



海洋地质与第四纪地质

MARINE GEOLOGY & QUATERNARY GEOLOGY

西湖凹陷平湖斜坡北段平湖组薄煤层与泥岩的微观岩石学特征及其沉积学意义

何贤科, 李文俊, 段冬平, 荣乘锐, 夏振通

Micro-petrological characteristics and its sedimentological significance of thin coal seam and mudstone in Pinghu Formation in the northern part of Pinghu Slope, Xihu Sag

HE Xianke, LI Wenjun, DUAN Dongping, RONG Chengrui, and XIA Zhentong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023030701>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国近海断坳转换期煤系烃源岩特征——以西湖凹陷平湖组烃源岩为例

Coal-bearing source rocks formed in the transitional stage from faulting to depression nearshore China——A case from the Pinghu Formation in the Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 102

东海盆地西湖凹陷平湖组微量稀土元素对古生产环境的指示意义

Trace rare earth elements in the Pinghu Formation of Xihu Sag and its implications for paleo-production environment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 72

西湖凹陷平北地区平湖组煤系烃源岩生烃潜力研究

A study on the hydrocarbon generation potential of the coal-bearing source rocks in the Pinghu Formation of Pingbei area, the Xihu depression

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 139

西湖凹陷保斜坡带平北地区平湖组“多元控砂”机制分析

“Multifactor control of sandboies distribution” in the Pinghu Formation, Pingbei region of Baochu slop, the Xihu Sag

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 115

西湖凹陷平湖斜坡带A气田沉积体系定量表征及海平面变化周期性探讨

Quantitative characterization of the depositional system in Gas field A, Pinghu slope belt, Xihu Sag and its bearing on periodicity of sea level changes

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 12

西湖凹陷天台斜坡带北部构造变换带特征及油气地质意义

Characteristics of the structural transfer zone of northern Tiantai slope in Xihu Sag of the East China Sea Basin and their petroleum geological significances

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 93



关注微信公众号，获得更多资讯信息

何贤科,李文俊,段冬平,等.西湖凹陷平湖斜坡北段平湖组薄煤层与泥岩的微观岩石学特征及其沉积学意义[J].海洋地质与第四纪地质,2024,44(2): 210-222.

HE Xianke, LI Wenjun, DUAN Dongping, et al. Micro-petrological characteristics and its sedimentological significance of thin coal seam and mudstone in Pinghu Formation in the northern part of Pinghu Slope, Xihu Sag[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 210-222.

西湖凹陷平湖斜坡北段平湖组薄煤层与泥岩的微观岩石学特征及其沉积学意义

何贤科,李文俊,段冬平,荣乘锐,夏振通

中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335

摘要:西湖凹陷平湖斜坡北段平湖组受河流与潮汐作用共同影响,水动力条件复杂,分支流水道砂体与潮汐水道砂体的成因存在争议。通过煤层与泥岩的微观岩石学特征分析,探讨其岩石结构与矿物组成、泥岩中碎屑颗粒排列方式、水动力条件与水介质环境,进而划分岩性相类型,展开砂-泥岩一体化的微相划分与水动力分析。其中,薄煤层可分为封闭洼地含草莓状黄铁矿煤层、分支流间湾沼泽纯煤层与天然堤粉砂质纹层煤层;泥岩可分为封闭洼地水平纹层状菱铁矿、分支流间湾含结核状菱铁矿,以及砂岩中交错纹层状菱铁矿。泥岩中广泛发育的菱铁矿指示平湖组沉积时期,发育富铁的局限潟湖环境;泥岩中黏土矿物以高岭石与伊利石混合的黏土为主,指示淡水-海水混层的沉积水介质环境。泥岩中微古生物与煤的显微组分指示其互层的箱形、钟形砂体为三角洲背景下的水道沉积,砂体为多期水道叠置的复合体。薄煤层与碳质泥岩及相关砂岩的微观岩石学分析表明,平湖斜坡北部平湖组具有典型的缓坡局限浅水沉积背景,陆源有机质供给丰富,泥岩中普遍富含碳质,砂体以单向水流沉积作用为主。薄煤层与泥岩岩相分析为薄煤层与砂岩成因分析提供了新的沉积学信息,为砂体预测评价提供了新的依据。

关键词:薄煤层;泥岩;微观岩石学;菱铁矿;平湖组;西湖凹陷

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: [10.16562/j.cnki.0256-1492.2023030701](https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023030701)

Micro-petrological characteristics and its sedimentological significance of thin coal seam and mudstone in Pinghu Formation in the northern part of Pinghu Slope, Xihu Sag

HE Xianke, LI Wenjun, DUAN Dongping, RONG Chengrui, XIA Zhentong

Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: The Pinghu Formation in the northern part of the Pinghu Slope is rive-tidal deposits. The hydrodynamic conditions were complex, and there is a controversy on the origin of sandbodies for distributary channels and tidal channels. Through the analysis of micro-petrological characteristics of coal seams and mudstones, the rock structure and mineral composition, the arrangement of clastic particles in mudstones, hydrodynamic conditions, and water medium environment were discussed, and the types of lithologic facies were divided, after which the sandstone microfacies were divided based on sandstone-mudstone integration, and hydrodynamics was analyzed. In particular, the thin coal seam can be categorized into the strawberry-shaped pyrite coal seam indicative of a closed-basin environment, the pure coal seam reflecting an interdistributary bay, and the silty laminated coal seam formed in natural levee. Mudstone can be categorized into horizontal lamellar siderite formed in a closed sag, siderite concretion formed in an interdistributary bay, and crisscrossed lamellar siderite in sandstone. The widely developed siderite in mudstone indicates that an iron-rich and restricted lagoon was developed during the deposition of Pinghu Formation in the north of Pinghu Slope. Minerals in mudstone are mainly clays mixed with kaolinite and illite, indicating a fresh-marine mixed water medium environment. The micropaleontological assemblage in mudstone and macerals of coal indicate that the interbedded box-shaped and bell-shaped sandbodies are channel deposits under delta background, and the sandbodies are the complex of multi-phase channel superposition. The microscopic petrological analysis of thin coal seams, mudstones, and related sandstones shows that the Pinghu Formation was formed in a typical gentle-slope water-restricted shallow background, in which terrigenous organic matter was rich, mudstones were carbon-abundant, and

资助项目:中海石油(中国)有限公司重大科技专项“西湖凹陷在生产油气田中后期综合调整关键技术研究与实践”(CNOOC-KJ135ZDXM39SH03);中海石油(中国)有限公司上海分公司科技项目(KJZL-2023-SH01)

作者简介:何贤科(1981—),男,硕士,高级工程师,长期从事海上油气开发相关工作, E-mail: hexk@cnooc.com.cn

收稿日期:2023-03-07; 改回日期:2023-04-17。 周立君编辑

sandbodies were dominated by one-way flow sedimentation. This study provided new data and a reference for reconstructing the sedimentary framework, understanding the genesis, and predicting sand bodies and thin coal seams in the Pinghu Formation in the Xihu Sag.

Key words: thin coal; mudstone; micro-petrology; siderite; Pinghu Formation; Xihu Sag

西湖凹陷勘探面积逾 5 万 km², 古近系的花港组、平湖组以及宝石组地层巨厚, 具有良好的油气勘探前景, 是我国天然气勘探的重要战场^[1-2], 其中平湖组既是主力烃源岩发育层系, 又是重要的勘探目的层, 油气勘探潜力巨大。有大量学者对西湖凹陷平湖组储层的古地理背景进行了研究, 总体认为平湖组沉积时期处于海陆过渡相的半封闭海湾背景, 以广泛分布的薄煤层为特色^[3-10]。西湖凹陷始新统平湖组以砂岩、泥岩、碳质泥岩、薄煤层互层为特征, 由于平湖组分布面积广, 古地貌背景差异大, 沉积水动力条件复杂, 不同部位与不同层序的沉积构造与沉积微相类型多样, 导致不同学者对不同地区平湖组的砂体成因一直存在争议, 严重影响了平湖组的储层评价预测与勘探开发部署。

近年来, 平湖组的油气勘探主要集中在平湖构造带北部, 对不同钻井平湖组沉积相划分存在一定分歧, 其争议主要集中于平湖组的沉积作用是以河流作用为主, 还是以潮汐作用为主。有些学者综合微体古生物、地球化学、岩芯、录井、地震等资料分析认为, 西部斜坡平湖构造带平湖组砂体为辫状河三角洲成因, 以河流作用为主, 局部存在短期的海侵, 受潮汐作用的影响较大^[11]; 煤层含硫量高, 薄且分散, 与近岸潟湖沉积类似^[9]; 平湖组中代表淡水环境的盘星藻等数量较多, 而代表海洋沉积的钙质超微化石等古生物少见, 平湖组沉积期以淡水沉积环境为主^[12]; 纵向上平湖组早中期潮汐作用影响大, 晚期发育受潮汐影响较弱^[13-14]。前人基于沉积构造, 结合测井、分析化验数据及地震等资料的综合分析, 认为平湖构造带主要发育受潮汐影响的三角洲—潮坪相沉积, 发育三角洲与潮坪两大类沉积体系^[15-17]; 通过频谱分析等方法, 分析了平湖构造带平湖组潮汐韵律与潮汐周期^[18]; 基于平湖构造带平湖组岩芯、测井及分析化验资料, 建立了平湖构造带平湖组海侵体系域潮控三角洲-潮坪沉积特征及模式。

尽管不同学者所用资料不同, 对西湖凹陷平湖组沉积背景存在不同认识, 但都可以归纳到半封闭海湾海陆交互相的古地理背景中^[19-24]。由于河流与潮汐相互作用复杂, 潮汐影响范围广, 潮汐作用对三角洲的改造程度差异较大, 导致目前还没有统一的潮汐影响三角洲的相模式^[25-27]。现代的潮汐三角

洲多位于中低纬度的河口湾附近, 受潮汐作用改造, 分支流河道加宽而成漏斗形, 并形成一系列垂直岸线排列的线状砂体, 如中国的长江三角洲、墨西哥湾的科罗拉多河三角洲、伊朗-伊拉克的底格里斯-幼发拉底河三角洲、西非卡萨芒斯河三角洲、印度-孟加拉恒河-布拉马普特拉河三角洲等^[28]。潮汐改造三角洲的典型沉积标志包括双向交错层理、向岸倾斜的交错纹层、低角度砂质纹层中发育的泥质纹层(泥披盖)、交错纹层倾角频繁发生变化、脉状层理、波状层理、透镜状层理与生物扰动构造等。与典型的潮汐三角洲沉积特征相比, 平湖构造带平湖组中除复合层理与生物扰动构造较常见外, 其他典型的潮汐成因沉积构造少见, 而曲流河的天然堤与前三角洲同样发育脉状层理、波状层理、透镜状层理等^[28-32], 这也是西湖凹陷不同地区平湖组砂体成因分析存在争议的主要原因。

平湖组煤层具有厚度薄、层数多、分布散等特点, 不同钻井中薄煤层的辨识度较低, 测井相差异不明显, 给砂体的岩相分析带来困难。目前平湖组沉积相的研究成果主要侧重于平湖组砂岩的沉积作用、水动力与沉积成因分析, 对薄煤层与碳质泥岩的沉积学与岩石学分析较少。由于海上岩芯资料少, 取芯井段短, 很难覆盖平湖组一个完整的沉积旋回; 煤与泥岩岩屑颗粒普遍较砂岩岩屑颗粒大, 能够保存岩石的微观结构与矿物学特征, 纵向上能够连续取样。开展煤与泥岩的单岩屑颗粒微观沉积学分析, 可以丰富平湖组的沉积相研究方法, 有效解决钻井岩石学分析中样品不足的难题, 为井下潮坪交互的沉积学分析提供新的地质信息。

本文从岩芯与泥岩岩屑的微观岩石学分析出发, 对平湖构造带北部平湖组中碳质纹层与菱铁矿进行成因分类, 提出了基于砂岩、煤与碳质泥岩微观岩石学特征的“三煤三铁”水动力分析与古环境分析方法, 明确细粒沉积物及其岩屑颗粒微观岩石学分析对砂岩成因及岩相划分、砂体微相编图与预测砂体的辅助作用。

1 地质背景

西湖凹陷位于东海陆架盆地东部的浙东坳陷内, 东邻钓鱼岛隆褶带, 西部以海礁凸起、渔山凸起

为界,是一个呈NNE向展布的古近系含油气凹陷,面积约 $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区平北地区位于西湖凹陷平湖斜坡带北部(图1),是西湖凹陷重要的油气聚集区。近年来,平北地区的天然气勘探开发不断获得新突破,为平湖组沉积背景分析提供了新的地质信息。

西湖凹陷新生代主要经历了6次构造运动,分别是雁荡运动(T100)、瓯江运动(T40)、平湖运动(T30)、花港运动(T20)、龙井运动(T12)和冲绳海槽运动(T0),形成了凹陷内5个区域性不整合面,将西湖凹陷新近系自下而上分为五大构造层系(表1):裂陷构造层(T100—T40)、断拗转换构造层(T40—T30)、拗陷构造层(T30—T20)、反转构造层(T20—T12)和区域沉降构造层(T12—T0)。平湖组位于断拗转换构造层,是本文研究的目的层系。

平湖组沉积期西湖凹陷处于断拗转换期,平北地区构造活动强烈,NE-NEE向生长断层持续活动,断层多断穿至平湖组顶界,且呈断阶状组合样式^[31-33]。复杂多变的沉积水动力与有利的成煤环境使得平北地区平湖组沉积了一套含薄煤层的砂泥层序。目前,对于平湖斜坡带平湖组的沉积相划分主要依据西湖凹陷平湖组海陆过渡相的沉积背景,如三角洲、潮坪与潟湖等,对于平湖斜坡带的古地貌特征以及与西湖凹陷其他地区沉积背景与沉积作用的差异性分析还没有系统展开,砂体成因分析存在模

式化与碎片化等问题。

平湖斜坡带油气勘探已进入构造岩性圈闭勘探开发阶段,需要对砂体成因与微相类型进行精细研究,但由于取芯井较少,取芯进尺有限,揭露的沉积学信息不足以支撑详细的微相类型划分与砂体分布规律预测研究。在海上油气田岩芯资料较少的情况下,本文通过泥岩、碳质泥岩、薄煤层等细粒沉积物岩屑样品的微观岩石学分析,弥补砂岩岩芯资料少与沉积学信息碎片化的缺陷,总结不同沉积环境下的泥岩、碳质泥岩与煤层的岩石学特征、沉积过程与沉积物搬运方式,进一步厘清平湖斜坡带平湖组的沉积模式,为西湖凹陷平湖组的沉积背景分析提供新的信息。

2 平湖组储集砂体发育特征

多数文献认为西湖凹陷平湖组总体上为海陆过渡相沉积^[4-8, 23-24],但不同构造带的古地理环境与沉积特征差异较大,有些地区以河流作用为主^[11, 34-36],有些地区则处于潮汐作用为主的潮坪环境^[16, 19]。平湖组沉积时期,西湖凹陷西缓坡带以河流作用为主,发育物源来自虎皮礁隆起、海礁隆起—渔山隆起的三角洲-陆棚体系;西湖凹陷东陡坡带,以阵发性水流沉积为主,发育物源来自钓鱼岛隆褶带的扇三角洲或近岸水下扇砂砾质-陆棚体系;西部斜坡带

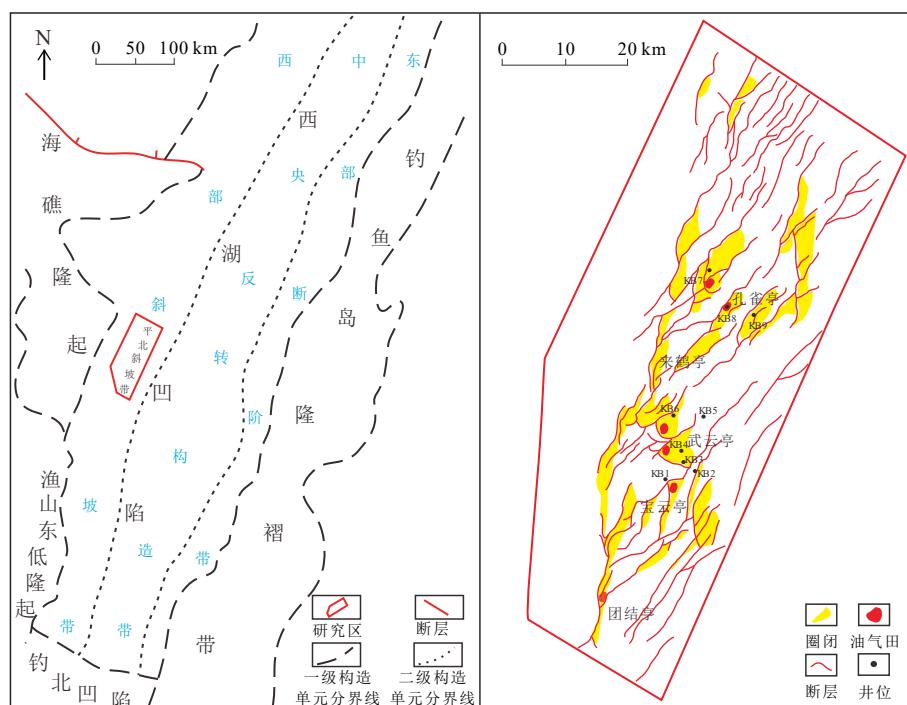


图1 西湖凹陷构造单元与平湖构造带北部构造位置

Fig.1 The structural units of Xihu Sag and the structural position of the northern part of the Pinghu Slope

表 1 西湖凹陷新生代地层层序与演化阶段

Table 1 The Cenozoic stratigraphic sequence, tectonic evolution stage of the Xihu Sag

地质年代		时间/Ma		沉积地层	反射界面	构造运动	演化阶段		主应力方向	断裂期次			
纪	世												
第四纪	更新世	2.6		东海组	T0	冲绳海槽运动	区域沉降		整体较弱	四期			
	上新世			三潭组	T10								
新近纪	中新世	5.3		柳浪组	T12	龙井运动	反转期						
				玉泉组	T16								
				龙井组	T20	花港运动	拗陷期						
		23		花港组	T30								
		34		平湖组 平一段 平五段	T40	平湖运动	断坳转换期		三期				
古近纪	渐新世	42.5		宝石组	T80	瓯江运动	裂陷二幕	二期					
		45.9		八角亭组 (?)	T100	雁荡运动	裂陷一幕						
		53											
		56.5											
	古新世	65											

三角洲体系外缘, 受潮汐影响较大, 发育线状潮汐沙脊砂体; 西次洼、中央反转构造带与东次洼以浅水陆棚的潮汐作用为主^[7-8]。平湖斜坡带处于西湖凹陷西部斜坡带, 靠近凹陷西部的海礁隆起与渔山隆起, 其外侧还发育宝云亭古隆和宁波 14-5 古隆, 受河流影响较大, 斜坡带内发育宁波 19 洼与宁波 8 洼沉降中心等地貌单元。

从岩性组合上看, 平湖斜坡带平湖组以砂泥互层组合为主, 夹多个薄煤层。平湖斜坡带平湖组普遍发育箱形、钟形、指状测井相的砂体, 底部发育冲刷面, 冲刷面上有滞留沉积的砂砾岩, 砂体中发育特殊的菱铁矿纹理交错层理, 具有典型水道砂体的正旋回序列(图 2)。上述这些砂体中, 典型的羽状交错层理少见, 与砂岩互层的粉砂岩、泥质粉砂岩中普遍发育复合层理与生物扰动构造, 其潮汐作用或潮汐改造的典型标志还不明确。

KB8 井平湖组主要岩性为箱状或钟形砂岩与深灰色泥岩互层, 砂岩中发育底砾岩, 含菱铁矿交错纹层。平湖组砂岩中普遍发育交错层理, 交错层理中普遍发育菱铁矿纹层, 而在背闪射图片中, 菱铁矿呈薄膜状覆盖在石英或长石碎屑颗粒表面, 体现了强水动力条件下的菱铁矿特征。与菱铁矿交错层理砂岩互层的泥岩中普遍发育菱铁矿结核, 表明研究区水体中菱铁矿含量较高, 指示相对封闭水介质环境^[37]。平湖组泥岩中普遍富含碳质, 依据碳质含量可分为含泥薄煤层、碳质泥岩与粉砂质纹层泥岩, 碳质表明陆源有机质供给丰富, 并受河水的搬运与改造。平湖组砂岩以块状正旋回砂岩为主,

为多期水道砂体叠置的复合水道砂砾岩与砂岩。平湖斜坡带平湖组地层厚度变化不大, 砂岩以低角度前积反射为特征, 表明沉积坡度平缓(图 3)。

平湖斜坡带不同部位砂岩的粒度差异较大, 但其测井相多以箱形与钟形为主, 与砂岩互层的薄煤层的测井响应差异小。平湖斜坡带砂岩岩芯少, 取芯井段长仅几米, 而且较分散, 典型的羽状交错层理等典型潮汐作用的沉积构造少见, 局部粉砂岩中见脉状层、波状层理、透镜状层理等复合层理类型, 目前主要依据沉积模式将最大海泛面附近的 P7 砂组中的中厚层泥岩划分为潮坪沉积。P7 砂组以泥岩与薄煤层为主, 夹薄层粉砂岩, 厚层砂体不发育, 目前普遍认为其是最大海泛面附近的沉积产物^[16,18-19]。平湖组中厚层箱形与钟形砂岩是以河流作用为主还是以潮汐作用为主, 是目前岩相分析中的难点难题。因此, 需要通过对砂岩互层泥岩、碳质泥岩及煤层微观岩石学特征差异性的对比分析, 揭示研究区不同地区沉积作用的差异性, 为砂体岩相划分与成因评价提供新的依据。

3 泥岩与煤层的微观岩石学分析

研究区平湖组薄煤层与泥岩的岩屑颗粒由于具有较强的韧性, 普遍比砂岩的岩屑颗粒大, 并保留了原始岩石结构(图 4), 可以用于制作岩石薄片, 为泥岩与薄煤层岩屑颗粒的微观岩石学分析提供了可能。通过岩芯-岩屑一体化、砂泥一体化分析, 提高样品的覆盖率与控制面, 可以解决钻井条件下

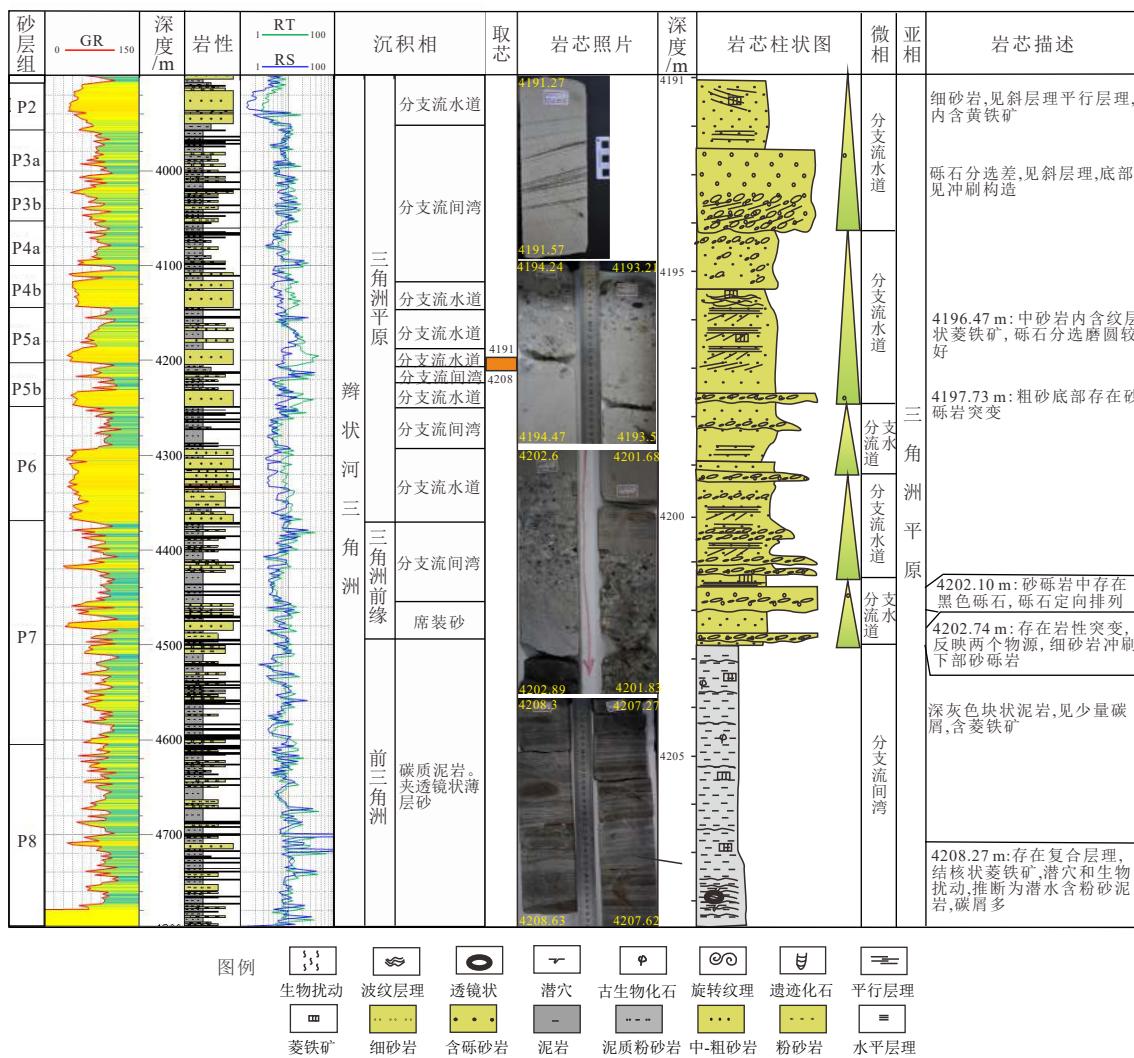


图2 KB8井平湖组岩性组合及其典型沉积构造与菱铁矿类型

Fig.2 Lithologic association, typical sedimentary structure, and siderite type of the Pinghu Formation in Well KB8

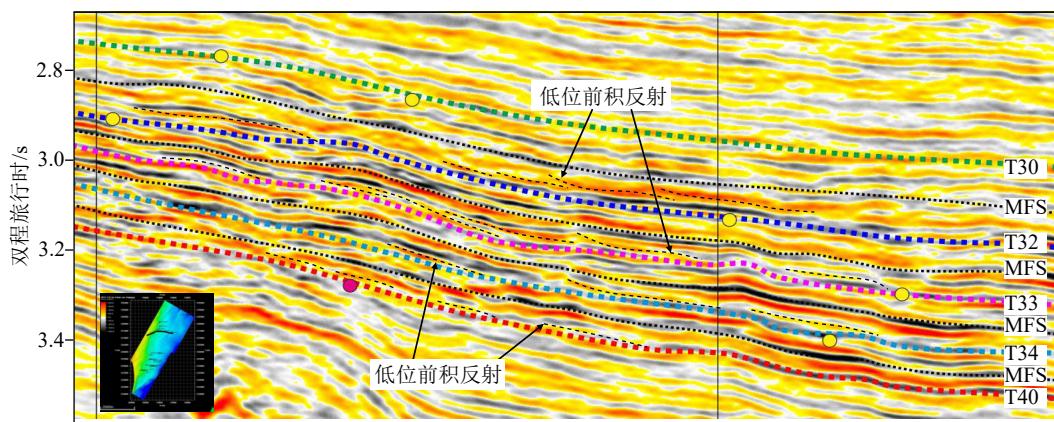


图3 平湖斜坡北段平湖组的地震反射特征

Fig.3 Seismic reflection profiles of the Pinghu Formation in the northern section of the Pinghu Slope

沉积学分析中样品取样难的问题。由于粒度小、观察难度大以及受实验条件的限制,占沉积记录2/3的细粒物质的沉积特征及成因等问题成为沉积学界乃至地质学界的薄弱研究领域。由于研究区

岩芯资料有限,取芯井段短,难以覆盖完整的沉积序列,平湖组砂体成因主要是依据西湖凹陷总的沉积模式与零星的岩芯展开,导致平湖斜坡带沉积学研究普遍存在碎片化与模式化的问题。论文拟采

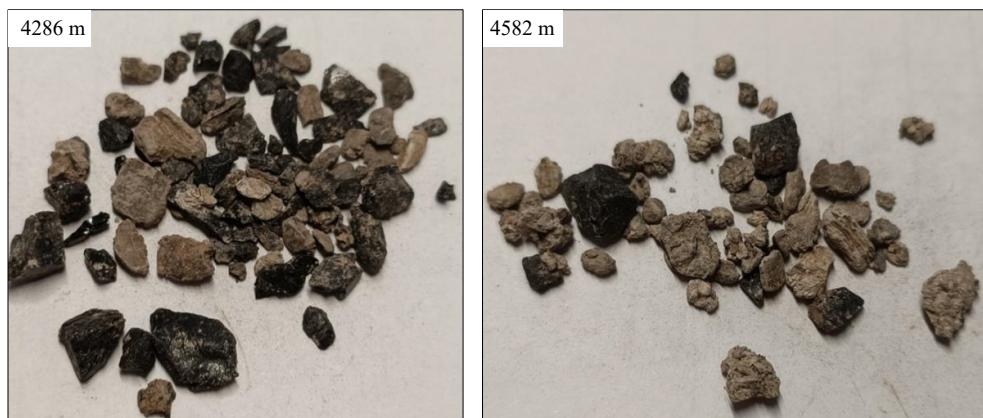


图 4 KB8 井平湖组典型薄煤层与泥岩岩屑图片

Fig.4 Typical pictures of coal seams and mudstones debris in the Pinghu Formation

用岩芯-岩屑一体化、砂-泥一体化的技术思路, 对重点时段进行密集的泥岩与薄煤层岩屑取样, 增加样品的控制密度, 展开详细的沉积学分析, 以建立连续样品控制的垂向沉积演化序列, 并对细粒沉积物单岩屑颗粒的沉积学分析进行了探索。目前普遍采用 PDC 钻井技术, 导致岩屑颗粒细小, 不利于岩石微观结构分析。通过研究区平湖组细粒沉积物(泥页岩)岩屑颗粒的不同尺度微观结构分析, 表明煤层、泥岩的单颗岩屑能够保存原始的岩石结构, 结合泥岩碎屑颗粒排列方式、粒度分布、典型金属硫化物、有机质类型、黏土矿物类型等分析实验, 能够提供大量的沉积学与地球化学信息, 辅助解决砂岩沉积作用中的难点问题。

3.1 岩屑挑选与制样

研究区岩芯资料较少, 论文对重点时段展开重点井岩屑的挑样与分析工作。通过岩屑样品的预处理分析, 发现泥岩、碳质泥岩与煤层的岩屑颗粒普遍比砂岩岩屑大, 岩屑颗粒完全可以满足普通光学薄片、电镜的制样要求, 而且透射光、电子显微镜的微观岩石学特征能够揭示岩石结构与沉积学方面的大量信息, 为井下沉积学分析提供了新的思路, 可以有效解决井下沉积学分析中样品少的难题。采样与样品预处理是煤层与泥页岩屑颗粒微观岩石学分析的关键, 需要严格岩屑颗粒的挑选与预处理, 最大限度地减少泥浆、岩屑混合、掉渣对样品质量的影响。泥岩岩屑样品现场采集、室内预处理、精细定位制样与砂岩样品差异较大, 沉积矿物与隐晶质矿物识别是细粒沉积物测试分析中的关键环节, 分析流程如下: (1) 岩屑分类与岩性归位; (2) 现场岩屑的鉴别、描述与取样, 尽量减少混样、掉渣与泥浆的影响; (3) 室内精细处理: 为了防

止岩屑破裂, 不能用淡水冲洗, 只能用毛刷剥离岩屑颗粒表面泥浆; (4) 精细制片与定位制样: 盐水磨片、典型纹层、矿物等的精细定位制样; (5) 微观岩石学观察: 注意碎屑颗粒排列、隐晶质矿物(碎屑黏土)与金属硫化物识别。

3.2 微观岩石学分析与“三煤三铁”划分

通过平湖斜坡带平湖组岩屑的微观岩石学特征与菱铁矿形态特征分析, 结合岩芯中的宏观沉积构造, 将研究区的菱铁矿划分为 3 种类型: 交错层理纹层状菱铁矿、结核状菱铁矿、纹层状与凝胶状条带菱铁矿(图 5)。平湖组碳质泥岩中的菱铁矿可能主要由同生期成岩过程中的生物异化铁还原作用(DIR)形成, 也可能出现在砂岩的交错纹理中。澳大利亚、西非铁矿主要赋存在太古代—元古代碳酸盐岩中, 其中菱铁矿主要为泥晶与微晶菱形体, 它的形成与生物作用紧密相关, 是从海水中直接沉淀而形成, 其沉积背景主要是弱氧化-弱还原的浅水环境, 通过生物作用将 Fe^{3+} 在缺氧、低硫、富铁的较浅水海洋环境中发生反应析出 FeCO_3 。菱铁矿广泛分布在湖泊沼泽环境中, 除了 DIR 外, 还有细菌硫酸盐还原反应(BSR)或甲烷厌氧氧化反应(AOM)参与到有机碳转换成无机碳的过程中^[37-41]。

交错层理纹层状菱铁矿对应分支流水道, 结核状菱铁矿对应分支流间湾, 纹层状菱铁矿与凝胶状菱铁矿和变形纹理的出现对应前三角洲和局限洼地。交错层理纹层状菱铁矿泥岩与碳质层纹层泥岩共生, 该类泥岩与粉砂质薄煤层共生, 煤层中含大量惰质组分, 表明水动力强度大, 煤层受冲刷改造明显; 结核状菱铁矿泥岩与碳质层纹层泥岩、薄煤层共生, 泥岩中碳质纹层较发育, 薄煤层较纯, 但草莓状黄铁矿少见; 纹层状菱铁矿、凝胶状菱铁

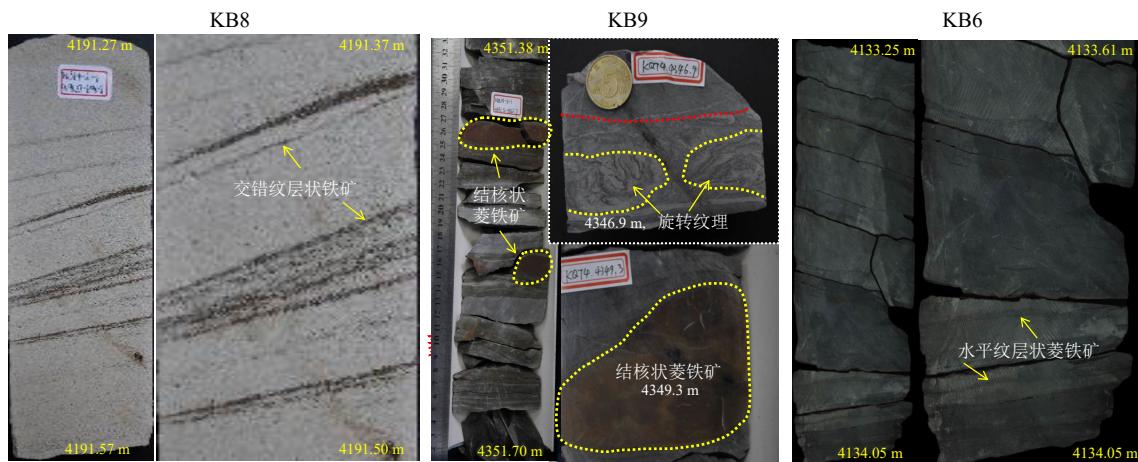


图 5 平湖组三种典型菱铁矿的形态特征

Fig.5 Morphological characteristics of three typical types of siderite in the Pinghu Formation

矿与碳质泥岩共生，主要分布在宁波 19 洼内部，泥岩中碳质纹层丰富，薄煤层含藻质体等水生显微组分，富含草莓状黄铁矿（图 6）。通过微观岩石学分析，将平湖组煤及碳质泥岩划分为 3 种类型，分别与菱铁矿 3 种类型相对应，形象称为“三煤三铁”，为研究区细粒沉积物的岩相划分提供了新的线索。

4 煤与碳质泥岩的古环境意义

研究区平湖组中煤层普遍较薄并分散，平均厚度 1~3 m。单煤层的地震预测难度大，如果把含薄煤层地层单元作为一个整体，称之为含煤层系，在地震上可以预测：当厚层的含煤层系与中厚层砂岩互层时，其地震反射特征表现为低频连续强反射。同时，通过“三煤三铁”的古环境分析，明确了不同类型薄煤层的成因与古环境意义，有效区分了三角洲平原、三角洲前缘与洼陷等亚环境薄层、菱铁矿微观岩石结构的差异性，为潮河联控复杂水动力条件下优势相带识别提供了地质依据，为薄煤系地层单元的沉积构型分析提供了新的思路，为平湖组不同沉积相类型中砂体成因解释与薄煤层的区分提供了新的依据。

4.1 泥岩与煤层的岩相分析

通过对平湖斜坡带平湖组薄煤层的微观岩石学分析，发现研究区薄煤层除少数为纯煤层外，绝大多数为含泥煤层、含粉砂质纹层煤层和碳质泥岩与碳质粉砂岩（图 7）。表明煤层受到分支流水道频繁冲刷，薄煤层往往与碳质泥岩、碳质粉砂岩一起构成“煤系层系”，多位于分支流水道砂体之上，代表分支流水道改造，或三角洲废弃后的产物。

平湖斜坡北段宁波 19 洼内的煤层通常较纯，或含泥质，碳质泥岩内含丰富的草莓状黄铁矿与重晶石，粉砂质含量较低，受分支流水道的影响较弱。宁波 19 洼碳质泥岩中还见到碳屑团块与旋转纹理，是陡坡背景下的准同生滑塌变形产物（图 8）。平湖组沉积早期，断裂活动强度大，宁波 19 洼水体较深，部分达到浪基面之下，充填薄煤层与碳质泥岩，为前三角洲—局限浅海沉积。KB1 井 P8 砂组见重力断层、旋转纹理的碳质泥岩与泥质粉砂岩，为典型的滑塌变形构造，表明其为沉积陡坡。同时在上述旋转纹理与重力断层内见纹层状的草莓状黄铁矿与碳质纹层互层，表明其为水体相对较深的还原环境。

通过薄煤层与泥岩岩屑的微观岩石学与沉积作用分析可以弥补砂岩取芯段短、零星分布的局限性。通过砂泥岩一体化分析，能够为砂岩沉积作用与成因分析提供更丰富的古地理信息。KB3 井位于宁波 19 洼内，平湖组沉积早期 P9 砂组发育三角洲分支流水道前缘箱形砂岩，与砂岩互层的泥岩岩屑中富含碳质纹层，碳质泥岩中见到大量草莓状黄铁矿，表明宁波 19 洼受到陆源碎屑供给的影响较大，同时还存在相对封闭的静水环境；平湖组沉积晚期 P3 砂组泥岩中见到丰富的植干化石碎片，碎片呈长条状分布在碳质泥岩中，表明宁波 19 洼已被浅沼泽化，碳质沉积后还受到后期水流的改造（图 9）。

4.2 泥岩与煤层的古地理背景探讨

通过分析细粒沉积物碎屑黏土矿物，可以有效地揭示砂岩沉积的水介质环境。海水介质主导的细粒沉积物中，泥岩中碎屑黏土矿物以伊利石、绿

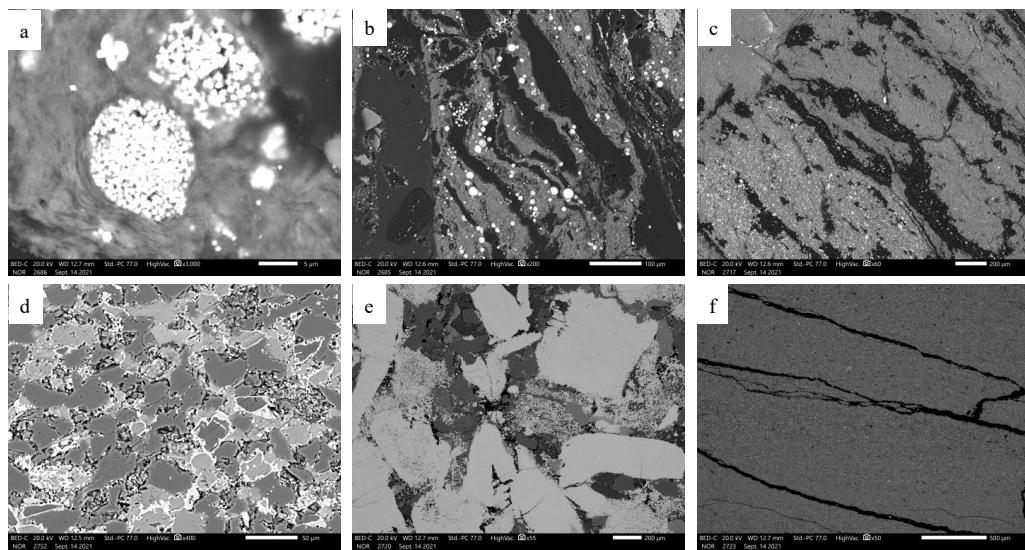


图 6 平湖组典型煤层的显微岩石结构特征与硫化物

a: 草莓状黄铁矿与薄煤层, KB1 井, P8 砂组, 背闪射; b: 泥质煤中草莓状黄铁矿, KB1 井, P8 砂组, 背闪射; c: 泥质与碳质互层, KB1 井, P8 砂组, 背闪射; d: 颗粒表面的菱铁矿包壳, KB8 井, P5 砂组, 背闪射; e: 碳质粉砂岩, KB8 井, P5 砂组, 背闪射; f: 碳质纹层, KB9 井, P3 砂组, 背闪射。

Fig.6 Microstructures and sulfide types in typical coal seams of the Pinghu Formation

a: Strawberry-shaped pyrite and coal seam in P8 sand unit of Well KB1; back flash; b: strawberry-shaped pyrite in argillaceous coal in the P8 sand unit of Well KB1; back flash; c: argillaceous and carbonaceous interbed in the P8 sand unit of Well KB1; back flash; d: siderite cladding on particle surface in the P5 sand unit of Well KB8; back flash; e: carbonaceous siltstone in the P5 sand unit of Well KB8; back flash; f: carbonaceous lamina in the P3 sand unit of Well KB9; back flash.

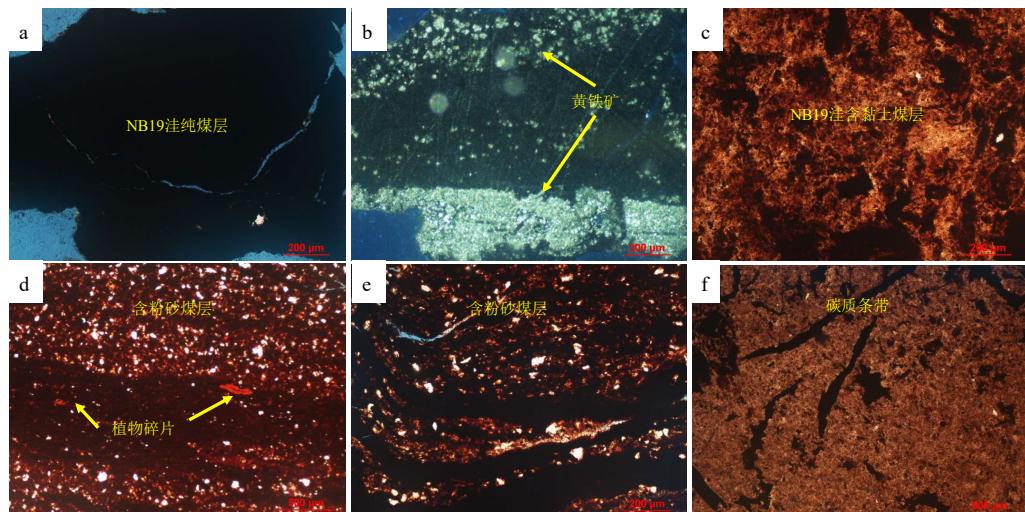


图 7 平湖组典型煤层的显微岩石结构特征

a: 纯煤层, KB3 井, P9 砂组, 单偏光; b: 纯煤层, 含草莓状黄铁矿, KB3 井, P9 砂组, 反射光; c: 泥质煤, KB3 井, P7 砂组, 单偏光; d: 粉砂质纹层煤, KB2 井, P4 砂组, 单偏光; e: 粉砂质纹层煤, KB8 井, P4 砂组, 单偏光; f: 碳质条带, KB7 井, P9 砂组, 单偏光。

Fig.7 Microstructures of typical coal seams in the Pinghu Formation

a: Pure coal seam in P9 sand unit of Well KB3; single polarized light; b: pure coal seam, strawberry-shaped pyrite in P9 sand unit of Well KB3; reflected light; c: argillaceous coal in P7 sand unit of Well KB3; single polarized light; d: silty laminated coal in P4 sand unit of Well KB2; single polarized light; e: silty laminated coal in P4 sand unit of Well KB8; single polarized light; f: carbon strip in P9 sand unit of Well KB7; single polarized.

泥石为主;以淡水介质主导的细粒沉积物中,泥岩中碎屑黏土矿物以高岭石为主。分支流间湾泥岩中,富含植物碎片与碳质;而潮坪泥岩中,植物碎片

与碳质含量较低。相对封闭水体中,如潟湖、分支流间湾,隐晶质的菱铁矿含量较高,富含草莓状黄铁矿与重晶石;而在开放潮坪环境,或开放的浅海

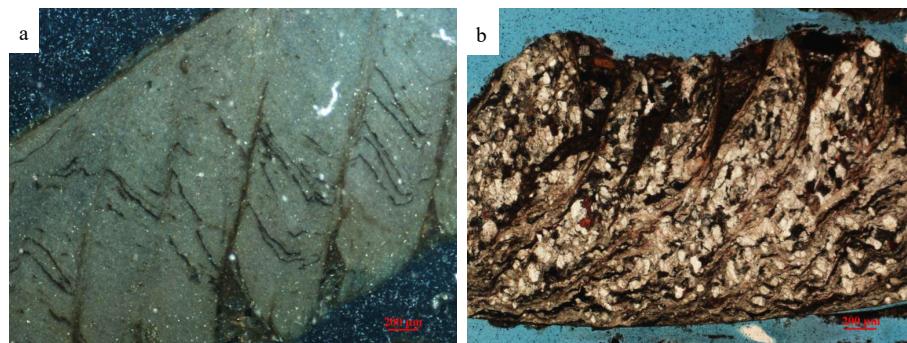


图 8 KB1 井泥岩中典型的滑塌变形构造与菱铁矿

a: 重力断层 P8 砂组, b: 旋转纹层。

Fig.8 Typical structure of slumping deformation and siderite in mudstone of Well KB1

a: Gravity fault in P8 sand unit, b: rotated laminae.

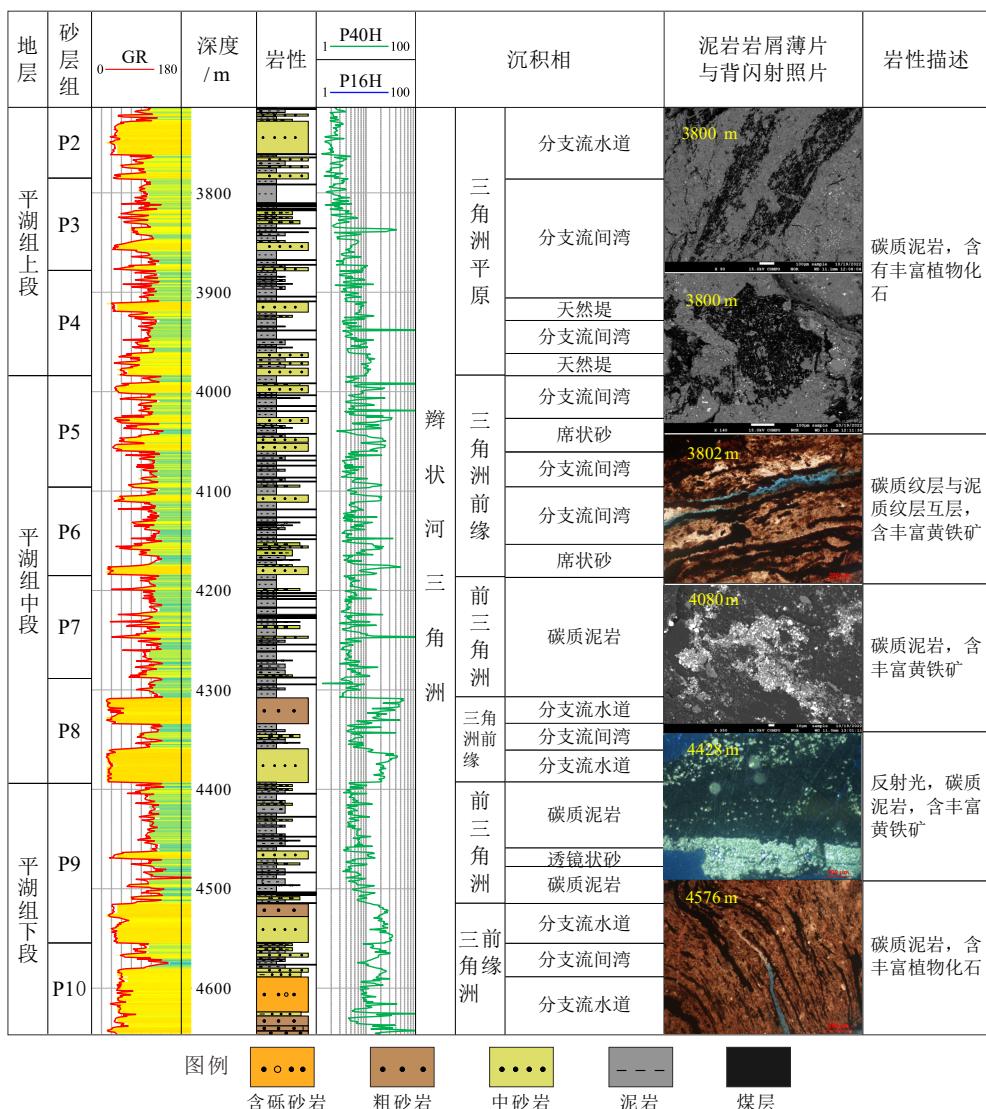


图 9 KB3 井单井相与泥岩岩屑颗粒的微观岩石学特征

Fig.9 Microfacies and micro-petrological characteristics of mudstone debris in Well KB3

背景中,以海绿石为主。平湖斜坡区由于斜坡外围宝云亭古隆、NB14-5古隆,以及反向断阶等的分割作用,研究区与西湖凹陷海湾区处于半隔离状态,

使得研究区平湖组沉积时期处于一个相对封闭水介质环境,具有典型淡化潟湖的沉积特点。平湖斜坡北段平湖组泥岩的黏土矿物以高岭石为主,混合

少量伊利石, 体现了淡水主导近海潟湖的水介质特点(图 10)。现有钻井揭示的沉积构造中, 与潮汐作用相关的典型沉积构造不多。因此, 平湖组沉积时期, 尽管西湖凹陷整体处于海湾背景, 但由于平湖斜坡带靠近海礁隆起与渔山低隆起, 受陆源供给的影响大, 水介质明显淡化, 再加上外围宝云亭等古隆的限制作用, 海水对陆源碎屑的搬运改造不明显(图 11)。

在大量岩屑颗粒微观岩石学分析基础上, 辅助岩芯观察, 新发现了交错层理纹层状、结核状、纹

层状 3 种类型的菱铁矿, 以及碳质粉砂岩、粉砂质纹层煤、泥岩煤和纯煤层 3 类薄煤层, 分别对应不同的古地理背景(表 2), 揭示了三角洲平原分支流水道夹层煤、分支流间湾粉砂质纹层煤及局限洼地薄煤层的差异性, 反过来为互层的箱状、钟形砂体的岩相划分提供了新线索。这些碳质泥岩中富含完整的植物碎片与菱铁矿, 表明平湖斜坡带平湖组沉积时期海水对泥岩的改造较弱, 海水相对局限, 古地理背景为相对封闭的潟湖环境。

煤与泥岩中的微古生物组合也能揭示古气候、

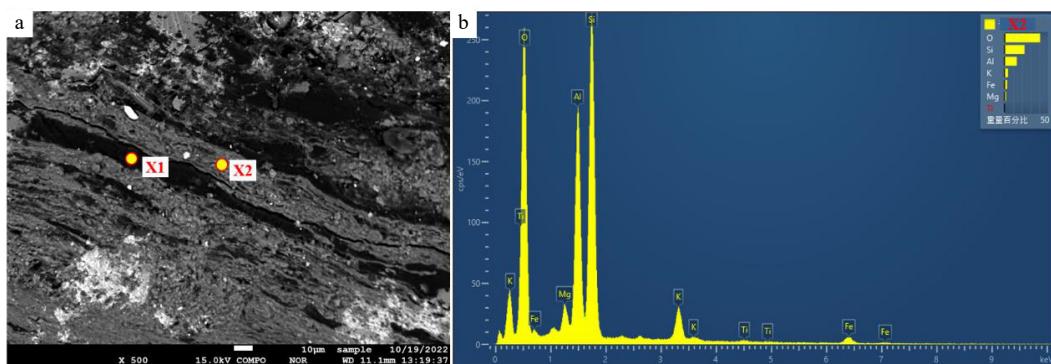


图 10 KB3 井平湖组碳质泥岩中的黏土矿物能谱图

a: 碳质泥岩的背散射图片, X1 为碳质纹层, X2 为黏土质纹层; b: 黏土质纹层的能谱。

Fig.10 Energy spectrum diagram of clay minerals in carbonaceous mudstone of the Pinghu Formation in Well KB3

a: The backscatter image of carbonaceous mudstone; X1: carbonaceous laminae, X2: clay laminae; b: energy spectrum of clayey laminae.

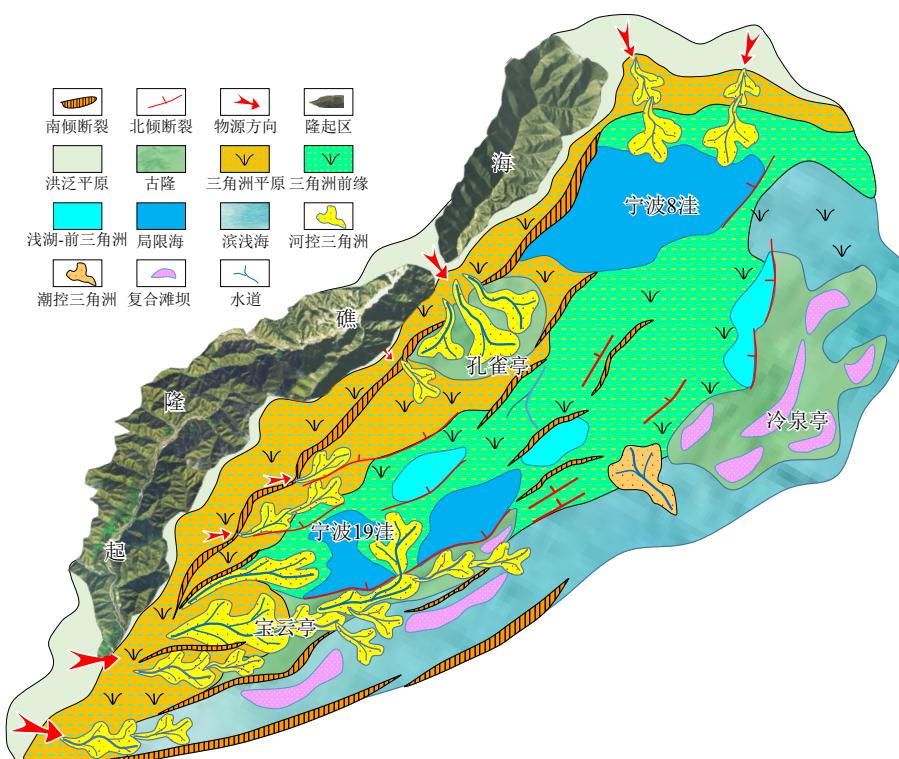


图 11 平湖斜坡北段平湖组沉积模式图

Fig.11 Sedimentary model of the Pinghu Formation in the northern section of the Pinghu Slope

表2 平湖组泥岩与煤层的微观岩石学类型及古地理指示意义

Table 2 Paleogeographic implications of micro-petrology of mudstone and coal seams in the Pinghu Formation

菱铁矿与煤层、碳质泥岩类型	微观岩石学特征	古环境
粉砂质纹层泥岩与薄煤层、菱铁矿交错纹理层理	泥质、碳质纹层与粉砂质纹层互层，长英质碎屑颗粒表面覆盖菱铁矿膜	天然堤与分支流水道砂体
富硫化物薄煤层、结核状菱铁矿泥岩	纯的薄煤层、含菱铁矿结核的碳质泥岩	分支流间湾静水沉积环境
富含草莓状黄铁矿薄煤层与碳质泥岩、纹层状菱铁矿	碳质纹层与菱铁矿纹层交互，富含草莓状黄铁矿	浪基面下静水潟湖环境

陆源供给强度与沉积水介质条件。平湖组泥岩、碳质泥岩与煤层的微体化石组合中,孢粉占绝对优势,浮游藻类在组合中所占比例很小,陆源有机质供给占绝对优势。浮游藻类中既有淡水藻类,如盘星藻、环纹藻等,也有海相沟鞭藻;盘星藻含量总体较少,主要分布在平湖组沉积晚期;海相沟鞭藻的总体含量很低,分布较为局限,主要见于平湖组的中、下部^[3]。上述微体生物化石组合表明,平湖斜坡带平湖组的海陆过渡环境位于亚热带,发育以河流沉积作用为主导的局限海水背景,且陆源供给丰富^[12]。大型沼泽环境与厚煤层需要稳定古地貌环境,地下水位突然升高或下降与海侵等都会影响沼泽的发育,脉动式的频繁海侵不利于沼泽及其植被的稳定发育,因此平湖组薄煤层体现了频繁的海平面升降或洪水侵蚀作用^[35-36]。薄煤层与暗色泥岩有机质显微组分包括结构镜质体、均质镜质体、基质镜质体、孢粉体、树脂体、丝质体等,煤层沉积序列主要有障壁-潟湖、三角洲平原分流间洼地及三角洲前缘分流间湾,其中三角洲含煤序列是本区的主要含煤序列。西湖凹陷西部斜坡带平湖组的岩相、粒度、古生物、地球化学以及测井相等综合研究表明,平湖斜坡北段平湖组含煤岩系应为陆相淡水为主的沉积体系,其沉积时期水体较浅,水体具有振荡的特征,煤岩系以还原环境下的湖泊-沼泽相沉积为主,局部区域存在潮汐影响。煤系烃源岩的分子组成以陆源芳烃化合物为主,Pr/Ph比值高达3.5~8.5,指示其形成于弱氧化的沼泽环境^[40-41]。

综合平湖斜坡带最新勘探成果,结合碳质泥岩和煤层的煤岩学与微观岩石学特征,建立了平湖斜坡带平湖组的沉积模式(图11):平湖斜坡带平湖组沉积时期发育近海局限潟湖,主要发育3大物源供给方向,包括孔北轴向物源、宝云亭西轴向物源和武云亭-来鹤亭-孔雀亭一线径向物源。主物源供给对研究区砂体的控制作用也十分明显,主水系与输导方向决定了沉积区砂体规模和砂体展布的差异。轴向物源供给方向有利于大型三角洲的发育,砂体规模较大;而水系规模较小的径向物源区通常

对应的三角洲规模也较小;碳质泥岩与薄煤层主要分布在相对封闭的分支流间湾与潟湖局限洼地。

5 结论

海上油气田钻井岩芯资料少,一直存在样品取样难的问题,难以展开系统的沉积学样品分析,沉积学认识上存在碎片化与模式化的缺陷。本文采用岩芯-岩屑一体化、砂-泥一体化的技术思路,对重点时段进行密集的岩芯-岩屑采样与沉积学分析,建立了连续样品覆盖的垂向沉积演化序列。尽管目前普遍采用PDC钻井技术,导致岩屑颗粒细小,但泥页岩的岩屑颗粒相对较大,通过岩屑颗粒不同尺度微观结构分析,可以揭示岩石微观结构特征与沉积学信息,如泥页岩中碎屑颗粒排列方式、粒度分布、典型金属硫化物、有机质类型、黏土矿物类型等,能够提供大量的沉积学与地球化学信息,辅助解决砂岩沉积作用分析中的难点问题。

(1)薄煤层与泥岩的微观岩石学特征表明,平湖组沉积时期平湖斜坡带处于淡化的潟湖环境,泥岩中黏土矿物以高岭石为主,储集砂体主要为分支流水道砂体,沉积作用以河流作用为主。与前人海陆过渡与河潮交互的认识对比,论文研究成果更突出了平湖斜坡带平湖组河流作用的主导性,强调了西湖凹陷平湖组海陆过渡背景框架下不同地区沉积作用的差异性,为西湖凹陷西部斜坡带近岸古隆背景下的沉积相研究提供了新的研究案例。

(2)细粒物的微观沉积学研究不仅有着重要的沉积学意义,而且有助于更好地精细评价与预测烃源岩,可以有效解决我国近海井下沉积学分析中样品少的难题。泥页岩与煤的微观沉积学分析方法不仅可以有效解决生产中岩芯资料有限的局限性,充分挖掘岩屑资料的研究潜力,还可以辅助解决砂岩水动力与沉积成因分析、缓坡浅水背景的沉积微相编图等难点问题。通过煤层、泥岩岩屑颗粒的微观岩石学分析,探索了砂-泥一体化的沉积相分析技术方法,解决了海上沉积学分析中样品少的问题,

增加了沉积序列样品的控制密度, 建立了平湖构造带北部平湖组近海潟湖的沉积模式。

参考文献 (References)

- [1] 彭伟欣. 东海油气勘探成果回顾及开发前景展望 [J]. 海洋石油, 2001, 21(3): 1-6. [PENG Weixin. Prospects for developments and prospects for oil/gas exploratory results in the East China Sea [J]. *Offshore Oil*, 2001, 21(3): 1-6.]
- [2] 叶加仁, 顾惠荣, 贾健谊. 东海西湖凹陷油气地质条件及其勘探潜力 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 111-116. [YE Jiaren, GU Huirong, JIA Jianyi. Petroleum geological condition and exploration potential of Xihu Depression, East China sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(4): 111-116.]
- [3] 陈琳琳, 王丽顺. 东海西湖凹陷新统平湖组沉积层序特征及控相机制讨论 [J]. 上海地质, 1990(2): 51-61. [CHEN Linlin, WANG Lishun. Analysis of depositional sequence and controlling Facies Mechanism in Pinghu Formation, Xihu Sag, East China Sea [J]. *Shanghai Land & Resources*, 1990(2): 51-61.]
- [4] 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.]
- [5] 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.]
- [6] 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.]
- [7] 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.]
- [8] 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.]
- [9] 王果寿, 周卓明, 肖朝辉, 等. 西湖凹陷春晓区带下第三系平湖组、花港组沉积特征 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 257-261,265. [WANG Guoshou, ZHOU Zhuoming, XIAO Chaohui, et al. Sedimentary characteristics of Eogene Pinghu Formation and Huagang Formation in Chunxiao zone of Xihu Lake Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(3): 257-261,265.]
- [10] 胡明毅, 沈娇, 胡蝶. 西湖凹陷平湖构造带平湖组砂岩储层特征及其主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 185-191. [HU Mingyi, SHEN Jiao, HU Die. Reservoir characteristics and its main controlling factors of the Pinghu Formation in Pinghu Structural Belt, Xihu Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2): 185-191.]
- [11] 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(江汉石油学院学报), 2013, 35(9): 11-14. [YANG Caihong, GAO Zhaozhong, 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 (Journal of Jianghan Petroleum Institute)*, 2013, 35(9): 11-14.]
- [12] 蒋海军, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 西湖凹陷古近系沉积环境分析: 以微体古生物化石为主要依据 [J]. 岩性油气藏, 2011, 23(1): 74-78. [JIANG Haijun, HU Mingyi, HU Zhonggui, et al. Sedimentary environment of Paleogene in Xihu Sag: microfossil as the main foundation [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2011, 23(1): 74-78.]
- [13] 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.]
- [14] 吴峰, 任培罡, 谈明轩, 等. 东海西湖凹陷孔雀亭地区平湖组沉积相演变及其主控因素分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 119-130. [WU Feng, REN Peigang, TAN Mingxuan, et al. Facies evolution and its controlling factors of the Pinghu Formation in the Kongqueting area of Xihu Depression, the East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(2): 119-130.]
- [15] 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): 142-151,160. [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): 142-151,160.]
- [16] 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.]
- [17] 陈忠云, 杜学斌, 李帅. 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 [J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 780-789. [CHEN Zhongyun, DU Xuebin, LI Shuai. Distributional signatures of depositional system of Pinghu Formation, Pinghu slope, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(5): 780-789.]
- [18] 刘思琦, 张昌民, 朱锐, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖组潮汐韵律与潮汐周期分析 [J]. 中南大学学报·自然科学版, 2021, 52(10): 3703-3716. [LIU Siqi, ZHANG Changmin, ZHU Rui, et al. Analysis of tidal rhythmites and tidal cycle of Pinghu Formation in Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2021, 52(10): 3703-3716.]

- [19] 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流三角洲·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.]
- [20] 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.]
- [21] 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.]
- [22] 赵洪,蒋一鸣,常吟善,等.西湖凹陷平湖组基于沉积相标志的沉积特征研究[J].上海国土资源,2018,39(1):88-92. [ZHAO Hong, JIANG Yiming, CHANG Yinshan, et al. Study on sedimentary characteristics of the Pinghu Formation based on sedimentary facies markers in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Shanghai Land & Resources, 2018, 39 (1): 88-92.]
- [23] 于水.西湖凹陷西斜坡平湖组烃源岩沉积成因分析[J].地球科学,2020,45(5):1722-1736. [YU Shui. Depositional genesis analysis of source rock in Pinghu Formation of western Slope, Xihu Depression [J]. Earth Science, 2020, 45 (5): 1722-1736.]
- [24] 王欣,李峰,沈娇,等.西湖凹陷杭州斜坡带平湖组沉积体系及演化[J].油气地质与采收率,2022,29(4):57-68. [WANG Xin, LI Feng, SHEN Jiao, et al. Evolution of sedimentary system of Pinghu Formation in Hangzhou slope belt, Xihu Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29 (4): 57-68.]
- [25] Willis B J. Deposits of tide-influenced river deltas[M]//Giosan L, Bhattacharya J P. River Deltas—Concepts, Models, and Examples. Tulsa: SEPM Special Publication, 2005: 87-129.
- [26] Williams G E. Late Precambrian tidal rhythmites in South Australia and the history of the Earth's rotation [J]. Journal of the Geological Society, 1989, 146 (1): 97-111.
- [27] Tessier B, Gigot P. A vertical record of different tidal cyclicity: an example from the Miocene Marine Molasse of Digne (Haute Provence, France) [J]. Sedimentology, 1989, 36 (5): 767-776.
- [28] Kvale E P, Archer A W. Tidal deposits associated with low-sulfur coals, Brazil Fm. (Lower Pennsylvanian), Indiana [J]. Journal of Sedimentary Research, 1990, 60 (4): 563-574.
- [29] Li S L, Yu X H, Steel R, et al. Change from tide-influenced deltas in a regression-dominated set of sequences to tide-dominated estuaries in a transgression-dominated sequence set, East China Sea Shelf Basin [J]. Sedimentology, 2018, 65 (7): 2312-2338.
- [30] Longhitano S G, Mellere D, Steel R J, et al. Tidal depositional systems in the rock record: a review and new insights [J]. Sedimentary Geology, 2012, 279: 2-22.
- [31] Boldt K V, Nittrouer C A, Ogston A S. Seasonal transfer and net accumulation of fine sediment on a muddy tidal flat: Willapa Bay, Washington [J]. Continental Shelf Research, 2013, 60: S157-S172.
- [32] 何将启,梁世友,陈拥锋,等.东海盆地西湖凹陷新生代构造演化对油气的控制作用:以平湖组油气响应为例[J].石油实验地质,2008,30(3):221-226. [HE Jiangqi, LIANG Shiyou, CHEN Yongfeng, et al. Control on petroleum by Cenozoic tectonic evolution in the Xihu Sag, the East China Sea Basin: taking petroleum response of the Pinghu Formation as an example [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30 (3): 221-226.]
- [33] 李云波,姜波,赵志刚,等.西湖凹陷构造发育及其对平湖组煤系的控制:与黄县盆地对比分析[J].中国矿业大学学报,2014,43(3):432-441. [LI Yunbo, JIANG Bo, ZHAO Zhigang, et al. Tectonic development characteristics and their influence on coal seam distribution characteristics in Xihu Sag, East China Sea: comparative analysis to the Huangxian Basin in Shandong province [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43 (3): 432-441.]
- [34] 李居云,姜波,屈争辉,等.东海西湖凹陷构造演化及控煤作用[J].煤田地质与勘探,2016,44(5):22-27. [LI Juyun, JIANG Bo, QU Zhenghui, et al. Tectonic evolution and control of coal in Donghai Xihu Sag [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44 (5): 22-27.]
- [35] 谢国梁.西湖凹陷平北地区平湖组聚煤规律[D].中国矿业大学硕士学位论文,2014:119. [XIE Guoliang. The coal accumulation patterns of Pinghu Formation in Pingbei area, Xihu Depression [D]. Master Dissertation of China University of Mining and Technology, 2014: 119.]
- [36] 杨秀清,毛景文,张作衡,等.条带状铁建造:特征、成因及其对地球环境的制约[J].矿床地质,2020,39(4):697-727. [YANG Xiuqing, MAO Jingwen, ZHANG Zuoheng, et al. Banded iron formations: their characteristics, genesis and implications for ancient Earth's environment [J]. Mineral Deposits, 2020, 39 (4): 697-727.]
- [37] 张一杰,沈玉林,杨天洋,等.层序格架制约下的菱铁矿发育特征:以黔西盘关地区晚二叠世煤系为例[J].煤炭学报,2020,45(S2):976-985. [ZHANG Yijie, SHEN Yulin, YANG Tianyang, et al. Development characteristics of siderite in the constraint of sequence frame: a case study of Late Permian coal measures in Panguan area [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45 (S2): 976-985.]
- [38] 杨秀清,张旭升.北祁连埃迪卡拉纪菱铁矿铁建造成因及其对海洋环境的约束[J].科学通报,2021,66(23):3032-3044. [YANG Xiuqing, ZHANG Xusheng. The genesis of Ediacaran siderite-rich iron formations in North Qilian, and its constraints on ancient oceanic conditions [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66 (23): 3032-3044.]
- [39] Raiswell R, Canfield D E. The iron biogeochemical cycle past and present [J]. Geochemical Perspectives, 2012, 1 (1): 1-2.
- [40] Li J W, Peng X T, Bai S J, et al. Biogeochemical processes controlling authigenic carbonate Formation within the sediment column from the Okinawa Trough [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 222: 363-382.
- [41] Ye J R, Qing H R, Bend S L, et al. Petroleum systems in the offshore Xihu Basin on the continental shelf of the East China Sea [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91 (8): 1167-1188.