

海上稀疏井区高精度地层格架约束下的地震沉积学刻画 ——以东海盆地西湖凹陷中央背斜带X区块古近系花港组为例

董鑫旭¹,周兴海²,李 昆²,蒲仁海¹,王爱国¹,关蕴文¹,张 鹏¹

(1. 西北大学地质学系/大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 中国石化上海海洋油气分公司, 上海 200120)

摘要:海上工区面积辽阔,单井资料匮乏,花港组内部横向上的沉积微相界定存在争议、纵向上的沉积演化规律不明。为充分挖掘现有井、震资料的地质解释潜力,选取东海盆地西湖凹陷中央背斜带X区块古近系花港组为研究对象,提出了井-震小波变换建立高精度等时地层格架、井点沉积相标志定相类型、分频RGB属性刻画沉积相展布以及古地貌恢复辅助沉积相演化规律分析的地震沉积学解释技术。研究结果表明:①测井-地震小波变换结果有较好的一致性,可将研究区花港组分为花港组上段(花上段)3个(H1—H3)和花下段5个(H4—H8)四级旋回,并在此基础上建立高精度等时地层格架。②根据岩心相、测井相和地震相相互印证,确认研究区花港组沉积期为辫状河三角洲沉积环境。分频振幅属性验证不同厚度砂岩层在15,30和45 Hz单频体的振幅响应明显,采用分频RGB属性融合可在平面凸显不同沉积体的边界。③研究区H1和H2旋回整体为三角洲前缘沉积,H3—H6旋回为浅水背景下的三角洲平原-前缘沉积,H7和H8旋回为辫状河三角洲平原沉积,砂层组沉积相垂向演化受控于物源供给、相对湖平面高低和古地貌形态。在井-震时频分析建立等时地层格架基础上,通过相关性分析优选属性进行RGB融合能够凸显不同厚度砂岩的展布,减少了人为主观因素的影响,提升了沉积体边界的识别能力,可为其他井网稀疏地带沉积相刻画提供借鉴。

关键词:沉积演化;地层格架;地震沉积学;花港组;古近系;西湖凹陷;东海盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Seismic sedimentological characterization of an offshore area with sparse well control under the constraint of a high-resolution stratigraphic framework: A case study of the Paleogene Huagang Formation in block X of the central anticlinal zone in the Xihu Sag, East China Sea Basin

DONG Xinxu¹, ZHOU Xinghai², LI Kun², PU Renhai¹, WANG Aiguo¹, GUAN Yunwen¹, ZHANG Peng¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. Shanghai Offshore Petroleum Company, SINOPEC, Shanghai 200120, China)

Abstract: Exploration in vast offshore survey areas faces the challenge of limited single-well data. To reveal the lateral sedimentary microfacies variations still in controversy and vertical sedimentary evolution pattern of the Huagang Formation, we focus on the Huagang Formation in block X of the central anticlinal zone in the Xihu Sag based on a comprehensive analysis of available logs and seismic data. Using the seismic sedimentological interpretation technology, which allows for analyzing the evolutionary pattern of sedimentary facies with the assistance of paleogeomorphic reconstruction, we establish a high-resolution isochronous stratigraphic framework through the wavelet transform of logs and seismic data. Furthermore, we calibrate the seismic facies types based on single-well sedimentary facies and delineate the distribution of sedimentary facies using frequency-division spectral decomposition red, green, and blue (RGB) attributes. Key findings are as follows: (1) The wavelet transform results from logs and seismic data, demonstrating high consistency, allow for the division of the Huagang Formation of the study area into eight fourth-order cycles: three in the upper member (H1—H3) and five in the lower member (H4—H8).

收稿日期:2023-10-17;修回日期:2024-01-06。

第一作者简介:董鑫旭(1995—),博士研究生,石油与天然气勘探、开发地质。E-mail:1276479878@qq.com。

通信作者简介:蒲仁海(1962—),教授、博士生导师,油气地质勘探和地震解释。E-mail:purenhai@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41390451)。

Consequently, a high-resolution isochronous stratigraphic framework is formed; (2) A comprehensive analysis of core facies, logging facies, and seismic facies suggests that the Huagang Formation in the study area had a sedimentary environment of braided deltas. Frequency-division seismic amplitude attributes reveal that sandstone layers of varying thicknesses exhibit the most significant seismic amplitude responses in single-frequency volumes of 15 Hz, 30 Hz, and 45 Hz. Therefore, the frequency-division RGB blends can be used to effectively delineate the boundaries of different sedimentary bodies in a planar view; (3) In the study area, the H1 and H2 cycles generally consist of delta-front sediments, the H3 to H6 cycles feature a combination of delta-plain and delta-front sediments in a shallow-water setting, and the H7 and H8 cycles comprise braided delta plain sediments. The vertical sedimentary facies evolution of these sand beds is governed by sediment supply, relative lake level, and paleogeomorphology. Based on the isochronous stratigraphic framework established through time-frequency analyses of logs and seismic data, the distributions of sandstones with different thicknesses can be characterized through RGB blends of seismic attributes selected via correlation analysis. This approach enhances the identification accuracy of sedimentary body boundaries while diminishing the influence of researchers' subjectivity, thus providing a reference for sedimentary facies characterization of other zones with sparse well patterns.

Key words: sedimentary evolution, stratigraphic framework, seismic sedimentology, Huagang Formation, Paleogene, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin (ECSSB)

引用格式:董鑫旭,周兴海,李昆,等. 海上稀疏井区高精度地层格架约束下的地震沉积学刻画——以东海盆地西湖凹陷中央背斜带X区块古近系花港组为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 293–308. DOI: 10. 11743/ogg20240120.

DONG Xinxu, ZHOU Xinghai, LI Kun, et al. Seismic sedimentological characterization of an offshore area with sparse well control under the constraint of a high-resolution stratigraphic framework: A case study of the Paleogene Huagang Formation in block X of the central anticlinal zone in the Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 293–308. DOI: 10. 11743/ogg20240120.

西湖凹陷作为东海盆地最大的富烃凹陷,具有广阔的勘探前景。随着勘探的持续推进,岩性和构造岩性复合圈闭已接力构造圈闭成为勘探的新方向,其重点在于优势沉积相带的刻画。开展地震沉积学研究是推动东海中-深层油气产能接替区建设的关键。以往的地震沉积相刻画多以地震属性切片及 90° 相移为依据刻画相边界^[1-3],但单一属性常常是对陆相复杂沉积环境的整体反映,其结果无明显的地质形态,并且不同科研人员在层内切片属性优选方面存在主观差异,切片的等时性难以保证。此外,当岩性种类复杂时,相位转换后地震同相轴并不能完全代表岩性信息,多解性较强^[4]。尤其在海上地震资料品质较低、断层发育、相变快、砂体厚度变化大等条件下,一味套用传统的技术流程难以取得较好的应用效果^[5]。如何基于研究目标的地质特点和现有资料,有针对性地开展地震沉积学刻画是推动东海中深层油气产能接替区建设的关键。

中央背斜带中北部近年来取得一系列油气新发现,但该地区花港组埋深大,多数井未钻穿花港组底部,井-震结合难度大,等时地层格架的建立缺乏标准。例如,孙思敏等基于测井曲线对比将花港组分为花上段和花下段两个三级层序,进一步细分将花上段

分H1—H3共3个砂层组,花下段分为H4—H8共5个砂层组^[6];张锡楠等以同相轴接触关系和波组反射特征将花港组同样划分出8个砂层组^[7];姜敏等借助分频倾角差属性将花上段分为H1—H5、花下段分为H6—H12共12个砂层组^[4]。与此同时,凹陷中部砂层组级别的沉积体系及演化研究不够系统;花港组内部沉积了大段连续砂体,这些砂体究竟是形成于河流、三角洲还是湿地扇等环境众说纷纭^[8-11]。基于上述问题,本文选取中央背斜带X区块古近系花港组作为研究目标,从地震资料频谱分析出发,以井-震小波变换建立高精度地层格架为前提,以频率域调谐振幅与地层厚度的对应关系为依据,借助分频振幅RGB(红-绿-蓝)属性融合等手段,在高精度四级层序地层格架基础上刻画砂层组的沉积相展布,并结合古地貌特征分析了砂层组垂向上演化规律,以期为本区下一步层位优选和有利区预测提供参考。

1 研究区地质概况

东海盆地是以新生代沉积为主的盆地,面积约为 $26.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[12]。西湖凹陷作为盆内已发现油气规模最大的凹陷,面积约 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$,位于盆内东部次一

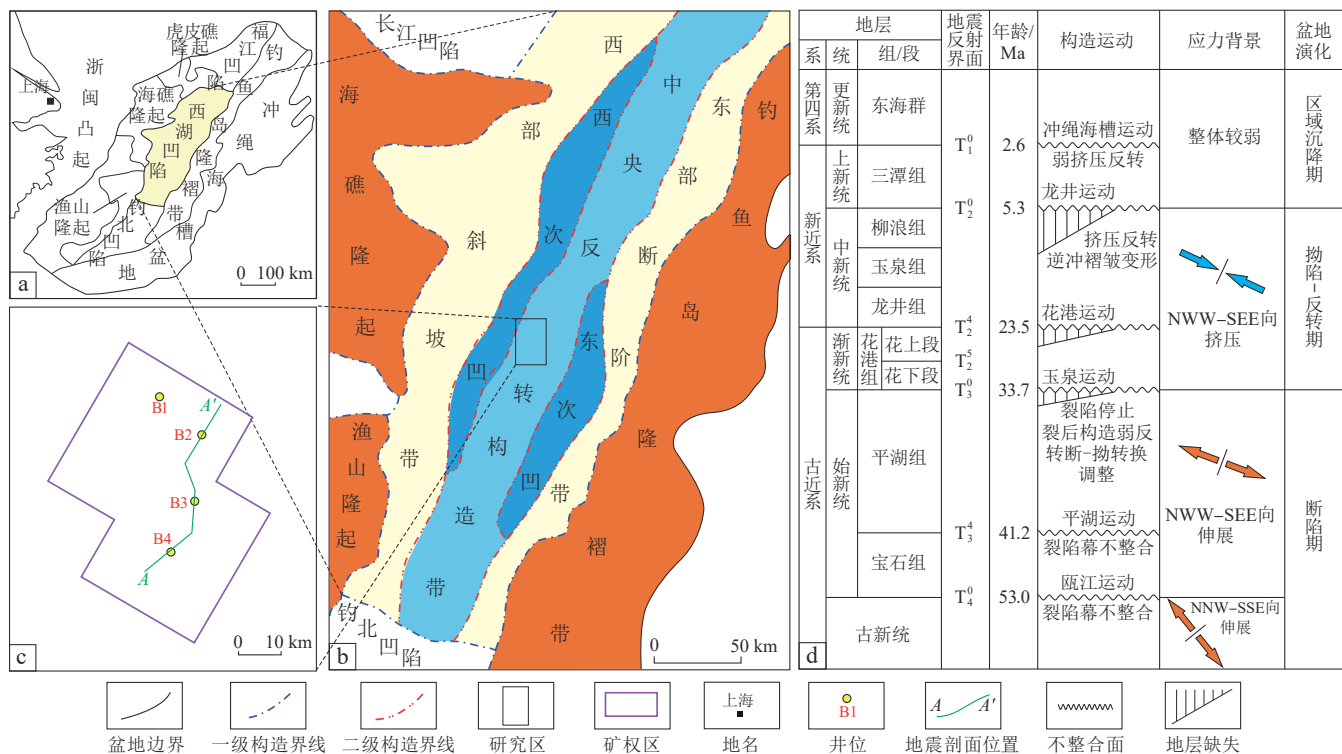


图1 东海盆地西湖凹陷构造特征及地层综合柱状图

Fig. 1 Structural characteristics and composite stratigraphic column of the Xihu Sag in the East China Sea Basin

a. 西湖凹陷位置; b. 研究区位置; c. 研究区钻井分布 d. 研究区构造演化阶段

级构造单元浙东拗陷的中部,东邻钓鱼岛隆褶带,西侧毗邻虎皮礁隆起和海礁隆起,南部以钓北凹陷为界,北与虎皮礁隆起和福江凹陷相接(图1a—c)。西湖凹陷在多次构造运动下历经早期断陷、中期拗陷反转以及晚期区域沉降3大阶段(图1d),在凹陷内部形成西斜坡、西次洼、中央反转背斜、东次洼以及东部断阶共5个二级油气聚集带^[13-14]。

本文研究区位于中央反转背斜带中北部,面积约2 100 km²。研究区新生代地层由底至顶依次为古新统,始新统宝石组和平湖组,渐新统花港组,中新统龙井组、玉泉组和柳浪组,上新统三潭组及更新统东海群^[4]。平湖组和花港组中的暗色泥岩和煤为主要烃源岩^[15],在通源断裂及大型砂体输导下,形成了平湖组、花港组、龙井组、玉泉组和柳浪组等多套含油气层^[12,16]。研究区完钻井在花港组—柳浪组中均获工业油气流,证实了良好的勘探前景。花港组作为主力产层,是本次研究的目的层系,形成于辫状河三角洲沉积环境。根据分级控制、旋回对比原则,花港组可分为花下段和花上段2个三级旋回^[6-7,17]。研究区多数井完钻于花下段但未钻穿花港组底部,因此亟需在资料有限情况下,充分利用测井垂向高分辨率和地震横向高预测性的特点刻画沉积相与砂体展布。

2 井-震小波变换建立高精度等时地层格架

2.1 小波变换划分不同级次层序的思路与方法

高精度等时地层格架的建立是沉积相刻画和储层预测的基础,其关键在于不同级别层序界面识别、不同级次旋回划分以及其隶属关系分析。测井、地震等复合地球物理信号是对地下多周期旋回体岩性和结构等信息的综合响应。一般地,粒度粗的砂岩单层厚度大,在井、震信号中呈低频,细粒的砂泥岩薄互层对应高频信号段。小波变换就是用将自变量为 t (时间序列,无量纲)的小波母函数 $\varphi(t)$ 经伸缩和移动变换后无限逼近原始信号 $f(t)$ 完成对原始信号的多尺度分析^[18-19]:

$$W_{\varphi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: $W_{\varphi}(a, b)$ 为信号 $f(t)$ 的小波变换得到的小波系数,无量纲; a 为尺度因子,无量纲; b 为时移因子,无量纲; $\varphi(t)$ 为小波母函数。尺度因子 a 与频率成反比,该参数的确定依据井-震信号分析的小波方差确定^[20]。通过小波方差极值可以确定小波分析中的尺度强度,从

而确定多级层序界面识别和基准面旋回划分。

目前,小波分析已被广泛用于地层划分对比研究中,一定程度细化了层序格架的建立^[21]。其中,采用Morlet小波对GR(自然伽马)曲线进行小波变换已在多个地区的层序划分研究中取得良好的应用效果^[22-23]。然而,前人皆基于单一的测井信号或地震信号进行小波变换层序分析,缺少井、震资料的联动,如何统一测井、地震两种信号小波变换识别的界面位置、厘清划分的旋回级次归属值得考究。笔者基于国内外相关技术应用实例调研,对该项技术的优点进行充分挖掘,提出了合成记录约束下的井-震小波变换联立建立高精度等时地层格架,主要步骤如下:①利用单井岩心、录井资料的完成单井地层划分;②根据已钻井段的合成记录和层位标定对单井地层划分进行校正;③对目的层段井、震信号进行一维连续小波分析,根据信号特点与单井层位划分选取合适尺度完成未钻穿井段的地层划分;④岩心、井-震小波变换等多资料相互印证以保证多级地层单元划分结果一致性,在此基础上多井对比、全区闭合建立等时地层格架。

2.2 应用效果

本次研究选取单井资料全、合成记录效果好的B2井作为标准井开展单井层序划分。首先,在传统的合成记录标定层位的基础上(图2a),以Morlet小波作母波函数开展GR曲线和井旁地震道小波分析,并做小波方差随尺度的变化图。从图2b和图2c可以看出,测井小波方差图中可识别出94,254和724三个极值点,地震较测井分辨率低仅出现16和35两个极值。将小波系数曲线上周期性震荡、波谱图中能量团特征与岩心旋回做对比可以看出,测井信号724尺度和地震信号35尺度下的小波系数曲线周期性震荡、能量团变迁趋势相似。小波变换系数曲线由底至顶震荡程度减弱,底部小波系数幅值较大向上曲线收窄变平缓,谱图中红色的高能量团有由大尺度(低频)向低尺度(高频)迁移,反映两个基准面半旋回,对应三级层序油层组(地层段)的花下段和花上段。在此基础上,遵循小层对比划分中先大层后小层原则,开展测井信号254尺度和地震信号16尺度下的小波分析,进一步划分出花上段3个、花下段5个四级旋回,对应四级层序砂层组(亚段)(图2d)。此外,B2井测井小波分析在94尺度还存在优势周期,可以辅助五级层序单砂层的划分。最后,依据已钻井段的岩心、岩屑录井资料对划分的层序界面进行校准,使岩、电、震多资料划分结果尽可能一致。需要强调的是,地震波是地下岩石岩

性、厚度、含油气性等多因素的综合响应,因而可能与测井识别的旋回存在不一致的情况,例如B2井的H4、H6和H7砂层组,这时则以纵向分辨率较高的测井识别结果为准。尽管地震小波变换在四级层序的旋回性识别效果存在分歧,但在反映该级次砂层组间结构体差异、识别砂层组间层序界面等方面与测井的匹配度较高,可对井网密度较低或钻井深度有限的地区提供参考。

标准井单井地层划分效果得到印证后,将研究范围扩大,应用此方法完成全区已钻井的地层划分,并辅以油-水界面、动态资料进行调整、验证等时性。在此基础上,以合成记录为桥梁,将井点的小波谱图插入地震剖面,在钻遇井段联络井、震小波分析完成层位标定。对于未钻遇的 T_3^0 等层序界面,基于区域引层和井旁地震道小波特征分析完成标定。最后根据标定结果,明确各级目的层地震反射波组特征,并沿着具有相同波组特征的同相轴追踪(图3),全区闭合完成等时地层格架的建立。

3 古地貌恢复

古地貌作为地层地质历史时期的形成背景,揭示沉积期源-汇格局的同时可以验证地震沉积学解释的合理性^[24]。印模法作为业内较为成熟的古地貌恢复方法,需要考虑的因素有很多,主要分为构造恢复(构造沉降量、水平走滑量)和厚度恢复(残余厚度、剥蚀厚度、古水深、压实作用)2大类^[2,25]。这些因素时时刻刻都在发生变化,全要素精准定量地恢复较难实现,大多是考虑研究目标的地质背景有针对性地对影响较大的因素进行恢复。研究区目的层接受沉积时,整个西湖凹陷已完成断陷期到拗陷期的转换,构造活动较弱因而可以省略构造恢复。目的层沉积始、末的玉泉运动和花港运动分别对盆地西部和东部影响较大,中央背斜带无明显削截特征,可以不开展剥蚀厚度的恢复。此外,前人研究表明,研究区花港组砂层组古水体较浅,不同层位差异较小,平均深度小于2.5 m^[26],为浅水沉积环境,古水深对古地貌恢复的影响微乎其微。因此本次古地貌恢复的流程主要考虑残余厚度计算、倾角校正和去压实校正3个方面(图4)。古地貌恢复结果显示,花下段地势整体西北高,东南低,整体呈现阶梯状河谷地貌;花下段沉积末期,对应 T_2^0 层序界面,太平洋板块俯冲导致西湖凹陷发生了局部抬升。随后再次进入拗陷阶段接受沉积,花上段地势变缓,原始的洼陷被一北东-南西向的次级隆起分隔呈隆-凹相间的格局。

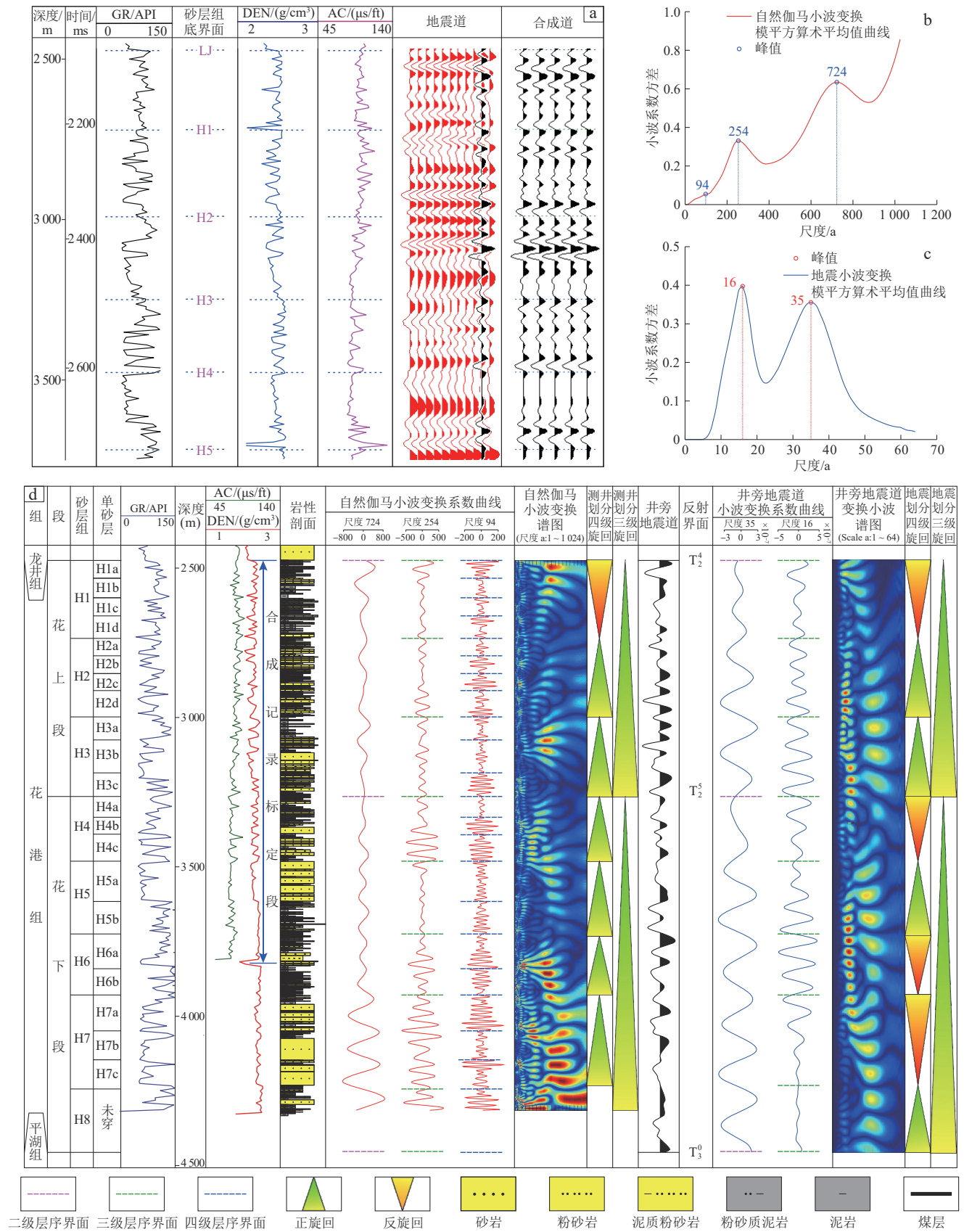


图2 西湖凹陷B2井井-震小波变换结果及地层划分图版

Fig. 2 Wavelet transform results from logs and seismic data and stratigraphic division chart for well B2 in the Xihu Sag

a. 井-震标定结果; b. 测井信号小波方差图; c. 地震信号小波方差图; d. B2井花港组地层划分综合图

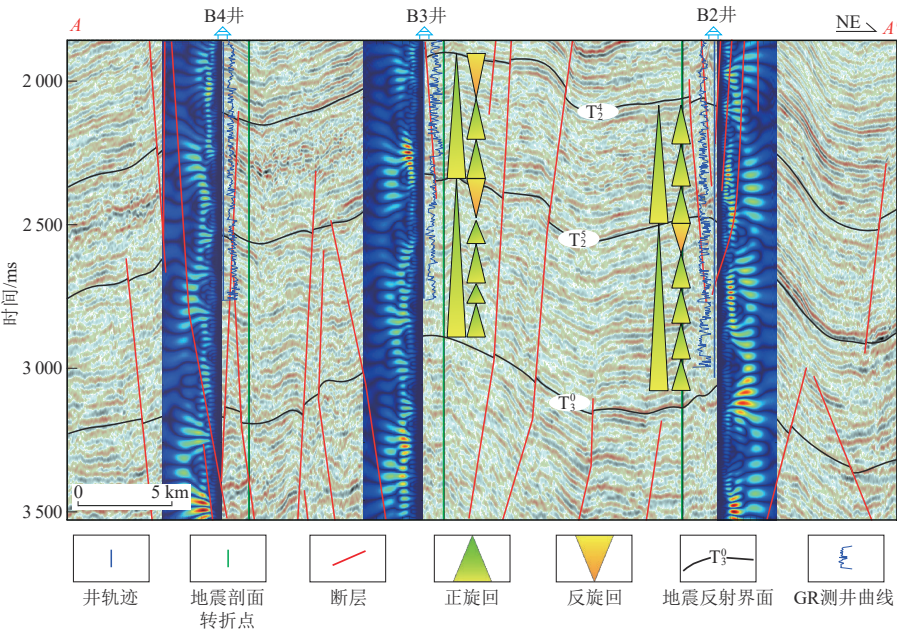


图3 基于井旁地震道小波变换解释地层格架(剖面位置见图1)

Fig. 3 Stratigraphic framework derived from the wavelet transform interpretation of near-well seismic traces (see Fig. 1 for section location)

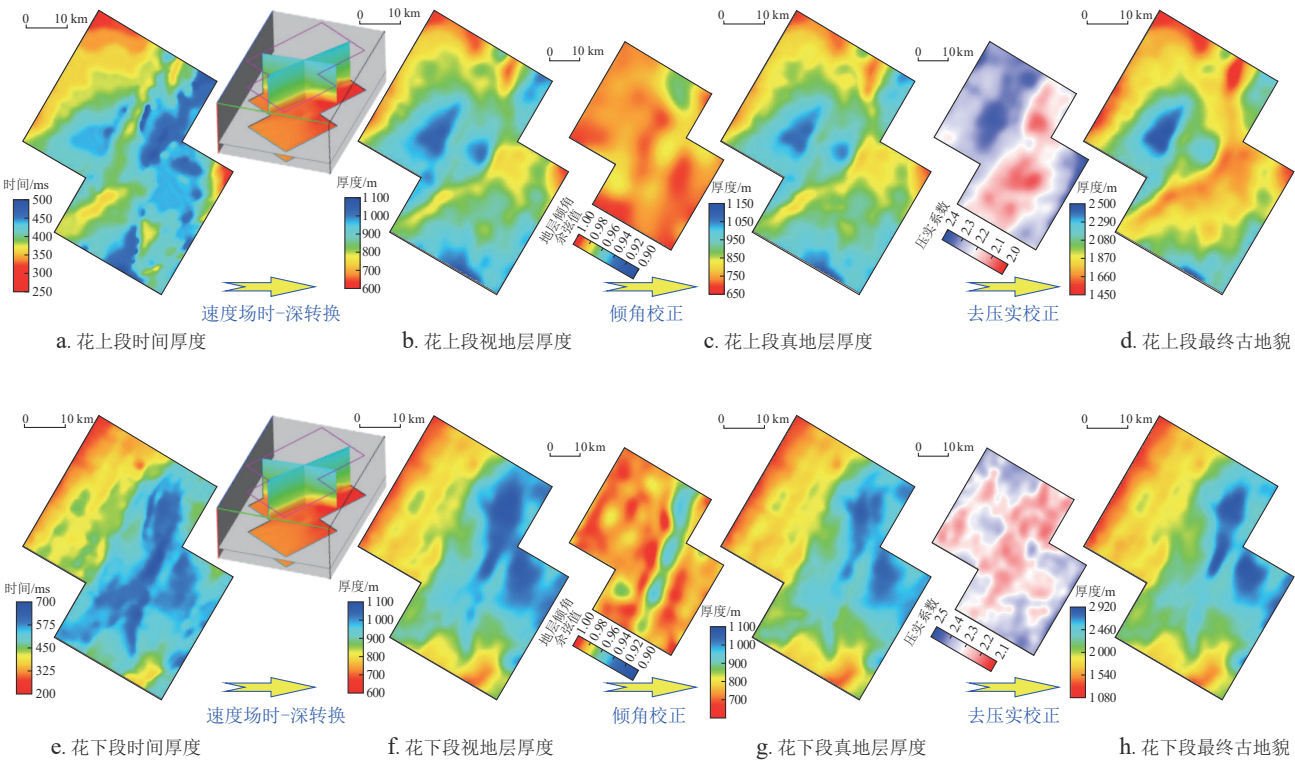


图4 西湖凹陷X区块古地貌精细恢复过程

Fig. 4 Fine-scale paleogeomorphic reconstruction process for block X in the Xihu Sag

4 沉积相类型

参考前人源-汇物源供应系统分析,综合研究区古地貌背景、岩心观察和测井响应,认为研究区花港组

发育陆相浅水湖泊背景下的辫状河三角洲沉积体系^[9,27-29],包括辫状河三角洲平原和辫状河三角洲前缘两种亚相。不同沉积环境下形成的岩石在成分、颜色、结构特征等方面存在差异,在测井曲线上的形态、变化幅度和叠置关系响应亦具有区别^[30]。

4.1 辫状河三角洲平原

辫状河三角洲平原中发育分流河道和泛滥平原两种微相。平原分流河道微相沉积以浅灰色、灰绿色的含砾砂岩、中-粗砂岩及中-细砂岩为主。近源的河道中水动力较强,多期河道叠置形成厚层连续砂体,可见多期冲刷面,之上为砾石定向排列的河床底部滞留沉积(图5a),砂岩内部可见反应水动力较强的平行层理以及板状(图5b)、槽状等交错层理。GR曲线显示低值且平滑呈箱形,偶有回返呈现为钟形或箱形的叠加,底部常见突变(图6)。泛滥平原为分流河道间的低洼蓄水区域,常由细粒的灰色、灰黑色的泥质粉砂岩、粉砂质泥岩或泥岩互层组成(图5c)。GR曲线呈中-高值的指状线形,齿化频繁(图6)。

4.2 辫状河三角洲前缘

辫状河三角洲前缘则由水下分流河道、水下分流间湾、河口坝和远砂坝组成。远源区的水下分流河道

是平原辫状河道在水下的延伸,河道底部同样可见冲刷面,但少见砾石,常以泥砾形式出现(图5d);由于湖水的阻滞,水动力减弱,岩石粒度变细,可见砂纹层理(图5e)、波状层理(图5f)和水平层理等反映弱水流的沉积构造;GR曲线显低值钟形或齿化箱形(图6)。分流间湾沉积微相与泛滥平原的岩性相同,但颜色有所变暗,常由深灰色或灰黑色泥岩和粉砂质泥岩组成;泥岩中可见炭化的植物茎叶化石(图5g),偶有煤层发育(图5h)。水下分流河道向湖区延伸过程中受湖水筛、刷形成前积的河口坝与远砂坝,位于河道分叉处或分流河道末端,具下细上粗的反粒度特征,电测曲线呈漏斗形(图6)。

5 沉积相体系展布

5.1 连井相展布

在岩心相、测井相标志划分微相的基础上,顺物源方向优选了地震和连井剖面对沉积相纵、横向变化进

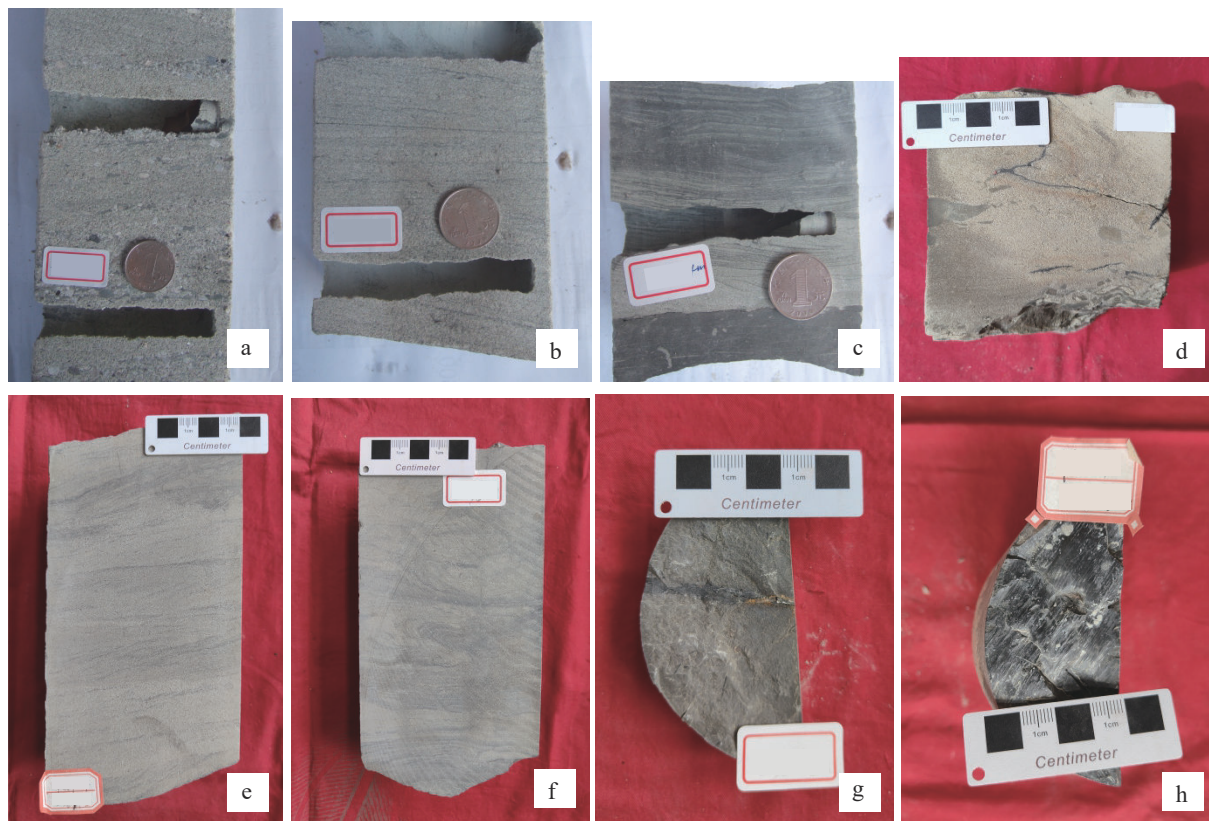


图5 西湖凹陷X区块花港组岩心岩性与沉积构造照片

Fig. 5 Photography showing the lithologies and sedimentary structures of cores from the Huagang Formation in block X of the Xihu Sag
a. 含砾粗砂岩,砾石定向排列, B2井,埋深3 141 m, H3砂层组; b. 底部板状交错层理,上部平行层理, B2井,埋深3 132 m, H3; c. 细砂岩、泥质粉砂岩互层, B2井,埋深3 141 m, H3砂层组; d. 细砂岩,底部泥砾冲刷面, B4井,埋深2 834 m, H2砂层组; e. 砂纹层理, B3井,埋深3 367 m, H6砂层组; f. 波状层理, B3井,埋深3 235 m, H5砂层组; g. 植物茎叶碎片炭化, B3井,埋深3 367 m, H6砂层组; h. 煤层, B3井,埋深3 406 m, H6砂层组

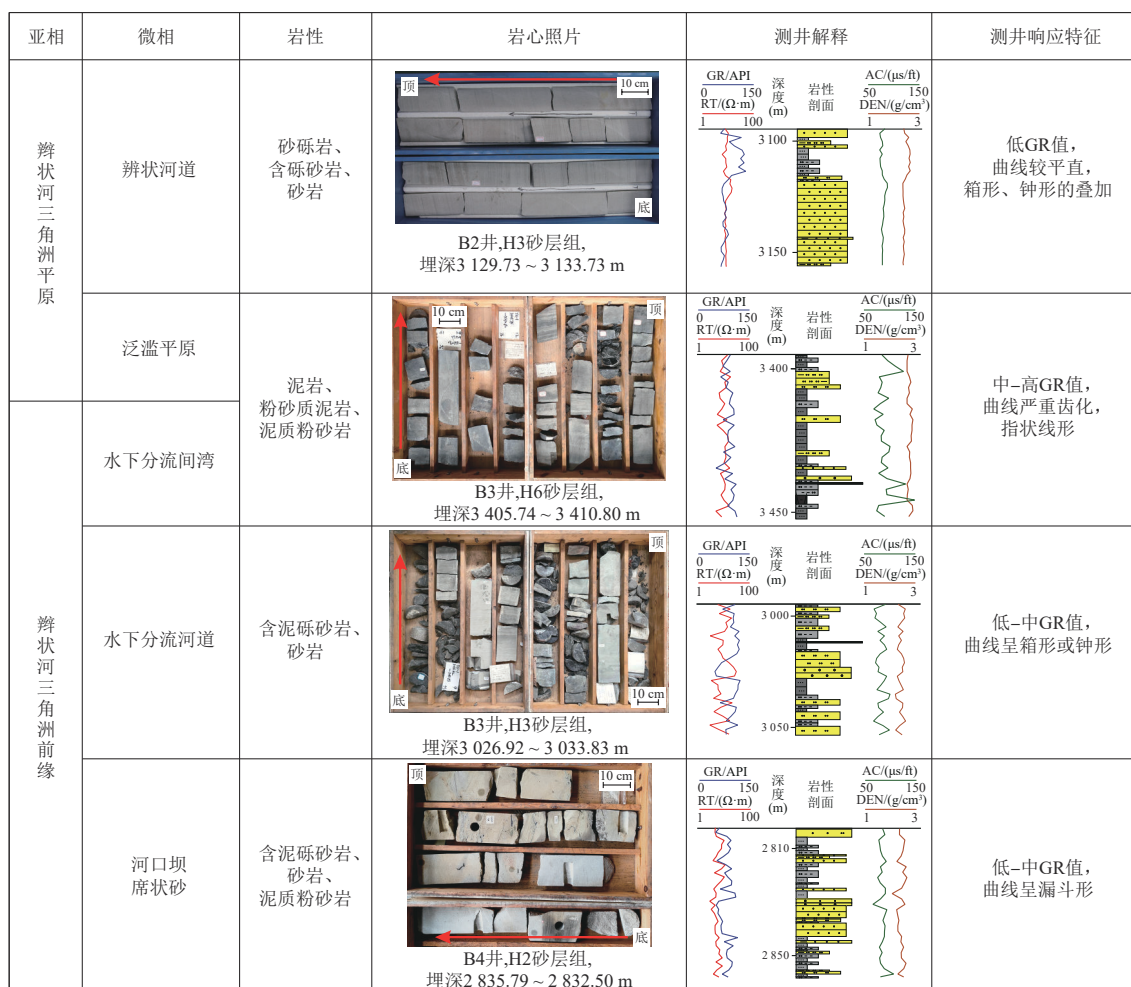


图6 西湖凹陷X区块花港组沉积相带岩心及测井响应

Fig. 6 Cores and log responses from a sedimentary facies zone of the Huagang Formation in block X of the Xihu Sag

行分析,同时验证井点沉积相识别的准确性。从图7可以看出,地震同相轴反射特征在纵、横向上都有明显的分带性。其中,处于三级层序底部的H8和H7砂层组在地震剖面上呈现低频、中-强振幅和较连续的特征,结合沉积背景和岩心观察鉴定为辫状河三角洲平原。H6—H3砂层组的地震同相轴则具有明显的北强南弱反射特征,由砂/地比含量高的辫状河三角洲平原过渡到三角洲前缘。与辫状河三角洲平原相比,辫状河三角洲前缘沉积环境下的砂岩和泥岩频繁互层使得地震信号频率增高,过渡为高频、中-弱振幅和中等连续的反射,两种亚相的反射特征变化界限大致在B2井南部,与前述的井点岩心相的颜色、粒度变化相一致。H3砂层组底部 T_2 对应一期局部沉积间断面,其上H3砂层组的低频和强震幅范围较花下段有所增加。花港组沉积末期受花港运动影响,整个西湖凹陷的沉积中心向北部迁移,从连井剖面可以看出(图8),研究区H2和H1砂层组砂/地比较低,与H3以下砂层组相比,砂/地比呈现南高北低

反转的趋势,相应地震剖面转变为南强北弱、中-强振幅和中-弱连续的特征。

5.2 沉积相平面展布

5.2.1 分频地震属性优选

合理的地震属性选择是刻画沉积相平面展布的前提。根据调谐效应和层间干涉原理,小于调谐厚度($\frac{1}{4}\lambda$)时,振幅与地层厚度成正相关关系,大于调谐厚度则相反^[31]。叠后地震保幅体经分频处理后得到一系列信息离散频率能量体(单频体),其中高频体的分辨率高、调谐厚度小,对薄层地质体的响应敏感;低频体分辨率低、调谐厚度大,反映厚层地质体。在多个频率体分析的基础上,优选高、中、低频体的振幅属性并对其进行融合能突出不同厚度砂体的分布,进一步实现河道等线形沉积体的变迁刻画。研究区通常采用归一化均方根振幅(RMS)属性的强震幅区域刻画砂体分布,通过

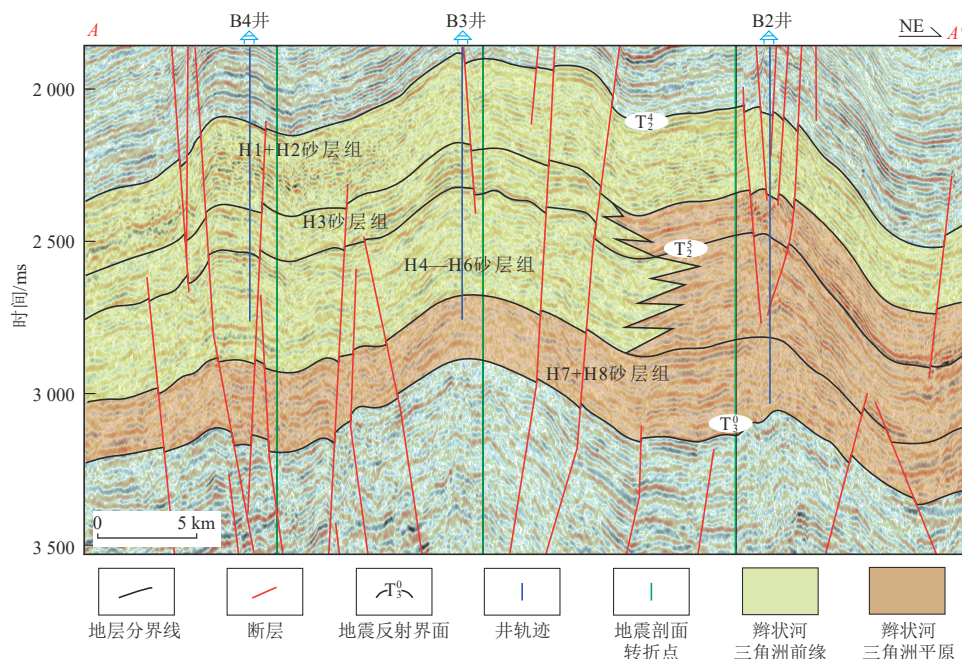


图 7 西湖凹陷 X 区块花港组 B2—B4 连井地震地质解释剖面(剖面位置见图 1c)

Fig. 7 Seismic and geological interpretations of well-tie profile crossing wells B2 to B4 for the Huanggang Formation in block X of the Xihu Sag (see Fig. 1c for the section location)

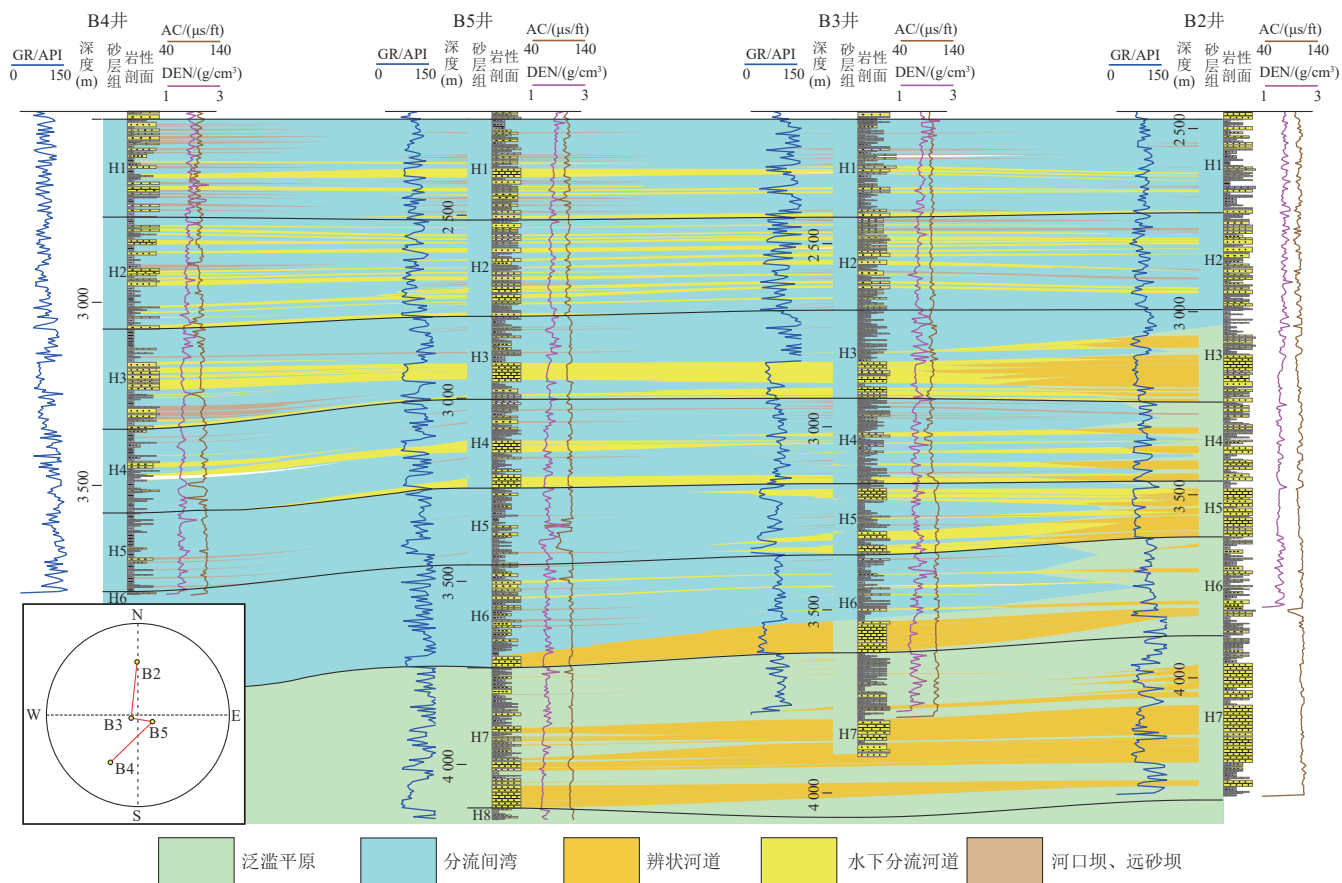


图 8 西湖凹陷 X 区块花港组 B2—B4 连井对比剖面

Fig. 8 Cross well correlation of the Huanggang Formation from wells B2 to B4 in block X of the Xihu Sag

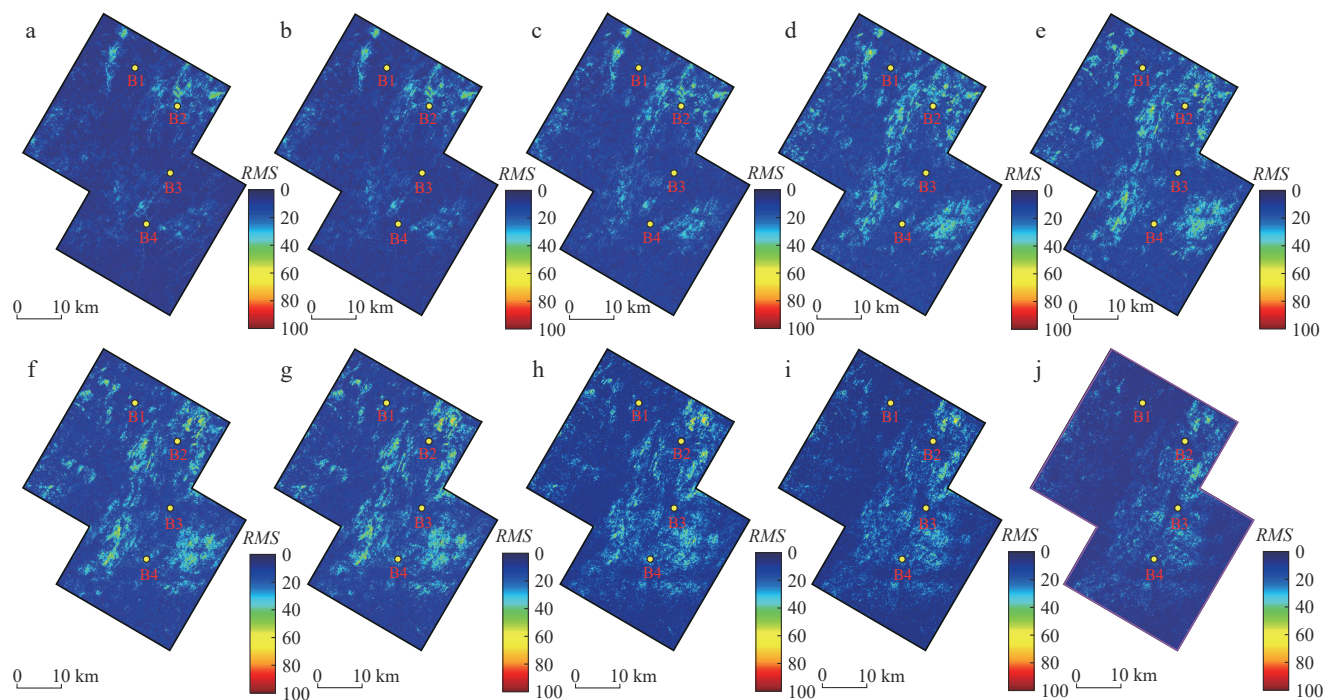


图9 西湖凹陷X区块花港组H4砂层组单频体归一化均方根振幅(RMS)属性扫描

Fig. 9 Normalized *RMS* attributes of single-frequency volumes for the H4 sand group of the Huagang Formation in block X of the Xihu Sag

a. 5 Hz; b. 10 Hz; c. 15 Hz; d. 20 Hz; e. 25 Hz; f. 30 Hz; g. 35 Hz; h. 40 Hz; i. 45 Hz; j. 50 Hz

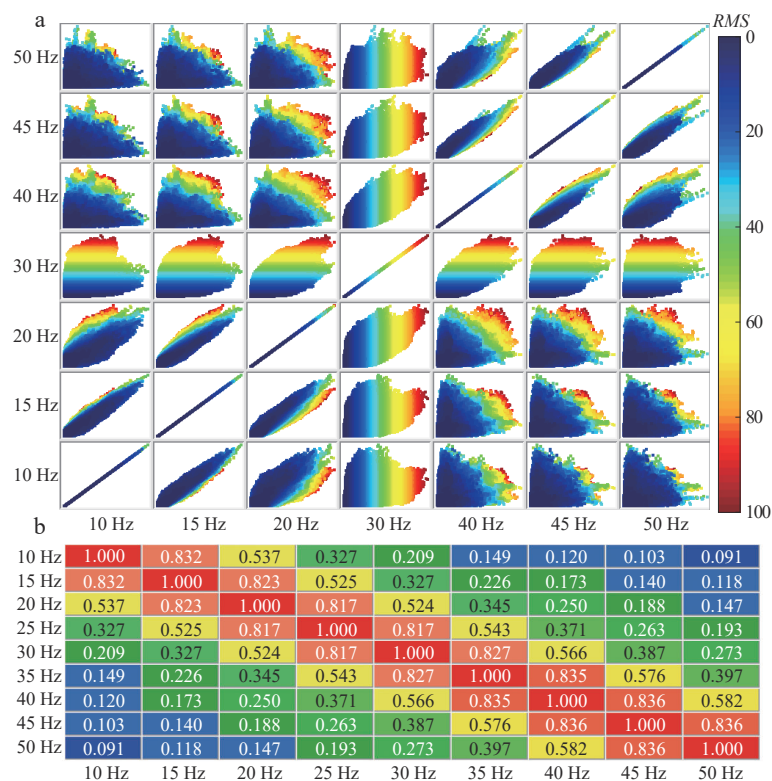


图10 西湖凹陷X区块B2井H4砂层组不同频率单频体均方根振幅属性相关性分析

Fig. 10 Correlations between *RMS* attributes of single-frequency volumes of different frequencies for the H4 sand group of well B2 in block X of the Xihu Sag

a. 单频体 *RMS* 属性交汇图; b. 单频体 *RMS* 相关系数矩阵图

多个层系的试验,确定了频率体属性优选的两个原则:一是分频后的单频体主频应在原始保幅体有效频宽范围内,且优选的中频应接近原始保幅体主频;二是高、中、低频体的选择尽可能有一定跨度,避免单频体振幅属性重叠范围较大难以突出不同厚度地质体。

以H4砂层组为例,研究区目的层段有效频宽为5~50 Hz,主频为25~30 Hz,不同层系、不同区带略有差异,以5 Hz的跨度提取单频体属性,逐个分析、对比观察发现,H4砂层组的归一化RMS高值在平面上呈现一定趋势的变化(图9a—j)。其中,H4砂层组的低频强振幅值在北部响应最明显,随着频率的增高,能量团向南部偏移,反映砂体北厚、南薄,符合花下段北部物源的辫状河三角洲沉积背景。

在平面观察不同单频体均方根属性能量团变化后,采用Landmark的RAVE模块对砂层组各个属性作相关性分析(图10a)。结果显示,以接近主频的30 Hz的RMS属性作为中间频率作相关分析,当频率降低至15 Hz时,相关系数由20 Hz中等相关的0.524

骤减至0.327;增加至15 Hz,相关系数由40 Hz的0.566降低至0.387(图10b),说明15、30 Hz和40 Hz的RMS属性之间平面相关性较低,重叠范围较小,可以突出不同厚度岩层的响应。再根据下列公式计算调谐厚度:

$$h=v/(4f) \quad (2)$$

式中: h 为调谐厚度,m; v 为层速度,m/s; f 为频率,Hz。

层速度 v 取2 500 m/s,频率 f 为15 Hz时调谐厚度为41.6 m。合成记录标定显示(图11),B2井H5砂层组含一套40 m厚的多期河道叠置砂体,其在15 Hz单频体上响应明显,而在30 Hz和45 Hz频率体上响应较弱。当频率为30 Hz调谐厚度对应20.8 m,45 Hz时对应13.9 m,而H4砂层组中的河道砂体被泥质夹层明显分割,单砂体厚度约10~20 m,在30 Hz和45 Hz频率体上振幅较高。合成记录论证结果显示,不同厚度砂岩层在15、30和45 Hz单频体的振幅响应具有良好的对应性,表明这些频率的选择是合理的。

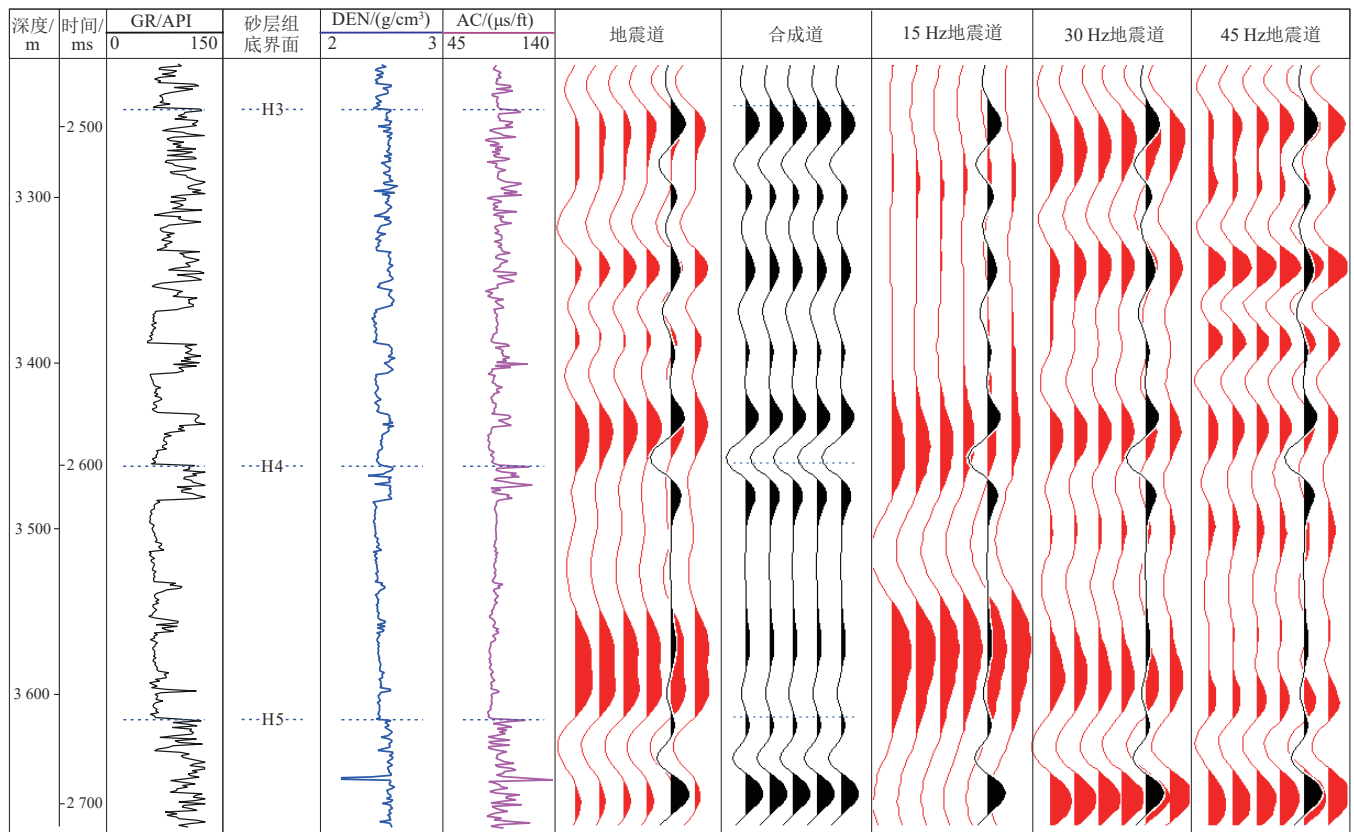


图11 西湖凹陷X区块B2井井-震标定不同厚度砂岩在叠后保幅体及单频体上的响应

Fig. 11 Responses of log-to-seismic calibrated sandstones of varying thicknesses on post-stack amplitude-preserved volumes and single-frequency volumes for well B2 in block X of the Xihu Sag

5.2.2 RGB属性融合刻画沉积相展布

单频体频率确定之后对其提取RMS属性,将单频体振幅属性值与基础色调值进行映射后叠加产生多种色光,通过颜色和亮度变化不仅能体现地质体边界,还可通过地质体厚度在空间中的变化反映沉积相带的叠置关系^[32-34]。以H4和H1砂层组作为示例,在高精度等时地层格架建立的基础上,参考沉积相标志和砂/地比值,依据融合属性进行沉积相平面解释。H4砂层组融合结果显示(图12a—e),强震幅区域在B2井以北呈片状并由高亮度红蓝色向蓝绿色转变,反映辫状河道频繁改道、交织形成的大规模砂体,河道宽度5~10 km,红色和蓝色区域为心滩沉积。B2井以南强震幅区域表现为条带状并在工区南端尖灭为朵状,亮度中等,色光偏绿色,解释为浅水沉积背景下的三角洲前缘水下分流河道,河道宽度2~6 km,在其边缘和远端的蓝绿色土豆状砂体解释为河口坝或远砂坝。值得说明的是,湖岸线是基于井点岩心相(颜色、粒度变化)、地球物理相(测井相、地震相)标志约束,

以反映厚层砂体的低频属性振幅强弱区域边界而确定的。H1砂层组单频体的高、中、低频强震幅区域均呈条带状由南向北展布,低频强震幅区域在西部响应最明显,随着频率增高,强震幅区域向东部偏移,表明砂体分布东薄西厚,这与西湖凹陷花港组沉积末期构造运动导致沉积中心向西北方向偏移这一地质背景相耦合。H1砂层组融合属性结果显示,强震幅区域呈窄带状,河道形态明显,整体为三角洲前缘沉积环境,不同颜色的条带状振幅解释为规模各异的水下分流河道沉积,河道宽1~5 km,东窄西宽(图12f—j)。

6 沉积相垂向演化

古地貌与沉积相展布综合分析发现,古地貌地势高低与沉积微相的分布有一定的对应性(图13)。区内H8和H7砂层组为辫状河三角洲平原沉积,H6—H3砂层组为浅水背景下的三角洲平原—前缘沉积,H2和H1砂层组整体为三角洲前缘沉积。沉积相展

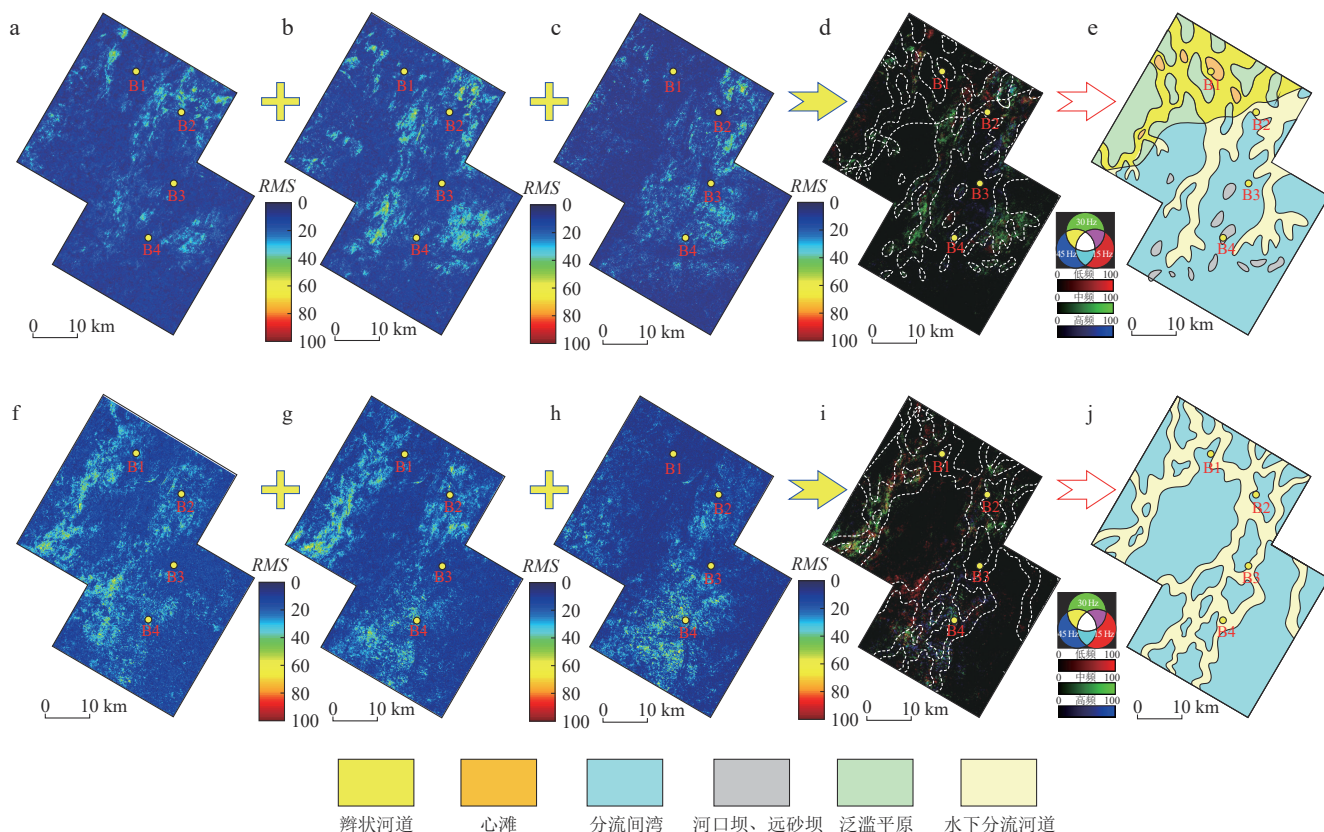


图12 西湖凹陷X区块RGB属性刻画沉积相过程

Fig. 12 RGB attribute-based characterization process of the sedimentary facies in block X of the Xihu Sag

a. H4砂层组, 15 Hz单频体归一化RMS属性; b. H4砂层组, 30 Hz单频体归一化RMS属性; c. H4砂层组, 45 Hz单频体归一化RMS属性; d. H4砂层组, RGB属性融合图; e. H4砂层组, 沉积相展布; f. H1砂层组, 15 Hz单频体归一化RMS属性; g. H1砂层组, 30 Hz单频体归一化RMS属性; h. H1砂层组, 45 Hz单频体归一化RMS属性; i. H1砂层组, RGB属性融合图; j. H1砂层组, 沉积相展布

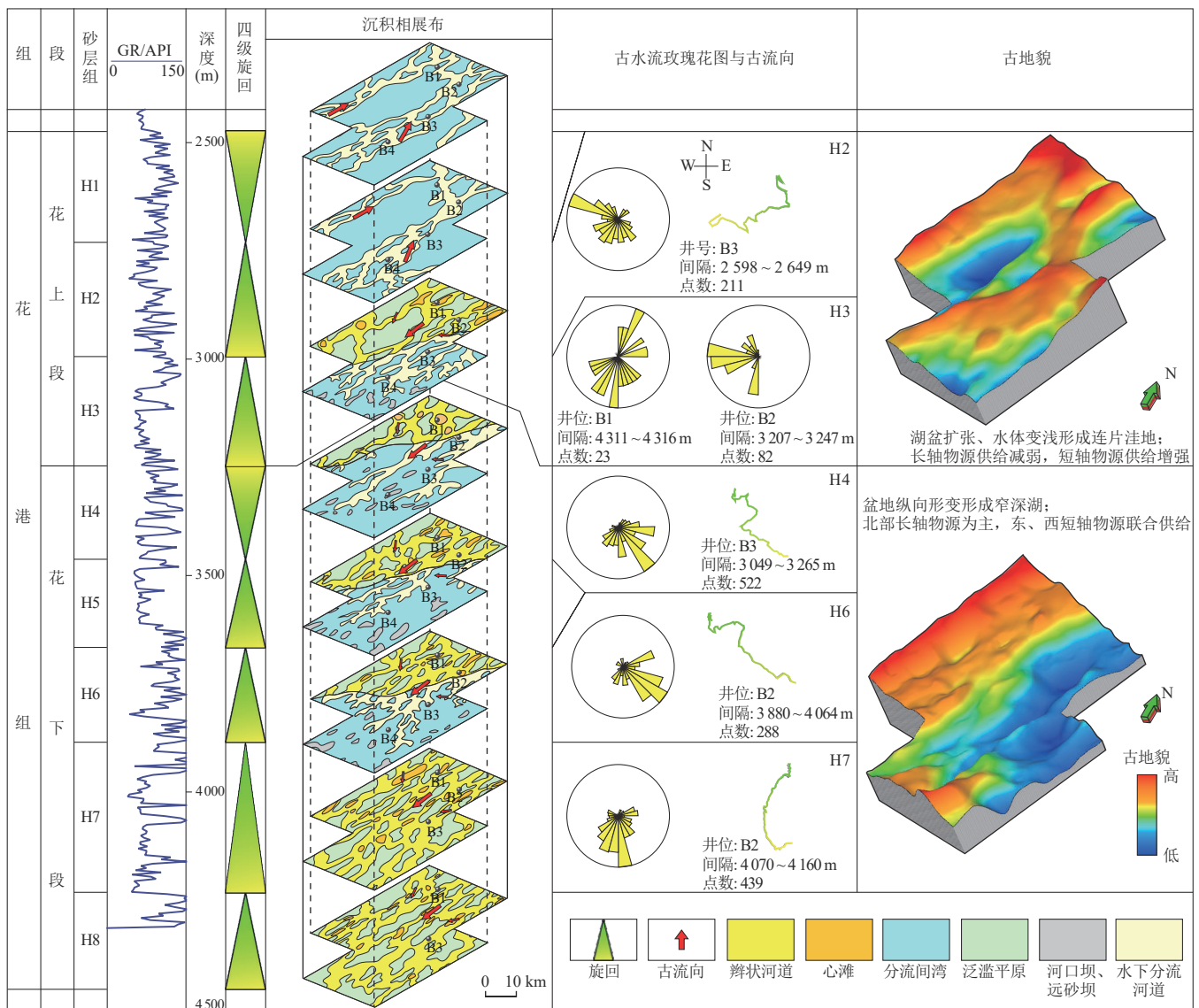


图13 西湖凹陷X区块古地貌特征与沉积相演化

Fig. 13 Paleogeomorphic characteristics and sedimentary facies evolution of block X in the Xihu Sag

布受相对湖平面高低和古地貌控制。花港组沉积初期(H8和H7砂层组沉积期),西湖凹陷在菲律宾板块与太平洋板块初始碰撞作用下发生纵向形变,沉积环境由海相变为陆相,湖平面随海平面同步下降^[8-9,35],此时湖泊面积较小,位于整个凹陷的南部,在物源充足、可容空间较低背景下,区内整体为辫状河三角洲平原沉积,辫状河道由北向南切叠、交织,砂体连片分布。随后湖平面震荡上升,H6—H4砂层组沉积期可容空间增大,在北部主物源与东、西部点状物源供应下,三角洲平原分流河道由沟谷向低洼区汇集,在低洼处受湖水阻碍作用形成水下分流河道朵体、河口坝和远砂坝^[36]。该时期古地貌起伏较大,古地貌控砂作用明显,各砂层组沉积相在垂

向上具有良好的继承性,湖岸线震荡上升控制着可容空间进而影响着砂体的规模。花下段沉积后局部构造抬升导致湖平面下降、可容空间减少,H3砂层组在先前沉积地形影响下向南进积,河道规模增大。至H2和H1砂层组沉积期,随着花港运动的规模不断增强,西湖凹陷湖盆中心向西北平移,北部轴向物源供应减少,东、西部物源供应增多^[37],研究区古流向发生反转。与下部地层由北向南古流向不同,倾角测井显示H2主流向以北向和西北向为主,区内整体演变为辫状河三角洲前缘,分流间湾较为发育,河道宽度明显变窄,由凹陷中部的局部突起分割为两个明显的河道带。

本研究探索了一套井-震小波变换建立高精度

地层格架、单井资料定相类型、分频RGB属性融合刻画沉积相平面展布的地震沉积学刻画方案。在该方案中,不同级别层序界面识别依赖井、震信号小波分析的奇异点,RGB融合的单频体选择基于属性间相关性分析,这些均在地震沉积相刻画要素选择上有一定的量化依据,减少了人为主观因素的影响,可为其他井网稀疏地带沉积相刻画提供借鉴。此外,应用该成果结合构造高点提出了多个构造圈闭目标,部分完钻井取得成效,印证了该方法在沉积体系预测研究中的可靠性。研究区花港组多个层系发育三角洲前缘水下分流河道薄砂体,下一步,在层位优选的基础上可开展小时窗的井-震时频分析,建立高频(单砂层级别)层序的同时赋予地震单同相轴地质旋回体意义,以进行薄层岩性油气藏或构造-岩性复合油气藏的预测。

7 结论

1) 以合成记录为桥梁,通过井-震小波系数曲线上周期性震荡、波谱图中能量团分布与岩心旋回变化特征,将研究区花港组分为花上段和花下段两个三级层序,进一步可将花上段细分为H1—H3共3个四级层序、花下段H4—H8共5个四级层序。

2) 研究区目的层段15、30和40 Hz频率下的RMS属性之间相关性较低,可以突出不同厚度岩层的响应。合成记录标定验证井上砂岩层厚度与单频体的振幅响应具有良好的对应性,在频率体属性优选的基础上进行RGB属性融合能突出更多的有效信息,从而降低多解性。

3) 研究区花港组整体为辫状河三角洲环境,H8和H7砂层组整体发育辫状河三角洲平原,多支河道交叉改道频繁;H6—H4沉积期,湖岸线位于B2井附近且震荡上升,发育三角洲平原-前缘沉积,B2井区以北沟谷处发育辫状河道,南部河道收缩在低洼处受湖水阻碍发散为朵体。花上段沉积前构造局部抬升,H3砂层组在先前沉积地形影响下向南进积,河道规模增大。H2和H1砂层组沉积期湖盆中心向西北平移,研究区古流向发生反转,研究区整体为辫状河三角洲前缘。

4) 针对研究区花港组多个层系内部发育的三角洲前缘水下分流河道薄砂体带,开展小时窗的井-震时频分析,赋予地震单同相轴地质旋回体意义,找寻河道砂岩尖灭点进行岩性油气藏或构造-岩性复合油气藏的预测将是下一步勘探研究的重点。

参 考 文 献

- [1] ZENG Hongliu. What is seismic sedimentology? A tutorial [J]. Interpretation, 2018, 6(2): SD1-SD12.
- [2] 娄敏, 刘江, 涂齐催, 等. 河流-三角洲相不同厚度储层的地震沉积学研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 2191-2203.
LOU Min, LIU Jiang, TU Qicui, et al. Application of seismic sedimentology to the prediction of fluvial-delta facies reservoirs with different thickness [J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 2191-2203.
- [3] 陈波, 段冬平, 刘英辉, 等. 西湖凹陷中深层河流相砂体地震沉积学解释与沉积演化分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 117-126.
CHEN Bo, DUAN Dongping, LIU Yinghui, et al. Seismic sedimentary interpretation and sedimentary evolution analysis on middle-deep fluvial facies sandbodies in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 117-126.
- [4] 娄敏, 蔡华, 何贤科, 等. 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[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(1): 125-138.
LOU Min, CAI Hua, HE Xianke, et al. Application of seismic sedimentology in characterization of fluvial-deltaic reservoirs in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(1): 125-138.
- [5] CHENG Yanjun, WU Zhiping, XU Bin, et al. Structural characteristics and genetic mechanism of transfer zones in an extensional rift zone: An example from the Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Tectonophysics, 2023, 856: 229852.
- [6] 孙思敏, 彭仕宓. 东海西湖凹陷平湖油气田花港组高分辨率层序地层特征[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2006, 28(4): 184-187, 448-449.
SUN Simin, PENG Shimi. High resolution sequence stratigraphic characters in Huagang Formation of Pinghu Formation oil and gas field in Xihu Depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(4): 184-187, 448-449.
- [7] 张锡楠, 程超, 鞠颢, 等. 河流相砂体精细描述在西湖凹陷某气田的应用[J]. 中国地质调查, 2020, 7(5): 25-32.
ZHANG Xinan, CHENG Chao, JU Hao, et al. Application of sandbody description of fluvial facies in one gas field of Xihu Sag [J]. Geological Survey of China, 2020, 7(5): 25-32.
- [8] 于兴河, 李顺利, 曹冰, 等. 西湖凹陷渐新世层序地层格架与沉积充填响应[J]. 沉积学报, 2017, 35(2): 299-314.
YU Xinghe, LI Shunli, CAO Bing, et al. Oligocene sequence framework and depositional response in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(2): 299-314.
- [9] 张国华, 刘金水, 秦兰芝, 等. 西湖凹陷渐新统花港组大型辫状河沉积体系特征[J]. 中国海上油气, 2018, 30(3): 10-18.

- ZHANG Guohua, LIU Jinshui, QIN Lanzhi, et al. Characteristics of the large braided river depositional system of the Oligocene Huagang Formation in the Xihu Sag [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(3): 10–18.
- [10] 陈琳琳. 西湖凹陷北部渐新统花港组湿地扇沉积学分析[J]. 复杂油气藏, 2015, 8(4): 1–6.
- CHEN Linlin. Sedimentary analysis of humid fan in Oligocene Huagang Formation of the northern Xihu Sag [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2015, 8(4): 1–6.
- [11] 肖剑南, 陈晶, 陈琳琳, 等. 西湖凹陷东坡渐新统花港组下段粗碎屑体基准面旋回分析[J]. 海洋石油, 2017, 37(4): 12–20.
- XIAO Jiannan, CHEN Jing, CHEN Linlin, et al. Analysis of base level cycles in coarse Lower Huagang Formation of Oligocene on eastern slope of Xihu Sag [J]. *Offshore Oil*, 2017, 37(4): 12–20.
- [12] 周荔青, 江东辉, 张尚虎, 等. 东海西湖凹陷大中型油气田形成条件及勘探方向[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 803–812.
- ZHOU Liqing, JIANG Donghui, ZHANG Shanghu, et al. Formation conditions and exploration direction of large and medium oil and gas reservoirs in Xihu Sag, East China Sea [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2020, 42(5): 803–812.
- [13] 余浪, 余一欣, 蒋一鸣, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷天台斜坡构造变换带发育特征及形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 753–763.
- YU Lang, YU Yixin, JIANG Yiming, et al. Characteristics and forming mechanisms of transform zone in the Tiantai slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 753–763.
- [14] ZHANG Guohua, LI Sanzhong, SUO Yanhui, et al. Cenozoic positive inversion tectonics and its migration in the East China Sea Shelf Basin [J]. *Geological Journal*, 2016, 51(S1): 176–187.
- [15] 李天军, 黄志龙, 郭小波, 等. 东海盆地西湖凹陷平北斜坡带平湖组煤系原油地球化学特征与油-源精细对比[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 432–444.
- LI Tianjun, HUANG Zhilong, GUO Xiaobo, et al. Geochemical characteristics of crude oil from coal measure source rocks and fine oil-source correlation in the Pinghu Formation in Pingbei slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 432–444.
- [16] 张迎朝, 邹玮, 陈忠云, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组气藏“先汇后聚”机制及地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1256–1269.
- ZHANG Yingzhao, ZOU Wei, CHEN Zhongyun, et al. The mechanism of “convergence ahead of accumulation” and its geological significance for gas reservoirs in Paleogene Huagang Formation across the central inverted structural zone of Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(5): 1256–1269.
- [17] 刘贤, 葛家旺, 赵晓明, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷渐新统花港组年代标尺及层序界面定量识别[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 990–1004.
- LIU Xian, GE Jiawang, ZHAO Xiaoming, et al. Time scale and quantitative identification of sequence boundaries for the Oligocene Huagang Formation in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 990–1004.
- [18] MUSHIN I A, MAKAROV V V, KOZLOV E A, et al. Structural-formational interpretation tools for seismic stratigraphy [J]. *Geophysical Prospecting*, 2000, 48(6): 953–981.
- [19] 殷文. 基于时频约束的井震资料联合时深标定方法[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2015, 42(3): 377–384.
- YIN Wen. Time-depth calibration with seismic and well data based on time-frequency constraint [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2015, 42(3): 377–384.
- [20] 彭军, 于乐丹, 许天宇, 等. 天文地层学研究程序及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用实例分析[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1292–1308.
- PENG Jun, YU Ledan, XU Tianyu, et al. Research procedure of astrostratigraphy and case study of Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1292–1308.
- [21] 冯磊. 利用地震资料时频特征分析沉积旋回[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(2): 95–99.
- FENG Lei. Using time-frequency characteristics to analyze sedimentary cycle [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(2): 95–99.
- [22] LI Wei, ZHANG Jianguo, XIE Jun, et al. Application of the wavelet transform and INPEFA in sequence stratigraphy [J]. *ACS Omega*, 2023, 8(3): 3441–3451.
- [23] WANG R, XIE J, RAN A H, et al. Comparison of INPEFA technology and wavelet transform in sequence stratigraphic division of mixed reservoir: A case study of lower Es₃ of KL oilfield in Laizhouwan Sag [J]. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2022, 12(12): 3213–3225.
- [24] POSAMENTIER H W, PAUMARD V, LANG S C. Principles of seismic stratigraphy and seismic geomorphology I: Extracting geologic insights from seismic data [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 228: 103963.
- [25] 王红岩. 西湖凹陷曲流河三角洲古地貌恢复及沉积特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 318–327.
- WANG Hongyan. Paleogeomorphic restoration and sedimentary characteristics of meandering river delta in Xihu Depression, East China Sea [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2020, 47(3): 318–327.
- [26] 姜雪, 熊志武. 基于灰色理论指导的储层构型半定量表征及优质储层预测——以西湖凹陷A构造花港组H3砂层组为例[J].

- 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 162-172.
- JIANG Xue, XIONG Zhiwu. Semi-quantitative study on reservoir configuration in grey theory—A case study of H3 sand unit of Huagang Formation in A Structure, Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 162-172.
- [27] 蔡佳, 祁鹏, 宋双. 东海盆地西湖凹陷花港组下段沉积相分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(2): 56-65.
- CAI Jia, QI Peng, SONG Shuang. Sedimentary facies of the Lower Huagang Formation in Xihu Depression of Donghai Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(2): 56-65.
- [28] 张建培, 徐发, 钟韬, 等. 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(1): 35-41.
- ZHANG Jianpei, XU Fa, ZHONG Tao, et al. Sequence stratigraphic models and sedimentary evolution of Pinghu and Huagang formations in Xihu trough [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(1): 35-41.
- [29] FENG L, LU Y C, WELLNER J S, et al. Fluvial morphology and reservoir sand-body architecture in lacustrine rift basins with axial and lateral sediment supplies: Oligocene fluvial-lacustrine succession in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2020, 67(2): 279-304.
- [30] 杨占龙, 陈启林, 郭精义. “三相”联合解释技术在岩性油气藏勘探中的应用——以吐哈盆地胜北地区为例[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 370-374.
- YANG Zhanlong, CHEN Qilin, GUO Jingyi. “Three facies” integrated interpretation technique and its application in lithologic reservoir exploration in Shengbei area, Turpan-Hami Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 370-374.
- [31] 岳大力, 李伟, 杜玉山, 等. 河流相储层地震属性优选与融合方法综述[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 3929-3943.
- YUE Dali, LI Wei, DU Yushan, et al. Review on optimization and fusion of seismic attributes for fluvial reservoir characterization [J]. Earth Science, 2022, 47(11): 3929-3943.
- [32] 侯东梅, 郭敬民, 全洪慧, 等. 基于分频RGB融合技术和水平井信息的辫状河储层构型研究——以C油田馆陶组为例[J]. 石油科学通报, 2022, 7(1): 1-11.
- HOU Dongmei, GUO Jingmin, QUAN Honghui, et al. Research into braided river reservoir architecture based on frequency fused seismic attribute and horizontal wells——A case study of the Guantao Formation of C oilfield [J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(1): 1-11.
- [33] 万晓龙, 刘瑞璟, 时建超, 等. 基于地震属性智能融合的湖相重力流沉积致密砂岩储层预测[J]. 石油科学通报, 2023, 8(1): 1-11.
- WAN Xiaolong, LIU Ruijing, SHI Jianchao, et al. Prediction of tight sandstone of lacustrine gravity-flow reservoirs using intelligent fusion of seismic attributes [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(1): 1-11.
- [34] 马佳国, 王建立, 周卿, 等. 分频RGB融合技术在精细刻画沉积微相中的应用[J]. 复杂油气藏, 2019, 12(3): 27-31.
- MA JIA Guo, WANG Jianli, ZHOU Qing, et al. Frequency division RGB fusion technique for fine description of sedimentary microfacies [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2019, 12(3): 27-31.
- [35] LIU Jinshui, LI Shuai, LIAO Kaifei, et al. New interpretation on the provenance changes of the upper Pinghu-Lower Huagang Formation within Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2023, 42(3): 89-100.
- [36] ZHANG Jingyu, LU Yongchao, KRIJGSMAN W, et al. Source to sink transport in the Oligocene Huagang Formation of the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 98: 733-745.
- [37] 赵洪, 蒋一鸣, 沈文超, 等. 西湖凹陷花港组物源特征及对储层的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 65-72.
- ZHAO Hong, JIANG Yiming, SHEN Wenchao, et al. Study on Huagang Formation provenance characteristics and effects on reservoirs in Xihu Sag [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 65-72.

(编辑 张玉银)