

引用: 田瀚, 王贵文, 段书府, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组储层特征及勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2021,26(5):60-73.

Tian Han, Wang Guiwen, Duan Shufu, et al. Reservoir characteristics and exploration target of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(5):60-73.

四川盆地中三叠统雷口坡组储层特征及勘探方向

田瀚^{1,2} 王贵文¹ 段书府² 辛勇光³ 张豪³

(1 中国石油大学(北京)地球科学学院; 2 中国石油勘探开发研究院; 3 中国石油杭州地质研究院)

摘要: 四川盆地中三叠统雷口坡组是中国石油西南油气田公司的重要战略接替领域。随着勘探形势的变化, 需要以全盆地为单元, 明确储层平面分布规律, 为下一步天然气勘探方向提供指导。基于丰富的岩心、测井、地震和野外露头等资料, 通过层序格架下的岩相古地理深化认识和储层特征综合分析, 认为: (1) 四川盆地雷口坡组属于局限台地沉积环境, 纵向上可划分为4个三级层序, 有利沉积相带发育在海侵体系域, 主要位于雷一¹亚段、雷三³亚段和雷四³亚段; (2) 雷口坡组“一洼两隆”的古地理格局控制着滩体分布, 其中盆地西侧龙门山前带滩体为复合叠置发育, 东侧膏盐湖边缘滩体为迁移叠置发育; (3) 雷口坡组发育沉积型和岩溶改造型两类储层, 其中沉积型储层以颗粒滩白云岩储层和微生物白云岩储层为主, 主要发育于盆地边缘及盆内古地貌高处, 而岩溶改造型储层主要发育于有利相带与岩溶残丘叠合处。综合考虑烃源岩、储层类型和圈闭条件等, 指出四川盆地雷口坡组下一步勘探方向: 剑阁—江油—名山一带是雷三段、雷四段颗粒滩白云岩储层和微生物白云岩储层有利勘探领域, 资阳—南充地区和泸州古隆起西缘是雷一段滩相白云岩储层有利勘探领域, 大川中地区是岩溶改造型储层有利勘探领域。

关键词: 四川盆地; 中三叠统; 雷口坡组; 岩相古地理; 储层特征; 勘探方向

中图分类号: TE112.23 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.05.006

Reservoir characteristics and exploration target of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin

Tian Han^{1,2}, Wang Guiwen¹, Duan Shufu², Xin Yongguang³, Zhang Hao³

(1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing); 2 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development; 3 PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology)

Abstract: The Middle Triassic Leikoupo Formation is a major strategic replacement field for petroleum exploration of PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company in Sichuan Basin. The exploration situation is changing, and the rule of reservoir distribution in basin scale is necessary to be identified, so as to provide guidance for gas exploration in the near future. The lithofacies paleogeography within sequence framework is further understood and reservoir characteristics are comprehensively analyzed by using a large number of core samples, well logging, seismic and outcrop data. The results show that: (1) It was a limited platform environment in Sichuan Basin during the deposition of Leikoupo Formation. The formation is subdivided into four tertiary sequences, and the favorable reservoirs are mainly developed in L₁¹ (1st sub-member of the 1st member of Leikoupo Formation), L₃³ and L₄³ sub-members of transgressive system tract; (2) The paleogeographic pattern of “one subsag and two uplifts” during the deposition of Leikoupo Formation controlled the distribution of beach reservoir, in which it was composite superimposed in the piedmont of Longmen Mountain in the western basin while it was migration superimposed of the marginal beach body of gypsum salt lake in the eastern basin; (3) There are two types of reservoirs of Leikoupo Formation, i.e., the facies-controlled reservoir and karst reservoir. The former is dominated by grain beach dolomite and microbial dolomite, which is mainly developed in the basin margin and paleo highs inside the basin, while the latter is developed in the superimposed area of favorable facies zones and karst residual mounds. Finally, the favorable exploration targets are proposed by comprehensively considering source rocks, reservoir types and

基金项目: 中国石油勘探与生产分公司科技项目“四川盆地雷口坡组天然气勘探有利区带评价”(kt2018-01-05)。

第一作者简介: 田瀚(1989—), 男, 湖北黄冈人, 在读博士, 工程师, 现从事复杂储层测井评价及测井地质学研究工作。地址: 北京市海淀区学院路20号石油大院, 邮政编码: 100083。E-mail: tianh_hz@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-03-02; 修改日期: 2021-08-17

trap conditions, including grain beach dolomite and microbial dolomite reservoirs of L_3 and L_4 members in Jiange-Jiangyou-Mingshan area, beach dolomite reservoirs of L_1 member in Ziyang-Nanchong area and the western margin of Luzhou paleo uplift, and karst reservoir in central Sichuan region.

Key words: Sichuan Basin, Middle Triassic, Leikoupo Formation, lithofacies paleogeography, reservoir characteristics, exploration target

0 引言

中三叠统雷口坡组处于四川叠合盆地海相碳酸盐岩演化的最后阶段,也是四川盆地重要的勘探层系^[1-5]。该层系勘探始于20世纪60年代,自1972年中坝气田发现至今,在四川盆地先后发现了卧龙河、磨溪和龙岗一批中小型气田及观音场、罗渡溪、孔滩等多个含气构造,近期在川西地区新发现了雷口坡组千亿立方米大气田——川西气田,展现出雷口坡组良好的勘探潜力^[6-7]。虽说雷口坡组油气勘探发现很多,但整体表现为“纵向多层段、平面点状分布”特征,尚未发现规模连片的油气田。这除了与雷口坡组成藏条件复杂有关外,还与目前对雷口坡组储层形成机制和分布规律缺乏整体性、系统性研究相关^[8-9]。

前人针对雷口坡组沉积特征和储层成因机制做过大量研究工作:如沉积环境方面,辛勇光等^[1,10-11]认为四川盆地中三叠统雷口坡组沉积期是一个水体浅、盐度大、范围广阔的障壁型碳酸盐台地,主要发育台地边缘、台内滩、潟湖和混积潮坪沉积;汪华等^[12]则认为四川盆地雷口坡组主要为局限台地相沉积,部分地区为开阔台地相和蒸发台地相,其中川西地区发育台缘滩亚相,川中地区以潟湖相和台内滩亚相为主;孙春燕等^[12-13]认为雷口坡组主要为一套浅水碳酸盐台地相沉积体系,发育台地边缘、局限台地、开阔台地和蒸发台地4种沉积相类型,发育台缘滩和台内滩两类颗粒滩白云岩储层。可以发现不论是哪种观点,前人都在强调台缘滩和台内滩的重要性,但是随着勘探程度的深入以及老井重新认识,发现雷口坡组在广阔的潮坪相带发育一类重要的储层——微生物白云岩,而且分布规模大,新发现的川西气田、川西南大兴场和川西北中坝气田等地区的储层主要发育这一岩类,这类潮坪相微生物白云岩的发现对传统认识提出了挑战,即现今盆地西侧龙门山前带是否为中三叠统雷口坡组沉积期的台地边缘?对于储层成因机制方面,目前主要有以下几种观点:(1)储层主要受沉积相和表生岩溶作用共同控制^[14-15];(2)表生岩溶作用和埋藏期岩溶作用是次生孔隙形成的关键^[13];

(3)“白云岩化+准同生期溶蚀+埋藏溶蚀”共同控制雷口坡组优质白云岩储层的形成;(4)优质白云岩储层的形成与分布受高频层序控制,高频层序不仅控制有利微相分布,而且对后期成岩作用具有一定影响,是影响储层发育与空间展布的关键。可以看出前人针对雷口坡组储层成因机制的观点也不尽相同,存在这些差异的原因与前人研究多局限于某一具体区块或层系密切相关。因此,为了弄清楚雷口坡组不同类型储层的成因机制和分布规律,需要着眼于全盆地,重视构造和岩相古地理演变关系,以层序地层为约束,系统分析中三叠统雷口坡组的沉积特征、储层形成机制和分布规律,从而为雷口坡组下一步勘探部署提供指导。

1 区域地质概况

四川盆地是扬子准地台上偏西北一侧的一个次一级构造单元,中三叠统雷口坡组沉积期属于扬子克拉通盆地的一部分,其西部经龙门山岛链与滇青藏大古洋相邻,北部经天井山、米仓山、大巴山隆起与秦岭海相邻,盆地西南部与东部分别被康滇古陆、江南古陆所围^[8,10],同时盆地内隆坳相间,发育泸州—开江古隆起和川西凹陷,这种古地理格局导致中三叠统雷口坡组沉积期四川盆地整体处于蒸发—局限台地相的沉积环境。

中三叠统雷口坡组主要为碳酸盐岩夹膏岩、盐岩沉积,顶部以泥—粉晶白云岩、角砾状白云岩、藻屑灰岩与上覆上三叠统须家河组陆相碎屑岩不整合接触,底部以区域标准层的黄绿色水云母黏土岩(俗称绿豆岩)与下伏下三叠统嘉陵江组整合接触^[12,15]。依据岩性、电性和沉积旋回特征,雷口坡组纵向上可分为雷一段、雷二段、雷三段、雷四段和雷五段(也有称天井山组)5个岩性段(图1)。

中三叠世末,随着印支运动的发生,四川盆地格局发生重大改变。碳酸盐台地整体抬升,盆地内出现大隆大坳格局,川东地区抬升形成泸州—开江古隆起,川西地区形成川西坳陷,整个雷口坡组表现出“西厚东薄”特征,从西往东地层逐渐尖灭,

隆起区地层遭受剥蚀严重,其中泸州古隆起顶部雷口坡组剥蚀殆尽,开江古隆起只残留中三叠统雷口坡组下部地层,印支运动抬升作用在川西北江油—

剑阁地区也有反映,雷口坡组上部地层部分被剥蚀^[8](图1),盆地内雷口坡组残余地层厚度在0~1000m之间。

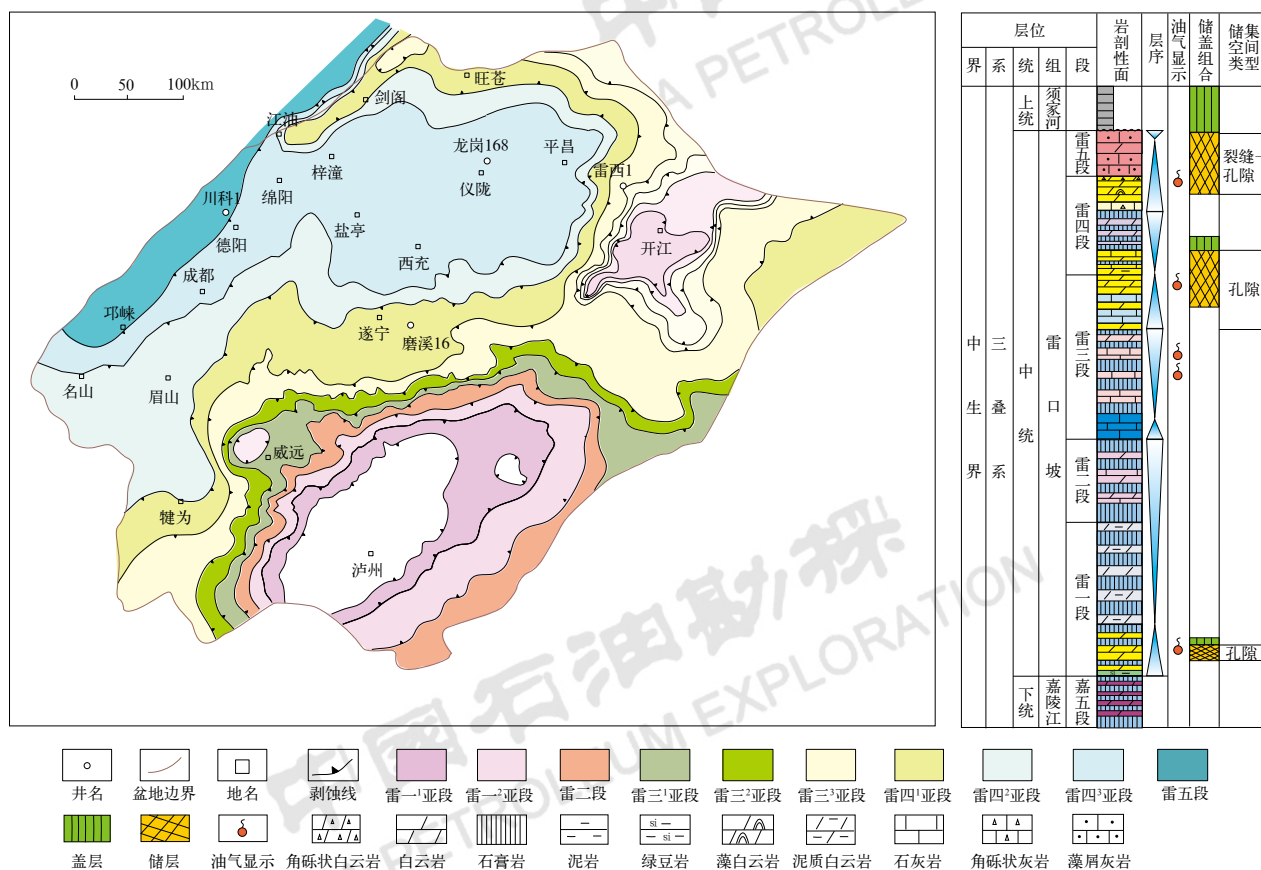


图1 四川盆地上三叠统沉积前古地质图(左)与地层柱状图(右)

Fig.1 Paleogeological map of Sichuan Basin before the deposition of Upper Triassic (left) and stratigraphic column (right)

2 层序—岩相古地理特征

2.1 层序地层划分

四川盆地中三叠统雷口坡组沉积期表现为盆地周缘古隆起发育及盆地内隆坳相间,这种特殊的古地理格局决定了雷口坡组为一套盐度大、水体较浅的碳酸盐台地相沉积体系,主要发育局限台地、蒸发台地、台地边缘和开阔台地4种沉积相类型,其中以局限台地和蒸发台地沉积为主^[8,12]。受古地貌环境和海平面升降的影响,雷口坡组纵向上表现为一套多旋回、多韵律的碳酸盐岩与蒸发岩组合,这种旋回性的变化特征决定了雷口坡组储层纵向叠置发育样式,且主要发育于海侵体系域时期。对于雷口坡组的层序地层划分已有很多学者开展过研究,认为雷口坡组可以划分为4个三级层序,每个三级层序内部均由海侵体系域

(TST)和高位体系域(HST)组成,低位体系域特征不明显。但是在具体的划分方案上存在差异:如孙春燕等认为4个三级层序分别对应雷一段、雷二段、雷三段、雷四段^[12,16-17];吕玉珍等则认为雷一段对应第一个三级层序,而雷二段对应第二个三级层序的海侵体系域,雷三¹亚段对应第二个三级层序的高位体系域^[11],雷三²—雷三³亚段、雷四段分别对应第三个和第四个三级层序。本文综合考虑地层岩性突变面、测井曲线特征和碳氧同位素变化规律等,重新系统厘定雷口坡组层序地层划分方案,认为雷口坡组自下而上仍划分为4个三级层序,且每个层序同样是由海侵体系域和高位体系域组成(图2),但具体划分标准与前人有所差异。

以川西北地区江油含增镇野外剖面为例(图2),该剖面雷口坡组发育齐全,从底部绿豆岩到顶部雷五段均保存完整,沉积厚度近830m,主要发育局限台

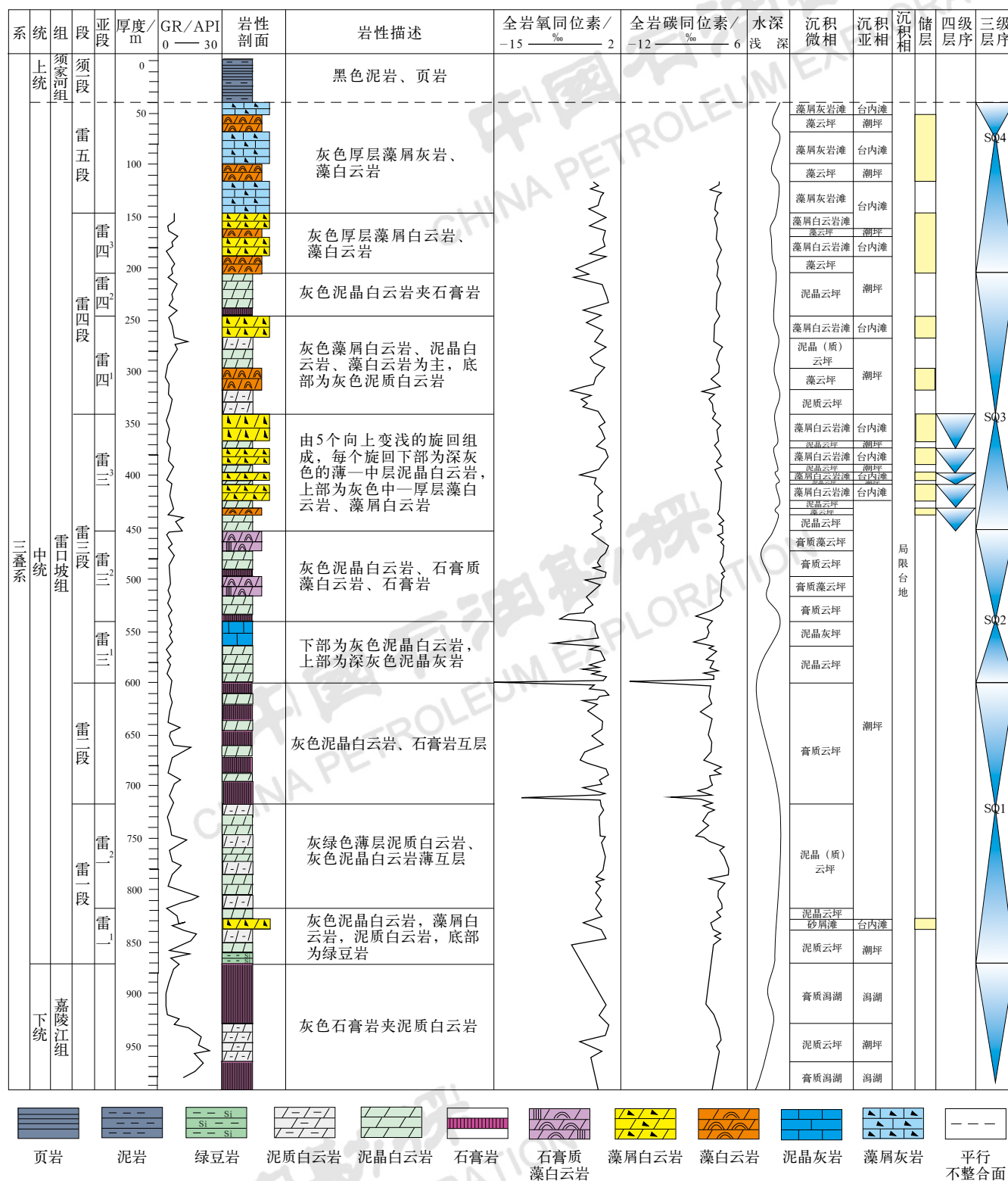


图2 川西北地区江油含增镇剖面雷口坡组柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of Leikoupo Formation of Hanzeng Town section in Jiangyou City, Northwest Sichuan Basin

地相潮坪亚相和台内滩亚相沉积。雷一段至雷二段为SQ1时期，由早期局限台地相潮坪亚相泥质云坪微相向台内滩亚相再向泥晶云坪微相和膏质云坪微相过渡，形成一个完整的从海侵体系域到高位体系域的变化；雷三¹亚段到雷三²亚段为SQ2时期，雷三¹亚

段沉积期由于大规模快速海侵，从雷二段膏质云坪微相转变为泥晶云坪和灰坪沉积，随着雷三²亚段沉积期海水的退去，又转变为局限台地相膏质云坪沉积；雷三³亚段到雷四²亚段为SQ3时期，主要发育局限台地相台内滩和潮坪沉积；雷四³亚段—雷五段为

SQ4时期,从海侵体系域至高位体系域发育局限台地相潮坪亚相的藻云坪沉积到藻屑灰岩滩沉积。

2.2 岩相古地理特征

层序—岩相古地理图是将层序地层学理论引入岩相古地理编图中,以体系域为编图单元,采用体系域压缩法编制古地理图,所编制的层序—岩相古地理图是反映具体地质体相对等时的岩相古地理图,在油气勘探、目标区的评选和远景预测中具有重要指导意义^[16]。本文基于所识别的三级层序,以不同体系域作为编图单元,绘制雷口坡组层序地层格架约束下的岩相古地理图,从而研究其沉积特征及演化规律。

SQ1-TST时期为雷一¹亚段沉积,由于地形平缓,整体表现为缓坡型局限台地沉积,在泸州地区发育古隆起^[8]。此阶段海侵规模较小,台地内主要以白云岩和蒸发岩沉积为主,川西龙门山前带局部发育台缘滩颗粒岩沉积,颗粒岩以砂屑白云岩为主;川中至泸州古隆起西北缘发育大面积的台内滩颗粒白云岩,平面上呈北东—南西向展布且分布稳定,是一套良好的孔隙型储层;川中坳陷、川东坳陷处为膏质云坪和膏质潟湖沉积,以沉积硬石膏岩、膏质白云岩和泥晶白云岩为主;川东地区由于受到盆地东南部江南古陆源碎屑的影响,主要沉积混积潮坪相的泥质白云岩(图3a)。

SQ1-HST时期为雷一²亚段至雷二段沉积,其沉积格局基本延续雷一¹亚段沉积时期。随着海平面的下降,盆地内以蒸发岩沉积为主,川中西充—仪陇坳陷处为膏盐岩沉积中心,围绕膏岩湖周缘发育膏质云坪,仅在川西龙门山前带发育云坪相,而川东地区仍为泥质云坪沉积(图3b)。

SQ2-TST时期为雷三¹亚段沉积,雷口坡组最大规模的海侵现象发生在这一时期,由于海平面升高,台地内与外海水体交流通畅,盆地内以石灰岩沉积为主。除了川东泸州、开江地区遭受剥蚀外,其他地区保存完好,其中川中—川西地区广泛发育含泥灰坪和泥灰质潟湖沉积,川西龙门山前带局部发育含灰云坪沉积,川东地区则以混积泥质灰坪和灰质泥坪沉积为特征(图3c)。

SQ2-HST时期为雷三²亚段沉积,该时期气候再次变干旱,同时受盆地周缘板块挤压作用增强的影响,盆地呈现出明显“一洼两隆”的地理格局,其中“一洼”为川中资阳—平昌坳陷,“两隆”分别为龙门山前带和泸州—开江古隆起。资阳—平昌坳陷区发

育膏质潟湖和膏灰质潟湖,膏质潟湖中央沉积巨厚的硬石膏岩和盐岩;川西龙门山前带以云坪沉积为主;川东地区以混积泥质灰坪为主(图3d)。

SQ3-TST时期为雷三³亚段沉积,该时期继承了雷三²亚段沉积时的沉积格局,受海侵影响,盆地内以石灰岩沉积为主。川西龙门山前带的邛崃—江油—广元一带局部发育台缘滩沉积;川中地区局部古地貌高处发育台内滩和云坪沉积,而资阳—平昌坳陷区发育灰质潟湖沉积,岩性以泥晶灰岩为主,岩心上可见明显水平层理特征,围绕着灰质潟湖发育大面积灰坪沉积(图3e)。

SQ3-HST时期为雷四¹⁺²亚段沉积,受印支运动早幕影响,盆地东部抬升明显,川东大部分地区雷口坡组被剥蚀殆尽,同时坳陷中心不断向西迁移。由于水体封闭,气候再次变干旱,川西—川中地区整体为蒸发台地膏质潟湖和膏质云坪沉积,此时期形成了盆地内最大的膏岩湖分布区,邛崃—仪陇地区发育厚层的硬石膏岩和盐岩,围绕着膏岩湖周缘发育膏质云坪沉积,仅川西局部地区发育云坪沉积(图3f)。

SQ4-TST时期为雷四³亚段至雷五段沉积中期,由于海侵作用影响,盆地内气候由干旱转为半干旱直至正常,膏岩湖范围迅速缩小,仅在川中盐亭—西充局部发育,盆地内广泛发育云坪、藻云坪沉积,形成了规模分布的微生物白云岩储集岩,而在川中盐亭—仪陇膏岩湖周围的地貌高处发育台内滩;在川西龙门山前带局部地区发育台缘滩沉积(图3g),如在江油含增镇剖面、雾1井见台缘滩相砂屑白云岩。

SQ4-HST时期为雷五段沉积后期,随着后期海水退去和构造挤压抬升作用,盆地整体进入海陆过渡时期。

基于层序—岩相古地理系统编图,明确了四川盆地雷口坡组沉积演化规律以及构造运动在其中所起到的作用。从图3a可以发现,在雷一¹亚段沉积时,泸州古隆起就已具雏形,但开江古隆起还未形成,盆地内地形平缓,发育大量台内滩沉积;受印支运动早幕影响,在雷二段沉积时(图3b),开江古隆起慢慢表现出来,川中西充—仪陇地区形成坳陷区,此时雷口坡组“一洼两隆”的格局基本形成;随着泸州—开江古隆起不断发展壮大,“一洼两隆”的古地理格局愈发表现明显,坳陷中心也不断向南迁移,具体表现为雷二段沉积时期西充—仪陇膏岩湖沉积中心逐渐迁移到雷三²亚段沉积时期遂宁—南充地区,膏岩湖分布范围相比雷二段沉积时期明显扩大。这段时期所

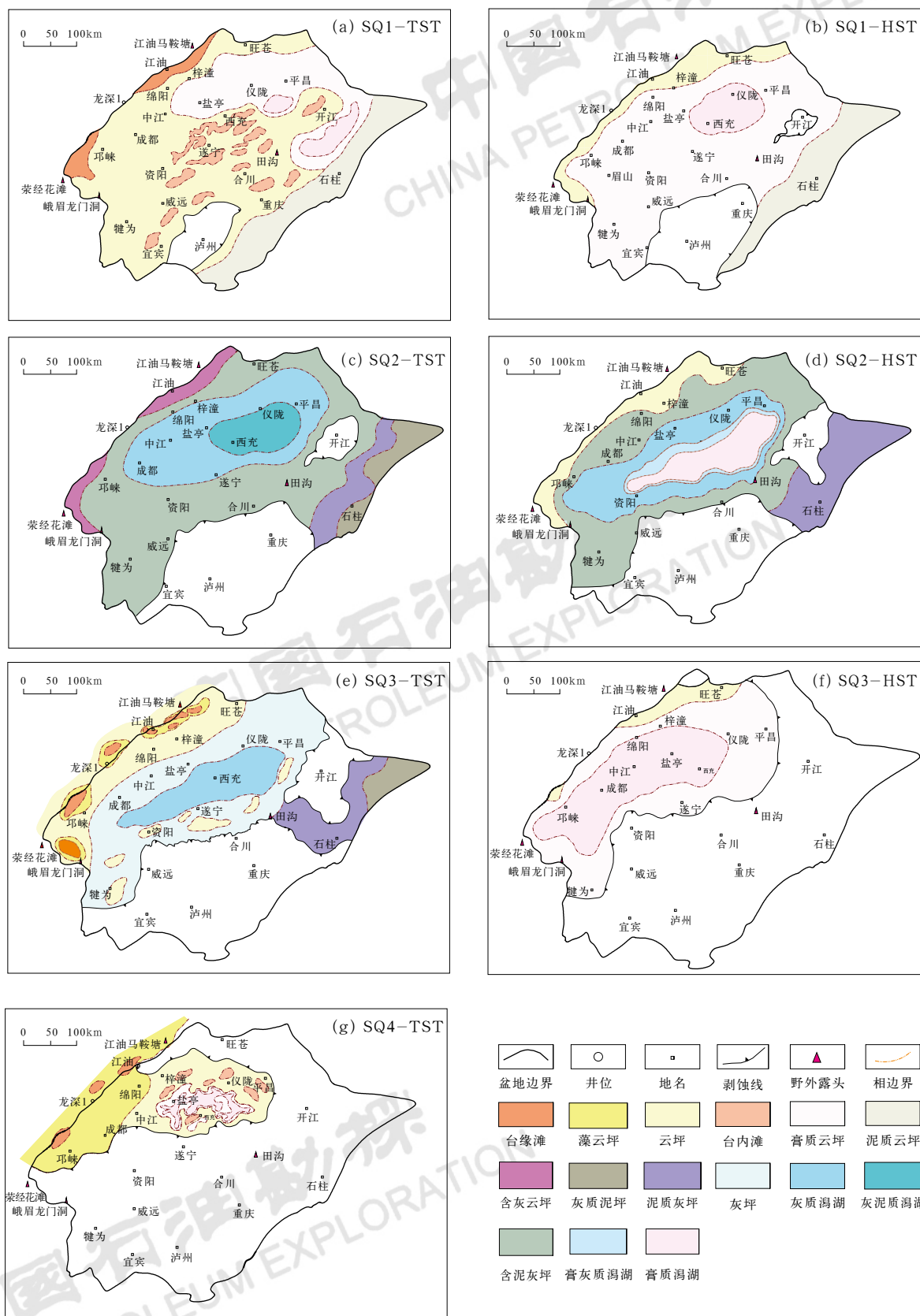


图3 四川盆地雷口坡组不同体系域沉积时期岩相古地理图

Fig.3 Lithofacies paleogeographic map of different depositional system tracts of Leikoupo Formation in Sichuan Basin

沉积的膏盐岩为纹层状膏盐岩夹块状膏盐岩,厚度较小,横向分布稳定,属于潟湖成因,说明雷一段—雷三²亚段沉积时盆地总体处于构造相对平静期;进入雷四段沉积时,随着泸州—开江古隆起不断由东向西抬升,川东雷口坡组被完全剥蚀,此时为构造活跃期,在盆地内东西向应力挤压作用下,新的沉降中心形成,强烈的蒸发作用使得膏盐岩在凹地快速沉积,并随着挤压作用阶段性活跃,发育具有向西迁

移趋势的膏岩盆,成都坳陷此时已见雏形(图3f),该时期沉积的膏盐岩多以块状硬石膏岩和盐岩为主,厚度差异巨大,横向变化较快,与早期的膏盐岩形成鲜明对比,由此也反映出构造活动从平静期向活跃期的转变。

从整个中三叠统雷口坡组沉积期沉积构造演化可以看出(图4),雷口坡组“一洼两隆”的古地理格局控制着雷口坡组有利相带的分布。其中,西隆为龙

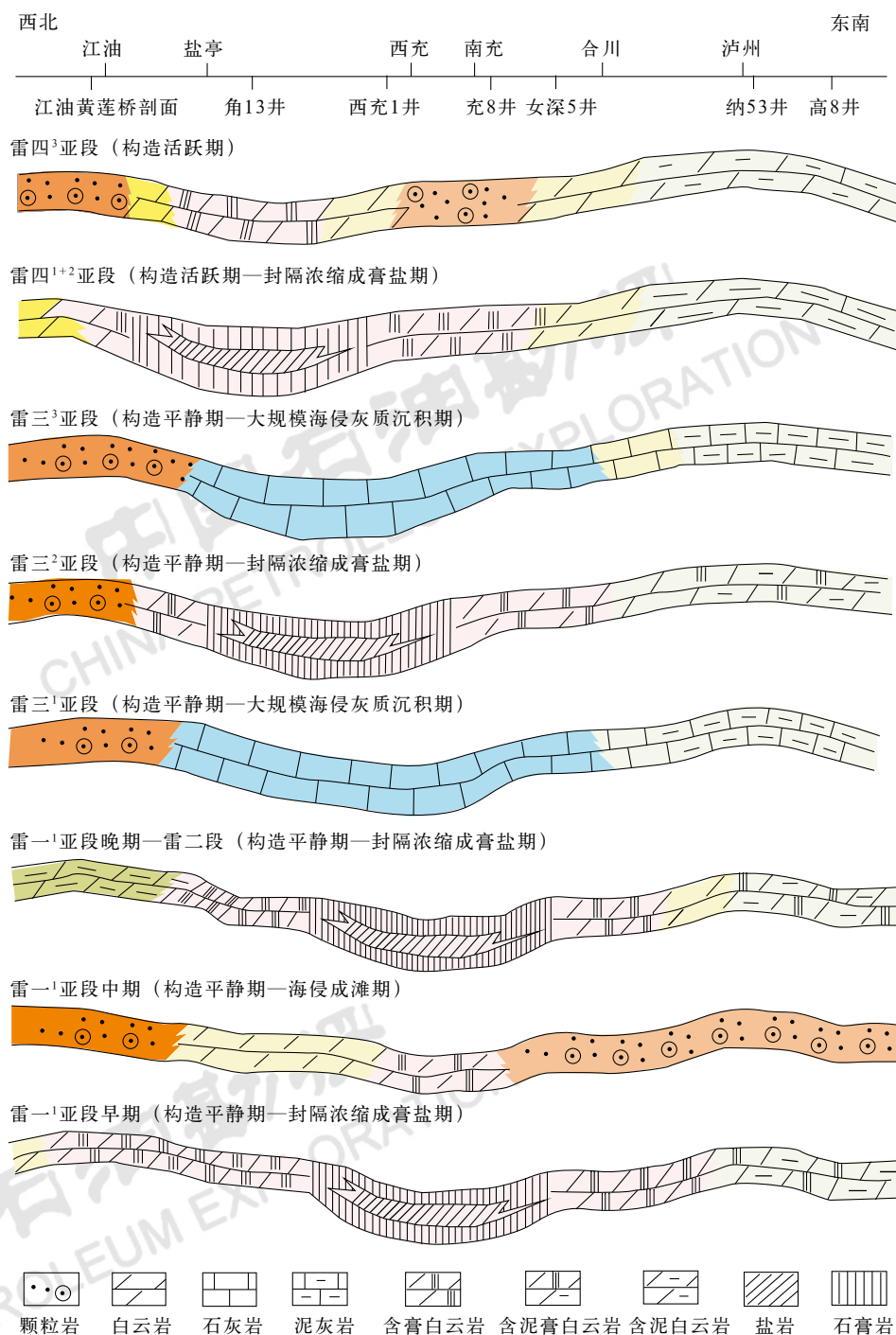


图4 四川盆地中三叠统雷口坡组沉积期沉积构造演化图

Fig.4 Tectonic-sedimentary evolution section during the deposition of Middle Triassic Leikoupo period in Sichuan Basin

门山前邛崃—江油—广元一带，该带长期处于古地貌高，虽说受到东西向挤压应力作用，但相对稳定，海侵期所形成的高能滩体具有纵向叠置发育特征，滩体厚度大；东隆为泸州—开江古隆起的西斜坡，随着印支运动泸州—开江古隆起不断由东向西抬升，盆地内坳陷沉积中心不断向西、向南发生迁移，围绕着膏岩湖东侧古地貌高处发育的滩体也跟着迁移，导致东侧膏盐湖边缘滩体表现为迁移叠置发育特征，滩体平面分布面积广，但发育厚度小。

3 储层特征及主控因素

四川盆地中三叠统雷口坡组发育两种储层类型（表 1），分别为沉积型储层和岩溶改造型储层，其中沉积型储层可进一步划分为颗粒滩白云岩储层和微生物白云岩储层，颗粒滩白云岩储层发育于雷一段和雷三段，以磨溪气田、中坝气田为代表；微生物白云岩储层发育于雷四段，以川西气田为代表；岩溶改造型储层见于盆地中部地区，以龙岗气田雷四段最为典型^[1]。

表 1 四川盆地雷口坡组储层类型及分布特征
Table 1 Reservoir types and distribution characteristics of Leikoupo Formation in Sichuan Basin

储层类型		岩性特征	储集空间	发育层段	储层厚度	发育区
沉积型储层	颗粒滩白云岩储层	砂屑白云岩、鲕粒白云岩、粉晶白云岩	粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、晶间溶孔	雷一 ¹ 亚段、雷三 ³ 亚段、雷四 ³ 亚段	5~20m	川中资阳—南充、泸州隆起西缘
		砂屑白云岩、藻屑白云岩、细—粉晶白云岩	粒间溶孔、晶间溶孔	雷三 ³ 亚段	20~70m	川西剑阁—名山
	微生物白云岩储层	藻纹层、藻屑白云岩、砂屑白云岩	藻格架孔、窗格孔、藻间溶孔	雷三 ³ 亚段、雷四 ³ 亚段—雷五段	—	川西剑阁—名山
岩溶改造型储层		颗粒白云岩、细—粉晶白云岩、角砾状白云岩	晶间溶孔、粒间溶孔、裂缝	雷一 ¹ 亚段、雷四 ³ 亚段	—	川中地层剥蚀带

3.1 储层特征

3.1.1 颗粒滩储层

盆地内颗粒滩白云岩储层主要为台内滩和台缘滩，以砂屑滩、藻屑滩和鲕粒滩为主，主要发育层段为雷一¹亚段、雷三³亚段和雷四³亚段，平面上分布于川西龙门山前带和川中古地貌高处，该类储层物性好，储集空间类型为粒间溶孔、粒内溶孔、藻间溶孔、晶间溶孔和铸模孔（图 5）。

雷一¹亚段的颗粒滩白云岩储层在川中地区广泛发育，以砂屑白云岩、粉晶白云岩为主。根据川中地区 28 口井岩心样品实测资料统计，岩心孔隙度介于 3.0%~31.79%，平均孔隙度可达 8.53%，渗透率为 0.02~1.82mD，平均渗透率为 0.26mD，具有中孔、低渗特征，储层厚度一般在 5~20m 之间，平面分布稳定。雷三³亚段的颗粒滩白云岩储层主要发育于川西龙门山前带和川中犍为—遂宁—平昌一带，以藻屑白云岩、砂屑白云岩为主，其中川西北中

坝—双鱼石地区相对最为发育，根据中坝气田 Z80 井 301 块岩样实测结果统计，岩心平均孔隙度为 4.25%，孔隙度大于 3% 的样品占 54.4%，渗透率大于 0.1mD 的样品占 85%^[1]，具有中—低孔、低渗特征，储层厚度可达 70m 左右。雷四³亚段的颗粒滩白云岩储层主要发育于川中龙岗地区，以鲕粒白云岩、砂屑白云岩、粉晶白云岩为主，围绕着川中盐亭—仪陇膏岩湖周缘地貌高处零星分布，根据龙岗气田 522 块岩样实测资料统计，岩心孔隙度主要分布于 1%~5%，平均孔隙度为 3.2%，渗透率主要分布于 0.001~5mD，平均渗透率为 0.23mD^[18]，具有低孔、特低渗特征。

3.1.2 微生物白云岩储层

微生物白云岩储层是中三叠统雷口坡组新发现的一类储集岩，主要发育在雷四³亚段—雷五段，由于雷四³亚段—雷五段沉积中期为层序 SQ4 的海侵体系域，此时气候由雷四²亚段沉积时期的干旱转为半干旱至近正常，以大面积发育富藻云坪为特征，平面上

主要分布于川西坳陷及其斜坡区,是近期雷口坡组获得油气勘探突破的领域,已发现的川西气田、川西南大兴场地区均发育这套储集岩类。雷口坡组微生物白云岩以藻凝块白云岩、藻纹层白云岩为主,储集空间类型以准同生期所形成的藻格架孔、藻间溶孔、窗格孔、鸟眼孔、生屑铸模孔为主^[8](图5),储层发育相带在局限台地相潮坪亚相,主要发育潮间带和潮下带微相^[6,19]。

川西雷四³亚段微生物白云岩储层总体表现为低孔、中—低渗特征,根据川西气田557块岩样的统计结果,岩孔孔隙度介于0.07%~20.2%,平均值为4.07%,孔隙度大于2%的岩样占74.2%,渗透率介于0.01~710mD,平均值为7.3mD,渗透率小于0.1mD的样品占44.6%。通过对不同岩性的岩样物性统计分析来看,潮间带藻云坪发育的藻纹层白云岩、藻粘结白云岩储集性能最好,平均孔隙度可大于5%;潮下带灰云坪和藻屑、砂屑滩发育的灰质白云岩及微晶藻砂屑灰岩储集性能中等—差,平均孔隙度小于4%^[19]。

3.1.3 岩溶改造型储层

岩溶改造型储层主要是指中三叠统雷口坡组顶面印支早期不整合面下的风化壳储层^[8,20]。由于受印支运动影响,盆地东部地层逐渐被抬升暴露于地表,雷口坡组由西向东逐渐被剥蚀,形成了一系列的地层剥蚀带,而该套岩溶改造型储层主要发育在地层剥蚀带内,平面上分布面积广。目前针对这类储层,川中龙岗—元坝地区雷四³亚段已获得勘探发现。

龙岗地区取心资料表明,后期表生岩溶作用对储层是一把“双刃剑”。首先,表生岩溶作用导致储层非均质性更严重,从龙岗173井的岩心(图5g、h)上可以看出,强烈的表生岩溶作用导致地层角砾化严重,角砾之间被泥质等完全充填,仅原始角砾中可见针孔发育;其次,表生岩溶作用改善了岩石物性条件,尤其是裂缝性储层,当岩石裂缝发育时,表生期的大气淡水会沿着裂缝发生渗流,如图5i元坝12井,沿裂缝发生了明显扩溶现象,岩石储渗性能得到改善。

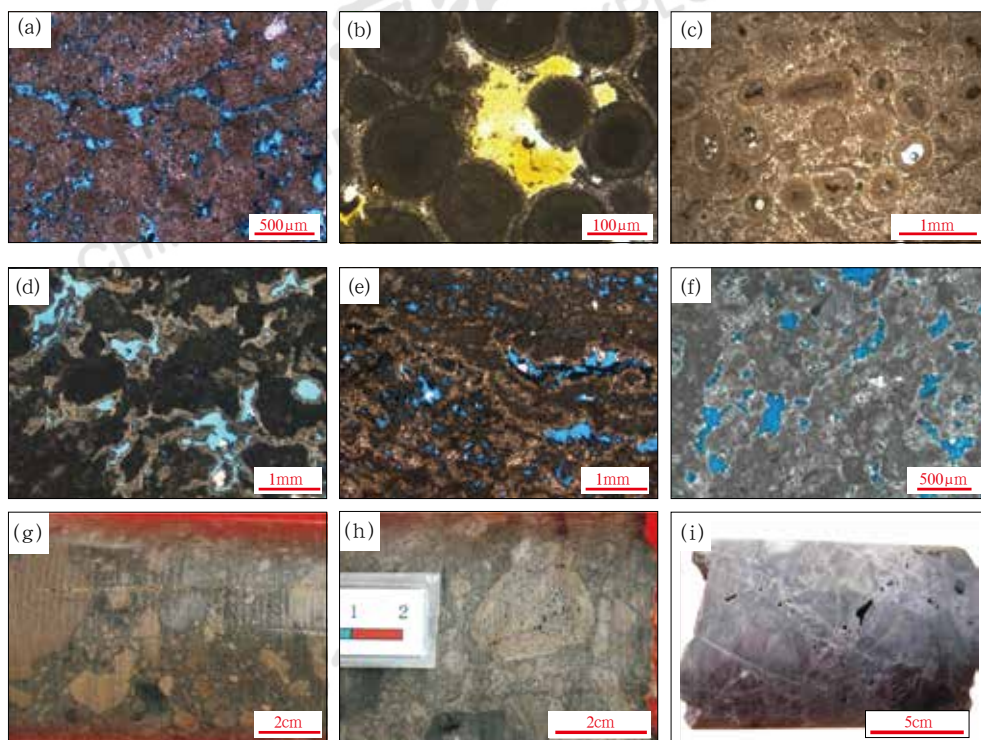


图5 四川盆地雷口坡组储层岩石特征

Fig.5 Rock physical properties of Leikoupo Formation in Sichuan Basin

- (a) 蓬萊19井,雷一¹亚段,3238.12m,泥晶砂屑白云岩,粒间溶孔,铸体; (b) 青林1井,雷三³亚段,3725.46m,含生屑鲕粒白云岩,粒间溶孔,(-); (c) 龙岗168井,雷四³亚段,4583.22m,鲕粒白云岩,粒内溶孔、铸模孔,(-); (d) 羊深1井,雷四³亚段,6229.87m,藻团块白云岩,藻间溶孔,铸体; (e) 鸭深1井,雷四³亚段,6219.41m,藻纹层白云岩,藻格架孔,铸体; (f) 江油含增镇剖面,雷三³亚段,藻团块白云岩,藻间溶孔,铸体; (g) 龙岗173井,雷四³亚段,3-77/84,灰色角砾状白云岩,充填作用强烈; (h) 龙岗173井,雷四³亚段,3296.97~3297.11m,灰色角砾状白云岩,角砾中见蜂窝状溶孔发育,角砾间完全被充填; (i) 元坝12井,雷四³亚段,4660.3m,泥晶白云岩,沿裂缝扩溶形成缝洞

岩溶改造型储层物性好坏受沉积微相和表生岩溶作用共同控制,其中有利沉积相带是储层发育的基础,后期表生岩溶作用起到改善或破坏作用。从实际钻探情况看,构成该类储层的岩性主要是颗粒白云岩、细—粉晶白云岩和含膏模孔泥晶白云岩,其中以颗粒白云岩物性最好^[1],平均孔隙度可达4.43%;粉晶白云岩次之,平均孔隙度为4.01%;泥晶白云岩和泥—粉晶白云岩平均孔隙度分别为1.77%和2.91%。后期表生淋滤作用对岩石物性改造能力强弱与岩性、古地貌和裂缝发育程度密切相关。当原岩基质孔隙或裂缝发育,岩溶改造作用相对较强;反之,由于无良好渗流通道,改造作用则不明显。另外,当处于岩溶高地时,由于水体快速流失,岩石改造能力有限;而岩溶洼地是水体汇聚带,充填和胶结作用明显,因此岩溶斜坡带是岩溶改造作用较好地带,主要发育于大川中地区广大地层剥蚀带内,而其中的岩溶残丘是岩溶型储层最有利发育部位,如位于岩溶残丘部位的龙岗173井,目前累计产天然气已超过 $4 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.2 储层发育主控因素

四川盆地中三叠统雷口坡组储层类型多样,根据不同类型储层岩石学特征及分布规律,对优质储层发育的主控因素进行系统梳理总结。

3.2.1 有利沉积微相是优质储层发育的基础

根据中三叠统雷口坡组取心资料统计发现,储层物性好坏与岩性存在密切关系。如图6所示,储层物性相对较好的主要是颗粒白云岩、微生物藻粘结白云岩和粉晶白云岩,而泥—粉晶白云岩、含膏白云岩和石灰岩等物性均较差,孔隙度一般小于3%,这表明不论何种类型储层,优质储层发育的前提条件是要有利的岩相基础,而有利沉积微相控制着岩相的分布,其中颗粒滩和潮坪是最为重要的沉积环境。

3.2.2 准同生期的白云石化和溶蚀作用是优质储层发育的关键因素

勘探实践表明,雷口坡组优质储层几乎全部发育在白云岩地层中,这是因为白云石化作用不仅能使岩石的孔隙度增大,而且还可以使原岩颗粒变大,提高岩石的抗压实性能。对于雷口坡组白云岩的白云石化时期,不少学者开展过研究,目前比较一致的观点认为是准同生期白云石化^[6,8,19,21]。首先从微量元素分析结果来看,雷口坡组白云石有序度较低,在0.38~0.68之间,平均为0.573,表明白云石具有同生—准同生期形成的特征;其次是雷口坡组白云岩的

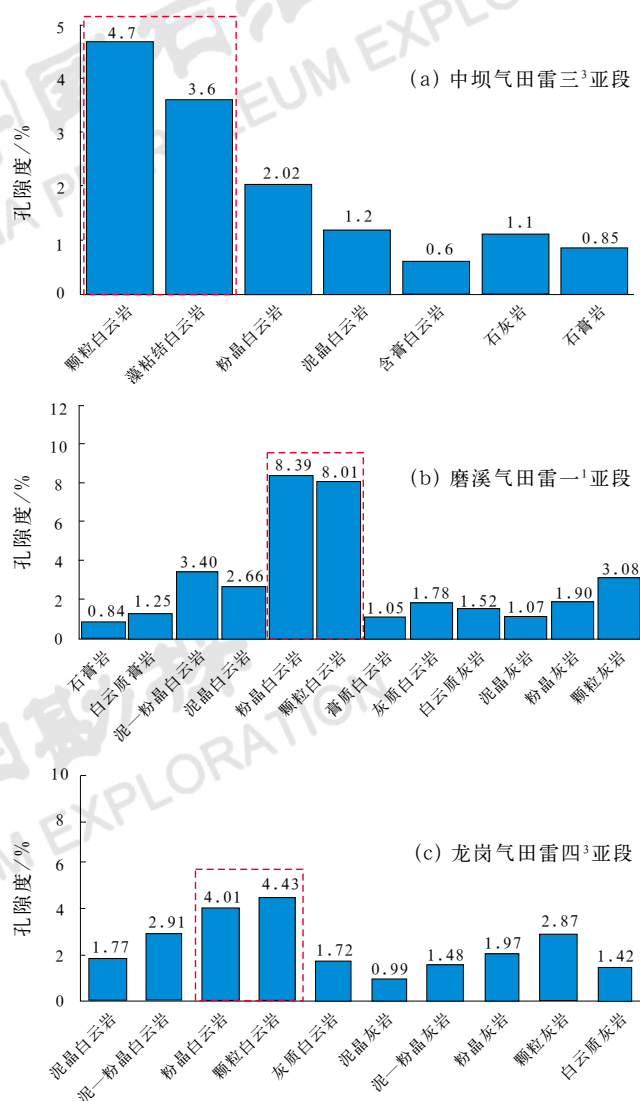


图6 不同类型储层物性与岩性对应关系

Fig.6 Relationship between reservoir physical property and lithology of different types of reservoirs

碳酸盐原始结构保存相对完整,晶粒细小,见鸟眼、窗格等沉积构造,表明沉积环境与蒸发潮坪有关;最后就是白云岩储层孔隙结构特征揭示雷口坡组溶蚀孔隙形成于准同生期,而白云岩要早于溶蚀孔隙形成,从大量的岩心和薄片观察中发现,雷口坡组常见具构造选择性溶蚀的窗格孔、生物碎屑和鲕粒的铸模孔、层状定向分布的藻格架孔等,这些孔隙结构特征都与早表生作用有关。

虽说优质储层几乎全部发育在白云岩地层中,但并非所有白云岩中均发育储层,高频旋回控制的多期准同生溶蚀作用是优质储层发育的关键。从四川盆地雷口坡组储层纵向发育样式上看(图7),不论哪套地层,其储层发育均明显受高频层序影响,高频旋回

控制着储层在纵向上层状叠置分布, 而优质储层主要发育在向上变浅的沉积旋回的顶部。

中三叠统雷口坡组沉积期, 由于地形平缓, 水体较浅, 相对海平面的升降会造成沉积岩体直接暴露

于海平面之上而遭受到大气淡水的改造, 而且前述雷口坡组储层孔隙结构特征都明显与早表生岩溶作用有关, 因此, 多旋回的准同生期溶蚀作用控制了优质储层纵向发育样式。

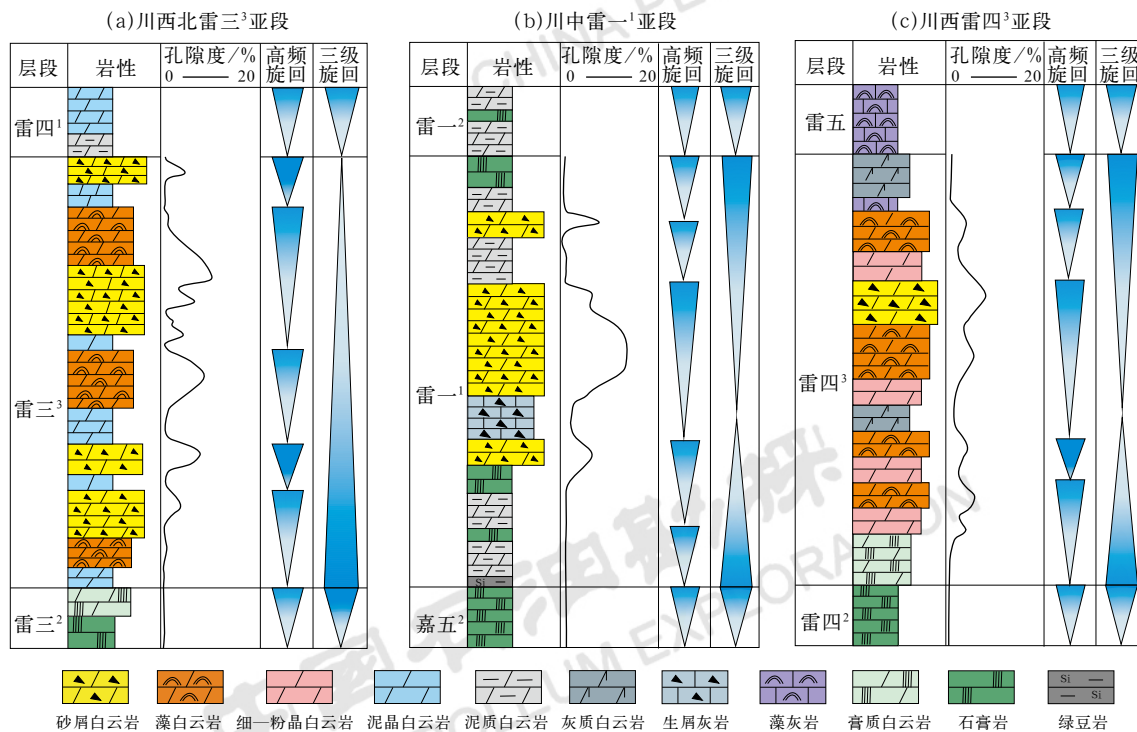


图 7 雷口坡组高频层序与储层发育特征

Fig.7 High frequency sequence and reservoir development characteristics of Leikoupo Formation

3.2.3 埋藏期和表生期成岩作用对储层起保存和改造作用

埋藏期和表生期成岩作用对储层增孔作用有限^[6,22], 更多是对原有孔隙空间的保存和改造。雷口坡组白云岩储层储集空间在同生—准同生期就已大量形成, 后期未被各种胶结物破坏而得以保存, 很重要的原因就是埋藏期油气的充注在一定程度上减缓了胶结作用的进行, 如青林 1 井雷三³亚段上部储层孔洞发育, 孔洞中见明显残余轻质油 (图 5b), 而下部无油质残余的储层多被晚期方解石或热液矿物 (硅质) 胶结充填; 雷口坡组微生物白云岩自身含有一定量的有机质, 具有有机酸的生成能力, 有机酸的存在使得地层形成弱酸性环境, 有效抑制了方解石的胶结; 同时埋藏期碳酸盐岩孔隙的改造作用主要是通过溶蚀和沉淀作用导致先存孔隙的富集和贫化, 是对先前孔隙分布状态进行调整且调整作用更为突出^[23-24]。

印支运动早期中三叠统雷口坡组抬升遭受剥蚀淋滤, 但是整体暴露时间较短。虽说在岩心和镜下薄片中能观察到角砾化、渗流粉砂等特征, 但并未见明显因表生岩溶作用而形成大量非组构选择性溶蚀孔洞的存在, 其更多是对原有沉积型储层的改造以及对裂缝性储层的扩溶, 龙岗气田和元坝气田的取心资料 (图 5g—i) 表明表生期的充填作用远强于溶蚀作用, 因此, 表生期的成岩作用更多是导致储层非均质性变得更强而已。

4 勘探方向

根据中三叠统雷口坡组构造—岩相古地理的分析, 明确了雷口坡组“一洼两隆”的古地理格局控制着储层平面分布, 结合前述储层主控因素分析, 进一步明确雷口坡组有利储层发育区带。基于烃源岩、储层类型和圈闭条件等成藏要素综合分析, 认为雷口坡组存在以下 3 个有利勘探区带值得关注 (图 8)。

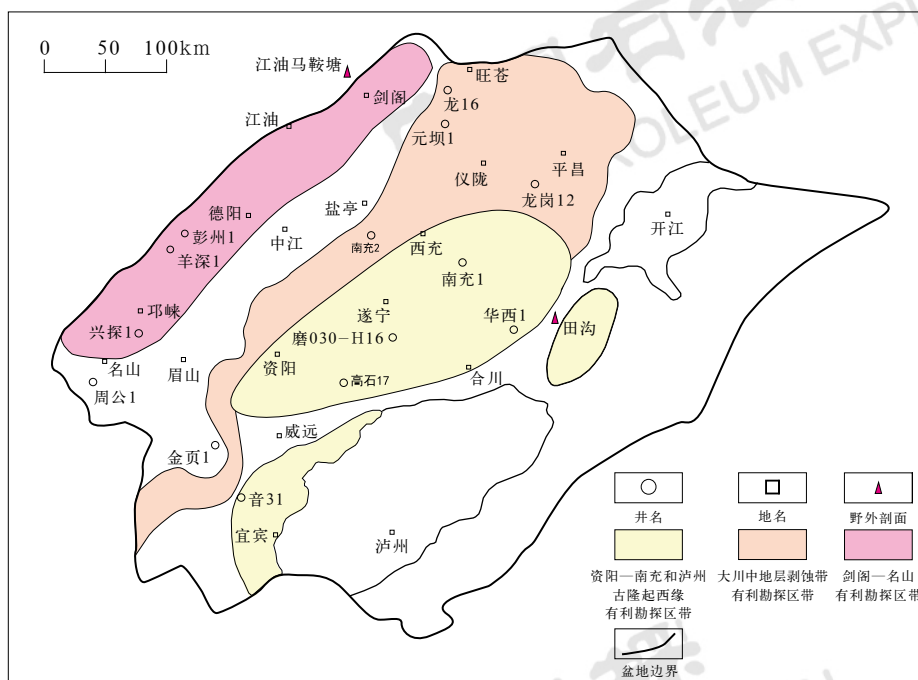


图8 四川盆地雷口坡组有利勘探区带分布预测图

Fig.8 Prediction of favorable exploration zone of Leikoupo Formation in Sichuan Basin

4.1 剑阁—江油—名山有利勘探区带

剑阁—江油—名山地区位于龙门山前带，中三叠统雷口坡组沉积期该区带位于四川盆地的地貌高处，是储层发育的有利区域。该区带上已发现雷三³亚段中坝气田和雷四³亚段川西气田，是目前雷口坡组现实勘探领域，主要理由如下：

(1) 剑阁—江油—名山地区发育厚层优质白云岩储层，从实际钻探情况来看，该区带雷一段、雷三段、雷四段储层纵向上叠置发育，且储层物性好、厚度大，具备良好储集条件，如中46井雷一¹亚段、雷三³亚段和雷四³亚段测井解释储层厚度分别为4.8m、63.6m和10.9m，孔隙度分别为3.0%、4.8%和3.5%，新钻探井ST102井取心也证实雷三³亚段白云岩储层发育。

(2) 通过对中坝气田、川西气田的气藏解剖来看，雷口坡组气源主要来自下伏二叠系龙潭组和上覆须家河组，而该区带处于须家河组生烃凹陷和龙潭组生烃强度大的区域，具备优越的烃源条件。

(3) 龙门山前带由于构造活跃，形成了一系列的背斜圈闭和深大断裂，这些断裂大多断至龙潭组底部，有效沟通了深部烃源岩，同时也为须家河组烃源岩与雷口坡组储层侧向对接提供“窗口”，有利于形成构

造气藏，目前在川西南大兴场和川西北双鱼石地区已见到良好勘探苗头。

4.2 资阳—南充和泸州古隆起西缘有利勘探区带

资阳—南充和泸州古隆起西缘区带雷一¹亚段滩相白云岩储层发育，且分布面积广，已发现雷一¹亚段磨溪气田和卧龙河气田，因此该区带具有良好勘探潜力，主要理由如下：

(1) 资阳—南充和泸州古隆起西缘区带雷一¹亚段滩相白云岩储层发育，储层厚度虽然不大，但物性较好，平面分布面积广且稳定。

(2) 资阳—南充地区正处于二叠系龙潭组烃源岩生烃中心，烃源岩生烃强度达 $(20\sim50)\times10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ ；泸州古隆起西缘毗邻志留系龙马溪组烃源岩生烃中心，烃源岩生烃强度达 $(35\sim85)\times10^8\text{m}^3/\text{km}^2$ ，两套烃源岩生烃强度都很大，具备形成大—中型气田的能力。

(3) 该区带位于川中古隆起发育区，存在一系列背斜圈闭，同时川中地区发育东西向和北西向两组深大断裂，具备沟通下伏烃源岩能力，且雷一¹亚段上部有雷二段和雷三段膏盐岩作盖层，具备良好成藏组合条件，其中储层、构造圈闭和通源断裂叠合处是重要勘探目标。

4.3 大川中地区雷口坡组剥蚀带有利勘探区带

四川盆地中三叠统雷口坡组沉积期, 由于受印支期泸州—开江古隆起由东向西抬升作用的影响, 雷口坡组形成一系列由东向西的地层剥蚀带, 重点层段(雷一¹亚段、雷三³亚段、雷四³亚段)的地层剥蚀带发育岩溶改造型储层, 目前在雷四³亚段地层剥蚀带中已发现龙岗气田, 其他地层剥蚀带虽尚未获得发现, 但仍具有一定勘探潜力, 主要理由如下:

(1) 大川中地区重点层段地层剥蚀带位于四川盆地岩溶斜坡区, 同时又处于“一洼两隆”的东隆有利滩带上, 具备风化壳岩溶储层发育条件。

(2) 该区带靠近须家河组生烃凹陷, 地层剥蚀带内岩溶沟谷中充填的须一段泥页岩可以与岩溶残丘储层直接侧向对接, 同时上部又被须一段泥页岩直接封盖, 形成岩性—地层圈闭, 具备良好源—储—盖配置关系。

(3) 大川中地区雷口坡组剥蚀带埋深较浅, 勘探成本低, 同时也可作为下古生界—震旦系的兼探层统筹考虑, 实行立体勘探。

对于地层剥蚀带, 如何有效提高储层预测精度是亟须解决的难题, 简阳1井虽钻揭岩溶残丘和有利相带发育, 且气测显示好, 但是有效储层厚度薄, 仅有2m, 该领域想要获得突破, 储层预测是关键。

5 结论与认识

(1) 四川盆地雷口坡组属于局限台地沉积环境, 纵向上可划分为4个三级层序, 通过层序—岩相古地理系统编图, 明确雷口坡组“一洼两隆”古地理格局控制着雷口坡组滩体展布, 其中西隆为龙门山前带, 该区滩体呈复合叠置发育; 东隆为川中膏盐湖东缘, 该区滩体呈迁移叠置发育。

(2) 雷口坡组储层主要发育在海侵期的雷一¹亚段、雷三³亚段和雷四³亚段, 存在沉积型和岩溶改造型两种储层类型, 其中沉积型储层以颗粒滩白云岩储层和微生物白云岩储层为主, 发育于台内滩和潮坪相中; 岩溶改造型储层是指受表生期岩溶作用改造过的一种储层类型, 该类型储层物性好坏仍受沉积微相控制, 主要发育于地层剥蚀带内的岩溶残丘和有利相带叠合处。

(3) 综合烃源岩、储层特征、圈闭类型和勘探现状等参数认为, 川西剑阁—名山地区储层发育, 油气显示活跃, 是目前雷口坡组现实勘探领域, 但是要想

获得勘探突破, 迫切需要加强地震攻关, 明确通源断裂发育情况, 其中川西北双鱼石地区和川西南大兴场地区值得重点关注; 川中资阳—南充地区和泸州古隆起西缘的雷一段有利勘探区带已发现油气藏类型均为构造气藏, 故寻找构造圈闭和通源断裂叠合区是关键; 而对于地层剥蚀带, 虽说是岩溶改造型储层发育区, 但是优质储层发育规律尚不明确, 该区带可以作为兼探层关注, 后续需要加强储层预测研究。

参考文献

- [1] 周进高, 辛勇光, 谷明峰, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组天然气勘探方向[J]. 天然气工业, 2010, 30(12): 16–19.
Zhou Jingao, Xin Yongguang, Gu Mingfeng, et al. Direction of gas exploration in the Middle Triassic Leikoupo Formation of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(12): 16–19.
- [2] 汪华, 刘树根, 秦川, 等. 四川盆地中西部雷口坡组油气地质条件及勘探方向探讨[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 669–674.
Wang Hua, Liu Shugen, Qin Chuan, et al. Study on petroleum geological conditions and hydrocarbon exploration direction of Leikoupo Formation in the centre and west of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(6): 669–674.
- [3] 杨雨, 文龙, 谢继容, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探进展与方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 44–55.
Yang Yu, Wen Long, Xie Jirong, et al. Progress and direction of marine carbonate gas exploration in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 44–55.
- [4] 唐红君, 黄金亮, 潘松圻, 等. 我国天然气探明未开发储量评价及发展对策建议[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(6): 37–44.
Tang Hongjun, Huang Jinliang, Pan Songqi, et al. Suggestions on assessment and development of China's proven but undeveloped natural gas reserves[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(6): 37–44.
- [5] 匡立春, 刘志红, 罗凯, 等. 突破核心技术 强化创新引领 驱动中国石油高质量发展[J]. 石油科技论坛, 2020, 39(1): 6–9.
Kuang Lichun, Liu Zhihong, Luo Kai, et al. Drive CNPC high-quality development by making breakthroughs in core technology and highlighting innovation-guided effects[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(1): 6–9.
- [6] 田瀚, 唐松, 张建勇, 等. 川西地区中三叠统雷口坡组储层特征及其形成条件[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(11): 1585–1594.
Tian Han, Tang Song, Zhang Jianyong, et al. Characteristics and formation conditions of carbonate reservoir in Leikoupo Formation of western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(11): 1585–1594.
- [7] 肖开华, 李宏涛, 段永明, 等. 四川盆地川西气田雷口坡组气藏储层特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 34–44.
Xiao Kaihua, Li Hongtao, Duan Yongming, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Leikoupo gas pools in the western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 34–44.
- [8] 王鑫, 辛勇光, 田瀚, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组沉积储层研究进展[J]. 海相油气地质, 2020, 25(3): 210–222.

- Wang Xin, Xin Yongguang, Tian Han, *et al.* Research progress on sedimentation and reservoir of Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020,25(3):210–222.
- [9] 李剑, 余源琦, 高阳, 等. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力[J]. 中国石油勘探, 2019,24(4):403–417.
- Li Jian, She Yuanqi, Gao Yang, *et al.* Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(4):403–417.
- [10] 辛勇光, 周进高, 倪超, 等. 四川盆地中三叠世雷口坡期障壁型碳酸盐岩台地沉积特征及有利储集相带分布[J]. 海相油气地质, 2013,18(2):1–7.
- Xin Yongguang, Zhou Jingao, Ni Chao, *et al.* Sedimentary facies features and favorable lithofacies distribution of Middle Triassic Leikoupo barrier carbonate platform in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013,18(2):1–7.
- [11] 吕玉珍, 倪超, 张建勇, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组有利沉积相带及岩相古地理特征[J]. 海相油气地质, 2013,18(1):26–32.
- Lu Yuzhen, Ni Chao, Zhang Jianyong, *et al.* Favorable sedimentary facies zone and lithofacies palaeogeography of Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013,18(1):26–32.
- [12] 孙春燕, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组沉积特征及有利储集相带[J]. 石油与天然气地质, 2018,39(3):498–512.
- Sun Chunyan, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, *et al.* Sedimentary characteristics and favorable reservoir facies distribution of the Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018,39(3):498–512.
- [13] 曾德铭, 王兴志, 石新, 等. 四川盆地西北部中三叠统雷口坡组滩体及储集性[J]. 沉积学报, 2010,28(1):42–49.
- Zeng Deming, Wang Xingzhi, Shi Xin, *et al.* Characteristics and reservoir property of the Leikoupo Formation of Middle Triassic in northwestern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010,28(1):42–49.
- [14] 宋晓波, 王琼仙, 隆轲, 等. 川西地区中三叠统雷口坡组古岩溶储层特征及发育主控因素[J]. 海相油气地质, 2013,18(2):8–14.
- Song Xiaobo, Wang Qiongxiang, Long Ke, *et al.* Characteristics and main controlling factors of Middle Triassic Leikoupo paleokarst reservoir in western Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013,18(2):8–14.
- [15] 杨光, 石学文, 黄东, 等. 四川盆地龙岗气田雷四³亚段风化壳气藏特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 2014,34(9):17–24.
- Yang Guang, Shi Xuewen, Huang Dong, *et al.* Characteristics and major controls of weathering crust gas reservoirs in T₂L₄³ in the Longgang Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(9):17–24.
- [16] 侯中健, 陈洪德, 田景春, 等. 层序岩相古地理编图在岩相古地理分析中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001,28(4):376–382.
- Hou Zhongjian, Chen Hongde, Tian Jingchun, *et al.* The application of sequence lithofacies and paleogeography mapping to the analyses of lithofacies paleogeography[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001,28(4):376–382.
- [17] 李宏涛, 胡向阳, 史云清, 等. 四川盆地川西坳陷龙门山前雷口坡组四段气藏层序划分及储层发育控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017,38(4):753–763.
- Li Hongtao, Hu Xiangyang, Shi Yunqing, *et al.* Sequence division and controlling factors of reservoir development of the 4th member of Leikoupo Formation in foreland of Longmen mountains in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017,38(4):753–763.
- [18] 王琼仙, 宋晓波, 王东, 等. 川西龙门山前雷口坡组四段储层特征及形成机理[J]. 石油实验地质, 2017,39(4):491–497.
- Wang Qiongxiang, Song Xiaobo, Wang Dong, *et al.* Reservoir characteristics and formation mechanism of the 4th member of the Leikoupo Formation in Longmen mountain front[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017,39(4):491–497.
- [19] 李蓉, 胡昊, 许国明, 等. 四川盆地西部坳陷雷四上亚段白云岩化作用对储集层的影响[J]. 新疆石油地质, 2017,38(2):149–154.
- Li Rong, Hu Hao, Xu Guoming, *et al.* Influences of dolomitization on reservoirs of upper T₂L₄ of Leikoupo Formation in western depression, Sichuan Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017,38(2):149–154.
- [20] 卞从胜, 汪泽成, 江青春, 等. 四川盆地川西地区雷口坡组岩溶储层特征与分布[J]. 中国石油勘探, 2019,24(1):82–93.
- Bian Congsheng, Wang Zecheng, Jiang Qingchun, *et al.* Characteristics and distribution of karst reservoirs in the Leikoupo Formation, western Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(1):82–93.
- [21] 丁熊, 谭秀成, 李凌, 等. 四川盆地雷口坡组三段颗粒滩储层特征及成因分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013,37(4):30–37.
- Ding Xiong, Tan Xiucheng, Li Ling, *et al.* Characteristics and genetic analysis of grain shoal reservoirs in Lei 3 member of Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(4):30–37.
- [22] 沈安江, 陈娅娜, 蒙绍兴, 等. 中国海相碳酸盐岩储层研究进展及油气勘探意义[J]. 海相油气地质, 2019,24(4):1–14.
- Shen Anjiang, Chen Yana, Meng Shaoxing, *et al.* The research progress of marine carbonate reservoirs in China and its significance for oil and gas exploration[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019,24(4):1–14.
- [23] 廖凤蓉, 吴小奇, 黄世鹏, 等. 川西北地区中坝气田雷口坡组天然气地球化学特征及气源探讨[J]. 天然气地球科学, 2013,24(1):108–115.
- Liao Fengrong, Wu Xiaoqi, Huang Shipeng, *et al.* Geochemical characteristics and gas-source correlation of Leikoupo Formation in Zhongba Field, northwest Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2013,24(1):108–115.
- [24] 宋晓波, 袁洪, 隆轲, 等. 川西地区雷口坡组潮坪白云岩气藏成藏地质特征及富集规律[J]. 天然气工业, 2019,39(增刊1):54–59.
- Song Xiaobo, Yuan Hong, Long Ke, *et al.* Geological characteristics and enrichment of tidal flat dolomite gas reservoir in Leikoupo Formation, western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019,39(S1):54–59.