

柴达木盆地马海盐湖厚层芒硝沉积特征及其成因

贺荟文^{1,2}, 赵艳军¹, 阮 壮², 王 楠^{1,3}, 崔子豪¹, 胡宇飞¹

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部深地资源成矿作用与矿产资源预测重点实验室, 北京 100037;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 自然资源实物地质资料中心, 河北 廊坊 065201)

摘要: 柴达木盆地马海盐湖含钾地层下部沉积了厚层芒硝。与钾盐通常形成于干热气候不同, 芒硝是典型的冷相盐类矿物, 因此厚层芒硝的沉积特征及成因的研究对认识古环境演变过程及其对钾盐成矿影响具有重要意义。文章以柴达木盆地马海矿区发育的厚层芒硝的地层剖面为研究对象, 通过系统取样开展薄片鉴定、化学组分、矿物类型和硫同位素分析, 研究了剖面化学组分、矿物类型和硫同位素的变化规律。结果显示, 该剖面的盐类矿物主要有石盐、石膏、芒硝及钙芒硝; 芒硝层沉积的最大年龄为 275.3 ± 47.9 ka BP; 剖面自下而上表现为由厚层纯净芒硝向含石膏石盐岩演变的特征, 下部为芒硝层, 中下部出现钙芒硝, 中上部石盐含量最高, 上部石盐含量相对减少, 石膏含量增加, 与之相对应的是沉积物化学组成中钾、镁和钙的含量稳定增高, 硫酸根和钠含量总体降低。厚层芒硝沉积时期, 马海盐湖处于持续干冷的气候条件, 有利于盐湖卤水中钾、镁持续富集, 为在局部富集形成固体钾矿奠定了基础。

关键词: 厚层芒硝; 沉积特征; 成因分析; 马海盐湖; 柴达木盆地

中图分类号: P578.7; P619.21⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)02-0311-14

Sedimentary characteristics and genesis analysis of thick-layer mirabilite in Mahai Salt Lake, Qaidam Basin

HE Hui-wen^{1,2}, ZHAO Yan-jun¹, RUAN Zhuang², WANG Nan^{1,3}, CUI Zi-hao¹ and HU Yu-fei¹

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Langfang 065201, China)

Abstract: A thick layer of mirabilite was deposited in the lower part of the potassium-bearing strata of the Mahai Salt Lake in the Qaidam Basin. Unlike potassium salts, which usually formed in dry and hot climate, mirabilite is mostly formed under extremely cold conditions. Therefore, the study of the sedimentary characteristics and genesis of thick-layer mirabilite is of great significance for understanding the evolution of ancient environments and their impact on potassium salt mineralization. The article takes the stratigraphic profile of thick-layer mirabilite developed in the Mahai mining area of the Qaidam Basin as the research object, through systematic sampling, thin section identification, chemical composition, mineral type, and sulfur isotope analysis were carried out to study the changes in the chemical composition, mineral type, and sulfur isotope of the profile. The results show that the salt minerals in this section are main stone salt, gypsum, mirabilite, and glauberite, the maximum deposition age of the mirabilite

收稿日期: 2023-11-09; **接受日期:** 2024-04-11; **编辑:** 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC2906502); 中国地质科学院矿产资源研究所基本科研业务费项目(KK2119); 青海中航资源有限公司委托科技攻关项目“青海马海矿区浅部固体钾矿水溶开采的关键问题研究”

作者简介: 贺荟文(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事沉积学及沉积盖层储层方面的研究工作, E-mail: 986872616@qq.com; 通讯作者: 王楠(1989-), 女, 博士研究生, 主要从事盐湖钾锂成矿作用研究、实物地质资料筛选采集工作, E-mail: wangnan@mail.cgs.gov.cn.

layer is 275.3 ± 47.9 ka BP, the research section shows the characteristic of evolution from thick-layer pure mirabilite to gypsum-bearing stone salt from bottom to top. The lower part is mirabilite layer, and glauberite appears in the middle and lower parts. The highest content of stone salt is in the middle and upper parts, while the content of stone salt in the upper part relatively decreases and the content of gypsum increases. Correspondingly, the content of potassium, magnesium, and calcium in the chemical composition of sediments steadily increases, while the overall content of sulfate ions and sodium decreases. During the period of thick-layer mirabilite deposition, Mahai Salt Lake was in a continuously dry and cold climate, which was beneficial to the continuous enrichment and increase of potassium and magnesium in the brine of the salt lake, which laid a foundation for the formation of solid potassium ore through local enrichment.

Key words: thick-layer mirabilite; sedimentary characters; cause analysis; Mahai Salt Lake; Qaidam Basin

Fund support: National Key R & D Program(2023YFC2906502); Basic Research Fee Project of Institute of Mineral Resources of CAGS (KK2119); Scientific and Technological Research Project Commissioned by Qinghai AVIC Resources Co., Ltd. "Research on Key Problems of Shallow Solid Potash Mining in Mahai Mining Area, Qinghai Province"

相关研究显示,芒硝是在干燥且极端寒冷的环境下形成的,多在年均温 $-7\sim-3^{\circ}\text{C}$ 以下形成(郑绵平等, 1998, 2016),且气候越冷,越容易沉积,沉积厚度也会随之增加(任静, 2013)。由于芒硝在寒冷条件下出现,但在夏天炎热时节会消融,因此现代沉积环境中厚层芒硝并不常见。柴达木盆地马海矿区北部在钾盐矿层下部普遍发育芒硝层,且局部厚度较大,为研究芒硝的成因和盐湖演变过程提供了有利条件。若厚层芒硝形成于持续稳定寒冷气候条件下,是否会影响盐湖卤水的蒸发浓缩和钾矿的形成,也是一个值得研究的问题。

为了更详细地研究厚层芒硝的沉积特征及其形成环境,笔者利用马海盐湖人工开挖渠道时揭露的剖面,开展现象观察,并选择3处剖面系统开展了样品采集,通过对样品进行的化学组分分析、薄片鉴定、能谱扫描电镜分析、X射线粉晶衍射(XRD)、硫同位素分析等方法研究了芒硝的沉积特征,利用铀系不平衡法对芒硝沉积的时间进行了限定,并探讨了剖面主量元素及矿物组成变化规律,还综合分析了马海盐湖厚层芒硝的成因,欲为相似沉积环境下成盐成钾机制的研究提供重要依据。

1 地质背景

马海盐湖位于柴达木盆地,北纬 $38^{\circ}02'\sim 38^{\circ}34'$,东经 $93^{\circ}40'\sim 94^{\circ}36'$ (图1),湖区由东南至西北延伸约 $80\sim 90$ km,南北宽约 25 km,面积约为 $2\ 000$ km^2 。在马海盐湖的东缘及南缘分别有德宗马

海湖和巴伦马海湖(张彭熹, 1987)。马海盐湖海拔约 $2\ 800$ m,广泛分布戈壁滩、风蚀残丘、丘陵、盐碱地等,昼夜温差大,由于日光直射暴晒,蒸发作用强烈且降水少,蒸发量远大于降水量,淡水资源严重紧缺。地表水补给主要来源于东北部的赛什腾山区,汇入马海盆地内的河流主要有鱼卡河、鲁西河、嗽唠河、脑儿河及南八仙河(崔庆岗等, 2018),其中鱼卡河河水常年直接注入德宗马海湖。马海盆地是柴达木盆地更新世-全新世的次级成盐盆地,发育具高原沉积特色的陆相沉积,褶皱和断裂构造运动发育,受基底断裂控制影响,构造线为北西向,背斜构造的隆起与马海盆地盐类沉积的形成有因果关系,使马海盆地逐渐形成封闭环境(魏新俊等, 1993; 姚佛军等, 2021),形成盐类沉积。

2 样品及方法

2.1 样品来源

本次研究的样品来源于马海盐湖矿区北部,利用矿区施工挖掘的长约 1 km渠道(图2),开展了3个剖面的编录与系统采样工作,剖面编号分别为P01、P02、P03(图3、图4)。3个剖面岩性均以石盐为主,夹杂粉砂,其中P02剖面底部发育厚层芒硝。芒硝大多分布于地表下剖面深度 $3.8\sim 6.4$ m之间,厚层纯净芒硝集中分布在地表下剖面 $5.4\sim 6.4$ m处,芒硝层与其上部地层接触关系为整合接触。3条剖面分别采集样品19、43、35个,样品间距不超过 20 cm且连续采集,可充分反映剖面的岩性变化规律。

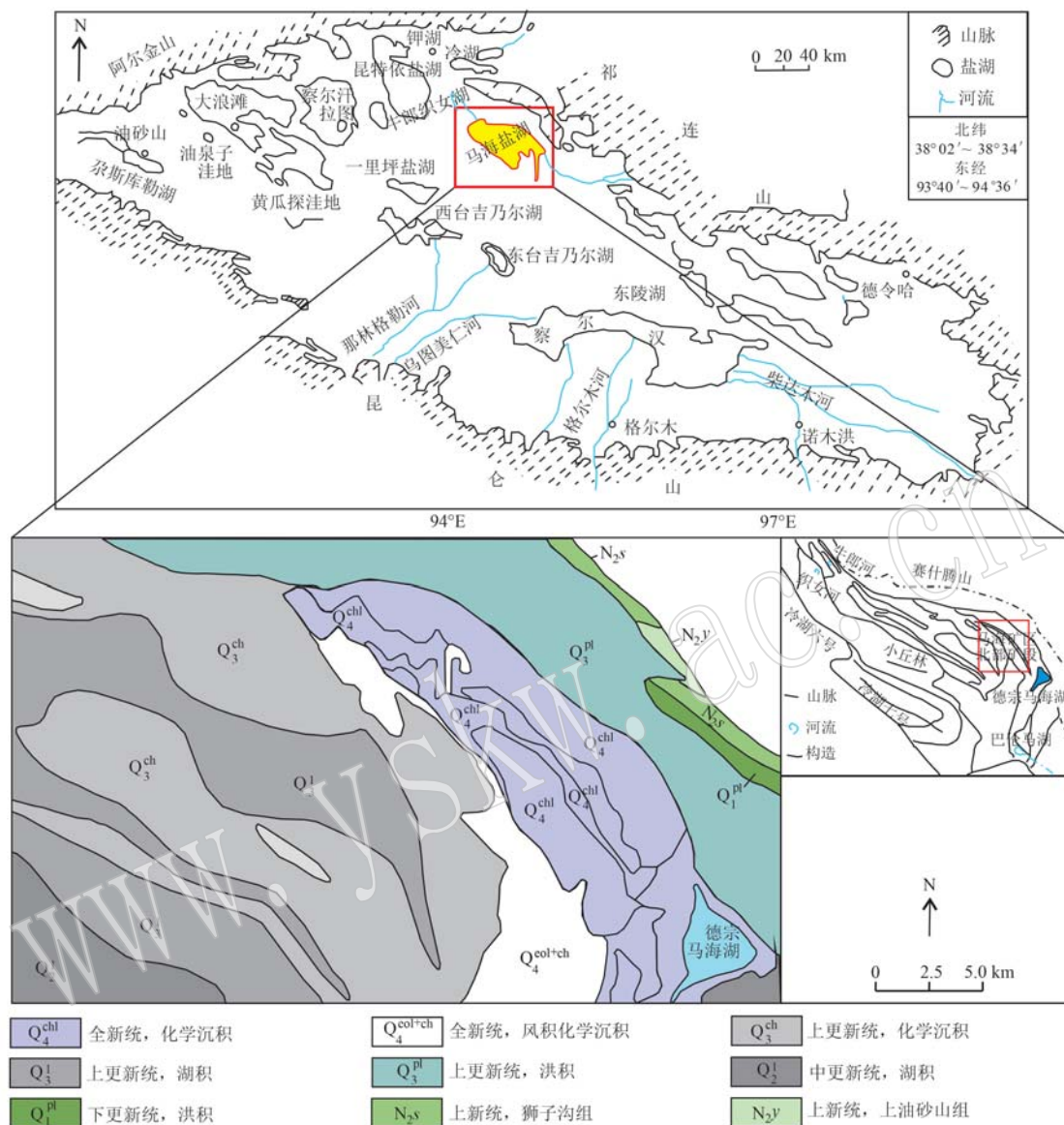


图 1 马海盐湖北部矿段地质图[据王弭力等(1992)、王朝旭等(2022)修改]

Fig. 1 Geological map of the northern part of Mahai Salt Lake [modified from Wang Mili *et al.*, 1992; Wang Zhaoxu *et al.*, 2022]

2.2 研究方法

本次研究主要的实验方法包括薄片鉴定、能谱扫描电镜分析、粉晶衍射、化学组分分析、硫同位素分析、铀系测年等。除铀系测年在中国科学院地质与地球物理研究所完成、能谱扫描电镜分析在中国地质科学院地质研究所完成外,其他实验均在中国地质科学院矿产资源研究所完成。薄片鉴定利用偏反光显微镜(型号 DM4500P)完成。将样品进行低温烘干后研磨至 200 目过筛后,采用布鲁克 D8 Discovery 对 97 个样品进行粉晶衍射矿物组分半定量分

析。选取干燥的样品进行抽真空处理后上机,扫描电镜型号为 FEI NOVA NanoSEM 450,能谱仪型号为 OXFORD X-Max (50 mm²)。采用美国热电公司 253plus、Flash EA 元素分析仪和 Conflo IV 多用途接口,对选自 P02 剖面的 11 个样品进行硫同位素分析,3 种国际标准物质为 IAEA-SO-5、IAEA-SO-6 和 NBS 127,标样的分析精度优于 0.2‰。使用型号为 SPECTRO ARCOS I 的电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES)完成元素化学分析实验,得到钾、钠、钙、镁、氯、硫酸根离子等的测试结果。铀系测

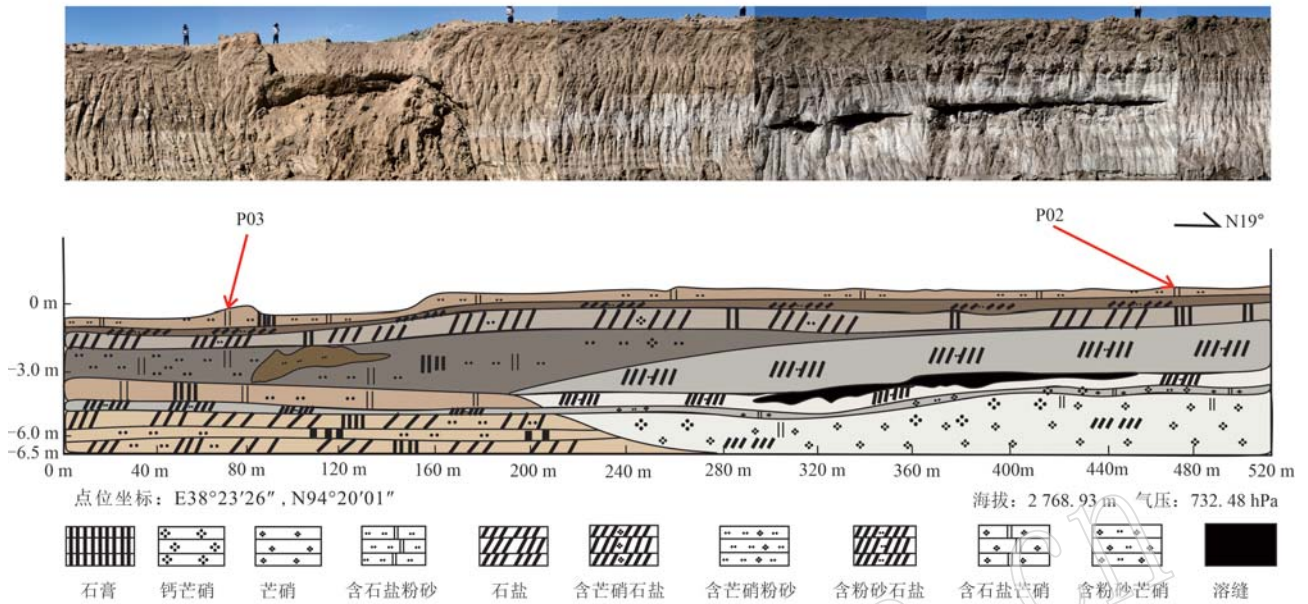


图 2 马海盆地研究区 P02、P03 剖面图

Fig. 2 Profile of P02 and P03 in the study area of Mahai Basin

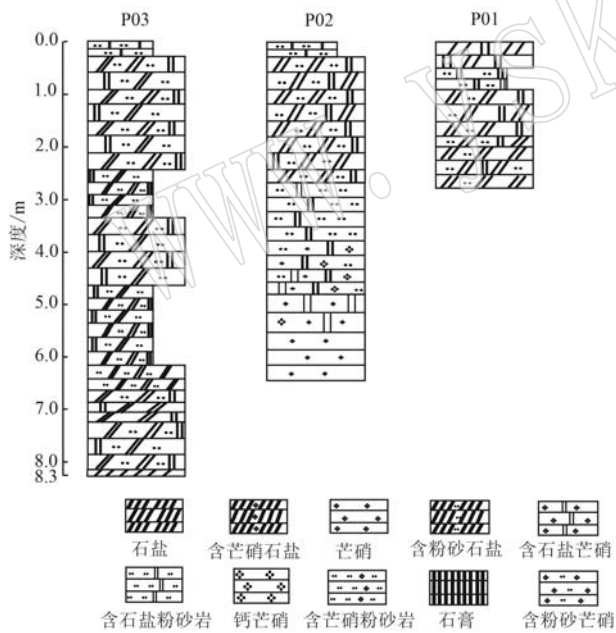


图 3 柴达木盆地马海研究区剖面柱状图

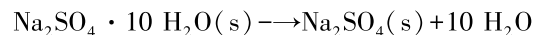
Fig. 3 Histogram of profile in Mahai study area of Qaidam Basin

年使用 Thermo Fisher Scientific 公司生产的 Neptune Plus 型多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 进行, 选取杂质较少的石盐样品, 进行清理后每个样品各 1 g, 在超净实验室对纯净的石盐样品进行化学处理, 按操作规范收集完铀、钍后方可进行上机实验。

3 芒硝岩石学特征

3.1 矿物薄片鉴定

芒硝是化学沉积的产物, 芒硝层大量发育在地下 5~7 m 处, 出露面与空气接触脱水, 从透明块状、粒状变为白色粉末状的无水芒硝。其反应如下:



芒硝具无色透明的块状结构, 表面呈玻璃光泽, 硬度较低。P02 剖面中芒硝与石盐、钙芒硝、石膏共生。芒硝在单偏光镜下呈无色透明状, 正交偏光镜下为一级灰白、一级黄干涉色, 多呈港湾状结构 (图 5), 显示其具后生改造成因 (刘芳等, 2023)。钙芒硝大多呈棱板状、碎片状, 其干涉色为二级黄、粉、蓝、绿色, 可见不完全解理, 负低突起, 糙面不显著, 在部分晶体中可见轻微溶蚀现象。

3.2 能谱扫描电镜分析

马海研究区 P02 剖面钙芒硝集合体呈条状、层状、放射状、针状、块状, 单晶晶体粒度为 50~150 μm, 钙芒硝常附在无水芒硝之上。扫描电镜需要干燥的样品才能进行抽真空上机, 因此芒硝已经大量脱水变成了无水芒硝。镜下无水芒硝多呈球状、块状, 其表面常见附着针状钙芒硝, 晶体粒度为 5~300 μm 不等 (图 6)。



图 4 柴达木盆地马海研究区含盐地层剖面及其中主要盐类矿物照片

Fig. 4 Salt-bearing stratigraphic profile and main salt minerals in Mahai study area of Qaidam Basin

a—P03 剖面; b—P02 剖面; c—P01 剖面; d—块状芒硝, 内部镶嵌少量石盐晶体; e—块状芒硝, 表面部分脱水, 夹杂细粒石盐颗粒; f—团块状石盐, 外表含少量无水芒硝; g—无水芒硝呈壳状展布; h—大量单个石盐晶体, 夹杂泥岩黏土等; i—团块状石盐, 夹杂黏土粉砂及少量石膏; Gp—石膏; Ha—石盐; Mb—芒硝; Td—无水芒硝; Cr—黏土; St—粉砂岩

a—P03 section; b—P02 section; c—P01 section; d—block mirabilite, embedded with a small amount of stone salt crystals; e—massive mirabilite, partially dehydrated on the surface, mixed with fine stone salt particles; f—lump stone salt with a small amount of anhydrous mirabilite on the surface; g—anhydrous mirabilite is distributed in the shape of shell; h—a large number of single stone salt crystals, mixed with mudstone and clay, etc.; i—lump stone salt, mixed with clay silt and a small amount of gypsum; Gp—gypsum; Ha—stone salt; Mb—mirabilite; Td—anhydrous mirabilite; Cr—clay; St—siltstone

3.3 化学组成及矿物组分特征

3.3.1 化学组成

采用水溶法分析了 3 个剖面 97 件样品化学组

分,从分析结果(表 1)来看,P01、P03 样品主要成分为 NaCl(石盐),P02 主要成分为 NaCl 和 Na₂SO₄。3 个剖面的 K⁺、Mg²⁺ 含量低,平均值均不高于 0.3%,

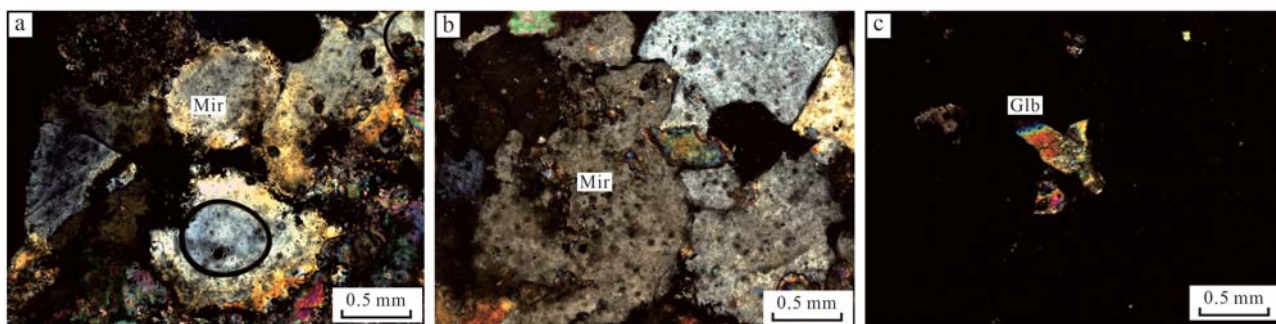


图5 P02剖面盐类矿物正交偏光镜下观测图

Fig. 5 Observation pictures of salt minerals in profile P02 under orthogonal polarizing microscope

a—芒硝周边出现港湾状溶蚀; b—芒硝发生局部溶蚀; c—菱板状钙芒硝, 粒度约0.6 mm; Mir—芒硝; Glb—钙芒硝
a—mirabilite was surrounded by harbor-like erosion; b—mirabilite had local erosion, c—rhombic plate-like glauberite had a particle size of about 0.6 mm; Mir—mirabilite; Glb—glauberite

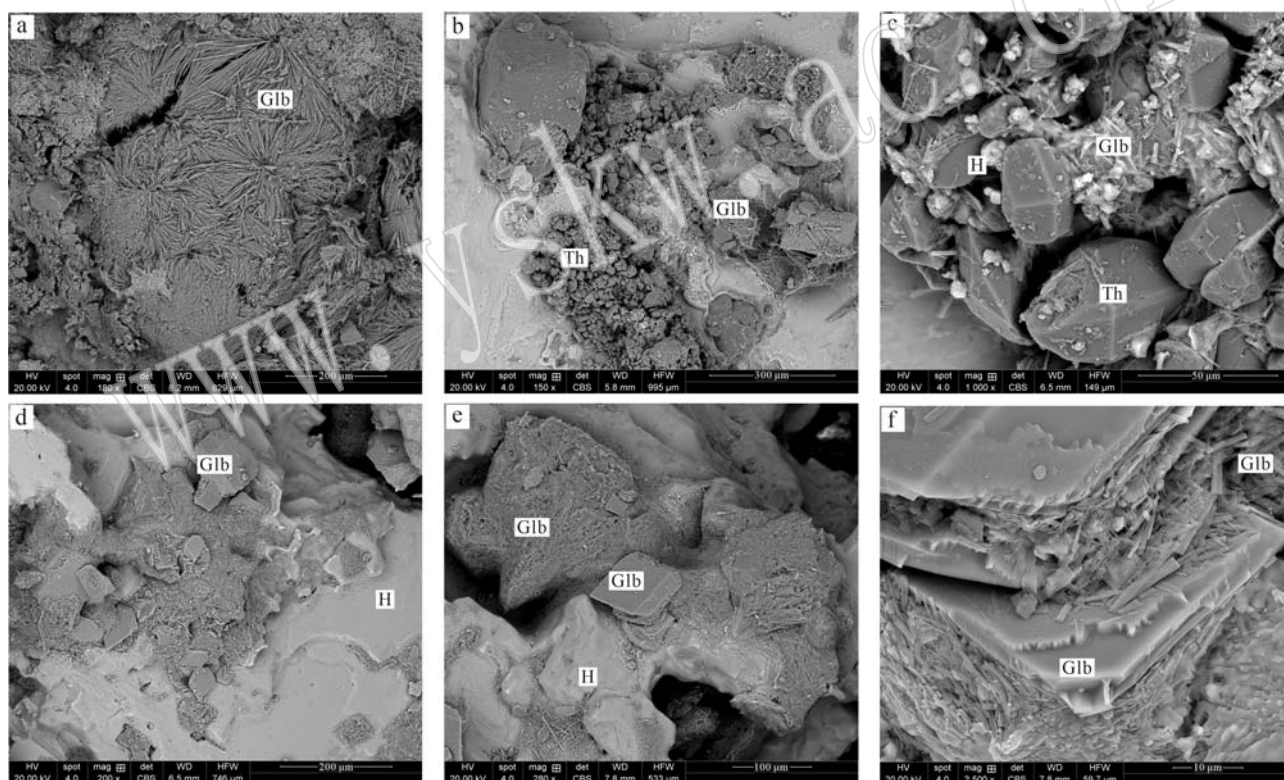


图6 P02剖面无水芒硝、钙芒硝扫描电镜特征

Fig. 6 Scanning electron microscopic characteristics of anhydrous mirabilite and glauberite in P02 profile

a—菊花状钙芒硝; b—球粒状无水芒硝及针状钙芒硝; c—球状无水芒硝及吸附在之上的条状钙芒硝; d—块状钙芒硝与丝状钙芒硝共生;
e—菱形钙芒硝与针状、丝状钙芒硝; f—层状、条状钙芒硝; Th—无水芒硝; H—石盐; Glb—钙芒硝
a—chrysanthemum-shaped glauberite; b—spherical thenardite and acicular glauberite; c—spherical thenardite and striped glauberite adsorbed on it;
d—block glauberite and filamentous glauberite; e—rhombic glauberite with needle and filamentous glauberite; f—layered and striped glauberite;
Th—thenardite; H—stone salt; Glb—glauberite

Ca^{2+} 平均含量 (P01 剖面 1.69%, P02 剖面 1.34%, 24.90%, 其最大值为 70.60%, 最小值为 0.20%; P03 剖面 1.33%), P02 剖面 SO_4^{2-} 平均含量为 P01、P03 剖面 SO_4^{2-} 平均含量均低于 5%。

表 1 P01、P02、P03 剖面常量元素(离子)含量统计表

 $w_B/\%$

Table 1 Content statistics of major elements (ions) of P01, P02 and P03 sections

地层剖面	元素(离子)	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
P01	平均值	28.48	0.11	1.69	0.15	45.46	4.10
	最大值	43.17	0.40	3.80	0.51	68.16	9.20
	最小值	10.20	0.04	0.13	0.02	17.00	0.30
P02	平均值	31.67	0.05	1.34	0.08	33.99	24.90
	最大值	38.36	0.71	5.78	0.85	61.70	70.60
	最小值	4.36	0.01	0.09	0.01	1.61	0.20
P03	平均值	20.91	0.16	1.33	0.30	33.19	3.81
	最大值	42.50	0.59	5.17	0.95	66.40	12.24
	最小值	1.17	0.06	0.33	0.06	1.66	0.79

3.3.2 矿物组分特征

粉晶衍射结果显示,P01 剖面主要矿物为石盐、

石英、石膏、钠长石及部分黏土矿物(表 2); P02 剖面主要矿物为石盐、钠长石、石膏、无水芒硝、钙芒硝

表 2 马海盐湖 P01 剖面的 XRD 矿物组分半定量分析结果

 $w_B/\%$

Table 2 Results of semi-quantitative analysis of XRD mineral assemblage in P01 profile of Mahai Salt Lake

编号	深度/m	石盐	石英	石膏	钠长石	白云石	伊利石	高岭石
H1	0.1	46	23	10	22			
H2	0.2	44	17	18	20			
H3	0.3	47	11	18	24			
H4	0.4	63	8	16	14			
H5	0.5	47	7	32	14			
H6	0.6	48	14	19	20			
H7	0.7	17	12	25	14	3	21	9
H8	0.8	13	10	27	14	3	24	10
H9	0.9	14	8	42	12		17	8
H10	1.0	52	8	26	14			
H11	1.2	50	8	30	12			
H12	1.4	55	9	19	17			
H13	1.6	54	8	22	15			
H14	1.8	60	6	19	16			
H15	2.0	52	17	13	19			
H16	2.2	71	3	10	15			
H17	2.4	83	3		14			
H18	2.6	90	10					
H19	2.8	97	3					

(表 3),其中深度 6.4~4.0 m 之间的无水芒硝应该是制样过程中芒硝脱水形成的,深度 5.6~4.2 m 之间存在少量钙芒硝,4.2 m 往上石英、长石等碎屑物质增加,夹杂少量方解石和白云石。P03 和 P01 剖面相比其黏土矿物分布更加广泛,6.7~4.7 m 处含少量方解石、白云石(表 4)。研究区剖面的 X 射线粉晶衍射结果与化学组分分析结果基本一致。

3.4 硫同位素组成及主控因素

马海研究区芒硝层硫酸盐矿物主要包括芒硝($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)、无水芒硝(Na_2SO_4)、钙芒硝 $[\text{CaNa}_2(\text{SO}_4)_2]$ 、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。芒硝富集

层 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 11.10‰~12.72‰,芒硝减弱层 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 13.67‰~14.09‰,总体数值范围相较于芒硝层有所上升,芒硝消失后 $\delta^{34}\text{S}$ 值范围为 10.79‰~13.40‰(表 3),相较于含芒硝层数值范围较大,可能是由于接近地面,干扰因素太多,数值范围有所波动,但总体变化不大。

海相成因蒸发岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 的数值范围在 19‰~24.3‰之间,大多约为 21‰(颜开等,2018),而陆相盐湖中的硫酸盐硫同位素组成变化较大,有研究显示在海陆交互沉积地层中, $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于 10‰~17‰时,硫同位素组成是河流淡水及海水共同

表3 马海盐湖 P02 剖面 XRD 矿物组分半定量分析结果及硫同位素组成

 $w_B/\%$

Table 3 Results of semi-quantitative analysis of XRD mineral assemblage and sulfur isotopic composition in P02 profile of Mahai Salt Lake

编号	深度/m	石盐	石英	方解石	石膏	芒硝	钠长石	白云石	无水芒硝	钙芒硝	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
H-1	0.2	11	21		23		45				
H-2	0.4	28	16		22		34				
H-3	0.6	60	12		28						10.79
H-4	0.8	71	12		17						
H-5	1.0	50	5		19		27				
H-6	1.2	54	4		20		22				
H-7	1.4	52	7		17		20	5			12.46
H-8	1.6	59	5		15		21				
H-9	1.8	67	3		14		16				
H-10	2.0	58	3		17		20	2			
H-11	2.2	60	4	4	12		21				
H-12	2.4	69	3		14		13				
H-13	2.6	72	3		9		15				13.40
H-14	2.8	97	3								
H-15	3.0	95	5								
H-16	3.2	78	2		6		14				
H-17	3.4	63	4		18		15				12.47
H-18	3.6	68	3		8		21				
H-19	3.8	92	3		6						
H-20	4.0	81	7						12		
H-21	4.2	72	2		5		15		6		
H-22	4.3	27	3		29			3	16	22	13.65
H-23	4.4	25	3		42				9	21	
H-24	4.5	57	3		16				9	14	
H-25	4.6	57	6		12				11	14	
H-26	4.7	61	3		20				8	8	13.97
H-27	4.8	48	4		18				16	14	
H-28	4.9	70	1		19				7	4	
H-29	5.0	54							23	23	14.09
H-30	5.1	59			15				17	10	
H-31	5.2	34			26				32	7	
H-32	5.3	54			25				14	7	
H-33	5.4	69							31		
H-34	5.5	4			20				75		
H-35	5.6	13							68	19	11.92
H-36	5.7	16	7						77		12.72
H-37	5.8	16							84		
H-38	5.9	17	5		10				68		
H-39	6.0	6	6						88		11.53
H-40	6.1	8							92		
H-41	6.2	5							95		11.10
H-42	6.3	11							89		
H-43	6.4	20							80		

作用的结果 (Tabakh *et al.*, 1998, 1999)。青海柴达木东斯库勒盐湖石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 数值介于 11.3‰~13.4‰ 之间 (魏新俊等, 1993), 昆特依晶间卤水 $\delta^{34}\text{S}$ 数值介于 17.3‰~19.9‰ 之间, 茫崖湖表卤水 $\delta^{34}\text{S}$ 数值在 11.5‰ 上下轻微浮动 (樊启顺等, 2009), 而东濮凹陷古近系硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 数值介于 26.1‰~37.5‰

之间 (Shi *et al.*, 2005)。影响硫同位素变化的因素主要是物质来源和还原作用, 硫酸盐型盐湖卤水的硫同位素值与 SO_4^{2-} 含量成正比 (樊启顺等, 2009)。德宗马海湖为硫酸镁亚型盐湖, 但通过图 7 可看出研究区硫同位素值与对应的硫酸根含量不呈线性关系, 推测与物质来源发生变化有关。

表4 马海盐湖 P03 剖面 XRD 矿物组分半定量分析结果

 $w_B/\%$

Table 4 Results of semi-quantitative analysis of XRD mineral assemblage in P03 profile of Mahai Salt Lake

编号	深度/m	石盐	石英	方解石	石膏	钠长石	白云石	伊利石	高岭石
H-1	0.3	22	38		10	24			5
H-2	0.6	26	12		33	15			14
H-3	0.8	36	15		13	21			14
H-4	1.0	39	12		16	19			15
H-5	1.2	16	12		13	46			14
H-6	1.5	35	20		11	21			13
H-7	1.7	38	13		15	18			16
H-8	1.9	51	10		17	16			7
H-9	2.1	33	7		31	13			15
H-10	2.3	69	12		19				
H-11	2.5	93	4		4				
H-12	2.8	3	41		13	26			17
H-13	3.0	15	14		41	16			13
H-14	3.2	15	20		28	21			16
H-15	3.4	4	27		18	34			17
H-16	3.6	40	14		18	12			15
H-17	3.8	65	6		29				
H-18	4.1	6	17	5	27	29			15
H-19	4.4	55	8		19	18			
H-20	4.7	36	9		16	20			19
H-21	5.0	6	8	4	23	13	3	30	13
H-22	5.3	5	5	2	48	9	2	22	9
H-23	5.6	6	5	2	50	7	2	21	7
H-24	5.9	5	12	4	17	18	3	29	12
H-25	6.2	3	13	5	8	19	4	35	13
H-26	6.5	90	10						
H-27	6.7	55	10	5	24		6		
H-28	6.9	41	4		54				
H-29	7.1	79	6		15				
H-30	7.3	84	4		12				
H-31	7.5	73	4		23				
H-32	7.7	50	12		38				
H-33	7.9	95	5						
H-34	8.1	79	6		15				
H-35	8.3	77	11		12				

本次马海研究区硫同位素测试结果显示 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 10‰~15‰之间,数值分布相对集中,在芒硝含量逐渐减少、钙芒硝沉积前后,硫同位素值略有升高,表明湖水组分有一定程度变化,可能与湖水物质来源变化有关系。

3.5 U-Th 测年结果

750 ka 以来,古气候波动对盐湖的变化有着强烈的影响(Huang *et al.*, 1993)。铀系测年测定 P02 剖面厚层芒硝沉积结束时代最大年龄为 275.3 ± 47.9 ka BP (表 5)。其最大沉积年龄可归属于

MIS8,但由于样品系统不封闭、参数矫正偏差大等问题,测年数据可能会出现误差。

4 讨论

4.1 芒硝的沉积特征

马海盆地与柴达木盆地的其他次级盆地具有一定相似性,含盐地层都主要由粉砂、黏土等与盐层互层组成(魏新俊等, 1993)。

P01、P02和P03剖面的 Mg^{2+} 和 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 、

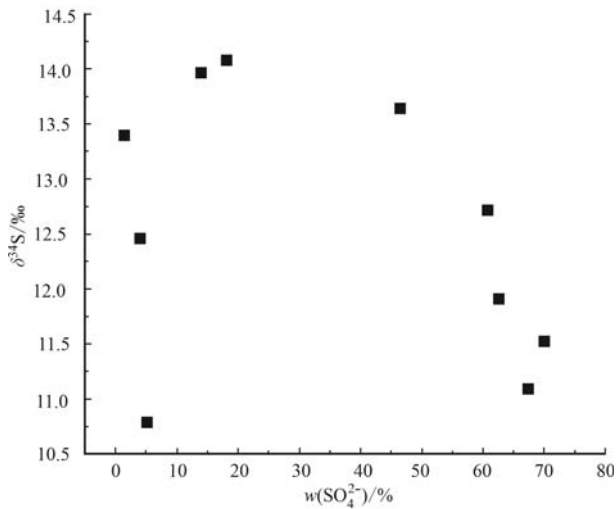


图7 马海盐湖厚层芒硝剖面 $\delta^{34}\text{S}$ 值与 SO_4^{2-} 含量关系散点图

Fig. 7 Scatter diagram of the relationship between $\delta^{34}\text{S}$ value and SO_4^{2-} content in thick-layer mirabilite in Mahai study area

Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 这3对离子变化趋势基本一致(图8、图9、图10)。在1.0~0 m处 K^+ 、 Mg^{2+} 含量均有稳定上升趋势。P02剖面中 K^+ 和 Mg^{2+} 有持续增高的趋势且含量处于低值, Mg^{2+} 的含量基本与 K^+ 的含量变化一致, 在1.0 m以下 K^+ 、 Mg^{2+} 含量均值分别为0.05%和0.08%且变化不明显。浅层 Cl^- 、 Na^+ 含量迅速降低是由于石盐持续析出后浅部与泥沙混合, 不可溶物含量增加。6.4~5.3 m中 SO_4^{2-} 含量快速升高, 与此同时 Cl^- 含量处于低值, 反映此阶段石盐沉积较少, 沉积物类型主要为芒硝。5.3~4.3 m处 Ca^{2+} 含量增加, 此时 SO_4^{2-} 含量相对减少, Ca^{2+} 的补充与 SO_4^{2-} 结合形成硫酸盐矿物。

P02剖面下半部分主要由厚层芒硝及石盐组成, 部分层段含少量钙芒硝; 上半部分主要由石盐及粉砂组成, 含少量石膏, 主要盐类矿物有石盐、石膏(表3)。芒硝含量随盐湖演变沉积过程出

表5 马海盐湖 P02 剖面石盐样品的铀系测年结果

Table 5 U series dating results of profiles P02 in Mahai Salt Lake

样号	深度/m	$w_B/10^{-9}$		$\frac{^{230}\text{Th}}{^{232}\text{Th}}$	$\delta^{234}\text{U}$ (测量值)	$\frac{^{230}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	^{230}Th 年龄 (未校正)/ka	^{230}Th 年龄 (校正)/ka	$\delta^{234}\text{U}$ 初始 值(校正)	^{230}Th 年龄 (校正)/ka BP
		^{238}U	^{232}Th							
H20	3.8~4.0	5±0	6 294±126	24.9±0.5	209.7±2.5	1.729 3± 0.006 0				
H22	4.2~4.3	3±0	5 163±103	19.3±0.4	235.2±3.0	2.021 3± 0.008 5				
H31	5.1~5.2	1±0	3 050±61	9.2±0.2	159.4±5.4	1.154 2± 0.009 3	331 221± 18 702	275 277± 47 853	347±48	275 254± 47 853

现由多到少的变化, 在钙芒硝出现后, 其含量逐渐减少, 在地下4.0 m处完全消失, 形态由早期的块状变为较小的粒状, 部分转化成无水芒硝; 在地下3.8~0 m处矿物类型主要为石盐、石膏及硅酸盐矿物(粉砂和黏土)。对比 P03 剖面 5.4~6.4 m处, 其主要为泥质粉砂结构, 块状构造, 成分平均含量约为石盐60%、粉砂20%、石膏15%、其他5%, 矿物类型比 P02 剖面多了高岭石、伊利石等黏土矿物, 芒硝及钙芒硝未在 XRD 中测得, 石盐为细粒, 大多固结呈团块, 分布不均匀(图3)。

厚层芒硝分布于马海研究区 P02 剖面地表下5.4~6.4 m处, 芒硝平均含量占比为80%, 新鲜芒硝无色透明, 多为块状构造, 接触空气极易脱水, 呈白色粉末状。地表下5.3~0.4 m主要沉积石盐, 平均含量约60%, 混合少量泥沙、石膏等, 0.4 m以上至地表主要为石盐及粉砂混合。其中钙芒硝是暖相矿物, 反映温暖的气候条件(刘成林等, 2008)。图9中显示 Ca^{2+} 含量迅速升高又迅速下降, 且最高值为

5.78%, 反映 Ca^{2+} 的补充可能是短期的。

4.2 厚层芒硝成因分析

马海盆地受基底断裂控制影响, 背斜构造隆起, 使马海盆地逐渐形成封闭环境, 有利于盐类沉积。盐类在冷暖不同的气候条件下, 其沉积矿物的种类和组合有所不同, 稳定的芒硝层需要持续7个月以上的冷环境才能形成(郑绵平等, 1998)。陈安东等(2017, 2020, 2022)认为柴达木盆地乃至整个青藏高原, 凡是以冰川融水补给为主的盐湖, 其盐类成盐期一定程度上受冰期控制, 冰雪融水通过河流对盐湖卤水补充淡水作用减弱。本次研究剖面沉积了厚度达1.2 m的芒硝层, 揭示出马海盐湖在相当长的一段时间里处于持续极寒气候条件, 富 Na_2SO_4 卤水在此气候条件下大量持续稳定地析出芒硝。伴随着钠的析出, 钾、镁等元素在卤水中持续稳定富集; 成盐演变中晚期, 气候变暖, 蒸发强度变大, 石盐大量析出, 钾、镁快速浓缩, 在局部形成了固体钾矿和富钾卤水。通过 XRD 粉晶衍射结果发现厚层芒硝上

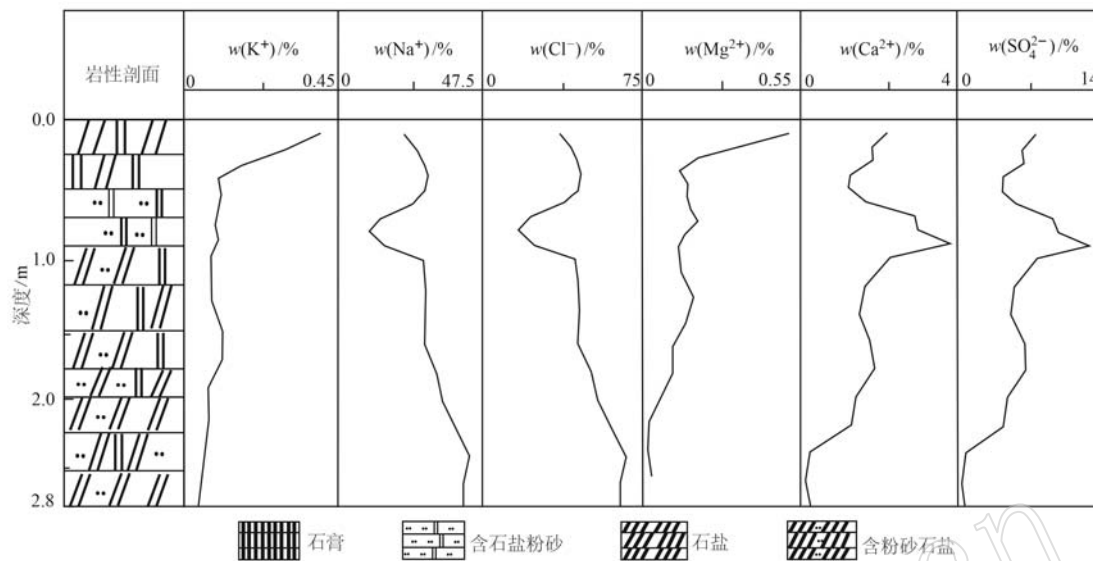


图 8 马海盐湖 P01 剖面主要元素分布特征图
Fig. 8 Distribution characteristics of major elements in P01 section of Mahai Salt Lake

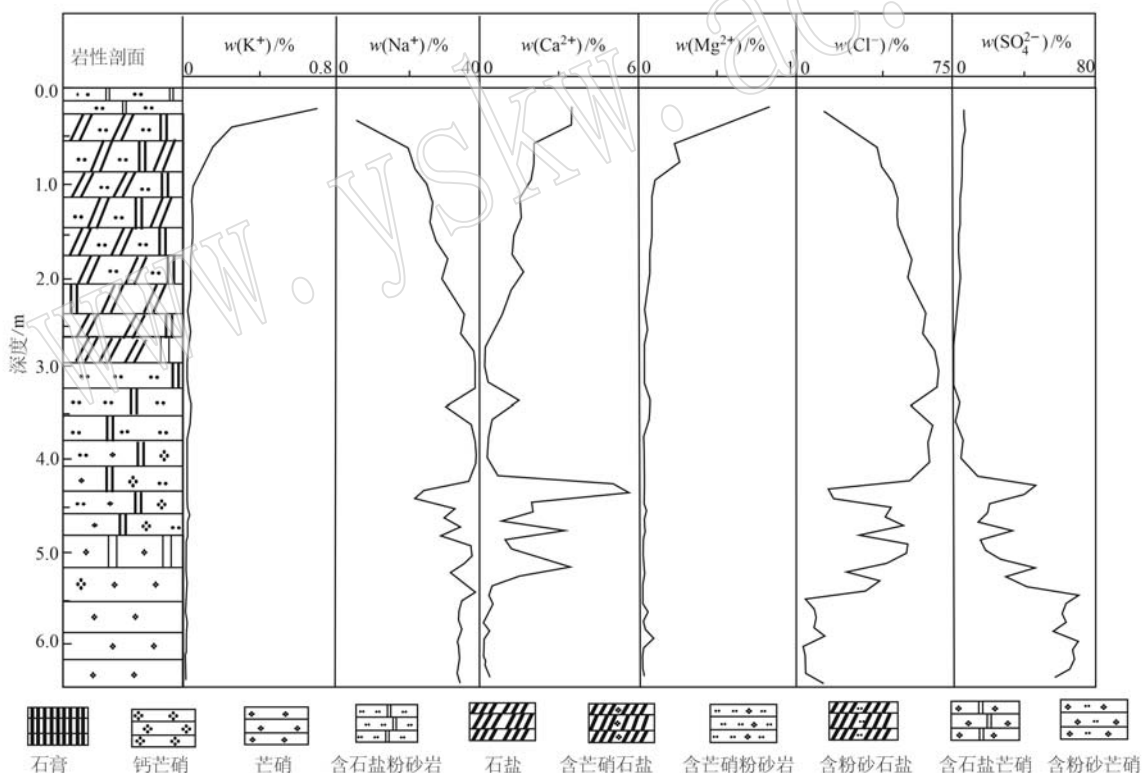


图 9 马海盐湖 P02 剖面主要元素分布特征图
Fig. 9 Distribution characteristics of major elements in P02 section of Mahai Salt Lake

部存在 4%~23% 的钙芒硝, 因其为典型的暖相矿物 (刘成林等, 2008, 2018), 并且钙芒硝沉积除了需要丰富的 Na^+ 和 SO_4^{2-} 之外, 还需要 Ca^{2+} 的补充, 因此推断本次研究剖面沉积时期, 马海盐湖在相当长的一段时间里处于持续极寒天气条件, 经化学沉积作用形成厚层芒硝, 而后经历短期气候变化气温回

暖, 另外硫同位素结果显示盐湖卤水的来源相对稳定, 仅在钙芒硝沉积期略有升高, 可以推测 P02 剖面局部可能有深部含钙较高卤水短暂通过断裂等上涌的方式进行了补充, 形成了钙芒硝沉积, 并且由于温度升高, 厚层芒硝在钙芒硝出现一段时间后彻底消失。

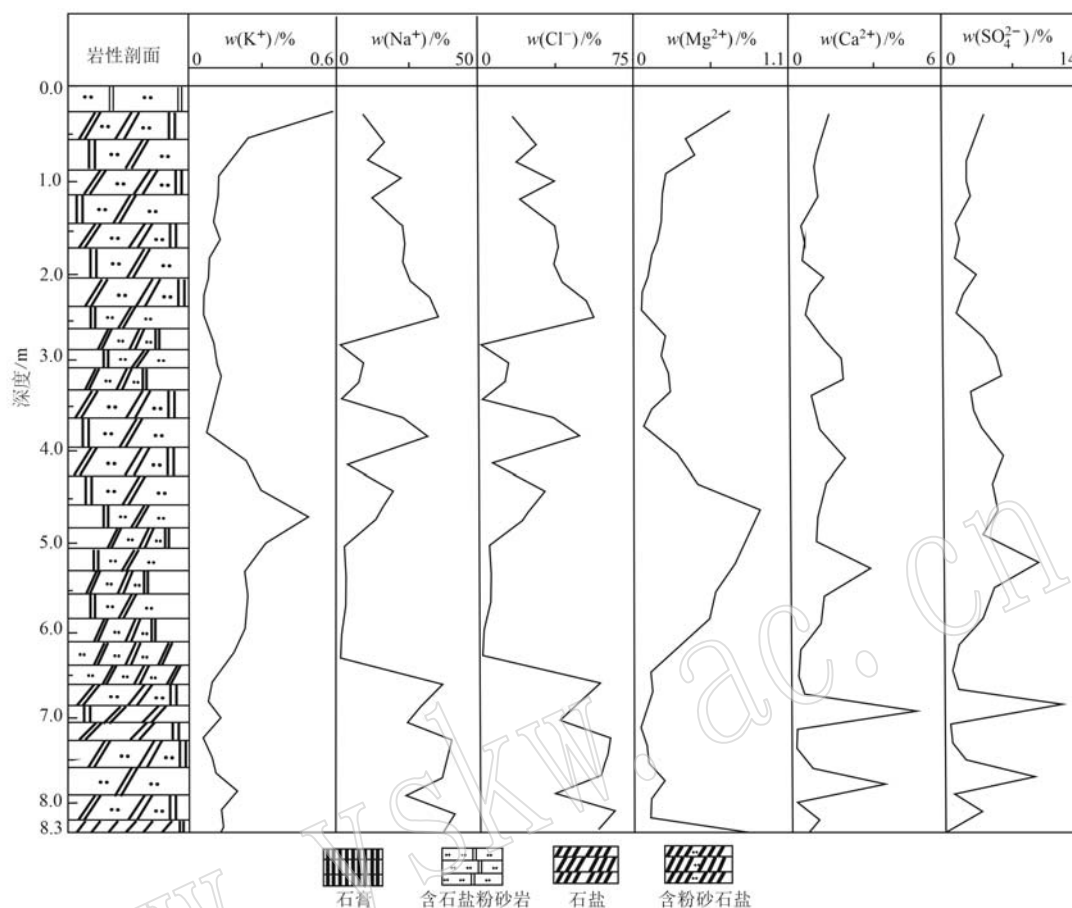


图 10 马海盐湖 P03 剖面主要元素分布特征图

Fig. 10 Distribution characteristics of major elements in P03 section of Mahai Salt Lake

5 结论

(1) 厚层芒硝形成阶段 SO_4^{2-} 含量快速升高, 与此同时 Cl^- 含量处于低值, 反映此阶段石盐沉积较少, Na^+ 与 SO_4^{2-} 结合形成芒硝。厚层芒硝削弱期 Ca^{2+} 含量明显增加, SO_4^{2-} 含量相对减少, Ca^{2+} 的补充与 SO_4^{2-} 结合形成硫酸盐矿物(石膏、钙芒硝)。成盐演变中晚期, 石盐大量析出, K^+ 、 Mg^{2+} 含量有稳定上升趋势, 证明没有钾镁盐矿物析出, 卤水一直在浓缩。

(2) 马海厚层芒硝剖面主要盐类矿物类型为石盐、石膏、芒硝、钙芒硝。芒硝层剖面中部钙芒硝的出现表明卤水组分变化的同时, 气温逐步回升, 而回暖前局部可能有深部含 Ca 较高卤水短暂通过断裂等上涌的方式进行了补充。长期稳定的干冷气候环境下, 冰雪融水的淡化作用减弱, 芒硝的大量沉积使

卤水中硫酸根和钠持续降低, 钾和镁不断浓缩, 为钾盐矿物的析出奠定了基础。

References

- Chen Andong, Gu Jiani, Wang Xuefeng, *et al.* 2022. Rethinking on correlation scheme between Late Quaternary evaporite-deposition period and glacial period in saline lakes of Qaidam Basin[J]. *Mineral Deposits*, 41(2): 426~439(in Chinese with English abstract).
- Chen Andong and Zheng Mianping. 2017. Salt-forming periods in the Qaidam Basin and their correlation with Quaternary glaciations and tectonic movements on the Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 35(6): 36~41(in Chinese with English abstract).
- Chen Andong, Zheng Mianping, Song Gao, *et al.* 2020. Evaporite deposits in the Qaidam Basin and their response to Quaternary glacial climates since marine oxygen isotope stage 6 (MIS6)[J]. *Geological Review*, 66(3): 611~624(in Chinese with English abstract).

- Cui Qinggang and Zhao Shufang. 2018. The characteristics and geological significance of ring-shaped salt crust in Mahai salt lake of Qaidam basin in Qinghai Province[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 40(4): 218~226(in Chinese with English abstract).
- Fan Qishun, Ma Haizhou, Tan Hongbing, *et al.* 2009. Geochemistry characteristics of sulfur isotope in oilfield brine of the western Qaidam basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(2): 137~142 (in Chinese with English abstract).
- Huang Q, Teh-Lung K and Phillips F M. 1993. Evolutionary characteristics of lakes and Palaeoclimatic undulation in the Qaidam Basin, China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 11(1): 34~45.
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, *et al.* 2008. Late Pleistocene mirabilite deposition in the lop nur saline lake, Xinjiang, and its paleoclimate implications[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(4): 397~404. (in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Sun Xiaohong, *et al.* 2018. Research on potash forming and exploration progress in potash deposits in the lop nur salt lake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1 551~1 570(in Chinese with English abstract).
- Liu Fang, Tian Jingxiong, He Wei, *et al.* 2023. Epigenetic reforming mineralization of the Guyuan rock salt deposit in Ningxia: Evidence from mineralogy[J]. *Geology and Exploration*, 59(1): 27~42. (in Chinese with English abstract).
- Ren Jing. 2013. The mirabilite deposits in China: A review[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 33(1): 109~112(in Chinese with English abstract).
- Shi Z S, Chen K Y and He S. 2005. Strontium, sulfur and oxygen isotopic compositions and significance of paleoenvironment of Paleogene of Dongpu depression[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 30(4): 430~436.
- Tabakh M E, Schreiber B C, Utha-Aroon C, *et al.* 1998. Diagenetic origin of basal anhydrite in the Cretaceous Maha Sarakham salt: Khorat Plateau, NE Thailand[J]. *Sedimentology*, 45(3): 579~594.
- Tabakh M E, Utha-Aroon C and Schreiber B C. 1999. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporites in the Khorat Plateau of northeastern Thailand[J]. *Sedimentary Geology*, 123(1~2): 31~62.
- Wang Zhaoxu, Zhao Yanjun, Zhao Xianfu, *et al.* 2022. Influence of sedimentary characteristics on water solution mining of low-grade potassium ore: A case study of Holocene in the northern ore section of Mahai Salt Lake, Qaidam Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(5): 929~940. (in Chinese with English abstract).
- Wei Xinjun, Jiang Jixue and Wang Mili. 1992. Sedimentary characteristics of quaternary and evolution of saline lake of Mahai potash deposit[J]. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, (1): 40~52(in Chinese with English abstract).
- Wei Xinjun, Shao Changduo, Wang Mili, *et al.* 1993. Material Constituents, depositional Features and Formation Conditions of Potassium-Rich Saltakes in Western Qaidam Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~197(in Chinese).
- Yan Kai, Liu Chenglin, Wang Jiuyi, *et al.* 2018. Sulfur isotopic characteristics of Eocene series in the yanjing-shenjindu sub-depression in the southern Jiangling depression and its implication for paleoclimate and provenance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1 647~1 660. (in Chinese with English abstract).
- Yao Fojun, Jiao Pengcheng, Zhao Yanjun, *et al.* 2021. Research of remote sensing recognition of concealed brine-controlling structures in dry salt lake area: A case study of Mahai salt lake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2 225~2 237 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Pengxi. 1987. Salt Lake in Qaidam Basin[M]. Beijing: Science Press, 1~235(in Chinese)
- Zheng Mianping, Zhang Yongsheng, Liu Xifang, *et al.* 2016. Progress and prospects of salt lake research in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(9): 2 123~2 166(in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Zhao Yuanyi and Liu Junying. 1998. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate[J]. *Quaternary Sciences*, 18(4): 297~307. (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈安东, 顾佳妮, 王学锋, 等. 2022. 晚第四纪柴达木盆地盐湖成盐期与冰期对比方案的再认识[J]. *矿床地质*, 41(2): 426~439.
- 陈安东, 郑绵平. 2017. 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*, 35(6): 36~41.
- 陈安东, 郑绵平, 宋高, 等. 2020. 晚第四纪 MIS6 以来柴达木盆地成盐作用对冰期气候的响应[J]. *地质论评*, 66(3): 611~624.
- 崔庆岗, 赵淑芳. 2018. 柴达木盆地马海盐湖的盐壳特征及其地质意义[J]. *化工矿产地质*, 40(4): 218~226.
- 樊启顺, 马海州, 谭红兵, 等. 2009. 柴达木盆地西部油田卤水的硫同位素地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 28(2): 137

~142.

- 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 等. 2008. 罗布泊盐湖晚更新世末期芒硝岩沉积及其古气候意义[J]. 地球学报, 29(4): 397~404.
- 刘成林, 焦鹏程, 孙小虹, 等. 2018. 罗布泊盐湖成钾规律研究与找矿进展[J]. 地质学报, 92(8): 1 551~1 570.
- 刘芳, 田景雄, 何伟, 等. 2023. 宁夏固原凹陷岩盐矿床后生改造成矿作用——来自矿物学的证据[J]. 地质与勘探, 59(1): 27~42.
- 任静. 2013. 中国芒硝类矿床研究现状[J]. 沉积与特提斯地质, 33(1): 109~112.
- 王弭力, 吴必豪, 田白, 等. 1992. 柴达木盆地马海盐矿床基本地质特征及形成条件浅析[C]//矿床地质研究所. 中国地质科学院矿床地质研究所文集(25). 北京: 地质出版社, 86~98.
- 王朝旭, 赵艳军, 赵宪福, 等. 2022. 沉积特征对低品位钾矿水溶开采的影响——以柴达木盆地马海盐湖北部矿段全新统为例[J]. 岩石矿物学杂志, 41(5): 929~940.
- 魏新俊, 姜继学, 王弭力. 1992. 马海钾矿第四纪沉积特征及盐湖演化[J]. 青海地质, (1): 40~52.
- 魏新俊, 邵长铎, 王弭力. 1993. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分、沉积特征及形成条件研究[M]. 北京: 地质出版社, 1~197.
- 颜开, 刘成林, 王九一, 等. 2018. 江陵凹陷南缘盐井-申津渡凹地始新统硫同位素特征及古气候和物质来源探讨[J]. 地质学报, 92(8): 1 647~1 660.
- 姚佛军, 焦鹏程, 赵艳军, 等. 2021. 干盐湖区隐伏控卤构造遥感识别研究——以马海盐湖为例[J]. 地质学报, 95(7): 2 225~2 237.
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1~235.
- 郑绵平, 张永生, 刘喜方, 等. 2016. 中国盐湖科学技术研究的若干进展与展望[J]. 地质学报, 90(9): 2 123~2 166.
- 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 1998. 第四纪盐湖沉积与古气候[J]. 第四纪研究, 18(4): 297~307.

www.yskw.ac.cn