

四川盆地中二叠统茅口组天然气大面积成藏的地质条件

汪泽成 江青春 黄士鹏 周 慧 冯庆付 戴晓峰 鲁卫华 任梦怡

中国石油勘探开发研究院

摘 要 近年来在四川盆地西北部(川西北)、中部(川中)等地区中二叠统茅口组钻获了一批高产气井,展现出该层系良好的天然气勘探前景,但其能否成为该盆地天然气规模勘探的重要层系,还取决于是否具备天然气大面积成藏的地质条件。为回答上述疑问,从烃源条件、颗粒滩分布、风化壳型岩溶储层分布及成因等 3 个方面开展了研究。结果表明:①茅口组缓坡颗粒滩体在广元—广安—重庆以西地区大面积分布,为储层形成奠定了地质基础;②全球海平面下降导致的区域性侵蚀面有利于大面积岩溶型储层的形成;③下志留统龙马溪组、茅一段—茅二 c 层及上二叠统龙潭组等 3 套主力烃源岩与茅口组风化壳岩溶储层构成“三明治式”源—储成藏组合,是天然气大面积成藏的关键。进而分析了茅口组天然气的富集条件,提出了有利勘探方向与目标。结论认为:①该盆地茅口组具备大面积天然气成藏的地质条件;②侵蚀微古地貌及后期走滑断裂改造控制了该区大型缝洞体的分布,颗粒滩—风化壳岩溶—走滑断裂“三位一体”控制了该区天然气富集高产的有利区带;③川中高石梯—磨溪地区走滑断裂发育,茅口组天然气成藏条件良好,是天然气规模勘探的有利地区。

关键词 四川盆地 中二叠世 茅口组 天然气大面积成藏 地质条件 颗粒滩 风化壳岩溶 源—储组合 勘探区

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.01.004

Geological conditions for massive accumulation of natural gas in the Mid-Permian Maokou Fm of the Sichuan Basin

Wang Zecheng, Jiang Qingchun, Huang Shipeng, Zhou Hui, Feng Qingfu, Dai Xiaofeng, Lu Weihua & Ren Mengyi
(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 1, pp.30-38, 1/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: In the past few years, a number of high-productivity gas wells were drilled in the Mid-Permian Maokou Fm in the northwestern and central parts of the Sichuan Basin. This set of strata appears to have bright prospects in natural gas exploration. To determine if it has necessary geological conditions for the massive accumulation of natural gas, we conducted a study in three aspects, i.e. conditions of hydrocarbon source rocks, distribution of grain beaches, and distribution and origin of weathered crust karst reservoirs. The following findings were obtained. First, the Maokou Fm gentle-slope grain beaches are distributed extensively in the areas to the west of Guangyuan—Guang'an—Chongqing, laying a reliable geological foundation for the formation of reservoirs. Second, the global sea-level fall led to the formation of regional erosion surfaces, which eventually promoted the formation of massive karst reservoirs. Third, three major sets of hydrocarbon source rocks (Lower Silurian Longmaxi Fm, Mao-1—Mao-2^c, and Upper Permian Longtan Fm) and the weathered crust karst reservoir of Maokou Fm formed a "sandwich-type" source-reservoir assemblage, which is the key to the massive accumulation of natural gas. On this basis, the gas enrichment conditions in the Maokou Fm were analyzed, and favorable exploration orientation and targets were proposed. In conclusion, the Maokou Fm in the basin has necessary geological conditions for the massive accumulation of natural gas. Besides, the erosion palaeogeomorphology and later strike-slip faults reworked and controlled the distribution of large fractures and cavities in the study area, and the combination of grain beaches, weathered crust karsts, and strike-slip faults controlled the favorable zones for the enrichment and high-productivity of natural gas. Moreover, the Gaoshiti—Moxi area in the central Sichuan Basin, where strike-slip faults are developed and there are favorable gas accumulation conditions in the Maokou Fm, is an ideal option for scale natural gas exploration.

Keywords: Sichuan Basin; Mid-Permian; Maokou Fm; Massive accumulation of natural gas; Geologic conditions, Grain beach; Weathered crust karsts; Source-reservoir assemblage; Exploration zone

基金项目: 国家科技重大专项“下古生界—前寒武系碳酸盐岩油气成藏规律、关键技术及目标评价”(编号: 2016ZX05004-001)。

作者简介: 汪泽成, 1966 年生, 教授级高级工程师, 博士; 主要从事含油气盆地构造与油气地质方面的研究工作。地址: (100083) 北京市海淀区学院路 20 号 910 信箱地质所。ORCID: 0000-0002-3904-5017。E-mail: wangzecheng@petrochina.com.cn

研究表明,中国古老克拉通盆地海相碳酸盐岩具备大型化成藏条件^[1-3],主要包括:相对稳定的构造环境、“广覆式”烃源岩及晚期规模生烃、层状或似层状储集层大面积分布以及地层一岩性圈闭集群式分布等。勘探已证实,我国海相碳酸盐岩大油气田以地层一岩性油气藏为主体,单个油气藏储量丰度低,但油气藏呈集群式分布,总体规模大。

四川盆地中二叠统茅口组作为早期勘探的主力含气层系,在2007年之前的50余年勘探历程中,仅在蜀南地区发现一批裂缝性气藏为主的小型气田^[4]。近10年来的甩开勘探,先后在川西北、川中地区发现了一批高产气井,初步展示了该层系良好的勘探前景。然而,茅口组能否成为四川盆地天然气规模勘探的主力层系?关键问题在于其是否具备天然气大面积成藏的条件。近年来,笔者研究团队紧紧围绕这一问题持续开展研究,完成了大量的老井复查、地层划分对比、沉积相研究与岩相古地理制图、储层特征与分布预测、烃源岩评价、气藏解剖等基础性工作,提出了有利勘探区带与目标。本文重点分析茅口组成藏条件,以期推进对该领域的勘探潜力认识和勘探部署工作。

1 勘探成果及启示

中二叠统是四川盆地天然气勘探最早的层系之一,早期勘探主要集中在蜀南地区。基于“溶洞沿裂缝分布”^[5-7]的认识及勘探不断深入,勘探模式由早期的“一占一沿”“三占三沿”,发展为“断层裂缝圈闭六项布井原则和模式”^[5]。

近几年,按照“跳出蜀南寻找新区带,突破裂缝探索储层新类型”的勘探思路,对中二叠统栖霞组一茅口组开展区域甩开勘探,在川中古隆起斜坡、川西北九龙山背斜及山前断裂带均获高产工业气流,显示出良好的天然气勘探前景。

通过总结四川盆地中二叠统多年来的天然气勘探成果,得出如下认识:

1) 中二叠统天然气资源丰富,资源探明率不足6%,勘探潜力大。新近完成的资源评价结果显示,中二叠统天然气资源量为 $1.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$,而已获探明储量仅为 $811.68 \times 10^8 \text{ m}^3$,剩余天然气资源丰富。

2) 中二叠统发育裂缝一溶洞型和白云岩孔洞型两类主要储集层。绝大多数井钻遇裂缝一溶洞型储层,且以茅口组为主,仅少数井钻遇白云岩储层且变化快。川西南地区汉深1、周公1等井,川西北地

区矿2、双探2、双探3等井,川中地区南充2、广探2等井分别钻遇栖霞组和茅口组白云岩储层。

3) 中二叠统茅口组在全盆地均有勘探发现,且盆地内中二叠统现有勘探开发成果主要集中在茅口组,如蜀南地区中二叠统已探明储量中茅口组储量占98%。川中一川西地区中二叠统16口出气井中茅口组产层井就占了15口。

4) 蜀南地区裂缝一溶洞型气藏开发效果较好。以自2井为代表的一批高产井,累计产量高、效益好,单井累计产量超 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的井140多口,其中大于 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的井1口(自2井),大于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的井8口。

60余年的勘探成果揭示,四川盆地中二叠统茅口组具备大面积天然气成藏的可能性。

2 茅口组天然气大面积成藏的条件

四川盆地中二叠统包括梁山组、栖霞组、茅口组,为一套海侵背景下的碳酸盐岩沉积^[8]。茅口末期,经历了东吴运动,导致了茅口组普遍遭受剥蚀^[9-11]。晚二叠世的海侵作用,使得龙潭组与茅口组呈假整合接触。区域性的构造演化为茅口组天然气的大面积成藏奠定了基础。下文从中二叠统烃源岩的再认识、茅口组颗粒滩分布、风化壳型岩溶储层形成与分布等方面,分析茅口组成藏条件。

2.1 茅口组发育良好的烃源条件

四川盆地栖霞组一茅口组气藏存在3套潜在烃源岩,从下至上依次为下志留统龙马溪组泥岩、中二叠统栖霞一茅口组石灰岩和上二叠统龙潭组煤系。

龙马溪组是四川盆地主力烃源岩层系之一^[12],不仅形成了川东石炭系常规气藏群,更是目前中国页岩气勘探开发的主力层系。烃源岩在乐山一龙女寺古隆起轴部缺失,斜坡区大面积分布,川东、蜀南地区厚度介于100~600 m。有机质类型为腐泥型, TOC 介于0.50%~8.75%, R_o 介于2.0%~4.5%,生气强度介于 $20 \times 10^8 \sim 80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[13]。

龙潭组(吴家坪组)发育海陆过渡相一海相的泥质烃源岩和煤系,有机质类型和厚度变化上明显受控于沉积环境^[14],盆地中部一南部发育龙潭组煤系烃源岩^[15],盆地北部发育吴家坪组和大隆组海相泥质烃源岩。龙潭组烃源岩厚度介于10~140 m, TOC 主要分布在3%~5%, R_o 介于1.9%~2.9%^[16]。

中二叠统栖霞组和茅口组以石灰岩为主,烃源

岩厚度介于 150 ~ 200 m, 大多数层段有机碳含量偏低。为了进一步明确中二叠统烃源岩质量及分布, 笔者立足于钻井资料, 在实测岩心 TOC 基础上 (表 1), 建立了自然伽马曲线与实测 TOC 值的关系 ($GR = 38.501 \times TOC + 20.201$, $R^2 = 0.8789$), 运用自然伽马测井评价 TOC 方法, 对全盆地 117 口井栖霞组—茅口组烃源岩进行了评价。

1) 中二叠统栖霞组—茅口组计算烃源岩 TOC 与实测 TOC 相关性较好 (计算 $TOC = 0.7556 \times$ 实测 $TOC + 0.203$, $R^2 = 0.7243$)。

2) 栖霞组烃源岩岩性以泥质灰岩为主, 主要分布在栖霞一段, 烃源岩厚度 10 ~ 70 m, 具有西薄东厚特征, 有机碳含量分布范围在 0.5% ~ 2.0%, 为差—中等烃源岩。

3) 茅口组烃源岩岩性以泥质灰岩、生物灰岩为主, 主要分布在茅一段和茅二 c 层 (图 1), 在川西南地区茅四段也发育烃源岩段, 厚度介于 30 ~ 200 m, 西薄东厚特征明显, 有机碳含量分布范围为 0.5% ~ 3.0%, 为中等—好级别烃源岩。

综上所述后认为, 茅口组为天然气主要目的层, 纵向上发育龙马溪组、茅口组一段—茅二 c 层及龙潭组 (吴家坪组) 3 套烃源岩, 为天然气大面积成藏奠定了烃源基础。

2.2 茅口组茅二—茅三段颗粒滩分布特征

四川盆地茅口期继承了栖霞期沉积古地理格局, 总体表现为西南高、东北低的缓坡台地格局 (图 2)。浅缓坡带主要分布在绵阳—安岳—泸州以西地区, 岩性以亮晶生屑灰岩、亮晶藻屑灰岩及泥晶生屑灰岩为主, 颗粒滩厚度介于 60 ~ 100 m, 典型相序表现为高能颗粒滩和滩间海。中缓坡带主要分布在广元—广安—重庆以西地区, 岩性以中等能量的生屑灰岩为主, 局部发育亮晶生屑灰岩, 滩间以泥灰岩为主, 颗粒滩厚度介于 30 ~ 80 m, 典型相序表现为中缓坡颗粒滩及滩间海为主。深缓坡带主要分布在广元—广安—重庆以东地区, 岩性以生屑泥晶灰岩和泥灰岩为主, 典型相序表现为深缓坡台洼及灰泥丘为主。茅口组颗粒滩在盆地中西部大面积分布, 累计厚度大于 30 m 的颗粒岩分布面积超过 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$, 为似层状岩溶储层的形成奠定了物质基础。

由于茅口组颗粒滩体单层厚度只有 5 ~ 15 m, 因此地震预测颗粒滩难度较大。为了进一步明确颗粒滩体空间分布, 笔者基于川中地区的钻井资料, 采用测井相构型方法识别颗粒滩体空间分布, 即: 根据测井 GR 值和曲线形态, 建立高能环境颗粒滩以及滩间低能环境含泥质灰岩的测井响应模型。

研究表明, 茅口组纵向上发育两期颗粒滩: 第

表 1 四川盆地中二叠统栖霞组—茅口组典型单井岩心实测 TOC 表

构造	井号	层位	深度 /m	岩性	TOC	构造	井号	层位	深度 /m	岩性	TOC
SL	S6	茅一段	4 161.5	深灰色泥晶灰岩	0.67%	DCG	C6	茅二段	2 861.0	深灰色生物碎屑灰岩	3.09%
		茅一段	4 174.8	灰色泥晶灰岩	0.80%			茅二段	2 845.0	深灰色泥晶灰岩	0.89%
		茅一段	4 183.0	灰色细晶灰岩	0.52%		C10	茅三段	2 781.0	深灰色泥晶灰岩	2.46%
		茅一段	4 186.0	灰色泥晶灰岩	1.15%			茅三段	2 778.5	深灰色泥晶灰岩	1.00%
		茅一段	4 191.3	深灰色泥质灰岩	2.66%	WLH	W79	茅二段	4 714.5	灰黑色石灰岩	1.50%
ZJC	Z8	茅一段	4 569.6	深灰色泥晶灰岩	0.54%			茅二段	4 712.5	灰黑色泥晶灰岩	0.93%
		茅一段	4 562.0	深灰色泥晶灰岩	0.43%			茅二段	4 705.0	灰色泥晶灰岩	0.49%
		茅一段	4 548.3	深灰色泥晶灰岩	0.35%			茅二段	4 689.0	灰色泥晶灰岩	0.59%
		茅二段	3 903.0	深灰色石灰岩	0.32%			茅三段	4 685.0	灰色泥晶灰岩	0.71%
A16	茅二段	茅二段	3 895.1	深灰色石灰岩	0.40%	WJB	WJ1	茅二段	3 903.2	灰黑色泥晶灰岩	0.71%
		茅二段	3 879.5	深灰色泥晶灰岩	0.58%			栖霞二段	4 031.3	深灰色泥晶灰岩	0.55%
		茅二段	3 986.1	深灰色粉晶灰岩	0.24%			栖霞二段	4 012.0	深灰色泥晶灰岩	0.77%
SGP	G2	茅二段	3 961.4	深灰色泥晶灰岩	0.78%			栖霞二段	3 998.2	深灰色泥晶灰岩	1.19%
		茅二段	3 955.6	深灰色泥晶灰岩	0.26%	JLS	L17	栖霞二段	5 872.1	灰色泥晶灰岩	0.87%
DCG	C6	茅二段	2 866.4	生屑灰岩	1.06%			栖霞二段	5 860.5	灰色泥晶灰岩	0.91%
		茅二段	2 864.4	深灰色生物碎屑灰岩	0.93%			栖霞二段	5 856.4	灰色泥晶灰岩	1.25%

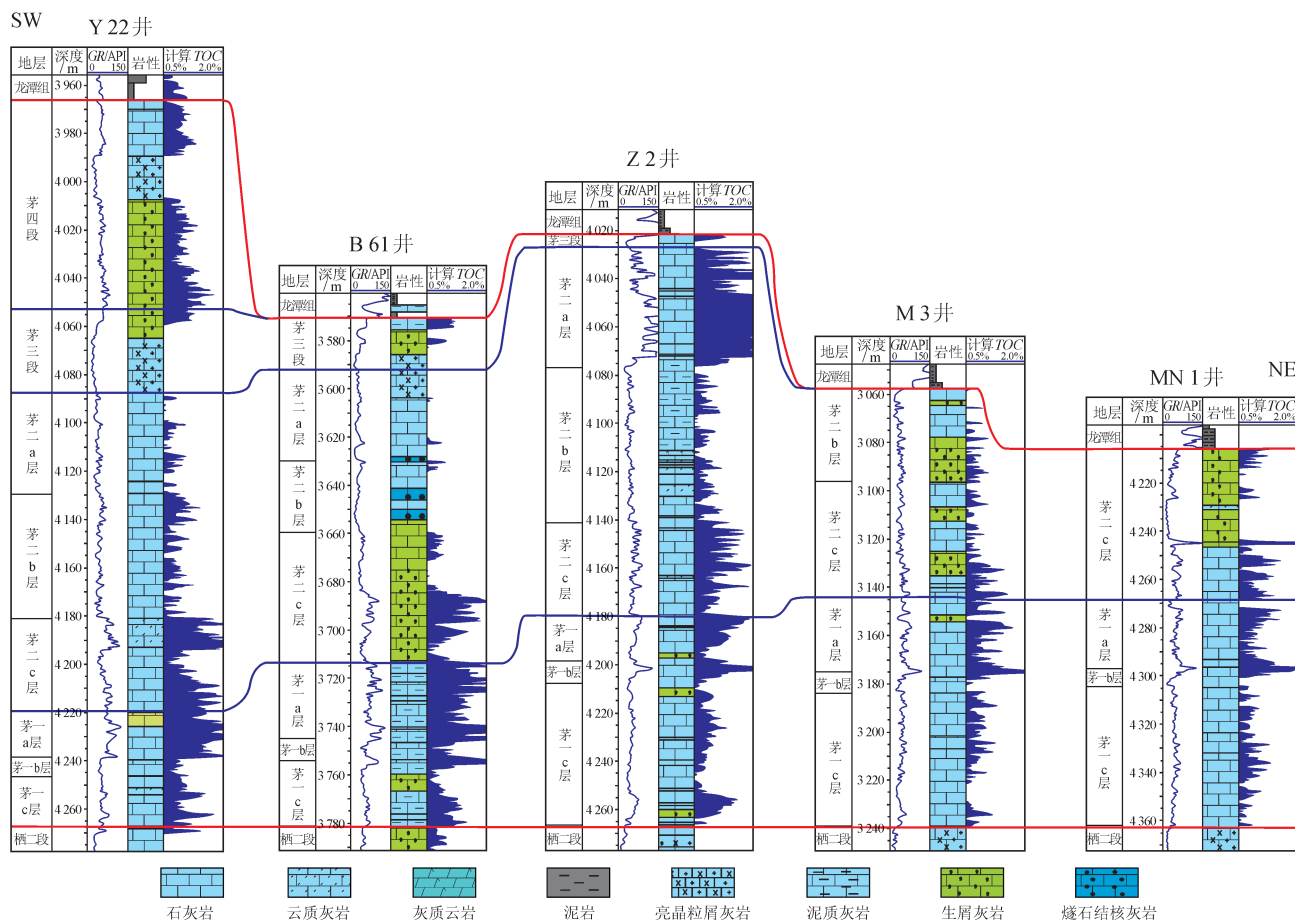


图 1 四川盆地茅口组烃源岩 TOC 纵向分布图

一期颗粒滩主要发育于茅二 b 层、第二期颗粒滩则主要发育于茅二 a 层—茅三段。第一期颗粒滩测井响应表现以测井相类型 3 (LF3) 型为主, 单个滩体厚度介于 5~10 m, 平面上主要分布于高石梯—磨溪(以下简称高磨)、威远地区, 其余地区零星分布。第二期颗粒滩体测井响应表现以 LF1 型和 LF2 型为主(图 3), 单个滩体厚度介于 10~15 m, 川中地区广泛分布。

2.3 茅口组风化壳型岩溶储层分布特征及成因

四川盆地茅口组普遍发育风化壳岩溶储层^[17]。层序地层对比表明, 岩溶储层段主要分布在茅口组二段、三段^[17]。基于层序地层对比以及牙形石带缺失分析, 笔者曾提出了四川盆地存在面积可超过 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的东吴期古隆起, 命名为“泸州—通江古隆起”, 指出古隆起斜坡带是风化壳岩溶储层发育的有利地区^[18]。图 4 是在补充新近钻井资料基础上修改完善的茅口组岩溶古地貌与颗粒岩厚度叠合图。按残留地层厚度可分为“侵蚀高地”“侵蚀上斜坡”“侵蚀下斜坡”3 个侵蚀地貌单元。侵蚀高地分布在盆地西南地区及川东石柱地区, 主要特征为茅四段部分被

保留; 侵蚀上斜坡分布在南充—泸州一带, 主要特征为茅四段剥蚀殆尽、茅三段部分遭受剥蚀; 侵蚀下斜坡分布在川北地区, 主要特征为茅三段剥蚀殆尽, 茅二段部分遭受剥蚀。侵蚀上斜坡区茅三段颗粒岩发育, 长期遭受风化淋滤作用, 有利于形成溶蚀孔洞型储层。

“东吴运动”性质是水平挤压的造山(褶皱)运动^[19]还是整体抬升的升降运动, 目前存在争议^[20]。笔者认为, 这一运动受控于晚古生代全球冰期, 是冰期全球海平面下降导致的区域性侵蚀作用。主要有如下证据: ①晚古生代全球冰期始于泥盆纪末, 鼎盛于石炭纪—早二叠世, 可延续到中晚二叠世^[21-23], 冰期海平面下降幅度为 20~120 m^[24]。二叠纪, 扬子陆块呈“孤岛”立于古特提斯洋^[25], 更易于受海平面升降变化影响。茅口组中期开始下降, 末期大幅度快速下降到最低点, 扬子大部分地区准平原化^[26]。②受全球海平面下降影响, 茅口组顶部地层普遍缺失。欧美等全球大部分地区茅口组顶部缺失 1~2 个化石带; 华南地区缺失 2 个以上牙形化石带, 四川盆地北部地区缺失 4~6 个牙形化石带。③在广西蓬莱滩^[27-28]、

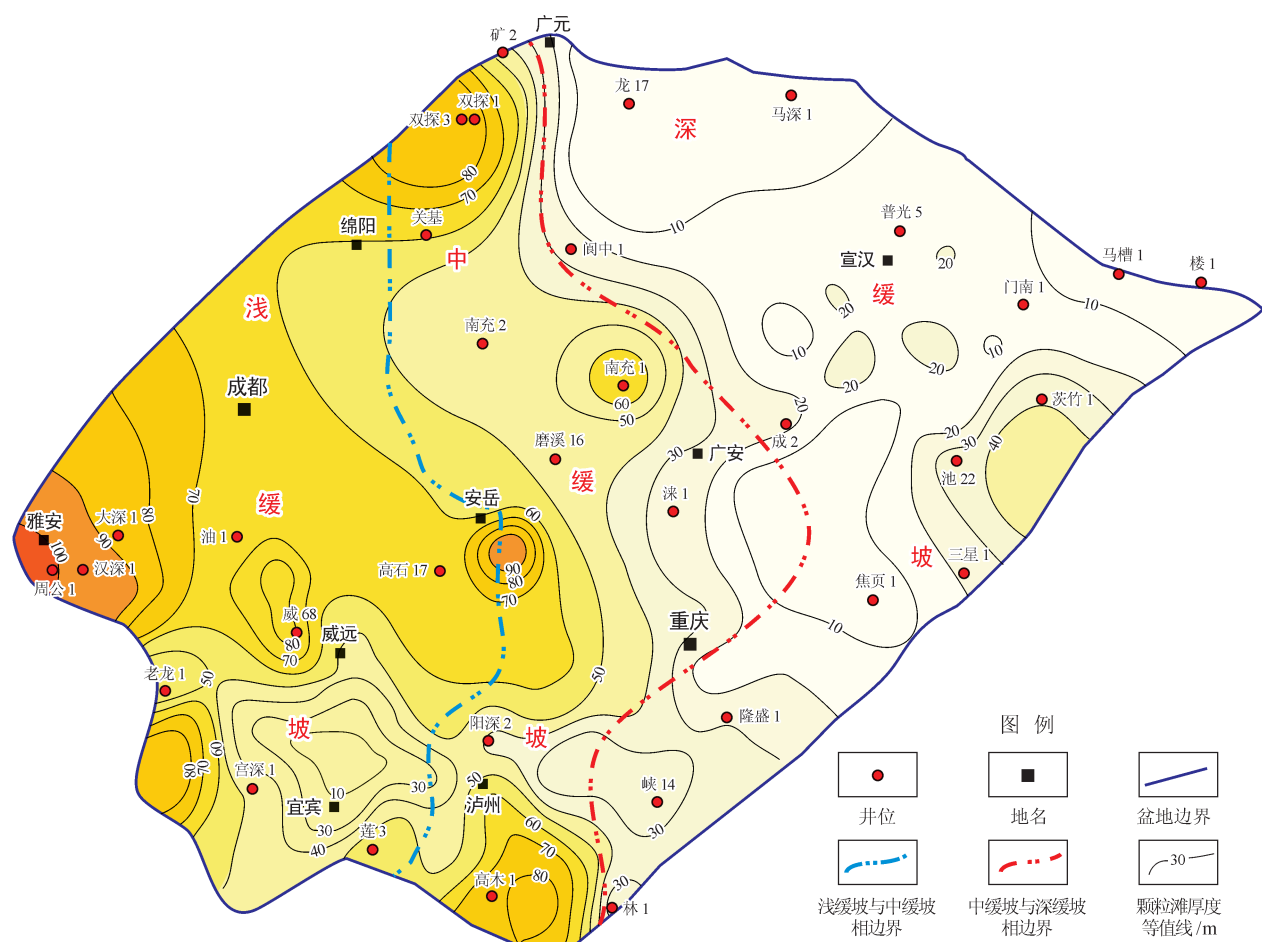


图 2 茅口组岩相古地理及颗粒滩厚度等值线图

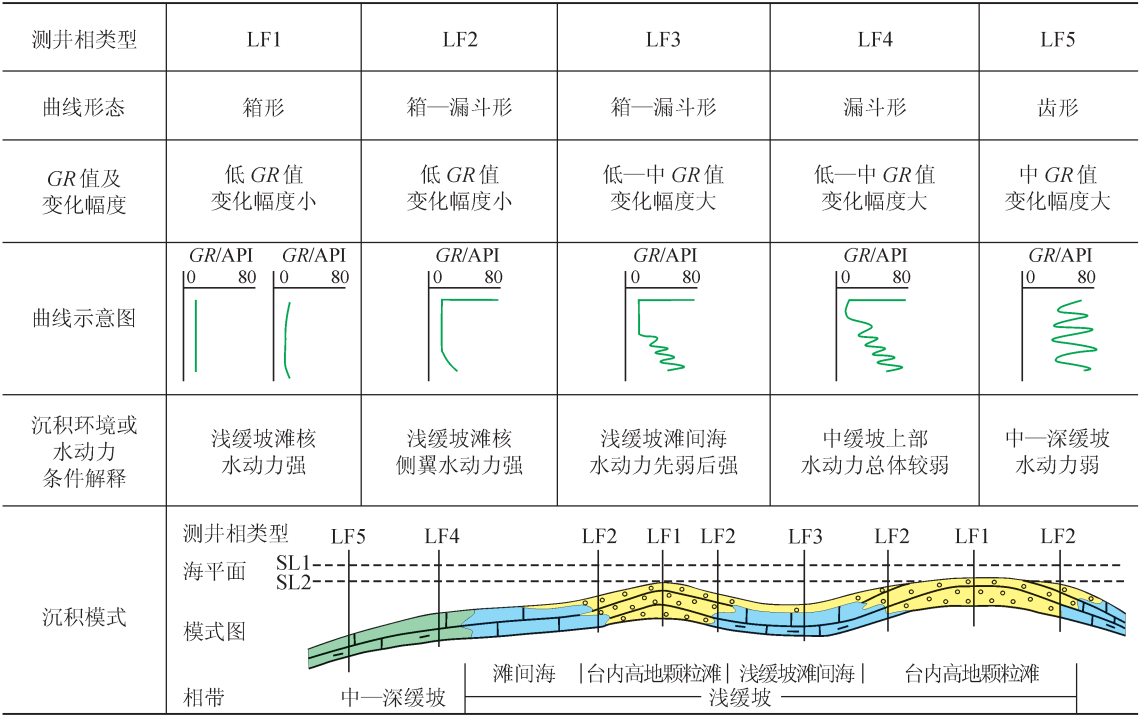


图 3 茅口组第二期（茅二 a 层—茅三段）颗粒滩及滩间洼地的测井响应特征图

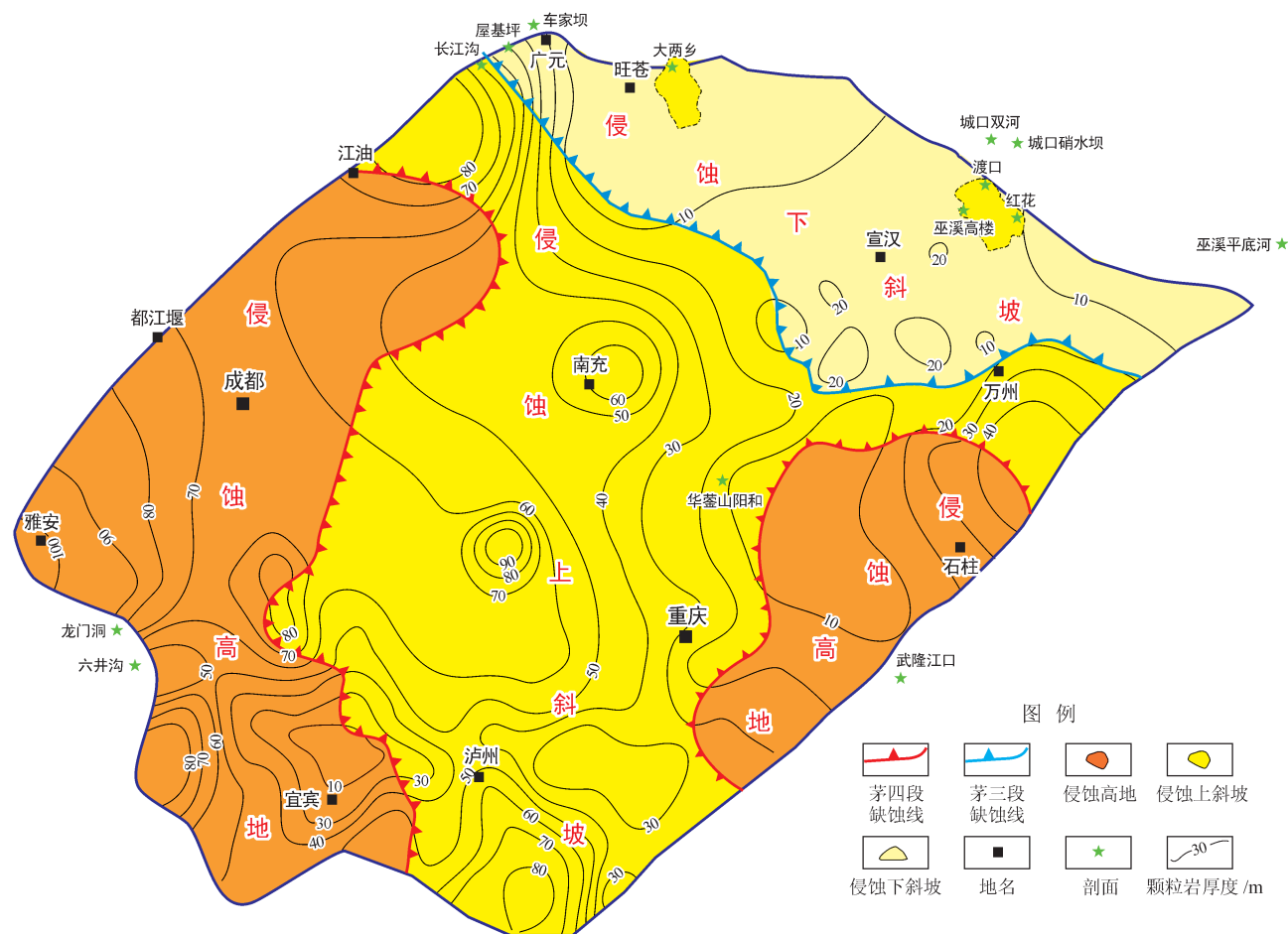


图 4 茅口组岩溶古地貌与颗粒岩厚度叠合图

川西北上寺、川东北渡口等剖面^[29]，均可见茅口组上部无机碳同位素出现正漂移、吴家坪组底部出现负漂移，表明茅口末期发生冰川作用，而吴家坪期冰川发生消融。

基于上述认识，建立了四川盆地茅口—吴家坪期沉积古地理演化剖面（图 5），茅口组沉积期四川盆地主体为碳酸盐岩缓坡沉积，川北地区为深缓坡—斜坡相沉积，大巴山地区发育盆地相。茅口组沉积后，发生受全球冰期影响的海平面下降，剥蚀基准面可能下降到茅口组下部，其上覆地层均遭受剥蚀，沉积地层厚值区剥蚀后的残留地层多，沉积地层薄值区剥蚀后的残留地层少，西南高北东低的古构造格局没有发生改变。吴家坪期海平面上升，茅口组剥蚀后的古构造格局仍得以保存，沉积环境及相带的平面展布和茅口组相似。川北地区茅口组剥蚀层位多，按照“隆升剥蚀”的观点，该地区要比四川盆地其他地区隆升的更高，但是在吴家坪期，该地区又迅速变为深水相沉积。这种急剧的构造格局变化难以用“隆升剥蚀”解释。而利用“海平面下降导致地层侵蚀”

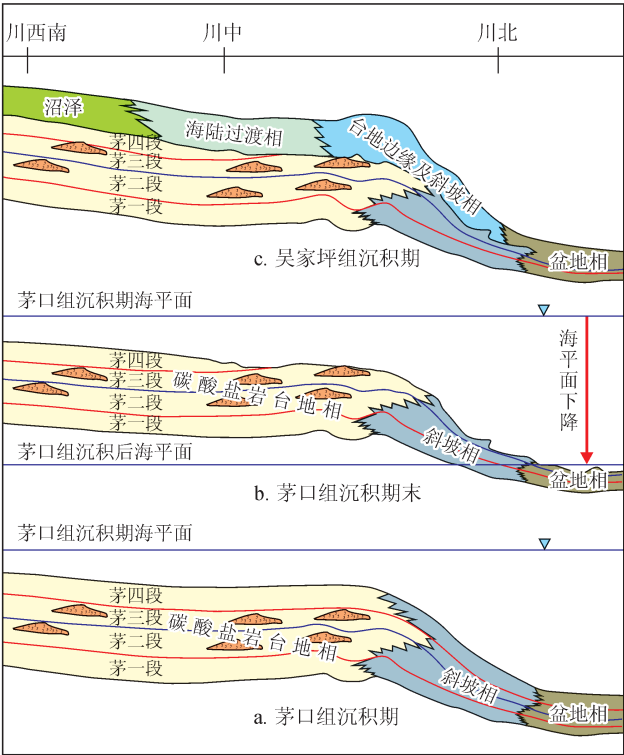


图 5 四川盆地茅口—吴家坪期沉积古地理演化剖面示意图

的观点,则合理地解释了四川盆地北部地区茅口组剥蚀层位多与吴家坪组深水沉积两者之间的矛盾。

中二叠统茅口组纵向上存在 3 套烃源岩,颗粒

滩在盆地中西部大面积分布,风化壳岩溶储层在盆地内普遍发育,源储关系配置良好,构成“三明治”式成藏组合(图 6),具备大面积天然气成藏的条件。

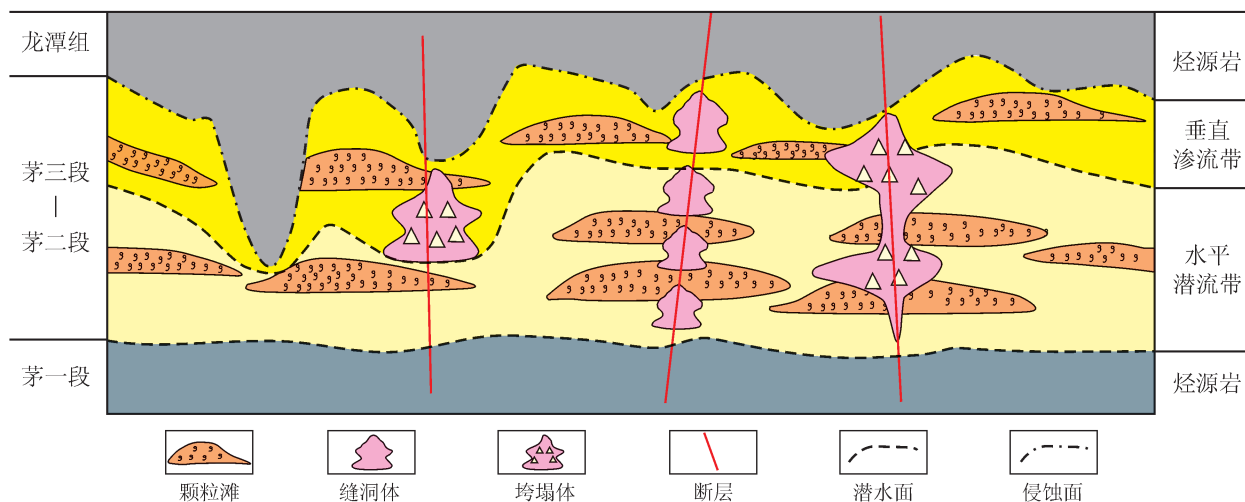


图 6 川中—蜀南地区茅口组缝洞型储层分布与成藏模式图

3 茅口组天然气富集条件

勘探揭示,尽管茅口组存在普遍含气现象,但钻遇的储层发育程度及单井产量变化大,富集高产有利区评价优选是当前勘探面临的主要问题。研究表明,有利的侵蚀微古地貌及走滑断裂发育带是评价富集高产区的因素。

3.1 侵蚀古地貌对岩溶储层的控制作用

对于碳酸盐岩风化壳储层而言,岩溶储层分布受侵蚀古地貌控制。宏观上,蜀南及高磨地区茅口组均处于侵蚀上斜坡带(图 4),颗粒滩发育,具备形成大面积岩溶储层条件。微观上,侵蚀面微古地貌如溶蚀洞的垮塌体、侵蚀沟槽的侧翼、侵蚀河谷(暗河和明河)等,岩溶储层厚度大、储集条件更为有利。蜀南茅口组大型的洞缝系统主要发育在古溶沟翼部及岩溶垮塌体边缘。这些大型洞缝系统一旦含气,可形成单体储量规模均超过 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的缝洞型气藏,如阳 7- 阳 33 井、阳 43 井、井 9 等气藏。

3.2 走滑断裂相关的大型洞缝系统有利于天然气富集高产

相对稳定的克拉通盆地腹部通常发育大型走滑断裂带,不仅有利于油气运移,而且有利于改善储层物性,是油气富集高产的有利区带。这一认识越来越引起勘探家的高度重视,并用于指导塔里木等盆地碳酸盐岩缝洞型油气藏勘探部署^[30-31]。

四川盆地中新生代受周缘构造运动影响,华蓥山断裂以西的广大地区普遍发育高角度走滑断裂。除少数规模较大的断裂向上进入中浅层碎屑岩,大多数断裂向上未穿越中三叠统膏盐岩层。通过解剖研究蜀南荷包场及川中高磨两个三维地震工区,分析走滑断裂带的储层特征及含气性。研究表明:

1) 走滑断裂有利于形成大型缝洞体,纵向多层缝洞体叠置(图 6),平面串珠状分布。基于三维地震资料,荷包场地区可识别出两条主走滑断裂,一条位于包 24 井—包 42 井一线,呈 NNE 向展布,另一条位于包 21 井—包 33 井一线,呈 NE 向展布。钻井证实,沿这两条走滑断裂带岩溶缝洞体发育,已发现包 33、包 46、包 21 等富集高产的含气缝洞体。

2) 断裂沟通气源,断裂与风化壳岩溶缝洞叠合区含气性好。高磨地区钻穿茅口组的钻井很多,由于不是钻探的主要目的层,绝大多数井未在茅口组试气。对该区 63 口井茅口组储层及含气性开展测井评价。结果表明:有 25 口井岩溶发育,单井累计储层厚度大于 15 m、平均有效孔隙度大于 3.5%,主要分布在高石梯及磨溪现今构造高部位和斜坡区与古岩溶地貌较高部位的叠合区;41 口井解释出“气层”或“差气层”,占 65%;22 口井解释出“水层”或“干层”,占 35%,表现出不完全受构造控制的大面积含气特点,但“气层”井呈现出沿断裂分布的特点。

4 结论

1) 四川盆地茅口组具备大面积天然气成藏地质条件。茅口组缓坡颗粒滩体在广元—广安—重庆以西地区大面积分布,为储层形成奠定了物质基础;全球海平面下降导致的区域性侵蚀面有利于大面积岩溶型储层形成;三套主力烃源岩(龙马溪组、茅一段—茅二c层及龙潭组)与茅口组风化壳岩溶储层构成“三明治式”源—储成藏组合,是天然气大面积成藏的关键。

2) 侵蚀微古地貌及后期走滑断裂改造控制了大型缝洞体分布,颗粒滩—风化壳岩溶—走滑断裂“三位一体”控制了天然气富集高产的有利区带。

3) 川中高磨地区走滑断裂发育,茅口组成藏条件良好,是勘探值得重视的有利区。

参 考 文 献

- [1] 赵文智,汪泽成,胡素云,潘文庆,杨雨,包洪平,等. 中国陆上三大克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化形成条件与特征[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 1-10.
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Hu Suyun, Pan Wenqing, Yang Yu, Bao Hongping, et al. Large-scale hydrocarbon accumulation factors and characteristics of marine carbonate reservoirs in three large onshore cratonic basins in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 1-10.
- [2] 赵文智,沈安江,胡素云,张宝民,潘文庆,周进高,等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12.
Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, Zhang Baomin, Pan Wenqing, Zhou Jingao, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 1-12.
- [3] 刘树根,孙玮,钟勇,田艳红,吴娟,王国芝,等. 四川叠合盆地深层海相碳酸盐岩油气的形成和分布理论探讨[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 15-27.
Liu Shugen, Sun Wei, Zhong Yong, Tian Yanhong, Wu Juan, Wang Guozhi, et al. Discussion on the theories of the hydrocarbon formation and distribution of the deep-seated marine carbonates in the Sichuan superimposed basin, China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 15-27.
- [4] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志: 卷十 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.
Sichuan Oil and Gas Field Drafting Group of Petroleum Geology of China. Petroleum geology of China: Volume 10[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [5] 刘仲宣,夏绍文. 川西南地区二叠系阳新统有效裂缝分布规律与布井方法探讨[J]. 天然气工业, 1991, 11(3): 1-7.
Liu Zhongxuan & Xia Shaowen. Distribution rules of the effective fractures in Yangxin series of Permian in southwest Sichuan and a discussion on the method of location of wells[J]. Natural Gas Industry, 1991, 11(3): 1-7.
- [6] 陈宗清. 川西南地区二、三叠系碳酸盐岩断带裂缝气藏[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 37-43.
Chen Zongqing. Fractured gas pools in Permian and Triassic carbonate rock faulted zone of south-west Sichuan region[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(3): 37-43.
- [7] 陈更生,岳宏. 四川盆地川西南地区下二叠统气藏类型及有效缝洞分布规律[J]. 天然气工业, 1995, 15(6): 10-13.
Chen Gengsheng & Yue Hong. Gas reservoir types and effective fracture-vug distribution laws of Lower Permian series in the southwest area of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 1995, 15(6): 10-13.
- [8] 赵宗举,周慧,陈轩,刘银河,张运波,刘玉娥,等. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 35-51.
Zhao Zongju, Zhou Hui, Chen Xuan, Liu Yinhe, Zhang Yunbo, Liu Yu'e, et al. Sequence lithofacies paleogeography and favorable exploration zones of the Permian in Sichuan Basin and adjacent areas, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2): 35-51.
- [9] 冯少南. 东吴运动的新认识[J]. 现代地质, 1991, 5(4): 378-384.
Feng Shaonan. New knowledge on Dongwu movement[J]. Geoscience, 1991, 5(4): 378-384.
- [10] 何斌,徐义刚,王雅玫,肖龙. 东吴运动性质的厘定及其时空演变规律[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(1): 89-96.
He Bin, Xu Yigang, Wang Yamei & Xiao Long. Nature of the Dongwu movement and its temporal and spatial evolution[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(1): 89-96.
- [11] 李旭兵,曾雄伟,王传尚,刘安,白云山. 东吴运动的沉积学响应——以湘鄂西及邻区二叠系茅口组顶部不整合面为例[J]. 地层学杂志, 2011, 35(3): 299-304.
Li Xubing, Zeng Xiongwei, Wang Chuanshang, Liu An & Bai Yunshan. Sedimentary response to the Dongwu movement: A case of the unconformity on top of the Permian Maokou Formation in the western Hubei—Hunan and neighboring areas[J]. Journal of Stratigraphy, 2011, 35(3): 299-304.
- [12] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,边立曾,赵喆. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一): 南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1-16.
Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, Bian Lizeng & Zhao Zhe. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 1): Distribution of four suits of regional marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2): 1-16.
- [13] 魏国齐,李剑,杨威,张水昌. 中国陆上天然气地质与勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Wei Guoqi, Li Jian, Yang Wei & Zhang Shuichang. Geology and exploration of onshore gas in China[M]. Beijing: Science Press, 2015.

- [14] 唐涤, 张琦, 万茂霞, 李红卫, 张敏. 四川盆地上二叠统烃源条件与资源潜力分析 [J]. 天然气勘探与开发, 2011, 34(3): 1-3. Tang Di, Zhang Qi, Wan Maoxia, Li Hongwei & Zhang Min. Source rock and resource potential of Upper Permian in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2011, 34 (3): 1-3.
- [15] 曹清古, 刘光祥, 张长江, 潘文蕾. 四川盆地晚二叠世龙潭期沉积环境及其源控作用分析 [J]. 石油实验地质, 2013, 35(1): 36-41. Cao Qinggu, Liu Guangxiang, Zhang Changjiang & Pan Wenlei. Sedimentary environment and its controlling on source rocks during late Permian in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(1): 36-41.
- [16] 邹才能, 徐春春, 汪泽成, 胡素云, 杨光, 李军, 等. 四川盆地台缘带礁滩大气区地质特征与形成条件 [J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 641-651. Zou Caineng, Xu Chunchun, Wang Zecheng, Hu Suyun, Yang Guang, Li Jun, et al. Geological characteristics and forming conditions of the large platform margin reef-shoal gas province in the Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(6): 641-651.
- [17] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 池英柳, 杨雨, 鲁卫华, 等. 四川盆地茅口组风化壳岩溶地貌及勘探选区 [J]. 石油学报, 2012, 33(6): 949-960. Jiang Qingchun, Hu Suyun, Wang Zecheng, Chi Yingliu, Yang Yu, Lu Weihua, et al. Paleokarst landform of the weathering crust of Middle Permian Maokou Formation in Sichuan Basin and selection of exploration regions[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(6): 949-960.
- [18] 汪泽成, 赵文智, 胡素云, 徐安娜, 江青春, 姜华, 等. 克拉通盆地构造分异对大油气田形成的控制作用——以四川盆地震旦系—三叠系为例 [J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 9-23. Wang Zecheng, Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Xu Anna, Jiang Qingchun, Jiang Hua, et al. Control of tectonic differentiation on the formation of large oil and gas fields in craton basins: A case study of Sinian-Triassic of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 9-23.
- [19] 李四光. 中国东南部古生代后期之造山运动 [J]. 中国地质学会志, 1931, 11(2): 209-217. Lee JS. Variskian or Hercynian movement in south-eastern China[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1931, 11(2): 209-217.
- [20] 陈显群, 刘应楷, 童鹏. 东吴运动质疑及川黔运动之新见 [J]. 石油与天然气地质, 1987, 8(4): 412-423. Chen Xianqun, Liu Yingkai & Tong Peng. Query about Dongwu movement and new opinion on Chuanqian movement[J]. Oil & Gas Geology, 1987, 8(4): 412-423.
- [21] Van Den Heuvel EPJ & Buurman P. Possible causes of glaciations [M]//Herman Y. Marine geology and oceanography of the Arctic Seas. Berlin Heidelberg: Springer, 1974.
- [22] Smith LB Jr & Read JF. Rapid onset of Late Paleozoic glaciation on Gondwana: Evidence from upper Mississippian strata of the Midcontinent, United States[J]. Geology, 2000, 28(3): 279-282.
- [23] Smith LB & Read JF. Discrimination of local and global effects on Upper Mississippian stratigraphy, Illinois Basin, USA[J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(6): 985-1002.
- [24] Golonka J & Ford D. Pangean (Late Carboniferous-Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2000, 161(1/2): 1-34.
- [25] 李江海, 杨静懿, 马丽亚, 王洪浩. 显生宙烃源岩分布的古板块再造研究 [J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1683-1698. Li Jianghai, Yang Jingyi, Ma Liya & Wang Honghao. A study of the distribution of source rocks in Phanerozoic based on paleoplate reconstruction[J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1683-1698.
- [26] 王成善, 李祥辉, 陈洪德, 覃建雄. 中国南方二叠纪海平面变化及升降事件 [J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 536-541. Wang Chengshan, Li Xianghui, Chen Hongde & Qin Jianxiong. Permian sea-level changes and rising-falling events in South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(4): 536-541.
- [27] Jin YG, Shen SZ, Henderson CM, Wang XD, Wang W, Wang Y, et al. The global stratotype section and point (GSSP) for the boundary between the Capitanian and Wuchiapingian stage (Permian)[J]. Episodes, 2006, 29(4): 253-262.
- [28] 韦雪梅, 江增光, 白玛曲宗, 韦恒叶. 广西来宾蓬莱滩剖面瓜德鲁普统一乐平统 (G-L) 界线生境型及其意义 [J]. 东华理工大学学报 (自然科学版), 2016, 39(4): 331-340. Wei Xuemei, Jiang Zengguang, Baima Quzong & Wei Hengye. The habitat type and its significance of Guadalupian-Lopingian (G-L) boundary in Penglaitan section, Guangxi[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Science), 2016, 39(4): 331-340.
- [29] 乔彦国, 时志强, 王艳艳, 张彪. 四川广元上寺剖面晚二叠世—早三叠世旋回地层: 基于小波分析的 P-T 界线地质事件探讨 [J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 403-410. Qiao Yanguo, Shi Zhiqiang, Wang Yanyan & Zhang Biao. The Late Permian-Early Triassic cyclostratigraphy in Shangsi section of Guangyuan area, Sichuan Province: Implications for P-T geological event based on wavelet analysis[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 403-410.
- [30] 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 李慧莉, 白振瑞, 焦存礼, 等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域 [J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 3-14. He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, Li Huili, Bai Zhenrui, Jiao Cunli, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 3-14.
- [31] 杨海军, 韩剑发. 塔里木盆地轮南复式油气聚集区成藏特点与主控因素 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(增刊 2): 53-62. Yang Haijun & Han Jianfa. Accumulation characteristics and the main controlling factors of Lunnan multilayer oil province, Tarim Basin, China[J]. Scientia Sinica Terrae, 2007, 37(S2): 53-62.

(修改回稿日期 2017-12-12 编辑 罗冬梅)