

四川盆地东部三叠系嘉陵江组海相钾盐成矿分析及靶区预测

朱正杰^{1,2,3}, 杨郑州¹, 张雄^{2,3}, 刘成林^{1,4}, 赵艳军⁴, 崔志伟²

(1. 百色学院, 广西 百色 533000; 2. 重庆地质矿产研究院外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室, 重庆 400042;
3. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室重庆研究中心, 重庆 400042; 4. 中国地质科学院 矿产资源研究所,
北京 100037)

摘要: 四川盆地是我国重要的成盐盆地,但是否能形成一定规模的钾盐矿床一直存在争议。本文以四川盆地三叠纪杂卤石成因-海相钾盐成钾条件分析-次级凹陷圈定-钾盐成钾靶区圈定为主线,利用光薄片鉴定、扫描电镜、Sr同位素、大地电磁测深及地震解释等手段分析了四川盆地三叠纪钾盐成矿潜力,并进行了资源量预测。四川盆地东部早三叠世嘉陵江组岩盐中赋存的杂卤石是自生的,是海水高度浓缩的产物,暗示岩盐沉积时古卤水浓缩已达到钾镁盐析出阶段,长寿双龙-合兴一带和垫江董家场一带可能存在有利于钾盐沉积的次级凹陷,后期构造运动对钾盐改造较小,保存条件较好。利用地震解释和大地电磁测深等结果初步圈定了长寿双龙-保合村勘查靶区,估算了资源量,为开展钻孔验证提供了科学依据。

关键词: 海相钾盐; 四川盆地; 早三叠世; 成钾潜力; 靶区预测

中图分类号: P619.21⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)01-0039-10

Metallogenic conditions and target prediction of potash deposits in the Triassic Jialingjiang Formation, eastern Sichuan Basin

ZHU Zheng-jie^{1,2,3}, YANG Zheng-zhou¹, ZHANG Xiong^{2,3}, LIU Cheng-lin^{1,4}, ZHAO Yan-jun⁴ and CUI Zhi-wei²

(1. Baise University, Baise 533000, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 3. Chongqing Research Center of State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Chongqing 400042, China; 4. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Sichuan Basin is one of the most important salt basins in China; nevertheless, whether it can produce industrial marine potash deposit or not remains a problem of much controversy. In this study, with the source of polyhalite, the forming condition, the sub-depression and the prediction of targets of potash deposits as main lines, and on the basis of microscopic identification, scanning electron microscope, strontium isotopic composition, seismic interpretation and magnetotelluric sounding, the authors systematically analyzed the potential of marine potash resources in the Lower-Triassic Formation, and made a prospecting breakthrough of marine potash exploration in eastern Sichuan Basin. The authors hold that the polyhalite existent in halite in eastern Sichuan Basin is authgenic, and the seawater was highly concentrated and had reached the critical point of the potassium and magnesium salts

收稿日期: 2020-10-10; 接受日期: 2020-12-08; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 重庆市科技创新领军人才计划; 国家自然科学基金青年科学基金项目(41902092); 百色学院博士启动资金项目

作者简介: 朱正杰(1983-), 男, 正高级工程师, 主要从事地球化学研究, E-mail: zhuzhjie@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。

precipitation in the early Triassic period. Two sub-depressions exist in the Diangjiang salt basin, i. e. the Hexing and Dongjiachang, and the potash salt in the sub-depression was well preserved and subjected to be less reconstructed by later tectonic movements. The results of the seismic interpretation and magnetotelluric sounding were used to delineate the exploration target area of Shuanglong-Baohe Village, and resources of potash salt were predicted, which should be useful for drilling verification.

Key words: marine potash; Sichuan Basin; Early Triassic period; potash-forming potential; target prediction

Fund support: Chongqing Science and Technology Foundation; National Natural Science Foundation of China (41902092); Doctoral Project from Baise University

钾盐矿主要用于制造工业用钾化合物和钾肥,其中95%的钾盐产品用于制造钾肥,5%应用于工业。已有土壤普查资料显示全国约70%的耕地缺钾,45%的耕地严重缺钾。我国已探明钾盐资源相对消费量乃杯水车薪,因此钾盐是我国紧缺的重要战略资源,2018年我国钾肥自给率仅为52.5%,需要大量进口(亓昭英等,2019)。世界钾盐资源丰富,基础储量为100亿吨,资源和产量集中在少数国家(如加拿大、俄罗斯等)。由于我国成盐地质构造条件复杂,寻找固体海相钾盐矿床一直是中国矿床学界的一大难题(刘成林等,2010,2015;刘成林,2013;董娟等,2015)。四川盆地是我国重要的成盐盆地,下三叠统嘉陵江组是我国钾盐矿产勘查的重点层位(蔡克勤等,1986;林耀庭等,2003;郑绵平等,2015;刘成林等,2016)。自上世纪60年代以来,原地质矿产部等在四川盆地开展了大量的找钾攻关工作,如川东北地区下中三叠统固液相钾盐普查、四川盆地东部三叠系成盐成钾条件分析、四川盆地东部三叠系浅部钾盐普查、四川盆地早中三叠世成钾条件研究及找钾远景评价等(林耀庭,1995;林耀庭等,1998;黄建国,1998),取得了一些进展,初步阐明了四川盆地三叠系海相钾盐的主要赋存层位、沉积环境、古地理以及各成盐期的成盐特征等,发现了杂卤石及一些富钾卤水矿点,但始终没有找到钾石盐等矿物,未能取得可溶性海相钾盐找钾的实质性进展,从而引起了四川盆地三叠纪到底能不能成钾的争论。基于此,随着新一轮找钾工作的开展,并伴着新测试分析方法的应用(如陈莉琼等,2010;王淑丽等,2014;陈安清等,2015;张研等,2015;赵艳军等,2015;周家云等,2015;孙小虹等,2016;唐清敏等,2018;张雄等,2018,2019;Liu *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019),对四川盆地找钾开展了大量研究,但一直存在是否能形成钾盐的争议。四川盆地东部三叠纪发现的主要钾盐矿物为

杂卤石,自生杂卤石是岩盐浓缩形成钾石盐的重要过渡矿物;前期的研究主要集中在杂卤石是否能作为钾盐利用,未对杂卤石成因及其指示的钾盐靶区预测进行研究,本文基于项目组的研究基础,主要采用光薄片鉴定、扫描电镜、Sr同位素分析及精细的岩相古地理、大地电磁测深、地震资料解译等手段,在分析杂卤石来源(自生还是次生)的基础上,通过详细的次级凹陷圈定,分析了四川盆地东部钾盐成矿靶区,为深入开展钻孔验证提供了科学依据。

1 区域地质背景

四川盆地在早三叠世嘉陵江期总体为海退的环境下,形成了一套由碳酸盐岩、石膏、岩盐为主的膏盐湖相和盐湖相沉积。同时,武隆隆起、石柱隆起、华蓥山隆起和泸州隆起的形成和发展,以及垫江盐盆、万县盐盆等的形成,为三叠纪形成规模巨大的盐湖创造了有利条件(王淑丽等,2014)(图1)。中三叠世雷口坡期,受湖南运动的影响,泸州-开江古隆起的明显上升导致凹陷形成,沉积了百余米的岩盐(蔡克勤等,1986)。中三叠世末海水全部退出,盆地结束了海相沉积的历史。

四川盆地东部面积较大的含盐盆地为南充盐盆和垫江盐盆,垫江盐盆成钾条件相对较好(Liu *et al.*, 2018),本文主要分析垫江盐盆的成钾条件并圈定成钾靶区。根据垫江盐盆已有岩性的分析,可将含盐系剖面自下而上分为3个成盐旋回(Ding *et al.*, 2019),以长平3井为例,第1旋回:I盐层岩芯地层剖面由白云岩-硬石膏岩-石岩盐组成,为灰白色、灰褐色硬石膏岩,浅灰色、灰褐色白云岩及黑灰色盐质硬石膏岩;第2旋回:II盐层岩芯地层剖面结构为白云岩-硬石膏岩-石岩盐-硬石膏岩-石岩盐,其中夹有2个硬石膏薄层,并有5个石岩盐层位含有硬石膏团块或斑块;第3旋回:III盐层岩芯地层

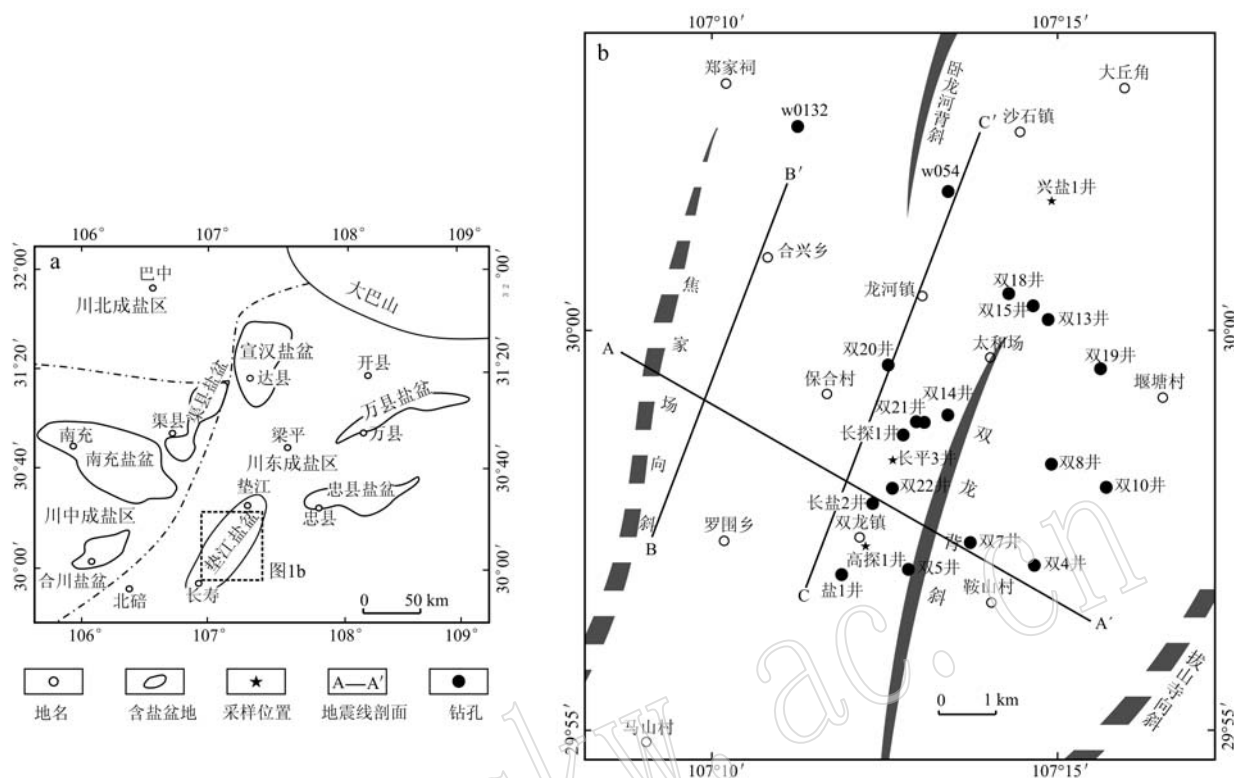


图1 四川盆地垫江盐盆构造位置及采样位置图(龚大兴等, 2015)

Fig. 1 Simplified geological map of the Dianjiang salt basin (after Gong Daxing *et al.*, 2015) and distribution of sampling sites

剖面结构为白云岩-硬石膏岩-白云岩,其中硬石膏岩中夹有3层白云岩薄层,同时还夹有1个约2.35 m厚的含盐硬石膏层。

2 样品采集与实验方法

2.1 样品采集

岩盐样品(图2)采集主要来自四川盆地东部垫江盐盆已有的岩盐钻孔,主要为长平3井、高探1井和兴盐1井(图1)。钻孔岩芯采样法为劈芯法,施工单位沿矿芯长轴方向用劈样机劈取1/2样品,项目组在施工单位采取1/2样品基础上再采取一半样品。本次主要对重点含盐段按照15~20 cm间隔连续采样,样品采集后存放于自封袋中,密封袋口,以免岩盐过多暴露在空气中融化。

2.2 实验方法

基于前期对已有的岩盐钻孔样品进行的化学分析等测试(张雄等, 2018),本次光薄片鉴定、扫描电镜样品采自长平3井、高探1井、兴盐1井。在国土资源部重庆矿产资源监督检测中心利用带能谱的高

分辨率扫描电镜对岩盐中的矿物进行形貌观察,加速电压为20 kV,仪器型号Energy+JSM6610LV,分析精度为0.01%。

Sr同位素分析样品主要为长平3井。Sr同位素分析在澳大利亚昆士兰大学完成,具体步骤为称取0.1~1.0 g岩盐样品,置于聚四氟乙烯封闭容器中,直接用水浸取,利用阳离子交换法分离Rb和Sr,采用ISOPROBE-T热电离质谱计(TIMS)进行分析。

地震及钻井资料主要来源于中石油、中石化等在垫江盐盆已开展的油气钻孔(图1),收集测线编号为:2008WXS001(AA')、2008WXS005(BB')、2008WXS008(CC')、wlht500,钻井为wo132、wo54。首先开展地震资料品质评价,在此基础上从已知井出发,通过井震结合,开展层位解释。大地电磁测量采用加拿大PHOENIX(凤凰)公司生产的V5-2000大地电磁观测系统中的MTU-5A及MTU-2EA系列,测点布设主要采用手持GPS定点、森林罗盘+测绳布极的测地方式,测量精度能够满足大地电磁测深的技术规程要求,探测目标层深度3 000 m左右。



图2 典型的岩盐照片

Fig. 2 Photos of halite in drill hole

3 结果与分析

3.1 垫江盐盆 $T_{J^{4-2}}$ 期沉积相特征

四川盆地三叠纪主要的成盐期为嘉二 2 ($T_{J^{2-2}}$)、嘉四 2 ($T_{J^{4-2}}$)、嘉五 2 ~ 雷一 1 ($T_{J^{5-2}} \sim T_{2l^{1-1}}$)、雷一 3 ($T_{2l^{1-3}}$)、雷三 2 ($T_{2l^{3-2}}$) 和雷四 2 ($T_{2l^{4-2}}$) 等,前人(刘成林等, 2016; 张雄等, 2018)分析认为 $T_{J^{4-2}}$ 段具备较大的成钾潜力。通过野外调查,结合对四川盆地东部垫江盐盆已有油气、岩盐钻孔的分析(龚大兴等, 2015),总结了四川盆地东部垫江盐盆 $T_{J^{4-2}}$ 期的沉积相特征。 $T_{J^{4-2}}$ 期四川盆地东部以长寿垫江盐盆、万县盐盆及宣汉盐盆面积较大,纵向上咸化持续时间较长。长寿双龙、渠县北东水口场一带见有赋存于石岩盐中的杂卤石层,在长寿双龙长平 3 井中发现有少量钾石盐,暗示其属于小的沉积咸化中心(图 3),可能是次级凹陷的存在。

3.2 岩盐矿物学特征及杂卤石成因

X 衍射、光薄片鉴定及扫描电镜结果显示四川盆地东部垫江盐盆三叠系含钾岩盐层矿物物质成分

较单一,主要为石盐、硬石膏、杂卤石等(图 4),并含少量钾石盐矿物。

杂卤石主要集中在嘉陵江组四段二亚段($T_{J^{4-2}}$ 期)的上部。杂卤石岩按其剖面上的岩类组合和赋存特征,主要有层状及层纹状杂卤石、赋存在岩盐中的杂卤石及浸染状杂卤石,这 3 种杂卤石以层状及层纹状为主。层状杂卤石结构均匀,镜下结构多呈显微粒状-微粒状结构、纤维放射状结构、不等粒结构;浸染状杂卤石在硬石膏中呈浸染状、斑点状、斑块、团块状等不定形分布,与围岩硬石膏接触界面不清晰,呈过渡关系,成分不纯,与硬石膏呈过渡岩类,两者相对含量不定,互相穿插,界限不甚清楚,矿物结构杂乱,主要呈柱状、板状、双晶较发育,与硬石膏呈港湾状接触,可见硬石膏的交代残余现象。

垫江盐盆早三叠世时期的杂卤石主要分布在石盐中,多呈薄层、条带、团块、细小斑点分布,细粒状结构,正交偏光下干涉色可达二级蓝,扫描电镜下主要为长柱状、针状或放射状集合体,结晶程度好,自形程度高,具有均匀的原生柱状和板状结构(图 5),具原生杂卤石特征。

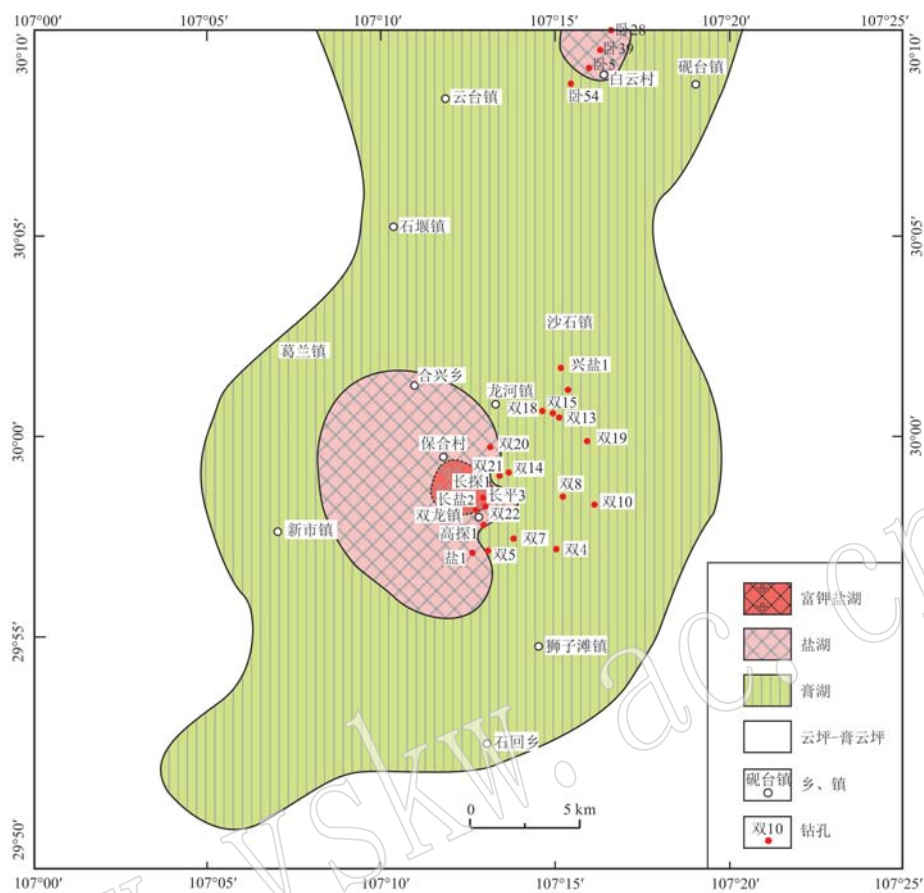
图 3 长寿双龙地区 T_1^{j+2} 成盐期沉积相示意图

Fig. 3 Geographic map of the Lower Triassic in Shuanglong area

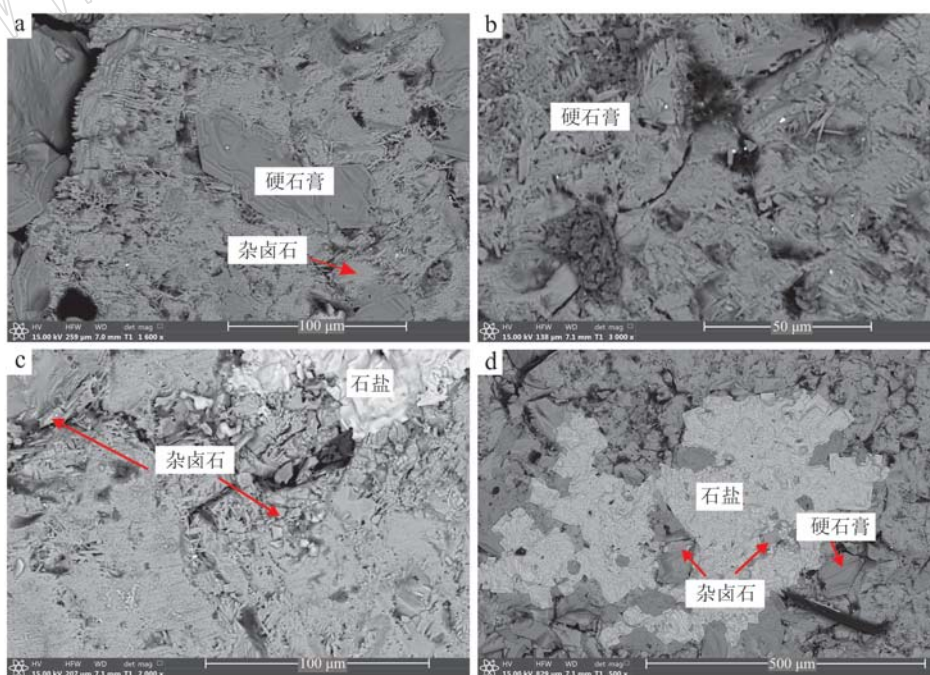


图 4 长平 3 井岩盐样品扫描电镜图

Fig. 4 SEM photos of salt samples in Changping well 3

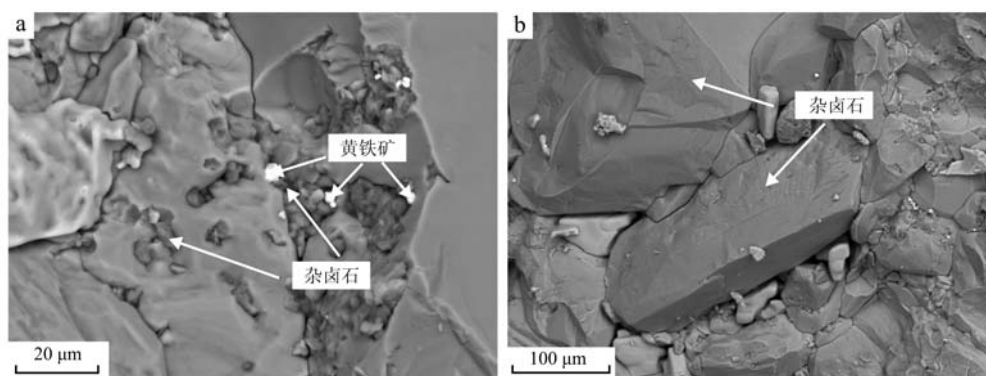


图5 长平3井层状杂卤石扫描电镜图

Fig. 5 SEM photos of polyhalites from salt samples in Changping well 3

3.3 岩盐 Sr 同位素特征

长寿地区长平3井岩盐样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为0.708 151~0.708 286,平均值为0.708 201, Sr同位素值变化较小,分布较为均一。

Sr同位素能有效追踪物质来源(Palmer and Edmond, 1989; Capo *et al.*, 1998)。通过测定,发现长平3井钾含量较高样品Sr同位素组成与早三叠世海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化范围[0.708 176~0.708 299,黄思静等(2011)]基本一致(图6),说明岩盐和杂卤石等的形成主要与海水有关,是海水高度浓缩的产物。因此,原生杂卤石接近了盐湖的浓缩中心,可以作为找钾的重要指示性矿物。

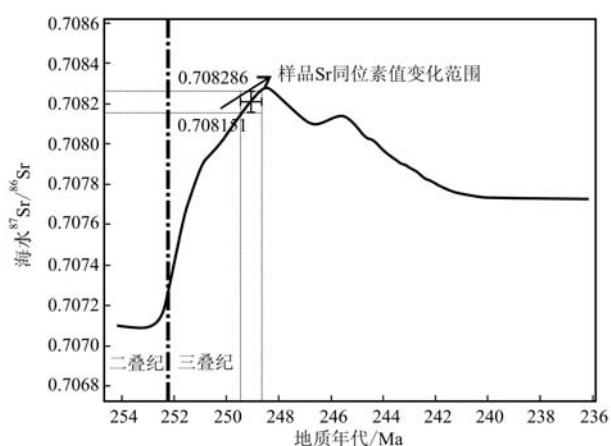


图6 四川盆地东部嘉陵江组岩盐样品锶同位素组成与全球海水锶同位素组成对比图(数据引自 Song *et al.*, 2015)

Fig. 6 Comparison of Sr isotopic values between halite samples in east Sichuan basin and seawater in the world (after Song *et al.*, 2015)

4 讨论

4.1 四川盆地东部成钾条件分析

前人已经从不同角度对四川盆地东部三叠纪钾盐成钾潜力进行了分析(刘成林等, 2016; 张雄等 2018; 唐清敏等, 2018),如长平3井整个岩盐段石盐的 Br/Cl 值为 0.06~5.49,平均 0.51,表明在嘉四期古卤水浓缩达到了钾镁盐析出沉积阶段,具备成钾条件。长平3井岩盐 Cl 同位素值全部落于钾石盐和光卤石区域,表明三叠纪嘉陵江期,岩盐沉积时古卤水已达到钾石盐析出阶段。岩盐化学成分分析显示 K^+ 含量在 0.02%~3.82% 之间,平均值为 0.53%,有 10 m 左右的岩盐层达到钾盐边界品位要求,最高含量达到钾盐工业品位要求,暗示其成钾条件较好,具备较大成钾潜力。

结合本文所观测的岩盐矿物学特征、杂卤石成因以及 Sr 同位素结果,认为四川盆地东部垫江盐盆岩盐层中赋存的杂卤石是自生的,是海水高度浓缩的产物,具备重要的找钾指示意义,四川盆地东部具备寻找海相钾盐的良好条件。

4.2 海相钾盐成矿预测及靶区圈定

可溶性钾盐是蒸发岩浓缩的最终产物,与盐盆中的次级凹陷密切相关,次级凹陷是钾盐形成和保存的重要部位(Liu *et al.*, 2018)。

利用大地电磁测深(MT)资料推断地层结构,通过对工作区地层结构的展布特征分析,编制了 MT 推断三叠系嘉陵江组次级凹陷图(图7)。从图中可以看出,三叠系嘉陵江组四段地层底部发育 2 处较为明显的次级凹陷。I 号次级凹陷位于垫江盐

盆北部,底界中心埋深约-3 050 m,面积约 6.4 km²,结合地质资料推断该凹陷区是由菩提山向明月峡背斜东南翼、斜北倾末端、梁平向斜南倾末端以、丹渡背斜北倾末端以及卧龙河背斜南倾末端共同围陷形成;Ⅱ号次级凹陷位于垫江盐盆东南部,中心埋深约-2 670 m,面积约 5.8 km²,结合地质资料推断该凹陷区是由丹渡背斜北倾末端、卧龙河背斜南倾末端、焦家场向斜北倾末端及双龙背斜西北翼共同围陷形成,与地震解译资料推测的次级凹陷位置是一致的(图8)。

垫江盐盆三叠系嘉陵江-雷口坡期沉积相显示其在三叠系嘉陵江组四段-雷口坡组一段时期均为

盐湖相和盐湖中心相,垫江盐盆在该时期为四川盆地浓缩中心之一。结合区内岩盐厚度分布特征、剩余重力异常特征、大地电磁测深及地震解译结果推测,垫江盐盆三叠系嘉陵江晚期可能存在有利于钾盐成矿的次级凹陷,凹陷位于长寿双龙-合兴一带和垫江董家场一带。

从钾盐成矿的物源-构造-气候三端员来看,四川盆地东部早三叠世物质来源主要为海水,物源条件是优越的。早三叠世,上扬子台地处于 18°~26°之间,属于有利成钾的副热带高压带气候区(万天丰等, 2007)。流体包裹体测温表明早三叠世四川盆地东部古气温较高(汪明泉等, 2015),盐湖卤水发生

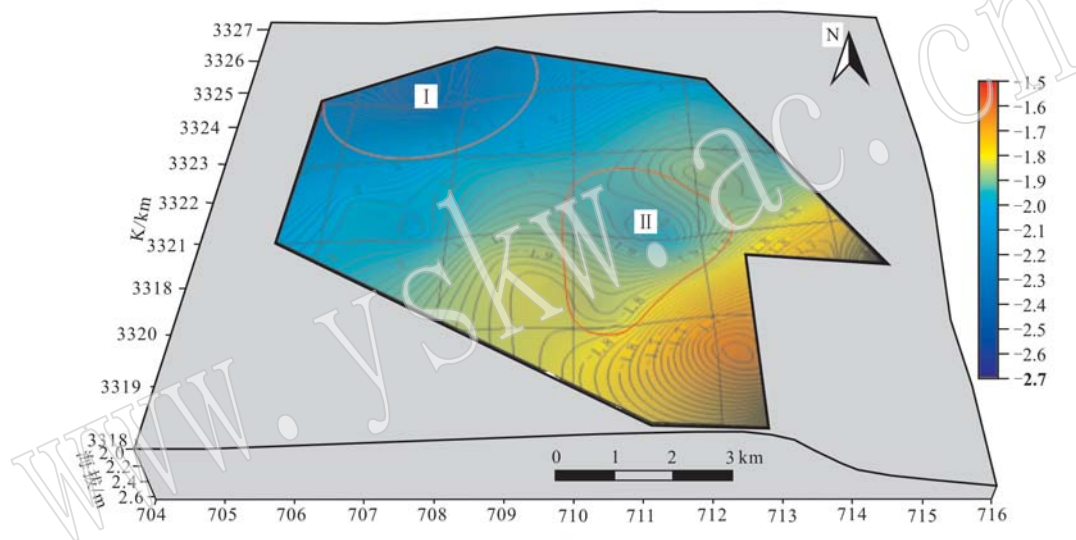


图7 MT推断次级凹陷位置图

Fig. 7 Location of sub-depressions through MT

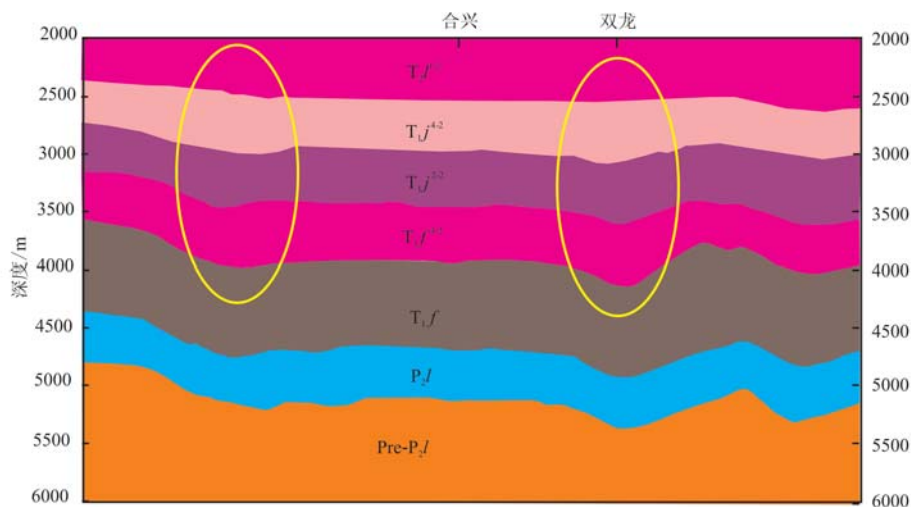


图8 AA'剖面次级凹陷的圈定

Fig. 8 Delineation of sub-depressions in section AA'

了高强度蒸发浓缩,高温可能导致了极端干旱气候,在气候条件上满足钾盐浓缩成矿条件。早中三叠世时期泸州-开江古隆起的形成,对四川盆地东部盐盆形成封闭条件提供了重要基础。古隆起相对周缘地形较高,其内部及边缘发育的小盐洼(如长寿双龙地区)由于其水浅、盆小、蒸发速率快,有利于卤水浓缩,形成次级凹陷,同时四川盆地存在数量较多的构造圈闭,因此在构造上也满足了钾盐形成的条件。综上,四川盆地东部早三叠世时期具备良好的“物源-构造-气候”端员耦合,成钾潜力较好,进而进一步圈定了勘查靶区。

根据已获得的钻孔资料、岩盐资料、地球化学分析成果及岩盐同位素分析等,可以圈定钾盐成矿远景区,根据成矿条件优越程度、已知矿化程度、成矿

信息丰富程度、矿产工作程度进行靶区圈定。大地电磁测深、地震解译等资料显示区内次级凹陷位置与古盐湖中心位置能够较好地重叠,且在盐湖中心边缘的长平3井中发现了大量原生杂卤石矿物和少量钾石盐矿物,化学成分分析显示长平3井岩盐中 K^+ 最高含量得到3.78%(张雄等, 2018),证实了较大的成钾潜力,岩盐化学成分、Br/Cl值、Cl同位素、光薄片鉴定、扫描电镜等分析认为长寿地区嘉四段四二亚段达到到钾镁盐析出阶段,初步圈定长寿双龙-保合村一带勘查靶区(图9)。利用圈定的靶区和K含量计算了钾盐资源量,其中达到边界品位的矿石总资源量9 889万吨,折算KCl资源量达到336万吨;达到综合利用品位的矿石总资源量46 456万吨,折算KCl资源量达到849万吨。

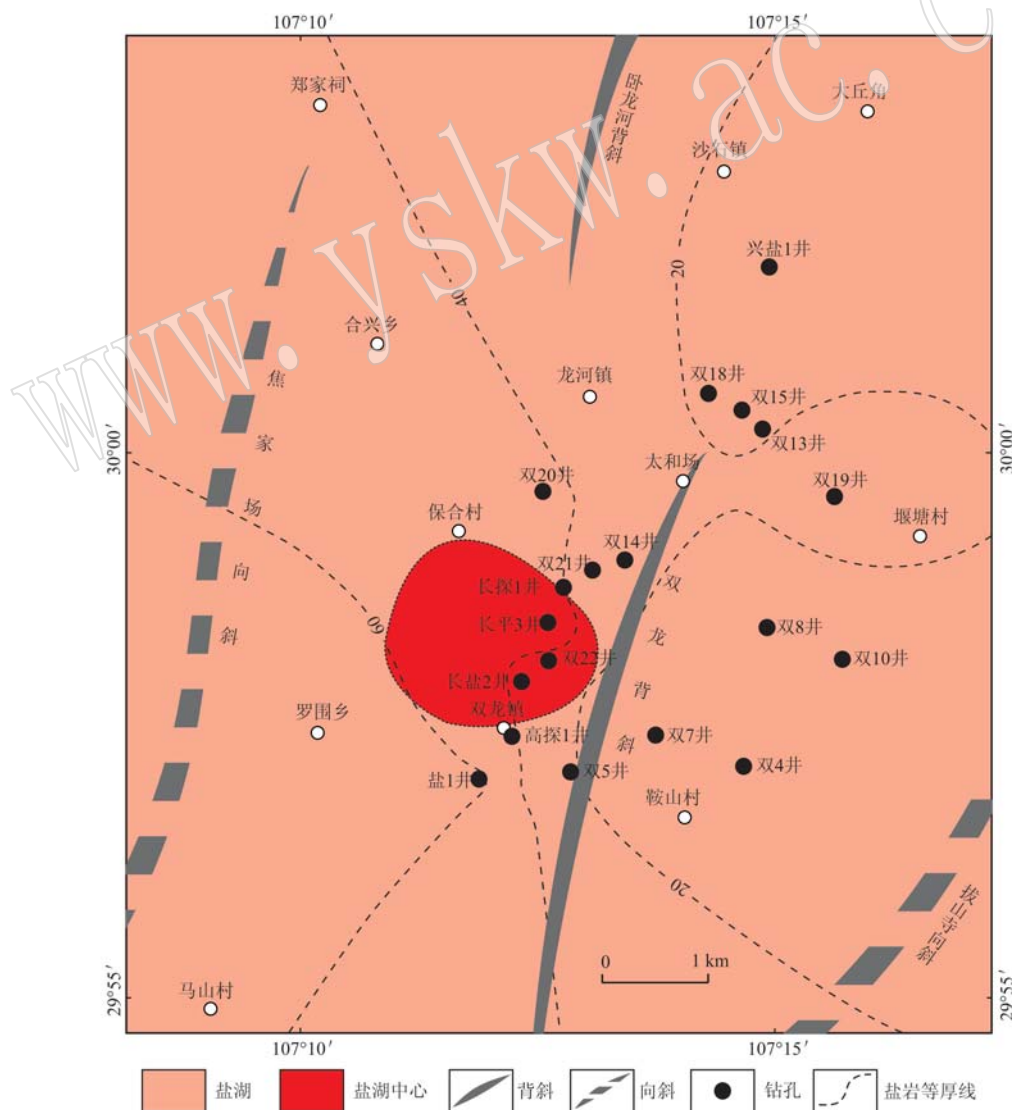


图9 垫江盐盆圈定的钾盐找矿靶区图

Fig. 9 Potash prospecting target in the Dianjiang salt basin

5 结论

(1) 光薄片鉴定、扫描电镜及 Sr 同位素等结果指示四川盆地东部早三叠世嘉陵江期赋存于岩盐中的杂卤石主要是自生成因的,是海水高度浓缩的产物,暗示该地区岩盐沉积时古卤水已经达到或接近钾盐析出阶段,原生杂卤石可以作为找钾的重要指示性矿物。

(2) 地震解译、大地电磁测深等地球物理手段明确了垫江盐盆存在次级凹陷,主要位于长寿合兴一带和垫江董家场一带。

(3) 原生杂卤石分布特征、溴含量、溴氯系数(Br/Cl 值)、岩盐厚度、岩盐顶板埋深、K⁺含量、古构造以及地球物理特征等指标圈定了长寿双龙地区成钾靶区,并进行了资源量预测,为下一步开展钻孔验证提供了科学依据。

References

- Cai Keqin and Yuan Jianqi. 1986. Metallogenic conditions and prospecting direction of Triassic potash in Sichuan[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 2: 1~9(in Chinese with English abstract).
- Capo R C, Stewart B W and Chadwick O A. 1998. Strontium isotopes as tracers of ecosystem processes: Theory and methods[J]. *Geoderma*, 82(1): 197~225.
- Chen Anqing, Wang Licheng, Ji Guangjian, *et al.* 2015. Evaporitic environment and the concentration model of potash in the Early-Middle Triassic, Northeastern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2 757~2 769(in Chinese with English abstract).
- Chen Liqiong, Shen Zhaoguo, Hou Fanghao, *et al.* 2010. Triassic in Sichuan Basin, evaporation basin formation environment and dolomite reservoir[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 32(4): 334~340(in Chinese with English abstract).
- Ding T, Liu C L, Zhao Y J, *et al.* 2019. Chlorine isotope analysis of Triassic salt rock and geological significance of ancient salt lake in Sichuan Basin, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 34: 909~915.
- Dong Juan, Gao Xiang, Fang Qinfang, *et al.* 2015. The characteristics of halite inclusions in the Mengyejing potash deposit, Yunnan Province, and their palaeoenvironmental significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(2): 227~236(in Chinese with English abstract).
- Gong Daxing, Zhou Jiayun, Wu Chihua, *et al.* 2015. Lithofacies paleogeography and salt-forming model of Lower-Middle Triassic in the Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2 075~2 086(in Chinese with English abstract).
- Huang Jianguo. 1998. The Triassic potash deposits in China: An example from the Sichuan Basin[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 18(4): 23~43(in Chinese with English abstract).
- Huang Sijing, Huang Yu, Lan Yefang, *et al.* 2011. A comparative study on strontium isotope composition of dolomites and their coeval seawater in the Late Permian-Early Triassic, NE Sichuan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3 831~3 842(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting. 1995. Geochemical behaviour of bromine and its application to prospecting for potash resource in Sichuan[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 17(3): 175~181(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, He Jinqian and Ye Maocai. 2003. On potash-forming model and ore-hunting direction of Lower-Middle Triassic series in Sichuan[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 25(2): 76~81(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting and Yi Shiming. 1998. Distribution genesis and significance of shallow seated polyhalite ore in Quxian, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 18(2): 121~125(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin. 2013. Characteristics and formation of potash deposits in continental rift basins: A review[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(5): 515~527(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wang Licheng, Yan Maodu, *et al.* 2018. The Mesozoic-Cenozoic tectonic settings, paleogeography and evaporitic sedimentation of Tethyan blocks within China: Implications for potash formation[J]. *Ore Geology Reviews*, 102: 406~425.
- Liu Chenglin, Jiao Pengcheng and Wang Mili. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China[J]. *Mineral Deposits*, 29(4): 581~592(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Wu Chihua, Wang Licheng, *et al.* 2016. Advance in the study of forming condition and prediction of potash deposits of marine basins in China's small blocks: Review[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(5): 581~606(in Chinese with English abstract).
- Liu Chenglin, Xuan Zhiqiang, Cao Yangtong, *et al.* 2015. Research on potash exploration at China Land Mass—Potash alteration and pattern of eastern Tethys Ocean, China[J]. *Geology of Chemical Minerals*, 37(4): 193~197(in Chinese with English abstract).
- Palmer M R and Edmond J M. 1989. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 92(1): 11~26.
- Qi Zhaoying, Qu Xiaorong, Ma Suoli, *et al.* 2019. Operational report of China's potassium fertilizer industry in 2018 and its development prediction[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 34(2): 1~4(in Chinese with English abstract).
- Song H B, Wignall P B, Tong J, *et al.* 2015. Integrated Sr isotope variations and global environmental changes through the Late Permian to early Late Triassic[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 424: 140~147.
- Sun Xiaohong, Hu Yufei, Liu Chenglin, *et al.* 2016. Argument that brine of salty lake in Sichuan basin had reached crystallizing point of potash minerals during Triassic: Evidence from chemical composition of inclusions in halite[J]. *Mineral Deposits*, 35(6): 1 157~1 168(in Chinese with English abstract).
- Tang Qingmin, Zhang Xiong, Zhu Zhengjie, *et al.* 2018. Analysis on the indicator of marine potash formation and chlorine isotopic composition

- of the Triassic Jialingjiang Formation in Dianjiang Depression, Eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1 671~1 679(in Chinese with English abstract).
- Wan Tianfeng and Zhu Hong. 2007. Positions and kinematics of Chinese continental blocks in reconstruction of global paleo-continent for paleozoic and Triassic[J]. *Geoscience*, 21(1): 1~13(in Chinese with English abstract).
- Wang Shuli and Zheng Mianping. 2014. Discovery of Triassic polyhalite in Changshou area of east Sichuan Basin and its genetic study[J]. *Mineral Deposites*, 35(5): 1 045~1 056(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingquan, Zhao Yanjun, Liu Chenglin, *et al.* 2015. Paleotemperature and sinificance of the evaporated seawater in salt forming process of the fourth member of Jialingjiang Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2 745~2 750(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiong, Zhu Zhengjie, Wei Yuyan, *et al.* 2019. Research on the effect of tectonism on the form and preservation of marine potash in Triassic Jialingjiang formation in Dianjiang Salt Basin, Eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(S1): 72~77(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiong, Zhu Zhengjie, Zhao Yangjun, *et al.* 2018. Analysis the prospects of marine potash of Trassic Jialingjiang Formation in Dianjiang salt basin, east Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1 661~1 670(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yan, Li Meng, Gong Daxing, *et al.* 2015. Research in identification and prediction method of the Triassic potash deposits in Sichuan basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1 970~1 979(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yanjun, Liu Chenglin, Gong Daxing, *et al.* 2015. The Luzhou-Kaijiang paleouplift control on the formation environments of Triassic salt and potassium of deposits in Eastern Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1 983~1 989(in Chinese with English abstract).
- Zhen Mianping, Hou Xianhua, Yu Changqing, *et al.* 2015. The leading role of salt formation theory in the breakthrough and important progress in potash deposit prospecting[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2): 129~139(in Chinese with English abstract).
- Zhou Jiayun, Gong Daxing and Li Meng. 2015. The characteristic of evaporite, migration of salt basins and its tectonic control in Triassic Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1 945~1 952(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 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.
- 陈安清, 王立成, 姬广建, 等. 2015. 川东北早-中三叠世聚盐环境及海水浓缩成钾模式[J]. *岩石学报*, 31(9): 2 757~2 769.
- 陈莉琼, 沈昭国, 侯方浩, 等. 2010. 四川盆地三叠纪蒸发岩盆地形成环境及白云岩储层[J]. *石油实验地质*, 32(4): 334~340.
- 董娟, 高翔, 方勤方, 等. 2015. 云南勐野井钾盐矿床石盐包裹体特征及古环境意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 34(2): 227~236.
- 龚大兴, 周家云, 吴驰华, 等. 2015. 四川盆地早中三叠世成盐期岩相古地理及成盐模式[J]. *地质学报*, 89(11): 2 075~2 086.
- 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.
- 黄思静, 黄喻, 兰叶芳, 等. 2011. 四川盆地东北部晚二叠世-早三叠世白云岩与同期海水锶同位素组成的对比研究[J]. *岩石学报*, 27(12): 3 831~3 842.
- 林耀庭. 1995. 溴的地球化学学习性及其在四川找钾工作中的应用[J]. *化工矿产地质*, 17(3): 175~181.
- 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*, 25(2): 76~81.
- 林耀庭, 伊世明. 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*, 18(2): 121~125.
- 刘成林. 2013. 大陆裂谷盆地钾盐矿床特征与成矿作用[J]. *地球学报*, 34(5): 515~527.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨[J]. *矿床地质*, 29(4): 581~592.
- 刘成林, 吴驰华, 王立成, 等. 2016. 中国陆块海相盆地成钾条件与预测研究进展综述[J]. *地球学报*, 37(5): 581~606.
- 刘成林, 宣之强, 曹养同, 等. 2015. 探索中国陆块找钾——中国东特提斯域成钾作用及模式[J]. *化工矿产地质*, 37(4): 193~197.
- 开昭英, 屈小荣, 马锁立, 等. 2019. 2018年我国钾肥行业运行报告及发展预测[J]. *磷肥与复肥*, 34(2): 1~4.
- 孙小虹, 胡宇飞, 刘成林, 等. 2016. 四川盆地三叠纪古盐湖已达钾石盐析出阶段——来自石盐流体包裹体化学组成的约束[J]. *矿床地质*, 35(6): 1 157~1 168.
- 唐清敏, 张雄, 朱正杰, 等. 2018. 四川盆地东部垫江凹陷三叠系嘉陵江组岩盐氯同位素特征与成钾指标研究[J]. *地质学报*, 92(8): 1 671~1 679.
- 万天丰, 朱鸿. 2007. 古生代与三叠纪中国各陆块在全球古大陆再造中的位置与运动学特征[J]. *现代地质*, 21(1): 1~13.
- 汪明泉, 赵艳军, 刘成林, 等. 2015. 四川盆地东部三叠系嘉陵江组成盐期浓缩海水古温度及其意义[J]. *岩石学报*, 31(9): 2 745~2 750.
- 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*, 35(5): 1 045~1 056.
- 张雄, 朱正杰, 魏玉燕, 等. 2019. 构造作用对四川盆地东部垫江盐盆三叠系嘉陵江组海相钾盐成矿——保存条件的影响[J]. *地质力学学报*, 25(S1): 72~77.
- 张雄, 朱正杰, 赵艳军, 等. 2018. 四川盆地东部垫江盐盆三叠系嘉陵江组成钾远景分析[J]. *地质学报*, 92(8): 1 661~1 670.
- 张研, 李萌, 龚大兴, 等. 2015. 四川盆地三叠系隐伏钾盐层识别与预测方法研究[J]. *地质学报*, 89(11): 1 970~1 979.
- 赵艳军, 刘成林, 龚大兴, 等. 2015. 泸州-开江古隆起对川东三叠纪成盐成钾环境的控制作用[J]. *地质学报*, 89(11): 1 983~1 989.
- 郑绵平, 侯献华, 于常青, 等. 2015. 成盐理论引领我国找钾取得重要进展[J]. *地球学报*, 36(2): 129~139.
- 周家云, 龚大兴, 李萌. 2015. 四川盆地三叠纪蒸发岩特征、盐盆迁移及其构造控制[J]. *地质学报*, 89(11): 1 945~1 952.