

天文周期约束下湖相页岩岩相组合类型及其发育特征

——以东营凹陷南坡始新统沙河街组为例

张顺^{1,2}, 刘惠民², 韩豫³, 梁超³, 李军亮^{1,2}, 黄智敏³

1. 中石化胜利油田勘探开发研究院, 山东东营, 257015

2. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京, 102206

3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266580

摘要 【目的】以东营凹陷南坡沙四上亚段页岩层系为例, 识别研究区记录的天文周期, 着重分析偏心率对研究区页岩沉积的控制作用, 总结偏心率对页岩岩相组合发育的影响。【方法】基于取心井段岩心精细观察描述及实验测试, 依据沉积环境特征, 进行岩相组合划分, 以 GR 测井曲线为替代性指标, 对其进行数据预处理、频谱分析、滤波和调谐分析。【结果】纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层组合、纹层状碳酸盐页岩夹碳酸岩相组合等类型最为发育; 地球轨道周期(偏心率、斜率、岁差)控制着气候旋回, 决定着页岩沉积旋回, 对页岩岩相组合具有明显的调控作用, 一个长偏心率对应一套岩相组合, 是岩相组合的主控因素。【结论】当偏心率增大时, 地球公转轨道偏率增加, 季节性开始增强, 夏季降水增多, 有利于长英类矿物沉积, 岩相组合类型主要为纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩; 当偏心率减少时, 地球公转轨道偏率减小, 季节性开始减弱, 夏季降水量减少, 此时页岩组分构成上碳酸盐矿物含量升高, 岩相组合类型主要为纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩相组合。研究成果为盆地内页岩甜点精细预测与评价提供重要指导。

关键词 岩相组合; 天文周期; 沙河街组; 湖相页岩; 页岩油

第一作者简介 张顺, 男, 1985 年出生, 博士, 副研究员, 石油地质学, E-mail: satisfactoryshun@163.com

通信作者 韩豫, 男, 1990 年出生, 博士后, 旋回地质学, hanyu.8866@163.com

中图分类号 P618.13

文献标志码 A

0 引言

陆相断陷湖盆页岩岩相类型丰富, 垂向叠置、组合关系复杂^[1-3], 不同类型页岩发育分布规律不清楚, 传统的层序地层学方法建立的等时地层格架无法满足页岩油精细勘探的需求^[4], 而米兰科维奇旋回识别和分析的应用可以很好地解决该问题。近年来, 大量的古气候和天文学研究使人们广泛地认识到地球气候的周期性变化受到地球轨道参数变化的控制^[5-7], 地球轨道信号不断在大洋、湖泊、三角洲等气候变化响应敏感的陆地和海洋沉积系统中被研究者发现, 并广泛应用地球轨道信号进行天文年代学及旋回分析。吴怀春等^[6]通过对松辽盆地茂 206 井自然伽马和密度测井的天文旋回识别和分析建立了青山口组浮动天文年代标尺, 为沉积期各种地质事件持续时间的确定提供了年代学依据。张坦等^[8]对准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组及孙善勇等^[9]使用米兰科维奇旋回理论对东营凹陷沙四上亚段湖相页岩地层进行精细划分与对比, 为页岩等细粒沉

收稿日期: 2024-11-08; 收修改稿日期: 2025-01-22

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U24B6002); 国家科技重大专项项目(2024ZD1400100) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.U24B6002; National Major Science and Technology Projects, No.2024ZD1400100]

积层序地层划分研究提供参考。Huang *et al.*^[10]在松辽盆地青山口组页岩中识别到约 17 万年地轴斜率调幅周期, 揭示出斜率变化对有机质埋藏的调控作用。美国始新世绿河组地层也记录了天文周期对页岩沉积的控制作用^[11-12]。

随着研究区页岩大量取心 (>4 000 m) 和系统分析测试, 发现东营缓坡带页岩岩相类型多、相变快, 以往以岩相为研究单元对页岩进行油气开发具有局限性, 表现在岩相尺度较小, 以单岩相作为勘探评价目标的可操作性差, 地质、工程甜点评价单元尺度不统一。为此, 学者提出以岩相组合作为页岩油勘探生产的主要评价对象, 其是按照一定叠置次序构成的能反映环境条件规律性演化并存在一定成因联系的岩相组合体^[13]。若能建立客观岩相组合框架, 将地层划分为若干岩相组合, 分析组合内岩相空间展布特征进而量化岩相占比, 可以很好地为实现页岩油勘探有利层段的预测提供依据^[14]。本文依照前人划分方案, 从页岩沉积环境分析入手, 进行研究区页岩岩相组合划分及特征分析, 结合以测井自然伽马 (GR) 曲线为替代指标的天文周期分析, 明确天文周期对岩相组合发育的约束作用, 为不同类型发育分布规律及页岩油甜点段精细预测提供理论支撑。

1 区域地质概况

东营凹陷是济阳坳陷内最大的次级构造单元, 位于其南部, 走向 NEE, 受晚白垩世上地幔上隆而处于伸展构造背景, 具有“北断南超, 西断东超”的特点, 典型的陆相箕状断陷湖盆^[15-16]。其西邻滨县和青城凸起, 北邻陈家庄凸起, 南侧为鲁西隆起, 勘探面积约 5 700 km²^[17]。凹陷主要发育利津洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷、民丰洼陷等次级洼陷 (图 1)。

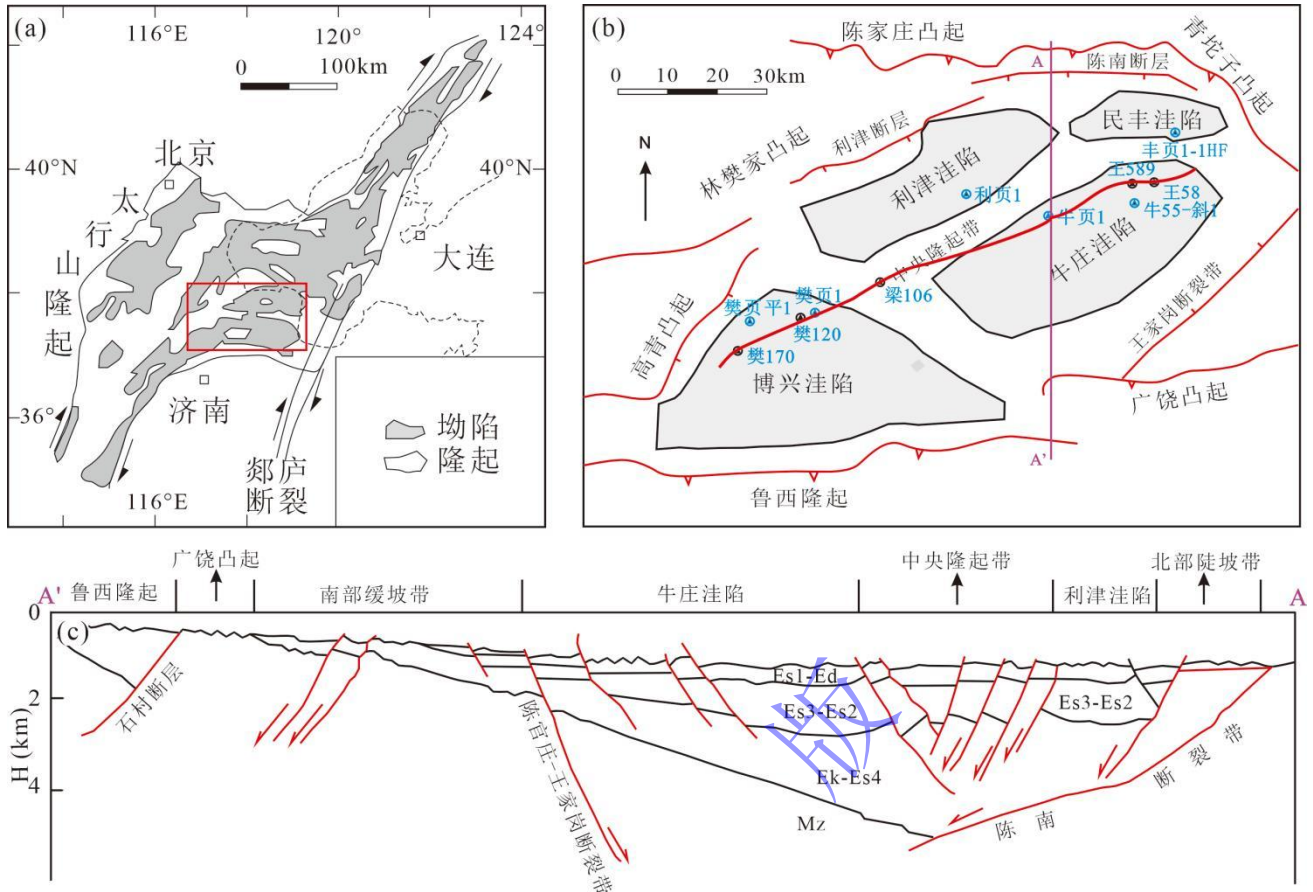


图1 东营凹陷构造位置及地层剖面

(a) 渤海湾盆地构造概况；(b) 东营凹陷区域构造及井位概况图；(c) 东营凹陷地层剖面图

Fig.1 Tectonic location and stratigraphy of the Dongying Depression

(a) structural overview of the Bohai Bay Basin; (b) regional structures and well locations; (c) stratigraphic cross-section

受喜山运动的幕式活动控制，东营凹陷发育与演化具有明显的阶段性，构造演化经历了裂陷期、断陷期和坳陷期3个阶段^[18-19]。在初始裂陷期由于气候总体处于干旱、半干旱状态，则发育以冲积扇、膏盐为代表的沉积充填类型。深陷扩张期气候潮湿、湖盆范围广大，水体达到最深，因此在深湖—半深湖背景下，斜坡区（陡、缓坡带）发育了各种三角洲，洼陷区则充填了大套富有机质页岩细粒沉积。沙河街组沙四晚期—沙三早期是东营凹陷的主要断陷活动期，该时期湖盆水体深度增加，存在多个湖侵和湖退旋回，形成一系列包括从咸水至淡水的多种湖相泥页岩沉积，缓坡带暗色泥岩总厚度超过1 000 m。本文研究对象为东营凹陷南部博兴、牛庄洼陷沙四上亚段页岩层系。

2 页岩岩相及其组合分类

2.1 页岩矿物岩石学特征

通过对东营凹陷6口页岩取心井300块次样品X衍射结果分析认为，东营凹陷沙四上亚段页岩主要矿物包括黏土矿物、石英、钾长石、斜长石、方解石、白云石、硬石膏、菱铁矿、黄铁矿等（表1）。黏土矿物质量百分含量（以下简称含量）介于2%~53%；平均值为37.7%；石英矿物含量介于2%~43%，平均含量

集中在 20%~26%；长石含量普遍小于 10%，其中钾长石矿物含量小于斜长石矿物含量；碳酸盐矿物含量普遍较高，其中方解石矿物平均含量集中在 25%~50%，白云石平均含量集中在 6%~10%，靠近南部缓坡带的博兴和牛庄洼陷碳酸盐矿物含量高于临近北部陡坡带的民丰和利津洼陷。

在岩石薄片观察和 X 射线全岩矿物衍射分析的基础上，明确了页岩的主要矿物组成和岩石类型。根据主要矿物类型，将东营凹陷沙四上亚段页岩划分为富碳酸盐矿物类页岩、富长英矿物类页岩、富黏土类页岩和混合矿物类页岩（碳酸盐矿物、黏土矿物、长英质矿物含量均小于 50%）四大类。

表 1 东营凹陷主要洼陷沙四上亚段页岩样品全岩矿物分析（300 块样品）
Table 1 Whole rock mineral analysis of shales samples in the main sag of the Dongying Depression

注陷	井号	主要矿物类型及其质量百分含量/wt.%								
		黏土	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	硬石膏	菱铁矿
博兴	樊页平 1	3~32	5~30	1~8	1~32	13~85	3~62	1~11	1~1	1~1
		(13.4)	(17.24)	(4)	(4.80)	(49.56)	(12.43)	(3.73)	(1)	(1)
	樊页 1	2~50	2~43		1~35	2~80	1~95	1~24		
		(15.80)	(22.38)	/	(5.64)	(38.12)	(16.57)	(2.57)	/	/
牛庄	牛页 1	5~41	10~43		1~6	2~72	1~63	1~15		1~3
		(18.92)	(25.07)	/	(1.97)	(45.89)	(6.18)	(2.30)	/	(1.12)
	牛 55-斜 1	2~46	5~38	1~6	1~16	4~88	1~56			1~6
		(20.44)	(19.38)	(3.43)	(6.28)	(39.9)	(9.55)			(1.46)

2.2 页岩岩相组合划分方案

随着研究区页岩大量取心（4 000 余米）和系统分析测试，发现东营缓坡带页岩岩相类型多、相变快，以单岩相作为勘探评价目标可操作性差，地质、工程甜点评价单元尺度不统一。页岩岩相组合划分不是简单地将几类岩相进行组合，而是要综合考虑多种控制因素，从而具有勘探地质意义^[20]。

断陷湖盆沉积环境复杂多变，而细粒沉积由于所处深水环境，岩石矿物成分、沉积构造、有机质丰度等记录的古环境信息更为完整和丰富^[21-23]，因此将沉积环境作为岩相及其组合类型划分的首要依据。鉴于页岩油甜点评价和分布预测的需求，还要通过伽马曲线及测井和岩心资料识别不同级次的旋回，划分层序界面，分析岩相及其组合样式，进而在层序地层格架下，结合测井资料的识别能力，分析岩相组合横向的发育分布特征。

按照上述划分依据和原则，可以对东营古近系页岩层系进行岩相组合划分——首先通过页岩油井取心井段岩心观察，初步分析取心段页岩的基本岩石和岩相类型；在此基础上对页岩沉积环境进行分析，对主要岩石和岩相类型的页岩进行样品的选取，完成矿物成分、主量微量元素分析等测试，并根据矿物含量和元素，提取古环境信息，对沉积环境相似的页岩进行岩相组合分类，完成页岩岩相组合的一级划分。在岩相组合大类划分的基础上，结合测井响应（自然伽马、深侧向电阻率、声波时差等测井曲线特征，对岩相组合进行二级划分。对于砂岩和碳酸盐岩夹层发育的页岩岩相组合的划分还应当考虑夹层的厚度、规模、分布特征等。依据沉积环境对岩相的控制作用，建立了基于“细粒物质来源”和“岩相垂向叠置样式”双

控的页岩岩相组合划分方案。

2.3 页岩岩相组合类型

基于研究区的页岩岩相多样性，结合沉积环境上的联系进行页岩岩相组合的划分，东营凹陷沙四上亚段页岩层系主要发育九种岩相组合，主要为基质型和夹砂岩、夹碳酸盐的夹层型。其中东营凹陷南坡沙四上亚段页岩层系主要发育基质型和碳酸盐岩夹层型页岩岩相组合。本文重点研究碳酸盐矿物含量相对较高的内源和混源型页岩岩相组合——纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩相组合、纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层组合、纹层状碳酸盐页岩夹碳酸岩相组合、层状灰质混合页岩夹碳酸盐页岩相组合等类型最为发育。

1) 纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层

纹层碳酸盐页岩相和纹层状灰质混合页岩相是济阳坳陷古近系最为发育的岩相类型（根据方解石晶体形貌，又可进一步分为泥晶碳酸盐页岩、细晶碳酸盐页岩和粗晶碳酸盐页岩），富有机质纹层状粗晶碳酸盐页岩是最有利的储集岩相类型，在实际的勘探实践中，也被认为是优势岩相^[24]。纹层状碳酸盐页岩和灰质混合页岩频繁互层（图2），是沙四上亚段中部最为发育的岩相组合。镜下观察，纹层特征显著，多数纹层平直，细/亮晶方解石纹层与富有机质黏土层（或有机质层/黏土层）界限清晰，揭示了陆源碎屑物质输入能力弱、浊流等事件沉积少、水体分层条件好、偏安静的水体环境。

总体上，纹层状碳酸盐页岩和灰质混合页岩互层岩相组合沉积环境为半湿润、少物源、咸水环境。湖泊咸化造成水体密度变大，形成了较为稳定的水体分层条件，减少了淡水输入及生物扰动，从而有利于有机质和纹层的保存。因此，该岩相组合指示了弱—静水环境，且有机质含量普遍较高。

2) 纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩相组合

相较于岩相组合1)，纹层状灰质混合页岩相在组合中的厚度占比降低，形成第二种岩相组合类型：纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩。当气候开始变湿润时，岩相组合中纹层状灰质混合页岩比例开始减小，向纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩过渡。该种岩相组合一般出现在沙四上亚段的纯上2亚段，指示了半湿润的静水、半深水环境，且有机质含量较高。

3) 纹层状碳酸盐页岩夹碳酸岩相组合

该岩相组合发育的碳酸盐夹层厚度集中在30 cm~150 cm，以纹层状或层状为典型的沉积构造特征。其中白云岩夹层集中发育段干湿指数达到最低，镜下特征及环境参数特征均表明该岩相组合主要是气候干燥、陆源输入较少、浅水、咸水—半咸水的强还原环境产物。该种岩相组合一般出现在沙四上亚段的纯上3、4亚段。

4) 层状灰质混合页岩夹碳酸盐页岩相组合

该岩相组合类型在岩心上表现为以层状灰质混合页岩相为主，夹有层状碳酸盐页岩相（图3），镜下观

察发现主要矿物呈现定向或弱定向排列，灰泥透镜体大小不一（200~500 μm ）、断续分布，局部纹层连续性较好，少量长英质矿物零星分布，成分混积特征较为显著；相较于其他页岩岩相组合，纹层欠发育，揭示水体深度、咸度和分层性弱于纹层状页岩岩相组合。TOC 集中在 2.9~4.12。该种岩相组合一般出现在沙四上亚段的纯上 1、2 亚段。

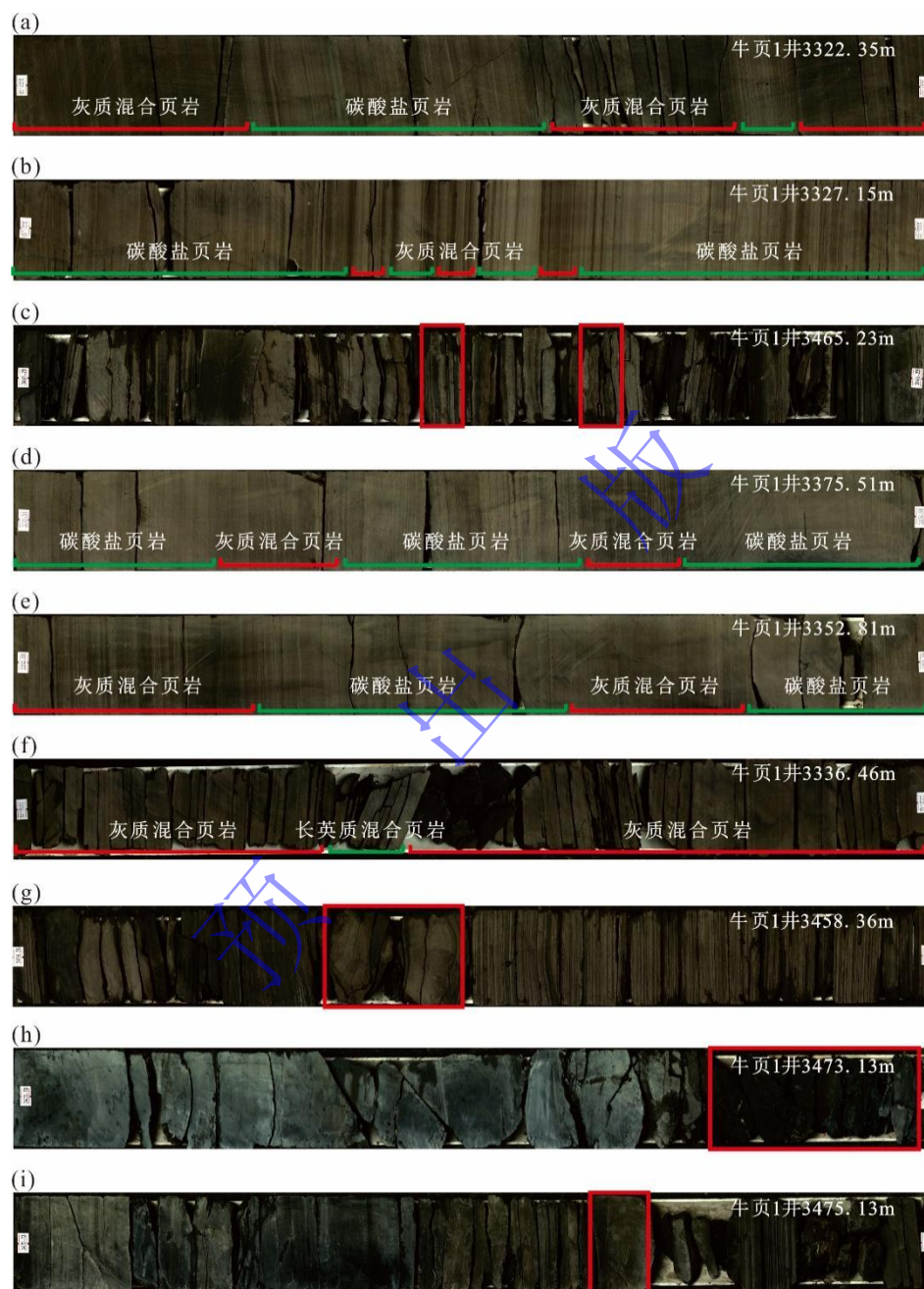


图2 东营凹陷沙四上亚段页岩岩相组合及岩心观察特征

(a) 纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层组合；(b) 纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩岩相组合；(c) 纹层状碳酸盐页岩夹碳酸岩相组合；(d) 层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩岩相组合；(e) 层状灰质混合页岩夹碳酸盐页岩岩相组合；(f) 灰质混合页岩夹长英质混合页岩岩相组合；(g) 层状长英质页岩夹砂岩相组合；(h) 层状长英质页岩夹长英质混合页岩岩相组合；(i) 纹层状长英质页岩夹黏土页岩岩相组合

Fig.2 Shale facies assemblage and core observations for upper Sha-4 member, Dongying Depression

5) 其他岩相组合

其他岩相组合包括灰质混合页岩夹长英质混合页岩、层状长英页岩夹长英质混合页岩、层状长英页岩夹砂岩等，陆源碎屑颗粒含量增多，近物源粗碎屑物质通过重力流水道供给至湖盆深水区，在沙四上亚段的纯上及纯下次亚段均有分布，指示了半湿润、陆源输入较多的浅水—半深水环境。

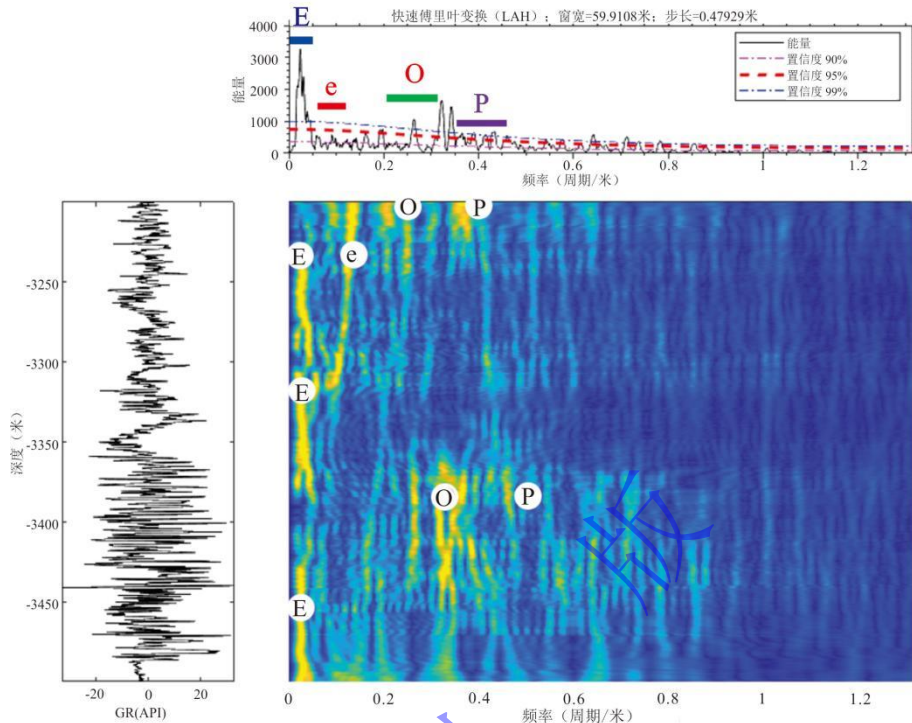


图3 GR测井信号频谱分析
Fig.3 Spectral analysis of GR logging signals

3 天文旋回分析约束下的岩相组合发育特征

3.1 天文周期识别的原理与方法

天文旋回理论也称作米兰科维奇 (Milankovitch) 旋回理论，是指在地球与其他星体之间的引力作用下地球轨道参数 (偏心率、斜率、岁差) 发生的 (准) 周期性变化，会驱动地球表面接收日照量变化，从而通过控制风化作用、搬运作用和沉积作用引起沉积产物的岩性、物化性质周期性变化^[25]。

偏心率是地球公转轨道长轴与短轴之差和赤道半径的比，在 0.05%~6.07% 范围内变化，具有 405 ka 的长偏心率周期和约 100 ka 的短偏心率周期两个主要周期^[26-27]。斜率指地轴的倾斜程度，具有 54 ka、41 ka 和 39 ka 等主要周期。岁差是由地球自转轴的缓慢进动产生，具有 24 ka、22 ka、19 ka 和 17 ka 等周期^[28]。

本研究选用研究区重点井的伽马测井数据作为天文旋回分析的古气候替代指标。首先，对伽马测井数据进行预处理，包括插值 (median interpolation, 确保数据等间距)、去趋势化 (LOWESS detrending, 去除超长周期影响)；随后，采用多窗口频谱分析 (Multi-taper Method, MTM) 和演化图谱分析 (Evolutionary Spectral Analysis) 来追踪数据中周期信号的演化。进行频谱分析时，数据均使用 robust 方法去除了“红噪音 (red noise)”。通过将数据里主要周期的比例和理论天文周期模型对比，识别出数据中的天文周期信号，

如 405 ka 长偏心率周期等。最后,利用“相关系数 correlation coefficient(COCO)”和“演化相关系数 evolutionary correlation coefficient (eCOCO)”^[29]追踪沉积速率的变化,找出其中最优的可能沉积速率,对频谱分析结果进行检验。以上旋回分析均使用 Acycle 软件 v2.6 版本完成^[30]。

3.2 天文周期对洼陷页岩沉积的控制作用

以牛庄洼陷牛页 1 井为例,分析天文旋回对该洼陷页岩沉积的控制作用。首先对牛页 1 井的自然伽马曲线进行滑动窗口频谱分析(图 3),发现 3 200~3 361 m 和 3 361~3 500 m 有明显的信号差异,通过相关系数法(eCOCO)进行沉积速率分析(图 4),亦发现 3 200~3 361 m 和 3 361~3 500 m 有明显的沉积速率变化,故分别对两段再进行频谱分析。

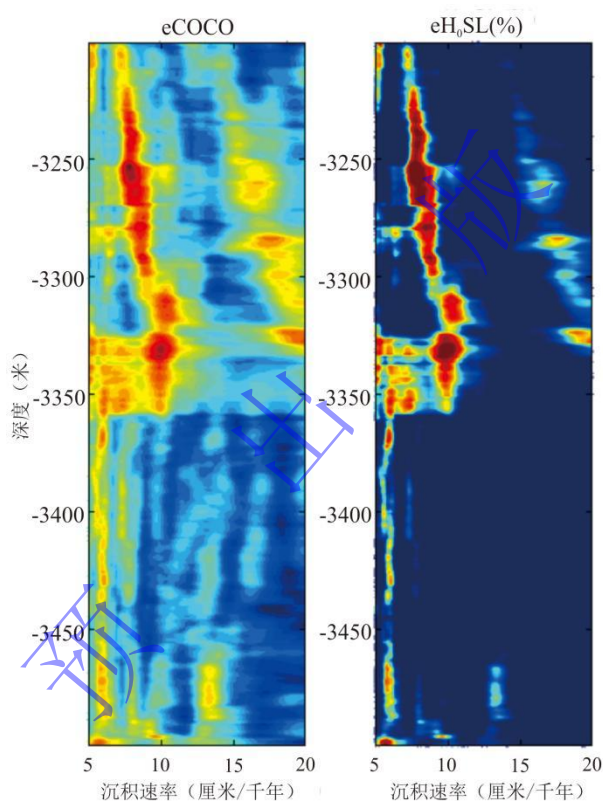


图 4 相关系数法分析沉积速率

Fig.4 Analysis of sedimentation rate using correlation coefficient method

频谱分析结果(图 5)显示两段均识别出了明显的偏心率、斜率、岁差信号,其中 3 200~3 361 m 旋回长度比值 37~24.7 : 11.6~7.9 : 4.9~3.3 : 3.5~2.3 : 2.1 : 1.99 : 1.8 与理论周期 405 : 127 : 51 : 40 : 23 : 22 : 19 符合较好,且该段偏心率信号强度较大,计算得出沉积速率 6.1~9.1 cm/ka; 3 361~3 500 m 旋回长度比值 29.7 : 9.2 : 3.8 : 3 : 1.77 : 1.55 : 1.38 与理论周期 405 : 127 : 51 : 40 : 23 : 22 : 19 符合较好,且该段斜率信号强度最大,计算得出沉积速率 7.3 cm/ka。

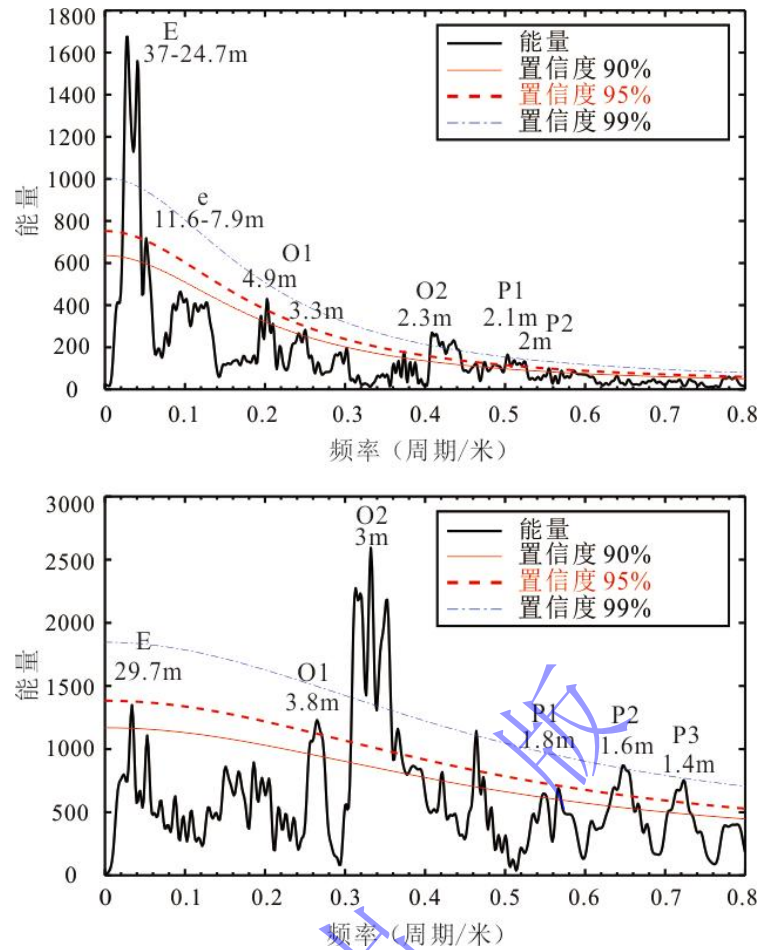


图5 频谱分析结果 (E. 偏心率; O. 斜率; P. 岁差)

Fig.5 Spectral analysis (E. eccentricity; O. obliquity; P. precession)

设计带通滤波器对 GR 曲线进行滤波得到 6 个长偏心率、20 个短偏心率、67 个斜率和 103 个岁差旋回信号。本研究着重分析偏心率对页岩沉积的控制作用。在牛页 1 井综合柱状图 (图 6) 可以得知, 偏心率对页岩沉积环境具有明显的调控作用, 偏心率通过控制地球表面接收到的太阳辐射量从而控制了气候的周期性变化, 在牛页 1 井中表现为控制了 25~37 m 的页岩旋回。当偏心率较高时, 东亚夏季风强度增强, 气候温暖潮湿, 陆源输入增多, 湖平面升高, 水体还原性增强, 体现在页岩组分构成 (图 7) 上为高偏心率时黏土 (21.7%)、粉砂 (28.3%) 含量增多、碳酸盐矿物 (47.6%) 含量减少, 同时具有较高的 TOC 含量 (4.18%); 反之当偏心率较低时, 夏季风强度减弱, 气候较为干旱, 湖平面下降, 水体还原性减弱, 体现在页岩组分构成上为低偏心率时黏土 (18.3%)、粉砂 (28.1%) 含量减少、碳酸盐矿物 (51.2%) 含量增多, 同时 TOC 含量 (2.31%) 降低。

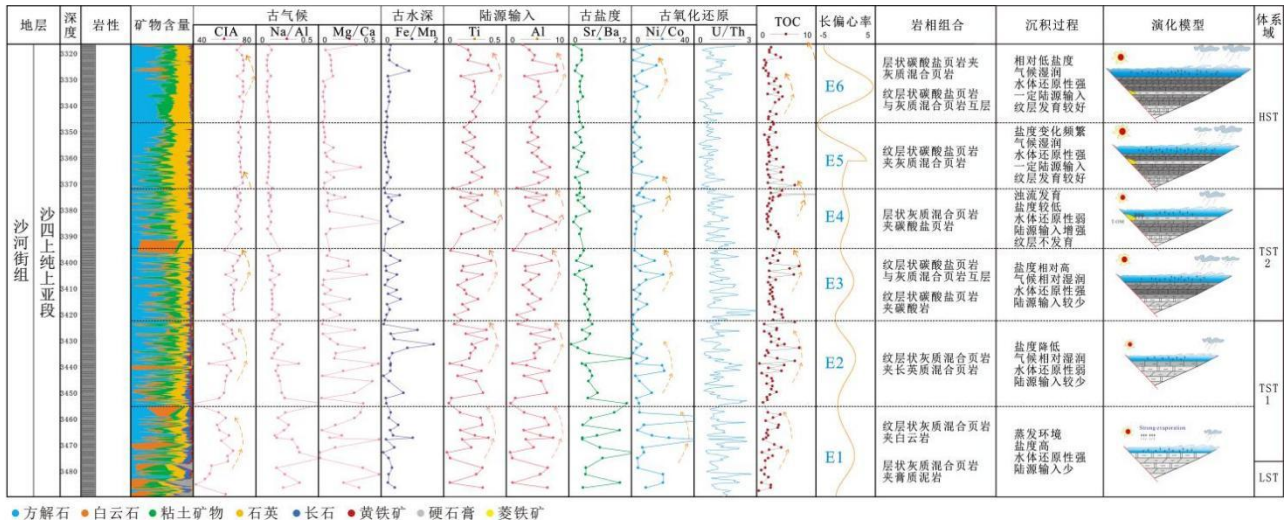


图6 牛页1井偏心率、斜率、岁差滤波结果综合柱状图

Fig.6 Comprehensive histogram of filtering results for eccentricity, obliquity and precession in well Niuye-1

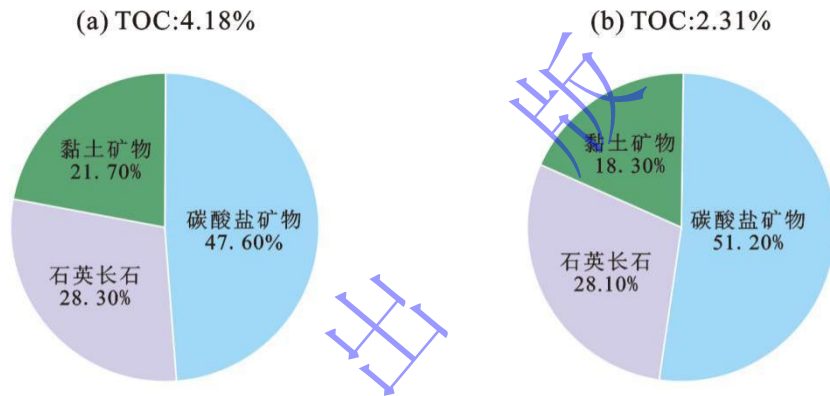


图7 牛页1井高偏心率半周期与低偏心率半周期组分构成差异

(a) 高偏心率半周期; (b) 低偏心率半周期

Fig.7 Differences in component composition between high- and low-eccentricity semi-cycles, well Niuye-1

选取一个偏心率周期详细剖析偏心率对岩相组合的控制作用 (图8): 当偏心率较低时, 地球公转轨道接近正圆, 季节性弱, 夏季风强度小, 降水少。此时页岩组分构成上碳酸盐矿物含量较高, 平均为 55%, 黏土矿物含量平均为 12%, 石英和长石含量平均为 31%, TOC 平均为 2.6%; 纹层特征上, 纹层性差, 碳酸盐纹层往往不连续, 多见方解石透镜体; 岩相组合类型主要为层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩。

当偏心率增大时, 地球公转轨道椭率增加, 季节性开始增强, 夏季降水增多。此时页岩组分构成上碳酸盐矿物含量降低, 平均为 47%, 石英和长石含量升高, 平均为 30%, TOC 升高, 平均为 3.46%; 纹层特征上, 以方解石纹层, 黏土粉砂纹层和富有机质黏土纹层为主; 岩相组合类型主要为纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层。

当偏心率极大时, 地球公转轨道椭率最大, 季节性强, 夏季风强度大, 降水量大。此时页岩组分构成上碳酸盐矿物平均含量为 50%, 黏土矿物含量升高, 平均为 23%, 石英长石含量平均为 25%, TOC 平均为

3.1%；纹层特征上，以方解石纹层，黏土粉砂纹层和富有机质黏土纹层为主；岩相组合类型主要为纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层。

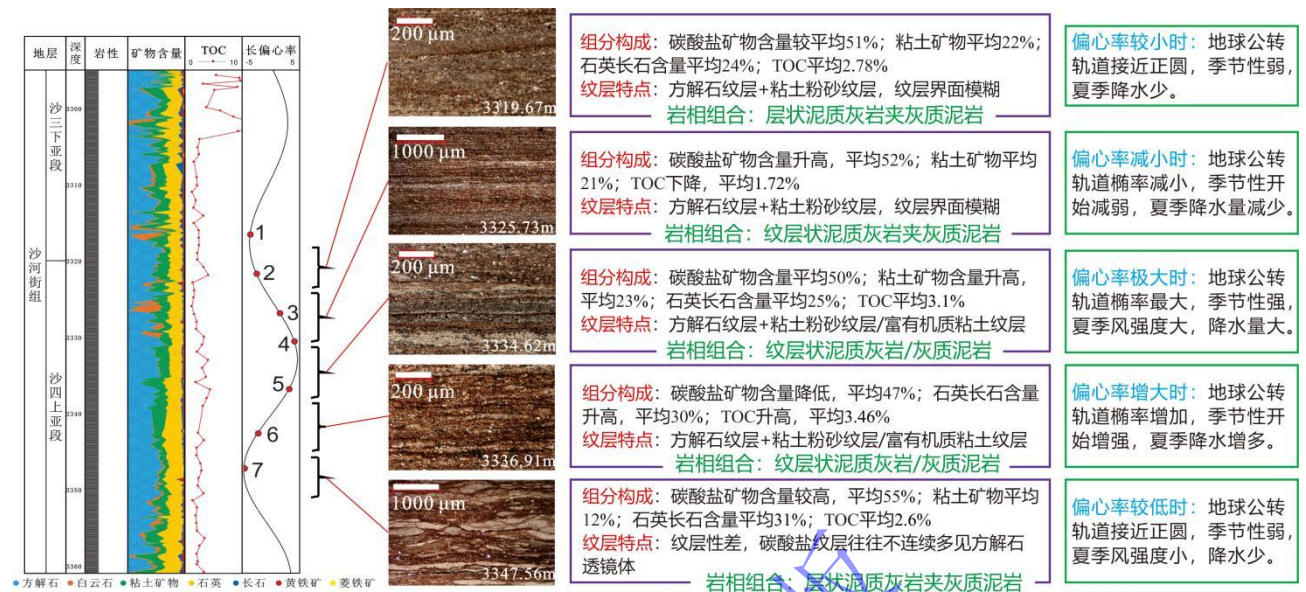


图 8 牛页 1 井偏心率对岩相组合控制作用

Fig.8 Effect of eccentricity on lithofacies assemblages, well Niuye-1

当偏心率减少时，地球公转轨道椭圆率减小，季节性开始减弱，夏季降水量减少。此时页岩组分构成上碳酸盐矿物含量升高，平均为 52%，黏土矿物平均含量为 22%，TOC 下降，平均为 1.72%；纹层特点上，以方解石纹层、黏土粉砂纹层为主，纹层界面模糊；岩相组合类型主要为纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩。

当偏心率较小时，地球公转轨道接近正圆，季节性弱，夏季降水少。此时页岩组分构成上碳酸盐矿物含量平均为 51%，黏土矿物平均含量为 22%，石英和长石含量平均为 24%，TOC 平均为 2.78%；纹层特征上，以方解石纹层，黏土粉砂纹层为主，纹层界面模糊；岩相组合类型主要为层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩。

3.3 偏心率和岩相组合耦合关系

根据上述分析，可知地球轨道周期（偏心率、斜率、岁差）控制着气候旋回，决定着页岩沉积旋回，对页岩岩相组合具有明显的调控作用，1 个长偏心率对应一套岩相组合，是页岩岩相组合的主控因素（图 9）。

以牛页 1 井（图 6）为例，根据前文方法，可以按照偏心率变化将牛页 1 井沙四上亚段分为六个阶段，自下而上分别为 E1、E2、E3、E4、E5、E6。E1 段周期内气候干旱，蒸发环境较强，陆源输入较小，岩相组合为层状灰质混合页岩夹膏质泥岩、纹层状碳酸盐页岩夹碳酸岩；E2 段的偏心率增加阶段，季节性开始增强，气候相对湿润，岩相组合主要为纹层状灰质混合页岩夹长英质混合页岩；E3 段底部处于偏心率较小时，夏季风强度减弱，陆源输入减少，岩相组合主要为纹层状碳酸盐页岩夹碳酸岩，随偏心率增加，E3

段上部岩相组合主要为纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层。E4 段偏心率较小且变化范围局限，该阶段伴随浊流发育，纹层发育不明显，岩相组合为层状灰质混合页岩夹碳酸盐页岩；E5 段在季节性增强、气候湿润、湖水较深的情况下，纹层很好地保存下来，碳酸盐矿物含量较低，该段岩相组合为纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩；E6 段下部偏心率增加阶段，季节性作用较明显，具有较多的降雨量与陆源输入，发育纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层组合，偏心率达极大后上部呈减小趋势，夏季风强度减弱，陆源输入减少，岩相组合为层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩。



图9 天文旋回对页岩岩相组合的调控作用示意

Fig.9 Regulation of shale lithofacies assemblages by astronomical cycles

以典型连井地质剖面为例，分析偏心率与岩相组合的耦合关系，该剖面位于湖盆中部，自西缘起始，穿过博兴洼陷、牛庄洼陷至湖盆东部（图 10）。在 E1 偏心率周期阶段内，都处于滨浅湖阶段，东西两侧的三角洲坝体为洼陷提供物源，湖盆中心蒸发作用强烈，洼陷主要沉积砂岩、膏质泥岩、白云岩夹层型岩相组合（樊页 1 井、牛页 1 井等）。随着向上 E2~E5 阶段，气候一直在变湿润，周边砂体后退，但降水、温度等会带动陆源输入、湖水盐度氧化还原程度的频繁变化，导致垂向上灰泥含量比不断变化，从而产生由灰质混合页岩夹长英质混合页岩—纹层状碳酸盐页岩与灰质混合页岩互层—纹层状碳酸盐页岩夹灰质混合页岩岩相组合的变化，总体呈现碳酸盐矿物含量增加的变化趋势。通过该剖面东西向对比、分析发现，在洼陷中心位置岩相组合变化更加频繁与明显，在 E1 偏心率周期阶段，牛庄洼陷与博兴洼陷发育的页岩岩相组合类型具有差异，牛页洼陷中心在该阶段发育膏质泥岩夹层，而博兴洼陷则主要沉积白云岩夹层，总体反映干旱的气候特征。

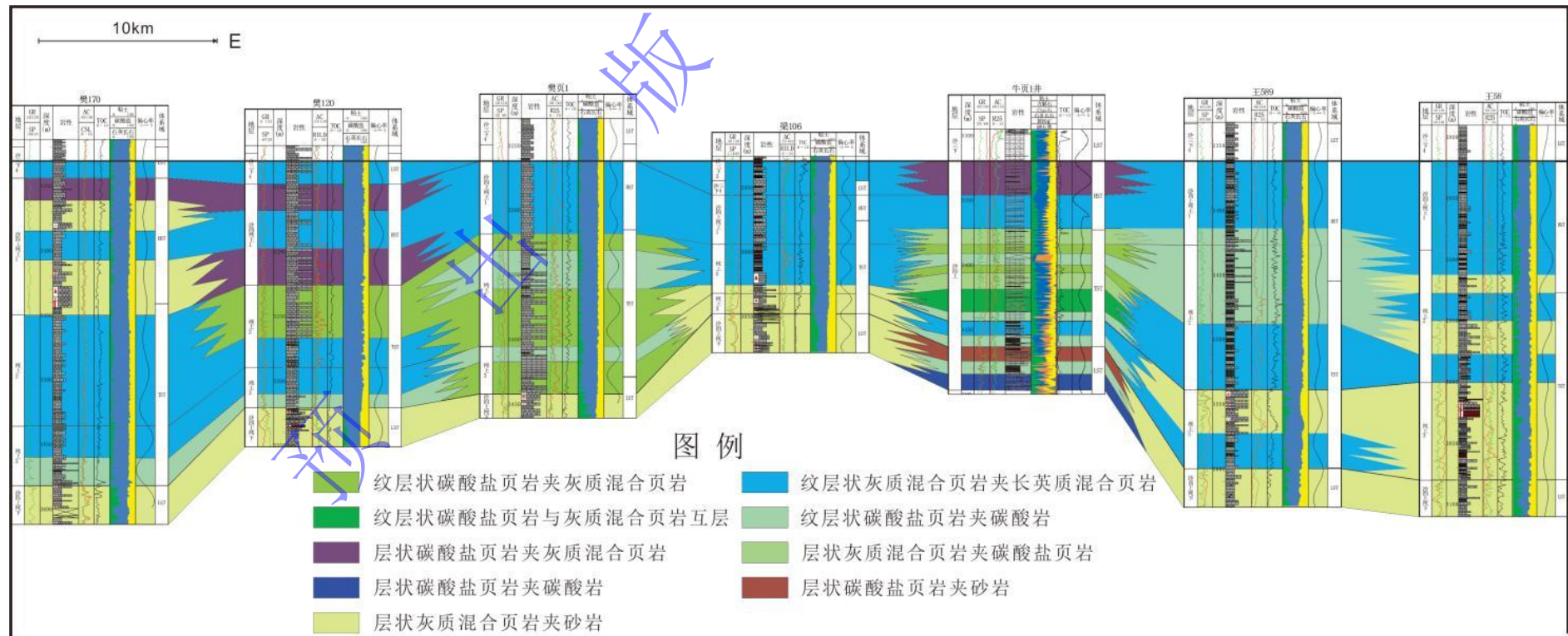


图 10 东营凹陷沙四上亚段东西向岩相组合连井图（连井剖面位置见图 1）

Fig.10 East-west lithofacies assemblage correlation diagram of the upper Sha-4 member in the Dongying Depression (profile location in Fig.1)

4 结论

(1) 偏心率、斜率、岁差等这些地球轨道参数的变化控制了古气候及陆源输入的周期性变化, 偏心率变化影响了季节性气候的发生、时间的长短及季节差异性明显与否。偏心率、斜率及岁差的共同制约作用影响气候特征, 陆源输入、古气候、古水深、古水体盐度及水体氧化还原性呈现不同的阶段性特征, 为沉积作用的发生提供了条件, 综合影响了研究区岩相及岩相组合的旋回变化。

(2) 偏心率低峰值时, 降雨较少导致表层盐度相对高, 有利于白云岩类干旱环境下产生蒸发物沉积, 水体较浅且弱分层, 不利于连续性纹层发育, 因此较发育层状泥质灰岩夹灰质泥岩, 部分可见白云岩夹层; 偏心率高峰值季节性强, 夏季风强度大, 降水量大, 降水导致表层盐度降低, 水深增加, 水体分层较强, 纹层发育较好易保存, 岩相组合类型主要为纹层状泥质灰岩/灰质泥岩。天文周期约束下的岩相组合发育规律, 可以为盆地内页岩油甜点精细预测与评价提供重要指导。

参考文献 (References)

- [1] 张顺, 刘惠民, 陈世悦, 等. 中国东部断陷湖盆细粒沉积岩岩相划分方案探讨: 以渤海湾盆地南部古近系细粒沉积岩为例[J]. 地质学报, 2017, 91(5): 1108-1119. [Zhang Shun, Liu Huimin, Chen Shiyue, et al. Classification scheme for lithofacies of fine-grained sedimentary rocks in faulted basins of eastern China: Insights from the fine-grained sedimentary rocks in Paleogene, southern Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(5): 1108-1119.]
- [2] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件: 以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 828-838. [Liu Bo, Shi Jiaxin, Fu Xiaofei, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in First member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong Sag, Songliao Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 828-838.]
- [3] 操应长, 梁超, 韩豫, 等. 基于物质来源及成因的细粒沉积岩分类方案探讨[J]. 古地理学报, 2023, 25(4): 729-741. [Cao Yingchang, Liang Chao, Han Yu, et al. Discussions on classification scheme for fine-grained sedimentary rocks based on sediments sources and genesis[J]. Journal of Palaeogeography, 2023, 25(4): 729-741.]
- [4] 王淳, 石巨业, 朱如凯, 等. 天文周期驱动下湖相细粒沉积岩有机质富集模式: 以东营凹陷 LY1 井沙三下—沙四上亚段为例[J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.016>. [Wang Bo, Shi Juye, Zhu Rukai, et al. Organic matter enrichment model of lacustrine fine-grained sedimentary rocks driven by astronomical cycles: A case study of the lower Es3 and upper Es4 sub-member in well LY1, Dongying Sag[J/OL]. Astronomy & Astrophysics. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2023.016>.]
- [5] Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 428(1): 261-285.
- [6] 吴怀春, 张世红, 黄清华. 中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 159-169. [Wu Huaichun, Zhang Shihong, Huang Qinghua. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin of northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 159-169.]
- [7] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1205-1214. [Shi Juye, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1205-1214.]
- [8] 张坦, 张昌民, 瞿建华, 等. 基于米兰科维奇理论的高频沉积旋回识别与对比: 以准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组为例[J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(5): 54-61. [Zhang Tan, Zhang Changmin, Qu Jianhua, et al. Identification and comparison of high frequency cycles based on Milankovitch theory: A case study of Baikouquan Formation in Mahu Depression, Junggar Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2017, 41(5): 54-61.]

- [9] 孙善勇, 刘惠民, 操应长, 等. 湖相深水细粒沉积岩米兰科维奇旋回及其页岩油勘探意义: 以东营凹陷牛页 1 井沙四上亚段为例[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(4): 846-858. [Sun Shanyong, Liu Huimin, Cao Yingchang, et al. Milankovitch cycle of lacustrine deepwater fine-grained sedimentary rocks and its significance to shale oil: A case study of the upper Es₄ member of well NY1 in Dongying Sag[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(4): 846-858.]
- [10] Huang H, Gao Y, Ma C, et al. Organic carbon burial is paced by a ~173-ka obliquity cycle in the middle to high latitudes[J]. Science Advances, 2021, 7(28): eabf9489.
- [11] Westerhold T, Röhl U. High resolution cyclostratigraphy of the Early Eocene: New insights into the origin of the Cenozoic cooling trend[J]. Climate of the Past, 2009, 5(3): 309-327.
- [12] Walters A P, Tierney J E, Zhu J, et al. Climate system asymmetries drive eccentricity pacing of hydroclimate during the Early Eocene greenhouse[J]. Science Advances, 2023, 9(31): eadg8022.
- [13] 刘惠民, 杨怀宇, 张鹏飞, 等. 古湖泊水介质条件对混积岩相组合沉积的控制作用: 以渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组三段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 297-306. [Liu Huimin, Yang Huaiyu, Zhang Pengfei, et al. Control effect of paleolacustrine water conditions on mixed lithofacies assemblages: A case study of the Palaeogene Es₃, Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 297-306.]
- [14] 黎茂稳, 马晓潇, 金之钧, 等. 中国海、陆相页岩层系岩相组合多样性与非常规油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 1-25. [Li Maowen, Ma Xiaoxiao, Jin Zhijun, et al. Diversity in the lithofacies assemblages of marine and lacustrine shale strata and significance for unconventional petroleum exploration in China[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 1-25.]
- [15] 杨勇强, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 东营凹陷沙四上亚段滩坝物源体系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 46-53. [Yang Yongqiang, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, et al. Beach bar-provenance system on the Upper part of Fourth member of Shahejie Formation, in Dongying Sag[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(1): 46-53.]
- [16] 张超, 张立强, 陈家乐, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及判别[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(5): 713-723. [Zhang Chao, Zhang Liqiang, Chen Jiale, et al. Lithofacies types and discrimination of Paleogene fine-grained sedimentary rocks in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(5): 713-723.]
- [17] 田继军, 姜在兴. 东营凹陷沙河街组四段上亚段层序地层特征与沉积体系演化[J]. 地质学报, 2009, 83(6): 836-846. [Tian Jijun, Jiang Zaixing. Sequence stratigraphy characteristics and sedimentary system evolution of upper Es₄ in the Dongying Depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 836-846.]
- [18] 郭兴伟, 施小斌, 丘学林, 等. 济阳拗陷新生代构造沉降特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(3): 6-11. [Guo Xingwei, Shi Xiaobin, Qiu Xuelin, et al. Characteristics of Cenozoic tectonic subsidence in Jiyang Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2006, 30(3): 6-11.]
- [19] 盛文波, 操应长, 刘晖, 等. 东营凹陷古近纪控盆断层演化特征及盆地结构类型[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(3): 290-296. [Sheng Wenbo, Cao Yingchang, Liu Hui, et al. Evolutionary characteristics of the Palaeogene basin-controlling boundary faults and types of basin architectures in the Dongying Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3): 290-296.]
- [20] 刘惠民, 张顺, 王学军, 等. 陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征: 以济阳拗陷东营凹陷沙四上亚段页岩为例[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 30-48. [Liu Huimin, Zhang Shun, Wang Xuejun, et al. Types and characteristics of shale lithofacies combinations in continental faulted basins: A case study from upper sub-member of Es₄ in Dongying Sag, Jiyang Depression[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 30-48.]
- [21] Milliken K L, Rudnicki M, Awwiller D N, et al. Organic matter-hosted pore system, Marcellus Formation (Devonian), Pennsylvania[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 177-200.
- [22] Krumbein W C. The mechanical analysis of fine-grained sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1932, 2(3): 140-149.
- [23] 周立宏, 蒲秀刚, 陈长伟, 等. 陆相湖盆细粒岩油气的概念、特征及勘探意义: 以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. 地球科学, 2018, 43(10): 3625-3639. [Zhou Lihong, Pu Xiugang, Chen Changwei, et al. Concept, characteristics and prospecting significance of fine-grained sedimentary oil gas in terrestrial lake basin: A case from the Second member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong Sag, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 2018, 43(10): 3625-3639.]
- [24] 刘惠民, 王勇, 杨永红, 等. 东营凹陷细粒混积岩发育环境及其岩相组合: 以沙四上亚段泥页岩细粒沉积为例[J]. 地球科学, 2020, 45(10): 3543-3555. [Liu Huimin, Wang Yong, Yang Yonghong, et al. Sedimentary environment and lithofacies of fine-grained hybrid sedimentary in Dongying Sag: A case of fine-grained sedimentary system of the Es₄[J]. Earth Science, 2020, 45(10): 3543-3555.]

- [25] 黄春菊. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状[J]. 地学前缘, 2014, 21 (2): 48-66. [Huang Chunju. The current status of cyclostratigraphy and astrochronology in the Mesozoic[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(2): 48-66.]
- [26] Hinnov L A, Park J J. Strategies for assessing Early--Middle (Pliensbachian--Aalenian) Jurassic cyclochronologies[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1999, 357(1757): 1831-1859.
- [27] Ikeda M, Tada R. Long Period astronomical cycles from the Triassic to Jurassic bedded chert sequence (Inuyama, Japan); geologic evidences for the chaotic behavior of solar planets[J]. Earth, Planets and Space, 2013, 65(4): 351-360.
- [28] Hinnov L A. Cyclostratigraphy and its revolutionizing applications in the earth and planetary sciences[J]. GSA Bulletin, 2013, 125(11-12): 1703-1734.
- [29] Li M S, Kump L R, Hinnov L A, et al. Tracking variable sedimentation rates and astronomical forcing in Phanerozoic paleoclimate proxy series with evolutionary correlation coefficients and hypothesis testing[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 501: 165-179.
- [30] Li M S, Hinnov L A, Kump L. *Acycle*: Time-series analysis software for paleoclimate research and education[J]. Computers & Geosciences, 2019, 127: 12-22.

Lithofacies Association Types and Their Development Due to Astronomical Cycle Constraints: A case study of the Lower Eocene Shahejie Formation on the southern slope of the Dongying Depression

ZHANG Shun^{1,2}, LIU HuiMin², HAN Yu³, LIANG Chao³, LI JunLiang^{1,2}, HUANG ZhiMin³

1. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257015, China

2. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China

3. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China

Abstract: [Objective] This study of the shale sequences of the upper subsection of the Sha 4 Member of the Shahejie Formation was conducted to identify the astronomical cycles recorded in the study area, and to summarize the effect of orbital eccentricity on shale sedimentation and lithofacies association development. [Methods] Lithofacies associations were delineated by detailed core observation and experimental testing of core sections from particular wells and by considering sedimentary paleoenvironments. GR logging curves were used as surrogate indicators for data preprocessing, spectral analysis, filtering and tuning analysis. [Results] Interbedded combinations of laminated carbonate shale and calcareous mudstone are most developed, along with their lithofacies associations. The eccentricity, obliquity and precession of the Earth's planetary orbital cycles control climatic cycles and determine the extent of cyclic shale sedimentation, producing a significant regulating effect on lithofacies associations. A single long eccentricity corresponds to a specific lithofacies association. [Conclusions] Increases in the orbital eccentricity of the Earth lead to enhanced seasonality and more summer precipitation, favoring the deposition of long-chain minerals. The main lithofacies during that time comprise interbedded laminated carbonate shale and calcareous mudstone. When the orbital eccentricity of the Earth decreases, seasonality weakens and summer precipitation is reduced. At this point, the shale composition becomes enriched with carbonate minerals, and the main resulting lithofacies association is a combination of laminated carbonate shale interbedded with calcareous mixed mudstone. The findings of this study provide important guidance for detailed prediction and evaluation of shale oil sweet spots.

Key words: lithofacies association; astronomical cycles; Shahejie Formation; lacustrine shale; shale oil