

马海盐湖北部矿段低品位固体钾矿中 钾盐矿物的赋存特征及成因探讨

龙鹏宇^{1, 2, 3)}, 赵艳军¹⁾, 胡宇飞^{1)*}, 杜江民^{2, 3)}, 何继辉⁴⁾, 王朝旭^{1, 2, 3)}

1)中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2)河北地质大学, 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 河北石家庄 050031;

3)河北地质大学地球科学学院, 河北石家庄 050031;

4)青海中航资源有限公司, 青海德令哈 817000

摘 要: 马海盐湖位于柴达木盆地中北部赛什腾凹陷内, 其矿区北部矿段全新统固体钾矿大规模固液转化开采已稳定运行近十年, 为钾肥生产提供了重要的资源保障。本文拟查明马海矿区北部矿段现阶段低品位固体钾盐矿物的类型和赋存特征, 开展了矿物薄片鉴定、能谱扫描电镜和 X 射线粉晶衍射等分析测试工作, 为水溶开采的可持续开发提供依据。研究发现: (1)杂卤石集中分布在 70–79 勘探线, 以原生和后生交代成因赋存, 且以前者为主。原生杂卤石呈片状、纤维状、粒状、纤维放射状和花瓣状集合体; 后生交代成因的杂卤石呈浸染状和具石膏假象的毛毡状。(2)光卤石多分布在 67–70 勘探线, 呈熔融状、他形粒状、裂纹状, 与石盐、杂卤石、钾石盐等矿物共生。(3)钾石盐仅在 72 勘探线集中分布, 呈自形-半自形立方单体, 与光卤石、杂卤石、水氯镁石等矿物共生。(4)根据马海盐湖杂卤石赋存特征分析其成因可能为在气候干冷, 流域补给水量减少, 湖水大面积收缩和浓缩, 矿区东南部富 K^+ 、 Mg^{2+} 的硫酸镁亚型卤水与牛郎织女湖富 Ca^{2+} 的高盐度氯化物型卤水发生混合掺杂作用, 形成了含钾镁钙硫酸盐型杂卤石钾盐矿物。高盐度氯化物型卤水在向东南部浓缩中心迁移渗透过程中, 受蒸发和浓缩, 便在研究区西北部形成了氯化物型光卤石、钾石盐等矿物。(5)需要根据杂卤石的赋存特征, 制定相应的固液转化方案。

关键词: 马海盐湖; 低品位固体钾盐; 钾盐矿物; 赋存特征; 成因

中图分类号: P578.32; P571 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.022401

Occurrence Characteristics and Genetic Study of Potassium Salt Minerals in Low Grade Solid Potassium Ore in the North Section of Mahai Salt Lake

LONG Peng-yu^{1, 2, 3)}, ZHAO Yan-jun¹⁾, HU Yu-fei^{1)*}, DU Jiang-min^{2, 3)}, HE Ji-hui⁴⁾, WANG Zhao-xu^{1, 2, 3)}

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031;

3) College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang, Hebei 050031;

4) Qinghai Zhonghang Resources Co., Ltd., Delingha, Qinghai 817000

Abstract: The Mahai Salt Lake is located in the Saishiteng Sag in the north-central part of the Qaidam Basin. The large-scale solid-liquid conversion mining of Holocene solid potash in the northern section of the mining area has been operating stably for nearly ten years, providing important potash fertilizer production. This paper intends

本文由国家重点研发计划课题“重点锂、铍成矿带成矿规律与预测评价研究与综合”(编号: 2019YFC0605203)、中国地质科学院矿产资源研究所基本科研业务费项目“柴达木盆地马海盐湖深部异常富集卤水的物质来源和成矿机理研究”(编号: KK2119)和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”(编号: zhzyb20210126-01)联合资助。

收稿日期: 2021-11-14; 改回日期: 2022-02-20; 网络首发日期: 2022-02-26。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 龙鹏宇, 男, 1995 年生。硕士研究生。主要从事层序地层学与能源盆地分析的研究工作。通讯地址: 050031, 河北省石家庄市裕华区槐安东路 136 号。E-mail: pengyulong1995@163.com。

*通讯作者: 胡宇飞, 女, 1987 年生。硕士, 助理研究员。主要从事钾盐矿物分析工作。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: huliuyufei@163.com。

to ascertain the types and occurrence characteristics of low-grade solid potash minerals at the current stage in the northern section of the Mahai mining area, and carry out analysis and testing work such as mineral thin slice identification, energy spectrum scanning electron microscopy and X-ray powder crystal diffraction, which are suitable for water-soluble mining, providing a basis for sustainable development. The research found that: (1) Polyhalite is concentrated near the 70–79 exploration line, with primary and epigenetic metasomatic genesis occurring, and the former dominates. The primary polyhalite is flake, fibrous, granular, fibrous radial and petal-like aggregates; the metasomatic polyhalites are disseminated and felt-like with the appearance of gypsum. (2) Carnallite is mostly distributed near the 67–70 exploration line, and it is molten, other-shaped granular, and crack-shaped. Symbiosis with salt, polyhalite, sylvine and other minerals. (3) Sylvine is only concentrated in the 72 exploration line. It is a euhedral-subhedral cubic monomer, which is symbiotic with minerals such as carnallite, polyhalite, and bischofit. (4) According to the analysis of the occurrence characteristics of polyhalite in the Mahai Salt Lake, the cause of deposition may be the cold and dry climate, which reduces the water supply in the basin, thereby causing the shrinking and concentration of lake water. The K^+ - and Mg^{2+} -rich magnesium sulfate subtype brine in the southeastern part of the mining area is mixed and doped with the Ca^{2+} -rich chloride-type brine of the Niulang Zhinu Lake, forming a potassium–magnesium–calcium sulfate-type polyhalite potassium salt mineral. In the process of high-salinity chloride brine migration and penetration to the southeast concentration center, the water evaporated and concentrated to form chloride-based carnallite, potash, and other minerals to the northwest of the study area. (5) It is necessary to formulate a corresponding solid–liquid conversion plan based on the occurrence characteristics of polyhalite.

Key words: Mahai Salt Lake; low grade solid potassium salt; potash minerals; occurrence characteristics; causes

钾盐是中国紧缺的非金属战略性矿产资源, 盐湖可溶性钾盐资源严重短缺的现状日益显著(王弭力等, 2006; 刘成林等, 2010; 郭明强等, 2011; 亓昭英等, 2019; 韩光等, 2022; 常政等, 2022)。2017 年我国钾肥总产量为 9.68×10^6 t, 表观消费量达 1.95×10^7 t, 自给率仅为 49.6%, 同比 2016 年下降 11.3%(杨华, 2007)。在油钾兼探、气钾兼探等新战略的实施背景下, 经几代地质学家 70 余年的钾盐找矿勘探工作, 除在柴达木盆地察尔汗盐湖、塔里木盆地罗布泊盐湖发现超大型钾盐矿床外, 已无更大突破。柴达木盆地 28 个盐湖矿区尚贮有数亿吨的低品位固体钾矿(亓昭英和马金元, 2009), 马海盐湖全新统矿层中贮存有近 8.1×10^6 t 的低品位固体钾矿(马金元, 2005), 相当于一个中型钾矿。对地表低品位固体钾矿的开发, 可有效保障我国钾盐资源的可持续发展并使我国在国际钾盐市场中有更多的话语权。

马海矿区位于柴达木盆地中北部, 是一个固液矿并存、贫富矿石并存, 钾、镁、钠等多种组分共(伴)生的第四纪盐湖矿床(马金元和杨平, 2005)。矿区开展地表低品位固体钾矿液化溶采的工程已有近十年, 随着水溶开采的持续进行, 固体钾矿的品位明显降低, 溶出液的成分也发生了明显变化, 给生产带来了很大的不确定性。要实现固液转化的可持续运行, 降低生产风险, 必须查清现阶段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存状态。本文通过对矿区 10 个钻孔岩芯进行编录, 开展岩芯观察、盐矿鉴定等工作, 深入研究了马海矿区北部矿段 67–79 勘探线钾盐矿物类型、空间分布特征及成因, 可为研究区溶采工作

的可持续发展提供保障, 并提高溶采效率。

1 地质背景

马海盐湖地处柴达木盆地中北缘断块带的赛什腾凹陷, 是在青藏高原区域性隆升构造动力背景下, 逐渐从统一的柴达木盆地中分离出来的近 NW—SE 方向的盆内闭流盆地, 沉积和贮存了丰厚的蒸发岩(图 1)(王弭力等, 1997)。冷湖背斜、赛前台地的隆升和阿尔金褶皱的旋扭复合使盆内古湖水向北东收缩至北部矿段, 北部矿段固相钾盐埋深厚度为 120.30 m, 最具经济意义的固体钾矿主要赋于全新统 J_n 钾矿层, 分布面积 111 km^2 , 该统厚度总体变化特征为东厚西薄, 最厚达 18.52 m(魏新俊等, 1993)。马海盐湖属内陆沙漠型干旱气候(刘圣, 2014), 北部矿段主要为干盐滩, 其晶间卤水主要受鱼卡河、噉唠河和脑儿河沿途河水下渗补给。

2 样品采集及测试方法

本文所取样品均来自青海中航资源有限公司马海矿区 67–79 勘探线北部矿段, 钻孔部署见图 2。作者在勘探现场对钻孔岩芯进行全孔编录, 按矿石不同自然类型分层、分段连续采取固体样品, 采集完毕后用自封袋密封保存。共采集岩芯样品 330 件。对固体盐样进行了薄片鉴定、X 射线粉晶衍射和能谱扫描电镜分析。

矿物薄片鉴定在中国地质科学院矿产资源研究所原子吸收实验室完成, 显微镜为徕卡荧光偏反光显微镜, 型号为 DM4500P。能谱扫描电镜分析在

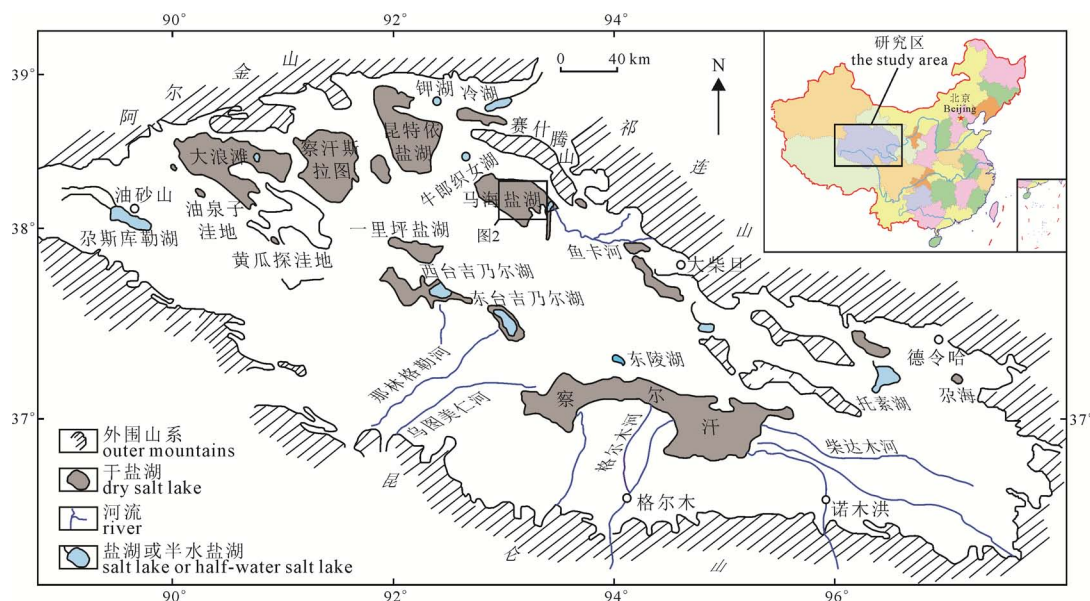


图1 马海盐湖地质简图(据杨谦, 1998; 王弭力等, 1997 修改)

Fig. 1 Geological map of Mahai Salt Lake (modified from YANG, 1998; WANG et al., 1997)

中国地质科学院地质研究所完成, 选取代表性强的样品, 制靶、烘干, 保证分析断面的新鲜、平坦, 利用 FEI NOVA NanoSEM 450 扫描电子显微镜对盐样进行观察, 并使用 OXFORD X-Max (50 mm²) 能谱仪进行能谱分析, 操作电压为 20 kV。X 射线粉晶衍射分析在中国地质科学院矿产资源研究所完成, 仪器型号为布鲁克 D8 Discovery, 将粉碎至 200 目的盐样放置于深度为 2 mm 的样品槽, 压实后放入 X 射线衍射分析仪中扫描。X 光源为铜靶/40 kV/40 mA, 探测器为 LYNXEYE_XE_T (1D mode) 一维探测器, 扫描方式为连续扫描, 每步扫描时间为 0.3 s, 扫描步长为 0.02°。

3 测试结果和分析

3.1 盐类矿物种类鉴定

对 10 个钻孔固体盐样的薄片鉴定、SEM 及

XRD 分析共鉴定出 12 种盐类矿物, 分别为石盐、钾石盐、光卤石、杂卤石、水氯镁石、白钠镁矾、石膏、半水石膏、硬石膏、钾石膏、白云石和方解石, 其中钾盐矿物为杂卤石、光卤石和钾石盐。

3.2 矿物薄片鉴定

杂卤石多呈花瓣状(图 3a)和纤维放射状(图 3b)集合体, 发现杂卤石交代石膏、半水石膏(图 3c)及少量石盐(图 3d)的现象, 杂卤石在研究区分布极为广泛。光卤石在单偏光下呈灰白色(图 3e), 晶体多呈 5~50 μm 的熔融状, 光卤石多以单颗粒形式赋存于石盐晶体溶洞中(图 3f)或赋存在碎屑物中与杂卤石共生(图 3g)。碳酸盐矿物主要为石膏和半水石膏, 呈板状、菱板状(图 3h), 主要与碎屑矿物共生, 极少数被杂卤石交代。

3.3 能谱扫描电镜分析

除研究区西北部(67-70 勘探线)外的送检样品均发现杂卤石, 杂卤石呈片状(图 4a)、纤维状(图 4b)、粒状(图 4c)、具石膏假象的毛毡状(图 4d), 主要赋存在石盐晶间和碎屑物间, 少数赋存在石盐溶洞和溶缝中。发现极少数杂卤石交代半水石膏的现象(图 4e)。杂卤石多与石盐、石膏、半水石膏、光卤石、钾石盐、水氯镁石等矿物共生。光卤石在研究区分布较为广泛, 为灰白色, 微晶矿物, 粒径普遍为 5~50 μm。多呈他形粒状(图 4f)、裂纹状(图 4g)和熔融状(图 4h)。光卤石多赋存在碎屑物间, 主要与钾石盐、杂卤石等矿物共生。钾石盐在研究区分布也较为广泛, 呈白色, 主要为微晶矿物, 粒径普遍为 3~10 μm, 大部分为自形-半自形立方单体(图 4h)。多与光卤石、杂卤石和水氯镁石等矿物共生, 少数与石盐共生。

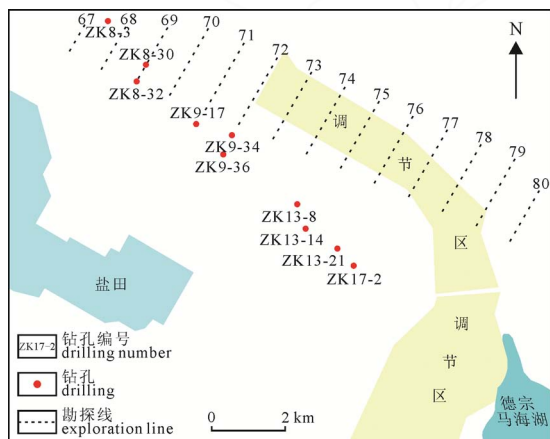
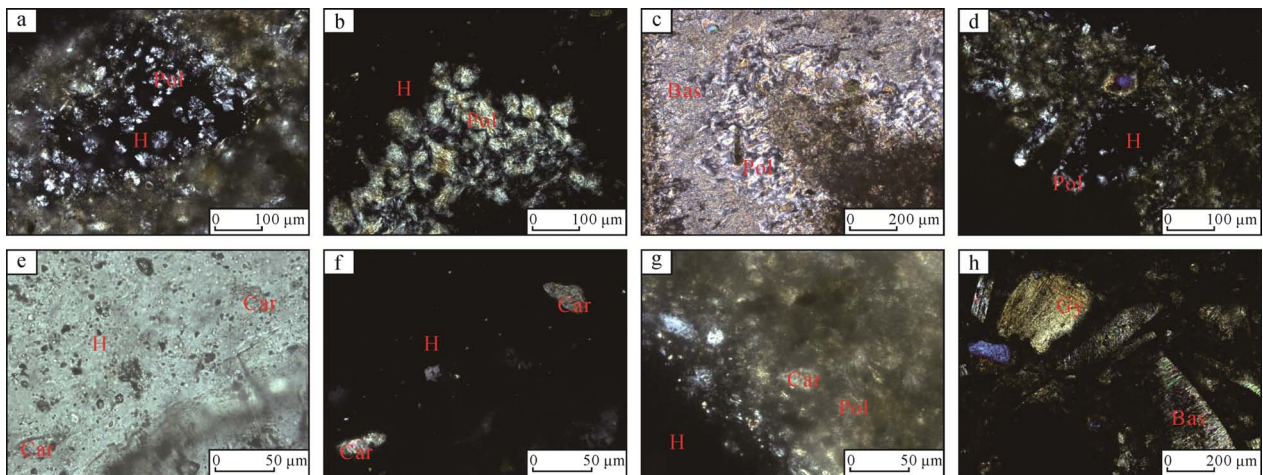


图2 研究区钻孔部署图

Fig. 2 Geological borehole distribution map of the study area



a—花瓣状杂卤石; b—纤维放射状杂卤石; c—杂卤石交代半水石膏; d—杂卤石交代石盐; e—赋存在石盐溶洞中的光卤石;

f—赋存在石盐溶洞中的光卤石; g—光卤石与杂卤石共生; h—石膏、半水石膏;

H—石盐; Pol—杂卤石; Bas—半水石膏; Car—光卤石; Gy—石膏。

a—petal shaped polyhalite; b—fibrous radial polyhalite; c—polyhalite forms by replacement with bassanite;

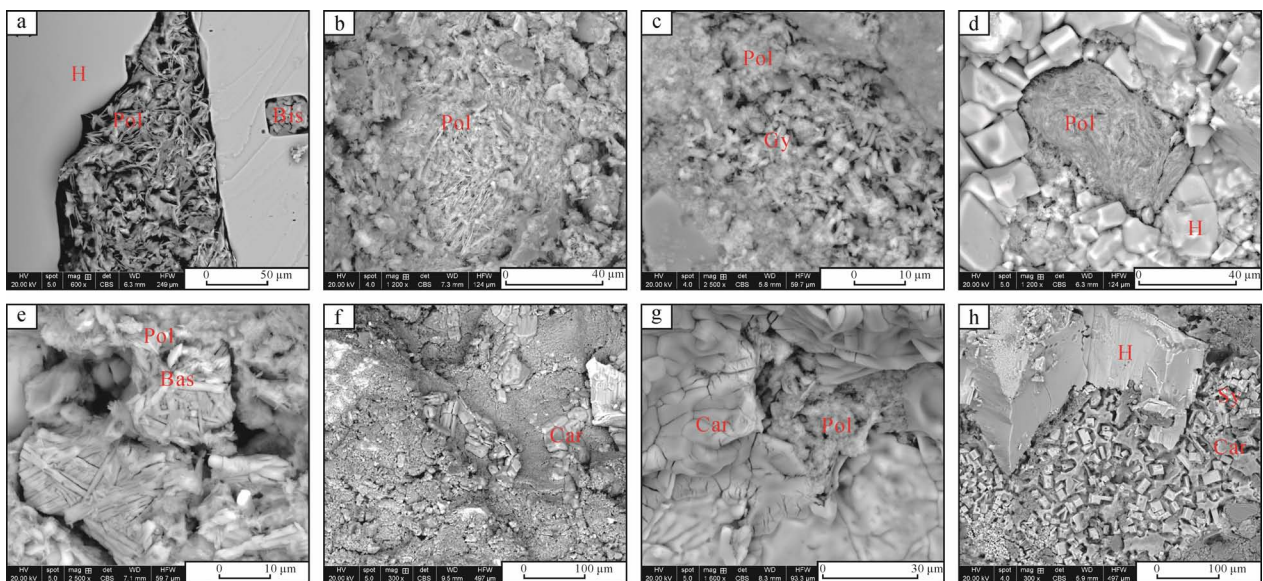
d—polyhalite forms by replacement with bassanite halite; e—carnallite occurs in halite caves; f—carnallite occurs in halite caves;

g—carnallite is symbiotic with polyhalite; h—gypsum, bassanite; H—halite; Pol—polyhalite; Bas—bassanite; Car—carnallite; Gy—gypsum.

图3 矿物薄片镜下特征(e为单偏光; a、b、c、d、f、g为正交光)

Fig. 3 Microscopic features of mineral thin slices

(e is in plane polarized light; a, b, c, d, f and g are in perpendicular polarized light)



a—片状杂卤石; b—纤维状杂卤石; c—粒状杂卤石与石膏共生; d—毛毡状杂卤石; e—杂卤石交代半水石膏;

f—他形粒状光卤石; g—裂纹状光卤石; h—钾石盐与光卤石共生; H—石盐; Pol—杂卤石;

Bas—半水石膏; Car—光卤石; Gy—石膏; Bis—水氯镁石; Sy—钾石盐。

a—petal-like polyhalite; b—fibrous polyhalite; c—granular polyhalite is symbiotic with gypsum; d—felt like polyhalite;

e—polyhalite formed by replacement with bassanite; f—anhedral granular carnallite; g—cracked carnallite;

h—sylvine is symbiotic with carnallite; H—halite; Pol—polyhalite; Bas—bassanite; Car—carnallite; Gy—gypsum; Bis—bischofite; Sy—sylvine.

图4 矿物扫描电镜特征

Fig. 4 Characteristics of mineral scanning electron microscopy

通过能谱扫描电镜分析结果可知, 光卤石和钾石盐在研究区普遍分布, 但镜下观察含量较少。杂卤石多集中分布在研究区中部、东南部, 且镜下观察含量较多。

3.4 X射线粉晶衍射分析

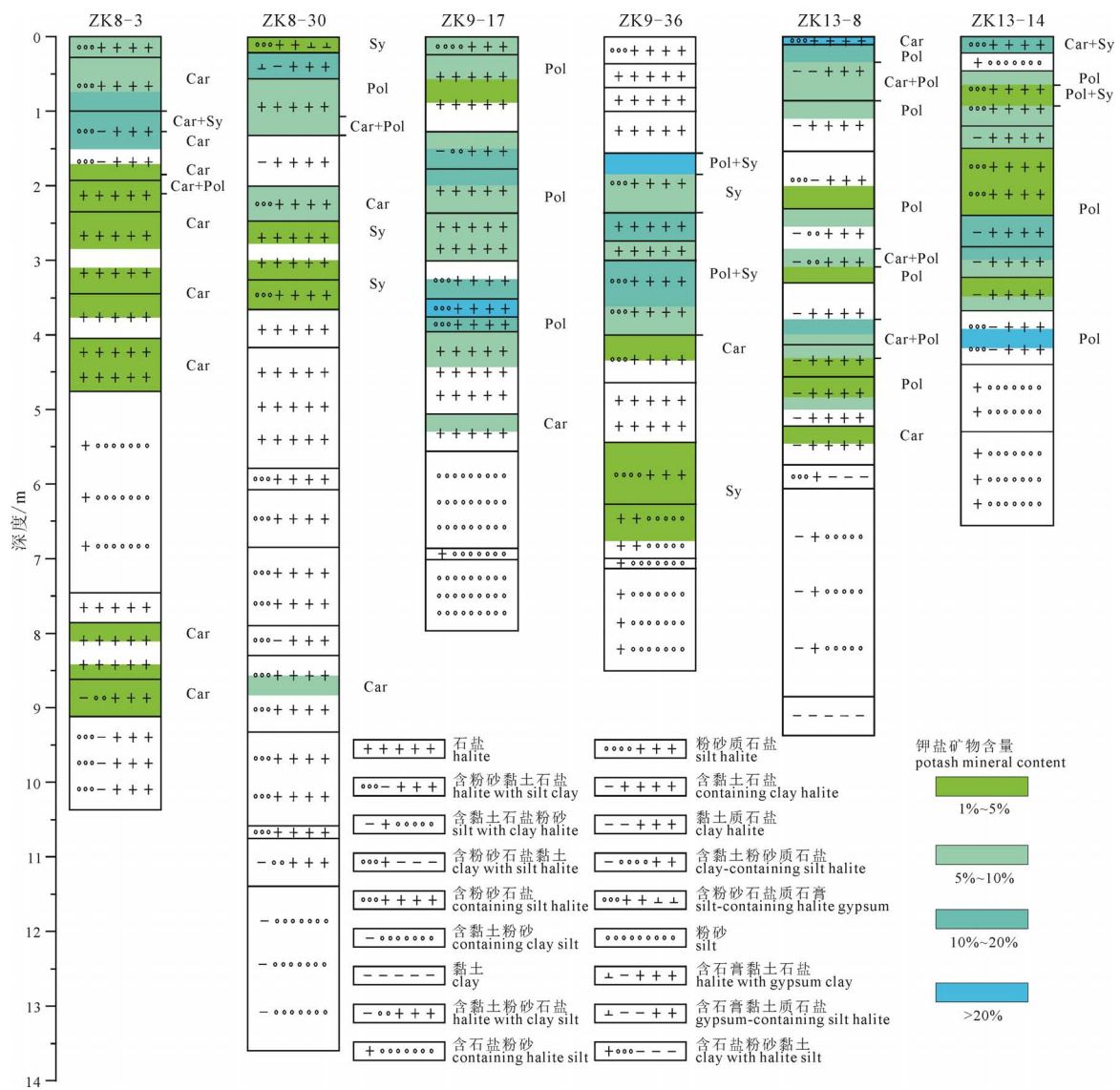
杂卤石、光卤石和钾石盐的X射线衍射结果见表1。由X射线衍射结果做出钾盐矿物的垂向分布

图(图5)。

结合表1、图5可以看出, 光卤石在研究区分布较为广泛, 含光卤石石盐层总厚度为8.32 m。主要集中在西北部(67—70 勘探线)的0.00—4.76 m矿层中, 含量多低于3%, 平均含量为5%; 其中在0.00—2.47 m处光卤石含量较高, 最大为20%。中部地区, 仅在4.00—4.30 m和5.30—5.55 m处发现光卤石,

表 1 X 衍射粉晶衍射结果/%
Table 1 Drillholes XRD result /%

样品编号	深度/m	杂卤石	光卤石	钾石盐	样品编号	深度/m	杂卤石	光卤石	钾石盐
ZK8-3 H-1	0.28		5%		ZK9-36 H-13	4.00	4%		2%
ZK8-3 H-2	0.53		6%		ZK9-36 H-14	4.30		3%	
ZK8-3 H-3	0.78		6%		ZK9-36 H-18	5.8			1%
ZK8-3 H-4	1.00		11%		ZK9-36 H-19	6.00			1%
ZK8-3 H-5	1.25		20%	6%	ZK9-36 H-20	6.27			1%
ZK8-3 H-6	1.50		10%		ZK13-8 H-1	0.10		25%	
ZK8-3 H-8	1.93		4%		ZK13-8 H-2	0.35	15%		
ZK8-3 H-9	2.15	1%	1%		ZK13-8 H-3	0.60	4%	2%	
ZK8-3 H-10	2.35		2%		ZK13-8 H-4	0.85	4%	3%	
ZK8-3 H-11	2.60		2%		ZK13-8 H-5	1.10	8%		
ZK8-3 H-12	2.85		2%		ZK13-8 H-10	2.30	2%		
ZK8-3 H-14	3.45		5%		ZK13-8 H-11	2.55	8%		
ZK8-3 H-15	3.75		3%		ZK13-8 H-13	3.05	3%	3%	
ZK8-3 H-17	4.30		3%		ZK13-8 H-14	3.29	2%		
ZK8-3 H-18	4.55		2%		ZK13-8 H-17	4.00	9%	8%	
ZK8-3 H-19	4.76		3%		ZK13-8 H-18	4.12	4%	3%	
ZK8-3 H-25	8.15		3%		ZK13-8 H-19	4.30	3%	4%	
ZK8-3 H-27	8.62		1%		ZK13-8 H-20	4.55	2%		
ZK8-3 H-28	8.90		3%		ZK13-8 H-21	4.80	2%		
ZK8-3 H-29	9.12		2%		ZK13-8 H-22	5.00	6%		
ZK8-30 H-1	0.21			1%	ZK13-8 H-24	5.46		2%	
ZK8-30 H-2	0.56	15%			ZK13-14 H-1	0.22		14%	3%
ZK8-30 H-3	0.80	5%			ZK13-14 H-3	0.71	7%		
ZK8-30 H-4	1.05	8%			ZK13-14 H-4	0.96	1%		1%
ZK8-30 H-5	1.32	9%		1%	ZK13-14 H-5	1.20	9%		
ZK8-30 H-9	2.25		7%		ZK13-14 H-6	1.50	7%		
ZK8-30 H-10	2.47		7%		ZK13-14 H-7	1.75	2%		
ZK8-30 H-11	2.75			1%	ZK13-14 H-8	2.00	5%		
ZK8-30 H-13	3.26			1%	ZK13-14 H-9	2.20	4%		
ZK8-30 H-14	3.66			1%	ZK13-14 H-10	2.40	4%		
ZK8-30 H-35	8.80		7%		ZK13-14 H-11	2.61	11%		
ZK9-17 H-1	0.24	10%			ZK13-14 H-12	2.82	13%		
ZK9-17 H-2	0.54	9%			ZK13-14 H-13	3.00	11%		
ZK9-17 H-3	0.90	4%			ZK13-14 H-14	3.23	7%		
ZK9-17 H-5	1.50	9%			ZK13-14 H-15	3.48	4%		
ZK9-17 H-6	1.77	14%			ZK13-14 H-16	3.68	7%		
ZK9-17 H-7	2.00	10%			ZK13-14 H-18	4.20	23%		
ZK9-17 H-8	2.36	7%			ZK17-2 H-1	0.15	7%		
ZK9-17 H-9	2.61	8%			ZK17-2 H-2	0.35	18%		
ZK9-17 H-10	3.00	5%			ZK17-2 H-3	0.54	5%		
ZK9-17 H-12	3.51	11%			ZK17-2 H-4	0.79	6%		
ZK9-17 H-13	3.75	22%			ZK17-2 H-5	1.04	4%		
ZK9-17 H-14	3.95	19%			ZK17-2 H-6	1.33	2%		
ZK9-17 H-15	4.20	9%			ZK17-2 H-7	1.49	6%		
ZK9-17 H-16	4.45	8%			ZK17-2 H-8	1.74	3%	2%	
ZK9-17 H-21	5.55		6%		ZK17-2 H-9	1.99	10%		
ZK9-36 H-6	1.80	19%		3%	ZK17-2 H-11	2.55	17%		
ZK9-36 H-7	2.10			7%	ZK17-2 H-12	2.80	2%		
ZK9-36 H-8	2.36			9%	ZK17-2 H-23	5.33		2%	
ZK9-36 H-9	2.74	9%		2%	ZK17-2 H-27	6.50	1%		
ZK9-36 H-10	3.00	3%		5%	ZK17-2 H-30	7.34	1%		
ZK9-36 H-11	3.30	4%		8%	ZK17-2 H-32	7.74	3%		
ZK9-36 H-12	3.60	11%		2%	ZK17-2 H-39	9.28	3%		



Pol-杂卤石; Car-光卤石; Sy-钾石盐。

Pol-polyhalite; Car-carnallite; Sy-sylvine.

图5 马海盐湖北部矿段西北—东南向钾盐矿物的空间分布(据X衍射结果)

Fig. 5 Spatial distribution of potash minerals in northwest to southeast direction (according to XRD results) in the north ore section of Mahai Salt Lake

含量分别为3%和6%。东南部地区,光卤石的分布较为分散且含量普遍较低,平均含量为5%,仅在0.00—0.22 m处含量达到14%~22%。

杂卤石同样分布广泛,含杂卤石石盐层总厚度为13.75 m。杂卤石主要集中分布在中部、东南部(70-79勘探线),平均含量分别为9%、6%。中部地区的0.00—4.45 m、5.30—5.55 m和东南部地区的0.10—5.46 m处普遍存在含杂卤石的石盐层,含量较高,多数大于3%。其中东南部地区的3.93—4.20 m处杂卤石含量最大,为23%。西北部地区,含杂卤石石盐层总厚度仅为0.94 m,且分布较为分散,主要分布在1.93—2.47 m和8.55—8.80 m处。

钾石盐仅在4个钻孔中发现,含钾石盐石盐层总厚度为5.71 m。其主要集中分布在72勘探线的1.56—4.00 m、5.44—6.27 m处,含量较低,仅在

1.80—2.36 m和2.74—3.30 m处含量为5%~9%,其余均小于3%。西北部地区,钾石盐分布较为分散,含量极低,在ZK8-3孔的1.00—1.25 m处含量最高,为6%,其余均为1%。而在东南部地区,仅在ZK13-14孔的0.00—0.22 m和0.71—0.96 m处发现钾石盐,含量分别为3%和1%。

4 钾盐矿物的成因机理

杂卤石($K_2Ca_2Mg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$)是一种可溶性的钾盐与硫酸盐的复盐矿物,在国内外硫酸盐型钾盐矿床中普遍存在。王弭力(1982)对硫酸盐型卤水蒸发实验时发现,杂卤石在下列两种情况会析出:①在硫酸钙盐沉积阶段,外来富 K^+ 、 Mg^{2+} 卤水的介入;②在硫酸钾镁盐沉积阶段,外来卤水带入 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 。四川盆地的杂卤石普遍认为是后生交

代成因(李亚文和韩蔚田, 1987; 潘忠华, 1988; 宋鹤彬和荆博华, 1991; 赵艳军等, 2015), 由富 K^+ 、 Mg^{2+} 的卤水与石膏、硬石膏发生水溶变质作用形成杂卤石, 其杂卤石常呈条纹状、浸染状、毛毡状、团块状、条带状、变余结构、具次生加大现象, 多赋存于硬石膏中, 部分产于石盐团块中。也有学者认为存在准同生阶段形成的原生杂卤石(黄建国, 1998; 刘成林等, 2008; 林耀庭和许祖霖, 2009; Zhao et al., 2020), 在盐湖晚期-干盐湖阶段, 盐湖规模小、水浅、蒸发快、易受外来淡水影响。在钾、镁盐还尚未析出时, 富含 K^+ 、 Mg^{2+} 的晶间硫酸盐型古卤水受到周期性的地表水淡水补给时, 引入 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 后发生掺杂作用, 经历了强烈的蒸发和浓缩后, 沉淀出杂卤石集合体。原生成因杂卤石常呈绒球状、纤维放射状、花瓣状、板状、柱状、片状、它形粒状集合体(王淑丽和郑绵平, 2014; 牛雪等, 2015; 仲佳爱等, 2018; 侯学文等, 2020)。

根据研究区杂卤石的赋存特征和微观组构, 绝大多数杂卤石为原生成因, 极少数为后生交代成因。原生成因的杂卤石呈片状、纤维状、粒状、纤维放射状集合体、花瓣状集合体, 多赋存在石盐晶间和碎屑物间, 少数赋存在石盐溶洞和溶缝中。后生交代成因的杂卤石, 与石膏、半水石膏等矿物共生, 呈浸染状和具石膏假象的毛毡状, 呈浸染状的杂卤石与石膏、半水石膏相互交织, 有明显的交代残余结构。

马海盆地湖盆的演化经历了上新世末以来的 5 次新构造运动的影响(魏新俊等, 1992), 多期的构造运动使马海盆地西南部的冷湖 VI、VII 号构造和小丘林构造及第三系相继形成水下隆起, 并持续抬升, 盐盆在断裂构造的影响下相对下沉。在中更新世晚期, 由于持续的构造运动, 使得南八仙周边中下更新统褶皱, 第三系于不同地段逆冲至第四系中、下更新统之上, 北部山区相对上升, 使马海盆地与柴达木古盐湖完全分割独立。封闭盆地的形成和干冷气候, 湖水逐渐向东南退缩, 出现了大规模的干盐滩环境。晚更新世时, 由于阿尔金山不断的走滑-挤压, 使柴达木盆地中部发生规模巨大的隆升, 北部也不断的抬升(沈振区等, 1990; 魏新俊等, 1992; 宋春晖, 2006; 何照等, 2016)。马海地区已形成的背斜进一步隆升, 向斜更加沉陷, 使得成矿物质向矿区东南部集中, 来源于矿区东部的鱼卡河水系经过东南部的盐沼带发生沉积分异作用, 至德宗马海湖已演化成富 K^+ 、 Mg^{2+} 的硫酸镁亚型卤水(魏新俊等, 1992)。矿区西北部、西南部分别受潜水和高盐度 $CaCl_2$ 型深循环卤水补给, 二者混合掺杂在牛郎织女湖群, 形成富 Ca^{2+} 的氯化物型卤水(魏新俊等,

1993), 矿区北高南低, 西高东低的地势(王弭力等, 1997), 使湖水和晶间卤水向德宗马海湖方向渗流, 这些卤水在德宗马海湖西北侧与富 K^+ 、 Mg^{2+} 的硫酸镁亚型卤水发生掺杂, 由于当时气候干冷(王弭力等, 1997; 宿星, 2006; 张玉淑等, 2014; 袁冶, 2015), 马海盐湖急剧的收缩和浓缩, 便在德宗马海湖西北侧形成了含杂卤石的石盐层。杂卤石的沉积消耗了大量的 SO_4^{2-} , 随着晶间卤水的不断补给, 德宗马海湖西北侧的硫酸镁亚型卤水逐渐向氯化物型卤水演化。当时湖水很浅, 利于蒸发、浓缩, 为光卤石和钾石盐的沉积和富集创造了条件。这种卤水在向浓缩中心迁移的过程中, 略经蒸发、浓缩便可析出光卤石、钾石盐等盐类矿物。光卤石和钾石盐是在杂卤石析出后卤水进一步蒸发浓缩形成的, 其分布范围也比杂卤石要小。

由于杂卤石常与碎屑矿物共生, 矿层的孔隙度和给水度相对较小, 溶剂渗流速度慢且效果差, 必须尽可能的减小渗水渠的间距, 增加基础面积, 提高水溶开采的效率。

5 结论

(1) 马海矿区北部矿段 67-79 勘探线全新统矿层中主要存在杂卤石、光卤石、钾石盐等钾盐矿物。杂卤石主要集中分布在 70-79 线, 光卤石集中分布在 67-70 线, 钾石盐集中分布在 72 线。

(2) 根据薄片鉴定和能谱扫描电镜观察, 发现杂卤石以原生为主, 呈片状、纤维状、粒状、纤维放射状集合体、花瓣状集合体与石盐、碎屑矿物共生。极少数杂卤石为后生交代成因, 呈浸染状和具石膏假象的毛毡状。光卤石呈熔融状、他形粒状、裂纹状, 与石盐、杂卤石、钾石盐等矿物共生。钾石盐呈自形-半自形立方单体, 与光卤石、杂卤石、水氯镁石等矿物共生。

(3) 通过对钾盐矿物的赋存特征进行分析, 初步认为, 受上新世末以来多期新构造运动的影响, 矿区东南部的富 K^+ 、 Mg^{2+} 的硫酸镁亚型卤水与西北部、西南部富含 Ca^{2+} 的氯化物型卤水发生掺杂作用, 并在全新世中晚期干冷气候的影响下, 在研究区 70-79 勘探线干盐滩浅部形成了含杂卤石的石盐层。高盐度氯化物型卤水进一步经蒸发、浓缩后沉积了光卤石和钾石盐。

(4) 需要根据杂卤石的赋存特征, 采取针对性的水溶开采措施。

致谢: 野外地质调查和盐类矿物鉴定得到了中国地质科学院矿产资源研究所刘成林研究员、焦鹏程研究员、赵宪福博士的大力帮助; 能谱扫描电镜分

析得到了中国地质科学院地质研究所施彬工程师的指导。在此表示感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2019YFC0605203), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. KK2119), and Qinghai Zhonghang Resources Co., Ltd. (No. zhzyb20210126-01).

参考文献:

- 常政, 袁小龙, 刘万平, 李梦玲, 苗卫良, 程怀德, 卜迪, 张昊, 张西营. 2022. 察尔汗盐湖固体钾盐溶解对溶剂注入速率响应机制研究[J]. 地球学报, 43(3): 287-294.
- 郭明强, 牛之建, 田兆雪. 2011. 浅析我国钾盐现状与存在问题及应对措施[J]. 中国矿业, 20(S1): 37-40.
- 韩光, 袁小龙, 韩积斌, 刘久波, 范增林, 胡燕, 张西营. 2022. 察尔汗盐湖霍布逊区段资源开采过程中储卤层系统变化特征研究[J]. 地球学报, 43(3): 279-286.
- 何照, 张西营, 黄聿铭, 马海州, 李永寿, 苗卫良, 于晨光. 2016. 柴达木盆地北部新生代构造运动及其对盐湖演化的影响[J]. 盐湖研究, 24(1): 1-7.
- 侯学文, 龚大兴, 文华国, 李超, 惠博, 张红, 周家云, 李进. 2020. 四川盆地三叠系杂卤石的时空分布、显微特征及成因研究[J]. 地质论评, 66(6): 1555-1571.
- 黄建国. 1998. 中国三叠纪钾盐沉积——以四川为例[J]. 岩相古地理, 18(4): 23-43.
- 李亚文, 韩蔚田. 1987. 四川盆地三叠系杂卤石形成条件的实验研究[J]. 现代地质, (Z1): 400-411.
- 林耀庭, 许祖霖. 2009. 论盐类保存条件研究对四川盆地三叠系找钾工作的重要性[J]. 盐湖研究, 17(1): 6-12.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-592.
- 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 樊卫东, 陈永志, 杨智琛, 王敬国. 2008. 罗布泊杂卤石沉积特征及成因机理探讨[J]. 矿床地质, 27(6): 705-713.
- 刘圣. 2014. 马海盆地荒漠绿洲区生态地下水位对人类活动响应的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 马金元, 杨平. 2005. 浅论青海省马海钾矿的资源优势和开发对策[J]. 化工矿物与加工, (4): 35-37.
- 马金元. 2005. 对马海钾矿床北部矿段资源开发的思考及建议[J]. 青海国土经略, (3): 10-11.
- 牛雪, 焦鹏程, 曹养同, 赵艳军, 刘斌山. 2015. 青海察尔汗盐湖别勒滩区段杂卤石成因及其成钾指示意义[J]. 地质学报, 89(11): 2087-2095.
- 潘忠华. 1988. 四川渠县农乐三叠系中下统杂卤石的成因初探[J]. 建材地质, 34(1): 6-11.
- 亓昭英, 马金元. 2009. 我国一次钾肥的生产现状与未来展望[J]. 磷肥与复肥, 24(1): 13-17, 28.
- 亓昭英, 屈小荣, 马锁立, 商立鹏. 2019. 2018 年我国钾肥行业运行报告及发展预测[J]. 磷肥与复肥, 34(2): 1-4.
- 沈振区, 童国榜, 张俊牌, 于淑凤, 李银罗. 1990. 青海柴达木盆地西部上新世以来的地质环境与成盐期[J]. 海洋地质与第四纪地质, (4): 89-99.
- 宋春晖. 2006. 青藏高原北缘新生代沉积演化与高原构造隆升过程[D]. 兰州: 兰州大学.
- 宋鹤彬, 荆博华. 1991. 四川渠县烂泥湾地区三叠系硫酸盐矿物硫同位素组成及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, (2): 181-187.

- 王弭力, 刘成林, 焦鹏程. 2006. 罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展与开发现状[J]. 地质论评, (6): 757-764.
- 王弭力, 杨智琛, 刘成林, 谢志超, 焦鹏程, 李长华. 1997. 柴达木盆地北部盐湖钾矿床及其开发前景[M]. 北京: 地质出版社.
- 王弭力. 1982. Q 凹陷杂卤石的地质意义[J]. 地质论评, (1): 28-37.
- 王淑丽, 郑绵平. 2014. 川东盆地长寿地区三叠系杂卤石的发现及其成因研究[J]. 矿床地质, 33(5): 1045-1056.
- 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.
- 宿星. 2006. 中更新世以来柴达木盆地西北缘气候变化的环境磁学研究[D]. 兰州: 兰州大学.
- 杨华. 2007. 2007 年国产钾肥企业面临严峻挑战[J]. 磷肥与复肥, (1): 17-18.
- 杨谦. 1988. 青海柴达木盆地的盐类矿产及其分布规律[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 13(1): 49-58.
- 袁冶. 2015. 柴达木盆地冷湖地区晚更新世晚期以来气候特征及对全球气候变化与高原隆升响应[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 张玉淑, 高东林, 刘永, 苗卫良, 时林, 李宝兰. 2014. 柴达木盆地晚更新世湖泊沉积物中黏土矿物特征及环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 33(1): 49-54.
- 赵艳军, 刘成林, 龚大兴, 周家云, 丁婷, 汪明泉, 王立成. 2015. 泸州-开江古隆起对川东三叠纪成盐成钾环境的控制作用[J]. 地质学报, 89(11): 1983-1989.
- 仲佳爱, 郑绵平, 唐学渊, 刘铸, 王富明, 蔡策, 庞博. 2018. 川东北黄金口背斜三叠系深部杂卤石特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 37(1): 81-90.

References:

- CHANG Zheng, YUAN Xiao-long, LIU Wan-ping, LI Meng-ling, MIAO Wei-liang, CHENG Huai-de, BU Di, ZHANG Hao, ZHANG Xi-ying. 2022. A Study on the Mechanism of Influence of the Dissolution of Solid Potassium Salt in Qarhan Salt Lake to the Rate of Solvent Injection[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 287-294(in Chinese with English abstract).
- GUO Ming-qiang, NIU Zhi-jian, TIAN Zhao-xue. 2011. Analyse the current situation of China's sylvite, existent problems and solutions[J]. China Mining Magazine, 20(S1): 37-40(in Chinese with English abstract).
- HAN Guang, YUAN Xiao-long, HAN Ji-bin, LIU Jiu-bo, FAN Zeng-lin, HU Yan, ZHANG Xi-ying. 2022. Comparative Analysis on the Characteristic Changes of the Brine Reservoir System before and after Exploration of the Qarhan Salt Lake (Huobuxun Area)[J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(3): 279-286(in Chinese with English abstract).
- HE Zhao, ZHANG Xi-ying, HUANG Yu-ming, MA Hai-zhou, LI Yong-shou, MIAO Wei-liang, YU Chen-guang. 2016. Cenozoic tectonic movements of the North Qaidam Basin and their effects on the evolution of salt lakes[J]. Journal of Salt Lake Research, 24(1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- HOU Xue-wen, GONG Da-xing, WEN Hua-Guo, LI Chao, HUI Bo, ZHANG Hong, ZHOU Jia-yun, LI Jin. 2020. Study on the temporal and spatial distribution, microscopic characteristics and genesis of Triassic polyhalite in Sichuan Basin[J]. Geological Review, 66(6): 1555-1571(in Chinese with English abstract).
- HUANG Jian-guo. 1998. The Triassic potash deposits in China: an example from the Sichuan Basin[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 18(4): 23-43(in Chinese with English abstract).

- LI Ya-wen, HAN Wei-tian. 1987. An experimental study on the formative conditions of polyhalite in Triassic system in Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, (Z1): 400-411(in Chinese with English abstract).
- LIN Yao-ting, XU Zu-lin. 2009. Significance of salts preservation condition research on finding potassium of the Triassic in Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 17(1): 6-12(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, WANG Mi-li. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China[J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 581-592(in Chinese with English abstract).
- LIU Cheng-lin, WANG Mi-li, JIAO Peng-cheng, FAN Wei-dong, CHEN Zhi-yong, YANG Zhi-chen, WANG Jing-guo. 2008. Sedimentary characteristics and origin of polyhalite in Lop Nur Salt Lake, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 27(6): 705-713(in Chinese with English abstract).
- LIU Sheng. 2014. Study on ecological groundwater level responses to human activities in the desert Oasis of Mahai Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- MA Jin-yuan, YANG Ping. 2005. Analysis of resource superiority of Mahai potash deposit in Qinghai Province and its developing measures[J]. *Industrial Minerals and Processing*, (4): 35-37(in Chinese with English abstract).
- MA Jin-yuan. 2005. Thoughts and Suggestions on the Resources Development of the Northern Section of the Mahai Potassium Deposit[J]. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, (3): 10-11(in Chinese).
- NIU Xue, JIAO Peng-cheng, CAO Yang-tong, ZHAO Yan-jun, LIU Bin-shan. 2015. The origin of polyhalite and its indicating significance for the potash formation in the Bieletan area of the Qarhan Salt Lake, Qinghai[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2087-2095(in Chinese with English abstract).
- PAN Zhong-hua. 1988. On the genesis of polyhalite in the Middle and Lower Triassic of Nongle, Quxian County, Sichuan Province[J]. *Building Material Geology*, 34(1): 6-11(in Chinese).
- QI Zhao-ying, MA Jin-yuan. 2009. The current status and outlook for the production of primary potash fertilizer in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 24(1): 13-17, 28(in Chinese with English abstract).
- QI Zhao-ying, QU Xiao-rong, MA Suo-li, SHANG Li-peng. 2019. Operational report of China's potassium fertilizer industry in 2018 and its development prediction[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 34(2): 1-4(in Chinese with English abstract).
- SHEN Zhen-ou, TONG Guo-bang, ZHANG Jun-pai, YU Shu-feng, LI Yin-luo. 1990. Geological environments since Pliocene and accumulation process of saline deposit in west Chaidamu Basin, Qinghai, China[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(4): 89-99.
- SONG Chun-hui. 2006. Tectonic uplift and Cenozoic sedimentary evolution in the northern margin of the Tibetan Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese with English abstract).
- SONG He-bin, JING Bo-hua. 1991. Sulfur isotopic composition of Triassic sulfate minerals in Lanniwan Area, Quxian County, Sichuan Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, (2): 181-187(in Chinese with English abstract).
- SU Xing. 2006. Study on environmental magnetism of the climatic changes in the Northwestern Qaidam Basin since the mid-Pleistocene[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese with English abstract).
- WANG Mi-li, LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng. 2006. Investigation and scientific research progress and exploitation present situation of Lop Nur Salty Lake potash deposits, Xinjiang, China[J]. *Geological Review*, (6): 757-764(in Chinese with English abstract).
- WANG Mi-li, YANG Zhi-chen, LIU Cheng-lin, XIE Zhi-chao, JIAO Peng-cheng, LI Chang-hua. 1997. Potash deposits and their exploitation prospects of saline lakes of the northern Qaidam basin[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Mi-li. 1982. The geological significance of polyhalite in Depression Q[J]. *Geological Review*, (1): 28-37(in Chinese with English abstract).
- WANG Shu-li, ZHENG Mian-ping. 2014. Discovery of Triassic polyhalite in Changshou area of East Sichuan Basin and its genetic study[J]. *Mineral Deposits*, 33(5): 1045-1056(in Chinese with English abstract).
- WEI Xin-jun, JIANG Ji-xue, WANG Mi-li. 1992. Sedimentary characteristics of Quaternary and evolution of saline lake of Mahai potash deposit[J]. *Qinghai Geology*, (1): 40-52(in Chinese with English abstract).
- WEI Xin-jun, SHAO Chang-duo, WANG Mi-li. 1993. Study on material composition, sedimentary characteristics and formation conditions of potassium rich lake in western Qaidam Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- YANG Hua. 2007. A rigorous challenge facing to China's potash fertilizer industry in 2007[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, (1): 17-18(in Chinese with English abstract).
- YANG Qian. 1988. The salt mineral resources and their spatial distribution in Chaidamu Basin, Qinghai[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 13(1): 49-58(in Chinese with English abstract).
- YUAN Ye. 2015. The characteristics of climate since Late Pleistocene in Lenghu Area of Qaidam Basin and its response to global climate change and uplift of the plateau[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan)(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yu-shu, GAO Dong-lin, LIU Yong, MIAO Wei-liang, SHI Lin, LI Bao-lan. 2014. Characteristics and environmental significance of clay minerals in the Late Pleistocene lake sediment, Qaidam Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 49-54(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yan-jun, LIU Cheng-lin, DING Ting, GONZALEZ L A, LI Zhao-qi, WANG Ming-quan, WANG Li-cheng, ZHU Zheng-jie. 2020. Origin and depositional paleoenvironment of Triassic polyhalite in the Jialingjiang Formation, Sichuan Basin[J]. *Carbonates and Evaporites*, 35(2): 35-64.
- ZHAO Yan-jun, LIU Cheng-lin, GONG Da-xing, ZHOU Jia-yun, DING Ting, WANG Ming-quan, WANG Li-cheng. 2015. The Luzhou-Kaijiang paleouplift control on the formation environments of Triassic salt and potassium of deposits in Eastern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1983-1989(in Chinese with English abstract).
- ZHONG Jia-ai, ZHENG Mian-ping, TANG Xue-yuan, LIU Zhu, WANG Fu-ming, CAI Ce, PANG Bo. 2018. Sedimentary characteristics and genetic study of deep polyhalite in Huangjingkou anticline of northeast Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 37(1): 81-90(in Chinese with English abstract).