

浅水曲流河三角洲前缘沉积特征及模式 ——以川西坳陷南段白马庙地区蓬莱镇组为例

孙志昫^{1,2}, 汤 潇¹, 刘 柏¹, 李 萌³, 何仕鹏¹, 黄 嵌¹, 谢诗意¹, 刘 梦⁴,
杨政林¹, 卜梓伟¹, 罗 龙³, 谭先锋³

(1. 中国石油西南油气田分公司 川西北气矿, 四川 绵阳 621709; 2. 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059 3. 重庆科技大学 石油与天然气工程学院, 重庆 401331; 4. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘 要: 基于岩心、薄片、测录井和三维地震等资料, 分析川西坳陷南段白马庙地区蓬莱镇组浅水三角洲前缘亚相的沉积特征、沉积相展布及模式。结果表明: 白马庙地区整体以细粒沉积物为主, 局部可识别砾级粗碎屑, 划分砾岩相、砂岩相、泥岩相三类岩相。研究区地形平坦、气候干旱炎热, 砂体具有“薄层叠置、多期复合”的发育特点, 在岩心上识别风暴沉积, 指示蓬莱镇沉积期受风暴扰动的浅水三角洲前缘沉积。蓬三段—蓬四段主要发育水下分流河道、河口坝、席状砂等微相, 河口坝多呈残余式、常被水下分流河道冲刷而叠置出现; 席状砂体分布较广, 平面呈条带状—枝网状的浅水三角洲前缘沉积。沉积模式主要受控于湖平面频繁波动及河流—湖浪改造, 表现为湖退进积到湖进退积的演化规律。该结果为白马庙地区沉积相认识、川西蓬莱镇组及同类区域勘探开发提供参考。

关键词: 浅水三角洲; 曲流河; 沉积特征; 沉积模式; 风暴沉积; 蓬莱镇组; 白马庙地区; 川西坳陷

中图分类号: TE121 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2026)01-0047-16

0 引言

“浅水三角洲”是由 Fisk H N 等^[1]研究密西西比河三角洲提出的, 作为重要的油气储集单元, 是沉积学和油气勘探的研究热点。浅水三角洲主要发育在构造条件稳定、地形平坦、水体较浅、湖平面频繁波动、供给充足的沉积背景^[2-6]下, 沉积以分流河道为骨架砂体, 单砂体厚度小, 易形成具有一定厚度的复合砂体, 河口坝易受改造且相对不发育, 平面分布较广, 河道延伸距离远^[2,7-9]。浅水三角洲分类方案多样, 根据供源系统, 分为浅水扇三角洲、浅水辫状河三角洲及浅水曲流河三角洲^[2]; 根据河流和湖浪作用, 分为分流河道型和分流砂坝型^[8]; 根据能量供应条件, 分为河控、浪控和潮控三角洲等^[10]。目前, 在松辽盆地、塔里木盆地和四川盆地等含油气盆地识别出浅水三角洲沉积^[11-13]。浅水三角洲作为陆相湖盆重要的沉积体系, 具备水体浅、地形平缓和沉积物供给充足等特点, 可识别风暴事件的扰动与改造的证据^[14-17]。风暴作用在浅水三角洲环境中形成一系列特征鲜明的沉积响应, 包括发育冲刷侵蚀面、渠模构造、富含撕裂状泥砾的砂岩, 以及最典型的丘状(HCS)、洼状(SCS)交错层理等识别标志^[14-16]。在鄂尔多斯盆地延长组^[14-15,17-18]、山东省青岛市灵山岛下白垩统^[15]等区域的研究中, 风暴沉积物的发现为厘定浅水三角洲沉积、分析单纯三角洲相或深水浊积岩认识, 以及理解储层成因机制提供重要依据。

川西坳陷上侏罗统蓬莱镇组是川西地区中浅层天然气增储上产的重要层位之一, 有关研究多聚焦于川西坳陷北段和中段的地层、沉积相和储层等^[19-24]。研究区沉积相主要为湖泊—三角洲沉积体系; 赵永刚^[25]认为研究区主要发育三角洲前缘亚相, 西北部发育三角洲平原亚相; 屠志慧^[26]认为研究区主要发育三角洲平原亚相, 包括(水下)分流河道微相, 南西部外缘发育三角洲前缘亚相; 杨小刚^[27]认为研究区主要发育三角洲平原亚相, 三角洲平原发育水上河道微相, 南西部发育三角洲前缘亚相。总体上, 研究区川西坳陷南段的沉积相研究相对薄弱, 且沉积相划分及展布存在差异, 小区沉积相缺乏精细研究, 在一定程度上

收稿日期: 2025-07-15; 编辑: 任志平 贺紫娇

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42102133)

作者简介: 孙志昫(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事石油与天然气地质学方面的研究。

通信作者: 汤 潇, E-mail: tangxiao1995@petrochina.com.cn

上制约寻找有利砂体。

以川西坳陷南段白马庙地区蓬莱镇组三段—四段(蓬三段—蓬四段)为研究对象,基于岩心观察、薄片鉴定、测录井及三维地震等资料,明确白马庙地区浅水沉积特征,在浅水背景下识别事件性风暴沉积,研究浅水三角洲前缘沉积微相及展布特征,建立白马庙地区沉积演化模式,为研究区勘探开发、同类区域勘探开发提供地质依据。

1 区域地质概况

白马庙地区位于四川省邛崃市、大邑县和蒲江县境内^[28],区域构造上隶属于川西坳陷南段、成都凹陷低缓构造带西南部(见图 1(a))^[23],整体呈北宽南窄、南高北低的形态展布^[29]。晚侏罗世,四川盆地湖盆构造稳定,地形较平坦,气温升高,由温凉向温暖的干旱—半干旱气候演变^[20,27,30-33];受燕山运动的影响,龙门山构造带、米仓山再次活动,大量碎屑物质向盆内输送^[23,34-35],形成规模较大、延伸较远的河流、三角洲沉积^[22]。研究区主要接受北西向龙门山和北东向米仓山—大巴山碎屑物源供给,呈“富长石富岩屑”的特征^[27],沉积一套以紫红色泥岩和灰绿色砂岩为主的碎屑岩地层^[21]。

研究区蓬莱镇组平均地层厚度约为 900 m,与下伏遂宁组呈整合接触,与上覆下白垩统天马山组或上白垩统夹关组呈不整合接触^[26]。对白马庙地区蓬莱镇组采用“五分法”划分方案,自下而上划分为蓬一段—蓬五段(见图 1(b)),各段底部以砂岩为界,砂体主要发育于蓬三段、蓬四段,即研究目的层段^[19,27,36]。蓬三段、蓬四段岩性主要为泥岩与细砂岩、粉砂岩呈不等厚互层,夹少量砾岩、灰岩和钙质泥岩(见图 1(b))^[36];根据沉积旋回和岩性变化,将蓬三段划分为 3 个砂组,蓬四段划分为 4 个砂组。

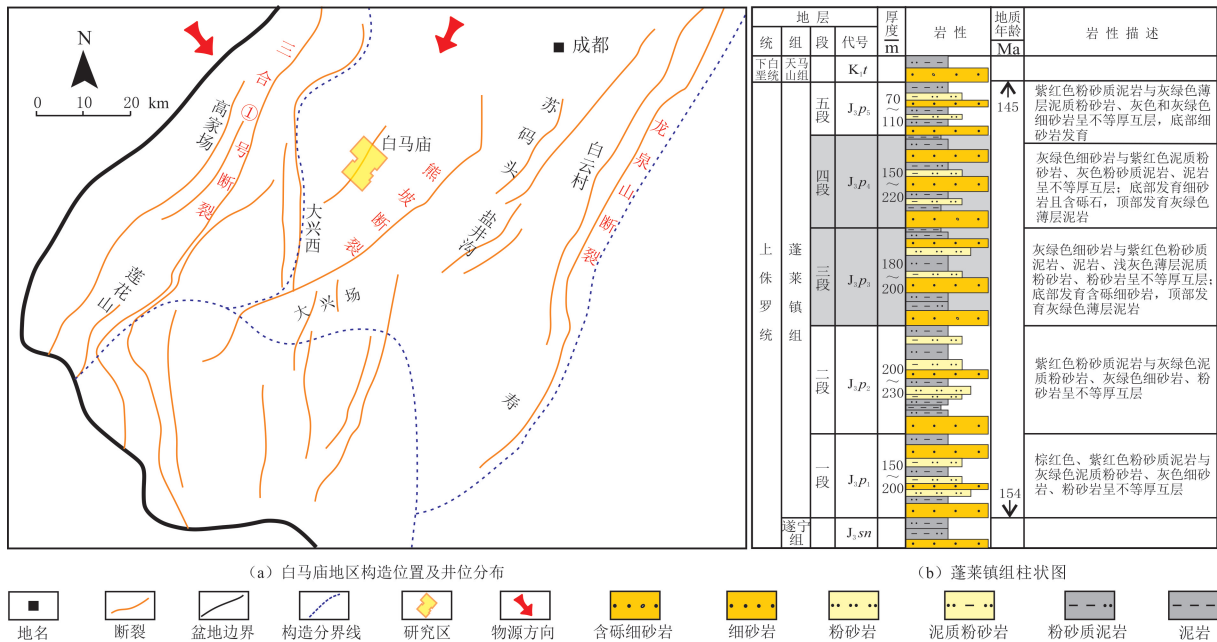


图 1 白马庙地区构造位置、井位分布与蓬莱镇组柱状图(据文献[29-30]修改)

Fig. 1 Structural position, well distribution, and stratigraphic column of the Penglaizhen Formation in the Baimamiao Area(modified by references[29-30])

2 沉积特征

2.1 岩石学特征

研究区蓬三段、蓬四段陆源碎屑组分包括石英、钾长石和斜长石,岩屑组分以沉积岩为主,变质岩岩屑次之,偶见岩浆岩岩屑。研究区岩性常见细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩,发育少量砾岩(见表 1 和图 1(b)),整体砂岩粒度细、砂泥比低,垂向上呈“泥包砂”特点,反映低能的水动力,一定条件下易形成浅水三角洲^[5]。岩石类型以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主(见图 2(a)),中等—较低的成分成

表 1 研究区浅水三角洲沉积体系岩相划分

Table 1 Lithofacies division of shallow water delta sedimentary system in study area

| 类别 | 岩相名称 | 符号 | 岩性 | 沉积构造 | 沉积解释 |
|---------|------------|---------|-----------|--------------------------|-------------------------------------------------------|
| 砾岩相 (G) | 块状砾岩相 | Gms1 | 细砾岩 | 块状层理, 颗粒大小混杂, 砾石略呈定向排列 | 发育于河床底部滞留沉积及主河道底部 (BQ55 井, 蓬四-3 砂组) |
| | 块状砾岩相 | Gms2 | 砂砾岩 | 块状层理, 砾石大小分选极差, 排列不定向 | 发育于高能振荡的滨浅湖, 受短暂风暴的影响 (BM2 井, 蓬三-1 砂组) |
| 砂岩相 (S) | 块状砂岩相 | Sm | 粉、细砂岩 | 块状层理, 具有一定韵律变化, 局部发育炭质条带 | 发育于浅水低能条件下的水下分流河道及河口坝 (BQ26 井, 蓬四-2 砂组) |
| | 平行层理砂岩相 | Sh | 细砂岩 | 平行层理, 粒度均一, 局部发育炭质条带 | 发育于浅水稳定条件下的水下分流河道及河口坝 (BQ23 井, 蓬四-4 砂组) |
| | 槽状交错层理砂岩相 | St | 细砂岩 | 小型槽状交错层理, 粒度均一 | 发育于浅水低能条件下的水下分流河道及河口坝 (SH1 井, 蓬四-3 砂组) |
| | 波状层理砂岩相 | Sr | 粉、细砂岩 | 波状层理, 偶见炭质条带 | 发育于浅水弱水动力条件下的分流间湾、河口坝边缘或与典型风暴沉积构造共生 (BQ25 井, 蓬四-1 砂组) |
| | 交错层理砂岩相 | Shc | 细砂岩 | 小型丘状、洼状交错层理, 粒度均一 | 风暴流或振荡水流条件下的典型风暴沉积构造 (BQ23 井, 蓬四-4 砂组) |
| | 变形层理砂岩相 | Sd | 粉、细砂岩 | 包卷层理、滑塌、揉皱变形等, 偶见生物扰动 | 主要受地形变化等触发机制形成, 多发于席状砂等微相 (BQ23 井, 蓬四-4 砂组) |
| | 交错层理粉砂岩相 | Src | 粉砂岩 | 爬升波纹交错层理, 粒度均一 | 发育于浅水较强动力条件下的水下分流河道边缘 (BQ26 井, 蓬四-2 砂组) |
| | 水平层理粉砂岩相 | Ssh | 粉砂岩、泥质粉砂岩 | 水平层理、波状层理, 偶见炭质条带发育 | 发育于稳定条件下的水下分流河道间、河口坝边缘等沉积环境 (BQ26 井, 蓬四-2 砂组) |
| | 浪成沙纹层理粉砂岩相 | Swr | 粉砂岩 | 浪成沙纹层理, 粒度均一 | 发育于弱水动力条件下的水下分流间湾、席状砂或与风暴沉积构造共生 (BQ56 井, 蓬三-1 砂组) |
| | 泥岩相 (M) | 块状层理泥岩相 | M | 泥岩 | 块状层理, 偶见砂质团块 |
| 粉砂质泥岩相 | | Ms | 泥岩、粉砂质泥岩 | 沙纹层理、波状层理等 | 发育于低能水动力条件下的水下分流河道间沉积 (BQ27 井, 蓬四-4 砂组) |

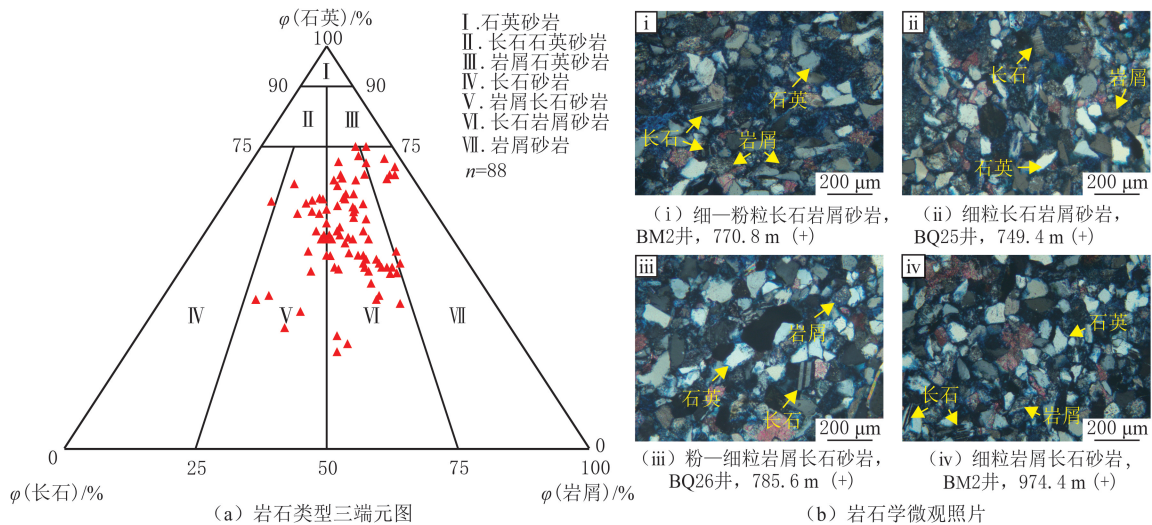


图 2 研究区蓬莱镇组岩石类型及特征

Fig. 2 Rock types and characteristics of Penglaizhen Formation in the study area

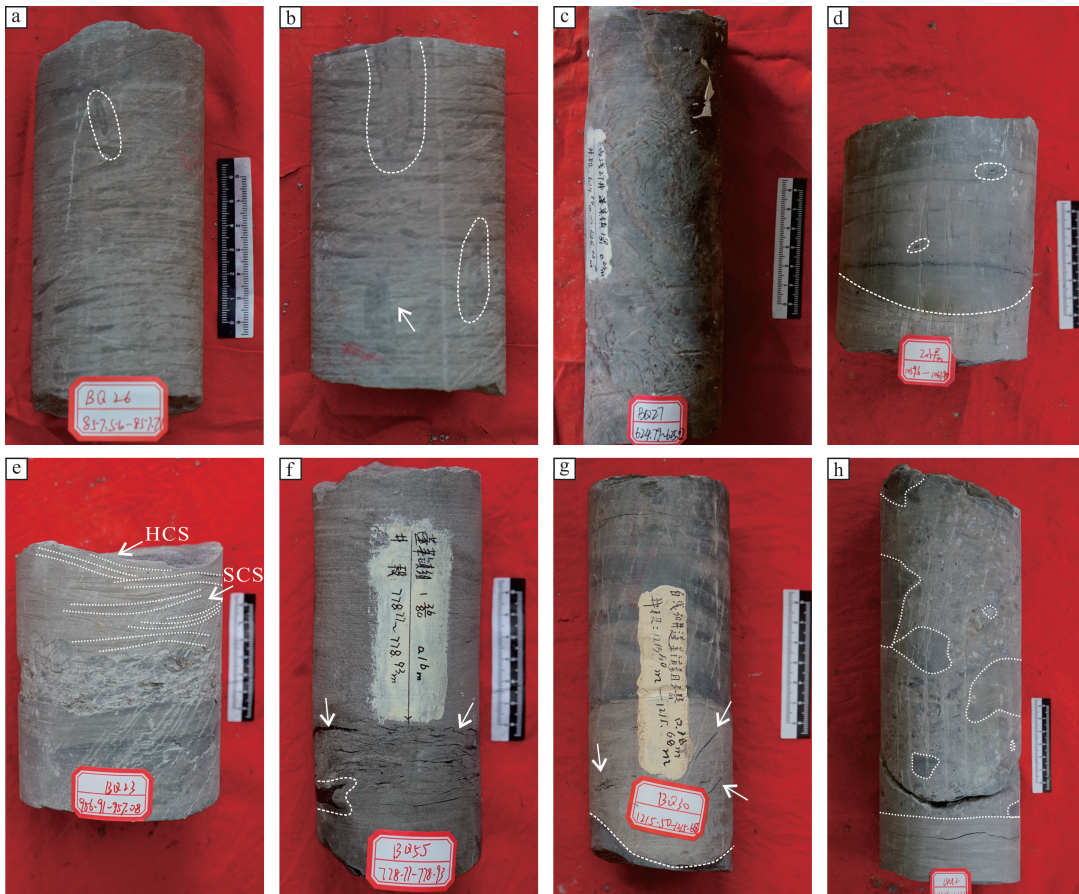
熟度反映相对近源、快速沉积的背景。研究区在细粒沉积物中可见粒径明显变大的粗粒碎屑和泥质炭质撕裂屑(见图 3(f-g)), 反映沉积物在沉积过程中受风暴影响而产生阶段性较强能量水体的搬运和再沉积作用^[17]。碎屑颗粒之间多呈点一线接触, 分选较好, 磨圆度以次棱一次圆为主, 棱角及次棱角次之(见图 2

(b)),中等—较好的结构成熟度表明碎屑经过一定距离的搬运。这些岩石学特征指示物源供应较充足、沉积速率较快、水动力条件较弱和受短暂高能风暴影响的浅水三角洲沉积特征^[15,37]。

2.2 岩相特征

根据岩心观察的岩性及沉积构造等特征,共识别三大类、十三小类岩相类型(见表1)。

(1)砾岩相。一类为河道冲刷成因的砾石分选中等,缺乏明显沉积构造,主要表现为块状,砾石颗粒大小混杂,砾石呈半定向排列特征,反映强水动力条件下的快速堆积;另一类为短暂风暴成因的砾石分选极差,砾石呈不定向排列,分布杂乱,反映快速堆积过程,由风暴引起的强烈紊流沉积形成(见图3(h))。



(a) 浪成交错层理,垂直虫孔, BQ26井, 857.6 m, 蓬四-1砂组; (b) 垂直虫孔, BQ26井, 856.6 m, 蓬四-1砂组; (c) 生物逃逸迹, BQ27井, 624.9 m, 蓬四-4砂组; (d) 截切构造, 撕裂屑, 炭质纹层, BM2井, 1 059.7 m, 蓬三-1砂组; (e) 丘状、洼状交错层理, BQ23井, 957.0 m, 蓬四-4砂组; (f) 块状粉砂岩含撕裂炭屑, BQ55井, 778.9 m, 蓬四-4砂组; (g) 渠模构造, 块状砂岩中见撕裂屑, BQ30井, 1 215.6 m, 蓬四-1砂组; (h) 截切构造, 风暴砂砾岩, 颗粒大小不一, 无定向性, BM2井, 1 061.6 m, 蓬三-1砂组

图3 研究区蓬莱镇组风暴沉积特征岩心照片

Fig. 3 Core photos of storm sedimentary characteristics in the Penglaizhen Formation in the study area

(2)砂岩相。将砂岩相细分为九小类沉积成因类型。研究区砂岩相岩性以细砂岩和粉砂岩为主,颜色主要为灰色、浅灰色及灰绿色。沉积构造多样,以块状层理、平行层理、交错层理为主。块状层理砂岩相岩性以粉、细砂岩为主,偶见泥质条带、炭屑,形成于浅水快速堆积的水下分流河道或河口坝;平行层理砂岩相岩性以细砂岩为主,粒度均一,通常形成于较强单向流、稳定沉积供给的分流河道,是事件性风暴垂向沉积序列B段的沉积构造标志^[15];交错层理砂岩相岩性主要为细砂岩、粉砂岩,发育小型槽状交错层理、丘状(洼状)交错层理、爬升波纹交错层理等。小型槽状层理指示浅水中等动力条件下的水下分流河道,河口坝沉积中偶见;丘状(洼状)交错层理是典型的风暴沉积构造(见图3(e)),反映振荡流与单向流的共同作用。

(3)泥岩相。泥岩相岩性主要为泥岩及粉砂质泥岩。常见灰绿色与紫红色、红棕色交替出现(见图3

(a)),其中,灰绿色指示还原环境,紫红色指示氧化环境,反映沉积期由湖平面升降引起的氧化—还原条件变化。泥岩相主要表现为块状(见图 3(j)),可见砂质团块、生物扰动等现象。

蓬三段、蓬四段沉积期,研究区发育河道砂体,指示显著的河流输入作用;发育较广泛的浪成沙纹层理、波状层理及生物扰动构造,反映水体较浅、易受潮浪影响。在岩心中识别事件性风暴沉积(见图 3),分布局限,单层厚度小,为小型风暴扰动,风暴沉积层作为风暴浪基面之上的典型产物,为浅水环境的指示标志^[15]。研究区蓬三段、蓬四段主要发育受河流和湖浪控制的浅水三角洲沉积体系。

2.3 风暴沉积特征

岩心观察发现非典型三角洲沉积的沉积构造特征,发育特殊的风暴沉积(见图 3)。生物逃逸迹是风暴沉积的辅助标志,发育于泥质粉砂岩,呈垂直或高角度倾斜的虫孔、虫迹(见图 3(a-c)),指示发生突发性沉积事件。

截切构造和冲刷—充填构造(渠模构造)指示,研究区存在风暴流流经沉积物表面时沉积物受到改造形成的侵蚀构造。截切构造包括两种,一种为风暴流流经沉积物表面后水体恢复平静,泥岩沉积覆盖在剪切面之上,形成不规则截切面的截切构造(见图 3(d));另一种是受强风暴回流的强剪切作用力,先期沉积物顶部遭受侵蚀剪切,随后粗粒沉积物快速堆积其上,形成截切构造(见图 3(h))。强风暴涡流或回流冲刷湖底而形成刨蚀坑,常被粗粒沉积物充填而形成渠模构造(见图 3(g))。

丘状交错层理、洼状交错层理及浪成沙纹层理等(见图 3(a,e)),是风暴沉积与浊积岩的重要区别标志之一。通常反映风暴后期能量逐渐减弱,受振荡流、混合流及重力分异作用影响,形成各种层理构造。风暴流作用减弱,风暴下降流携带大量的被搅动起来的砂质、泥碳等悬浮物质,以密度流的性质搬运并沉积下来,砂质和炭屑沉积形成含撕裂状炭屑的块状粉砂岩(见图 3(f))。

2.4 砂体发育特征

白马庙地区蓬莱镇组发育的(水下)分流河道具有多期性特征(见图 4),单期河道砂体厚度较薄,大多数砂体呈叠置复合形态,地层整体含砂率较低。由于地形平缓,处于浅水的沉积环境,沉积物可容空间较小,易受河流与湖浪的改造,研究区砂体厚度发育较薄,河道砂体厚度主要在 4~8 m 之间,当湖浪作用强时,河道砂体易受改造而形成席状化、多期次的薄层砂体,大量薄层砂岩分布于泥质沉积,砂体发育特征与浅水三角洲沉积环境相符。

3 沉积相类型及特征

3.1 沉积相类型

蓬莱镇组沉积期,川西坳陷构造背景表现为稳定沉降^[35,38],研究区构造条件稳定。四川盆地晚侏罗世处于半干旱—干旱炎热古气候环境^[33],有利于物理风化作用,为沉积盆地提供充足的碎屑物源;受蒸发作用和季节性降水的影响,导致湖平面高频变化,普遍观察到氧化—还原色频繁交替现象(见图 5(a-b)),是沉积期古环境变化的直接反映。构造与气候为浅水三角洲的发育提供重要基础。研究区碎屑颗粒主要分布在粉砂级(0.01~0.10 mm)及细砂级(0.10~0.25 mm)区间(见图 2),主要发育粉细砂岩,粗粒沉积物较少。研究区广泛发育紫红色泥岩与灰绿色粉细砂岩频繁互层的沉积序列,构成氧化色—还原色组合(见图 5(a-b)),岩心可见砂岩内部沉积构造多样、多种交错层理(见表 1、图 5),反映受河流入湖后湖浪、沿岸流改造的牵引流沉积过程。湖平面频繁变化,导致沉积界面周期性暴露与淹没转换。综合构造背景、岩心、薄片和地震资料,明确白马庙地区发育浅水三角洲沉积体系,进一步识别浅水三角洲前缘亚相,包括水下分流河道、河口坝、席状砂和下水分流河道间湾微相(见图 6-7)。

3.2 沉积亚相及微相特征

(1)浅水三角洲前缘亚相。研究区砂体发育具有“薄层叠置、多期复合”的特点(见图 4),其中(水下)分流河道砂体以砂体类型为主,占比为 43%;叠置砂体次之,最发育的复合砂体构型为河口坝—(水下)分流河道砂体,占比为 54%,(水下)分流河道砂体叠置次之,指示浅水三角洲前缘的沉积环境。复合砂体发育广泛,构型主要表现为高水位期河口坝向前加积、低水位期水下分流河道下切早期形成的河口坝,形成

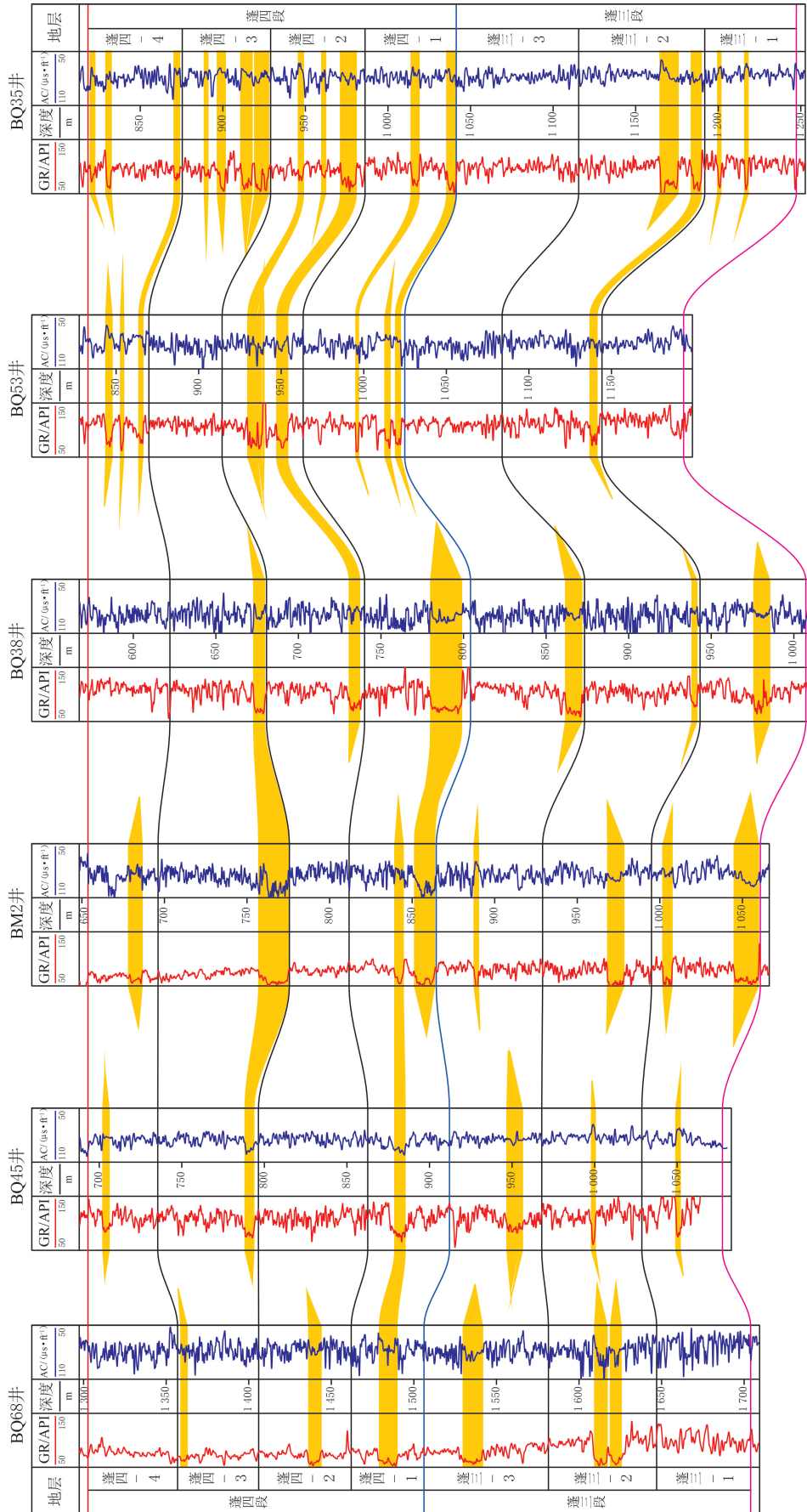


图 4 研究区蓬莱镇组砂体剖面
Fig. 4 Sand body correlation profile of the Penglaizhen Formation in the study area

典型的河口坝一分流河道复合砂体。这种构型指示沉积过程受控于湖平面频繁变化、河流作用与湖浪改造,指示浅水三角洲前缘沉积环境。此外,在砂岩中识别典型的风暴沉积构造,如发育良好的丘状(洼状)交错层理及伴生的风暴侵蚀底面(见图 3(e)),夹于浅水三角洲前缘沉积,指示形成于风暴浪基面之上的浅水环境,记录研究区蓬莱镇沉积期经历短暂的小规模风暴事件。



(a) 紫红色、灰绿色频繁交替出现, BQ26井, 777.8~779.5 m, 蓬四-2砂组; (b) 红棕色、灰绿色交替出现, BQ22井, 1025.4~1026.7 m, 蓬四-3砂组; (c) 块状砾岩相 (Gms1), BQ55井, 781.5 m, 蓬四-3砂组; (d) 平行层理砂岩相 (Sh), SH1井, 888.2 m, 蓬四-3砂组; (e) 槽状交错层理砂岩相 (St), SH1井, 894.2 m, 蓬四-3砂组; (f) 波状层理砂岩相 (Sr), BQ25井, 751.6 m, 蓬四-1砂组; (g) 交错层理粉砂岩相 (Src), BQ26井, 780.9 m, 蓬四-2砂组; (h) 浪成沙纹层理粉砂岩相 (Swr), BQ56井, 1079.4 m, 蓬三-1砂组; (i) 变形层理砂岩相 (Sd), BQ26井, 780.6 m, 蓬四-2砂组; (j) 块状泥岩相 (M), BQ26井, 766.6 m, 蓬四-2砂组

图5 研究区蓬莱镇组典型岩心照片

Fig. 5 Typical core photos of Penglaizhen Formation in study area

(2) 水下分流河道微相。岩性以细砂岩为主,含少量粉砂岩,颜色为灰绿色、浅灰色,主要发育块状层理、平行层理和小型槽状交错层理等沉积构造(见图 5),多以单期或多期叠置在早期河口坝沉积之上。在测井曲线上表现为齿化箱形、钟形或箱—钟形等复合形态。河道砂体厚度平均为 5.6 m,垂向上多呈正韵律特征,底部常见含泥砾的冲刷面;剖面上为顶平底凸特征;平面上,顺物源方向呈条带状展布;地震剖面上可见中—强振幅的透镜状反射结构(见图 7)。

(3) 河口坝微相。河口坝在高水位时沉积最强,低水位时易被分流河道切割改造而残留,是一种重要的三角洲前缘沉积微相。岩性主要为细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩,发育规模较小,颜色以灰绿色为主,常见低角度交错层理、浪成沙纹层理和波状层理(见图 5)。在测井曲线上表现为齿化漏斗形,受河流与湖浪的改造作用,常与箱形、钟形水下分流河道微相叠置出现,一般发育在水下分流河道前端或分汊侧缘。河口坝砂体厚度平均为 4.0 m,垂向上具有典型下细上粗的反韵律特征,剖面上呈底平顶凸特征,平面上近椭圆状或呈新月状展布,地震剖面上可见中振幅、低连续的前积反射特征(见图 7)。

(4) 席状砂微相。岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,颜色多为灰色、红棕色,内部常见波状层理、浪成沙纹层理等反映低能水动力条件的沉积构造(见图 5)。在测井曲线上多表现为指形或多个指形叠置且呈锯齿状,主要发育在水下分流河道或河口坝的边部(见图 7)。单套砂体厚度多小于 2.0 m,垂向上呈细—粗—细的复合韵律特征,剖面上具有薄而宽的特点,平面上呈大面积的片状分布,地震剖面上无明显响应。在湖面高频振荡背景下,研究区三角洲前缘水下分流河道和河口坝受湖浪与沿岸流的控制,砂体经过强烈冲刷改造而在地形平缓的浅水区形成广泛分布的席状砂体。

(5) 水下分流河道间湾微相。岩性主要为粉砂质泥岩、泥岩,颜色主要为灰绿色或紫红色,常见水平层理或均质韵律(见图 5)。在测井曲线上表现为微齿化高 GR 段,发育在水下分流河道间的低洼地带;地震剖面上表现为弱振幅空白反射(见图 7)。

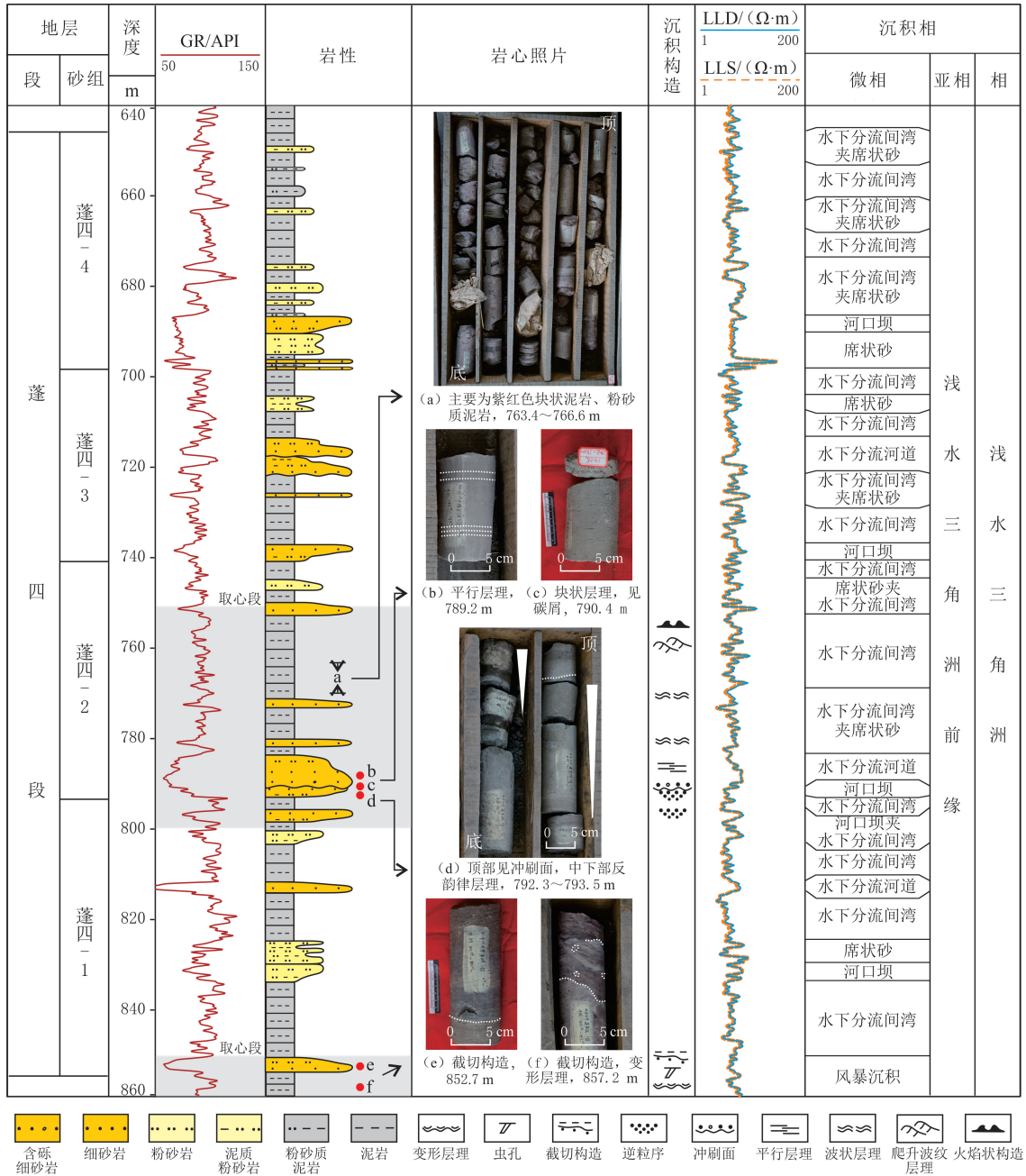


图6 BQ26井沉积相综合柱状图
Fig. 6 Comprehensive column chart of sedimentary facies in well BQ26

4 沉积相分布及沉积模式

为明确研究区蓬三段和蓬四段浅水三角洲沉积相分布及沉积模式, 分别建立顺物源与垂物源方向的骨架剖面(见图8-9), 利用岩心、钻测井及地震资料, 分析研究区沉积演化特征, 建立受风暴影响的浅水三角洲沉积模式。

4.1 沉积相纵向展布

顺主物源方向的BQ29—BQ28—SQ25—BQ40—BQ38—SQ19连井剖面呈北东—南西向, 位于研究区中部。纵向上, 水下分流河道微相多表现为垂向叠置样式, 主要集中发育于蓬三-3、蓬四-1、蓬四-2、蓬四-3砂组。其中, 蓬四段砂体整体连通性优于蓬三段的, 河道砂体厚度较薄, 在BQ38井区发育最厚。研

究区南部 BQ40—BQ38—SQ19 井区残余河口坝较发育,呈河口坝—水下分流河道复合砂体构型,在各砂组分布。此外,研究区受浅水沉积背景及湖水、河流的控制,使得席状砂体较为发育,主要发育在南部区域(见图 8)。





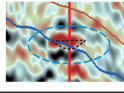




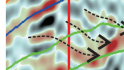








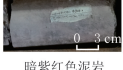
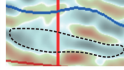
| 相 | 亚相 | 微相 | 岩相 | 垂向序列 | 测井曲线 | | | 岩心照片 | 地震属性响应及描述 | |
|-------|---------|---------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| | | | | | GR/API | LLD/($\Omega\cdot m$) | 形态 | | 剖面 | 描述 |
| 浅水三角洲 | 浅水三角洲前缘 | 水下分流河道 | Gms1、Sm Sh、St Src |  BM2井 |  |  | 齿化箱形或钟形 |  平行层理 |  | 中—强振幅,剖面上见透镜状反射 |
| | | 河口坝 | Sh、St Sr、Sd |  BQ24井 |  |  | 微齿化漏斗形 |  反韵律 |  | 中振幅、弱连续,剖面上见隐形前积反射特征 |
| | | 席状砂 | Ssh、Sd Swr、Ms |  BQ56井 |  |  | 指形 |  波状层理、浪成沙纹层理 |  | 厚度小,无明显响应 |
| | | 水下分流河道间 | Ms、M Swr、Ssh |  BQ20井 |  |  | 齿化高GR |  暗紫红色泥岩 |  | 弱振幅,连续空白反射 |

图 7 研究区蓬莱镇组沉积微相识别图版

Fig. 7 Identification chart of sedimentary microfacies of Penglaizhen Formation in study area

垂直物源方向 BQ58—BM10—BQ38—BQ52—SH2—BQ34 连井剖面主要呈北西—南东向,位于研究区南西部。水下分流河道微相较发育的层段为蓬三-3、蓬四-1、蓬四-2 和蓬四-3 砂组,南部 BQ34 井区砂体相对不发育。河口坝主要发育在 BM10、BQ34 井区,其中残余河口坝占比大于 60%,普遍被上部水下分流河道切割冲刷。席状砂体主要发育在河流延伸较远的中部 BQ38、BQ52 井区(见图 9)。

4.2 沉积相平面展布

结合地震振幅属性切片,优选蓬三段和蓬四段最发育的浅水三角洲前缘砂体,对蓬三-2 与蓬四-1 砂组开展层段沉积相刻画;选取欠发育的蓬四-4 砂组与砂体发育的蓬四-1 砂组进行层段对比,开展沉积相平面展布刻画。

蓬三段、蓬四段主要为浅水三角洲前缘亚相,蓬四段水下分流河道延伸较远、形态更加细长(见图 10(c、e));蓬三段水下分流河道延伸有限,平面河道分布较宽(见图 10(g))。

蓬三-2 砂组沉积期,水下分流河道平面展布以树枝状—网状为主,河道延伸较近,整体规模较小且相互交织,在平面上具有较强的连续性。河口坝发育程度低,滨浅湖与水下分流河道间湾的分布范围较大,反映沉积环境水动力较弱(见图 10(f-g))。蓬四-1 砂组沉积期,水下分流河道砂体主要呈树枝状—网状展布,河道延伸最远,整体规模大于蓬三-2 与蓬四-4 砂组的,反映湖平面相对较低,砂体表现为进积特征。在单井中可见河道砂体通常叠置在漏斗形河口坝砂体之上(见图 10(a))。蓬四-1 砂组的河道砂体厚度相对较大(见图 8-9),指示沉积期河流下切能力相对较强,反映湖平面下降的沉积响应。河口坝发育程度相对发育,多分布于河道末梢或分支部位,多呈小型朵状,整体表现为三角洲前缘水下分流河道较为发育、能量较强的沉积格局(见图 10(c-d))。蓬四-4 砂组的水下分流河道平面多呈条带状—树枝状展布,河道规模不及蓬四-1 砂组的,延伸较远,地震属性响应较弱,在单井中可见河道砂体较薄(见图 4、图 10(a)),反映沉积期湖平面相对较高,下切能力弱。河口坝一般分布于河道末梢,发育程度较低;席状砂呈薄层状广泛分布于河道与河口坝周边,整体沉积相展布表明沉积水动力相对减弱。

蓬三-2 至蓬四-1 砂组沉积期,沉积水动力呈逐渐增强再减弱的变化趋势,三角洲前缘沉积作用在蓬四段上并占主导,水下分流河道规模先增加后减小,河口坝发育程度由弱变强,反映研究区沉积环境从水动力较弱的滨浅湖—三角洲前缘过渡到水动力较强的三角洲前缘沉积体系、湖平面先下降进积后下降退积的演化过程(见图 10)。

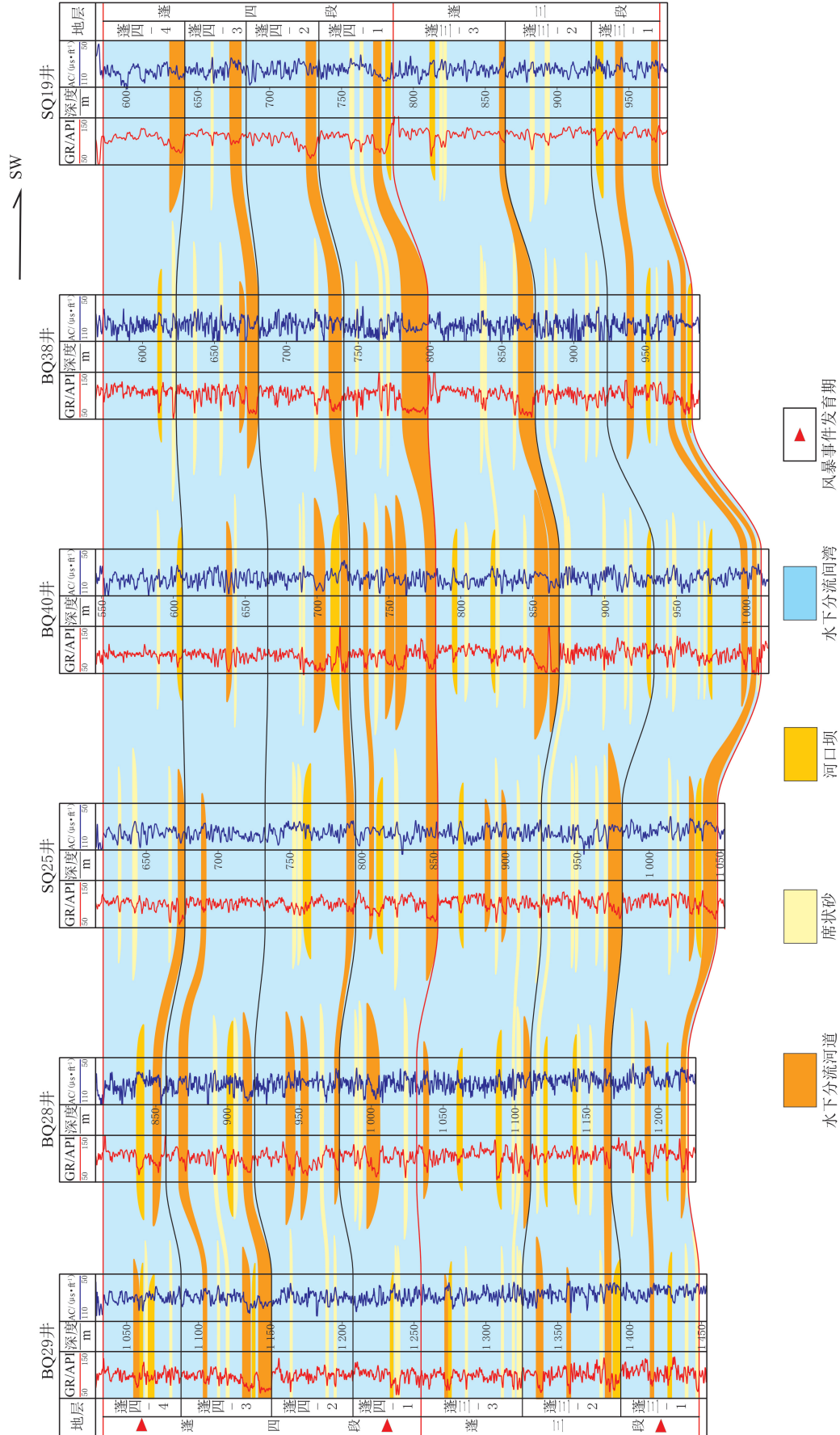


图 8 Well-tie profile of depositional facies along transport direction in the target interval of the study area

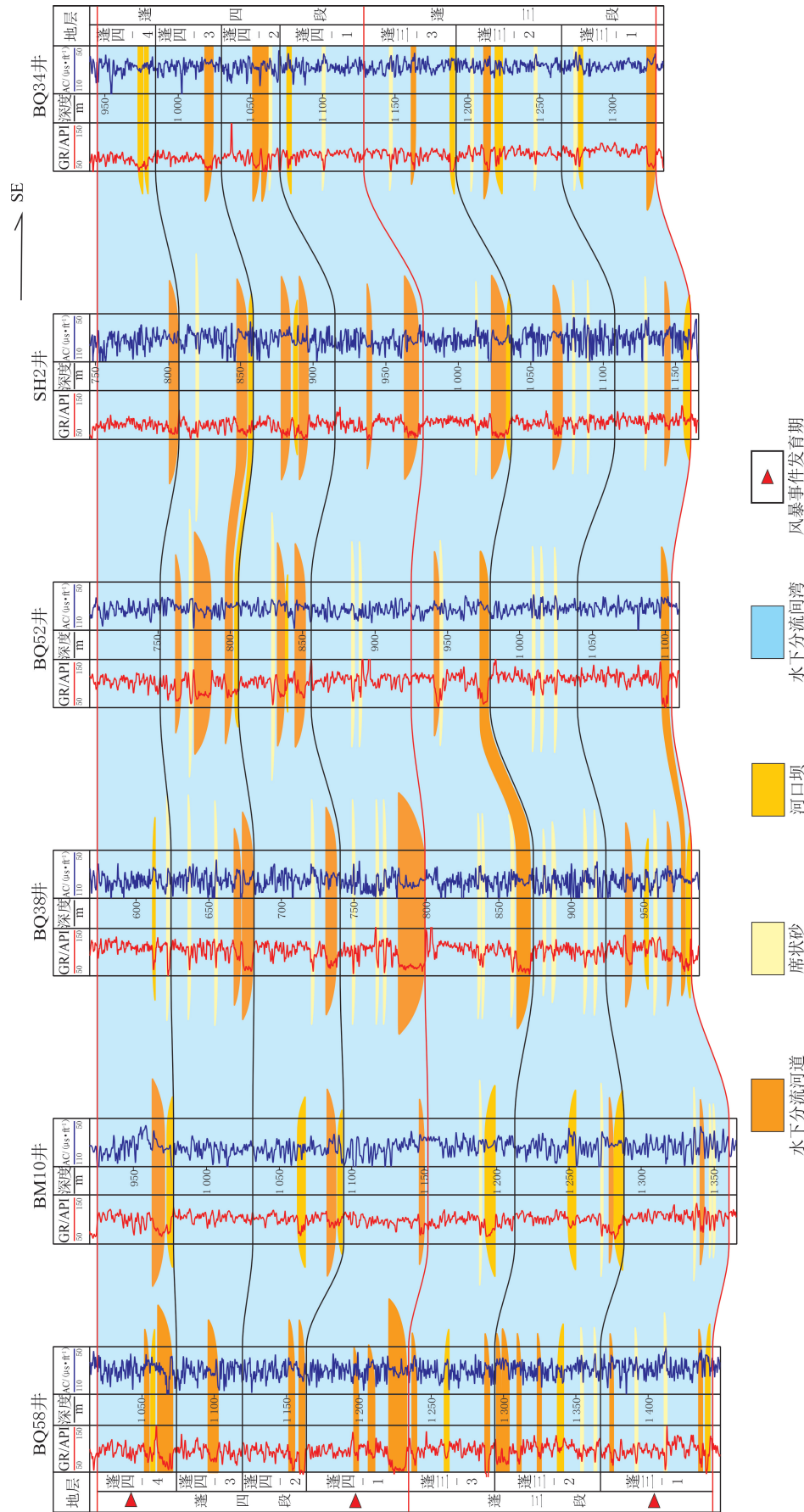


图 9 研究区目的层段垂向物源方向沉积相连井剖面

Fig. 9 Well-tie profile of depositional facies across transport direction in the target interval of the study area

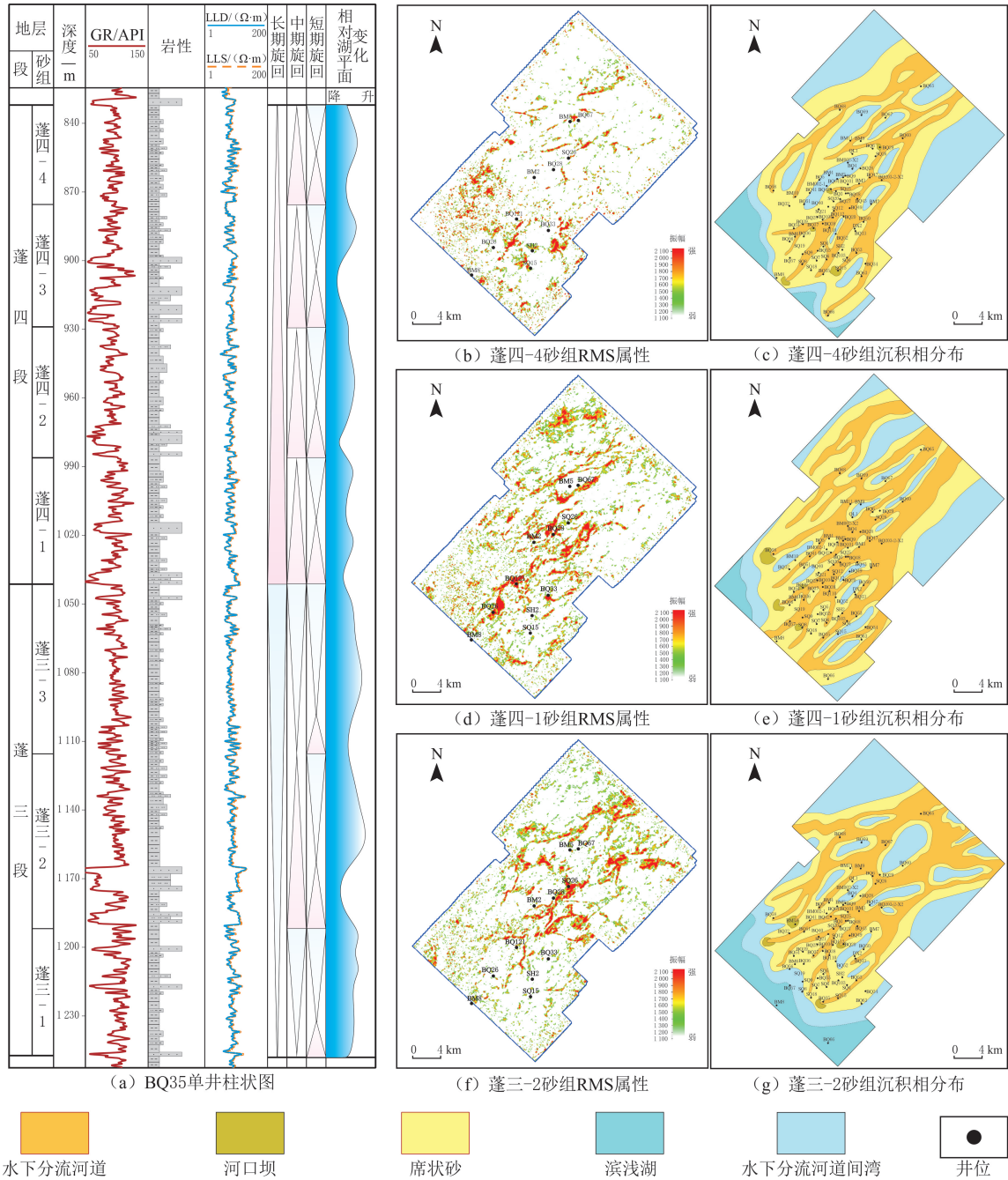


图10 研究区重点砂组最小振幅属性及沉积相平面分布

Fig. 10 Minimum amplitude attribute map and depositional facies plan view of the key interval in the study area

4.3 沉积模式

侏罗纪晚期,四川盆地气候炎热干旱^[32],白马庙地区所处川西坳陷的构造背景稳定,地形平坦,水体浅^[38],研究区受长短轴双向物源供应,处于富长石、富岩屑的交汇区^[26]。研究区岩心紫红色与灰绿色颜色频繁变化(见图5(a-b)),指示湖平面频繁波动。沉积物粒度相对较细,多为细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩,岩性整体上表现为“泥包砂”特点(见图4),砂体发育表现为“薄层叠置,多期复合”的特点(见图8-9),多见水下分流河道砂体冲刷沉积在河口坝砂体之上,呈漏斗—箱形/漏斗—钟形叠置砂体。岩心上识别异常粗粒沉积及风暴特殊沉积构造(见图3),指示研究区发育受风暴扰动的细粒河流供源的浅水三角洲前缘沉积。

蓬三段、蓬四段沉积期,研究区处于浅水三角洲前缘沉积环境,主要发育水下分流河道、河口坝和席状

砂体(见图 7、图 10)。研究区具有浅水缓坡的沉积特点,碎屑物质入水后被长距离搬运,容易频繁改道,随河流的延伸,在河道前端容易冲刷河口坝而形成“坝上河”,表现为河口坝—水下分流河道的叠置复合砂体(见图 10(a)),平面上的河道展布呈条带状到树枝状—网状分布,在分叉处及河道前端易形成河口坝或后期被冲刷的残余河口坝沉积,呈椭圆状或新月状(见图 10)。由于水体整体较浅,可容空间小,湖平面频繁升降,受河流、湖浪和沿岸流等因素控制,先期水下分流河道或河口坝容易受改造,形成薄层席状砂体,多发育在河道两侧及河道前端,河道前端席状砂横向分布广(见图 11)。

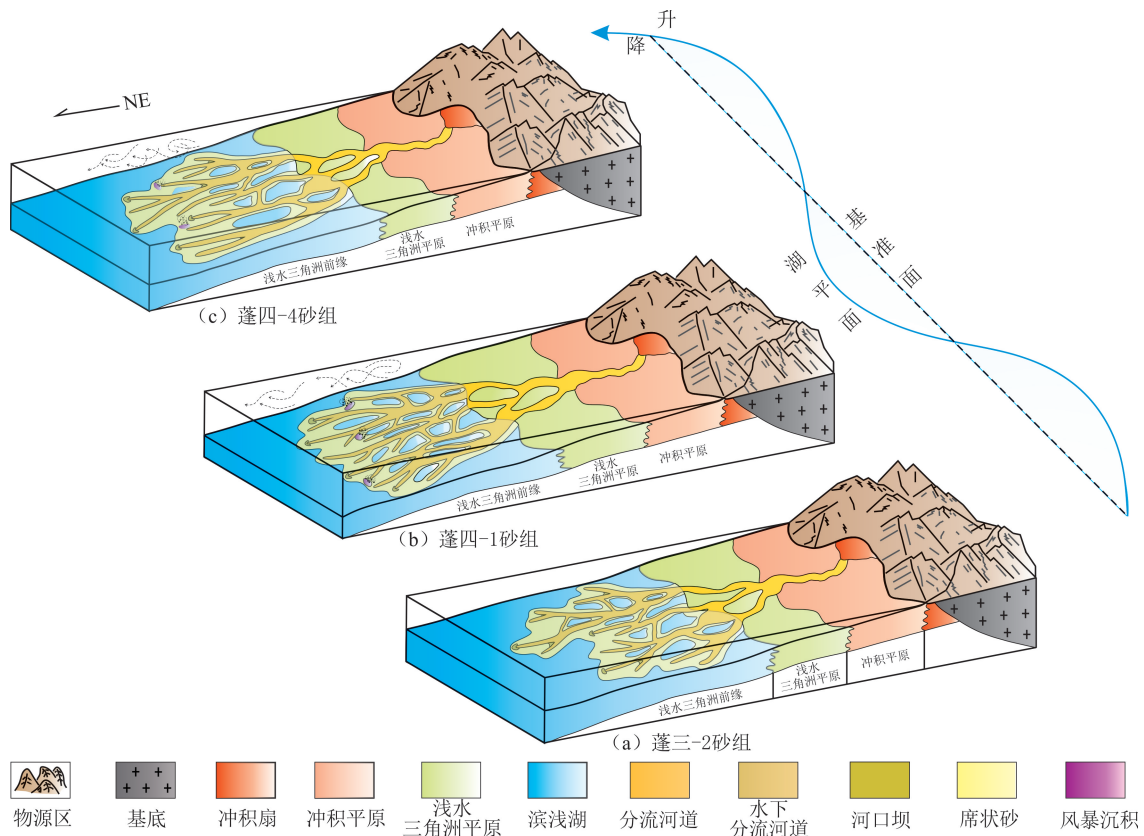


图 11 白马庙地区蓬莱镇组浅水三角洲沉积模式

Fig. 11 Sedimentary model of shallow water delta in Penglaizhen Formation of Baimamiao Area

蓬三-2 砂组、蓬四-1 砂组沉积期,是蓬三段和蓬四段浅水三角洲前缘体系最发育的时期,湖平面相对较低(见图 11),河流下切能力最强,地震属性响应强(见图 10),单井上的砂体沉积厚度较大(见图 4、图 10),可以作为勘探开发的重点砂组;蓬四-4 砂组砂体发育程度减弱,单井上的砂体厚度小,地震属性响应弱,指示蓬四段整体上表现为湖进退积的演化规律。

5 结论

(1)川西坳陷南段白马庙地区上侏罗统蓬莱镇组三段—四段岩性主要为灰绿色、灰色粉砂岩和细砂岩;岩相主要为砾岩相、砂岩相、泥岩相三大类,划分为块状砂砾岩相、平行砂岩相、槽状交错层理砂岩相、波状层理砂岩相、变形层理砂岩相、块状泥岩相等十三小类。

(2)蓬三—蓬四段沉积期,研究区构造稳定,地形平坦,氧化色—还原色颜色频繁变化,反映湖平面频繁波动;单砂体发育具有厚度小、多期性特点,复合叠置砂体主要表现为河口坝—水下分流河道叠置类型;砂体呈条带状—树枝状分布,显示浅水三角洲前缘沉积的特征。

(3)研究区主要发育水下分流河道、河口坝、水下分流间湾和水下分流河道间湾微相,骨架砂体以北东—南西向展布的水下分流河道砂体为主,外缘可见席状化砂体发育;蓬莱镇组为以湖浪、河流控制下的条带状—枝网状受风暴扰动的浅水三角洲沉积模式。

参考文献(References):

- [1] Fisk H N, Kolb C R, Mcfarlan E, et al. Sedimentary framework of the modern Mississippi delta[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954,24(2):76-99.
- [2] 朱筱敏,潘荣,赵东娜,等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013,37(5):7-14.
Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine basin and typical case analyses[J]. *Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition)*, 2013,37(5):7-14.
- [3] 邹才能,赵文智,张兴阳,等. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. *地质学报*, 2008,82(6):813-825.
Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008,82(6):813-825.
- [4] 李建平,刘子玉,陈莹,等. 浅水三角洲基本特征、形成条件及沉积模式:以渤海新近系为例[J]. *地质科学*, 2023,58(4):1340-1353.
Li Jianping, Liu Ziyu, Chen Ying, et al. Basic characteristics, formation conditions and depositional models of shallow water deltas: a case study of Neogene in Bohai Sea[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2023,58(4):1340-1353.
- [5] Ma Z, Dong G, Wang T, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta: a case study from the Paleogene Funing Formation in the Haian Sag of the Subei Basin, China[J]. *Minerals*, 2025,15:75.
- [6] 胡宇斌,高先志,罗龙,等. 准噶尔盆地中4区中侏罗统头屯河组曲流河—浅水三角洲砂体微相分布特征研究[J]. *地球学报*, 2019,40(5):725-736.
Hu Yubin, Gao Xianzhi, Luo Long, et al. Microfacies distribution characteristics of meandering river-shallow water delta sandbodies in Toutunhe Formation of Middle Jurassic strata of block 4, Middle Junggar Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2019,40(5):725-736.
- [7] 朱筱敏,叶蕾,谢爽慧,等. 低可容空间陆相湖盆富砂浅水三角洲沉积模式及实例分析[J]. *古地理学报*, 2023,25(5):959-975.
Zhu Xiaomin, Ye Lei, Xie Shuanghui, et al. Sedimentary models and case study of sand-rich shallow-water delta in continental lacustrine basins with low accommodation[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023,25(5):959-975.
- [8] 张昌民,尹太举,朱永进,等. 浅水三角洲沉积模式[J]. *沉积学报*, 2010,28(5):933-944.
Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010,28(5):933-944.
- [9] 楼章华,卢庆梅,蔡希源,等. 湖平面升降对浅水三角洲前缘砂体形态的影响[J]. *沉积学报*, 1998,16(4):27-31.
Lou Zhanghua, Lu Qingmei, Cai Xiyuan, et al. Influence of lake level fluctuation on sand body shapes at shallow-water delta front [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998,16(4):27-31.
- [10] 李洪辉,李伟,岳大力,等. 流量变化对浅水三角洲沉积特征影响[J]. *地球科学*, 2025,50(6):1-18.
Li Honghui, Li Wei, Yue Dali, et al. Impact of discharge variability on sedimentary characteristics in shallow-water deltas[J]. *Earth Science*, 2025,50(6):1-18.
- [11] 钱子桐,邓庆杰,杨烁,等. 松辽盆地北部昌德地区白垩系泉头组四段浅水三角洲砂体结构及控制因素[J]. *东北石油大学学报*, 2025,49(3):83-96.
Qian Zitong, Deng Qingjie, Yang Shuo, et al. Sand body structure and controlling factors of shallow water delta sand bodies in fourth member of Cretaceous Quantou Formation, Changde Area, North Songliao Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2025,49(3):83-96.
- [12] 贺萍,王青春,于靖波,等. 大涝坝地区下白垩统巴什基奇克组浅水三角洲沉积特征[J]. *东北石油大学学报*, 2021,45(2):67-78.
He Ping, Wang Qingchun, Yu Jingbo, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water delta of the Lower Cretaceous Bashijiqike Formation in Dalaoba Area[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021,45(2):67-78.
- [13] 杨跃明,王小娟,陈双玲,等. 四川盆地中部地区侏罗系沙溪庙组沉积体系演化及砂体发育特征[J]. *天然气工业*, 2022,42(1):12-24.
Yang Yueming, Wang Xiaojuan, Chen Shuangling, et al. Sedimentary system evolution and sandbody development characteristics of Jurassic Shaximiao Formation in the Central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022,42(1):12-24.
- [14] 安小平,唐颖,周小英,等. 鄂尔多斯盆地延长组风暴沉积特征及意义:以环江地区长8油层组为例[J]. *西安石油大学学报*, 2021,36(4):26-32.
An Xiaoping, Tang Ying, Zhou Xiaoying, et al. Characteristics and significance of storm deposits in Yanchang Formation, Ordos Basin: taking Chang 8 oil-bearing formation in Huanjiang Area as an example[J]. *Journal of Xian Shiyou University*, 2021,36(4):26-32.
- [15] 齐文,姜在兴,向树安,等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田下二叠统下石盒子组盒2及盒3段风暴岩研究[J]. *古地理学报*, 2008,10(2):167-174.
Lin Wen, Jiang Zaixing, Xiang Shuan, et al. Researches on tempestites of the member 2 and member 3 of Lower Permian Xiashihezi Formation in Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008,10(2):167-174.
- [16] 钟建华,倪良田,邵珠福,等. 青岛灵山岛下白垩统风暴岩与风暴沉积的发现及意义[J]. *古地理学报*, 2016,18(3):381-398.

- Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Shao Zhufu, et al. Tempestites and storm deposites in the Lower Cretaceous from Lingshan Island, Qingdao[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016,18(3):381-398.
- [17] 周晓峰,刘丽丽,王建国,等.鄂尔多斯盆地延长组开阔浅水湖泊风暴沉积[J].科技导报,2016,34(18):203-208.
Zhou Xiaofeng, Liu Lili, Wang Jianguo, et al. Storm deposition in open shallow water lakes of the Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. *Science & Technology Review*, 2016,34(18):203-208.
- [18] 张新见,许涛,周舳,等.准中4区块侏罗系头屯河组滩坝及风暴沉积特征[J].东北石油大学学报,2012,36(5):45-50.
Zhang Xinjian, Xu Tao, Zhou Fei, et al. Sedimentary characteristics of beach bar and storm deposits in Toutunhe Formation of Jurassic in block 4 of the middle of Junggar Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2012,36(5):45-50.
- [19] 雷卞军,杨跃明,蒋裕强,等.川西邛崃—浦江蓬莱镇组高分辨率地层研究[J].天然气工业,2003,23(6):68-73.
Lei Bianjun, Yang Yueming, Jiang Yuqiang, et al. Research on high resolution sequence stratigraphy of Jurassic Penglaizhen Formation in West Sichuan[J]. *Natural Gas Industry*, 2003,23(6):68-73.
- [20] 刘君龙,纪友亮,杨克明,等.浅水湖盆三角洲岸线控砂机理与油气勘探意义:以川西坳陷中段蓬莱镇组为例[J].石油学报,2015,36(9):1060-1073.
Liu Junlong, Ji Youliang, Yang Keming, et al. Mechanism of lake shoreline control on shoal water deltaic sandbodies and its significance for petroleum exploration: a case study of Penglaizhen Formation in the middle part of Western Sichuan Depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015,36(9):1060-1073.
- [21] 刘君龙,纪友亮,张克银,等.川西前陆盆地侏罗系沉积体系变迁及演化模式[J].石油学报,2016,37(6):743-756.
Liu Junlong, Ji Youliang, Zhang Keyin, et al. Jurassic sedimentary system transition and evolution model in Western Sichuan Foreland Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016,37(6):743-756.
- [22] 叶素娟,李嵘,张庄,等.川西坳陷中段上侏罗统蓬莱镇组物源及沉积体系研究[J].沉积学报,2014,32(5):930-940.
Ye Sujuan, Li Rong, Zhang Zhuang. Provenance analysis and depositional system of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the middle part of Western Sichuan, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014,32(5):930-940.
- [23] 陈佩佩,胡望水,黄鑫,等.川西坳陷SDG地区浅水三角洲沉积特征及沉积成因模式[J].油气地质与采收率,2018,25(2):20-28.
Chen Peipei, Hu Wangshui, Huang Xin, et al. Sedimentary characteristics and sedimentary genetic models of shallow water delta in the SDG Area, West Sichuan Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2018,25(2):20-28.
- [24] 谢刚平,叶素娟,田苗,等.川西坳陷致密砂岩气藏勘探开发实践新认识[J].天然气工业,2014,34(1):44-53.
Xie Gangping, Ye Sujuan, Tian Miao, et al. New understandings of exploration and development practices in tight sandstone gas reservoirs in Western Sichuan Depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2014,34(1):44-53.
- [25] 赵永刚.白马庙—松华地区蓬莱镇组沉积相研究[D].成都:西南石油学院,2003:1-123
Zhao Yonggang. The study of sedimentary facies of Penglaizhen Formation, Baimamiao-Songhua Area, the south of West Sichuan Sag[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2003:1-123
- [26] 屠志慧.川西地区白马庙蓬莱镇组砂体解释及沉积微相研究[D].成都:西南石油学院,2004:1-59
Tu Zhihui. Sand interpretation and study of sedimentary microfacies of Penglai Formation in Baimamiao in the west of Sichuan[D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2004:1-59
- [27] 杨小刚.川西南部地区上侏罗统蓬莱镇组沉积相及储层特征研究[D].成都:西南石油大学,2016:1-84.
Yang Xiaogang. Sedimentary facies and reservoir characteristics of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in Southern Sichuan Basin, China[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016:1-84.
- [28] 徐伟,李和,白马庙气田蓬莱镇组多层气藏开发地质特征研究[J].天然气勘探与开发,2004,27(4):29-34.
Xu Wei, Li He. Study on development geologic characteristics of Penglaizhen Formation multilayer gas reservoir in Baimamiao Gas Field[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2004,27(4):29-34.
- [29] 吴冠桦,刘宏,宋林珂,等.四川盆地西南部东瓜场地区侏罗系沙溪庙组沉积特征及有利储层预测[J].岩性油气藏,2025,37(2):92-102.
Wu Guanhua, Liu Hong, Song Linke, et al. The deposition characteristics and favorable reservoir prediction of Jurassic Shaximiao Formation in Dongguachang Area, Southwestern Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2025,37(2):92-102.
- [30] 谢格云,田云英,刘柏,等.川西南部地区中侏罗统沙溪庙组优质储层形成条件与控制因素[J].天然气工业,2022,42(7):45-54.
Xie Geyun, Tian Yunying, Liu Bai, et al. Formation conditions and controlling factors of high-quality reservoirs in the Middle Jurassic Shaximiao Formation of the Southwestern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022,42(7):45-54.
- [31] 吴东胜,李泽坤,林小云,等.天然气优势运移路径的动态追踪:以川西坳陷白马庙气藏为例[J].长江大学学报(自然科学版),2024,21(6):1-8.
Wu Dongsheng, Li Zekun, Lin Xiaoyun, et al. Dynamic tracking of dominant migration pathways for natural gas: an example from Baimamiao gas reservoir in West Sichuan Depression[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2024,21(6):1-8.

- [32] 刘君龙,孙冬胜,纪友亮,等. 川西晚侏罗世前陆盆地浅水三角洲砂体分布特征与叠置模式[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1164-1178.
Liu Junlong, Sun Dongsheng, Ji Youliang, et al. Distribution characteristics and superimposition pattern of the Late Jurassic shallow water deltaic sand body in the foreland basin of Western Sichuan Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1164-1178.
- [33] 周敏,李祥辉,王旌羽. 四川盆地东北部中—晚侏罗世沉积环境与古气候[J]. 沉积学报, 2024, 42(3): 1003-1014.
Zhou Min, Li Xianghui, Wang Jingyu, et al. Sedimentary environments and paleoclimate of the Middle-Late Jurassic in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(3): 1003-1014.
- [34] 李朝辉. 四川盆地侏罗纪岩相古地理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016: 1-104.
Li Zhaohui. Study on the Jurassic lithofacies and paleogeography of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016: 1-104.
- [35] 宋华杰. 川西坳陷盆地侏罗系三维构造重建与演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2023: 1-94.
Song Huajie. 3D structural reconstruction and evolution of the Jurassic System in the West Sichuan Depression Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2023: 1-94.
- [36] 赵永刚,陈景山,雷卞军,等. 川西邛崃县白马庙气田上侏罗统蓬莱镇组高分辨率层序地层分析[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 674-681.
Zhao Yonggang, Chen Jingshan, Lei Bianjun, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Baimamiao Gas Field, Qionglai County, Western Sichuan[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 674-681.
- [37] Zhang Chengcheng, Wang Hua, Liao Jiani, et al. Oligocene storm-induced lacustrine deposits in the Yaxi Area of the Jiuxi Basin, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 161: 122-138.
- [38] 杨永剑. 川西坳陷中段侏罗系浅水三角洲砂体展布特征及其成因分析[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(4): 73-75.
Yang Yongjian. Characteristics and genetic analysis of Jurassic shallow-water deltaic sandbodies in the Central Western Sichuan Depression[J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(4): 73-75.

.....
(上接第 46 页)

- [39] 张英杰,王龙. 显生宙一级层序的银河年旋回响应: 重要的进展与争论[J]. 地球科学进展, 2020, 35(3): 275-285.
Zhang Yingjie, Wang Long. Response of first-order sequence to the galactic year cycle in the Phanerozoic: an important progress and topic[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(3): 275-285.
- [40] Schenau S J, Reichart G J, De Lange G J. Phosphorus burial as a function of paleoproductivity and redox conditions in Arabian Sea sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2015, 69: 919-931.
- [41] Jiang Z X, Liand C, Wu J, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing finegrained sedimentary rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34: 1031-1039.
- [42] Ver Straeten C A, Brett C E, Sageman B B. Mudrock sequence stratigraphy: a multi-proxy(sedimentological, paleobiological and geochemical) approach, Devonian Appalachian Basin[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 304: 54-73.
- [43] Hemmesch N T, Harris N B, Mnich C A, et al. A sequence-stratigraphic framework for the Upper Devonian Woodford Shale, Permian Basin, West Texas[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 2014, 98: 23-47.