

张锡楠, 王皖丽, 黄启彰. 东海盆地西湖凹陷平湖斜坡带典型井平湖组微量元素古环境差异及控制因素[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(7): 76-88.

ZHANG Xinan, WANG Wanli, HUANG Qizhang. Paleoenvironmental difference and controlling factor of trace elements in Pinghu Formation of typical wells in Pinghu Slope Belt of the Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(7): 76-88.

东海盆地西湖凹陷平湖斜坡带典型井平湖组微量元素古环境差异及控制因素

张锡楠, 王皖丽, 黄启彰

(中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200050)

摘要:结合地质背景,对研究区的烃源岩进行了有机地球化学综合评价,对西湖凹陷平湖组烃源岩的形成环境等方面进行了系统研究,分析探讨不同沉积环境中平湖组烃源岩的发育特征,重点研究平湖组 3 个层段沉积物中微量元素的含量及其变化特征与沉积发育时的古盐度、古氧化还原条件、古气候的对应关系,再结合有机碳含量与元素的关系,厘清烃源岩的形成环境及主控因素。研究结果表明:①平湖组各层段多含煤,烃源岩有机质丰度高,为Ⅱ₂—Ⅲ型有机质,处于成熟—高成熟阶段,有良好的生烃潜力,平湖组中段烃源岩好于上段与下段;②水体特征为淡水-半咸水,存在局部海侵过程,受到震荡式水体变化影响,平湖组沉积时,总体表现为氧化-还原沉积环境,古气候以温暖湿润为主,从早至晚逐渐向温暖湿润变化;③元素比值及有机碳含量分析表明,研究区烃源岩的发育主要受古气候与古生产力控制,温暖湿润的气候有利于平湖组烃源岩的发育,较高的古生产力主导平湖组中段有机质的富集。

关键词:元素地球化学;古环境重建;烃源岩;西湖凹陷;东海

中图分类号:P744.4;P736

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.120

0 前言

西湖凹陷是目前东海陆架盆地中重要的含油气凹陷之一^[1]。目前,该凹陷已进行了近 50 年的油气勘探,发现了多个含油气构造,近百口井钻遇油气显示,勘探潜力巨大^[2]。在油气资源潜力评价方面,已经取得了多项成果。其中,平湖组泥岩厚度大,有机质丰度高,处于成熟—高成熟阶段,属于凹陷的主力烃源岩段^[3-4]。

前人对西湖凹陷平湖组煤系烃源岩的生烃潜力已经进行了大量研究,刻画出煤系烃源岩的生烃特征。研究成果显示,平湖组烃源岩有机质富含树

脂体^[1-3],存在陆源生物和水生生物双重生源贡献,主要为腐泥腐殖型和腐殖型干酪根^[4-5],整体处于成熟阶段。纵向上,平湖组中段泥岩的有机质丰度最高,其次是上段和下段;其中,泥岩有机质丰度多为中等—好,以Ⅲ型为主,部分为Ⅱ₂型;煤岩的氢指数高于泥岩,总体评价为好烃源岩,为Ⅱ₁—Ⅱ₂型有机质,姥植较高,显微组分以镜质组为主^[6-7]。平湖组古气候特征在各层段存在变化,上、中段下部和下段等为温暖润湿型气候,中段上部为干热的气候,总体为温暖-潮湿的古气候^[8-9]。孢粉化石组合、科奇法、Sr 元素含量、Sr/Ba 比值揭示,平湖组以淡水沉积为主,局部存在海侵。元素比值指示平湖组古氧化还原特征有弱氧化-弱还原与氧化环境两种^[10-11]。前人指出,平湖组烃源岩发育受到古气候、海平面变化、古构造格局等控制^[12],且受到沉降速率、母质来源、有机质保存条件等影响^[9]。

目前广泛应用于判断沉积环境的元素及元素比值有: Fe、Mn、Sr、Ba、B、Ga、B/Ga、Sr/Ba^[13]。

收稿日期: 2024-05-15

资助项目: 中海石油重大科技专项“东海西湖凹陷大中型气田勘探方向及关键技术研究”(KJZX-2023-0101)

第一作者: 张锡楠(1990—),女,硕士,工程师,主要从事油气田地质方面的研究工作。E-mail: 475604179@qq.com

值得注意的是, 在应用时需注意甄别判断指标与实际地质的匹配性。例如: WEI 和 ALGEO^[14] 提出, B/Ga 比值对于泥岩或页岩古盐度评价准确度可达 88%, Sr/Ba 比值对于泥岩古盐度评价准确度可达 66%。使用判别指标来指示古沉积环境的盐度时, 需结合研究区域所经历过的构造与环境演化等因素。在探索古盐度时尽量选择经受少量风化作用的样品, 避免只使用其中一种判别指标来研究古盐度的变化规律。对于氧化还原敏感的微量元素, 在氧化环境和还原环境中的化学形态、溶解度明显不同, 具有不同的地球化学行为。经过多年探寻和研究, 目前已有很多指标被用来判别古水体的氧化还原条件^[15-16]。樊秋爽等^[17] 在总结前人对于古氧化还原的多项判别指标后指出, 各项指标均存在其自身影响因素, 在应用这些指标时容易出现多指标的不协调, 甚至会出现不同指标结论间的矛盾, 因此, 最好采用有机与无机指标结合使用。

本文结合西湖凹陷的地质背景、层序地层和沉积特征资料, 在前人有关构造演化、沉积特征及烃

源岩生烃潜力评价的基础上, 结合地质和地球化学资料, 进一步分析了平湖组烃源岩的形成环境, 深化了对西湖凹陷平湖组烃源岩形成环境、有机质的保存和富集规律的认识, 建立了烃源岩的发育模式, 并通过有机碳含量与判别指标的相关性分析, 综合判别了平湖组烃源岩形成及富集的主控因素。对预测优质烃源岩的分布、推动该地区的油气勘探工作具有重要意义。

1 地质背景

东海盆地位于欧亚板块东缘、西太平洋俯冲带前缘^[18], 面积约为 $26.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。西湖凹陷是东海陆架盆地中的一个次级凹陷, 位于其东部, 东接钓鱼岛隆褶带, 西有海礁隆起与渔山东低隆起等, 南临钓北凹陷, 北与福江凹陷毗邻, 东西最宽达 130 km, 南北长达 400 km, 总面积约为 $4.6 \times 10^4 \text{ km}^2$, 凹陷内部可进一步划分为西部斜坡带、中央反转构造带和东部断阶带 3 大次级构造带^[19-20] (图 1)。



据文献 [1,10] 修改

图 1 西湖凹陷地质背景

Fig.1 Geological background of the Xihu Sag

目前已经建立的地层层序显示, 自下而上可划分为 8 个层段 (图 2), 分别为始新统 (宝石组、平湖组)、渐新统花港组、中新统 (龙井组、玉泉组、柳浪

组)、上新统三潭组和更新统东海群^[21]。其中, 始新统平湖组是本文研究的目的层段。平湖组的沉积以泥岩为主, 夹粉砂岩与砂岩, 含大量煤层, 厚度达

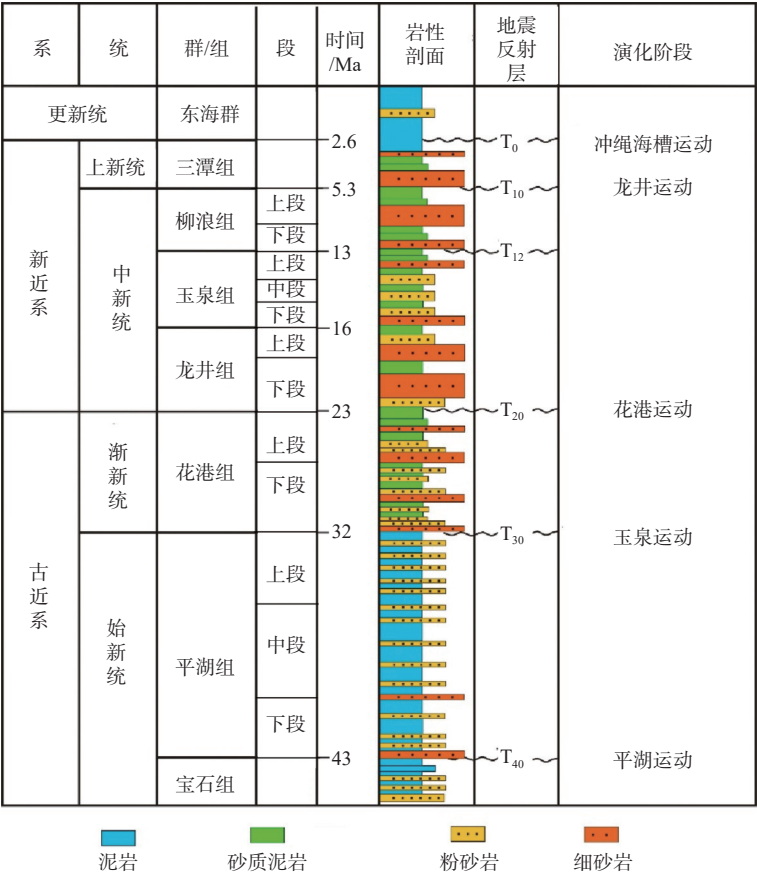


图 2 西湖凹陷地层综合柱状图

Fig.2 Generalized stratigraphic column of the Xihu Sag

1 500 m。根据平湖组岩性组合,可将平湖组自下而上分为下、中、上 3 段。其中,下段以泥岩为主,砂岩,粉砂岩、细砂岩、煤层不等厚互层;中段仍以泥岩居多,含粉砂岩;上段总体上为泥岩与粉砂岩,但泥岩明显少于中段^[22]。

2 样品及实验方法

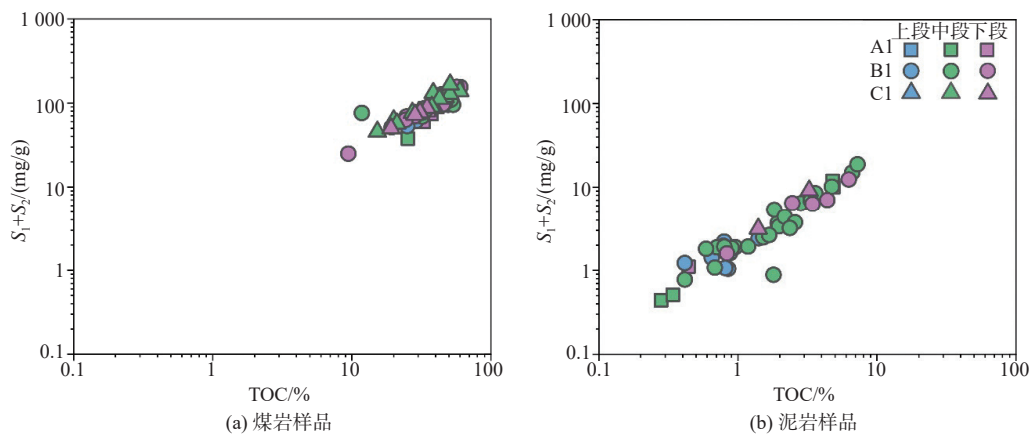
本研究所用烃源岩样品共 103 件,其中,泥岩样品 50 件,煤岩样品 53 件。样品来自西湖凹陷平湖斜坡带 A1、B1、C1 井等 3 口单井(图 1)。A1 井烃源岩样品有 9 件,B1 井烃源岩样品有 73 件,C1 井烃源岩样品有 21 件。用于本研究而采集的烃源岩样品涉及的地层主要有 3 段,分别为平湖组上段、中段及下段,主要为黑色煤层,含少量泥岩、砂岩以及粉砂质泥岩。采得的样品测试实验工作均委托中国石油大学(北京)进行检测,实验方法及采用的仪器设备与标准为:碎样至 200 目以下,呈粉末状,称取约 20 g 用于主微量测试,测试温度为 22 ℃,相对湿度 53%。主微量测试仪器分别是 AxiosmAX

X 射线荧光光谱仪与 ELEMENT XR 等离子体质谱仪,测试标准包括 GB/T 14506.28—2010 与 GB/T 14506.30—2010,分析误差控制在 10% 以内。

3 烃源岩地球化学特征

有机质丰度与生成的油气的量成正比关系。以现有的资料及烃源岩有机质丰度评价标准来看,选取总有机碳(TOC)和生烃潜量(S₁+S₂)评价烃源岩样品的有机质丰度。依据中国海洋石油总公司企业标准(Q/HS1017—2006)评价有机质丰度,从井位横向数据结果来看,B1 井煤岩样品有机质丰度优于 A1 与 C1 井,C1 井泥岩样品有机质丰度高于 A1 与 B1 井;从纵向上的数据来看,平湖组中段的煤系烃源岩样品有机质丰度最高,泥岩以平湖组下段有机质丰度最高;以生烃潜力和有机碳含量来看,煤岩生烃能力最好,泥岩次之。

平湖组烃源岩丰度分布范围较大,既有 TOC >30% 的煤,也有 TOC <5% 的泥岩。其中,平湖组中段烃源岩中煤所占比例最大,煤岩样品丰度优于

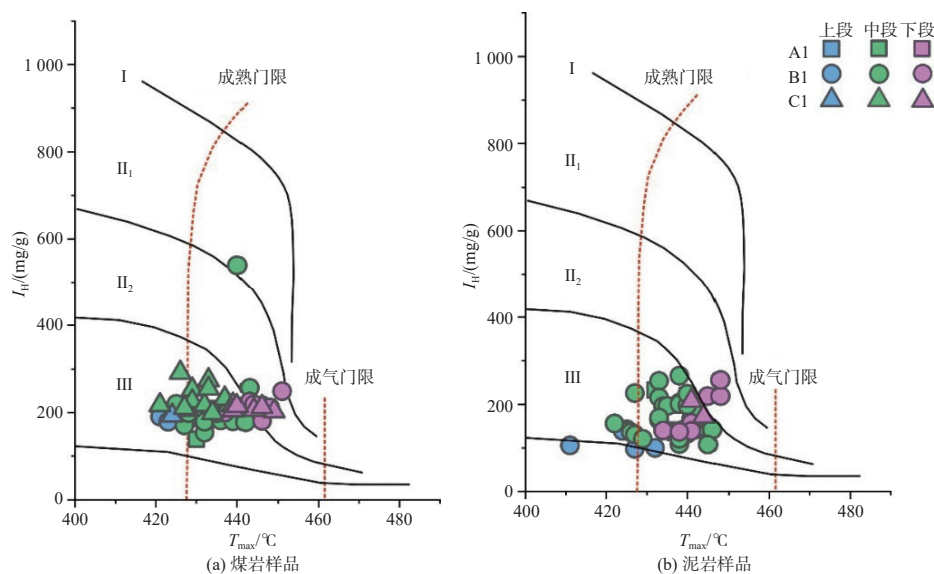
图 3 研究区烃源岩 TOC 与 S_1+S_2 关系散点图Fig.3 Scatter diagram of TOC and S_1+S_2 of source rocks in the study area

上段及下段(图 3a); 中段泥岩样品的有机质丰度同样远高于上段与下段(图 3b)。整体看, 平湖组烃源岩有机质丰度大多属于好—很好, 其中, 中段的有机质丰度最高, 上段和下段次之。

有机质类型是用来刻画烃源岩特征的重要指标之一。显微组分可以用来确定成烃母质, 干酪根中显微组分的组成不同, 成烃特征因此差异明显^[23]。

本研究利用岩石热解参数、显微组分等数据, 对平湖组 3 个层段的烃源岩样品进行有机质类型划分。

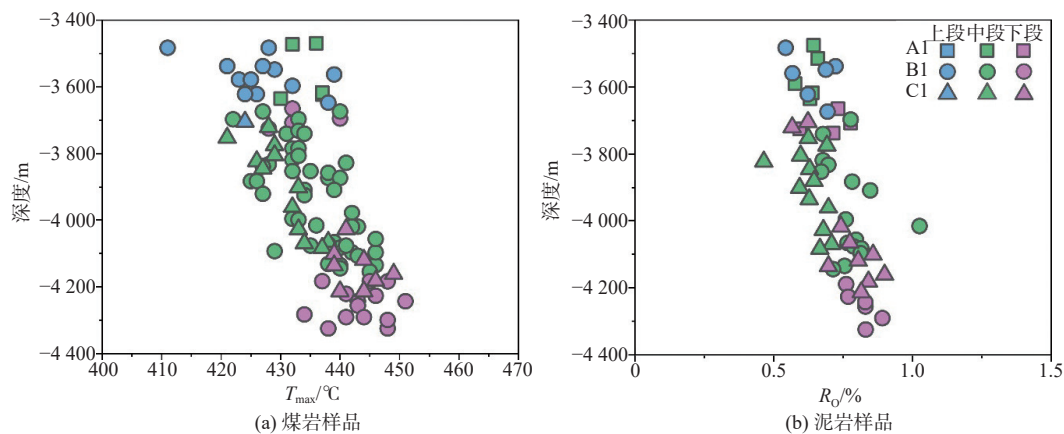
以热解 I_H-T_{max} 判断的有机质类型结果来看, 西湖凹陷平湖组不同层段的煤岩样品有机类型以 III 型为主, 少量为 II₂ 型(图 4a); 泥岩样品中除了 B1 井下段少量样品为 II₂ 型外, 绝大多数为 III 型(图 4b)。

图 4 氢指数 I_H 与 T_{max} 值划分有机质类型Fig.4 Discrimination of organic matter types by hydrogen index I_H and T_{max} value

烃源岩成熟度评价指标包括岩石热解峰温 T_{max} 与镜质体反射率 R_O 。 T_{max} 是常用来判别有机质成熟度的重要指标之一; R_O 可直接反映烃源岩的有机质成熟度。

根据测定数据显示, 上段烃源岩样品的 T_{max} 介于 411~439 °C, 均值为 426.69 °C, R_O 介于 0.54%~0.72%, 平均为 0.64%; 中段烃源岩样品的 T_{max} 介于

421~446 °C, 均值为 434.75 °C, R_O 介于 0.47%~1.03%, 平均为 0.7%; 下段烃源岩样品的 T_{max} 介于 428~451 °C, 均值为 441.44 °C, R_O 介于 0.57%~0.90%, 平均为 0.77%。可见, 西湖凹陷平湖组烃源岩成熟度随着深度的增加逐渐增加, 绝大多数样品处于成熟阶段(图 5a)。 R_O 随着深度的增加逐渐增大, 这与 T_{max} 体现出的趋势相近(图 5b)。

图5 平湖组不同层段 $T_{\max}$ 、 R_o 随深度变化Fig.5 $T_{\max}$ and R_o changes with depth in different layers of the Pinghu Formation

4 烃源岩沉积环境

沉积物中的 B 元素主要来源有: 从陆源碎屑中继承的 B、黏土矿物从湖水中吸附的 B、有机质中吸附的 B^[24], 能够以硼酸的形式被植物吸收, 聚集在植物体内。煤层中有较高的 B 含量^[25]。B 含量的变化主要受到盐度变化的影响^[26]。在地球化学分析中 B 元素属于比较容易确定的一种元素, 可反映水体盐度变化。Ga 元素容易被高岭石吸附, 淡水比海水中具有更多的 Al、Si、Ga, 可见, Ga 含量在淡水沉积物中比在海洋条件下形成的沉积物高, 因此, Ga 可用来判别海陆相^[27]; $B/Ga > 6$ 指示咸水环境, < 3 指示淡水环境, 介于两者之间为半咸水环境^[28]。Ba 元素的迁移能力低于 Sr 元素, 水体中盐度较低时, Sr、Ba 皆以重碳酸盐的形式存在。盐度升高时, Ba 以 $BaSO_4$ 的形式沉淀, Sr 继续在水体中富集。盐度继续增加, $SrSO_4$ 溶解度较大, 因此, Sr 在水体盐度较高时才会发生沉淀并析出^[29-30]。 $Sr/Ba > 1$

指示咸水环境, < 0.5 指示淡水环境, 介于两者之间为半咸水环境^[31]。

结合研究区实际特点, 本文重点采用 B/Ga 比值与 Sr/Ba 比值分析与评价西湖凹陷平湖斜坡带平湖组的古盐度条件及其变化特征, 进而探究古盐度条件与有机质富集的内在联系。

平湖组上段 B/Ga 比值结果介于 1.4~3.15, 平均为 2.72, 共 6 件样品, 指示淡水环境; 平湖组中段的 B/Ga 比值介于 1.05~9.93, 平均为 3.26, 共 36 件样品, 指示淡水-半咸水环境; 平湖组下段的 B/Ga 比值介于 2.57~7.78, 平均为 4.96, 共 13 件样品, 指示淡水-半咸水环境。平湖组上段的 Sr/Ba 比值介于 0.13~0.77, 平均为 0.31, 共 8 件样品, 指示淡水环境; 平湖组中段的 Sr/Ba 比值介于 0.14~0.91, 平均为 0.42, 共 37 件样品, 指示淡水-半咸水环境; 平湖组下段的 Sr/Ba 比值介于 0.12~0.99, 平均为 0.68, 共 13 件样品, 指示淡水-半咸水环境。平湖组各层段的 B/Ga、Sr/Ba 等比值自上而下呈现波动性变化(图 6), 平湖组下段具有较高的 B/Ga 值与 Sr/Ba 值。

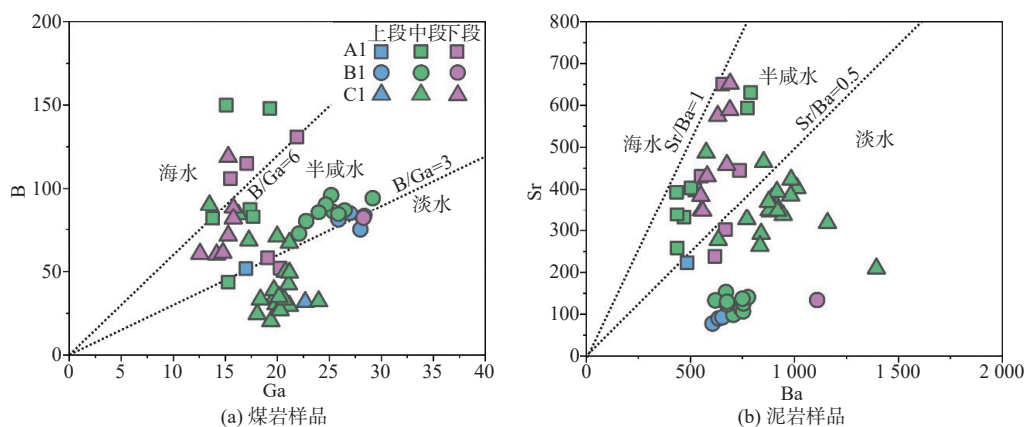


图6 平湖组烃源岩沉积时古盐度特征

Fig.6 Paleo-salinity characteristics of source rocks in the Pinghu Formation during sedimentation

平湖组各层段均具有相对较低的 Sr/Ba 值, 指示其沉积时主要处于半咸化-淡化水体环境。

判别古氧化还原条件时, 可采用沉积物中易受氧化或还原等状态影响的元素及其比值, 这是由于对水体中氧化敏感的元素会因为水体含氧量的变化出现迁移或富集等现象。因此, 可以利用保留在岩石中的元素信息来指示古氧化还原特征^[32-33]。温度比较低的时候, 由于在沉积物表面化学活动性弱, Th 元素稳定保存在沉积物中, U 元素在氧化条件下会从沉积物丢失, 还原条件下则赋存于沉积物, 因此, U/Th 比值越高, 越偏向还原条件。U/Th < 0.75 揭示氧化环境^[34]; Cr 能够与沉积物中的陆源碎屑结合, V 以四价态形式与有机质结合后聚集在还原条件下的沉积物中, 氧化和贫氧一般以 V/Cr=2 来划分界限, V/Cr < 2 揭示氧化环境^[35]; V 和 Sc 的溶解度较为相似, 二者以比例变化溶于其

他元素, 在缺氧的还原环境中 V/Sc 比值较高^[36], V/Sc < 9 揭示氧化环境^[37]。埋藏后 Ni 不易迁移和演变, 因此, 基本保存了沉积时的初始含量。另外, Ni 和 Co 在沉积物中常赋存于黄铁矿中, 成岩黄铁矿 Ni/Co > 1。Cu/Zn > 0.63 揭示氧化环境, < 0.21 为弱还原环境^[38]。

结合研究区实际特点, 本文重点采用来源相对单一、沉积后较为稳定, 在国内外研究中得到有效应用的微量元素 U、Th、V、Cr、Ni、Co、Sc、Cu、Zn 及其比值参数, 分析西湖凹陷平湖组各层段的古氧化还原条件及其变化特征, 进而探究古氧化还原条件与有机质富集的内在联系。

U/Th 与 V/Cr 等比值中, 平湖组不同层段烃源岩沉积环境大多处于氧化环境(图 7a), 在利用 V/Sc 与 Cu/Zn 比值进行计算时, 大多样品介于氧化-弱还原环境, 少量处于氧化环境(图 7b)。

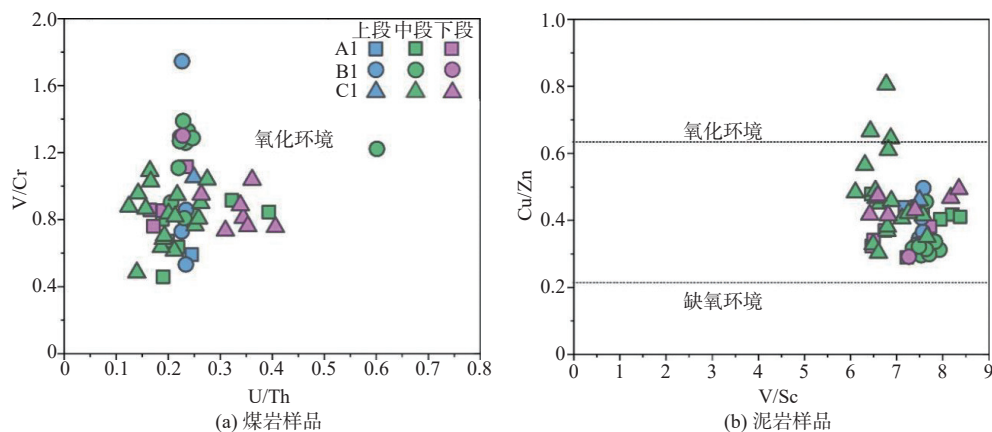


图 7 平湖组烃源岩沉积时古环境的氧化还原条件

Fig.7 Paleo-redox conditions of source rocks in the Pinghu Formation during sedimentation

Fe、Mn、Cr、V、Co、Ni 等是潮湿气候型元素, Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba 等是干旱气候型元素, 因此, 可以利用潮湿型气候元素的总和除以干旱型气候的总和, 得到的这一比值即为古气候指数 CI 值, 比值越大, 气候越趋向于潮湿温暖^[39], CI 值 > 0.4 指示温暖湿润的古环境^[40]; Mn 在干燥环境中含量高, 在潮湿环境中含量低, 但 Fe 易在潮湿环境中存在, 因此, 可利用沉积物中的 Fe/Mn 的值来判别古气候, 比值高时, 古气候为温暖湿润气候, 比值较低时, 古气候干旱炎热^[41]; Sr 多出现在潮湿气候中, 含量高时则说明为干旱气候^[42], Cu 多存在于湿润环境, Sr/Cu < 10 指示温暖湿润的古环境^[43]。

结合研究区实际特点, 采用 CI 值、Sr、Cu、Fe、Mn 等微量元素及其比值分析西湖凹陷平湖组 3 个

层段的古气候变化特征, 探究古气候与有机质富集的内在联系。平湖组上段古气候指数 CI 值介于 0.5~1.4, 平均为 1.11, 共 7 件样品, 指示潮湿型气候; 平湖组中段古气候指数 CI 值介于 0.4~1.28, 平均为 0.92, 共 37 件样品, 指示潮湿型气候; 平湖组下段古气候指数 CI 值介于 0.34~1.21, 平均为 0.63, 共 13 件样品, 指示潮湿型气候; 总体而言, 从平湖组下段至上段 CI 值逐渐增加, 气候变得温暖湿润起来。平湖组上段样品的古气候指数 Sr/Cu 值介于 1.64~12.13, 平均为 4.74, 共 7 件样品, 指示温暖潮湿型气候; 平湖组中段样品的古气候指数 Sr/Cu 值介于 1.48~18.95, 平均为 7.72, 共 37 件样品, 指示温暖潮湿型气候; 平湖组下段样品的古气候指数 Sr/Cu 值介于 3.93~19.67, 平均为 12.55, 共 13 件样

品,指示温暖潮湿型气候;综合来看,平湖组上段的 Sr/Cu 平均值最小,指示气候最为温暖潮湿,中段与下段的气候比上段干旱炎热。平湖组自下段至上段,古气候指数 CI 值逐渐增大, Sr/Cu 比值逐渐减小。CI 值 > 30 时,指示干旱的古气候条件,因此可

以判别出平湖组不同层段古气候多为半干旱-半潮湿(图 8a)。相比之下,平湖组下段部分 Sr/Cu 比值较大,且多数样品点 > 10,指示半潮湿-半干旱的古气候条件,而中段及上段的 Sr/Cu 比值则较低,指示温暖潮湿的气候条件(图 8b)。

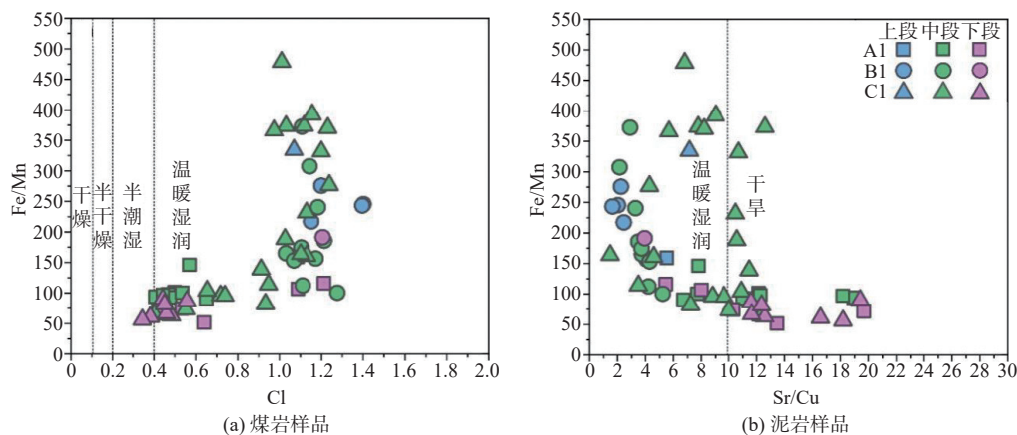


图 8 平湖组烃源岩沉积时古气候特征

Fig.8 Paleoclimatic characteristics of source rocks in the Pinghu Formation during sedimentation

5 主控因素

分析烃源岩发育主控因素,对于刻画平湖组各个层段的烃源岩发育模式有重要意义。古盐度、古气候以及古氧化还原条件影响着烃源岩的形成环境,忽略不利因素后,有利因素即为烃源岩发育的主控因素。通过分析古盐度、古气候、古氧化还原条件等烃源岩形成环境,探讨烃源岩发育的控制因素,以能够反映古环境的元素比值作为横坐标,有机碳含量作为纵坐标,进行相关性分析,确定控制平湖组各层段烃源岩发育的主要因素。

平湖组不同层段的古盐度水平存在差异,中段与下段的盐度水平最高,上段次之;不同层段多处于氧化、氧化-弱还原环境中;而古气候变化差异性并不大,总体而言,由下段至上段古气候逐渐变得温暖湿润。平湖组烃源岩大多处于淡水环境中,少量处于半咸水环境。平湖组上段及下段样品数量较少,因而 TOC 与古盐度之间的具体关系很难体现;平湖组中段的数据较多,随着盐度的升高,TOC 含量增加(图 9a)。

西湖凹陷平湖组 3 个层段样品的有机碳含量与沉积环境的氧化程度之间并无明显的关联性,可见,氧化还原条件对平湖组有机质富集的影响相对较小。U/Th 比值与 TOC 的协变关系中,剔除 B1

井中段的异常值外,其余样品的 U/Th 比值介于 0.1~0.4,表现为氧化环境,U/Th 比值与 TOC 无明显线性相关(图 10a)。Cu/Zn 与 TOC 协变图中,样品数值都介于 0.21~0.63,平湖组上段 Cu/Zn 比值大多高于中段,整体表现为氧化-还原的环境特征,随着 TOC 的增高,平湖组上段至平湖组下段的 Cu/Zn 比值逐渐减小(图 10b)。

当气候条件由干旱性向潮湿性气候转变时,平湖组 3 个层段的 TOC 含量大致呈现升高的趋势,表明相对温暖潮湿的条件更有利于有机质的富集(图 11)。

平湖斜坡带平湖组不同层段烃源岩的有机质丰度及类型等特征的差异不大,为中等—好烃源岩,有机质类型主要为 II₂—III 型。平湖组上、中、下段烃源岩的有机质成熟度差异明显,成熟度随埋深加大而增加。平湖组上段至下段烃源岩沉积水体盐度由淡水向半咸水过渡,整体处于氧化,氧化-弱还原环境,沉积时期气候为温暖湿润(图 12)。

平湖斜坡带平湖组烃源岩以潮坪沉积为主,其中,潮间带烃源岩面积最大,受到西部物源输入,形成由西向东的河流、三角洲沉积体系,三角洲受到潮汐作用改造明显,存在聚煤作用和海侵作用的双重影响,有利于有机质富集与保存,形成优质煤系烃源岩。分析认为,平湖斜坡带平湖组烃源岩形成于温暖潮湿的沉积环境,为氧化-弱还原环

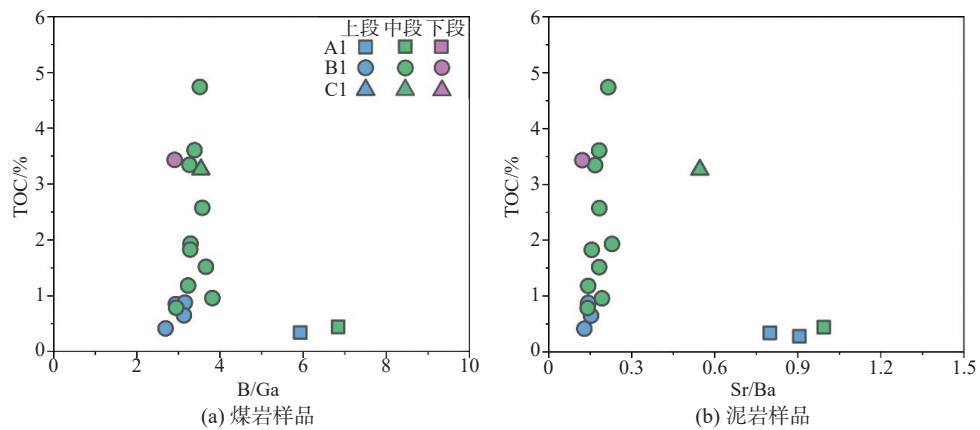


图 9 平湖组古盐度与有机碳含量协变图

Fig.9 Correlation between palaeoclimate and organic carbon content in the Pinghu Formation

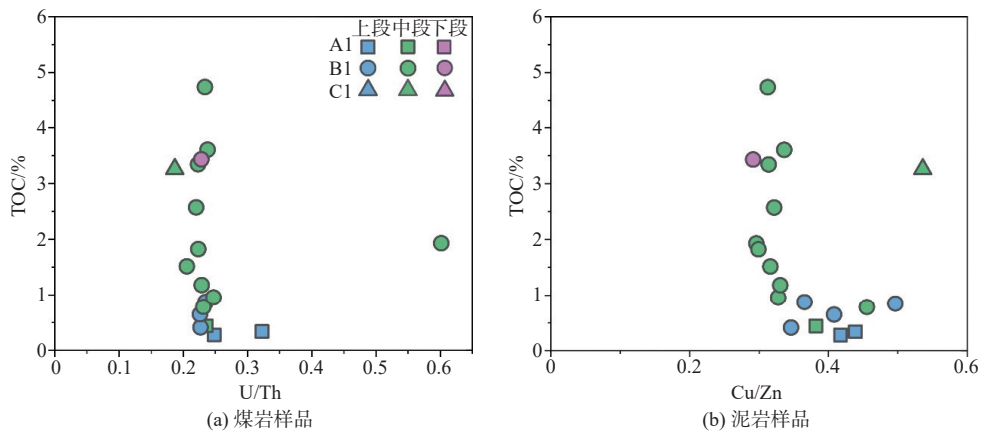


图 10 平湖组古氧化还原条件与有机碳含量协变图

Fig.10 Correlation between paleoredox conditions and organic carbon content in the Pinghu Formation

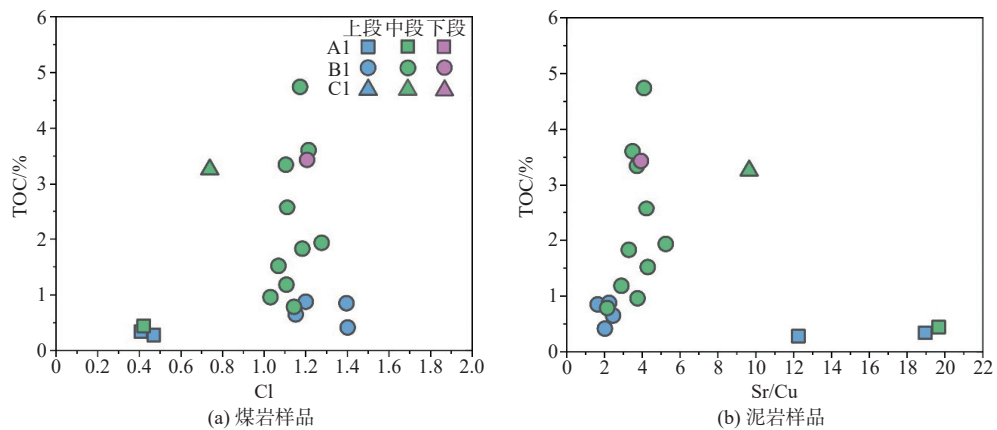
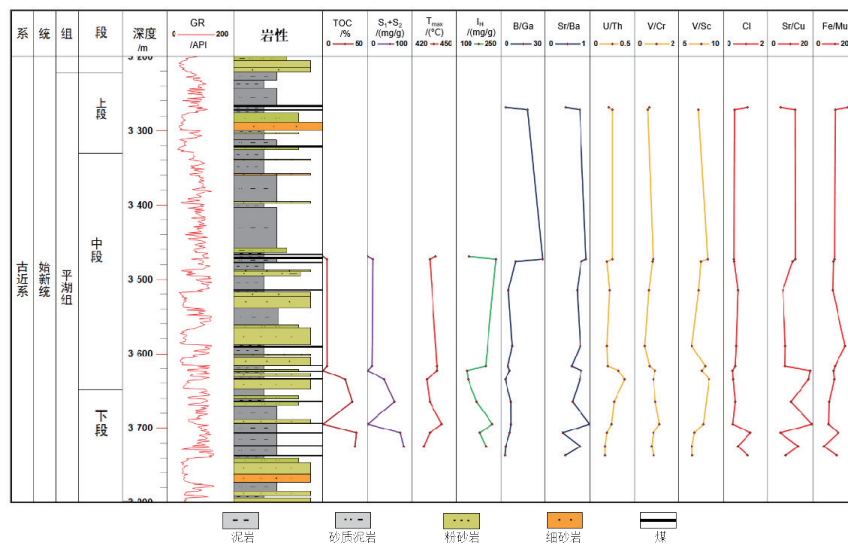


图 11 平湖组古气候与有机碳含量协变图

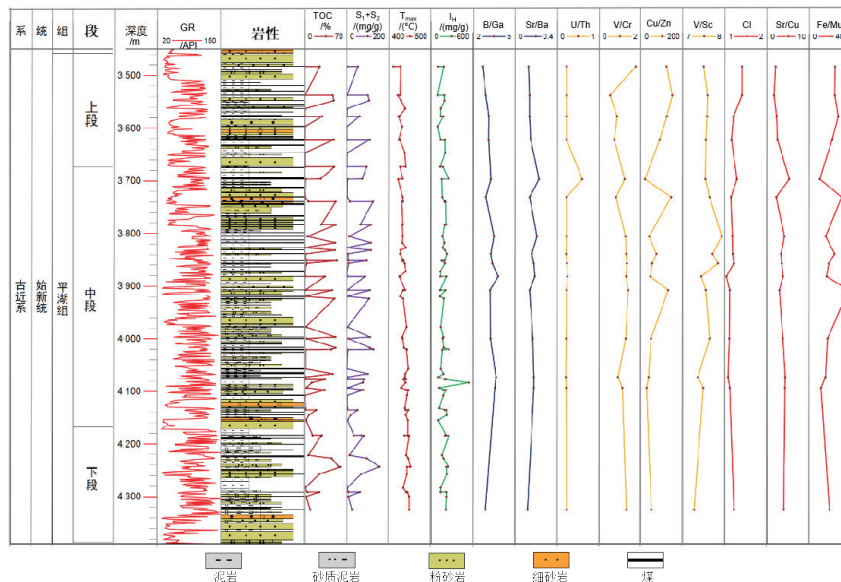
Fig.11 Correlation between palaeoclimate and organic carbon content in the Pinghu Formation

境, 多为氧化-淡水-微咸水。纵向上, 从下段到上段, 水体环境表现为由浅变深再变浅。生烃母质主要包括煤层和陆源分散有机质(陆源海相泥岩)。古盐度的增加有利于平湖组中部有机质的保存和富集, 温暖潮湿的古气候和较高的古生产力有利

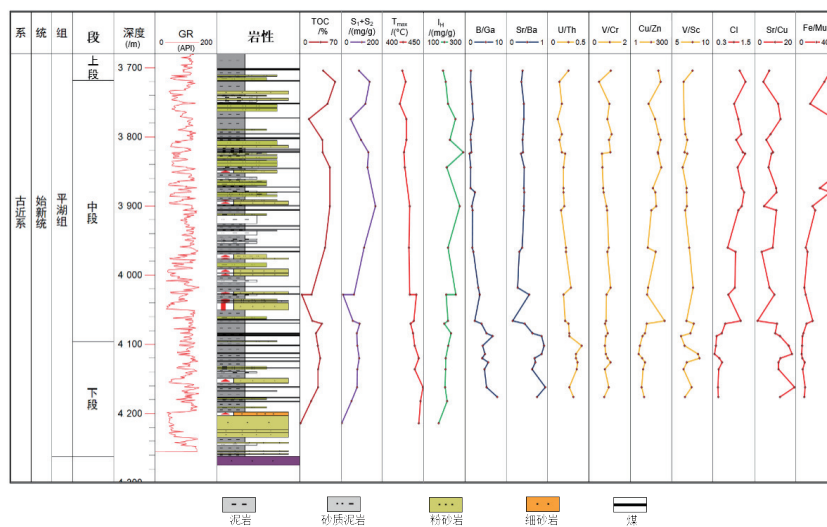
于平湖组烃源岩的发育。基于以上烃源岩古环境分析, 建立了西湖凹陷平湖组优质烃源岩的发育模式(图 13), 平湖组优质烃源岩的发育环境主要为潟湖(图 13a)、潮坪(图 13b)和潮控局限海湾或短暂局部海侵(图 13c)。



(a) A1 井



(b) B1 井



(c) C1 井

图 12 A1、B1、C1 井平湖组有机地化指标与沉积环境恢复

Fig.12 Organic geochemical indices and sedimentary environment restoration of the Pinghu Formation in Wells A1, B1, and C1

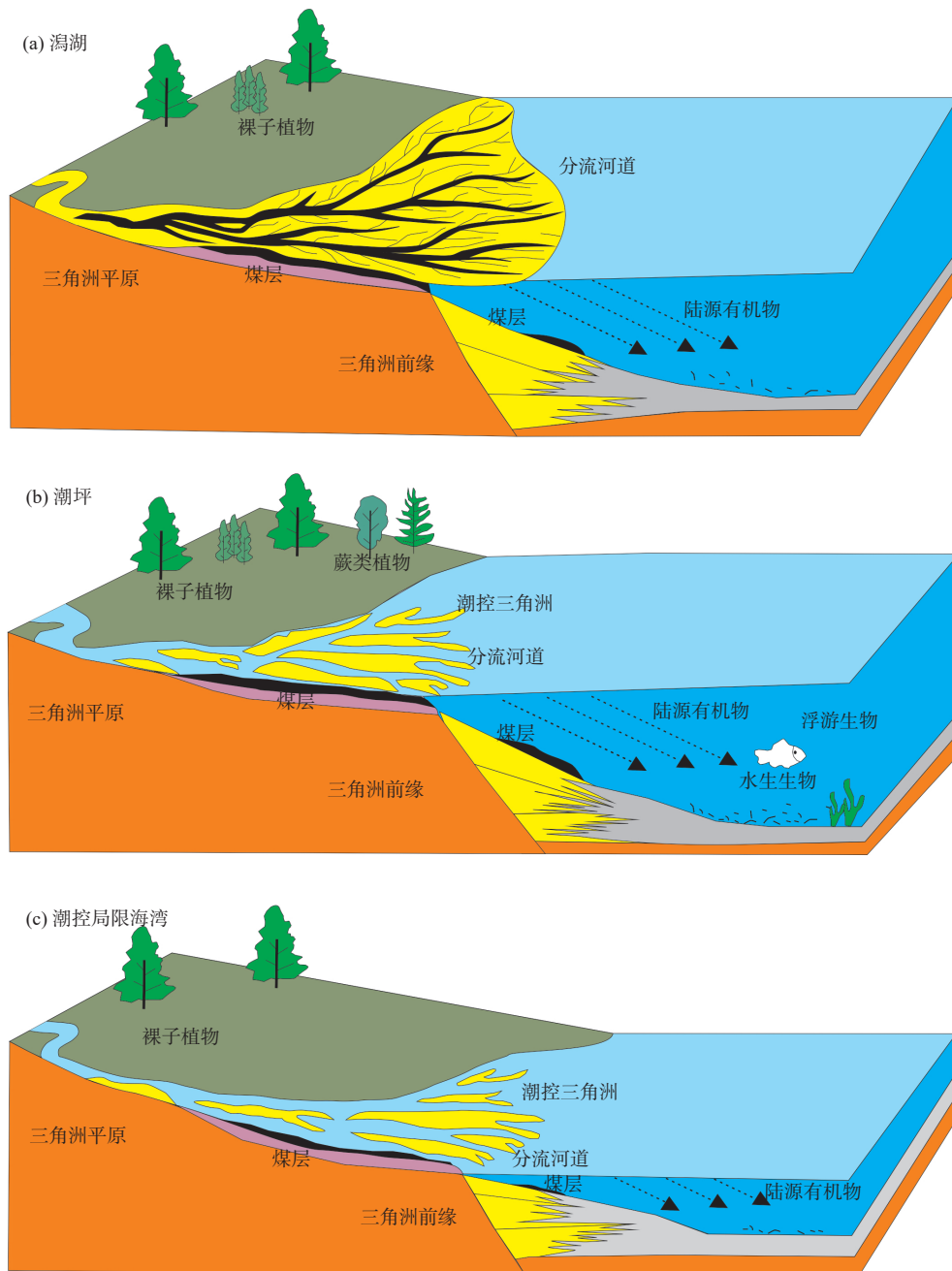


图 13 平湖组不同区段烃源岩发育模式

Fig.13 The development model of source rocks in different sections of the Pinghu Formation

6 结论

(1) 平湖组烃源岩有机质丰度较高, 主要为Ⅱ₂—Ⅲ型有机质, 处于成熟—高熟阶段。煤和泥岩都具有一定的生烃潜力, 但又存在一定差异。其中, 各个层段煤岩样品的有机质丰度高、有机质类型较好, 大部分达到好—优质烃源岩的评价标准; 但泥岩样品相较于煤岩有机质丰度则偏低, 类型较差。纵向上, 平中段、平下段和部分泥岩达到中等以上

有机质丰度评价标准。

(2) 明确了研究区平湖组不同层段不同岩性的烃源岩沉积环境以潮坪沉积为主, 存在聚煤作用和海侵作用双重影响, 有利于有机质富集与保存, 形成优质煤系烃源岩。平湖斜坡带平湖组烃源岩沉积环境以温暖湿润气候、氧化居多, 存在氧化-弱还原过渡环境、水体环境为淡水-半咸水。

(3) 平湖组中段有着比平湖组上段更高的有机碳含量, 说明盐度越高, 气候越潮湿温暖, 越有利于有机质的保存; 平湖组上段氧化性较强, 不利于有

机质保存,因而 TOC 低;而平湖组中段还原性强,氧化性较上段弱,水体易分层,利于有机质保存,因而 TOC 高。各层段烃源岩的发育受控于古盐度与古气候,随着盐度逐渐增加,利于有机质保存和富集;温暖湿润的古气候条件有利于烃源岩的发育。

参考文献:

- [1] 刁慧,刘金水,侯读杰,等.中国近海断-拗转换期煤系烃源岩特征:以西湖凹陷平湖组烃源岩为例[J].海洋地质与第四纪地质,2019,39(6):102-114.
DIAO H, LIU J S, HOU D J, et al. 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[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(6): 102-114.
- [2] 周心怀,徐国盛,崔恒远,等.东海西湖凹陷中央反转构造带古近系花港组致密砂岩储集层裂缝发育特征与油气成藏关系[J].石油勘探与开发,2020,47(3):462-475.
ZHOU X H, XU G S, CUI H Y, et al. Fracture development and hydrocarbon accumulation in tight sandstone reservoirs of the Paleogene Huagang Formation in the central reversal tectonic belt of the Xihu Sag, East China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 462-475.
- [3] 孙伯强,陈剑新.东海西湖凹陷保坨斜坡下第三系煤成油的研究[J].海洋石油,2000(1):1-7.
SUN B Q, CHEN J X. Preliminary study on coal-generation oil of Eocene system in the Baochu Slope of Xihu Sag, East China Sea[J]. Offshore Oil, 2000(1): 1-7.
- [4] 李上卿,李纯洁.东海西湖凹陷油气资源分布及勘探潜力分析[J].石油实验地质,2003,25(6):721-728.
LI S Q, LI C J. Analysis on the petroleum resource distribution and exploration potential of the Xihu Depression, the East China Sea[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(6): 721-728.
- [5] QUAN Y B, CHEN Z Y, JIANG Y M, et al. Hydrocarbon generation potential, geochemical characteristics, and accumulation contribution of coal-bearing source rocks in the Xihu Sag, East China Sea shelf basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 136: 105465.
- [6] LIU J S, KANG S L, SHEN W C, et al. Petrology and hydrocarbon significance of the coaly source rocks from the Pinghu Formation in the Xihu Sag, East China Sea shelf basin[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2020, 38(5): 1295-1319.
- [7] KANG S L, SHAO L Y, QIN L Z, et al. Hydrocarbon generation potential and depositional setting of Eocene oil-prone coaly source rocks in the Xihu Sag, East China Sea shelf basin[J]. ACS Omega, 2020, 5(50): 32267-32285.
- [8] 徐波.东海盆地西湖凹陷天台反转带花港组地层水地球化学特征及其成因[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(3):62-71.
XU B. Geochemistry and genesis of the formation water in Huagang Formation of the Tiantai Inversion Zone, the Xihu Depression of the East China Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(3): 62-71.
- [9] 田杨,叶加仁,雷闯,等.断陷盆地海陆过渡相烃源岩发育模式:以西湖凹陷平湖组为例[J].地球科学,2019,44(3):898-908.
TIAN Y, YE J C, LEI C, et al. Development model for source rock of marine-continental transitional facies in faulted basins: a case study of Pinghu Formation in Xihu Sag[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 898-908.
- [10] 徐波,胡碧瑶,顾智鹏,等.西湖凹陷平湖斜坡带平湖组微量元素和稀土元素地球化学特征及其地质意义[J].西安石油大学学报(自然科学版),2021,36(2):28-37.
XU B, HU B Y, GU Z P, et al. Geochemical characteristics of trace elements and rare earth elements of Pinghu Formation in Pinghu Slope Belt of Xihu Sag and their geological significance[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2021, 36(2): 28-37.
- [11] 徐博,曾文倩,刁慧,等.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[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(3):72-84.
XU B, ZENG W Q, DIAO H, et al. Trace rare earth elements in the Pinghu Formation of Xihu Sag and its implications for paleo-production environment[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(3): 72-84.
- [12] 魏恒飞,陈践发,陈晓东,等.西湖凹陷平湖组滨海型煤系烃源岩发育环境及其控制因素[J].中国地质,2013,40(2):487-497.
WEI H F, CHEN J F, CHEN X D, et al. The controlling factors and sedimentary environment for developing coastal coal-bearing source rock of Pinghu Formation in Xihu Depression[J]. Geology in China, 2013, 40(2): 487-497.
- [13] 严云奎.鄂尔多斯盆地延长油田区上古生界沉积相及储层微观特征研究[D].西安:西北大学,2010.
YAN Y K. A study on the sedimentary facies and microscopic characteristics of reservoirs in the Upper Paleozoic of the Changqing Oilfield, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- [14] WEI W, ALGEO J T. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 287: 341-366.
- [15] 韦恒叶.古海洋生产力与氧化还原指标:元素地球化学综述[J].沉积与特提斯地质,2012(2):76-88.
WEI H Y. Productivity and redox proxies of palaeo-oceans: an overview of elementary geochemistry[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012(2): 76-88.
- [16] 欧阳思琪,吕修祥,薛楠,等.早中寒武世古环境特征与烃源岩发育模式:以塔里木盆地柯坪-巴楚地区为例[J].中国矿业大学学报,2022(2):293-310.
OUYANG S Q, LYU X X, XUE N, et al. Paleoenvironmental characteristics and source rock development model of the Early-Middle Cambrian: a case of the Keping-Bachu area in the Tar-

- im Basin[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2022(2): 293-310.
- [17] 樊秋爽, 夏国清, 李高杰, 等. 古海洋氧化还原条件分析方法与研究进展 [J]. *沉积学报*, 2022, 40(5): 1150-1171.
FAN Q S, XIA G Q, LI G J, et al. Analytical methods and research progress of redox conditions in the paleo-ocean[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*. 2022, 40(5): 1150-1171.
- [18] 张迎朝, 陈忠云, 刁慧, 等. 东海盆地 X 凹陷油气成藏模式与勘探突破 [J]. *中国海上油气*, 2024, 36(2): 1-12.
ZHANG Y Z, CHEN Z Y, DIAO H, et al. Reservoir-forming models and exploration breakthroughs in the X Sag of the East China Sea basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*. 2024, 36(2): 1-12.
- [19] 赵丽娜. 东海陆架盆地西湖凹陷平湖构造带沉积相研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
ZHAO L N. The study on sedimentary facies of Pinghu Zone in Xihu Sag in the East China Sea shelf basin[D]. Changchun: Jilin University.
- [20] 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 X H. 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.
- [21] 蒋一鸣, 何新建, 张绍亮. 东海陆架盆地“反转-改造”构造迁移演化特征: 以西湖凹陷边缘构造为例 [J]. *长江大学学报 (自科版)*, 2016, 13(26): 1-7.
JIANG Y M, HE X J, ZHANG S L. The Characteristics of “inverse-transform” tectonic migration evolution of the East China Sea shelf basin: by taking the marginal structure of Xihu Sag for example[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2016, 13(26): 1-7.
- [22] 刘伟. 沉积物元素地球化学特征的古环境学意义: 以西湖凹陷古近纪地层为例 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2008.
LIU W. The paleoenvironmental significance of characteristic of element Geochemistry in sediments: taking the Paleogene strata of the Xihu Depression as an example[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2008.
- [23] 徐国盛. 石油与天然气地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 2021.
XU G S. *Petroleum and Natural Gas Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2021.
- [24] WANG C Y, LIN G S, WEI Y Q, et al. Major factors influencing boron adsorption in sediments: a case study of modern sediments in Qinghai Lake[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(4): 1-12.
- [25] CALVERT S E, PEDERSEN T F. Geochemistry of recent oxic and anoxic marine sediments: implications for the geological record[J]. *Marine Geology*, 1993, 113(1/2): 67-88.
- [26] 胡晓峰, 刘招君, 柳蓉, 等. 桦甸盆地始新统桦甸组黏土矿物和无机地球化学特征及其古环境意义 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(3): 416-423.
HU X F, LIU Z J, LIU R, et al. Clay mineral and inorganic geochemical characteristics of Eocene Huadian Formation in Huadian Basin and their paleoenvironment implications[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 416-423.
- [27] 刘英俊. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
LIU Y J. *Elemental Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [28] WEI W, ALGEO T J. Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 287: 341-366.
- [29] 郑荣才, 杨梅青. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究 [J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(1): 20-25.
ZHENG R C, YANG M Q. Study on palaeosalinity of Chang-6 Oil reservoir set in Ordos Basin[J]. *Oil And Gas Geology*, 1999, 20(1): 20-25.
- [30] 钱凯, 时华星. 资源评价工作中古盐度测定法的选择 [J]. *石油勘探与开发*, 1982(3): 35-41.
QIAN K, SHI H X. The choice of the method of paleosalinity determination in resources evaluation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1982(3): 35-41.
- [31] 郑一丁, 雷裕红, 张立强, 等. 鄂尔多斯盆地东南部张家滩页岩元素地球化学、古沉积环境演化特征及油气地质意义 [J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(7): 1395-1404.
ZHENG Y D, LEI Y H, ZHANG L Q, et al. Characteristics of element geochemistry and paleosedimentary environment evolution of Zhangjiantan Shale in the southeast of Ordos Basin and its geological significance for oil and gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(7): 1395-1404.
- [32] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA[J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [33] LIU P, LIU C, GUO R L. Depositional environment and organic matter enrichment of the Lower Cambrian Niutitang shale in western Hubei Province, South China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 109: 381-393.
- [34] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [35] 腾格尔, 刘文汇, 徐永昌, 等. 无机地球化学参数与有效烃源岩发育环境的相关研究 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(2): 193-200.
TENG G E, LIU W H, XU Y C, et al. Correlative study on parameters of inorganic geochemistry and hydrocarbon source rocks formative environment[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(2): 193-200.
- [36] 胡俊杰, 马寅生, 王宗秀, 等. 地球化学记录揭示的柴达木盆地北缘地区中—晚侏罗世古环境与古气候 [J]. *古地理学报*, 2017, 19(3): 480-490.
HU J J, MA Y S, WANG Z X, et al. Palaeoenvironment and palaeoclimate of the Middle to Late Jurassic revealed by geochemical records in northern margin of Qaidam Basin[J]. *Journal of*

- [Palaeogeography](#), 2017, 19(3): 480-490.
- [37] HIROTO K, YOSHIO W. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary[J]. [Geology](#), 2001, 29(11): 995-998.
- [38] 梅水泉. 岩石化学在湖南前震旦系沉积环境及铀来源研究中的应用[J]. 湖南地质, 1988(3): 25-31.
- MEI S Q. Application of rock chemistry in the study of Presinian sedimentary environment and the source of uranium mineralization in Hunan Province[J]. *Hunan Geology*, 1988(3): 25-31.
- [39] 关有志. 科尔沁沙地的元素、黏土矿物与沉积环境[J]. 中国沙漠, 1992, 12(1): 12-18.
- GUAN Y Z. The element, clay mineral and depositional environment in Horqin sand land[J]. *Journal of Desert Research*, 1992, 12(1): 12-18.
- [40] 杨万芹, 蒋有录, 王勇. 东营凹陷沙三下—沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015(4): 19-26.
- YANG W Q, JIANG Y L, WANG Y. Study on shale facies sedimentary environment of lower Es3 - upper Es4 in Dongying Sag[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2015(4): 19-26.
- [41] 王随继, 黄杏珍. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 66-71.
- WANG S J, HUANG X Z. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang Depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(1): 66-71.
- [42] 张天福, 孙立新, 张云, 等. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J]. [地质学报](#), 2016, 90(12): 3454-3472.
- ZHANG T F, SUN L X, ZHANG Y, et al. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(12): 3454-3472.
- [43] 金中国, 刘辰生, 邹林, 等. 贵州务-正-道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据[J]. [地质学报](#), 2018, 92(4): 817-827.
- JIN Z G, LIU C S, ZOU L, et al. Geochemical evidence of sedimentary environment of Permian bauxite in the Wuchuan-Zheng'an-Daozhen area, Guizhou Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(4): 817-827.

Paleoenvironmental difference and controlling factor of trace elements in Pinghu Formation of typical wells in Pinghu Slope Belt of the Xihu Sag, East China Sea Basin

ZHANG Xinan, WANG Wanli, HUANG Qizhang

(Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200050, China)

Abstract: Based on the geological background, the organic geochemical comprehensive evaluation on the source rocks in the study area was carried out, and the paleoenvironment of source rocks in the Pinghu Formation in the Xihu Sag were analyzed. The content and variation of trace elements in the three layers of the Pinghu Formation, the corresponding relationship between the paleosalinity, paleoredox conditions, and the paleoclimate during sedimentation were studied. Combined with the relationship between organic carbon content and elements, the paleoenvironment and controlling factors of the source rocks were clarified. Results show that ① all the sections of the Pinghu Formation contain coal, and the organic matter in the source rock is abundant in the types of II₂ - III that are in the mature-high mature stage and have good hydrocarbon generation potential. Meanwhile, the source rocks in the middle section of the Pinghu Formation are better than that in the upper and lower sections. ② The water body was fresh to brackish water with local transgression due to oscillation of local water body. The overall paleoenvironment of Pinghu Formation was in oxidation-reduction. The paleoclimate was mainly warm-humid, and then changed gradually to warm-humid. ③ The development of the source rocks was controlled by mainly paleoclimate and paleoproductivity as indicated by element ratio and organic carbon content analyses. The ancient warm and humid conditions favored the development of the source rocks, and the high paleoproductivity enhanced the enrichment of organic matter in the middle section of Pinghu Formation.

Key words: elemental geochemistry; paleoenvironmental reconstruction; source rocks; Xihu Sag; East China Sea