

三角洲与重力流砂体构型特征及其对油藏分布的控制

——以鄂尔多斯盆地甘泉地区三叠系延长组长7油层组为例

李晓龙^{1,2},白玉彬^{1,2},陈珊珊³,张刚⁴,王聪娥⁵

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院,陕西 西安 710065;2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室,陕西 西安 710065;3. 延长油田股份有限公司勘探开发技术研究中心,陕西 延安 716000;4. 延长油田股份有限公司,陕西 延安 716000;5. 延长油田股份有限公司下寺湾采油厂,陕西 延安 716100)

摘要:鄂尔多斯盆地甘泉地区三叠系延长组长7油层组发育三角洲前缘和重力流型致密油藏。为了明确不同沉积构型单元储集性能的差异及其对油藏分布与富集的控制机制。综合利用岩心、测井和生产动态资料,分析了长7油层组三角洲和重力流沉积内部单砂体构型特征、纵向接触关系和分布规律。研究了砂体构型对油藏分布的控制作用,结合试油、试采资料,建立了砂体构型油气成藏模式。研究结果表明:①长7油层组纵向上主要发育连续叠加型、间隔叠加型、薄互层型和单层型4种砂体构型,横向上发育稳定型、摆动型和迁移型3种砂体构型。②纵向上长7¹油层亚组主要发育连续叠加型,间隔叠加型次之;长7²油层亚组主要发育间隔叠加型,薄互层型次之;长7³油层亚组主要发育薄互层型和单层型。平面上连续叠加型和间隔叠加型主要分布于研究区北部和东北部;薄互层型主要发育在研究区中部向南一侧区域;单层型集中分布于南部地区。③储集性能最优的构型为连续叠加型和间隔叠加型,其中连续叠加型砂体的油气产量最高。④不同构型砂体与烃源岩的叠置关系存在差异,研究区砂体构型和烃源岩有4类源-储配置关系。长7¹油层亚组的连续叠加型油气富集程度最高;长7²油层亚组的间隔叠加型次之;长7³油层亚组主要为烃源岩。长7¹油层亚组的连续叠加型砂体是下一步勘探的优选目标。

关键词:源-储配置;成藏模式;油气分布规律;砂体构型;长7油层组;甘泉地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

The configuration characteristics of delta and gravity flow sand bodies and their control on reservoir distribution—Chang 7 of Triassic Yanchang Formation in Ganquan area of Ordos Basin Oil layer group as an example

LI Xiaolong^{1,2}, BAI Yubin^{1,2}, CHEN Shanshan³, ZHANG Gang⁴, WANG Cong'e⁵

[1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. Exploration and Development Technology Research Center, Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000, China; 4. Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716000, China; 5. Xiasiwan Oil Production Plant, Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an, Shaanxi 716100, China]

Abstract: The oil layer group of the 7th member of the Yanchang Formation (also referred to as the Chang 7 oil layer group) in the Ganquan area of the Ordos Basin hosts tight oil reservoirs of the delta-front and gravity-flow origin. This study aims to determine the differences in reservoir properties across varying sedimentary architectural units and the mechanisms through which these units control oil reservoir distribution and hydrocarbon enrichment. Using data from core observations, logging, and production performance, we analyze the architectural characteristics, vertical contact relationships, and distribution patterns of individual sand bodies within the deltaic and gravity-flow deposits in the Chang 7 oil layer group and explore the role of sand body architectures in controlling oil reservoir distribution. By

收稿日期:2025-06-07;修回日期:2025-09-17。

第一作者简介:李晓龙(2000—),男,硕士研究生,致密油、致密储层。E-mail: 1326030435@qq.com。

通信作者简介:白玉彬(1981—),男,副教授、硕士研究生导师,致密油(页岩油)富集规律与甜点评价。E-mail: baiyubin@xsyu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42372155);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2025JC-YBQN-437);陕西省教育厅专项科研计划项目(24JK0603)。

combining data from well and production tests, we establish the hydrocarbon accumulation models associated with sand body architectures. The results indicate that the Chang 7 oil layer group contains four primary vertical sand body architecture types: continuously superimposed, intermittently superimposed, thinly interbedded, and single-layer types. Meanwhile, three lateral sand body architecture types are identified in the oil layer group: stable, swinging, and migrating. Vertically, the 1st subgroup of the Chang 7 oil layer group (also referred to as the Chang 7¹ oil layer subgroup) primarily exhibits the continuously superimposed sand body architecture, followed by the intermittently superimposed type. In contrast, the Chang 7² oil layer subgroup is dominated by the intermittently superimposed sand body architecture, succeeded by thinly interbedded type, while the Chang 7³ oil layer subgroup predominantly contains the thinly interbedded and single-layer architectures. Literally, continuously and intermittently superimposed sand body architectures are widely seen in the northern and northeastern parts of the study area. In contrast, thinly interbedded architectures are mainly found in the south-central part of the study area, whereas the single-layer architecture is concentrated in the southern part. Continuously and intermittently superimposed sand bodies exhibit the most favorable reservoir properties, with the continuously superimposed sand bodies yielding the highest hydrocarbon production. Different types of sand body architectures exhibit varying superposition relationships with source rocks, with four types of source rock-reservoir configurations detected in the study area. The continuously superimposed sand bodies in the Chang 7¹ oil layer subgroup, among others, show the highest degree of hydrocarbon enrichment, followed by the intermittently superimposed sand bodies in the Chang 7² oil layer subgroup. The Chang 7³ oil layer subgroup consists primarily of source rocks, while the continuously superimposed sand bodies in the Chang 7¹ oil layer subgroup are identified as the most promising target for future hydrocarbon exploration.

Key words: source-reservoir combination, accumulation mode, oil and gas distribution law, Sand body configuration, Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

引用格式: 李晓龙, 白玉彬, 陈珊珊, 等. 三角洲与重力流砂体构型特征及其对油藏分布的控制——以鄂尔多斯盆地甘泉地区三叠系延长组长7油层组为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1485–1503. DOI: 10. 11743/ogg20250507.

LI Xiaolong, BAI Yubin, CHEN Shanshan, et al. The configuration characteristics of delta and gravity flow sand bodies and their control on reservoir distribution—Chang 7 of Triassic Yanchang Formation in Ganquan area of Ordos Basin Oil layer group as an example [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1485–1503. DOI: 10. 11743/ogg20250507.

砂体构型(又称储层构型)最早由 Allen^[1]提出,用来表征河流相砂体的几何形态和内部结构特征,这一概念体系自 Miall^[2-3]提出“构型要素分析法”以来不断完善。国内外学者通过露头、现代沉积和地下地质相结合,逐步建立了陆相盆地三角洲和河流等沉积体系的构型模式^[4-9],而针对深水重力流沉积的砂体构型研究仍存在较大探索空间。近年来,随着非常规油气地质理论的发展,学者们逐步认识到不同砂体构型单元的级次划分与组合样式对储层质量具有决定性影响^[10]。

前人研究表明,砂体构型受控于物源供给、古地貌和触发机制等多因素影响^[11],不同沉积微相对应不同的构型单元。例如,重力流沉积按照重力驱动作用可划分为浊流沉积、砂质碎屑流沉积和滑动-滑塌沉积3种沉积微相^[12],根据形态和发育位置,其内部可进一步划分为朵叶体、水道和侧积体等不同级次构型单元^[13]。在 Miall^[2-3]理论上,前人对不同地区砂体构型分类开展了大量研究:部分学者针对辫状河三角

洲、三角洲前缘和湖底扇等沉积体,通过露头观察和等时地层格架的建立,采用“分级解剖”“垂向分期-侧向划界”和“层次分析”等方法,实现了不同级次砂体构型单元的精细划分与表征^[14-16];另一部分学者则基于测井资料分析、岩心观察和地质知识库,以地层格架或湖平面变化为约束,完成了砂体结构刻画、构型要素分布模式整合和单砂体垂向叠置关系分类,为沉积微相研究与储层预测提供了重要依据^[17-19]。

目前,砂体构型研究主要集中于油气开发领域^[20-22],如构型对油井生产的控制作用^[23]、构型分布样式对油藏数值模拟和剩余油分布的影响^[24-25]以及利用构型分析指导剩余油挖潜等方面^[26]。总体而言,当前学界在沉积构型的分类体系构建、精细表征方法和开发应用等方面已形成丰富研究成果,但在油气勘探领域的针对性探索仍显薄弱,特别是有关构型对储层质量的控制机制、构型特征与油气富集规律的关联性等核心问题尚未形成系统认知,这些研究方向亟待进一步突破。

鄂尔多斯盆地是中国重要的能源基地,三叠系延长组长7油层组陆相页岩油藏是近年油气勘探的重点领域。其中,重力流砂体作为优质储层的重要载体,其空间构型特征直接控制着油藏分布规律和富集程度^[27]。甘泉地区位于盆地东南部坳陷带,长(延长组)7油层组不仅发育三角洲前缘沉积,还发育典型的湖相重力流沉积体系^[28]。前期勘探已证实该区蕴含丰富的致密油资源,但砂体空间展布复杂及储层非均质性强等问题严重制约了开发效益^[29-30]。

目前,针对该区的研究多集中于砂体宏观沉积模式分析,而对沉积物中砂体内部构型单元的空间配置关系及其对油藏形成的控制机理缺乏系统性认识^[31-32]。尽管前人已对研究区三角洲砂体构型开展了一定探索^[33-34],但关于重力流砂体构型特征和分布规律的研究仍属空白,这成为制约该区精细勘探的瓶颈。具体而言,现有研究仍存在以下两方面不足:①对重力流复合砂体内部单期次单元的切割叠置关系缺乏定量表征;②不同构型单元储集性能差异及其对油藏富集的控制机制尚不明确。

本研究以鄂尔多斯盆地甘泉地区三叠系延长组

长7油层组为例,在前人对该区沉积相研究的基础上,通过岩心观察识别三角洲和重力流沉积的构造演化序列,建立砂体构型分级方案和空间配置模式;结合直井和水平井资料,利用测井相分析划分单砂体边界;通过储层物性、含油饱和度和生产动态资料,建立构型单元与储集性和含油性的定量关系,揭示不同构型单元对油气富集过程的控制机制。研究成果可为长7油层组陆相页岩油高效勘探和规模开发提供理论指导。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国东部与西部构造带的接合部位,是一个中生界和新生界叠加在古生界之上的大型多旋回克拉通盆地,总面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[35]。按照基底性质和构造形态,盆地内部可划分为6个一级构造单元:西缘逆冲带、晋西挠褶带、天环坳陷、伊盟隆起、渭北隆起和伊陕斜坡(图1a)。

延长组自上而下发育长1—长10共10个油层组,整体为内陆坳陷湖泊—三角洲沉积。其中,长7油层组

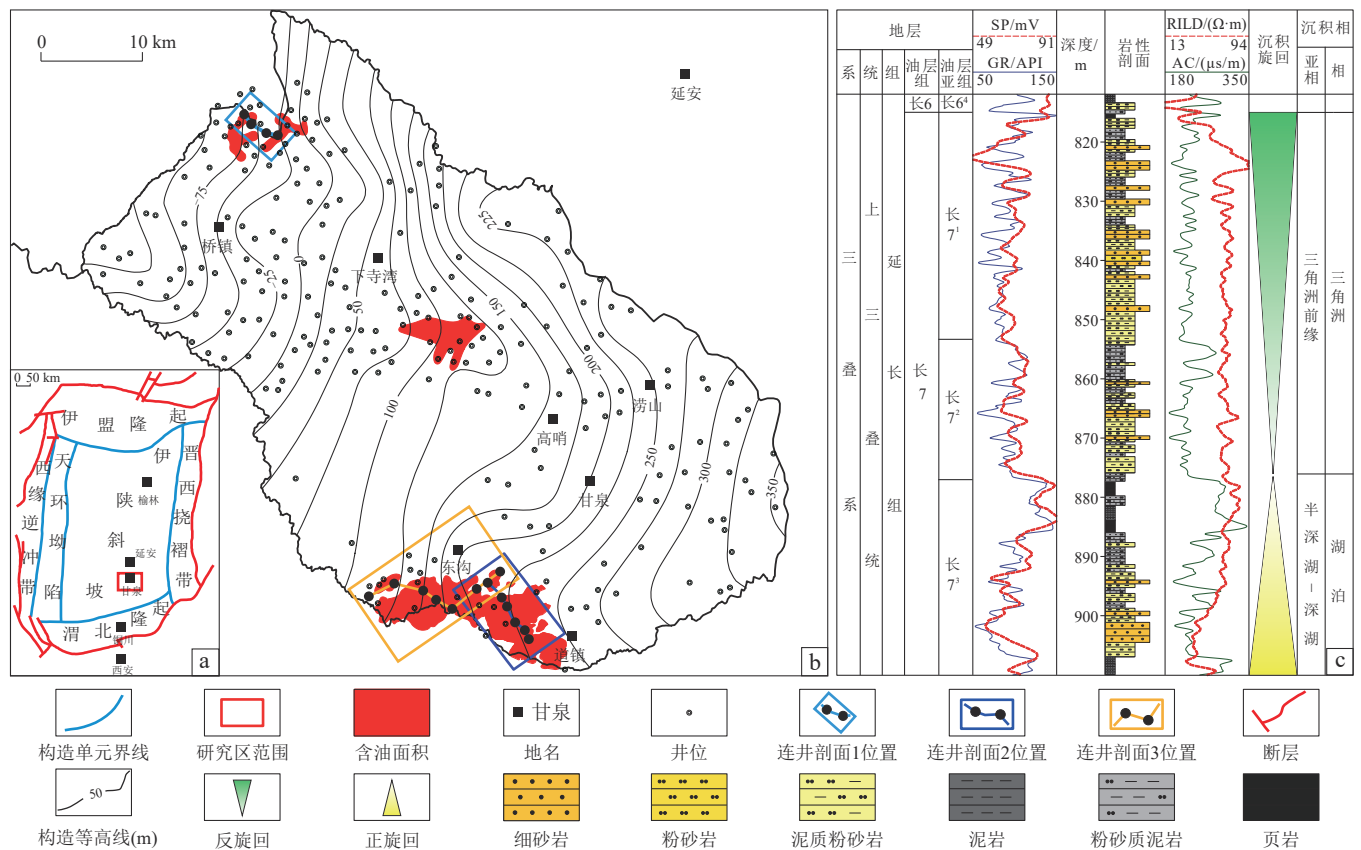


图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分(a)、甘泉地区长7油层组顶面构造(b)及长7油层组岩性地层综合柱状图(c)

Fig. 1 Structural unit division map of the Ordos Basin (a), as well as the structural map of the top surface (b) and the composite stratigraphic column (c) of the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

沉积期是湖泊发育鼎盛阶段,长7油层组自上而下分为长7¹、长7²和长7³三个油层亚组^[36](图1c)。该时期湖盆内沉积了一套成因类型多样、分布范围广的细粒沉积岩,其厚度占比达60%~80%,湖盆中心区域占比超过90%^[36-37]。

甘泉地区位于鄂尔多斯盆地东南部,构造上位于陕北斜坡东南部和晋西挠褶带西侧(图1a)。研究区西北、西南和北部分别与志丹、富县和安塞地区接壤,整体呈东高西低的单斜构造,局部发育低幅度构造,其构造格局主要受渭北隆起和晋西挠褶带的演化控制^[38]。研究区总面积约为2 265.7 km²,目前长7油层组探明含油面积仅为105.4 km²。

鄂尔多斯盆地已发现油藏的烃源岩主要为长4+5油层组—长9油层组暗色泥岩和黑色页岩,其中长7油层组主要发育黑色泥页岩,平均埋深1 400 m,是盆地中生界最主要的烃源岩^[39]。研究区现有探井340余口,开发井137口,其中南部东沟地区为当前重点开发区。该区自2010年开发投产以来,累计开发面积58.2 km²,完钻开发井181口(含水平井47口),井网密度2.3口/km²,平均井深1 179 m,平均井距567.5 m。

2 砂体构型识别及分类

2.1 砂体构型要素类型及其识别特征

构型要素的识别划分是开展砂体构型研究的基础^[40]。本研究基于沉积微相分析,对长7油层组砂体构型进行分类,并建立不同构型要素的识别标准。

研究区砂体因形成过程和沉积环境不同,具有不同的构型特征与展布范围。研究区主要发育三角洲相和湖泊相沉积^[32-34],砂体发育受可容纳空间(A)和物源供给量(S)变化的控制,具体表现为地层自下而上A/S值逐渐减小。结合岩心资料分析,研究区三角洲相主要发育三角洲前缘沉积,砂体主要发育于水下分流河道(图2a)、天然堤(图2b)和河口坝(图2c)3种微相中;半深湖—深湖亚相主要发育洪水型重力流沉积,包括砂质碎屑流沉积(图2d)、浊流沉积(图2e)和滑动—滑塌沉积(图2f)3种微相。根据不同沉积微相,建立砂体构型要素识别模板(图2)。

2.2 主要砂体构型及其特征

综合研究区沉积特征分析,将砂体构型划分为4种主要类型,并建立研究区砂体构型模式图(图3)。

1) 连续叠加型:指两期及以上单砂体垂向接触,

后期形成的单砂体对前期单砂体无明显侵蚀和冲刷作用。该砂体具有以下典型特征:①以细砂岩和粉砂岩为主,泥质含量低,砂/地比普遍高于70%;②夹层仅局部发育泥质夹层,单层厚度多介于0.3~0.7 m,呈零星分布;③沉积成因属多期次沉积叠加作用的产物,垂向上呈连续稳定叠置结构;④平面展布主要受控于侵蚀型水道和板状朵叶体两类沉积微相;⑤储层物性特征表现为垂向—侧向双重连通性,显著优于同期发育的孤立砂体。

2) 间隔叠加型:指垂向上两期单砂体间主要被泥岩等细粒沉积物分隔,两期单砂体本身没有接触。该砂体具有以下典型特征:①主要由细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩组成,泥质组分较连续叠加型砂体增加15%~20%,砂/地比集中于50%~65%;②夹层以厚度小于1.0 m的泥质条带为主(占比约72%),偶见透镜状夹层,平均密度为0.8条/m;③平面展布受控于过渡型水道和板状朵叶体复合沉积体系,其中过渡型水道占比达58%;④垂向结构呈现“砂—泥—砂”互层特征,单期砂体厚度1.5~3.0 m,被厚度0.3~0.8 m泥质隔层分隔。

3) 薄互层型:指垂向上砂体与泥质岩(或其他细粒沉积)以薄夹层形式频繁交替,单砂体厚度较薄(通常小于2.0 m),泥质夹层厚度与砂体厚度相当或更薄,整体呈现“砂—泥互层”的韵律性特征。该类砂体具有以下特征:①主要由粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩组成,砂/地比小于50%;②泥质夹层厚度超过2.0 m,在三角洲沉积中主要发育于河口坝,在重力流中主要形成于水道边缘的漫溢沉积和水道前端朵叶体部位;③测井曲线形态以复合指型为主;④由于漫溢沉积中泥岩占比显著(通常>50%),导致不同沉积时期的单砂体在垂向上相互隔离,同时,水道主体与相邻漫溢沉积体之间普遍存在连续分布的泥岩隔层,平面展布呈弱连通或不连通特征。深湖中这种特殊的沉积构型主要受控于高频基准面旋回背景下泥质沉积物幕式供给的沉积机制。

4) 单层型:指垂向上仅发育单一砂体,砂体内部无明显分层,上下均被连续分布的厚层泥质岩(或其他非渗透性岩层)包裹,呈现“泥—砂—泥”的孤立状垂向特征。该类砂体具有以下特征:①主要由泥岩、粉砂质泥岩和少量砂岩组成,砂/地比普遍低于30%;②岩相组合以孤立单砂体为主,指示沉积能量较低的水动力环境;③此类构型主要为三角洲中天然堤部分砂体沉积,测井形态为单一形态,赋存于重力流滑动—滑塌沉积和水道间微相内。整体上看,该类构型主要表现为

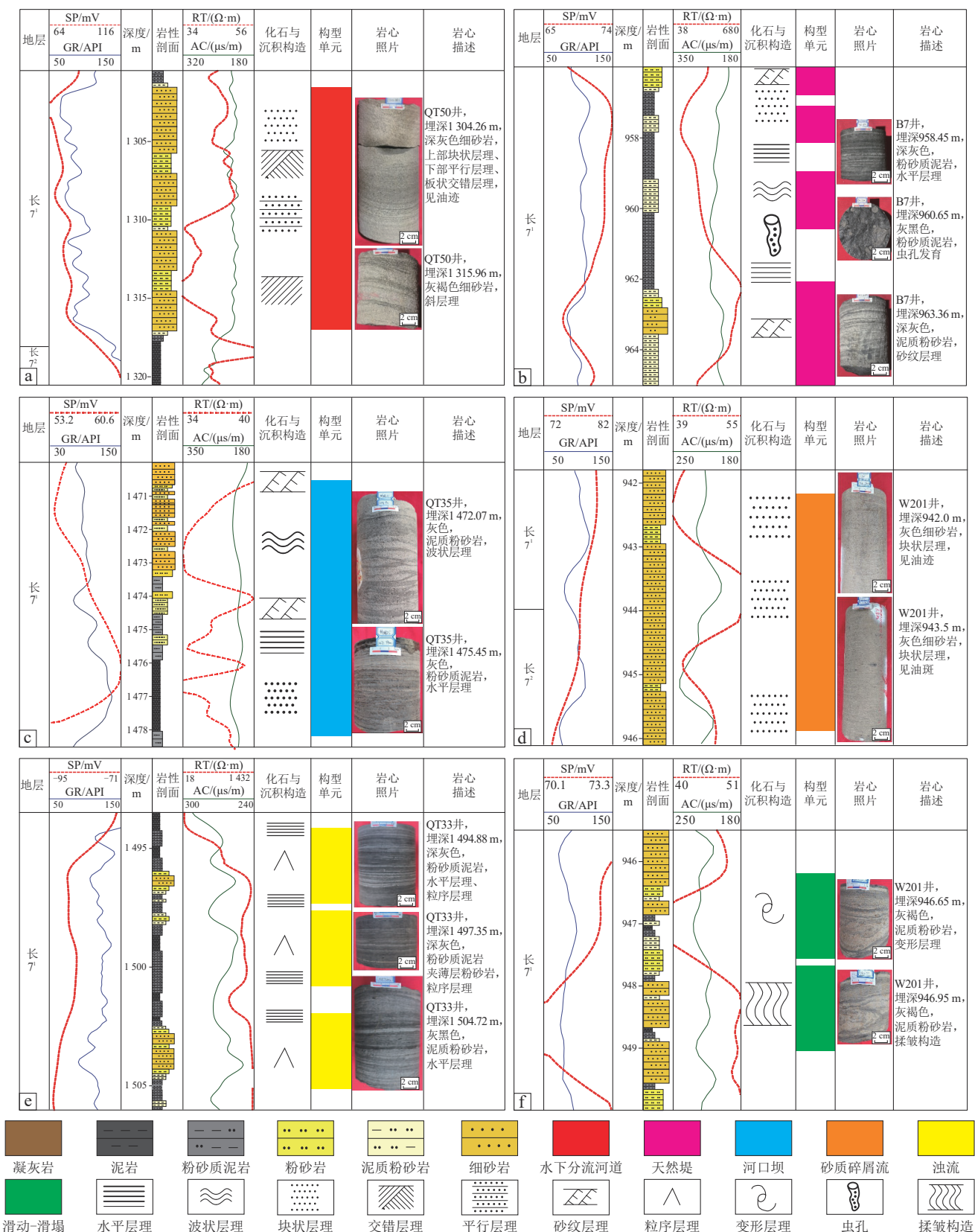


图2 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组砂体构型要素解释模板

Fig. 2 Interpretation templates for identifying the architectural elements of sand bodies in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

- a. QT50井,埋深1 300.0~1 320.0 m; b. B7井,埋深957.0~965.0 m; c. QT35井,埋深1 470.0~1 478.0 m; d. W201井,埋深941.0~946.5 m;
e. QT33井,埋深1 494.0~1 506.0 m; f. W201井,埋深943.5~950.0 m

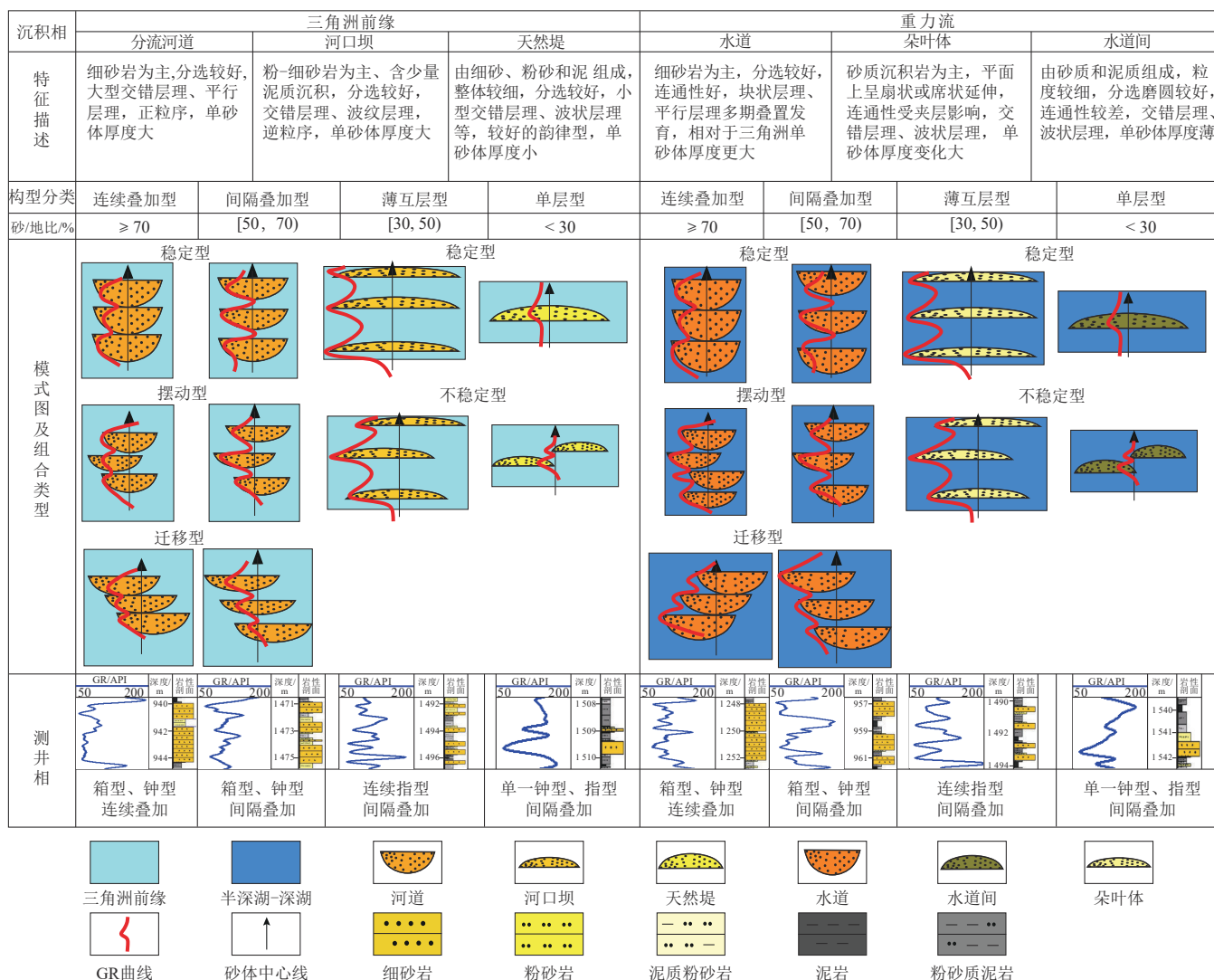


图3 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组砂体构型模式

Fig. 3 Architectural patterns of sand bodies in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

厚层泥质沉积中夹中-薄层砂岩,其成因机制与水道体系的周期性活动密切相关。

3 砂体构型表征

3.1 单砂体边界确定

单砂体作为复合砂体形成的基本组成单元,其准确识别对构型边界厘定和砂体连通性研究具有重要意义^[40-41]。本研究基于沉积微相、砂体厚度差异和测井特征,结合水平井和直井资料,建立了地下单砂体构型边界有效反映识别方法。研究目的层采用2口水平井(QT32P14井和QT32P12井)和2口直井(QT32井和QT32P13井)。其中,QT32P14井发育大段泥岩,分隔了QT32井和QT32P13井发育的两套单砂体。垂向上,

泥质隔夹层可分隔多期河道;侧向上,砂体高程差异、厚度变化和河道间沉积共同构成了识别河道期次的边界依据(图4)。

结合构型模板和测井曲线在横向和纵向上的变化特征,判断砂体横向迁移情况和砂体纵向规模。横向上,河道在发育过程中存在明显的侧向迁移现象,本研究以砂体中心与砂体半径的关系定义偏移幅度变化量,当单期砂体中心偏移量等于上一期砂体半径时,定义为偏移量50%。根据这一标准,研究区发育两期主河道和多期分支河道,将研究区砂体迁移模式划分为稳定型和不稳定型两类。稳定型砂体迁移幅度较小(偏移量<50%)(图5a,b),前人研究中也称为堆叠型^[42];不稳定型砂体(偏移量≥50%)又可进一步区分为具有定向迁移特征的迁移型(图5c)和表现为无定向迁移特征的摆动型(图5d)。纵向上,砂体纵向厚度

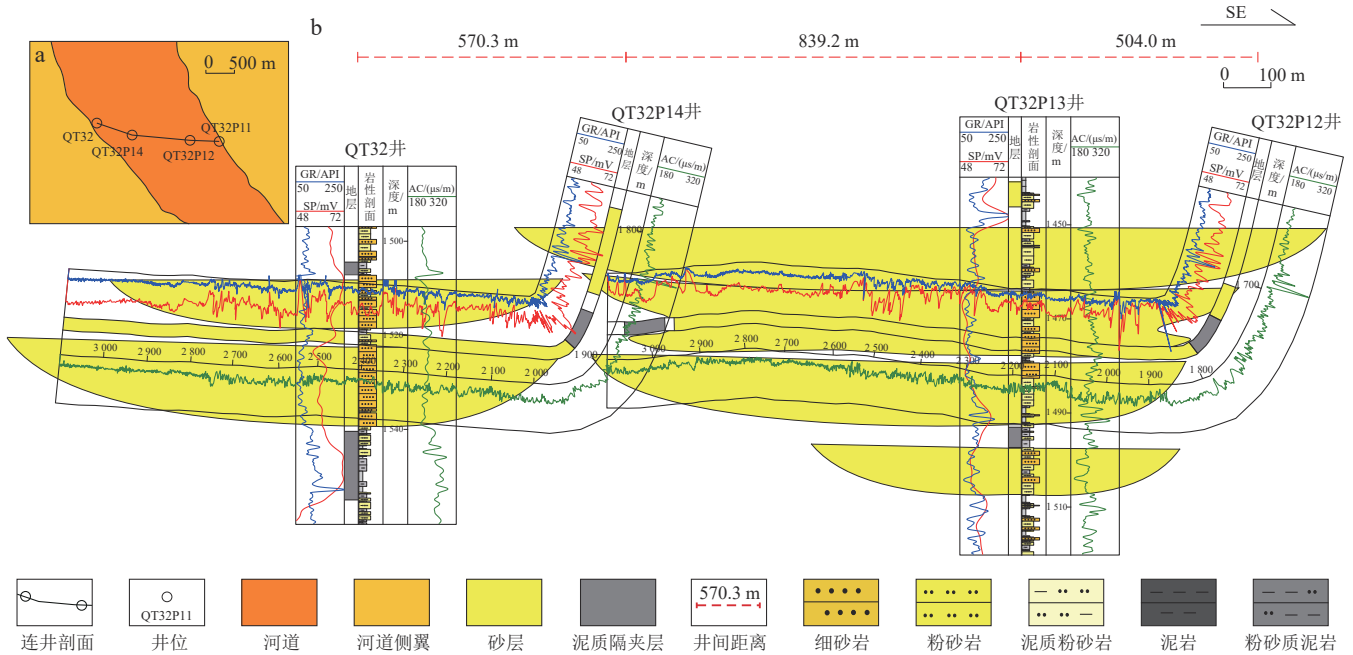


图4 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组水平井与邻近直井平面位置相图(a)与QT32井—QT32P14井—QT32P13井—QT32P12井单砂体构型连井剖面(b)(剖面位置见图1中剖面1)

Fig. 4 Map showing the positions of horizontal wells and adjacent vertical wells (a) and well-correlation section crossing wells QT32, QT32P14, QT32P13, and QT32P12 showing the architecture of individual sand bodies (b) in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin (see section 1 in Fig. 1 for the section location)

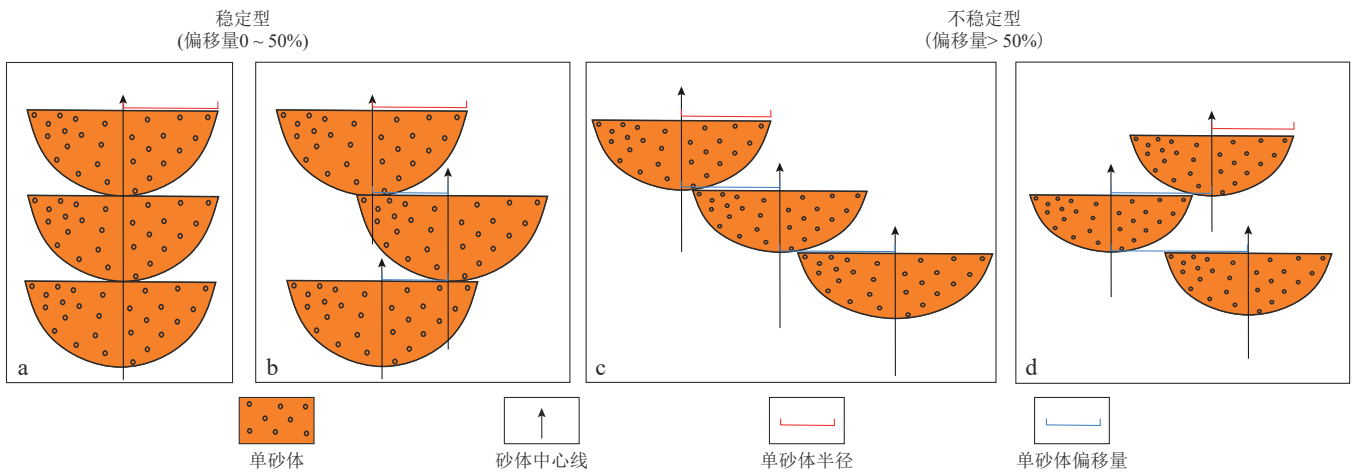


图5 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组砂体构型横向变化类型

Fig. 5 Lateral variation patterns of sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

a. 稳定型(几乎不偏移); b. 稳定型(局部发生偏移, 偏移量 < 50%); c. 迁移型(单方向偏移, 偏移量 > 50%); d. 摆动型(左右偏移, 偏移量 > 50%)

变化类型是指在垂向序列中,以单砂体厚度为量化指标的砂体规模变化特征,根据厚度的演变规律可细分为3种类型:等厚型(单砂体厚度在纵向上保持稳定)、增厚型(单砂体厚度沿纵向逐渐增大)和减薄型(单砂体厚度沿纵向逐渐减小)。

3.2 砂体构型定量规模

砂体的几何形态及规模主要受沉积环境控制^[19]。

不同砂体构型具有不同的规模分布,基于对研究区水平井和开发井的砂体构型剖面分析,系统统计各类砂体构型的厚度和宽度参数。统计结果表明,在厚度方面,连续叠加型厚度最大(平均值为8.6 m),其次是间隔叠加型(平均值为5.4 m),薄互层型(平均值为3.7 m)和单层型(平均值为3.2 m)相对较小;在宽度方面,连续叠加型和间隔叠加型都表现出较大的宽度(平均值分别为1 310.0 m和1 140.0 m),而薄互层型

宽度最小(平均值为650.0 m)(表1)。

这种规模差异与各类砂体构型的沉积成因密切相关。连续叠加型和间隔叠加型主要为砂质碎屑流和水下分流河道的产物,砂体规模大且稳定性较好;相比之下,薄互层型和单层型受沉积环境限制,整体规模相对较小。

4 砂体构型分布规律

研究区物源主要来自东北方向,砂体来源主要受两个区域相带控制:东北部三角洲前缘相带和西南部湖相重力流沉积^[43]。通过纵横交叉方法进行砂体构型分析,精细刻画构型展布规律。

4.1 纵向分布规律

水平井砂体构型剖面分析显示(图6),在纵向构

型中,连续叠加型和间隔叠加型砂体,其成因与分流河道及重力流水道的沉积作用密切相关,因此在沉积环境上兼具广泛性—既发育于三角洲前缘,也可见于深湖区域。重力流叠加型砂体构型的分布则相对局限,主要发育在三角洲向湖泊过渡的相带,即深湖边缘位置,这一区域的重力流活动为其形成提供了动力条件。薄互层型砂体的形成源于砂泥岩的频繁交替沉积,因此主要发育在相变频繁的相带;从具体分布来看,它们多见于三角洲前缘河道的边缘区域,包括河口坝、天然堤以及湖泊相重力流水道的两侧,且以朵叶体沉积和河道间沉积为主要表现形式。最后,单层型砂体的沉积类型更为多样,多为朵叶体和天然堤沉积,同时也包含部分深水重力流砂体沉积。

长7³油层亚组主要发育单层型和薄互层型,不见连续叠加型和间隔叠加型。该油层亚组以深湖沉积为主。此时砂体来源主要为部分单一水道的延伸和河道

表1 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组不同砂体构型定量规模统计

Table 1 Quantitative statistics of the scales of different sand body architecture types in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

砂体构型	厚度/m		宽度/m		宽/厚比
	分布范围	平均值	分布范围	平均值	
连续叠加型	3.5 ~ 12.6	8.6	620.0 ~ 1 940.0	1 310.0	152:1
间隔叠加型	2.6 ~ 8.4	5.4	560.0 ~ 1 910.0	1 140.0	211:1
薄互层型	1.5 ~ 5.8	3.7	470.0 ~ 1 320.0	650.0	175:1
单层型	2.1 ~ 7.2	3.2	410.0 ~ 1 890.0	760.0	237:1
平均值	—	5.3	—	1 015.0	191:1

注:“—”表示无数据。

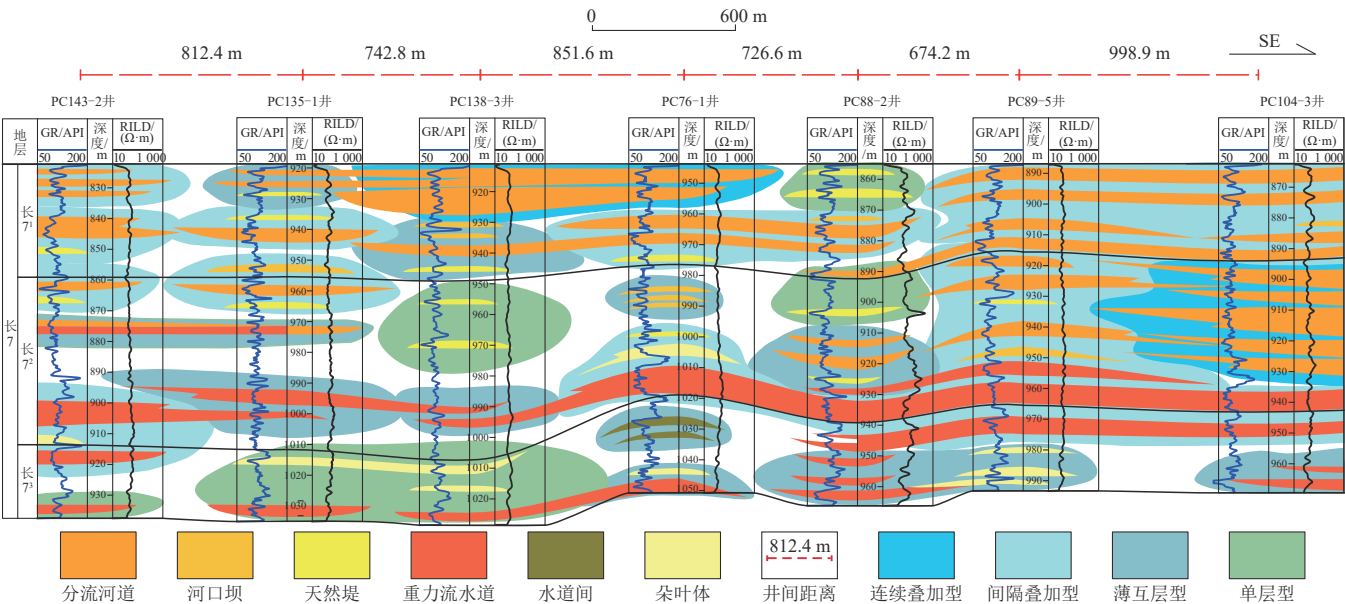


图6 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组纵向砂体构型连井剖面(剖面位置见图1剖面2)

Fig. 6 Well-correlation section showing the vertical sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin (see section 2 in Fig. 1 for the section location)

前缘朵叶体。由于湖盆扩张,这一沉积期不发育多期河道或沉积水道,陆源碎屑物质供给不足,故不发育连续叠加型和间隔叠加型构型。

长7²油层亚组主要发育间隔叠加型和单层型,局部发育连续叠加型,偶见薄互层型。该油层亚组三角洲前缘沉积和湖相重力流沉积均有发育。砂体主要源自重力流水道和朵叶体。

长7¹油层亚组主要发育连续叠加型、间隔叠加型和薄互层型,单层型少有发育。该油层亚组主要发育三角洲前缘沉积。砂体主要源自多期分流通河道砂体。

从长7油层组整体来看,研究区砂体构型主要发育稳定型,不稳定型多以重力流沉积为主(图7)。长7³油层亚组发育的大量重力流沉积导致该层段不稳定型构型显著增多,而长7¹~长7²油层亚组的三角洲前缘沉积环境相对稳定,其少量发育的不稳定型构型可能与河道迁移、湖平面波动及气候变化等因素有关^[19]。

4.2 平面分布规律

综合研究区沉积微相和小层单井测井相,对研究区340余口探井测井相进行逐一分类;将不同类型的测井曲线与沉积相叠加分析,并结合砂体构型模式图,识别出不同构型的分布特征;以沉积微相为基础控制构型大致分布范围,通过测井相区分构型的具体类型,最终完成不同砂体构型的平面表征。

长7³油层亚组沉积期是湖泛最大时期,碎屑物质供给不足,河道发育受限,砂体由重力流和局部河道沉积形成。该油层亚组主要发育薄互层型和单层型,少量间隔叠加型和连续叠加型。薄互层型分布在研究区中部,单层型在研究区西北、东南地区发育,间隔叠加型和连续叠加型在研究区东北一侧发育(图8a)。

长7²油层亚组沉积时期湖盆已经出现萎缩,陆源碎屑物质供给增多,发育大型多期河道,大量砂体在河道中相互叠置,砂体连片性增强,形成叠加型沉积构型。该油层亚组以连续叠加型和间隔叠加型为主,其次为薄互层型和单层型。连续叠加型和间隔叠加型主要发育在研究区北部和东北部地区,薄互层型主要分布在研究区中部和东南部地区,而单层型主要在研究区中部靠西部地区发育(图8b)。

长7¹油层亚组沉积期湖盆面积相对最小,陆源碎屑物质供给充足,河道多且延伸长,砂体连片叠加,大量砂体在河道以及重力流水道中形成。该油层亚组连续叠加型和间隔叠加型最为发育,薄互层型和单层型在局部发育。其中连续叠加型主要发育在研究区西北-西南部和东北部地区,间隔叠加型主要发育在北部区域和东北地区,而薄互层型主要发育在研究区中部向北一侧和东南部地区,单层型主要发育在中部靠南部地区(图8c)。

横向构型中,平面上砂体构型整体以稳定型为主

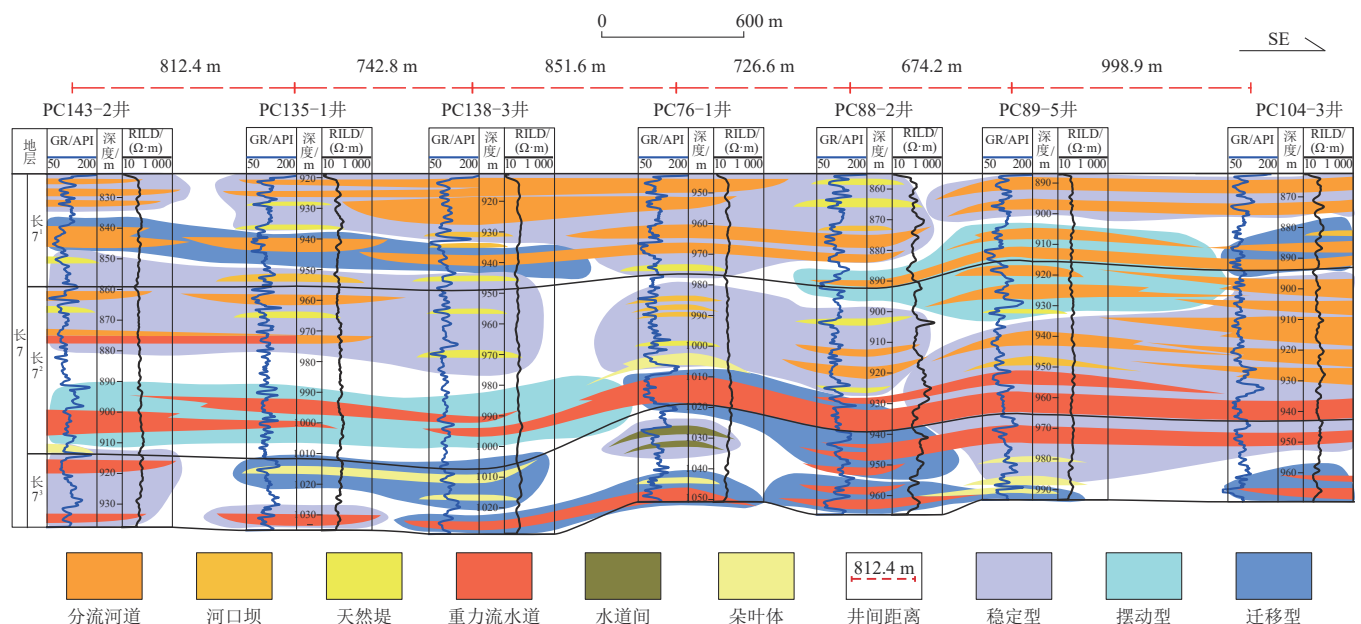


图7 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组横向砂体构型连井剖面(剖面位置见图1剖面2)

Fig. 7 Well-correlation section showing the lateral sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin (see section 2 in Fig. 1 for the section location)

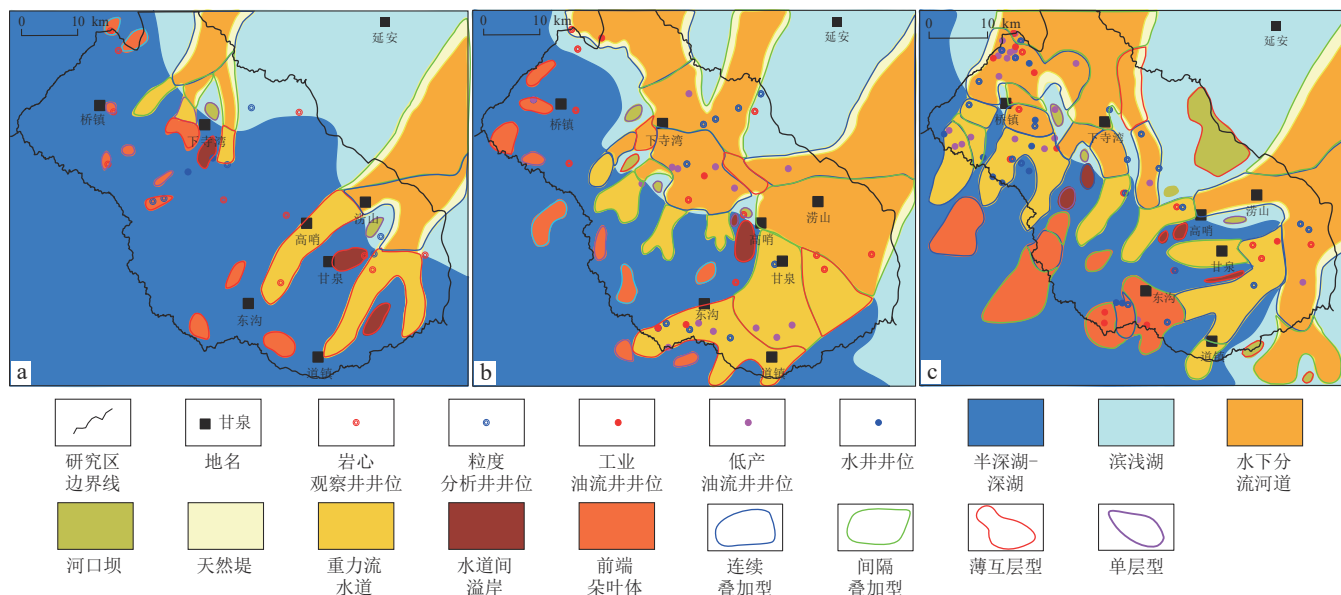


图8 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组纵向砂体构型平面分布

Fig. 8 Planar distribution map of vertical sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

a. 长7³油层亚组; b. 长7²油层亚组; c. 长7¹油层亚组

导,摆动型和迁移型在各层位发育规模相对有限。在长7³油层亚组,研究区东部和东北部地区主要发育稳定型,摆动型多发育在研究区中部,迁移型则集中分布于西南部地区(图9a)。长7²油层亚组研究区东南部以迁移型为主,西北部 and 东北部地区以稳定型为主,摆动型主要发育在中部地区(图9b)。长7¹油层亚组则是沿湖盆向东一侧发育稳定型,西北部主要发育迁移型,中部地区发育摆动型(图9c)。

5 砂体构型对油藏分布的控制

致密砂岩储层中,不同砂体构型显著影响着储层物性和含油性特征。根据前述构型分类模板,将研究区长7油层组试油层段与不同构型进行匹配,研究构型对储集层物性和含油性的控制作用,总结其对油气富集规律的影响。需要特别说明的是,由于不稳定

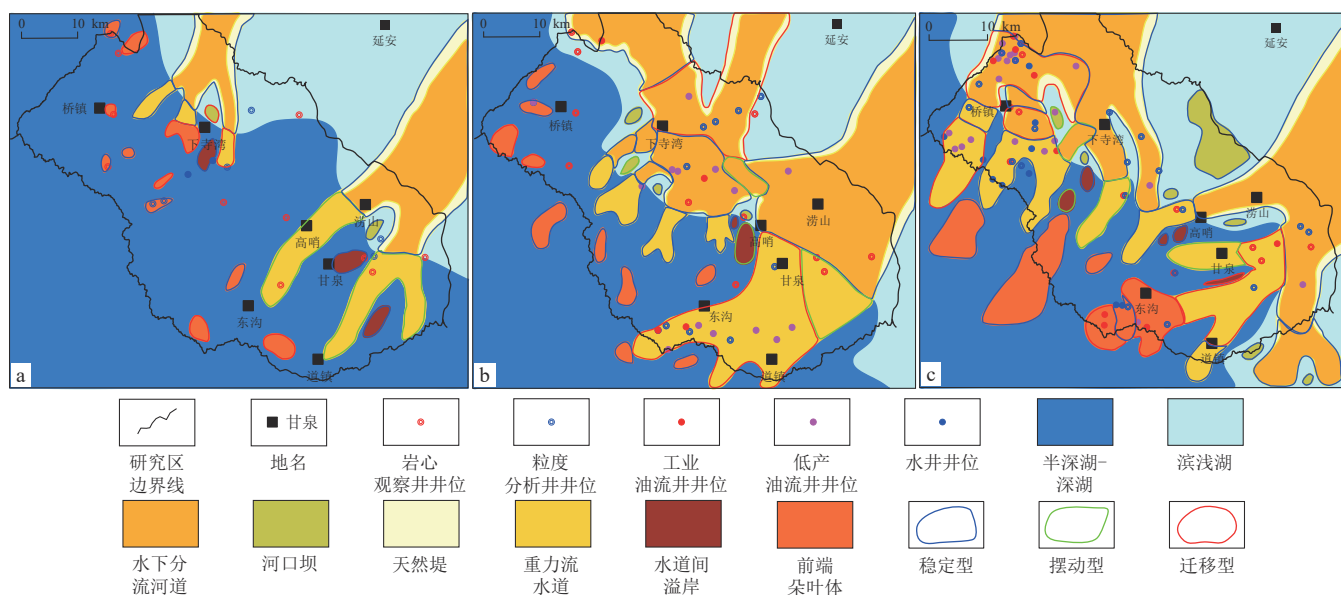


图9 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组横向砂体构型平面分布

Fig. 9 Planar distribution map of lateral sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

a. 长7³油层亚组; b. 长7²油层亚组; c. 长7¹油层亚组

型构型本身砂体结构稳定性差且储集性能普遍较差,其含油性远不如稳定型砂体构型,因此本研究仅就横向稳定型对应的4类构型进行讨论。

5.1 构型对储层的控制作用

通过对研究区长7油层组不同构型单砂体及其对应油层厚度的综合分析发现(图10a),油层厚度主要介于1.00~6.00 m。其中,间隔叠加型平均油层厚度最大(平均值为3.87 m),其次是连续叠加型(平均值为3.08 m),而薄互层型(平均值为2.35 m)和单层型(平均值为2.38 m)相对较小。

连续叠加型和间隔叠加型构型因其砂体发育厚度大且连续性好而含油性较好。其中,间隔叠加型油层厚度最大。研究区长7油层组烃源岩主要发育在长7³油层亚组,油气向上运移近源成藏^[44]。间隔叠加型砂体厚度与连续叠加型相当,但油层厚度显示更好。笔者认为这与其砂体之间的烃源岩发育有关系,砂岩中的烃源岩夹层既能阻挡油气的垂向运移,又可以作为相邻储层提供油源。而连续叠加型砂体因富砂程度高,砂体相互切叠,油气易于沿砂体交切部位逸散^[45],油气的保存条件相对较差,且相对远离烃源岩,油气充注相对不足,所以油层厚度较间隔叠加型薄,这也与延长组长7油层组“近源成藏、源内聚集”的观点符合^[46-47]。

对于孔隙度和砂体构型的关系来说,研究区孔隙度整体分布在6.00%~10.00%(图10b)。其中,连续叠加型和间隔叠加型孔隙度最优(平均值分别为8.23%和8.20%),其次为薄互层型(平均值为7.45%)和单层型(平均值为6.95%)。综合以上两个要素和砂体构型在研究区的特征表明,连续叠加型

和间隔叠加型砂体厚度大、含油性佳且孔隙度整体较好,即连续叠加型和间隔叠加型可作为研究区优势储层。

5.2 构型对含油性的控制作用

将研究区长7油层组含油饱和度、产量和砂体构型结合分析表明:连续叠加型构型含油饱和度最好(平均值为58.3%),其次是间隔叠加型(平均值为54.9%)和薄互层型(平均值为52.3%),单层型(平均值为43.2%)最差(图11a)。其中,薄互层型饱和度值变化幅度最大,笔者认为这与砂岩夹层中源岩是否发育有关,夹层中发育烃源岩层会使得饱和度较高,发育泥岩则饱和度较低。

研究区生产井和试油井的试油层段主要分布在连续叠加型和间隔叠加型构型中。其中,连续叠加型为研究区产量最优构型(平均值为0.61 m³/d),其次是间隔叠加型(平均值为0.26 m³/d)和薄互层型(平均值为0.11 m³/d)(图11b)。虽然间隔叠加型在储层表现一定优势,但其含油性不如连续叠加型,间隔叠加型储层的间断性使得其在产量上表现不如连续叠加型。以上结果表明,连续叠加型与间隔叠加型对油气的分布与富集均具有显著的控制作用。

结合研究区产油井进行分析,不同构型的油层厚度和产油量之间不存在明显的相关性。但主力生油层主要分布在连续叠加型和间隔叠加型这2种构型中,薄互层型仅2口井出油,且日产油量不到1 m³,而单层型几乎不见油气显示,这可能与单层型砂体厚度太薄以及饱和度较低导致并无工业油流产出(图12)。因此认为,连续叠加型和间隔叠加型砂体构型可作为研究区长7油层组的有利勘探目标。

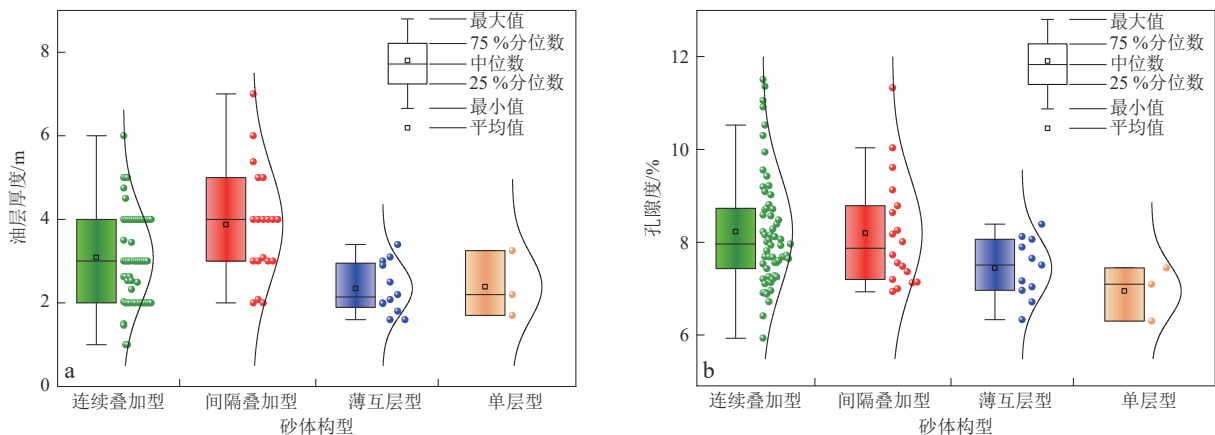


图10 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组不同构型油层厚度(a)和孔隙度(b)箱形图

Fig. 10 Box plots showing the oil layer thickness (a) and porosity (b) of different sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

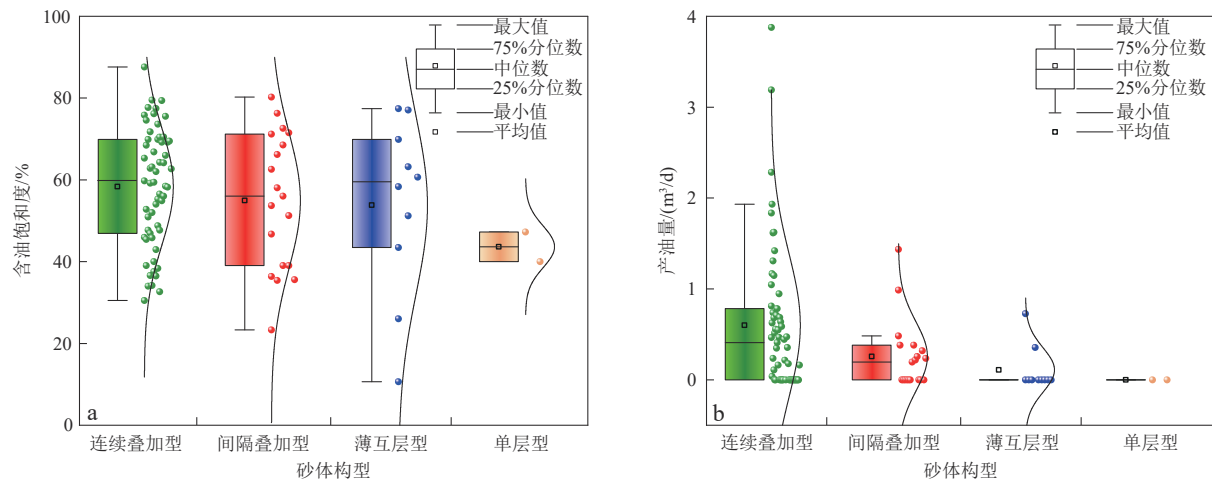


图11 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组不同构型含油饱和度(a)和对应油层产量(b)箱形图

Fig. 11 Box plots showing the oil saturation (a) and corresponding oil layer production (b) of different sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

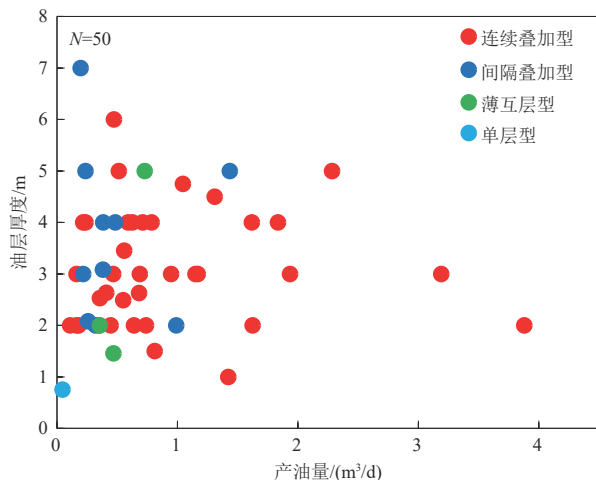


图12 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组不同构型产量和油层厚度关系

Fig. 12 Relationship between daily oil production and oil layer thickness across different sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

综合上述结果,针对连续叠加型和间隔叠加型油井进行单井构型分析。连续叠加型砂体测井响应表现为自然伽马测井值(平均值 < 80 API)、声波时差(平均值 $< 250 \mu\text{s/m}$)、深感应电阻率(平均值 $> 30 \Omega \cdot \text{m}$)和自然电位数值该层段变化幅度不大。孔隙度和含油饱和度较高,渗透率整体稳定在约 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图13)。该类砂体油气显示较好,该层段试油日产量可达 1.5 m^3 ,砂体间无稳定隔夹层,形成高连通性储集体;间隔叠加型砂体间有泥岩发育,测井曲线显示自然伽马值不稳定(介于 $70 \sim 140$ API)、声波时差变化幅度大(介于 $200 \sim 280 \mu\text{s/m}$)、深感应电阻率变化幅度

较小(平均值 $< 30 \Omega \cdot \text{m}$),孔隙度相对连续叠加型较小,渗透率非均质性强,物性表现整体不如连续叠加型。

5.3 构型对富集模式的控制作用

上述论证说明,不同构型物性和含油气性差异十分明显,研究区油藏主要分布在连续叠加型和间隔叠加型2种构型中。油气的形成不仅与储层的品质密切相关,还与烃源岩的发育位置高度关联。长7油层组源-储配置类型多样^[48-49],不同的配置关系直接导致油藏分布存在显著差异。

源-储配置类型和匹配程度决定了油气富集的形式,油气生成后会就近运移到较好的储层中,只有相互匹配的储层和烃源岩才能形成油气富集和工业产能^[50]。前人根据源-储厚度关系、源-储叠置关系、烃源岩品质和烃类运移距离等进行了源-储结构类型划分^[51-54]。本文在结合岩心观察、测井解释和砂/地比的基础上,建立了不同砂体构型特征对应的源-储结构划分方案(图14):①连续叠加型构型(单砂体厚度大,测井特征稳定,砂/地比大于 0.7 ,储层上下发育有稳定优质烃源岩);②间隔叠加型(单砂体厚度相对较小,测井特征相对稳定,砂/地比介于 $0.5 \sim 0.7$,储层上、下均发育中-厚层烃源岩,但砂体中部有泥质夹层);③薄互层型(单砂体厚度小,测井特征变化快,砂/地比介于 $0.3 \sim 0.5$,烃源岩和储层呈薄互层发育,且中间发育大量薄泥质夹层);④单层型(单砂体厚度整体偏薄,测井特征不稳定,砂/地比小于 0.3 ,烃源岩和储层发育不定,发育中-厚层烃源岩和中-厚层泥质隔层)。

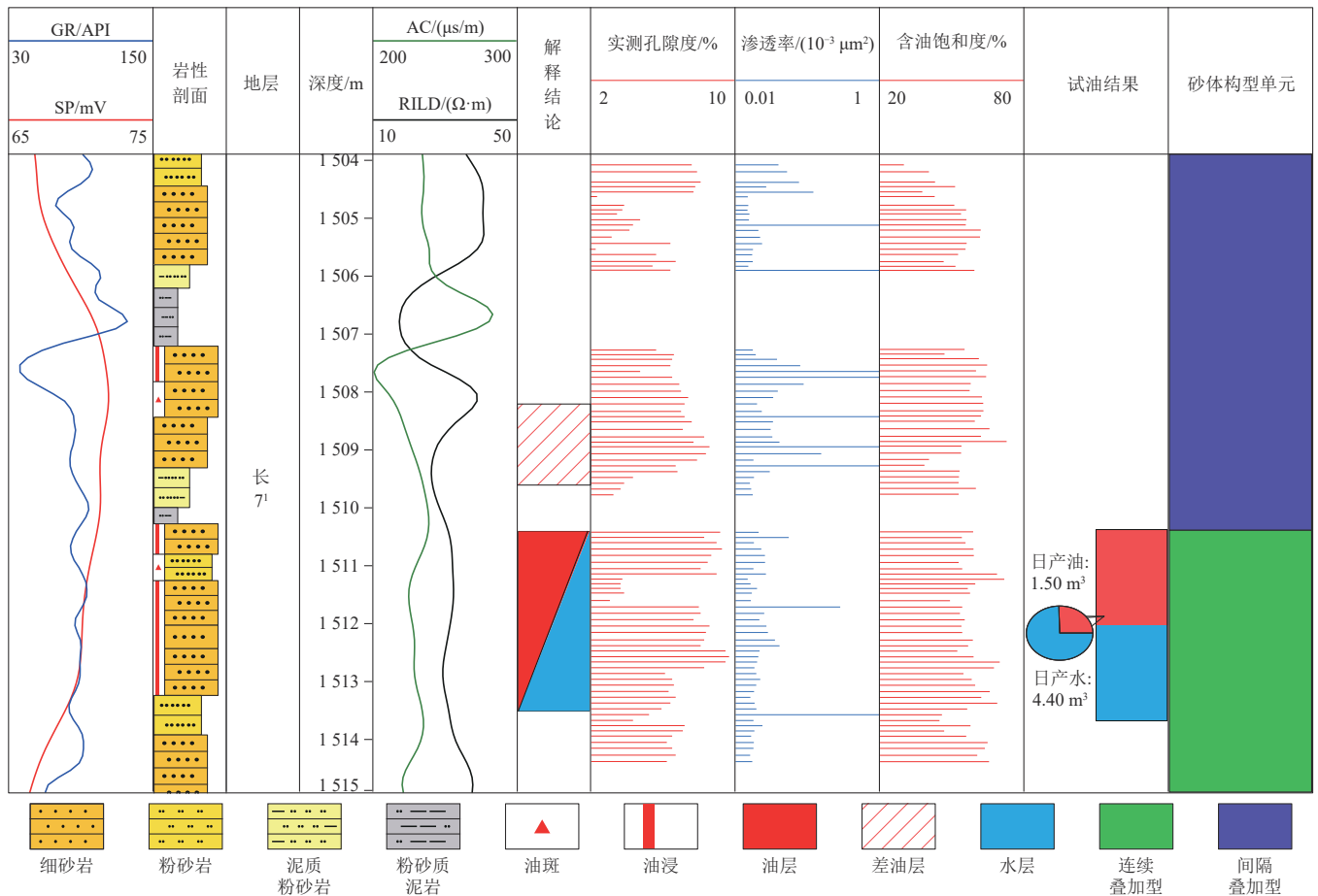


图13 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组QT32井砂体构型剖面

Fig. 13 Profile showing the sand body architectures in well QT32 within the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地长7³油层亚组发育大量暗色泥岩和黑色页岩,为长7¹和长7²油层亚组提供了丰厚的油源基础^[30,55]。结合试油和解释结论,进一步将不同砂体构型和油藏分布特征进行关联,建立了研究区对应砂体构型成藏模式图(图15)。

研究区长7油层组顶部发育一套稳定的暗色泥岩,既可作为源岩对该层段供烃,又可阻隔该层段油气向上运移。长7¹和长7²油层亚组发育的连续叠加型和间隔叠加型构型作为长7油层组的优势储集体,正是油气富集成藏的有利场所。长7³油层亚组主要发育薄互层型和少量单层型。其中,薄互层型以泥页岩和薄层粉-细砂岩互层为主,具有优越的生、盖条件,但储集性能差,该类型油气聚集受储层条件控制,有效厚度、有效孔隙度和非均质性等都会影响油气充注^[56];单层型砂体构型因发育在大套泥岩中,泥质隔夹层多,非均质性强^[57],其砂体形成的不稳定性与砂体本身的致密性导致难以形成较好的油气聚集(图15)。

5.4 水平井产量验证

不同沉积构型反映了沉积环境的细微变化,对砂体的形成、分布和性质具有重要影响,因此,在水平井开发过程中,了解目标区域的沉积构型特征,对于准确追踪砂体具有重要意义^[58-59]。结合研究区水平井开发数据,发现连续叠加型、间隔叠加型和薄互层型的水平井开发均有较高的产量。

连续叠加型初始产量最高,采出效率最快。到注采中期时,含水率上升,产量同步增加。但该类型由于储层厚度大,储集空间连通性好,油气易发生垂向运移,导致后期产量随时间变化递减较快(图16a);间隔叠加型从开采初期到中、后期产量相对稳定。后期随含水率升高,产量开始下降。该类型储层条件较好,且受上、下盖层保护,油气产出具有较强的稳定性(图16b);薄互层型虽受限于储层厚度,但具有良好的封盖条件,其产量从开采初期到现阶段始终维持在较低水平,但整体保持稳定(图16c)。

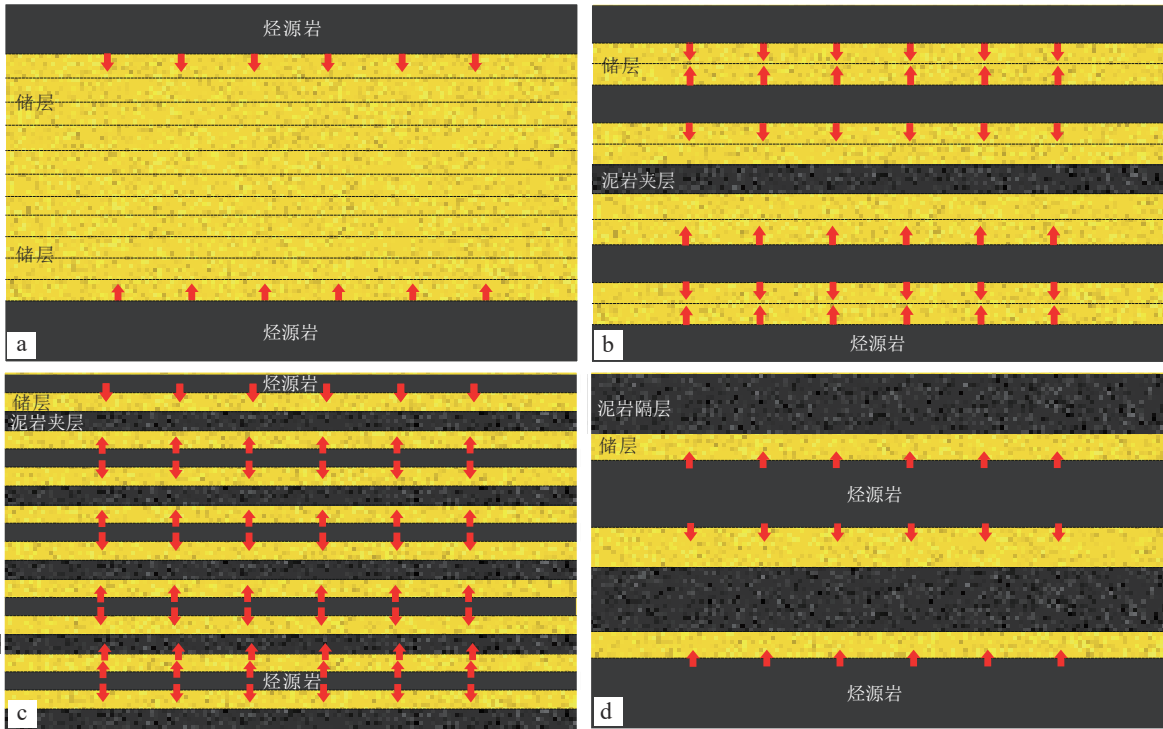


图 14 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组砂体构型源-储配置模式

Fig. 14 Source rock-reservoir configuration models of different sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin

a. 连续叠加型砂体 + 厚层烃源岩; b. 间隔叠加型砂体 + 中-厚层烃源岩; c. 薄互层型砂体 + 薄层烃源岩; d. 单层型砂体 + 厚层烃源岩 (图中红色箭头表示油气运移方向。)

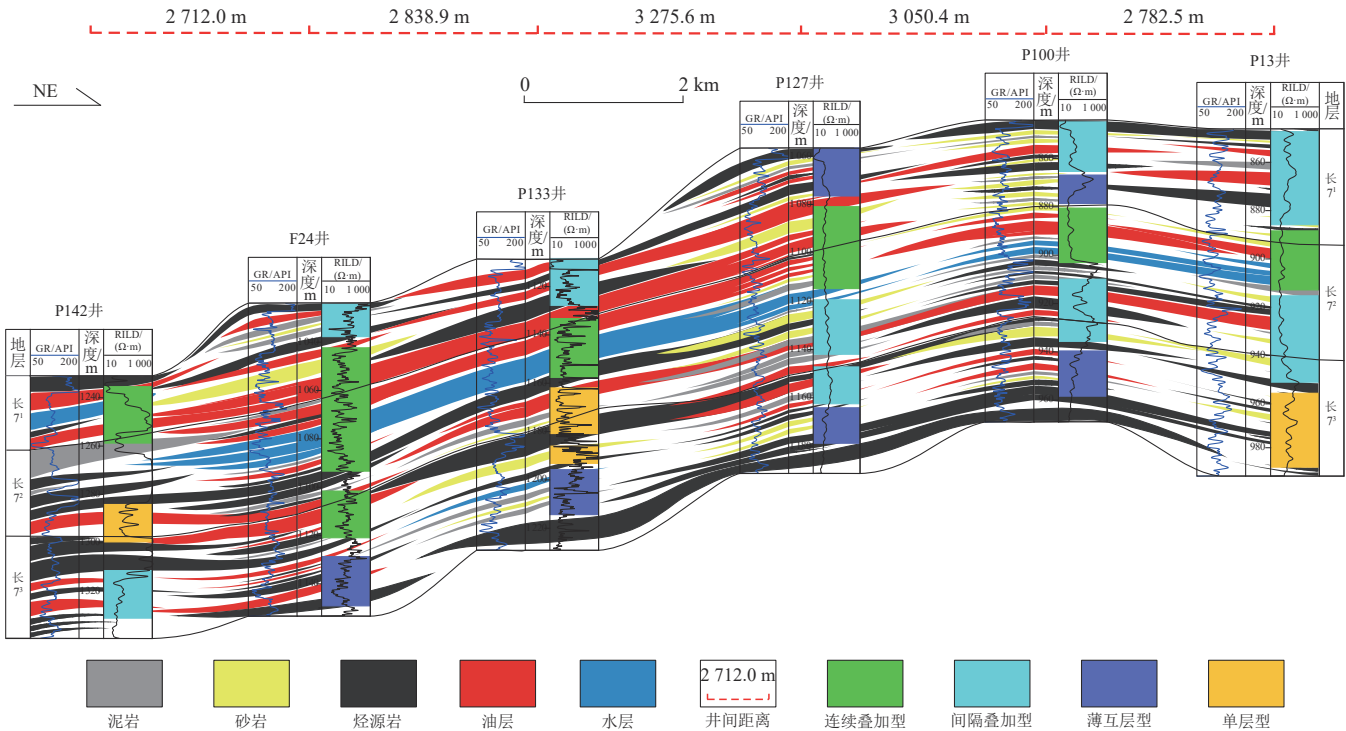


图 15 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组砂体构型控藏分布模式(剖面位置见图1剖面3)

Fig. 15 Well-correlation section showing oil reservoir distribution patterns under the control of different sand body architectures in the Chang 7 oil layer group, Ganquan area, Ordos Basin (see section 3 in Fig. 1 for the section location)

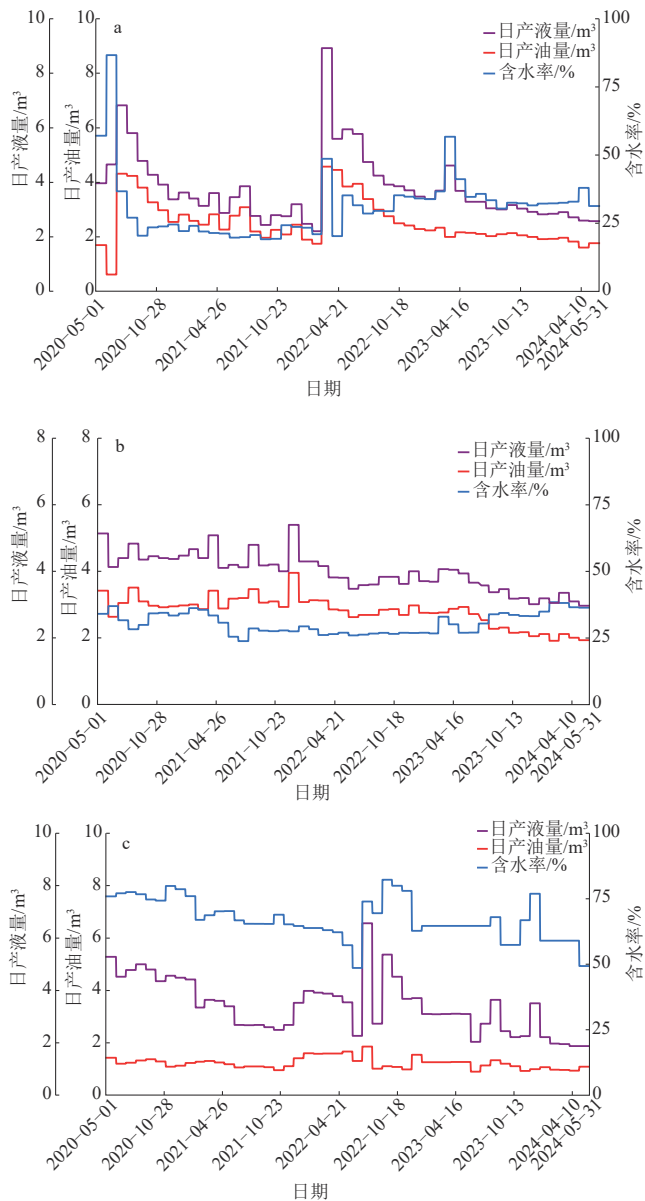


图16 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7油层组不同砂体构型水平井排采曲线

Fig. 16 Horizontal well drainage curves of different sand body configurations in Chang 7 reservoir group of Ganquan area, Ordos Basin

a. LP1井,连续叠加型; b. PP52井,间隔叠加型; c. PP4井,薄互层型

6 结论

1) 甘泉地区长7油层组纵向上砂体构型分为连续叠加型、间隔叠加型、薄互层型和单层型4种类型;横向上砂体构型可分为稳定型、摆动型和迁移型3种类型。

2) 通过纵、横方向对比,长7¹油层亚组主要发育连续叠加型和间隔叠加型,长7²油层亚组主要发育间

隔叠加型和薄互层型,长7³油层亚组主要发育薄互层和单层型;连续叠加型和间隔叠加型主要在研究区北部和东北部一带发育,薄互层型主要发育在研究区中部向南一侧的地区,单层型主要发育在研究区南部地区。

3) 不同的砂体构型对油藏分布的控制作用存在明显差异。连续叠加型和间隔叠加型具有较好的储集性能和含油性,间隔叠加型和薄互层型富集效率较好,连续叠加型产能最高。连续叠加型可作为下一步勘探的首选目标,间隔叠加型和薄互层型具有一定勘探潜力。

参 考 文 献

- [1] ALLEN J R L. Studies in fluvial sedimentation: Bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the brownstones (L. devonian), Welsh Borders[J]. Sedimentary Geology, 1983, 33(4): 237-293.
- [2] MIALD A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22(4): 261-308.
- [3] MIALD A D, JONES B G. Fluvial architecture of the Hawkesbury sandstone (Triassic), Near Sydney, Australia [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(4): 531-545.
- [4] 封从军, 赵逸, 贾鹏, 等. 浅水湖盆三角洲储层构型模式探讨[J]. 地质科学, 2013, 48(4): 1234-1245.
FENG Congjun, ZHAO Yi, JIA Peng, et al. Reservoir architecture model of shallow lacustrine delta[J]. Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica), 2013, 48(4): 1234-1245.
- [5] 封从军, 鲍志东, 杨玲, 等. 三角洲前缘水下分流河道储集层构型及剩余油分布[J]. 石油勘探与开发, 2014, 48(3): 323-329.
FENG Congjun, BAO Zhidong, YANG Ling, et al. Reservoir architecture and remaining oil distribution of deltaic front underwater distributary channel [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 48(3): 323-329.
- [6] 何文祥, 吴胜和, 唐义疆, 等. 河口坝砂体构型精细解剖[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 42-46.
HE Wenxiang, WU Shenghe, TANG Yijiang, et al. Detailed architecture analyses of debouch bar in Shengtuo Oilfield, Jiyang Depression [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 42-46.
- [7] 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 99-103.
YUE Dali, WU Shenghe, LIU Jianmin. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4):

- 99-103.
- [8] 吴胜和, 徐振华, 刘钊. 河控浅水三角洲沉积构型[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 202-215.
- WU Shenghe, XU Zhenhua, LIU Zhao. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(2): 202-215.
- [9] 徐振华, 邓航, 吴胜和, 等. 河控浅水三角洲前缘树枝状沙坝沉积构型与形成机理[J]. 古地理学报, 2024, 26(6): 1338-1351.
- XU Zhenhua, DENG Hang, WU Shenghe, et al. Depositional architecture and formative mechanism of dendritic bars within river-dominated shallow-water delta front [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2024, 26(6): 1338-1351.
- [10] POSAMENTIER H W, WALKER R G. Deep-water turbidites and submarine fans [M]//POSAMENTIER H W, WALKER R G. Facies Models Revisited. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 2006: 397-520.
- [11] MULDER T, ALEXANDER J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J]. Sedimentology, 2001, 48(2): 269-299.
- [12] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s): Deep-water processes and facies models—a critical perspective[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17(2): 285-342.
- [13] 吕奇奇, 付金华, 罗顺社, 等. 坳陷湖盆重力流水道-朵叶复合体沉积特征及模式——以鄂尔多斯盆地西南部三叠系延长组长7段为例[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(6): 1143-1156.
- LYU Qiqi, FU Jinhua, LUO Shunshu, et al. Sedimentary characteristics and model of gravity flow channel-lobe complex in a depression lake basin: A case study of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in southwestern Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1143-1156.
- [14] 朱卫红, 吴胜和, 尹志军, 等. 辫状河三角洲露头构型——以塔里木盆地库车坳陷三叠系黄山街组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 482-489.
- ZHU Weihong, WU Shenghe, YIN Zhijun, et al. Braided river delta outcrop architecture: A case study of Triassic Huangshanjie Formation in Kuche depression, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 482-489.
- [15] 王勃力. 定边东仁沟沟区长7段致密储层砂体构型及水平井参数优化[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- WANG Boli. Sand body architecture and horizontal well parameter optimization of tight reservoir of Chang 7 member in Dongrengou oil block, Dingbian [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [16] 刘瑞璟, 岳大力, 白斌, 等. 鄂尔多斯盆地庆城油田Z211井区长6油组湖底扇多级次砂体构型表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(2): 42-55.
- LIU Ruijing, YUE Dali, BAI Bin, et al. Multilevel sand architecture characterization of sub-lacustrine fan in Chang-6 member, Z211 area, Qingcheng Oilfield, Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025, 49(2): 42-55.
- [17] 崔明明, 李进步, 王宗秀, 等. 辫状河三角洲前缘致密砂岩储层特征及优质储层控制因素——以苏里格气田西南部石盒子组8段为例[J]. 石油学报, 2019, 40(3): 279-294.
- CUI Mingming, LI Jinbu, WANG Zongxiu, et al. Characteristics of tight sand reservoir and controlling factors of high-quality reservoir at braided delta front: A case study from Member 8 of Shihezi Formation in southwestern Sulige Gas Field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(3): 279-294.
- [18] 童强. 鄂尔多斯盆地史家湾-堡子湾地区长8₂-长9砂体构型及多因素耦合储层综合评价[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- TONG Qiang. Reservoir architecture of Chang 8₂-Chang 9 and comprehensive reservoir evaluation with multi factors coupling in Shijiawan-Buziwan area, Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.
- [19] 封从军, 鲍志东, 代春明, 等. 三角洲前缘水下分流河道单砂体叠置机理及对剩余油的控制——以扶余油田J19区块泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 128-135.
- FENG Congjun, BAO Zhidong, DAI Chunming, et al. Superimposition patterns of underwater distributary channel sands in deltaic front and its control on remaining oil distribution: A case study from K₁q⁴ in J19 Block, Fuyu Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(1): 128-135.
- [20] 吴胜和, 岳大力, 刘建民, 等. 地下古河道储层构型的层次建模研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(增刊1): 111-121.
- WU Shenghe, YUE Dali, LIU Jianmin, et al. Research on hierarchical modeling of underground ancient channel reservoir configuration [J]. Science China Earth Sciences, 2008, 38(S1): 111-121.
- [21] 曾祥平. 储集层构型研究在油田精细开发中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(4): 483-489.
- ZENG Xiangping. Application of reservoir structure research in the fine exploitation of oilfields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(4): 483-489.
- [22] 万琼华, 吴胜和, 陈亮, 等. 基于深水浊积水道构型的流动单元分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 306-313.
- WAN Qionghua, WU Shenghe, CHEN Liang, et al. Analysis of flow unit distribution based on architecture of deep-water turbidite channel systems [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 306-313.
- [23] 龙明, 徐怀民, 江同文, 等. 滨岸相碎屑岩储集层构型动态评

- 价[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 754-763.
- LONG Ming, XU Huaimin, JIANG Tongwen, et al. Performance evaluation for littoral-facies clastic reservoir architecture [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39 (6) : 754-763.
- [24] 印森林, 陈恭洋, 戴春明, 等. 河口坝内部储层构型及剩余油分布特征——以大港油田枣南断块长轴缓坡辫状河三角洲为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 630-639.
- YIN Senlin, CHEN Gongyang, DAI Chunming, et al. Reservoir architecture and remaining oil distribution in mouth bar—A case study on the braided delta of long-axis gentle slope in Zaonan fault block of Dagang Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 630-639.
- [25] 鲍志东, 李忠诚, 陈栗, 等. 成熟探区相控油藏储集体精细表征与产能劈分[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(3): 61-77.
- BAO Zhidong, LI Zhongcheng, CHEN Li, et al. Fine reservoir characterization and capacity splitting of facies controlled oil reservoir in mature petroleum exploration areas [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(3): 61-77.
- [26] 李宇鹏, 吴胜和. 储集层构型分级套合模拟方法[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 630-635.
- LI Yupeng, WU Shenghe. Hierarchical nested simulation approach in reservoir architecture modeling [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 630-635.
- [27] 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1015-1026.
- SUN Longde, ZOU Caineng, JIA Ailin, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46 (6) : 1015-1026.
- [28] 张军, 白玉彬, 闫新智, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区长7段深水重力流沉积及勘探意义[J/OL]. 沉积学报: 1-21 [2025-04-25]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>.
- ZHANG Jun, BAI Yubin, YAN Xinzhi, et al. Sedimentary characteristics of deep-water gravity flow in the Chang 7 member of the Yanchang Formation in the Fuxian area, Ordos Basin and its significance for petroleum exploration [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-21 [2025-04-25]. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>.
- [29] 付金华, 喻建, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地致密油勘探开发新进展及规模富集可开发主控因素[J]. 中国石油勘探, 2015, 20(5): 9-19.
- FU Jinhua, YU Jian, XU Liming, et al. New progress in exploration and development of tight oil in Ordos Basin and main controlling factors of large-scale enrichment and exploitable capacity [J]. China Petroleum Exploration, 2015, 20(5): 9-19.
- [30] 葛云锦, 任来义, 贺永红, 等. 鄂尔多斯盆地富县—甘泉地区三叠系延长组7油层组致密油富集主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(6): 1190-1200.
- GE Yunjin, REN Laiyi, HE Yonghong, et al. Main factors controlling the tight oil enrichment in the 7th oil layer group of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian-Ganquan area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(6): 1190-1200.
- [31] 杨智, 付金华, 郭秋麟, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相致密油发现、特征及潜力[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(6): 9-15.
- YANG Zhi, FU Jinhua, GUO Qiulin, et al. Discovery, characteristics and resource potential of continental tight oil in Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(6): 9-15.
- [32] 尹虎, 屈红军, 孙晓晗, 等. 鄂尔多斯盆地东南部三叠系长7油层组深水沉积特征及演化规律[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(5): 145-155.
- YIN Hu, QU Hongjun, SUN Xiaohan, et al. Characteristics of deep-water deposits and evolution law of Triassic Chang 7 reservoir in southeastern Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(5): 145-155.
- [33] 王永乐, 马俊生, 陈剑峰, 等. 鄂尔多斯盆地东南部山西组曲流河三角洲构型特征及沉积模式[J]. 东北石油大学学报, 2022, 46(5): 26-39.
- WANG Yongle, MA Junsheng, CHEN Jianfeng, et al. Architectural characteristics and sedimentary model of meandering river delta of Shanxi Formation in the southeast of Ordos Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2022, 46(5): 26-39.
- [34] 徐潇, 赵俊兴, 解古巍, 等. 基准面升降变化控制下的湖泊三角洲前缘砂体构型耦合关系研究——以鄂尔多斯盆地东南部地区延长组长6-长8为例[J]. 矿物岩石, 2024, 44(4): 178-192.
- XU Xiao, ZHAO Junxing, XIE Guwei, et al. Study on the coupling relationship between base level changes and sand body configuration of lake delta front: A case study of Chang 6 to Chang 8 of the Yanchang Formation in the southeastern Ordos Basin [J]. Mineralogy and Petrology, 2024, 44(4): 178-192.
- [35] 刘池洋, 王建强, 张东东, 等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存-成藏特点[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(5): 1011-1029.
- LIU Chiyang, WANG Jianqiang, ZHANG Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(5): 1011-1029.
- [36] 陈飞, 胡光义, 孙立春, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区上三叠统延长组砂质碎屑流沉积特征及其油气勘探意义[J]. 沉积学报, 2012, 30(6): 1042-1052.
- CHEN Fei, HU Guangyi, SUN Lichun, et al. Sedimentary characteristics and the significance of petroleum exploration of

- sandy debris flows of Yanchang Formation of the Upper Triassic, Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(6): 1042–1052.
- [37] 李威, 文志刚. 鄂尔多斯盆地西南地区延长组长7段细粒沉积物特征研究[J]. *地质学报*, 2017, 91(5): 1120–1129.
- LI Wei, WEN Zhigang. Characteristics of fine-grained sediments from the 7th member of the Yanchang Formation in the southwestern Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(5): 1120–1129.
- [38] 朱必清, 陈世加, 白艳军, 等. 鄂尔多斯盆地甘泉地区延长组长8段原油地球化学特征及来源[J]. *现代地质*, 2022, 36(2): 742–754.
- ZHU Biqing, CHEN Shijia, BAI Yanjun, et al. Geochemical characteristics and source of crude oil in Chang 8 member of Yanchang Formation, Ganquan area, Ordos Basin [J]. *Geoscience*, 2022, 36(2): 742–754.
- [39] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 130–181.
- YANG Junjie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in ordos basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 130–181.
- [40] 张佳佳, 吴胜和, 王瑞峰, 等. 东非鲁伍马盆地深水X气藏海底扇储层构型研究: 重力流—底流交互作用的指示意义[J]. *古地理学报*, 2023, 25(1): 163–179.
- ZHANG Jiajia, WU Shenghe, WANG Ruifeng, et al. Submarine-fan reservoir architecture of deepwater gasfield X in Rovuma Basin offshore East Africa: Insights for the interaction between sediment gravity flows and bottom currents [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(1): 163–179.
- [41] 马江波, 冯纪慧, 李刚, 等. 安塞油田黑山梁区长6油层组单砂体构型分析及平面展布特征[J]. *地质科学*, 2024, 59(4): 1018–1033.
- MA Jiangbo, FENG Jihui, LI Gang, et al. Configuration analysis and plane distribution characteristics of single sand body in Chang 6 reservoir formation of Heishanliang area, Ansai Oilfield [J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 2024, 59(4): 1018–1033.
- [42] 胡光义, 范廷恩, 陈飞, 等. 复合砂体构型理论及其生产应用[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 1–10.
- HU Guangyi, FAN Tingen, CHEN Fei, et al. Theory of composite sand body architecture and its application to oilfield development [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 1–10.
- [43] 陈义国, 封从军, 魏登峰, 等. 鄂尔多斯盆地东南部三叠系延长组6段致密油的形成、分布与勘探对策[J]. *石油学报*, 2025, 46(2): 335–354.
- CHEN Yiguo, FENG Congjun, WEI Dengfeng, et al. Formation, distribution, and exploration strategies of tight oil in the Member 6 of Triassic Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(2): 335–354.
- [44] 肖正录, 李勇, 喻健, 等. 致密油“近源成藏”关键地球化学证据——以鄂尔多斯盆地延长组近源组合为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(3): 517–527.
- XIAO Zhenglu, LI Yong, YU Jian, et al. Key geochemical evidence of “near-source accumulation” of tight oil: A case study of near-source assemblage of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(3): 517–527.
- [45] 杨海风, 石文龙, 张中巧, 等. 莱州湾洼陷带浅层岩性油藏富集机理与亿吨级油田新发现——以垦利10-2油田为例[J]. *中国海上油气*, 2024, 36(4): 23–36.
- YANG Haifeng, SHI Wenlong, ZHANG Zhongqiao, et al. Enrichment mechanism of shallow lithologic reservoirs and newly discovered billion-ton oilfield in depression zone of Laizhou Bay Sag: A case study of KL10-2 Oilfield [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2024, 36(4): 23–36.
- [46] 赵靖舟, 孟选刚, 韩载华. 近源成藏——来自鄂尔多斯盆地延长组湖盆东部“边缘”延长组6段原油的地球化学证据[J]. *石油学报*, 2020, 41(12): 1513–1526.
- ZHAO Jingzhou, MENG Xuangang, HAN Zaihua. Near-source hydrocarbon accumulation: Geochemical evidence of lacustrine crude oil from the member 6 of Yanchang Formation, eastern margin of Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(12): 1513–1526.
- [47] 牟蜚声, 尹相东, 胡琮, 等. 鄂尔多斯盆地陕北地区三叠系长7段致密油分布特征及控制因素[J]. *岩性油气藏*, 2024, 36(4): 71–84.
- MOU Feisheng, YIN Xiangdong, HU Cong, et al. Distribution characteristics and controlling factors of tight oil of Triassic Chang 7 member in northern Shaanxi area, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(4): 71–84.
- [48] 王福伟, 陈冬霞, 解广杰, 等. 鄂尔多斯盆地庆城地区延长组7段源-储结构控制下致密砂岩油的差异富集机制[J]. *石油学报*, 2022, 43(7): 941–956, 976.
- WANG Fuwei, CHEN Dongxia, XIE Guangjie, et al. Differential enrichment mechanism of tight sandstone oil under the control of the source-reservoir structures of Member 7 of Yanchang Formation in Qingcheng area, Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(7): 941–956, 976.
- [49] 何发岐, 朱建辉, 齐荣, 等. 基于天文周期等时格架预测细粒沉积岩相展布——以鄂尔多斯盆地富县地区三叠系长7段为例[J]. *石油实验地质*, 2024, 46(5): 927–940.
- HE Faqi, ZHU Jianhui, QI Rong, et al. Prediction of fine-grained sedimentary lithofacies distribution based on astronomical cycle isochronous lattice: A case study of Triassic Chang 7 member of Fuxian area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024, 46(5): 927–940.

- [50] 李潮流,王长胜,张文静,等. 陆相湖盆夹层型页岩油甜点分级测井评价方法研究——以鄂尔多斯盆地陕北吴起地区延长组长7段为例[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(4): 156–165.
LI Chaoliu, WANG Changsheng, ZHANG Wenjing, et al. Logging evaluation method for sweet spots classification of the interlayered type shale oil in continental lake basin: A case study of the seventh member of Yanchang Formation in Wuqi area in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(4): 156–165.
- [51] 付锁堂,姚泾利,李士祥,等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组陆相页岩油富集特征与资源潜力[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 698–710.
FU Suotang, YAO Jingli, LI Shixiang, et al. Enrichment characteristics and resource potential of continental shale oil in Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(5): 698–710.
- [52] 高岗,梁晓伟,朱康乐,等. 鄂尔多斯盆地长7段源储组合特征与油气成藏模式[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 198–205.
GAO Gang, LIANG Xiaowei, ZHU Kangle, et al. Characteristics of source-reservoir assemblage and hydrocarbon accumulation model of Chang 7 member in Ordos Basin [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(3): 198–205.
- [53] 刘雨林,范凌霄,房大志,等. 源—储分类新方法在川东地区页岩气井产量分析中的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(3): 429–436.
LIU Yulin, FAN Lingxiao, FANG Dazhi, et al. Application of a new source-reservoir classification method in production analysis of shale gas wells in eastern Sichuan [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(3): 429–436.
- [54] 郭旭升,胡宗全,申宝剑,等. 中国页岩油气源—储耦合类型划分及勘探意义[J]. 石油学报, 2024, 45(11): 1565–1578.
GUO Xusheng, HU Zongquan, SHEN Baojian, et al. Classification and exploration significance of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(11): 1565–1578.
- [55] 张凤奇,张凤博,钟红利,等. 鄂尔多斯盆地甘泉南部地区延长组长7致密油富集主控因素[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(3): 12–19.
ZHANG Fengqi, ZHANG Fengbo, ZHONG Hongli, et al. Main controlling factors of the enrichment of Chang 7 tight oil of Yanchang Formation in southern Ganquan area, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2016, 28(3): 12–19.
- [56] 陈义国,贺永红,王超,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组8段非常规油藏成因与成藏模式——以盆地东南部甘泉西区为例[J]. 石油学报, 2021, 42(10): 1270–1286.
CHEN Yiguo, HE Yonghong, WANG Chao, et al. Genesis and accumulation patterns of unconventional oil reservoir in member 8 of Triassic Yanchang Formation: A case study of the western Ganquan area, southeastern Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(10): 1270–1286.
- [57] 钟红利,卓自敏,张凤奇,等. 鄂尔多斯盆地甘泉地区长7页岩油储层非均质性及其控油规律[J]. 特种油气藏, 2023, 30(4): 10–18.
ZHONG Hongli, ZHUO Zimin, ZHANG Fengqi, et al. Heterogeneity of Chang 7 shale oil reservoir and its oil control law in Ganquan area, Ordos Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(4): 10–18.
- [58] 屈雪峰,何右安,尤源,等. 鄂尔多斯盆地庆城油田页岩油开发技术探索与实践[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(4): 170–180.
QU Xuefeng, HE Youan, YOU Yuan, et al. Research and practice of shale oil development technology in Qingcheng Oilfield of Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(4): 170–180.
- [59] 邬德刚,吴胜和,刘常妮,等. 基于平面约束的三维砂体构型建模方法[J/OL]. 中国石油大学学报(自然科学版): 1–13 [2025–07–28]. <https://link.cnki.net/urlid/37.1441.TE.20240617.1429.002>.
WU Degang, WU Shenghe, LIU Changni, et al. An intelligent 3D reservoir modeling method with constraint from planar distribution of sedimentary facies [J/OL]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science): 1–13 [2025–07–28]. <https://link.cnki.net/urlid/37.1441.TE.20240617.1429.002>.

(编辑 王 迪)