

四川盆地绵阳—广安台洼二叠系长兴组 含礁地层对比与沉积相特征*

孙豪飞¹ 马昕亮^{2,3,4} 文 龙¹ 梁 婷^{2,3,4} 张文杰¹
李平平^{2,3,4} 明 盈¹ 姜福杰^{2,3} 徐 亮¹

- 1 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610051
2 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249
3 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
4 中国石油大学(北京)碳酸盐岩研究中心, 北京 102249

摘 要 四川盆地绵阳—广安台洼是发育在晚二叠世—早三叠世上扬子碳酸盐岩台地内的洼地。其水深介于正常浪基面与最大风暴浪基面之间, 北侧与深水区的斜坡相过渡。台洼内上二叠统长兴组为一套云化程度极低的含礁地层。利用岩性特征结合频谱趋势属性分析技术(INPEFA), 长兴组自下而上分为长一段(SQ1-HST和SQ2-TST)、长二下亚段(SQ2-HST)、长二中亚段(SQ3)和长二上亚段(SQ4)。长一段由泥晶灰岩和泥页岩组成, 形成缓坡型台地。长二段以生屑颗粒灰岩和骨架灰岩的大量出现为特征, 形成镶边型台地。绵阳—广安台洼发育在长二段沉积期, 可分为台洼滩、台洼礁、台洼滩间及台洼海4个亚相。台洼滩发育在SQ2-SQ4的HST, 为生屑颗粒灰岩, 呈低GR(29.3~34.6 API)和较低CNL(13.3%~18.0%)。台洼礁发育在SQ4-TST, 为(云质)海绵骨架灰岩, 呈较低GR(34.0~37.3 API)和较高CNL(19.0%~22.0%)。台洼滩间在长二段各体系域均可发育, 以生屑粒泥灰岩和生屑泥粒灰岩为主, 具低CNL(9.9%~11.3%)—低RT(33.1~37.3 $\Omega \cdot m$)—低DEN(2.55~2.57 g/cm³)—低GR(26.0~29.5 API)。台洼海发育于SQ2-HST, 为泥晶灰岩、粉砂岩和泥岩的互层, 测井曲线齿化严重。在岩石学特征和发育层位上, 台洼与台内的礁/滩亚相具有可对比性, 但与台缘带显著不同。研究结果不仅可以弥补台洼相的研究空白, 也可以为绵阳—广安台洼地区勘探部署提供理论支撑。

关键词 绵阳—广安台洼 点礁 长兴组 上二叠统 四川盆地

第一作者简介 孙豪飞, 男, 1989年生, 硕士, 工程师, 主要从事油气地质研究与勘探部署工作。E-mail: sunhaofei@petrochina.com.cn。

通讯作者简介 梁婷, 女, 1983年生, 博士, 副教授, 研究方向为碳酸盐岩沉积学与沉积地球化学。E-mail: tliang@cup.edu.cn。

中图分类号: P588.24⁺5 文献标志码: A

Stratigraphic and sedimentary characteristics of the Permian Changxing Formation in Mianyang-Guang'an Trough, Sichuan Basin

SUN Hao-fei¹ MA Xin-liang^{2,3,4} WEN Long¹ LIANG Ting^{2,3,4} ZHANG Wen-jie¹

* 国家自然科学基金青年项目(编号: 41602108)和中国石油西南油气田分公司科技专项(编号: JS2023-096)共同资助。[Co-funded by Funds for Young Scientists of the National Natural Science Foundation of China (No. 41602108) and PetroChina Southwest Oil and Gasfield Company Project (No. JS2023-096)]

收稿日期: 2025-06-06 改回日期: 2025-07-28

LI Pingping^{2,3,4} MING Ying¹ JIANG Fujie^{2,3} XU Liang¹

¹ Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu 610051, China

² State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

³ College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

⁴ Carbonate Research Center, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract Mianyang-Guang'an Trough in Sichuan Basin is an intra-platform depression developed within the Upper Yangtze Platform during the Late Permian to Early Triassic. This trough, with a water depth between fair-weather wave base and maximum storm wave base, transitions northward into slope facies. In Mianyang-Guang'an Trough, the Changxing Formation, deposited during the Late Permian, is characterized by numerous patch reefs/shoals with minimal dolomitization. By integrating petrographic analysis with Integrated Nonstationary Process Empirical Function Analysis (INPEFA), the Changxing Formation can be subdivided, in an ascending order, into the 1st Member (SQ1-HST and SQ2-TST), lower part in the 2nd Member (SQ2-HST), middle part in the 2nd Member (SQ3), and upper part in the 2nd Member (SQ4). The 1st Member is mainly composed of micritic limestones intercalated with shales and mudstones, which constructed a ramp. The 2nd Member, in contrast, is characterized by grainstones and framestones, which formed a rimmed platform. Mianyang-Guang'an Trough, which developed during the deposition of the 2nd Member, comprises four subfacies, including shoals, reefs, inter-shoal zones and off-reef seafloor deposits. The shoals, which are commonly associated with HST in SQ2, SQ3 and SQ4, are mainly formed by skeletal grainstones, and characterized by low GR (29.3~34.6 API) and relatively low CNL values (13.3%~18.0%). The reefs, developed in the SQ4-TST, are formed of framestones and/or dolomitic framestones, and characterized by relatively low GR (34.0~37.3 API), and relatively high CNL values (19.0%~22.0%). The inter-shoal zones, developed in both HST and TST, consist of wackestones and packstones that are characterized by low CNL (9.9%~11.3%), low RT (33.1~37.3 $\Omega \cdot m$), low DEN (2.55~2.57 g/cm³), and low GR values (26.0~29.5 API). The off-reef seafloor deposits, which consist of intercalated micritic limestones, siltstones and mudstones, are commonly associated with the SQ2-HST, and characterized by serrated log curves. In terms of petrographic and stratigraphic characteristics, reefs and shoals developed in Mianyang-Guang'an Trough are comparable to those in the platform-interior facies, but distinct from those in the platform margins. The stratigraphic and sedimentary characteristics of the Changxing Formation in Mianyang-Guang'an Trough can provide a novel geological model for deciphering trough facies on the carbonate platforms, but also offer theoretical support for exploration in this region.

Key words Mianyang-Guang'an Trough, patch reef, Changxing Formation, Upper Permian, Sichuan Basin

About the first author SUN Haofei, born in 1989, MSc., engineer, is engaged in petroleum and natural gas geological research and exploration deployment. E-mail: sunhaofei@petroChina.com.cn.

About the corresponding author LIANG Ting, born in 1983, Ph. D., associate professor, is engaged in carbonate sedimentology and sedimentary geochemistry. E-mail: tliang@cup.edu.cn.

0 引言

碳酸盐岩台地（以下简称“台地”）是指浅海环境下（最大风暴浪基面以上），由碳酸盐沉积

物长期堆积形成的厚层沉积体（Tucker and Wright, 1990; James and Jones, 2014）。在台地上，由于全球控制因素（如光照、温度、水体营

养条件、盐度、碳酸盐饱和度和泥质含量等)和区域性控制因素(如水动力条件、洋流海洋—气候系统、大气系统,以及陆源碎屑沉积物和淡水输入等)的差异(Schlager, 2003; Reijmer, 2021),碳酸盐沉积常常呈现不同的沉积相带分布特征(James, 1983; James and Jones, 2014; Gischler, 2025)。因此,前人提出了诸如陆表海模式(Irwin, 1965)、镶边台地模式(Read, 1985; Tucker and Wright, 1990)、综合模式(Wilson, 1975; 金振奎等, 2021)、缓坡台地模式(Burchette and Wright, 1992)、孤立台地模式(Tucker and Wright, 1990)以及基于构造背景的台地沉积模式(Bosence, 2005)等,用以刻画不同类型台地上的沉积规律。然而,这些沉积模式普遍忽略了古老台地中构造古地理(如古裂陷)对沉积相的控制作用。近年来,随着古裂陷在四川盆地、塔里木盆地和鄂尔多斯盆地的陆续发现(魏国齐等, 2015; 管树巍等, 2017; 周进高等, 2024),理解其对沉积特征的影响已然成为古老台地沉积模式构建的关键(武赛军等, 2019; 陈鑫等, 2022)。目前大部分的研究都集中在规模较大的古裂陷,如四川盆地震旦纪—寒武纪的德阳—安岳裂陷(如魏国齐等, 2015)和晚二叠世的开江—梁平海槽(王一刚等, 2005)等,而对规模较小的裂陷(如台洼)关注较少。迄今为止,台洼仅在上扬子克拉通盆地晚二叠世—早三叠世台地有报道(张奇等, 2010; 李秋芬等, 2015; 文龙等, 2023)。

发育在上扬子克拉通盆地晚二叠世—早三叠世台地内部的台洼位于四川盆地绵阳—广安一带,被称为绵阳—广安台洼(张奇等, 2010; 李秋芬等, 2015)。其与同样可以发育在台地内部的深水潟湖不同,台洼向北与广海连通,且其内长兴组发育极其丰富点礁/滩群,极具勘探潜力(文龙等, 2023)。由于绵阳—广安台洼走向与开江—梁平海槽一致,绵阳—广安台洼曾经一度被认为是位于最大风暴浪基面之下的深水环境(李秋芬等, 2015; 文龙等, 2023)。然而,近年来的研究表明,绵阳—广安台洼和开江—梁平海槽可能在沉积过程上并不一致。首先,绵阳—广安台洼的长兴组发育了大量的点礁/滩群,而在开江—梁平海槽尚未发现长兴组点礁(文龙等, 2023; 王嘉先等, 2025)。其次,环海槽形成的台地边缘相带生物礁具有云化程

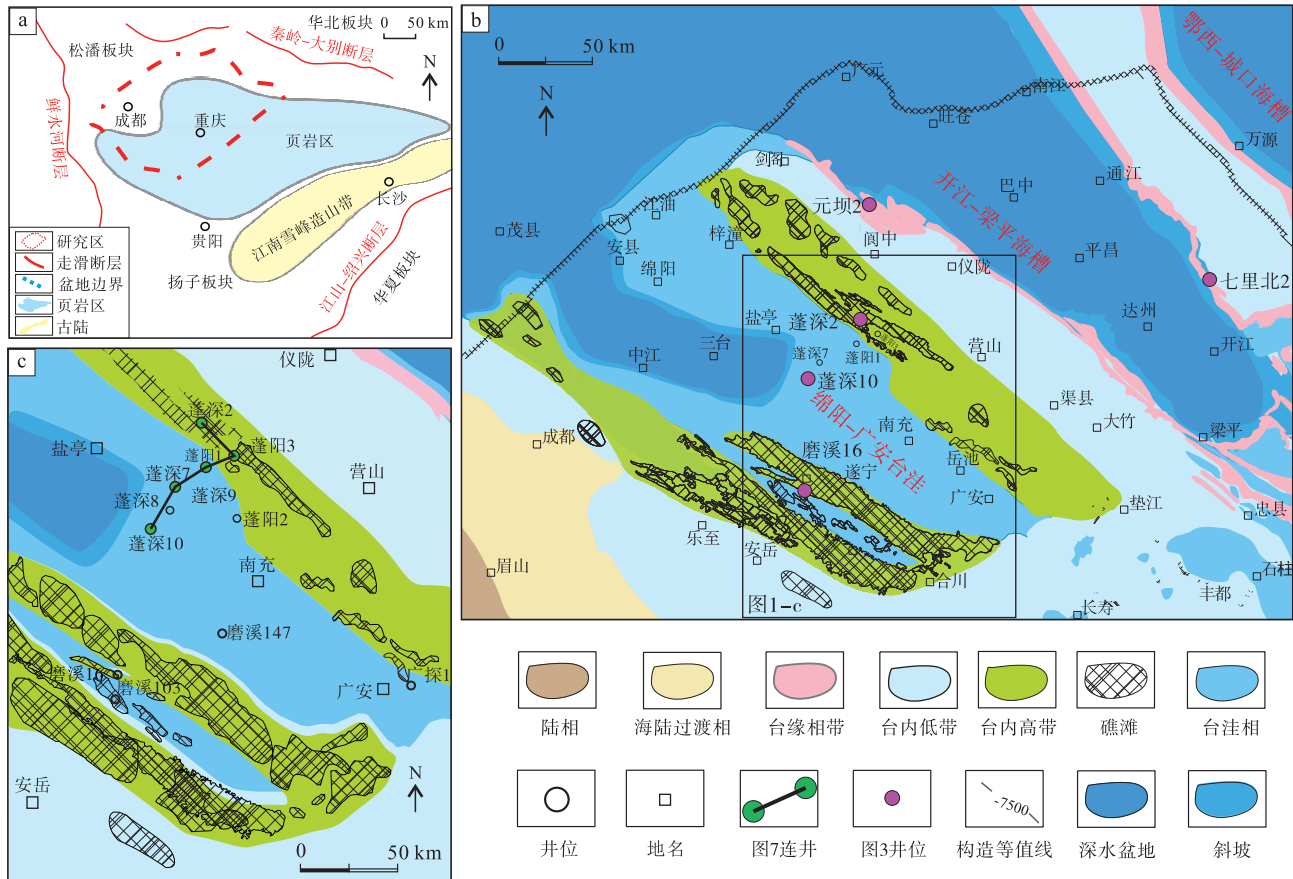
度高的特点(Li *et al.*, 2015; 吴亚生等, 2015),而在绵阳—广安台洼内部及其周缘的长兴组礁/滩云化程度普遍较低(王东等, 2023; 王嘉先等, 2025)。最后,台洼的地震数据显示其在水深上比开江—梁平海槽浅(张奇等, 2010; 李秋芬等, 2015)。因此,绵阳—广安台洼是与广海连通的台内洼地,水深在正常浪基面之下,最大风暴浪基面之上。然而,由于以往对台洼的认识不足,关于发育在台洼内的含礁地层的沉积相和地层对比研究尚未开展。显然的,对台洼相研究的缺乏,不仅影响了对碳酸盐岩台地相带展布和规律的完整性认识,也限制了绵阳—广安台洼的下一步勘探部署。

本研究以绵阳—广安台洼及其东缘最新钻遇的长兴组含礁/滩地层为研究对象,达到以下研究目的:(1)利用频谱趋势属性分析技术(INPEFA)搭建台洼—台内—台缘长兴组含礁地层的等时地层格架;(2)结合薄片和测井数据,明确绵阳—广安台洼长兴组沉积相类型及特征;(3)分析绵阳—广安台洼长兴组点礁/滩的发育规律。研究结果不仅可以丰富对台洼含礁地层的沉积学理论认识,同时也可以为四川盆地晚二叠世岩相古地理重建提供新的数据,为进一步拓展四川盆地长兴组油气勘探领域提供参考。

1 地质背景

四川盆地是处于上扬子克拉通盆地北缘的叠合盆地(图 1-a)。在晚二叠世—早三叠世,四川盆地进入克拉通内裂陷盆地演化阶段(倪新锋等, 2007; 黄福喜, 2011)。在晚二叠世,受北东—南西向的张应力影响,四川盆地形成了近北西—南东走向的“三隆三坳”地貌格局。自东向西,三坳分别为鄂西—城口海槽、开江—梁平海槽以及绵阳—广安台洼(图 1-b)。研究区位于绵阳—广安台洼,其西南边界倚靠遂宁—合川台内礁滩带,而东北边界紧临梓潼—广安台内礁滩带(图 1-c)。绵阳—广安台洼形成于长兴组沉积中晚期,消亡于飞仙关组沉积早期(姜华等, 2014)。

四川盆地在晚二叠世进入稳定的构造阶段,沉积环境演化为上扬子克拉通盆地内的碳酸盐岩台地,形成了以石灰岩和含云灰岩为主的长兴组(张奇等, 2010; 张建勇等, 2011)。长兴组上覆于上二叠统龙潭组泥页岩,两者以整合关系接触。



a—四川盆地在扬子板块的位置 (改自邱楠生等, 2020; 何治亮等, 2021; 李跃杰等, 2023); b—二叠系长兴组沉积相图 (引自西南油气田分公司勘探开发研究院资料, 2023); c—绵阳—广安台洼沉积相图

图 1 四川盆地绵阳—广安台洼位置及晚二叠世长兴组沉积相

Fig. 1 Location and the Later Permian Changhsingian sedimentary facies of Mianyang-Guang'an Trough, Sichuan Basin

长兴组顶部为侵蚀不整合面, 与上二叠统一下三叠统的飞仙关组泥页岩分隔 (Yin *et al.*, 2014)。厚度上长兴组东厚西薄, 在川东北可厚达 300 m, 而在川中只有 55~140 m (王东等, 2023; 姚鑫阳等, 2024)。

关于长兴组的分层方案, 迄今尚未统一 (表 1)。传统的长兴组地层划分方案是根据岩石学和测井特征, 将长兴组自下而上划分为长一段、长二段和长三段 (蒋裕强等, 2019; 唐雨等, 2021; 陈鑫等, 2022; 左洛滔等, 2022)。其中, 长一段以深灰色泥晶灰岩为主, 呈低—中伽马 (GR) 及中—高电阻率 (RT) 为主的测井特征; 长二段则以出现海绵骨架灰岩/云岩和生屑颗粒灰岩/云岩为典型特征, GR 曲线表现为低值—极低值; 长三段又恢复为泥晶灰岩和泥质灰岩为主, 骨架灰岩/云岩只局部发育, GR 曲线表现为低—中值的特征 (蔡强等, 2024; 姚鑫阳等, 2024)。然而, 也有学者

(郭彤楼, 2011; 胡忠贵等, 2014; 刘树根等, 2016; 章学刚等, 2022; 王东等, 2023) 和油田公司采用层序地层学的观点 (Wright and Burchette, 1996), 将长兴组划分为 2 个三级层序, 进而划分为长兴组下段和长兴组上段 (表 1)。其中下段对应三分方案中的长一段和长二段, 而上段对应长三段。本研究统合岩石学特征和层序地层学观点, 对长兴组进行地层划分 (图 2-a)。首先, 根据岩石学特点, 将台洼区长兴组点礁划分为以泥晶灰岩为主的长一段, 以及大量出现海绵骨架灰岩和生屑颗粒灰岩的长二段 (图 2-a)。在此基础上, 结合层序地层学观点, 对长二段进一步划分为长二下亚段、长二中亚段和长二上亚段 (图 2-a)。

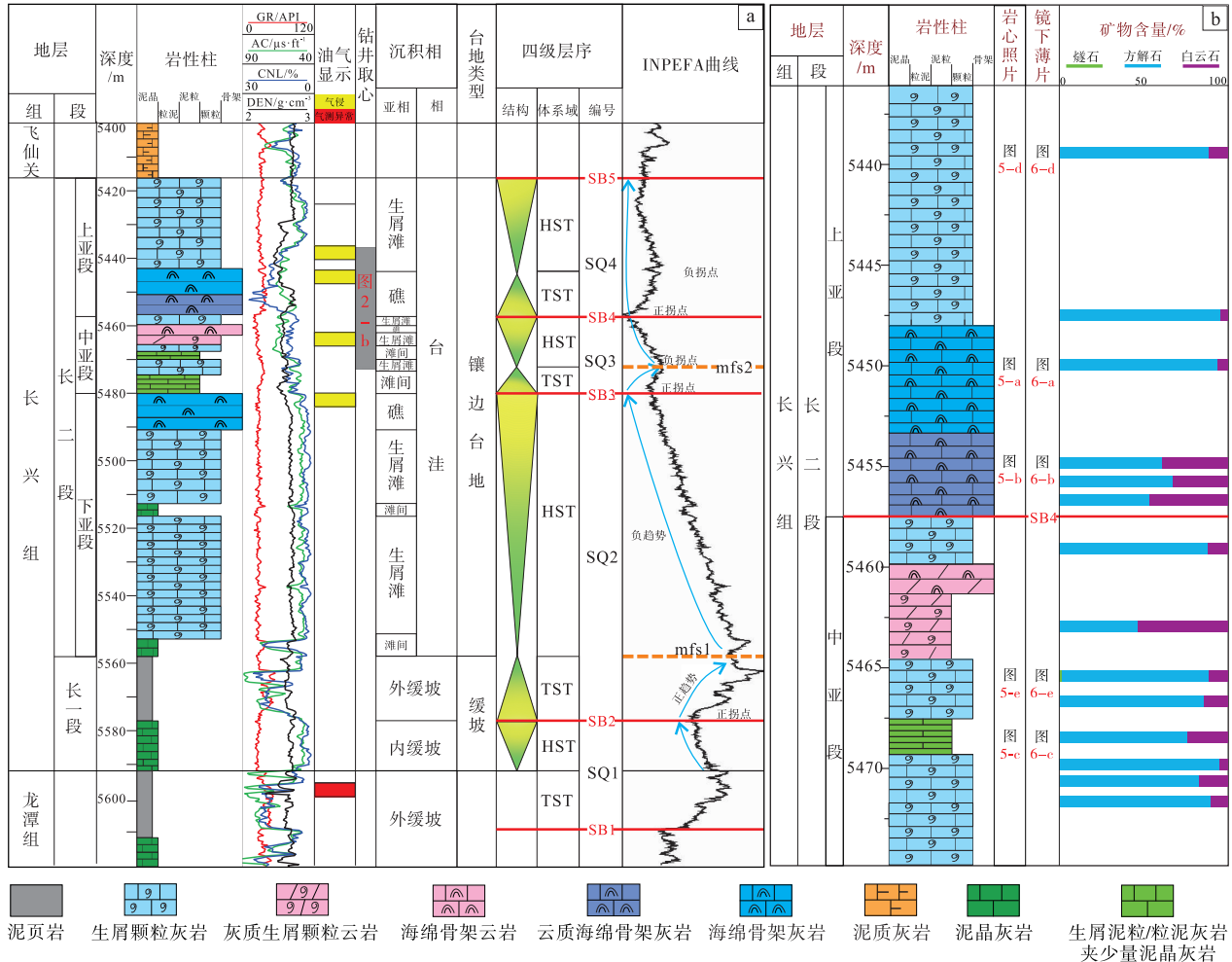
2 研究方法

为了有效识别长兴组内的层序界面, 本研究采

表 1 四川盆地长兴组分层方案对比

Table 1 Stratigraphic divisions of the Changxing Formation in Sichuan Basin

观点	分段	界面识别依据		代表性地区与论文
		岩石学特征	测井特征	
二分法	上段	出现大量海绵骨架灰岩和生屑颗粒灰岩	自然伽马 (GR) 曲线由箱状低值向齿状中高值转换	普光元坝地区 (郭彤楼, 2011); 建南地区 (胡忠贵等, 2014); 川中地区 (刘树根等, 2016); 磨溪地区 (王东等, 2023); 仪陇地区 (章学刚等, 2022)
	下段	泥晶灰岩为主	自然伽马 (GR) 曲线先升高后下降识别出层序界面	
三分法	长三段	泥晶灰岩和泥质灰岩	自然伽马 (GR) 曲线表现为低—中值的特征	武胜地区 (蒋裕强等, 2019); 龙岗 (唐雨等, 2021); 开江梁平海槽 (陈鑫等, 2022); 黄龙地区 (左洛滔等, 2022); 开江梁平海槽东侧 (蔡强等, 2024); 普光—七里北—黄龙场地区 (姚鑫阳等, 2024)
	长二段	生屑颗粒灰岩与骨架灰岩/云岩	自然伽马 (GR) 曲线表现为低值—极低值	
	长一段	泥晶灰岩为主	低—中伽马 (GR) 及中—高电阻率 (RT) 为主	



a—蓬深10井长兴组全井段综合柱状图; b—蓬深10井长兴组取心段综合柱状图

图 2 四川盆地绵阳—广安台洼内蓬深10井长兴组综合柱状图

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic columns of the Changxing Formation in Well Pengshen 10 from Mianyang-Guang'an Trough, Sichuan Basin

用 INPEFA 对研究区绵阳—广安台洼点礁及其周围 5 口钻井(图 1-c), 以及研究区外(包括开江—梁平海槽周缘和遂宁—合川台内滩) 3 口钻井(图 1-b) 的 GR 数据进行处理。INPEFA 曲线从左至右表示了一个富泥化的过程, 代表相对海平面上升; 而曲线从右至左代表相对海平面下降的过程。INPEFA 曲线的转折点能够指示层序界面(Nio *et al.*, 2005)。其中的负拐点对应 GR 的异常高点, 代表了海泛面。正拐点则对应 GR 异常减小点, 对应相对海平面的低位。

为了分析长兴组的岩石学特征, 本研究对蓬深 10 井(36.1 m) 和蓬深 2 井(8 m) 的长兴组岩心进行了详细描述, 并制备了铸体薄片 22 张(包括蓬深 2 井 8 张, 蓬深 10 井 14 张; 图 2-b)。为了区别方解石和白云石, 对铸体薄片进行了部分的茜素红染色。同时, 为了确定矿物组成, 本研究针对薄片位置的粉末样品进行 X 射线衍射(XRD) 测试。

对于碳酸盐岩的命名, 采用矿物组成+结构组分共同命名的方法。首先根据矿物组成, 确定出白云岩(白云石 $\geq 90\%$, 方解石 $< 10\%$)、灰质云岩(白云石 50% ; $10\% \leq$ 方解石 $< 50\%$)、云质灰岩($10\% \leq$ 白云石 $< 50\%$; 方解石 $\geq 50\%$) 和石灰岩(白云石 $\leq 10\%$; 方解石 $\geq 90\%$)。在此基础上, 根据结构组分特征, 采用邓哈姆分类方案(Dunham, 1962), 对碳酸盐岩进行命名。考虑到国内碳酸盐岩研究对邓哈姆命名中的名词有众多不同的译法, 结合研究区为含礁地层的特点, 采用吴亚生(2023) 对宏生物岩的中文命名方案, 如骨架灰岩/云岩, 生屑颗粒灰岩/云岩、生屑泥粒灰岩/云岩和生屑粒泥灰岩/云岩。由于泥晶灰岩/云岩很难界定是否与生物的关系, 所以采用描述性的名词即“泥晶灰岩/云岩”的表述。“云质”或者“灰质”放在名称之前, 如云质骨架灰岩等。

为了建立对研究区不同碳酸盐岩类型具有识别功能的测井标志, 采用数值归纳统计方法(Neinast and Knox, 1973; 易士威和王权, 2005), 针对不同岩性进行 GR、RT、AC(声波时差)、CNL(补偿中子) 和 DEN(密度) 绘制了测井数值箱型图。数据离散程度大, 代表测井数据对岩相的敏感度低, 数据有效性低; 而数据离散程度小则代表测井曲线对岩相的敏感度高, 数据有效性高。

3 层序划分与对比

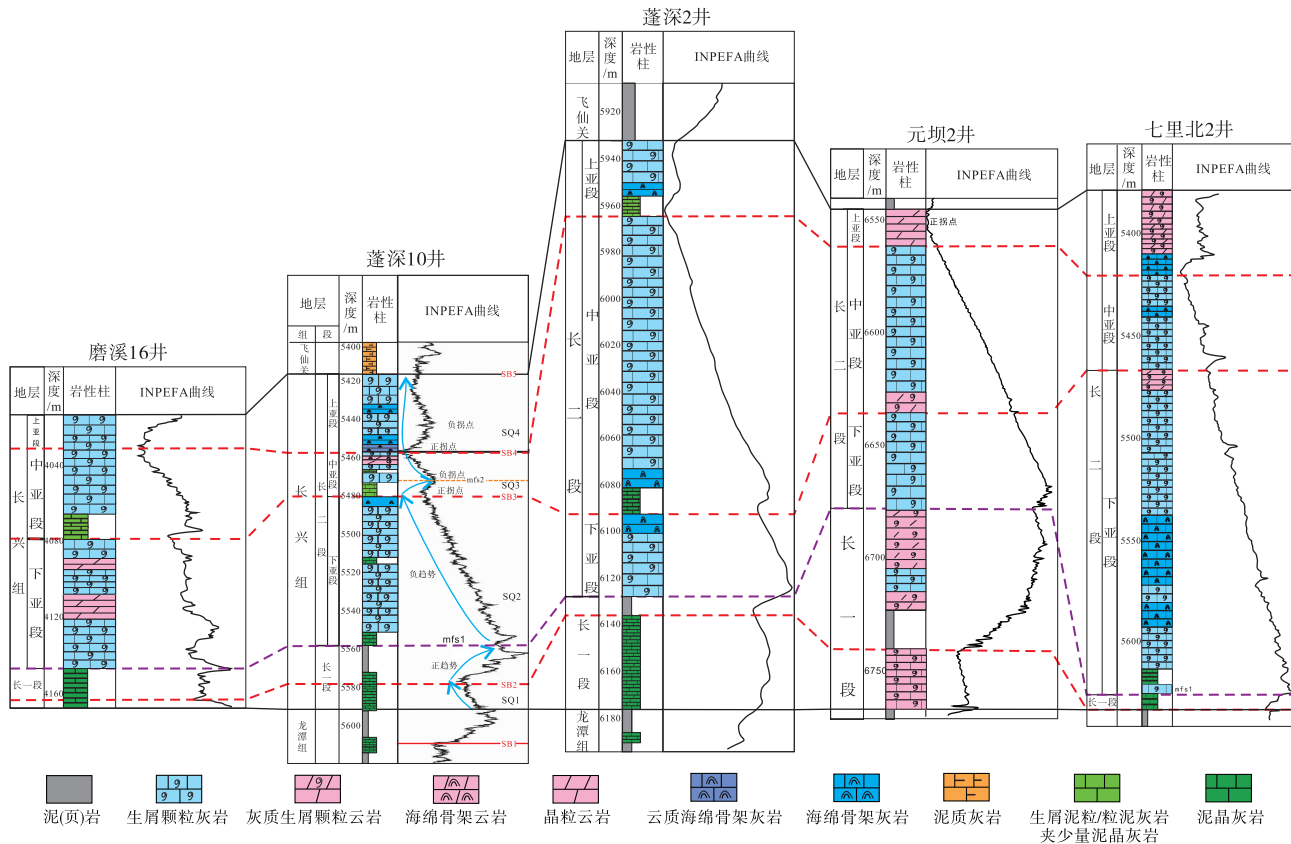
3.1 层序划分

从岩性上看, 发育在川中台洼区点礁的长兴组自下而上可分为: 由泥晶灰岩和泥岩组成的长一段, 主要由生屑颗粒灰岩和海绵骨架灰岩组成的长二段。长一段和长二段分界线对应着 INPEFA 曲线上的最大海泛面(mfs1)。在 INPEFA 曲线上, 川中台洼区长兴组点礁可识别出 5 个层序界面, 自下而上为 SB1、SB2、SB3、SB4 和 SB5(图 2-a)。其中, SB1 出现在龙潭组内部, 是下伏泥晶灰岩和上覆褐黑色泥页岩的分界面。SB5 为长兴组的顶界面, 其下为长兴组生屑颗粒灰岩, 其上为飞仙关组泥质灰岩。SB2、SB3 和 SB4 出现在长兴组内部, 均以 INPEFA 曲线正拐点为识别标志。

以 SB1-SB5 为界, 龙潭组顶部—长兴组自下而上可以分成 SQ1、SQ2、SQ3 和 SQ4 共 4 个四级层序。其中, SQ1 上部发育的高位体系域(HST) 对应长一段下部的泥晶灰岩, 而 SQ2 下部的海侵体系域(TST) 对应长一段上部的泥岩。SQ2-HST、SQ3 以及 SQ4 共同组成了长二段, 并分别对应了长二下亚段、长二中亚段和长二上亚段。在岩性上, 长二下亚段以生屑颗粒灰岩为主, 其顶部发育海绵骨架灰岩。长二中亚段主要发育生屑粒泥灰岩和生屑颗粒灰岩为主, 其顶部发育海绵骨架云岩(图 2-b)。在长二段上亚段, 主要岩石类型为生屑颗粒灰岩和海绵骨架灰岩。因此, 综合岩石学以及层序地层学观点, 将长兴组划分为长一段与长二段, 并在长二段内部进行亚段划分的方案更为合理(图 2-a)。

3.2 地层对比

虽然前人针对开江—梁平海槽两侧的台缘礁(姚鑫阳等, 2024) 以及川中的台内滩(王东等, 2023) 开展了长兴组地层格架的研究, 但这些研究大多着眼于某个小区块, 无法实现区域性对比。为了建立适用于全区的地质格架, 本研究分别选取了开江—梁平海槽西侧的元坝地区台缘礁(元坝 2 井)、开江—梁平海槽东侧的川东台缘礁(七里北 2 井) 以及台洼西南侧的遂宁—合川台内滩(磨溪 16 井) 为代表, 与研究区内的台洼点礁(蓬深 10 井) 和梓潼—广安台内礁滩(蓬深 2 井) 进行地层对比(图 3)。通过对比发现, 长兴组的层序地层



从左至右数据来源：磨溪 16 井改自王东等 (2023)；蓬深 10 井来自本研究；蓬深 2 井来自本研究；元坝 2 井数据来自中石化勘探分公司资料；七里北 2 井改自姚鑫阳等 (2024)；井位见图 1-b

图 3 四川盆地不同井位地层对比图

Fig. 3 Stratigraphic correlation among various wells throughout the Sichuan Basin

在绵阳—广安台洼点礁（蓬深 10 井）发育最全，为实现全区的等时地层格架搭建提供契机。

长一段下部（SQ1-HST）对应相对海平面下降阶段（图 3）。在元坝地区（元坝 2 井）和绵阳—广安台洼区点礁（蓬深 10 井）以及梓潼—广安台内礁/滩（蓬深 2 井），该段都较为发育（图 3）。这说明元坝地区和台洼区在长一段沉积初期的海退背景下，碳酸盐工厂依然处于启动状态。该层在川东台缘礁（七里北 2 井）不发育，在遂宁—合川台内滩（磨溪 16 井）发育较差，说明川中台内滩和川东的台缘礁可能在海退时期发生暴露，导致长一段底部的沉积记录沉积缺失。由此可见，在长兴组沉积初期，相较于遂宁—合川台内位置和开江—梁平海槽东北侧，绵阳—广安台洼区及其周缘以及元坝地区的水体深度可能相对较大。

长一段上部（SQ2-TST）对应于海平面快速上升阶段（图 3）。因为广泛的海侵，所以该层在全区都有发育。以泥晶灰岩和泥岩互层为典型特征，

其顶界面为最大海泛面（mfs1）。值得注意的是，长一段上部在元坝 2 井的沉积厚度最大，且以生屑颗粒云岩为主，说明了元坝地区在长一段沉积晚期开始进入了碳酸盐工厂的活跃期。这与前人的研究结果是一致的，即元坝 2 井从长一段开始进入浅水生屑滩发育阶段（李平等，2023）。

长二下亚段（SQ2-HST）对应相对海平面下降阶段（图 3）。岩性以生屑颗粒灰岩夹生屑泥粒灰岩、生屑粒泥灰岩和泥晶灰岩为主。总体来看，在四川盆地，碳酸盐工厂在长二下亚段沉积时期进入相对活跃的时期。其中，七里北 2 井的长二下亚段发育厚度最大。这符合前人认为的在长二段开始，开江—梁平海槽东北侧台缘礁滩带进入了发育的繁盛期（姚鑫阳等，2024）。

长二中亚段（SQ3）沉积期伴随着一次小规模相对海平面波动，即经历了短暂的相对海平面上升之后开始较长时间的相对海平面下降（图 3）。在 INPEFA 曲线上，遂宁—合川台内滩（磨溪 16

井)、台洼点礁(蓬深 10 井)和梓潼—广安台内礁/滩(蓬深 2 井)能看到明显的中亚段和下亚段分界 SB3。然而, SB3 所对应的 INPEFA 正拐点在开江—梁平海槽两侧台缘相带的位置都不明显(七里北 2 井和元坝 2 井)。这种差异性表明海槽两侧的台缘带礁/滩相的沉积速率比台洼点礁以及台内礁/滩大。相应的,在沉积上,表现为台内礁/滩和台洼点礁/滩具有多期叠加的特点(王东等, 2023),而海槽两侧的台缘礁/滩相则呈现纵向上的连续性(宋昊等, 2022)。

长二上亚段(SQ4)形成于整体海平面处在长兴组沉积时期的相对较低的位置(图 3),在全区域沉积厚度都相对较薄。台缘礁和台内礁/滩的位置,

对 SQ4 的海平面波动记录较差,这可能与相对海平面下降造成的暴露有关(Liang *et al.*, 2020)。相反的,长二上亚段沉积期发生的小规模海平面波动可以被台洼内点礁和台洼周缘的礁记录下来。

4 沉积相类型与识别标志

从 INPEFA 曲线可以看出,长一段沉积期相对海平面比长二段沉积期略高,且长一段沉积期碳酸盐工厂生产效率远低于长二段沉积期。这符合前人关于长兴组碳酸盐岩台地类型的研究结果,即长一段沉积形成缓坡台地,而长二段沉积时期,逐渐形成了镶边台地(胡忠贵等, 2014; 秦鹏等,

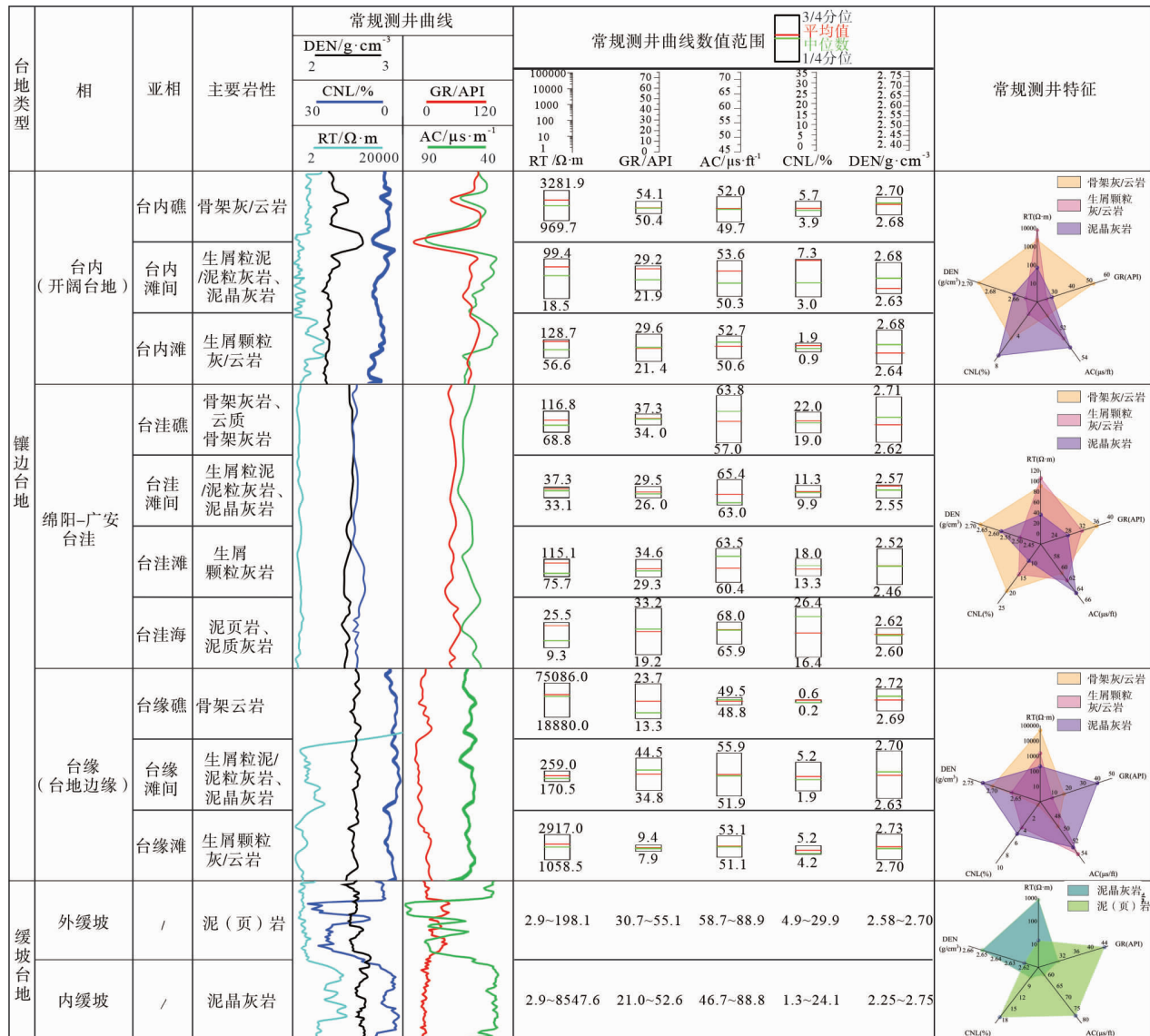


图 4 四川盆地长兴组岩性综合识别图版

Fig. 4 Comprehensive identification plate of lithology of the Changxing Formation, Sichuan Basin

2018)。因此，对碳酸盐岩沉积相的厘定需要分成 2 种台地类型，即缓坡型和镶边台地型。

4.1 缓坡型

这种台地类型主要发育在长一段沉积期，对应于上扬子克拉通盆地初始裂解时期，台洼尚未形成。在研究区，可以识别出正常浪基面以上的内缓坡和风暴浪基面以下的外缓坡 2 种沉积相类型。其中，内缓坡以泥晶灰岩为主，局部夹着少量生屑粒泥灰/云岩。在测井曲线上表现为 GR、CNL 和 AC 较低，而 RT 和 DEN 较高的特征(图 4)。外缓坡以泥晶灰岩与泥页岩互层为主。在测井曲线上表现为 GR、CNL 和 AC 较高，而 RT 和 DEN 较低的特征(图 4)。

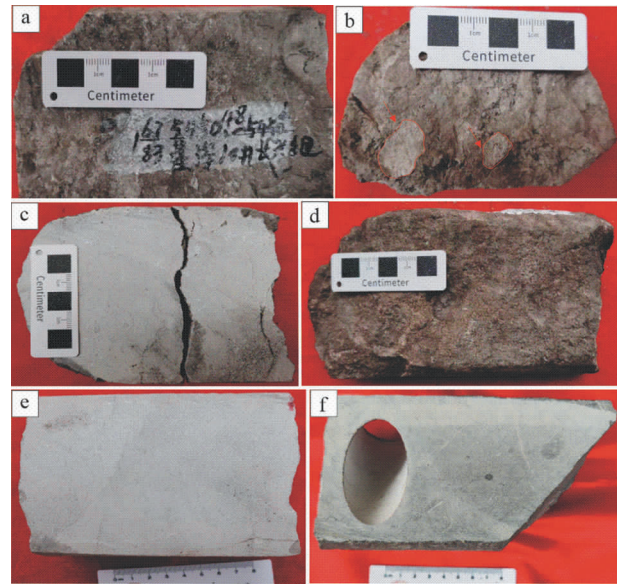
4.2 镶边台地型

长二段下亚段沉积期，缓坡型台地逐渐发育成镶边型台地。在镶边型台地内，发育了水深较大的台洼相，以及浅水环境下的台地边缘相（简称台缘相）和开阔台地相（胡忠贵等，2014；黎荣等，2016）。其中，台洼相内又进一步识别出生屑滩（以下称“台洼滩”）、生物礁（以下称“台洼礁”）、礁/滩间（以下称“台洼滩间”）和台洼海（即洼地）4 种亚相，而台缘相和开阔台地可以各自进一步分为生屑滩（以下分别称“台缘滩”和“台内滩”）、生物礁（以下分别称“台缘礁”和“台内礁”）、礁/滩间（以下分别称“台缘滩间”和“台内滩间”）3 种亚相(图 4)。

4.2.1 台洼礁

造礁生物均为海绵。在矿物组成上，方解石含量为 53.2%~93.9%，白云石含量为 6.1%~46.8%（图 2-b）。岩性以海绵骨架灰岩以及云质海绵骨架灰岩为主(图 5-a, 5-b；图 6-a, 6-b)。通过常规测井数值箱型图(图 4)可以看出，GR 和 CNL 测井数据对海绵骨架灰岩以及云质海绵骨架灰岩的响应效果最好，具有高 GR 值（34.0~37.3 API；中位数 35.8 API）和高 CNL 值（19.0%~22.0%；中位数 20.4%）的特征(图 4)。

前人通过对露头的研究发现，虽然台内礁和台缘礁虽然都是以海绵为主要的造礁生物，但是两者在云化程度上明显不同。通常台缘礁云化严重而台内礁和滩云化程度低（吴亚生等，2006，2015；Liang *et al.*, 2020）。因此，在岩石学特征上，台洼



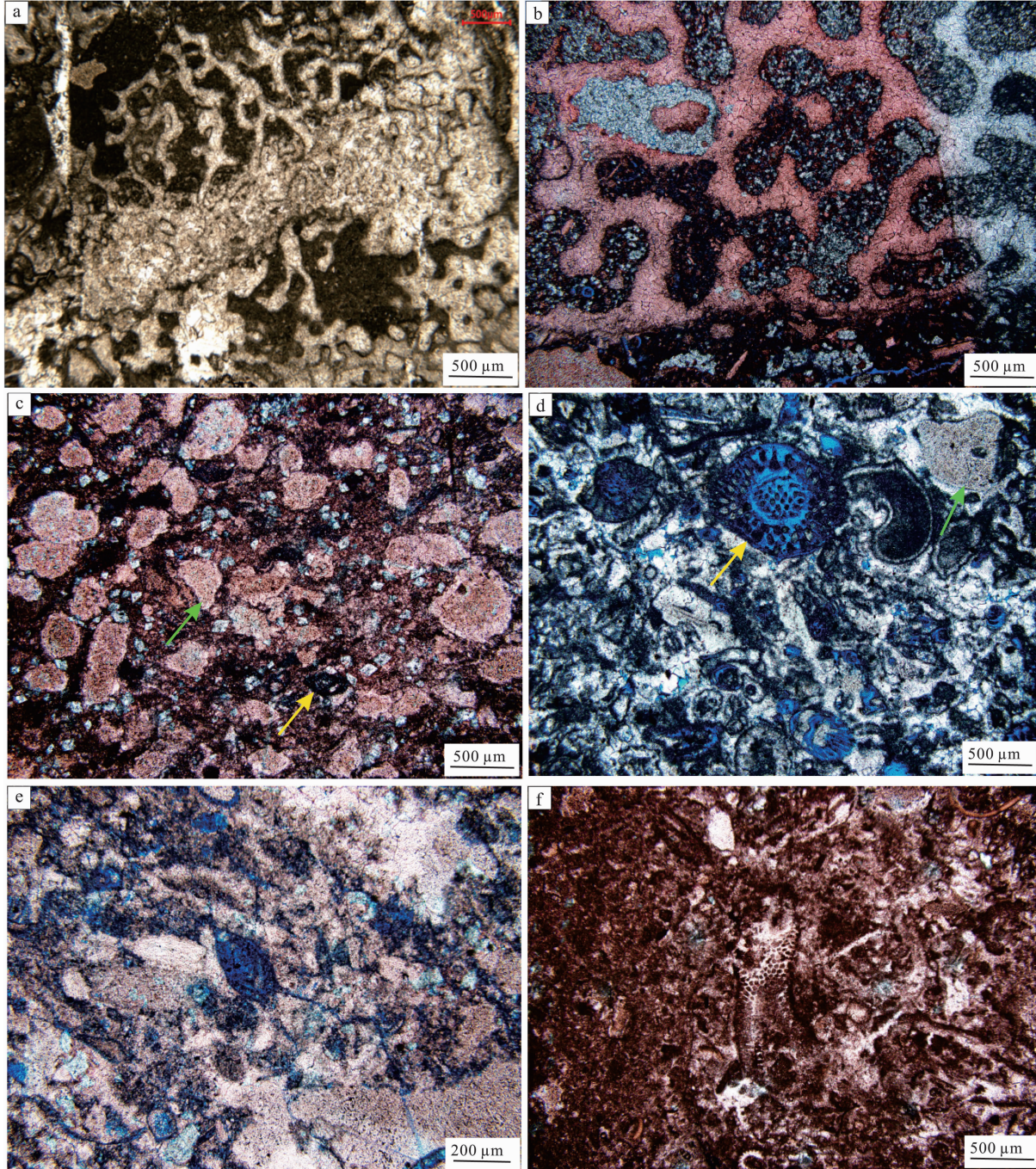
a—海绵骨架灰岩，蓬深 10 井，井深 5450.1 m，长二上亚段；b—云质海绵骨架灰岩，残余骨架为海绵（红色箭头），蓬深 10 井，井深 5455.0 m，长二上亚段；c—生屑泥粒灰岩，蓬深 10 井，井深 5468.7 m，长二中亚段；d—生屑颗粒灰岩，蓬深 10 井，井深 5439.1 m，长二上亚段；e—生屑颗粒灰岩，蓬深 10 井，井深 5466.3 m，长二中亚段；f—生屑泥粒灰岩，蓬深 2 井，井深 6044.9 m，长二中亚段

图 5 四川盆地绵阳—广安台洼内长兴组点礁（蓬深 10 井）以及梓潼—广安台内长兴组礁滩带（蓬深 2 井）岩心
Fig. 5 Cores of the Changxing Formation reefs in Mianyang-Guang'an Trough (Well Pengshen 10) and in the Zitong-Guang'an Open Shelf (Well Pengshen 2), Sichuan Basin

内发育的点礁云化程度低更加符合台内点礁的特点。然而，在测井特征上，发育在不同相带的海绵骨架灰岩显示出较大的差异。相较于台内礁，台洼礁的长兴组海绵骨架灰岩具有 GR 值更低、CNL 更高的测井特征(图 4)。而与台缘礁的长兴组海绵骨架灰岩相比，台洼内发育的海绵骨架灰岩 GR 值和 CNL 值均明显更高(图 4)。

4.2.2 台洼滩

该亚相主要以生屑颗粒灰岩为主，可夹少量（云质）生屑泥粒灰岩(图 5-d, 5-e；图 6-d, 6-e)。主要矿物为方解石和白云石，其中方解石含量为 46.2%~95.5%，而白云石为 4.5%~53.8%（图 2-b）。在长二中亚段，云化最为严重，白云石含量可以达到 53.8%。生屑类型在长二中亚段主要为 *Deckerella*、*Endothyrid* 有孔虫、棘皮类和苔藓虫为主（图 6-c），而在长二上亚段生屑以 *Parafusulina schucherti* 有孔虫为主，含少量棘皮类



a—海绵骨架灰岩，蓬深 10 井，井深 5450.1 m，长二上亚段，未经茜素红染色；b—云质海绵骨架灰岩，残余骨架为海绵，蓬深 10 井，井深 5455.0 m，长二上亚段，经部分茜素红染色；c—生屑泥粒灰岩，生屑为棘皮类（绿色箭头）和有孔虫（黄色箭头），蓬深 10 井，井深 5468.7 m，长二中亚段，经茜素红染色；d—生屑颗粒灰岩，生屑为 *Parafusulina schucherti* 类有孔虫（黄色箭头）和棘皮类（绿色箭头），蓬深 10 井，井深 5439.1 m，长二上亚段，未经茜素红染色；e—生屑颗粒灰岩，生屑为有孔虫和棘皮类，蓬深 10 井，井深 5466.3 m，长二中亚段，经茜素红染色；f—生屑泥粒灰岩，蓬深 2 井，井深 6044.9 m，长二中亚段，经茜素红染色

图 6 四川盆地绵阳—广安台洼内长兴组点礁（蓬深 10 井）以及梓潼—广安台内长兴组礁滩带（蓬深 2 井）样品镜下特征

Fig. 6 Petrographic analysis of the Changxing Formation reefs in Mianyang-Guang'an Trough (Well Pengshen 10) and

in Zitong-Guang'an Open Shelf (Well Pengshen 2), Sichuan Basin

(图 6-d)。根据生屑组合, 研究区内的长二上亚段可以与老龙洞二叠系—三叠系界限 (PTB) 剖面 (第 2 层), 以及贵州紫云的石头寨 PTB 剖面 (第 1 层) 长兴组顶部的生屑颗粒灰岩进行地层对比 (吴亚生等, 2006; Liang *et al.*, 2020)。

通过常规测井曲线数值范围 (图 4) 可以看出, CNL 和 GR 测井数据对识别台洼滩的生屑颗粒灰岩具有一定优势, 表现出低 GR (29.3~34.6 API; 中位数 31.2 API) 和较低 CNL (13.3%~18.0%; 中位数 15.2%) 的特征 (图 4)。与台洼滩相比, 台内滩和台缘滩的生屑颗粒灰岩 GR 值和 CNL 值都相对低 (图 4)。

4.2.3 台洼滩间

以生屑粒泥灰岩和生屑泥粒灰岩为主, 夹泥晶灰岩 (图 5-c, 5-f; 图 6-c, 6-f)。在矿物组成上, 方解石含量为 76.0%~94.9%, 白云石含量较低, 为 5.1%~24.0% (图 2-b)。通过常规曲线数

值范围 (图 4) 可以看出, 综合应用 RT、GR、CNL 和 DEN 曲线对于识别台洼滩间生屑粒泥灰岩和生屑泥粒灰岩最为有效, 表现为低 RT (33.1~37.3 $\Omega \cdot m$; 中位数为 35.8 $\Omega \cdot m$)、低 GR (26.0~29.5 API; 中位数 27.2 API)、低 CNL (9.9%~11.3%; 中位数 10.5%) 和低 DEN (2.55~2.57 g/cm^3 ; 中位数 2.56 g/cm^3) 的测井特征 (图 4)。虽然台洼滩间和台内滩间相的生屑粒泥灰岩和生屑泥粒灰岩在 GR 上的区别不大, 但前者相对于后者表现出 RT 更低、CNL 更高和 DEN 相对低的特点 (图 4)。相较于台缘滩间, 台洼滩间的生屑粒泥灰岩和生屑泥粒灰岩具有 RT 更低, GR 更低, CNL 更高和 DEN 相对低的特点 (图 4)。

4.2.4 台洼海

区别于台洼滩间, 台洼海以泥质灰岩夹泥页岩为主, 主要出现在长二下亚段 (图 7)。在台洼内, 该台洼海与台洼滩间在平面上相邻。在测井方面,

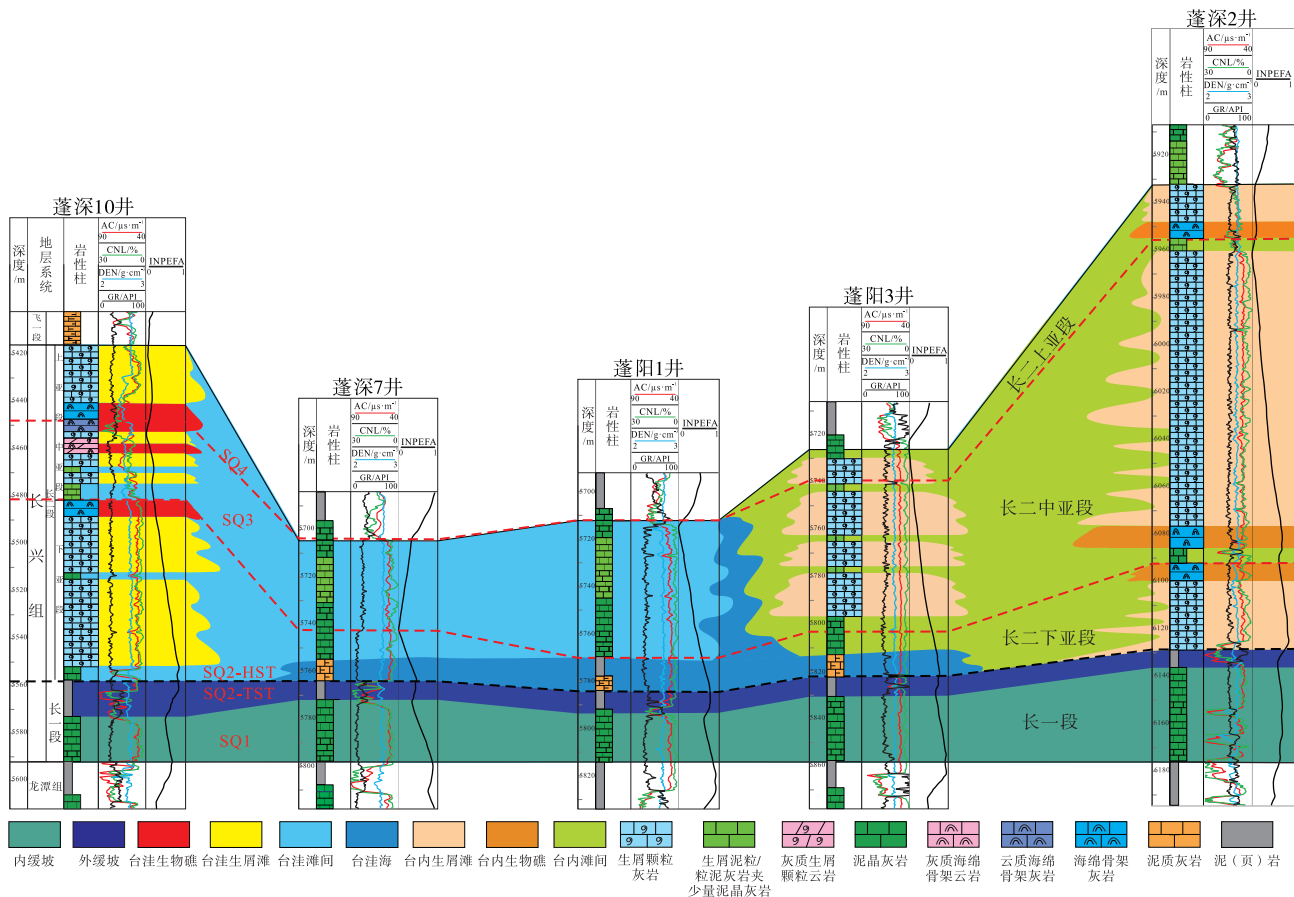


图 7 四川盆地绵阳—广安台洼及其周缘长兴组南西—北东向沉积对比 (剖面位置见图 1-c)

Fig. 7 Sedimentary correlation of the Changxing Formation in Mianyang-Guang'an Trough, Sichuan Basin (location is shown in Fig. 1-c)

该亚相中的泥质灰岩表现为 GR 高值，齿化严重。同时，其 AC、CNL 以及 DEN 都相对较高(图 4)，指示泥质含量较高。

5 沉积相的时空发育规律

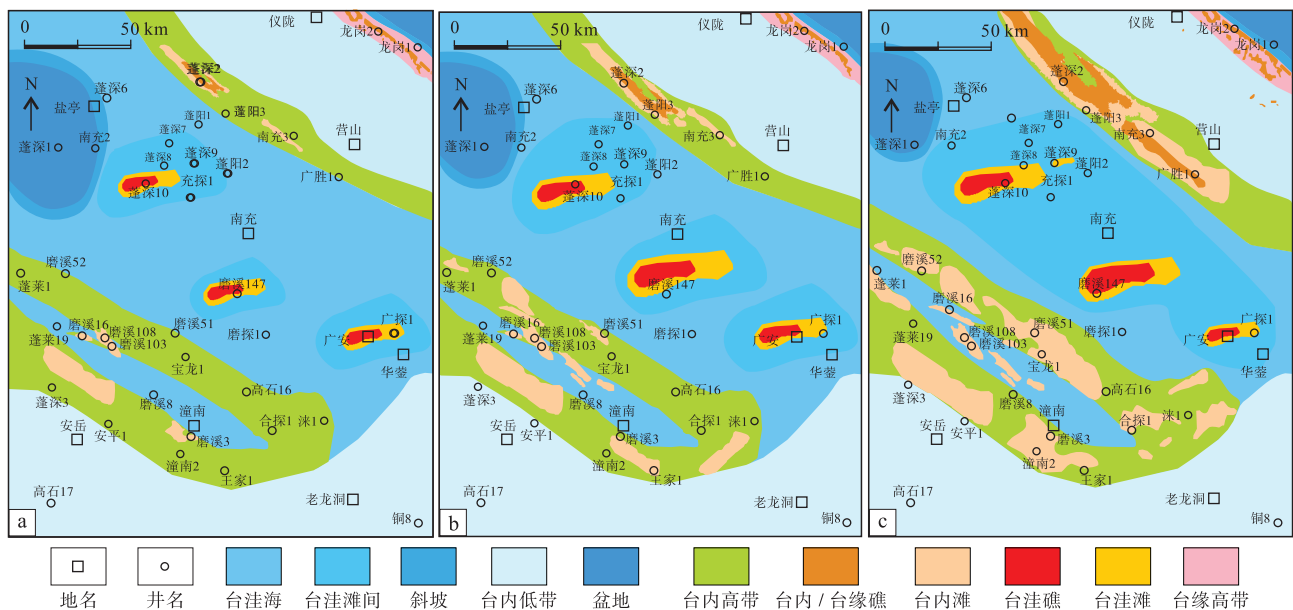
在层序格架内，对研究区南西—北东走向的蓬深 10 井—蓬深 7 井—蓬阳 1 井—蓬阳 3 井—蓬深 2 井剖面进行沉积相分析发现，绵阳—广安台洼长兴组厚度变化较大(图 7)。其中，在台洼内发育的礁滩复合体，沉积厚度较厚，可达 250 m。相反的，在台洼滩间沉积厚度相对较薄，仅为 80 m。

在长一段初始沉积的时候(SQ1-HST)，研究区与其周围的梓潼—广安地区(蓬深 2 井)在岩性和沉积厚度上具有一致性，说明绵阳—广安台洼在这个时期并未形成。因此，该时期研究区总体继承了下伏龙潭组的沉积地貌，形成了缓坡型碳酸盐岩台地。根据研究区在该沉积期间以泥晶灰岩和生屑粒泥灰岩为主，可以判断该沉积环境是位于平均浪基面之上的内缓坡。结合从七里北 2 井到磨溪 16 井—蓬深 10—蓬深 2 井，再到元坝 2 井，长一段底部沉积厚度逐渐变大的特征(图 3)，该缓坡向西北方向水体加深。根据元坝 2 井长一段底部达到最厚，且在长一段沉积初期就有滩的发育(图 3)，元坝地区附近可能接近当时缓坡台地上的平均浪基

面，形成了生屑滩。

在长一段沉积的晚期(SQ2-TST)，绵阳—广安台洼及其周缘的梓潼—广安地区和遂宁—合川地区沉积厚度差异均不大(图 3；图 7)，说明台洼在该时期仍未形成。研究区内，长兴组沉积呈现出泥晶灰岩与泥岩和页岩互层的特征，说明碳酸盐工厂间歇性关闭。结合该沉积期区域内相对海平面上升的特点，研究区总体处于风暴浪基面以下的深水环境。

到了长二下亚段沉积期(SQ2-HST)，开江—梁平海槽两侧(元坝 2 井和七里北 2 井)都大规模发育生物礁和生屑滩(图 3)，说明镶边台地开始建造。此时，研究区内也出现了岩性和沉积厚度上的差异(图 7)，说明台洼在该时期开始发育。相应的绵阳—广安台洼内第 1 期礁滩复合体开始发育。同时，伴随着台洼的产生，在台洼周缘形成了相对隆升的构造单元，即遂宁—合川高带和梓潼—广安高带。在这些构造高部位，礁和滩开始在长二段沉积期形成，整体厚度较厚(图 8-a；图 9)。其中，梓潼—广安地区形成的构造高带，由于远离古陆且更容易接受来自深水区域的营养补给(李秋芬等，2015)，更容易发育生物礁。相反的，由于遂宁—合川地区的构造高带，更靠近古陆，且远离广海，所以更容易形成颗粒滩(李秋芬等，2015)。



a—长二下亚段沉积期；b—长二中亚段沉积期；c—长二上亚段沉积期。相带边界修改自文龙等(2023)、王嘉先等(2025)和Wen等(2025)

图 8 四川盆地绵阳—广安台洼及其周缘长兴组沉积相平面分布

Fig. 8 Sedimentary facies distribution of the Changxing Formation in Mianyang-Guang'an Trough, Sichuan Basin

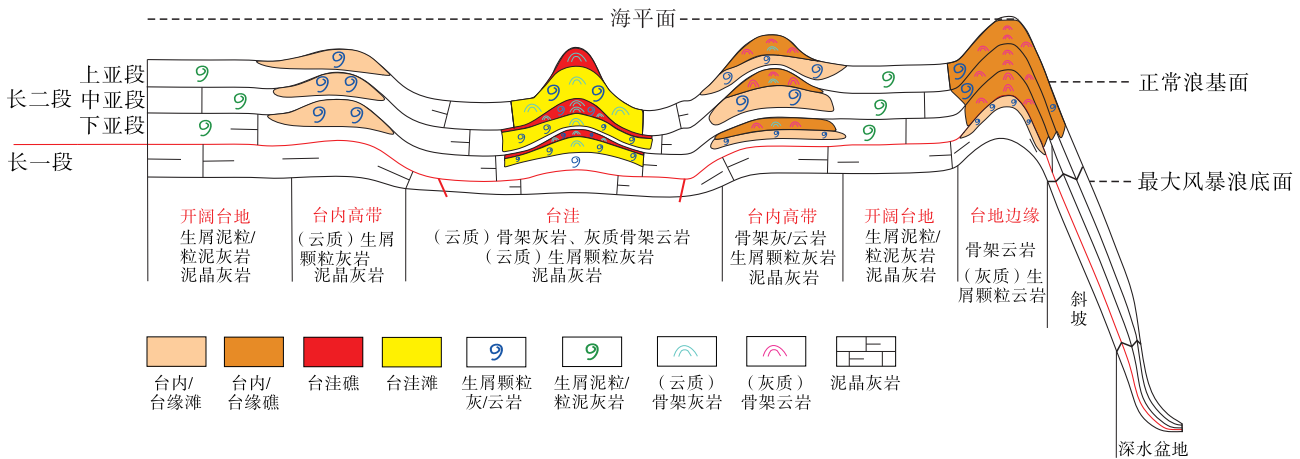


图 9 四川盆地绵阳—广安台洼及其周缘上二叠统长兴组二段沉积模式

Fig. 9 Sedimentary facies model of the Member 2 of Changxing Formation of Upper Permian in Mianyang-Guang'an Trough and its peripheral areas, Sichuan Basin

长二段中亚段沉积的时期(SQ3)，伴随着相对海平面小幅度上升，在开阔台地内部和台洼内具有正地貌的位置，开始发育第2期海绵礁(图7)。紧接着，相对海平面的下降，礁停止发育，并被第2期生屑滩覆盖(图8-b)。在台地边缘，礁滩体连续沉积，形成了礁—滩的叠置规律(姚鑫阳等，2024)。

到了长二段上亚段沉积期(SQ4)，伴随着相对海平面小幅度上升，在绵阳—广安台洼和梓潼—广安台内的地貌高带发育了第3期海绵礁(图7)。随后，伴随着相对海平面下降，礁被第3期生屑滩覆盖(图8-c)。而在台地边缘，由于相对海平面变化较小，未对边缘礁滩体连续沉积产生影响(图9)。值得注意的是，在台缘和台内，长二上亚段发育的礁滩复合体顶部均可被厚度不等(0.05~15 m)的微生物岩覆盖(吴亚生等，2006，2015；Kershaw *et al.*，2012)。而在台洼内，由于研究区内尚未获得关于长兴组顶部—飞仙关组底部的岩心和露头数据，其中微生物岩发育情况仍需进一步讨论。

总之，台洼礁以及环台洼的台内礁同时形成，都形成于长二段沉积初期。这些相带与台洼的形成时间上的一致性说明，与台洼形成相关的张应力所造成的构造高带，可能是台洼礁和环台洼的台内礁形成的主控因素。在台洼和环台洼的台内地貌高带，长二段下中上亚段都有礁滩亚相的发育，形成了相似的滩—礁—滩间的叠置规律(图7)。相对于

台缘礁，台洼礁和台内礁在横向和纵向上的规模都相对较小(图9)，且云化程度都较低，显示出岩石类型上的强非均质性。同时，相对于台缘的礁滩复合体，台洼及台洼周缘的台内礁滩复合体，展示出完整的沉积序列，为全区的地层格架对比提供了参照对象。

6 结论

本研究以发育在上扬子克拉通盆地晚二叠世台洼内的含礁地层为研究对象，通过薄片鉴定和测井数据分析，结合 INPEFA 技术，进行了地层格架搭建以及沉积特征的研究，得到了以下结论：

1) 根据岩性特征，长兴组可以划分为长一段和长二段。根据 INPEFA，长二段可以进一步划分为长二下亚段、长二中亚段和长二上亚段。这种分类方案具有全区可对比性。

2) 四川盆地在长二段沉积期进入镶边台地沉积体系，其内部的台洼、开阔台地和台地边缘礁/滩开始发育。在台洼内，可以识别出台洼滩、台洼礁、台洼滩间以及台洼海4种亚相。

3) 台洼滩以生屑颗粒灰岩为主，GR 和 CNL 测井识别效果最佳，发育在长二段的 HST。台洼礁以骨架灰岩和云质骨架灰岩为主，GR 和 CNL 测井识别效果最佳，主要发育在长二上亚段(SQ4-TST)和长二中亚段(SQ3-TST)。台洼滩间以生屑粒泥灰岩和生屑泥粒灰岩为主，可以通过 RT、GR、CNL 和 DEN 测井识别该亚相，发育台洼礁/

滩附近。台洼海以泥质灰岩和泥页岩为主,测井曲线齿化严重,发育在远离礁/滩的位置。

4) 台洼礁滩复合体形成在构造高部位,对海平面变化相对敏感。其发育规律与台缘礁滩体明显不同,但与台内礁/滩具有可比性。

参考文献 (References)

- 蔡强,黄天俊,杨东凡,罗文军,兰雪梅,王俊杰,唐思哲,杨亚男,闫梦楠. 2024. 川东地区新钻区块礁滩沉积模式及有利相带:以板东南缘上二叠统长兴组为例. 天然气勘探与开发,47(2): 24-34. [Cai Q, Huang T J, Yang D F, Luo W J, Lan X M, Wang J J, Tang S Z, Yang Y N, Yan M N. 2024. Depositional model of reef and shoal in the newly drilled block in the eastern Sichuan area and favorable facies belt: taking the Upper Permian Changhsing Formation in the southeastern edge of the Ban area as an example. *Natural Gas Exploration and Development*,47(2): 24-34]
- 陈鑫,陈雷,刘菲,冯亮,谭秀成,刘冬玺. 2022. 川东地区长兴组生物礁发育特征与迁移规律. 断块油气田,29(1): 26-32. [Chen X, Chen L, Liu F, Feng L, Tan X C, Liu D X. 2022. Development characteristics and migration laws of Changhsing Formation bioreefs in the eastern Sichuan area. *Fault Block Oil and Gas Field*,29(1): 26-32]
- 管树巍,吴林,任荣,朱光有,彭朝全,赵文韬,李杰. 2017. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景. 石油学报,38(1): 9-22. [Guan S W, Wu L, Ren R, Zhu G Y, Peng Z Q, Zhao W T, Li J. 2017. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China. *Acta Petrolei Sinica*,38(1): 9-22]
- 郭彤楼. 2011. 川东北地区台地边缘礁、滩气藏沉积与储层特征. 地学前缘,18(4): 201-211. [Guo T L. 2011. Deposition and reservoir characteristics of reef and shoal gas reservoirs on the platform margin in the northeastern Sichuan area. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 201-211]
- 何治亮,聂海宽,李双建,刘光祥,丁江辉,边瑞康,卢志远. 2021. 特提斯域板块构造约束下上扬子地区二叠系龙潭组页岩气的差异性赋存. 石油与天然气地质,42(1): 1-15. [He Z L, Nie H K, Li S J, Liu G X, Ding J H, Bian R K, Lu Z Y. 2021. Differential occurrence of shale gas in the Permian Longtan Formation in the Upper Yangtze region under the constraints of Tethyan plate tectonics. *Petroleum and Natural Gas Geology*,42(1): 1-15]
- 胡忠贵,胡明毅,廖军,刘冬玺,蔡全升,王丹. 2014. 鄂西建南地区长兴组沉积相及生物礁沉积演化模式. 天然气地球科学,25(7): 980-990. [Hu Z G, Hu M Y, Liao J, Liu D X, Cai Q S, Wang D. 2014. Depositional facies and reef sedimentary evolution pattern of the Changhsing Formation in the Jian'an area of Western Hubei. *Natural Gas Geoscience*,25(7): 980-990]
- 黄福喜. 2011. 中上扬子克拉通盆地沉积层序充填过程与演化模式. 成都理工大学硕士学位论文,1-65. [Huang F X. 2011. Sedimentary sequence filling process and evolution pattern of the Sichuan Craton Basin. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology,1-65]
- 姜华,汪泽成,杜宏宇,张春明,王瑞菊,邹姐姐,王铜山,谷志东,李永新. 2014. 乐山—龙女寺古隆起构造演化与新元古界震旦系天然气成藏. 天然气地球科学,25(2): 192-200. [Jiang H, Wang Z C, Du H Y, Zhang C M, Wang R J, Zou N N, Wang T S, Gu Z D, Li Y X. 2014. Tectonic evolution of the Leshan-Longnusi paleo-uplift and gas accumulation in the Neoproterozoic Sinian System. *Natural Gas Geoscience*,25(2): 192-200]
- 蒋裕强,周亚东,陈智雍,谷一凡,付永红,易娟子,张洁伟,蒋增政. 2019. 川东地区台内洼地二叠系生物礁、滩沉积格局及勘探意义. 天然气地球科学,30(11): 1539-1550. [Jiang Y Q, Zhou Y D, Chen Z Y, Gu Y F, Fu Y H, Yi J Z, Zhang J W, Jiang Z Z. 2019. Depositional pattern and exploration significance of Permian bioreef and shoal sediments in the intraplatform depression of the eastern Sichuan area. *Natural Gas Geoscience*,30(11): 1539-1550]
- 金振奎,王金艺,梁婷,朱小二. 2021. 沉积地质学(上、下册). 北京:石油工业出版社. [Jin Z K, Wang J Y, Liang T, Zhu X E. 2021. *Sedimentary Geology (Vol. 1 & 2)*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 李平平,魏广鲁,徐祖新,李毕松,彭雨晴,邹华耀. 2023. 四川盆地元坝气田长兴组古原油的运移方向与聚集特征. 地学前缘,30(6): 277-288. [Li P P, Wei G L, Xu Z X, Li B S, Peng Y Q, Zou H Y. 2023. Migration direction and accumulation characteristics of ancient crude oil in the Changhsing Formation of the Yuanba gas field in the Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*,30(6): 277-288]
- 李秋芬,苗顺德,王铜山,江青春,汪泽成,李军,谢芬,殷积锋,谷志东. 2015. 四川盆地晚二叠世克拉通内裂陷作用背景下的盐亭—潼南海槽沉积充填特征. 地学前缘,22(1): 67-76. [Li Q F, Miao S D, Wang T S, Jiang Q C, Wang Z C, Li J, Xie F, Yin J F, Gu Z D. 2015. Sedimentary filling configuration of Yanting-Tongnan trough under the background of intracratonic rift in Late Permian, Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*,22(1): 67-76]
- 黎荣,胡忠贵,张航,李伟,王明. 2016. 川东卧龙河—洋渡溪区带长兴组台内礁滩沉积格局及有利储集体展布. 沉积学报,34(5): 973-982. [Li R, Hu Z G, Zhang H, Li W, Wang M. 2016. Depositional pattern of intraplatform reef and shoal in the Wulonghe-Yangduxik area of the Changhsing Formation and distribution of favorable reservoirs. *Acta Sedimentologica Sinica*,34(5): 973-982]
- 李跃杰,谢静平,高兆龙,汪晓星,阳聪,赵玲丽,袁海峰,徐国盛,邓双林. 2023. 蜀南地区二叠系茅口组流体包裹体特征与油气充注期次分析. 天然气勘探与开发,46(4): 69-79. [Li Y J, Xie J P, Gao Z L, Wang X X, Yang C, Zhao L L, Yuan H F, Xu G S, Deng S L. 2023. Characteristics of fluid inclusions and oil and gas charging stages in the Permian Maokou Formation in southern Sichuan. *Natural Gas Exploration and Development*,46(4): 69-79]
- 刘树根,宋金民,罗平,孙玮,李智武,钟勇,余永强. 2016. 四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景. 成都理工大学学报(自然科学版),43(2): 129-152. [Liu S G, Song J M, Luo P, Sun W, Li Z W, Zhong Y, Yu Y Q. 2016. Characteristics of

- deep microbial carbonate reservoirs and oil and gas exploration prospects in the Sichuan Basin. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(2): 129–152]
- 倪新锋, 陈洪德, 田景春, 韦东晓. 2007. 川东北地区长兴组—飞仙关组沉积格局及成藏控制意义. *石油与天然气地质*, 28(4): 458–465. [Ni X F, Chen H D, Tian J C, Wei D X. 2007. Sedimentary pattern and hydrocarbon accumulation control significance of the Changxing-Feixianguan formations in northeastern Sichuan. *Petroleum and Natural Gas Geology*, 28(4): 458–465]
- 秦鹏, 胡忠贵, 吴嗣跃, 左滔滔, 韩露. 2018. 川东长兴组台缘礁滩相储层纵向非均质性特征及形成机制: 以川东宣汉盘龙洞长兴组剖面为例. *岩石矿物学杂志*, 37(1): 61–74. [Qin P, Hu Z G, Wu S Y, Zuo M T, Han L. 2018. Vertical heterogeneity characteristics and formation mechanisms of shoal reservoirs in the Changhsing Formation in eastern Sichuan: A case study of the Changhsing Formation section in Xuanhan Panlongdong. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 37(1): 61–74]
- 邱楠生, 冯乾乾, 腾格尔, 吴航. 2020. 川东南丁山地区燕山期—喜马拉雅期差异构造—热演化与页岩气保存. *石油学报*, 41(12): 1610–1622. [Qiu N S, Feng Q Q, Teng G E, Wu H. 2020. Differential tectonic-thermal evolution and shale gas preservation in the Dingshan area of southeastern Sichuan during the Yanshanian-Himalayan periods. *Acta Petrolei Sinica*, 41(12): 1610–1622]
- 宋昊, 胡明毅, 陈旭, 王胜利, 左滔滔, 邓志强. 2022. 不同坡度背景下生物礁沉积结构及差异演化特征: 以开江—梁平海槽西侧长兴组为例. *断块油气田*, 29(6): 788–793, 799. [Song H, Hu M Y, Chen X, Wang S L, Zuo M T, Deng Z Q. 2022. Sedimentary structures and differential evolution characteristics of bioreefs under different slope conditions: a case study of the Changhsing Formation on the west side of the Kaijiang-Liangping Trough. *Fault Block Oil and Gas Field*, 29(6): 788–793, 799]
- 唐雨, 张云峰, 胡林辉, 唐洪明, 徐亮, 陈思铤, 刘冬玺, 钟平强. 2021. 开江—梁平海槽西侧中东段长兴组台缘储层特征及差异性. *沉积学报*, 39(6): 1593–1608. [Tang Y, Zhang Y F, Hu L H, Tang H M, Xu L, Chen S Q, Liu D X, Zhong P Q. 2021. Characteristics and differences of platform edge reservoirs in the middle and eastern sections of the west side of the Kaijiang-Liangping Trough. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1593–1608]
- 王东, 刘宏, 唐松, 白金昊, 周刚, 李正勇, 梁锋, 谭秀成, 耿超, 杨应. 2023. 川中二叠系长兴组层序格架内台内滩沉积构型与分布规律. *石油勘探与开发*, 50(2): 346–359. [Wang D, Liu H, Tang S, Bai J H, Zhou G, Li Z Y, Liang F, Tan X C, Geng C, Yang Y. 2023. Depositional configuration and distribution laws of intraplatform shoals within the sequence framework of the Changhsing Formation in the central Sichuan. *Petroleum Exploration and Development*, 50(2): 346–359]
- 王嘉先, 孙豪飞, 徐亮, 明盈, 徐唱, 冉钰, 李长志, 李阳, 杨容. 2025. 德阳—武胜海槽长兴组礁滩沉积及储源特征研究. *断块油气田*, 32(2): 242–250. [Wang J X, Sun H F, Xu L, Ming Y, Xu C, Ran Y, Li C Z, Li Y, Yang R. 2025. Study on reef and shoal sedimentation and reservoir-source characteristics of the Changhsing Formation in the Deyang-Wusheng Trough. *Fault Block Oil and Gas Field*, 32(2): 242–250]
- 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 徐春春, 邹才能, 谢武仁, 曾富英, 武赛军. 2015. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征. *天然气工业*, 35(1): 24–35. [Wei G Q, Yang W, Du J H, Xu C C, Zou C N, Xie W R, Zeng F Y, Wu S J. 2015. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(1): 24–35]
- 文龙, 张本健, 陈骁, 徐亮, 马华灵, 彭瀚霖. 2023. 四川盆地二叠、三叠系构造—沉积特征及有利勘探区带. *天然气勘探与开发*, 46(4): 1–12. [Wen L, Zhang B J, Chen X, Xu L, Ma H L, Peng H L. 2023. Tectonic-sedimentary characteristics and favorable exploration zones of the Permian and Triassic in the Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 46(4): 1–12]
- 武赛军, 魏国齐, 杨威. 2019. 开江—梁平海槽东侧长兴组台缘生物礁发育特征及油气地质勘探意义. *中国石油勘探*, 24(4): 457–465. [Wu S J, Wei G Q, Yang W. 2019. Development characteristics and geological exploration significance of platform edge bioreefs in the eastern side of the Kaijiang-Liangping Trough. *China Petroleum Exploration*, 24(4): 457–465]
- 王一刚, 张静, 刘兴刚, 徐丹舟, 师晓蓉, 宋蜀筠, 文应初. 2005. 四川盆地东北部下三叠统飞仙关组碳酸盐蒸发台地沉积相. *古地理学报*, 7(3): 357–371. [Wang Y G, Zhang J, Liu X G, Xu D Z, Shi X R, Song S J, Wen Y C. 2005. Depositional facies of the carbonate evaporite platform of the Lower Triassic Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 7(3): 357–371]
- 吴亚生. 2023. 生物岩的分类. *古地理学报*, 25(3): 511–523. [Wu Y S. 2023. Classification of biolith (biogenic rocks). *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(3): 511–523]
- 吴亚生, YANG Wan, 姜红霞, 范嘉松. 2006. 江西修水二叠纪—三叠纪界线地层海平面下降的岩石学证据. *岩石学报*, 22(12): 3039–3046. [Wu Y S, Yang W, Jiang H X, Fan J S. 2006. Petrologic evidence for sea-level drop in latest Permian in Jiangxi Province, China and its meanings for the mass extinction. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 3039–3046]
- 吴亚生, 姜红霞, 刘丽静, 赵锐. 2015. 四川宣汉盘龙洞上二叠统长兴组沉积相与岩石地层精细划分. *地质学报*, 89(2): 412–424. [Wu Y S, Jiang H X, Liu L J, Zhao R. 2015. Depositional facies and detailed lithostratigraphic division of the Upper Permian Changhsing Formation in the Panlong Cave, Xuanhan, Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 89(2): 412–424]
- 易士威, 王权. 2005. 岩性地层油气藏勘探思路与勘探方法. *中国石油勘探*, (2): 9–14, 63. [Yi S W, Wang Q. 2005. Geological exploration ideas and methods for lithologic and stratigraphic oil and gas reservoirs. *China Petroleum Exploration*, (2): 9–14, 63]
- 姚鑫阳, 胡忠贵, 武赛军, 谢武仁, 杨帅奇, 姚敏, 毕宇航. 2024. 川东北地区开江—梁平海槽东侧长兴组沉积特征及有利区预测. *沉积学报*, 42(6): 2102–2118. [Yao X Y, Hu Z G, Wu S J, Xie W

- R, Yang S Q, Yao M, Bi Y H. 2024. Sedimentary characteristics and favorable area prediction of the Changhsing Formation on the eastern side of the Kaijiang-Liangping Trough in northeastern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(6): 2102-2118]
- 张建勇,周进高,郝毅,王小芳,吕玉珍,张大智,徐美茹,张润合,谷明峰,张敬艺. 2011. 四川盆地环开江—梁平海槽长兴组—飞仙关组沉积模式. *海相油气地质*, 16(3): 45-54. [Zhang J Y, Zhou J G, Hao Y, Wang X F, Lü Y Z, Zhang D Z, Xu M R, Zhang R H, Gu M F, Zhang J Y. 2011. Sedimentary model of the Changxing and Feixianguan formations around the Kaijiang-Liangping Trough in the Sichuan Basin. *Marine Petroleum Geology*, 16(3): 45-54]
- 张奇,屠志慧,饶雷,徐亮,邓思思. 2010. 四川川中地区晚二叠世蓬溪—武胜台凹对台内生物礁滩分布的控制作用. *天然气勘探与开发*, 33(4): 1-4, 7, 91. [Zhang Q, Tu Z H, Rao L, Xu L, Deng S S. 2010. Control of the Pengxi-Wusheng platform depression on the distribution of intra-platform biogenic reef and shoal facies in the Late Permian in the central Sichuan Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 33(4): 1-4, 7, 91]
- 章学刚,熊冉,邓庆杰,杨文杰. 2022. 四川盆地洗象池组颗粒滩沉积组合特征及沉积控储机理. *科学技术与工程*, 22(4): 1389-1398. [Zhang X G, Xiong R, Deng Q J, Yang W J. 2022. Sedimentary characteristics and controlling mechanisms of reservoir formation of the Xixiangchi Formation particulate shoals in the Sichuan Basin. *Science Technology and Engineering*, 22(4): 1389-1398]
- 周进高,徐哲航,黄世伟,李文正,段军茂,朱永进,郑剑锋,吴东旭,常少英. 2024. 碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向. *石油与天然气地质*, 45(4): 929-953. [Zhou J G, Xu Z H, Huang S W, Li W Z, Duan J M, Zhu Y J, Zheng J F, Wu D X, Chang S Y. 2024. Frontiers and future development directions of carbonate reservoir research. *Petroleum & Natural Gas Geology*, 45(4): 929-953]
- 左滔滔,胡忠贵,李世临,陈卫东,朱宜新,孙玉华. 2022. 开江—梁平海槽东侧长兴组沉积组合类型及分布规律. *断块油气田*, 29(1): 60-65. [Zuo M T, Hu Z G, Li S L, Chen W D, Zhu Y X, Sun Y H. 2022. Types and distribution laws of sedimentary combinations of the Changhsing Formation on the eastern side of the Kaijiang-Liangping Trough. *Fault Block Oil and Gas Field*, 29(1): 60-65]
- Bosence D. 2005. A genetic classification of carbonate platforms based on their basinal and tectonic settings in the Cenozoic. *Sedimentary Geology*, 175(1-4): 49-72.
- Burchette T P, Wright V P. 1992. Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary Geology*, 79(1): 3-57.
- Dunham R J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham W E (ed). *Classification of carbonate rocks: a symposium*. AAPG Memoir, 1: 108-121.
- Gischler E. 2025. Sediment distribution and facies of modern tropical reefs and carbonate platforms revisited: a global perspective. *Sedimentary Geology*, 486: 106929.
- Irwin M L. 1965. General theory of epeiric clear water sedimentation. *AAPG Bulletin*, 49(4): 445-459.
- James N P. 1983. Reefs. *Carbonate Depositional Environments*. In: Scholle P A, Bebout D G, Moore C H (eds). *AAPG Memoir*, 33: 345-462.
- James N P, Jones B. 2014. *Origin of Carbonate Sedimentary Rocks*. Hoboken: Wiley, 1-66.
- Kershaw S, Crasquin S, Li Y, Collin P-Y, Forel M-B, Mu X, Baud A, Wang Y, Xie S, Maurer F, Guo L. 2012. Microbialites and global environmental change across the Permian-Triassic boundary: a synthesis. *Geobiology*, 10: 25-47.
- Li H, Long S X, You Y C, Liu G P, Li X P. 2015. Sequence and sedimentary features of the Changxing Fm organic reefs and their control on reservoir development in the Yuanba Gas Field, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry B*, 2(6): 506-514.
- Liang T, Bao Z D, Zhu X E, Guo Y X, Li J Y, Jones B. 2020. Rare earth elements in dolostones and limestones from the Mesoproterozoic Gaoyuzhuang Formation, North China: implications for penecontemporaneous dolomitization. *Journal of Asian Earth Sciences*, 196: 104374.
- Neinast G S, Knox C C. 1973. Normalization of well log data. *The SPWLA 14th Annual Logging Symposium*, Lafayette, Louisiana: SPWLA - 1973-I.
- Nio S D, Brouwer J H, Smith D, Jong M D, Böhm A. 2005. Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs. *First Break*, 23(4): 71-76.
- Read J F. 1985. Carbonate platform facies models. *AAPG Bulletin*, 66: 860-878.
- Reijmer J J G. 2021. Marine carbonate factories: Review and update. *Sedimentology*, 68(5): 1729-1796.
- Schlager W. 2003. Benthic carbonate factories of the Phanerozoic. *International Journal of Earth Sciences*, 92(4): 445-464.
- Tucker M E, Wright V P. 1990. *Carbonate Sedimentology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1-482.
- Wen L, Luo B, Zhang B J, Chen X, Li W Z, Liu Y F, Hu, A P, Zhang X H, Shen, A J. 2025. Formation and preservation of pores in deep limestone reservoirs: a case study of Upper Permian Changxing Formation, central Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 52(2): 330-345
- Wilson J L. 1975. The impact of urbanization. *Urban Studies Journal*, 22(3): 456-478.
- Wright V P, Burchette T P. 1996. Shallow water carbonate sediments. In: Reading H G (ed). *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. Blackwell Science: 325-394.
- Yin H, Jiang H, Xia W, Feng Q, Zhang N, Shen J. 2014. The end-Permian regression in South China and its implication on mass extinction. *Earth Science Reviews*, 137: 19-33.