

# 基于水文地球化学模拟的昆特依盐湖杂卤石 成矿流体来源初步研究

艾子业<sup>1,2,3</sup>, 李永寿<sup>1,2</sup>, 唐启亮<sup>1,2</sup>, 程怀德<sup>1,2</sup>, 李俊<sup>1,2,3</sup>,  
周同亮<sup>1,2,3</sup>, 张西营<sup>1,2</sup>, 吕学成<sup>4</sup>, 蔡万宁<sup>4</sup>

(1. 中国科学院青海盐湖研究所, 中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室, 青海 西宁 810008;  
2. 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 青海 西宁 810008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;  
4. 青海盐湖镁业有限公司, 青海 格尔木 816000)

**摘要:**柴达木盆地昆特依盐湖赋存大量杂卤石。研究结果显示, 苏干湖湖水模拟蒸发析出的盐类矿物与研究区实际情况相符, 但杂卤石析出量很少; 油田卤水模拟析盐结果中没有发现杂卤石, 且析出盐类矿物与实际情况差异很大。典型钻孔杂卤石饱和指数(SI)分析表明, 卤水相对杂卤石而言是不饱和的。综合分析揭示, 地表水应该是昆特依盐湖成盐物质的主要来源, 而深部油田卤水对于杂卤石的形成具有重要作用, 杂卤石的沉积是不同流体混合作用的结果。

**关键词:**昆特依盐湖; 杂卤石矿; 水文地球化学模拟; 饱和指数; 成矿流体来源

**中图分类号:** P619.211

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-858X(2018)04-0044-07

杂卤石( $\text{Ca}_2\text{MgK}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )是一种常见的含钾矿物, 普遍存在于古代及现代蒸发岩矿床中<sup>[1]</sup>。杂卤石是制造“有机钾肥”硫酸钾(SOP)的重要原料, 利用该矿物来制造 SOP 是当前国际钾肥行业发展的新趋势<sup>[2-3]</sup>。国外对该矿物已经开展了诸多研究, 但多侧重于海相, 陆相很少<sup>[4-9]</sup>。杂卤石在我国发现比较晚, 最早在 20 世纪 90 年代发现于四川的三叠系地层中<sup>[10]</sup>。此后, 在柴达木盆地、新疆的罗布泊、江汉盆地以及山东的大汶口盆地等地都发现了该矿物<sup>[11-18]</sup>。柴达木盆地杂卤石比较丰富, 主要存在于盆地北缘的昆特依盐湖, 这些杂卤石已经形成了一定规模的矿床, 且具有埋藏浅、品位较高的特点<sup>[14]</sup>。本文以柴达木盆地昆特依盐湖为研究对象, 通过对该盐湖补给水源的分析研究, 尝试利用水文地球化学模拟方法(EVP/EQL 和 PHREEQC)对杂卤石成矿流体来源进行识别并探讨它们在杂卤石

形成过程中的作用。

## 1 区域地质概况

昆特依盐湖是柴达木盆地北部的一个北西—南东向次级断陷盆地, 位于北纬  $38^\circ 24' \sim 39^\circ 20'$ , 东经  $92^\circ 45' \sim 93^\circ 25'$ , 长约  $75 \sim 80 \text{ km}$ , 宽约  $20 \sim 30 \text{ km}$ , 总面积  $1\,680 \text{ km}^2$ 。大地构造隶属于柴达木盆地北缘断块带西段, 北部为阿尔金山南斜坡, 东部为冷湖系列背斜构造(主要是冷湖三、四、五和六号构造), 南部为葫芦山背斜构造, 西部为鄂博梁 I 号和 II 号背斜构造(图 1)。张彭熹等<sup>[19]</sup>认为, 昆特依湖盆是在上新世末期的构造运动中从柴达木湖中分割出来的一个独立湖盆; 沈振枢<sup>[20]</sup>则认为该盆地的形成是早更新世柴达木古湖的初步分割以及中—晚更新世古湖完全解体的结果。总之, 昆特依盆地是在青藏高原区域性隆

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2017-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672087, 41402082); 西部之光项目“柴达木盆地杂卤石矿层储集性能评价及最佳溶采区预测”; 青海省应用基础研究计划项目(2014-ZJ-704)

作者简介: 艾子业(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向盐类矿床学和地球化学。Email: 1048227694@qq.com。

通信作者: 张西营(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事盐湖地球化学研究。Email: xyszchina@isl.ac.cn。

升构造动力背景下,逐渐从柴达木盆地分隔出来而形成的次级盆地,盆内及周缘地区发育了多条大断裂,并对盐湖的成矿作用产生重要影响<sup>[21]</sup>。昆特依盐湖周围分布有苏干河、绿草河、清水河、苦水河等多条补给河流以及冷湖、钾湖、盐湖、苏

干湖、小苏干湖等大小湖泊。大(小)哈尔腾河(绿草河是大哈尔腾河下游的一个河段)是最主要的地表河流补给源,河水在最终汇入苏干湖之后以地下径流的方式补给盐湖区,为湖区主要的河流补给来源。

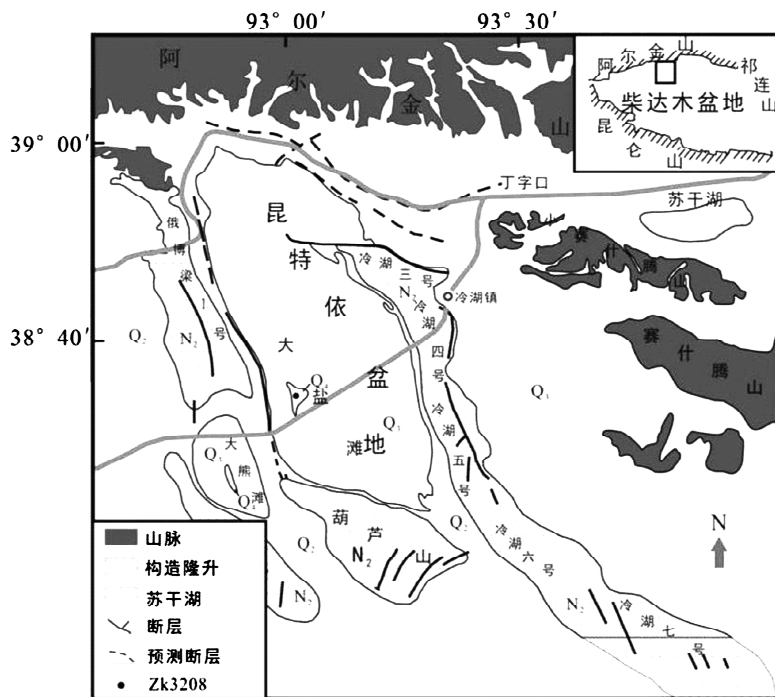


图1 柴达木盆地昆特依盐湖地质简图(修改自文献<sup>[24]</sup>)

Fig. 1 Geological map of Kuntay playa in north Qaidam Basin

从已揭露的地层来看,新生代以来昆特依盐湖地区发育了渐新统下干柴沟组、中新统上干柴沟组和下油砂山组、上新统上油砂山组和狮子沟组、下更新统阿拉尔组、中更新统尕斯库勒组、上更新统达布逊组以及全新统察尔汗组等9个地层单元,其中盐类沉积主要集中在第四系地层中。研究表明,昆特依盐湖最早成盐于1 Ma<sup>[22-23]</sup>,大部分地区可能在晚更新世末期基本就成为了一个干盐滩<sup>[22]</sup>。研究区杂卤石主要分布在盆地西侧大盐滩矿区的更新统地层中,自早更新世以来,大盐滩 ZK3208 孔及其附近小范围地区基本为昆特依盐湖的沉降中心和化学沉积中心<sup>[14]</sup>,因此 ZK3208 是昆特依盐湖盐类沉积的代表性钻孔。据推算,该盐湖杂卤石大规模形成于中更新世中晚期,杂卤石矿自下而上可分为5个主要成矿层位,矿层厚度介于1~7 m之间,埋深最大不超过140 m,最大面积372 m<sup>2</sup>,除了第1和第5层外,其

余3层的杂卤石矿分布面积均较大,且矿层厚度自下而上呈增加趋势<sup>[14,24]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

苏干湖位于昆特依盐湖东部,主要接受来自东部的大、小哈尔腾河的补给(图1)。在苏干湖水采集了1个样品(SH04)。野外测定 pH、温度、Eh 等参数。装入 500 mL 聚乙烯塑料瓶中。冷湖三、四号构造带分别位于位于冷湖镇的北部和南部,油田水样品主要采自储油罐底部放水口,少量样品采自自喷井,其中冷湖三号构造中的油田卤水来自地下 466.2~730.4 m 深的中侏罗统(J<sub>2</sub>)地层中,冷湖四号构造中的油田水样来自渐新统(E<sub>3</sub>)地层至中新统(N<sub>1</sub>)地层中,深度 511.4

~610.0 m<sup>[25]</sup>。样品采集后,装入 500 mL 聚乙烯塑料瓶中用防水胶带封存,共采集油田水样 68 件。

2.2 样品测试

将采集的水样在室内用双层滤纸进行过滤,将过滤后的清液稀释后进行水化学成分分析,全部分析工作在中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成。主要分析方法及检测精度如下:Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>采用容量法,RSD≤0.5%;其余离子利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)进行分析,其中,S 的检测限 < 1 mg/L;Na 的检测限 < 0.1 mg/L;K、Ca、Mg 的检测限均 < 0.05 mg/L。通过对冷湖三号、四号构造中油

田水水样进行测试分析得知,油田水中主要的成分包括 Na、K、Ca、Mg、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 等(表 1)。

2.3 EQL/EVP 和 PHREEQC 水文地球化学模拟

EQL/EVP 程序是基于 Pitzer 理论的一种卤水化学演化平衡模型,可定量计算卤水体系中各离子的富集特征以及盐类矿物的蒸发析出序列等<sup>[17,26-29]</sup>。本文利用 EQL/EVP 软件模拟析盐规律。首先,在 EQL/EVP 软件中输入或设定要计算样品的化学组分和物理化学参数,程序开始运行;程序运行后,获得一系列数据,这些数据代表了随着水体的不断浓缩,析出的各种矿物及残余溶液中的主要组分含量;根据计算出的数据,建立浓缩系数—矿物含量对数图,从中可以看出模拟水体在不同浓缩阶段的析盐规律。

表 1 苏干湖湖水和冷湖构造油田水的主要水化学成分

Table 1 Main hydrochemical components of Suganhu lake water and oilfield brines of Lenghu Structure areas

| 地 点      |     | $\rho$ | pH   | TDS   | Na     | K      | Ca    | Mg    | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl     | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> |
|----------|-----|--------|------|-------|--------|--------|-------|-------|-------------------------------|--------|-------------------------------|
| 苏干湖      |     |        | 9.07 | 28.94 | 7 900  | 383.50 | 47.51 | 1 301 | 9 269.0                       | 8 710  | 852.2                         |
| 冷湖<br>三号 | 最大值 | 1.070  | 8.4  | 97.00 | 23 234 | 239    | 9 611 | 2 549 | 1 226                         | 59 723 | 1 171                         |
|          | 最小值 | 1.003  | 6.0  | 3.84  | 1 156  | 17     | 25    | 4     | 1                             | 1 406  | 93                            |
|          | 平均值 | 1.024  | 7.1  | 33.24 | 8 884  | 96     | 2 564 | 674   | 253                           | 19 819 | 394                           |
| 冷湖<br>四号 | 最大值 | 1.050  | 7.39 | 92.9  | 31 778 | 104    | 4 994 | 1 785 | 680                           | 56 200 | 551                           |
|          | 最小值 | 1.020  | 6.12 | 30.00 | 7 767  | 29     | 1 592 | 191   | 2                             | 17 333 | 33                            |
|          | 平均值 | 1.030  | 6.79 | 43.20 | 12 327 | 64     | 2 454 | 1 099 | 40                            | 26 375 | 106                           |

TDS 的单位为 g/L,离子浓度单位为 mg/L,密度( $\rho$ )的单位为 g/cm<sup>3</sup>,pH 为无量纲

PHREEQC 是由美国地质调查局开发的水文地球化学模拟软件,该程序已被广泛用于各类水体的水文地球化学过程模拟和计算<sup>[8,30-35]</sup>。利用美国地质调查局编写的 PHREEQC 软件(Version 3.3.9.11951)和前人水化学数据<sup>[24]</sup>开展杂卤石等盐类矿物的饱和指数计算,具体步骤如下:1)安装并打开软件,进入 windows 界面,打开 SOLUTION 进行参数设置;2)在 General 选项中根据实际测量,输入 pH、密度等参数;3)在 Individual element input 选项中选择并填写实际测量的元素含量,默认数据单位为 mg/L;4)参数设置完毕,在 Option 选项中,设置默认数据库为 pitzer 数据库;5)保存文件并运行,可以获取包括饱和指数(SI)在内的一系列运算结果。

3 结果与讨论

3.1 补给水蒸发析盐模拟

本研究利用 EQL/EVP 卤水化学平衡模型在开放体系下对昆特依盐湖代表性地表水源(苏干湖)和深部流体(冷湖地区油田卤水)分别进行了模拟。考虑到研究区属于高寒地区,模拟温度  $t = 11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;根据前人研究<sup>[17,27]</sup>,设定二氧化碳分压  $P_{\text{CO}_2} = 10^{-3.4}$ 。结果见图 2 和图 3。

分析结果显示,苏干湖湖水的水化学类型为硫酸钠亚型,该水体在开放体系下的盐类析出序列为:

- 1) 方解石 + 菱镁矿
- 2) 方解石 + 菱镁矿 + 芒硝
- 3) 方解石 + 菱镁矿 + 芒硝 + 石膏
- 4) 方解石 + 菱镁矿 + 芒硝 + 石膏 + 石盐 + 钙芒硝
- 5) 方解石 + 菱镁矿 + 芒硝 + 石膏 + 石盐 + 钙芒硝 + 白钠镁矾
- 6) 方解石 + 菱镁矿 + 芒硝 + 石膏 + 石盐 + 钙芒硝 + 白钠镁矾 + 泻利盐 + 杂卤石
- 7) 方解石 + 菱镁矿 + 芒硝 + 石膏 + 石盐 + 钙芒硝 + 白钠镁矾 + 泻利盐 + 杂卤石 + 钾石盐
- 8) 方解石 + 菱镁矿 + 芒硝 + 石膏 + 石盐 + 钙芒硝 + 白钠镁矾 + 泻利盐 + 杂卤石 + 钾石盐 + 钾盐镁矾 + 光卤石
- 9) 方解石 + 菱镁矿 + 芒硝 + 石膏 + 石盐 + 钙芒硝 + 白钠镁矾 + 泻利盐 + 杂卤石 + 钾石盐 + 钾盐镁矾 + 光卤石 + 水氯镁石 + 无水石膏。

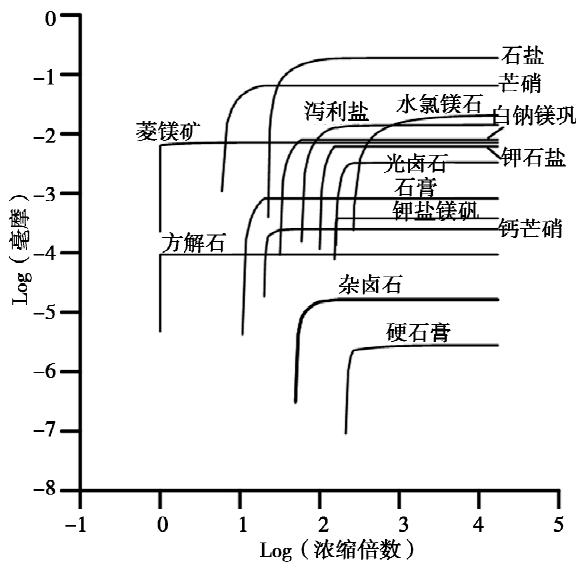


图2 开放系统下苏干湖湖水演化模拟

Fig. 2 Evolution of Suganhu lake water simulate with EQL/EVP computer program in open system

结果表明,析出的主要盐类矿物为:芒硝(50%,重量百分比,下同)、石盐(24.2%)、泻利盐(7.4%)、白钠镁矾(5.9%)和水氯镁石(7.9%),这些矿物占总盐量的95%。虽然杂卤石也有析出,但仅占总盐量的0.02%,这显然与矿区杂卤石大量产出的实际情况不符。虽然该卤水体系模拟蒸发析出的盐类矿物与昆特依盐湖的

实际情况有较好的一致性,但各种盐类矿物的比例则与矿区实际情况存在很大差异。不过,以苏干湖湖水为代表的地表水显然对昆特依盐湖的成盐物质具有重要贡献,但单纯的苏干湖湖水补给盐湖并不能形成大量的杂卤石。

昆特依盐湖另一个重要的成盐物质补给源来自深部的油田卤水,分析结果表明,这些油田水为Ca-Cl型卤水。选择具有代表性的油田卤水样品开展开放系统下EQL/EVP地球化学模拟,盐类析出序列为:

- 1) 方解石
- 2) 方解石 + 石盐 + 石膏
- 3) 方解石 + 石盐 + 石膏 + 硬石膏
- 4) 方解石 + 石盐 + 石膏 + 硬石膏 + 光卤石
- 5) 方解石 + 石盐 + 石膏 + 硬石膏 + 光卤石 + 南极石 + 水氯镁石
- 6) 方解石 + 石盐 + 石膏 + 硬石膏 + 光卤石 + 南极石 + 水氯镁石
- 7) 方解石 + 石盐 + 石膏 + 硬石膏 + 光卤石 + 南极石 + 水氯镁石 + 溢晶石

模拟结果显示,该体系下析出的矿物主要有方解石、石膏、硬石膏、石盐、光卤石、水氯镁石以及罕见的南极石和溢晶石等;其中,石盐占总盐量的48.8%,南极石为30.7%,水氯镁石为18.2%,其余盐类仅占不到3%,并且析出的盐类矿物中

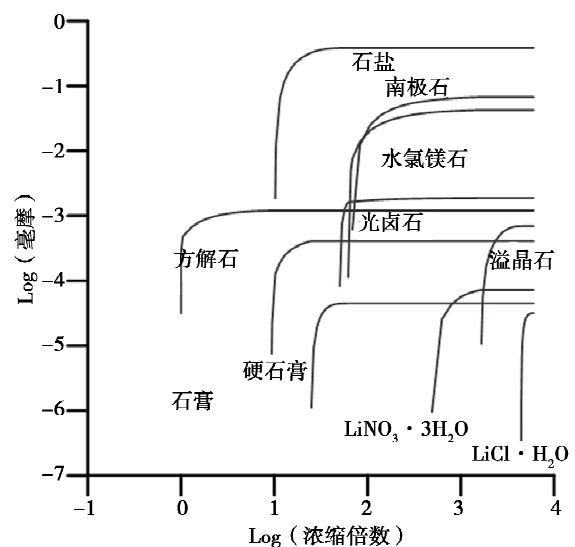


图3 开放系统下冷湖油田卤水演化路径EQL/EVP模拟  
Fig. 3 Evolution of the oilfield brine modelled by EQL/EVP computer program in open system

没有杂卤石。从析出矿物的种类来看,这与大盐滩的矿物序列差异巨大。油田卤水虽然可能是重要的成盐物源之一,但模拟结果指示了这些深部油田卤水不可能是最主要的成盐物质贡献者。

综合分析表明,单纯的地表水和深部油田卤水都难以形成昆特依盐湖中大量存在的杂卤石。实际上,在盐湖成矿卤水演化的早期,卤水中 K、Mg 浓缩程度较低,因此难以形成或难以大量形成杂卤石;而演化的后期,则缺乏形成杂卤石所需要的 Ca,这也难以形成大量杂卤石。虽然在后期的富 K、Mg 卤水环境下杂卤石可以交代石膏,但事实上在很多含大量杂卤石的层位却没有发现石膏的存在<sup>[14,24]</sup>。因此,研究区杂卤石应该是多种流体混合、掺杂以及水岩反应等作用 and 过程的产物,这些过程和作用是复杂的,有待深入研究和理解。

4.2 不同储卤层矿物饱和指数

饱和指数(SI)是水文地球化学研究中应用较

广泛的一个指标,它主要研究的是矿物在水中的饱和状态。饱和指数(SI)的定义为:

$$SI = \lg \frac{IAP}{K}$$

式中,SI 为矿物的饱和指数;IAP 为矿物溶解反应中相关离子的活度积;K 为矿物在某温度下溶解反应的平衡常数。当 SI = 0 时,矿物在水溶液中处于平衡状态;当 SI < 0 时,表明矿物在水溶液中未达到饱和状态,矿物将发生溶解;当 SI > 0 时,表明矿物在水溶液中处于过饱和状态,矿物将发生沉淀<sup>[35]</sup>。

本文选择昆特依盐湖沉积中心的典型钻孔 ZK3208 剖面,基于黎成忠等人对钻孔卤水分层取样及水化学分析数据结果<sup>[24]</sup>,并利用 PHREEQC 软件对主要盐类矿物的饱和指数进行了计算,结果见表 2。

表 2 ZK3208 孔不同层位卤水中主要盐类矿物的饱和指数  
Table 2 Saturation index of major saline minerals in different brines from core ZK3208

| 取样深度/m          | 钾石盐   | 水氯镁石  | 白钠镁矾  | 光卤石   | 泻利盐   | 五水泻盐  | 石膏    | 石盐    |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.78 ~ 12.05    | -0.71 | -3.08 | -0.17 | -2.69 | -0.43 | -0.74 | -0.41 | -0.02 |
| 14.37 ~ 37.59   | -0.92 | -3.03 | 0.02  | -2.86 | -0.26 | -0.57 | -0.52 | -0.07 |
| 38.51 ~ 61.96   | -1.18 | -2.98 | 0.06  | -3.06 | -0.19 | -0.50 | -0.25 | -0.09 |
| 67.13 ~ 88.52   | -0.78 | -3.84 | -1.26 | -3.52 | -1.37 | -1.71 | -0.08 | 0.03  |
| 90.16 ~ 130.02  | -0.78 | -3.00 | -0.08 | -2.68 | -0.35 | -0.65 | -0.20 | -0.01 |
| 134.29 ~ 159.31 | -0.99 | -2.91 | 0.13  | -2.80 | -0.20 | -0.50 | -0.13 | -0.02 |
| 164.57 ~ 227.11 | -0.39 | -2.96 | -0.74 | -2.25 | -0.58 | -0.90 | -0.05 | -0.09 |
| 233.27 ~ 335.81 | -1.34 | -4.54 | -1.92 | -4.78 | -1.91 | -2.27 | -0.18 | -0.08 |
| 取样深度/m          | 钙芒硝   | 四水泻盐  | 钾盐镁矾  | 钾石膏   | 杂卤石   | 软钾镁矾  | 芒硝    | 六水泻盐  |
| 0.78 ~ 12.05    | -0.05 | -0.99 | -1.40 | -2.00 | -0.75 | -1.31 | -0.62 | -0.62 |
| 14.37 ~ 37.59   | -0.14 | -0.83 | -1.46 | -2.42 | -1.12 | -1.45 | -0.58 | -0.45 |
| 38.51 ~ 61.96   | 0.10  | -0.76 | -1.64 | -2.65 | -1.02 | -1.88 | -0.61 | -0.38 |
| 67.13 ~ 88.52   | 0.15  | -1.97 | -2.47 | -2.03 | -1.48 | -2.61 | -0.62 | -1.57 |
| 90.16 ~ 130.02  | 0.17  | -0.90 | -1.38 | -1.92 | -0.37 | -1.36 | -0.64 | -0.53 |
| 134.29 ~ 159.31 | 0.30  | -0.74 | -1.43 | -2.21 | -0.41 | -1.56 | -0.62 | -0.38 |
| 164.57 ~ 227.11 | -0.11 | -1.15 | -1.25 | -1.29 | 0.15  | -1.12 | -1.03 | -0.77 |
| 233.27 ~ 335.81 | -0.06 | -2.55 | -3.62 | -3.11 | -3.33 | -4.13 | -0.54 | -2.12 |

分析结果显示,杂卤石饱和指数几乎都小于0或接近-1,表明卤水相对杂卤石而言是不饱和的,但不同卤水层的杂卤石饱和指数也呈现出一定的变化。白钠镁矾的饱和指数几乎接近于0,石盐与石膏的饱和指数也非常接近0,这表明这些矿物在卤水中是饱和或近于饱和的。实际上,这几种矿物在研究区不仅存在,而且分布比较广泛,饱和指数结果与此具有很好的一致性。钙芒硝与石盐一样,基本处于饱和状态,研究区地层中也存在该矿物。除了这些矿物外,其它矿物的饱和指数基本都小于0甚至小于-1,代表了这些矿物是均处于不饱和状态。从不同矿物饱和指数在剖面上的变化来看,这些矿物的饱和指数自下而上呈现增加趋势,显示了随着成盐作用的增强,各种盐类矿物也趋于饱和状态。由于地层中的现存卤水是各种地球化学作用和过程的最终结果,如何通过现在的卤水及储卤介质成分组起来反演这些作用和过程仍需深入研究。

对比钻孔 ZK3208 剖面杂卤石饱和指数和相应层位杂卤石含量发现,两者总体上具有较好的一致性,杂卤石饱和指数自下而上呈现出增大趋势,而杂卤石含量也随之增加(图4)。从整体上来看,杂卤石成矿作用具有阶段性,而这很可能指示了流体补给具有脉冲性。

## 4 结论与建议

1) 苏干湖湖水析盐序列和矿物组合与研究区实际情况具有较好的一致性,但各种盐类矿物的质量比却存在较大差异;这表明,虽然以苏干湖湖水为代表的地表水对昆特依盐湖的成盐物质具有重要贡献,但单纯的地表水补给并不能形成大规模的杂卤石沉积。冷湖油田卤水析出的盐类矿物与昆特依盐湖差异很大且没有析出杂卤石,推测油田卤水可能是重要成盐物源之一,但不可能是杂卤石形成最重要的贡献者;杂卤石应该是多源流体混合及水岩反应等复杂作用的产物。

2) 从饱和指数(SI)计算结果来看,盐湖地下卤水相对杂卤石都是不饱和的,即在现存卤水环境下难以析出大量杂卤石,明显与昆特依盐湖的实际情况不相符;如何正确反演杂卤石的形成过程,仍需进一步研究。

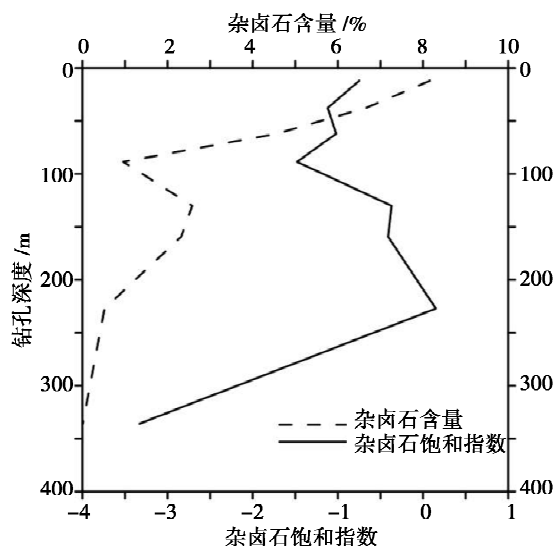


图4 ZK3208 孔各层位杂卤石含量与饱和指数随深度的变化

Fig. 4 Changes of content and saturation index of polyhalite with depth in core ZK3208

3) 对比各层位杂卤石含量及其相应的饱和指数,两者总体上具有较好的一致性,但存在波动变化,推测盐湖蒸发成盐过程中多次受深部流体的脉冲式补给。

**致谢:** 本文得到了中国地质科学院矿产资源研究所马黎春博士和叶传永博士的大力帮助,在此表示衷心感谢。

## 参考文献:

- [1] Warren J K. Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons [M]. Berlin: Springer Science and Business Media, 2006.
- [2] Sutradhar A K, Kaiser D E, Rosen C J. Evaluation of polyhalite as a source of potassium and sulfur for acorn-soybean rotation in Minnesota [C]//Proceedings of the 46th North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference, 2016, 32: 125 - 135.
- [3] Pavuluri K, Malley Z, Mzimhiri M K, et al. Evaluation of polyhalite in comparison to muriate of potash for corn grain yield in the Southern Highlands of Tanzania [J]. International Scholars Journals, 2017, 5(3): 325 - 332.
- [4] Stewart F H. The mineralogy of the British Permian evaporites [J]. Mineralogical Magazine, 1965, 34: 460 - 470.
- [5] Harville D G, Fritz S J. Modes of diagenesis responsible for observed succession of potash evaporites in the Salado Formation, Delaware Basin, New Mexico [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1986, 56(5): 648 - 656.

- [6] Peryt T M, Pierre C, Gryniv S P. Origin of polyhalite deposits in the Zechstein (Upper Permian) Zdrada platform (north Poland) [J]. *Sedimentology*, 1998, 45 (3): 565 – 578.
- [7] Rahimpour-Bonab H, Shariatnia Z, Siemann M G. Origin and geochemistry of Miocene marine evaporites associated with red beds: Great Kavir Basin, Central Iran [J]. *Geological Journal*, 2007, 42 (1): 37 – 54.
- [8] García-Veigas J, Cendón D I, Rosell L, *et al.* Salt deposition and brine evolution in the Granada Basin (Late Tortonian, SE Spain) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 369: 452 – 465.
- [9] Holt N M, García-Veigas J, Lowenstein T K, *et al.* The major-ion composition of Carboniferous seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 134: 317 – 334.
- [10] 黄宣镇. 中国首例杂卤石矿床 [J]. *云南地质*, 1996, 1: 52 – 61.
- [11] 王弭力. Q 凹陷杂卤石的地质意义 [J]. *地质评论*, 1982, 28 (1): 28 – 37.
- [12] 王弭力, 刘成林, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖钾盐资源 [M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [13] 赵德钧, 韩蔚田, 蔡克勤, 等. 大汶口凹陷下第三系含盐段杂卤石的成因及其找钾意义 [J]. *地球科学*, 1987, 12 (4): 349 – 356.
- [14] 魏新俊, 邵长铎, 王弭力, 等. 柴达木盆地西部富钾盐湖物质组分沉积征及形成条件研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [15] 袁见齐, 杨谦, 孙大鹏, 等. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件 [M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [16] 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 等. 罗布泊杂卤石沉积特征及成因机理探讨 [J]. *矿床地质*, 2008, 6: 705 – 713.
- [17] 刘成林, 马黎春, 焦鹏程, 等. 罗布泊盐湖化学沉积序列及其控制因素 [J]. *矿床地质*, 2010, (4): 625 – 630.
- [18] 牛雪, 焦鹏程, 曹养同, 等. 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*, 2015, 89 (11): 2087 – 2095.
- [19] 张彭熹, 等. 柴达木盆地盐湖 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [20] 沈振枢. 柴达木盆地第四纪含盐地层划分及沉积环境 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [21] 王弭力, 杨智琛, 等. 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, 1997.
- [22] 黄麒, 韩凤清. 柴达木盆地盐湖演化与古气候波动 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [23] Wang J Y, Fang X M, Appel E, *et al.* Magnetostratigraphic and radiometric constraints on salt formation in the Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78 (11): 53 – 64.
- [24] 黎成忠, 李正焕. 青海省冷湖镇昆特依钾矿田普查报告 [R]. 格尔木: 青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 1990.
- [25] 高锡兴. 中国含油气盆地油田水 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [26] Risacher F, Clement A. A computer program for the simulation of evaporation of natural waters to high concentration [J]. *Comput Geosci*, 2001, 27: 191 – 201.
- [27] Ma L C, Lowenstein T K, Russell J M. A brine evolution model and mineralogy of chemical sediments in a volcanic crater, Lake Kitagata, Uganda [J]. *Aquatic geochemistry*, 2011, 17 (2): 129 – 140.
- [28] 马黎春, 刘成林, 马建强, 等. 基于海相石盐流体包裹体的古海水演化热力学模拟 [J]. *地质学报*, 2015, (11): 1962 – 1969.
- [29] Ma L, Tang Q, Li B, *et al.* Sediment characteristics and mineralogy of salt mounds linked to underground spring activity in the Lop Nor playa, Western China [J]. *Chemical Erde-Geochemistry*, 2016, 76 (3): 383 – 390.
- [30] Parkhurst D L, Appelo C A. User's Guide to PHREEQC (Version 2) – A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations [Z]. Denver: Geological Survey, 1999.
- [31] Uliana M M, Sharp J M. Tracing regional flow paths to major springs in Trans Pecos Texas using geochemical data and geochemical models [J]. *Chemical geology*, 2001, 179 (1): 53 – 72.
- [32] 窦妍, 侯广才, 钱会, 等. 干旱—半干旱地区地下水水文地球化学演化规律研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2010, (3): 88 – 92.
- [33] 单慧媚, 马腾, 谭婷, 等. 博茨瓦纳 Sua 盐湖地下卤水来源及成因 [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2013, (3): 607 – 615.
- [34] 叶传永, 郑绵平. 青海尕斯库勒盐湖湖体的化学组分存在形式及饱和度研究 [J]. *科技导报*, 2016, 34 (21): 101 – 111.
- [35] 魏亚妮, 李培月, 钱会, 等. 水文地球化学模拟研究与应用 [J]. *水资源与水工程学报*, 2010, (1): 58 – 61.

(下转第 72 页)

## The Influence of Different Solvents on the Extraction of Boron and Isotopic Composition of Boron in Carbonate Sediments

YANG Jian<sup>1,2,3</sup>, MA Yun-qi<sup>1,2</sup>, PENG Zhang-kuang<sup>1,2,3</sup>, LI Hai-jun<sup>1</sup>, CHAI Xiao-li<sup>1</sup>,  
XIAO Ying-kai<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan-ling<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources,  
Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;  
2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lake, Xining, 810008, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

**Abstract:** In the present work, the influence of different solvents (hydrochloric acid, Acetic acid and EDTA – 2Na solution) on the extraction of boron and isotopic composition of boron from carbonate in sediments was studied. The results show that 1 mol/L HAc is the best one for extraction of boron from carbonate in sediments, which can completely dissolve carbonate, and 1 mol/L HAc has little effect on gypsum, silicate, iron oxides and other minerals. Meanwhile, before the solution was injected into the resin, the sub-boiling ammonia was used to adjust pH to weak alkaline, and the amount of the sub-boiling ammonia was less, thus the background was less. Carbonate sediments are dissolved by hydrochloric acid and saturated EDTA – 2Na solution, which is easy to remove boron from other minerals than carbonates, such as gypsum, silicate minerals, etc. It is unfavorable to extract boron from carbonate components.

**Key words:** Carbonate component; hydrochloric acid; Acetic acid; EDTA – 2Na; Extracted boron content; Boron isotope composition

(上接第 50 页)

## Preliminary Study on the Source of formation-ore fluids of Polyhalite in Kuntay Playa Based on Hydrogeochemical Simulation

AI Zi-ye<sup>1,2,3</sup>, LI Yong-shou<sup>1,2,3</sup>, TANG Qi-liang<sup>1,2</sup>, CHENG Huai-de<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,2,3</sup>,  
ZHOU Tong-liang<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xi-ying<sup>1,2</sup>, LÜ Xue-cheng<sup>4</sup>, CAI Wan-ning<sup>4</sup>

- (1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lake, Xining, 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China; 4. Qinghai Salt Lake Magnesium Industry Co. Ltd., Golmud, 816000, China)

**Abstract:** There are voluminous polyhalite deposits in Kuntay Playa of north Qaidam Basin. The present study shows that the saline minerals formed by evaporation simulation of Suganhu lake water is in accordance with the facts in the area, while only little polyhalite is found during the process. For oilfield waters, no polyhalite is found during the simulated evaporating process and the saline minerals from the simulation are obviously different with the fact. The analyses result of saturation index (SI) from typical core profile shows that these brines are undersaturated relative to polyhalite. Comprehensive analyses suggest that surface water should be main source of Kuntay playa and the oilfield brines play an important role in the formation of polyhalite. The deposition of polyhalite is the result of mixing of different fluids.

**Key words:** Kuntay playa; Polyhalite deposits; Hydrogeochemical simulation; Saturation index; Source of ore-forming fluid