

doi: [10.12097/gbc.2022.02.027](https://doi.org/10.12097/gbc.2022.02.027)

四川仪陇—平昌地区长兴组—飞仙关组层序地层及沉积演化

廖鑫羽¹, 肖云鹏^{2*}, 宋振宇³

LIAO Xinyu¹, XIAO Yunpeng^{2*}, SONG Zhenyu³

1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术海南分公司, 海南 澄迈 571999;

2. 中海石油(中国)有限公司海南分公司, 海南 海口 570300;

3. 长江大学地球科学学院, 湖北 武汉 430100

1. CNOOC Energy Company Limited, Engineering Technology Hainan Compang, Chengmai 571999, Hainan, China;

2. CNOOC China Limited, Hai Nan Branch, Haikou 570300, Hainan, China;

3. Geosciences School of Yangtze University, Wuhan 430100, Hubei, China

摘要: 四川仪陇—平昌地区, 特别是环开江—梁平海槽区域的长兴组—飞仙关组蕴藏着大量油气资源, 但其三级层序划分方案有待统一。基于最新的钻井岩心、测井、野外露头资料综合分析, 识别出岩性岩相突变界面及局部暴露不整合界面 2 种 II 型层序界面, 将仪陇—平昌地区的长兴组—飞仙关组划分为 4 个三级层序, 建立了层序地层格架。该区目的层主要发育典型的镶边台地沉积体系, 至晚期海槽消失, 发育陆表海型台地体系开阔台地及蒸发台地。长兴组沉积期, 开江—梁平海槽范围逐渐扩大, 高位域是生物礁发育的有利阶段, 由于 SQ2 晚期海平面急速下降, 其生物礁规模较 SQ1 时期有所减小; 飞仙关组沉积早期海平面快速上升, 鲕粒滩难以形成, 随后进入整体海退阶段, 至 SQ3 高位域时期, 鲕粒滩连片发育。层序划分方案与礁、滩储层发育特征匹配, 能够应用于下一步油气勘探。

关键词: 长兴组; 飞仙关组; 层序划分; 沉积演化; 仪陇—平昌地区; 四川

中图分类号: P512.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)02/03-0350-13

Liao X Y, Xiao Y P, Song Z Y. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Changxing—Feixianguan Formations in Yilong—Pingchang area, Sichuan Province. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(2/3): 350–362

Abstract: The Yilong—Pingchang area in Sichuan, especially the Changxing—Feixianguan Formations in the region surrounding the Kaijiang-Liangping trough, contains a large amount of oil and gas resources, but the third class sequence classification scheme needs to be unified. Based on the comprehensive analysis of the latest drilling core, well logging, and field outcrop data, two types of type II sequence interfaces, including the lithologic facies abrupt interface and the partial exposure unconformity interface, were identified. The Changxing—Feixianguan Formations in the study area were divided into 4 third class sequences, and a sequence stratigraphic framework was established. The target stratum in the study area mainly developed a typical rimmed platform sedimentary system. In the late stage, the trough disappeared, and the open platform and evaporate platform of the epicontinental sea platform system developed. During the deposition of the Changxing Formation, the Kaijiang-Liangping trough gradually expanded, and the highstand system tract was a favorable stage for the development of reefs. Due to the rapid decline in sea level in the late SQ2 period, the scope of the reefs was reduced compared to the SQ1 period. The sea level rose rapidly in the early depositional stage of the Feixianguan Formation, and it was difficult to form oolitic shoals, and then entered the overall regression stage, and to the highstand system tract of

收稿日期: 2022-02-26; 修订日期: 2022-08-28

资助项目: 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院项目《仪陇—平昌地区海相碳酸盐岩岩相古地理研究》(编号: DQYT-1201002-2019-JS-1022)

作者简介: 廖鑫羽(1995-), 女, 硕士, 工程师, 从事石油地质勘查研究。E-mail: ex_liaox2@cnooc.com.cn

* 通信作者: 肖云鹏(1993-), 男, 硕士, 地质工程师, 从事开发地质研究。E-mail: xiaoy4@cnooc.com.cn

SQ3, the oolitic shoals developed contiguously. The sequence classification scheme matches the development characteristics of reef and shoal reservoirs and can be applied to the next step of oil and gas exploration.

Key words: Changxing Formation; Feixianguan Formation; sequence classification; sedimentary evolution; Yilong—Pingchang area; Sichuan Province

四川盆地位于扬子古板块西部(赵文智等, 2002), 是中国陆上最重要的天然气产区之一(张水昌等, 2006; 吴小奇等, 2015; 张勇等, 2023), 其中环开江—梁平海槽是碳酸盐岩礁滩气勘探开发的重点区域, 已发现普光、罗家寨、铁山坡、龙岗、元坝等大中型气田(Ma et al., 2008; 韩克猷等, 2014; Wang et al., 2015; Wang et al., 2018; 蒋裕强等, 2018)。与碎屑岩沉积体系相比, 碳酸盐层序地层研究更复杂, 属于内源自生成因, 层序发育、内部沉积充填、沉积建造样式和形态受海平面升降、构造基底沉降、沉积速率、古气候等因素的影响(Sarg, 1988; Schlager, 2005; 何治亮等, 2014)。因而, 不同学者基于层序界面类型对应的多种地质作用和产物差异, 建立了不同的识别方法。四川盆地长兴组—飞仙关组三级层序划分方案有待统一: 陈中强(1995)、王兴志等(2002)将长兴组和飞仙关组划入同一个三级层序; 马永生等(2008)、陈洪德等(2009)均将长兴组划分为 2 个三级层序, 董霞等(2009)将其划分为 1 个三级层序; 李国军等(2007)、郑荣才等(2009)将飞仙关组划分为 2 个三级层序, 谭先锋等(2012)将其划分为 3 个三级层序。此外, 长兴组时期是否发育低位体系域也是亟需解决的关键问题(何金海, 2013)。“开江—梁平海槽”这一概念最早由王一刚等(1998)提出, 张延充等(2009)还曾提出“泛开江—梁平海槽”的观点, 马永生等(2006)则认为海槽并不存在, 仅是一个水体较深的台棚环境; 相应地, 对沉积格局的认识及沉积相的划分也存在差异。目前大部分学者认同海槽的存在, 并基于此种观点开展沉积相及储层研究。台缘带礁滩是区内长兴组—飞仙关组时期最重要的储层类型, 不同学者对其展布及演化的认识具有差别。针对上述问题, 以仪陇—平昌地区钻遇的长兴组—飞仙关组最新单井及区内外野外露头实测剖面为基础, 开展三级层序界面识别, 建立层序地层格架, 结合前人研究成果, 分析层序格架内沉积演化, 以期为进一步油气勘探提供依据。

1 地质概况

四川盆地为扬子准台地西北部一个次一级构造

单元, 可划分为 5 个构造带(郝毅等, 2020), 仪陇—平昌地区主体属于川北低陡褶皱带(图 1)。研究区目的层系主要经历过东吴运动、印支运动、燕山运动及喜山运动(汪泽成等, 2002)。东吴运动使扬子准台地结束海侵抬升为陆, 下二叠统普遍遭受剥蚀, 使区内形成了西高东低的平缓斜坡和内部高低不平的低矮丘陵式地貌。晚二叠世末, 长兴期—早三叠世初飞仙关期的拉张性基底断裂作用在台地内形成了一些裂谷型坳陷, 如开江—梁平海槽、城口—鄂西海槽等(王一刚等, 2008; 蒋裕强等, 2018), 伴以水下玄武岩喷发, 是台缘带礁、滩发育的基础。中三叠世末的印支运动是四川盆地由拉张到挤压的转折点, 并进入了陆相沉积阶段(姜华等, 2014)。燕山期地壳强烈抬升, 形成了研究区地层褶皱的基础, 至喜马拉雅期, 受北西向、南东向的挤压及北面大巴山弧的控制, 研究区震旦系以上地层强烈褶皱, 形成了研究区现今的构造格局。目的层系长兴组岩性主要为泥晶(颗粒)灰岩、藻灰岩、礁灰岩等, 其同时异地层大隆组发育硅质岩与硅质页岩、炭质页岩互层; 下伏吴家坪组泥晶—微晶灰岩或龙潭组粉砂质泥岩及泥质粉砂岩, 与长兴组整合接触。飞仙关组与长兴组整合接触, 主要发育泥晶(颗粒)灰岩, 顶部发育泥质云岩、页岩与石膏岩互层岩相; 上覆嘉陵江组发育灰岩、白云岩、石膏岩、盐岩等, 与飞仙关组不整合接触, 整体上呈现出断断续续的海退过程。

2 沉积相划分

综合利用岩心、野外露头、测井等资料, 建立沉积相标志, 结合前人研究成果, 对研究区目的层进行了沉积相划分(表 1)。

(1) 蒸发台地相: 该相带位于碳酸盐岩台地向陆一侧的潮上沉积区, 海水循环受限且古地貌较高或长期出露地表, 蒸发作用强烈, 地势相对低洼处易形成石膏岩, 相对凸起处则发育准同生蒸发成因白云岩(谭先锋等, 2012)。可划分为蒸发坪和蒸发潟湖 2 个亚相, 蒸发潟湖是蒸发台地中一些浅水湖泊, 泥质含量较蒸发坪高, 钻井上可根据 GR 曲线值的高低

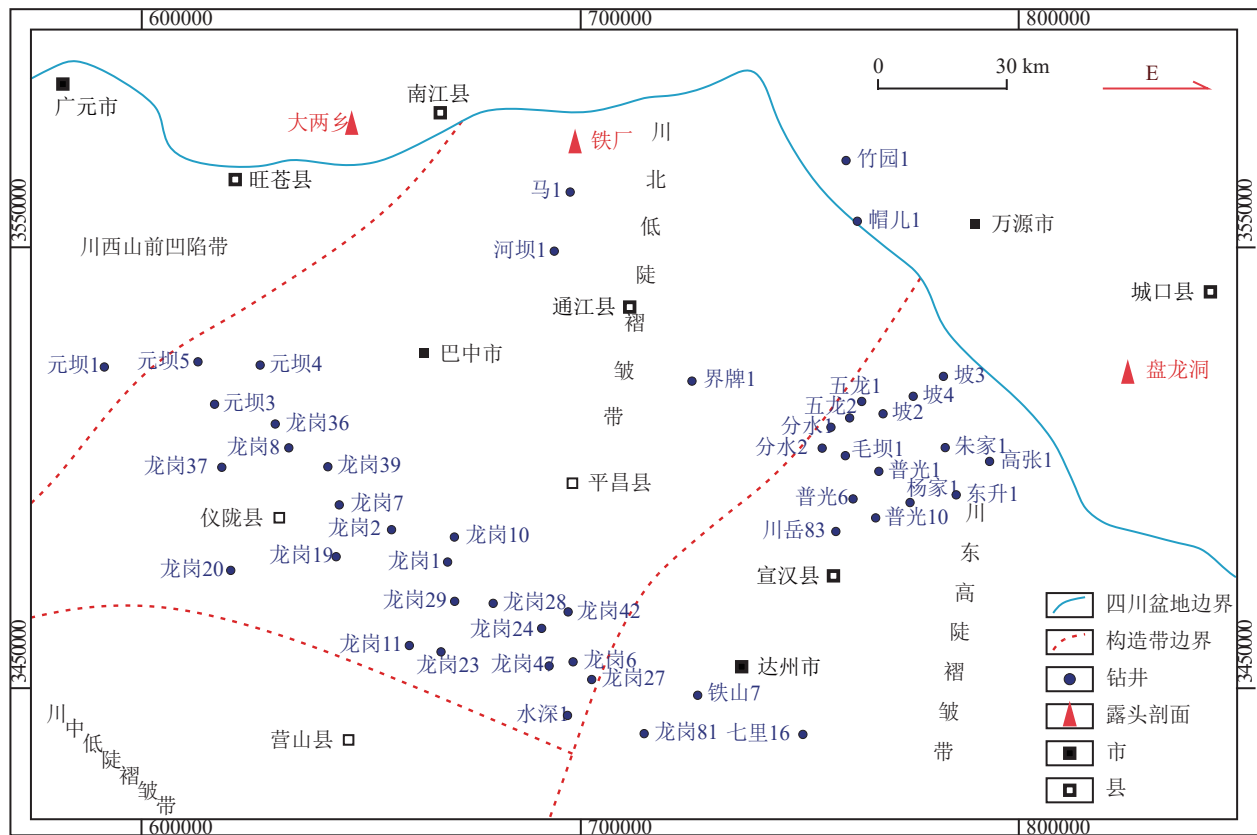


图 1 研究区范围及钻井、露头剖面位置(据郝毅等, 2020 修改)

Fig. 1 The scope of the study area and the location of wells and outcrop sections

表 1 长兴组-飞仙关组沉积相划分

Table 1 Sedimentary facies division of Changxing Formation-Feixianguan Formation

相	亚相	微相	主要岩性	发育层位
蒸发台地	蒸发坪	云坪、云膏坪、膏泥坪等	云岩、膏岩、含膏云岩、云质膏岩	T_1f^4
	蒸发潟湖	云膏质潟湖	云岩、膏岩、云质膏岩、含泥云岩	T_1f^4
局限台地	潮间坪	灰坪、云坪、云泥坪等	灰岩、云岩、泥质云岩	P_3c^2 、 T_1f
	局限潟湖	灰质潟湖、云质潟湖	灰岩、云岩、云质灰岩、灰质云岩	P_3c^2 、 T_1f
	台内滩	鲕粒滩、生屑滩	鲕粒/生屑灰岩/云岩	T_1f^{1-2}
开阔台地	台内礁滩	生物礁、鲕粒滩、生屑滩	生物礁灰岩、鲕粒/生屑灰岩	P_3c 、 T_1f^{1-3}
	滩间海	滩间洼地	泥晶灰岩、含泥灰岩	P_3c 、 T_1f^{1-3}
台地边缘	台缘礁滩	生物礁、鲕粒滩、生屑滩	生物礁灰岩/云岩、鲕粒/生屑灰岩/云岩	P_3c 、 T_1f^{1-3}
台地前缘斜坡	上斜坡	碎屑流及原地沉积	砾屑灰岩、砂屑灰岩、生屑灰岩	P_3c 、 T_1f^{1-3}
	下斜坡	浊流及原地沉积	泥质灰岩、钙质泥岩、页岩	P_3c 、 T_1f^{1-3}
广海陆棚	外陆棚、内陆棚	灰质陆棚、泥质陆棚	(含燧石条带)灰岩、泥岩	P_3c 、 T_1f^{1-3}
盆地	盆内平原	硅质平原、泥质平原	硅质岩、硅质页岩、钙质页岩	P_3c
滨岸潮坪	潮间坪	潮间混合坪	颗粒灰岩、泥质灰岩、泥岩	T_1f^4
	潮上坪	潮上泥坪	泥质云岩、页岩、膏岩	T_1f^4

注： T_1f^4 —下三叠统飞仙关组4段； T_1f —下三叠统飞仙关组； T_1f^{1-3} —飞仙关组1~3段； P_3c —二叠系乐平统长兴组； P_3c^2 —长兴组2段

对二者进行区分,并根据岩相组合进一步划分微相。

(2)局限台地相:该相带指障壁岛或大的浅滩之后向陆一侧十分平缓的海岸地带或浅水盆地,海水循环不畅,水体能量低,盐度偏高,古生物化石稀少,沉积物以白云岩、灰岩、灰质白云岩、白云质灰岩、泥质白云岩为主。可进一步分为潮间坪、局限潟湖、

台内滩等亚相: 台内滩发育于浪基面附近, 代表台地内的高能环境, 主要为鲕粒滩、生屑滩和砂屑滩(图版 I-a, b); 潮间坪发育于平均高潮线至低潮线之间, 水动力强弱受潮汐作用控制, 水体较浅或短期暴露环境下发育云坪、云泥坪等微相; 局限潟湖发育于正常浪基面之下, 泥质含量高于潮间坪, GR 值较高且变化幅度较大(图 2-a), 沉积较厚, 面积较大, 微相以灰质潟湖、云质潟湖为主, 蒸发作用较强处可发育含膏潟湖。

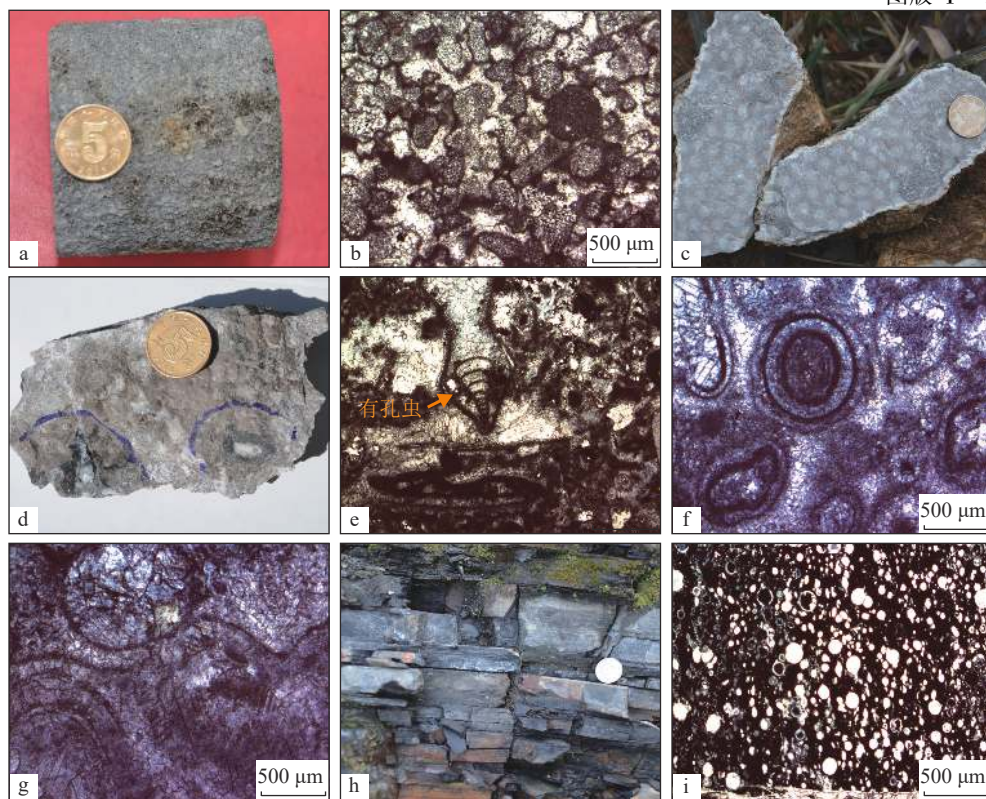
(3) 开阔台地相: 该相带位于碳酸盐岩台地靠海一侧, 与广海连通性较好, 海水循环通畅, 盐度正常, 生物种类丰富。台内礁滩发育于浪基面附近, 受波浪、潮汐作用影响, 水动力较强, 形成鲕粒、生屑等颗粒沉积或生物建造, 其中台内礁微相仅发育于长兴组(图版 I-c-e)。滩间海发育于浪基面之下的低能环境中, 沉积物以薄—中层状深灰色泥晶灰岩为主, 发育水平层理、生物钻孔等构造, 泥质含量及 GR 值高于台内礁滩(图 2-b)。

(4) 台地边缘相: 台地边缘指浅水碳酸盐岩台地向海一侧的高能相带, 受到波浪、潮汐作用的强烈改造, 有利于厚度较大的亮晶鲕粒灰岩、生物礁灰岩、生屑灰岩等发育(图版 I-f, g)。该相带呈凸起伏状, 水体下降时期可暴露出海平面, 遭受大气淡水淋滤作用和混合白云石化作用, 产生大量溶蚀孔缝, 形成良好储层。

(5) 台地前缘斜坡相: 该相带为台缘带与海槽之间的过渡沉积, 位于浪基面之下, 氧化界面附近, 水动力较弱, 主要发育薄层泥质灰岩、钙质泥岩等原地沉积; 由于地势陡峭, 台缘带半固结或未固结的沉积物常发生垮塌, 被重力流搬运至该相带, 上斜坡亚相中发育碎屑流, 响水村剖面该微相岩性多为泥晶砾屑灰岩、砾屑泥质灰岩, 下斜坡亚相坡度较缓, 沉积物较细, 发育浊流沉积物。GR 值变化幅度较大, 见漏斗型、低幅齿形、尖指型, 且在分水 1 井观察到若干向上变粗的韵律(图 2-c)。

(6) 广海陆棚相: 位于氧化界面之下, 碳酸盐岩

图版 I Plate I



a. 鲕粒白云岩, 东升 1 井, 6140.90 m, 飞二段(岩心照片); b. 亮晶砂屑云岩, 杨家 1 井, 5873.72 m, 飞二段(显微照片, 单偏光); c. 群体四射珊瑚礁灰岩, 江油市二郎庙镇龙潭村坪上剖面, 第 13 小层, 长兴组(露头照片); d. 海绵礁灰岩, 达州市宣汉县盘龙洞剖面, 第 8 小层, 长兴组(露头照片); e. 亮晶海绵障积礁灰岩, 见有孔虫, 第 8 小层, 长兴组(显微照片, 单偏光); f. 亮晶鲕粒灰岩, 五龙 1 井, 6647.10 m, 飞二段(显微照片, 正交偏光); g. 残余亮晶鲕粒灰岩, 五龙 2 井, 6390.20 m, 飞二段(显微照片, 正交偏光); h. 硅质岩与硅质页岩、炭质页岩互层, 广元市旺苍县三江镇大两乡剖面, 第 20 小层, 大隆组(露头照片); i. 放射虫硅质岩, 广元市旺苍县三江镇大两乡剖面, 第 20 小层, 大隆组(显微照片, 单偏光)

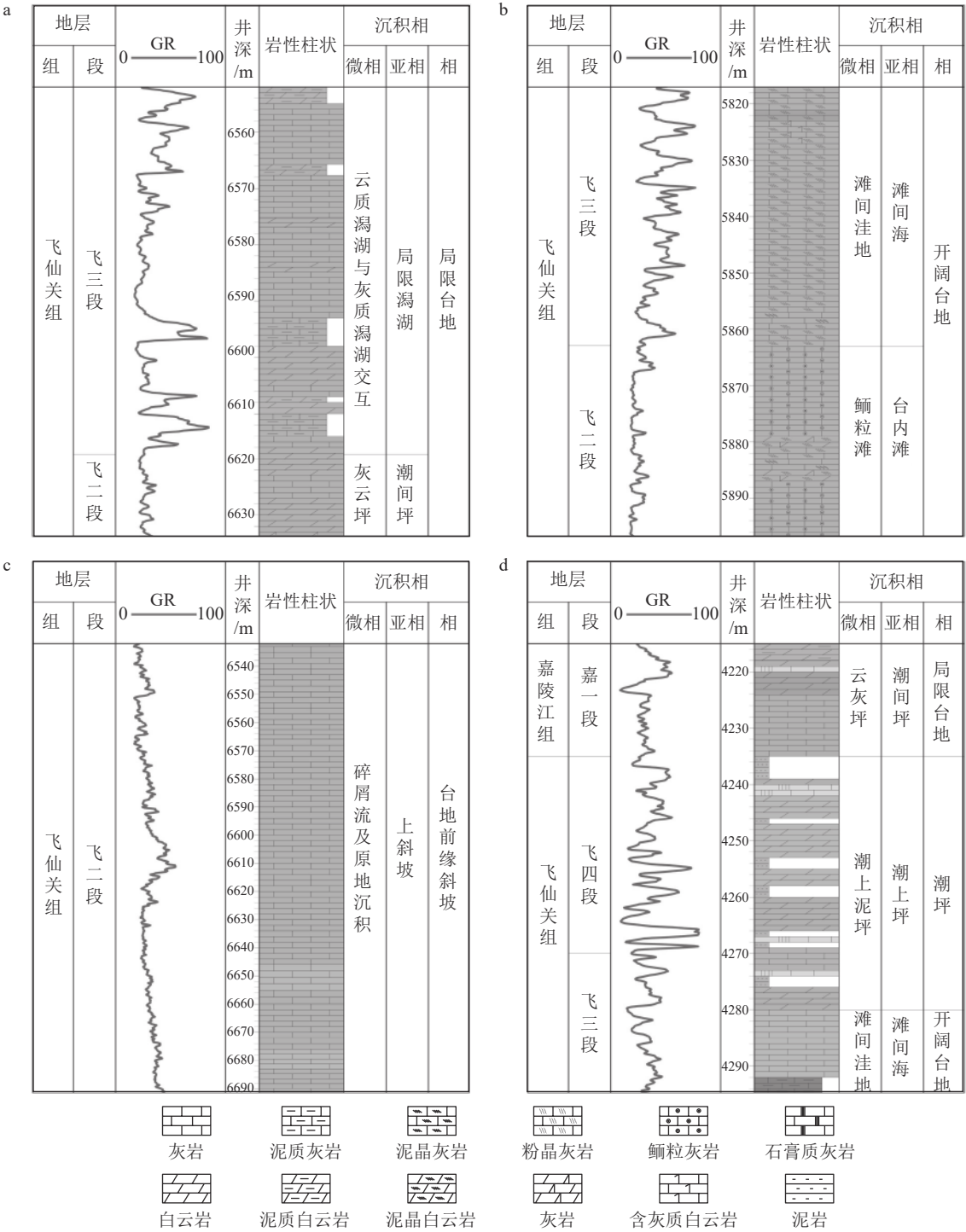


图 2 典型测井相标志

Fig. 2 Typical logging sedimentary facies symbols

a—五龙 1 井, 深度 6552~6632 m, 比例尺 1 : 500; b—龙岗 20 井, 深度 5817~5897 m, 比例尺 1 : 500; c—分水 1 井, 深度 6532~6692 m, 比例尺 1 : 1000; d—高张 1 井, 深度 4215~4295 m, 比例尺 1 : 500

补偿界面之上, 地势平坦, 范围宽广, 水体运动很弱或处于静止条件, 为低能带, 沉积物以暗色细粒灰泥和页岩为主, 可划分为灰质陆棚、泥质陆棚微相。

(7) 盆地相: 该相带位于广海陆棚之下的深水区, 水体循环基本停滞, 见于研究区北西部旺苍县大两乡剖面大隆组, 岩性为薄层硅质岩、硅质页岩、炭

质页岩互层(图版 I -h, i), 划分为硅质平原和泥质平原 2 个微相。

(8) 滨岸潮坪相: 该相带主要发育于研究区目的层飞仙关组第四段, 响水村剖面为亮晶介壳灰岩、亮晶生屑砂屑灰岩、泥质灰岩、泥岩等交互岩相, 属潮间混合坪微相, 钻井上为泥质云岩、页岩与石膏岩互层岩相, 属潮上泥坪微相, GR 曲线呈尖指型或高幅齿形(图 2-d)。上述二者均属于干旱型滨岸沉积, 有别于四川盆地吴家坪组/龙潭组底部泥岩、炭质页岩、煤层、粉砂岩等组成的潮湿型滨岸沉积。

3 层序地层研究

3.1 层序界面特征及划分方案

根据经典层序地层学理论, 层序界面主要有

I 型和 II 型 2 种类型。基于最新钻井、野外露头资料, 本文主要以岩性岩相、常规测井曲线变化特征为依据识别层序界面。识别出岩性岩相突变界面及局部暴露不整合界面, 均属于 II 型层序界面。

三级层序界面 SB1 大致对应于长兴组/大隆组与下伏龙潭组/吴家坪组分界面, 属于岩性岩相突变层序界面, 整合接触, 缺少陆上暴露的标志, 这是因为研究区晚二叠世海平面处于主体上升期, 短周期的海平面下降被长周期的海平面上升掩盖, 没有造成陆上暴露, 只是形成了一些水下沉积间断。华蓥市合流镇椿木坪乡剖面界面之下为龙潭组灰色中—厚层状含砂屑泥晶灰岩, 界面之上为长兴组浅灰色厚层状生屑砂屑亮晶灰岩, 台缘滩亚相, 反映了海平面下降, 低能相带转化为高能相带的过程(图版 II—

图版 II Plate II



a. 华蓥市合流镇椿木坪乡剖面三级层序界面 SB1, 大致对应于长兴组与龙潭组分界面; b. 广元市旺苍县三江镇大两乡剖面三级层序界面 SB1, 大致对应于大隆组与吴家坪组分界面; c. 华蓥市合流镇椿木坪乡剖面三级层序界面 SB2; d. 广元市旺苍县三江镇大两乡剖面三级层序界面 SB3, 大致对应于飞仙关组与大隆组分界面; e. 广安市桂兴镇响水村剖面三级层序界面 SB4; f. 广安市桂兴镇响水村剖面三级层序界面 SB5, 大致对应于嘉陵江组与飞仙关组分界面

a); 广元市旺苍县三江镇大两乡剖面界面之下为吴家坪组浅海陆棚相灰色薄—中层状含生屑泥晶灰岩, 界面之上为大隆组硅质盆地深灰色薄层放射虫硅质岩与灰黑色炭质页岩、硅质页岩互层(图版 II-b); 巴中市南江县铁厂乡椒树塘剖面界面之下为龙潭组页岩, 界面之上为长兴组中层状含砾屑生屑灰岩; 钻井上, 该界面附近常规测井 GR 曲线呈明显高值。

SB2 位于长兴组/大隆组内, 为连续沉积的整合界面, 发生岩性岩相转换。椿木坪乡剖面界面之下发育灰色中层状微晶—粉晶灰岩, 界面之上发育厚层—块状微晶砂屑灰岩, 属于台内滩亚相(图版 II-c), 反映由较低能的滩间环境过渡为浅滩环境; 龙岗 23 井常规测井 U 曲线在界面之下呈低值低幅齿形, 在界面之上变为中值齿形; 竹园 1 井界面处发育粉晶白云岩, 相较于上下两侧发育的泥晶灰岩, 反映了海平面的快速下降。

SB3 对应飞仙关组与下伏长兴组/大隆组的分界面, 也是三叠系与二叠系之间的一级层序界面, 属于连续沉积的岩性岩相突变界面。广安市桂兴镇响水村剖面界面之下为长兴组台缘滩微相中层状粒屑亮晶灰岩, 界面之上为台地前缘斜坡薄层钙质泥岩夹泥质灰岩, 反映了水体加深的过程; 大两乡剖面界面之下为大隆组硅质岩性, 向上过渡为飞仙关组微晶灰岩与钙质页岩不等厚互层(图版 II-d); 龙岗 20 井、龙岗 23 井界面处岩性变化相似, 由生屑灰岩夹藻灰岩过渡为泥晶—微晶灰岩, 环境由礁滩过渡为滩间。

SB4 位于飞仙关组内部, 属于岩性岩相突变层序界面。响水村剖面界面之下发育台地边缘含粉屑微晶灰岩夹亮晶砂屑灰岩, 界面之上发育滩间海微晶—粉晶灰岩(图版 II-e); 钻井上, 界面处 GR 曲线变化特征明显, 由低值低幅齿形过渡为中—低值中幅齿形。

SB5 与飞仙关组顶界面相对应, 界面凹凸不平, 属于局部暴露不整合层序界面。响水村剖面界面处发育潮坪相中—薄层泥质灰岩, 向上为嘉陵江组厚层状微晶灰岩(图版 II-f); 区内钻井上该界面特征较为一致, 界面之下发育泥岩、页岩、石膏岩、白云岩薄互层为主的潮上泥坪微相, 界面之上为嘉陵江组大段灰岩(图 3), 界面附近 GR 值较低, 反映了海平面下降造成陆上暴露后逐渐上升的演化过程。

3.2 层序地层格架

在关键层序界面识别的基础上, 将研究区长兴组—飞仙关组划分出 4 个三级层序, 在层序内部均以最大海泛面(mfs)为界, 划分出海侵体系域(TST)和

高位体系域(HST), 从而建立了研究区层序地层格架(图 3)。

3.2.1 SQ1 层序特征

三级层序 SQ1 大致对应于牙形刺 *Clarkina wangi* 带至 *Clarkina postwangi* 带下部, 菊石 *Paratirolites-Shevyrevites* 带至 *Pseudotirolites-Pleuronodoceras* 带下部, 底界面为上二叠统长兴组/大隆组与龙潭组/吴家坪组的分界面。大隆组见于大两乡剖面, 层序内发育深灰色薄层放射虫硅质岩与灰黑色炭质页岩、硅质页岩互层岩相, 互层比 3 : 1~6 : 1。达州市宣汉县盘龙洞剖面该时期发育大段生物礁, TST 内发育礁灰岩, HST 内以发育礁云岩为主。前人研究表明, 该时期开江—梁平海槽已规模较大且持续向东南方向扩张。在台地、台缘相区, 钻井上见生屑灰岩、礁灰岩、藻灰岩等, 应为礁、滩沉积; 在靠近海槽的钻井上, 见 GR 曲线持续升高的现象, 是由于海槽不断扩张, 层序内自下而上水体不断加深。

3.2.2 SQ2 层序特征

该层序大致对应于牙形刺 *Clarkina postwangi* 带上部至 *Clarkina meishanensis* 带, 菊石 *Pseudotirolites-Pleuronodoceras* 带上部至 *Rotodiscoceras* 带。大两乡剖面该时期发育薄层硅质岩与炭质页岩互层, 互层比 5 : 1~10 : 1, 硅质岩单层厚度具有由薄变厚再变薄的特征。盘龙洞剖面 TST 中下部发育白云岩相, 最大海泛面附近发育灰岩相, 至 HST 中上部以晶粒白云岩为主, 部分具残余颗粒结构。该层序时期, 研究区海平面仍处于主体上升期, 沉积环境较稳定。在台地、台缘相区见礁、滩沉积, GR 曲线特征变化不大; 未见礁、滩处为滩间环境, 泥质灰岩发育处 GR 曲线呈现相对高值, 为最大海泛面; 海槽内水体较深, 各体系域内的沉积环境差别不大。

3.2.3 SQ3 层序特征

三级层序 SQ3 大致对应于牙形刺 *Hindeodus parvus* 带至 *Clarkina carinata* 带中下部, 菊石 *Otoceras woodwardi* 带至 *Gyronite psilogyrus* 带, 底界面为下三叠统飞仙关组与上二叠统长兴组/大隆组之间的界面。响水村剖面 TST 内发育泥质灰岩、钙质泥岩为主, 夹数层砾屑灰岩、含砾屑泥质灰岩, 沉积背景为斜坡碎屑流、浊流, HST 内以发育斜坡碎屑流(含)砾屑灰岩为主, 上部见亮晶鲕粒灰岩、砂屑灰岩, 台缘环境。钻井上, 该时期 HST 内常发育颗粒滩沉积, 颗粒主要为鲕粒, 次为砂屑、生屑, 以灰岩相为主; 普光地区及五龙 1 井、朱家 1 井、东升 1 井、竹

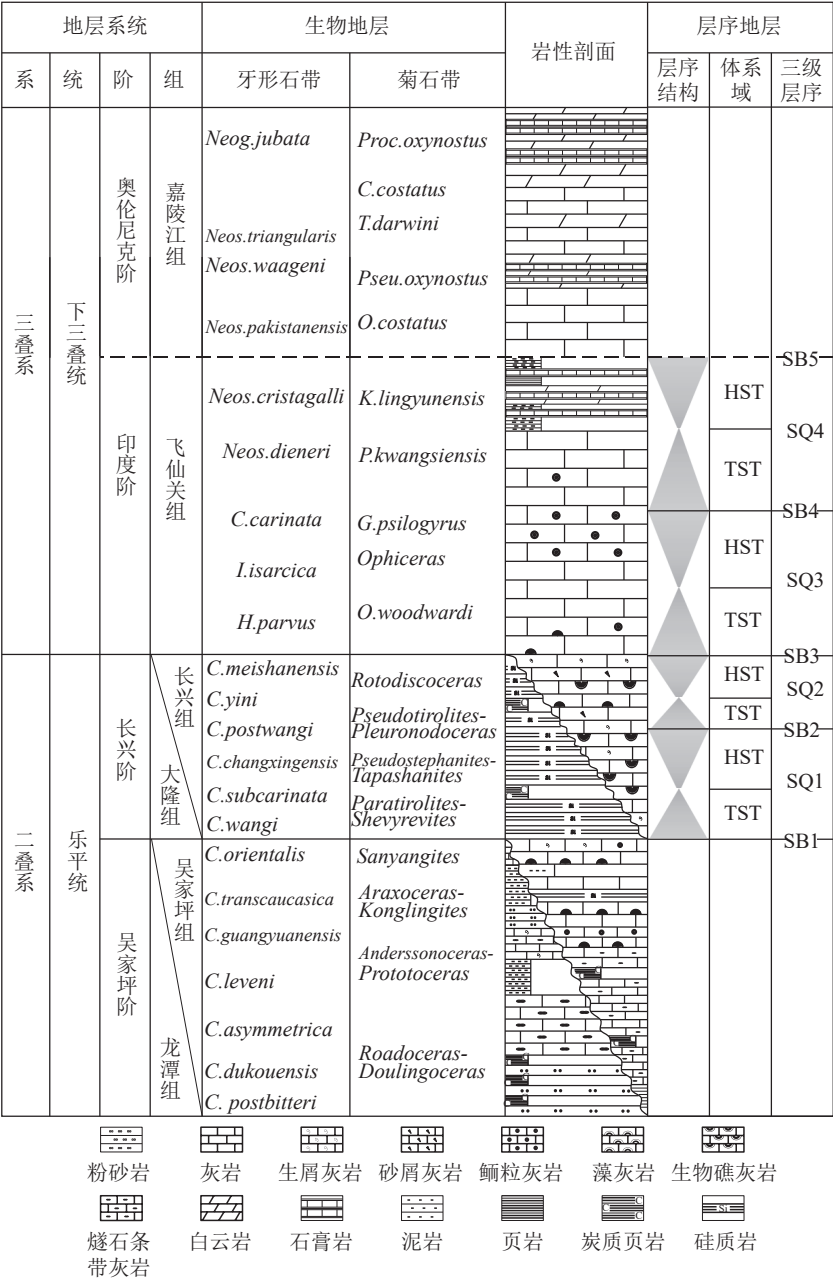


图 3 研究区层序地层综合柱状图

Fig. 3 Comprehensive histogram of sequence stratigraphy in the study area

园 1 井等处见颗粒白云岩发育,能够形成比颗粒灰岩更优质的储层(厚东琳,2019)。

3.2.4 SQ4 层序特征

三级层序 SQ4 大致对应于牙形刺 *Clarkina carinata* 带上部至 *Neospathodus cristagalli* 带,菊石 *Proptychites kwangsiensis* 带至 *Koninckites lingyunensis* 带。响水村剖面 TST 内以微晶—粉晶灰岩为主,夹少量生屑灰岩或含粉屑灰岩,HST 内为亮晶介壳灰岩、亮晶生屑砂屑灰岩、泥质灰岩、泥岩

等交互发育岩相,应为混积潮坪环境。钻井上,研究区内该层序时期岩性稳定,TST 至 HST 下部以灰岩相为主,夹鲕粒灰岩、生屑灰岩等,部分井见白云岩,HST 上部发育泥质云岩、页岩与石膏岩互层岩相,与上覆嘉陵江组底部厚层状微晶灰岩呈不整合接触。

4 层序格架内沉积演化

在沉积相划分的基础上,开展了层序格架下的

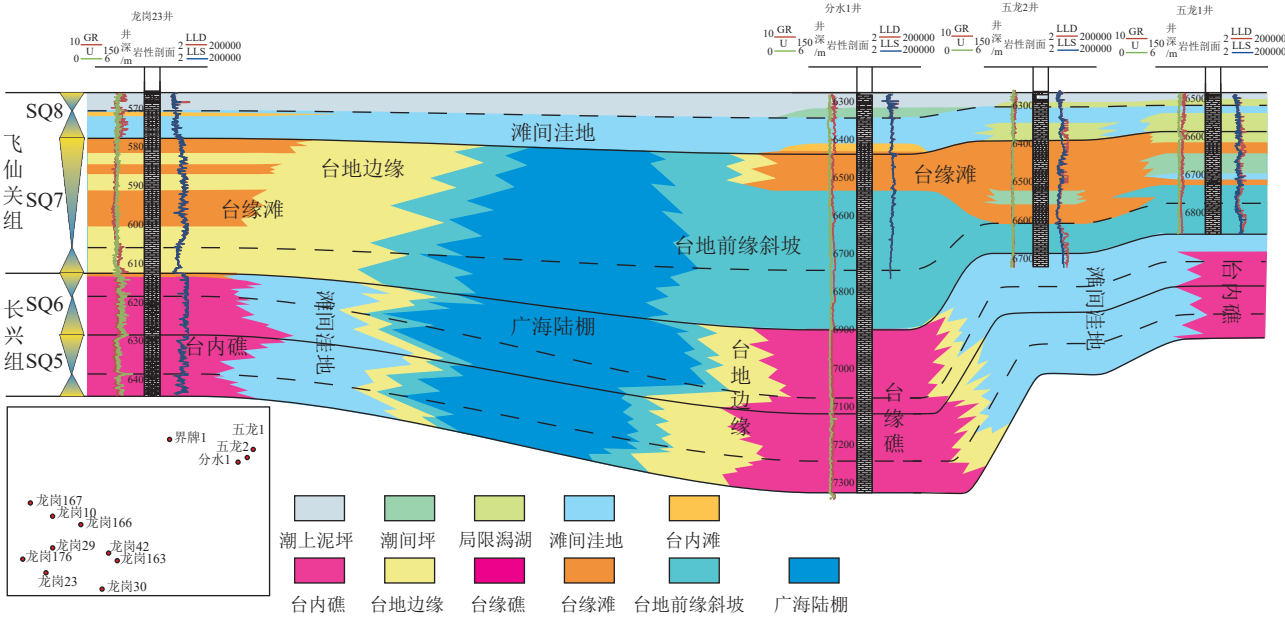


图4 龙岗23井-分水1井-五龙2井-五龙1井长兴组-飞仙关组连井沉积相对比图

Fig. 4 Sedimentary facies comparison of Changxing—Feixianguan Formations of wells Longgang23-Fenshui1-Wulong2-Wulong1

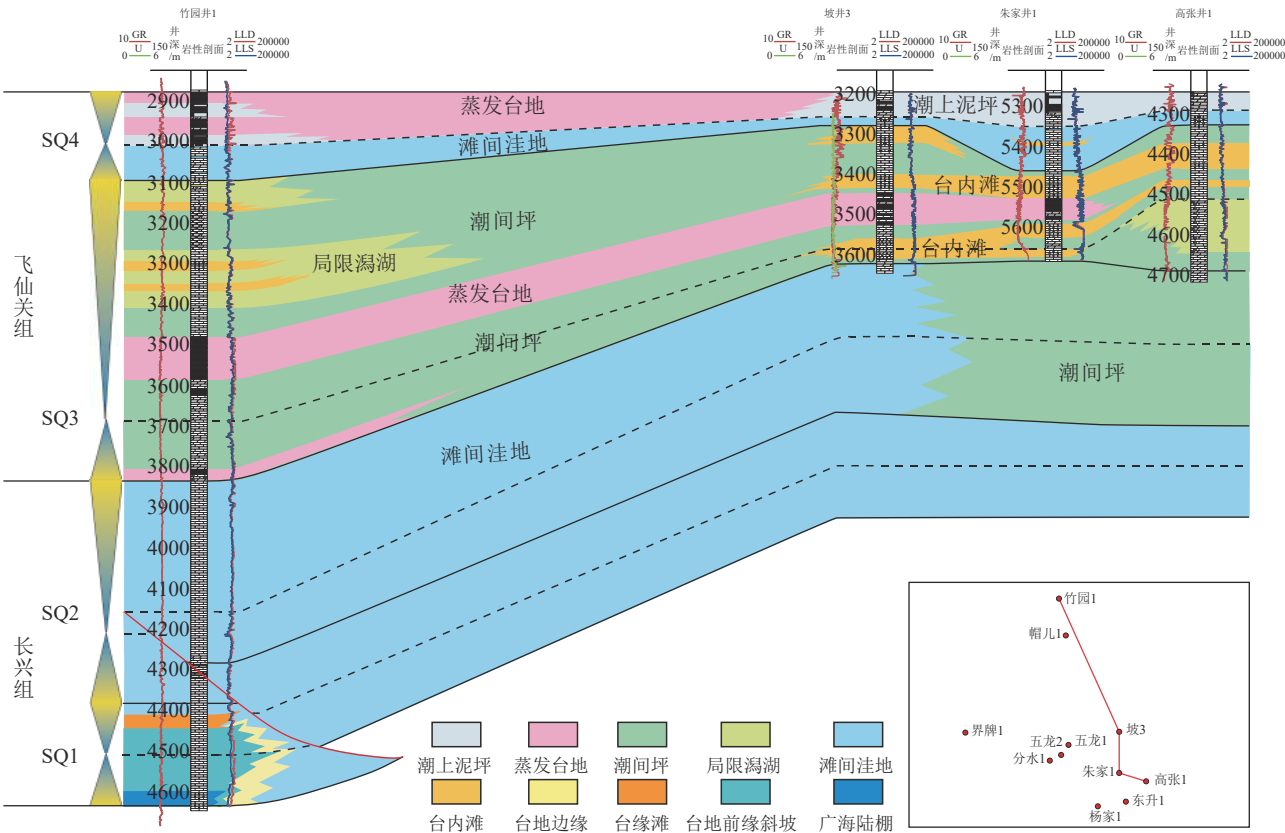


图5 竹园1井-坡3井-朱家1井-高张1井长兴组-飞仙关组连井沉积相对比图

Fig. 5 Sedimentary facies comparison of Changxing—Feixianguan Formations of wells Zhuyuan1-Po3-Zhujia1-Gaozhang1

连井沉积相对比(图 4、图 5)及地震沉积学分析,并参考地震相平面图,绘制了各层序或体系域的沉积相平面图,进而恢复了研究区长兴期—飞仙关期层序格架内的沉积演化。

4.1 SQ1 时期

中—晚二叠世的东吴运动及峨眉山玄武岩喷发

导致上扬子地区岩相古地理格局突变,纵、横向上沉积分异明显,其中,研究区开江—梁平海槽在龙潭组/吴家坪组沉积期便已具有较大的规模(陈斐然等, 2020)。吴家坪阶上部—长兴阶沉积期研究区整体处于二级层序的海侵阶段(马永生等, 2009),开江—梁平海槽在 SQ1 时期持续扩张。该时期,研究区

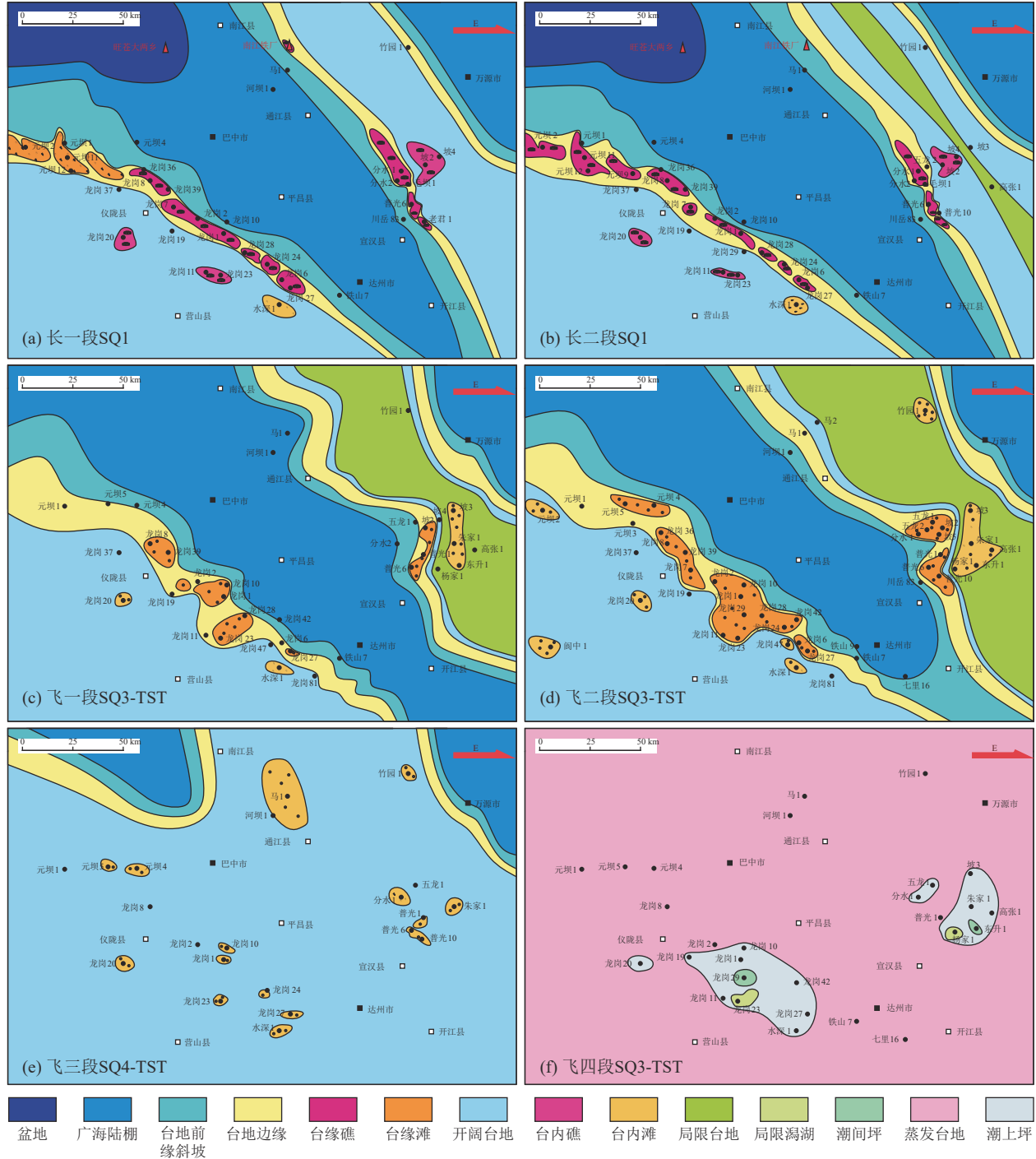


图 6 仪陇—平昌地区层序格架下沉积演化

Fig. 6 Sedimentary evolution under sequence framework in the Yilong—Pingchang area

西北部大两乡剖面附近发育盆地相硅质平原,元坝、龙岗、普光及南江铁厂乡等地台缘带内礁、滩发育,龙岗 20 井、龙岗 23 井、水深 1 井等处,以及坡 2 井—坡 4 井一带开阔台地内礁、滩发育(图 6-a)。

4.2 SQ2 时期

该时期基本沿袭了 SQ1 时期的沉积格局,开江—梁平海槽范围继续扩张,龙岗 10 井、元坝 4 井均由台地前缘斜坡沉积过渡为广海陆棚沉积,铁厂剖面由台缘沉积演化为斜坡沉积。台缘、台内礁滩仍较发育,但规模较 SQ1 时期有所减小。地震相表明,开江—梁平海槽及城口—鄂西海槽之间的开阔台地内,呈平行亚平行席状披盖中强反射的局限台地相开始发育(图 6-b)。

4.3 SQ3—TST 时期

三叠纪早期,研究区整体处于海退阶段(马永生等,2009),开江—梁平海槽广海陆棚开始收缩,区内未见盆地相沉积。呈平行亚平行丘状中弱反射的台地边缘范围较长兴组沉积期有所扩大,普光、龙岗地区台缘鲕粒滩较发育。研究区东北部局限台地范围进一步扩大,坡 3 井—东升 1 井一带发育白云岩相鲕粒滩(图 6-c)。

4.4 SQ3—HST 时期

开江—梁平海槽继续收缩,广海陆棚向西北方向收缩至七里 1 井—七里 16 井附近,海槽两侧台缘带向海槽内扩张,台缘鲕粒滩范围较 SQ3—TST 时期明显扩大。开江—梁平海槽西南侧开阔台地及东北侧局限台地内见多处鲕粒滩、生屑滩发育(图 6-d)。

4.5 SQ4—TST 时期

该时期,开江—梁平海槽已快速收缩至巴中市以北,研究区地震相分带特征基本消失,整体为开阔台地环境,元坝、龙岗、普光、河坝等地均见台内滩零星分布(图 6-e)。

4.6 SQ4—HST 时期

海槽已经消失,受海平面大幅度下降、气候炎热干旱、水循环受限等的影响,研究区地震相呈现连片平行亚平行席状中弱—弱反射特征,整体为蒸发台地环境。龙岗 10—水深 1 井、龙岗 20 井、坡 3—杨家 1 井、五龙 1—分水 1 井等处地震相呈平行亚平行断续中强反射特征,发育泥质云岩、页岩与石膏岩互层岩相,属潮上泥坪环境(图 6-f)。

5 油气勘探意义

四川盆地及其周缘发育下寒武统、上奥陶统一

下志留统、下二叠统和上二叠统 4 套区域性烃源岩(赵培荣等,2020);SQ4—HST 沉积期,区内较稳定的蒸发台地与潮坪环境为飞仙关组天然气成藏提供了致密的区域性盖层(厚东琳,2019),同时,其中封存的高盐度地层水为下伏飞仙关组及长兴组提供了重要的白云石化流体,有利于优质储层的形成(高梅生等,2007;郑荣才等,2007)。良好的生、储、盖匹配关系使得在研究区目的层内已发现了多个大—中型气田,本文为研究区长兴组—飞仙关组下一步油气勘探提供参考。

在本文提出的层序格架下可以观察到,长兴组 SQ1 时期礁、滩范围大于 SQ2 时期,飞仙关组台缘滩、台内滩范围在 SQ3—TST 时期小于 SQ3—HST 时期,至 SQ4—TST 时期仅零星分布。长兴组时期研究区整体处于二级层序的海侵阶段(张建勇等,2011),三级层序海侵体系域时期,可容空间增长速率高于碳酸盐堆积速率,水体较深,不利于生物礁发育,至高位体系域时期,可容空间增长速率减缓,水体循环良好且氧气、光线充足,造礁生物得以大量繁盛,形成以生屑灰岩、障积礁、骨架礁组成的生物礁沉积。SQ2—HST 时期,区内整体海侵结束,可容空间增长速率远低于碳酸盐堆积速率,海平面急速下降,生物礁顶部暴露而停止生长。飞仙关组初期海平面快速上升(郑荣才等,2009),鲕粒滩难以形成,随后进入整体海退阶段,可容空间增长缓慢,与碳酸盐堆积速率相当,能够在台缘及台地内高部位形成鲕粒滩沉积。SQ3—TST 时期可容空间增长速率略高于碳酸盐堆积速率,台缘滩及台内滩范围较小,SQ3—HST 是区内鲕粒滩、生屑滩最发育的时期。SQ4 早期为海侵阶段,区内海槽基本消失,发育开阔台地环境,主要发生填平补齐作用,颗粒滩零星分布,SQ4—HST 时期海平面大幅度下降,区内发育稳定的蒸发台地与潮坪环境。本文层序划分方案与礁、滩储层发育特征具有较好的匹配关系。刘燕婷(2019)对比了研究区北部江南东—黑池梁及镇巴地区长兴组—飞仙关组的台缘礁滩储层特征,提出储层形成的基础是古地貌、基底断裂,成岩作用、构造作用可以改造储层。通常认为,在生物礁微相中,优质储集层一般发育在礁核,景小燕等(2021)结合元坝气田实际,提出优质储集层主要发育于生物礁礁盖的潮坪及浅滩环境,控制因素主要是沉积相、白云岩

化及溶蚀作用。晋达等(2020)对普光地区长兴组台缘生物礁储层的分布预测支持上述观点。冯林杰等(2021)细分了开江—梁平海槽南段飞仙关组的储集岩类型,提出组构选择性溶蚀作用和渗透回流白云石化作用是鲕滩储层的主控因素。因此,在本文层序划分方案下,开展研究区礁、滩储层分布预测,并进一步分析储层特征,有助于下一步的油气勘探。

台缘带水体相对较浅且准同生期白云石化作用、溶蚀作用较强时,可形成厚度较大且物性较好的台缘礁、滩储层(王素荣,2003)。台内礁、滩形成于台地内局部地貌高处或有沉积作用、生物作用形成的隆起区,沉积厚度、分布范围较小,对其储集性能的研究相对于台缘带仍较薄弱。李宏涛(2016)分析了川东北河坝地区飞三段台内鲕粒滩气藏的成藏过程与模式;董庆民等(2021)开展了川东地区长兴组台内礁滩储层特征与形成机制研究,发现白云石化对储层具有明显的促进作用。可见,台内礁、滩储层具有良好的勘探前景。本文利用最新的钻井、地震资料,综合前人研究成果,在研究区开江—梁平海槽发现了多处台内礁、滩,其中SQ3时期海槽东侧局限台地内鲕粒滩、生屑滩白云石化程度高(图6-c、d),或许能够作为下一步勘探的重点区域。

6 结 论

(1)基于最新钻井、野外露头资料,以岩性岩相、常规测井曲线变化特征为依据,识别出岩性岩相突变界面及局部暴露不整合界面等2种Ⅱ型层序界面,将仪陇—平昌地区长兴组—飞仙关组划分为4个三级层序,建立了研究区层序地层格架。

(2)长兴组SQ1至飞仙关组SQ3时期,研究区发育典型的镶边台地沉积体系,包括局限台地、开阔台地、台地边缘、台地前缘斜坡、广海陆棚、盆地等相类型,SQ4时期发育陆表海型台地体系,海侵域内主要发育开阔台地,高位域内发育蒸发台地为主,夹滨岸体系潮上泥坪。

(3)长兴组沉积期,开江—梁平海槽范围逐渐扩大,高位域是生物礁发育的有利阶段,而SQ2高位域时期海平面急速下降,导致生物礁停止生长,规模较SQ1时期有所减小。飞仙关组沉积早期海平面快速上升,鲕粒滩难以形成,随后进入整体海退阶段,至SQ3高位域时期,鲕粒滩连片发育;SQ4海侵域时期

海槽基本消失,主要发生填平补齐作用,至高位域时期海平面大幅度下降,区内主要发育稳定的蒸发环境。层序划分方案与礁、滩储层发育特征匹配,能够应用于下一步油气勘探。

参考文献

- Ma Y S, Zhang S C, Guo T L, et al. 2008. Petroleum geology of the Puguang sour gas field in the Sichuan Basin, SW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 25(4): 357–370.
- Sarg J F. 1988. Carbonate sequence stratigraphy [C]//Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, et al. Sea level changes: An integrated approach. SEPM Special Publication No. 42: 155–181.
- Schlager W. 2005. Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy: SEPM concepts in sedimentology and paleontology No. 8 [M]. Tulsa: Society for Sedimentary Geology.
- Wang G W, Li P P, Hao F, et al. 2015. Impact of sedimentology, diagenesis, and solid bitumen on the development of a tight gas grainstone reservoir in the Feixianguan Formation, Jiannan area, China: Implications for gas exploration in tight carbonate reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 65: 250–265.
- Wang Z L, Jiang C, Jiang Y Q, et al. 2018. Distribution patterns and controlling factors for reservoir characteristic difference of oolitic shoals, Feixianguan Formation, eastern Longgang area, SW China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(23): 751–764.
- 陈斐然,魏祥峰,刘珠江,等. 2020. 四川盆地二叠系龙潭组页岩孔隙发育特征及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 31(11): 1593–1602.
- 陈洪德,钟怡江,侯明才,等. 2009. 川东北地区长兴组—飞仙关组碳酸盐岩台地层序充填结构及成藏效应[J]. *石油与天然气地质*, 30(5): 539–547.
- 陈中强. 1995. 二叠纪末期的全球淹没事件[J]. *岩相古地理*, 3: 34–39.
- 董庆民,胡忠贵,陈世悦,等. 2021. 川东地区长兴组台内礁滩储层特征与形成机制[J]. *中国矿业大学学报*, 50(5): 1–18.
- 董霞,郑荣才,罗爱军,等. 2009. 开江—梁平台内海槽东段长兴组层序—岩相古地理特征[J]. *沉积学报*, 27(6): 1124–1130.
- 冯林杰,蒋裕强,刘菲,等. 2021. 川东地区开江—梁平海槽南段飞仙关组鲕滩储层特征及主控因素[J]. *石油学报*, 42(10): 1287–1298.
- 高梅生,郑荣才,文华国,等. 2007. 川东地区三叠统飞仙关组白云岩成因——来自岩石结构的证据[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 3: 297–304.
- 韩克猷,孙玮. 2014. 四川盆地海相大气田和气田群成藏条件[J]. *石油与天然气地质*, 35(1): 10–18.
- 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.
- 何金海. 2013. 川东北地区长兴组层序、沉积相及储层发育分布规律研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文.
- 何治亮,高志前,张军涛,等. 2014. 层序界面类型及其对优质碳酸盐岩储层形成与分布的控制[J]. *石油与天然气地质*, 35(6): 853–859.
- 厚东琳. 2019. 白云石化对储层发育的控制作用——以普光、元坝气田飞仙关组为例[J]. *断块油气田*, 26(4): 449–452.

- 姜华, 汪泽成, 杜宏宇, 等. 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[J]. *天然气地球科学*, 25(2): 192-200.
- 蒋裕强, 谷一凡, 徐昌海, 等. 2018. 开江-梁平海槽东侧飞仙关组岩相分区及地质意义[J]. *天然气地球科学*, 29(8): 1067-1077.
- 晋达, 杜浩坤, 孟凡冰, 等. 2020. 普光地区长兴组生物礁储层分布预测[J]. *物探与化探*, 44(1): 50-58.
- 景小燕, 张小青, 高蕾, 等. 2021. 元坝气田长兴组生物礁储层特征及主控因素研究[J]. *西北地质*, 54(3): 188-197.
- 李国军, 郑荣才, 唐玉林, 等. 2007. 川东北地区飞仙关组层序-岩相古地理特征[J]. *岩性油气藏*, 4: 64-70.
- 李宏涛. 2016. 台内鲕粒滩气藏成藏过程与模式——以川东北河坝地区下三叠统飞仙关组三段为例[J]. *石油勘探与开发*, 43(5): 723-732.
- 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*, 3: 326-331.
- 马永生, 储昭宏. 2008. 普光气田台地建造过程及其礁滩储层高精度层序地层学研究[J]. *石油与天然气地质*, 29(5): 548-556.
- 马永生, 陈洪德, 王国力. 2009. 中国南方构造-层序岩相古地理图集(震旦纪—新近纪)[M]. 北京: 地质出版社: 246-278.
- 谭先锋, 李洁, 何金平, 等. 2012. 开江-梁平海槽区带南段飞仙关组层序-岩相古地理特征[J]. *中国地质*, 39(3): 612-622.
- 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: 111-333.
- 王素荣. 2003. 川东北地区下三叠统飞仙关组沉积相及其对储层的控制[D]. 西南石油大学硕士学位论文.
- 王兴志, 张帆, 马青, 等. 2002. 四川盆地东部晚二叠世—早三叠世飞仙关期礁、滩特征与海平面变化[J]. *沉积学报*, 2: 249-254.
- 王一刚, 文应初, 张帆, 等. 1998. 川东地区上二叠统长兴组生物礁分布规律[J]. *天然气工业*, 6: 25-30.
- 王一刚, 洪海涛, 夏茂龙, 等. 2008. 四川盆地二叠、三叠系环海槽礁、滩富气带勘探[J]. *天然气工业*, 1: 22-27, 161-162.
- 吴小奇, 刘光祥, 刘全有, 等. 2015. 四川盆地元坝气田长兴组-飞仙关组天然气地球化学特征及成因类型[J]. *天然气地球科学*, 26(11): 2155-2165.
- 张建勇, 周进高, 郝毅, 等. 2011. 四川盆地环开江-梁平海槽长兴组-飞仙关组沉积模式[J]. *海相油气地质*, 16(3): 45-54.
- 张水昌, 朱光有. 2006. 四川盆地海相天然气富集成藏特征与勘探潜力[J]. *石油学报*, 5: 1-8.
- 张延充, 杨爱国, 梅燕, 等. 2009. 泛开江-梁平海槽及勘探有利相带地震预测[J]. *天然气工业*, 29(10): 28-30, 136-137.
- 张勇, 李彦婧, 潘兰, 等. 2023. 构造特征对重庆南川地区页岩气保存条件的影响[J]. *地质通报*, 42(5): 680-686.
- 赵培荣, 高波, 郭战峰, 等. 2020. 四川盆地上二叠统海陆过渡相和深水陆棚相页岩气的勘探潜力[J]. *石油实验地质*, 42(3): 335-344.
- 赵文智, 张光亚, 河海清, 等. 2002. 中国海相石油地质与叠合含油气盆地[M]. 北京: 地质出版社: 201-219.
- 郑荣才, 胡忠贵, 冯青平, 等. 2007. 川东北地区长兴组白云岩储层的成因研究[J]. *矿物岩石*, 4: 78-84.
- 郑荣才, 罗平, 文其兵, 等. 2009. 川东北地区飞仙关组层序-岩相古地理特征和鲕滩预测[J]. *沉积学报*, 27(1): 1-8.