

铀系法年代学研究进展及在高原盐湖中的应用

马妮娜, 郑绵平

中国地质科学院矿产资源研究所; 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘要 高原盐湖在形成的各个阶段, 都详尽记录和保存着其咸化阶段的环境变化信息, 是研究极端干旱气候的重要载体。年代学是盐湖古气候研究最重要的一项内容, 也是后续研究工作的基础。目前除了最常用的¹⁴C定年、光释光(OSL)定年、电子磁悬共振(ESR)和古地磁定年等方法外, 铀系法定年在盐湖沉积的年代学研究中也得到了广泛的应用。随着技术发展, 铀系测年技术方法经历了 α 谱法、热电离质谱法(TIMS)再到多接收器电感耦合等离子体质谱技术(MC-ICP-MS)的不同发展阶段。而这些技术方法在不同时期和阶段对第四纪及高原盐湖的定年研究做出了一定的贡献。盐湖沉积中的碳酸盐黏土、石盐和石膏等盐类矿物都可以作为铀系定年的研究材料。随着质谱技术的发展, 盐类矿物的微区定年也逐渐成为可能。同时, 盐湖沉积中盐类矿物的铀系定年研究仍然有限, 未来多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。

关键词 青藏高原; 盐湖沉积; 铀系法年代学; 盐类矿物

盐湖沉积是特定自然地理和地质环境的产物, 对古气候和古环境变化有着灵敏的记录。盐湖由淡水湖—咸水湖演变而来, 自形成起, 在其发展的各个阶段都详尽地保存着周围环境变化的信息, 包括一般湖沼相所缺失的咸化阶段的宝贵资料^[1-2]。因此, 盐湖沉积是陆相沉积中又一个研究极端干旱气候的重要载体。

青藏高原分布着地球上数量最多、总面积最大、海拔最高的湖泊盐湖群, 这些盐湖大多深居高原腹地或高原盆地之中, 为典型的陆相成因^[3]。盐湖区作为青藏高原上较为独特的地理单元, 是在高原隆升过程中不断响应区域气候环境及全球变化的产物。自新生代以来, 该地区的气候和环境演变与青藏高原的隆升密切相关, 沉积了巨厚的湖相沉积, 尤其以盐泥互层的盐湖沉积为特征, 这种连续巨厚的盐湖相沉积

物中保存了大量的古气候信息, 能够为青藏高原古湖泊演化、长尺度的气候环境演变及大气环流的演化提供一个高分辨率的研究载体^[4-10]。

重建盐湖沉积记录的古气候演化, 首要任务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。因此, 年代学是盐湖古气候研究最关键的内容之一, 为后续研究工作的基础。第四纪学家们发展了许多专门测定年轻沉积物年龄的方法和技术(表1)^[11-12]。这些测年方法主要分两类: 一类属数值定年, 如放射性定年法、树木年轮等; 另一类属对比性定年, 如某些岩石地层法、生物法乃至地磁法。在实际的应用中, 以上两类方法相辅相成、互相验证。

表1 第四纪测年方法及技术归纳

Fig. 1 The summary of methods and technologies for Quaternary dating

岩石地层法	生物法	磁性地层法	考古法	放射性定年法	其他测年法
地层层序	化石	磁性倒转	文化古迹	放射性同位素法	黑曜岩脱水
构造其次	孢子花粉		历史文献	宇宙成因核素	岩石漆法
沉积纹层	树木年轮			核辐射效应法	氨基酸消旋法
	地衣生长法				

收稿日期: 2016-11-22; 修回日期: 2017-02-24

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41302142)

作者简介: 马妮娜, 助理研究员, 研究方向为盐湖地质学 and 同位素年代学, 电子邮箱: 56258751@qq.com

引用格式: 马妮娜, 郑绵平. 铀系法年代学研究进展及在高原盐湖中的应用[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 77-82; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.06.009

学者们通过各种方法对盐湖沉积的年代学进行研究,取得了一系列重要进展。目前最常用的测年方法有¹⁴C定年、铀系定年、光释光(OSL)定年、电子磁悬共振(ESR)和古地磁定年等。受各种定年方法自身局限性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。尤其在干旱区的盐湖中,新生代以来沉积了巨厚又连续的盐湖相沉积物,除了盐类矿物以外缺乏其他有效的测年材料,往往只能间接地获得盐层的沉积年代。光释光和电子磁悬共振方法的可靠性往往取决于很多自由参数及U摄取历史不确定度的校正^[13-14]。¹⁴C的理论测年范围为100~50000 a BP,但实际有效测年范围不超过30000 a BP^[15]。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,¹⁴C测年中存在复杂的碳库效应,其¹⁴C年代老于30 ka BP时,测出的年龄可能被低估,需谨慎对待。而随着测年技术的发展和质谱技术的广泛应用,铀系不平衡法在盐湖古气候研究中得到了越来越多的应用。

1 铀系年代学方法与原理

铀系法测年又称铀系不平衡法测年,主要系基于放射性核素²³⁸U与其衰变子体²³⁴U、²³⁰Th之间的不平衡关系测定地质年龄的有效手段。在自然界的岩石和水体中,广泛分布着放射性元素铀。在天然水体中,铀络合阴离子很容易溶于水并被水载运;相反,Th⁴⁺则容易水解,沉淀或被吸附在其他物质上。一般来说,盐湖沉积物中U含量都比较高。U在晶间卤水中含量为海水的10倍(海水中U含量约为3.3 μg/g),而不同产状的卤水中U含量可达海水的100倍以上^[16]。当湖水经蒸发浓缩,主要盐分形成新的各种盐类矿物沉积时,U进入矿物晶格与碎屑组分的沉积物沉淀到湖底。因此,在这些新生矿物中含有微量U,Th的含量可以忽略。其后,²³⁸U衰变产生中间子体²³⁴U($T_{1/2}=245.6$ ka)^[17]和²³⁰Th($T_{1/2}=75.2$ ka)^[18],随着时间推移子体与²³⁸U达到久期平衡,沉积物的年龄视²³⁰Th和²³⁸U与²³⁴U和²³⁸U之间的不平衡程度来确定。

假设样品形成后保持在化学封闭体系条件下,即相对于U-Th同位素不发生后期加入和迁出,则样品的年龄可从²³⁰Th的生长速率计算^[19]

$$\frac{{}^{230}\text{Th}}{{}^{234}\text{U}} = \frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{234}\text{U}} \left(1 - e^{-\lambda_{230}t}\right) + \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \left(1 - \frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{234}\text{U}}\right) \times \left[1 - e^{-(\lambda_{230} - \lambda_{234})t}\right] \quad (1)$$

式中, λ_{230} 和 λ_{234} 分别是²³⁰Th和²³⁴U的衰变常数, t 表示年龄,其中 $\lambda_{234}=2.8263 \times 10^{-6}$ /a, $\lambda_{230}=9.1577 \times 10^{-6}$ /a^[20]。根据样品的²³⁰Th/²³⁴U和²³⁴U/²³⁸U放射性比值,样品的年龄可以通过式(1)求得。

2 铀系法测年技术方法的国内外研究进展

20世纪30年代中期,研究者应用过剩²²⁶Ra测定喀拉海铁锰结核的生长速度(1 mm/10³ a)^[21],为铀系的年代学研究拉

开了序幕。从20世纪50年代中期到80年代,铀系同位素测定主要是依靠 α 谱法。 α 谱法U-Th年代学研究在测定末次间冰期珊瑚阶地年龄、探讨晚更新世以来海平面变迁以及晚更新世以来全球气候变化等方面都取得了较大成功。 α 谱法通常需经化学分离、电沉积镀片后才能测定,分析周期长、影响因素多。测定样品所需的U、Th含量为10~100 μg,精确度一般为10⁻²,对于²³⁸U—²³⁴U—²³⁰Th衰变系列, α 谱法测年范围在350 ka之内,年龄为120 ka的样品²³⁰Th年龄不确定度为±10 ka(表2)^[22-24]。对含有约100 μg ²³⁸U的样品进行分析需要几天的测定时间,精度在±(2%~4%)^[24]。 α 谱法测定时间通常为几天甚至十几天。 α 谱法虽然测试精度相对较低,但其技术方法已经十分成熟,适用范围较广,对于铀含量较低的样品可以加大样品用量。

20世纪80年代中期,较为成熟的热电离质谱法(thermal ionization mass spectrometry, TIMS)分析技术被用于铀系定年;1986和1987年,Edwards等^[25]首先报道了用TIMS铀系定年法进行末次间冰期珊瑚的定年,得到了一组高精度的数据;20世纪80年代后期,美国加州理工大学率先用TIMS铀系法成功地测定了海水和珊瑚中超低丰度的²³⁴U和²³⁰Th含量,标志着不平衡铀系定年方法技术上的突破^[26]。自Edwards等首次成功建立TIMS铀系定年法后,解决了距今500 ka以来珊瑚、石笋、湖泊文石、年轻火山岩等样品的精确定年问题,是第四纪年代学方面的革命性突破,被广泛应用于第四纪环境、地质、考古等研究。TIMS法相对于 α 谱法,分析时间从几天缩短到几小时,样品所需U、Th含量从10~100 μg减小到0.1~1 μg,精确度从10⁻²提高到10⁻³(表2)。对于²³⁸U—²³⁴U—²³⁰Th衰变系列,TIMS法相对于 α 谱法,测年范围从350 ka扩大到500 ka。尽管TIMS法是对同位素进行连续测定,需要进行拖尾校正,而且动态范围受到限制,但U、Th同位素的测量不确定度能达到,所以用TIMS技术,年龄为120 ka的样品²³⁰Th年龄不确定度从±10 ka降低到±2 ka^[23, 27]。中国的TIMS铀系测年研究约从20世纪90年代中期开始。1996年中国科技大学引进了MAT262型质谱仪,彭子成等^[27]利用该仪器测定了国内铀系标样(石笋)和国际珊瑚标样,所得年龄与 α 谱法一致,但精度高很多,其误差范围小于±1%。

随着质谱技术的不断发展,质谱铀系定年技术也逐渐在发展。1997年,Luo等^[28]首次将多接受器电感耦合等离子体质谱技术(multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry, MC-ICP-MS)用于²³⁰Th定年,随后Hinrichs等^[29]和Shen等^[27]将单接受器电感耦合等离子体质谱技术(single collector inductively coupled plasma mass spectrometry, SC-ICP-MS)也用于铀系定年。相比TIMS方法,ICP-MS铀系定年法具有更省时、省样和精度更高的优势,并且使得定年精度更高、测年范围更宽,用数十毫克样品就可获得小于5‰的年龄精度,同时将测年上限扩展到600 ka,误差降低到12 ka(表2)。由于应用高灵敏度质谱技术可测量及其微量的²³⁰Th,故测年下限达到数十年,误差仅为1~2年。该方法被

表2 铀系法核素分析方法对比
Fig. 2 Comparison of analytical methods for U-series nuclides

分析方法	样品量		精度(2σ)					测试时间		检测器
	U	Th	²³⁸ U	²³⁵ U/ ²³⁸ U	²³⁴ U/ ²³⁸ U	²³² Th	²³⁰ Th/ ²³² Th	U	Th	U、Th
α 谱仪	1~100 μg	1~100 μg	2%~10%	2%~10%	2%~10%	2%~10%	2%~10%	1~28 d	1~28 d	半导体检测器
TIMS	100~2000 ng	100~2000 ng	0.10%	0.50%	0.50%	0.30%	0.50%	4 h	4 h	单个离子计数器
ICP-MS	10~450 ng	10~600 ng	0.1%~1.5%	0.50%	0.1%~10%	0.5%~5%	0.5%~10%	1~10 min	1~10 min	单个离子计数器
MC-ICP-MS	10~450 ng	10~600 ng	<0.1%	0.01%	0.05%~0.2%	<0.1%	0.1%~0.3%	15~30 min	15~60 min	多个法拉第杯和单个或多个离子计数器

认为是目前最可靠的第四纪定年手段,而且有进行微区测年的前景^[30]。目前,国内很少有实验室能独立完成MC-ICP-MS铀系定年研究的报道,多需要依靠国外实验室的帮助。

3 铀系法测年在盐湖地区的应用

依据²³⁸U放射性同位素的衰变规律和铀系法测年原理,值得强调的是盐湖沉积中存在可供开展铀系年代测定的材料。在盐湖沉积中的不纯碳酸盐和碳酸盐黏土^[31]可供作为铀系定年材料,而且石盐^[32]和石膏^[33-35]等盐类矿物亦可作为铀系定年的材料。

青藏高原盐湖早期研究中,研究者主要采用钻孔中的盐类矿物进行铀系定年。例如,沈振枢等^[36]通过对ZK401、ZK402等钻孔中的盐类铀系定年,并结合古地磁、孢粉等来研究青海柴达木盆地西部地区的地质环境和成盐期;张彭熹等^[37]根据CK1-81、CK88-01和CK89-04这3个钻孔石盐矿物的铀系年代,提出察尔汗盐湖开始成盐的年代为50 ka。韩凤清等^[38]对柴达木盆地昆特依盐湖沉积物进行了铀系年代学及古地磁特征研究,指出该区最老的盐层形成于早更新世晚期(约730 ka BP),大量的盐类沉积则始于300 ka BP左右。

而随着α谱法和TIMS技术的日趋成熟和完善,盐湖中碳酸盐的铀系法测年应用最为广泛。郑绵平等^[39]和马志邦等^[40]应用全溶样的等时线模式分别对西藏扎布耶湖和纳木错湖中碳酸盐黏土样品进行了²³⁰Th/²³⁸U的铀系年代学研究,建立了中晚更新世以来的同位素年代标尺;魏乐军等^[41-42]分别对碳酸盐型盐湖洞错盐湖DZ01剖面、台错湖TT-1剖面进行了多代用指标及¹⁴C、铀系年代学研究,重建了湖区晚更新世晚期至全新世中期的古气候、古环境演变过程。马妮娜等^[43]通过实体显微镜下观察,筛选出台错湖TT-1剖面中的茎状碳酸盐样品作为研究对象,应用α谱法分析²³⁰Th的精度能够达

到1~3%,对年龄约6649 a BP的新生碳酸盐其年龄误差可达89 a(±1σ),将该研究剖面测定年龄的精度提高了近1个数量级。

目前除了应用最广泛的碳酸盐的铀系法定年以外,很多研究者也尝试用盐湖中广泛分布的石盐和石膏等盐类矿物进行盐湖沉积物定年,并与¹⁴C等方法进行对比校正。Peng等^[33]应用²³⁰Th/²³⁴U方法测定了加利福尼亚Searles盐湖盐类沉积物的年龄,并与¹⁴C年代进行了对比,经过校正之后的¹⁴C和²³⁰Th数据基本一致。Luo等^[44]应用铀系不平衡法测定了柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖中石膏的年龄,结果与全岩等时线年龄值一致。Phillips等^[34]应用²³⁰Th/²³⁴U方法分别测定了柴达木盆地西部大浪滩和尕斯库勒湖钻孔ZK-402和ZK-2605中石盐的年龄,结果表明2个次级盆地成盐的年代基本一致。彭子成等^[45]使用石膏矿物的质谱—铀系(²³⁰Th—²³⁴U—²³⁸U)定年技术,结果表明铀系法测定盐湖石膏矿物方法可行,年代可靠,相对误差为±1.6%~±4.7%。Luo等^[46]应用石膏矿物的质谱铀系(²³⁰Th—²³⁴U—²³⁸U)定年技术,测定了罗布泊盐湖含盐地层石膏矿物的年龄,并获得了相对可靠的年代框架。Li等^[35]应用²³⁰Th/²³⁴U方法测定了青藏高原秋里南木盐湖盐类沉积物的铀系年龄,结果与¹⁴C年代基本一致。马妮娜等^[47]应用²³⁰Th/²³⁴U方法测定了柴达木盆地西部大浪滩地表芒硝剖面中的石膏样品的年龄,获得了可靠的年代数据。

4 结论及展望

高原盐湖在其形成的各个阶段,都详尽记录和保存着咸化阶段的环境变化信息,也是继黄土、冰芯等第四纪陆相沉积以来,又一个研究极端干旱气候的重要载体。年代学是盐湖古气候研究最重要的一项内容,也是后续工作的基础。目前除了最常用的¹⁴C定年、光释光定年、电子磁悬共振和古地

磁定年等方法外, 铀系法定年也得到了广泛的应用。盐湖沉积中的碳酸盐黏土、石盐和石膏等盐类矿物都可以作为铀系定年的研究材料。

铀系法年代学研究随着技术的发展, 经历了不同时期的发展和应用。 α 谱法、热电质谱法和多接受器电感耦合等离子体质谱技术都在不同时期和阶段对第四纪及高原盐湖的定年研究做出了一定的贡献。并且随着质谱技术的发展, 盐类矿物的微区定年也逐渐成为可能。

但是, 铀系法定年技术在盐湖沉积研究中尚有诸多问题和不足, 亟待解决。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及沉积物中 U、Th 的来源对铀系定年影响的研究也很少^[31]。未来开展此类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。另外, 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, 铀系测年和其他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, 完善铀系测年和其他测年方法在盐湖沉积中的相关基础研究, 进一步提高盐湖沉积测年结果的准确性。

今后需要加强铀系定年方法在盐湖沉积中的基础研究, 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的基础。

参考文献(References)

- [1] 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 第四纪盐湖沉积与古气候[J]. 第四纪研究, 1998, 18(4): 297-307.
Zheng Mianping, Zhao Yuanyi, Liu Junying. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate[J]. Quaternary sciences, 1998, 18(4): 297-307
- [2] Zheng M, Tang J, Liu J, et al. Chinese saline lakes[J]. Hydrobiologia, 1993, 267(1): 23-36.
- [3] 郑绵平. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989.
Zheng Mianping. Saline lakes on the Qinghai-Tibetan plateau[M]. Beijing: Beijing Scientific and Technical Press, 1989.
- [4] 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.
Huang Qi, Chen Kezao. Palaeoclimatic fluctuation fashion of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin in the past 730,000 years[J]. Quaternary sciences, 1990, 10(3): 205-212.
- [5] 黄麒, 孟昭强, 刘海玲. 柴达木盆地察尔汗湖区古气候波动模式的初步研究[J]. 中国科学, 1990(6): 94-105.
Huang Qi, Meng Zhaoqiang, Liu Hailing. The preliminary research on the paleoclimate fluctuation patterns of Qarhan Salt Lake in Qaidam basin[J]. Science China, 1990(6): 94-105.
- [6] 沈振枢. 柴达木盆地(水6孔)气候地层序列的海陆对比[J]. 青海地质, 1993(2): 48-56.
Shen Zhenshu. Continent-ocean comparison of climatostratigraphic sequence in Qaidam Basin[J]. Geology of Qinghai, 1993(2): 48-56.
- [7] Wang J, Wang Y J, Liu Z C, et al. Cenozoic environmental evolution of the Qaidam Basin and its implications for the uplift of the Tibetan Plateau and the drying of central Asia[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1999, 152(1/2): 37-47.
- [8] 江德昕, 杨惠秋. 青海达布逊湖 50 万年以来气候变化的孢粉学证据[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 101-106.
Jiang Dexin, Yang Huiqiu. Palynological evidence for climatic changes in Dabuxun lake of Qinghai province during the past 500000 years[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(1): 101-106.
- [9] 王建, 黄巧华, 柏春广, 等. 2.5 Ma 以来柴达木盆地的气候干湿变化特征及其原因[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 34-38.
Wang Jian, Huang Qiaohua, Bo Chunguang, et al. Tendency of the quaternary climatic change in Qaidam basin and its causal mechanism[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(1): 34-38
- [10] 康安, 朱筱敏, 韩德馨, 等. 柴达木盆地第四纪孢粉组合及古气候波动[J]. 地质通报, 2003, 22(1): 12-15.
Kang An, Zhu Xiaomin, Han Dexin, et al. Quaternary sporopollen assemblages and paleoclimatic fluctuation in the Qaidam Basin[J]. Geological bulletin of China, 2003, 22(1): 12-15.
- [11] 刘嘉麒, 王文远. 第四纪地质定年与地质年表[J]. 第四纪研究, 1997(3): 193-202.
Liu Jiaqi, Wang Wenyuan. Quaternary geological dating and time scale [J]. Quaternary Sciences, 1997(3): 193-202.
- [12] 孙洪艳, 李志祥, 田明中. 第四纪测年研究新进展[J]. 地质力学学报, 2003, 9(4): 371-378.
Sun Hongyan, Li Zhixiang, Tian Mingzhong. New progress in Quaternary dating research[J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(4): 371-378.
- [13] Grün R, Huang P, Huang W, et al. ESR and U-series analyses of teeth from the palaeoanthropological site of Hexian, Anhui Province, China[J]. Journal of Human Evolution, 1998, 34(6): 555-564.
- [14] Grün R, Ge Y, McCulloch M, et al. Detailed mass spectrometric U-series analyses of two teeth from the archaeological site of Pech de l'Aze II: Implications for uranium migration and dating[J]. Journal of Archaeological Science, 1999, 26(10): 1301-1310.
- [15] Grün R, Stringer C. Electron spin resonance dating and the evolution of modern humans[J]. Archaeometry, 1991, 33(2): 153-199.
- [16] 黄麒, 韩凤清. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Huang Qi, Han Fengqing. Salt lake evolution and paleoclimate fluctuations in the Chadam Basin of China[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [17] De Bièvre P, Lauer K, Moret H, et al. The half life of ²³⁴U[C]//Proceedings of an International Conference on Chemical and Nuclear Data, Measurement and Applications, Canterbury. London: Institution of Civil Engineers, 1971, 221-225.
- [18] Ivanovich M, Latham A, Ku T L. Uranium-series disequilibrium applications in geochronology[M]//Ivanovich M, Harmon R S, Uranium Series Disequilibrium: Applications to earth, marine, and environmental sciences. 2nd Ed. Oxford: Clarendon Press, 1992: 62-89.
- [19] Kaufman A, Broecker W. Comparison of ²³⁰Th and ¹⁴C ages for carbonate materials from Late Lahontan and Bonneville[J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70(16): 4039-4054.
- [20] Cheng H, Edwards R, Hoff J, et al. The half-lives of uranium-234 and thorium-230[J]. Chemical geology, 2000, 169(1/2): 17-33.
- [21] Kurbatov L, Egorov V. On the possibility of determining the age of contemporary deposits by the radioactive method; experiment in determining the age of a ferro-manganese concretion of the Kara sea by the radioactive method[J]. Arctica, 1936, 4: 107-120.
- [22] Shen C, Edwards R, Cheng H, et al. Uranium and thorium isotopic and

- concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Chemical Geology*, 2002, 185(3/4): 165-178.
- [23] Goldstein S, Stirling C. Techniques for measuring uranium-series nuclides: 1992-2002[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 52(1): 23-57.
- [24] Zhao J, Yu K, Feng Y. High-precision ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th disequilibrium dating of the recent past: A review[J]. *Quaternary Geochronology*, 2009, 4(5): 423-433.
- [25] Edwards R, Chen J, Wasserburg G. ^{238}U - ^{234}U - ^{230}Th - ^{232}Th systematics and the precise measurement of time over the past 500000 years[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1987, 81(2): 175-192.
- [26] Bard E, Hamelin B, Fairbanks R. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados: Sea level during the past 130000 years[J]. *Nature*, 1990, 346: 456-458.
- [27] 彭子成, 王兆荣, 孙卫东, 等. 高精度热电质谱(TIMS)铀系法对第四纪标样年龄测定的研究[J]. *科学通报*, 1997, 42(19): 2090-2093.
Peng Zicheng, Wang Zhaorong, Sun Weidong, et al. The study of the quaternary prototype age determination by high precision thermal ionization mass spectrometric dating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(19): 2090-2093.
- [28] Luo X, Rehkämper M, Lee D, et al. High precision $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ measurements using energy-filtered ICP magnetic sector multiple collector mass spectrometry[J]. *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*, 1997, 171: 105-117.
- [29] Hinrichs J, Schnetger B. A fast method for the simultaneous determination of ^{230}Th , ^{234}U and ^{235}U with isotope dilution sector field ICP-MS[J]. *Analyst*, 1999, 124(6): 927-932.
- [30] 程海. 铀系年代学新进展 ICP-MS ^{230}Th 测年[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(3): 292.
Cheng Hai. A new progress of uranium series chronology: ICP-MS ^{230}Th dating[J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(3): 292.
- [31] 马志邦, 马妮娜, 张雪飞, 等. 西藏扎布耶湖晚更新世沉积物 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 年代学研究[J]. *地质学报*, 2010, 84(11): 1641-1651.
Ma Zhibang, Ma Nina, Zhang Xuefei, et al. $^{230}\text{Th}/\text{U}$ chronology of late Pleistocene lacustrine deposits in Zabuye Salt Lake, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(11): 1641-1651.
- [32] Fan Q, Ma H, Ma Z, 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.
- [33] Peng T, Goddard J, Broecker W. A direct comparison of ^{14}C and ^{230}Th ages at Searles Lake, California[J]. *Quaternary Research*, 1978, 9(3): 319-329.
- [34] Phillips F, Zreda M, Ku T, et al. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ^{36}Cl dating of evaporite deposits from the western Qaidam Basin, China: Implications for glacial-period dust export from Central Asia[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1993, 105(12): 1606-1616.
- [35] Li M, Kang S, Ge J, et al. Saline rhythm and climatic change since 20.6 kyr BP from the Qiulinanmu Playa Lake in Tibet[J]. *Carbonates Evaporites*, 2010, 25(1): 5-14.
- [36] 沈振区, 童国榜, 张俊牌, 等. 青海柴达木盆地西部上新世以来的地质环境与成盐期[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1990(4): 89-99.
Shen Zhenqu, Tong Guobang, Zhang Junpai, et al. Geological environ-
- ments since Pliocene and accumulation process of saline deposit in west Chaidamu Basin, Qinghai, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1990(4): 89-99.
- [37] 张彭熹, 张保珍, 洛温斯坦 T K, 等. 古代异常钾盐蒸发岩的成因: 以柴达木盆地察尔汗盐湖钾盐的形成为例[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Lowenstein T K, et al. The cause of the ancient abnormal potash evaporite: A case study of the formation of sylvite in Qarhan Salt Lake, Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [38] 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.
Han Fengqing, Huang Qi, Wang Kejun, et al. Study of geochemical evolution and palaeo-climatic fluctuation of Kunteyi salt lake in the Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1995, 26(5): 502-508.
- [39] 郑绵平, 袁鹤然, 刘俊英, 等. 青藏高原扎布耶盐湖 128 ka 以来沉积特征与古环境记录[J]. *地质学报*, 2007, 81(12): 1608-1617.
Zheng Mianping, Yuan Heran, Liu Junying, et al. Sedimentary characteristics and paleoenvironmental records of Zabuye Salt Lake, Tibetan Plateau, since 128 ka BP[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(12): 1608-1617.
- [40] 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.
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.
- [41] 魏乐军, 郑绵平, 马志邦. 西藏台错盐湖 TT-1 剖面的沉积特征和年代学研究[J]. *地球学报*, 2004, 25(4): 397-404.
Wei Lejun, Zheng Mianping, Ma Zhibang, et al. Characteristics and chronology of saline sediments along profile TT-1 of Dahyab Tso (Tai Cuo) in Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2004, 25(4): 397-404.
- [42] Wei L, Zheng M, Liu X, et al. Discovery of borax-bearing mirabilite beds in Dong Co, northern Tibet, and its palaeoclimatic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(3): 271-282.
- [43] Ma N, Ma Z, Zheng M, et al. ^{230}Th dating of stem carbonate deposits from Tai Cuo lake, western Tibetan Plateau, China[J]. *Quaternary International*, 2012, 250: 55-62.
- [44] Luo S, Ku T. U-series isochronal dating: A generalized method employing total-sample dissolution[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(2): 555-564.
- [45] 彭子成, 刘卫国, 张兆峰, 等. 罗布泊湖相沉积石膏的热电质谱-铀系定年[J]. *科学通报*, 2001, 46(9): 767-770.
Peng Zicheng, Liu Weigu, Zhang Zhaofeng, et al. High precision thermal ionization mass spectrometric dating of gypsum on Lop Nur lake deposition[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(9): 767-770.
- [46] Luo C, Peng Z, Yang D, et al. A Lacustrine record from Lop Nur, Xinjiang, China: Implications for paleoclimate change during Late Pleistocene[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(1): 38-45.
- [47] 马妮娜, 郑绵平, 马志邦, 等. 柴达木盆地大浪滩地区表层芒硝的形成时代及环境意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(3): 433-444.
Ma Nina, Zheng Mianping, Ma Zhibang, et al. Forming age of surface mirabilite in Dalangtan, Qaidam Basin and its environmental significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(3): 433-444.

Research progress in uranium-series dating method and application for saline lake of Tibet Plateau

MA Nina, ZHENG Mianping

MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

Abstract The saline lake deposits involve information of environmental changes during various stages of its evolution and are an important research carrier for extreme arid climates. The geochronological study is very important for reconstructing the past climate changes, as recorded in the salt lake. At present, besides the dating based on the ^{14}C , the OSL, the ESR and the paleomagnetism, the uranium-series dating is used widely in the chronology research of the salt lake deposit. With the advancement of the dating technology, the uranium-series dating has experienced several stages: The α spectrometry, the TIMS and the MC-ICP-MS, which have made some contributions to the geochronological study of the Quaternary and the salt lakes on the plateau. And various kinds of saline minerals, such as the carbonate, the halite and the gypsum, can be used as the uranium-series dating materials. With the progress of the mass spectrometry technology, the micro dating in saline minerals becomes possible. But the uranium-series dating on saline minerals remains a research issue. So in the future, the dating researches on saline minerals will be helpful for the applications of the uranium-series dating technology for the saline lake.

Keywords Qinghai-Tibetan Plateau; saline lake; uranium-series dating; saline minerals

(责任编辑 傅雪)