



移动阅读

颜宇豪, 陈安清, 张本健, 等, 2024. 四川盆地奥陶纪沉积体系演化与古地理格局重建[J]. 沉积与特提斯地质, 44(3): 600–612. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.12001

YAN Y H, CHEN A Q, ZHANG B J, et al., 2024. Evolution of the Ordovician sedimentary system and paleogeographic reconstruction in the Sichuan Basin, China[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(3): 600–612. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.12001

四川盆地奥陶纪沉积体系演化与古地理格局重建

颜宇豪^{1,2}, 陈安清^{1,2*}, 张本健³, 杨欧文^{1,2}, 张玺华³, 周刚³, 杨帅^{1,2},
孙诗¹, 陈洪德^{1,2}

(1. 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, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 我国塔里木、鄂尔多斯盆地的奥陶系海相碳酸盐岩中发现了多个大型油气田, 但四川盆地奥陶系油气发现方面至今未取得实质性突破。此前的勘探着重于岩溶储层和裂缝型储层, 只有少量井获得天然气流发现, 四川盆地奥陶系是否发育更具规模勘探潜力的滩相储层是当前亟需回答的问题。由于奥陶系岩性变化快, 关于其沉积体系, 仍存在争议, 一定程度上限制了对潜在储集相带的认识。本文根据测井、地震及露头剖面资料, 分析了四川盆地奥陶系沉积相特征, 重建了各沉积期的岩相古地理格局。结果表明: 桐梓组—红花园组沉积期, 四川盆地所在的扬子板块受泛非运动影响, 上扬子构造较为稳定, 发育以碳酸盐岩台地为主的沉积相, 沉积模式为陆表海浅水台地, 滩相白云岩围绕乐山-龙女寺古隆起的周缘分布; 湄潭组沉积期, 由于全球海平面上升, 构造环境转变为加里东运动主控的强挤压背景, 隆-拗格局加剧, 沉积环境主要为混积陆棚; 十字铺—宝塔—临湘组沉积期, 重新发育以灰岩为主的碳酸盐岩, 为陆表海碳酸盐岩缓坡环境; 五峰组沉积期, 加里东运动导致在川东南形成局限的深水海湾环境, 沉积了一套富有机质页岩。总体上, 四川盆地奥陶纪沉积演化经历了由陆表海浅水台地到混积陆棚、再演变为陆表海缓坡、最后演变为滞留深水陆棚的过程。

关键词: 古地理; 古隆起; 奥陶系; 沉积演化; 陆表海台地

中图分类号: P531

文献标识码: A

Evolution of the Ordovician sedimentary system and paleogeographic reconstruction in the Sichuan Basin, China

YAN Yuhao^{1,2}, CHEN Anqing^{1,2*}, ZHANG Benjian³, YANG Ouwen^{1,2}, ZHANG Xihua³, ZHOU Gang³,
YANG Shuai^{1,2}, SUN Shi¹, CHEN Hongde^{1,2}

(1. Key Laboratory of Deep-time Geography and Environment Reconstruction and Applications, MNR & Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: With many large oil and gas fields having been discovered in the Ordovician marine carbonate rocks in the Tarim and

收稿日期: 2023-05-17; 改回日期: 2023-06-07; 责任编辑: 周小琳; 科学编辑: 杨平

作者简介: 颜宇豪 (1998—), 男, 硕士, 主要从事沉积古地理研究工作。E-mail: 1401027945@qq.com

通讯作者: 陈安清 (1981—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积古地理研究与教学工作。E-mail: aqinth@163.com

资助项目: 四川省科技计划创新群体项目 (2023NSFSC1986)

Ordos basins, however, no substantial breakthrough has been made in the oil and gas discoveries in the Ordovician of the Sichuan Basin. Previous exploration focused on karst and fractured reservoirs, and only a few wells were found to have natural flow. Whether there is greater potential of large-scale exploration potential beach reservoirs in the Ordovician of the Sichuan Basin is an urgent question to be answered. Due to the rapid change of lithology, the sedimentary system of the Ordovician is still controversial, which limits the understanding of potential reservoir facies belts to some extent. Based on logging, seismic, and outcrop profile data, the characteristics of Ordovician sedimentary facies in the Sichuan Basin are analyzed, and the lithofacies paleogeographic pattern of each sedimentary period is reconstructed. The results show that during the sedimentary period of the Tongzi–Honghuayuan formations, the Yangtze plate, where the Sichuan Basin is located, was influenced by the Pan-African movement, and the upper Yangtze structure was relatively stable. The dominant sedimentary facies was a carbonate platform, and the sedimentary model was an epigenetic shallow platform. Beach facies dolomite distributed around the periphery of the Leshan-Longnusi palaeouplift. During the sedimentary period of the Meitan Formation, due to the rise in global sea level, the tectonic environment changed into a strong compressive background dominated by the Caledonian movement, the uplift and depression pattern was intensified, and the sedimentary environment was mainly mixed shelf. In the sedimentary period of the Shizipu–Baota–Linxiang formations, carbonate deposits dominated by limestone redeveloped, representing an epigenetic carbonate gentle slope environment. During the sedimentary period of the Wufeng Formation, the Caledonian movement led to the formation of a limited deep-water bay environment in the southeast Sichuan Basin, where a set of organic-rich shales were deposited. In general, the Ordovician sedimentary evolution in the Sichuan Basin has undergone a process from epicontinental shallow platform to mixed shelf, then to epicontinental gentle slope, and finally to lingering deep shelf.

Key words: paleogeography; Paleo-uplift; Ordovician; sedimentary evolution; epeiric carbonate platform

0 引言

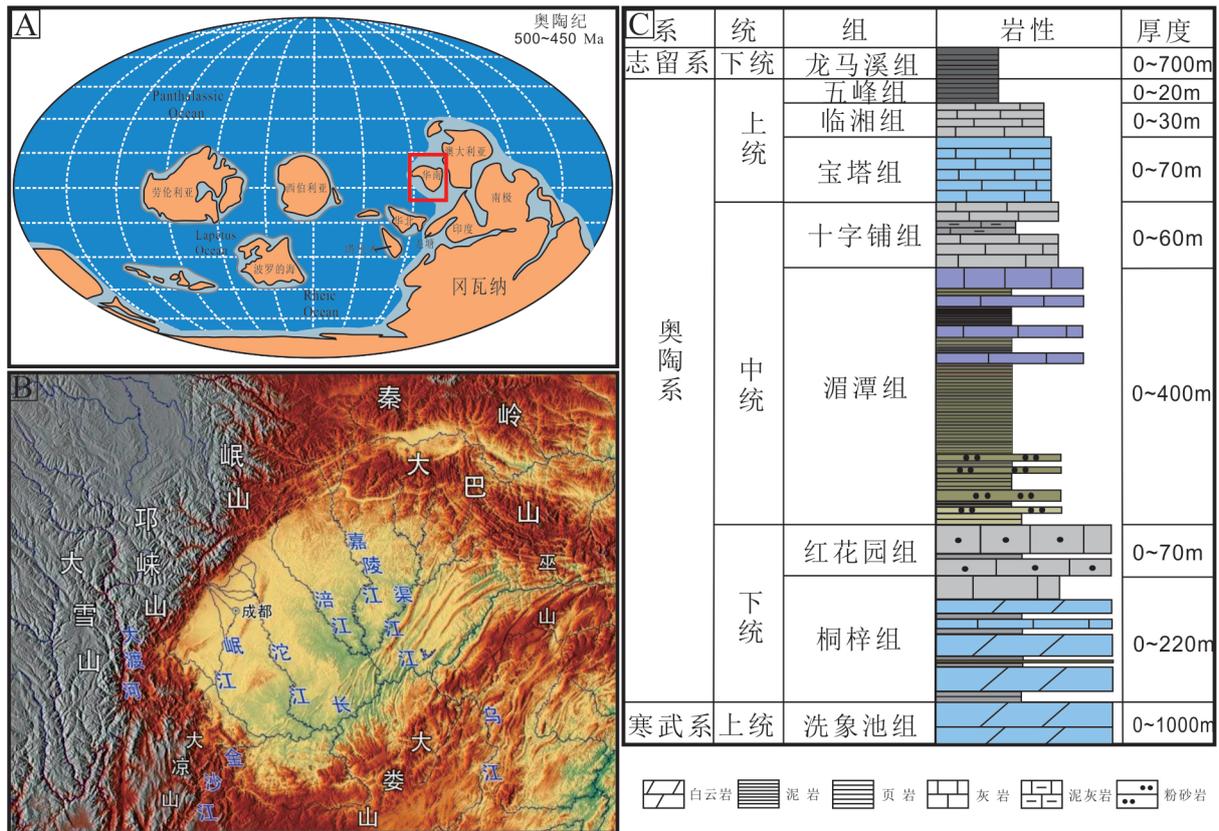
四川盆地是我国天然气储量最大的盆地(郭旭升等, 2022; 胡东风等, 2021; 刘树根等, 2011)。奥陶系是全球重要碳酸盐岩含油气层系, 相继在塔里木盆地、鄂尔多斯盆地等多地发现大型气田(梁狄刚等, 2000; 夏日元等, 1999), 但四川盆地的奥陶系至今未取得大的突破。已有的钻井揭示奥陶系上统和下统的碳酸盐岩具备储层发育条件(黄文明等, 2011; 杨威等, 2012), 也获得了油气显示(杨威等, 2012; 郭彤楼, 2014; 朱东亚等, 2015), 但关于奥陶系是否发育相控储层及其古地理格局和沉积演化的研究较为薄弱。总体认为该时期上扬子处于加里东旋回的板块汇聚阶段(刘宝珺等, 1994; 马永生等, 2009; 黄福喜等, 2011), 四川盆地的早奥陶世和晚奥陶世为碳酸盐岩镶边台地, 发育有局限台地和边缘浅滩, 中奥陶世为混积陆棚沉积, 晚奥陶世未演变为深水陆棚环境(李皎等, 2015)。大部分勘探研究认为奥陶系储层主要是岩溶储层和裂缝型储层, 也有人认为其具备发育滩相储层的潜力(黄文明等, 2011; 杨威等, 2012; 李伟等, 2014; 朱东亚等, 2015)。鉴于此, 本文在前人研究成果的基础上, 通过对四川盆地钻井资料和野外露头的沉积学分

析, 以及对各钻井的地层厚度统计, 识别了沉积相类型及其发育特征, 重建了各沉积期的岩相古地理图, 揭示了奥陶纪沉积体系与岩相古地理格局演化。

1 区域地质背景

四川盆地位于华南板块的上扬子地区(图 1B), 以西北的龙门山褶皱带、北部的米仓山隆起、东北的大巴山褶皱带、东南的湘鄂西褶皱带、西南的峨眉山凉山褶皱带为界, 总面积约为 $24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 是一个典型的叠合盆地(Wang et al., 2013; 何登发等, 2011; 张国伟等, 2013)。奥陶纪时期, 四川盆地所在的扬子板块处于低纬度地区(图 1A)。早奥陶世总体为相对稳定的内克拉通拗陷盆地, 中、晚奥陶世, 上扬子由于加里东运动, 构造背景逐渐向挤压背景演变, 四川盆地奥陶纪周缘多个古隆起发生隆升, 沉积环境变为局限海盆(汪泽成等, 2002; 黄文明等, 2011; 李皎等, 2015)。

四川盆地奥陶系的地层分布广泛, 可以分为龙门山、川中地区、川东—黔北和鄂川 4 大分区, 各地区岩性序列有一定区别。下统包括发育白云岩的桐梓组及发育云质灰岩或灰岩的红花园组; 中统为涪潭组及十字铺组, 涪潭组主要为黑色泥页岩夹薄层粉砂岩或灰岩层, 十字铺组以灰岩夹泥页岩为



A. 奥陶纪全球古地理图 (Huang et al., 2018); B. 四川盆地高程地貌图; C. 四川盆地奥陶系地层划分综合柱状图

图1 四川盆地奥陶纪地质概况

Fig. 1 Geological overview of the Ordovician in the Sichuan Basin

主;上统包括宝塔组、临湘组及五峰组,宝塔组以发育泥质龟裂灰岩为特征,临湘组发育泥质灰岩,五峰组岩性突变,主要发育黑色页岩(图1C)。

2 沉积相体系分析

本文在野外剖面 and 岩心的沉积相标志分析的基础上,确立了沉积相划分方案。然后通过岩心沉积学特征及其测井响应关系,结合野外剖面的沉积相演化特征,对沉积相在钻井上的垂向演化序列进行了详细分析(图2)。上扬子板块在奥陶纪早期基本继承了晚寒武世洗象池组沉积期的沉积格局,受加里东运动的影响,中、晚奥陶世的沉积特征有较大的变化。奥陶系下统桐梓组—红花园组以发育局限台地为主,测井电性上呈现出叠置的低GR箱型结构;中统的湄潭组以陆棚沉积体系为特征,测井电性变为齿化高GR形态;中统的十字铺组至上统的宝塔—临湘组,GR再次变低,但和桐梓组有所不同,GR曲线较稳定,并且一般都是一个单的低GR箱型结构,反映出沉积环境较为稳定,岩性

变化较小;最终到临湘—五峰组再次演变为陆棚相沉积,此时GR突然增高。总体上,四川盆地奥陶系主要发育碳酸盐岩台地、碳酸盐岩缓坡、碎屑陆棚和混积陆棚4类沉积体系。

2.1 碳酸盐岩台地

碳酸盐岩台地主要发育于奥陶世早期的桐梓组—红花园组。该时期,研究区整体以局限台地亚相为主,发育浅灰色—深褐色砂质白云岩、泥质白云岩等岩石类型,可识别出潮坪、浅滩、潟湖、台地边缘等微相。

该时期研究区水体较浅,由于潮汐作用,古隆起周围潮坪相对发育,相带受古隆起的控制,在测井电性上呈现出叠置的低GR箱型结构,为白云岩的加积或进积体。主要发育低能潮缘滩间白云岩和潮下泥灰岩,可见潮汐作用形成的纹层构造。

台内浅滩以北东—南西向分布于局限台地之中,呈席状透镜体。岩石类型为浅灰色砂屑白云岩、角砾状白云岩及生屑白云岩等(图3A),生物碎屑主要为三叶虫、棘皮类、瓣鳃类、介形虫等(杨威

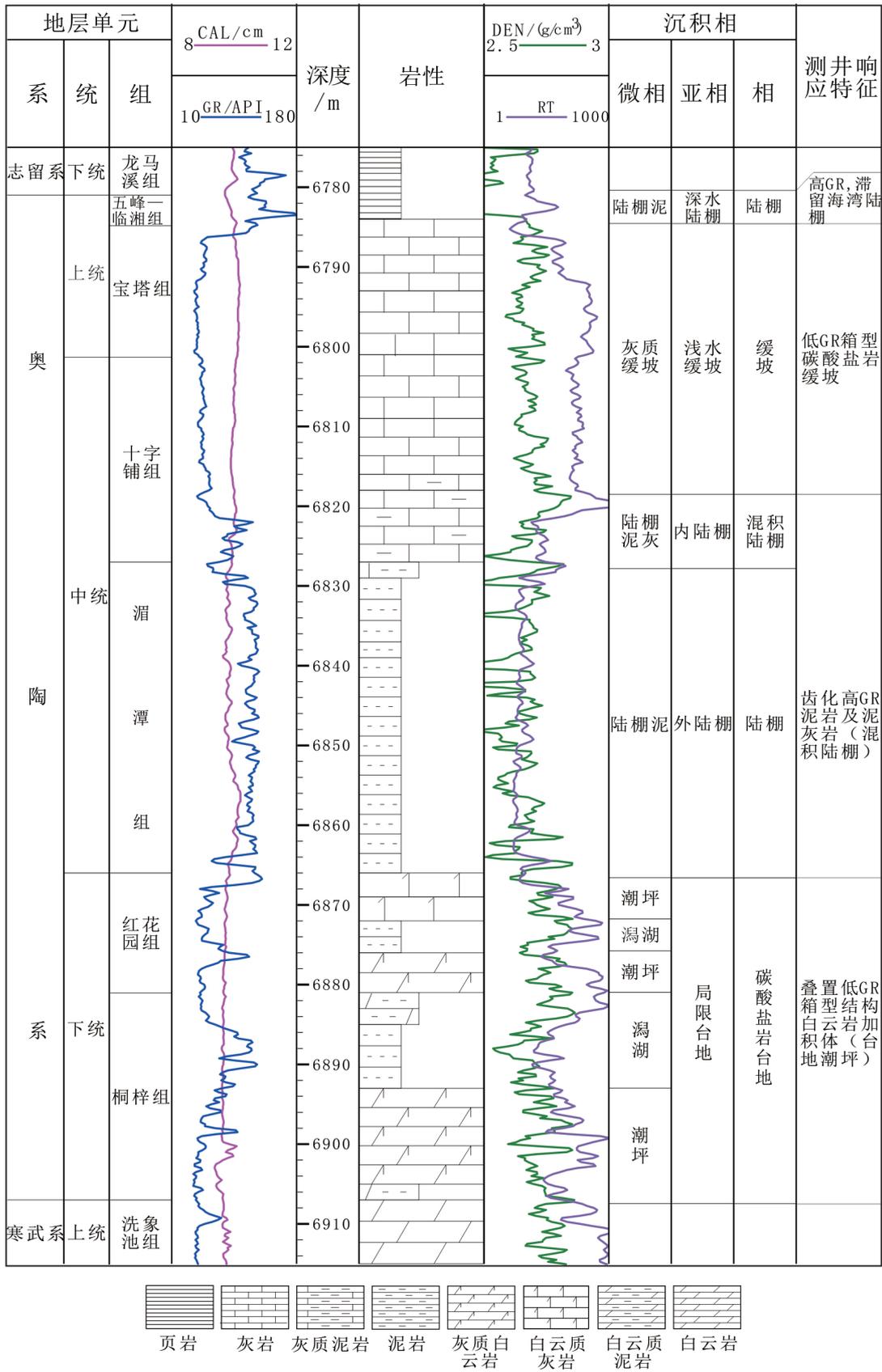


图2 蓬深2井沉积体系划分及测井响应特征

Fig. 2 Sedimentary system division and logging response characteristics of Well Pengshen2

等, 2012)。

潟湖的主要岩石类型为页岩及白云质泥岩, 在红花园组识别出两处膏岩沉积, 反映了低洼、水体浅且含盐度较高的沉积环境, 属于咸化潟湖微相的典型特征。

台地边缘相主要发育于红花园组沉积期, 发育交错层理等沉积构造。此时高能碳酸盐沉积物增多, 白云质沉积物减少, 主要发育鲕粒灰岩、亮晶胶结生物碎屑灰岩等(图 3B), 生物碎屑主要为介壳、腹足、横板珊瑚、三叶虫、腕足(图 3C)等, 反映高能的沉积环境。

2.2 混积陆棚

混积陆棚主要发育于中奥陶世湄潭组时期, 是四川盆地奥陶系重要沉积环境之一。该时期, 研究区主要发育细粒沉积的泥页岩, 并有碎屑岩与薄层碳酸盐岩互层, 形成陆源碎屑-碳酸盐岩混积陆棚相, 测井电性表现为齿化高 GR 形态, 可分为浅水

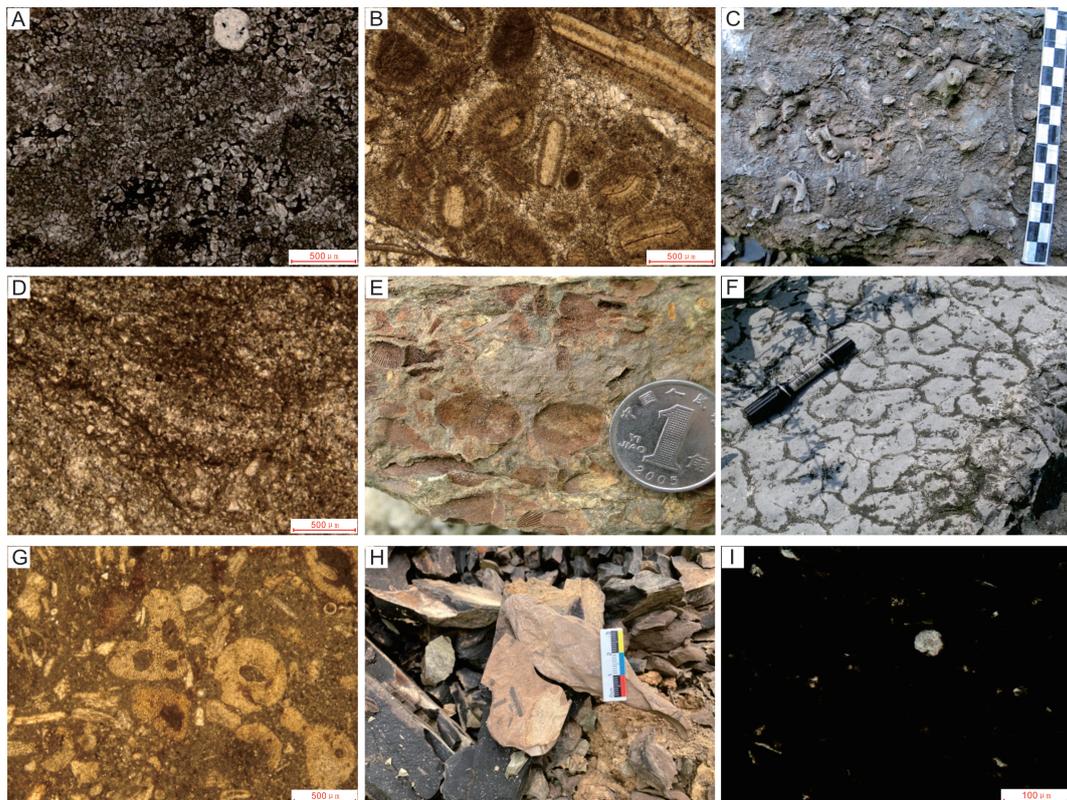
陆棚和深水陆棚两种亚相。浅水陆棚亚相主要发育低能泥微晶灰岩和灰质泥岩混合沉积(图 3D), 生物化石丰富(图 3E), 偶有砾屑灰岩发育, 深水陆棚亚相页岩所占比例较高, 偶夹有瘤状泥灰岩。

2.3 碳酸盐岩缓坡

奥陶系中统十字铺组及上统宝塔组、临湘组沉积期, 四川盆地整体为浅海环境, 发育碳酸盐岩缓坡相, 特点是分布广、坡度小、水体较深, 测井曲线中 GR 较稳定, 测井形态表现为一个单的低 GR 箱型结构, 反映出沉积环境较为稳定、岩性变化较小的特征。岩性以内缓坡泥晶胶结生物碎屑灰岩和外缓坡含生屑泥晶灰岩及瘤状灰岩为主, 颗粒含量较少, 发育著名的宝塔组泥质龟裂纹灰岩(图 3F), 沉积少量生物碎屑灰岩, 以泥晶胶结为特征(图 3G), 指示水体沉积能量较弱。

2.4 碎屑陆棚

奥陶系上统的五峰组, 四川盆地整体为局限海



A. 砂质残余砂屑粉晶白云岩, 桐梓组, 华蓥山李子垭剖面; B. 含生物碎屑亮晶鲕粒灰岩, 红花园组, 华蓥山李子垭剖面; C. 造礁格架生物灰岩, 红花园组, 华蓥山李子垭剖面; D. 灰质泥岩, 湄潭组, 华蓥山李子垭剖面; E. 含生物泥岩, 湄潭组, 华蓥山溪口剖面; F. 泥质龟裂纹灰岩, 宝塔组, 华蓥山溪口剖面; G. 泥晶胶结生物碎屑灰岩, 宝塔组, 华蓥山李子垭剖面; H. 黑色页岩中的笔石化石, 五峰组, 华蓥山李子垭剖面; I. 页岩中的放射虫, 五峰组, 接龙剖面

图 3 四川盆地及邻区奥陶系典型岩相及岩石类型

Fig. 3 Typical lithofacies and rock types of the Ordovician in the Sichuan Basin and its adjacent areas

盆环境,发育碎屑陆棚相。该时期,测井曲线中GR再次突然变高,密度和电阻也都有相应的响应,并且全区非常一致。主要沉积了五峰组黑色页岩,常发育笔石化石(图3H),以页岩中的放射虫为特征(图3I),表明该时期水体深,以还原环境为主,非常有利于有机质的形成。因此,五峰组有机质含量高,是四川盆地重要的烃源岩和页岩气勘探目标(Nie et al., 2023; Yan et al., 2018)。

3 岩相古地理特征

岩相古地理是盆地演化研究的重要基础(牟传龙, 1992)。在上述单井和露头沉积体系分析的基础上,对四川盆地北东—南西和北—南两个方向的网状骨架连井剖面开展了详细的连井沉积相对比(图4,图5)。然后对100多口井进行了各地层组的地层厚度统计,进一步根据过井地震剖面,明确了四川盆地奥陶系的地层尖灭线和地层厚度分布。基于前人的相关研究成果(杨威等, 2012; 李皎等, 2015; 胡华蕊等, 2019),综合分析各单井和连井剖面的沉积相分析结果,结合地层厚度变化趋势的约

束,最终确定各沉积环境的边界,重建了各个组沉积时期的古地理。总体上,四川盆地奥陶纪期间的古地理格局呈现出西北高东南低的特征,并经历了两次海平面的升降旋回。

3.1 桐梓组沉积期

下奥陶统桐梓组沉积期基本继承了晚寒武世洗象池组的沉积格局(图6),四川盆地为相对稳定的内克拉通拗陷,沉积环境为浅海,整体表现为以局限台地为主的浅水碳酸盐岩台地。总体上,沿着古隆起东侧由西向东依次为潮坪、局限台地、台地边缘、缓坡及陆棚沉积,台内浅滩在局限台地中呈补丁状分布。潮坪围绕古隆起分布于盆地西部的剑阁—乐山一带,为砂岩夹页岩相沉积。局限台地相分布在上扬子克拉通盆地的中部,岩性以白云岩为主,夹灰岩、页岩,在池7井周围,沉积深度可达80 m,泥页岩的主要富集区域在达州一带,厚度较小。局限台地内部有多处台内浅滩,岩性为浅灰色砂屑白云岩,台内浅滩分布形态受来自现今扬子北东方向的海流影响,呈现出近北东—南西向的多排有序分布。台地边缘滩分布在盆地东北方向,紧

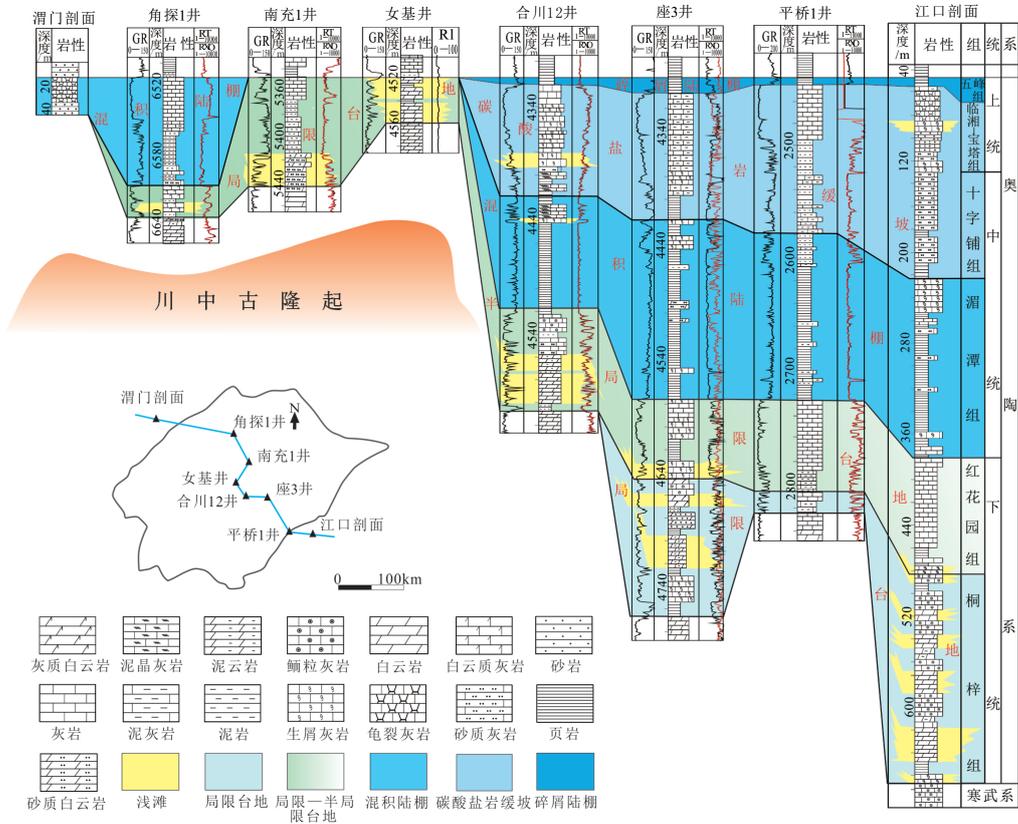


图4 四川盆地奥陶系NW-SE方向连井沉积相对比图

Fig. 4 Relative map of the Ordovician NW-SE direction connected well deposits in the Sichuan Basin

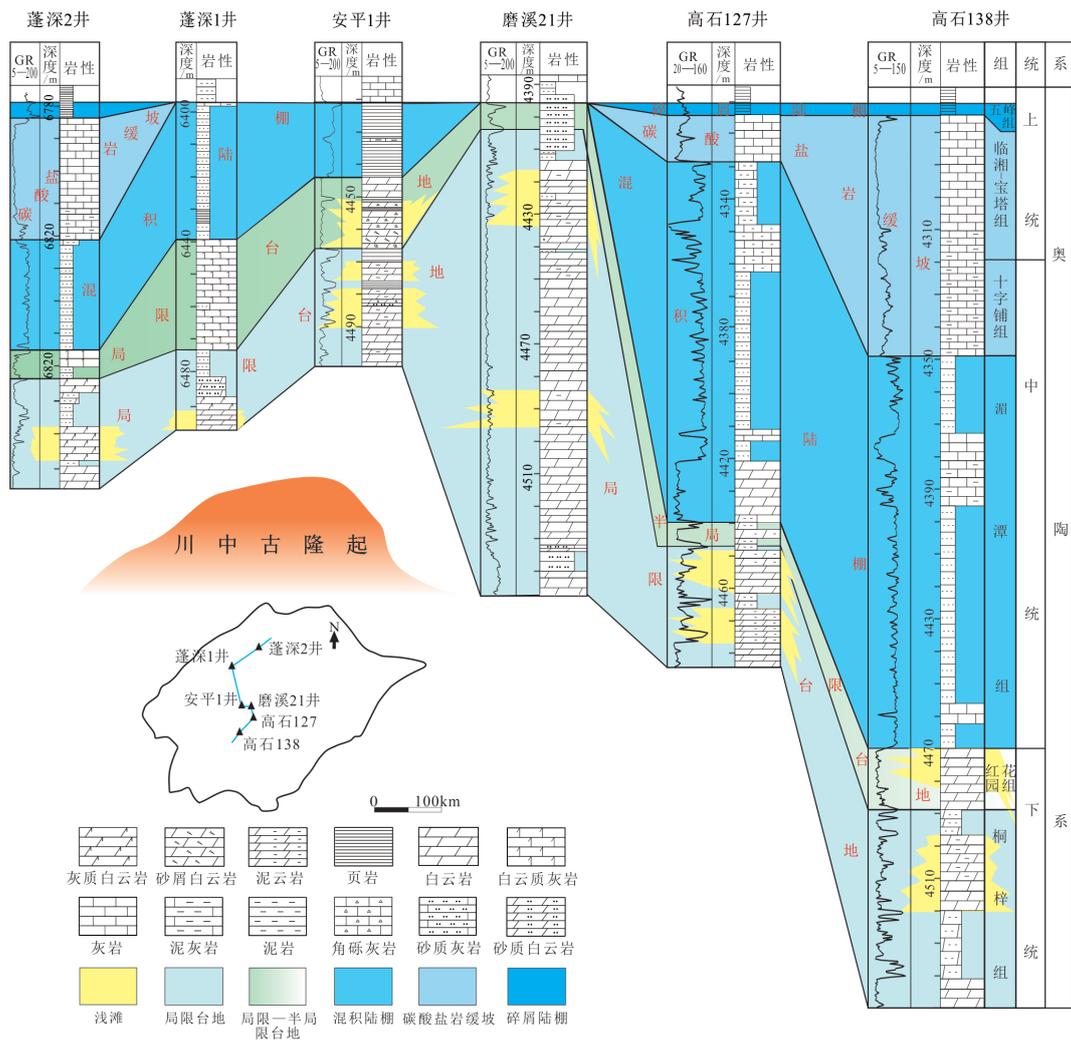


图5 四川盆地奥陶系 N-S 方向连井沉积相对比图

Fig. 5 Relative map of the Ordovician N-S direction connected well deposits in the Sichuan Basin

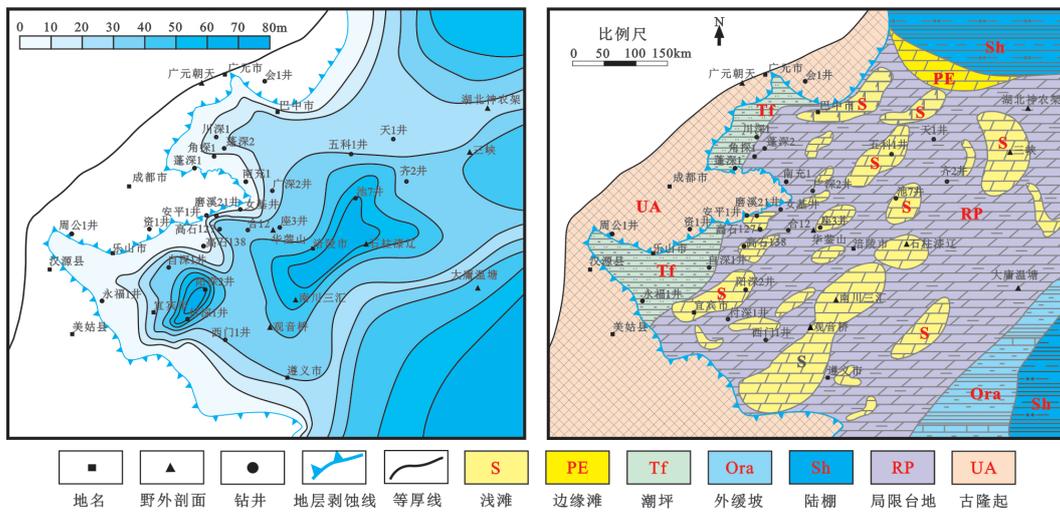


图6 桐梓组沉积厚度及岩相古地理图

Fig. 6 Sedimentary thickness and lithofacies paleogeographic maps of the Tongzi Formation

邻陆棚, 岩石类型为生屑灰岩、砂屑灰岩夹白云岩沉积。

3.2 红花园组沉积期

下奥陶统红花园组沉积期, 四川盆地的沉积构造格局及台地性质基本继承了桐梓组古地理格局(图7), 上扬子克拉通仍然表现为以局限台地为主的碳酸盐岩台地, 四周被古隆起所围限。整体上, 该区域岩相展布由西向东依次仍为潮坪、局限台地、台地边缘、缓坡及陆棚沉积。潮坪发育于古隆起两翼, 规模相对于桐梓组时期有所缩小。台内浅滩呈北东—南西向展布, 规模也有所减小, 古隆起南侧的浅滩相对规模较大, 在古隆起东部池7井、南部阳深2井一带, 浅滩沉积厚度大, 可达到70 m,

主要发育灰岩沉积, 沉积物云质减少而灰质增多, 沉积亮晶胶结的颗粒灰岩, 浅滩多见生物碎屑, 如在华蓥山李子垭剖面发育鲕粒灰岩。台地边缘分布变广, 发育鲕粒生物碎屑灰岩, 台地边缘中可见两处膏盐潟湖相沉积, 分布于大庸温塘—长阳两河口一带。在盆地北东及南东边缘为缓坡、陆棚沉积, 岩石类型以泥岩、泥页岩为主。

3.3 涪潭组沉积期

中奥陶统涪潭组沉积期, 四川盆地古地理格局发生变化(图8), 整体以混积陆棚为主。受加里东运动的影响, 东南沿海及南缘地区褶皱、隆起为陆, 四川盆地及周缘的古地理格局也发生了变化, 整体表现为盆缘及盆内隆起开始出现, 周边的大陆边缘

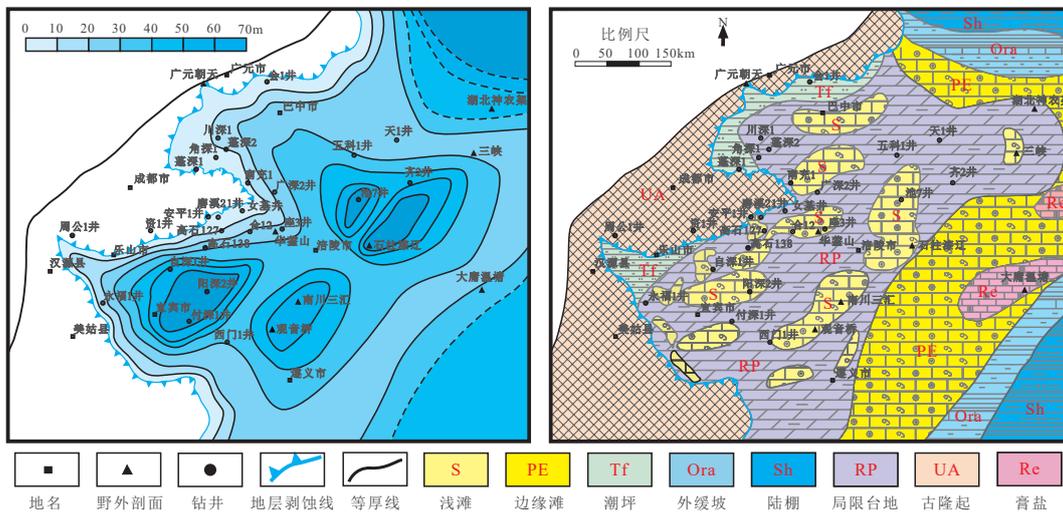


图7 红花园组沉积厚度及岩相古地理图

Fig. 7 Sedimentary thickness and lithofacies paleogeographic maps of the Honghuayuan Formation

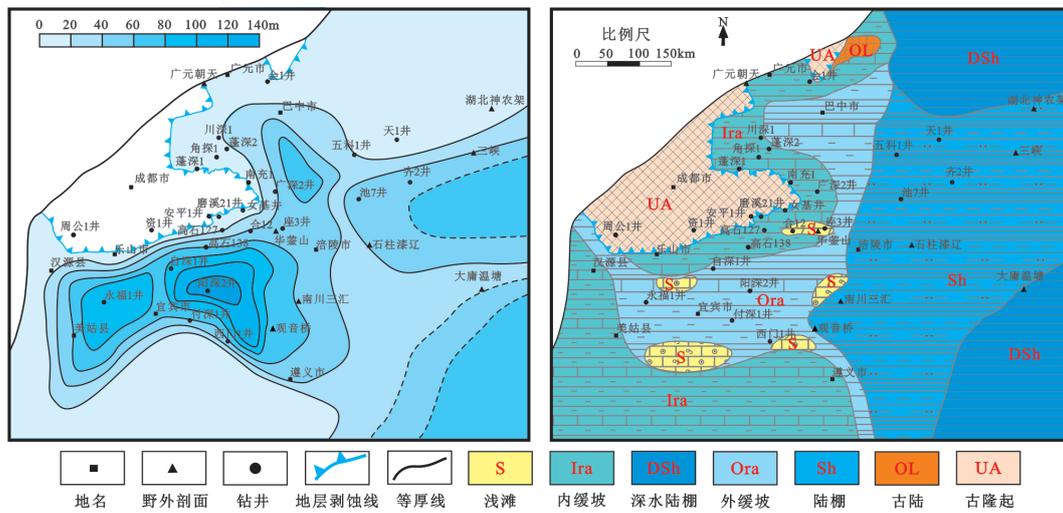


图8 涪潭组沉积厚度及岩相古地理图

Fig. 8 Sedimentary thickness and lithofacies paleogeographic maps of the Meitan Formation

盆地,转变为前陆盆地,从而导致华南板块快速海侵,海平面急剧上升,西部南侧及北部的古隆起被淹没,仅保留乐山—龙女寺古隆起及部分北部隆起区。乐山—龙女寺古隆起具有向东延伸的特点,而北部隆起区略有缩小。

该时期,岩相展布由西向东依次为内缓坡—外缓坡—陆棚—深水陆棚。海平面的相对升高以及陆源碎屑物的增多,使盆地东南缘的碳酸盐岩台地被海水淹没而停止发育,沉积物中碎屑组分逐渐增多,碳酸盐岩台地被混积陆棚取代。总体上,四川盆地以陆源细碎屑输入沉积为主,岩性为泥岩、泥页岩,厚度较大,在乐山—龙女寺古隆起东侧呈环带状,该时期的烃源岩相较于桐梓组时期普遍更厚、更为富集,在永福1井—阳深2井附近,烃源岩厚度可达140 m。在沉积期晚期,灰质成分增多,泥岩中夹有薄层灰岩,表明有碳酸盐沉积环境恢复的迹象。

3.4 十字铺—宝塔—临湘组沉积期

中奥陶统十字铺组至上奥陶统宝塔—临湘组沉积期(图9),四川盆地沉积格局发生明显分异,表现为黔中隆起形成、盆地东北部出现斜坡相沉积及盆地东部边缘出现深水裂陷盆地沉积。

岩相展布由西向东依次为内缓坡—外缓坡—陆棚—深水陆棚—盆地。整体上,四川盆地以碳酸盐岩缓坡相为主,黔东—湘西地区可见深水陆棚相,而缓坡相区相对较高的部位具有生物丘和低能滩分布,在古隆起东南侧的阳深2井—合12井一带出现小规模浅滩沉积。该沉积期发育了一套碳酸

盐岩,外缓坡相以灰岩为主,规模相较于红花园组沉积期较为局限,沉积物颗粒含量比早奥陶世的灰岩少,以泥晶胶结为特征,宝塔龟裂纹灰岩分布非常广泛,指示沉积环境为水深低能环境。内缓坡相以白云岩为主,在东边涪陵一带则为深水陆棚的页岩、泥页岩沉积。四川盆地古隆起依然向东扩大,女基井—女深5井已处于剥蚀区域,缺失了该时期的体系域沉积。

3.5 五峰期沉积期

晚奥陶世五峰组沉积期,由于加里东运动的强挤压作用影响,四川盆地被困为一局限海盆(图10),主要发育浅海深水沉积。

岩相展布由西向东依次为陆棚—深水陆棚。四川盆地的整体的沉积格局为东部南缘为浅水陆棚沉积,西部北缘为深水陆棚沉积。十字铺—宝塔—临湘组沉积期发育的碳酸盐岩缓坡相灭亡,演变为陆棚环境,其中西部水体相对较浅,以浅水陆棚为主,东部发育深水陆棚。岩石类型主要为黑色页岩,可见笔石及页岩中的放射虫,指示深水还原环境,有机质保存较好,是油气勘探的重点层位。

4 沉积演化模式

沉积模式是油气勘探预测的重要基础。关于四川盆地奥陶纪的碳酸盐岩沉积模式的认识,有人认为是碳酸盐岩镶边台地(许效松等,2001;严德天等,2008),也有人提出是由台地向缓坡转换(杨威等,2012;李皎等,2015;胡华蕊等,2019)。基于前述的单井沉积相分析、连井沉积相对比和岩相古

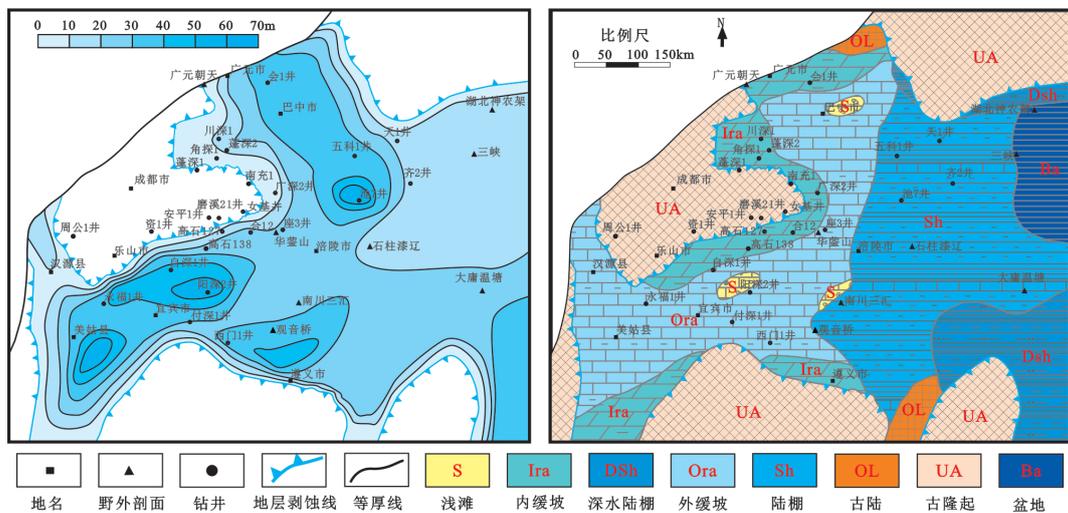


图9 十字铺—宝塔—临湘组沉积厚度及岩相古地理图

Fig. 9 Sedimentary thickness and lithofacies paleogeographic maps of the Shizipu–Baota–Linxiang formations

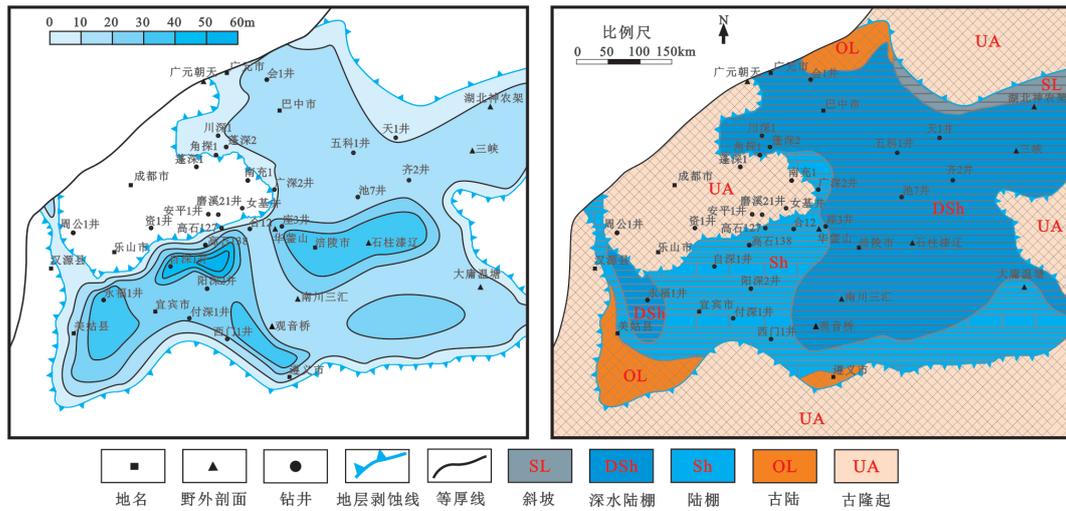


图 10 五峰组沉积厚度及岩相古地理图

Fig. 10 Sedimentary thickness and lithofacies paleogeographic maps of the Wufeng Formation

地理重建研究,重新系统认识了四川盆地奥陶纪不同时期的沉积模式,揭示了四川盆地奥陶纪由陆表海浅水台地到混积陆棚,再演变为陆表海缓坡,最后演变为滞留深水陆棚的过程(图 11)。

奥陶世早期,四川盆地基本继承了晚寒武世洗象池组的沉积格局,四川盆地主体处于浅水陆表海碳酸盐岩台地环境。此时扬子板块主要受泛非运动(郁南运动)的影响,来自川西的构造应力造成乐山—龙女寺古隆起持续发育(汪正江等, 2022),古隆起以东,沉积相带依次为潮坪、局限台地、台地边缘滩、台缘斜坡。台地内部发育了稳定的台内浅滩,呈近北东向补丁状分布在东部池 7 井一带,滩体较发育,沉积厚度大。我们通过对岩心及镜下薄片的观察,识别出了大量潮坪相的特征。同时,测井电性上呈现出叠置的低 GR 箱型结构,密度值一般在 2.8 左右,应为白云岩的加积或进积体,表明碳酸盐岩台地内部广泛发育潮坪相,在古隆起附近呈席状分布。潮坪上常发育薄层滩体,偶有泥岩条带夹层。红花园组沉积期,测井曲线指示出多个薄层膏盐,在大庸温塘至长阳两河口之间膏盐层厚度较大,桐梓组时期亦存在两处膏岩发育区(胡华蕊等, 2019),指示早奥陶世为非常浅的水体,是典型陆表海环境。古地理背景上,四川盆地所在的上扬子板块在奥陶纪位于北纬 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间(图 1A),有利于蒸发岩发育(Wardlaw, 1972; Borchert, 1977)。构造性质上,上扬子板块内部为相对稳定的克拉通内拗陷盆地,构造—沉积分异较弱,为陆表海浅水台地沉积模式(薛平, 1986; Irwin, 1965),有利于台内

白云岩储集体的发育(黄福喜等, 2011; 陈安清等, 2017)。

中奥陶世,构造—沉积格局主控因素由泛非运动(郁南运动)主控转变为加里东运动主控(汪正江等, 2012),构造掀斜作用使得上扬子板块该时期发生快速海侵并造成东南缘的挤压,形成了雪峰造山带及川东南的深水拗陷,早奥陶世的碳酸盐岩台地淹没衰退。由于加里东运动的发生,中—上扬子板块在奥陶纪进入第一幕弱挤压构造背景,扬子西缘的陆源碎屑供给大幅度增多,沉积环境转变为开阔的混积陆棚环境。乐山—龙女寺古隆起以东,依次发育潮坪、内缓坡、外缓坡、深水陆棚—盆地。潮坪相主要分布于古隆起东侧的潼南县—岳池县—西充县一带;内缓坡发育有多处浅滩,浅滩分布于南川县、习水县、美姑县、珙县及犍为县等。整个中奥陶世以泥页岩沉积为主,并且沉积的厚度较大,在晚期灰质成分增多,偶夹薄层灰岩,表明碳酸盐岩沉积环境有恢复的迹象(刘伟等, 2017; 胡华蕊等, 2019)。

晚奥陶世,加里东运动造成扬子板块不同区的相对海平面差异性升降,在全球海平面上升背景下,川中一带的区域海平面相对下降,并且由于构造活动减弱,陆源碎屑物的供给减少,碳酸盐工厂再次恢复,上扬子板块重新发育了一套以灰岩为主的碳酸盐岩。但该时期没有广泛分布的滩相,全区大部分地区为微晶灰岩,俗称宝塔龟裂纹灰岩,属于碳酸盐岩缓坡环境。缓坡相区相对较高的部位偶见生物丘和低能滩分布。颗粒含量较早奥陶世少,并

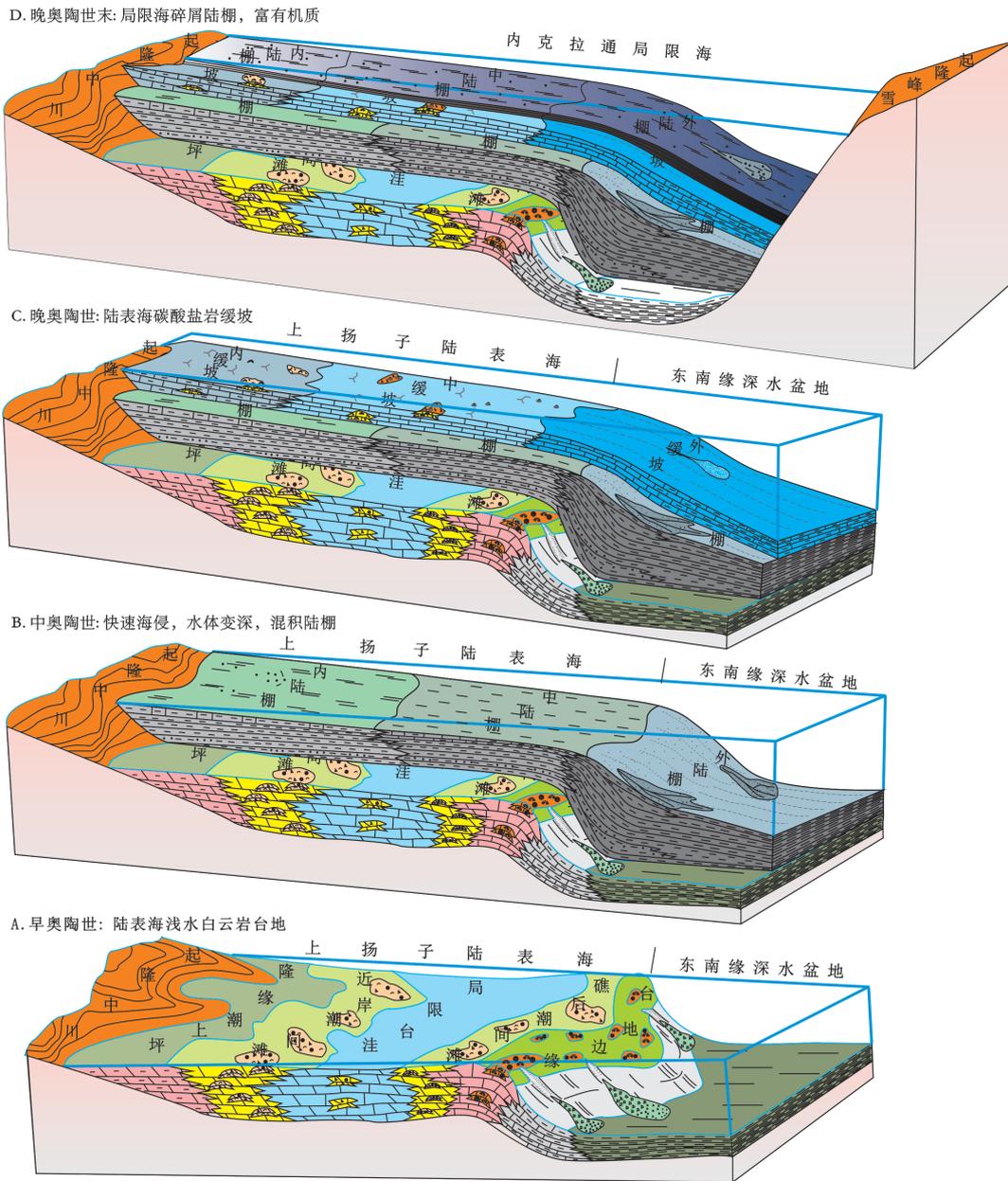


图 11 四川盆地奥陶纪沉积演化模式

Fig. 11 Ordovician sedimentary evolution model for the Sichuan Basin

且以泥晶胶结为特征,发育泥晶生物碎屑灰岩和含生屑泥晶灰岩。黔东—湘西一带出现深水陆棚相。

奥陶纪末,中—上扬子受加里东运动强挤压作用的影响,四川盆地周缘多个古隆起持续隆起与扩张,四川盆地成为了一个局限海盆(牟传龙等, 2010)。局限海盆内的相对海平面的快速上升,周缘古隆起的陆源物质供给增多,使得碳酸盐沉积环境再次关闭,变成了一个滞留的海湾陆棚环境,沉积水体以还原环境为主,沉积了五峰组富有机质黑

色笔石页岩,一直持续到志留纪龙马溪组沉积期,形成了四川盆地的一套重要的烃源岩,也是页岩气勘探的主要目标。

5 结论

(1)基于岩心和露头的沉积相标志,明确了川中地区的沉积体系类型,包括碳酸盐岩台地体系、混积陆棚体系、碳酸盐岩缓坡体系和碎屑陆棚体系。

(2)基于沉积相横向对比、沉积相垂向演化和

各层序的厚度分布等,进行四川盆地奥陶纪的岩相古地理重建,揭示了川中地区由陆表海浅水台地到混积陆棚,再演变为陆表海缓坡,最后演变为滞留深水陆棚的过程。

(3)早奥陶世桐梓组—红花园组沉积期的浅水碳酸盐岩台地发育受加里东古隆起地貌控制的滩相,具有良好的相控储层勘探潜力;晚奥陶世宝塔—临湘期的碳酸盐岩缓坡亦发育一定的滩相储层,是次要的潜在勘探层系。

References

- Borchert H, 1977. On the Formation of Lower Cretaceous Potassium Salts and Tachhydrite in the Sergipe Basin (Brazil) with Some Remarks on Similar Occurrences in West Africa (Gabon, Angola etc.) [J]. *Time-and Strata-Bound Ore Deposits*: 94–111.
- Chen A Q, Yang S, Chen H D, et al., 2017. 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.
- Guo T L, 2014. Characteristics and exploration potential of Ordovician reservoirs in Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 35 (3): 372–378.
- Guo X S, Zhao Y Q, Shen B J, et al., 2022. Marine shale gas exploration theory in southern China: review and prospects[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96 (1): 172–182.
- 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.
- Hu D F, Wang L J, Huang R C, et al., 2021. Petroleum Exploration History and Enlightenment in Sichuan Basin: A Case Study on Sinopec Exploration Areas[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42 (3): 283–290.
- Hu H R, Xing F C, Hou M C, et al., 2019. Ordovician Sequence and Lithofacies Paleogeography Reconstruction in Upper Yangtze Region and Its Implications for Oil and Gas Exploration[J]. *Earth Science*, 44 (3): 798–809.
- Huang B C, Yan Y G, Piper J D A, et al., 2018. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during Late Paleozoic and Early Mesozoic times[J]. *Earth Science Reviews*, 186 (1): 8–36.
- Huang F X, Chen H D, Hou M C, et al., 2011. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Caledonian (Cambrian-Silurian) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (8): 2299–2317.
- Huang W M, Liu S G, Ma W X, et al., 2011. Petroleum exploration potential of the Ordovician in the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 32 (3): 461–473.
- Irwin M L, 1965. General theory of epeiric clear water sedimentation [J]. *AAPG Bulletin*, 49 (4): 445–459.
- Li J, He D F, Mei Q H, 2015. Tectonic-depositional environment and prototype basins evolution of the Ordovician in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36 (4): 427–445.
- Li W, Yi H Y, Hu W S, et al., 2014. Tectonic evolution of Caledonian paleohigh in the Sichuan Basin and its relationship with hydrocarbon accumulation[J]. *Natural Gas Industry*, 34 (3): 8–15.
- Liang D G, Zhang S C, Zhang B M, et al., 2000. 7. Understanding On Marine Oil Generation In China Based On Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, (4): 534–547.
- Liu B J, Xu X S, 1994. Paleogeographic atlas of Sinian Triassic in South China[M]. Beijing: Science Press, 61–73.
- 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]. *Chinese Journal of Geology*, 46 (1): 233–257.
- Liu W, Hong H T, Xu A N, et al., 2017. Lithofacies Paleogeography and Exploration Potential of Ordovician in Sichuan Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 22 (4): 1–10.
- Ma Y S, Chen H D, Wang G L, et al., 2009. Sequence Stratigraphy and Palaeogeography in South China[M]. Science Press, Beijing.
- 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.
- Mou C L, Xu X S, Lin M, 1992. Sequence stratigraphy and compilation of lithofacies and palaeogeographic maps: An example from the Devonian strata in southern China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 12 (4): 1–9.
- Nie H K, Jin Z J, Li P, et al., 2023. Deep shale gas in the Ordovician-Silurian Wufeng–Longmaxi formations of the Sichuan Basin, SW China: Insights from reservoir characteristics, preservation conditions and development strategies[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 244: 105521.
- Wang Y J, Fan W M, Zhang G W, et al., 2013. Phanerozoic tectonics of the South China Block: Key observations and controversies[J]. *Gondwana Research*, 23 (4): 1273–1305.
- Wang Z C, Zhao W Z, Zhang L, et al., 2002. Tectonic sequences and natural gas exploration of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 76–100.
- Wang Z J, Wang Q Y, Yang F, 2022. Study on the deposition and filling process of the Mianyang-Changning cratonic rift: Implications for the Pan-African orogeny on the western margin of Yangtze Block[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (3): 350–367.
- Wang Z J, Xie Y, Yang P, et al., 2012. Marine basin evolution and oil and gas geology of Sinian-early Paleozoic period on the western side of the Xuefeng Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 31 (11): 1795–1811 (in Chinese with English abstract).
- Wardlaw N C, 1972. Unusual Marine Evaporites with Salts of Calcium and Magnesium Chloride in Cretaceous basins of Sergipe, Brazil[J]. *Economic Geology*, 67 (2): 156–168.
- Xia R Y, Tang J S, Guan B Z, et al., 1999. Ordovician palaeokarst landform in Ordos basin and gas enrichment characteristics[J]. *Oil & Gas Geology*, 20 (2): 37–40 (in Chinese with English abstract).

abstract) .

- Xu X S, Wan F, Yin F G, et al., 2001. Environment facies, ecological facies and diagenetic facies of Baota Formation, of Late Ordovician[J]. Mineral Petrol, (3) : 64-69.
- Xue P, 1986. Origin of evaporites in a vast epicontinental platform sea[J]. Geological Review, 32 (1) : 59-66.
- Yan C N, Jin Z J, Zhao J H, et al., 2018. Influence of sedimentary environment on organic matter enrichment in shale: A case study of the Wufeng and Longmaxi Formations of the Sichuan Basin, China.[J]. Marine & Petroleum Geology, 92: 880-894.
- Yan D T, Wang Q C, Chen D Z, et al., 2008. Sedimentary Environment and Development Controls of the Hydrocarbon Sources Beds: the Upper Ordovician Wufeng Formation and the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Yangtze Area[J]. Acta Geological Sinica, 82 (3) : 321-327.
- Yang W, Xie W R, Wei G Q, et al., 2012. Sequence lithofacies paleogeography, favorable reservoir distribution and exploration zones of the Cambrian and Ordovician in Sichuan Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 33 (202) : 21-34.
- Zhang G W, Guo A L, Wang Y J, et al. 2013. Tectonics of South China continent and its implications[J]. Scientia Sinica (Terrae), 43(10): 1553-1582 (in Chinese with English abstract) .
- Zhu D Y, Zhang D W, Li S J, et al., 2015. Development Genesis and Characteristics of Karst Reservoirs in Lower Assemblage in Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 20 (1) : 33-44.
- 李皎, 何登发, 梅庆华, 2015. 四川盆地及邻区奥陶纪构造-沉积环境与原型盆地演化[J]. 石油学报, 36 (4) : 427-445.
- 李伟, 易海永, 胡望水, 等, 2014. 四川盆地加里东古隆起构造演化与油气聚集的关系[J]. 天然气工业, 34 (3) : 8-15.
- 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等, 2000, 7. 从塔里木盆地看中国海相生油问题[J]. 地学前缘, (4) : 534-547.
- 刘宝珺, 许效松, 1994. 中国南方岩相古地理图集 震旦纪—三叠纪 [M]. 北京: 科学出版社, 61-73.
- 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.
- 刘伟, 洪海涛, 徐安娜, 等, 2017. 四川盆地奥陶系岩相古地理与勘探潜力[J]. 海相油气地质, 22 (4) : 1-10.
- 马永生, 陈洪德, 王国力, 等, 2009. 中国南方层序地层与古地理 [M]. 北京: 科学出版社.
- 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.
- 牟传龙, 许效松, 林明, 1992. 层序地层与岩相古地理编图——以中国南方泥盆纪地层为例[J]. 沉积与特提斯地质, 12 (4) : 1-9.
- 汪泽成, 赵文智, 张林, 等, 2002. 四川盆地构造层序与天然气勘探 [M]. 北京: 地质出版社.
- 汪正江, 王启宇, 杨菲, 等, 2022. 扬子西缘泛非造山与绵阳—长宁克拉通裂陷的沉积充填过程研究[J]. 沉积与特提斯地质, 42 (3) : 350-367.
- 汪正江, 谢渊, 杨平, 等, 2012. 雪峰山西侧震旦纪—早古生代海相盆地演化与油气地质条件[J]. 地质通报. 31 (11) : 1795-1811.
- 夏日元, 唐健生, 关碧珠, 等, 1999. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征[J]. 石油与天然气地质, 20 (2) : 37-40.
- 许效松, 万方, 尹福光, 等, 2001. 奥陶系宝塔组灰岩的环境相、生态相与成岩相[J]. 矿物岩石, (3) : 64-69.
- 薛平, 1986. 陆表海台地型蒸发岩的成因探讨[J]. 地质论评, 32 (1) : 59-66.
- 严德天, 王清晨, 陈代钊, 等, 2008. 扬子及周缘地区上奥陶统一志留统烃源岩发育环境及其控制因素[J]. 地质学报, 82 (3) : 321-327.
- 杨威, 谢武仁, 魏国齐, 等, 2012. 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, 33 (202) : 21-34.
- 张国伟, 郭安林, 王岳军, 等, 2013. 中国华南大陆构造与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 43(10): 1553-1582.
- 朱东亚, 张殿伟, 李双建, 等, 2015. 四川盆地地下组合碳酸盐岩多成因岩溶储层发育特征及机制[J]. 海相油气地质, 20 (1) : 33-44.

附中文参考文献

- 陈安清, 杨帅, 陈洪德, 等, 2017. 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.
- 郭彤楼, 2014. 四川盆地奥陶系储层发育特征与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 35 (3) : 372-378.
- 郭旭升, 赵永强, 申宝剑, 等, 2022. 中国南方海相页岩气勘探理论: 回顾与展望[J]. 地质学报, 96 (1) : 172-182.
- 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.
- 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等, 2021. 四川盆地中国石化探区油气勘探历程与启示[J]. 新疆石油地质, 42 (3) : 283-290.
- 胡华蕊, 邢凤存, 侯明才, 等, 2019. 上扬子奥陶纪层序岩相古地理重建及油气勘探启示[J]. 地球科学, 44 (3) : 798-809.
- 黄福喜, 陈洪德, 侯明才, 等, 2011. 中上扬子克拉通加里东期(寒武—志留纪)沉积层序充填过程与演化模式[J]. 岩石学报, 27 (8) : 2299-2317.
- 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等, 2011. 四川盆地奥陶系油气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 32 (3) : 461-473.