

文章编号: 1671-1505(2024)03-0525-20 DOI:10.7605/gdxb.2024.03.049

西湖凹陷花港组浅水三角洲平原分流河道沉积构型*

杨 征^{1,2} 吴胜和^{1,2} 段冬平³ 徐振华^{1,2} 熊绮聪^{1,2} 张玉飞^{1,2}

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

3 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

摘 要 渐新统花港组上段是东海陆架盆地西湖凹陷中南部地区的主要产油气层位, 但对其沉积体系的认识一直存在争议, 砂体构型特征及控制因素的研究也相对匮乏。综合运用岩心、测井及地震等资料, 研究渐新统花港组上段沉积环境、沉积微相类型、砂体沉积构型特征及其控制因素。结果表明: 西湖凹陷中南部花港组上段以浅水三角洲平原沉积为主, 分流河道是最主要的砂体类型。根据弯曲度差异, 可将分流河道划分为辫流型(弯曲度 1~1.05)、曲流型(弯曲度大于 1.15)和辫-曲转换型(弯曲度 1.05~1.15) 3 种类型, 其中辫流型分流河道砂体“宽而厚”, 平面组合呈交织宽条带状, 心滩呈斑点状排列, 砂体垂向叠置样式以切叠型为主; 曲流型分流河道砂体“窄而薄”, 平面样式为单一条带型或分叉-合并型, 厚砂以点坝的形式分布在河道边缘, 砂体垂向叠置样式以“孤立型”为主; 辫-曲转换型分流河道是辫流型和曲流型的过渡类型, 河道砂体规模中等, 河道内心滩和点坝同时发育。3 类分流河道的厚度与宽度呈对数正相关, 宽厚比具有辫流型>辫-曲转换型>曲流型的特征。推测古地貌和基准面变化是影响浅水三角洲分流河道构型特征的主要因素, 其中古地貌控制了分流河道的河型变化, 较陡的地形有利于低弯度辫流型分流河道的形成, 而长期基准面上升造成了分流河道规模逐渐下降, 中期基准面的上升造成了分流河道砂体叠置样式发生切叠型→叠加型→孤立型的演变。研究成果完善了浅水三角洲的沉积构型知识库, 对地下浅水三角洲分流河道储集层的预测及开发具有重要的指导意义。

关键词 东海陆架盆地 西湖凹陷 渐新统 花港组 浅水三角洲 分流河道 沉积构型

第一作者简介 杨征, 男, 1995 年生, 中国石油大学(北京)博士研究生, 主要从事沉积学、储层表征与建模研究工作。E-mail: 632255079@qq.com。

通讯作者简介 吴胜和, 男, 1964 年生, 中国石油大学(北京)教授、博士生导师, 主要从事沉积学、储层表征与建模研究。E-mail: reser@cup.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Architecture characteristics of distributary channels in shallow water delta plain of the Huagang Formation in Xihu sag, East China Sea

YANG Zheng^{1,2} WU Shenghe^{1,2} DUAN Dongping³ XU Zhenhua^{1,2} XIONG Qicong^{1,2} ZHANG Yufei^{1,2}

1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Shanghai Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract The upper Oligocene Huagang Formation is crucial for oil and gas exploration in the cen-

* 国家自然科学基金项目(编号: 42272110)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 42272110)]

收稿日期: 2023-12-05 改回日期: 2024-02-26

tral and southern Xihu sag of the East China Sea Shelf Basin. However, there has been ongoing debate on the sedimentary system, and limited research has been conducted on the characteristics of sand body architecture and the controlling factors. This paper studied the sedimentary environment, microfacies types, sand body architecture, and controlling factors of the upper Oligocene Huagang Formation through a comprehensive analysis of core, logging, and seismic data. The upper Huagang Formation in the central-south part of Xihu sag shows shallow-water delta plain sedimentation, with distributary channels being the predominant type of sand body. These distributary channels are categorized into three types based on their curvature: braided (curvature = $1 \sim 1.05$), meandering (curvature > 1.15), and braided-meander transition (curvature = $1.05 \sim 1.15$). The sand bodies found in braided distributary channels are wide and thick, with intertwined wide bands. Channel bars in these channels are arranged in a speckled pattern. The sand body's vertical stacking style is mainly characterized as incised stacking. In contrast, the sand bodies in meandering channels are narrow and thin, appearing as either single strip type or bifurcation-merging type in the planar direction. Thick sand layers are distributed as point bars in the channel margin, and the vertical stacking style is mostly isolated. The braided-meandering type of diversion channel is a transitional type between braided and meandering channels. It is characterized by moderate-sized channel sand bodies containing inner channel bars and point bars. The thickness and width of these distributary channels are positively correlated in a logarithmic manner. The ratio of width to thickness follows the pattern of braided type $>$ transitional type $>$ meandering type. The architecture characteristics of distributary channels are primarily influenced by paleogeomorphology and changes in base levels. Paleogeomorphology controls changes in channel types within shallow water delta plain, and low curvature braided distributary channels are more likely to develop in steep terrain. As the long-term base level increases, the size of distributary channels decreases, while a rise in mid-term base level has resulted in the transition of distributary channel sand bodies from incised to superimposed and isolated stacking types. This research enhances our understanding of the sedimentary structure of shallow water deltas and provides valuable guidance for predicting and developing distributary channel reservoirs in underground shallow water deltas within oil and gas fields.

Key words East China Sea Shelf Basin, Xihu sag, Oligocene, Huagang Formation, shallow-water delta, distributary channel, sedimentary architecture

About the first author YANG Zheng, born in 1995, is a Ph.D. candidate of China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in sedimentology, reservoir characterization and modelling. E-mail: 632255079@qq.com.

About the corresponding author WU Shenghe, born in 1964, is a professor and Ph.D. supervisor of China University of Petroleum (Beijing). He is mainly engaged in sedimentology, reservoir characterization and modelling. E-mail: reser@cup.edu.cn.

浅水三角洲分流河道储集层近年来一直是油气勘探开发领域的热点,国内多个盆地都相继发现了浅水三角洲沉积储层,如鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地、松辽盆地、四川盆地等。前人对浅水三角洲分流河道沉积的地质条件、砂体形态、内部充填样式、定量规模及叠置样式等特征开展过相关研究(贺婷婷等,2014;付晶等,2015;Zhang *et al.*, 2018;吴胜和等,2019;徐振华等,2019;王夏斌

等,2020),为该类型油气储层的勘探开发提供了很好的地质理论基础。

西湖凹陷是中国东海陆架盆地中规模最大的含油气凹陷,同时也是近海天然气勘探的重点区域之一。随着东海油气勘探程度的加大与基础资料的逐步丰富,众多学者对该凹陷主力产气层渐新统花港组的沉积相认识越来越深入,但也逐渐出现分歧。在勘探初期,一些学者通过岩石学特征、古生物及

微量元素等分析, 提出西湖凹陷花港组总体为受到海水或咸水—半咸水影响的滨岸湖泊三角洲—河流沉积(武法东等, 1997; 陈琳琳和谢月芳, 1998; 李顺利等, 2018)。近年来, 大部分学者认为花港组以陆相沉积为主, 主要发育辫状河与曲流河交互的陆相河流沉积体系和近岸湖泊沉积体系(王果寿等, 2002; 孙思敏和彭仕宓, 2006; 张国华等, 2018; 刘金水等, 2019); 部分学者认为西湖凹陷花港组发育辫状河三角洲和曲流河三角洲沉积体系(王文娟等, 2014; 何贤科等, 2023; 娄敏等, 2023), 凹陷的西部缓坡带和东部陡坡带分别发育正常河流—三角洲沉积和扇三角洲—湖泊沉积体系(胡明毅等, 2010; 张绍亮等, 2014; 朱毅秀等, 2019); 一些学者基于层序体系域和充填样式的研究认为花港组发育湿地扇三角洲—湖泊沉积体系(葛海波, 2014; 周瑞琦等, 2018); 也有学者认为西湖凹陷花港组为发育在狭窄的限制性河谷中的辫状河和网结河沉积, 并据此提出了“轴向辫状河道模型”(刘金水等, 2019; 杜学斌等, 2020)。因此, 目前对于西湖凹陷花港组的研究主要集中在勘探阶段或开发早期, 沉积相、砂体构型和空间演化特征的描述相对匮乏。由于不同沉积体系下的砂体分布、构型等特征存在差异, 影响油气田的精细开发, 也较难满足西湖凹陷内各主力油气田增储上产的需求, 因此亟需对该地区沉积相进行厘定, 并进一步开展砂体构型特征的研究。

为了进一步明确西湖凹陷中南部的沉积相类型及砂体分布演化特征, 文中以沉积学与储层构型相关理论为指导, 基于精细的岩心观测、测井响应特征、地震反射与反演数据等分析手段, 采用“井震联动”的研究方法, 确定了研究区花港组上段为浅水三角洲沉积体系, 阐明其主要砂体类型——分流河道的类型、构型与演化特征, 并对其控制因素进行分析。这一研究成果完善了浅水三角洲分流河道的沉积构型知识库, 且对西湖凹陷中南部花港组的油气勘探和精细开发具有重要的指导意义。

1 区域地质概况

西湖凹陷位于中国东海海域的东海陆架盆地内。东海陆架盆地是中国目前面积最大的含油气盆地之一, 为以新生代沉积为主的复合型盆地, 平面上具有“东西分带、南北分块”的特征(图1-A),

自西向东依次为西部拗陷带、中部隆起带和东部拗陷带, 形成了“两拗夹一隆”的地质格局(许薇龄和乐俊英, 1988)。东部拗陷带包括钓北凹陷、西湖凹陷和福江凹陷3个次级凹陷。西湖凹陷走向为北北东, 西缘自北向南依次与虎皮礁凸起、长江凹陷、海礁凸起、钱塘凹陷和渔山凸起相邻, 东侧紧邻钓鱼岛隆褶带, 北靠福江凹陷, 南部与钓北凹陷相邻(图1-A)。西湖凹陷内部自西向东可划分为5个构造单元, 分别为西部斜坡带、西次凹、中央反转构造带、东次凹和东部断褶带(图1-B)(李上卿, 2000)。研究区位于西湖凹陷中南部, 总面积约1000 km², 构造上横跨西次凹和中央反转构造带, 是西湖凹陷内重要的油气产区。

西湖凹陷中南部的新生代沉积地层自下而上由始新统(平湖组)、渐新统(花港组)、中新统(龙井组、玉泉组和柳浪组)、上新统(三潭组)和第四系(东海群)组成, 岩性主要为砂砾岩和泥岩(张建培等, 2012)。花港组是西湖凹陷重要的油气勘探目的层段, 可划分为2个二级层序, 对应花港组上段和下段(图2)。花港组下段以粗砂岩为主, 夹少量的泥岩。花港组上段包括5个砂层组, 岩性为杂色泥岩与灰白色细砂岩、粉砂岩互层, 夹棕红色或紫色泥岩, 且砂岩中常见槽状交错层理、板状交错层理等各种反映牵引流的沉积构造(魏恒飞等, 2012; 张建培等, 2012; 陈忠云等, 2013; 于兴河等, 2017; 刘金水等, 2019)。

和中国东部的很多盆地一样, 西湖凹陷在新生代沉积演化过程中经历了断陷期、断-拗转换期、拗陷期、构造反转和整体沉降期5个阶段(图2), 对其有重要影响的构造运动共有7次, 包括基隆运动、雁荡运动、平湖运动、玉泉运动、花港运动、龙井运动和冲绳海槽运动(刘金水等, 2003; 赵志刚等, 2016)。玉泉运动结束之后, 花港组开始沉积, 标志着盆地演化进入拗陷期, 断陷活动趋于停止。花港组沉积后期的花港运动引起了地层构造形变和盆地的初始反转, 并造成普遍的地层缺失(赵金海, 2004; 张国华和张建培, 2015)。龙井运动使盆地经历了强烈的构造挤压反转, 在盆地中央形成了规模宏大的中央反转背斜, 对西湖凹陷已生成油气的运聚产生了重大影响(张建培等, 2008)。

受盆地断陷-拗陷机制的控制, 在T21界面之下(花港组下段及以下地层)研究区发育了大量

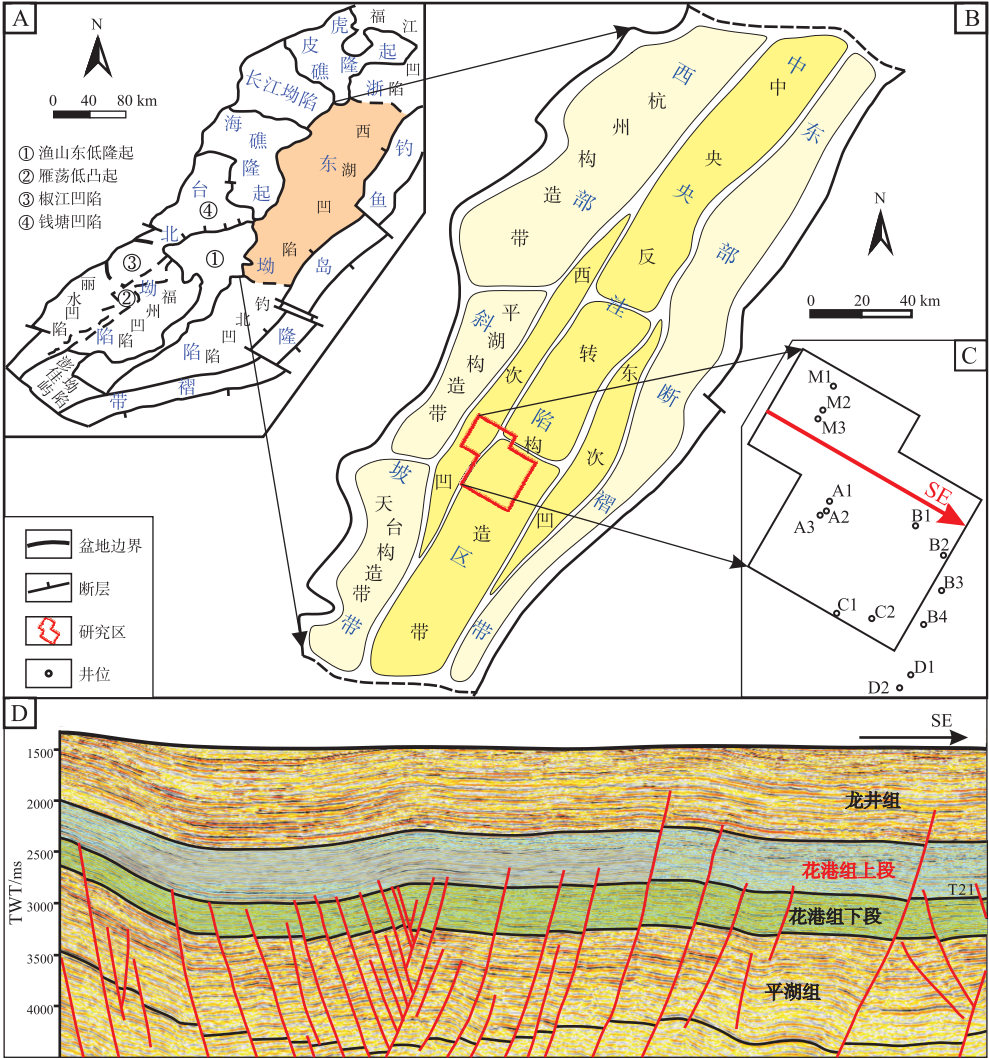


图 1 西湖凹陷构造分区与研究区井位分布

Fig. 1 Structural units of Xihu sag and well distribution of study area

近 NE-SW 走向的小角度断层，其中西部以正断层为主，而东部以逆断层为主。断层在 T21 界面之上（花港组上段及之上地层）的发育程度明显减弱，仅在研究区东部地区（B 气田一带）发育几条零星的大断层，其走向与区域构造基本一致，部分断层可向上断穿至中新统(图 1-D)。

2 资料与方法

沉积构型的研究级次与资料的丰富程度和研究手段密切相关。西湖凹陷中南部因位于海洋地区而钻井数量少，目前研究区内的探井共计 10 口，分别集中分布于 4 个区域，其中 A 区的井距平均值最小（约 1.25 km），B 区井距平均值最大（约 6.3 km）。考虑到研究区内的三维地震资料较丰富，

因此本次在充分挖掘钻井资料的基础上通过“井震结合”的方法来综合分析储层的沉积构型特征。参考吴胜和等（2013）的沉积构型分级方案，三角洲分流河道的构型级次为 7 级，其内部点坝/心滩坝为 8 级构型。研究区地震资料的主频约 27 Hz，有效频带宽度为 10~60 Hz，地震可识别的垂向砂体厚度最小约为 10 m，即 8 级构型。由于地震资料主频较低，而研究区的沉积体宽度远大于厚度，因此采用地震沉积学的方法制作地层切片，能够清晰地刻画垂向上难以识别的砂体的平面展布特征（Zeng *et al.*, 1998; Zeng and Backus, 2005）。在进行地层切片前对不同地震属性与单井上的砂体厚度进行相关性分析，包括振幅类、能量类、频率类、弧长等属性，发现井上砂体与 90°相位转换后的地

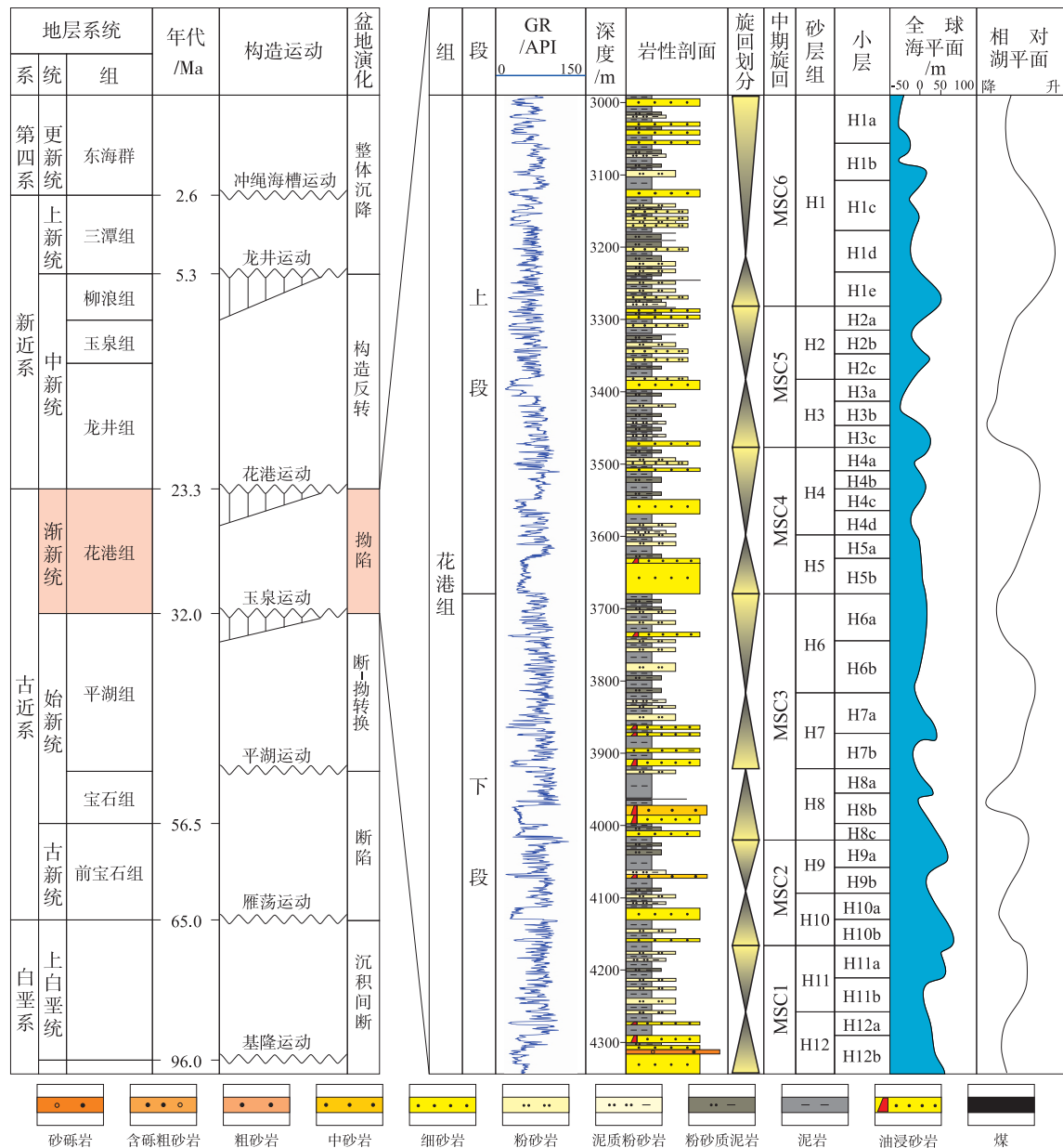


图 2 西湖凹陷渐新统花港组综合地层柱状图 (改编自兴河等, 2017)

Fig. 2 Comprehensive stratigraphic column of the Oligocene Huangang Formation in Xihu sag (modified from Yu *et al.*, 2017)

震波谷有很好的对应关系, 最小振幅属性可以很好地区分厚度大于 10 m 的砂体 (以 H3b 小层为例, 相关系数为 0.7083, 图 3), 因此利用该属性制作地层切片 (图 4-A) 进而开展砂体平面展布的研究, 可以得到分流河道砂体的平面分布特征。在确定砂体边界的基础上, 利用 V_p/V_s 反演的体属性与砂体厚度相关性较好 ($R = 0.71$) 的特征 (图 4-B), 通过相控插值得到砂体厚度的平面分布 (图 4-C)。上述方法可以合理地刻画砂体的平面展布和剖面分布特征 (图 4-D), 为研究区的沉积相论证

以及砂体构型研究提供了有效支撑。

在对分流河道进行分类时, 参考了 Rust (1978) 对河流弯曲度的定义方法, 将研究区内分流河道的弯曲度定义为穿过分流河道中心线的首尾实际长度与直线距离之比。研究区分流河道的整体弯曲度均大于或等于 1, 其中该值越大反映分流河道越弯曲。本次根据弯曲度的差异对分流河道进行分类, 进而对不同类型分流河道的构型特征开展进一步表征。在表征分流河道的规模特征时, 依次测量穿过研究区分流河道头部、中部和尾部的宽度与

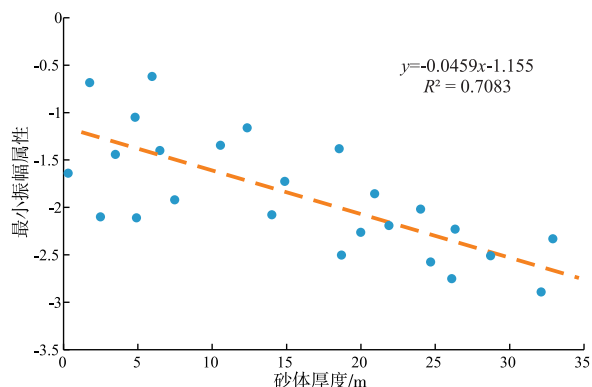


图 3 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段小层砂体厚度与最小振幅属性相关性

Fig. 3 Correlation between sandbody thickness and minimum amplitude of the sublayer in upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

厚度并分别取平均值,用来代表该分流河道的宽度和厚度。

在对花港组上段的古地貌进行分析时采用印模法,该方法的原理是利用上覆沉积地层与下伏古地貌之间存在的“镜像”关系,根据上覆地层厚度进行古地貌形态的恢复。具体流程为:首先选取等水深面作为基准面(文中选取 H1d 顶界面),并对基准面进行层拉平;由于 H1-H5 砂组之间的地层

未发生剥蚀,可根据砂岩和泥岩的压实程度差异进行去压实校正,恢复其原始沉积厚度;最后通过上覆原始地层沉积厚度的逐层剥离得到古地貌图。

3 沉积学分析

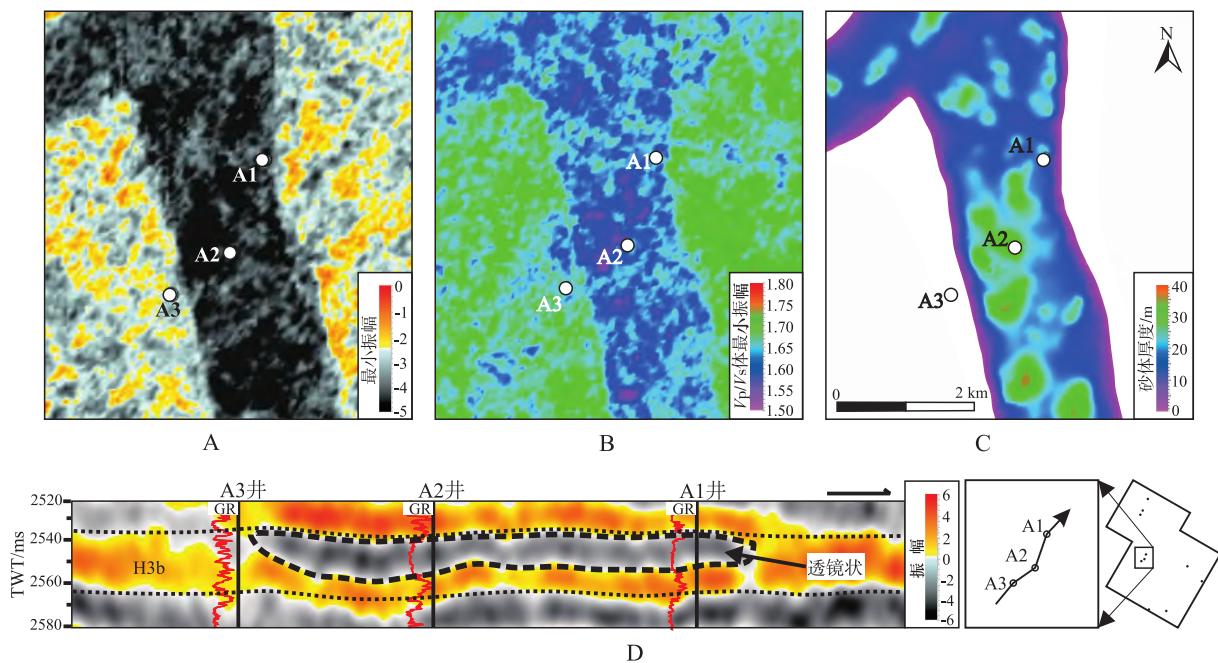
3.1 浅水三角洲沉积体系论证

通过对沉积物粒度、结构、沉积构造、测井相、地震反射特征等进行综合分析,认为西湖凹陷中南部花港组上段发育浅水三角洲沉积体系,且以三角洲平原沉积亚相为主。

3.1.1 地球化学、泥岩和古生物特征反映浅水沉积环境

在油气地球化学中, Pr/nC_{17} 与 Ph/nC_{18} 的比值关系能够指示成烃母质的形成环境,比值大于 2 一般为氧化环境,而比值小于 1 则指示还原环境(Chen *et al.*, 2009)。研究区花港组上段样品的 Pr/nC_{17} 值为 0.45~1.7 (平均 0.92), Ph/nC_{18} 值为 0.12~0.48 (平均 0.36),两者的比值关系(图 5)表明,研究区花港组上段的成烃母质形成于弱氧化—弱还原沉积环境。

此外,泥岩的颜色和性质及古生物特征可以较好地指示沉积水体的深浅。花港组上段的泥岩有 3



A—最小振幅属性地层切片; B— V_p/V_s 体最小振幅地层切片; C—砂体厚度平面分布图; D—H3b 小层振幅剖面图

图 4 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段分流河道的井震响应特征

Fig. 4 Characteristics of well and seismic response in distributary channels in the upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

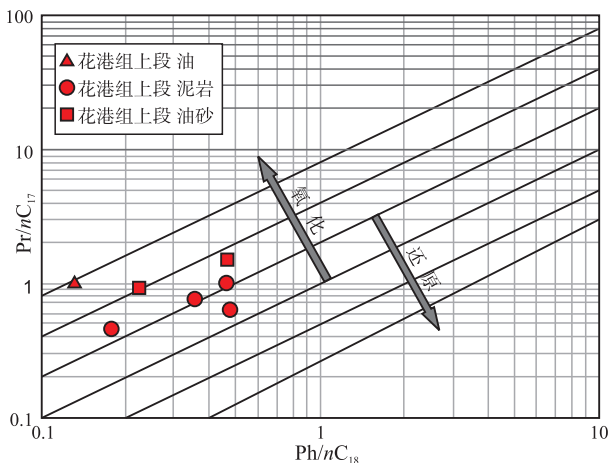


图5 西湖凹陷 B2 井渐新统花港组上段烃源岩 Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 相关图 (底图改自 Chen *et al.*, 2009)

Fig. 5 Correlation plots of Pr/nC_{17} vs. Ph/nC_{18} of source rock in the upper member of Oligocene Huagang Formation in Well B2 of Xihu sag (base map modified from Chen *et al.*, 2009)

种类型, 分别是浅灰色含粉砂泥岩、灰褐色碳质泥岩和深灰色泥岩。其中, 浅灰色含粉砂泥岩和灰褐色碳质泥岩(图 6-A, 6-B) 的分布较广泛, 沉积厚度大于 0.5 m, 且在泥岩岩心中可见被子植物化石(图 6-C), 指示其沉积时很可能为靠近湖边的陆上或浅水环境。深灰色泥岩一般较纯(图 6-D), 但在研究区内几乎不可见, 仅在紧邻研究区南部的探井中可见到此类岩心。在粉砂岩、泥质粉砂岩等细粒沉积岩心剖面上可见垂直虫孔发育, 其表现为多个密集出现的垂直管状体, 管中充填有上覆地层的砂质物(图 6-A; 图 7-A), 说明其一般发育于高能的浅水环境中。

3.1.2 沉积构造与粒度特征反映牵引流沉积

研究区的砂岩岩心见块状构造和各种类型的交

错层理, 包括槽状交错层理、板状交错层理、平行层理等(图 7-B, 7-C, 7-D), 这些沉积构造均指示其为牵引流沉积。在细砂岩底部可见滞留沉积, 砾石的磨圆度好且呈半定向排列, 指示水流为单一方向(图 7-E)。部分细砂岩中可见不规则泥砾镶嵌于其中的冲刷—充填构造(图 7-F), 其为流动介质侵蚀破坏下伏的松散泥质沉积物并短距离搬运后形成的沉积构造。岩心中多个薄泥质层或细砂层不规则等厚交互沉积形成的波状或脉状层理也较为常见(图 7-G, 7-H), 这种沉积构造可能形成于河流—三角洲入湖(海)处或水动力较弱的牵引流边部位置。

岩心观察表明, 西湖凹陷中南部花港组上段的沉积物粒度整体较细, 以细砂岩、粉砂岩和泥岩为主, 分选中等, 颗粒磨圆度为次棱角状—次圆状。沉积物的粒度概率累积曲线呈三段式, 反映沉积物搬运方式以跳跃和悬浮搬运为主, 含少量滚动搬运成分(图 8-A)。粒度分布 C-M 图中的数据点绝大多数分布在 P-Q-R-S 段, 亦反映了以跳跃和悬浮搬运为主的牵引流沉积特征(图 8-B)。

3.1.3 岩心韵律、测井曲线形态及地震相反映以分流河道为主的沉积特征

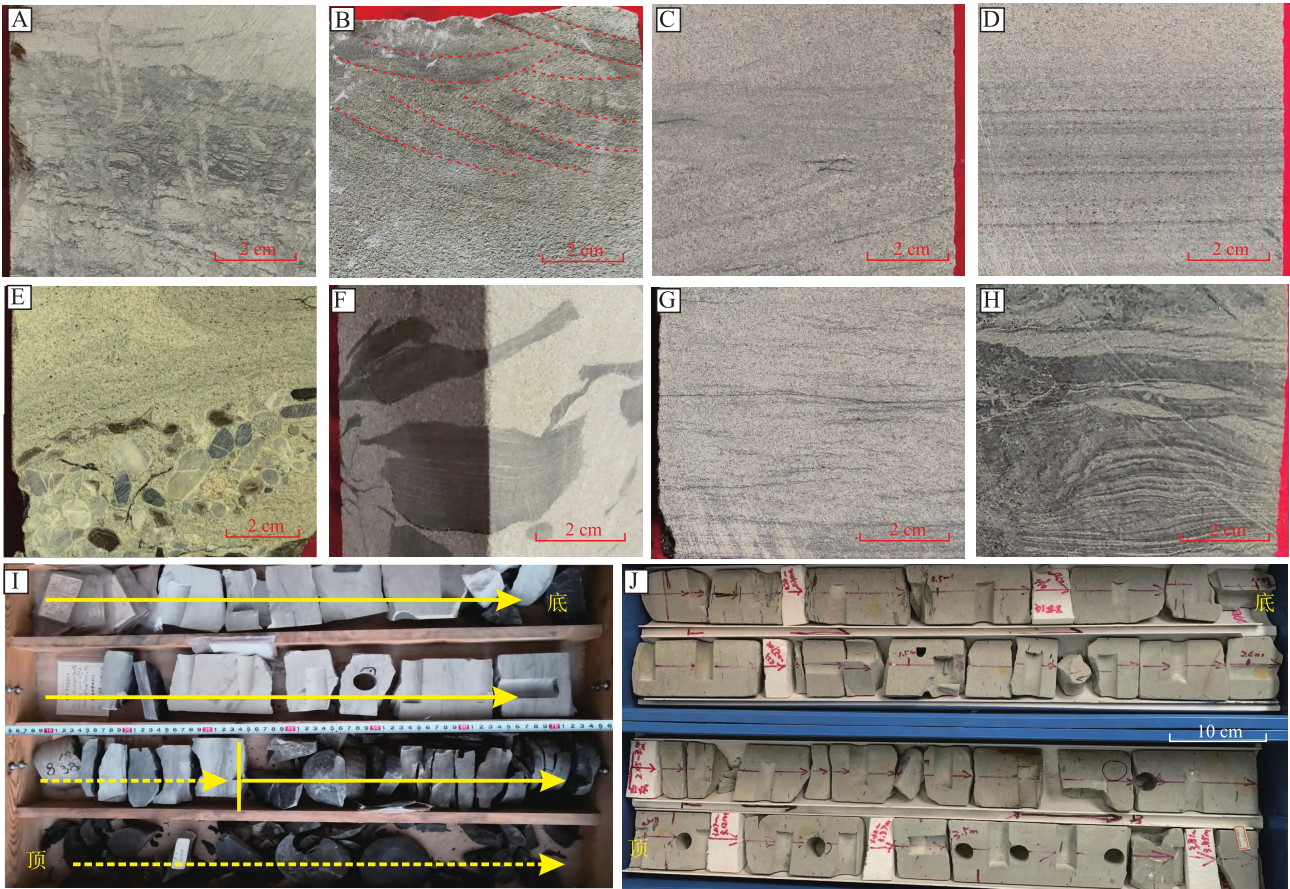
在西湖凹陷中南部花港组上段的岩心中常见正韵律和均质韵律(图 7-I, 7-J), 反韵律分布较少, 但在研究区以南的地区较常见。自然伽马曲线能较好地反映岩性, 形态包括钟型、箱型、漏斗型和指型 4 类。4 类曲线形态中, 钟型、箱型和指型的比例较高, 分别为 29%、36% 和 30%, 而漏斗型曲线的占比很低, 仅为 5% (表 1)。正韵律(钟型曲线)一般反映陆相的河流或三角洲分流河道沉积,



A—浅灰色含粉砂泥岩, 可见垂直虫孔构造, A3 井, 4200.1 m; B—灰褐色碳质泥岩, D2 井, 2579.9 m; C—灰褐色泥岩, 含被子植物叶片化石, F1 井, 2959.3 m; D—深灰色泥岩, M3 井, 4069.9 m

图6 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段泥岩岩心特征

Fig. 6 Core characteristics of mudstone in the upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag



A—浅灰色泥质粉砂岩，垂直虫孔发育，A1 井，3531.8 m；B—浅灰色细砂岩，槽状交错层理发育，B3 井，3427.5 m；C—细砂岩，楔状交错层理发育，B3 井，2422.85 m；D—细砂岩，平行层理发育，A3 井，4187.6 m；E—含砾细砂岩，底部见冲刷面，A1 井，3527.8 m；F—中砂岩，含泥砾，D1 井，2717.14 m；G—粉砂岩，含泥质条带，A3 井，4198.92 m；H—波状层理，A3 井，4200.58 m；I—正韵律，M3 井，4066.79~4068.85 m；J—均质韵律，D2 井，2769.90~2773.88 m

图 7 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段岩心沉积构造与韵律特征

Fig. 7 Sedimentary structures and rhythmic characteristics of core of the upper member of Oligocene Huangang Formation in central-south part of Xihu sag

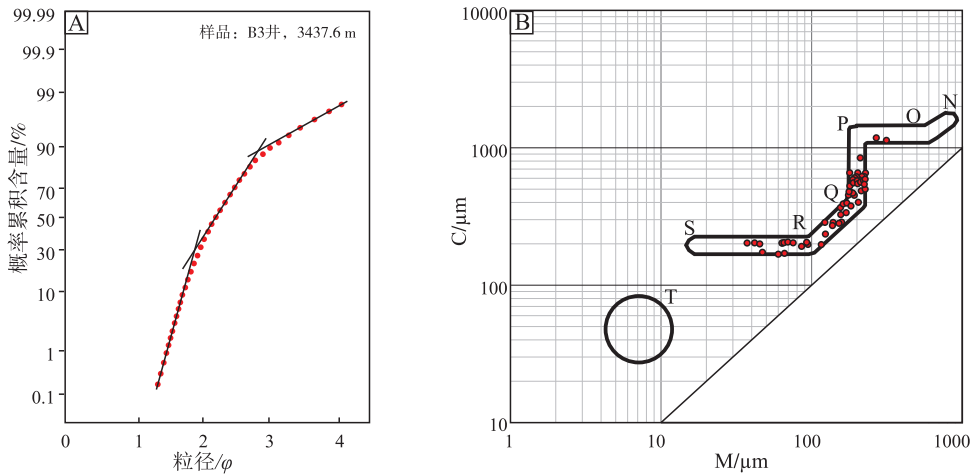


图 8 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段粒度分布散点图

Fig. 8 Grain size distribution of the upper member of Oligocene Huangang Formation in central-south part of Xihu sag

均质韵律（箱型曲线）可能指示河道或河口坝沉积，其中指示河道的均质韵律的下部一般为反映河道间沉积的浅灰色含杂质的泥岩和粉砂质泥岩，而指示河口坝的均质韵律的下部一般为湖相沉积的深色质纯泥岩。由于前者在研究区内普遍发育而后者几乎不发育，因此推测其指示河道沉积，而不是三角洲前缘的河口坝沉积。反韵律（漏斗型曲线）可能是溢岸（决口扇）或者河口坝沉积，而能够反映河口坝沉积的反韵律其下部一般与深色质纯的泥岩组合出现，但该岩性组合在研究区内则更少见，即三角洲前缘几乎不发育。综上所述，可推测研究区花港组上段沉积时以三角洲沉积体系的平原部分为主，而在研究区以南的地区发育以河口坝为主的三角洲前缘沉积。此外，结合地震切片上波谷呈明显的条带状响应、地震剖面上强波谷反射呈顶平底凸状或透镜状的现象（图 4-A，4-D），可进一步印证研究区花港组上段沉积时三角洲分流河道沉积十分发育。

表 1 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段测井曲线形态统计
Table 1 Statistics of logging curve morphology in the upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

伽马曲线形态	总占比/%	井区占比/%			
		M 区	A 区	B 区	C 区
钟型	29	33	23	40	32
箱型	36	29	44	30	33
漏斗型	5	2	3	6	8
指型	30	36	30	24	27

依据研究区花港组上段地球化学特征、泥岩特征、古生物化石、沉积构造、粒度分布、岩心韵律、测井曲线形态和地震相等特征的综合分析，认为西湖凹陷中南部花港组上段发育以三角洲平原为主的浅水三角洲沉积体系，且分流河道沉积是最主要的砂体类型。

3.2 沉积微相类型与特征

在识别出浅水三角洲沉积体系的基础上，根据测井曲线与岩心标志进一步识别出分流河道、分流河道间、溢岸、河口坝和滨浅湖等微相（表 2）。

分流河道沉积是浅水三角洲平原的骨架砂体，岩性以中砂岩和细砂岩为主，分选较好，发育平行层理、板状交错层理、楔状交错层理、槽状交错层理等。分流河道底部一般可见明显的冲刷-充填构

造，河道底砾岩常见定向排列（图 7-B 至 7-F）。垂向上呈向上变细的正韵律或粒度变化不明显的均质韵律，自然伽马曲线呈钟型或箱型（表 2）。分流河道砂体在地震平面上呈条带状，在地震剖面上表现为具有强振幅、较好连续性的波谷，偶见透镜状。分流河道的沉积特征与河流沉积近似，该微相构成了浅水三角洲平原亚相的骨架部分。在分流河道内部，根据厚层砂体的发育位置与形态，可将其区分为心滩和点坝 2 种类型，心滩一般出现在河道的中部，而点坝则靠近河道的一侧发育。

分流河道间沉积为分流河道之间水动力较弱的细粒沉积，分布范围较广。岩心上主要为浅灰色泥岩或碳质泥岩，含少量粉砂和细砂。泥岩中含较多的杂质，可见碳屑、植物根茎化石等，主要发育水平层理、透镜状层理和生物扰动构造（图 7-A）。自然伽马曲线较平直，无明显韵律性（表 2）。

溢岸沉积是紧邻分流河道两侧的细粒沉积，包括分流河道两侧的天然堤沉积以及洪水期河道越岸决口扇或决口水道沉积，以灰色粉砂岩为主，岩心中一般发育波状交错层理和上攀交错层理等沉积构造。自然伽马曲线呈中尖峰状、指状，具有较低的声波时差与电阻率，韵律不明显。由于溢岸沉积体的厚度一般较小（小于 10 m）、地震响应不明显，因此难以被清晰识别。

河口坝为分流河道携带的沉积物进入湖盆水体时发生沉降和沉积形成的沉积体，岩性以细砂岩为主，底部可见粉砂岩，厚度中等，分选较好，受到河流与湖浪的双重冲刷而发育平行层理、槽状交错层理等沉积构造。岩心剖面呈典型的反韵律、均质韵律或复合韵律，具有较高的声波时差与较低的电阻率，剖面上呈“底平顶凸”状。河口坝砂体在研究区内的发育程度较低，具有反韵律特征的岩心在研究区内仅局部可见，而在研究区以南的区域较常见。

滨浅湖沉积为相对安静水体环境下形成的细粒沉积，与分流河道间泥岩相比，滨浅湖中的泥岩几乎不含杂质、质地较纯，岩心中常见块状层理或水平层理等沉积构造。自然伽马曲线的响应特征表现为极高伽马值，靠近泥岩基线，具较低电阻率与声波时差（表 2）。

在上述 5 种不同类型微相中，浅水三角洲平原分流河道沉积是研究区最主要的砂体类型，河口坝

表 2 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段不同沉积微相的岩电特征
Table 2 Lithological and logging characteristics of sedimentary microfacies of the upper member
of Oligocene Huangang Formation in central-south part of Xihu sag

微相类型	GR /API	深度 /m	岩心描述	岩石类型	沉积构造	韵律与 电性特征	岩心照片
	0180		泥粉细中 砂砂砂砂				
分流河道		3528 3530 3532	 A2井	中砂岩 细砂岩	交错层理 平行层理 底部见冲刷面	正韵律 均质韵律 钟型曲线 箱型曲线	
分流河道间		3530 3532	 B3井	粉砂质泥岩 灰色泥岩	水平层理 透镜状层理 生物扰动构造	无韵律 曲线较平直	
溢岸		3174 3176 3178	 A2井	粉砂岩	波状交错层理 爬升层理	韵律不明显 指状曲线	
河口坝		3296 3298	 C1井	细砂岩 粗粉砂岩	平行层理 波状层理	反韵律 漏斗型曲线	
滨浅湖		3410 3412	 C2井	深灰色泥岩	水平层理 块状层理 含碳屑	无韵律 曲线接近 泥岩基线	

在研究区内发育程度低，仅在研究区以南地区出现频率较高，因此文中重点对分流河道的沉积构型特征进行描述。

4 分流河道的沉积构型特征

4.1 分流河道的类型

综合分析花港组上段不同沉积时期的沉积微相分布可以发现，花港组上段以浅水三角洲平原沉积为主，湖相沉积仅在 H1 时期局部可见。参考前人对分流河道的划分方案(贺婷婷等，2014)，本次研究根据分流河道的弯曲度特征，将西湖凹陷中南部花港组上段的浅水三角洲分流河道划分为 3 种类型：辫流型分流河道、辫-曲转换型分流河道和曲流型分流河道(图 9)。其中，辫流型分流河道的弯

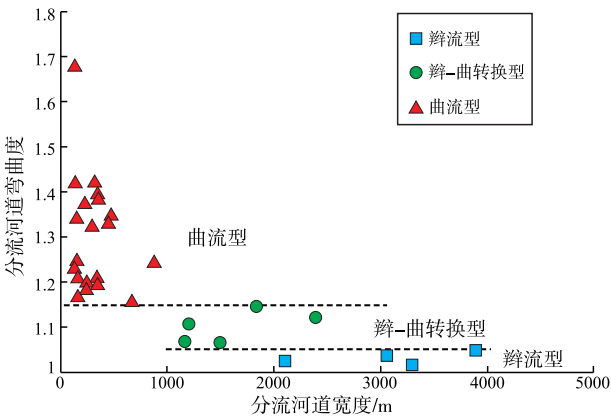


图 9 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段分流河道弯曲度与厚度关系
Fig.9 Diagram of curvature and thickness of distributary channels in the upper member of Oligocene Huangang Formation in central-south part of Xihu sag

曲度分布在 1~1.05 之间, 辫-曲转换型分流河道的弯曲度为 1.05~1.15, 曲流型分流河道的弯曲度大于 1.15。通过对分流河道的宽度等特征进行测量和统计(测量方法见第 2 节), 认为不同类型分流河道的平面形态、规模和叠置样式等特征存在差异。

进一步分析表明, 3 种类型的分流河道具有不同的沉积序列(图 10)。辫流型分流河道沉积以中—细砂岩为主, 河道底部可见磨圆度较好的砾石, 心滩砂体呈均质韵律, 且底部可见不规则泥岩撕裂屑呈半定向镶嵌于砂岩中(10-A)。在辫—曲转换型分流河道中, 具有侧积层的点坝沉积与上部的均质韵律心滩砂体紧密共存, 中间常发育薄层的溢岸细粒沉积(10-B)。曲流型分流河道的沉积序列与曲流河相似, 但其粒度相对较细, 岩心呈典型的正韵律(10-C)。

4.2 分流河道的构型特征

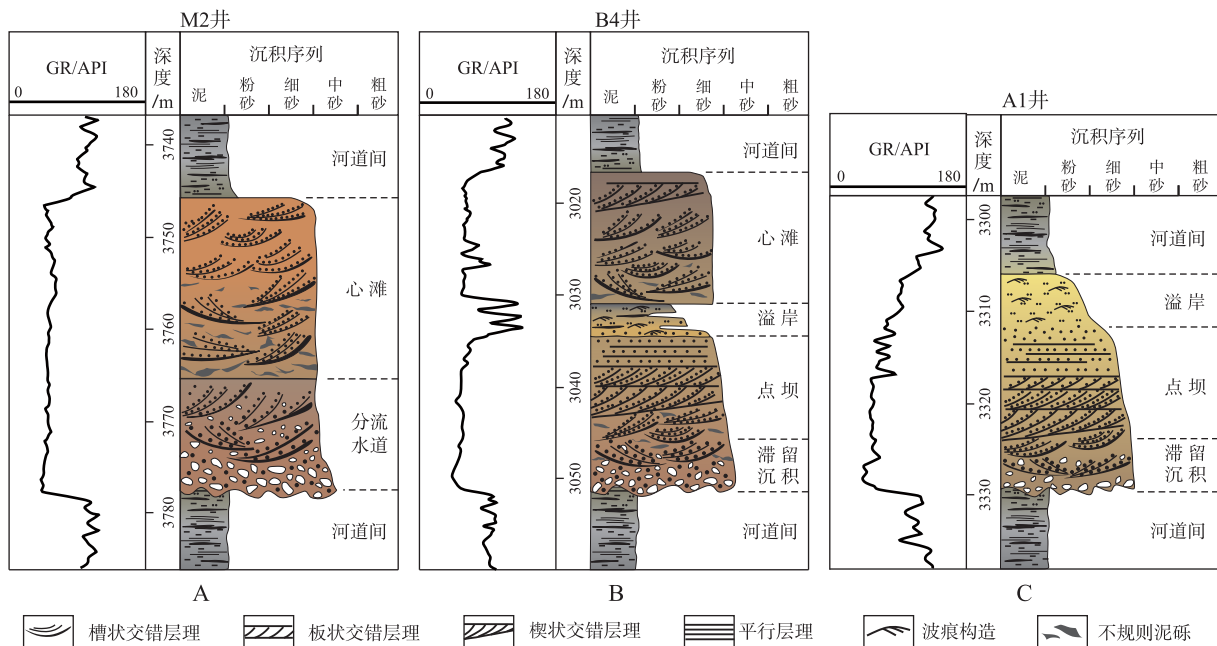
4.2.1 平面形态特征

辫流型分流河道在花港组上段的底部最为发育(H5b 小层), 平面上可见 2 条较宽的分流河道分布在研究区中西部, 呈近 NE-SW 向展布, 河道弯曲度很低(图 11)。研究区内分流河道的平面组合样式主要呈交织条带型, 2 条规模较大的分流河道

被中间发育的 2 条较小的分流河道所连通。河道内部的厚层砂体主要出现在河道中部, 与辫状河中的心滩砂体相似。单一的心滩砂体在平面上一般呈“椭圆形”、不规则“菱形”等形态, 多个心滩砂体在分流河道内组合成或密或疏的不规则“斑点状”, 平面上具有“窄坝宽水道”的特征(图 11-D)。

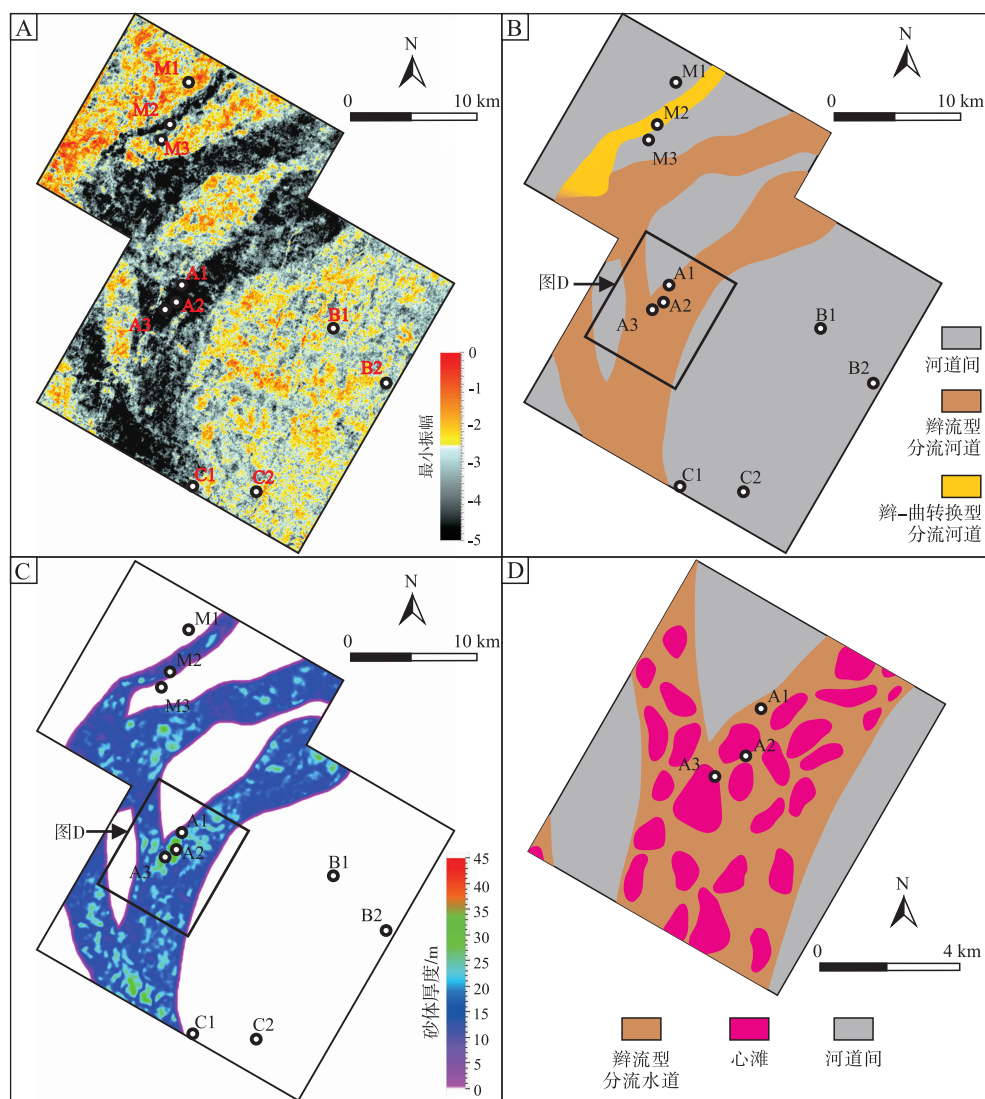
辫-曲转换型分流河道在 H3 砂层组沉积中期(H3b 时期)发育程度最高, 呈 NE-SW 流向穿过研究区中部(图 12), 在花港组上段初始沉积阶段(H5b 时期)研究区西部亦局部可见该类型分流河道(图 11)。辫-曲转换型分流河道既具有辫状河发育心滩的特征, 也可见与曲流河相似的河道一侧“点坝”的发育现象, 是心滩、点坝共同出现在同一河道中的一种分流河道类型。不同的分流河道在平面上呈分叉-合并型的组合样式, H3b 时期发育的辫-曲转换型分流河道在研究区中部频繁地分叉、合并, 并在研究区南部彻底分叉为 2 条分流河道。

曲流型分流河道具有与曲流河相似的高弯曲度特征(图 13), 该类型分流河道在 H1d 时期广泛分布, H3b 时期在研究区的东西两侧局部发育(图 12)。在曲流型分流河道中, 厚层砂体一般以点坝的形式分布于河道一侧。在 H3b 时期, 可见



A—辫流型分流河道; B—辫—曲转换型分流河道; C—曲流型分流河道
图 10 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段分流河道的典型沉积序列

Fig. 10 Typical sedimentary sequences of distributary channels in the upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag



A—最小振幅属性地层切片；B—沉积微相平面图；C—砂体厚度平面分布图；D—分流河道内部构型平面图

图 11 西湖凹陷中南部渐新统花港组 H5b 小层分流河道及其内部构型

Fig. 11 Distributary channels and its architecture of H5b layer in the Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

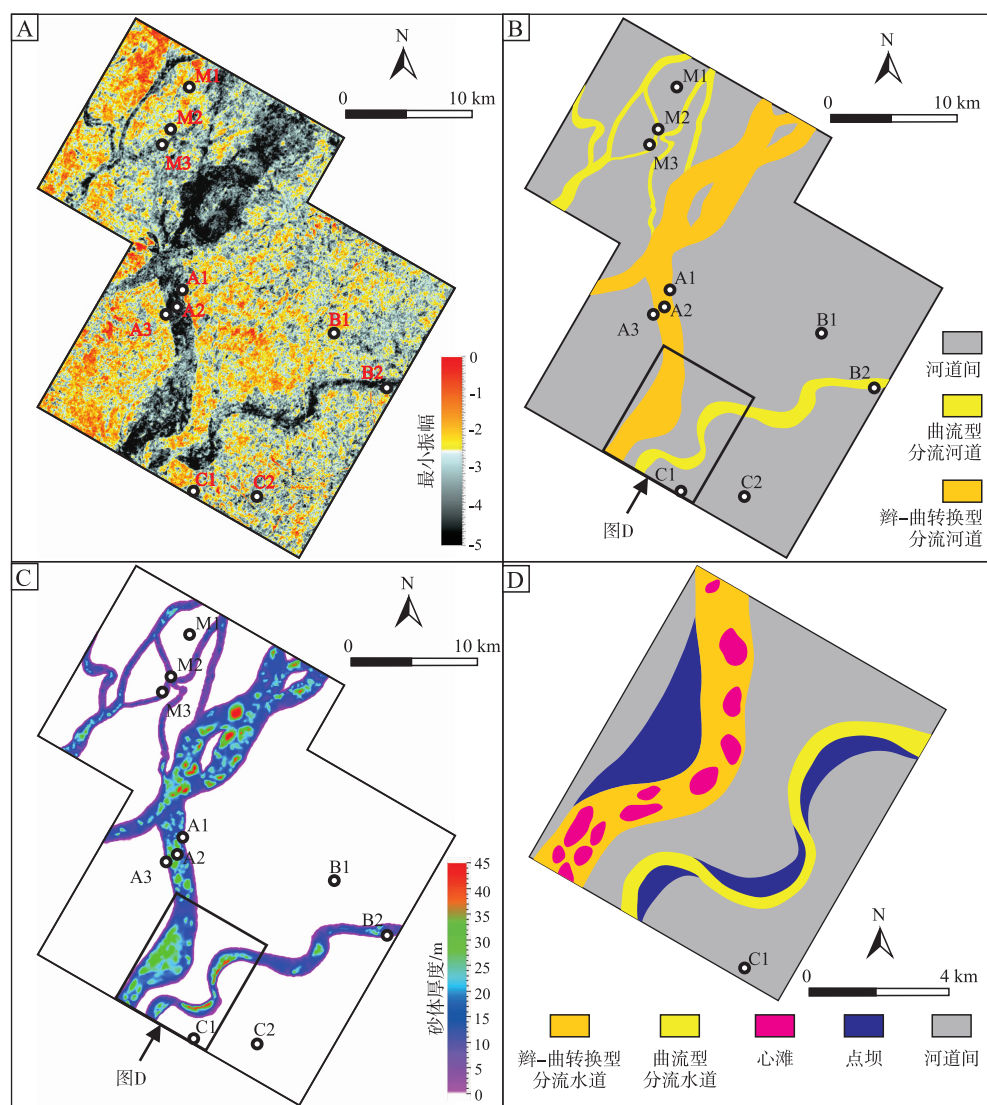
明显的新月形点坝分布在河道的边部，点坝的规模与分流河道的规模和弯曲程度呈正相关。H1d 时期发育的曲流型分流河道呈 NW-SE 向展布，多条分流河道在平面上呈现不同的组合样式，主要有单一条带型、分叉-合并型 2 种类型。

4.2.2 分流河道的规模

辫流型分流河道宽度大（2~4 km）、砂体厚（30~35 m），具有“低弯度、宽而厚”的特征（图 14）。河道中的厚层砂体出现在心滩处，河道交汇处的砂体厚度也明显增大（图 9-C）。辫流型分流河道的宽厚比较大，厚度与宽度呈较明显的对数正相关（ $R^2=0.7733$ ）。

辫-曲转换型分流河道的弯曲度比辫流型分流河道有所增加，河道规模则有所减小，河道砂体的宽度为 1000~2500 m，厚度范围较大（20~45 m），平均厚度为 35 m。辫-曲转换型分流河道砂体的宽厚比中等，厚度和宽度呈很好的对数正相关（ $R^2=0.8865$ ）（图 14）。与辫流型分流河道相比，辫-曲转换型分流河道内心滩的发育规模和频率都有所降低，而在河道交汇处其规模则有一定增加（图 11；图 12）。

曲流型分流河道呈“窄而薄”的特征，其宽度为 100~500 m，平均 235 m；厚度为 20~35 m，平均 27 m。曲流型分流河道砂体的宽厚比较小，厚



A—最小振幅属性地层切片；B—沉积微相平面图；C—砂体厚度平面分布图；D—分流河道内部构型平面图

图 12 西湖凹陷中南部渐新统花港组 H3b 小层分流河道及其内部构型

Fig. 12 Distributary channels and its architecture of H3b layer in the Oligocene Huangang Formation in central-south part of Xihu sag

度与宽度之间呈较好的对数关系 ($R^2 = 0.527$) (图 14), 随着河道宽度的增加, 河道厚度呈现出明显的增加趋势, 这可能与曲流型分流河道的侧向加积有关。

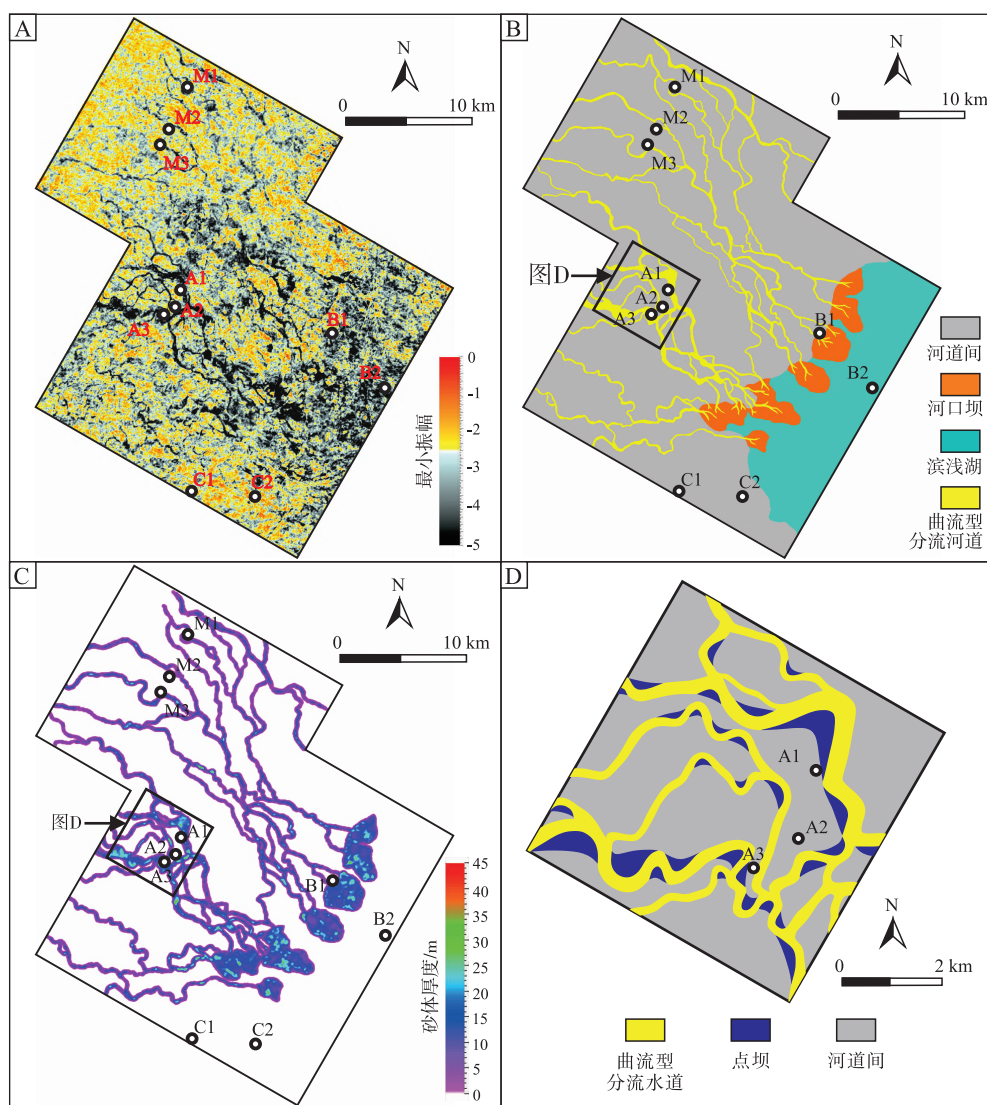
4.2.3 分流河道的垂向叠置样式

花港组分流河道砂体的叠置关系可以总结为 2 种类型, 即相同类型分流河道之间与不同类型分流河道之间。在上述 2 类叠置关系中可识别出 3 种主要的垂向叠置样式: 切叠型、叠加型和孤立型。

辫流型分流河道侧向迁移快, 砂体规模整体较大, 一般表现为辫流型分流河道砂体的相互切叠, 在其他 2 类分流河道中切叠型的砂体叠置样式发育

程度较低。呈切叠型接触的砂体间的连通性较好, 不存在物性隔夹层, 且该类型的叠置样式在震上也有较好的响应, 距地层顶面不同高程的强波谷反射的分流河道在侧向上相互连接(图 15-A)。该样式主要分布在中期基准面上升半旋回的底部, 空间上形成叠置连片的砂体。

叠加型的砂体叠置样式主要出现在研究区的辫-曲转换型分流河道之间, 而与其与辫流型和曲流型分流河道之间的砂体叠置关系较为少见。叠加型的砂体之间相互接触或间隔很小, 下切现象几乎不发育(图 15-B)。垂向叠加型的砂体分布样式主要出现在中期基准面旋回上升半旋回的中部。



A—最小振幅属性地层切片；B—沉积相平面图；C—砂体厚度平面分布图；D—分流河道内部构型平面图

图 13 西湖凹陷中南部渐新统花港组 H1d 小层分流河道及其内部构型

Fig. 13 Distributary channels and its architecture of H1d layer in the Oligocene Huangang Formation in central-south part of Xihu sag

孤立型的砂体在曲流型分流河道中最为常见，由于其规模相对其他 2 类分流河道较小，不同的曲流型分流河道砂体在垂向上多以透镜状镶嵌在河道间的细粒泥岩中，形成了典型的“泥包砂”结构(图 15-C)。这种孤立型的砂体叠置样式主要分布在中期基准面上升的末期或旋回转换面附近。

4.3 分流河道构型模式及其油气勘探开发意义

基于对西湖凹陷中南部花港组上段沉积演化规律的认识，本次提出了西湖凹陷花港组上段浅水三

角洲分流河道的构型模式(图 16)。随着长期基准面的上升，形成了一系列垂向上具有继承性的分流河道沉积。在长期基准面旋回上升初期，形成了以低弯度的辫流型分流河道为主的沉积，河道较顺直，砂体宽而厚(图 16-A)。在长期基准面上升的中期，形成了以中低弯度的辫-曲转换型分流河道为主的沉积，砂体规模中等(图 16-B)。在长期基准面上升的晚期，分流河道呈“窄而薄”的高弯度曲流型，平面组合样式为单一条带状或交织条带状(图 16-C)。

不同类型分流河道的构型模式对于油气勘探和精细开发具有较高的指导意义和应用价值。辫流

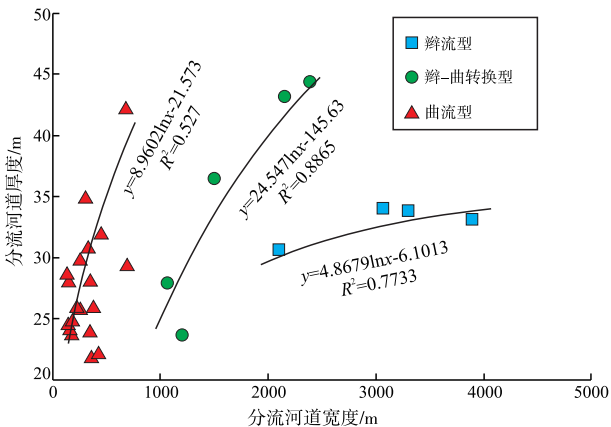


图 14 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段分流河道宽度与厚度散点图

Fig. 14 Diagram of width and thickness of distributary channels in the upper member Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

型、曲流型与辫-曲转换型分流河道的规模具有一定差异，在进行油气勘探时可指导构造-岩性圈闭的搜索。曲流型河道以构造-岩性圈闭为主，重点关注气田周边构型岩性潜力的搜索；辫流型河道以构造油气藏为主，重点关注剩余油气的挖潜，提高采收率。砂体的叠置关系和连通性则对油气田精细开发有较好的指示意义，辫流型分流河道垂向上多呈切叠型，砂体连通性好，油气平面非均质程度相对较低；曲流型分流河道的砂体以孤立型为主，砂

体侧向连通性较差，油气以顺河道方向运移为主。

5 分流河道沉积特征的控制因素

海（湖）平面变化和构造运动是控制层序形成的主要作用，而由于地质条件不同，各控制因素对沉积环境的相对重要性也存在差别（楼章华等，1999；曾灿等，2017）。研究区花港组上段沉积时期处于湖盆拗陷阶段中晚期，控制层序地层和分流河道沉积特征的因素主要有 2 个：一个是构造沉降与沉积物供给共同作用形成的古地貌，另一个是由绝对海（湖）平面、构造沉降与气候共同作用引起的基准面旋回的变化。

研究区浅水三角洲沉积中不同类型的分流河道之间差异的形成与物源和湖盆 2 个方面的因素有关。基准面旋回变化是影响三角洲形成和演化过程的重要湖盆特征，长期基准面旋回变化决定了可容纳空间的大小，进而影响河流—三角洲输入湖盆的沉积物通量。而构造活动影响了河流入湖时的地形地貌（坡降），并对三角洲分流河道的形态等特征产生进一步影响（郑荣才等，2001）。

5.1 古地貌的影响

古地貌对分流河道的影响主要体现在地形坡度上，地形坡度的差异造成了浅水三角洲分流河道弯

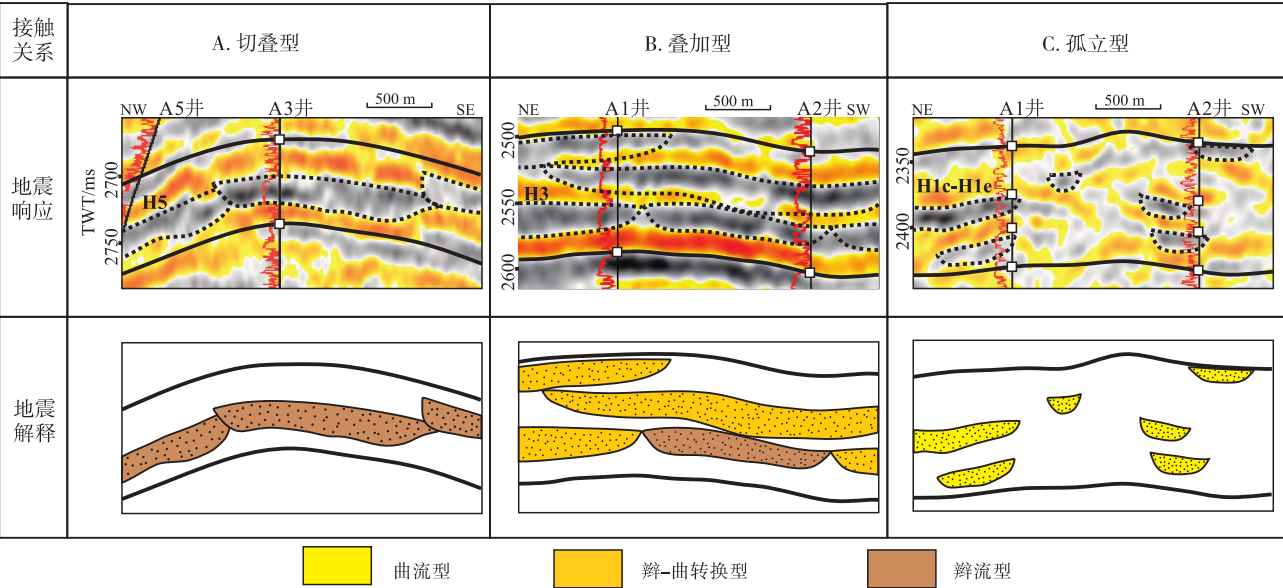


图 15 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段分流河道垂向叠置关系类型

Fig. 15 Vertical stacking style types of distributary channel sandbodies in the upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

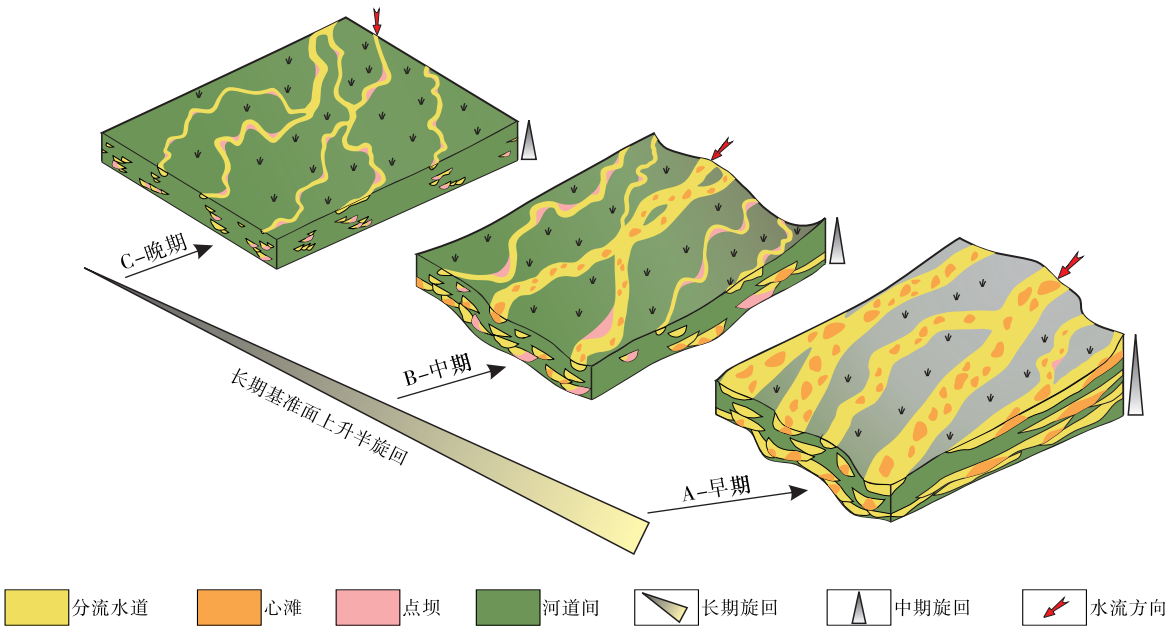


图 16 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段分流河道构型模式

Fig. 16 Architecture model of distributary channels in the upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

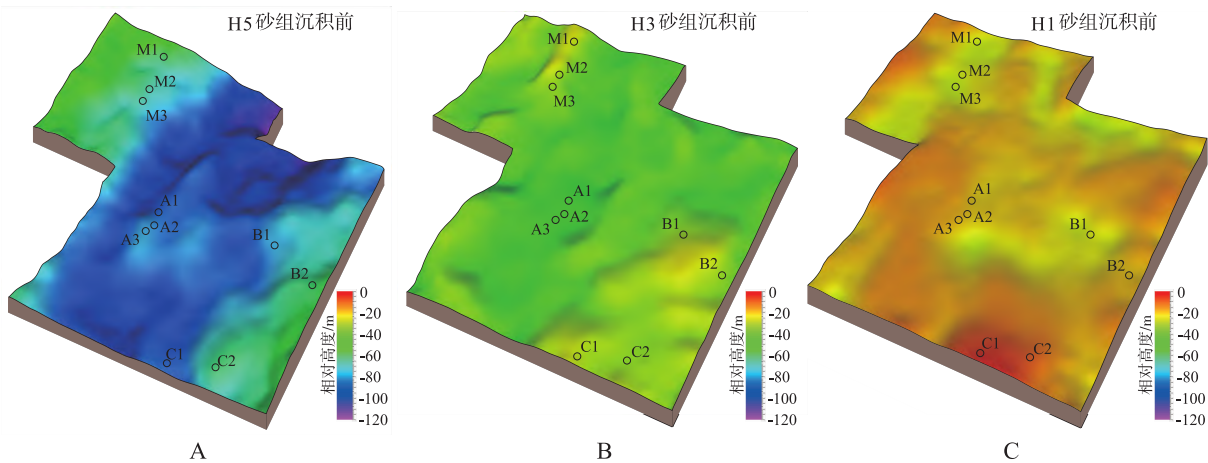


图 17 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段古地貌

Fig. 17 Palaeogeomorphology of the upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

曲度的变化，进而造成分流河道类型的差异。西湖凹陷中南部花港组上段沉积时期主要受到花港运动的影响，花港运动开始于 H5 砂组沉积的早期，结束于 H1 砂组沉积的末期。花港组上段沉积之前，研究区的古地貌整体为北高南低，中部的地形坡度（约 1/500）比东西两侧的地形（坡度约 1/1000）更陡，地形也相对低洼，为低弯曲度的辫流型分流河道的形成提供了条件（图 17-A）。花港组上段沉积中期（H3 砂组开始沉积时），花港运动的初始活动造成了研究区南部开始逐步抬升，导致中部地形坡度差异有所减小，形成了弯曲度有所增加的辫-曲

转换型分流河道；而由于东西两侧的地形坡度相对较缓（坡度约 1/1500），形成了具有更低弯曲度的曲流型分流河道（图 17-B）。H1 砂组开始沉积时花港运动达到鼎盛期，研究区中部和南部低洼地区的进一步抬高造成了全区基本呈“填平补齐”的地貌特征，因此发育具有高弯曲度的曲流型分流河道。同时，由于该阶段南北向的地形差异不明显，分流河道也由早期的近 NS 向过渡为 NW-SE 向展布，沉积中心由研究区南侧逐渐变为研究区东部（图 17-C）。

5.2 基准面旋回变化的影响

基准面旋回的升降变化是造成研究区三角洲分流河道的规模和叠置样式差异的重要因素。本次参考前人的基准面旋回划分方案（于兴河等，2017），以花港组沉积期间的湖平面升降变化、气候特征等作为主要依据，结合 A/S（可容空间/沉积物供给速率）变化趋势，将花港组划分为 6 个中期旋回。花港组上段包含 MSC4、MSC5 和 MSC6 共 3 个中期旋回，分别对应 H4-H5 砂层组、H2-

H3 砂层组和 H1 砂层组(图 2)。其中，花港组上段开始沉积至 H1d 为长期基准面的上升阶段，H1d 至花港组顶部为长期基准面下降阶段。

结合基准面旋回的变化，可以发现分流河道的规模和叠置样式受控于基准面旋回的变化。其中，长期基准面的变化对于分流河道的规模起到了主控作用，而中期基准面的升降变化则控制着分流河道砂体的垂向叠置样式(图 18)。

在长期基准面旋回上升初期（花港组上段初始沉积阶段）或下降晚期（H1 砂组顶部），由于

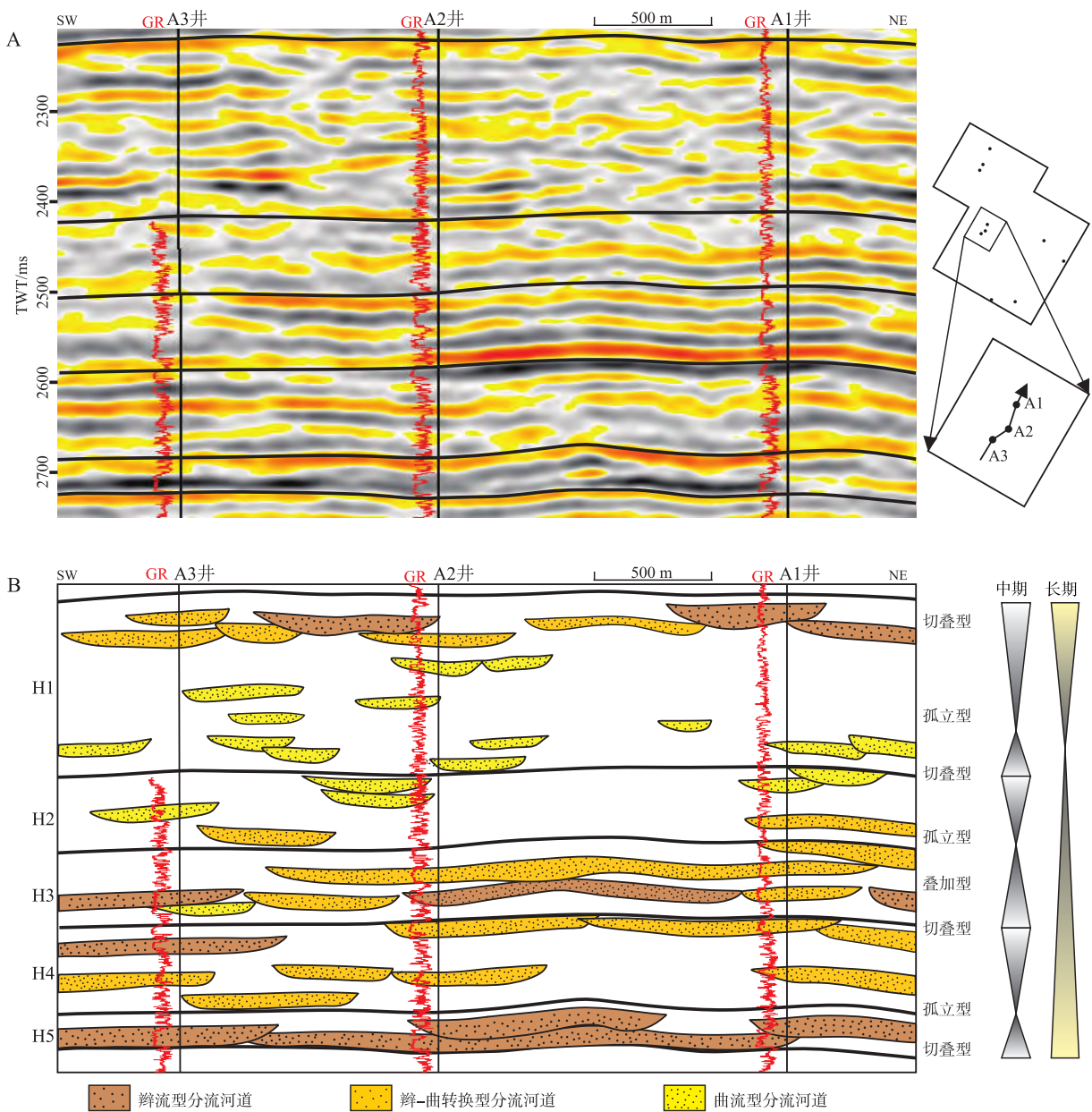


图 18 西湖凹陷中南部渐新统花港组上段井震对比剖面

Fig. 18 Well-seismic comparison profile of the upper member of Oligocene Huagang Formation in central-south part of Xihu sag

物源供给充足,分流河道砂体宽而厚,规模较大;而在长期基准面旋回上升的中晚期(H1中下部沉积时期),随着物源供给的明显下降,砂体厚度和平面规模也减小。在中期基准面旋回上升早期或下降晚期(H5底部、H4顶部、H3底部和H2顶部),砂体在较低的可容空间下发生频繁的侧向迁移,因此砂体主要呈切叠型的垂向叠置样式;而随着中期基准面逐渐上升,可容空间逐渐增加,砂体侧向迁移程度的降低,造成砂体的垂向接触样式逐渐向弱连通的叠加型和不连通的孤立型演变(H2中部、H1中下部)(图16;图18)。

6 结论

1) 西湖凹陷中南部花港组上段发育浅水三角洲沉积体系,且三角洲平原分流河道沉积是最主要的砂体类型。分流河道沉积的测井曲线以钟型、箱型和指型为主,岩心上可见块状层理和槽状、板状等交错层理,地震切片具有条带状响应且剖面上见透镜状反射等,反映了其具有分流河道的牵引流沉积特征。

2) 根据弯曲度差异,西湖凹陷中南部的浅水三角洲平原分流河道可划分为辫流型、辫-曲转换型和曲流型3种主要类型。辫流型分流河道呈低弯度(弯曲度 $1 \sim 1.05$)的宽条带状,砂体宽而厚,心滩砂体平面组合呈或密或疏的斑点状,河道的平面组合样式为交织条带状;辫流型分流河道侧向迁移频繁,砂体接触类型以切叠型为主。辫-曲转换型分流河道呈中低弯度(弯曲度 $1.05 \sim 1.15$)的条带状,砂体宽度中等,厚层砂体以心滩和点坝的形式分布于河道内,河道的平面组合样式为分叉-合并型,砂体叠置类型以垂向叠加型为主。曲流型分流河道呈中高弯度的条带状,河道砂体最窄,河道的平面组合类型包括单一条带型和分叉-合并型;砂体垂向上多呈孤立型分布在河道间泥岩中。3类分流河道的厚度与宽度具有明显的对数正相关关系,河道的宽厚比具有辫流型>辫-曲转换型>曲流型的特征。

3) 古地貌是浅水三角洲分流河道类型的主控因素,长期基准面变化控制着浅水三角洲分流河道的规模,中期基准面旋回的升降变化则控制着砂体的叠置样式。窄而陡的古地貌有利于辫流型分流河

道的形成,而宽而缓的古地貌则更倾向于发育曲流型分流河道。随着长期基准面旋回的上升,浅水三角洲分流河道的规模逐渐变小;而随着中期基准面旋回的上升,砂体的垂向叠置样式从连通性最好的切叠型逐渐过渡为垂向叠加型,最终演变为互不连通的孤立型。

参考文献(References)

- 陈琳琳,谢月芳. 1998. 东海西湖凹陷花港组沉积模式初探. 海洋石油, 18(4): 15-21. [Chen L L, Xie Y F. 1998. Discussion on depositional mode of Huagang Formation in Xihu trough, the East China Sea. Offshore Oil, 18(4): 15-21]
- 陈忠云,张建培,张涛,鲁法伟. 2013. 西湖凹陷层序划分及海平面变化响应. 海洋地质前沿, 29(9): 15-20. [Chen Z Y, Zhang J P, Zhang T, Lu F W. 2013. Stratigraphic sequences in Xihu sag and their response to sea level changes. Marine Geology Frontiers, 29(9): 15-20]
- 杜学斌,陆永潮,曹强,叶加仁,贾冀新,赵珂,段丹. 2020. 东海盆地西湖凹陷深部储层“相-岩-温”三元分级评价原则与效果. 地质科技通报, 39(3): 10-19. [Du X B, Lu Y C, Cao Q, Ye J R, Jia J X, Zhao K, Duan D. 2020. Grading evaluation of deep reservoir in Xihu Depression, East China Sea Basin. Bulletin of Geological Science and Technology, 39(3): 10-19]
- 付晶,吴胜和,王哲,刘钰铭. 2015. 湖盆浅水三角洲分流河道储层构型模式:以鄂尔多斯盆地东缘延长组野外露头为例. 中南大学学报(自然科学版), 46(11): 4174-4182. [Fu J, Wu S H, Wang Z, Liu Y M. 2015. Architecture model of shallow-water delta distributary channel in lake basin: a case study of the Yanchang formation outcrops in the eastern margin of Ordos basin. Journal of Central South University (Science and Technology), 46(11): 4174-4182]
- 葛海波. 2014. 东海陆架盆地西湖凹陷天外天一黄岩地区平湖—花港组层序地层及沉积相研究. 成都理工大学硕士学位论文. [Ge H B. 2014. The Study of Pinghu and Huagang Formation Sequence Stratigraphy and Sedimentation Facies Feature in Tianwaitian and Huangyan Region of Xihu Sag, East China Sea. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 贺婷婷,李胜利,高兴军,宋岑,周新茂,贺东旭. 2014. 浅水湖泊三角洲平原分流河道类型与叠置模式. 古地理学报, 16(5): 597-604. [He T T, Li S L, Gao X J, Song C, Zhou X M, He D X. 2014. Types and superposed patterns of distributary channels in a shallow lacustrine delta plain. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 16(5): 597-604]
- 何贤科,娄敏,蔡华,李炳颖,刘英辉,黄鑫. 2023. 西湖凹陷C油田花港组浅水三角洲储集层构型. 新疆石油地质, 44(5): 517-527. [He X K, Lou M, Cai H, Li B Y, Liu Y H, Huang X. 2023. Architecture of shallow-water delta reservoir of Huagang Formation in C oilfield, Xihu Sag. Xinjiang Petroleum Geology, 44(5): 517-527]
- 胡明毅,柯岭,梁建设. 2010. 西湖凹陷花港组沉积相特征及相模式.

- 石油天然气学报, 32(5): 1-5. [Hu M Y, Ke L, Liang J S. 2010. The characteristics and pattern of sedimentary facies of Huangang Formation in Xihu depression. Journal of Oil and Gas Technology, 32(5): 1-5]
- 李上卿. 2000. 东海西湖凹陷新生代地质构造特征与演化. 海洋石油, 20(2): 8-14. [Li S Q. 2000. Cenozoic basin geological tectonic feature and evolution in Xihu Trough, the East China Sea. Off-shore Oil, 20(2): 8-14]
- 李顺利, 许磊, 于兴河, 侯国伟, 胡勇, 高照普. 2018. 东海陆架盆地西湖凹陷渐新世海侵作用与潮控体系沉积特征. 古地理学报, 20(6): 1023-1032. [Li S L, Xu L, Yu X H, Hou G W, Hu Y, Gao Z P. 2018. Marine transgressions and characteristics of the tide-dominated sedimentary systems in the Oligocene, Xihu sag, East China Sea Shelf Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 20(6): 1023-1032]
- 刘金水, 廖宗廷, 贾健谊, 周祖翼, 杨娟. 2003. 东海陆架盆地地质结构及构造演化. 上海地质, 24(3): 1-6. [Liu J S, Liao Z T, Jia J Y, Zhou Z Y, Yang J. 2003. The geological structure and tectonic evolution of the East China Sea Shelf Basin. Shanghai Geology, 24(3): 1-6]
- 刘金水, 陆永潮, 秦兰芝. 2019. 源-汇系统分析方法在大型储集体研究中的应用: 以西湖凹陷中央反转带花港组为例. 石油实验地质, 41(3): 303-310. [Liu J S, Lu Y C, Qin L Z. 2019. Application of source to sink system analysis in large reservoir research: a case study of Huangang Formation, Central Inversion Belt, Xihu Depression. Petroleum Geology and Experiment, 41(3): 303-310]
- 娄敏, 蔡华, 何贤科, 刘英辉, 黄鑫, 张宪国, 刘华峰. 2023. 地震沉积学在东海陆架盆地西湖凹陷河流—三角洲相储集层刻画中的应用. 石油勘探与开发, 50(1): 125-138. [Lou M, Cai H, He X K, Liu Y H, Huang X, Zhang X G, Liu H F. 2023. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu sag, East China Sea shelf basin. Petroleum Exploration and Development, 50(1): 125-138]
- 楼章华, 兰翔, 卢庆梅, 蔡希源. 1999. 地形、气候与湖面波动对浅水三角洲沉积环境的控制作用: 以松辽盆地北部东区葡萄花油层为例. 地质学报, 73(1): 83-91. [Lou Z H, Lan X, Lu Q M, Cai X Y. 1999. Controls of the topography, climate and lake level fluctuation on the depositional environment of a shallow-water delta: a case study of the Cretaceous putao-hua reservoir in the northern part of Songliao Basin. Acta Geologica Sinica, 73(1): 83-91]
- 孙思敏, 彭仕必. 2006. 东海西湖凹陷平湖油气田花港组沉积相及沉积演化. 西北大学学报: 自然科学版, 36(S1): 63-67. [Sun S M, Peng S M. 2006. Sedimentary facies and evolution of Huangang Formation of Pinghu oilfield in Xihu sag, the East China. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 36(S1): 63-67]
- 王果寿, 周卓明, 肖朝辉, 李美洲, 周维奎, 王琳. 2002. 西湖凹陷春晓区带下第三系平湖组、花港组沉积特征. 石油与天然气地质, 23(3): 257-261, 265. [Wang G S, Zhou Z M, Xiao C H, Li M Z, Zhou W K, Wang L. 2002. Sedimentary characteristics of Eocene Pinghu Formation and Huangang Formation in Chunxiao zone of Xihu Lake depression. Oil & Gas Geology, 23(3): 257-261, 265]
- 王文娟, 张银国, 张建培. 2014. 东海盆地西湖凹陷渐新统花港组地震相特征及沉积相分布. 海相油气地质, 19(1): 60-68. [Wang W J, Zhang Y G, Zhang J P. 2014. Seismic facies features and sedimentary facies distribution of Oligocene Huangang Formation in Xihu Sag, East China Sea Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 19(1): 60-68]
- 王夏斌, 姜在兴, 胡光义, 范廷恩, 范洪军, 何明薇, 陈飞. 2020. 浅水三角洲分流河道沉积模式分类. 地球科学与环境学报, 42(5): 654-667. [Wang X B, Jiang Z X, Hu G Y, Fan T E, Fan H J, He M W, Chen F. 2020. Classification of sedimentary models of distributary channels in shallow-water deltas. Journal of Earth Sciences and Environment, 42(5): 654-667]
- 魏恒飞, 陈践发, 张铜磊, 李伟, 刘娅昭, 吴雪飞, 王冠男. 2012. 西湖凹陷花港组层序地层划分和聚煤特征. 煤炭学报, 37(S1): 149-156. [Wei H F, Chen J F, Zhang T L, Li W, Liu Y Z, Wu X F, Wang G N. 2012. Sequence stratigraphic division and concentrating coal characteristics of Huangang Formation in Xihu depression. Journal of China Coal Society, 37(S1): 149-156]
- 武法东, 陆永潮, 陈平, 周平. 1997. 东海西湖凹陷渐新统花港组海绿石的发现及其意义. 沉积学报, 15(3): 158-161. [Wu F D, Lu Y C, Chen P, Zhou P. 1997. The discovery and significance of glauconites in the Huangang Formation of the Oligocene, Xihu depression, East China Sea. Acta Sedimentologica Sinica, 15(3): 158-161]
- 吴胜和, 纪友亮, 岳大力, 印森林. 2013. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨. 高校地质学报, 19(1): 12-22. [Wu S H, Ji Y L, Yue D L, Yin S L. 2013. Discussion on Hierarchical Scheme of Architectural Units in Clastic Deposits. Geological Journal of China Universities, 19(1): 12-22]
- 吴胜和, 徐振华, 刘钊. 2019. 河控浅水三角洲沉积构型. 古地理学报, 21(2): 18-31. [Wu S H, Xu Z H, Liu Z. 2019. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(2): 18-31]
- 许薇龄, 乐俊英. 1988. 东海的构造运动及演化. 海洋地质与第四纪地质, 8(1): 9-21. [Xu W L, Le J Y. 1988. Tectonic movement and evolution of the East China Sea. Marine Geology & Quaternary Geology, 8(1): 9-21]
- 徐振华, 吴胜和, 刘钊, 赵军寿, 耿红柳, 吴峻川, 张天佑, 刘照玮. 2019. 浅水三角洲前缘指状砂坝构型特征: 以渤海湾盆地渤海BZ25油田新近系明化镇组下段为例. 石油勘探与开发, 46(2): 322-333. [Xu Z H, Wu S H, Liu Z, Zhao J S, Geng H L, Wu J C, Zhang T Y, Liu Z W. 2019. Sandbody architecture of the bar finger within shoal water delta front: insights from the Lower Member of Minghuazhen Formation, Neogene, Bohai BZ25 Oilfield, Bohai Bay Basin, East China. Petroleum Exploration and Development, 46(2): 322-333]
- 于兴河, 李顺利, 曹冰, 侯国伟, 王亚风, 皇甫志远. 2017. 西湖凹陷渐新世层序地层格架与沉积充填响应. 沉积学报, 35(2): 299-314. [Yu X H, Li S L, Cao B, Hou G W, Wang Y F, Huangfu Z Y. 2017. Oligocene sequence framework and depositional response in

- the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 299–314]
- 曾灿,尹太举,宋亚开. 2017. 湖平面升降对浅水三角洲影响的沉积数值模拟实验. *地球科学*, 42(11): 2095–2104. [Zeng C, Yin T J, Song Y K. 2017. Experimental on numerical simulation of the impact of lake level plane fluctuation on shallow water delta. *Earth Science*, 42(11): 2095–2104]
- 张国华,张建培. 2015. 东海陆架盆地构造反转特征及成因机制探讨. *地质学前沿*, 22(1): 260–270. [Zhang G H, Zhang J P. 2015. A discussion on the tectonic inversion and its genetic mechanism in the East China Sea Shelf Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 260–270]
- 张国华,刘金水,秦兰芝,赵洪. 2018. 西湖凹陷渐新统花港组大型辫状河沉积体系特征. *中国海上油气*, 30(3): 10–18. [Zhang G H, Liu J S, Qin L Z, Zhao H. 2018. Characteristics of the large braided river depositional system of the Oligocene Huagang Formation in the Xihu sag. *China Offshore Oil and Gas*, 30(3): 10–18]
- 张建培,张涛,刘景彦,戴林,李键,漆滨汶. 2008. 西湖凹陷反转构造分布与样式. *海洋石油*, 28(4): 14–20. [Zhang J P, Zhang T, Liu J Y, Dai L, Li J, Qi B W. 2008. Distribution and style of inverted structures in Xihu Depression. *Offshore Oil*, 28(4): 14–20]
- 张建培,徐发,钟韬,张田,余逸凡. 2012. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组层序地层模式及沉积演化. *海洋地质与第四纪地质*, 32(1): 35–41. [Zhang J P, Xu F, Zhong T, Zhang T, Yu Y F. 2012. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huagang Formations in Xihu Trough. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(1): 35–41]
- 张绍亮,秦兰芝,余逸凡,唐贤君. 2014. 西湖凹陷渐新统花港组下段沉积相特征及模式. *石油地质与工程*, 28(2): 5–8. [Zhang S L, Qin L Z, Yu Y F, Tang X J. 2014. Sedimentary facies characteristics and its mode of lower member of Oligocene Huagang Formation in Xihu sag. *Petroleum Geology and Engineering*, 28(2): 5–8]
- 赵金海. 2004. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(上). *海洋石油*, 24(4): 6–14. [Zhao J H. 2004. The forming factors and evolution of the Mesozoic and Cenozoic basin in the East China Sea. *Offshore Oil*, 24(4): 6–14]
- 赵志刚,王鹏,祁鹏,郭瑞. 2016. 东海盆地形成的区域地质背景与构造演化特征. *地球科学*, 41(3): 546–554. [Zhao Z G, Wang P, Qi P, Guo R. 2016. Regional background and tectonic evolution of East China Sea Basin. *Earth Science*, 41(3): 546–554]
- 郑荣才,彭军,吴朝容. 2001. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义. *沉积学报*, 19(2): 249–255. [Zheng R C, Peng J, Wu Z R. 2001. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(2): 249–255]
- 周瑞琦,傅恒,徐国胜,苗清,付振群. 2018. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组沉积层序. *沉积学报*, 36(1): 132–141. [Zhou R Q, Fu H, Xu G S, Miao Q, Fu Z Q. 2018. Eocene Pinghu Formation-Oligocene Huagang Formation sequence stratigraphy and depositional model of Xihu Sag in East China Sea Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(1): 132–141]
- 朱毅秀,黄导武,王欢,何贤科,师源,余亚明. 2019. 东海西湖凹陷 A 气田渐新统花港组三段厚层砂岩沉积环境. *石油与天然气地质*, 40(6): 1226–1235. [Zhu Y X, Huang D W, Wang H, He X K, Shi Y, She Y M. 2019. Sedimentary setting of thick sandstone in the 3rd member of the Oligocene Huagang Formation in A gas field in the Xihu Sag, East China Sea Basin. *Oil & Gas Geology*, 40(6): 1226–1235]
- Chen D Z, Wang J G, Qing H R, Yan D, Li R W. 2009. Hydrothermal venting activities in the Early Cambrian, South China: petrological, geochronological and stable isotopic constraints. *Chemical Geology*, 258: 168–181.
- Rust B R. 1978. A classification of alluvial channel systems. In: Miall A D(ed). *Fluvial Sedimentology*. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 5: 187–198.
- Zeng H L, Backus M M. 2005. Interpretive advantages of 90°-phase wavelets(Part 1): modeling. *Geophysics*, 70(3): C7–C15.
- Zeng H L, Backus M M, Barrow K T, Tyler N. 1998. Stratal slicing(Part I): realistic 3-D seismic model. *Geophysics*, 63(2): 502–513.
- Zhang L, Bao Z D, Dou L X, Zang D S, Mao S W, Song J, Zhao J H, Wang Z C. 2018. Sedimentary characteristics and pattern of distributary channels in shallow water deltaic red bed succession: a case from the Late Cretaceous Yaojia Formation, southern Songliao Basin, NE China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171: 1171–1190.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)