

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2016.02.002

# 神狐海域水合物钻探区第四纪米氏旋回 高频层序地层划分

刘杰<sup>1</sup>, 孙美静<sup>2</sup>, 苏明<sup>1</sup>, 吴能友<sup>1,3</sup>, 严恒<sup>4</sup>, 杨睿<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 天然气水合物重点实验室, 广州 510640;

2. 中国地质调查局 广州海洋地质调查局, 广州 510640;

3. 中国地质调查局 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

4. 中海石油有限公司 湛江分公司, 湛江 524057)

**摘要:**基于高分辨率 2D 地震资料,建立了珠江口盆地白云凹陷第四纪层序地层格架,将第四纪沉积充填序列划分为 3 个体系域,即低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST)。根据陆坡进积特征和地层叠加样式、垂向上侵蚀特征变化(其上见下切水道)、中频强振幅同相轴的空间可追踪性等地震反射特征,将高位体系域(HST)进一步划分为两个沉积旋回单元 HST-I、HST-II。在等时地层格架的约束下,以神狐海域水合物钻探区 well-I 钻井作为研究对象,选择自然伽马曲线(GR)通过频谱分析进行米兰科维奇旋回特征的研究,识别出偏心率周期(95 ka)、斜率周期(40 ka)和岁差周期(22、19ka)。研究区第四纪沉积充填序列主要受偏心率周期(95 ka)的控制,偏心率(95 ka)对应于旋回厚度 11.494 m,以此周期和对应的旋回厚度计算出钻探区第四纪沉积速率为 12.1 cm/ka。通过构建滤波器对测井曲线进行滤波处理,发现 95 ka 的偏心率控制的优势旋回个数在 20 个左右。对斜率周期(40 ka)识别出的高频旋回采用 Fischer 图解法求取其可容纳空间变化曲线,检验了高精度层序地层划分的正确性。

**关键词:**米兰科维奇旋回;频谱分析;高频层序;神狐海域;白云凹陷

**中图分类号:**P539.2 **文献标识码:**A **文章编号:**0256-1492(2016)02-0011-08

米兰科维奇(Milankovich)理论是从全球尺度上研究日射量与地球气候之间关系的天文理论。该理论认为轨道要素,即偏心率(eccentricity, E)、地轴倾斜角度或称黄赤交角(obliquity, O)和岁差(precession, P)周期性变化引起的光照、冰川消长、气候等变化,进而导致地球表面气温、沉积环境和沉积特征等的周期性变化<sup>[1]</sup>。受米兰科维奇天文轨道周期控制形成的地层序列即为米兰科维奇(米氏)旋回。早期对米兰科维奇理论的研究,主要集中在海相沉积记录中米氏旋回的识别和描述。随着研究的

不断深入,米兰科维奇理论研究涉及的地质时代范围已由第四纪延伸扩展到新生代、中生代、古生代甚至前寒武纪<sup>[2-6]</sup>,涉及的沉积环境已由海相扩展到冲积扇、河流、扇三角洲等陆相地层,并在地质年代划分和对比、相对海平面变化分析、沉积速率的计算等方面取得了一定的应用成果。

作为潜在的高效清洁能源,天然气水合物是以甲烷为主的烃类气体分子与水分子组成的一种似冰状固态物质,形成于低温、高压和有充足的气-水来源的环境中,主要分布于永久冻土带和水深大于 300 m 的深水沉积物中。天然气水合物的形成、聚集和分布受到温度、压力条件的直接制约,并随着古气候和古沉积环境的变化而发生动态演变。受天文轨道周期控制形成的米氏旋回可以反映地球表面日照量和古气温的变化,从而影响古温度条件和沉积环境。因此,将米氏旋回与古气温、古沉积环境相结合应用到水合物的形成-分解的研究中,对理解水合物动态成藏过程具有重要作用。实际上,已有学者注意到了米氏旋回在水合物动态成藏中的重要作用。比如 Lisiecki 和 Raymo(2005)通过深海氧同位素分析,恢复了 5.5 Ma 至今全球古海水温度变化

**基金项目:**国家自然科学基金项目(41576048);油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学)开放基金项目(PLC201407);中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室开放基金(TPR-2014-14);中科院可再生能源重点实验室基金项目(y507j61001)

**作者简介:**刘杰(1986—),男,硕士,助理研究员,从事海域天然气水合物成藏地质条件分析方面的科研工作。E-mail: liujiel@ms.giec.ac.cn

**通讯作者:**苏明(1983—),男,博士,副研究员,目前主要从事深水沉积过程及其资源效应、海域天然气水合物成藏等方面的科研工作。E-mail: suming@ms.giec.ac.cn

**收稿日期:**2015-11-02; **改回日期:**2015-12-31。张光威编辑

曲线,并在该曲线上识别出 41 和 100 ka 的米氏旋回<sup>[14]</sup>;Majorowicz 等(2012)分别针对 5.5 Ma 至今全球古海水温度变化的 41 和 100 ka 的旋回周期,对麦肯齐三角洲(Mckenzie Delta)地区水合物的形成和分解进行了数字模拟,结果表明水合物的动态成藏受到这两个气温周期旋回的影响<sup>[15]</sup>。

本文利用神狐海域高分辨率 2D 地震资料建立等时地震地层格架。在地震地层格架的约束下,选取神狐海域水合物钻探区 well-I 井为解剖对象,运用天文旋回地层理论进行米兰科维奇旋回的识别与划分,并利用识别出的米氏旋回周期和对应的旋回厚度计算出钻探区的沉积速率,最后对识别出的高频旋回采用 Fischer 图解法,求取其可容纳空间变化曲线,检验了高精度层序地层划分的正确性。本研究为神狐海域水合物钻探区的高频层序单元对

比、米氏旋回控制下的水合物动态演化过程等研究提供基础和参考。

### 1 区域地质背景

南海北部神狐海域构造上隶属于珠江口盆地白云凹陷(图 1a),自下而上划分为 3 个主要的构造演化阶段:早始新世-晚渐新世时期的伸展断陷阶段、晚渐新世-中新世的拗陷沉降阶段、晚中新世以后的块断升降阶段<sup>[16-17]</sup>。发生于渐新世与中新世之间的白云运动,使得 23.8 Ma 以来白云凹陷深部地幔上隆产生强烈的热沉降,陆架坡折带由之前位于南部隆起带附近,突变式地跳跃到白云凹陷北坡<sup>[16-17]</sup>。此后盆地进入相对稳定的时期,陆架坡折带距今 21 Ma 以来一直稳定分布持续至今,迁移特征不明显,

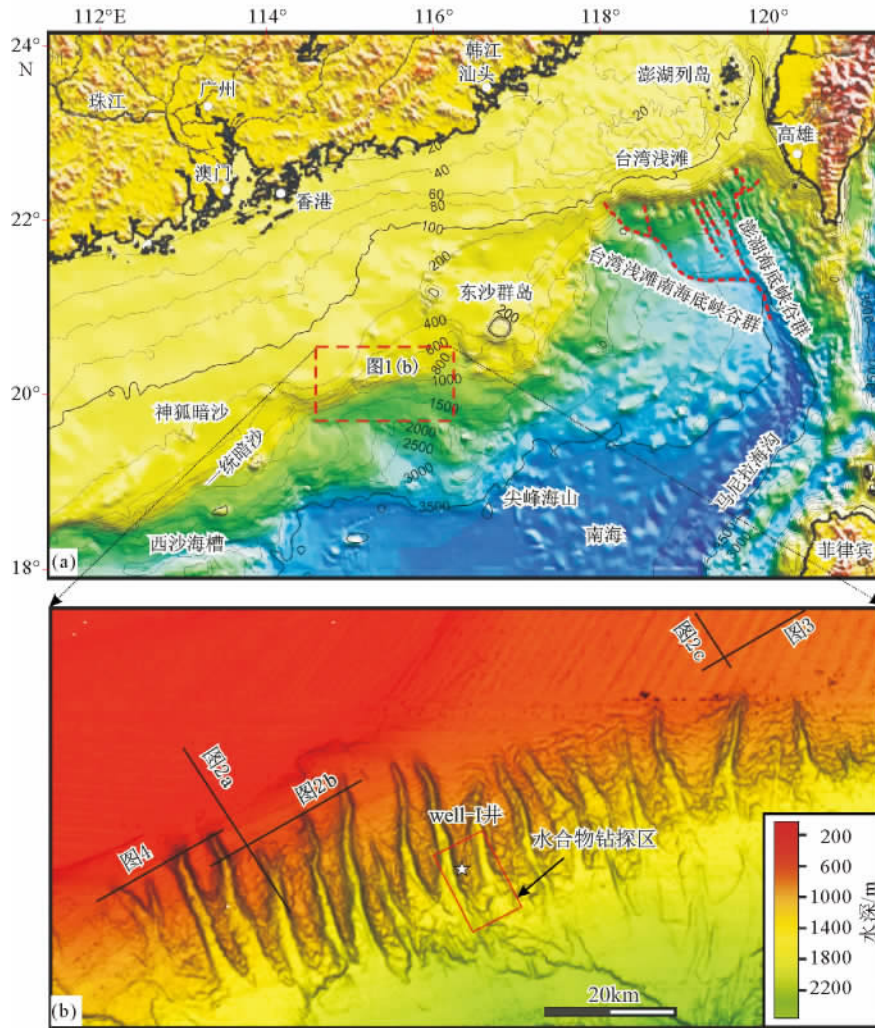


图 1 珠江口盆地神狐海域及水合物钻探区位置(海底地形地貌底图修改自文献<sup>[19]</sup>)

Fig. 1 The location map of the gas hydrate drilling area in the Shenhu waters, the Pearl River Mouth Basin (the seabed topography basemap modified from Ding et al. , 2013)

白云凹陷也由渐新世晚期的浅海陆架环境转为陆坡深水环境<sup>[18]</sup>。约 13.8 Ma,南海北部发生大规模海退,处于半深海-深海环境背景下的白云凹陷发育陆架边缘三角洲、陆架-陆坡水道、深水扇等深水沉积体系。受沉积物供给和地形地貌的影响,滑移、滑塌、浊流等沉积体在下陆坡内广泛发育。

2007年,广州海洋地质调查局在位于白云凹陷水深 1 000~1 500 m 的陆坡区,实施天然气水合物钻探,并成功钻取天然气水合物样品。well-I 井位于水合物钻探区西部峡谷脊部,水深约 1 200 m(图 1b)。岩性以细粒黏土为主,夹杂少量粉砂岩,主要为深海环境,从过 well-I 井的地震反射剖面可以观察到地震反射同相轴以连续、中等振幅强度为主,杂乱反射地震相少见,暗示其间可能不存在明显的地层间断和缺失,是进行米兰科维奇旋回研究的理想对象。

## 2 第四纪高精度层序地层格架

### 2.1 层序边界及体系域的识别

结合前人的区域地层划分方案<sup>[16,20]</sup>,可以识别出研究区第四纪的底界面,即 T1 界面(图 2)。该界面在地震剖面上表现为中频、中等振幅、连续性好的地震反射同相轴,在研究区的北部具有区域上的可追踪性和可对比性(图 2a)。T1 界面往往显示出对下伏地层的冲刷,如 NEE 向地震剖面中显示的 T1 界面附近发育的小型侵蚀性水道,宽 33.5~119 m,侵蚀深度较浅,通常为 40~140 ms TWT(two-way travel time,双程旅行时间)(图 2b)。另外,在工区东部 SSE 向地震剖面中,T1 界面下见到明显的削截(图 2c)。T1 界面至现今海底为第四纪沉积充填序列,构成了一个完整的三级层序,根据地震反射特征和同相轴的接触关系(如垂向上由席状平行反射变化为前积反射、下超接触关系等),可自下而上划分为 3 个体系域(图 2),分别是低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)和高位体系域(LST)。

#### 2.1.1 低水位-海侵体系域

T1 界面处发育的小型侵蚀性水道,是低水位体系域最为明显的特征。特别是在研究区的北部,可以观察到发育数量众多的小型水道(图 2b 和图 3)。此外,从东北部 NEE 向地震剖面中还可以发现,这些小型水道的形态、规模和内部充填结构均表现出和北部 NEE 向地震剖面中相似的特征,水道的宽度为 25~110 m,下切深度为 30~110 ms TWT(图

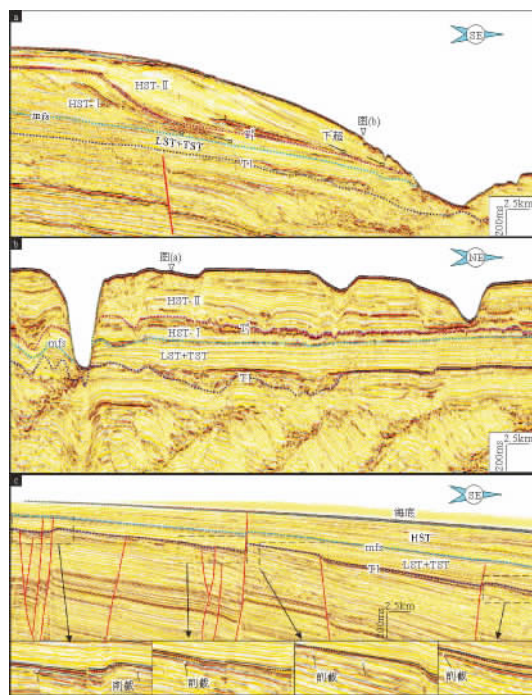


图 2 神狐海域第四纪层序边界与体系域识别及高水位体系域内沉积旋回单元的划分(剖面位置见图 1b)  
Fig. 2 Identification and division of sequence boundary, system domain, and sedimentary cycles in the HST of the Quaternary in study area (position shown in Fig. 1b)

3)。研究区北部水道的广泛发育,且自西向东规模的相似性,暗示这些小型水道为相似背景下的产物,推测为第四纪低水位体系域时期海平面下降所导致的结果。

在小型水道的顶部,可以发现一套弱-中等振幅强度、连续性好、平行的地震反射同相轴,整体厚度稳定,在西北部 SSE 向和 NNE 向地震剖面(图 2b)、东北部 NEE 向地震剖面(图 3)中均可以观察到。SSE 向地震剖面显示,这套平行反射之上为进

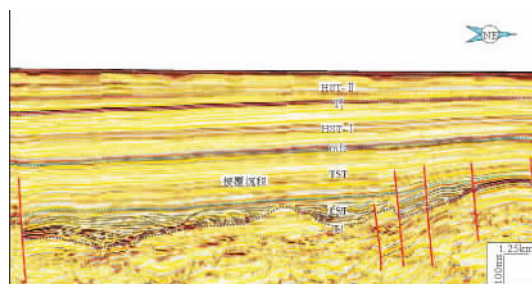


图 3 神狐海域东北部 T1 界面附近小型侵蚀性水道及披覆沉积体特征(剖面位置见图 1b)  
Fig. 3 The characteristics of the small erosion channel and drape sediments on the T1 interface in the northeast of the study area (position shown in Fig. 1b)



积特征明显的地震反射同相轴,进积的地震同相轴均下超至高频、强振幅、连续性好的同相轴之上(可视为最大海泛面 mfs)(图 2a)。因此,我们将这套平行特征明显的地震反射解释为披覆细粒沉积,可能与海侵体系域时期海平面的上升具有关联性。

### 2.1.2 高水位体系域

最大海泛面至海底为高水位体系域, SSE 向地震剖面中,中等-强振幅、中等连续性的地震反射同相轴表现出显著的前积特征,向下陆坡方向同相轴发生收敛,下超特征明显(图 2a),这些地震反射被解释为高水位体系域时期发育的陆架边缘三角州,说明这一时期来自北部的大量沉积物可以注入到陆坡区域。在 NEE 向地震剖面中,高水位体系域常表现为中等振幅强度、中等连续性的地震反射特征,但地层的形态多为楔状、丘状,甚至波状(图 2b 和图 3),这可能是地震剖面延伸方向与陆架边缘三角州延伸方向具有一定夹角所导致的结果。

## 2.2 高水位体系域沉积旋回单元的划分

在高水位体系域中,我们还可以识别出一个强振幅、连续性好的地震反射同相轴。SSE 向地震剖面中,该地震反射同相轴上下的进积形态和结构存在着差异:之下,主要表现为斜交前积结构,同相轴下超至 mfs 界面;之上,主要表现为透镜状的 S 型前积结构,同相轴下超至该界面,上部可见顶超现象(图 2a)。因此,我们将该界面命名为  $T_1^0$  界面。 $T_1^0$  界面在研究区北部可进行区域性的追踪和对比,在 NEE 向地震剖面中均可识别出强振幅、连续性好的地震反射界面,界面上下的厚度存在显著差异(HST-I 厚度为 50~180 ms TWT,而 HST-II 厚度为 75~300 ms TWT)(图 2b),说明在剖面位置处主要记录了高水位体系域晚期的进积单元(HST-II 单元)。根据  $T_1^0$  界面将高水位体系域划分为 2 个沉积旋回单元(HST-I 和 HST-II),代表了两期陆架边缘三角州的进积事件。

## 3 米兰科维奇旋回的识别与划分

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<sup>[1]</sup>。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<sup>[1,21-22]</sup>,其中 Laskar 等(2004, 2011)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<sup>[21-22]</sup>。本文采用 Laskar (2011)的方案,计算了北纬 20°(研究区纬度)夏至日(6 月 21 日)5.3 Ma 以来的偏心率(E)、斜率(O)与岁差(P)变化的理论值,采样间隔为 1 ka。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:401 ka(E3)、125 ka(E2)、95 ka(E1),3 个斜率周期:52 ka(O3)、40 ka(O2)、30 ka(O1),3 个岁差周期:23 ka(P3)、22 ka(P2)、19 ka(P1)。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。

从理论上说,稳定沉积地层的露头、岩心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,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<sup>[23]</sup>。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。

神狐海域水合物钻探区 well-I 井自然伽马曲线序列采样间隔为 0.125 m,数值范围为 10~40 API,主要为未固结的黏土,含少量粉砂岩。在进行米兰科维奇旋回识别之前,对其进行环境校正、去奇异值、数据归一化等预处理。之后采用德国不莱梅大学 Boris Priehs 基于 Matlab 开发的 Redfit 图形用户界面对所选自然伽马曲线进行频谱分析,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<sup>[24]</sup>。由于 Torrence 和 Compo 提供的连续小波变换工具箱能够提供统计学上的显著性检验<sup>[25]</sup>,这种显著性检验所得结果保证了更高的可信度。故采用该小波变换工具箱进行小波分析,子波选择 Morlet 小波,  $\omega_0 = 10$ 。

通过频谱分析、滤波处理等技术手段,能清楚地识别米氏旋回。对 well-I 井自然伽马数据进行频谱分析(图 4a),结果表明,处于 95%置信度之上的主要旋回厚度为 11.494、4.81、2.636、2.154 m,其比例关系为 5.33 : 2.23 : 1.22 : 1,与轨道周期 95 ka : 40 ka : 22 ka : 19 ka 的比例关系 5 : 2.11 : 1.16 : 1 接近。因此,可认为旋回厚度 11.494 m 对应于

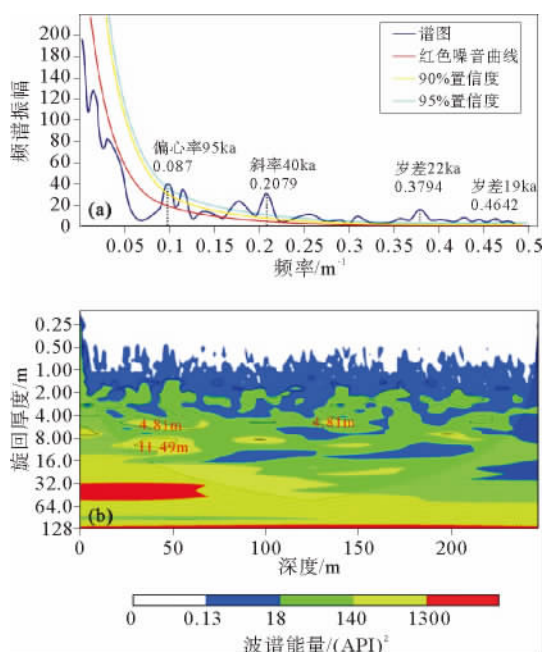


图 4 神狐海域水合物钻探区 well-I 井自然伽玛曲线频谱分析与连续小波变化

Fig. 4 Spectrum analysis and continuous wavelet spectrum of natural GR logging of well-I in the gas hydrate drilling area of the Shenhu waters

95 ka 的偏心率周期, 旋回厚度 4.81 m 对应于 40 ka 的斜率周期, 而 2.636 m 与 2.154 m 则分别对应于 22 ka 和 19 ka 的岁差周期。通过构建滤波器, 对测井曲线进行滤波处理, 发现 95 ka 的偏心率控制的优势旋回个数在 20 个左右, 发现 40 ka 的斜率控制的优势旋回个数在 46 个左右, 以偏心率周期 (95 ka) 和对应的优势旋回厚度计算出钻探区第四纪沉积速率为 12.1 cm/ka。

目前, 关于高频层序 (四—六级) 成因主要受米兰科维奇旋回控制或影响的认识比较一致<sup>[26]</sup>。从频谱图上可见, 偏心率 (95 ka) 的周期幅值最大, 斜率 (40 ka) 次之; 连续小波分析显示在 45~55 m 深度段存在两个振幅较强的区域, 分别为 11.494 m 对应的 95 ka 的偏心率周期和 4.81 m 对应的 40 ka 的斜率周期 (图 4b)。频谱分析和连续小波分析的结果表明该层段主要受偏心率 (95 ka) 周期控制。结合实际地质情况和层序级别的划分标准, 认为 95 ka 的偏心率周期控制六级层序。参考按照 95 ka 的偏心率周期划分的六级层序, 结合自然伽马曲线特征、地震剖面反射特征, 根据层序地层学原理, 按照一定的组合划分了五级层序; 从而将神狐海域第四纪地层精细划分为 4 个四级层序, 9 个五级层序, 约 20 个六级层序 (图 5)。

## 4 可容纳空间分析

确定海平面变化的方法主要包括测海岸上超法、沉积相序法、稳定同位素法、群落生态法、Fisher 图解法等。Fischer 图解又被称作可容纳空间图解, 是一种对可识别高频旋回累加厚度的偏差进行成图, 来识别不同沉积旋回、研究其可容纳空间变化的统计分析方法<sup>[27-28]</sup>。其基本假设是在所要分析的旋回组成中, 最高频的组分可以很好地识别并可作为基本统计单元。

如上所述, 神狐海域第四系中保存着受地轴倾斜率周期 (40 ka) 控制的地层旋回, 通过构建滤波器, 对测井曲线进行滤波处理, 发现 40 ka 的斜率控制的优势旋回个数在 46 个左右, 结合自然伽马曲线进行高频旋回的划分。以高频旋回平均厚度累积偏移量为纵坐标, 旋回数为横坐标, 绘制 Fischer 图解。Fischer 曲线的升降表示可容纳空间的变化, 上升表示可容纳空间增加, 下降表示可容纳空间减小。通过 Fischer 图解分析可容纳空间, 表明相对海平面变化阶段性明显, 图解明显分成 4 个部分, 分别对应低位体系域 (LST)、海侵体系域 (TST)、高位体系域 (HST-I、HST-II) (图 6)。

研究区低位体系域发育时期基准面快速下降, 使得神狐海域北部地区沿着上陆坡自西向东发育了一系列规模相似的侵蚀性水道。随着基准面的快速上升, 海侵体系域时期过渡为一套披覆沉积。高位体系域时期, 受古珠江物源的影响发育了一套高位陆架边缘三角洲沉积。高位体系域早期 (HST-I) 发育于基准面上升晚期。垂向上叠置的高频层序厚度变化不大或略微增加, 同时陆架边缘轨迹显示为平坦型, 反映其沉积时可容纳空间增加速率变化不大, 基准面上升速度较慢。高位体系域形成晚期 (HST-II) 与基准面下降早期, 其厚度明显大于高位体系域早期 (HST-I), 推测可能与第四纪晚期研究区沉积物供给增强有关。

## 5 结论

(1) 运用高分辨率二维地震资料, 通过地震反射参数 (频率、振幅、连续性)、内部反射结构和外部形态 3 个方面对研究区的地震反射界面进行识别与追踪, 将神狐海域第四纪地层分为低位体系域、海侵体系域、高位体系域。基于陆坡进积特征的垂向变化、垂向上侵蚀特征的变化、强振幅同相轴的空间可追

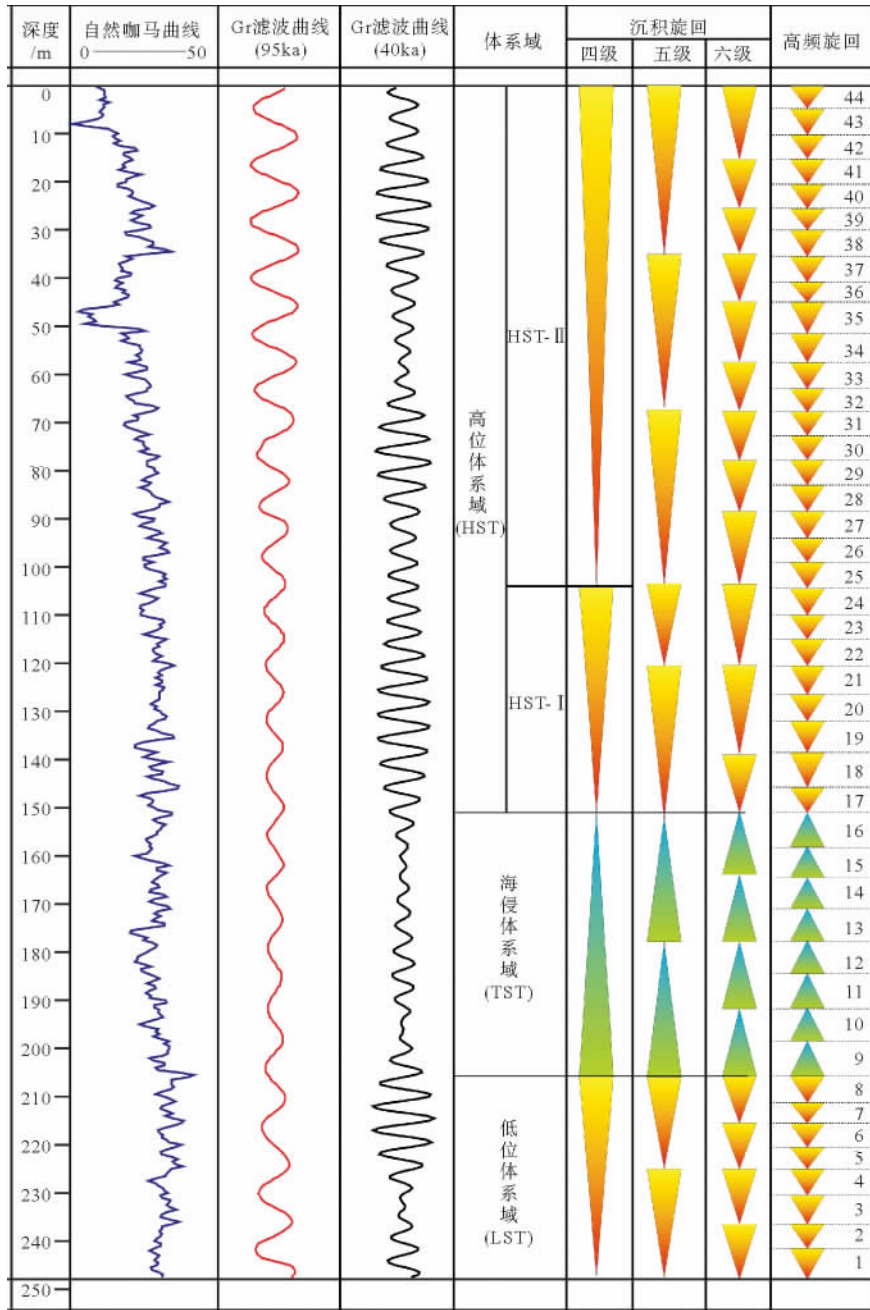


图 5 珠江口盆地神狐海域 well-I 井高频层序地层划分

Fig. 5 Stratigraphic Division of high-frequency cycles for well-I in the gas hydrate drilling area of the Shenhu waters

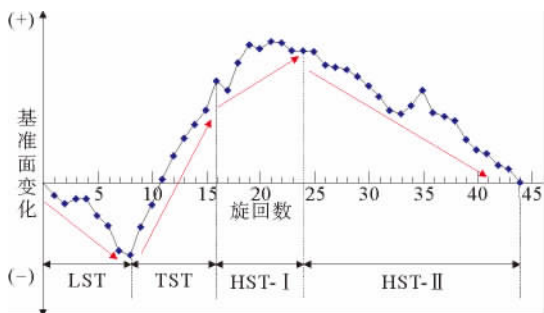


图 6 神狐海域水合物钻探区 well-I 井 Fischer 图解曲线

Fig. 6 Fischer diagram curves of well-I in the gas hydrate drilling area of the Shenhu waters

踪性等因素,将高位体系域划分为 2 个沉积旋回。

(2)通过自然伽马频谱分析发现,识别出偏心率周期(95 ka)、斜率周期(40 ka)、岁差周期(22 ka、19 ka),且主要受偏心率周期(95 ka)控制,偏心率(95 ka)对应于旋回厚度 11.494 m。通过构建滤波器对测井曲线进行滤波处理,发现 95 ka 的偏心率控制的优势旋回个数在 20 个左右,以此周期和对应的旋回厚度计算出钻探区第四纪沉积速率为 12.1 cm/ka。

(3)在对斜率周期(40 ka)控制发育的高频旋回

划分基础上,应用 Fischer 图解法做出可容纳空间的变化曲线。Fischer 图解的可容纳空间分析的结果与地质认识一致,结合钻井层序分析、地震层序分析验证了米兰科维奇高频层序划分的正确性。

### 参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] Osleger D, Read J F. Relation of eustasy to stacking patterns of meter-scale carbonate cycles, Late Cambrian, U. S. A [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61: 1225-1252
- [3] Francisco J. Lobo, Domenico Ridente. Stratigraphic architecture and spatio-temporal variability of high-frequency (Milankovitch) depositional cycles on modern continental margins: An overview [J]. *Marine Geology*, 2014, 352(S1): 215-247.
- [4] 邱贵强, 刘军愕, 帅平. 米兰柯维奇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): 45-49. [QIU Guiqiang, LIU June, SHUAI Ping. Basic principle of Milankovitch cycle and its prospect in terrigenous lake basin analysis [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2001, 8(5): 5-9]
- [5] 徐道一. 天文地质年代学与旋回地层学研究进展 [J]. *地层学杂志*, 2005, 29: 635-640. [XU Daoyi. Astro-geologic time scale and the advancements of cyclostratigraphy [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29: 635-640.]
- [6] 李斌, 孟自芳, 李相博, 等. 靖安油田延长组米兰柯维奇沉积旋回分析 [J]. *地质科技情报*, 2005, 24(2): 64-70. [LI Bin, MENG Zifang, LI Xiangbo, et al. Analysis of Milankovitch cycles of Yanchang Formation in Jing'an Oilfield [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2005, 24(2): 64-70.]
- [7] Olsen P E, Kent D V. Milankovitch climate forcing in the tropics of Pangaea during the Late Triassic [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 122(1/4): 1-26.
- [8] Nádor A, Lantos M, Tóth-Makk Á, et al. Milankovitch-scale multi-proxy records from fluvial sediments of the last 2.6 Ma, Pannonian Basin, Hungary [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(20): 2157-2175.
- [9] Massari F, Capraro L, Rio D. Climatic modulation of timing of systems-tract development with respect to Sea-level changes (middle Pleistocene of Crotona, Calabria, Southern Italy) [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(5/6): 461-468.
- [10] Francisco J Lobo, Domenico Ridente. Stratigraphic architecture and spatio-temporal variability of high-frequency (Milankovitch) depositional cycles on modern continental margins: An overview [J]. *Marine Geology*, 2014, 352(S1): 215-247.
- [11] 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. [XU Wei, XIE Xinong. A new method to calculate sedimentary rates based on Milankovitch Cycles: a case study on middle section of 3rd member of Shahejie Formation in well Niu38, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2012, 34(2): 207-214.]
- [12] 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): 781-789. [SONG Mingshui, LI Cunlei, ZHANG Jinliang. Fine division and correlation of conglomerate sedimentary cycles in Yanjia area of Dongying depression [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2012, 33(5): 781-789.]
- [13] Sloan, E. D. Gas hydrates: Review of physical/chemical properties [J]. *Energy & Fuels*, 1998, 12(2): 191-196.
- [14] Lisiecki L E and Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic  $\delta^{18}\text{O}$  records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1): 1-17.
- [15] Majorowicz J, Safanda J, Osadetz K. Inferred gas hydrate and permafrost stability history models linked to climate change in the Beaufort-Mackenzie Basin, Arctic Canada [J]. *Climate of the Past*, 2012, 8(2): 667-682.
- [16] 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义 [J]. *地质论评*, 2007, 53(2): 145-150. [PANG Xiong, CHEN Changmin, SHAO Lei, et al. Baiyun Movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications [J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 145-150.]
- [17] 柳保军, 庞雄, 颜承志, 等. 珠江口盆地白云深水区渐新世一中新世陆架坡折带演化及油气勘探意义 [J]. *石油学报*, 2011, 32(2): 234-242. [LIU Baojun, PANG Xiong, YAN Chengzhi, et al. Evolution of the Oligocene-Miocene shelf slope-break zone in the Baiyun deep-water area of the Pearl River Mouth Basin and its significance in oil-gas exploration [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2011, 32(2): 234-242.]
- [18] Pang X, Yang S K, Zhu M, et al. The deep water fan systems and petroleum resource in the northern slope of South China Sea [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(3): 626-631.
- [19] Ding W W, Li J B, Li J, et al. Morphotectonics and evolutionary controls on the Pearl River Canyon system, South China Sea [J]. *Marine Geophysical Research*, 2013, 34(3/4): 221-238.
- [20] Zhou D, Sun Z, Liao J, et al. Filling history and post-break-up acceleration of sedimentation in Baiyun Sag, deepwater northern South China Sea [J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20(1): 160-171.
- [21] 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(1): 261-285.
- [22] 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.
- [23] Wonik T. Gamma-Ray measurement in the Kirchrode I and

- II borehole[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 174: 97-105.
- [24] Schulz M, Mudelsee M. REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series[J]. *Computers & Geosciences*, 2002, 28: 421-426.
- [25] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-78.
- [26] Kuhlmann J, Asioli A, Trincardi F. Sedimentary response to Milankovitch-type climatic oscillations and formation of sediment undulations: evidence from a shallow-shelf setting at Gela Basin on the Sicilian continental margin[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 108: 76-94.
- [27] Sadler PM, Osleger D A, Montanez I P. On the labelling, length and objective basis of Fischer plots[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(2): 360-368.
- [28] Husinec A, Basch D, Rose B. FISCHERPLOTS: An Excel spreadsheet for computing Fischer plots of accommodation change in cyclic carbonate successions in both the time and depth domains[J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34(3): 269-277.

## HIGH-RESOLUTION SEQUENCE STRATIGRAPHY ON MILANKOVITCH CYCLES IN THE GAS HYDRATE DRILLING AREA OF SHENHU WATERS

LIU Jie<sup>1</sup>, SUN Meijing<sup>2</sup>, SU Ming<sup>1</sup>, WU Nengyou<sup>1,3</sup>, YAN Heng<sup>4</sup>, YANG Rui<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

4. Zhanjiang Division of CNOOC Ltd., Zhanjiang 524057, China)

**Abstract:** The Quaternary sequence stratigraphic framework was established for the northern slope of the Baiyun Sag, the Pearl River Mouth Basin, based on high resolution 2D seismic profiles. The deposit is divided into three systems tracts, i. e. the LST (lowstand systems tract, LST), TST (transgressive systems tract, TST) and HST (highstand systems tract, HST). The HST could be further divided into two depositional units, HST-I and HST-II, according to the prograding styles of the slope, the vertical stacking patterns, the change in erosion features, and the continuity of high-amplitude seismic reflectors. Under the constraints of stratigraphic framework, the natural gamma data from Well-I of the gas hydrate drilling area of the Shenhu waters have been used for spectral analysis. The Milankovitch cycles are identified by spectrum analysis, including the eccentricity cycles (95 ka), obliquity cycle (40 ka), precession cycles (22 ka, 19ka), and the sequence is mainly controlled by the eccentricity cycle (95 ka), corresponding to a thickness of 11.494 m. It is found that the number of dominant cycles controlled by the eccentricity cycles (95 ka) is about 20 after filtering of logs. The sedimentation rate in the drilling area is 12.1 cm/ka calculated with the eccentricity cycle and the corresponding thickness of the cycle. The accommodation change curves of the sequences obtained using Fischer diagram can verify the high resolution sequence stratigraphic division.

**Key words:** Milankovitch cycles; spectral analysis; high-frequency cycles; Shenhu waters; Baiyun Sag