

晚第四纪 MIS6 以来柴达木盆地成盐作用 对冰期气候的响应

陈安东¹⁾, 郑绵平¹⁾, 宋高¹⁾, 王学锋²⁾, 李洪普³⁾, 韩光³⁾, 袁文虎³⁾

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

2) 中国科学院地质与地球物理研究所, 新生代地质与环境重点实验室, 北京, 100029;

3) 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海格尔木, 816099

内容提要: 气候是控制柴达木盆地盐类沉积的主要因素之一, 但是其作用机制尚待明确。作者以柴达木盆地察汗斯拉图盐湖的 3 个含盐剖面为研究对象, 采用多接收电感耦合等离子质谱 (MC-ICP-MS) 铀系测年测定其沉积时代, 并通过 X 射线粉晶衍射 (XRD) 分析测定其盐类矿物种类。铀系测年显示 D18 剖面石盐和芒硝层的沉积时代为 13.1 ± 2.0 ka BP ~ 15.9 ± 2.5 ka BP, 其中芒硝沉积年代属于末次冰期 MIS2 晚期; MXK2 剖面芒硝层的沉积时代分别为 131.7 ± 39.5 ka BP 和 158.3 ± 10.8 ka BP, D12 剖面芒硝层的沉积时代分别为 166.6 ± 20.2 ka BP 和 198.0 ± 20.6 ka BP, 可以对应于倒数第二次冰期 MIS6。XRD 分析确定了 3 个剖面的盐类矿物主要为芒硝、石盐和石膏。综合多个盐湖晚第四纪成盐数据, 本文认为倒数第二次冰期 MIS6 和末次冰期 MIS2 是柴达木盆地晚第四纪重要的成盐期, 冰期的冷干气候有利于石盐和芒硝等盐类沉积。柴达木盆地“冰期成盐”的根本原因, 是由于冰期环境下盆地周边山体冰川规模的扩张以及干冷的冰期气候, 共同造成了盐湖补给水量的减少。此外, 晚第四纪 MIS6 和 MIS2 的冰期降温也是导致盆地中冷相盐类沉积的直接原因。

关键词: 柴达木盆地; 盐湖; 成盐期; 倒数第二次冰期; 末次冰期; 铀系测年

世界上大型海相蒸发岩矿床通常是在干旱气候背景下沉积的, 其中大多为“干热”气候 (Herrero et al., 2015; Warren, 2016)。因为盐类沉积通常是由于太阳能蒸发作用导致蒸发量超过补给水量, 进而引起水体浓缩和盐类沉积, 而“干热”的气候模式有利于这种成盐作用的进行 (Herrero et al., 2015; Warren, 2010, 2016)。有研究表明加拿大麋鹿岬 (Elk Point) 盆地泥盆纪蒸发岩、美国新墨西哥盆地二叠纪蒸发岩、美国密执安盆地志留纪蒸发岩、欧洲蔡希斯坦盆地二叠纪蒸发岩矿床均形成于“干热”的气候条件下 (钱自强等, 1994; 张永生等, 2014)。此外, 中国陕北奥陶纪、四川盆地三叠纪和新疆库车盆地古近纪等海相蒸发岩矿床均形成于高温气候背景下 (张永生等, 2014; 赵艳军等, 2015; 刘成林等, 2016)。

但是, 在柴达木盆地和青藏高原等高海拔地区, 却存在寒冷气候条件下的陆相盐类沉积。柴达木盆

地各大盐湖区在第四纪期间均有盐类沉积, 且大多具有冷相盐类组合特征 (郑绵平等, 2010)。而第四纪气候的主要特征是冰期与间冰期的交替发生 (刘嘉麒等, 2001), 但对于冰期气候在柴达木盆地盐类沉积过程中所起的作用有待明确。沈振枢等 (1993) 提出柴达木盆地在冷期的盐层厚度明显大于暖期, 黄麒等 (2007) 指出柴达木盆地各大盐湖区在末次冰期 MIS2 均有石盐沉积。陈安东等 (2017) 对中更新世以来柴达木盆地成盐期与青藏高原冰期序列进行了系统的对比, 认为冰期环境有利于石盐和芒硝等盐类沉积。此外, 对于气候因素在柴达木盆地盐类沉积过程中所起的作用, 回答“高温成盐”还是“冰期成盐”这一科学问题, 学术界尚存在不同的认识 (郑绵平等, 1989, 1998; 赵艳军等, 2015; Chen Andong et al., 2017; 陈安东等, 2017)。

2018 年作者在柴达木盆地西部察汗斯拉图盐湖开展矿产地质调查期间, 采集了该盐湖的第四纪

注: 本文为国家重点研发计划课题 (编号: 2017YFC0602806)、国家自然科学基金资助项目 (编号: 41902190)、中国地质科学院矿产资源所基本科研业务费专项经费 (编号: KK1923) 和中国地质调查局地质调查项目 (编号: DD20190172, DD20160054) 的成果。

收稿日期: 2019-10-17; 改回日期: 2020-02-08; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.03.006

作者简介: 陈安东, 男, 1987 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事盐湖学与第四纪地质学研究; Email: anton.chen@163.com。

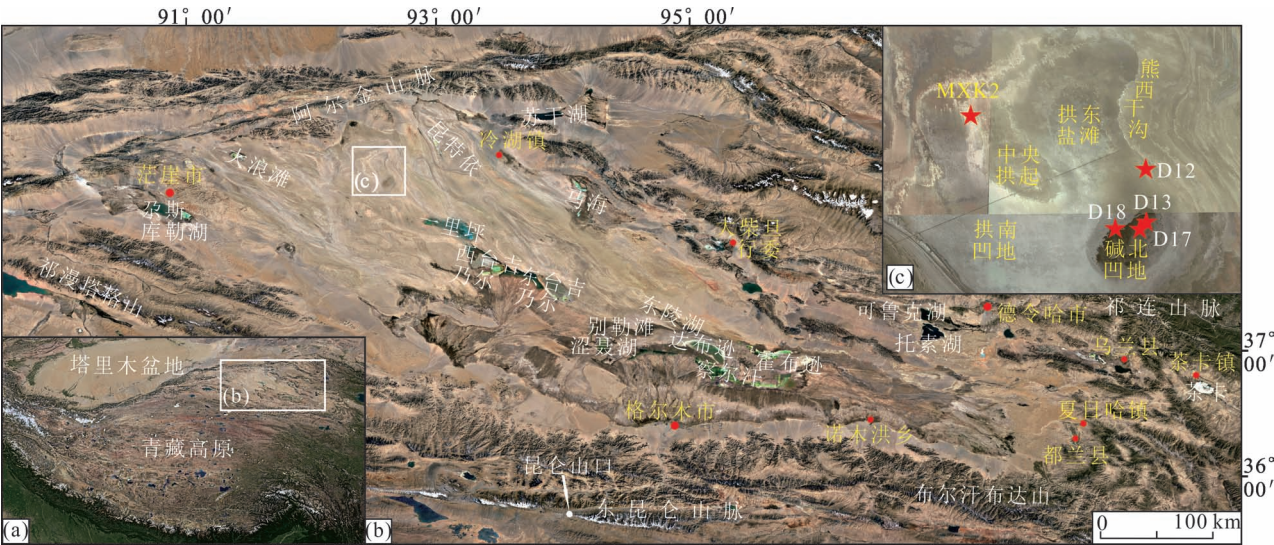


图 1 柴达木盆地西部察汗斯拉图盐湖位置图(据 Chen Andong et al. ,2018 修改)

Fig. 1 Location of the study area(modified after Chen Andong et al. , 2018)

(a) 青藏高原; (b) 柴达木盆地; (c) 察汗斯拉图盐湖; 红色五角星示本文剖面位置

(a) Qinghai—Xizang(Tibetan) Plateau; (b) Qaidam Basin; (c) Chahansilatu Playa; Red star indicating the sampling sites

盐类矿物样品。本文以该盐湖近期开挖的卤水沟和露天矿坑的 3 个含芒硝剖面为研究对象,通过 XRD 分析和 MC-ICP-MS 铀系测年,测定其盐类矿物种类和沉积年代。通过本项研究及柴达木盆地多个盐湖晚第四纪成盐数据,本文提出 MIS6 以来成盐期与冰期和深海氧同位素阶段的对比方案,并对晚第四纪冰期气候在盐类沉积过程中所起的作用进行探讨,进一步阐明柴达木盆地“冰期成盐”机制。

1 区域概况

柴达木盆地位于青藏高原东北部 90°00'~98°20'E,35°55'~39°10'N 之间,面积 121000 km²,盆地内部海拔一般在 2675~3350 m(图 1)。盆地周边被东昆仑山脉、祁连山脉和阿尔金山脉环绕。海拔 4800~5000 m 以上的高山发育大陆型山岳冰川,加之昆仑山脉和祁连山脉腹地辽阔,因此构成了柴达木盆地主要的水源补给区(袁见齐等,1983;张彭熹,1987)。阿尔金山脉腹地相对较小,没有大型河流注入柴达木盆地。

柴达木盆地干燥寒冷,少雨多风,具有高原大陆性气候特征。盆地内部月平均最低温和最高温分别为-15~-10℃(1 月)和 15~17℃(7 月),盆地西部年均气温为 3℃(张彭熹,1987)。盆地西部年降水量低于 20 mm,而蒸发量为 2000~3000 mm(张彭熹,1987)。柴达木盆地极端干旱的气候有利于盐

湖发育和盐类沉积。

本文研究区察汗斯拉图位于柴达木盆地的西北部,该盐湖西部为阿尔金山脉,东北方向为昆特依,西南方向为大浪滩,东南方向为一里坪(图 1)。该盐湖是一个干盐湖,地表主要出露下更新统一全新统的湖相和盐类化学沉积。该盐湖晶间卤水的水化学类型为硫酸镁亚型(袁见齐等,1995)。察汗斯拉图是柴达木盆地重要的芒硝矿区,芒硝矿层在该盐湖的中央拱起、拱南凹地和碱北凹地的中、上更新统地层中广泛分布。中央拱起是察汗斯拉图芒硝矿的主要采矿区,地表的芒硝层可厚达数米。碱北凹地的芒硝层中含有较多石盐,此外还是该盐湖钾镁盐沉积的核心部位。而拱南凹地的芒硝中含有一些石盐,但不含钾镁盐层。

本文的研究对象 D18 剖面位于碱北凹地卤水沟的最北端,采样位置均位于工业卤水的水位以上,避免了其他地层的卤水对样品造成污染;MXK2 剖面位于中央拱起西北部,是一个芒硝矿露天采矿坑;D12 剖面位于碱北凹地北部,是一个探矿坑。以上 3 个剖面均为含芒硝剖面,剖面照片及其中主要盐类矿物照片见图 2,剖面位置等信息见表 1。此外,作者还对碱北凹地中心 D13 和 D17 剖面开展了研究,但这两个剖面下部的盐层受到工业卤水污染,且剖面上部未找到原生石盐层,无法得出有效的铀系年代序列。

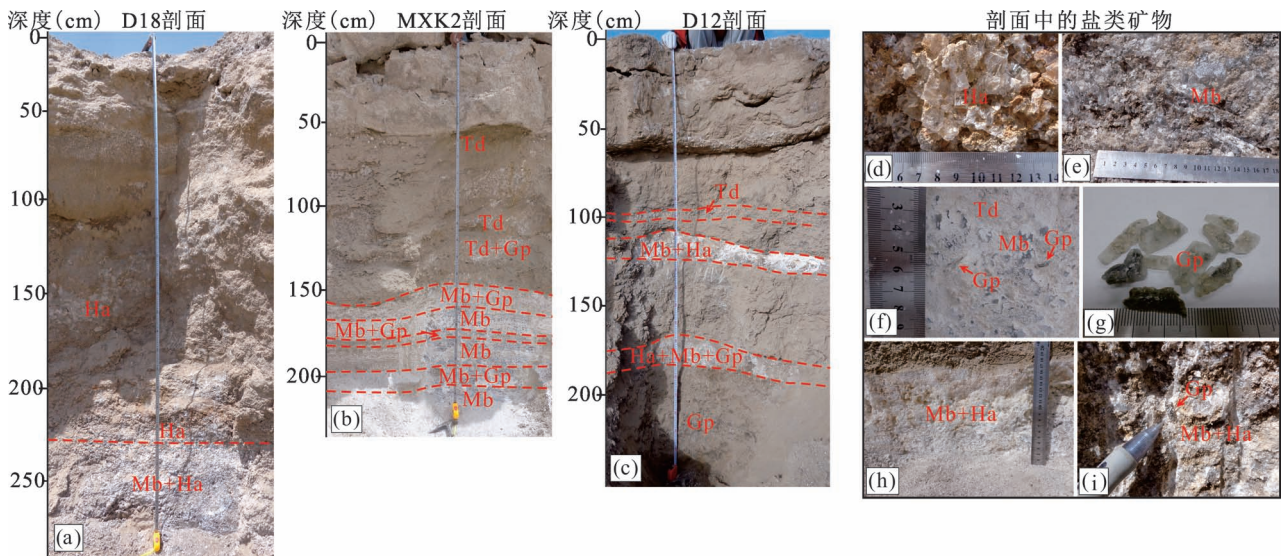


图 2 柴达木盆地察汗斯拉图含盐地层剖面及其中主要盐类矿物

Fig. 2 Photos of salt-bearing profiles and main salt minerals in the Chahansilatu playa

图中(a)、(b)和(c)分别为 D18、MXK2 和 D12 剖面;(d) 为 D18 剖面石盐晶体;(e) 为 D18 剖面底部的含石盐芒硝层;(f) 为 MXK2 剖面的无水芒硝、芒硝和石膏;(g) 为 MXK2 剖面石膏样品 MXK2-3;(h) 为 D12 剖面的含石盐芒硝层;(i) 为 D12 剖面含石盐芒硝层中的石膏。Gp—石膏; Ha—石盐; Mb—芒硝; Td—无水芒硝

The profiles are D18 (a), MXK2 (b) and D12 (c); photos are showing halite crystals of D18 profile (d); mirabilite layer with halite of D18 profile (e); thenardite, mirabilite and gypsum of MXK2 profile (f); gypsum dating sample MXK2-3 of the MXK2 profile (g); mirabilite layer with halite of D12 profile (h); gypsum crystals in the mirabilite and halite layer of D12 (i). Gp—gypsum; Ha—halite; Mb—mirabilite; Td—thenardite

2 样品处理和测试

2.1 XRD 分析

为了准确的鉴定剖面中的盐类矿物种类,作者共选择了 45 个盐类矿物样品进行 XRD 分析。测试仪器为日本理学 Rigaku MiniFlex 600 型 X 射线粉晶衍射仪,测试条件:CuKα 靶,电压/电流为 40 kV/15 mA,扫描角度为 3°~70°,步长为 0.02°。盐类矿物样品均密封低温保存且未烘干,剔除晶体表面杂质后研磨至 100 目。XRD 测试在自然资源部盐湖资源与环境重点实验室测试完成。

表 1 柴达木盆地察汗斯拉图含盐剖面基本信息

Table 1 Information of salt-bearing profiles in the Chahansilatu playa

剖面名称	地理位置	坐标(E/N)	海拔高度(m)	主要盐类矿物
D18	碱北凹地西北部	92°35'2.9" 38°20'44.3"	2698	石盐、芒硝
MXK2	中央拱起西北部	92°24'43.3" 38°28'53.8"	2708	芒硝、石膏
D12	碱北凹地以北	92°37'15.3" 38°25'21.8"	2702	芒硝、石盐、石膏

2.2 MC-ICP-MS 铀系测年

在 MXK2 剖面中,测年样品选择地层中的原生石膏晶体,该类石膏晶体通常呈板柱状,无色透明或者含少量黑色杂质,长 1~2 cm,呈薄层状夹在芒硝层之间或芒硝层中(图 2f 和 2g)。依据石膏的形态及其在地层中的赋存状态,这种石膏通常被判定为原生石膏(Cody et al., 1988; Mees et al., 2012)。石膏样品共计 3 个,采样深度见表 2。在样品前处理过程中,首先将石膏晶体在超声波清洗机中用酒精洗去杂质,碾碎后挑选其中无色透明的碎片研磨成 200 目以下的粉末。

由于盐湖中沉积的芒硝易脱水且易溶化,系统封闭性较差,不宜作为铀系测年材料。芒硝晶体暴露在空气中容易脱去结晶水($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O}$),由无色透明晶体变成白色粉末(图 2e, 2f 和 2h),在柴达木盆地的大风天气下,这一过程仅需要数十分钟就可以完成。而密封的、含石盐杂质的芒硝会随着温度升高而溶化,在夏季很容易完成这一过程。所以作者对采集的芒硝样品密封且低温(<10℃)保存,即便如此,在样品处理过程中也难免有部分芒硝脱水或者溶化。此外,石盐在地下卤水中可能会发生重结晶,系统封闭性也不如

表 2 察汗斯拉图剖面²³⁰Th 测年结果(±2σ)
Table 2 ²³⁰Th dating results of the profiles (±2σ)

样品编号	测年 矿物	采样深度 (cm)	²³⁸ U (×10 ⁻⁹)	²³² Th (×10 ⁻¹²)	$n(^{230}\text{Th})/n(^{232}\text{Th})$ (×10 ⁻⁶)	$\delta^{234}\text{U}$ (测量值)	$\frac{A(^{230}\text{Th})}{A(^{238}\text{U})}$	²³⁰ Th 年代(a) (未校正)	²³⁰ Th 年代(a) (校正)	$\delta^{234}\text{U}$ 初始 (校正)	²³⁰ Th 年代 (ka BP) (校正)
D18-1	石盐	190~195	17.7±0.04	4178.2±84.0	11.9±0.2	253.8±2.5	0.1710±0.0009	15913.1±93.0	13157.5±1953.3	263.4±3.0	13.1±2.0
D18-2	石盐	215~220	15.7±0.03	4706.0±94.7	11.4±0.2	265.9±2.8	0.2070±0.0010	19352.7±112.4	15878.5±2463.4	278.1±3.5	15.9±2.5
D18-3	石盐	270	0.5±0.001	159.5±3.2	9.9±0.7	240.6±8.8	0.1898±0.0137	18007.4±1415.0	14265.6±2983.1	250.5±9.4	14.2±3.0
MXK2-3	石膏	155~160	69.9±0.24	116766.9±2368.0	9.4±0.2	139.2±3.2	0.9484±0.0061	181548.1±3223.4	131686.1±39462.5	201.9±22.8	131.7±39.5
MXK2-5	芒硝	198~211	5.49±0.01	3385.1±67.9	25.9±0.5	178.4±2.9	0.9677±0.0038	173257.5±1960.1	158304.7±10845.3	278.9±9.6	158.3±10.8
D12U2	石膏	90	28.4±0.05	31686.0±634.8	15.7±0.3	224.6±11.7	1.0594±0.0090	193255.8±6905.1	166644.9±20231.6	359.5±27.8	166.6±20.2
D12U3	石膏	110	44.0±0.07	51882.9±1039.7	15.7±0.3	226.4±5.5	1.1225±0.0056	225481.0±4995.0	197985.3±20609.9	395.9±25.0	198.0±20.6
GBW04412	-	-	10550.5±16.3	5569.4±112.3	33483.9±677.7	851.1±2.3	1.0720±0.0024	87068.1±327.2	87060.7±327.2	1088.1±3.1	87.0±0.3

注:标准物质 GBW04412 的年代为 85.00±4.00 ka(王立胜等,2016);D18 剖面²³⁰Th 年龄利用 $n(^{230}\text{Th})/n(^{232}\text{Th})$ 值为 $(2.2\pm 1.1)\times 10^{-6}$ 进行校正,参考柴达木盆地西部一里坪 15VZK01 深钻的碎屑物实测数据;MXK2 和 D12 剖面的²³⁰Th 年龄利用 $n(^{230}\text{Th})/n(^{232}\text{Th})$ 值为 $(4.4\pm 2.2)\times 10^{-6}$,参考地壳平均值;BP(距今)中的“今”为公元 2000 年。 $\frac{A(^{230}\text{Th})}{A(^{238}\text{U})}$ 为放射性活度比值。

$$\delta^{234}\text{U} = \left\{ \left[\frac{A(^{234}\text{U})}{A(^{238}\text{U})} \right] - 1 \right\} \times 1000.$$

石膏。本文所采用的石盐测年材料,作者谨慎的选择 D18 剖面中薄层状的白色石盐,以及芒硝层中的石盐晶体。

作者并不试图强调石盐和芒硝也适合作为铀系测年材料,但是在有些盐湖剖面中没有其他更合适的测年材料可选的情况下,不妨采用石盐和芒硝作为尝试。而且,石盐和芒硝作为铀系测年材料,也已经取得了一系列成果(沈振枢等,1993;黄麒等,2007;侯献华等,2010;Han Wenxia et al.,2014)。本文用来测年的芒硝样品共计 1 个,石盐样品共计 3 个,采样深度见表 2。芒硝和石盐样品均在清理干净表面杂质后机械破碎,挑选无色透明的碎块研磨至 10 目以下。

本文用来测年的石膏、石盐和芒硝样品均利用 2 mol/L 稀盐酸溶解,然后进行分离。采用多接收电感耦合等离子体质谱法(multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry, MC-ICP-MS)进行铀系定年,使用美国 Thermo-Fisher 公司的 Neptune Plus 型多接收电感耦合等离子体质谱仪测定样品中 U 和 Th 的同位素比值,最后计算出²³⁰Th 年龄。在测试过程中,使用 GBW04412 标准物质控制测试误差。样品的分离纯化和质谱测量流程参照王立胜等(2016)的实验方法。测试实验在中国科学院地质与地球物理研究所铀系年代学实验室完成。

3 测试结果

3.1 主要盐类矿物

D18 剖面的盐类矿物以石盐(NaCl)和芒硝(Na₂SO₄·10H₂O)为主,卤水沟底部有次生的石膏(CaSO₄·2H₂O)晶体。作者在 D18 剖面未发现固体钾盐矿物,而对更靠近碱北凹地湖中心的 D13 剖面和 D17 剖面的细砂层中的盐类矿物进行 XRD 分析,发现其中的盐类矿物主要为钾石膏(K₂Ca(SO₄)₂·H₂O)、光卤石(KMgCl₃·6H₂O)、钾石盐(KCl)和杂卤石(K₂Ca₂Mg(SO₄)₄·2H₂O)。在 D13 和 D17 剖面中,钾石膏呈片状赋存在全新统细砂层中,钾石膏表面有白色粉末状的光卤石、杂卤石和钾石盐。在这两个剖面中,也有一些光卤石和杂卤石呈白色斑点状分布在细砂层中。在察汗斯拉图盐湖,地表的固体钾盐矿物大多分布在碱北凹地,而碱北凹地是该盐湖直到晚更新世末期—全新世才干涸的区域。

MXK2 剖面的芒硝相对较为纯净,芒硝层中除

了石膏晶体,XRD 分析未检出其他盐类矿物。在 MXK2 剖面盐壳以下紧邻的粉砂层中,含有次生的石盐、石膏和芒硝(已脱水成无水芒硝)。D12 剖面的芒硝层中均含有较多的石盐,下部芒硝层中除了石盐还有石膏晶体。D12 剖面盐壳以下紧邻的粉砂层中,含有次生的石膏和芒硝(已脱水成无水芒硝);底部的灰泥和粉砂层中含有次生的石膏晶体,灰泥中的碳酸盐矿物以文石和方解石为主,并含少量菱镁矿。

芒硝是典型的冷相盐类矿物,在低于 32℃ 的卤水中,Na₂SO₄ 的溶解度随着温度降低而减小,因而芒硝更易在冰期的冷环境下析出,甚至在冰下析出(Last and Ginn,2005;Grasby et al.,2013;Herrero et al.,2015)。按照其成因,芒硝甚至不能被称之为“真正的”蒸发岩矿物(Warren,2016)。芒硝作为冷相矿物,形成于年均温-7~-3℃ 以下且达到 7 个月以上的冷环境才能形成稳定的芒硝层(郑绵平等,1998,2016)。因此,芒硝对冰期冷环境带来的降温比较敏感。而石盐是广温相盐类矿物,石盐的沉积与卤水浓缩相关(郑绵平等,1998,2016)。

3.2 铀系测年结果

D18 剖面的石盐铀系年龄分别为 13.1±2.0 ka BP (D18-1)、15.9±2.5 ka BP (D18-2) 和 14.2±3.0 ka BP (D18-3)(表 2,图 3)。其中,D18-1 样品产自剖面 190~195 cm 的石盐层;D18-2 产自 215~220 cm 的石盐层,该石盐层以深为含石盐的芒硝层;D18-3 产自剖面底部芒硝层中的石盐晶体。该剖面的芒硝沉积时代可以归属于末次冰期 MIS2。这 3 个样品的数据误差均超过 15%,实际上,对于柴达木盆地盐湖剖面顶部和钻孔浅部盐类矿物的铀系数据,以往在一里坪和东陵湖也出现过误差过大

的问题,主要是由于样品中初始 Th 的含量较高导致(陈安东等,2017;Chen Andong et al.,2018)。D18 剖面 3 个样品的数据在误差范围内基本一致,均归属于晚更新世晚期,符合该区域的地质资料。前人对察汗斯拉图 ZK5025 钻孔近地表盐壳测定的¹⁴C 数据也表明该盐湖在 MIS2 干涸(沈振枢等,1993;黄麒等,2007),与本文的铀系数据接近,表明我们的数据虽然误差比较大,但还是基本可靠的。

MXK2 剖面的石膏和芒硝铀系年代分别为 131.7±39.5 ka BP (MXK2-3) 和 158.3±10.8 ka BP (MXK2-5)(图 3),其中 MXK2-3 出现较大的测年误差,如果不考虑测年误差的话,和 MXK2-5 均可归属于倒数第二次冰期 MIS6(130~191 ka)。D12 剖面的石膏铀系年代分别为 166.6±20.2 ka BP (D12U2) 和 198.0±20.6 ka BP (D12U3)(图 3),其中 D12U2 的年代属于 MIS6,但 D12U3 的年代略早于 MIS6,如果不考虑测年误差,甚至可以归属 MIS7。但是须知 MXK2 和 D12 剖面都是短剖面,而柴达木盆地盐湖的沉积速率往往较大,短剖面盐层的年代不可能相差太大。MXK2 剖面和 D12 剖面的铀系年代均归属于中更新世晚期,符合该区域的地质资料。

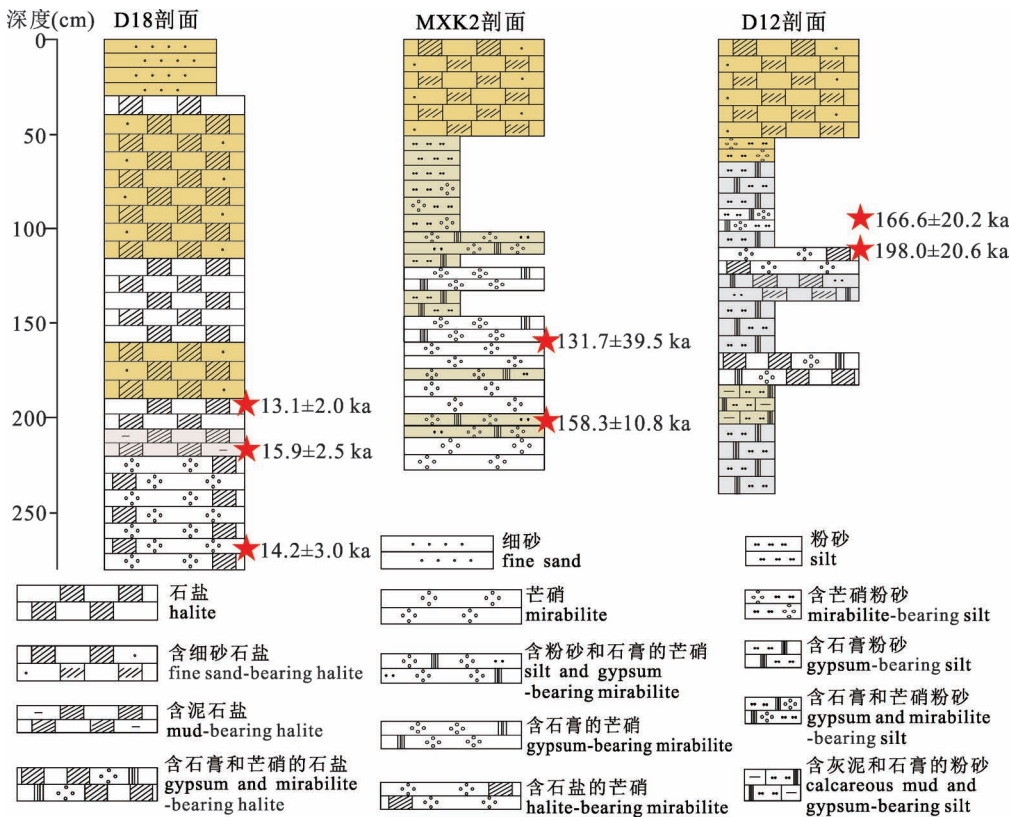


图 3 柴达木盆地察汗斯拉图剖面柱状图及其成盐时代
Fig. 3 Lithology and dating results of the profiles of the Chahansilatu playa

表 3 末次冰期早冰阶至新仙女木(YD)冰进期间
柴达木盆地盐类沉积的测年数据

Table 3 Dating results of salt deposits in the Qaidam Basin since the Early
Glacial Stage of the Last Glaciation to Younger Dryas event

盐湖	钻孔或采样点 及位置(E/N)	盐类矿物及 深度(m)	测年方法 和数据(ka)	参考文献
大浪滩	ZK336 钻孔 91°25'15"/ 38°32'06"	石盐和芒硝(9.84)	¹⁴ C: 31.26±1.90	沈振枢等,1993; 黄麒等,2007
		石盐和芒硝(12.0)	²³⁰ Th: 18.70±2.10	
	ZK312 钻孔 91°25'15"/ 38°32'06"	泻利盐(6.55)	²³⁰ Th: 16.90±3.20	
		石盐(38.39)	²³⁰ Th: 22.90±1.30	
		石盐和石膏(40.20)	²³⁰ Th: 26.30±3.30	
		石盐和石膏(63.55)	¹⁴ C: 26.77±0.60	
	ZK402 钻孔 91°21'25"/ 38°27'56"	石盐(1.35)	²³⁰ Th: 27.90±9.10	侯献华等, 2010
		石盐(3.35)	¹⁴ C: 25.61±0.48	
		石盐(8.84)	¹⁴ C: 31.30±3.1	
	梁 ZK02 钻孔 91°27'/ 38°33'	石盐(1.50)	²³⁰ Th: 14.9±1.0	
		石盐(9.00)	²³⁰ Th: 24.2±0.8	
		石盐(18.60)	²³⁰ Th: 31.1±1.4	
察汗斯拉图	ZK5025 钻孔 92°36'35"/ 38°19'14"	石盐(1.70)	¹⁴ C: 29.8±2.4	黄麒等,2007
		石盐(1.70)	¹⁴ C: 29.79±2.42	沈振枢等,1993
	D18 剖面 92°35'2.9"/ 38°20'44.3"	石盐(1.90~1.95)	²³⁰ Th: 13.1±2.0	本文
		石盐(2.15~2.20)	²³⁰ Th: 15.9±2.5	
昆特依	地表盐壳	盐(0.10)	¹⁴ C: 15.7±4.2	黄麒等,2007
		盐(0.10)	¹⁴ C: 14.1±0.2	
	ZK3208 钻孔 93°02'03"/ 38°34'46"	盐(3.82)	²³⁰ Th: 30.6±3.3	
		石膏(14.46)	²³⁰ Th: 65.1±8.5	
一里坪	82CK1 钻孔	石盐(7.74)	¹⁴ C: 12.1±0.65	黄麒等,2007
		石盐(15.20)	¹⁴ C: 25.8±0.54	
		石盐(18.19)	¹⁴ C: 32.5±0.65	
	15YZK01 钻孔 93°11'57"/ 37°58'03"	石盐(13.5~0.0)	32.5~2.0 (据 ²³⁰ Th年代计算)	陈安东等,2017
马海	地表盐壳	石盐	15(据 ²³⁰ Th年代推断)	黄麒等,2007
尕斯库勒	地表盐壳	石盐	25 ka BP 以后 (据 80CK1 钻孔 和 ZK2605)	黄麒等,2007
察尔汗盐湖区	CK6 钻孔 94°47'25"/ 37°06'31"	石盐(40.60)	¹⁴ C: 24.8±0.94	沈振枢等,1993; 黄麒等,2007
		石盐(52.22)	¹⁴ C: 31.4±1.78	
	地表盐壳	石盐	²³⁰ Th: 16.1±1.3	
		石盐	²³⁰ Th: 12.2±1.1	
		石盐	²³⁰ Th: 12±1.5	
	81CK1 钻孔 达布逊 东北湾	石盐(17.0)	²³⁰ Th: 16.7±0.18	黄麒等,2007
		石盐(21.9)	²³⁰ Th: 24.2±0.77	
		石盐(28.2)	²³⁰ Th: 32.3±3.10	
	88CK1 钻孔 别勒滩	石盐(14.21)	²³⁰ Th: 16.0±0.80	
		石盐(24.33)	²³⁰ Th: 32.5±1.40	
		石盐(17.2)	²³⁰ Th: 22.4±1.7	
	89CK4 钻孔 别勒滩	石盐(22.8)	²³⁰ Th: 25.0±1.8	
		石盐(26.4)	²³⁰ Th: 27.6±4.5	

4 分析与讨论

4.1 柴达木盆地盐湖 MIS6 以来成盐期与冰期的对比

中更新世以来的青藏高原冰期序列已经建立(施雅风,2002;易朝路等,2005;赵井东等,2011;崔之久等,2011),尤其是 MIS6 以来的冰期/间冰期温度和降水量的变化也已经取得了大量的研究成果(李吉均等,1991;潘保田等,1994,1997;施雅风,1998,2002;侯光良等,2019)。此外,近年来,柴达木盆地成盐期数据的不断积累(沈振枢等,1993;黄麒等,2007;Zhang Weilin et al.,2012;Wang Jiuyi et al.,2013;Chen Andong et al.,2017;陈安东等,2017),使我们有条件将柴达木盆地成盐期与青藏高原第四纪冰期进行时间与空间上的系统对比。

为了将柴达木盆地成盐期与末次冰期 MIS2 进行对比,作者对多个盐湖在末次冰期的盐类沉积和测年数据进行了总结(表 3)。大量的同位素年代数据显示柴达木盆地西部盐湖在 MIS2 均有石盐沉积,个别盐湖还有芒硝和泻利盐沉积;在 MIS2 晚期盐湖面积萎缩,干盐滩面积扩张(表 3)。而柴达木盆地东部察尔汗盐湖成盐较晚,袁见齐等(1995)曾提出察尔汗盐湖的四次成盐期:31.0~25.8 ka、24.7~20.0 ka、19.0~16.5 ka 和 15~8 ka,其中大多数时间在 MIS2 范围内。在本文中,察汗斯拉图 D18 剖面的芒硝沉积年代对应于末次冰期 MIS2,与柴达木盆地东、西部盐湖在 MIS2 出现盐类沉积是可以对比的。所以,柴达木盆地东、西部盐湖在 MIS2 均有石盐沉积。

倒数第二次冰期 MIS6 柴达木盆地西部盐湖均有石盐沉积,相关盐类沉积的测年数据已经有系统的总结(陈安东等,2017)。本文中,MXK2 剖面和 D12 剖面的芒硝沉积时代可以

对应于倒数第二次冰期 MIS6,与前人在柴西多个盐湖取得的芒硝沉积年代是一致的。察汗斯拉图 SG-1 钻孔进尺 37.2~37.25 m 和 37.60~37.65 m 出现少量芒硝,依据古地磁获得的沉积速率计算其年代约为 185 ka(Li Minghui et al.,2010;Zhang Weilin et al.,2012)。一里坪 15YZK01 钻孔进尺 72.0 m 出现少量芒硝晶体,依据古地磁和²³⁰Th 测年获得的沉积速率计算其年代为 173 ka(Chen Andong et al.,2017)。大浪滩的层状芒硝的²³⁰Th 测年数据为 143~195 ka(马妮娜等,2011)。以上数据表明柴西盐湖芒硝沉积时代在区域上可以相互佐证,柴西多个盐湖存在 MIS6 的芒硝沉积。

基于晚第四纪冰期与成盐期的对比关系,本文初步提出倒数第二次冰期 MIS6 以来的对比方案(表 4)。按照该对比方案,晚第四纪倒数第二次冰期 MIS6 和末次冰期 MIS2 是柴达木盆地两个重要的成盐期。末次冰期 MIS4 柴达木盆地西部盐湖也有盐沉积(黄麒等,2007),但不如 MIS2 普遍。末次间冰期 MIS5 柴达木盆地东部盐湖出现高湖面和泛湖期(樊启顺等,2010;Fan Qishun et al.,2010,2012),盐沉积较少。MIS3 为相对 MIS5 较弱的暖湿阶段,柴西部分盐湖出现盐沉积,而柴东湖泊出现高湖面记录(郑绵平等,2006)。MIS1 虽然总体上处于间冰期,但是仍然伴随着小冰期、新冰期和全新世早中期冰进等冷阶段,柴达木盆地出现干盐滩面积扩大的情况。而 MIS1 出现的全新世大暖期(8.5~3.0 ka BP)中的稳定暖湿阶段(7.2~6.0 ka BP)(施雅风等,1992),也与察尔汗盐湖洪泛期(约 8~5 ka BP)基本重合(袁见齐等,1995),显示该暖湿阶段不利于盐沉积。

但是,这一对比方案还存在以下问题需要考虑:①蒸发岩沉积受到“气候—构造—物源”共同控制,而气候并不是控制成盐的唯一因素;②晚第四纪期间不受冰川融水补给的盐湖或者受冰川融水补给影响较小的盐湖可能存在不同的盐沉积特征;③同一个盐湖的河流入湖口、湖中心和湖边缘的盐沉积特征可能存在区别;④晚第四纪多个冰期的降温幅度不一致,而且间冰期升温过程中也伴随着冷期;⑤晚第四纪冰期/间冰期旋回还伴随着亚洲中心干旱化,柴达木盆地气候呈现出“振荡干化”且干旱程度加剧的特征。以上情况造成“冰期成盐”这一科学问题复杂化,还需要进一步完善。因此,我们的对比方案仅针对晚第四纪期间受冰川融水直接或者间接补给的大盐湖区,而单一的某个钻孔或剖面并不一定完全适用。

4.2 晚第四纪气候对盐类沉积的控制作用

在通常情况下,高温可以加快卤水蒸发和浓缩,有利于盐类沉积(Warren,2010,2016)。赵艳军等(2015)计算获得柴达木第四纪盐湖石盐流体包裹体的均一温度为 17.9~38.2℃,平均值为 34.0℃。罗布泊上更新统石盐流体包裹体记录的温度最大值为 35.6℃~43℃,反映出罗布泊晚更新世末期处于干旱、炎热的环境(Sun Xiaohong et al.,2017)。此外,也有证据表明全新世以来,青海湖和茶卡盐湖随着温度的升高而导致古盐度升高,但在寒冷条件下古盐度降低(张彭熹等,1992;沈吉等,2001;刘兴起等,2007)。但是作者认为对于青藏高原和柴达木盆地受冰川融水补给的盐湖及其中的陆相盐沉积,在晚第四纪成盐过程中,冰期气候和冰川活动所起的作用是不容忽视的。

表 4 柴达木盆地 MIS6 以来成盐期与青藏高原冰期对比方案

Table 4 Comparison scheme between salt-forming periods in the Qaidam Basin and Quaternary glacial periods in the Qinghai—Xizang(Tibetan) Plateau since MIS6

年代(ka)	MIS	青藏高原冰期	柴达木盆地成盐期与盐类沉积
0~10	1	间冰期中包含小冰期,新冰期,全新世早中期冰进	干盐滩面积扩大,盐湖中沉积钾镁盐(黄麒等,2007)。察尔汗盐湖在全新世大暖期出现洪泛期(施雅风等,1992;袁见齐等,1995)
11~28	2	YD 冰进,近冰阶,末次冰盛期(LGM)	成盐期:盆地中几乎所有盐湖均有石盐沉积,部分盐湖有芒硝、泻利盐沉积。盐湖面积萎缩,在 15 ka BP 左右形成大面积干盐滩(黄麒等,2007)
32~58	3	3a 和 3c 暖期,3b 冰进	高湖面期:相对较弱,柴西部分盐湖有石盐沉积,柴东湖泊出现高湖面记录(郑绵平等,2006)
58~75	4	末次早冰阶	成盐期:相对较弱,柴西多个盐湖有石盐沉积
75~125	5	末次间冰期:5a,5c 和 5e 暖期,5b 和 5d 相对冷	高湖面和泛湖期:以碎屑岩和碳酸盐岩沉积为主,柴西盐湖有石膏沉积,石盐和芒硝沉积较少
130~191	6	倒数第二次冰期 MIS6	成盐期:柴西盐湖均有石盐沉积,多个盐湖出现芒硝沉积

晚第四纪气候对柴达木盆地蒸发沉积矿床的控制作用,实质上是冰期/间冰期旋回对盐类沉积的控制作用。在柴达木盆地和青藏高原,凡是以冰川融水补给为主的盐湖,其盐类沉积必然受到冰川活动的影响,其成盐期必定受冰期控制。末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM, 24~18 ka)青藏高原冰川面积是现代冰川的 7.5 倍,倒数第二次冰期 MIS6 冰川规模甚至比 LGM 还要大(李吉均等,1991;潘保田等,1994;施雅风等,1999)。鉴于柴达木盆地盐湖的水源补给主要依赖昆仑山脉、祁连山脉和阿尔金山脉的冰冻圈融水和大气降水,冰冻圈在冰期/间冰期旋回背景下的消长,将直接影响到盐湖的补给水量。在倒二冰期 MIS6 和末次冰期 MIS2,作为柴达木盆地主要水源补给区的祁连山和昆仑山均有冰进的证据(赵井东等,2001;Zhou Shangzhe et al., 2002; Owen et al., 2006)。冰期冷环境下冰冻圈的规模扩张,汇入盆地的水量减少,最终引起盐湖水浓缩和盐度升高,也是导致盐类沉积的一个重要途径(Herrero et al., 2015;陈安东等,2017;Chen Andong et al., 2017)。另外,在 MIS6 和 MIS2 期间的降温,也是导致盐湖中冷相矿物芒硝和泻利盐沉积的直接原因。按照芒硝形成和保存的条件推算,柴西地区在 MIS2 和 MIS6 降温至少达到 6~10℃。

此外,晚第四纪倒数第二次冰期 MIS6 和末次冰期 MIS2 气候均以“冷干”为特征(李吉均等,1991;潘保田等,1997;施雅风等,1999;侯光良等,2019),有利于盐类沉积。在倒数第二次冰期 MIS6,青藏高原东部气温相对比现在低 8~12℃,降水量减少(李吉均等,1991)。也有研究表明青藏高原东北部在 MIS6 降温 12℃ 以上(潘保田等,1994),气候相对末次冰期较湿(潘保田等,1994;赵井东等,2011)。在倒数第二次冰期 MIS6,柴达木盆地西部盐湖均有石盐沉积,一里坪、察汗斯拉图和大浪滩还有芒硝沉积(沈振枢等,1993;韩凤清等,1995;黄麒等,2007;马妮娜等,2011;Li Minghui et al., 2010; Zhang Weilin et al., 2012; 陈安东等, 2017; Chen Andong et al., 2017)。在末次冰盛期,青藏高原平均降温 7℃,降水量只有现代的 30%~70%(李吉均等,1991;施雅风等,1999)。在 MIS2 的冷干气候下,柴达木盆地几乎所有的盐湖均有石盐析出,并形成大面积的干盐滩(Chen and Bowler, 1986; 沈振枢等,1993;张保珍等,1995;黄麒等,2007;陈安东等,2017;Chen Andong et al., 2017)。而古里雅冰芯记录显示末次冰期 MIS4 的降温不及 LGM,但是湿度

稍大于 LGM(赵井东等,2011)。MIS4 的温度特征在深海氧同位素曲线上有明显的记录(Lisiecki and Raymo, 2005),温度和湿度特征在青藏高原冰川规模上也有反映(赵井东等,2001, 2002; Yang Jianqiang et al., 2006; 王杰等, 2012; Chevalier and Replumaz, 2019),所以在柴达木盆地 MIS4 的盐沉积不如 MIS2 普遍。

在此需要指出,即使在晚第四纪冰期降水量没有减少,仅依靠柴达木盆地内部的大气降水、深部水和油田水等也不足以维持盐湖的长期存在。柴西冷湖地区年均降水量低于 20 mm(张彭熹,1987),向东至都兰县夏日哈地区的降水量增加至 240 mm(Yu Lupeng et al., 2012)。盆地内部的深部水和油田水可以影响到盐湖的水化学组成(李润民,1983),但也很难维持一个盐湖区的长期存在。所以,柴达木盆地盐湖最重要的水源补给还是来自盆地周边山体(袁见齐等,1983;张彭熹,1987),通过地表和地下径流对盐湖进行补给。本文无法恢复晚第四纪冰川、河道和盐湖的演化过程,但是我们可以根据昆仑山现代冰川对三湖地区(台吉乃尔、涩聂和达布逊盐湖区)的补给情况将今论古(图 4,表 5)。

表 5 柴达木盆地三湖地区盐湖及入湖河流
Table 5 Salt lakes in the Sanhu area and their inflow rivers

序号	盐湖区	主要固体盐类沉积	入湖河流
1	台吉乃尔 (东台吉乃尔和西台吉乃尔湖)	石盐、芒硝和 白钠镁矾	东台吉乃尔河 和那陵格勒河
2	涩聂(涩聂湖 和别勒滩)	石盐、光卤石和 少量钾石盐	乌图美仁河、大灶 火河、拖拉海河和 清水河
3	达布逊(察尔汗 和达布逊湖)	石盐、光卤石、水氯 镁石和少量钾石盐	格尔木西河、格尔 木东河和跃进河

三湖地区主要由发源于东昆仑山脉北坡的河流补给,河水主要来自山区的冰川融水和大气降水(袁见齐等,1983),还有少量的热泉水和地下水(周长进等,2002;高东林等,2006;余俊清等,2018)。在冰期随着冰冻圈规模扩张和雪线下降,这些水大部分以固体形式储存在山上。而更新世柴达木古湖由东南向西北补给,三湖地区是补给水流的主要起点之一(沈振枢等,1993;Chen Andong et al., 2017)。按照这种补给方式,湖水可以由达布逊—涩聂—台吉乃尔——一里坪—察汗斯拉图方向自东南向西北补

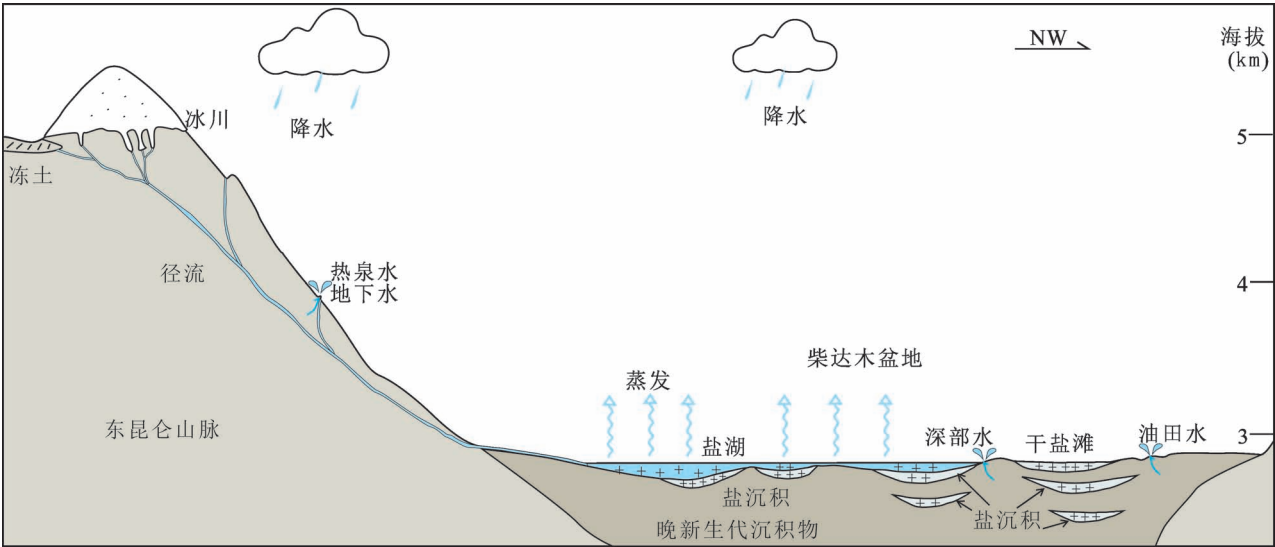


图 4 柴达木盆地盐湖与昆仑山冰川相互作用示意图

Fig. 4 Diagrammatic sketch of interactions between salt lakes in the Qaidam Basin and glaciers on the Kunlun Mountains

给。因此,上述盐湖的盐沉积均与冰川活动有直接的联系。此外,大浪滩、马海、尕斯库勒和昆特依等盐湖在晚第四纪的成盐期也与冰期存在一定的对应关系(陈安东等,2017),但具体的补给过程有待进一步研究。

尽管有研究表明柴达木盆地在冰期出现“高湖面”(Phillips et al., 1993; 张虎才等, 2007; 杨一博等, 2018),但是本文认为至少 MIS6 和 MIS2 的冰期气候不利于“高湖面”的出现。虽然存在“温湿”气候模式的冰期,比如末次冰期 MIS3b 冰进,也有大量的数据表明在 MIS3,青藏高原色林错、扎布耶和纳木错以及柴达木盆地盐湖出现高湖面(郑绵平等, 2006; 刘俊英等, 2007; Owen et al., 2006)。此外,末次间冰期 MIS5 柴达木盆地盐湖成盐数据也较少。目前已经有研究表明尕海、托素湖在末次间冰期 MIS5 出现高湖面,对应湖泊淡化期(樊启顺等, 2010; Fan Qishun et al., 2010, 2012)。而古里雅冰芯记录 MIS5e 青藏高原比现在升温 5℃ 以上(姚檀栋等, 1997; 施雅风等, 1998),在 MIS3a 和 MIS3c 高出现代 3℃ 和 4℃ (施雅风等, 2002),均为暖期。以上研究表明 MIS5 和 MIS3 温度升高伴随着柴达木盆地湖泊水位升高,而“冷干”的 MIS6 和 MIS2 很难出现“高湖面”。

基于柴达木盆地盐类沉积与气候变化的关系,本文认为在短时间尺度上,全球变暖对于柴达木盆地盐类沉积是不利的。遥感数据显示近 40 年来青

藏高原向暖湿气候转型,全球变暖导致高原冰川退化、冻土消融和降水量增加(闫丽娟等, 2014; Yan Lijuan et al., 2015; Bibi et al., 2018; Li Huiying et al., 2019)。来自冰冻圈和大气圈的水体汇入盐湖水体圈,造成了湖泊水位上涨、面积扩张和盐度下降。对于青藏高原和柴达木盆地受冰川融水补给的盐湖,全球变暖不利于其盐类沉积。更为直接的证据,来自 1989 年夏季气温升高引起高山冰川融化,导致柴达木盆地“特大洪水”事件,最终造成多个盐湖水位上涨和石盐溶解(袁见齐等, 1995; 黄麒等, 2007)。不可否认随着冰川消融和降水量的增加,汇入盐湖的水量增加可以带来更多的盐类矿物,并促进分散的固体钾盐转为液相且向矿区低洼处汇集,但限于篇幅本文不拟赘述。

5 结论

(1)察汗斯拉图发育有倒数第二次冰期 MIS6 和末次冰期 MIS2 的芒硝和石盐层。中央拱起 MXK2 剖面 and 碱北凹地以北 D12 剖面芒硝的沉积年代可以对应于倒数第二次冰期 MIS6,碱北凹地 D18 剖面芒硝的沉积年代为末次冰期 MIS2 晚期。

(2)对于柴达木盆地受冰川融水补给的盐湖,其成盐期必定受到冰期的影响。倒数第二次冰期 MIS6 和末次冰期 MIS2 是柴达木盆地重要的成盐期,在盆地西部盐湖均有 MIS6 和 MIS2 的石盐沉积,个别盐湖还有芒硝和泻利盐沉积。末次间冰期

MIS5 温度升高不利于柴达木盆地盐类沉积。晚第四纪 MIS6 和 MIS2 柴达木盆地“冰期成盐”的根本原因,是由于冰期环境下冰川规模的扩张以及干冷的冰期气候,共同造成了盐湖补给水量的减少。此外,晚第四纪冰期 MIS6 和 MIS2 的降温也是导致冷相盐类(如芒硝和泻利盐)沉积的直接原因。

致谢: 青海森盛矿业有限公司在野外矿产地质调查和采样工作中提供了支持,审稿专家和责任编辑为本文提供了宝贵的修改意见,在此一并表示感谢!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈安东, 郑绵平, 施林峰, 王海雷, 徐建明, 袁文虎. 2017. 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. 地球学报, 38(4): 494~504.

崔之久, 陈艺鑫, 张威, 周尚哲, 周力平, 张梅, 李川川. 2011. 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨. 第四纪研究, 31(5): 749~764.

樊启顺, 赖忠平, 刘向军, 孙永娟, 隆浩. 2010. 晚第四纪柴达木盆地东部古湖泊高湖面光释光年代学. 地质学报, 84(11): 1652~1660.

高东林, 马海洲, 张西营, 韩凤清, 周笃珩. 2006. 西台吉乃尔盐湖地下卤水的赋存特征. 盐湖研究, 14(2): 1~6.

韩凤清, 黄麒, 王克俊, 王华安, 原力. 1995. 柴达木盆地昆特依盐湖的地球化学演化与古气候变化. 海洋与湖沼, 26(5): 502~508.

侯献华, 郑绵平, 张成君, 施林峰, 王有德. 2010. 柴达木盆地西部大浪滩 140 ka 以来沉积特征与古环境. 地质学报, 84(11): 1623~1630.

侯光良, 赖忠平, 刘向军, 鄂崇毅, 魏海成. 2019. 晚冰期以来青藏高原降水序列集成重建. 第四纪研究, 39(3): 615~628.

黄麒, 韩凤清. 2007. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动. 北京: 科学出版社.

李吉均, 周尚哲, 潘保田. 1991. 青藏高原东部第四纪冰川问题. 第四纪研究, (3): 193~203.

李润民. 1983. 柴达木盆地察尔汗钾镁盐成矿地质条件. 地质论评, 29(3): 262~268.

刘成林, 吴驰华, 王立成, 方小敏, 赵艳军, 颜茂都, 张永生, 曹养同, 张华, 吕凤琳. 2016. 中国陆块海相盆地成钾条件与预测研究进展综述. 地球学报, 37(5): 581~606.

刘嘉麒, 倪云燕, 储国强. 2001. 第四纪的主要气候事件. 第四纪研究, 21(3): 239~248.

刘俊英, 郑绵平, 袁鹤然, 刘喜方, 王海雷. 2007. 西藏扎布耶湖区 128~1.4 ka BP 的微体古生物与环境气候变化. 地质学报, 81(12): 1618~1635.

刘兴超, 王永波, 沈吉, 王苏民, 杨波. 2007. 16000 a 以来青海茶卡盐湖的演化过程及其对气候的响应. 地质学报, 81(6): 843~849.

马妮娜, 郑绵平, 马志邦, 陈文西, 孔凡晶, 施林峰. 2011. 柴达木盆地大浪滩地区表层芒硝的形成时代及环境意义. 地质学报, 85(3): 433~444.

潘保田, 李吉均, 周尚哲. 1994. 青藏高原倒数第二次冰期冰楔的发现及其意义. 科学通报, 17: 1599~1602.

潘保田, 邬光剑. 1997. 青藏高原东北部最近两次冰期降温幅度的初步估算. 干旱区地理, 20(2): 17~24.

钱自强, 曲一华, 刘群. 1994. 钾盐矿床. 北京: 地质出版社.

沈吉, 张恩楼, 夏威夷. 2001. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究, 21(6): 508~513.

沈振枢, 程果, 乐昌硕, 刘淑琴, 张发胜, 王强, 祁国柱, 张嘉尔, 葛同明, 雷世太. 1993. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境. 北京: 地质出版社.

施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 唐领余, 王富葆, 姚檀栋, 赵希涛, 张丕远, 施少华. 1992. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. 中国科学(B 辑), 22(12): 1300~1308.

施雅风, 李吉均, 李炳元. 1998. 青藏高原晚新生代隆升与环境变化. 广东: 广东科技出版社.

施雅风, 李吉均, 李炳元, 姚檀栋, 王苏民, 李世杰, 崔之久, 王富葆, 潘保田, 方小敏, 张青松. 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报, 54(1): 10~20.

施雅风. 1998. 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. 冰川冻土, 20(3): 197~208.

施雅风. 2002. 中国第四纪冰期划分改进建议. 冰川冻土, 24(6): 687~692.

施雅风, 姚檀栋. 2002. 中低纬度 MIS3b(54~44 ka BP)冰期与冰川前进. 冰川冻土, 24(1): 1~9.

王杰, 潘保田, 张国梁, 崔航, 曹泊, 耿豪鹏. 2012. 贡嘎山东坡中更新世晚期以来冰川作用年代学研究. 中国科学: 地球科学, 42(12): 1889~1900.

王立胜, 马志邦, 程海, 段武辉, 肖举乐. 2016. MC-ICP-MS 测定铀系定年标样的²³⁰Th 年龄. 质谱学报, 37(3): 262~272.

闫丽娟, 郑绵平, 袁志洁. 2014. 近 40 年来气候变化对青海盐湖及其矿产资源开发的影响——以小柴旦湖为例. 矿床地质, 33(5): 921~929.

姚檀栋, Thompson L G, 施雅风, 秦大河, 焦克勤, 杨志红, 田立德, Thompson E M. 1997. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. 中国科学(D 辑), 27(5): 447~452.

杨一博, 方小敏, Albert Galy, 杨戎生. 2018. 柴达木盆地西部第四纪气候变化和流域风化. 第四纪研究, 38(1): 76~85.

易朝路, 崔之久, 熊黑钢. 2005. 中国第四纪冰期数值年表初步划分. 第四纪研究, 25(5): 609~619.

袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 1983. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析. 地质论评, 29(2): 159~165.

袁见齐, 杨谦, 孙大鹏, 霍承禹, 蔡克勤, 王文达, 刘训建. 1995. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件. 北京: 科学出版社.

余俊清, 洪荣昌, 高春亮, 成艾颖, 张丽莎. 2018. 柴达木盆地盐湖锂矿床成矿过程及分布规律. 盐湖研究, 26(1): 7~14.

张保珍, 张彭熹, Lowenstein T K, Spencer R J. 1995. 青藏高原末次冰期盛冰阶的时限与干盐湖地质事件. 第四纪研究, (3): 193~201.

张虎才, 雷国良, 常风琴, 樊红芳, 杨明生, 张文翔. 2007. 柴达木盆地察尔汗贝壳堤剖面年代学研究. 第四纪研究, 27(4): 511~521.

张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖. 北京: 科学出版社.

张彭熹, 张保珍, 钱桂敏, 李海军, 徐黎明. 1992. 青海湖全新世以来古环境参数的研究. 第四纪研究, (3): 225~238.

张永生, 邢恩袁, 陈文西. 2014. 国内外古陆表海盆成钾条件对比——兼论华北成钾的可能性. 矿床地质, 33(5): 897~908.

赵井东, 周尚哲, 崔建新, 潘小多, 许刘兵, 张小伟. 2001. 摆浪河流域的 ESR 年代学与祁连山第四纪冰川新认识. 山地学报, 19

- (6): 481~488.
- 赵井东, 周尚哲, 崔建新, 焦克勤, 业渝光, 许刘兵. 2002. 乌鲁木齐河源冰碛物的 ESR 测年研究. 冰川冻土, 24(6): 737~743.
- 赵井东, 施雅风, 王杰. 2011. 中国第四纪冰川演化序列与 MIS 对比研究的新进展. 地理学报, 66(7): 867~884.
- 赵艳军, 刘成林, 张华, Li Zhaoqi, 丁婷, 汪明泉. 2015. 古盐湖卤水温度对钾盐沉积的控制作用探讨. 岩石学报, 31(9): 2751~2756.
- 郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元. 1989. 青藏高原盐湖. 北京: 北京科学技术出版社.
- 郑绵平, 袁鹤然, 赵希涛, 刘喜方. 2006. 青藏高原第四纪泛湖期与古气候. 地质学报 80(2), 169~180.
- 郑绵平, 刘喜方. 2010. 青藏高原盐湖湖水化学及其矿物组合特征. 地质学报, 84(11): 1585~1600.
- 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 齐文, 孔凡晶, 乜贞, 贾沁贤, 卜令忠, 侯献华, 王海雷, 张震, 孔维刚, 林勇杰. 2016. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望. 地质学报, 90(9): 2123~2165.
- 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 1998. 第四纪盐湖沉积与古气候. 第四纪研究, (4): 297~307.
- 周长进, 董锁成. 2002. 柴达木盆地主要河流的水质研究及水环境保护. 资源科学, 24(2): 37~41.
- Bibi S, Wang Lei, Li Xiuping, Zhou Jing, Chen Deliang, Yao Tandong. 2018. Climatic and associated cryospheric, biospheric, and hydrological changes on the Tibetan Plateau; a review. International Journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.5411.
- Chen Andong, Zheng Mianping, Shi Linfeng, Wang Hailei, Xu Jianming, Yuan Wenhui. 2017&. Gypsum ^{230}Th dating of the 15YZK01 drilling core in the Qaidam Basin; salt deposits and their link to Quaternary glaciation and tectonic movement. Acta Geoscientica Sinica, 38(4): 494~504.
- Chen Andong, Zheng Mianping, Shi Linfeng, Wang Hailei, Xu Jianming. 2017. Magnetostratigraphy of deep drilling core 15YZK01 in the northwestern Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau): tectonic movement, salt deposits and their link to Quaternary glaciation. Quaternary International, 436: 201~211.
- Chen Andong, Zheng Mianping, Yao Haitao, Su Kui, Xu Jianming. 2018. Magnetostratigraphy and ^{230}Th dating of a drill core from the Southeastern Qaidam Basin; salt lake evolution and tectonic implications. Geosciences Frontiers, 9: 943~953.
- Chen Kezao and Bowler J M. 1986. Late Pleistocene evolution of salt lakes in the Qaidam Basin, Qinghai Province, China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 54: 87~104.
- Chevalier M L and Replumaz A. 2019. Deciphering old moraine age distributions in SE Tibet showing bimodal climatic signal for glaciations; Marine Isotope Stages 2 and 6. Earth and Planetary Science Letters, 507: 105~118.
- Cody R D and Cody A M. 1988. Gypsum nucleation and crystal morphology in analog saline terrestrial environments. Journal of Sedimentary Petrology, 58: 247~255.
- Cui Zhijiu, Chen Yinxin, Zheng Wei, Zhou Shangzhe, Zhou Liping, Zhang Mei, Li Chuanchuan. 2011&. Research history, glacial chronology and origins of Quaternary glaciations in China. Quaternary Sciences, 31(5): 49~764.
- Fan Qishun, Lai Zhongping, Liu Xiangjun, Sun Yongjuan, Long Hao. 2010&. Luminescence chronology of high lake levels of paleolakes in the late Quaternary eastern Qaidam Basin. Acta Geologica Sinica, 84(11): 1652~1660.
- Fan Qishun, Lai Zhongping, Long Hao, Sun Yongjuan, Liu Xiangjun. 2010. OSL chronology for lacustrine sediments recording high stands of Gahai Lake in Qaidam Basin, northeastern Qinghai—Tibetan Plateau. Quaternary Geochronology, 5: 223~227.
- Fan Qishun, Ma Haizhou, Cao Guangchao, Chen Zongyan, Cao Shengkui. 2012. Geomorphic and chronometric evidence for high lake level history in Gahai and Toson Lake of north-eastern Qaidam Basin, north-eastern Qinghai—Tibetan Plateau. Journal of Quaternary Science, 27(8): 819~827.
- Gao Donglin, Ma Haizhou, Zhang Xiyang, Han Fengqing, Zhou Dujun. 2006&. Storage characteristics of ground brines of west Taijinar Salt Lake. Journal of Salt Lake Research. 14(2): 1~6.
- Grasby S E, Smith I R, Bell T, Forbes D L. 2013. Cryogenic formation of brine and sedimentary mirabilite in submergent coastal lake basins, Canadian Arctic. Geochimica et Cosmochimica Acta, 110: 13~28.
- Han Fengqing, Huang Qi, Wang Kejun, Wang Huaan, Yuan Li. 1995&. Study of geochemical evolution and palaeoclimatic fluctuation of Kuntzei Salt Lake in the Qaidam Basin, Qinghai. Oceanologia et Limnologia Sinica, 26(5): 502~508.
- Han Wenxia, Ma Zhibang, Lai Zhongping, Appel Erwin, Fang Xiaomin, Yu Lupeng. 2014. Wind erosion on the north-eastern Tibetan Plateau: constraints from OSL and U—Th dating of playa salt crust in the Qaidam Basin. Earth Surface Process and Landforms, 39: 779~789.
- Herrero M J, Escay J I, Schreiber B C. 2015. Thenardite after mirabilite deposits as a cool climate indicator in the geological record; lower Miocene of central Spain. Climate of the Past, 11: 1~13.
- Hou Guangliang, Lai Zhongping, Liu Xiangjun, E Chongyi, Wei Haicheng. 2019&. Synthetically reconstructed precipitation variability in the Qinghai—Tibet Plateau over the last 16 ka. Quaternary Sciences, 39(3): 615~628.
- Hou Xianhua, Zheng Mianping, Zhang Chengjun, Shi Linfeng, Wang Youde. 2010&. Sedimentary characteristics and paleoenvironmental of Dalangtan Salt Lake in western Qaidam Basin, since 140 ka BP. Acta Geologica Sinica, 84(11): 1623~1630.
- Huang Qi, Han Fengqing. 2007#. Evolution of Salt Lakes and Palaeoclimate Fluctuation in Qaidam Basin. Beijing: Science Press.
- Last W M and Ginn F M. 2005. Saline systems of the Great Plains of western Canada; an overview of the limnogeology and paleolimnology. Saline Systems, 10: 1~38.
- Li Huiying, Mao Dehua, Li Xiaoyan, Wang Zongming, Wang Cuizhen. 2019. Monitoring 40-year lake area changes of the Qaidam Basin, Tibetan Plateau, using landsat time series. Remote Sensing, 11, 343; doi: 10.3390/rs11030343.
- Li Jijun, Zhou Shangzhe, Pan Baotian. 1991&. The problems of Quaternary glaciations in the eastern part of Qinghai—Xizang Plateau. Quaternary Sciences, (3): 193~203.
- Li Minghui, Fang Xiaomin, Yi Chaolu, Gao Shaopeng, Zhang Weilin, Galy A, 2010. Evaporite minerals and geochemistry of the upper 400 m sediments in a core from the Western Qaidam Basin, Tibet. Quaternary International, 218: 176~189.
- Li Running. 1983&. The geological conditions for the formation of the Qarhan K—Mg saline deposit in the Qaidam Basin. Geological Review, 29(3): 262~268.
- Lisiecki L E and Raymo M E. 2005. A Plio—Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. Paleoceanography, 20(1): 1~16. DOI: 10.1029/2004PA001071.

- Liu Chenglin, Wu Chihua, Wang Licheng, Fang Xiaomin, Zhao Yanjun, Yan Maodu, Zhang Yongsheng, Cao Yangtong, Zhang Hua, Lü Fenglin. 2016#. Advance in the study of forming condition and prediction of potash deposits of marine basins in China's small blocks: review. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(5): 581~606.
- Liu Jiaqi, Ni Yunyan, Chu Guoqiang. 2001#. Main palaeoclimatic events in the Quaternary. *Quaternary Sciences*, 21(3): 239~248.
- Liu Junying, Zheng Mianping, Yuan Heran, Liu Xifang, Wang Hailei. 2007#. Microfossils and Climatic and Environmental Changes in the Zabuye Lake Area, Tibet, from 128 to 1.4 ka BP. *Acta Geologica Sinica*, 81(12): 1618~1635.
- Liu Xingqi, Wang Yongbo, Shen Ji, Wang Sumin, Yang Bo. 2007#. Evolution of Chaka Salt Lake during the Last 16000 years and its response to climatic Change. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 843~849.
- Ma Nina, Zheng Mianping, Ma Zhibang, Chen Wenxi, Kong Fanjing, Shi Linfeng. 2011. Forming age of surface mirabilite in Dalangtan, Qaidam Basin and its environmental significance. *Acta Geographica Sinica*, 85(3): 433~444.
- Mees F, Casteñeda C, Herrero J, Ranst E V. 2012. The nature and significance of variations in gypsum crystal morphology in dry lake basins. *Journal of Sedimentary Research*, 82: 41~56.
- Owen L A, Robert F C, Ma Haizhou, Barnard P L. 2006. Late Quaternary landscape evolution in the Kunlun Mountains and Qaidam Basin, Northern Tibet: A framework for examining the links between glaciation, lake level changes and alluvial fan formation. *Quaternary International*, 154~155: 73~86.
- Pan Baotian, Li Jijun, Zhou Shangzhe. 1994. Discovery and significance of ice wedges during Penultimate Glaciation in the Qinghai—Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 39: 578~582.
- Pan Baotian, Wu Guangjian. 1997#. Preliminary estimation on the drop range in temperature during the last two glaciations in the northeastern Qinghai—Xizang Plateau. *Arid Land Geography*, 20(2): 17~24.
- Phillips F M, Zreda M G, Ku T L, Luo S D, Huang Qi, Elmore D, Kubik P W, Sharma P. 1993. $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ and ^{36}Cl dating of evaporite deposits from the western Qaidam Basin, China: implications for glacial-period dust export from Central Asia. *Geological Society of America Bulletin*, 105: 1606~1616.
- Qian Ziqiang, Qu Yihua, Liu Qun. 1994#. Potash Deposits. Beijing: Geological Publishing House.
- Shen Ji, Zhang Enlou, Xia Weilan. 2001#. Records from lake sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1000 years. *Quaternary sciences*, 21(6): 508~513.
- Shen Zhenshu, Cheng Guo, Le Changshuo, Liu Shuqin, Zhang Fasheng, Wang Qiang, Qi Guozhu, Zhang Jiaer, Ge Tongming, Lei Shitai. 1993#. The Division and Sedimentary Environment of Quaternary Salt-bearing Strata in Qaidam Basin. Beijing: Geological Publishing House.
- Shi Yafeng, Kong Zhaozheng, Wang Sumin, Tang Lingyu, Wang Fubao, Yao Tandong, Zhao Xitao, Zhang Peiyuan, Shi Shaohua. 1994. The climatic fluctuation and important events of Holocene megathermal in China. *Science in China (Series B)*, 37(3): 353~365.
- Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan. 1998#. Uplift and Environmental Changes of Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau in the Late Cenozoic. Guangdong: Guangdong Science & Technology Press.
- Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan, Yao Tandong, Wang Sumin, Li Shijie, Cui Zhijiu, Wang Fubao, Pan Baotian, Fang Xiaomin, Zhang Qingsong. 1999#. Uplift of the Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau and East Asia environmental change during late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*, 54(1): 10~20.
- Shi Yafeng. 1998#. Evolution of the cryosphere in the Tibetan Plateau, China, and its Relationship with the global change in the Mid-Quaternary. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 20(3): 197~208.
- Shi Yafeng. 2002#. A suggestion to improve the chronology of Quaternary glaciations in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(6): 687~692.
- Shi Yafeng, Yao Tandong. 2002#. MIS3b (54~44 ka BP) cold period and glacial advance in middle and low latitudes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(1): 1~9.
- Sun Xiaohong, Zhao Yanjun, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Zhang Hua, Wu Chihua. 2017. Paleoclimatic information recorded in fluid inclusions in halites from Lop Nur, Western China. *Scientific Reports*, 7: 16411. DOI:10.1038/s41598-017-16619-4.
- Wang Jie, Pan Baotian, Zhang Guoliang, Cui Hang, Cao Bo, Geng Haopeng. 2012. Late Quaternary glacial chronology on the eastern slope of Gongga Mountain, eastern Tibetan Plateau, China. *Science China (Series D: Earth Sciences)*, 56(3): 354~365.
- Wang Jiuyi, Fang Xiaomin, Appel E, Zhang Weilin. 2013. Magnetostratigraphic and radiometric constraints on salt formation in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 78: 53~64.
- Wang Lisheng, Ma Zhibang, Cheng Hai, Duan Wuhui, Xiao Jule. 2016#. Determination of ^{230}Th dating age of Uranium-series standard samples by multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 37(3): 262~272.
- Warren J K. 2010. Evaporites through time: tectonic, climatic and eustatic controls in marine and nonmarine deposits. *Earth-Science Reviews*, 98: 217~268.
- Warren J K. 2016. Evaporites: A Geological Compendium (Second Edition). Switzerland: Springer International Publishing Switzerland.
- Yan Lijuan, Zheng Mianping, Yuan Zhijie. 2014#. Influence of climate change on salt lakes in Qinghai Province and their mineral resources exploitation in the past forty years: A case study of Xiao Qaidam Lake. *Mineral Deposits*, 33: 921~929.
- Yan Lijuan, Zheng Mianping. 2015. Influence of climate change on saline lakes of the Tibet Plateau, 1973~2010. *Geomorphology*, 246: 68~78.
- Yang Jianqiang, Zhang Wei, Cui Zhijiu, Yi Chaolu, Liu Kexin, Ju Yuanjiang, Zhang Xiaoyong. 2006. Late Pleistocene glaciations of the Diancang and Gongwang Mountains, southeast margin of the Tibetan plateau. *Quaternary International*, 154~155: 52~62.
- Yang Yiibo, Fang Xiaomin, Albert Galy, Yang Rongsheng. 2018#. Quaternary climate change and catchment weathering in the western Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 38(1): 76~85.
- Yao Tandong, Thompson L G, Shi Yafeng, Qin Dahe, Jiao Keqin, Yang Zhihong, Tian Lide, Thompson E. M. 1997#. Climate variation since the last interglaciation recorded in the Guliya ice core. *Science in China (Series D)*, 40(6): 662~668.
- Yi Chaolu, Cui Zhijiu, Xiong Heigang. 2005#. Numerical periods of

Quaternary glaciations in China. *Quaternary Sciences*, 25(5): 609~619.

Yuan Jianqi, Huo Chengyu, Cai Keqin. 1983#. The high mountain—deep basin saline environment—a new genetic model of salt deposits. *Geological Review*, 29(2): 159~165.

Yuan Jianqi, Yang Qian, Sun Dapeng, Huo Chengyu, Cai Keqin, Wang Wenda, Liu Xunjian. 1995#. The Formation Conditions of the Potash Deposits in Charhan Saline Lake, Caidamu Basin, China. Beijing: Geological Publishing House.

Yu Lupeng, Lai Zhongping. 2012. OSL chronology and palaeoclimatic implications of aeolian sediments in the eastern Qaidam Basin of the northeastern Qinghai—Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 337~338: 120~129.

Yu Junqing, Hong Rongchang, Gao Chunliang, Cheng Aiyang, Zhang Lisa. 2018#. Lithium brine deposits in Qaidam Basin: constraints on formation processes and distribution pattern. *Journal of Salt Lake Research*, 26(1): 7~14.

Zhang Baozhen, Zhang Pengxi, Lowenstein T K, Spencer R J. 1995#. Time range of the Great Ice Age of the Last Glacial Stage and its related geological event of playa in the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. *Quaternary Sciences*, (3): 193~201.

Zhang Hucai, Lei Guoliang, Chang Fengqin, Fan Hongfang, Yang Mingsheng, Zhang Wenxiang. 2007#. Age determination of shell bar section in salt lake Qarhan, Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 27(4): 511~521.

Zhang Pengxi. 1987#. Saline Lakes in the Qaidam Basin. Beijing: Science Press.

Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Qian Guimin, Li Haijun, Xu Liming. 1992#. The study of paleoclimatic parameter of Qinghai Lake since Holocene. *Quaternary sciences*, (3): 225~238.

Zhang Weilin, Appel E, Fang Xiaomin, Song Chunhui, Cirkpa O. 2012. Magnetostratigraphy of deep drilling core SG-1 in the western Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau) and its tectonic implications. *Quaternary Research*, 78: 139~148.

Zhang Yongsheng, Xing Enyuan, Chen Wenxi. 2014#. Comparative study of palaeo-epicontinental marine basin potash-forming conditions between China and foreign countries with special reference to potash-forming possibilities in North China. *Mineral Deposits*, 33(5): 897~908.

Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, Cui Jianxin, Pan Xiaoduo, Xu Liubing, Zhang Xiaowei. 2001#. ESR chronology of Bailanghe valley and new understanding of Qilianshan Mountain's Quaternary glaciation. *Journal of Mountain Science*, 19(6): 481~488.

Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, Cui Jianxin, Jiao Keqin, Ye Yuguang, Xu Liubing. 2002#. ESR dating of glacial tills at the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(6): 737~743.

Zhao Jingdong, Shi Yafeng, Wang Jie. 2011#. Comparison between Quaternary glaciations in China and the Marine Oxygen Isotope Stage (MIS): and improved schema. *Acta Geographica Sinica*, 66(7): 867~884.

Zhao Yanjun, Liu Chenglin, Zhang Hua, Li Zhaoqi, Ding Ting, Wang Mingquan. 2015#. The controls of paleotemperature on potassium salt precipitation in ancient salt lakes. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2751~2756.

Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, Zheng Yuan. 1989#. Saline Lakes on the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau. Beijing: Beijing Science and Technology Press.

Zheng Mianping, Zhao Yuanyi, Liu Junying. 1998#. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate. *Quaternary Sciences*, 4: 297~307.

Zheng Mianping, Liu Xifang. 2010#. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai—Tibet Plateau, China. *Acta Geologica Sinica*, 84(11): 1585~1600.

Zheng Mianping, Yuan Heran, Zhao Xitao, Liu Xiafang. 2006#. The Quaternary Pan-lake (overflow) period and paleoclimate on the Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 80(2): 169~180.

Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, Nie Zhen, Kong Fanjing, Qi Wen, Jia Qinxian, Pu Lingzhong, Hou Xianhua, Wang Hailei, Zhang Zhen, Kong Weigang, Lin Yongjie. 2016. Progress and prospects of salt lake research in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90: 1195~1235.

Zhou Changjin, Dong Suocheng. 2002#. Water quality of main rivers in the Qaidam Basin and water environmental protection. *Resources Science*, 24(2): 37~41.

Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang. 2002. Quaternary Glaciation of Bailang River Valley, Qilian Shan. *Quaternary International*, 97~98: 103~110.

Evaporite deposits in the Qaidam Basin and their response to Quaternary glacial climates since marine oxygen isotope stage 6 (MIS6)

CHEN Andong¹⁾, ZHENG Mianping¹⁾, SONG Gao¹⁾, WANG Xuefeng²⁾,
LI Hongpu³⁾, HAN Guang³⁾, YUAN Wenhui³⁾

1) MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) Key laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029;

3) Qaidam Integrated Geological Exploration Institute of Qinghai Province, Golmud, Qinghai, 816099

Objectives: Climate is one of the dominant factors which control evaporite deposits in Qaidam Basin, but its mechanism remains to be clarified. The aim of this paper is to make a comparison between the evaporite deposit

period and glacial period since marine oxygen isotope stage 6 (MIS6), and clarify the role of late Quaternary glacial climate in evaporite deposit.

Methods: The authors took 3 salt-bearing profiles (D18, MXK2 and D12) from the western Qaidam Basin as the study object, applied multiple collector inductively coupled plasma mass spectrometry (MC-ICP-MS) to obtain the salt deposit age, and applied X-ray diffraction (XRD) to identify the salt minerals from the profiles.

Results: MC-ICP-MS U-series dating indicated the deposit ages of D18 profile are 13.1 ± 2.0 ka BP ~ 15.9 ± 2.5 ka BP, of which the mirabilite deposit belong to the late stage of last glacial MIS2; mirabilite deposit ages in MXK2 profile are 131.7 ± 39.5 ka BP and 158.3 ± 10.8 ka BP respectively, mirabilite deposit ages in D12 profile are 166.6 ± 20.2 ka BP and 198.0 ± 20.6 ka BP, which can correspond to the penultimate glacial period MIS6. XRD analysis confirmed that salt minerals in the 3 profiles were mainly mirabilite, halite and gypsum.

Conclusions: Combining the study of this paper and evaporite deposits data of other salt lakes in the Qaidam Basin, this paper proposes that the penultimate glacial period MIS6 and the last glaciation MIS2 are two important salt-forming periods of the late Quaternary in the Qaidam Basin, and the cold and dry climate of the glacial period is favorable for salt deposits such as halite and mirabilite. The fundamental reason for salt deposit in the glacial environment in the Qaidam Basin is the expansion of glacier scale in the surrounding mountains, and the dry and cold glacial climate, resulting in the reduction of the recharge volume of the salt lakes in the Qaidam Basin. Besides, the temperature decrease during MIS6 and MIS2 is the direct genesis of the deposit of cold-phase salt minerals such as mirabilite and epsomite.

Keywords: Qaidam Basin; salt lake; evaporite deposit period; penultimate glacial period; last glaciation; U-series dating

Acknowledgements: This study is supported by the National Key R & D Program of China (No. 2017YFC0602806), National Natural Science Foundation of China (No. 41902190), Institute of Mineral Resources, CAGS Research Foundation (No. KK1923) and Geological Survey Project of China (No. DD20190172 and DD20160054).

First author: CHEN Andong, male, born in 1987, Ph. D. , assistant research fellow, is mainly engaged in salinology and Quaternary geology; Email: anton.chen@163.com

Manuscript received on: 2019-10-17; Accepted on: 2020-02-08; Edited by: LIU Zhiqiang

Doi: 10.16509/j. georeview. 2020. 03. 006