

川西地区雷口坡组岩相古地理与富钾卤水预测^{*}

徐国盛¹, 陈美玲¹, 刘 为¹, 孟昱璋^{1,2}, 杨 朋¹, 胡永宏³,
彭敬成³, 王宪刚³, 黄小琼⁴

(1 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059; 2 四川华源矿业勘查开发有限责任公司, 四川 成都 610059; 3 邛崃市鸿丰钾矿肥有限公司, 四川 成都 611541; 4 中石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610051)

摘 要 利用测井、录井、岩芯、薄片、扫描电镜及能谱分析等资料, 综合研究川西地区雷口坡组岩相古地理、分析富钾卤水成因并预测有利分布区带。川西地区中三叠统雷口坡组发育蒸发台地相、局限台地相和开阔台地相。地层年代从古到新可分为雷一至雷五共 5 期, 海平面经历了 2 次变浅→加深的旋回, 雷四¹ 期由于快速海退, 广泛发育蒸发台地相, 其中成都地区膏盆内发育平落坝、盐井沟及大兴场 3 个盐盆。认为川西地区雷口坡组富钾卤水是由海水蒸发浓缩而成的海相原生沉积含钾卤水, 在晶间卤水、钾盐类溶滤水和陆相径流来源卤水的掺合下, 发生高度变质作用而形成的混合型水。富钾卤水遵循“膏盆-盐盆控区、褶皱-断层定带、裂缝-孔隙储卤”的分布特征。在沉积相、岩相古地理、富钾卤水来源与分布特征等综合研究的基础上, 提出了“卤水聚钾中心”和“储卤中心”的概念, 结合单井卤水层水化学分析数据与富钾卤水的工业开采指标, 在川西地区雷口坡组圈定并预测出 1 个卤水聚钾中心和 3 个储卤中心, 卤水聚钾中心位于平落坝构造区, 储卤中心分别位于江油中坝、丹棱大兴场以及彭山盐井沟构造区, 可为四川盆地中三叠统雷口坡组富钾卤水的勘探指明方向。

关键词 地质学; 岩相古地理; 富钾卤水; 卤水聚钾中心; 储卤中心; 中三叠统; 雷口坡组; 川西地区

中图分类号: P619.21⁺1

文献标志码: A

Lithofacies palaeogeography and forecast of potassium-rich brine of Leikoupo Formation in western Sichuan

XU GuoSheng¹, CHEN MeiLing¹, LIU Wei¹, MENG YuZhang^{1,2}, YANG Peng¹, HU YongHong³,
PENG JingCheng³, WANG XianGang³ and HUANG XiaoQiong⁴

(1 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2 Sichuan Huayuan Mining Exploitation Co. Ltd., Chengdu 610059, Sichuan, China; 3 Hongfeng Potash Fertilizer Co. Ltd., Chengdu 611541, Sichuan, China; 4 Research Institute of Exploration and Development, CNPC Southwest Oil-Gas Branch Company, Chengdu 610051, Sichuan, China)

Abstract

Based on the data of well logging, compound logging, core, thin section, SEM and energy spectrum

^{*} 本文得到国家地质调查项目油钾兼探实施方案和调查评价综合研究(1212011085524)和四川三叠纪富钾卤水富集规律及有利地区调查评价(1212010011803)的联合资助

第一作者简介 徐国盛, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 从事储层评价与油气成藏研究。Email: xgs@cdut.edu.cn

^{**} 通讯作者 刘 为, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 储层评价与油气成藏研究专业。Email: liuweier_china@sina.cn

收稿日期 2011-08-05; 改回日期 2012-02-28。秦思婷编辑。

analysis, the authors made a comprehensive study of lithofacies palaeogeography of western Sichuan basin, analyzed the origin of potassium-rich brine and forecast the promising areas. The sedimentary facies are composed of evaporate platform, restricted platform and open platform facies in the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan basin. The sea water of Leikoupo spanned two evolutionary processes from regression to transgression during 1st-5th stages. And during 4th stage, with the rapid regression, evaporate platform deposits were produced in several areas. Chengdu gypsum-basin micro-facies include 3 salt-basin micro-facies, which are called Pingluoba, Daxingchang and Yanjinggou salt-basin respectively. The potassium-rich brine in western Sichuan basin is a mixed high-degree metamorphic brine, which suggests that the sea facies primary sedimentary potassium brine from the evaporation and concentration of sea water became mature by inter-crystalline brine, brine from dissolution and infiltration reaction between potassium saline minerals and brine from continental flow. In addition, the distribution characteristics of the potassium-rich brine can be generalized into "gypsum-basin and salt-basin control the area, folds and faults determine the zone, and cracks and pores store the brine". Based on a comprehensive analysis of sedimentary facies, lithofacies palaeogeography and the origin and distribution characteristics of potassium-rich brine in western Sichuan basin, the authors put forward two concepts which are called "brine aggregate-potash center" and "brine reservoir center". According to the single well water chemical analytical data of brine formation and standard industrial production indices of rich potassium brine, one aggregate-potash center and three rich-halogen centers were delineated and predicted in western Sichuan basin, with the aggregate-potash center located in Pingluoba structure area, and the rich-halogen centers located respectively in Jiangyou Zhongba, Danling Daxingchang and Pengshan Yanjinggou structure areas, which indicate the direction for exploring rich potassium brine in the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan basin.

Key words: geology, lithofacies palaeogeography, potassium-rich brine, brine aggregate-potash center, brine reservoir center, Middle Triassic, Leikoupo Formation, western Sichuan basin

从四川盆地西部中三叠统雷口坡组钻探发现品质位居全国之冠的富钾卤水以来,经过 20 余年的勘探和研究,已对其岩相古地理、富钾卤水成因等方面有了较深的认识,即蒸发环境是四川盆地成钾的有利环境,但富钾卤水绝不是简单的盐盆海水蒸发浓缩后的产物,后期的成岩作用以及化学反应影响着卤水的成分(Ayora et al., 1994a; 1994b; 2001; Holland et al., 1996; 林耀庭等, 2008; 郑绵平等, 2006; 宋鹤彬, 1997)。虽已认识到川西地区雷口坡组富钾卤水为“蒸发浓缩的海相卤水、非海相卤水以及埋藏成岩过程中封存卤水对地层中海相蒸发岩溶滤作用形成的混合水”(黄思静等, 1997; 林耀庭等, 2002; 2008, 2009; 林耀庭, 2005; 宋鹤彬, 1997)。但目前依然存在着不少问题,如许多学者研究的主要目标是寻找石油与天然气滩相储层,而不是蒸发台地相膏盆、盐盆,因此与富钾卤水勘探联系不够紧密;另外,对富钾卤水分布特征的研究也相对较少。为此,本文深入研究了川西地区雷口坡组岩相古地理,并结合地球化学指标从地质历史的角度探讨富钾卤水的

形成与演化以及分布特征,预测与圈定“储卤中心”和“卤水聚钾中心”,以期对川西地区雷口坡组富钾卤水的勘探指明方向。

1 地质背景

中三叠世雷口坡期的四川盆地属于内陆克拉通盆地。晚元古代的晋宁运动使裂解的扬子古陆依次聚合造山,产生了强烈的褶皱、岩浆侵入和区域变质作用,早期结晶基底和地槽沉积发生褶皱回返,陆壳增生,均标志着地壳的结晶和逐渐硬化,四川盆地的基底基本形成。中三叠世末印支运动早幕,盆地内出现大隆大拗格局,川东南抬升形成了泸州-开江古隆起,而川西地区形成了川西拗陷,包括剑阁、德阳、成都、乐山等地区。古隆起的发展造成盆地内中-下三叠统广遭剥蚀,核部剥蚀至嘉陵江三段(图 1)。雷口坡组与下伏嘉陵江组为平行不整合接触,两组之间的分界线为“绿豆岩”层;与上覆的须家河组或马鞍塘组亦为不整合接触(吴应林等, 1989)(图 2)。

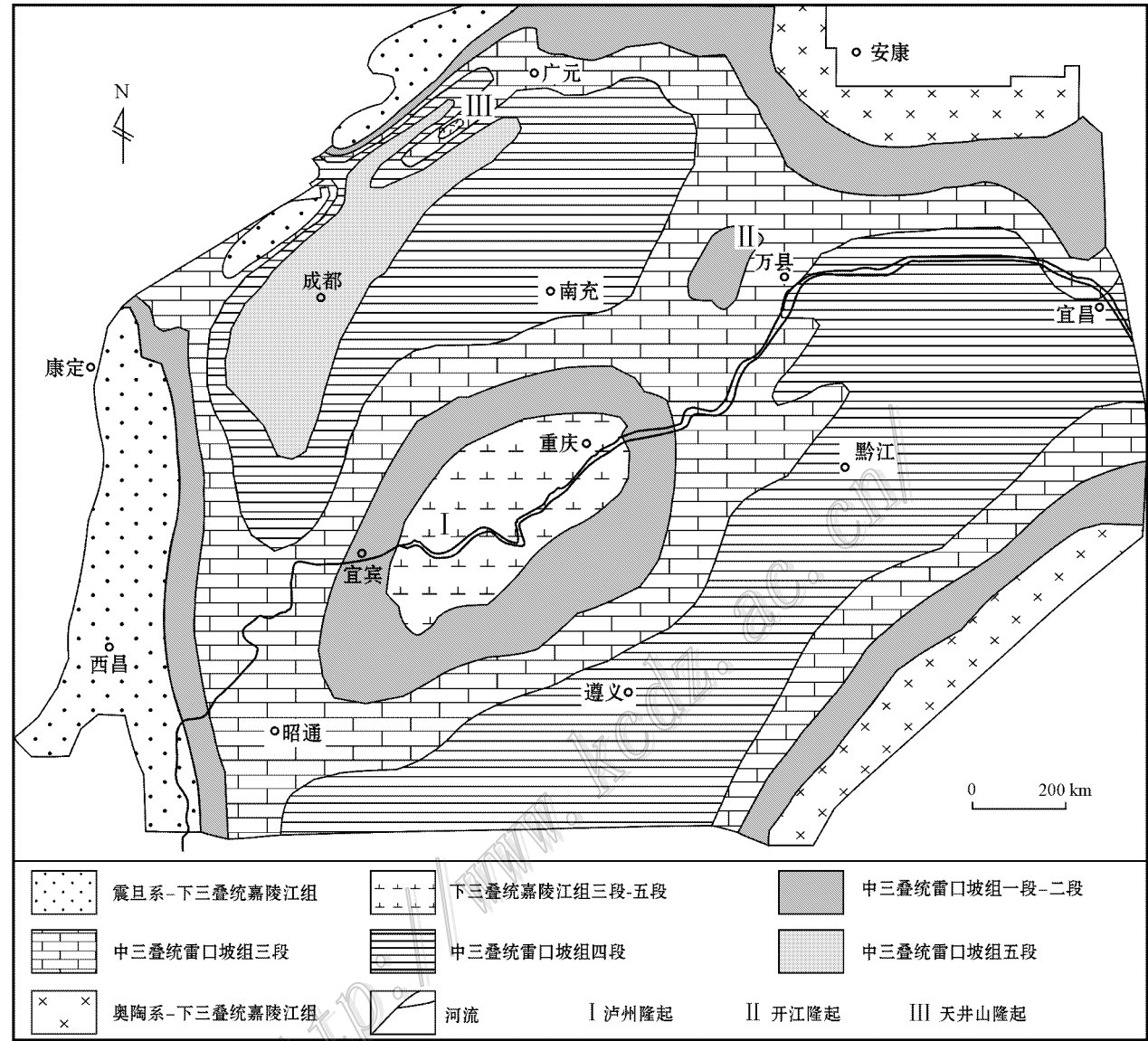


图 1 四川盆地晚三叠世前古地质图

Fig. 1 Geological map of pre-Late Triassic period in Sichuan basin

川西地区雷口坡组岩性以白云岩为主,是一套白云岩、灰岩、膏盐岩和泥岩的岩性组合。其中,以白云岩最为丰富,种类繁多,广泛分布于各层段之中,孔隙度与渗透率较大;灰岩较少,在雷口坡组一段、三段局部可见,储集性能相对较差;雷一、雷二、雷四段夹有少量膏盐岩,成都地区雷四段膏盐岩较厚,可达 500 m 以上,雷五段(也称天井山组)因受印支运动早幕的影响,大部分地区已剥蚀殆尽(林良彪等, 2007),仅存于川西北地区,主要为鲕粒灰岩、生物灰岩和白云岩。川西地区雷三段为孔隙度与渗透率较

大的主力储层,储集岩类型主要为颗粒白云岩、藻粘结白云岩和晶粒白云岩等。

2 沉积相划分与沉积微相特征

前人已对川西地区雷口坡组沉积相进行过研究。林良彪等(2007)认为川西北地区雷口坡组为碳酸盐台地相,蒸发台地亚相包括膏盆、膏湖微相;李幸运(2009)也认为川西坳陷南段雷口坡组为碳酸盐台地相,蒸发台地亚相包括膏盆、盐盆、盐膏盆微相。

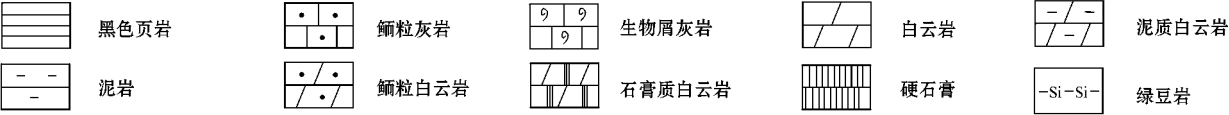
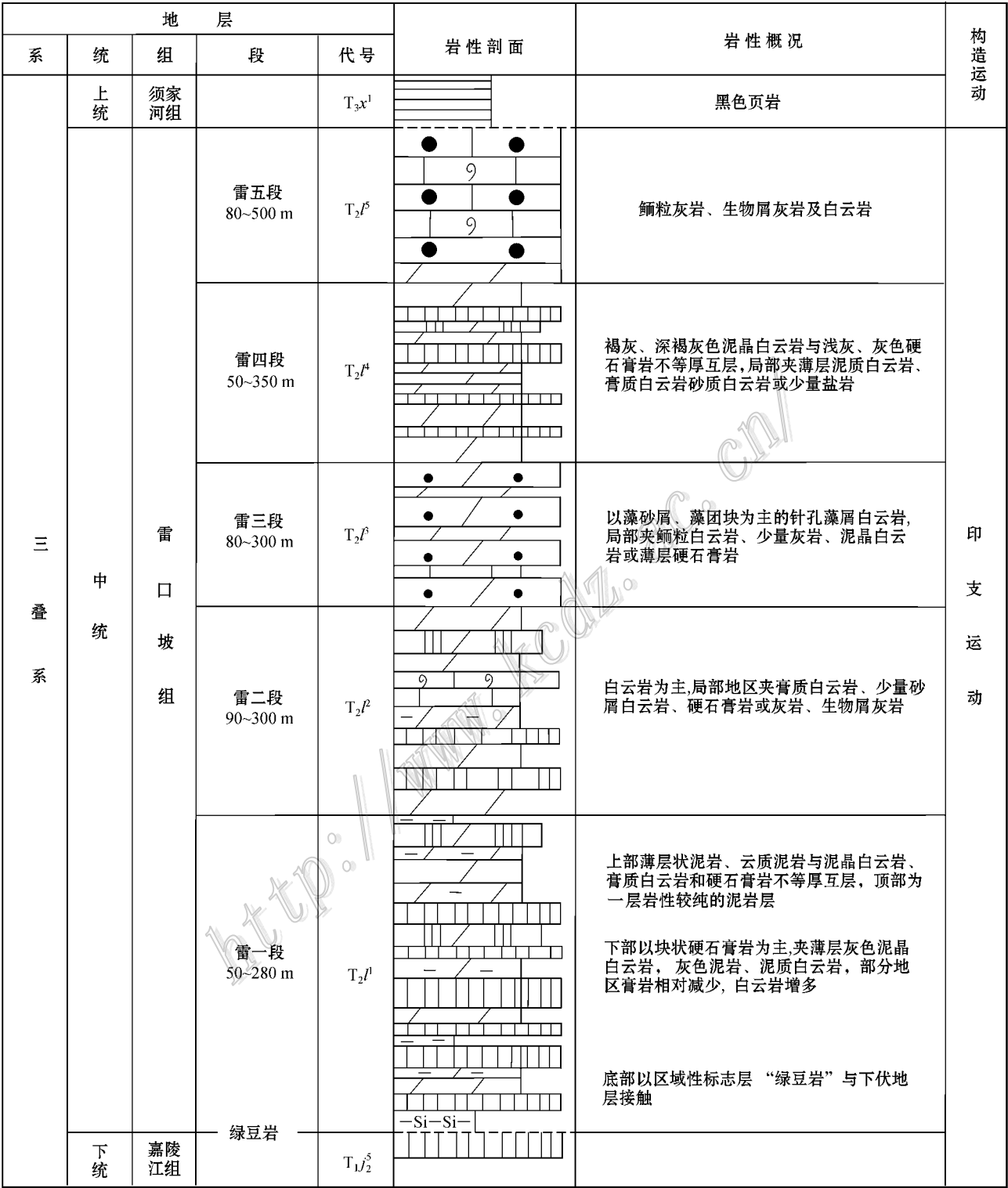


图 2 川西地区中三叠统地层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of Middle Triassic period in western Sichuan basin

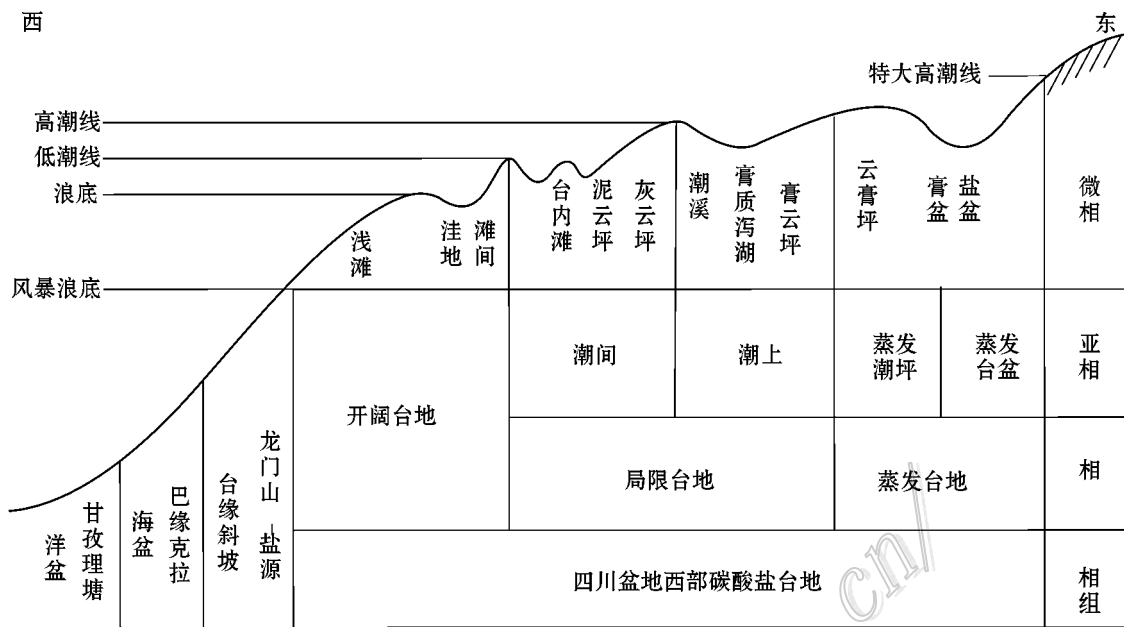


图 3 川西地区雷口坡组沉积相模式图

Fig. 3 Model of sedimentary facies of Leikoupo Formation in western Sichuan basin

利用沉积学、矿物学、岩石学原理对岩芯、薄片、扫描电镜以及能谱等资料综合分析认为,川西地区雷口坡组巨厚蒸发岩至少有两种不同的成因:一是局限台地膏质泻湖成因;二是蒸发台盆膏(盐)盆成因。前者类似于许靖华(1985)提出的“干化盆地说”,即广海海水周期性地注入台地内深水洼地,接着海水在干旱炎热的气候下蒸发、浓缩,如此交替进行。蒸发台盆与局限台地-膏质泻湖的主要区别是蒸发台盆较深,地形起伏较大,盆内沉积的地层厚度明显大于周围地区,蒸发浓缩更强烈,而膏质泻湖较浅,地形起伏不大,与周围地层厚度差异不明显。林良彪等(2007)虽将蒸发岩-膏岩划分为膏湖和膏盆两种不同的沉积微相,但是未将膏湖和膏盆微相明确分开。李幸运(2009)根本未提及蒸发岩的膏质泻湖成因。本文将川西地区雷口坡组划分出开阔台地、局限台地和蒸发台地3个沉积相,并依据岩性分布的特点将蒸发台地相划分出膏盆、盐盆、云膏坪3个微相,局限台地相划分出台内滩、泥云坪、灰云坪、潮溪、膏质泻湖、膏云坪6个微相,开阔台地划分出浅滩、滩间洼地2个微相(图3)。

2.1 局限台地相

局限台地相是指由于滩、礁或岛屿等的遮挡作用而形成的与广海呈半连通状态的沉积环境;水体能量较弱,局部浅水区常发育台内滩沉积。局限台

地相为研究区的主要沉积相,雷口坡组一至五段皆有发育,以膏质泻湖、台内滩、潮溪 3 种微相为主。

(1) 膏质泻湖

膏质泻湖指局限台地内水体相对受限的潮上洼地, 广海海水周期性注入其中, 接着海水在干旱炎热的气候下蒸发、浓缩、咸化, 从而形成白云质石膏、石膏岩等。膏质泻湖为川西地区雷口坡组蒸发岩形成的主要沉积环境之一, 主要发育在雷口坡组一段、二段。

(2) 台内滩

台内滩为局限台地内浅水区能量相对较高的局部微环境。川西地区 T_2l^1 至 T_2l^5 均发育有台内滩微相,其中以 T_2l^3 分布最广,岩石类型以粒屑白云岩为主,如中 46 井和青林 1 井雷三段,发育中-厚层状具溶孔亮晶砂屑白云岩、鲕粒白云岩、针孔藻屑白云岩等,可夹粉-微晶白云岩,单层厚度多小于 10 m,但累计厚度可达 63~165 m,如中 46 井 165 m,青林 1 井 65 m,鱼 1 井 135 m。台内滩的类型有针孔藻屑滩、砂屑滩、鲕滩、生物碎屑滩等(图 4),粒屑岩多而厚,孔隙发育,为优质储层的发育创造了条件,有条件成为储集富钾卤水的优质储层。

(3) 潮溪

潮溪是指潮上环境的潮汐通道。典型的潮溪相

是夹于膏质泻湖中较薄的粒屑白云岩。

2.2 蒸发台地相

蒸发台地相主要发育于雷四¹亚段,主要指在膏质泻湖靠陆一侧的潮上环境。蒸发台地相分为蒸发台盆和蒸发潮坪 2 个亚相。其中蒸发台盆为蒸发台地内继承性发展的深水洼地,蒸发潮坪为宽阔而平

坦地带。由于海平面的下降,蒸发台盆内聚集了受限的海水,由于气候干旱,海水不断蒸发浓缩,致使蒸发台地内广泛发育蒸发岩类-膏岩、盐岩等(强子同,2007)。如关基井 T₂l⁴ 硬石膏累计厚度 111 m,丰卤 1 井 T₂l₁⁴ 岩性主要为含硬石膏菱镁矿石盐岩、含菱镁矿石膏岩、石盐岩等(图 5)。

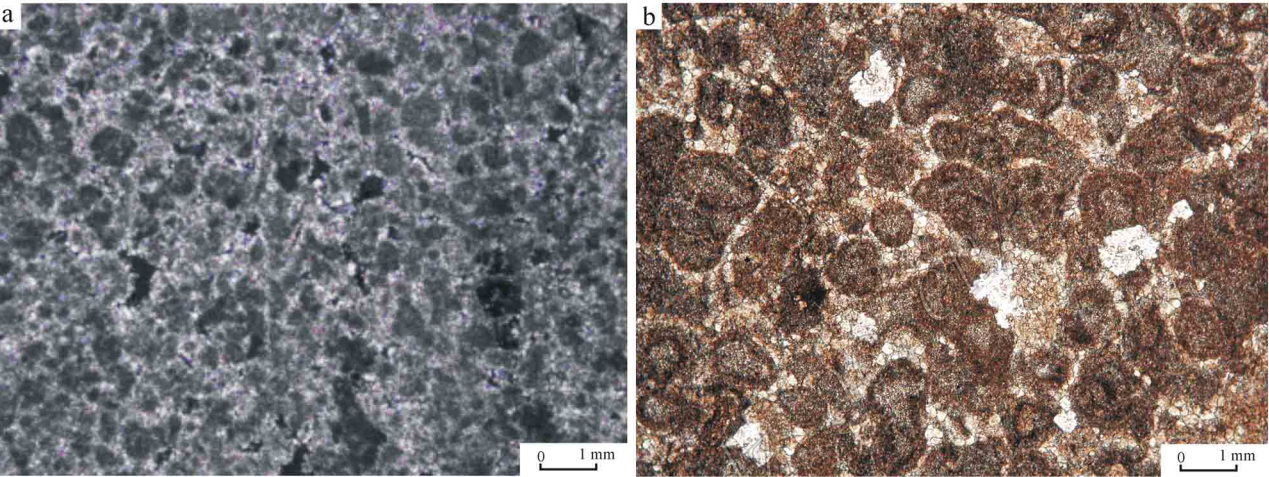


图 4 川西地区雷口坡组台内滩微相薄片特征

a. 具溶蚀孔隙的亮晶藻砂屑白云岩。砂屑磨圆度较高,说明经过了高能量水体的长时间淘洗。亮晶胶结物的晶粒较大,说明在水动力较强的台内滩沉积条件下,原始沉积物颗粒间的细粒灰泥质点已被冲洗带走。中 46 井, T₂l³, 3 053.43 m, 正交偏光; b. 亮晶砂屑鲕粒白云岩。

鲕粒直径约 0.2~0.5 mm,代表了水体能力高的台内滩沉积环境。丰卤 1 井, T₂l₁⁴, 4 523.22 m, 单偏光

Fig. 4 Reservoir characteristics of point bars in platform micro-facies of the Leikoupo Formation in western Sichuan basin

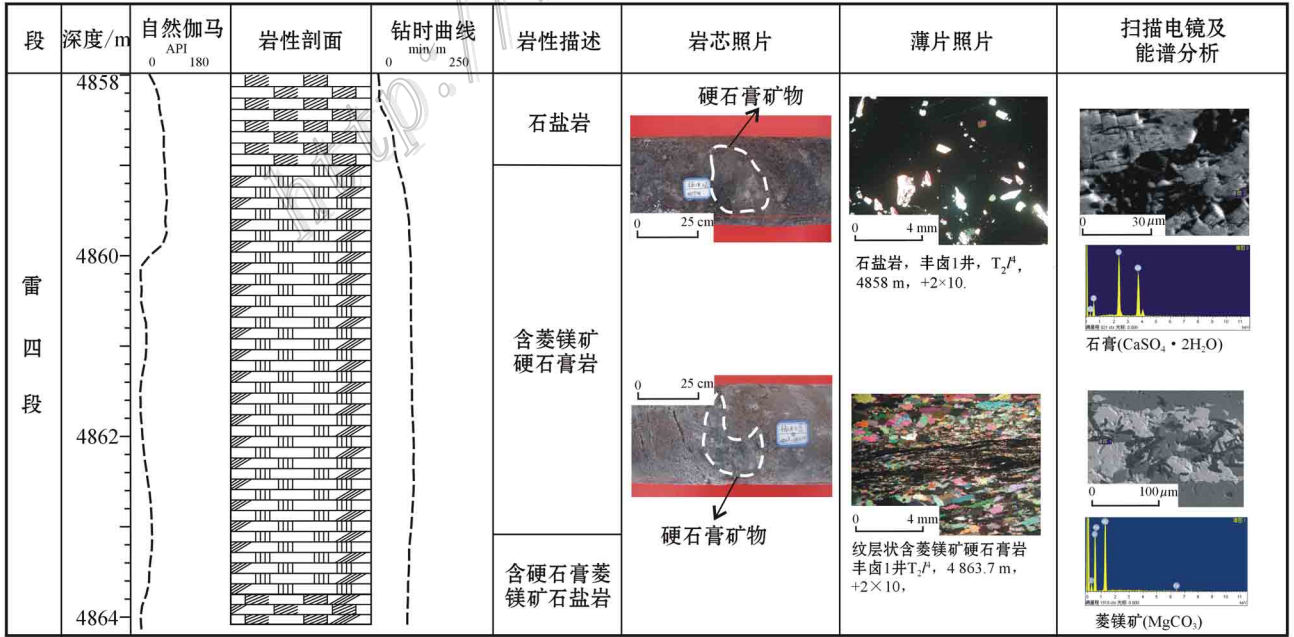


图 5 川西地区丰卤 1 井雷四段蒸发台地相

Fig. 5 Evaporate platform facies of 4th Member of Leikoupo Formation in Fenglu well 1 of western Sichuan basin

依据岩性分布的特点,将蒸发台盆亚相进一步划分为膏盆和盐盆2个微相,二者古地貌相近,岩性不同;其中膏盆微相岩石类型以石膏、硬石膏等为主,而盐盆微相内蒸发作用更为强烈,以石盐、菱镁矿、杂卤石等高盐度蒸发矿物为主。

2.3 开阔台地相

(1) 浅滩

浅滩在地貌上为开阔台地内的水下高地,水体较浅,水动力较强,受潮汐作用,甚至波浪作用也较大。在沉积物上,常是粒屑灰岩、鲕粒灰岩等。川西地区雷口坡组以褐灰、灰色砂屑、鲕粒、生物屑白云岩为主,鲕粒、砂屑含量一般大于50%,鲕粒有单鲕、复鲕,分选磨圆较好。

(2) 滩间洼地

滩间洼地发育于浅滩之间低洼的微环境内,水体能量相对较局限,岩性主要为灰色-深灰色灰岩,含泥灰岩,可含生物屑或夹生物灰岩薄层或条带,有时也可夹少量灰云岩或泥岩。研究区滩间洼地沉积的岩性以含泥灰岩、白云岩间夹鲕粒、砂屑白云岩为主。

3 岩相古地理特征与演化

通过岩相古地理研究可以达到评价矿产资源、了解矿产发育规律和预测矿产远景之目的。笔者结合前人研究成果(董兆雄等,1994;冯增昭等,1997;冯增昭,2003;蒋维红等,2007;林耀庭等,2008;马永生等,2009;王鸿祯,1985;郑绵平等,2006),运用沉积学基本原理及岩相古地理图的编制方法,在编制单井沉积相柱状图、岩性与沉积相对比图等图件的基础之上。恢复了川西地区中三叠世雷口坡7个亚期的岩相古地理。

3.1 岩相古地理概况

受东南侧江南古陆抬升以及西侧龙门山岛链与康滇古陆持续下降的影响,四川盆地中三叠世总体呈西深东浅、南深北浅的局面。此时,四川盆地北部有秦岭古陆,东有江南古陆,西有康滇古陆、龙门山岛链。位于龙门山岛链西侧的松潘-甘孜海槽为主要的海侵策源地,海侵的主要通道是川西地区龙门山岛链间的溢口以及龙门山岛链与康滇古陆间的溢口(图6)。由于川西地区海盆环境逐渐稳定以及陆源物质注入量的减少,沉积环境以局限台地、蒸发台地为主(林耀庭等,2008)。随着开江-泸州隆起带的

不断上升扩大,形成横亘中部的屏障,迫使盐盆西迁,泸州-开江隆起的次级构造(资阳-威远鼻状凸起)将川西拗陷分割为成都蒸发海盆和江油蒸发海盆,其中以成都蒸发海盆规模及沉积厚度最大,且沉积环境闭塞,蒸发作用强烈,非常有利于海水的浓缩(宋鹤彬,1997)。在成都蒸发海盆内部,蒲江-成都一带是较为隆起的地貌,将成都蒸发海盆分隔成南、北、东3个次级盆地,三者依次以平落坝盐盆、大兴场盐盆、盐井沟盐盆为沉积中心。

3.2 岩相古地理演化

通过对川西地区中三叠统雷口坡组沉积相的综合分析,并结合前人的研究成果,认为川西地区雷一至雷五期海水经历了2次变浅→加深的旋回,各期岩相古地理特征及演化规律如下:

(1) $T_2l^1 \sim T_2l_2^2$ 期

该期是一个普遍海退时期,四川盆地东部的江南古陆开始上升为陆,西部成为陆源充填区。川西地区以局限台地沉积为主。周公山构造周公1井显示,雷一段为浅灰色泥质白云岩夹膏质白云岩、薄层石膏与白云质灰岩,属于典型的膏云坪沉积。江油黄莲桥剖面显示, T_2l^1 底部以鲕粒细晶白云岩为主,向上依次过渡为泥质白云岩→泥质白云岩夹砂砾屑白云岩→含鲕粒微晶白云岩→含藻纹层的泥晶白云岩,体现了潮间泥云坪、灰云坪、潮溪沉积的特点。

(2) $T_2l_1^3 \sim T_2l_2^3$ 期

$T_2l_1^3$ 和 $T_2l_2^3$ 期,2者分别为一次海侵和海退期。 $T_2l_1^3$ 期发生了最大规模的一次海侵,促使水体变深,并带来了菊石、腕足类等正常浅海发育的生物群。川西地区广泛发育浅滩沉积(针孔藻屑滩、砂屑滩、鲕滩、生物碎屑滩等)。从 $T_2l^1 \sim T_2l_2^2$ 海退期到 $T_2l_1^3$ 海侵期为雷口坡一至五期川西地区海水所经历的第1次变浅→加深的旋回。

(3) $T_2l_1^4 \sim T_2l_2^4$ 期

$T_2l_1^4$ 和 $T_2l_2^4$ 期,2者分别为一次广泛的海退期和一次比较局限的海侵期。 $T_2l_1^4$ 期(即雷四¹期亚段地层沉积期)由于广泛的海退而成为主要的成盐期,川西成都地区主要发育蒸发台地膏盆、盐盆微相(图7)。然而,川西北地区发育膏盆微相,未至盐盆阶段。通过川西成都地区雷口坡组岩性及沉积相连井对比(图8)可知,成都蒸发台盆的边缘与中心地区岩相区别明显(雷四段尤为明显),表明成都蒸发台盆内沉积相展布特点鲜明。

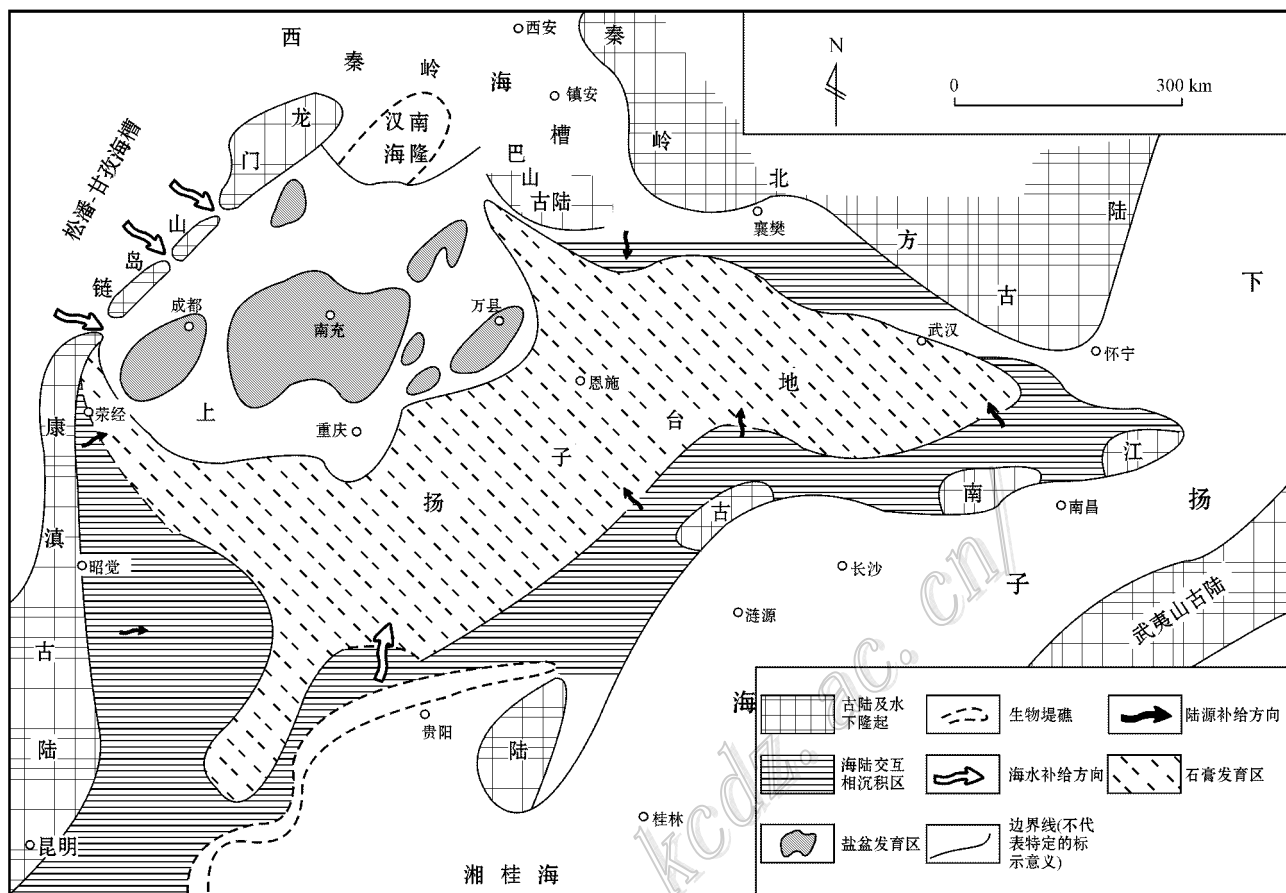


图 6 上扬子台地中三叠世雷口坡期岩相古地理略图(据林耀庭等, 2008)

Fig. 6 Middle Triassic lithofacies palaeogeographic map of Leikoupo Formation in upper Yangtze platform

(after Lin et al., 2008)

南部次级盆地内,从周公 1 井-汉 1 井-大深 1 井逐渐邻近盆地沉积中心(大兴场盐盆),地层厚度增大,含盐度逐渐增高,岩相也相应发生变化(董兆雄等, 1994)(图 8)。大深 1 井 T_2l^4 下部发育泥晶白云岩及藻席硬石膏岩,石盐主要为团块状盐,代表了蒸发台地膏盆、盐盆夹云膏坪沉积;上部为层纹状菱镁质硬石膏、杂卤石薄层并含有硫镁矾,代表了蒸发台地膏、盐盆的沉积特点。

北部次级盆地内,从平落 4 井-平落 20 井-丰卤 1 井逐渐临近平落坝盐盆的边缘,地层厚度减小,含盐度逐渐降低,杂卤石等盐类矿物含量也逐渐减少(图 8)。薄片鉴定、扫描电镜以及能谱资料表明,相对邻区井位而言,丰卤 1 井雷四段上部发育亮晶砂屑鲕粒白云岩、亮晶藻屑灰岩、残余砂屑粉晶白云岩等,代表沉积水体能量较高。综合上述证据,推测丰卤 1 井可能位于平落坝盐盆的边缘,这可能也是其勘探

富钾卤水失败的原因。

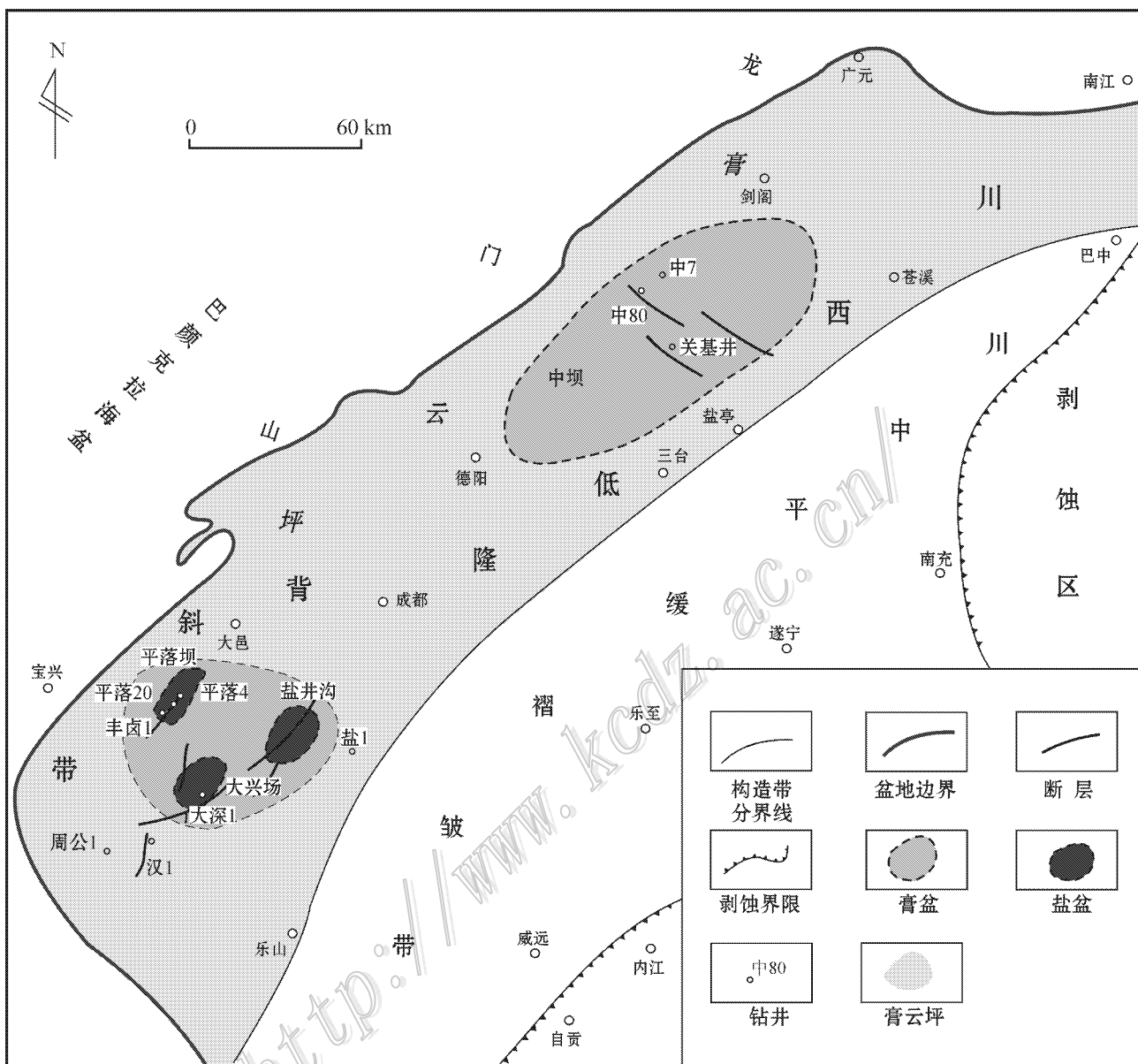
(4) $T_2l^5 \sim T_2l^2$ 期

T_2l^5 继承了 T_2l^2 期比较局限的海侵特点,主要发育潮坪、滩相石灰岩、白云岩。但由于晚三叠世早期的印支运动,使 T_2l^5 抬升遭受剥蚀,故地层保存极不完整。从 T_2l^4 海退期到 T_2l^2 海侵期为雷口坡一期至五期川西地区海水所经历的第 2 次变浅→加深的旋回。

4 富钾卤水分布特征与预测

4.1 富钾卤水来源

弄清富钾卤水的来源是研究其分布特征并预测有利远景区的基础。有学者(Ayora et al., 1994a; 1994b; Holland et al., 1996)认为卤水绝不是简单的盐盆蒸发浓缩后的产物,后期的成岩作用以及化学

图 7 川西地区 T_2l_1 岩相古地理图Fig. 7 Lithofacies palaeogeography map of T_2l_1 in western Sichuan basin

反应对卤水的成分有一定的影响。

前人(黄思静等,1997;林耀庭等,1996;宋鹤彬,1997)通过川西雷口坡组富钾卤水 25℃ 等温蒸发析盐实验,以及对化学元素含量比值($K \times 1\,000/Cl$ 、 $K/Br \times 1\,000/Cl$)和 δD 、 $\delta^{18}O$ 、 $\delta^{34}S$ 和 $\delta^{11}B$ 同位素组分的分析,认为川西地区雷口坡期海水蒸发浓缩程度为泻利盐沉积阶段,富钾卤水不可能是单一的海水蒸发浓缩过程的产物,而是包括蒸发浓缩的原始海水、地层中的海相蒸发岩类由于溶滤作用产生

的卤水以及陆源卤水的混合水。其中,海相蒸发岩类由于溶滤作用产生的卤水应是钾的主要来源,而且石膏转化为硬石膏过程中脱出的结晶水对于溶解蒸发岩类起到了不可忽视的作用。据博歇特等(1976)研究,当石膏转化为硬石膏,将有 48.6% 体积的结晶水被释放,这种脱出的结晶水不仅可能导致石膏本身被溶滤,并且“在 30℃ 时,每立方米石膏脱出水的饱和溶液,还能完全溶解 0.08 m³ 的石盐,或 0.54 m³ 的光卤石,或者把 0.81 m³ 的光卤石转化为

钾石盐”。据林耀庭等(2009)估算,如果用厚度来表示,将会有300 m以上的结晶水脱出,可见其脱出的结晶水量及可能溶解盐类的数量是十分可观的。这种结晶水所溶解的盐分,在地下蒸发作用下,一部分逐步干涸,形成新的固相,另一部分则有可能转入储卤层。这一点从盆地中-中三叠统的含卤层及岩石特征可以得到证实。但是迄今为止,川西地区雷口坡组卤水异常高的钾、硼含量,尤其是硼的含量仍未得到十分合理的解释。

因此,从岩相古地理演化的角度对川西地区雷口坡组富钾卤水来源进行分析,富钾卤水的各成因阶段应该是:①沉积作用阶段,中三叠世雷口坡期在总的海退背景下来自松潘-甘孜海槽的海水发生旋回性的海进、海退。海水在川西地区膏盆、盐盆中蒸发浓缩形成固态的多韵律盐系以及随着沉积物一起保存下来的原生含钾海水。②印支运动阶段,地层抬升遭受表生作用及渗入水的淋滤作用。因此,直接暴露地表的含盐系受到大气淡水的溶蚀作用形成卤水。③深埋藏作用阶段,早-中三叠世发生沉积后,在印支期古剥蚀以后的地质历史时期,盆地接受广泛的沉积,上覆地层逐渐加厚,早-中三叠系地层温度和上覆地层压力也逐渐升高。在高温高压的地层条件下,矿物脱出的结晶水溶解盐类,溶解盐分的含钾卤水储存在储层的孔隙和裂缝中,并且地静压力也相应起着压缩蒸发岩体积和影响蒸发岩结构构造的作用。④喜马拉雅阶段,形成了一系列褶皱和断裂,使膏盐层在水动力及水化学特征上具有明显的分带性。褶皱、断层作用使膏盐层抬升至地表或断层通至地表的区域,大气淡水的淋滤作用会使含钾卤水淡化,不利于富钾卤水的聚集;相反,褶皱和断层产生的裂缝也能给富钾卤水提供运移通道和聚集空间。

综上,川西地区雷口坡富钾卤水的成因是:于沉积期海水蒸发浓缩形成原生海相沉积含钾卤水;于印支运动阶段、深埋藏作用阶段、喜马拉雅阶段被晶间卤水、钾盐类溶滤水和陆相径流来源的卤水掺合。川西地区雷口坡富钾卤水是经历了复杂的物理、化学、生物化学等高度变质作用而形成的混合型水。

4.2 富钾卤水分布特征及预测

川西地区雷口坡组富钾卤水受岩相古地理、构造、储层类型三者的共同制约。

在岩相古地理方面,川西地区雷口坡组一段、二

段发育多个膏质泻湖,雷四段发育中坝、成都2个膏盆,成都膏盆内发育3个盐盆(图7)。膏盐盆、富钾卤水和蒸发岩的分布具有2个特点:①从已钻探发现富钾卤水情况来看,富钾卤水的分布明显受到膏盆和盐盆(尤其是盐盆)的控制,而与膏质泻湖关系不大。譬如平落坝构造区丰卤1井与平落4井距离较近,但是卤水品质差异甚大,丰卤1井卤水钾含量为1.15~3.88 g/L,平落4井卤水钾含量高达49.95 g/L。这应是由于丰卤1井位于平落坝盐盆的边缘造成的(前已述及),盐盆地缘海水蒸发浓缩的程度未达到钾盐析出点,致使沉积的固体钾盐不足,而导致深埋藏阶段蒸发岩溶滤产生的卤水含钾量不高;而且由于地势较高,地层中海相蒸发岩溶滤水和陆相卤水补给不充分,即使补给充分,形成的蒸发岩类也易被大气降水溶解而最终流失。又如中坝构造较平落坝构造钾含量要低,这应是受雷口坡期岩相古地理控制的,川西北地区发育膏盆微相,海水蒸发浓缩程度低,未至盐盆阶段,最终导致该区钾含量不高。②就成都蒸发台盆而言,蒸发岩的分布模式为多“牛眼式”。“牛眼式”模式是指盐类沉积相呈同心圈状分布,由外向内,依次沉积碳酸盐岩相、石膏岩相、石盐相,最中心为钾镁盐相。

在构造方面,川西地区平落坝构造断层面附近的裂缝孔隙发育带为卤水主要富集区,这一点已被平落4井和平落20井的钻探证实。而其他裂缝发育带,如构造高点、断层和构造转折带,也应是卤水富集区。在裂缝孔隙欠发育区,卤水贫乏,一般无开采价值。这是因为在构造应力的作用下储层发生破裂,进一步改善了断层附近和褶皱转折处储层的储集和渗滤能力。同时,裂缝的形成有利于酸性地层水的进一步侵入,从而发生以埋藏溶蚀作用为特征的成岩变化。因此,在断层附近和褶皱转折处裂缝与孔隙发育,运移通道条件好,容易形成具经济开采价值的较大规模的卤水富集区。

在储层方面,富钾卤水储层主要为裂缝-孔隙型,平落4井钻探证实雷四段富钾卤水主要储集在薄至厚层状细粉晶白云岩、藻屑白云岩、膏质白云岩夹层中,主要储集空间为裂缝、晶间溶孔、粒间溶孔,沉积相、构造运动、成岩作用共同控制了储层孔隙、裂缝的发育,说明构造作用和溶蚀作用对于储层发育的重要性。

利用单井卤水层水化学分析数据以及重要含盐层段岩相古地理的研究结果,结合川西地区雷口坡

表 2 川西地区雷口坡组深层卤水的化学组成

Table 2 Chemical composition of deep formation brine of Leikoupo Formation in western Sichuan basin

名称	地理位置	构造	井号	层位	$\omega(B)(g/L)$		矿化度/(g/L)
					K	Na + K	
卤水聚钾中心	邛崃地区	平落坝	平落 4 井	雷四段	49.95	147.88	383.95
			丰卤 1 井	雷四段	1.15	33.69	无数据
				雷三段	3.88	84.75	无数据
储卤中心	江油地区	中坝	中 7 井	雷三段	2.43	39.79	117.17
			中 80 井	雷三段	无数据	41.36	112.61
	丹棱地区	大兴场	大深 1 井	无数据	无数据	无数据	无数据
	彭山地区	盐井沟	盐 1 井	无数据	无数据	无数据	无数据

地区雷口坡组共划分出 1 个卤水聚钾中心和 3 个储卤中心(图 9)。卤水聚钾中心、储卤中心都分布在断层附近,且与盐盆、构造的展布方向基本一致,均呈北东向。卤水聚钾中心位于平落坝构造区,平落 4 井雷四段卤水钾含量高达 49.95 g/L,储卤中心位于江油中坝构造、丹棱大兴场、彭山盐井沟构造带;各储卤构造深层卤水的化学组成见表 2。

综上,笔者认为川西地区雷口坡组富钾卤水遵循“膏盆-盐盆控区、褶皱-断层定带、裂缝-孔隙储卤”的分布特征。平落坝卤水聚钾中心、大兴场储卤中心、盐井沟储卤中心(尤其是平落坝卤水聚钾中心)应为有利的富钾卤水勘探区。

5 结 论

(1)川西地区中三叠统雷口坡组主要发育了蒸发台地、局限台地、开阔台地 3 种沉积相,其中局限台地广泛发育,而蒸发台地主要发育于雷四¹期。雷一至雷五期海水经历了 2 次变浅→加深的旋回。其中雷四¹期,成都地区广泛发育膏、盐盆,且海水的蒸发浓缩已达到泻利盐阶段,为富钾卤水的形成提供了基本的物质基础。

(2)研究发现,富钾卤水的分布明显受到膏盆和盐盆(尤其是盐盆)发育区的控制,而且构造褶皱和断层面附近的裂缝孔隙发育带为卤水主要富集区。为此,川西地区雷口坡组富钾卤水遵循“膏盆-盐盆控区、褶皱-断层定带、裂缝-孔隙储卤”的分布特征。

(3)利用单井卤水层水化学分析数据以及重要的含盐层段岩相古地理的研究结果,依据川西地区雷口坡组富钾卤水分布特征,参照富钾卤水的相关

工业开采指标,圈定与预测了储卤中心和卤水聚钾中心,卤水聚钾中心位于平落坝构造区,3 个储卤中心分别位于江油中坝、丹棱大兴场以及彭山盐井沟构造区。

参考文献/References

博歇特 H, 缪尔 R O. 1976. 盐类矿床:蒸发岩的成因、变质和变形 [M]. 袁见齐译. 北京:地质出版社. 1-204.

董兆雄, 邓明. 1994. 川西地区中三叠统雷口坡组岩相古地理[J]. 矿物岩石, 14(4):46-53.

冯增昭, 鲍志东, 李尚武. 1997. 中国南方早中三叠世岩相古地理 [M]. 北京:石油工业出版社. 1-223.

冯增昭. 2003. 我国古地理学的形成、发展、问题和共识[J]. 古地理学报, 2(2):129-141.

黄思静, 曾允孚. 1997. 四川成都盆地某深层富钾卤水的地球化学特征及成因[J]. 沉积学报, 15(3):67-71.

蒋维红, 董春梅, 闫家宁. 2007. 岩相古地理学研究现状及发展趋势 [J]. 断块油气田, 14(3):1-3.

《矿产资源综合利用手册》编委会. 2010. 矿产资源综合利用手册 [M]. 科学出版社.

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, 10(1):8-17.

林良彪, 陈洪德, 张长俊. 2007. 四川盆地西北部中三叠世雷口坡组岩相古地理[J]. 沉积与特提斯地质, 27(3):51-58.

林耀庭, 颜仰基. 1996. 四川盆地西部富钾卤水水文地球化学特征及其成因意义探讨[J]. 盐湖研究, 4(1):1-12.

李慈君, 杨立中, 周训, 陈明. 1992. 深层卤水资源量评价的研究 [M]. 北京:地质出版社. 1-113.

李幸运. 2009. 川西坳陷南段雷口坡组层序地层及沉积相研究[D]. 导师:王多义. 成都:成都理工大学. 83 页.

林耀庭. 2005. 论四川盆地地下中三叠统(T_{1j}-T_{2l})地下水的形成[J]. 盐湖研究, 13(1):1-7.

- 林耀庭, 陈绍兰. 2008. 论四川盆地地下、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, 许祖霖. 2009. 论盐类保存条件研究对四川盆地三叠系找钾工作的重要性[J]. 盐湖研究, 17(1):6-12.
- 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. 1-301.
- 强子同. 2007. 碳酸盐岩储层地质学[M]. 北京: 地质出版社. 1-470.
- 宋鹤彬. 1997. 川西成都盐盆平落 4 井富钾硼溴浓卤水水化学同位素地球化学特征及形成机制[J]. 地球学报, 18(3):282-289.
- 王鸿祯. 1985. 中国古地理图集[M]. 北京: 地图出版社. 41-130.
- 吴应林, 朱忠发, 王吉礼. 1989. 上扬子台地早、中三叠世岩相古地理及沉积矿产的环境控制[M]. 重庆: 重庆出版社. 1-222.
- 许靖华. 1985. 大地构造与沉积作用[M]. 北京: 地质出版社. 1-458.
- 郑绵平, 齐文, 张永生. 2006. 中国钾盐地质资源现状与找钾方向初步分析[J]. 地质通报, 25(11):1239-1246.
- Ayora C, García-Veigas J and Pueyo J J. 1994a. X-ray microanalysis of fluid inclusions and its application to the geochemical modeling of evaporite basins[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58:43-55.
- Ayora C, García-Veigas J and Pueyo J J. 1994b. The chemical and hydrological evolution of an ancient potash-forming evaporite basin as constrained by mineral sequence, fluid inclusion composition, and numerical simulation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58:3379-3394.
- Ayora C, Cendón D I, Taberner C and Pueyo J J. 2001. Brine-mineral reactions in evaporite basins: Implications for the composition of ancient oceans[J]. *Geology*, 29(3):251-254.
- Holland H D, Horita J and Seyfried W E Jr. 1996. On the secular variations in the composition of Phanerozoic marine potash evaporites[J]. *Geology*, 24:993-996.

<http://www.kcdz.ac.cn/>