

东海西湖凹陷平湖斜坡带平湖组沉积体系 平面分区特征及差异性展布

陈忠云¹, 杜学斌², 李 帅¹

1. 中海石油(中国)有限公司 上海分公司, 上海 200335;

2. 中国地质大学(武汉) 海洋学院, 武汉 430074

摘要: 东海陆架盆地西湖凹陷平湖斜坡带始新统平湖组是目前已证实的主力油气富集层系, 对其沉积体系已开展过多轮研究, 但是仍然存在很大争议。在前人研究的基础上, 基于新处理的三维地震、岩心和多种地球化学测试等资料, 对平湖斜坡带平湖组沉积环境和沉积体系重新展开了系统分析。平湖斜坡带主要发育三种沉积体系类型: 河控三角洲、潮汐改造为主的三角洲和潮坪沉积体系。这三种沉积类型在平面上具有明显的分区性, 平北地区以河控三角洲沉积为主, 平中地区发育受潮汐改造的三角洲沉积, 平南地区处于半封闭海湾湾口, 以潮坪体系为主, 洋流控制着砂体的空间展布形态和规模。整体而言, 平湖斜坡带平湖组沉积格局从北向南表现出受海水影响逐渐加强的变化规律。

关键词: 沉积展布规律; 沉积体系; 平湖组; 始新统; 西湖凹陷; 东海陆架盆地

中图分类号: TE122.24

文献标识码: A

Distributional signatures of depositional system of Pinghu Formation, Pinghu slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

CHEN Zhongyun¹, DU Xuebin², LI Shuai¹

1. Shanghai Branch, CNOOC (China) Co., Ltd., Shanghai 200335, China;

2. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract: The Eocene Pinghu Formation on the Pinghu slope of Xihu Sag of East China Sea Shelf Basin is a main confirmed strata for hydrocarbon enrichment. At present, many studies have been carried out on its sedimentary system, but certain controversies are still existed. On the basis of previous studies and newly processed 3D seismic, core and geochemical data, it was re-analyzed in this paper for the sedimentary system of Pinghu Formation. Results show that there are three types of sedimentary system on the slope belt: river-controlled delta, tidal-transformed delta and tidal flat depositional system. These three types of sedimentary modes have obvious zoning characteristics in plane. The northern area is dominated by river-controlled delta deposits. The middle area is dominated by tidal-transformed delta deposits. The southern area is in the mouth of a semi-closed bay, dominated by tidal flat system, and ocean currents control the spatial distribution shape and scale of sand bodies. It is concluded that the influence of seawater on the sedimentary pattern of the Pinghu Formation in the slope belt is strengthening from north to south.

Key words: sedimentary distribution law; sedimentary system; Pinghu Formation; Eocene; Xihu Sag; East China Sea Shelf Basin

平湖斜坡带是东海陆架盆地西湖凹陷石油地质研究重点关注的区带之一, 目前经历了多轮多次的研究, 为斜坡带油气勘探突破提供了强有力的支持。然而, 虽然前人针对西湖凹陷平湖组沉积体系及环境开展了大量的研究, 但是仍然存在很

大争议。目前主要有以下几种观点: (1) 平湖组以海湾环境和潮坪—沼泽环境为主^[1-4]; (2) 受潮汐影响的辫状河三角洲^[5]; (3) 不是受潮汐影响的潮汐三角洲体系, 而是浅水环境下辫状河三角洲沉积^[6]。本次研究在充分吸收和借鉴前人成果的基础

上,综合利用多口钻井(含新增加的钻孔)、岩心、测井以及新处理的三维地震等资料,对平湖斜坡带平湖组沉积体系重新开展了系统研究,识别出河控三角洲、潮汐改造三角洲和潮坪等3种主要的沉积体系类型,进而提出沉积体系平面展布“三分模型”,以期为进一步有利区带预测和有利储集体寻找提供借鉴。

1 地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地东北部的东部凹陷带,是盆地中最大的次级构造单元,面积约为 $4.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,从西向东依次划分出西部斜坡带、中央反转背斜构造带、东部断阶带3个构造单元^[7-13]。平湖斜坡带位于西湖凹陷西部斜坡带的中段,西侧紧邻海礁隆起,是西湖凹陷最有利的油气富集区带之一(图1)。西湖凹陷地层从下至上划分为宝石组、平湖组、花港组、龙井组、玉泉组、柳浪组、三潭组与东海群。其中平湖组是研究区内重

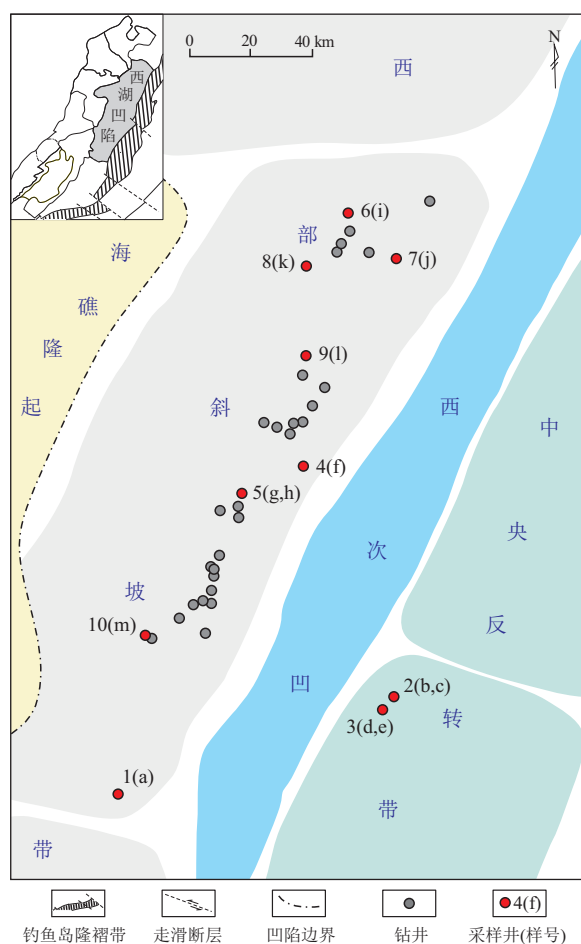


图1 东海西湖凹陷构造简图及研究井位示意

据文献[4-5,7,12-13]修改。

Fig.1 Structural diagram of Xihu Sag in East China Sea and schematic diagram of research wells

要的烃源岩层,主要岩性组合为砂岩、粉砂质泥岩、泥岩和煤层互层(图2)^[14-18]。平湖组由老至新可划分为SQ1(平下段: $T_4^0-T_3^4$)、SQ2(平中段: $T_3^4-T_3^2$)和SQ3(平上段: $T_3^2-T_3^0$)3个三级层序(图2),分别对应深洼高凸、浅洼低凸、淤平剥蚀3个地貌演化阶段,同时也对应着3套储盖组合^[19]。

2 主要沉积体系类型及特征

综合利用西湖凹陷平湖斜坡带钻井岩性组合、电性特征、岩心沉积构造等资料,对平湖斜坡带平湖组沉积相类型展开系统识别和分析,共识别出河控三角洲、潮汐改造三角洲及潮坪体系3类主要沉积组合,进一步识别出9种沉积亚相(表1),厘清了每种沉积体系的沉积构成及识别标志。

2.1 河控三角洲体系沉积特征

河控三角洲相在垂向上主要发育在层序SQ1,平面上主要分布在潮汐作用影响较弱的平湖斜坡带北部的来鹤亭区。

2.1.1 三角洲平原亚相

分流河道是三角洲平原的骨架部分,是河水搬运沉积物的主要运输通道,是三角洲体系中粒度最粗的沉积单元。岩心观察表明,岩性主要以含砾较高的中、粗砂岩为主,最大粒径0.8 cm,呈向上变细的正粒序,底部冲刷明显,可见冲刷面(图3a-e)。

粒度正态概率曲线表现为两段式,即跳跃次总体和悬浮次总体,两者占据的百分比分别为40%左右,同时两种组分的斜率分别为 45° 和 15° ,缺乏滚动组分,说明粒度分选性不太好(图4a);测井相以漏斗型及箱型组合为主,具有典型的河道特征(图4b)。

2.1.2 三角洲前缘亚相

三角洲前缘亚相发育在平原亚相外侧,微相包含水下分支河道、分支河道间、河口砂坝等(表1)。与平原河道相比,前缘分支河道粒度较细,常在中—细砂之间,见一些小型冲刷界面,发育一些暗色泥砾、小型撕裂构造等;层理以交错层理为主,反映了相对较强的水动力条件^[19](图3f-g)。分支河道间以黏土沉积为主,含有少量的粉砂、细砂,可见生物扰动构造(图3h),测井曲线总体特征为低幅平直或微齿状(图5)。河口坝整体粒度为中细砂岩,具有下细上粗的反韵律,反映砂体前积的特点。

2.2 潮汐改造为主的三角洲体系沉积特征

研究区内平湖组各个层序均发育潮汐改造的三角洲,其中以层序SQ2最为典型,平面主要发育在平湖斜坡带中部的宝云亭地区。整体以细

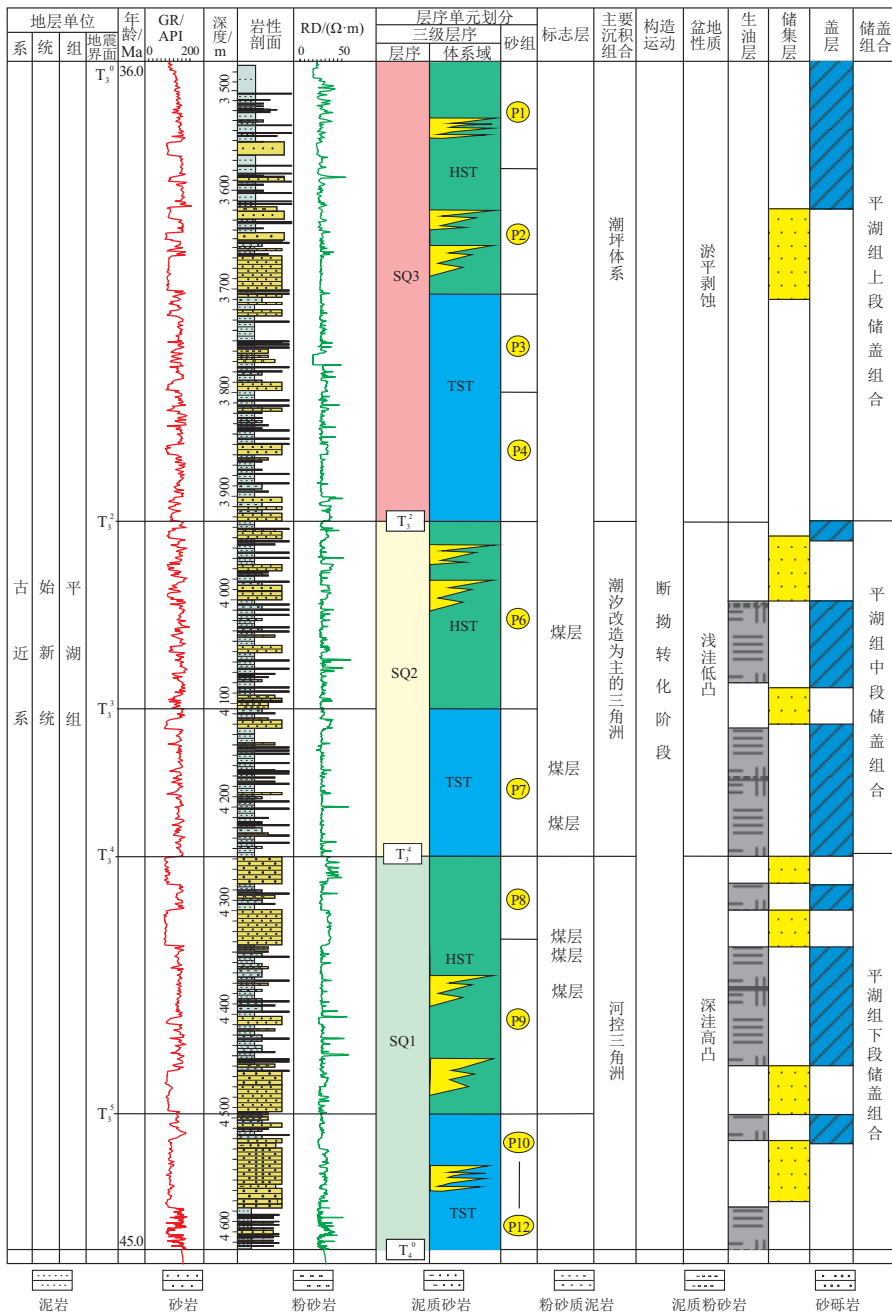


图 2 东海陆架盆地始新统平湖组层序—沉积综合分析柱状图

Fig.2 Sequence-stratigraphic column of Eocene Pinghu Formation, East China Sea Shelf Basin

表 1 东海西湖凹陷平湖斜坡带平湖组沉积体系类型划分
Table 1 Classification of sedimentary system types of Pinghu Formation in Pinghu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

沉积相	亚相	微相
河控三角洲	三角洲平原	水上分流河道、分流河道间
	三角洲前缘	水下分流河道、分流间湾、河口砂坝
	前三角洲	前三角洲泥
潮汐改造为主的三角洲	三角洲平原	水上分流河道、分流河道间、沼泽
	三角洲前缘	水下分流河道、河口砂坝、潮汐砂坝、砂脊、席状砂
	前三角洲	前三角洲泥
潮坪	潮上带	沼泽、泥坪
	潮间带	泥坪、混合坪、砂坪、潮汐砂脊、潮砂丘
	潮下带	潮汐水道、潮砂席、水下沙坝

注：表中内容据刘晓晨(2018)^[19]修改。

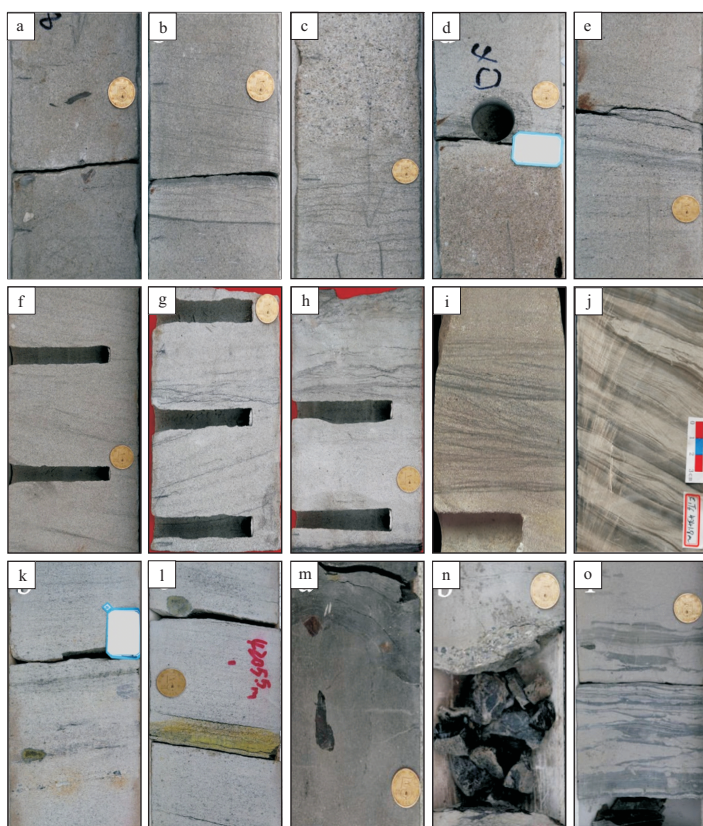


图3 东海西湖凹陷平湖组典型岩心照片

a-e 为 8 井, 4 104.86~4 114.21 m; a. 灰白色含砾中砂岩, 最大粒径 0.8 cm; b. 板状交错层理, 底见冲刷面; c. 灰白色砂砾岩, 低角度交错层理; d. 灰白色中砂岩, 冲刷面, 正粒序; e. 灰白色中砂岩, 楔状交错层理。f-h 为 7 井, 4 465.89~4 474.79 m; f. 灰白色中细砂岩, 板状交错层理; g. 灰白色中细砂岩, 小型交错层理; h. 灰色粉砂岩, 脉状层理。i. 5 井, 4 015.2 m, 灰色细—粉砂岩, 羽状交错层理; j. 5 井, 4 341.8 m, 粉砂岩, 透镜状层理; k. 4 井, 4 203.17 m, 灰白色细沙岩, 暗色矿物定向, 含泥砾; l. 4 井, 4 211.67 m, 灰白色细沙岩, 倒粒序。m-o 为 1 井, 3 235.5~3 240.7 m; m. 浅灰色泥质粉砂岩, 岩性截变面; n. 底砾岩及碳质泥岩; o. 浅灰色泥质粉砂岩, 撕裂状泥砾, 脉状层理

Fig.3 Typical core pictures of Pinghu Formation in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

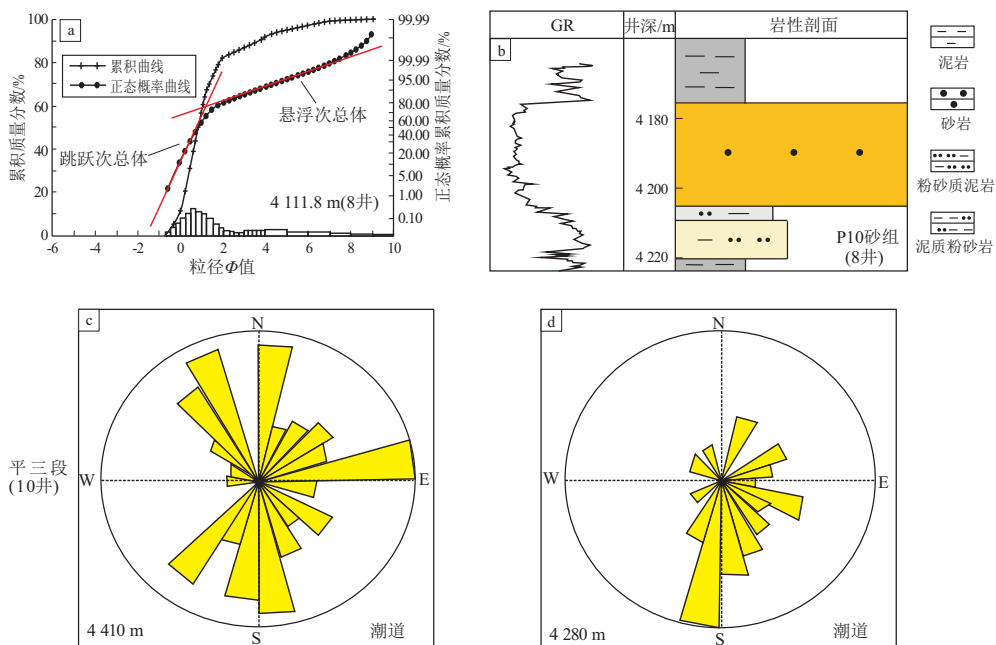


图4 东海西湖凹陷平湖组典型粒度曲线特征、岩—电组合特征和古流向特征

a. 8 井深度 4 111.8 m 粒度曲线; b. 8 井 P10 砂组岩性—测井曲线; c 和 d. 10 井平三段古流向

Fig.4 Typical grain size curve, characteristics of rock-electric assemblage and multidirectional paleo current of Pinghu Formation, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

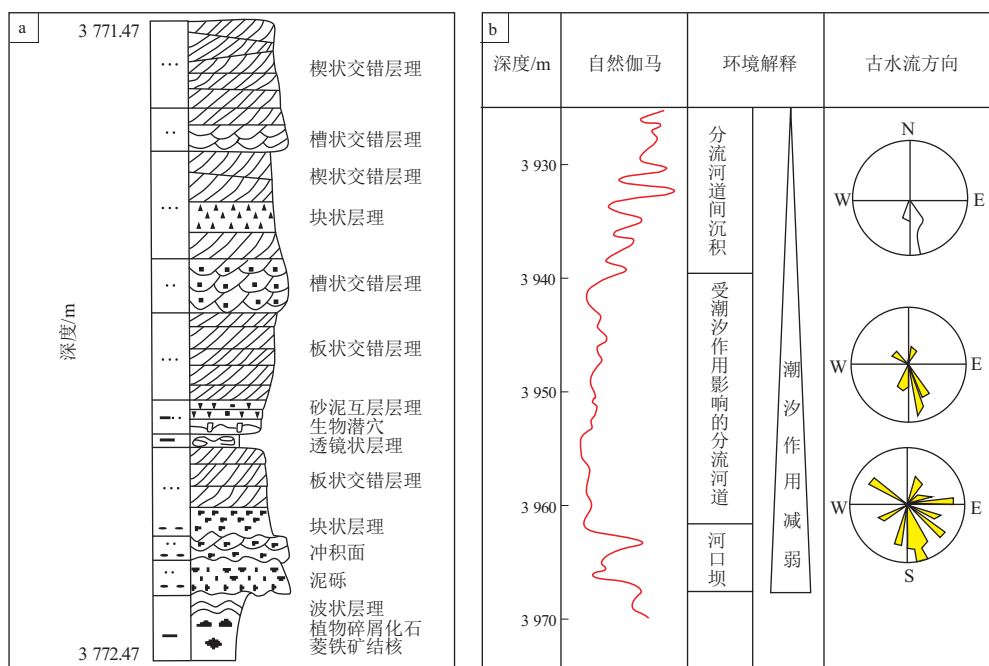


图 5 东海西湖凹陷受潮汐作用影响的水下分流河道(a)、测井曲线及古水流变化(b)

Fig.5 Distributary channels(a), logging curves and palaeocurrents(b) affected by tide of Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

砂岩为主,颗粒相对较细,发育透镜状层理、小型波状层理、双向羽状交错层理等沉积构造(图 3i-j),指示平湖组受潮汐水动力影响作用明显;含有植物碎屑化石和菱铁矿结核,古水流方向具有多向性(图 5)。

2.2.1 潮汐改造三角洲平原亚相

潮汐改造三角洲平原沉积特征与河控三角洲平原有很多相似之处,以正旋回沉积过程为主,底部多为砾岩或泥质砾岩,常见滞留沉积层;向上逐渐过渡为砂岩或细粒岩(泥岩)。

2.2.2 潮汐改造三角洲前缘亚相

受潮汐作用影响,三角洲前缘砂体易遭潮汐、波浪的改造作用,形成一系列改造后的河口砂坝、潮汐砂坝、砂脊、席状砂等。尤其是砂坝会被改造成放射状分布的线状砂脊,垂向表现为向上变粗的反粒序。砂脊上部为砂质沉积,脉状层理发育;砂脊下部砂泥频繁互层,生物扰动较为明显(图 3k-l)。

2.3 潮坪体系沉积特征

在地形平缓且潮流活动强烈的区域,常常发育潮坪沉积体系,根据潮水活动的范围可进一步划分出潮上带、潮间带和潮下带。研究区平湖组潮坪沉积体系分布广泛,其中垂向上以层序 SQ3 最为典型,而平面上主要发育在平湖斜坡带南部的平南地区。

(1)潮上带。以泥坪和沼泽沉积为主,主要的

岩相类型为块状泥岩、水平层理泥质粉砂岩等。岩心中常见植物碎片及黑色煤块。

(2)潮间带。潮间带是潮坪体系的主体,由岸向海依次划分出泥坪、混合坪以及砂坪。其中,高潮线以上为泥坪,为含水平层理和块状层理的细粒沉积泥岩相,反映了低能环境的沉积;低潮线以下为砂坪,以砂岩沉积为主,反映水动力条件强、潮流能量高。泥坪与砂坪之间为混合坪沉积,沉积物粒度介于两者之间,沉积构造极为丰富,发育典型的波状层理、透镜状层理、脉状层理、羽状交错层理。

(3)潮下带。潮下带主要由潮汐水道(潮道)、潮砂席、水下砂坝等微相组成,岩心上可见到多个由含泥砾为主的中砂岩到细砂岩正旋回组成的潮汐水道沉积,偶尔可见植物化石碎屑,发育板状交错层理;旋回顶部细粒沉积物中可见双黏土层砂岩相以及潮汐层理细粒岩相等(图 3m-o);可见多向水流现象(图 4c-d),反映较强的潮汐作用的存在。测井曲线上以正韵律为主,一般表现为顶底突变的箱形或齿化箱型。潮下带下部主要发育暗色泥岩及粉砂质泥岩,沉积构造以透镜状层理为主,其下伏为海湾相泥岩(图 3o)。

3 沉积体系平面分区差异分析

3.1 锆石物源的分区性

为了说明沉积物来源的差异性,本文利用数理

统计的方法对 10 个平湖组碎屑岩锆石样品开展了样品间亲缘性分析。主要手段是借助 VERMEESCH (2013) 提出的 K-S 效应值来描述相似度,将样品间亲缘关系降至二维并用欧几里得距离展示^[20-21]。其中,用实线连接亲缘关系最近的样品,虚线表示亲缘次之的样品。

分析表明,平湖斜坡带碎屑锆石样品经过降维,被明显的分为三群(图 6)。其一为左侧的 1 井 a 样品,表现出来来自渔山东低隆起的平南地区(斜坡南区)单物源特征;其二为右侧的 4 个样品(样品 i-l),表现出来来自海礁隆起的来鹤亭(斜坡北区)

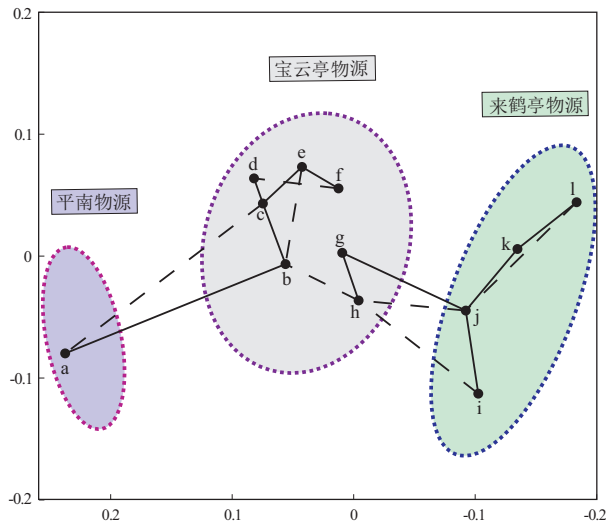


图 6 东海西湖凹陷平湖斜坡带碎屑锆石年龄多维尺度分析

a-l 为样品编号,位置见图 1;实线表示亲缘关系最近的样品,虚线表示亲缘关系次之的样品

Fig.6 Multidimensional scale analysis of detrital zircon ages, Pinghu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

物源特征;三是中间交汇区,表现为海礁隆起和渔山东低隆起共同“供源”的宝云亭(斜坡中部)物源特征(图 6)。

此外,选取了不同位置的三口单井的 12 个样品,分别开展了锆石形貌学统计分析(锆石表面撞击程度、锆石磨圆程度),结果如图 7 所示。来鹤亭物源中岩浆锆石数量大于变质锆石,锆石磨圆较弱;宝云亭物源中岩浆锆石和变质锆石数量近于一致,锆石磨圆弱—较强;平南物源中变质锆石偏多,锆石磨圆程度较强。

3.2 重矿物、黏土矿物、碎屑矿物组合的分区性

碎屑岩重矿物组合、黏土矿物、碎屑矿物组成和成分成熟度等指标受风化程度、搬运距离、沉积过程、成岩作用等多种地质过程影响,能够在一定程度上反映源区特征^[22-26]。对斜坡带不同区的重点单井重矿物组合特征开展分析,来鹤亭区(斜坡北区)以石榴子石为主,占比可到 50%,其余组合为锆石+磁铁矿+白钛矿;宝云亭区(斜坡中部)以赤褐铁矿为主要重矿物,占比 50%以上,其余组合为电气石+锆石+白钛矿组合为主(图 8a)。与重矿物组合相似,不同区段内黏土矿物类型与相对含量也存在明显差别(图 8a),来鹤亭区表现为较高的高岭石含量,宝云亭区表现出较高的伊蒙混层含量,平南区则表现出较高的伊利石含量。对于碎屑矿物组成和成分成熟度来说,平湖斜坡带砂岩成熟度总体较高,石英含量在 75%以上(图 8a),说明经历了较长距离搬运。比较而言,北段来鹤亭区成分成熟度最高,南段平南区成分成熟度次之,中段宝云亭区砂岩的成分成熟度最低。因此,重矿物组

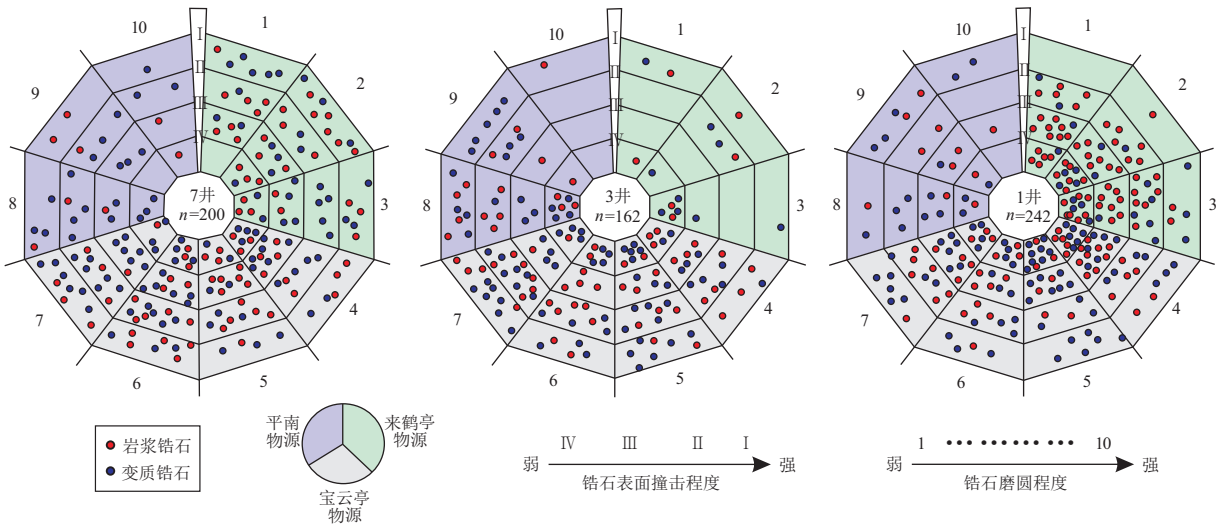


图 7 东海西湖凹陷平湖斜坡带不同来源碎屑锆石形貌统计对比蜘蛛网图

Fig.7 Cobweb map of detrital zircons from different sources, Pinghu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

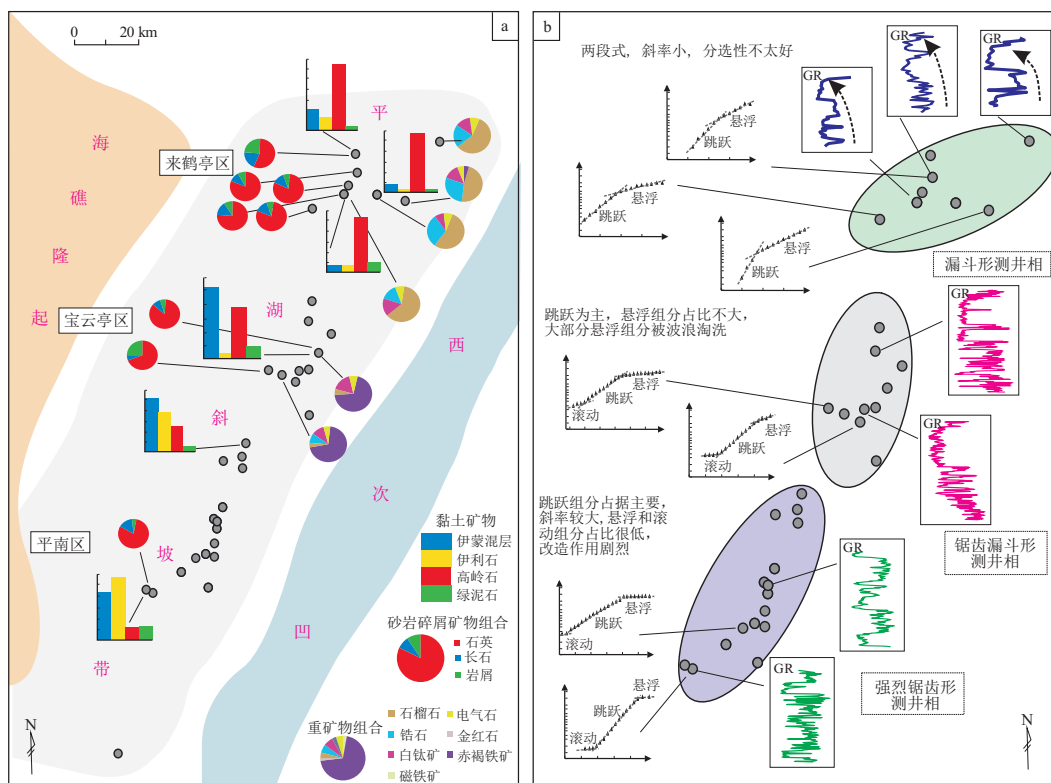


图 8 东海西湖凹陷平湖斜坡带平湖组上段 (SQ3) 重矿物组合、黏土矿物 (a) 和砂岩碎屑矿物含量综合分区 (b)
 Fig.8 Distribution of heavy mineral assemblage, clay mineral (a) and detrital mineral contents (b) of upper section of Pinghu Formation (SQ3) in Pinghu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

合、黏土矿物、矿物组成和成分成熟度都表明,斜坡带发育 3 个相对独立的沉积体系分区。

3.3 粒度差异特征

通过粒度概率累积曲线可直观地比较沉积物之间的差别和辨别沉积环境^[27-28],因此本文结合沉积构造,使用粒度分析对沉积环境作进一步分析。从粒度概率曲线分区图(图 8b)可以看出,来鹤亭地区沉积物粒度曲线以跳跃和悬浮两段式为主,同时两种组分的百分含量接近、曲线斜率接近,说明该地区沉积过程中的分选性并不好;宝云亭地区的粒度组分以跳跃组分为主,悬浮组分占比不大,同时滚动组分开始出现,表明砂体受到海水的淘洗且能量较弱;平南区沉积物粒度概率曲线显示以跳跃组分为主,且斜率较大,悬浮及滚动组分占比很低,表明该地区潮汐改造作用剧烈。总体上,从北部至南部,粒度概率曲线指示砂体受到改造的能量逐渐加强,在南部地区作用剧烈。该粒度分布规律与沉积相展布规律有很好的对应关系。

3.4 砂岩分布特征的分区性

砂岩平面分布图也能够反映沉积物源的分区特征。由图 9 可以看到,砂岩在平面上具有明显的分区性,从北往南,存在着 3 个砂岩厚度高值区,对应着 3 个物源方向。

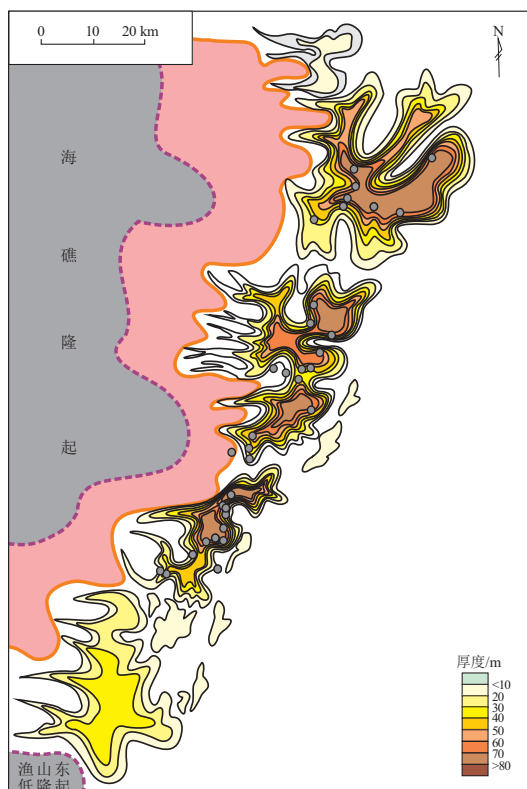


图 9 东海西湖凹陷平湖斜坡带平湖组 (SQ3-HST) 砂岩厚度分布
 Fig.9 Sandstone thickness of Pinghu Formation (SQ3-HST), Pinghu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

4 沉积体系分区模型建立

根据研究区平湖组岩心组合差异、重矿物组合差异、黏土矿物特征、碎屑矿物组分等特征,认为平湖斜坡带平湖组沉积体系具有明显的分区性,自北向南分为 3 个沉积区:北部来鹤亭三角洲沉积区、中部宝云亭潮汐改造三角洲沉积区和南部平南潮坪沉积区,从而建立了平湖组沉积体系分区模型(图 10)。

北部来鹤亭地区发育河控为主的三角洲沉积体系。由于海礁隆起物源供给充足,使得三角洲砂体垂向厚度大、平面分布广;以中粗砂岩为主,常见小型冲刷面、交错层理,测井曲线以漏斗(倒圣诞树)形、箱形为主(图 8b),粒度组合表现为下细上粗的倒粒序特征。

中部宝云亭地区发育受潮汐改造的三角洲沉积体系。由于砂体在一定程度上遭受了潮流影响,使得原有的三角洲砂体规模变小、朵体分散,同时在前缘带外侧发育一系列潮汐改造成因的滩坝砂体。

在平南地区,三角洲砂体规模小、延距短、孤立分布,整个地区实际上以潮坪体系为主。碎屑颗粒以粉细砂岩为主,分选好,磨圆好,测井曲线组合以

锯齿形和指形为主(图 8b)。

整体而言,平湖斜坡带平湖组沉积物的这种分区特征,不仅是碎屑物质“源—汇”体系空间差异性的反映,也是水动力条件空间差异性的反映,实际上是河流水动力与潮汐水动力此消彼长、相互博弈的结果展示。

5 结论

(1) 西湖凹陷平湖斜坡带发育有河控三角洲、受潮汐影响的三角洲及潮坪 3 种主要的沉积体系类型。河控三角洲以 SQ3 层序最为发育、含砾较高的中、粗砂岩为典型特征,呈向上变细的正粒序,底部冲刷明显。潮汐改造三角洲相以 SQ2 层序最为典型,砂岩颗粒相对较细,单砂体厚度较薄,小型交错层理、羽状交错层理发育。潮坪体系主要发育在受潮流作用影响明显且地形平缓的河海交互作用地区,潮汐砂脊、潮砂丘、潮道易于识别。

(2) 碎屑锆石形貌学的多维度统计分析、重矿物、黏土矿物、碎屑矿物组合特征、粒度概率曲线和测井相分析以及砂岩厚度平面分布等特征均显示,斜坡带沉积体系在平面上具有明显的分区特征。

(3) 平湖斜坡带平湖组沉积体系从北向南潮汐改造作用逐渐加强,影响着河控三角洲沉积体系

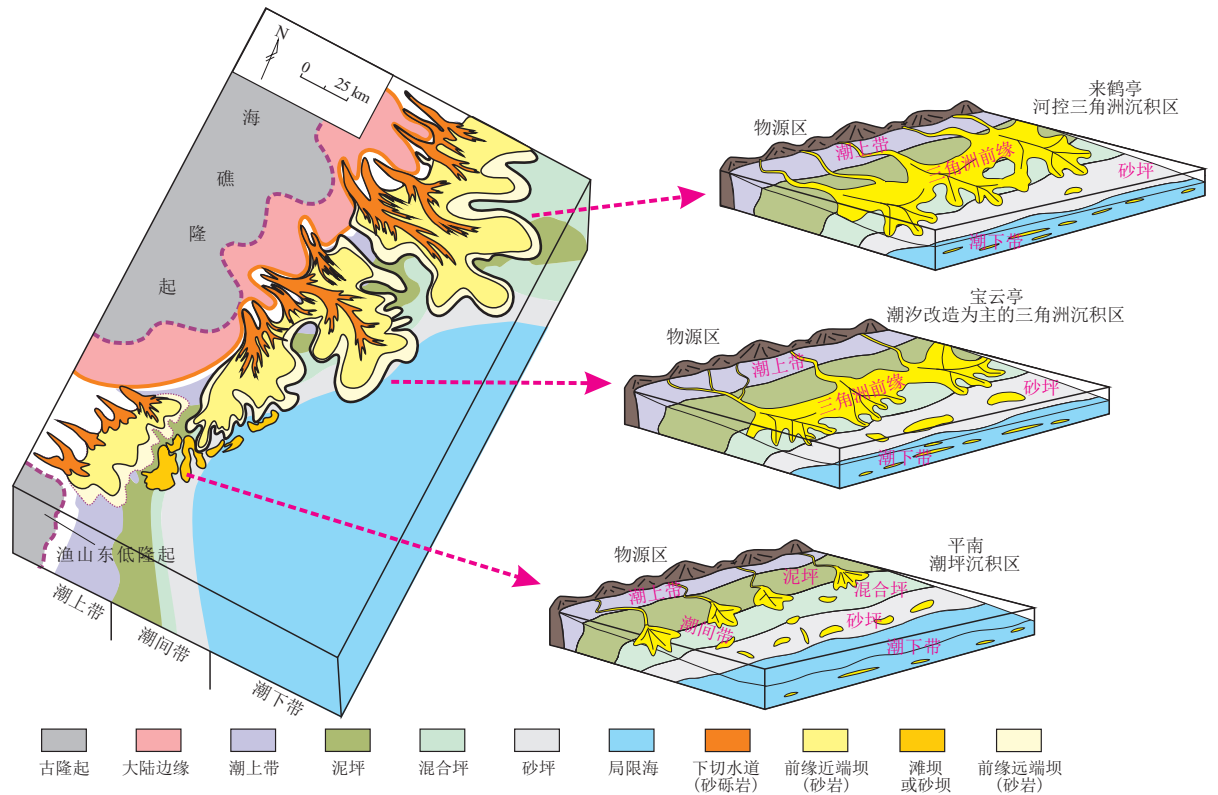


图 10 东海西湖凹陷平湖斜坡带平湖组沉积体系三分模型

Fig.10 Zonation of depositional system of Pinghu Formation, Pinghu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

逐渐变为潮坪沉积体系,即北段来鹤亭区主要发育河控三角洲沉积体系,中段宝云亭区以潮汐改造三角洲体系为主,南段平南区以潮坪沉积体系为主。

参考文献:

- [1] 彭伟欣,刘金水.东海西湖凹陷保俶斜坡平湖组层序地层分析[J].上海地质,1995(4):15-24.
PENG Weixin,LIU Jinshui.Sequence stratigraphic analysis of Pinghu Formation in Baoshu slope of Xihu Sag in the East China Sea[J].Shanghai Geology,1995(4):15-24.
- [2] 蒋一鸣,邵龙义,李帅,等.西湖凹陷平湖构造带平湖组沉积体系及层序地层研究[J].现代地质,2020,34(1):141-153.
JIANG Yiming,SHAO Longyi,LI Shuai,et al.Deposition system and stratigraphy of Pinghu Formation in Pinghu tectonic belt,Xihu Sag[J].Geoscience,2020,34(1):141-153.
- [3] 张志垚,张昌民,侯国伟,等.东海盆地某凹陷 P 井区平湖组沉积微相及沉积模式[J].地质与资源,2020,29(2):142-151.
ZHANG Zhiyao,ZHANG Changmin,HOU Guowei,et al.Microfacies distribution and sedimentary model of Pinghu Formation in P well area,East China Sea Basin[J].Geology and Resources,2020,29(2):142-151.
- [4] 王泽宇,徐清海,侯国伟,等.东海陆架盆地西湖凹陷 W 井区平湖组潮汐沉积模式[J].海相油气地质,2021,26(2):159-169.
WANG Zeyu,XU Qinghai,HOU Guowei,et al.Tidal depositional model of Pinghu Formation in W well block of Xihu Sag,East China Sea Shelf Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2021,26(2):159-169.
- [5] 刘成鑫.东海平湖油气田平湖组沉积相研究[J].海洋石油,2010,30(2):9-13.
LIU Chengxin.Study on sedimentary facies for Pinghu Formation in Pinghu oil and gas field in East China Sea Basin[J].Offshore Oil,2010,30(2):9-13.
- [6] 杨彩虹,高兆红,蒋一鸣,等.西湖凹陷平湖斜坡带始新统平湖组碎屑沉积体系再认识[J].石油天然气学报,2013,35(9):11-14.
YANG Caihong,GAO Zhaohong,JIANG Yiming,et al.Reunderstanding of clastic rock sedimentary facies of Eocene Pinghu Formation in Pinghu Slope of Xihu Sag[J].Journal of Oil and Gas Technology,2013,35(9):11-14.
- [7] XIE Guoliang,SHEN Yulin,LIU Shugen.Trace and rare earth element (REE) characteristics of mudstones from Eocene Pinghu Formation and Oligocene Huagang Formation in Xihu Sag,East China Sea Basin; implications for provenance, depositional conditions and paleoclimate[J].Marine and Petroleum Geology,2018,92:20-36.
- [8] SUO Yanhui,LI Sanzhong,ZHAO Shujuan,et al.Continental margin basins in East Asia:tectonic implications of the Mesozoic East China Sea pull-apart basins[J].Geological Journal,2015,50(2):139-156.
- [9] WANG Qian,LI Sanzhong,GUO Lingli,et al.Analogue modeling and mechanism of tectonic inversion of the Xihu Sag,East China Sea Shelf Basin[J].Journal of Asian Earth Sciences,2017,139:129-141.
- [10] YANG F L,XU X,ZHAO W F,et al.Petroleum accumulations and inversion structures in the Xihu Depression,East China Sea Basin[J].Journal of Petroleum Geology,2011,34(4):429-440.
- [11] 杜学斌,陆永潮,曹强,等.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[J].地质科技通报,2020,39(3):10-19.
DU Xuebin,LU Yongchao,CAO Qiang,et al.Grading evaluation of deep reservoir in Xihu Depression,East China Sea Basin[J].Bulletin of Geological Science and Technology,2020,39(3):10-19.
- [12] 徐陈杰,叶加仁,刘金水,等.东海西湖凹陷平湖组 III 型干酪根暗色泥岩生排烃模拟[J].石油与天然气地质,2020,41(2):359-366.
XU Chenjie,YE Jiaren,LIU Jinshui,et al.Simulation of hydrocarbon generation and expulsion for the dark mudstone with type-III kerogen in the Pinghu Formation of Xihu Sag in East China Sea Shelf Basin[J].Oil & Gas Geology,2020,41(2):359-366.
- [13] 徐陈杰,叶加仁,刘金水,等.东海西湖凹陷天然气成藏时期的关键证据:气烃包裹体[J].天然气工业,2021,41(11):64-73.
XU Chenjie,YE Jiaren,LIU Jinshui,et al.Key evidence of gas accumulation period in Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin: gas hydrocarbon inclusion[J].Natural Gas Industry,2021,41(11):64-73.
- [14] 魏恒飞,陈践发,郭旺,等.西湖凹陷平湖组层序地层划分和聚煤特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(3):669-679.
WEI Hengfei,CHEN Jianfa,GUO Wang,et al.Concentrating coal characteristics and sequences stratigraphic division of Pinghu Formation in Xihu Depression[J].Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2013,43(3):669-679.
- [15] 周瑞琦,傅恒,徐国盛,等.东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花港组沉积层序[J].沉积学报,2018,36(1):132-141.
ZHOU Ruiqi,FU Heng,XU Guosheng,et al.Eocene Pinghu Formation-Oligocene Huagang Formation sequence stratigraphy and depositional model of Xihu Sag in East China Sea Basin[J].Acta Sedimentologica Sinica,2018,36(1):132-141.
- [16] ZHU Yangming,LI Ying,ZHOU Jie,et al.Geochemical characteristics of Tertiary coal-bearing source rocks in Xihu Depression,East China Sea Basin[J].Marine and Petroleum Geology,2012,35(1):154-165.
- [17] ABBAS A,ZHU Hongtao,ZENG Zhiwei,et al.Sedimentary facies analysis using sequence stratigraphy and seismic sedimentology in the Paleogene Pinghu Formation,Xihu Depression,East China Sea Shelf Basin[J].Marine and Petroleum Geology,2018,93:287-297.
- [18] HUBERT J F.A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstone[J].Journal of Sedimentary Research,1962,32(3):440-450.
- [19] 刘晓晨.西湖凹陷平湖斜坡带平湖组砂体精细刻画及时空演化研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2018.
LIU Xiaochen.Fine characterization and evolution of sand body of Pinghu Formation in Pinghu Slope,Xihu Sag[D].Wuhan:China University of Geosciences(Wuhan),2018.

- [20] VERMEESCH P. Multi-sample comparison of detrital age distributions [J]. *Chemical Geology*, 2013, 341: 140-146.
- [21] 赵珂, 杜学斌, 贾冀新, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带的物源分析: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学及重矿物的证据 [J]. *地质科技通报*, 2020, 39(3): 68-76.
ZHAO Ke, DU Xuebin, JIA Jixin, et al. Provenance analysis of the Pinghu slope belt in Xihu Depression: evidence from detrital zircon U-Pb chronology and heavy minerals [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 68-76.
- [22] 王行信, 韩守华. 中国含油气盆地砂泥岩黏土矿物的组合类型 [J]. *石油勘探与开发*, 2002, 29(4): 1-3.
WANG Xingxin, HAN Shouhua. The combination pattern of clay minerals of sandstone and mud rock in China's petroliferous basins [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2002, 29(4): 1-3.
- [23] 张哨楠, 丁晓琪, 万友利, 等. 致密碎屑岩中粘土矿物的形成机理与分布规律 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 34(3): 174-182.
ZHANG Shaonan, DING Xiaoqi, WAN Youli, et al. Formation mechanism and distribution of clay minerals of deeply tight siliciclastic reservoirs [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2012, 34(3): 174-182.
- [24] 黄苏卫, 张传运, 刘峰. 西湖凹陷 Y 构造花港组黏土矿物特征及对储层物性的影响 [J]. *海洋石油*, 2018, 38(2): 13-20.
HUANG Suwei, ZHANG Chuanyun, LIU Feng. Clay mineral characteristics of Huagang Formation and impact on the physical property of sandstone reservoir in structure Y of Xihu Sag [J]. *Offshore Oil*, 2018, 38(2): 13-20.
- [25] 吴嘉鹏, 万丽芬, 张兰, 等. 西湖凹陷平湖组岩相类型及沉积相分析 [J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(1): 27-34.
WU Jiapeng, WAN Lifen, ZHANG Lan, et al. Lithofacies types and sedimentary facies of Pinghu Formation in Xihu Depression [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(1): 27-34.
- [26] 赵雷昭, 刘腾腾, 庞江, 等. 砂岩储层中自生高岭石的成因与演化 [J]. *辽宁化工*, 2018, 47(2): 116-118.
ZHAO Leizhao, LIU Tengting, PANG Jiang, et al. Formation causes and evolution of authigenic kaolinite in sandstone reservoir [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2018, 47(2): 116-118.
- [27] 杨飞, 邹姐姐, 史基安, 等. 柴达木盆地北缘马仙地区古近系碎屑岩沉积环境粒度概率累积曲线特征 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(4): 690-700.
YANG Fei, ZOU Niuniu, SHI Ji'an, et al. Probability cumulative grain size curves in the Paleogene clastic sediments and environmental significance in Maxian region of northern Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(4): 690-700.
- [28] 张婕茹, 杨宏飞, 韩建斌, 等. 粒度概率曲线特征及岩相组合分析在沉积环境研究中的应用 [J]. *天然气技术与经济*, 2018, 12(4): 20-23.
ZHANG Jieru, YANG Hongfei, HAN Jianbin, et al. Application of probability cumulative grain size curves and lithofacies association to sedimentology [J]. *Natural Gas Technology and Economy*, 2018, 12(4): 20-23.

(编辑 徐文明)

(上接第 779 页)

- [12] 蒋一鸣. 西湖凹陷平湖斜坡带平湖组碎屑锆石 U-Pb 年龄及米兰科维奇旋回: 对源—汇系统及沉积演化的约束 [J]. *地质科技情报*, 2019, 38(6): 133-140.
JIANG Yiming. Detrital zircon U-Pb age and milankovitch cycles of Pinghu Formation in the Pinghu Slope of Xihu Depression: Constraints on source-sink system and sedimentary evolution [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(6): 133-140.
- [13] 刘金水, 陆永潮, 秦兰芝. 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 [J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 303-310.
LIU Jinshui, LU Yongchao, QIN Lanzhi. Application of source to sink system analysis in large reservoir research: a case study of Huagang Formation, Central Inversion Belt, Xihu Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(3): 303-310.
- [14] 赵珂, 杜学斌, 贾冀新, 等. 西湖凹陷平湖斜坡带的物源分析: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学及重矿物的证据 [J]. *地质科技通报*, 2020, 39(3): 68-76.
ZHAO Ke, DU Xuebin, JIA Jixin, et al. Provenance analysis of the Pinghu slope belt in Xihu Depression: Evidence from detrital zircon U-Pb chronology and heavy minerals [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(3): 68-76.
- [15] 何昕皓, 李晓龙, 赵洪, 等. 东海西湖凹陷碎屑岩物源聚类分析 [J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(6): 11-19.
HE Xinkai, LI Xiaolong, ZHAO Hong, et al. Clustering analysis of clastic rocks for provenance in Xihu depression [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(6): 11-19.
- [16] WANG Wenguang, LIN Chengyan, ZHANG Xianguo, et al. Provenance, clastic composition and their impact on diagenesis: A case study of the Oligocene sandstone in the Xihu sag, East China Sea Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 126: 104890.
- [17] ZHANG Jingyu, PAS D, KRIJGSMAN W, et al. Astronomical forcing of the Paleogene coal-bearing hydrocarbon source rocks of the East China Sea Shelf Basin [J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 406: 105715.
- [18] 吴正韩. 中国东海陆架盆地西湖凹陷生物地层初探 [J]. *地层学杂志*, 2014, 38(4): 470-478.
WU Zhenghan. Cenozoic biostratigraphy of the Xihu Sag, north-east continental shelf basin of the east China sea [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2014, 38(4): 470-478.

(编辑 徐文明)