

引用格式:张尚虎,李昆,庄建建,等.断陷期源汇系统及勘探方向:以东海陆架盆地西湖凹陷平北地区为例[J].油气藏评价与开发,2025,15(5):722-733.

ZHANG Shanghu, LI Kun, ZHUANG Jianjian, et al. Source-sink system and exploration directions during rift period: A case study of Pingbei area in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(5): 722-733.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.05.002

断陷期源汇系统及勘探方向 ——以东海陆架盆地西湖凹陷平北地区为例

张尚虎,李昆,庄建建,朱宝衡,郑欣,杨超

(中国石化上海海洋油气分公司,上海 200120)

摘要:针对东海陆架盆地西湖凹陷保俶斜坡带平北地区宝石组—平湖组下段(以下简称平下段)沉积微相类型及砂体展布特征不明确的问题,该研究利用古地貌、生物遗迹、微量元素、井-震结合手段及现代沉积类比等多种方法开展了沉积微相类型、时空演化及圈闭模式分析。研究表明:平北地区宝石组—平下段处于强烈断陷期,古地貌呈深凹高隆构造格局,对沉积体系具有较强的控制作用。宝石组物源来自北部虎皮礁隆起的岩浆岩,平下段西侧海礁隆起物源供给逐步增强,形成双物源格局。微量元素分析认为:平湖组、宝石组沉积时期为干热古气候,整体属于海陆过渡、贫氧沉积环境。宝石组—平下段发育4个三级层序,为逐渐水进过程。综合岩心相、测井相及生物遗迹相分析,宝石组—平下段发育潮汐三角洲、潮坪相、海相3种沉积相及水下分支河道、席状砂、河口坝、潮汐水道、砂坪、混合坪、泥坪、支流间湾、海湾泥9种沉积微相。广泛发育的潮坪相为主要的沉积相类型,斜坡近凹带发育树状涨潮及退潮三角洲、潮道、潮汐砂坝沉积,明确了宝石组—平下段5种控砂模式,包括壑-垒型、隆起-断坡型、多断坡型、转换带型及挠曲坡折型控砂模式,总结了5种圈闭类型,包括壑-垒型构造圈闭、隆起-断坡型构造圈闭、多断坡型构造-岩性复合圈闭、转换带型构造-岩性复合圈闭、挠曲坡折型岩性圈闭。斜坡内带的平湖组、宝石组发育海湾环境下多类型规模砂体,受挠曲坡折控制易形成岩性集中尖灭;砂体经潮流和波浪淘洗为纯净细砂岩,抗压实能力较强,易形成“甜点”储层,整体成藏条件优越,为下步勘探指明方向。

关键词:西湖凹陷;平北地区;断陷期;源汇系统;勘探方向

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Source-sink system and exploration directions during rift period: A case study of Pingbei area in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

ZHANG Shanghu, LI Kun, ZHUANG Jianjian, ZHU Baoheng, ZHENG Xin, YANG Chao

(Sinopec Shanghai Offshore Oil & Gas Company, Shanghai 200120, China)

Abstract: To address the unclear sedimentary microfacies types and sandbody distribution characteristics in the Baoshi Formation-lower member of Pinghu Formation (hereinafter referred to as lower Pinghu member) in the Pingbei area of the Baochu slope belt, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin, the study employed a comprehensive approach combining paleogeomorphology, biological traces, trace element analysis, well-seismic integration, and modern depositional analogs to analyze the sedimentary microfacies types, spatiotemporal evolution, and trap models. The research indicated that the Baoshi Formation-lower Pinghu member in the Pingbei area was in the intense rift period, with a paleo-geomorphologic pattern characterized by deep depressions and high uplifts, exerting a strong control on the sedimentary system. The Baoshi Formation was sourced from magmatic rocks in the northern Hupijiao uplift, while sediment supply from the Haijiao uplift in the western lower Pinghu member gradually increased, forming a dual-provenance system. Trace element analysis indicated that the deposition of the Pinghu and Baoshi Formations occurred under an arid and hot paleoclimate in a generally suboxic, marine-continental transitional environment. Four third-order sequences were developed in the Baoshi Formation-lower Pinghu member, representing a progressive marine transgression. Integrated analysis of core facies, logging facies, biofacies, and ichnofacies revealed that the Baoshi Formation-lower Pinghu member developed three sedimentary facies (tidal delta, tidal flat facies, and marine facies) and nine microfacies (subaqueous distributary

收稿日期:2024-11-20。

第一作者简介:张尚虎(1978—),男,硕士,高级工程师,从事海上油气地质研究。地址:上海市浦东新区锦康路50弄2号楼,邮政编码:200120。

E-mail: zhangshanghu.shhy@sinopec.com

通信作者简介:庄建建(1984—),男,硕士,高级工程师,从事海上油气勘探研究。地址:上海市浦东新区锦康路50弄2号楼,邮政编码:200120。

E-mail: zhuangjianjian.shhy@sinopec.com

基金项目:中国石化先导项目“海域重点增储与突破目标勘探潜力及评价”(YTBXD-CGKT-2024-002-011-SH)。

channels, sheet sands, mouth bars, tidal channels, sand flats, mixed flats, mud flats, interdistributary bays, and bay mud). The extensively developed tidal flat facies was the dominant sedimentary facies type. Dendritic flood and ebb tidal deltas, tidal channels, and tidal sand bars developed near the slope depression belt. Five sand-controlling models were identified in the Baoshi Formation-lower Pinghu member: graben-horst type, uplift-fault slope type, multiple fault slope type, transfer zone type, and flexural slope break type. Five trap types were summarized: graben-horst structural traps, uplift-fault slope structural traps, multiple fault slope structural-lithological composite traps, transfer zone structural-lithological composite traps, and flexural slope break lithological traps. Within the inner slope zone, the Pinghu and Baoshi Formations developed large-scale sand bodies under bay environments, which were prone to lithologic pinch-out controlled by flexural slope breaks. Tidal and wave reworking produced clean fine sandstones with strong compaction resistance, forming favorable "sweet spot" reservoirs. Overall, the inner slope zone possesses excellent accumulation conditions. The research findings provide clear directions for future exploration.

Keywords: Xihu Sag; Pingbei area; rift period; source-sink system; exploration direction

西湖凹陷是东海陆架盆地油气资源最丰富的凹陷,始新统宝石组及平湖组是斜坡带主力勘探层系,为半封闭海湾沉积环境。前期在平湖组发现了多个油气藏,宝石组也有一定发现,证实平北地区始新统油气成藏条件良好^[1-2]。由于宝石组及平湖组下段(以下简称平下段)埋深较大,前期对其研究较少,随着勘探逐渐走向深层,钻井揭示深层高压溶蚀“甜点”具备较好的产能,因此释放了深层宝石组—平下段扩储潜力。海湾环境下的沉积体系研究对油气勘探具有重要意义,前人在其它地区已开展了深入研究。韩银学等^[3]基于钻井、岩心、地震等资料,分析了白云凹陷恩平组半封闭海湾环境下不同沉积时期的古地貌与物源特征,重建了物源体系与恩平组沉积格局的关系,为该区的油气勘探潜力的认识提供了重要依据。朱淑玥等^[4]通过野外露头 and 钻井资料,对鄂尔多斯盆地西缘晚石炭世羊虎沟组地层进行沉积学和地球化学分析,划分不同的物源体系,并进一步结合沉积体系分析,揭示了海陆过渡相河控—潮控三角洲沉积体系的古地理格局,从而为鄂尔多斯盆地西缘油气勘探提供指导。

目前,平北地区进入构造-岩性复合油气藏勘探阶段,对沉积相及砂体展布的精度要求较高,但目前对于研究区海湾环境下的沉积微相类型、时空演化及控砂机制等认识并不十分明确。对于平湖组的沉积相类型认识较统一,为三角洲—潮坪沉积体系^[5-8],但对沉积微相的类型及展布具有一定的争议。部分学者认为发育潮控三角洲沉积,微相类型主要为潮汐砂坝,三角洲等发育较少^[5];也有部分学者认为三角洲为主要沉积相类型,三角洲前端被潮汐及波浪改造^[9-10]。对沉积微相类型及控砂机制认识的不足,直接影响了该地区圈闭类型及规模砂体发育区的落实,制约了深层油气勘探。为了解决以上问题,基于“源-汇”研究思路,利用古地貌、生物遗迹、微量元素、井-震结合及现代沉积类比多种方法开展了平北地区的沉积相类型及时空演化研究,明确了平北地区发育海湾环境下多种沉积微相类型,落实了多种圈闭类型,为

研究区下步勘探工作指出了有利方向,具有十分重要的生产实践意义。

1 构造背景及层序特征

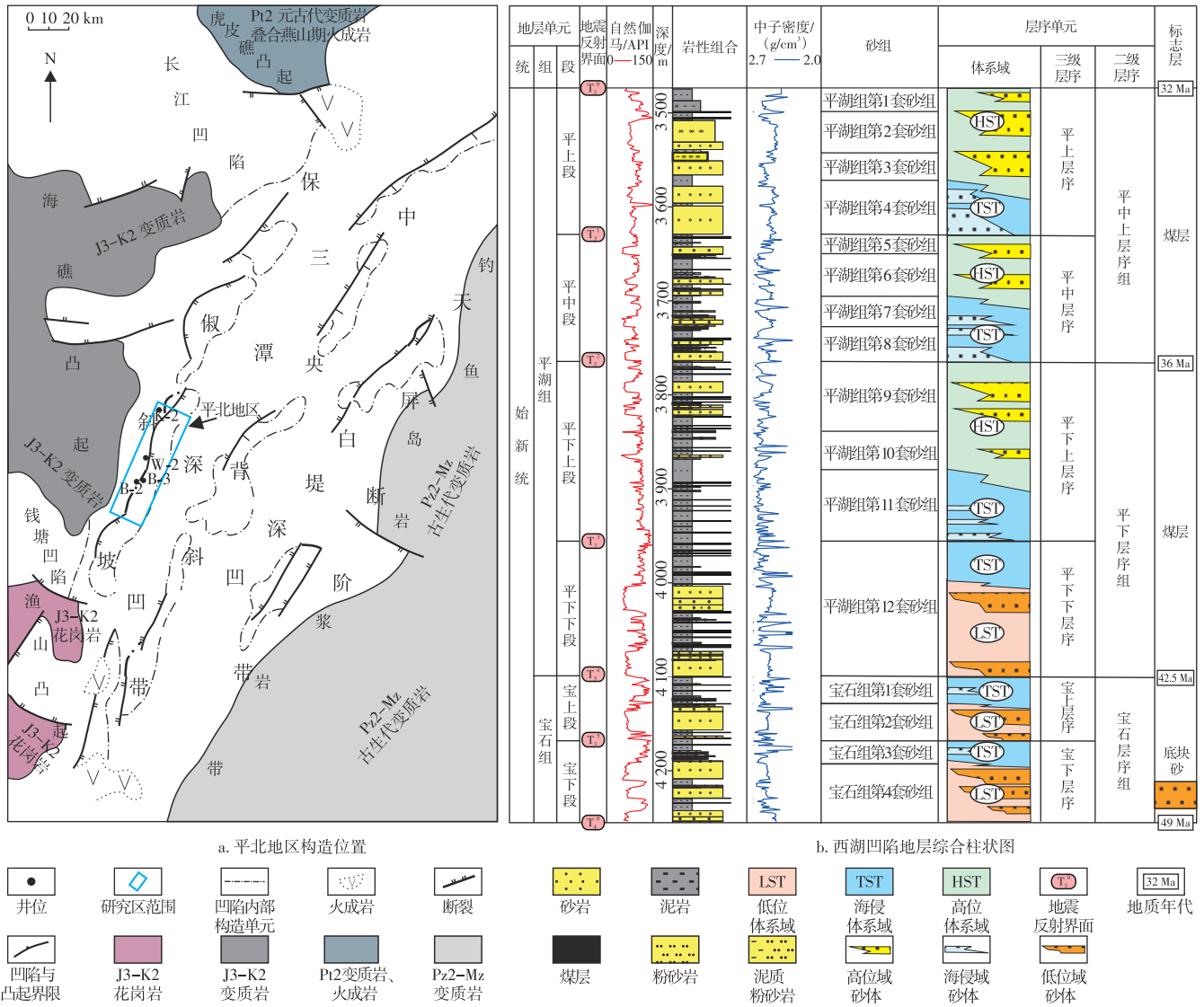
1.1 平北地区结构构造特征

东海陆架盆地是在前震旦纪基底上发育起来的中新生代弧后陆缘断陷-拗陷盆地,位于欧亚板块的东南缘。西湖凹陷是东海陆架盆地中规模较大的中生代含油气凹陷^[11-14],长约430 km,宽约120 km,总面积约 5.9×10^4 km²。西湖凹陷自西向东分为保俶斜坡、三潭深凹、中央背斜带、白堤深凹、天屏断阶5个次级构造单元(图1)。从构造演化看,西湖凹陷经历了断陷期、断拗转换期、拗陷期、反转期及沉降期五大阶段^[15-17]。勘探主要层系为始新统宝石组及平湖组。

平北地区位于保俶斜坡平湖构造带北段,勘探程度较高。目前处于勘探开发一体化阶段,已发现油气田4个,建成生产平台5座。平北地区经历多期构造演化,形成隆洼相间的构造格局,呈现出明显的分区、分段和继承性特征。断陷初期(古新世),区域上处于强烈伸展状态,北西向基底隐伏断裂活动强烈,具有明显的横向剪切作用并分割次级构造单元,使南北呈现出典型的“分段式”特征,控制南北分段沉积的差异性(图2a)。断陷早—中期(始新世早—中期),区域上处于弱伸展状态,北东向同沉积断裂继续活动,断裂规模较大、活动时间长,对沉积充填和东西平面次级构造单元边界具有显著控制作用(图2b)。

1.2 平北地区层序地层特征

始新统自下而上可划分为1个二级构造层序及6个三级层序,宝石组—平下段处于裂陷早期,对应二级层序的低位—水进期,为1个海平面逐渐上升的过程,可划分为4个三级层序,自下而上分别为宝下层序(SQ1)、宝上层序(SQ2)、平下下层序(SQ3)及平下上层序(SQ4)。主



注:J3-K2为晚侏罗世至晚白垩世,Pt2为中元古代,Pz2-Mz为晚古生代至中生代;平上段为平湖组上段,平中段为平湖组中段,平下段为平湖组下段上部,平下下段为平湖组下段下部,宝上段为宝石组上段,宝下段为宝石组下段。

图1 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区构造区划

Fig. 1 Structural division of Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

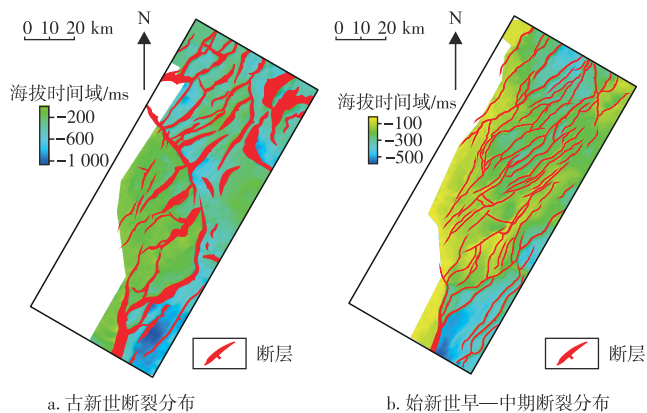


图2 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区断裂体系分布

Fig. 2 Distribution of fault systems in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

力层段以碎屑岩沉积为主。宝石组沉积厚度介于300~500 m,岩性组合为中等厚度灰、深灰色泥岩与细砂

岩互层,夹多套薄煤层,自然伽马曲线基线明显升高。平下段沉积厚度介于500~1 500 m,以厚层泥岩夹中等厚度砂岩为主,含大量煤层(图1)。

2 源汇系统

2.1 物源分析

西湖凹陷西邻海礁隆起和渔山东低隆起,基底为元古代变质岩叠加白垩纪岩石;北部为虎皮礁隆起,基底为中生代上白垩统及侏罗系岩石;东部为钓鱼岛隆起,基底为晚古生代与中生代岩石^[18-20]。应用锆石 U-Pb 同位素定年法及锆石颗粒的阴极发光特征分析法对宝石组—平下段物源区进行定位。宝石组锆石颗粒多为自形-半自形,边界平直清晰,发育很窄的环带,主要为岩浆岩成因,

年龄以前寒武纪为主,中生代次之,古生代最低。平下下段部分锆石颗粒破碎,发育变质增生边,为变质成因锆石,整体上岩浆岩成因略高于变质成因,年龄以前寒武纪为主,中生代年龄和古生代年龄占比相当。平上下段锆石岩浆岩成因和变质成因相当,中生代年龄占比增加。结合西湖凹陷周缘基岩属性,宝石组物源主要来自北部虎皮礁隆起的岩浆岩,以长轴远源为主,碎屑物质自北向南搬运,并接受潮汐作用改造,平下段西侧海礁隆起物源逐步增强,形成双物源格局(图1)。

2.2 古地貌及古水系分析

古地貌研究是源汇系统分析的基础。通过提取恢复西湖凹陷平北地区宝石组—平下段的古地貌参数:残余地层厚度、地层剥蚀厚度、沉积物压实系数和沉积期古水深,并综合参数特征重绘以上各个关键界面的古地貌形态,利用三维空间信息可视化平台 Petrel 将其呈现出来。考虑到研究区钻井密度较小,可能难以控制大范围古地貌,因此,该研究结合区域地震资料开展古地貌恢复。

宝石组沉积期古地貌呈西高东低格局,发育多隆、多汇聚中心及三级坡折带(图3)。北北东向和北西向同沉积断裂对地貌的隆洼分布起主要影响。西部以一级坡折带为边界主要发育陡坡带,陡坡带分布范围广且地势陡峭,沟谷发育,有大量的水系通道。一级坡折带与二级坡折带、二级坡折带与三级坡折带之间发育上、下2个缓坡带,上缓坡带地势起伏较大。受断层及三级坡折带控制形成了南、中、北3个汇聚中心,南汇区面积最大,北汇区次之,中汇区最小。受古地貌控制,陡坡带发育单支平行

状水系,展布范围较广,主要受河流作用影响,河道大而少,宽度介于300~600 m;斜坡带中部靠近物源方向一侧主要发育多树枝状水系,受到河流与潮汐联合控制,河道数量增加,宽度减小,支流发育且与主河道呈锐角相交;斜坡带东南部主要发育网结状水系,河道小而多,宽度减小到几十米至两百米,支流大量发育,主要受到潮汐作用控制。

平湖组下段古地貌同样呈现西高东低的格局,坡度相较于宝石组趋缓,隆洼分布清晰。北北东向和北西向同沉积断裂对地貌的隆洼分布起主要影响,源区沉积物搬运的沟谷开口方向受北西向断层控制。西部以一级坡折带为边界主要发育陡坡带,提供了充足的物源,以二级坡折带为边界分为上、下2个缓坡带,三级坡折带控制次洼,继承了南、中、北3个汇聚中心。古水系方面,陡坡带发育单支平行状水系,主要集中在潮上带;斜坡带中部靠近物源方向一侧主要发育多树枝状水系,主要集中在潮间带,相较于宝石组,该区域范围明显增大;斜坡带东南部主要发育网结状水系,与宝石组相比,汇区范围明显增大,物源径口、长源水系、汇聚中心增多,水系发育(图3)。

2.3 沉积体系研究

2.3.1 沉积环境分析

1) 古气候判识

利用微量元素 Sr、Cu(锶、铜)来研究平北地区平湖组、宝石组的古气候变化情况。Sr为喜干旱元素,Sr/Cu的比值介于1~10时指示温暖潮湿气候条件,Sr/Cu的比值大于10时指示干热气候条件^[21]。宝石组 Sr/Cu 的比值主要介于1~8,表明宝石组沉积期气候属于湿温气候。平湖组 Sr/Cu 的比值大部分介于14~48,表明沉积期气候为干热气候。

2) 海陆相判识

Sr、Ba(锶、钡)两元素化学性质相近,但Ba元素在沉积流体中易与硫酸根离子结合形成BaSO₄沉淀,因此,迁移能力较弱。多数Ba在近岸沉积物中富集,而Sr可迁到大洋深处,这种差异使得Sr/Ba的比值常作为判识海(咸)与陆(淡)相的依据。Sr/Ba的比值小于0.2时为陆相环境(淡),Sr/Ba的比值介于0.2~0.5时为海陆过渡环境(半咸水),Sr/Ba的比值大于0.5时为海相环境(咸)^[22]。平湖组和宝石组 Sr/Ba 的比值主要分布于0~0.5,为海陆过渡的淡水-半咸水沉积环境。

3) 氧化还原环境判识

V/(V+Ni)(钒与钒+镍的含量比值)对水体深度变化反应较灵敏,随水体还原程度增加逐渐增大。一般V/(V+Ni)的比值大于0.84时,指示缺氧的还原环境;V/(V+Ni)的比值介于0.60~0.84时,为贫氧的过渡环

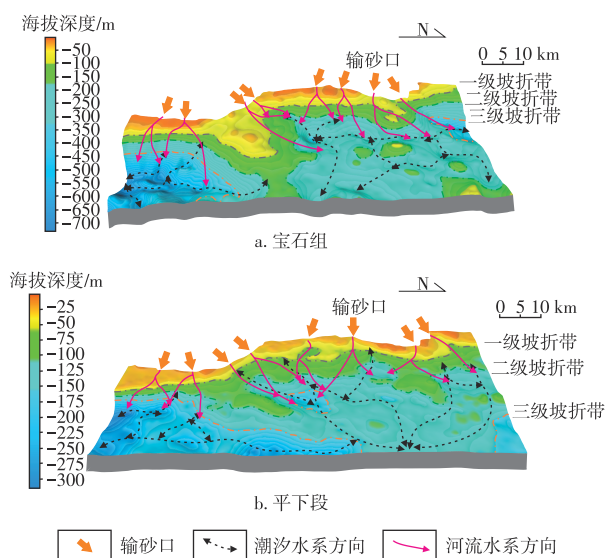


图3 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区宝石组—平下段古地貌及古水系

Fig. 3 Paleogeomorphology and paleodrainage systems of Baoshi Formation-lower Pinghu member in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

境,水体分层不强; $V/(V+Ni)$ 的比值小于0.60时,指示富氧的氧化环境,水体分层弱^[23]。平北地区平湖组、宝石组 $V/(V+Ni)$ 的比值整体介于0.60~0.84,为水体分层不强的贫氧环境。

综合各元素指标对古气候、海陆及氧化还原环境的判别认为,研究区平湖组、宝石组古水体特征为海相至过渡相。

2.3.2 沉积相类型

1) 岩心相及测井相

结合岩心相、测井相识别多种沉积微相,包括泥坪、混合坪、砂坪、潮道、潮砂坝、水道、河口坝(图4)。典型沉积微相岩心-测井特征如下:①泥坪测井曲线表现为平滑或微起伏,以平直形和指形为主,自然伽马曲线表现正高异常,岩性以泥岩、粉砂质泥岩为主,主要发育块状层理、透镜状层理(B-2井平湖组第12套砂组);②潮道测井曲线表现为顶、底突变的箱形、钟形,以锯齿化为主,厚度较薄,主要为中—细砂岩、泥岩,属于高能沉积环境,为正粒序层理、爬升层理、交错层理(K-2井平湖组第10套砂组);③潮砂坝测井曲线为箱形、钟形,岩性表现为中—粗砂岩、细砂岩,发育平行层理、板状交错层理(W-2井平湖组第10套砂组);④水道测井曲线为箱形、

钟形,以微齿化为主,岩性主要为粉砂岩、细砂岩,发育块状层理(B-3井平湖组第9套砂组)。

2) 生物遗迹相

通过分析遗迹化石与一些暴露标志或沉积构造的关系,可以揭示化石的成因、形成环境。遗迹组构是以遗迹化石为内容的关于生物扰动构造总体结构及其内部构造特征的研究,能够精确地解释沉积环境。高遗迹组构分异度反映了生物种类的增多和生物习性的进化。生物扰动强度与水体氧化还原条件具有良好对应关系。富氧环境中,造迹生物活跃,生物扰动通常强烈复杂;水体氧含量减少时,生物扰动强度减小;缺氧环境中,生物扰动极为微弱甚至完全停止。生物扰动构造在沉积物中也会垂向分布,表示为阶层。

对平北地区7口井平湖组、宝石组的遗迹化石进行IDIAP(遗迹学数字图像分析工具包)分析,识别出多种遗迹构造及遗迹组构,并统计生物扰动量,通过生物扰动强度指示生态环境。结果显示:平北地区平湖组和宝石组发育大量咸水-半咸水环境下的遗迹化石(图5),主要类型有:海蚯蚓迹(Arenicolites,简称Ar)、蛇形迹(Ophiomorpha,简称Op)、海生迹(Thalassinoides,简称Th)、漫游迹(Planolites,简称Pl)、墙迹(Teichichnus,简称Te)、双杯迹(Diplocraterion,简称Di),代表潮坪沉积环境。


沉积微相	泥坪	混合坪	砂坪	潮道	潮砂坝	水道	河口坝
颜色	深灰色	灰色 灰白色	灰色	灰色	灰白色	灰色	灰白色
岩性	泥岩、 粉砂质泥岩	粉砂岩泥岩	细砂岩、 粉砂岩	中—细砂岩、 泥岩	中—粗砂岩、 细砂岩	粉砂岩、 细砂岩	粉砂岩、 细砂岩
沉积构造	块状层理、 透镜状层理	脉状层理、 平行层理	波状层理、 斜层理	正粒序层理、 爬升层理	平行层理、 板状交错层理	块状层理	反粒序层理、 交错层理
测井相	平直形 B-2井,平湖组第11套砂组,3 545.5 m 指形 B-2井,平湖组第12套砂组,3 719 m	剧烈变化 锯齿状 K-2井,平湖组第10套砂组,4 300 m	箱形 B-2井,平湖组第12套砂组,4 085 m	钟形锯齿化 B-1井,平湖组第12套砂组,3 980 m 箱形锯齿化 K-2井,平湖组第10套砂组,4 470 m	箱形 W-2井,平湖组第10套砂组,4 610 m 钟形 K-2井,平湖组第10套砂组,4 375 m	箱形 B-3井,平湖组第9套砂组,3 780 m 钟形 B-2井,宝石组第1套砂组,3 808 m	漏斗形 K-2井,平湖组第9套砂组,4 254 m
岩心相	 B-2井,平下段,黑色泥岩,块状构造	 K-2井,平下段,灰白色钙质泥岩夹粉砂,见褐红色泥质团块	 B-3井,平下段,灰白色砂岩,含灰色泥质条带,斜层理	 K-2井,平下段,灰白色砂岩,羽状交错层理,层理多为暗色矿物定向排列	 W-2井,平下段,灰白色砂砾岩,发育交错层理	 B-3井,平下段,灰白色砂岩,块状结构,含红褐色矿物颗粒	 K-2井,平下段,灰白色钙质粉砂岩,局部发育交错层理
							

图4 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区不同沉积微相的测井、岩心特征

Fig. 4 Well logging and core characteristics of different sedimentary microfacies in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

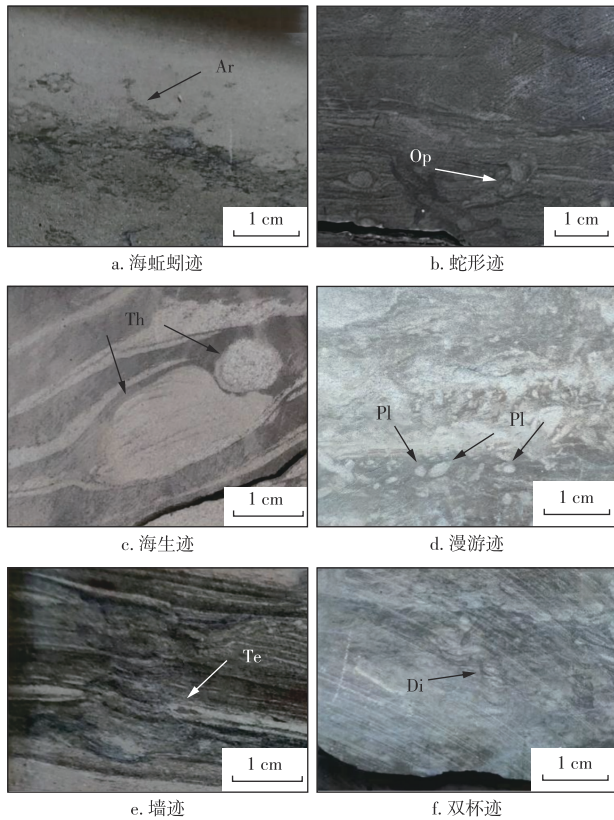


图5 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区遗迹化石照片
Fig. 5 Ichnofossil photographs from Pingbei area in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

具体而言,宝石组主要遗迹化石为海蚯蚓迹、漫游迹、墙迹,生物扰动指数介于1~3,遗迹组构指数介于2~4,遗迹组构分异度较低,生物扰动强度中等。生物扰动主要出现在层面或层内浅部,偶见向下延伸现象,扰动深度介于0.5~3.0 cm,潜穴之间交切现象较少,表现为简

单浅阶层及复杂浅—中阶层类型。平湖组主要发育漫游迹、海生迹、蛇形迹、墙迹和双杯迹,生物扰动指数介于2~3,遗迹组构指数介于2~4,平湖组底部生物扰动强度较强烈,顶部较弱,整体遗迹组构分异度较低。总体而言,平湖组遗迹化石以觅食迹为主体,从顶至底生物扰动强度和分异度逐渐增大,遗迹阶层类型主要从简单浅阶层转变为复杂中阶层,指示水动能较弱、由贫氧转向相对富氧变化的沉积环境;宝石组生物扰动强度较大,整体遗迹组构分异度较低,阶层类型主要为复杂浅—中阶层,指示有机质丰度较高、水体动能较弱的富氧环境(表1)。

综合沉积环境、岩心相、测井相及生物遗迹相等特征分析,宝石组—平下段划分出潮汐三角洲、潮坪相及海相3种沉积相以及水下分支河道、河口坝、席状砂等9种沉积微相(表2)。

2.3.3 沉积相展布

根据古地貌等参数进行类比,平北地区“潮汐—三角洲”沉积体系类似于现代钱塘江地区“潮汐—三角洲”沉积体系,在涨潮和退潮的过程中,潮流流速达到最大值,此时潮流可搬运和沉积砂质沉积物,有涨潮流与退潮流联合主导沉积过程,形成“潮汐树”,其主要特征为:“树冠”向陆延伸,发育树枝状潮道,外形呈朵叶状,成排分布,潮汐层系发育(图6)。当涨潮流速率与退潮流速率相等时,产生厚度相等的2个砂层;当涨潮流速率大于退潮流速率时,沉积1个厚层和1个薄层砂层;当退潮流能量微弱时,则不能搬运砂质沉积物,此时,只能形成1个砂层(图7)。

表1 不同层段遗迹学指标统计

Table 1 Statistics of ichnological indices in different stratigraphic layers

砂组	主要遗迹构造	生物扰动		遗迹组构		阶层类型
		强度	指数	指数	分异度	
宝石组第1套砂组	海蚯蚓迹、漫游迹、墙迹	中等	1~3	2~4	较低	简单浅阶层、复杂浅—中阶层
平湖组第12套砂组	墙迹、海生迹、双杯迹	较强烈	2~3	3~4	较高	简单中阶层
平湖组第11套砂组	漫游迹、海生迹	中等	2	3	较低	简单浅—中阶层
平湖组第9套砂组	漫游迹、海生迹	中等	2	3	较低	简单浅阶层
平湖组第3套砂组	蛇形迹、海生迹	弱—中等	2	2~3	低	复杂浅—中阶层

表2 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区宝石组—平下段沉积相类型划分

Table 2 Sedimentary facies classification of Baoshi Formation—lower Pinghu member in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

沉积相	沉积亚相	沉积微相
潮汐三角洲	三角洲前缘	水下分支河道
		河口坝
		席状砂
		支流间湾
潮坪相	潮间带	潮汐水道
		砂坪
		混合坪
海相	半封闭海湾	泥坪
		海湾泥



a. 钱塘江涨潮

b. 钱塘江退潮

图6 钱塘江涨潮与退潮期卫星显示图

Fig. 6 Satellite images taken during flood and ebb tides in Qiantang River

为进一步明确平北地区宝石组一平下段沉积体系(图8),基于“潮汐树”沉积模式指导下,综合分析物源、古水系、古地貌及古环境对沉积微相的影响,并基于地震属性对砂体展布特征进行刻画(图8e—图8h),形成了平北地区具有树状特征的“潮汐-三角洲”沉积体系。

早始新世宝石组第4套砂组砂层沉积时期,为裂陷早期,平北地区西部海礁凸起及古潜山均处于暴露剥蚀环境,沉积物主要卸载于内斜坡,由于坡度较大,潮上带及潮下带均局部发育,潮间带面积较广。物源以点状为主,北部略强于南部,但物源向凹内推进距离整体较近,具有盆地裂陷早期特征。三角洲近凹侧发育小型涨潮、退潮三角洲“潮汐树”,潮道多发育于东北部区域,潮道以中—小型为主。另外,平北南部地区古地貌更开阔,发育潮汐影响更强烈的潮汐砂脊沉积(图8a、图8e)。

中始新世(宝石组末期)宝石组第2套砂组沉积时期,物源规模及向凹陷内推进距离逐渐增加,潮上带沉积范围扩大,但仍以潮间带为主要沉积亚相。三角洲朵叶规模及距离增大,但潮道规模整体不大,主要分布在中—东部地区,受古地形影响,呈北东—南西向及北西—南东向展布,涨潮三角洲规模较大,潮道部分连通,退潮三角洲单独发育(图8b、图8f)。

中始新世(平湖组早期)平湖组第12套砂组,随着裂陷

作用逐渐增强,物源供给进一步增加,三角洲规模及推进距离进一步增大,潮上带及潮下带呈条带状主要发育西部及东南部地区,潮间带仍为主要的沉积亚相类型。此时,潮道及涨、退潮三角洲规模增大,南部出现潮汐砂脊,受北东—南西向潮流影响呈顺潮流方向展布(图8c、图8g)。

中始新世(平湖组早—中期)平湖组第11套砂组,受海平面上升影响,沉积范围逐步扩大,但沉积体向陆退积,自北向南广泛发育混合坪相,潮下带范围变大。三角洲规模有所减小,并多呈孤立朵叶状,潮道及涨、退潮三角洲规模也有所减小,受古地貌控制,东南部地区受潮汐影响强烈,发育呈群带状的潮汐砂脊群(图8d、图8h)。

3 控砂机制及圈闭模式

在断陷盆地中,构造活动是控制盆地基底沉降的主要因素,控制着可容空间的增长,从而控制砂体的展布。宝石组一平下段发育构造坡折带,由古隆起与同沉积构造活动(断裂或褶皱)形成沟—隆相间的限制型坡折沉积区域(如地垒与地堑、凸起与斜坡、断坡与洼陷、斜坡与洼陷之间的边界地带),控制了储集体的时空分布。宝石组一平下段可识别出2种构造坡折带:断控型坡折带与坡控型坡折带。断控型坡折带由于断层构造样式不同,可归纳出堑—垒型、隆起—断坡型、多断坡型3种控砂模式;坡控型坡折带发育转换带型和挠曲坡折型2种控砂模式,转换带型为主要控砂模式(图9)。

3.1 堑—垒型控砂模式

该类型在古隆起背景下,受多个正、反向同生断裂控制形成的堑—垒组合,砂体在地堑沉积。高位坡折向大陆边缘为潮上带沉积,高位坡折和低位坡折之间为潮间带沉积,低位坡折向东深洼内为潮下带沉积。潮上带沉

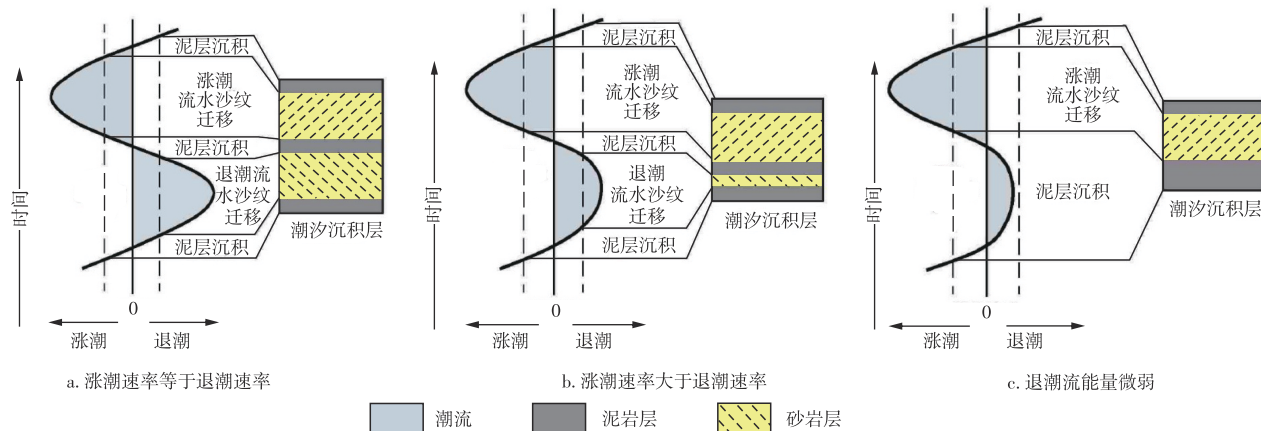


图7 不同涨、退潮速率形成垂向沉积序列模式

Fig. 7 Vertical sedimentary sequence models formed under different flood and ebb tide rates

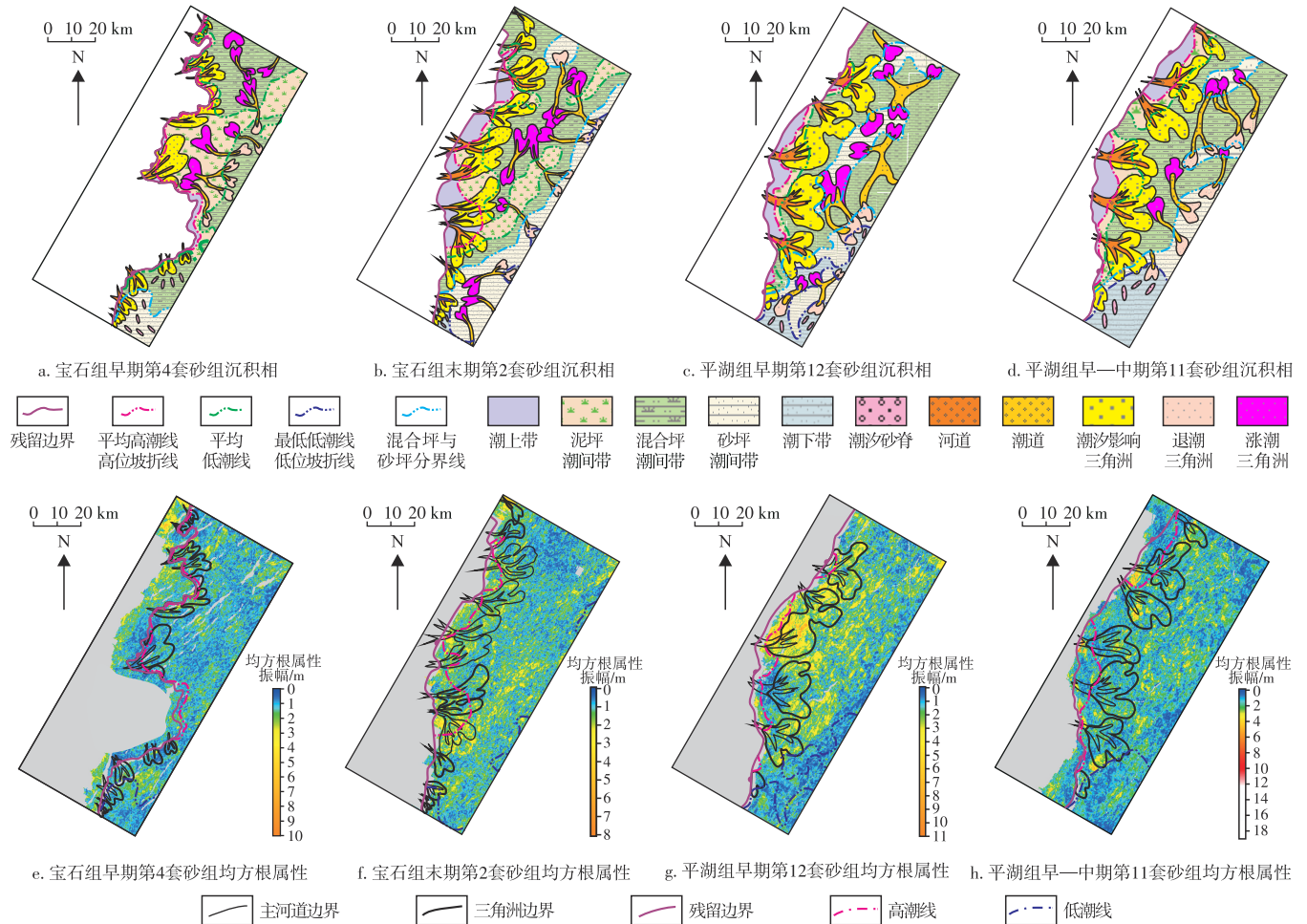


图8 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区宝石组—平下段沉积相

Fig.8 Sedimentary facies of Baoshi Formation-lower Pinghu member in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

积相类型主要为高位水道沉积,潮间带主要发育低位下切水道、海进潮道,潮下带以低位三角洲前缘为主,该模式指示高位水道、低位三角洲前缘近端坝是最有利的储集体目标。

3.2 隆起-断坡型控砂模式

该类型断坡主要发育在古隆起侧翼,砂体受古隆起及其衍生正断层共同控制,构造坡折发育于高位体系域,主要发育潮间带或高位近端三角洲沉积。大型同生断层下降盘发育三角洲前缘远端—前三角洲沉积;低位断控坡折内到西湖凹陷的深洼内,其层序体系域构成齐全,包括低位、海进和高位3个体体系域。高位潮间带砂体为宝石组可供勘探的最主要的储集体目标。

3.3 多断坡型控砂模式

多断层坡折的整体落差较大,其多阶断坪和断坡可控制高位坡折和低位坡折的位置,为划分沉积相带提供依据。高位坡折向大陆边缘为潮上带沉积,高位坡折和低位坡折之间为潮间带沉积,低位坡折向东深洼内为潮

下带沉积。其中,潮上带主要发育三角洲平原,潮间带以低位下切河道、高位三角洲前缘与高位滩坝沉积为主,潮下带沉积相类型有低位近端坝和低位滩坝砂。宝石组潮间带三角洲砂体是最有利的储集体目标。

3.4 转换带型控砂模式

该坡控型坡折底部为低幅倾斜断层,局部断至宝石组,形成一系列台阶即转换带坡折。断层转换带处断层的活动较弱,以优势汇聚地势形成砂体运聚渠道。自高位坡折到大陆边缘仅发育高位体系域,主要发育三角洲平原-前缘沉积;由低位坡折至西湖凹陷深洼,发育潮间带—潮下带沉积。三角洲前缘水道—前三角洲滩坝砂体是最有利的储集体目标。

3.5 挠曲坡折型控砂模式

该坡控型坡折底部为隐伏断裂或构造褶皱,控制一系列挠曲坡折,形成“坡—坪—坡—坪”的地形。由于地层单元发生挠曲或弯折变化,向深洼带逐渐变厚,以地形控制砂体,低位水道及水道侧翼向高部位坡折形成尖灭。

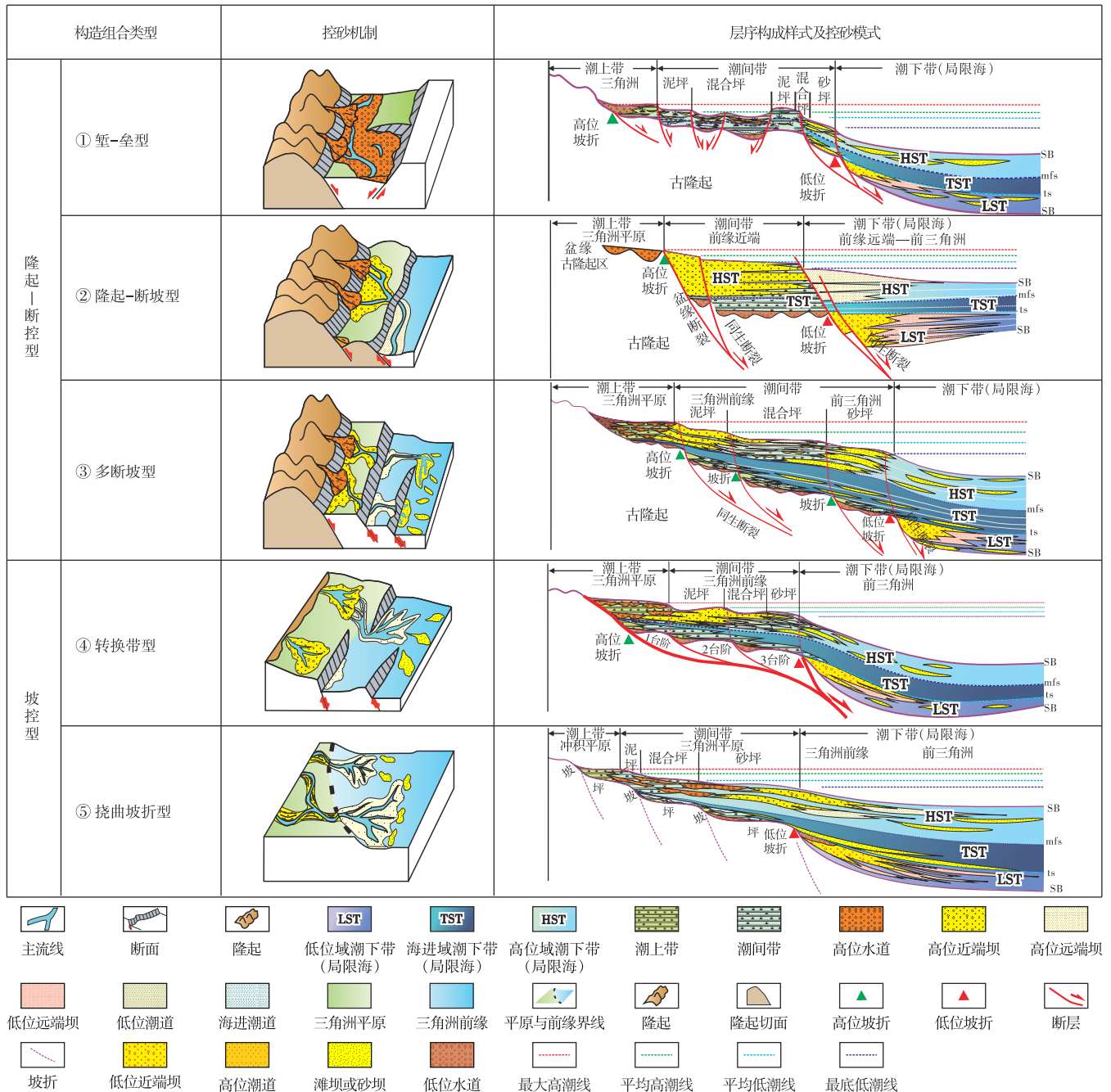


图9 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区宝石组一下段主要层序构成及控砂模式

Fig. 9 Main sequence structures and sand-controlling models of Baoshi Formation-lower Pinghu member in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

靠陆一侧挠曲坡折的坪上主要发育海侵体系域的水道及局部的潮间带砂体。低位域潮间带砂及三角洲前缘水道是最主要的储集体目标。

3.6 断层-坡折控砂形成圈闭模式

根据5种构造控砂模式总结西湖凹陷宝石组一下段发育5种圈闭类型:①坳-垒型构造圈闭;②隆起-断坡型构造圈闭;③多断坡型构造-岩性复合圈闭;④转换带型构造-岩性复合圈闭;⑤挠曲坡折型岩性圈闭。

坳-垒型、隆起-断坡型构造圈闭主要为断块圈闭、断鼻圈闭和背斜圈闭。多断坡型、转换带型由多条断层、坡折控制,砂体与断层搭接,形成构造-岩性复合圈闭。挠曲坡折型岩性圈闭主要为岩性上倾方向尖灭的砂体及侧翼方向尖灭的砂体(图10)。

4 下步勘探潜力区

基于沉积体系、圈闭发育模式研究,同时结合研究区

圈闭模式	圈闭类型	平面形态	剖面形态	
① 箕-垒型构造圈闭	构造圈闭	断块圈闭		
		断鼻圈闭		
背斜圈闭				
② 隆起-断坡型构造圈闭	构造圈闭	背斜圈闭		
③ 多断坡型构造-岩性复合圈闭		断层上倾尖灭,岩性侧翼封堵		
		岩性上倾尖灭,断层侧翼封堵		
④ 转换带型构造-岩性复合圈闭	复合圈闭	断层上倾尖灭,岩性侧翼封堵		
⑤ 挠曲坡折型岩性圈闭		岩性上倾尖灭		

注:黄色部分为砂体。

图10 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区宝石组—平下段主要圈闭特征

Fig. 10 Main trap types in Baoshi Formation—lower Pinghu member of Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

成藏条件分析,认为平北地区内带是下步有利勘探方向。从成藏条件看,平北地区内带紧靠三潭深凹生烃中心,供烃条件十分优越。发育一系列大型北东向正断裂,断裂下断至平湖组下段、宝石组烃源岩层系,上断至平湖组上段—花港组下段储集层,具有良好的源储配置,油气运移通道发育。沟源断裂与自西向东的三角洲前缘水下分流河道相交,构成高效输导体系。此外,斜坡内带发育大型挠曲坡折,坡折之下可容纳空间大,有利于规模砂体卸载,属于典型的挠曲坡折型控砂模式,坡折控制下的低位域潮间带砂及三角洲前缘水道是有利储集体,岩性上倾方向尖灭的砂体及河道侧翼方向尖灭的砂体是最有利的勘探目标。从沉积储层看,平北地区内带平湖组、宝石组发育广阔的潮坪沉积体系,砂体类型包括三角洲前缘水下分流河道砂、河口坝砂、潮坪砂、涨潮三角洲与退潮三角洲潮汐树形成的潮汐水道砂、潮汐砂坝砂等多种砂体类型,纵向上叠合性较好,砂岩经过河流、潮流、波浪等水动力淘洗,多为较纯净的细砂岩,抗压实能力较强,钻井证实在深度为4 500 m时依然能保持较好的储层物性。砂岩百分比介于30%~60%,适宜形成构造-岩性复合圈闭及岩性圈闭。

综上所述,平北地区内带是下步寻找规模油气的有利区(图11)。在平北地区内带落实了三大有利圈闭群,分别为孔雀亭东、武-宝云亭东、团结亭东圈闭群,初步刻画构

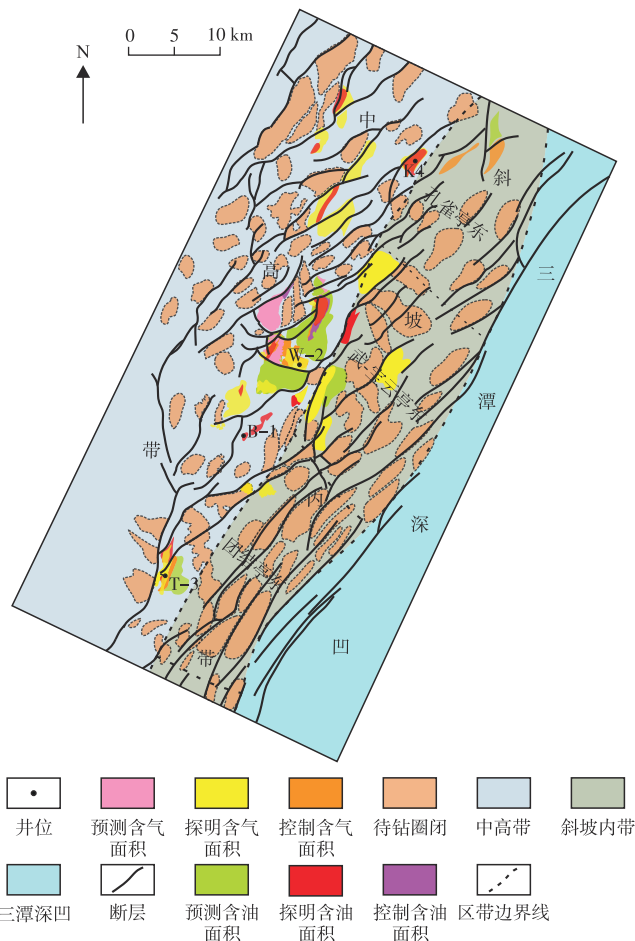


图11 东海陆架盆地西湖凹陷平北地区复合圈闭分布
Fig. 11 Distribution of composite traps in Pingbei area, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin

造-岩性复合圈闭39个,圈闭资源量高达 $1\ 706 \times 10^8 \text{ m}^3$,预计可形成3~4个百亿立方米级油气规模储量区。

5 结论与认识

1)东海盆地西湖凹陷平北地区宝石组—平下段沉积与裂陷早期,构造活动强烈,构造地貌呈现“多隆多洼”格局,发育三级古地貌坡折带,一级坡折带控制边界陡坡,二、三级坡折带控制缓坡,陡坡带主要发育单支平行状水系,河流作用为主。缓坡带发育多树枝状水系及网结状水系,主要受到潮汐作用控制。

2)物源方向上,首次明确了断陷期发育北部长轴方向物源占主导。西部短轴物源作用逐渐增强的变化过程,北部物源经过长距离搬运至凹陷区,经过潮汐作用改造沉积于潮间带—潮下带。

3)通过类比现今钱塘江潮汐沉积体系,认为平北地区宝石组—平下段发育广阔的潮间带沉积,受涨潮流及退潮流的控制作用形成涨潮三角洲及退潮三角洲,涨、退潮三角洲平面呈树状展布,纵向上受潮流速率影响发育

等厚型、非等厚型及单层型3种沉积序列。

4)结合层序、古地貌特征,平北地区平下段发育5种控砂模式及5种圈闭类型。斜坡内带发育挠曲坡折型控砂模式,岩性上倾方向尖灭型及河道侧翼方向尖灭型圈闭较发育,且经潮流和波浪淘洗为纯净细砂岩,抗压实能力较强,易形成“甜点”储层,是最有利的勘探目标区。

参考文献

- [1] 周心怀. 西湖凹陷地质认识创新与油气勘探领域突破[J]. 中国海上油气, 2020, 32(1): 1-12.
ZHOU Xinhuai. Geological understanding and innovation in Xihu sag and breakthroughs in oil and gas exploration. [J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(1): 1-12.
- [2] 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 & Experiment, 2020, 42(5): 803-812.
- [3] 韩银学, 陈莹, 杨海长, 等. 白云凹陷恩平组“源—汇”体系及其对油气勘探的影响[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(2): 25-34.
HAN Yinxue, CHEN Ying, YANG Haichang, et al. “Source to sink” of Enping Formation and its effects on oil and gas exploration in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(2): 25-34.
- [4] 朱淑玥, 刘磊, 虎建玲, 等. 鄂尔多斯盆地西缘晚石炭世羊虎沟组源—汇系统特征及古地理格局[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1430-1450.
ZHU Shuyue, LIU Lei, HU Jianling, et al. Characteristics of the Source-to-Sink system and paleogeographical pattern from the Upper Carboniferous Yanghugou Formation in western margin of the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(5): 1430-1450.
- [5] 刘英辉, 蔡华, 段冬平, 等. 西湖凹陷平湖地区平湖组海侵体系域潮控三角洲—潮坪沉积特征及模式[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(1): 33-40.
LIU Yinghui, CAI Hua, DUAN Dongping, et al. The sedimentary characteristics of tidal delta and tidal flat in transgressive system tract of Pinghu Formation in Pinghu area, Xihu Sag[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(1): 33-40.
- [6] 蔡华, 秦兰芝, 刘英辉. 西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源—汇系统差异性及其耦合模式[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 880-897.
CAI Hua, QIN Lanzhi, LIU Yinghui. Differentiation and coupling model of source-to-sink systems with transitional facies in pingbei slope of Xihu Sag[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 880-897.
- [7] 李昆, 周兴海, 丁峰, 等. 西湖凹陷保俶斜坡带平北地区平湖组“多元控砂”机制分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(6): 115-123.
LI Kun, ZHOU Xinghai, DING Feng, et al. “Multi-factor control of sandboies distribution” in the Pinghu Formation, Pingbei region of Baochu slop, the Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(6): 115-123.
- [8] 侯国伟, 李帅, 秦兰芝, 等. 西湖凹陷西部斜坡带平湖组源—汇体系特征[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 29-39.
HOU Guowei, LI Shuai, QIN Lanzhi, et al. Source-to-Sink system of Pinghu Formation in west slope belt of Xihu sag, East China Sea basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 29-39.
- [9] 刘书会, 王宝言, 刘成鑫. 西湖凹陷平湖地区平湖组沉积相的再认识[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(3): 1-3.
LIU Shuhui, WANG Baoyan, LIU Chengxin. The recognition about sedimentary facies in Pinghu formation of Pinghu region[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(3): 1-3.
- [10] 程浩, 金振奎, 余文端, 等. 苏北盆地溱潼凹陷阜三段浅水三角洲沉积古地貌、古环境恢复[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(3): 368-378.
CHENG Hao, JIN Zhenkui, YU Wenduan, et al. Sedimentary Palaeogeomorphology and Palaeo-environment reconstruction of shallow water delta in the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(3): 368-378.
- [11] 于仲坤, 丁飞, 赵洪. 西湖凹陷构造演化特征及油气运聚单元划分[J]. 上海国土资源, 2018, 39(4): 75-78.
YU Zhongkun, DING Fei, ZHAO Hong. Characteristics of structural evolution and classification of hydrocarbon migration and accumulation units in Xihu Sag, China[J]. Shanghai Land & Resources, 2018, 39(4): 75-78.
- [12] 侯方辉, 张志珣, 张训华, 等. 东海陆架盆地北部新构造运动特征[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(11): 1-6.
HOU Fanghui, ZHANG Zhixun, ZHANG Xunhua, et al. Neotectonic movement of the northern East China Sea shelf basin[J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(11): 1-6.
- [13] 黄晓松, 唐贤君, 许怀智, 等. 东海盆地西湖凹陷基底时空演化特征再认识及勘探意义[J]. 上海国土资源, 2024, 45(2): 125-131.
HUANG Xiaosong, TANG Xianjun, XU Huaizhi, et al. Reunderstanding of temporal and spatial evolution characteristics of the basement of Xihu Depression in East China Sea Basin and its exploration significance[J]. Shanghai Land & Resources, 2024, 45(2): 125-131.
- [14] 王军, 曹磊, 许怀智, 等. 东海盆地西湖凹陷平湖地区油气源对比及油气运移特征分析[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(1): 1-11.
WANG Jun, CAO Lei, XU Huaizhi, et al. Comparison of oil-gas sources and analysis of oil-gas migration characteristics in Pinghu area of Xihu Sag, the East China Sea Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2024, 39(1): 1-11.
- [15] 钟锴, 朱伟林, 高顺莉, 等. 东海陆架盆地形成演化及油气成藏关键地质问题[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3485-3497.
ZHONG Kai, ZHU Weilin, GAO Shunli, et al. Key geological questions of the formation and evolution and hydrocarbon accumulation of the East China Sea shelf basin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3485-3497.
- [16] 周心怀, 蒋一鸣, 唐贤君. 西湖凹陷成盆背景、原型盆地演化及勘探启示[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 1-10.
ZHOU Xinhuai, JIANG Yiming, TANG Xianjun. Tectonic setting, prototype basin evolution and exploration enlightenment of Xihu sag in East China Sea basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 1-10.

- [17] 徐东浩, 秦兰芝, 李帅, 等. 西湖凹陷平北斜坡平湖组潮坪环境砂体沉积模式及控制因素[J]. 中国海上油气, 2024, 36(5): 57-67.
XU Donghao, QIN Lanzhi, LI Shuai, et al. Sedimentary models and controlling factors of sand bodies in tidal flat environment of Pinghu Formation on Pingbei Slope of Xihu Sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2024, 36(5): 57-67.
- [18] 何昕锴, 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.
- [19] 蒋一鸣, 何新建, 唐贤君, 等. 钓鱼岛隆褶带物质构成及东海西湖凹陷原型盆地东边界再认识[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 773-783.
JIANG Yiming, HE Xinjian, TANG Xianjun, et al. Material composition of Diaoyu Islands folded zone and reanalysis of eastern boundary of prototype basin of Xihu Sag in East China Sea[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 773-783.
- [20] 陈冰, 王家林, 吴健生, 等. 东海陆架盆地海礁凸起南块基底性质研究[J]. 石油实验地质, 2002, 24(4): 301-305.
CHEN Bing, WANG Jialin, WU Jiansheng, et al. Study on the basement properties of the south Haijiao uplift in the East China Sea shelf basin[J]. Experimental Petroleum Geology, 2002, 24(4): 301-305.
- [21] 陈浩, 肖宝珠, 崔培龙, 等. 湖北襄阳地区龙潭组富锂黏土岩地球化学特征及其对物源和古沉积环境的指示[J]. 资源环境与工程, 2024, 38(2): 137-146.
CHEN Hao, XIAO Baozhu, CUI Peilong, et al. Geochemical characteristics, provenance and Palaeosedimentary environment of lithium-rich claystone in Longtan formation in Xiangyang area, Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2024, 38(2): 137-146.
- [22] 兰华平, 任战利, 张莹, 等. 关中盆地新近系泥岩地球化学特征: 物源和古沉积环境恢复[J]. 地质通报, 2024, 43(10): 1801-1817.
LAN Huaping, REN Zhanli, ZHANG Ying, et al. Geochemical characteristics of Neogene mudstone in Guanzhong basin: Provenance and paleosedimentary environment restoration[J]. Geological Bulletin of China, 2024, 43(10): 1801-1817.
- [23] 王若谷, 周进松, 张建锋, 等. 鄂尔多斯盆地东南部晚石炭世—中二叠世沉积环境及演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(6): 1023-1036.
WANG Ruogu, ZHOU Jinsong, ZHANG Jianfeng, et al. Sedimentary environment and evolution of late carboniferan-Middle Permian in southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(6): 1023-1036.

(编辑 常燕)