文章编号:0258-7106(2008)06-0705-09

罗布泊杂卤石沉积特征及成因机理探讨*

刘成林[1],王弭力[1],焦鹏程[1],樊卫东[2],陈永志[1],杨智琛[1],王敬国[2]
(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 新疆地质矿产勘探开发局第三地质大队,新疆 库尔勒 841000)

摘 要 罗布泊是世界最大的盐湖之一。罗布泊第四纪地层中不仅蕴藏有超大型规模的卤水钾盐矿床,同时也沉淀了一定规模的固体钾盐矿,杂卤石是主要的固体钾矿物。罗布泊杂卤石主要分布于罗北凹地内部,分布区长轴走向与罗北凹地走向一致,面积约 326 km^2 剖面上,杂卤石分布区呈不对称的扁透镜体状。杂卤石以杂卤石岩或含杂卤石钙芒硝岩等形式产出,杂卤石岩及含杂卤石岩呈薄层状分布,最多达 12 层,埋深 10~38 m,其 KCl 含量一般为 3%~10%,最高达 15.48%。研究表明,罗布泊杂卤石成因机制有 2 种:①盐湖(钙芒硝阶段)沉积期间,可能出现气候热波动事件,卤水化学体系演化到杂卤石相区,导致杂卤石结晶析出,主要形成方式为杂卤石交代钙芒硝,部分纯杂卤石岩可能直接从卤水中沉淀出来;②盐湖晚期或干盐湖阶段,石盐晶粒间卤水受地表水混合发生掺杂作用,导致杂卤石析出并沉积于石盐等晶粒间。罗布泊杂卤石等固体钾盐资源具有一定的成矿潜力,查明其成因和分布规律可为勘查评价罗布泊固体钾盐提供理论支持。

关键词 地质学;杂卤石;固体钾盐;成因机理;罗布泊盐湖
中图分类号:P619.21$^+$1 **文献标志码**:A

Sedimentary characteristics and origin of polyhalite in Lop Nur Salt Lake, Xinjiang

LIU ChengLin[1], WANG MiLi[1], JIAO PengCheng[1], FAN WeiDong[2], CHEN YongZhi[1], YANG ZhiChen[1] and WANG JingGuo[2]
(1 MRL Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 No. 3 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract

Located in the eastern part of Tarim Basin, Xinjiang, the Lop Nur Lake is one of the largest playa lakes in the world. In that lake, a superlarge brine potash deposit was discovered within Quaternary salt strata. There also exist some solid potash deposits in the strata, in which polyhalite is a dominant potash mineral, which is mainly distributed in the inner part of the Luobei Hollow within the Lop Nur Lake. The polyhalite is spread in an area of about 326 km^2, and its long axis is parallel to the axis of the Luobei Hollow, with its shape assuming an unsymmetrical lens in NE-WS direction. The polyhalite occurs as pure polyhalite rock or polyhalite-bearing rock, and there are twelve thin layers of polyhalite and polyhalite-bearing rock. The buried depth of polyhalite layers varies from 10 m to 38 m, and the KCl contents are generally from 3% to 10% wt., with the highest value up to 15.48%. Studies show that there exist two kinds of polyhalite precipitation mechanisms: ① hot

* 本研究得到国家科技攻关 305 项目专题(96-915-08-05 和 2003BA612A-06-15)资助
第一作者简介 刘成林,男,1963 年生,研究员,博士生导师,主要从事盐湖沉积与钾盐矿床研究。E-mail:liuchengl@263.net
收稿日期 2008-06-22;改回日期 2008-08-06。李德先编辑。

http://www.kcdz.ac.cn/

weather events might have occurred during the precipitation of glaubeirite, and polyhalite precipitated through the replacement of glauberite; meanwhile, some pure polyhalite beds probably precipitated directly from paleo-lake brine; ② during the playa stage, the intercrystal brine enriched in K and Mg ions was mixed with Ca-rich surface water, polyhalite probably precipitated from the mixed water and occurred between halite grains. Investigation shows that solid potash resources in the Lop Nur Salt Lake deserve further exploration. The researches on the distribution and genesis of polyhalite can provide theoretical support to solid potash exploration in the Lop Nur Lake.

Key words: geology, polyhalite, solid potash salt, genetic mechanism, Lop Nur Salt Lake

罗布泊位于新疆塔里木盆地东部,是世界最大的第四纪干盐湖之一。1995～1997 年,在罗布泊东北部的罗北凹地,发现了超大型规模的卤水钾盐资源(王弭力等,1996;1998;2001)。近年,中国国家投资公司罗布泊钾肥公司开始大规模开发该钾盐矿,2007 年已获准建设 120 万吨硫酸钾项目,该项目采用的技术仅针对液体钾资源的开发。本次研究发现,该地区存在着一定规模的固体钾盐矿物分布,杂卤石是其中的主要固体钾矿物。

中国杂卤石(矿)在第四纪和第三纪盐湖沉积中分布较广,至今已有很多报道,如在柴达木盆地昆特依❶、大浪滩盐湖❷、江汉盆地第三纪含盐系(王弭力,1982)、山东渤海湾盆地第三纪含盐系(刘群等,1987;赵德钧等,1987)中及四川盆地三叠系杂卤石矿(黄宣镇,1996;林耀庭等,2004)等地均有发现。以往对罗布泊钾盐成因的研究主要集中在卤水钾盐矿上,而杂卤石矿层由于钾品位相对较低,加之其溶解度较小(25℃时为 19.13 g/L,安莲英等,2004),开发利用难度较大,一直未给予足够重视。但国内一些实验研究(黄宣镇,1996;安莲英等,2007;郝丽芳,2005)及最近对罗布泊杂卤石矿石的淋滤实验结果表明(陈永志等,2008),杂卤石是可以开发利用的,并推测罗北凹地内部可能存在一个更次级的凹地,杂卤石沉积于此凹地内,分布面积达 326 km^2。

目前,随着钾肥消费量和价格的不断攀升,杂卤石将成为中国不可忽视的重要钾盐资源。本文通过对罗布泊罗北凹地杂卤石特征及成因的分析研究,探讨了罗布泊固体钾盐的沉积规律,为固体钾盐资源评价提供重要的理论基础。寻找杂卤石及其他固体钾盐矿,可为罗布泊钾盐的可持续开发提供重要的后备资源。

1 罗布泊盐湖沉积概况

1.1 盐湖沉积演化历史

罗布泊沉积特征研究显示,罗布泊第四纪沉积韵律发育,有 3 次较大规模的湖水蒸发浓缩过程,最后演变为干盐湖。各时期的沉积环境特征如下:

早更新世 罗布泊为统一大湖,淡水-微咸水和咸水环境交替出现,以淡-微咸水为主,沉积物为粉砂粘土及石膏。

中更新世 早—中期,罗布泊南部仍然为淡水-微咸水和咸水环境,东北部边缘出现菱镁矿沉积。菱镁矿一般在较高盐度环境条件下沉积,反映了当时该地区湖水蒸发强度较大,应属湖滨相产物;晚期,罗布泊南部环境保持不变,而北部出现了大量的钙芒硝沉积,表明罗布泊的东北部地区已进入盐湖环境。尽管南部与北部的湖区通过某些通道连成一片,但两者的化学沉积特征差别仍较大,应属于不同的化学沉积体系。

晚更新世 罗布泊南部保持微咸水-咸水环境,沉积物中出现大量的有孔虫化石及其他共生的介形虫和轮藻化石(王弭力等,1999);北部地区被构造分隔出来的罗北凹地等湖区已演化为高盐度盐湖环境,并出现了多种盐类矿物沉积,如钙芒硝、石盐、杂卤石和钠镁矾等。

全新世 早期,罗布泊南部继承早期的环境,北部的高盐度盐湖区沉积物中除石膏外,还夹有少量钙芒硝及石盐,其沉积环境有淡化趋势,主要为咸水湖环境;中期,北部地区的罗北凹地出现大量石盐沉积,并开始转变为干盐湖,而南部沉积环境未变;晚期,罗布泊南部由微咸水-咸水环境向盐湖环境转变,

❶ 青海省柴达木综合地质勘查大队. 1990. 青海省冷湖镇昆特依钾矿田普查报告.

❷ 青海省第一地质大队. 1988. 青海省茫崖镇大浪滩钾矿矿田详查普查地质报告.

之后出现了石盐沉积并于近现代演变为干盐湖。

1.2　化学沉积系列

罗北凹地盐类矿物在地层中的分布特征表现为：下更新统仅出现石膏；中更新统除少量菱镁矿外，大量出现钙芒硝及石膏；上更新统仍以钙芒硝为主，其上部出现杂卤石、钠镁矾及白钠镁矾薄层；全新统出现石盐、钾盐镁矾及少量光卤石、钾石膏、钾石盐、硬石膏等。罗布泊盐湖化学沉积系列可总结为，石膏、半水石膏-钙芒硝-钠镁矾（少量）-杂卤石-石盐-钾盐镁矾、光卤石、钾石膏、钾石盐，反映了从早更新世至全新世，卤水逐渐浓缩的过程。

2　杂卤石特征及杂卤石岩类型

2.1　杂卤石特征

杂卤石（polyhalite）的化学分子式为 $K_2CaMg(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$，是一种含钾的复盐矿物，可以直接作为复合钾肥使用。本研究中的杂卤石呈微细晶结构，大小一般为 0.01～0.05 mm，单晶形态为叶片状（图 1a）、针状、纤维状，集合体呈绒球状、放射状或扇状（图 1b、c、d）等。杂卤石（样品号为 YKD0008G1）的红外光谱见图 2，能谱成分见表 1。

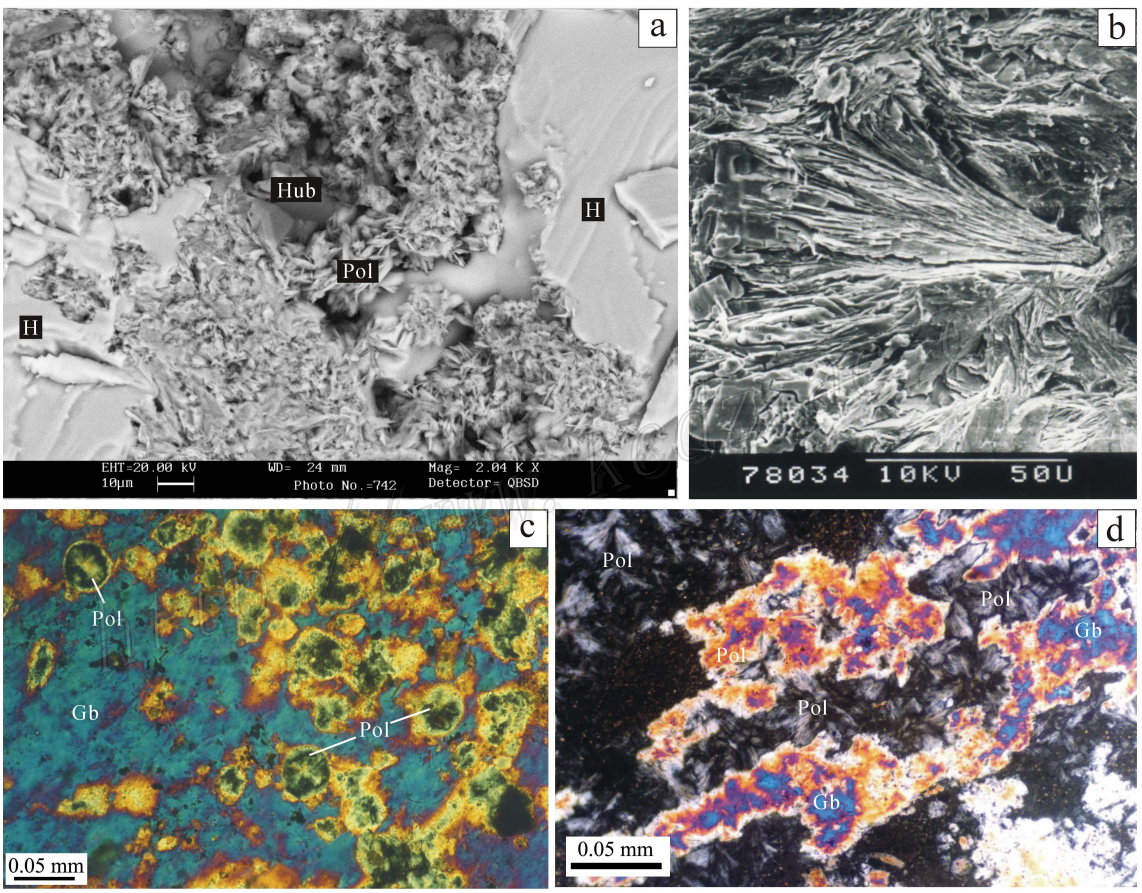

图 1　盐岩中杂卤石的结构特征

a. 杂卤石单晶呈叶片状，集合体呈扇状及放射状，并沿石盐边缘交代；b. 杂卤石集合体呈扇状；c. 杂卤石（绒球状）交代钙芒硝（正交偏光）；d. 杂卤石（灰白色，束状）交代钙芒硝（正交偏光）；H—石盐；Pol—杂卤石；Hub—杂硝矾；Gb—钙芒硝

Fig. 1　Structural characteristics of polyhalite in the salt rock

a. Polyhalite crystals with leaf shape, and crystal-assembling bodies with fan and radiating shapes; polyhalite replacing halite along the edges of the latter; b. Polyhalite-assembling body with fan shape; c. Ployhalite with ball shape replacing glauberite; d. Grayish white polyhalite replacing glauberite; H—Halite; Pol—Polyhalite; Hub—Humberstonite; Gb—Glauberite

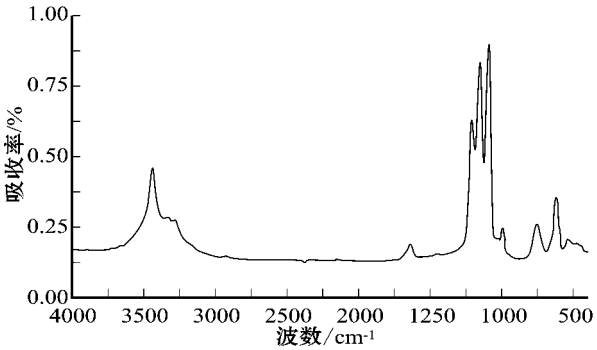

图 2 杂卤石红外光谱分析图谱

Fig. 2 Infrared spectral analyses of polyhalite

表 1 杂卤石能谱成分

Table 1 Electron spectroscopic analyses of ployhalite

	O	Na	Mg	Al	Si
w_B/%	44.62	7.97	4.11	0.25	0.59
	S	Cl	K	Ca	Fe
w_B/%	16.55	8.27	8.45	9.05	0.14

测试单位:中国石油勘探开发研究院实验中心。

杂卤石理论化学组成为(w_B):K 12.90%,Ca 13.29%,Mg 4.03%,S 21.24%,H_2O 5.98%;K/Ca 比值 0.97,K/Mg 比值 3.2,K/S 比值 0.61。能谱分析值为 K/Ca 比值 0.93,K/Mg 比值 2.06,K/S 比值 0.51。对比可见,排除样品中混入了一些 NaCl 成分(石盐背景)外,杂卤石主要元素理论值及比值与能谱值基本相近。

2.2 杂卤石产状

宏观上,杂卤石集合体(杂卤石岩或含杂卤石的 XX 岩)一般呈薄层状产出;微观上,杂卤石晶体通常产于钙芒硝晶体内部(图 1c、d),部分产于石盐晶粒间(图 1a)、晶粒边缘及其内部,少数产于钠镁矾晶粒间、晶粒边缘及其内部。

2.3 杂卤石岩特征

杂卤石在沉积物中的含量差别较大(1%~>95%),根据含量不同可将含杂卤石的岩石类型划分为 4 种:① XX 杂卤石岩(沉积物),杂卤石含量超过 90%,主要有杂卤石岩、含粘土杂卤石岩和含石盐杂卤石岩等;② XX 质杂卤石岩,杂卤石含量 50%~90%,主要有钙芒硝质杂卤石岩,其次为石盐质杂卤石岩和粉砂质杂卤石岩;③ 杂卤石作为次要组分产于其他盐类矿物及沉积物中,含量 10%~50%,如杂卤石质钙芒硝岩、杂卤石质石盐岩、杂卤石质钠镁矾岩等;④ 杂卤石作为少量成分,含量小于 10%,主要有含杂卤石钙芒硝岩、含杂卤石石盐岩、含杂卤石钠镁矾岩等。

3 杂卤石矿层分布特征

罗北凹地杂卤石分布于凹地内部,晚更新世中-晚期,由于卤水持续蒸发浓缩,盐湖水位下降,罗北凹地盐湖除沉积钙芒硝外,杂卤石也在低洼处沉积,进而形成杂卤石矿层,杂卤石分布区构成了一个更次级"杂卤石凹地"。平面上,其形态大致呈"鞋垫状",长轴走向与罗北凹地走向一致,面积 326 km^2;剖面上,杂卤石分布区呈不对称的扁透镜体,重心偏北(图 3)。

杂卤石岩层或含杂卤石岩层的埋深 10~38 m,从薄片鉴定结果看,罗北凹地岩石中杂卤石矿物含量超过 10% 的层段有 7 个,小于 10% 的层段有 5 个。罗北凹地钻孔岩心 KCl 含量一般为 3%~10%,最高达 15.48%(王弭力等,2001),这些高钾含量层位(深度 11~25 m)与杂卤石的分布层位相吻合,说明这些钾元素主要来自杂卤石。

3.1 矿层厚度分布特征

钻孔资料显示,杂卤石层累计厚度 1~9 m,从杂卤石层累计厚度分布趋势图(图 4)可以看出,杂卤石分布于凹地内部,其长轴呈 NE 向展布,与凹地走向(NNE)有一个夹角。分布区明显分出 5 个中心区,最大和最厚的分布区位于凹地中南部,其次为 NE 部,两者之间有 2 个较小的中心区。

3.2 分布面积

从杂卤石厚度分布趋势图求得的分布面积(表 2、图 4)可以看出,罗北凹地杂卤石分布区总面积为 326.45×10^6 m^2,厚度 1~2 m 的薄层矿层面积最大,为 153.95×10^6 m^2,占了总面积的近一半,厚度大的矿层分布面积相对较小,最大厚度(8~9 m)的矿层分布面积也最小,为 0.77×10^6 m^2。随着矿层厚度的增加,矿层分布面积呈快速下降,尤其在 1.50~3.50 m之间,下降速率最大,之后逐渐变缓,厚度大于4.00 m的矿层面积在 40×10^6 m^2 以下,矿层厚度与其面积呈负相关。

3.3 氯化钾含量分布趋势

从罗北凹地杂卤石中氯化钾分布趋势图(图 5)可以看出,地层中氯化钾平均含量分布表现为 4 个中心,两个最高值区位于北部,氯化钾平均含量在 7%~8%以上,南部3个中心含量相对较低,最高值为5%。

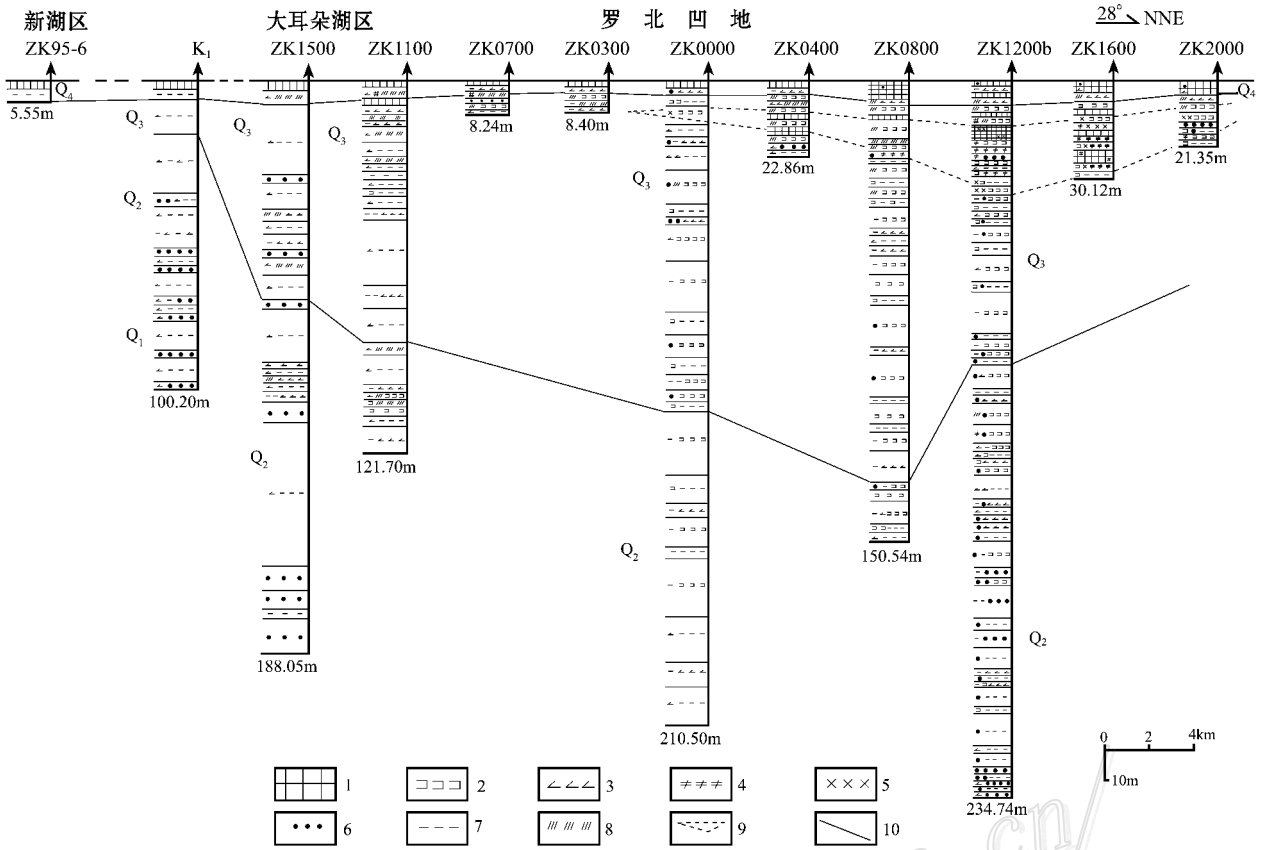

图 3　罗北凹地杂卤石在 NNE-SSW 地层剖面中的分布特征

1—石盐；2—钙芒硝；3—石膏；4—白钠镁矾；5—杂卤石；6—砂及细砾；7—粘土；8—淤泥；9—杂卤石分布区；10—地层界线

Fig. 3 Distribution of polyhalite in NNE-SSW trending section of the Luobei Hollow in the north of the Lop Nur Lake

1—Halite；2—Glauberite；3—Gypsum；4—Simonyite；5—Polyhalite；6—Sand and gravel；7—Clay；8—Alluvial soil；9—Distribution of polyhalite；10—Strata boundary

http://www.kcdz.ac.cn/

表 2　罗北凹地杂卤石分布面积

Table 2　Distributiona of polyhalite in the Luobei Hollow

	累计厚度/m								合计
	1～2	2～3	3～4	4～5	5～6	6～7	7～8	8～9	
面积/$\times 10^6$ m^2	153.95	80.89	38.26	29.32	12.89	6.60	3.77	0.77	326.45

与矿层厚度图对比，矿层较厚的区域氯化钾含量相对较低，这可能是由于在中更新世末—晚更新世时期，罗北凹地沉降中心受新构造影响向南迁移，导致南部杂卤石沉积厚度增大，同时，由于补给主要来自南部的大耳朵湖区，因此，南部受淡化的影响程度比北部强，导致了北部地层杂卤石含量比南部高一些。

3.4　杂卤石层数分布趋势

统计显示，罗北凹地含杂卤石地层的单层数最大达 12 层，而较厚的含矿层数为 8 层。杂卤石在罗北凹地南、北部的分布基本一致，南部仅比北部多 1～2 层。杂卤石层数分布特征在罗北凹地内部勾画出了一个 NE 向展布的次级‘深’凹地，南部略比北部深一些。按照盆地迁移成钾理论（Wang et al.，2005），如果还可以区分出更次一级的成钾洼地，其内将有更晚期阶段的钾盐矿物（钾芒硝、钾石膏等）沉积成矿。

4　杂卤石成因讨论及结论

关于杂卤石成因，有关研究显示，海水的蒸发系

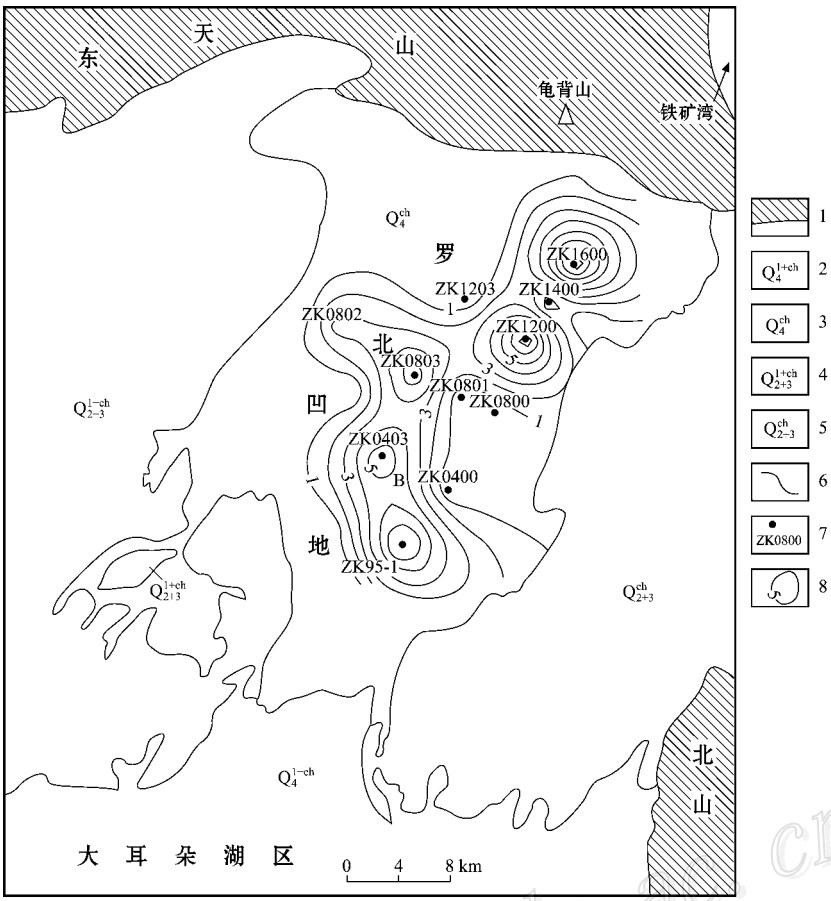

图 4 罗北凹地杂卤石累计厚度分布趋势

1—山区；2—全新统湖积和化学沉积；3—全新统化学沉积；4—中-上更新统湖积和化学沉积；5—中-上更新统化学沉积；6—地质界线；7—钻孔；8—杂卤石厚度等值线

Fig. 4 Distribution trend of cumulative thickness of polyhailte beds in the Lop Nur Lake

1—Mountainous area；2—Holocene lacustrine and chemical sediments；3—Holocene chemical sediments；4—Middle-Upper Pleistocene lacustrine and chemical sediments；5—Middle-Upper Pleistocene chemical sediments；6—Geological boundary；7—Drill holes；8—Polyhalite thinkness isolines

列中不一定出现杂卤石沉积(Usilio,1849；王弭力,1982；陈郁华,1983)。瓦里亚什科认为(1965),杂卤石可直接从溶液中结晶,或先析出石膏,而后在成岩作用影响下转变为杂卤石,后者可能性更大一些。王弭力(1982)认为,在下面两种情况下才可能出现杂卤石沉积：第一,在硫酸钙盐沉积阶段,外来补给带来足够的钾镁元素；第二,在硫酸钾镁盐沉积阶段,外来补给带来钙元素。

各国杂卤石矿床的成因也各不相同,波兰蔡切斯坦地层杂卤石矿床成因是,沉积石盐后的富钾镁卤水交代硬石膏形成(Peryt et al.,1998)。山东大汶口第三系杂卤石产于石盐岩中和/或与石盐共生,系干旱内陆盐湖周边含钙补给水掺杂作用而形成(赵德钧,1987)。对四川盆地三叠系杂卤石成因研究较多,李亚文等认为(1987),该区杂卤石有很大一部分产于硬石膏层中,与硬石膏互层,在实验研究的基础上分析,成岩作用中盐层遭受来自石膏层水的溶滤,在石膏层较厚、盐层较薄的层段,石盐和钾镁盐可被全部溶掉,形成对 NaCl 及 K、Mg 盐均不饱和的液体,当这种对易溶盐类不饱和的液体进入石膏层,部分 K、Mg 组分就能与 $CaSO_4$(硬石膏)结合生成杂卤石被保留下来,形成现在所看到的"硬石膏-杂卤石-硬石膏"剖面；潘忠华(1988)认为是溶滤固体钾盐的卤水交代石膏形成杂卤石；黄宣镇(1996)提出两种看法,第一,浅水盆地中的残余卤水与石膏发生同生交代作用,第二,膏坪汇流水与残余浓缩卤水混合蒸发沉积；林耀庭等(2004)则认为,杂卤石是外来富钾含镁卤水交代硬石膏所形成。

由上述讨论可见,国内外杂卤石主要由富钾镁卤水交代石膏及硬石膏形成,可能也存在不同水体

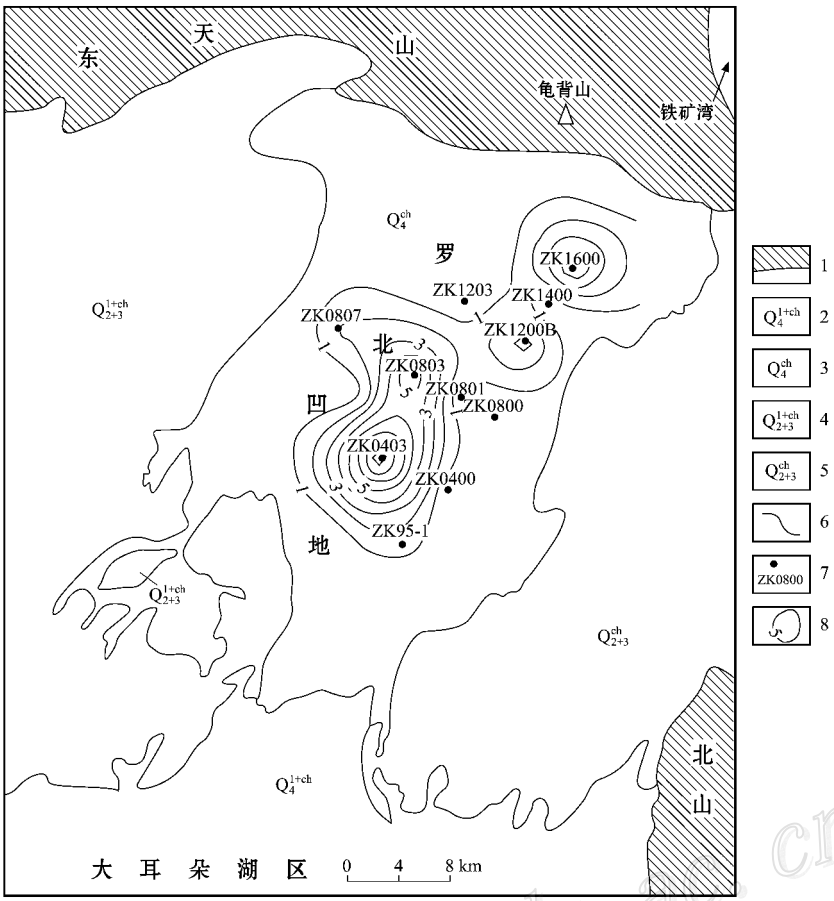

图 5　罗北凹地杂卤石中氯化钾分布趋势

1—山区；2—全新统湖积和化学沉积；3—全新统化学沉积；4—中-上更新统湖积和化学沉积；5—中-上更新统化学沉积；6—地质界线；7—钻孔；8—氧化钾含量等值线

Fig. 5　Distribution trend of KCl content of polyhailte beds in the Lop Nur Lake

1—Mountainous area；2—Holocene lacustrine and chemical sediments；3—Holocene chemical sediments；4—Middle-Upper Pleistocene lacustrine and chemical sediments；5—Middle-Upper Pleistocene chemical sediments；6—Geological boundary；7—Drill hole；8—KCl content isolines

的混合掺杂作用。罗布泊盐湖沉积有其特殊性，其杂卤石的成因也具有独特性。在罗布泊盐湖化学沉积演化过程中，可能一直受到富钙水的大量补给，并沉积了世界罕见的巨量钙芒硝矿，导致了卤水中钾元素聚集成矿（刘成林等，2003；2006；2007）。从罗布泊盐类析出顺序也可推断，罗布泊卤水“富钙”，同时，补给罗布泊的河水相对富含硫酸根（具有较高的硫酸根/氯离子比值）（刘成林等，1999）。同属于陆相蒸发岩盆地，江汉盆地第三纪盐湖和柴达木第四纪盐湖的杂卤石都是在石盐沉积之后析出，而罗布泊盐湖的杂卤石是在钙芒硝沉积之后、石盐沉积之前析出，因此，在钙芒硝沉积阶段，罗布泊卤水中钾元素含量已较高了。

显然，罗布泊盐湖卤水既富钙也富钾镁，这是杂卤石沉积所需的物质条件。此外，气候环境对杂卤石的析出也可能发挥关键作用。在一个相对短的时期内，罗北凹地出现了多次杂卤石沉积，可能与多次较高温度的气候波动有关。由钙离子叠加的五元体系相图（何法明等，1988）可知，当温度等于或小于 32.5 ℃时，杂卤石相区很小，与钙芒硝共结线也很短，但当温度为 55 ℃时，杂卤石相区面积急速扩大，几乎占相图一半面积，与钙芒硝共结线长度大大延伸，因此，温度越高，越有利于杂卤石析出。

关于杂卤石的析出形式，从罗布泊杂卤石的赋存状态和显微结构分析，主要有两种，即产于钙芒硝岩和产于岩盐中。

第一种成因形式是杂卤石交代钙芒硝。这类杂卤石出现于罗北凹地钙芒硝岩地层，罗北凹地杂卤石大多数属于此类。含杂卤石的地层呈层状分布，杂卤石交代钙芒硝是在湖底进行，属于沉积至准同

生沉积阶段的产物。罗布泊盐湖沉积时期气候干热(刘成林等,2006),古湖水不断得到富钙水补给,导致了巨量钙芒硝沉积(刘成林等,2007)。由于钙离子、钠离子和硫酸根离子的大量移出,使得卤水中钾、镁元素浓度快速增加,当出现短期更高温的气候事件时,卤水化学组成体系很快演化到杂卤石相区,此时湖底已有钙芒硝沉积,钙芒硝与水化学体系处于化学平衡状态,而钾元素浓度的增加破坏了这种平衡,朝着杂卤石结晶相区的方向反应,于是出现了杂卤石交代钙芒硝。同时,一些较纯的杂卤石岩(薄层状)可能直接从卤水结晶析出,因为,析出钙芒硝的卤水体系本身有丰富的钙源,可以不需要交代先期沉积的钙芒硝就可获得杂卤石结晶所需的钙离子。

第二种成因形式是杂卤石交代石盐及钠镁矾,并沉积于石盐等晶粒的孔隙中。这类杂卤石赋存于石盐岩中,含量较少,主要分布于浅部干盐滩石盐层中。石盐和钠镁矾属于罗布泊干盐湖阶段的产物,显然,此阶段杂卤石的沉积条件与钙芒硝岩中杂卤石的形成条件有较大差异,杂卤石有可能是从残余晶粒间的卤水中结晶析出的。之所以出现杂卤石交代石盐等晚期盐类矿物的现象,可能是盐湖晚期接近于干盐湖阶段,晶间硫酸盐型卤水中钾镁离子较高,当受到较淡地表水补给时,两种水体混合,出现掺杂作用(袁见齐等,1984),导致杂卤石结晶沉淀,同时,地表水对石盐产生溶蚀作用形成孔隙,可为杂卤石晶体生长提供空间。

总之,晚更新世末期,罗布泊盐湖出现 12 期杂卤石沉积,其中 8 期含量较高。杂卤石主要由交代作用和混合掺杂作用形成。罗北凹地杂卤石分布区面积达 326 km^2,显示了罗北凹地固体钾盐巨大的成矿潜力,值得进一步开展科学研究和资源调查评价。

志 谢 文中罗北凹地杂卤石累计厚度分布趋势图和氯化钾分布趋势图由研究生唐敏和胡妍娜绘制,在此表示感谢。

References

An L Y, Yin H A, Tang M L and Yao L P. 2004. Study on the dissoving behavior of polyhalite in water [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 24(4): 108-110 (in Chinese with English abstract).

An L Y, Liu N, Yin H A, Tang M L and Hao L F. 2007. Laboratorial study on the leaching process of polyhalite [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 27(2): 112-115 (in Chinese with English abstract).

Chen Y H. 1983. Sequence of salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation (25℃) of the Huanghai sea water [J]. Acta Geologica Sinica, (4): 379-390 (in Chinese with English abstract).

Chen Y Z, Liu C L and Jiao P C. 2008. Characteristics and preliminary dissolution experiment of polyhalite in Lop Nur [A]. The ninth committee of mineral deposits [C]. Geol. Pub. House. 816-817.

Hao L F. 2005. Optimum technological conditions of polyhalite in Leaching agent [J]. Sea-Lake Salt and Chemical Industry, (3): 19-20, 28 (in Chinese with English abstract)

He F M, Liu S C, Bai C Q, et al. 1988. Identification method manual of saline minerals [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House. 148-150 (in Chinese with English abstract).

Huang X Z. 1996. The first polyhalite deposit of China [J]. Yunnan Geology, 15(1): 52-61 (in Chinese with English abstract).

Li Y W and Han W T. 1987. An experimental study on the formation conditions of polyhailte in Triassic System in Sichuan basin [J]. Geoscience, 1(3~4): 102-113 (in Chinese with English abstract).

Lin Y T and He J Q. 2004. The characteristics and genesis meanings of polyhalite potash deposits in Huayingshan, Sichuan [J]. Geology of Chemical Minerals, 26(3): 145-149 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Wang M L and Jiao P C. 1999. Hydrogen, oxygen, strontium and sulfur isotopic geochemistry and potash-forming material sources of Lop Salt Lake, Xinjing [J]. Mineral Deposits. 18(3): 268-275 (in Chinese with English abstract).

Liu C L, Jiao P C, Wang M L, Li S D and Chen Y Z. 2003. 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, Chen Y Z, Chen W S, Jiao P C, Wang M L and Li S D. 2006. 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 Sinca, 26(1): 94-98 (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]. Mineral Deposits, 26(3): 322-329 (in Chinese with English abstract)

Liu Q, Chen Y H, Li Y C, Lan Q C, Yuan H R and Yan D L. 1987. Salt sediments of terrigenous clastic-chemogenic type in Meso-Cenozoic of China [M]. Beijing Science and Technology Publishing House. 23 (in Chinese with English abstract).

Pan Z H. 1998. The primary probing of polyhalite formation of Middle-Lower Triassic System in Nongle, Qixian, Sichuan Province [J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald, (1): 6-11 (in Chinese with English abstract).

Peryt, Pierre and Gryniv. 1998. Origin of polyhalite deposits in the Zechstein (Upper Permian) Zdrada platform (northern Poland)

[J]. Sedimentology, 45(3): 565-578.

Usilio I L. 1849. Analyse de l'eau de la Mediterannee sur les cotes de Fiance. Etutes sur la composition de l'eau dela Mediterannee et sur I'exploitation des sels quelle contient [J]. Ann. de Chim. et de Phys., (3).

Valyashko M G. 1965. Geochemical regularity for the formation of potash deposits[M]. Fan L, et al. translated. Beijing: China Industrial Press. 144p.

Wang M L. 1982. The geological significance of polyhalite in depression Q [J]. Geological Review, 28(1): 28-37 (in Chinese with English abstract).

Wang M L, Li Y 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]. Geological Society of China, ed. The academic exchange meeting of major achievements of the geological sciences obtained in the Eigth Five-Year-Plan period [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press. 446-449 (in Chinese).

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

Wang M L, Liu C L, Jiao P C, et al. 2001. Saline Lake poatsh resources in the Lop Nur, Xinjiang[M]. Bejing: Geol. Pub. House. 199-209 (in Chinese with English abstract).

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.

Yuan J Q and Cai K Q. 1984. The evolution stages and characteristics of salt precipitation [A]. Sedimentology and organic geochemistry symposium[C]. Beijing: Science Press. 146-151 (in Chinese with English abstract).

Zhao D J, Han W T, Cai K Q and Gao J H. 1987. The study of polyhailte genesis and its significance of potash-finding in Dawenkou depression, Shandong Province [J]. Earth Science, 12(4): 349-356 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

安莲英，殷辉安，唐明林，尧丽萍. 2004. 杂卤石溶解性能的测定[J]. 矿物岩石，24(4): 108-110.

安莲英，刘　宁，殷辉安，唐明林，郝丽芳. 2007. 杂卤石矿地浸模拟实验研究[J]. 矿物岩石，27(2): 112-115.

陈郁华. 1983. 25℃恒温蒸发的析盐序列及某些微量元素的分布规律[J]. 地质学报，(4): 379-390.

陈永志，刘成林，焦鹏程. 2008. 罗布泊杂卤石特征及其溶矿试验初步研究[A]. 第九界全国矿床会议论文集[C]. 地质出版社. 816-817.

郝丽芳. 2005. 杂卤石盐浸过程工艺条件的优化研究[J]. 海湖盐与化工，(3): 19-20, 28.

何法明，刘世昌，白崇庆，等. 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.

黄宣镇. 1996. 中国首例杂卤石矿床[J]. 云南地质，15(1): 52-61.

李亚文，韩蔚田. 1987. 四川盆地三叠系杂卤石形成条件的实验研究[J]. 现代地质，1(3～4): 102-113.

林耀庭，何金全. 2004. 四川华蓥山浅层杂卤石钾矿地质特征及成因意义[J]. 化工矿产地质，26(3): 145-149.

刘成林，王弭力，焦鹏程. 1999. 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，焦鹏程，王弭力，李树德，陈永志. 2003. 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，陈永志，陈伟十，焦鹏程，王弭力，李树德. 2006. 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，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[J]. 矿床地质，26(3): 322-329.

刘　群，陈郁华，李银彩，蓝庆春，袁鹤然，阎东兰. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑-化学岩型盐类沉积[M]. 北京: 北京科学技术出版社. 23.

潘忠华. 1998. 四川渠县农乐三叠系中下统杂卤石的成因初探[J]. 中国非金属矿工业导刊，(1): 6-11.

王弭力. 1982. Q 凹陷杂卤石的地质意义[J]. 地质论评，28(1): 28-37.

王弭力，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]. 中国地质学会编"八五"地质科技重要学术交流会议论文选集[C]. 北京: 冶金工业出版社. 446-449.

王弭力，刘成林，焦鹏程，杨智琛，李亚文. 1998. 罗布泊罗北凹地超大型钾矿床特征及其开发前景[J]. 矿床地质，17(增): 432-436.

王弭力，刘成林，焦鹏程，等. 2001. 罗布泊盐湖钾盐资源[M]. 北京: 地质出版社. 199-209.

M·Г·瓦里亚什科. 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. 144 页.

袁见齐，蔡克勤. 1984. 盐类沉积的演化阶段及其特征[A]. 沉积学和有机地球化学学术论文选集[C]. 北京: 科学出版社. 146-151.

赵德钧，韩蔚田，蔡克勤，高建华. 1987. 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，12(4): 349-356.

http://www.kcdz.ac.cn/