

川西坳陷SDG地区浅水三角洲 沉积特征及沉积成因模式

陈佩佩¹, 胡望水^{1*}, 黄鑫², 邓美洲³

(1.长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北 武汉 430100; 2.中海石油上海分公司, 上海 200000; 3.中国石化西南油气分公司 评价所,四川 成都 610000)

摘要:四川盆地川西坳陷SDG地区沉积特征复杂,对其沉积相的解释尚存许多争议。根据SDG地区313口井的测井和录井资料、25口取心井的岩心和分析化验等资料,在构造和沉积背景控制下通过稳定重矿物以及岩屑组合确定沉积物来源,对岩相类型及其成因进行解释,并结合前人研究成果对典型浅水三角洲的沉积识别标志和特征进行剖析,采用“点—线—面—体”的研究思路对沉积演化规律进行总结,进而建立研究区浅水三角洲的沉积成因模式。研究结果表明,SDG地区具有形成浅水三角洲的有利地质条件。其砂岩粒度细、分布广泛,单层砂体薄且规模小,粒度概率累积曲线表现为较强的牵引流作用特点,发育特征性的岩相组合,沉积砂体在(水下)分流河道两侧及前方整体具有明显的河控性特征,且具有典型的河道改造特征。针对研究区浅水三角洲提出5种沉积成因模式,即三角洲平原“河控带状体”模式、三角洲前缘“河控带状体”模式、三角洲前缘“河控河口坝”模式、三角洲前缘—前三角洲过渡带“浪控席状砂”模式以及三角洲前缘“浪控远砂坝”模式,其中三角洲前缘“浪控远砂坝”模式是针对SDG地区首次提出。

关键词:浅水三角洲 沉积特征 沉积成因模式 蓬莱镇组 SDG地区 川西坳陷

中图分类号:TE112.221

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and sedimentary genetic models of shallow water delta in the SDG area, west Sichuan Depression

CHEN Peipei¹, HU Wangshui¹, HUANG Xin², DENG Meizhou³

(1.Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 2.Shanghai Branch, CNOOC, Shanghai City, 200000, China; 3.Institute of Oil and Gas Evaluation, SINOPEC Southwest Branch, Chengdu City, Sichuan Province, 610000, China)

Abstract: The interpretation of sedimentary facies remains controversial since the sediment is complex in the SDG area, west Sichuan Depression, Sichuan Basin. Considering the complex sedimentary characteristics in the Penglaizhen Formation of the SDG area, the sediment provenance direction was determined under the control of structure and sedimentary background through analyzing the stable heavy mineral and rock debris combination based on cores and measurements results from 25 cored wells and logging data of 313 wells. On this basis, the lithofacies type and their genetic environments were interpreted. Combined with the previous research results, the typical characteristics and identification marks of shallow water delta were dissected and then the sedimentary evolution characteristics were summarized to establish the sedimentary genetic model of shallow water delta based on the principle of “point—line—plane—volume”. The study results show that the SDG area has favorable geological conditions for the formation of shallow water delta, and the sand is characterized by fine granularity and wide distribution, but the single sand body is thin and small. The cumulative probability curves of granularity shows that the deposition was controlled by traction current which results in typical lithofacies combinations,

收稿日期:2017-12-01。

作者简介:陈佩佩(1990—),女,湖北荆州人,在读博士研究生,从事石油勘探与开发方面的研究。联系电话:15871380585, E-mail: 525630581@qq.com。

*通讯作者:胡望水(1963—),男,湖北孝感人,教授,博导。联系电话:18971182089, E-mail: huwangshui@126.com。

and the deposited sand bodies have obvious fluvial-dominated characteristic at both sides of (underwater) distributary channels and their front, and the channel was reformed obviously. Based on the further exploration of sedimentary characteristics and sedimentary facies, five kinds of sedimentary models were put forward for shallow water delta, which are the model of fluvial-controlled blocky sand in delta plain, the model of fluvial-controlled blocky sand in delta front, the model of fluvial-controlled debouch bar in delta front, the model of tide-controlled sheet sand in delta front-prodelta transition zone and the model of tide-controlled far sand bar in delta front, and the model of tide-controlled far sand bar in delta front is proposed for the first time in the SDG area.

Key words: shallow water delta; sedimentary characteristic; sedimentary genetic model; Penglaizhen Formation; SDG area; west Sichuan Depression

FISK在1954年研究密西西比河三角洲时首次提出浅水三角洲沉积相类型^[1]。随后POSTMA等根据水深差异导致的三角洲沉积特征差异将河控三角洲分为深水型和浅水型^[2-3]。国外对浅水三角洲的研究涉及成因动力学、沉积微相构成及内部结构等多方面^[3-5],指出浅水三角洲与正常三角洲沉积特征差异主要表现为骨架砂体类型和形态及沉积相带分异等。中国浅水三角洲研究始于1980年左右,在山西省沁水煤田太原组至上石盒子组首次发现河控浅水三角洲^[6],目前对浅水三角洲的研究主要集中于松辽盆地、鄂尔多斯盆地及渤海湾盆地^[7-9],随着中国对陆相盆地勘探开发投入力度和关注度增加,大型坳陷湖盆内发育的河控浅水三角洲受到广泛关注^[10]。前人研究结果^[11-13]表明,中国浅水三角洲发育区地形较平缓,水体较浅,且多具有整体缓慢沉降的特点,以大型坳陷湖盆发育最多,形成的砂体具有单层薄、规模小且分布广泛的特征^[11-13]。

中国众多学者针对四川盆地SDG地区蓬莱镇组的沉积特征进行了研究与探索,主要存在浅水三角洲、近源短轴三角洲、远源长轴三角洲、辫状河三角洲、曲流河三角洲以及河流相(辫状河)沉积等多种观点^[14-16];且沉积特征分析及沉积模式建立多集中于优势沉积相的常规剖析,缺乏针对性地系统研究;此外,成因砂体空间分布模式的建立相对欠缺,且研究手段较单一,存在多解性和不确定性。针对SDG地区沉积特征的复杂性,笔者根据研究区25口取心井的岩心和分析化验资料以及313口井的测井、录井资料,在构造和沉积背景控制下根据稳定重矿物及岩屑组合特征对沉积物来源进行分析,在此基础上对岩相及其成因进行解释,并结合前人研究成果对典型沉积相识别标志和特征进行剖析,采用“点—线—面—体”的研究思路对沉积演化规律进行分析,进而建立研究区浅水三角洲沉积成因模式,以期可以指导SDG地区优质储层的预测,为寻找岩性油气藏提供可靠的地质依据。

1 地质概况

四川盆地川西坳陷在早侏罗世整体表现为基底具有一致缓慢沉降特征,构造活动相对较弱,地形十分平缓且倾角较小^[15],盆地古气候为干旱、半干旱,湖面大规模快速收缩且水体较浅^[16],具备形成富有特色的浅水三角洲沉积体系的地质条件。SDG地区位于川西坳陷中段(图1),勘探面积约为 $1.33 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。其上侏罗统蓬莱镇组自下而上可以划分为蓬一段、蓬二段、蓬三段和蓬四段,岩性整体表现为砂、泥岩互层,其中砂岩粒度较细,以细砂和粉砂粒级为主,且岩性在横向上变化较小^[14]。

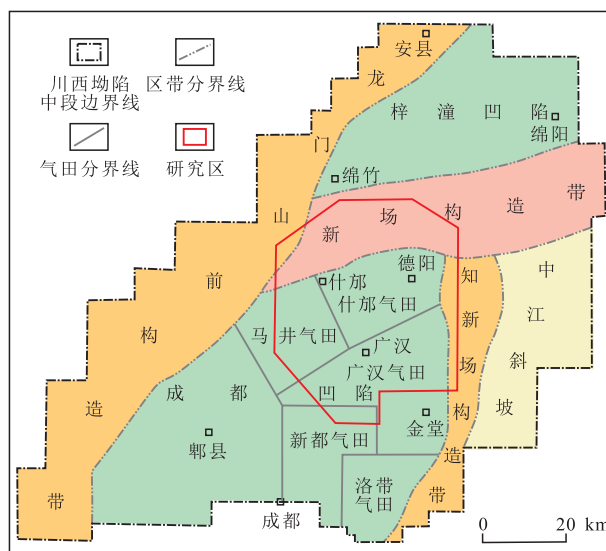


图1 SDG地区区域构造划分

Fig.1 Regional geological structure division of the SDG area

由于SDG地区重矿物分析资料较少,因此选取研究区附近10口取心井的稳定重矿物数据分析其平面组合规律(图2)发现,龙门山前沿NW—SE方向超稳定重矿物含量逐渐增加,新场构造带稳定重矿物含量由NE—SW方向逐渐增加。研究区及附近取心井岩屑组合类型所占比例的统计结果表明,平面上在龙门山北段以沉积岩为主,龙门山中段以变

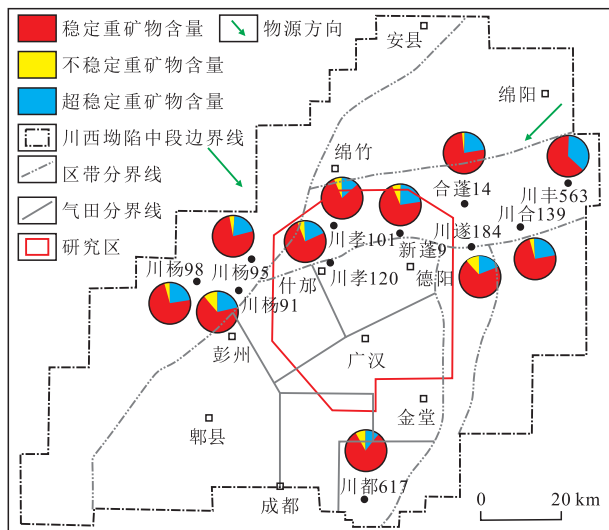


图2 SDG地区蓬莱镇组稳定重矿物含量分布

Fig.2 Diagram showing the distribution of the stable mineral content of the Penglaizhen Formation in the SDG area

质岩为主,在坳陷内部的南部地区以变质岩为主,北部地区以沉积岩为主;研究区蓬莱镇组具有混源沉积特征,以龙门山北段绵竹地区为主要物源区,龙门山中段及坳陷东部为次要物源区。

2 沉积特征及沉积相特征

2.1 沉积特征

2.1.1 砂体发育特征

分析岩心及测井曲线回返特征发现,SDG地区蓬莱镇组发育的(水下)分流河道存在多期性,单期河道砂体较薄,各地层单元含砂率较低,为12.4%~42.5%,平均为29.2%(图3)。造成以上现象的原因主要为:①研究区距离物源区较远,沉积物供给能力有限,导致整体的砂岩沉积厚度随距物源区距离

的增大而逐渐变薄;②研究区整体处于浅水沉积环境,可容纳空间较小,造成砂体整体沉积较少;③沉积坡度较小,河流携带的沉积砂体受(水下)分流河道和湖浪联合改造,大量薄层砂体分布于泥质沉积中^[17-19]。

2.1.2 岩相划分及特征

根据研究区蓬莱镇组25口取心井岩心观察的颜色、组成、结构及沉积构造等特征,可以识别出4大类14小类岩相类型(表1)。砾岩相主要为块状砾岩相,没有明显的沉积构造发育,整体表现为块状,砾岩中的砾石大小不一且混杂沉积,具有定向排列特征,一般为底部粗向上逐渐变细,分析其成因主要为河道底部滞留沉积。砂岩相的岩性大部分为细砂岩,少量为粉砂岩,主要发育块状层理、小型槽状交错层理、板状交错层理以及平行层理,根据岩性和层理发育类型的差异,可以推断沉积环境的水流能量、方向、急缓情况以及沉积物堆积速率,进而根据沉积成因将砂岩相进一步细分为4小类。粉砂岩相的岩性主要为粉砂岩,以水平层理、包卷层理、波状层理和沙纹层理发育为主,根据泥质含量以及不同层理组合类型,可以推断沉积环境的水流能量、水流方向、地形陡缓情况以及可能发育的沉积微相类型,进而将粉砂岩相进一步细分为5小类。泥岩相的岩性均为块状泥岩,仅发育少量的砂质条带,层理类型主要有块状层理和水平层理,通过分析泥岩颜色、化石发育特征、砂质条带发育情况以及部分特殊成分的差异,可以推断沉积环境的水体能量、氧化还原条件以及水体动荡情况,进而将泥岩相进一步细分为4小类。

研究区蓬二段和蓬三段细、粉砂岩中发育大量的槽状交错层理、平行层理和底冲刷等沉积构造组

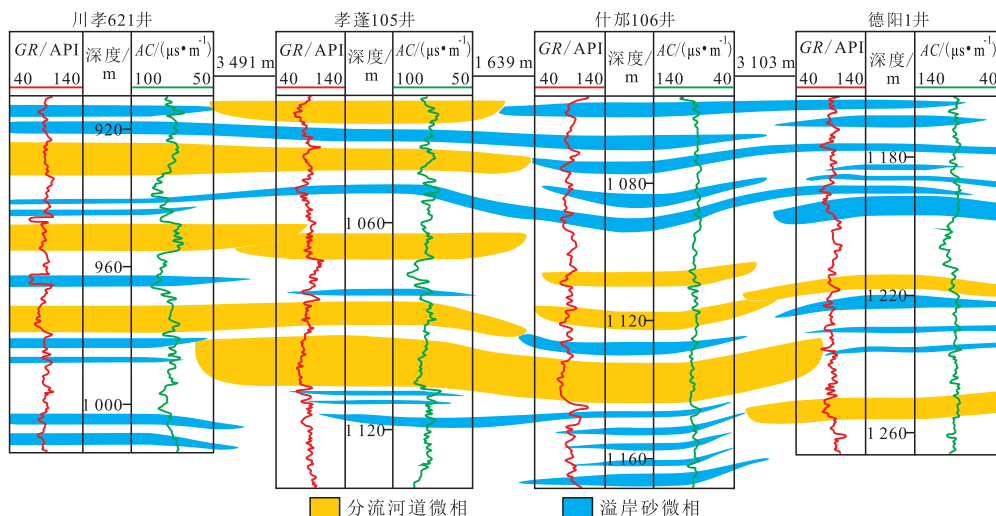
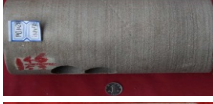
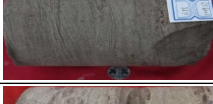
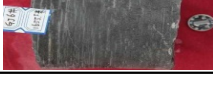


图3 SDG地区蓬三段沉积剖面

Fig.3 Sedimentary section of the third member of the Penglaizhen Formation in the SDG area

表1 SDG地区浅水三角洲沉积体系岩相划分					
Table1 Lithofacies division of sedimentary system of shallow water delta in the SDG area					
岩相类型	主要岩性	主要沉积构造	岩心照片	成因解释	
砾岩相	块状砾岩相	细砾岩	块状层理,颗粒大小混杂且定向排列		河道底部滞留沉积(什邡2井,蓬四段)
砂岩相	块状砂岩相	细砂岩	块状层理,见韵律变化,多为钙质胶结		高流态、高浓度单向水流中的沉积物迅速沉积(什邡19井,蓬三段)
	交错层理岩相	细砂岩	板状交错层理、粒度均一		高流态单向水流作用造成水下砂丘迁移形成(马蓬36井,蓬四段)
	平行层理砂岩相	粉、细砂岩	平行层理、粒度均一		高流态,水流浅、急条件下以垂向加积为主形成(马井102井,蓬三段)
	槽状交错层理砂岩相	粉、细砂岩	小型槽状交错层理		双向中、低流态水流作用产物(马井14井,蓬二段)
粉砂岩相	水平层理粉砂岩相	粉砂岩	水平层理、波状层理,夹泥质条带		地形平缓条件下,低流态单向水流作用的产物(什邡20井,蓬三段)
	变形层理粉砂岩相	粉砂岩	包卷层理、揉皱变形等		因地形或其他触发机制形成的准同生变形(广汉1井,蓬一段)
	波状层理粉砂岩相	粉砂岩	波状层理,纹层在空间上断续分布		三角洲前缘河口砂坝或席状砂沉积(马井13井,蓬一段)
	水平层理泥质粉砂岩相	泥质粉砂岩	波状层理、水平层理,见生物扰动		形成于低能条件下,常见于分流河道间湾或席状砂沉积(什邡20井,蓬三段)
	沙纹层理粉砂岩相	粉砂岩	沙纹层理		三角洲平原溢岸砂及泛滥平原沉积(广金5井,蓬三段)
泥岩相	紫红色块状泥岩相	泥岩	块状层理,含钙质团块、砂质条带		形成于分流河道间湾等低能强氧化沉积环境(马井14井,蓬二段)
	灰绿色块状泥岩相	泥岩	块状层理,含砂质条带		形成于低能弱还原条件下,常见于分流河道间湾沉积(什邡6井,蓬二段)
	杂色块状泥岩相	泥岩	块状层理,含砂质条带		形成于低能弱还原过渡条件下,常见于分流河道间湾沉积(什邡20井,蓬三段)
	灰黑色水平层理泥岩相	泥岩	水平层理,含介形虫化石		形成于前三角洲泥或分流河道间湾等低能静水还原沉积环境(广金6井,蓬二段)

合^[18](表1),反映(水下)分流河道微相较发育。在蓬一段沉积时期,研究区东北部发育大量的浪成沙纹层理、波状层理,表明该时期研究区属于沉积水体较浅、受水下分流河道和湖浪共同作用的河湖过渡带的浅水三角洲前缘沉积;而大量发育在粉砂质泥岩以及泥质粉砂岩中的水平层理,反映SDG地区

经历水体较浅、弱水动力沉积环境。

2.1.3 河道砂体改造特征

通过岩心观察及测井曲线分析发现,研究区蓬莱镇组在垂向上发育多个相互叠置的正韵律沉积,可识别出多个沉积间断面。同一沉积时期发育的沉积间断面之间的井点位置关系的分析结果,可以

反映出较强水动力条件下的(水下)分流河道不断迁移和改造现象^[20-21]。在垂向上正韵律沉积间断面主要表现为有泥岩和无泥岩沉积间断正韵律叠置方式^[22]。有泥岩的沉积间断面常见于三角洲平原亚相中,其泥质沉积间断面的厚度一般小于1 m,可以视为一期河道砂体沉积过程中的泥质夹层;而无泥质沉积间断面的间断正韵律则是(水下)分流河道不断迁移、改造形成的,其单层厚度较薄,一般为0.6~1.8 m,砂岩粒级以粉砂—细砂为主(图3)。河道在迁移过程中反复摆动,水流较快,泥质沉积物沉积较少或被改造,该沉积韵律在可容纳空间增长速率相对较低的浅水三角洲前缘亚相中较发育^[23]。

2.1.4 粒度概率累积曲线特征

主要利用研究区蓬莱镇组25口取心井的粒度分析资料,对储层砂体粒度的分布特征进行研究。结果表明,研究区粒度概率累积曲线显示为两段式和不明显的三段式^[24],缺乏滚动搬运主体,反映河流沉积特征,且沉积物质属于细粒沉积;跳跃总体的曲线斜率中等至较高,悬浮总体含量略高,细截点偏细,曲线总体表现为较强的牵引流沉积。综合以上特征,研究区蓬莱镇组整体表现为浅水三角洲分流河道沉积特征。岩心粒度分析资料表明,其岩性以细粉砂岩、粉砂岩为主,分选较差,发育的沉积构造类型多为水体较稳定的水平层理、沙纹层理以及少量的小型交错层理和平行层理,与浅水三角洲

分流河道的沉积特征具有较高的一致性。

2.2 沉积相特征

在调研川西坳陷沉积背景的基础上,根据什邡3井、广金6井、广汉1井、马井102井和马井35井等25口井的岩心观察结果及313口井的测井和录井资料,在典型沉积相标志识别的基础上,结合砂岩厚度、砂地比、地震属性、波阻抗反演、测井相等分析结果,以“点—线—面—体”为研究思路,确定SDG地区的沉积相特征,进而分析沉积演化规律,总结沉积成因模式。

2.2.1 关键井沉积相特征分析

基于研究区69口关键井的地质资料,进行岩石学特征、泥岩颜色、粒度、沉积构造及沉积韵律等沉积相识别标志分析,确定沉积相类型,总结测井相模式(表2)。研究区蓬莱镇组4个段的岩性差异较小,整体上以紫红、棕褐色(粉砂质)泥岩及绿灰、褐灰色粉、细砂岩互层沉积为主(表1),反映蓬莱镇组沉积时期属于氧化—弱氧化浅水沉积环境。综合分析岩相和测井相特征,确定研究区蓬莱镇组沉积相识别特征(表2)。

2.2.2 多井沉积相演化分析

在蓬莱镇组沉积时期,SDG地区具有独特的浅水沉积环境及干旱、半干旱气候条件,造成水体涨落频繁且控制区域较大,水体的动荡变化导致沉积相在垂向上具有较大的相变特征,为了能够准确厘

表2 SDG地区蓬莱镇组沉积相识别特征
Table2 Identification characteristics of the sedimentary microfacies of the Penglaihen Formation in the SDG area

沉 积 相		沉 积 特 征	沉 积 构 造	沉 积 韵 律	自然电位 曲线特征
亚相	微相				
三 角 洲 平 原	分流河道	褐色、棕褐色块状细砂岩	大一中型交错 层理、平行层理	正韵律或 复合韵律	呈钟形、箱形 或漏斗形
	决口扇	褐色、灰色、灰绿色粉砂岩和泥质粉砂岩	中一小型交错层 理、变形层理	反韵律或 复合韵律	呈钟形或漏斗形
	溢岸砂	中薄层细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	交错层理、波状层 理、透镜状层理	反韵律	齿化漏斗形
	分流河道间湾	粉砂质泥岩、泥岩	水平层理	复合韵律	平直形为主
三 角 洲 前 缘	水下分流河道	厚层—中厚层中—细砂岩向上逐渐过渡为细砂岩与粉砂岩,与下伏岩层呈突变接触,底部常发育冲刷面	大型交错层理、 平行层理等	正韵律或 复合韵律	钟形、箱形、叠置 钟形、齿化箱形
	河口坝	中厚层细砂岩、薄层粉砂岩、泥质粉砂岩	交错层理	反韵律为主	漏斗形、齿 化漏斗形
	远砂坝	薄层细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩互层	小型交错层 理、变形层理	反韵律或 复合韵律	叠置漏斗形 或台阶形
	席状砂	薄层细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	沙纹层理	反韵律	指形、齿形
	水下分流河道间湾	泥质粉砂岩、泥岩	水平层理	复合韵律	较平缓,偶见锯 齿形、低平指形
前三角洲	前三角洲泥	泥岩为主,夹薄层粉砂质泥岩、泥质粉砂岩	水平层理	复合韵律	较平缓
浅湖	浅湖泥	泥岩为主,夹少量薄层粉砂质泥岩	水平层理	复合韵律	较平缓
	滩砂	泥质粉砂岩与泥岩互层	沙纹层理	复合韵律	指形、齿形

定沉积相在横向和垂向上的变化规律以及沉积体系的空间分布特征,在岩心资料解剖和关键井沉积相特征分析的基础上,以关键井为中心,建立NS和EW2个方向共32条连井沉积相对比剖面,分析沉积相的横向变化特征。研究表明,沉积相对比剖面的最底部为前三角洲亚相,向上依次为三角洲前缘、平原亚相。整体表现为下细上粗的反旋回垂向沉积特征,上部多发育三角洲平原分流河道微相,具有下粗上细的间断正韵律特征;顶部偶发育炭质

泥岩沼泽沉积,具有典型的河控浅水三角洲沉积特征。研究区蓬莱镇组整体表现为NE和WN方向河道发育规模大于SW和ES方向,NE—SW方向砂体连通性稍好于WN—ES方向,单期河道砂体厚度不一,多以孤立式为主,河道砂体弱切叠分布(图3)。

2.2.3 沉积相平面展布特征

在物源、岩心、关键井沉积相以及多井典型沉积相对比分析的基础上,总结SDG地区蓬莱镇组沉积相平面分布特征。结果(图4)表明,研究区蓬—

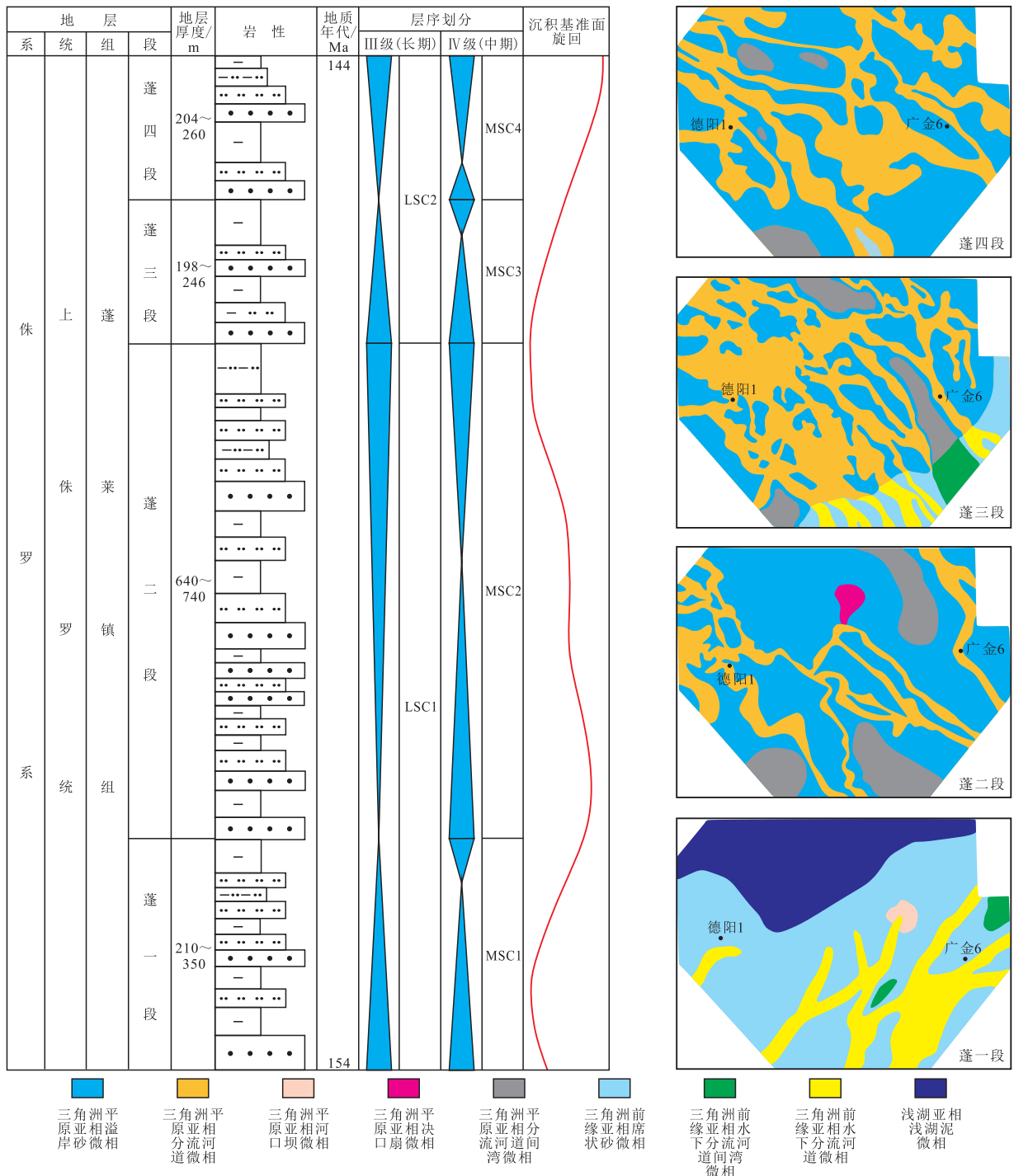


图4 SDG地区蓬莱镇组沉积演化及沉积相分布特征
Fig.4 Sedimentary evolution and characteristics of sedimentary facies distribution of the Penglaizhen Formation in the SDG area

段以浅水三角洲前缘亚相为主体,部分为前三三角洲亚相,蓬二段、蓬三段和蓬四段主要为浅水三角洲平原亚相。平面上,研究区蓬三段的河道规模及河道分叉指数最大,沉积砂体较厚,且主要呈大范围分布于分流河道微相之中,而蓬四段次之,蓬一段则最小;也反映出纵向上河流能量从蓬一段至蓬三段依次变大,之后在蓬四段变小,表现为湖进退积之后湖退进积的沉积演化过程。

3 沉积演化规律及沉积成因模式

3.1 沉积演化规律

在蓬莱镇组沉积时期,SDG地区的沉积基准面总体处于下降背景条件下,主要经历了4个演化阶段(图4)。蓬一段沉积时期沉积基准面早期快速上升晚期下降、蓬二段沉积时期沉积基准面早期缓慢上升晚期下降、蓬三段沉积时期沉积基准面早期较快上升晚期下降、蓬四段沉积时期沉积基准面缓慢下降。以反映SDG地区整体沉积演化规律的关键井广汉1井以及具有代表性的蓬一段5砂组、蓬二段7砂组、蓬三段3砂组和蓬四段6砂组为例,总结蓬莱镇组沉积时期自下而上的沉积演化规律。研究区在蓬一段沉积时期总体上表现为大范围湖侵,以浅湖亚相为主,发育有小范围的浅水三角洲前缘亚相,砂体主要成因为水下分流河道、河口坝和席状砂微相;研究区自蓬二段沉积时期开始整体湖退进积,仅发育三角洲平原亚相,砂体以分流河道和溢岸砂微相成因为主;在蓬三段沉积时期研究区湖侵面积较小,发育小范围三角洲前缘亚相,砂体整体仍以分流河道和溢岸砂微相成因为主,少量水下分流河道和席状砂微相成因为主;至蓬四段沉积时期研究区湖退进积,仅发育三角洲平原亚相,砂体成因为分流河道和溢岸砂微相。

3.2 沉积成因模式

在蓬莱镇组沉积时期,SDG地区整体处于浅水沉积环境,沉积早期受河流改造形成的砂体,随后在河流及湖岸流的共同作用下形成大量的席状砂,这些砂体在顺物源方向主要沿河道两侧广泛分布,且延展范围广,呈现出以水下分流河道微相为核心并沿其两侧呈带状分布的沉积特征。根据研究区浅水三角洲发育的地质背景、沉积特征、平面展布规律及垂向演化特征,提出5种沉积成因模式。

3.2.1 三角洲平原“河控带状体”模式

研究区蓬二段上部和蓬三段可见大量分叉的分流河道,且河道分布广、延伸远,分流河道对浅水

三角洲平原亚相的沉积物分布具有主控作用。在平面上,以分流河道为中心,向两侧依次发育分流河道—天然堤—溢岸砂—河道间泥质沉积,整体上呈现出明显的河控带状体特征(图5)。

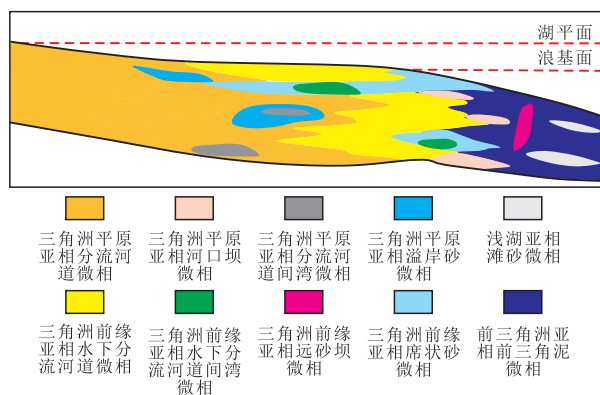


图5 SDG地区蓬莱镇组浅水三角洲沉积成因模式

Fig.5 Sedimentary genetic models of shallow water delta of the Penglaizhen Formation in the SDG area

3.2.2 三角洲前缘“河控带状体”模式

在蓬一段沉积时期,研究区中部—北东部浅水三角洲前缘亚相的发育具有明显的河控性。在平面上,以水下分流河道微相为主体,其发育范围控制了三角洲前缘亚相发育沉积微相的类型、规模及展布特征等。单支水下分流河道由中心向两侧及前方依次发育水下分流河道—席状砂(细、粉砂岩)—漫流沉积(泥质粉砂岩)—水下分流河道间湾(泥质粉砂岩及粉砂质泥岩沉积),具有河控带状体分布特征^[25](图5)。

3.2.3 三角洲前缘“河控河口坝”模式

在蓬一段沉积时期,研究区北东部三角洲前缘亚相内部的前缘区发育少量河口坝沉积,根据河口坝砂体的岩性与河道砂体具有的继承性关系,结合研究区实际沉积微相展布特征,可知研究区河口坝为典型的河控河口坝。究其原因主要为从物源区经河道迁移搬运来的砂体在快速水进的水动力条件下,在水浅而平缓的湖底进行长距离搬运,受湖水阻力限制,导致搬运能量逐渐衰竭,在河口区沉积所形成,此时砂体仍保留河控特点。分析研究区实际的河口坝砂体展布特征及整体的沉积微相分布发现,在河口坝沉积区两侧及前方依次发育水下分流河道—水下分流河道间席状砂—河口坝—席状砂,具有条带状展布特征(图5)。

3.2.4 三角洲前缘—前三三角洲过渡带“浪控席状砂”模式

在SDG地区三角洲前缘—前三三角洲过渡带附近,浪控席状砂较发育。由于距沉积物源较远,沉积物供给不足,导致水下分流河道水动力较弱,河

流改造作用显著减弱,而随着沉积物向湖继续推进,砂体受逐渐增强的湖浪改造作用,导致席状砂呈现出明显的浪控性,主要特征表现为:①单一席状砂沿水下分流河道向河道两侧垂向分布;②多期次的席状砂彼此呈现出平行分布特征;③在平面上具有由三角洲前缘—前三角洲过渡分布特征,呈明显的河控席状砂—河流与湖浪共同作用席状砂—浪控席状砂的环状分布特征(图5)。

3.2.5 三角洲前缘“浪控远砂坝”模式

该沉积成因模式为根据SDG地区实际沉积特征而首次提出。研究区远砂坝砂体主要发育于三角洲前缘亚相的外前缘区,水下分流河道主体在向湖相快速进积的过程中,由于受到湖水的阻挡,导致沉积物迁移速率迅速降低,携带的沉积物也因此快速堆积^[26],且受潮浪改造作用明显,在河口沉积区前方较远的区域形成远砂坝沉积,岩性以粉砂岩为主,并有少量粘土及细砂岩沉积,平面上呈条带状分布^[27](图5)。

4 结论

SDG地区蓬莱镇组砂岩粒度细且分布广泛,单层砂体薄且规模小,粒度概率累积曲线表现为较强的牵引流作用特点,发育特征性的岩相组合,沉积砂体在(水下)分流河道两侧及前方具有典型的改造特征,整体上具有明显的河控性特征,为典型的浅水三角洲沉积特征。关键井沉积相分析发现,河流能量自蓬一段至蓬三段依次变大,之后在蓬四段变小,表现为湖进退积之后湖退进积的沉积演化特征。多井沉积相演化分析结果显示,河道砂体反复迁移、多期冲刷,呈正韵律叠置,且砂体延伸较远。沉积相平面展布特征表现为蓬一段以浅水三角洲前缘亚相为主体,部分为前三角洲亚相,蓬二段、蓬三段和蓬四段主要为浅水三角洲平原亚相;河道规模以及河道分叉指数以蓬三段最大,蓬四段次之,蓬一段则最小。最终建立SDG地区浅水三角洲5种沉积成因模式,即三角洲平原“河控带状体”模式、三角洲前缘“河控带状体”模式、三角洲前缘“河控河口坝”模式、三角洲前缘—前三角洲过渡带“浪控席状砂”模式及三角洲前缘“浪控远砂坝”模式。

参考文献:

- [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] POSTMA G. An analysis of the variation in delta architecture [J]. *Terra Nova*, 1990, 2(2): 124–130.
- [3] DONALDSON A C. Pennsylvanian sedimentation of central Appalachians [J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1974, 148(5): 47–48.
- [4] OLARIU C, BHATTACHARYA J P. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(2): 212–233.
- [5] HOY R G, RIDGWAY K D. Sedimentology and sequence stratigraphy of fan-delta and river-delta deposystems, Pennsylvanian Minturn Formation, Colorado [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(7): 1 169–1 191.
- [6] 李超, 韩雪芳, 胡勇, 等. 浅水三角洲相多期窄河道砂体结构研究——以渤海海域渤中25-1南油田为例 [J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(6): 43–49.
LI Chao, HAN Xuefang, HU Yong, et al. Architecture of multi-phase narrow-channel sand bodies of shallow water deltaic facies: a case study on BZ25-1S oilfield [J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(6): 43–49.
- [7] 席胜利, 李文厚, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地神木地区下二叠统太原组浅水三角洲沉积特征 [J]. *古地理学报*, 2009, 11(2): 187–194.
XI Shengli, LI Wenhao, LIU Xinshe, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta of the Lower Permian Taiyuan Formation in Shenmu area, Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(2): 187–194.
- [8] 孙雨, 马世忠, 姜洪福, 等. 松辽盆地三肇凹陷葡萄花油层河控浅水三角洲沉积模式 [J]. *地质学报*, 2010, 84(10): 1 502–1 509.
SUN Yu, MA Shizhong, JIANG Hongfu, et al. Sedimentary mode of shallow lacustrine fluvial-dominated delta of Putaohua reservoirs in the Sanzhao Depression, Songliao Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(10): 1 502–1 509.
- [9] 贺永红, 张锐, 马芳侠, 等. 三角洲河口区沉积微相演化特征及成因分析——以鄂尔多斯盆地樊学地区长4+5油层组为例 [J]. *中国石油勘探*, 2017, 22(2): 35–43.
HE Yonghong, ZHANG Rui, MA Fangxia, et al. Analysis on evolution and genesis of sedimentary microfacies in delta estuary: an example from Chang 4+5 pay zone in Fanxue area, Ordos Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(2): 35–43.
- [10] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式: 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 89–99.
ZHU Xiaomin, LIU Yuan, FANG Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 89–99.
- [11] 李元昊, 刘池洋, 独育国, 等. 鄂尔多斯盆地西北部上三叠统延长组长8油层组浅水三角洲沉积特征及湖岸线控砂 [J]. *古地理学报*, 2009, 11(3): 265–274.
LI Yuanhao, LIU Chiayang, DU Yuguoguo, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta and lake shoreline control on sandbodies of Chang8 oil-bearing interval of the Upper Triassic Yan-

- chang Formation in northwestern Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(3): 265–274.
- [12] 刘柳红, 朱如凯, 罗平, 等. 川中地区须五段—须六段浅水三角洲沉积特征与模式[J]. 现代地质, 2009, 23(4): 667–675.
- LIU Lihong, ZHU Rukai, LUO Ping, et al. Characteristics and depositional models for the shallow-water deltas of the 5th–6th interval, Xujiahe Formation, Upper Triassic in Central Sichuan Basin, China [J]. Geoscience, 2009, 23(4): 667–675.
- [13] 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.
- [14] 叶素娟, 李嵘, 张庄. 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.
- [15] 赵兰. 川西坳陷上侏罗统蓬莱镇组高分辨率层序地层与沉积相研究[D]. 武汉: 长江大学, 2013.
- ZHAO Lan. Study on high resolution sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in Western Sichuan Depression [D]. Wuhan: Yangtze University, 2013.
- [16] 刘安然. 川西坳陷中段上侏罗统蓬莱镇组沉积相研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- LIU Anran. Sedimentary facies study of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the middle section of Western Sichuan Depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [17] 刘超, 姜在兴, 陈骥. 青海湖北部冲积扇沉积特征、演化过程及控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(5): 1–9.
- LIU Chao, JIANG Zaixing, CHEN Ji. Sedimentary characteristics, evolution and controlling factors of the alluvial fans, the north of Qinghai Lake [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(5): 1–9.
- [18] 李一赫, 尚尧, 张顺, 等. 多物源复合式浅水三角洲沉积特征与沉积模式[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(3): 1–9.
- LI Yihe, SHANG Yao, ZHANG Shun, et al. Sedimentary characteristics and models of the composite shallow water delta with the multiple sources [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(3): 1–9.
- [19] 孙春燕, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 松辽盆地兴城地区泉四段浅水三角洲沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 66–74.
- SUN Chunyan, HU Mingyi, HU Zhonggui, et al. Sedimentary characteristics of shallow water delta of Quan-4 member in Xingcheng area, Songliao Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(3): 66–74.
- [20] 胡忠贵, 胡明毅, 胡九珍, 等. 潜江凹陷东部地区新沟咀组下段浅水三角洲沉积模式[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1 263–1 273.
- HU Zhonggui, HU Mingyi, HU Jiuzhen, et al. Shallow water delta depositional model of the lower segment of the Xingouzui Formation in eastern Qianjiang depression [J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1 263–1 273.
- [21] 赵谦, 周江羽, 李兰斌, 等. 柴达木盆地七个泉地区渐新世沉积特征与隐蔽油藏预测[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(4): 22–29.
- ZHAO Qian, ZHOU Jiangyu, LI Lanbin, et al. Analysis of Oligocene sedimentary characteristics and subtle oil reservoir prediction in the Qigeguan area, Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(4): 22–29.
- [22] 袁静, 张红, 张明星, 等. 东营凹陷石村断层下降盘沙三段—沙二段沉积、演化特征及主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(2): 22–29.
- YUAN Jing, ZHANG Hong, ZHANG Mingxing, et al. Sedimentary evolution characteristics and the main controlling factors of 2nd and 3rd members of Shahejie Formation in downthrown side of Shicun Fault in Dongying sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 22–29.
- [23] 向立宏, 赵铭海, 郝雪峰, 等. 济阳坳陷东营组沉积体系新认识[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(3): 8–13, 66.
- XIANG Lihong, ZHAO Minghai, HAO Xuefeng, et al. New understanding on sedimentary system of Dongying Formation in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(3): 8–13, 66.
- [24] 吴靖, 姜在兴, 潘悦文, 等. 湖相细粒沉积模式——以东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1 080–1 089.
- WU Jing, JIANG Zaixing, PAN Yuewen, et al. Lacustrine fine-grained depositional model: a case study of the upper submember of the fourth Member of Paleogene Shahejie Formation in Dongying sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(9): 1 080–1 089.
- [25] 陈杰, 刘传虎, 谭明友, 等. 进积型三角洲交汇区沉积模式——以东营凹陷沙三中亚段为例[J]. 沉积学报, 2016, 34(6): 1 187–1 197.
- CHEN Jie, LIU Chuanhu, TAN Mingyou, et al. Depositional model of prograding delta confluences: A case from Es₃ Members in the Paleogene Dongying sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(6): 1 187–1 197.
- [26] 王越, 陈世悦, 梁绘媛, 等. 和什托洛盖盆地侏罗系辫状河三角洲沉积模式研究[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 81–86.
- WANG Yue, CHEN Shiyue, LIANG Huiyuan, et al. Sedimentary model of braided river delta of the Jurassic in Heshituoluogai Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 81–86.
- [27] 满欣欣, 王红亮, 单俊峰. 辽河坳陷双台子构造带沙三段层序格架内沉积特征及演化[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 110–120.
- MAN Xinxin, WANG Hongliang, SHAN Junfeng. Characteristics and evolution of sedimentary sequences of the 3rd member of Shahejie Formation in Shuangtaizi tectonic belt, the Liaohe Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 110–120.