

# 四川盆地东部垫江盐盆三叠系海相钾盐成钾有利区圈定:地球物理和地球化学方法综合应用

张雄<sup>1,2)</sup>,毛玲玲<sup>1)</sup>,何昌成<sup>1)</sup>,朱正杰<sup>1,2)</sup>,栾进华<sup>1)</sup>,李永博<sup>3)</sup>,赵海彤<sup>1)</sup>,胡峰<sup>1)</sup>,田和明<sup>1)</sup>,李长超<sup>1)</sup>

1) 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室,重庆地质矿产研究院,重庆,400042;

2) 百色学院,广西百色,533000;

3) 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所,河北廊坊,065000

**内容提要:**垫江盐盆是四川盆地三叠纪时期重要的一个成盐成钾次级盆地,在早三叠世嘉陵江组四段岩盐中发现了大量含钾矿物,具备成钾潜力,但海相钾盐成矿有利区还需要进一步研究。本文通过系统收集垫江盐盆内已有钻孔资料,对嘉陵江组四段岩盐厚度进行统计,对嘉陵江组四段钻井岩盐样品进行化学成分分析,结果表明在双龙地区和五洞地区岩盐厚度大,岩盐钾含量较高,可能是古盐湖蒸发浓缩中心;对垫江盐盆内3条地震剖面进行重新解译,并开展了7条大地电磁测深剖面测量工作,结果显示早三叠世嘉陵江期在垫江盐盆北段的五洞地区和南段的双龙地区可能存在有利于钾盐沉积的凹地,地球物理和地球化学结果较为一致。综合分析认为,早三叠世嘉陵江期,垫江盐盆北段的五洞镇一带和南段的双龙一带是海相钾盐成矿的有利区,研究结果可为进一步开展钻孔验证提供科学依据。

**关键词:**海相钾盐;地球化学方法;地球物理方法;垫江盐盆

钾盐是我国七大宗紧缺的矿产资源之一,目前我国耕地仍大范围缺钾,钾盐自给率仅50%,2020年进口钾盐874万t,2021年1~2月进口钾盐已达144万t(中国无机盐工业协会)。我国目前探明的钾盐储量主要赋存在青海柴达木盆地的察尔汗盐湖(Yuan Jianqi et al., 1995)和新疆罗布泊等地的第四系盐湖晶间卤水中(Wang Mili, 2001; Liu Chenglin et al., 2002)。由于我国大陆地质构造复杂,主要由多个小陆块多期次离散、拼合而成(Wang Hongzhen, 2004),导致了我国古代沉积盆地破碎、蒸发岩类型多、埋藏深度大、分布复杂的格局,其复杂的大地构造演变历史与动力学过程对我国古代盐盆地钾盐成矿具有明显的控制作用(Liu Chenglin et al., 2016, 2018)。因此,中国古代盐盆地找钾成为“久攻不破”的难题。

四川盆地地下三叠统是我国钾盐矿产勘查的重点

区域和层位。近年来随着四川盆地东部新一轮钾盐找矿工作的开展以及新测试分析手段的运用,在垫江盐盆嘉陵江组四段岩盐中发现了大量杂卤石矿物(Zhao Yanjun et al., 2015)。Liu Chenglin et al. (2018)研究提出,东特提斯域小陆块海相盆地,因小陆块碰撞-闭合形成次级盆地构成的湖链系统,其东部次级盆地最有利成钾。垫江盐盆从大地构造上看正好位于上扬子小陆块的四川盆地东部,三叠纪时期位于特提斯洋东部,处于该模式预测的成钾有利部位。关于四川盆地东部嘉陵江组四段成钾,前人主要运用地球化学手段研究了岩盐氯同位素特征(Ding Ting et al., 2018; Zhang Xiong et al., 2018)、岩盐包裹体成分特征以及包裹体测温(Chen Xu, 2014; Sun Xiaohong et al., 2016; Wang Mingquan et al., 2016)、古构造演化(Zhao Yanjun et al., 2015; Zhang Xiong et al., 2019)与战略靶区

注:本文为国家自然科学基金青年科学基金项目(编号41902092)资助的成果。

收稿日期:2020-12-14;改回日期:2021-04-12;网络发表日期:2021-06-15;责任编辑:潘静。

作者简介:张雄,男,1990年生。工程师,主要从事构造地质与矿产地质研究。E-mail:zhangxiong305@163.com。通讯作者:朱正杰,男,1983年生。正高级工程师,主要从事地质学研究。E-mail:zhuzhjie@163.com。

**引用本文:**张雄,毛玲玲,何昌成,朱正杰,栾进华,李永博,赵海彤,胡峰,田和明,李长超. 2021. 四川盆地东部垫江盐盆三叠系海相钾盐成钾有利区圈定:地球物理和地球化学方法综合应用. 地质学报, 95(7):2052~2061, doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021191.

Zhang Xiong, Mao Lingling, He Changcheng, Zhu Zhengjie, Luan Jinhua, Li Yongbo, Zhao Haitong, Hu Feng, Tian Heming, Li Changchao. 2021. Delineation of favorable potash forming areas of the Triassic marine potash in the Dianjiang salt basin, eastern Sichuan: application of geophysical and geochemical methods. Acta Geologica Sinica, 95(7):2052~2061.

(Zhou Jiayun et al., 2015; Gong Daxin, 2016; Liu Chenglin et al., 2016)等,认为垫江盐盆古气候和古构造条件优越,具有较好的成钾潜力,因地球物理探测的缺乏,导致对钾盐最终沉积成矿的构造位置还不清楚。本文系统收集了垫江盐盆已有的油气和岩盐钻孔资料,采集了垫江盐盆北部仅有的岩盐钻孔 ZK001 井岩盐样品进行化学分析,结合大地电磁测深剖面 and 地震剖面等地球物理手段,对垫江盐盆成钾有利区进行研究和圈定,以期为进一步钾盐勘查提供依据。

## 1 区域地质概况

早三叠世时期,四川盆地受华北和华南地块碰撞影响,呈现“东高西低”的分异态势,构成了一个天然的海水制盐的巨型“多效蒸发”系统,海水自东向西退缩,符合东特提斯小陆块“碰撞-湖链”成钾模式(Liu Chenglin et al., 2018)。早中三叠世构造格架表现为两方面:一是周边台缘的古隆起;二是盆地内部隆起坳陷的分异。台缘古隆起主要有江南古隆起、龙门山古隆起、康滇古隆起和大巴山隆起。盆地内部则分布有三个北东向的隆起、坳陷带,由北向南为川西坳陷带、川东隆起带和鄂黔坳陷带。垫江盐盆区域上受华蓥山基底断裂和七曜山基底断裂控制,处于华蓥山断裂和七曜山断裂控制区域中间地带,受华蓥山断裂和七曜山断裂活动影响较小,相对比较稳定,有利于钾盐的蒸发沉积。

垫江盐盆位于四川盆地东部长寿—垫江一带,为一北东向展布的椭圆形凹陷,面积约  $4.5 \times 10^3$  km<sup>2</sup>。区内构造线方向与盐盆方向一致,均为北东—南西向。盐盆周围由明月峡背斜、飞龙场背斜和黄草峡背斜包围,内部主要有双龙背斜、卧龙河背斜、丰都向斜、黄泥塘背斜、梁平向斜等构造。地表出露地层主要为侏罗系沙溪庙组和遂宁组,三叠系含盐地层仅在盐盆边缘背斜核部出露(图 1b)。

早三叠世嘉陵江期,地壳活动强烈,四川盆地处于西高东低向东高西低转换阶段,在总体为海退的环境下,盆地东部水下隆起逐渐隆升,海水变浅,武隆隆起、石柱隆起、华蓥山隆起和泸州—开江隆起对垫江盐盆形成封闭条件起到了重要作用(Zhao Yanjun et al., 2015)。当时,垫江盐盆位于古特提斯洋东部,北纬  $10.6^\circ \sim 23.1^\circ$  之间(Yan Maodu et al., 2014),属于有利成钾的副热带高压带气候区;古气候条件炎热,古海水温度较高,蒸发作用较强(Wang Mingquan, 2016),盆地内形成一套由碳酸

盐岩、石膏、岩盐等组成的膏盐湖相和盐湖相沉积。中三叠世末海水向西退出,盆地结束了海相沉积的历史。晚三叠世及中生代,燕山运动使盆地再次沉降,接受陆河湖相砂泥岩沉积,早三叠世盐类沉积深埋地腹(Zhou Jiayun et al., 2015)。

## 2 研究方法

本次地球化学样品主要采集了 ZK001 井嘉陵江组四段,ZK001 井为垫江盐盆北部仅有的岩盐钻孔,其余钻孔均为油气钻孔,难以采集岩芯样品。本次共采集岩盐样品 16 件,在国土资源部重庆矿产资源监督检测中心利用电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES)分析,测试仪器型号为热电 iCAP6000,利用水浸取法直接溶解全岩样品后上机测试,测试误差  $<5\%$ 。

地球物理方法主要使用大地电磁测深和地震。地震解译主要是对工作区内已有的地震剖面资料进行了收集和重新解译。地震及钻井资料主要来源于中石油、中石化等石油公司。收集测线编号:2008WXS001、2008WXS005、2008WXS008、wlht500。钻井:wo54、wo132。利用地震剖面附近已有的 wo54 和 wo132 测井资料建立井震关系,在此基础上开展地震层位精细解释,本研究共对比解释了三叠系至震旦系的 7 个地震反射层,工区的地质层位标定采用已钻井的声波合成地震记录进行标定。各地层反射层波形、波组特征清楚,剖面的信噪比、分辨率较高。剖面品质较好,所反映的构造形态及断层特征清楚;纵向上,中—浅层标志层:侏罗系底、须家河组底、飞仙关组四段底、飞仙关组底、上二叠统底反射层资料品质好,信噪比高、连续性较好、地震反射特征清楚。共解译地震剖面 3 条,其中北东—南西向两条,北西—南东向一条。

本次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 系列,工作投入 MT 测量仪器(V5-2000)5 台,50H 磁探头 9 根。开工前后在工作区内选择干扰较小的地点进行 5 套 MTU-5A 大地电磁测量仪和 3 套 50H 测传感器的标定工作,以检查仪器设备的完好性,工作结束后分别对 5 套 MTU-5A 大地电磁测量仪进行了仪器一致性试验。经试验,检查点与被检查点  $0.01 \sim 320$  Hz 的视电阻率和相位曲线形态一致,同一模式下的视电阻率和相位( $\rho_{xy}$ 、 $\varphi_{xy}$ 、 $\rho_{yx}$ 、 $\varphi_{yx}$ )的均方相对误差均小于  $5.0\%$ 。本次共完成大地电磁测深点 201 个,分为 7 条大地电磁

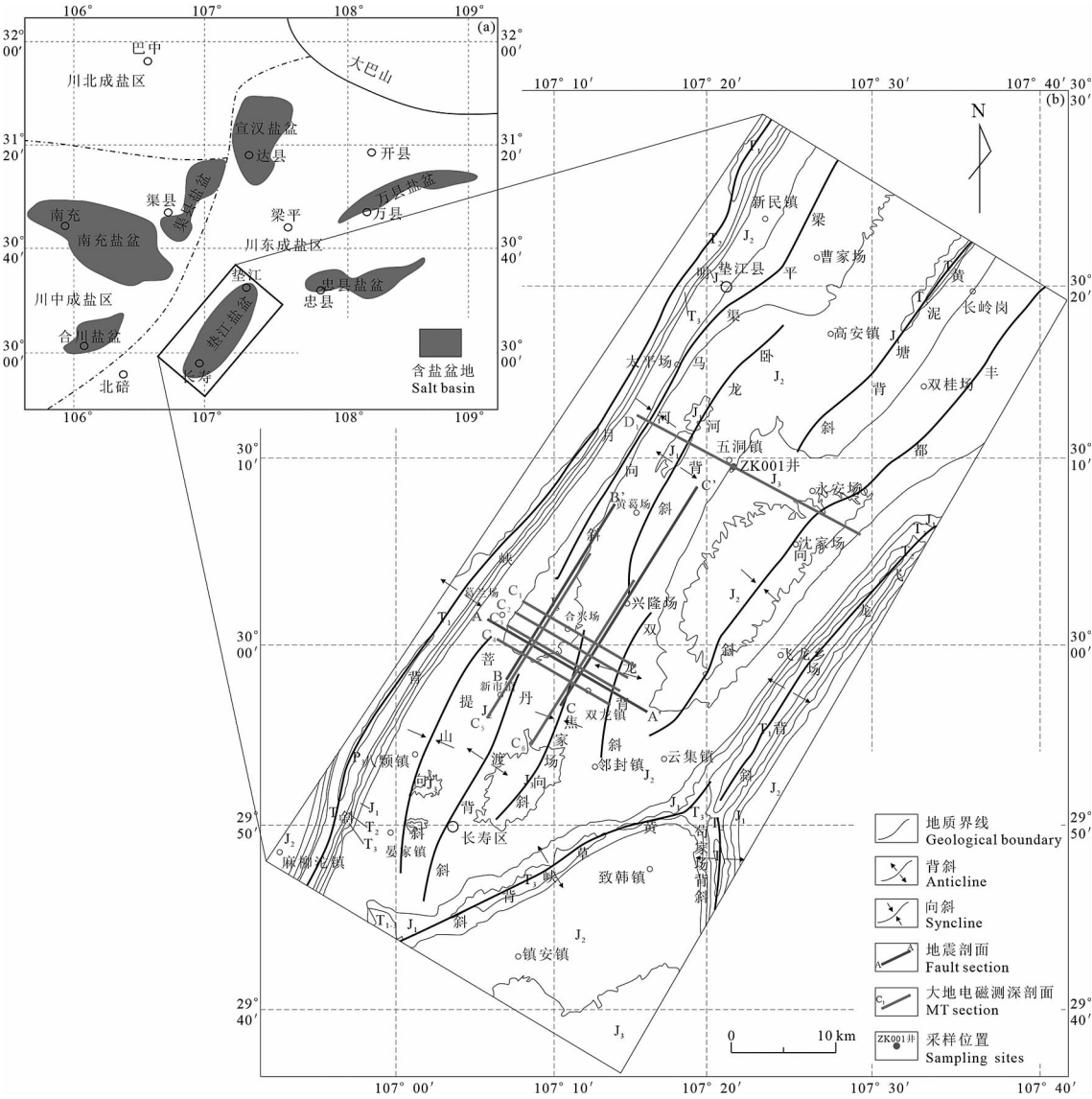


图 1 四川盆地东部含盐盆地分布示意图(a,据 Gong Daxing,2016 修改)和垫江盐盆地地质简图及地球物理剖面图(b)  
Fig. 1 Distribution map of salt basins in the eastern Sichuan basin (a, modified after Gong Daxing, 2016)  
and simplified geological map of Dianjiang depression and geophysical profile (b)

测深剖面,其中南部长寿地区 6 条,北部垫江地区 1 条,为了对比地震与大地电磁测深结果,其中 3 条大地电磁测深剖面与地震剖面位置基本重合(图 1)。

3 结果与讨论

3.1 含盐地层埋深及厚度特征和地球化学特征

垫江盐盆地岩盐主要赋存于早三叠世嘉陵江组和雷口坡组地层中,含钾矿物仅在嘉陵江组四段二亚段岩盐中发现。嘉陵江组四段二亚段岩性主要为硬石膏、白云岩、膏质白云岩、石盐岩等。岩盐主要有浅灰色、无色透明和橘红色盐岩三种,具有明显层理,岩芯上表现为明暗相间的盐岩层。纵向上,嘉陵江组四段二亚段普遍为白云岩—硬石膏—岩盐—硬

石膏—白云岩剖面结构类型,上下为碳酸盐段,中部为含盐段,含盐层剖面结构相对简单,反映了盐湖从发生、发展到消亡,即淡—咸—淡的演化、发展过程,形成多个咸化成盐旋回。

系统收集垫江盐盆地内已有钻孔资料,发现垫江盐盆地南段嘉陵江组四段盐岩埋深普遍在 2750 m 左右,垫江盐盆地北段卧龙河背斜核部受构造影响,嘉陵江组四段岩盐埋深较浅,卧龙河背斜东翼嘉陵江组四段岩盐埋深较深,在 3500 m 左右。嘉陵江组四段二亚段岩盐厚度 3~62 m 不等,主要包含三个比较稳定盐组。下部第一盐组在双盐 1 井盐厚度最大,从南向北盐岩厚度减小,到垫江盐盆地北段 ZK001 井厚度有增大趋势;第二和第三盐组在长平

3 井盐岩厚度最大,向南北两侧厚度逐渐减小,到 ZK001 井后厚度增大(图 2)。从岩盐厚度等值线图(图 3)可以看出,嘉陵江组四段二亚段岩盐在垫江盐盆内有两个岩盐厚度集中区,岩盐厚度受构造影响较大,北段厚度较大区域主要在卧龙河背斜东翼的五洞镇一带,南段厚度较大区域主要在双龙背斜西翼的双龙镇一带,厚度均在 50 m 以上。需要说明的是,现有的岩盐钻孔,普遍为岩盐开采和温泉钻孔,由于实际生产需要,在嘉陵江组四段二亚段有足够的岩盐厚度就没有继续向下打井,所以收集到的钻孔均未钻穿嘉陵江组四段二亚段,推测嘉陵江组四段二亚段实际岩盐厚度要大于已统计厚度。

ZK001 井主要位于垫江盐盆卧龙河背斜南东翼,嘉陵江组四段岩盐样品化学分析结果显示(图 4), $K^+$  含量在 0.020%~1.503% 之间,平均值为 0.276%。Zhang Xiong et al. (2018)对长平 3 井、兴盐 1 井和高探 1 井嘉陵江组四段岩盐样品进行了分析,结果显示,长平 3 井嘉陵江组四段岩盐  $K^+$  含量

较高,部分样品  $K^+$  含量达到钾盐工业品位要求,而兴盐 1 井和高探 1 井岩盐  $K^+$  含量较低,普遍低于 0.08%(Zhang Xiong et al., 2018)。统计钻孔资料显示,在长寿双龙地区、卧龙河背斜核部和卧龙河背斜东翼的五洞镇一带均有含钾矿物杂卤石发育。其中卧龙河背斜核部杂卤石厚度较低,主要发育在嘉陵江组五段岩盐中;ZK001 井雷口坡组一段岩盐和嘉陵江组四段岩盐中均发现有杂卤石矿物,厚度超过 10 m;长平 3 井嘉陵江组四段岩盐中发现了约 29 m 的含有杂卤石岩盐,其中有 13.67 m 岩盐钾离子含量达到了综合利用水平。可以看出,长平 3 井和 ZK001 井岩盐钾离子含量相对较高,岩盐厚度大,含杂卤石岩盐厚度大,推测长平 3 井和 ZK001 井所在区域可能为当时的盐湖沉积中心。

3.2 大地电磁测深对次级凹地的圈定

在垫江盐盆开展了 7 条大地电磁测深剖面,其中南部长寿地区 6 条,北部垫江地区 1 条,共完成大地电磁测深点 201 个,剖面具体位置见图 1。结果

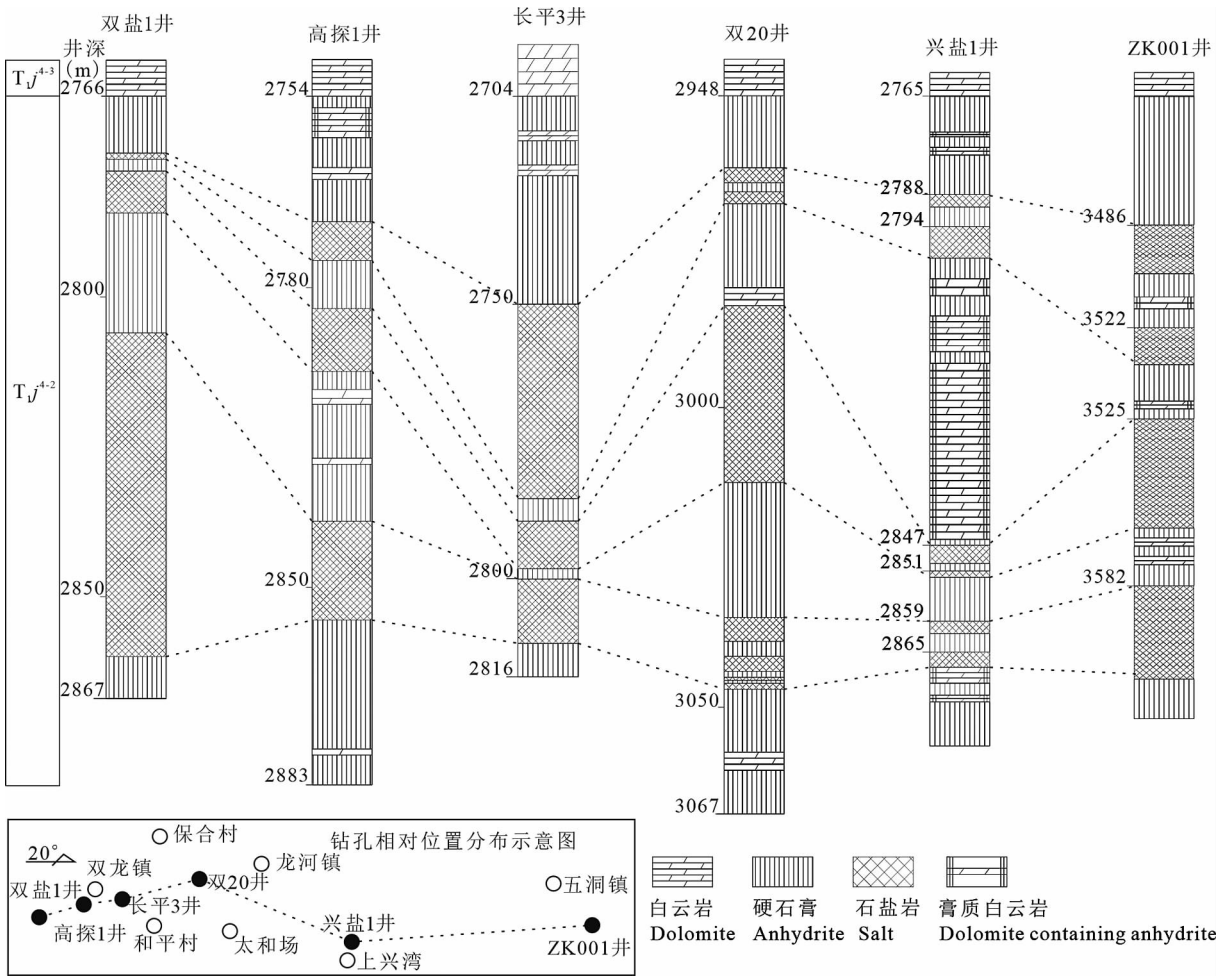


图 2 垫江盐盆部分钻孔嘉陵江组四段二亚段柱状对比图  
Fig. 2 Profile of well section of salt bearing borehole in Dianjiang salt basin

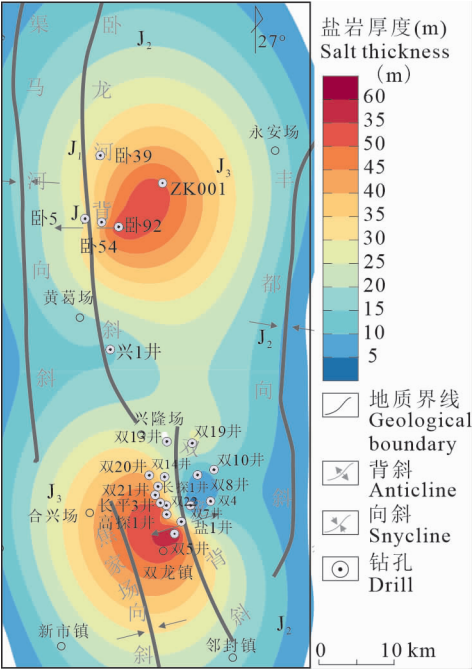


图 3 垫江盐盆嘉陵江组四段岩盐厚度等值线图  
Fig. 3 Salt thickness counter map of Jialingjiang Formation in Dianjiang salt basin

显示垫江盐盆深部发育波浪状起伏的次级构造。地层从地表到深部按电性特征可分为 4 层,即第四系黏土及侏罗系上统(Q-J<sub>3</sub>)含泥砂岩地层、侏罗系中下统(J<sub>1</sub>-J<sub>2</sub>)含石英砂岩和钙质泥岩地层、三叠系上

统须家河组(T<sub>3</sub>xj)含煤地层、三叠系雷口坡组及嘉陵江组四段(T<sub>2</sub>l-T<sub>1</sub>j<sup>4</sup>)灰岩地层、三叠系下统及二叠系以下(T<sub>1</sub>j<sup>2</sup>-P)灰岩地层,钾盐矿层位于须家河组含煤地层与三叠系中下统灰岩地层之间的过渡带层。垫江盐盆南部长寿地区地层整体呈现北深南浅、西浅东深的空间展布特征。地层波浪起伏,变化平缓,北部凹陷南部隆起。嘉陵江组四段地层电性特征与须家河组地层电性特征一致,断面图上具有平行特征,也同样呈现北深南浅、西浅东深的空间展布特征。其底部沿东南方向发育 2~3 处次级凹地,次级凹地沿北西向延展,北端次级凹地埋深最深至-3050 m,东南部次级凹地次埋深最深至-1970 m(图 5)。垫江盐盆北部剖面结果推断认为,五洞镇一带存在有利于钾盐成矿的次级凹地存在。这几处凹地与须家河组地层显示的凹地特征一致。由于须家河组低电阻特征主要是由含煤地层造成,煤的形成主要是位于沼泽等凹地地区,初步认为嘉陵江组时期次级凹地和须家河组时期次级凹地具有一定的继承性,凹地位置变动较小。

3.3 地震对次级凹地的圈定

本研究收集 2008WXS001、2008WXS005、2008WXS008、wlht500 等地震测线资料,共解译 3 条穿过研究区的地震剖面,其中两条平行区内构造线方向(B—B'剖面 and C—C'剖面),一条垂直区内构

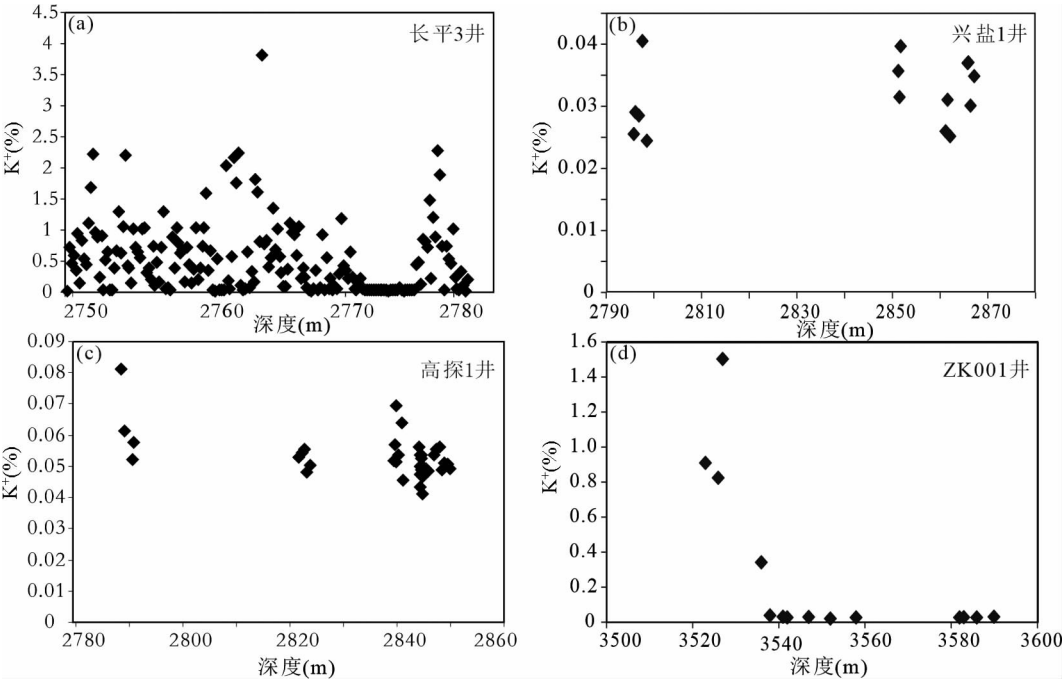


图 4 垫江盐盆中部分钻孔岩盐钾离子含量图(a,b 和 c 数据引自 Zhang Xiong et al.,2018)  
Fig. 4 Potassium ion content of wells in Dianjiang salt basin(a, b and c modified after Zhang Xiong et al.,2018)



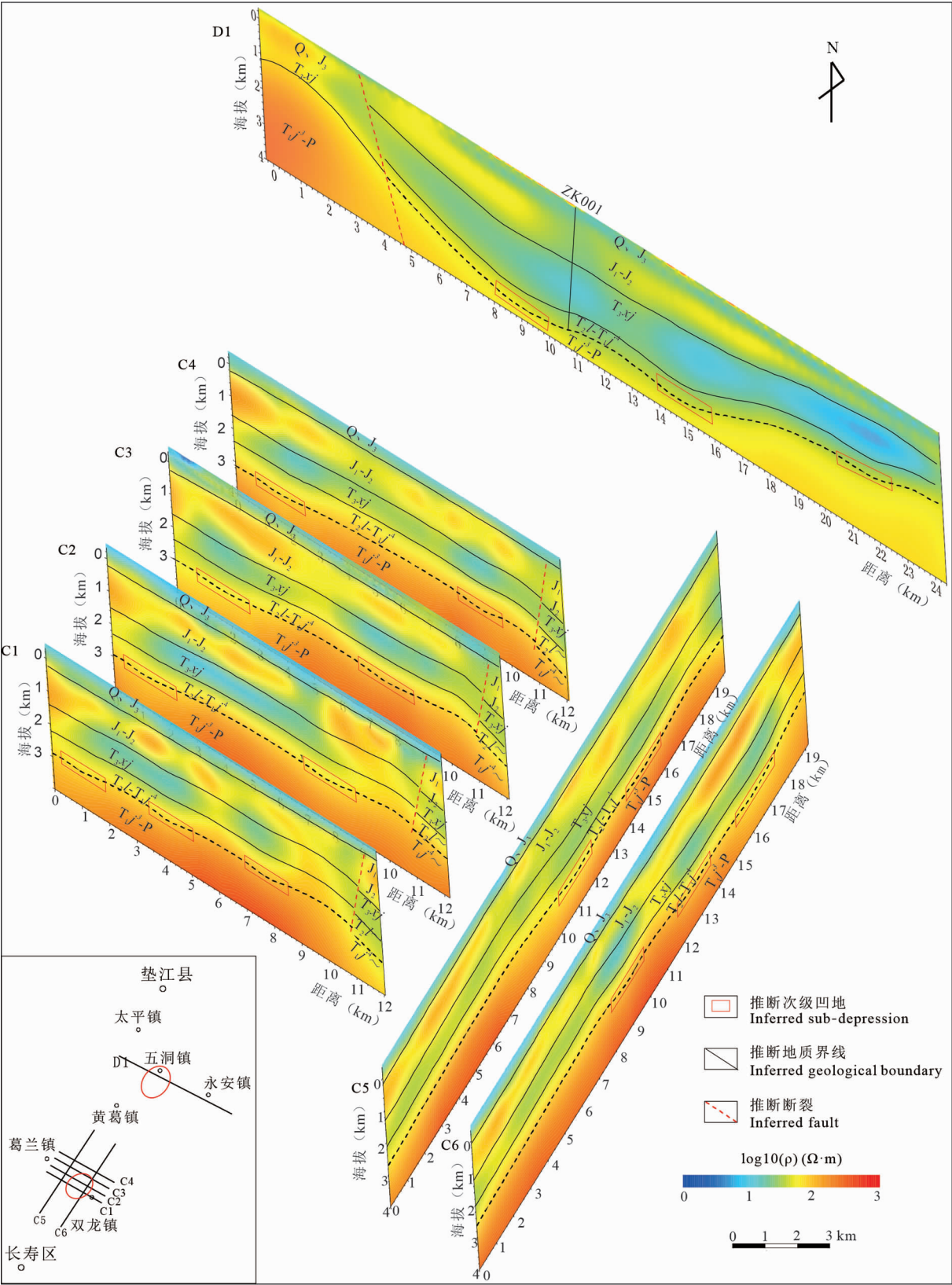


图 5 垫江盐盆大地电磁测深推断解译图(剖面位置见图 1)

Fig. 5 MT interpretation map of Dianjiang salt basin (the profile position is shown in Fig. 1)

造线方向(A—A'剖面)(图 1)。中—浅层标志层: 侏罗系底部、须家河底部、飞仙关四段底部、飞仙关底部、上二叠统底部反射层资料品质好,信噪比高、连续性较好、地震反射特征清楚。利用四川盆地东部地区卧 132 和卧 54 钻井的测井资料建立井震关系,在此基础上开展地震层位精细解译。NW 向地震剖面(A—A'剖面)垂直于构造线方向(图 1)。结果显示垫江盐盆南段内地层呈现北西低南东高,总体倾向北西的特点,目的层( $T_{1j}^{4-2}$ - $T_{2l}^{1-2}$ )厚度整体变化不大,但在合兴和双龙附近有明显增厚(图 6a)。NW 向地震剖面(B—B'剖面和 C—C')平行于构造线走向(图 1)。根据解译结果显示,区域上在东北向发生极轻微褶皱,幅度较低。目的层( $T_{1j}^{4-2}$ - $T_{2l}^{1-2}$ )厚度相对稳定,在双龙附近有增厚现象(图 6b)。综合分析认为,在双龙—合兴一带,嘉陵江组四段含盐地层厚度大,可能存在次级凹地。

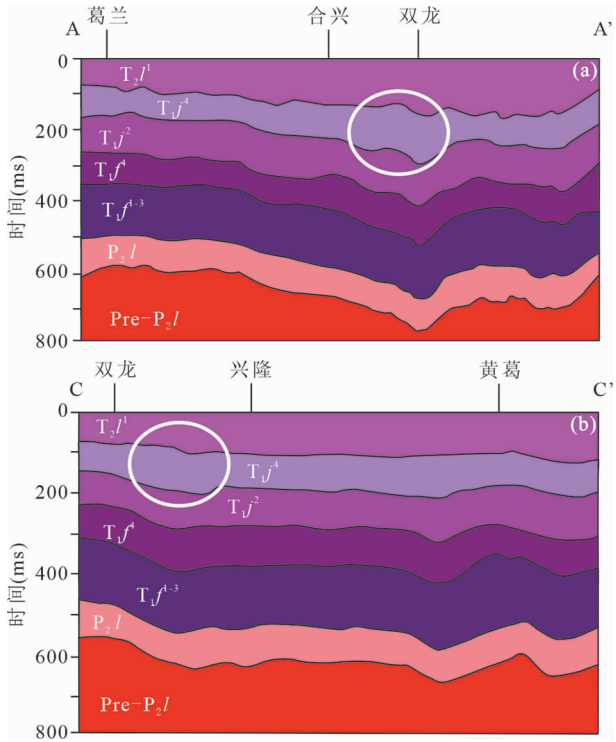


图 6 地震解译推断须家河组沉积前沉积构造图  
(剖面位置见图 1)

Fig. 6 Interpretation map of seismic section in the Dianjiang salt basin (the profile position is shown in Fig. 1)

3.4 讨论

钾盐成矿是地球表生环境中“气候—物源—构造”三要素耦合的作用,极端干旱气候是成钾的前提,海水等富钾物质来源和构造凹地是成钾的必要条件(Liu Chenglin et al., 2015)。垫江盐盆地区

早-中三叠世位于古特提斯洋东部,北纬 10.6°~23.1°之间(Yan Maodu et al., 2014),属于有利成钾的副热带高压带气候区。Wang Mingquan (2016)对川东地区岩盐流体包裹体研究表明嘉陵江期古海水的温度为 17.7~63.5℃,平均温度为 33.7℃;Xiao Sheng et al. (2015)对四川盆地碳酸盐碳氧同位素进行研究发现,海水温度最高 68.4℃,属于亚热带气候(Xiao Sheng et al., 2015)。证实当时气候条件炎热,古海水温度较高,有利于古海水蒸发浓缩,为钾盐形成奠定了良好的气候条件。Sun Xiaohong et al. (2016)对长平 3 井岩盐进行了流体包裹体分析,石盐流体包裹体中 K<sup>+</sup> 含量平均为 24.12 g/L,与现代海水浓缩到钾石盐析出阶段的 K<sup>+</sup> 含量(Chen Yuhua, 1983)基本一致;Zhang Xiong et al. (2018)通过对长平 3 井岩盐氯同位素和溴氯系数特征研究,均认为其古盐湖卤水已浓缩达到了钾石盐析出阶段(Sun Xiaohong et al., 2016; Zhang Xiong et al., 2018)。

盆地中最深的构造凹地是成钾的必要条件之一,即成钾三个要素中构造的“极端成分”(Liu Chenglin et al., 2015),“最深的构造凹地”往往就是古卤水浓缩、汇集的中心。早三叠世嘉陵江期,四川盆地东部地壳活动强烈,在总体为海退的背景下,水下隆起逐渐隆升,盆地内形成一套由碳酸盐岩、石膏、岩盐等组成的膏盐湖相和盐湖相沉积。垫江盐盆所在的川东地区在三叠纪时期主要受华蓥山基底断裂和七曜山基底断裂控制。垫江盐盆位于华蓥山断裂和七曜山断裂控制区域中间地带,受华蓥山断裂和七曜山断裂活动影响较小,处于相对稳定区块,有利于钾盐的蒸发浓缩。同时泸州、开江等古隆起还处于水下隆起阶段,垫江盐盆受古隆起地形起伏的影响,处于水下高地,内部及周缘形成一些相互独立的小洼陷,这些洼陷周缘被高地及礁滩发育而封闭起来,由于盆小水浅,会快速蒸发演化成盐湖(Zhao Yanjun et al., 2015)。在垫江盐盆南段的双龙背斜西翼的双龙一带和垫江盐盆北段的卧龙河背斜东翼的五洞镇一带,岩盐厚度较大,化学分析结果显示这两个区域嘉陵江组四段岩盐中钾离子含量较高,并发现了大量杂卤石矿物,表明这两个地方可能是当时的盐湖浓缩中心。地震反演结果和大地电磁测深数据也显示,在这两个区域膏盐层厚度大,深部的嘉陵江组平面上呈凹陷状,可能是当时的次级凹地,与地球化学分析结果一致。上述工作也符合基于罗布泊等盆地找钾总结出的盆地钾盐找矿四个准

则(Liu Chenglin et al., 2010)。因此,综合分析认为,垫江盐盆南段长寿双龙地区和北段垫江五洞地区在早三叠世嘉陵江期可能是垫江盐盆盐湖浓缩沉积中心,是成钾的有利区,也是下一步找钾工作的重点区域。

# 4 结论

综合梳理研究四川盆地东部垫江盐盆已有钻孔和地震剖面资料,详细分析垫江盐盆三叠系海相钾盐的地球化学与地球物理探测特征,取得以下主要认识:

(1)垫江盐盆北段的五洞镇一带和南段的双龙一带,岩盐厚度大,厚度均在 50 m 以上。位于双龙的长平 3 井和位于五洞的 ZK001 井嘉陵江组四段 K<sup>+</sup> 含量高,可能是嘉陵江组四段时期垫江盐盆内盐湖蒸发浓缩中心。

(2)大地电磁测深结果显示垫江盐盆内双龙地区和五洞镇一带存在有利于钾盐成矿的次级构造凹地,与须家河组的含煤地层显示的凹地位置一致,位置变动较小。地震剖面反演结果显示,在长寿双龙一带,嘉陵江组四段地层有明显增厚,可能存在构造凹地,地震结果与大地电磁测深结果一致。

(3)地球化学分析结果和地球物理分析结果一致,显示在五洞镇一带和双龙一带可能存在有利于钾盐沉积的构造凹地。综合分析认为,这两个区域为垫江盐盆成钾有利区,是下一步寻找海相钾盐的重要靶区。

**致谢:**中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所王书民教授级高工对大地电磁测深数据解译的指导、成都理工大学李金玺副教授对地震剖面数据解译的指导,中国地质科学院矿产资源研究所刘成林研究员、中国科学院青海研究所张西营研究员和审稿老师提出的建设性意见对文章修改提供了重要帮助,在此一并表示衷心的感谢!

# References

Chen Xu. 2014. Characteristics of salt-bearing series in eastern Sichuan basin and research in homogenization temperature of the fluid inclusions in salt. Master dissertation of Beijing Chinese Academy of Geological Sciences, 95 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuhua. 1983. Sequence if salt separation and regularity of some trace elements distribution during isothermal evaporation (25℃) of the Huanghai sea water. *Acta Geologica Sinica*, (4): 379~390 (in Chinese with English abstract).

Ding Ting, Liu Chenglin, Zhao Yanjun, Zhu Zhengjie. 2018. Chlorine isotope analysis of Triassic salt rock and geological significance of ancient salt lake in Sichuan Basin, China.

Carbonates and Evaporites, 34: 909~915.

Godon A, Jendrzejewski N, Eggenkamp H G M. 2004. A cross-calibration of chlorine isotopic measurements and suitability of seawater as the international reference material. *Chemical Geology*, 207(1-2): 1~12.

Gong Daxing. 2016. The Triassic salt-forming environment, potash-forming conditions and genetic mechanism in Sichuan Basin. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).

Eggenkamp H G M, Kreulen R, Van Groos A F K. 1995. Chlorine stable isotope fractionation in evaporates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(24): 5169~5175.

Kaufmann R S, Long A, Campbell D J. 1988. Chlorine isotope distribution in formation waters, Texas and Louisiana. *AAPG Bulletin*, 72(7): 839~844.

Liu Chenglin, Wang Mili, Jiao Pengcheng, Chen Yongzhi, Li Shude. 2002. Formation of pores and brine reserving mechanism of the aquifers in quaternary potash depisits in Lop Nur lake, Xinjiang, China. *Geological Review*, (4): 437~450 (in Chinese with English abstract).

Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Wang Mili. 2010. A tentative discussion on exploration model for potash deposits in basins of China. *Mineral Deposits*, 29(4): 581~592 (in Chinese with English abstract).

Liu Chenglin, Jiao Pengcheng, Lu Fenglin, Wang Yongzhi, Sun Xiaohong, Zhang Hua, Wang Licheng, Yao Fojun. 2015. The impact of the linked factors of provenance, tectonics and climate on potash formation: an example from the potash deposits of Lop Nur Depression in Tarim Basin, Xinjiang, western China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, (6): 2030~2047.

Liu Chenglin, Wu Chihua, Wang Licheng, Fang Xiaomin, Zhao Yanjun, Yan Maodu, Zhang Yongsheng, Cao Yangtong, Zhang Hua, Lu Fenglin. 2016. Advance in the study of forming condition and prediction of potash deposits marine basins in China's small blocks: review. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(5): 581~606.

Liu Chenglin, Wang Licheng, Yan Maodu, Zhao Yanjun, Cao Yangtong, Fang Xiaomin, Shen Lijian, Wu Chihua, Lv Fenglin, Ding Ting. 2018. The Mesozoic-Cenozoic tectonic settings, paleogeography and evaporitic sedimentation of Tethyan blocks within China: implications for potash formation. *Ore Geology Reviews*, 102: 406~425 (in Chinese with English abstract).

Sun Xiaohong, Hu Yufei, Liu Chenglin, Ding Ting, Hu Mingyue, Zhao Yanjun, Wang Mingquan. 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. *Mineral Deposits*, 35(6): 1157~1168 (in Chinese with English abstract).

Wang Mingquan. 2016. Paleotemperature and its potash-forming effect in early and middle Triassic in eastern Sichuan Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 58 (in Chinese with English abstract).

Xiao Sheng, Xiao Chuantao, Liang Wenjun. 2015. Carbon and oxygen isotope composition of carbonatic rock from the middle Permian-lower Triassic in Chuanxi area. *Science and Technology Review*, 33(22): 19~26 (in Chinese with English abstract).

Yan Maodu, Zhang Dawen. 2014. Drifting history of China's main blocks during specific periods and its tectonic constraints on marine potash formation. *Mineral Deposits*, 33(5): 945~963 (in Chinese with English abstract).

Zhang Xiong, Zhu Zhengjie, Zhao Yanjun, Wei Yuyan, Mao Linlin, Shuang Yan, Yang Hongyong, Liu Yongwang. 2018. Analysis the forming of marine potash conditions of Trassic Jialingjiang Formation in Dianjiang salt basin, east Sichuan basin. *Acta Geologica Sinica*, 92(8): 1661~1670 (in Chinese with English abstract).

Zhang Xiong, Zhu Zhengjie, Wei Yuyan, Zhao Yanjun, Zhang Yu.



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. *Journal of Geomechanic*, 25 (S1): 72 ~ 77 (in Chinese with English abstract).

Zhao Yanjun, Liu Chenglin, Gong Daxin, Zhou Jiayun, Ding Ting, Wang Mingquan, Wang Licheng. 2015. The Luzhou-Kaijiang paleouplift control on the formation environments of Triassic salt and potassium of deposits in eastern Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1983~1989 (in Chinese with English abstract).

Zhou Jiayun, Gong Daxin, Li Meng. 2015. The characteristic of evaporite, migration of salt basins and its tectonic control in Triassic Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 1945~1952 (in Chinese with English abstract).

## 参 考 文 献

- 陈旭. 2014. 川东地区长平三井含盐系特征及石盐流体包裹体的研究. 中国地质科学院硕士学位论文.
- 陈郁华. 1983. 黄海水 25℃恒温蒸发时的析盐序列及某些微量元素的分布规律. *地质学报*, (4): 379~390.
- 龚大兴. 2016. 四川盆地三叠纪成盐环境、成钾条件及成因机制. 成都理工大学博士学位论文.
- 刘成林, 王弭力, 焦鹏程, 陈永志, 李树德. 2002. 罗布泊第四纪卤水钾矿储层孔隙成因与储集机制研究. *地质论评*, 48(4): 437~450.
- 刘成林, 焦鹏程, 王弭力. 2010. 盆地钾盐找矿模型探讨. *矿床地质*, 9(4): 581~592.
- 刘成林, 吴驰华, 王立成, 方小敏, 赵艳军. 2016. 中国陆块海相盆地成钾条件与预测研究进展综述. *地球学报*, 37(5): 581~606.
- 罗重光, 肖应凯, 马海州, 马云麒, 张艳灵, 贺茂勇. 2012. 盐湖卤水蒸发过程中的稳定氯同位素分馏. *科学通报*, 57(14): 1242~1251.
- 孙大鹏, 帅开业, 高建华, 刘卫国, 周引民, 马育华. 1998. 氯化物型钾盐矿床氯同位素地球化学的初步研究. *现代地质*, 12(2): 80~85.
- 孙小虹, 胡宇飞, 刘成林, 丁婷, 胡明月, 赵艳军, 汪明泉. 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. *矿床地质*, 35(6): 1157~1168.
- 王鸿祯. 2004. 王鸿祯文集. 北京: 地质出版社.
- 王弭力. 2001. 罗布泊地区钾盐资源开发利用研究. 中国地质科学院“九五”科技成果汇编: 中国地质学会, 34~36.
- 汪明泉, 赵艳军, 刘成林, 丁婷. 2016. 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. *岩石学报*, 31(9): 2745~2750.
- 肖胜, 肖传桃, 梁文君. 2015. 川西地区中二叠统一下三叠统碳酸盐岩碳氧同位素特征. *科技导报*, 33(22): 19~26.
- 颜茂都, 张大文. 2014. 中国主要陆块特定时段的漂移演化历史及其对海相钾盐成矿作用的制约. *矿床地质*, 33(5): 945~963.
- 袁见齐, 杨谦, 孙大鹏, 霍承禹, 蔡克勤, 王文达, 刘训健. 1995. 察尔汗盐湖钾盐矿床的形成条件. 北京: 地质出版社.
- 张雄, 朱正杰, 赵艳军, 魏玉燕, 刘永旺, 双燕, 杨洪永, 毛玲玲. 2018. 四川盆地东部垫江盐盆三叠系嘉陵江组成钾远景分析. *地质学报*, 92(8): 1661~1670.
- 张雄, 朱正杰, 魏玉燕, 赵艳军, 张宇. 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. *地质力学学报*, 25(S1): 72~77.
- 赵艳军, 刘成林, 龚大兴, 周家云, 丁婷, 汪明泉, 王立成. 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. *地质学报*, 89(11): 1983~1989.
- 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. *地质学报*, 89(11): 1945~1952.

Delineation of favorable potash forming areas of the Triassic marine potash in the Dianjiang salt basin, eastern Sichuan: application of geophysical and geochemical methods

ZHANG Xiong<sup>1,2)</sup>, MAO Lingling<sup>1)</sup>, HE Changcheng<sup>1)</sup>, ZHU Zhengjie<sup>\*1,2)</sup>, LUAN Jinhua<sup>1)</sup>, LI Yongbo<sup>3)</sup>, ZHAO Haitong<sup>1)</sup>, HU Feng<sup>1)</sup>, TIAN Heming<sup>1)</sup>, LI Changchao<sup>1)</sup>

1) Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China;

2) Baise University, Baise, Guangxi 533000, China;

3) Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang, Hebei 065000, China

\* Corresponding author: zhuzhj@163.com

Abstract

The Dianjiang salt basin is one of the most important Triassic Potash-forming sub-basins in the eastern Sichuan basin, where a large number of potassium-bearing minerals have been found within the halite in the fourth member of the Jialingjiang Formation ( $T_1j^4$ ). Nevertheless, the favorable potash-forming areas of marine potash still remain elusive and need further study. Based on the systematic collection of the drilling well data in the Dianjiang salt basin, this paper calculated the salt thickness of the  $T_1j^4$  and analyzed the chemical components of the halite samples. Results show that the salt thicknesses of the Shuanglong area and the Wudong area are the highest. Within these two areas, the potassium content of halite shows a distinctive high level, suggesting that the probable ancient salt lake evaporation and concentration centers of the Dianjiang salt basin were in the Changping and the Wudong areas. Moreover, we reinterpreted three seismic profiles across the Dianjiang salt basin, and employed the magnetotelluric sounding studies on another seven sections. These reveal that the significant sub-depressions favouring potash deposition during the period of Jialingjiang Formation likely exist in the Wudong part in the northern Dianjiang salt basin and in the Shuanglong part in the southern Dianjiang salt basin. This geophysical observation is in good agreement with the geochemical result. In short, comprehensive analyses show that the Wudong area in the northern Dianjiang basin and the Shuanglong area in the southern Dianjiang salt basin may be the favorable potash-forming areas of marine potash during the period of Jialingjiang Formation in the early Triassic. The results of this study may be verified by drilling.

**Key words:** marine potash; geophysical methods; geochemical methods; Dianjiang salt basin