

罗布泊断陷带内形成富钾卤水机理研究^{*}

刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 王弼力

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要 罗布泊干盐湖位于新疆塔里木盆地东部。1995 年以来, 在罗布泊发现了超大型规模钾盐矿床, 钾盐资源主要赋存于罗北凹地等盐系地层中。近年来调查发现, 在罗布泊分布有地堑式张性断陷带, 不仅控制成钾凹地的形成, 其本身也储集卤水, 蕴藏有一定规模的卤水钾盐资源。地球物理(EH-4)测量显示, 断陷带深达 1 000 m 处有卤水存在的信息。断陷带内钻孔卤水化学分析结果揭示, 下部卤水比重高于上部, 卤水中氯化钾含量也呈“下高上低”的态势, 这与盐湖蒸发析盐序列不一致或正相反。文章认为, 卤水垂向对流是导致卤水化学特征垂向分异的机理, 即, 在罗布泊盐湖演化过程中, 断陷带内出现较小规模的洼地或盐湖, 湖表水蒸发浓缩形成卤水, 上部卤水比重不断增加, 并沿张性断裂逐渐向下部或深部流动、渗透, 形成了卤水的对流。由于罗布泊地堑式断陷带长达 30~50 km, 向下延长深度可达 1 000 m, 这些都说明罗布泊断陷带内可以形成和储集一定规模的富钾卤水, 它们应该成为今后罗布泊盐湖钾盐资源扩大找矿的新空间。

关键词 地质学 断裂 卤水 成钾模式 盐湖 罗布泊

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

Formation mechanism of potash-bearing brine in fault belts of Lop Nur Lake, Xinjiang

LIU ChengLin, JIAO PengCheng, CHEN YongZhi and WANG MiLi

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

Abstract

Located in the east of Tarim Basin, Lop Nur Lake is one of the biggest playas in the world. Since 1995, large-size potash deposits have been found in the playa, and these potash resources are mainly preserved in the intercrystalline pores of glauberite layers. Recent investigations show that there are graben-type faults in Lop Nur Lake, which not only controlled the formation of the potash-forming subbasins or hollows but also preserved brine and accumulated certain amounts of potash reserves. Geophysical survey (EH-4) reveals that there probably exists brine down to 1 000 m of the fault belts. And the brine from drill holes is characterized chemically by the phenomenon that salinity and potassium content of the brine are higher in the lower strata than in the upper strata. The authors hold that this vertical chemical differentiation of brine might have been caused by the brine convection. As the graben-type faults in Lop Nur Lake are 30~50 km in length and 1 000 m in depth, it is most probable that potash deposits with some reserves are preserved in them. Therefore, these fault belts should be regarded as new space in exploring potash deposits within Lop Nur Lake in future.

^{*} 本文得到国家自然科学基金重点项目(40830420)、国家科技攻关 305 项目专题(2001BA609A-07-15)和地调项目(200010300105)的联合资助

第一作者简介 刘成林, 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事盐湖与钾盐矿床研究。Liuchengl @ 263.net

收稿日期 2009-11-27; 改回日期 2010-5-13。李 岩编辑。

Key words: geology, fault, brine, formation of potash, salt lake, Lop Nur

罗布泊盐湖位于塔里木盆地的东端,盐湖沉积区面积 18 056 km²,是世界最大的干盐湖之一。自 1995 年在罗布泊钻探调查发现了超大型卤水钾矿床(王弼力等,1996;1998;2001)以来,关于罗布泊卤水钾矿成因的研究就一直没有间断(刘成林等,1999;2003;2006;2007;2008;2009;Wang et al., 2005)。而关于钾盐矿床的形成,自 20 世纪以来,针对海相和陆相钾盐沉积,地质学家提出了很多沉积模式或理论。Schmalz (1970) 提出 2 种蒸发岩的分布模式,即“牛眼式”和“泪滴式”。“牛眼式”模式为盐类沉积相呈同心圈状分布,由外向内,依次沉积碳酸盐岩相、石膏岩相、石盐相,最中心为钾镁盐相;“泪滴式”模式,远离补给区,依次沉积碳酸盐岩、石膏岩、石盐,在距离补给区最远的地方沉积钾镁盐。瓦里亚什科(1965)提出“预备盆地”和“干盐湖”等成钾说,自析盆地发展的规律,即钾盐开始结晶时,盆地应当进入“干湖”阶段。袁见齐等(1983)提出“高山深盆”成盐成钾模式。张彭熹(1987)提出“高山深盆振荡干化、分离盆地同步分异”成钾模式。曲懿华(1982)提出,很多大型钾盐矿床的形成与地壳深部卤水补给有重要关系,可称为“深卤补给成钾”。刘群等(1987)提出“卫星式”和“串珠状”成盐成钾分布模式。郑绵平等(1989;1998)提出“多级盆地成盐成钾模式”,等。对于罗布泊盐湖钾盐成因或成矿规律,Wang 等,(2005)提出了“高山深盆迁移”论和“两段式”成钾论。总之,上述成钾理论主要是从宏观盆地构造演化来研究钾盐沉积规律的,传统意义上的钾盐矿一般呈层状或透镜状产出。Liu 等(2006),在罗布泊盐湖发现了地堑式张性断裂,它不仅控制着成钾凹地的形成,其本身也储集卤水。断裂(陷)带形成、储集卤水在国外也有发现,例如,加拿大学者首先在加拿大地盾结晶岩深部断裂陷带内发现高盐度卤水(Frape et al., 1984a; 1984b; Fritz et al., 1982),认为这种高盐度卤水可能是大气降水沿裂隙下降到地盾结晶岩深处,经长时间水-岩反应形成的。然而,也有一些学者提出不同看法,认为这些断裂内的高盐度水起源于海水,然后渗入断裂带内形成的(Bottomley et al., 1999;2005),不过这些高盐

度卤水中钾离子含量较低,不能形成富钾卤水,这是由于伊利石化吸附钾离子所致(Bottomley et al., 2004)。显然,罗布泊断裂(陷)带内形成和储集富钾卤水具有其特殊性,查清其机理对深化认识现代盐湖成钾与开拓找钾思路有积极意义。

1 罗布泊盐湖张性断陷带特征

研究发现,罗布泊受到 NNE-SSW 向主压应力作用,产生了一系列相同方向的张性断层或地堑式断陷带(图 1),构成罗布泊地堑式断裂构造系;这种构造型式形成了一些大的成盐凹地,如罗北凹地(Liu et al., 2006)。这些张性断陷带一般长度可达 30~60 km,宽度从数百米~数千米,向下延伸近千米(图 2)。在断裂带的浅部可以形成含钾盐类沉积,浅层卤水丰富,可形成固体钾盐矿化和中-小型卤水钾矿床^①。

2 断陷带内地层卤水化学特征垂向变化

由图 3、图 4 可见,在罗布泊地堑式断陷带内,钻孔所揭示的部分沉积地层,由下向上岩性从(含石膏)粉砂岩、砂岩及泥岩,变为微溶性的石膏,最后变为易溶性的石盐、钙芒硝等,其沉积环境从微咸到咸水环境,最后为盐湖环境。

卤水盐度[ρ (TDS), TDS 为可溶盐总和]和氯化钾含量[w (KCl)]呈波状起伏变化,由下向上,总体呈下降趋势:ZKD0303 孔,卤水盐度和氯化钾含量,分别从浅部(1.50 m)的 303.43 g/L 和 1.11%,变为 41 m 处的 331.81 g/L 和 1.26%;ZKD0017 孔,卤水盐度和氯化钾含量,在浅部(深度 1.8~2.4 m)为 318 g/L 和 1.34%,到 38.4 m 深处变为 330.41 g/L 和 1.38%。这些数据显示了卤水化学特征呈现上下分异的现象,这与盐湖逐渐浓缩所析出的盐类矿物沉积顺序不一致或正相反,这可能说明,断陷带或凹地内较深部卤水盐度和钾含量可能普遍比浅部高。

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. 十五科技攻关 305 项目课题报告.

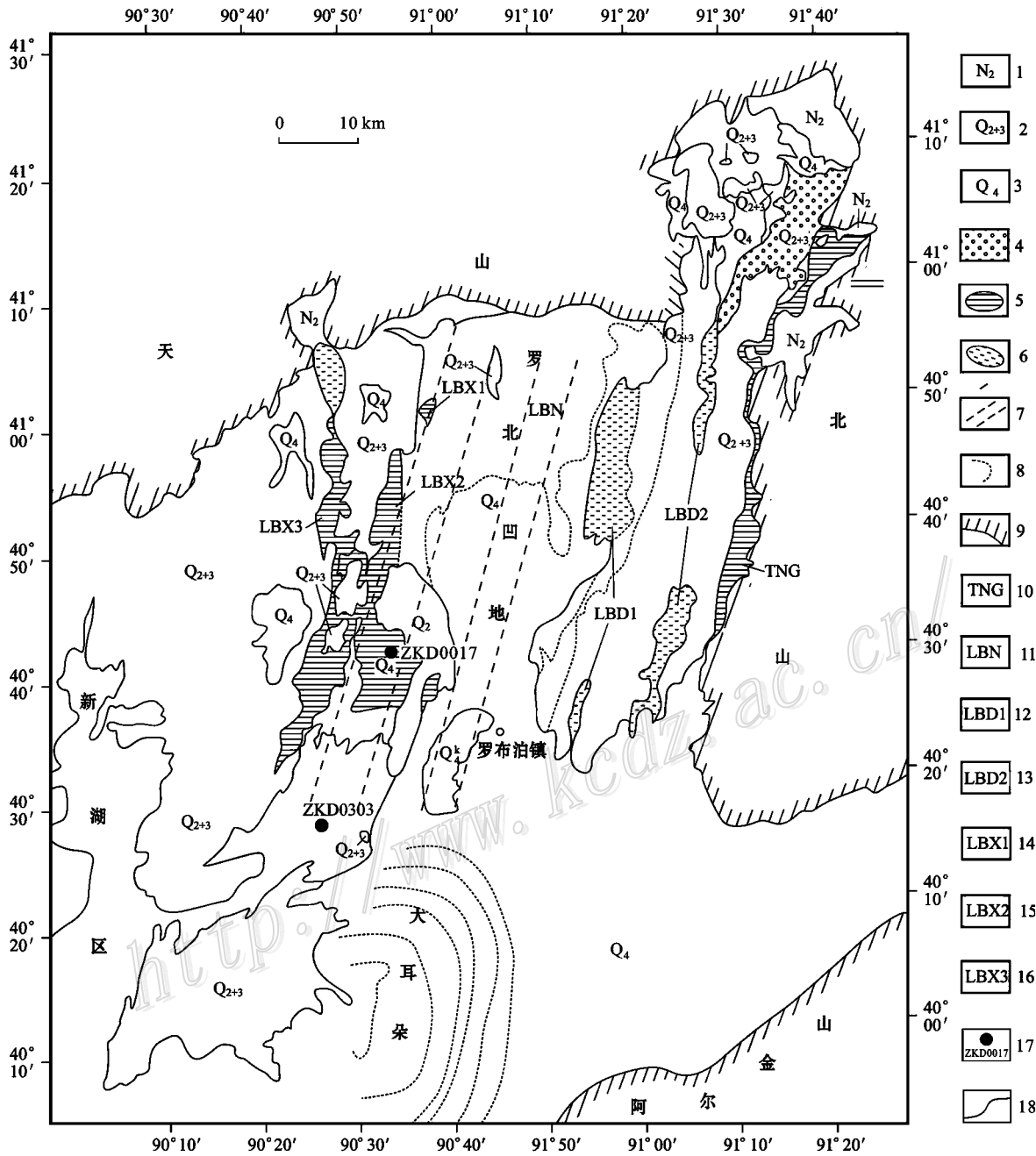


图 1 罗布泊盐湖地质构造图

1—上新统；2—中上更新统；3—全新统；4—冲洪积；5—断陷带；6—推测地表断陷带；7—推测地下断陷带；8—古湖岸线；9—山区；10—铁南凹陷带；11—罗北内部断陷带；12—罗北东 1 号断陷带；13—罗北东 2 号断陷带；14—罗北西 1 号断陷带；15—罗北西 2 号断陷带；16—罗北西 3 号断陷带；17—钻孔及编号；18—地质界线

Fig. 1 The map of geology and structure of Lop Nur Salt Lake

1—Pliocene series；2—Mid-Pleistocene series；3—Quaternary series；4—Alluvial sediments；5—Faulting belts；6—Inferred faulting belts on surface；7—Inferred faulting belts underground；8—Paleolake coast relic line；9—Mountainous area；10—Tienan faulting belt；11—The faulting belt in Luobei Hollow；12—Luobeidong No. 1 fault belt；13—Luobeidong No. 2 fault belt；14—Luobeixi No. 1 fault belt；15—Luobeixi No. 2 fault belt；16—Luobeixi No. 3 fault belt；17—Drillhole and its serial number；18—Geological boundary

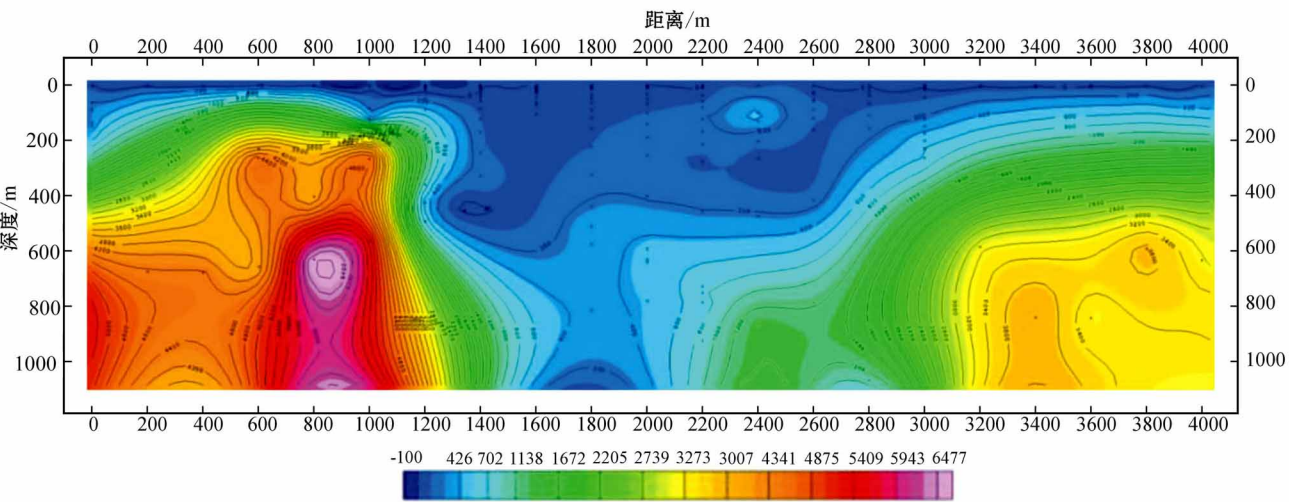


图 2 罗北西 3 号断陷带 EH-4 测量剖面(L5)(兰色表示低电阻,指示卤水存在)

Fig. 2 EH-4 section of Luobeixi No.3 fault belt (blue denoting the low resistance and showing the existence of brine)

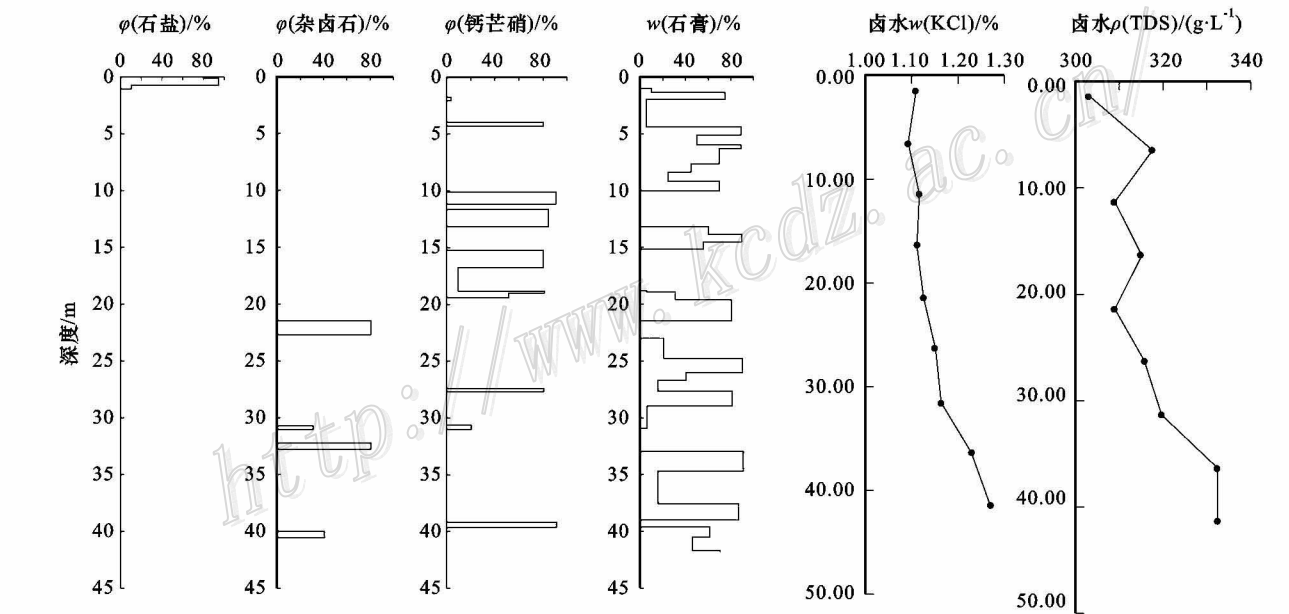


图 3 断陷带地层(ZKD0303 孔)盐类矿物与卤水盐度、钾含量变化

Fig. 3 The variation of saline minerals, potassium content and salinity of brine in the strata of the fault belt (drill hole ZKD0303)

3 断陷带内形成和储集富钾卤水

调查发现,罗布泊断陷构造带是良好的储卤构造,可以形成和存储一定规模的卤水钾矿床。在罗布泊盐湖演化过程中,由于湖水和洪水顺着断裂带补给,断裂带内出现较小规模的洼地或盐湖,湖水蒸发浓缩形成富钾卤水,上部卤水比重不断增加,自然

沿张性断裂逐渐向下部或深部流动或渗透。由于表层卤水不断蒸发浓缩,卤水盐度增大,比重也不断增加,盐度大的卤水向下运移,盐度不比重大小的卤水向上运移,形成了卤水的对流(图 5);长期循环对流的结果是下部卤水盐度高于上部卤水,其卤水中氯化钾品位逐渐增加,达到工业品位,并呈“下高上低”的态势(图 3、图 4)。由于张性断裂出现,导致卤水出现“下渗上涌”的对流循环,最后,盐度大的卤水聚集

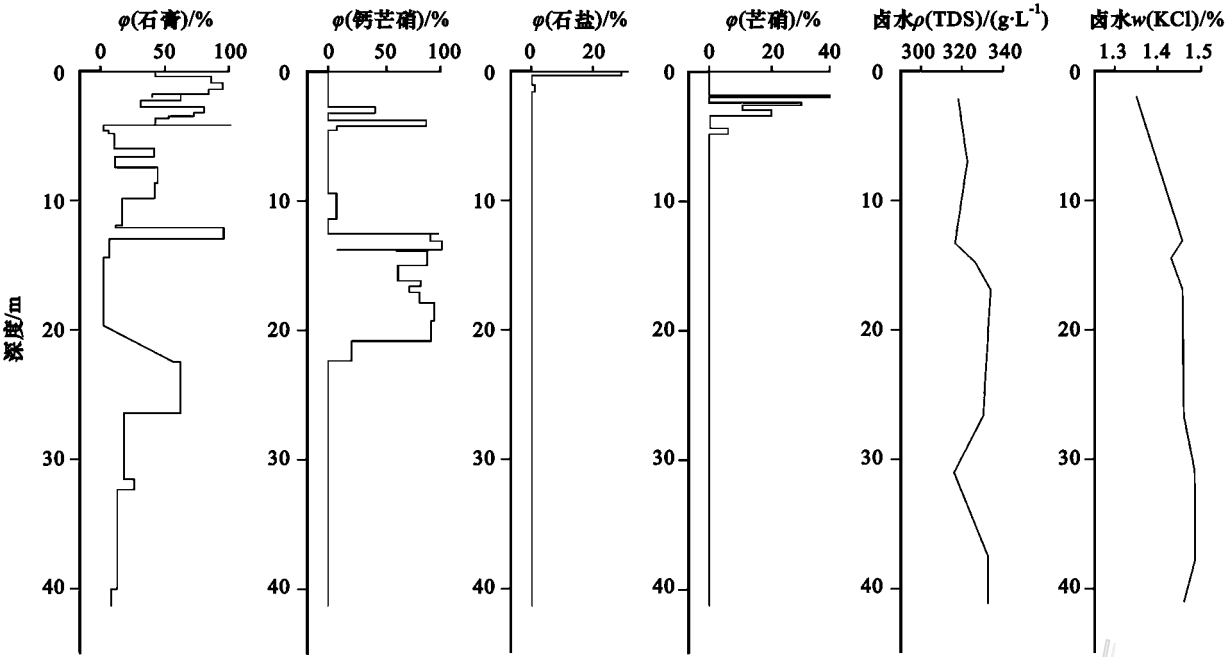


图 4 断陷带地层(ZKD0017 孔)盐类矿物与卤水盐度、钾含量变化

Fig. 4 The variation of saline minerals, potassium content and salinity of brine in the strata of the fault belt (drill hole ZKD0017)

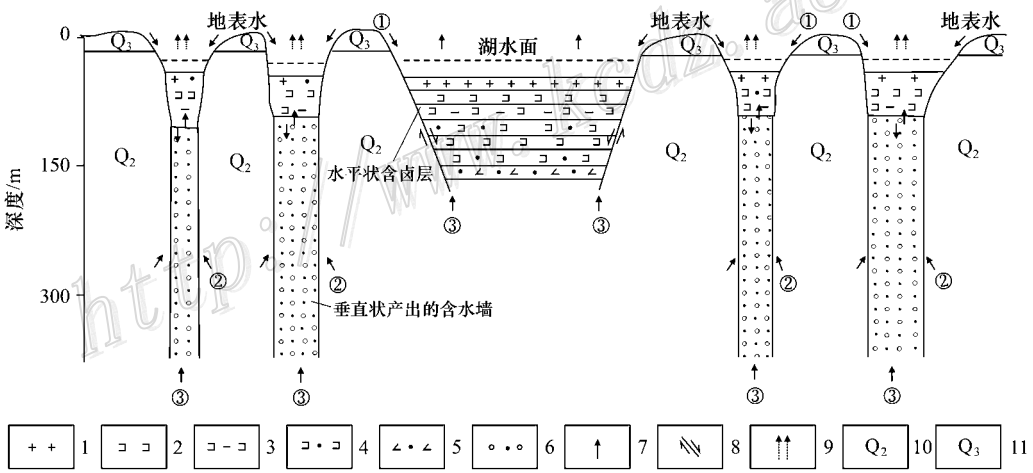


图 5 罗布泊盐湖“含水墙”成钾模式示意图(刘成林等,2009)

1—石盐;2—钙芒硝岩;3—含粘土钙芒硝岩;4—含粉砂钙芒硝岩;5—含粉砂石膏岩;6—断裂带内的沉积;7—断裂带内的卤水流向;8—正断层;9—蒸发作用;10—中更新统;11—上更新统;①—地表水;②—第四纪地层水;③—深部地层水

Fig. 5 The sketch map of “brine-bearing wall” model for the formation of brine potash

1—Halite;2—Glauberite rock;3—The clay-bearing glauberite rock;4—The silt-bearing glauberite rock;5—The silt-bearing gypsum rock;6—The sediments in fault belt;7—The brine convection in fault belt;8—Normal fault;9—Evaporation;10—Mid-Pleistocene series;11—Upper-Pleistocene series;①—Surface water;②—Water in Quaternary series;③—Water in the deep strata

于较深储集层中。

此外,罗布泊盐湖可能存在深部地层水补给(刘成林等,2003)。地层水因断裂带破碎减压,受地层静压力影响向断裂带汇集,来自山区的深循环大气降水也向断裂带汇集,第四纪水平含矿卤水层也可

以补给,这些卤水也参与蒸发-对流循环。根据区域构造特征分析与电法探测(Liu et al., 2006),罗布泊地堑式断裂带向下延长深度应该很大,由于这种断裂带成垂向分布,其产出状态类似墙体,因此,将这种成钾模式称为“含水墙”模式(图 5)。

4 新模式的应用

通常,罗布泊断陷带分布的地方,地表多表现为小型盐湖洼地,沉积时间短,成盐成钾规模也小,在以前的钾盐勘查工作中常被忽视。“含水墙”成钾模式的提出,改变了含钾卤水通常储存于盐类地层中的水平状分布模式,建立了卤水垂向分布模式认识。根据此模式,对罗布泊罗北凹地外围断陷带开展调查,发现了几个中型卤水钾矿,累积获得数千万吨卤水钾盐资源^{①②}。

5 结 语

盐湖卤水钾矿通常形成和储集于水平状产出的盐类沉积层和部分碎屑层中,可以称为“水平”成钾模式,这是国内外盐湖地下卤水赋存的基本规律,一般由潜水层和几个承压层构成,呈层状、似层状及透镜状,水平分布模式也是国内外盐湖钾矿勘查的地质依据。罗布泊盐湖的垂向断陷带内可以形成和储集富钾卤水,其卤水矿体与内生矿床的矿脉产状有一定的相似性。该认识是对盐湖钾盐成矿理论的补充和创新,拓宽了盐湖钾盐成矿规律研究和勘查方向,依据此模式,在盐湖区可望发现更多的盐湖钾资源。

References

- Bottomley D J, Katz A, Chan L H, Starinsky A, Douglas M, Clark I D and Raven K G. 1999. The origin and evolution of Canadian Shield brines: Evaporation or freezing of seawater? New lithium isotope and geochemical evidence from the Slave craton [J]. *Chem. Geol.*, 155 (3-4): 295-320.
- Bottomley D J and Clark I D. 2004. Potassium and boron co-depletion in Canadian Shield brines: Evidence for diagenetic interactions between marine brines and basin sediments [J]. *Chem. Geol.*, 203 (3-4): 225-236.
- Bottomley D J, Clark I D, Battye N and Kotzer T. 2005. Geochemical and isotopic evidence for a genetic link between Canadian Shield brines, dolomitization in the Western Canada Sedimentary Basin, and Devonian calcium-chloridic seawater [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 42 (11): 2059-2071.
- Frape S K, Fritz P and McNutt R H. 1984a. Water-rock interaction and chemistry of groundwater from the Canadian Shield [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48: 1 617-1 627.
- Frape S K, Fritz P and Blackmer A J. 1984b. Saline groundwater discharges from crystalline rocks near Thunder Bay, Ontario, Canada [A]. In: Eriksson E, ed. *Hydrochemical balances of freshwater systems* [C]. International Association for Hydrological Sciences, Publication No. 150: 369-379.
- Fritz P and Frape S K. 1982. Saline groundwater in the Canadians Shield: A first overview [J]. *Chem. Geol.*, 36: 179-190.
- 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 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, 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. 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, 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 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. 2006. Studies of fluid inclusions in glauberite of middle-upper pleistocene strata and their paleoclimatic 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, 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 C L, Wang M L, Jiao P C, Fan W D and Chen Y Z. 2008. Sedimentary characteristics and origin of polyhalite in Lop Nur salt lake, Xinjiang [J]. *Mineral Deposits*, 27 (6): 705-713 (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): 796-803 (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 elastic-chemogenic type in Meso-Cenozoic of China [M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press. 22-24, 131, 128 (in Chinese with English abstract).

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调查评价.“十五”科技攻关 305 项目专题.

② 中国地质科学院矿产资源研究所. 2003. 罗布泊钾矿区外围钾盐资源潜力研究与评价. 国土资源地质大调查项目.

- Qu Y H. 1982. Deep brine : A new origin of potash deposits[J]. J. Mineral. & Petrol. , 1 : 7-14(in Chinese).
- Schmalz R F. 1970. Environment of marine evaporate deposition [J]. Miner. Ind. , 35(8) : 1-7.
- Valyaskko M G. 1965. Translation by Fan Li, et al. Geochemical regularity for the formation of potash deposits [M]. Beijing : China Industrial Press. 17-19(in Chinese).
- 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 Chinese).
- 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.) : 430-435(in Chinese).
- Wang M L, Liu C L, Jiao P C, Yang Z 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 the Lop Nur, Xinjiang[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 199-209, 177-186(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, Huo C Y and Cai K Q. 1983. The high mountain-deep basin saline environment : A new genetic model of salt deposits[J]. Geol. Rev. , 29(2) : 159-165(in Chinese with English abstract).
- Zhang P X. 1987. Salt lake of Chaidam basin[M]. Beijing : Sci. Press. 129-131(in Chinese).
- Zheng M P, Xiang J, Wei X J and Zheng Y. 1989. Salt lakes of Xizang plateau[M]. Beijing : Beijing Science and Technolgy Press. 102-104 (in Chinese).
- Zheng M P and Qi W. 1998. Salt formation model of multilevel salt lakes : Earth system science (China advance century expectation) [M]. Beijing : China Sci. & Techn. Pub. House. 466-468(in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 刘成林, 王弼力, 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, 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. 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, 王弼力, 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) : 93-98.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力, 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.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 樊卫东, 陈永志, 杨智琛, 王敬国. 2008. 罗布泊杂卤石沉积特征及成因机理探讨[J]. 矿床地质, 27(6) : 705-713.
- 刘成林, 王弼力, 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) : 796-803.
- 刘群, 陈郁华, 李银彩, 蓝庆春, 袁鹤然, 阎东兰. 1987. 中国中新代陆源碎屑-化学岩型盐类沉积[M]. 北京 : 北京科学技术出版社. 22-24, 131.
- 曲懿华. 1982. 钾盐矿床母液来源的新途径-深卤补给[J]. 矿物岩石, (1) : 7-14.
- 瓦里亚什科 M. 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. 274-309.
- 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[C]. “八五”地质科学重要成果学术交流会议论文选集[M]. 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) : 433-436.
- 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, 陈建忠, 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. 156-159.
- 袁见齐, 霍承禹, 蔡克勤. 1983. 高山深盆的成盐环境——一种新的成盐模式的剖析[J]. 地质论评, 29(2) : 159-165.
- 张彭熹. 1987. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京 : 科学出版社. 129-131.
- 郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京 : 北京科学技术出版社. 102-104.
- 郑绵平, 齐文. 1998. 多级盐湖盆地成矿模式-地球系统科学(中国进展·世纪展望)[C]. 北京 : 中国科技出版社. 466-468.

刘成林, 王弼力, 焦鹏程. 1999. 新疆罗布泊盐湖氢氧锶硫同位素地