

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

王朝旭^{1,2,3}, 赵艳军¹, 赵宪福⁴, 王青春^{2,3}, 何继辉⁵, 胡宇飞¹, 龙鹏宇^{1,2,3}

(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. 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. 中化地质矿山总局 地质研究院, 北京 100101; 5. 青海中航资源有限公司,
青海 德令哈 817000)

摘要: 马海盐湖是柴达木盆地全新世形成的富低品位固体钾盐矿干盐湖, 钾盐水溶开采潜力巨大。本文采用岩矿鉴定方法, 对含盐系地层的沉积韵律岩性、钾盐矿物与矿层分布特征进行了研究, 并分析了地层岩性的分布规律。结果表明, 在马海盐湖北部矿区的主要沉积中心, 沉积了一套以粘土-粉砂-石盐-粉砂石盐为主的沉积地层, 同时在东南部形成了一个次级沉积中心; 研究区钾盐矿物主要为杂卤石、光卤石、钾石盐等; 沉积韵律分析结果显示, 钾盐矿层多分布在IV₂韵律层顶部和IV₃-IV₄韵律层, 产出形态在垂向上为层状、透镜状, 平面上呈NE-SW向展布且连续性减弱; 钾盐矿物和矿层分布与沉积演化关系密切, 表明沉积特征对研究区钾盐矿水溶开采具有重要影响, 为同类型低品位钾盐矿开采提供了一些参考。

关键词: 全新世; 马海盐湖; 沉积特征; 水溶开采

中图分类号: P619.21⁺1; P588.24⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)05-0929-12

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

WANG Zhao-xu^{1,2,3}, ZHAO Yan-jun¹, ZHAO Xian-fu⁴, WANG Qing-chun^{2,3}, HE Ji-hui⁵,
HU Yu-fei¹ and LONG Peng-yu^{1,2,3}

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;
2. Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 3. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China; 4. Geological Institute of China Chemical Geology and Mine Bureau, Beijing 100101, China; 5. Qinghai AVIC Resources Co. Ltd, Delingha 817000, China)

Abstract: Mahai Salt Lake is a dry salt lake rich in low-grade solid potash ore formed in the Holocene in the Qaidam Basin, with great potential for water-soluble exploitation of potash. In this paper, the lithology of sedimentary rhythm of salt-bearing strata, the distribution characteristics of potash minerals and ore beds are studied by using the rock and mineral identification method. The results show that in the main sedimentary center of the northern mining area of the Mahai Salt Lake, a set of sedimentary strata dominated by clay, silt, rock salt, silty rock salt was

收稿日期: 2022-04-16; 接受日期: 2022-07-15; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604801); 中国地质科学院矿产资源研究所基本科研业务费项目(KK2119)

作者简介: 王朝旭(1995-), 男, 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, E-mail: 2234783159@qq.com; 通讯作者: 赵宪福(1985-), 男, 博士后, 从事蒸发岩矿床工作, E-mail: zhaoxianfu@foxmail.com。

deposited, while a secondary sedimentary center was formed in the southeast; The potash minerals in the study area are mainly halogenite, carnallite and potash salt; The results of sedimentary rhythm analysis show that the potash deposits are mainly distributed at the top of the IV_2 rhythmic layer and the IV_3 to IV_4 rhythmic layer, and the occurrence pattern is stratified and lenticular in the vertical direction, and is distributed in the NE-SW direction in the plane with weak continuity. The distribution of potash minerals and ore beds is closely related to the sedimentary evolution, indicating that the sedimentary characteristics have an important influence on the water solution mining of potash ore in the study area, which provides some references for the mining of the same type of low-grade potash ore.

Key words: Holocene; Mahai Salt Lake; sedimentary characteristics; water solution mining

Fund support: National Key R & D Project (2018YFC0604801); Basic Research Fund Project of Institute of Mineral Resources, CAGS (KK2119)

钾盐是中国紧缺重要战略资源之一,我国是农业大国,钾盐资源的相对储量和钾肥生产对保障我国粮食安全至关重要(刘成林等, 2006; 郑绵平等, 2015; 李欣萌等, 2019)。马海盐湖经 3 万年漫长的成矿过程沉积了大量钾盐矿物,富集成固液矿床(魏新俊等, 1993),很大程度上为我国钾盐矿产资源的开发利用提供了保障。经过近 10 年的固液转化开采,马海盐湖北部矿段全新统固体钾矿绝大部分区域含量(KCl 含量)已经降低至 2%,成为典型的低品位固体钾矿。以往学者对钾盐溶采工作中固体矿床的控矿因素(黄书城, 1994; 高小芬等, 2013)和物相分析(李欣萌等, 2019)、固体钾矿驱动溶解实验中水动力(王晓等, 2015a, 2015b; 李文鹏, 1991)和水化学场的变化特征(潘晓晨等, 2013; Li *et al.*, 2020)等进行了研究,在固液转化机理等方面取得了丰富成果,但有关宏观沉积特征对水溶开采影响的研究较少。为了进一步查清低品位固体钾矿水溶开采的控制因素,为精准开采提供依据和支撑条件,本文拟通过系统的沉积学和矿物学研究工作,查明全新世马海盐湖北部矿段沉积特征对水溶开采的控制性作用。

1 地质背景

马海盐湖位于柴达木盆地东北缘,是于上新世末期由褶皱和断裂构造活动形成的一个次级汇水盆地,其沉积演化与青藏高原新构造运动密切相关(刘成林等, 2010)。上新世末期—早更新世初期,在第 1 期新构造运动控制下,南缘古近系地层褶皱形成水下隆起,花海子、鱼卡淡水域汇聚于盆地;早更新世中晚期,第 2、第 3 期新构造运动使盆地西南部的冷

湖构造进一步褶皱隆起,导致马海盐湖的封闭程度增强;中更新世末期,第 4 期新构造运动使盐湖西南部的背斜连同中、下更新统的地层一起隆升、露出水面,使马海盐湖与邻近次级盆地完全隔离,成为一个孤立的封闭湖盆(金之钧等, 2004);至晚更新世晚期,第 5 期新构造运动开始(魏新俊等, 1992),盆地在周围背斜挤压的背景下缩短、拗陷,形成了“高山低盆”的基本构造骨架(何照等, 2016),同时,盆地北部的赛什腾山前台地剧烈抬升,在背斜构造和台地隆升、赛前断裂、冷湖断裂的逆掩作用下,湖盆相对下沉,阿尔金褶皱的旋扭复合作用使其下降幅度自西向东增加,古湖水向东退缩,并在南、北方向上大面积收缩,仅局限在北西-南东向的狭长凹地(王振强等, 2010)。

马海盐湖主要气候类型为内陆寒冷干旱型气候(项洋旭等, 2015),水源补给主要来自东部鱼卡河、嗽唠河和脑儿河沿途的渗流,而盆地西部和南部由于背斜构造形成的丘陵地貌对地下水的补给产生了隔断(潘玉麟等, 2006)。马海盐湖是典型的陆相盐湖(王弭力等, 1997),在构造-物源-气候的共同作用下(魏新俊等, 1993),沉积了大量固液并存的含多种盐类组分的蒸发盐类矿床(图 1)。

2 样本采集和研究方法

2.1 样品采集

本文样品和数据来源于 2020 年课题组在马海盐湖北部矿段开展的资源勘查工作,钻孔岩性数据为在钻探现场第一时间的编录资料。所用钻孔都进行了全孔连续取芯,单个岩芯样品的长度不超过 0.25 m。

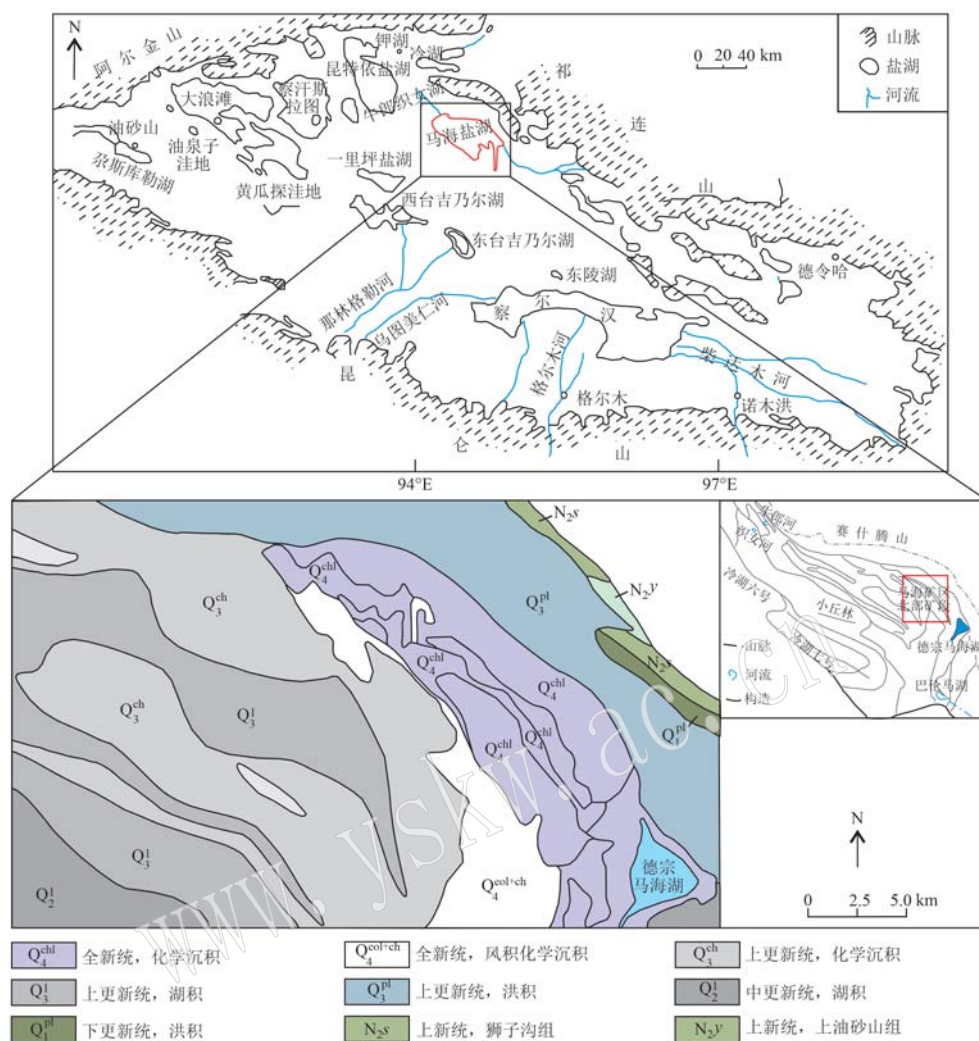


图1 马海盐湖北部矿段地质图[据王弭力等(1997)、Li等(2020)修改]

Fig. 1 Geological map of the northern ore section of Mahai Salt Lake (Modified from Wang Mili *et al.*, 1997; Li *et al.*, 2020)

2.2 研究方法

选取马海矿区溶采工程钻孔部署所涉及的16个钻孔, 对其所组成的“双十字”钻孔连井沉积剖面(图2), 按照盐湖沉积特征规律及沉积旋回划分原则进行沉积韵律层划分, 并按照在各韵律层出现的不同矿物种类进行岩矿鉴定, 包括薄片鉴定和能谱扫描电镜分析, 两种方法相互补充。薄片鉴定利用偏反光显微镜(LEICADM4500P)来完成, 在磨制薄片的原岩中选取具有代表性的扫描电镜样品, 利用扫描电镜-能谱仪(FEI Nova NanoSEM 450、Gatan MonoCL4、OXFORD X-Max50mm2), 在HV = 10 kV、Spotsize 为5的条件下对蒸发岩矿物的形态和矿物组合进行微观角度的观察、拍摄和能谱鉴定。测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所完成。

3 研究结果

3.1 含盐系沉积韵律划分

在新构造运动背景下, 相同次序的沉积作用和条件不断重复沉积而组成的一个层序称为沉积韵律。魏新俊等(1993)通过各钻孔深度对应的岩性变化, 按照淡-咸-盐-咸-淡的气候旋回规律对马海矿区全新统地层进行了沉积韵律划分, 划分出以粘土-粉砂-盐岩-粉砂盐岩为主的4个IV级韵律层(图3)。其中 IV_1 韵律层岩性多以粘土为主, IV_2 韵律层底部有一层细砂, 随后出现较厚的石盐层, 且这两个韵律层沉积厚度较大, 而在 IV_3 和 IV_4 韵律层中均为盐层和含粉砂盐层交互出现, 其中 IV_3 韵律层较

IV₄ 韵律层中石盐厚,且中间以碎屑(粘土、粉砂)为分界线,偶尔以砂质石盐为分界线。

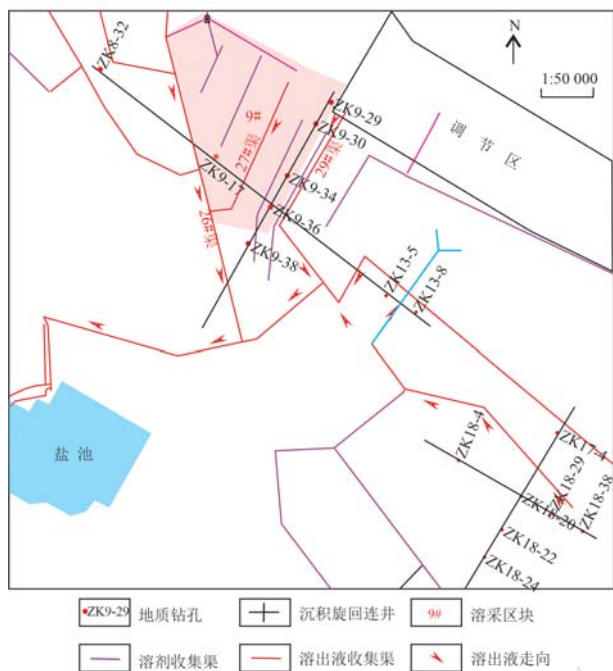


图2 研究区水溶开采部孔图

Fig. 2 Pore map of water solution mining in the study area

3.2 矿物特征

通过对各钻孔蒸发盐矿物赋存层位(表1)及岩矿鉴定结果可知,全新世马海盐湖沉积蒸发盐层骨架以石盐为主;主要钾盐矿物以杂卤石、光卤石、钾石盐为主,三者除局部地层赋存外,主要富钾层位多分布于浅层7 m以上范围内,且均出现溶蚀现象。石盐(H)多为无色透明,普遍为半自形-他形粒状,细晶(0.2~1.5 mm)-中细晶(0.5~5 mm)不等,靠近上部溶蚀现象明显(图4a),残留的晶体多呈港湾状,孔洞及裂隙中多以碎屑矿物充填,下部则破碎现象明显,极少数具有完全的立方体解理(图4b)。杂卤石(Pol)为微晶矿物集合体,多呈花瓣状(图4c)、纤维放射状(图4d),扫描电镜下微晶矿物呈片状(图4e)、毛毡状、纤维状(图4f),多与钾石盐、光卤石、水氯镁石共生,部分交代石膏、半水石膏,多分布在石盐晶体间和石盐溶缝、溶洞中(图4g)。光卤石(Car)为半自形-他形粒状微晶,含量较少,多与石盐共生于顶部层位及岩性变化交界处的石盐晶间或孔洞中(图4h、4i),扫描电镜下呈灰白色规则-不规则溶球状,多与碎屑或石膏共生(图4j、4k)。钾石盐(Sy)在扫描电镜下呈白色,普遍为3~10 μm微晶,

少数为完全立方单体(图4l),多数呈半自形粒状(图4m),溶蚀现象明显,主要与光卤石、杂卤石共生(图4n、4o),多数发现在光卤石的晶体间,少数与石盐共生。

3.3 含盐率

含盐率指盐层厚度占整个地层厚度的比率,含盐率的分析是盐湖成盐强度的最直观体现,利用它能够准确圈定研究区的沉积中心。结合马海盐湖构造背景、地势呈西南高-东北低、为NW-SE走向的次级凹陷等特征,统计了16个地质钻孔的各韵律层厚度、盐层厚度,从而计算出含盐率并绘制了相关等值线图。由图5、图6可知,各韵律层盐层厚度和地层沉积厚度呈正相关分布。从各韵律层含盐率等值线图(图7)中发现,各韵律层含盐率大小与前两者契合,IV₁韵律层仅在东南部ZK18-38钻孔处出现高值;IV₂韵律层含盐率在东北部ZK9-34钻孔处和东南部ZK18-38钻孔处同时出现高值,但后者分布范围相对较大;IV₃韵律层于东北部ZK9-29钻孔处出现高值,而在东南部ZK18-22处呈小范围出现;IV₄韵律层含盐率西北部与东南部均出现高值,并具明显分界,成盐强度呈现由东南部向西北部推移的趋势。

3.4 钾盐矿层分布特征

在复杂气候的多旋回影响下,钾盐沉积过程差异明显,形成不同品位的固体钾盐矿层(图8)。由图8可知,马海盐湖全新统主要为低品位钾盐矿层,并赋存于碎屑层和纯盐层中,其钾含量在碎屑中多于纯盐层,品位在KCl>2%范围钾盐矿层仅局部小范围内富集在粉砂或粘土含量较大的石盐层位中,原因多为淡化期形成碎屑沉积,可使干早期浓缩富集的K⁺被粘土吸附,或因淡水的掺杂形成杂卤石沉积,使K⁺不能在水中富集造成。平面上单层钾盐矿层沉积厚度由SW向NE逐渐变薄,但其分布层位逐渐变多,矿层南部连续性比北部连续性好。垂向上,钾盐矿层分为层状和透镜状两种形态,其中5 m以上范围内多呈层状钾盐层产出,而5~8 m范围内多呈透镜状钾盐层产出。

4 讨论

对于低品位钾盐矿床开采而言,水溶开采具有扩大可采储量、提高资源利用率的优势。20世纪70年代位于美国犹他州Paradox盆地的TexasGulf公司尝试使用水溶法开采技术开采低品位固体钾矿用

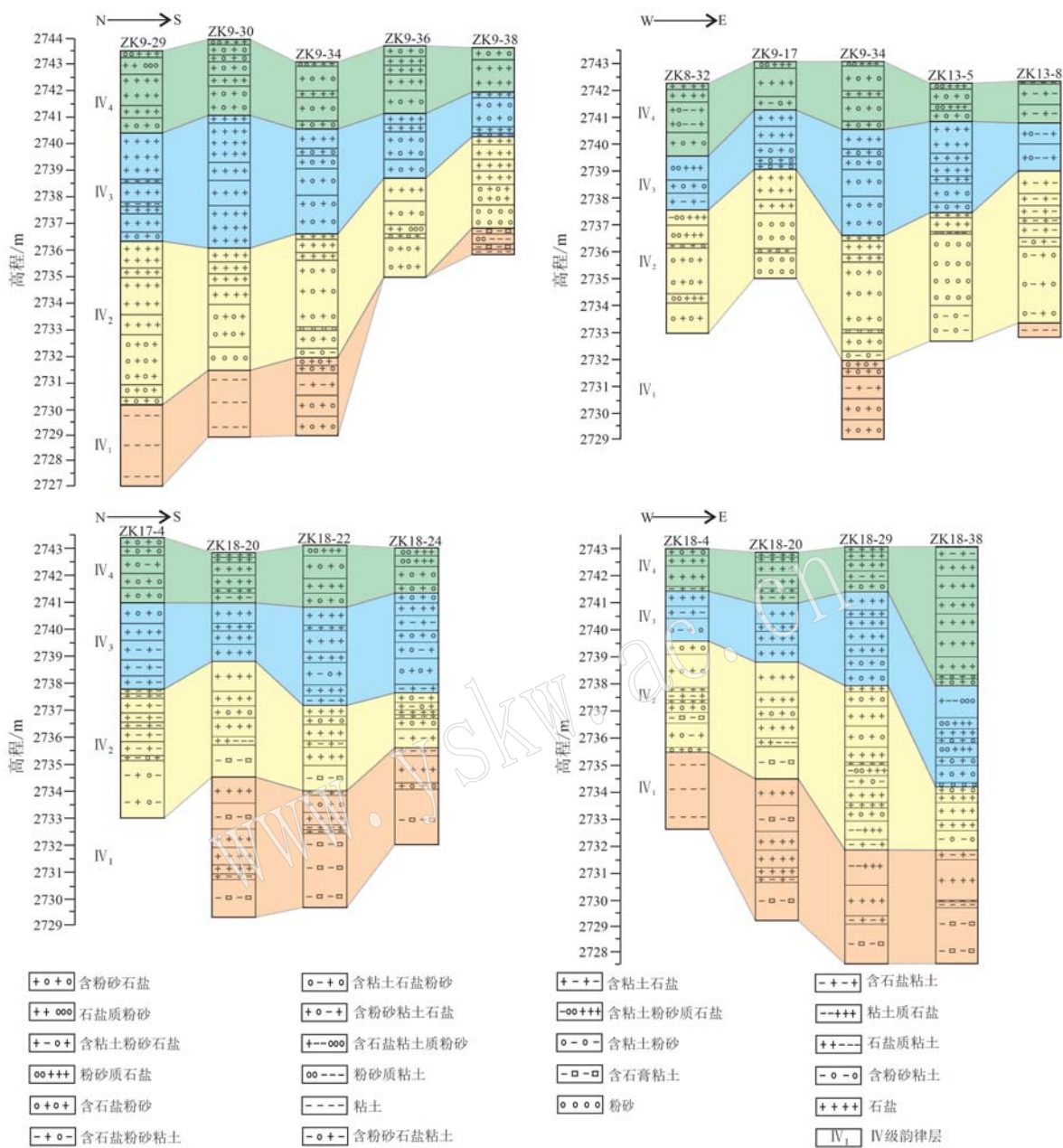


图 3 沉积旋回连井剖面图(据马海矿区野外编录)
Fig. 3 Sedimentary cycle interwell section (according to field records of Mahai mining area)

表 1 采样-矿物赋存层位一览表
Table 1 Sampling-mineral occurrence horizon list

钻孔编号	样品编号	取样深度/m	矿物组成	钻孔编号	样品编号	取样位置/m	矿物组成
ZK9-13	B-3	2.43~2.48	H+Sy	ZK9-36	B-2	1.75~1.80	H+Sy
ZK9-17	B-8	3.87~3.91	H+Pol	ZK9-36	B-6	3.60~3.65	H+Sy+Pol
ZK9-29	B-1	0.44~0.52	H+Car	ZK13-8	B-1	2.60~2.63	H+Sy+Pol
ZK9-29	B-7	7.09~7.13		ZK13-8	B-2	3.53~3.68	
ZK9-29	B-8	7.82~7.89	H+Car	ZK18-24	B-1	0.00~0.05	H+Sy+Car H+Pol+Car
ZK9-30	B-5	5.25~5.30		ZK18-28	B-1	1.00~1.05	
ZK9-34	B-3	2.18~2.26	H+Pol				

注：H—石盐；Sy—钾石盐；Pol—杂卤石；Car—光卤石。

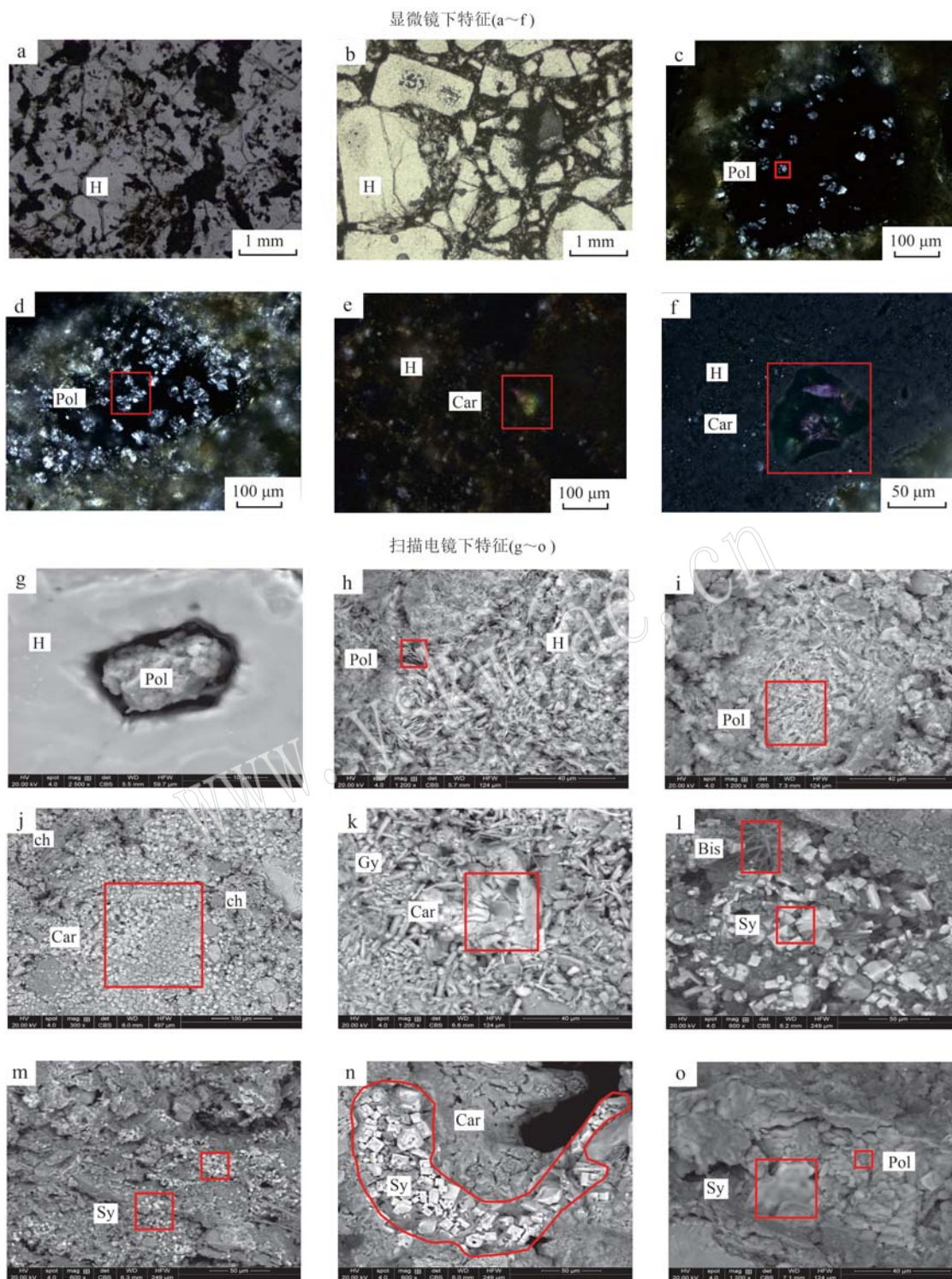


图4 全新世马海盐湖蒸发盐矿物的电子显微镜和能谱扫描电镜照片

Fig. 4 Electron microscope and energy spectrum scanning electron microscope photos of evaporite minerals in the Holocene Mahai Salt Lake

- a—溶蚀状石盐(H); b—破碎状石盐; c—花瓣状杂卤石(Pol); d—纤维放射状杂卤石; e, f—石盐-光卤石(Car); g—石盐-杂卤石; h—片状杂卤石; i—纤维状杂卤石; j—碎屑(ch)-光卤石; k—石膏(Gy)-光卤石; l—水氯镁石(Bis)-立方体状钾石盐(Sy); m—溶球状钾石盐; n—光卤石-钾石盐; o—杂卤石-钾石盐
- a—dissolution rock salt(H); b—broken rock salt; c—petal-shaped polyhalite(Pol); d—fibrous radial polyhalite; e, f—rock salt-carnallite(Car); g—rock salt-polyhalite; h—sheet polyhalite; i—fibrous polyhalite; j—chipping(ch)-carnallite; k—gypsum(Gy)-carnallite; l—bischofite(Bis)-cubic potash salt(Sy); m—spheroidal potash salt; n—carnallite-potash salt; o—polyhalite-potash salt

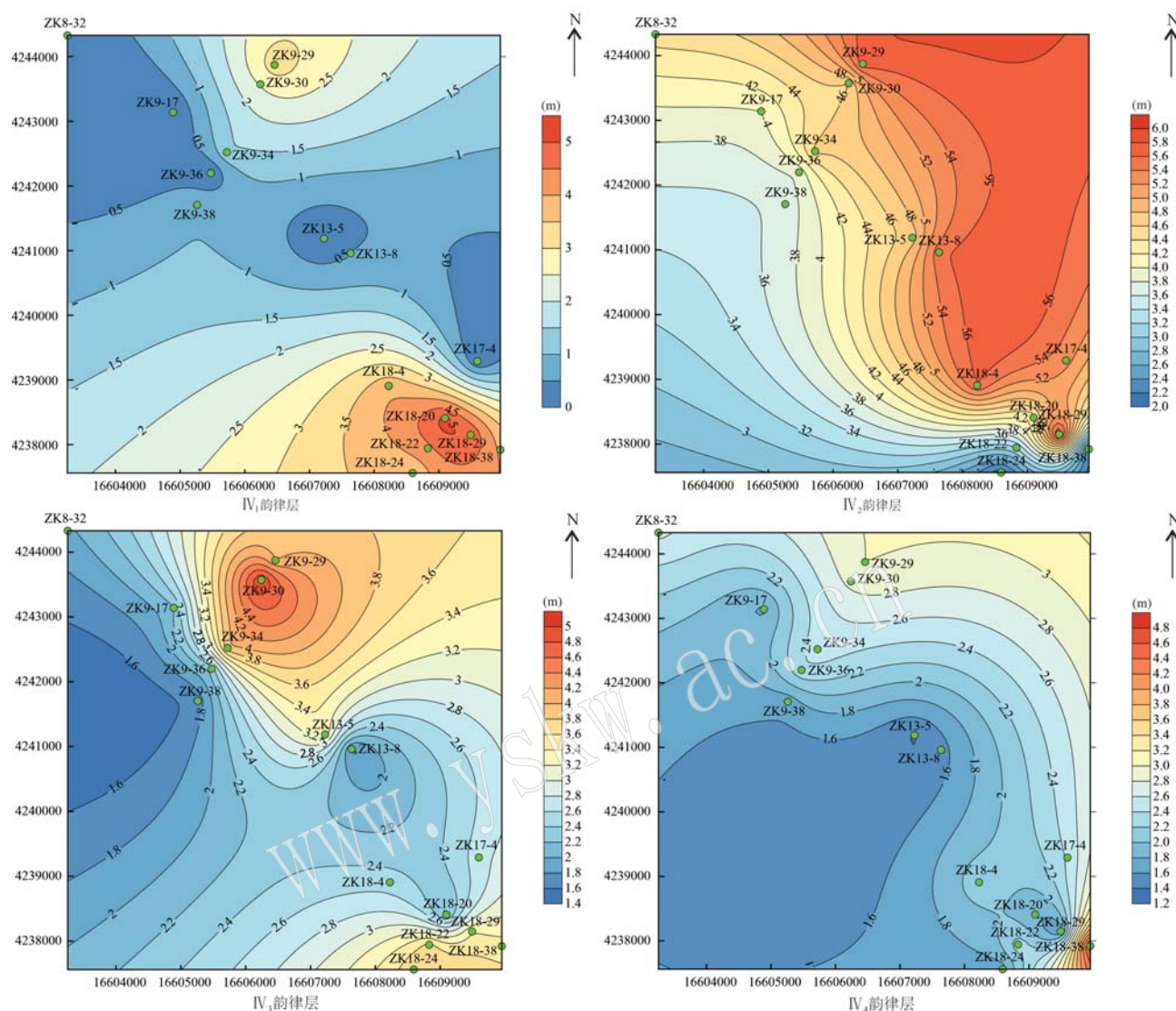


图5 各韵律层地层厚度等值线图

Fig. 5 Contour map of thickness of each rhythmic layer

于生产钾肥;青海盐湖集团针对别勒滩区段低品位固体钾矿开展工业性溶采试验,对于有一定埋深的固体钾矿也采用水溶法开采(李瑞琴等,2021;李海民等,2021)。针对马海矿区低品位钾盐矿床沉积特征,可采用渠道注水侧向渗透驱动的溶矿模式(图9),利用水位落差将配制好的溶剂注入溶剂收集渠,溶剂沿渠道两侧向前渗透并逐渐抬高矿层中的水位。其中溶出液收集渠多布施在沉积中心位置,溶剂输送渠分布在沉积中心外围,利用中心采卤的法式产生水位落差。综合分析沉积环境对水溶开采的影响因素有如下几点:

(1) 隔水层对于水溶开采发挥着至关重要的作用。黄书城(1994)研究淮安盐矿认为,由于多旋回、

多韵律的特点,但没有真正好的隔水层,为确保其溶采工程部署,只能选择底板有4 m左右较纯的石盐岩、夹石层作为隔水层;而 McKelvey 和 Milne (1962)、Bredhoeft 等(1963)、王英等(2012)认为,粘土可以阻挡盐分运移,并且泥质层在卤水形成过程中能够阻挡水中离子的转移。根据对全新世马海盐湖北部矿段沉积韵律的划分,研究区在湿润-干旱气候的转化条件下,沉积了一套以泥岩-粉砂-盐岩-粉砂盐岩为主的沉积序列,由于垂向上普遍发育粉砂和粘土夹层,且平面上石盐钾矿层连续性差,常被粉砂和粘土分割成透镜体,导致溶剂不能均匀、稳定地作用于钾矿层,降低了溶采效率。但平面上全新统底部是较厚粘土层,作为隔水层,它可以避免上部

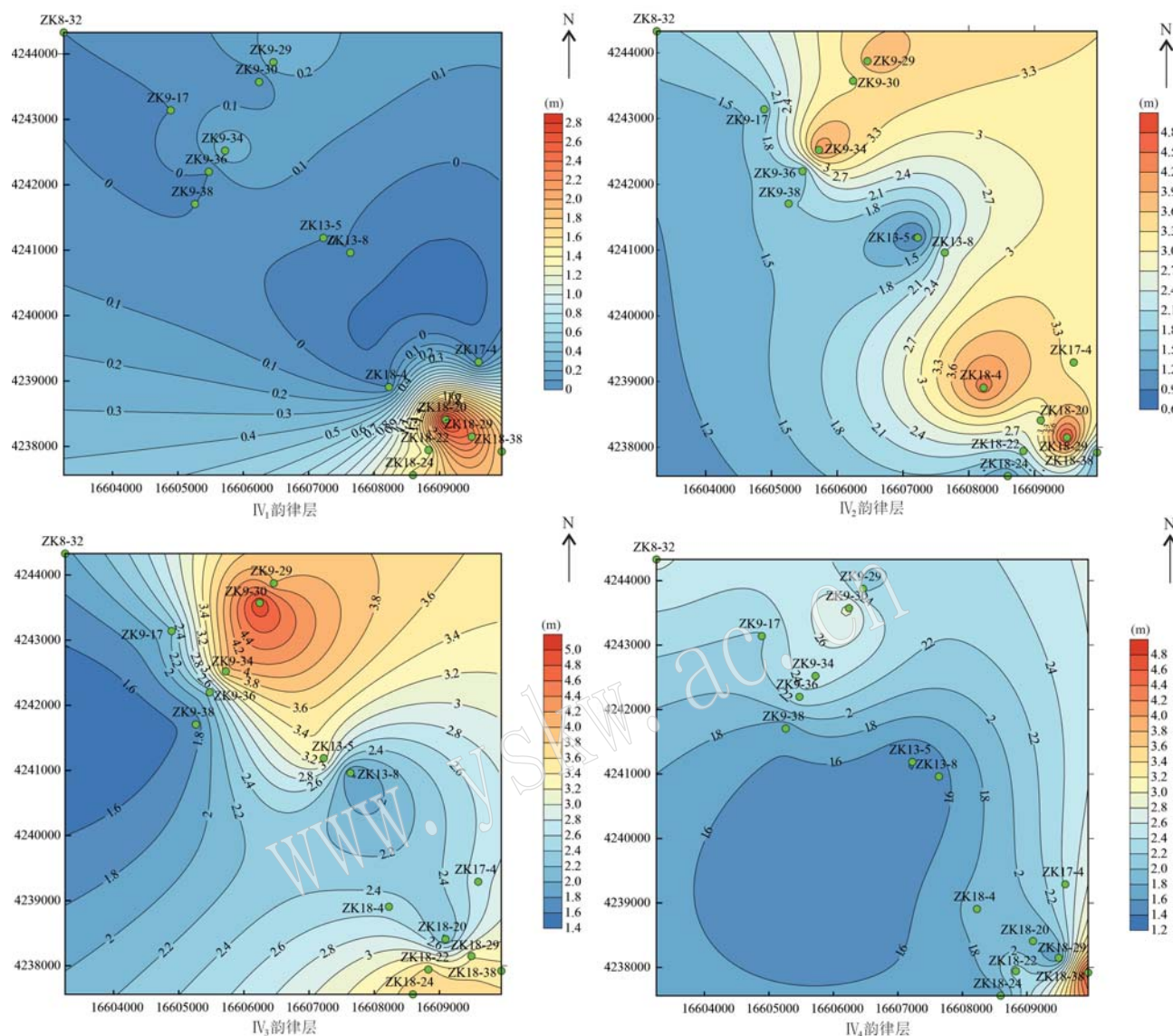


图6 各韵律层盐层厚度等值线图

Fig. 6 Contour map of salt layer thickness of each rhythmic layer

溶剂注入后与深部晶间卤水连通形成优势通道,导致溶剂无法按设计通道在浅部矿层内输送和浸泡,为全新统开展水溶法开采低品位固体钾矿提供了必要条件。

(2) 因受复杂沉积环境的影响,全新世马海盐湖北部矿段马海矿区发育多个不同级次的沉积中心,便于按照沉积和水文单位划分溶采区块进行精细化作业,提高溶矿效率。通过对含盐率的计算可知,马海矿区主要沉积中心位于钻孔 ZK9-34 范围内,次级沉积中心位于 ZK18-38 范围内; IV_2 韵律层含盐率大于 IV_3 韵律层,并且较松散均匀分布,从而增加了溶剂在地层中的渗流速度。

(3) 全新世马海盐湖北部矿段钾盐矿层存在一定的差异性,多以低品位钾盐矿层为主体,其连续性对水溶开采的渗流通道布施起着重要作用,对连通性差的钾矿层加密渠道,应按照沉积韵律特征对溶采工程特别是溶剂渗流渠道进行优化,增加溶剂与固体钾矿的接触面积,提高钾矿溶解速率和溶采工作效率。而针对不同钾盐矿物类型、不同 K^+ 品位的矿体,应采用不同成分溶剂浸泡下的反应机制,揭示其固液转化机理,明确溶剂成分、水量在不同溶采作业区块的调整方向。

由此可见,全新世马海盐湖北部矿段的水溶开采作业受沉积特征的明显控制,研究钾盐储层的沉

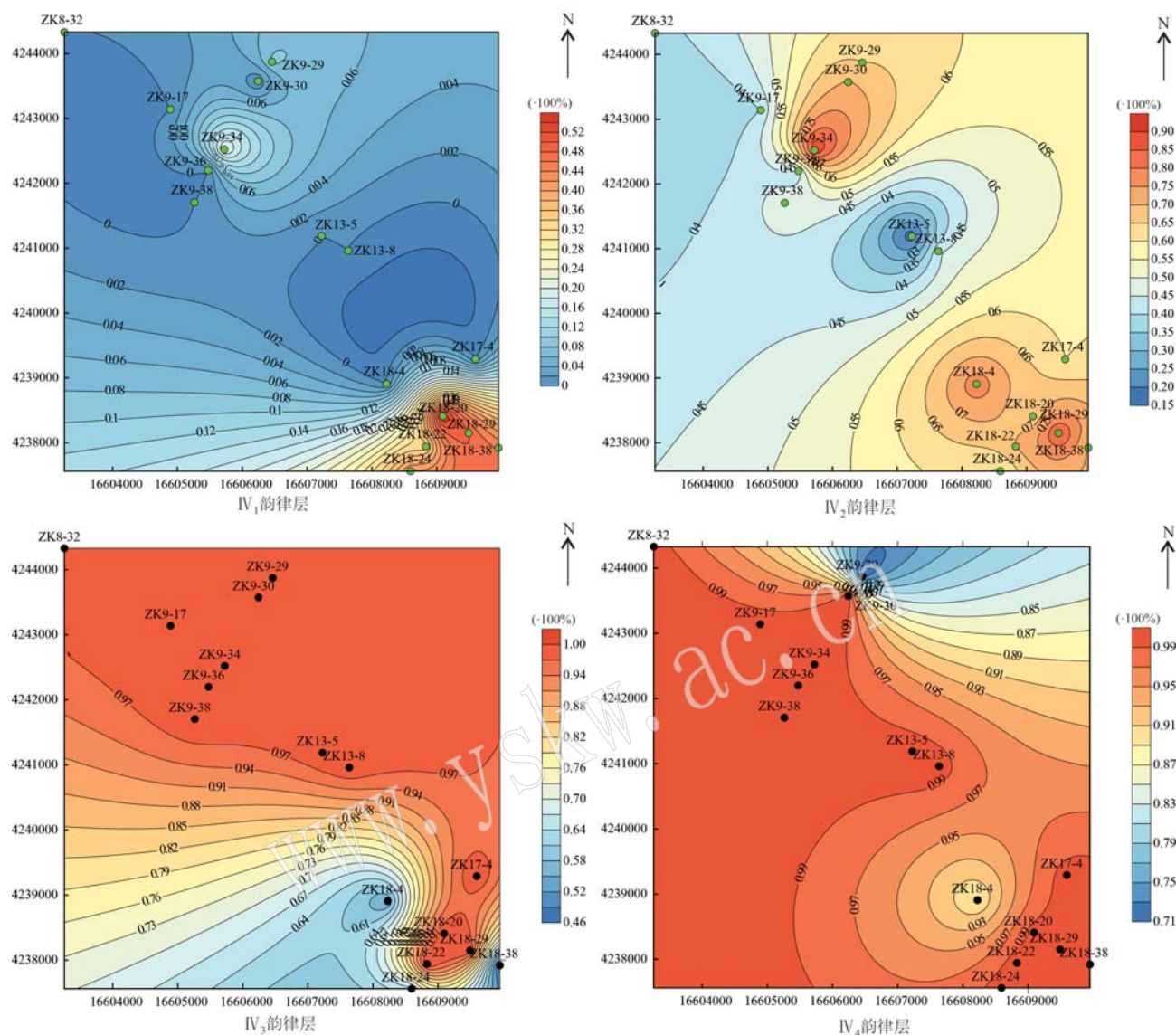


图 7 各韵律层含盐率等值线图

Fig. 7 Contour map of salt content of each rhythmic layer

积特征至关重要。

5 结论

马海盐湖北部矿段全新统底部 IV_1 韵律层和各韵律层之间的分界线主要为粘土或粉砂,这对马海矿区水溶开采工程发挥着至关重要的作用。

全新统各韵律层含盐率在马海矿区表现为沉积中心由东南部向中部迁移,说明了全新世发育多个沉积中心,这对马海矿区区块化水溶开采作业具有重要意义。

矿物学和矿床学研究结果表明,马海盐湖北部

矿段钾盐矿物主要为杂卤石、光卤石、钾石盐,主要分布在浅层 7 m 以上层位。低品位钾盐矿层的分布特点说明了不同品位矿体的分布和矿层连续性具有地域差异,这对马海矿区溶采渠道布措具有指导性意义。

致谢 本文撰写过程得到了中国地质科学院矿产资源研究所刘成林研究员、焦鹏程研究员在盐类矿物鉴定和野外地质调查等方面的指导,中国地质科学院地质研究所施彬工程师对本文样品的能谱扫描电镜测试提供了帮助,青海中航资源有限公司实验室也提供了支持,在此深表感谢。

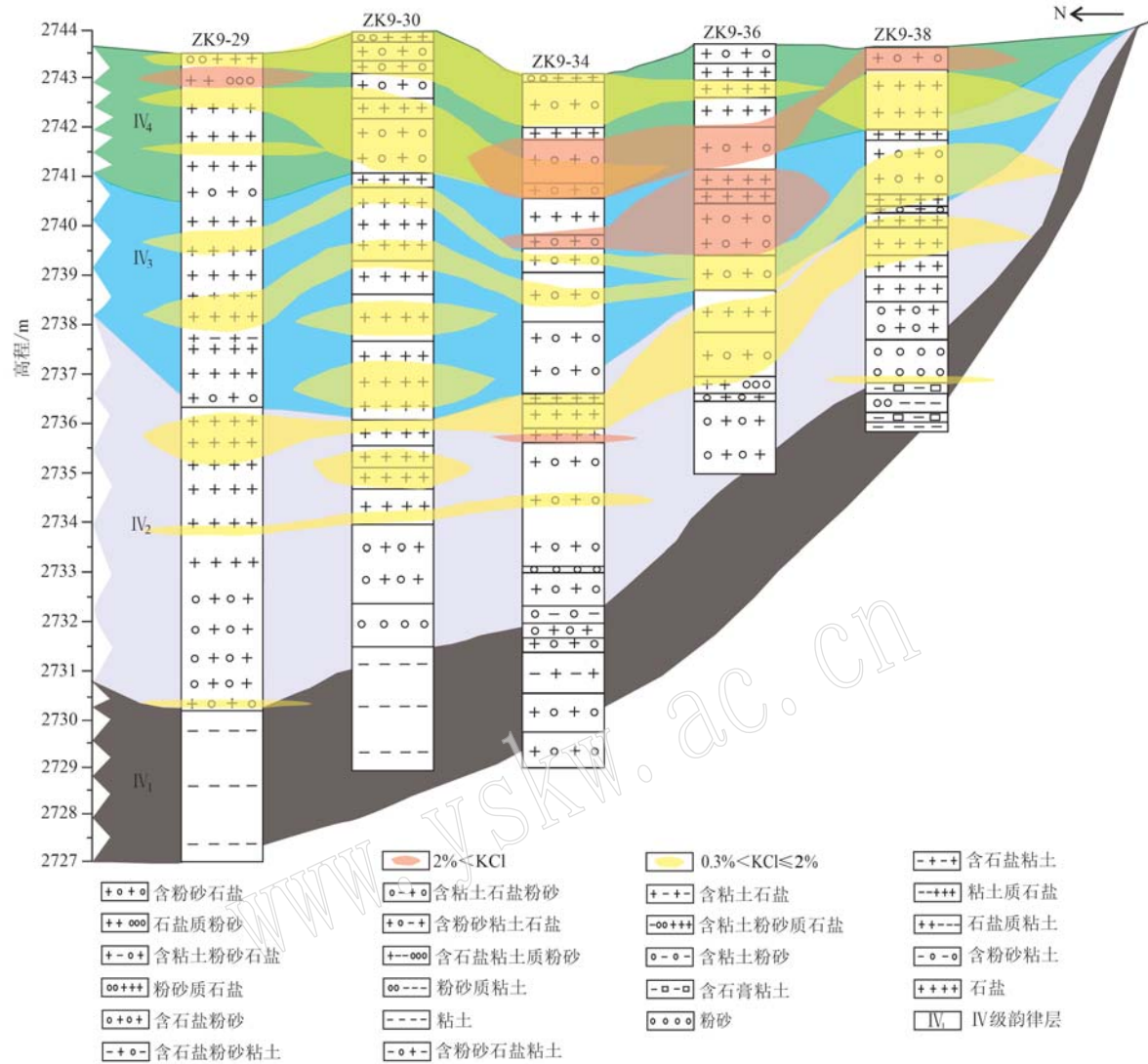


图 8 不同品位钾盐矿层分布特征(据马海矿区资源量统计)

Fig. 8 Distribution characteristics of different grades of potash deposits (according to the statistics of Mahai mining area resources)

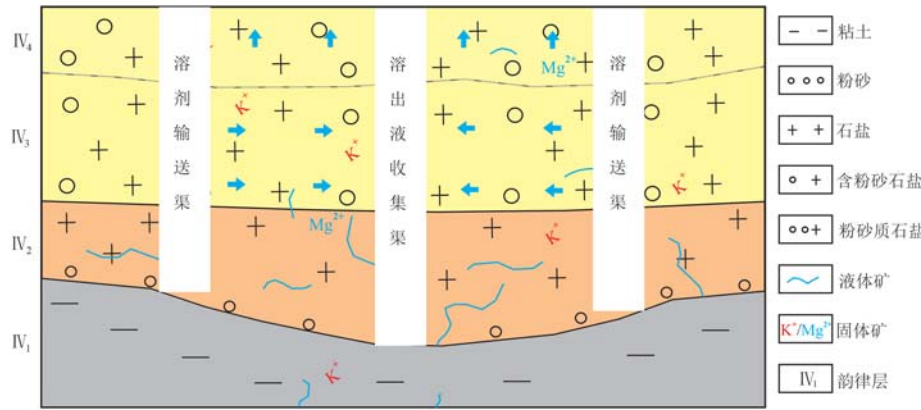


图 9 马海矿区 J_{IV} 矿层侧向渗透驱动溶矿示意图

Fig. 9 Schematic diagram of lateral osmotic driven ore dissolution of seam J_{IV} in Mahai mining area

References

- Bredehoeft J D, Blyth C R, White W A, *et al.* 1963. Possible mechanism for concentration of brines in subsurface formations[J]. AAPG Bulletin, 47 (2): 257~269.
- Gao Xiaofen, Lin Xiao, Zhang Zhiyong, *et al.* 2013. Spatial-temporal distribution characteristics and ore-controlling factors of Quaternary potash deposits on the Tibetan Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 32(1): 186~194(in Chinese).
- He Zhao, Zhang Xiyong, Huang Yuming, *et al.* 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).
- Huang Shucheng. 1994. Geology of Xiaguan rock salt block of Huaian salt deposit and solution mining[J]. Jiangsu Geology, (2): 81~85(in Chinese).
- Jin Zhijun, Zhang Mingli, Tang Liangjie, *et al.* 2004. Evolution of Meso-Cenozoic Qaidam basin and its control on oil and gas[J]. Oil & Gas Geology, (6): 603~608(in Chinese).
- Li Haimin, He Jihui and Hu Shengzhong. 2021. Main methods of development and utilization of low grade surface solid potassium ore in the north section of Mahai salt lake potassium mining area[J]. Journal of Salt Lake Research, 29(3): 1~8(in Chinese).
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2020. The effect of solvent chemistry on potassium dissolution extraction from low-grade solid potash ore in Qarhan Salt Lake, China[J]. Applied Geochemistry, 115.
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Zhao Yanjun, *et al.* 2021. A study of the field experimental liquefaction and exploitation of low-grade solid potassium resource in the Bieletan experimental area, Qinghai Province[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 40(1): 76~88(in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng. 1991. The Model of Dissolving and Driving Exploitation and the Software Development in Oarhan Salt Lake[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Li Ximmeng, Yin Shihui, Zhang Xuran, *et al.* 2019. Mineral facies analysis of low-grade potash ore in Dalangtan Qaidam Basin[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 48(22): 125~126(in Chinese).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng and Wang Mili. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China[J]. Mineral Deposits, 29(4): 581~592(in Chinese).
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, *et al.* 2006. The exploration experiences of potash deposits in the world and probing of countermeasures of China's future potash-deposits investigation[J]. Geology of Chemical Minerals, (1): 1~8(in Chinese).
- Mckelvey J G and Milne I H. 1962. The flow of salt solutions through compacted clay[J]. Clays & Clay Minerals, 9(1): 248~259.
- Pan Xiaochen, Cheng Huaigang and Cheng Fangqin. 2013. Study on stepped high temperature evaporation of dissolved brine in Mahai salt lakes[J]. Inorganic Chemicals Industry, 45(6): 15~18(in Chinese).
- Pan Yulin and Lei Yanzhi. 2006. Conditions of groundwater recharge, runoff, drainage in Balunmahai potash mine area and its water and salt balance budgetary estimation[J]. Industrial Minerals & Processing, (7): 5~7, 24(in Chinese).
- Wang Mili, Yang Zhichen, Liu Chenglin, *et al.* 1997. Potash Deposits and Their Exploitation Prospects of the Saline Lakes of the Northern Qaidam Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Wang Xiao, Jiang Hong and Wang Aili. 2015b. Study on the dissolution kinetics of K^+ , Na^+ in low-grade salt mines [J]. Chemistry, 78(11): 1 049~1 052(in Chinese).
- Wang Xiao, Ju Zhenchuang and Zhang Cong. 2015a. Research into in-expanding experimental dissolving-driving of low grade solid potassium resources[J]. China Mining Magazine, 24(7): 100~103(in Chinese).
- Wang Ying, Zuo Wenzhe and Chen Yongli. 2012. The study on membrane effect on the influence of the solute transport in the process of the salt water flow[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 34(4): 62~64(in Chinese).
- Wang Zhenqiang, Hu Xiumei, Wu Yibei, *et al.* 2010. Sedimentology and evolution of sedimentary facies for the Cenozoic in the Mahai region on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sichuan, 30(2): 129~131(in Chinese).
- 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).
- Wei Xinjun, Shao Changduo and Wang Mili. 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).

- Xiang Yangxu, Lou Huajun, Zhang Zheng, *et al.* 2015. Variations of annual average temperature and precipitation in the Mahai Basin in recent 40 years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 13(6): 1 040~1 044(in Chinese).
- Zheng Mianping, Hou Xianhua, Yu Changqing, *et al.* 2015. The leading role of salt formation theory in the breakthrough and important progress in potash deposit prospecting[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2): 129~139(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 高小芬, 林 晓, 张智勇, 等. 2013. 青藏高原第四纪钾盐矿时空分布特征及成矿控制因素[J]. *地质通报*, 32(1): 186~194.
- 何 照, 张西营, 黄聿铭, 等. 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.
- 黄书城. 1994. 淮安盐矿下关矿区岩盐矿床地质特征与水溶开采[J]. *江苏地质*, (2): 81~85.
- 金之钧, 张明利, 汤良杰, 等. 2004. 柴达木中生代盆地演化及其控油气作用[J]. *石油与天然气地质*, (6): 603~608.
- 李海民, 何继辉, 胡生忠. 2021. 马海盐湖钾矿区北部矿段低品位地表固体钾矿开发利用主要方法[J]. *盐湖研究*, 29(3): 1~8.
- 李瑞琴, 刘成林, 赵艳军, 等. 2021. 青海别勒滩试验区低品位固体钾盐液化开采的野外实验研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 40(1): 76~88.
- 李文鹏. 1991. 察尔汗盐湖溶矿驱动开采模型及其软件开发[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 李欣萌, 尹诗惠, 张旭冉, 等. 2019. 柴达木盆地大浪滩低品位钾盐矿物相分析[J]. *山东化工*, 48(22): 125~126.
- 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, 等. 2006. 世界主要古代钾盐找矿实践与中国找钾对策[J]. *化工矿产地质*, (1): 1~8.
- 潘晓晨, 成怀刚, 程芳琴. 2013. 马海盐湖溶采卤水高温梯级蒸发实验研究[J]. *磷肥与复肥*, 45(6): 15~18.
- 潘玉麟, 雷延智. 2006. 巴仑马海钾矿区地下水的补给、径流、排泄条件分析及水盐均衡概算[J]. *化工矿物与加工*, (7): 5~7, 24.
- 王 晓, 姜 虹, 王爱丽. 2015b. 低品位盐矿中 K^+ 、 Na^+ 的溶解动力学研究[J]. *化学通报*, 78(11): 1 049~1 052.
- 王 晓, 据振闯, 张 聪. 2015a. 低品位固体钾矿驱动溶解开采扩大试验研究[J]. *中国矿业*, 24(7): 100~103.
- 王 英, 左文喆, 陈永理. 2012. 咸水越流中膜效应对溶质运移的影响[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 34(4): 62~64.
- 王弭力, 杨智琛, 刘成林, 等. 1997. 柴达木盆地北部盐湖钾盐矿床及其开发前景[M]. 北京: 地质出版社.
- 王振强, 胡秀梅, 吴义北, 等. 2010. 柴北缘马海地区新生界沉积特征与沉积相演化[J]. *四川地质学报*, 30(2): 129~131.
- 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.
- 项洋旭, 娄华君, 张 征, 等. 2015. 马海盆地近 40 年以来气温、降水演变规律[J]. *南水北调与水利科技*, 13(6): 1 040~1 044.
- 郑绵平, 侯献华, 于常青, 等. 2015. 成盐理论引领我国找钾取得重要进展[J]. *地球学报*, 36(2): 129~139.