

冯许魁,杨雨,朱亚东,等,2024.四川盆地二叠纪礁滩体发育特征、分布模式及有利勘探区带[J]. 沉积与特提斯地质,44(2):278-294. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.01003

FENG X K, YANG Y, ZHU Y D, et al., 2024. Development characteristics, distribution patterns and favorable exploration zones of Permian reef shoals in Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(2): 278–294. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.01003

# 四川盆地二叠纪礁滩体发育特征、分布模式及 有利勘探区带

冯许魁<sup>1</sup>,杨 雨<sup>2</sup>,朱亚东<sup>1\*</sup>,崔永平<sup>3</sup>,陈 辉<sup>1</sup>,巫芙蓉<sup>1</sup>,臧殿光<sup>1</sup>,倪华玲<sup>1</sup>,吴育林<sup>1</sup>,徐宝亮<sup>1</sup>,郭海洋<sup>1</sup>

(1. 中国石油东方地球物理公司研究院,河北 涿州 072750; 2. 中国石油西南油气田分公司,四川 成都 610051;3. 中国石油勘探与生产分公司,北京 100007)

摘要:围绕四川盆地二叠纪开江-梁平海槽的台缘礁滩相勘探已获得巨大成功,但近十年勘探进入瓶颈期。为进一步深化二 叠纪礁滩认识、取得规模性勘探新突破,本文以钻测井、地震及地质资料为基础,系统开展了二叠纪构造-沉积演化特征及 礁滩分布规律研究,明确了下一步礁滩勘探的有利区带。研究表明: (1)栖霞期台内滩受加里东末期阶梯状环形侵蚀地貌 控制,其台内滩表现出早、中、晚三期环带状展布的特点,川北九龙山—龙岗地区、蜀南宜宾—内江地区栖二段晚期环形 台内滩成藏条件优越,勘探程度低,是下一步的重要勘探方向; (2)茅二段沉积期是二叠纪沉积格局转换的关键时期,茅 二下亚段沉积受加里东古隆残留地貌控制,台内滩仍呈环带状分布,至茅二上亚段古地貌受峨眉地幔柱隆升活动影响,有 利相带转变为北西-南东向"条带状"展布特征,磨溪北斜坡地区茅二上亚段台缘滩是茅口组重要的接替领域; (3)长兴 期台缘礁向开江-梁平海槽内迁移形成多排礁滩体,具有优越的源储配置条件,是二叠系新的潜在勘探领域。 关键词:四川盆地;二叠系;礁滩体;发育特征;分布模式;有利勘探区带 中图分类号: P618.13

# Development characteristics, distribution patterns and favorable exploration zones of Permian reef shoals in Sichuan Basin

FENG Xukui<sup>1</sup>, YANG Yu<sup>2</sup>, ZHU Yadong<sup>1\*</sup>, CUI Yongping<sup>3</sup>, CHEN Hui<sup>1</sup>, WU Furong<sup>1</sup>, ZANG Dianguang<sup>1</sup>, NI Hualing<sup>1</sup>, WU Yulin<sup>1</sup>, XU Baoliang<sup>1</sup>, GUO Haiyang<sup>1</sup>

(1. Research Institute, Bureau of Geophysical Prospecting INC., CNPC, Zhuozhou 072750, China; 2. PetroChina Southwest Oil & Gas field Company, Chengdu 610051, China; 3. PetroChina Exploration & Production Company, Beijing 100007, China)

Abstract: The exploration of carbonate rocks around the Permian Kaijiang-Liangping trough in the Sichuan Basin has achieved great success, but exploration has entered a bottleneck period in the past decade. In order to further deepen the understanding of Permian reef shoals and achieve new breakthroughs in large-scale exploration, based on drilling, logging, seismic, and geological

收稿日期: 2022-08-06; 改回日期: 2023-02-13; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 杨平

作者简介: 冯许魁(1967—),男,教授级高级工程师,从事地震地质综合研究。E-mail: fengxukui@cnpc.com.cn 通讯作者: 朱亚东(1980—),男,高级工程师,从事地震地质综合研究。E-mail: zhuyadong\_sc@cnpc.com.cn 资助项目: 国家自然科学基金项目"石油开发中多相流体相互作用的建模、数学理论与数值模拟"(11931013)

data, a systematic study has been carried out on the Permian tectonic-sedimentary evolution characteristics and the distribution patterns of Permian reef shoals, and the favorable zones for further reef shoals exploration have been identified. Research shows that: (1) The shoal in the Qixia Formation tableland is controlled by the late Caledonian ladder-like annular erosion, featuring a ring-like distribution in the early, middle, and late stages. The Jiulong Mountain–Longgang region in northern Sichuan and the Yibin–Neijiang region in southern Sichuan have good conditions for the inner shoal formation of the ring-like tableland in the late stage of the second member of the Qixia Formation, with a low degree of exploration, needing further exploration in the next step. (2) The second stage of the Maokou Formation is the key period for the transformation of the sedimentary pattern of the Permian system. The sedimentation of the lower sub-member of the Maokou Formation was controlled by the residual landform of the Caledonian paleo-uplift, thus, the inner shoal is distributed in a ring belt. The ancient landform of the area to the upper sub-member of the Maokou Formation was affected by the uplift of the Emei mantle plume, so, the favorable sedimentary facies transformed into a "strip-like" distribution pattern trending northwest-southeast. The platform margin shoal of the upper sub-member of the Maokou Formation in the north slope region of Moxi is a major successor area of the Maokou Formation. (3) The platform margin reef shoals of the Changxing Formation migrated into the Kaijiang-Liangping trough to form multiple rows of reef shoals, which have superior source and reservoir distribution conditions, being a potential exploration area of the Permian system.

Key words: Sichuan Basin; Permian system; reef shoal; devel opment characteristics; distribution pattern; favorable exploration area

#### 0 引言

四川盆地二叠系为典型的海相碳酸盐岩沉积 地层,油气资源丰富、勘探潜力大,一直是盆地最 重要的勘探层系之一,已有 60 余年的勘探历程。 截至 2019 年底,在盆内已探明的 13 个大型-特大 型气田中,就有 6 个发现于二叠系。其中,普光(探明 储量为 4 121.7×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)、元坝(探明储量为 2 303.5× 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)和双鱼石气田(探明储量为 1 000×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>)均 为千亿方级大型-特大型气田(马新华等, 2019;魏 国齐等, 2019;李建忠等, 2021)。从二叠系气藏发 现历程看,早期成果基本为规模大小悬殊的构造气 藏,如黄龙场、铁山及自流井等构造型气藏等。受 普光、元坝等大型-特大型岩性气田发现的启发,二 叠系勘探目标逐渐由寻构造气藏转向岩性气藏(杨 跃明等, 2020)。

2008年以来,随着勘探的推进,西南油气田分 公司针对四川盆地二叠系礁滩岩性气藏展布特征 开展了大量基础研究及勘探工作,取得了良好的 钻探成效,如JT1、GS001-X5、MX31-X1及MX42 等多口井在栖霞组、茅口组获得了高产工业气流, 但也有部分钻井落空(如JnT1、JG1等井),说明该 层系内的沉积相带与储层分布较为复杂,尚需深 入研究。为了寻找新的有利区带及目标领域、实 现规模性勘探新突破,迫切需要开展新一轮的盆 地级研究,深化构造-沉积演化、有利相带展布特 征及礁滩分布规律等认识。本文在前人研究基础 上,通过系统分析钻测井、地震及区域地质资料, 详细讨论了四川盆地二叠纪构造-沉积演化特征 及礁滩体分布规律,预测了礁滩储层发育有利区 带,以期为新的天然气规模储量发现提供理论 支撑。

#### 1 区域地质背景

四川盆地地理位置位于中国西部四川省东部, 大地构造位置属于扬子准地台的次一级构造单元, 是由盆地周缘的大型断裂带和褶皱带围限起来的 大型构造沉积盆地。该盆地西起龙门山造山带和 松潘-甘孜褶皱构造带,东止七曜山断裂带及黔渝 湘鄂褶皱带,北接米仓山-大巴山造山带,南靠小江 断裂带(图1)。四川盆地受扬子地块、松潘-甘孜 地块、华北地块及华夏地块等相互间构造应力作 用,经历了加里东运动、海西运动、印支运动、燕 山运动及喜马拉雅运动后,在纵向上形成由上扬子 克拉通海相地层与上覆前陆盆地陆相地层叠合的 呈北东向展布的多旋回沉积盆地(李忠权等, 2011; 李洪奎等, 2019)。四川盆地是我国重要的大型含 油气叠合盆地,蕴藏着丰富的天然气资源,发育震 旦系--下古生界、石炭系、二叠系、三叠系及侏罗 系等多套含油气层系,其中二叠系一直是盆内海相 碳酸盐岩勘探和研究的重点领域。



图 1 四川盆地区域构造位置图(据魏国齐等, 2019) Fig. 1 Regional tectonic location map of Sichuan Basin (modified from Wei et al., 2019)

## 2 地层分布及储层基本特征

二叠系沉积前,受加里东运动与云南运动隆升 作用影响,四川盆地长期暴露遭受剥蚀,形成准平 原化的缓坡型沉积基底。早二叠世,在广泛海侵背 景下,梁山组和栖霞组一段由加里东古隆起外围向 核部依次超覆于石炭系、泥盆系、志留系、奥陶系 及寒武系等地层之上,与下伏地层呈多角度不整合 接触关系(刘雁婷等,2014)。

由此可见, 二叠系中统梁山组和栖霞组沉积主要是对加里东末期残留地貌的"填平补齐", 其地层展布主要表现为"环带状"特征。其后, 二叠系中统茅口组至二叠系上统各层系地层受峨眉地幔柱隆升影响逐渐呈现出明显的南北分异的特点, 如茅口组"一缘、三高带"以及长兴组"五隆三凹"的沉积格局(王一刚等, 2008)。区域钻测井及地质研究成果表明, 二叠纪一早三叠世大致经历了五期

完整的海侵-海退沉积旋回,分别是二叠系(海西期) 的梁山组—栖霞组沉积、茅一段—茅二段沉积、茅 三段---茅四段沉积、吴家坪组---长兴组沉积及三 叠系下统(印支早期)的飞仙关组沉积,并发育五套 礁滩储集体及其相应的成藏组合(图 2)。其中栖 霞组、茅口组及长兴组等高位域礁滩相孔隙型储 层规模发育,钻探成效显著,是二叠系近期勘探的 重点领域。栖霞组二段储层岩性以细-中晶白云岩 为主,具残余颗粒结构,储集空间主要为晶间孔、 残余粒间孔及粒(晶)间溶孔,孔隙度主要介于 2%~6%, 渗透率主要分布在 0.01~1.00 md, 储层厚 度一般为 5~35 m(汪华等, 2014); 茅口组二段储层 岩性以残余颗粒白云岩为主,储集空间以晶间溶孔、 粒间孔及粒(晶)间溶孔为主,孔隙度为 2%~5%,渗 透率主要分布在 0.01~1.00 md, 储层一般厚 5~20 m(胡东风等, 2019);长兴组储层岩性以生物礁白 云岩为主,储集空间以晶间溶孔、残余粒间孔、粒

(2)



图 2 四川盆地 GS18 井—LT1 井二叠系—三叠系飞仙关组地层分布及沉积旋回特征 Fig. 2 Stratigraphic distribution and sedimentary cycle characteristics of Permian – Triasic Feixianguan Formation in Wel GS18–Wel LT1, Sichuan Basinn

间扩溶孔及溶洞为主, 孔隙度为 5%~15%, 渗透率 主要分布在 0.01~5.00 md, 储层厚度一般为几米至 数十米(刘建强等, 2017)。

#### 3 古地貌恢复方法及其分布特征

#### 3.1 古地貌恢复方法

古地貌作为沉积地层发育的背景,很大程度上 控制了沉积物的分配和相分异,也决定了高能礁滩 体的分布范围,即主要围绕台缘或台内正地形等古 地貌高带发育。古地貌恢复方法主要包括残余厚 度法、印模法、压实恢复及层序地层学恢复法等 (张亚等, 2020),四川盆地二叠系古地貌恢复常用 的方法主要为残余厚度法及印模法。残余厚度法 是利用目的层至下伏某个标志层(近似作为等时基 准面)的厚度来反映古地貌形态,厚度大的区域对 应古地貌高带,厚度小的区域代表古地貌低带(牟 传龙等,2010)。印模法则是利用目的层至古水平 面(一般选择填平补齐面)的厚度来镜像反映古地 貌高低。前人研究成果表明,三叠系下统飞仙关组 沉积晚期四川盆地台地-海槽格局基本消失,区域 地貌趋于填平补齐,常选取飞四段底界作为印模法 恢复长兴末期古地貌时的参考面(程锦翔等,2011), 但该界面距离栖霞组和茅口组相对较远,难以准确

反映其古地貌变化特征;同时考虑到四川盆地二叠 系沉积整体以海侵为主,一般沉积地貌相对较高的 浅水区,碳酸盐岩沉积速率高、地层厚度大且高能 滩相发育,而沉积地貌低的相对深水区,碳酸盐岩 沉积速率低、地层厚度薄且以低能泥质灰岩沉积 为主,由此选择残余厚度法来恢复二叠系各关键时 期沉积地貌特征。

本轮研究的具体方法是:首先选取 21 条盆地 格架二维地震测线(测线长度 10350 km)作为基于 剖面,在利用过格架大剖面的117口典型钻井资料 对主要目的层地震层位进行标定的基础上,完成全 盆地二叠系底界、栖二段底界、茅口组底界、茅二 段底界、茅三段底界、长兴组底界及长兴组顶界等 层位的地震地层的层序划分工作;再通过加密二维 地震资料 2149 条(测线长度 47 498 km)及三维地 震资料 37 块(满覆盖面积 49 027 km<sup>2</sup>), 并补充盆地 范围内均匀分布的326口钻井资料进行井震标定, 完成二叠系关键地震层位的对比解释,以获取四川 盆地高精度的地震层位解释成果数据(图 3,图 4); 最后基于盆地二叠系主要目的层地震层位解释成 果,编制栖二段、茅一段、茅二段及长兴组厚度图, 分别反映栖二段、茅二下亚段、茅二上亚段及长兴 组沉积期古地貌展布特征。



图 3 四川盆地二、三维地震测网及典型钻井井位分布图

Fig. 3 Distribution map of two-dimensional and three-dimensional seismic networks and typical drilling locations in the Sichuan Basin



图 4 四川盆地二叠系地震地质层位解释标准剖面 Fig. 4 Standard section of Permian seismic geological horizon interpretation in Sichuan Basin

# 3.2 古地貌基本特征

通过四川盆地二叠系主要目的层系沉积前古

地貌特征刻画,可以看出二叠系沉积前至茅二下亚 段沉积期古地貌主要受盆地西南部的加里东古隆

(2)



图 5 四川盆地二叠系沉积前古地质图 Fig. 5 Pre-sedimentary Paleogeologic map of the Permian system in Sichuan Basin

起控制,呈环带状展布,而茅二上亚段至长兴组沉 积期古地貌则逐渐受盆地南侧峨眉地幔柱隆升作 用控制,呈现出北西-南东向展布特征,不同时期沉 积地貌格局的演化在很大程度上控制了二叠系礁 滩发育特征及分布规律(图 5,图 6)。

研究认为,四川盆地二叠系沉积前至少在洗象 池末期(郁南运动)、奥陶系末期(都勾运动)及志 留系中晚期发生过三次大规模差异隆升运动,围绕 加里东古隆起核部由内向外形成多期环形剥蚀区, 这些环带既是岩性岩相变化带,易于暴露发生差异 侵蚀作用,也是古构造运动中应力释放带,进而形 成多期环形阶梯状地貌,控制二叠纪早期沉积地貌 格局。栖霞组二段沉积期,盆内发育早、中、晚三 期环形高带,可能分别对应洗象池末期、奥陶系末 期及中上志留统剥蚀区(图 6a);茅二下亚段沉积 期,加里东古隆环形地貌特征逐渐消亡,盆地中北 部开始沉降,仅在盆地西南部及龙女寺一合川地区 残留部分古隆起地貌特征(图 6b);至茅二上亚段 沉积期,受峨眉地幔柱隆升作用影响,盆地南部整 体抬升,盆地中北部持续沉降,古地貌发生北西-南 东向分异,在江油一南充一卧龙河地区形成沉积地 貌相对高带(图 6c);长兴期,古地貌继续发生北西-南东向分异,发育开江-梁平海槽且蓬溪-武胜台凹 发育定型,古地貌高带主要分布在海槽或台凹周缘 (图 6d)。

### 4 二叠纪构造-沉积演化及其礁滩发育模式

从二叠系关键沉积期沉积地貌可以看出,不同 时期构造-沉积格局具有差异大、变化快的特点,栖 霞期的环形地貌是如何演化为长兴期北西-南东向 展布的台槽沉积地貌格局?它们之间是否存在内 在成因联系?针对上述问题,本文对盆地二叠纪各 时期地貌格局差异之间的转换关系、动力学机制 及沉积演化规律等方面开展了进一步探讨,并重建



a. 四川盆地栖霞组二段沉积期古地貌分布图; b. 四川盆地茅二下亚段沉积期古地貌分布图; c. 四川盆地茅二上亚段沉 积期古地貌分布图; d. 四川盆地长兴组沉积期古地貌分布图

#### 图 6 四川盆地二叠系重点层系沉积地貌平面分布图 Fig. 6 Planar distribution map of sedimentary landform in key stratum of Permian system in Sichuan Basin

了二叠纪构造-沉积演化及礁滩发育模式,为进一步拓展二叠系新的勘探领域提供理论支撑。

#### 4.1 构造-沉积演化的动力学机制

加里东运动是四川盆地二叠系沉积前的大规 模差异隆升运动,在很大程度上控制了二叠系沉积 早期的沉积格局。加里东运动早期,盆地西南侧康 定-汶川地区暴露遭受剥蚀,为寒武系筇竹寺组砂 泥质陆棚沉积提供大量陆源碎屑物质,德阳-安岳 裂陷槽逐渐填平补齐;加里东中晚期,古隆起向盆 内推进至乐山—龙女寺地区,下古生界—震旦系地 层遭受长期暴露、剥蚀,形成"西南高、北东低" 的环状古地貌格局。由此可见,加里东运动动力来 源于盆地西南侧,可能是古特提斯洋壳向扬子板块 的俯冲、聚合作用(He et al., 2003; Williams and Gostin, 2000),也可能是类似地幔柱的持续隆升作 用(Cox, 1989; Campbell and Griffiths, 1990; Xu et al., 2004;杨巍等, 2014),但前者可能性更大,因为 —方面在盆地西南侧未发现类似峨眉地幔柱隆升 形成的大火成岩省,另一方面加里东古隆西南-北 东向轴线方向与后期印度板块与欧亚板块的碰撞 方向类似,表明加里东期上扬子地台在整体拉张背 景下,可能已存在局部挤压作用。

早二叠世晚期至晚三叠世,峨眉地幔柱活动成 为控制上扬子构造-沉积格局的主要因素。茅口期 一长兴期,峨眉地幔柱活动中心大致位于现今云南 省东北部,导致云贵及川南地区抬升,而四川盆地 中北部相对沉降。地幔柱发育依次经历了平静期、 高峰期及消亡期等阶段,伴随基底断裂拉张沉陷, 形成南西高、北东低的陡缓相间变化的宽缓斜坡, 局部呈现"阶地"特征,尤其在盆地中北部出现北 西-南东向"隆凹相间"的地貌特征,彻底改变了 加里东古隆控制的环状地貌格局。

综上所述,加里东古隆起与峨眉地幔柱可能是 古特提斯洋壳与扬子板块相互聚合、离散作用背 景下不同阶段的产物,在二叠纪构造-沉积演化过 程中,加里东运动奠定了整个二叠系沉积的地貌基 础,而峨眉地幔柱活动则是改造早二叠世晚期至早 三叠世不同时期碳酸盐岩沉积地貌格局的关键,这 种具有继承性的改造作用为二叠纪构造-沉积格局 演化及其礁滩相带迁移提供了盆地动力学条件。

#### 4.2 构造-沉积演化特征及其礁滩发育模式

大量钻测井、地震及地质资料的综合分析认 为,在加里东古隆起和峨眉地幔柱的共同影响下, 二叠纪一早三叠世碳酸盐岩沉积围绕不同时期的 沉积古地貌高带,随着海平面升降,形成五套横向 迁移、纵向叠置连片的礁滩储集体及相应的储盖 组合(图7)。在不同区域,有利沉积相带发育层位 不同,决定了勘探的组合与对象不同。

栖霞期,在加里东古隆起宏观地貌背景下,发 育一套完整的海侵-海退沉积旋回。栖一段短暂海 侵结束后,进入栖二段高位体系域,随着相对海平 面下降,在古隆起宽缓阶梯状环形地貌背景下,形 成由古隆起核部向边缘多期渐进迁移、大面积分 布的台内滩体。

茅口期发育两套海侵-海退沉积旋回, 茅一— 茅二期为第一套旋回, 其中茅二下亚段高位早期, 在加里东古隆残留高地上发育多期迁移台内滩体, 茅二上亚段高位晚期,受峨眉地幔柱隆升影响,在 北东向宽缓古隆背景上形成系列"阶地",发育北 西-南东向"条带状"高位域台缘滩相沉积;茅三 一茅四期为第二套海侵-海退旋回(PSQ3 层序),地 幔柱隆升作用逐渐增强,波及盆地南部,导致盆地 中北部相对快速沉降,川西南地区一直保持较高的 古地貌特征,持续发育高能生屑滩,盆地北部开江-梁平海槽西侧边缘逐渐形成北西-南东向坡折带, 开始发育茅三段台缘滩相沉积。茅口组晚期,上扬 子地台发生大规模抬升作用,在广泛的海退背景下 茅口组地层发生大面积岩溶作用,形成优质岩溶型 储层。

吴家坪期一长兴期为一套完整的海侵-海退旋回。旋回早期,地幔柱活动达到顶峰,形成大面积火山喷发活动,释放了地幔柱上涌能量,构造隆升作用趋于平缓(梁新权等,2013)。吴家坪期,在茅口组大规模侵蚀地貌背景下,随海平面上升,形成 广泛海侵沉积(张帆等,1993)。该时期火山喷发及 陆源碎屑供应增多,盆地南侧泸州—重庆地区发育



a. 四川盆地二叠系—三叠系飞仙关组礁滩分布典型地震大剖面特征; b. 四川盆地二叠系—三叠系飞仙关组构造-沉积演 化及礁滩分布模式

#### 图 7 四川盆地二叠系—三叠系飞仙关组构造-沉积演化及礁滩分布模式

Fig. 7 Tectonic-sedimentary evolution and ref-shoal distribution model of the Permian – Triasic Feixianguan Formation in Sichuan Basin

龙潭组沼泽相碳质页岩,川东北宣汉一开县地区 WY1井也钻遇沼泽相碳质页岩夹煤层,表明吴家 坪期在继承茅口组沉积背景的基础上,盆地南侧及 盆地东北侧相对抬升,持续为盆内提供物源,而盆 地中北部的开江-梁平海槽及蓬溪-武胜台凹则持 续沉降,逐渐具备台槽雏形。长兴期,地幔柱活动 趋于平稳,盆地西南侧近物源区以海陆过渡相沉积 为主;远离物源区,以清水碳酸盐台地沉积为主,海 侵期-高位早期,海平面上升速度与生物礁生长速 度基本持平,海槽边缘持续建隆,发育大规模台缘 礁滩体,高位晚期,槽内高地形成多排礁滩体。

飞仙关期包含一套完整海侵-海退旋回。长兴 末期,地幔柱隆升运动结束,盆内大规模海退,蓬溪-武胜台凹及开江-梁平海槽逐渐消亡。飞仙关早期 快速海侵,继承长兴末期地貌格局,依次发育陆相-海陆过渡相-台地相沉积,沿长兴期海槽、台凹边缘 高带发育继承性鲕滩体;飞仙关中晚期高位域,随 着沉积物向海槽(台凹)沉积充填,鲕滩体也向海槽 (台凹)区迁移,最终形成纵向多期叠置、横向大面 积连片分布的鲕滩前积体(倪新锋等,2007)。

#### 5 礁滩体发育特征及迁移规律

#### 5.1 二叠系礁滩体发育特征

#### 5.1.1 栖霞组多期台内滩的"环带状"展布特征

川中台内滩体是四川盆地栖霞组重要的勘探 领域,前期研究及勘探实践表明川中台内滩主要受 加里东古隆环形地貌控制,沿奥陶系侵蚀窗呈环带 状展布(郝毅等,2013)。随着越来越多钻井及地震 地质资料的揭示,栖霞组台内滩逐步呈现出多期环 带状展布的特征。

高石梯一磨溪地区大量钻井证实,奥陶系环形 侵蚀窗之上栖霞组滩相白云岩储层发育,地震剖 面A上见明显前积现象,前积体振幅具有上弱下 强反射特征,代表浅水高能向深水低能环境过渡, MX42井、MX31-X1井及GS18井等均钻遇该套高 能滩体,储层岩石类型以细-中晶白云岩为主,见残 余生屑结构,晶间孔、晶间溶孔及溶洞发育,该区 已有数十口井获得高产工业气流,展示出巨大的勘 探潜力。奥陶系侵蚀窗以南,靠近加里东古隆核部 的沧浪铺组一洗象池组环形剥蚀区,栖霞组内部同 样见振幅具有上弱下强的前积反射特征,DB1井、 ZJ2井及YT1井等多口在该区域钻遇栖霞组高能 滩体,储层岩性以亮晶生屑灰岩为主,表明沧浪铺 组一洗象池组尖灭线附近也存在滩相发育有利区; 奥陶系侵蚀窗之外的剑阁一九龙山地区也与高磨 地区类似,志留系中上统地层呈角度不整合于二叠 系地层之下,栖霞组内部同样见多个振幅呈上弱下 强的前积体反射特征,目前该区域的LT1井、L004x6井等钻遇该套滩相储层,岩性主要为中晶白云 岩,晶间孔发育,测试均获日产超百万方工业气流, 表明栖霞组晚期阶梯状环带具有较大的勘探前景 (图 6a,图 8)。

综上所述,早二叠世,继承加里东末期古地貌, 由古隆起核部向外围逐级降低,形成多期阶梯状缓 坡型沉积地貌,进而控制栖霞组台内滩体形成早、 中、晚三期环带状展布的特征。目前处于中期环 带的高磨地区栖霞组台内滩已进入开发阶段,早期 环带和晚期环带虽有部分钻井钻遇栖霞组滩相白 云岩储层获气,但对其滩体发育特征、分布规律及 勘探规模等研究尚处于初期阶段,因此该领域可能 成为盆内栖霞组下一步新的勘探和研究方向。

5.1.2 茅口组多期滩体的迁移发育特征

四川盆地针对蜀南岩溶型储层勘探已进入开 发阶段,近几年盆地中北部茅二段滩相孔隙型白云 岩储层勘探不断取得突破,在川中龙女寺—南充地 区及川东板东—卧龙河地区的多口井钻遇茅二段 滩相白云岩储层并获得高产工业气流(陈轩等, 2012),已成为茅口组重要的接替领域。

古地貌分析认为,川中龙女寺一合川地区位于 加里东古隆起残留地貌高部位,茅一段海侵期沉积 物由四周向继承性古地貌高带超覆沉积,茅二下亚 段沉积期,该古地貌高带成为海水高位震荡区,是 高能滩体发育有利部位,地震剖面 B 中见地层上 隆、振幅减弱等反射特征。该区的 MX145 井、 MX39 井及 MX150 井等多口井钻遇茅二下台内高 能滩相白云岩储层,岩性以细-中晶白云岩为主,见 残余砂屑结构,晶间孔及晶间溶孔发育,其中 MX145 井测试获气 212×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,表明该区勘探潜 力巨大(图 6b,图 9)。

茅二上亚段沉积期,海平面持续高位震荡,在 盆地南高北低的缓坡背景下,沉积物由加里东古隆 核部继续向北迁移,茅二上亚段高能滩带也由龙女 寺—合川地区向北迁移至 JT1 井区—南充地区。 地震剖面 C上可见多个振幅上弱下强的低角度前 积地震反射结构,反映高位期随着沉积物由加里东 古隆高部位向周缘不断迁移,高能带也随之迁移,



地震剖面 A. 川中—川西北地区栖霞组台内滩地震剖面特征; a. DB1 井栖霞组,亮晶生屑灰岩,方解石胶结(单偏光); b. MX42 井栖霞组,灰色晶粒状白云岩,溶孔、溶洞发育; c. MX42 井栖霞组,细晶白云岩,见生屑结构,晶间孔、晶间溶孔发育(单偏光); d. LT1 井栖霞组,中晶白云岩,晶间孔发育(单偏光)

图 8 川中—川西北地区下古生界多期侵蚀窗附近栖霞组台内滩及储层发育特征

Fig. 8 Development characteristics of inner shoal and reservoir in Qixia Formation near the multi-stage erosion window of Lower Paleozoic in central and northwest Sichuan



地震剖面 B. 川中磨溪地区茅二下亚段台内滩地震剖面特征; a. MX145 井茅二下亚段,中晶白云岩,见残余砂屑结构 (单偏光); b. MX39 井茅二下亚段,中晶白云岩,溶孔、溶洞发育(单偏光); c. MX39 井茅二下亚段,细-中晶白 云岩,见晶间孔、溶孔(单偏光); d. MX150 井茅二下亚段,中晶白云岩,晶间孔及晶间溶孔发育(单偏光)

图 9 川中磨溪地区茅二下亚段台内滩及储层发育特征

Fig. 9 Development characteristics of inner shoal and reservoir in the lower sub-member of Maokou Formation in Moxi region in central Sichuan

最终形成多期叠置、连片分布的茅二上亚段滩相 储集体。JT1 井、NC1 井及 NC2 井等多口井均于 该带钻遇茅二上亚段滩相储层,储集岩类型以细晶 白云岩为主,见残余砂屑结构,晶间孔及晶间溶孔 发育,目前已有 JT1 井、NC1 井及 GT2 井等多口井 获高产工业气流,证实该区是近期茅口组获得规模 储量的现实领域(图 6c,图 10)。

#### 5.1.3 长兴组海槽内礁滩体发育特征

长兴期,开江-梁平海槽及蓬溪-武胜台凹发育 定型,高位期在海槽(台凹)边缘等继承性古地貌高 带,发育大规模台缘(隆)生物礁滩体,以"开江-梁 平海槽"两侧最为显著(王瑞华等,2006;牟传龙等, 2005)。近期,为了进一步拓展长兴组勘探领域,开 展了岩屑复查及地震资料解释等一系列工作,在海 槽内发现大量生物碎屑及多排生物礁滩异常体,表 明"海槽或台凹"等负地形并非生物礁滩发育的 禁区,槽内局部高地(断全)也可以发育继承性生物 礁滩体。此外,海槽内礁滩体一般为龙潭组及飞仙 关组早期烃源层包裹,成藏条件优越,具有较大勘 探潜力。

结合海槽西侧老井岩屑复查成果,对龙岗三地 震资料进行了重新解释,研究认为开江-梁平海槽 西侧长兴组原台缘带向东推进2km,且海槽内见 长兴组局部增厚、内部反射杂乱或弱振幅等地震 异常特征。其中雷音铺构造 L17 井钻遇原海槽内 长兴组生屑灰岩,见造礁生物海绵,在地震剖面 E 中具有飞底上隆及长兴组内部弱振幅反射等特征, 测试微气;亭子铺构造 T3 井、T4 井也钻遇原海槽 内长兴组生屑灰岩,藻类及有孔虫等生物碎屑发育, T3 井测试产气  $1.2 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d, T4 井长兴组发生井涌, 点火可燃。由此可见,海槽西侧长兴组台缘生物礁 滩具有向槽方向迁移、形成多排生物礁滩体的特 征,可与中石化元坝地区多排生物礁滩体进行类比 (图 6d,图 11)。目前西南油气田分公司已针对海 槽内礁滩地震异常体部署三维地震勘探及风险探 井目标,一旦取得突破,有望成为二叠系勘探重要 的接替领域。

#### 5.2 二叠系礁滩体展布特征及迁移规律

为了进一步明确四川盆地二叠系重点勘探层 系礁滩体时空发育特征及迁移规律,笔者结合盆地



地震剖面 C. 川中—川北地区茅二上亚段台缘滩地震剖面特征; a. NC2 井茅二上亚段,灰质细晶白云岩(单偏光); b. NC2 井茅二上亚段,灰质细晶白云岩,见晶间孔、晶间溶孔(单偏光); c. JT1 井茅二上亚段,细晶白云岩,具残余砂屑结构,见晶间孔(单偏光); d. JT1 井茅二上亚段,细晶白云岩,见残余砂屑结构,晶间孔、晶间溶孔发育(单偏光)

#### 图 10 川中一川北地区茅二上亚段台缘滩及储层发育特征

Fig. 10 Development characteristics of inner shoal and reservoir in the upper sub-member of Maokou Formation in central and north Sichuan



地震剖面 D、E. 开江-梁平海槽西侧长兴组台缘(槽内)礁滩体地震剖面特征; a. LY17 井长兴组,生屑泥晶灰岩,见海 绵; b. LY17 井长兴组,含生屑泥晶灰岩(单偏光); c. T4 井长兴组,生屑灰岩,见藻类、有孔虫(单偏光); d. T4 井长兴组,含生屑泥晶灰岩,见有孔虫(单偏光)

#### 图 11 开江-梁平海槽西侧长兴组台缘(槽内)礁滩体发育特征

# Fig. 11 Development characteristics of reef shoal of Changxing Formation in the western edge of Kaijiang-Liangping trough (within the trough)

不同区域典型钻井资料及二、三维地震资料(图 3), 以上述古地貌恢复及礁滩发育特征分析为基础, 通过井震结合、地震相分析及地震相-沉积相转换 等方法,确定了栖霞组二段、茅二下亚段、茅二上 亚段及长兴组沉积相展布特征(图 12)。从沉积 相平面分布图可以看出,二叠系礁滩体分布在很大 程度上受古地貌控制,即古隆起残留高带或台缘 (凹)边缘等正地形多为高能礁滩体发育的有利 部位。

栖二段沉积期,在加里东古隆起残留背景下, 自西向东依次发育台地边缘相、开阔海台地相及 台内洼地亚相等。该期沉积沿加里东古隆起周缘 坡折带形成多期环带状台内滩,岩性以生物碎屑灰 岩为主,后经多期成岩作用改造形成优质白云岩储 层,地震剖面上滩相异常带呈丘状弱振幅反射特征。 栖二段高位域早期,由郁南运动及都匀运动形成的 早、中环形坡折带控制了加里东古隆核部至环形 边缘的台内滩相沉积,位于中期环带的高磨地区栖 霞组勘探已进入开发阶段;栖二段高位域晚期,随 着相对海平面下降,志留系中晚期差异隆升运动形 成的晚期环形坡折带控制了外环带台内滩的沉积, 川西北九龙山地区 LT1井、L17井及川南地区



a. 四川盆地栖霞组二段沉积相平面分布图; b. 四川盆地茅二下亚段沉积相平面分布图; c. 四川盆地茅二上亚段沉积相 平面分布图; d. 四川盆地长兴组沉积相平面分布图



Fig. 12 Planar distribution of sedimentary facies in key stratum of Permian system in Sichuan Basin

Z2 井、K10 井及 T18 井等均钻遇该期栖霞组滩相储层获工业气流(图 12a)。

290

茅一段至茅二段沉积期,盆地沉积地貌在继承 栖霞期"环状"地貌格局的基础上,随着峨眉地幔 柱的不断隆升,逐渐改造为"西南高、北东低"的 大型缓坡地貌特征。茅二下亚段沉积期,进入缓慢 海退期,自南向北依次发育碳酸盐岩台地及斜坡相。 该时期盆地西南部及龙女寺—合川地区等位于古 隆起高带,水体能量较强,有利于台内高能滩相沉 积,龙女寺地区已有 MX145 井、MX150 井及 TS4 井等十多口井钻遇该套滩相白云岩储层获工业气流 (图 12b)。

茅二上亚段沉积期,受峨眉地幔柱隆升作用控

制,加里东古隆环形地貌被彻底改变,沉积相带呈 现北西-南东向展布特征,自南向北依次发育碳酸 盐岩台地相、台地边缘相、斜坡相及陆棚相。该时 期,在盆地中北部江油一南充一卧龙河地区形成大 规模"条带状"展布的古地貌高带,具有一定障壁 作用,沿该高带发育高位域台缘滩相沉积,岩性主 要为生物碎屑灰岩及云岩,地震剖面上呈前积、振 幅减弱等反射特征。GJ井、W93井、NC1井及 JT1井等先后在该带上钻遇优质滩相白云岩储层 并获工业气流(图 12c)。

长兴期,继承早期南北分异地貌,盆地南侧持 续抬升遭受暴露剥蚀,为盆内提供大量陆源碎屑物 质,由南向北依次发育陆相、海陆过渡相、碳酸盐 岩台地相、台地边缘相、斜坡相及海槽相。该阶段 海平面持续上升,开江-梁平海槽或武胜-绵竹台凹 边缘礁滩体垂向加积增厚,形成北西-南东向展布 的台缘相生物礁沉积,岩性主要为生物礁灰岩或白 云岩;最新地震解释成果表明,海槽内巴中—达州 地区存在多排高带,是槽内礁滩体发育的有利部位, 目前 HB1 井、T3 井及 T4 井等已于该高带钻遇生 屑灰岩获气(图 12d)。

#### 5.3 二叠纪礁滩发育特征研究的意义

自普光、元坝及龙岗等海槽边缘相大型气田 发现后,四川盆地二叠系礁滩勘探再无重大突破, 进入瓶颈期。本次基于盆地二叠系最新勘探及研 究成果,重新整体构建构造-沉积演化及礁滩发育 模式,具有以下意义:①建立全区井震统一的地震 层位解释方案,深化沉积旋回认识,提出在加里东 古隆起和峨眉地幔柱活动共同控制下,从栖霞组到 飞仙关组发育多旋回、具内在成因联系的完整沉 积体系。②受古地貌演化及海平面旋回控制,二叠 系礁滩储集体在空间上有序迁移、规模性展布,宏 观分布特征及规律清晰,为不同区域勘探指明了领 域方向。③改变原有"单一坡折带"、"海槽(台 凹)边缘"控滩认识,提出在不同海平面旋回背景 下,多期坡折带、多级次古地貌高带控滩观点,为 拓展勘探新领域提供了新的思路。综上所述,二叠 纪各时期礁滩体在古地貌高部位纵向建隆的同时, 受海平面变化影响,发生大规模横向迁移,并受不 同级次古地貌高带控制,在整个川中---川北全区发 育多期次、多排礁滩体。

#### 6 有利勘探区带预测及前景展望

二叠系沉积前古地貌特征及礁滩分布规律研 究表明,二叠系礁滩储层发育有利相带分布面积广、 纵向多层系叠置,尤其是在开江-梁平海槽及蓬溪-武胜台凹等勘探程度较低的区域,也存在大规模礁 滩有利相带叠置区,纵向上与下伏志留系或寒武系 烃源层接触,源储配置良好(李建忠等,2021),因此, 四川盆地二叠系具有广阔的勘探前景(图 13)。

栖霞组三期环形台内滩相有利区分布范围广, 地震剖面上滩体多期前积、振幅减弱等特征清 晰,且紧邻下伏烃源岩,通源断裂发育,成藏条件 优越,有利勘探面积达15250km<sup>2</sup>。高磨地区栖二 段中期环形台内滩相已有多口井获工业气流,如 MX42井、GS18井等,而针对早、晚环形台内滩勘 探则相对较少,尤其是晚期环形坡折带分布面积大、 勘探程度低,是二叠系下一步拓展天然气勘探领域 的重点区带。川北九龙山一龙岗地区栖二段晚期 环形台内滩相与海槽西侧长兴期台缘叠置区具有 多层系立体勘探价值,海槽区源储配置条件优越, 潜力较大,目前除九龙山地区获得突破外,其他区 域尚处于探索阶段;蜀南宜宾一内江地区成藏条件 优越,由于前期未形成栖二段晚期台内滩环形规模 展布的认识,该层系一直作为茅口组岩溶储层的兼 探层,已发现 Z2 井、K10 井及 T18 井等工业气井, 且多口钻井发生井漏、放空或气测异常,表明该区 栖霞组是下一步老井上试及风险勘探的重点 层系。

茅口组二段滩相孔隙型白云岩储层广泛分布 于盆地中北部,地震剖面上滩体上隆、振幅减弱等 特征清晰,成藏条件优越,有利勘探面积达7250 km<sup>2</sup>。茅二上亚段台缘滩相呈北西-南东向广泛分 布于川西江油—川中南充—川东卧龙河地区,已 有JT1井、NC1井及BD3井等多口钻井在该带上 钻遇滩相白云岩储层获工业气流,表明该条带勘探 潜力巨大。近期,川中古隆北斜坡地区JT1井茅二 上亚段勘探取得突破,标志着构造斜坡区茅二段岩 性气藏勘探进入新的阶段,川西-川中-川东构造斜 坡及向斜区逐渐成为茅口组勘探和研究的热点 领域。

长兴组槽内礁滩相是二叠系勘探的新领域,大量二三维地震资料已证实槽内存在平行于开江-梁平海槽的多排正地形,地震上具有丘形上隆、振幅减弱等异常反射特征,位于海槽内生烃中心,易于被烃源层包裹,源储配置优越,有利勘探面积近2000 km<sup>2</sup>,具有重大勘探价值。开江-梁平海槽内长兴组T3井、T4井已获得油气显示,同时二叠系其他层系也相继取得钻探突破,如L004-X6井栖霞组测试获127.7×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d 工业气流,YB7井茅口组测试获气105.94×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,L16井飞仙关组测试获气15.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,表明海槽内已成为二叠系下一步勘探的重点区域。

### 7 结论

(1)随着四川盆地二叠系多层系勘探及研究的 不断突破,礁滩发育特征及分布规律逐渐明确。研 究认为栖霞组二段台内滩受加里东古隆起阶梯状 环形侵蚀地貌控制,具有围绕古隆起呈多期环带状



图 13 四川盆地二叠系上统底界构造背景与二叠系礁滩有利区带叠合图

Fig. 13 Superposition map of the upper boundary tectonic setting of the Permian system and the favorable zones of the Permian reef-shoal in Sichuan Basin

展布的特点, 茅二下亚段台内滩受加里东古隆残留 地貌控制, 沿龙女寺—合川地区等古地貌高带分布; 茅二上亚段及长兴组沉积期则受峨眉地幔柱隆升 作用影响, 礁滩发育有利相带主要分布在盆地中北 部, 呈北西-南东向条带状展布, 具有多期迁移、连 片叠置的特征。

(2)重新构建二叠系构造-沉积旋回及礁滩发 育模式,为拓展新的勘探领域奠定基础。研究认为 在加里东古隆起残留地貌背景和峨眉地幔柱隆升 作用的共同控制下,二叠纪一早三叠世发育五个大 的沉积旋回,受海平面变化影响,二叠系礁滩体发 生多期大规模迁移,同时受到多级次古地貌高带及 坡折带控制,最终形成纵横向有序迁移、规模性展 布的礁滩储集体,其不受海槽(台凹)限制,广泛分 布于整个川中—川北地区。

(3)二叠系礁滩有利相带分布面积广,成藏条件优越,具有广阔的勘探前景。川北九龙山—龙岗

地区、蜀南宜宾一内江地区栖二段晚期环形台内 滩相成藏条件优越,勘探程度低,是扩大二叠系勘 探规模的潜在领域;磨溪北斜坡地区茅二上亚段台 缘滩相优质白云岩储层大面积发育,有望成为规模 增储的重要接替领域;开江-梁平海槽内长兴组礁 滩相地震异常特征清晰,位于海槽内生烃中心,源 储配置条件优越,是二叠系未来勘探中重要的探索 方向。

#### References

- Campbell I H, Griffiths RW, 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 99 (1/2) : 79 - 93.
- Chen X, Zhao W Z, Zhang L P, et al., 2012. Discovery and exploration significance of structure-controlled hydrothermal dolomites in the Middle Permian of the central Sichuan Basin[J]. ACTA Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 33 (4): 562 – 569 (in

Chinese with English abstract).

- Cheng J X, Guo T L, Tan Q Y, et al., 2011. Characteristics and controlling factors of the reef shoal reservoirs from the Changxing Formation-Feixianguan Formation in the Xuanhan-Daxian zone, northeastern Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 31 (3) : 64 – 70 (in Chinese with English abstract).
- Cox K G, 1989. The role of mantle plumes in the development of continental drainage patterns [J]. Nature, 342 (6252) : 873 877.
- Hao Y, Zhou J G, Zhang J Y, et al., 2013. The dolostone reservoirs from the Middle Permian Qixia Formation in northwestern Sichuan Basin: Characteristics and controlling factors[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 33 (1) : 68 - 74 (in Chinese with English abstract).
- He B, Xu Y G, Chung S L et al., 2003. Sedimentary evidence for a rapid, kilometer-scale crustal doming prior to the eruption of the Emeishan flood basalts[J]. Earth and Planetary Science Letters, 213 (3/4): 391-395.
- Hu D F, Wang L J, Huang R C, et al., 2019. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 39 (6) : 13 – 21 (in Chinese with English abstract).
- Li H K, Li Z Q, Long W, et al., 2019. Vertical configuration of Sichuan Basin and its superimposed characteristics of the prototype basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 46 (3) : 257 - 267 (in Chinese with English abstract).
- Li J Z, Gu Z D, Lu W H, et al., 2021. Main factors controlling the formation of giant Marine carbonate gas fields in the Sichuan Basin and exploration ideas[J]. Natural Gas Industry, 41 (6) : 13 26 (in Chinese with English abstract).
- Li Z Q, Ying D L, Li H K, et al., 2011. Evolution of the western Sichuan basin and its superimposed characteristics, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 27 (8) : 2362 – 2370 (in Chinese with English abstract).
- Liang X Q, Zhou Y, Jiang Y, et al., 2013. Difference of sedimentary response to Dongwu Movement: Study on LA-ICPMS U-Pb ages of detrital zircons from Upper Permian Wujiaping or Longtan Formation from the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 29 (10): 3592 – 3606 (in Chinese with English abstract).
- Liu J Q, Zheng H F, Liu B, et al., 2017. Characteristics and genetic mechanism of the dolomite in the Middle Permian Maokou Formation, central Sichuan area[J]. ACTA Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 38 (4): 386 – 398 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y T, Zhang W J, Xiong Z F, et al., 2014. Sequence Stratigraphy of the Middle Permian strata in northeastern Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 34 (2) : 47 - 53 (in Chinese with English abstract).
- Ma X H, Yang Y, Wen L, et al., 2019. Distribution and exploration

direction of medium and large-sized Marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 46 (1) : 1 - 13 (in Chinese with English abstract).

- Mou C L, Ma Y S, Wang R H, et al., 2005. Diagenesis of the Upper Permian Panlongdong organic reefs in northeastern Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 25 (1-2) : 198 – 202 (in Chinese with English abstract).
- Mou C L, Xu X S, 2010. Sedimentary evolution and petroleum geology in South China during the Early Palaeozoic [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 30 (3) : 24 – 29 (in Chinese with English abstract).
- Ni X F, Chen H D, Tian J C, et al., 2007. Sedimentary framework of Changxing-Feixianguan Formations and its control on reservoiring in northeastern Sichuan basin[J]. Oil & Gas Geology, 28 (4) : 458 – 462 (in Chinese with English abstract).
- Wang H, Shen H, Huang D, et al., 2014. Origin and distribution of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 34 (9) : 25 – 32 (in Chinese with English abstract).
- Wang R H, Mou C L, Tan Q Y, et al., 2006. Diagenetic processes and environments of the reef shoal dolostones from the Changxing Formation in the Daxian-Xuanhan region, northeastern Sichuan [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 26 (1) : 30 - 36 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y G, Hong H T, Xia M L, et al., 2008. Exploration of reef-bank gas reservoirs surrounding permian and triassic troughs in sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 28 (1) : 22 – 27 (in Chinese with English abstract).
- Wei G J, Yang W, Liu M C, et al., 2019. Distribution rules, main controlling factors and exploration directions of giant gas fields in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 39 (6) : 1 – 12 (in Chinese with English abstract).
- Williams G E, Gostin V A, 2000. Mantle plume uplift in the sedimentary record: Origin of kilometre-deep canyons within Late Neoproterozoic successions, South Australia[J]. Journal of the Geological Society, 157 (4):759-768.
- Xu Y G, Chung S L et al., 2004. Geologic, geochemical, and geophysical Consequences of plume involvement in the Emeishan flood-basalt province[J]. Geology, 32 (10) : 917 – 920.
- Yang W, Zhang T S, Liu Z C, et al., 2014. Sedimentary and environmental responses to mantle plume: A case study of Emeishan mantle plume[J]. Acta Petrologica Sinica, 30 (3) : 835 – 850 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y M, Yang Y, Wen L, et al., 2020. New exploration progress and prospect of Middle Permian natural gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 40 (7) : 10 - 22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F, Wen Y C, Qiang Z T, et al., 1993. Carbonate RAMP

sedimentation of Permian in Wujiapin, Sichuan and its neighbouring region [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 15 (1) : 34 - 41 (in Chinese with English abstract).

Zhang Y, Chen S L, Zhang X L, et al., 2020. Restoration of paleokarst geomorphology of Lower Permian Maokou Formation and its petroleum exploration implication in Sichuan Basin[J]. Northwest Oil & Gas Exploration, 32 (3) : 44 - 55 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 陈轩,赵文智,张利萍,等,2012.川中地区中二叠统构造热液白 云岩的发现及其勘探意义[J].石油学报,33(4):562-569.
- 程锦翔,郭彤楼,谭钦银,等,2011.川东北宣汉-达县地区长兴组-飞仙关组礁滩储层特征及其控制因素[J].沉积与特提斯地质, 31 (3):64-70.
- 郝毅,周进高,张建勇,等,2013.川西北中二叠统栖霞组白云岩 储层特征及控制因素[J]. 沉积与特提斯地质,33(1):68-74.
- 胡东风,王良军,黄仁春,等,2019.四川盆地东部地区中二叠统 茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J].天然气工业,39(6): 13-21.
- 李洪奎,李忠全,龙伟,等,2019.四川盆地纵向结构及原型盆地 叠合特征[J].成都理工大学学报,46(3):257-267.
- 李建忠,谷志东,鲁卫华,等,2021.四川盆地海相碳酸盐岩大气 田形成主控因素与勘探思路[J].天然气工业,41(6):13-26.
- 李忠权,应丹琳,李洪奎,等,2011.川西盆地演化及叠合特征研究[J].岩石学报,27(8):2362-2370.
- 梁新权,周云,蒋英,等,2013.二叠纪东吴运动的沉积响应差异: 来自扬子和华夏板块吴家坪组或龙潭组碎屑锆石 LA-ICPMSU-Pb 年龄研究[J].岩石学报,29(10):3592-3606.

刘建强,郑浩夫,刘波,等,2017.川中地区中二叠统茅口组白云

岩特征及成因机理[J].石油学报,38(4):386-398.

- 刘雁婷,张文军,熊治富,等,2014.四川盆地东北部中二叠统层 序地层特征[J]. 沉积与特提斯地质,34(2):47-53.
- 马新华,杨雨,文龙,等,2019.四川盆地海相碳酸盐岩大中型气 田分布规律及勘探方向[J].石油勘探与开发,46(1):1-13.
- 牟传龙,马永生,王瑞华,等,2005. 川东北地区上二叠统盘龙洞 生物礁成岩作用研究[J]. 沉积与特提斯地质,25(1-2):198-202.
- 牟传龙,许效松, 2010. 华南地区早古生代沉积演化与油气地质条件[J]. 沉积与特提斯地质, 30(3):24-29.
- 倪新锋,陈洪德,田景春,等,2007.川东北地区长兴组—飞仙关 组沉积格局及成藏控制意义[J].石油与天然气地质,28(4): 458-462.
- 汪华,沈浩,黄东,等,2014.四川盆地中二叠统热水白云岩成因及其分布[J].天然气工业,34(9):25-32.
- 王瑞华,牟传龙,谭钦银,等,2006.
  达县—宣汉地区长兴组礁滩白云岩成岩作用与成岩环境研究
  [J]. 沉积与特提斯地质,26(1):30-36.
- 王一刚,洪海涛,夏茂龙,等,2008.四川盆地二叠、三叠系环海 槽礁滩富气带勘探[J].天然气工业,28(1):22-27.
- 魏国齐,杨威,刘满仓,等,2019.四川盆地大气田分布、主控因 素与勘探方向[J].天然气工业,39(6):1-12.
- 杨巍,张廷山,刘治成,等,2014.地幔柱构造的沉积及环境响应
  ——以峨眉地幔柱为例[J].岩石学报,30(3):835-850.
- 杨跃明,杨雨,文龙,等,2020.四川盆地中二叠统天然气勘探新 进展与前景展望[J].天然气工业,40(7):10-22.
- 张帆, 文应初, 强子同, 等, 1993. 四川及邻区晚二叠统吴家坪碳 酸盐缓坡沉积[J]. 西南石油学院学报, 15(1):34-41.
- 张亚,陈双玲,张晓丽,等,2020.四川盆地茅口组岩溶古地貌刻 画及油气勘探意义[J].岩性油气藏,32(3):44-55.