

文章编号: 0258-7106 (2014) 05-1011-09

新疆库车盆地钾盐科探 1 井含盐系地球化学特征及找钾指示*

吴 坤¹, 刘成林^{2*}, 焦鹏程², 曹养同², 张 华², 高 超³, 赵宪福²

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3 北京市地质工程设计研究院, 北京 101500)

摘 要 在盐湖沉积演化过程中, 钾盐矿物在盐类沉积的中晚期阶段才开始析出。因此, 研究含盐系盐类的沉积地球化学特征, 不仅可以从侧面获取岩盐的沉积物源和成盐古卤水蒸发浓缩程度等地球化学信息, 而且更能揭示古盐湖钾盐富集趋势。文章通过对库车盆地钾盐科探 1 井钻取的岩芯样品进行高精度采样测试, 得出岩盐中 $Mg \times 10^3/Cl$ 、 $K \times 10^3/Cl$ 、 $Li \times 10^3/Cl$ 与 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 含量的垂向变化规律。并与库车盆地其他钻孔中的岩盐含钾性进行对比, 同时, 依据钻井剖面岩性特征, 与潜江凹陷和大汶口凹陷含盐系剖面进行对比, 论述研究区成盐的地球化学特征, 对其钾盐成矿前景进行分析和评价。

关键词: 地球化学; 库车盆地; 科探 1 井; 地球化学特征; 成钾前景

中图分类号: P611.4; P619.211

文献标志码: A

Geochemical characteristics and ore-prospecting indicators of salt-bearing series in No. 1 exploratory drill hole of Kuqa Basin, Xinjiang

WU Kun¹, LIU ChengLin², JIAO PengCheng², CAO YangTong², ZHANG Hua², GAO Chao³
and ZHAO XianFu²

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Beijing Institute of Geological Engineering, Beijing 101500, China)

Abstract

In the deposition process of the saline lake, potassium began to precipitate at the middle or late stage of salt deposition. Therefore, the study of sedimentary geochemical characteristics of the salt minerals can not only obtain the information on the source of sediments and the concentration extent of brine but also reveal the geochemical characteristics of hidden deposits, especially the condition of potassium content. In this paper, by using the methods of geochemical analysis and adopting the Kuqa Basin as the study object, the authors analyzed core samples collected from No. 1 potassium exploratory drill hole and obtained vertical variation regularity of such coefficients of rock salt as $Mg \times 10^3/Cl$, $K \times 10^3/Cl$ and $Li \times 10^3/Cl$ as well as ion concentrations of K^+ , Mg^{2+} , Li^+ , Cl^- and Ca^{2+} . In comparison with potassium content of halite in other drill holes in the Kuqa Basin and through a comparative study of salt sections in the Qianjiang depression and Dawenkou depression according to

* 本文得到国家“973”计划(编号: 2011CB403007)、中央地质勘查基金项目(编号: 2009650004)和“十二五”国家科技支撑计划 305 项目(编号: 2011BAB06B00)的联合资助

第一作者简介 吴 坤, 男, 1990 年生, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: wukunfighting@126.com

** 通讯作者 刘成林, 男, 1963 年生, 研究员, 主要从事沉积矿床研究工作。Email: liucheng1263.net

收稿日期 2014-06-25; 改回日期 2014-08-15。苏 杭编辑。

the lithological characteristics of well sections, the authors discussed the geochemical characteristics of salt deposition in the study area and evaluated the potash exploration prospect of the Kuqa Basin.

Key words: geochemistry, Kuqa basin, No. 1 exploratory drill hole, geochemical characteristics, prospect of potash formation

钾肥是农业三大肥料之一。中国作为一个拥有13亿人口的农业大国,耕地资源紧缺,为了保证粮食安全和对农产品需求而需要不断增加作物产量,因此形成了中国特有的化肥高量投入耕作体系(郑绵平等,2010)。世界钾盐资源量丰富,但集中在少数国家,如加拿大和俄罗斯等。中国钾盐储量不多,已探明的钾盐矿床主要集中于青海柴达木盆地、新疆塔里木盆地罗布泊盐湖卤水钾盐矿床(王弭力等,2006)。中国对钾盐的需求量巨大,但目前基本为卤水型钾盐,固体找钾至今尚未突破。因此,开展古代盐湖找钾是一项长期而又艰巨的任务。

从国外找钾经验来看,大型钾盐矿床的发现一般经过十几年甚至更长的时间,其中一部分是通过石油钻井发现的(刘成林等,2006)。中国几十年找钾历程中,古代固体钾盐除在云南勐野井获得少量(约2000多万吨)储量外,其他地方一直没有突破。从上世纪70年代起,塔里木盆地一直是找钾重点,但至今仍未有突破。塔里木盆地作为找钾远景区之一,特别是库车盆地和莎车盆地,在漫长的地质历史时期,历经多次海侵-海退,后期又经历持续干旱、封闭的气候条件(马万栋等,2004;张华等,2013),发育了巨厚的蒸发岩沉积。其中,库车盆地中石盐岩层厚度从几十米至上千米不等,表明该盆地具有较好的成钾潜力(刘成林等,2008a;2010;2013),并且在石盐岩中发现了众多钾盐矿物及其组合,进一步表明库车盆地古盐湖在古近纪-新近纪演化到了钾盐沉积阶段(刘成林等,2008b;2008c),这为库车盆地的钾盐找矿提供了科学依据。本文在前人研究成果的基础上,通过对拜城县托克逊乡钾盐科探1井(图1)石盐岩岩芯段的样品进行化学分析,以期从含盐系地层的地球化学特征来探索研究区是否具有找钾远景。

1 区域地质背景

新疆库车盆地位于南天山构造带和塔里木盆地之间,东西长约550 km,南北宽30~80 km,面积约为28 500 km²。晚二叠世,塔里木地块向伊犁地块俯冲(刘志宏等,2000),在南天山南缘产生了库车周

缘前陆盆地(张明利等,2002;阎福礼等,2003)。三叠纪是库车前陆盆地的主要发育期(张明利等,2002;阎福礼等,2003),侏罗纪初该盆地发育已经完成。始新世末,受印度板块和欧亚板块碰撞产生的远距离效应的影响,塔里木板块向天山构造带再次俯冲,库车前陆盆地再次复活并接受沉积,形成库车再生前陆盆地(贾承造,1992;曹守连等,1994)。晚三叠世—早侏罗世,南天山造山带处于稳定发展阶段,盆地主要受燕山期和喜马拉雅期构造运动控制,尤其是喜马拉雅期末的构造运动最强烈,形成了天山山前大型逆冲褶皱系及一系列逆冲断层(胡鹏等,2012),最终造成库车盆地呈现“四带四凹”的构造格局(图1),即北部单斜带、克拉苏-依奇克里克构造带、秋里塔格背斜带、前缘隆起带及拜城凹陷、阳霞凹陷、乌什凹陷、温宿凹陷。

盆地内向前陆隆起方向沉积物依次超覆变薄,并具有造山期磨拉石建造特征(田在艺等,1990;阎福礼等,2003)。其地层以中-新生界为主,最大埋深可达10 000 m(赵靖舟等,2002)。白垩系主要分布于拜城凹陷以北,下统为河流相、湖相沉积,上统为干燥条件下的河流相沉积(周宗良等,1999)。古近系主要为河湖相沉积(张丽娟等,2006),盐湖沉积尤其发育(刘成林等,2013),其下部库姆格列木群为巨厚的蒸发岩沉积,上部为少量石盐岩、石膏岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩沉积。新近系主要为河湖相沉积和山麓相洪积。第四系沉积物遍布于盆地的大部分地区,主要有洪冲积物、风积物和冰川遗迹等。

2 样品采集与分析结果

本文测试样品采集自库车盆地拜城县托克逊乡DZK01钻孔(科探1井)。DZK01钻孔是在中央地质勘查基金项目“新疆库车盆地西部钾盐普查”资助下实施的,是新疆库车盆地第一口以找钾为目标的科研钻探井。DZK01钻孔在钻进过程中遇到高压软泥岩层被迫终孔,终孔深度为1507 m,其取芯地层为古新统库姆格列木群(E₁₋₂k),钻孔取芯率为82%。测试样品选自该群上石盐段石盐岩岩芯(图2),样品

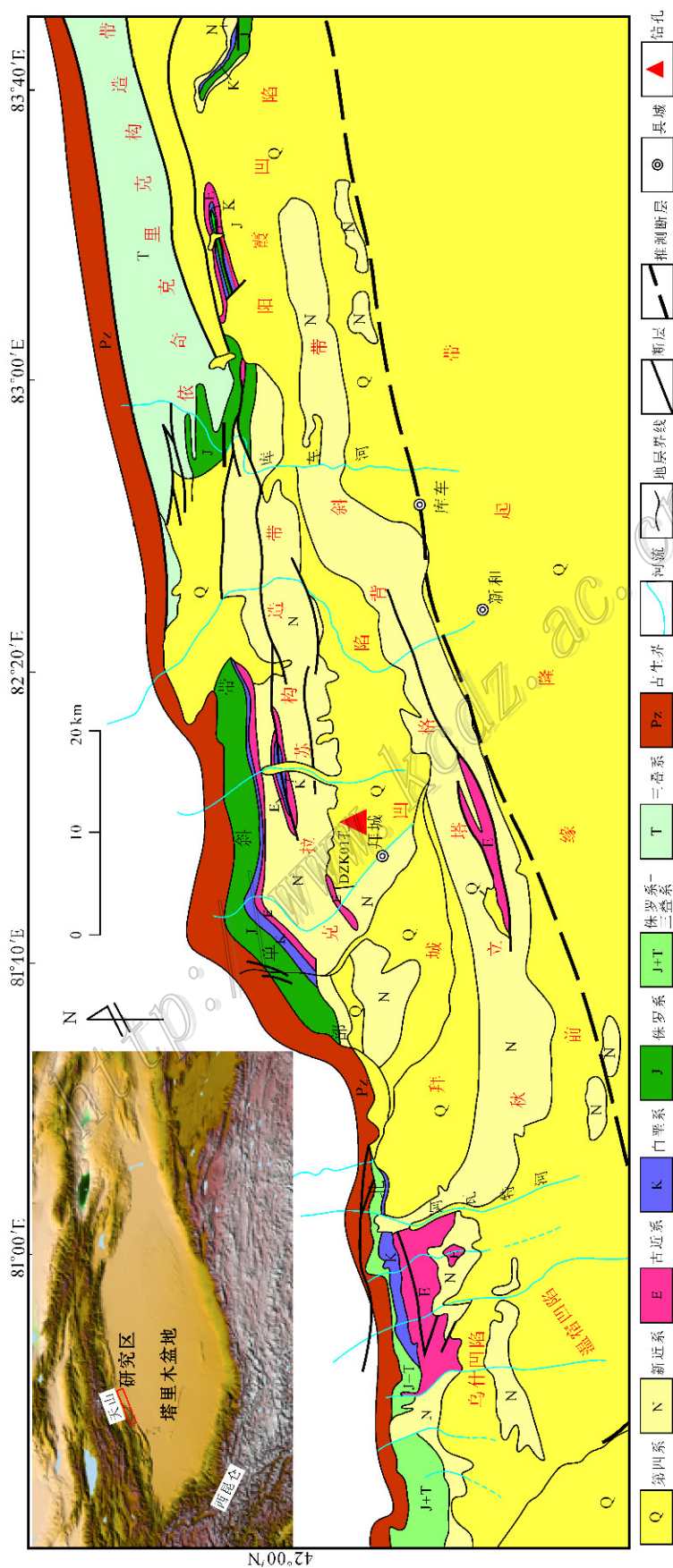


图 1 库车盆地地质图及钻孔位置 (据刘成林等, 2013)

Fig. 1 Geological map of the Kuga Basin, showing locations of drill holes (modified after Liu et al., 2013)

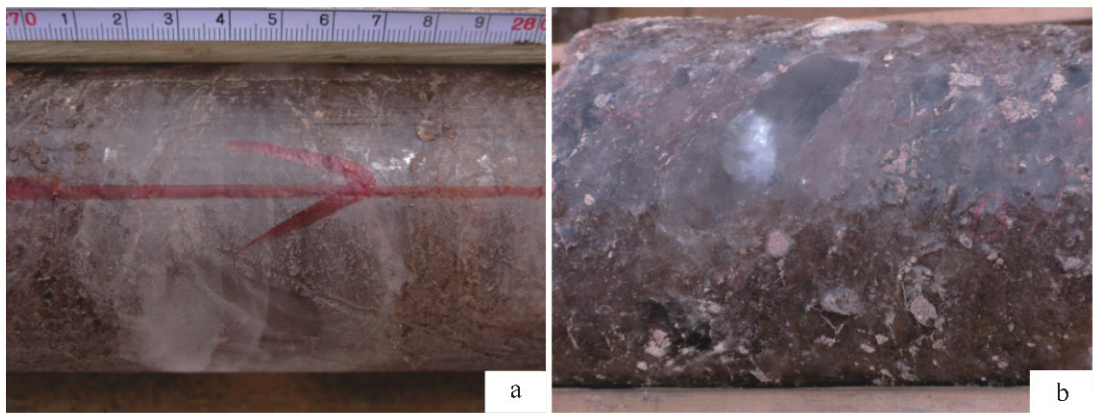


图 2 DZK01 钻孔岩芯照片(无色透明的石盐)
a. 井深 1396.56~1396.66 m; b. 井深 1468.93~1469.03 m
Fig. 2 Photos of drill hole DZK01(colorless transparent crystal salt)
a. Well depth 1396.56~1396.66 m; b. Well depth 1468.93~1469.03 m

采集深度区间为 1321.39~1486.62 m,通过捡块取样一共采集了 295 件岩芯样品进行室内化学分析。

由于含盐系中泥砾普遍发育,因此,为了排除测试过程中泥砾及其他杂质掺杂对实验结果的影响,对所采的石盐岩样品进行了系统挑选。测试分析了 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Li^+ 、 Cl^- 的含量。本次样品测试工作由中国地质科学院矿产资源研究所地球化学分析实验室完成。其中岩盐样品用水溶法溶解,再用原子吸收仪(国产瑞利 WFX-130)分析测试。

由于测试样品过多,数据量过大,测试分析的原始数据未全部列出,仅列出样品测试数据的统计结果(表 1)。

3 讨论

3.1 含盐系地球化学特征

3.1.1 钾离子

含盐系中钾的分散、聚集及赋存状态,不仅可以作为盆地找钾的直接标志,而且可以为分析和判断成钾有利层段提供重要线索。从钻孔含盐系 K^+ 含

量深度变化曲线看(图 3a),含盐系中 K^+ 含量由下至上明显表现出 4 个层段的富集:层段 I, K^+ 富集的深度区间为 1485.87~1475.01 m, $w(K^+)$ 最大值为 0.343%,最小值为 0.045%,平均值为 0.206%;层段 II, K^+ 富集的深度区间为 1468.23~1437.48 m, $w(K^+)$ 最大值为 0.218%,最小值为 0.045%,平均值为 0.111%;层段 III, K^+ 富集的深度区间为 1427.09~1412.87 m, $w(K^+)$ 最大值为 0.145%,最小值为 0.025%,平均值为 0.080%;层段 IV, K^+ 富集的深度区间为 1401.01~1335.08 m, $w(K^+)$ 最大值为 0.289%,最小值为 0.039%,平均值为 0.113%。分析结果显示,库车盆地 DZK01 钻孔岩芯中 $w(K^+)$ 最大为 0.343%,最小为 0.019%,平均值为 0.100%。DZK01 钻孔揭示的含盐层段中 K^+ 含量普遍偏低这一现象,与库车盆地其他地区钻孔岩芯、剖面样品化学测试结果相比具有良好的一致性。石盐中 K^+ 含量阶段性的富集与亏损反映了盐湖间歇性的咸化-淡化-咸化的蒸发浓缩过程,其中层段 I、II、III、IV(特别是层段 I) K^+ 发生了富集作用,指示在整个盐湖演化过程中这 4 个层段的卤水浓缩程度接近了钾盐析出阶段或者有相应的富钾卤水对盆地进行补充。

3.1.2 镁离子

镁盐的易溶性决定了其在盐湖演化过程中,镁盐矿物常常在卤水蒸发浓缩的后期、晚期阶段才能析出或进入石盐等矿物晶体。因此,岩盐中 Mg^{2+} 的含量变化也常常指示了卤水蒸发浓缩的阶段以及

表 1 DZK01 钻孔岩芯化学成分特征

分析结果	$w(B)/\%$				
	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Li^+	Cl^-
最大值	0.343	13.089	1.517	0.0070	59.820
最小值	0.019	0.134	0.043	0.0002	5.314
平均值	0.100	1.760	0.372	0.0010	46.085

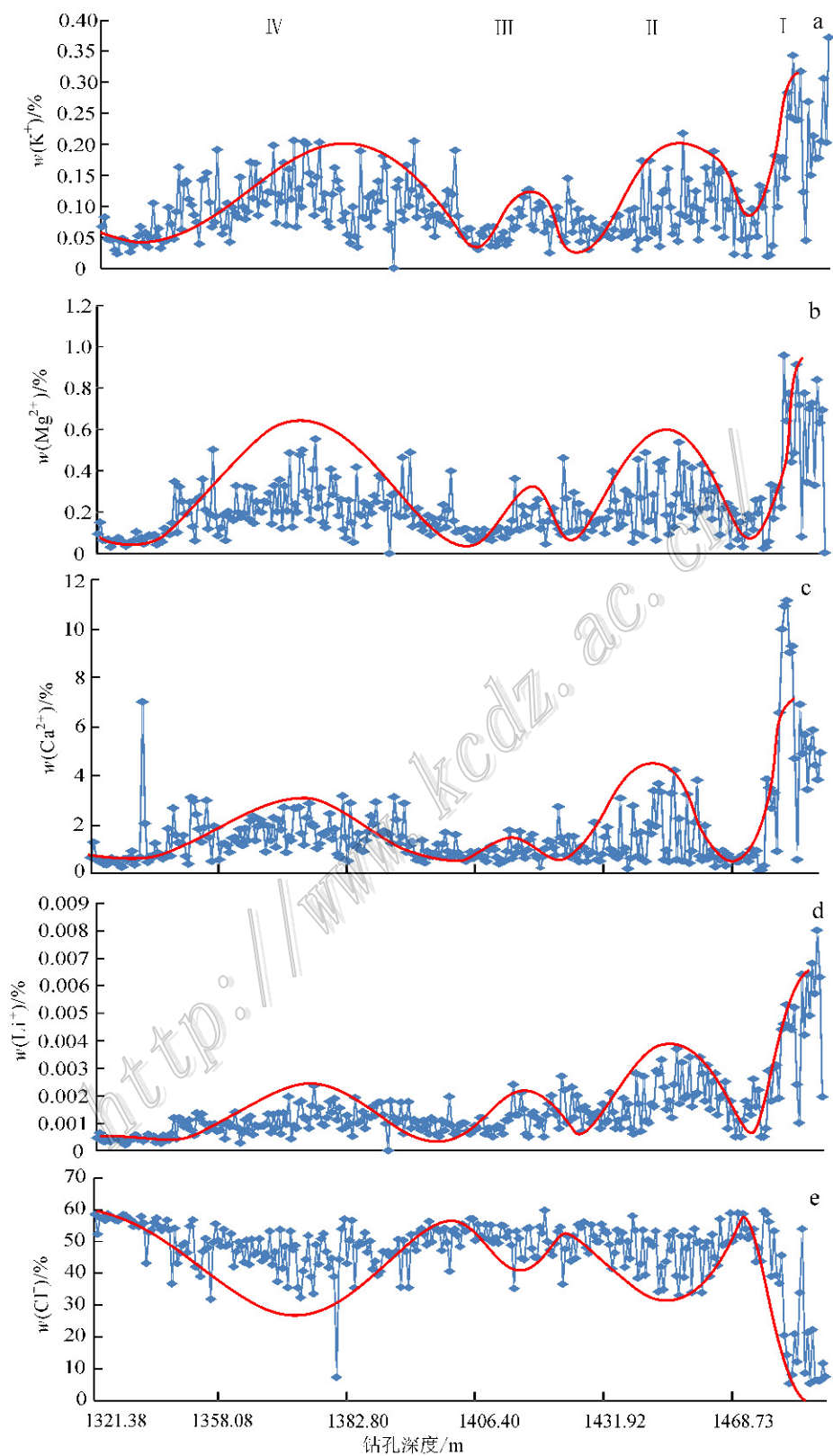


图 3 DZK01 钻孔 K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Li⁺、Cl⁻ 含量变化趋势图

Fig. 3 Variation tendency of K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Li⁺、Cl⁻ concentrations in drill hole DZK01

钾、镁盐的富集程度。分析测试结果显示,石盐中 Mg^{2+} 含量深度变化与 K^+ 含量深度变化具有良好的-致性(图 3b),在含盐层系中 Mg^{2+} 含量从下至上虽然表现出整体有下降的趋势,但其相对富集区间却与 K^+ 十分同步,两者之间显示出强烈的正相关性。上述证据显示,DZK01 钻孔中石盐的 K^+ 、 Mg^{2+} 应具有相同的物源背景,在持续的蒸发作用下,盐湖演化已经接近钾镁盐析出阶段,在扫描电镜下能看到石盐晶间的含钾矿物(邢万里等,2013)。

3.1.3 钙离子

从 DZK01 钻孔 Ca^{2+} 含量深度变化趋势看(图 3c),岩盐中 Ca^{2+} 虽然在小范围内出现频繁振荡,但是其总体演化趋势仍然表现出 4 个层段的相对富集,与 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 含量变化呈一定的正相关。在正常的海相蒸发岩形成过程中,钙的硫酸盐和碳酸盐作为溶解度较小的盐类矿物,在蒸发浓缩的初期阶段就基本上以灰岩、白云岩、石膏岩等形式析出,所以其地球化学行为在盐湖演化后期、晚期表现得并不活跃。但是,在本次测试中 Ca^{2+} 含量变化与 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 含量变化表现出一定的同步性,从侧面反映了在盐湖正常演化过程中,有外源物质对其提供相应的钙源,从而导致在盐湖演化后期 Ca^{2+} 表现出异常的化学行为。

3.1.4 锂离子

DZK01 钻孔含盐系 Li^+ 含量深度变化趋势(图 3d)与 K^+ 、 Mg^{2+} 变化趋势大体一致,仍然表现出由老至新 4 个层段的相对富集,其富集的深度区间也大致和 K^+ 、 Mg^{2+} 富集深度区间相同。一般来说,石盐中 Mg^{2+} 、 Li^+ 离子含量较少。但是在海水蒸发到晚期阶段后 Li^+ 也会以类质同象替换光卤石等镁盐矿物中的 Mg^{2+} ,而且随着蒸发浓缩程度的加剧,其进入矿物中的含量也会相应增加。因此,在石盐中 Mg^{2+} 、 Li^+ 的含量变化不仅代表卤水蒸发浓缩的程度,而且可以指导评价钾盐沉积规模及预测成钾前景。本次钻孔中 Li^+ 含量的深度变化趋势表明, K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 之间呈显著的正相关,进一步说明了石盐中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 应来自相同的物源补给,且盐湖已经达到了蒸发浓缩中晚期阶段,而各离子的这种地球化学行为也符合盐湖演化过程中盐类矿物析出的一般规律。

3.1.5 氯离子

从 Cl^- 的含量深度变化特征(图 3e)可以看出,与前述岩盐中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Li^+ 相对富集层段相

对应的是, Cl^- 在这 4 个层段表现出强烈的亏损,与 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Li^+ 含量变化显示出强烈的负相关。在盐湖演化至石盐或者更晚阶段,由于石盐的不断析出,卤水中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 浓度升高,其进入石盐矿物的机率也会逐渐增加。岩盐中 Cl^- 所表现出来的异常化学行为,进一步证实了在盐湖演化过程中,沉积环境对库车古盐湖的沉积地球化学演化有较大作用。

3.2 含盐系地球化学特征系数

从 DZK01 钻孔含盐系各离子含量深度变化对比分析图中可以看出, K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 离子的含量变化趋势在整个钻孔剖面中表现出良好的一致性,甚至其峰值出现的具体深度都十分的同步。

岩盐中 $\text{K} \times 10^3/\text{Cl}$ 、 $\text{Mg} \times 10^3/\text{Cl}$ 、 $\text{Li} \times 10^3/\text{Cl}$ 的垂向变化也与 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 含量变化相一致(图 4)。这说明在石盐沉积过程中,卤水系统中的 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 具有相同的物质来源(如原始海水、深部热液、油田水等),在没有其他物质混染的情况下(如黏土吸附周围地层中游离态的 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+),含盐层系中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Li^+ 的相对富集以及富集区段中钾石盐、钾石膏、杂卤石等矿物的发现,确切地指示了卤水蒸发浓缩已经达到晚期,是重要的找钾标志。

3.3 对比讨论

3.3.1 库车钻孔盐岩中钾含量对比

上世纪 70 年代地矿部在库车盆地西部及中北部布置了一些钻孔,对比库车盆地前期钻孔测试结果,可以发现 DZK01 钻孔岩芯样品中 K^+ 含量普遍高于其他钻孔(表 2)。与此同时,结合 DZK01 钻孔含盐层系岩性主要以石盐为主,膏岩沉积普遍缺乏以及部分层段有钾盐矿物发育等现象(邢万里等,2013),说明在 DZK01 钻孔及其附近地区含盐层系的沉积过程中,卤水蒸发、浓缩阶段已经达到晚期,局部甚至已经达到了钾盐富集、析出阶段,而钻孔地区及邻区的古地理位置可能更靠近盐盆沉积中心地带,是盆地重要的找钾线索。

3.3.2 含盐系剖面对比

潜江凹陷位于江汉盆地的中部,是扬子陆块上发育起来的江汉盆地的一个次级构造单元(卢明国等,2004),也是其最重要成盐凹陷。潜江凹陷作为盆地的沉积中心,古近纪时期发育了一套巨厚的蒸发岩沉积,主要为石膏岩、石盐岩。潜江组自下而上可分为 4 段,即潜四段、潜三段、潜二段和潜一段,并

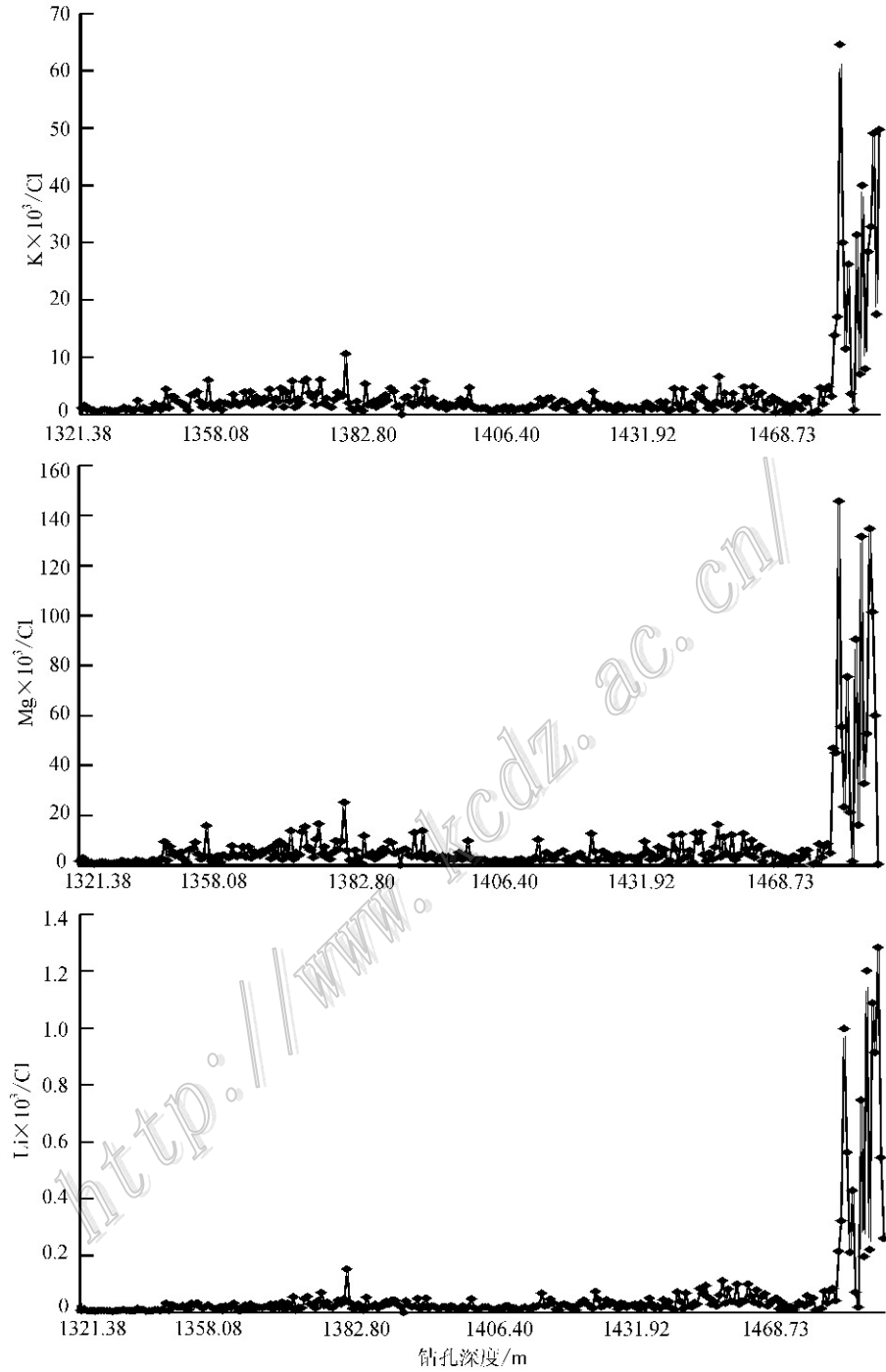


图 4 DZK01 钻孔 $K \times 10^3/Cl$ 、 $Mg \times 10^3/Cl$ 、 $Li \times 10^3/Cl$ 垂向变化对比
Fig. 4 Vertical variations of $K \times 10^3/Cl$, $Mg \times 10^3/Cl$, $Li \times 10^3/Cl$ in drill hole DZK01

在潜二段发育有钾盐矿层。山东大汶口凹陷位于鲁西隆起区中部,产于以构造拉张作用为主的中、新生代断陷盆地中,属于汶蒙盆地西端的一个凹陷,凹陷内接受了始新统官庄组沉积(朱忠德,1988;李钟模,1994)。该组分 3 段,为一套含泥灰岩、含泥盐岩、硬石膏岩沉积组合(李钟模,1994),在其第二段上部

赋存有巨量的(硬)石膏、石盐和钾矿层(朱忠德,1988)。在凹陷内盐类沉积的过程中,由于气候条件、构造运动的变化,造成了盐类沉积韵律构造十分发育,且具多级性。最后在沉积旋回的中上部,发育钾盐矿层,反映出盐湖演化晚期卤水已经达到钾盐矿物析出阶段。

表 2 库车盆地钻孔岩芯 K⁺ 含量对比

Table 2 K⁺ content comparison of drill hole cores in the Kuqa Basin

钻孔号	层号	w(K ⁺)/%		
		最低值	最高值	平均值
DZK01	—	0.010	0.343	0.019
ZK-8	—	0.008	0.052	0.012
ZK-12	—	0.001	0.052	0.010
ZK-18	1~51	0.003	0.009	0.0049
	52~165	0.003	0.009	0.0058
	172~248	0.003	0.015	0.0075
	249	0.010	0.010	0.010
ZK-16	—	0.003	0.012	0.0066
ZK-19	1~104	0.003	0.012	0.0068
	105~190	0.003	0.010	0.0054
	191~229	0.003	0.008	0.0063
ZK-15	—	0.005	0.018	0.010
ZK-22	—	0.005	0.015	0.0094
DN-102	—	0.008	0.152	0.053
DB-101	—	0.021	0.064	0.035

注：“—”表示无此项。ZK-8、ZK-12、ZK-18、ZK-16、ZK-19、ZK-15、ZK-22，数据来源于地质矿产部矿床地质研究所(1980)；DN-102、DB-101，数据来源于中国地质科学院矿产资源研究所(2010)。

库车盆地古近系蒸发岩地层主要是石盐层和膏岩层。含盐地层中钾盐矿物或含钾矿物主要以光卤石、钾石盐、钾芒硝、钾石膏等形式产出，指示了卤水已经浓缩至钾盐析出阶段，是直接的找钾线索。参考潜江凹陷含盐系剖面以及大汶口盆地含盐系剖面

特征(图 5)，通过对比发现：DZK01 井剖面上盐段、软泥岩层与潜江凹陷和大汶口凹陷含盐系剖面上段(含盐段)、中段(淡化层)具有很好的对比性，并且都属于同一个时代的地层。因此，预测在 DZK01 孔下段可能会有钾盐层的存在。

4 结 论

(1) 从含盐系各离子含量深度变化对比分析图中可以看出，K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Li⁺ 离子含量的变化趋势在整个地层中表现出良好的一致性，从下至上 K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、Li⁺ 离子含量的变化明显表现出 4 个层段的相对富集，K×10³/Cl、Mg×10³/Cl、以及 Li×10³/Cl 的峰值区间也与上述 4 个层段具有良好的一致性，这表明在蒸发岩沉积过程中，上述 4 个层段具有较高的蒸发浓缩程度，含盐层系中 K⁺、Mg²⁺、Li⁺ 的相对富集确切地指示了卤水蒸发浓缩已经达到晚期阶段，是重要的找钾标志。

(2) DZK01 钻孔与库车其他钻孔中盐岩含钾性对比分析表明：DZK01 钻孔研究区钻遇的上盐段地层比库车其他钻孔盐岩中 K⁺ 含量高得多，初步说明勘查选区较库车其他区域钾富集程度要高。

(3) DZK01 钻孔剖面同潜江凹陷、大汶口凹陷剖面岩性特征相比，含钾地层都属于古近系始新统，并且其岩性组成及其变化特征十分相似，说明在

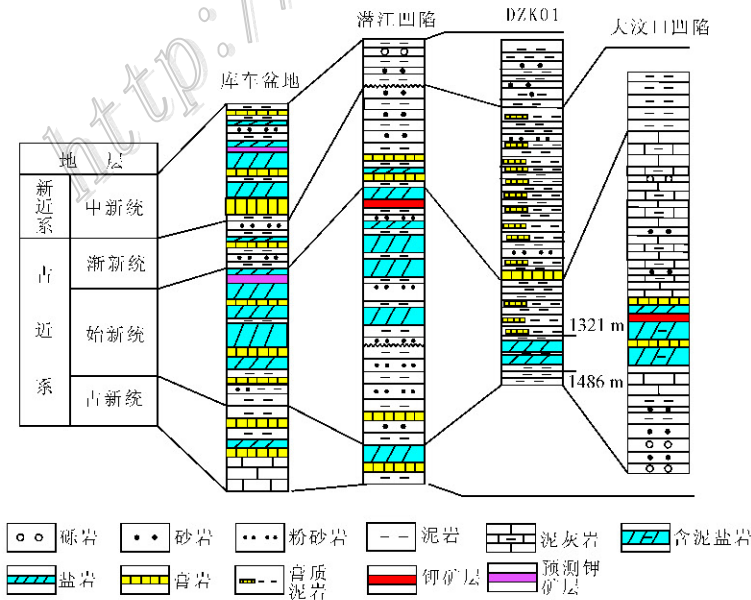


图 5 含盐系地层剖面对比(据曹养同等, 2010)

Fig. 5 Correlation of profiles of salt-bearing strata (modified after Cao et al., 2010)

DZK01 钻孔所在地区成钾的可能性较大。以此推断库车盆地具有较好的成钾前景, 具有进一步勘查的潜力。

志 谢 样品采集过程中得到新疆地质工程公司钻探人员、矿产资源所徐海明和樊莉等人的大力协助; 样品测试分析主要由王英素和陈永志完成; 论文评审过程中得到了专家的宝贵意见; 在此一并表示感谢!

参考文献/References

- 曹守连, 陈发景, 罗传容. 1994. 塔北中、新生代前陆盆地沉降机制的数值模拟[J]. 石油与天然气地质, 15(2): 113-120.
- 曹养同, 刘成林, 焦鹏程, 陈永志. 2010. 中新世盆地蒸发岩沉积旋回对比及库车盆地成钾探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 657-668.
- 地质矿产部矿床地质研究所. 1980. 新疆库车盆地第三纪成盐条件及找钾远景研究报告[R].
- 胡 鹏, 闫秋实, 赖万昌. 2012. 库车盆地岩盐及卤水地球化学特征及成矿远景分析[J]. 四川有色金属, (4): 38-42.
- 贾承造. 1992. 塔里木板块构造演化[A]. 李清波, 戴金星, 刘如琦, 李继亮, 主编. 现代地质学研究文集(上)[C]. 南京: 南京大学出版社. 22-31.
- 李钟模. 1994. 山东大汶口盆地蒸发岩特征及成钾规律[J]. 盐湖研究, 2(2): 1-10.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程, 陈永志. 2006. 世界主要古代钾盐找矿实践与中国找钾对策[J]. 化工矿产地质, 28(1): 1-8.
- 刘成林, 焦鹏程, 曹养同. 2008a. 蒸发岩盆地构造反转对钾盐成矿控制研究[A]. 第九届全国矿床会议论文集[C]. 北京: 地质出版社. 370-373.
- 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 王弼力, 宣之强. 2008b. 库车盆地第三系岩盐地层钾矿物组合发现及其意义[A]. 见: 第九届全国矿床会议论文集[C]. 北京: 地质出版社. 374-375.
- 刘成林, 王弼力, 焦鹏程. 2008c. 中国古代蒸发盆地钾盐成矿可能性分析与预测[A]. 第九届全国矿床会议论文集[C]. 北京: 地质出版社. 368-369.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弼力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. 矿床地质, 29(4): 581-592.
- 刘成林, 曹养同, 杨海军, 焦鹏程, 顾乔元. 2013. 库车前陆盆地古近纪—新近纪盐湖环境变迁及其成钾效应探讨[J]. 地球学报, 34(5): 547-558.
- 刘志宏, 卢华复, 李西建, 贾承造, 雷刚林, 陈楚铭, 王国强, 范湘涛. 2000. 库车再生前陆盆地的构造演化[J]. 地质科学, 35(4): 482-492.
- 卢明国, 童小兰, 王必金. 2004. 江汉盆地江陵凹陷油气成藏期分析[J]. 石油实验地质, 26(1): 28-30.
- 田在艺, 柴桂林, 林 梁. 1990. 塔里木盆地的形成与演化[J]. 新疆石油地质, 11(4): 259-275.
- 王弼力, 刘成林, 焦鹏程. 2006. 罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展与开发现状[J]. 地质评论, 52(1): 757-764.
- 邢万里, 刘成林, 王安建, 焦鹏程, 李国武, 赵宪福, 高 超. 2013. 库车前陆盆地古近系蒸发岩岩石学、矿物学与成钾环境分析——以DZK01孔岩芯为例[J]. 地球学报, 34(5): 559-566.
- 阎福礼, 卢华复, 贾 东, 于际民. 2003. 塔里木盆地库车坳陷中、新生代沉降特征探讨[J]. 南京大学学报(自然科学版), 39(1): 31-39.
- 张 华, 刘成林, 曹养同, 孙宏伟, 王立成. 2013. 塔里木古海湾新生代海退时限及方式的初步探讨[J]. 地球学报, (34)5: 577-584.
- 张丽娟, 李多丽, 孙玉善, 程 明. 2006. 库车坳陷西部古近系—白垩系沉积储层特征分析[J]. 天然气地球科学, 17(3): 355-360.
- 张明利, 金之钧, 汤良杰, 刘国林. 2002. 前陆盆地研究的回顾与展望[J]. 地质评论, 48(2): 214-220.
- 赵靖舟, 戴金星. 2002. 库车油气系统油气成藏期玉成藏史[J]. 沉积学报, 20(2): 314-318.
- 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 刘喜方, 陈文西, 李金锁. 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 81(11): 1523-1553.
- 中国地质科学院矿产资源研究所. 2010. 塔里木盆地钾盐大规模成矿条件与找矿靶区预测技术研究报告[R].
- 周宗良, 高树海, 刘志忠. 1999. 西南天山造山带与前陆盆地系统[J]. 现代地质, 13(3): 275-280.
- 朱忠德. 1988. 山东大汶口盐矿盐类沉积的韵律特征和沉积阶段[J]. 矿床地质, 7(1): 87-96.
- Ma W D, Ma H Z, Tan H B, Dong Y P, Zhang X Y and Sun G F. Geochemistry of Brines from salt ore deposits in western Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 23(3): 238-244.