

柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期及构造运动阶段的相关性

陈安东, 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 柴达木盆地沉积有巨厚的晚新生代沉积物和丰富的矿产资源, 是研究晚新生代以来气候与环境变化、构造运动与盆地演化、成盐成矿规律的理想地区。通过对柴达木盆地钻孔和剖面的含盐地层测年数据进行总结, 并与青藏高原第四纪冰川活动和构造运动进行对比, 认为柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期及构造运动阶段具有一定的对应关系。柴达木盆地西部盐湖和干盐湖中通常发育有倒数第二次冰期及末次冰期的石盐层, 某些盐湖中还有希夏邦玛冰期、望昆冰期、中梁赣冰期的石盐层; 迄今为止在柴达木盆地东部的察尔汗盐湖中仅发现末次冰期以来的石盐层。冰期环境下的干冷气候及冰川扩张, 造成盐湖补给水源的减少, 有利于盐类物质的沉积。

关键词 柴达木盆地; 成盐期; 青藏高原构造运动; 第四纪冰期

柴达木盆地是位于青藏高原北部的一个大型山间盆地, 面积约 12 万 km²。盆地中蕴藏着丰富的矿产资源, 被称为中国的“聚宝盆”。盆地中沉积有巨厚的晚新生代沉积物, 是研究古环境变化、构造运动和成盐成矿规律的理想场所。近年来, 关于晚新生代青藏高原隆升过程及其环境效应的研究取得了较大进展^[1-3]。青藏高原第四纪冰川发育及其与构造运动的耦合关系得到进一步确立^[4-6]。同时, 对柴达木盆地成盐地层年代学数据和成盐期划分的研究也在不断完善^[7-12]。本研究将柴达木盆地成盐期与青藏高原构造运动阶段及第四纪冰期进行对比, 对柴达木盆地成盐成矿规律与第四纪气候和环境变化、青藏高原隆升和柴达木盆地演化之间的关系进行梳理, 对于找矿工作具有重要的应用意义。郑绵平等^[10-12]提出青藏高原成盐期与第四纪冰期具有一致性, 以及 6 次(干旱)成盐期的理论。黄麒等^[8]也提出柴达木盆地成盐期与构造运动和第四纪冰期存在一定的对应关系。但是均没有将成盐期与第四纪冰期和构造运动阶段进行系统的对比, 因此, 本研究对柴达木盆地成盐成矿作用与青藏高原构造运动以及第四纪冰川活动的关系进行对比和补充。

1 青藏高原晚新生代构造运动与冰川活动

青藏高原的隆起对亚洲甚至全球晚新生代以来的气候与环境产生了深远的影响。但是对于青藏高原的隆升过程,

目前存在不同的看法。对青藏高原北部以及柴达木盆地与青藏高原隆升相关的环境变化和沉积记录的研究, 虽然得出了不同的隆升阶段划分^[11-21, 13-17](表 1), 但是均肯定了晚新生代构造运动在青藏高原隆升过程中所起的作用。关于中国第四纪冰期划分, 目前对于中更新世以来的冰期序列已经有比较清晰的认识, 并与深海氧同位素阶段(marine oxygen isotope stage, MIS)进行了对比^[14, 18-19](表 2)。其中希夏邦玛冰期疑似是青藏高原最老的冰期, 年代约在 1.17~0.80 Ma^[20]。中梁赣冰期是祁连山地区目前已经发现的最老的冰期, 对应于 MIS12 阶段^[21-22]。

青藏高原构造运动与第四纪冰川活动存在着一定的耦合关系^[5-6]。晚新生代全球变冷可能与青藏高原隆升紧密相关, 构造运动促进岩石圈化学风化作用加剧, 使得大气中 CO₂ 浓度下降, 进而引起降温^[23]。昆黄运动(1.1~0.7 Ma)导致青藏高原原面隆升至 3 km 以上, 青藏高原隆升进入冰冻圈^[15, 24]。在 MIS16 阶段冰期气候的耦合下, 望昆冰期即青藏高原上规模最大的冰期出现^[24]。共和运动(0.15 Ma)导致黄河溯源侵蚀进入共和盆地, 青藏高原东部及可可西里隆升至 4.2 km 以上^[19], 共和运动促进了末次冰期的出现。朱筱敏等^[16]通过柴达木盆地磁性地层确认 0.24~0.09 Ma 对应于共和运动, 而这一时间段与倒数第二次冰期(0.30~0.13 Ma)的时间比较接近, 是否存在对应关系需要进一步确认。

收稿日期: 2016-11-10; 修回日期: 2017-02-27

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212331413023); 国家自然科学基金项目(U1407027)

作者简介: 陈安东, 博士, 研究方向为第四纪地质学, 电子信箱: anton.chen@163.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究员, 研究方向为盐类学与矿床地质学, 电子信箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 陈安东, 郑绵平. 柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期及构造运动阶段的相关性[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 36-41; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.06.003

表1 晚新生代青藏高原构造运动阶段划分
Table 1 Tectonic activity stages on the Tibetan Plateau in the late Cenozoic

构造运动阶段划分/Ma						参考文献
2.80~2.00	1.60~1.10	0.76~0.60	0.30~0.16	0.03~至今		刘淑琴等 ^[13]
青藏运动 (2.8~2.0)	阿尔金运动 (1.6~1.1)	柴达木运动 (0.4~0.16)	华西运动 (0.03~至今)			朱允铸等 ^[14]
青藏运动主幕 3.6	青藏运动 B 幕 2.6	青藏运动 C 幕 1.7	昆黄运动 (1.1~0.7)/ (1.2~0.6)	共和运动 0.15		李吉均等 ^[1-2] ; 崔之久等 ^[15]
2.52~2.28	1.94~1.66	1.38~1.10	0.71~0.50	0.24~0.09		朱筱敏等 ^[16]
青藏运动 A 幕 3.60~3.33、3.21~3.12	3.00~2.59	2.19~2.15	1.70~1.65	1.07~0.99	0.13 以来	郑绵平等 ^[17]

表2 中国第四纪冰期划分方案
Table 2 Quaternary glaciation cycles in China

施雅风 ^[4]			赵井东 ^[18]			崔之久 ^[19]		
年代/ka	MIS	冰期划分	年代/ka	MIS	冰期划分	年代/ka	MIS	冰期划分
0~11	1	冰后期			小冰期	0~11	1	小冰期 新冰期
11~28/32	2	末次冰期晚冰阶, 末次冰期冰盛期 (LGM)	0~10	1	新冰期 全新世早中期冰进	11~28/32	2	末次冰期 IV(YD) 末次冰期 III
28/32~58/60	3	MIS3a 间冰期 MIS3b 末次冰期 中冰阶 MIS3c 间冰期	11~28	2	YD 冰进 近冰阶 末次冰盛期	28/32~58/60	3	MIS3c 暖期 末次冰期 II(MIS3b) MIS3a 暖期
58/60~75	4	末次冰期早冰阶	32~58	3	MIS3a(暖) MIS3b(冷) MIS3c(暖)	58/60~75	4	末次冰期 I
75~130		末次间冰期	58~75	4	末次早冰阶	75~100	5	末次间冰期
130~	6	倒数第二次冰期 (开始时间可能在 MIS8 或者 MIS10) 间冰期	75~125	5	间冰期		6	倒数第二次冰期 III 阶段
420~480	12	中梁赣冰期	130~300	6~8	古乡冰期		7	间冰期
480~600	13~15	大间冰期		9~11	间冰期	100~360	8	倒数第二次冰期 II 阶段
600~800	16~20	昆仑冰期(最大冰 期)	420~480	12	中梁赣冰期		9	间冰期
800		间冰期 希夏邦玛 冰期	480~620	13~15	大间冰期		10	倒数第二次冰期 I 阶段
			620~780	16~18	昆仑冰期 间冰期	360~420	11	间冰期
			> 800		希夏邦玛冰期	420~480	12	中梁赣冰期
						480~600	13~15	大间冰期
						600~800	16~20	望昆冰期
						> 800		希夏邦玛冰期?

2 柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期和构造运动

沈振枢等^[7]和黄麒等^[8]利用钻孔古地磁测年建立了柴达木盆地4 Ma以来完整的磁性地层序列,并对一些钻孔顶部岩芯采用²³⁰Th、¹⁴C和³⁶Cl等测年方法,取得了一系列的同位素年代学数据。但是,在成盐期与古气候的关系对比中,前人更加关注“干旱”对于成盐作用的影响,并没有将成盐期与第四纪冰期进行系统的对比。柴达木盆地部分钻孔和剖面(图1)记录的含盐地层的年代学数据见表3^[25]。该年代学数据显示柴达木盆地钻孔记录的成盐期与青藏高原第四纪冰期可以相互对比(表4)^[26]。柴达木盆地西部各盐湖和干盐湖均发育有末次冰期和倒数第二次冰期的盐层;尕斯库勒湖还发育有中梁赣冰期的石盐层;马海、一里坪和昆特依(干)盐湖发育有望昆冰期的石盐层;昆特依还发育有希夏邦玛冰期的石盐层。而柴达木盆地东南部的察尔汗盐湖区仅发育末次冰期

以来的石盐层,尤其以末次冰期冰盛期的石盐层最为普遍,在察尔汗盐湖区多个钻孔中均有发现。由此可见,柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期可以相互对比。

柴达木盆地西部的大浪滩 ZK402 记录早在 4.00 Ma 之前就已经进入石盐、石膏沉积阶段。察汗斯拉图 ZK4613 记录的最底部石盐层古地磁时代为 3.596~3.549 Ma, 在 3.280~3.190 Ma 也有石盐层;马海在 2.54 Ma 开始出现石膏沉积^[7-8]。虽然在晚上新世至早更新世没有明确的冰期划分,但是该时间段内也有北半球变冷的记录。青藏运动主幕导致青藏高原发生强烈的构造隆升,主夷平面解体^[2]。李吉均等^[26]认为,第四纪冰期正是在 3.5 Ma 以来,青藏高原强烈隆升导致的北半球变冷而开始的。同时,亚洲中部干旱化在 3 Ma 明显加剧,青藏高原在该阶段加速沉积黄土^[2]。所以该时段,察汗斯拉图开始在 3.596~3.549 Ma 形成最早的石盐沉积,而紧随其后在 3.280~3.190 Ma 形成的石盐层也可以与郑绵平等^[17]

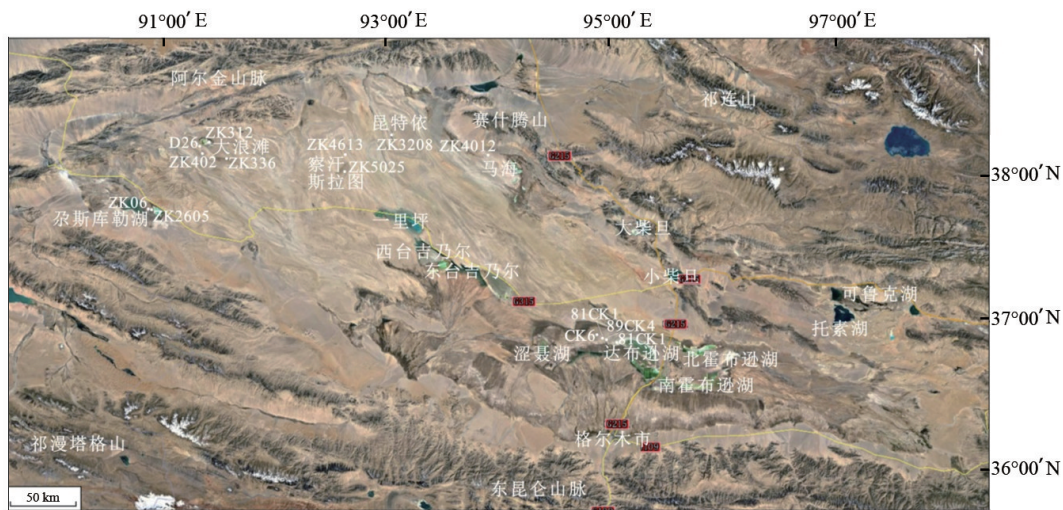


图1 柴达木盆地部分钻孔以及(干)盐湖

Fig. 1 Drilling cores, salt lakes and playas in the Qaidam Basin

表3 柴达木盆地部分钻孔和剖面含盐地层测年数据

Table 3 Dating results of salt deposits in the Qaidam Basin

盐湖	钻孔或剖面	钻孔位置	盐类矿物	测年方法	样品深度/m	年代/ka	来源
昆特依	ZK3208	93°02'03"E 38°34'46"N	表层盐壳	¹⁴ C	0.10	24.4±4.3~14.1±0.2	黄麒等 ^[8]
			含盐粉砂	²³⁰ Th	3.82	30.6±3.3	
			含石膏淤泥	²³⁰ Th	14.46	65.1±8.5	
			含石盐的碎屑岩	²³⁰ Th	98.36~23.70	247±28~125.6±24.5	
			石盐	古地磁	121.95~114.95	329±42~292±32	
察汗斯拉图	ZK4613 ZK5025	92°39'05"E 38°26'13"N 92°36'35"E 38°19'14"N	含石盐的碎屑岩	²³⁰ Th	226.86	~628	沈振枢等 ^[7] 沈振枢等 ^[7] ;黄麒等 ^[8]
			含石盐的碎屑岩	²³⁰ Th	335.81~334.68	1060	
			含石盐的碎屑岩	²³⁰ Th	4.36	105.9±7.1	
			含石盐芒硝	²³⁰ Th	83.00	256.0±27.1	

表3 柴达木盆地部分钻孔和剖面含盐地层测年数据
 Table 3 Dating results of salt deposits in the Qaidam Basin

(续)

盐湖	钻孔或剖面	钻孔位置	盐类矿物	测年方法	样品深度/m	年代/ka	来源
大浪滩	D26剖面	91°21'15"E 38°31'01"N	芒硝	U系	2.75~1.47	195.1±10.0~169.9±5.6	马妮娜等 ^[27]
			含石盐黏土	¹⁴ C	3.35	25.61±0.48	沈振枢等 ^[7]
			石盐	¹⁴ C	8.84	31.3±3.1	
					1.35	27.9±9.1	
	ZK402	91°21'25"E 38°27'56"N	石盐	²³⁰ Th	71.0~44.0	247.0±34.9~109.6±15.4	沈振枢等 ^[7] ;黄麒等 ^[8]
					88.35	> 300	
					1.35	11.0±12.5	
					38.1	136±49	
	ZK336	91°33'20"E 38°26'08"N	石盐、芒硝	²³⁰ Th	12.0	18.7±2.1	沈振枢等 ^[7] ;黄麒等 ^[8]
					32.6	83.0±5.6	
					44.33	109.6±8.1	沈振枢等 ^[7] ;黄麒等 ^[8]
					40.2~38.39	26.3±3.3~22.9±1.3	
ZK312	91°25'15"E 38°32'06"N	石盐	²³⁰ Th	125.9	230.3±32.5		
尕斯库勒湖	ZK2605	90°56'33"E 38°05'04"N	含石盐黏土	¹⁴ C	2.14	5.5±0.3	
			石盐	³⁶ Cl	67.27~33.46	271.0±57.0~206.4±34.2	
			石盐	古地磁	114.98	610	沈振枢等 ^[7] ;黄麒等 ^[8]
			含石盐的碎屑岩	U系	27.35~22.10	172.0±13.0~118.6±12.9	沈振枢等 ^[7]
			含石膏的碎屑岩	U系	95.66~43.74	339.7±45.0~236.3±23.9	
			含粘土石膏、石盐	AMS ¹⁴ C	50~0	29.7±0.3~13.5±0.4	叶传永等 ^[28]
马海	ZK4012	93°51'06"E 38°23'59"N	石盐	古地磁	97	629~589	黄麒等 ^[8]
			石盐	²³⁰ Th	39.6~10.3	203±16.1~111±16.3	
察尔汗盐湖区	81CK1	达布逊东北湾	石盐	²³⁰ Th	21.9~9.10	24.2±0.77~11.9±1.4	黄麒等 ^[8]
					44.95~43.7	53.0±5.10~45.4±2.86	
	88CK1	别勒滩	石盐	²³⁰ Th	14.21	16.0±0.80	黄麒等 ^[8]
					43.01	50.1±4.00	
	89CK4	别勒滩	石盐	²³⁰ Th	26.4~17.2	27.6±4.5~22.4±1.7	黄麒等 ^[8]
				42.8~37.2	54.5±4.5~48.1±6.5		
CK6	94°47'25"E 37°06'31"N	石盐粉砂	¹⁴ C	52.22~40.60	31.4±1.78~24.8±0.95	沈振枢等 ^[7]	

表4 柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期对比

Table 4 Comparison between salt deposits in the Qaidam Basin and the Quaternary glaciations on the Tibetan Plateau

盐湖	希夏邦玛冰期	望昆冰期	中梁赣冰期	倒数第二次冰期	早冰阶	末次冰期中冰阶	晚冰阶, LGM
昆特依	石盐	石盐	—	石盐、石膏	石膏	—	石盐
察汗斯拉图	—	—	—	石盐、芒硝	—	—	石盐
大浪滩	—	—	—	石盐、芒硝	—	—	石盐、芒硝
尕斯库勒湖	—	石盐	石盐	石盐、石膏	—	—	石盐、石膏
马海	—	石盐	—	石盐	—	—	石盐
察尔汗盐湖区	—	—	—	—	石盐	石盐	石盐

划分的构造运动阶段相吻合。马海地区在 2.54 Ma 开始有石膏沉积,该时段接近第四纪底界,该时段在黄土高原午城黄土开始堆积(2.6 Ma)。干冷气候促进了中国北方黄土堆积,同时也促进了柴达木盆地部分盐湖的石盐沉积。

青藏高原第四纪冰期环境通常伴随着温度和湿度的降低,干冷的冰期环境有利于成盐作用进行^[29]。如在倒数第二次冰期 MIS6 阶段,青藏高原东部气温降低 8~12°C,同时降水量也有减少^[30],该时段在柴达木盆地西部各盐湖中广泛析出冷相矿物芒硝。末次冰盛期 MIS2 阶段,青藏高原气温平均降低 7°C,降水量仅为现在的 30%~70%^[31]。虽然在望昆冰期 MIS16 阶段,青藏高原的降水量相对较高,但是冰川面积也有所增大^[24],而且盆地中降水量与青藏高原山地也存在差异,柴达木盆地中可能也会形成有利于石盐析出的环境。

3 结论

柴达木盆地晚新生代盐类物质沉积与全球变冷以及亚洲中部干旱化是一系列成因上相关的地质事件,与青藏高原在晚新生代的强烈隆升及其造成的环境效应密切相关。柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期具有一定的对应关系,与青藏高原构造运动阶段也可以对比。盆地西部钻孔中记录的成盐期与希夏邦玛冰期、望昆冰期、中梁赣冰期、倒数第二次冰期、末次冰期可以进行对比;尤其是倒数第二次冰期和末次冰期 MIS2 阶段的盐层分布较为普遍,该两个冰期中形成的盐层在柴达木盆地西部成盐盆地中均有发现;末次冰期 MIS2 阶段形成的盐层分布更加广泛,甚至包括成盐较晚的察尔汗盐湖区。柴达木盆地成盐期与第四纪冰期可以对比,同时也可以与 MIS 进行对比。

参考文献(References)

- [1] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381-391.
Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Tibetan Plateau and its impacts on environments in surrounding area[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(5): 381-391.
- [2] 李吉均, 周尚哲, 赵志军, 等. 论青藏运动主幕[J]. 中国科学(地球科学), 2015, 45(10): 1597-1608.
Li Jijun, Zhou Shangzhe, Zhao Zhijun, et al. The Qingzang Movement: The major uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Science China (Earth Sciences), 2015, 45(10): 1597-1608.
- [3] Li Jijun, Fang Xiaomin, Song Chunhui, et al. Late Miocene-Quaternary rapid stepwise uplift of the NE Tibetan Plateau and its effects on climatic and environmental changes[J]. Quaternary Research, 2014, 81(3): 400-423.
- [4] 施雅风. 中国第四纪冰期划分改进建议[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 687-692.
Shi Yafeng. A suggestion to improve the chronology of Quaternary glaciations in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 687-692.
- [5] 施雅风, 崔之久, 苏珍. 中国第四纪冰川与环境变化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2006.
Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Su Zhen. The Quaternary glaciations and environmental variations in China[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 2006.
- [6] 施雅风, 赵井东, 王杰. 中国第四纪冰川新论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2011: 1-213.
Shi Yafeng, Zhao Jingdong, Wang Jie. New understanding of Quaternary glaciations in China[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2011: 1-213.
- [7] 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: 9-148.
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: 9-148.
- [8] 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: 52-201.
Huang Qi, Han Fengqing. Evolution of salt lakes and palaeoclimate fluctuation in Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press. 2007: 52-201.
- [9] 郑绵平. 论中国盐湖[J]. 矿床地质, 2001, 20(2): 181-128.
Zheng Mianping. On saline lakes of China[J]. Mineral Deposits, 2001, 20(2): 181-128.
- [10] 郑绵平, 向军, 魏新俊, 等. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1989: 17-18.
Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, et al. Saline lakes on the Qinghai-Tibetan Plateau[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1989: 17-18.
- [11] 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.
- [12] 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 等. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2123-2165.
Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, et al. Progress and prospects of salt lake research in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4): 2123-2165.
- [13] 刘淑琴, 张发胜. 柴达木马海盆地沉积环境和成盐作用[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 3-4.
Liu Shuqin, Zhang Fasheng. The sedimentary environment and the salinization of Mahai Basin in Chaidamu[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992: 3-4.
- [14] 朱允铸, 钟坚华, 李文生. 柴达木盆地新构造运动及盐湖发展演化[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 57.
Zhu Yunzhu, Zhong Jianhua, Li Wensheng. The Neotectonic Movement and the evolution of saline lakes of Qaidam Basin in Northwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 57.
- [15] 崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 等. 关于“昆仑—黄河运动”[J]. 中国科学(地球科学), 1998, 28(1): 53-59.
Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian, et al. On Kunlun-Yellow River tectonic movement[J]. Science in China(Earth Sciences), 1998, 28(1): 53-59.
- [16] 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-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(3): 413-424.
- [17] 郑绵平, 张雪飞, 候献华, 等. 青藏高原晚新生代湖泊地质环境与成盐成藏作用[J]. 地球学报, 2013, 34: 129-138.
Zheng Mianping, Zhang Xuefei, Hou Xianhua, et al. Geological environments of the late Cenozoic lakes and salt-forming and oil-gas pool-forming actions in the Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2013, 34: 129-138.

- [18] 赵井东, 施雅风, 王杰. 中国第四纪冰川演化序列与MIS对比研究的新进展[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 867-884.
Zhao Jingdong, Shi Yafeng, Wang Jie. Comparison between Quaternary glaciations in China and the Marine Oxygen Isotope Stage (MIS): An improved schema[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 867-884.
- [19] 崔之久, 陈艺鑫, 张威, 等. 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨[J]. 第四纪研究, 2011, 31(5): 749-764.
Cui Zhijiu, Chen Yixin, Zhang Wei, et al. Research history, glacial chronology and origins of Quaternary glaciations in China[J]. Quaternary Sciences, 2011, 31(5): 749-764.
- [20] Zheng Benxing, Xu Qinqi, Shen Yongping. The relationship between climate change and Quaternary glacial cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau: Review and speculation[J]. Quaternary International, 2002, 97(1): 93-101.
- [21] 周尚哲, 李吉均, 张世强, 等. 祁连山摆浪河谷地的冰川地貌与冰期[J]. 冰川冻土, 2001, 23(2): 131-138.
Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang, et al. Glacial geomorphology and ice ages in the Bailang River Basin, Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 131-138.
- [22] Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang. Quaternary glaciation of the Bailang River Valley, Qilian Shan[J]. Quaternary International, 2002(97): 103-110.
- [23] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate [J]. Nature, 1992, 359(6391): 117-122.
- [24] 施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻圈的演化及其与全球变化的联系[J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 197-208.
Shi Yafeng. Evolution of the cryosphere in the Tibetan Plateau, China, and its relationship with the global change in the mid Quaternary[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(3): 197-208.
- [25] 陈安东, 郑绵平, 施林峰, 等. 柴达木盆地一里坪石膏²³⁰Th定年及成盐期与第四纪冰期和构造运动的关系[J]. 地球学报, 2017. doi: 10.3975/cagsb.2016.00.00.
Chen Andong, Zheng Mianping, Shi Linfeng, et al. Gypsum ²³⁰Th dating of the 15YZK01 drilling core in the Qaidam Basin: Salt deposits and their link to Quaternary glaciation and tectonic movement[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017. doi: 10.3975/cagsb.2016.00.00.
- [26] Chen Andong, Zheng Mianping, Shi Linfeng, et al. Magnetostratigraphy of deep drilling core 15YZK01 in the northwestern Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau): Tectonic movement, salt deposits and their link to Quaternary glaciation[J]. Quaternary International, 2017. doi: 10.1016/j.quaint.2017.01.026. (in press).
- [27] 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. Froming age of surface mirabilite in Dalangtan, Qaidam Basin and its environmental significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(3): 433-444.
- [28] 叶传永, 王志明, 赵世勤, 等. 柴达木盆地西部尕斯库勒盐湖280 ka以来沉积特征[J]. 沉积学报, 2014, 32(1): 85-92.
Ye Chuanyong, Wang Zhiming, Zhao Shiqin, et al. Sedimentary characteristics since 280 ka B.P. in Gasikule Salt Lake in Western Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(1): 85-92.
- [29] 李吉均, 舒强, 周尚哲, 等. 中国第四纪冰川研究的回顾与展望[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 235-243.
Li Jijun, Shu Qiang, Zhou Shangzhe, et al. Review and prospects of Quaternary glaciations research in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 235-243.
- [30] 李吉均, 周尚哲, 潘保田. 青藏高原东部第四纪冰川问题[J]. 第四纪研究, 1991, 11(3): 193-203.
Li Jijun, Zhou Shangzhe, Pan Baotian. The problems of Quaternary glaciation in the eastern part of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Quaternary Sciences, 1991, 11(3): 193-203.
- [31] 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. 地理学报, 1999, 54(1): 10-20.
Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan, et al. Uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau and east Asia environmental change during late Cenozoic[J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(1): 10-20.

Salt-forming periods in the Qaidam Basin and their correlation with Quaternary glaciations and tectonic movements on the Tibetan Plateau

CHEN Andong, ZHENG Mianping

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

Abstract The thick late Cenozoic sediments and the abundant mineral resources in the Qaidam Basin provide an ideal place for the research of the palaeo-climate, the tectonic movement, the basin evolution, and the salt mineralization theory. This paper reviews the salt-forming dating results recorded in the drilling cores and sections in the Qaidam Basin, and compares them with the tectonic movement periods and the Quaternary glaciations on the Tibetan Plateau. The comparison results indicate that there are certain correlations between the salt forming periods and the tectonic movement periods and the Quaternary glaciations. In the salt lakes and playas one usually observes preserved salt deposits formed in the Penultimate Glaciation and the Last Glaciation, and in some places there are salt deposits formed in the Xixiabangma Glaciation, the Wangkun Glaciation and the Zhonglianggan Glaciation; in the Qarhan Salt Lake in the eastern Qaidam Basin there are only salt deposits formed since the Last Glaciation. The dry and cold climate and the expansion of glacier during the glacial environment reduce the water supply in the salt lakes, which is favourable for the salt deposits.

Keywords Qaidam Basin; salt deposit; tectonic movement of Tibetan Plateau; Quaternary glaciations

(责任编辑 傅雪)