

塔里木盆地顺托果勒地区志留系柯坪塔格组 米兰科维奇旋回沉积记录

贾东力¹, 田景春¹, 林小兵¹, 杨国华², 冯文新², 张翔¹, 唐艳³, 杨辰雨⁴

(1. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 郑州工业贸易学校, 河南 郑州 450007;
3. 四川省第三测绘工程院, 四川 成都 610500; 4. 四川省地质矿产勘查开发局, 四川 德阳 618000)

摘要:塔里木盆地志留系柯坪塔格组主要沉积于盆地构造活动相对稳定期的潮坪环境,是盆地内典型的海相碎屑岩地层之一,由多层中-细砂岩和泥岩频繁互相叠置而成,地层分布上具有明显的三段特性。根据前人已有研究成果,柯坪塔格组在国际地层表上对应于特列奇阶、埃隆阶及鲁丹阶,沉积时限应介于8.1~12.7 Ma。然而目前对其米兰科维奇高频地层旋回格架划分鲜有探讨,通过选择顺托果勒地区顺9井自然伽马测井曲线作为替代指标,运用频谱分析法进行计算。结果表明顺9井柯坪塔格组记录并保存了完整的米兰科维奇旋回,天文旋回周期在地层沉积过程中对旋回厚度具有明显的控制作用。其中旋回厚度16.73 m对应于405 ka长偏心率周期;5.24 m和3.92 m分别对应于125 ka和95 ka的短偏心率周期;1.59 m和1.26 m分别对应于38.1 ka和31.1 ka的斜率周期。地层平均沉积速率为4.15 cm/ka,沉积时限为10.4 Ma,通过经验模态分解法建立了顺9井柯坪塔格组“浮动”天文年代标尺。柯坪塔格组共记录了83个125 Ka短偏心率旋回,334个31.1 ka周期斜率旋回。最后结合Fischer图解法,以125 ka短偏心率周期作为控制的五级旋回划分的标准模式,分析各个高频旋回之间的叠加差异及成因。该结果为盆地内或类似盆地海相碎屑岩高频旋回划分提供了一种统一的、不受人为影响且行之有效的新方法。

关键词:米兰科维奇旋回;频谱分析;经验模态分解;天文年代标尺;柯坪塔格组;志留系;塔里木盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Milankovitch cycles in the Silurian Kepingtage Formation in Shuntuoguole area, Tarim Basin

Jia Dongli¹, Tian Jingchun¹, Lin Xiaobing¹, Yang Guohua², Feng Wenxin², Zhang Xiang¹, Tang Yan³, Yang Chenyu⁴

(1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Zhengzhou Industry and Trade Schools, Zhengzhou, Henan 450007, China; 3. The Third Academy of Engineering of Surveying and Mapping, Chengdu, Sichuan 610500, China; 4. Geochemistry Exploration Brigade of Sichuan Bureau of Exploration and Development of Geology and Minerals Resources, Deyang, Sichuan 618000, China)

Abstract: The Silurian Kepingtage Formation in the Tarim Basin is mainly deposited in the tidal flat environment during a relatively stable period of tectonic activity. It is one of the typical marine clastic sequences in the basin. And it is composed of frequently alternating and superimposing medium-fine sandstone and mudstone, and can be obviously divided into three intervals. According to previous research results, the Kepingtage Formation can be approximately correlated with the Telychian, Aeronian and Rhuddanian Stage of the International Stratigraphic Chart, and its deposition period should be within 8.1-12.7 Ma. However, its Milankovitch high-frequency stratigraphic cycle framework is rarely discussed. Taking the Gamma-Ray logs of Well Shun-9 as proxies and using spectral analysis method for computation, we found that the Kepingtage Formation in Well Shun-9 recorded the complete Milankovitch cycle. The astronomical cycle significantly controls the cycle thickness, with the cycle thickness of 16.73 m corresponding to the long eccentricity of 405 ka, the cycle thickness of 5.24 m and 3.92 m corresponding to the short eccentricity of 125 ka and 95 ka respectively, and the cycle thickness of 1.59 m and 1.26 m corresponding to the obliquity of 38.1 ka and 31.1 ka respectively. The average sed-

收稿日期:2017-12-15; 修订日期:2018-05-09。

第一作者简介:贾东力(1988—),男,博士研究生,层序地层学与沉积学。E-mail:25944718@qq.com。

通讯作者简介:林小兵(1980—),男,博士、讲师,沉积学与储层地质学。E-mail:linxiaobing07@cdut.cn。

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(1212011220760);成都理工大学沉积地质学科科研创新团队项目(KYTD201703)。

imentary rate was estimated as 4.15 cm/ka and the depositing time as 10.4 Ma. And a “floating” astronomical time scale was established for the Kepingtage Formation in Well Shun-9 based on Empirical Mode Decomposition (EMD). The Kepingtage Formation was found to have 83 cycles with short eccentricity of 125 ka and 334 cycles with obliquity of 38.1 ka. Finally, we analyzed the superposition differences and their causes of each high-frequency cycle by using the Fischer plots and a standard model for fifth-order cycle division under the control of the short eccentricity of 125 ka. This result provides a new method that is unified and unbiased for high-frequency cycle division of marine clastic strata in this basin and similar basins.

Key words: Milankovitch cycle, spectral analysis, EMD, astronomical time scale, Kepingtage Formation, Silurian, Tarim Basin

旋回地层特指建立在时间、尺度及成因共同约束下,顶底由层序界面限定和内部相对整合的具有旋回特征的沉积地层,主要研究记录并保存在地层中的米氏旋回,即由地球天文轨道周期变化形成的沉积旋回记录^[1-2]。而轨道参数的周期变化引起了地球表面日照量的周期性变化,进而导致全球气候的周期性变化,并被记录在对气候变化响应相对较敏感的沉积体系中。这些由地球天文轨道驱动力造成的旋回地层记录被称为米兰科维奇旋回,即天文旋回理论^[3]。

前人研究表明,米兰科维奇旋回作为一种轨道力存在于太古宙以来的各个地史时期。其地球轨道偏心率、斜率和岁差三要素的周期性变化对地表日照量、全球气候和海平面变化具有明显的影响,结果导致天文轨道驱动着海平面的变化,从而控制着三级、四级、五级甚至六级沉积层序。笔者正是在本文中考虑到米兰科维奇旋回中3个周期之间的比率关系在地质历史时期具有相对的稳定性^[1,4],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或相近(误差在5%以内)的关系,我们就认为研究层段的各旋回对应于各米氏旋回,从而就完成了“深度域”和“时间域”之间的数据转换,最后通过计数法得到目的层段内所包含米氏旋回的个数,进而就可以得到分析层段的持续时间^[5]。因此米兰科维奇旋回特征及高频层序研究能够用于分析古环境和古气候变化、计算目的层位的沉积速率、区域地层等时精细对比以及完善地层年代表等研究,为理解和解决地球科学领域的众多问题提供依据。

本文针对塔里木盆地顺托果勒低隆起以海相碎屑岩沉积为主的柯坪塔格组为对象,运用频谱分析法,EMD(经验模态分解法)法及Fischer图解法对柯坪塔格组进行米兰科维奇旋回分析,建立柯坪塔格组“浮动”天文年代标尺,以短偏心率周期125Ka为划分标准,建立高精度层序地层格架,分析各高频旋回叠置关系及差异性,旨在把米兰科维奇旋回理论应用在高频层序划分过程中,同时为本地区及类似地区提供一种

分析层段持续时间,沉积速率及高频旋回地层划分的显著方法。

1 地质背景

现今塔里木盆地是古生代克拉通盆地与中生代前陆盆地叠置复合而形成的大型多期叠合盆地,在地貌上被天山造山带、西昆仑造山带和阿尔金造山带所围限,其古生代的构造格局,以发育多个大型的北西西向、北东东或北东向的古隆起、古坳陷带为显著特征,也发育了从海相、海陆过渡相、陆相的完整海侵-海退沉积旋回^[6]。本文的研究区顺托果勒低隆区,南北方向处于塔北隆起和塔中-古城隆起的夹持之间,东西方向上处于阿瓦提凹陷与满加尔坳陷之间的低梁部位,呈“马鞍形”处于南北两个正向构造带和东西两个负向构造带之间(图1)^[7]。自奥陶系以来,顺托果勒隆起及邻区经历了碳酸盐岩台地发育、台地内隆起-斜坡形成、北西向与北东向断裂改造,岩浆活动、区域翘倾变动及早期断层再活动等多个阶段^[8],在早、中奥陶世处于稳定的克拉通沉积环境,在晚奥陶世,塔中地区发生台盆分异,卡塔克隆起发生隆升,而处于围斜区的顺托果勒地区稳定沉降,早志留世,卡塔克隆起未受到明显的构造活动影响,顺托果勒地区持续稳定沉降,故志留系保存了较完整的古生代地层。

2 地层划分

区内志留系柯坪塔格组发育较为完整,普遍埋深大于5100 m,其作为1个二级层序的底界,代表盆内重要构造运动的界面(晚奥陶世末构造运动),强烈的构造活动造成盆地内地层大规模的隆升,变形及后期的剥蚀改造,形成盆内广泛分布的不整合,同时剥蚀强度的差异也造成了志留系柯坪塔格组沉积层序具有不对称的结构特点^[9]。沉积充填序列上,柯坪塔格组具有明显的3个岩性段,自下而上分为下砂岩段(S_1k^1),

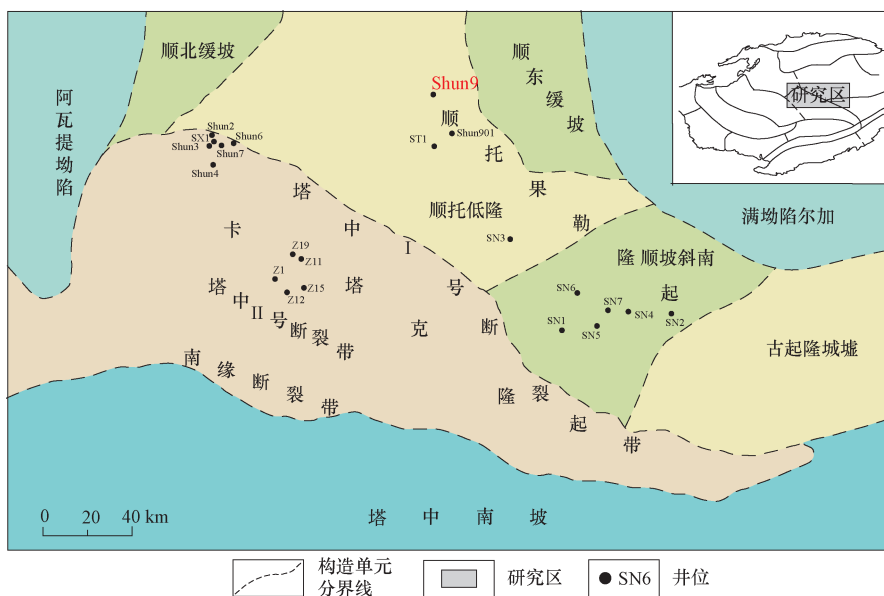


图1 塔里木盆地顺托果勒低隆区构造示意图

Fig. 1 Structural location of the Shuntuoguole low uplift area, Tarim Basin

中泥岩段(S_1k^2),上砂岩段(S_1k^3)。其中上段沉积了一套海相细砂岩、中砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩互层,中段沉积一套绿色、灰绿色泥岩,下段为一套砂岩与泥岩互层组合(图2)。结合前人研究和岩心观察可明显看出顺托果勒地区柯坪塔格组属滨岸和潮坪环境沉积产物^[10-12]。由于在滨岸和潮坪沉积环境中受波浪及潮汐作用影响,沉积作用变化较活跃,可容纳空间变化成为旋回地层沉积厚度的最主要控制因素,同时该地层保存较多,较完整,岩性和沉积构造清楚,因而柯坪塔格组是进行旋回地层分析的良好地层。

3 数据选择及处理

由于气候变化与地球轨道参数两者之间的关系密不可分,故古气候替代指标是能够反映之前气候变化的各类地球化学和地球物理等参数,同时经过前人的研究证明,在深海、湖泊和河流沉积物中均发现了米氏旋回记录^[13],在缺乏准确的地层测年数据下,稳定沉积地层中符合采样密度要求的岩性变化、地球化学数据(如氧同位素 $\delta^{18}O$,碳同位素 $\delta^{13}C$, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值, $CaCO_3$ 含量,磷/钛等)、古生物指标(如生物的绝灭速率,生物更替,丰度等)和能反应气候变化的地球物理数据(如自然伽马,磁化率,岩石密度和色率等)^[3,14]均可作为替代性指标用于米兰科维奇旋回的研究。

米兰科维奇旋回的周期性(准周期性)变化的最终结果是沉积层序有规律的发育,表现在沉积结构、岩性、岩相呈现出韵律性和旋回性,而在众多替代性指标

中,任何反应岩性变化的测井曲线则连续地记录下了这种变化,并且具有很高的纵向分辨率^[15]。例如:J. D. Ogg 用测井曲线分析沉积速率的不连续,Spalett 等利用 AC、RT 和 GR 对阿根廷下白垩地层的研究,Fotini 和 Maltezzou 等对科学深钻测井曲线的分析都证明海相、湖相地层都可用测井曲线分析米兰科维奇周期^[16]。

因此在研究过程中,首先是要选择合适的替代性指标来开展旋回地层学研究工作,理论上,每一个测井数据都能体现出岩性变化具有一定的周期性,其中的自然伽马曲线记录了在放射性核衰变过程中发出的伽马射线的强度,其强度与岩层中的 ^{40}K 、 ^{232}Th 及 ^{238}U 的含量有关。粘土物质和有机质对放射性元素具有很强的吸附能力,而且其缓慢的沉积速率让放射性元素有足够的时间从流体中分离出来,因此,自然伽马曲线既能反映岩层中泥岩和有机质含量的变化,同时与控制气候变化的因素具有良好的相关性,故与其他测井曲线相比,自然伽马曲线可以敏感地反映岩性旋回和岩相韵律互层在深度域中的变化。

由此,本文选择了钻遇地层较全的顺9井自然伽马测井曲线进行频谱分析、EMD 分解及 Fischer 图解等处理。为满足分析需要,首先对测井曲线数据去除各种环境“噪音”,包括如下预处理:1)去极值,即去除偏移均值很大的异常值,用均值或插值代替;2)去除线性趋势化,即去除数据序列随时间或深度而逐渐变大或变小的趋势性变化,本次处理选用了5阶去趋势化处理方法;3)小波去噪,即选用小波分析中的 dbN 小波去除产生干扰的频率成分。

综上所述,本文在总结了前人研究的基础上,根据卫星测量的地球数据对米兰科维奇的地球轨道参数进行了计算及校正(表1)^[18,21-24],其结果揭示了405,125,95 ka三种稳定的偏心率周期。柯坪塔格组位于志留系下部,根据2016年国际地层年代地层表可知,早志留世柯坪塔格组大致开始于 (443.8 ± 1.5) Ma,结束于 (433.4 ± 0.8) Ma。鉴于此,本次研究根据Berger提出的计算模型,选择了440 Ma对应的斜率长短周期38.1,31.1 ka和岁差长短周期19.5,16.6 ka作为柯坪塔格组沉积时期的米氏旋回周期进行高频旋回分析^[18],这些理论轨道周期之间的比例关系稳定不变,可作为本次研究中确定天文周期的基准。

4.2 米氏旋回确定

在构造稳定的前提下,地层沉积时期的环境周期性变化可在测井曲线的周期性变化中详细的体现出来,而对测井曲线数据进行频谱分析来进行周期性旋回地层研究已经是一种既成熟又有效的统计分析方法。其实质是将测井曲线看作是各种地质因素共同在深度域(或时间域)上引起地层规律性变化而形成的一个综合信号,通过对目的层段的测井曲线进行频谱分析,计算随深度变化的周期信号的频率,找出这段曲线的主要周期成分,经过反复比较,发现层段范围内波长比率与标准天文周期固定比率相同或相近的频率,两者的比率越接近,越能反应古气候变化信息,进而可揭示该段地层旋回形成过程中主要受到了哪些天文周期的控制,就可认为研究层段的各地层旋回对应于米兰科维奇旋回的各个周期^[25]。

本文研究中,利用了PAST软件的REDFIT程序对顺9井自然伽马测井曲线数据进行频谱分析,主要选择90%置信度为计算阈值(表2;图3)。其横坐标为“频率”,由于地层为深度序列,故此处的频率特指

单位厚度内地层旋回变化的次数。纵坐标为“能量”,表示各个频率的能量大小和其深度域中的相对重要性大小。能量值越大,地层中出现的对应周期的沉积旋回越频繁,因此频谱曲线能量高点的谐频对应于曲线主频,将其换算为相应波长,再根据数据采样间隔可得出相应旋回厚度。从国际年代地层表(2016版)可知志留系柯坪塔格组沉积大致介于 $(433.4 \pm 0.8) \sim (443.8 \pm 1.5)$ Ma,故其沉积时限应介于8.1~12.7 Ma。在处于大于90%置信度的主要频率中,假定A点对应长偏心率旋回,即周期为405 ka,其平均沉积旋回厚度则等于16.73 m。由于顺9井柯坪塔格组地层埋深为5 206~5 641 m,即地层厚度为435 m,可计算出柯坪塔格组的沉积时限为10.4 Ma。处于柯坪塔格组沉积时限范围内,假设成立;若远远超出了志留系柯坪塔格组的沉积时限,则假设不成立,该点周期只能与短偏心率旋回或更小的米级旋回对应。同理可判定点A,B,C,D和E对应频率为0.007,0.024,0.032,0.079和0.097,其相对应的平均沉积旋回厚度为16.73,5.24,3.92,1.59和1.26 m,同时之间比例关系为1:0.313:0.234:0.095:0.075,与轨道周期405:125:95:38.1:31.1 ka的比例关系1:0.309:0.234:0.094:0.076异常接近,仅仅在短偏心率和斜率周期产生极小的误差。旋回厚度间的比例关系与理论天文周期比例的差异均在5%以内,而在频谱分析结果中可看到,偏心率周期和斜率周期均处于90%置信度之上,岁差周期在记录中处于90%置信度以下,相对振幅能量偏心率>斜率,表明柯坪塔格组沉积过程中,偏心率影响最大,而岁差受到构造运动和气候周期等的强烈干扰,信息记录能量较弱且不连续,同时部分峰值虽满足沉积时限范围的条件,但未找到与米氏旋回周期相似的比率,说明这些峰值很可能为噪音或者受其他周期旋回共同控制的

表1 地史时期的岁差和斜率周期

Table 1 Precession and obliquity cycle during the geological time

地质年代	年龄/Ma	岁差周期/a	斜率周期/a
第四纪	0	19 00 ~ 23 000	41 000 ~ 54 000
白垩纪末期	72	18 622 ~ 22 449	39 280 ~ 51 055
二叠纪中期	270	17 545 ~ 20 902	34 778 ~ 43 703
二叠纪早期	298	17 387 ~ 20 678	34 163 ~ 42 736
泥盆纪晚期	380	16 916 ~ 20 015	32 390 ~ 39 997
志留纪早期	440	16 567 ~ 19 529	31 134 ~ 38 099
寒武纪晚期	500	16 207 ~ 19 029	29 885 ~ 36 245
新元古代初期	1 000	14 832 ~ 17 162	25 522 ~ 30 021
中元古代早期	1 500	13 765 ~ 15 750	22 520 ~ 25 951
早元古代中期	2 000	12 612 ~ 14 258	19 590 ~ 22 136

表 2 塔里木盆地顺 9 井柯坪塔格组频谱分析相关参数

Table 2 Parameters for spectral analysis of the Kepingtage Formation in Well Shun-9, Tarim Basin

轨道旋回周期/ka	峰值点序号	能量值	频率/(旋回数/m ⁻¹)	平均旋回厚度/m	平均沉积速率/(cm · ka ⁻¹)	旋回厚度比值
偏心率	405	A	21 613	0.007	16.73	4.13
	125	B	5 847.7	0.024	5.24	4.19
	95	C	5 058.4	0.032	3.92	4.13
斜率	38.1	D	527.15	0.079	1.59	4.17
	31.1	E	306.9	0.097	1.26	4.15

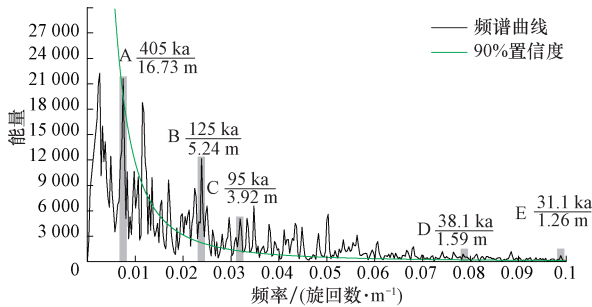


图 3 塔里木盆地顺 9 井柯坪塔格组自然伽马曲线频谱分析

Fig. 3 Spectral analysis of natural gamma logs of the Kepingtage Formation in Well Shun-9, Tarim Basin

结果。综合分析认为,志留系柯坪塔格组中很好地保存了米兰科维奇旋回,因此可认为旋回厚度 16.73 m 对应于 405 ka 长偏心率周期,5.24 和 3.92 m 分别对应于 125 ka 和 95 ka 的偏心率周期,1.59 和 1.26 m 分别对应于 38.1 ka 和 31.1 ka 的斜率周期。利用平均旋回厚度除以其对应的天文旋回周期,可得到平均沉积速率,而且不同的旋回厚度所计算得出的沉积速率误差不大。本文计算结果表明柯坪塔格组平均沉积速率约为 4.15 cm/ka,与 Chen Shuping^[26]对塔里木盆地沉积速率的计算结果相符合,间接证明本文的频谱分析结果的正确性。

尽管通过频谱分析法能从替代指标的时间(或深度)域数据中很好地计算出其包含的主要频率(周期)成分,但其分析得到的结果仅为一段时间(或深度)内的平均谱结构,不能反映出频率域随时间(或深度)的变化信息,也不能对地层的沉积速率在各个地质历史时期的变化情况有良好反映,而经验模态分解(Empirical Mode Decomposition,简称 EMD)法则能较好的解决这一问题^[27]。由于 EMD 方法相较于小波变换法更适用于测井数据这一类非线性与非平稳态序列,运用 EMD 法对测井数据提取局部均值曲线,其将复杂信号分解得到一系列固有模态函数(Intrinsic Mode Functions,简称 IMF)。每一个函数分量中都包含了信号的完成信息,选择一组合适且最符合地质研究目标的 IMF 则更能直观反映序列的频谱分析结果^[24],特别在对高频沉积旋回

准确客观识别过程中更能充分凸显其“数学显微镜”的作用,克服了小波变换中小波基选取的约束。

首先,根据顺托果勒地区志留系柯坪塔格组频谱分析识别出的斜率旋回周期(38.1 ka),可以计算出地层沉积时限:(435 m ÷ 1.59 m) × 38.1 ka = 10.4 Ma。其次,根据得出的柯坪塔格组的沉积时限计算结果,我们可得到对应 125 ka 偏心率周期的五级层序发育个数,即:

$$10.4 \text{ Ma} \div 125 \text{ ka} \approx 83 \text{ 个} \quad (1)$$

另外,对顺 9 井自然伽马测井曲线进行 EMD 分解得到 IMF1—IMF9 共计 9 个固有模态和一个残余项 R (图 4),结果表明:顺 9 井柯坪塔格组中可能存在作为五级层序划分标尺的短偏心率周期 125 ka,在参照岩性变化特征及测井曲线变化特征下,以柯坪塔格组底部为开始对与之相对应的高频旋回地层进行划分。采用计数法得到顺 9 井柯坪塔格组对应于 125 ka 周期保存了约 83 个短偏心率周期旋回,对应于固有模态函数 IMF3。因此,再结合先前计算出的柯坪塔格组平均沉积速率,以旋回信号清晰、相对稳定的短偏心率旋回 125 ka 为标准,建立了柯坪塔格组高分辨率“浮动”天文年代标尺(图 5),使得顺 9 井柯坪塔格组中每一深度位置的地质年龄都能做出较为精确的估计。同时,我们可合理的认为,若对有地层剥蚀现象的井如顺 3、顺 4 井等进行上述频谱分析和计算,能够近似的得出该井的地层剥蚀量,本文不在赘述,特列出计算公式如下:地层剥蚀量 = 10.4 Ma ÷ 斜率周期 × 斜率,对应平均旋回厚度 - 现今地层厚度。

5 可容空间变化

可容纳空间变化是形成沉积层序的本质因素。从理论上来说,随着可容纳空间的周期性变化,沉积物的叠加样式和沉积体系的发育也呈周期性变化^[28]。在绘制 Fischer 图解时,横坐标表示地层厚度,纵坐标表示高频旋回的累计厚度偏移,对测井曲线数据处理遵循:①消除测井曲线长趋势化偏移;②运用钟形函数 5

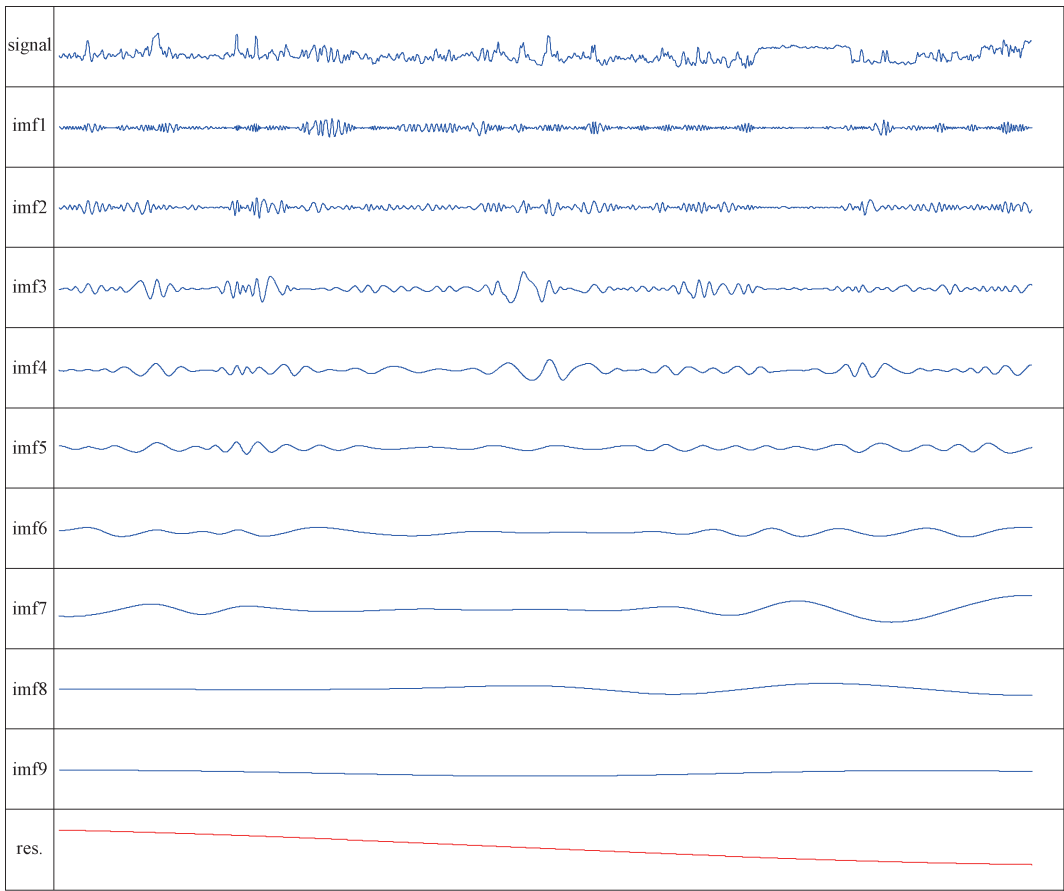


图 4 塔里木盆地顺 9 井 GR 曲线 EMD 分解图

Fig. 4 EMD diagram of GR logs from Well Shun-9, Tarim Basin

点加权滑动平均法去除曲线无关的毛刺干扰,突出沉积旋回的周期波动变化;③采用一阶差分法和极值判别法计算沉积旋回厚度^[29]。

通过对柯坪塔格组 GR 曲线进行 Fischer 图解(图 6),并结合前文建立的“浮动”天文年代标尺可知:柯坪塔格组可划分为 1 个二级层序、4 个三级层序、26 个四级层序及 83 个五级层序,观察可知各级高频旋回具有明显的不对称性,并且各级旋回之间叠加比均体现出变化。其中,三级层序界面分别对应井深约 5 561.4、5 450 和 5 336 m 的位置,界面相应岩性为灰色细砂岩、灰色中砂岩和灰色细砂岩。第一个三级旋回层序由 5 个四级旋回层序和 20 个五级旋回层序叠加组成,对应厚度约为 87.9 m;第二个三级旋回层序由 7 个四级旋回层序和 24 个五级旋回叠加组成,对应厚度约为 111.4 m;第三个三级旋回层序由 5 个四级旋回层序和 17 个五级旋回叠加组成,对应厚度约为 114 m;第四个三级旋回层序由 9 个四级旋回层序和 22 个五级旋回叠加组成,对应厚度约为 130 m。究其原因,我们推测主要为在潮坪沉积环境中旋回形成时的地层堆积作用所导致,由于波浪和潮汐的

改造作用,使前期未固结成岩的旋回地层出现沉积缺失,并且改造作用越大,这种缺失越明显,随之产生各级旋回叠加比的变化;同时,潮坪沉积物主要依靠潮汐回流从陆源区带入,当海平面快速上升时,由于个别区域沉积物供应不足而导致形成比较单一的潮下非补偿性小旋回,而后续旋回便直接发育其上,造成前后或更多的旋回叠加;当海平面快速下降时,原有沉积的旋回上部会遭受侵蚀,从而形成两个旋回的兼并。正是由于这些情况造成的旋回叠加和兼并,各级旋回的不对称性和组成各级旋回的比率变化在所难免。

从旋回变化趋势曲线可以看出,受 125 ka 短偏心率控制的沉积旋回经历了 83 次高频海平面升降变化,且每个沉积旋回都经历了一次可容纳空间由小变大再减小的过程,其他更低频次的旋回也有同样的增加—减小的过程。以三级层序可容纳空间演化为例,柯坪塔格组第一次可容纳空间持续约为 2 Ma,可容纳空间呈现由快速增加变为快速减少的趋势;第二次可容纳空间持续时间约为 2.8 Ma,呈现由较快速增加变为缓慢减少的趋势;第三次可容纳空间持续时间约为 2 Ma,

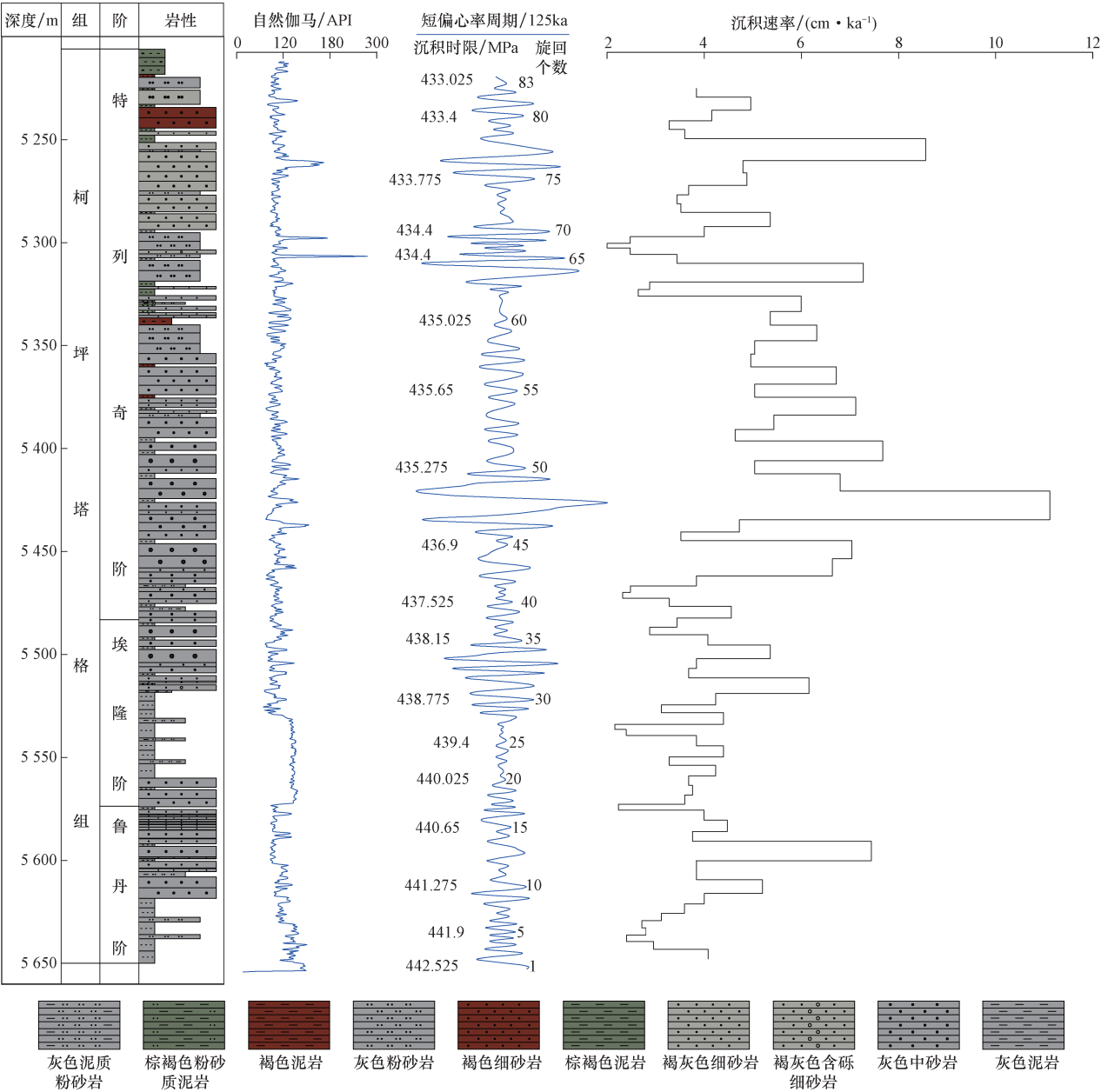


图5 塔里木盆地顺9井岩性剖面、“浮动”天文年代标尺及沉积速率综合图

Fig. 5 Composite chart showing lithology, "floating" astronomical time scale and sedimentary rate of Well Shun-9, Tarim Basin

呈现由缓慢增加变为快速减少的趋势;第四次可容纳空间持续时间约为 3.6 Ma,呈现由快速增加变为快速减少的趋势。

同时在三级层序可容纳空间上升过程中,发育多套潮下带中-细砂岩、泥质粉砂岩和薄层泥岩组成的退积型旋回地层,而在可容纳空间下降过程中,发育潮间带薄砂泥岩互层、细砂岩的加积-进积旋回地层。

6 结论

1) 通过自然伽马测井曲线频谱分析法发现,柯

坪塔格组沉积地层中保存完好的米兰科维奇旋回,天文轨道参数参数比与识别出的地层旋回厚度比率一致,受控于 405 ka 的长偏心率周期影响的旋回厚度为 16.73 m,125 ka 和 95 ka 短偏心率周期影响的旋回厚度为 5.24 和 3.92 m,受控于 38.1 ka 和 31.1 ka 的斜率周期影响的旋回厚度为 1.59 和 1.26 m,揭示出天文轨道旋回在塔里木盆地柯坪塔格组沉积过程中具有明显影响,其中偏心率对该区域地层影响最大。

2) 柯坪塔格组的沉积时限约为 10.4 Ma,其中共记录了 83 个 125 ka 周期短偏心率旋回和 334 个 31.1 ka 周期斜率旋回,分别对应于层序地层学中的五级和六级层序,证明米兰科维奇旋回对高频层序发育具有稳

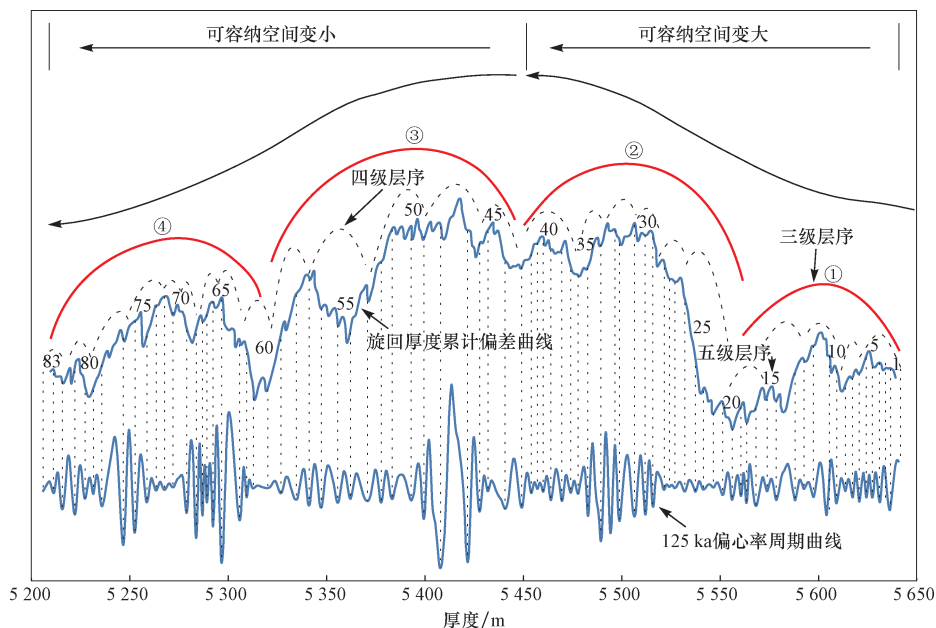


图6 塔里木盆地柯坪塔格组 Fischer 图解与可容纳空间变化趋势

Fig. 6 Fischer interpretation and trend of accommodation variation of the Kepingtage Formation, Tarim basin

定的控制作用,可为高频层序的划分方案建立时间标尺,显著提高了高频层序划分的统一性,客观性。

3) 基于米兰科维奇计算得到塔里木盆地柯坪塔格组沉积速率为 4.15 cm/ka ,结合 EMD 分解法以 125 ka 短偏心率旋回周期为标准,建立了柯坪塔格组具有相对时间概念的“浮动”天文年代标尺,大大提高了小规模旋回的识别,该天文标尺可对顺9井柯坪塔格组地层中每一深度位置的地质年龄和任一层段的沉积时限都能做出较为精确的估计,进而可估算出任一层段的沉积速率,总结出了一种有助于计算和对比沉积速率变化的新方法。

4) 依托天文年代标尺和 Fischer 图解的结合,对可容纳空间变化及高频旋回叠置关系进行分析,对三级层序划分、对比及层序沉积模型建立具有指导意义。结果显示柯坪塔格组各级沉积旋回均经历了可容纳空间上升—下降的过程,可划分出1个二级层序,4个三级层序,26个四级层序,83个五级层序及334个六级层序,各级旋回之间的叠置比均存在变化,大多数六级旋回按4:1的比率向上叠加为五级旋回,少数为5:1的比率向上叠加,而五级旋回主要按3:1的比率向上叠加为四级旋回,只有顶部的按照4:1比率叠加。为此,本文提供了一个对不同级别高频旋回叠置关系分析的新手段。

参 考 文 献

[1] Schwarzscher W. Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory[M]. Elsevier, 1993. 1–50.

[2] Doyle P, Bennet M. Unlocking the stratigraphical record: advances in modern stratigraphy[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 1998, 58(1): 209–210.

[3] 吴怀春, 张世红, 冯庆来, 等. 旋回地层学理论基础、研究进展和展望[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2011, 36(3): 409–428.

Wu Huaichun, Zhang Shihong, Feng Qinglai, et al. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2011, 36(3): 409–428.

[4] 吴智勇. 米兰科维奇韵律层及其年代地层意义[J]. 地层学杂志, 1995, 19(2): 156–160.

Wu Zhiyong. Rhythmites with Milankovitch periods and their chronostratigraphic implications[J]. Journal of stratigraphy, 1995, 19(2): 156–160.

[5] 金之钧, 范国章, 刘国臣. 一种地层精细定年的新方法[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1999, 24(4): 379–382.

Jin Zhijun, Fan Guozhang, Liu Guochen. A new method for accurate dating of strata[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(4): 379–382.

[6] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 1–98.

Jia Chengzao. Tectonic characteristics and petroleum in Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 1–98.

[7] 熊万林, 陈红汉, 云露, 等. 塔中隆起北坡顺托果勒区块志留系储层油气充注历史—以顺9井流体包裹体分析为例[J]. 石油学报, 2013, 34(2): 239–246.

Xiong Wanlin, Chen Honghan, Yun Lu, et al. Hydrocarbon charging history for Silurian reservoirs of Shuntuoguole block in the north slope of Tazhong uplift, Tarim Basin: constraints from fluid inclusion of well Shun 9[J]. Acta Petrolei Sinica, 34(2): 239–246.

[8] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气

- 突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 38–51.
- Qi Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 38–51.
- [9] 任建业, 张俊霞, 阳怀忠, 等. 塔里木盆地中央隆起带断裂系统分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 219–230.
- Ren Jianye, Zhang Junxia, Yang Huaizhong, et al. Analysis of fault systems in the Central uplift, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 219–230.
- [10] 赵文光, 周波, 蔡忠贤, 等. 塔中地区志留系柯坪塔格组沉积特征与油气分布[J]. 石油学报, 2008, 29(2): 231–234.
- Zhao Wenguang, Zhou Bo, Cai Zhongxian, et al. Sedimentary characteristics and pool distribution in the Silurian Kepingtage Formation of Tazhong area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 29(2): 231–234.
- [11] 张翔, 田景春, 彭军. 塔里木盆地志留–泥盆纪岩相古地理及时空演化特征研究[J]. 沉积学报, 2008, 26(5): 762–771.
- Zhang Xiang, Tian Jingchun, Peng Jun. The lithofacies Paleogeography and space time evolution of Silurian-Devonian in the Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 762–771.
- [12] 彭军, 张涵冰, 鲁明, 等. 顺托果勒柯坪塔格组储层成岩作用与孔隙演化[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(4): 173–182.
- Peng Jun, Zhang Hanbing, Lu Ming, et al. Diagenesis and porosity evolution of Kepingtage in Shuntuoguole block[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2016, 38(4): 173–182.
- [13] K Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's Orbit: Pacemaker of the Ice Ages[J]. Science, 1976, 194(4270): 1121.
- [14] Abels H A, Aziz H A, Krijgsman W, et al. Long-period eccentricity control on sedimentary sequences in the continental Madrid Basin (middle Miocene, Spain)[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 289(1–2): 220–231.
- [15] 吴淑玉, 刘俊. 北黄海东部坳陷始新统米兰科维奇旋回特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2015, 40(11): 1933–1944.
- Wu Shuyu, Liu Jun. Characteristics of Milankovitch Cycle in Eocene Formation, Eastern Depression of the North Yellow Sea Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(11): 1933–1944.
- [16] 吴瑞棠, 张守信, 刘椿, 等. 现代地层学[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1989: 1–50.
- Wu Ruitang, Zhang Shouxin, Liu Chun, et al. Modern stratigraphy[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 1989: 1–50.
- [17] Hinnov L A, Hilgen F J. Cyclostratigraphy and astrochronology[C]// Felix Gradstein, James G Ogg. The Geologic Time Scale 2012, Elsevier, 2012: 63–83.
- [18] Berger A, Loutre M F, Laskar J. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for paleoclimate studies[J]. Science, 1992, 255(5044): 560–566.
- [19] 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.
- [20] 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(2): 784–785.
- [21] 刘占红, 陈荣, 宋成兵, 等. 塔里木盆地石炭系卡拉沙依组旋回地层与层序地层综合研究[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2012, 37(5): 1051–1065.
- Liu Zhanhong, Chen Rong, Song Chengbing, et al. Cyclostratigraphy and sequence stratigraphy on carboniferous Karashayi Formation of Tarim Basin, China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2012, 37(5): 1051–1065.
- [22] Berger A, Loutre M F. Astronomical forcing through geological time[J]. Orbital Forcing and Cyclic Sequences, 2009: 15–24.
- [23] 赵治信, 张桂芝. 新疆古生代地层及牙形石[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 145–149.
- Zhao Zhixin, Zhang Guizhi. Paleozoic stratigraphy and conodonts in Xinjiang[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 145–149.
- [24] 张运波, 赵宗举, 袁圣强, 等. 频谱分析法在识别米兰科维奇旋回及高频层序中的应用——以塔里木盆地塔中–巴楚地区下奥陶统鹰山组为例[J]. 吉林大学学报(地), 2011, 41(2): 400–410.
- Zhang Yunbo, Zhao Zongju, Yuan Shengqiang, et al. Application of spectral analysis to identify Milankovitch Cycles and high-frequency sequences—take the Lower Ordovician Yingshan Formation of Mid-Tarim Basin as an example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(2): 400–410.
- [25] 李凤杰, 郑荣才, 罗清林, 等. 四川盆地东北地区长兴组米兰科维奇周期分析[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 805–810.
- Li Fengjie, Zheng Rongcai, Luo Qinglin, et al. Analysis of Milankovitch Cycles of the Changxing Formation in Northeastern Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(6): 805–810.
- [26] Chen Shuping, Jin Zhijun, Wang Yi, et al. Sedimentation rate rhythms: evidence from Filling of the Tarim Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2015, 89(4): 1264–1275.
- [27] 张猛, 王华忠, 隋志强, 等. 基于经验模态分解和小波变换的地震瞬时频率提取方法及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(3): 565–571.
- Zhang Meng, Wang Huazhong, Sui Zhiqiang, et al. Seismic instantaneous frequency extraction based on empirical mode decomposition and wavelet transform[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(3): 565–571.
- [28] 李凤杰, 刘殿鹤, 郑荣才, 等. 四川盆地东北地区上二叠统层序地层特征研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 93–100.
- Li Fengjie, Liu Dianhe, Zheng Rongcai, et al. The sequence stratigraphic characteristics of Upper Permian in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 93–100.
- [29] 伊海生. 测井曲线旋回分析在碳酸盐岩层序地层研究中的应用[J]. 古地理学报, 2011, 13(4): 456–466.
- Yi Haisheng. Application of well log cycle analysis in studies of sequence stratigraphy of carbonate rocks[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(4): 456–466.