

doi:10.3799/dqkx.2015.174

# 北黄海东部拗陷始新统米兰科维奇旋回特征

吴淑玉<sup>1,2</sup>, 刘俊<sup>1,2,3\*</sup>

1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东青岛 266071

2. 青岛海洋地质研究所海洋油气与水合物资源地质室, 山东青岛 266071

3. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

**摘要:** 米兰科维奇旋回是记录在沉积地层中的表现形式, 其代表的时间涵义是进行高分辨率地层划分和对比的有效手段, 从地层中揭示的米兰科维奇旋回, 可以完善地层学尤其是旋回地层学理论。以北黄海东部拗陷为研究对象, 根据 J. Laskar 的解决方案计算出该区始新统的米兰科维奇旋回周期为: 125 ka 和 99 ka 的偏心率周期, 51 ka 和 39 ka 的地轴斜率周期, 23 ka 和 19 ka 的岁差周期。通过对 3 口井的 GR(自然伽马)和 SP(自然电位)测井曲线进行频谱分析, 发现其频谱峰值与天文周期存在着良好的对应关系, 因此可以判定该区域地层中保存着完好的米兰科维奇沉积旋回。地层旋回厚度存在 13.03~15.89 m 的长周期、3.70~5.21 m 的中周期和 2.17~2.94 m 的短周期, 并由此计算地层的沉积速率为 121.20~127.12 m/Ma。从隆起沿着斜坡往湖盆中心, 沉积持续时间越长且沉积厚度也越厚, 但沉积速率相对稳定。通过连续小波变换对始新统地层进行小层划分, 划分出 6 期沉积体, 以每个沉积体为独立窗口进行频谱分析计算出沉积的持续时间和速率, 从气候变化的影响分析每个阶段的沉积环境。从下往上层序地层 E<sub>6</sub> 期为低水位体系域, E<sub>5</sub> 和 E<sub>4</sub> 为湖泊扩张体系域, E<sub>3</sub> 为高位体系域, E<sub>2</sub> 和 E<sub>1</sub> 为湖泊收缩体系域。以上方法可以证明米兰科维奇进行沉积旋回分析是一种有效的方法。

**关键词:** 北黄海东部拗陷; 始新统; 米兰科维奇; 沉积旋回; 沉积速率; 沉积持续时间; 地球物理。

**中图分类号:** P31

**文章编号:** 1000-2383(2015)11-1933-12

**收稿日期:** 2015-03-29

## Characteristics of Milankovitch Cycle in Eocene Formation, Eastern Depression of the North Yellow Sea Basin

Wu Shuyu<sup>1,2</sup>, Liu Jun<sup>1,2,3\*</sup>

1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China

2. Marine Hydrocarbon and Gas Hydrate Geology Division, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Milankovitch cycle is the manifestation of sedimentary stratigraphy recorded, its time implication is an effective means of high resolution stratigraphic division and correlation, from the reservation information of Milankovitch cycles, which enrich stratigraphic theory, especially cyclostratigraphic theory. Characteristics of Milankovitch cycle in the eastern depression of the North Yellow Sea basin are explored in this study. Major parameters of Milankovitch cycle are worked out by J. Laskar solution in the Eocene formation: the eccentricity cycle is 125 ka and 99 ka; the obliquity cycle is 51 ka and 39 ka; and the precession cycle is 23 ka and 19 ka. It is found by frequency spectrum analysis of the GR and SP well logging of three wells that the spectrum peak cycle corresponds well to its astronomy cycle, indicating well-preserved Milankovitch cycle in the formation. Stratigraphic cycle thickness is of 13.03 to 15.89 m long-cycle, 3.70 to 5.21 m mid-cycle and 2.17 to 2.94 m short-cycle, by which the formation sedimentation rate is calculated as between 121.20 to 127.12 m/Ma. The sedimentary duration is increasingly longer and the deposition thickness is increasingly thicker from uplift along the slope toward the center of the lake basin. How-

**基金项目:** 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室基金项目 (Nos. MRE201318, MRE201121, MRE201115); 国家海洋局海底重点实验室基金项目 (No. KLSG1102); 中国地质调查项目 (No. GZH200700405); 国土资源部公益性行业科研专项课题 (No. 201211086-09)。

**作者简介:** 吴淑玉 (1985-), 女, 助理研究员, 主要从事地震、测井资料解释和反演等地球物理研究工作。E-mail: hmwshuyu@163.com

\* **通讯作者:** 刘俊, E-mail: vnlj@163.com

**引用格式:** 吴淑玉, 刘俊, 2015. 北黄海东部拗陷始新统米兰科维奇旋回特征. 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1933-1944.

ever, the sedimentation rate is relatively stable. As to sublayer division of Eocene with the continuous wavelet transform, it can be divided into six sedimentary bodies, with each body as a separate window for spectrum analysis to calculate the duration and rate of sedimentation. From the perspective of the impact of climate change on the sedimentary environment, it is concluded that,  $E_6$  period was low water system tract,  $E_5$  and  $E_4$  were lake expand system tract,  $E_3$  was highstand system tract,  $E_2$  and  $E_1$  were lakes contraction system tract from the bottom to top sequence stratigraphy. It is confirmed that Milankovitch cycle is an effective approach for depositional cycle analysis.

**Key words:** eastern depression of the North Yellow Sea basin; Eocene; Milankovitch; depositional cycle; sedimentation rate; sedimentation duration; geophysics.

## 0 引言

米兰科维奇理论认为,地球轨道偏心率、地轴倾角和岁差三要素的周期性变化影响地球表层单位面积所接收到的日照量,日照量变化直接影响气候,气候的周期性波动影响海(湖)平面的规律性变化(李凤杰等,2007).这些变化都记录在沉积地层中,表现在沉积结构、岩性、岩相的变化,相对应的物性参数及其测井曲线记录下了这种变化(李庆谋,1996).

地层定年有很多种方法(敬海鑫等,2015;乔培军等,2015),常用的是古生物和同位素测年等方法,但是它们的分辨率相对较低,纵向不连续,而且采样点之间有可能存在沉积间断,因此用这些资料确定的沉积速率总体上小于或等于实际的沉积速率(张占松等,1999).而测井曲线纵向分辨率高,具有纵向连续的特点,测井曲线是识别米兰科维奇(简称米氏)周期的基础,对古气候变化有良好的记录,是反映沉积环境变化良好的替代性指标.因此本文在GR(自然伽马)曲线为主、SP(自然电位)曲线为辅的基础上进行频谱分析,通过在频率域中寻找与米氏周期比率相等的沉积旋回周期,以判断米氏旋回的存在,并且计算北黄海东部坳陷井点始新统的沉积持续时间和速率,以构造运动和层序地层学理论为指导,采用连续小波变换对始新统地层进行高分辨率的小层划分,以各个沉积体为独立窗口对GR曲线进行频谱分析,分别计算出各个阶段的沉积持续时间和速率,最后对地层进行高分辨率的沉积环境分析.

## 1 地质背景

北黄海盆地位于黄海北部,盆地的北部为辽东—海洋岛隆起区,南部为胶北—刘公岛隆起区,西隔渤海口与渤海湾盆地相望,东邻安州盆地,构造走向为NE向,面积约为2210 km<sup>2</sup>.该盆地是印支—

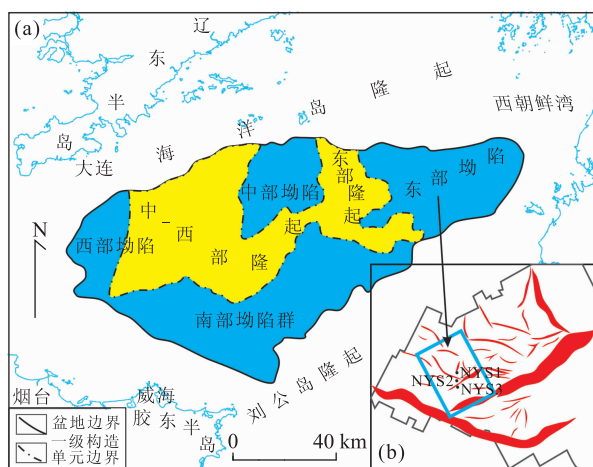


图 1 北黄海盆地构造区划

Fig. 1 Geotectonic map of North Yellow Sea basin

图 1 据梁杰等(2013)修改;图 1a 黄色区域代表中生代,蓝色区域代表新生代;图 1b 中蓝色边框为本文研究区块,红色区域代表构造单元

燕山运动时期在中朝板块东部(华北地块东延部分)区域隆起背景之上发育的以中、新生代为主陆内断陷盆地.盆地自东向西、由北往南可划分为东部坳陷、东部隆起、中部坳陷、中—西部隆起、西部坳陷和南部坳陷群 6 个一级构造单元(图 1).自 20 世纪 80 年代以来,于盆地的东部坳陷发现钻井 20 余口,并在中、新生界发现工业性油流,说明东部坳陷具有一定的油气生成潜力.

古近纪中期,东部太平洋板块由原先的 NNW 向斜向欧亚板块的俯冲逐步转为 NW 向正向俯冲,由于这一区域应力场改变导致坳陷转为张扭状态,始新世时期,挤压作用停止,盆地张性断裂活跃,湖盆快速扩张,主要发育厚度较大的滨湖—河流相沉积体系,储层保存完整,砂泥岩和砂砾岩互层发育,旋回性强,对气候变化反映灵敏.本文通过对北黄海东部坳陷始新统的 GR 和 SP 曲线进行频谱分析,分析该区沉积与米氏周期对应的比较稳定的旋回周期,进一步分析地层的沉积旋回变化和高频层序演化的控制因素.

## 2 分析方法

经过前人的研究证明,地质记录中的米氏旋回存在于深海、湖泊和河流沉积物中(Hays *et al.*, 1976).在缺乏准确的地层测年数据下,判断地层中是否存在米氏旋回,只能通过间接的方法求取,假设米氏旋回周期比率关系在一定的地质历史时期是稳定的,如果能够在地层所包含的各种旋回周期中找到与米氏周期比率相等的关系,那么就能够证明米氏旋回的存在(李凤杰等,2003).对频谱曲线分析每一个峰值的主频,求得旋回厚度及其之间的比率关系,如果分析层段的旋回厚度比率与天文旋回周期具有相似或相同的比率,就说明地层中保存着反映古气候变化的信息(王永军等,2007).

信号分析之前通过 Matlab 软件编写程序消除了测井曲线的高频干扰和低频背景,通过小波重构信号对生成信号进行标准化,再利用中值滤波法去除白噪.对于频谱分析,采用德国不莱梅大学 Boris Priehs 基于 Matlab 开发的 Redfits 选择置信度为 99%、95%和 90%的峰值频率进行分析,分析的结果用 Matlab 进行绘图.

本文采用了Analysieries 2.0.8软件根据 Laskar *et al.* (2011)的解决方案计算了 38°N(北黄海东部

坳陷)始新世 36.5~53.0 Ma 期间日照量、偏心率(E)、地轴斜率(O)和岁差(P)变化的理论值(图 3),采样间隔为 1 ka,对以上数据分别进行频谱分析后(图 2),获得了 4 个偏心率周期:402 ka( $E_4$ )、125 ka ( $E_3$ )、99 ka ( $E_2$ )、95 ka ( $E_1$ ), 2 个斜率周期: 51 ka( $O_2$ )、39 ka( $O_1$ ), 3 个岁差周期: 23 ka( $P_3$ )、22 ka( $P_2$ )、19 ka( $P_1$ ). 这些理论轨道周期之间存在的稳定比例关系,可作为本次研究中确定天文周期的基准.

判断地层中发现的旋回是否为米氏旋回,多数观点认为,地质历史时期变化比较缓慢,具有相对的稳定性,其周期内的比率在一定的地质历史时期是稳定的.如果能够在地层所包含的各种旋回中找到与米氏周期比率相等的关系,就可以认为该层段受米氏旋回影响.反之,如果不能保持恒定比率,则旋回性可能是与米氏周期无关的变化作用(如成岩作用的阶段性、浊流频率或其他沉积现象)的结果(Brescia *et al.*, 1996).为了验证米氏旋回的存在,不同学者提出了不同的方法. Bailey (2001)认为在研究区邻近地区相同层段地层中若能找到相同频率的峰值,则米氏旋回确实存在. Lever (2004)、Poletti *et al.* (2004)认为应当分析同一研究层段其他不同的替代指标或不同地区利用同一替代指标进行分析以

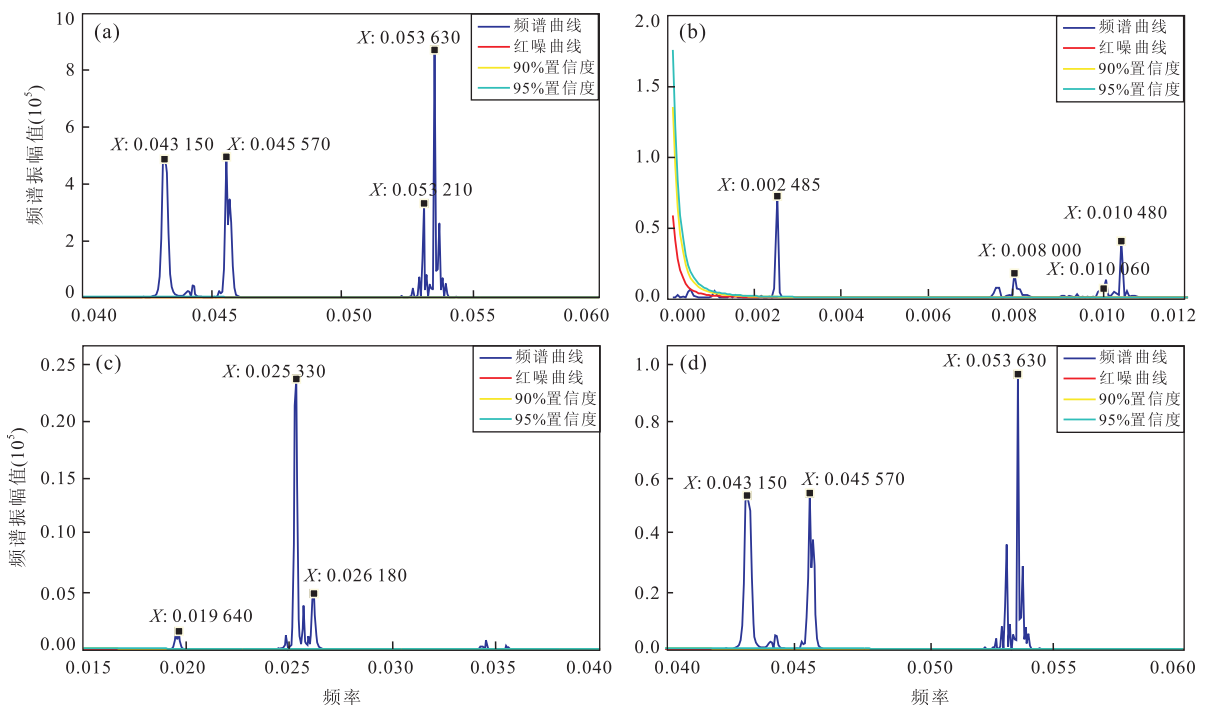


图 2 36.5~53.0 Ma 期间的日照量、偏心率、斜率和岁差的频谱

Fig. 2 Insolation, eccentricity, precession and obliquity frequency spectrum of 36.5 to 53.0 Ma

X 表示频率. a. 始新统日照量频谱分析; b. 始新统偏心率频谱分析; c. 始新统斜率频谱分析; d. 始新统岁差频谱分析

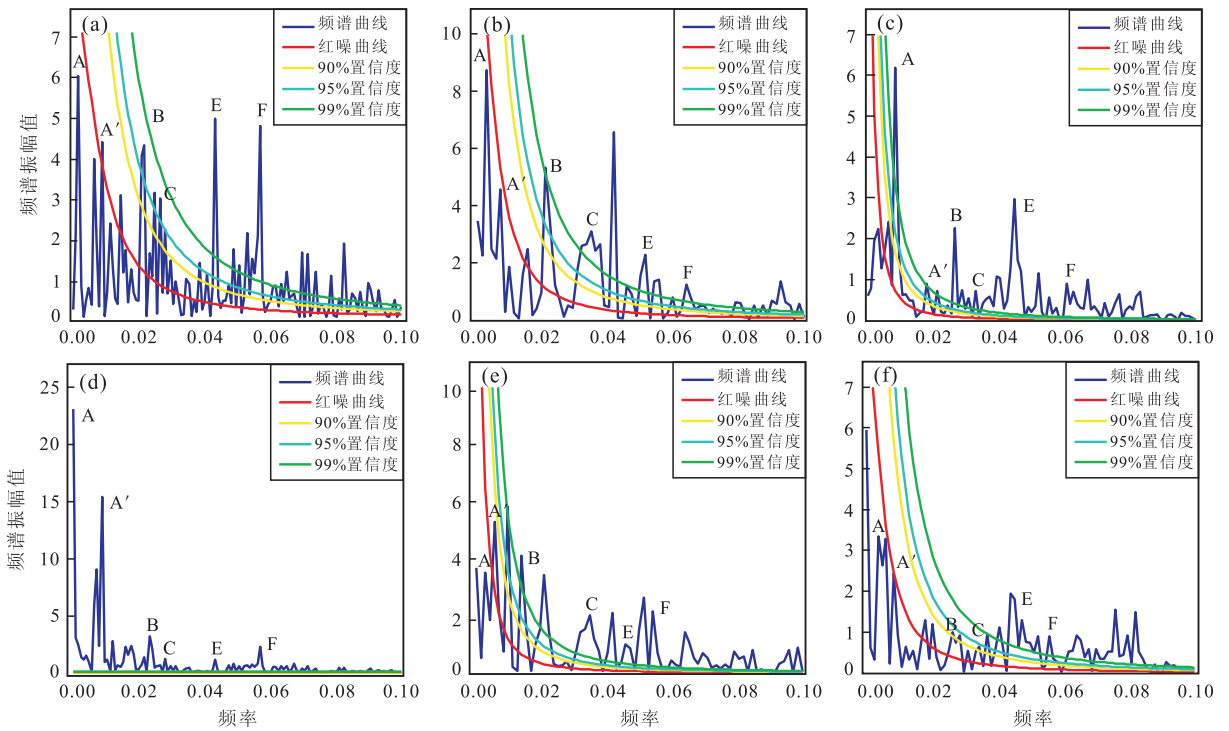


图 3 NYS3 井、NYS2 井和 NYS1 井的 GR 和 SP 测井曲线频谱

Fig. 3 Diagram of GR and SP well logging frequency spectrum of NYS3 well, NYS2 well and NYS1 well

a. NYS3 井始新统 GR 频谱分析; b. NYS2 井始新统 GR 频谱分析; c. NYS1 井始新统 GR 频谱分析; d. NYS3 井始新统 SP 频谱分析; e. NYS2 井始新统 SP 频谱分析; f. NYS1 井始新统 SP 频谱分析

提高精确度。

首先对北黄海东部坳陷 NYS3 井的 GR 和 SP 测井曲线进行预处理, 采用一维离散小波多尺度分解去除高频干扰和消除低频背景, 通过小波重构信号对测井曲线进行标准化后采用中值滤波方法去除白噪. 每条测井曲线的采样间隔为 0.125 m, 为了便于对比, GR 和 SP 测井曲线应取相同深度段, 进行快速傅里叶变换(FFT), 从深度域转换成频率域, 得出频谱曲线. 频谱曲线中的频率高点表示其深度序列中的相对重要性, 因此高点的谐频对应于曲线的主频, 将其转化为相应波长, 根据采样间隔从而得出旋回厚度。

笔者对 NYS3 井的 1342~2593 m 井段的 GR 和 SP 测井曲线进行频谱分析表明, 该井段存在米氏旋回周期(图 3a 和 3d). 图 3 中纵坐标表示相对强度, 横坐标表示频率(旋回个数/m), 图 3 中 A、A'、B、C、E、F 的峰值频率分别为 GR: 0.008 20, 0.009 60, 0.025 58, 0.027 18, 0.044 00, 0.057 60; SP: 0.008 00, 0.009 60, 0.024 00, 0.027 18, 0.044 00, 0.057 60. 对应的旋回厚度为 GR: 15.26, 13.03, 4.89, 4.60, 2.84, 2.17; SP: 15.64, 13.03, 5.21, 4.60, 2.84, 2.17. 对应的旋回厚度比为 GR:

1.00:0.85:0.32:0.30:0.19:0.14; SP: 1:0.83:0.33:0.29:0.18:0.14. 而根据 J. Laskar 方案(Laskar *et al.*, 2011) 计算的天文周期: 125 ka ( $E_3$ ), 99 ka ( $E_2$ ), 51 ka ( $O_2$ ), 39 ka ( $O_1$ ), 23 ka ( $P_3$ ), 19 ka ( $P_1$ ), 之间的比率为: 1.00:0.79 2:0.312:0.304:0.184:0.152. 可以发现, A、A'、B、C、E、F 各峰值与天体轨道的变化周期之间均有良好的对应关系, 因此可以认为 15.26~15.64 m 和 13.03 m 的旋回分别与 125 ka 和 99 ka 的偏心率周期相对应; 4.89~5.21 m 和 4.60 m 的旋回分别与 51 ka 和 39 ka 的地轴斜率周期相对应; 2.84 m 和 2.17 m 的旋回分别与 39 ka 和 23 ka 的岁差周期相对应。

用类似的方法, 对坳陷内部保存较完整的 NYS1 井和 NYS2 井中的始新统的 GR 和 SP 测井曲线进行频谱分析, 其频谱分析见图 3, 由于 NYS2 的 2178~2277 m 段的 SP 曲线存在严重的畸形, 故将这一段剔除. 得出各层段的旋回厚度及其比值, 并与米氏旋回周期进行了比较, 然后计算出各层段的沉积持续时间和速率, 结果见表 1.

通过分析表 1 的数据得知, 北黄海东部坳陷始新统的地层旋回厚度比与米氏周期比十分接近: A' 旋回与 A 旋回的厚度比为 0.72~0.86, 与对应的米

表 1 北黄海东部坳陷始新统地层的米兰科维奇主频、旋回厚度、厚度比、沉积持续时间和沉积速率

Table 1 Dominant frequency, thickness, thickness ratio, sedimentation duration and sedimentation rate of Milankovitch cycles of Eocene formation in eastern depression of North Yellow Sea basin

测井曲线	井号	井段(m)	厚度(m)	偏心率						地轴斜率						沉积持续时间(Ma)	沉积速率(m/Ma)								
				A			A'			B			C					E			F				
				125 ka	99 ka	51 ka	39 ka	23 ka	19 ka	岁差															
GR	NYS3	1 342.0~2 593.0	1 251	频率	0.008 200	0.009 600	0.025 580	0.027 180	0.044 000	0.057 600	10.247	122.08	GR	NYS2	1 330.0~2 277.0	947	频率	0.008 300	0.009 700	0.027 500	0.033 800	0.045 400	0.061 250	7.865	121.20
				旋回厚度(m)	15.26	13.03	4.89	4.60	2.84	2.17							旋回厚度(m)	15.05	12.89	4.55	3.70	2.75	2.04		
	厚度比	1.00	0.85	0.32	0.30	0.19	0.14	厚度比	1.00	0.86	0.35	0.28		0.21	0.14										
	频率	0.008 200	—	0.026 200	0.029 700	0.042 600	0.052 200	频率	0.008 200	—	4.77	4.21		2.94	2.40										
	旋回厚度(m)	15.17	—	4.77	4.21	2.94	2.40	旋回厚度(m)	15.17	—	0.31	0.28		0.19	0.16										
	厚度比	1.00	—	0.31	0.28	0.19	0.16	厚度比	1.00	—	0.024 000	0.027 180		0.044 000	0.057 600										
SP	NYS3	1 342.0~2 593.0	1 251	频率	0.008 000	0.009 600	0.024 000	0.027 180	0.044 000	0.057 600	9.998	125.12	SP	NYS2	1 330.0~2 178.0	848	频率	0.008 067	0.009 400	0.027 100	0.029 100	0.044 800	0.053 000	6.839	124.00
				旋回厚度(m)	15.64	13.03	5.21	4.60	2.84	2.17							旋回厚度(m)	15.50	13.27	4.61	4.30	2.79	2.36		
	厚度比	1.00	0.83	0.33	0.29	0.18	0.14	厚度比	1.00	0.86	0.30	0.28		0.21	0.15										
	频率	0.007 900	0.011 000	0.025 200	0.026 800	0.042 600	0.052 200	频率	0.007 900	0.011 000	0.025 200	0.026 800		0.042 600	0.052 200										
	旋回厚度(m)	15.89	11.37	4.96	4.66	2.94	2.40	旋回厚度(m)	15.89	11.37	4.96	4.66		2.94	2.40										
	厚度比	1.00	0.72	0.31	0.29	0.18	0.15	厚度比	1.00	0.72	0.31	0.29		0.18	0.15										

氏旋回周期比0.792的误差不超过8.80%；B旋回与A旋回的厚度比为0.29~0.32，与对应的米氏旋回周期比0.312的误差不超过7.05%；C旋回与A旋回的厚度比为0.28~0.30，与对应的米氏旋回周期比0.304的误差不超过7.89%；E旋回与A旋回的厚度比为0.18~0.19，与对应的米氏旋回周期比0.184的误差不超过3.20%；F旋回与A旋回的厚度比为0.14~0.15，与对应的米氏旋回周期比0.152的误差不超过7.89%。综合分析认为，北黄海东部坳陷的始新统地层很好地保存了米氏旋回。其中偏心率周期引起的地层旋回厚度为13.03~15.89 m；地轴斜率周期引起的地层旋回厚度为3.70~5.21 m；岁差周期引起的地层旋回厚度为2.17~2.94 m。沉积速率为旋回厚度除以与对应的旋回周期可得，而且不同旋回厚度所计算的沉积速率误差较大，本文通过计算得出沉积速率为121.200~127.120 m/Ma。地层厚度是由沉积持续时间和沉积速率共同决定的，在地层具有相对的稳定性的前提下，假设现今保存的地层和已被剥蚀的地层具有相同的沉积速率，现今的地层厚度通过钻井分层可得，通过米氏旋回计算的沉积速率，保留的地层厚度除以沉积速率即可得到该段厚度的沉积持续时间。NYS3井由GR和SP测井曲线计算的始新统的沉积持续时间为9.980 Ma和10.247 Ma，相对

误差为2.49%，NYS1井计算的持续时间为5.998 Ma和5.727 Ma，相对误差为4.73%，NYS2井由GR曲线计算1330~2277 m段的沉积持续时间为7.865 Ma，而由SP曲线计算1330~2178 m段的沉积持续时间为6.839 Ma，则反推该井2178~2277 m段的沉积持续时间为1.026 Ma。北黄海东部坳陷始新统沉积旋回基本存在13.03~15.89 m的长周期、3.70~5.21 m的中周期和2.17~2.94 m的短周期。

由图5和表1可以分析，NYS1井位于洼中隆起区，始新世时期沉积厚度为728 m，沉积持续时间为5.998 Ma，沉积速率为121.360 m/Ma；NYS2井位于斜坡区，沉积厚度为947 m，沉积持续时间为7.865 Ma，沉积速率为121.200 m/Ma；NYS3井位于靠近沉积中心区，沉积厚度为1251 m，沉积持续时间为10.247 Ma，沉积速率为122.080 m/Ma。由此可以看出，从隆起沿着斜坡往湖盆中心，沉积时间越长，沉积的厚度也越厚，而沉积速率比较稳定。由图4可以看出，在始新统早期，位于NYS3首先接受沉积，NYS1和NYS2为沉积过路，随着湖盆扩张，湖平面上升，位于斜坡区和隆起区的地层也开始逐渐接受沉积，总体上来说靠近沉积中心的沉积年代最长，地层沉积也最厚。影响沉积速率主要有4个方面的因素：构造沉降、气候、湖平面变化和物源。从构

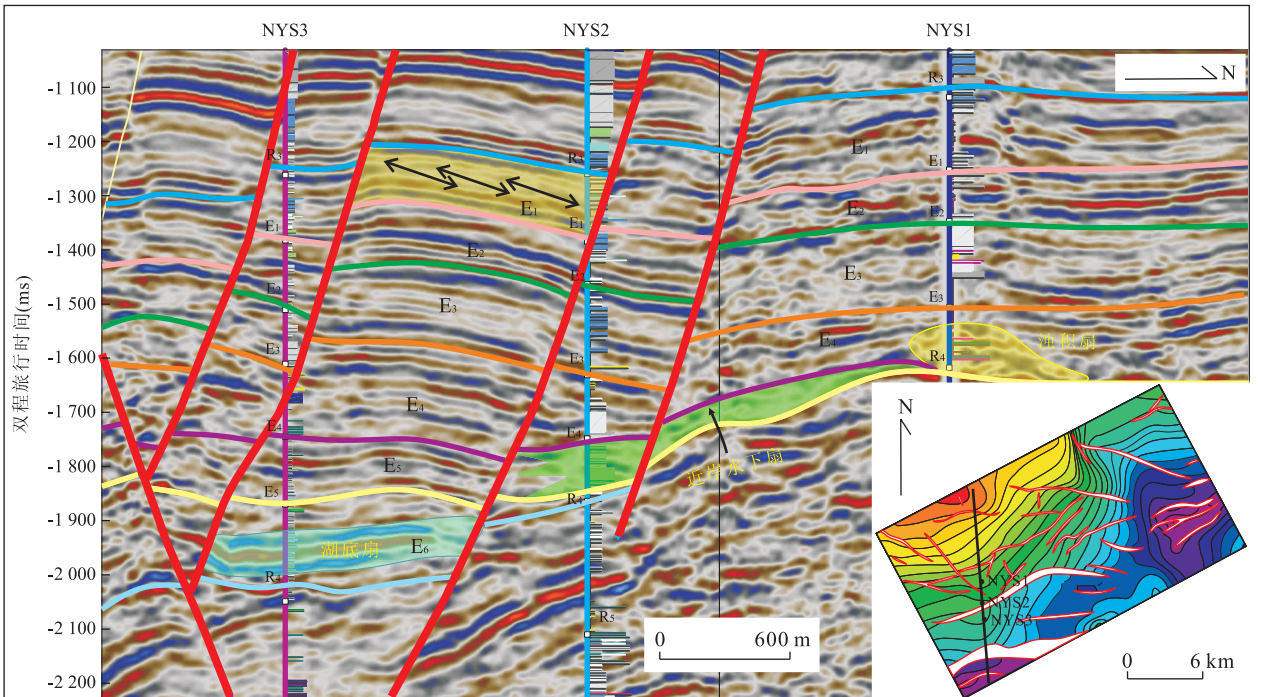


图 4 北黄海东部坳陷始新统过井的地震剖面反射特征

Fig. 4 Seismic reflection characteristics of Eocene formation with crossing well in the eastern depression of North Yellow Sea basin

表 2 北黄海东部坳陷始新统米氏旋回周期的相对强度和比值

Table 2 Relative power and rate of Milankovitch cycles of Eocene formation in the eastern depression of North Yellow Sea basin

井号		偏心率		地轴斜率		岁差	
		A	A'	B	C	E	F
NYS3	相对强度	1 589.00	1 698.00	1 235.00	1 172.00	1 943.00	1 870.00
	强度比值	1.000	1.069	0.777	0.738	1.223	1.177
NYS2	相对强度	1 260.00	3 247.00	1 197.00	375.80	1 576.00	607.90
	强度比值	1.000	2.577	0.950	0.298	1.251	0.482
NYS1	相对强度	2 547.00	—	3 550.00	2 146.00	4 664.00	1 573.00
	强度比值	1.000	—	1.394	0.843	1.831	0.618
NYS3	相对强度	3 777.00	5 598.00	1 162.00	412.80	442.80	865.60
	强度比值	1.000	1.482	0.308	0.109	0.117	0.229
NYS2	相对强度	1 599.00	1 231.00	646.50	527.80	1 132.00	547.30
	强度比值	1.000	0.77	0.404	0.33	0.708	0.342
NYS1	相对强度	4 592.00	4 642.00	2 311.00	1 464.00	1 542.00	1 799.00
	强度比值	1.000	1.011	0.503	0.319	0.336	0.392
平均值	相对强度	2 560.67	3 283.20	1 683.58	1 016.40	1 883.30	1 210.47
	强度比值	1.000	1.28	0.66	0.4	0.74	0.47

造运动角度来看,该区属于同一凹陷,构造差异性小,相对稳定,说明构造沉降是形成这种沉积速率稳定的一个重要因素;始新统时期区内气候湿润,降水量较高,有充足的物源供给,整体水体较浅,浅湖相沉积分布范围较大,说明气候、湖平面和物源是相互作用区域沉积速率相对稳定的另一重要因素。

结合图 3 和表 2 可以得出,北黄海东部坳陷始新统的米氏旋回 A、A'、B、C、E、F 的偏心率、地轴斜率和岁差的平均相对强度分别为:2 560.67, 3 283.20, 1 683.58, 1 016.40, 1 883.30, 1 210.47。各峰值的相对强度之比为:1.00:1.28:0.66:0.40:0.74:0.47。因此可以认为偏心率和岁差是影响该区地层旋回的主要因素,其中偏心率影响最大,地轴斜率影响最小,表明偏心率引起的地层旋回(厚度为 13.03~15.89 m)是最明显的。偏心率决定太阳与地球的距离,影响地球的整个日照量,进而影响气候,冰期均发育于偏心率极小值,由于偏心率极小值导致地球接受日照量减少,寒冷干燥的气候导致沉积供给不充分,有利于形成较粗颗粒的砂岩;相反偏心率极大值导致地球接受日照量增加,温暖潮湿的气候使得物源供给丰富,有利于细粒的泥页岩等发育(田世峰,2012)。

### 3 沉积旋回特征

古近纪早期进入喜山运动,地幔延续了晚白垩世总体上拱的特点,北黄海盆地处于稳定隆起剥蚀状态,因此缺失古新统沉积。到了始新世时期,挤压作用基本停止,盆地重新发生沉降,湖盆沉积范围又

开始扩大(张莉等,2009),区内降雨量较高,气候湿润,有充足的物源供给,整体水体较浅,浅湖相沉积分布范围较大,局部为半深湖相沉积,以砂泥互层为特征,富含有机质的湖相泥岩,厚度较大,有机碳含量可达 7%,含 I 型富无定形干酪根和 III 型干酪根的混合物(王立飞等,2010)。在始新世末期,受到喜山运动 I 幕的影响,挤压构造运动引起北黄海地区第三次构造反转和沉积间断(龚承林等,2009),始新统地层和上覆渐新统形成不整合面,图 5 中等时界面 R<sub>3</sub> 和 R<sub>4</sub> 分别为始新统顶底界面。以层序地层学为指导,综合测井曲线、岩心和地震数据等资料,利用连续小波变换对 NYS1 井、NYS2 井和 NYS3 井对始新统地层进行划分,得到高分辨率层序地层 6 期的四级层序 E<sub>1</sub>~E<sub>6</sub>(图 4),以各个沉积体为单独窗口,对 GR 测井曲线进行频谱分析,得到对应米氏旋回周期分析的沉积持续时间和沉积速率(表 3、表 4、表 5 和图 5),由于研究层组相对厚度小,得到的是与米氏旋回的地轴斜率周期和岁差周期相对应的旋回厚度,可以看出各个窗口显示出良好的米氏旋回特征。

在闭流湖盆中,湖平面低于盆地的基准面,相对湖平面的变化不受盆地基底构造沉降的影响,因此从四级层序角度可以不讨论构造沉降的方式,只讨论气候变化的影响。气候的变化是旋回性的,在干旱的气候,大气降水少,注入湖盆的水量小于蒸发量,湖平面下降,可容空间减少;在潮湿的气候,大气的降雨量达注入湖盆的水量大于蒸发量,湖平面不断上升,可容空间加大,另外河流入湖带来大量的沉积物,沉积物的填充进一步提高了相对湖平面(纪友

表 3 NYS3 井始新统米氏旋回厚度、厚度比、沉积持续时间和沉积速率

Table 3 Thickness, thickness ratio, sedimentation duration and sedimentation rate of Milankovitch cycles of Eocene formation of NYS3 well

井深(m)	层段		地轴斜率		岁差		沉积持续时间(Ma)	沉积速率(m/Ma)
			C	E	F			
1342.00~1533.00	E <sub>1</sub>	旋回厚度	4.778	—	2.389	1.559	122.520	
		厚度比	1.000	—	0.500			
1533.00~1732.10	E <sub>2</sub>	旋回厚度	—	3.553	2.764	1.369	145.455	
		厚度比	—	0.429	0.333			
1732.10~1880.00	E <sub>3</sub>	旋回厚度	—	3.083	2.313	1.103	134.060	
		厚度比	—	1.001	0.751			
1880.00~2073.00	E <sub>4</sub>	旋回厚度	—	—	2.681	1.847	104.468	
		厚度比	—	—	0.333			
2073.00~2264.00	E <sub>5</sub>	旋回厚度	4.775	2.985	2.171	1.560	122.427	
		厚度比	1.000	0.626	0.455			
2264.00~2593.00	E <sub>6</sub>	旋回厚度	4.569	2.570	—	2.808	117.146	
		厚度比	1.000	0.562	—			

表 4 NYS2 井始新统米氏旋回厚度、厚度比、沉积持续时间和沉积速率

Table 4 Thickness, thickness ratio, sedimentation duration and sedimentation rate of Milankovitch cycles of Eocene formation of NYS2 well

井深(m)	层段		地轴斜率		岁差		沉积持续时间(Ma)	沉积速率(m/Ma)
			B	C	E	F		
1330.00~1528.00	E <sub>1</sub>	旋回厚度	—	4.128	2.751	—	1.871	105.85
		厚度比	—	1.000	0.667	—		
1528.00~1650.25	E <sub>2</sub>	旋回厚度	5.094	—	—	1.910	1.224	99.88
		厚度比	1.000	—	—	0.375		
1650.25~1894.00	E <sub>3</sub>	旋回厚度	—	3.549	2.485	—	2.028	120.18
		厚度比	—	1.000	0.700	—		
1894.00~2074.00	E <sub>4</sub>	旋回厚度	—	4.687	3.125	—	1.978	91.00
		厚度比	—	1.000	0.667	—		
2074.00~2277.00	E <sub>5</sub>	旋回厚度	—	—	2.818	—	1.657	122.52
		厚度比	—	—	1.000	—		

表 5 NYS1 井始新统米氏旋回厚度、厚度比、沉积持续时间和沉积速率

Table 5 Thickness, thickness ratio, sedimentation duration and sedimentation rate of Milankovitch cycles of Eocene formation of NYS1 well

井深(m)	层段		地轴斜率		岁差		持续时间(Ma)	沉积速率(m/Ma)	
			A	B	C	E			F
1147.40~1344.40	E <sub>1</sub>	旋回厚度	—	—	4.405	2.747	2.057	1.744	112.936
		厚度比	—	—	1.072	0.624	0.467		
1344.40~1480.40	E <sub>2</sub>	旋回厚度	—	5.666	—	—	—	1.224	111.105
		厚度比	—	—	—	—	—		
1480.40~1706.40	E <sub>3</sub>	旋回厚度	15.152	—	4.469	—	—	1.865	121.212
		厚度比	1.073	—	0.295	—	—		
1706.40~1874.40	E <sub>4</sub>	旋回厚度	—	5.502	—	2.342	—	1.557	107.878
		厚度比	—	1.044	—	0.426	—		

亮,2005)。

始新统地层是从高位体系域发育到低位体系域的过程,最大湖泛面发育在 E<sub>3</sub> 和 E<sub>4</sub> 的界面之间,由图 4 可以看出,古近系早期,NYS1 井位置为古隆

起,始新世早期地层的沉积过路或沉积间断,E<sub>6</sub> 沉积时期为始新统湖盆形成的初期,气候以干旱一半干旱为主,物源来自北边和西边的高地,只有 NYS3 井接受沉积,根据岩心资料分析,岩性为灰色含砾粗



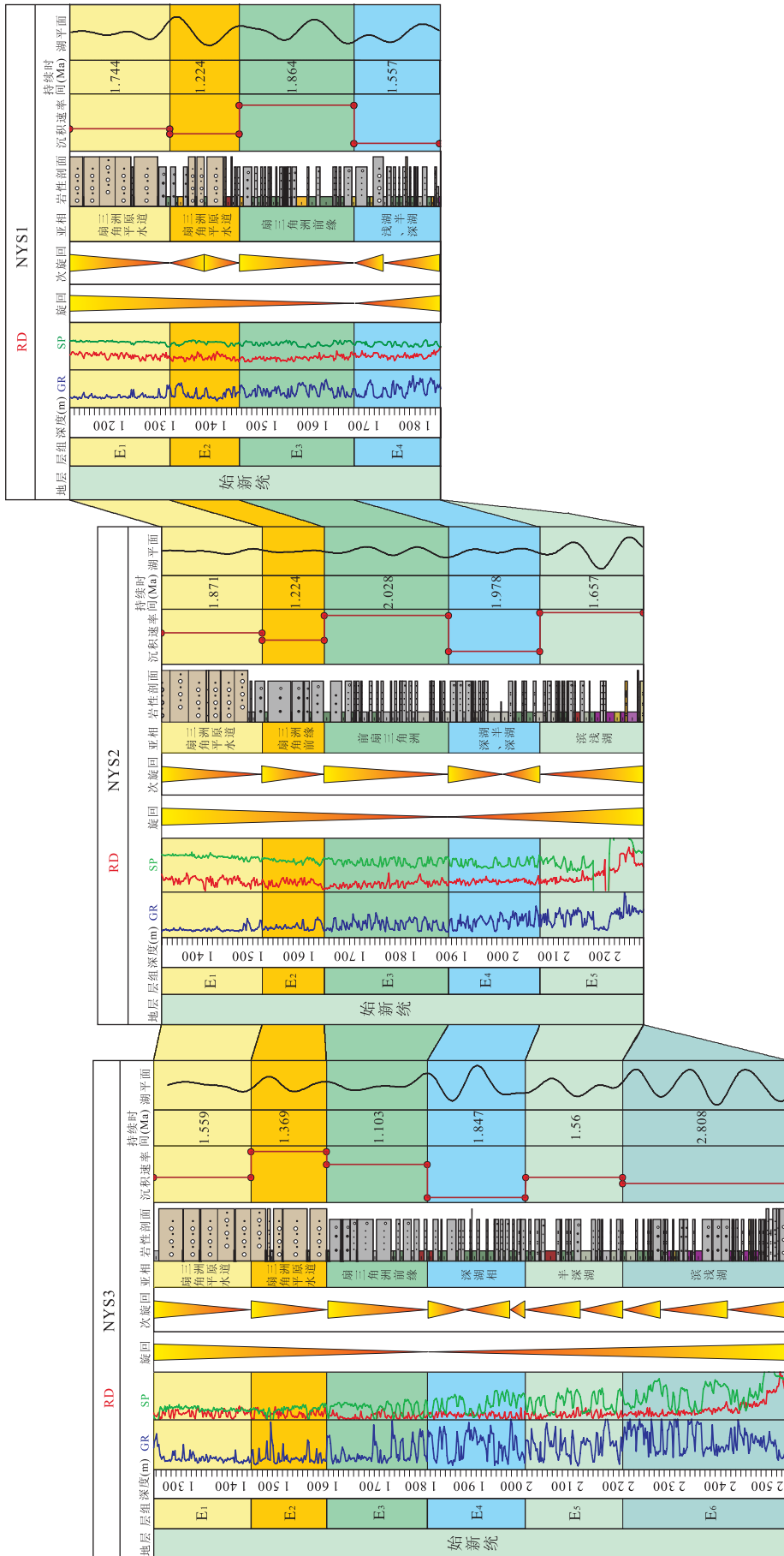


图 5 北黄海东部坳陷始新统联井地层对比 Fig. 5 Well stratigraphic correlation of Eocene formation in the eastern depression of North Yellow Sea basin

砂岩、中砾岩和浅灰色粉砂岩,泥岩下部主要为红褐色,上部为灰绿色,GR 曲线为箱状或钟形,以滨浅湖相沉积为主,沉积速率为 117.146 m/Ma,沉积持续时间为 2.808 Ma,地层厚度为 329 m.层序底部为厚层的粗砂岩和砂砾岩等粗碎屑岩夹薄层的红褐色的泥岩,地震相上为连续的强同相轴反射,为湖底扇沉积,由于洪水或者滑塌事件产生的砂、泥、砾混杂的重力流水体系,直插湖底而形成。

$E_5$  为湖盆扩张初始阶段,气候由干旱向潮湿转换,随着水深的加大,水流能量增强,物源供给充足,从北边和西边高地起经河流搬运过来,在洪水扩张期被河流带到湖中,又被波浪和湖流搬运到滨湖带中堆积下来,经过长距离的搬运与湖浪的反复冲刷作用,岩石成熟度较高,分选、磨圆度较好,沉积速率开始变大.位于盆地中心的 NYS3 井岩性为浅灰色粉砂岩、细砂岩和含砾中砂岩,泥岩为褐色和灰绿色,为半深湖相沉积,地震相为亚平行、连续一较连续的强反射结构,沉积速率为 122.427 m/Ma,沉积持续时间为 1.560 Ma,地层厚度为 191 m.位于斜坡同生断层下降盘的 NYS2 井也开始沉积,岩性为灰色、灰白色细砂岩,褐黄色粉砂岩和褐色、红褐色泥岩,地震相为杂乱、断续一较连续的前积反射结构,为水体较浅透光性较好的滨浅湖相沉积环境中的近岸水下扇,沉积速率为 122.520 m/Ma,沉积持续时间为 1.657 Ma,地层厚度为 203 m.

$E_4$  阶段气候为潮湿时期,水体达到最大湖泛面时期,随着湖盆扩张,物源供应不足,碎屑岩从高地远距离搬运过来,3 口井的岩性除了 NYS1 井层段含有黄褐色泥岩外,均为浅灰色细砂岩和绿灰色泥岩,岩性特点为粒度细、颜色深、有机含量高、以质纯的泥岩为主.位于盆地中心的 NYS3 井为深湖相沉积,地震相为席状,内部为平行反射,顶底接触关系整一,成层性较好,呈高频、中一强振幅和连续性较好的强反射,由于此处受到构造影响,穿过断层的上下盘,沉积速率较快,为 104.468 m/Ma,沉积持续时间为 1.847 Ma,地层厚度为 193 m.位于斜坡的 NYS2 井地震相为帚状的前积反射结构,为深湖、半深湖沉积环境下的扇三角洲相,沉积速率为 91 m/Ma,沉积持续时间为 1.978 Ma,地层厚度为 180 m.位于古高地的 NYS1 井地震相为丘形、连续一较连续反射,为浅湖、半深湖环境下的浊积扇相,由于靠近物源的碎屑岩或火山碎屑岩的快速堆积而形成,沉积速率为 107.878 m/Ma,沉积持续时间为 1.557 Ma,地层厚度为 169 m.

$E_3$  阶段初期气候由潮湿转向温湿,由于构造反转,盆地开始受到挤压应力,湖盆开始抬升萎缩,湖面下降.位于古高地的 NYS1 井以浅灰色中砂岩和灰色、褐色泥岩组成,地震相为近岸顶部有削蚀和顶超,底部为下超,连续性差一中等和中一弱振幅的分散同相轴组成,向斜坡近源方向同相轴非系统性侧向终止,为扇三角洲前缘沉积,沉积速率为 121.212 m/Ma,沉积持续时间为 1.865 Ma,地层厚度 226 m.而靠近湖心方向频率增强、相位增多、平行性反射结构,但局部有波浪起伏的席状反射的 NYS2 井以浅灰色中砂岩、细砂岩和绿灰色、褐黄色泥岩为主,砂体不太发育,为前扇三角洲沉积,沉积速率为 120.18 m/Ma,沉积持续时间为 2.028 Ma,地层厚度为 224 m. NYS3 井为浅灰色细砂岩和褐色、灰褐色泥岩,砂体比较发育,地震相为中一强振幅,连续一断续反射明显,发育扇三角洲前缘沉积且受到断层影响,沉积速率较大,为 134.060 m/Ma,沉积持续时间为 1.103 Ma,但地层偏薄,厚度为 148 m.

$E_2$  阶段气候变暖,水体由深变浅的转化,湖盆继续萎缩, NYS1 井以大套的杂色砂砾岩夹褐黄色和灰绿色的泥岩,地震相为连续一较连续的强反射,为扇三角洲平原的水上分流河道,沉积速率为 111.105 m/Ma,沉积持续时间为 1.224 Ma,地层厚度为 136 m. NYS2 井以浅灰色粗砂岩和中砂岩间夹绿灰色泥岩,为下细上粗的反韵律,地震相为席状连续性好的强反射,为扇三角洲前缘的席状砂沉积,沉积速率为 99.880 m/Ma,沉积持续时间为 1.224 Ma,地层厚度为 122 m. NYS3 井为浅灰色粗砂岩、杂色砂砾岩和绿灰色泥岩,岩性下细上粗的反韵律,地震相表现为较连续且与下界面下超的前积反射,为扇三角洲前缘的河口坝沉积,此处物源供给充足沉积速率上升,为 145.455 m/Ma,沉积持续时间为 1.369 Ma,地层厚度为 199 m.

$E_1$  阶段气候干燥,湖盆大面积收缩,湖水逐渐变浅,整体为扇三角洲平原,沉积了一大套的杂色砂砾岩夹薄层的绿灰色泥岩, NYS1 井处地震相与下界面呈下超现象,由于陆源碎屑物质粒度较粗,缺乏细粒沉积物,沉积速率为 112.936 m/Ma,沉积持续时间为 1.744 Ma,地层厚度为 197 m. NYS2 井处地震相为叠瓦状的前积反射,前积层为顶超和下超的方式终止于地层单元的顶、底界面之上,是在水平面相对静止时期由较粗的碎屑物质进积所造成,沉积速率为 105.850 m/Ma,沉积持续时间为 1.871 Ma,

地层厚度为 191 m, NYS3 井地震相为帚状朝盆地中心发散反射结构, 沉积速率为 122.520 m/Ma, 沉积持续时间为 1.559 Ma, 地层厚度为 191 m.

通过以上分析可以得出米兰科维奇进行旋回分析是一种有效的方法, 天文周期影响气候的变化, 从地层的旋回性分析, 发现气候对层序的控制是通过降雨量、蒸发水量的影响, 进一步引起湖平面的变化而完成的, 气候对该区层序地层发育的控制过程主要有以下几个过程:

(1) 低水位体系域时期( $E_6$  期)气候干燥, 蒸发量大于降雨量, 湖盆水位较低, 湖面积比较小, 只有位于湖盆中心的地层接受沉积, 沉积物以季节性的河流带来的粗粒的沉积物为主, 发育扇三角洲, 位于高地区为沉积过路或者沉积间断.

(2) 湖泊扩张体系域时期( $E_5$  和  $E_4$  期), 气候逐渐变为潮湿, 沉积物的供应和水量不断增加, 湖平面扩张, 沉积地层呈退积式向盆地边缘上超, 到气候为潮湿时期湖盆达到最大湖泛面, 物源供应不足, 沉积速率有所下降, 主要发育近岸水下扇和浊积扇.

(3) 高水位体系域时期( $E_3$  期), 气候由潮湿向干旱转换, 湖水范围不再扩大, 湖平面基本保持不变, 地层主要以加积式准层序为主, 顶部以粗粒碎屑沉积为主, 发育扇三角洲.

(4) 湖泊收缩体系域时期( $E_2$  和  $E_1$  期), 由于气候干燥, 蒸发量大于降雨量, 湖平面下降, 主要沉积大套的粗碎屑沉积, 直到湖泊消亡.

## 4 结论

(1) 通过对北黄海东部坳陷的始新统地层进行频谱分析, 发现地层中保存着完好的米氏旋回, 受偏心率周期 125 ka 和 99 ka 影响的层旋回厚度为 13.03~15.89 m, 地轴斜率周期 51 ka 和 39 ka 引起的地层旋回厚度为 3.70~5.21 m, 岁差周期 39 ka 和 23 ka 引起的地层旋回厚度为 2.17~2.94 m. 由偏心率、地轴斜率和岁差的平均相对强度峰值计算, 表明偏心率对该区域始新统地层影响最大, 地轴斜率影响最小.

(2) 由米氏旋回计算北黄海东部坳陷始新统地层的沉积速率为 121.20~127.12 m/Ma, 从隆起沿着斜坡往湖盆中心, 沉积持续时间也越长, 沉积厚度也越厚, 而沉积速率比较稳定.

(3) 在层序地层学的指导下, 综合测井曲线、岩心和地震数据等资料, 利用连续小波变换对始新统

地层进行小层划分, 得出 6 期沉积体, 以每个沉积体为独立窗口进行频谱分析, 进而求出每个阶段的沉积速率和沉积持续时间, 根据层序纵向划分和对比, 从气候变化的影响分析每个阶段的沉积环境.

(4) 始新统地层是从高位体系域发育到低位体系域的过程,  $E_6$  期气候干燥, 湖盆低洼处 NYS3 井处开始发育滨浅湖相沉积, 沉积速率为 117.146 m/Ma,  $E_5$  期气候由干旱向潮湿转换, NYS3 和 NYS2 湖盆开始扩张, 发育滨浅湖一半深湖相沉积, 沉积速率为 112~123 m/Ma,  $E_4$  期气候潮湿, 湖盆扩张到最大湖泛面, 发育半深湖—深湖相沉积, 沉积速率为 91~108 m/Ma,  $E_3$  期气候由潮湿转向温湿, 加上构造反转湖盆开始萎缩, 但物源供应充足, 主要发育扇三角洲前缘和前扇三角洲相沉积, 沉积速率为 120~134 m/Ma,  $E_2$  期气候变暖, 发育粗粒的扇三角洲平原和扇三角洲前缘沉积, 位于盆地中心的 NYS3 井的沉积速率较高, 为 145 m/Ma, 其他地方沉积速率为 100~111 m/Ma,  $E_1$  期气候干燥, 湖盆大面积收缩, 在继承  $E_2$  期的基础上发育粗粒的扇三角洲平原沉积, 沉积速率为 105~123 m/Ma.

致谢: 衷心感谢审稿专家在审稿过程中给出的意见和建议.

## References

- Bailey, R. J., 2001. Sequence Stratigraphy and Orbital Forcing in Permian (Rotliegend) Desert Deposits: A Discussion. *Journal of the Geological Society*, 158: 785—791. doi:10.1144/jgs.158.5.785
- Brescia, M., d'Argenio, B., Ferreri, V., et al., 1996. Neural Net Aided Detection of Astronomical Periodicities in Geologic Records. *Earth and Planetary Science Letters*, 139(1—2): 33—40. doi:10.1016/0012—821X(96)84608—5
- Gong, C. L., Lei, H. Y., Wang, Y. M., et al., 2009. Hydrocarbon Geologic Characters and Structural Evolution in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(1): 79—86 (in Chinese with English abstract).
- Hays, J. D., Imbrie, J., Shackleton, N. J., 1976. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194(4270): 1121—1132. doi:10.1126/science.194.4270.1121
- Ji, Y. L., 2005. Sequence Stratigraphy. Tongji University Press, Shanghai, 157 (in Chinese).
- Jing, H. X., Sun, D. Y., Gou, J., et al., 2015. Chronology,

- Geochemistry and Hf Isotope of Granite from Southern Xingkai Block. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(6): 982—994 (in Chinese with English abstract).
- Laskar, J., Fienga, A., Gastineau, M., et al., 2011. La2010: A New Orbital Solution for the Long-Term Motion of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 532(A89): 1—15. doi:10.1051/0004-6361/201116836
- Lever, H., 2004. Cyclic Sedimentation in the Shallow Marine Upper Permian Kennedy Group, Carnarvon Basin, Western Australia. *Sedimentary Geology*, 172(1—2): 187—209. doi:10.1016/S1342-937X(05)70312-9
- Li, F. J., Wang, D. Y., Zheng, X. M., et al., 2003. The Application of Frequency Spectral Analysis of Logging Curves on Sedimentary Cycle Studies in Coal-Bearing Strata. *Coal Geology & Exploration*, 31(6): 14—18 (in Chinese with English abstract).
- Li, F. J., Zheng, R. C., Luo, Q. L., et al., 2007. Analysis of Milankovitch Cycles of the Changxing Formation in Northeastern Sichuan Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 36(6): 805—810 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. M., 1996. The Analysis and Application of Milankovitch Cycles by Logging Data. *Acta Geophysica Sinica*, 39(5): 699—704 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J., Wen, Z. H., Xiao, G. L., et al., 2013. Reservoir Characteristics and Influential Factors in the Eastern Depression of the North Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(2): 111—119 (in Chinese with English abstract).
- Poletti, L., Premoli, S. I., Masetti, D., et al., 2004. Orbitally Driven Fertility Cycles in the Palaeocene Pelagic Sequences of the Southern Alps (Northern Italy). *Sedimentary Geology*, 164(1—2): 35—54. doi:10.1016/j.sedgeo.2003.09.001
- Qiao, P. J., Zhu, W. L., Shao, L., et al., 2015. Carbonate Stable Isotope Stratigraphy of Well Xike-1, Xisha Islands. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(4): 725—732 (in Chinese with English abstract).
- Tian, S. F., 2012. Cyclostratigraphy of Mesozoic and Cenozoic and Implication for Hydrocarbon Exploration—Case Study of the Huizhou Depression and Meishan Section (Dissertation). China University of Petroleum, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. F., Wang, Y. T., Hu, X. Q., 2010. Stratigraphy and Sedimentary Characters of the Western Depression, North Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(3): 97—104 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Guo, Z. Q., Liu, W. H., et al., 2007. Analysis of Milankovitch Cycles of Quaternary in Sanhu Area, Eastern Qaidam Basin. *Progress in Geophysics*, 22(2): 544—551 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zhou, Y. Z., Wang, L. L., et al., 2009. A Study on Hydrocarbon Generation Conditions in the North Yellow Sea Basin. *Natural Gas Industry*, 29(1): 21—25 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. S., Cai, D. G., Gan, L. D., 1999. Studying Sedimentation Rate by Means of Spectral Analysis of Logs. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 21(4): 18—20, 22 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 龚承林, 雷怀彦, 王英民, 等, 2009. 北黄海盆地东部坳陷构造演化与油气地质特征. *海洋地质与第四纪地质*, 29(1): 79—86.
- 纪友亮, 2005. 层序地层学. 上海: 同济大学出版社, 157.
- 敬海鑫, 孙德有, 苟军, 等, 2015. 兴凯地块南部花岗岩年代学、地球化学及 Hf 同位素特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(6): 982—994.
- 李凤杰, 王多云, 郑希民, 等, 2003. 测井曲线频谱分析在含煤地层沉积旋回研究中的应用. *煤田地质与勘探*, 31(6): 14—18.
- 李凤杰, 郑荣才, 罗清林, 等, 2007. 四川盆地东北地区长兴组米兰科维奇周期分析. *中国矿业大学学报*, 36(6): 805—810.
- 李庆谋, 1996. 测井曲线 Milankovitch 周期分析与应用. *地球物理学报*, 39(5): 699—704.
- 梁杰, 温珍河, 肖国林, 等, 2013. 北黄海盆地东部坳陷储层特征及影响因素. *海洋地质与第四纪地质*, 33(2): 111—119.
- 乔培军, 朱伟林, 邵磊, 等, 2015. 西沙群岛西科 1 井碳酸盐岩稳定同位素地层学. *地球科学——中国地质大学学报*, 40(4): 725—732.
- 田世峰, 2012. 中、新生代旋回地层学研究及其油气地质意义——以惠州凹陷和煤山剖面为例(博士学位论文). 青岛: 中国石油大学.
- 王立飞, 王衍棠, 胡小强, 2010. 北黄海盆地西部坳陷地层与沉积特征. *海洋地质与第四纪地质*, 30(3): 97—104.
- 王永军, 郭泽清, 刘卫红, 等, 2007. 柴达木盆地东部三湖地区四系米兰柯维奇旋回分析. *地球物理学进展*, 22(2): 544—551.
- 张莉, 周永章, 王嘹亮, 等, 2009. 北黄海盆地生烃条件研究. *天然气工业*, 29(1): 21—25.
- 张占松, 蔡道钢, 甘利灯, 1999. 用测井曲线能谱分析技术研究沉积速率. *江汉石油学院学报*, 21(4): 18—20, 22.