

川中雷口坡组膏盐岩成因及对储层的影响

朱童¹ 王兴志² 沈忠民¹ 李乐³ 李浩⁴ 王鹏¹

(1.成都理工大学能源学院,四川成都610059; 2.西南石油大学资源与环境学院,四川成都610500;
3.中国地质大学(武汉)资源学院,湖北武汉430074;
4.中海石油(中国)有限公司天津分公司勘探开发研究院,天津300452)

摘要:通过岩心观察、薄片鉴定、成岩孔隙演化与埋藏史关系研究等手段,分析了川中雷口坡组膏盐岩微相的成因及其演化,并从沉积相、成岩过程、构造作用三个方面论述了膏盐岩对川中雷口坡组储层的控制与影响。研究表明,川中雷口坡组膏盐岩形成于受限陆表海的潮坪环境,其微相分为潮上带的膏盐池、潮间带的膏盐湖和局限潮下带的膏盐盆;其成因可分为潮上带浓卤水在低洼处汇聚成因或潮间潮下带表层浓卤水下置换成因;其分布与海平面升降导致的膏盐岩沉积中心迁移有关,同时与点滩的分布也有一定联系。膏盐岩的形成以及同生—准同生期溶蚀、表生期溶蚀垮塌、中—深埋藏期的硫酸盐热化学还原反应产生的埋藏溶蚀等作用对川中雷口坡组中上部储层的形成控制有重要贡献。此外,膏盐岩的底辟作用和构造运动产生的裂缝、断层,对烃源的运移、气藏的重新分布起着一定的促进作用。

关键词:川中雷口坡组;膏盐岩微相;硫酸盐热化学还原;浓卤水

中图分类号:TE122.2²¹ **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)01-0122-13

膏盐岩包括石膏、硬石膏、共生的盐类(NaCl)等,据Ford et al. (1989)估计,膏盐岩占陆地面积25%,约有 $6\ 000\times 10^4\text{ km}^2$,全球分布广泛^[1]。膏盐岩在中国境内海相地层中十分发育,譬如塔里木盆地中寒武统、鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组、四川盆地三叠系嘉陵江组、雷口坡组等。

膏盐岩形成包括有沉积成因、热液—火成成因、生物成因等,目前来看,对于中国膏盐岩形成,沉积成因占主导地位,包括最早的“深水蒸发说”(Bischof, 1855)^[2]、“砂坝说”(Ochsenius, 1877)^[3],到后来的“沙漠说”(Walther, 1894)^[4]、“多级海盆说”(Branson, 1915; H. Berchert, 1959)^[5]、回流说(King, 1947; Scruton, 1953)^[6-7]、“萨布哈说”(Amiel & Friedman, 1971)^[8]以及深盆说(Schmalz, 1969)^[9]、干化深盆说(许靖华, 1972)^[10]等多种沉积成因类

型^[11]。不同的沉积环境及岩类组合能反映出不同的膏盐岩成因,四川盆地中三叠统雷口坡组的膏盐岩与碳酸盐组合形式多样,可能是几种膏盐岩沉积成因类型的共同影响。

膏盐岩不仅作为良好的盖层对油气能形成良好的圈闭,而且较高的易溶性对储层的贡献十分重要,结合已有的勘探,可见其分布与储层的发育及气藏的分布也有一定联系。目前,在川中雷一段探明了磨溪气田,储量为 $253.87\times 10^8\text{ m}^3$,川西雷三段探明了中坝气田,储量为 $86.30\times 10^8\text{ m}^3$ ^[12],这些气藏均含高硫化氢。近年来在川中北部雷四段和川中南部的雷三段获得了较丰富的工业气流,同时也含有较高的硫化氢气体,可见硫化氢是该类碳酸盐储层中重要的影响因子。膏盐岩中的石膏最有利于硫化氢气体的形成^[13],而且硫化氢的含量与膏岩的

收稿日期:2013-03-01;改回日期:2013-10-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41172119)资助。

作者简介:朱童,男,1986年生,博士生,主要从事储层地质、地球化学方面研究;E-mail:bbna1986@163.com。

通讯作者:沈忠民,男,1954年生,博士,教授,博士生导师,主要从事油气地球化学及成藏研究;E-mail:szm313@cdut.edu.cn。

分布有紧密的联系^[4],石膏参与的TSR反应过程及其生成的硫化氢气体对储层的发育也有重要影响^[5],因此膏盐岩中的膏岩与气藏含高硫化氢也有密切的关系。

基于上述原因,本文以区内膏盐岩为主线,分析膏盐岩成因机制,并从沉积相、成岩过程、构造作用3个方面对川中雷口坡组雷三、雷四段膏盐岩控制影响白云岩储层形成发育的过程进行论述。

1 地质背景

从四川盆地周缘来看,早三叠世飞仙关时期,四川海域周缘就已经存在西侧的康滇古陆,西北侧的龙门山水下古隆起,北侧的汉南隆起和大巴山推覆带构成的北方古陆,东南缘的雪峰古陆,南缘的贵阳海隆,整个上扬子海域成为闭塞、半闭塞的沉积环境。四川西北部,受理塘、甘孜北西向拉张断裂和龙门山西侧北东向断裂控制,到中三叠世雷口坡时期形成松潘—甘孜海槽,同时联系阿坝地区出现的雷口坡中晚期和须家河早期的地层超覆,推测此时的龙门山甚至抬升为古陆;川东—鄂西区域,雪峰古陆在嘉陵江中后期急剧抬升并且向西北推覆,形成开江—泸州水下古隆起,到雷口坡时期,开江—泸州水下古隆的南端上升为陆地,成为剥蚀区,而且开江—泸州古隆的抬升幅度大于周边山系,特别是大于龙门山古隆的抬升幅度,因此导致从嘉陵江中后期开始,整个四川盆地由西高东低逐渐演化成东高西低的地貌。北方古陆和南缘贵阳海隆也在不断抬升,加上康滇古陆、开江—泸州水下隆起、龙门山岛链的进一步障壁作用,使四川盆地总体表现为东西两侧较浅,中部相对较深,沉积环境更加闭塞的受限陆表海环境。盆地东缘由于雪峰古陆的存在与海水基本隔绝,因此越过南缘贵阳海隆或者是通过西北缘龙门山岛链间的小规模初步浓缩的海水为四川盆地海水补给方向,盆地内部水动力更弱,仅有小规模潮汐和波浪作用。林耀庭等(2002)^[16]认为,早、中三叠世,四川盆地远离赤道向北移动,到达北纬26.68°,平均古温度为34.6~36.9℃,该时期总体表现为干旱炎热气候与潮湿气候频繁交替。因此在上述各种条件的限制下,整个盆地在中三叠世发育有石膏或石盐等蒸发盐沉积和碳酸盐沉积(图1)^[16-19]。

研究区主要位于四川盆地中部,雷口坡组地層分为四段,其上部雷三段、雷四段地層进一步又可细分为若干小层(雷三¹,雷三²,雷三³,雷四¹,雷四²,雷四³,川中南部雷四段由于剥蚀严重而没有细分)。地層厚度为27.5~900 m,纵向上具有多旋回、多韵律的灰岩、白云岩与蒸发岩沉积组合,其中硬石膏主要分布于研究区雷三²亚段和北部雷四²亚段,呈薄—中厚层状;盐岩主要分布于研究区雷三²亚段,其中北部龙岗—营山地区分布面积较小,主要为中—薄层状,中南部地区如南充、遂宁、龙女寺、广安等构造区分布面积较大,为中—厚层状,如广100井,厚度可达190余米(图1-B,1-C)。

2 膏盐岩微相类型及成因

参考前人对碳酸盐岩沉积相的研究^[18-25],本文把四川盆地雷口坡组沉积相划分为受限的陆表海环境,具体细分为潮上带、潮间带、局限潮下带(由于水体循环受到限制,因此没有划分开阔潮下带)。

通过前人对膏盐岩特征及形成环境的认识^[26-28],以及卢耀如等在青藏高原及新疆—内蒙古一带的内陆盆地碳酸盐—硫酸盐复合岩溶类型研究中把复合岩溶地区划分为内陆干湖、内陆湖洼、内陆湖盆3种类型^[1]的启示,本文把相应于陆表海各亚相中的膏盐岩微相分别命名为膏盐池、膏盐湖、膏盐盆3种微相(图2)。

2.1 膏盐池

膏盐池微相形成环境为潮上带浅的低洼平坦处,常年暴露于海平面上,洼内为半干涸的海水,相当于内陆干湖的形态。在雷口坡时期持续的构造上升和干旱炎热的气候条件等因素的影响下,低洼处便通过强烈的蒸发而沉淀膏盐岩,同时洼内聚集盐度较大的卤水池,并且在这种高镁钙比率的水体参与下,潮上带广泛发生准同生白云石化作用(后面详细论述),加上潮上带对海平面升降变化十分敏感,因此膏盐池微相主要为瘤状或透镜状的膏盐岩(图版-1)与白云岩的薄互层沉积,含少量石灰岩、粘土质。常见一些浅水暴露标志,如膏盐假晶(图版-2)、鸟眼构造、帐篷构造等。这些也可看作是萨布哈环境下形成的产物。

2.2 膏盐湖

膏盐湖微相形成环境为潮间带较浅的低洼处,

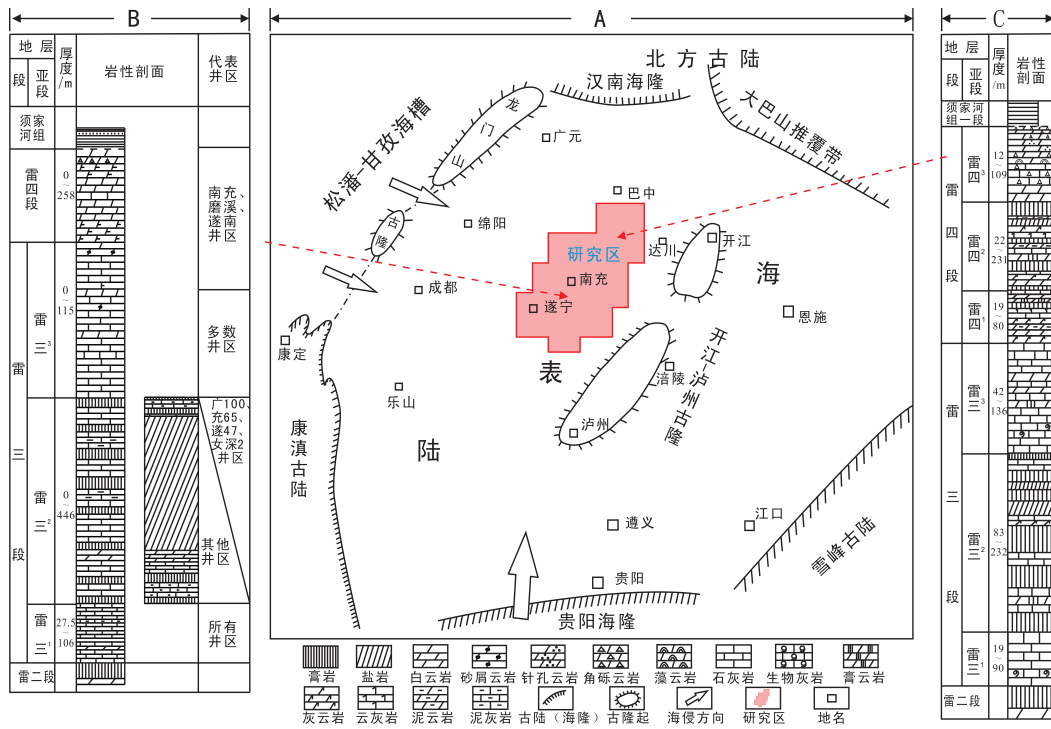


图1 四川盆地及邻区雷口坡期沉积背景(A据文献[17-19]修改)
 A—四川盆地及邻区雷口坡期古地理图;B—川中南部雷口坡组雷三雷四段典型岩性柱状图;C—川中北部雷口坡组雷三雷四段典型岩性柱状图

Fig.1 Sedimentary background of Leikoupo period in Sichuan basin and its adjacent areas
 (Fig.1A modified after References [17-19])

A—Paleogeographic map of Leikoupo period in Sichuan basin and its adjacent areas; B—Typical lithologic column of 3rd and 4th member of Leikoupo Formation in the southern part of central Sichuan; C—Typical lithologic column of 3rd and 4th member of Leikoupo Formation in the northern part of central Sichuan

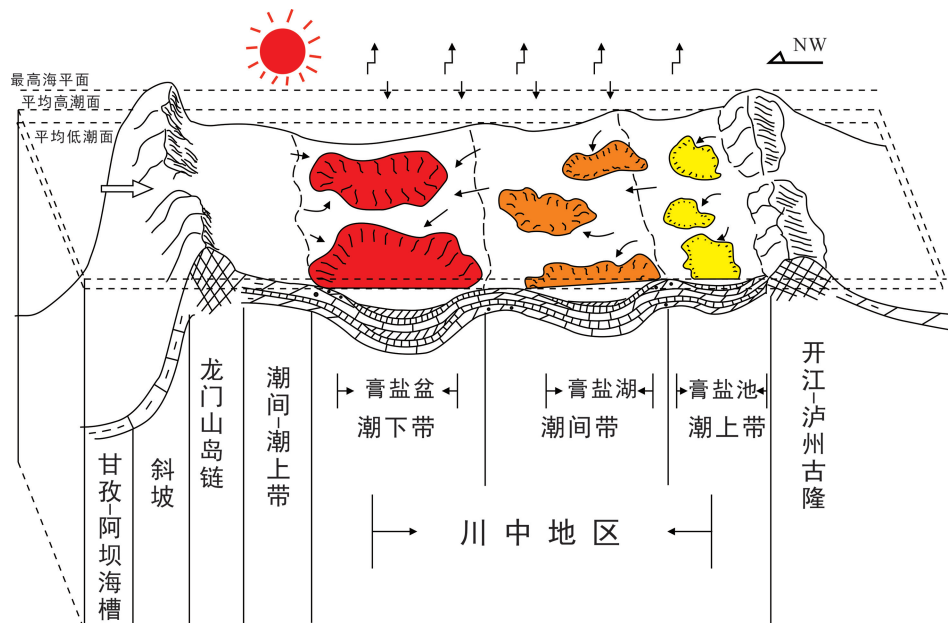
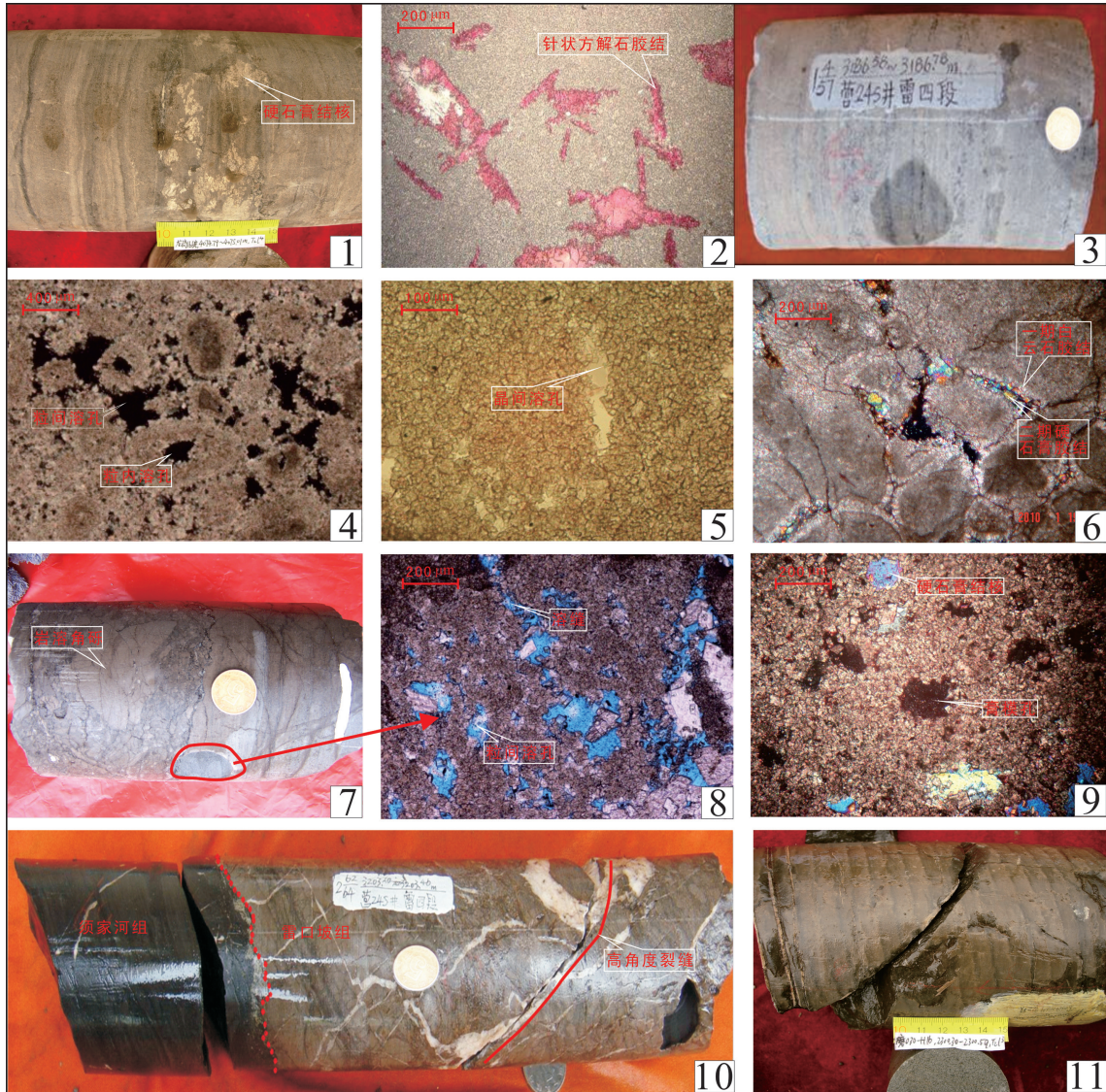


图2 川中雷口坡组膏盐岩微相成因模式图

Fig.2 Mode chart for gypsum-salt rock microfacies origin of Leikoupo Formation in central Sichuan basin

图版 Plate



1—含硬石膏结核的泥—粉晶白云岩,具有塑性变形,龙岗166井, T_{2l4}^3 , 4074.79~4075.01 m, 岩心; 2—含板片状、针状硬石膏粉晶白云岩,硬石膏溶解后被方解石充填,磨22井, T_{2l4} , 2283.24 m(-); 3—灰白色中层块状膏岩,营24S井, T_{2l4} , 3186.58~3186.78 m, 岩心; 4—亮晶鲕粒白云岩,见粒间溶孔、粒内溶孔,龙岗19井, T_{2l4}^3 , 3692.08 m, N×5(+); 5—粉晶白云岩,见晶间孔、晶间溶孔,磨22井, T_{2l3}^3 , 2320.91 m(-); 6—亮晶砂屑云岩,见粒间溶孔,第一世代粒状白云石胶结,第二世代硬石膏胶结,龙岗002-1井, T_{2l4} , 3986 m(+); 7—岩溶角砾岩,见角砾、岩溶微缝、缝合线,龙岗160井, T_{2l4} , 3711.70~3711.87 m, 岩心; 8—岩溶角砾中的砂屑微晶白云岩,见粒间溶孔、溶缝,龙岗160井, T_{2l4} , 3711.7 m(-), 铸体薄片; 9—含膏质粉晶云岩,见膏模孔和硬石膏,营22井, T_{2l4} , 3554.80 m(+); 10—雷口坡组与上覆须家河组分界线(虚线),雷口坡组顶部见多期低角度裂缝被方解石充填,高角度裂缝(实线)未充填,营24S井, T_{2l4} , 3203.10~3203.46 m, 岩心; 11—灰色泥晶灰岩夹灰黑色泥质泥晶灰岩,见水平缝被硅质、石膏全充填,高角度缝未充填,磨030-H16井, T_{2l3} , 2300.30~2300.59 m, 岩心

1—muddy to micritic dolomite including nodular anhydrite, having plastic deformation, well of Longgang166, T_{2l4}^3 , 4074.79~4075.01 m, core; 2—powder crystal dolomite including anhydrite with appearance of plate or acicular form, anhydrite was dissolved and filled by calcite, well of Mo22, T_{2l4} , 2283.24 m, (-); 3—grey gypsum rock with middle lamella and blocky structure, well of Ying24S, T_{2l4} , 3186.58~3186.78m, core; 4—sparry oolitic dolomite, seeing intergranular dissolved pore and intragranular dissolved pore, well of Longgang 19, T_{2l4}^3 , 3692.08 m, (+); 5—powder dolomite, seeing intercrystalline pore and intercrystalline dissolved pore, well of Mo22, T_{2l3}^3 , 2320.91 m, (-); 6—sparry dolarenite, seeing intergranular dissolved pore, the first generation of granular dolomite cementation, the second

generation of anhydrite cements, well of Longgang002-1, T₂l₄, 3986 m, (+); 7-karst breccia, seeing breccia, karst microfracture and stylolite, well of Longgang160, T₂l₄, 3711.70~3711.87 m, core; 8-micrite dolarenite in karst breccia, seeing intergranular dissolved pore and dissolution fracture, well of Longgang160, T₂l₄, 3711.7 m, (-), casting slice; 9-gypsiferous powder dolomite, seeing gypsum mould hole and anhydrite, well of Ying22, T₂l₄, 3554.80 m, (+); 10-the stratigraphic boundary between Leikoupo formation and Xujiuhe formation overlying (dashed line), multi-phase low angle fractures were filled by calcite, high angle fracture (solid line) was not filled, well of Ying24S, T₂l₄, 3203.10~3203.46m, core; 11-gray micritic limestone intercalated with black argillaceous micritic limestone, seeing horizontal fractures were full filled with siliceous deposits and gypsum, high angle fracture was not filled, well of Mo030-H16, T₂l₃, 2300.30~2300.59 m, core

比膏盐池较深,相当于内陆湖洼的形态。同样受到构造抬升和干旱炎热的气候条件影响,蒸发沉淀形成膏盐岩。同时形成的高盐度卤水和来自于潮上带萨布哈环境的高盐度卤水共同作用,潮间带也发生较强的白云石化,因此岩性主要为一套薄—中层状的膏盐岩(图版-3)、花斑状膏质泥粉晶白云岩,与泥—粉晶白云岩、少量泥晶灰岩、不规则灰褐色泥纹不等厚互层沉积(图1-C,雷四²亚段)。浅水暴露标志较少。

2.3 膏盐盆

膏盐盆微相形成环境为潮下带较深、面积更大的凹陷处,水体更深而且循环作用较差甚至呈停滞状态,相当于内陆湖盆的形态。一方面来自于浅水区的高盐度水体可进一步汇聚于此;另一方面,干旱炎热环境下,在这些水体较深、能量较低的凹陷内,表层水体蒸发浓缩,产生密度大的卤水,下沉并置换海底密度较小的海水,并且随着蒸发作用的进行,卤水中各种溶质离子按溶解度的大小依次沉淀碳酸盐类矿物、石膏类矿物、石盐等,同时由于白云石化作用不强,白云岩生成较少。因此纵向上表现为大套厚层的膏岩和盐岩夹石灰岩分布,如南充、遂宁、广安等附近雷三²亚段岩性组合呈现这一特点(图1-B,图3),相邻的龙岗、磨溪部分区域雷三²亚段为中层状的膏岩夹石灰岩分布(图1-C,图3),平面上具有从凹陷边缘向凹陷中心呈环状分布,显示出盆地蒸发浓缩的特点。

整体来看,四川盆地在雷口坡时期相当于一个堰塞盆地,在一个潮汐作用微弱,海水几乎不流动的受限陆表海环境中,当海平面下降,盆地中的水体足够浓缩形成蒸发岩以前,薄—中层蒸发岩就在盆地边缘的浅水低洼区发育了,而当海水循环继续受到很大限制时,盆地中部的深洼区就形成巨厚蒸发岩层(图3)。三种微相统一起来,实际上是盆地

中心深水区和浅水区的相的分布,所区别的是分布形态和岩性组合的不同。

3 膏盐岩微相的演化与滩体形成

川中雷口坡中晚期有多个聚盐期,期间成盐作用被淡化作用所中断,说明陆表海受到海平面升降作用影响较大,反映出成盐多旋回的特点,在剖面上组成一套淡化至咸化的碳酸盐岩—蒸发岩系(图3)。

雷三时期研究区局部地区沉积界面低于平均低潮面,以及受到构造和地形分异作用,可形成大型的局限半—深水盆地,如南充附近(充65井),沉积物为半深水的泥晶灰岩、泥质泥晶灰岩,当海平面下降,这种盆地更加受到限制和隔绝,在干旱炎热气候、水体循环差等条件的影响下,形成巨厚层的蒸发岩系,厚度由盆地中心向边缘减薄,岩性组合由中心盐岩、硬石膏向边缘碳酸盐岩过渡(图3,雷三²亚段),平面呈牛眼状分布。雷三³早期,四川盆地受到一次小规模的海侵,成盐作用被中断,川中地区发育大套的泥晶灰岩、泥质灰岩沉积,随后海平面又缓缓下降,到雷三³中晚期川中盆地边缘局部地貌高点发育滩相沉积,如磨25井、磨22井等(图3,雷三³亚段)。

雷四时期,整个四川盆地海平面持续下降,川中大部分处于潮间带。川中北部雷四段保存较好,其中雷四²时期,是一个重要的成盐期,潮间带地洼处形成膏盐湖沉积,膏盐岩厚度相对较小,往湖洼边缘膏盐岩减薄,并伴随有白云石化作用形成的白云岩以及灰岩沉积,并且到雷四³时期,湖洼边缘的局部地貌高点形成滩相沉积,如龙岗28井、龙岗11井、营22井等。川中南部由于受到泸州古隆影响,雷四段大部分被剥蚀,保存不完整,不便解释。对于中部地区,李凌等(2012)研究认为,四川盆地雷

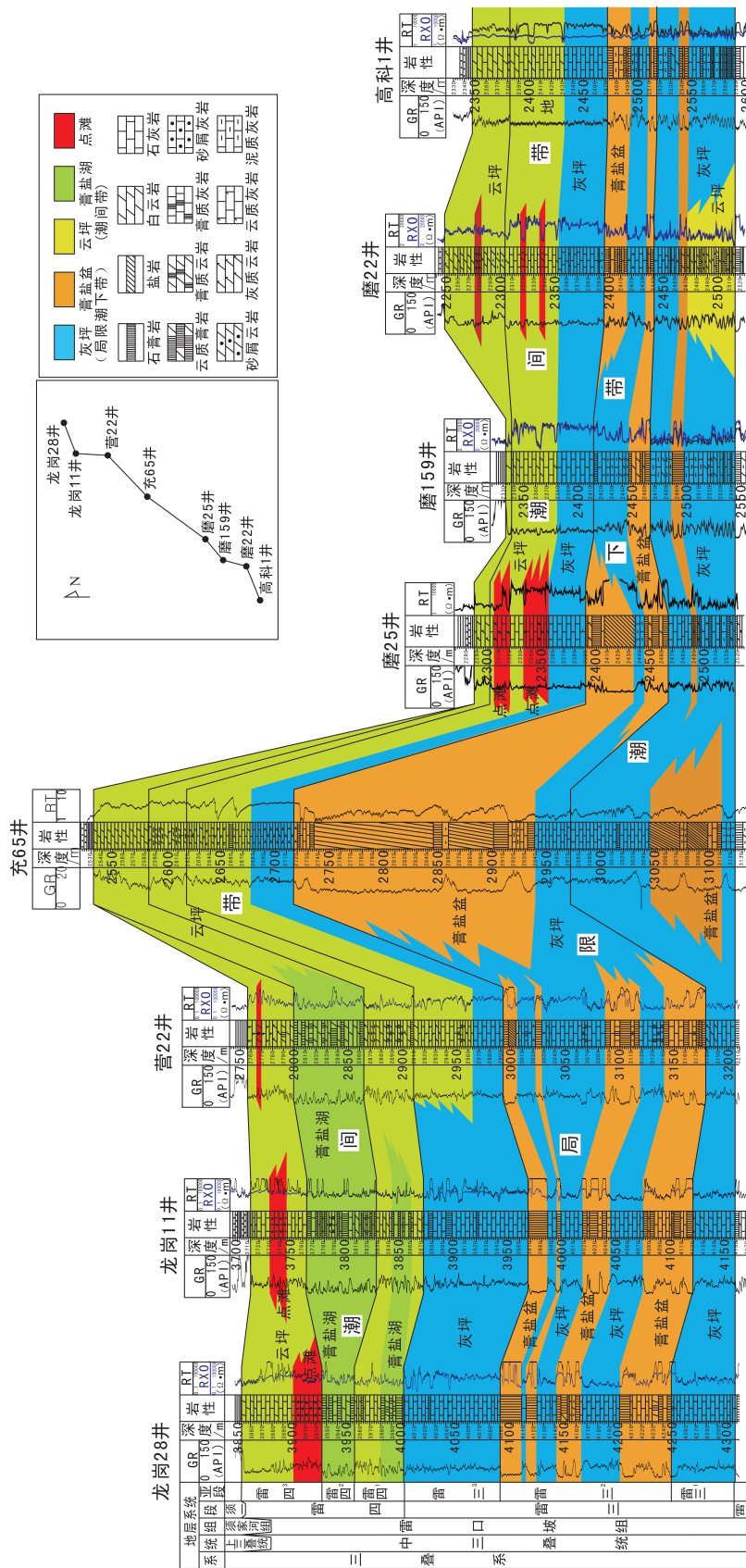


图3 川中雷口坡组雷三雷四段沉积微相对比图
Fig.3 Comparative diagram of sedimentary facies between 3rd member and 4th member of Leikoupo Formation in central Sichuan basin

四下—中亚段沉积期膏盐岩沉积中心向西北迁移至蒲江—成都—仪陇—一线^[29],所以位于潮间带的南充附近雷四段不发育膏盐岩,如充65井雷四段发育一套云质灰岩、泥质云岩、白云岩沉积组合。

4 成岩过程中膏盐岩对储层的影响

膏盐岩无论是在其形成过程中,还是后期溶蚀以及参与发生 TSR 反应等,对储层的发育、改造都起着十分重要的作用^[30-33]。因此,本文在川中雷口坡组中上部地层埋藏史与孔隙演化过程的研究基础上(图4),发现川中雷口坡组中上部的膏盐岩在成岩过程中对其储层的形成、发育有重要影响。

4.1 同生—准同生阶段

正常海水的Mg/Ca比率约为3:1到4:1,而干热地区潮上带表层沉积物的粒间水或表层积水的Mg/Ca比率可达20:1,甚至更高^[18]。由于潮上带石膏的沉淀可以使溶液中的钙离子减少,导致粒间水或表层积水的Mg/Ca比率提高,因此白云岩化作用可能与这种富镁卤水直接相关,从而与石膏沉淀也有间接联系。这种富镁的卤水与表层的碳酸盐沉积物

如文石颗粒等接触或者下渗到下伏石灰岩中,便发生蒸发泵或回流渗透白云石化。因此潮间—潮上带石膏常常与白云岩类伴生,白云岩的产生对有利的沉积相带的分布以及后期埋藏阶段的一系列变化都有重要的影响,如研究区北部的点滩相、南部的云坪相(图版-4、图版-5)都存在于潮间—潮上带环境中,而且白云岩具备的强抗压实性、较高孔隙性特征为后期储层的发育提供了基础。

具体来看,在膏盐湖、膏盐盆附近的局部地貌高地可能发育的点滩(川中北部地区雷四段)水体较浅,水动力较强,主要堆积各种砾砂屑、鲕粒、藻屑和生屑颗粒,灰泥基质较少,发育粒间孔、藻格架孔等原生孔隙,孔隙度可达30%~40%,但同时受到海底同生—准同生阶段围绕颗粒边缘呈一期马牙状或栉壳状文石、高镁方解石胶结作用,使孔隙度缩小至15%以下;不过滩体在海平面升降的影响下,频繁暴露于水体之上,受到富镁卤水和大气淡水的共同作用发生混合水白云石化作用,加上其他白云石化作用的影响,颗粒大部分被云化,并且在同生溶蚀作用的影响下,产生较多的粒间孔、铸模孔、粒

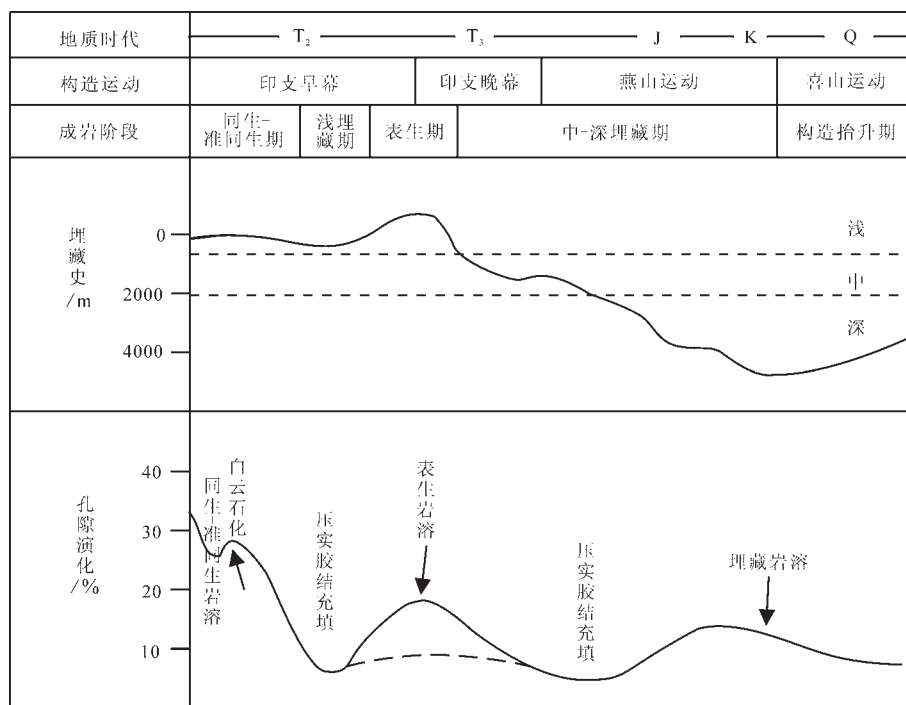


图4 川中雷口坡组中上部地层埋藏史与孔隙演化图

Fig.4 Burial history and porosity evolution diagram of upper strata of Leikoupo Formation in central Sichuan basin

内溶孔(图版-4),孔隙度可增高至15%~30%;而川中南部位于潮间带地势低洼或者邻近区域的地方,水动力较弱,主要堆积各种灰泥、膏盐岩和少量生屑沉积,这种基质间微孔和生物体腔孔十分发育,孔隙度可达30%~40%,但是海底的堆积、胶结,使孔隙度又降低至15%以下,不过当富镁卤水流经这些区域时发生的准同生白云石化作用(包括蒸发泵和回流渗透白云石化),使这些沉积物形成了粉晶白云岩,发育晶间孔,同时大气淡水的溶蚀改造形成部分晶间溶孔(图版-5),孔隙度可增高至20%~30%。

4.2 浅埋藏阶段

浅埋藏阶段沉积物脱离了水体,迅速被掩埋,发生压实、充填、胶结作用,前期形成的大量孔隙消失,孔隙度降低至5%以下,岩性变得较致密。但是石膏成分的参与,譬如颗粒间的二期粒状石膏胶结(图版-6)或者晶粒间的石膏基质的充填,可为后期石膏的溶蚀等现象奠定物质基础。

4.3 表生期阶段

中三叠世末印支运动中晚期,四川盆地整体抬升,海水从北至南先后退出四川盆地^[34],川中地区龙岗—营山—广安—合川—潼南一带,长期进入表生阶段,接受大气淡水成岩环境的改造。川中南部雷三³亚段的云坪由于下伏于雷四段,距离风化剥蚀面较远,一般未受到大气淡水的改造,绝大部分仍处于浅埋藏阶段,孔隙度在10%以下。但是川中北部龙岗—营山地区的雷四³亚段滩体基本处于大气淡水的中部水平潜流带。由于水对碳酸盐岩的溶蚀作用需借助CO₂,而对于膏盐岩的溶蚀是直接性的^[35],所以膏盐岩更易溶解,使岩层镂空,造成上覆碳酸盐岩垮塌下来,形成岩溶角砾(图版-7)。川中北部龙岗—营山地区雷四段顶部岩溶现象十分明显,岩溶角砾发育,溶沟中可见渗流粉砂、渗流豆粒,角砾成分复杂,但角砾中多见云化砂屑(图版-8),所以川中北部雷四³亚段储层应该为受岩溶改造的滩相储层。

4.4 中—深埋藏阶段

研究区雷口坡组中上部地层在印支晚期—燕山期即上三叠统、侏罗系、白垩系沉积期间经历持续埋深的过程,进一步的压实和胶结作用使储层孔隙度甚至降低至5%以下,但该阶段的中后期由于

埋藏溶蚀作用的发生使孔隙度增加,可达15%左右。因此对储层有建设性的成岩作用是埋藏溶蚀作用,可能主要是有机质热成熟过程中产生的有机酸或烃类气体运移到有利储集相带中,与相邻石膏的热化学还原反应(TSR)产生的腐蚀性硫化氢气体进一步溶蚀有利储集相的过程有关。

所谓TSR反应是硫酸盐与烃类或者有机质在高温下形成的反应,其反应方程式为:



烃类中主要是重烃组分与硫酸盐反应,反应温度一般在100~140℃,在某些地区可能更高。

四川盆地中部雷口坡组气藏主要来自于下伏上二叠统的烃源岩地层^[36]。四川盆地二叠系烃源岩在晚三叠世—早侏罗世达到生烃高峰,早—中白垩世处于高一过成熟阶段,进入生气高峰^[37],大量的烃类气体通过深大断裂^[38],向上运移到川中雷口坡组中上部储层,此外,川中地区雷口坡组上覆上三叠统须家河组烃源岩在晚侏罗世、晚白垩世经历了2次排烃过程^[39],因此少量的腐蚀性有机酸也可以通过裂缝、断裂带(图版-10)向下进入到川中雷口坡组中上部储层(主要是川中北部雷四³亚段)。这些烃类气体或者有机酸在中侏罗世—晚白垩世的深埋藏、高温条件下与储层附近的硬石膏层或含膏泥岩、含膏碳酸盐岩中的硬石膏发生硫酸盐热化学还原反应生成大量硫化氢气体。硫酸盐热化学还原作用(TSR)过程及生成的强腐蚀性的硫化氢气体对川中北部的颗粒滩相储层和川中南部的云坪相晶粒储层进行溶蚀改造,粒间溶孔、晶间溶孔(图版-4、图版-5)等有利的储集空间大量形成,储层孔隙度增大。研究区雷口坡组可见瘤状、团块状的膏模(溶)孔,粒间溶孔中充填的少量石膏(图版-6、图版-9)以及天然气中含有较高的硫化氢气体,证实发生了硫酸盐热化学还原(TSR)反应。

5 构造作用阶段膏盐岩对储层的影响

研究区雷口坡组地层在膏盐岩的底辟作用和印支早、晚期运动、燕山运动和喜马拉雅早期运动等多期构造作用的影响下产生大量构造裂缝后,便于流体的运移以及气藏的重新分布。

研究区膏盐岩底辟作用和构造作用的证据,雷雪等研究^[40]表明,川中南部龙女寺地区雷口坡组沉

积时期雷三²亚段的两套膏盐岩(底部一套较薄,上部一套较厚)是广泛沉积的。雷口坡时期,膏盐岩的沉积厚度受微地貌控制,变化幅度较小,中三叠世末印支运动中晚期,四川盆地整体抬升和海水退出使川中雷口坡组地层出露地表,进入表生作用阶段遭受差异性的风化剥蚀,之后又上覆陆相沉积继续埋深,随着雷口坡组地层深度的增加,这些上覆的硬岩层如砾砂岩、残留灰云岩等在膏盐岩底辟作用下弯曲褶皱产生许多微裂缝。而后期燕山—喜山运动中水平的挤压力使膏盐岩上面的这些硬岩层进一步产生较多的逆冲断层(图5)。

如前面所述,下覆的上二叠统烃源岩中产生的烃类裂解天然气在同时期构造作用下重新分布,通过深大断裂^[38]进入到雷口坡组中上部有利储层,而须家河组烃源岩有机质热演化产生的少量有机酸向下也进入到雷口坡组中上部有利储层,这些物质在满足 TSR 反应的高温、深埋条件下与硬石膏反

应,产生大量硫化氢气体,溶蚀改造雷口坡组中上部储层(图版-10、图版-11)。

当然,烃源除了纵向运移外,横向运移、平面铺开的情况,应该与有利的沉积相带、成岩相带有关。川中雷口坡组中上段的滩相、云坪相中受到溶蚀改造较好的地方,储层物性、渗透率一般也较好,便于这些烃源的运移、聚集成藏。

6 结论

(1)四川盆地雷口坡期沉积背景为受限的陆表海环境,雷口坡组雷三段雷四段沉积期,川中地区主要位于其中的潮坪环境,海平面总体呈缓慢下降,同时炎热干旱与潮湿气候频繁交替。膏盐岩微相的成因是位于潮上带的水体在蒸发作用的影响下,形成盐度较大的卤水,在低洼或凹陷处汇聚形成或者是表层水体蒸发浓缩下沉置换下层水体形成。具体分为三种微相,膏盐池、膏盐湖、膏盐盆。

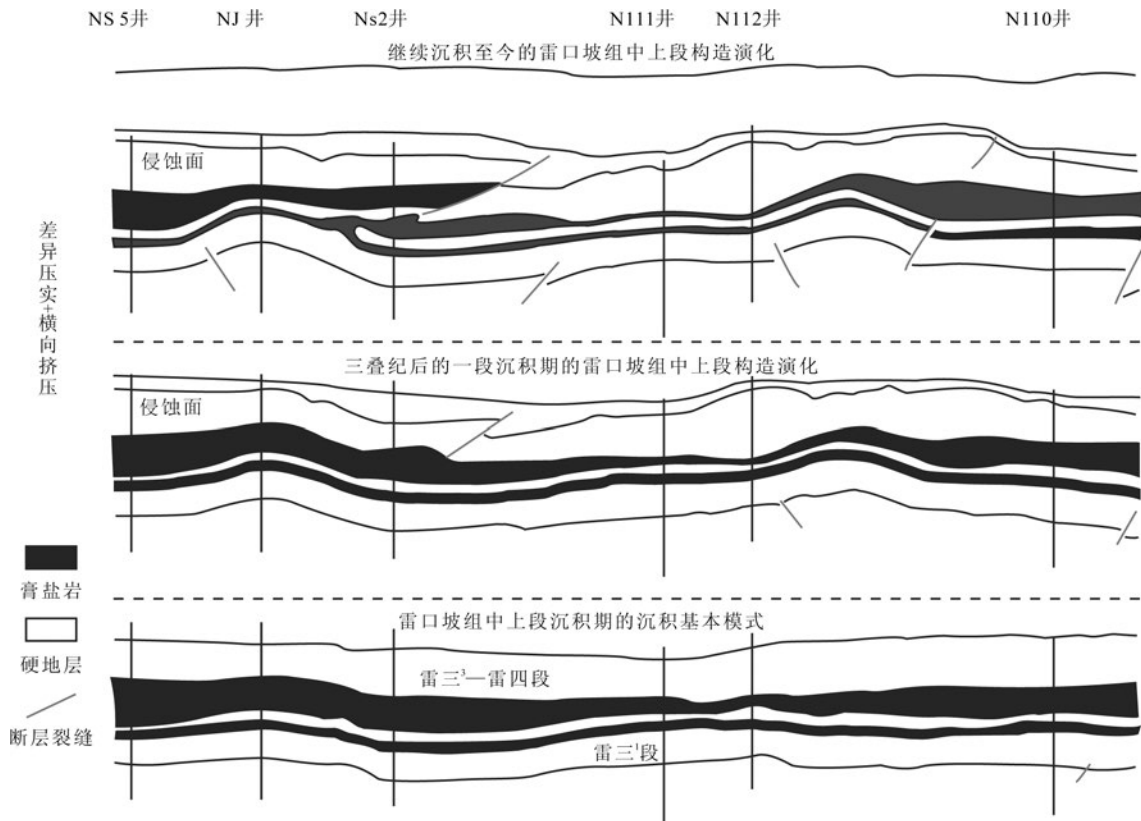


图5 川中南部龙女寺地区的雷口坡组中上部地层沉积和构造演化示意图(据文献[40]修改)
Fig.5 Sedimentary and tectonic evolution diagram of upper strata of Leikoupo Formation in Longnvsi area of southern central Sichuan basin(modified after Reference[40])

膏盐池岩性特征为薄层状、瘤状或针状的石膏与白云岩类伴生,膏盐湖岩性特征呈中—厚层状膏盐岩与膏质白云岩、泥粉晶白云岩不等厚互层;膏盐盆岩性特征为大套厚层的膏岩和盐岩夹石灰岩。三种微相统一起来,实际上是盆地中心深水区和边缘浅水区的膏盐岩的分布情况。

(2)川中雷三雷四段膏盐岩演化过程中存在多个成盐期,期间被淡化作用中断,雷三²和雷四²是重要的成盐期,南充附近雷三²亚段为一套厚层的膏盐盆沉积,龙岗地区雷四²亚段为一套薄—中层膏盐湖沉积,淡化作用期间,磨溪局部地区雷三³亚段发育滩相沉积,龙岗局部地区雷四³亚段发育滩相沉积。

(3)成岩过程中同生—准同生时期的白云石化、溶解作用;表生期的岩溶改造;中—深埋藏期的埋藏溶蚀、硫酸盐热化学还原作用对储层形成、发育有重要影响。

(4)膏盐岩的底辟构造和构造运动形成的裂缝、断层对储层的改造、流体的运移、气藏的重新分布起着重要的促进作用。

(5)沉积、成岩、构造作用与膏盐岩因素的共同影响使储层形成较多的粒间溶孔、晶间溶孔、膏模溶孔,溶洞、裂缝等,川中北部的滩相、川中南部的云坪相中受到溶蚀改造较好的地方,便于天然气聚集成藏。

参考文献(References):

- [1] 卢耀如,张凤娥. 硫酸盐岩岩溶及硫酸盐岩与碳酸盐岩复合岩溶—发育机理与工程效应研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 5-28, 88-94.
Lu Yaoru, Zhang Feng e. Sulfate Carst and Sulfate-carbonate Carst—Development Mechanism and Engineering Effect Research[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 5-28, 88-94 (in Chinese with English abstract).
- [2] Bischof G. Lchrbuch Der Chem Ischen Und Physicalischen Geologie[M]. Bonn: Adolph Marcus. 1855, Bd. II, 3: 1667-2512.
- [3] Ochsenius C. Die Bildung Der Steinsalzlager Und Ihrer Mutterlaugen Salae Pfeffer[M]. Halle. 1877, 172.
- [4] Walther J. Lithogenesis der Genewrt—Beobachtungen uber die Bildung der Gesteine an der heutigen Erdoberflache. Fischer. Jena: Teil der Einleitung in die Geologie[J]. Fischer. Jena, 1894, III, 535-1055.
- [5] Branson F B. Origin of thick gypsum and salt deposits[J]. Geol.

- Soc. Am. Bull., 1915, 26: 231-242.
- [6] King R H. Sedimentation in Permian Castile Sea[J]. AAPG Bulletin, 1947, 31(3): 470-477.
- [7] Scruton P C. Deposition of evaporates[J]. AAPG Bulletin, 1953, 53: 798-823.
- [8] Amiel A J, Friedman G M. Continental Sabkha in Arava Valley between Dead Sea and Red Sea: Significance for origin of evaporites[J]. AAPG Bulletin, 1971, 55(4):581-592.
- [9] Schmalz R F. Deep-water evaporite deposition: A genetic model[J]. AAPG Bulletin, 1969, 53(4): 798-823.
- [10] Hsu K J. Origin of saline giants: A critical review after the discovery of meditterance[J]. Earth- Science Review, 1972, 8: 371-386.
- [11] 何幼斌, 王文广. 沉积岩与沉积相[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 146-150, 246-257.
He Youbin, Wang Wenguang. Sedimentary Rock and Sedimentary Facies[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007: 146-150, 246-257(in Chinese with English abstract).
- [12] 沈安江, 周进高, 辛勇光, 等. 四川盆地雷口坡组白云岩储层类型及成因[J]. 海相油气地质, 2008, 13(4): 19-28.
Shen Anjiang, Zhou Jingao, Xin Yongguang, et al. Origin of Triassic Leikoupo dolostone reservoir in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(4): 19-28(in Chinese with English abstract).
- [13] 樊建明, 郭平, 孙良田, 等. 天然气储层中硫化氢分布规律——成因及对生产的影响[J]. 特种油气藏, 2006, 13(2): 90-94.
Fan Jianming, Guo Ping, Shun Liangtian, et al. Hydrogen sulfide distribution, genesis and impact on production in gas reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2006, 13(2): 90-94(in Chinese with English abstract).
- [14] 江兴福, 徐人芬, 黄建章. 川东地区飞仙关组气藏硫化氢分布特征[J]. 天然气工业, 2002, 22(2): 24-27.
Jiang Xingfu, Xu Renfen, Huang Jianzhang. Characteristics of hydrogen sulfide distribution in Feixianguan formation gas reservoirs in east Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(2): 24-27(in Chinese with English abstract).
- [15] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地高含H₂S天然气的分布与TSR成因证据[J]. 地质学报, 2006, 80(8): 1208-1218.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Distribution of high H₂S-bearing natural gas and evidence of TSR origin in the Sichuan Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (8): 1208-1218(in Chinese with English abstract).

- [16] 林耀庭, 何金权, 王田丁, 等. 四川盆地中三叠统成都盐盆富钾卤水地球化学特征及其勘查开发前景研究[J]. 化工矿产地质, 2002, 24(2): 72-84.
Lin Yaoting, He Jinquan, Wang Tianding, et al. Geochemical characteristics of potassium-rich brine in middle Triassic Chendu salt basin of Sichuan Basin and its prospects for brine tapping[J]. Geology of Chemical Minerals, 2002, 24(2): 72-84(in Chinese with English abstract).
- [17] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 68-72, 90-113.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. The Formation and Development of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 68-72, 90-113(in Chinese with English abstract).
- [18] 冯增昭. 碳酸盐岩相古地理学[M]. 北京: 石油工业出版社. 1989: 58-83, 131-147.
Feng Zengzhao. Lithofacies Paleogeography of Carbonate Rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 58-83, 131-147(in Chinese with English abstract).
- [19] 冯增昭, 鲍志东, 李尚武. 中国南方早中三叠世岩相古地理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 105-134.
Feng Zengzhao, Bao Zhidong, Li Shangwu. Lithofacies Paleogeography of Middle and Lower Triassic of South China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 105-134(in Chinese with English abstract).
- [20] 里丁 H G. 沉积环境和相[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 222-258.
Reading H G. Sedimentary Environment and Facies[M]. Beijing: Science Press, 1985: 222-258(in Chinese with English abstracts).
- [21] 徐文礼, 郑荣才, 费怀义, 等. 土库曼斯坦阿姆河盆地卡洛夫—牛津阶沉积相特征[J]. 中国地质, 2012, 39(4): 954-964.
Xu Wenli, Zheng Rongcai, Fei Huaiyi, et al. The sedimentary facies of Callovian-Oxfordian Stage in Amu Darya basin, Turkmenistan[J]. Geology in China, 2012, 39(4): 954-964(in Chinese with English abstract).
- [22] 董兆雄, 姚泾利, 孙六一, 等. 重新认识鄂尔多斯南部早奥陶世马家沟期碳酸盐台地沉积模式[J]. 中国地质, 2010, 37(5): 1327-1335.
Dong Zhaoxiong, Yao Jingli, Sun Liuyi, et al. The carbonate platform sedimentary model of southern Ordos basin[J]. Geology in China, 2010, 37(5): 1327-1335(in Chinese with English abstract).
- [23] 张玉修, 李勇, 张开均, 等. 西藏羌塘盆地依仓玛地区中上侏罗统碳酸盐岩特征及其环境意义[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 393-400.
Zhang Yuxiu, Li Yong, Zhang Kaijun, et al. Characteristics of Mid-Upper Jurassic carbonate rocks in Yichangma area, Qiangtang Basin, Tibet: Implications for the sedimentary environment[J]. Geology in China, 2006, 33(2): 393-400(in Chinese with English abstract).
- [24] 雷卞军, 周跃宗, 杨金利, 等. 川中—川南过渡带嘉陵江组二段沉积相及其展布特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1149-1158.
Lei Bianjun, Zhou Yuezhong, Yang Jinli, et al. Sedimentary facies of the second member of the Jialingjiang Formation in the central-southern Sichuan transition zone and its distribution characteristics[J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1149-1158(in Chinese with English abstract).
- [25] 冯仁蔚, 王兴志, 张帆, 等. 四川盆地东北部下三叠统飞——飞三段孤立碳酸盐岩台地沉积相及相关研究[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 54-66.
Feng Renwei, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. Sedimentary facies of isolated carbonate platform of the first to third members of the lower Triassic Feixianguan Formation in the northeastern part of the Sichuan Basin and other related aspects[J]. Geology in China, 2008, 35(1): 54-66(in Chinese with English abstract).
- [26] Amadi F O, Major R P, Baria L R. Origins of gypsum in deep carbonate reservoirs: Implications for hydrocarbon exploration and production[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(2): 375-390.
- [27] Federico O, Laura R, Elisabet P, et al. Meganodular anhydritization: A new mechanism of gypsum to anhydrite conversion (Palaeogene-Neogene, Ebro Basin, north-east Spain)[J]. Sedimentology, 2012, 59(4): 1257-1277.
- [28] Florias M, Carmen C, Juan H, et al. The nature and significance of variations in gypsum crystal morphology in dry lake basins[J]. Journal of Sedimentary Research, 2012, 82(1): 41-56.
- [29] 李凌, 谭秀成, 邹春, 等. 四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及膏盐盆迁移演化与构造意义[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 316-324.
Li Ling, Tan Xiucheng, Zou Chun, et al. Origin of the Leikoupo Formation gypsum-salt and migration evolution of the gypsum-salt pot in the Sichuan Basin, and their structure significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 316-324(in Chinese with English abstract).
- [30] 杨威, 魏国齐, 金惠, 等. 川东北飞仙关组鲕滩储层成岩作用和孔隙演化[J]. 中国地质, 2007, 34(5): 822-828.
Yang Wei, Wei Guoqi, Jin Hui, et al. Diagenesis and pore

- evolution of the oolitic shoal reservoir in the Feixianguan Formation in northeastern Sichuan[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5): 815–821(in Chinese with English abstract).
- [31] 王文之, 田景春, 张翔, 等. 川南丹凤—塘河地区嘉陵江组储层特征及储层主控因素[J]. *中国地质*, 2012, 39(1): 127–134.
Wang Wenzhi, Tian Jingchun, Zhang Xiang, et al. Characteristics and major controlling factors of Jialingjiang Formation reservoirs in Danfeng–Tanghe area, southern Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 2012, 39(1): 127–134(in Chinese with English abstract).
- [32] 吴仕玖, 曾德铭, 王岩, 等. 川中龙岗—营山地区雷口坡组雷四3亚段储层成岩作用及孔隙演化[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 919–926.
Wu Shijiu, Zeng Deming, Wang Yan, et al. Reservoir diagenesis and porosity evolution of Leikoupo–4³ Formation in Longgang–Yingshan area of central Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 919–926(in Chinese with English abstract).
- [33] 何莹, 胡东风, 张箭, 等. 四川盆地大湾—毛坝—铁山坡地区飞仙关组储层特征及其主控因素[J]. *中国地质*, 2008, 35(5): 922–939.
He Ying, Hu Dongfeng, Zhang Jian, et al. Reservoir rock characteristics and main controlling factors of the Feixianguan Formation in the Maoba–Dawan–Tieshanpo area, Sichuan basin[J]. *Geology in China*, 2008, 35(5): 922–939(in Chinese with English abstract).
- [34] 曾德铭, 王兴志, 张帆, 等. 四川盆地西北部中三叠统雷口坡组储层研究[J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 253–266.
Zeng Deming, Wang Xingzhi, Zhang Fan, et al. Study on reservoir of Leikoupo Formation of middle Triassic in northwestern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 253–266(in Chinese with English abstract).
- [35] 卢耀如, 张凤娥, 阎葆瑞, 等. 硫酸盐岩岩溶发育机理与有关地质环境效应[J]. *地球学报*, 2002, 23(1): 1–6.
Lu Yaoru, Zhang Feng'e, Yan Baorui, et al. Mechanism of Karst Development in Sulphate Rocks and Its Main Geo–environmental Impacts[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(1): 1–6(in Chinese with English abstract).
- [36] 朱光有, 张水昌, 梁英波, 等. 四川盆地天然气特征及气源[J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 234–248.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. The characteristics of nature gas in Sichuan Basin and its sources[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(2): 234–248(in Chinese with English abstracts).
- [37] 刘全有, 金之钧, 高波, 等. 四川盆地二叠系烃源岩类型与生烃潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 10–18.
Liu Quanyou, Jin Zhijun, Gao Bo, et al. Types and hydrocarbon generation potential of the Permian source rocks in the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 10–18(in Chinese with English abstract).
- [38] 王英民, 童崇光, 徐国强, 等. 川中地区基底断裂的发育特征及成因机制[J]. *成都地质学院学报*, 1991, 18(3): 52–60.
Wang Yingming, Tong Chongguang, Xu Guoqiang, et al. On the characteristics and mechanism of basement faults in central Sichuan Basin[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1991, 18(3): 52–60 (in Chinese with English abstract).
- [39] 蒋裕强, 郭贵安, 陈义才, 等. 川中地区须家河组天然气成藏机制研究[J]. *天然气工业*, 2006, 26(11): 1–3.
Jiang Yuqiang, Guo Gui'an, Chen Yicai, et al. Mechanism of gas reservoiring in Xujiahe Formation in central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(11): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- [40] 雷雪, 李忠, 翟中华, 等. 川中地区中三叠统雷口坡组构造特征及解释方法探讨[J]. *石油物探*, 2005, 44(2): 137–141.
Lei Xue, Li Zhong, Zhai Zhonghua, et al. Structure style analysis of Leikoupo Formation in Mid- Triassic in central Sichuan Basin[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2005, 44(2): 137–141(in Chinese with English abstract).

The origin of gypsum–salt rock of Leikoupo Formation and its influence on the gas reservoir in central Sichuan basin

ZHU Tong¹, WANG Xing–zhi², SHEN Zhong–min¹, LI Le³, LI Hao⁴, WANG Peng¹

(1. *Institute of Energy Resource, Chendu University of Technology, Chendu 610059, Sichuan, China;*

2. *Institute of Resource and Environment, Southwest Petroleum University, Chendu 610500, Sichuan, China;*

3. *Faculty of Resources, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, Hubei, China;*

4. *the Exploration and Development Institute of CNOOC Tianjin Branch Company, Tianjin, 300452, China)*

Abstract: Based on core observation, thin section identification, diagenetic porosity evolution and studies of burial history relationship, the authors analyzed the origin and evolution of gypsum–salt rock microfacies of Leikoupo Formation in central Sichuan basin and investigated the controlling role and influence of gypsum–salt rocks on the reservoir of Leikoupo Formation in the aspects of sedimentary facies, diagenetic process, and tectonization. It is shown that the gypsum–salt rocks in central Sichuan basin were formed in a limited tidal flat environment of epicontinental sea, which included gypsum–halite pond of supratidal zone, gypsum–halite lake of intertidal zone and gypsum–halite basin microfacies of limited subtidal zone. Its origin included the concentration of the supratidal zone shallow dense brine in low areas, and the sinking and replacement of superficial dense brine produced in the intertidal–subtidal zone. The distribution of gypsum–salt rocks was related to the deposit center migration resulting from rising and falling of the sea level, and also had something to do with the distribution of the point beach. The formation of gypsum–salt rocks, the dissolution effects in the contemporaneous–penecontemporary period, the supergene period karst collapse and the medium–deep burial period dissolution generated by thermochemical sulfate reduction (TSR) all had important contribution to the formation and control of the upper reservoir in Leikoupo Formation in central Sichuan basin. In addition, gypsum–salt rock diapir as cracks and fractures generated by tectonic movements played a certain role in promoting the migration of hydrocarbon source and the redistribution of the gas reservoir.

Key words: Leikoupo Formation in central Sichuan basin; gypsum–salt rock microfacies; thermochemical sulfate reduction; dense brine

About the first author: ZHU Tong, male, born in 1986, doctoral candidate, majors in reservoir geology and geochemistry; E–mail: bbna1986@163.com.

About the corresponding author: SHEN Zhong–min, male, born in 1954, doctor, professor, tutor of doctorate candidate, majors in geochemistry and accumulation study of oil–gas; E–mail: szm313@cdut.edu.cn.