

## 四川盆地奥陶系岩相古地理与勘探潜力

刘伟<sup>1</sup>, 洪海涛<sup>2</sup>, 徐安娜<sup>1</sup>, 姜华<sup>1</sup>, 石书缘<sup>1</sup>

(1 中国石油勘探开发研究院; 2 中国石油西南油气田分公司)

**摘要** 在前人研究基础上,依托露头 and 钻井资料,以沉积相分析为核心,结合四川盆地构造演化,采用单因素分析多因素综合法,以“组”为单元编制了奥陶纪岩相古地理图。奥陶纪四川盆地及邻区总体呈现西高东低的古地理格局,自西向东发育滨岸相、混积潮坪相、局限台地相、开阔台地相和斜坡相—盆地相。从岩相古地理视角对成藏条件的分析表明:奥陶系五峰组沉积期四川盆地主体属于局限海环境,发育了一套优质烃源岩,此外,与奥陶系临近的上覆志留系龙马溪组和下伏寒武系筇竹寺组烃源岩在有断层沟通的情况下可提供有效气源;奥陶系碳酸盐岩总体致密,白云石化、表生溶蚀和裂缝的存在是储层形成的关键因素,对应发育了桐梓组—红花园组颗粒滩白云岩储层、岩溶储层和宝塔组裂缝储层等三类储层;奥陶系发育下部(下生上储)和上部(上生下储)两套成藏组合,具有较好的勘探潜力。

**关键词** 四川盆地; 奥陶纪; 岩相古地理; 油气成藏; 勘探潜力

**中图分类号**: TE121.3

**文献标识码**: A

四川盆地是我国重要的含油气盆地之一,在新元古界震旦系—中生界侏罗系多个层系中均有规模油气发现,特别是震旦系—古生界海相碳酸盐岩层系,相继在二叠系—三叠系发现了普光气田和龙岗气田,在寒武系龙王庙组发现了安岳气田等一批大型特大型气田。但是,四川盆地奥陶系的勘探一直没有取得较好的成效。本次在重建奥陶纪岩相古地理的基础上,分析了四川盆地奥陶系生油岩和储层发育的地质条件以及勘探前景,希望能对四川盆地奥陶系油气勘探有借鉴意义。

对四川盆地而言,盆地级的奥陶纪岩相古地理研究相对较弱,主要体现在两个方面:一是前人多把四川盆地作为扬子地台的一部分,以“统”为单元对中上扬子或扬子地区成图<sup>[1-3]</sup>;二是在盆地内部,为了解决具体的勘探问题而针对某一区块开展研究。杨威等<sup>[4]</sup>以“层序”为单元编制的奥陶纪岩相古地理图,进一步深化了认识。但总体而言,四川盆地岩相古地理图件精度仍然偏低,这制约了勘探领域的评价。

本次在前人工作基础上,以17个露头点和52个钻井点资料为基础,以沉积相分析为核心,结合四川盆地构造演化,采用单因素分析多因素综合法<sup>[5]</sup>,以“组”为单元编制四川盆地奥陶纪岩相古地理图,并在此基础上,预测有利烃源岩和储层分布,分析奥陶系成藏潜力及勘探前景。

### 1 地质背景

四川盆地是一个海相克拉通盆地(震旦纪—中三叠世)和前陆盆地(晚三叠世—新生代)复合的叠合盆地<sup>[6]</sup>。南华纪开始,受罗迪尼亚(Rodinia)大陆裂解影响,华南地区发生普遍的张裂作用。到晚震旦世,进入稳定沉降阶段,晋宁期的板块汇聚作用被加里东早期的拉张—伸展作用所代替,逐渐形成了以扬子克拉通(碳酸盐台地)为核心,分别向南、向北、向西南逐渐变深的克拉通内坳陷盆地。中奥陶世,华夏板块和扬子板块再次碰撞拼合,导致构造背景由伸展转为挤压,中上扬子地区盆缘及盆内隆起开始出现,四川盆地主体为挤压环境下的克拉

收稿日期: 2015-09-08; 改回日期: 2017-04-18

本文受国家科技重大专项“下古生界—前寒武系碳酸盐岩油气成藏规律与勘探方向”(编号:2016ZX05004-001)与中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“深层大油气田形成与分布”(编号:2014E-32-01)资助

刘伟: 1978年生,高级工程师,2008年中国石油勘探开发研究院毕业,获博士学位。从事海相碳酸盐岩沉积与储层研究。通讯地址: 100083 北京市海淀区学院路20号; E-mail: liuwei086@petrochina.com.cn

通盆地<sup>[7]</sup>,志留纪末扬子板块与华夏板块形成统一的华南板块,盆地主体基本消亡。

奥陶纪地层在四川盆地内分布广泛,除川中隆起外,其他地区均有分布,并且发育较全。四川盆地

奥陶系属于华南地层区扬子地层分区(IV3)<sup>[8]</sup>,可以划分出川西南—川东,雷波,广元—南江,城口—秀山等4个地层小区(图1),不同地层小区的划分对比方案<sup>①</sup>见表1。

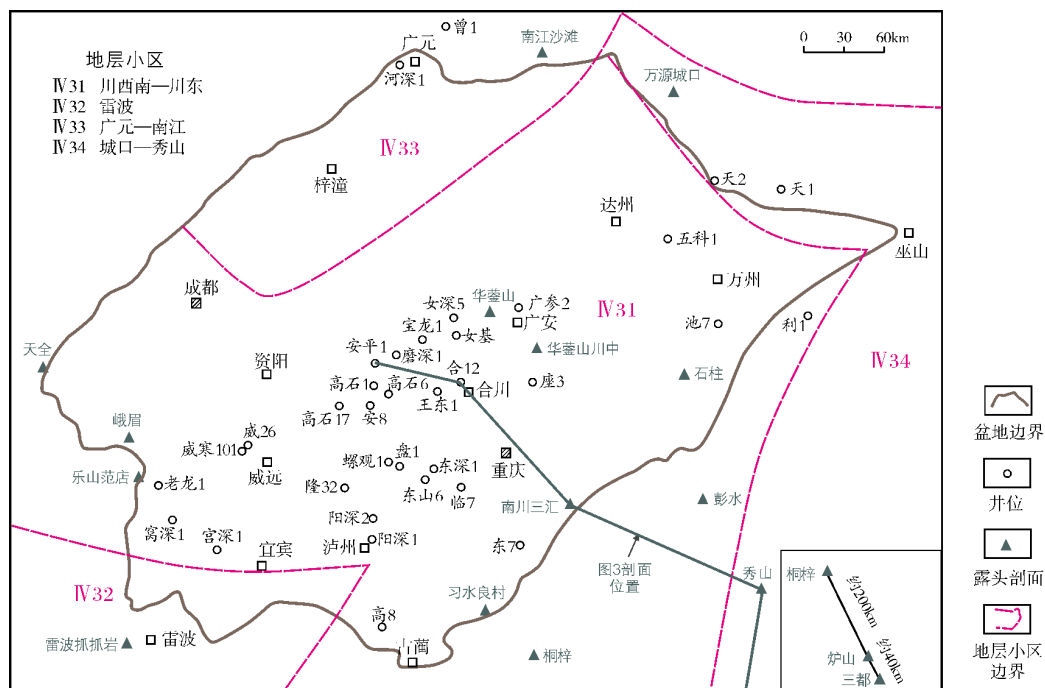


图1 四川盆地奥陶纪地层区划及沉积相研究资料点分布

炉山剖面和三都剖面在成图范围之外,位于桐梓剖面东南方向,直线距离约200~250 km(参见右下角示意图)

表 1 四川盆地奥陶系划分对比表

地 层			地 层 小 区													
系	统	阶	川西南—川东					雷波			广元—南江			城口—秀山		
志 留 系			(二叠系)梁山组					龙马溪组			龙马溪组			龙马溪组		
奥陶系	上统	赫南特阶	<div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div>	五峰组			五峰组			五峰组			五峰组			
		凯迪阶		临湘组			临湘组			临湘组			临湘组			
	桑比阶	宝塔组			宝塔组			宝塔组			宝塔组					
	中统	达瑞威尔阶	<div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div> <div></div>	十字铺组			巧家组			谭家沟组			庙坡组			
		大坪阶		湄潭组			红石崖组			西梁寺组			牯牛潭组			
下统	弗洛阶	大乘寺组			红花园组			赵家坝组			大湾组					
	特马豆克阶	罗汉坡组			桐梓组						南津关组					
寒 武 系			洗象池群			娄山关群			二道水组			陡坡寺组			三游洞组	

① 中国石油集团科学技术研究院. 海相碳酸盐岩大油气田勘探理论与技术[R]. 2013.

## 2 四川盆地奥陶纪岩相古地理特征

### 2.1 主要沉积相类型及特征

四川盆地及邻区,奥陶系碎屑滨岸和清水碳酸盐岩台地环境同时存在,两者之间是过渡的混积潮坪环境。碎屑滨岸体系包括滨岸相、潮坪相,清水碳酸盐岩体系中主要包括开阔台地、局限台地和台地边缘等沉积相类型(表2)。

**滨岸相和潮坪相** 受康滇古陆、川中隆起和川北隆起的影响,在盆地西南部为滨岸相沉积,以发育冲洗交错层理的灰色细粒石英砂岩、岩屑石英砂岩为特征。潮坪相可以细分为碎屑潮坪和混积潮坪。碎屑潮坪相多见于下奥陶统红石崖组/赵家坝组,总体为薄到中厚层的细砂岩、粉砂岩夹泥页岩,发育鱼骨状交错层理、斜层理(图2a)、小型冲刷构造、波痕和虫迹等。与碎屑潮坪相邻的是混积潮坪相,多个层位普遍发育,以泥页岩、粉砂质泥页岩、粉—细砂岩夹灰岩或与灰岩互层为特征(图2b),透镜状层理、干裂和波痕等沉积构造常见。

**局限台地相和开阔台地相** 远离陆源区进入清水碳酸盐岩台地环境,主要相类型包括局限台地和开阔台地。局限台地水体循环相对不畅,能量较低,以泥晶灰岩、泥晶颗粒灰岩和泥粉晶白云岩沉积为主,靠近西部潮坪相区多夹有泥页岩与粉砂岩,向东则为较纯的碳酸盐岩。桐梓组和十字铺组在盆地西部的局限台地中分布较广。开阔台地相在早奥陶世分布最为广泛,其中台内滩发育(图2c),以红花园组为最,十字铺组次之。颗粒滩规模较大,颗粒多样,以鲕粒、砂屑和生物碎屑为主(图2d),大型交错层理发育。

**台地边缘相** 台地边缘相主要分布在盆地外围,以颗粒滩或生物礁为特征。颗粒滩主要由生物碎屑灰岩和砂屑灰岩组成,呈多个厚2~20m的旋回。生物礁见于贵州凯里的炉山剖面红花园组,造礁生物以古杯海绵为主(图2e),含量约60%~80%,常与生物碎屑滩伴生。

**陆棚相** 以浅灰色—灰色、灰绿色粉砂质泥岩,泥质粉砂岩为主(图2f),夹生物碎屑灰岩和砂屑灰岩,当陆源碎屑物较少时,以静水碳酸盐岩沉积为主。

表2 四川盆地及邻区奥陶系主要沉积相类型

相	亚相	沉积特征
滨岸	—	主要在早奥陶世川西南地区发育,以浅灰色—灰色细粒石英砂岩、岩屑石英砂岩沉积为特征,发育冲洗交错层理和生物扰动构造
潮坪	砂泥坪	多见于下奥陶统红石崖组/赵家坝组,总体为薄层到中厚层的细砂岩、粉砂岩夹泥页岩,局部砂岩和泥页岩互层,发育鱼骨状交错层理、斜层理、小型冲刷构造、波痕等(如雷波抓抓岩剖面)
	混积潮坪	以泥页岩、粉砂质泥岩、粉—细砂岩和石灰岩互层为特征,发育透镜状层理、干裂和波痕等沉积构造
局限台地	滩间海	主要为灰色薄—中层泥晶灰岩,薄层泥—粉晶白云岩,靠近西部受陆源碎屑影响,多夹黄灰色、灰色中—薄层粉砂岩、细砂岩或泥岩,桐梓组和十字铺组分布较广
	台内滩	以鲕粒、砂屑和生物碎屑滩为主,规模相对较小,见有交错层理、冲刷面等,水体能量相对较低,例如华蓥山剖面桐梓组
开阔台地	滩间海	沉积物以灰色—深灰色泥晶灰岩为主,局部见有深灰色泥灰岩,发育水平层理、微波状层理
	台内滩	主要发育在浅水高能地带,以灰色—深灰色鲕粒灰岩、砂屑灰岩和生物碎屑灰岩为主,多呈席状、透镜状展布,单层厚度一般为几米到十几米,发育交错层理、斜层理和平行层理,红花园组最为发育
台地边缘	台缘滩	岩石类型多样,包括鲕粒灰(云)岩、砂屑灰(云)岩、砂屑鲕粒灰(云)岩、生物碎屑灰岩等,亮晶胶结,沉积构造以大型交错层理为主
	台缘礁	生物礁主要分布在红花园组,断续分布,常与生物碎屑滩伴生,造礁生物以古杯海绵为主,生物含量约60%~80%(如贵州炉山剖面)
陆棚	—	以黄绿色—灰黑色泥质粉砂岩、硅质碳质页岩、砂质页岩、硅质岩为主,水平微细层理发育
局限海	—	以深灰色—黑色页岩、碳质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩为主,可见笔石、水平层理及波状层理



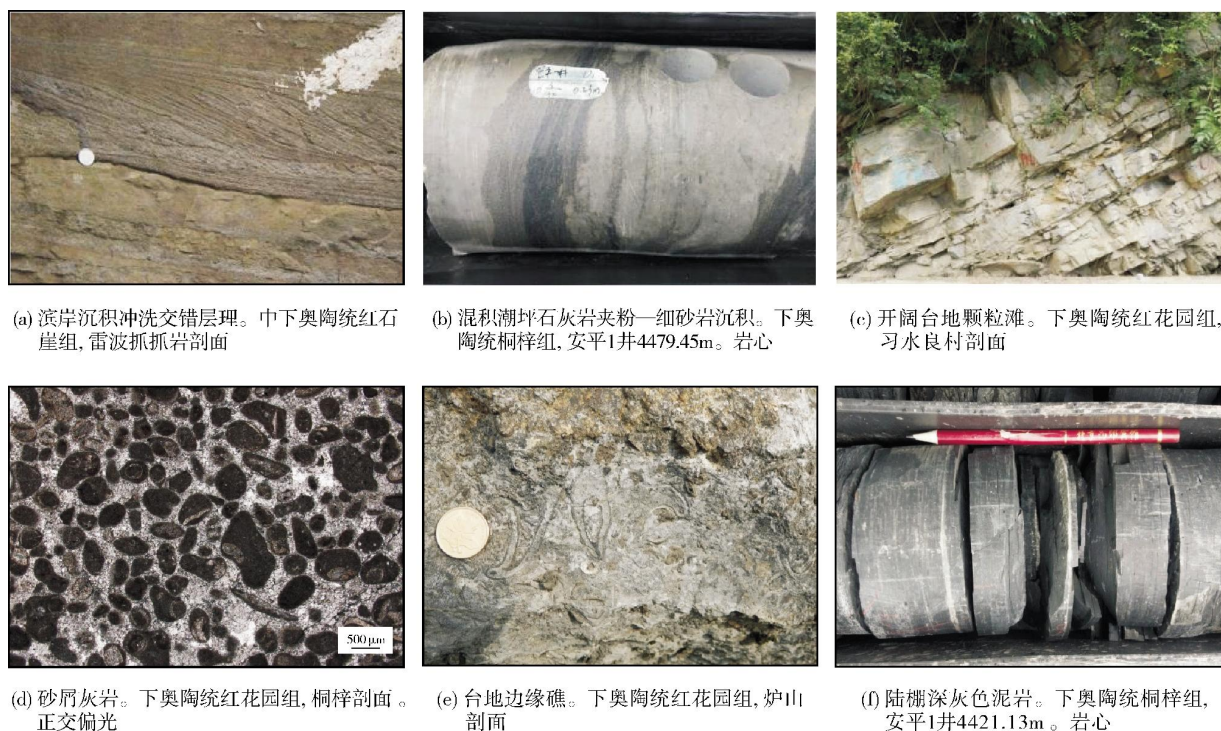


图2 四川盆地及周缘奥陶系典型沉积相特征

## 2.2 奥陶纪岩相古地理特征

四川盆地及邻区在奥陶纪继承了寒武纪古地理格局, 总体具有西高东低的特点。早中奥陶世, 西部康滇古陆和北部古陆稳定发育, 自西向东发育滨岸相、混积潮坪相、(局限)开阔台地相、斜坡相和盆地相(图3, 图4), 呈北东—南西走向展布; 晚奥陶世海侵范围进一步扩大, 水体逐渐加深, 过渡为陆棚环境; 到奥陶纪末, 受周缘古陆和古隆起的围限, 盆地主体演变为局限海环境。本次整体上按地层“组”为单元, 考虑到宝塔组和临湘组沉积期的古地理格局与沉积环境相似, 故将其作为一个编图单元。

### 2.2.1 桐梓组沉积期

早奥陶世, 四川盆地主体位于稳定克拉通内拗陷盆地之中, 基本继承了寒武纪末期的岩相古地理格局, 以碎屑滨岸、混积潮坪和清水碳酸盐岩台地环境为主(图4a)。受西部康滇古陆的影响, 盆地西侧陆源碎屑供给充分, 属于碎屑滨岸—潮坪环境。例如盆地西南雷波抓抓岩剖面红石崖组以薄至中厚层状的细砂岩、粉砂岩夹泥页岩为主, 发育鱼骨状交错层理、斜层理、波痕以及大量的虫孔。向东过官深1井—

高石1井—一线, 过渡为清水碳酸盐岩台地环境, 其中桐梓—南川三汇—石柱剖面一线以西为局限台地环境, 以东为开阔台地环境。碎屑滨岸与局限台地之间, 属于过渡性的混积潮坪环境。局限台地内广安—五科1井和阳深2井—隆32井—泸州地区, 地层厚度较大。五科1井以灰黑色—深灰色、灰绿色页岩与灰色—深灰色石灰岩及粒屑灰岩互层为特征, 阳深2井和隆32井则以深灰色、灰绿色页岩夹深灰色、灰褐色泥晶灰岩和灰色泥质白云岩及白云岩为主。这两个地区泥页岩沉积厚度较大(图5a), 反映水体能量较低, 推测在这两个地区可能存在两个小型台内洼地。这一时期碳酸盐岩台地北部台缘带位于万源城口以北, 东南边缘相带位于贵州铜仁和湖南吉首以西, 黔中隆起也开始形成, 表现为水下低隆<sup>[9]</sup>。

### 2.2.2 红花园组沉积期

盆地内部红花园组厚度集中在 20~80 m 之间, 分布稳定, 表明这一时期沉积环境相对稳定。红花园组沉积期, 古地理格局与桐梓组沉积期相似, 但在持续海侵作用影响下, 清水碳酸盐岩台地范围有所扩大, 而且台地与外海水体通畅, 整体表现为开阔台地环境(图 4b)。盆地东部的台内洼地已经转

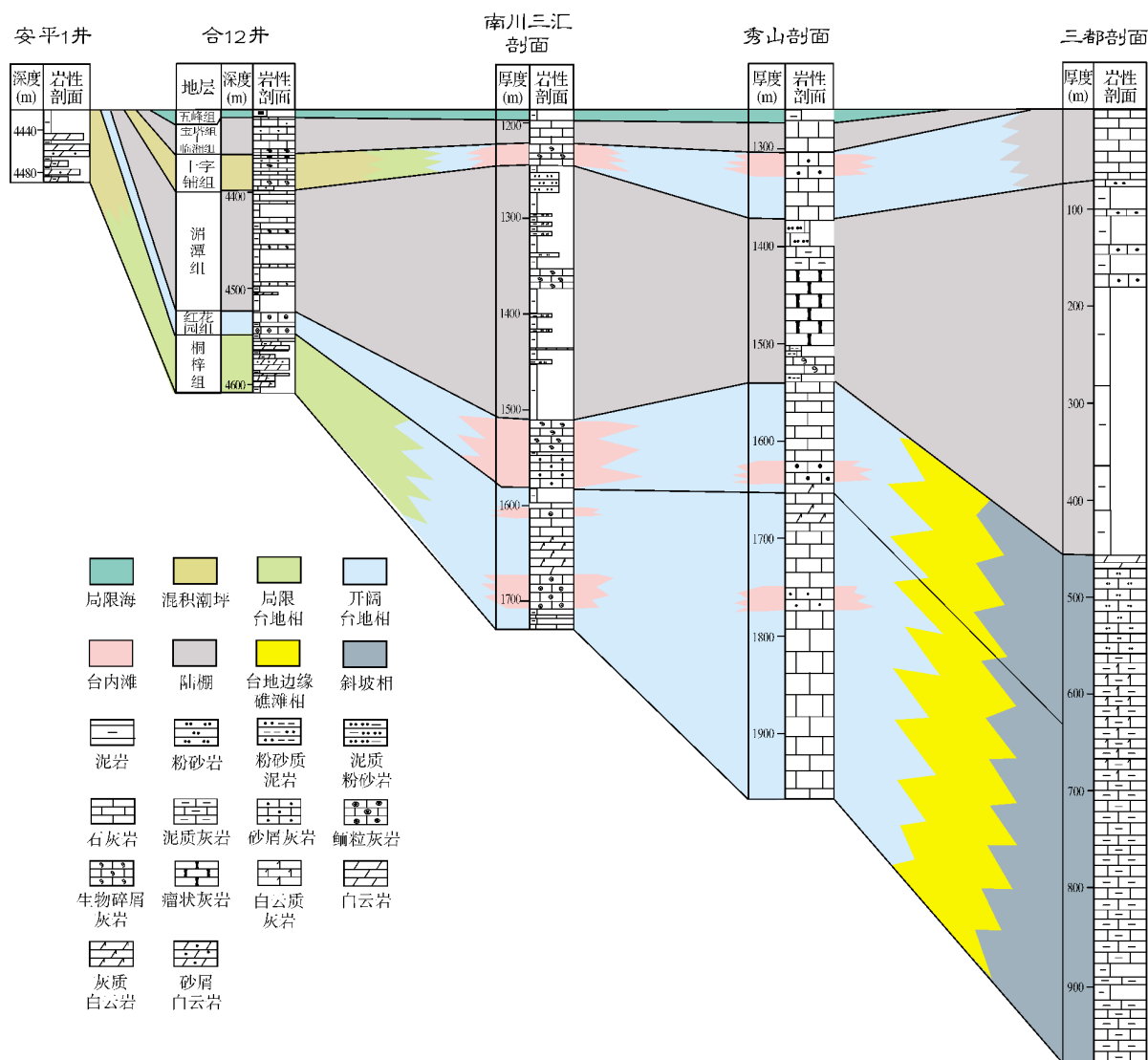


图3 四川盆地奥陶系沉积相对比剖面  
剖面位置见图1

变为开阔台地环境,但泸州地区的台内洼地仍然存在,只是规模略有缩小。开阔台地内部颗粒滩大面积发育(图5b),颗粒类型以生物碎屑和砂屑为主,鲕粒其次,滩体多呈北东—南西走向。贵州炉山剖面红花园组见有古杯海绵生物礁建造,推测该时期台地边缘位于这一地区,与前期相比没有明显变化。黔中隆起稳定发育。

### 2.2.3 湄潭组沉积期

中晚奥陶世,受晚加里东运动的影响,华南地区的构造背景由伸展转为挤压,四川盆地主体为挤压背景下的浅海克拉通盆地,受控于黔中古隆起和雪

峰山隆起的构造掀斜作用,相对海平面上升,水体加深,同时,大量陆源碎屑物注入,基本结束了清水碳酸盐岩台地环境(图4c)。盆地西部仍为滨岸—潮坪环境;中东部为碎屑陆棚环境,以浅灰色—灰色、灰绿色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主,夹生物碎屑灰岩和砂屑灰岩。湄潭组沉积晚期,碳酸盐岩含量有增加,表明水体逐渐变浅、碎屑物供给相对减少。

### 2.2.4 十字铺组沉积期

随着陆源碎屑物供给的逐渐减少,四川盆地及邻区又恢复为清水碳酸盐岩台地环境。北部古陆的规模大范围缩小,川中隆起和黔中古陆的规模则进

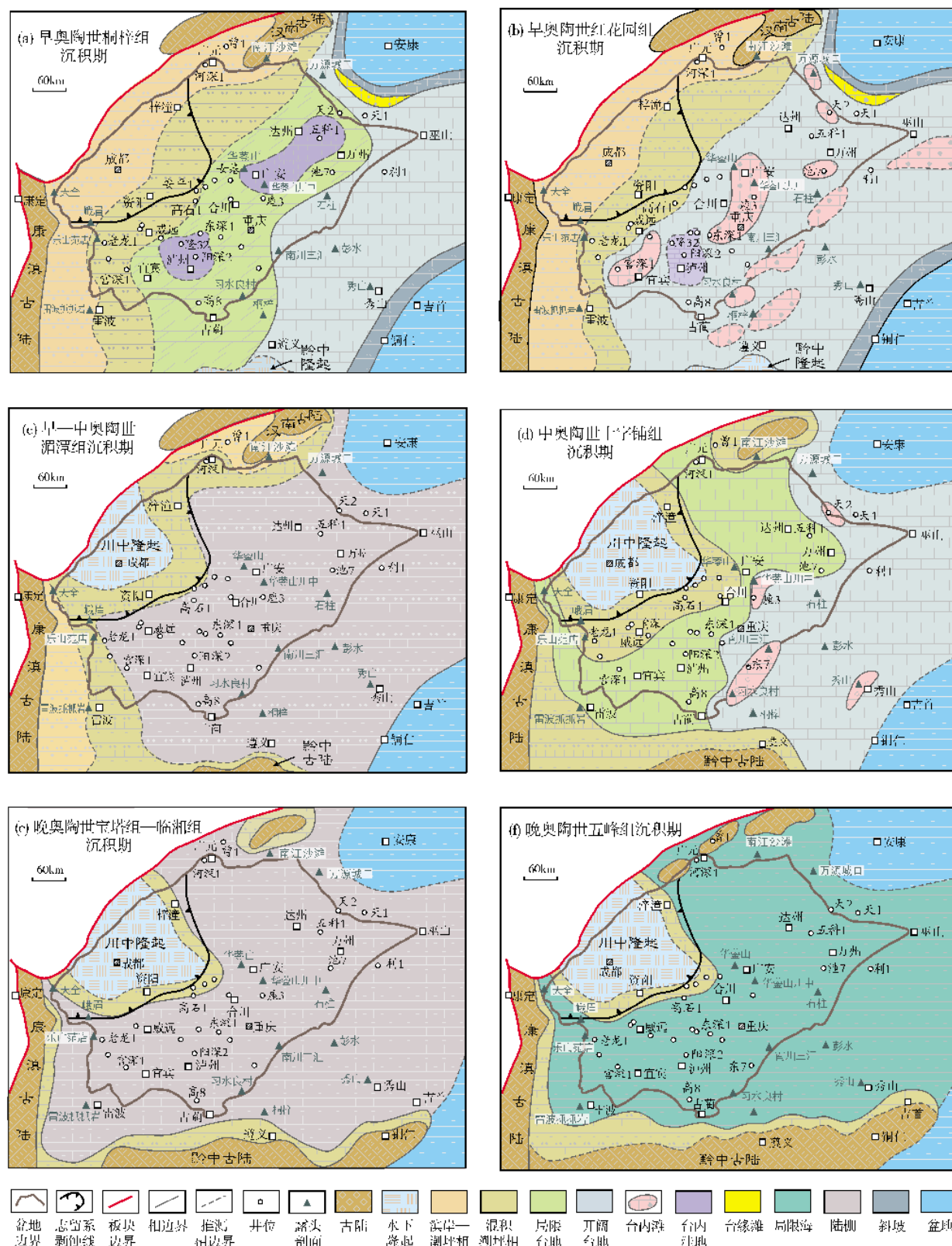


图4 四川盆地及邻区奥陶纪岩相古地理



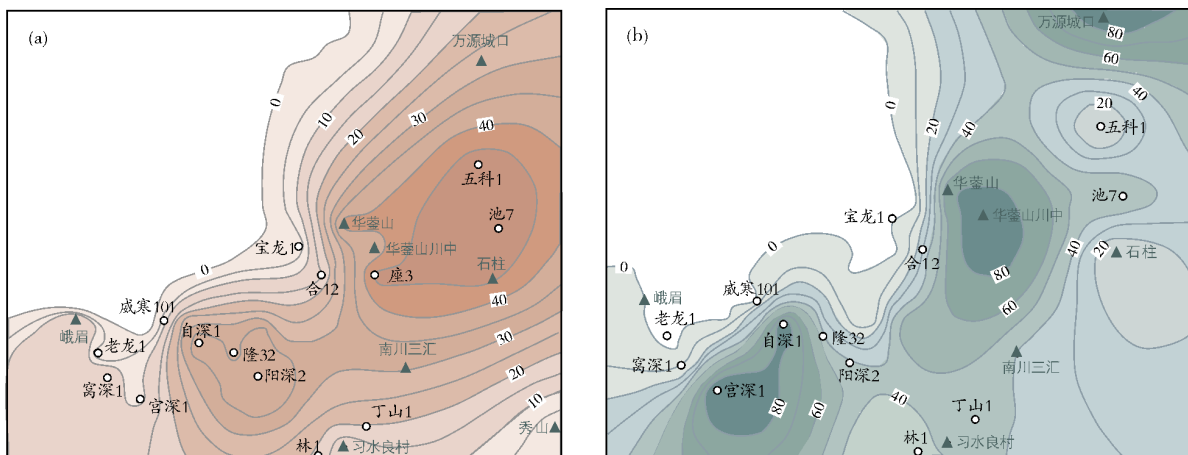


图5 四川盆地奥陶系桐梓组泥页岩厚度(a)及红花园组颗粒灰岩百分含量(b)

一步扩大,古陆和隆起周缘为湖坪或混积湖坪环境(图4d)。十字铺组沉积期古地理格局与桐梓组沉积期有些类似,自西向东由混积湖坪向局限台地、开阔台地及盆地过渡。局限台地的范围有所扩大,并可能从川中隆起的南北两侧与西部大洋沟通。开阔台地内局部发育台内滩,主要分布在习水良村—南川三汇、秀山、座3井和天2井地区,颗粒灰岩占地层厚度的20%~30%,以生物碎屑灰岩和砂屑灰岩为主。威远附近的自深1井、万州附近的池7井等地区也有颗粒滩发育,但规模较小,厚度较薄。

### 2.2.5 宝塔组—临湘组沉积期

晚奥陶世,全球海平面进一步上升,四川盆地及邻区古水深进一步增大,宝塔组和临湘组沉积了一套厚度不大(主体为20~40 m)但区域分布稳定的泥晶灰岩或含生物碎屑泥晶灰岩,普遍发育瘤状构造和弱变形层理。宝塔组内可以见到大量头足类角石化石,形体大小不等,大者长2 m以上,小的也在10~20 cm以上,个体完整、密集成层分布,排列有序<sup>[10]</sup>。宝塔组—临湘组的岩性特征所指示的浪基面以下水体安静的较深水环境,角石大量出现,并且少见底栖类化石,表明沉积环境可能位于不利于底栖生物生活的透光带以下<sup>[11]</sup>;另外根据游泳者的体形大小应与水柱的深度成正比,推断生物的活动水域深度约在100~150 m<sup>[12]</sup>。

总体而言,宝塔组—临湘组沉积期,水体较深,相对比较平静,陆源碎屑干扰较小,盆地主体为以碳酸盐岩沉积为主的陆棚环境。这一时期,北部古陆的范围进一步缩小,川中隆起和黔中古陆的范围则进

一步扩大(图4e)。

### 2.2.6 五峰组沉积期

晚奥陶世五峰组沉积期,华夏板块与扬子地块之间的汇聚过程导致盆地基底快速沉降<sup>[13]</sup>,同时康滇古陆、黔中古陆和川中隆起的进一步发展造成中上扬子地区海域被围限,形成局限海(图4f)。四川盆地五峰组整体岩性特征为一套厚度不超过20 m、富含笔石化石的黑色页岩、碳质页岩、硅质页岩、粉砂质页岩,反映了强还原的较深水环境。

## 3 四川盆地奥陶系油气勘探潜力

尽管四川盆地及邻区奥陶系中油气显示普遍存在,但四川盆地的奥陶系钻探却并未取得较好成效,仅在泸州地区东深1井和广元地区河深1井获工业气流<sup>[14]</sup>。下面从岩相古地理的视角,探讨四川盆地奥陶系的烃源岩条件、储层条件及油气勘探潜力。

### 3.1 烃源岩条件

上扬子地区奥陶纪经历了早奥陶世碳酸盐岩台地—中奥陶世陆棚/台地—晚奥陶世局限海盆的古地理演化。五峰组沉积期,由于川中隆起、黔中古陆和雪峰山隆起的发展,四川盆地大部地区形成局限海,这是烃源岩发育的有利环境。五峰组以富含笔石的黑色碳质页岩沉积为主,尽管厚度较薄,但是分布稳定,有机质丰度高,是一套优质烃源岩。黔北地区五峰组烃源岩有机碳含量在2%~10%之间,多数大于4%,母质类型好,以I型干酪根为主<sup>[15-16]</sup>。

涪潭组沉积期,盆地主体为碎屑陆棚环境,虽然水体较深,但受大量陆源碎屑物质注入的影响,沉积物以灰色—黄绿色泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩为主,有机碳含量较低。早奥陶世盆地内发育两个台内洼地,但是由于紧邻物源区,或是周缘颗粒滩沉积物被水体运动带入洼地内,故沉积物颗粒较粗,烃源岩条件并不好。尽管不排除局部有较好烃源岩发育,但总体而言,涪潭组生烃条件并不理想。

奥陶系五峰组—志留系龙马溪组是一套厚层优质烃源岩,盆地内在川东与川西南有分布。此外,寒武系筇竹寺组是一套全盆地广泛分布的优质烃源岩,厚度通常在100~400 m之间,但是它与奥陶系之间有中—下寒武统巨厚的白云岩、泥质岩层相隔,在有断裂沟通或侧向相接的情况下也可以为奥陶系储层提供气源。

### 3.2 储层条件

奥陶系碳酸盐岩相对致密,基质孔隙度偏低。据黄文明等<sup>[17]</sup>统计,川中地区奥陶系基质孔隙度平均值仅为0.96%、渗透率 $(0.03\sim1.96)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,川东南十字铺组、临湘组和宝塔组基质孔隙度小于1%的样品占总数的90%。由此可见,如果没有后期的改造,奥陶系碳酸盐岩难以形成有一定规模的有效储层。基于露头、岩心和薄片分析,发现白云石化作用、表生溶蚀作用和裂缝的存在是奥陶系储层形成的关键因素,与此相对应,可发育白云岩储层、岩溶储层和裂缝储层等三类储层。

**白云岩储层** 白云岩储层主要在下奥陶统桐梓组和红花园组发育,它包括可识别原始沉积结构的颗粒白云岩和不能识别原始沉积结构的晶粒白云岩。颗粒白云岩的颗粒类型多样,包括砂屑、砾屑、鲕粒和藻砂屑等,孔隙以粒间孔和粒间溶孔为主,见有少量溶蚀孔洞。晶粒白云岩以粉细晶白云岩为主,可见到颗粒幻影,表明原岩为颗粒灰岩。56个岩心/岩块样品的137个实测数据分析表明(图6),颗粒(砂屑)白云岩的孔隙度多在3%~5%之间,渗透率多在 $1\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 以上。粉细晶白云岩晶粒多呈自形—半自形,孔隙以晶间孔和晶间溶孔为主,孔隙度多在2%~3.5%之间,渗透率在 $(0.5\sim1)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间。由此可见,白云岩储层的分布与沉积关系密切。颗粒滩白云石化后形成的颗粒白云岩和粉

细晶白云岩的孔隙度和渗透率要高于潮坪环境形成的泥晶白云岩;另外,颗粒滩沉积旋回顶部准同生期暴露,受到大气淡水的淋滤,会形成大量溶蚀孔隙。

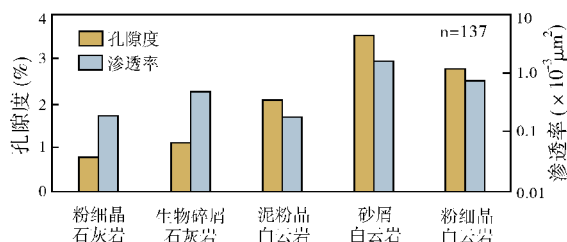


图6 四川盆地奥陶系不同岩性孔隙度与渗透率分布特征

**岩溶储层** 志留系沉积后的加里东运动导致川中地区奥陶系抬升暴露(表1,上覆二叠系梁山组),在沉积间断长约120 Ma的地质历史中,志留系剥蚀殆尽的面积超过 $6\times10^4\text{km}^2$ (图4),这为岩溶储层的发育提供了有利的地质条件。川中古隆起核部剥蚀最为严重,中上奥陶统和下奥陶统大部已被剥蚀,仅残留桐梓组下部,下二叠统直接覆盖在其上部,如安平1井等揭示。桐梓组—红花园组岩溶储层发育带呈环带状围绕古隆起分布,溶蚀孔洞发育<sup>[18]</sup>。女基井在下奥陶统桐梓组见半充填垂直溶扩缝,小型溶洞沿缝发育;女深5井桐梓组见岩溶角砾,大小不等,最大 $5.9\text{cm}\times9.1\text{cm}$ 。

**裂缝储层** 裂缝型储层主要在上奥陶统宝塔组发育。宝塔组沉积期,四川盆地主体是较深水陆棚环境,沉积了一套低能泥晶灰岩、泥晶颗粒灰岩,并且泥质含量较重。宝塔组基质孔隙度比较低,从东深1井的统计数据来看,平均只有1.12%<sup>[17]</sup>。但该井在宝塔组获得天然气 $22\times10^4\text{m}^3/\text{d}$ 的高产,这主要归因于龟裂纹灰岩中裂缝非常发育。尽管裂缝增加的孔隙度有限,但是裂缝能够沟通彼此孤立的孔隙,能够有效提高渗透率。

总体而言,奥陶系碳酸盐岩比较致密,基质孔并不发育。下奥陶统桐梓组和红花园组颗粒滩的白云石化、川中地区表生岩溶以及四川盆地晚期构造活动形成的大量裂缝都能够有效改善储层的质量。从统计结果来看,有效储层主要分布在桐梓组和红花园组颗粒白云岩段、川中志留系尖灭线以西,以及宝塔组泥晶灰岩裂缝发育段。

下奥陶统桐梓组和红花园组,台内滩规模分布,



盆地东南部颗粒灰岩厚度在 10~30 m 之间,占地层厚度的 20%~80%,后期经过白云石化和表生溶蚀改造后可以形成有效储层。桐梓组储层岩性主要为砂屑白云岩和粉晶白云岩,由于白云石化程度不同,导致储层发育的厚度薄,分布局限,且主要分布在川东南地区。红花园组储层岩性主要为颗粒(含白云质)灰岩和泥晶灰岩,相对于桐梓组而言,白云化程度低,储集性能相对于白云岩类储层来说要差。对上奥陶统宝塔组而言,基质孔隙度普遍小于 1%,裂缝是其主要储集空间,盆地东部及南部断裂发育区是宝塔组有利储层发育区。此外,志留系沉积后川中地区奥陶系抬升暴露,在川中隆起核部及周缘的奥陶系剥蚀区可形成岩溶储层。

### 3.3 成藏模式

四川盆地中奥陶统湄潭组是一套厚约 13~448 m 的碎屑岩夹碳酸盐岩沉积,下段以泥岩为主,夹粉砂岩、粉砂质泥岩和薄层状生物碎屑灰岩;上段为薄—中厚层状灰岩、生物碎屑灰岩或瘤状灰岩与粉砂质泥岩互层。湄潭组可以将奥陶系分为上下两个成藏组合(图 7);对于下部组合而言,在有大型断裂沟通的情况下,盆地内广泛分布的寒武系筇竹寺组烃源岩可以为下奥陶统储层提供气源;对于上部组合而言,奥陶系顶部的五峰组和志留系龙马溪组烃源岩可以为上奥陶统储层提供气源,同时五峰组和龙马溪组泥页岩本身也是优质的盖层。

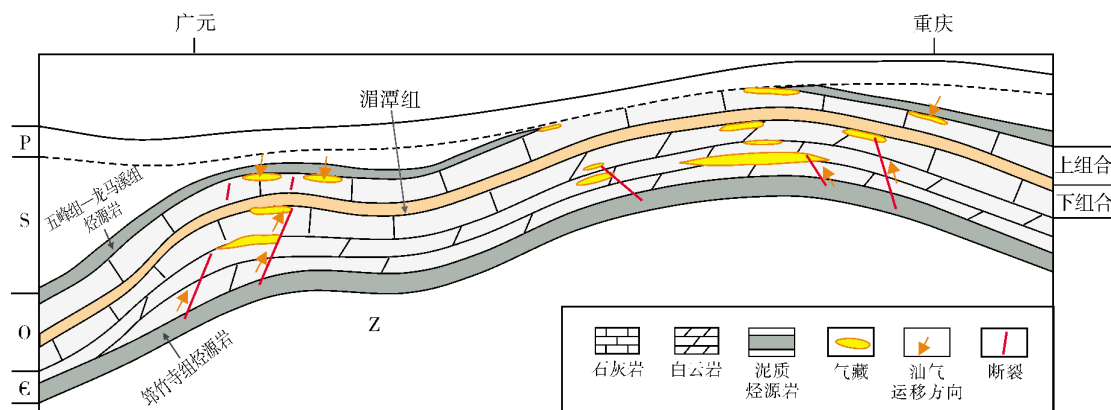


图 7 四川盆地奥陶系成藏模式图

## 4 结论

奥陶纪四川盆地及邻区总体呈现西高东低的古地理格局,自西向东发育滨岸相、混积潮坪相、局限台地相、开阔台地相和斜坡相—盆地相,略呈北东—南西走向分布。

奥陶系碳酸盐岩总体致密,基质孔隙度偏低。白云石化作用、表生溶蚀作用和裂缝的存在是奥陶系有效储层形成的关键因素,对应地可发育白云岩储层、岩溶储层和裂缝储层等三类储层。

奥陶系可以分为上下两个成藏组合。下部成藏组合以寒武系筇竹寺组为烃源岩,储层主要是下奥陶统桐梓组和红花园组的颗粒白云岩和岩溶储层,湄潭组为盖层,成藏关键是大断裂沟通筇竹寺组气源。上部成藏组合,储层主要是上奥陶统宝塔组裂缝型储层,上奥陶统五峰组和志留系龙马溪组既是烃源岩又是盖层。

### 参考文献

- [1] 冯增昭,彭勇民,金振奎,等. 中国南方早奥陶世岩相古地理[J]. 古地理学报, 2001, 3(2): 11-23.
- [2] 冯增昭,彭勇民,金振奎,等. 中国南方中及晚奥陶世岩相古地理[J]. 古地理学报, 2001, 3(4): 10-27.
- [3] 马永生,陈洪德,王国力,等. 中国南方层序地层与古地理[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [4] 杨威,谢武仁,魏国齐,等. 四川盆地寒武纪—奥陶纪层序岩相古地理、有利储层展布与勘探区带[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 21-34.
- [5] 冯增昭. 单因素分析多因素综合作图法——定量岩相古地理重建[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 3-18.
- [6] 郭正吾. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [7] 陈洪德,郭彤楼. 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, 2012.
- [8] 《中国地层典》编委会. 中国地层典: 奥陶系[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [9] 牛新生,冯常茂,刘进. 黔中隆起的形成时间及形成机制探讨[J]. 海相油气地质, 2007, 12(2): 46-50.

- [10] 许效松, 万方, 尹福光, 等. 奥陶系宝塔组灰岩的环境相、生态相与成岩相[J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 64-68.
- [11] 王泽中. 宝塔灰岩——中奥陶统密集段[J]. 岩相古地理, 1996, 16(5): 18-20.
- [12] 周明魁, 王茹春, 李志明, 等. 中国南方奥陶纪—志留纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [13] 苏文博, 李志明, Frank R. Ettensohn, 等. 华南五峰组—龙马溪组黑色岩系时空展布的主控因素及其启示[J]. 地球科学 中国地质大学学报, 2007, 32(6): 819-827.
- [14] 陈宗清. 论四川盆地奥陶系天然气勘探[J]. 天然气工业, 2009, 30(1): 23-30.
- [15] 林家善, 谢渊, 刘建清, 等. 黔北上奥陶统五峰组烃源岩有机地球化学特征及古环境意义[J]. 地质通报, 2012, 31(11): 1922-1927.
- [16] 田海芹, 郭彤楼, 胡东风, 等. 黔中隆起及其周缘地区海相下组合与油气勘探前景[J]. 古地理学报, 2006, 8(4): 509-518.
- [17] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 四川盆地奥陶系油气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(3): 461-473.
- [18] 汪泽成, 赵文智, 张林, 等. 四川盆地构造层序与天然气[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

编辑: 董庸

## Lithofacies Paleogeography and Exploration Potential of Ordovician in Sichuan Basin

Liu Wei, Hong Haitao, Xu Anna, Jiang Hua, Shi Shuyuan

**Abstract:** Based on the outcrop and drilling data, we reconstructed the Ordovician lithofacies paleogeography map in Sichuan Basin with a method of single-factor analysis and multi-factor comprehensive mapping. There developed coastal facies, alluvial tidal flat facies, limited platform facies, open platform facies and slope-basin facies from west to east. According to the hydrocarbon source conditions, Late Ordovician Wufeng Formation developed in limited sea is high-quality source rocks, in addition, when connected by faults, the overlying Silurian Longmaxi Formation and the underlying Lower Cambrian Qiongzhusi Formation are effective source rocks. According to the reservoir conditions, dolomitization, supergene dissolution, and fracture development are the key factors for the formation of Ordovician carbonate reservoirs. Correspondingly, three types of reservoirs developed including particle-gravel dolomite reservoir, karst reservoir in Tongzi Formation and Honghuayuan Formation, and crack reservoir in Baota Formation. The Ordovician developed two sets of reservoir assemblages, i.e., the lower part and the upper part, which have good exploration potential.

**Key words:** Lithofacies paleogeography; Hydrocarbon accumulation; Exploration potential; Ordovician; Sichuan Basin

Liu Wei: PhD, Senior Geological Engineer. Add: PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, 20 Xueyuan Rd., Beijing, 100083, China