

陆相断陷湖盆生烃潜力的古气候波动响应研究

——以东濮凹陷古近系文古4井为例

舒徐洁¹, 杨栋栋^{2,3}, 程成¹, 徐田武², 卫玮⁴, 王洪作¹

(1. 南通大学地理科学学院, 江苏南通 226001; 2. 中国石化中原油田分公司勘探开发研究院, 河南濮阳 457001;
3. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 安徽合肥 230009; 4. 中石化经纬有限公司中原测控公司, 河南濮阳 457001)

摘要: 古气候波动会影响古沉积环境, 从而造成沉积物组分的变化, 并最终导致沉积岩生烃潜力的变化。陆相断陷湖盆是我国陆相含油气盆地的重要类型, 近年来还成为重要的致密油藏勘探区, 但关于气候波动对地层生烃潜力影响方面的研究还较为匮乏。东濮凹陷是在中-古生界基底上发育起来的一个新生代断陷咸化湖盆, 在构造稳定期其沉积记录主要受短期气候波动影响。本文以东濮凹陷古近系文古4井为例, 综合运用矿物学、微体古生物学和有机地球化学方法来揭示古气候波动与生烃潜力之间的成因联系。结果显示, 古近系沙河街组(沙三上8~10段)形成于整体较为干热的气候背景中, 期间发生多次短周期的相对干旱-潮湿波动, 古气候波动不仅体现在孢粉化石和岩石的矿物组成上, 而且影响了有机碳的含量, 使其随着气候的相对干旱-潮湿波动发生减少-增加的变化。本次研究结果提示构造稳定期内短周期的气候波动是影响陆相断陷湖盆生烃潜力的重要因素, 相对潮湿的气候更有利于有机质的富集。

关键词: 古气候波动; 东濮凹陷; 陆相湖盆; 生烃潜力

中图分类号: P57; Q914; P618.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)01-0087-08

Paleoclimate response of hydrocarbon generation potential for the lacustrine rift basin: A Paleogene example from Wengu 4 well in Dongpu Depression

SHU Xu-jie¹, YANG Dong-dong^{2,3}, CHENG Cheng¹, XU Tian-wu², WEI Wei⁴ and WANG Hong-zuo¹

(1. School of Geography, Nantong University, Nantong 226001, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang 457001, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 4. Jingwei Zhongyuan Measurement and Control Company, SINOPEC, Puyang 457001, China)

Abstract: Paleoclimate fluctuations directly or indirectly change ecosystem, and sediment composition, which led to that the change of hydrocarbon generation potential of sedimentary rocks. Lacustrine rift basin, one important type of petroliferous basin, has currently been recognized to be an important tight oil exploration area. However, study on co-variation between climate fluctuation and hydrocarbon generation potential is absent. Dongpu Depression, developed on Paleozoic-Mesozoic basement, is a Cenozoic lacustrine rift basin, whose sedimentary records were mainly controlled by short-term climate fluctuations during tectonic quiescent period. In this study, compilation and comparison of mineralogy, micropaleontology and organic geochemistry data from Wengu 4 well in Dongpu Depression were used to reveal the genetic relationship between paleoclimate fluctuations and hydrocarbon generation potential. The results suggest that the Paleogene Shahejie Formation (third member 8~10) was formed in overall

收稿日期: 2021-05-18; 接受日期: 2021-10-13; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中石化页岩油先导项目(P20049-3)

作者简介: 舒徐洁(1987-), 男, 助理研究员, 主要从事岩石学及地球化学相关研究, E-mail: Blade4ever@163.com。

网络首发时间: 2021-11-04; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20211104.1358.002.html>

dry-hot climate, with several times of climate fluctuations between relatively dry and relatively humid, which correspond to the waning and waxing of organic content. Co-variation of climate and organic content from Shahejie Formation indicate a genetic relationship between paleoclimate fluctuations and hydrocarbon generation potential, humid climate is more beneficial for the accumulation of organic matter.

Key words: paleoclimate fluctuations; Dongpu Depression; lacustrine basin; hydrocarbon generation potential

Fund support: Sinopec Shale Oil Pilot Project (P20049-3)

古气候对沉积记录的影响是多方面的,它能够通过改变风化作用的类型和强度来影响沉积物的输入,通过影响输入沉积盆地的物质来改变水体的环境和营养组成来影响生物的发育,通过直接改变水体的水热条件来影响生物群落的变化。这些古气候波动产生的影响都会保存到沉积记录中,并最终影响沉积岩中有机质的含量和沉积岩的生烃潜力。陆相断陷湖盆是我国陆相含油气盆地的重要类型,近年来还成为重要的致密油勘探区,具有面积小、水体浅、易受短期气候波动影响的特点(Hao *et al.*, 2011; 林畅松等, 2015)。关于陆相湖盆沉积记录的古气候反演研究较多,但这些研究主要关注气候本身的变化或气候对生态系统或其他环境要素的影响(Carroll and Bohacs, 1999; Fan *et al.*, 2007; 吴伟等, 2012; 罗威等, 2013; 王健等, 2021),对气候的生烃潜力影响研究则较为匮乏(刘占红等, 2007; Hao *et al.*, 2011; 牛杏等, 2018)。东濮凹陷是在中-古生界基底上发育起来的一个新生代断陷咸化湖盆,其古近纪地层是重要的油气富集和勘探层位,在构造稳定期沉积记录主要受短期气候波动影响。本文以东濮凹陷古近系文古4井(沙三上8~10段)为例,分别用矿物和孢粉作为古气候指标,有机碳含量作为生烃潜力指标,来探讨古气候波动对陆相断陷湖盆生烃潜力的影响。

1 地质背景

中生代以来受西太平洋构造域演化制约,渤海湾盆地发育了众多的断陷盆地(周立宏等, 2003)。东濮凹陷是渤海湾盆地南端众多断陷盆地中的一个,位于鲁、豫两省交界处,面积约5 300 km²,呈北北东向展布,以新生界地层为主(余海波等, 2020)。盆地具有南宽北窄、东断西超、东西分带、南北分块、隆洼相间的构造格局(图1),盆地充填物以古近纪沉积物为主,厚度可达4 000~

6 000 m,岩性以粉砂岩、砂岩和泥岩夹膏-盐岩为主,发育多套盐岩,含盐地层最大累加厚度4 000 m以上,纯盐层最大累加厚度达2 000 m以上。盐岩在垂向上呈旋回性和韵律性发育,在横向上呈分区性和迁移性展布,盐岩与砂岩表现为同时异相,呈指状交叉消长关系,都夹于稳定的泥页岩之间(陈发亮等, 2000)。近年来随着致密油/页岩油等非常规油气勘探的不断深入,在盐湖盆地中发现了较为典型的盐间夹层型致密油,该类型致密油具有砂-泥-碳酸盐岩、碳酸盐岩-膏(质)岩-盐岩的盐韵律特征,受短周期内古气候影响显著。

2 研究内容与结果

本次研究选取文古4块的文古4井3 102~3 177 m段为研究对象,该层段对应沙河街组沙三上8~10段,其中发育有典型的盐岩沉积韵律(图2),其在纵向上主要表现为一套砂-泥-碳酸盐岩、碳酸盐岩-膏(质)岩-盐岩等水体变浅的沉积旋回。其中IV级盐韵律表现为从盐岩→(含泥)钙芒硝岩→含白云石泥岩(含泥白云岩)-泥岩→白云岩→钙芒硝岩→盐岩的淡化-咸化序列和盐类矿物的析出顺序。在该段盐岩沉积中主要发育多种湖相泥岩、页岩和泥灰(云)岩,包括黑页岩、富有机质纹层页岩、钙质纹层页岩、灰色钙质页岩、灰色页岩、纹层状泥灰(云)岩以及灰色块状的钙质/粉砂质泥岩。本次工作对该层段进行了孢粉、全岩矿物、粘土矿物和有机碳含量的分析。

2.1 孢粉分析

本次研究共分析了28件岩心样品,所有样品中均见到丰富的孢粉化石,经鉴定,含3大类,84属,其中常见的有29属(图3),其组合特征如下:被子植物花粉(36.6%~79.6%,平均65.05%)占优势,裸子植物花粉(18.8%~62.7%,平均34.08%)次之,蕨类孢子花粉(0~2.8%,平均0.86%)较少;被子植物花

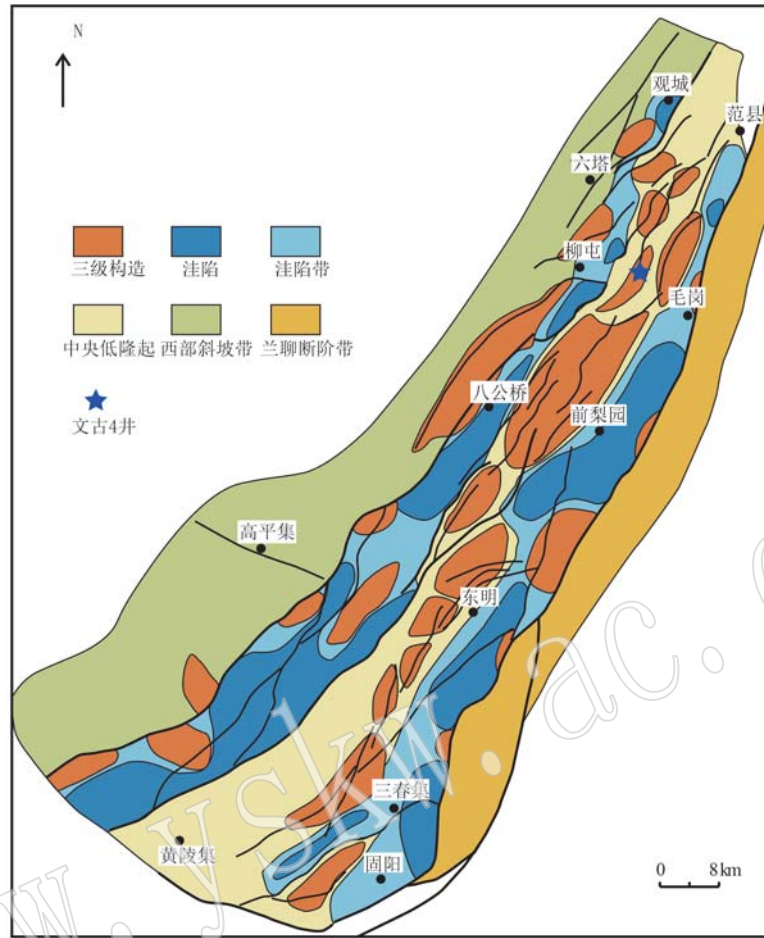


图 1 东濮凹陷构造单元划分图
 Fig. 1 Tectonic units diagram of the Dongpu Depression

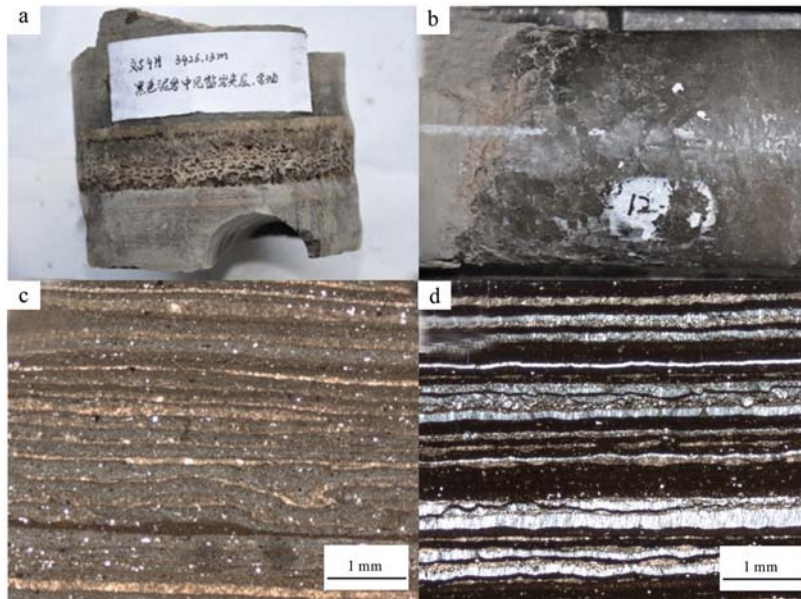


图 2 文古 4 井岩心照片和显微特征

Fig. 2 Photos and microphotograph of rock samples from Wengu 4 well
 a—黑色纹层状泥岩中夹盐岩韵律层; b—盐韵律段竹节状盐岩; c—纹层状泥灰岩; d—纹层状灰岩、亮晶灰岩与泥质泥晶灰岩互层
 a—black laminated mudstone with salt rock rhythmic layers; b—bamboo-like salt rock with rhythms; c—laminated marl; d—laminated limestone intercalated with sparite and argillaceous limestone

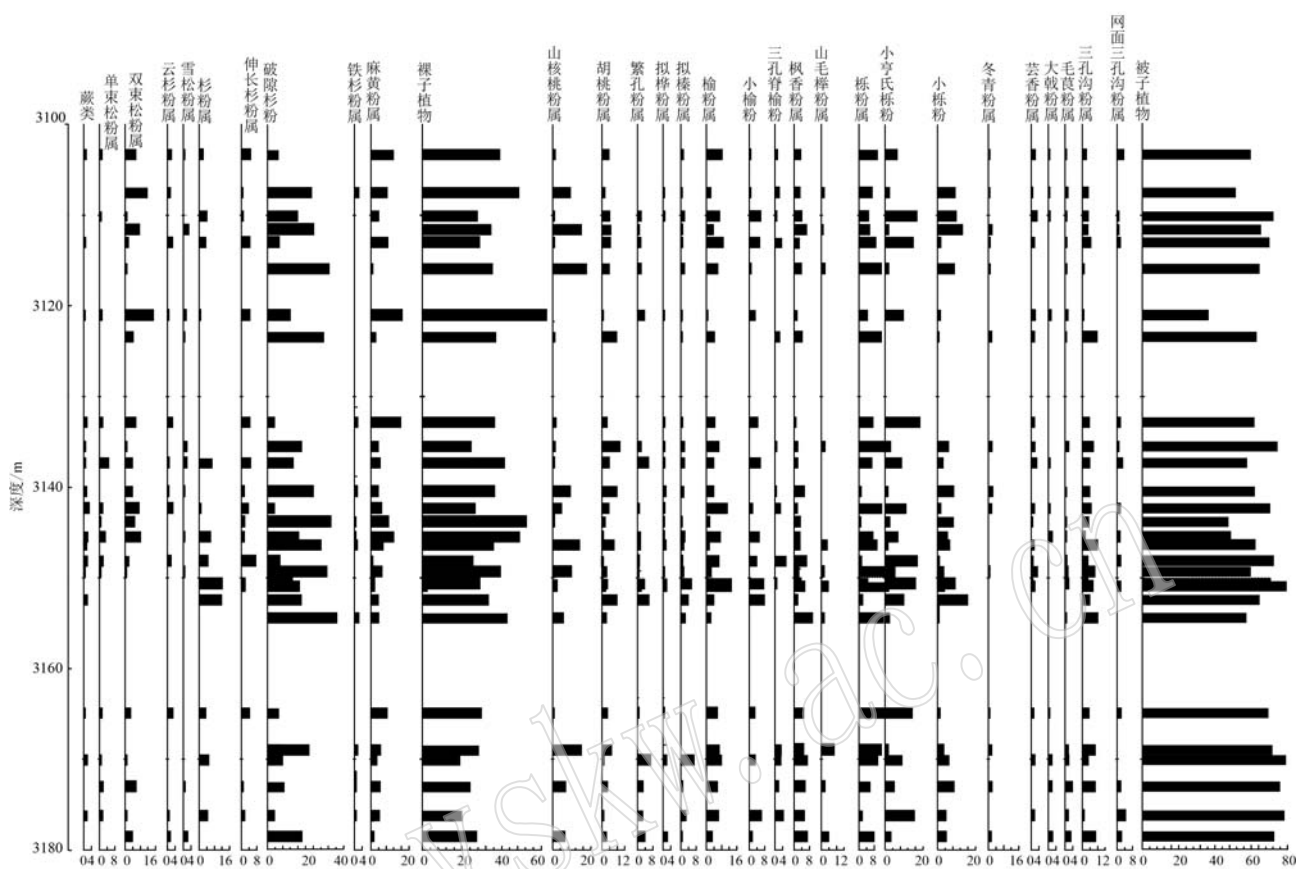


图3 东濮凹陷文古4井(3102~3177 m)主要孢粉化石

Fig. 3 Sporopollen from the Wengu 4 well (3102~3177 m) in Dongpu Depression

粉类中, 栎粉属(15.6%~31.2%, 平均21.99%)含量明显多于榆粉属+脊榆粉属(2.4%~20.3%, 平均10.68%), 小亨氏栎粉较多, 枫香粉属、桦科、胡桃科等较常见, 三孔沟粉属、网面三孔沟粉属较多; 裸子植物花粉类中, 杉粉属(8.3%~32.4%, 平均21.19%)发育, 松科(0~11.9%, 平均6.39%)和麻黄粉属(0~16.4%, 平均5.66%)个别样品丰富; 蕨类孢子花粉见少量的水龙骨单缝孢属、凤尾蕨孢属、三角孢属等。

2.2 全岩和粘土矿物组成

本次研究共对211件岩心样品进行了全岩和粘土矿物组成分析, 结果显示样品所含的矿物种类较多(图4), 但不同层位中各种矿物的含量变化较大, 主要包括方解石(0~66%, 平均24.6%)、粘土矿物(4%~53%, 平均23.7%)和石英(3%~43%, 平均16.3%), 其次为白云石(0~70%, 平均11.4%)和斜长石(1%~32%, 平均8.6%)以及少量岩盐(0~15%, 平均4.3%)和黄铁矿(0~14%, 平均2.9%)。此外, 部分层位含有较多的硬石膏(0~78%, 平均

8.0%)。粘土矿物分析结果则显示, 其主要由伊利石(43%~97%, 平均70.4%)组成, 其次为伊蒙混层(3%~45%, 平均18.1%), 高岭石(0~26%, 平均7.1%)和绿泥石(0~14%, 平均4.4%)的含量较低。

2.3 有机碳含量

本次研究共对259件岩心样品进行了有机碳含量分析, 结果显示其纵向变化较大(0.19%~7.11%, 平均1.61%), 具有明显的波动性, 暗示生烃潜力的明显变化。

3 讨论

3.1 古气候分析

孢粉作为植物的生殖细胞, 是推断植物群面貌和反演古气候特征的有用指标。本次研究在定量统计的基础上, 利用前人对不同孢粉所反映的植被和气候特点的总结(叶得泉, 1993; 周山富等, 2007), 对研究区孢粉组合反映的气温带、干湿度和植被类

型进行分析,并以此来分析研究区该时间段的植被类型和气候特点。结果显示,本研究段植被以落叶阔叶(35.5%)和针叶(28.1%)为主,灌木(15.9%)和常绿落叶(14.7%)次之,草本较少(2.5%);热带-亚热带(31.0%)和亚热带(32.9%)植被成分较高,暖温带(25.0%)次之,热带成分很少。干湿类型则显示中生(48.7%)成分最高,喜湿(26.8%)和旱生(21.3%)成分次之。因此,孢粉特征反映研究区处于亚热带-暖温带半干旱-半湿润气候条件区,植被类型应为针阔混交林。另一方面,全岩矿物中蒸发相的岩盐和硬石膏频繁地出现,粘土矿物则以反映干冷气候的伊利石为主,反映暖湿气候的高岭石较少,这些特点也暗示研究区整体处于相对干旱的环境,但期间发生了频繁的相对于湿波动。

3.2 古气候对生烃潜力的影响

为进一步揭示研究区该时段的气候波动情况,并探讨气候波动与沉积岩生烃潜力之间的联系,本文以反映干旱气候条件的特征花粉麻黄粉属和蒸发相矿物(石盐+硬石膏)来表征气候的相对于湿波动

状况,同时,由于绿泥石指示更为干旱的气候(Xu *et al.*, 2017),其与伊利石的比值也被用来反映干旱程度的变化(图 4)。另一方面,沉积岩中有机碳含量的高低是评价其生烃能力的最基础指标(刘占红等, 2007),根据有机碳的含量可以对烃源岩的有机质丰度进行初步评价,结果显示,有机质相对富集的层段有 6 个,相对贫乏的层段也有 6 个,它们分别与气候指标反映的相对潮湿和相对干旱相对应(图 5,图中除麻黄粉属为个点直接相连外,其余都是采用局部加权回归拟合出来的曲线,红线代表最大可能的趋势线,两条蓝线围起来的部分代表 95% 的置信区间,真实曲线在这一范围内的概率为 95%),表明研究区沉积岩生烃潜力与短期气候波动之间存在密切的成因联系,相对潮湿的气候条件更有利于有机质的富集和生烃潜力的提高。

优质烃源岩一般具有有机质丰度高、分布稳定(厚度不一定大)的特征,是形成大、中型油田的物质基础。基于海相沉积的研究,人们提出了有机质富集的 3 个主要观点,即生产力模式(Calvert *et al.*, 1995)、

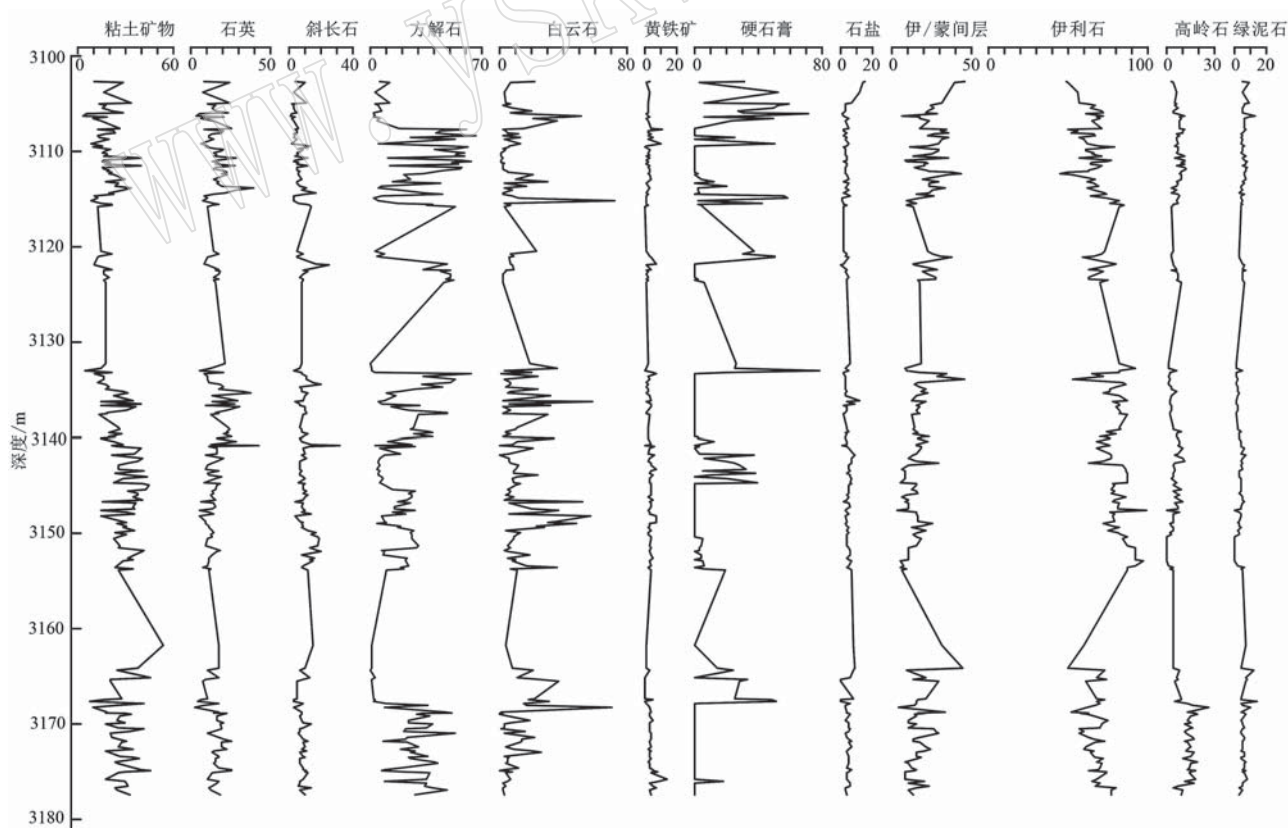


图 4 东濮凹陷文古 4 井(3 102~3 177 m)的矿物组成

Fig. 4 Mineralogy from the Wengu 4 well (3 102~3 177 m) in Dongpu Depression

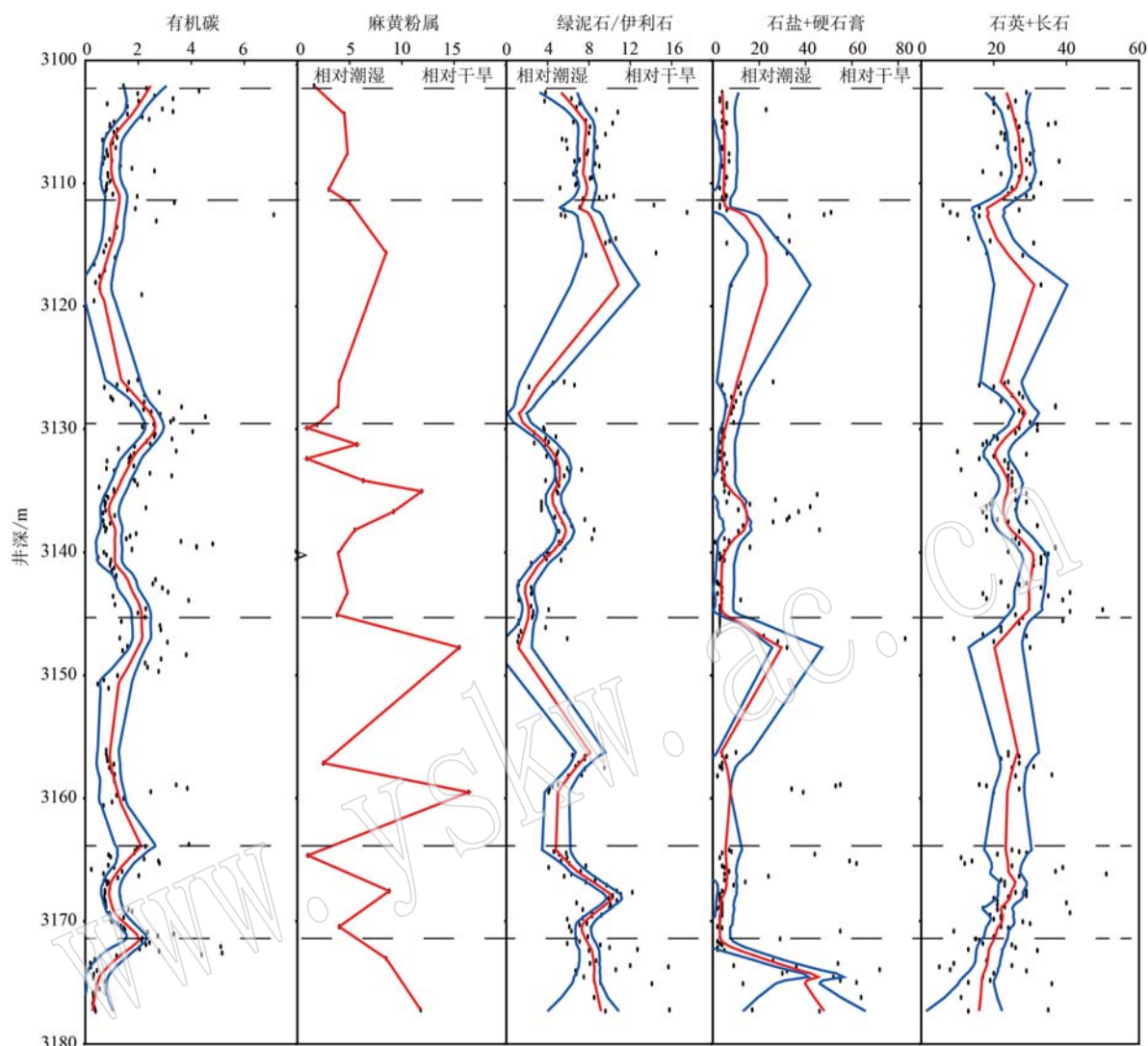


图5 文古4井有机碳含量与孢粉、矿物组成之间的联系

Fig. 5 The correlation between organic carbon, sporopollen and mineral compositions from Wengu 4 well in Dongpu Depression

保存模式 (Demaison and Moore, 1980) 和叠加模式 (Ingall and Jahnke, 1997), 它们分别认为高生产力、保存条件及生产力和保存条件的共同作用是有机质富集的主控因素。而对于湖相烃源岩, 其保存模式主要强调因地理隔离、古水深变化或生物作用等因素引起水体缺氧, 从而导致优质烃源岩形成 (马小祥等, 2019), 而生产力模式主要强调富有机质的形成是由于湖泊表层水体具较高的生产力, 只要生产力高, 即使湖泊水体还原性较弱也可形成优质烃源岩 (胡涛等, 2021)。对东濮凹陷沙三段的有机质富集机制研究表明生产力越大, 有机质富集程度越高 (胡涛等, 2021)。本文的研究显示在盆地处于构造稳定期, 其性质和保存条件均处于相对稳定的前提下,

相对潮湿气候期更有利于有机质的富集, 支持气候通过生产力模式来实现对有机质的控制, 因为相对潮湿的气候能提供更好的温热条件, 有利于生物的繁殖, 从而提高水体和盆地周围的生产力, 最终提高沉积盆地的有机质丰度。同时, 相对潮湿的气候条件能够增强风化作用的强度, 从而通过提高营养物质的输入, 改变水体的环境和营养组成来影响生物的发育, 以提高水体的生产力。另一方面, 以长石和石英为代表的陆源碎屑物质输入与有机质含量具有相反的变化趋势 (图4), 则可能是因为陆源碎屑对有机质具有一定的稀释作用 (Fu *et al.*, 2015; 丁江辉等, 2019)。

4 结论

本文通过对东濮凹陷文古 4 井沙三上 8~10 段综合的微体古生物、矿物学和有机地球化学分析,探讨了短期气候波动对陆相断陷湖盆沉积岩生烃潜力的影响,结果显示该研究层段整体形成于较为干旱的气候环境中,但发生了 6 次明显的相对于旱和相对潮湿波动,同时,有机碳含量具有明显的波动性。两者的对比分析显示,相对潮湿的气候更有利于有机质的富集,气候主要通过生产力模式来控制有机质的富集和沉积岩的生烃潜力。研究结果表明,对于处于构造稳定期的陆相断陷(咸化)湖盆,在其性质和沉积物保存条件都相对稳定的前提下,相对潮湿的气候条件下形成的烃源岩可能是更好的勘探层位。

References

- Calvert S, Pedersen T, Naidu P D, *et al.* 1995. On the organic carbon maximum on the continental slope of the eastern Arabian Sea [J]. *Journal of Marine Research*, 53: 269~296.
- Carroll A and Bohacs K. 1999. Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls [J]. *Geology*, 27: 99~102.
- Chen Faliang, Zhu Hui, Li Xutao, *et al.* 2000. Partition of sequence strata and discussion about salt rock resource in Shahejie formation of Eocene, Dongpu Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18 (3): 384~388 (in Chinese with English abstract).
- Demaison G J and Moore G T. 1980. Anoxic environments and source bed genesis [J]. *Organic Geochemistry*, 2: 9~31.
- Ding Jianghui, Zhang Jinchuan, Li Xingqi, *et al.* 2019. Characteristics and controlling factors of organic matter enrichment of Lower Carboniferous black rock series deposited in inter-platform region, Southern Guizhou Depression [J]. *Lithological Reservoirs*, 31(2): 83~95 (in Chinese with English abstract).
- Fan M, Dettman D, Song C, *et al.* 2007. Climatic variation in the Linxia basin, NE Tibetan Plateau, from 13.1 to 4.3 Ma: The stable isotope record [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 247: 313~328.
- Fu X, Jian W, Chen W, *et al.* 2015. Organic accumulation in lacustrine rift basin: Constraints from mineralogical and multiple geochemical proxies [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 104(2): 495~511.
- Hao F, Zhou X, Zhu Y, *et al.* 2011. Lacustrine source rock deposition in response to co-evolution of environments and organisms controlled by tectonic subsidence and climate, Bohai Bay Basin, China [J]. *Organic Geochemistry*, 42: 323~339.
- Hu Tao, Pang Xiongqi, Jiang Fujie, *et al.* 2021. Factors controlling differential enrichment of organic matter in saline lacustrine rift basin: A case study of third member Shahejie Fm in Dongpu depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(1): 140~152 (in Chinese with English abstract).
- Ingall E and Jahnke R. 1997. Influence of water-column anoxia on the elemental fractionation of C and P during sediment diagenesis [J]. *Marine Geology*. 139: 219~229.
- Lin Changsong, Xia Qinglong, Shi Hesheng, *et al.* 2015. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis [J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 9~20 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhanhong, Li Sitian, Xin Renchen, *et al.* 2007. Paleoclimatic information in stratigraphic records and its relation to the formation of hydrocarbon source rocks——A case study of the Paleogene strata in the Huanghekou subbasin of the Bohai Bay basin, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 7: 830~840 (in Chinese with English abstract).
- Luo Wei, Xie Jinyou, Liu Xinyu, *et al.* 2013. The study of Paleogene climate in the Haizhong depression, Beibu basin, Northern South China Sea [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 30(3): 288~296 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xiaoxiang, Yao Suping, Zhang Bailin, *et al.* 2019. Redox conditions of Paleogene paleolake and development models of high-quality source rocks in the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 25(6): 801~812 (in Chinese with English abstract).
- Niu Xing, Yang Xianghua, Yan Detian, *et al.* 2018. The palaeoclimate and paleoenvironment evolution and the development mechanism of high-quality hydrocarbon source rock in Mesozoic, North Carnarvon Basin, Australia [J]. *Acta Petrolei Sinica*, (8): 902~915 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jian, Peng Jie, Cao Yingchang, *et al.* 2021. Mid-late Eocene paleoclimatic characteristics and significance in the Dongying Depression: An example from well Haoke-1 [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*: 1~20 [2021-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1038.P.20210205.1142.003.html>
- Wu Wei, Lin Changsong, Zhou Xinhui, *et al.* 2012. Paleoclimate evolution and its influence on lake level changes of Paleogene Dongying

- epoch in Liaodong Bay, East China[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 36(1): 33~39, 46 (in Chinese with English abstract).
- Xu G Z, Deconinck J F, Feng Q L, *et al.* 2017. Clay mineralogical characteristics at the Permian-Triassic Shangsi section and their paleoenvironmental and/or paleoclimatic significance[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 474: 152~163.
- Yu Haibo, Cheng Xiushen, Xu Tianwu, *et al.* 2020. Characteristics about hydrocarbon accumulation controlled by structure in Paleogene of Dongpu Sag[J]. *Geoscience*, 34(6): 1119~1131 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Lihong, Li Sanzhong, Liu Jianzhong, *et al.* 2003. The Yanshanian structural style and basin prototypes of the Mesozoic Bohai Bay Basin [J]. *Progress in Geophysics*, (4): 692~699 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈发亮, 朱 晖, 李绪涛, 等. 2000. 东濮凹陷下第三系沙河街组层序地层划分及盐岩成因探讨[J]. *沉积学报*, 18(3): 384~388.
- 丁江辉, 张金川, 李兴起, 等. 2019. 黔南坳陷下石炭统台间黑色岩系有机质富集特征及控制因素[J]. *岩性油气藏*, 31(2): 83~95.
- 胡 涛, 庞雄奇, 姜福杰, 等. 2021. 陆相断陷咸化湖盆有机质差异富集因素探讨——以东濮凹陷古近系沙三段泥页岩为例[J]. *沉积学报*, 39(1): 140~152.
- 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 等. 2015. 地貌演化、源-汇过程与盆地分析[J]. *地学前缘*, (1): 9~20.
- 刘占红, 李思田, 辛仁臣, 等. 2007. 地层记录中的古气候信息及其与烃源岩发育的相关性——以渤海黄河口凹陷古近系为例[J]. *地质通报*, (7): 830~840.
- 罗 威, 谢金有, 刘新宇, 等. 2013. 北部湾盆地海中凹陷古近纪古气候研究[J]. *微体古生物学报*, 30(3): 288~296.
- 马小祥, 姚素平, 张柏林, 等. 2019. 渤海湾盆地东濮凹陷古近系古湖盆氧化还原条件及其优质烃源岩的发育模式[J]. *高校地质学报*, 25(6): 801~812.
- 牛 杏, 杨香华, 严德天, 等. 2018. 澳大利亚 North Carnarvon 盆地中生代气候环境演变与优质烃源岩发育机制[J]. *石油学报*, (8): 902~915.
- 王 健, 彭 捷, 操应长, 等. 2021. 东营凹陷中晚始新世古气候演化特征及其意义——以郝科1井为例[J/OL]. *沉积学报*: 1~20 [2021-12-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1038.P.20210205.1142.003.html>
- 吴 伟, 林畅松, 周心怀, 等. 2012. 辽东湾古近纪东营期古气候演化及其对湖平面变化的影响[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 36(1): 33~39, 46.
- 叶得泉. 1993. 中国油气区第三系(1)总论[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 余海波, 程秀申, 徐田武, 等. 2020. 东濮凹陷古近纪盆地结构控烃控藏特征[J]. *现代地质*, 34(6): 1119~1131.
- 周立宏, 李三忠, 刘建忠, 等. 2003. 渤海湾盆地地区燕山期构造特征与原型盆地[J]. *地球物理学进展*, (4): 692~699.
- 周山富, 杨方之. 2007. 孢粉地质学[M]. 杭州: 浙江大学出版社.