



移动阅读

赵世民, 刘治成, 张律, 等, 2023. 四川盆地广安构造三叠系深藏杂卤石地质特征及找钾启示[J]. 沉积与特提斯地质, 43(1): 117-129. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10006](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10006)

ZHAO S M, LIU Z C, ZHANG L, et al., 2023. Geological characteristics and implications for potassium prospecting of Triassic deep polyhalite, Guang'an structure, Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(1): 117-129. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10006](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2022.10006)

四川盆地广安构造三叠系深藏杂卤石地质特征及找钾启示

赵世民¹, 刘治成^{2*}, 张律², 杨 舫¹, 曾成杰¹, 雷 琴¹

(1. 四川省地质矿产勘查开发局一一三地质队, 四川 泸州 646000; 2. 四川省国土资源科学技术研究院(四川省卫星应用技术中心), 四川 成都 610045)

摘要: 广安构造作为四川盆地重要的隐伏含钾构造之一, 下—中三叠统雷口坡组—嘉陵江组杂卤石广泛发育。前人对杂卤石的找钾启示研究较少, 杂卤石是否是易溶性钾盐的找矿标志尚无定论。本文通过野外调查、老井复查, 结合广安构造 ZK1 井测录井、岩心样品测试等资料开展杂卤石地质条件及找钾启示研究, 以期为广安地区下一步钾盐勘探开发提供参考。ZK1 井钻遇杂卤石矿(化)层 6 层, 单层厚度最大为 7.03 m, 累计厚度可达 11.21 m。杂卤石主要呈块状、浸染状与硬石膏共生, 少量条带状、簇状、星点状。镜下可见杂卤石呈板状、纤维状、它形粒状、放射状、团块状等。含钾剖面序列为“硬石膏—杂卤石—硬石膏”, KCl 最高品位 22.9%, 平均品位 14.57%, 石盐层不发育。研究认为 ZK1 井杂卤石以后生交代成因为主, 少量原生成因。在靠近盐湖中心区域, 硬石膏层相对较薄的凹陷地段, 很可能是易溶性钾盐的找矿突破点。

关键词: 杂卤石; 钾盐; 三叠系; 广安构造; 四川盆地

中图分类号: P619.211

文献标识码: A

Geological characteristics and implications for potassium prospecting of Triassic deep polyhalite, Guang'an structure, Sichuan Basin

ZHAO Shimin¹, LIU Zhicheng^{2*}, ZHANG Lü², YANG Xian¹, ZENG Chengjie¹, LEI Qin¹

(1. 113 Geological Team of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Luzhou 646000, China; 2. Sichuan Institute of Land Science and Technology (Sichuan Satellite Application Technology Center), Chengdu 610045, China)

Abstract: The Guang'an Anticline is one of the important hidden potassium bearing structures in Sichuan Basin. Polyhalites occurs widespread in the Leikoupo and Jialingjiang Formations of lower-middle Triassic. There are few previous studies on implications of potassium prospecting of polyhalite, and whether polyhalite is a prospecting indicator of soluble sylvite is still a debated topic. In this work, based on field investigation and previous well review, combined with the data of logging and core testing of ZK1 well in Guang'an structure, the geological conditions and implications of potassium prospecting of polyhalite are studied, in order to provide reference for the next sylvite exploration and development in Guang'an area. Six mineralized polyhalite layers are intersected by ZK1, with a maximum thickness of 7.03 m and a total thickness of 11.21 m. Polyhalite is mainly massive, disseminated with a small amount of banded, clustered and star shaped, and the paragenous mineral is anhydrite. Under the microscope, the polyhalite occurs as plate, fibrous, anhedral granular, radial and crumbly, etc. The potassium bearing sequence is interbedding of anhydrite and polyhalite

收稿日期: 2021-11-28; 录用日期: 2022-02-26; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 邓奇

作者简介: 赵世民(1966—), 男, 教授级高级工程师, 现从事钾盐调查评价工作。E-mail: sc113@foxmail.com

通讯作者: 刘治成(1983—), 男, 博士研究生, 从事矿产勘查及成矿规律研究。E-mail: lzc_15@126.com

资助项目: 四川省政府性投资地质勘查项目“四川省广安市广安区大安钾盐(杂卤石)远景评价”

with the highest grade of KCl 22.9% (average grade 14.57%), and the halite layer is not developed. The results suggest that the polyhalite in ZK1 is mainly derived of epigenetic metasomatism with little primary origin. In the areas close to the central facies of the salt lake, the depression with relatively thin anhydrite layer is key target of soluble sylvite.

Key words: polyhalite; sylvite; triassic; Guang'an structure; Sichuan Basin

0 引言

钾元素作为肥料的三要素之一,在农业生产中有着不可替代的作用(孙爱文等, 2009; 郑绵平等, 2010; 龚大兴等, 2016; 黄长兵, 2017)。截至 2020 年底,全球钾盐(KCl)储量 129×10^8 t, 俄罗斯、加拿大、白俄罗斯、土库曼斯坦四国储量占全球 81.18%, 中国钾盐储量 3.17×10^8 t, 占全球 2.46%(陈毓川等, 2021^①)。

一方面我国钾资源紧缺,长期依赖进口(郑绵平等, 2010); 另一方面四川盆地三叠系隐伏性钾盐资源丰富(黄长兵, 2017)。川中南充—广安地区一直被认为是成盐条件最好、成钾潜力最大的地区(张榕根和藏瑞霞, 1976^②)。由于埋藏深,找矿难度大,固体可溶性钾盐找矿没有突破,仅于宣汉黄金口、邛崃平落坝等地发现了富钾卤水(龚大兴等, 2016)。川中地区固态富钾矿物主要为埋深超过 2 500 m 的杂卤石、无水钾镁矾等,勘探开发难度较大(钟林秀, 2017; 侯学文等, 2020)。广安构造作为四川盆地重要的隐伏含钾构造之一,油气钻井密布,为钾盐勘探工作提供了便利条件(陈科贵, 2013; 龚大兴等, 2016)。1983 年—1985 年,原四川石油管理局在广安构造施工的广参 2 井发现了杂卤石,未见富钾卤水的报告。前人通过油气钻井、测录井资料对广安地区三叠系钾盐开展了综合研究(陈科贵等, 2013; 龚大兴等, 2016; 黄长兵, 2017; 李文博, 2018; 侯学文等, 2020),但三叠系层位划分体系不同,蚀变含砾玻屑沉凝灰岩(绿豆岩)认识分歧,杂卤石成因探讨不一,易溶性钾盐勘探工作尚未实现突破。

2021 年,四川省地矿局 113 地质队在广安构造北翼近核部实施的杂卤石探井 ZK1 井,完成了下—中三叠统嘉陵江组五段上亚段—雷口坡组一段下亚段(T_2^{j5-2} — T_2^{l1-1})杂卤石矿(化)层取心及相关分析测试工作。本文在 ZK1 井杂卤石岩石矿物学和地球化学特征分析研究的基础上,结合区内油气钻井资料。探讨广安构造三叠系杂卤石成因,总结广安构造三叠系杂卤石型钾盐富集规律,以期四

川盆地三叠系钾盐矿下一步找矿工作提供重要启示。

1 区域地质背景

早—中三叠世,包括四川盆地在内的上扬子地台,是一个不断上升的碳酸盐岩—蒸发岩台地(翟光明, 1989; 邓康龄, 1992; 林耀庭等, 2003, 2008; 马永生等, 2009; 孟昱璋, 2011)。早三叠世,四川盆地西高东低,陆源碎屑来自西侧的康滇古陆。盆地西部以河流相、滨海相碎屑岩为主,向东逐渐发育泥灰坪相泥质岩和灰岩。中三叠世,盆地周缘古陆逐渐抬升,形成东高西低的古地理格局,促使沉积中心迁移至盆地西部(郭正吾等, 1996)。雷口坡末期,泸州—开江古隆起不断上升露出水面,川东地区开始向陆相演变,沉积了大套红色碎屑岩。晚三叠世,海水从东向西渐次退出,四川盆地结束海相沉积历史(王东升和田荣和, 1985; 邓康龄, 1992; 郭正吾等, 1996; 孟昱璋, 2011, 龚大兴, 2016)。

总的来说, T_2^j — T_2^l 时期,四川盆地盐盆沉积中心由川东向西南迁聚,形成封闭—半封闭海湾型环境,湖盆咸化程度逐渐增大,川中一带膏盐层广泛发育(李朝阳等, 1991; 郑绵平等, 2010; 龚大兴, 2016)。成盐期结束后,四川盆地经历了印支运动、燕山运动及喜山构造运动,形成了现今的构造格局(翟光明, 1989; 邓康龄, 1992; 郭正吾等, 1996; 童崇光, 2000; 林耀庭等, 2003)。

广安构造位于川中古隆中斜平缓构造带的东北部,地处乐山—龙女寺古隆起—华蓥山褶皱带与大巴山褶皱带的交汇部位(翟光明, 1989; 郭正吾等, 1996; 夏凌等, 2006; 车国琼等, 2007; 李登华等, 2007; 付斌等, 2009)。构造范围东以华蓥山为界、南至武胜、西到南充、北抵营山—渠县一带(图 1a)。现今的广安构造形态为一东西走向的椭圆形短轴背斜圈闭,东端轴线(延长线)近与华蓥山走向正交,长轴 16.60~28.34 km,短轴 10~12 km,卷入面积约 200 km²(周长武等, 1980^③)。中国石油天然气集团有限公司调查结果显示,广安构造圈闭从震旦系顶界至侏罗系连续发育,由深至浅构造幅度逐渐变小,地表为南北两翼倾角 2°~8°的宽缓背斜(图 1b)。

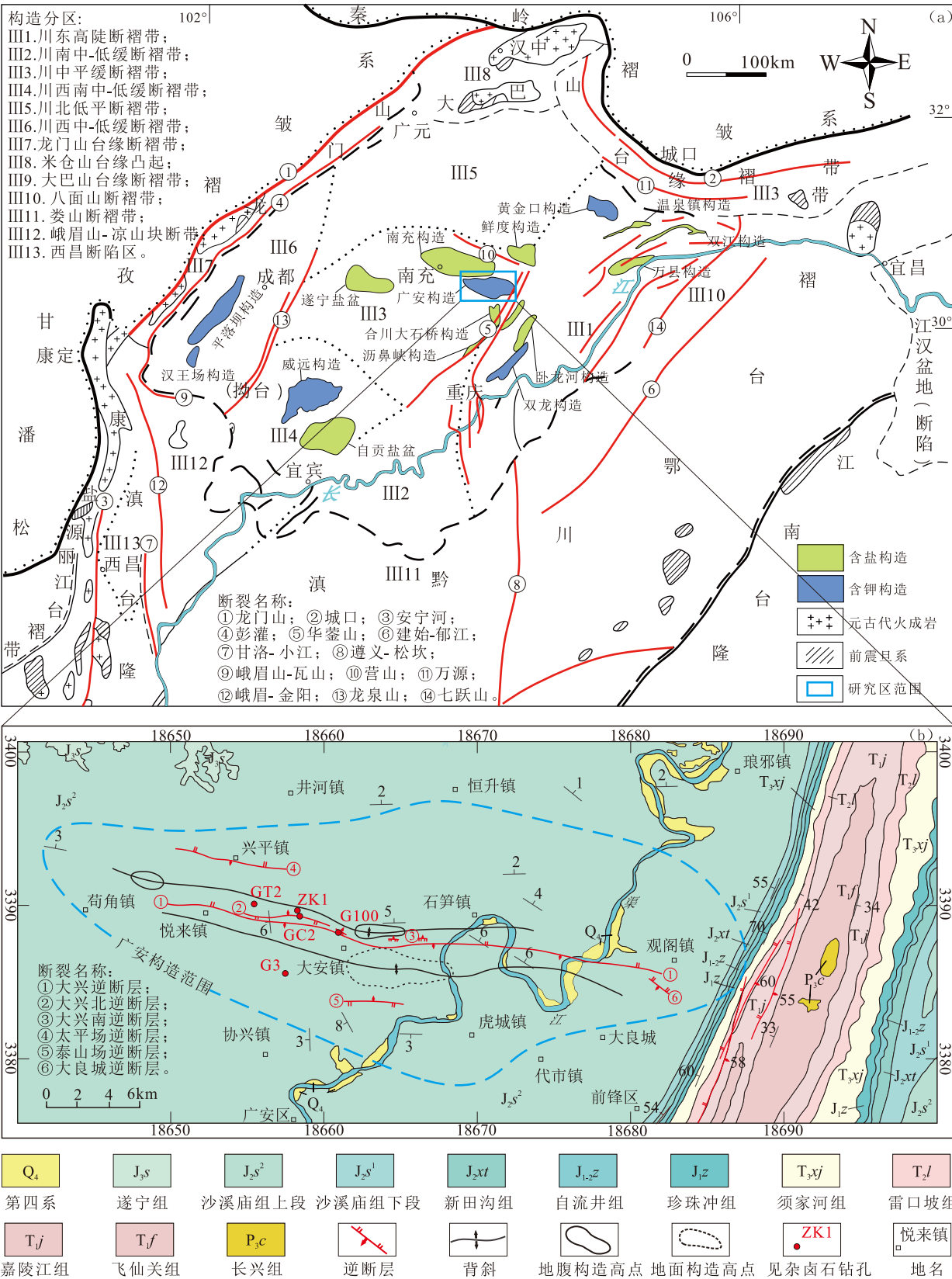


图 1 四川盆地构造单元分区图 (a. 据翟光明, 1989; 童崇光, 2000; 孟昱璋, 2011; 龚大兴等, 2016 修改) 和广安构造区区域地质简图 (b. 据周长武等, 1980^③)

Fig. 1 Tectonic zoning map of Sichuan Basin (a. after Zhai, 1989; Tong, 2000; Meng, 2011; Gong et al., 2016) and regional geological map of Guang'an (b. after Zhou et al., 1980^③)

广安构造三叠系断裂发育,断距下大上小,延伸至地表消失。虽然 ZK1 井未发现对杂卤石矿层造成明显破坏的断裂,但在下一步的找盐找钾过程中仍须重视地腹断裂对矿层的影响。

2 ZK1 井三叠系蒸发岩剖面特征

由于前人对区域标志层“绿豆岩”的认识分歧,导致雷口坡组底界划分不一致(黄东等,2011)。一是 T_2l^{1-2} 内部发育少量灰绿色白云质泥页岩,与“绿豆岩”特征相似,极易混淆;二是从沉积旋回、咸化阶段以及岩性组合来看,“绿豆岩”上下的 T_j^{5-2} — T_2l^{1-1} 属于连续的蒸发岩沉积,作为早—中三叠世等时界面的“绿豆岩”并不是一个大的沉积阶段的起点。因此,张榕根和藏瑞霞(1976)^②在做含盐韵律分析时,从沉积旋回的角度将 T_2l 底界划分在原 T_2l^{1-1} 与 T_2l^{1-2} 分界面上,中国石油天然气集团有限公司部署于广安构造西段北翼的 GT2 井亦采用了以上划分标准。

通过 ZK1 井岩心分析测试、地球物理测井解释,结合区内连井剖面对比,综合判定 ZK1 井井深 2 999.85~3 000.69 m 的浅灰白—灰绿色蚀变含砾玻屑沉凝灰岩为区域标志层“绿豆岩”(图 2a、b)。本文雷口坡组沿用“绿豆岩”底界划分方案,将全区稳定发育的浅灰白—灰绿色蚀变含砾玻屑沉凝

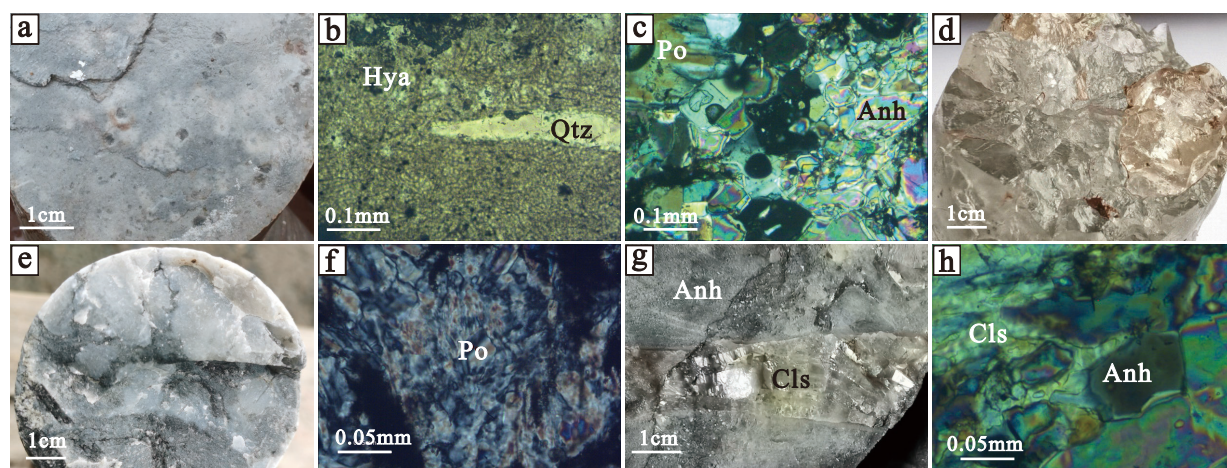
灰岩底界作为雷口坡组底界,但做沉积旋回分析时不受此约束(图 3;图 4)。

ZK1 井下—中三叠统嘉陵江组—雷口坡组(T_j — T_2l)蒸发岩广泛发育,沉积环境主要为开阔台地、局限台地、蒸发台地(图 3)。嘉陵江组二段(T_j^2)时期为三叠纪第一次海退时期,沉积大段膏湖相膏岩。嘉陵江组三段(T_j^3)时期再次海侵,沉积开阔台地相厚层灰岩。经历多次海水进退、蒸发浓缩后,于嘉陵江组五段上亚段(T_j^{5-2})中期开始演变为蒸发台地相的盐盆微相,发育少量石盐及多层杂卤石。至雷口坡组三段中亚段(T_2l^{3-2})沉积了多套厚层石盐后,沉积环境逐渐向陆相演变。

三叠系主要含盐层段为雷口坡组三段中亚段(T_2l^{3-2})、嘉陵江组五段上亚段—雷口坡组一段下亚段(T_j^{5-2} — T_2l^{1-1})、嘉陵江组四段上亚段(T_j^{4-2})。

① T_2l^{3-2} 含盐段,该段以无色石盐为主,夹浅灰白色硬石膏,中部为浅灰色泥晶灰岩、浅灰色灰质硬石膏、灰白色硬石膏、无色石盐呈不等厚互层。ZK1 井 T_2l^{3-2} 发育两层石盐(图 3),单层厚度最大 10.15 m,总厚 19.75 m。

② T_j^{5-2} — T_2l^{1-1} 含盐段,该含盐段是 T_j^{5-1} 海侵之后的又一次成盐过程,由于 T_j^{5-1} 海侵持续短暂, T_j^{5-2} — T_2l^{1-1} 含盐段达到了很高的咸化程度。ZK1 井揭露 T_j^{5-2} — T_2l^{1-1} 为一套以白云岩、硬石膏



a. 雷口坡组底部蚀变含砾玻屑沉凝灰岩(绿豆岩),井深 3 000.00 m; b. 蚀变含砾玻屑沉凝灰岩发育长条状石英,井深 3 000.10 m, (—); c. 微含杂卤石硬石膏,井深 3 007.50 m, (+); d. 无色透明石盐,井深 3 034.50 m; e. 高品位灰白色杂卤石,井深 2 980.50 m; f. 板状—纤维状杂卤石,井深 2 979.70 m, (+); g. 硬石膏内发育浅黄绿色天青石(硫酸锶),井深 3 005.00 m; h. 含天青石硬石膏,井深 3 004.50 m, (+)。Anh—硬石膏; Po—杂卤石; Cls—天青石; Qtz—石英; Hya—蚀变玻屑。

图 2 ZK1 井 T_j^{5-2} — T_2l^{1-1} 含盐段主要岩矿特征图

Fig. 2 Rock and mineral characteristics of salt bearing section (T_j^{5-2} — T_2l^{1-1}) in ZK1

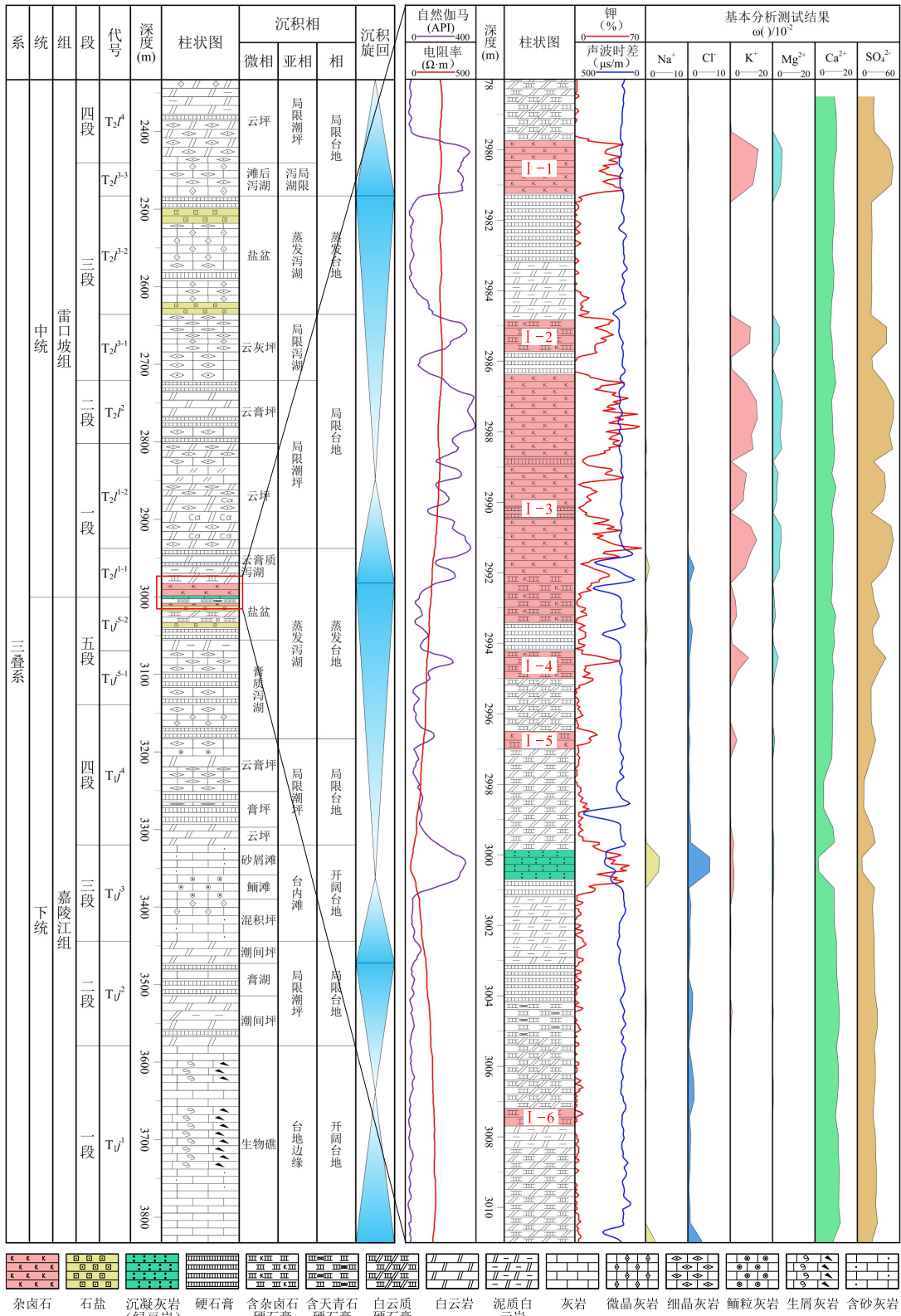


图3 广安构造 ZK1 井 (T_{1j}—T_{2l}) 沉积相和杂卤石赋存情况综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive histogram of sedimentary facies (T_{1j}—T_{2l}) and polyhalite occurrence in ZK1, Guang'an structures

(图 2c)、石盐(图 2d)为主的碳酸盐—硫酸盐—氯化物组合(图 3), 夹杂卤石(图 2e、f), 见少量天青石 (图 2g、h)。
T_{2l}¹⁻¹ 中、上部为灰色、深灰色泥质白云岩、白

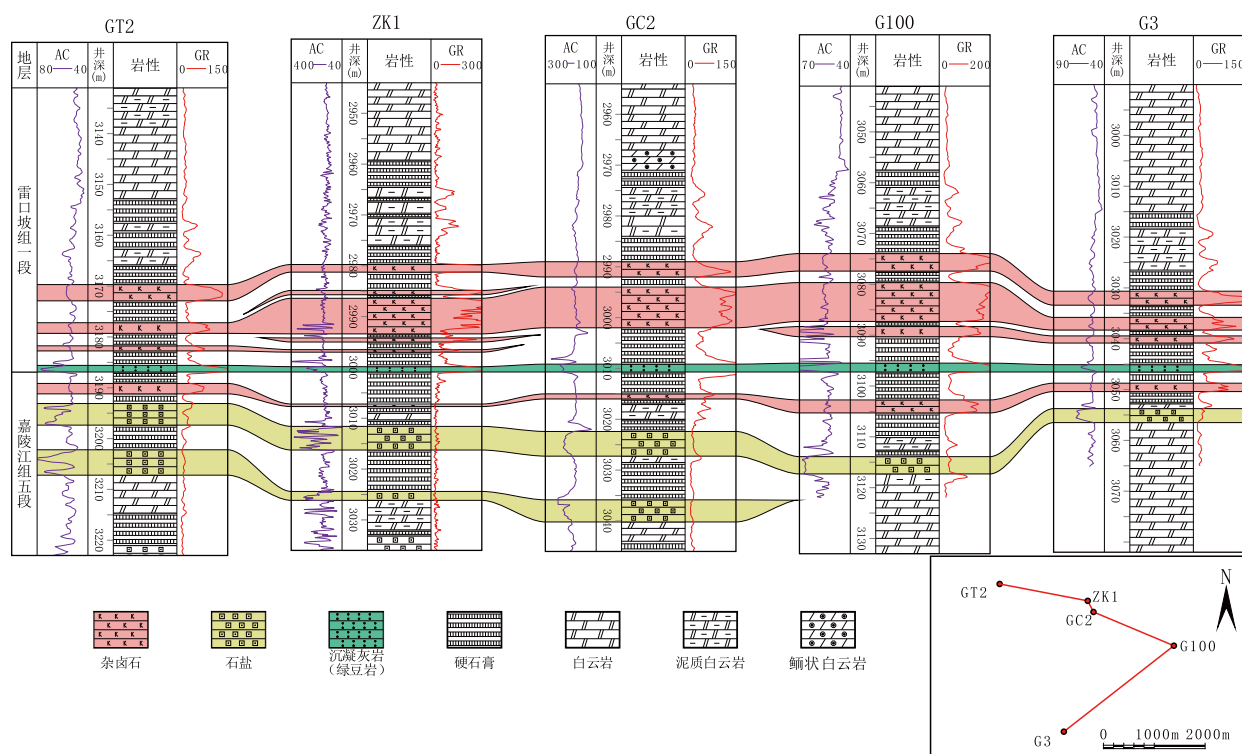


图4 广安构造三叠系见杂卤石钻孔连井剖面图

Fig. 4 Connection drillhole section of Triassic polyhalite, Guang'an Structure

云岩为主,夹灰白色硬石膏。下部灰白色硬石膏为主,夹灰白色杂卤石,白云岩局部含膏质或去白云化。ZK1井 T_2^{l-1} 底部发育 0.84 m 厚“绿豆岩”(图 2a; 图 3; 图 4),岩性为浅灰白—灰绿色蚀变含砾玻屑沉凝灰岩(图 2a、b)。

T_j^{5-2} 上部以深灰色硬石膏为主,夹浅灰色细—粉晶白云岩,含少量微含杂卤石硬石膏;中部浅灰、灰色泥晶、细粉晶白云岩;下部以无色石盐为主,夹灰白色硬石膏、深灰色细粉晶白云岩。白云岩局部含灰质,可见膏化,部分硬石膏微含杂卤石。

T_j^{5-2} — T_2^{l-1} 含盐段主要岩性组合与“宣汉黄金口”、“川东长寿地区”相似(仲佳爱等, 2018)。

③ T_j^{4-2} 含盐层段, T_j^{4-2} 是继 T_j^{3-4} 海侵之后的第一次大规模海退阶段。 T_j^{4-2} 含盐层段岩性以灰白色硬石膏、无色石盐为主,夹灰色粉晶白云岩,白云岩中局部可见黑色有机质,石盐层位于 T_j^{4-2} 中上部。ZK1 井 T_j^{4-2} 层段石盐不发育,主要以大段硬石膏为主(图 3)。

3 杂卤石特征

3.1 杂卤石分布特征

广安构造三叠系杂卤石主要赋存于“绿豆岩”

上下的 T_2^{l-1} — T_j^{5-2} 层段。ZK1 井揭露杂卤石矿(化)层 6 层,累计厚度 11.21 m(表 1; 图 3)。其中 T_2^{l-1} 杂卤石累计厚度 10.71 m, T_j^{5-2} 测井、录井资料无杂卤石显示,通过连续采样分析测试发现, T_j^{5-2} 发育约 0.5 m 厚微含杂卤石硬石膏(表 1; 图 3)。纵向上,广安构造三叠系杂卤石层由下至上品位逐渐增高(表 1; 图 3)。反映出 T_2^{l-1} — T_j^{5-2} 时期海平面整体震荡海退,蒸发浓缩的过程。

平面上,根据区内油—气—钾钻井综合解释成果。区内“绿豆岩”标志层稳定发育,全区可对比。“绿豆岩”上下的杂卤石整体分布连续,部分分支间断的现象与小型盐盆沉积特征相吻合(图 4)。

三叠系杂卤石层沿广安构造核部呈条带状分布,东西展布较稳定,往南北(广安背斜两翼)快速减薄。靠近广安构造核部的 ZK1、GC2、C100 井杂卤石厚度明显大于两翼 GT2、G3 井(表 2; 图 4)。

ZK1 井 T_2^{l-1} — T_j^{5-2} 构造增厚明显。薄层状白云岩多发育小型层间断裂(图 5a);膏盐层受构造挤压应力作用产生塑性变形,局部可见鸟眼状构造(图 5b);部分层段小型揉皱发育导致局部岩心产状直立(图 5c)。笔者认为,后期构造作用是导致广安背斜核部杂卤石厚度增加的主要原因。

表 1 ZK1 井钻遇杂卤石矿层情况表
Table 1 Polyhalite layers intersected by ZK1

矿(化)层编号	地层代号	主要岩性	顶深/m	底深/m	厚度/m	KCl品位/%	工业类型
I -1	T_2l^{1-1}	杂卤石	2 979.74	2 981.24	1.5	22.92	硬石膏型杂卤石
I -2	T_2l^{1-1}	杂卤石	2 984.83	2 985.72	0.89	17.83	
I -3	T_2l^{1-1}	杂卤石	2 986.38	2 993.41	7.03	13.73	
I -4	T_2l^{1-1}	含白云石杂卤石硬石膏	2 994.21	2 995.00	0.79	11.46	
I -5	T_2l^{1-1}	含杂卤石硬石膏	2 996.50	2 997.00	0.50	5.91	
I -6	T_j^{5-2}	微含杂卤石硬石膏	3 007.19	3 007.69	0.5	0.39	

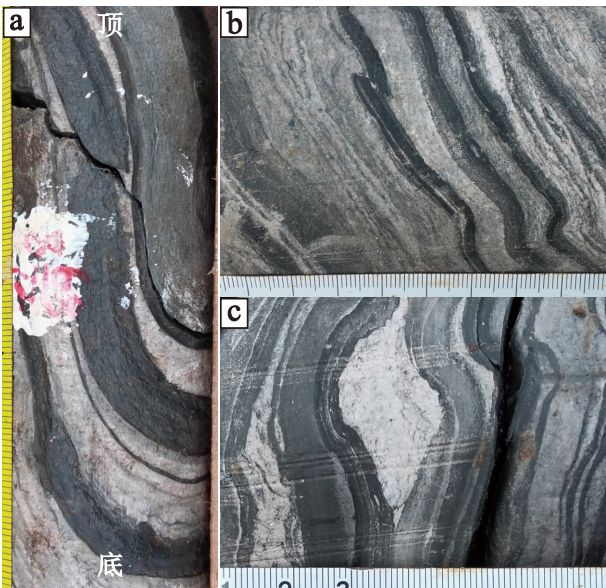
表 2 广安构造见杂卤石钻孔统计表
Table 2 Statistics of polyhalite in drillholes, Guang'an structure

井名	层段	厚度/m	累计厚度/m	构造位置
GT2	T_2l^{1-1}	6.22	8.24	广安构造北翼
	T_j^{5-2}	2.02		
ZK1	T_2l^{1-1}	10.71	11.21	
	T_j^{5-2}	0.50		
GC2	T_2l^{1-1}	11.00	12.00	广安构造核部
	T_j^{5-2}	1.00		
G100	T_2l^{1-1}	13.12	15.66	
	T_j^{5-2}	2.54		
G3	T_2l^{1-1}	6.66	8.32	广安构造南翼
	T_j^{5-2}	1.66		

3.2 杂卤石矿物学特征

广安构造三叠系杂卤石与硬石膏共生,ZK1 井钻遇多层石盐均不发育杂卤石。按杂卤石赋存形态划分,广安构造主要发育硬石膏型杂卤石。受钻井液影响,杂卤石岩心表面会形成厚度约 1 mm 的黄色薄壳(图 6a),可以直观地区别硬石膏和杂卤石。ZK1 井岩心显示,杂卤石主要为致密块状构造(图 6a)、浸染状(图 6b),少量条带状-肠状(图 6c)、星点状-簇状(图 6d)、团块状-鲕粒状(图 6e)、斑块状构造等(图 6f)。杂卤石新鲜面为无色—浅灰色调,粒径为 0.01~0.5 mm 不等,具二级蓝干涉色,二轴晶负光性。镜下可见杂卤石呈板状-放射状(图 7a、f)、纤维-放射状(图 7b、i)、它形粒状(图 7d)等,部分杂卤石颗粒包含硬石膏(图 7g、h)、白云石(图 7e)。可见杂卤石简单双晶(图 7k)及长轴放射状集合体,在岩石中呈团块状富集或充填于硬石膏间。

根据 ZK1 井岩心现场编录资料显示,块状杂卤石品位较高,层理不发育,主要分布在 I -1、I -2、



a. 岩心产状变形直立, 井深 2 996.00 m; b. 灰黑色白云石发育小型断裂, 井深 2 981.50 m; c. 岩心受挤压应力作用产生似眼状硬石膏, 井深 2 984.00 m。

图 5 ZK1 井膏岩层岩心宏观特征
Fig. 5 Macro characteristics of gypsum rock core in ZK1

I -3 矿(化)层的中上部。往矿(化)层顶、底板方向杂卤石品位逐渐降低,纵向上由下至上形成“星点状、簇状→团斑状、条带状→浸染状、致密块状”的渐变剖面(表 3)。ZK1 井杂卤石矿(化)层由上至下,亦是由致密块状至星点状渐变,I -6 矿(化)层仅在镜下发现星点状杂卤石。

3.3 样品及分析方法

ZK1 井对三叠系杂卤石矿(化)层及顶底板(T_j^{5-2} — T_2l^{1-1})进行连续取心,岩心直径 70 mm,取心长度 108.71 m,矿层及顶、底板采取率 90.4%。化学基本分析样采用四分之一劈心法取样,样品长度为 0.5 m,连续采样,样品加工方法按照《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T 0130.2—2006)执

表3 ZK1井 I-1 杂卤石矿层剖面组合特征表
Table 3 Comprehensive characteristics of I-1 polyhalite layers in ZK1

主要岩性	矿石构造	品位	层理发育程度	备注
硬石膏夹白云质条带	/	/	清晰	顶板
杂卤石岩	浸染状、致密块状	高	不发育	矿层
含杂卤石硬石膏	团斑状、条带状	中	模糊	矿层
微含杂卤石硬石膏	星点状、簇状	低	较清晰	矿层
白云石、硬石膏互层	/	/	清晰	底板

行。化学基本分析测试单位:四川省地矿局化探队;外检单位:青海省地质矿产测试应用中心。测试方法:等离子体发射光谱法;主要仪器:icap6300 等离子体光谱仪、Agilent7900 等离子体质谱仪;测试环境:温度 24℃,湿度 53%; K^+ 方法检出限为 0.03%,加标回收率在 90%~110% 之间。岩矿鉴定样品采用全心法取样,分层采取,主要采用薄片鉴定。岩矿鉴定测试单位:四川省地矿局化探队、四川省地矿局区调队。

3.4 地球化学特征

样品测试结果表明, T_1J^{5-2} — T_2I^{1-1} 层段, Ca^{2+} 含量由下至上呈轻微下降的趋势,除“绿豆岩”层明显降低外,整体变化不大(图 3)。杂卤石层段 K^+ 、 Mg^{2+} 含量呈正相关(图 3), SO_4^{2-} 在扣除 $CaSO_4$ 配矿占比后,亦与 K^+ 、 Mg^{2+} 含量呈正相关。ZK1 井杂卤石矿(化)层 K^+ 含量由下至上,呈阶段性增长趋势。说明在沉积环境整体咸化的过程中, T_2I^{1-1} — T_1J^{5-2} 时期发生了多次小规模补给淡化。

石盐中 K^+ 含量最低为 0.066%,最高为 0.095%,平均值 0.078%。而“绿豆岩”中 K^+ 含量为 1.17%~1.84%,平均 1.51%,换算 KCl 平均品位达到 2.87%。岩矿鉴定结果表明,“绿豆岩”顶、底板硬石膏内零星发育少量杂卤石颗粒。“绿豆岩”顶板 KCl 品位为 3.35%,底板 KCl 品位为 3.30%,均达到 KCl 边界品位 3%。但“绿豆岩”含钾顶底板厚度均小于 0.5 m,厚度极薄且 KCl 品位极低。推测为“绿豆岩”原生 K^+ 、 Mg^{2+} 离子与硬石膏化学沉积形成。

4 讨论

4.1 杂卤石成因

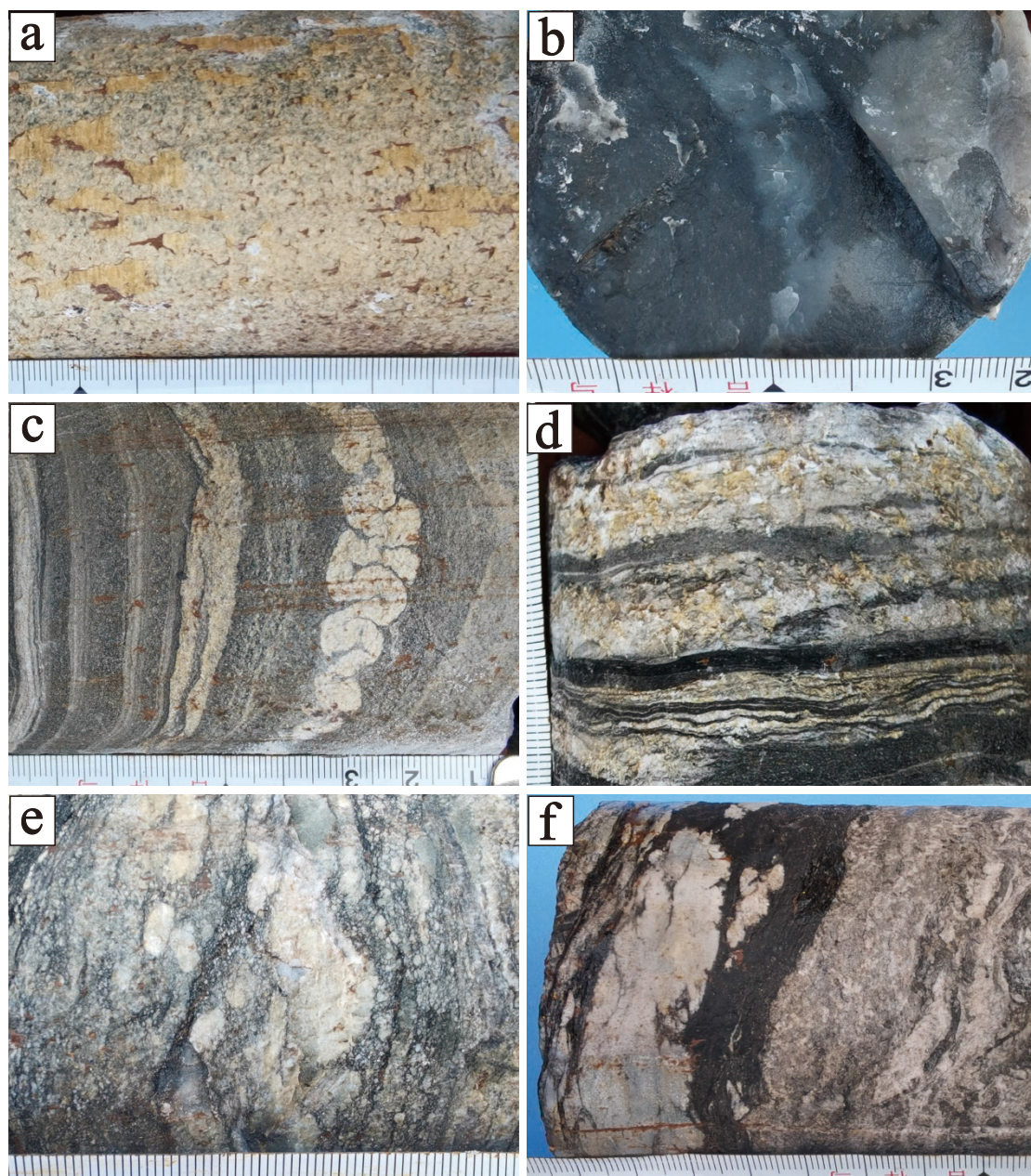
四川盆地三叠系杂卤石的成因问题,前人研究认为有交代成因、原始沉积等(侯学文等, 2020)。作为硫酸钙盐与硫酸钾镁盐复盐的杂卤石其形成是十分困难的,当卤水达到硫酸钙饱和时,因钾、

镁远没有饱和,只能析出石膏之类的硫酸钙盐矿物,而当卤水达到钾镁盐沉积阶段时,又因缺钙(大量的钙在硫酸钙盐沉积阶段早已析出)仍不能形成以杂卤石为主的钾镁盐沉积(孙宏伟等, 2014)。

李亚文和韩蔚田(1987)、林传律(1994)研究认为,杂卤石在盐相中的分布与海水蒸发的物理化学资料完全符合,四川盆地三叠系杂卤石是水溶变质形成。石膏脱水转化成硬石膏所释放出的大量结晶水,除能自身溶滤 $CaSO_4$ 组分外,对易溶盐更具极强溶解力(林耀庭和郑茂全, 2002)。当易溶盐层和钾盐呈薄层时,便形成 $NaCl$ 和 K^+ 、 Mg^{2+} 均不饱和的溶液,该溶液与 $CaSO_4$ 结合,便生成杂卤石。孙宏伟等(2014)提出,原生沉积的杂卤石需要有外来特定成分溶液进行补给,即硫酸钾镁盐沉积阶段补给钙离子,或在硫酸钙盐沉积阶段补充钾镁离子。

黄建国(1998)提出四川盆地三叠系杂卤石为准同生及变质交代成因。蔡克勤和袁见齐(1986)研究农乐杂卤石,认为其成因有准同生交代成因和后生成因两种。林耀庭和尹世明(1998)通过杂卤石类型及共生组合特征研究认为渠县农乐三叠系杂卤石是富 K^+ 、 Mg^{2+} 溶液交代硬石膏成因。王淑丽和郑绵平(2014)通过溴氯系数、杂卤石与石盐接触关系等研究认为,长寿地区“硬石膏—石盐—含杂卤石石盐—硬石膏”剖面杂卤石主要为原生成因。仲佳爱等(2018)通过粉晶 X 衍射结合扫描电镜等研究认为,川东黄金口背斜三叠系薄层状杂卤石为原生沉积。李文博(2018)通过沉积环境研究认为,川东北地区三叠系杂卤石成因复杂,原生及交代成因兼而有之,广安地区具有成钾的可能性。侯学文等(2020)通过蒸发实验认为,四川盆地三叠系杂卤石有原生成因和交代成因两种。

前人研究认为,原生成因的杂卤石与其他矿物界线清晰,层状发育。而与硬石膏接触界面不清晰、互相穿插、交代残余的杂卤石更偏向于交代成因,即由早期沉积的石膏与晚期富含 K^+ 、 Mg^{2+} 的浓缩



a. 致密块状杂卤石, 井深 2 988.00 m; b. 硬石膏内发育浸染状灰白色半透明杂卤石, 井深 2 980.10 m; c. 杂卤石呈条带状、肠状产出, 井深 2 980.70 m; d. 硬石膏发育星点-簇状杂卤石, 井深 2 980.50 m; e. 硬石膏发育鲕粒状杂卤石, 井深 2 988.50 m; f. 硬石膏发育斑状、团块状杂卤石, 井深 2 979.50 m。

图 6 ZK1 井三叠系杂卤石沉积构造特征

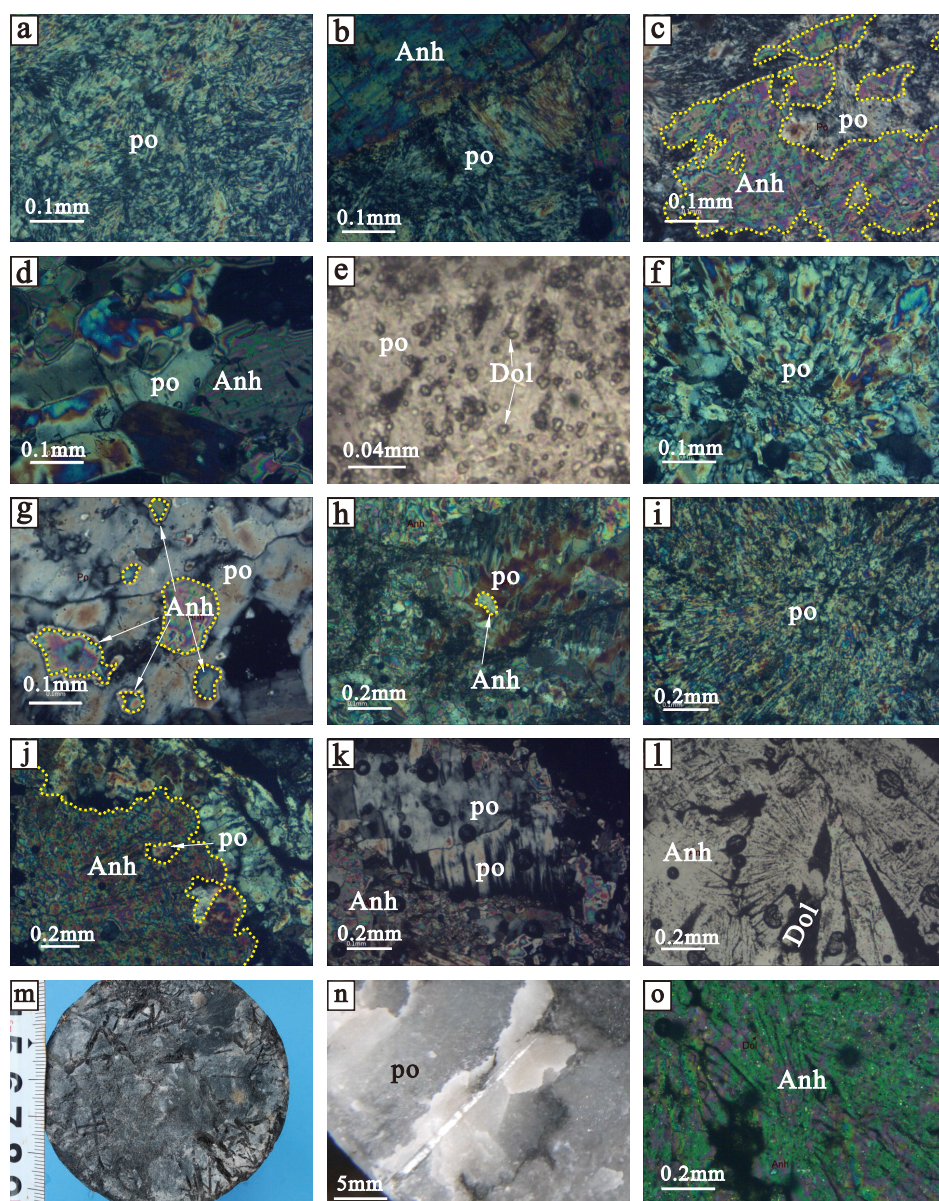
Fig. 6 Sedimentary structural characteristics of Triassic polyhalite in ZK1

卤水作用而生成。

ZK1 井揭露杂卤石矿(化)层 6 层(不含“绿豆岩”层), 杂卤石与硬石膏接触界线模糊(图 6b; 图 7b), 块状杂卤石层层理不发育。少量薄层状-条带状含杂卤石硬石膏呈层状发育(图 6c), 但规模较小。镜下可见杂卤石与硬石膏交代接触(图 7c、j); 部分块状杂卤石内部残余硬石膏斑晶(图 7g);

杂卤石及硬石膏内部均发育星点状白云石(图 7e、l)。

I-6 矿(化)层发育残余斑状-放射状硬石膏(图 7l、o), 该矿(化)层大段硬石膏连续发育, KCl 品位 0.39%。笔者认为, 大段石膏脱水形成硬石膏的过程中, 斑状-放射状可溶矿物溶蚀殆尽, 被硬石膏充填形成残余斑状-放射状硬石膏, 也有可能是原生沉积的钾镁盐被硬石膏交代形成。



a. I-1 矿(化)层板状-纤维状杂卤石, 井深 2 980.00 m, (+); b. I-2 矿(化)层纤维状杂卤石交代硬石膏, 井深 2 985.00 m, (+); c. I-2 矿(化)层杂卤石与硬石膏港湾状交代接触, 井深 3 985.20 m, (+); d. I-3 矿(化)层杂卤石呈它形充填于硬石膏之间, 井深 2 989.50 m, (+); e. I-3 矿(化)层杂卤石内包裹白云石, 井深 2 987.00 m, (—); f. I-3 矿(化)层发育板状-放射状杂卤石, 井深 2 991.00 m, (+); g. I-3 矿(化)层杂卤石交代残余硬石膏, 井深 2 992.00 m, (+); h. I-4 矿(化)层杂卤石内残余硬石膏斑晶, 井深 2 994.50 m, (+); i. “绿豆岩”底部纤维-放射状杂卤石, 井深 3 000.80 m, (+); j. “绿豆岩”底部杂卤石与硬石膏成港湾状交代接触, 井深 3 001.00 m, (+); k. I-6 矿(化)层杂卤石发育简单双晶, 井深 3 007.50 m, (+); l. I-6 矿层变余放射纤维状硬石膏包裹白云石, 井深 3 007.50 m, (—); m. I-1 矿(化)层顶部杂卤石内残余少量黑色斑晶; n. I-1 矿(化)层高品位杂卤石内残余少量无色透明长柱状矿物晶体; o. I-6 矿(化)层发育残余斑状-放射状硬石膏。Anh—硬石膏; Po—杂卤石; Dol—白云石。

图 7 ZK1 井三叠系杂卤石显微特征

Fig. 7 Microscopic characteristics of Triassic polyhalite in ZK1

I-1 号杂卤石矿(化)层顶部, 样品编号 ZK1-20(取样井深 2 979.74~2 980.24 m; 取样长度 0.5 m)的杂卤石内残余少量黑色、无色透明斑晶(图 7m、

n), 测试结果显示该样品 K 含量为 13.18%, 大于杂卤石理论 K 含量 12.9%(杂卤石化学式为 $K_2Ca_2Mg[SO_4]_4 \cdot 2H_2O$, 理论化学组成: K 12.9%, Mg

4.03%, Ca 13.29%, SO_4 63.73%, H_2O 5.98%)。初步配矿结果显示, ZK1-20 号样品含有比杂卤石 K 含量更高的富钾矿物。笔者研究认为, 石膏脱水溶滤作用水对富钾矿物的不完全溶滤, 是导致 I-1 号杂卤石矿(化)层顶部高钾残余的主要原因, 不排除 T_2J^{1-1} 蒸发浓缩阶段末期沉积原生钾镁盐的可能。

综上所述, 笔者初步研究认为, 广安构造三叠系块状、浸染状杂卤石主要以交代成因为主。即石膏结晶水经脱水作用溶滤先期沉积的钾镁盐形成不饱和卤水, 与脱水形成的硬石膏交代形成杂卤石。原始沉积杂卤石较少, 主要为条带状、簇状、星点状。硬石膏较厚的层段, 原始沉积的薄层钾镁盐溶滤完全, 硬石膏充填放射状晶骸; 厚层钾镁盐则溶滤不完全, 形成高品位杂卤石内残余疑似钾镁盐斑晶的现象。

4.2 找钾启示

盆内早期找钾工作均以易溶性钾石盐以及富钾卤水作为主要目标, 将杂卤石、无水钾镁矾等矿物作为咸化标志开展找钾工作。截止目前, 盆内除实验室发现中 1 井 T_2J^{1-1} (井深 3 045.05~3 045.20 m) 放射状杂卤石内发育少量颗粒状钾石盐外(卞慕英和蒋铭廉, 1979^④), 并未有过其他钾石盐的报道。林耀庭(1994)认为成钾的古构造条件和成钾后期的保存条件不够理想, 是造成四川盆地找钾工作难度大的一个重要原因。

近年来, 四川盆地找钾方向主要以杂卤石及富钾卤水为主。作为四川盆地三叠系杂卤石找矿标志的“绿豆岩”广泛发育, 郑大中(1998)研究认为用“绿豆岩”制取钾肥在技术上可行, 但是相较于水云母粘土岩型“绿豆岩”, 广安地区蚀变含砾玻屑沉凝灰岩型“绿豆岩”钾含量偏低, 找钾成果意义不大。三叠系富钾卤水前景亦不容乐观, 这也是本文依托项目针对杂卤石的主要原因。一方面四川盆地三叠系易溶性钾盐勘探迟迟未见突破; 另一方面盆内难溶性杂卤石储量丰富, 油-气-钾合探成果显著(倪师军等, 2015^⑤)。广安构造“绿豆岩”上下杂卤石分布稳定, 以杂卤石为目标的找钾工作取得了一定的成果。受开发工艺限制, 要想实现真正的找钾突破, 四川盆地三叠系易溶性钾盐才是下一步勘探的主要方向。

形成杂卤石需要丰富的 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 及相应的 Ca^{2+} 离子, 表明杂卤石本身即 K^+ 、 Mg^{2+} 离子相对富集的标志。从补给说(富含 Ca^{2+} 离子的淡水补

给高浓度富含 K^+ 、 Mg^{2+} 离子的卤水形成杂卤石)的角度, 大量杂卤石的出现反映蒸发浓缩过程受淡水补给影响明显, 对形成易溶性钾盐反而是不利的。基于石膏脱水溶滤形成杂卤石的说法, 厚层硬石膏并不利于原生易溶性钾盐的保存。

T_2J^{3-2} 作为广安构造三叠世最后一个成盐期, GC2 井 T_2J^{3-2} 含盐段发育三层石盐, 单层最大厚度 48.5 m, 总厚度 83.1 m; 位于 GC2 井 209° 方向, 直线距离 460 m 的 GS1 井 T_2J^{3-2} 发育两层石盐, 单层厚度最大 148.0 m, 总厚 154.5 m; G18 井则只有 27 m。广安构造 T_2J^{3-2} 石盐厚度变化巨大, 表明 T_2J^{3-2} 沉积时期, 以广深 1 井为盐盆沉积中心发育一个小型石盐体。虽然新、老钻井均未在 T_2J^{3-2} 石盐体乃至其上下发现杂卤石及其他富钾矿物。但根据 Schmalz(1970)提出的“泪滴式”蒸发模式理论(沿着补给方向, 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)。笔者认为, 在下一步的找钾工作应注意 T_2J^{3-2} 盐盆边缘凹陷沉积钾镁盐的可能。

同时, 基于高品位杂卤石顶部残余疑似钾镁盐斑晶的线索, 结合杂卤石的多种成因。笔者研究认为, 在靠近盐湖中心的区域, 硬石膏层相对较薄的凹陷地段, 有望成为易溶性钾盐的找矿突破点。

5 结论

(1) 四川盆地广安构造 ZK1 井 T_2J^{1-1} — T_2J^{5-2} 成盐期共发育 6 层杂卤石, 累计厚度 11.21 m。其中 5 层达到 KCL 工业品位, 累计厚度 10.71 m。杂卤石最高品位超过 90%, 表明广安构造具有较好的成钾条件。在深藏杂卤石取得开采突破的情况下, 广安地区杂卤石型钾盐矿有望建产。

(2) 广安构造三叠系含钾序列为“硬石膏-杂卤石-硬石膏”型。 T_2J^{1-1} — T_2J^{5-2} 主要岩性组合符合海水蒸发浓缩序列的基本特征, 杂卤石主要呈致密块状-浸染状与硬石膏共生, 少量呈条带状、星点-簇状、团块-鲕粒状、斑块状等。镜下可见大量块状、浸染状杂卤石交代硬石膏, 属交代成因。层理清晰的薄层条带状杂卤石属原始沉积。

(3) 在下一步的找钾工作应注意 T_2J^{3-2} 盐盆边缘凹陷沉积钾镁盐的可能。基于杂卤石成因分析认为, 在靠近盐湖中心相的边缘区域, 硬石膏层相对较薄的凹陷地段, 有望成为易溶性钾盐的勘探突破点。

注释:

- ① 陈毓川, 郑绵平, 邵厥年, 等, 2021. 全球锂、钴、镍、锡、钾盐矿产资源储量评估报告 (2021) [R]. 中国地质调查局全球矿产资源战略研究中心.
- ② 张榕根, 藏瑞霞, 1976. 四川盆地川中地区找钾工作阶段报告 [R]; 四川省地质局第七普查勘探大队.
- ③ 周长武, 龙德, 李修华, 等, 1980. 广安幅 H-48-17 1/20 万区域地质调查报告 [R]. 四川省地质局.
- ④ 卞慕英, 蒋铭康, 1979. 四川盆地三叠纪盐类矿物总结报告 [R]. 国家地质总局第二地质大队. Bian M Y, Jiang M L, 1979.
- ⑤ 倪师军, 王绪本, 徐国盛, 等, 2015. 四川三叠纪富钾卤水富集规律及有利地区调查评价成果报告 [R]. 成都理工大学.

References

- Cai K Q, Yuan J Q, 1986. Metallogenic conditions and prospecting direction of Triassic potash in Sichuan[J]. *Geology of Chemical Minerals* (2): 1-9 (in Chinese with English abstract).
- Che G Q, Gong C M, Wang N, 2007. Gas accumulation on condition the Xujiahe group of Guang'an area[J]. *Natural Gas Industry* (6): 1-5+145 (in Chinese with English abstract).
- Chen K G, Li C M, Li L, 2013. Geophysical logging criteria and discriminant model for the potassium-rich strata and their application to Sichuan Basin: A case study of Guang'an area of central Sichuan[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34 (5): 623 - 630 (in Chinese with English abstract).
- Deng K L, 19992. Formation and evolution of Sichuan Basin and domains for oil and gas exploration[J]. *Natural Gas Industry* (5): 7-12+6 (in Chinese with English abstract).
- Zhai G M, 1989. *Petroleum Geology of China: Vol. 10 Sichuan Oil Province*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Fu B, Wang X Z, Jiang Z B, et al, 2009. Diagenesis and porosity evolution of upper Triassic X6 formation in Guang'an structure[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition)*, 11 (02): 5 - 7+25 (in Chinese with English abstract).
- Gong D X, 2016. Salt forming environment, potassium forming conditions and genetic mechanism of Triassic in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Gong D X, Zhou J Y, Luo L P, et al, 2016. Salt forming environment and potassium forming conditions of Triassic in Sichuan Basin[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1-130 (in Chinese).
- Guo Z W, Deng K L, Han Y H, et al, 1996. Formation and evolution of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Hou X W, Gong D X, Wen H G, et al, 2020. Study on the temporal and spatial distribution, microscopic characteristics and genesis of Triassic polyhalite in Sichuan Basin[J]. *Geological Review*, 66 (6): 1555 - 1571 (in Chinese with English abstract).
- Huang D, Zhang J, Yang G, et al, 2011. The discussion of stratum division and stratum for the Leikoupo formation of middle Triassic in Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 33 (3): 89 - 95+195-196 (in Chinese with English abstract).
- Huang J G, 1998. The Triassic potash deposits in China: an example from the Sichuan Basin[J]. *Lithofacies Paleogeography*, 18 (4): 23 - 43 (in Chinese with English abstract).
- Huang C B, 2017. Research on logging identification and evaluation of Triassic concealed potassium deposits in Sichuan Basin[D]. Southwest Petroleum University (in Chinese).
- Li C Y, Lun Z Q, Hu J C, et al, 1991. *Regional geological records of Sichuan Province*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Li D H, Li W, Wang Z C, et al, 2007. Genetic type and source of gas in the Guang'an gasfield, central Sichuan[J]. *Geology in China* (5): 829-836 (in Chinese with English abstract).
- Li W B, 2018. Research on formation conditions and genetic mechanism of Triassic polyhalite deposit in Northeast Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Li Y W, Han W T, 1987. An experimental study on the formative conditions of polyhalite in Triassic system in Sichuan Basin[J]. *Geoscience*, (Z1): 400 - 411 (in Chinese with English abstract).
- Lin C L, 1994. Metamorphic evolution of K-bearing rock series of the Triassic and implication in search for potash salt in Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sichuan* (2): 122-129 (in Chinese with English abstract).
- Lin Y T, 1994. On K-bearing property of the marine Triassic and search for potash salt in Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sichuan* (2): 111-121 (in Chinese with English abstract).
- Lin Y T, Chen S L, 2008. Discussion on evaporite generating modes, salt forming mechanism and potassium-hunting prospect of lower middle Triassic in Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 16 (3): 1 - 10 (in Chinese with English abstract).
- Lin Y T, He J Q, Ye M C, 2003. On potash-forming model and ore-hunting direction of lower-middle Triassic series in Sichuan Basin[J]. *Geology of Chemical Minerals* (2): 76-81+86 (in Chinese with English abstract).
- Lin Y T, Yin S M, 1998. Distribution, genesis and significance of shallow-stated polyhalite ore in Quxian, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan* (2): 42-46 (in Chinese with English abstract).
- Lin Y T, Zheng M Q, 2002. Theory on guidance of heat-melted salt of Triassic period in search of potash in Sichuan Basin[J]. *Journal of Salt Lake Research* (1): 8-17 (in Chinese with English abstract).
- Ma Y S, Chen H D, Wang G L, 2009. *Structure of southern China: atlas of sequence lithofacies and paleogeography*[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Meng Y Z, 2011. Research on lithofacies paleogeography and natural gas accumulation of Jialingjiang formation in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Schmalz R F, 1970. Environment of marine evaporate deposition [J]. *Miner: Industrial*, 35 (8): 1 - 7.
- Sun A W, Zhang W F, Du F, et al, 2009. China's development strategy on potash resources and fertilizer[J]. *Modern Chemical Industry*, 29 (9): 10 - 14+16 (in Chinese with English abstract).
- Sun H W, Cao Y T, Zhang H, 2014. Genesis and potassium prospecting of polyhalite in evaporite basin[J]. *Geology of Chemical Minerals*,

- 36 (1) : 8-12 (in Chinese with English abstract).
- Tong C G, 2000. Relationship between neotectonic movement and structural evolution and gas pools formation of Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (2) : 123-130 (in Chinese with English abstract) .
- Wang D S, Tian R H, 1985. Formation and enrichment of salt brine and bromine, iodine, boron, lithium and potassium in Sichuan Basin[C]. Journal of Institute of hydrogeology and engineering geology, Chinese Academy of Geological Sciences (No. 1) : 56-133 (in Chinese) .
- Wang S L, Zheng M P, 2014. Discovery of Triassic polyhalite in Changshou area of East Sichuan Basin and its genetic study[J]. Mineral Deposits, 33 (5) : 1045-1056 (in Chinese with English abstract).
- Xia L, Huang D S, Peng C, 2006. Preliminary application of multi-component technology in Guang'an structural exploration[J]. Progress in Exploration Geophysics (2) : 135-139+5 (in Chinese with English abstract) .
- Zheng D Z, 1998. Analysis on the production of potash fertilizer with "mungbean rock" and its comprehensive utilization, and on the feasibility of the development and utilization of potassium phosphate rock[J]. Sichuan Chemical Industry and Corrosion Control (1) : 4-9 (in Chinese with English abstract) .
- Zheng M P, Yuan H R, Zhang Y S, et al, 2010. Regional Distribution and Prospects of Potash in China[J]. Acta Geologica Sinica, 84 (11) : 1523-1553 (in Chinese with English abstract).
- Zhong L X, 2017. Geological characteristics and metallogenic conditions of Nongle shallow polyhalite potash deposit in Quxian, Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese) .
- Zhong J A, Zheng M P, Tang X Y, et al, 2018. Characteristics and genesis of Triassic deep polyhalite in Huangjinkou anticline, Northeastern Sichuan[J]. Mineral Deposits 37 (1) : 81-90 (in Chinese with English abstract) .
- 北京:地质出版社.
- 侯学文, 龚大兴, 文华国, 等, 2020. 四川盆地三叠系杂卤石的时空分布、显微特征及成因研究[J]. 地质论评, 66 (6) : 1555-1571.
- 黄东, 张健, 杨光, 等, 2011. 四川盆地中三叠统雷口坡组地层划分探讨[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 33 (3) : 89-95+195-196.
- 黄建国, 1998. 中国三叠纪钾盐沉积——以四川为例[J]. 岩相古地理, 18 (4) : 23-43.
- 黄长兵, 2017. 四川盆地三叠系隐性钾矿测井识别与评价研究[D]. 西南石油大学.
- 李朝阳, 伦志强, 胡金城, 等, 1991. 四川省区域地质志[M]. 北京:地质出版社.
- 李登华, 李伟, 汪泽成, 等, 2007. 川中广安气田天然气成因类型及气源分析[J]. 中国地质 (5) : 829-836.
- 李文博, 2018. 川东北三叠系杂卤石矿层形成条件及成因机理研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 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, (Z1) : 400-411.
- 林传律, 1994. 四川盆地三叠系含钾岩系变质演化特点及找矿意义[J]. 四川地质学报 (2) : 122-129.
- 林耀庭, 1994. 论四川盆地海相三叠系含钾性及找钾方向[J]. 四川地质学报 (2) : 111-121.
- 林耀庭, 陈绍兰, 2008. 论四川盆地下, 中三叠统蒸发岩的生成模式, 成盐机理及找钾展望[J]. 盐湖研究, 16 (3) : 1-10.
- 林耀庭, 何金权, 叶茂才, 2003. 论四川盆地中三叠统成盐模式及找钾方向[J]. 化工矿产地质 (2) : 76-81+86.
- 林耀庭, 尹世明, 1998. 四川渠县浅层杂卤石矿分布特征及其成因和意义[J]. 四川地质学报 (2) : 42-46.
- 林耀庭, 郑茂全, 2002. 论四川盆地三叠系盐类热融水溶变质对找钾方向的控制[J]. 盐湖研究 (1) : 8-17.
- 马永生, 陈洪德, 王国力, 2009. 中国南方构造—层序岩相古地理图集[M]. 北京: 科学出版社.
- 孟昱璋, 2011. 四川盆地嘉陵江组岩相古地理与天然气成藏研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 孙爱文, 张卫峰, 杜芬, 等, 2009. 中国钾资源及钾肥发展战略[J]. 现代化工, 29 (9) : 10-14+16.
- 孙宏伟, 曹养同, 张华, 2014. 蒸发岩盆地杂卤石成因及找钾意义[J]. 化工矿产地质, 36 (1) : 8-12.
- 童崇光, 2000. 新构造运动与四川盆地构造演化及气藏形成[J]. 成都理工学院学报 (2) : 123-130.
- 王东升, 田荣和, 1985. 四川盆地盐卤水及其中溴碘硼锂钾的形成和富集规律[C]//中国地质科学院水文地质工程地质研究所刊(第1号) : 56-133.
- 王淑丽, 郑绵平, 2014. 川东盆地长寿地区三叠系杂卤石的发现及其成因研究[J]. 矿床地质, 33 (5) : 1045-1056.
- 夏凌, 黄东山, 彭才, 2006. 多分量技术在广安构造勘探中的初步应用[J]. 勘探地球物理进展 (2) : 135-139+5.
- 郑大中, 1998. 用“绿豆岩”制钾肥及其综合利用浅析兼论含钾磷岩石开发利用的可行性[J]. 四川化工与腐蚀控制 (1) : 4-9.
- 郑绵平, 袁鹤然, 张永生, 等, 2010. 中国钾盐区域分布与找钾远景[J]. 地质学报, 84 (11) : 1523-1553.
- 钟林秀, 2017. 四川渠县农乐浅层杂卤石型钾盐矿床地质特征及成矿条件研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 仲佳爱, 郑绵平, 唐学渊, 等, 2018. 川东北黄金口背斜三叠系深部杂卤石特征及成因探讨[J]. 矿床地质, 37 (1) : 81-90.
- 蔡克勤, 袁见齐, 1986. 四川三叠系钾盐成矿条件和找矿方向[J]. 化工地质 (2) : 1-9.
- 车国琼, 龚昌明, 汪楠, 等, 2007. 广安地区须家河组气藏成藏条件[J]. 天然气工业 (6) : 1-5+145.
- 陈科贵, 李春梅, 李利, 等, 2013. 四川盆地含钾地层的地球物理测井标志、判别模型与应用——以川中广安地区为例[J]. 地球学报, 34 (5) : 623-630.
- 邓康龄, 1992. 四川盆地形成演化与油气勘探领域[J]. 天然气工业 (5) : 7-12+6.
- 翟光明, 1989. 中国石油地质志: 卷十 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 付斌, 王兴志, 蒋志斌, 等, 2009. 广安构造须家河组须六段储层成岩作用与孔隙演化[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 11 (02) : 5-7+25.
- 龚大兴, 2016. 四川盆地三叠纪成盐环境、成钾条件及成因机制[D]. 成都: 成都理工大学.
- 龚大兴, 周家云, 罗丽萍, 等, 2016. 四川盆地三叠纪成盐环境及成钾条件[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1-130.
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等, 1996. 四川盆地的形成与演化[M].