

人工智能驱动的陆架砂体地震沉积学表征

——以珠江口盆地惠州凹陷新近系珠江组主力砂体为例

葛家旺^{1,2}, 陈聪¹, 刘培^{3,4}, 赵晓明^{1,2}, 易震^{3,4}, 甄艳^{1,2}, 张安¹, 唐小龙¹

[1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 2. 天然气地质四川省重点实验室, 四川 成都 610500; 3. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518054; 4. 中海石油深海开发有限公司, 广东 深圳 518054]

摘要:浅海陆架砂体具备优越的岩性圈闭条件,但因其储层厚度薄(小于1/8地震波长)、横向变化快且岩性复杂,导致砂体预测存在显著多解性。以珠江口盆地惠州凹陷新近系珠江组三段(SB₁—SB₂)主力产层ZJ3A和ZJ3B陆架砂体为研究对象,利用测井、岩心、薄片等资料,建立岩性定量解释标准,并优选出敏感地震属性。在此基础上,采用多个人工智能算法进行多属性拟合训练,建立人工智能算法驱动的地震沉积学表征方法体系。研究结果表明:①随机森林算法地震多属性拟合的ZJ3A砂体预测效果最优,多发育南宽北窄的不对称状地貌单元,陆架砂体最长达17.15 km,平均面积为11.23 km²;ZJ3B砂体采用增强回归树模型的预测效果最佳,多发育南北近似等宽的对称状地貌单元,且砂体规模小,平均面积6.21 km²。②ZJ3A和ZJ3B两套砂体地震形貌分别指示了单向流动的沿岸流和双向流动的潮汐动力改造效应,综合反映了海平面升降期间沿岸流—潮汐水动力差异响应机制。③多种人工智能算法拟合及优选的地震沉积学研究提升了地震砂体预测准确度,定量化的地震地貌单元表征可揭示研究区沉积水动力学特征,可为后续岩性圈闭的目标优选提供良好的地质依据。

关键词:人工智能算法;地震沉积学;陆架砂体;珠江组;惠州凹陷;珠江口盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

AI-driven seismic sedimentological characterization of shelf sand bodies: A case study on the Neogene Zhujiang Formation, Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

GE Jiawang^{1,2}, CHEN Cong¹, LIU Pei^{3,4}, ZHAO Xiaoming^{1,2}, YI Zhen^{3,4}, ZHEN Yan^{1,2}, ZHANG An¹, TANG Xiaolong¹

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangdong 518054, China; 4. CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen, Guangdong 518054, China)

Abstract: Neritic shelf sand bodies generally hold favorable geologic conditions for the formation of lithologic traps. However their small reservoir thickness ($< 1/8$ wavelength), rapid lateral variation, and complex lithologies, lead to the sand body prediction results highly ambiguous. In this study, we investigate shelf sand bodies ZJ3A and ZJ3B, the major pay zones within the 3rd member of the Neogene Zhujiang Formation (also referred to as the Zhu 3 Member; confined by third-order sequence boundaries SB1 and SB2) in the Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin (PRMB). Using well logs, as well as data from core and thin section observations, we establish quantitative lithological interpretation standards and select the optimal seismic attributes sensitive to sand body morphology. Accordingly, several artificial intelligence (AI) algorithms are employed for fitting and training based on multiple seismic attributes. As a result, an AI-driven seismic sedimentological characterization system is developed. The results indicate that the fitting of multiple seismic attributes using the random forest (RF) algorithm yielded the most accurate prediction for ZJ3A. The characterization results reveal that this sand body comprises predominantly asymmetric geomorphological units characterized by wide southern parts and narrow northern parts. These units exhibit a maximal length of up to 17.15 km and an average area of 11.23 km².

收稿日期:2024-11-25;修回日期:2025-05-12。

第一作者简介:葛家旺(1988—),男,副研究员、硕士研究生导师,层序地层学、地震沉积学及储层地质学。E-mail: gjwddn@163.com。

通信作者简介:陈聪(1998—),男,硕士研究生,地震沉积学。E-mail: chencongswpu@163.com。

基金项目:四川省自然科学基金项目(2023NSFSC0810);企业协作项目(CCL2023SZPS0071)。

In contrast, the boosted regression tree (BRT) model yielded the optimal prediction for ZJ3B. The characterization results show that this sand body consists primarily of symmetric geomorphological units characterized by roughly the same widths in the northern and southern parts. These units are small in scale, with an average area of 6.21 km². The seismic geomorphologies of ZJ3A and ZJ3B indicate the dynamic modification effects of unidirectional coastal currents and bidirectional tides, respectively. Therefore, their seismic geomorphologies jointly reflect the differential hydrodynamic response mechanisms of coastal currents and tidal dynamics during sea-level fluctuations. Seismic sedimentological research combined with fitting and selecting the optimal seismic attributes using multiple AI algorithms can enhance the seismic prediction accuracy of sand bodies. Furthermore, the quantitative characterization of seismic geomorphological units holds implications for the depositional hydrodynamic research of the study area. The results of this study will provide a robust geological basis for selecting the optimal lithologic trap targets subsequently.

Key words: artificial intelligence (AI) algorithm, seismic sedimentology, shelf sand body, Zhujiang Formation, Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin

引用格式:葛家旺,陈聪,刘培,等. 人工智能驱动的陆架砂体地震沉积学表征——以珠江口盆地惠州凹陷新近系珠江组主力砂体为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 860–875. DOI: 10. 11743/ogg20250311.

GE Jiawang, CHEN Cong, LIU Pei, et al. AI-driven seismic sedimentological characterization of shelf sand bodies: A case study on the Neogene Zhujiang Formation, Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 860–875. DOI: 10. 11743/ogg20250311.

随着地震勘探技术的发展,地震沉积学以高分辨率三维地震数据为基础,通过等时切片和属性分析获取现今地下地貌和沉积信息,对沉积体系中沉积单元的形态、储层分布进行预测^[1-2]。由于绝大部分沉积体具有宽度远远大于厚度的特征,利用地层切片技术可将在地震垂向分辨率上难以识别的薄层砂体在平面上进行识别^[3-4]。伴随着地震沉积学理论的不完善,从起初的半定量研究逐渐转为定量研究,为复杂油气藏岩性预测和油气勘探开发评价提供了重要技术支撑。研究证实,地震属性与地下砂体类型和储层性质关系密切,如何选择合适的敏感地震属性预测砂体分布及储层质量是当前地震沉积学研究的热点和难点议题^[5-6]。近年来,得益于人工智能算法在非线性拟合、快速计算和大数据处理等方面的优势,其与地震沉积学方法的结合在属性优选、砂体预测和地震岩性反演等领域中得到了广泛应用,并在油气勘探开发领域激发了石油地质学家的浓厚兴趣^[7-9]。

在广阔的浅海陆架环境中,普遍发育着离海岸线几十至几百千米、近平行于海岸线方向的条带状砂体,亦称为陆架砂脊^[10-11]。该类海相条带型薄层砂体常被陆架泥岩包裹形成透镜状岩性圈闭,与下部烃源岩通过断层或砂体网络匹配沟通,具备优越的油气成藏条件^[12-13]。珠江口盆地新近系中新统陆架砂脊岩性目标勘探取得系列突破,珠江组三段(珠三段)主力砂体ZJ3A和ZJ3B屡获可观油气发现或显示^[14]。进一步勘探开发发现,由于珠江组陆架砂脊长期遭受不同种类和强度的水动力改造作用,砂体厚度往往小于1/16

地震波长,大大增加了该类砂体储层质量的预测难度^[12,14]。

针对珠江口盆地惠州凹陷西南地区浅海陆架砂体厚度较薄(小于1/8地震波长)、优质储层展布规律不明确的问题,本文综合运用地震、测井和岩心等资料,在地震沉积学理论指导下,引入主流的人工智能算法模型进行地震多属性拟合,实现了珠三段ZJ3A和ZJ3B主力砂体的厚度预测。在此基础上,精细刻画了两套砂体的地震地貌,系统分析了其与水动力作用类型的耦合关系,并探讨了在油气勘探开发中的应用前景,以期讨论和推动地震沉积学与人工智能融合关键技术发展。

1 区域地质概况

珠江口盆地位于中国南海北部大陆边缘,是一个呈北东-南西走向的新生代大陆边缘裂陷型盆地,盆地由南向北可划分为南部坳陷带、南部隆起带、中部坳陷带、中央隆起带、北部坳陷带和北部隆起带6个构造单元(图1a)^[13-14]。惠州凹陷位于北部坳陷带中部,北邻北部隆起带,南接东沙隆起,东、西两侧分别被惠陆低凸起、惠西低凸起和西江凹陷所环绕(图1b),总面积约7 000 km²^[15]。研究区位于惠州凹陷南部(图1a,b),包含惠州凹陷及东沙隆起的部分区域,三维地震资料覆盖面积约948 km²,实钻井30余口。

作为珠江口盆地东部最重要的富烃凹陷,惠州凹陷自下而上发育古近系文昌组、恩平组、珠海组,新近

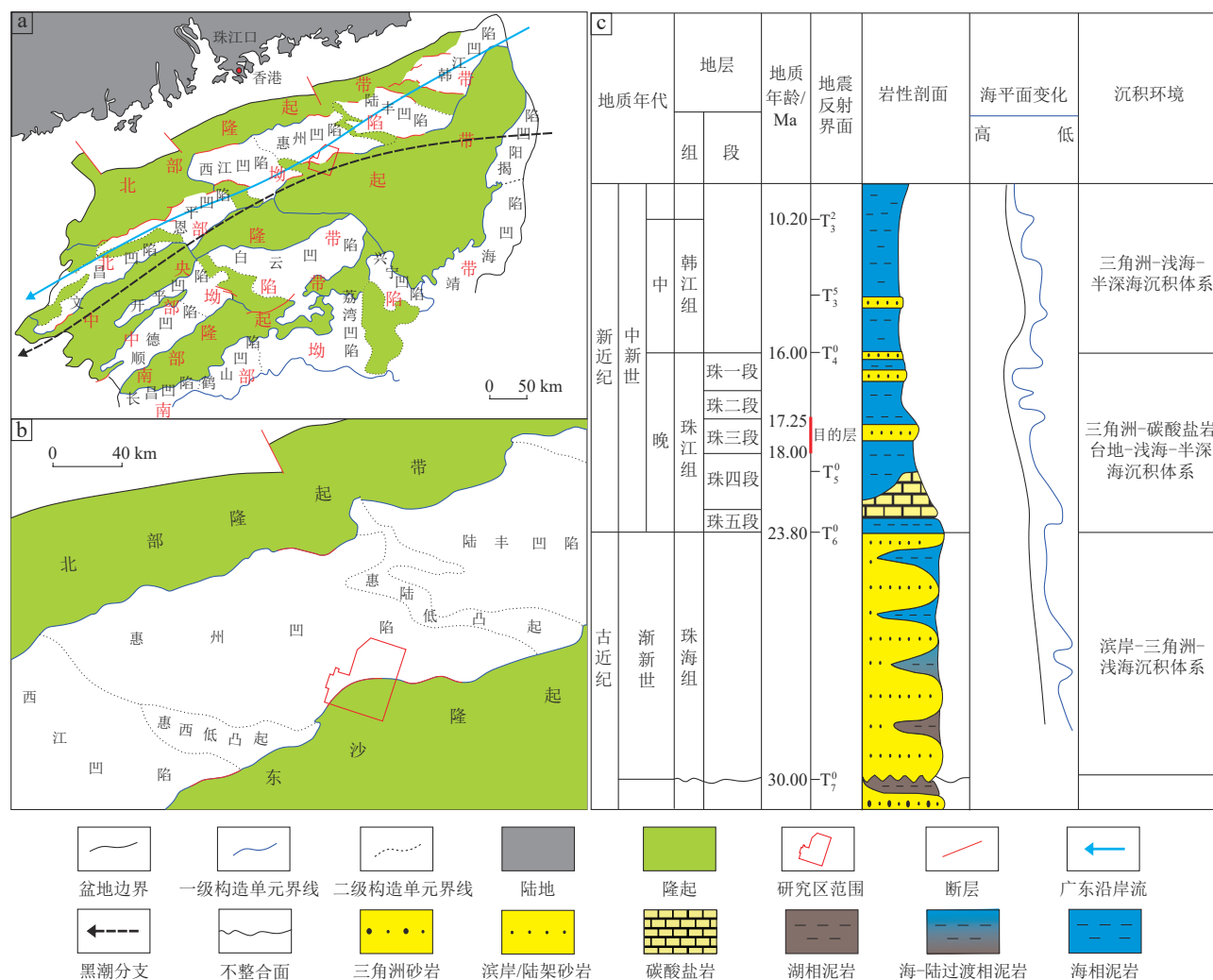


图1 珠江口盆地惠州凹陷构造位置及地层综合柱状图

Fig. 1 Tectonic location and composite stratigraphic column of the Huizhou Sag, PRMB

a. 珠江口盆地构造区划分; b. 研究区构造位置; c. 珠江口盆地地层综合柱状图

(海平面变化中的左线位整体变化趋势线, 右线为前人根据钻测井资料恢复的曲线。)

系珠江组、韩江组、粤海组、万山组及第四系等多套地层,其中珠江组是惠州凹陷内重要的含油层段^[16]。受南海运动和区域海平面变化的联合作用,惠州凹陷新生代地层主要发育陆相、海-陆过渡相和海相3种沉积类型,总体上呈现先陆相、后海相的沉积演化规律^[17]。

珠江组沉积时期,在南海运动和连续性海侵作用的共同影响下,东沙隆起上逐渐发育了一个多期叠置的碳酸盐台地,海平面的频繁变化促使北部来源的碎屑沉积物向凹陷内推进,最终形成碎屑岩与碳酸盐岩共生的沉积模式^[18]。惠州凹陷珠江组可划分为5个三级层序,自上而下分别对应珠一段—珠五段(图1c)^[12-13]。近年来,珠江口盆地惠州凹陷西南部新近系岩性圈闭勘探取得突破,陆续发现珠江组系列陆架砂体岩性油气藏^[14],其中珠三段ZJ3A和ZJ3B两套陆架砂体成为近年来勘探开发的重点关注层系。现今南海北部陆架

发育多类型水动力条件,研究区主要受到广东沿岸流和太平洋黑潮分支的影响(图1a)^[19]。前人对南海北部波浪进行全年观测研究,统计数据揭示波浪均为西南流动方向,这一现象导致了广东沿岸流总体呈现西南向的流动特点^[20]。而太平洋黑潮进入吕宋岛后,形成2个不同的流动方向,其中研究区的太平洋黑潮流向为西南向^[21]。此外,研究区普遍发育潮汐地质营力^[11,22-23]。

2 研究方法

2.1 可容空间序列法

可容空间序列法(APD法)将地层叠置样式与体系域界面相联系。不同体系域界面之上的地层叠置样式

存在差异性:海退底界面(BSFR)是下降体系域与高位体系域的分界面,其上地层叠置样式表现为PD(进积-降积)序列;最大海泛面(MFS)是高位体系域与海侵体系域的分界面,其上地层叠置样式表现为AP(加积-进积)序列;最大海退面(MRS)是海侵体系域与低位体系域的分界面,其上地层叠置样式表现为R(退积)序列^[24-25]。

2.2 人工智能算法

机器学习作为人工智能的重要分支,是实现人工智能的关键技术手段。依据学习机制的不同,机器学习算法主要分为监督学习、无监督学习、半监督学习和强化学习4类。在地质领域,监督学习和无监督学习算法的应用较为常见^[26]。近年来,随机森林、支持向量机、增强回归树和人工神经网络等人工智能算法在储层预测中的应用日益增多。随机森林(random forest, RF)通过整合多种决策树模型,提升预测模型的准确性,具有强大的拟合能力和高效的运算性能^[27];支持向量机(support vector machine, SVM)作为一种分类模型,擅长处理复杂非线性问题,并能在一定程度上缓解模型的过度拟合^[28];增强回归树(boosted regression trees, BRT)算法强调模型迭代训练,通过不断减少误差,提供更准确的预测结果^[29];人工神经网络(artificial neural networks, ANN)是一种为模仿动物神经网络系统的结构而建立的信息处理模型,具备多层次信息处理能力,具有较大的计算量和较强的自适应性^[30]。

2.3 测井曲线标准化及岩性标定

为了消除测井信号采集过程中产生的误差并实现测井数值量纲的相对统一,对测井曲线进行标准化处理是一种常用且有效的方法,其中标准井和标准层的选取最为关键。鉴于研究区目的层GR测井曲线对岩性具有较高的敏感性,本次研究采用均值-方差法(计算GR测井曲线的均值和方差),实现对测井数据进行标准化。

根据研究区已有的井壁取心和薄片岩性鉴定报告,将岩性与标准化后的GR曲线进行对应标定。本次标定选取了来自6口井的壁心和薄片,共计118个样品数据,涵盖了细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩以及泥质粉砂岩等岩性类型。

2.4 相关性分析

皮尔逊相关性分析是一种广泛应用于各领域的统计学方法,用于判断两个变量之间的线性相关程度。皮尔逊相关性系数的绝对值越接近1,表明两个变量

的线性相关性越强。当系数大于0时,表明两个变量呈正线性相关;当系数小于0时,则表明两个变量呈负线性相关^[31]。

随机森林权重排序是基于随机森林算法的特征优选方法。在该算法中,各属性变量对目标变量(如砂体厚度)的贡献度可通过其权重来衡量。权重排序越靠前,表明属性变量与目标变量相关性越强^[32]。

3 研究结果

3.1 重点砂体层序地层格架

搭建体系域级别的地层格架并厘定砂体发育期次是储层精细描述和地震砂体预测的关键,前人对研究区内珠江组层序地层的研究成果已较为成熟。珠三段作为本次研究的目的层,其顶、底分别由三级层序界面SB₁和SB₂所界定^[18,22,33]。本文在海相碎屑岩层序标准化指导下,根据典型地震地层叠置关系,厘清了珠三段体系域级别层序地层格架。

采用四分层序方案,结合APD法和地震反射终止关系,识别出珠三段最大海退面(MRS)、最大海泛面(MFS)和海退底界面(BSFR),由下至上划分为低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST)和下降体系域(FSST)。该划分方案与研究区滨线轨迹变化趋势和海平面变化曲线具有良好的对应关系(图2)。

在珠三段高频层序格架约束下,ZJ3A砂体和ZJ3B砂体分别发育于FSST和TST。在地震剖面上,ZJ3A砂体地震反射同相轴连续性好,中-强振幅,砂体呈叠瓦状排列,表现为前积特征;ZJ3B砂体地震反射同相轴连续性中等,中等振幅,砂体逐渐向碳酸盐岩台地尖灭,表现为上超特征(图3a)。在测井曲线上,2个砂体在剖面上呈现中间厚、两侧薄的透镜状特征(图3b);ZJ3A砂体表现为中等幅度箱形,岩性以细砂岩和粉砂岩为主,整体粒度较粗;ZJ3B砂体表现为低幅度漏斗形,岩性以粉砂岩和泥质粉砂岩为主(图2,图3b)。

3.2 人工智能多属性砂体预测

研究区珠三段内部发育的ZJ3A砂体和ZJ3B架砂体横向厚度变化快,整体较薄,预测难度大。本文充分利用地震数据,并结合岩心、薄片及测井数据,在地震沉积学理论技术指导下,引入先进的人工智能算法对这2套砂体进行预测。预测流程主要分为3个步骤:①砂体厚度提取;②地震属性优选;③人工智能算法非线性拟合(图4)。

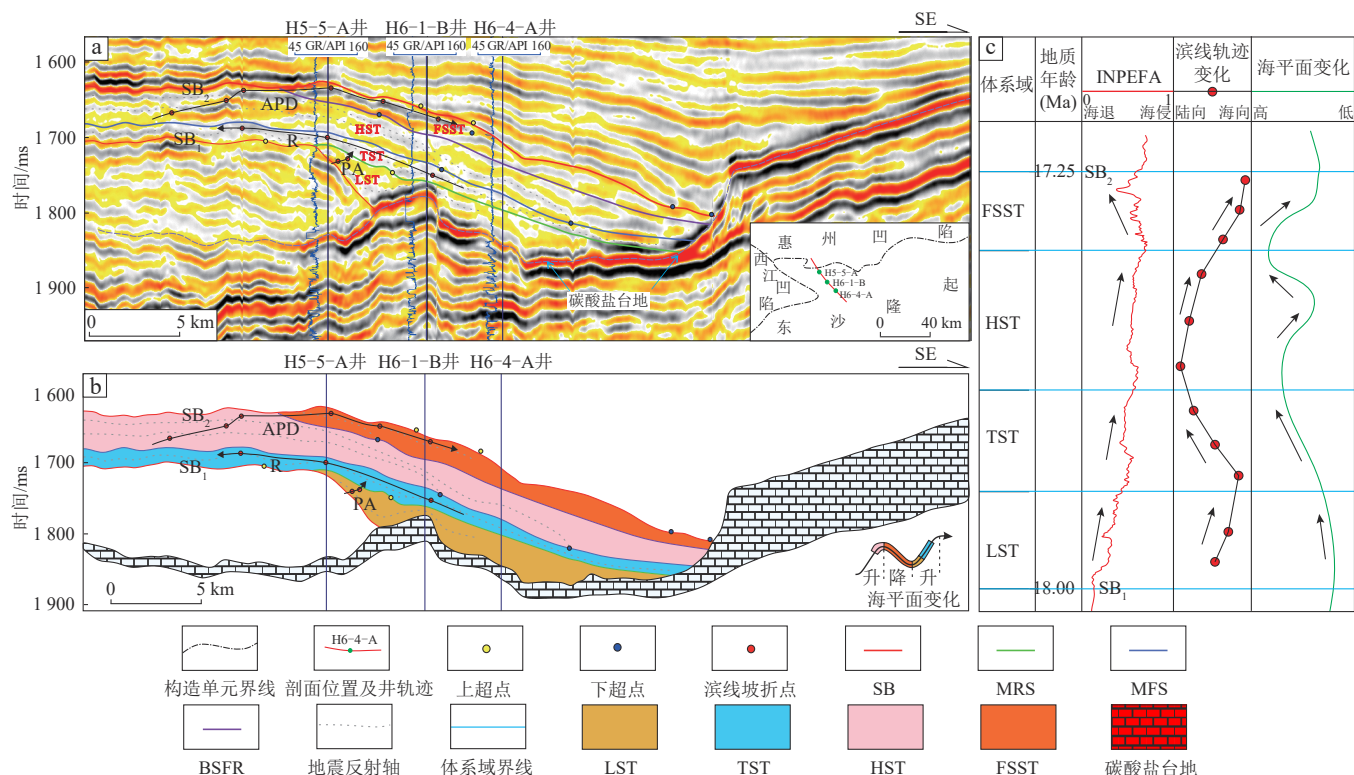


图2 珠江口盆地惠州凹陷珠三段内部体系域划分

Fig. 2 Division of system tracts within the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

a. 地震层序划分; b. 体系域划分模式; c. 不同体系域对应的滨线迁移轨迹及海平面变化趋势

SB. 层序边界; MRS. 最大海退面; MFS. 最大海泛面; BSFR. 海退底界面; APD. 加积-进积-加积叠置序列; PA. 进积-加积叠置序列; R. 退积序列; LST. 低位体系域; TST. 海侵体系域; HST. 高位体系域; FSST. 下降体系域 (INPEFA 曲线根据 H5-5-A 井生成; 海平面变化曲线据文献[33]修改。)

3.2.1 砂体厚度提取

选取 H3-3-F 井作为标准井, 并以 ZJ3A 砂体下部的稳定泥岩层作为标准层, 对全区测井曲线进行标准化处理。通过标定研究区 6 口井、118 个数据点, 建立了珠三段 ZJ3A 砂体和 ZJ3B 砂体的 GR 岩性定量解释标准(图 5a), 用于对全区实钻井的目的层岩性进行解释。考虑到油气富集的优质储层粒度较粗, 在提取单井砂体厚度时, 仅考虑粉砂岩和细砂岩的厚度。结果显示, ZJ3A 砂体厚度分布范围在 0 ~ 31.70 m, 平均厚度为 6.67 m; ZJ3B 砂体厚度分布范围在 0 ~ 11.40 m, 平均厚度为 2.58 m(图 5b, c)。总体来看, 目的层砂体厚度较薄, 仅在部分井点超过 10.00 m, 大部分在 2.00 ~ 6.00 m。

3.2.2 地震属性优选

具有地质意义的地震属性的提取与优选及其平面成像, 是地震沉积学分析的关键步骤^[2,6]。地震属性包括振幅、波形、相位等 8 大类、100 多种属性, 不同种类

的属性在表征地质体岩性、物性及含油气性等方面具有不同的敏感性。

本研究基于研究区三维地震数据, 提取目的层中对砂体形态较为敏感的振幅、波形、统计和信号中的 4 大类、17 种地震属性。对提取的砂体厚度数据与这些地震属性进行皮尔逊相关性分析和随机森林权重计算, 联合优选相关性排名前三的地震属性。通过比较皮尔逊相关性系数和随机森林权重, 优选出的 ZJ3A 砂体地震属性为弧长、平均瞬时频率、振幅标准差、平均瞬时振幅、半能量, ZJ3B 砂体地震属性为半能量、最大振幅、平均正振幅、弧长、平均瞬时振幅(图 6)。在属性相关性不高的情况下, 优选多个地震属性进行拟合可降低地质解释的多解性, 而通过数学分析的定量化优选方法则相对提高了属性优选的准确性^[34]。

3.2.3 人工智能非线性拟合及优选评价

将优选的地震属性和砂体厚度作为标签数据, 分别输入到 RF, SVM, BRT 和 ANN 算法模型中进行非线性训练拟合, 采用监督学习方法预测砂体厚度。本

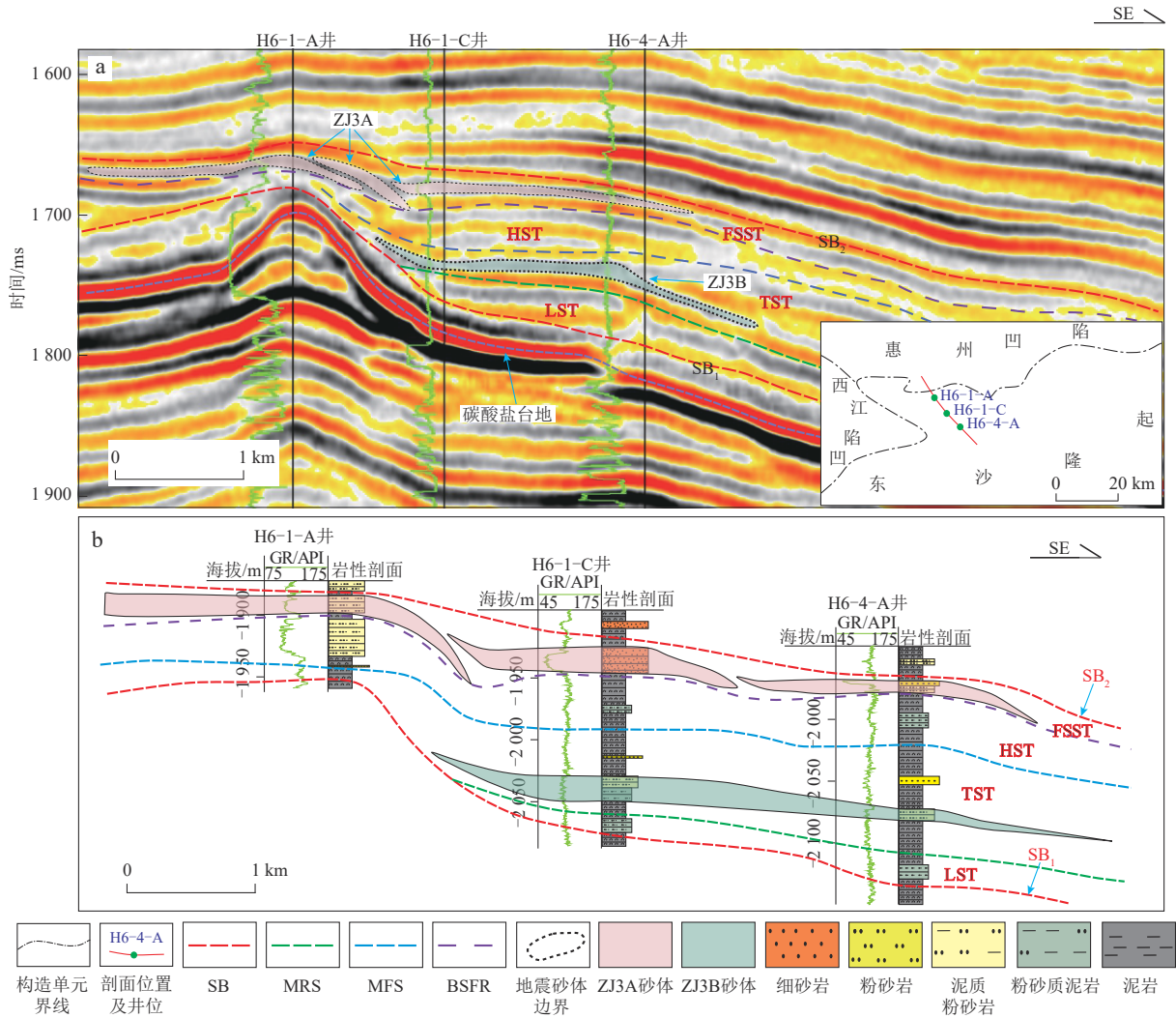


图3 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体井-震剖面

Fig. 3 Well-tied seismic sections of the ZJ3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

a. 砂体地震特征; b. 砂体测井特征

SB. 层序边界; MRS. 最大海退面; MFS. 最大海泛面; BSFR. 海退底界面; LST. 低位体系域; TST. 海侵体系域; HST. 高位体系域; FSST. 下降体系域

研究采用2种训练拟合模式:全井参与训练和随机挑选部分井参与训练。鉴于各算法拟合结果存在差异,通过预测值与真实值进行相关性分析,最终优选拟合度最高、平均误差最小的模型结果作为砂体厚度预测值。

将全区所有实钻井砂体厚度和优选的地震属性分别输入各个智能算法模型中进行多次迭代拟合,开展预测值与真实值进行相关性分析,结果表明:ZJ3A砂体各拟合模型相关性由强到弱排序为RF(0.82) > BRT(0.79) > SVM(0.56) > ANN(0.21),即RF拟合模型效果最佳(图7a—d)。ZJ3B砂体各拟合模型相关性由强到弱排序为BRT(0.79) > RF(0.74) > ANN(0.49) > SVM(0.22),BRT模型效果最好(图7e—h)。

随机挑选3口不同的井不参与模型的训练拟合,

对比各井点预测值与真实值的误差,最终优选适合ZJ3A砂体和ZJ3B砂体的拟合模型。经多次迭代拟合,结果表明:ZJ3A砂体使用的RF拟合模型的拟合效果最佳,平均误差0.28;ZJ3B砂体使用的BRT拟合模型的拟合效果最佳,平均误差0.25(表1)。

综合全井拟合训练和部分井拟合训练结果,分别优选RF和BRT拟合模型作为ZJ3A砂体与ZJ3B砂体厚度的预测模型。由拟合模型得到的厚度分布规律显示:ZJ3A砂体厚度分布范围在0~22 m,多数集中在4~18 m,且南部砂体较厚、规模较大,条带状形态较为连续;ZJ3B砂体厚度分布范围在0~8 m,较ZJ3A砂体薄,多数集中在2~7 m,且南部和北部发育规模小、厚度超过6 m的砂体,平面形态呈不连续的条带状(图8a,b)。

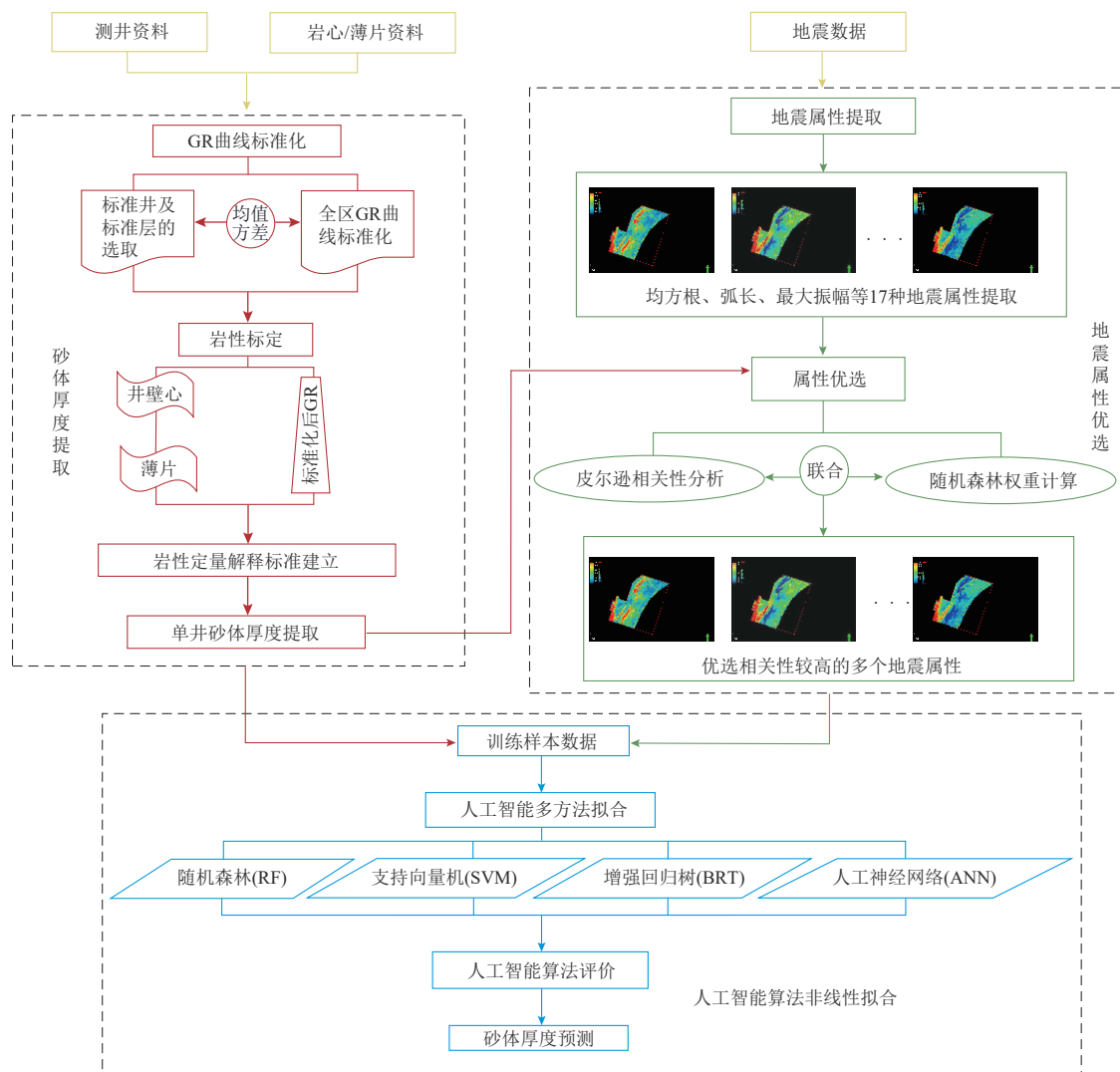


图4 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体人工智能预测流程图

Fig. 4 Workflow of AI-driven prediction of sand bodies ZJ3A and ZJ3B in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

3.3 陆架砂体地震地貌刻画

基于人工智能拟合得到的砂体厚度分布图(图8a, b), 结合前人对陆架砂体的地质认识, 进一步刻画ZJ3A砂体和ZJ3B砂体的地震地貌特征(图8c, d)。

ZJ3A砂体和ZJ3B砂体发育的地貌单元存在差异, 根据形态特征可分I型条带地貌单元(南宽北窄型)和II型条带地貌单元(南北近似等宽型)(图8c, d)。ZJ3A砂体中以发育I型为主, II型次之(图8c); 而在ZJ3B砂体中, II型占主导地位(图8d)。

根据所刻画的地貌单元, 分别统计2套陆架砂体的地貌参数: ZJ3A砂体共统计24套条带单元, 其中长度范围在3.55~17.15 km, 平均长度为7.82 km; 最大宽度范围在0.69~3.38 km, 平均最大宽度为1.90 km; 长/宽比值范围在2.05~9.75, 平均长/宽比值为4.54; 面积范围在3.76~42.71 km², 平均面积为11.23 km²。ZJ3B砂

体共统计37套条带单元, 其中长度范围在3.54~10.41 km, 平均长度为5.89 km; 最大宽度范围在0.70~3.30 km, 平均最大宽度为1.24 km; 长/宽比值范围在3.12~8.81, 平均长/宽比值为4.92; 面积范围在2.31~20.39 km², 平均面积为6.21 km²(图9)。

4 讨论

4.1 人工智能多属性拟合优势

随着油气勘探开发难度的增加, 单属性分析在地质解释中的局限性日益凸显, 容易导致多解性问题^[7,35]。为了更准确突出地质体的地震反射特征并降低多解性, 属性拟合(属性融合)成为一种常用的方法。RGB(红-绿-蓝三原色)属性融合是地震沉积学的重要研究方法之一, 通过彩色图像直观地反映地下异常地

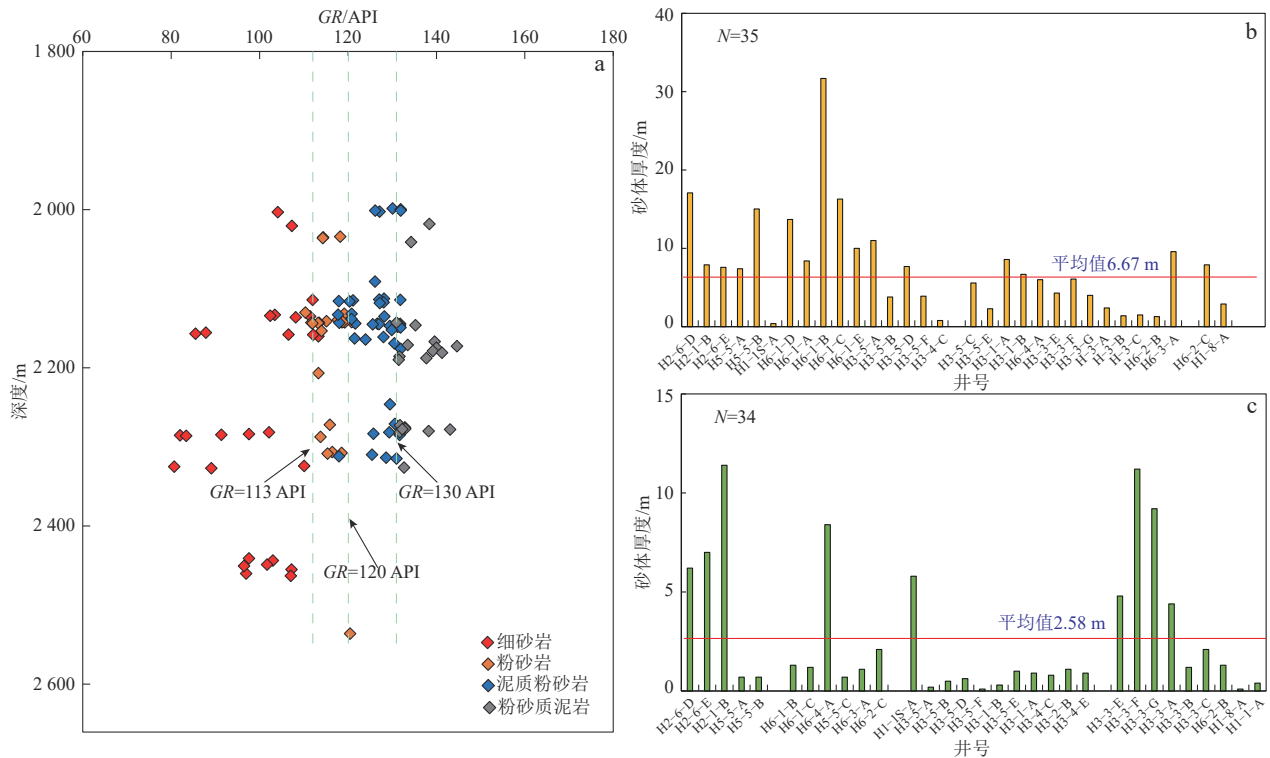


图5 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体岩性定量解释标准及厚度统计

Fig. 5 Quantitative lithological interpretation standards and thickness statistics of ZJ3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

- a. 不同岩性自然伽马测井值(GR)分布范围,定量解释标准为细砂岩 $GR < 113$ API、粉砂岩 $113 \text{ API} \leq GR < 120$ API、泥质粉砂岩 $120 \text{ API} \leq GR < 130$ API 和粉砂质泥岩 $GR \geq 130$ API; b. ZJ3A砂体厚度分布柱状图; c. ZJ3B砂体厚度分布柱状图
(b图和c图横坐标轴中空出的位置代表砂体厚度为0的井,未标出。)

质体,是目前较为主流属性融合方法^[5,36]。然而,RGB属性融合方法目前存在2个不足:①融合属性的数量有限,通常只能融合3~4个地震属性;②融合过程主要涉及显示效果的调节,缺乏复杂的数学计算和分析。

本研究提出的人工智能驱动的多属性拟合方法在陆架薄层砂体预测中具有明显优势:首先,本方法采用的拟合属性数量更多,且均为经过数学分析优选的地震属性,有效降低了属性解释的多解性;其次,拟合过程引入先进的人工智能算法,增强了属性拟合的准确性(图6—图8)。与常用的单一地震属性相比,ZJ3A砂体和ZJ3B砂体的单一属性虽然能够初步反映砂体分布范围,但无法准确显示砂体规模及地貌的南北差异等细节(图10),而人工智能拟合结果则能展现更多细节和丰富内容(图8,图9)。

4.2 陆架砂体地震地貌与水动力作用探讨

陆架沉积物的改造受主要控于水动力条件和相对海平面变化等因素。浅海陆架区的水动力条件复杂多样,包括潮流、沿岸流、河流和风暴等,这些水动力类型

对陆架沉积物的改造具有重要影响^[37-38]。潮流由海平面的周期性变化引起,具体表现为海水的双向流动,且具有对称性^[39]。沿岸流则是在风力或波浪作用下形成,沿着局部海岸流动。在沉积物搬运和改造能力方面,潮汐和波浪存在显著差异。冯钰等(2022)^[40]通过对泰国湾表层陆源碎屑进行粒度分析,揭示潮汐和波浪作用下的沉积物特征,认为潮汐作用区以沉积极细砂-中粉砂岩为主,分选差,水动力能量相对较弱;波浪作用区沉积以中砂岩为主,分选较好,其水动力能量通常较强。这种差异使得潮汐和沿岸流在沉积物分布和地貌形态上具有不同的影响。

国外学者对陆架混合水动力与海平面升降关系的讨论一直没有停止。传统观念认为,在海侵环境中,潮汐控制更为显著;而在海退过程中,波浪作用起主导作用^[41]。在陆架三角洲沉积过程中,河流-波浪-潮汐混合水动力作用始终伴随着三角洲的发育。Anna等(2009)^[42]根据特定的地层叠置样式、几何形状和沉积相组合特征,将陆架三角洲划分为多个体系域类型,并研究了不同体系域对应的优势水动力类型,其中FSST

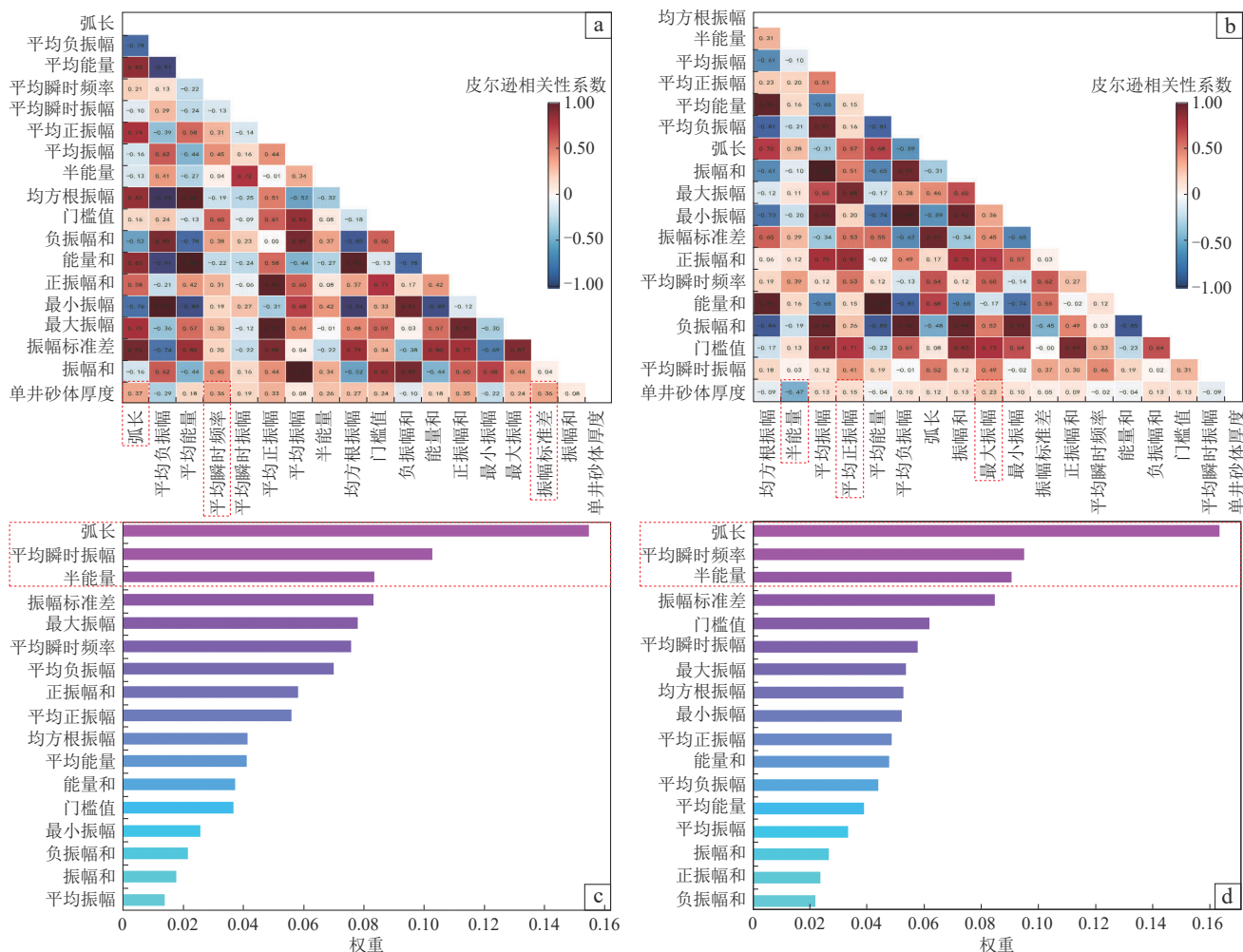


图6 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体相关性分析结果

Fig. 6 Correlation analysis results of ZJ3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

a. ZJ3A砂体皮尔逊相关性分析结果; b. ZJ3B砂体皮尔逊相关性分析结果; c. ZJ3A砂体随机森林权重计算结果; d. ZJ3B砂体随机森林权重计算结果
(图中红色虚线框内为相关性排名前三的地震属性。)

以波浪作用为主, TST以潮汐作用为主。陆架三角洲形态受控于海平面升降变化, 在海侵期间, 相对海平面的升高加剧了潮汐能量, 而在宽阔海岸的低水位期, 波浪作用通常占主导地位^[43]。

研究区发育的广东沿岸流主要受到东亚季风控制, 沿西南方向流动, 与冬季风向一致; 而潮汐在研究区内普遍存在, 受东沙隆起地貌限制, 沿着西南或北东方向流动。^[11, 23, 44]。这些水动力对陆架砂体进行了复杂的改造, 导致砂体形态和储层物性发生变化, 因此深入研究水动力作用显得尤为重要^[11, 45, 46]。在缺少取心井的研究区内, 区分不同水动力类型是一项挑战。前人通过砂体平面几何特征, 总结出2种主要的水动力改造类型: ①双向流动的潮汐作用为主, 砂体形态多呈南北等宽的对称状; ②以单向流动的海流为主, 砂体形态呈沿海流流动方向加宽的不对称状^[10, 47]。本研究基

于陆架砂体地貌形态, 结合砂体走向、岩性、物性特征和相对海平面变化及研究区内潮汐和沿岸流向特点, 探讨ZJ3A砂体和ZJ3B砂体优势水动力作用类型。

ZJ3A砂体地貌形态以南宽北窄的I型地貌单元为主, 走向为北东-南西向(图10), 岩性以细砂岩为主, 含少量粉砂岩, 平均孔隙度和渗透率分别为23.72%和 $442.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 砂体发育于相对海平面下降的FSST时期; H2-1-B井ZJ3A砂体取心段分析结果显示, 从上至下依次发育块状层理细砂岩相、砂纹层理细砂岩相和冲洗层理粉砂岩相, 这一沉积序列表明沉积物粒度从下至上逐渐变粗, 水动力作用逐渐增强, 且波浪改造作用明显(图11a); 根据研究区内沿岸流流动方向和单向流动特征, 推断ZJ3A砂体的优势水动力类型为沿岸流(表2)。ZJ3B砂体地貌形态以南北等窄的II型地貌单元为主, 走向为北东-南西向, 岩性以

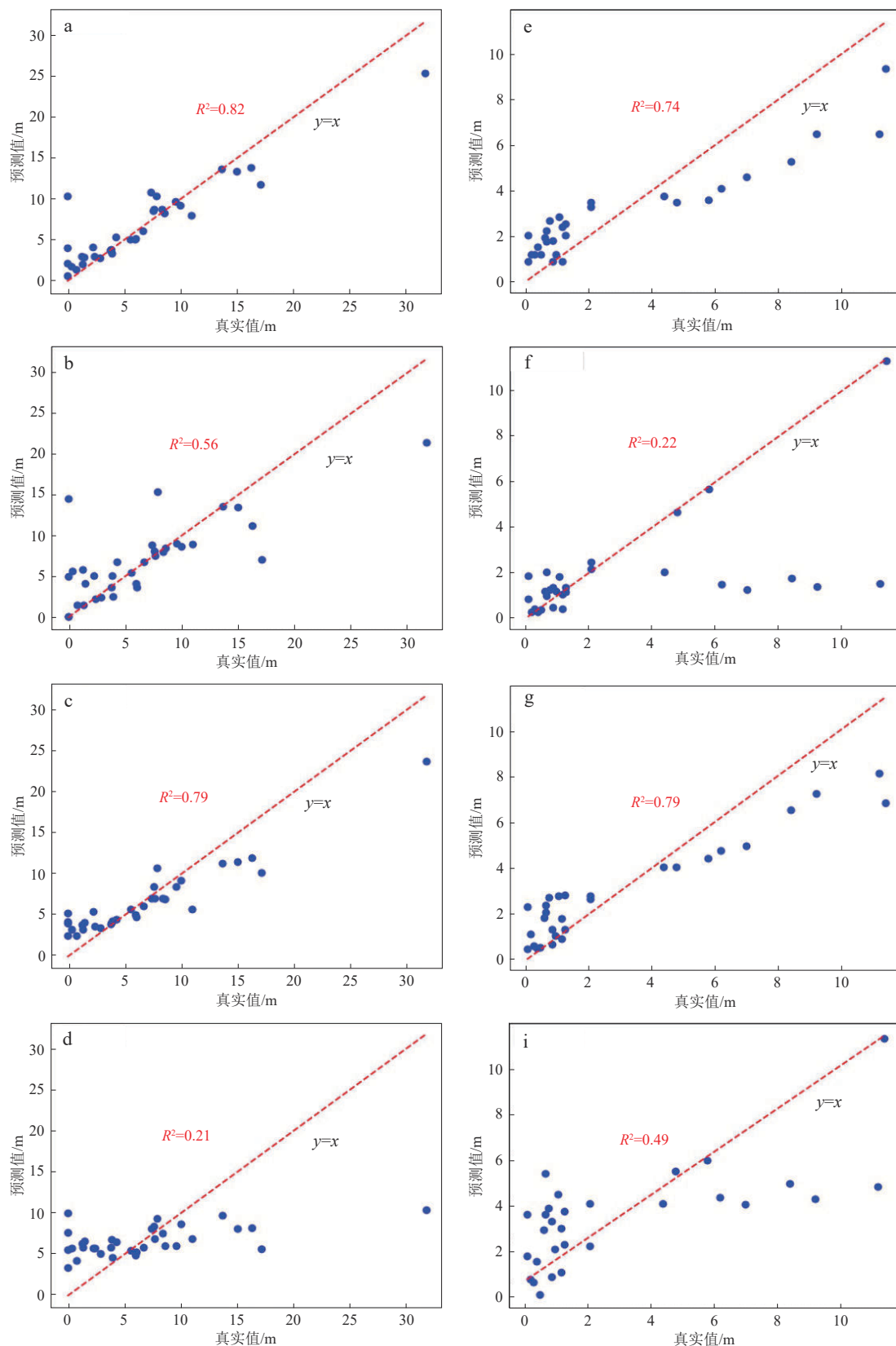


图7 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体全井训练拟合模型评价

Fig. 7 Assessment of well-based training and fitting models for ZJ3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB
a—d. 分别为ZJ3A砂体随机森林(RF)模型、支持向量机(SVM)模型、增强回归树(BRT)模型和人工神经网络(ANN)模型拟合度; e—h. 分别为ZJ3B砂体随机森林(RF)模型、支持向量机(SVM)模型、增强回归树(BRT)模型和人工神经网络(ANN)模型拟合度
(R^2 为图7中评价模型的决定系数。)

表1 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体拟合模型误差

Table 1 Errors of the fitting models for ZI3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

ZJ3A砂体						ZJ3B砂体					
拟合模型	验证井点	真实值	预测值	误差	平均误差	拟合模型	验证井点	真实值	预测值	误差	平均误差
RF	H3-5-A	11.0	8.7	0.2	0.28	RF	H6-1-B	1.3	1.9	0.5	0.32
	H3-5-E	3.9	2.5	0.4			H6-2-C	2.1	1.6	0.2	
	H6-1-D	13.7	9.8	0.3			H6-4-A	8.4	6.1	0.3	
SVM	H3-5-A	11.0	7.3	0.3	0.44	SVM	H6-1-B	1.3	2.2	0.7	0.39
	H3-5-E	3.9	1.6	0.6			H6-2-C	2.1	1.6	0.2	
	H6-1-D	13.7	8.3	0.4			H6-4-A	8.4	10.3	0.2	
BRT	H3-5-A	11.0	5.0	0.5	0.39	BRT	H6-1-B	1.3	1.7	0.3	0.25
	H3-5-E	3.9	3.1	0.2			H6-2-C	2.1	1.5	0.3	
	H6-1-D	13.7	7.9	0.4			H6-4-A	8.4	9.6	0.1	
ANN	H3-5-A	11.0	13.1	0.2	0.33	ANN	H6-1-B	1.3	2.1	0.6	0.38
	H3-5-E	3.9	2.3	0.4			H6-2-C	2.1	2.7	0.3	
	H6-1-D	13.7	8.4	0.4			H6-4-A	8.4	10.3	0.2	

注:误差=(真实值-预测值)/真实值。

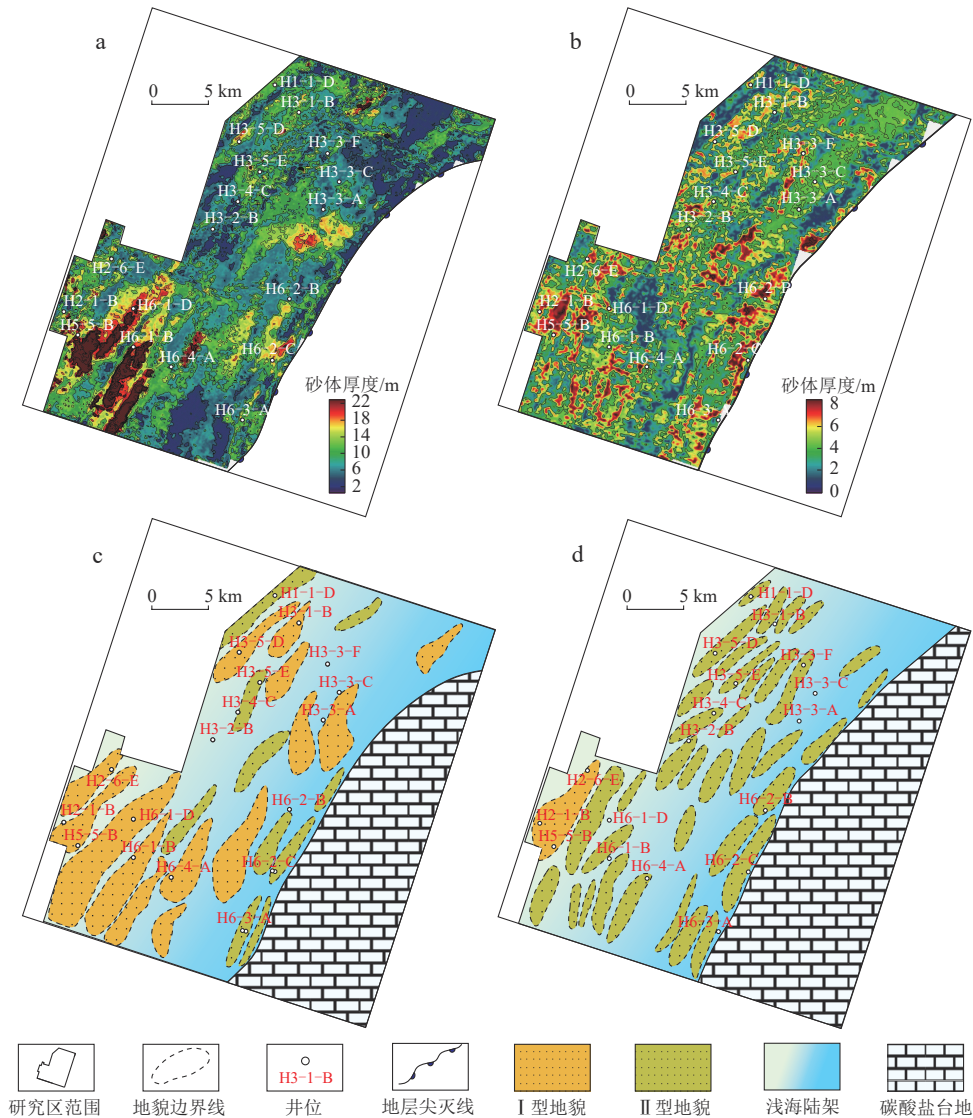


图8 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体预测厚度及地貌

Fig. 8 Predicted isopach and geomorphological maps of ZJ3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

a. ZJ3A砂体预测厚度平面分布 ;b. ZJ3B砂体预测厚度平面分布 ;c. ZJ3A砂体地貌示意图;d. ZJ3B砂体地貌示意图

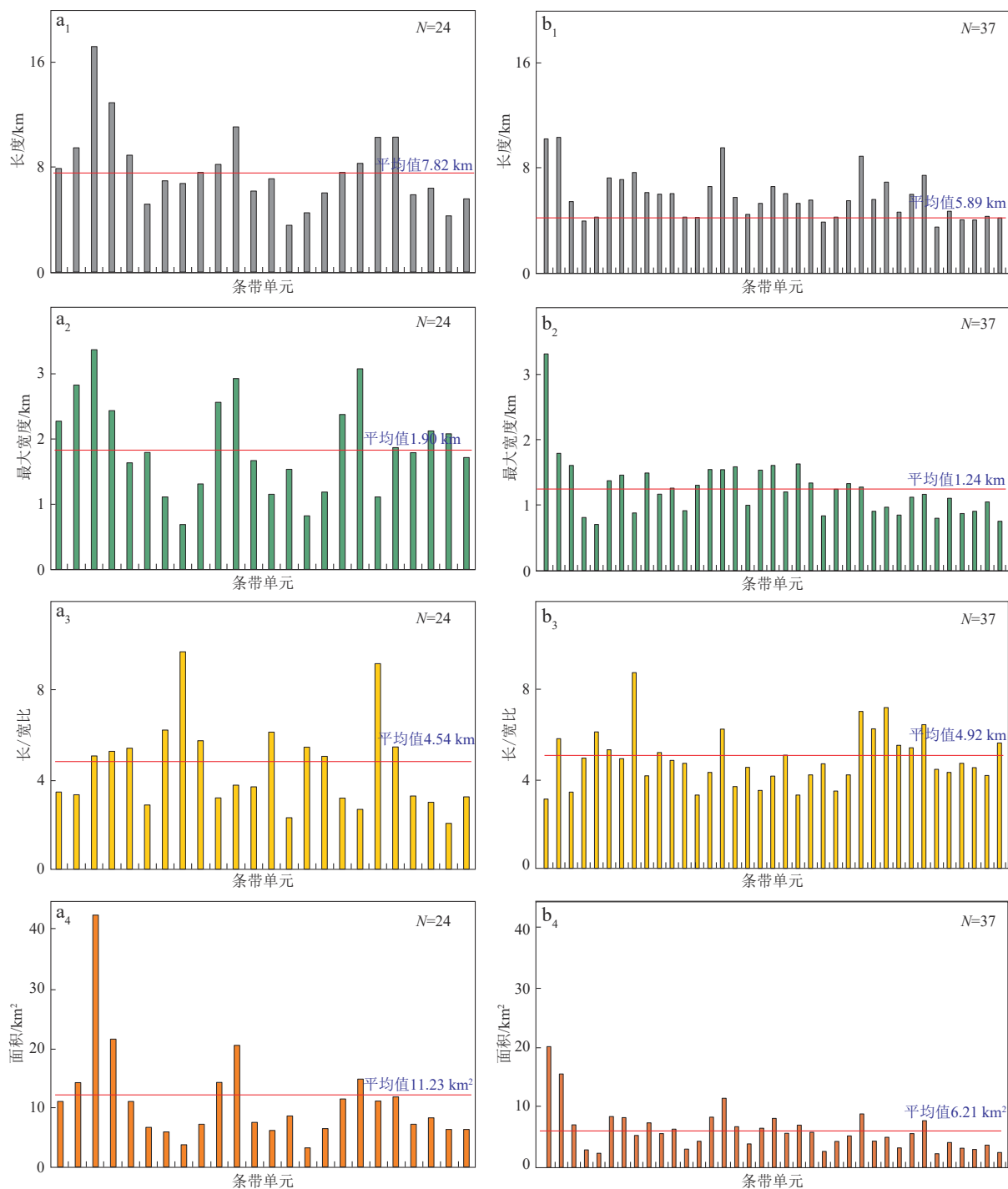


图9 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体形貌参数统计

Fig. 9 Statistics of morphological parameters of ZJ3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

a_1 . ZJ3A 砂体长度, a_2 . ZJ3A 砂体最大宽度, a_3 . ZJ3A 砂体长/宽比, a_4 . ZJ3A 砂体面积; b_1 . ZJ3B 砂体长度, b_2 . ZJ3B 砂体最大宽度, b_3 . ZJ3B 砂体长/宽比, b_4 . ZJ3B 砂体面积

粉砂岩为主(图8),平均孔隙度和渗透率分别为11.74%和 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,砂体发育于相对海平面上升的TST时期;研究区H1-1-D井ZJ3B砂体取心段的观察分析显示,从上至下依次发育平行层理粉砂岩相、脉状层理粉砂岩相和韵律层理粉砂岩相,这一沉积序列表明沉ZJ3B沉积期水动力作用相对较弱,潮汐作

用明显(图11b);根据研究区内潮汐流动方向和双向流动特征,判断ZJ3B砂体的优势水动力类型为潮汐(表2)。总体来说,ZJ3A砂体在FSST时期主要受波浪改造作用,沉积物粒度较粗,具有较好的储层物性;而ZJ3A砂体在TST时期主要受潮汐改造作用,沉积物粒度较细,储层物性相对较差。

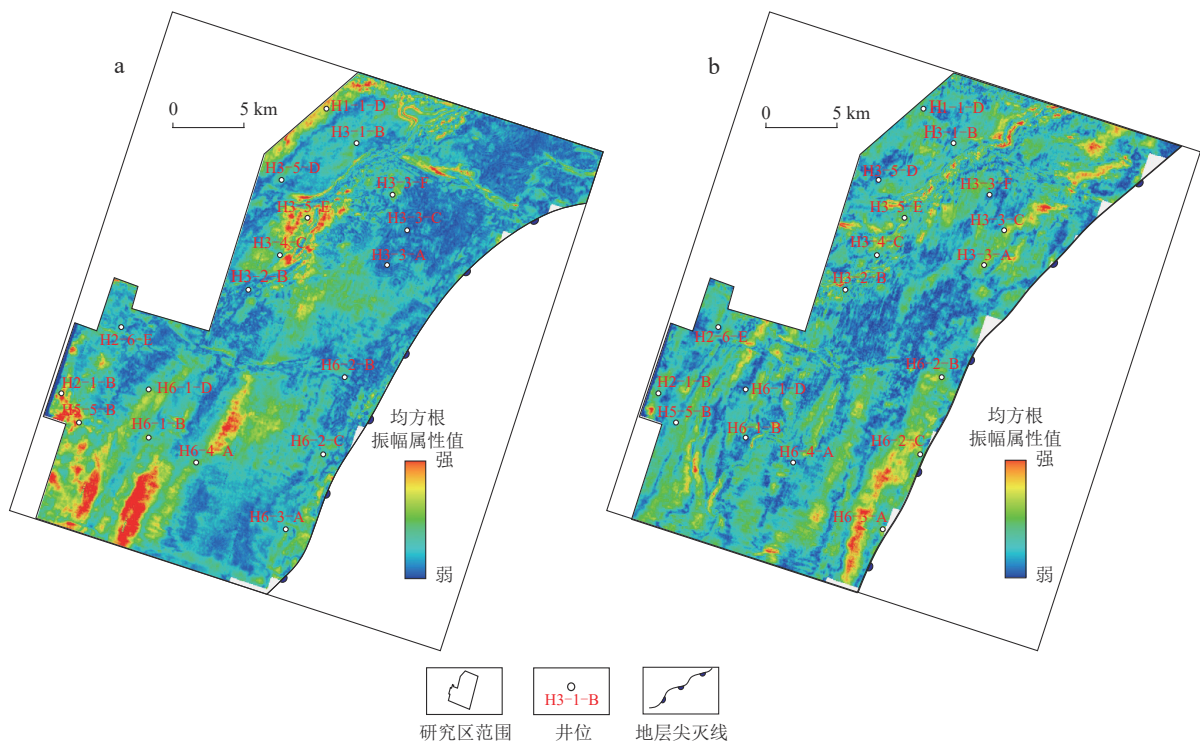


图10 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体(a)和ZJ3B砂体(b)均方根振幅属性值平面分布
Fig. 10 Root-mean-square attribute maps of ZJ3A (a) and ZJ3B (b) sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

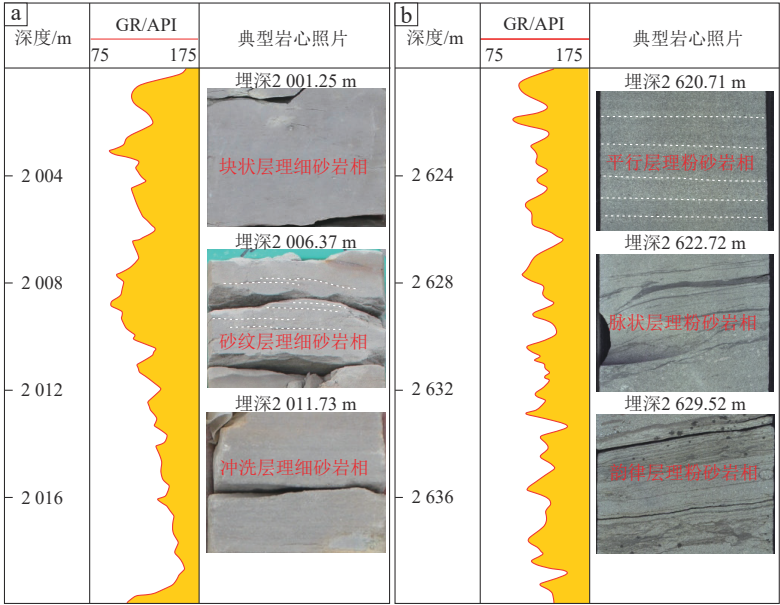


图11 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体典型岩心照片
Fig. 11 Photos of typical cores from ZJ3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB
a. H2-1-B井,ZJ3A砂体;b. H1-1-D井,ZJ3B砂体
(井位见图8和图10。)

4.3 应用展望及发展趋势

薄层砂体的预测是海上油气田勘探不可或缺的技术之一,离不开地震沉积学的理论和技术方法。随着人工智能技术的迅猛发展及多学科交叉融合,油气勘

探开发与人工智的结合成为未来趋势。本研究强调人工智能与地震沉积学方法的结合,为提高陆架薄层砂体预测准确性,应注意以下几点:①单井砂体厚度解释与提取是砂体厚度预测的基础,测井曲线标准化处理和岩性标定是关键,正确的岩性定量解释标准可快

表2 珠江口盆地惠州凹陷珠三段ZJ3A砂体和ZJ3B砂体综合表征

Table 2 Comprehensive characterization of ZJ3A and ZJ3B sand bodies in the Zhu 3 Member, Huizhou Sag, PRMB

属性	ZJ3A 砂体				ZJ3B 砂体			
地貌类型	Ⅰ 型地貌为主(南宽北窄型)				Ⅱ 型地貌为主(南北等宽型)			
砂体走向	北东-南西				北东-南西			
优势水动力类型	沿岸流(单向流动)				潮汐(双向流动)			
地貌参数	长度/km	最大宽度/km	长/宽比	面积/km ²	长度/km	最大宽度/km	长/宽比	面积/km ²
	3.55 ~ 17.15	0.69 ~ 3.38	2.05 ~ 9.75	3.76 ~ 42.71	3.54 ~ 10.41	0.70 ~ 3.30	3.12 ~ 8.81	2.31 ~ 20.39
	(7.82)	(1.90)	(4.54)	(11.23)	(5.89)	(1.24)	(4.92)	(6.21)
岩性	细砂岩(为主)+粉砂岩(为辅)				粉砂岩(为主)			
物性(平均值)	孔隙度/%		渗透率/(10 ⁻³ μm ²)		孔隙度/%		渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	
	20.10 ~ 28.20 (23.72)		53.70 ~ 606.04 (442.00)		8.61 ~ 15.96 (11.74)		0.02 ~ 0.70 (0.15)	
海平面升降	海平面下降(FSST)				海平面上升(TST)			

注:表中数据为最小值~最大值(平均值)。

速、准确推进全区实钻井的岩性解释,增强预测结果的真实性。②多属性优选是保证,需确保地震属性多样性和多种方法的联合优选,避免单一属性引起的多解性,提高预测的准确性。③多种智能算法拟合是重点,采用人工智能算法处理复杂非线性油气地质问题具有优势,多种算法的加入保证了预测的模型可对比性。④多层次算法优选及误差分析,能够实现预测值与真实值的检验,确保预测算法的可靠性。

5 结论

1)在三级层序界面(SB18和SB17.25)约束下,识别和划分珠三段高精度层序地层格架。珠三段自下而上分别发育LST,TST,HST和FSST,其中主力砂体ZJ3A和ZJ3B分别发育于FSST和TST。

2)针对浅海陆架砂体厚度薄、优质储层展布规律不清的问题,在地震沉积学理论指导下,引入多种人工智能算法进行非线性拟合可提高预测准确度。ZJ3A砂体采用RF拟合模型,相关系数为0.82,平均误差为0.28;ZJ3B砂体采用BRT拟合模型,相关系数为0.79,平均误差为0.25。

3)ZJ3A砂体以发育南宽北窄的I型地貌单元为主,长度、最大宽度、长/宽比和面积等地貌参数的平均值分别为7.82 km,1.90 km,4.54和11.23 km²;ZJ3B砂体以发育南北等宽的II型地貌单元为主,长度、最大宽度、长/宽比和面积等地貌参数的平均值分别为5.89 km,1.24 km,4.92和6.21 km²。

4)研究区普遍受到单向流动的沿岸流和双向流动的潮汐影响,根据ZJ3A和ZJ3B砂体地貌特征,探讨两套砂体受到改造的优势水动力类型:ZJ3A砂体主要受单向流动的沿岸流改造,ZJ3B砂体主要受双向流动的潮汐影响。

参 考 文 献

[1] WOOD L J. Quantitative seismic geomorphology of Pliocene and Miocene fluvial systems in the northern Gulf of Mexico, U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(9): 713-730.

[2] 曾洪流,朱筱敏,朱如凯,等. 陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 275-284.

ZENG Hongliu, ZHU Xiaomin, ZHU Rukai, et al. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 275-284.

[3] ZENG Hongliu, BACKUS M M, BARROW K T, et al. Stratal slicing, Part I: Realistic 3-D seismic model [J]. Geophysics, 1998, 63(2): 502-513.

[4] 曾洪流. 地震沉积学在中国: 回顾和展望[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 417-426.

ZENG Hongliu. Seismic sedimentology in China: A review [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 417-426.

[5] 朱筱敏,董艳蕾,曾洪流,等. 中国地震沉积学研究现状和发展思考[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 397-411.

ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, ZENG Hongliu, et al. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(3): 397-411.

[6] 朱筱敏,董艳蕾,曾洪流,等. 沉积地质学发展新航程——地震沉积学[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 189-201.

ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, ZENG Hongliu, et al. New development trend of sedimentary geology: Seismic sedimentology [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(2): 189-201.

[7] 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.

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 [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 293-308.

[8] 张文起,李春雷. 基于多层残差网络的地震提频处理在薄储集

- 层识别中的应用[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(1): 102-108.
- ZHANG Wenqi, LI Chunlei. Seismic frequency enhancement processing based on multi-layer residual network and its application to identification of thin reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(1): 102-108.
- [9] 白青林, 刘烜良, 张军华, 等. 基于CV-XGBoost的水下分流河道砂体厚度预测及应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(5): 1602-1610.
- BAI Qinglin, LIU Xuanliang, ZHANG Junhua, et al. Sand body thickness prediction of underwater distributary channel based on CV-XGBoost method [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(5): 1602-1610.
- [10] 刘振夏, 夏东兴, 王揆洋. 中国陆架潮流沉积体系和模式[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(2): 141-147.
- LIU Zhenxia, XIA Dongxing, WANG Kuiyang. Tidal depositional systems and patterns of China's continental shelf[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(2): 141-147.
- [11] 丁琳, 杜家元, 罗明, 等. 珠江口盆地惠州凹陷新近系珠江组K22陆架砂脊沉积成因分析[J]. 古地理学报, 2016, 18(5): 785-798.
- DING Lin, DU Jiayuan, LUO Ming, et al. Analysis of depositional genesis of K22 shelf sand ridges in the Neogene Zhujiang Formation in Huizhou sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2016, 18(5): 785-798.
- [12] 陈维涛, 杜家元, 龙更生, 等. 珠江口盆地海相层序地层发育的控制因素分析[J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 73-83.
- CHEN Weitao, DU Jiayuan, LONG Gengsheng, et al. Analysis on controlling factors of marine sequence stratigraphy evolution in Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 73-83.
- [13] 丁琳, 张昌民, 杜家元, 等. 珠江口盆地惠州凹陷珠江组K系列陆架砂脊沉积演化与成因[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(3): 379-385.
- DING Lin, ZHANG Changmin, DU Jiayuan, et al. Depositional evolution and genesis of K set of shelf sand ridges in the Zhujiang Formation of Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(3): 379-385.
- [14] 杜家元, 丁琳, 张向涛, 等. 珠江口盆地惠州凹陷西南部新近系岩性油气藏勘探思路与关键技术[J]. 石油实验地质, 2017, 39(6): 858-864.
- DU Jiayuan, DING Lin, ZHANG Xiangtao, et al. Exploration approach and techniques for the Neogene lithologic reservoirs in the southwestern Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(6): 858-864.
- [15] 高阳东, 彭光荣, 张向涛, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系文昌组源-汇系统特征及演化[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 584-599.
- GAO Yangdong, PENG Guangrong, ZHANG Xiangtao, et al. Characteristics and evolution of the source-to-sink system of the Paleogene Wenchang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 584-599.
- [16] 芮志锋, 林畅松, 杜家元, 等. 关键层序界面识别及其在岩性油气藏勘探中的意义——以惠州凹陷珠江组为例[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(1): 96-105.
- RUI Zhifeng, LIN Changsong, DU Jiayuan, et al. Key sequence surfaces identification and its significance in the exploration of lithologic reservoirs: A case of Zhujiang Formation in Huizhou Depression [J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(1): 96-105.
- [17] 彭光荣, 王绪诚, 陈维涛, 等. 珠江口盆地惠州26洼东南缘古近系恩平组上段断-拗转换期源-汇系统及勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 613-625.
- PENG Guangrong, WANG Xucheng, CHEN Weitao, et al. Source-to-sink system during rifting-depression transition period and its exploration significance: A case study of the Upper Enping Formation at southeastern margin of Huizhou 26 sub-sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 613-625.
- [18] 向巧维, 丁琳, 芮志锋, 等. 珠江口盆地东部珠江组碳酸盐岩—碎屑岩共生区层序发育模式[J]. 中国海上油气, 2021, 33(2): 47-55.
- XIANG Qiaowei, DING Lin, RUI Zhifeng, et al. Sequence stratigraphic model of carbonate clastic rock symbiosis area of Zhujiang Formation in eastern Pearl River Mouth Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2021, 33(2): 47-55.
- [19] LIU Zhifei, COLIN C, LI Xiajing, et al. Clay mineral distribution in surface sediments of the northeastern South China Sea and surrounding fluvial drainage basins: Source and transport [J]. Marine Geology, 2010, 277(1/4): 48-60.
- [20] 李永青, 李彬, 石洪源, 等. 南海北部波浪特征分析[J]. 海洋湖沼通报, 2019(2): 18-23.
- LI Yongqing, LI Bin, SHI Hongyuan, et al. Analysis of wave characteristics in the northeastern part of the South China Sea [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019(2): 18-23.
- [21] CENTURIONI L R, NIILER P P, LEE D K. Observations of inflow of philippine sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait [J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34(1): 113-121.
- [22] 丁琳, 黄书勤, 卓海腾, 等. 砂体成因驱动下的岩性圈闭形成模式: 以珠江口盆地惠州凹陷中新世强制海退砂为例[J]. 地球科学进展, 2024, 39(8): 862-876.
- DING Lin, HUANG Shuqin, ZHUO Haiteng, et al. Models of stratigraphic trap formation driven by sandstone genesis: A case study of the Miocene forced regressive sandstone in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Advances in Earth Science, 2024, 39(8): 862-876.
- [23] 黄书勤, 卓海腾, 冯进, 等. 南海北部陆架区下一中新统古海滩脊三维沉积结构及演化规律[J]. 沉积学报, 2025, 43(1): 139-153.
- HUANG Shuqin, ZHUO Haiteng, FENG Jin, et al. Three-dimensional sedimentary characteristics and evolution of ancient beach ridges in the Early to Middle Miocene of the northern South China Sea shelf [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2025, 43(1): 139-153.
- [24] 徐长贵, 龚承林. 从层序地层走向源-汇系统的储层预测之路[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(3): 521-538.
- XU Changgui, GONG Chenglin. Predictive stratigraphy: From sequence stratigraphy to source-to-sink system [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 521-538.
- [25] 葛家旺, 唐小龙, 赵晓明, 等. 南海琼东南盆地西区晚更新世陆架边缘层序结构及差异机制[J]. 地球科学进展, 2024, 39(7): 737-751.

- GE Jiawang, TANG Xiaolong, ZHAO Xiaoming, et al. Variability in the shelf-edge sequence architecture and its controlling factors in the western part of the Late-Pleistocene Qiongdongnan Basin, South China Sea [J]. *Advances in Earth Science*, 2024, 39(7): 737-751.
- [26] DONG Peng, LIAO Xinwei, CHEN Zhiming. An approach for automatic parameters evaluation in unconventional oil reservoirs with deep reinforcement learning [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 209: 109917.
- [27] 付君豪, 陈再贺, 付宪, 等. 利用随机森林算法预测束鹿凹陷束21井区馆陶组储层砂地比[J]. *大庆石油地质与开发*, 2023, 42(6): 34-41.
- FU Junhao, CHEN Zaihe, FU Xian, et al. Prediction of sandstone-strata thickness ratio of Guantao Formation reservoir in Shu 21 well area of Shulu Sag via random forest algorithm [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2023, 42(6): 34-41.
- [28] 杨剑锋, 乔佩蕊, 李永梅, 等. 机器学习分类问题及算法研究综述[J]. *统计与决策*, 2019, 35(6): 36-40.
- YANG Jianfeng, QIAO Peirui, LI Yongmei, et al. A review of machine-learning classification and algorithms [J]. *Statistics and Decision*, 2019, 35(6): 36-40.
- [29] BAKER J, SWANSON D, TAYMAN J. Boosted regression trees for Small-Area population forecasting [J]. *Population Research and Policy Review*, 2023, 42(4): 51.
- [30] LOU Guangxin, SHI Hongzhen. Face image recognition based on convolutional neural network [J]. *China Communications*, 2020, 17(2): 117-124.
- [31] 肖阳, 王家豪, 李志刚, 等. 基于大数据的页岩油区块产量差异分析方法研究[J]. *钻采工艺*, 2022, 45(3): 73-78.
- XIAO Yang, WANG Jiahao, LI Zhigang, et al. Study on production difference analysis method of shale oil play based on big data [J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(3): 73-78.
- [32] 李泉伦, 陈争光, 焦峰. 基于Stacking集成学习的近红外光谱油页岩含油率预测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(4): 1030-1036.
- LI Quanlun, CHEN Zhengguang, JIAO Feng. Prediction of oil content in oil shale by near-infrared spectroscopy based on stacking ensemble learning [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(4): 1030-1036.
- [33] 秦国权. 微体古生物在珠江口盆地新生代晚期层序地层学研究中的应用[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(4): 1-18.
- QIN Guoquan. Application of micropaleontology to the sequence stratigraphic studies of Late Cenozoic in the Zhujiang River Mouth Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(4): 1-18.
- [34] LI Wei, YUE Dali, WU Shenghe, et al. Thickness prediction for high-resolution stratigraphic interpretation by fusing seismic attributes of target and neighboring zones with an SVR algorithm [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 113: 104153.
- [35] 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.
- [36] BITRUS P R, IACOPINI D, BOND C E. Defining the 3D geometry of thin shale units in the Sleipner reservoir using seismic attributes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 78: 405-425.
- [37] NNAFIE A, WOLF T B J, DE SWART H E. Tidal sand ridges on the shelf: A numerical study of their natural morphodynamic evolution and response to interventions [J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 205: 104195.
- [38] LOBO F J, DOS PASSOS NASCIMENTO J L, DURÁN R, et al. Geomorphological features along the shelf of the southern Brazilian margin: Implications for shallow-water sediment transport induced by ocean currents [J]. *Geomorphology*, 2024, 456: 109215.
- [39] 彭畅, STEEL R J, 龚承林, 等. 潮汐沉积过程及沉积特征研究综述[J]. *古地理学报*, 2023, 25(5): 1069-1089.
- PENG Yang, STEEL R J, GONG Chenglin, et al. A review on tidal depositional processes and characteristics [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(5): 1069-1089.
- [40] 冯铎, 刘志飞, SOMPONGCHAIYAKUL P, 等. 泰国湾表层沉积物陆源碎屑的粒度特征及其展现的沉积动力环境[J]. *地学前缘*, 2022, 29(4): 211-220.
- FENG Shuo, LIU Zhifei, SOMPONGCHAIYAKUL P, et al. Grain size characteristics of terrigenous clastics in surface sediments of the Gulf of Thailand and their significance for sedimentary dynamic environment [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(4): 211-220.
- [41] DALRYMPLE R W, ZAITLIN B A. High-resolution sequence stratigraphy of a complex, incised valley succession, Cobequid Bay—Salmon River estuary, Bay of Fundy, Canada [J]. *Sedimentology*, 1994, 41(6): 1069-1091.
- [42] PONTEN A, PLINK-BJORKLUND P. Process regime changes across a regressive to transgressive turnaround in a shelf - slope basin, Eocene Central Basin of Spitsbergen [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(1): 2-23.
- [43] OLARIU C. Autogenic process change in modern deltas: Lessons for the ancient [M]//MARTINIUS A W, RAVNÅS R, HOWELL J A, et al. *From Depositional Systems to Sedimentary Successions on the Norwegian Continental Margin*. Chichester: Wiley Blackwell, 2014: 149-166.
- [44] ZHUO Haiteng, WANG Yingmin, SHI Hesheng, et al. Seismic geomorphology, architecture and genesis of Miocene shelf sand ridges in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 54: 106-122.
- [45] 李俊良, 王海荣, 张建新, 等. 珠江口盆地西部珠江组潮流砂脊的分布、形态和水动力机制[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(5): 671-677.
- LI Junliang, WANG Hairong, ZHANG Jianxin, et al. Distribution, geometry and hydrodynamic mechanism of tidal sand ridges in the Zhujiang Formation, the western Zhujiangkou Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(5): 671-677.
- [46] ZHANG Xiangtao, DING Lin, DU Jiayuan, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of shelf sand ridges in the Pearl River Mouth Basin, northeast of South China Sea [J]. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2017, 2(2): 141-155.
- [47] DYER K R, HUNTLEY D A. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges [J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19(10): 1285-1330.