

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

魏恒飞^{1,2} 陈践发^{1,2} 陈晓东³ 曹 冰³ 郭 望^{1,2} 张俊华^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京, 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 3. 中国海洋石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030)

摘要: 西湖凹陷平湖组是凹陷内油气藏形成的主力源岩之一, 其烃源岩岩石学类型主要有泥岩、炭质泥岩和煤, 有机质类型为 II—III 型, 有机质丰度较高, 总体为中等—好烃源岩。西湖凹陷平湖组发育的沉积环境主要为海湾、潮汐影响的三角洲、辫状河三角洲及潮坪, 而发育烃源岩的沉积环境主要为海湾和潮坪, 此时期沉积水体介质条件为咸水—半咸水, 在三角洲和潮坪发育的泥炭沼泽中表现为氧化性, 海湾环境中表现为弱还原性。平湖组源岩的发育受控于古气候、沉积环境、海平面变化及古构造格局, 其中古构造格局控制着烃源岩的发育厚度和位置, 海平面变化控制着烃源岩在地层内部的分布特点, 古气候为烃源岩的发育提供了良好的物质背景, 沉积环境控制着烃源岩的丰度、类型和保存条件。在平湖组烃源岩发育环境及控制因素研究的基础上, 建立了平湖组烃源岩发育的沉积模式。

关键词: 平湖组; 烃源岩; 古气候; 沉积环境; 海平面; 古构造格局

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2013)02-0487-11

西湖凹陷是中国东海陆架盆地的一个富油气凹陷, 其中发育的平湖组是西湖凹陷主要的烃源岩之一; 平湖组烃源岩不仅有有机质丰度高, 而且分布范围广, 厚度逾千米, 是西湖凹陷各油气田的主力供油气源岩^[1-3], 探讨西湖凹陷平湖组烃源岩发育环境及其控制因素, 对预测平湖组烃源岩和油气藏的分布都是有利的。有机质的生产率和缺氧的还原环境是控制有机质富集的两个最主要因素^[6-10], 有机质的生产率为烃源岩的发育提供了物质条件, 缺氧的还原环境为有机质的富集提供了良好的保存条件, 但 Demaison 和 Moore 认为缺氧的还原环境是提高烃源岩中富氢的和富类脂类的有机质保存能力的主要原因^[9], 而沉积环境对烃源岩的发育起着控制作用, 沉积环境中有机质原始生产力、沉积速率及保存条件等因素, 能决定烃源岩的有机质类型和丰度等^[8,17-19], 因此本文以沉积环境控制烃源岩发育理论为指导, 探讨西湖凹陷

平湖组烃源岩发育环境及其控制因素, 并探讨滨海断陷盆地演化末期烃源岩发育模式。

1 地质概况

西湖凹陷是中国东海陆架盆地中的一个次级凹陷, 是中国重要的含油气凹陷之一, 根据地震地质解释结果显示, 西湖凹陷总体上可划分出 3 个二级的构造带, 即东部陡坡断隆带、中央洼陷—反转带、西部斜坡带, 中央洼陷—反转带进一步划分为 3 个三级构造单元(图 1)。西湖凹陷始于白垩纪末断陷作用发育时期, 构造应力以拉张应力为主, 早始新世与中始新世之间, 拉张应力强度有所减弱, 始新世与渐新世之间, 构造应力场由先前的拉张应力场向挤压应力场转化, 导致盆地(凹陷)由裂陷阶段向坳陷阶段转换^[20-22], 且正反转构造发育, 其中平湖组即发育于凹陷由裂陷阶段向坳陷阶段的转换时期, 这时凹

收稿日期: 2012-08-07; 改回日期: 2013-03-05

基金项目: 国家重大专项大型油气田及煤层气开发项目(2011ZX05023-001-011)资助。

作者简介: 魏恒飞, 男, 1983 年生, 博士生, 从事层序地层及油气资源评价工作; E-mail: hengfei_w14@126.com。

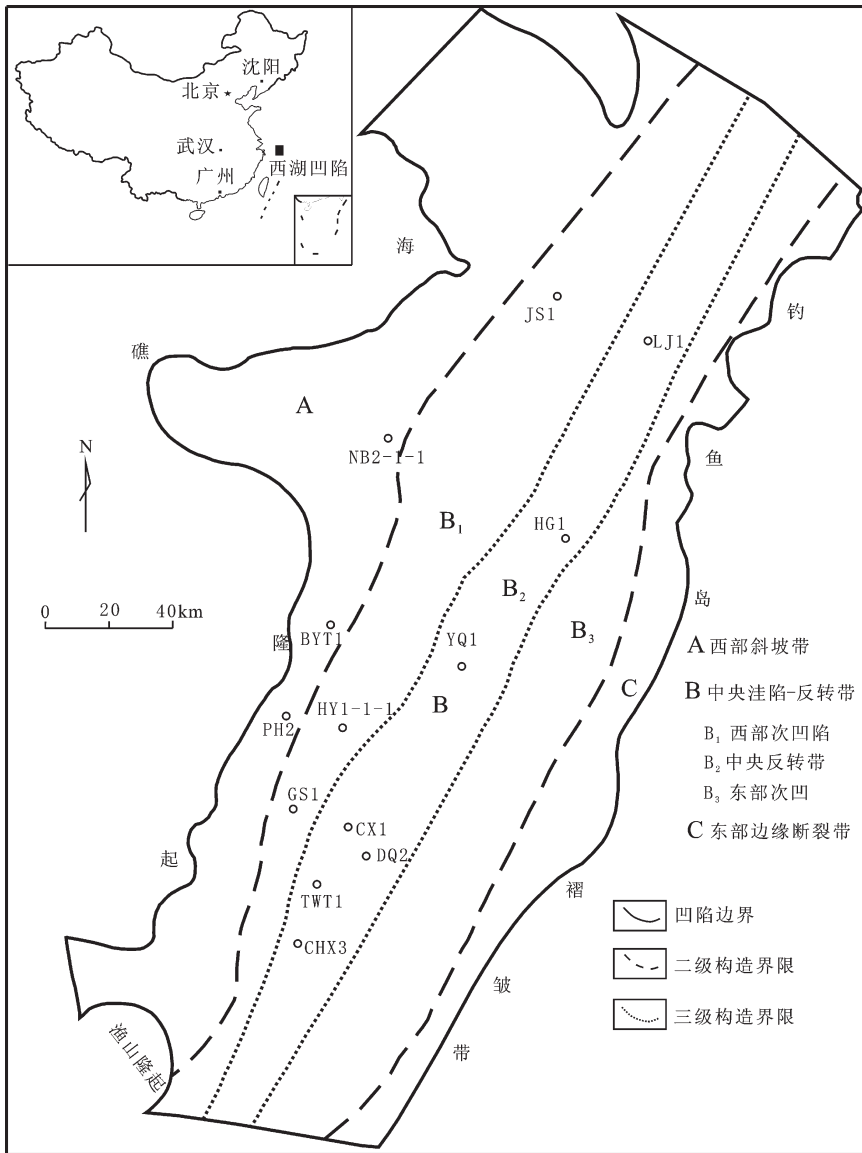


图1 西湖凹陷位置及构造区划

Fig.1 Location and structural division of Xihu depression

陷在渔山隆起附近通过渔山门槛与海连通,因此其沉积环境主要发育了一套半封闭海湾相为主的沉积物,并在凹陷的西部斜坡和东部的陡坡带发育了一套含煤地层,这套滨海型含煤地层也是西湖凹陷的主力烃源岩。

2 平湖组烃源岩特征

西湖凹陷平湖组烃源岩最大厚度 1 300 m,其中平湖组下段烃源岩较好,以暗色泥岩为主,烃源岩厚度达 800 m,平湖组中段烃源岩稍逊于下段,以煤层和暗色泥岩为主,烃源岩厚度达 300 m,平湖组上段

烃源岩在整个凹陷中发育不全,多被剥蚀,整体较差,烃源岩厚度达 200 m。根据盆地构造演化和地层沉积特征分析,西湖凹陷古近系中、上始新统平湖组为半封闭海湾沉积,岩性为海湾及海湾潮坪相粉砂、泥岩夹炭质泥岩、煤线,该层位烃源岩属煤系烃源岩,从岩性上可分为深灰色泥岩、炭质泥岩和煤(图 2)。

根据岩石热解参数分析结果显示,平湖组烃源岩有机质类型主要为 II₂-III 型的偏腐殖型干酪根(图 3),暗色泥岩 TOC 平均为 1.31%,煤的 TOC 平均为 61.84%^[24,25],且煤层的有机质丰度最高,炭质泥岩次之,暗色泥岩最低(图 3);现今平湖组烃源岩都已

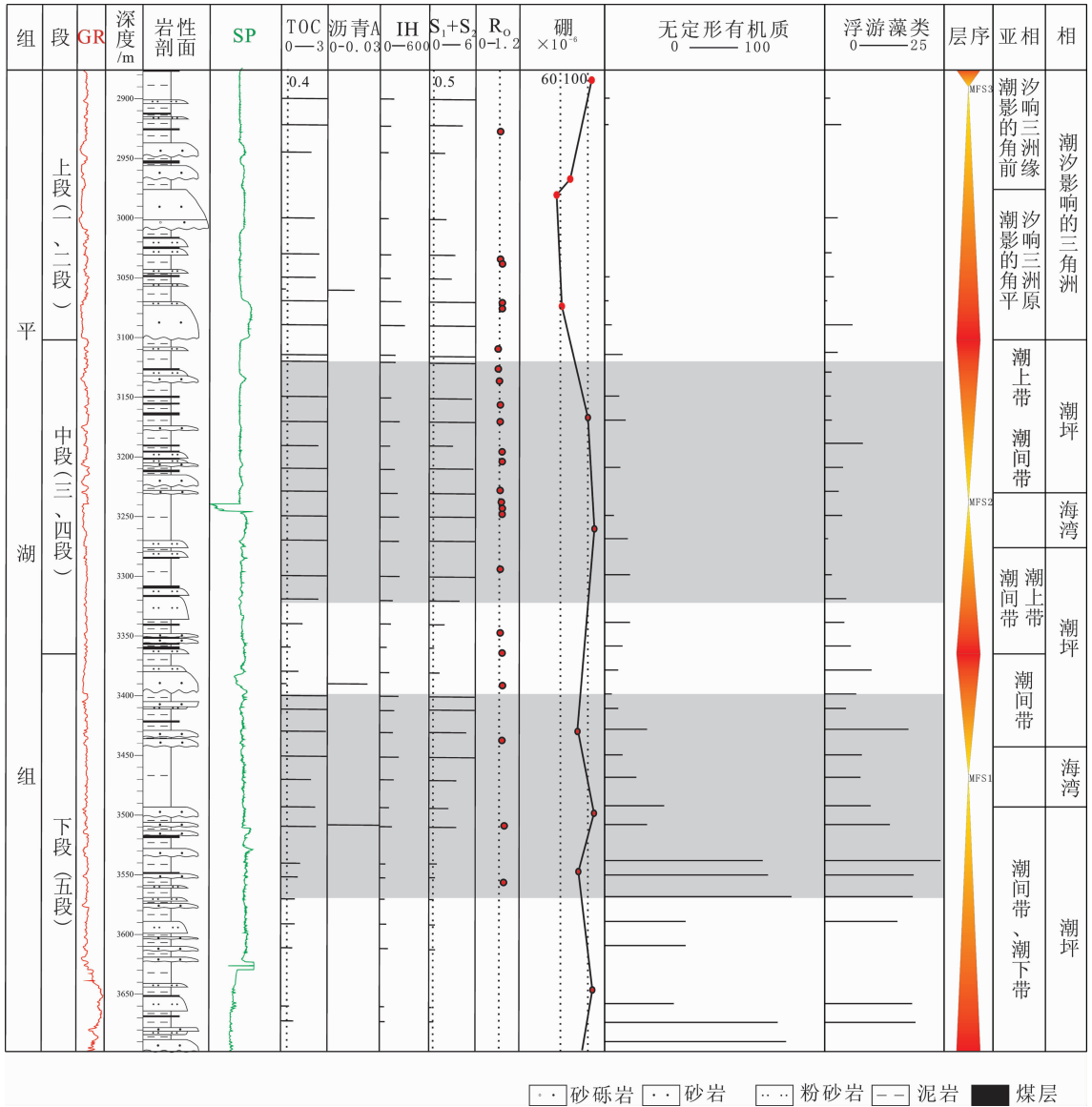


图 2 PH2 井沉积与地球化学综合剖面

Fig.2 Integrated sedimentary and geochemical section of PH2 well

进入高成熟阶段,通过油气源对比,凹陷内现今发现的石油均来自平湖组烃源岩,天然气主要来自平湖组及其下的高成熟烃源岩^[26,27]。另外平湖组有机质来源主要为陆源高等植物,海湾泥岩中含有部分原生有机质(图 2),烃源岩中有机质显微组分类型以脂镜富氢相为主,部分烃源岩的富氢组分含量较高^[9]。

3 平湖组烃源岩发育环境

3.1 平湖组沉积环境

良好的沉积环境是影响有机质富集的重要因素,地质历史时期好的烃源岩多富集于浅海、潟湖及

陆相的半深湖—深湖环境,烃源岩的发育环境具有很大的局限性,因此研究烃源岩富集的沉积环境是探讨烃源岩富集的重要方面。通过对岩心资料和钻测井资料的分析,西湖凹陷现有钻井已揭露的沉积环境主要有潮汐影响的三角洲、潮坪、海湾及辫状河三角洲。

3.1.1 潮汐影响的三角洲

潮汐影响的三角洲主要分布于西湖凹陷的西部斜坡带,多发育于平湖组的中晚期。潮汐影响的三角洲平原在所有钻井中钻遇较少,其发育的沉积类型主要为发育砂砾岩的底部具冲刷现象的河道滞留沉

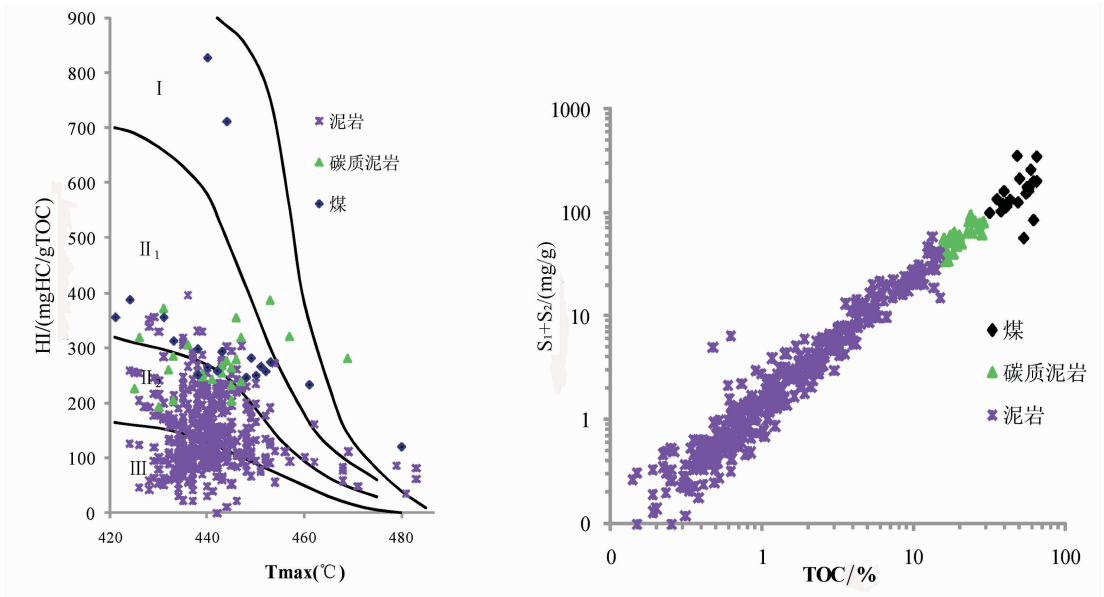


图3 平湖组烃源岩有机质类型和丰度

Fig.3 Organic matter type and abundance of source rock of Pinghu Formation

积,以细砂岩为主的河道边滩沉积,发育薄煤层、具泥裂构造的泥岩(图5-a)和粉砂岩的泛滥盆地沉积;潮汐影响的三角洲前缘发育的主要沉积类型有水下分流河道、分流间湾及河口坝,其中水下分流河道的岩性主要为具有块状层理和小型板状交错层理

的细砂岩,细砂岩多具冲刷现象(图4中PH1井),分流间湾沉积主要发育有具水平层理的泥岩、粉砂岩及煤层(图5-b),河口坝沉积主要发育有具板状层理和波状层理的细砂岩和粉砂岩(图5-c);另外潮汐影响的前三角洲沉积与海湾泥岩和潮下带泥岩

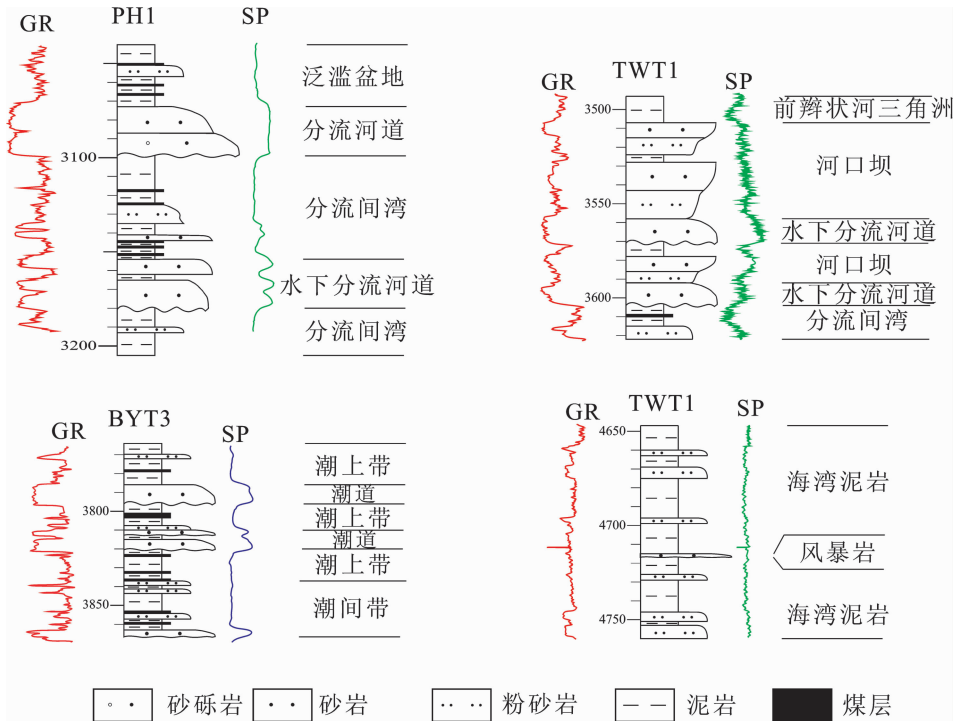


图4 平湖组各沉积环境的沉积序列图

Fig.4 Sedimentary sequence of each sedimentary environment in Pinghu Formation

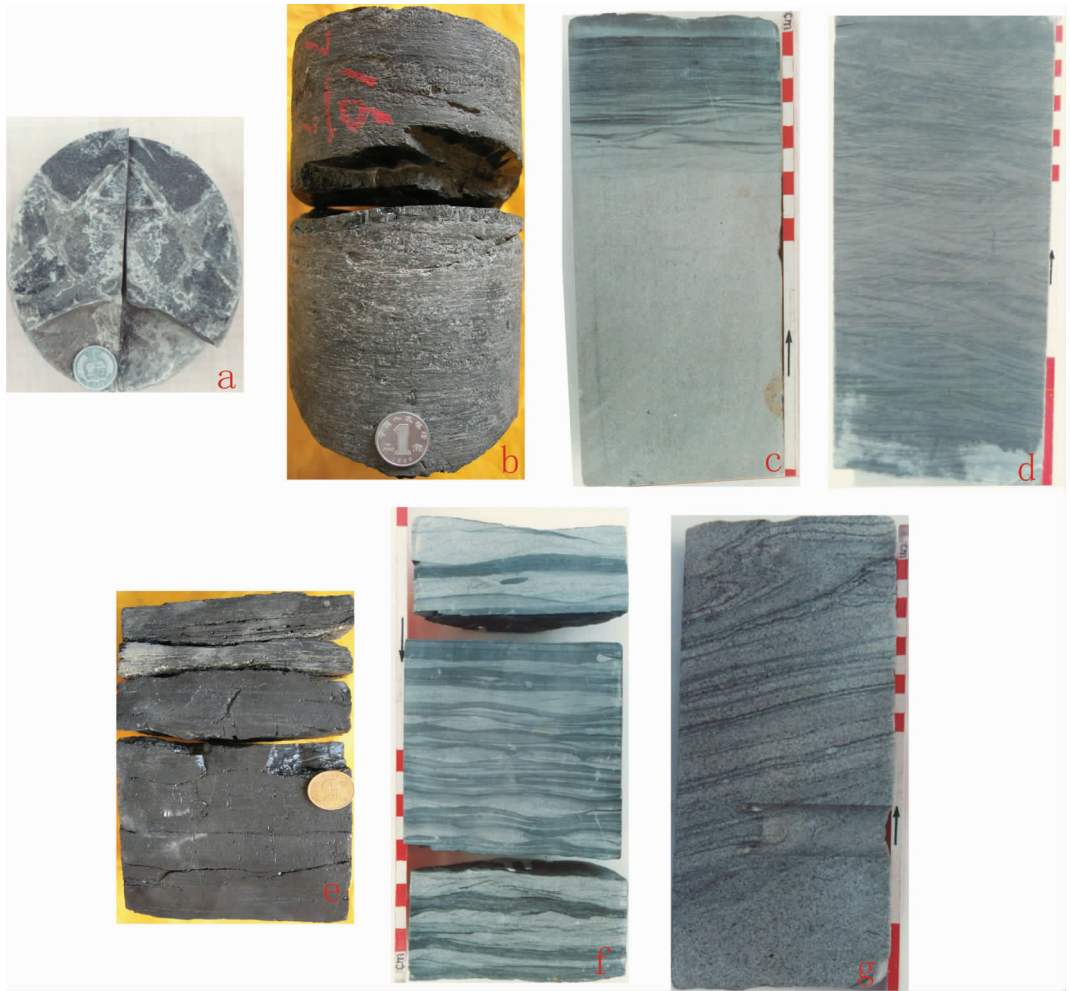


图 5 平湖组各沉积环境的岩心照片图

a—具“V”字型泥裂潮汐影响的三角洲泛滥盆地沉积,PH2,3 062.05 m;b—具水平、波状层理的分流间湾煤层,PH4 井,2 949.7 m;c—具板状交错层理和波状层理的河口坝沉积,PH1,3 141 m;d—具凹形交错层理的正常浪基面与风暴浪基面之间的风暴岩沉积,JS1 井,4 505.22 m;e—潮上带泥炭沼泽形成的煤层,PH5,3 093.88 m;f—具波状、透镜状层理的潮间带沉积,PH1 井,4 173 m;g—具变形层理的潮间带渠道沉积,KQT1 井,4 054 m

Fig.5 Core photo of each sedimentary environment in Pinghu Formation

a—“V”-shaped mud crack developed in flood basin of tidal delta ,PH2 well, 3 062.05 m; b—Coal-bearing horizontal and wavy bedding developed in interdistributary bay, PH4 well, 2 949.7 m; c—Tabular cross and wavy bedding developed in channel-mouth bar, PH1 well, 3 141 m; d—Concave cross bedding developed in storm rock between normal wave base and storm wave base, JS1 well, 4 505.22 m; e—Coal formed in peat bog of supralittoral zone, PH5 well, 3093.88 m; f—Wavy and lenticular bedding formed in intertidal zone, PH1 well, 4 173 m; g—Deformation bedding formed in tidal channel of intertidal zone, KQT1 well, 4 054 m

多成渐变关系。

3.1.2 海湾

海湾环境在平湖组发育期整体具有范围变小的趋势,其形态整体呈长条形与凹陷走向平行,在垂向上海湾沉积与潮坪沉积及三角洲沉积呈过渡关系,主要岩性为含生物化石的泥岩和粉砂岩,并以水平和块状层理为主,在海湾泥岩中夹有不完整序列风暴岩沉积,这些风暴岩多为具有凹形层理的细砂岩和粉砂岩(图 5 中 d)、平行层理的细砂岩及水平层

理的粉砂岩(图 4 中 TWT1 井)。

3.1.3 辫状河三角洲

辫状河三角洲主要发育于西湖凹陷东缘的断裂带内侧,由于没有靠近东部断裂边缘的钻井,所以钻井揭示多为辫状河三角洲前缘和前辫状河三角洲(图 4 中 TWT1 井)。其中辫状河三角洲前缘发育的主要沉积类型有水下分流河道、分流间湾及河口坝,其中水下分流河道的岩性主要为具有大型板状和楔状交错层理的中细砂岩,中细砂岩的多具冲刷现象,

分流间湾沉积主要发育有具水平层理的泥岩、粉砂岩及煤层,河口坝沉积主要发育有具波状层理的细砂岩和粉砂岩;前辫状河三角洲沉积与海湾泥岩和潮下带泥岩多成渐变关系。

3.1.4 潮坪

潮坪沉积分布在西湖凹陷的两侧,主要发育于平湖组发育期的早中期,其中潮坪主要发育潮上带、潮间带和潮下带 3 个亚环境。潮上带主要发育有泥炭沼泽和泥坪沉积,泥炭沼泽沉积岩性主要以炭质泥岩和煤层为主(图 5-e),泥坪主要以泥岩和粉砂质泥岩为主;潮间带主要发育砂泥混合坪、砂坪及潮道 3 种沉积类型,砂泥混合坪主要特征是具有脉状、透镜状及波状层理的细砂岩、粉砂岩与泥岩(图 5-f),砂坪主要为具有双向交错层理的细砂岩,潮道分布在潮间带与潮下带的过渡地带,其沉积物主要为具有槽状交错层理、板状交错层理及变形层理的细砂岩(图 5-g),底部多具冲刷现象(图 4 中 BYT3 井);潮下带主要的沉积类型有高能坪和低能坪,高能坪主要为具有双向交错层理的砂岩,低能坪主要为泥岩和粉砂质泥岩。

3.2 沉积水体介质条件及烃源岩发育环境

3.2.1 沉积水体介质条件

不同的沉积环境往往具有不同的沉积介质条件,沉积介质条件一般包括含盐度、氧化-还原条件等,它们在一定程度上也对生物、沉积物等产生影响。

一般认为,海相环境的硼含量较高,而淡水中的含量较低^[8,29],通过对 PH2 井样品硼含量的分析,平湖组硼含量多大于 60×10^{-6} (图 2),这表明平湖组的沉积水体介质的盐度为半咸水到咸水。氧化-还原条件直接影响有机质的降解、保存以及变价元素的赋存状态,沉积岩中铁的价态可作为反映氧化-还原条件的有效指标。在氧化条件下 Fe^{3+} 丰富,而在还原条件下, Fe^{2+} 占优势。因此 Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 的比值往往用作判断氧化还原条件的标准。当 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} < 1$ 时属氧化条件^[30];当 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} > 5$ 时则属还原条件。在西湖凹陷的海湾环境的暗色泥岩分析样品中, $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 最小值为 0.88,最大值可达 30.78。其比值小于 1 的样品仅占 3.3%; 1~5 的占 32.3%; 大于 5 的占 64.4%,表明平湖组海湾环境沉积时以还原-弱还原条件为主^①。朱扬明通过分析西湖凹陷平湖组煤系烃

源岩分子地球化学特征时发现潮坪及三角洲发育的泥炭沼泽为氧化环境,而海湾暗色泥岩为弱氧化-弱还原^[31]。综上所述,西湖凹陷平湖组发育期的沉积水体介质盐度为半咸水-咸水,而氧化还原性在不同环境中表现不同,在泥炭沼泽中表现为氧化性,在海湾环境中表现为弱还原^[32]。

3.2.2 发育烃源岩的主要环境

沉积环境既控制着有机质丰度,又影响着有机质类型,是控制烃源岩发育和分布的最重要因素,沉积环境的还原性、水动力条件等直接决定了有机质的富集和保存情况。西湖凹陷平湖组发育期凹陷整体处于半封闭海湾环境^[33],水体介质性质为咸水-半咸水氧化-弱还原,在这种水体介质条件下发育的海湾环境、潮坪、潮汐影响的前三角洲、前辫状河三角洲及各环境中发育的泥炭沼泽都是烃源岩发育的良好地带,有机质能够在这些环境中较好地保存下来(图 2),从而形成烃源岩。西湖凹陷平湖组烃源岩的岩石类型主要为煤层、炭质泥岩及泥岩,其中煤层多形成于凹陷两侧的潮坪环境和三角洲分流间湾的覆水沼泽中,而炭质泥岩多发育于煤层被淹没时期的泛滥盆地和三角洲前缘地带,暗色泥岩主要发育于较深的海湾环境、潮坪、潮汐影响的前三角洲及前辫状河三角洲中(图 6)。

4 西湖凹陷平湖组烃源岩发育的控制因素

沉积环境中有机质原始生产力、沉积速率及保存条件等因素,能决定烃源岩的有机质类型和丰度等^[8,17-19],沉积盆地中发育沉积环境的控制因素,也是控制烃源岩发育的因素,其中古气候控制着沉积环境中沉积物的类型及沉积物中生物的生长条件,海平面变化控制着沉积环境的空间及平面展布特征,进而控制着烃源岩的发育位置,古构造格局从根本上控制着沉积环境中沉积物的沉积速率和保存条件。

4.1 古气候

古气候不仅影响古生物的生长条件,而且影响着地表沉积物的剥蚀速率,从而影响着生物的生产速率和沉积物的沉积速率。李明兴等通过对平湖组四段、五段的松科化石含量减少,亚热带植物花粉增多的分析,认为当时气候属亚热带气候,而平湖组

① 武法东.东海西湖单井沉积相综合研究.中国地质大学(北京),2006.

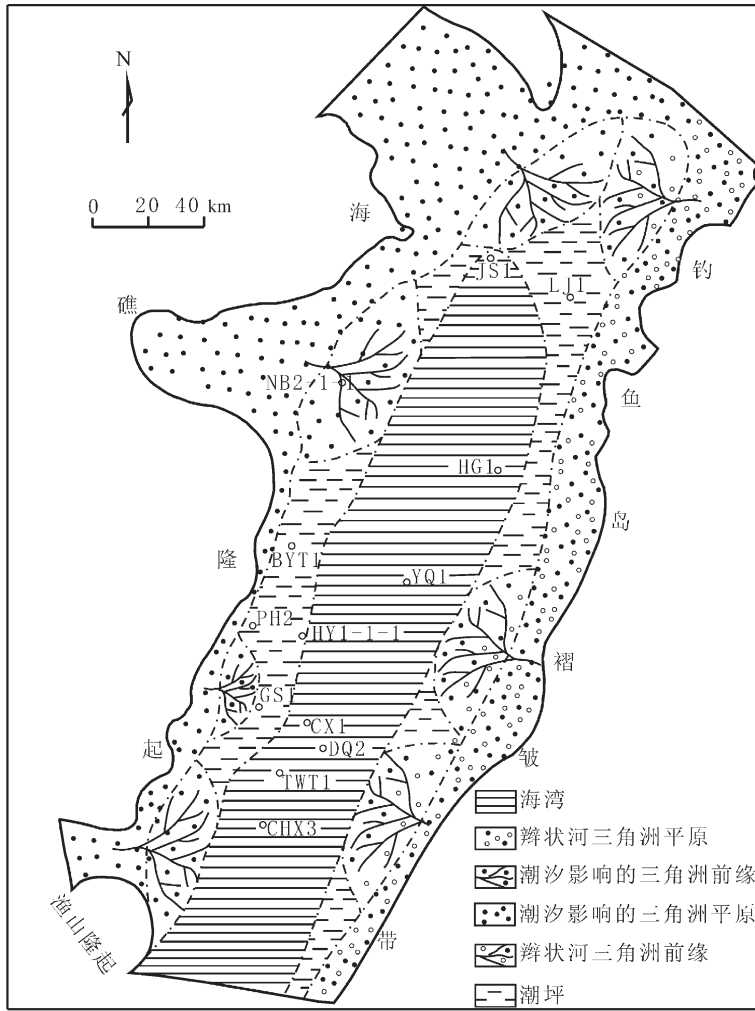


图 6 西湖凹陷平湖组沉积环境平面分布图

Fig.6 The distribution of sedimentary environment of Pinghu Formation in Xihu depression

一、二、三段松科植物花粉稍有增加, 亚热带植物花粉稍有减少来分析, 气候要比前期稍凉, 属北亚热带气候^①。在古近纪始新世西湖凹陷的地理位置为古太平洋西岸及大陆东岸, 这种地理位置的亚热带往往气候湿热, 利于高等植物和浮游生物的生长, 从而为西湖凹陷平湖组有机质的富集提供了原始物质条件, 因此古气候影响着烃源岩发育的物质基础。

4.2 海平面变化

海平面的变化控制着优质烃源岩在地层中的分布位置, 西湖凹陷整体为一个半封闭海湾环境, 当海平面升高, 凹陷内的水体与海洋大面积连通时, 海水中的硼含量就会增加(图 2), 粗粒碎屑物质沉积就会向凹陷两侧移动, 细粒的沉积物就会发育起来, 在

这种低水动力的情况下, 有机质也能较好的保存下来, 这些特征从沉积物中的无定形有机质和浮游藻类不断地增加^[34,35]及烃源岩的丰度也不断增加等方面可以反映出来(图 2), 因此平湖组中较好的烃源岩多发育于最大海泛面附近沉积环境中水动力较弱的条件下, 所以西湖凹陷烃源岩的发育受海平面的周期变化的控制。

4.3 古构造格局

烃源岩的发育要有适宜的构造沉降条件和埋藏条件, 如果没有足够的沉降量, 那么沉积的有机质将被氧化分解, 从而形成不了烃源岩。西湖凹陷平湖组发育期处于凹陷断陷期的中末期阶段, 凹陷的沉降幅度从平湖组下段到上段呈减缓趋势, 从而导致从

①李明兴. 西湖凹陷地层划分与对比. 中海石油(中国)有限公司上海分公司勘探部, 2006.

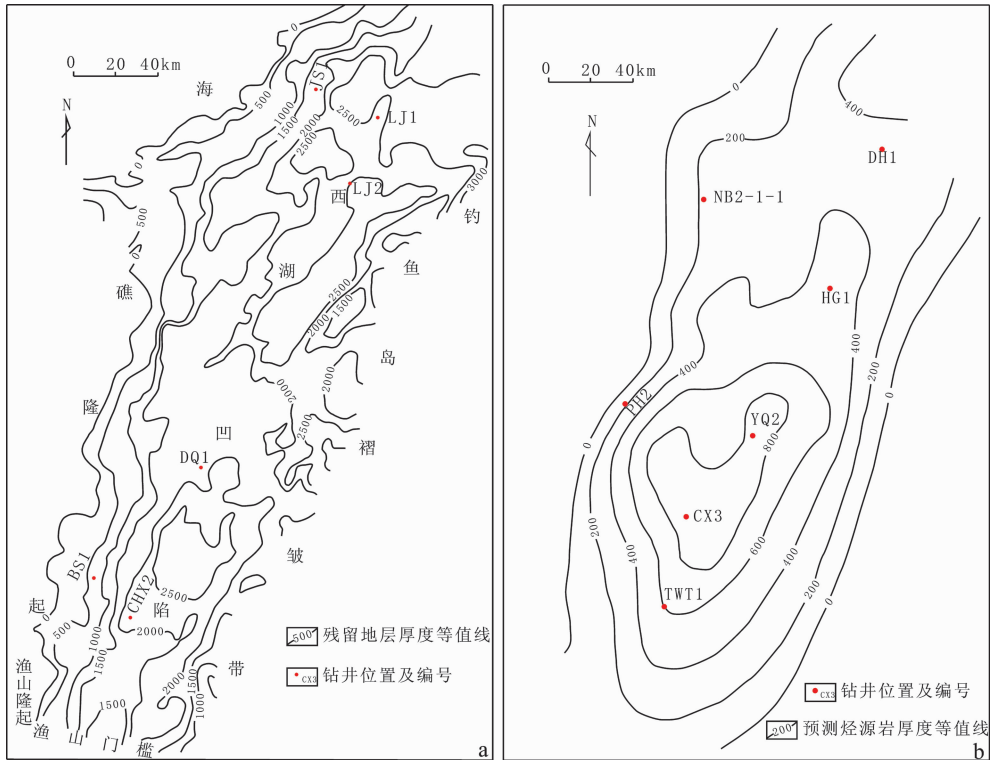


图7 西湖凹陷平湖组四、五及六段残留厚度图(a)和五、六段烃源岩厚度图(b)
Fig.7 Residual thickness of 4th, 5th and 6th member (a) and source rock thickness of 5th and 6th member (b) of Pinghu Formation in Xihu depression

平湖组下段至上段烃源岩丰度的降低。西湖凹陷平湖组烃源岩发育的地点与西湖凹陷的构造沉降中心和沉积中心密切相关, 总体表现为在构造沉降中心和沉积中心附近烃源岩的沉积厚度最大(图7)。

西湖凹陷平湖组在西部斜坡带普遍发育沥青质煤层, 这些煤层不但层数多, 而且厚度薄, 从而构成平湖组煤系烃源岩, 这种煤系烃源岩的形成与西湖凹陷的古构造演化历程密切相关, 在西湖凹陷平湖组发育期, 断陷作用处于减弱阶段, 而前期强烈的断陷作用导致地表强烈的不均衡性, 导致剥蚀和沉积量较大, 这种广泛填低补平作用致使西湖凹陷平湖组沉积中后期西部斜坡带地势比较平坦, 而在这些平坦地带的低洼区域往往形成泥炭沼泽环境, 并且由于短周期海平面的变化, 致使潮汐水体的不稳定性, 造成泥炭沼泽发育具有间歇性, 从而形成煤层与暗色泥岩的间歇互层式煤系烃源岩(图2)。

5 平湖组烃源岩发育模式

平湖组发育期为西湖凹陷断陷末期, 这个时期

是断陷盆地的主要聚煤期^[36], 另外凹陷此时与海连通, 烃源岩发育和煤层的形成也受控于全球海平面的变化, 其聚煤作用和烃源岩的发育又具有滨海环境的特点, 因而有别于陆相断陷盆地断陷末期的聚煤和烃源岩发育。平湖组烃源岩的有机质来源在不同环境中来源不同, 在三角洲和潮坪泥炭沼泽环境中有机质主要来自陆源高等植物, 而海湾环境中有机质一部分来自陆源高等植物一部分来自原地的水生生物^[37]。

综上所述, 西湖凹陷平湖组烃源岩的形成受控于古气候、海平面变化及古构造格局的综合影响, 而这些因素对烃源岩发育的控制作用直接体现在不同环境的古生产力和氧化还原性上, 一是在潮坪和三角洲发育的泥炭沼泽中表现为高的有机质生产率起主导作用, 由于高的有机质生产率, 而使泥炭沼泽水体氧化性显得微不足道了, 从而为烃源岩的形成创造条件; 二是海湾环境呈还原性水介质条件起主导作用, 这种环境中有机质生产率较泥炭沼泽中低, 但由于其底部水体的缺氧而使有机质得以保存形成烃

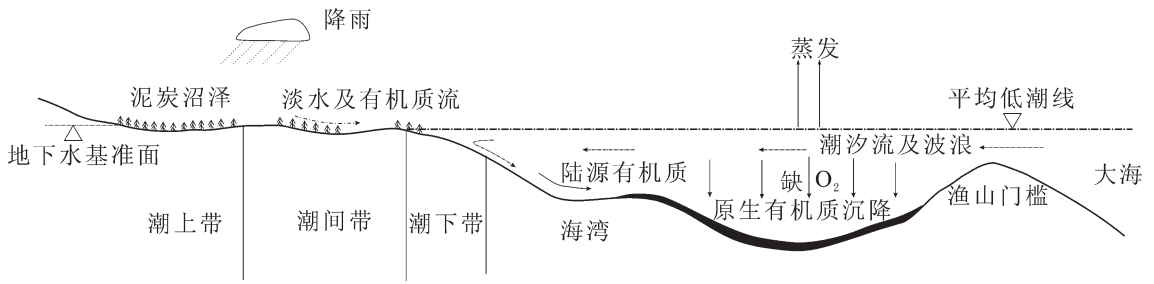


图8 平湖组烃源岩发育的沉积模式

Fig.8 Sedimentary model for the development of source rock in Pinghu Formation

源岩(图8)。

6 结论

(1)平湖组煤系烃源岩具有丰度高、厚度大的特点,是西湖凹陷油气的主要源岩,此时的沉积水体盐度为咸水—半咸水,三角洲和潮坪中发育的覆水泥炭沼泽中沉积水体表现为氧化性,而海湾环境中表现为弱还原性,在这种水体介质条件下,煤和炭质泥岩主要形成于潮坪和三角洲中发育的覆水泥炭沼泽中,而暗色泥岩主要形成于海湾中。

(2)平湖组烃源岩的发育主要受控于古气候、海平面变化及古构造格局,而古气候为烃源岩的发育提供了良好的物质背景,古构造格局控制着沉积环境的平面展布及烃源岩的发育厚度和位置,海平面变化控制着烃源岩在地层内部的分布特点。

(3)综合考虑平湖组发育期的沉积水体介质条件、烃源岩发育环境和主控因素,建立了西湖凹陷平湖组烃源岩发育的沉积模式,在潮坪和三角洲发育的泥炭沼泽中高的有机质生产速率对有机质的富集的影响远胜于氧化还原条件,而在海湾环境中的弱还原性使陆源有机质和原生有机质得以保存。

参考文献(References):

- [1] 陈敬轶,王飞宇,刘晓. 东海平湖油气田烃源岩特征与油气生成[J]. 地质科技情报, 2010, 29(6):80-83.
Chen Jingyi, Wang Feiyu, Liu Xiao. Characteristics of source rocks and hydrocarbon generation in Pinghu field, East China sea[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(6):80-83(in Chinese with English abstract).
- [2] 冯晓杰,蔡东升. 东海陆架盆地中新生代构造演化对烃源岩分布的控制作用[J]. 中国海上油气, 2006, 18(6):372-375.
Feng Xiaojie, Cai Dongsheng. Controls of Mesozoic and Cenozoic tectonic evolution on source rock distribution in East China Sea shelf basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2006, 18(6):372-375(in

Chinese with English abstract).

- [3] 刘道燕. 东海陆架盆地烃源岩及其烃类特点[J]. 海相油气地质, 1996, 1(2):34-37.
Liu Daoyan. Discussion on source rock and hydrocarbon characteristics of East China sea shelf basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1996, 1(2):34-37 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李贤庆,钟宁宁,王铁冠,等. 东海盆地西湖凹陷下第三系烃源岩显微组分组成和成烃组分剖析[J]. 中国海上油气, 1995, 9(1):19-25.
Li Qingxian, Zhong Ningning, Wang Tieguan, et al. The study on maceral composition and hydrocarbon-generating macerals of lower tertiary source rocks in Xihu sag, East China Sea basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1995, 9(1):19-25 (in Chinese with English abstract).
- [5] 孙伯强. 东海西湖凹陷烃源岩有机相研究[J]. 海洋石油, 2001, 20(2):7-13.
Sun Boqiang. Sedimentary organic facies of hydrocarbon source rocks in the Xihu sag[J]. Offshore Oil, 2001, 20(2):7-13(in Chinese with English abstract).
- [6] Muller P J, Suess E. Productivity sedimentation rate and sedimentary organic matter in the ocean—organic carbon preservation[R]. Deep-Sea Research, 1979:1347-1362.
- [7] 万晓樵,刘文灿,李国彪,等. 白垩纪黑色页岩与海水含氧量变化—以西藏南部为例[J]. 中国地质, 2003, 30(1):36-47.
Wan Xiaojiao, Liu Wencan, Li Guobiao, et al. Cretaceous black shale and dissolved oxygen content—A case study in southern Tibet[J]. Chinese Geology, 2003, 30(1):36-47 (in Chinese with English abstract).
- [8] Pedersen T F, Calvert S E. Anoxia vs Productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rock? [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74:454-466.
- [9] Dymond J, Suess E, Lyle L. Barium in Deep-Sea Sediment: A Geochemical Proxy for Paleoproductivity [J], Paleoceanography, 1992, 7(2):163-181.
- [10] Francois R, Honjo S, Manganini S J, et al. Biogenic barium fluxes to the deep sea: implications for paleoproductivity reconstruction[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(2):289-303.

- [11] Tyson R V, Pearson T H. Modern and ancient continental shlf anoxia [J]. Geological Society of Special Publication, 1991, 58:470-482.
- [12] 施春华, 黄秋, 颜佳新. 广西来宾栖霞组缺氧沉积环境地球化学特征[J]. 地质地球化学, 2001, 29(4):35-39.
Shi Chunhua, Huang Qiu, Yan Jiaxin. Geochemistry of anaerobic sedimentary environments of the Qixia formation in Laibin, Guangxi [J]. Geology-geochemistry, 2001, 29 (4):35-39 (in Chinese with English abstract).
- [13] 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. 地质学报, 2006, 80(3):467-472.
Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Sun Shengli, et al. Main factors influencing marine carbonate source rock formation[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(3):467-472(in Chinese with English abstract).
- [14] 陈践发, 张水昌, 鲍志东, 等. 海相优质烃源岩发育的主要影响因素及沉积环境[J]. 海相油气地质, 2006, 11(3):49-54.
Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Bao Zhidong, et al. Main sedimentary environments and influencing factors for development of marine organic-rich source rocks [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(3):49-54(in Chinese with English abstract).
- [15] John I.Hedges, Richard G.Keil. Sedimentary organic matter preservation:an assessment and speculative synthesis [J]. Marine Chemistry, 1995, 49:81-115.
- [16] Demaison G J, Moore G T . Anoxic environments and oil source bed genesis[J]. Organic Geochemistry, 1980, 2(1):9-31.
- [17] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. 地学前缘, 2005, 12(3):39-48.
Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Bian Lizeng, et al. Development constraints of marine source rocks in China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(3):39-48(in Chinese with English abstract).
- [18] 李天义, 何生, 杨智. 海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析[J]. 地质科技情报, 2008, 27(6):63-70.
Li Tianyi, He Sheng, Yang Zhi. The marine source rock formation conditions and control factors [J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27 (6):63-70 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张宝民, 张水昌, 边立曾, 等. 浅析中国新元古一下古生界海相烃源岩发育模式[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 I):58-69.
Zhang Baomin, Zhang Shuichang, Bian Lizeng, et al. Analysis in developing model of marine source rock on upper proterozoic-lower paleozoic in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (supplement I):28-69(in Chinese).
- [20] 张远兴, 叶加仁, 苏克露, 等. 东海西湖凹陷沉降史与构造演化[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(2):215-223.
Zhang Yuanxing, Ye Jiaren, Sun Kelu, et al. The burial history and evolution of Xihu depression [J]. Geotectonica Ermetallogenia, 2009, 33(2):215-223(in Chinese with English abstract).
- [21] 何将启, 梁世友, 陈拥峰, 等. 东海盆地西湖凹陷新生代构造演化对油气的控制作用[J]. 石油地质实验地质, 2008, 30(3):221-226.
He Jiangqi, Liang Shiyu, Chen Yongfeng, et al. Control on petroleum by Cenozoic tectonic evolution in the Xihu sag, the East China sea basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30 (3):221-226(in Chinese with English abstract).
- [22] 宋小勇, 储呈林, 芮志峰. 东海盆地西湖凹陷构造样式及其演化[J]. 高校地质学报, 2010, 16(1):86-93.
Song Xiaoyong, Chu Chenglin, Rui Zhifeng. Structural framework and evolution of Xihu sag in East China sea basin [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(1):86-93(in Chinese with English abstract).
- [23] 吴跃兴. 平湖组煤不同密度镜质组热解色谱特征及生烃潜力[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(1):29-32.
Wu Yuexing. Pyrolysis chromatographic characteristics and source potential of the coal vitrinite fractions with various densities, Pinghu formation, East China Sea basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(1):29-32(in Chinese with English abstract).
- [24] 傅宁. 东海盆地西湖凹陷煤系烃源岩及凝析油中的二萜化合物[J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8(1):21-28.
Fu Ning. Diterpenoid compounds in coal measures and condensates in Xihu sag of East China Sea basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1994, 8(1):21-28(in Chinese with English abstract).
- [25] 叶加仁, 顾惠荣, 贾健宜. 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(in Chinese with English abstract).
- [26] Ye Jiaren, Qing Hairuo, Bend Stephen 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.
- [27] 叶军, 郭迪孝. 东海西湖凹陷天然气地质化特征[J]. 石油实验地质, 1996, 18(2):174-181.
Ye Jun, Guo Dixiao. Geochemical characters of the natural gas in west lake depression, the East China Sea [J]. Petroleum Geology & Experiment, 1996, 18(2):174-181(in Chinese with English abstract).
- [28] 杨锐. 微量元素硼的环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1993, 13(3):91-96.
Yang Rui. Environmental significance of trace element boron [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1993, 13(3):91-96 (in Chinese with English abstract).
- [29] 邓平. 微量元素在油气勘探中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(1):27-32.
Deng Ping. The application of trace amount of elements in the exploration of oil and gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(1):27-32(in Chinese with English abstract).
- [30] 腾格尔. 海相地层元素、碳氧同位素分布与沉积环境和烃源岩发育关系—以鄂尔多斯盆地为例[D]. 兰州:中国科学院兰州地质研究所, 2004:44-45.
Teng Geer. The Distribution of Elements, Carbon and Oxygen Isotopes on Marine Strata and Environmental Correlation between them and Hydrocarbon Source Rocks Formation—An Example from Ordovician Basin, China [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of

- Geology, Chinese Academy of Science, 2004:44–45 (in Chinese with English abstract).
- [31] 朱扬明, 周洁, 顾圣啸, 等. 西湖凹陷始新统平湖组煤系烃源岩分子地球化学特征[J]. 石油学报, 2012, 33(1):32–39.
Zhu Yangming, Zhou Jie, Gu Shengxiao, et al. Molecular geochemistry of Eocene Pinghu formation coal-bearing source rocks in the Xihu depression, East China Sea shelf basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(1):32–39(in Chinese with English abstract).
- [32] 武法东, 周平. 东海陆架盆地西湖凹陷第三系层序地层与沉积体系分析[M]. 北京:地质出版社, 2000:120–124.
Wu Fadong, Zhou Ping. Tertiary Sequence Stratigraphy and Depositional System Analysis Xihu Depression, the East China Sea Shelf Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000:120–124(in Chinese with English abstract).
- [33] 陈琳琳. 东海西湖凹陷平湖组沉积环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(4):69–78.
Chen Linlin. Depositional environment evolution of Pinghu formation in Xihu depression, the East China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1998, 18(4):69–78(in Chinese with English abstract).
- [34] 王可德, 居杏珍, 张健益, 等. 东海陆架盆地西南部的海相始新统[J]. 微体古生物学报, 1990, 7(4):295–309.
Wang Kede, Ju Xingzhen, Zhang Jianyi, et al. Eocene marine deposits in the Southwestern continental shelf basin of the East China Sea[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1990, 7(4):295–309(in Chinese with English abstract).
- [35] 王开发, 吴国璋. 孢粉相及其应用 [J]. 微体古生物学报, 1989, 6(1):103–110.
Wang Kaifa, Wu Guoxuan. Palynofacies and its application[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1989, 6(1):103–110(in Chinese with English abstract).
- [36] 李思田, 李宝芳, 杨士恭, 等. 中国东北部晚中生代断陷型煤盆地的沉积作用和构造演化 [J]. 地球科学—武汉地质学院学报, 1982, 18(3):275–294.
Li Sitian, Li Baofang, Yang Shigong, et al. Sedimentation and tectonic evolution of mesozoic faulted coal basins in northeastern China [J]. Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology, 1982, 18(3):275–294(in Chinese with English abstract).

The controlling factors and sedimentary environment for developing coastal coal-bearing source rock of Pinghu Formation in Xihu depression

WEI Heng-fei^{1,2}, CHEN Jian-fa^{1,2}, CHEN Xiao-dong³,
CAO Bing³, GUO Wang^{1,2}, ZHANG Jun-hua^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. College of Earth Sciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. CNOOC(China) Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: The Pinghu Formation is one of the major source rocks for oil and gas reservoirs in Xihu depression. The types of source rocks are mudstone, carbonaceous mudstone and coal, the organic matter type is II–III, the organic matter is abundant, and on the whole, the rocks are medium–good source rocks. The Pinghu Formation of Xihu basin is mainly developed in bay, delta influenced by tide, braided river delta and tidal flat, with source rocks deposited in the bay and tidal flat environment. During the depositional stage of Pinghu Formation, the sedimentary water was brackish–saline, the characteristics were oxidative in peat swamp developed in delta and tidal flat, and low reducing in bay. There were four factors which dominated the development of source rocks in Pinghu Formation: paleo–structure, which determined the thickness and location of source rocks; sea level, which controlled the distributive characteristics of source rocks within the strata; paleo–climate, which provided approved material background for the development of source rocks; sedimentary environment, which governed the abundance, types and conservational conditions of source rocks. On the basis of the study of the controlling factors and sedimentary environment responsible for developing source rocks of Pinghu Formation, the authors have established a sedimentary model for developing source rocks in Pinghu Formation.

Key words: Pinghu Formation; source rock; paleoclimate; sedimentary environment; sea level; paleotectonic structure

About the first author: WEI Heng-fei, born in 1983, doctor candidate, engages in study of sequence stratigraphy and evaluation of oil and gas resources; E-mail: hengfei_w14@126.com.