

文章编号: 0253-2697(2024)07-1092-12 DOI:10.7623/syxb202407005

鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组孢粉相及其沉积古环境恢复

李剑锋^{1,2} 李相博³ 马 博⁴ 黄军平³ 孔庆芬^{1,2} 张 艳³ 吉利明^{5,6}

(1. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院 陕西西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 陕西西安 710018;
3. 中国石油勘探开发研究院西北分院 甘肃兰州 730020; 4. 兰州资源环境职业技术大学黄河流域生态环境产教融合研究院 甘肃兰州 730020;
5. 中国科学院西北生态环境资源研究院 甘肃兰州 730000; 6. 甘肃省油气资源勘探与评价重点实验室 甘肃兰州 730000)

摘要:为揭示鄂尔多斯盆地南部三叠系优质烃源岩有机质来源,对三叠系延长组的岩心开展了孢粉相分析和沉积古环境恢复。①延长组 9 段—6 段可识别出 3 种孢粉相:孢粉相 I 以无定形有机质(AOM)为主;孢粉相 II 以 AOM 和植物碎屑共同发育为特征;孢粉相 III 以发育植物碎屑为主。②延长组可划分出 3 种孢粉相组合:组合 A 中以孢粉相 III 为主,可见少量孢粉相 I 和孢粉相 II,形成于河/湖三角洲和滨湖沉积,为近源富氧的高能环境产物;组合 B 中以孢粉相 II 为主,可见少量孢粉相 I 和孢粉相 III,是浅湖—半深湖亚相产物,反映低氧—缺氧的近源—远源环境;组合 C 中以孢粉相 I 为主,仅出现于延长组 7 段 3 亚段,形成于半深湖—深湖亚相静水缺氧环境。③元素地球化学古环境分析显示:研究区在延长组 7 段 3 亚段沉积期为持续的高度湿润气候,在延长组 9 段 1 亚段、延长组 7 段 1 亚段和延长组 6 段 3 亚段沉积期可出现不连续的潮湿气候,其余时段为半干旱—半潮湿气候;湖平面在延长组 7 段 3 亚段沉积期达到最高;湖泊生产力在延长组 8 段 1 亚段沉积期开始升高,至延长组 7 段 3 亚段沉积期达到高峰;高度湿润气候、湖泊最大水深与最高生产力的同期出现,指示印支期盆地的快速沉降事件与卡尼期全球潮湿气候事件耦合是鄂尔多斯盆地南部延长组 7 段 3 亚段沉积期藻类勃发和降解 AOM 大规模聚集的关键因素,并导致发育优质烃源岩。

关键词:鄂尔多斯盆地;三叠系延长组;孢粉相;古环境;古气候;烃源岩

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Palynofacies and sedimentary paleoenvironment reconstruction of Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin

Li Jianfeng^{1,2} Li Xiangbo³ Ma Bo⁴ Huang Junping³ Kong Qingfen^{1,2} Zhang Yan³ Ji Liming^{5,6}

(1. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Shaanxi Xi'an 710018, China; 2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil and Gas Fields, Shaanxi Xi'an 710018, China; 3. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Northwest, Gansu Lanzhou 730020, China; 4. Yellow River Basin Ecotope Integration of Industry and Education Research Institute, Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University, Gansu Lanzhou 730020, China; 5. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China; 6. Key Laboratory of Petroleum Resources Exploration and Evaluation, Gansu Province, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract:To reveal the organic matter sources of high-quality Triassic source rocks in southern Ordos Basin, palynofacies analysis and sedimentary paleoenvironment reconstruction were carried out on the core of the Triassic Yanchang Formation. The findings show as follows. (1) Three types of palynofacies can be identified from Member 9 to Member 6 of Yanchang Formation. Specifically, palynofacies Type I is mainly composed of amorphous organic matter (AOM); palynofacies Type II is characterized by co-development of AOM and plant debris; palynofacies Type III is dominated by plant detritus. (2) Three types of palynofacies assemblage are classified. Assemblage A is mainly composed of palynofacies Type III, with a small amount of palynofacies Type I and II. It is formed in fluvial/lacustrine delta and lakefront facies, as being a near-source oxygen-rich product in high-energy environment. Assemblage B mainly contains palynofacies Type II, with a small amount of palynofacies Type I and III. It is a shallow to semi-deep

基金项目:国家自然科学基金项目“鄂尔多斯盆地延长期湖泊热流体活动与优质烃源岩发育机制”(No. 42372176)、“深水块状砂岩形成机理及沉积模式研究——以鄂尔多斯盆地延长组为例”(No. 41772099)和甘肃省青年科技基金项目“纹层结构对低熟页岩原位转化的微观协同机制研究”(23JRRA1372)资助。

第一作者:李剑锋,男,1968年9月生,1991年获南京大学地球化学专业学士学位,现为中国石油长庆油田公司勘探开发研究院高级工程师,主要从事油气地球化学研究。Email:ljf_cq@petrochina.com.cn

通信作者:吉利明,男,1963年1月生,2005年获中国地质大学(武汉)地球化学专业博士学位,现为中国科学院西北生态环境资源研究院研究员,主要从事石油地质与微体古生物研究。Email:jilimin@lzb.ac.cn

lacustrine subfacies product, reflecting the hypoxic to anoxic near-source or far-source environment. Assemblage C is dominated by palynofacies Type I, which is only found in the 3rd submember of Member 7 of Yanchang Formation. It was formed in the semi-deep to deep lacustrine static water anoxic environment. (3) The element geochemical paleoenvironmental analysis shows that the study area had a continuous highly humid climate during the depositional period in the 3rd submember of Member 7 of Yanchang Formation, the discontinuous humid climate might occur during the depositional periods in the 1st submember of Member 9 and Member 7, and the 3rd submember of Member 6 of Yanchang Formation, and semi-arid to semi-humid climate occurred in the remaining periods. The lake level reached its highest during the depositional period in the 3rd submember of Member 7 of Yanchang Formation. The lake productivity began to increase in the depositional period of the first submember of Member 8 of Yanchang Formation, and reached its peak in the depositional period of the 3rd submember of Member 7 of Yanchang Formation. The simultaneous occurrence of highly humid climate, maximum lake depth, and maximum productivity indicates that the coupling of rapid subsidence in the Indosinian period and global humid climate events in the Carnian period is the key factor for the algal bloom and large-scale accumulation of degraded AOM in the depositional period of the 3rd submember of Member 7 of Yanchang Formation in southern Ordos Basin, leading to the development of high-quality source rocks.

Key words: Ordos Basin; Triassic Yanchang Formation; palynofacies; paleoenvironment; paleoclimate; source rock

引用:李剑锋,李相博,马博,黄军平,孔庆芬,张艳,吉利明.鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组孢粉相及其沉积古环境恢复[J].石油学报,2024,45(7):1092-1103.

Cite: LI Jianfeng, LI Xiangbo, MA Bo, HUANG Junping, KONG Qingfen, ZHANG Yan, JI Liming. Palynofacies and sedimentary paleoenvironment reconstruction of Triassic Yanchang Formation in southern Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(7): 1092-1103.

湖相油源岩中有机质的富集受水体中浮游生物的生产力、底水的氧化-还原条件和沉积速率共同影响,较高的初级生产力和缺氧沉积环境被认为是有机质富集保存的有利因素^[1-2]。鄂尔多斯盆地在中-上三叠统延长组沉积期为一个大型拗陷淡水湖泊,其中,延长组7段(长7段)3亚段沉积期为最大湖泛期,也是深湖亚相烃源岩形成的主要阶段,发育了由页岩、碳质泥岩和暗色泥岩组成的凝缩层沉积^[3]。以往的研究认为,温暖潮湿的气候条件和广阔的湖泊环境为湖盆内浮游生物的勃发创造了条件,进而为优质烃源岩的广泛发育奠定了物质基础^[3]。近十余年来的大量研究认为,晚三叠世鄂尔多斯盆地频繁发生的火山喷发和湖底热液活动向湖泊输入了丰富的营养物,促进了湖泊藻类和浮游生物的大量繁殖,并导致湖泊生产力迅速提高和富氢有机质大规模富集^[4-6]。目前,延长组的成烃藻类生物属性和富集特征仍不明确, Ji等^[7-8]对延长组烃源岩开展了大量微体古生物研究,但仅在少数地区的优质烃源岩中发现光面球藻、葡萄藻等有机壁藻类化石。

对沉积岩中的分散有机质开展研究在中国早期被称为有机相分析^[9],之后称为干酪根显微组分分析^[10],其原理和方法与孢粉相分析相似,但有机颗粒的分类不尽相同,尤其是对不同碎屑有机质的母质来源和生烃潜力的认识明显不足。例如,主要生烃组分中的无定形有机质(AOM)一般被简单地分为藻类/细菌降解的腐泥型AOM和高等植物组织降解产生的腐殖型AOM,而将植物木质碎屑笼统地归于镜质体。

鄂尔多斯盆地三叠系延长组烃源岩有机组分的研究也主要基于干酪根组分分析,一般认为腐殖型AOM和腐泥型AOM是延长组烃源岩的主要烃源,具有陆源高等植物和低等水生生物混源的特征^[11-12],但对不同碎屑中有机质的生物属性和生烃能力缺乏进一步定量分析,这制约了烃源岩潜力的准确评价及其母质来源追溯。此外,在以往延长组的研究中,无论是烃源岩有机质组成分析,还是沉积古环境恢复都主要围绕长7段主力烃源岩进行,缺乏延长组整体特征和演化历史的研究。

孢粉相是指利用孢粉分析技术,从沉积物中获得在显微镜下可观察的所有抗酸有机质(亦称孢粉有机质)。其组成和保存条件不仅与母质类型相关,而且受到沉积环境和成岩作用控制^[13-16]。因此,孢粉相研究能够较完整地定量反映沉积有机质的丰度和生物来源,在国际上广泛应用于沉积有机质类型划分和烃源岩潜力评价^[15,17-20]以及沉积古环境重建等^[19-22]。孢粉相的研究和应用在中国远未得到重视,较详细的孢粉相研究见于东营凹陷和渤海海域莱州湾凹陷古近系沙河街组的烃源岩分析^[23-25]。近年来,Zhang等^[26]尝试将孢粉相分析方法应用于鄂尔多斯盆地中-上三叠统延长组,马博等^[27]尝试将其应用于酒西盆地白垩统赤金堡组,并在烃源岩评价和古环境研究中取得了良好的效果。

针对延长组烃源岩中成烃有机壁藻类化石稀少、碎屑有机质富集特征不明等问题,笔者在鄂尔多斯盆地南部三叠系湖泊沉积中心选取了连续的延长组岩心样品,通过孢粉相分析,系统开展了延长组不同层段的

烃源岩评价和古环境恢复,并结合元素地球化学分析,重建了延长组沉积期的古气候及其演变过程,以期揭示延长组烃源岩碎屑有机质的组成特征和生物来源,并为探讨延长组优质烃源岩的发育机理、开展烃源岩孢粉相评价方法的应用提供新思路。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部,是中国重要的大型含油气盆地,面积约为 $32 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地的东部、南部、西部和北部边缘分别以吕梁山、秦岭、六盘山—贺兰山和阴山为界,内部可划分为西缘逆冲带、天环坳陷、陕北斜坡、晋西挠褶带、伊盟隆起和渭北隆起 6 个一级构造单元^[28](图 1)。其中,盆地中部 SN 向展布的陕北斜坡是盆地的主体,也是盆地内中生界石油的主要分布区。鄂尔多斯盆地属于多旋回叠合克拉通盆地,太古宇和元古宇构成了盆地的基底,下古生界发育海相碳酸盐岩沉积,上古生界以海陆交互相沉积为特征。河流—湖泊相沉积的中上三叠统延长组是盆地内主要的烃源岩层和储层,延长组自下而上被划分为 10 段[延长组 10 段(长 10 段)—延长组 1 段(长 1 段)],每段可进一步细分为 2~3 个亚段,其中,长 7 段特别是 3 亚段广泛发育以暗色泥岩、碳质泥岩和油页

岩为特征的优质烃源岩,不仅提供常规油气,也是致密油和页岩油集中分布的层段^[29-30]。

2 样品与分析条件

样品取自位于鄂尔多斯盆地南部陕北斜坡南端铜川瑶曲镇的 YK1 井,该井在三叠系长 10 段—延长组 4 段(长 4 段)连续取心,取心段代表了鄂尔多斯盆地稳定沉积区含深湖亚相在内的中—上三叠统完整地层序列,岩性为砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、碳质泥岩、油页岩和凝灰岩等。采样前用去离子水冲洗岩心,在延长组 9 段(长 9 段)—延长组 6 段(长 6 段)重点层位共采集样品 251 个,采样间距为 0.2~10.0 m 不等。

所有样品用酸解法进行孢粉相分析:根据岩性和总有机碳(TOC)含量称取 20~50 g 样品,粗碎至约 0.2 mm 后置于塑料杯中;之后,先加入 10% 的稀 HCl 浸泡并搅拌,反应结束后用蒸馏水反复清洗至中性,再加入 20% 的 HF 浸泡并搅拌至反应停止后清洗至中性;最后,用 $3 \mu\text{m}$ 尼龙筛除去灰分,沉淀后获得碎屑有机质,制片后在双目显微镜下分别在透射光和激发荧光下进行组分鉴定、统计和拍照。

对其中 122 个样品进行元素分析。主量元素分析用 Magix PW2403 型 X 射线荧光光谱仪完成;取 10 g 粉碎至小于 200 目的全岩样品,对其压片后开展分析;间隔进行标准物质测试以保证分析精度,重复样品的标准差为 2%。微量和稀土元素用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)完成;取 3 g 岩石样品用玛瑙研钵磨细至小于 300 目,烘干后取适量磨细样品在适当浓度的标准酸溶液中溶解,并选择与目标元素对应的标样进行分析。

3 孢粉有机质组成

3.1 碎屑有机质分类

依据镜下形态特征与生物来源,延长组的孢粉有机碎屑可划分为 AOM、植物碎屑和孢型 3 种类群^[15,17,31]。依据形态特征,AOM 可进一步区分为颗粒状 AOM 和凝胶化 AOM,前者为不规则的团块状聚合体颗粒,由微粒状或纤维状有机质构成,由浮游植物、藻类和细菌等在缺氧环境中降解形成,降解程度较低的颗粒状 AOM 内经常保留清晰的藻体等生物结构。凝胶化 AOM 来自经细菌降解的陆源植物组织,其内部也可残留明显的生物结构^[32-33]。常见的植物碎屑包括角质体、半透明木质纤维碎屑、凝胶化颗粒和不透明颗粒^[17-19]。角质体由表皮组织碎片经搬运及沉积过程氧化和降解形成的角质层构成;半透明木质纤维碎屑来源于植物木质部,一般具明显的生物结构;凝胶

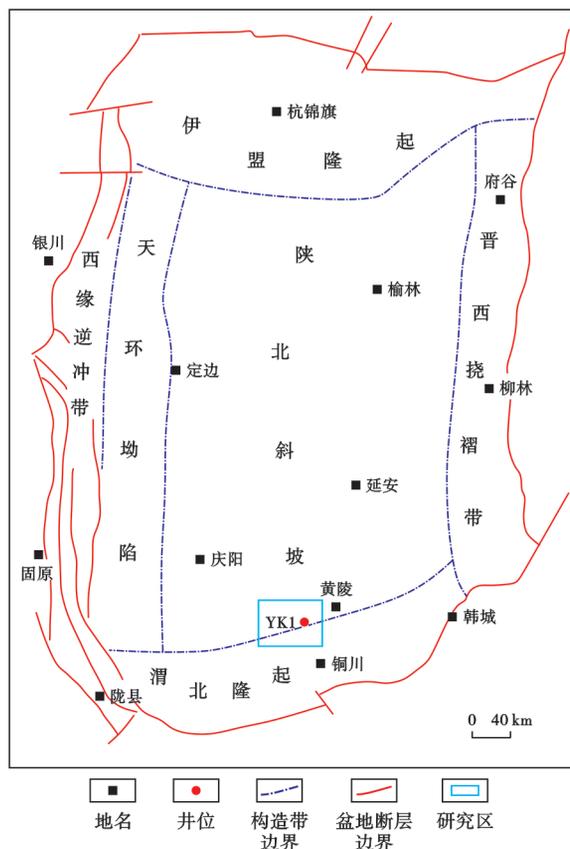


图 1 鄂尔多斯盆地构造区划及研究区位置

Fig. 1 Tectonic division of Ordos Basin and location of study area

化颗粒是未完全降解的由细粒植物碎屑构成的凝胶化团块;不透明颗粒主要来源于被氧化或燃烧的植物组织的丝质体。孢型包括各种植物的孢子花粉和分散的藻类、疑源类孢囊。

3.2 鉴定统计结果

孢粉有机碎屑的鉴定和统计结果显示,延长组中 AOM 最为丰富,主要为颗粒状 AOM [图 2(a)、图 2(b)],凝胶化 AOM [图 2(c)] 也很常见,但以相对细小的颗粒为主,含量较低。各种植物碎屑也很丰富,其中,半透明木质纤维碎屑最为常见,多呈表面光滑的棱角状,较大碎屑可保留管状或孔洞结构 [图 2(d)],激发荧光极其微弱。角质体在延长组烃源岩中经常出现,呈黄褐色—深褐色、透明状,具较强的激发荧光 [图 2(e)]。凝胶化颗粒在透光下呈黄褐色—棕色,表面光滑、呈胶体状光泽,其中,木质凝胶化颗粒显示微弱的激发荧光 [图 2(f)],凝胶化角质体一般具有强烈的黄色荧光 [图 2(g)—图 2(j)]。不透明颗粒在延长组中含量不高,但普遍存在 [图 2(g)]。孢型在延长组的有机质中含量较低,主要为双气囊花粉和三缝孢子,具原始生物结构和较强烈的荧光 [图 2(k)]。藻类体主要发现于长 7 段 3 亚段,以疑源类的光面球藻 [图 2(l)] 和不同程度降解的葡萄藻 [图 2(m)] 为主。延长组的孢粉有机碎屑组成反映了典型的湖泊相沉积特征。

AOM 和藻类体是延长组最主要的生烃组分,前者在长 9 段、延长组 8 段(长 8 段)、长 7 段 3 亚段、长 7 段 1 亚段 + 2 亚段和长 6 段的平均含量分别为 24.7%、20.7%、52.3%、48.0% 和 27.3%,在优质烃源岩发育的长 7 段 3 亚段中 AOM 丰度最高。藻类体也主要出现在长 7 段 3 亚段,平均含量达 25.2%,而在其他层段几乎不含或仅少量出现。图 3 中给出了不同孢粉有机组分的实际含量(即相对含量与 TOC 含量的乘积)的变化曲线。可以看出,除了 AOM 和藻类体外,其他组分含量都很低,其中,含量较高且连续分布的是凝胶化颗粒和半透明木质碎屑,不透明颗粒含量较低,而角质体和孢型含量很低。

3.3 生烃贡献

AOM 和藻类体在长 7 段 3 亚段的含量远高于其他层段,氢指数(HI)和生烃潜量($S_1 + S_2$) 在长 7 段 3 亚段也相应地达到持续的高值区间(图 3),显示出较高的生烃潜力。长 7 段 1 亚段 + 2 亚段的 AOM 较为丰富,HI 较高且持续稳定,生烃潜力仅次于长 7 段 3 亚段。长 6 段、长 8 段和长 9 段的 AOM 丰度和 HI 较低,且变化频繁,生油能力较低。颗粒 AOM 一般具有较强的激发荧光,经不同程度降解和排烃后激发荧光

减弱 [图 2(a)、图 2(b)];凝胶化 AOM 也具有较强的荧光显示 [图 2(c)];藻类体具有最强烈的激发荧光 [图 2(l)、图 2(m)]。因此,AOM 和藻类体是延长组烃源岩的最主要的液态烃来源。孢型和角质体显示较强烈的激发荧光 [图 2(e)、图 2(k)],也具有较高的生油能力,但其在延长组的含量很低,生烃贡献非常有限。值得关注的是,在延长组的植物碎屑有机质中存在一类特殊的凝胶化颗粒——凝胶化角质体,由于其具有极强的激发荧光 [图 2(g)—图 2(j)],指示其属于富氢的具有生油能力的组分。延长组有机组分的研究中曾经在长 9 段发现许多片状的凝胶化颗粒^[34],由于其叶片形态和明显的激发荧光等特征,确认为凝胶化角质体。与常见的由叶片表层脱落形成的薄膜状角质体相比,凝胶化角质体较厚实,体积也更大,推测来源于裸子植物,特别是松柏类的楔形叶。碎屑有机质鉴定在长 9 段—长 6 段除了见到楔形叶状的凝胶化角质体 [图 2(g)、图 2(h)] 外,还发现多种不同形态的凝胶化角质体 [图 2(i)、图 2(j)],可能是裸子植物不同器官组织表层的代谢产物。凝胶化角质颗粒的普遍特征是显示强烈的激发荧光,使之与凝胶化木质颗粒和其他植物碎屑相区别。在延长组的孢粉有机质组成中,包括凝胶化角质体在内的凝胶化颗粒的丰度不超过 3%(图 3),对烃源岩液态烃的贡献较为有限,其主要影响反映在陆源生物标志物的输入上。此外,凝胶化角质颗粒分布于长 9 段、长 7 段 1 亚段和长 6 段,相应的有机质类型主要为 III 型,少数为 II₂ 型,也反映了凝胶化角质体的陆源有机质属性和沉积环境。

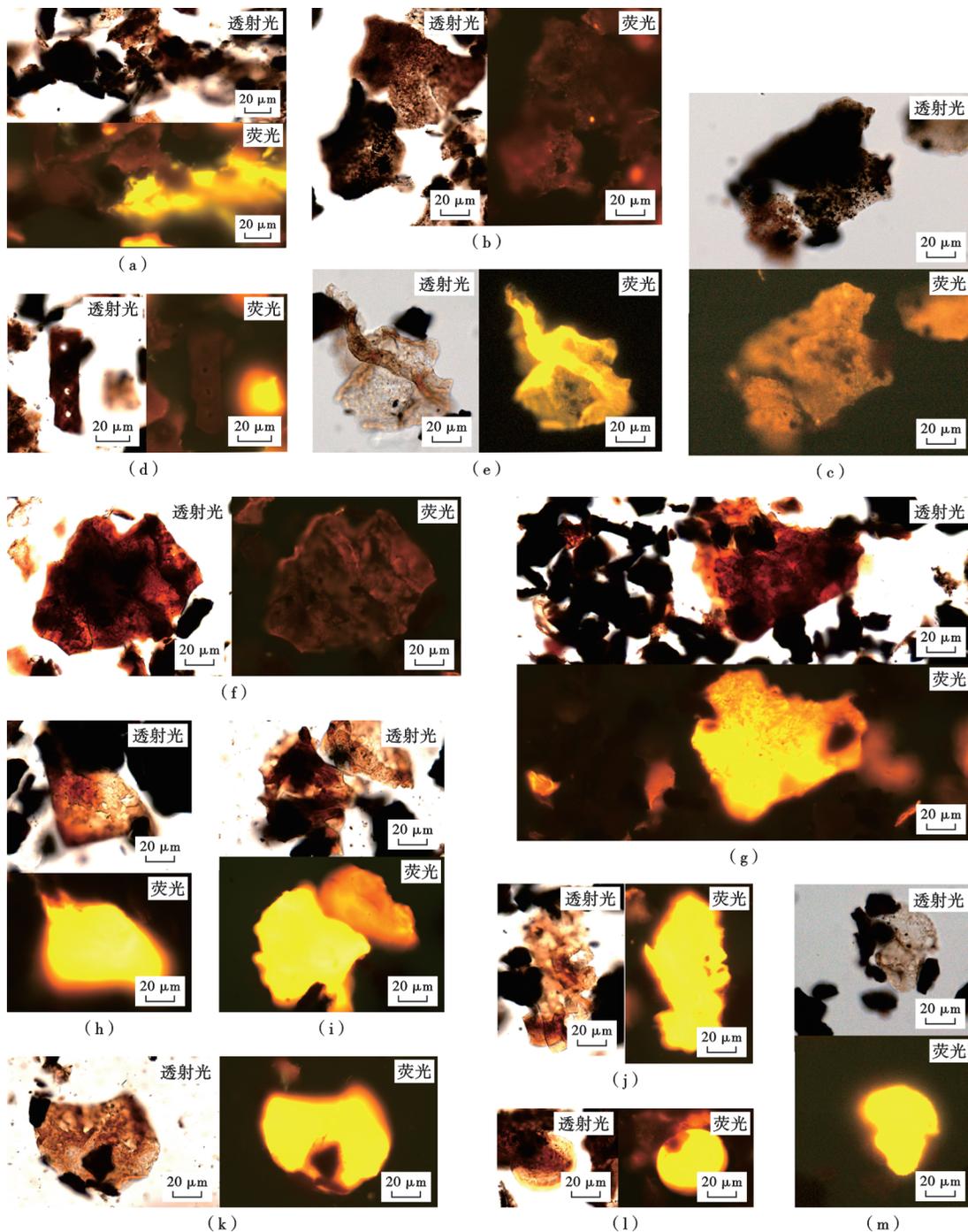
4 孢粉相组合

4.1 孢粉相类型

系统观察延长组烃源岩中有机质的碎屑组成和纵向变化,可识别出 3 种代表性孢粉相类型。

孢粉相 I:以 AOM 占绝对优势,同时荧光下可辨认出丰富的以光面球藻和葡萄藻为主的藻类体,其他组分均很少出现 [图 4(a)]。高丰度 AOM 的出现通常与上升流或缺氧沉积环境有关^[35-36],在浅陆架沉积物中 AOM 含量较低,而在较深水的低氧—缺氧条件下 AOM 含量较高,且向盆地中心方向不断升高^[37-38]。保存完好的原先生长于水体上层透光带的光面球藻、葡萄藻和孢型,其高含量也指示低能量环境和较深水的原地埋藏特征。该孢粉相反映 I 型有机质属性,是典型的深湖亚相静水缺氧环境的沉积产物^[15,20,31]。

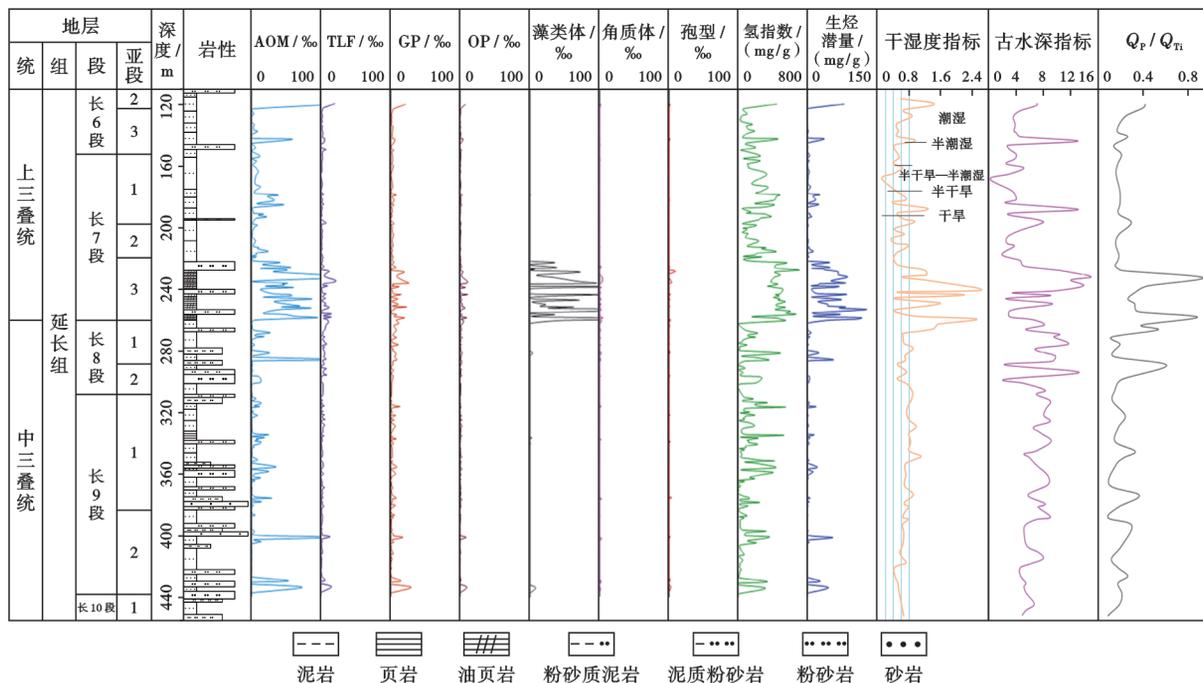
孢粉相 II:同时含有较丰富的 AOM 和植物碎屑组分 [图 4(b)],与孢粉相 I 相比,其 AOM 含量降低、植物碎屑含量升高,指示沉积水体的深度变浅,沉积环



(a) 颗粒无定形有机质, 呈棕黑色椭圆形、长条形和不规则形态, 边缘呈模糊的毛刺状和齿状, 显较强的黄色或暗色荧光, 长 7 段 2 亚段, 209.1 m; (b) 颗粒无定形有机质, 呈棕黑色、棕褐色团块状, 边缘不规则, 显暗淡的棕红色荧光, 长 7 段 3 亚段, 247.8 m; (c) 凝胶化无定形有机质, 棕黑色—深褐色长方形, 边缘不规则, 淡黄色荧光, 长 7 段 3 亚段, 223.8 m; (d) 半透明木质碎屑, 棕色长条状, 具孔状结构, 显微弱褐色荧光, 长 7 段 2 亚段, 209.1 m; (e) 角质体, 呈褐色片状、带状体, 具气孔结构, 显强烈黄色荧光, 长 7 段 1 亚段, 190.4 m; (f) 凝胶化颗粒, 呈棕红色团块, 具原始木质结构, 显暗淡的黄褐色荧光, 长 8 段 2 亚段, 290.1 m; (g) 凝胶化角质体 (图像中心) 呈棕红色三角形团块, 覆鳞片状突起, 显强烈黄色荧光, 而不透明颗粒 (图像两侧) 呈黑色不规则形态, 棱角状, 无荧光显示, 长 6 段 3 亚段, 144.8 m; (h) 凝胶化角质体, 呈深褐色叶片状, 具密集气孔结构, 显强烈黄色荧光, 长 7 段 1 亚段, 190.4 m; (i) 凝胶化角质体, 呈深褐色, 萌芽状和鳞片状, 显强烈的黄色、橙色荧光, 长 6 段 1 亚段, 61.3 m; (j) 凝胶化角质体, 呈深褐色锥状体, 具网状和气孔结构, 显强烈黄色荧光, 长 6 段 3 亚段, 144.8 m; (k) 孢粉体, 褐色两气囊花粉, 显强烈黄色荧光, 长 7 段 3 亚段, 223.8 m; (l) 藻类体, 黄褐色圆形光面球藻, 显强烈黄色荧光, 长 6 段 2 亚段, 74.1 m; (m) 藻类体, 深褐色半球形葡萄藻, 显强烈黄色荧光, 长 7 段 1 亚段, 190.4 m。

图 2 鄂尔多斯盆地 YK1 井延长组主要孢粉有机质的类型

Fig. 2 Main types of palynological organic matters of Yanchang Formation in Well YK1, Ordos Basin



注: AOM—无定形有机质; TLF—半透明木质碎屑; GP—凝胶化颗粒; OP—不透明颗粒。

图 3 YK1 井延长组不同类型有机碎屑组分含量、主要孢粉有机质分布与古环境演化

Fig. 3 Contents of different types of organic clastic components, main palynological organic matter distribution and paleoenvironment evolution of Yanchang Formation in Well YK1

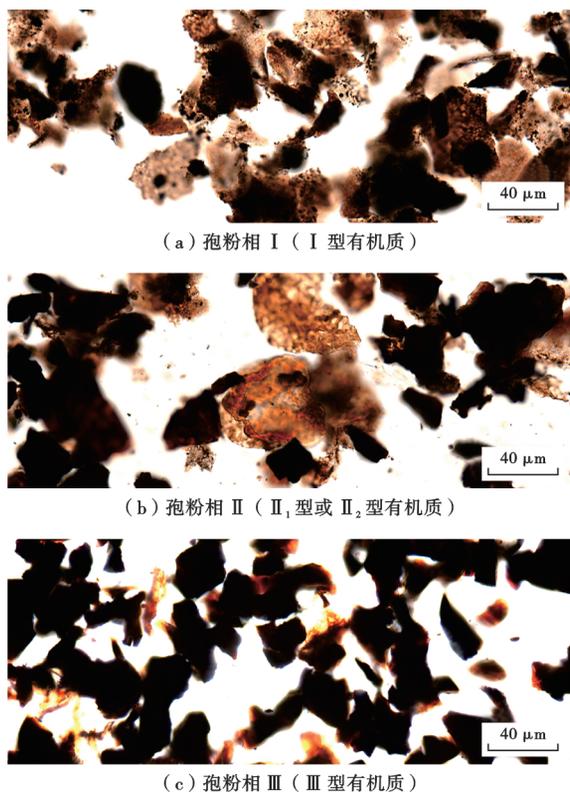


图 4 YK1 井延长组不同孢粉相的有机碎屑组成

Fig. 4 Organic clastic compositions of different palynofacies of Yanchang Formation in Well YK1

境向偏氧化方向发展。该孢粉相中,各种降解的植物碎屑和较丰富的 AOM 的共生特征指示低氧—缺氧沉积环境,且随着二者相对含量的变化,可出现 II₁ 型和 II₂ 型有机质,可能形成于远源半动荡浅湖环境。

孢粉相 III:以植物碎屑为主,半透明木质碎屑和凝胶化颗粒最为丰富,不透明颗粒含量也较高,其他组分较少[图 4(c)]。半透明木质碎屑和凝胶化颗粒等结构植物碎屑在中生代主要来源于木本裸子植物、次生维管植物和蕨类植物,表现为近源沉积或经历短距离搬运,显示弱降解特征^[39],代表近源的河流—湖泊系统,特别是河口和三角洲环境的堆积^[40-41]。不透明颗粒是在半氧化—氧化环境下形成的,通常沉积在近源和相对高能量的环境中^[42-43]。因此,该孢粉相的有机质以 III 型为代表,形成于充氧的高能滨湖和三角洲环境^[26]。

4.2 有机质类型

依据孢粉有机质类型指数(I_T)确定了每个样品的有机质类型。 I_T 的计算和类型划分按照行业标准(SY/T 5125—2014^[10])进行:

$$I_T = (a + 0.50b + 0.10c_1 - 0.75c_2 - d) \times 100$$

(1)

根据式(1)计算得到的 I_T 值,按照 $I_T \geq 80$ 、 $80 >$

$I_T \geq 40$ 、 $40 > I_T \geq 0$ 和 $I_T < 0$, 可将有机质划分为 I 型、II₁ 型、II₂ 型和 III 型。

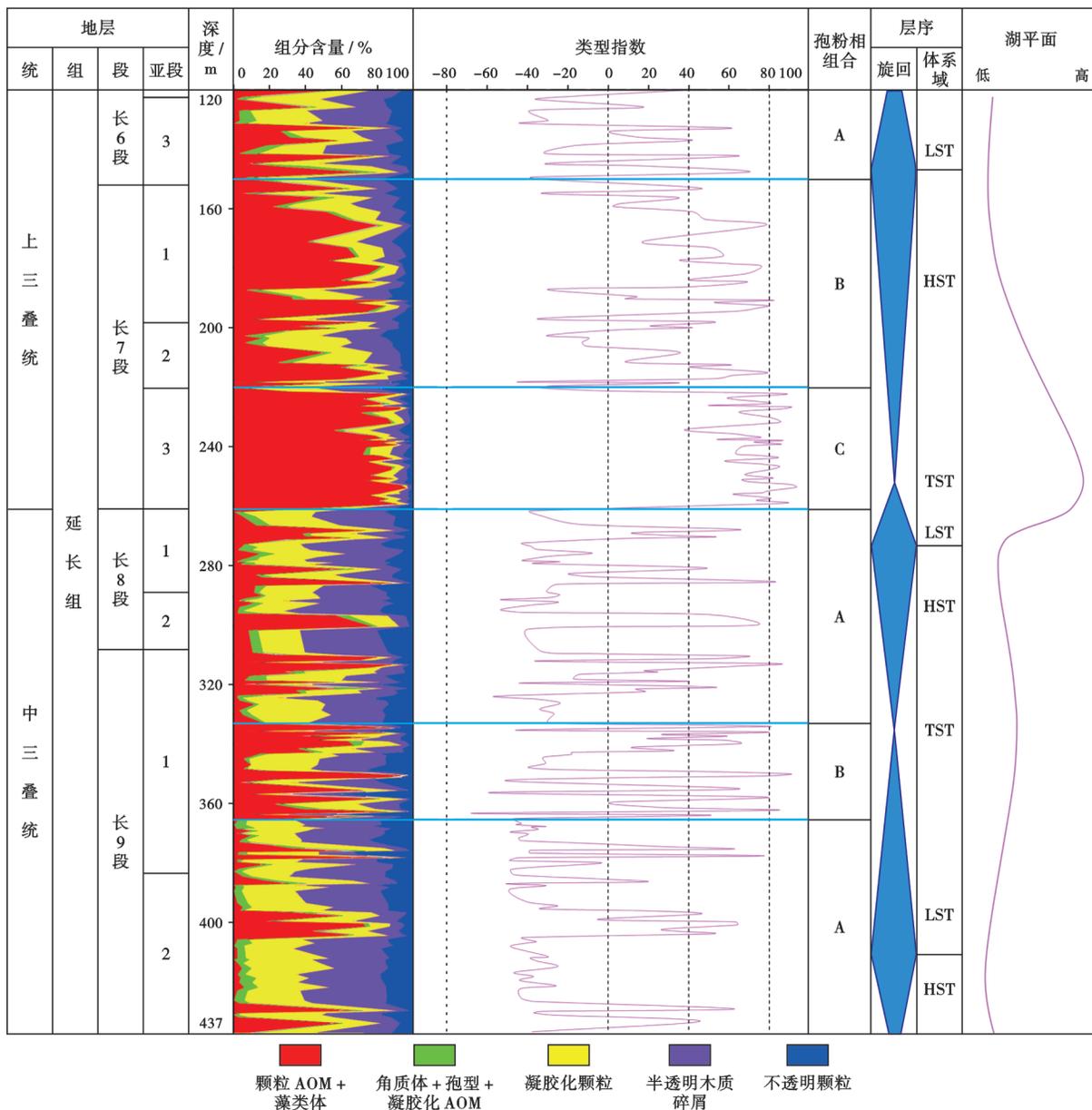
4.3 孢粉相组合

依据前述 3 种典型孢粉相类型出现的频率和分布特征, 长 9 段—长 6 段烃源岩可划分出 A、B 和 C 共 3 种孢粉相组合(图 5)。

孢粉相组合 A: 以孢粉相 III 为主, 可交叉出现孢粉相 I 和少量孢粉相 II。有机质主要为 III 型, 占样品数的 69.6%, 其次为 II₁ 型和 II₂ 型, 分别占 17.8% 和 11.1%。有机碎屑以丰富的半透明木质和凝胶化颗粒为特征, 平均含量分别为 31.5% 和 30.0%。AOM 含

量变化较大, 平均含量为 20.4%, 藻类体偶尔出现, 不透明颗粒处于整个井段的最高值, 平均为 12.5%, 角质体和孢型经常出现, 平均含量分别为 3.2% 和 2.3%。该孢粉相组合显示沉积以陆源植物碎屑输入为主, 可能形成于河流—滨湖近源高能环境^[15, 23, 31]。

孢粉相组合 B: 以孢粉相 II 为主, 可交叉出现孢粉相 I 和孢粉相 III。有机质主要为 II₁ 型, 占样品数的 42.1%, 其次为 II₂ 型和 III 型, 分别占样品数的 26.3% 和 27.6%, I 型仅少量出现。该组合中 AOM 的相对含量较孢粉相组合 A 有明显上升, 平均含量达 45.1%。半透明木质、凝胶化颗粒和不透明颗粒含量则较孢粉相



注: LST—低位体系域; TST—湖进体系域; HST—高位体系域。

图 5 YK1 井延长组有机质类型的分布与孢粉相组合的划分

Fig. 5 Distribution of organic matter types and division of palynofacies assemblage of Yanchang Formation in Well YK1

组合 A 有所降低,平均含量分别为 18.4%、22.2% 和 9.9%。角质体和孢型也较常见,平均含量分别为 2.3% 和 1.8%。该孢粉相组合显示沉积具有浮游生物和高等植物有机碎屑混合输入的特征,可能形成于浅湖—半深湖亚相远源贫氧环境^[15,31]。

孢粉相组合 C:基本由孢粉相 I 构成。有机质以 II₁ 型和 I 型为主,分别占样品数的 52.5% 和 40.0%, II₂ 型和 III 型少量出现,分别占 5.0% 和 2.5%。有机碎屑以高丰度 AOM 和藻类体为特征,AOM 不仅丰度高,而且含量稳定,平均含量为 52.3%。藻类体的平均含量为 25.2%。半透明木质、凝胶化颗粒和不透明颗粒的含量较孢粉相组合 B 进一步显著降低,平均含量分别为 7.8%、9.0% 和 4.1%。角质体和孢型含量较低,平均含量分别为 1.0% 和 0.6%。该孢粉相组合显示沉积以藻类和浮游生物有机质输入为主,指示半深湖—深湖亚相远源缺氧静水环境^[6,44]。

图 5 显示:纵向上,孢粉相组合 A 分别出现于 YK1 井长 9 段 2 亚段—长 9 段 1 亚段下部(365.5~437.3 m)、长 9 段 1 亚段中部—长 8 段(260.9~333.2 m) 和长 6 段 2 亚段+3 亚段(119.5~151.9 m);组合 B 分布于长 9 段 1 亚段中部(333.2~365.5 m) 和长 7 段 1 亚段+2 亚段(151.9~219.8 m);组合 C 出现于长 7 段 3 亚段(219.8~260.9 m)。最有利于油源岩发育的孢粉相组合 C 仅出现在长 7 段 3 亚段,该段连续沉积厚度达 40 m,其中,暗色泥岩、碳质泥岩和油页岩最为发育,形成以 II₁ 型和 I 型干酪根为主的优质烃源岩;其次是孢粉相组合 B 分布的长 9 段 1 亚段中部和长 7 段 1 亚段+2 亚段,这些层段出现较丰富的 II₁ 型和 II₂ 型有机质,可形成良好的油源岩。

5 沉积古环境

5.1 古环境

具有相似孢粉有机质组成的孢粉相可指示特定的沉积环境,因此孢粉相可应用于烃源岩沉积古环境的恢复和解释。AOM 不仅指示底部水体因分层而形成的缺氧环境,还可反映较高的生产力和有机质保存率^[15,31,44],并且随着营养物质的输入和氧含量的减少而增加^[15,32];植物碎屑通常大量沉积于近岸高能环境;孢粉和藻类等,在较浅水近岸环境中相对丰富,通常沉积于多泥质的远源环境^[15,31,45]。目前较为有效的综合解释方法是 Tyson 提出的 A—Ph—Pa 三元图解法^[15,20],其中,A、Ph 和 Pa 分别代表 AOM、植物碎屑(Phytoclasts)和孢型(Palynomorphs)组分。该图解有助于揭示碎屑有机质的生物来源、搬运途径和沉积环境的氧化-还原状态,并且在世界各地不同时代的孢

粉相研究中已得到应用^[19,45]。

图 6 是长 6 段、长 7 段、长 8 段和长 9 段 4 个不同沉积阶段烃源岩孢粉有机质的 A—Ph—Pa 三元图解。总体上,长 9 段、长 8 段、长 7 段 1 亚段+2 亚段和长 6 段样品的分布均靠近 A—Ph 组分一侧,组分多以植物碎屑为主,AOM 也较丰富,孢型含量很低;长 7 段 3 亚段样品的分布比较分散,不仅含有丰富的 AOM 和较丰富的藻类体和孢型,也含有一定的植物碎屑组分。

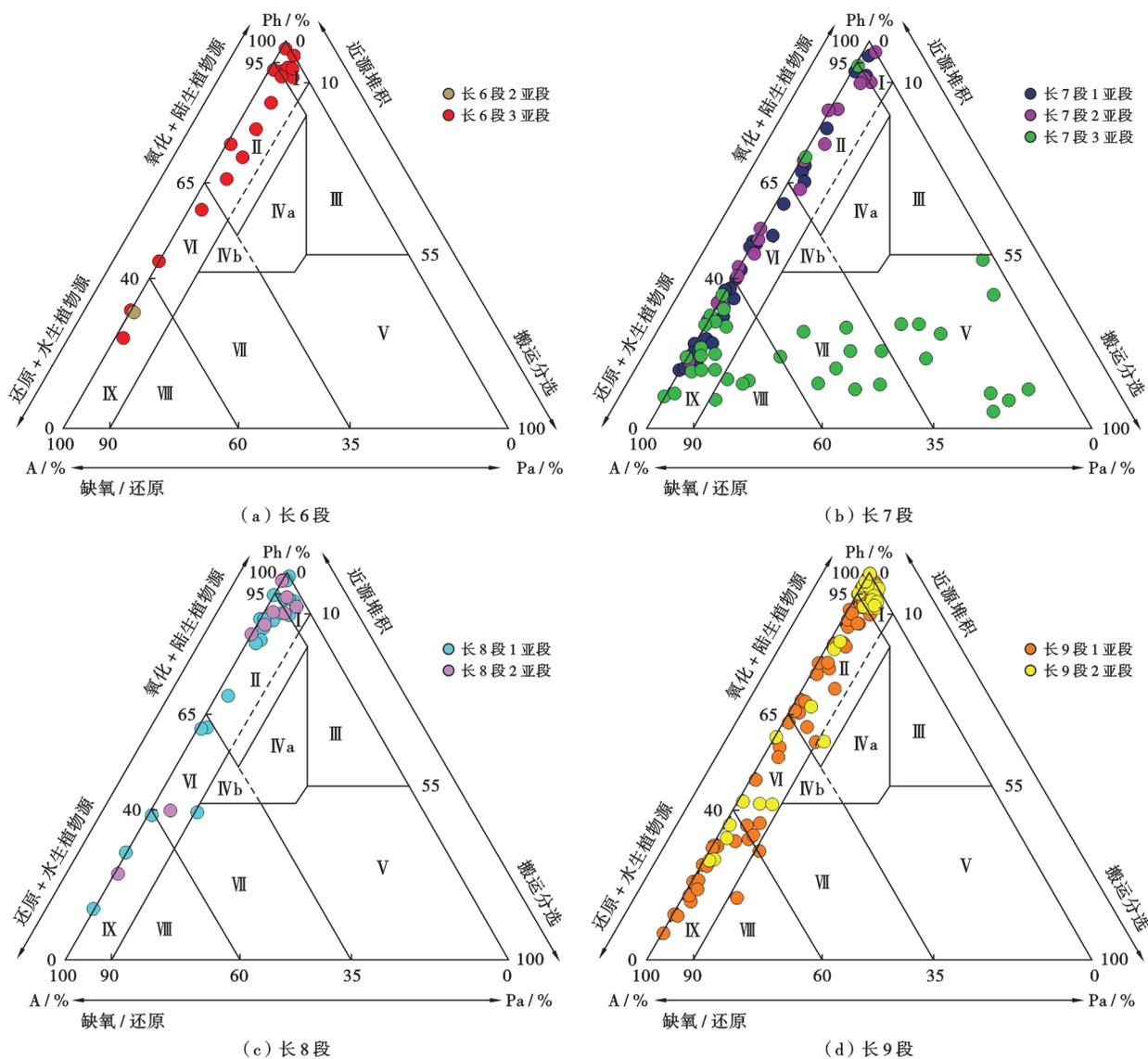
长 9 段 2 亚段样品在图 6(d)中主要分布于 I、II 和 VI 区,少数分布于 IX 区;长 9 段 1 亚段样品主要分布于 II、VI 和 IX 区。这指示长 9 段沉积期研究区处于盆地边缘或近源环境。早期的长 9 段 2 亚段沉积期为更接近陆架的含氧环境,而后期的长 9 段 1 亚段沉积期为远源贫氧—缺氧盆地环境。

长 8 段样品在图 6(c)中主要分布于 I 和 II 区,少数分布于 VI 和 IX 区,指示长 8 段沉积期研究区主要位于陆架边缘或贫氧—缺氧盆地边缘。早期的长 8 段 2 亚段沉积期更接近陆架,而后期的长 8 段 1 亚段沉积期为盆地边缘或近源的低氧—缺氧盆地环境。

长 7 段 3 亚段样品在图 6(b)中主要分布于 V、VII、VIII 和 IX 区,指示该亚段沉积期为典型的远源陆架或盆地环境,水体中含氧、贫氧和缺氧交替出现;长 7 段 1 亚段+2 亚段样品在图 6(b)中主要分布于 VI 和 IX 区,部分分布于 I 和 II 区,指示沉积环境以近源—远源的低氧—缺氧盆地环境为主,间或出现边缘陆架或边缘贫氧—缺氧盆地环境。与长 7 段 3 亚段沉积期相比,研究区在长 7 段 1 亚段+2 亚段沉积期的水体变浅,且更接近陆源区域。

长 6 段与长 8 段 1 亚段相似,样品在图 6(a)中也主要分布于 I 和 II 区,少数分布于 VI 和 IX 区,指示沉积环境以陆架边缘或贫氧—缺氧的盆地边缘环境为主,亦可出现近源—远源的低氧—缺氧盆地环境。

延长组的层序划分和湖平面演化见图 5,从长 9 段底部至长 6 段顶部发育 3 个湖退—湖进沉积序列。孢粉相组合 C 所处的长 7 段 3 亚段对应最大湖泛期的高水位演化阶段,该阶段在远源半深湖—深湖环境条件下沉积了以 AOM 和藻类体为主要碎屑有机质的优质烃源岩。由于当时地震和各种重力流活动频发,湖底的氧化-还原条件出现大幅的频繁变化。孢粉相组合 B 所处的长 9 段 1 亚段中部和长 7 段 1 亚段+2 亚段分别对应早期次级湖进阶段和湖退早期的高位体系域阶段,该阶段研究区处于较深的半深湖或浅湖亚相低氧—缺氧的近源—远源沉积环境,碎屑有机质以 AOM 和植物碎屑同时发育为特征,可形成良好的烃源岩。孢粉相组合 A 产出的长 9 段 2 亚段、长 9 段 1 亚段、长 8 段和长 6 段



注：I—陆架边缘或盆地；II—贫氧—缺氧的盆地边缘；III—多砂质含氧近陆架；IV a—陆架—盆地过渡区(贫氧)；IV b—陆架—盆地过渡区(贫氧—缺氧)；V—富泥质含氧远陆架；VI—近源低氧—缺氧陆架；VII—远源贫氧—缺氧陆架；VIII—远源贫氧—含氧陆架；IX—远源低氧—缺氧盆地；A—无定形有机质；Ph—植物碎屑；Pa—孢型。

图6 YK1井延长组孢粉有机质 A—Ph—Pa 三元图解(底图据文献[15,19])

Fig. 6 A-Ph-Pa ternary diagram of palynological organic matter of Yanchang Formation in Well YK1

多对应低位湖进早期或湖退演化阶段,该阶段研究区主要发育河湖三角洲和滨湖亚相陆缘或近源低氧—缺氧沉积环境,孢粉有机质以陆源植物碎屑为主,也可出现较丰富的 AOM,生烃能力较差。

5.2 古气候

沉积物中 Al、Fe、Mn、V、Ni、Cr 和 Co 等元素在潮湿气候条件下的相对含量较高,而在干燥气候条件下,由于水分蒸发和水介质碱性增大,Ca、Mg、Na、K、Sr 和 Ba 等元素的大量析出沉淀会导致其在沉积物中的含量升高。因此,根据这两类元素的化学活性计算,可得到反映古环境干湿度变化的指标(C)^[46-47]：

$$C = \frac{\sum(Q_{Fe} + Q_{Mn} + Q_{Cr} + Q_{Ni} + Q_{V} + Q_{Co})}{\sum(Q_{Ca} + Q_{Mg} + Q_{Na} + Q_{K} + Q_{Sr} + Q_{Ba})} \quad (2)$$

式(2)中,C 值越高代表气候越潮湿,反之则越干燥,C 值大于 0.8 指示进入潮湿气候区间。研究区在延长组沉积期先后出现多次潮湿气候,包括长 9 段 1 亚段、长 7 段 3 亚段、长 7 段 1 亚段和长 6 段 3 亚段沉积期(图 3),其中,以长 7 段 3 亚段沉积期表现的高 C 值特征持续时间最长,C 的最大值达到 2.6,反映该阶段为持续降雨与高度湿润气候,可能与卡尼期全球潮湿气候事件相关^[48-49],且与之相对应,该亚段富含藻类体和 AOM(图 3),并形成孢粉相组合 C(图 5)。长 9 段 1 亚段和长 7 段 1 亚段沉积期间断出现潮湿气候,发育植物碎屑和 AOM 同时富集的孢粉相组合 B。延长组其他沉积期的 C 值主要为 0.4~0.8,气候在半干旱—半潮湿至半潮湿之间波动,形成以植物碎屑为主

的孢粉相组合 A。

古水深指标 $[(Q_{Al} + Q_{Fe}) / (Q_{Ca} + Q_{Mg})]$ 曲线(图3)指示:长10段—长8段沉积期湖平面不断升高;在长7段3亚段沉积早期,指标快速回落后迅速上升至最高,并在中—后期持续处于高位;长7段2亚段沉积期以后,湖平面大幅降低并长期处于较低水平,仅在个别层段发育期可出现短暂的湖平面抬升。这与长7段3亚段沉积期持续的高水位和C值所反映的潮湿气候事件有很好的对应关系,这些气候环境变化可能是造成该阶段湖泊藻类勃发的重要因素。

古生产力指标为P、Ti元素含量的比值(Q_P / Q_{Ti}),其演化曲线(图3)显示:长9段沉积期湖泊的生产力适中,但波动频繁;从长8段1亚段沉积早期至长7段3亚段沉积期,先后出现3次高生产力演化阶段,且逐次升高;长7段2亚段沉积期之后,湖泊的生产力迅速回落且维持在较低水平。湖泊在长7段3亚段沉积期出现的最高生产力、最大湖泊深度和潮湿气候事件在时间上相吻合,表明三者之间存在联系。各种地理、环境和气候因子的叠加不仅决定了湖泊沉积相的特征,而且决定了其中生物有机相的特征。延长组沉积早期的湖进阶段(长10段—长8段沉积期)和晚期的湖退阶段(长6段—长5段沉积期)具有浅水沉积的特征,发育河流相、三角洲相和滨—浅湖亚相;中期为湖泊鼎盛期(长7段沉积期),具有大面积深水沉积的特征,半深湖—深湖亚相大范围分布,兼有广泛的重力流沉积^[50-51]。孢粉相古环境分析表明:在长9段、长8段和长6段沉积期,研究区交替出现高能近源冲积扇—三角洲环境与滨—浅湖环境;在长7段3亚段沉积期,广泛发育远源半深湖—深湖缺氧环境;之后,随着半深湖—深湖亚相面积逐渐收缩,在长7段1亚段+2亚段沉积期形成以浅湖—半深湖为主的远源贫氧环境。

Ji等^[52]对鄂尔多斯盆地西南部陇东地区长8段—长7段烃源岩开展的孢粉组合与古植物群研究认为,该地区在中—晚三叠世的气候为温暖潮湿,盆地区处于温带—亚热带暖湿或湿热气候。长期稳定的温暖潮湿气候和广阔的深水湖泊环境为水生藻类的大规模发育和长7段优质烃源岩的形成创造了条件。对鄂尔多斯盆地南部延长组孢粉相组合与元素地球化学古气候环境指标的分析表明,潮湿气候事件与湖泊大范围的快速加深是藻类勃发及其降解AOM大量形成,最终导致优质烃源岩沉积的重要条件。这一认识不仅支持了前期孢粉学研究的成果,而且显示长7段3亚段沉积期的藻类勃发和优质烃源岩沉积可能是印支期鄂尔多斯盆地的快速构造沉降事件与全球潮湿气候事件耦合的结果。

6 结 论

(1) 鄂尔多斯盆地南部长9段—长6段识别出3种孢粉相:孢粉相I以AOM占绝对优势,出现较丰富的藻类体;孢粉相II以AOM和植物碎屑同时发育为特征;孢粉相III以发育植物碎屑为主。延长组可划分出3种孢粉相组合:组合A中以孢粉相III为主,分布于长9段中一下部、长9段顶部—长8段和长6段2亚段+3亚段;组合B中以孢粉相II为主,分布于长9段1亚段中部和长7段1亚段+2亚段;组合C由孢粉相I构成,仅出现于长7段3亚段。

(2) 孢粉相组合A的分布层段对应发育湖进早期或湖退期低位阶段的沉积,主要为河、湖三角洲和滨湖亚相陆缘或近源充氧的高能沉积环境。组合B所处的层段对应发育次级湖进或湖退期高位体系域沉积,为浅湖—半深湖亚相低氧—缺氧的近源—远源环境,可形成良好烃源岩。组合C所处的长7段3亚段是最大湖泛期高水位阶段的产物,反映远源斜坡或半深湖—深湖静水沉积环境,发育优质烃源岩。

(3) 研究区在长7段3亚段沉积期为持续的高度湿润气候,并与最大湖水深度和最高生产力的出现阶段相吻合。晚三叠世印支期的快速构造沉降事件与卡尼期全球潮湿气候事件的耦合可能是鄂尔多斯盆地长7段3亚段沉积期藻类勃发和优质烃源岩形成的关键控制因素。

符号注释: I_T —有机质类型指数; a —腐泥组(颗粒AOM+藻类体)含量; b —壳质组(角质体+孢型+凝胶化AOM)含量; c_1 —富氢镜质体(凝胶化颗粒)含量; c_2 —镜质体(半透明木质碎屑)含量; d —丝质体(不透明颗粒)含量; C —反映古环境干湿度变化的指标; Q_{Fe} 、 Q_{Mn} 、 Q_{Cr} 、 Q_{Ni} 、 Q_V 、 Q_{Co} 、 Q_{Ca} 、 Q_{Mg} 、 Q_{Na} 、 Q_K 、 Q_{Sr} 、 Q_{Ba} 、 Q_P 和 Q_{Ti} —Fe、Mn、Cr、Ni、V、Co、Ca、Mg、Na、K、Sr、Ba、P和Ti元素含量。

参 考 文 献

- [1] PIPER D Z, CALVERT S E. A marine biogeochemical perspective on black shale deposition[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 95(1/2): 63-96.
- [2] CHEN Guo, GANG Wenzhe, CHANG Xiangchuan, et al. Paleoproductivity of the Chang 7 unit in the Ordos Basin (North China) and its controlling factors[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 551: 109741.
- [3] 吉利明, 吴涛, 李林涛. 陇东三叠系延长组主要油源岩发育时期的古气候特征[J]. *沉积学报*, 2006, 24(3): 426-431.
JI Liming, WU Tao, LI Lintao. Paleoclimatic characteristics during sedimentary period of main source rocks of Yanchang Formation (Triassic) in eastern Gansu[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(3):

- 426-431.
- [4] YANG Hua, ZHANG Wenzheng, WU Kai, et al. Uranium enrichment in lacustrine oil source rocks of the Chang 7 Member of the Yanchang Formation, Erdos Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(4): 285-293.
- [5] 邱欣卫, 刘池洋. 鄂尔多斯盆地延长期湖盆充填类型与优质烃源岩的发育 [J]. *地球学报*, 2014, 35(1): 101-110.
 QIU Xinwei, LIU Chiyang. Lake-basin filling types and development of high quality hydrocarbon source rocks in Ordos Basin in Late Triassic Yanchang Period [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(1): 101-110.
- [6] HE Cong, JI Liming, SU Ao, et al. Source-rock evaluation and depositional environment of black shales in the Triassic Yanchang Formation, southern Ordos Basin, north-central China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 173: 899-911.
- [7] JI Liming, MENG Fanwei, SCHIFFBAUER J D, et al. Correlation between highly abundant oil-prone leiosphaerid acritarchs and hydrocarbon source rocks from the Triassic Yanchang Formation, eastern Gansu Province, Northwestern China [J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(3): 554-560.
- [8] JI Liming, YAN Kui, MENG Fanwei, et al. The oleaginous *Botryococcus* from the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, northwestern China: morphology and its paleoenvironmental significance [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 38(5): 175-185.
- [9] 郝芳, 陈建渝, 孙永传, 等. 有机相研究及其在盆地分析中的应用 [J]. *沉积学报*, 1994, 12(4): 77-86.
 HAO Fang, CHEN Jianyu, SUN Yongchuan, et al. Organic facies studies and their use in sedimentary basin analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(4): 77-86.
- [10] 国家能源局. 透射光—荧光干酪根显微组分鉴定及类型划分方法: SY/T 5125—2014 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
 National Energy Administration. Method of identification microscopically the macerals of kerogen and indivision the kerogen type by transmitted-light and fluorescence: SY/T 5125-2014 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [11] 吉利明, 吴涛, 李林涛. 鄂尔多斯盆地西峰地区延长组烃源岩干酪根地球化学特征 [J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 424-428.
 JI Liming, WU Tao, LI Lintao. Geochemical characteristics of kerogen in Yanchang Formation source rocks, Xifeng area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(4): 424-428.
- [12] 孔庆芬. 鄂尔多斯盆地延长组烃源岩有机显微组分特征 [J]. *新疆石油地质*, 2007, 28(2): 163-166.
 KONG Qingfen. The organic maceral characteristic of Yanchang source rock in Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2007, 28(2): 163-166.
- [13] COMBAZ A. Les palynofaciès [J]. *Revue de Micropaléontologie*, 1964, 7(3): 205-218.
- [14] POWELL A J, DODGE J D, LEWIS J. Late Neogene to Pleistocene palynological facies of the Peruvian continental margin upwelling, Leg 112 [M] // SUESS E, VON HUENE R. Proceedings of the Ocean Drilling Project, Scientific Results, 112. College Station, Texas: Ocean Drilling Program, 1990: 297-321.
- [15] TYSON R V. Sedimentary organic matter; organic facies and palynofacies [M]. London: Chapman and Hall, 1995.
- [16] ERCEGOVAC M, KOSTIĆ A. Organic facies and palynofacies; nomenclature, classification and applicability for petroleum source rock evaluation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 68(1/2): 70-78.
- [17] SEBAG D, COPARD Y, DI-GIOVANNI C, et al. Palynofacies as useful tool to study origins and transfers of particulate organic matter in recent terrestrial environments: synopsis and prospects [J]. *Earth-Science Reviews*, 2006, 79(3/4): 241-259.
- [18] GRAZ Y, DI-GIOVANNI C, COPARD Y, et al. Quantitative palynofacies analysis as a new tool to study transfers of fossil organic matter in recent terrestrial environments [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2010, 84(1): 49-62.
- [19] MUELLER S, VELD H, NAGY J, et al. Depositional history of the Upper Triassic Kapp Toscana Group on Svalbard, Norway, inferred from palynofacies analysis and organic geochemistry [J]. *Sedimentary Geology*, 2014, 310: 16-29.
- [20] TYSON R V. Palynofacies analysis [M] // JENKINS D G. Applied micropalaeontology. Dordrecht, Netherlands: Springer, 1993: 153-191.
- [21] TYSON R V, FOLLOWS B. Palynofacies prediction of distance from sediment source: a case study from the Upper Cretaceous of the Pyrenees [J]. *Geology*, 2000, 28(6): 569-571.
- [22] ZOBAA M K, OBOH-IKUENOBE F E, IBRAHIM M I. The Cenomanian/Turonian oceanic anoxic event in the Razzak field, North Western Desert, Egypt: source rock potential and paleoenvironmental association [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(8): 1475-1482.
- [23] 张淼, 陈清华, 徐金鲤. 东营凹陷沙河街组四段孢粉相特征及其生烃潜力 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(6): 28-35.
 ZHANG Miao, CHEN Qinghua, XU Jinli. Characteristics of palynofacies and its hydrocarbon generation potential of Member 4 of Shahejie Formation in Dongying depression [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2011, 35(6): 28-35.
- [24] 张晶巧, 蔡进功, 王学军, 等. 东营凹陷湖相烃源岩孢粉相特征及其意义 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2013, 44(8): 3446-3452.
 ZHANG Jingqiao, CAI Jingong, WANG Xuejun, et al. Palynofacies of lacustrine source rocks in Dongying depression and its significance [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(8): 3446-3452.
- [25] 潘文静, 刘士磊, 田德瑞, 等. 渤海海域莱州湾凹陷沙四段孢粉相分析——古湖盆演化及烃源岩响应 [J]. *微体古生物学报*, 2019, 36(2): 151-162.
 PAN Wenjing, LIU Shilei, TIAN Derui, et al. Palynofacies of the fourth Member of the Shahejie Formation in the Laizhou Bay sag, Bohai Sea—Response of source rock to the lake evolution [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2019, 36(2): 151-162.
- [26] ZHANG Mingzhen, JI Liming, WU Yuandong, et al. Palynofacies and geochemical analysis of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin: implications for hydrocarbon generation potential and the paleoenvironment of continental source rocks [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 152: 159-176.
- [27] 马博, 吉利明, 张明震, 等. 酒西盆地白垩统赤金堡组烃源岩孢粉相特征及其石油地质意义 [J]. *石油学报*, 2020, 41(11): 1376-1387.
 MA Bo, JI Liming, ZHANG Mingzhen, et al. Palynofacies characteristics of source rocks of Lower Cretaceous Chijinbao Formation in Jiuxi Basin and their petroleum geological significance [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(11): 1376-1387.

- [28] 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志(卷十二):长庆油田[M]. 北京:石油工业出版社,1992:124-145.
Editorial Committee of Petroleum Geology of Changqing Oilfield. Petroleum geology of China (Vol. 12):Changqing oilfield [M]. Beijing:Petroleum Industry Press,1992:124-145.
- [29] FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 931-945.
- [30] 付锁堂, 金之钧, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7段从致密油到页岩油认识的转变及勘探开发意义[J]. 石油学报, 2021, 42(5): 561-569.
FU Suotang, JIN Zhijun, FU Jinhua, et al. Transformation of understanding from tight oil to shale oil in the Member 7 of Yanchang Formation in Ordos Basin and its significance of exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(5): 561-569.
- [31] 李建国, BATTEN D J. 孢粉相:原理及方法[J]. 古生物学报, 2005, 44(1): 138-156.
LI Jianguo, BATTEN D J. Palynofacies: principles and methods [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2005, 44(1): 138-156.
- [32] PACTON M, GORIN G E, VASCONCELOS C. Amorphous organic matter—experimental data on formation and the role of microbes[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2011, 166(3/4): 253-267.
- [33] ȚABĂRĂ D, PACTON M, MAKOU M, et al. Palynofacies and geochemical analysis of Oligo-Miocene bituminous rocks from the Moldavidian Domain (Eastern Carpathians, Romania): implications for petroleum exploration [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2015, 216: 101-122.
- [34] 张明震, 吉利明, 杜宝霞, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组陆相烃源岩中角质体组分新认识及生烃贡献[J]. 石油学报, 2017, 38(5): 525-532.
ZHANG Mingzhen, JI Liming, DU Baoxia, et al. New understanding to the cutinite from source rocks of Triassic Yanchang Formation and its hydrocarbon-generation contribution[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(5): 525-532.
- [35] TISSOT B, PELET R. Sources and fate of organic matter in ocean sediments. Oceanologica Acta, 1981: 97-103.
- [36] SUMMERHAYES C P. Sedimentation of organic matter in upwelling regimes[M]// THIEDE J, SUESS E. Coastal upwelling: its sediments record part B; sedimentary records of ancient coastal upwelling. New York: Plenum Press, 1983: 29-72.
- [37] DOW W G, PEARSON D B. Organic matter in gulf coast sediments[C]// Offshore Technology Conference. Houston, Texas: OTC, 1975: 85-90.
- [38] BUJAK J P, BARSS M S, WILLIAMS G L. Offshore east Canada's organic type and color and hydrocarbon potential[J]. Oil and Gas Journal, 1977, 75(14): 198-202.
- [39] CARVALHO M D A, FILHO J G M, MENEZES T R. Paleoenvironmental reconstruction based on palynofacies analysis of the Aptian-Albian succession of the Sergipe Basin, northeastern Brazil[J]. Marine Micropaleontology, 2006, 59(1): 56-81.
- [40] ERCEGOVAC M, JEREMIĆ M, DAJI S. Miocene sedimentary organic facies and palynofacies in Drmno depression (Serbia) [J]. Annales Géologiques De La Péninsule Balkanique, 1997, 61: 143-165.
- [41] ATTA-PETERS D, AGAMA C I, ASIEDU D K, et al. Palynology, palynofacies and palaeoenvironments of sedimentary organic matter from Bonyere-1 Well, Tano Basin, western Ghana[J]. International Letters of Natural Sciences, 2013, 5: 27-45.
- [42] MARTIN-CLOSAS C, PERMANYER A, VILA M J. Palynofacies distribution in a lacustrine basin[J]. Geobios, 2005, 38(2): 197-210.
- [43] CINCOTTA A, YANS J, GODEFROIT P, et al. Integrated paleoenvironmental reconstruction and taphonomy of a unique Upper Cretaceous vertebrate-bearing locality (Velaux, southeastern France) [J]. PLoS One, 2015, 10: e0134231.
- [44] TEWARI R, AWATAR R, PANDITA S K, et al. The Permian-Triassic palynological transition in the Guryul Ravine section, Kashmir, India: implications for Tethyan-Gondwanan correlations[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 149: 53-66.
- [45] PANCHALA WEERAKOON W A, AGGARWAL N, JHA N, et al. Reconstruction of the Upper Gondwana palaeoclimates based on palynostratigraphy, palynofacies and sedimentology of the Jurassic sequences in the Tabbowa Basin, Sri Lanka[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 172: 264-278.
- [46] CAO Jian, WU Ming, CHEN Yan, et al. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China[J]. Geochemistry, 2012, 72(3): 245-252.
- [47] QIU Xinwei, LIU Chiyang, MAO Guangzhou, et al. Major, trace and platinum-group element geochemistry of the Upper Triassic nonmarine hot shales in the Ordos Basin, central China[J]. Applied Geochemistry, 2015, 53: 42-52.
- [48] SIMMS M J, RUFFELL A H. Climatic and biotic change in the Late Triassic[J]. Journal of the Geological Society, 1990, 147(2): 321-327.
- [49] 李相博, 朱如凯, 惠潇, 等. 晚三叠世卡尼期梅雨事件(CPE)在陆相盆地中的沉积学响应——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(2): 511-526.
LI Xiangbo, ZHU Rukai, HUI Xiao, et al. Sedimentological response of a lacustrine basin to the Late Triassic Carnian Pluvial Episode (CPE): case study from the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(2): 511-526.
- [50] 邓秀芹, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地中及上三叠统延长组沉积相与油气勘探的突破[J]. 古地理学报, 2011, 13(4): 443-455.
DENG Xiuqin, FU Jinhua, YAO Jingli, et al. Sedimentary facies of the Middle-Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and breakthrough in petroleum exploration [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 443-455.
- [51] 郭艳琴, 惠磊, 张秀能, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积体系特征及湖盆演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 593-602.
GUO Yanqin, HUI Lei, ZHANG Xiuneng, et al. Sedimentary system characteristics and lake basin evolution of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 593-602.
- [52] JI Liming, MENG Fanwei. Palynology of Yanchang Formation of Middle and Late Triassic in eastern Gansu Province and its paleoclimatic significance[J]. Journal of China University of Geosciences, 2006, 17(3): 209-220.