

文章编号 0258-7106(2007)03-0322-08

罗布泊盐湖巨量钙芒硝沉积及其成钾效应分析*

刘成林, 焦鹏程, 王弭力, 陈永志

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 罗布泊盐湖位于新疆塔里木盆地东部, 盐湖沉积的主要盐类矿物是钙芒硝, 其资源量巨大, 卤水钾矿赋存于钙芒硝岩晶间孔隙中, 显然, 钾盐的聚集与钙芒硝沉积有着密切的联系。文章通过对罗布泊盐湖的钙芒硝沉积特征研究, 探讨了钾盐矿床的形成与钙芒硝的沉积关系。研究显示钙芒硝沉积时期, 古气候具有“热”的特点, 有利于钙芒硝沉积, 盐湖物质来源有“富硫酸根”的地表水, 也可能存在富钙水的补给。结晶试验显示, 罗布泊现代卤水与含氯化钙水掺合后, 蒸发析出石膏和水钙芒硝, 同时, 早期沉积的石膏被交代成为钙芒硝, 这两种方式是钙芒硝形成的主要机制。罗布泊钙芒硝的成钾效应主要表现为3个方面: 钙芒硝具有菱板状结构, 在沉积和成岩过程中钙芒硝岩发育大量孔隙, 钙芒硝孔隙储集了富钾卤水, 大量钙芒硝的析出导致卤水中钾离子相对富集。研究认为, 罗布泊盐湖巨量钙芒硝的沉积控制了钾盐的形成和分布, 钙芒硝岩成储钾盐的认识在实践上推进了罗布泊盐湖的找钾工作。

关键词: 地质学, 盐湖, 钙芒硝, 钾盐成矿, 罗布泊, 新疆

中图分类号: P611.4

文献标识码: A

Sedimentation of glauberite and its effect on potash deposits formation in Lop Nur salt lake, Xinjiang, China

LIU ChengLin, JIAO PengCheng, WANG MiLi and CHEN YongZhi

(Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract

The Lop Nur salt lake is located in the eastern part of Tarim basin, Xinjiang, China. From Mid-Pleistocene, the Lop Nur gradually evolved into a salt lake, and since 1995, brine-potash deposits have been discovered in this lake. The domination of glauberite in salt minerals constitutes the unique characteristics of this lake. The authors conducted a systematic research on the glauberite sedimentary feature and the relationship between glauberite sedimentation and potash-deposits formation. The results show that the paleoclimate was “hot” during the glauberite crystallization-sedimentation period, which was beneficial to the crystallization of glauberite, and that the lake was supplied with “sulfate-rich” surface water and probably “calcium-rich” hypergene brine. Crystallization experiments show that, if modern brine of the Lop Nur is mixed with “CaCl₂” water, hydroglauberite and gypsum will crystallize from the mixture after evaporation. It is therefore inferred that if hydroglauberite loses water it will change into glauberite. Moreover, the rock-film study shows that gypsum often occurs as a remnant in the inner part of the glauberite crystal, or glauberite can replace gypsum in glauberite rocks, which also constitutes the mechanism of glauberite formation. A new chemical reaction of glauberite sedimentation is suggested in this paper. The effect of potash formation controlled by glauberite sedimentation covers three as-

* 本研究得到“十五”攻关 305 项目(2003BA612A-06-15)和地调项目(1212010561601)的共同资助

第一作者简介 刘成林, 男, 1963 年生, 博导, 研究员, 主要从事盐湖沉积与钾盐矿床研究。

收稿日期 2006-10-10; 改回日期 2007-03-20。张绮玲编辑。

pects: as glauberite had the rhombohedral-plate shape, lots of pores were developed in the glauberite rocks during sedimentation and diagenesis; pores of glauberite rocks hold brine; and glauberite crystallization in large amounts resulted in the accumulation of potassium in brine formed by the removal of Ca^{2+} and Na^+ . It is hence considered that the crystallization and sedimentation of a considerable quantity of glauberite might have had an important effect on the formation and distribution of potash deposits in the Lop Nur. The understanding of the controlling role of glauberite in the formation of potash deposits can obviously promote the potash investigation in the Lop Nur salt lake.

Key words: geology, salt lake, glauberite, potash formation, Lop Nur, Xinjiang

罗布泊位于新疆塔里木盆地东部,为现代干盐湖。早更新世时期,罗布泊盐湖环境为单一环境(微咸水-咸水环境);中更新世时期,其沉积环境逐渐演变为“二元结构”,即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,而北部为盐湖环境,出现钙芒硝沉积及钾盐聚集;到全新世末期,罗布泊盐湖基本干涸(刘成林等,1999a)。罗布泊盐湖因沉积巨量钙芒硝矿层并蕴藏大规模钾盐矿而受到地质学家的关注。

钙芒硝是一种微溶于水的硫酸盐矿物,其化学分子式为 $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$,钙芒硝晶体多呈菱板状,沉积顺序介于石膏和石盐之间。钙芒硝在第四纪盐湖及古代盐湖沉积地层中广泛分布(曲懿华等,1979),但一般呈分散状、条带状及薄层状产出,与碳酸盐、石盐、硬石膏、杂卤石、芒硝、无水芒硝和白钠镁矾等共生。据统计(魏东岩,2001),中国较大规模的陆相钙芒硝矿主要有:川西坳陷晚白垩纪钙芒硝矿床,西宁-民和盆地晚白垩世—早第三纪钙芒硝矿床,云南安宁盆地石盐-钙芒硝矿床,湖南澧县钙芒硝矿,山西运城界村白钠镁矾-芒硝-钙芒硝矿床,新疆库车盆地上第三系钙芒硝层等;海相钙芒硝主要分布在四川长宁盆地震旦系上统海相地层、华北下奥陶统海相蒸发岩系(其中多处见钙芒硝岩薄层)等地。国外钙芒硝主要出现于中亚费尔干纳盆地、智利阿卡特玛盆地、美国上志留统和三叠系含盐系及德国二叠系含盐系等。已报道的资料显示,国内外钙芒硝(矿)的沉积规模都不能与罗布泊钙芒硝的沉积规模相媲美。

罗布泊盐湖演化到钙芒硝沉积阶段,即在盐湖演化早期钙芒硝沉积阶段(第二阶段),出现了钾盐成矿,说明该钾盐矿为一种新类型钾矿床。基于新的地质特征认识,王弭力等提出了“两段式”成钾论

(Wang et al. 2005)。可见,罗布泊钙芒硝沉积在钾盐大规模聚集过程中发挥了重要作用,本文主要就此问题进行深入探讨。

1 罗布泊钾盐矿床研究概况

自1995年以来,在罗布泊北部的罗北凹地发现了超大型规模的卤水钾盐矿产资源(王弭力等,1996,1998,2001)。“十五”期间,在罗北凹地外围盐湖沉积区又发现4个卤水钾矿^①,这些卤水钾矿主要赋存于钙芒硝岩晶间孔隙中。罗布泊卤水矿层主要为中、上更新统及全新统。卤水矿层结构特征是1个潜水层和5个主要承压层,呈似层状和偏透镜状产出,潜卤平均孔隙度为28.00%,承压层平均孔隙度为14.00%,卤水氯化钾平均品位为1.40%,水化学类型为硫酸镁亚型。

2 钙芒硝沉积特征

2.1 钙芒硝分布特征

平面上,根据地面调查、钻孔岩心及ETM卫星影像分析,钙芒硝主要分布于罗布泊北、东北部(图1),钙芒硝岩沉积分布区面积达3 820 km²。

地层时代上,钙芒硝分布于中更新统上部及上更新统(图2),含量由下向上逐渐增高,上部含量较稳定,分布均匀。

2.2 钙芒硝沉积量估算

按照钙芒硝岩的分布面积3 820 km²,保守估计钙芒硝岩中钙芒硝含量为60%,钙芒硝岩层平均累计厚度为50 m,岩石密度采用2.8 t/m³(钙芒硝密度),则罗布泊盐湖钙芒硝质量等于面积与厚度与百

① 中国地质科学院矿产资源研究所,2005.罗布泊及邻区盐湖钾盐资源评价研究报告(“十五”科技攻关305项目专题)。

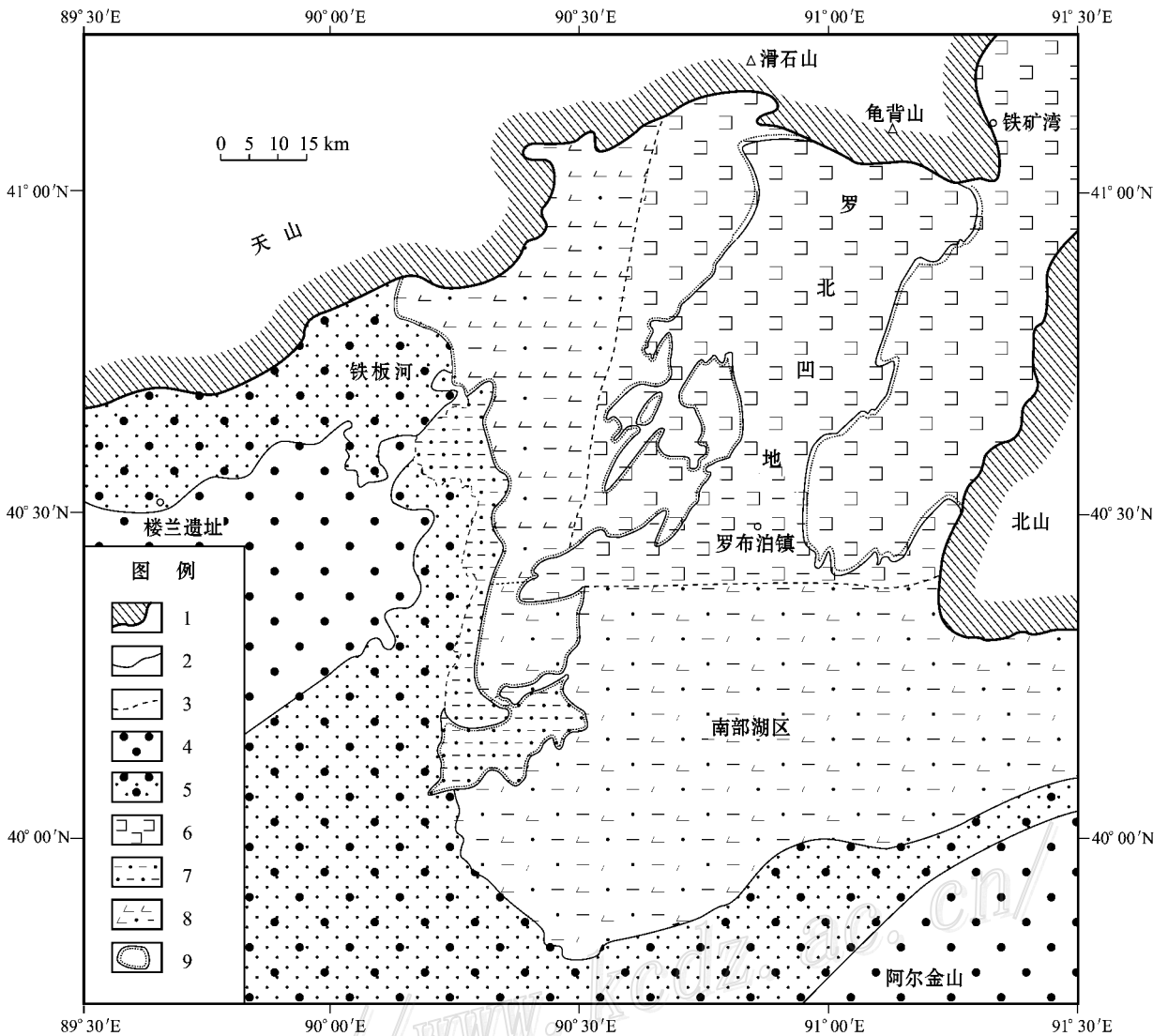


图1 罗布泊中更新世末期-上更新世早期盐类矿物相分布图(据2000年ETM分析和野外调查等资料编制)

1—山区基岩 2—地质界线 3—推测地质界线 4—风成沉积; 5—冲洪积; 6—钙芒硝沉积; 7—粉砂粘土; 8—石膏及石膏粉砂粘土; 9—抬升区

Fig. 1 The distribution of saline mineral facies during late Mid-Pleistocene to early Late- Pleistocene

1—Mountain area bedrock ; 2—Geological boundary ; 3—Inferred geological boundary ; 4—Eolian sediments ; 5—Diluvial and alluvial sediments ; 6—Glauberite ; 7—Silty clay ; 8—Gypsum and gypsum-bearing siltclay ; 9—Uplifted area

分含量与密度之积,即为 $3\ 820 \times 106 \times 50 \times 60\% \times 2.80 = 3200$ 亿吨,可见,该区钙芒硝岩矿石沉积量可谓巨量。

2.3 钙芒硝矿物学特征

钙芒硝($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$)为微细晶-粗巨晶结构,大小从0.1 mm~4 cm不等,自形-半自形,多呈菱板状、菱柱状及片状,部分为粒状,集体呈束状,花瓣状。钙芒硝岩以厚层状(几米至几十米)产出为主,薄层及分散状次之。

2.4 钙芒硝沉积演化

中更新世以来,罗布泊北部地区逐渐变为以钙

芒硝沉积为主的盐湖环境,到了中更新世末,北部钙芒硝沉积区大部分抬升露出水面(刘成林等,1999a),同时,罗北凹地等发生沉降,形成次级凹地,维持盐湖沉积环境,钙芒硝继续大量析出,直到晚更新世末期停止沉积。

3 钙芒硝成因

3.1 物质来源分析

罗布泊周边河流的水化学组成及特征列入表1。由表可见,补给罗布泊的主要河流水(现代)多属于

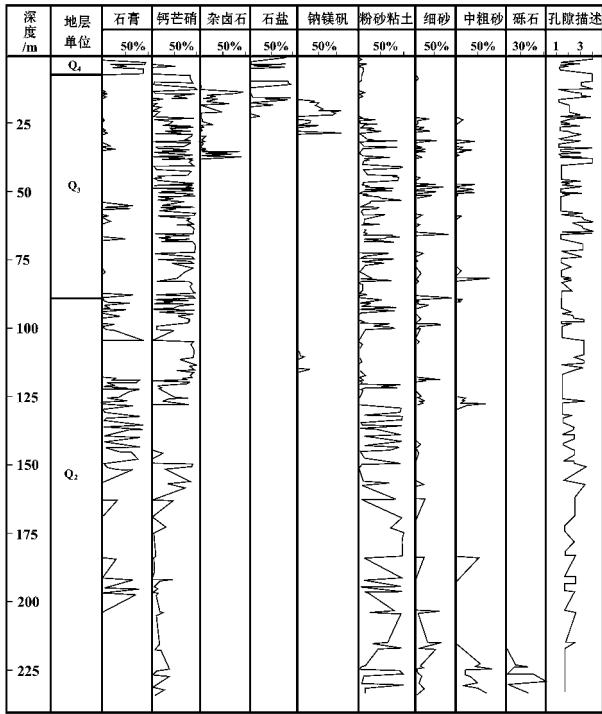


图 2 ZK1200B 孔钙芒硝等盐类矿物在地层中分布 (王弼力等 2001)

孔隙描述 :1—致密 2—一般 3—较发育 4—发育

Fig. 2 The distribution of glauberite and other saline minerals in strata of drillhole ZK1200B (Wang et al., 2001)
Description of pores : 1—Compact ; 2—Common ; 3—Fairly well-developed ; 4—Well-developed

硫酸钠亚型,个别为硫酸镁亚型。这与一般河水多为碳酸盐型有很大不同,原因可能是该区气候干旱,河水在流入罗布泊前经受了较强烈的蒸发作用,如塔里木河上游矿化度小于 1g/L(郑喜玉等,1995),

至中下游增至每升几克(樊自立,1998)。

由表 1 可知,补给罗布泊的河水 SO_4^{2-}/Cl^- 比值为 1.97,而柴达木盆地主要补给河水平均比值是 0.5(鱼卡河 1.01,塔塔棱河 0.69,阿拉尔河 1.15,那棱格勒河 0.36,乌图美仁河 0.29,格尔木河 0.57,柴达木河 0.28,素棱格勒河 0.05)。海水 SO_4^{2-}/Cl^- 比值为 0.14。由此可见,补给罗布泊的河水 SO_4^{2-} 的含量明显高于柴达木盆地河水及海水,这可能是该区河水淋滤、溶解了塔里木盆地西部第三系中的硫酸盐矿物,而使其富含 SO_4^{2-} 等组分所致(刘成林等,1999b)。

塔里木盆地油田水盐度很高(表 2),最小为 83.75 g/L,最大达 202.94 g/L,大多超过 140 g/L。塔里木盆地内的寒武系—奥陶系、石炭系、三叠系、侏罗系—白垩系和第三系等多为海相及海陆过渡相,均含油田水。油田水为典型的氯化钙型水,阴离子以 Cl^- 为主,阳离子除 $K^+、Na^+$ 外, Ca^{2+} 含量高达 4.52~11.86 g/L,而镁则明显低得多(0.40~1.51 g/L)。塔里木盆地东部中生代地层厚度巨大,油田水属承压水性质,研究区内新构造活动强烈,在静压力和构造运动双重因素作用下,第四纪时可能在塔里木盆地东部边缘低压带及构造活动带溢出油田水,这样就可能形成了油田水对罗布泊地区的补给。

将罗北凹地卤水成分点投影到 25°C Ca^{2+} 重叠的 $K^+、Na^+、Mg^{2+}、Cl^-、SO_4^{2-}-H_2O$ 五元体系相图上(图 3)。如果不考虑 Ca^{2+} 的加入,罗北凹地卤水成分点呈一条带状分布,主要分布于白钠镁矾相区,顶端将进入钾镁盐大量析出阶段,此时卤水演化

表 1 补给罗布泊的周边河流的水化学成分*

Table 1 Chemical components of rivers pouring into Lop Nur

采样地点	$\mu(B)$ (毫克当量/升)							水化学类型	SO_4^{2-}/Cl^-
	$K^+ + Na^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Kn_2		
塔里木河(卡拉)	6.077	3.733	6.005	4.434	7.547	3.831	1.17	硫酸钠亚型	2.34
孔雀河(尉犁)	7.522	2.651	11.009	6.064	9.197	5.921	1.11	硫酸钠亚型	2.05
车尔臣河(塔特朗)	8.459	2.937	4.045	6.79	4.992	3.658	1.23	硫酸钠亚型	1
若羌河(县城)	4.492	1.685	4.382	3.007	4.782	2.770	1.24	硫酸钠亚型	2.149
米兰河(36团)	2.605	2.648	2.648	3.007	2.490	2.404	0.93	硫酸镁亚型	1.122
疏勒河(两湖)	12.63	9.939	8.044	8.112	18.928	3.571	1.25	硫酸钠亚型	3.156
平均值	6.946	3.840	6.022	5.236	7.989	3.693			1.97

原始数据据樊自立等,1987; Kn_2 为化学特征系数(瓦里亚什科,1965)。

① 柴达木综合地质队,中国地质科学院矿床地质研究所,1991.柴达木盆地第四纪钾盐矿床形成条件及找矿方向的综合研究。

表 3 罗布泊晶间卤水蒸发析盐试验

Table 3 Evaporation experiments of intercrystal brine from the Lop Nur

卤水密度/(g/mL)	析出盐矿物
1.235	无固体盐析出
1.238	石盐、微量石膏
1.241	石盐、微量石膏
1.241	石盐、微量石膏
1.242	石盐、微量石膏
1.243	石盐、微量石膏
1.244	石盐、微量石膏
1.245	石盐、微量石膏
1.246	石盐、微量石膏
1.248	石盐、微量石膏
1.250	石盐、微量石膏
1.253	石盐、微量石膏
1.257	石盐、微量石膏
1.260	石盐、微量石膏
1.263	石盐、微量石膏
1.266	石盐、微量石膏
1.271	石盐、微量石膏
1.283	石盐、微量石膏
1.278	石盐、微量石膏
1.288	石盐约 95%、泻利盐约 5%

试验者 陈永志 杨智琛, 1999 地点 新疆吐鲁番。

盐。在这个过程中,微量石膏一直有沉淀,但未出现钙芒硝沉淀。其原因可能是卤水中钙离子含量太低,原卤中 Ca^{2+} 含量仅 0.016%,由于石膏的溶解度比钙芒硝小,故优先析出石膏。可以推断,如果有大量钙离子补给,此时卤水即能析出钙芒硝矿物。

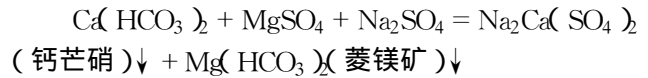
室内模拟蒸发试验^①:罗北凹地 ZK95-2SU2 卤水 400 ml 稀释至 800 ml 放置澄清,取卤水清液 600 ml 倒入烧杯中,取 5 g CaCl_2 溶于 100 ml 蒸馏水中,待完全溶解后,兑入 600 ml 稀释卤水后,放入 30℃ 恒温箱蒸发。7 天后,开始析出细小针状石膏晶体;蒸发 35 天时,针状晶体消失,开始出现微细晶矿物;持续蒸发,又出现大量中细晶立方体石盐;对烧杯底部微细晶进行红外分析,确定为石膏和水钙芒硝。

上述实验显示,罗北凹地卤水得到钙的补给,无疑将会出现水钙芒硝沉淀(钙芒硝可能由水钙芒硝脱水转变而来)。每次实验都有石膏沉淀,随着蒸发作用的进行,石膏被水钙芒硝交代,或残留或消失。这与罗北凹地中广泛出现钙芒硝交代石膏的现象相吻合。

3.4 钙芒硝沉积化学反应式分析

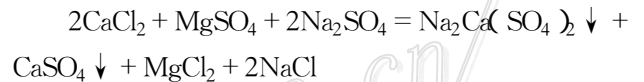
罗布泊地区在早中更新世时期出现石膏沉积,之后在其北部出现钙芒硝沉淀,罗北凹地形成后,除钙芒硝继续大量析出外,晚期还出现钠镁矾、杂卤石等矿物。

M·Γ·瓦里亚什科(1965)提出,在富含硫酸钠的溶液中形成钙芒硝的化学反应:



最初形成“细粒物质”钙芒硝的准稳定形态,其 Na:Ca 比例不固定,其成分中包含水,在盐湖成岩作用过程中,这种“细粒物质”逐渐转变成钙芒硝。

然而,在罗布泊地区,菱镁矿的沉积量很小,与石膏和钙芒硝的沉积量远不相称,而所发现的菱镁矿与钙芒硝基本无共生关系,故推测地表水中钙以 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 形式被带入罗布泊的数量也相应较小,难以满足巨厚层钙芒硝沉淀需求的钙离子数量。由此说明,盐湖中钙的来源除河水补给外,还有其他来源,可能有来自盆地深部地层的油田水或氯化物型水。综合分析,提出如下化学反应式(刘成林等, 2006c):



由反应结果可见,钙芒硝和石膏均同时产出,沉积量相当,总体上与罗布泊地层中出现的钙芒硝与石膏沉积情况类似,有时两者还共生,多数情况下各自呈层状产出。

不过,从图 2 可见,自中更新世末期以来,钙芒硝的沉积量明显增多,而石膏则显著减少或消失,这与本文所提出的化学反应产物(即钙芒硝与石膏沉积量应相当)似乎不一致。其原因可能是,中更新世末期以来,罗布泊处于“热”的气候条件,有利于钙芒硝结晶析出,而石膏属于“冷相矿物”,气候条件不利于其结晶。此外,罗布泊第四纪含盐系内广泛出现钙芒硝交代石膏的现象(刘成林等, 2003b),而且沉积物中石膏含量与钙芒硝含量之间呈消长关系,这可能说明至少部分钙芒硝系交代石膏而形成的。

综合可见,罗布泊钙芒硝的成因是,在“热”气候条件下,受到富“硫酸根”水和“富钙”水补给,通过化学结晶和交代作用两种方式形成。两种作用有时可

① 中国地质科学院矿产资源研究所, 2001. 罗布泊含盐系成岩作用及卤水钾矿储集性评价.

能交织在一起,而当石膏被交代成钙芒硝时,这些钙芒硝可起到“晶芽”或“晶种”的作用,诱导钙芒硝继续结晶生长。由于钙芒硝矿物具有菱板状结构,当大量钙芒硝沉积到湖底堆积时,晶体堆积表现为杂乱无章状态,颗粒之间的接触关系为“角-棱”或“点-面”状,这样就容易产生蜂窝状孔隙。

4 钙芒硝沉积与成钾

罗布泊中的钙芒硝岩发育大量孔隙,其中储集了富钾卤水,这是钙芒硝对卤水钾盐成矿的关键控制作用之一。罗布泊盐湖卤水的主要阳离子是 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,阴离子为硫酸根和氯离子,因巨量钙芒硝析出,卤水中 Ca^{2+} 、 Na^+ 离子被大量移出,致使 K^+ 含量大幅上升,从而促进了卤水中钾元素的聚集。由此可见,罗布泊钙芒硝的沉积正是通过上述两种方式对钾聚集成矿发挥作用的。

5 结论

罗布泊盐湖出现巨量钙芒硝沉积,分布于中更新统上部 and 上更新统中。富钾卤水矿主要赋存于钙芒硝岩中,在盐湖演化较早期阶段(第二阶段)形成钾矿,从而产生了一种新类型钾盐矿床——罗布泊型钾盐矿床。罗布泊钙芒硝沉积时期古气候具有“热”的特点,物质来源有“富硫酸根”的地表水和“富钙”深部水。钙芒硝的沉积系盐湖卤水与“氯化钙”水掺合蒸发形成,同时,钙芒硝广泛交代石膏。钙芒硝成钾效应表现为:钙芒硝具有菱板状结构,在沉积和成岩过程中发育大量孔隙,这些孔隙储集富钾卤水;大量钙芒硝的析出也导致卤水中钾离子相对富集。因此,巨量钙芒硝的沉积控制了罗布泊盐湖钾矿的形成和分布。

References

Cai C F, Mei B W and Ma T. 1997. The coaction of fluids and rocks of Tarim basin[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese with English abstract)

Fan Z L, ed. 1998. Resources and environments and persistent development of Tarim river basin[M]. Beijing: Science Press. 75p (in Chinese).

Fan Z L, Li P Q and Zhang B Q. 1987. Salt crust in the Lop Nur area [A]. In: Xia X C, ed. Scientific investigation and research in the

Lop Nur[M]. Beijing: Science Press. 141~156 (in Chinese).

Gu S Q and Lin H Z. 1986. The experiment researches of hydroglauberite[J]. Chinese Science Bulletin, 9: 684~688 (in Chinese)

He F M, Liu S C, Bai C Q, Yu X Z, Yan S R, Jiang M L and Zhou Q W. 1988. Manual of identification methods for saline minerals[M]. Beijing: Chemical Industry Pub. House. 148~150 (in Chinese).

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 Nur salt lake, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 18(3): 268~275 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Wang M L, Jiao P C, Li S D, 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, China[J]. Geol. Rev., 48(4): 437~444 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Jiao P C, Wang M L, Li S D and Chen Y Z. 2003a. 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, Jiao P C, Wang M L, Yang Z C, Li S D and Chen Y Z. 2003b. Characteristica of diagenesis of the Quaternary salt-bearing strata, Lop Nur lake, Xinjiang[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 21(2): 240~245 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Wang M L, Jiao P C, Li S D and Chen Y Z. 2006a. Features and formation mechanism of faults and potash-forming effect in the Lop Nur Salt Lake, Xinjiang, China[J]. Acta Geologica Sinica, 80(6): 936~943.

Liu C L, Chen Y Z, Chen W S, Jiao P C, Wang M L and Li S D. 2006b. Studies of fluid inclusions in glauberite of middle-upper Pleistocene strata and their paleoclimate significance in Lop Nur salty lake, Xinjiang, NW China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 26(1): 93~98 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Chen Y Z, Jiao P C and Wang M L. 2006c. Crystallizing experiments and probing of chemical reaction of glauberite, Lop Nur salt lake, Xinjiang, China[J]. Mineral Deposits, 25(Supp.): 233~236 (in Chinese).

Qu Y H, Qian Z Q and Han W T. 1979. Manual of identification for saline minerals[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 81~83, 206~209 (in Chinese).

Valyashko M G. 1965. Geochemical regularity for the formation of potash deposits[M]. Fan L et al. translated. Beijing: China Industrial Press. 3p (in Russian).

Wang M L, Li T Q, Liu C L, Yang Z C and Li C H. 1996. Important discovery of a potash deposits in Luobei subbasin of the Lop Nur, Xinjiang, China[A]. In: Geological Society of China, ed. Selected papers presented to the academic exchange meeting of major achievements of the geological sciences obtained in the Eighth Five-Year Plan period[C]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 446~449 (in Chi-

nese).

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.

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 potash resources in Lop Nur, Xinjiang[M]. Beijing: Geol. Pub. House. 81~83, 206~209(in Chinese with English abstract).

Wang M L, Liu C L, Jiao P C, Yang Z C and Li Y W. 1998. Characteristics of the Luobei subbasin superlarge potash deposit in the Lop Nur and its development prospects[J]. Mineral Deposits, 17 (Supp.) 433~435(in Chinese).

Wei Dongyan. 2001. On glauberite deposits of China[J]. Geology of Chemical Minerals, 23(2): 75~82(in Chinese with English abstract).

Zheng M P, Zhao Y Y and Liu J Y. 2000. Palaeoclimatic indicators of China's Quaternary saline lake sediments and hydrochemistry[A]. Special Issue I Papers on geology of China for the 31st IGC, Rio de Janeiro[C]. Beijing: Geol. Pub. House. 95~101.

Zheng X Y, Li B X, Gao Z H, Xu C, Zhang M G, Cai B, Zhang B Z and Shan F S. 1995. Saline lakes in Xinjiang[M]. Beijing: Science Press. 4~5(in Chinese).

附中文参考文献

蔡春芳, 梅博文, 马亭, 等. 1997. 塔里木盆地流体-岩石相互作用[M]. 北京: 地质出版社.

樊自立(主编). 1998. 塔里木河流域资源环境及可持续发展[M]. 北京: 科学出版社. 75.

樊自立, 李培清, 张丙乾. 1987. 罗布泊的盐壳[A]. 夏训诚. 罗布泊科学考察与研究[M]. 北京: 科学出版社. 141.

谷树起, 蔺焕珠. 1986. 水钙芒硝的实验研究[J]. 科学通报(9): 684~688.

何法明, 刘世昌, 白崇庆, 喻显珍, 严肃蓉, 蒋铭廉, 周清文. 1988. 盐类矿物鉴定工作方法手册[M]. 北京: 化学工业出版社. 148~150.

刘成林, 王弼力. 1999a. 罗布泊第四纪沉积环境演化与成钾作用[J]. 地球学报(2 增刊) 264~270.

刘成林, 王弼力, 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, 18(3) 268~275.

刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 陈永志, 李树德. 2002. 罗布泊第四纪卤水钾矿储卤层孔隙成因与储集机制研究[J]. 地质论评, 48(4): 437~444.

刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 李树德, 陈永志. 2003a. 新疆罗布泊第四纪盐湖上升流体及其成钾意义[J]. 矿床地质, 22(4) 386~392.

刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 杨智琛, 李树德, 陈永志. 2003b. 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, 陈永志, 陈伟十, 焦鹏程, 王弼力, 李树德. 2006b. 罗布泊盐湖更新世晚期沉积钙芒硝包裹体特征及古气候意义探讨[J]. 矿物学报, 26(1) 94~98.

刘成林, 陈永志, 焦鹏程, 王弼力. 2006c. 罗布泊盐湖钙芒硝结晶实验与化学反应探讨[J]. 矿床地质, 25(增刊) 233~236.

曲懿华, 钱自强, 韩蔚田. 1979. 盐类矿物鉴定手册[M]. 北京: 地质出版社. 53 页.

瓦里亚什科 M Г. 1965. 钾盐矿床形成的地球化学规律[M]. 范立, 等译. 北京: 中国工业出版社. 3.

王弼力, 李廷祺, 刘成林, 杨智琛, 李长华. 1996. 新疆罗布泊罗北凹地钾矿的重大发现[A]. “八五”地质科学重要成果学术交流会论文集选集[C]. 北京: 冶金工业出版社. 446~449.

王弼力, 刘成林, 焦鹏程, 杨智琛, 李亚文. 1998. 罗布泊罗北凹地超大型钾盐矿床特征及其开发前景[J]. 矿床地质, 17(增刊): 433~435.

王弼力, 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, 陈建中, 王新民, 于志鸿, 李亚文. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京: 地质出版社. 81~83, 206~209.

魏东岩. 2001. 论中国钙芒硝矿床[J]. 化工矿产地质, 23(2): 75~82.

郑绵平, 刘俊英, 赵元艺. 2001. 中国第四纪盐湖沉积与水化学的古气候标志[A]. 第 31 届国际地质大会中国代表团学术论文集[C]. 北京: 地质出版社. 95~101.

郑喜玉, 李秉肖, 高章洪, 徐昶, 张明刚, 蔡碧琴, 张保珍, 山发寿. 1995. 新疆盐湖[M]. 北京: 科学出版社. 4~5.