

文章编号: 1009-3850(2014)03-0064-08

米氏旋回在涠西南凹陷 WZ11-4N 油田高频层序 地层识别与对比中的应用

孙美静¹, 刘杰²

(1. 广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760; 2. 中国科学院 广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 针对应用常规方法进行高频层序划分和对比容易受人为因素影响, 所建立的高级别层序地层格架具有多解性等问题, 本文引入天文地层学中气候旋回受天文周期驱动的理论, 选择涠西南凹陷 WZ11-4N 油田 4 口钻井中的流一段地层为研究对象, 进行米兰科维奇旋回特征分析。对自然伽马数据进行频谱分析的结果显示, 在不同钻井中, 流一段地层主要受偏心率周期(401ka、125 ka 和 95 ka)控制。对该周期滤波分析后, 选择控制流一段发育的主要米兰科维奇周期曲线, 建立了该区的高分辨率天文年代标尺。最后以偏心率 125 ka 周期曲线作为 6 级层序划分的参考曲线, 对流一段层序进行高频旋回地层划分与对比。在此基础上, 最终实现高频地层格架下沉积相的精细对比。

关键词: 米兰科维奇旋回; 频谱分析; 高频层序; 流一段; 涠西南凹陷

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

沉积盆地内米兰科维奇(米氏)旋回已经被证实在地层记录中广泛存在, 且被成功地应用于地质年代划分中^[1-3]。国内外学者将米兰科维奇(Milankovitch)旋回用于陆相盆地高频层序地层识别和对比, 进行了很多有益的尝试和探索^[4-9]。Olsen, Kent 等对美国东部 Newark 盆地上三叠统旋回地层研究, 在从卡尼阶到瑞替阶的约 3500m 厚度的沉积中识别出约 2 万年的岁差旋回, 约 10 万年的偏心率旋回, 约 41.3 万年的偏心率旋回, 并在晚三叠世 3 个阶的旋回地层中划分出了 53 个偏心率旋回^[4]。Burn 等通过识别海岸线迁移和叠置方式, 识别出了西班牙北部 Montserrat 扇三角洲的米氏旋回, 并对气候等的影响进行了讨论^[5]。徐伟等以东营凹陷牛 38 井沙三中为例, 采用米兰科维奇周期建立了天文标尺, 同时进行了沉积速率的计算^[6]。宋明水等利用米兰科维奇旋回对东营凹陷盐家地区砂砾岩体进行了高分辨率地层划分对比^[7]。李培廉等以东海平湖油气田古近系平湖组和花港组为对象, 进行了高分辨率层序地层分析、沉积持续时

间和沉积速率估算及储层对比^[8]。张海峰等认为高级别层序划分过程中, 以米氏旋回作为高级别层序划分的时间标尺, 可以为层序划分提供一种不受人为因素影响的天然标准, 大大地提高层序划分的科学性, 保证了层序划分方案的统一性^[9]。

本文选择了涠西南凹陷 WZ11-4N 油田流一段地层为解剖对象, 运用天文旋回地层理论, 进行高频旋回地层划分与对比, 旨在尝试提供一种有效且准确, 不受人为因素的影响, 且能合理地解释地层的形成环境、预测有利砂体的分布规律的陆相盆地高频层序单元对比划分方法。

1 地质背景

涠西南凹陷位于北部湾盆地的西北边缘, 北接涠西南大断层, 南邻企西隆起及海中凹陷。受区域近北西-南东向拉张应力作用, 凹陷内发育 3 条北东-南西走向的正断层, 这 3 条断层控制了整个凹陷的构造格局, 形成了明显的北断、南超的箕状凹陷(图 1a)。WZ11-4N 油田位于涠西南凹陷东南缓

坡带上。流一段沉积早期,其物源主要来自涠西南低凸起,发育了一套以砂砾岩、细砂岩为主的由东南向西北展布的缓坡型扇三角洲沉积体系,随着湖

平面上升,过渡为一套湖相沉积;流一段沉积晚期,湖盆萎缩,扇三角洲规模减小,同时受西南长轴向物源的影响,发育了一套正常三角洲沉积^[10](图1b)。

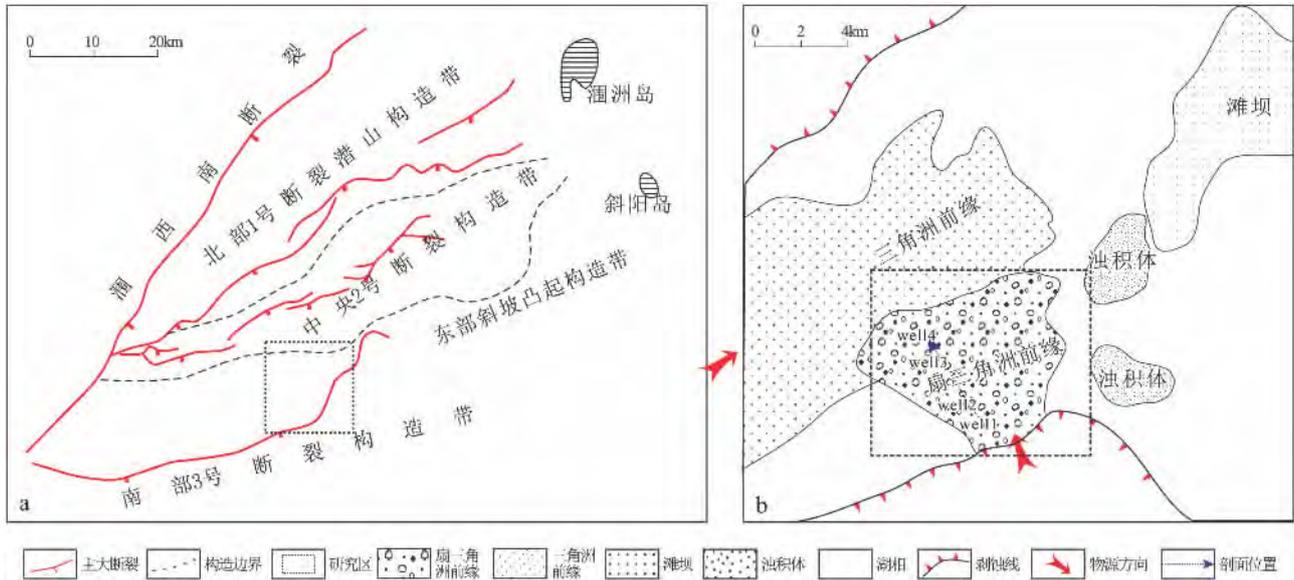


图1 涠西南凹陷区域构造图(a)及研究区流一段沉积相平面图(b)

Fig.1 Tectonic setting of the Weixinan depression (a) and plan of sedimentary facies in the 1st member of the Liushagang Formation (b)

2 数据与方法

理论上,稳定沉积地层的岩心、露头及与气候变化相关联的替代性指标均可用于米兰科维奇旋回的研究,如野外实测的地层剖面、岩心中氧同位素的比值、碳酸盐的成分、磁性参数等。但是,这些参数都需要通过化学或者是物理的分析测试手段才能够获得,而且数据也不连续。与之相比,自然伽马等测井数据具有数据容易获取、连续性好、包含信息量大、能较好地反映沉积物中泥质和有机质含量变化等优点,是恢复沉积盆地古环境、古气候的有价值的参考指标,常被应用到沉积环境等的分析当中^[11]。因此,本文采用自然伽马测井曲线作为米兰科维奇旋回周期分析的参数曲线。测井序列采样间隔为0.125 m,数值范围为45~265 API。本文在进行旋回地层分析之前,对所选GR曲线进行环境校正、去奇异值、数据归一化等预处理。之后通过频谱分析、滤波处理等技术手段,从中提取丰富的地质信息,找出其沉积旋回的主要周期特征,进而进行高频层序的划分及沉积相对比。

本文采用德国不莱梅大学 Boris Priehs 基于 Matlab 开发的 Redfit 图形用户界面进行频谱分析,主要选择显著性水平 0.05~0.1(95%~90%置信

度)的峰值频率进行分析,对处于95%置信度之下的数据结果选择性使用。

3 米兰科维奇理论轨道周期

米兰科维奇理论主要基于轨道要素,即偏心率(E)、地轴倾斜角度或称黄赤交角(O)和岁差(P)3个参数周期性的变化引起光照、冰川消长、气候等变化,从而导致了地球表面沉积环境与沉积特征的周期性变化^[12-15]。米氏旋回的峰值时间跨度为20~500ka,主要包含约20ka、40ka、100ka、400ka等周期^[16-19]。

目前的轨道要素计算方法中,具有代表性的有 Berger、Loutre、Laskar 等提出的方案,其中 Laskar (2010) 提出的解决方案则综合考虑了太阳公转、地月相互作用、地表潮汐摩擦力、轨道重力和地球形状等多种影响因素^[16-19]。根据前人研究得知^[20],涠西南凹陷流一段地层的地质年代在32~37Ma之间。本文采用 La(2010) 计算了北纬20°(研究区纬度)夏至日(6月21日)32~37Ma期间偏心率(E)、斜率(O)与岁差(P)变化的理论值,采样间隔为1ka。对获得的理论轨道曲线分别进行频谱分析后,获得了3个偏心率周期:401ka(E3)、125ka(E2)、95ka(E1),3个斜率周期:52ka(O3)、40ka(O2)、

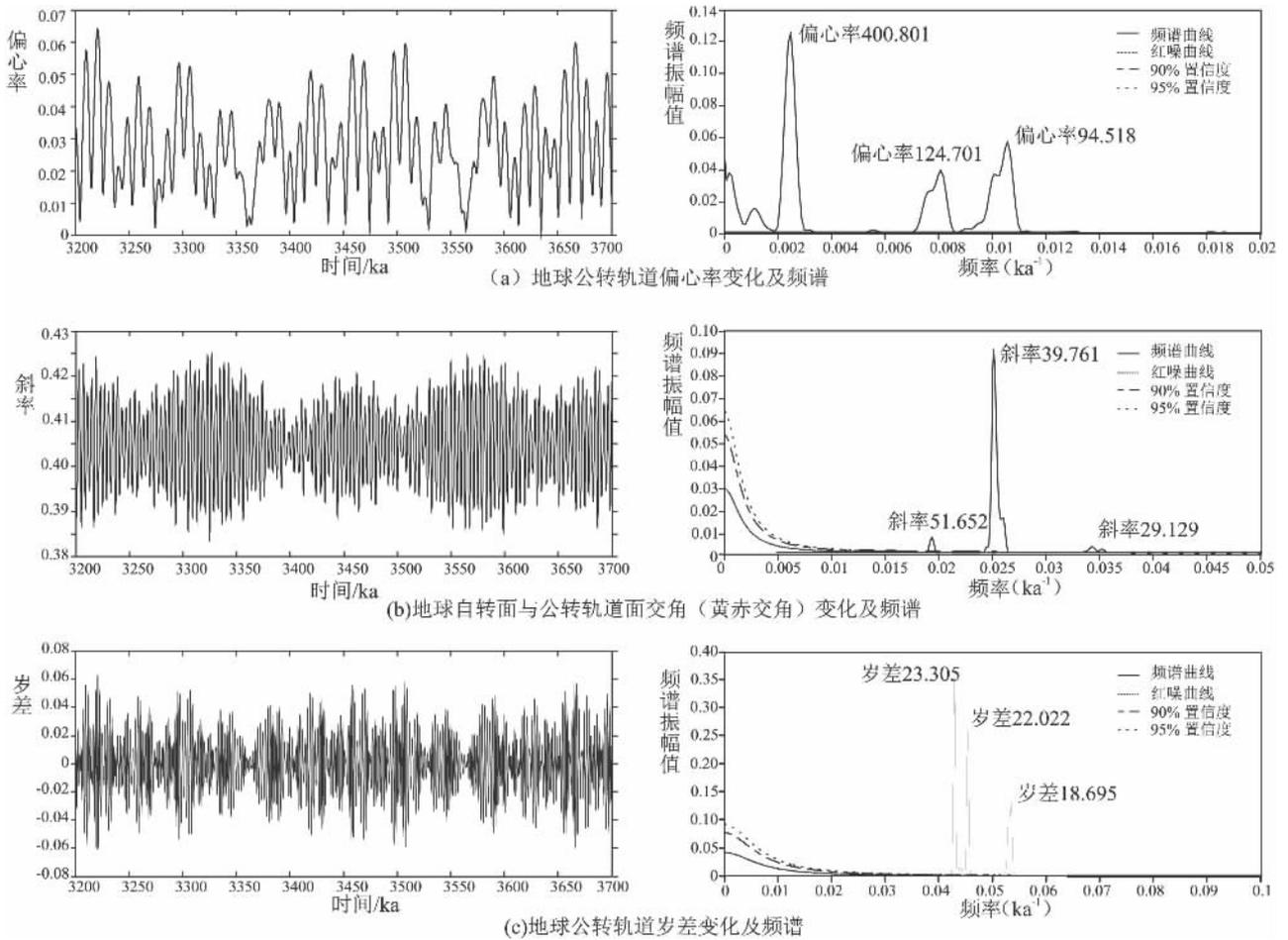


图2 距今30~37Ma 渭西南凹陷地球轨道三要素理论变化曲线及频谱

Fig. 2 Spectral analysis and theoretical curves for the Weixinan depression during 30 to 37 Ma BP

30 ka (O1) 3 个岁差周期: 23 ka (P3)、22 ka (P2)、19 ka (P1) (图2)。这些理论轨道周期之间存在稳定的比例关系,可作为本次研究中确定天文周期的基准。

4 米兰科维奇旋回分析

目前米氏旋回地层学研究主要集中在海相、深湖相等连续沉积地层中。对于冲积扇、河流、扇三角洲等近岸陆相地层,其连续性和完整性均较差且自旋回发育^[21];因此在进行米氏旋回分析时应考虑到地层保存程度、事件沉积等因素的影响。本文选取了WZ11-4N油田的4口探井: well1、well2、well3、well4 进行分析,均能清楚地识别米氏旋回。以well4井为例,对流一段自然伽马数据进行频谱分析结果(表1,图3)表明,处于95%置信度之上的主要旋回厚度为44.248m、14.045m、10.572m、5.692m、4.405m、2.515m、2.102m,其比例关系为21.05:6.683:5.03:2.708:2.096:1.197:1,与轨道周期401ka:125ka:95ka:52ka:40ka:23ka:19ka

的比例关系21.105:6.579:5:2.737:2.105:1.211:1非常接近,因此可认为旋回厚度44.248m、14.045m、10.572m分别对应于401ka、125ka、95ka的偏心率周期,旋回厚度5.692m与4.405m对应于52ka和40ka的斜率周期,而2.515m与2.102m则分别对应于23ka和19ka的岁差周期。从频谱图上可见,偏心率(401ka、125ka、95ka)的周期幅值最大,说明该层段主要受偏心率周期控制。

5 天文年代标尺的建立

以125ka理论偏心率周期曲线为目标曲线,以401ka的理论偏心率曲线为辅助曲线,以从well4井流一段GR曲线中提出的125ka滤波曲线为调谐曲线,以401ka的偏心率曲线为参考曲线,以前人研究成果确定流一段底界面年龄为37Ma,利用调节线使2条曲线的峰值位置对应一致,建立了流一段高分辨率的天文年代标尺(图4)。每2条调节线之间为一个偏心率125ka周期,其中共保存了约44个这样的周期,持续时间在5.5Ma左右,推算出的流

表 1 涪西南凹陷 WZ11-4N 油田流一段典型井自然伽马曲线频谱分析结果及比例关系

Table 1 Spectral analytical results and ratios for the natural gamma-ray data for the resenative wells in the 1st member of the Liushagang Formation

井名	频率 (m ⁻¹)	厚度 (m)	比值	理论比值	轨道周期(ka)
Well1	0.0215	46.512	21.094	21.105	偏心率 401
	0.071	14.144	6.414	6.579	偏心率 125
	0.092	10.911	4.948	5	偏心率 95
	0.166	6.028	2.734	2.737	斜率 52
	0.215	4.66	2.113	2.105	斜率 40
	0.296	3.381	1.533	1.526	斜率 29
Well2	0.454	2.205	1	1	岁差 19
	0.0219	45.662	21.139	21.105	偏心率 401
	0.073	13.712	6.347	6.579	偏心率 125
	0.09	11.161	5.166	5	偏心率 95
	0.178	5.612	2.598	2.737	斜率 52
	0.23	4.348	2.013	2.105	斜率 40
Well3	0.381	2.626	1.216	1.211	岁差 23
	0.463	2.16	1	1	岁差 19
	0.0233	42.918	21.008	21.105	偏心率 401
	0.074	13.517	6.617	6.579	偏心率 125
	0.1	9.97	4.88	5	偏心率 95
	0.196	5.097	2.495	2.737	斜率 52
Well4	0.254	3.94	1.929	2.105	斜率 40
	0.49	2.043	1	1	岁差 19
	0.0226	44.248	21.05	21.105	偏心率 401
	0.071	14.045	6.683	6.579	偏心率 125
	0.095	10.572	5.03	5	偏心率 95
	0.176	5.692	2.708	2.737	斜率 52
	0.227	4.405	2.096	2.105	斜率 40
	0.398	2.515	1.197	1.211	岁差 23
	0.476	2.102	1	1	岁差 19

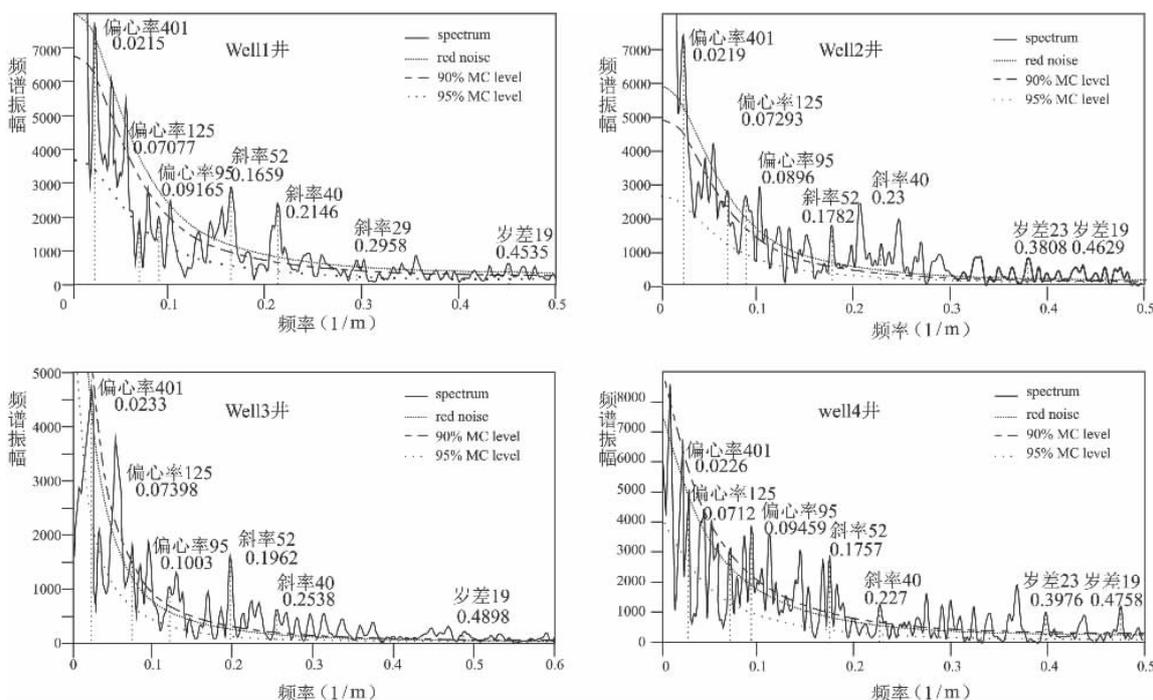


图 3 涪洲 WZ 11-4N 油田典型井流一段自然伽马曲线频谱分析

Fig. 3 Spectral analysis of the natural gamma-ray curves for the resenative wells in the 1st member of the Liushagang Formation

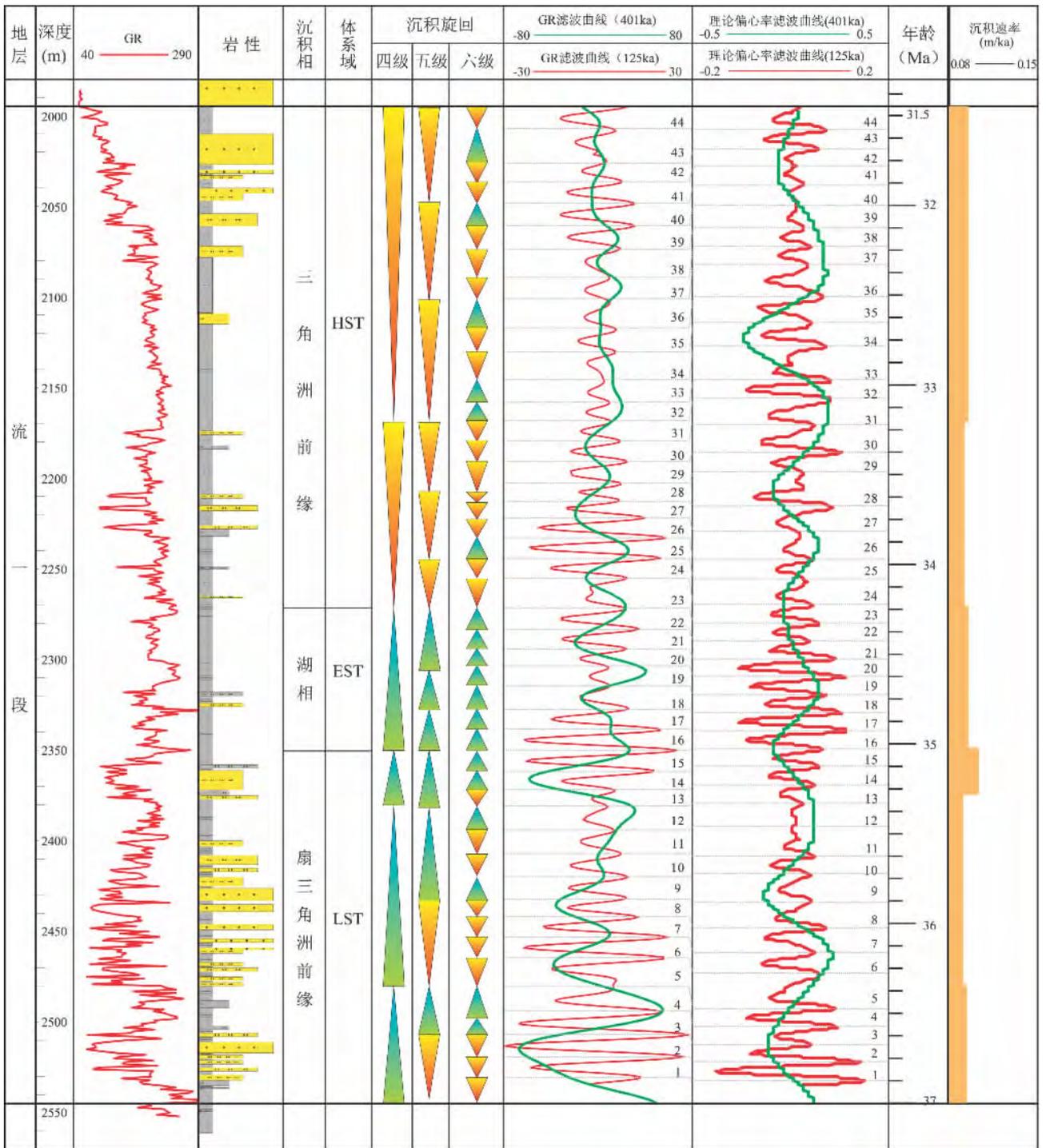


图4 涪西南凹陷流一段 well4 井高频层序地层划分及天文年代标尺

Fig. 4 Division of the high-frequency cycles and astronomical timescale for the well-4 of the WZ11-4N Oil Field in the 1st member of the Liushagang Formation

一段顶部年龄为 31.5Ma,平均沉积速率大约为 0.111m/ka。这与该井单井上沉积速率 0.108 m/ka 一致,说明结果可靠。该天文标尺的建立使得 well4 井流一段地层每一深度位置的地质年龄都能作出较为精确的估计。

6 高频层序的划分及沉积相对比

米氏旋回分析是在时间域内对地层旋回特征进行分析,实现邻井地层在时间划分上的一致性。要建立旋回划分方案,必须结合实际的地质情况与沉积特征,找出地质旋回界面,实现米氏旋回与地

层旋回的统一。

目前关于高频层序(IV~VI)成因主要受米兰科维奇旋回控制或影响的认识比较一致。通过上述的频谱分析,401ka 的偏心率周期控制的优势旋回厚度主要在 45m,125ka 的偏心率周期控制的优势旋回厚度主要在 13m 左右。根据井上流一段总厚度与旋回厚度之比取整来估算 401ka 的偏心率控制的优势旋回个数在 14 个左右,125ka 的偏心率控制的优势旋回在 44 个左右。认为 401ka 的偏心率周期控制 V 级层序,125ka 的偏心率周期控制 VI 级层序。参考按照 401ka 的偏心率周期划分的 V 级层序、125ka 的偏心率周期划分的 VI 级层序,根据层序地层学原理,按照一定的组合划分了 IV 级层序。从而将流一段精细划分为 6 个 IV 级层序,14 个 V 级层序,约 44 个 VI 级层序(图 5)。

在高频层序划分和对比的基础上,进行了 V 级层序格架下的沉积相对比。研究区流一段低位域沉积期物源主要来自涠西南低凸起,发育了一套以砂砾岩、细砂岩为主,由东南向西北展布的扇三角洲沉积体系。低位域时期各井均以扇三角洲水下分流河道沉积为特征,向凹陷中心方向河口坝逐渐发育。well1 井靠近凹陷边缘,水体较浅,水动力较

强,可容纳空间较小,对湖平面升降变化敏感。随着湖平面下降,水下分流河道顶部细粒沉积,容易受到冲刷侵蚀,导致水下分流河道垂向上互相切割叠置。因而保存的 VI 级层序数目较少,其组合 V 级层序的厚度较薄,表现为粒度较粗的正旋回地层叠加型式。靠近凹陷中心的 well2 井水体相对较深,可容纳空间较大,水动力相对变弱,水下分流河道侧向叠置,旋回性明显。因而保存的 VI 级层序数目增多,厚度较厚,为低位域时期沉积中心,表现为粒度较细的正旋回地层叠加型式。位于凹陷中心的 well4 井,水体较深,因而正旋回和反旋回均发育。

随着湖平面上升,湖扩域时期过渡为一套湖相沉积。这一时期沉积中心位于凹陷中心 well4 井附近。该井保存的 V 级、VI 级旋回的数目较多,地层厚度较大。同时连井对比上可以看到地层明显上超现象。

流一段高位域时期湖盆萎缩,扇三角洲规模减小。扇三角洲由东南向西北展布,厚度逐渐减薄,VI 级层序的数目和厚度变化规律与低位域时期一致。高位域晚期受西南长轴向物源的影响发育了一套高位正常三角洲沉积,仅影响到 well4 井附近,其它井不受西南物源影响,不发育三角洲沉积。

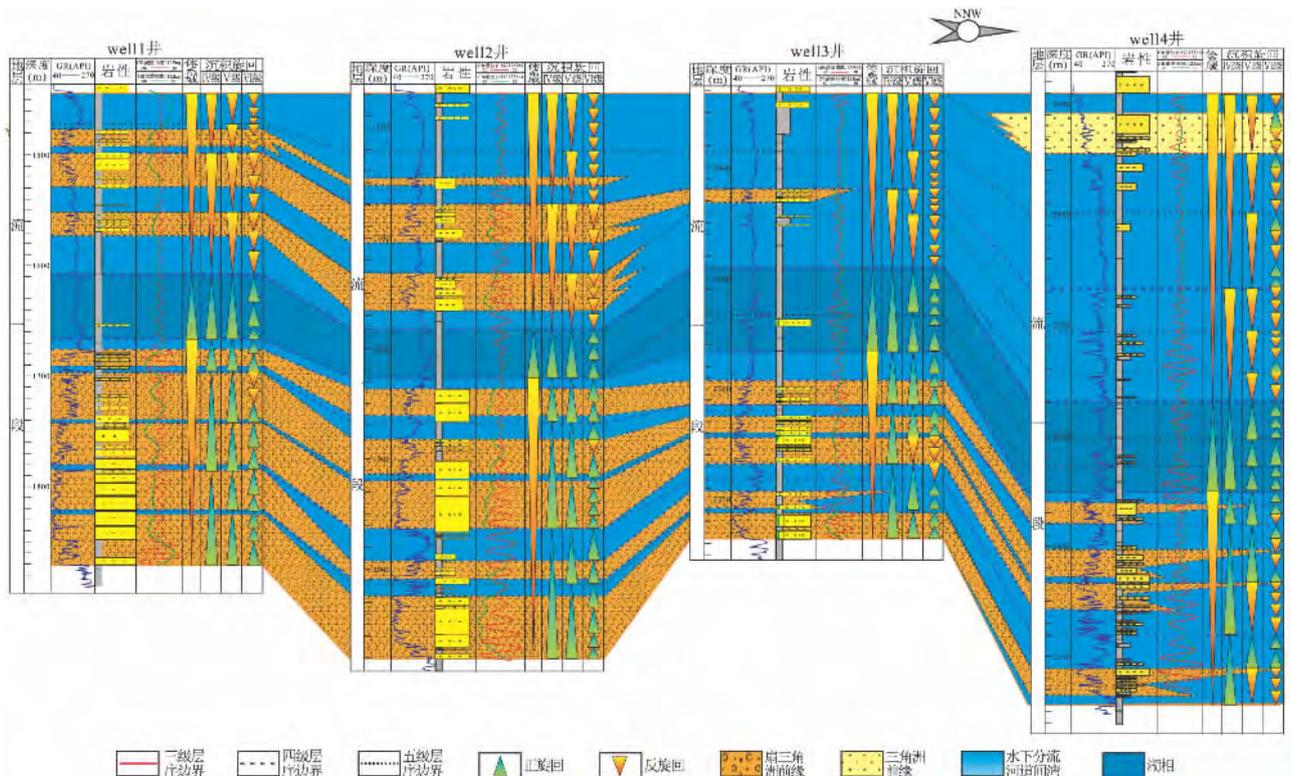


图 5 涠西南凹陷 WZ11-4N 油田流一段高频层序地层格架下沉积相对比

Fig. 5 Sedimentary facies correlation within the high-resolution stratigraphic framework in the 1st member of the Liushagang Formation

7 结论

(1) 通过自然伽马频谱分析发现, WZ11-4N 油田不同钻井中流一段地层受偏心率周期(401ka、125ka、95ka)控制, 其中保存了近 14 个 401ka 周期, 44 个 125ka 周期, 持续时间约 5.5 Ma。以理论偏心率 125ka 曲线为目标曲线, 以从 GR 曲线中提出的 125ka 滤波曲线为调谐曲线, 建立了流一段地层的高分辨率天文年代标尺, 较为精确地确定了不同深度对应的地质年龄。

(2) 依据层序地层学基本原理, 参考经过滤波处理的伽玛曲线对流一段层序进行高频旋回地层划分与对比。研究结果显示 401ka 的偏心率周期控制 V 级层序, 125ka 的偏心率周期控制控制六级层序。可将流一段划分为 6 个 IV 级层序, 12 个 V 级层序, 约 44 个 VI 级层序。

(3) 基于米兰科维奇周期的高频旋回的识别与对比, 满足了涠西南凹陷开发阶段的高精度地层对比的要求。运用此方法建立高频层序单元对比格架, 提高了该凹陷在沉积相对比、储层预测和评价的精度及储层非均匀性预测等研究。

参考文献:

- [1] SCHWARZACHER W. Cyclostratigraphy and the Milankovitch Theory [M]. New York: Elsevier, 1993.
- [2] FISCHER A G, BOTTJER D J. Orbital forcing and sedimentary sequence [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(7): 1063-1069.
- [3] 刘泽纯, 孙世英, 汪永进等. 柴达木盆地三湖地区第四纪地层学和其年代学分析[J]. 中国科学辑, 1990, (11): 202-212.
- [4] OISEN P E, KENT D V. Milankovitch climate forcing in the tropics of Pangaea during the Late Triassic [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1996, 122: 1-26.
- [5] BURN B A, HELLER P L, MARZO M et al. Fluvial response in a sequence stratigraphic framework: Example from the Montserrat Delta, Spain [J]. JSR, 1997, 67(2): 311-320.
- [6] 徐伟, 解习农. 基于米兰科维奇周期的沉积速率计算新方法: 以东营凹陷牛 38 井沙三中为例 [J]. 石油实验地质, 2012, 34(2): 207-214.
- [7] 宋明水, 李存磊, 张金亮. 东营凹陷盐家地区砂砾岩体沉积期次精细划分与对比 [J]. 石油学报, 2012, 33(5): 509-514, 781-788.
- [8] 李培廉, 盛蔚. 米氏旋回在平湖油气田高分辨率层序地层分析中的应用 [J]. 中国海上油气(地质), 1994, 8(3): 171-177.
- [9] 张海峰. 以米氏旋回为标尺进行高级别层序地层划分与对比: 以准噶尔盆地中 I 区块为例 [J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 18-21.
- [10] 王健, 操应长, 李俊良. 北部湾盆地涠西南凹陷古近系层序结构与非构造圈闭 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 304-311.
- [11] WONIK T. Gamma-ray measurement in the Kirchrode I and II borehole [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 174: 97-105.
- [12] 王起琮. 天文周期约束下的基准面旋回层序划分方法 [J]. 新疆石油地质, 2009, 30(4): 509-514.
- [13] 邱桂强, 刘军锴, 帅萍. 米氏旋回基本原理及其在陆相湖盆分析中的应用前景 [J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(5): 5-9.
- [14] 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]. 地质前缘, 2008, 15(4): 159-169.
- [15] HERBERT T D. Long climatic time series from sediment physical property measurements [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(7): 1089-1108.
- [16] 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等. 南海 ODP1143 站上新世至更新世天文年代标尺的建立 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(1): 31-39.
- [17] BERGER A, LOUTRE M F, LASKAR J. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate studies [J]. Science New Series, 1992, 255(5044): 560-566.
- [18] LASKAR J, ROBUTEL P, JOUTEL F et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth [J]. Astronomy and Astrophysics, 2004, 428: 261-285.
- [19] LASKAR J, FIENGA A, GASTINEAU M et al. La2010: a new orbital solution for the long-term motion of the Earth [J]. Astronomy and Astrophysics, 2011, 532: 89-104.
- [20] 徐建永, 张功成, 梁建设等. 北部湾盆地古近纪幕式断陷活动规律及其与油气的关系 [J]. 中国海上油气, 2011, 26(6): 362-388.
- [21] 张海峰, 张林晔. 东营凹陷沙河街组四段滩坝砂米氏旋回层序划分与对比 [J]. 地层学杂志, 2008, 32(3): 278-284.

High-frequency sequence stratigraphic division and correlation for the WZ11-4N Oil Field in the Weixinan depression by using the Milankovitch theory

SUN Mei-jing¹, LIU Jie²

(1. *Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, Guangdong, China*; 2. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China*)

Abstract: The strata in the 1st member of the Liushagang Formation are explored with the aid of the Milankovitch theory for the selected wells of the WZ11-4N Oil Field in the Weixinan depression. The spectral analysis of the natural gamma-ray spectral logs shows that the strata in the 1st member strata of the Liushagang Formation are dominantly controlled by the 401 ka, 125 ka and 95 ka eccentricity cycles. The high-resolution astronomical timescale is based on the major Milankovitch curves for the 1st member of the Liushagang Formation. The 125 ka eccentricity curves are used as the referenced curves for the 6th-order sequence stratigraphic division and conduct the high-resolution cyclic stratigraphic division and correlation, and finally the division and correlation of the sedimentary facies within the high-resolution stratigraphic framework in the 1st member of the Liushagang Formation.

Key words: Milankovitch cycle; spectral analysis; high-frequency sequence; 1st member of the Liushagang Formation; Weixinan depression