

# 柴达木盆地盐湖沉积磁性地层年代学研究进展

施林峰<sup>1</sup>, 郑绵平<sup>1</sup>, 王海雷<sup>1</sup>, 侯献华<sup>1</sup>, 齐路晶<sup>2</sup>

1. 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
2. 防灾科技学院, 三河 065201

**摘要** 柴达木盆地因其巨厚的新生代盐湖沉积成为研究青藏高原隆升、古湖泊演化、气候环境演变以及盐类资源钾盐勘探开发的热点地区之一。而磁性地层年代学是这种长尺度湖相沉积研究中必不可少的定年方法。总结了早期柴达木盆地各个沉积中心的磁性地层结果, 详细描述了近年来已发表的最新3个千米钻孔的磁性地层年代成果, 包括柴达木盆地西部大浪滩沉积中心的梁ZK02孔和梁ZK05孔、察汗斯图拉沉积中心的SG-1孔。根据新的磁性地层年代结果, 重新厘定了柴达木盆地西部沉积中心的第四纪底界深度, 并为探讨柴达木盆地第四纪气候变化、青藏高原阶段性隆升和新型的砂砾层卤水资源提供了精确的年代制约。

**关键词** 柴达木盆地; 盐湖沉积; 千米深钻; 磁性地层

柴达木盆地地处青藏高原北缘, 是青藏高原的一部分, 是中国西部大型山间盆地。盆地位于东经90°00'E~98°20'E, 北纬35°55'N~39°10'N, 面积为12.1万km<sup>2</sup>。盆地周围被祁连山、阿尔金山和东昆仑山环抱, 盆地内部为盐湖沉积平原和湖相冲积平原, 平均海拔在2800 m左右。盆地边缘主要为洪积冲积平原, 海拔一般为3000~3200 m, 西部可达3500 m。自第三纪末以来, 伴随青藏高原的强烈隆升, 柴达木盆地发生剧烈的相对沉降, 上新世以来在柴达木盆地西部的大浪滩地区沉积厚度可达2500 m, 而在东部的达布逊湖区沉积厚度更是达4000 m以上, 其中现今的察尔汗地区堆积了2800 m以上的第四纪湖相沉积物<sup>[1]</sup>。柴达木盆地这种巨厚的连续新生代盐湖沉积为研究青藏高原的隆升历史、古湖泊演化、长尺度的气候环境演变及季风的演化提供了一个高分辨率的载体<sup>[2-7]</sup>。另外, 柴达木盆地独特的地理环境和地质背景, 在盆地中形成大量的金属和非金属盐类矿产资源及油气能源。盆地中盐湖演化时间长, 盐湖化学类型以氯化物型和硫酸盐型为主, 盐类沉积厚度大、储量丰富, 包括石盐、钾盐、镁盐、芒硝、锂盐、硼矿、溴、碱、铷和铯等多种盐类矿物, 其储量位居全国前列<sup>[8-12]</sup>。其中钾盐资源约占全国盐湖钾资源量的60%。中国是农业大国, 对钾盐需求量很大, 每年需进口超过500万t。柴达木盆地是中国重要的钾盐储量和生产基

地, 对其深入的基础地质调查研究能为柴达木盆地的钾盐成矿历史、成矿规律提供理论依据, 对解决中国钾肥供不应求的问题有着重要的实际意义<sup>[9-12]</sup>。

可见, 柴达木盆地高原新生代湖泊沉积因其保存着高原隆升、季风演化和成矿作用等崭新、翔实的信息, 而成为国际上研究全球变化的热点地区之一。然而不管是高原隆升和环境气候变化的科学研究, 还是矿产资源的评价调查, 一个精确的年代框架是必不可少的。湖相沉积的测年方法主要包括<sup>14</sup>C加速器质谱测年(AMS<sup>14</sup>C)、Th<sup>230</sup>、光释光等, 但是这些测年方法年代范围较小, 仅局限于中更新世晚期以来的气候研究和浅部矿产勘查。对于柴达木盆地巨厚的连续湖相沉积, 进行长尺度的气候演化研究和深部矿产资源勘探, 就需要大尺度的年代标尺, 而古地磁测年无疑是一种十分合适的测年方法。本文将着重介绍磁性地层年代学在柴达木盆地中的应用和研究进展。

## 1 早期的磁性地层研究结果

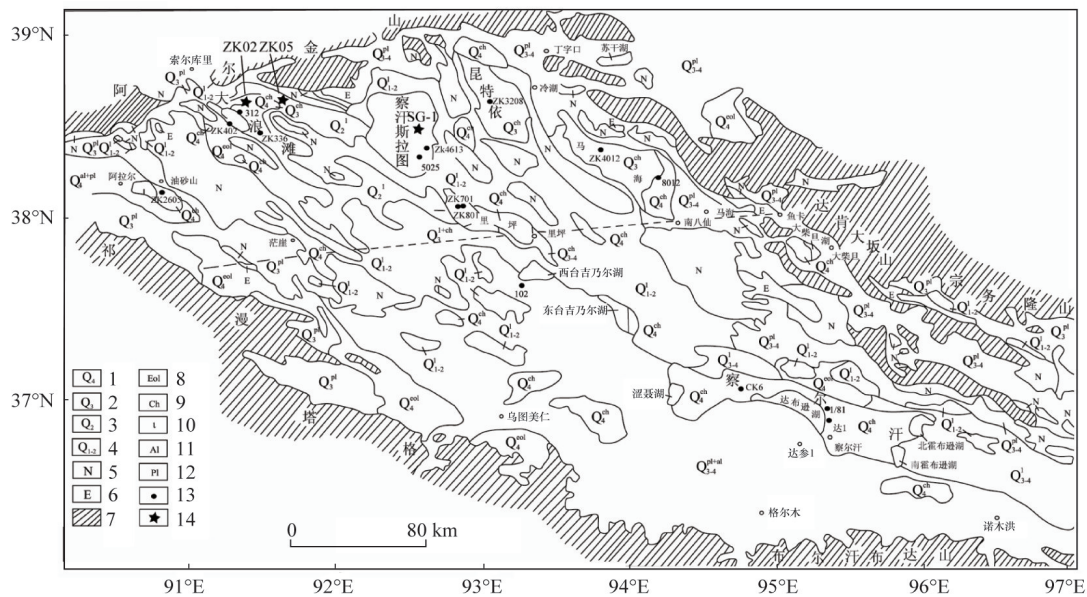
1983—1987年, 沈振枢等<sup>[3]</sup>先后对柴达木盆地尕斯库勒湖(ZK2605)、大浪滩(ZK402、ZK336)、察汗斯拉图(ZK4613)、马海(ZK4012)、昆伊特(ZK3208)、一里坪(ZK701+801)和察尔汗(CK6)地区的8个深孔进行了磁性地层学研究(图1)。

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2017-02-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41202130); 中国地质调查局地质调查项目(1212010818057, 1212011018004)

作者简介: 施林峰, 助理研究员, 研究方向为古地磁与第四纪古气候, 电子信箱: 54894975@qq.com

引用格式: 施林峰, 郑绵平, 王海雷, 等. 柴达木盆地盐湖沉积磁性地层年代学研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 71-76; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.06.008



★为本研究钻孔所在位置

图1 柴达木盆地第四纪地质示意

Fig. 1 The Quaternary geological map of Qaidam Basin

磁性地层结果表明,各个钻孔均已穿透布容/松山(B/M)界限(0.73 Ma),除ZK3208、CK6孔外,其余各孔均已穿透松山/高斯(M/G)界限(2.48 Ma),其中ZK4012、ZK4613、ZK402孔还穿透了高斯/吉尔伯特(G/Gi)界限(3.40 Ma)<sup>[13]</sup>(图2)<sup>[3]</sup>。各个钻孔的布容正极性期内均未记录明显的极性漂移事件,在松山反极性内,除了ZK402孔外,均有规律地出现了Jaramillo、Olduvai、Reunion正极性亚时。在ZK2605、ZK336、ZK4012、ZK3208、ZK701和CK6孔磁极性序列中,在布容正极性期和Jaramillo亚时之间存在一个可对比的正极性事件,沈振枢等<sup>[3]</sup>将其暂命名为“后期Jaramillo”事件,年代估计为0.8 Ma。在高斯正极性期内,各个钻孔均记录了Keana和Mammoth两个反极性亚时。马海的ZK4012钻孔时代最老,在吉尔伯特反极性期内依次记录了Cochiti、Nunivak、Sidufjall和Thvera正极性亚时,其底部年代已十分接近5 Ma的上新世下限。这是首次对整个柴达木盆地各个沉积中心进行系统的磁性地层年代学研究。沈振枢等<sup>[3,13-14]</sup>综合这8个钻孔的磁性地层结果建立了5 Ma以来柴达木盆地钻孔剖面连续沉积的磁性地层(图2),同时结合同位素年代学及生物地层对比等综合资料,正确地划分了柴达木盆地第四系底界及内部各统,建立了4个井下第四纪地层单位。从图2可以看出,柴达木盆地东西部第四纪底界深度差异很大。在西部大浪滩地区第四纪底界深度在500~600 m,察汗斯图拉约350 m,马海最浅,不到300 m。中部过渡区一里坪在900多m。到了东部察尔汗地区,CK6孔底部910 m深度对应后期Jaramillo事件(0.8 Ma),根据沉积速率推算第四纪底界深度将在2800 m左右。这说明第四纪时沉积中心在柴达木盆地的东部。另外,沈振枢等<sup>[4,13]</sup>根据各个钻孔的磁性地层年代,分别计算各个钻孔的沉积速

率,发现在柴达木盆地西北部相对隆起区存在2个高沉积速率带,时代分别为2.80~2.00 Ma和1.60~1.10 Ma,认为是青藏高原两次新构造运动强烈抬升期。但是在盆地东南部凹陷区沉积速率却呈现相反的变化,这是柴达木盆地东西部差异性升降造成的<sup>[3,13]</sup>。

在随后的几十年内,柴达木盆地并没有新的全取芯长度钻孔的磁性地层数据报道,仅仅是一些浅钻孔或者深钻孔目标层位的古地磁数据,如Liu等<sup>[1]</sup>综合了达布逊1号孔、涩中6井、涩深1井、台南1井、盐心1井、驼中2井及鸭湖剖面的磁性地层结果,建立了柴达木盆地东部的一个第四纪磁极性序列。因此在这十几年中柴达木盆地的大部分第四纪研究工作采用的年代框架还是参考沈振枢等<sup>[3]</sup>的磁性地层结果。然而,沈振枢等<sup>[3]</sup>所采用的古地磁数据多为20世纪80年代所测,其取样间隔相对较大,测试仪器设备相对落后,其结果已逐渐不能满足现代科学研究所要求的高分辨率和高精度的年代框架。同样,在沈振枢等的磁性地层序列中存在一些疑义的地方,例如某些钻孔中的极性序列不完整,在松山反极性期内缺失一部分正极性亚时(如ZK402);松山反极性期相对布容正极性期来说沉积厚度较短(如ZK402、ZK4613、ZK4012);松山反极性期内的正极性亚时厚度偏大,反极性亚时厚度偏小(如ZK4613、ZK4012)(图2)。另外,沈振枢等<sup>[3]</sup>所采用的国际标准极性柱在一些极性亚时的时代上已经做出了调整,例如B/M界限的时代从0.73 Ma校正到0.78 Ma, M/G界限时代从2.48 Ma校正到2.581 Ma, G/Gi界限的时代从3.4 Ma校正到3.58 Ma。因此,柴达木盆地需要新的磁性地层年代结果来进行补充完善。

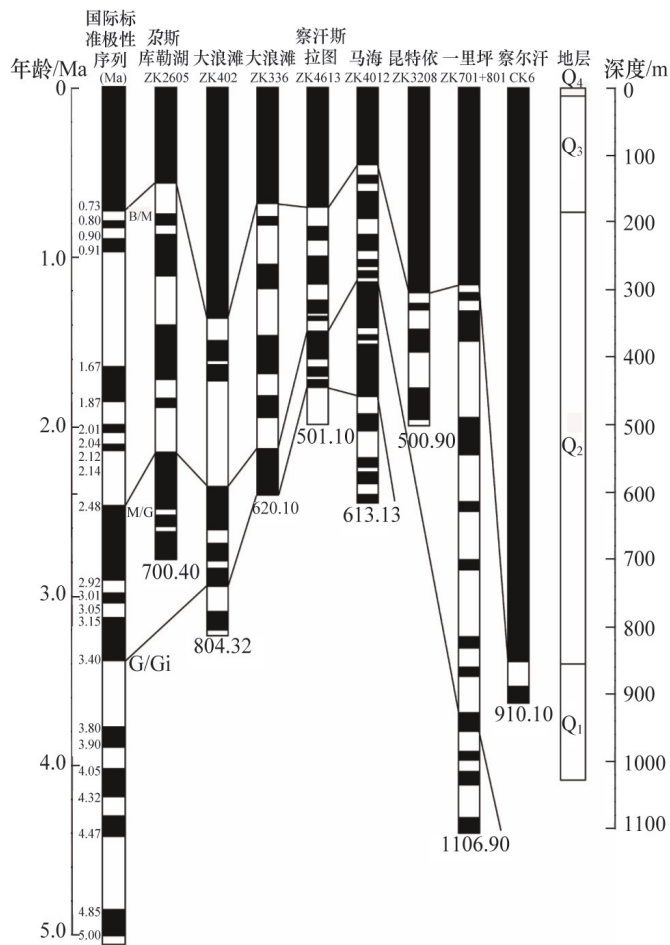


图2 柴达木盆地各钻孔古地磁极性对比

Fig. 2 Comparison of geomagnetic polarity sequences of drill holes in Qaidam Basin

### 2 磁性地层最新研究进展

近10年来,随着新一轮钾盐矿产资源普查工作的开展,柴达木盆地的钾盐资源勘查重心转入深部,在柴达木盆地西部施工了多达20余孔千米以上全取芯的钻探工程。以建立柴达木盆地中、上新世以来高分辨率的环境资源演变过程和机制为研究目标,在柴达木盆地东部同样进行了多个深浅不一的全取芯钻探工程。如此多的长尺度全取芯钻孔为柴达木盆地磁性地层年代研究提供了丰富的素材,以下将详细介绍目前已经发表的磁性地层年代结果。

梁ZK02孔位于柴达木盆地西部大浪滩东北部小梁山以北的梁北洼地,地理坐标为38°33'N,91°21'E(图1),靠近大浪滩盐湖的沉积中心,钻孔进尺1000 m,取芯率高达95%。岩性为碎屑岩与蒸发岩互层,从底部到顶部由碎屑岩层夹蒸发岩层过渡到顶部蒸发岩层夹碎屑岩层,蒸发岩含量与种类逐渐增多,碎屑岩逐渐减少。梁ZK02孔的磁极性序列记录了6个正极性期,分别对应于布容期、Jaramillo、Cobb Mountain、Olduvai、Reunion II和Reunion I(图3)<sup>[15]</sup>。另外,在布容期内存在一次极性漂移事件,深度为67.5~69.6 m,对应于

Norwegian-Greenland Sea事件,年龄约为70~80 ka。松山期内的3次极性漂移事件分别对应于Bjorn事件(1.255 Ma)、Gandar事件(1.47~1.48 Ma)、Gilsa事件(1.57 Ma)(图3)。梁ZK02孔的B/M界限深度位于315 m,钻孔底部未出现高斯正极性期,而根据沉积速率外推底部年龄接近M/G的界线年龄2.581 Ma。这说明大浪滩的第四纪底界深度应该在1000 m以上,远比沈振枢等<sup>[3]</sup>根据梁南洼地ZK402和梁东洼地ZK336确定的500~600 m底界深度深得多。这也说明梁ZK02孔所在梁北洼地是整个大浪滩盐湖的沉积中心。相比于ZK402孔和Zk336孔,梁ZK02孔的极性序列更加完整,并且各极性段的沉积速率相对合理,更为可靠。在该孔的磁性年代学框架基础上,秦永鹏等<sup>[15]</sup>以蒸发岩沉积序列作为主要依据,结合碎屑岩变化以及孢粉分析,认为该地区在第四纪发生过3次较大的沉积环境变化,分别发生在2.5~2.2、1.2~0.7和0.4 Ma。

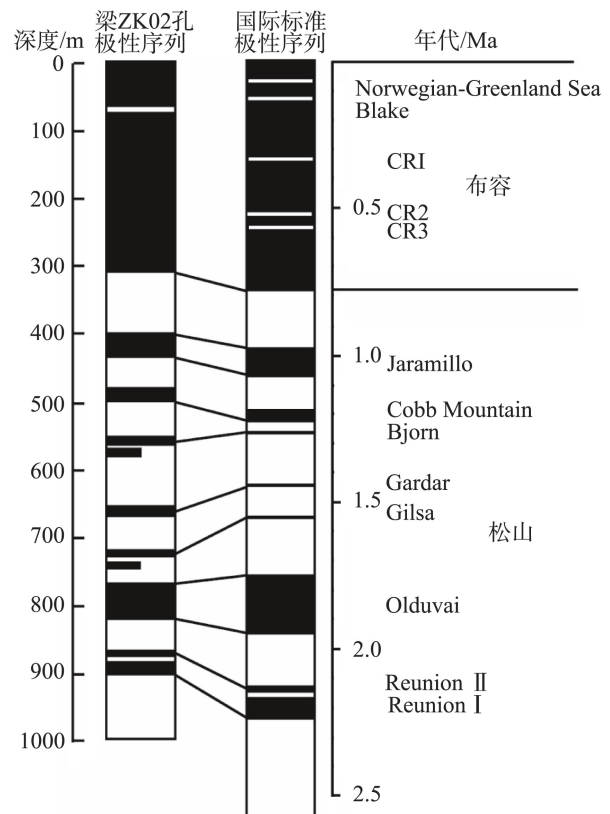


图3 大浪滩地区梁ZK02孔磁性地层结果

Fig. 3 Magnetostratigraphic result of Liang ZK02 borehole in Dalangtan playa

梁ZK05钻孔(38°36'50.4"N,91°36'24.3"E)位于柴达木盆地西北部大浪滩地区梁北洼地的东北边缘,尖顶山的西北方,距阿尔金山约10 km(图1)。整个钻孔进尺1025 m,为全取芯。梁ZK05钻孔岩性从上到下分为4个部分:顶部103 m为灰黑色、青灰色、灰绿色的含石盐、石膏的粘土粉砂层,代表了深湖相沉积环境;103~331 m岩芯主体为灰黄色、黄褐色、棕红色的粘土粉砂,代表了浅湖相沉积环境;331~357 m岩芯由多个中粗砂、细砂、粉砂和粘土粉砂的沉积序列组成,

代表了湖滨三角洲相沉积环境;357~1025 m岩芯为黄褐色的含卵砾石的中粗砂层和卵砾石层,代表了山前冲洪积沉积。由于钻孔330 m以下岩芯松散,无法进行古地磁取样,因此该孔的磁性地层研究仅限于钻孔顶部330 m岩芯。该孔330 m岩芯的磁极性序列记录了4个正极性带,与国际标准磁极性序列对比,分别对应于布容期、Jaramillo、Cobb Mountain和Olduvai(图4)<sup>[16]</sup>。梁ZK05钻孔的极性柱底部没有出现Reunion亚时,因此钻孔330 m岩芯的年代应小于2128 ka, B/M界限的深度位于94 m<sup>[16]</sup>。根据钻孔的沉积速率,推算出钻孔最顶部年龄约为111 ka,钻孔底部330 m深处的年龄为2046 ka<sup>[16]</sup>。梁ZK05钻孔记录了3次极性漂移事件,位于51~58、207.5~212和249~252 m,分别对应于Calabrian Ridge 2(515~525 ka)、Gardar(1465~1485 ka)和Gilsa(1567~1575 ka)。施林峰等<sup>[16]</sup>认为梁ZK05孔底部巨厚的中粗砂层和卵砾石层是阿尔金山强烈隆升的直接沉积响应。根据磁性地层年代,表明钻孔卵砾石层结束年代约为2 Ma,意味着阿尔金山的这次强烈隆升应早于2 Ma,对应于青藏运动B幕。近期在该区砂砾石层中发现了富含氯化物型孔隙卤水,是柴达木盆地西部

新发现的新型钾盐矿资源,矿化度高、品味稳定、化学成分单一,开采时不易结盐,可作为后续开发钾盐的备选区域<sup>[17]</sup>。而根据钻孔磁性地层年代结果,可以确定这种新型的砂砾石孔隙卤水的时代为早更新世,这为寻找深层富钾卤水提供了时代上的证据。

2008年中德联合在柴达木盆地西部的察汗斯图拉次级沉积中心进行钻探工程,SG-1钻孔地理位置38°24'35.3"N, 92°30'32.6"E(图1),钻孔进尺938.5 m,取芯率高达95%。SG-1孔的岩性在0~326.7 m为灰白色的厚层石盐和浅灰黑色含盐泥岩粉砂互层,在泥岩粉砂层频繁出现石膏晶体或者薄层的石膏层;在326.7~723.1 m岩性为灰白色薄层石盐层和黑灰色、浅青灰色含零散石膏晶体和一些薄层泥灰层的泥岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩;底部723.1~938.5 m岩性主要为灰色的粉砂岩、泥岩和泥灰岩,个别层位含有石盐晶体和零散的石膏晶体<sup>[18]</sup>。SG-1孔的磁极性序列一共记录了16个正极性和15个反极性,Zhang等<sup>[18]</sup>给出了两种对比方式(图5)<sup>[18]</sup>。第一种最优对比方式,N1—N4对应于布容正极性期,

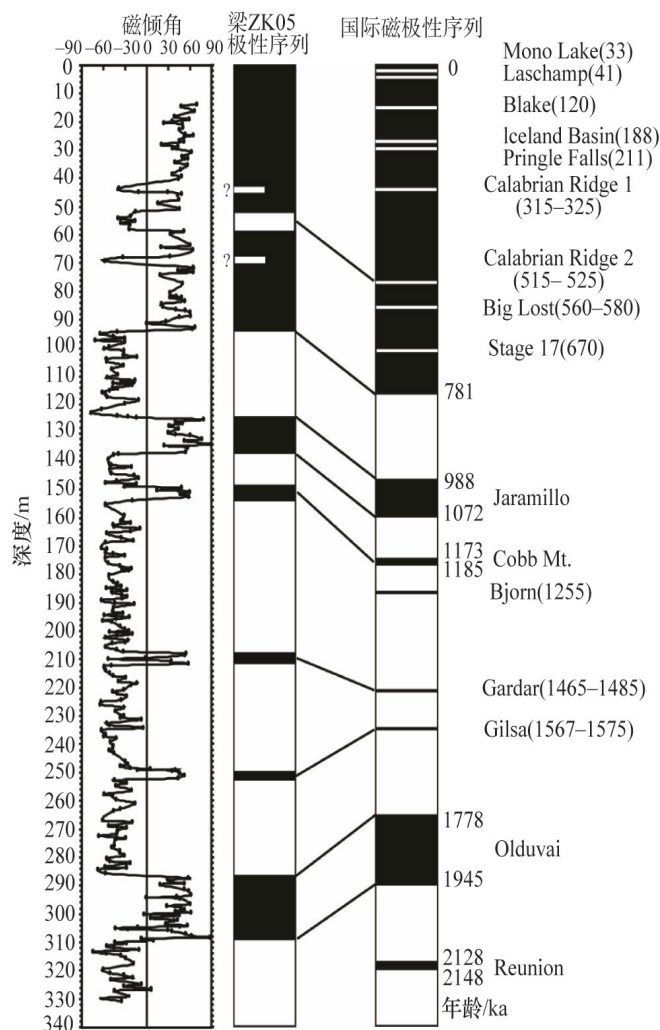


图4 大浪滩地区梁ZK05孔磁性地层结果

Fig. 4 Magnetostratigraphic result of Liang ZK05 borehole in Dalangtan playa

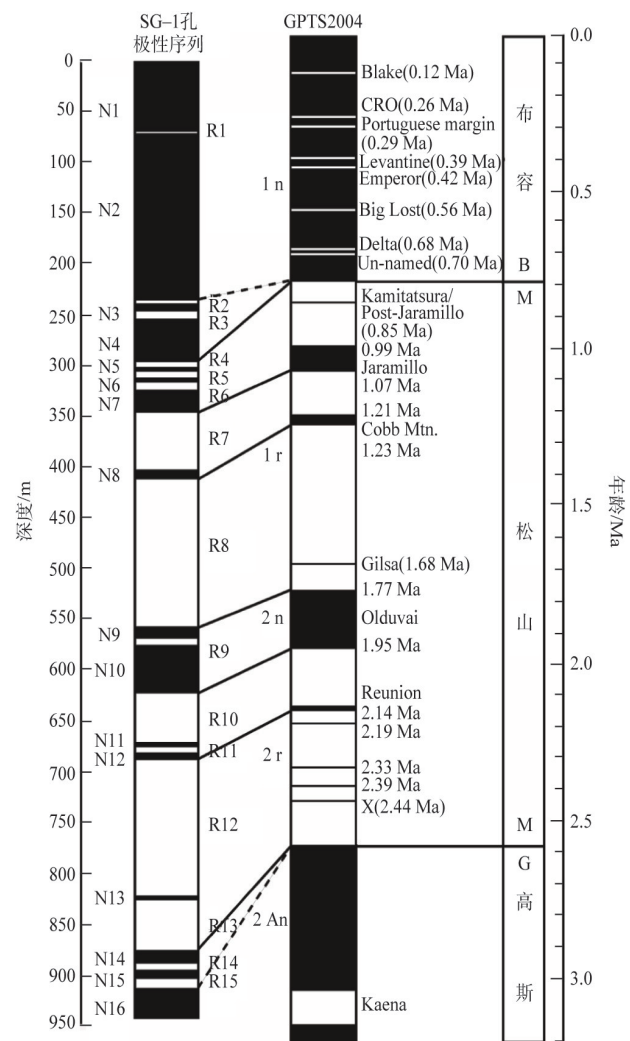


图5 察汗斯拉图地区SG-1孔磁性地层结果

Fig. 5 Magnetostratigraphic result of SG-1 borehole in Chahansilatu playa

R4—R13 对应松山期, 布容期内的 R1、R2 和 R3 分别对应极性漂移事件 Portuguese margin (290 ka) 或 CR0 (260 ka)、Delta 事件 (680 ka) 和 Un-named (q) 事件 (700 ka)。松山期内的 N7、N8、N9—N10 和 N12 分别对应于 Jaramillo、Cobb Mountain、Olduvai 和 Reunion 正极性亚时。N5 和 N13 可能对应于 Kamikatsura 事件或者 Post-Jaramillo 事件 (0.85 Ma) 和 X 事件 (2.44 Ma)。N14—N16 对应于高斯正极性期。这种对比方式 B/M 界限深度为 297.9 m, M/G 界限深度在 877.5 m, 钻孔底部外推年龄约 2.77 Ma。第二种可能的对比方式是将 B/M 界限对应于 N2 或者 N3 的底部, M/G 界限对应于 N16 的顶部 (图 5)。相比较早先的 ZK4613 钻孔, SG-1 钻孔更位于察汗斯图拉的沉积中心, 由此可以推断察汗斯图拉地区第四纪底界深度应在 877.5 m 以上。根据 SG-1 孔的磁性地层年代计算的沉积速率在 2.6~2.2 Ma 和 0.8 Ma 之后增加, 表明这两个时期剥蚀作用增强, 其原因是青藏高原北缘脉冲式隆升以及随后的全球气候变冷造成的<sup>[18]</sup>。

### 3 结论

1) 本文总结了早期柴达木盆地各个沉积中心的磁性地层研究结果, 详细描述了近年来发表的最新 3 个钻孔的磁性地层成果, 包括柴达木盆地西部大浪滩沉积中心的梁 ZK02 孔和梁 ZK05 孔、察汗斯图拉沉积中心的 SG-1 孔。与柴达木盆地早期的磁性地层数据相比, 最新 3 个钻孔的磁极性序列普遍更为完整, 各个极性段的沉积速率相对合理, 因此其磁性地层年代也更为合理精确。另一方面, 在最新 3 个钻孔的磁极性序列中普遍识别出了多个极性漂移事件, 进一步提高了各个钻孔磁性地层的年代分辨率。

2) 根据最新的磁性地层研究结果, 我们重新厘定了柴达木盆地西部大浪滩和察汗斯图拉沉积中心的第四纪底界深度, 并且获得了以下成果: 柴达木盆地大浪滩地区在 2.5~2.2、1.2~0.7 和 0.4 Ma 时发生过 3 次较大的沉积环境演变<sup>[15]</sup>; 青藏高原北缘在 2.6~2.2 Ma 和 0.8 Ma 时发生阶段性隆升<sup>[16, 18]</sup>; 在柴达木盆地北缘山前发现的新型砂砾石层卤水资源时代为早更新世<sup>[16, 17]</sup>。

3) 目前尚有多长尺度钻孔的磁性地层结果尚未发表或者正在进行磁性地层测试研究, 其中包括柴达木盆地西部大浪滩、马海、一里坪等地区的多个钻孔及盆地东部察汗汗的 QC-1 钻孔 (1200 m 全取芯) 和 QJ-1 钻孔 (3500 m 全取芯)。届时所有的磁性地层资料将涵盖整个柴达木盆地, 时代将从中新世跨越到第四纪, 以此来建立完善整个柴达木盆地新近纪以来的磁性地层年代框架, 为今后研究青藏高原隆升和气候环境演变及找矿突破、成矿理论研究提供坚实的年代学基础。

### 参考文献 (References)

[1] Liu Z C, Wang Y J, Chen Y, et al. Magnetostratigraphy and sedimentologically derived geochronology of the Quaternary lacustrine deposits of a

3000 m thick sequence in the central Qaidam Basin, western China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1998, 140(1): 459-473.

[2] Lu H J, Xiong S F. Magnetostratigraphy of the Dahonggou section, northern Qaidam Basin and its bearing on Cenozoic tectonic evolution of the Qilian Shan and Altyn Tagh Fault[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(3): 539-550.

[3] 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.

Shen Zhenshu, Cheng Guo, Le Changshuo, et al. The division and sedimentary environment of Quaternary salt-bearing strata in Qaidam Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.

[4] 朱筱敏, 康安, 韩德馨, 等. 柴达木盆地第四纪环境演变、构造变形与青藏高原隆升的关系[J]. *地质科学*, 2003, 38(3): 413-424.

Zhu Xiaomin, Kang An, Han Dexin, et al. Relation among Quaternary environmental evolution, tectonic deformation in the Qaidam Basin and uplifting of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(3): 413-424.

[5] 黄麟, 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): 652-663.

Huang Lin, Meng Zhaoqiang, Liu Hailing. A preliminary study on paleoclimatic fluctuation model of Qarhan Salt Lake in Qaidam Basin[J]. *Scientia Sinica*, 1990(6): 652-663.

[6] 魏新俊, 姜继学. 柴达木盆地第四纪盐湖演化[J]. *地质学报*, 1993, 67(3): 255-265.

Wei Xinjun, Jiang Jixue. The evolution of the Quaternary salt lake in the Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 67(3): 255-265.

[7] 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.

[8] 蔡永青. 柴达木盆地盐湖矿产资源开发利用现状及对策[J]. *中国国土资源经济*, 2003, 16(2): 11-13.

Cai Yongqing. Exploitation and utilization of salt lake mineral resources in the Basin of Qaidam[J]. *The Resources Economy*, 2003, 16(2): 11-13.

[9] 郑绵平, 项仁杰, 葛振华. 我国钾、镁、锂、硼矿产资源的可持续发展[J]. *国土资源情报*, 2004(3): 27-32.

Zheng Mianping, Xiang Renjie, Ge Zhenhua. The sustainable development of mineral resources in potassium, magnesium, lithium, borate of China[J]. *Land and Resources Information*, 2004(3): 27-32.

[10] 郑绵平, 齐文. 我国盐湖资源及其开发利用[J]. *矿产保护与利用*, 2006(5): 45-50.

Zheng Mianping, Qi Wen. Saline Resources and its development in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2006(5): 45-50.

[11] 郑绵平, 齐文, 张永生. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. *地质通报*, 2006, 25(11): 1239-1246.

Zheng Mianping, Qi Wen, Zhang Yongsheng. Present situation of potash resources and direction of potash search in China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(11): 1239-1246.

[12] 郑绵平, 卜令忠. 盐湖资源的合理开发与综合利用[J]. *矿产保护与利用*, 2009(1): 17-22.

Zheng Mianping, Bu Lingzhong. Rational development and comprehensive utilization of salt lakes resources[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2009(1): 17-22.

[13] 沈振枢, 程果, 葛同明. 柴达木盆地第四纪磁性地层特征及其意义

- [J]. 青海地质, 1992(2): 19-29.  
Shen Zhenshu, Cheng Guo, Ge Tongming. Magnetostratigraphic characteristics of Quaternary system in Qaidam Basin and its significance[J]. Qinghai Geology, 1992(2): 19-29.
- [14] 沈振枢, 王强, 程果, 等. 青海柴达木盆地第四纪下限[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1992, 12(1): 97-108.  
Shen Zhenshu, Wang Qiang, Cheng Guo, et al. The lower Quaternary boundary in the Qaidam Basin of Qinghai Province[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1992, 12(1): 97-108.
- [15] 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.  
Qin Yongpeng, Hou Xiaohua, Zheng Mianping, et al. Magnetostratigraphy of Liang-ZK02 borehole in Dalangtan, Qaidam Basin and its paleoenvironmental significance[J]. Geological Review, 2012, 58(3): 553-564.
- [16] 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.  
Shi Linfeng, Zheng Mianping, Li Jinsuo, et al. Magnetostratigraphy of Liang ZK05 borehole in Dalangtan, Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(11): 1631-1640.
- [17] 李洪普, 郑绵平, 侯献华, 等. 柴达木黑北凹地早更新世新型砂砾层卤水水化学特征与成因[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2014, 39(10): 1333-1342.  
Li Hongpu, Zheng Mianping, Hou Xianhua, et al. Hydrochemistry characteristics and origin of new brine sandy gravel in early Pleistocene of Hebei Concave in Qaidam Basin[J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(10): 1333-1342.
- [18] 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(1): 139-148.

## Research progresses on magnetostratigraphy of saline lake deposit in Qaidam Basin

SHI Linfeng<sup>1</sup>, ZHENG Mianping<sup>1</sup>, WANG Hailei<sup>1</sup>, HOU Xianhua<sup>1</sup>, QI Lujing<sup>2</sup>

1. MLR key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China

**Abstract** Because of its thick Cenozoic saline lake sediments, the Qaidam Basin has become a hotspot of studies of the uplift of the Tibet Plateau, the paleolake evolution, the climate change and the salt resource exploration. The magnetostratigraphy is an essential dating method for such long scale lacustrine sediments. This paper reviews the early magnetostratigraphic results in the deposit centers of the Qaidam Basin, and the new three magnetostratigraphic results of kilometer-scale drill holes in detail, including the cores ZK02 and ZK05 in the Dalangtan playa, the core SG-1 in the Chahansilatu playa. Based on the new magnetostratigraphic results, the Quaternary boundary is redefined in the deposit center of the western Qaidam Basin, which provides accurate age constraints of the Quaternary climate change in the Qaidam Basin, the stepwise uplift of the Tibet Plateau, and the new brine in the sandy gravel.

**Keywords** Qaidam Basin; saline lake deposit; kilometer-scale drill holes; magnetostratigraphy

(责任编辑 傅雪)