

文章编号:1000-0550(2025)03-0996-11

# 罗布泊第四纪深层含钾卤水成因机制探讨

樊馥<sup>1,2</sup>, 郭廷峰<sup>3</sup>, 侯献华<sup>1,2</sup>, 张凡凯<sup>4</sup>, 于咏梅<sup>4</sup>, 孟凡巍<sup>5</sup>, 王冀洺<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 自然资源部盐湖资源重点实验室, 北京 100037

3. 青海省地质矿产勘查开发局, 西宁 810000

4. 新疆国投罗布泊钾盐开发有限责任公司, 新疆哈密 839000

5. 中国矿业大学地球与资源学院, 江苏徐州 221116

**摘要** 【目的】探讨罗布泊深部卤水地球化学及成因演化特征, 并对卤水钾盐成矿模式进行探索, 旨在为后续罗布泊深层含钾卤水资源选区提供科学依据。【方法】通过对罗布泊地区 LDK02 孔卤水储层岩石学分析, 卤水常、微量元素及同位素测试, 利用相图、元素相关性分析等手段, 探讨了罗布泊深层含钾卤水的成矿物质来源与成矿模式。【结果与结论】LDK02 井 200~500 m 早—中更新世卤水以硫酸盐型为主, 卤水  $K^+$  含量远超 3g/L, 达到单独开采利用标准。卤水钠氯系数接近 1, 硼同位素与海相沉积物相近, 反映了卤水主要为海相盐类溶滤成因类型;  $HBO_2$  和  $K^+$  的正相关性, 反映溶滤盐层提供了卤水中一定量的  $K^+$ 。D、O 同位素正漂移、与中新世含盐地层相近的锶同位素特点, 进一步指示了卤水主要为中新世含盐地层淋滤且经历了浓缩蒸发过程。结合前人对于罗布泊早—中更新世构造演化及现代径流系统形成历史的研究, 认为古近纪—新近纪海相和海陆交互相含盐地层, 尤其是中新世含盐地层盐类物质发生溶解, 被塔里木河水携带进入罗布泊, 是研究目的层段卤水  $K^+$  的重要来源。此外, 结合更新世时期西域构造运动背景, 认为西域运动相关的深部富 K、Li 热液, 以及与构造运动相关的储层火山碎屑物质的溶蚀溶解, 也是卤水中  $K^+$  的重要物质来源。以此为基础, 初步建立了罗布泊早—中更新世 200~500 m 深层含钾卤水“深部物质补给+古盐溶滤”二元成矿模式。

**关键词** 罗布泊; 第四纪; 常、微量元素; 同位素; 成钾物质来源

**第一作者简介** 樊馥, 女, 1982 年出生, 正高级工程师, 盐类矿床学, E-mail: 383106448@qq.com

**通信作者** 郭廷峰, 男, 正高级工程师, E-mail: guotingfeng1012@163.com

**中图分类号** P619.211 **文献标志码** A

**DOI** 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.067

**CSTR** 32268.14/j.cjxb.62-1038.2023.067

## 0 引言

罗布泊位于我国塔里木盆地的东端, 有“死亡之海”、“地球旱极”之称。是我国最大内陆河—塔里木河河水注入而形成的一个湖泊, 较小的孔雀河水也曾注入<sup>[1]</sup>。现作为我国第二大钾盐基地, 主要开采罗布泊北凹地 200 m 以浅硫酸盐型卤水。

罗布泊作为亚洲大陆的干旱中心, 曾是我国第二大咸水湖, 面积为 18 056 km<sup>2</sup>。70 年代完全干涸。郑绵平<sup>[2]</sup>通过罗布泊部分地区野外考察, 分析预测“在第一盐沉积区龟背山南局部区域”(即后来发现

的罗北凹地)可能有丰富的富钾卤水聚集。后续, 王弭力等<sup>[3]</sup>建立了“新构造运动使盆地产生沉积分异, 制约沉降中心形成”的盆地迁移认识, 认为罗北凹地是构造迁移后的“深盆”, 发现了罗北凹地 200 m 以浅钙芒硝作为储集空间的卤水钾盐矿床, 建立了“高山深盆迁移论”和“两段式成钾”理论。随着开发研究不断深入, “含水墙”以及“上升卤水补给”等成钾模式相继提出<sup>[4-5]</sup>, 使罗布泊成为陆相成钾理论研究热点地区。在成钾物质来源研究方面, 推测塔里木盆地晚白垩纪以及古近纪—新近纪两次成盐期形成的巨厚含盐系地层, 其封存的古卤水及后期构造抬升

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-08-29; 录用日期: 2023-09-20; 网络出版日期: 2023-09-20

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFE0104000); 中国地质调查项目(DD20230037) [Foundation: National Key Research and Development program, No. 2023YFE0104000; China Geological Survey Project, No. DD20230037]

出露溶解释放的硫酸根和钾离子等,可能是罗布泊重要的盐类物质来源<sup>[6]</sup>,后期认为卤水中盐类及钾元素来源于“富硫酸根”的地表水和深部富钙水的补给<sup>[7-8]</sup>。至2008年,浅部(<200 m)钾盐资源量已基本查明。罗布泊钾盐公司为实施罗布泊地区钾盐资源战略接替,开展罗布泊盐湖第二空间钾盐找矿,同时作为国家重点研发项目课题“重点陆相盆地深层含钾卤水富集规律与成矿预测”参加单位,钻探了LDK02井,该井揭示200 m以深发育早、中更新世深部含钾卤水资源<sup>[9]</sup>(图1)。已有初步研究揭示,该井200~500 m深度段卤水钾含量最为丰富<sup>[10]</sup>。本文拟通过对该孔200~500 m卤水样品进行水化学分析,结合储层岩石类型特点,探讨罗布泊深部卤水地球化学及成因演化特征,并对卤水钾盐成矿模式进行探索,为后续罗布泊深层含钾卤水资源选区提供科学依据。

## 2 区域地质背景

### 2.1 区域构造和沉积环境演化

作为塔里木盆地的最低洼处,罗布泊夹持于东

天山、北山及阿尔金山之间。控盆构造上,罗布泊北为库鲁克塔格南麓大断裂,南为阿尔金北部山前断裂,西临南北向的七克里克断裂,东达罗布泊东断裂。阿尔金及库鲁克塔格走滑断裂系统对罗布泊地区新生代以来构造演化控制明显,与呈左行走滑的阿尔金断裂伴生的若羌断层和与右行走滑的库鲁克塔格断裂伴生的孔雀河断层,在罗布泊地区形成一个近东西向的拉张背景<sup>[11-12]</sup>。罗布泊即是产生于这一拉张背景下的箕状凹陷<sup>[13]</sup>。罗布泊作为塔里木盆地的汇水中心,汇水面积及物质补给量巨大。早更新世中期—中更新世主要为半干旱气候,晚更新世末期气候变得极端干旱,全新世以来,罗布泊古湖经历了咸水湖、盐湖、微咸水湖、盐湖、咸水湖,最后演变为干盐湖<sup>[14]</sup>。

### 2.2 地层发育

研究区地层发育情况如下(表1):

第四系下更新统( $Q_p^1$ ):岩性主要为石膏、钙芒硝、石盐、砂、粉砂、黏土、粉砂质黏土等,赋存含钾卤水储层,地层厚度约为440~610 m。

第四系中更新统( $Q_p^2$ ):岩性主要为石膏、石盐及

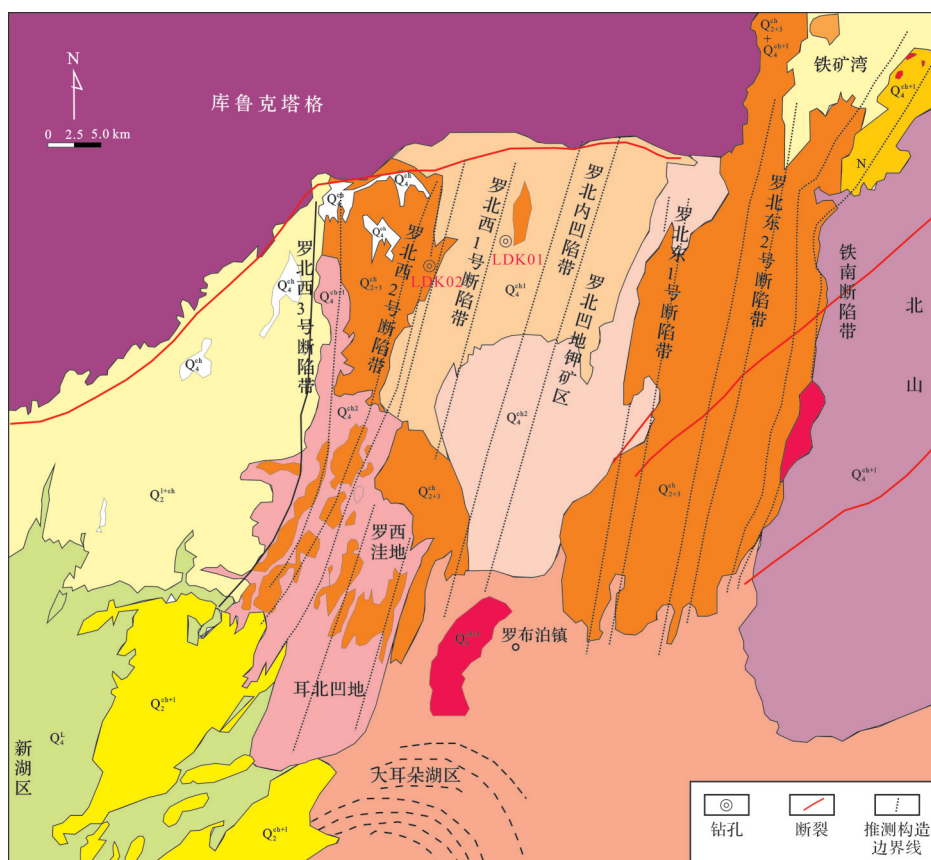


图1 罗布泊盐湖区深钻孔位置图(据文献[4]修改)

Fig.1 Deep drilling location in Lop Nur Salt Lake (modified from reference [4])

钙芒硝、含黏土(粉砂、石膏)的钙芒硝、黏土等。发育富钾卤水储层,地层厚度约为60~179 m。

第四系上更新统( $Q_p^3$ ):岩性主要为钙芒硝、石盐、粉砂、黏土等,赋存卤水储层,地层厚度约为100~155 m。

第四系全新统( $Q_h$ ):岩性主要为石膏、石盐,地层厚度约为6.16~10.00 m。

### 3 样品采集与测试

#### 3.1 样品采集

本次分析卤水样品选自国投罗钾公司实施钻探的LDK02井,该孔位于罗北凹地2号断陷带(图1),井深1 200 m。200 m以浅,主要为现今罗布泊主力产水层系—钙芒硝浅部卤水储层。200~500 m深度段卤水资源最为丰富,为本次研究目的层位,卤水出水温度介于32 ℃~36 ℃<sup>[9]</sup>。按深度约15~20 m间隔,采用定深取样方式<sup>[9]</sup>,取得了15个卤水样品,卤水样品无色透明。同时,对200~500 m深度段

岩心进行分层取样,并对部分典型储层岩石样品进行岩心观察,发现该井卤水发育深度段储层岩石类型以含砾中粗砂、中粗砂为主。颜色多呈灰绿、灰白和红褐色(图2)。另外,对储层岩石样品进行岩石薄片磨制、铸体薄片加工,并进行镜下观察和拍照(图3,4)。

#### 3.2 水化学分析

对研究区目的层段卤水样品进行了矿化度、常、微量元素以及D、O同位素、Sr同位素及B同位素分析。

##### 3.2.1 分析测试方法

###### 1) 常、微量元素

常、微量元素测定在中国地质科学院盐湖与热水研究发展中心实验室完成,其中卤水 $Li^+$ 、 $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Rb^+$ 、 $Cs^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Sr^{2+}$ 含量采用原子吸收分光光度计法测定。 $Cl^-$ 、 $HCO_3^-$ 、 $OH^-$ 、 $CO_3^{2-}$ 、 $HBO_2$ 使用容量法进行分析。 $Br^-$ 含量采用苯酚红比色法测定。 $SO_4^{2-}$ 含量采用重量法分析测定。系统误差为1.6%。

###### 2) D、O同位素

D、O同位素在北京核工业地质研究院完成测试。使用的测试仪器包括Flash EA元素分析仪、MAT253质谱。测量结果以SMOW为标准,记为 $\delta D_{V-SMOW}$ 及 $\delta^{18}O_{V-SMOW}$ ,分析精度分别优于 $\pm 1\text{‰}$ 及 $\pm 0.2\text{‰}$ 。氢同位素参考标准为国家标准物质北京大学标准水,其 $\delta D_{V-SMOW} = -64.8\text{‰}$ , $\delta^{18}O_{V-SMOW} = -8.79\text{‰}$ ;兰州标准水,其 $\delta D_{V-SMOW} = -84.55\text{‰}$ , $\delta^{18}O_{V-SMOW} = -12.48\text{‰}$ 。

###### 3) 锶同位素

锶同位素组成的测量是由南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室同位素固体质谱室的TIMSVG-354同位素质谱仪完成。标样NBS-987测得 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 平均值是0.710 250( $n=8$ )。所有的结果归一化得到 $^{87}Sr/^{86}Sr=0.119 4$ 。每个样品分析误差小于 $\pm 0.05\%$ 。

表1 LDK02孔地层分布<sup>[9]</sup>

Table 1 Strata of LDK02 bore<sup>[9]</sup>

| 地质年代    | 地层分层 | 底界深度/m | 主要岩性描述               |
|---------|------|--------|----------------------|
| $Q_h$   | 1    | 8.5    | 石盐、石膏(岩)             |
|         | 2    | 27.8   | 钙芒硝(岩)、石盐、粉砂         |
| $Q_p^3$ | 3    | 56     | 钙芒硝(岩)               |
|         | 4    | 68.7   | 含石膏(或淤泥)的钙芒硝(岩)      |
|         | 5    | 92.5   | 含淤泥的钙芒硝夹粉砂质泥岩        |
|         | 6    | 105.22 | 含黏土(粉砂、石膏)的钙芒硝(岩)    |
| $Q_p^2$ | 7    | 126.5  | 钙芒硝、石膏、黏土            |
|         | 8    | 150    | 石膏质黏土、含粉砂的石盐、含粉砂的钙芒硝 |
|         | 9    | 234.7  | 粉砂质黏土、石膏、泥质石膏        |
| $Q_p^1$ | 10   | 445    | 粉砂、粉砂质黏土、石膏(岩)       |
|         | 11   | 590    | 粉砂质黏土、钙芒硝(岩)         |
|         | 12   | 1 200  | 粉砂质黏土与钙芒硝互层          |

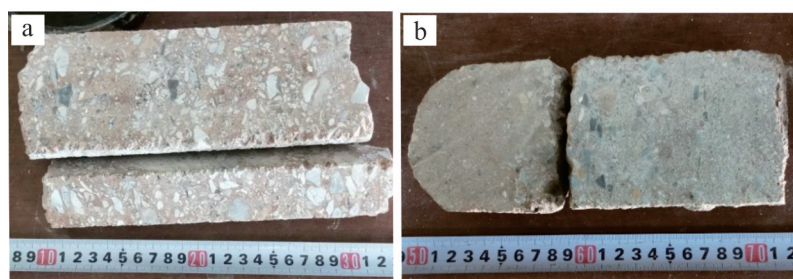


图2 罗布泊 LDK02 井 200~500 m 岩心特征

(a)含砾中粗砂,363.67 m;(b)含砾中粗砂,475.00 m;

Fig.2 Core characteristics of well LDK02 in Lop Nur at 200~500 m



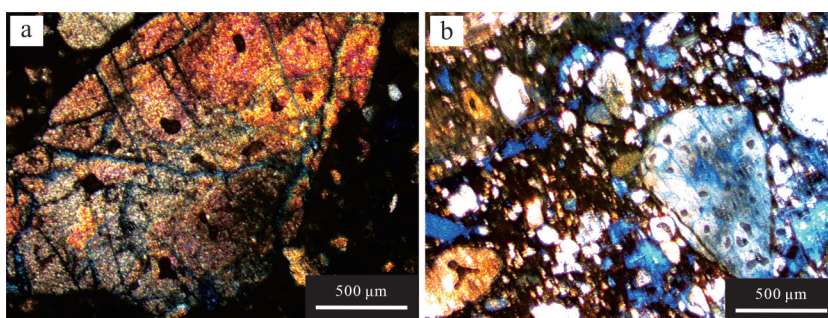


图4 200~500 m深度段岩心镜下孔隙、裂缝发育特征

(a) 鲕粒灰岩碎屑颗粒发生钙芒硝蚀变,且颗粒内部裂缝发育,460.42 m,正交光;(b) 基质溶蚀孔洞大量发育,460.42 m,单偏光;

Fig.4 Characteristics of pores and fractures in the depth section of 200-500 m under microscope

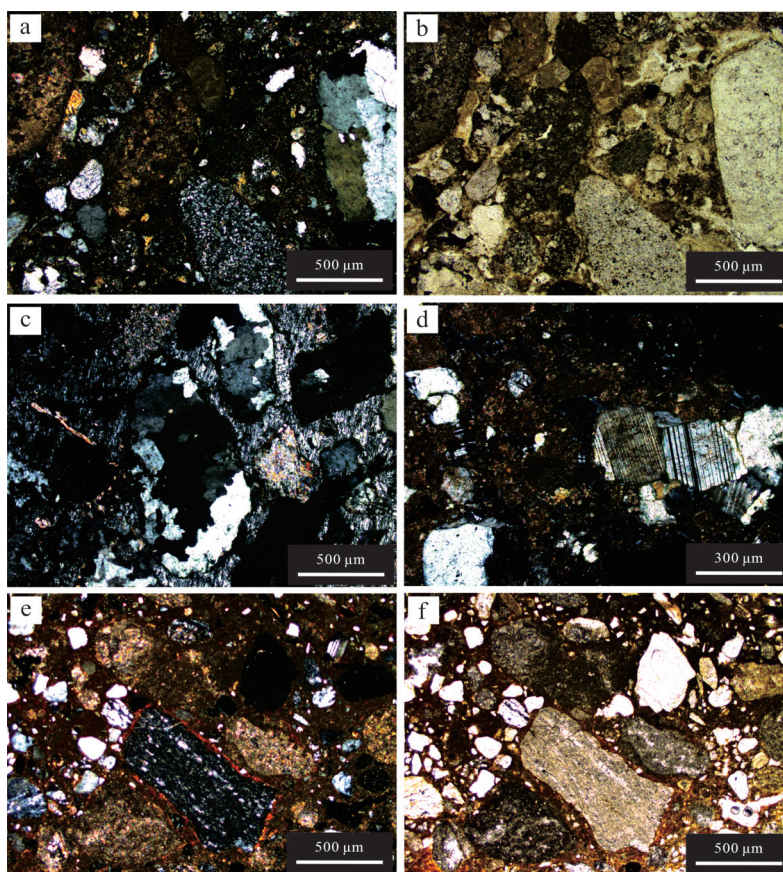


图3 200~500 m深度段岩心镜下岩石学特征

(a) 凝灰质颗粒、碳酸盐软泥、变质岩岩屑、铁质胶结物,300.80 m,正交光;(b) 凝灰质岩屑颗粒表面有不透明铁质析出,300.80 m,单偏光;(c) 变质岩岩屑和石膏胶结物,380.00 m,正交光;(d) 条纹长石岩屑和碳酸岩软泥,长石表面高岭土化,420.66 m,正交光;(e) 凝灰质颗粒,周缘铁质包壳,460.42 m,正交光;(f) 碳酸盐和凝灰质碎屑颗粒,460.42 m,单偏光

Fig.3 Petrological characteristics of cores at depths of 200-500 m under microscope

#### 4) 硼同位素

硼同位素组成在中国科学院青海盐湖所完成。利用装有硼特效树脂的离子交换柱开展硼的分离纯化,为避免同质异位素质谱峰干扰,降低质量歧视效应,硼同位素组成的测试采用 $C_5BO_3^{2+}$ —石墨双涂样方法,并在Triton热电离同位素质谱仪(Thermo Fisher)上进行。采用静态双接收法获得离子流强度 $I_{308}$ 和

$I_{309}$ ,并经 $^{17}O$ 校正后得到 $^{11}B/^{10}B$ 。其中 $^{11}B/^{10}B = I_{308}/I_{309} - 0.00079$ ,硼同位素在组成 $\delta^{11}B$ 表示为 $\delta^{11}B(‰) = [(^{11}B/^{10}B)_{\text{样品}} / (^{11}B/^{10}B)_{\text{标准}} - 1] \times 1000$ 。硼同位素标准样品为美国国家标准与技术研究所(NIST)提供的NIST SRM 951( $HBO_3$ ),其提供的 $^{11}B/^{10}B$ 比值为 $4.04362 \pm 0.00137$ ,即分析精度优于 $0.2‰(2\sigma)$ ,实际样品分析精度约为 $1‰$ 。

### 3.2.2 卤水常微量元素、同位素分析结果

常量元素分析测试结果如表2。 $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ 分布范围介于0.709 976~0.710 298,平均值为0.710 181。 $\delta\text{D}$ 分布范围介于-0.2‰~9.3‰,平均值为5.3‰; $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围介于0.5‰~4.9‰,平均值为2.57‰; $\delta^{11}\text{B}$ 分布范围介于22.48‰~25.03‰,平均值为23.97‰。

## 4 数据与分析

### 4.1 岩石学与储集空间特征

目的层段岩心岩石薄片和铸体薄片镜下观察结果显示,岩性以火山碎屑沉积岩为主,少量含砾碳酸岩及鲕粒灰岩夹层,靠近顶部为钙芒硝层。火山碎屑沉积岩中的矿物颗粒及岩屑类型包括碳酸盐软泥颗粒、硅质岩屑、凝灰岩屑、条纹长石岩屑、长石、石英碎屑颗粒等。颗粒多呈棱角、次棱角状。成分和结构成熟度低,粒度变化范围大。

成岩现象可见石膏作为胶结物胶结碎屑颗粒,红色铁质和玻璃质胶结物充填孔隙,碱性长石、条纹长石碎屑颗粒表面高岭土化蚀变,凝灰质岩屑颗粒表面有不透明铁质析出,碳酸岩颗粒重结晶。部分层段可见碎屑矿物颗粒出现红色铁质包壳(图3),反

映颗粒沉积早期为干旱氧化的沉积环境。

目的层段岩石学特征总体上反映了早期碳酸盐阶段暴露氧化到后期硫酸盐阶段浓缩卤水充填孔隙的演化过程。

在铸体薄片,可以看到灰岩、鲕粒灰岩、钙芒硝等碎屑颗粒由于脆性破裂形成的微裂缝。同时,碎屑颗粒内部、胶结物、基质等发生溶蚀形成的溶蚀孔洞也有发育(图4)。

### 4.2 各深度段卤水有用组分特征

参照卤水综合利用及开采工业指标(盐湖和盐类矿产地地质勘查规范 DZ/T0212—2002)<sup>[15]</sup>(表3):目的层段卤水 $\text{K}^+$ 含量远超3 g/L的卤水 $\text{K}$ 单独开采利用标准。 $\text{Li}^+$ 含量达到13 mg/L综合利用标准(表2,3)。

### 4.3 罗布泊深层卤水水化学类型特征

根据瓦里亚什科卤水类型划分标准,目的层段为硫酸盐型卤水。Piper图解中,阳离子集中于 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 端元,含量约占阳离子总量的90%以上, $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Ca}^{2+}$ 含量极低;阴离子以 $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ 为主,含量为阴离子总量的90%以上,其中, $\text{Cl}^-$ 为阴离子主体,含少量 $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 含量极低,反映该套卤水极少受大气水混入影响(图5)。

表2 LDK02井深层卤水(200~500 m)水化学特征(mg/L)

Table 2 Hydrochemical characteristics in deep brine (200-500 m) of well LDK02 (mg/L)

| 样品原号 | 深度/m | $\text{Cl}^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{Na}^+$ | $\text{K}^+$ | $\text{Mg}^{2+}$ | $\text{Ca}^{2+}$ | $\text{Br}^-$ | $\text{HCO}_3^-$ | $\text{CO}_3^{2-}$ | $\text{Li}^+$ | $\text{Rb}^+$ | $\text{Sr}^{2+}$ | $\text{HBO}_2$ | 矿化度       |
|------|------|---------------|--------------------|---------------|--------------|------------------|------------------|---------------|------------------|--------------------|---------------|---------------|------------------|----------------|-----------|
| 1-15 | 220  | 358 110       | 48 313             | 216 679       | 10 653       | 18 057           | 1 156            | 30.90         | 200              | 0                  | 16.60         | 0.94          | 9.88             | 49.00          | 653 092   |
| 1-16 | 240  | 307 761       | 44 599             | 181 342       | 8 878        | 14 901           | 1 393            | 24.20         | 223              | 0                  | 14.00         | 0.80          | 7.49             | 42.00          | 558 985   |
| 1-17 | 260  | 334 780       | 103 440            | 209 987       | 12 876       | 20 334           | 587              | 21.00         | 242              | 50.60              | 19.30         | 1.29          | 1.08             | 68.10          | 682 174   |
| 1-18 | 280  | 401 680       | 88 000             | 252 661       | 10 488       | 15 900           | 1 258            | 15.90         | 297              | 0                  | 17.00         | 1.10          | 1.00             | 57.50          | 770 134   |
| 1-19 | 300  | 283 779       | 87 494             | 189 246       | 12 520       | 17 735           | 421              | 18.90         | 197              | 0                  | 16.40         | 0.96          | 1.31             | 59.80          | 591 358   |
| 1-20 | 320  | 319 120       | 84 750             | 207 759       | 11 459       | 16 312           | 627              | 18.90         | 255              | 0                  | 15.70         | 1.04          | 1.25             | 52.10          | 640 155   |
| 1-21 | 340  | 282 102       | 86 177             | 182 183       | 12 238       | 15 192           | 451              | 17.60         | 249              | 0                  | 16.00         | 1.10          | 1.10             | 54.30          | 578 544   |
| 1-22 | 360  | 481 610       | 96 880             | 313 124       | 13 099       | 18 112           | 1 158            | 19.20         | 279              | 0                  | 18.80         | 1.27          | 1.05             | 62.10          | 924 208   |
| 1-23 | 380  | 348 490       | 93 060             | 230 168       | 13 203       | 19 592           | 606              | 20.10         | 285              | 0                  | 18.20         | 1.20          | 1.18             | 66.00          | 705 261   |
| 1-24 | 400  | 544 060       | 95 810             | 356 755       | 12 225       | 17 361           | 1 041            | 20.30         | 284              | 0                  | 18.10         | 1.22          | 1.24             | 67.40          | 1 027 393 |
| 1-25 | 420  | 323 650       | 93 880             | 199 712       | 12 721       | 20 393           | 704              | 20.30         | 232              | 0                  | 17.60         | 1.23          | 1.23             | 64.60          | 651 175   |
| 1-26 | 440  | 529 492       | 89 026             | 337 581       | 11 189       | 16 811           | 1 514            | 18.60         | 280              | 0                  | 17.00         | 1.17          | 1.13             | 58.50          | 985 752   |
| 1-27 | 460  | 296 257       | 84 454             | 190 564       | 12 408       | 16 143           | 556              | 21.60         | 224              | 0                  | 14.10         | 0.95          | 1.09             | 48.80          | 600 573   |
| 1-28 | 480  | 633 068       | 87 557             | 407 097       | 11 493       | 17 247           | 1 940            | 21.80         | 253              | 0                  | 18.50         | 1.17          | 0.87             | 58.40          | 1 158 527 |
| 1-29 | 500  | 313 414       | 73 043             | 201 069       | 12 523       | 17 982           | 392              | 19.50         | 234              | 0                  | 16.30         | 1.07          | 1.37             | 56.00          | 618 561   |

### 4.4 卤水成分演化阶段特征

#### 4.4.1 元素比值特征

卤水钠氯系数( $n\text{Na}^+/m\text{Cl}^-$ )介于0.91~1.02,接近1。研究认为,海相地下残余卤水一般小于0.85~0.87,非海相蒸发盐地层中保存的地下卤水钠氯系数更小,而

表3 卤水综合利用及开采工业指标(mg/L)

Table 3 Industrial indices for the comprehensive utilization and mining of brine (mg/L)

|      | $\text{K}^+$ | $\text{B}^{3+}$ | $\text{Br}^-$ | $\text{I}^-$ | $\text{Rb}^+$ | $\text{Li}^+$ |
|------|--------------|-----------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| 综合利用 | 1 300        | 150             | 150           | 10           | 10            | 13.1          |
| 单独开采 | 3 100        | 300             | 300           | 30           | 20            | 24.6          |



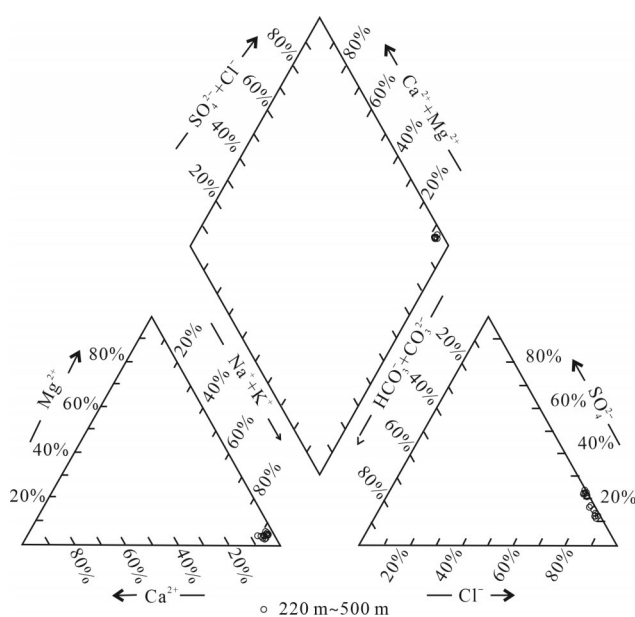


图5 LDK02井深层卤水Piper图解

Fig.5 Piper diagram of deep brine in well LDK02

溶滤卤水的钠氯系数一般大于或接近1,溶滤钾盐时系数值会比较低,甚至降到0.7左右<sup>[16]</sup>。目的层段卤水钠氯系数特征反映其溶滤石盐层的成因特征。

目的层段卤水钾氯系数( $K^+/Cl^- \times 1\,000$ )介于16.53~40.16。通常认为该系数为75时,卤水达到钾盐沉积阶段。而该套卤水分布特征指示了其浓缩尚未达到钾盐沉积阶段。

#### 4.4.2 相图

因目的层段卤水出水温度为32℃~36℃,故选用 $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ // $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$ - $H_2O$ 五元体系35℃介稳相

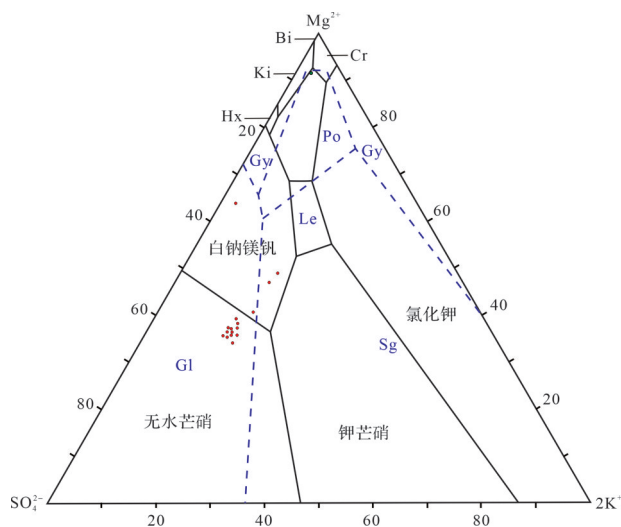


图6 卤水五元体系35℃介稳相图

Fig.6 Equilibrium phase diagram of five-element brine system at 35 °C

图进行目的层段样品点投图(图6),可以看出卤水样品投点主要集中至无水芒硝和白钠镁矾相区,反映卤水浓缩析出的矿物以无水芒硝为主、部分样品含白钠镁矾,卤水演化至硫酸盐阶段。含钙矿物以钙芒硝为主,发育少量钾石膏,与岩石薄片观察的石膏胶结物出现的特征一致。同时,与现今正在开采的罗北凹地200 m以浅钙芒硝储层卤水钾盐矿中盐类矿物类型相近<sup>[5]</sup>,反映了目的层段深部卤水钾矿可能与上覆200 m以浅卤水钾盐矿具有继承演化关系。

#### 4.5 元素相关性特征

卤水 $K^+$ 与矿化度及其离子的相关性分析表明, $K^+$ 与矿化度相关关系不明显,线性相关系数仅0.002 6,反映 $K^+$ 含量并没有伴随可能存在的蒸发或溶滤过程发生明显增加。 $K^+$ 含量具有伴随着 $Li^+$ 、 $HBO_2$ 、 $Rb^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 含量增加而上升的趋势,显示出了较好的正相关关系。相关性分析显示, $K^+$ 与 $Li^+$ 的相关系数甚至达到0.991 8, $K^+$ 与 $HBO_2$ 的相关系数为0.521 7, $K^+$ 与 $Mg^{2+}$ 和 $SO_4^{2-}$ 的相关系数分别为0.415 0和0.564 8,反映 $K^+$ 与 $Li^+$ 、 $HBO_2$ 以及 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$ 物质来源关系密切。 $K^+$ 与 $Cl^-$ 的相关性不明显,与 $Ca^{2+}$ 具有明显的负相关关系,指示含 $Ca^{2+}$ 流体的加入稀释了溶液中的 $K^+$ (图7)。

#### 4.6 深部卤水同位素分析

##### 4.6.1 $Sr$ 及 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 特征

目的层段卤水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 介于0.709 976~0.710 239。中生代开始至今,海水中 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 平均值整体呈升高趋势,现今达到最高值0.709 3<sup>[17]</sup>。海水中锶的来源主要有壳源( $^{87}Sr/^{86}Sr$ 平均值为0.711 9)和幔源( $^{87}Sr/^{86}Sr$ 平均值为0.703 5)两种,海水中锶同位素的组成特征是这两种来源混合后的综合反映。目的层段卤水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 明显低于大陆地表风化系统壳源锶,具有与海水接近但略高于海水的Sr同位素特征。据报道,塔里木盆地塔中地区奥陶纪碳酸盐 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 为0.706 44~0.709 38(与奥陶纪海水0.707 8~0.709 0接近);志留系地层水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 介于0.710 57~0.712 58;石炭系地层水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 介于0.711 00~0.719 00<sup>[18]</sup>;库车凹陷<sup>[19]</sup>古近纪海相盐岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 介于0.708 718~0.709 326,Sr含量介于2.055~18.608  $\mu g/g$ ,具有海陆混合特征的中新世盐岩 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 介于0.709 909~0.710 868。通过与塔里木盆地现有蒸发岩及卤水层位 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 对比,可以看出,目的层段卤水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 特征与中新世盐岩最为接近,推测中新世石盐可能为该套卤水的源盐层。

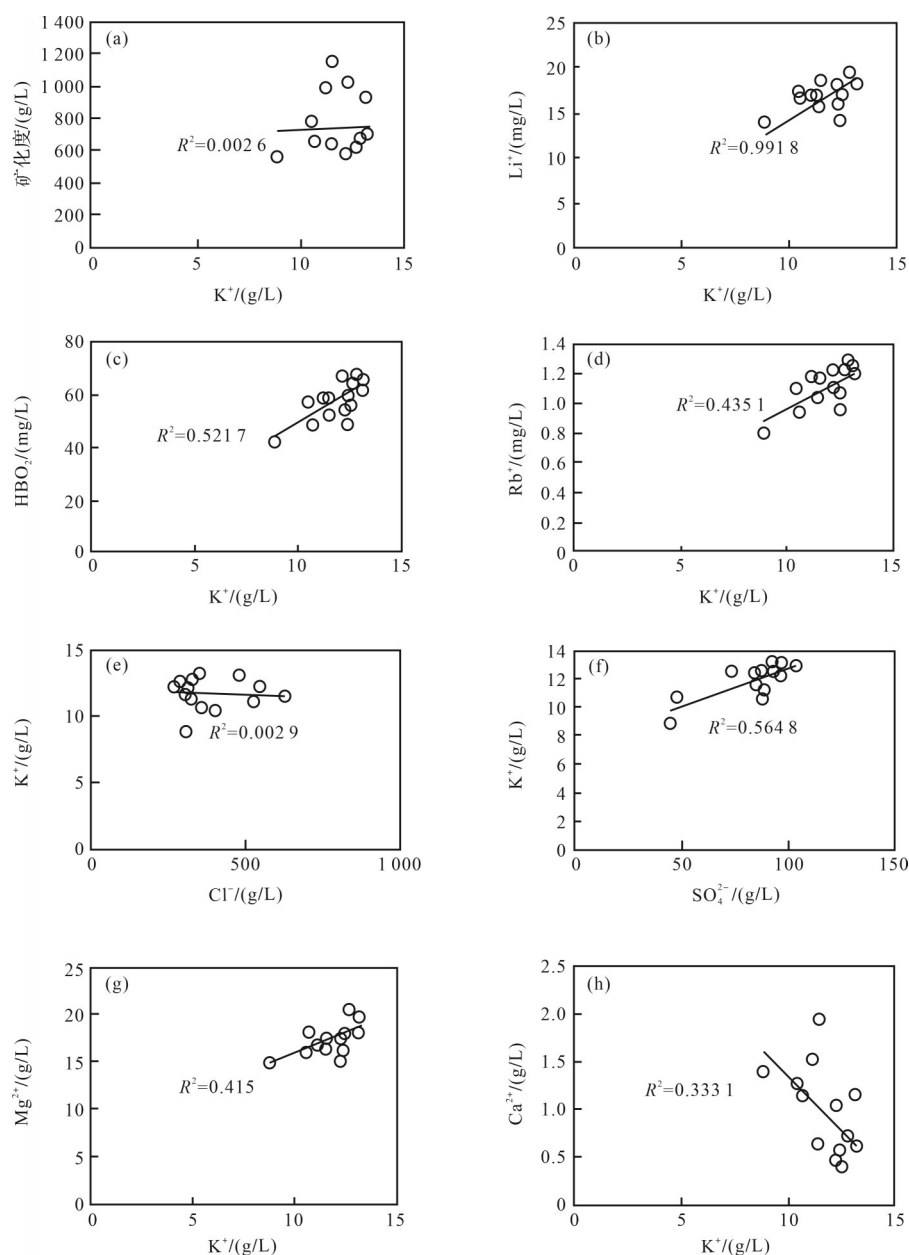


图7 220~500 m深度段元素相关性特征

Fig.7 Correlation characteristics of elements at depth of 220-500 m

此外,目的层段卤水Sr含量介于0.87~9.88 mg/L,平均为2.15 mg/L。已知海水中Sr的质量浓度约为8 mg/L,当Sr与CaSO<sub>4</sub>共沉淀时,降为小于1 mg/L。淡水中的Sr含量极低。从卤水1/Sr及<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr关系图解(图8)可以看出,卤水样品点大致分布于两个端元,较高Sr含量端元,样品仅有两个,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr数值在0.710 1附近,多数样品点集中于较低Sr含量端元,<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr分布范围相对较宽,反映了低Sr流体对目的层卤水的贡献。结合该套卤水可能源盐层即中新世盐岩Sr含量特征(7.935~84.397 μg/g)以及罗布泊第

四纪陆相沉积背景,推测淡水溶滤中新世石盐层产生的物质,可能是目的层卤水主要的盐类物质来源。

#### 4.6.2 卤水D、O同位素特征

200~500 m深度段卤水O同位素介于0.5‰~4.9‰,D同位素介于-0.2‰~9.3‰,多位于0附近,与标准海水点比较接近。同时,D、O同位素图解中目的层卤水样品点分布于大气降水线附近,O同位素明显高于大气降水且正漂移特征明显,D也呈现出升高的趋势(图9),与塔里木河浅层地下水O同位素范围和正漂移特征<sup>[20]</sup>相似,与典型的蒸发过程水体D、O

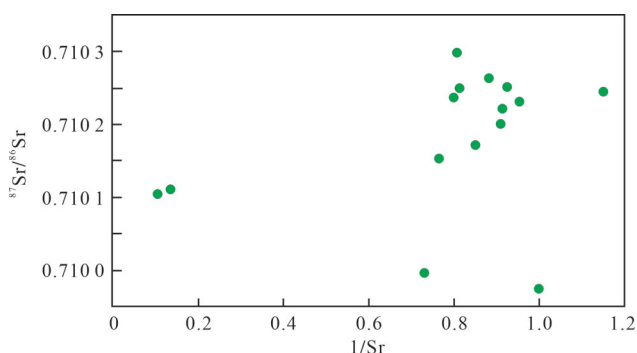
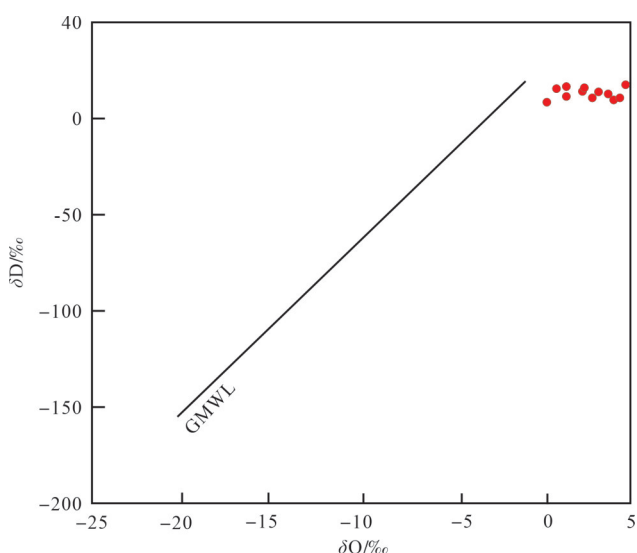
图8 卤水 1/Sr 与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  相关关系Fig.8 1/Sr vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  of brine

图9 D、O 同位素图解

GMWL 全球大气水线

Fig.9 Diagram of D and O isotopes

同位素共同升高特点一致,二者的演化趋势反映了其蒸发浓缩成因。结合薄片观察到的卤水储层岩石溶蚀溶解发育特点,认为卤水与围岩储层存在这一程度的水—岩反应,也可能是导致该区卤水O同位素正漂移的因素。

#### 4.6.3 卤水硼同位素特征

目的层段卤水硼含量为42.00~68.10 mg/L、硼同位素分布指示高硼同位素且硼同位素分布集中(分布范围为23.46‰~25.03‰)特点,反映了相对稳定和单一的硼同位素来源特征。原始地幔和陆壳的 $\delta^{11}\text{B}$ 值均较低<sup>[21]</sup>,分别为 $(-10\pm 2)\text{‰}$ <sup>[22]</sup>和 $-20\text{‰}\sim -7\text{‰}$ <sup>[23]</sup>,海水具有稳定的B含量和相对较高的 $\delta^{11}\text{B}$ 值,分别为 $4.5\times 10^{-6}$ 和40‰(相对SRM951)<sup>[24]</sup>。肖容阁等<sup>[25]</sup>对硼及硼同位素研究指出,封闭盐湖卤水 $\delta^{11}\text{B}$ 值大于40‰,海水为39.50‰,海相硼矿介于

18.20‰~31.73‰,海相沉积物介于13.90‰~25.20‰,海水交代岩石4.51‰~10.85‰。目的层段卤水 $\delta^{11}\text{B}$ 介于23.46‰~25.03‰,特征与海相沉积物十分接近。

## 5 讨论

### 5.1 卤水K物质来源分析

LDK02孔200~500 m深度段卤水以硫酸盐型为主,相图显示其演化至硫酸盐阶段,且对应的析出矿物类型为大量的钙芒硝,与罗北浅层卤水钙芒硝大量发育特征吻合。 $\text{K}^+$ 含量较高,为8~13 g/L,与现今正在开采的罗北凹地含钾卤水矿的硫酸盐水化学特征以及 $\text{K}^+$ 含量介于9~12 g/L<sup>[26]</sup>相近。罗北凹地正在开采的浅层卤水锶同位素介于0.710 44~0.710 80<sup>[6]</sup>,目的层段卤水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 介于0.709 976~0.710 239,二者均与中新世盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.709 909~0.710 868)接近,同时浅部卤水略高,反映演化过程中,随时间推移壳源物质的影响在变大。两套卤水诸多相似性特征表明,目的层段卤水与浅层卤水可能为同源继承演化关系。

元素相关性分析显示 $\text{K}^+$ 与 $\text{Li}^+$ 、 $\text{HBO}_2$ 具有良好的正相关性, $\text{K}^+$ 与 $\text{Li}^+$ 相关系数甚至达到0.991 8。现有研究认为Li多为深部物质来源,研究区 $\text{K}^+$ 与 $\text{Li}^+$ 高的相关系数反映了深部物质对该套卤水K的贡献。彭希龄等<sup>[27]</sup>对新疆第四纪地壳运动的研究指出,早一中更新世之交,新疆地区发生西域运动,作为喜山运动主幕,这次运动造成了新疆范围内区域不整合和假整合,以及一些基岩山区的块断造山运动。LDK02井早一中更新世界限之交的200~500 m深度段大量发育的火山凝灰质岩屑成分(图4)和产出卤水 $\text{K}^+$ 与 $\text{Li}^+$ 良好的相关性,指示了与构造运动期吻合的火山物质或深部热液贡献特征,是对该时期构造运动的良好沉积响应。

$\text{K}^+$ 与 $\text{HBO}_2$ 的相关系数为0.521 7,卤水 $\delta^{11}\text{B}$ 与海相沉积物接近的特征指示B的海相沉积物溶滤来源,结合目的层卤水钠氯系数(介于0.91~1.02)溶滤成因特点,推测溶滤的海相盐类物质也可能为该套卤水提供了一定含量的K。塔里木盆地存在古近纪—新近纪海退残余卤水形成的巨厚含盐系地层,上文多套含盐地层的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分析指示了卤水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与塔里木盆地中新世的石盐最为接近,多种证据表明目的层段卤水 $\text{K}^+$ 的物质来源为盐岩溶滤。



新疆库车凹陷盐构造研究已经发现,古近纪—新近纪盐类在构造作用下,抬升上拱,形成穹隆构造。塔里木盆地内类似盐构造抬升至高出地表,经历风化剥蚀作用,极可能为盆地内罗布泊等盐湖提供了盐物质来源。前人对现今正在开发的200 m以浅钙芒硝含钾卤水成因研究普遍认为,塔里木河贫 $\text{Ca}^{2+}$ 、富 $\text{SO}_4^{2-}$ 的 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 型水,与深部来源 $\text{CaCl}_2$ 水体混合,共同提供了该区200 m以浅卤水钾矿成钾物质来源<sup>[20]</sup>。现代径流系统研究揭示,早更新世晚期,塔里木盆地西部剧烈抬升,河流强烈切割侵蚀,塔里木河在该时期可能就已经开始补给罗布泊<sup>[28]</sup>。基于200~500 m深度段卤水在常、微量元素对比和Piper图解中与塔里河水成分相近的富集 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 的特点,以及卤水 $\text{K}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 良好的正相关特征(图7),推测塔里木河很可能作为地表隆起盐穹隆剥蚀溶滤盐类物质的“搬运工”,将老地层的钾和盐类物质搬运、汇聚到罗布泊地区。后经蒸发浓缩,形成该套卤水现今硼同位素、锶同位素、D、O同位素特征。

## 5.2 深层卤水钾成矿模式

早中更新世时期,西域运动促使研究区周边构造抬升。在罗布泊地区,表现为凝灰质碎屑颗粒在碎屑储层中大量出现,气候变得更加干旱,与构造运动伴生的K、Li含量较为丰富的火山碎屑物质成为重要的储层岩石类型,该套储层中火山碎屑物质经历

后期成岩过程中的溶蚀溶解作用,以及与构造活动伴生的热液流体加入,成为早—中更新世地层卤水钾的重要物质来源。与此同时,塔里木盆地西部剧烈抬升,加剧了古近纪—新近纪海相、海陆交互相含盐地层,主要是中新世地层抬升剥蚀和大气淡水对盐层的淋滤溶解,塔里木河携带这些溶解的盐类物质(包括 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等)补充进入罗布泊,与富K、Li、B的热液流体共同形成了现今200~500 m深度段含钾卤水矿,可以称之为“深部物质补给+古盐溶滤”二元成钾模式(图10)。

## 6 结论

通过对研究区LDK02井卤水储层岩石学与储集空间、卤水常、微量元素及同位素分析,认为LDK02井200~500 m含钾卤水 $\text{K}^+$ 含量达到单独开采利用标准。该套早—中更新世卤水类型为硫酸盐型,与西域运动相关的深部富K、Li物质,以及古近纪—新近纪海相、海陆交互相含盐地层,主要是中新世含盐地层溶解的盐类物质补给,是该层段卤水 $\text{K}^+$ 的重要来源,可概括为罗布泊地区“深部物质补给+古盐溶滤”二元成钾模式。目的层段200~500 m含钾卤水与现今开采的罗布泊200 m以浅含钾卤水矿存在诸多相似性特征,推测二者可能为同源继承演化关系。

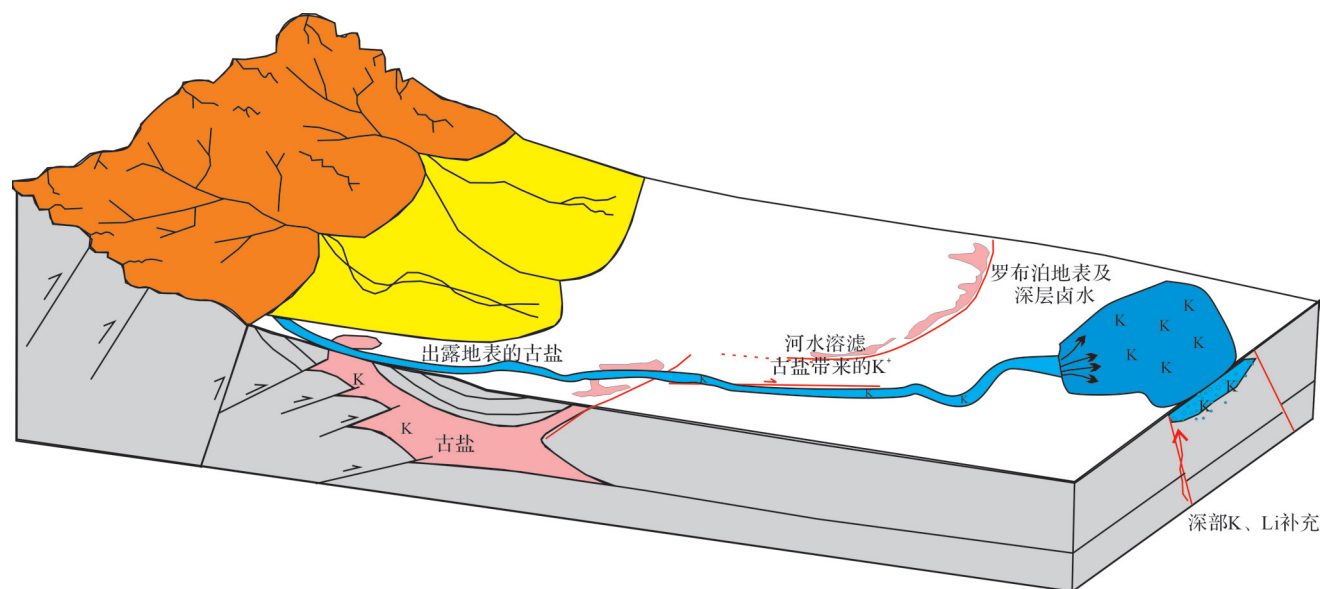


图10 罗布泊深层卤水二元成钾模式

Fig.10 Binary potassium formation pattern of deep brine in Lop Nur

## 参考文献(References)

- [1] 苏北海. 谁说罗布泊是游移湖[J]. 新疆大学学报, 1982(1): 24-33. [Su Beihai. Who says Lop Nur is a wandering lake[J]. Journal of Xinjiang University, 1982(1): 24-33.]
- [2] 郑绵平, 齐文, 吴玉书, 等. 晚更新世以来罗布泊盐湖的沉积环境和找钾前景初析[J]. 科学通报, 1991, 36(23): 1810-1813. [Zheng Mianping, Qi Wen, Wu Yushu, et al. Sedimentary environment of Lop Nur Salt Lake since Late Pleistocene and its potassium prospecting prospects[J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(23): 1810-1813.]
- [3] 王弭力, 刘成林, 焦鹏程. 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, 2006, 52(6): 757-764. [Wang Mili, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng. Investigation and scientific research progress and exploitation present situation of Lop Nur Salty Lake potash deposits, Xinjiang, China[J]. Geological Review, 2006, 52(6): 757-764.]
- [4] 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 等. 新疆罗布泊第四纪盐湖上升卤水流体及其成钾意义[J]. 矿床地质, 2003, 22(4): 386-392. [Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili, et al. Ascending brine fluids in Quaternary salty lake of Lop Nur in Xinjiang and their significance in potash formation[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(4): 386-392.]
- [5] 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 等. 罗布泊断陷带内形成富钾卤水机理研究[J]. 矿床地质, 2010, 29(4): 602-608. [Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, et al. Formation mechanism of potash-bearing brine in fault belts of Lop Nur Lake, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 2010, 29(4): 602-608.]
- [6] 刘成林, 王弭力, 焦鹏程. 新疆罗布泊盐湖氢氧锶硫同位素地球化学及钾矿成矿物质来源[J]. 矿床地质, 1999, 18(3): 268-275. [Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng. Hydrogen, Oxygen, strontium and sulfur isotopic geochemistry and potash forming material sources of Lop Nur salt lake, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(3): 268-275.]
- [7] 刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 等. 罗布泊盐湖巨量钙芒硝沉积及其成钾效应分析[J]. 矿床地质, 2007, 26(3): 322-329. [Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili, et al. Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur salt lake, Xinjiang, China[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(3): 322-329.]
- [8] 王文祥, 李文鹏, 刘成林, 等. 第四纪以来塔里木河流域对罗布泊的钾离子输运量[J]. 矿床地质, 2013, 32(6): 1285-1290. [Wang Wenxiang, Li Wenpeng, Liu Chenglin, et al. Transportation of potassium from rivers surrounding Tarim Basin to Lop Nur since Quaternary[J]. Mineral Deposits, 2013, 32(6): 1285-1290.]
- [9] 张云, 李晓东, 赵岩, 等. 罗布泊盐湖深部钾盐地质科学钻探 LDK02 孔冲洗液工艺[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(9): 57-62. [Zhang Yun, Li Xiaodong, Zhao Yan, et al. Drilling fluid for the potassium geological scientific drilling borehole LDK02 in deep Lop Nur salt lake[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(9): 57-62.]
- [10] 张华, 刘成林, 焦鹏程, 等. 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, 2021, 95(7): 2030-2040. [Zhang Hua, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, et al. Deep potash deposits in the Lop Nur salt lake: Theory, practice, exploration advances and prospecting[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(7): 2030-2040.]
- [11] 施炜, 刘成林, 杨海军, 等. 基于砂箱模拟实验的罗布泊盆地新构造变形特征分析[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(4): 529-534. [Shi Wei, Liu Chenglin, Yang Haijun, et al. Research on Neotectonic of the Lop Nur Basin based on sandbox experiments[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(4): 529-534.]
- [12] Zhang H, Jiao P C, Liu C L, et al. 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, 2021, 2: 364-366.
- [13] 郭召杰, 张志诚. 罗布泊形成及演化的地质新说[J]. 高校地质学报, 1995, 1(2): 82-87. [Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng. The geological interpretation of the forming and evolution of Lop Nur, NW China[J]. Geological Journal of China Universities, 1995, 1(2): 82-87.]
- [14] 张瑜, 马黎春, 王凯. 罗布泊干盐湖第四纪环境演变研究进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 149-164. [Zhang Yu, Ma Lichun, Wang Kai. Research progress of Quaternary environmental evolution in Lop Nur Playa[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 149-164.]
- [15] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0212—2002 盐湖和盐类矿产地质勘查规范[S]. 中华人民共和国国土资源部, 2003. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0212-2002 Specifications for salt-lake, salt mineral exploration [S]. Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2003.]
- [16] Fontes J C, Matray J M, Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France: 1. Brines associated with Triassic salts[J]. Chemical Geology, 1993, 109: 149-175.
- [17] Veizer J, Demovic R. Strontium as a tool in facies analysis[J]. Jour. Sed. Petrology, 1974, 44(1): 93-115.
- [18] Cai Chunfang, Wang Jiyang, Gu Jiayu. Fluid-rock interaction in Chinese sedimentary basins[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005, 22(2): 239-247.
- [19] 王兴元, 尹宏伟, 邓小林, 等. 库车坳陷新生代盐岩锶同位素特征及物质来源分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2015, 51(5): 1068-1074. [Wang Xingyuan, Yin Hongwei, Deng Xiaolin, et al. Strontium isotope characteristics and the origin of Cenozoic salt deposits in Kuqa Depression[J]. Journal of Nanjing university (Natural sciences), 2015, 51(5): 1068-1074.]
- [20] Li R Q, Liu C L, Xu H M, et al. Genesis of glauberite sedimentation in Lop Nur Salt Lake—Constraints from thermodynamic simulation of the shallow groundwater in the Tarim River Basin, China[J]. Chemical Geology, 2020, 537: 119461.
- [21] 郭顺. 俯冲—碰撞带硼循环[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(5): 1049-1060. [Guo Shun. Boron cycling in subduction-collision zones[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(5): 1049-1060.]

- [22] Chaussidon M, Marty B. Primitive boron isotope composition of the mantle[J]. *Science*, 1995, 269(5222): 383-386.
- [23] Chaussidon M, Albarède F. Secular boron isotope variations in the continental crust: An ion microprobe study[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, 108(4): 229-241.
- [24] Spivack A J, Palmer M R, Edmond J M. The sedimentary cycle of the boron isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(7): 1939-1949.
- [25] 肖容阁, 蔡克勤, 大井隆夫等. 硼及硼同位素地区化学在地质研究中的应用[J]. *地学前缘(中国地质大学, 北京)*, 1999, 6(2): 361-367. [Xiao Rongge, Takao Oi, Cai Keqin et al. Application of Boron and Boron isotopic geochemistry in the study of geological process[J]. *Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing)*, 1999, 6(2): 361-367. ]
- [26] 顾新鲁, 赵振宏, 李清海, 等. 罗布泊地区罗北凹地潜卤水钾矿床成因与开发前景[J]. *水文地质工程地质*, 2003, 30(2): 32-36, 5. [Gu Xinlu, Zhao Zhenhong, Li Qinghai, et al. Analysis of the developing prospect of the unconfined brine kalium mine in the North Hollow of the Lop Nur region[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 30(2): 32-36, 5. ]
- [27] 彭希龄. 新疆新构造运动的表现和特点[J]. *成都理工学院学报*, 1998, 25(2): 169-181. [Peng Xiling. Appearances and Characteristics of the Neotectonic Movements in Xinjiang[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1998, 25(2): 169-181. ]
- [28] Lü F L, Zhang H, Liu C L, et al. 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*, 2021, 205: 105473.

## Discussion on Sources of Potassium in Quaternary Deep Potassium Brines in Lop Nur

FAN Fu<sup>1,2</sup>, GUO TingFeng<sup>3</sup>, HOU XianHua<sup>1,2</sup>, ZHANG FanKai<sup>4</sup>, YU YongMei<sup>4</sup>, MENG FanWei<sup>5</sup>, WANG JiMing<sup>1</sup>

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Key Laboratory of Salt Lake Resources, Ministry of Natural Resources, Beijing 100037, China

3. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development in Qinghai Province, Xining 810000, China

4. SDIC Xinjiang Luobupo Hoevellite Co., Ltd., Hami, Xinjiang 839000, China

5. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China

**Abstract:** [Objective] The paper explores the geochemical and genetic evolution characteristics of deep potassium-rich brine in Lop Nur and investigates the potassium salt mineralization model, aiming to provide a scientific basis for subsequent target selection of deep potassium-rich brine resources in Lop Nur. [Methods] Based on the petrological analysis of the brine reservoir and analysis on the normal and trace elements and isotopes of the brine, using the means of phase diagram and element correlation analysis. [Results and Conclusions] It is found that the brine of 200 m to 500 m from the Early to Middle Pleistocene in well LDK02 in Lop Nur area is mainly sulphate-type, and the content of  $K^+$  is far more than 3g/L, reaching the  $K^+$  alone mining and utilization standard. The sodium chloride coefficient is close to 1, and the boron isotopes are close to the marine sediments, which indicates the brine is mainly of Marine salt origin. The positive correlation between  $K^+$  and  $HBO_2$  indicates that the filtration salt bed provides a certain amount of  $K^+$  in brine. The characteristics of strontium isotopes are similar to those of Miocene saline formations, the positive drift of D and O isotopes, which indicates that the brine was mainly leached from the Miocene saline formations and had undergone a concentrated evaporation process. Combined with previous studies on the tectonic evolution in the Early and Middle Pleistocene and the formation history of modern runoff system in Lop Nur, the soluble salt from the marine and marine-terrestrial salt-bearing strata in the Paleogene- Neogene, especially Miocene saline strata, which are carried by the Tarim River into Lop Nur, are the important source of brine  $K^+$ . In addition, considering the tectonic movement background of the western region in the Pleistocene, indicates that the K-rich and Li-rich hydrothermal fluids and the dissolution of volcanic detritus related to tectonic movement also provide an important source of K in the brine. Based on this, a binary model of “deep material recharge + paleo-salt dissolution and filtration” for potassium-bearing brine from the 200 -500 m in the early-middle Pleistocene in Lop Nur has been established.

**Key words:** Lop Nur; Quaternary; normal and trace elements; isotopes; potassium source