

# 四川盆地南缘二叠系茅口组构造-沉积分异及控储效应

孟宪武<sup>1</sup>, 陈安清<sup>2,3</sup>, 李雯<sup>2,3</sup>, 苏成鹏<sup>1</sup>, 孙诗<sup>2,3</sup>,  
宋晓波<sup>1</sup>, 黄光辉<sup>2,3</sup>, 雍茹男<sup>2,3</sup>, 王泽宇<sup>2,3</sup>, 朱茜<sup>2,3</sup>

1. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 成都 610041;

2. 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

3. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059

**[摘要]** 四川盆地作为中国海相碳酸盐岩油气的主力产区,在盆地震旦系、寒武系和二叠系发现多个大型油气聚集带。与蕴含巨量油气的二叠系长兴组礁滩相储层相比,二叠系茅口组碳酸盐岩储层以往一直被认为是裂缝、缝洞型储层,油气勘探未取得重大突破。最近,在川中地区茅口组台缘相带显示具有良好白云岩储层,其形成背景与基底断裂活化导致构造-沉积分异密切相关。川南地区在茅口期亦发生基底断裂活动,但对于该地区是否发育类似的台缘相带仍不明确。通过开展详细的野外露头和钻井资料分析,开展了构造-沉积分异和岩相古地理重建研究。结果表明,川南地区茅口组发育碳酸盐开阔台地、台地边缘和深水陆棚相,具有由浅水台缘滩向深水陆棚转换形成的构造-沉积分异结构。岩相古地理重建结果显示中二叠系茅口组沉积期碳酸盐台地发育优质滩相储层,并受白云石化和溶蚀作用改造。在此基础上,建立了川南地区的构造-沉积分异控储模式,揭示了台缘相带的“宽边缘、薄滩体、间断加积”特性。

**[关键词]** 构造-沉积分异;古地理重建;滩相储层;茅口组;四川盆地

**[分类号]** TE122

**[文献标志码]** A

## Platform margin tectono-sedimentary differentiation and reservoir control effects of the Permian Maokou Formation, southern margin of Sichuan Basin

MENG Xianwu<sup>1</sup>, CHEN Anqing<sup>2,3</sup>, LI Wen<sup>2,3</sup>, SU Chengpeng<sup>1</sup>, SUN Shi<sup>2,3</sup>,  
SONG Xiaobo<sup>1</sup>, HUANG Guanghui<sup>2,3</sup>, YONG Runan<sup>2,3</sup>, WANG Zeyu<sup>2,3</sup>, ZHU Qian<sup>2,3</sup>

收稿日期:2024-01-06; 改回日期:2024-03-11。 责任编辑:魏 威。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(42272132);中国石化西南油气分公司勘探开发研究院项目(34450000-22-ZC0607-0038)。

第一作者:孟宪武(1978—),男,高级工程师,研究方向:石油天然气勘探,E-mail:zlmxw@sohu.com。

通信作者:陈安清(1981—),男,教授,研究方向:沉积地质学,E-mail:aiqnth@163.com。

引用格式:孟宪武,陈安清,李雯,等,2025.四川盆地南缘二叠系茅口组构造-沉积分异及控储效应[J].成都理工大学学报(自然科学版),52(1):94-107.

Meng X W, Chen A Q, Li W, et al., 2025. Platform margin tectono-sedimentary differentiation and reservoir control effects of the Permian Maokou Formation, southern margin of Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 52(1):94-107.

1. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Southwest Branch Company, Chengdu 610041, China;
2. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications of Ministry of Natural Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract:** As the main production area of marine carbonate oil and gas in China, multiple large oil and gas accumulation zones have been discovered around Sinian, Cambrian, and Permian systems in Sichuan Basin. Compared with the reef/shoal facies reservoir in the Permian Changxing Formation, which contains large quantities of oil and gas, the carbonate reservoir in the Permian Maokou Formation has been always treated as a fractured and/or fractured-vuggy reservoir, wherein no major detection of oil and gas has been made. Recently, the platform margin facies belt of the Maokou Formation in the central Sichuan Basin has shown good dolomite reservoirs, whose formation background is closely related to tectono-sedimentary differentiation caused by basement fault activation. During the Maokou period, basement fault activity also occurred in the southern Sichuan Basin. However, it is still unclear whether similar platform margin facies have developed in this region. This article conducts a detailed analysis of field outcrop and drilling data, investigating tectono-sedimentary differentiation and lithofacies paleogeographic reconstruction. The results show that the Maokou Formation in the southern Sichuan Basin has developed carbonate platforms, platform margins, and deep-water shelf facies, with a tectono-sedimentary differentiation structure formed by the transition from a shallow water, platform margin beach to a deep-water shelf. The lithofacies paleogeographic reconstruction show that high-quality beach facies reservoirs developed on the carbonate platform during the sedimentary period of the middle Permian Maokou Formation, and were subjected to dolomitization and dissolution transformation. On this basis, a tectono-sedimentary differentiation control reservoir model is established for the southern Sichuan Basin, which reveals the characteristics of wide margin, thin beach bodies and intermittent aggradation in the platform margin facies belt.

**Key words:** tectono-sedimentary differentiation; paleogeographic reconstruction; beach facies reservoir; Maokou Formation; Sichuan Basin

碳酸盐岩油气储层在世界油气分布中占有重要地位,其油气储量约占全球油气总储量 50%,油气产量达到全球油气总产量 60% 以上(范嘉松,2005;谷志东等,2012)。四川盆地深层海相碳酸盐岩是中国天然气勘探的重点领域,资源量约占该盆地常规天然气总资源量的 85%(马新华等,2019)。目前已在震旦系灯影组、寒武系龙王庙组、二叠系长兴组等层位发现多个大型油气聚集带,已探明天然气储量超万亿立方(马永生等,2006;陈洪德等,2007;田景春等,2012;陈安清等,2017a,2017b;张玺华等,2020)。

茅口组是四川盆地二叠系油气勘探开发的重要层系,自 20 世纪 50 年代开始,茅口组油气勘探集中在蜀南地区,主要针对东吴运动造成的表生岩溶储层。近年随着勘探程度逐渐深入,最新研究表明川中地区在茅口中期受活动基底断裂活化影响,发生显著构造-沉积分异作用(张玺华等,2018,2019;Dong et al.,2020;王兴志等,2021;杨

雨等,2023),形成北西-南东向深水裂陷槽,沿裂陷槽边缘发育稳定大型台缘带,位于台缘带上的角探 1 井、蓬阳 1 井及磨溪 039-H2 井均显示具有优质白云岩储层(宋晓波等,2016;杨跃明等,2020;杨雨等,2023;何文渊等,2023)。在构造-沉积分异作用下,凹陷区和隆起区分别控制了优质烃源岩和优质储层的发育,最终控制了油气资源分布(马永生等,2020;刘树根等,2022)。四川盆地南缘在茅口期同样具有基底断裂活动,并且大量野外剖面 and 钻井资料显示川南地区在茅口中期发育典型深水硅泥质沉积(孟琦,2022),暗示该地区存在台地-陆棚的沉积相带分异,但对其是否也发育规模性台地边缘储集相带尚不清楚,制约了该地区茅口组油气勘探。

本研究基于四川盆地南缘茅口组野外剖面实测和钻井资料系统梳理,通过开展沉积相划分,在此基础上重建了岩相古地理格局,精细刻画了茅口中期的台缘分异结构,结合储层发育特征建立

了构造-沉积分异控储模式,以期为研究区下一步茅口组滩相储层的勘探开发提供理论依据与科学指导。

### 1 地质背景

二叠纪时期,华南板块位于低纬度赤道附近(图 1-A),东部毗邻泛大洋的深海盆地,北部、西部和南部均被古特提斯洋围绕(Scotese and Langford,1995;Hou et al.,2020)。华南板块由扬子板块和华夏板块拼合而成,两者之间为江南盆地和右江盆地。四川盆地位于扬子地台西北部,是典型的多旋回性克拉通盆地(刘树根等,2011;何登发等,2011;陈洪德和郭彤楼,2012)。在晚石炭世一早二叠世,受云南运动影响,四川盆地以构造隆升为主,盆地大范围缺失下二叠统地层(陈洪德等,1999)。梁山期开始初步海侵,形成一套海陆过渡相沉积(张启明等,2012;黄涵宇等,2017)。栖霞期一茅口期,随着冈瓦纳大陆冰川消融,海侵进一步扩大,发育稳定的海相碳酸盐岩沉

积(杨帅等,2021;刘树根,2022)。茅口晚期,东吴运动和峨眉山地幔柱上升共同驱动地壳快速差异抬升,伴随全球海平面在该时期下降至显生宙的最低点(Haq and Schutter,2008),造成茅口组地层抬升剥蚀。

研究区位于四川盆地南部(简称川南地区),区域构造上属于川南低陡褶皱带,主要发育北东-南西向和北西-南东向的 2 组基底断裂。研究区范围西起凉山甘洛,东至重庆彭水,北达广安华蓥,南抵贵州大方(图 1-B)。本次研究的茅口组(P<sub>2</sub>m)与下伏栖霞组(P<sub>2</sub>q)呈整合接触,与上覆龙潭组煤系地层或峨眉山玄武岩呈不整合接触。研究区内茅口组地层厚度约为 150~300 m,自下而上划分为 4 段,分别为茅一段、茅二段、茅三段和茅四段。茅一段发育深灰色灰岩-泥灰岩韵律旋回,宏观上可见明显的“眼皮眼球”构造;茅二段主要为灰色泥晶灰岩和浅灰色生物碎屑灰岩,局部出现白云石化现象;茅三段-茅四段发育深灰色泥灰岩、泥晶灰岩和含燧石结核或条带灰岩(图 1-C)。

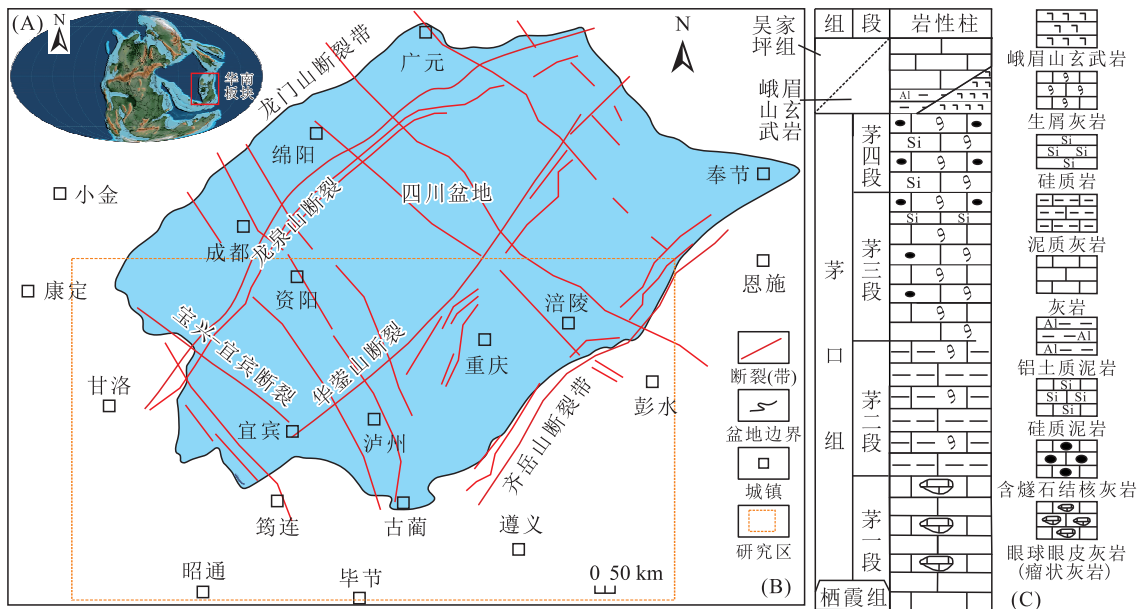


图 1 研究区地质背景  
Fig. 1 Geological background of the study area

(A)中二叠世全球古地理复原图(引自 Scotese,2021);(B)研究区构造位置图(引自 杨帅等,2021);  
(C)研究区茅口组综合柱状图

### 2 沉积相分析

通过开展野外剖面实测,系统梳理钻井资料,并进行室内镜下岩石薄片观察和鉴定。基于 Tucker and Tucker (1981)提出的陆表海碳酸盐台地模式,本文将川南地区中二叠统茅口组划分为 3

类沉积相,分别为台地相、台地边缘相和陆棚相。

#### 2.1 台地相

##### 2.1.1 开阔台地

开阔台地在研究区茅口组广泛发育(图 2),并受构造运动和海平面变化等多因素影响,发育多种类型的微环境,主要为台内滩和滩间海。其中,台

内滩主要发育含生屑灰岩(低能滩),亮晶生屑灰岩或云质灰岩(高能滩);滩间海主要发育泥晶灰岩和

含生屑泥晶灰岩。开阔台地通常具有丰富生物碎屑,主要为腕足、双壳、棘皮、蠕类和海百合等。

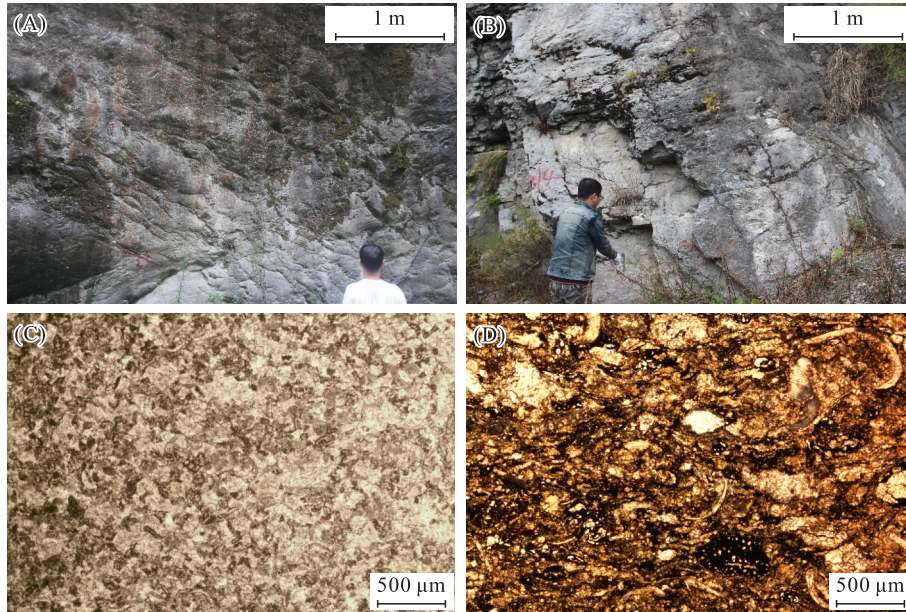


图 2 开阔台地沉积特征

Fig. 2 Sedimentary characteristics of the open platform facies

(A)燕子岩剖面,茅二段,含生屑泥晶灰岩;(B)新基姑剖面,茅一段,含生屑泥晶灰岩;  
(C)TY1井,茅三段,深度2672.7m,云质灰岩;(D)JH1井,茅一段,深度2891.5m,亮晶生屑灰岩

2.1.2 淹没台地

相对于开阔台地,淹没台地的沉积水体明显加深,泥质含量较高,岩性主要为深灰色泥晶灰

岩、泥质灰岩、泥粒灰岩和泥页岩(图3)。淹没台地具有丰富的小型薄壳生物,如双壳、腕足等。在研究区内,淹没台地主要发育在茅一段。

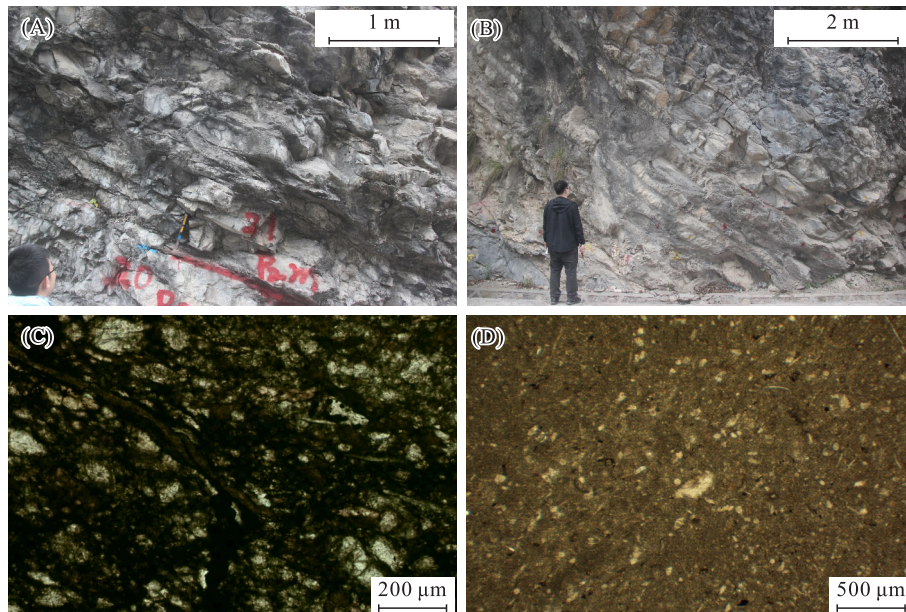


图 3 淹没台地沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of the drowned platform facies

(A)三道水剖面,茅一段,眼皮眼球灰岩;(B)铁索桥剖面,茅一段,眼皮眼球灰岩;  
(C)YY9井,茅一段,泥质灰岩;(D)羊角剖面,茅一段,粒泥灰岩

## 2.2 台地边缘相

研究区内台地边缘是浅水台地与深水陆棚的过渡相带,主要发育台缘滩相,其沉积水体能量相对较高,适宜海洋生物繁盛(图 4)。台缘滩按照水动力条件可分为低能滩和高能滩。低能滩的主要特征为生物较为完整,含少量砂屑;高能滩的主要特征为亮晶胶结,生物较破碎。来

自 TY3 井茅口组岩石薄片揭示典型的白云岩化,菱形晶体明显,可见尺寸约为 0.5~1 mm 的小个体生物,以有孔虫、腕足为主,保存相对完整,推断应为台缘低能浅滩。JS101 井茅口组生屑含量较高,可达 80%,生物保存较破碎,生物类型主要为腕足、海百合茎、有孔虫等,指示其为台缘高能浅滩。

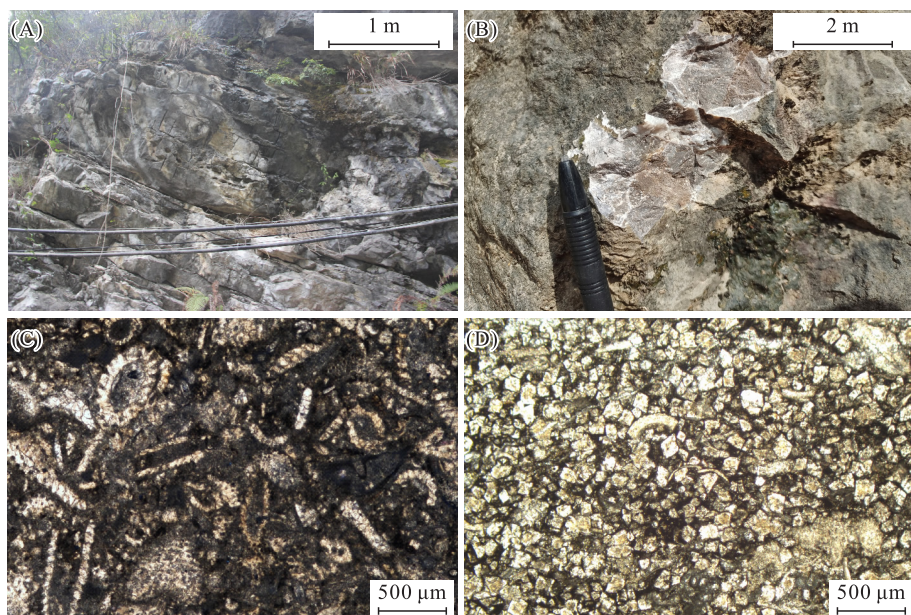


图 4 台缘滩相沉积特征

Fig. 4 Sedimentary characteristics of the platform margin beach facies

(A) 椿木乡剖面,茅二段,亮晶生屑灰岩;(B) 硃底剖面,茅二段,白云岩;  
(C) JS101 井,茅二段,深度 2 398.2 m,生屑灰岩;(D) 硃底剖面,茅二段,白云岩

## 2.3 陆棚相

研究区内深水陆棚主要发育在茅口中晚期,分布范围为茅二段-茅四段。深水陆棚的沉积水体相对较深,主要发育薄层深灰色或黑色硅质灰岩,硅质岩及硅质泥岩,有机质含量较高,具放射虫和海绵骨针等生物(图 5)。

## 3 川南茅口组岩相古地理分布

在川南地区茅口组沉积相分析基础上,本研究根据 50 余口钻井和 20 余条剖面等基础资料,开展茅口组各段对应地层厚度、颗粒灰岩厚度、白云岩(云质灰岩)厚度、泥质灰岩厚度及硅质岩厚度等单因素统计,结合地震剖面,明确各单因素在研究区的分布特征,重建茅口组岩相古地理格局,揭示茅口早期-茅口中期的岩相古地理转换。

茅一段沉积期,全盆发生整个二叠纪甚至晚古生代以来的区域最大海泛事件(王成善等,1999;陈洪德等,1999)。栖霞期发育的局限台地在茅一段时期完全消退,转化为开阔台地,岩性主要为含生屑微晶灰岩和生屑微晶灰岩。经历了栖霞期的填平补齐和以较深水沉积为主的茅口初期海侵的进一步沉积填平后,加里东古地貌不再对研究区的沉积起控制性作用(杨雨等,2023;冯许魁等,2023)。但在茅口早期最大海泛事件的背景下,川南地区雅安一带依旧为茅一段时期的古地貌高部位,继承性发育较小规模的台内滩。在开阔台地内部也发育有较小规模的生屑滩,岩性以生屑灰岩和云质灰岩为主。受海侵作用影响,研究区沉积水体变深,沉积物中泥质含量更高,主要发育泥灰岩、泥晶灰岩、含生屑微晶灰岩,主体沉积环境处于水动力较弱的淹没台地(图 6-A)。

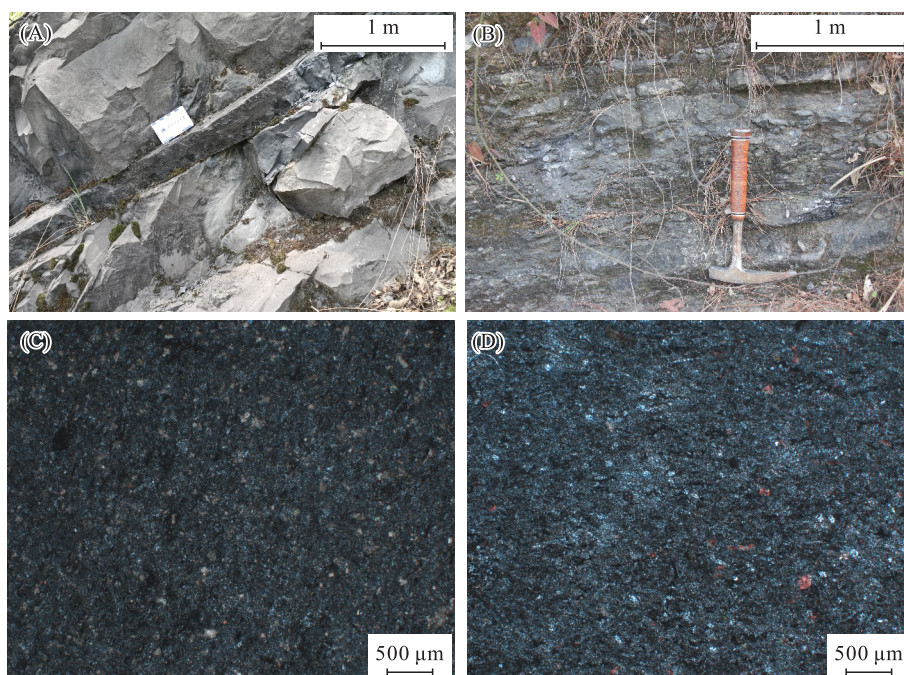


图 5 陆棚相沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics of the shelf facies

(A) 桑树村剖面, 茅二段, 薄层硅质岩; (B) 白果坪剖面, 茅三段, 薄层硅质泥岩;  
(C) 桑树村剖面, 茅二段, 硅质岩; (D) 白果坪剖面, 茅三段, 硅质岩

茅二段沉积期, 岩相古地理格局发生显著转变, 伴随海平面大幅度下降, 盆地大部分地区由茅一段时期的淹没台地转变为开阔台地。但在盆地南部受峨眉山大火成岩省隆升效应背景下的同沉积断裂影响, 区域构造-沉积分异作用加剧, 研究区岩相古地理分布表现为浅水台缘滩和深水陆棚同时发育的分异格局。台缘滩带在宜宾—古蔺—泸州一带沿断裂带展布方向发育呈“半岛”状分布(图 6-B), 岩性以白云岩、云质灰岩和亮晶颗粒灰岩为主, 生屑含量较高。同时, 开阔台地内部发育一些台内滩, 水动力条件相较于台缘滩较弱, 岩性主要为含生屑泥晶灰岩。而在台缘带南侧(遵义—贵阳地区)和东侧(石柱—南川地区)发育深水陆棚相(图 6-B), 岩性以泥质灰岩与硅质岩为主, 具有海绵骨针和放射虫等深水标志生物。

#### 4 构造-沉积分异控储作用

构造-沉积分异是大型沉积盆地对其周边或内部应力环境的响应结果, 伴随原型盆地性质的转变, 沉积盆地内部表现为不同部位的差异构造作用(古隆起、古裂隙-拗陷), 由此造成的地层层

序、岩相、充填物质等相应变化, 最终控制了油气成藏组合和发育过程(马永生等, 2006; 何登发等, 2022)。在构造-沉积分异下, 凹陷区和隆起区分别控制了优质烃源岩和优质储层的发育, 而隆凹相间格局则奠定了源储配置关系, 有利于油气从生油岩侧向运移到储集层中聚集成藏。

构造沉积分异的控储作用在四川盆地二叠系表现得非常典型(陈洪德等, 2006; 马永生等, 2017; 陈安清等, 2017a; 杨雨等, 2020; 张玺华等, 2020; 罗开平等, 2020; 孟宪武等, 2021; 李龙龙等, 2023), 构造差异隆升或沉降导致古地貌上的隆凹, 伴随海平面升降, 使得不同地区沉积相和充填物表现出明显差异, 岩相和岩性在空间上呈交错叠置的特点。有人认为川东中二叠世茅口期台内生物礁发育受基底断裂活动形成的“台块-台槽”型的构造-沉积分异格局所控制(罗冰等, 2015); 也有人认为川西北中二叠世茅口晚期受区域构造活动影响, 形成构造-沉积分异相关的深水槽, 深水槽两侧的台缘带具有良好勘探前景(张玺华等, 2019; 李雯等, 2023)。

##### 4.1 川南深水凹陷分布特征

中二叠世, 泛大陆由先前聚合转为逐渐裂解,



同时华南板块发生东吴运动(何斌等, 2005; 梁新权等, 2013)和峨眉山地幔柱隆升(徐义刚等, 2017; Huang et al., 2022)等构造事件。在全球及区域构造活跃背景下, 四川盆地发育多组基底断裂, 这些断裂带控制了盆地内部及其周缘的多个构造-沉积分异区, 如开江—梁平海槽、蓬溪—武胜台洼和绵阳—长宁海槽等。本次研究的川南地区同样发育多组基底断裂(图 6-B), 暗示该地区可能受构造-沉积分异作用影响, 具有典型深水凹陷区。

基于研究区野外剖面和钻井资料显示, 在川东南—黔北地区茅口组中部发育薄层硅质岩和泥质灰岩, 同时具有海绵骨针和放射虫等深水生物, 指示其为深水低能陆棚区(图 7)。而在深水陆棚

区北侧的古蔺—泸州一带和资阳地区茅口组中部发育白云岩和亮晶颗粒灰岩, 并且具有较为丰富的生物碎屑, 指示其沉积环境为浅水高能台缘滩。研究区台缘滩由多期次发育滩体组成, 单期滩体厚度较薄, 一般在几米到十几米之间, 滩体的发育和终止与海平面变化密切相关。当海平面下降, 沉积水体变浅, 水动力条件增强, 有利于浅滩形成扩大; 当海平面上升, 沉积水体加深, 水动力条件减弱, 造成浅滩萎缩。此外, 不同于长兴组巨厚的台缘礁滩, 研究区茅口组厚度不大的台缘浅滩在一定程度上削弱了台缘带的障壁作用, 导致滩体向岸后深处发育, 在平面上形成绵延数千米到数十千米的大面积台缘滩。

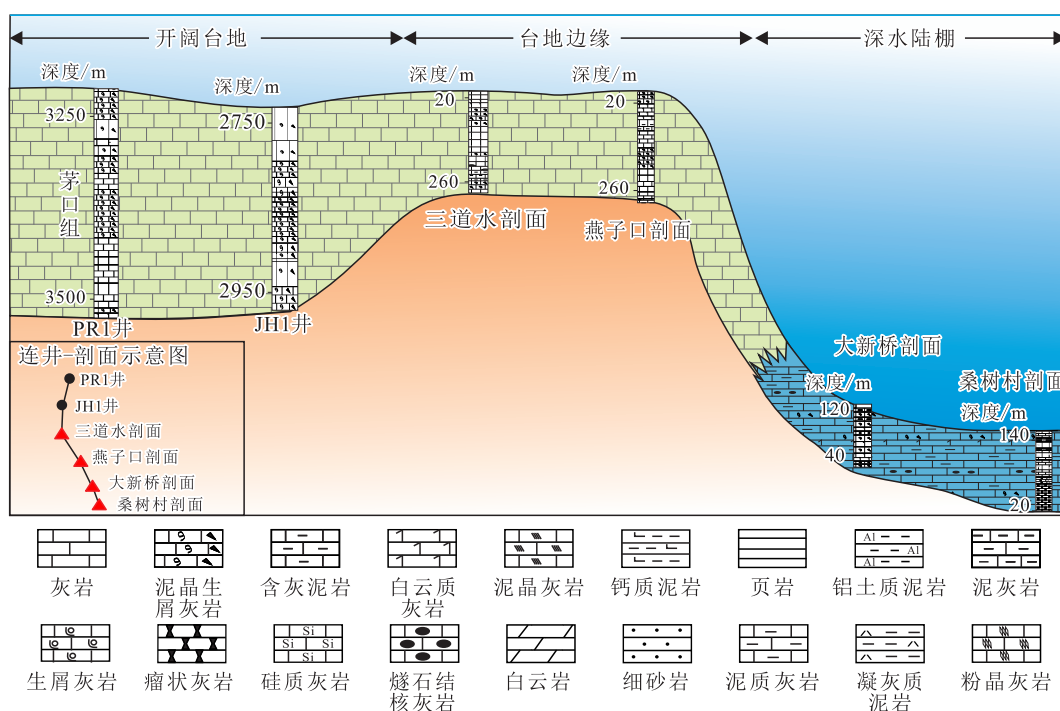


图 7 川南地区茅口组沉积充填结构

Fig. 7 Sedimentary filling structure of the Maokou Formation in the southern Sichuan Basin

#### 4.2 构造-沉积分异控储模式

川南地区茅口组台缘滩储层类型主要分为白云岩孔洞型和灰岩裂缝型。白云岩孔洞包括白云石化产生的白云石晶间孔和后期溶蚀作用产生的溶蚀孔洞(图 8-A~C)。扫描电镜可见大量毫米级及微米级的溶蚀孔洞、晶间孔和晶间溶孔, 多为早期颗粒间孔隙受岩溶作用和白云石化作用改造形成(图 8-D~F)。灰岩裂缝型储层可见多条微裂缝, 裂缝贯穿生物及晶体, 多为后期构造运动

所致(图 8-G,H)。此外, 镜下显示还存在少量的生物格架孔(图 8-I), 可能与溶蚀作用有关。

白云化储层是碳酸盐岩储层的主要类型, 这是由于其在深埋条件下更容易保持孔隙, 白云岩储层的有效孔隙形成源于前驱灰岩、封闭体系下的白云岩化作用以及成岩过程中的溶蚀改造。二叠系茅口组白云岩通常主要发育在台缘滩或台内滩等浅水高能区, 受相带控制明显(陈洪德等, 2007; 郝毅等, 2020; 杨雨等, 2023)。例如在

开江—梁平海槽等构造沉积分异区,台缘滩带有利于白云石化作用的发生,并且作为地貌高点亦为溶蚀作用提供有利条件(徐胜林等,2011;张玺华等,2018)。川南地区在茅口中期受基底断裂带活化影响,发生构造-沉积分异作用,由先前统一开阔台地转变为台缘滩-深水陆棚并存的分异格局(图 9),结合该时期岩相古地理分布特征,表明台地边缘带规模可以达到数十公里宽。研究区台

缘滩的空间分布受海平面变化影响,随着海侵作用开始萎缩,并在海退之后再次大规模发育。此外,随着全球海平面在茅口中期开始持续下降至显生宙以来的最低点(Haq and Schutter,2008;沈树忠等,2019),同时叠加峨眉山大火成岩省和东吴运动的双重影响,进一步加剧了川南地区构造-沉积分异作用,扩大了台缘滩分布范围,从而更加有利于白云岩化。

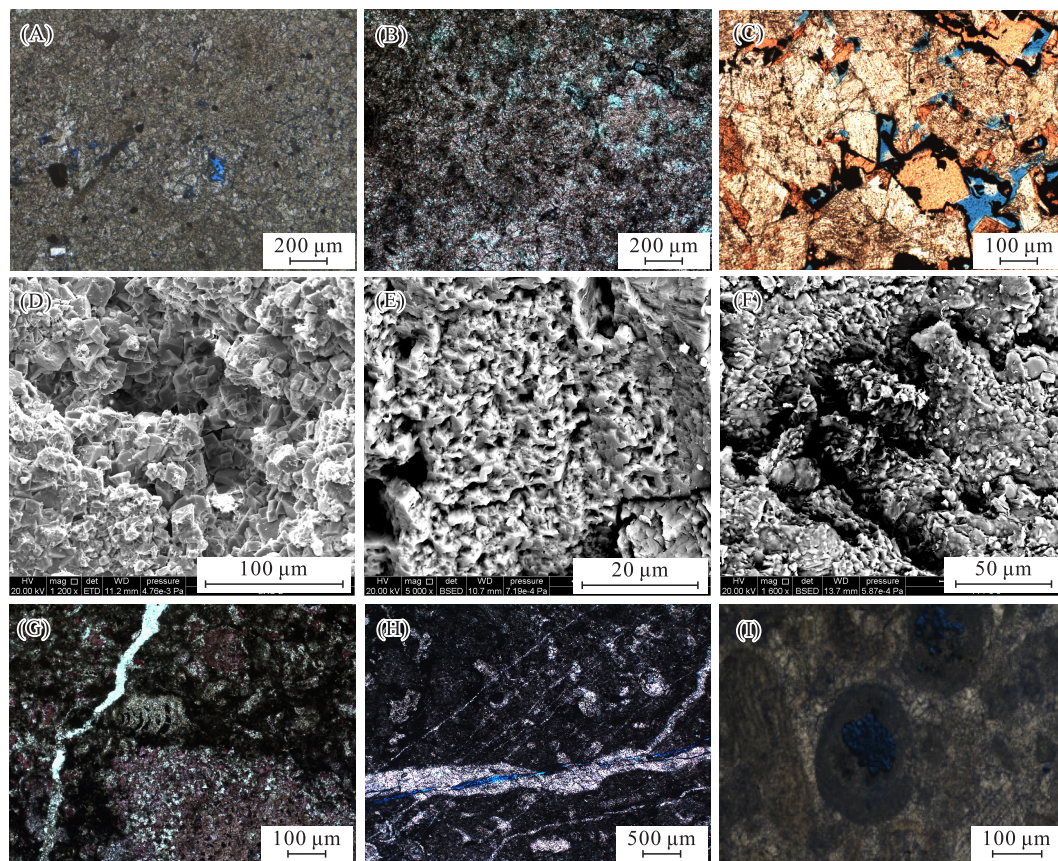


图 8 川南地区茅口组储层典型照片

Fig. 8 Typical reservoir photos of the Maokou Formation in the southern Sichuan Basin

(A)JS101 井,白云石溶蚀孔,茅二段,深度 4 759 m;(B)TY1 井,白云石溶蚀孔,茅二段,深度 2 709 m;  
(C)桐底剖面,白云石粒间孔和溶蚀孔,茅二段;(D)桐底剖面,白云石粒间孔和溶蚀孔,茅二段;(E)芭蕉村剖面,  
白云石溶蚀孔,茅二段;(F)TY1 井,白云石溶蚀孔,茅二段,深度 2 709 m;(G)TY1 井,茅二段,深度 2 738 m,  
微裂缝;(H)JH1 井,茅二段,深度 2 743.43 m,微裂缝;(I)JH1 井,茅二段,深度 2 775.03 m,生物格架孔

基于川南地区茅口组沉积相分析和岩相古地理重建,表明在构造-沉积分异作用下,台缘滩和陆棚构成典型的台缘分异结构和良好源储配置(图 9)。针对该地区茅口组滩相储层,其沉积背景为受构造-沉积分异作用控制下的台缘带,伴随茅口期频繁海平面升降,最终形成薄滩体+宽边缘+白云石化+间断加积的滩体类型。综上所述,位于宜宾—泸州和资阳—邻水地区的台缘滩

带是川南地区茅口组的有利储层分布区,值得进一步勘探,实现新的突破。

## 5 结论

a. 根据野外剖面和钻井资料,将川南地区中二叠统茅口组划分为台地、台地边缘和陆棚等 3 类沉积相,其中台地相可以分为开阔台地和淹没台地,台地边缘相以台缘滩为主。



- tologica Sinica, 35(5):1054—1062. (in Chinese)
- 陈安清, 杨帅, 陈洪德, 等, 2017b. 陆表海台地沉积充填模式及内克拉通碳酸盐岩勘探新启示[J]. 岩石学报, 33(4):1243—1256.
- Chen A Q, Yang S, Chen H D, et al., 2017b. The sedimentary filling model of epeiric platform and new inspiration of innercratonic carbonate for oil & gas exploration[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(4):1243—1256. (in Chinese)
- 陈洪德, 郭彤楼, 侯明才, 等, 2012. 中上扬子叠合盆地沉积充填过程与物质分布规律[M]. 北京: 科学出版社.
- Chen H D, Guo T L, Hou M C, et al., 2012. Sedimentary Filling Process and Material Distribution in the Middle and Upper Yangtze Superimposed Basin[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- 陈洪德, 侯明才, 许效松, 等, 2006. 加里东期华南的盆地演化与层序格架[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 33(1):1—8.
- Chen H D, Hou M C, Xu X S, et al., 2006. Tectonic evolution and sequence stratigraphic framework in South China during Caledonian[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 33(1):1—8. (in Chinese)
- 陈洪德, 庞林, 倪新峰, 等, 2007. 中上扬子地区海相油气勘探前景[J]. 石油实验地质, 29(1):13—18.
- Chen H D, Pang L, Ni X F, et al., 2007. New brief remarks on hydrocarbon prospecting of marine strata in the Middle and Upper Yangtze region[J]. Petroleum Geology & Experiment, 29(1):13—18. (in Chinese)
- 陈洪德, 覃建雄, 王成善, 等, 1999. 中国南方二叠纪层序岩相古地理特征及演化[J]. 沉积学报, 17(4):509—520.
- Chen H D, Qin J X, Wang C S, et al., 1999. Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics and evolution of Permian in South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 17(4):509—520. (in Chinese)
- 范嘉松, 2005. 世界碳酸盐岩油气田的储层特征及其成藏的主要控制因素[J]. 地学前缘, 12(3):23—30.
- Fan J S, 2005. Characteristics of carbonate reservoirs for oil and gas fields in the world and essential controlling factors for their formation[J]. Earth Science Frontiers, 12(3):23—30. (in Chinese)
- 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.
- 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. (in Chinese)
- 谷志东, 汪泽成, 胡素云, 等, 2012. 全球海相碳酸盐岩巨型油气田发育的构造环境及勘探启示[J]. 天然气地球科学, 23(1):106—118.
- Gu Z D, Wang Z C, Hu S Y, et al., 2012. Tectonic settings of global marine carbonate giant fields exploration significance[J]. Natural Gas Geoscience, 23(1):106—118. (in Chinese)
- 郝毅, 姚倩颖, 田瀚, 等, 2020. 四川盆地二叠系茅口组沉积特征及储层主控因素[J]. 海相油气地质, 25(3):202—209.
- Hao Y, Yao Q Y, Tian H, et al., 2020. Sedimentary characteristics and reservoir-controlling factors of the Permian Maokou Formation in Sichuan Basin[J]. Marine Natural Gas Geology, 25(3):202—209. (in Chinese)
- 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 等, 2005. 东吴运动性质的厘定及其时空演变规律[J]. 地球科学, 30(1):89—96.
- He B, Xu Y G, Wang Y M, et al., 2005. Nature of the Dongwu Movement and its temporal and spatial evolution[J]. Earth Science, 30(1):89—96. (in Chinese)
- 何登发, 包洪平, 高山林, 等, 2022. 构造-沉积分异原理及其地质意义[J]. 古地学报, 24(5):920—936.
- He D F, Bao H P, Gao S L, et al., 2022. Principles of tectonic-depositional differentiation and its geological significance[J]. Journal of Paleogeography (Chinese Edition), 24(5):920—936. (in Chinese)
- 何登发, 李德生, 张国伟, 等, 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 46(3):589—606.
- He D F, Li D S, Zhang G W, et al., 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 46(3):589—606. (in Chinese).
- 何文渊, 白雪峰, 蒙启安, 等, 2023. 碳酸盐台内斜坡认识突破与重大发现——以川中地区中二叠统茅口二段气藏勘探为例[J]. 中国石油勘探, 28(1):59—70.
- He W Y, Bai X F, Meng Q A, et al., 2023. New understanding and significant discovery in the inner slope of carbonate platform: A case study of gas exploration in the second member of Maokou Formation in

- Central Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 28(1):59-70. (in Chinese)
- 黄涵宇,何登发,李英强,等,2017. 四川盆地及邻区二叠纪梁山-栖霞组沉积盆地原型及其演化[J]. *岩石学报*, 33(4):1317-1337.
- Huang H Y, He D F, Li Y Q, et al., 2017. The prototype and its evolution of the Sichuan sedimentary basin and adjacent areas during Liangshan and Qixia stages in Permian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4):1317-1337. (in Chinese)
- 李龙龙,罗开平,刘栩,等,2023. 晚古生代构造-沉积分异对四川盆地二叠系多类型气藏的控制作用[J]. *石油实验地质*, 45(1):60-71.
- Li L L, Luo K P, Liu X, et al., 2023. Controlling effect of late Paleozoic tectonic and sedimentary differentiation on multi-type gas reservoirs in Permian, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 45(1):60-71. (in Chinese)
- 李雯,杨帅,陈安清,等,2023. 川西北深层中二叠统茅口组岩相古地理及勘探意义[J]. *地球科学*, 48(2):609-620.
- Li W, Yang S, Chen A Q, et al., 2023. The lithofacies paleogeographic of the Middle Permian deep Maokou Formation and its significance for hydrocarbon exploration, northwestern Sichuan Basin [J]. *Earth Science*, 48(2):609-620. (in Chinese)
- 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-ICPMS U-Pb 年龄研究[J]. *岩石学报*, 29(10):3592-3606.
- 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)
- 刘树根,李智武,孙玮,等,2011. 四川含油气叠合盆地基本特征[J]. *地质科学*, 46(1):233-257.
- Liu S G, Li Z W, Sun W, et al., 2011. Basic geological features of superimposed basin and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 46(1):233-257. (in Chinese)
- 刘树根,文龙,宋金民,等,2022. 四川盆地中二叠统构造-沉积分异与油气勘探[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 49(4):385-413.
- Liu S G, Wen L, Song J M, et al., 2022. Sedimentary topography and tectonic differentiation on the Middle Permian platform and hydrocarbon exploration in Sichuan Basin, SW China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 49(4):385-413. (in Chinese)
- 罗冰,王文飞,陈韵骐,等,2015. 四川盆地东部中二叠统茅口组台内藻礁沉积特征[J]. *海相油气地质*, 20(1):53-61.
- Luo B, Wang W F, Chen Y Q, et al., 2015. Sedimentary characteristics of Middle Permian Maokou algal framework reef rock in the east of Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 20(1):53-61. (in Chinese)
- 罗开平,曹清古,彭金宁,等,2020. 四川盆地德阳-武胜拉张槽西段构造-沉积特征及勘探领域[J]. *石油实验地质*, 42(2):163-171.
- Luo K P, Cao Q G, Peng J N, et al., 2020. Tectonic-sedimentary characteristics and exploration plays in the western section of Deyang-Wusheng intracratonic sag, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 42(2):163-171. (in Chinese)
- 马新华,杨雨,张健,等,2019. 四川盆地二叠系火山碎屑岩气藏勘探重大发现及其启示[J]. *天然气工业*, 39(2):1-8.
- Ma X H, Yang Y, Zhang J, et al., 2019. A major discovery in Permian volcanic rock gas reservoir exploration in the Sichuan Basin and its implications[J]. *Natural Gas Industry*, 39(2):1-8. (in Chinese)
- 马永生,何登发,蔡勋育,等,2017. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. *岩石学报*, 33(4):1007-1020.
- Ma Y S, He D F, Cai X Y, et al., 2017. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4):1007-1020. (in Chinese)
- 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等,2020. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. *石油与天然气地质*, 41(4):655-672+683.
- Ma Y S, Li M W, Cai X Y, et al., 2020. Mechanism and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems [J]. *Oil & Gas Geology*, 41(4):655-672+683. (in Chinese)
- 马永生,牟传龙,谭钦银,等,2006. 关于开江-梁平海槽的

- 认识[J]. 石油与天然气地质, 27(3):326-331.
- Ma Y S, Mou C L, Tan Q Y, et al., 2006. A discussion on Kaijiang-Liangping ocean trough[J]. *Oil & Gas Geology*, 27(3):326-331. (in Chinese)
- 孟琦, 2022. 中二叠世扬子碳酸盐岩台地南部沉积演化及其地质意义[D]. 武汉: 中国地质大学.
- Meng Q, 2022. Middle Permian Sedimentary Evolution of the Southern Yangtze Carbonate Platform and Its Geological Significance [D]. Wuhan: China University of Geosciences. (in Chinese)
- 孟宪武, 刘勇, 石国山, 等, 2021. 四川盆地川西坳陷中段构造演化对中三叠统雷口坡组油气成藏的控制作用[J]. *石油实验地质*, 43(6):986-1014.
- Meng X W, Liu Y, Shi G S, et al., 2021. The structural evolution of the middle section of the West Sichuan Depression in the Sichuan Basin controlled the hydrocarbon accumulation in the Middle Triassic Leikoupo Formation[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 43(6):986-1014. (in Chinese)
- 沈树忠, 张华, 张以春, 等, 2019. 中国二叠纪综合地层和时间框架[J]. *中国科学: 地球科学*, 49(1):160-193.
- Shen S Z, Zhang H, Zhang Y C, et al., 2019. Permian integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 49(1):160-193. (in Chinese)
- 宋晓波, 隆轲, 王琼仙, 等, 2016. 四川盆地西部中二叠统茅口组油气地质条件及勘探潜力[J]. *海相油气地质*, 21(1):1-6.
- Song X B, Long K, Wang Q X, et al., 2016. Petroleum geology conditions and exploration potential of Middle Permian Maokou carbonate rock in western part of Sichuan Basin[J]. *Marine Natural Gas Geology*, 21(1):1-6. (in Chinese)
- 田景春, 郭维, 黄平辉, 等, 2012. 四川盆地西南部茅口期岩相古地理[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 34(2):1-8.
- Tian J C, Guo W, Huang P H, et al., 2012. Lithofacies palaeogeography of Maokou Period in southwestern Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 34(2):1-8. (in Chinese)
- 王成善, 李祥辉, 陈洪德, 等, 1999. 中国南方二叠纪海平面变化及升降事件[J]. *沉积学报*, 17(4):536-541.
- Wang C S, Li X H, Chen H D, et al., 1999. Permian sea-level changes and rising-falling events in South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4):536-541. (in Chinese)
- 王兴志, 李博, 杨西燕, 等, 2021. 四川盆地北部中二叠世晚期“广元—旺苍”海槽特征及其油气地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 48(3):562-574.
- Wang X Z, Li B, Yang X Y, et al., 2021. Characteristics of “Guangyuan-Wangcang” trough during late middle Permian and its petroleum geological significance in northern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3):562-574. (in Chinese)
- 徐胜林, 陈洪德, 陈安清, 等, 2011. 四川盆地海相地层烃源岩特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(2):343-358.
- Xu S L, Chen H D, Chen A Q, et al., 2011. Source rock characteristics of marine strata, Sichuan Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(2):343-358. (in Chinese)
- 徐义刚, 黄小龙, 王焰, 等, 2017. 二叠纪地幔柱与地表系统演变[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(3):359-373+358.
- Xu Y G, Huang X L, Wang Y, et al., 2017. Permian mantle plumes and Earth's surface system evolution[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(3):359-373+358. (in Chinese)
- 杨帅, 陈安清, 张玺华, 等, 2021. 四川盆地栖霞—茅口期古地理格局转换及勘探启示[J]. *沉积学报*, 39(6):1466-1477.
- Yang S, Chen A Q, Zhang X H, et al., 2021. Paleogeographic transition of the Permian Chihhsia-Maokou Period in the Sichuan Basin and indications for oil-gas exploration[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6):1466-1477. (in Chinese)
- 杨雨, 文龙, 陈聪, 等, 2023. 四川盆地西部二叠系多期台缘带油气勘探潜力[J]. *地学前缘*, 30(1):1-10.
- Yang Y, Wen L, Chen C, et al., 2023. Oil and gas exploration potential of the Permian multi-stage platform-margin zone, western Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(1):1-10. (in Chinese)
- 杨雨, 文龙, 谢继容, 等, 2020. 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*, 25(3):44-55.
- Yang Y, Wen L, Xie J R, et al., 2020. Progress and direction of marine carbonate gas exploration in the Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 25(3):44-55. (in Chinese)
- 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.
- 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)
- 张启明, 江新胜, 秦建华, 等, 2012. 黔北—渝南地区中二叠世早期梁山组的岩相古地理特征和铝土矿成矿效应[J]. *地质通报*, 31(4):558-568.
- Zhang Q M, Jiang X S, Qin J H, et al., 2012. Lithofacies palaeogeography of the early Middle Permian Liangshan Formation in northern Guizhou-southern Chongqing area and its bauxite ore-forming effect [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(4):558-568. (in Chinese)
- 张玺华, 陈聪, 黄婕, 等, 2019. 四川盆地中二叠世广元—巴中拉张槽的发现及其油气地质意义[J]. *中国石油勘探*, 24(4):466-475.
- Zhang X H, Chen C, Huang J, et al., 2019. The discovery of Middle Permian Guangyuan-Bazhong extensional trough in the Sichuan Basin and its petroleum geological significance [J]. *China Petroleum Exploration*, 24(4):466-475. (in Chinese)
- 张玺华, 陈聪, 张亚, 等, 2018. 川西北地区茅口组海槽相地质特征及其油气地质意义[J]. *天然气勘探与开发*, 41(3):42-50.
- Zhang X H, Chen C, Zhang Y, et al., 2018. Geological characteristics of trough facies, Maokou Formation, northwestern Sichuan Basin: Implications for geology [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 41(3):42-50. (in Chinese)
- 张玺华, 彭瀚霖, 文龙, 等, 2020. 四川盆地西北部灯影组深水沉积的发现及油气地质意义[J]. *天然气勘探与开发*, 43(4):10-21.
- Zhang X H, Peng H L, Wen L, et al., 2020. Discovery of deep-water deposits in Northwest Sichuan Basin during Dengyingian period: Implications for petroleum geology [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 43(4):10-21. (in Chinese)
- Dong Y X, Xu S L, Wen L, et al., 2020. Tectonic control of Guadalupian-Lopingian cherts in northwestern Sichuan Basin, South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 557:109915.
- Haq B U, Schutter S R, 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. *Science*, 322:64-68.
- Hou Z S, Fan J X, Henderson C M, et al., 2020. Dynamic palaeogeographic reconstructions of the Wuchiapingian Stage (Lopingian, late Permian) for the South China Block [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 546:109667.
- Huang H, Magdalena H H, Yin Q Z, et al., 2022. Eruptive tempo of Emeishan large igneous province, southwestern China and northern Vietnam: Relations to biotic crises and paleoclimate changes around the Guadalupian-Lopingian boundary [J]. *Geology*, 50(9):1083-1087.
- Scotese C R, Langford R P, 1995. *The Permian of Northern Pangea* [M]. Berlin: Springer.
- Scotese C R, 2021. Tutorial: Paleomap PaleoAtlas for GPlates and the PaleoData Plotter Program [R]. DOI:10.13140/RG.2.2.34367.00166
- Tucker R M, Tucker M E, 1981. Evidence of syndimentary tectonic movements in the Triassic halite of Cheshire [J]. *Nature*, 290(5806):495-496.