

· 战略性非金属矿产 ·

# 罗布泊盐湖罗北凹地杂卤石沉积、分布特征及成因分析

马宝成<sup>1,2</sup>, 张 华<sup>1</sup>, 颜 辉<sup>2</sup>, 焦鹏程<sup>1</sup>, 刘成林<sup>1</sup>, 杨玉明<sup>2</sup>, 赵 芝<sup>1</sup>, 赵亮亮<sup>2</sup>,  
李东星<sup>2</sup>, 尹慧晶<sup>1,3</sup>, 袁 苗<sup>1,4</sup>, 张凡凯<sup>2</sup>, 于咏梅<sup>2</sup>, 李文学<sup>2</sup>, 王 江<sup>2</sup>, 王露莎<sup>2</sup>

(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. 国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司, 新疆 哈密 839000; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 东华理工大学, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 采用岩石薄片鉴定、X射线衍射分析、扫描电镜以及元素地球化学等分析测试手段, 对罗布泊盐湖罗北凹地杂卤石的沉积和分布特征进行了研究。结果显示, 罗北凹地杂卤石主要发育于含盐系中上部, 或以质地较纯的层状杂卤石岩产出, 或与钙芒硝/石盐/白钠镁矾共同产出。杂卤石有交代和原生两种成因类型: 前者是罗北凹地杂卤石产出的主要类型, 是罗布泊硫酸盐型盐湖自身蒸发析出产物, 在盐湖演化中后期交代钙芒硝或者石膏形成; 后者可能为富钙卤水补给富钾镁盐湖形成。罗北凹地杂卤石的分布具有在南北方向上南厚北薄、在东西方向上中间厚两侧薄的特点, 对应的 KCl 含量也同样具有南高北低、中间高两侧低的特点, 它们的分布特征明显受控于区域构造活动, 构造导致的沉降区有利于杂卤石聚集成矿。本区杂卤石矿埋藏浅、规模较大, 可作为后备钾盐资源。

**关键词:** 杂卤石; 钾盐; 盐湖; 罗布泊

中图分类号: P578.7<sup>3</sup>; P619.21<sup>1</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)05-0679-12

## The sedimentary, distribution and genesis analysis of polyhalite in the Luobei Sag of Lop Nur Salt Lake

MA Bao-cheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>, YAN Hui<sup>2</sup>, JIAO Peng-cheng<sup>1</sup>, LIU Cheng-lin<sup>1</sup>, YANG Yu-ming<sup>2</sup>,  
ZHAO Zhi<sup>1</sup>, ZHAO Liang-liang<sup>2</sup>, LI Dong-xing<sup>2</sup>, YIN Hui-jing<sup>1,3</sup>, YUAN Miao<sup>1,4</sup>, ZHANG Fan-kai<sup>2</sup>,  
YU Yong-mei<sup>2</sup>, LI Wen-xue<sup>2</sup>, WANG Jiang<sup>2</sup> and WANG Lu-sha<sup>2</sup>

(1. Ministry of Natural Resources Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Xin Jiang Luobupo Potash Co., LTD, State Development and Investment Corporation, Hami 839000, China; 3. China university of geoscience, Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory of Nuclear Resource and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The sedimentary and distribution characteristics of polyhalite in the Luobei Sag of Lop Nur Salt Lake were studied using section identification, XRD, SEM, and elemental geochemistry. The results show that polyhalite in the Luobei Sag mainly develops in the middle-upper part of the salt-bearing series. It occurs as either pure-layered polyhalite rocks or in association with glauberite, halite or blodite. There are two origin of polyhalite: replaced and primary. The former is the main type in the Luobei Sag and formed through evaporation of the Lop Nur sulfate

收稿日期: 2023-06-19; 接受日期: 2023-08-08; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41972092); 第三次新疆综合科学考察项目课题(2022xjkk1303); 国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司科技项目

作者简介: 马宝成(1991-), 工程师, 主要从事盐类矿床勘探开发, E-mail: mabaocheng\_mbc@163.com; 通讯作者: 张 华(1985-), 男, 副研究员, 主要从事盐湖及盐类矿产研究, E-mail: zhanghuaeduct@sina.com。

salt-type salt lake during the middle and later stages of evolution, with replacement of glauberite or gypsum. The latter may be formed by the enrichment of potassium-magnesium salts due to the supply of calcium-rich brine. The distribution of polyhalite in the Luobei Sag shows a characteristic of thicker in the south and thinner in the north in the south-north direction, and thicker in the middle and thinner on both sides in the east-west direction. The corresponding KCl content also present a similar pattern with higher values in the southern and middle parts, and lower values in the northern and on both sides. These distribution characteristics are clearly controlled by regional tectonic activity, where tectonic-induced subsidence areas are favorable for polyhalite accumulation and mineralization. The shallow burial and large scale of polyhalite deposits in this area make them a potential reserve of potassium salt resources.

**Key words:** polyhalite; potash; salt lake; Lop Nur

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (41972092); The Third Xinjiang Scientific Expedition Program (2022xjkk1303); Scientific and Technological Project of SDIC, Xin Jiang Luobupo Potash Co., LTD

我国是农业和人口大国,粮食是立国之本。钾肥是“粮食中的粮食”,在保障国家粮食生产安全中具有重要的作用。罗布泊是全球最大的干盐湖之一,蕴藏着丰富的盐类矿产资源。自1995年发现罗北凹地浅部超大型卤水钾盐矿床以来(王弭力等,1996,2001),后续勘查研究在罗北凹地外围及深部也发现卤水钾盐资源(刘成林,2003;焦鹏程等,2014,2018;张华等,2021)。目前,随着国家的开发建设,罗布泊已成为世界最大的单体硫酸钾生产基地,极大地缓解了我国钾肥资源严重紧缺的状况,在促进地方经济发展、保障国家粮食安全方面发挥了重要作用。

目前罗布泊盐湖主要开采利用的钾盐资源为罗北凹地浅部(<100 m)卤水,但随着近15年的大规模开采,罗布泊盐湖浅部卤水资源锐减,严重威胁罗布泊钾肥基地的可持续发展,寻找新区域、新层位、新类型的后备钾盐资源是当前亟待解决的重要问题。目前,关于罗布泊盐湖区钾盐成矿理论研究和找矿勘查工作主要集中于钙芒硝岩及其晶间赋存的卤水钾盐资源(王弭力等,1996,1998,2001;刘成林等,1999,2009,2010,2018;赵海彤等,2014;Liu *et al.*, 2006, 2015; Li *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021)。与卤水钾盐资源相比,罗布泊以及其他第四纪盐湖固体钾盐资源受关注较少(Peryt *et al.*, 1998, 2005;刘成林等,2008;李瑞琴等,2021;王朝旭等,2022)。一方面,这些第四纪盐湖中固体钾盐资源埋藏浅、易开采,可作为后备资源,在维持矿山可持续发展、巩固罗布泊钾盐基地地位等方面仍具有重要作用;另一方面,该区第四纪盐湖固体钾盐

成因的研究,对我国其他盐湖甚至古代含盐盆地钾盐找矿具有重要指导意义。

本文借助国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司新近实施的勘探工程,在钻孔编录、岩矿鉴定和地球化学测试分析的基础上,对罗北凹地浅部杂卤石沉积特征、成因进行了归纳总结,以期为该区后续固体钾盐勘查提供理论依据和数据支撑。

## 1 区域地质

罗布泊位于我国新疆塔里木盆地东端,是世界上最大的第四纪干盐湖之一。构造上,罗布泊位于塔里木地块、阿尔金构造带和北山褶皱带的交汇处。重力、地震等物探资料显示,罗布泊地区具有东南部高、西北部低的特点,呈一南高北低的斜坡形态(孟贵祥等,2010)。受控于印度-欧亚碰撞的远程效应,晚新生代以来罗布泊经历了多期构造活动,并对盆地成盐成钾产生了深远影响。一方面,塔里木盆地构造反转,导致盆地东部的罗布泊地区在上新世末期成为最低洼地区,接受了塔里木河流域丰富的物质补给(Liu *et al.*, 2015;吕凤琳等,2015,2018;Lü *et al.*, 2021)。另一方面,晚更新世罗布泊地区发生构造分异,统一的罗布泊古湖分为南部大耳朵湖区和北部罗北凹地等多个次级凹地,同时发育一系列北北东向的断陷带(图1),为成钾物质的储集和运移提供了场所(王弭力等,2001;Liu *et al.*, 2006;刘成林等,2008,2009;Zhang *et al.*, 2021)。晚更新世以来,罗北凹地作为罗布泊盐湖北部抬升区内的凹陷之一,其基底向北倾斜,与整体凹陷的抬

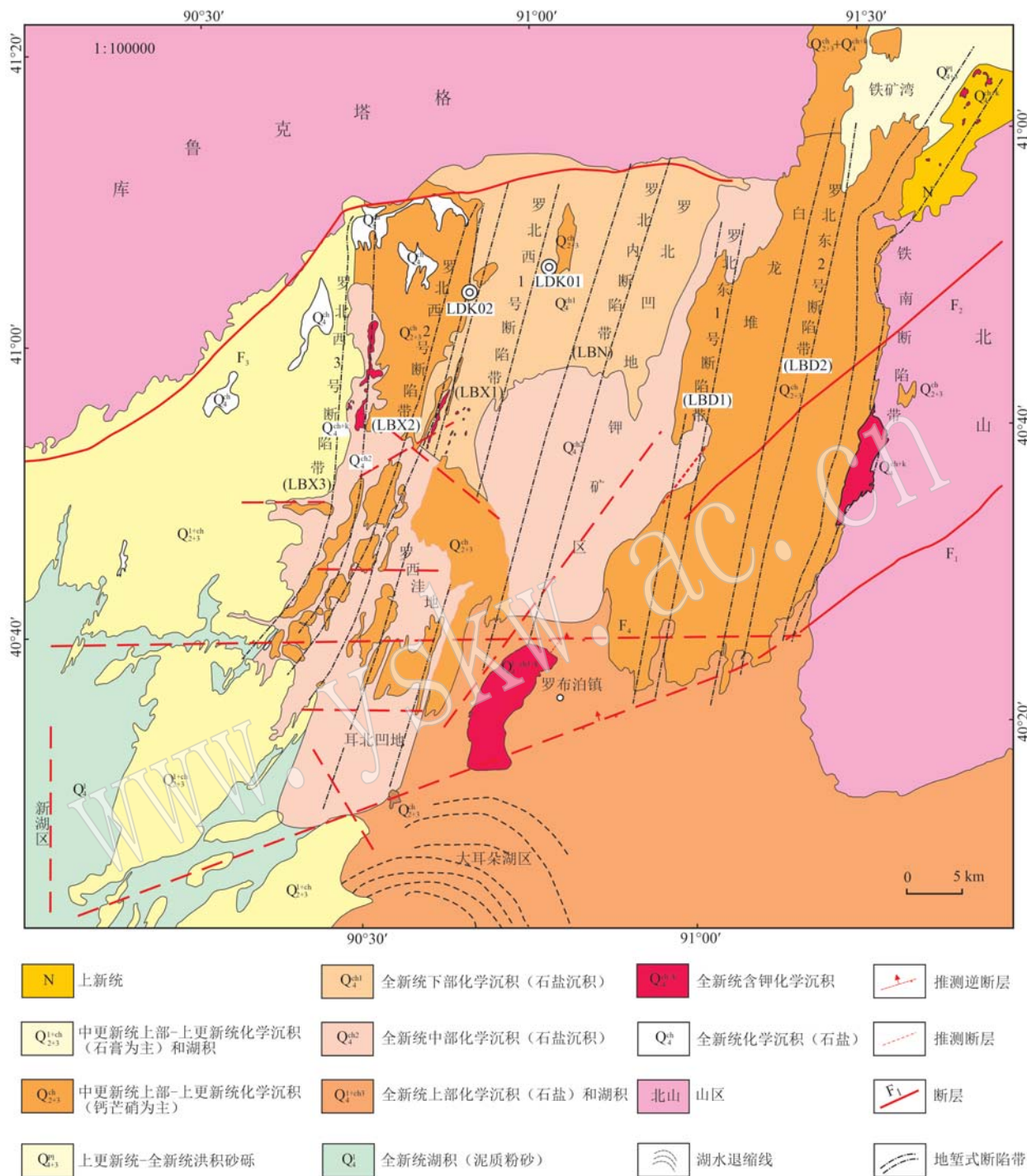


图1 罗布泊盐湖区地质简图(据刘成林,2003)

Fig. 1 Schematic geological map of Lop Nur Salt Lake(after Liu Chenglin, 2003)

升地势倾斜方向正好相反,并持续沉降(王弭力等, 2001),在其南部与大耳朵湖之间形成一隆起区,更有利于罗北凹地封闭的钾盐聚集构造空间的形成(刘成林等, 2018)。

## 2 材料与方法

对罗北凹地新近的25口勘探孔(图2)进行了



观察编录,其中含杂卤石钻孔 22 口。在此基础上,采用岩石薄片鉴定、多晶 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜及能谱以及元素地球化学分析方法,对不同钻孔、不同层位的杂卤石进行了镜下现象观察和可溶钾含量分析。XRD 和元素地球化学分析在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完成。先将样品粉碎至 200 目,采用正压法制样,然后进行 XRD 测试,测试仪器为布鲁克 D8 Discovery、 $\theta/\theta$  立式测角仪,LYNXEYE\_XE\_T (1D mode) 一维探测器,铜靶,分析软件为 MID JADE 8.6 版,数据库为 PDF-4+2023 版本,测试电流 40.0 mA,电压 40.0 kV,扫描范围( $2\theta$ ) $2^{\circ}\sim 70^{\circ}$ ,扫描步长  $0.02^{\circ}$ ,每步扫描时间 0.25 s。样品粉碎至 200 目,采用水溶法处理后,再采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry, ICP-OES)进行可溶盐组分分析,仪器型号为德国斯派克 SPECTRO ARCOS SOP。扫描电镜及能谱分析在中国地质科学院地质研究所自然资源部大陆动力学重点实验室完成,仪器为 FEI NOVA NanoSEM 450 以及 OXFORD X-Max( $50\text{ mm}^2$ )。

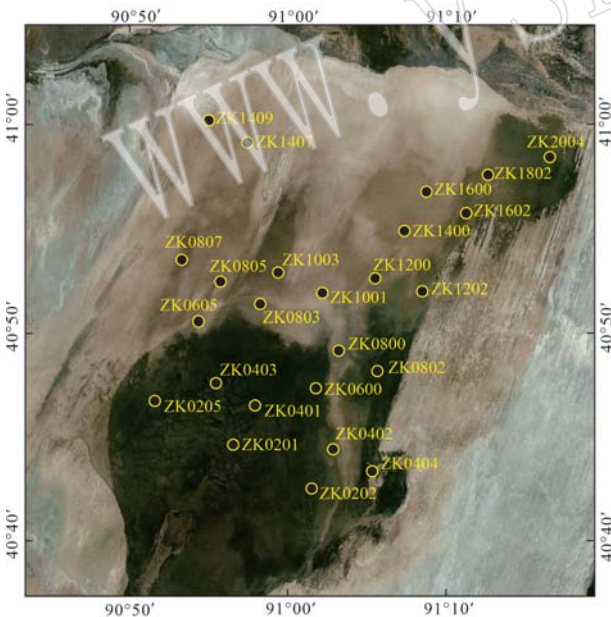


图 2 罗北凹地钻孔分布图

Fig. 2 Distribution of related cores in Luobei Sag

### 3 杂卤石沉积特征

#### 3.1 赋存形式

罗北凹地杂卤石的赋存形式主要有 3 种: ① 杂卤石岩。杂卤石含量超过 90%, 部分杂卤石可因层

内发育少量石盐、钙芒硝等, 形成含石盐或者含钙芒硝杂卤石岩。该类杂卤石通常以层状、似层状的形式产出于钙芒硝岩/石盐岩之间, 单层厚度小于 5 cm。杂卤石层或连续发育(层状), 或以近水平脉状(似层状)产出(图 3a), 层面通常近于水平, 部分发生弯曲(图 3b)。② 含钙芒硝/石盐/白钠镁矾(质)的杂卤石岩。杂卤石含量为 50%~90%, 依据杂卤石含量可进一步划分为含钙芒硝/石盐/白钠镁矾/黏土杂卤石岩, 或者钙芒硝/石盐/白钠镁矾/黏土质杂卤石岩。该类杂卤石多以隐晶质形式呈分散状与钙芒硝等盐类矿物共生(图 3c), 或充填于钙芒硝等盐类矿物晶间, 或交代钙芒硝等产出。③ 含杂卤石(质)的钙芒硝/石盐/白钠镁矾岩。杂卤石为次要组分, 含量占 10%~50%, 依据杂卤石含量进一步划分为含杂卤石钙芒硝/石盐/白钠镁矾岩、杂卤石质钙芒硝/石盐/白钠镁矾岩等(图 3d)。相应的杂卤石含量也因赋存形式的不同而发生变化(图 4)。

#### 3.2 产出形态

罗北凹地浅部杂卤石产出形态多样。杂卤石单晶多呈纤维状、板状、片状(图 5a、5b); 集合体多呈花瓣状交代石膏或者钙芒硝产出(图 5c、5d), 或呈放射状、绒球状产出于钙芒硝、白钠镁矾或者石盐晶间(图 5e、5f)。

## 4 杂卤石分布特征

#### 4.1 杂卤石顶板

罗北凹地杂卤石顶板埋藏深度范围为 7.85~23.45 m, 平均埋深为 13.63 m, 最浅者为钻井 ZK0202, 最深者为 ZK2004。从顶板埋深分布来看(图 6), 罗北凹地南(ZK0205)、北(ZK2004)两侧顶板埋深较大, 至中部具有两个明显的中心, 即 ZK1400-ZK1600 以及 ZK0600-ZK0605-ZK0807-ZK1003-ZK1001-ZK0802 围限的区域。

#### 4.2 杂卤石底板

罗北凹地中浅部杂卤石底板埋藏深度范围为 12.62~36.95 m, 平均埋深 22.24 m, 埋深最浅位于钻井 ZK0202, 最深位于 ZK0800。从底板埋藏深度分布来看(图 7), 除罗北凹地东北部次级洼地内 ZK2004 钻井底板埋深较大外, 在罗北凹地内部底板埋深较大区域主要位于罗北凹地南部区, 对应 ZK0600-ZK0605-ZK0807-ZK0802 之间的区域。北东-南西方向上, 埋深最大的 ZK0600-ZK0800 和 ZK1400-



图 3 罗北凹地浅部杂卤石赋存类型

Fig. 3 Occurrence types of polyhalite in shallow Luobei Sag

a—乳白色条带状杂卤石岩, 钻孔 ZK1400, 15.46 m; b—乳白色似层状杂卤石岩, 钻孔 ZK1400, 19.46 m; c—钙芒硝质(灰色)杂卤石岩, 钻孔 ZK1600, 20.88 m; d—含杂卤石和石盐的白钠镁矾岩, 钻孔 ZK1802, 21 m  
 a—milk white banded polyhalite, core ZK1400, 15.46 m; b—milk white para-bedded polyhalite disturbed by glauberites, core ZK1400, 19.46 m; c—glauberite (grey) -bearing polyhalite (milk white), core ZK1600, 20.88 m; d—polyhalite- and halite-bearing bloedite, core ZK1802, 21 m

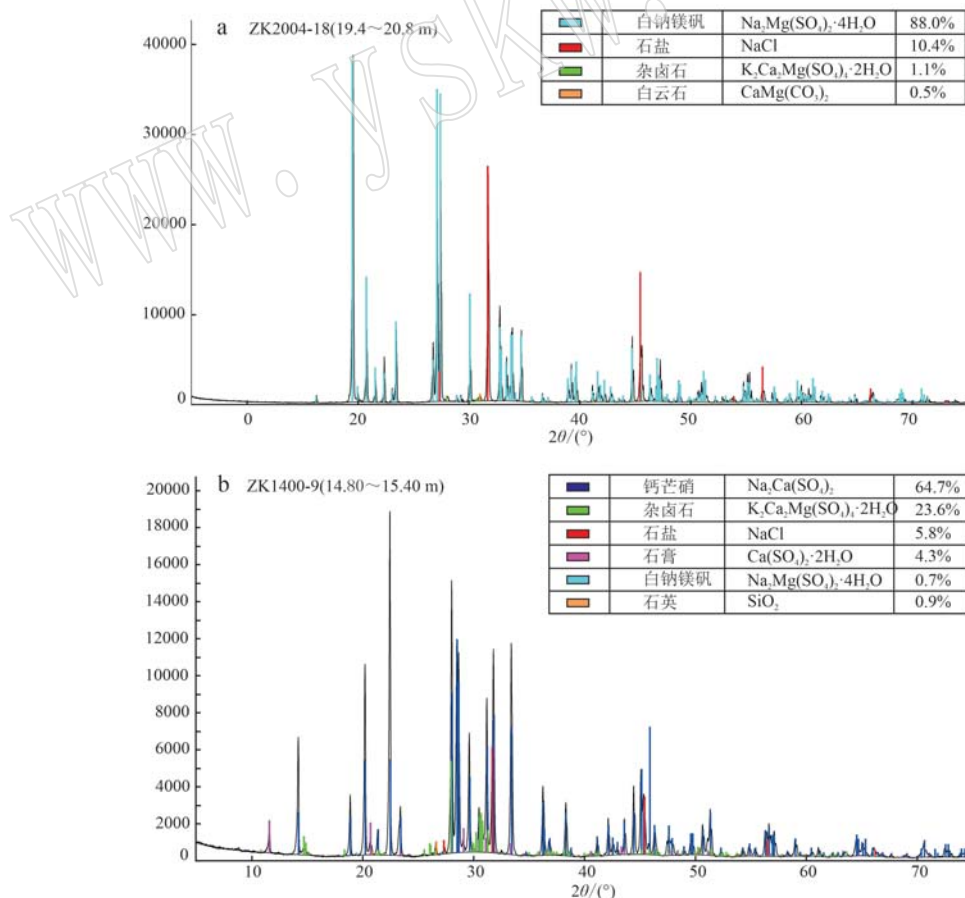


图 4 样品 ZK2004-18(19.40~20.80 m) (a) 和 ZK1400-9(14.80~15.40 m) (b) 的 XRD 衍射图谱及成分组成  
 Fig. 4 XRD diffraction patterns and compositions of sample ZK2004-18(19.40~20.80 m) (a) and sample ZK1400-9 (14.80~15.40 m) (b)



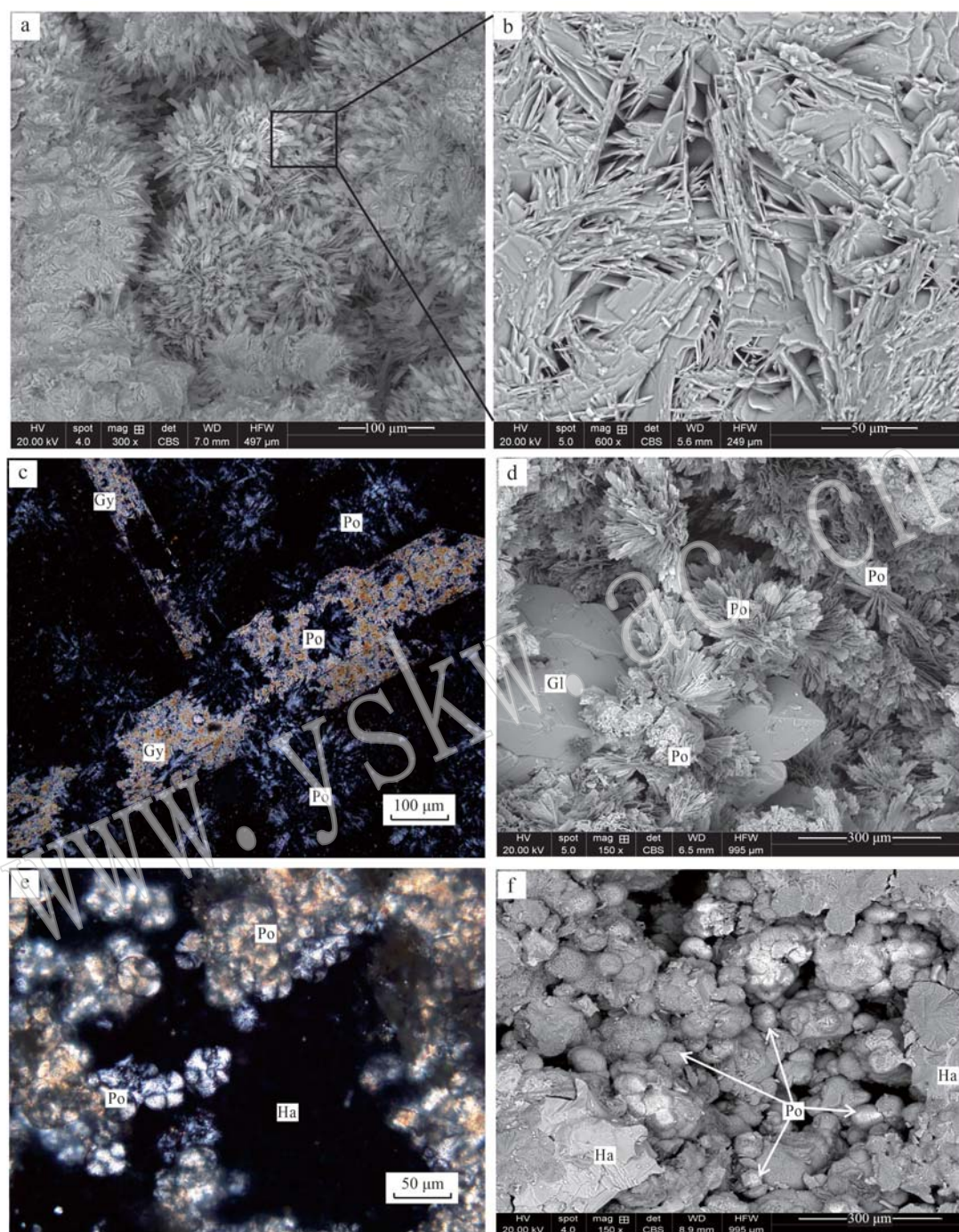


图5 杂卤石样品的显微照片

Fig. 5 Microphotographs of polyhalite samples

a—片状杂卤石单晶, ZK0401, 12.46 m, SEM; b—a的局部放大; c—杂卤石(Po)交代石膏(Gy), 正交偏光; d—杂卤石(Po)交代钙芒硝(Gl), SEM; e—产于石盐(Ha)晶间的放射状杂卤石集合体(Po), 正交偏光; f—产于石盐(Ha)晶间的绒球状杂卤石集合体, SEM  
a—polyhalite tabular crystal, ZK0401, 12.46 m, SEM; b—detail view of a; c—gypsum (Gy) was replaced by polyhalite (Po), crossed polarized light; d—glauberite (Gl) was replaced by polyhalite, SEM; e—radial polyhalite aggregates produced among halite (Ha) crystals, crossed polarized light; f—ball shape of polyhalite aggregate produced among halite (Ha) crystals, SEM

ZK1600 区域有沿北东方向呈串珠状展布的趋势。

### 4.3 杂卤石厚度

罗北凹地浅部杂卤石累计厚度范围为 0.45 ~

11.54 m, 平均厚度为 5.59 m。最厚者出现在钻井 ZK0401, 钻井 ZK0205 中杂卤石层厚度最小(图 8)。从杂卤石厚度分布来看, 具有典型的南厚北薄的特点; 大致

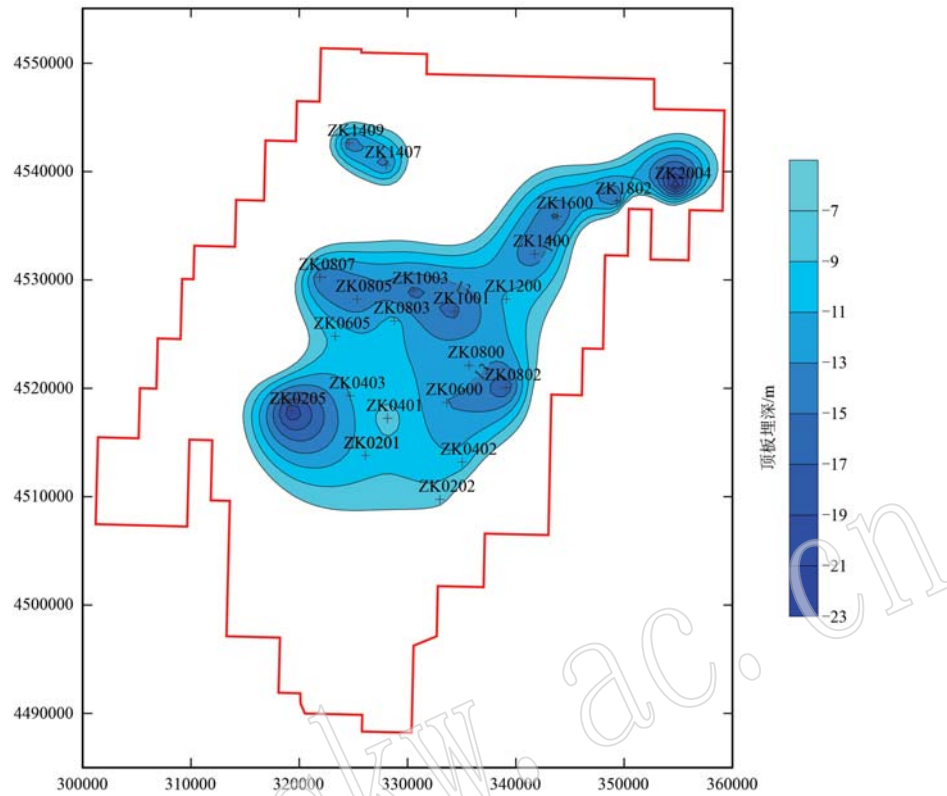


图 6 罗北凹地杂卤石层顶板埋深等值线图  
Fig. 6 Contour map of roof depth of polyhalite in Luobei Sag

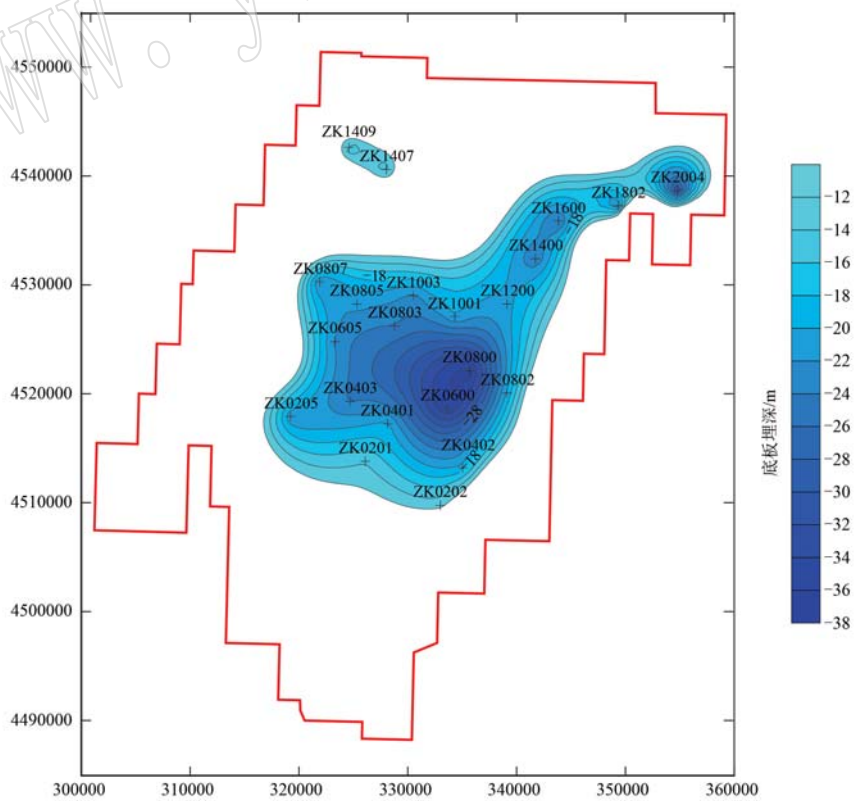


图 7 罗北凹地杂卤石层底板埋深等值线图  
Fig. 7 Contour map of floor depth of polyhalite in Luobei Sag

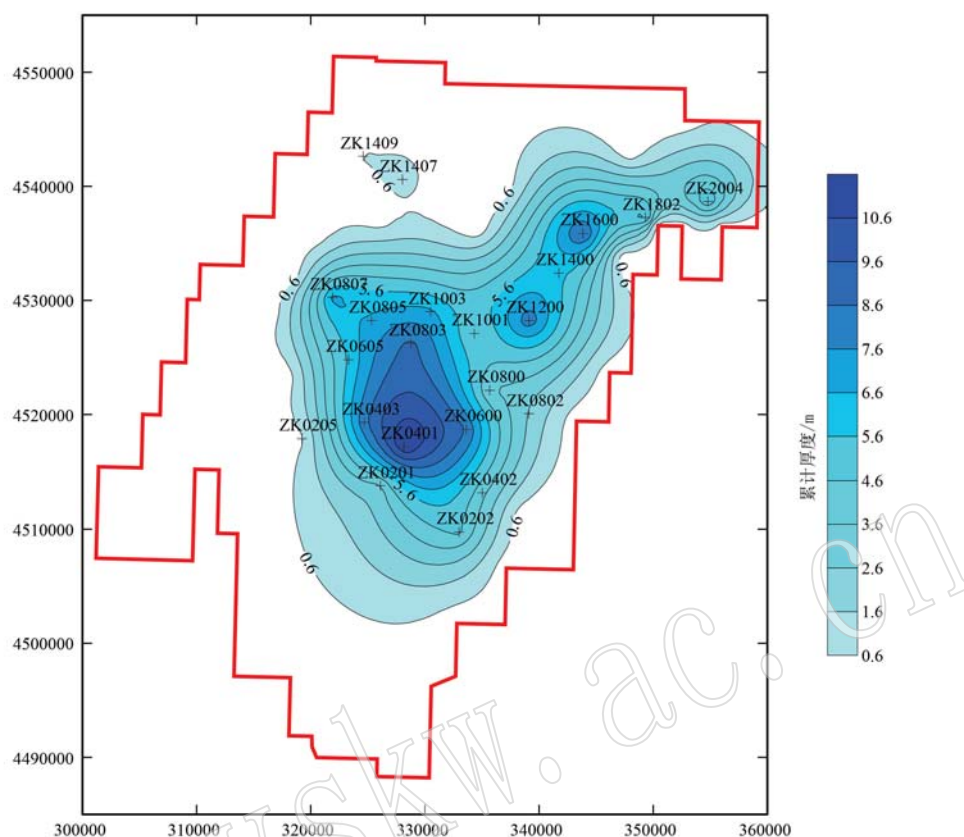


图8 罗北凹地杂卤石层累计厚度等值线图

Fig. 8 Contour map of accumulated thickness of polyhalite in Luobei Sag

以 ZK1001-ZK1003 连线为界,北部杂卤石累计厚度仅在局部地区较大,具有分散分布的特点;南部杂卤石厚度普遍较大,尤以 ZK0401 与 ZK0803 之间的区域为最大。

#### 4.4 杂卤石 KCl 含量

采用单个钻孔内所有杂卤石样品 KCl 含量与其各样铅直厚度加权平均值作为该钻孔平均 KCl 含量。从 KCl 含量分布来看(图 9),具有南北分段的特点,大致以 ZK10 勘探线为界,北部钻孔 KCl 含量普遍偏低,且 KCl 高值中心较为分散,以 ZK1200、ZK1600 以及 ZK2004 为代表。南部钻孔 KCl 含量普遍较高,高值区集中在 ZK04 至 ZK08 勘探线之间,钻井 ZK0803 具有最高 KCl 含量。基于 22 口钻孔中杂卤石层段 KCl 含量分析统计,初步估算罗北凹地浅部杂卤石层段 KCl 资源量达 1 000 万吨以上(KCl  $\geq 0.5\%$ ),属于大型资源规模。

## 5 讨论

### 5.1 杂卤石成因分析

罗北凹地杂卤石可分为交代和原生两种成因类

型。前者是由于钙芒硝大量析出,残余卤水中钾、镁等元素快速富集,破坏古湖水原有的水化学平衡,朝着杂卤石结晶相区发展,出现杂卤石交代钙芒硝和石膏的现象(袁见齐等,1984;刘成林等,2008)。这种盐湖富钾镁卤水交代钙的硫酸盐形成的杂卤石是罗北凹地杂卤石主要类型,这也是其他含盐盆地最为普遍的现象(Eugster *et al.*, 1980; Harvie and Weare, 1980; Harvie *et al.*, 1980, 1982)。

罗北凹地内另一种杂卤石为原生成因,常以较纯的杂卤石岩薄层产出,或产于钙芒硝、白钠镁矾或石盐晶间。由于罗布泊古盐湖中石膏或者钙芒硝的析出,导致古卤水中的钙离子几乎消耗殆尽。一方面,周缘淡水输入会带来一定量的钙源,与残余的富钾、镁卤水反应形成钙芒硝等晶间杂卤石沉积。室内蒸发实验结果同样表明,形成杂卤石的卤水不一定是饱和钾、镁盐的浓缩卤水,其在稀释一倍的条件仍可以析出杂卤石,这种沉积作用可从石盐沉积的中后期一直延续到钾镁盐析出阶段(韩蔚田等, 1982)。另一方面,新近的研究发现罗布泊盐湖深部



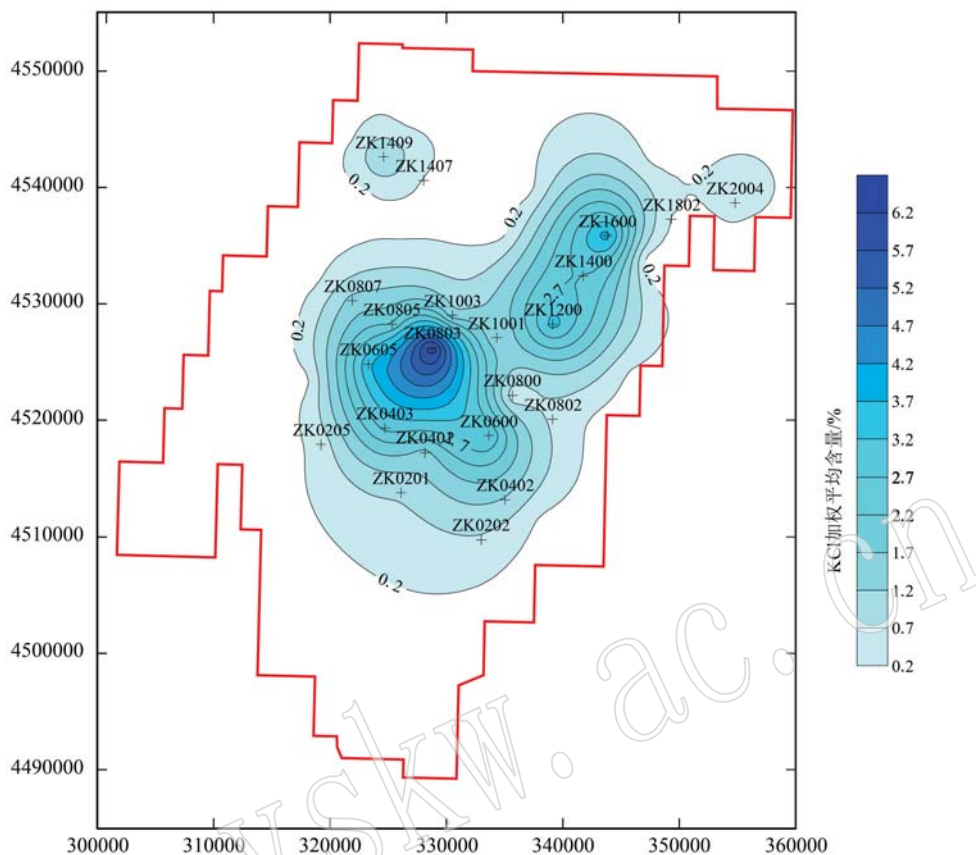


图9 罗北凹地杂卤石层平均KCl含量等值线图

Fig. 9 Contour map of average KCl content of polyhalite in Luobei Sag

赋存有氯化钙型卤水 (Zhang *et al.*, 2021)。在晚第四纪构造活动时期,深部氯化钙型卤水可沿活化的断裂补给富钾镁盐湖,从而为杂卤石的形成提供钙源。目前,关于深部富钙流体补给盐湖形成的杂卤石报道较少,其成因机理值得进一步探索。

此外,对杂卤石形成的物理化学条件研究表明 (韩蔚田等, 1982; 何法明等, 1988), 杂卤石形成温度不低于 13℃, 且温度越高越有利于杂卤石析出。罗北凹地杂卤石产出层段大致相同, 显示了这一时期可能具有普遍高温的气候背景条件。对杂卤石产出对应层段石盐层的年龄以及流体包裹体均一温度研究表明, 该层段大致时代为距今 19~11 ka (Lü *et al.*, 2018), 期间间隔仅 8 千年, 这期间罗布泊地区大气温度达到 37.9~45.3℃ (Sun *et al.*, 2017)。前述研究揭示的罗北凹地中浅部存在多个蒸发沉积旋回, 显示了这一时期虽然气候总体干旱, 但仍具有波动、振荡的特点。这种多期次的咸化-淡化过程, 为该区钾盐成矿积累了大量的成钾物质, 在后期气候变得极端干热情况下, 湖水快速蒸发浓缩, 导致钾大

量富集。因此, 罗北凹地杂卤石的形成进一步说明, “钾盐成矿并不一定需要长期稳定的气候背景” (刘成林等, 2018), 当构造-物源-气候成钾要素满足时, 短时间可以导致钾盐大规模聚集、成矿, 该成钾过程可称为“多期积累, 晚期爆发成矿” (Liu *et al.*, 2015)。

## 5.2 杂卤石分布控制因素

罗北凹地中浅部杂卤石具有在南北方向上南厚北薄、在东西方向上中间厚两侧薄的特点。在杂卤石底板埋深上同样具有南深北浅以及中间深两侧浅的特点。

遥感地质和构造解译结果表明, 罗布泊盐湖区具有“一隆两凹”的格局, 即大耳朵北部存在一隆起区分隔大耳朵凹地和罗北凹地, 在区域上形成南、北相对下沉, 中间相对抬升。而下沉的罗北凹地在南部沉降更深。构造形变剖面揭示, 除北部靠近罗北凹地内部弧形区的区域外, 罗北凹地南部整体都发生明显沉降, 且沉降幅度从北向南具有逐渐增大的趋势。氦气剖面测量同样揭示, 罗北凹地内氦气测

值南部明显大于北部,指示了罗北凹地南部断陷作用更为强烈,沉降更深。

因此,遥感与物化探结果揭示的罗北凹陷南部沉降更深,与杂卤石的底板埋深南深北浅以及杂卤石厚度的南厚北薄的特点具有对应良好的关系,指示该区杂卤石的分布明显受区域沉降。同时,从杂卤石具有呈北东方向带状分布的特点,位于凹地中部的杂卤石分布最厚的区带与罗北内断陷带大致重合,显示了杂卤石的分布还可能受控于断陷带的发育。

## 6 结论

(1) 罗北凹地杂卤石主要发育于浅部含盐系的中上部,主要产出方式为质地较纯的杂卤石岩、含钙芒硝/石盐/白钠镁矾/黏土杂卤石岩以及含杂卤石(质)钙芒硝/石盐/白钠镁矾岩等类型。

(2) 罗北凹地杂卤石主要以单晶或者集合体形态产出,单晶多呈板状、片状、纤维(毛毡)状,集合体多以放射状、花瓣状集合体形式产出,部分晶间孔隙中杂卤石晶体以绒球状集合体形式产出。

(3) 罗北凹地杂卤石可以分为原生和交代两种成因类型。前者多呈薄层状产于钙芒硝/石盐层之间,或充填于钙芒硝/石盐/白钠镁矾晶间,是古盐湖浓缩至钾镁盐析出阶段,富钙流体入侵盐湖,经蒸发浓缩而成;后者为该区杂卤石主要产出类型,为古盐湖卤水演化至钾镁盐阶段交代钙芒硝/石膏的结果。

(4) 罗北凹地杂卤石的分布具有在南北方向上南厚北薄的特点,KCl含量具有南高北低的特点,杂卤石厚度和KCl含量高值中心与罗北凹陷沉降区具有良好的对应关系,表明杂卤石沉积、分布受控于区域构造活动。

**致谢** 中国地质科学院地质研究所施彬博士在扫描电镜实验过程中给予了大量帮助,审稿专家提出了建设性修改意见,在此一并表示谢意。

## References

- Eugster H, Harvie C and Weare J. 1980. Mineral equilibria in a six-component seawater system, Na-K-Mg-Ca-SO<sub>4</sub>-Cl-H<sub>2</sub>O at 25°C [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 1 335~1 347.
- Han Weitian, Cai Keqin and Gu Shuqi. 1982. Formation condition of polyhalite in the system of K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>/Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-H<sub>2</sub>O [J]. *Chinese Science Bulletin*, 27(6): 362~365(in Chinese).
- Harvie C and Weare J. 1980. The prediction of mineral solubilities in natural waters; The Na-K-Mg-Ca-SO<sub>4</sub>-Cl-H<sub>2</sub>O system from zero to high concentrations at 25°C [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44: 981~997.
- Harvie C, Eugster H and Weare J. 1982. Mineral equilibria in a six-component seawater system, Na-K-Mg-Ca-SO<sub>4</sub>-Cl-H<sub>2</sub>O at 25°C. II: Compositions of the saturated solutions [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 1 603~1 618.
- Harvie C, Weare J, Hardie L, *et al.* 1980. Evaporation of sea water: Calculated mineral sequence [J]. *Science*, 208: 498~500.
- He Faming, Liu Shichang, Bai Chongqing, *et al.* 1988. Identification Method Manual of Saline Minerals [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Yan Hui, *et al.* 2014. New progress of potassium prospecting in deep salt lake of Lop Nur region in Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1 011~1 024(in Chinese with English abstract).
- Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, Zhang Hua, *et al.* 2018. New progress of potassium-bearing brine prospecting in deep salt lake of Lop Nur region [J]. *Mineral Deposits*, 37(1): 191~194(in Chinese with English abstract).
- Li Ruiqin, Liu Chenglin, Xu Haiming, *et al.* 2020. Genesis of glauberite sedimentation in Lop Nur salt lake-constrains from thermodynamic simulation of the shallow groundwater in the Tarim River Basin, China [J]. *Chemical Geology*, 537: 119461.
- 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 Beletan experimental area, Qinghai Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 76~88(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin. 2003. New progress of research and evaluation of potash resources in peripheral area of Lop Nur salt lake [J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 286(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin and Wang Mili. 1999. Evolution of Quaternary depositional environments and formation of potash deposits in Lop Nur lake, Xinjiang, China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 20 (sup): 264~270(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Lü Fenglin, *et al.* 2015. The impact of the linked factors of provenance, tectonics and climate on potash formation: An example from the potash deposits of Lop Nur depression

- in Tarim Basin, Xinjiang, western China[J]. *Acta Geologica Sinica* (English edition), 89(6): 2 030~2 047.
- 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 Chenglin, Ma Lichun, Jiao Pengcheng, *et al.* 2010. Chemical sedimentary sequence of Lop Nur salt lake in Xinjiang and its controlling factors[J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 625~630(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, *et al.* 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 Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, *et al.* 2009. The probing of regularity and controlling factors of potash deposits distribution in Lop Nur salt lake, Xinjiang[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 796~802(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, *et al.* 2006. Features and formation mechanism of faults and potash-forming effect in the Lop Nur salt lake, Xinjiang, China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 30(6): 936~943.
- Lü Fenglin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2018. Provenance of the Quaternary lake basin and tectonic evolution of the basin in Lop Nur: Evidence from detrital zircon U-Pb age of core LDK01 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1 571~1 588(in Chinese with English abstract).
- Lü Fenglin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2018. The first halite age revealed by MC-ICP-MS U-series dating in Lop Nur, Northwestern China[J]. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 92(2): 881~882.
- Lü Fenglin, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2015. The discussion on sedimentary characteristics phased evolution and controlling factors of saline lake in Asia interior: Records from deep drill cores of LDK01 in Lop Nur, Xinjiang, northwestern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2 770~2 782(in Chinese with English abstract).
- Lü Fenglin, Zhang Hua, Liu Chenglin, *et al.* 2021. The finalization of the modern drainage pattern of the Tarim Basin: Insights from petrology and detrital zircon geochronology of sediments from Lop Nur [J]. *Catena*, 205: 105473.
- Meng Guixiang, Yan Jiayong, Lü Qingtian, *et al.* 2010. New discovery of Lop Nur salt basin structure and its significance for potash deposit exploration [J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 609~615(in Chinese with English abstract).
- Peryt T M, Pierre C and Gryniv S P. 1998. Origin of polyhalite in the Zechstein (Upper Permian) Zdrada platform (northern Poland) [J]. *Sedimentology*, 45(3): 565~578.
- Peryt T M, Tomassi-Morawiec H, Czapowski C, *et al.* 2005. Polyhalite occurrence in the werra (Zechstein, upper permian) peribaltic basin of Poland and russia: Evaporite facies constraints [J]. *Carbonates and Evaporites*, 20(2): 182~194.
- Sun Xiaohong, Zhao Yanjun, Liu Chenglin, *et al.* 2017. Paleoclimatic information recorded in fluid inclusions in halites from Lop Nur, Western China[J]. *Scientific Report*, 7(1): 16411.
- Wang Mili, Li Tingqi, Liu Chenglin, *et al.* 1996. Major Discovery of Potassium Deposit in Luobei Depression, Lop Nur, Xinjiang [C]//Selected Papers of the Academic Exchange Meeting on Important Achievements of Geological Science during the Eighth Five year Plan. Beijing: Metallurgical Industry Press (in Chinese with English abstract).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 1998. Characteristics and exploitation prospects of super large potash deposits in Luobei Depression, Lop Nur [J]. *Mineral Deposits*, 17 (Supplement): 433~436(in Chinese with English abstract).
- Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2001. Saline Lake Potash Resources in the Lop Nur, Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaoxu, Zhao Yanjun, Zhao Xianfu, *et al.* 2019. Influence of sedimentary characteristics on water-soluble mining of low-grade potassium ore: A case study of Holocene Series 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).
- Yuan Jianqi and Cai Keqin. 1984. The evolution stages and characteristics of salt precipitation [C]//Sedimentology and organic geochemistry symposium. Beijing: Science Press, 146~151(in Chinese without English abstract).
- Zhang Hua, Jiao Pengcheng, Liu Chenglin, *et al.* 2021. Discovery of the Ca-Cl type brine in deep aquifers and implications for the shallow giant glauberite deposits in the Lop Nur playa, Tarim Basin, NW China [J]. *China Geology* (English Edition), 2: 1~3.
- Zhang Hua, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2020. Deep potash deposits in the Lop Nur salt lake: Theory, practice, exploration advance and prospecting [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(7): 2 030~2 040(in Chinese with English abstract).



- Zhao Haitong, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2014. Morphology characteristics and influential factors of glauberite growth from Lop Nur Salt Lake, China [J]. *Acta Mineral. Sin.*, 34 (1): 97~106 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 韩蔚田, 蔡克勤, 谷树起. 1982.  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ - $H_2O$  六元体系中杂卤石形成条件的研究[J]. *科学通报*, 27(6): 362~365.
- 何法明, 刘世昌, 白崇庆, 等. 1988. 盐类矿物鉴定工作方法手册[M]. 北京: 化学工业出版社.
- 焦鹏程, 刘成林, 颜辉, 等. 2014. 新疆罗布泊盐湖深部钾盐找矿新进展[J]. *地质学报*, 88(6): 1 011~1 024.
- 焦鹏程, 刘成林, 张华, 等. 2018. 罗布泊盐湖深部卤水钾盐找矿取得新进展[J]. *矿床地质*, 37(1): 191~194.
- 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.
- 刘成林. 2003. 罗布泊钾矿区外围盐湖钾盐资源研究与评价新进展[J]. *矿床地质*, 22(3): 286.
- 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.
- 刘成林, 马黎春, 焦鹏程, 等. 2010. 罗布泊盐湖化学沉积序列及其控制因素[J]. *矿床地质*, 29(4): 625~630.
- 刘成林, 王弭力. 1999. 罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用[J]. *地球学报*, 20(增刊): 264~270.
- 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 等. 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.
- 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 等. 2009. 罗布泊盐湖钾盐矿床分布规律及控制因素分析[J]. *地球学报*, 30(6): 796~802.
- 吕凤琳, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2015. 亚洲大陆内部盐湖沉积特征、阶段性演化及其控制因素探讨——基于罗布泊 LDK01 深孔岩心记录[J]. *岩石学报*, 31(9): 2 770~2 782.
- 吕凤琳, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2018. 罗布泊第四纪湖盆物源与盆地构造演化特征: 来自 LDK01 孔碎屑锆石 U-Pb 年龄证据[J]. *地质学报*, 92(8): 1 571~1 588.
- 孟贵祥, 严加永, 吕庆田, 等. 2010. 罗布泊盐湖盆地结构新发现及找钾意义[J]. *矿床地质*, 29(4): 609~615.
- 王弭力, 李廷祺, 刘成林, 等. 1996. 新疆罗布泊罗北凹地钾矿的重大发现[C]//“八五”地质科学重要成果学术交流会议论文集. 北京: 冶金工业出版社, 446~449.
- 王弭力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 1998. 罗布泊罗北凹地超大型钾盐矿床特征及其开发前景[J]. *矿床地质*, 17(增刊): 433~436.
- 王弭力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 袁见齐, 蔡克勤. 1984. 盐类沉积的演化阶段及其特征[C]//沉积和有机地球化学学术论文选集. 北京: 科学出版社, 146~151.
- 张华, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2021. 罗布泊盐湖区深部钾盐找矿: 理论、勘查、进展及前景分析[J]. *地质学报*, 95(7): 2 030~2 040.
- 赵海彤, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2014. 罗布泊干盐湖钙芒硝形貌特征及生长影响因素[J]. *矿物学报*, 34(1): 97~106.