

# 新疆库米什盆地硝酸盐型盐湖中锶离子 迁移富集规律研究

李长忠<sup>1,2,3</sup>, 程怀德<sup>1,2</sup>, 张西营<sup>1,2</sup>, 宋建国<sup>1,2,3</sup>, 马学海<sup>1,2,3</sup>, 蒋天明<sup>1,2,3</sup>,  
李俊<sup>1,2,3</sup>, 海擎宇<sup>1,2</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)

**摘要:** 新疆库米什盆地是典型的硝酸盐型盐湖分布区, 盆地盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  的含量明显比新疆其他盐湖要高, 但对该地区盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  的迁移富集规律尚未开展深入研究。本文以库米什盆地硝酸盐型盐湖为研究对象, 探讨了研究区硝酸盐型盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  的迁移富集规律。研究结果表明: ① 库米什盆地水体和沉积物中的  $\text{Sr}^{2+}$  均具有自北西至南东向逐渐迁移富集的规律, 与河水汇聚方向基本一致, 表明盐湖中的  $\text{Sr}^{2+}$  主要随径流逐渐汇集至成盐凹陷中; ② 无论是水体还是沉积物中,  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等化学组分之间均具有较好的相关性和变化趋势上的一致性, 受它们物质补给源的影响较大。盐湖水体在蒸发浓缩作用下, 其矿化度逐渐增高,  $\text{Sr}^{2+}$  含量也随之升高, 表明  $\text{Sr}^{2+}$  的富集与蒸发浓缩作用过程有关; ③ 库米什盆地硝酸盐型盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  的补给源与盆地北西部的天青石矿床、北东部及北西部的碳酸盐岩(以泥盆系灰岩为主)、盆缘的侵入岩有关。综合分析表明, 库米什盆地硝酸盐型盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  的迁移富集具有多源、多方向补给的特征。

**关键词:** 新疆库米什盆地; 硝酸盐型盐湖; 锶离子; 迁移规律

中图分类号: P619.21<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)01-0089-10

## A study of the migration and enrichment regularity of strontium ions in nitrate type salt lakes in Kumishi Basin, Xinjiang

LI Chang-zhong<sup>1,2,3</sup>, CHENG Huai-de<sup>1,2</sup>, ZHANG Xi-ying<sup>1,2</sup>, SONG Jian-guo<sup>1,2,3</sup>, MA Xue-hai<sup>1,2,3</sup>,  
JIANG Tian-ming<sup>1,2,3</sup>, LI Jun<sup>1,2,3</sup> and HAI Qing-yu<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 Lakes, Xining 810008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Representative nitrate type salt lakes are distributed in the Kumishi Basin in Xinjiang. The concentration of  $\text{Sr}^{2+}$  in the basin salt lakes is higher than that of other salt lakes in Xinjiang, but the migration and enrichment regularity of strontium ions in the salt lakes in the study area requires further investigation. In this paper, the research object is the content of strontium ions in nitrate salt lakes. The migration and enrichment regularity of strontium ions in nitrate typical salt lakes in the study area is discussed. The results are as follows: ① Concentrations of  $\text{Sr}^{2+}$  tend to be enriched from northwest to southeast in the water bodies and sediments of the Kumishi Basin, consistent with the converging direction of the river. It is shown that  $\text{Sr}^{2+}$  of the salt lakes is mainly concentrated in

收稿日期: 2020-09-20; 接受日期: 2020-11-24; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 西北研究院“一三五”重点培育项目(Y760031090); 科技部专项项目(2012FY112600)

作者简介: 李长忠(1993-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: lichangzhong18@mails.ucas.ac.cn; 通讯作者: 程怀德(1976-), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事蒸发岩矿床地球化学研究, E-mail: chenghuaide@isl.ac.cn。

the salt formation depression along with the river water (including groundwater); ② Regardless of water bodies or sediments, the variation trend of  $\text{Sr}^{2+}$  is consistent with that of  $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  in chemical composition nitrate-type salt lakes. It is greatly affected by the material supply source of chemical components. Under the action of evaporation and concentration, the salinity of salt lake water bodies gradually increases, and the content of  $\text{Sr}^{2+}$  also increases. It is shown that the enrichment of  $\text{Sr}^{2+}$  is related to evaporation and concentration processes; ③ Main replenishment source of  $\text{Sr}^{2+}$  is the celestite deposit in the northwest and carbonate rocks (mainly Devonian limestone) and strontium-rich intrusive rocks in the northeast and northwest of nitrate-type salt lakes in the Kumishi Basin. Comprehensive analysis shows that migration and enrichment of strontium ions have the characteristics of multi-source and multi-directional replenishment.

**Key words:** Kumishi Basin, Xinjiang; nitrate type salt lakes; strontium ions; migration regularity

**Fund support:** Key Cultivation Project in the 13th Five-Year Plan of Northwest Research Institute (Y760031090); Special Project of Ministry of Science and Technology (2012FY112600)

锶(Sr)是第五周期ⅡA族的碱土金属元素,广泛分布于自然界中,但分布不均,富集成矿的难度较大(胡进武等,2004;陆石基等,2020)。一般而言,含锶或富锶岩石为富锶地下水的形成提供了物质来源,锶则经过风化、淋滤后在水流作用下进行迁移和富集(葛文胜等,2001;崔林等,2006;苏春田等,2017;石海岩等,2018;陆石基等,2020)。研究表明,含锶矿物和富含锶的闪长岩、花岗岩、粘土岩、碳酸盐岩等是主要的富锶母岩(刘庆宣等,2004)。中国现代盐湖中,新疆地区的盐湖卤水中 $\text{Sr}^{2+}$ 含量普遍不高,根据已有数据资料来看,其含量一般为1 mg/L或更低,但在南天山山间盆地(如库米什盆地)的硝酸盐型盐湖中, $\text{Sr}^{2+}$ 的含量却可达10 mg/L以上(郑喜玉等,2002)。这些硝酸盐型盐湖为什么具有相对较高的 $\text{Sr}^{2+}$ 含量以及这些 $\text{Sr}^{2+}$ 是怎样迁移和富集的等科学问题至今还不甚清楚。

库米什盆地发育有多个硝酸盐型盐湖,是新疆最典型和最重要的硝酸盐型盐湖分布区(郑喜玉等,2002)。本文以库米什盆地内高山冰雪融水形成的常年河流及硝酸盐型盐湖为研究对象,开展系统的地表水(河流水、井水、地表卤水等)及水系沉积物的取样、分析和地球化学研究,依此探讨研究区盐湖中 $\text{Sr}^{2+}$ 的物源以及 $\text{Sr}^{2+}$ 的迁移富集规律,以期对揭示硝酸盐型盐湖中相对富 $\text{Sr}^{2+}$ 的机制乃至硝酸盐矿床成矿作用提供资料和依据。

## 1 区域地质背景

库米什盆地位于吐哈盆地的西部,塔里木盆地的北东部(图1),盆地的北部、北东部、南部、西部分

别与南天山、乔尔塔格山、库鲁克塔格山、克孜勒山相邻,盆地周缘发育有托克逊断裂、辛格尔断裂、盆地南缘断裂、包尔图断裂等构造带。据资料,研究区内年均降水量为44.8 mm,年均蒸发量3 361.1 mm,为降水量的75倍多,年平均气温为10.68℃;年最低气温出现在12月至次年2月份,最低气温达21.7℃;年最高气温在6~8月份出现,最高气温达47℃。湖区发育有狼牙状、微波状、平坦状、鼓包状的微地貌且起伏不平(黄铁栋等,2004),盐滩的组成则以坚硬的盐壳为主,植被稀少,盐壳表层沉积物内发育有一层较薄的钾硝石、钠硝石矿,以石盐壳为储存介质发育有丰富的晶间卤水资源。

盆地由于受到强烈构造运动的影响,自北西至南东向分布着硝尔布拉克、乌布喀什布拉克、乌尊布拉克、乌勇布拉克、小横山等5处形状各异的现代洼地,硝酸盐矿体就赋存于其内(黄铁栋,2005)。吴富强(1999)根据盆地主界面深度和磁力异常资料,将库米什盆地划分为“一隆两凹”,即北部的硝尔凹陷带、中部的乌尊隆起带以及南部的帕尔沙凹陷带,硝尔布拉克和乌布喀什布拉克分布于硝尔凹陷带,乌尊布拉克分布于乌尊隆起带,乌勇布拉克及小横山则分布于帕尔沙凹陷带内(图1)。

古新世-上新世早期时,由于喜马拉雅运动的影响,盆地开始沉降,在原侏罗系沉积层之上接受了一套以红色为主的河流相沉积物,为区域性沉降阶段,上新世晚期以来的新构造运动促成了盆地现今的地貌格局(胡剑风等,2004;陈奋雄等,2008)。中更新世中期-晚更新世早期湖盆因受到突发性地质事件和气候事件的影响,湖水开始咸化,湖区局部出现了钠钙硫酸盐类沉积物(郑喜玉,2000)。距今35.0

ka 以来,库米什盆地气候开始持续干旱、湖水急剧浓缩,在距今 30.0 ka 左右湖区开始形成连续的蒸发

岩化学沉积层并赋存高矿化度卤水,表明乌尊布拉克盐湖进入成盐阶段(梁青生, 1999)。

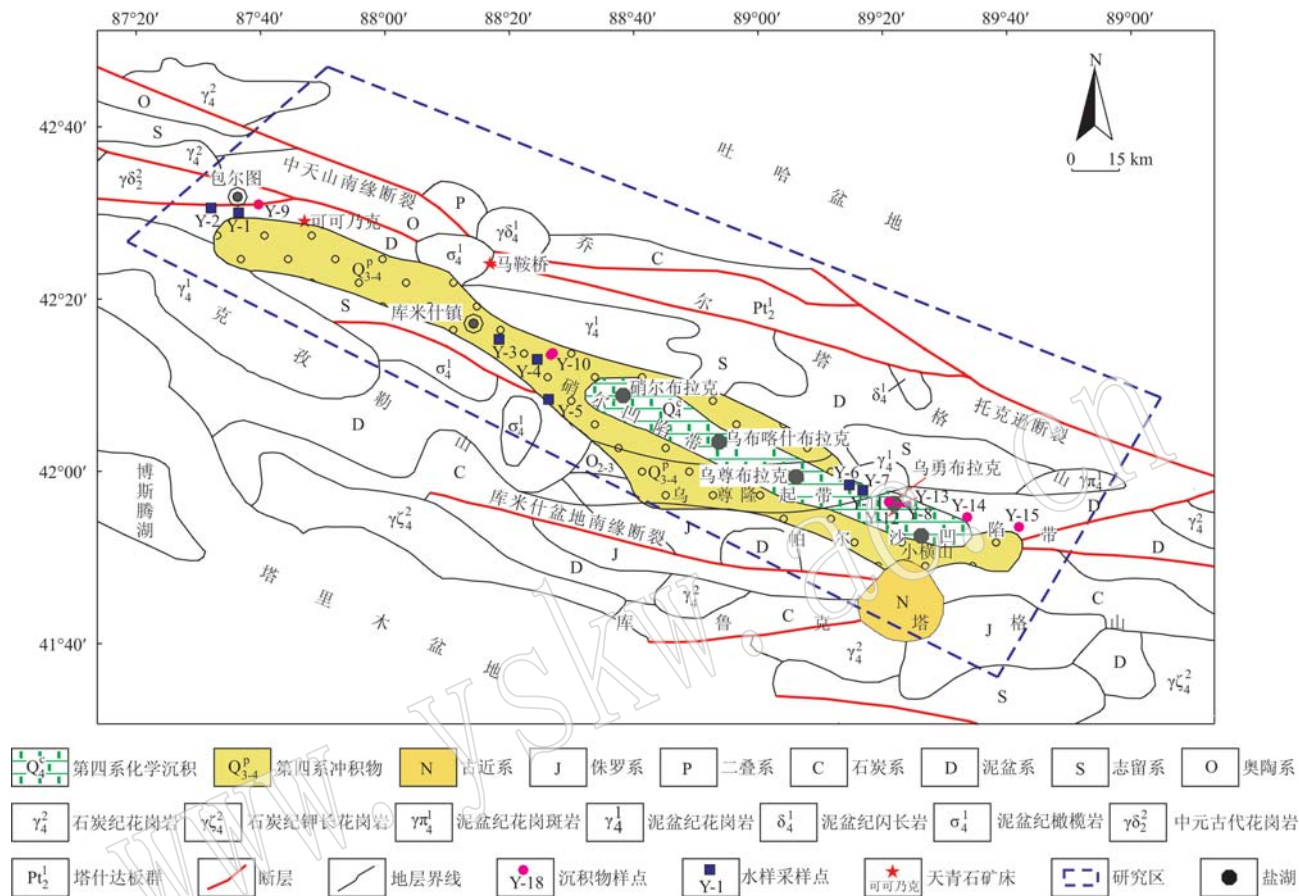


图 1 库米什盆地地质略图和采样点分布(据新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Kumishi basin showing sampling points(modified after BGMRX, 1993)

库米什盆地出露的主要地层为泥盆系结晶灰岩,侏罗系泥质砂岩及煤岩,第四系河湖相含砾细粉砂、粉砂粘土和含盐岩系沉积,硝酸盐矿床则赋存于第四系冲洪积和盐类化学沉积物中,盆缘还广泛分布有志留系、泥盆系、石炭系的花岗岩、钾长花岗岩、花岗闪长岩等侵入岩。盆地的西北部发育有可可乃克和马鞍桥两个天青石矿床,它们的矿床类型属于沉积改造型(折延凤等, 2008; 肖丙建等, 2015)。湖盆内盐类矿物的组成以石盐、钾硝石、钠硝石为主,含有水硝碱镁矾、石膏、芒硝、无水芒硝、白钠镁矾等矿物(王冰生等, 1992; 王冰生, 1993; 郑喜玉, 2000)。

## 2 样品采集与分析方法

### 2.1 样品采集

在野外踏勘的基础上,参照水系沉积物地球化学找矿基本原则和采样方法,从盆地西北部的包尔图断裂至南东部横穿整个盆地采集表层沉积物和河水、井水、卤水样品,采样位置详见图 1。采集的样品包括河水(2 个)、井水(2 个)、微咸水(1 个)、盐湖卤水(3 个)、洪积扇沉积物(2 个)和盐湖沉积物(5 个)。

样品采集前,用待取水洗涤取样瓶和采水器各 3

次,采样后装入取样瓶并密封,采样量为 500 mL。洪积扇及盐湖沉积物样品在 0~0.2 m 范围内直接用密封塑料袋进行均匀采集,现场密封保存。

2.2 分析方法

所有样品的测试工作在中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心完成。利用赛默飞公司生产的电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)对河水、井水、卤水、表层沉积物样品中的  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Sr^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  等进行测试,各组分的检测限为:  $SO_4^{2-} < 0.1 \text{ mg/L}$ ,  $K^+$ 、 $Mg^{2+} \leq 0.01 \text{ mg/L}$ ,  $Ca^{2+} \leq 0.001 \text{ mg/L}$ ,  $Sr^{2+} < 0.012$

$\text{mg/L}$ ;用离子色谱仪(ICS-500+)测定  $NO_3^-$  的含量,检测限为  $NO_3^- \leq 0.015 \text{ mg/L}$ ;  $Na^+$  用离子平衡差减法测定,误差小于 2.0%;  $Cl^-$  用  $Hg(NO_3)_2$  容量滴定法测定,误差小于 1.0%。

3 结果

3.1 北西至南东向水样中离子含量变化

库米什盆地自北西至南东向采集的水样化学组成见表1,离子含量变化情况见图2。库米什盆地硝

表 1 北西至南东向剖面水样主要化学组分

mg/L

Table 1 The main chemical components of the water samples from NW-SE-trending profile

样品编号	$K^+$	$Na^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$NO_3^-$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$Sr^{2+}$	$HCO_3^-$	矿化度	水体类型
Y-1	3.42	66.29	79.69	32.06	10.21	79.42	173.03	1.24	228.03	710	河水
Y-2	9.43	104.88	102.48	37.48	20.08	255.01	373.37	1.48	238.08	1 160	河水
Y-3	7.57	274.02	129.62	35.94	23.93	307.08	499.83	2.42	149.88	1 430	井水
Y-4	11.07	588.84	207.53	77.57	37.17	894.25	788.31	3.77	59.41	3 480	井水
Y-5	226.30	8 300.77	604.80	446.60	31.41	10 962.46	5 828.50	11.56	181.42	26 580	咸水
Y-6	347.60	37 531.55	791.50	954.00	476.61	50 376.24	15 680.00	25.20	99.81	106 290	卤水
Y-7	374.75	47 155.18	833.50	1 054.50	533.70	66 154.89	14 925.00	20.46	124.45	131 160	卤水
Y-8	3 365.00	114 190.26	360.10	6 088.00	4 116.00	182 801.47	16 500.00	14.96	108.58	327 530	卤水

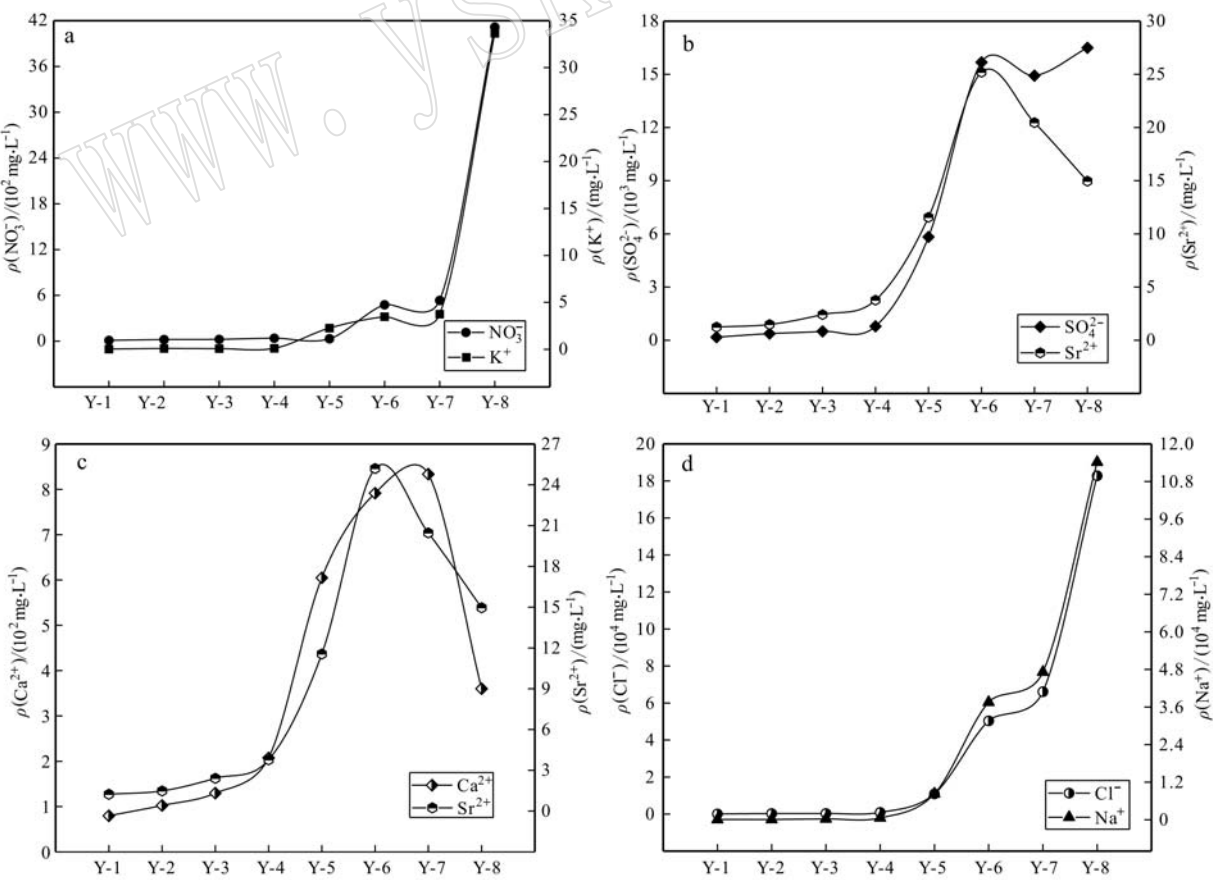


图 2 北西至南东向剖面水样离子含量变化曲线

Fig. 2 Variation diagram of ions content in water samples from northwest to southeast



酸盐型盐湖的主要成矿离子包括  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  等,河水的矿化度范围为 710~1 160 mg/L,井水的矿化度范围为 1 430~3 480 mg/L,盐湖微咸水矿化度为 26 580 mg/L,盐湖卤水矿化度范围为 106 290~327 530 mg/L;由图 1 和表 1 可知,水体的矿化度自北西至南东向逐渐增高。河水  $Sr^{2+}$  的平均含量为 1.36 mg/L,是世界主要河流水体中 Sr 含量平均值 (0.078 mg/L) 的 17 倍多 (Han and Liu, 2004);井水中  $Sr^{2+}$  的平均含量为 3.10 mg/L,是世界主要河流水体中  $Sr^{2+}$  含量平均值 (0.078 mg/L) 的 39 倍多,是盆地北西部河水  $Sr^{2+}$  平均含量的 2.3 倍多,其含量剧增,说明发源于南天山的常年河流在洪积扇上转为地下水之后,水体运移至山脚自溢区的过程中  $Sr^{2+}$  逐渐富集;卤水中的  $Sr^{2+}$  的平均含量为 20.21 mg/L,约为海洋水  $Sr^{2+}$  含量平均值 (约 8 mg/L) 的 2.5 倍 (陈容文, 1979)。卤水中的  $Sr^{2+}$  的平均含量是盆地北西部河水中  $Sr^{2+}$  平均含量的约 14.9 倍多,是井水中  $Sr^{2+}$  的平均含量的约 6.5 倍多,这反映出盆地北西部的淡水至盆地内的卤水,  $Sr^{2+}$  的含量在逐渐增高,同时说明库米什盆地补给水体的运移方向是北西至南东向,最终在盆地的南部东汇聚,在强烈的蒸发浓缩作用下形成卤水,  $Sr^{2+}$  也随之逐渐富集。

从图 2 中可以发现,  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$  的含量自北西至南东向逐渐增高,  $Sr^{2+}$  的含量也逐渐增高,  $Sr^{2+}$  与  $SO_4^{2-}$ 、 $Ca^{2+}$  的含量变化趋势基本一致。图 2a 显示,  $K^+$  与  $NO_3^-$  的含量变化具有非常强的相关性,推测在硝酸盐型盐湖中  $K^+$  与  $NO_3^-$  以钾硝石矿物的形式存在。图 2d 显示,  $Na^+$  与  $Cl^-$  的含量变化曲线相一致,相关性非常强,说明盆地硝酸盐型盐湖中发育有石盐 (NaCl) 矿物。图 2b 和图 2c 显示,盆地南东部的 Y-6 号水样中  $Sr^{2+}$  的含量出现异常高值,这可能与盆地北东部泥盆系灰岩 (图 1) 在风化淋溶作用

下释放的  $Sr^{2+}$  有关。图 2c 显示,  $Sr^{2+}$  的含量变化趋势与  $Ca^{2+}$  的含量变化趋势几乎一致,随着矿化度的增高,这两个离子的含量也同步增高和变化,这是因为锶和钙在元素周期表属于同一个主族,具有相似的化学性质,溶解于天然水的  $CO_2$  与碳酸盐岩中的  $CaCO_3$ 、 $SrCO_3$  发生水岩作用,使得淋溶水中的  $Sr^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$  同步增加 (胡进武等, 2004)。

### 3.2 北西至南东向表层沉积物中离子含量变化

在库米什盆地北西至南东向所采集沉积物的主要成矿离子的分析结果见表 2,自北西至南东向  $K^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Sr^{2+}$  的平均含量分别为 0.20%、11.47%、0.76%、0.11%、0.005 6%,  $NO_3^-$ 、 $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  的平均含量分别为 0.31%、17.58%、2.55%,  $Cl^-$  和  $Na^+$  的平均含量最高,说明盐湖沉积物的组成以石盐为主,  $Sr^{2+}$  可能以吸附状态存在于盐湖表层沉积物内。  $Sr^{2+}$  的平均含量 (0.005 6%) 与其克拉克值 (0.003 5%) (李学礼等, 2010) 的比值为 1.6,说明  $Sr^{2+}$  比在地壳中相对富集。自北西至南东向沉积物中  $Sr^{2+}$  的含量变化较大,可能受到盆地北东部泥盆系的碳酸岩盐、花岗岩以及志留系砂岩、凝灰岩等交错分布 (图 1) 的影响。图 3a 显示,  $K^+$  和  $NO_3^-$  的含量变化趋势基本一致,但 Y-13 号样品中  $K^+$  含量出现明显异常,可能是 Y-13 号样品附近发育的富钾花岗岩经风化作用释放的  $K^+$  引起的 (王冰生, 1993)。自北西至南东向的表层沉积物中  $Sr^{2+}$  含量变化曲线与  $Ca^{2+}$ 、 $K^+$ 、 $SO_4^{2-}$  的含量变化曲线相一致 (图 3b~3d),反映出它们之间具有一定的内在联系。

## 4 讨论

### 4.1 $Sr^{2+}$ 与主要化学组分相关性分析

采用线性回归分析的方法,比较分析了水样与沉积物样品中  $Sr^{2+}$  与  $SO_4^{2-}$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  以及  $K^+$  与  $NO_3^-$

表 2 北西至南东向剖面沉积物样主要化学组分  
Table 2 The main chemical components of the sediment samples from NW-SE-trending profile

样品编号	$w_B/\%$						$w_B/10^{-5}$	
	$K^+$	$Na^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$	$Sr^{2+}$
Y-9	0.03	—	0.04	0.02	0.02	0.12	1.25	—
Y-10	0.03	22.12	0.33	0.01	33.24	2.02	85.20	7.77
Y-11	0.87	16.43	2.55	0.60	26.40	8.07	2 010.89	11.04
Y-12	0.06	38.24	0.13	0.06	58.50	1.22	44.74	4.55
Y-13	0.39	3.30	1.35	0.07	4.67	4.07	0.16	6.96
Y-14	0.02	0.19	0.75	0.01	0.21	1.94	0.05	8.12
Y-15	0.01	0.04	0.16	0.01	0.05	0.43	12.26	0.50

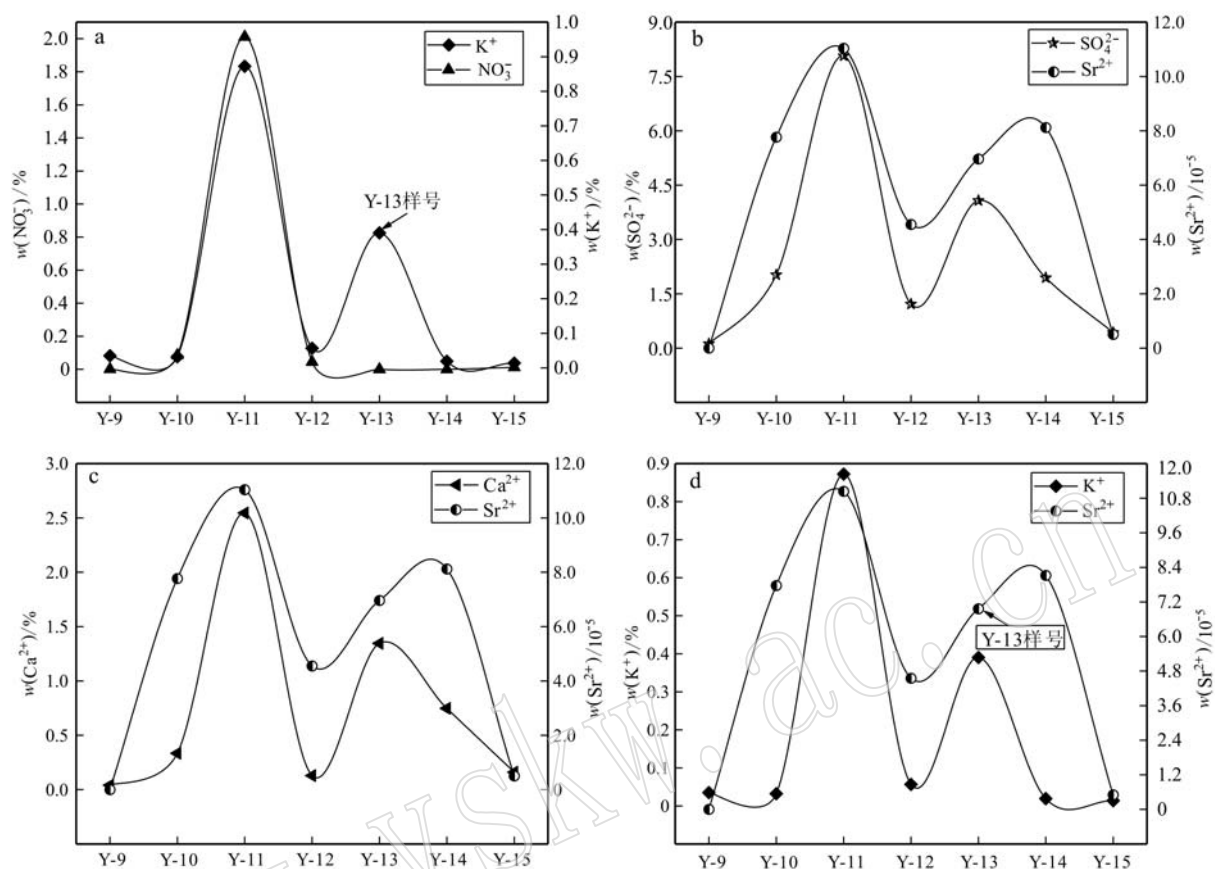


图3 库米什盆地北西至南东向沉积物样离子含量变化曲线

Fig. 3 Variation diagram of ions content in sediment samples from northwest to southeast

的相关性,从而对  $\text{Sr}^{2+}$  的迁移形式及  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等离子的内在联系进行探讨。在库米什盆地自北西至南东向采集的水样中部分成矿离子相关性分析见图4所示,  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{K}^+$  间具有非常强的正相关关系,相关系数为 0.995(图4a),且二者的离子含量变化基本一致(图2a),这与它们在硝酸盐型盐湖中形成硝酸盐矿物(钾硝石)和来源于盆地西北部有关;  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  之间也具有非常显著的正相关关系,相关系数为 0.878(图4b),说明研究区水样中的  $\text{Sr}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  具有相同的来源,以离子的形式随着地下水迁移富集至盆地的硝酸盐型盐湖内;  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  之间非常强的正相关性(相关系数为 0.879,图4d),可能与盆地西北部大面积出露地表的泥盆系灰岩的风化淋溶作用有关。

库米什盆地硝酸盐型盐湖表层沉积物中  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  以及  $\text{K}^+$  与  $\text{NO}_3^-$  的相关性如图5所示,  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  之间呈正相关关系(图5b, 5d),相比于水样这三者的相关性有所减弱,反映出

表层沉积物中这三者的物质来源复杂,可能受到盆地北东部盆缘碳酸盐岩及侵入岩的影响。图4c和图5c显示,硝酸盐型盐湖表层沉积物中  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  相关性( $r^2=0.411$ )强于水中  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  的相关性( $r^2=0.114$ ),产生这个现象的原因可能是:自北西至南东向盆地水体的补给来源较为复杂,比如在盆地西北部冲洪积扇区转入地下的河水补给、盆地北东部季节性洪流补给等,因而随水体迁移的  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  的物质来源具有多源的特征,导致水中  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  的相关性较弱。湖盆北东部发育有大量的冲洪积扇,且规模巨大,受地貌环境影响对盐湖表层沉积物的物质补给更为直接,迁移距离较短。因此,盐湖表层沉积物中的  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  的物质补给来源受盆缘岩层的影响较大,导致盐湖表层沉积物中  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{K}^+$  相关性增强。通过分析综合分析图4b、4d和图5b、5d发现,  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的在沉积物中的相关性弱于水中的相关性,但依然呈现成强相关性,反映出  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的物质补给来源相同,水中的  $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、

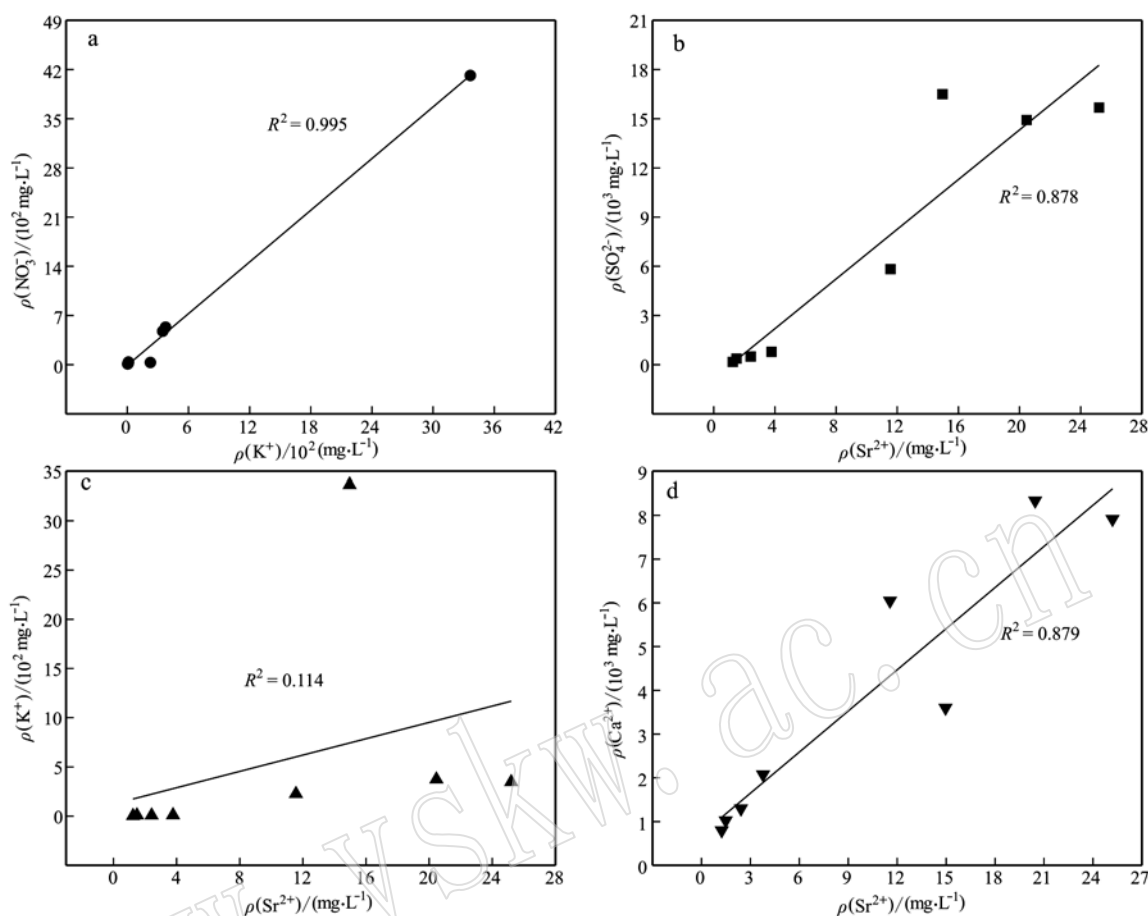


图4 水样中成矿离子含量相关性分析

Fig. 4 Correlation analyses of ore-forming ion concentrations in water samples

$\text{Ca}^{2+}$  来源于盆地西北部, 沉积物中的  $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  离子可能来源于盆地东北部碳酸岩盐、花岗岩等。

#### 4.2 盐湖中锶的物质来源探讨

库米什盆地东北部发育有大量的泥盆系侵入岩, 岩石类型以花岗岩、钾长花岗岩和中基性岩为主。杨天南等(2006)对库米什盆地周缘泥盆系侵入岩进行了全岩化学分析研究, 侵入岩样品中锶的分析结果显示, X104号样品(中基性岩和酸性花岗岩)锶的平均含量( $1\,193.60 \times 10^{-6}$ )为地壳中锶平均含量( $375 \times 10^{-6}$ )的约3.2倍(Taylor and McLennan, 1985); X106号样品(中基性岩)锶的平均含量( $933.33 \times 10^{-6}$ )约为地壳中锶平均含量( $375 \times 10^{-6}$ )的2.5倍。张彭熹(1987)对柴达木盆地盐湖卤水中锶(Sr)的分布进行分析时, 发现现代盐湖锶的分布与盆缘岩层中锶盐的溶滤风化作用有关, 因而库米什盆地周缘显著锶异常的侵入岩与硝酸盐型盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  的补给源有关。

库米什盆地西北部发育的可可乃克、马鞍桥天

青石矿床形成于二叠纪早期至末期(折延凤等, 2008; 肖丙建等, 2015), 在这之后库米什盆地受到印支运动、燕山运动、喜马拉雅运动的影响下经历了复杂的成矿作用过程。天青石矿床的围岩以灰岩、砂岩、泥岩为主, 其与盆地之间的地势非常陡峭, 有季节性水流形成的冲沟和洪积扇将二者相互连接。天青石的溶解度大于方解石, 在泥岩、灰岩中的天青石较碳酸盐在风化作用过程中更易淋溶进入水体产生  $\text{Sr}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ , 水体中存在的  $\text{SO}_4^{2-}$  则会提高方解石、白云石的溶解度(闫志为, 2008), 从而导致碳酸盐岩中的  $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  进入水体, 最终, 天青石和碳酸盐岩产生的  $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  随着高山冰雪融水形成的常年河流和季节性水流逐渐汇入至盆地的硝酸盐型盐湖中, 成为库米什盆地硝酸盐型盐湖成矿离子的又一补给源, 在湖水的蒸发浓缩作用下逐渐富集, 文中  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  以及  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  的相关性分析结果也说明这一点。

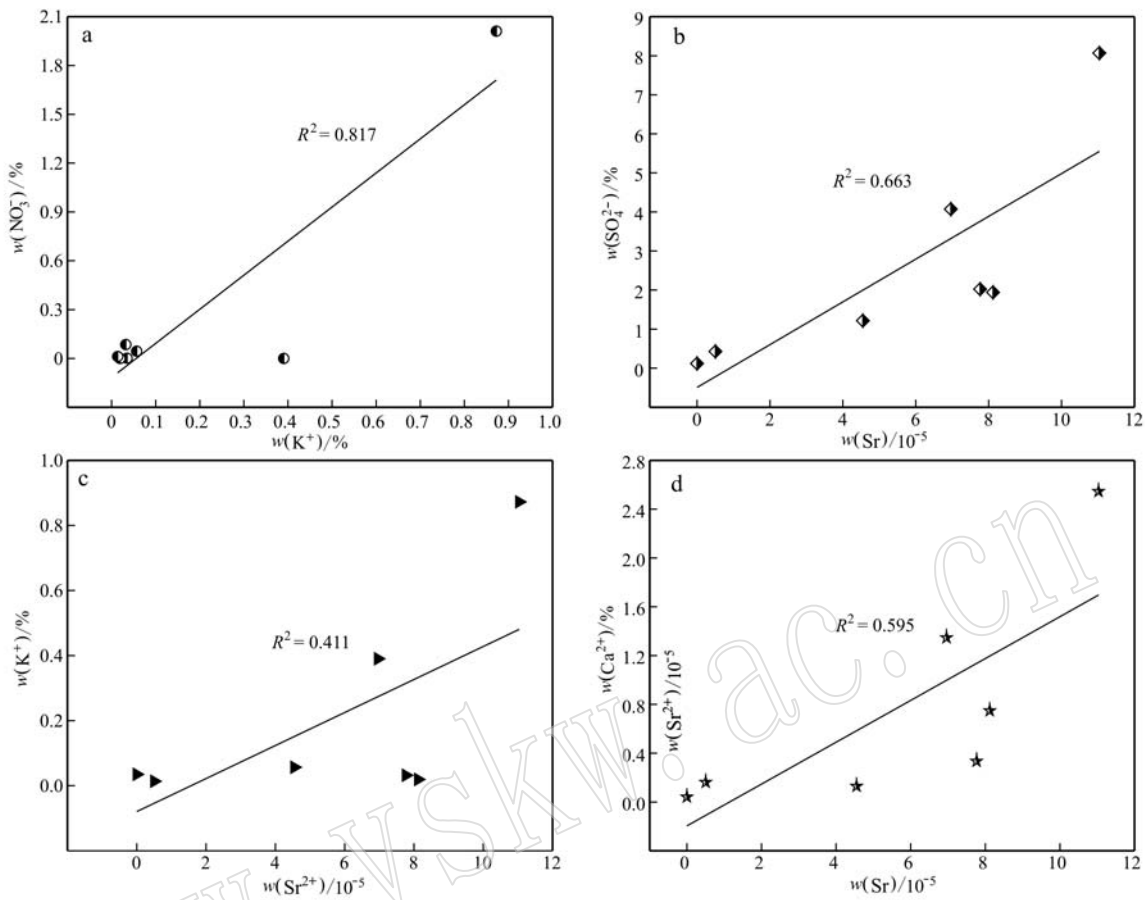


图 5 沉积物样中成矿离子含量相关性分析  
Fig. 5 Correlation analyses of ore-forming ion concentrations in sediment samples

笔者搜集整理了柴达木盆地部分盐湖卤水  $\text{Sr}^{2+}$  含量(表 3),与库米什盆地硝酸盐型盐湖卤水的  $\text{Sr}^{2+}$  含量进行对比分析。库米什盆地硝酸盐型盐湖卤水中  $\text{Sr}^{2+}$  的平均含量(20.21 mg/L)为海洋水  $\text{Sr}^{2+}$  平均含量(8 mg/L)的约 2.5 倍。柴达木盆地盐湖卤水中  $\text{Sr}^{2+}$  的平均含量(82.23 mg/L)约为海洋水  $\text{Sr}^{2+}$  平均含量的 10 倍。柴达木盆地盐湖卤水中  $\text{Sr}^{2+}$  的平均含量(82.23 mg/L)高于库米什盆地硝酸盐型盐湖卤水中的  $\text{Sr}^{2+}$  的平均含量(20.21 mg/L)。柴达木盆地盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  物质补给来源与盆地内深大断裂中深部水的上升补给、第三系油田水、盆缘发育的火成岩和碳酸盐岩以及天青石矿床等有关(葛文胜等,2001;崔林等,2006)。根据前人资料和本文研究,库米什盆地硝酸盐型盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  的物质补给来源主要与盆地北西部的天青石矿床、碳酸盐岩、花岗岩以及东北部的侵入岩、碳酸盐岩有关,盆缘岩层在风化淋溶作用下产生的  $\text{Sr}^{2+}$  随地表水流汇入湖区,导致硝酸盐型盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  含量相对偏高。

表 3 柴达木盆地部分盐湖卤水锶含量  
Table 3 Content of strontium in brine water of the salt lakes in the Qaidam Basin

盐湖名称	矿化度/ ( $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{Sr}^{2+})$ / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	水化学类型
尕斯库勒湖	333.27	7.00	硫酸镁亚型
昆特依湖	328.92	182.00	氯化物型
一里坪	327.24	12.00	硫酸镁亚型
牛郎织女湖	555.07	373.00	氯化物型
巴龙马海湖	313.99	90.00	氯化物型
西台吉乃尔湖	336.33	27.00	硫酸镁亚型
东台吉乃尔湖	331.53	20.00	硫酸镁亚型
察尔汗湖	321.46	37.00	硫酸镁亚型
霍布逊湖	311.24	83.50	氯化物型
别勒滩	358.00	10.00	硫酸镁亚型
达布逊湖	331.85	63.00	氯化物型

注:数据来源张彭熹(1987)。

综上所述,新疆盐湖的形成条件与柴达木盆地存在明显差异,新疆盐湖(包括硝酸盐型盐湖)中的  $\text{Sr}^{2+}$  含量及其富集的地球化学规律与机制与柴达木盆地迥异,新疆盐湖  $\text{Sr}^{2+}$  的富集过程主要体现在表



生作用过程,目前尚无明显证据表明与深部流体作用有关联。

## 5 结论

(1) 库米什盆地水体和沉积物中的  $\text{Sr}^{2+}$  均具有自北西至南东向逐渐迁移富集的规律,与河水汇聚方向基本一致,表明盐湖中的  $\text{Sr}^{2+}$  主要随河水(包括地下水)逐渐汇集至成盐凹陷中;无论是水体还是沉积物中,  $\text{Sr}^{2+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等化学组分之间具有较好的相关性和变化趋势上的一致性,受它们物质补给源的影响较大。盐湖水体在蒸发浓缩作用下,其矿化度逐渐增高,  $\text{Sr}^{2+}$  的含量也随之升高,表明  $\text{Sr}^{2+}$  的富集与蒸发浓缩作用过程有关。

(2) 库米什盆地硝酸盐型盐湖中  $\text{Sr}^{2+}$  主要来源于盆地北西部的天青石矿床,北东部及北西部的碳酸盐岩(以泥盆系灰岩为主)、盆缘的侵入岩,各物源区的贡献度还需进一步开展工作予以确定。

**致谢** 中国科学院青海盐湖研究所分析测试中心的王波老师帮助完成了样品的分析测试工作,两位匿名审稿专家对论文提出宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

## References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Egon ( BGMRX ). 1993. Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Chen Fenxiong, Wang Chengwei, Chen Liyun, *et al.* 2008. Discuss on tectonic evolvement to dominating process of sandstone type uranium deposits forming in Kumishi Basin[J]. Xinjiang Geology, 26(2): 176~179(in Chinese with English abstract).
- Chen Rongwen. 1979. Introduction to Oceanography[M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 46~51(in Chinese).
- Cui Lin and Li Junmin. 2006. Paleogeographic environment of celestite deposits in western Qaidam Basin, Qinghai Province[J]. Qinghai Science and Technology, 33(5): 20~23(in Chinese).
- Ge Wensheng and Cai Keqin. 2001. Mineralization system of celestite deposits in northwestern Qaidam Basin[J]. Geoscience, 15(1): 53~59(in Chinese with English abstract).
- Ge Wensheng, Liu Bin, Qiu Bin, *et al.* 2010. Geological characteristics and resource potential of K-rich nitrate salt lake minerogenetic belt in southern margin of East Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 29(4): 437~438(in Chinese with English abstract).
- Han G and Liu C Q. 2004. Water geochemistry controlled by carbonate dissolution: A study of the river waters draining karst-dominated terrain, Guizhou Province, China[J]. Chemical Geology, 204(1): 1~21.
- Hu Jianfeng, Liu Yukui, Zheng Duoming, *et al.* 2004. Structural feature in Kumux Basin and its exploration prospecting[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 25(1): 26~28(in Chinese).
- Hu Jinwu, Wang Zengyin, Zhou Lian, *et al.* 2004. Hydro geochemical characteristics of the strontium in Kast water[J]. Carsologica Sinica, 23(1): 38~43(in Chinese with English abstract).
- Huang Tiedong. 2005. Formation of the salt lakes and  $\text{KNO}_3$  ore in the Kumishi block-falling basin in Xinjiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 26(6): 20~24(in Chinese with English abstract).
- Huang Tiedong, Zhang Canli and Yao Jun. 2004. The microrelief form of Wuyongbulake Depression and the mark of salt prospecting[J]. West-China Exploration Engineering, 32(9): 100~102(in Chinese).
- Li Xueli, Sun Zhanxue and Liu Jinhui. 2010. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 51~130(in Chinese).
- Liang Qingsheng. 1999. Investigation of salt-forming environments and ages of Last Wuzunbulake salt lake in Xinjiang[J]. Journal of Salt Lake Research, 7(2): 1~5(in Chinese with English abstract).
- Liu Qingxuan, Wang Guiling and Zhang Fawang. 2004. Geochemical environment of trace element strontium (Sr) enriched in mineral waters [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 25(6): 19~23(in Chinese with English abstract).
- Lu Shiji, Zhang Xueming, Xiong Shuai, *et al.* 2020. Distribution and enrichment of strontium in karst river basins of Zigui area[J]. Geology in China, 47(5): 1~11(in Chinese with English abstract).
- She Yanfeng, Li Mingkai, Liu Farong, *et al.* 2008. Celestine deposit geological characteristics and utilization prospect in the Tuokexun Ma'anqiao[J]. China Non-Metallic Minerals Industry, 70(5): 49~50(in Chinese).
- Shi Haiyan, Miao Weiliang, Zhang Xiyi, *et al.* 2018. Geochemical characteristics and ore-forming material source of celestite deposits in Dafeng mountain, Northwestern Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 92(8): 1 733~1 752(in Chinese with English abstract).
- Su Chuntian, Huang Chenhui, Zou Shengzhang, *et al.* 2017. Enrichment environment and sources of strontium of groundwater in Xintian county, Hunan Province[J]. Carsologica Sinica, 36(5): 678~683(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Compo-

- sition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 1~312.
- Wang Bingsheng. 1993. Nitrate-type sylvite deposits in Kumishi Basin[J]. Xinjiang Geology, 11(1): 74~79(in Chinese with English abstract).
- Wang Bingsheng and Ge Jianxin. 1992. Humberstonite discovered for the first time in China[J]. Uranium Geology, 8(2): 89~92(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuqiang. 1999. Analysis of Kumishi Basin[J]. Natural Gas Industry, 19(4): 103~104(in Chinese).
- Xiao Bingjian and Liu Chuanpeng. 2015. Geological characteristics and origin of celestite deposit in Kokonak area in Heshuo county in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Shandong Land and Resources, 31(12): 16~22(in Chinese with English abstract).
- Yan Zhiwei. 2008. Influences of  $\text{SO}_4^{2-}$  on the solubility of calcite and dolomite[J]. Carsologica Sinica, 27(1): 24~31(in Chinese with English abstract).
- Yang Tiannan and Wang Xiaoping. 2006. Geochronology, petrochemistry and tectonic implications of Early Devonian plutons in Kumux area, Xinjiang[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 25(5): 401~411(in Chinese with English abstract).
- Zhang Pengxi. 1987. Qaidam Basin Salt Lake[M]. Beijing: Science Press, 158~167(in Chinese).
- Zheng Xiyu. 2000. Sedimentary features of sylvite nitrate in Lake Wuzunbulake[J]. Journal of Salt Lake Research, 8(1): 41~45(in Chinese with English abstract).
- Zheng Xiyu, Zhang Minggang, Xu Chang, et al. 2002. China Salt Lake Annals[M]. Beijing: Science Press, 36~243(in Chinese).
- 附中文参考文献
- 陈奋雄, 王成渭, 陈黎昀, 等. 2008. 地质构造演化对砂岩型铀矿成矿控制作用: 以新疆库米什盆地为例[J]. 新疆地质, 26(2): 176~179.
- 陈容文. 1979. 海洋学概论[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 46~51.
- 崔林, 李俊民. 2006. 青海省柴达木盆地西部锶矿成矿古地理环境[J]. 青海科技, 33(5): 20~23.
- 葛文胜, 蔡克勤. 2001. 新柴达木盆地西北部锶矿成矿系统研究[J]. 现代地质, 15(1): 53~59.
- 葛文胜, 刘斌, 邱斌, 等. 2010. 新疆东天山南缘富钾硝酸盐盐湖成矿带地质特征及资源潜力[J]. 矿床地质, 29(4): 437~438.
- 胡剑凤, 刘玉魁, 郑多明, 等. 2004. 新疆库米什盆地构造特征及勘探前景[J]. 新疆石油地质, 25(1): 26~28.
- 胡进武, 王增银, 周炼, 等. 2004. 岩溶水锶元素水文地球化学特征[J]. 中国岩溶, 23(1): 38~43.
- 黄铁栋. 2005. 新疆库米什断陷盆地内盐湖及钾硝石矿的形成[J]. 水文地质工程地质, 26(6): 20~24.
- 黄铁栋, 张灿丽, 姚军. 2004. 乌勇布拉克洼地微地貌形态与盐类找矿标志[J]. 西部探矿工程, 32(9): 100~102.
- 李学礼, 孙占学, 刘金辉. 2010. 水文地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 51~130.
- 梁青生. 1999. 新疆乌尊布拉克东部干盐湖成盐环境和成盐年代的初步研究[J]. 盐湖研究, 7(2): 1~5.
- 刘庆宣, 王贵玲, 张发旺. 2004. 矿泉水中微量元素锶富集的地球化学环境[J]. 水文地质工程地质, 25(6): 19~23.
- 陆石基, 张学明, 熊帅, 等. 2020. 湖北秭归岩溶流域锶的分布特征与富集规律[J]. 中国地质, 47(5): 1~11.
- 折延凤, 李明凯, 刘发荣, 等. 2008. 托克逊马鞍桥天青石矿床地质特征及利用前景[J]. 中国非金属矿工业导刊, 70(5): 49~50.
- 石海岩, 苗卫良, 张西营, 等. 2018. 柴达木盆地西北部大风山天青石矿床地球化学特征及成矿物源属性探讨[J]. 地质学报, 92(8): 1733~1752.
- 苏春田, 黄晨晖, 邹胜章, 等. 2017. 新田县地下水锶富集环境及来源分析[J]. 中国岩溶, 36(5): 678~683.
- 王冰生. 1993. 库米什盆地的硝酸盐型钾盐矿床[J]. 新疆地质, 11(1): 74~79.
- 王冰生, 葛建新. 1992. 我国首次发现的水硝碱镁矾矿物[J]. 铀矿地质, 8(2): 89~92.
- 吴富强. 1999. 库米什盆地浅析[J]. 天然气工业, 19(4): 103~104.
- 肖丙建, 刘传鹏. 2015. 新疆和硕县可可乃克天青石矿床地质特征及成因探讨[J]. 山东国土资源, 31(12): 16~22.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 闫志为. 2008. 硫酸根离子对方解石和白云石溶解度的影响[J]. 中国岩溶, 27(1): 24~31.
- 杨天南, 王小平. 2006. 新疆库米什早泥盆世侵入岩时代、地球化学及大地构造意义[J]. 岩石矿物学杂志, 25(5): 401~411.
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 158~167.
- 郑喜玉. 2000. 乌尊布拉克湖硝酸钾盐沉积特征[J]. 盐湖研究, 8(1): 41~45.
- 郑喜玉, 张明刚, 徐昶, 等. 2002. 中国盐湖志[M]. 北京: 科学出版社, 36~243.