编号:0258-7106(2016)06-1190-15

# 罗布泊盐湖富钾卤水成因再探讨

## ——碎屑层卤水蒸发实验分析\*

## 孙小虹<sup>1</sup>,刘成林<sup>1</sup>,焦鹏程<sup>1</sup>,颜 辉<sup>3</sup>,陈永志<sup>1</sup>,马黎春<sup>1</sup>,张永明<sup>2</sup>, 王春连<sup>1</sup>,李文学<sup>3</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所国土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 中国科学院青海盐湖研究所,青海西宁 810008)

摘 要 罗布泊盐湖钙芒硝岩孔隙中蕴藏有超大型规模的卤水钾矿,富钾卤水成因一直备受关注。罗北凹地 从统一的罗布泊大湖区中分隔出来后,成盐过程中其湖水仍以南部大湖的补给为主,罗北凹地卤水化学演化与"大 耳朵"湖水密切相关。"大耳朵"湖区含石膏碎屑层普遍储藏有卤水,应该是罗北凹地盐湖的"源卤水",钾离子 (<sub>4</sub>(K<sup>+</sup>)为3.12 g/L左右)已初步富集,平均矿化度为198.83 g/L。为了查明该卤水的化学演化趋势及析盐序列 笔 者于2009年、2010年两次采集了大量卤水样品,分别进行室内等温蒸发和自然蒸发实验。蒸发实验结果表明 随着 卤水浓缩首先析出(硬)石膏,随后析出大量石盐,最后出现少量钾石盐和光卤石,与 EQL/EVP 卤水蒸发模型模拟结 果相似。将碎屑层卤水蒸发过程中化学组成变化与罗北凹地卤水进行对比,结果显示罗布泊古湖水蒸发至石膏沉 积之后,在罗北凹地水化学组成明显发生变化,没有大量石盐沉积,而以钙芒硝沉积为主。推测应是受到深部"富钙 水"的持续补给,而'大耳朵'湖起到'预备盆地'的作用,罗布泊古湖水经'大耳朵'湖蒸发浓缩后,钾离子得到初步富 集,在流入罗北凹地后与深部"富钙'水混合,强烈蒸发浓缩,大量钙芒硝矿物析出,最后形成富钾卤水。

关键词 地球化学 蒸发实验 化学演化 富钾卤水 ;大耳朵 "干盐湖 ;罗布泊

中图分类号:P618.31 文献标志码:A

## A further discussion on genesis of potassium-rich brine in Lop Nur: Evaporating experiments for brine in gypsum-bearing clastic strata

SUN XiaoHong<sup>1</sup>, LIU ChengLin<sup>1</sup>, JIAO PengCheng<sup>1</sup>, YAN Hui<sup>3</sup>, CHEN YongZhi<sup>1</sup>, MA LiChun<sup>1</sup>, ZHANG YongMing<sup>2</sup>, WANG ChunLian<sup>1</sup> and LI WenXue<sup>3</sup>

(1 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 SDIC Xinjiang Lop Nur Potash Co., Ltd., Hami 839000, Xinjiang, China; 3 Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China)

#### Abstract

The "Great Ear" playa is located in the southern part of Lop Nur. The southern Great Lakes water was still the main supply to Luobei depression after the separation of Luobei depression from the unified Lop Nur region. Brine chemical evolution in Luobei depression is closely related to the "Great Ear". Brine in gypsum-bearing clastic strata in "Great Ear" is confined brine, and potassium (about 3.12 g/L) has been initially enriched with

收稿日期 2016-09-30;改回日期 2016-10-21。苏 杭编辑。

<sup>\*</sup> 本文得到国家自然科学基金重点项目(编号 40830420)资助

第一作者简介 孙小虹,女,1983年生,博士后,高级工程师,矿产普查与勘探专业。Email:sxhbei@163.com

a salinity of 198.83 g/L. In 2009 and in 2010, the authors took a large amount of brines and carried out the isothermal evaporating and natural evaporating experiments in order to investigate the evolving tendency of the brine. The evaporating experimental results show that gypsum was first separated with the brine concentration, and then a large amount of halite and a small amount of sylvite and carnallite were separated finally. A comparison of chemical composition during the clastic brine evaporation with the brine in Luobei shows that the composition of ancient brine obviously changed after gypsum deposition. Huge amounts of glauberite minerals, instead of massive halite, were deposited. So it might be continuously recharged by the deep "calcium-rich water". Therefore, the "Great Ear" Lake acted as a "preparing basin". Potassium in the ancient lake water was preliminarily enriched through evaporation in the "Great Ear" Lake. Then the water might be mixed with the deep "calcium-rich" water in Luobei depression. Huge amounts of glauberite minerals evaporation and finally the potassium-rich brine was formed.

**Key words:** geochemistry, evaporating experiment, chemical evolution, potassium-rich brine, "Great Ear" playa, Lop Nur

卤水蒸发实验不仅是盐湖矿产资源开发利用研 究的基础(高世扬等 ,1996 ;宋彭生等 ,2011 ;姜旭等 , 2013) 还是蒸发岩矿床成因研究的物理化学基础 (李亚文等 ,1994 ;1995 ;孙大鹏等 ,1995 ),能够为探 讨天然盐类沉积和变化规律提供理论依据(曲懿华 等 2010 )。罗布泊盐湖位于新疆塔里木盆地东部, 其次级干盐湖区主要有罗北凹地、" 大耳朵 "湖区、铁 南凹地、新湖区等(图1),其中"大耳朵"湖区位于罗 布泊南部,地层以石膏和粉砂黏土沉积为主。盐类 矿物相分布特征显示自中更新世以来 ,罗布泊湖水 化学组成就表现出了南北分异的现象,南部靠近补 给源,北部远离补给源(王弭力等,2001)。罗北凹地 从统一的罗布泊大湖区中分隔出来后 其湖水仍以 南部大湖的补给为主。因此,罗北凹地卤水化学演 化与"大耳朵"湖水密切相关。"大耳朵"湖区含石膏 碎屑层普遍储藏有卤水 应该是罗北凹地盐湖的'源 卤水 ",该卤水的蒸发实验研究至今未有报道。

罗布泊盐湖巨量钙芒硝岩晶间赋存大规模富钾 卤水矿(王弭力等 2001),其成因一直备受地质学家 的关注,相继提出"高山深盆迁移"论和"两段式"成 钾论(Wang et al., 2005),"深部上升卤水流体补给" 成钾(刘成林等,2003b),"含水墙"成钾(刘成林等, 2009 2010a),物源-气候-构造各要素"极端成分"耦 合成钾(Liu et al., 2015)等,这些成钾理论指导了罗 布泊钾盐大规模勘查和扩大找矿工作。然而,富钾 卤水成因及其与储层钙芒硝岩的关系尚未完全查 清。国内外学者关于钙芒硝成因,主要有交代石膏

成因(Hardie, 1968;刘成林等, 2003a),直接从硫酸 盐溶液中晶出的原生成因(杨清堂,1989)、钙钠硫酸 盐脱水形成的次生成因(谷树起等,1986)以及生物 化学成因(魏东岩 2001)等观点。研究表明,上述各 种成因在同一个钙芒硝矿床中往往都存在(魏东岩, 1988、朱井泉等,1989),而原生成因观点只是根据钙 芒硝产出状态推断的 ,至今未见直接从硫酸盐溶液 中析出钙芒硝矿物的报道。罗布泊盐湖钙芒硝的形 成受多种因素的影响(刘成林等,2002;2003a; 2007)研究发现钙芒硝晶体内常含有一些残留石膏 晶体 说明相当部分的钙芒硝系交代石膏而成 刘成 林等,2003a)。另一种观点是在对罗布泊现代卤水 化学组成相图的分析基础之上,开展室内卤水加入 " 富钙 "水的蒸发结晶实验 ,获得水钙芒硝 ,认为水钙 芒硝脱水转变为钙芒硝是罗布泊钙芒硝的形成机制 之一(刘成林等,2006)。赵海彤等(2014)通过研究 罗布泊干盐湖钙芒硝晶体形貌与沉积环境条件,认 为不同晶体形态及形态组合的钙芒硝是湖盆不同位 置的湖水在干热气候条件下蒸发沉积的产物。可见 罗布泊盐湖的钙芒硝成因没有完全查明 ,钙芒硝矿 物如何结晶形成需要进一步研究。本文通过室内等 温蒸发和自然蒸发实验研究 揭示"大耳朵"湖区含 石膏碎屑层卤水的演化过程和析盐规律,并与 EQL/ EVP 模型模拟结果及地层盐类矿物组合进行对比, 探讨了罗布泊富钾卤水成因 对进一步揭示罗布泊 盐湖形成演化及钙芒硝成因具有重要意义。



1—全新统冲积物;2—全新统化学和湖积物;3—全新统化学沉积物;4—上更新统和全新统风积物;5—上更新统和全新统洪积物; 6—中上更新统化学沉积物;7—山区基岩;8—钻孔及编号

Fig. Fig. Geological map of Lop Nur in Xinjiang (modified after Liu et al. 2003b)

1—Holocene alluvial sediments; 2—Holocene chemical and lacustrine sediments; 3—Holocene chemical sediments; 4—Upper Pleistocene and Holocene aeolian sediments; 5—Upper Pleistocene and Holocene diluvia sediments; 6—Middle Pleistocene and Upper Pleistocene chemical sediments; 7—Mountain bedrock; 8—Drill hole and its serial number

1 实 验

#### 1.1 野外自然蒸发气候特征

罗布泊地区现代属于干热气候(王弭力等, 2001) 具有降水量小、蒸发量高、温差大及风力强等 典型的大陆性干旱气候特征。夏季为大风季节,天 气炎热,最高气温大于40℃。笔者于2010年7月 12 日至 9 月 11 日在罗中地区进行卤水自然蒸发实 验过程中,每日 5 次(8:00~20:00 ,隔 3 h 一次)定时 观测气温、湿度及风速;另用温湿度记录仪自动记录 每天的环境温度和湿度。结果(图 2 )显示 2010 年 7 月到 9 月温度总体有下降趋势,平均为 28.72℃,最 高达 44.2℃;日温差平均 16℃;湿度变化较大 (8.94%~46.53%),平均值为 21.94%。据观测,风 速变化 0.06~12.63 m/s,平均值为 3.07 m/s。



### 图 2 罗中地区 2010 年 7 月至 9 月实测气象要素 (温度和湿度) 日变化曲线

Fig. 2 Diurnal variation curves of found meteorological factors ( temperature and humidity ) from July to September in 2010 in Lop Nur

### 1.2 实验原料

卤水样取自"大耳朵"湖区 ZK0404 孔(40°08′ 55.5"N,91°10′29"E,图1),为含石膏碎屑层承压卤 水,井深为150m。卤水的主要成分见表1,为硫酸 盐型卤水,进一步划分,其化学类型属硫酸钠亚型。 据罗北凹地约 200 余个卤水化学分析结果(王弭力 等,2001)统计,罗北凹地富钾卤水密度为1.1966~ 1.2840 g/mL、 $\rho$  (NaCl<sub>eq</sub>)为 298.50 ~ 410.10 g/L、  $\rho$  (K<sup>+</sup>)为 5.52~12.26 g/L、 $\rho$  (Ca<sup>2+</sup>)为 0.09~  $0.38 \text{ g/L}, \rho$  (Mg<sup>2+</sup>)为 8.45~26.95 g/L, 是富钾、 钠而贫钙、镁的工业卤水。卤水化学组成分析表明 罗北凹地浅层卤水 KCl、Na,SO4 含量分布呈现出"北 低南高"的态势;MgCl。含量则在中南部较高,向北 及向南呈逐渐下降的趋势 NaCl 含量表现出明显的 南低北高 "趋势,与硫酸钠的分布相反,水型以硫酸 镁亚型为主(王弭力等,2001)。罗北凹地从统一的 罗布泊大湖区中分隔出来后,成盐过程中其湖水仍 以南部大湖的补给为主 "大耳朵"湖区含石膏碎屑 层卤水应该是罗北凹地盐湖的"源卤水",两者有成 因联系。

#### 1.3 实验方法

约 20 L 卤水样于 2009 年 10 月被采集。其中, 17 L 卤水用于 30℃等温蒸发实验,将卤水置于玻璃 容器中,温度用电暖气控制,精度为±1℃。另取 3 L 卤水放入恒温箱中进行 50℃等温蒸发实验。两组等 温蒸发实验过程中,均在有盐类析出和相变时分别 取固相、液相样品。

自然蒸发实验卤水样于 2010 年 6 月被采集,在 罗布泊罗中地区室外进行。实验前,挖掉地表盐壳 (厚约 40 cm),待场地填平后放上简易蒸发容器(铁 皮桶,直径为 120 cm ;高度为 80 cm);另在附近平坦 地方放上小型蒸发容器(铁皮桶,直径为 45 cm ;高度 为 49 cm)。同时进行两组实验,均在有盐类析出和 相变时分别取固相和液相样品。实验1:将卤水(约 723 L)置于大桶进行自然蒸发,在取样时进行固液 分离;实验2:将卤水(约 50 L)置于小桶进行自然蒸 发,在取样时不进行固液分离。每日 5 次(8:00~ 20:00,隔3 h 一次)定时观测卤水温度、水量变化及 析盐情况等,借助偏光显微镜观察新析出的固相,取 样以新固相析出或蒸发水量来判断。

1.4 分析方法

实验中测定液相和固相样品主要离子含量的方 法如下:K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Li<sup>+</sup>、Rb<sup>+</sup>、Sr<sup>2+</sup>均采 用原子吸收分光光度计测定  $Cl^-$ 采用硝酸银沉淀滴 定法  $SO_4^2^-$ 采用硫酸钡重量法  $Br^-$ 采用容量法。固 相样品盐类矿物鉴定主要采用 X 射线衍射及扫描电 镜/能谱分析。

## 2 实验结果

#### 2.1 30℃和 50℃ 等温蒸发实验

原始卤水的密度为 1.056 g/L,矿化度为 198.82 g/L,为 CaSO<sub>4</sub> 饱和溶液。在蒸发浓缩过程 中,其析盐顺序如下(表 2、表 3):

30℃和 50℃等温蒸发析盐规律大致相同,首先析 出(硬)石膏,当卤水浓缩到密度为 1.215 g/L时,开始 析出石盐,直到最后蒸干,卤水密度最高为 1.239 g/L,

表 1 " 大耳朵 "湖区含石膏碎屑层承压卤水化学组成

Table 1 Main chemical composition of brine in gypsum-bearing clastic strata from the "Great Ear"

	10	Je i main en	cinical col	nposition o	Spsum bearing clastic strata from the Great Lai								
<b>1</b>						液相化学	<b>学组成(</b>	(g/L))					
名 ほん g/mL 加 化 ほん g/ L ) ー			$K^+$	$Ca^{2+}$	$\mathrm{Mg}^{2^+}$	Na <sup>+</sup>	Cl-	$SO_4^{2-}$	$\mathrm{Sr}^{2+}$	Li <sup>+</sup>	$\mathrm{Br}^+$		
水样	1.056	198.83	3.12	1.82	2.78	69.06	115.95	6.09	0.0060	0.00047	0.01012		
测试力	単位・中国世	1.后利学院矿立2	2.11.12.111.12.111.12.11	ま生地球化	受守险室								

					表 2 ";	大耳朵"	<b>递区</b> 企會;	碎屑层卤:	水 30℃ 箏	温蒸发实明	俭结果			
		Ta	ble 2 Ch	nemical co	mposition	of brine	s in gypsu	um-bearing	clastic st	rata during	g 30°C isot	hermal eva	aporation	
П <del>Х1</del>	密度/	矿化度/		.//	> 液	泪化学组 <sub>1</sub>	或(p(B)/(i	g/L))				耶奈克指数		마다 EE -1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1-1
作于自由	(g/mL)	(g/L)	$\mathbf{K}^{+}$	Ca <sup>2+</sup>	Mg	5+	$Na^+$	CI-	$\mathrm{SO}_4^{2-}$	$\mathrm{Sr}^{2+}$	$2K^+$	$\mathrm{Mg}^{2+}$	$\mathrm{SO}_4^{2^{-}}$	やT 江 四 作日
原始卤水	1.056	198.82	3.12	1.82	2 2.7	78 6	9.06	115.95	6.09	0.0060	18.34	52.53	29.13	
L30-1	1.166	220.19	3.33	$1.5^{4}$	4	L L	1.59	132.45	6.30	0.0061	13.60	65.43	20.97	石膏(母液夹带石盐)
L30-2	1.173	254.09	3.80	1.37	L.	14 0 8	3.15	152.32	6.30	0.0064	11.92	72.01	16.07	石膏(母液夹带石盐)
L30-3	1.231	325.08	5.30	1.05	5 7.1	5 1.	13.59	192.05	5.93	0.0070	16.01	69.42	14.57	石盐+少量石膏(母液夹带光卤石)
L30-4	1.225	323.67	7.77	0.97	7 7.8	30 1(	<b>38.44</b>	192.05	6.63	0.0092	20.31	65.58	14.11	石盐(母液夹带光卤石和氯化钾)
L30-5	1.225	333.40	10.55	0.85	3.9.6	9 1(	06.56	198.68	7.04	0.0107	22.22	65.70	12.08	石盐(母液夹带光卤石)
蒸于								-61						石盐+钾石盐+光卤石
		Ta	ble 3 Ch	emical co	表 3 "; mposition	大耳朵" of brine	- 親区合画: s in gypsu	碎屑层卤: m-bearing	大 50°C 箏 c dastic st	温蒸发实引 rata during	俭结果 g 50℃ isot	hermal eva	aporation	
2	密度/	矿化度/			液相化学;	组成( <sub>p</sub> (E	((T))/(g/L))		10	Ħ	17 奈克指数			<u> </u>
年中	(d/mL)	(g/L)	K <sup>+</sup>	$Ca^{2+}$	${\rm Mg}^{2+}$	$\mathrm{Na}^+$	CI-	$\mathrm{SO}_4^{2^{-}}$	$\mathrm{Sr}^{2^+}$	2K <sup>4</sup>	${\rm Mg}^{2^+}$	$\mathrm{SO}_4^{2-}$		析出卤相
原始卤水	1.056	198.82	3.12	1.82	2.78	69.06	115.95	6.09	0.0060	18.34	52.53	29.13		
L50-1	1.215	355.59	6.01	1.30	5.72	141.77	192.05	8.73	0.0063	24.61	58.38	22.56 (	(硬)石膏+少	量石盐(母液夹带光卤石和氯化镁)
L50-2	1.196	336.35	7.95	1.10	12.73	110.34	196.61	7.62	0.0081	16.25	74.32	11.26	石盐+少	量(硬)石膏(母液夹带光卤石)
L50-3	1.239	333.82	11.80	0.89	11.08	103.55	198.68	7.82	0.0083	24.86	66.25	11.83	¥	i盐(母液夹带光卤石)
L50-4	1.236	365.07	22.01	0.58	6.13	116.03	211.09	9.22	0.0115	52.73	40.06	15.25	7	<b>T盐(母液夹带光卤石)</b>
蒸于														石盐+光卤石
测试单位:	中国地质科学	<b>洋院矿产资源</b> 6	开究所表生	地球化学到	ţ验室;"∕"	表示原始	卤水尚未材	斤出固相。						

1194

2016 年



a. 石盐晶间白色粒状光卤石; b. 石盐粒间黑色氯化镁矿物

Fig. 3 Result of mineral precipitation scanning

a. The white gray in halite crystal is carnallite; b. The black mineral (MgCl2) in halite crystal

仍大量析出石盐。石盐在析出过程中逐渐由细粒— 中粒—粗粒。通过扫描电镜能谱/分析,发现 30℃蒸 发过程中母液夹带少量光卤石和钾石盐(图 3a),而 50℃蒸发过程中母液夹带少量光卤石和氯化镁矿物 (图 3b)。

图 4 显示 30℃、50℃ 等温蒸发过程中"大耳朵" 湖区含膏碎屑层卤水主要元素的变化规律。

K<sup>+</sup>:两组实验中变化规律基本一致,蒸发过程 中随卤水失水量增大,含量不断上升。

SO<sub>4</sub><sup>-</sup>:两组实验中变化规律也基本相同。(硬) 石膏析出阶段,含量稍有降低;(硬)石膏析出阶段结 束后,因无硫酸盐再析出,含量开始逐渐增大。

Ca<sup>2+</sup>:两组实验中变化规律基本一致。(硬)石 膏析出阶段,含量逐渐降低;(硬)石膏析出阶段结束 后,含量保持稳定。

Mg<sup>2+</sup>:蒸发前期,两组实验中 Mg<sup>2+</sup>均处于富 集状态,含量上升较快;之后,因蒸发过程中一直未 有镁盐析出,前者(30℃)Mg<sup>2+</sup>含量一直保持上升趋 势,而后者(50℃)Mg<sup>2+</sup>含量先下降,再升高,可能是 高温,母液夹带较多的缘故。

Na<sup>+</sup>:两组实验中变化规律基本一致。蒸发前 期处于富集阶段,含量不断上升;开始析出石盐后, 含量稍有下降,趋势缓慢。50℃蒸发,(硬)石膏析出 阶段时间短,所以 Na<sup>+</sup>前期富集阶段时间比 30℃蒸 发短。

Cl<sup>-</sup>:变化与 Na<sup>+</sup>相似,蒸发前期处于富集阶段,析出石盐后,含量稍有下降,趋势缓慢。

#### 2.2 野外自然蒸发实验

原始卤水经过蒸发和浓缩,其析盐序列如下(表 4、表 5):首先析出石膏;卤水浓缩到密度为 1.206 g/L 时,开始析出石盐;之后持续蒸发,卤水密度最 高为 1.213 g/L,仍大量析出石盐;最后蒸干,仍以石 盐为主,含少量光卤石和钾石盐。在上述析盐过程 中,卤水结晶途径相对简单。其原始组成点位于 25℃ Ca<sup>2+</sup> 重叠的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-H<sub>2</sub>O 六元体系相图的石膏相区(图 5),然后随着石膏和石 盐的析出,其组成点向右上移至钾石盐相区。

图6显示"大耳朵"湖区含膏碎屑层卤水在自然

	ed sampling)	中国中华	20 L LLI 121 AT	/	石膏	盐+少量石膏(母液夹带钾石盐和光卤石)	石盐+光卤石+钾石盐		tted sampling)	中国中外		/	石膏	石盐+少量石膏	石盐	石盐+少量光卤石	石盐+钾石盐+光卤石	
	n <sup>(</sup> separat		$O_{4}^{2}-$	9.13	4.18	0.94 石			ı ( unsepara	纹	$\mathrm{SO}_4^{2-}$	29.13	21.69	15.79	11.29	10.70		
结果	composition of brines in gypsum-bearing clastic strata during natural evaporation	克指数	s + S	53 20	68 1	68 10		验结果 moration	ഈ ≤百 <del>来</del> Iporation	<b>F</b> 奈克指线	耶奈克指 Mg <sup>2+</sup>	52.53	58.16	62.84	67.51	66.12	) a	
∇样)实验		耶奈亨	- 4	34 52.	14 67.	38 65.			₩作/头 <sup>:</sup> tural eva	Ħ	$2\mathrm{K}^+$	18.34	20.15	21.37	21.19	23.18	$\bigcirc$ <sup>2</sup>	71
<b>ઇ(分离</b> 月			2K	60 18.	57 18.	23 23.		あくて	、 イン 海 during na		$\mathrm{Sr}^{2^+}$	0.0060	0.0056	0.0062	0.0097	0.0107		
(自然蒸;		液相化学组成(p(B)/(g/L))	$\mathrm{Sr}^{2+}$	0.00	0.00	0.01		<sup>长桥出固相。</sup> 富层卤水自然蒸劣	日 ※ ※ 々 ic strata	56	SO <sup>2</sup>	6.09	5.76	5.35	6.47	7.02		•
屑层卤水			$SO_4^{2-}$	6.09	5.34	7.98			ৰ লৈ বিষয় ring clast	((1))	31- K	5.95	1.72	5.34	8.79	3.10		析出固相
耳朵"湖区含膏碎厚			CI -	115.95	185.34	198.28		卤水尚未 <b>今</b> 章许高	ゴ 高 弾 デ / 停 sum-bear	$(\rho(B)/(g$	+ T	06 11	55 15	.86 18	. 15 18	56 19		卤水尚未
			$\mathrm{Na}^+$	69.06	105.99	100.40		表示原始	* · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	化学组成	Ž +	8 69.	1 89.	9 107	9 100	. 99.		表示原始
<b>4</b> "大∎			$\mathrm{Mg}^{2+}$	2.78	6.45	12.13	0	w.+.,"	人中、 1 of brin	液相	$Mg^2$	2.7	3.9	5.3	9.7	10.9		驰室;"/"
表			Ca <sup>2+</sup>	1.82	l.17	).81		球化学文 <b>+</b>	≪ ≫ npositior		$\mathrm{Ca}^{2+}$	1.82	1.48	1.11	0.95	0.88		球化学实
	emical co		χ <sup>+</sup>	. 12	.56	3.89 (		所表生地	mical cor		$\mathbf{K}^+$	3.12	4.36	5.90	9.89	12.39		所表生地
	ole 4 Ch	芰/		82 3	86 5	50 13		·资源研究	e 5 Che	旷化度/	(g/L)	198.82	256.79	310.97	316.08	323.97		"资源研究
	Tab	矿化质	1/g)	198.8	309.8	333.		学院矿产	Table	1 4	()	9	œ	6	2	6		学院矿产
		密度/	(g/mL)	1.056	1.201	1.206		<sup>1</sup> 国地质科		密度	(g/m	1.05	1.17	1.20	1.20	1.20		□国地质科
		비채		原始卤水	L1 大-1	L1 大-2	蒸于	测试单位: 中		百井	1 <del>т</del> пп	原始卤水	L1 小-1	L1 小-2	L1 45-3	L1 小-4	蒸于	测试单位: 中

2016 年





图 5 "大耳朵 "湖区含膏碎屑层卤水自然蒸发实验析盐路线 底图引自:曲懿华等 2010;25℃ Ca<sup>2+</sup>重叠的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-H<sub>2</sub>O 六元体系 ,图中虚线表示 Ca<sup>2+</sup>重叠 ,Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>饱和无需显示 )

Fig. 5 Salt precipitation route for natural evaporation of the brine in gypsum-bearing clastic strata (base map after Qu et al. , 2010; The Ca<sup>2+</sup>-Superimposed K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>/U = SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-H<sub>2</sub>O system at 25°C dashed line represents Ca<sup>2+</sup>-superimposed, Na<sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> ions are saturated, so no need to display)







蒸发过程中主要元素的变化规律。

K<sup>+</sup>: 随蒸发作用的进行,含量不断上升。

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:石膏析出阶段,含量逐渐降低,随着石膏。 析出结束其含量逐渐增大。分离取样实验到蒸发的 最后阶段,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>含量下降(图 6a),但析出固相未检 测出硫酸盐矿物,与实际不符。

Ca<sup>2+</sup>:石膏析出阶段,含量逐渐降低;之后含量 保持稳定。

Mg<sup>2+</sup>:变化与 K<sup>+</sup>相似,蒸发过程中含量不断 上升。

Na<sup>+</sup>:蒸发前期处于富集阶段,含量不断上升; 开始析出石盐后,含量稍有下降,趋势缓慢。

Cl<sup>-</sup>:变化与 Na<sup>+</sup>相似,蒸发前期处于富集阶段,析出石盐后,含量呈缓慢下降趋势。

3 EQL/EVP 模型模拟卤水析盐规律

EQL/EVP 卤水蒸发模型是基于 Pitzer 's 离子 相互作用理论,采用 Newton-Raphson 算法求解线性 质量-平衡方程组和非线性质量-活度方程组的卤水 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及析出 量(Risacher et al., 2001)。刘成林等(2010b)和 Ma 等(2010)用该模型对罗布泊主要入流河水——塔里 木河水进行了模拟,模拟结果与罗布泊盐湖实际化 学沉积及丰度较为接近。

利用 EQL/EVP 模型对"大耳朵"湖区含石膏碎 屑层承压卤水进行模拟,模拟温度分别为 30℃和 50℃对应二氧化碳分压分别为 10<sup>-2.17</sup>和 10<sup>-2</sup>,模 拟过程在封闭系统和开放系统内分别进行。封闭系 统是指,在整个蒸发过程中,卤水及析出的盐类矿物 始终在一个系统内,允许卤水与矿物发生反应。而 开放系统是指,在卤水蒸发过程中,一旦有盐类矿物 析出,便将其从系统内取出,不存在卤水与矿物间的 反应。

30℃开放系统模拟结果(图 7a)显示有 11 种盐 类矿物析出 随卤水浓缩系数的增大,其析出序列及 矿物组合为:

(1)石膏+方解石(少)

(2)石盐+石膏(少)+方解石(少)

(3)石盐+石膏(少)+方解石(少)+水菱镁矿 (极少)+杂卤石(极少)+ pensal(C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>)极少)

(4)石盐+石膏(少)+方解石(少)+钾石盐 (少)+水菱镁矿(极少)+杂卤石(极少)+ pensalt (C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>) 极少)

(5) 石盐 + 石膏(少) + 方解石(少) + 钾石盐

(少)+ 钾盐镁矾(极少)+ 水菱镁矿(极少)+ 杂卤石
 (极少)+ pensal(C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>)极少)

(6)石盐+石膏(少)+方解石(少)+钾石盐
(少)+光卤石(少)+钾盐镁矾(极少)+水菱镁矿
(极少)+杂卤石(极少)+ pensal(C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>)极少)

(7)石盐 + 石膏(少)+方解石(少)+ 钾石盐
(少)+光卤石(少)+ 钾盐镁矾(极少)+ 硫酸镁(极少)+ 水菱镁矿(极少)+ 杂卤石(极少)+ pensalt

(C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>)极少)

(8)石盐 + 石膏(少)+方解石(少)+ 钾石盐
(少)+光卤石(少)+水氯镁石(少)+ 钾盐镁矾(极少)+ 硫酸镁(极少)+水菱镁矿(极少)+ 杂卤石(极少)+ pensal(C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>) 极少)

30℃封闭系统模拟结果(图 7b)显示有 10 种盐 类矿物析出,随卤水浓缩系数的增大,其析出序列及 矿物组合为:



H-Halite; Gy-Gypsum; Ca-Calcite; An-Anhydrite; Hy-Hydromagnesite; Po-Polyhalite; Pen-Pensalt; Sy-Sylvite; Car-Carnallite;

Kai—Kainite ; Kie—Kieserite ; Bi—Bischofite

(1)石膏+方解石(少)

(2) 石盐+石膏(少)+方解石(极少)

(3)石盐 + 水菱镁矿(极少) + pensalt(C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>) (极少)

(4)石盐 + 水菱镁矿(极少)+ pensalt(C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>)
 (极少)+杂卤石(极少)

(5)石盐 + 钾石盐(少) + pensalt(C<sub>5</sub>KS<sub>6</sub>) 极
 少) + 杂卤石(极少) + 水菱镁矿(极少)

(6)石盐+光卤石(少)+杂卤石(极少)+水菱
镁矿(极少)

(7)石盐 + 石膏(少)+ 光卤石(少)+ 硫酸镁
(极少)+ 水菱镁矿(极少)

(8)石盐 + 石膏(少) + 光卤石(少) + 硫酸镁
(极少) + 水氯镁石(极少) + 水菱镁矿(极少)

50℃开放系统模拟结果(图 7c)显示有 10 种盐 类矿物析出 随卤水浓缩系数的增大,其析出序列及 矿物组合为:

(1) 硬石膏 + 方解石(少)

(2)石盐+硬石膏(少)+方解石(少)

(3)石盐+硬石膏(少)+方解石(少)+水菱镁 矿(极少)

(4)石盐+硬石膏(少)+方解石(少)+水菱镁
 矿(极少)+杂卤石(极少)

(5)石盐+硬石膏(少)+方解石(少)+钾石盐 (少)+水菱镁矿(极少)+杂卤石(极少)

(6)石盐+硬石膏(少)+方解石(少)+钾石盐
(少)+钾盐镁矾(极少)+水菱镁矿(极少)+杂卤石
(极少)

(7)石盐+硬石膏(少)+方解石(少)+钾石盐
(少)+光卤石(少)+钾盐镁矾(极少)+水菱镁矿
(极少)+杂卤石(极少)

(8) 石盐 + 硬石膏(少) + 方解石(少) + 钾石盐
 (少) + 光卤石(少) + 钾盐镁矾(极少) + 硫酸镁(极少) + 水菱镁矿(极少) + 杂卤石(极少)

(9)石盐+硬石膏(少)+方解石(少)+钾石盐
(少)+光卤石(少)+水氯镁石(少)+钾盐镁矾(极少)+硫酸镁(极少)+水菱镁矿(极少)+杂卤石(极少)

50℃封闭系统模拟结果(图 7d)显示有 9 种盐类 矿物析出,随卤水浓缩系数的增大,其析出序列及矿 物组合为:

(1)硬石膏 + 方解石(少)
(2)石盐 + 硬石膏(少) + 方解石(少)

(3)石盐+硬石膏(少)+水菱镁矿(极少)

(4)石盐+硬石膏(少)+杂卤石(少)+水菱镁 矿(极少)

(5)石盐+硬石膏(少)+钾石盐(少)+杂卤石
 (少)+水菱镁矿(极少)

(6)石盐+硬石膏(少)+光卤石(少)+杂卤石
(极少)+水菱镁矿(极少)

(7)石盐+硬石膏(少)+光卤石(少)+硫酸镁
 (极少)+水菱镁矿(极少)

(8) 石盐 + 硬石膏(少) + 光卤石(少) + 硫酸镁
 (极少) + 水氯镁石(极少) + 水菱镁矿(极少)

EQL/EVP 卤水蒸发模拟结果表明 "大耳朵 '湖 区含膏碎屑层卤水 30℃蒸发析出的盐类矿物以石 膏、石盐为主,50℃蒸发以硬石膏和石盐为主,另外 在蒸发初期还析出少量方解石(30℃和50℃蒸发过 程中析出量分别在0~9.6%和0~5.3%),后期析 出少量钾石盐(含量小于1.7%),光卤石(含量小于 2.5%)和水氯镁石(含量小于2.3%)以及极少量的 钾盐镁矾(含量小于0.5%),硫酸镁(含量小于 0.6%),杂卤石(含量小于0.3%)和水菱镁矿(含量 小于0.01%)等。其中 极少量的钾盐镁矾仅在开放 系统模拟过程有析出。

## 4 讨 论

自新近纪末以来 ,塔里木盆地西部抬升 ,罗布泊 成为该地区的最终汇水区(夏训诚 ,1987 )。早更新 世—中更新世早中期,罗布泊为统一大湖,出现微咸 至咸水环境 :至中更新世晚期 ,北部开始进入盐湖环 境 出现钙芒硝沉积及钾盐聚集 而南部仍然保持微 咸水-咸水环境,主要沉积物为含石膏粉砂沉积(刘 成林等 ,1999a)。此后 南部"大耳朵"湖为罗北凹地 重要的补给来源(王弭力等,2001)。水化学研究揭 示,该湖区含石膏碎屑层承压卤水可以代表石膏析 出阶段的古湖水 其卤水 (K<sup>+</sup>)为 3.12 g/I(表 1)。 蒸发实验结果显示 :卤水的析盐序列相对简单 ,依次 为(硬)石膏、大量石盐、少量钾石盐和光卤石等,与 EQL/EVP 卤水蒸发模型模拟结果(图 7)相似。在 蒸发过程中随着石膏的析出,卤水中 Ca<sup>2+</sup> 逐渐减 少 在没有大量钙离子补给的情况下 ,无法到达钙芒 硝相区(图5)因而没有钙芒硝矿物析出。而刘成林 等(2010)用 EQL/EVP 模型对罗布泊主要入流 河水——塔里木河水进行模拟,结果显示有大量钙

1201
------

表 6 " 大耳朵 '湖区含膏碎屑层卤水与塔里木河水主要离子含量及比值

Table 6 Chemical composition of brines in gypsum-bearing clastic strata and rivers in Tarim Basin

		ρ	<b>(</b> B <b>)∕(</b> mg∕I	.)		$CO^{2} = ICI^{-}$	$0^{2+} 0^{1-}$	$K = 10^3 / (Cl^2 + SO^2)$	
	$K^+$	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl-	$SO_4^{2-}$	- SO <sub>4</sub> 7CI	Ca <sup>2</sup> /Cl	$K * 10^{\circ} / (CI + SO_{4}^{\circ})$	
" 大耳朵 '碎屑层卤水	3120	69060	1820	115950	6090	0.05	0.02	25.57	
塔里木河水*	4.92	102	60.78	88	242	2.75	0.69	14.90	

注:\* 塔里木河水主要离子含量数据引自 Bo et al., 2013。

芒硝矿物析出,且与罗布泊盐湖实际化学沉积及丰 度较为接近。那么,如何解释"大耳朵"湖区含石膏 碎屑层卤水蒸发过程中没有析出钙芒硝矿物?

将蒸发实验所用卤水和塔里木河水的主要离子 含量及比值进行对比 结果(表6)发现"大耳朵"湖区 含膏碎屑层卤水相对贫  $SO_a^{2-}$  和  $Ca^{2+}$ 、富  $K^+$ 。而罗 布泊盐湖的补给来源主要是塔里木盆地中西部的地 表河流,水化学调查显示(Bo et al., 2013),塔里木 流域水化学具"富硫酸根和钾、贫氯"背景特征,这可 能就是导致罗布泊盐湖化学沉积出现巨量钙芒硝而 石盐很少的原因。与"大耳朵"湖区卤水样品的锶同 位素组成(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值为0.711 164)相比,罗北凹 地卤水样品的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值(0.710 61) 刘成林等, 1999b)明显偏小。推测在罗北凹地有<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值 更低的卤水补给,并与"大耳朵"湖水补给发生混合,, 具有更低<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值的卤水很可能是深部地层水。 该地区很多流体上升通道或遗迹(刘成林等,2003b) 以及一系列地堑式张性断裂带(Liu et al., 2006)的发 现 均被认为是存在深部地层水 富钙 补给的证据。

表 7 对比了罗布泊"大耳朵"含石膏碎屑层(早 中更新统)卤水 1 及其蒸发至石膏析出后石盐开始 析出时卤水 2 与罗北凹地钙芒硝晶间卤水 3 的组成 特征,卤水 2 耶奈克指数 2K 高于卤水 3,而卤水 3 的耶奈克指数 SO4 高于卤水 2。将卤水样品耶奈克

指数投影在的 25℃ Ca<sup>2+</sup> 重叠的 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、  $Cl^{-}$ 、 $SO_{4}^{2}$ -H<sub>2</sub>O 六元体系相图上(图 5),可以看出, 罗北凹地钙芒硝晶间卤水分布于钙芒硝相区 ,与罗 北凹地盐类矿物以钙芒硝为主的组合特征相吻合, 而碎屑层卤水蒸发至石膏析出后,即析出石盐,其组 成点向右上移至钾石盐相区。早-中更新世,罗布泊 古湖水中钾离子已初步富集到 3.12 g/L 左右,形成 " 含钾卤水 ",该卤水如果正常蒸发浓缩将在石膏沉 积之后析出石盐,石盐开始析出时卤水中 (K<sup>+</sup>)可 达 5.90 g/L 左右, 而事实上盐湖沉积中心不断向北 收缩,在中更新世晚期罗北凹地石膏沉积相对减少, 没有大量石盐沉积 ,而以钙芒硝沉积为主。表明罗 布泊古湖水蒸发至石膏沉积之后,在罗北凹地应不 断受到'富钙水 "的补给 ,致使水化学组成点发生变 化 转移到钙芒硝相区 持续析出钙芒硝矿物。罗北 凹地钙芒硝晶间卤水浓缩程度较高( <u>(</u> K<sup>+</sup> )达 9.27 g/L 表 7),其古湖水不直接由当时塔里木河水补 给 而是经南部'大耳朵 '湖蒸发浓缩后再向它补给, 即' 大耳朵 '湖起着' 预备盆地 '的作用。

"大耳朵"湖区地层常见咸水湖相石膏沉积(王 弭力等 2001),浅部为含粉砂石盐沉积(盐壳),以石 盐为主,发现少量光卤石和杂卤石等(Ma et al., 2009)。但"大耳朵"湖区地层中也有少量钙芒硝沉 积。该湖区西北部耳北凹地最深的钻孔ZKD0303

表 7 碎屑层卤水蒸发至石膏析出后与罗北凹地卤水组成对比

Table 7 Chemical composition of brine in clastic strata, brine after gypsums deposition in the evaporation process

and brine in Luobei depression

동·20 번 미	矿化度/(g/L)		液柞	目化学组成(	¢(B)∕(mg/	L))			耶奈克指数	
凶小作四		$K^+$	Ca <sup>2+</sup>	$Mg^{2+}$	Na <sup>+</sup>	Cl-	$SO_4^2$	$2K^+$	$Mg^{2+}$	$SO_4^2$
卤水1	198.82	3.12	1.82	2.78	69.06	115.95	6.09	18.34	52.53	29.13
<b>卤水</b> 2	310.97	5.90	1.11	5.39	107.86	185.34	5.35	21.37	62.84	15.79
卤水 3	336.74	9.27	0.03	16.86	95.12	175.04	39.49	9.64	56.99	33.37

注: 卤水 1 为"大耳朵"湖含膏碎屑层原始卤水, 卤水 2 为碎屑层卤水自然蒸发至石膏析出后石盐开始析出时的卤水(对应图 5 中的点 2), 卤水 3 为罗北凹地钙芒硝晶间卤水。



1—石盐;2—粉砂;3—钙芒硝;4—泥 Fig. 8 Lithologic diagram for QK1 section 1—Halite;2—Silt;3—Glauberite;4—Mud

(40°23′45″N,90°32′51″E)沉积物研究("罗布泊及邻 区盐湖钾盐资源评价研究 "专题报告 2005 )显示 .盐 壳下面可见少量钙芒硝矿物。另外 "大耳朵"湖区 东部一个浅坑 QK1(40°10.949′N,91°10.490′E)剖 面岩性如图 8 所示 盐壳下面为含钙芒硝泥质粉砂, 钙芒硝晶形为菱板状,呈分散分布。因此,推断早更 新世—中更新世早中期,塔里木河水流经"大耳朵" 湖 因蒸发作用 ,析出大量石膏 ,所以卤水中相对贫 Ca<sup>2+</sup>和 SO<sup>2-</sup>。中更新世晚期—晚更新世,受新构造 运动影响,罗布泊最大的成盐盆地——罗北凹地形 成 相对富硫酸根和钾离子的塔里木河水经"大耳 朵 '湖初步蒸发浓缩后 ,形成" 含钾卤水 " ,随着石膏 的析出 卤水中钾离子进一步富集 随后对罗北凹地 进行了持续补给 同时在富钙离子的深部水补给下 形成钙芒硝。而在南部"大耳朵"湖区,可能由于塔 里木河水停留时间短或者深部富钙水补给的缺乏, 因而仅形成少量钙芒硝矿物 同时进一步证明了钙 芒硝矿物的形成应需要" 富钙 "水持续补给( 刘成林 等 2007 )的观点 ,该" 富钙 "水可能为深部地层水( 或 油田水)。

## 5 结 论

(1)"大耳朵"湖区含石膏碎屑层卤水蒸发析盐 顺序依次为(硬)石膏、石盐、少量钾石盐与光卤石 等,各种盐析出的顺序与理论分析基本吻合。含膏 碎屑层卤水蒸发过程中没有析出钙芒硝,主要原因 可能是钙离子的缺乏。

(2)碎屑层卤水蒸发过程中化学组成变化与罗 北凹地卤水对比结果表明:罗布泊古湖水蒸发至石 膏沉积之后,钾离子得到初步富集,罗北凹地卤水继 续蒸发浓缩,南部'大耳朵'湖,卤水化学组成基本保 持稳定,为罗北凹地起到'预备成钾'的作用。

(3)罗北凹地古盐湖卤水没有析出大量石盐, 而以钙芒硝沉积为主,推测应是受到深部"富钙水" 的持续补给,强烈蒸发浓缩,最后形成富钾卤水。

志 谢 感谢国投新疆罗布泊钾盐有限公司矿 产资源部陈伟、杨宝恒等对野外自然蒸发实验工作 的支持和帮助;感谢宣之强老师、王英素老师、刘宝 坤等在样品扫描电子显微镜/能谱分析、化学分析以 及 X 射线衍射分析中的大力帮助!

References

11/0

- Bo Y , Liu C L , Jiao P C , Chen Y Z and Cao Y T. 2013. Hydrochemical characteristics and controlling factors for waters ' chemical composition in the Tarim Basin , western China J ]. Chemie der Erde , 73 (3) 343-356.
- Gao S Y and Liu D G. 1996. Solar evaporation of surface brine( in Summer ) of Da Chaidan salt lake J J. Journal of Salt Lake Science , 4 (3-4).73-86( in Chinese with English abstract ).
- Gu S Q and Lan H Z. 1986. Experimental study on hydroglauberit [J]. Chinese Science Bulletin , (9):684-688 (in Chinese ).
- Hardie L A. 1968. The origin of the recent non-marine evaporite deposit of Saline Valley, Inyo County, California. Geochimica et Cosmochimica Acta, 32 :1279-1301.
- Jiang X Zhou B H and Nie Z. 2013. Experimental research progress in evaporation of salt lake brind J ]. Inorganic Chemicals Industry ,45 (6):1-4( in Chinese with English abstract ).
- Li Y W and Han W T. 1994. A review of physicochemical study on the origin of evaporate J ]. Earth Science Frontiers ( China University of Geosciences, Beijing ), 1(3-4):211-215( in Chinese with Eng-lish abstract ).
- Li Y W and Han W T. 1995. Experimental study of 25°C isothermal evaporation of sea water from the south China Sea[J]. Scientia Geologica Sinica , 30(3) 233-239( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L and Wang M L. 1999a. Evolution of Quaternary depositional

environments and forming of potash deposits in Lop Nur lake , Xinjiang , China J ]. Acta Geoscientia Sinica , 20( Supp. ):264-270 ( in Chinese with English abstract ).

- Liu C L , Wang M L and Jiao P C. 1999b. Hydrogen , Oxygen , Strontium and Sulfur Isotopic Geochemistry and Potash-forming Material Sources of LOP salt lake , Xinjiang J ]. Mineral Deposits , 18(3): 268-275 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L , Wang M L , Jiao P C , Chen Y Z and Li S D. 2002. Formation of pores and brine reserving mechanism of the aquifers in Quaternary potash deposits in Lop Nur Lake , Xinjiang , Ching J ]. Geological Review , 48(4):437-443 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L , Jiao P C , Wang M L , Yang Z C , Li S D and Chen Y Z. 2003a. Characteristics of diagenesis of the Quaternary salt-bearing strata , Lop Nur lake , Xinjiang J ]. Acta Sedimentologica Sinica , 21(2) 240-246 (in Chinese with English abstract ).
- Liu C L , Jiao P C , Wang M L , Li S D and Chen Y Z. 2003b. Ascending brine fluids in Quaternary salty lake of Lop Nur in Xinjiang and their significance in potash formation[ J ]. Mineral Deposits. 22 (4): 386-392 (in Chinese with English abstract ).
- Liu C L , Wang M L , Jiao P C , Li S D and Chen Y Z. 2006. Features and formation mechanism of faults and potash-forming effect in the Lop N1ur Salt Lake , Xinjiang , China[ J ]. Acta Geologica Sinica , 80( 6 ) 936-943.
- Liu C L , Chen Y Z , Jiao P C and Wang M L. 2006. Crystallizing experiments and probing of chemical reaction of glauberite , Lop Nur salt lake , Xinjiang , China[ J ]. Mineral Deposits , 25( Supp. ): 233-236 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L , Jiao P C , Wang M L and Chen Y Z. 2007. Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur salt lake ,Xinjiang ,China J J. Mineral Deposits. 26(3): 322-329 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L , Wang M L , Jiao P C and Chen Y Z. 2009. The probing of regularity and controlling factors of potash deposits distribution in Lop Nur salt lake , Xinjiang J ]. Acta Geoscientia Sinica , 30( 6 ): 796-802 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu C L , Jiao P C and Wang M L. 2010a. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China J ]. Mineral Deposits , 29 (4):581-592 (in Chinese with English abstract ).
- Liu C L , Ma L C , Jiao P C , Sun X H and Chen Y Z. 2010b. 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 C L , Jiao P C , Lv F L , Wang Y Z , Sun X H , Zhang H , Wang L C and Yao F J. 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 Chin& J ]. Acta Geologica Sinica (English Edition ), 89(6) 2030-2047.
- Ma L C , Lowenstein T K , Li B G , Jiang P A , Liu C L , Zhong J P , Sheng J D , Qiu H L and Wu H Q. 2010. Hydrochemical characteristics and brine evolution paths of Lop Nor Basin , Xinjiang Province , western China[ J ]. Applied Geochemistry , 25 :1770-1782.
- Qu Y H, Qian Z Q and Han W T. 2010. Identification manual of salt minerals [M]. Beijing : Geological Publishing House in Chinese ).
- Risacher F and Clement A. 2001. A computer program for the simulation of evaporation of natural waters to high concentration[J]. Computers & Geosciences, 27(2):191-201.
- Song P S, Li W, Sun B, Nie Z, Bu L Z and Wang Y S. 2011. Recent development on comprehensive utilization of Salt Lake resources J. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 27(5): 801-815 (in Chinese with English abstract).
- Sun D P , Li B X , Ma Y H and Liu Q Z. 1995. An investigation on evaporating experiments for Qinghai-Lake water , China J J. Journal of Salt Lake Science , 3(2):10-19( in Chinese with English abstract ).
- Wang M L , Liu C L , Jiao P C , Han W T , Song S S , Chen Y Z , Yang Z C , Fan W D , Li T Q , Li C H , Feng J X , Chen J Z , Wang X M , Yu Z H and Li Y W. 2001. Saline lake poatsh resources in the Lop Nur , Xinjigang M ]. Beijing : Geological Publishing House( in Chinese ).
- Wang M L , Liu C L , Jiao P C and Yang Z C. 2005. Minerogenic theory of the superlarge Lop Nur potash deposit , Xinjiang , China J . Acta Geologica Sinica , 79(1) 53-65.
- Wei D Y. 1988. Glauberite in saline deposit and its Origin[ J ]. Minerals and Rocks , & 1 ) 92-98( in Chinese with English abstract ).
- Wei D Y. 2001. On glauberite deposits in China J J. Geology of Chemical Minerals , 23 (2) 75-82 ( in Chinese with English abstract ).
- Xia X C. 1987. Scientific investigation and research in the Lop Nur Lake region[ C ]. Beijing : Science Press ( in Chinese ).
- Yang Q T. 1989. The origin and sedimentary environment analysis of glauberite[ J ]. Acta Sedimentologica Sinica 7(3):137-141 ( in Chinese with English abstract ).
- Zhao H T , Liu C L , Jiao P C , Sun X H , Li D X. 2014. Morphology

characteristics and influential factors of glauberite growth from Lop Nur Salt Lake , China J ]. Acta Mieralogica Sinica , 34(1) 97-106 (in Chinese with English abstract).

Zhu J Q and Hu W X. 1989. Types and geneses of glauberite in the Anning Basin , Yunnan Province J J. Jouranal of Hebei College of Geology , 12(1) 34-42( in Chinese with English abstract ).

#### 附中文参考文献

- 高世扬 柳大纲. 1996. 大柴旦盐湖夏季组成卤水的天然蒸发(含硼 海水型盐湖卤水的天然蒸发 [J]. 盐湖研究 A(3-4):73-86.
- 谷树起,蔺焕珠.1986.水钙芒硝的实C验研究[J]科学通报(9): 684-688.
- 姜旭 周保华, 七贞. 2013. 中国盐湖卤水蒸发实验研究进展[J]. 无 机盐工业 45(6):1-4
- 李亚文,韩蔚田. 1994. 蒸发岩成因的物理化学研究[J]. 地学前缘 (中国地质大学,北京),1(3-4)211-215.
- 李亚文 ,韩蔚田, 1995, 南海海水 25℃ 等温蒸发实验研究[J], 地质 科学 ,30(3) 233-239.
- 刘成林,王弭力.1999a.罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用[J]. 地球学报 (X 增刊) 264-270.
- 刘成林,王弭力,焦鹏程.1999b.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,1g(3)268-275.
- 刘成林,王弭力,焦鹏程,陈永志,李树德.2002.罗布泊第四纪卤水钾 矿储层孔隙成因与储集机制研究」].地质论评,48(4):437-443.
- 刘成林,焦鹏程,王弭力,杨智琛,李树德,陈永志.2003a.罗布泊第四 纪含盐系成岩作用特征研究 J].沉积学报,21(2):240-246.
- 刘成林,焦鹏程,王弭力,李树德,陈永志.2003b.新疆罗布泊第四纪 盐湖上升流体及其成钾意义[1].矿床地质,22(4)386-392.

- 刘成林 陈永志 ,焦鹏程 ,王弭力.2006. 罗布泊盐湖钙芒硝结晶实验 与化学反应探讨[]]. 矿床地质 25(增刊) 233-236.
- 刘成林,焦鹏程,王弭力,陈永志.2007.罗布泊盐湖巨量钙芒硝沉积 及其成钾效应分析[]].矿床地质,26(3)322-329.
- 刘成林,王弭力,焦鹏程,陈永志.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.
- 刘成林,焦鹏程,王弭力.2010a.盆地钾盐找矿模型探讨[J].矿床地 质 29(4)581-592.
- 刘成林,马黎春,焦鹏程,孙小虹,陈永志.2010b.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.
- 曲懿华, 线自强, 韩蔚田. 2010. 盐矿物鉴定手册[M]. 北京 地质出版 社.
- 孙大鹏,李秉孝,马育华,刘群柱. 1995. 青海湖湖水的蒸发实验研 究[]. 盐湖研究, (2):10-19.
- 宋彭生 李武 孙柏 也贞,卜令忠,王云生.2011. 盐湖资源开发利用进展 J]. 无机化学学报 27(5):801-815.
- 王弭力,刘成林 焦鹏程,韩蔚田,宋松山,陈永志,杨智琛,樊卫东,李 廷祺,李长华,冯金星,陈建忠,王新民,于志鸿,李亚文.2001.罗 布泊盐湖钾盐资源 M1.北京,地质出版社.
- 魏东岩.1988. 盐类沉积中的钙芒硝及其成因[J].矿物岩石,8(1): 92-98.
- 魏东岩.2001. 论中国钙芒硝矿床 [].化工矿产地质 23(2):75-82.
- 夏训诚. 1987. 罗布泊科学考察与研究[C]. 北京 科学出版社.
- 杨清堂.1989. 钙芒硝的成因和沉积环境简析[J]. 沉积学报,7(3): 137-141.
- 赵海形,刘成林,焦鹏程,孙小虹,李德先. 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.
- 朱井泉,胡文 .1989. 云南安宁盆地钙芒硝的类型与成因[J].河北 地质学院学报,12(1):34-42.