

塔里木盆地库车坳陷古新统一始新统蒸发岩 地球化学特征及成钾分析

——以 KL4 井为例

徐 洋, 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 曹养同

(中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要: 库车坳陷古新统一始新统发育巨厚的蒸发岩, 尤其是盆地西部, 出露多处盐矿点。本文主要研究了 KL4 钻孔古新统一始新统蒸发岩中钾盐矿物和含钾矿物特征, 在此基础上分析了库车坳陷古新统一始新统蒸发岩地层中成钾趋势。研究发现, 在含钾层段 I 产出钾芒硝, 层段 II 产出原生钾石盐、钾石膏和含钾石盐石膏, 说明古盐湖已经达到钾盐沉积阶段。钻孔化学组分分析结果显示, 钻孔底部至顶部 K^+ 浓度呈现不断富集的趋势, 且最大值达到 1.273%, 结合离子含量、钾氯系数、镁氯系数、锂氯系数和锶钙系数等特征, 进一步确定古盐湖演化过程中存在两次成钾浓缩趋势, 认为含钾层段 I 和 II 具有成钾潜力, 其中层段 II 成钾潜力更大。

关键词: 蒸发岩; 矿物学; 地球化学; 古新统一始新统; 成钾分析; 库车坳陷

中图分类号: P588.24⁺7; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)05-0755-10

Geochemical characteristics and potash formation analysis of Paleocene-Eocene evaporites in Kuqa depression of Xinjiang: A case study of borehole KL4

XU Yang, LIU Cheng-lin, JIAO Peng-cheng, CHEN Yong-zhi and CAO Yang-tong

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

Abstract: Paleocene-Eocene thick evaporites are developed in Kuqa depression, especially in the western part, with many salt spots. In this paper, the authors studied potash minerals and potassium-bearing salt minerals of Paleocene-Eocene evaporites so as to analyze potash-forming trend of Paleocene-Eocene evaporites in Kuqa depression. Glaserite mineral exists in potash-forming layer section I; original sylvine, potassium gypsum and potassium-bearing halite gypsum occur in potash-forming layer section II, indicating that ancient salt lake had reached potash deposition phase. Borehole chemical composition analysis shows that, from borehole bottom to the top, the shallower the depth, the higher the K^+ concentration, with a maximum of 1.273%. In combination with characteristics of ions content, the potassium-to-chlorine ratio, the magnesium-to-chlorine ratio, the lithium-to-chlorine ratio and the strontium-to-calcium ratio, the authors determined two potash-forming trends during ancient salt lake evolution, and initially hold that potassium layer section I and II have the potential to form potash, with layer section II having larger potential to form potash.

Key words: evaporite; mineralogy; geochemistry; Paleocene-Eocene; potassium-forming analysis; Kuqa depression

Fund support: National "The Twelfth Five-year" Science and Technology Support Project (2011BAB06B06)

收稿日期: 2016-10-28; 接受日期: 2017-08-09

基金项目: 国家“十二五”科技支撑课题(2011BAB06B06)

作者简介: 徐 洋(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事表生成矿作用研究, E-mail: geologyxu@163.com; 通讯作者: 刘成林(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事钾盐、盐湖及沉积矿床等研究, E-mail: liuchengl@263.net。

我国钾盐资源贫乏,几十年来,固体钾盐找矿一直没有突破。塔里木盆地是我国重点找钾区之一,尤其是塔里木盆地库车坳陷。库车坳陷气候条件、物质来源及构造条件等方面皆有利于形成钾盐矿产(刘成林等, 2008a, 2008b; 唐敏等, 2009; 张华等, 2013), 古近纪—新近纪古盐湖演化沉积的蒸发岩厚度大且分布范围广,以石盐岩和石膏岩为主,并且在岩盐中发现多种原生和次生钾盐矿物和含钾矿物,指示该坳陷具有较好的成钾潜力。深入研究库车坳陷古近系蒸发岩,对丰富钾盐矿产成矿理论和实现找钾突破具有重要的意义。

近年来部分学者对库车坳陷古近系—新近系蒸发岩进行了大量的研究工作,其中包括蒸发岩沉积演化特征(曹养同等, 2010; 唐敏等, 2012; 刘成林等, 2013b)、蒸发岩岩石学和矿物学特征(孙小虹等, 2010; 刘成林等, 2013a; 邢万里等, 2013)、古近纪—新近纪构造环境与蒸发岩的关系(许建新等, 2006; 郭光辉等, 2006)等方面的研究,但是对钻井蒸发岩地球化学特征的研究相对薄弱。KL4井位于库车坳陷西北部,古新世—始新世古盐湖具有良好的成钾潜力,开展 KL4 井石盐岩和石膏岩的地球化学分析很有必要,可以为库车坳陷进一步找钾工作提供理论依据。

1 地质背景

塔里木盆地库车坳陷位于南天山造山带与塔里木盆地北缘之间(Graham *et al.*, 1993; Lu *et al.*,

1994; 卢华复等, 1996)。库车坳陷北临南天山山麓深大断裂,南濒轮台—新和断裂,与南天山造山带和塔里木盆地北缘的延伸方向一致,呈近东西向展布。

早二叠世末期华力西运动奠定了库车坳陷基底的基本面貌(张朝军等, 1998)。古近纪早中期,库车坳陷受近南北向挤压应力作用,其中包括始新世末期印度板块与欧亚板块碰撞引起的近南北向的挤压应力(郭令智等, 1992; 何光玉等, 2003)。古近纪晚期,库车坳陷构造应力发生改变,由挤压应力转变为伸展应力(何光玉等, 2003),说明该坳陷已经处于伸展构造演化阶段,坳陷的沉降中心开始由北向南迁移,控制古盐湖的迁移演化过程。上新世南天山强烈隆起形成了向南推进的构造负载(陈书平等, 2007),促使坳陷发生挠曲沉降,随着作用时间的持续,离造山带越远,挠曲作用越不明显,最终造成库车坳陷非均衡性沉降,对坳陷内含盐系及盐构造的发育起到一定的控制作用。据汤良杰等(2003),将该坳陷自北向南依次划分为北部单斜带、克拉苏—依奇克里克构造带、拜城凹陷、阳霞凹陷、秋里塔克背斜带、前缘隆起带,“四带两凹”的基本构造格局定型于中新世之后(图1)。

克拉苏剖面由北向南切穿巴什基奇克背斜、喀桑托开背斜和拜城凹陷, KL4 井位置在喀桑托开背斜处。喀桑托开背斜形成于早上新世,其下部的逆冲断层没有切割 KL4 井膏盐层(图2)。构造前沉积的地层厚度均匀, KL4 井库姆格列木群(E_{1-2k})膏盐层虽然受构造挤压作用形成构造背斜和地形隆起(汪新等, 2010; 雷刚林, 2014),但没有使构造前沉积

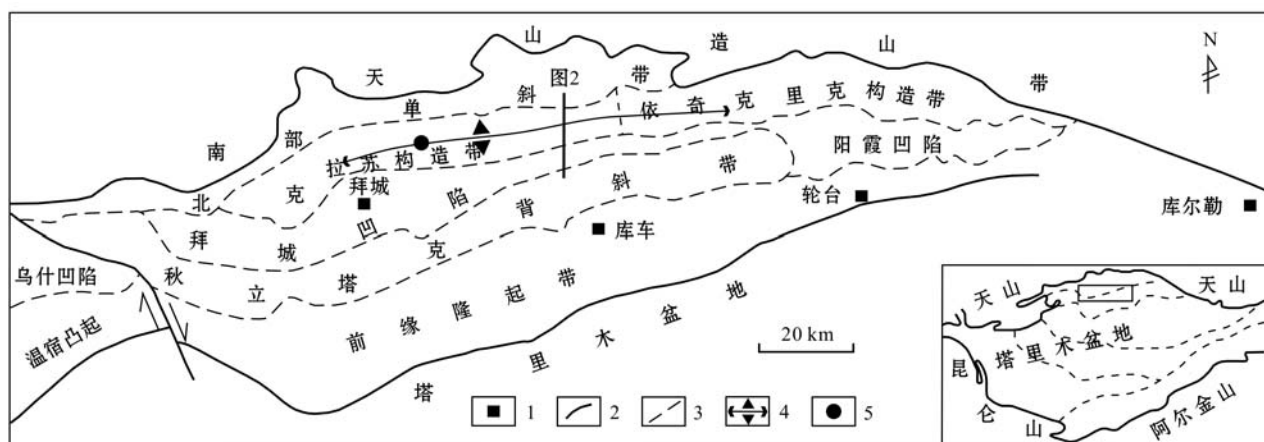


图1 库车坳陷大地构造简图(据汤良杰等, 2003)

Fig. 1 Sketch map of tectonics of the Kuqa depression (modified after Tang Liangjie *et al.*, 2003)

1—城市; 2—坳陷边界; 3—构造单元分界线; 4—喀桑托开背斜; 5—KL4井位置

1—city; 2—depression boundary; 3—boundary between tectonic units; 4—Kasanguokai anticline; 5—borehole KL4 location

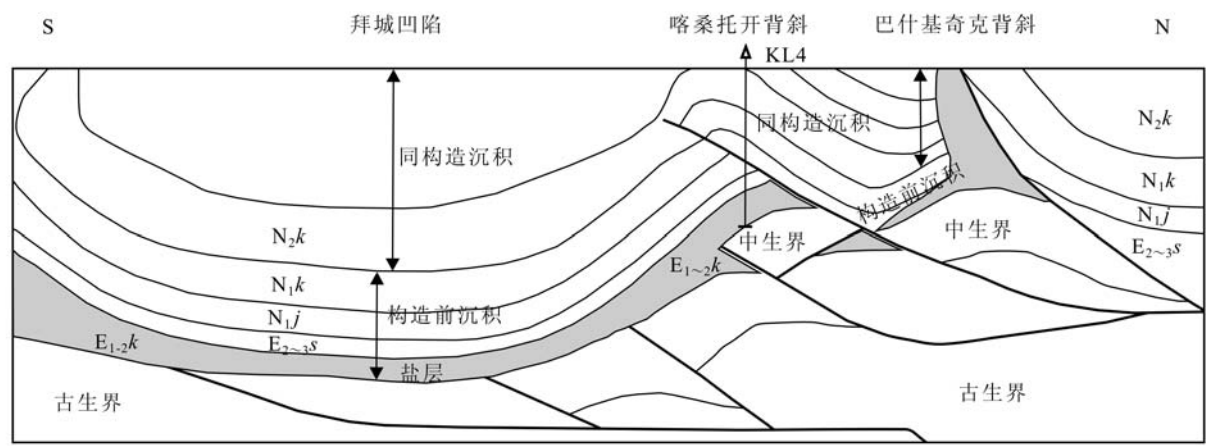


图 2 库车坳陷克拉苏剖面(引自汪新等,2010)

Fig. 2 Kelasu cross-section in Kuqa depression(after Wang Xin *et al.* , 2010)

地层发生倒转和叠置,也没有改变膏盐层初始蒸发沉积旋回面貌。

古盐湖在干旱的蒸发条件下,库车坳陷西部古近系库姆格列木群(E_{1-2k})与东部新近系吉迪克组(N_{1j})形成广泛分布的巨厚膏盐层(邬光辉等,2004;席斌斌等,2015)(表 1)。KL4 井蒸发岩主要赋存于

古近系库姆格列木群中,主要岩性是巨厚的盐岩和膏岩,紫红色、灰绿色粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩夹灰绿色泥质条带。古新世—始新世, KL4 井蒸发岩厚度大,在古盐湖蒸发沉积旋回中心位置,库姆格列木群盐岩主要为含石盐的泥岩,属于盐泥坪相,为泥岩与石盐沉积频繁交替变化或古盐湖边缘沉积环境,

表 1 库车坳陷第三系主要出露地层与岩性

Table 1 Main stratigraphy and lithology of Tertiary in Kuqa depression

地层单位			岩性	厚度/m
系	统	组/群		
新近系	上新统	库车组(N_{2k})	杂色砾岩, 紫红、灰绿含砾砂岩、粉砂岩	450~3 600
		康村组(N_{1k})	褐红色泥岩、巨厚杂色砾岩、灰白细砂岩	650~1 600
	中新统	吉迪克组(N_{1j})	紫红色含砾砂岩、灰绿色粉砂岩、泥岩、巨厚盐岩和石膏岩	200~1 300
古近系	渐新统	苏维依组(E_{2-3s})	灰绿色粉砂岩、泥岩、少量石膏岩	150~600
	始新统一 古新统	库姆格列木群(E_{1-2k})	紫红色、灰绿色粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩夹灰绿色泥质条带、 巨厚的盐岩和石膏岩	110~3 000

形成了盐与泥的交替和混合沉积。

2 研究方法和分析结果

对 KL4 井钻井岩屑编录并挑选出含杂质较少的石盐岩和石膏岩岩屑样品 123 件,采样深度区间为2 176~2 540 m 和3 406~3 700 m。样品化学成分分析测试由中国地质科学院矿产资源研究所外生地球化学实验室完成,其中石盐岩样品用水溶法溶解,石膏岩样品用酸溶法溶解,再用原子吸收(国产

瑞利 WFX-130)分析测试,分析误差 5% 以内,精度 0.01 mg/L。由于测试样品数量和数据量较大,测试分析的原始数据未能一一列出,本文以各钻井离子曲线变化特征来展示测试结果,含钾层段 I 和 II 样品数据以表格形式列出。另外,还挑选了多个具有代表性的岩盐样品进行了能谱扫描电镜分析,对钾盐矿物及含钾矿物进行了形态观察和能谱鉴定,测试工作由中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心完成,使用扫描电子显微镜/能谱仪,扫描电镜型号 TESCAN-VEGA \ LMU,能谱仪型号 Inca。

3 钾盐矿物学特征

KL4井蒸发岩类型是碎屑-化学岩型,通过能谱扫描电镜分析发现了钾盐矿物及含钾盐矿物,如原生和次生钾石盐、钾石膏、钾芒硝和含钾石盐石膏岩等,可将其分为氯化物型、硫酸盐型、其他含钾盐类矿物型3种类型:

(1) 氯化物型

KL4井中钾石盐(KCl)可分为原生和次生型2种类型。在钻孔岩屑(石盐岩)晶间,发现原生钾石盐矿物(图3a、3b),晶体呈白色,自形粒状结构,粒径10 μm 左右;石盐晶体呈灰色,半自形-他形粒状结构。钾石盐的自形程度比石盐好,并且在二者接触部位石盐呈港湾状,可以推测钾石盐结晶的时间晚于石盐,符合古海水蒸发析盐演化序列,可以判断该钾石盐为原生成因。次生型钾石盐(图3c、3d)呈灰白色溶蚀状,具隐晶质结构;硬石膏是深灰色晶体,呈细粒结构,粒径5 μm 左右。推测溶蚀状次生钾石盐的形成可能是后期硫酸盐型卤水交代的结果。

(2) 硫酸盐型

硫酸盐型含钾矿物有钾石膏(图3e、3f)和钾芒硝(图3g、3h)两种。钾石膏呈深灰色,放射状、针状结构,粒径10 μm 左右,发育在石盐晶面上。钾芒硝呈灰色,圆形、椭圆形、球状结构,粒径20~30 μm ,星点状分布在深灰色石盐和白色钾石盐中。

(3) 其他含钾盐类矿物型

含钾盐类矿物型仅发现含钾石盐石膏岩(图3i、3j),呈灰白色,隐晶质结构,以集合体形式产出。此种类型K含量偏低。

4 蒸发岩地球化学特征

库车坳陷KL4井岩屑蒸发岩含钾层段化学分析数据见表2。

蒸发岩系中钾含量的多少不仅能作为找钾的直接指标,还可以作为判断成钾有利层位的重要线索,钾、镁等离子的含量可作为直接找钾的地球化学标志(陈郁华等,1998;吴坤等,2014)。除此之外,钾氯系数($10^3 \text{ K}^+/\text{Cl}^-$)、镁氯系数($10^3 \text{ Mg}^{2+}/\text{Cl}^-$)、锂氯系数($10^3 \text{ Li}^+/\text{Cl}^-$)和锶钙系数($10^2 \text{ Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$)同样可以直接或间接地指示成钾条件和成钾背景。

在岩石化学组分变化趋势图(图4)中,自底部到顶部KL4井蒸发岩系中 K^+ 含量逐渐升高,指示有2个成钾层段,尤其在300多米厚的层段Ⅱ中 K^+ 含量整体较高。层段Ⅰ的钾富集深度区间为3463~3571 m,取样24块,蒸发浓缩 K^+ 含量最大值为0.308%,平均值为0.133%。层段Ⅱ的钾富集深度区间为2176~2533 m,取样21块, K^+ 含量达到本钻最高值1.273%,平均值0.695%。

镁盐的出现预示着卤水蒸发浓缩已经达到了后期阶段,钾镁盐通常是共生出现的,如杂卤石和光卤石。测试分析结果显示 Mg^{2+} 含量为0.009%~1.929%,主要富集层位在层段Ⅱ,与 K^+ 曲线基本保持同步,呈现良好的正相关性。 Li^+ 离子半径与 Mg^{2+} 相近,化学性质相似,因此在古盐湖蒸发晚期阶段Li常以类质同像置换镁盐矿物中的Mg, Li^+ 含量随着 Mg^{2+} 含量的增加而增加(谭红兵,2005)。这与本文所测结果一致。

Sr与Ca的化学性质相似,在蒸发岩系中均与硫酸盐有着密切联系,在一定条件下常常以类质同像形式相互置换,可为研究古沉积环境和成盐阶段提供重要信息(Deckker *et al.*, 1988;游海涛等,2002)。由于 CaSO_4 的溶解度较 SrSO_4 低,因而在古盐湖蒸发浓缩到硫酸盐阶段 CaSO_4 会先于 SrSO_4 沉淀,Sr却还是以离子形式存在于卤水中,因此膏岩的锶钙系数在一定程度上可以反映卤水的咸化程度。

5 讨论

5.1 矿物学特征讨论

综上钾盐矿物学特征分析,原生和次生钾石盐、钾石膏、钾芒硝和含钾石盐石膏等钾盐矿物及含钾矿物的发现,充分说明了库车坳陷古新世—始新世古盐湖蒸发作用强度很高,已经演化到了钾盐析出阶段。次生钾石盐是后期硫酸盐型卤水交代作用的结果,硫酸盐型卤水可能是淋滤上下层位或外围地层的含钾矿物的结果。原生和次生钾石盐、钾石膏和含钾石盐石膏矿物来自钻井含钾Ⅱ层段(图4),钾芒硝来自含钾Ⅰ层段。图3中的盐矿物、含钾盐矿物大部分赋存在层段Ⅱ,与表2和图4中高含钾量相对应,即图3a、3c、3e和3i中的钾石盐和钾石膏均产在层段Ⅱ中,图3g的钾芒硝(3565 m)产在层段Ⅰ中,该深度附近没有膏岩沉积,可能是次生形成的。

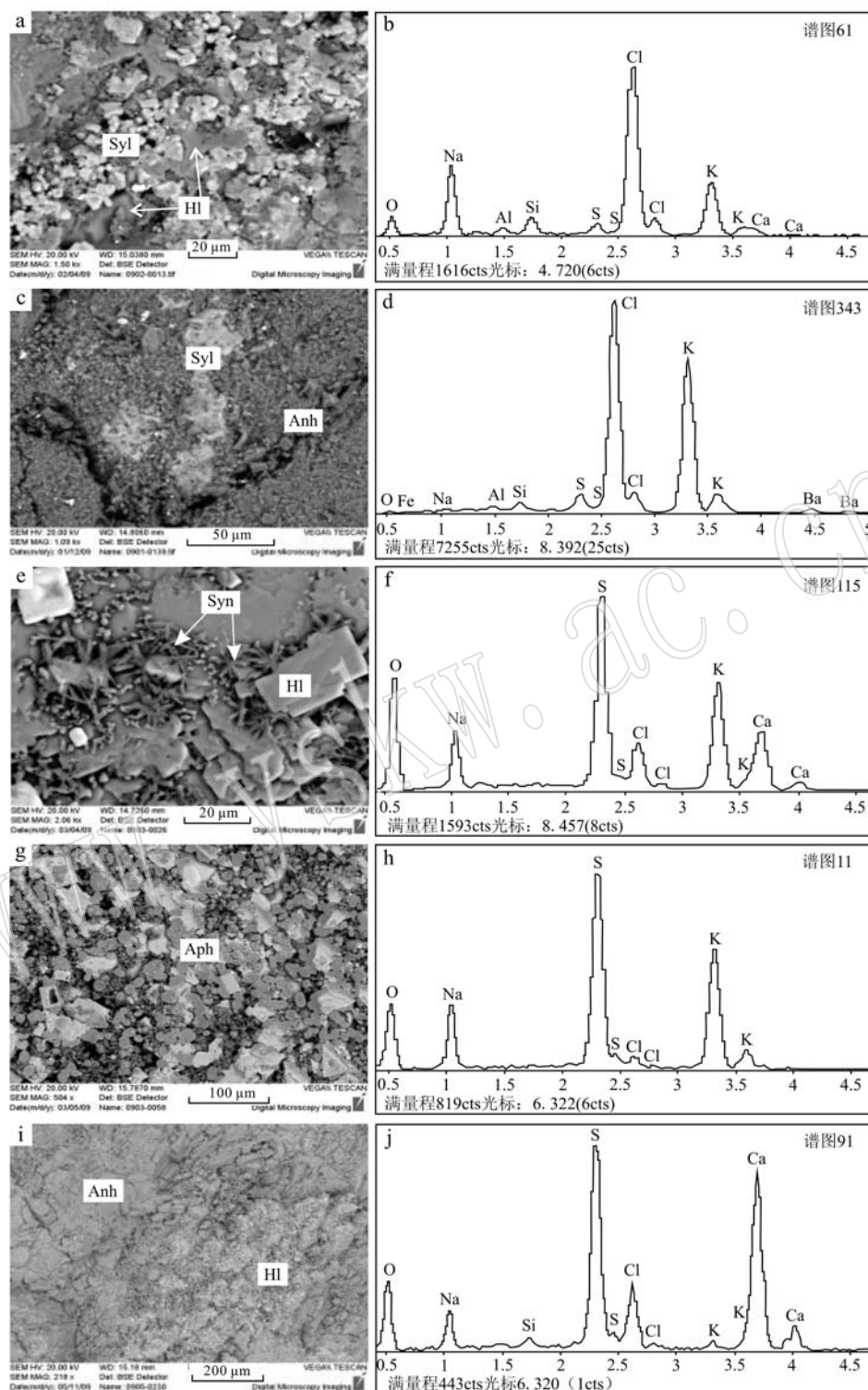


图3 KL4井钾盐矿物、含钾盐矿物扫描电镜照片及其能谱分析图

Fig. 3 SEM photographs of borehole KL4 potassium minerals, potassium-bearing minerals and their energy spectrum analysis graph
a, b—石盐中星点状白色钾石盐(KL4-2481 m)及钾石盐能谱图; c, d—深灰色硬石膏中灰白色溶蚀状钾石盐(KL4-2410 m)及钾石盐能谱图; e, f—石盐中灰色放射状钾石膏(KL4-2540 m)及钾石膏能谱图; g, h—灰色圆形、椭圆形、球状钾芒硝(KL4-3565 m)及钾芒硝能谱图;
i, j—含钾盐类矿物(KL4-2344 m)及含钾盐类矿物能谱图; Hl—石盐; Syl—钾石盐; Anh—硬石膏; Syn—钾石膏; Aph—钾芒硝
a, b—star-like white sylvine in halite (KL4-2481 m) and energy spectrum graph of sylvine; c, d—grayish white dissolution-like sylvine in dark gray anhydrite (KL4-2410 m) and energy spectrum graph of sylvine; e, f—gray radial syngenite in halite (KL4-2540 m) and energy spectrum graph of syngenite; g, h—gray round, oval, spherical apthitalite (KL4-3565 m) and energy spectrum graph of apthitalite; i, j—potassium-bearing saline minerals (KL4-2344 m) and its energy spectrum graph; Hl—halite; Syl—sylvine; Anh—anhydrite; Syn—syngenite; Aph—apthitalite

表 2 库车坳陷 KL4 井岩屑蒸发岩含钾层段化学分析

 $w_B/\%$

Table 2 Chemical analyses of rock residual evaporates potassium-bearing intervals from borehole KL4 in Kuqa depression

含钾	深度/m	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Sr ²⁺	Li ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	总和
含 钾 层 段 II	2 176	0.649	0.000	8.610	0.832	0.062	0.003	3.536	0.000	13.692
	2 181	0.886	0.000	4.192	1.460	0.013	0.004	7.907	0.000	14.462
	2 186	0.932	0.000	4.586	1.130	0.022	0.004	12.562	0.000	19.236
	2 218	0.551	0.000	8.122	0.899	0.041	0.003	33.381	0.000	42.997
	2 222	0.240	0.237	0.000	0.015	0.030	0.001	0.000	0.584	1.107
	2 243	0.545	0.000	8.719	0.742	0.040	0.003	35.770	0.000	45.819
	2 248	0.112	0.269	0.000	0.010	0.029	0.001	0.000	0.516	0.937
	2 276	0.901	0.000	5.405	1.116	0.024	0.003	17.754	0.000	25.203
	2 281	0.617	0.000	7.429	0.849	0.042	0.003	30.563	0.000	39.503
	2 298	0.899	0.000	3.906	1.394	0.010	0.004	12.554	0.000	18.767
	2 342	1.148	0.000	3.952	1.638	0.009	0.005	8.260	0.000	15.012
	2 345	0.916	0.000	4.732	1.476	0.016	0.004	12.569	0.000	19.713
	2 371	0.538	0.000	9.660	0.659	0.060	0.003	41.930	0.000	52.850
	2 383	0.611	0.000	9.699	0.738	0.045	0.003	42.134	0.000	53.230
	2 403	1.273	0.000	3.252	1.929	0.024	0.005	6.045	0.000	12.528
	2 408	0.286	0.000	11.968	0.429	0.065	0.002	54.062	0.000	66.812
	2 413	0.912	0.000	2.348	1.290	0.006	0.004	1.636	0.000	6.196
	2 461	0.522	0.000	9.348	0.458	0.050	0.002	41.751	0.000	52.131
	2 468	0.992	1.297	0.000	0.023	0.024	0.001	0.000	2.902	5.239
	2 507	0.657	0.913	0.000	0.023	0.018	0.001	0.000	2.006	3.618
	2 533	0.400	1.491	0.000	0.015	0.019	0.001	0.000	2.665	4.591
含 钾 层 段 I	3 463	0.174	0.000	12.667	0.163	0.079	0.002	58.925	0.000	72.010
	3 483	0.169	0.000	12.780	0.168	0.075	0.002	58.673	0.000	71.867
	3 487	0.296	0.000	11.792	0.275	0.081	0.002	60.736	0.000	73.182
	3 518	0.308	1.326	0.000	0.023	0.037	0.001	0.000	2.327	4.022
	3 519	0.227	2.188	0.000	0.010	0.038	0.001	0.000	3.584	6.048
	3 520	0.073	0.352	0.000	0.010	0.039	0.001	0.000	0.610	1.085
	3 522	0.125	1.752	0.000	0.011	0.044	0.001	0.000	2.819	4.752
	3 523	0.176	0.772	0.000	0.018	0.041	0.001	0.000	1.352	2.360
	3 524	0.233	3.086	0.000	0.014	0.041	0.001	0.000	4.977	8.352
	3 526	0.073	2.186	0.000	0.011	0.039	0.001	0.000	3.442	5.752
	3 534	0.066	0.273	0.000	0.012	0.039	0.001	0.000	0.481	0.872
	3 536	0.066	0.356	0.000	0.011	0.047	0.001	0.000	0.610	1.091
	3 550	0.068	0.455	0.000	0.015	0.039	0.001	0.000	0.764	1.342
	3 556	0.231	2.080	0.000	0.013	0.036	0.001	0.000	3.421	5.782
	3 560	0.100	1.661	0.000	0.011	0.043	0.001	0.000	2.655	4.471
	3 562	0.092	0.358	0.000	0.014	0.044	0.001	0.000	0.636	1.145
	3 564	0.068	0.269	0.000	0.009	0.040	0.001	0.000	0.477	0.864
	3 565	0.056 0	0.446	0.000	0.009	0.043	0.001	0.000	0.739	1.294
	3 566	0.072	6.767	0.000	0.011	0.041	0.001	0.000	10.514	17.406
	3 567	0.192	2.689	0.000	0.015	0.042	0.001	0.000	4.327	7.266
	3 568	0.064	0.793	0.000	0.009	0.039	0.001	0.000	1.282	2.188
	3 569	0.107	0.765	0.000	0.009	0.038	0.001	0.000	1.278	2.198
	3 570	0.055	7.293	0.000	0.012	0.038	0.001	0.000	11.312	18.711
	3 571	0.111	1.524	0.000	0.012	0.040	0.001	0.000	2.454	4.142

注：本文测试主要针对膏盐岩中钾、镁、锂等含量，由于石油钻井岩屑膏盐岩中不可溶物质（比如砂质、泥质）比较多，所以最后呈现的总含量较低。

5.2 地球化学特征系数指示意义

钾氯系数与 K^+ 含量曲线在图 4 中呈现良好的正相关性,二者共同确定 2 个成钾层段的位置。这间断出现的 2 次含钾高峰和自底到顶 K^+ 含量的变化与卤水淡化-咸化-淡化沉积旋回的发展旋回相吻合。镁氯系数与钾氯系数在垂向上的变化一致,进一步确定了含钾层段。

锂氯系数在垂向上的曲线变化趋势与钾氯系数和镁氯系数保持基本一致,仍然表现出 2 个层段的含钾趋势。 Li 、 Mg 和 K 元素相似的地球化学行为说明了它们来自同一物质母源。一般情况下石盐中 Li 和 Mg 含量甚微,对成钾的指示作用不大,但是在钾镁盐矿物中它们含量的变化可以指示含钾层位,用于成钾前景预测。一般来说, Sr 在膏岩中的含量高于盐岩,且其含量的高低可以为研究古盐湖演化历史或成熟度提供可靠的参数(刘群等,1987), $KL4$ 井中 Sr^{2+} 含量及锶钙系数在膏岩中达到峰值而在石盐岩中偏低(表 2、图 4)的情况与之吻合。相比古盐湖

演化历史较老的勤野井(膏岩中较低的 Sr 含量)(刘群等,1987),膏岩中高含量的 Sr 同时指示库车坳陷古盐湖演化历史比较新。

5.3 成钾指示

$KL4$ 井 K^+ 含量要高于库车坳陷其他 11 口钻井(吴坤等,2014)至少 1~2 个数量级,成钾条件十分有利,这是由于 $KL4$ 井更靠近库车坳陷古新世—始新世沉积中心,即也是蒸发浓缩中心(刘成林等,2013b),所以 $KL4$ 井具有一定的代表性。自下向上 K^+ 浓度逐渐升高,顶部层段 II 达到最高值 1.273%,并且 2 个含钾层段发现大量的钾盐矿物和含钾矿物,说明古盐湖演化已经达到钾盐析出阶段,具有良好的成钾远景。钾氯系数、镁氯系数和锂氯系数曲线变化特征十分相似,分别在层段 I 和 II 达到波峰值,指示 2 期浓缩成钾趋势。虽然层段 I 中 K^+ 浓度相比较低,但是钾氯系数、镁氯系数和锂氯系数达到波峰值,说明存在蒸发浓缩程度较高的背景,可能含钾卤水迁移到附近上下地层或外围地层中。

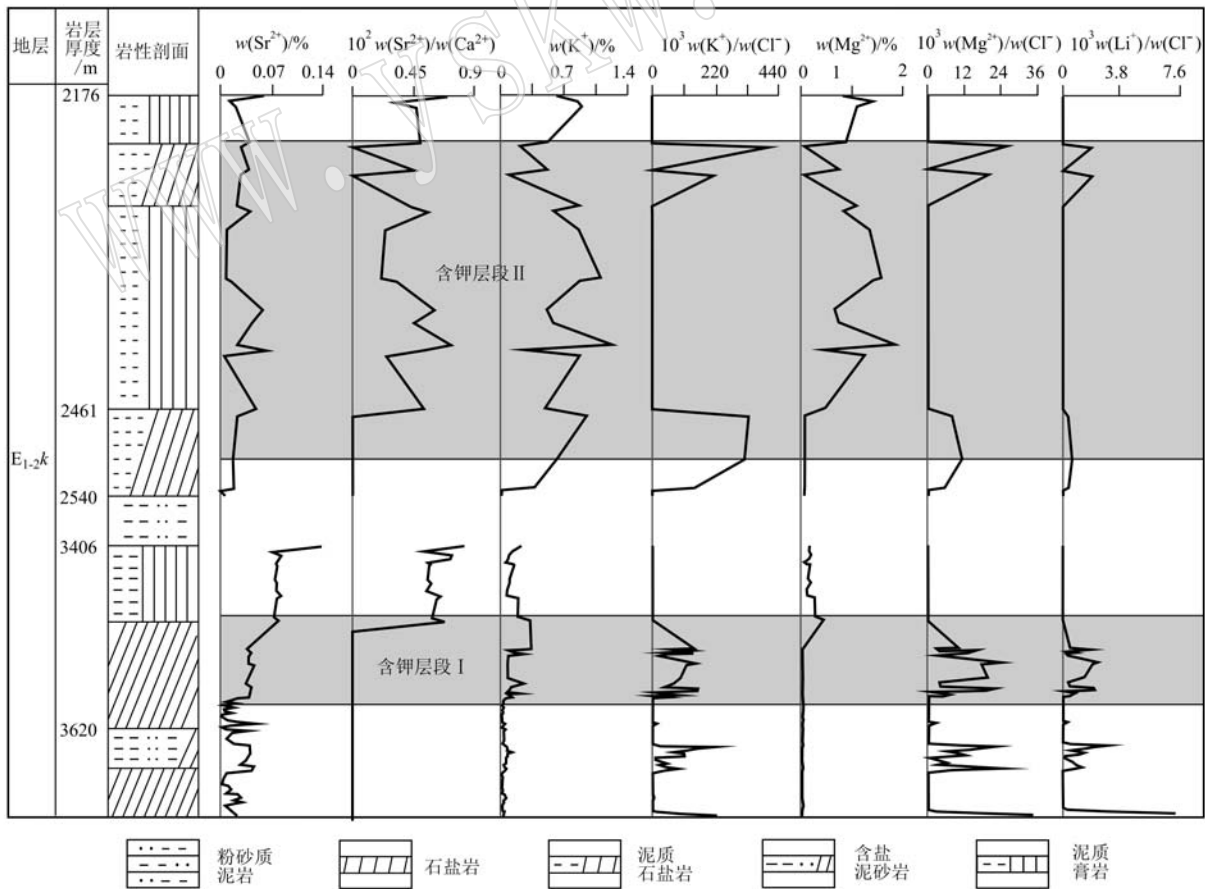


图 4 $KL4$ 井岩性剖面及化学组分变化趋势图
Fig. 4 Lithologic profile and chemical composition trend of borehole $KL4$

6 结论

(1) KL4 井古新统一始新统蒸发岩以沉积石盐岩为主,钾盐矿物包括原生和次生钾石盐;含钾矿物包括钾石膏、钾芒硝和含钾石盐石膏。其中原生钾石盐,遵循古海水蒸发析盐顺序,自形钾石盐形成时间晚于半自形-他形石盐;后生钾石盐可能是后期硫酸盐型卤水交代的结果,呈溶蚀状。

(2) 通过 KL4 井化学组分分析可知,自底部向顶部 K^+ 含量整体呈现逐渐富集的趋势,且在顶部(含钾层段 II) K^+ 浓度达到最大值 1.273%。结合 K^+ 、 Mg^{2+} 、钾氯系数、镁氯系数、锂氯系数和锶钙系数等参数特征,确定古盐湖演化过程中存在 2 次蒸发浓缩成钾趋势,遵循卤水淡化-咸化-淡化沉积旋回的特点。

(3) 综合 KL4 井含钾及钾盐矿物学特征和地球化学特征,确定含钾层段 I 和 II 具有成钾潜力,其中层段 II 成钾潜力更大。层段 I 虽然有良好的成钾背景,但是含钾卤水可能迁移到附近上下地层或外围地层中。

References

- Cao Yangtong, Liu Chenglin, Yang Haijun, *et al.* 2010. Identification and correlation of the Paleogene and Neogene evaporites sedimentary cycles in Kuqa Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Palaeogeography*, 12(1): 31~41(in Chinese with English abstract).
- Chen Shuping, Tang Liangjie, Qi Jiafu, *et al.* 2007. Roles of salt in deformation: Compression of the salt-related structures between Kuqa depression and Dongpu depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 745~754(in Chinese with English abstract).
- Chen Yuhua, Yuan Heran and Du Zhiyue. 1998. Discovery and study on Ordovician potash salt horizons in northern Shanxi[J]. *Geological Review*, 44(1): 100~106(in Chinese with English abstract).
- Deckker P D, Chivas A R, Shelley J M G, *et al.* 1988. Ostracod shell chemistry: A new palaeoenvironmental indicator applied to a regressive/transgressive record from the Gulf of Carpentaria, Australia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 66(3): 231~241.
- Graham S A, Hendrix M S, Wang L B, *et al.* 1993. Collision success or basin of western China: Impact of tectonic inheritance on sand composition[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 105: 323~324.
- Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Lu Huafu, *et al.* 1992. Two kinds of long-range tectonic effects of Indo-Tibetan tectonic collision[A]. *Modern Geology Research Corpus(1)*[C]. Nanjing: Nanjing University Press, 81~91(in Chinese with English abstract).
- He Guangyu, Lu Huafu, Wang Liangshu, *et al.* 2003. Evidence for Paleogene extensive Kuqa Basin, Tarim[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences)*, 39(1): 40~45(in Chinese with English abstract).
- Lei Ganglin, Wang Xin, Wu Chao, *et al.* 2014. Characteristics and Deformation Mechanism of Salt Structures in Kuqa Depression, Tarim Basin[M]. Petroleum Industry Press(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Cao Yangtong, Yang Haijun, *et al.* 2013b. Discussion on Paleogene-Neogene environmental change of salt lakes in Kuqa Foreland Basin and its potash-forming effect[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 34(5): 547~558(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, *et al.* 2008a. Potassium mineral assemblages found and its significance in Tertiary rock salt strata of Kuqa Basin[A]. The 9th National Conference on Deposit [C]. Beijing: Geological Publishing House, 374~375(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Xuan Zhiqiang, *et al.* 2013a. Potassium mineral research progress in Paleogene evaporites of Kuqa Basin[J]. *Geological Review*, 59(2): 233~234(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Mili and Jiao Pengcheng. 2008b. The ancient evaporation basin potash mineralization possibility analysis and prediction in China[A]. The 9th National Conference on Deposit[C]. Beijing: Geological Publishing House, 368~369(in Chinese with English abstract).
- Liu Qun, Chen Yuhua, Li Yincui, *et al.* 1987. Mesozoic and Cenozoic Terrigenous Clastic-chemical Rock Type Salt Deposit in China[M]. Beijing Science and Technology Press, 63~67(in Chinese with English abstract).
- Lu H F, Howell D G, Jia D, *et al.* 1994. Rejuvenation of the Kuqa Foreland Basin, northern flank of the Tarim Basin, Northern China [J]. *International Geology Review*, 36: 1151~1158.
- Lu Huafu, Jia Dong, Cai Dongsheng, *et al.* 1996. Paleozoic tectonic evolution of Tarim and West Tianshan[A]. *Tarim Basin Petroleum Geology Research Progress*[C]. Beijing: Science Press, 235~245

- (in Chinese with English abstract).
- Ma W D, Ma H Z, Tan H B, *et al.* 2004. Geochemistry of brines from salt ore deposits in western Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geochemistry, 23(3): 238~244.
- Sun Xiaohong, Liu Chenglin, Xuan Zhiqiang, *et al.* 2010. The new discovery of natural mineral strontium chloride in Kuqa Basin, Xinjiang Province[J]. Geology of Chemical Minerals, 32(4): 211~215(in Chinese with English abstract).
- Tan Hongbing. 2005. Geochemical Research on Ancient Salt Rock and Prospect of Sylvite Deposit Formation in Western Tarim Basin[D]. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, 18~19(in Chinese with English abstract).
- Tang Liangjie, Jia Chengzao, Jin Zhijun, *et al.* 2003. Tertiary salt pillow structures in the central sector of the Kuqa foreland fold-and-thrust belt, Tarim Basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Geology, 38(3): 281~290(in Chinese with English abstract).
- Tang Min, Liu Chenglin and Jiao Pengcheng. 2009. Prognosis of potash resource quantity in Eocene rock salt strata of Kuqa Basin, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 28(4): 503~509(in Chinese with English abstract).
- Tang Min, Ren Yongguo and Cao Yangtong. 2012. Characteristics of evaporites sedimentary evolution in Paleogene-Neogene basin and analysis of available resources in Kuqa Basin[J]. Journal of Salt Lake Research, 20(3): 1~8(in Chinese with English abstract).
- Wang Xin, Wang Zhaoming, Xie Huiwen, *et al.* 2010. Cenozoic salt tectonics and physical models in the Kuqa depression of Tarim Basin[J]. China Sci. Sin. Terrae, 40(12): 1 655~1 668(in Chinese with English abstract).
- Wu Guanghui, Cai Zhenzhong, Zhao Kuanzhi, *et al.* 2006. Salt tectonic formation mechanism discussion in Kuqa depression of Tarim Basin[J]. Xinjiang Geology, 24(2): 182~186(in Chinese with English abstract).
- Wu Guanghui, Wang Zhaoming, Liu Yukui, *et al.* 2004. Kinematics characteristics of the Kuqa depression in the Tarim Basin[J]. Geological Review, 50(5): 476~483(in Chinese with English abstract).
- Wu Kun, Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, *et al.* 2014. Geochemical characteristics and ore-prospecting indicators of salt-bearing series in No. 1 exploratory drill hole of Kuqa Basin, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 33(5): 1 011~1 019(in Chinese with English abstract).
- Xi Binbin, Qian Yixiong, Shi Weijun, *et al.* 2015. The characteristics of primary inclusions in halite in Bachu uplift of Tarim Basin and their implications for paleo-temperature: A case study of well Bt5[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 34(1): 79~86(in Chinese with English abstract).
- Xing Wanli, Liu Chenglin, Wang Anjian, *et al.* 2013. Analysis of petrology, mineralogy and K-forming environment of Paleogene evaporites in Kuqa Foreland Basin: A case study of drill hole DZK01[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(5): 559~566(in Chinese with English abstract).
- Xu Jianxin, Ma Haizhou, Yang Laisheng, *et al.* 2006. Paleogene and Neogene tectonic environment and sedimentation of evaporite in Kuqa Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(2): 227~235(in Chinese with English abstract).
- You Haitao, Cheng Rihui and Liu Changling. 2002. Paleosalinity recovery method reviewed[J]. World Geology, 21(2): 111~117(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chaojun and Tian Zaiyi. 1998. Tertiary salt structures and hydrocarbons in Kuqa depression of Tarim Basin[J]. Acta Petroli Sinica, 19(1): 6~11(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hua, Liu Chenglin, Cao Yangtong, *et al.* 2013. A tentative discussion on the time and the way of marine regression from Tarim Bay during the Cenozoic[J]. Acta Geoscientica Sinica, 34(5): 577~584(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹养同, 刘成林, 杨海军, 等. 2010. 新疆库车盆地古近系-新近系蒸发岩沉积旋回识别及对比[J]. 古地理学报, 12(1): 31~41.
- 陈书平, 汤良杰, 漆家福, 等. 2007. 盐在变形中的作用: 库车坳陷与东濮坳陷盐构造对比研究[J]. 地质学报, 81(6): 745~754.
- 陈郁华, 袁鹤然, 杜之岳. 1998. 陕北奥陶系钾盐层位的发现与研究[J]. 地质论评, 44(1): 100~106.
- 何光玉, 卢华复, 王良书, 等. 2003. 塔里木盆地库车地区早第三纪伸展盆地的证据[J]. 南京大学学报(自然科学), 39(1): 40~45.
- 郭令智, 施央申, 卢华复, 等. 1992. 印藏碰撞的两种远距离构造效应[A]. 现代地质学研究文集(上)[C]. 南京: 南京大学出版社, 81~91.
- 雷刚林, 汪 新, 吴 超, 等. 2014. 塔里木盆地库车坳陷盐相关构造特征及变形机理[M]. 石油工业出版社.
- 刘成林, 曹养同, 杨海军, 等. 2013b. 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.

- 刘成林, 焦鹏程, 陈永志, 等. 2008a. 库车盆地第三系岩盐地层钾矿物组合发现及其意义[A]. 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, 焦鹏程, 宣之强, 等. 2013a. 库车盆地古近系蒸发岩中钾盐矿物研究进展[J]. 地质论评, 59(2): 233~234.
- 刘成林, 王弭力, 焦鹏程. 2008b. 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.
- 刘群, 陈郁华, 李银彩, 等. 1987. 中国中、新生代陆源碎屑-化学岩型盐类沉积[M]. 北京科学技术出版社, 63~67.
- 卢华复, 贾东, 蔡东升, 等. 1996. 塔里木和西天山古生代板块构造演化[A]. 塔里木盆地石油地质研究新进展[C]. 北京: 科学出版社, 235~245.
- 孙小虹, 刘成林, 宣之强, 等. 2010. 库车盆地天然氯化钾矿物的发现[J]. 化工矿产地质, 32(4): 211~215.
- 谭红兵. 2005. 塔里木盆地西部古盐岩地球化学与成钾预测研究[D]. 中国科学院研究生院, 18~19.
- 汤良杰, 贾承造, 金之钧, 等. 2003. 库车前陆褶皱冲断带中段第三系盐枕构造[J]. 地质科学, 38(3): 281~290.
- 唐敏, 刘成林, 焦鹏程. 2009. 库车盆地古近纪岩盐层中钾盐资源量预测研究[J]. 矿床地质, 28(4): 503~509.
- 唐敏, 任永国, 曹养同. 2012. 库车盆地古近纪-新近纪蒸发岩沉积演化特征及其资源效应初步探讨[J]. 盐湖研究, 20(3): 1~8.
- 汪新, 王招明, 谢会文, 等. 2010. 塔里木库车坳陷新生代盐构造解析及其变形模拟[J]. 中国科学: 地球科学, 40(12): 1655~1668.
- 郭光辉, 蔡振中, 赵宽志, 等. 2006. 塔里木盆地库车坳陷盐构造成因机制探讨[J]. 新疆地质, 24(2): 182~186.
- 郭光辉, 王招明, 刘玉魁, 等. 2004. 塔里木盆地库车坳陷盐构造运动学特征[J]. 地质论评, 50(5): 476~483.
- 吴坤, 刘成林, 焦鹏程, 等. 2014. 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[J]. 矿床地质, 33(5): 1011~1019.
- 席斌斌, 钱一雄, 施伟军, 等. 2015. 塔里木盆地巴楚隆起岩盐中原生包裹体特征及意义——以巴探5井为例[J]. 岩石矿物学杂志, 34(1): 79~86.
- 邢万里, 刘成林, 王安建, 等. 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.
- 许建新, 马海州, 杨来生, 等. 2006. 库车盆地古近纪和新近纪构造环境与蒸发岩沉积[J]. 地质学报, 80(2): 227~235.
- 游海涛, 程日辉, 刘昌岭. 2002. 古盐度复原法综述[J]. 世界地质, 21(2): 111~117.
- 张朝军, 田在艺. 1998. 塔里木盆地库车坳陷第三系盐构造与油气[J]. 石油学报, 19(1): 6~11.
- 张华, 刘成林, 曹养同, 等. 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.