

天然气地球科学
Natural Gas Geoscience
ISSN 1672-1926, CN 62-1177/TE

《天然气地球科学》网络首发论文

题目：高频层序格架内富有机质页岩沉积特征及其主控因素——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩为例

作者：刘方凯，刘小平，赵贤正，金凤鸣，姜文亚，官全胜，孙彪，盛开

收稿日期：2025-02-05

网络首发日期：2025-06-10

引用格式：刘方凯，刘小平，赵贤正，金凤鸣，姜文亚，官全胜，孙彪，盛开. 高频层序格架内富有机质页岩沉积特征及其主控因素——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩为例[J/OL]. 天然气地球科学.
<https://link.cnki.net/urlid/62.1177.TE.20250609.1452.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.11764/j.issn.1672-1926.2025.05.005

高频层序格架内富有机质页岩沉积特征及其主控因素
——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段湖相页岩为例

刘方凯^{1,2}, 刘小平^{1,2}, 赵贤正⁴, 金凤鸣³, 姜文亚³, 官全胜³, 孙彪^{1,2}, 盛开³

(1.油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249;

2.中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3.中国石油大港油田公司天津 300280;

4.中国石油天然气集团有限公司咨询中心, 北京 100724)

摘要: 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段发育一套富有机质页岩层系, 是目前页岩油勘探的关键层段, 然而, 由于缺乏高精度层序格架的约束, 页岩沉积受控因素尚不明确。以沧东凹陷 G108-8 井为研究对象, 对 GR 测井数据进行小波变换分析, 建立了六级尺度下的高频层序地层格架。综合利用地球化学测试数据和 X 射线矿物衍射资料, 系统研究了高频层序内部矿物分布特征、有机地球化学特征、页岩沉积环境及其主控因素, 建立了古气候驱动下的页岩沉积组合模式。结果表明: ①孔二段富有机质页岩层系共划分为 21 个六级层序 (SQ1-SQ21), 依据沉积环境演变特征划分为 3 个沉积阶段: 快速湖侵期 (SQ1-SQ6)、振荡湖侵期 (SQ7-SQ17) 以及稳定高位期 (SQ18-SQ21)。页岩类型以长英质页岩、灰云质页岩和混合质页岩为主, 有机质类型以 I 型和 II₁ 型为主, 整体进入生油窗阶段。②页岩沉积过程中, 有机质富集和矿物组成受古气候控制。古气候作为主控因素, 通过驱动古水深、古生产力、古氧化还原条件及陆源碎屑输入控制了有机质富集; 同时通过控制陆源碎屑输入影响了长英质矿物、黏土矿物占比, 通过控制古盐度影响碳酸盐矿物占比。③在高频层序格架约束下, 孔二段页岩发育 A-D4 种组合模式: A 型 (快速湖侵期/振荡湖侵早期)、B 型 (快速湖侵期/稳定高位后期)、C 型 (振荡湖侵期) 和 D 型 (振荡湖侵早期), 据此建立了古气候驱动下的页岩沉积组合模式。

收稿日期: 2025-02-05; 修回日期: 2025-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目“辉绿岩侵入作用对陆相页岩油源储系统的影响机理研究——以苏北盆地为例”(编号: 42072150)资助.

作者简介: 刘方凯(1999-), 男, 安徽安庆人, 硕士, 主要从事油气地质勘探研究. Email: vm2892@163.com.

通信作者: 刘小平(1971-), 男, 安徽无为, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事石油地质学方面的研究. Email: liuxiaoping@cup.edu.cn.

关键词：高频层序；孔二段；页岩油；沉积特征；主控因素

中图分类号：TE122.1

0 引言

近年来，随着储层表征与水力压裂技术的突破，兼具优质烃源岩特征与有利储集岩性的富有机质页岩层系越来越受到各界重视，其巨大油气资源潜力得到证实。页岩通常由黏土矿物、陆源碎屑矿物、碳酸盐岩矿物、湖盆自生矿物以及有机质组成^[1]，页岩类型是决定页岩油勘探开发中储层物性特征与完井质量的关键因素^[2-3]。页岩类型研究中早期广泛应用的分类方案是基于矿物组成的三端元图解法^[4]，然而，由于其划分因素单一，在沉积环境复杂多变的盆地中难以有效指导油气勘探研究。因此，为满足细粒沉积学研究和非常规油气勘探的需求，页岩分类方案逐渐从单因素向多因素发展。目前，基于有机质含量（TOC）、矿物组成及其来源等参数研究和评价页岩已成为研究的主流。国内学者姜在兴等^[5]首次在矿物相对含量分类基础上，引入 TOC 作为三端元划分方案：以 2%和 4%作为界限将有机质区分为低、中、高三级；以 50%矿物含量为界限划分为灰岩和粘土岩两类，共区分出 6 种不同的岩石类型。X 射线衍射（XRD）分析是目前岩石学研究的主要测试手段之一，其具有测试成本较低且测试速度快的优点，被广泛应用于岩石矿物特征研究中。鄢继华等^[6]基于 XRD 分析数据，以长英质矿物、碳酸盐矿物和黏土矿物为端元，将细粒沉积岩划分为粘土岩、碳酸盐岩、粉砂岩、细粒混合沉积岩 4 类。针对特殊地质背景，如吉木萨尔凹陷芦草沟组发育大量火山相关的矿物，蕙克来等^[7]进一步提出以矿物来源为划分依据，采用陆源碎屑、碳酸盐矿物和火山碎屑为新三端元的划分方案。

研究表明，海相页岩沉积普遍受海平面控制。在地层层序格架中，页岩通常发育于海侵体系域（TST）或早期高位体系域（EHST），并在不同体系域中表现出差异分布特征。其主要受古气候、物源和湖平面的控制，而受构造旋回和突发性事件的影响较小^[8]。然而，不同于海相页岩，陆相页岩沉积环境变化频繁，其形成过程受到多种因素制约，因此，高频层序地层学研究对研究陆相细粒沉积岩非常重要。在常规层序地层学研究中，页岩往往以“均质”形式存在。基于地震反射终止关系和岩性宏观非均质性的常规层序划分方法，已难以满足

细粒沉积岩高频层序划分的需求。

渤海湾盆地孔二段富有机质页岩层系展现出了良好的页岩油潜力。作为沧东凹陷页岩油主要的勘探层系，孔二段发育连续优质烃源岩。前人针对孔二段的沉积特征、页岩油形成潜力及甜点分布等方面开展了相当深入的研究^[9-12]。随着勘探工作的深入，目前孔二段研究仍存在以下关键问题：现有层序划分方案将富有机质页岩段分为 11 个五级层序（平均厚度约 30 m），但其划分精度仍有待提升^[11,13-14]；虽然孔二段页岩有机质富集特征方面已有众多研究成果，但矿物沉积与古环境的关系仍缺乏进一步的深入研究^[13-14]。本文研究以沧东凹陷孔二段富有机质页岩为研究对象，系统分析了高频层序格架内页岩纵向非均质分布特征，阐明高频层序格架约束下的沉积主控因素，建立页岩组合发育模式。以期查明有机质富集及矿物沉积机理，为页岩油甜点精准预测提供理论依据。

1 地质背景

渤海湾盆地整体面积约 $2 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，是我国东部重要的含油气盆地之一。该盆地地跨北京、天津两市，向北延伸至渤海海域。盆地内部沉积构造单元分为辽河拗陷、渤中拗陷、济阳拗陷、黄骅拗陷、冀中拗陷以及临清—东濮拗陷^[9-14]。黄骅拗陷位于渤海湾盆地中部，北临燕山褶皱带，东临渤中拗陷，南临济阳拗陷，西临冀中拗陷[图 1（a）]。沧东凹陷作为黄骅拗陷南部的一个次级构造单元，夹持于孔店凸起、沧县隆起、徐黑凸起与东光凸起之间，总地质面积约 4700 km^2 ，勘探面积约 1760 km^2 ，为黄骅拗陷内第二大富油气凹陷。该凹陷根据构造特征可进一步划分为孔西斜坡、孔东斜坡、南皮斜坡、孔东斜坡及舍女寺断鼻带等 5 个次级构造单元，是大港油田页岩油气勘探的重点区域。研究区重点探井 G108-8 井位于孔东断层附近，是一口为评价页岩油储层而部署的全取心井[图 1（b）]。

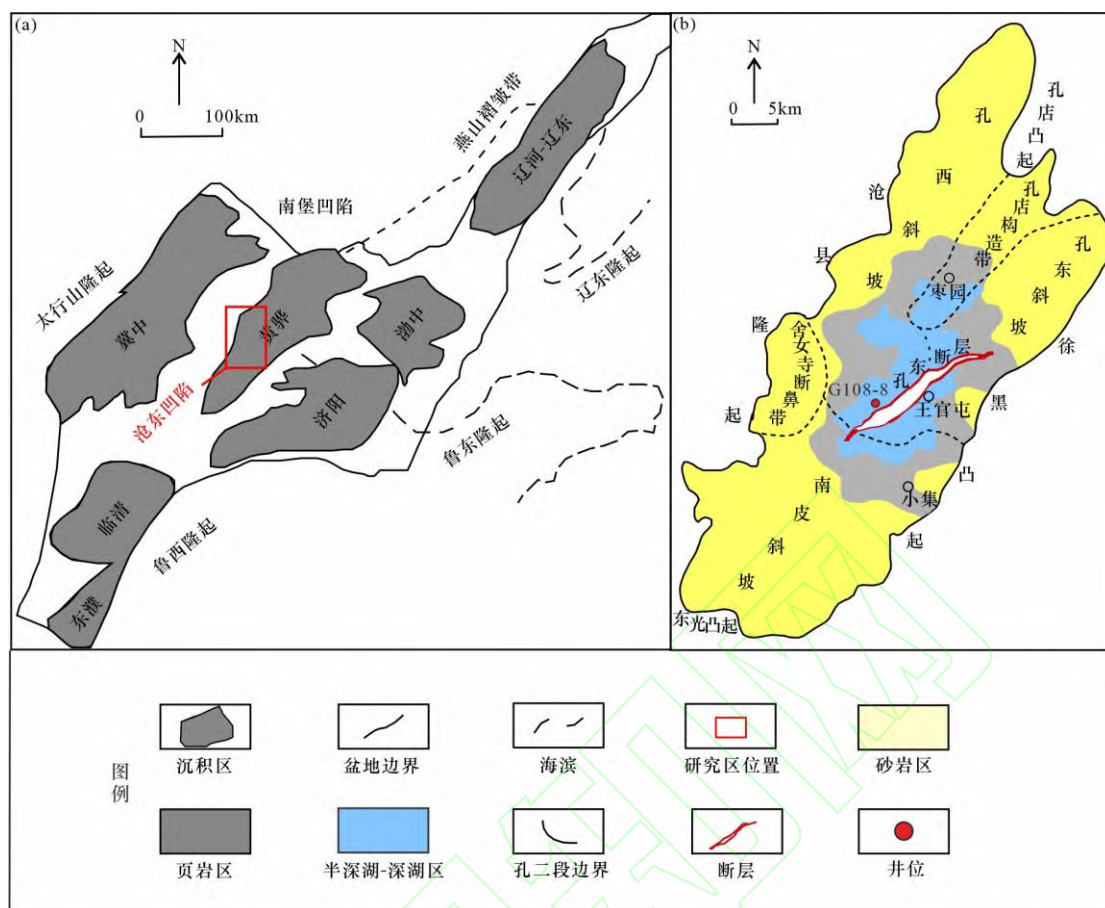


图 1 沧东凹陷地质背景图

Fig.1 Geological background map of the Cangdong Sag

(a) 研究区地理位置图; (b) 研究区构造平面图

2 样品与实验

本研究以大港油田在沧东凹陷部署的重点取心井 G108-8 井为研究对象。作为区域标准井，G108-8 井实现了孔二段 (E_{k2}) 的完整取心，连续取心长度达 495m，平均收获率 99.2%，系统揭示了孔二段页岩纵向岩性组合特征。基于该井获取的高质量岩心资料，结合配套实验分析数据取得的研究成果，对认识孔二段地质特征具有重要参考价值。

本文研究基于 G108-8 井系统采集的 1208 块页岩样品，采用等密度-变密度联合采样法，在中国石油大学（华东）深层油气全国重点实验室完成测试。其中，全部样品 1208 块进行了 X 射线衍射 (XRD) 矿物组成分析和有机地球化学测试，178 块样品同时开展了常/微量元素地球化学测试，实验数据覆盖整个孔二段页岩层系。

3 高频层序格架内部特征

3.1 高频层序地层格架的建立

3.1.1 高频层序划分方法

近年来，小波变换方法在地层划分研究中得到广泛应用^[10]。自然伽马测井（GR）对有机质和泥质含量具有显著响应特征，可以有效反映湖平面的升降变化^[9,15-16]。页岩层系 GR 值纵向波动幅度小，但经过小波变换分解，可以转换为不同尺度的振荡波。不同尺度的振荡波可以有效反映相应尺度下的湖平面变化过程^[17]。本文研究通过 MATLAB 小波变换工具，将 G108-8 井 GR 测井曲线分解为 12 条不同的小波（图 2），经对比发现，d10-d8 小波曲线与前人基于地球化学指标及测井参数划分的三-五级层序具有良好对应关系。因此，在前人已建立的三一五级层序格架基础上，本文研究采用 d6 小波在五级层序内部开展次级高频层序的识别与划分。

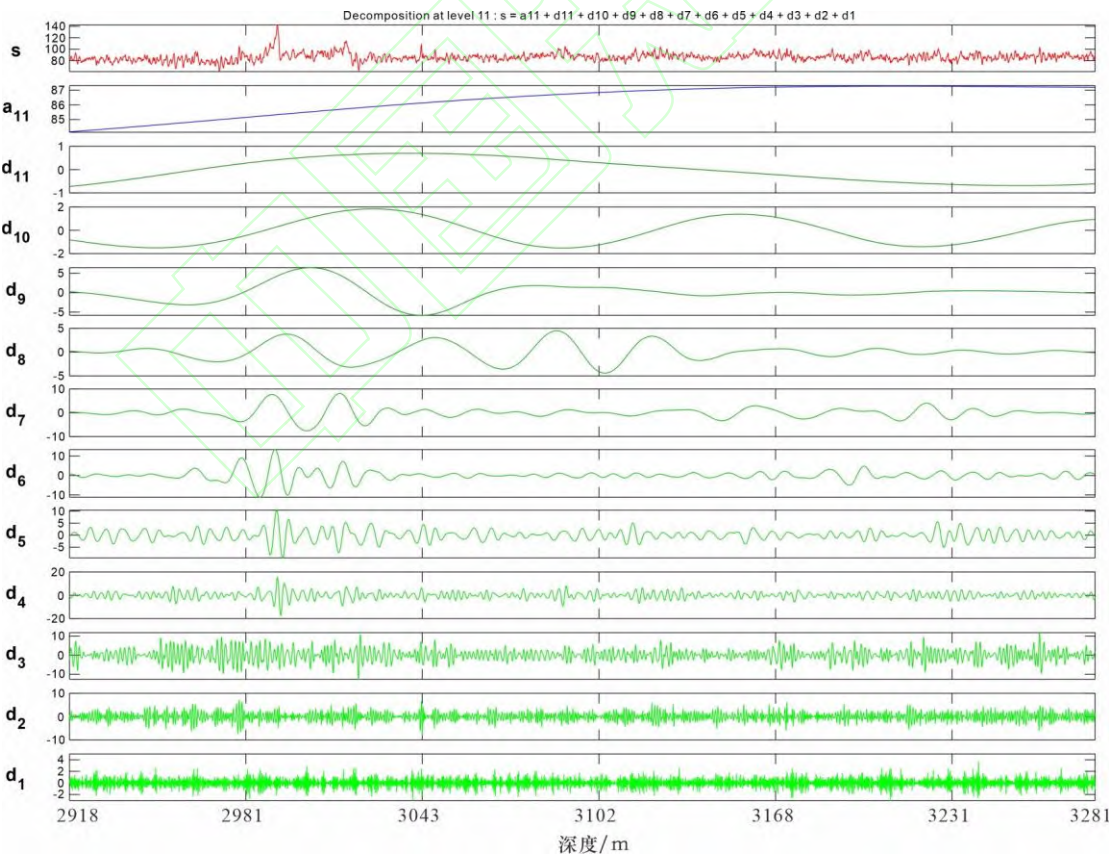


图 2 沧东凹陷孔二段小波变换

Fig.2 Wavelet transform analysis of the Ek₂ in the Cangdong Sag

3.1.2 高频层序划分结果

EMBRY 等^[18]提出的 T-R 层序理论认为：层序是一次完整的海侵事件的体现。一个完整的层序应由海侵旋回和海退旋回组成，层序以复合面为界，包括向盆地边缘的不整合面和向海方向的最大海泛面。该理论在陆相页岩研究中得到了广泛应用^[19-20]。基于 T-R 旋回理论，本研究采用小波变换方法，将 d6 小波尺度下观测到的完整的湖进-湖退旋回视为一个六级层序。同时，赵贤正等人^[11,13]研究证实了 X 射线矿物衍射及 TOC 数据与 T-R 旋回存在显著的响应关系，可以作为高频层序界面识别的辅助依据。综合上述方法，本文研究将孔二段富有机质页岩划分为 21 个六级层序（SQ1-SQ21），各层序界面特征显著（图 3）。

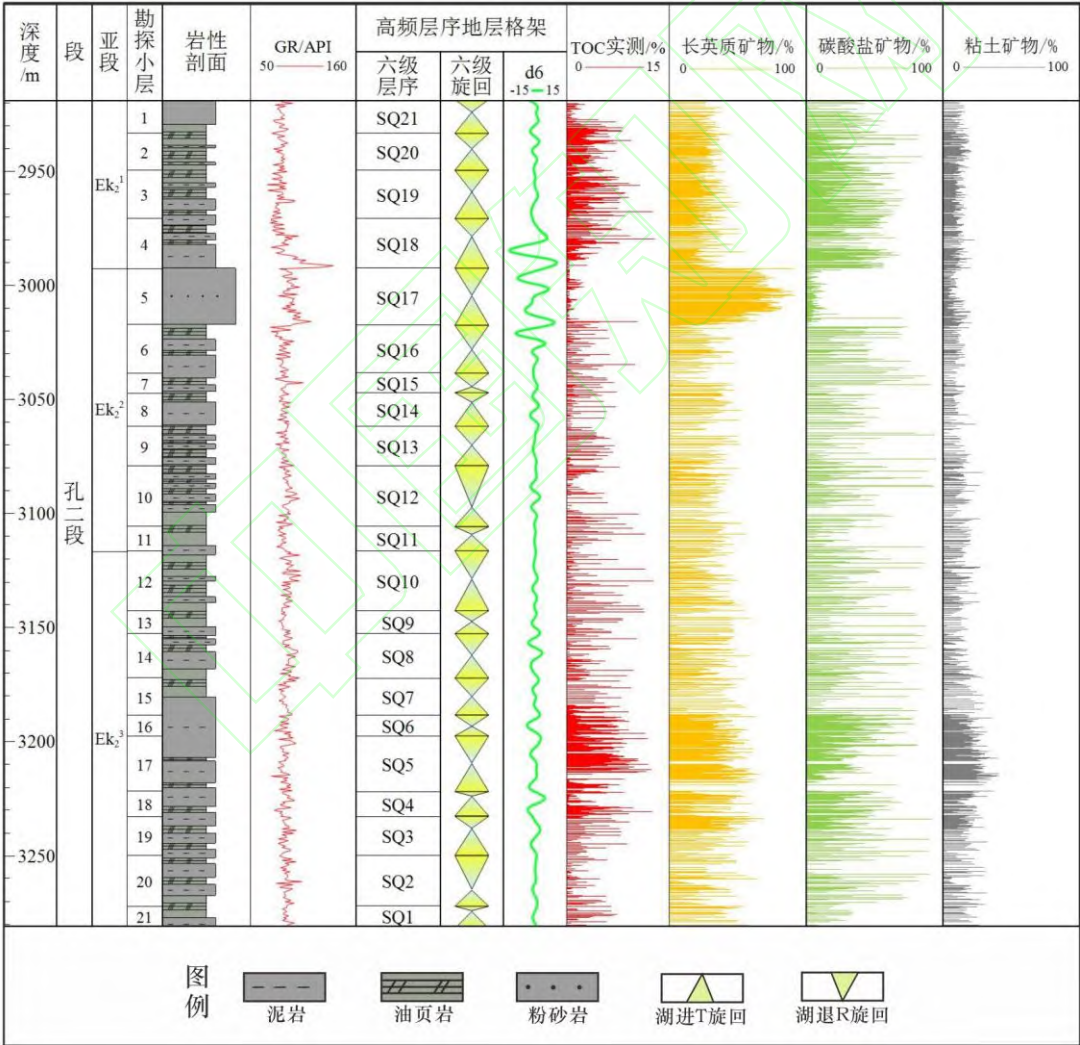


图 3 沧东凹陷孔二段富有机质页岩段高频层序划分结果

Fig.3 High-frequency sequence division results of the organic-rich shale interval in the Ek₂ of the Cangdong Sag

3.2 高频层序内部特征

3.2.1 矿物组分特征

基于高频层序划分结果，本文研究以六级层序为评价单元系统评价了孔二段矿物组成特征：孔二段主要矿物为长英质矿物、碳酸盐矿物及黏土矿物，长英质矿物含量为1%~92%（平均为36.57%）；碳酸盐矿物含量为0%~95%（平均为32.66%）；黏土矿物含量为1%~41%（平均为14.56%）。在六级层序的约束下，孔二段矿物组成呈现明显的旋回性分布[图4（a）]。除SQ17层序内部因重力流成因砂岩发育导致长英质矿物含量异常增高外，孔二段矿物垂向上整体表现出如下特征：长英质矿物呈“减少—增加”的旋回性变化；碳酸盐矿物旋回变化特征与长英质矿物相反，表现出“增加—减少”的变化趋势；黏土矿物演化趋势与长英质矿物类似，指示这2类矿物主要来源可能相同。与东部盆地其余富油气凹陷不同的是，方沸石在孔二段广泛分布，纵向上其含量由底到顶呈上升趋势。张悦等^[21]通过矿物XRD衍射实验，测得方沸石含量为0%~59%，平均值为14.43%，认为其广泛分布对储层储集性能的改善具有重要意义。

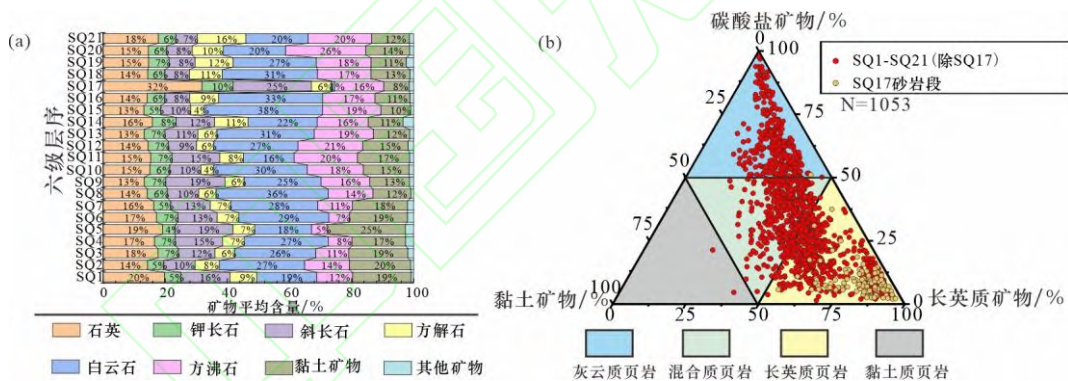


图4 高频层序格架内矿物组成特征

Fig.4 Mineral composition characteristics within the high-frequency sequence framework

(a) 孔二段矿物含量分布图；(b) 页岩组分三端元图

基于矿物组成特征，本文研究以50%相对矿物含量为界限，将孔二段富有机质页岩划分为4类：长英质页岩（石英+长石类矿物>50%）、灰云质页岩（方解石+白云石>50%）、黏土质页岩（黏土矿物含量>50%）以及混合质页岩（三类矿物含量均<50%）。除SQ17砂岩段外，孔二段主要发育长英质页岩、灰云质页岩和混合质页岩，黏土质页岩仅在部分层序零星分布[图4（b）]。

3.2.2 有机地球化学特征

(1) 有机质丰度

有机质丰度被广泛应用于评价油气资源量，基于高频层序划分结果，根据《烃源岩地球化学评价方法》(SY/T 5735—2019)，采用总有机碳 (TOC) 含量作为评价指标^[22]，系统评价孔二段页岩有机质丰度特征。孔二段 TOC 含量为 0.14%~12.92% (平均为 3.50%)，属典型陆相富有机质页岩。以 TOC 含量 1% 和 2% 为分级标准进行评价，孔二段 TOC 其纵向分布呈现显著非均质性，整体呈“增—减—增”的旋回性变化。除 SQ17 砂岩段 TOC 含量较低，其余层序均显示富有机质特征 (图 5)。

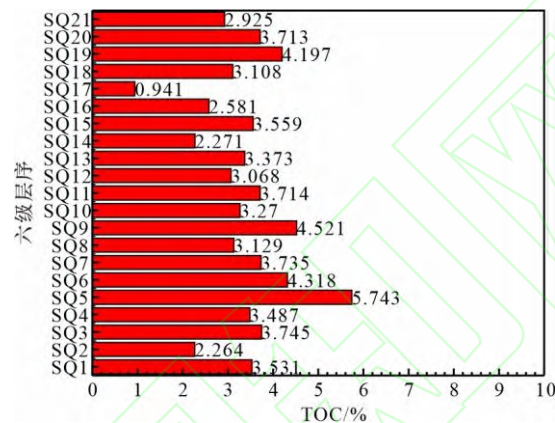


图 5 高频层序内部 TOC 分布特征

Fig.5 TOC distribution characteristics within high-frequency sequences

(2) 有机质类型

有机质的类型是评估烃源岩质量的关键指标，对生烃潜力和生成产物有着重要影响，不同类型有机质的生烃门限值存在显著差异^[23]。基于 T_{\max} - I_H 交会图分析[图 6 (a)]，孔二段有机质类型以 I 型与 II₁ 型为主，II₂ 型次之，III 型少量发育，揭示了孔二段有机质的生油特性。

以六级层序为评价单元对有机质类型进行系统评价，结果显示[图 6 (b)]：I 型干酪根和 II₁ 型干酪根在孔二段广泛分布，仅在 SQ17 砂岩段两者含量显著降低；II₂ 型干酪根在孔二段少量分布，纵向上呈现“减—增—减”的变化趋势；SQ10 与 SQ17-SQ18 层序沉积时期陆源输入增强，III 型干酪根相对发育，可能源自陆源碎屑输入所携带的沉积物。

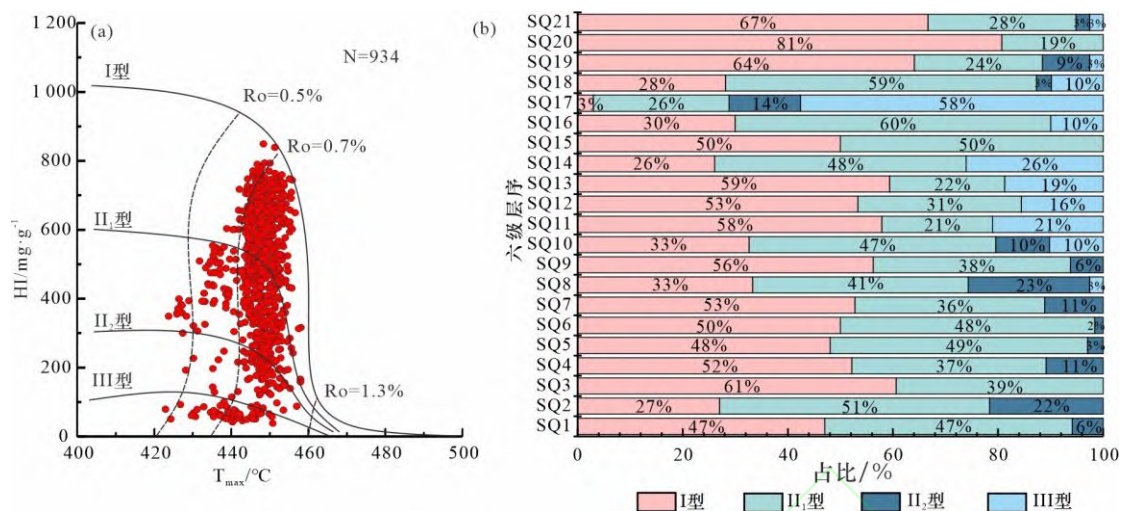


图 6 沧东凹陷孔二段页岩层系有机质类型及分布特征

Fig.6 Types and distribution characteristics of organic matter in the shale of the Ek₂ in the Cangdong Sag

(a) I_H 与 T_{max} 交汇图; (b) 层序内部有机质分布图

(3) 有机质成熟度

在烃源岩有机质埋藏演化过程中，其向油气转化的热演化程度被称为有机质成熟度，通常采用镜质体反射率 R_o 来作为评价指标^[24]。孔二段 R_o 值为 0.66%~0.91%（平均为 0.76%），整体进入生油窗阶段（ $R_o > 0.5\%$ ），垂向上呈现随埋深增加成熟度逐渐升高的趋势（图 7）。

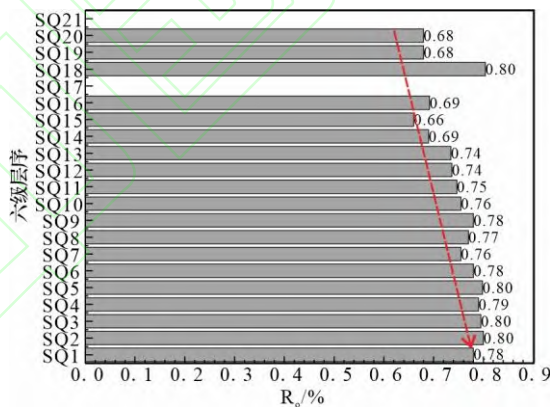


图 7 高频层序内部有机质成熟度特征

Fig.7 Organic matter maturity characteristics within high-frequency sequences

4 高频层序对页岩沉积控制作用

4.1 高频层序约束下的沉积环境演化特征

不同元素在特定环境中表现出不同的富集特征，其含量变化可有效反映沉积古环境^[25-26]。该研究方法已在多个盆地的地层环境研究中得到广泛应用^{[14,27-}

^{35]}。本文研究采用表 1 所列元素指标，系统重建孔二段的沉积古环境，分析结果如下：

表 1 沧东凹陷孔二段沉积环境分析指标

Table 1 Sedimentary environment analysis index of Ek ₂ in the Cangdong Sag		
古沉积环境因素	参数	分级类型
古气候	古气候指数 C ^[27]	0~0.1 干旱气候；0.1~0.2 半干旱气候；0.2~0.4 半湿润气候；>0.4 湿润气候
	化学蚀变指数 CIA ^[28]	50~70 寒冷干燥，弱风化作用；70~80 温暖湿润，中等风化作用；80~100 炎热潮湿，强风化作用
古盐度	Sr/Ba ^[29]	<0.6 淡水；0.6~1.0 半咸水；>1.0 咸水
	Ca/(Ca+Fe) ^[30]	<0.5 淡水；0.5~0.8 半咸水；>0.8 咸水
古生产力	剩余钡 Ba _{bio} ^[31]	<200×10 ⁻⁶ 低古生产力；200×10 ⁻⁶ ~1000×10 ⁻⁶ 中等古生产力；>1000×10 ⁻⁶ 高古生产力
	P/Ti ^[32]	<0.34 低古生产力；0.34~0.79 中等古生产力；>0.79 高古生产力
古氧化还原性	V/(V+Ni) ^[33]	<0.46 强氧化环境；0.46~0.60 强氧化-弱还原环境；0.60~0.84 弱氧化-强还原环境；>0.84 强还原环境
	Cu/Zn ^[34]	<0.21 强还原环境；0.21~0.38 弱还原环境；0.38~0.50 弱氧化-弱还原环境；0.50~0.63 弱氧化环境；>0.63 强氧化环境
	Fe/Mn ^[35]	<30 深水环境；30~50 半深水环境；>50 浅水环境
古水深	(Al+Fe)/(Ca+Mg) ^[35]	<0.5 浅水环境；0.5~1.0 半深水环境；>1.0 深水环境
古陆源输入	Ti/Al ^[14]	Ti/Al 比值越大，指示陆源输入程度越强

4. 1. 1 古陆源输入

Al 和 Ti 元素主要来源于长英质矿物及黏土矿物等陆源碎屑物质，在河流和风力的作用下搬运至半深湖-深湖环境中沉积下来。Ti/Al 值可以有效指示陆源输入强弱，Ti/Al 值越大指示陆源输入程度越强^[14]。孔二段 Ti/Al 值为 0.026~0.061（平均为 0.045），指示孔二段富有机质页岩沉积期持续受到较强的陆源输入影响。

4. 1. 2 古生产力

古生产力是制约湖相页岩有机质富集的关键因素。剩余钡（Ba_{bio}）和 P/Ti 比值是指示初级生产力高低的有效指标^[31-32]，其中剩余钡（Ba_{bio}）采用如下公

式计算：

$$Ba_{bio} = Ba_{sam} - Al_{sam} \times (Ba/Al)_{PAAS} = Ba_{sam} - Al_{sam} \times 0.0075 \quad (1)$$

式中： Ba_{sam} 和 Al_{sam} 分别来自于所测样品的含量； $(Ba/Al)_{PAAS}$ 为太古宙后澳大利亚页岩中 Ba 与 Al 含量的比值 0.0075。

分析结果显示，孔二段页岩样品 P/Ti 值为 0.06~0.91（平均 0.31），剩余钡（ Ba_{bio} ）值为 $(156.31 \sim 923.31) \times 10^{-6}$ （平均 445.02×10^{-6} ），指示孔二段页岩沉积期湖盆古生产力处于中等水平。

4.1.3 古水深

湖相页岩沉积过程中，湖盆水体深度是其连续沉积的重要控制因素。本文研究采用 Fe/Mn 和 $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 值来指示古水深^[35]。孔二段 Fe/Mn 比值为 4.21~181.81（平均值为 42.74）， $(Al+Fe)/(Ca+Mg)$ 值为 0.15~3.44（平均为 1.02），综合指示孔二段页岩沉积于半深水—深水环境。

4.1.4 古气候

古气候是岩石沉积过程中影响最大的古沉积环境参数之一，其变化往往导致其他沉积环境参数发生改变，并对页岩中元素的富集有着重要影响。本文研究采用古气候指数 C 值来判别古气候的变化^[27]，其计算公式如下：

$$C = \Sigma(Fe + Mn + Cr + V + Ni + Co) / \Sigma(Ca + Mg + K + Sr + Ba + Na) \quad (2)$$

采用化学蚀变指数 CIA 来指示地表母岩风化强度^[28]。CIA 的计算公式如下：

$$CIA = \{x(Al_2O_3) / [x(Al_2O_3) + x(CaO^*) + x(Na_2O) + x(K_2O)]\} \times 100 \quad (3)$$

式中： CaO^* 仅代表硅酸盐矿物中的 CaO； x 表示矿物的摩尔含量，由于孔二段页岩层系碳酸盐矿物含量高，为排除样品所含碳酸盐矿物中可能存在的 CaO 对计算结果产生影响，采用 CaO 校正公式对其进行校正：

$$CaO^* = \min[x(CaO) - x(P_2O_5) \times 10/3, x(Na_2O)] \quad (4)$$

计算结果显示，孔二段页岩 C 值为 0.09~1.05（平均为 0.22），CIA 值为 49.87~67.22（平均为 57.04），指示孔二段页岩沉积期物源区母岩受弱风化作用影响，气候为半干旱型。

4.1.5 古盐度

湖盆水体盐度对矿物沉积和有机质富集具有重要影响,采用 Sr/Ba 值和 Ca/(Ca+Fe)值能有效指示湖盆古盐度特征^[29-30]。孔二段碳酸盐矿物含量较高,页岩样品 Cao 含量为 3.97%~26.90%,然而 Sr 元素含量、Sr/Ba 值与 CaO 含量呈显著正相关[图 8(a),图 8(b)],证实了 Sr 和 Ba 含量不受高碳酸盐含量的影响^[36]。样品分析显示孔二段 Sr/Ba 比值为 0.33~2.72 (平均 1.17), Ca/(Ca+Fe)值为 0.27~0.88 (平均为 0.72),共同指示孔二段页岩沉积于半咸水—咸水环境。

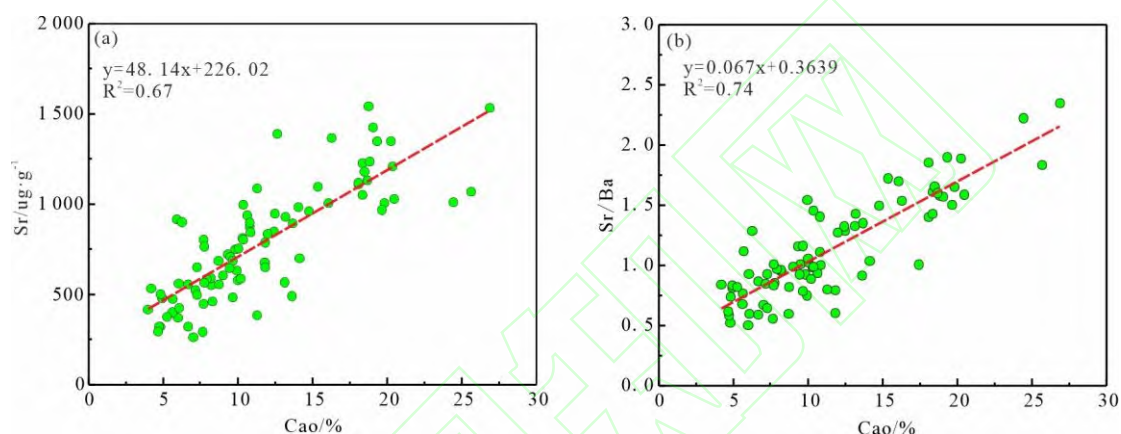


图 8 Sr 及 Sr/Ba 值与 CaO 的相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of Sr and Sr/Ba ratio with CaO

(a) Sr 与 CaO 交会图; (b) Sr/Ba 与 CaO 交会图

4.1.6 古氧化还原条件

湖泊水体的含氧量是控制有机质富集的关键因素。由于不同微量元素对氧化还原的敏感性存在差异, V/(V+Ni)和 Cu/Zn 值被广泛用作指示古氧化还原条件的有效指标^[27,28]。孔二段 V/(V+Ni)值为 0.48~0.88 (平均 0.72), 指示弱氧化—强还原环境; Cu/Zn 比值处于 0.29~1.17 之间, 平均值为 0.43, 指示弱氧化—弱还原环境。两者指示结果有所差异, 基于目前研究多认为 V/(V+Ni)判别精度更高^[27-35], 因此本文研究采用 V/(V+Ni)值作为主要判别指标, 同时采用 Cu/Zn 值作为辅助验证指标。综合分析指示孔二段页岩主要形成于贫氧还原环境。

4.1.7 高频层序内沉积环境演化

综合孔二段页岩沉积环境分析结果（图 9），以本文研究建立的六级层序为评价单元，将孔二段页岩地层分为以下 3 个沉积演化阶段：

（1）快速湖侵时期（SQ1–SQ6）

该沉积时期为孔二段页岩沉积初期。湿润的气候条件导致了地表水动力的增加，进而导致沉积物向湖盆大量涌入，水体盐度受地表水的涌入降低，湖泊水位因而迅速上涨。来自物源区的风化产物在湖泊底部快速堆积，在沉积物快速沉积产生的稀释效应影响下，碳酸盐矿物的含量逐渐减少。

（2）振荡湖侵时期（SQ7–SQ17）

该沉积时期为孔二段页岩沉积中期。此时气候呈现干旱-湿润交替的周期性变化，气候的周期性变化导致了沉积环境的频繁变化，陆源物质的流入开始减少，湖泊水体盐度逐渐升高，从而导致长英质矿物和黏土矿物含量逐渐降低。随着湖泊水位缓慢上涨，较高的水体盐度加速了碳酸盐矿物的沉淀，进而导致碳酸盐矿物含量逐渐增加。

（3）稳定高位时期（SQ18–SQ21）

该沉积时期为孔二段页岩沉积末期。在持续干旱气候条件下，强烈的蒸发作用和稳定的深水环境共同提高了湖盆碳酸盐矿物沉积速率，碳酸盐矿物含量逐渐增加。与此同时，陆源碎屑物质的输入量相较上一个时期虽有所增加，但受较高的湖平面影响，长英质矿物和黏土矿物等陆源碎屑矿物含量仍相对稳定。上述 3 个不同演化阶段沉积环境的显著差异，侧面验证了高频层序格架划分的准确性与可靠性。

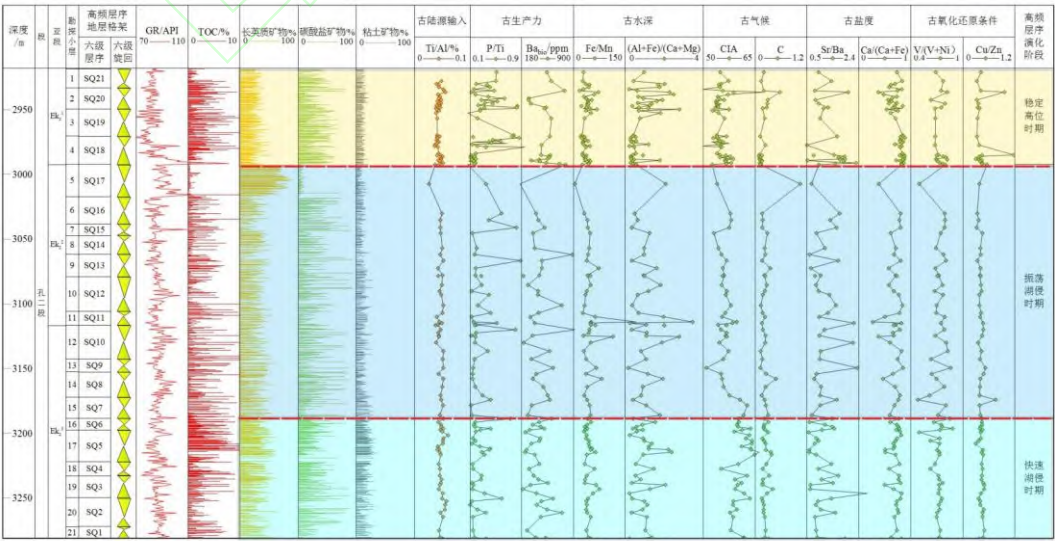


图 9 沧东凹陷孔二段富有机质页岩层系沉积环境特征

Fig.9 Depositional environment of the Ek₂ organic-rich shales, Cangdong Sag

4.2 富有机质页岩层系沉积主控因素

4.2.1 沉积环境对有机质富集的控制

基于研究区高频层序—沉积环境的耦合分析表明，TOC 与古气候指标（C 值）呈显著正相关，随着 C 值的增加，TOC 含量逐渐上升，指示气候越温暖湿润越有利于有机质富集（图 10a）；古水深指标（Fe/Mn）与 TOC 的关系则呈现明显的阶段性， $50 < \text{Fe/Mn} < 75$ 时与 TOC 无相关性，此时 Fe/Mn 指示浅水环境；而当 $\text{Fe/Mn} < 50$ 时，其与 TOC 呈现负相关，表明水深达到一定程度时，随着水体的加深，越有利于有机质富集（图 10b）；TOC 与陆源输入指标（Ti/Al）和古生产力指标（P/Ti）均呈弱负相关，TOC 含量随 Ti/Al 和 P/Ti 比值的变大逐渐降低。前人研究表明，孔二段页岩沉积期湖盆古生产力主要受陆源输入控制^[14]，而当 $\text{Ti/Al} < 0.045$ 且 $\text{P/Ti} < 0.4$ 时，多数样品却表现出较高的 TOC 含量[图 10(c), 图 10(d)]，表明适量的陆源碎屑输入带来了大量的营养物质提高了湖盆古生产力，同时又降低了碎屑输入对有机质稀释的影响，从而为有机质富集提供了基本条件；古盐度指标 Sr/Ba 与 TOC 之间呈显著负相关，在盐度较低的环境，多数样品所含 TOC 含量较高（ $\text{Sr/Ba} < 1.0$ ），随着盐度的增加，TOC 含量逐渐下降（图 10e），表明低盐度环境更有利于有机质保存；值得注意的是，TOC 含量与氧化还原条件指标 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 之间无相关性（图 10f），不同氧化还原条件下均存在高 TOC 含量的样品，表明氧化还原条件不是研究区有机质富集的主控因素。

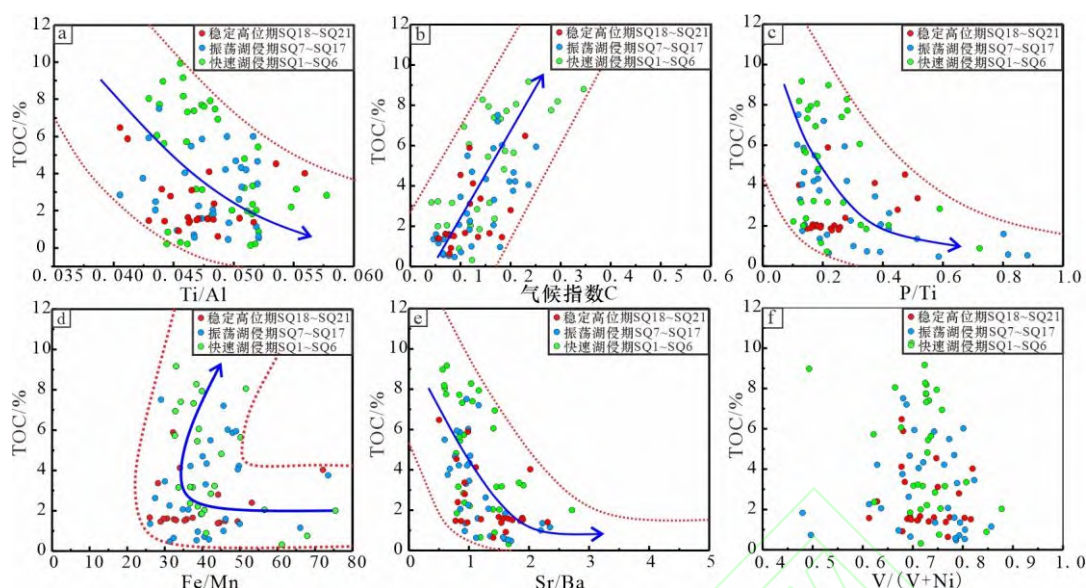


图 10 沉积环境参数与 TOC 的关系

Fig.10 Relationship between TOC and sedimentary environment

(a) Ti/Al 与 TOC 交会图; (b) 气候指数 C 与 TOC 交会图; (c) P/Ti 与 TOC 交会图; (d) Fe/Mn 与 TOC 交会图; (e) Sr/Ba 与 TOC 交会图; (f) $V/(V+Ni)$ 与 TOC 交会图

为了进一步明确有机质富集主控因素，通过将古气候与其余沉积参数进行对比，对比分析表明孔二段有机质富集主要受古气候控制[图 11(a)—图 11(e)]，其余沉积环境参数均受到古气候变化的显著影响，古气候条件的变化有效控制了古水深、古生产力、氧化还原条件及陆源碎屑输入的变化，最终导致不同沉积时期有机质的差异富集，具体变化过程如下：

在孔二段沉积早期（快速湖侵时期），湿润的气候驱动了地表径流的增加，大量陆源碎屑物质随地表径流输入湖泊，给湖泊提供了充足的养分，进而导致盆地富营养化，藻类及浮游植物大量繁殖，湖盆水位快速上涨，大量藻类的勃发与死亡快速消耗了水体氧气，导致湖盆底部缺氧，贫氧的深水环境给有机质提供了一个良好的保存空间，导致该阶段有机质不断富集。

在孔二段沉积晚期（稳定高位时期），在持续干旱气候条件影响下，物源区风化作用减弱，陆源碎屑输入量减少，此时湖盆中心远离物源区，湖盆初级生产力因而下降。强烈的蒸发作用使得水体盐度逐渐升高，相对干旱的古气候抑制了藻类的生长发育，但受到稳定的深水环境及其他相对稳定沉积参数影响，有机质保存较好，富集程度下降幅度小。

而在孔二段沉积中期（振荡湖侵时期），气候呈现周期性旋回变化，在干旱半周期，其有机质富集机理与稳定高位时期类似，而在湿润半周期，有机质富

集机理则与快速湖侵期类似。从而导致该阶段出现多次有机质差异富集现象（图 9）。

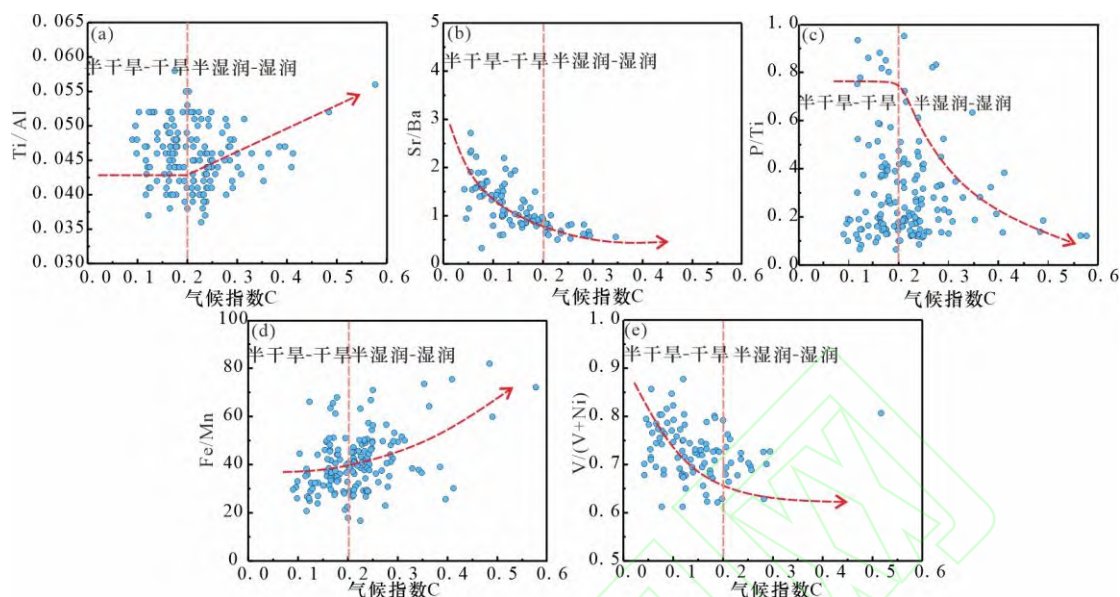


图 11 古气候与其余沉积参数的关系

Fig. 11 Relationship between Paleoclimate and Other Sedimentary Parameters

(a) 古气候与陆源输入指标交会图；(b) 古气候与古盐度指标交会图；(c) 古气候与古生产力指标交会图；(d) 古气候与古水深指标交会图；(e) 古气候与古氧化还原指标交会图

4.2.2 沉积环境对矿物组成的控制

湖相页岩的矿物组成特征在不同凹陷与层系中表现出显著差异，揭示了细粒沉积过程的复杂性^[5]。研究表明，在温暖湿润气候条件下，物源区母岩更容易发生风化和矿物转化作用，生成长英质矿物和黏土矿物等碎屑物质通过地表径流输入湖泊^[37-38]。分析表明：陆源碎屑输入与黏土矿物、长英质矿物呈正相关，与碳酸盐矿物无明显相关性[图 12 (a)]；古气候与黏土矿物和长英质矿物呈显著正相关，与碳酸盐矿物呈显著负相关[图 12 (b)]；古盐度与长英质矿物和黏土矿物呈显著负相关，与碳酸盐矿物呈显著正相关[图 12 (e)]，综合表明碳酸盐矿物主要为湖盆自生而非外来输入。古水深指标 Fe/Mn 与古生产力指标 P/Ti 与 3 类矿物相关性较弱，且两类指标的变化均受到其余一种或几种指标的变化影响，因此不是主控因素[图 12(c),图 12(d)]。前文研究证实了古气候的变化直接控制了陆源碎屑输入及古盐度的变化，综合表明在孔二段页岩沉积时期，古气候通过控制陆源输入和古盐度控制了页岩矿物组成，是其主控因素。具体变化过程如下：

快速湖侵时期，湿润的气候驱动地表径流和碎屑输入的增加，含长英质矿物及黏土矿物的碎屑物质被大量输入湖盆，温暖湿润的气候条件促进了藻类的大量勃发，有机质在此阶段大量积累。姜在兴等^[39-40]研究表明，有机质在成熟过程中产生的有机酸可溶解碳酸盐矿物，同时大量的外来淡水输入导致湖水矿化度快速降低，碳酸盐矿物的含量逐渐减少。

振荡湖侵时期，气候的周期性变化导致碎屑输入及水体矿化度的频繁变化。在干旱半周期，降水减少导致陆源碎屑输入减少，有机质富集程度较低，对碳酸盐矿物含量影响较小，同时强烈的湖盆蒸发作用提高了湖水矿化度，造成碳酸盐矿物沉淀效率增加，导致长英质和黏土矿物含量减少，碳酸盐矿物含量逐渐增加。而在湿润半周期，矿物沉积机理与快速湖侵时期相似。

稳定高位时期，持续性的干旱气候导致了碎屑输入的减少，长英质矿物和黏土矿物等碎屑物质含量因而减少。干旱气候引发湖水的强烈蒸发，湖水矿化度逐渐上升。持续的干旱气候及高矿化度的水体抑制了藻类生存，大量藻类的死亡促进了碳酸盐矿物的快速沉淀^[41]，导致碳酸盐矿物含量逐渐增加。

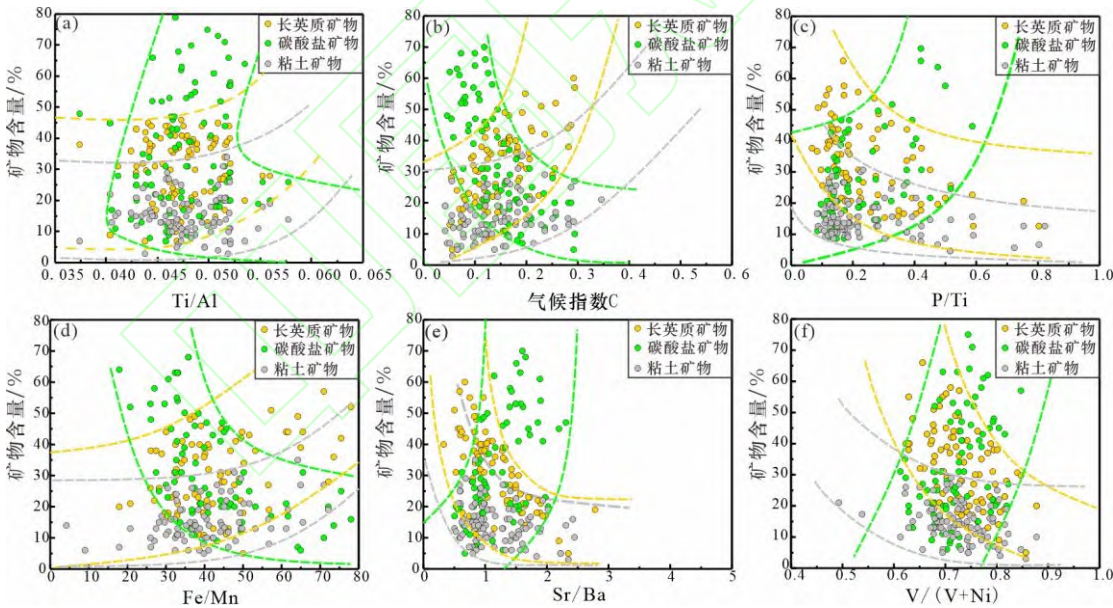


图 12 矿物组分与沉积环境的关系

Fig.12 Relationship between mineral components and sedimentary environment

(a) 陆源输入与矿物含量交会图；(b) 古气候与矿物含量交会图；(c) 古生产力与矿物含量交会图；
(d) 古水深与矿物含量交会图；(e) 古盐度与矿物含量交会图 (f) 古氧化还原与矿物含量交会图

4.3 高频层序约束下的页岩组合发育模式

通过高频层序地层格架与沉积环境分析, 本文研究建立了沧东凹陷孔二段湖相页岩沉积模式: 在古气候变化控制下, 温暖湿润气候促进了地表降水及河流输入增加, 湖平面随之上升, 出现湖侵现象; 干旱气候致使地表降水及河流输入减少, 湖平面逐渐下降, 产生湖退现象。频繁的湖侵—湖退 (T-R 旋回) 是形成高频层序地层的主控因素, 伴随众多沉积古环境参数的协同变化^[37], 形成四类页岩组合模式。

A 型页岩组合主要形成于快速湖侵早期 (SQ1–SQ2) 和振荡湖侵早期 (SQ7), 沉积环境表现出强陆源输入、低盐度和高有机质富集程度的特征。较为湿润的气候抑制了碳酸盐矿物的沉淀, 促进了长英质矿物和黏土矿物的快速沉积, 纵向上形成富有机质长英质-混合质页岩组合。

B 型页岩组合主要发育于快速湖侵阶段 (SQ2–SQ4) 和稳定高位末期 (SQ20–SQ21)。干旱气候导致了湖盆水深下降及陆源输入碎屑的减少, 在湖盆自生作用的影响下, 高盐度水体促进了碳酸盐矿物的沉淀, 纵向上形成富有机质混合质—灰云质页岩组合。

C 型页岩组合在三个沉积阶段广泛分布。孔二段沉积环境复杂多变, 纵向演化快, 沉积环境的振荡导致页岩非均质性增强, 形成富有机质长英质—灰云质—混合质页岩组合。

D 型页岩组合主要形成于振荡湖侵早期 (SQ8–SQ10)。该时期陆源输入与湖盆自生作用并存, 沉积物以长英质矿物和碳酸盐矿物为主, 纵向上快速堆积形成富有机质长英质—灰云质页岩组合。四类页岩组合在孔二段垂向上相互叠置, 共同构成了孔二段页岩沉积组合模式 (图 13)。

5 结论

(1) 通过 GR 测井曲线小波变换分析, 本文研究将渤海湾盆地沧东凹陷孔二段页岩层系划分为 21 个六级层序 (SQ1–SQ21), 建立了六级层序尺度下的高频层序地层格架。研究区主要发育长英质页岩、灰云质页岩和混合质页岩, 有机质类型主要为 I 型和 II₁ 型, 整体进入生油窗阶段。

(2) 基于高频层序地层格架与元素地球化学分析, 将孔二段沉积环境划分为 3 个演化阶段: 下部快速湖侵期 (SQ1–SQ6) 气候湿润, 低盐度, 陆源输入强, 古生产力低; 中部振荡湖侵期 (SQ7–SQ17) 气候经历干旱—湿润的周期性变化, 高盐度, 陆源输入、古生产力等参数频繁波动; 上部稳定高位时期 (SQ18–SQ21) 气候持续干旱, 表现为中等陆源输入, 高盐度, 较高古生产力。

(3) 揭示了孔二段沉积期古气候对页岩沉积的控制机制。古气候通过驱动古水深、古生产力、氧化还原条件及陆源碎屑输入的变化提供了有机质富集的基本条件, 最终导致了有机质的差异富集。同时古气候通过控制陆源输入和古盐度, 进而控制长英质、黏土矿物和碳酸盐矿物的相对含量。基于以上认识, 建立了古气候驱动的页岩沉积组合模式。

参考文献 (References)

- [1] CICHON-PUPIENIS A, LITTKE R, LAZAUSKIENĖ J, et al. Geochemical and sedimentary facies study-Implication for driving mechanisms of organic matter enrichment in the Lower Silurian fine-grained mudstones in the Baltic Basin (W Lithuania) [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2021, 244: 1-24.
- [2] BHATTACHARYA S, CARR T R, PAL M. Comparison of supervised and unsupervised approaches for mudstone lithofacies classification: Case studies from the Bakken and Mahantango-Marcellus Shale, USA[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 33: 1119-1133.
- [3] 曾棒, 刘小平, 刘国勇, 等. 陆相泥页岩层系岩相测井识别与预测:以南堡凹陷拾场次洼为例[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(1): 69-79.
- ZENG B, LIU X P, LIU G Y, et al. Logging identification and prediction of lithofacies of lacustrine shale system in Shichang Sub-Sag, Nanpu Depression[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(1): 69-79.
- [4] SHEPARD F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1954, 24(3): 151-158.
- [5] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1031-1039.
- JIANG Z X, LIANG C, WU J, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [6] 鄢继华, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 基于 X 射线衍射数据的细粒沉积岩岩石定名方法与应用[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(1): 48-54.
- YAN J H, PU X G, ZHOU L H, et al. Naming method of fine-grained sedimentary rocks on basis of x-ray diffraction data[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(1): 48-54.
- [7] 蒯克来, 操应长, 朱如凯, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油储层岩石类型及特征[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1495-1507.
- XI K L, CAO Y C, ZHU R K, et al. Rock types and characteristics of tight oil reservoir in Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(12): 1495-1507.
- [8] SUN B, LIU X, LIU J, et al. The heterogeneity of lithofacies types, combination modes, and sedimentary model of lacustrine shale restricted by high-frequency sequence[J]. *Geological Journal*, 2022, 32(10): 1-17.
- [9] 李玲玲, 杨威, 刘子藏, 等. 沧东凹陷孔东斜坡孔二段沉积特征与油气成藏[J]. *地质学刊*, 2019, 43(4): 584-588.
- LI L L, YANG W, LIU Z C, et al. Sedimentary characteristics and hydrocarbon accumulation of the 2nd Member of the Kongdian Formation in the Kongdong Slope, the Cangdong Sag[J]. *Journal of Geology*, 2019, 43(4): 584-588.

- [10] 陈世悦, 胡忠亚, 柳飒, 等. 沧东凹陷孔二段泥页岩特征及页岩油勘探潜力[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(18): 26-33.
- CHEN S Y, HU Z Y, LIU S, et al. Sedimentary characteristics of the mudstone and shale in the Second Member of Kongdian Formation in Cangdong Sag and its potentiality for shale oil[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(18): 26-33.
- [11] 方正, 蒲秀刚, 陈世悦, 等. 陆相湖盆深水区页岩高频层序对储层发育的影响——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段页岩为例[J]. 石油学报, 2023, 44(10): 1663-1682.
- FANG Z, PU X G, CHEN S Y, et al. Effect of shale high frequency sequence in deep water areas of continental lacustrine basin on reservoir development: A case study of the Member 2 of Kongdian Formation shale of Cangdong Sag in Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1663-1682.
- [12] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1013-1029.
- ZHAO X Z, ZHOU L H, PU X G, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1013-1029.
- [13] 赵贤正, 蒲秀刚, 鄢继华, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔二段细粒沉积旋回及其对有机质分布的影响[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(3): 468-480.
- ZHAO X Z, PU X G, YAN J H, et al. Cycles of fine-grained sedimentation and their influences on organic matter distribution in the second member of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(3): 468-480.
- [14] 蒲秀刚, 董姜畅, 柴公权, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段页岩高丰度有机质富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 696-709.
- PU X G, DONG J C, CHAI G Q, et al. Enrichment model of high-abundance organic matter in shales in the 2nd member of the Paleogene Kongdian Formation, Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 696-709.
- [15] 王艳忠, 操应长, 远光辉. 小波分析在深水砂砾岩和泥页岩地层层序划分中的应用[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 251-258.
- WANG Y Z, CAO Y C, YUAN G H. Application of wavelet analysis in sequence division of deepwater glutenite and shale layer[J]. Natural Gas Geosciences, 2012, 23(2): 251-258.
- [16] 江东辉. 高频层序划分揭示断陷深湖层系源储共生发育规律——以北部湾盆地海中凹陷始新统流沙港组二段为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 527-540.

- JIANG D H. High-frequency sequence division reveals the intergrowth development regularity between source rocks and reservoirs of deep lake facies strata in the faulted depression: Taking the Eocene Liushagang 2 interval in Haizhong Depression, Beibuwan Basin as an example[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2024, 54(3): 527-540.
- [17] TUCKER M, ARLAND J. High-frequency cycles and their sequence stratigraphic context: Orbital forcing and tectonic controls on Devonian cyclicity, Belgium[J]. *Geologica Belgica*, 2010, 13(3): 213-240.
- [18] EMBRY A F. Transgressive-regressive (T-R) sequence analysis of the Jurassic succession of the Sverdrup Basin, Canadian Arctic Archipelago[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1993, 30(2): 301-320.
- [19] 徐彬, 李建明, 张永庶, 等. T-R 旋回层序在陆相盐湖盆地中的应用——以柴西南英西地区下干柴沟组上段为例[J]. *断块油气田*, 2020, 27(4): 412-417.
- XU B, LI J M, ZHANG Y S, et al. Application of T-R cycle sequence in continental salt lake basin: A case study of the Upper Member of Lower Ganchaigou Formation in Yingxi area, southwestern Qaidam Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2020, 27(4): 412-417.
- [20] 肖明国, 李杰, 郭建华, 等. T-R 旋回在东濮凹陷的应用: 以古近纪沙河街期为例[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(12): 3002-3010.
- XIAO M G, LI J, GUO J H, et al. Application of T-R cycles in Dongpu sag: Taking Shahejie stage of Paleogene as an example[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2018, 49(12): 3002-3010.
- [21] 张跃, 陈世悦, 孟庆爱, 等. 黄骅坳陷沧东凹陷孔二段细粒沉积岩中方沸石的发现及其地质意义[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(4): 37-43.
- ZHANG Y, CHEN S Y, MENG Q A, et al. The discovery of analcite in fine-grained sedimentary rocks of the Second Member of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Huanghua Depression: Implications for Early Diagenetic environment[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(4): 37-43.
- [22] 张亮, 夏宗立, 王斌, 等. 深层烃源岩测井评价方法: 以库车坳陷侏罗系阳霞组烃源岩为例[J/OL]. *地球物理学进展*. <https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20241227.1703.016>
- ZHANG L, XIA Z L, WANG B, et al. Well log evaluation methods of deep source rocks: the Jurassic Yangxia Formation in Kuqa depression[J/OL]. *Progress in Geophysics*. 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20241227.1703.016>
- [23] 姜振学, 宋岩, 唐相路, 等. 中国南方海相页岩气差异富集的控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 617-628.
- JIANG Z X, SONG Y, TANG X L, et al. Controlling factors of marine shale gas differential enrichment in southern China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 617-

- [24] 赵青芳, 谢德智, 陈建文, 等. 下扬子区二叠系烃源岩评价与生源环境[J]. 地质通报, 2023, 42(7): 1154-1165.
- ZHAO Q F, XIE D Z, CHEN J W, et al. Evaluation and biogenetic derivation and sedimentary environment of source rocks from Permian in the Lower Yangze region[J]. Geological Bulletin of China, 2023, 42(7): 1154-1165.
- [25] ALGEO T J, MAYNARD J B. Trace-element behavior and redox facies in core shales of Upper Pennsylvanian Kansas-type cyclothems[J]. Chemical Geology, 2004, 206(3-4): 289-318.
- [26] ALGEO T J, TRIBOVILLARD N. Environmental analysis of Paleooceanographic systems based on Molybdenum-Uranium covariation[J]. Chemical Geology, 2009, 268(3): 211-225.
- [27] 刘祥柏, 柳广弟, 宋泽章, 等. 渤海湾盆地歧口凹陷沙河街组烃源岩沉积环境及形成机理[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(12): 2008-2031.
- LIU X B, LIU G D, SONG Z Z, et al. The paleo-sedimentary environment and formation mechanism of the source rocks in Shahejie Formation, Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(12): 2008-2031.
- [28] 张美洲, 朱筱敏, 姜振学, 等. 陆相淡水湖盆页岩有机质富集主控因素研究: 以四川盆地东北部侏罗系自流井组为例[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 806-822.
- ZHANG M Z, ZHU X M, JIANG Z X, et al. Main controlling factors of organic matter enrichment in continental freshwater lacustrine shale: A case study of the Jurassic Ziliujing Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography(Chinese Edition), 2023, 25(04): 806-822.
- [29] 张治波, 朱志军, 王文锋, 等. 滇西兰坪盆地中—新生代蒸发岩元素地球化学特征及其形成环境[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 356-379.
- ZHANG Z B, ZHU Z J, WANG W F, et al. Geochemical characteristics and formation environment of Mesozoic and Cenozoic evaporative rocks in Lanping Basin, western Yunnan[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2019, 49(2): 356-379.
- [30] NELSON B W. Sedimentary phosphate method for estimating paleosalinities[J]. Science, 1967, 158(3): 917-920.
- [31] HAO F, TIAN J, XU Q, et al. Paleoenvironment evolution of the lacustrine organic-rich shales in the second member of Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, China: Implications for organic matter accumulation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 133: 105244.
- [32] LI Y, LIU G, SONG Z, et al. Organic matter enrichment due to high primary productivity in the deep-water shelf: Insights from the lower Cambrian Qiongzhusi shales of the central Sichuan Basin, SW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 239: 105417.

- [33] 张妍, 吴欣松, 康积伦, 等. 准东吉南凹陷二叠系芦草沟组烃源岩有机质富集机制[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(9): 1574-1589.
- ZHANG Y, WU X S, KANG J L, et al. Mechanism of organic matter enrichment in the Permian Lucaogou Formation, Jinan Sag, eastern Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(9): 1574-1589.
- [34] 尹锦涛, 俞雨溪, 姜呈馥, 等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩元素地球化学特征及与有机质富集的关系[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1544-1556.
- YIN J T, YU Y X, JIANG C F, et al. Relationship between element geochemical characteristic and organic matter enrichment in Zhangjiatan Shale of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(6): 1544-1556.
- [35] 王盛亮, 杨雪松, 罗胜, 等. 河套盆地临河坳陷北部临河组元素地球化学特征及古环境恢复[J]. 矿物岩石, 2023, 43(3): 73-82.
- WANG S L, WANG H, LI Q Y, et al. Element geochemical characteristics and paleoenvironment restoration of Linhe Formation in the Northern Linhe Depression, Hetao Basin[J]. Mineralogy and Petrology, 2023, 43(3): 73-82.
- [36] ALGEO T J, LI C. Redox classification and calibration of redox thresholds in sedimentary systems[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 287(3-4): 8-26.
- [37] 成大伟, 张志杰, 洪海涛, 等. 四川盆地东部侏罗系凉高山组层序结构, 沉积演化及其主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 262-272.
- CHENG D W, ZHANG Z J, HONG H T, et al. Sedimentation and provenance and the basin-mountain relationship of the Jurassic Lianggaoshan Formation in eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 262-272.
- [38] NESBITT H W, YOUNG G M, MCLENNAN S M, et al. Effects of chemical weathering and sorting on the petrogenesis of siliciclastic sediments, with implications for provenance studies[J]. The journal of geology, 1996, 104(5): 525-542.
- [39] JIANG Z X, ZHANG W Z, LIANG C, et al. Basic characteristics and evaluation factors of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [40] ZHANG J G, JIANG Z X, JIANG X L, et al. Oil generation induces sparry calcite formation in lacustrine mudrock, Eocene of East China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 71(3): 344-359.
- [41] HAY B J, HONJO S, KEMPE S, et al. Interannual variability in particle flux in the southwestern Black Sea[J]. Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers, 1990, 37(6): 911-928.

Sedimentary characteristics and main controlling factors of organic-rich shale in high-frequency sequence framework: A case study of lacustrine shale in the Second Member of Kongdian Formation in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin

LIU Fangkai^{1,2}, LIU Xiaoping^{1,2}, ZHAO Xianzheng⁴, JIN Fengming³, JIANG Wenya³, GUAN Quansheng³, SUN Biao^{1,2}, SHENG Kai³

(1.State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2.College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3. PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China;

4.CNPC Advisory Center, Beijing 100724, China)

Abstract: The Second Member of the Kongdian Formation (Ek_2) in the Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, hosts a set of organic-rich shale intervals, which are the key targets for shale oil exploration. However, due to the lack of constraints from a high-resolution sequence stratigraphic framework, the controlling factors of shale sedimentation remain unclear. Taking Well G108-8 in the Cangdong Sag as a case study, Through wavelet transform analysis of GR logging data, a high-frequency sequence stratigraphic framework at the sixth-order scale was established. By integrating geochemical testing data and X-ray mineral diffraction (XRD) analyses, the mineral distribution characteristics, organic geochemical characteristics, shale sedimentary environment characteristics, and their controlling factors within high-frequency sequences were systematically studied. A shale sedimentary assemblage model driven by paleoclimate was established. The results demonstrate that: (1) The organic-rich shale of the Ek_2 was divided into 21 sixth-order sequences (SQ1–SQ21), which are classified into three sedimentary stages based on sedimentary environment evolution characteristics: rapid lake transgression phase (SQ1–SQ6), oscillating lake transgression phase (SQ7–SQ17), and stable highstand phase (SQ18–SQ21). The shale lithofacies are dominated by felsic, calcareous-dolomitic, and mixed shales, with organic matter dominated by Type I and II₁ kerogen, collectively within the oil generation window. (2) During shale deposition, The enrichment of organic matter and mineral composition were primarily controlled

by paleoclimate. Paleoclimate serves as the dominant controlling factor, governing organic matter enrichment by modulating paleo-water depth, paleoproductivity, paleo-redox conditions, and terrigenous clastic input. Concurrently, it regulates the proportions of felsic minerals and clay minerals by controlling terrigenous clastic input, while modulating carbonate mineral content by controlling paleosalinity. (3) Under the constraints of the high-frequency sequence framework, four distinct shale assemblage patterns (A-D) are identified in the Ek₂, with their primary distributions characterized as follows: Type A(rapid transgression phase / early oscillatory transgression phase), Type B(rapid transgression phase / late stable highstand phase), Type C(oscillatory transgression phase) and Type D(early oscillatory transgression phase). Based on these findings, a shale assemblage model driven by paleoclimate was established.

Keywords: High-Frequency Sequence; The Second Member of the Kongdian Formation; Shale Oil; Sedimentary Characteristics; Main Controlling Factors

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42072150).