

蠡县斜坡沙一下亚段混积特征及其控储效应

薛辉¹, 肖博雅¹, 许梦婷¹, 亢品², 叶大帅¹, 张瑞雪¹, 郭悦苗¹,
汤小琪¹, 韩春元¹

1. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院, 河北任丘 062552

2. 中国石油华北油田分公司第五采油厂, 河北辛集 052360

摘要 【目的】蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积广泛发育, 明确混积特征及其控储效应对确定下一步勘探开发目标具有重要意义。【方法】综合利用岩心、薄片、测井、地震及分析测试等资料, 对沙一下亚段混合沉积类型、分布规律、控制因素、沉积模式及优质储层形成机理进行研究。【结果】沙一下亚段存在混积岩和混积层系 2 种岩石类型, 发育混积砂岩类、混积碳酸盐岩类和混积泥岩类 3 大类、6 小类混积岩, 存在陆源碎屑岩—碳酸盐岩层系、陆源碎屑岩—混积岩层系、碳酸盐岩—混积岩层系、混积岩—混积岩层系 4 种组合、16 种类型; 发育三角洲前缘、滨浅湖、半深湖 3 种混积亚相、8 种混积微相, 混合沉积在横向上相变较快, 纵向上多类型岩石频繁叠置, 平面上各小层沉积特征差异性明显, 发育低水位期和高水位期两种混合沉积模式; 混合沉积受气候及水体环境、构造背景及古地貌、物源供给条件、湖平面升降等因素共同控制; 高能相带发育的砂质滩坝和碳酸盐岩滩坝是有利的混积微相, 封闭咸化水体环境控制优质储层的形成和展布, 沉积旋回控制优质储层的发育程度和分布位置。【结论】西南部古地貌高地发育的混积型滩坝是有利的勘探目标。

关键词 混合沉积; 分布规律; 控制因素; 沉积模式; 控储效应; 沙一下亚段; 蠡县斜坡

第一作者简介 薛辉, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 高级工程师, 储层沉积学, E-mail: XH630445@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

混合沉积是一种特殊的沉积现象^[1], 作为碳酸盐沉积和陆源碎屑沉积之间的过渡类型^[2], 广泛发育于陆相湖泊和海相陆棚、斜坡及台地等环境中^[3-4]。因其特殊的沉积背景^[5], 对了解盆地的古气候、构造运动、海(湖)平面升降、沉积速率以及沉积动力学有特殊的意义^[6-9]。同时, 混合沉积物因具有良好的近油源条件和储集条件^[10], 又是油气运移、富集的重要载体, 受到国内外学者的广泛关注。国外学者在 20 世纪 50 年代开始关注混合沉积现象^[11], 但研究内容多限于岩性和简单产状的描述。20 世纪 80 年代自 Mount^[12]首次提出混合沉积物概念以来, 国内外学者开始对混积岩的分类、成因等进行研究和讨论^[8]。20 世纪 90 年代之后, 对混合沉积机制、控制因素、沉积模式及其与油气关系的研究逐渐成为主要趋势^[13-14]。进入 21 世纪, 国内外学者对混合沉积研究逐渐完善与深入, 主要包括岩石成分、岩性命名等基础理论问题的讨论^[15], 不同沉积背景下混合沉积模式的建立^[2], 混合沉积型油气储层的发现

及其油气地质意义的探讨^[9,16]。前人对混合沉积的研究多集中在海相环境,对陆相湖盆混积岩研究较为薄弱。近年来,随着国内油气勘探开发力度的增大,我国在陆相盆地中陆续发现大量的陆源碎屑—碳酸盐混合沉积现象^[1,17-19],且相继获得重大油气突破,展现出巨大的资源潜力和勘探前景,混合沉积储层作为一种重要的非常规储层^[20],已成为当下油气增储上产的重要领域之一^[21]。

饶阳凹陷蠡县斜坡在沙河街组一段下亚段(以下简称沙一下亚段)沉积时期经历古近系以来最大规模的湖侵^[22],在大的水进背景下又出现多次小规模水退,水进水退的频繁变化叠加研究区宽缓的斜坡背景和隆凹相间的构造格局十分有利于混合沉积的发生^[17]。前人对研究区沙一下亚段的研究主要集中在“尾砂岩”和湖相碳酸盐岩^[23-24]两方面,且多作为两个独立的系统分别研究,将两者的混合沉积作为整体研究相对较少:杜一帆等^[25]分析沙一下亚段混积滩坝沉积和分布特征,认为混积滩坝岩性以灰质砂岩、砂质鲕粒灰岩、生物碎屑灰岩为主,混积滩坝的发育和展布受控于古气候、古物源、古地貌、古水体等地质因素;叶蕾等^[26]分析沙一下亚段沉积环境,认为沙一下亚段发育浅水三角洲和滨浅湖滩坝两种亚相,造成多种岩性混合沉积,以深灰色、灰黑色泥岩、粉砂质泥岩夹灰色细砂岩、粉砂岩、生物碎屑灰岩和白云质灰岩为主。综上所述,前人认为沙一下亚段混合沉积普遍发育,二者相互混杂、交替出现,但对该套混合沉积认识程度较低,尤其是对沉积特征研究还相当薄弱,优质混积岩储层发育机制及分布规律尚不清楚,仍需进行系统规模的研究。

近年来,华北油田针对沙一下亚段混合沉积储层勘探取得重要油气突破,部署5口探井,均获高产工业油流,证实该区混合沉积储层具有巨大的勘探潜力,在随后部署的一些井中也钻遇类似的混积岩储层,但储层品质相差悬殊,试油试采结果差距较大,针对该区沙一下亚段混合沉积特征及控储效应的研究已成为下步勘探开发的核心地质问题。因此,笔者在大量岩心及薄片观察的基础上,结合测井、地震和分析化验等资料,分析沙一下亚段混合沉积的岩石学特征,明确微相类型及分布规律,总结发育模式及控制因素,探讨混合沉积对储层的控制作用,从而预测有利的储层发育区,以期为进一步勘探开发提供理论依据。

1 地质概况

蠡县斜坡位于渤海湾盆地冀中拗陷饶阳凹陷的西部^[27],是在中上元古界碳酸盐岩基底上发育的继承性斜坡,斜坡整体呈北东走向,西抬东倾,地形起伏不大,坡度小于 4° ^[28]。斜坡内北东向断裂与北西向鼻状构造相互配合,构成南北分区、东西分带的构造格局^[29-30](图1a)。蠡县斜坡经历多期幕式构造运动,纵向上依次发育东营组(E_d)、沙一上亚段

(E_{S1}^S)、沙一下亚段 (E_{S1}^X)、沙二段 (E_{S2}) 和沙三段 (E_{S3}) 共 5 套含油层系 (图 1b), 目的层沙一下亚段沉积时期, 地层平缓, 气候温暖湿润, 先后经历湖盆萎缩和扩张 2 个沉积演化阶段, 构成一个完整的三级沉积旋回, 自下而上依次发育三角洲平原、三角洲前缘、滨浅湖、半深湖等沉积亚相, 反映湖退到湖侵的沉积过程^[31]。本文根据岩性组合特征, 将沙一下亚段细分为 I、II、III 等 3 个砂组 (图 1c), III 砂组对应高位体系域, 为辫状河三角洲前缘沉积环境, 以细砂岩、灰质细砂岩、粉砂岩为主, 为区内主力储层发育期; II 砂组为湖侵体系域早期, 主要为滨浅湖沉积环境, 以灰质细砂岩、含砂鲕粒灰岩、泥质灰 (云) 岩、砂质灰 (云) 岩为主, 为混合沉积主要发育期; I 砂组为湖侵体系域晚期, 属于半深湖—湖沉积, 主要发育灰质泥岩、灰质页岩、油页岩等, 是研究区主力烃源岩和优质盖层发育期。

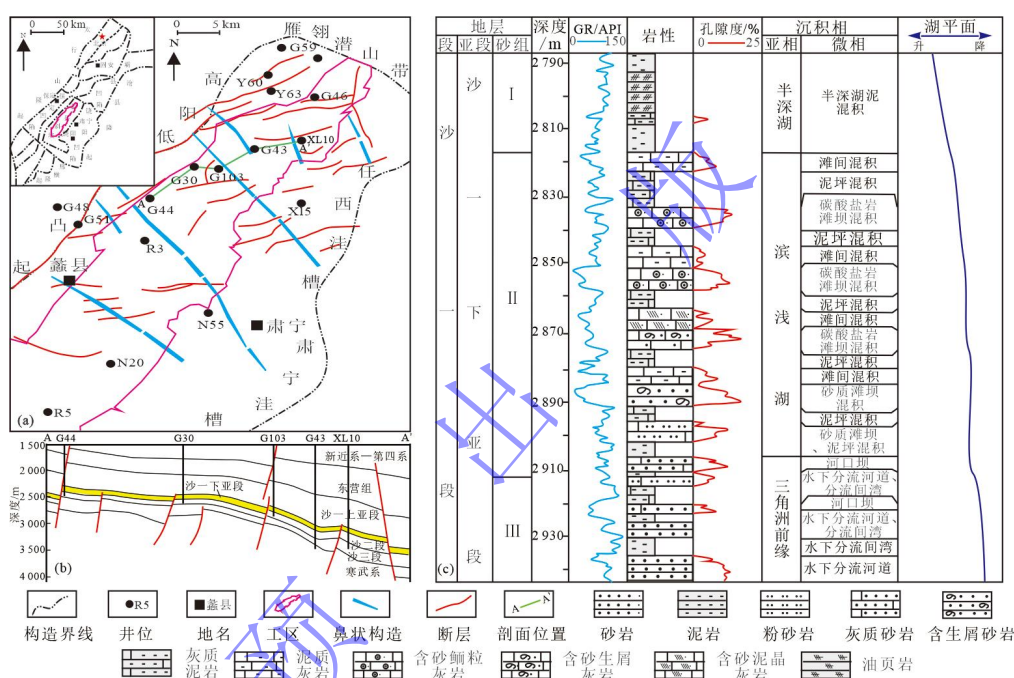


图 1 蠡县斜坡工区概况
(a) 研究区位置图; (b) 剖面位置图; (c) 沙一下亚段地层综合柱状图

Fig.1 Overview of the Lixian Slope

2 岩石学特征

通过对研究区 35 口井的岩心观察与 387 张矿物薄片的分析鉴定, 认为蠡县斜坡沙一下亚段既有同一层系的成分混合沉积, 也有互 (夹) 层混合沉积, 即存在狭义和广义两种混合沉积类型^[32], 狭义的混合沉积构成混积岩, 广义混合沉积构成混积层系。

2.1 混积岩

目前, 国内外关于混积岩的命名和分类尚未统一^[33-34]。本文在 Mount^[12]分类方案基础上, 参考张雄华等^[35]提出的三端元分类法, 依据组分含量的差异将研究区沙一下亚段混积岩划

分混积砂岩类、混积碳酸盐岩类、混积泥岩类 3 大类，可进一步细分为 6 种类型（表 1）。

表 1 蠡县斜坡沙一下亚段混积岩划分方案

Table 1. Mixed rock division of the Lower First Member of Shahejie Formation in Lixian Slope

混积岩类型	主要岩性
混积砂岩类	含碳酸盐岩颗粒砂岩 灰（云）质砂岩
混积碳酸盐岩类	含砂颗粒灰（云）岩 含砂泥晶灰（云）岩 含泥（泥质）灰（云）岩
混积泥岩类	灰（云）质泥岩

含碳酸盐岩颗粒砂岩。灰色—浅灰色，见块状层理（图 2a），该类岩石以陆源碎屑为主，含量在 60%~90%之间，碳酸盐颗粒含量在 10%~25%之间，颗粒类型主要为鲕粒、生物碎屑及砂屑（图 2b, c），颗粒粒径较小，0.1~0.3 mm。研究区含碳酸盐岩颗粒砂岩多形成于水动力较强且陆源碎屑供应不足的沉积环境中。

含灰（灰质）砂岩。灰色，见平行层理（图 2d），偶见小型交错层理，岩石中陆源碎屑含量较高，在 50%~90%之间，陆源碎屑中石英含量最高（图 2e），65%~75%，粒径 0.1~0.25 mm，分选中等，次圆—次棱角状，见少量的碳酸盐矿物，多为泥粉晶结构，含量在 15%~25%之间，也见少量碳酸盐颗粒。含灰（灰质）砂岩多形成于三角洲前缘或滨浅湖滩坝等浅水蒸发环境中。

含砂颗粒灰（云）岩。灰色、灰黑色，块状（图 2f），岩石中碳酸盐岩颗粒含量在 50%~75%之间，颗粒类型主要为鲕粒和生物碎屑（图 2g~h），含有少量内碎屑（图 2i），其中，鲕粒大小一般在 0.2~0.4 mm 之间，呈同心圆状排列，核心多为石英、砂屑、生物介壳等。含砂颗粒灰（云）岩中陆源碎屑含量较少，5%~25%之间，以石英为主，长石较少，碎屑颗粒多为次棱角—次圆状，零散分布于碳酸盐颗粒之间（图 2j），分选性和磨圆度均较差，粒径 0.1~0.2 mm。含砂颗粒灰（云）岩多形成于物源供给不充分的高能浅水环境。

含砂（砂质）泥晶灰（云）岩。灰褐色—浅灰色，块状（图 2k），岩石中碳酸盐含量超过 70%，成分主要为方解石或白云石，泥粉晶结构，有一定数量的陆源碎屑混入（图 2l），含量在 15%~30%之间，陆源碎屑不均匀分布在碳酸盐岩基质中，偶见砂屑、鲕粒和生物碎屑颗粒。含砂泥晶灰（云）岩主要形成于浅湖较低能环境中。

含泥（泥质）灰（云）岩。灰色—灰黑色，见泥质纹层（图 2m），该类岩石中碳酸盐矿物含量大于 50%，多为粉晶、泥晶结构，见少量鲕粒、螺类、介形虫等（图 2n）。泥质含量较高，在 15%~45%之间，粉砂、砂级陆源碎屑含量较少。含泥（泥质）灰（云）岩多

形成于局限封闭静水环境。

灰(云)质泥(页)岩。灰色—深灰色,黑色,具有水平层理(图2o),富含有机质,泥质含量超过50%,见层理缝,多被方解石填充(图2p),碳酸盐岩矿物含量在10%~45%之间,含少量石英、长石等陆源碎屑,该类岩石多形成于水动力条件较弱的静水还原环境中。

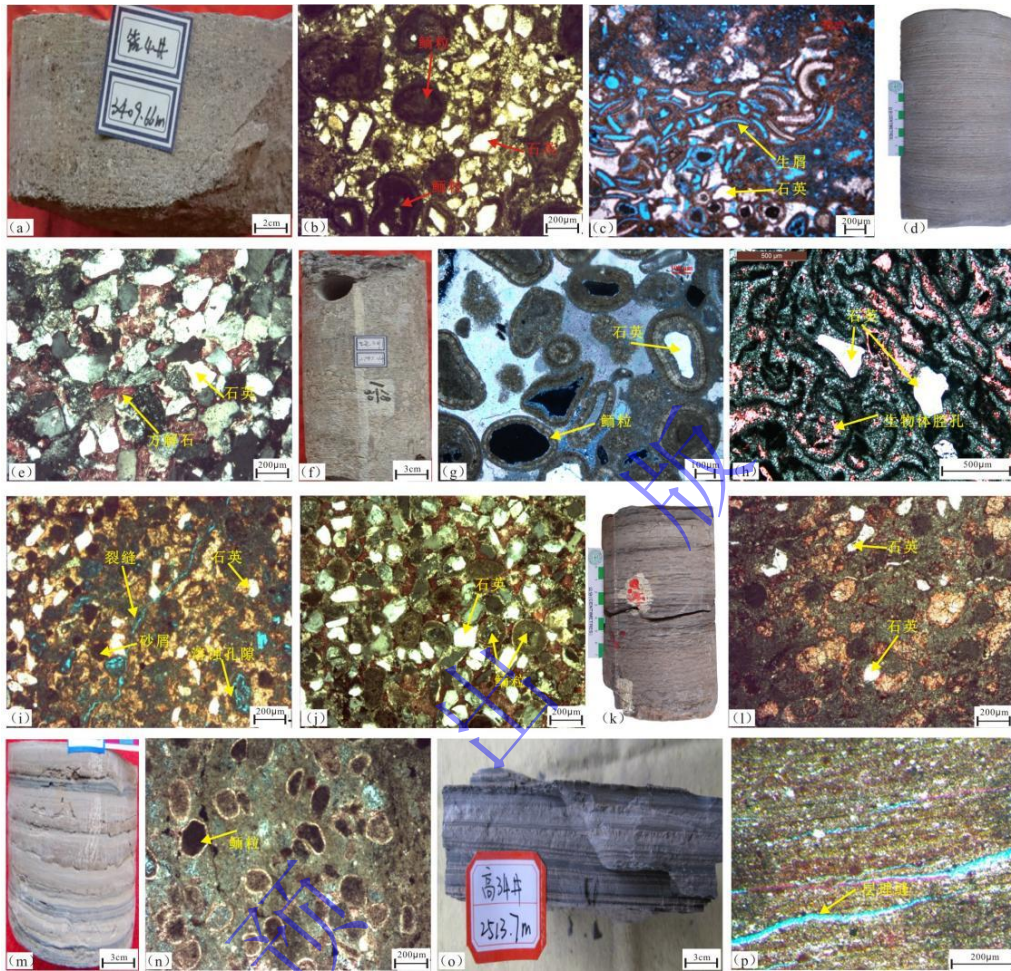


图2 蠡县斜坡沙一下亚段混积岩石学特征

(a) 含鲕粒细砂岩, R4井, 3 409.6 m; (b) 含鲕粒细砂岩, G28井, 2 425.1 m, 单偏光; (c) 含生屑细砂岩, G37井, 2 570.2 m, 蓝色铸体; (d) 灰质细砂岩, 平行层理, N45井, 3 634.2 m; (e) 灰质砂岩, G108井, 2 469.6 m, 单偏光; (f) 灰色含砂颗粒灰岩, R3井, 2 797.3 m; (g) 含砂鲕粒灰岩, G37井, 2 574.8 m, 单偏光; (h) 含砂质生屑灰岩, 见生物体腔孔, G104井, 2 589.1 m, 单偏光; (i) 含砂屑灰岩, 见裂隙, G118井, 2 341.8 m, 蓝色铸体; (j) 含鲕粒细砂岩, G105井, 2 450.2 m, 单偏光; (k) 含砂泥晶灰岩, 滴酸起泡, N45井, 3 631.2 m; (l) 含砂泥晶灰岩, G104, 2 635.3 m, 单偏光; (m) 泥质灰岩, 见泥质纹层, G34, 2 513.3 m; (n) 泥质灰岩, 见鲕粒, G105井, 2 451.6 m, 单偏光; (o) 灰质页岩, 水层层理, G34, 2 513.7 m; (p) 灰质泥岩, 见层理缝, 方解石半填充, N55, 3 712.2 m, 单偏光

Fig.2 Mixed rock petrological characteristics in the Lower First Member of the Shahejie Formation, Lixian Slope

2.2 混积层系

物源供给和湖平面升降变化,使得碳酸盐岩、陆源碎屑岩、混积岩在垂向上频繁交互^[36],形成混积层系。本文参考董桂玉等^[6]的分类方法,依据岩性组合方式,认为蠡县斜坡沙一下亚段存在陆源碎屑岩—碳酸盐岩层系、陆源碎屑岩—混积岩层系、碳酸盐岩—混积岩层系、混积岩—混积岩层系4种混积层系,依据组合关系可进一步划分出16种类型(图3),各

种混积层系常相互叠加，交替发育，形成复杂的混合沉积复合体。

陆源碎屑岩—碳酸盐岩层系。此类混积层系在区内最为普遍，主要有细砂岩与颗粒灰岩、细砂岩与泥晶灰（云）岩 2 种类型。细砂岩与颗粒灰岩混积层系中细砂岩为沉积主体（图 3a），岩性较细，分选性较好，灰色，颗粒灰岩薄层状产出，灰色、灰褐色，主要为生物灰岩，此类混积层系主要形成于距离物源较近的滨浅湖区域。细砂岩与泥晶灰（云）岩混积层系中砂岩粒度较细，以粉—细砂为主，泥晶灰岩颜色主要为灰色、深灰色，泥—粉晶结构，二者以互层或夹层形式出现，厚度均较薄，垂向上夹杂在厚层泥岩当中（图 3b），说明沉积时水动力较弱，多发育在水下分流间湾微相中。

陆源碎屑岩—混积岩层系。此类混积层系在区内广泛发育，主要表现为泥岩与砂质灰岩、泥岩与泥质灰岩、泥岩与灰质砂岩、泥岩与灰质泥岩、细砂岩与灰质细砂岩、细砂岩与泥质灰岩、细砂岩与砂质灰岩等 7 种类型。泥岩与砂质灰岩混积层系中泥岩为灰色，砂质灰岩为褐灰色，二者互层状产出（图 3c），说明沉积时水体能量变化较快，主要形成于向上变浅的滨浅湖环境中。泥岩与泥质灰岩混积层系中泥岩呈灰色、深黑色，泥质灰岩多以薄层状形式产出（图 3d），灰色，多形成于远离陆源的水体安静的泥坪环境中。泥岩与灰质细砂岩混积层系中二者互层分布（图 3e），泥岩灰色、灰绿色，说明沉积时水体能量不稳定，主要发育在间歇性废弃的水下分流河道微相中。泥岩与灰质泥岩混积层系中泥岩厚度较大（图 3f），灰色—灰黑色，灰质泥岩厚度较薄，此类混积层系主要形成于物源供给不足、水动力条件较弱的泥坪或水下分流间湾微相中。细砂岩与灰质细砂岩混积层系中细砂岩为沉积主体（图 3g），灰质细砂岩多表现为夹层形式，砂岩分选性较好，说明沉积时陆源碎屑供给较为充分，主要形成于水动力较强的水下分流河道或砂质滩坝混积微相中。细砂岩与泥质灰岩混积层系中二者互层状产出（图 3h），厚度较薄，砂岩以细砂为主，夹少量粉砂，泥质灰岩主要为灰色，泥晶结构，此类混积层系主要形成靠近陆源一侧的砂质滩坝混积微相中。细砂岩与砂质灰岩混积层系同细砂岩与泥质灰岩混积层系一样，薄层状产出（图 3i），夹杂在厚层泥岩之中，主要形成于砂质滩坝混积微相中。

碳酸盐岩—混积岩层系。此类混积层系在研究区比较少见，主要为颗粒灰岩与灰质细砂岩、颗粒灰岩与灰质页岩、泥晶灰岩与泥质灰岩、泥晶灰岩与灰质泥岩 4 种。颗粒灰岩与灰质细砂岩混积层系中以大套厚层状的鲕粒灰（云）岩或生屑灰（云）岩为主（图 3j），底部为薄层状的灰质细砂岩，主要形成于陆源碎屑供给较少的碳酸盐岩滩坝混积微相中。颗粒灰岩与灰质页岩混积层系中底部为鲕粒灰岩，向上突变为灰质页岩（图 3k），灰色、灰黑色，推测为水体突然变深，主要形成于碳酸盐岩滩坝靠近湖心一侧。泥晶灰岩与泥质灰岩混积层

系中二者厚度都较薄，互层状分布（图 3l），泥晶灰岩为灰色，以灰泥为主，泥质灰岩灰黑色，夹泥质条带，主要形成于滩间混积微相中。泥晶灰岩与灰质泥岩混积层系中泥晶灰岩以薄层夹在灰质泥岩中（图 3m），灰质泥岩灰黑色，该类混积层系主要形成于水动力较弱的滩间或半深湖泥混积微相中。

混积岩—混积岩层系。此类混积层系在研究区较为常见。主要表现为灰质细砂岩与砂质灰岩、灰质泥岩与泥质灰岩、灰质细砂岩与泥质灰岩 3 种类型。灰质细砂岩与砂质灰岩混积层系中二者多以互层形成产出（图 3n），灰质细砂岩呈灰色，以细砂为主，砂质灰岩呈深灰色，形成于水动力较强的砂质滩坝或碳酸盐滩坝混积微相中。灰质泥岩与泥质灰岩混积层系中泥质灰岩以薄层状夹杂在灰质泥岩之中（图 3o），颜色多为灰黑色，主要形成于水体较安静的滩间或半深湖泥混积微相中。灰质细砂岩与泥质灰岩混积层系中二者互层状产出（图 3p），灰质细砂岩呈灰色，泥质灰岩呈深灰色，主要形成于向上变深的沉积环境中，受陆源碎屑影响较少，主要发育在滩间混积微相中。

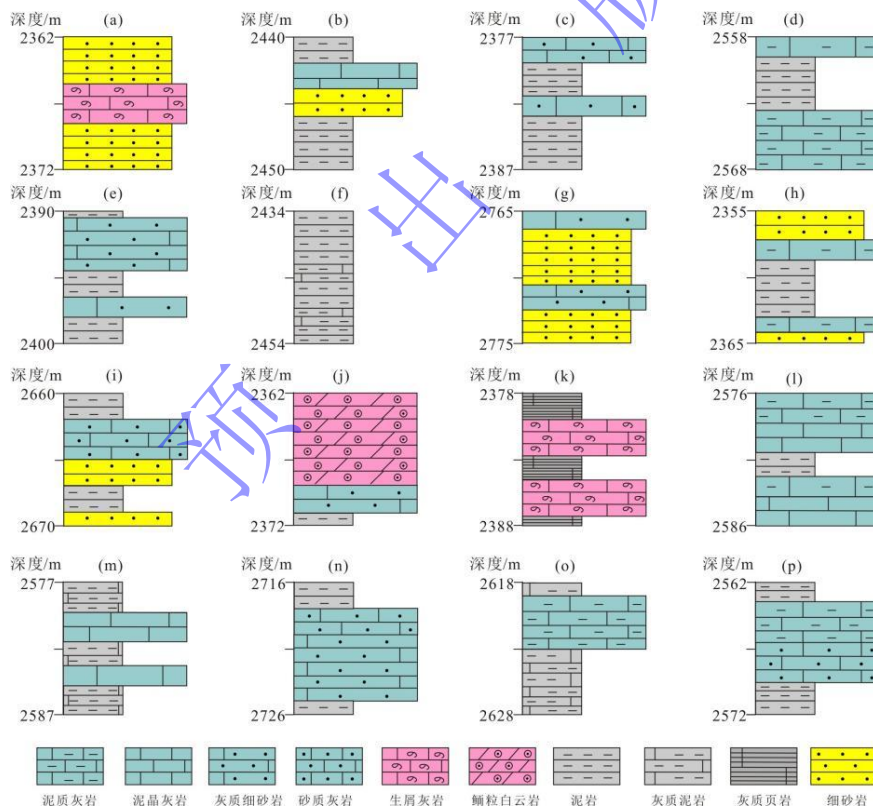


图 3 蠡县斜坡沙一下亚段混积层系类型

(a) 细砂岩与颗粒灰岩混积层系，G16 井；(b) 细砂岩与泥晶灰岩混积层系，G105 井；(c) 泥岩与砂质灰岩混积层系，G115 井；(d) 泥岩与泥质灰岩混积层系，G104 井；(e) 泥岩与灰质细砂岩混积层系，G35-5 井；(f) 泥岩与灰质泥岩混积层系，G30-12 井；(g) 细砂岩与灰质细砂岩混积层系，G33 井；(h) 细砂岩与泥质灰岩混积层系，G30-100 井；(i) 细砂岩与砂质灰岩混积层系，G38 井；(j) 鲕粒白云岩与灰质砂岩混积层系，G11 井；(k) 生屑灰岩与灰质页岩混积层系，G30-86 井；(l) 泥晶灰岩与泥质灰岩混积层系，G35 井；(m) 泥晶灰岩与灰质泥岩混积层系，G30-70 井；(n) 灰质细砂岩与砂质灰岩混积层系

系, G27 井: (o) 灰质泥岩与泥质灰岩混积层系, G24 井: (p) 灰质细砂岩与泥质灰岩混积层系, G35-2 井

Fig.3 Types of mixing in sedimentary system of the Lower First Member, Shahejie Formation, Lixian Slope

3 混合沉积亚相类型、分布及沉积模式

3.1 沉积亚相类型

目前, 国内外关于混合沉积的沉积相定义、微相的划分没有统一的方案^[37]。在此, 笔者依据研究区特殊的沉积环境及在该环境下形成的混合沉积物特征的综合, 在岩心观察基础上, 结合测井曲线及地震响应特征, 认为研究区混合沉积主要发生在三角洲前缘、滨浅湖、半深湖 3 种亚相中。

3.1.1 三角洲前缘混积亚相

该类混积亚相发育较少, 主要分布在蠡县斜坡西南部, 该区距离湖岸线较远, 当陆源碎屑供应充足时, 三角洲前缘朵体不断向东北方向进积, 碳酸盐生长受到抑制, 混合沉积不发育; 当物源供应不稳定, 三角洲前缘朵体向西南方向退积, 在沉积间歇期可导致碳酸盐矿物在原先沉积的砂质基底上生长, 形成混积层系。研究区三角洲前缘混积亚相整体上仍具有三角洲前缘的沉积特征, 主要发育在三角洲前缘远端, 由于河道输砂能力减弱, 有利于混合作用发生, 依据不同的沉积部位可进一步划分为水下分流河道、河口坝、水下分流间湾 3 种微相。此 3 种微相在垂向上与滨浅湖亚相互层形成混积层系。

水下分流河道微相。河道底部常发育厚层的细砂岩或灰质细砂岩, 是由于陆源碎屑供应不足, 碳酸盐矿物析出与碎屑物质混合形成, 上部由于水体安静, 发育泥岩、灰质泥岩(图 4a), 在测井曲线上自然伽马曲线呈齿状钟型, 电阻率中高值, 地震上表现为顶平底凸的特征, 同相轴表现为中—弱振幅、弱前积反射特征。

河口坝微相。该类微相底部为灰黑色泥岩或粉砂岩, 向上过渡为灰质细砂岩或含生物碎屑细砂岩(图 4b), 垂向上表现为向上变粗的反韵律, 自然电位曲线呈漏斗形, 电阻率下小上大, 地震上表现为顶凸底平特征, 同相轴表现为中—弱振幅、断续特征。

水下分流间湾微相。该类微相位于三角洲前缘低洼处, 水动力条件较弱, 岩性主要为厚层灰色泥岩夹薄层泥晶灰岩或泥质灰岩(图 4c), 自然电位曲线表现为平直形、微幅指形, 电阻率低值, 地震上同相轴较为连续, 表现为中—弱振幅特征。

3.1.2 滨浅湖混积亚相

滨浅湖亚相主要发育在研究区中东部, 依据形成环境及岩性特征可进一步划分为泥坪、砂质滩坝、碳酸盐岩颗粒滩坝、滩间等 4 种混积微相。

泥坪混积微相。该类微相处于陆相与湖相的过渡带^[38], 波浪和湖流作用都较弱, 岩性

主要为灰（云）质泥岩、灰（云）质粉砂岩，少量泥质灰岩、泥岩，见水平层理和植物碎片，主要发育陆源碎屑岩—混积岩层系和混积岩—混积岩层系（图 4d）。泥坪混积微相中泥质含量较高，自然电位曲线较为平直，局部指形，电阻率为中低值，地震振幅能量中等，较为连续，平行—亚平行状。

砂质滩坝混积微相。该类微相主要发育在水体较浅、水动力作用较强的滨浅湖地区，且多分布在纯砂质滩坝靠湖一侧^[39]，岩性以浅灰色、灰白色含灰或灰质细砂岩为主，中厚层状，砂质滩坝混积微相中砂质含量在 60%~80%之间，以石英为主，分选性较好，磨圆度较高，含有少量鲕粒、异地搬运来的生物碎屑颗粒及砂屑。砂质滩坝混积微相在相序上表现为向上变粗的反韵律，主要发育陆源碎屑岩—混积岩层系（图 4e）。测井曲线特征同河口坝类似，自然电位一般为低幅齿化漏斗形，电阻率中低值，地震上呈丘状反射，中—强振幅。

碳酸盐岩滩坝混积微相。该类微相多发育于靠近湖心一侧的古地貌隆起处，水动力较强，陆源碎屑供给较少，是碳酸盐颗粒与碎屑颗粒混合的最佳场所^[40]。该相带形成的混积岩主要为含砂颗粒灰（云）岩，含少量砂质泥晶灰（云）岩，具有生物碎屑含量高、泥质含量低的特点，主要发育陆源碎屑岩—碳酸盐岩层系和陆源碎屑岩—混积岩层系（图 4f）。自然伽马曲线呈箱形或齿化箱形，电阻率中高值，地震响应特征与砂质滩坝混积微相相似，同向轴波状起伏。

滩间混积微相。该类微相发育在混积型滩坝间的滨浅湖区域，位于最低湖水面和浪基面之间的低洼地带，水体能量较低，岩性主要为浅灰色、灰色泥（砂）质灰（云）岩，少量灰绿色灰（云）质泥岩，见细小水平层理，主要发育陆源碎屑岩—混积岩层系（图 4g）。自然电位曲线呈指形，电阻率中低值，地震上同相轴中—强振幅、连续性较差、杂乱状。

3.1.3 半深湖混积亚相

半深湖混积亚相发育在浪基面以下水体较深的部位，该区靠近湖盆中心区域，水体安静，主要发育半深湖泥混积微相。

半深湖泥混积微相。主要发育在研究区东北部、东部，该区水动力条件较弱，岩性主要为厚层深灰色、灰黑色泥岩，夹薄层灰（云）质泥（页）岩，含少量泥质灰（云）岩，多见水平层理，半深湖泥混积微相主要发育陆源碎屑岩—混积岩层系和混积岩—混积岩层系（图 4h）。自然伽马曲线一般为低幅齿形或平直形，电阻率中低值，地震上表现为中—强振幅、连续性较好、平行状。

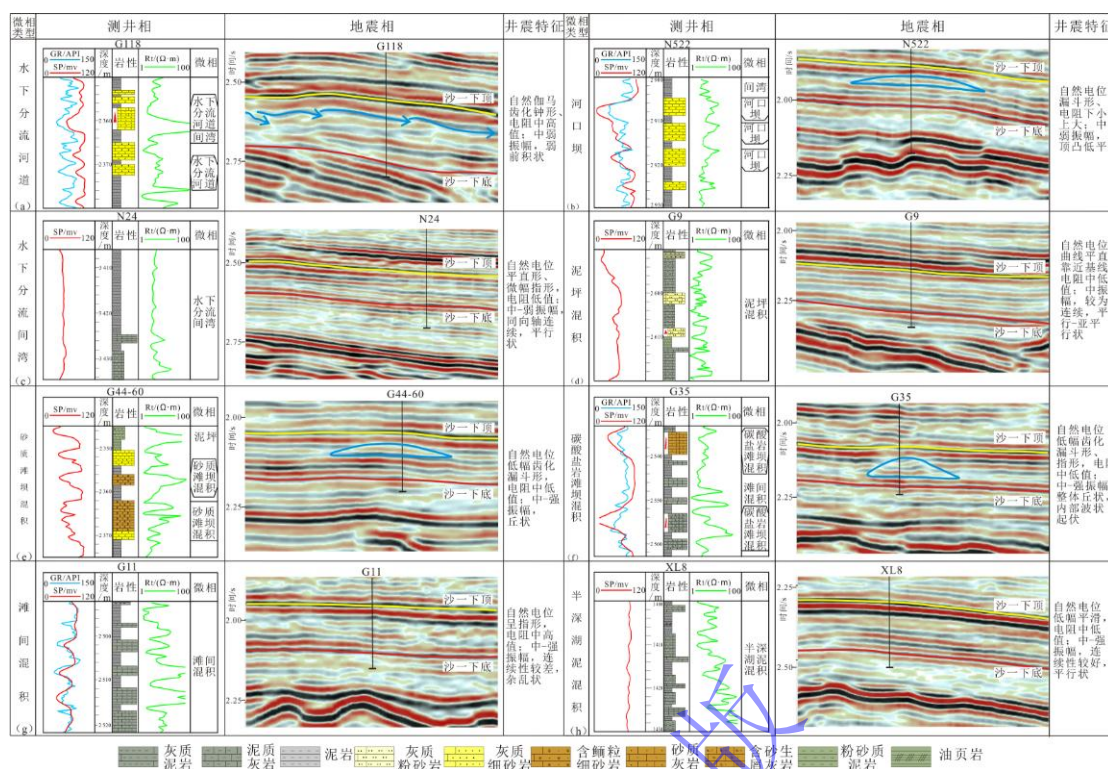


图 4 蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积不同微相井震特征

Fig.4 Well logs and seismic sections of mixed sediments with different microfacies, Lower First Member, Shahejie Formation, Lixian Slope

3.2 沉积微相分布特征

3.2.1 纵横向分布

蠡县斜坡沙一下亚段沉积时期，主要发育西南方向太行山地区物源，伴随构造沉降及气候转向温润，湖侵开始，随着湖平面的上升和周期性的震荡，混合沉积开始发育。近东北方向 A—A' 连井剖面可以看出（图 5a），III 砂组沉积时期，研究区整体处于低水位期，陆源碎屑供应较为充分，在西南部靠近物源区，主要发育三角洲前缘水下分流河道，河口坝微相零星发育；中部处于滨浅湖环境，分别发育泥坪和砂质滩坝混积微相；东北部基本处于半深湖环境，发育半深湖泥混积微相。II 砂组沉积时期，处于湖侵体系域早期，随着湖平面上升，西南部三角洲前缘砂体向物源方向退积，水下分流河道微相发育范围较小，该时期滨浅湖范围较大，在靠近物源方向主要发育砂质滩坝混积微相；在地势低洼区主要发育滩间混积微相；远离物源区的水下古隆起主要发育碳酸盐岩滩坝混积微相；东部水体较深，发育半深湖泥混积微相。I 砂组沉积时期，研究区整体进入湖侵体系域晚期，该时期湖盆范围最大，在西南方向水动力较强，主要发育碳酸盐岩滩坝混积微相，且越靠近湖心方向，碳酸盐岩颗粒含量越少，在滩间低洼区发育滩间混积微相；中东部水体较深，主要发育半深湖泥混积微相。从近东北剖面可以看出，横向上沉积环境由三角洲前缘向滨浅湖、半深湖过渡，相变较快，水

下分流河道、河口坝、砂质滩坝和碳酸盐岩滩坝等混积微相分布不稳定，连续性差；纵向上随着水体逐渐变深，多类型的混合沉积叠置复合发育。

从近北西向 B—B'剖面可知（图 5b），III 砂组沉积时期，研究区西南部陆源碎屑供应较为充分，主要发育三角洲前缘水下分流河道微相；东南部水体较深处陆源供应不足，主要发育泥坪混积微相，在古地貌高地，发育砂质滩坝混积微相。II 砂组沉积时期，湖侵开始，三角洲前缘分布范围减小，湖盆范围扩大，在地势较高处，发育砂质滩坝混积微相，同时由于水体逐渐变深，物源供应不足，在砂质滩坝混积微相上部见碳酸盐滩坝混积微相发育。I 砂组沉积时期，湖盆范围最大，在近物源区砂质滩坝混积微相发育；在远离物源的中部地区，碳酸盐滩坝混积微相发育；东部水体较深，主要发育半深湖泥混积微相。从近北西向剖面可以看出，横向上各混积微相有一定连续性，自西向东厚度有逐渐减薄趋势；纵向上随着水体逐渐变深，混积岩类型由混积砂岩类向混积碳酸盐岩类、混积泥岩类转变。

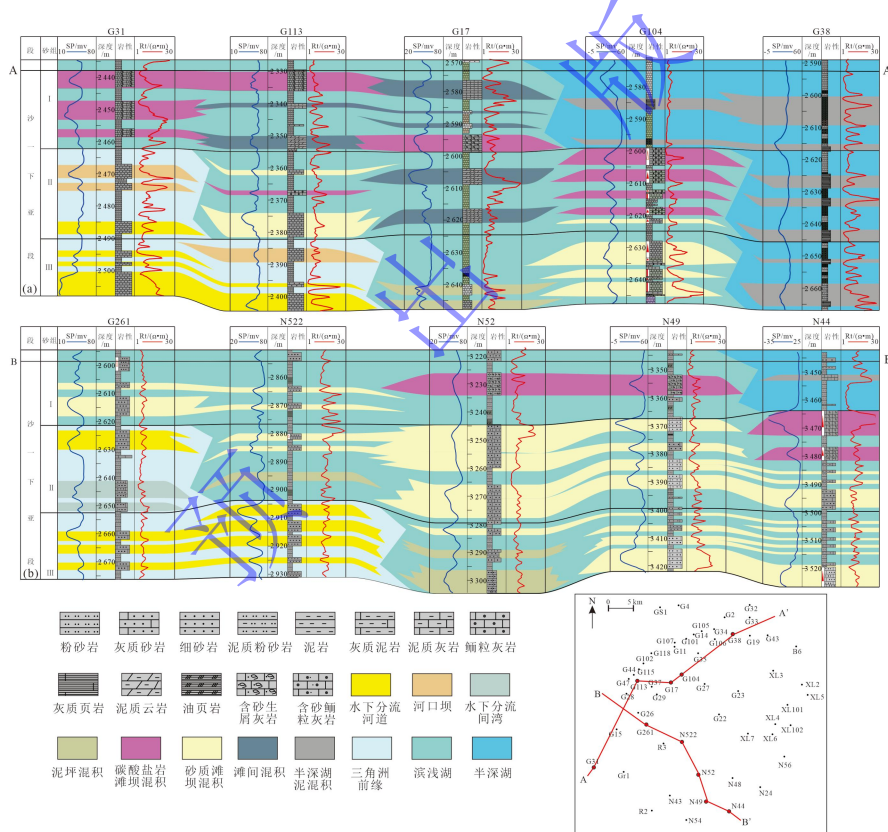


图 5 蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积连井剖面

(a) 平行物源方向；(b) 垂直物源方向

Fig.5 Cross-well section of facies in mixed sediments, Lower First Member, Shahejie Formation, Lixian Slope

3.2.2 平面分布特征

蠡县斜坡沙一下亚段沉积时期具有西南高、北东低的古地貌特点，地层整体宽缓，具有隆凹相间的构造格局。根据单井相、连井相及地震相分析，编制各个小层沉积微相图（图 6）。

III 砂组沉积时期，气候干热，湖平面较低，在西南部 G44、G47、G28 等井区发育三角洲前缘水下分流河道微相（图 6a），该区受陆源碎屑的影响严重，混合沉积不发育；在 G29、G37、G11 等井区属于三角洲前缘前端，陆源碎屑供给不充分，主要发育水下分流河道混积微相；同时，由于河流分叉、砂体卸载，在 G107 井区发育河口坝混积微相；研究区中部基本进入滨浅湖环境，在局部古地貌高地形成砂质滩坝混积微相，如 G2 井区；在滩间低洼区域主要发育滩间混积微相，如 G34 井区；研究区东部大部分地区都处于半深湖沉积环境，水体较为安静，在 G43 井区发育半深湖泥混积微相。III 砂组沉积时期，西南部陆源碎屑供给量充分，混合沉积主要分布在研究区中东部。

II 砂组沉积时期，湖侵开始，湖平面缓慢上升，西南部三角洲前缘相带范围减小，水下分流河道延伸不远（图 6b），滨浅湖范围较大，G29 井区主要发育砂质滩坝混积微相；在靠近湖心一侧的水下古隆起区，如 G27、G2、G23 等井区，陆源碎屑供给较弱，主要发育碳酸盐岩滩坝混积微相；在研究区东部 XL4、XL6 井区，水体较深，主要发育半深湖泥混积微相。II 砂组沉积时期，陆源碎屑供给减少，西南部三角洲前缘砂体不断向物源方向退积，在中东部局部古地貌高地上见砂质滩坝和碳酸盐岩滩坝混合沉积，混积滩坝大致呈南北走向，表现为透镜状或孤立状，该时期混合沉积类型多、规模大。

I 砂组沉积时期，湖平面不断上升，研究区西南部 G28、G27、G4 等井区发育滨浅湖沉积，其他大部分区域处于半深湖沉积环境（图 6c）。西南部 G26、G44 等井区主要发育砂质滩坝混积微相；远离物源区如 G104、G27 井区，陆源碎屑供给较少，主要发育碳酸盐岩滩坝混积微相；中部 G19、G23 井区水体较深，主要发育半深湖泥混积微相。I 砂组沉积时期主要发育滩坝混积微相，但滩坝规模较小，在平面上连续性差。

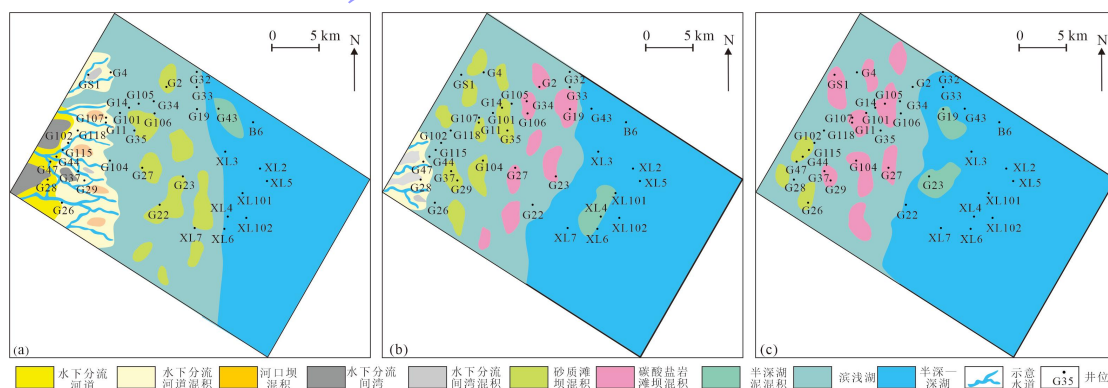


图 6 蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积微相特征

(a) III 砂组沉积微相；(b) II 砂组沉积微相；(c) I 砂组沉积微相

Fig.6 Mixed sedimentary microfacies characteristics in the Lower First Member of the Shahejie Formation, Lixian Slope

3.3 混合沉积模式

在上述对蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积特征研究的基础上,认为研究区存在低水位期和高水位期两种混积模式。低水位期主要对应III砂组沉积时期,该期湖平面较低,可容空间较小(图7a)。研究区西南部物源供应充足,三角洲前缘砂体不断向东北方向进积,水下分流河道迁移改道频繁,河口坝不发育,沉积的岩性以陆源碎屑为主,碳酸盐岩生长受到抑制,混合沉积作用不明显,在三角洲前缘前端,由于物源供应能力降低,发育水下分流河道微相,在三角洲砂体边缘靠近滨浅湖区域,发育泥坪混积微相。在水下古隆起区发育砂质滩坝混积,形成的混积岩中陆源碎屑含量较高,主要发育砂岩—灰质砂岩混积层系。在滩间低洼区,水动力较弱,物源供应不足,主要发育泥岩—泥质灰岩混积层系。在东部靠近湖心一侧,水流不畅,岩性颗粒较细,为半深湖泥混积微相,主要发育泥岩—灰质泥岩混积层系。

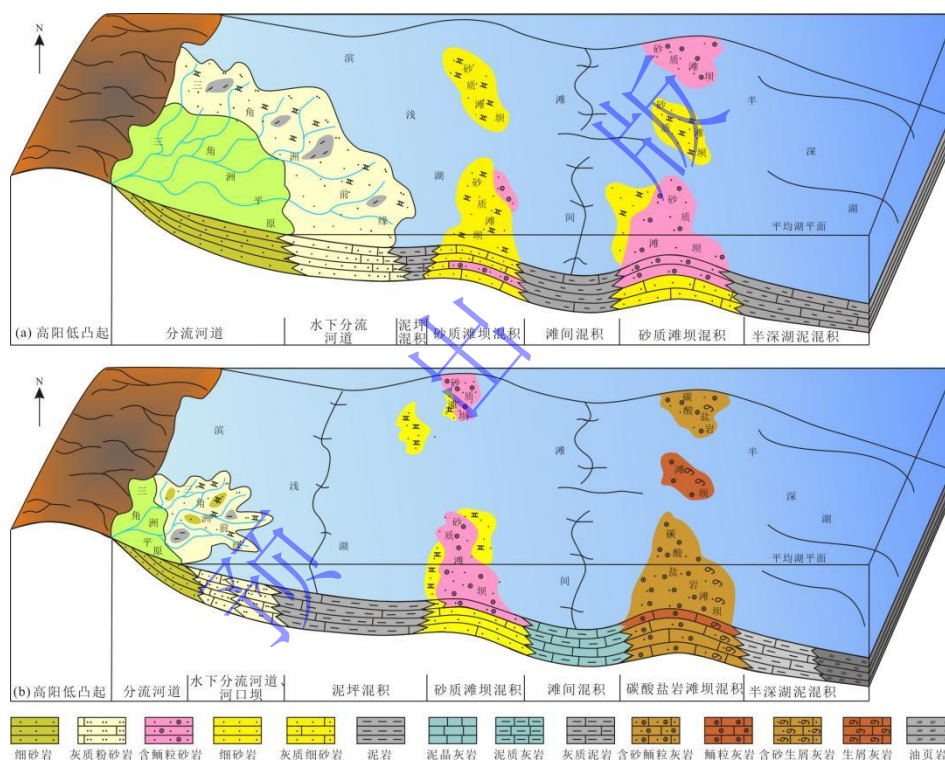


图7 蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积模式

(a) 低水位期沉积模式; (b) 高水位期沉积模式

Fig.7 Models of mixed sedimentary rock in the Lower First Member of the Shahejie Formation, Lixian Slope

高水位期主要对应II、I砂组沉积时期,该时期由于大规模的湖侵,湖平面较高,物源供应能力减弱,三角洲砂体向西南方向退积,研究区大部分地区处于浪基面以下(图7b)。因物源供应有限,河流携带的沉积物容易在河口位置卸载堆积形成河口坝微相,岩性以陆源碎屑为主,主要发育细砂岩—灰质细砂岩混积层系。同时,由于水下分流河道改道或者废弃,水下分流间湾微相发育,主要发育泥岩—灰质泥岩混合层系。在三角洲前缘与滨浅湖过渡区域,水动力条件较弱,主要发育泥坪混积微相。在近物源方向一侧水下古隆起区,受河流—

三角洲物源体系控制形成砂质滩坝混积微相, 该区陆源碎屑物质含量较多, 主要发育细砂岩—灰质细砂岩混合层系。在远离物源方向的低隆区, 陆源碎屑供给严重不足, 主要发育碳酸盐岩滩坝混积微相, 该区碳酸盐岩成分占主体。在滩间低洼区, 湖水闭塞, 主要发育灰质泥岩—泥质灰岩混积层系。东部水体较深, 水动力较弱, 主要发育半深湖泥混积微相。

4 混合沉积控制因素

4.1 气候及水体环境

气候与水体环境通过影响降水及干湿过程, 进而影响碳酸盐岩的发育、分布及产出率变化, 对混积岩的形成和分布具有重要的控制作用^[25]。据殷杰等^[41]对沙一下亚段古生物孢粉资料分析, 认为代表温暖、潮湿背景的落叶阔叶树的栎粉属占多数, 平均含量可达 30%, 也见含量在 10%~15%之间的麻黄粉属, 蕨类孢子很少, 说明沙一下亚段沉积时期气候条件相对干旱。另外, 分析研究区沙一下亚段 13 口井的微量元素, 发现 Sr/Cu 值分布于 3.33~8.86 之间, 平均 5.31, Sr/Ba 值分布于 0.39~1.81 之间, 平均 0.76; Th/U 值分布于 1.32~7.18 之间, 平均 3.87, 以上参数均指示沙一下亚段沉积时期气候总体属于相对干旱状态, 且为微咸水—半咸水环境, 该环境十分有利于藻类、螺类、介形虫等生物生长和碳酸盐岩的发育, 与陆源碎屑一起形成同层混合和互(夹)层式混合沉积物。因此, 炎热干旱的气候与咸化的水体环境, 是研究区混积岩、混积层系广泛发育的根本条件。

4.2 构造背景与古地貌

混合沉积多发育在相对稳定的构造背景中, 正向古地貌单元是混合沉积发育和分布的主要位置^[2]。蠡县斜坡沙一下亚段沉积时期, 湖盆进入裂陷扩张期, 构造活动较弱, 地层稳定沉降, 湖平面上升, 在研究区西南部, 古地貌较高, 盆广水浅, 阳光充足, 营养丰富, 有利于生物繁殖和碳酸盐岩发育, 该区受波浪和湖流作用较强, 易与陆源碎屑混合形成混合沉积体系, 垂向上多表现为碳酸盐岩与碎屑岩间互沉积。沙一上亚段沉积时期, 研究区进入断坳抬升期, 西南部物源供应充分, 不利于混合沉积形成, 该时期以大型三角洲沉积为主。

蠡县斜坡具有隆凹相间的构造格局^[24], 统计发现研究区 80%以上的混合沉积发育在西南部相对高的古地貌上。在斜坡中部, 古地貌相对较低, 水体较为安静, 形成的混合沉积物中碳酸盐颗粒含量较少, 岩性主要为泥质灰岩、灰质泥岩。在斜坡东部, 古地貌更加低洼, 混合沉积不发育。因此, 稳定的构造背景和正向古地貌是混合沉积形成的重要条件。

4.3 物源供给条件

陆源碎屑物质的供给直接影响混合沉积的组分特征和发育规模^[36]。前人研究表明, 陆

源碎屑供给与碳酸盐岩沉积具有此消彼长的关系^[42]。在沙一下亚段沉积时期，研究区西南部物源供给不稳定，洪水期陆源碎屑供给量较大，对碳酸盐岩沉积具有一定的抑制作用，形成的混积岩中陆源碎屑含量较多；间歇期物源供给减少，在适宜的水体环境和古地貌背景下，生物和碳酸盐岩开始大量发育，形成的混积岩中碳酸盐含量较高。研究区中东部，陆源碎屑供给较少，水体较深，混积岩中泥质含量较高。因此，物源供给强弱是控制混合沉积的一个重要因素。

4.4 湖平面升降

湖平面升降通过控制陆源碎屑物质的供给和碳酸盐岩的发育程度来影响混合沉积的进行^[14]。蠡县斜坡在Ⅲ砂组沉积时期，湖平面较低，西南方向的物源不断向湖盆中心进积，形成的混合沉积物以陆源碎屑为主，灰岩以及泥（砂）质灰岩呈薄层状产出。Ⅱ砂组沉积时期，湖平面有所上升，陆源碎屑逐步向物源方向退积，充足的可容空间为碳酸盐岩沉积提供了有利的条件，该时期形成以碳酸盐岩占主体的混合沉积物，纵向上表现为鲕粒灰岩、生屑灰岩与陆源碎屑一起形成同层式或互层式混合。Ⅰ砂组沉积时期，湖平面最高，湖盆范围最大，该时期碳酸盐产率降低甚至完全停止，主要形成由灰质泥岩、泥灰岩、油页岩、泥岩构成的混积层系。

综上所述，研究区沙一下亚段混合沉积受气候及水体环境、构造背景及古地貌、物源供给条件、湖平面升降等 4 种因素共同控制，其中气候及水体环境、构造背景及古地貌和物源供给条件是主要因素，湖平面升降是次要因素。

5 混合沉积控储效应

5.1 混合沉积与储集层物性关系

对研究区 15 口井 423 个岩心物性数据统计分析发现，不同类型岩石储层物性差异性较大(图 8a)，相对较纯的砂岩类和碳酸盐岩类储层物性较好，平均孔隙度分别为 14.6%、15.8%，混积岩类储层物性相对较差，平均孔隙度为 9.45%，混积岩中（含）碳酸盐岩颗粒质细砂岩和含砂颗粒灰（云）岩储层物性最好，平均孔隙度分别为 12.7%和 15.6%；其次为灰质砂岩和含砂泥晶灰（云）岩，平均孔隙度分别为 11.6%和 7.3%；泥质灰（云）岩和灰(云)质泥岩孔隙度最差，通常为非储层。

分类统计发现，不同微相条件下混积岩储层物性明显不同（图 8b, c）。碳酸盐岩滩坝混积为最有利的微相类型，该相带受湖平面周期性震荡，极易暴露出水而发生淡水淋滤溶蚀作用和白云石化作用，发育大量的溶蚀孔和生物体腔孔（图 2h），岩性主要为含砂颗粒灰

(云)岩, 储层物性最好, 平均孔隙度为 16.6%, 平均渗透率为 $25.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。砂质滩坝混积微相次之, 该微相受湖浪改造淘洗充分, 泥质杂基少, 主要发育含鲕粒(生屑)细砂岩、灰质细砂岩, 砂岩分选性好, 有利于粒间孔隙的发育, 储层物性较好, 平均孔隙度为 14.8%, 平均渗透率为 $8.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。在三角洲前缘环境下形成水下分流河道和河口坝微相也相对较好, 岩性主要为灰质细砂岩、含碳酸盐岩颗粒细砂岩, 平均孔隙度分别为 11.4%、13.4%。滩间混积微相储层岩性致密, 储层物性较差, 平均孔隙度为 7.3%。在低能环境下形成的分流间湾、泥坪和半深湖泥混积微相中泥质含量较高, 岩性较细, 主要为灰质泥岩, 储层物性最差, 平均孔隙度分别为 2.1%、1.7%、1.7%。

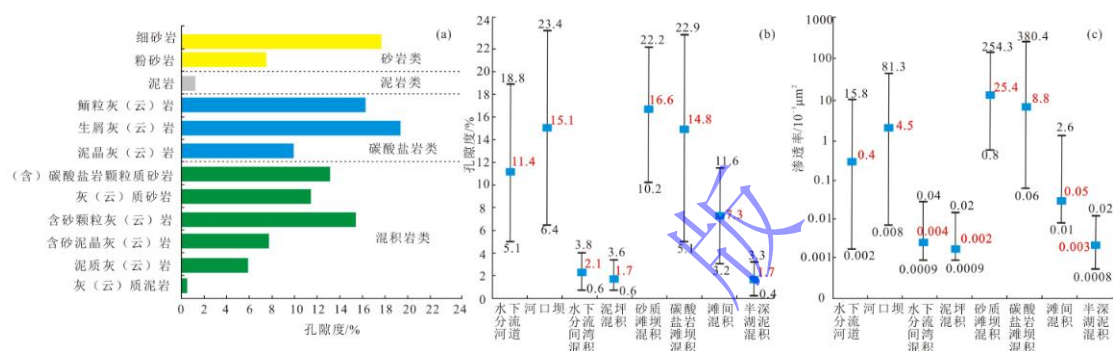


图 8 蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积孔隙度、渗透率特征

(a) 不同岩性储层物性特征; (b) 混合沉积孔隙度特征; (c) 混合沉积渗透率特征

Fig.8 Porosity and permeability characteristics of mixed sedimentation, Lower First Member, Shahejie Formation, Lixian Slope

5.2 混合沉积对储集层物性控制机理

研究区混合沉积对储层的控制作用主要表现在两个方面:一是沉积环境为混积岩储层形成提供物质基础,控制优质储层的形成和展布。蠡县斜坡沙一下亚段沉积时具有封闭咸化的湖泊环境,该环境十分有利于藻类、螺类、介形虫等生物发育和碳酸盐矿物的饱和沉淀,特别是在研究区西南部,在水下古隆起处碳酸盐岩滩坝混积微相发育,该相带形成的岩性富含颗粒,且颗粒类型主要为生屑,统计生屑含量与储层物性关系(9a),发现二者正相关性明显,生屑含量越高,孔隙度越好。同时,封闭咸化环境下形成的泥晶包壳、螺类、介形虫及内碎屑颗粒增强了岩石的抗压强度^[43],统计泥晶包壳含量与压实损失孔隙度的关系,发现二者负相关明显(图9b),表明包壳含量越多,压实损失孔隙度越少,储层物性越好。

另一方面,沉积旋回控制有利混积岩储层发育位置,是影响混积岩储层非均质性的的重要因素^[44]。蠡县斜坡沙一下亚段沉积时期,整体表现为向上变深的沉积序列,但由于湖平面周期性变化,在内部发育多个湖侵—湖退沉积旋回,纵向上多旋回的沉积背景造成不同期次碳酸盐岩滩坝混积储层与低能泥质灰岩(灰质泥岩)相互叠置,使得储层非均质性较强,含

砂生屑灰岩、含砂鲕粒灰岩等优质混积岩储层就发育在旋回顶部，且都在湖退半旋回中（图 9c）。如 G118 井在 2 330.6~2 343.4 m 连续取心，在 SQ1-2-HST 发育碳酸盐岩颗粒滩混积微相，旋回顶部物性测试孔隙度分别达 18.7%，渗透率 $34.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，综合解释为油层，底部孔隙度为 13.6%，渗透率 $15.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，综合解释为差油层；在 SQ1-2-TST 中发育滩间混积微相，主要为泥质灰岩，岩心孔隙度平均为 4.5%，渗透率平均为 $3.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，为非渗透层。

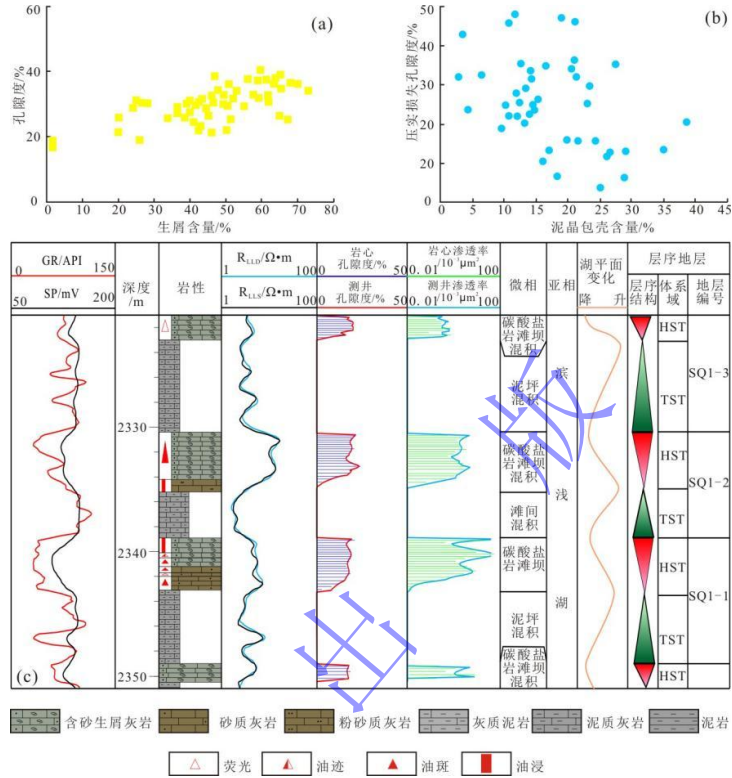


图 9 混合沉积与优质储层关系

(a) 生屑含量与孔隙关系；(b) 泥晶包壳含量与压实损失孔隙度的关系；(c) G118 井 2 330.6~2 343.4 m 储层特征

Fig.9 Relationship between mixed sedimentation and high-quality reservoirs

5.3 有利储层分布预测

基于上述分析，认为碳酸盐岩颗粒滩坝和砂质滩坝组成的混积滩坝是最有利的微相类型。通过将研究区各小层混积滩坝厚度叠加，编制等值线图，结合古地貌特征、构造特征和平面分布规律，综合分析得出蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积有利储层分布预测图（图 10），可以看出研究区混积滩坝在平面上表现为 3 条近似南北向的条带状分布，分别为 G30-G109-G9-10、G14-G104 和 GS4-G102-G28 方向，其中最有利储集区带分布在 G109、G9-10 井区，该区主要处于构造位置较高的古隆起上，混积滩坝的厚度超过 60 m，受风化淋滤作用和白云岩化作用强，平均孔隙度为 19.3%、渗透率为 $46.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。其次为西南部 G28 井区，该区混积滩坝厚度平均为 42.8 m，主要发育含砂生屑云岩、生屑云岩，平均孔隙度为 17.6%、渗透率为 $24.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，且靠近反向正断层，有利于裂缝和溶蚀孔隙的发育，

可作为下一步有利的油气勘探重点区。

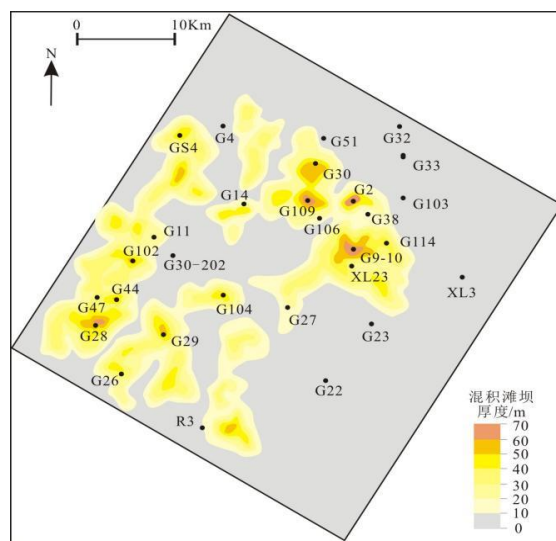


图 10 蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积有利储层分布预测

Fig.10 Favorable reservoir prediction in mixed sedimentation, Lower First Member of the Shahejie Formation, Lixian Slope

6 结论

(1) 蠡县斜坡沙一下亚段发育混积砂岩类、混积碳酸盐岩类和混积泥岩类的 3 大类、6 小类混积岩, 存在陆源碎屑岩—碳酸盐岩层系、陆源碎屑岩—混积岩层系、碳酸盐岩—混积岩层系、混积岩—混积岩层系 4 大类、16 种混积层系类型。

(2) 蠡县斜坡沙一下亚段混合沉积主要发生在三角洲前缘、滨浅湖、半深湖 3 种亚相中, 可识别出水下分流河道、河口坝、水下分流间湾、泥坪、砂质滩坝、碳酸盐岩滩、滩间和半深湖泥 8 种混合沉积微相, 沙一下亚段混合沉积在横向上相变较快, 纵向上多类型岩石频繁叠置, 平面上各小层混合沉积特征差异性明显, 发育低水位期和高水位期两种混合沉积模式。

(3) 混合沉积主要受气候及水体环境、构造背景及古地貌、物源供给条件、湖平面升降等 4 种因素共同控制。高能相带发育的砂质滩坝和碳酸盐岩滩坝是有利混积微相类型, 形成的混积岩储层物性最好, 封闭咸化水体是混积岩储层形成基础, 控制优质储层形成和展布, 沉积旋回控制优质储层的发育程度和分布范围。综合分析认为西南部 G109、G9-10、G28 井区发育混积滩坝是有利的勘探目标。

致谢 感谢审稿专家对文章提出的宝贵意见和建议, 使得文章在理论水平和勘探意义上得到很大的提升。

参考文献 (References)

- [1] 张世铭, 张小军, 张婷静, 等. 柴西狮子沟地区古近系下干柴沟组混积岩储层特征及影响因素分析[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 1059-1068, 1087. [Zhang Shiming, Zhang Xiaojun, Zhang Tingjing, et al. Reservoir characteristics of the Paleogene mixed carbonate-siliciclastic rock or succession and its influencing factors in the Shizigou area of the western Qaidam Basin[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 1059-1068, 1087.]
- [2] 宋章强, 杜晓峰, 徐伟, 等. 渤海古近系混合沉积发育特征与沉积模式[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3663-3676. [Song Zhangqiang, Du Xiaofeng, Xu Wei, et al. Sedimentary features and development pattern of mixed deposition of Paleogene system in Bohai sea area[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3663-3676.]
- [3] 司马立强, 杨毅, 吴丰, 等. 柴西北小梁山地区狮子沟组混积岩储层评价[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 173-180. [Sima Liqiang, Yang Yi, Wu Feng, et al. Reservoir evaluation on mixing deposit of Shizigou Formation in Xiaoliangshan, Northwest of Qaidam Basin[J]. Geoscience, 2014, 28(1): 173-180.]
- [4] 于冬冬, 张永生, 邢恩袁, 等. 柴达木西部南翼山构造地表混积岩岩石学特征及沉积环境讨论[J]. 地质学报, 2018, 92(10): 2068-2080. [Yu Dongdong, Zhang Yongsheng, Xing Enyuan, et al. Petrological characteristics and sedimentary environment of the surface mixed rocks in Nanyishan Structure, western Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2018, 92(10): 2068-2080.]
- [5] 刘桂珍, 张丹丹, 李盼. 鄂尔多斯东南部上古生界混积层沉积特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 25-34. [Liu Guizhen, Zhang Dandan, Li Pan. Sedimentary characteristics of Upper Paleozoic mixed deposits in Southeastern Ordos[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2018, 40(2): 25-34.]
- [6] 董桂玉, 陈洪德, 何幼斌, 等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 931-939. [Dong Guiyu, Chen Hongde, He Youbin, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-carbonate sediments[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(9): 931-939.]
- [7] 王国忠. 南海北部大陆架现代礁源碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积作用[J]. 古地理学报, 2001, 3(2): 47-54. [Wang Guozhong. Mixed sedimentation of recent reefoid carbonates and terrigenous clastics in the North continental shelf of the South China sea[J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(2): 47-54.]
- [8] 张锦泉, 叶红专. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积[J]. 成都地质学院学报, 1989, 16(2): 87-92. [Zhang Jinqian, Ye Hongzhan. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments[J]. Journal of Chengdu College of Geology, 1989, 16(2): 87-92.]
- [9] 薛永安, 庞小军, 郝轶伟, 等. 渤海海域秦南凹陷东南缘沙一段混积岩优质储层成因及勘探意义[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3527-3542. [Xue Yong'an, Pang Xiaojun, Hao Yiwei, et al. Genesis of high-quality mixed rock reservoir and its exploration significance in Es₁ around Southeast margin of Qinnan Sag, Bohai Sea[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3527-3542.]
- [10] 宋光永, 朱超, 李森明, 等. 柴达木盆地英西地区湖相混积型碳酸盐岩储层成因及发育模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(3): 1-12. [Song Guangyong, Zhu Chao, Li Senming, et al. Genetic mechanism and development model of lacustrine hybrid carbonate reservoirs in the western Yingxioling structural belt, Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(3): 1-12.]
- [11] Maxwell W G H, Swinchart J P. Great barrier reef: Regional variation in a terrigenous-carbonate province[J]. Geological Society of America Bulletin, 1970, 81(3): 691-724.
- [12] Mount J. Mixed siliciclastic and carbonate sediments: A proposed first-order textural and compositional classification[J]. Sedimentology, 1985, 32(3): 435-442.
- [13] 杨朝青, 沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境: 一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积[J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 59-66. [Yang Chaoqing, Sha Qing'an. Sedimentary environment of the Middle Devonian Qujing Formation, Qujing, Yunnan province: A kind of mixing sedimentation of terrigenous clastics and carbonate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(2): 59-66.]
- [14] 江茂生, 沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. 地球科学进展, 1995, 10(6): 551-554. [Jiang Maosheng, Sha Qing'an. Research advances in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems[J]. Advances in Earth Sciences, 1995, 10(6): 551-554.]
- [15] 叶茂松, 解习农, 徐长贵, 等. 混积岩分类命名体系探讨及对混积岩储层评价的启示: 以渤海海域混积岩研究为例[J]. 地质论评, 2018, 64(5): 1118-1131. [Ye Maosong, Xie Xinong, Xu Changgui, et al. Discussion for classification-designation system of mixed siliciclastic-carbonate sediments and the implication for their reservoir prediction: A case study of mixed sediments from

- Bohai Sea area[J]. Geological Review, 2018, 64(5): 1118-1131.]
- [16] 解习农, 叶茂松, 徐长贵, 等. 渤海湾盆地渤中凹陷混积岩优质储层特征及成因机理[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3526-3539. [Xie Xinong, Ye Maosong, Xu Changgui, et al. High quality reservoirs characteristics and forming mechanisms of mixed siliciclastic-carbonate sediments in the Bozhong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3526-3539.]
- [17] 叶子倩, 朱红涛, 杜晓峰, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷古近系沙一段混积岩发育特征及沉积模式[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3731-3745. [Ye Ziqian, Zhu Hongtao, Du Xiaofeng, et al. Sedimentary characteristics and model of mixed siliciclastic-carbonates of member 1 of Paleogene shahejie Formation, Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3731-3745.]
- [18] 王越, 张奎华, 林会喜, 等. 博格达山周缘芦草沟组混合沉积控制因素及模式[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(6): 686-692. [Wang Yue, Zhang Kuihua, Lin Huixi, et al. Controlling factors and model of mixed deposits of Lucaogou Formation on the periphery of Bogda Mountain[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(6): 686-692.]
- [19] 崔航, 朱世发, 施振生, 等. 川北侏罗系大安寨段湖相混积层系沉积特征与发育模式[J]. 古地理学报, 2022, 24(6): 1099-1113. [Cui Hang, Zhu Shifa, Shi Zhengsheng, et al. Sedimentary characteristics and development model of lacustrine fine-grained hybrid sedimentary rocks in the Jurassic Da'anzhai member, northern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2022, 24(6): 1099-1113.]
- [20] 昌建波, 邹晓萍, 余国达, 等. 珠江口盆地惠州凹陷南部珠江组混合沉积作用[J]. 海相油气地质, 2017, 22(4): 19-26. [Chang Jianbo, Zou Xiaoping, Yu Guoda, et al. Mixed clastic and carbonate deposits of Zhujiang Formation in the southern Huizhou Depression, Zhujiangkou Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(4): 19-26.]
- [21] 庞小军, 牛成民, 王冠民, 等. 渤海海域深层沙一段混积岩优质储层成因: 以渤中13-A构造为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 354-369. [Pang Xiaojun, Niu Chengmin, Wang Guanmin, et al. Genesis of high-quality reservoirs with deeply mixed rocks in the Es₁ in BZ13-A structure, Bohai Sea[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(2): 354-369.]
- [22] 薛辉, 韩春元, 肖博雅, 等. 蠡县斜坡高阳地区沙一下亚段浅水三角洲前缘沉积特征及模式[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(4): 69-80. [Xue Hui, Han Chunyuan, Xiao Boya, et al. Sedimentary characteristics and models of shallow water delta front of the Lower first member of Shahejie Formation in Gaoyang area, Lixian Slope[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(4): 69-80.]
- [23] 杨帆, 于兴河, 张峰, 等. 冀中坳陷饶阳凹陷蠡县斜坡带层序地层发育模式及主控因素[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 82-89. [Yang Fan, Yu Xinghe, Zhang Feng, et al. Sequence stratigraphic model and key controlling factors of Lixian Slope in Raoyang Sag, Central Hebei Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(1): 82-89.]
- [24] 薛辉, 韩春元, 肖博雅, 等. 高阳沙一下亚段湖相碳酸盐岩颗粒滩储层发育特征及分布[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(2): 79-88, 96. [Xue Hui, Han Chunyuan, Xiao Boya, et al. Development characteristics and distribution zone of lacustrine carbonate grain bank reservoir in the Lower part of the first member of Shahejie Formation in Gaoyang area[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(2): 79-88, 96.]
- [25] 杜一帆, 朱筱敏, 叶蕾, 等. 饶阳凹陷蠡县斜坡沙一下亚段混积滩坝沉积特征与发育模式[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3759-3778. [Du Yifan, Zhu Xiaomin, Ye Lei, et al. Features and model of mixed sediments in Lower submember of first member of Shahejie Formation in Lixian Slope, Raoyang Sag[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3759-3778.]
- [26] 叶蕾, 朱筱敏, 张锐锋, 等. 冀中坳陷饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙河街组一段浅水三角洲和滩坝的沉积环境[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 587-600. [Ye Lei, Zhu Xiaomin, Zhang Ruifeng, et al. Sedimentary environment of shallow-water delta and beach-bar of the member 1 of Shahejie Formation in Lixian slope of Raoyang Sag, Jizhong Depression[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(3): 587-600.]
- [27] 刘金龙, 李胜利, 梁星如, 等. 冀中坳陷蠡县斜坡古近系沙一下亚段沉积物源分析[J]. 古地理学报, 2016, 18(5): 809-817. [Liu Jinlong, Li Shengli, Liang Xingru, et al. Provenance analysis of the Lower part of member 1 of Paleogene Shahejie Formation in Lixian Slope, Central Hebei Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(5): 809-817.]
- [28] 赵贤正, 金凤鸣, 李玉帮, 等. 断陷盆地斜坡带类型与油气运聚成藏机制[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 841-849. [Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Li Yubang, et al. Slope belt types and hydrocarbon migration and accumulation mechanisms in rift basins[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(6): 841-849.]
- [29] 刘建, 任莹, 王丹蕾, 等. 蠡县斜坡北段储层流体包裹体特征及成藏时期[J]. 地质科技情报, 2016, 35(1): 53-58. [Liu Jian,

- Ren Ying, Wang Danlei, et al. Fluid inclusions characteristics and hydrocarbon accumulation Period of the reservoir in the northern section, Lixian Slope[J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(1): 53-58.]
- [30] 张峰, 李胜利, 黄杰, 等. 华北蠡县斜坡油气藏分布、成藏模式及主控因素探讨[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 189-195. [Zhang Feng, Li Shengli, Huang Jie, et al. Hydrocarbon reservoir distribution, accumulation models and main controlling factors in Lixian slope, North China[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 189-195.]
- [31] 杜一帆, 朱筱敏, 高园, 等. 饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙河街组一段物源特征研究[J]. 地质前缘, 2021, 28(1): 115-130. [Du Yifan, Zhu Xiaomin, Gao Yuan, et al. Sedimentary provenance of the first member of the Shahejie Formation, Lixian Slope, Raoyang Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 115-130.]
- [32] 曾楷, 李飞, 龚峤林, 等. 寒武系第二统仙女洞组混合沉积特征及古环境意义: 以川北旺苍唐家河剖面为例[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 166-181. [Zeng Kai, Li Fei, Gong Qiaolin, et al. Characteristics and paleoenvironmental significance of mixed siliciclastic-carbonate sedimentation in the Xiannüdong Formation, Cambrian (Series 2): A case study from the Tangjiahe Section, Wangcang, northern Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 166-181.]
- [33] 王梦琪, 张强, 谢俊, 等. 莱州湾凹陷南部地区浅层沙三下亚段混积岩岩石学特征及成岩作用[J]. 中国海洋大学学报, 2020, 50(4): 83-94. [Wang Mengqi, Zhang Qiang, Xie Jun, et al. Research on the petrological and diagenetic characteristics of mixed rocks in the shallow Lower Es₃, in the southern region of Laizhouwan Sag[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(4): 83-94.]
- [34] 吴奎, 惠冠洲, 高京华, 等. 辽东湾北部地区混合沉积特征及地球物理响应[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3589-3602. [Wu Kui, Hui Guanzhou, Gao Jinghua, et al. Mixed sediment characteristics and geophysical responses in northern area of Liaodong Bay, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3589-3602.]
- [35] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. 地质科技情报, 2000, 19(4): 31-34. [Zhang Xionghua. Classification and origin of mixosedimentite[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(4): 31-34.]
- [36] 王启明, 杜晓峰, 宛良伟, 等. 渤海海域莱南斜坡带沙三下亚段混合沉积发育特征及主控因素[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3645-3662. [Wang Qiming, Du Xiaofeng, Wan Liangwei, et al. Characteristics of mixed sedimentary development and main control factors in Lower Third member of Shahejie Formation of southern Slope belt of Laizhouwan Sag, Bohai Sea[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3645-3662.]
- [37] 杜晓峰, 徐长贵, 朱红涛, 等. 陆相断陷盆地陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究进展[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3509-3526. [Du Xiaofeng, Xu Changgui, Zhu Hongtao, et al. Research advances of mixed Siliciclastic and carbonate sediments in continental rift basins[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3509-3526.]
- [38] 纪友亮, 马达德, 薛建勤, 等. 柴达木盆地西部新生界陆相湖盆碳酸盐岩沉积环境与沉积模式[J]. 古地理学报, 2017, 19(5): 757-772. [Ji Youliang, Ma Dade, Xue Jianqin, et al. Sedimentary environments and sedimentary model of carbonate rocks in the Cenozoic lacustrine Basin, western Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(5): 757-772.]
- [39] 罗妮娜, 侯守探, 纪友亮, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷大王庄地区古近系沙三上亚段混积模式研究[J]. 沉积学报, 2020, 38(5): 1037-1048. [Luo Nina, Hou Shoutan, Ji Youliang, et al. Sedimentary model of mixed rocks in the Upper Es₃ of Paleogene in the Dawangzhuang area, Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(5): 1037-1048.]
- [40] 王金友, 张立强, 张世奇, 等. 济阳拗陷沾化凹陷沙二段湖相混积岩沉积特征及成因分析: 以罗家-邵家地区为例[J]. 地质论评, 2013, 59(6): 1085-1096. [Wang Jinyou, Zhang Liqiang, Zhang Shiqi, et al. Sedimentary characteristics and origin of lacustrine mixed rocks of the Second member of the Eocene Shahejie Formation in Zhanhua Sag, Jiyang Depression: Taking Luojia-Shaojia area for an example[J]. Geological Review, 2013, 59(6): 1085-1096.]
- [41] 殷杰, 王权, 郝芳, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷沙一下亚段古湖泊环境与烃源岩发育模式[J]. 地球科学, 2017, 42(7): 1209-1222. [Yin Jie, Wang Quan, Hao Fang, et al. Palaeolake environment and depositional model of source rocks of the Lower Submember of Sha₁ in Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2017, 42(7): 1209-1222.]
- [42] 黄众, 胡孝林, 杨松岭, 等. 澳大利亚北卡那封盆地晚三叠世混合沉积特征[J]. 海相油气地质, 2018, 23(1): 21-28. [Huang Zhong, Hu Xiaolin, Yang Songling, et al. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation of Upper Triassic in northern Carnarvon Basin, Australia[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2018, 23(1): 21-28.]

- [43] 庞小军, 牛成民, 杜晓峰, 等. 渤海海域环渤中地区沙一二段混积岩优质储层差异及成因[J]. 地球科学, 2020, 45 (10) : 3853-3869. [Pang Xiaojun, Niu Chengmin, Du Xiaofeng, et al. Differences and genesis of high-quality reservoirs of mixed siliciclastic-carbonate rocks in the Es₁₂ around Bozhong Depression, Bohai Sea[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3853-3869.]
- [44] 刘辰生, 于汪. 金湖凹陷西斜坡阜宁组灰岩段混积储层特征[J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2015, 37 (4) : 13-21. [Liu Chensheng, Yu Wang. Mixing reservoir characteristic of limestone member in West Slope of Jinhu Depression[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2015, 37(4): 13-21.]

Controlling Effect of Mixed Sedimentation on Reservoirs in the Lower First Member of the Shahejie Formation, Lixian Slope

XUE Hui¹, XIAO BoYa¹, XU MengTing¹, KANG Pin², YE DaShuai¹, ZHANG RuiXue¹, GUO YueMiao¹, TANG XiaoQi¹, HAN ChunYuan¹

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu, Hebei 062552, China

2. No. 5 Oil Production Plant of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Xinji, Hebei 052360, China

Abstract: [Objective] Mixed sediments were widely developed in the Lower First Member of the Shahejie Formation in the Lixian Slope and their influence on the development of hydrocarbon reservoirs is of great significance. The aim of this study was to clarify their properties to determine the target area for exploration and development in the next step. [Methods] The types, distribution regularity, control factors, sedimentary model and mechanism of high-quality reservoir formation in mixed sediments were analyzed from cores, thin sections, seismic well logging and laboratory analysis data. [Results] Two types of mixed sedimentation occur in the study area: mixed sedimentary rock and mixed sedimentary strata. Three major categories of mixed sedimentary rock (mixed sandstones, mixed mudstones and mixed carbonate rocks) are further divided into six types. The mixed sedimentary strata are divided into 16 types in four lithofacies assemblages: terrigenous rock-carbonate rock, terrigenous rock-mixed sedimentite, carbonate rock-mixed sedimentite, and mixed sedimentite. The Lower First Member of Shahejie Formation in the Lixian Slope has typical mixed features, which occur in eight microfacies types: underwater distributary channel microfacies, mouth bar sheet microfacies, underwater diversion bay microfacies, mud flat microfacies, sandy beach bar microfacies, carbonate beach bar microfacies, inner beach microfacies and semi-deep lake mud microfacies. The mixed sediments display rapid phase transformation laterally, and multiple rock types are frequently superimposed vertically. The mixed sediments are distributed differently at different intervals, two mixed depositional models are evident, one developed during lowstand periods, and one during highstand periods influenced by climatic and water environments, tectonic background, paleogeomorphology, sediment supply and lake level changes. The mixed sediments play a significant role in reservoir control; the sandy beach bars and carbonate beach bars that were developed in high-energy facies zones contain the most favorable mixed sedimentary microfacies. A closed saline water environment is the foundation of reservoir formation, controlling the formation and distribution of high-quality reservoirs; sedimentary cycles control the degree of development and distribution. [Conclusion] The paleogeomorphology highland in the

southwestern region contains favorable areas for mixed beach bar development and exploration.

Keywords: mixed sediments; distribution regularity; control factors; sedimentary model; reservoir control effect; Lower First Member of Shahejie Formation; Lixian Slope

