

早始新世极热气候时期湖盆水体性质及生烃环境 ——以东营凹陷古近系孔店组为例

刘萍¹, 谭先锋^{2,3}, 陈青^{2,3}, 王佳^{2,3}, 梁迈³, 王萍³, 王伟庆⁴

(1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 复杂油气田勘探开发重庆市重点实验室, 重庆 401331;
3. 重庆科技学院 石油与天然气工程学院, 重庆 401331 4. 中国石化 胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘要:早始新世极热气候(IETM)事件严重影响了海洋和湖泊的水体性质和生物活动。依据钻井岩心、元素分析、有机碳同位素与有机碳含量等实验结果,研究了东营凹陷湖盆早始新世时期的湖泊水体氧化还原变化和古生产力条件,发现湖盆早期出现了较强的还原性,之后逐步恢复其氧化性。极热气候事件引起的湖水氧化还原界面的波动变化改变了其氧化还原格局,造成氧化还原环境与湖水深度变化的“不协调性”。湖盆早期具有较高的生产力,随后迅速降低之后逐渐增高,生产力的最低时期与极热气候(IETM)事件发生时期比较一致。由此证实了湖泊的时空波动演化经历了古新世—始新世时期的极热气候(IETM)事件,该事件具有明显的沉积记录和生物地球化学响应,决定了原始湖盆的水体氧化还原性质和生命活动过程,改变了整个湖盆的氧化还原结构。极热气候引起的湖水缺氧咸化造成了湖泊生产力的短暂降低,而随着恢复期的增氧作用的加强,生产力得到了极大的恢复,尤其是沙河街组四段有机碳含量较高,具有较高的生产力,成为主要的生油层和致密油气产层。

关键词:氧化还原;古生产力;极热气候;早始新世;孔店组;东营凹陷

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Water redox conditions and environment for source rock deposition in lacustrine during the Initial Eocene Thermal Maximum(IETM): A case study on the Paleogene Kongdian Formation in the Dongying Sag

Liu Ping¹, Tan Xianfeng^{2,3}, Chen Qing^{2,3}, Wang Jia^{2,3}, Liang Mai³, Wang Ping³, Wang Weiqing⁴

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Complex Oil and Gas Exploration and Development, Chongqing 401331, China; 3. Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 4. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: The Initial Eocene Thermal Maximum(IETM) has seriously affected the water quality and biological activities of sea and lake. Based on the experimental results of drilling cores, elemental analysis, organic carbon isotope and TOC, the lakewater oxidation-reduction conditions and paleoproductivity of Dongying terrestrial fault basin during early Eocene has been studied in this paper. It turned out that the lacustrine was strongly reductive but resumed oxidation environment afterward. The fluctuations of redox interface caused by the extreme climate events changed the lacustrine redox pattern, which resulted in the “disharmony” of the oxidation-reduction variation along the water depth. The productivity of the lacustrine was high in the early time, followed by a rapid decrease but increased progressively again. The lowest productivity period is basically consistent with the IETM. It has confirmed that the Initial Eocene Thermal Maximum(IETM) has affected the spatial and temporal fluctuation of the lacustrine. This event has obvious sedimentary record and biogeochemical response, which determines water oxidation-reduction and the bio-mass activities of the original basin. The hypoxia of lacustrine caused by thermal maximum resulted in the temporary decrease in productivity. However, productivity has been greatly restored with the sufficient oxygen supply after the event. This is especially demonstrated in the No. four section of

收稿日期:2016-11-27;修订日期:2016-12-20。

第一作者简介:刘萍(1978—),男,博士研究生,沉积地质与古环境。E-mail:liuping@cdut.edu.cn。

通讯作者简介:谭先锋(1982—),男,博士、副教授,沉积地质与古环境。E-mail:xianfengtian8299@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41202043);中国石油科技创新基金项目(2014D-5006-0108);重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2016jcyjA0606)。

Shahejie Formation with the higher TOC content and the productivity, and thus becomes the main reservoir of tight oil and gas production.

Key words: redox, paleoproductivity, IETM, Early Eocene, Kongdian Formation, Dongying Sag

早始新世时期,全球范围内发生了极热气候(IETM)事件,也可以称为古新世—始新世极热气候事件(PETM)或晚古新世极热气候事件(LPTM)^[1-3],严重影响了全球碳循环过程和程度,深刻改变着全球生态系统和沉积记录^[4-5],自从 ODP Site 690 钻孔中识别以来,一直是国内外古环境与古气候研究的热点^[6-7]。全球范围内,该事件的典型特征是造成了古新世—始新世之交(~56 Ma)的碳同位素负漂现象(carbon isotope excursion,简称 CIE)^[7],漂移幅度(-2‰~-6‰),全球地表温度平均增加 5~6℃^[8],该负漂移现象在海相地层和陆相地层中均有很好的记录^[9-11]。这种全球性的负漂移事件是由于该时期大气中存在有过量的¹²CO₂^[12],导致了气候的持续增温。全球性的极热事件深刻改变着该时期的气候环境变化、沉积格局和沉积记录^[13],如全球海洋酸化导致了碳酸盐补偿深度(CCD)变浅,碳酸盐补偿深度普遍升高^[14],全球海洋和湖泊水体整体缺氧,部分喜氧生物的灭绝^[15],高纬度地区的气候变得潮湿多降雨,低纬度地区变得干旱少雨^[16],极热干旱气候导致陆地风化作用增强,河流携带这些营养元素到海洋或者湖泊中,导致了初级生产力的短暂增强^[17-19]。

陆相湖泊规模远小于海洋,是物质来源、气候条件和地质构造条件等参数的综合响应,敏感度远远高于海洋。因此,陆相湖泊对极热气候事件的响应特征与海洋环境相比较有一定的特殊性^[20],如陆相湖泊沉积记录中的碳同位素偏移量要大于海洋的偏移量^[9]。中国北方古新世—始新世之交发育一系列的陆相湖泊^[21],湖泊面积相对较小,物质来源和气候变化对湖泊的影响较大,在持续高温背景下,湖泊的物质供给大小和充填方式、矿物组及元素构成、同位素分异程度、生命的繁殖和生产力的大小均有一定的响应关系^[22]。在岩性叠置上也有一定的旋回关系和物质聚集规律^[23],这种旋回变化明显受控于特殊气候背景下的天文周期变化和水体介质变化^[24]。这一系列的特殊变化导致了后期的成岩改造也有所差异,进而决定了早期的特殊成岩响应和晚期的成岩演化系统过程^[25-26]。前已述及,极热气候的变化导致了地表环境的变化,该事件(IETM)的发生必然导致了陆地湖泊中的氧化还原的特殊性,也必然影响着湖泊生产力的变化。因此,为了揭示该时期陆相湖泊的水体性质的氧化还原状况

及生物活动过程,本文以东营凹陷早古近纪孔店组为例,开展该事件(IETM)前后湖盆氧化还原的结构及生物生产力研究。

1 区域地质背景

东营凹陷位于渤海湾盆地西南部地区,为济阳坳陷的次一级构造单元(图 1a),北边为陈家庄凸起,南边为鲁西隆起,西边为滨县凸起和青城凸起等陆地环境(图 1b)。新生代陆相湖盆主要是在中生代地层之上发育起来的各种断陷湖盆,古近纪早期为断陷的早期,东营凹陷发育一系列的盐湖和河流的沉积体系,从下到上主要发育了孔店组和沙四段,IETM 时期主要发育孔店组,因此,本次研究的重点对象为孔店组。孔店组在研究区可以分为三段,孔一段主要为红色岩性,孔二段主要为灰色岩性,孔三段主要为红色岩性,构成了红-灰-红的地层结构,岩性地层旋回比较发育普遍(图 1c)。

该时期,研究区主要发育的断陷型湖盆,且呈现北断-南超的特征,湖盆中央地区地层厚度明显高于湖盆的边缘,从钻遇地层来看,中央地区的井位地层发育较完整,是研究的理想井位(图 2)。地层对比表明,北边的 Z19 井区地层堆积薄,主要为粗碎屑的砂砾岩,发育孔一段上部地层;中央地区的 HK1 与 SK1 井区,发育泥岩、膏岩和粉砂岩的薄互层的细粒沉积物;南边的 W46 与 W100 等井区发育粉砂岩、砂岩和泥岩的薄互层的中粒沉积物,膏岩不太发育。HK1 与 SK1 井区地层厚度较大,约 7 000 m,而湖盆边缘地区厚度较小,北部地区厚度大于北边,约 0~500 m 不等,南部地区地层厚度约为 1 000~4 000 m。对比表明北部陡坡带主要为粗碎屑沉积区,中央主要为化学沉积区,南部缓坡主要为细粒碎屑沉积区。

2 样品选择及实验测试

本次研究选取东营凹陷古近系孔店组钻井,按照前人对该时期的古地理背景研究,分别选取位于不同湖泊水深的井位进行取样分析,浅湖环境的 W100 井, W46 井和 WG1 井;深湖-半深湖环境的 HK1 井, SK1 井和 XDF10 井。并收集东营凹陷其他次一级凹陷的井位测试资料,如 L2 井与 MS1 等井位。样品尽量选

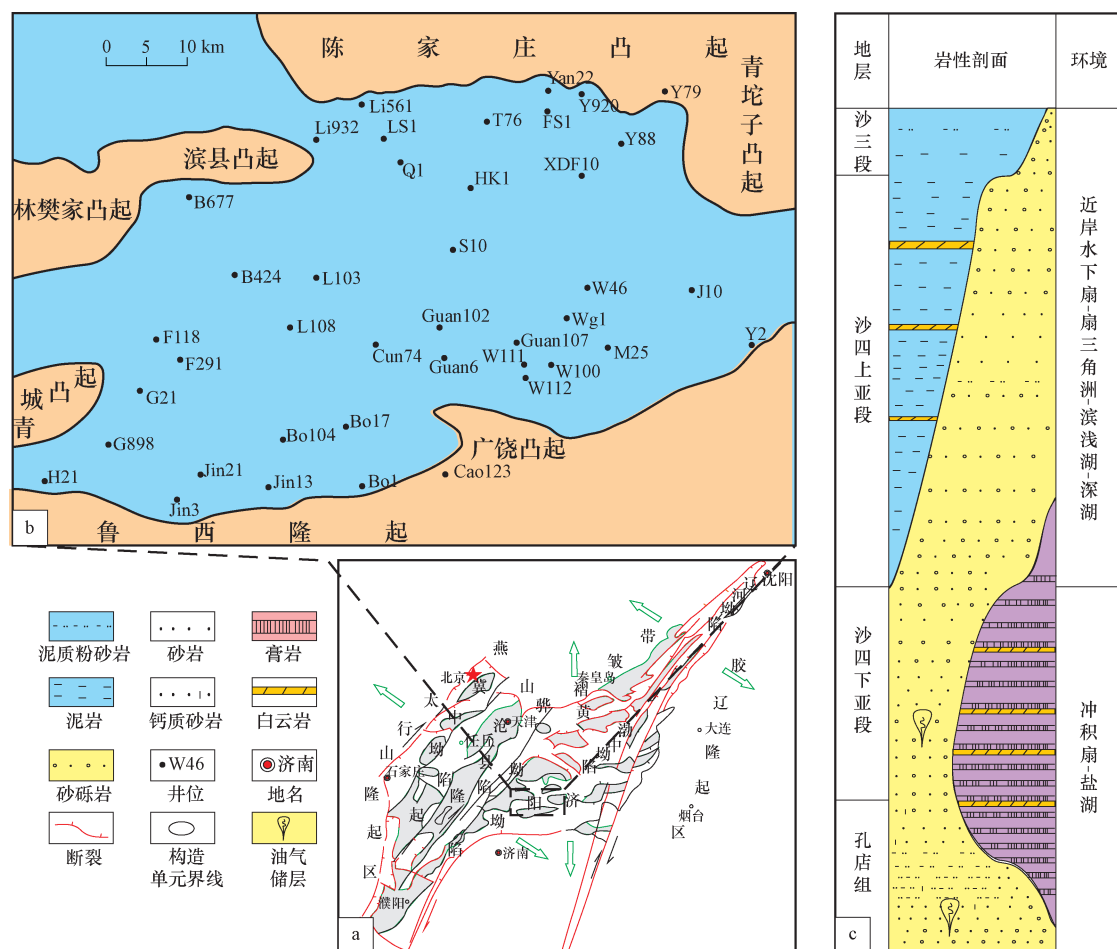


图1 东营凹陷位置及地层结构

Fig. 1 Location and stratigraphic outcrop map of the Dongying Sag

择保留原始沉积环境信息较好的粘土岩、钙质粉砂岩,并按照高频旋回沉积节律进行选择。所有井位样品进行了薄片磨制和观察;W100井,W46井,HK1井和SK1井的104件样品进行了微量元素分析和稀土元素分析。根据研究需要选择W100井14件样品进行了有机碳同位素分析,W46井23件样品进行了无机碳同位素分析,实验分析在中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室完成,W100井30件样品在长江大学油气地球探测技术教育部重点实验室完成碳同位素测试,利用EA+MAT253仪器进行分析测试。另外,收集胜利油田地质研究院30余口井薄片鉴定、常量元素、碳氧同位素、孢粉分析、粘土矿物X-衍射、有机碳含量与生物标志化合物等资料。对所有测试结果进行了分类整理,很好的满足研究要求。

2 氧化还原条件及湖平面变化

2.1 岩石矿物学特征对氧化还原的指示

岩石矿物学特征可以很好地反应湖盆水体和气候

条件变化,如氧化条件下可形成红色地层,强烈还原条件下可形成深色地层^[23]。极热气候时期,地球CO₂浓度增高,湖泊水体整体处于缺氧状态,岩石学地层记录主要表现为深灰色、灰黑色地层,气候增氧恢复期,氧化作用增强,岩石主要表现为红色、浅灰色地层沉积。如图3所示,W46井极热气候前后岩石矿物学特征主要表现为:①极热气候时期(IETM)地层主要颜色为灰黑色泥岩,含有少量的硬石膏,该时期钾长石含量偏低,斜长石含量较高,表明该时期湖盆水体表现为缺氧环境(图3);②极热气候恢复期,地球整体处于增氧环境,图3显示地层中主要表现为红色及紫红色地层,偶尔为灰色地层,该时期石英含量普遍增高,钾长石含量增高,斜长石含量降低,总体表现为氧化环境;③岩性观察还表明,在增氧期同样出现了大量的灰色粉砂岩夹层,这种岩性实际上主要跟物质组成有关,并非与氧化还原有很好对应关系(图3)。

2.2 元素地球化学特征对氧化还原的指示

某些特定的常量及微量元素可以作为很好的氧化

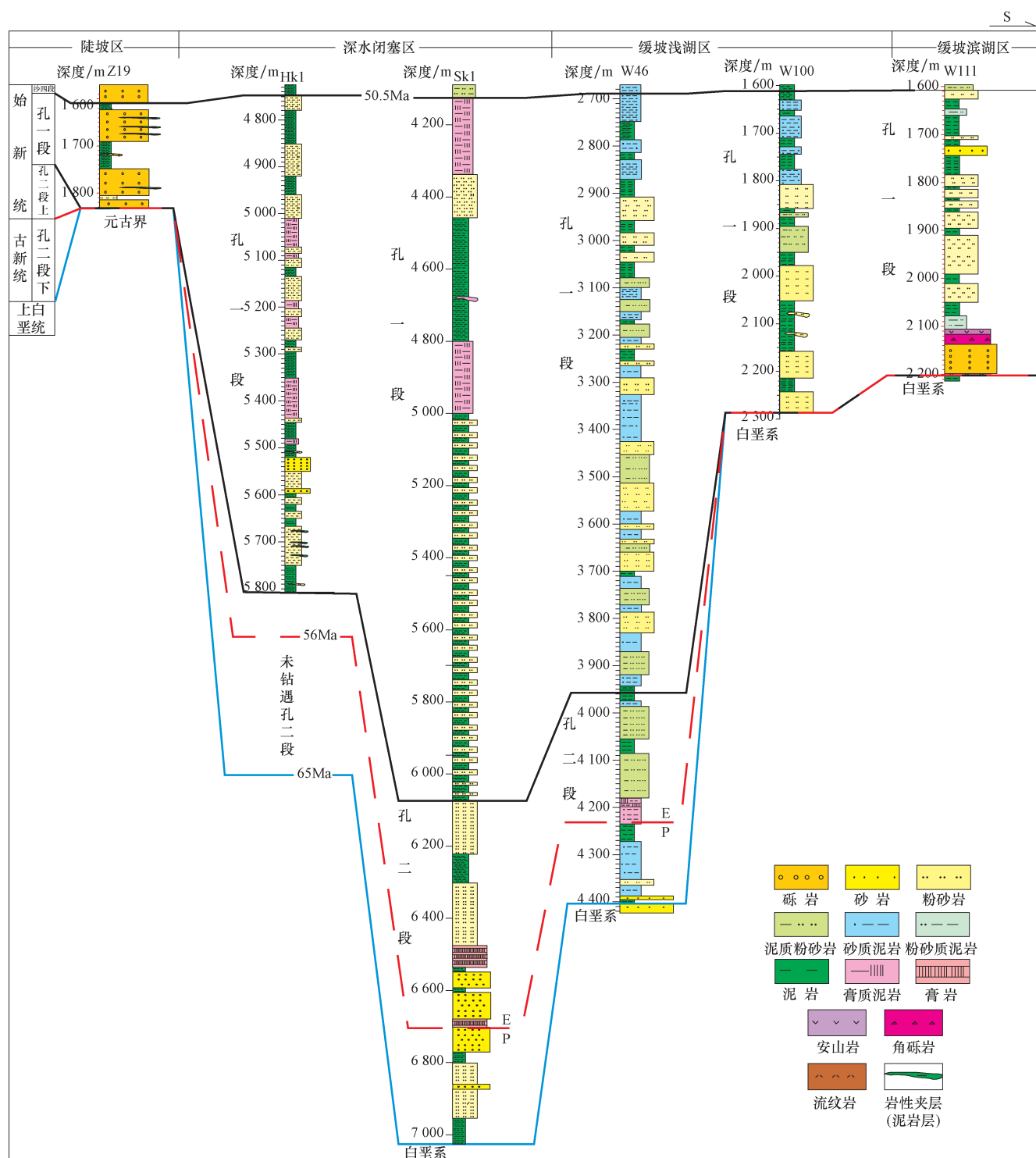


图2 东营凹陷重点井位沉积剖面

Fig. 2 Sedimentary section of key wells in the Dongying Sag

还原和水体深度判别指标。As, Cr, Mo, U, V 等元素含量与沉积环境的氧化还原条件有关, 硫化氢的出现极其敏感^[27]。某些特殊的微量元素比值对氧化还原条件具有很好的指示作用, 如 V/Cr, Ni/Co 和 Th/U 对沉积环境的判别效果较好。Th 和 U 在还原状态下地球化学性质相似, 在氧化状态下差别很大^[28]。在表生环

境下, Th 只有 + 4 价一种价态且不易溶解, 而 U 则不一样。U 在强还原状态下为 + 4 价, 不溶解于水, 导致它在沉积物中富集; 而在氧化状态下, U 以易溶的 + 6 价存在, 造成沉积物中 U 的丢失。基于这两种元素的地球化学性质差异, 沉积物或沉积岩中, Th/U 比值可以作为环境的氧化还原状态指示^[15]。Th/U 值在 0 ~ 2

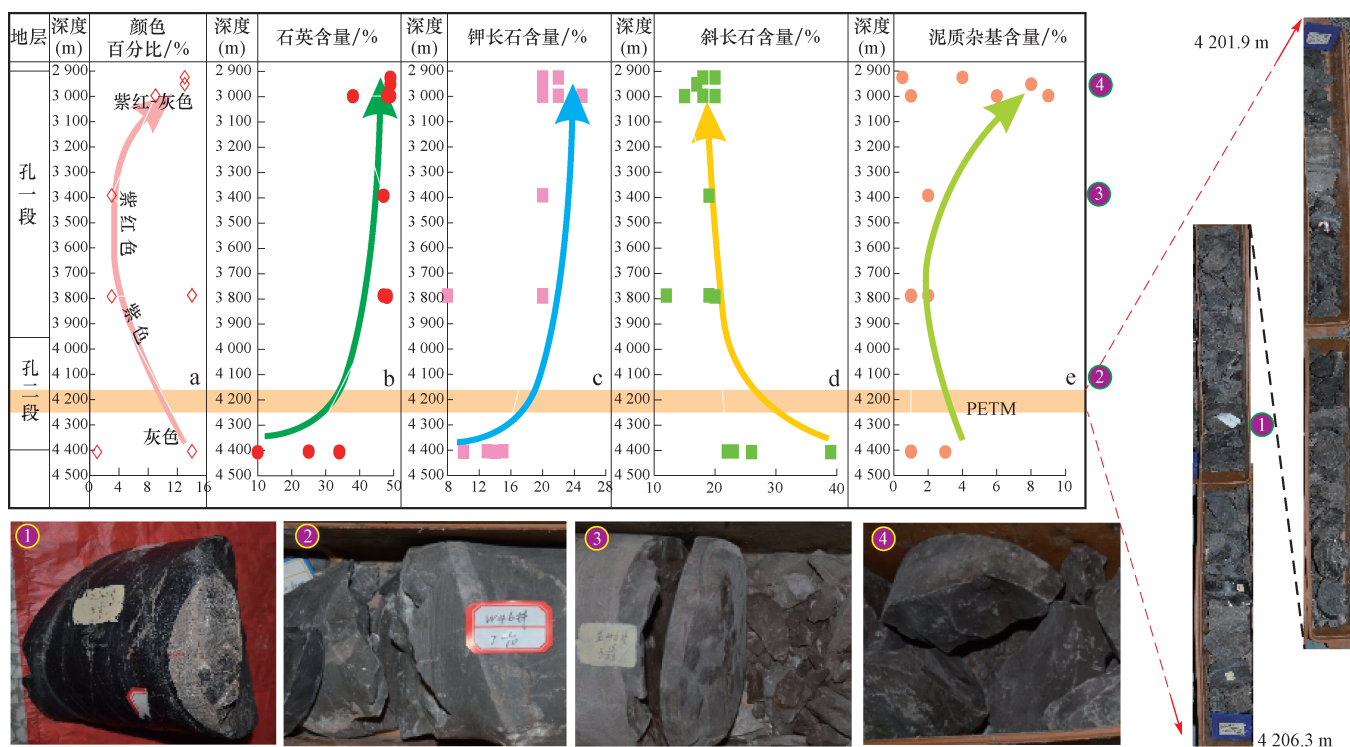


图3 东营凹陷极热气候前后岩石矿物学响应特征(W46井)

Fig. 3 Lithological and mineralogical response to the IETM in the Dongying Sag (Well W46)

a. 颜色; b. 石英含量; c. 钾长石含量; d. 斜长石含量; e. 泥质杂基含量

①极热气候时期强烈还原环境下形成的灰黑色泥岩,埋深4 205.3 m; ②极热气候时期恢复期沉积的灰色泥岩和粉砂岩,埋深4 112.6 m;

③极热气候时期恢复期增氧作用形成的紫红色泥岩,埋深3 395.8 m; ④极热气候时期恢复期增氧作用形成的紫红色泥岩,埋深2 955.3 m

指示缺氧环境,在强氧化环境下这个比值可达8^[28]。V/Cr在还原环境下,数值较大;氧化环境下,数值较小;Ni/Co值越大,代表的还原作用越强;值越小,代表的氧化作用越强。沉积岩中普遍高的V/(V+Ni)比值(均值>0.7)也指示缺氧的沉积环境^[29]。在氧化条件下,Ce³⁺易氧化成Ce⁴⁺被Fe和Mn氧化物胶体吸附而发生沉淀,湖水中Ce强烈负亏损;还原环境中,由于铁、锰氧化物溶解,Ce⁴⁺还原为Ce³⁺而被释放出来,湖水中Ce相对富集。因此,也可以利用Ce含量的变化来判别环境中的氧化还原条件^[28]。利用地球化学手段可以对湖平面进行研究,如利用微量元素特征,可以判别水体的深度^[29],Ni/Ti,Mn/Ti,Co/Ti和Sr/Ba等值,可以较好的判别水体的深度,Mn,Co和Ni等元素主要代表深水环境,而Ti元素通常出现在浅水环境,比值越大,说明水体深度越大;Sr/Ba比值越大,同样代表深度越深。

根据钻孔样品的采样情况,选取采样比较密集的W100井和W46井样品进行氧化还原条件和湖平面波动变化分析,建立了氧化还原条件和湖平面波动变化综合图(图4)。通过对比分析,主要具有以下特征。

1) 深水缓坡区还原指标高于浅水缓坡区,湖泊水

体深度指数高于浅水缓坡区。地球化学指标显示深水区(W46井)Th/U,V/Cr和V/(V+Ni)高于浅水区(W100井),说明了深水区还原性高于浅水区;深水区(W46)Ni/Ti,Co/Ti和Sr/Ba比值均高于浅水区(W100),证实了深水区还原指标整体高于浅水区(图4)。

2) 湖水深度和氧化条件有逐渐增加的趋势,但期间出现多次波动变化。①孔二段沉积时期V/Cr和V/(V+Ni)较高,指示了该时期湖泊具有较强的还原条件,总体处于缺氧状态。而Ni/Ti,Co/Ti和Sr/Ba总体具有较低的数值,表明该时期湖水深度较低,这与断陷湖盆的演化过程具有较好的耦合性,W46井P/E界限附近表现出了较强的还原性,说明了极热气候事件对湖盆水体的氧化还原界面造成了影响。②孔一段沉积期,Th/U值总体增高,V/Cr,V/(V+Ni)和Ni/Co值降低,说明该时期氧化性总体增强;W100井地球化学数据表明,尽管该井区只沉积孔一段,缺失IETM事件地层沉积,但热气候的周期性回返导致了该井区经历了3次氧化作用恢复期和2次还原期。而湖水深度指标显示,该时期Ni/Ti,Co/Ti和Sr/Ba总体表现持续增高的趋势,表明湖水深度较高,期间经历了多次湖水的波

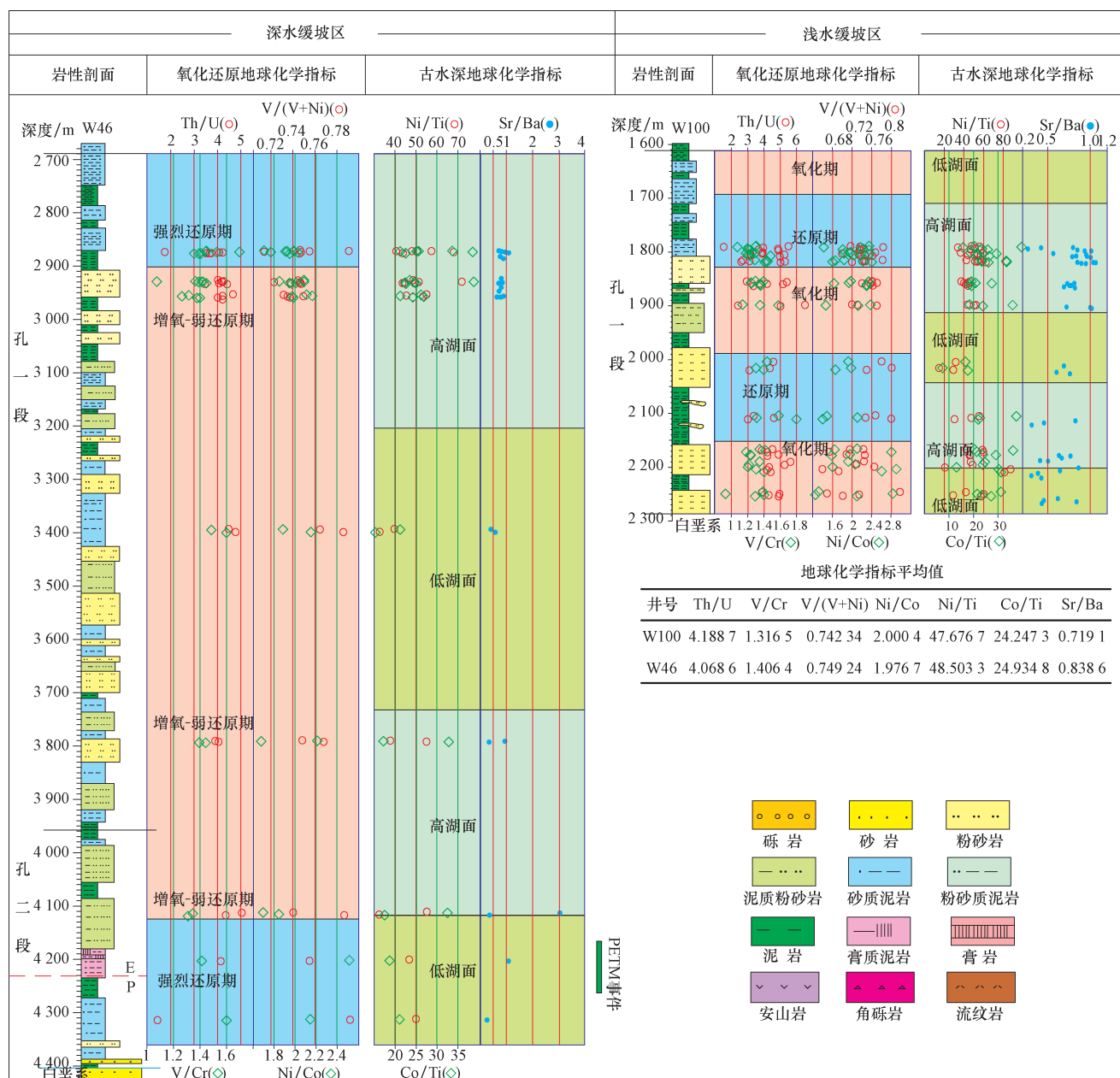


图4 东营凹陷早始新世氧化还原条件与湖平面波动变化

Fig. 4 Redox conditions and lake level fluctuation during the Early Eocene in the Dongying Sag

动变浅, W100 井地球化学指标显示, Ni/Ti , Co/Ti 和 Sr/Ba 值在该时期较低, 表明了该时期古水深总体较低。主要原因可能是在经历了全球 IETM 事件之后, 始新世早期(孔一段)进入的全球气候适宜期^[2], 空气中含氧量增加, 全球氧化作用增强, 局部降水导致湖水持续上涨, 加之热气候的间歇回返, 引起了缺氧与还原环境的周期出现, 孔一段宏观红色地层和灰色地层的韵律出现也证实了该时期氧化还原的动荡出现。

3) 水体深度不是制约氧化还原条件的唯一因素, 可能跟气候环境有关。W46 井地球化学指标表明, 古近纪早期(孔二段)为强烈还原期, 而该时期古水深指标指示了该时期具有较浅的湖泊水体, 氧化还原与水深并非

具有很好的耦合性。原因可能跟 P/E(古新统/始新统) 界线附近发生了全球极热事件(IETM), 导致大气中 CO_2 浓度增加, 气候干旱, 湖盆水体的氧化还原界面较低, 总体为缺氧环境。随着 IETM 事件的结束, 大气中含氧量增加, 湖盆水体的氧化还原界面上升, 湖盆水体总体表现为氧化环境。晚期的间歇性热气候的回返, 氧化还原界面的波动变化引起湖盆水体的氧化还原性的波动变化, 导致了氧化还原性与水体深度的不耦合。

3 古生产力与生烃环境

湖泊内植物进行光合作用时优先吸收 $^{12}\text{CO}_2$, 因此

形成的有机质含有较多的 ^{12}C ,导致岩石中有机碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值偏轻,也就是说生产力越高,生成的有机质越多, $\delta^{13}\text{C}$ 值就越低; Mo 和 U 两种元素含量与湖泊生产力具有很好的耦合关系,含量越高,生产力越强^[30-31];有机碳含量也可以作为判断古生产力的重要手段,其含量越高,古生产力高^[30]。

为了揭示东营凹陷古近纪早期断陷湖泊的古生产力状况,建立了研究区古湖泊环境不同沉积部位钻孔的有机碳含量纵向分布(图5)。①空间分布上,W46井的古生产力总体较高,而HK1井古生产力普遍偏低;SK1井生产力在孔店组出现较大的差异,断陷湖盆发育早期古生产力较高,随后出现一段时间的低生产力期,晚期出现了生产力的复苏,这种生产力的时空差异可能跟当时的气候条件和湖泊沉积部位有关。其原因可能是HK1井主要位于湖盆水体的高盐度区,不利于

生物的大规模发育,只在湖泊表层出现少量的生物群落的繁衍,生产力较低;W46井主要处于湖泊水体的较浅水部位,长期受陆源的影响,水体盐度总体较低,比较适宜生物的大量繁殖,是生物的理想生存场所。②纵向分布上,SK1井较完整的显示了从 P_1k^2 到 E_2 时期的古生产力状况,古生产力经历了古新世早期的高值,到随后的低值,再到缓慢变高,到了始新世中晚期的沙河街组,古生产力明显具有较高的含量。W46井尽管样品点较少,但是出现了类似的变化。③有机碳含量的极低值分布层段在 P/E 界线附近,与IETM事件发生的时间基本一致,这可能跟 P/E 时期的极热气候时事件有关,全球 CO_2 的增高和温度的增高,湖水的咸化,导致了大量生物的不适应,造成了古生产力出现了短暂的降低。

IETM事件之后的系列热事件间歇出现引起了湖

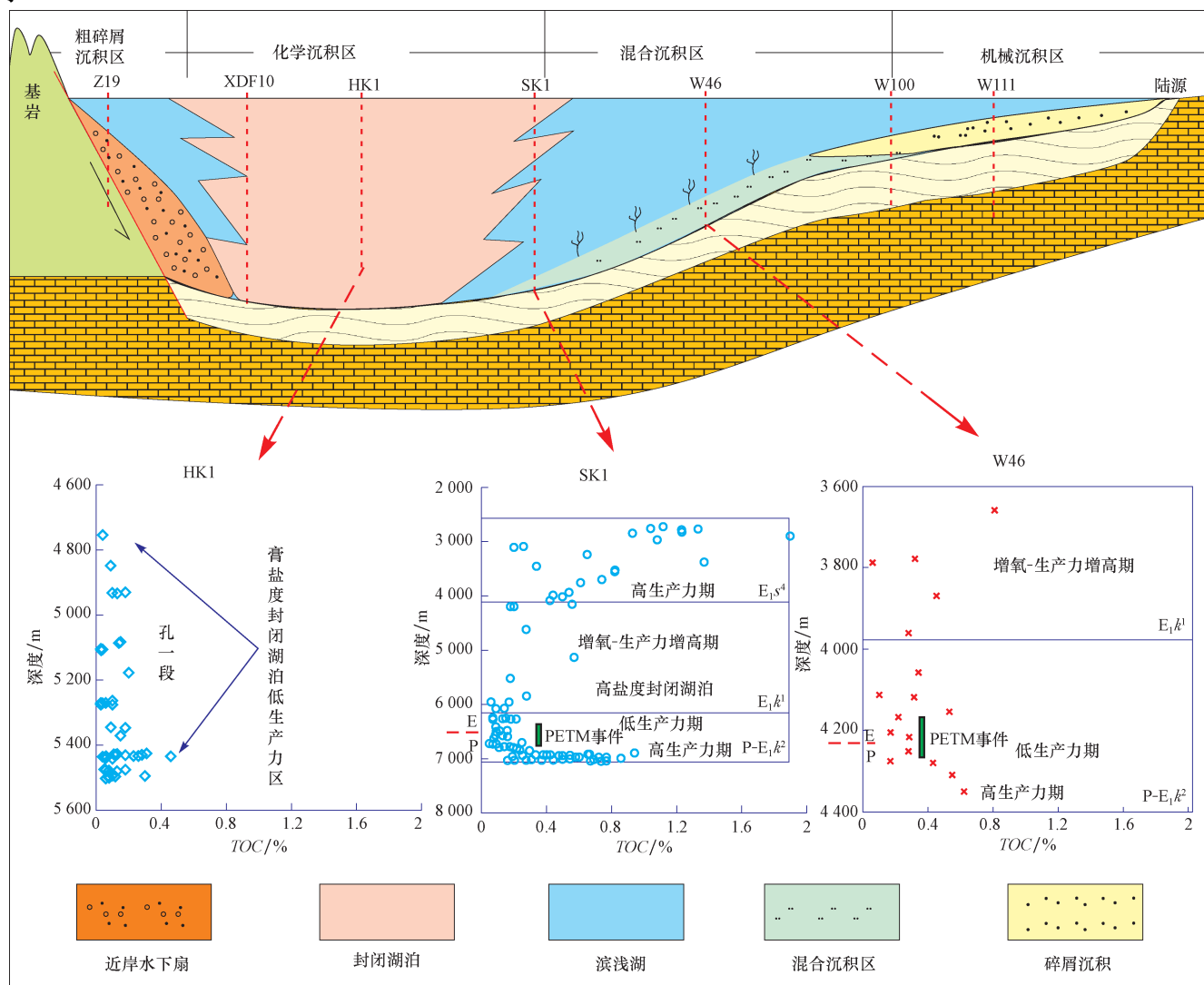


图5 东营凹陷早始新世有机碳含量(TOC)对比

Fig. 5 TOC content comparison during the Early Eocene in the Dongying Sag

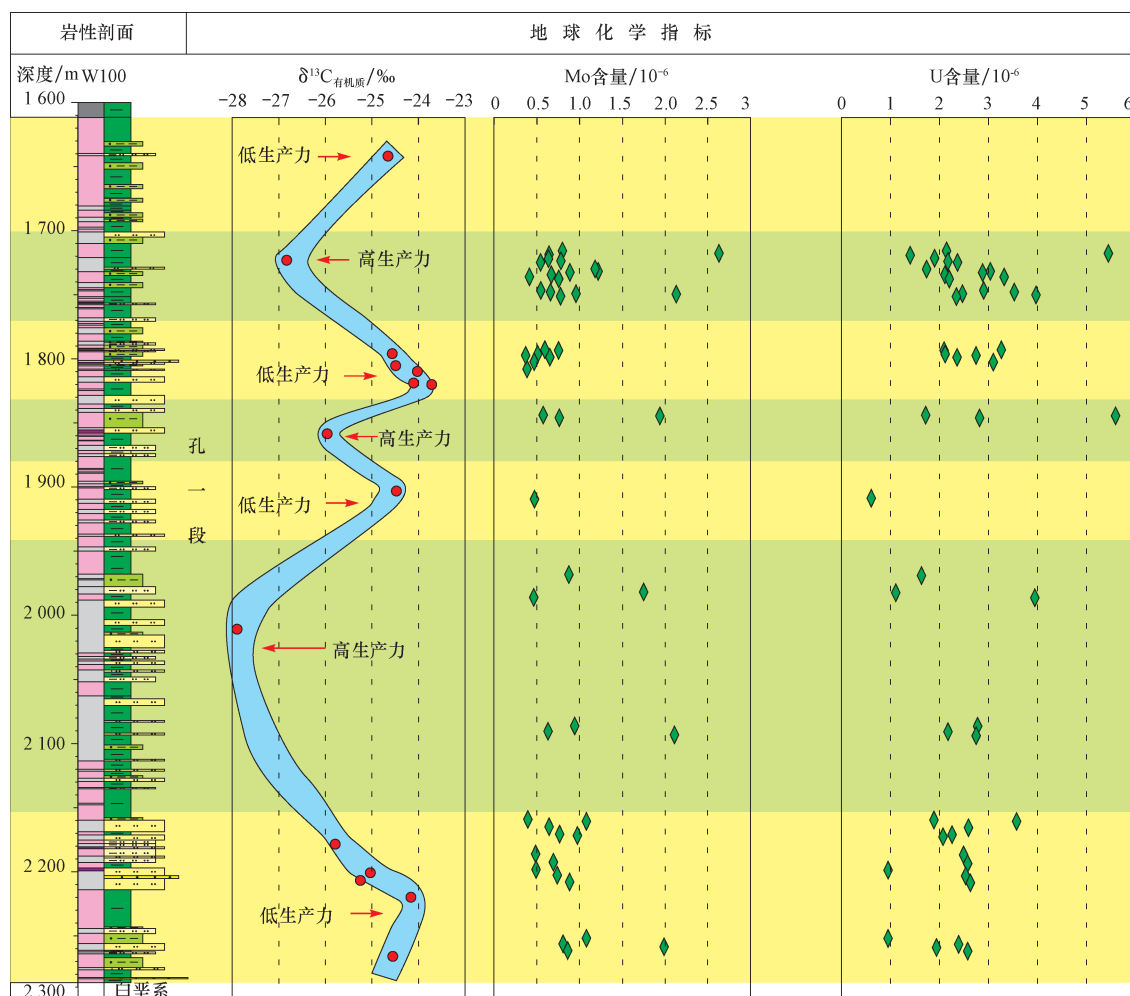


图6 东营凹陷早始新世古生产力纵向演化(W100井)

Fig. 6 Vertical evolution of paleoproductivity during the Early Eocene in the Dongying Sag(W100)

泊古生产力的波动变化,明显具有多旋回演化特征,W100井孔一段记录了IETM事件之后的古生产力变化,明显经历了7个阶段的交替变化(图6), $\delta^{13}\text{C}_{\text{有机质}}$ 介于 $-27.9\text{‰} \sim -23.71\text{‰}$ 。第一个阶段 $\delta^{13}\text{C}_{\text{有机质}}$ 值均较大,一般大于 -26‰ ,该阶段对应于较小的Mo和U含量,说明该时期生产力较低,地层岩性记录上显示了红色的氧化沉积物,也证实了该阶段生产力较低。第二阶段为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{有机质}}$ 达到了 -28‰ ,该阶段出现了较高的Mo和U元素含量,说明该阶段生产力较高,持续时间较长,说明生物活动繁盛,后期保存较好。第三阶段为生产力的再次降低,地层记录出现红色泥岩为背景,说明该时期气候干旱炎热,氧化程度高,生物生产力较低。第四个阶段出现了生产力的短暂变高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{有机质}}$ 值有所降低,Mo和U元素出现短暂升高。第五阶段为生产力达到最低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{有机质}}$ 值达到最高,Mo和U元素值出现响应的低值。第六阶段生产力短暂降低, $\delta^{13}\text{C}_{\text{有机质}}$ 值有所降低,Mo和U元素出现短暂升高,沉

积记录显示主要为灰色的泥岩,说明该时期的深水环境有利于保存生物有机质。第七个阶段为生产力最后一次降低期, $\delta^{13}\text{C}_{\text{有机质}}$ 含量较高,沉积记录主要为红色的泥岩地层,说明生产力较低。据此说明了IETM事件之后的系列热气候时期的干旱环境影响了湖盆水体的生物活动和生产力的高低。

4 讨论

东营凹陷古近纪早期的受到极热气候事件的影响非常明显,该时期正好处于新生代断陷盆地的初期,由于湖盆水体较少,广大地区主要为河流地质作用引起的冲积平原。由于极热气候的影响,造成了中低纬度地区广泛干旱少雨,风化作用比较强烈^[17],从而影响了整个湖盆的堆积过程和物质分异程度^[22]。该时期湖盆水体的性质也受到了明显的制约,水介质的氧化还原性和生产力的大小明显具有典型的特征。

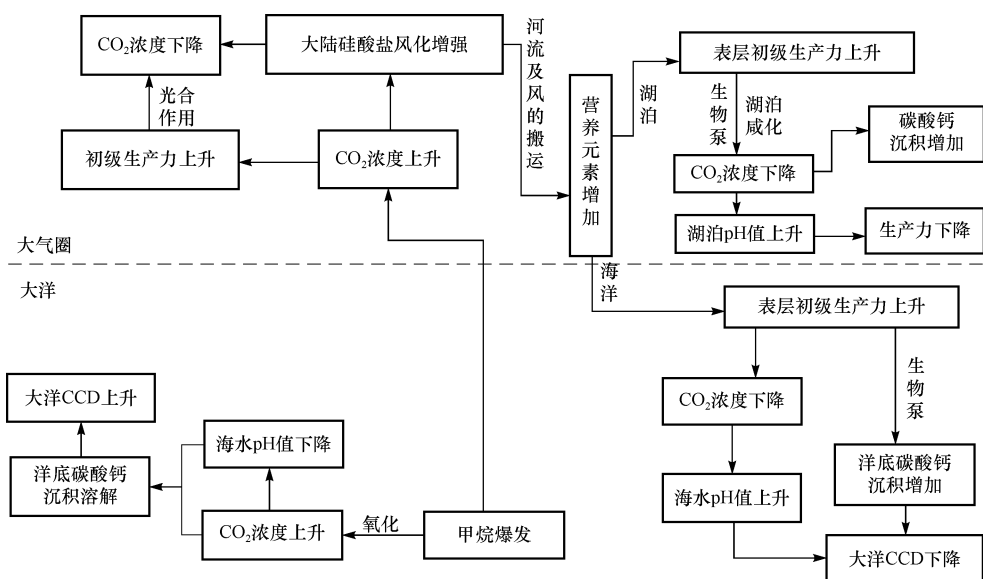


图7 IETM 时期全球碳循环简化模式(据文献[17],修改)

Fig. 7 Simplified model of global carbon cycle during the Early Eocene(modified from reference [17])

受到极热气候事件的影响,大气中的 $^{12}\text{CO}_2$ 浓度广泛增加,过量的 $^{12}\text{CO}_2$ 进入到水介质表面,导致了海洋和湖泊水介质的 HCO_3^- 增加,从而加速了海洋和湖泊水体的酸化过程^[2,17]。对于海洋来讲,CCD 界面上移,大量原始沉淀的碳酸钙溶解(图7)。而对于湖泊而言,本身无大规模碳酸盐沉淀积累,直接导致该时期碳酸钙沉淀变少,湖泊水体的酸性条件较强。尽管处于断陷湖盆的早期,湖泊水体比较浅,但是由于过量 CO_2 的存在,导致了整个沉积环境处于缺氧还原的环境,这正好与该时期的浅水环境是相反的,这种缺氧环境在W46 井的岩石矿物响应和元素地球化学响应中均得到了很好的印证。该时期的极热气候直接导致了湖平面的变化与氧化还原的“不协调性”,甚至出现了相反的演化规律。但是随着整个大陆气候的恢复,大气中的含氧量增加,沉积过程恢复到正常的水平,湖盆水体开始恢复到正常状态,甚至是含氧量的过量增加,从而形成了孔店组一段的大规模红色沉积地层,并且碳酸钙含量的增加,这点在显微镜下可以观察到孔一段砂岩中的“基底式”原生碳酸钙的含量较高^[22-26]。

尽管极热气候造成了陆地风化作用增强,营养元素增多,为生物生存提供了大量的营养元素(图7),但是对于济阳地区的断陷湖泊来讲,影响因素是非常复杂的。①断陷处于初期,湖盆水体较少,从而对极热气候响应非常灵敏,甚至是具有直接的关系;②断陷初期的断裂活动强烈,存在多个喷流点^[22],将深部热液物质带入湖泊,这导致湖泊水体并不是非常适合早期的生物生存;③极热气候导致了 CO_2 浓度的增加,这实

际上又有利于湖泊微生物的生存;④该时期的山体升高差不大,凸起发育不广,尽管北边有陈家庄凸起、南边有鲁西隆起,但是其规模和地形高差不大,风化作用增强实际上影响并不太大。因此,这4 个特点导致了济阳断陷型湖泊的生物活动具有一定的特殊性。①从SK1 井和W46 两口井的有机质含量纵向演化上看,实际上在断陷初期,具有较高的生产力,说明在该时期实际上具有非常广泛的生物活动;②IETM 时期的有机质含量较低,说明极热气候的影响在湖泊中造成了整个湖水的酸化和咸化,不适宜生物的生长,生产力普遍较低(图7),这可能还跟中低纬度地区的干旱作用有关;③而进入增氧恢复期之后,整体生产力得到了很大的提升,在经历了湖水咸化和干旱少雨之后,降雨量也有所增加,湖盆水体咸化程度逐渐缓解,生物得到了大量的爆发,尤其是在沙四段的有机质含量非常高,是研究区主要的生油层,也是致密油气的主力产层。

5 结论

1) 全球极热气候(IETM)事件严重影响了东营凹陷早古近纪时期的湖泊水体氧化还原结构和生物的活动过程。该时期湖泊水体氧化还原程度虽然与水体的深度有一定联系,但是湖泊水体深度明显不是决定氧化还原程度的唯一原因,经历了多期次的氧化还原变化,导致了湖平面的变化与氧化还原的“不协调性”,甚至出现了相反的演化规律,可能跟 IETM 事件的 CO_2 的增高而引起的氧化还原界面的波动变化有关。

2) 该时期生物活动并不活跃,生产力普遍较低,

早期生产力较高,随后迅速降到最低,在逐渐增高,该时期古湖泊生产力的演变具有多旋回变化的特点。极热的气候环境导致了湖盆水体的浓缩蒸发,形成了盐度较高的盐湖,CO₂的过量溶解,导致了湖盆水体的碳酸盐含量增加,从而在碎屑物质沉积过程中形成了碳酸钙沉积和硬石膏的化学沉积。由于早期浮游植物对¹²CO₂的吸收,会导致短暂的湖泊古生产力较高,但是随着湖盆的咸化,生物的活动存活较难,主要以旱生植物为主,古生产力降到最低,但是随着湖盆水体含氧量的增加,生物的活动得到极大的提高,生产力总体普遍增高,也导致了沙四段成为主要的生油层和致密油气的主力产层。

参 考 文 献

- [1] J C Zachos, M W Wara, S Bohaty, et al. A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene-Eocene thermal maximum[J]. *Science*, 2003, 302(5650): 1551–1554.
- [2] J Zachos, M Pagani, L Sloan, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686–693.
- [3] B S Cramer, J R Toggweiler, J D Wright, et al. Ocean overturning since the Late Cretaceous: inferences from a new benthic foraminiferal isotope compilation[J]. *Paleoceanography*, 2009, 24(4): 43–47.
- [4] S Morón, J M Feinberg, C Jaramillo, et al. Climate change during the Early Paleogene in the Bogotá Basin (Colombia) inferred from paleosol carbon isotope stratigraphy, major oxides, and environmental magnetism[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2013, 388(3): 115–127.
- [5] 刘志飞, 胡修棉. 白垩纪至早第三纪的极端气候事件[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(5): 681–690.
Liu Zhifei, Hu Xiumian. Extreme climate events in the Cretaceous and Paleogene[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(5): 681–690.
- [6] J P Kennett, L D Stott. Abrupt deep-sea warming, paleo-oceanographic changes and benthic extinctions at the end of the Paleocene[J]. *Nature*, 1991, 353(6341): 225–229.
- [7] J Zachos, M Pagani, L Sloan, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 64 Ma to Present[J]. *Science*, 2001, 292(5517): 686–693.
- [8] C M John, N R Banerjee, F J Longstaffe, et al. Clay assemblage and oxygen isotopic constraints on the weathering response to the Paleocene-Eocene thermal maximum, east coast of North America[J]. *Geology*, 2012, 40(7): 591–594.
- [9] 朱敏, 丁仲礼, 王旭, 等. 南阳盆地 PETM 事件的高分辨率碳同位素记录[J]. *科学通报*, 2010, 55(24): 2400–2405.
Zhu Ming, Ding Zhongli, Wang Xu, et al. High-resolution carbon isotope record for the Paleocene-Eocene thermal maximum from the Nanyang basin, central China[J]. *Chinese Sci Bulletin*, 2010, 55(24): 2400–2405.
- [10] B S Cramer, J R Toggweiler, J D Wright, et al. Ocean overturning since the Late Cretaceous: inferences from a new benthic foraminiferal isotope compilation[J]. *Paleoceanography*, 2009, 24(4): 43–47.
- [11] M García, G Ercilla, B Alonso, et al. Sediment lithofacies, processes and sedimentary models in the Central Bransfield Basin, Antarctic Peninsula, since the Last Glacial Maximum[J]. *Marine Geology*, 2011, 290(1–4): 1–16.
- [12] C B Wan, D H Wang. Trend of Santonian (Late Cretaceous) atmospheric CO₂ and global mean land surface temperature: Evidence from plant fossils[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(9): 1138–1145.
- [13] J F Neff, J W Hagadorn, D Sunderlin, et al. Sedimentology, facies architecture and chemostratigraphy of a continental high-latitude Paleocene-Eocene succession-The Chickaloon Formation, Alaska[J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 240(1): 14–29.
- [14] D E Penman, B Hönisch, R E Zeebe, et al. Rapid and sustained surface ocean acidification during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum[J]. *Paleoceanography*, 2014, 29(5): 357–369.
- [15] H Kimura, Y Watanabe. Ocean anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary[J]. *Geology*, 2001, 29(1): 995–998.
- [16] P K Bijl, S Schouten, A Sluijs, et al. Early Palaeogene temperature evolution of the southwest Pacific Ocean[J]. *Nature*, 2009, 461(7265): 776–778.
- [17] 赵玉龙, 刘志飞. 古新-始新世最热事件对地球表层循环的影响及其触发机制[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(4): 341–349.
Zhao Yulong, Liu Zhifei. The Impacts of the Paleocene-Eocene Thermal Maximum (PETM) Event on earth surface cycles and its trigger mechanism[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(4): 341–349.
- [18] J C Zachos, G R Dickens, R E Zeebe. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics[J]. *Nature*, 2008, 451(2008): 279–283.
- [19] T J Bralower, D C Kelly, R M Leckie. Biotic effects of abrupt Paleocene and Cretaceous climate events[J]. *JOIDES Journal*, 2002, 28(1): 29–34.
- [20] 陈祚伶, 丁仲礼. 古新世-始新世极热事件研究进展. 第四纪研究[J], 2011, 31(6): 937–950.
Chen Zuolin, Ding Zhongli. A review on the Paleocene-Eocene thermal maximum[J]. *Quaternary sciences*, 2011, 31(6): 937–950.
- [21] 冯有良, 周海民, 任建业, 等. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 156–1376.
Feng Youliang, Zhou Haimin, Ren Jianye, et al. Paleogene sequence stratigraphy in the east of the Bohai Bay Basin and its response to structural movement. *Sci Sin Terrae*, 2010, 40(10): 1356–1376.
- [22] 谭先锋, 王佳, 雷丽丹, 等. 早古近纪陆相断陷型湖泊物质分异作用及其对“PETM”事件的响应: 以济阳坳陷孔店组为例[J]. *地球科学*, 2016, 41(11): 1893–1908.
Tan Xianfeng, Wang Jia, Lei Lidan, et al. Material differentiation and its response to the “PETM” event in continental fault Lake during the Early Paleogene period—Take the Kongdian Fm. of Paleogene in Jiyang Depression for Example[J]. *Earth Science*, 2016, 41(11): 1893–1908.

- Fan Junxuan, Michael J M, Chen Xu, et al. South China Ordovician Silurian Longmaxi group black graptolite shale of biostratigraphy [J]. Science China: Earth Sciences, 2012, 42(1): 130–139.
- [15] 张正顺, 胡沛青, 沈娟, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩矿物组成与有机质赋存状态[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 766–771.
- Zhang Zheng-shun, Hu Pei-qing, Shen Juan, et al. Mineral compositions and organic matter occurrence modes of Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 766–771.
- [16] 魏祥峰, 刘若冰, 张廷山, 等. 页岩气储层微观孔隙结构特征及发育控制因素——以川南—黔北 XX 地区龙马溪组为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 1048–1059.
- Wei Xiangfeng, Liu Ruobing, Zhang Tingshan, et al. Micro-pores structure characteristics and development control factors of shale gas reservoir: A case of Longmaxi Formation in XX area of southern Sichuan and northern Guizhou [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1048–1059.
- [17] 归榕, 王永平. 基于常规测井数据计算储层岩石力学参数——以鄂尔多斯盆地上古生界为例[J]. 地质力学学报, 2012, 18(4): 418–424.
- Gui Rong, Wan Yongping. Rock mechanics parameter calculation based on conventional logging data: A case study of upper Paleozoic in Ordos basin [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18(4): 418–424.
- [18] 王濡岳, 丁文龙, 王哲, 等. 页岩气储层地球物理测井评价研究现状[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(1): 228–241.
- Wang Ruyue, Ding Wenlong, Wang Zhe, et al. Progress of geophysical well logging in shale gas reservoir evaluation [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(1): 228–241.
- [19] 谢庆明, 程礼军, 刘俊峰, 等. 渝东南黔江地区龙马溪组页岩气储层测井解释评价研究[J]. 地球物理进展, 2014, 29(3): 1312–1318.
- Xie Qingming, Cheng Lijun, Liu Junfeng, et al. Well logging interpretation and evaluation of gas shale reservoir at Longmaxi Formation in Qianjiang area of Southeast of Chongqing area [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(3): 1312–1318.
- [20] 闫建平, 蔡进功, 赵铭海, 等. 测井信息用于层序地层单元划分及对比研究综述[J]. 地层学杂志, 2009, 33(4): 441–450.
- Yan Jianping, Cai Jingong, Zhao Minghai, et al. Advances in the study of sequence stratigraphic division and correlation using well log information [J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(4): 441–450.
- [21] 伍梦婕, 钟广法, 李亚林, 等. 四川盆地龙马溪组页岩气储层地震—测井层序分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 51–55.
- Wu Mengjie, Zhong Guangfa, Li Yalin, et al. Seismic logging sequence analysis of Longmaxi shale gas reservoir in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5): 51–55.

(编辑 张玉银)

(上接第48页)

- [23] 谭先锋, 田景春, 黄建红, 等. 陆相碎屑岩旋回沉积记录中的物质响应及聚集规律——以济阳拗陷王家岗地区古近系孔店组为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 332–341.
- Tan Xianfeng, Tian Jinchun, Huang Jianhong, et al. Material response and accumulation law in the Cyclic sedimentation record of Continental clastic-To the Jiyang Depression Wangjiagang Paleogene Kongdian as an example [J]. Oil and Geology, 2013, 34(3): 332–341.
- [24] 谭先锋, 蒋艳霞, 李洁, 等. 济阳拗陷古近系孔店组高频韵律旋回沉积记录及成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(1): 61–72.
- Tan Xianfeng, Jiang Yanxia, Li Jie, et al. Sedimentary record of high frequency cycles and its origin of kongdian formation of Paleogene in jiyang depression [J]. Oil and Geology, 2015, 36(1): 61–72.
- [25] 谭先锋, 田景春, 林小兵, 等. 陆相断陷盆地深部碎屑岩成岩演化及控制因素: 以东营断陷盆地古近系孔店组为例[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 934–944.
- Tan Xianfeng, Tian Jinchun, Lin Xiaobin, et al. Diagenetic evolution and controlling factors of deep-seated clastic rocks in Terrestrial Fault-depressed Basin [J]. Geoscience, 2010, 24(5): 934–944.
- [26] 谭先锋, 冉天, 罗龙, 等. 滨浅湖环境中“砂—泥”沉积记录及成岩作用系统——以济阳拗陷古近系孔店组为例[J]. 地球科学进展, 2016, 31(6): 615–633.
- Tan Xianfeng, Ran Tian, Luo Long, et al. The “sand-mud” sedimentary record and its Diagenetic system in shore-shallow Lacustrine—A case study of Eocene Kongdian Formation in Jiyang Depression [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(6): 615–633.
- [27] 韦恒叶. 古海洋生产力与氧化还原指标[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(2): 76–88.
- Wei Hengye. Ancient marine productivity and redox index [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(2): 76–88.
- [28] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993, 18–31.
- Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary geochemistry and environmental analysis [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993, 18–31.
- [29] 常华进, 储雪蕾, 冯连君, 等. 氧化还原敏感微量元素对古海洋沉积环境的指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(1): 91–99.
- Chang Huajin, Chu Xuelei, Feng Lianjun, et al. The indicative significance of redox sensitive trace elements to the paleo marine sedimentary environment [J]. Geological Review, 2009, 55(1): 91–99.
- [30] 尹秀珍, 万晓樵, 司家亮. 松辽盆地 G-12 井晚白垩世青山口组沉积时期古湖泊学替代指标分析[J]. 地质学报, 2008, 82(5): 676–682.
- Yin Xiuzhen, Wan Xiaoqiao, Si Jialiang. Paleolimnological Proxies of Late Cretaceous Qingshankou Sedimentary Period from Well G12 in Songliao Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(5): 676–682.
- [31] 刘招君, 孟庆涛, 柳蓉. 古湖泊学研究——以桦甸断陷盆地为例[J]. 沉积学报, 2012, 28(5): 917–925.
- Liu Zhaojun, Meng Qingtao, Liu Rong. Paleolimnology study: Taking Huadian fault basin as an example [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 28(5): 917–925.

(编辑 董立)