明显比铀系测年结果老^[25](图 1a)。ISL-1A 钻孔中 AMS ^{14}C 年代与铀系定年结果只在上部 $0 \sim 15$ m 深的地层中基本一致;从 30.29 m 深开始往下,AMS ^{14}C 年代出现倒转并基本稳定在 30 cal ka BP 附近,且明显比铀系定年结果年轻(图 1b),可能是测年有机质受到了现代碳的污染,导致 AMS ^{14}C 年代被低估^[21]。柴达木盆地西台吉乃尔盐湖沉积剖面的 OSL 年代和

AMS ^{14}C 年代存在显著的不一致, AMS ^{14}C 年代 (33 ~ 40 cal ka BP) 明显比 OSL 年代 (57.9 ka

和 69.1 ka) 年轻^[22]。

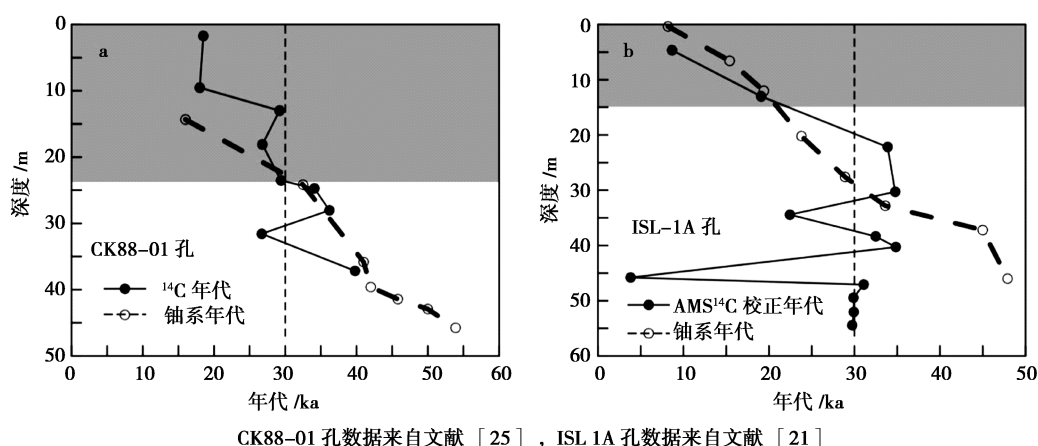


图 1 察尔汗盐湖钻孔沉积 ^{14}C 测年结果和铀系测年结果比较

Fig. 1 Comparisons between ^{14}C ages and uranium-series ages in cores from Qarhan salt lakes, Qaidam Basin

不同测年方法得出的结果不一致,一方面与测年方法自身的局限性有关,另一方面可能与盐湖沉积的特殊性有关。对于盐湖沉积,开展多种测年方法的交叉验证,准确评估各种测年方法得出的结果,提高测年的准确性,对于盐湖沉积的年代学研究是必要的。

3.2 铀系和 OSL 测年方法在盐湖沉积中的基础研究尚不完备

目前对盐湖钻孔和剖面沉积中盐类矿物 U-Th 同位素体系的封闭性以及不同矿物(石

膏、石盐、芒硝等)铀系测年结果的比较研究很少。对盐湖区各类水体 U、Th 同位素地球化学行为以及沉积物中 U、Th 的来源对铀系定年影响的研究也很少^[14]。未来开展这些方面的研究将对铀系测年技术在盐湖沉积中的应用产生积极作用。

准确测定等效剂量和剂量率是获得可靠 OSL 年代的前提。获得准确的等效剂量的一个重要前提就是要确定待测样品在最后一次埋藏之前其 OSL 信号残留值的大小,即其 OSL 信号是否完全“归零”或衰退到某一稳定的残留值。

表 2 西台吉乃尔盐湖沉积剖面 K、U、Th 含量

Table 2 Contents of K, U and Th in deposits from West Taijinar salt lake

样品号	深度/m	K/%	U/ $\times 10^{-6}$	Th/ $\times 10^{-6}$	Th/U
XT-1*	0.4	1.55	6.92	6.35	0.92
XT-2	0.7	2.54	4.07	13.01	3.20
XT-3	1.0	2.24	4.74	11.30	2.38
XT-4	1.3	2.52	4.09	12.80	3.13
XT-5	1.6	2.86	4.43	14.40	3.25
XT-6*	1.9	1.63	3.03	8.11	2.68
XT-7	2.1	2.35	3.54	11.60	3.28
XT-8	2.3	2.61	3.74	12.81	3.43

* 数据来自文献[22]

在湖相沉积的 OSL 年代测定方面,目前对湖相沉积的曝光机制研究还不够。另外测年材料(石英或长石)和测年信号(OSL 或 IRSL)在盐湖沉积的年代学研究中也有待继续深入。

盐湖沉积中的 K、U、Th 和 Th/U 比值变化大。西台吉乃尔盐湖沉积剖面的 K 含量变化范围为 1.55% ~ 2.86%, U 含量变化范围为 3.03×10^{-6} ~ 6.92×10^{-6} , Th 含量变化范围为 6.35×10^{-6} ~ 14.40×10^{-6} , Th/U 比值变化范围为 0.92 ~ 3.43(表2)。上述结果表明盐湖沉积的 K、U、Th 含量变化幅度大,从而影响等效剂量和剂量率的准确估算,进而影响到 OSL 测年结果的准确性。盐湖沉积中一个非常重要的影响因子是水的波动可能造成放射性 K、U、Th 元素分布不稳定,即环境剂量率的不稳定。

4 总结与展望

学者们采用各种测年方法对盐湖沉积的年代学进行了研究。基于目前已进行的¹⁴C定年、铀系定年、OSL 定年和古地磁定年等多种测年方法,在盐湖沉积的年代学研究方面取得了一系列重要进展,建立了多个盐湖钻孔沉积的年代学标尺,为开展盐湖沉积的古气候研究提供了重要的支持。

然而,对于同一套盐湖沉积,不同测年方法得出的结果有时不一致以及铀系测年、OSL 测年方法在盐湖沉积中的基础研究尚不完备,一定程度制约了盐湖沉积的古气候学研究。未来需要加强各种不同方法的交叉验证,完善铀系测年和光释光测年在盐湖沉积中的相关基础研究,并开发新的更好的测年方法,进一步提高盐湖沉积测年结果的准确性。

致谢:刘向军博士和审稿专家提出了建设性修改意见,特致谢忱!

参考文献:

- [1] 郑绵平. 论中国盐湖[J]. 矿床地质, 2001, 20(2): 181 - 189.
- [2] Chen K Z, Bowler J M. Late Pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam basin, Qinghai province, China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 54(1): 87 - 104.
- [3] Oviatt C G, Madsen D B, Miller D M, *et al.* Early Holocene Great Salt Lake, USA [J]. *Quaternary Research*, 2015, 84(1): 57 - 68.
- [4] Zheng M P, Yuan H, Liu J Y, *et al.* Sedimentary characteristics and paleoenvironmental records of Zabuye Salt Lake, Tibetan Plateau, since 128 ka BP [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(5): 861 - 874.
- [5] 黄麒, 陈克造. 七十三万年来柴达木盆地察尔汗盐湖古气候波动的形式 [J]. 第四纪研究, 1990, 10(3): 205 - 212.
- [6] 张彭熹, 张保珍. 柴达木地区近三百万年来古气候环境演化的初步研究 [J]. 地理学报, 1991, 46(3): 327 - 335.
- [7] Han W, Ma Z, Lai Z, *et al.* Wind erosion on the north-eastern Tibetan Plateau: constraints from OSL and U-Th dating of playa salt crust in the Qaidam Basin [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(6): 779 - 789.
- [8] Hsu K J. Origin of saline giants: a critical review after the discovery of the Mediterranean evaporite [J]. *Earth-Science Reviews*, 1972, 8(4): 371 - 396.
- [9] 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析 [J]. 地质论评, 1983, 29(2): 159 - 165.
- [10] 张彭熹, 等. 柴达木盆地盐湖 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [11] 郑喜玉. 新疆盐湖及其成因 [J]. 海洋与湖沼, 1984, 15(2): 168 - 178.
- [12] Huang Q, Cai B Q, Yu J Q. The ¹⁴C age and cycle of sedimentation of some saline lakes on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1981, 26(1): 66 - 70.
- [13] Cupper M L, Drinnan A N, Thomas I. Holocene palaeoenvironments of salt lakes in the Darling Anabranch region, south-western New South Wales, Australia [J]. *Journal of Biogeography*, 2000, 27(5): 1079 - 1094.
- [14] 马志邦, 马妮娜, 张雪飞, 等. 西藏扎布耶湖晚更新世沉积物²³⁰Th/²³⁸U 年代学研究 [J]. 地质学报, 2010, 84(11): 1641 - 1651.
- [15] Bobst A L, Lowenstein T K, Jordan T E, *et al.* A 106 ka paleoclimate record from drill core of the Salar de Atacama, northern Chile [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 173: 21 - 42.
- [16] Magee J W, Miller G H, Spooner N A, *et al.* Continuous 150 k. y. monsoon record from Lake Eyre, Australia: insolation-forcing implications and unexpected Holocene failure [J]. *Geology*, 2004, 32(10): 885 - 888.
- [17] 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 等. 罗布泊盐湖晚更新世末期芒硝岩沉积及其古气候意义 [J]. 地球学报, 2008, 29(4): 397 - 404.
- [18] Zhang J F, Liu C L, Wu X H, *et al.* Optically stimulated lu-

- minescence and radiocarbon dating of sediments from Lop Nur (Lop Nor), China [J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 150 – 155.
- [19] 沈振枢, 程果, 乐昌硕, 等. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [20] Zhang W, Appel E, Fang X, *et al.* Magnetostratigraphy of deep drilling core SG-1 in the western Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) and its tectonic implications [J]. *Quaternary Research*, 2012, 78: 139 – 148.
- [21] Fan Q S, Ma H Z, Ma Z B, *et al.* An assessment and comparison of ^{230}Th and AMS ^{14}C ages for lacustrine sediments from Qarhan Salt Lake area in arid western China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71 (3): 1227 – 1237.
- [22] Zeng F M, Xiang S Y. Geochronology and mineral composition of the Pleistocene sediments in Xitaijinair salt lake region, Qaidam Basin; preliminary results [J]. *Journal of Earth Science*, 2015; in press.
- [23] Cutler K B, Gray S C, Burr G S, *et al.* Radiocarbon calibration and comparison to 50 kyr BP with paired ^{14}C and ^{230}Th dating of corals from Vanuatu and Papua New Guinea [J]. *Radiocarbon*, 2004, 46 (3): 1127 – 1160.
- [24] Pigati J S, Quade J, Wilson J, *et al.* Development of low-background vacuum extraction and graphitization systems for ^{14}C dating of old (40 – 60 ka) samples [J]. *Quaternary International*, 2007, 166: 4 – 14.
- [25] 梁青生, 黄麒. 青海察尔汗盐湖达布逊区段和别勒滩区段的成盐年代 [J]. *沉积学报*, 1995, 13 (3): 126 – 131.
- [26] Reimer P J, Bard E, Bayliss A, *et al.* IntCal13 and MARINE13 radiocarbon age calibration curves 0 – 50000 years cal BP [J]. *Radiocarbon*, 2013, 55 (4): 1869 – 1887.
- [27] Long H, Shen J. Underestimated ^{14}C -based chronology of late Pleistocene high lake-level events over the Tibetan Plateau and adjacent areas: Evidence from the Qaidam Basin and Tengger Desert [J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58 (2): 183 – 194.
- [28] Long H, Shen J, Wang Y, *et al.* High-resolution OSL dating of a late Quaternary sequence from Xingkai Lake (NE Asia): Chronological challenge of the “MIS 3a Mega-paleolake” hypothesis in China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 428: 281 – 292.
- [29] Song Y G, Lai Z P, Li Y, *et al.* Comparison between luminescence and radiocarbon dating of late Quaternary loess from the Ili Basin in Central Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 2015, 30: 405 – 410.
- [30] Hou J, D'Andrea W J, Liu Z. The influence of ^{14}C reservoir age on interpretation of paleolimnological records from the Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 48: 67 – 79.
- [31] Liu X Q, Dong H L, Rech J A, *et al.* Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene – Holocene [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 867 – 879.
- [32] 李明慧, 康世昌, 朱立平, 等. 青藏高原扎布耶盐湖晚全新世气候环境演化 [J]. *干旱区地理*, 2008, 31 (3): 333 – 340.
- [33] Ku T L. The uranium-series methods of age determination [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1976, 4: 347 – 379.
- [34] Edwards R L, Chen J H, Wasserburg G J. ^{238}U – ^{234}U – ^{230}Th – ^{232}Th systematics and the precise measurement of time over the past 500 000 years [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 81: 175 – 192.
- [35] Peng Z C, Wang Z R, Sun W D, *et al.* High-precision timing of the Quaternary standard samples with thermal ionization mass spectrometry (TIMS) U-series method [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43 (4): 333 – 336.
- [36] 韩凤清, 黄麒, 王克俊, 等. 柴达木盆地昆特依盐湖的地球化学演化与古气候变化 [J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26 (5): 502 – 508.
- [37] 韩凤清, 黄麒, 王克俊, 等. 柴达木盆地昆特依盐湖的地球化学演化与古气候变化 [J]. *盐湖研究*, 1991, (4): 1 – 6.
- [38] 侯献华, 郑绵平, 张成君, 等. 柴达木盆地西部大浪滩 140 ka 以来沉积特征与古环境 [J]. *地质学报*, 2010, 84 (11): 1623 – 1630.
- [39] Wang H L, Zheng M P, Yuan H. Highstands in the interior of the Qinghai-Tibetan Plateau since the last interglacial: evidence from grain-size analysis of lacustrine core sediments in Zabuye Salt Lake [J]. *Geological Journal*, 2015; in press.
- [40] Aitken M J. An introduction to optical dating [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [41] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol [J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32 (1): 57 – 73.
- [42] Kang S, Lu Y, Wang X. Closely-spaced recuperated OSL dating of the last interglacial paleosol in the southeastern margin of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6: 480 – 490.
- [43] Lu Y C, Wang X L, Wintle A G. A new OSL chronology for dust accumulation in the last 130 000 yr for the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Research*, 2007, 67 (1): 152 – 160.
- [44] Rhodes E J. Optically Stimulated Luminescence Dating of Sediments over the Past 200 000 Years [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2011, 39: 461 – 488.
- [45] Wang X L, Lu Y C, Wintle A G. Recuperated OSL dating of fine-grained quartz in Chinese loess [J]. *Quaternary Geochronology*, 2006, 1 (2): 89 – 100.
- [46] Sun Y, Clemens S C, Morrill C, *et al.* Influence of Atlantic

- meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5: 46–49.
- [47] Wang X Y, Yi S W, Lu H Y, *et al.* Aeolian process and climatic changes in loess records from the northeastern Tibetan Plateau: response to global temperature forcing since 30 ka [J]. *Paleoceanography*, 2015, 30(6): 612–620.
- [48] Liu X J, Lai Z P, Madsen D, *et al.* Lake level variations of Qinghai Lake in northeastern Qinghai-Tibetan Plateau since 3.7 ka based on OSL dating [J]. *Quaternary International*, 2011, 236: 57–64.
- [49] Liu X J, Lai Z P, Madsen D M, *et al.* Last deglacial and Holocene lake level variations of Qinghai Lake, north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2015, 30(3): 245–257.
- [50] Fan Q S, Lai Z P, Long H, *et al.* OSL chronology for lacustrine sediments recording high stands of Gahai Lake in Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5: 223–227.
- [51] Lai Z P, Mischke S, Madsen D. Paleoenvironmental implications of new OSL dates on the formation of the “Shell Bar” in the Qaidam Basin, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2014, 51(2): 197–210.
- [52] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G. A geologic time scale 2004 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [53] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, *et al.* Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416: 159–163.
- [54] Zhu R X, Hoffman K A, Potts R, *et al.* Earliest presence of humans in northeast Asia [J]. *Nature*, 2001, 413: 413–417.
- [55] Zheng H, Wei X, Tada R, *et al.* Late Oligocene-early Miocene birth of the Taklimakan Desert [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(25): 7662–7667.
- [56] Ding Z L, Sun J M, Yang S L, *et al.* Preliminary magnetostratigraphy of a thick eolian red clay loess sequence at Lingtai, the Chinese Loess Plateau [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(8): 1225–1228.
- [57] Dupont-Nivet G, Krijgsman W, Langereis C G, *et al.* Tibetan plateau aridification linked to global cooling at the Eocene-Oligocene transition [J]. *Nature*, 2007, 445: 635–638.
- [58] Wang J, Fang X, Appel E, *et al.* Magnetostratigraphic and radiometric constraints on salt formation in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 53–64.
- [59] 吕宝凤, 赵小花, 周莉, 等. 柴达木盆地新生代沉积转移及其动力学意义 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(4): 552–558.
- [60] 施林峰, 郑绵平, 李金锁, 等. 柴达木盆地大浪滩梁 ZK05 钻孔的磁性地层研究 [J]. *地质学报*, 2010, 84(11): 1631–1640.
- [61] 秦永鹏, 侯献华, 郑绵平, 等. 柴达木盆地大浪滩梁—ZK02 孔的磁性地层及其古环境研究 [J]. *地质论评*, 2012, 58(3): 553–564.

Progress on Dating Deposits from Salt Lake in China

ZENG Fang-ming

(*Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China*)

Abstract: Salt lake deposit records regional climatic and hydrological changes during the past. Thus, it is an important archive for paleoclimatic study. Geochronological study is very important for reconstructing the past climate change recorded in salt lake. At present, ^{14}C dating, uranium-series dating, OSL (optically stimulated luminescence) dating and paleomagnetic dating are the most common methods to date deposits from salt lake. Due to limitations of the above dating methods and characteristics of salt lake deposits, past researches show that chronological results derived by different dating methods are sometimes inconsistent. Accurate dating of deposits from salt lake is still difficult. Therefore, the paleoclimate study on salt lakes has been hampered. Organic matter is few in the deposits from salt lakes, and it can be easily contaminated by modern carbon. The ^{14}C ages of salt lake deposits are usually influenced by complicated carbon reservoir effect. The latest researches show that the ^{14}C ages are probably underestimated when the ^{14}C ages are older than 30 cal ka BP. Basic study for uranium-series and OSL dating methods, and exploitation of new better methods to improve the accuracy of dating results in deposits from salt lake, will help to establish a robust foundation for paleoclimatic reconstruction in the future.

Key words: Salt lake; Geochronology; Salt lake evolution; Paleoclimate