

· 基础地质 ·

塔里木盆地中一下寒武统自然伽马测井曲线周期及其在沉积层序划分中的意义

陈书平^{1,2}, 王毅³, 周子勇^{1,2}, 杨伟利³, 张雨桐⁴, 冯桂民^{1,2}
CHEN Shuping^{1,2}, WANG Yi³, ZHOU Ziyong^{1,2}, YANG Weili³,
ZHANG Yutong⁴, FENG Guimin^{1,2}

1. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)), 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;

3. 中国石化股份有限公司勘探开发研究院, 北京 100083;

4. 完美世界(北京)软件科技发展有限公司, 北京 100101

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. Institute of Exploration and Development, SINOPEC, Beijing 100083, China;

4. Perfect World (Beijing) Software Technology Development Co., Ltd., Beijing 100101, China

摘要:盆地的沉积充填能够反映出周期性地质过程和天文过程。塔里木盆地中下寒武统地层保存完整,有较完整的自然伽马(GR)曲线。利用环满加尔坳陷的13口钻井的自然伽马(GR)曲线,施行经验模态分解,得到0.3 Ma、2 Ma和11 Ma的周期。0.3 Ma的峰值对应地球轨道偏心率的变化,2 Ma周期对应冰川型海平面变化周期,11 Ma周期对应太阳能量变化周期或星际云团相遇周期。这些周期补充和校准了先前得到的地质或天文周期,并能帮助理解古气候变化周期和高频层序地层。

关键词:自然伽马测井曲线;碳酸盐岩;寒武纪;波动;周期

中图分类号:P534.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)07-0943-07

Chen S P, Wang Y, Zhou Z Y, Yang W L, Zhang Y T, Feng G M. The cycles filtered from natural gamma-ray logging curves of Lower-Middle Cambrian in the Tarim Basin and their significance in sedimentary sequence division. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(7): 943-949

Abstract: The sedimentary fill of a basin always reflects periodic geological and astronomical processes. The sequence of the Lower-Middle Cambrian in the Tarim Basin has been preserved well with no erosion and has some gamma-ray (GR) well logging curves. Thirteen GR curves in the Lower-Middle Cambrian around Manjiaer depression were applied to wave analysis in terms of the empirical mode decomposition, and the time cycles of 0.3 Ma, 1~2 Ma and 10~11 Ma were obtained. The 0.3 Ma period corresponds to the change cycle of the earth's orbital eccentricity, the 1~2 Ma period to that of the glacier-type eustasy, and the 10~11 Ma period to that

收稿日期:2019-12-02;修订日期:2020-02-04

资助项目:国家油气重大专项《塔里木深层-超深层寒武系成藏条件及主控因素》(编号:2017ZX05005-002-005)、重点研发计划《超深层及中新元古界盖层封闭性与油气保存机理》(编号:2017YFC0603105)、中国科学院战略性先导科技专项(A类)子课题《四川盆地重点地区深层油气运移机理与富集模式》(编号:XDA14010306)

作者简介:陈书平(1965-),男,博士,教授,博士生导师,从事构造地质学和油区构造分析方面的教学和科研工作。E-mail:csp21c@163.com

of the earth's rotation angular velocity or that of the solar energy. These periods have supplemented and corrected previous geological and astronomical cyclic sequence and are of significance in understanding both paleoclimate change and high frequency sedimentary sequence.

Key words: gamma-ray well logging; carbonate; Cambrian; wave; cycle

盆地中的沉积层序是地球内外动力作用的结果,记录了周期性的地球过程和天文过程^[1-2]。中国沉积盆地分析证明,沉积物沉积速率存在百万年以上的周期^[3-5]。这些周期性过程与地球内部和银河系天文过程有关。在深海岩心^[6]、碳酸盐岩^[7]和冰心^[8]中找到了米兰科维奇万年周期。这些长短不一的周期过程的相互叠加控制着盆地的沉积,也在一定程度上控制着包括油气在内的矿产资源的发育和分布。

地球和天文周期过程存在多种标志物,沉积物的泥质含量就是其中之一。沉积物中泥质含量与降水丰沛程度、古气候的温暖或潮湿程度有关,也就是与古气候有关^[9-13]。泥质岩中的粘土矿物对放射性元素 K、Th、U 等具有很强的吸附性,泥质含量越多,放射性元素浓度越大,放射性越强^[14-15]。碳酸盐岩对放射性元素吸附作用很小。石油勘探中自然伽马(GR)测井曲线反映了地层放射性强度的变化,也就是反映了泥质含量的多少,可以用来进行古气候研究^[11-13, 15-16]。已有研究利用泥质含量与气候的关系对地层进行了精细定年^[17]和精细划分^[18]。

塔里木盆地寒武系—下奥陶统是连续沉积过程形成的地层,主要由碳酸盐岩和所夹的薄层泥岩组成,后续构造运动没有对该套地层进行过剥蚀,使该套层序得以完整保存。尤其是中、下寒武统,是塔里木深层勘探的重要层系,GR 测井资料齐全。本文利用中—下寒武统的 GR 曲线,进行波动分析,试图得到一些周期性过程,探索古老海相沉积对气候变化的响应。

1 地质背景

塔里木盆地位于中国西北地区,发育于塔里木板块之上,由北部拗陷等 9 个二级构造单元组成(图 1)。其沉积地层包括南华系、震旦系、古生界、中生界及新生界^[19-21]。

南华纪为裂陷发育阶段,震旦纪为拗陷阶段。寒武纪以来,塔里木盆地进入台地沉积环境,发育台地相、陆棚相和盆地相。此时,全球海平面上升,生物大爆发,开始碳酸盐岩、膏盐岩、泥质岩沉积。寒武系—中奥陶统是一个连续沉积过程,随后发生

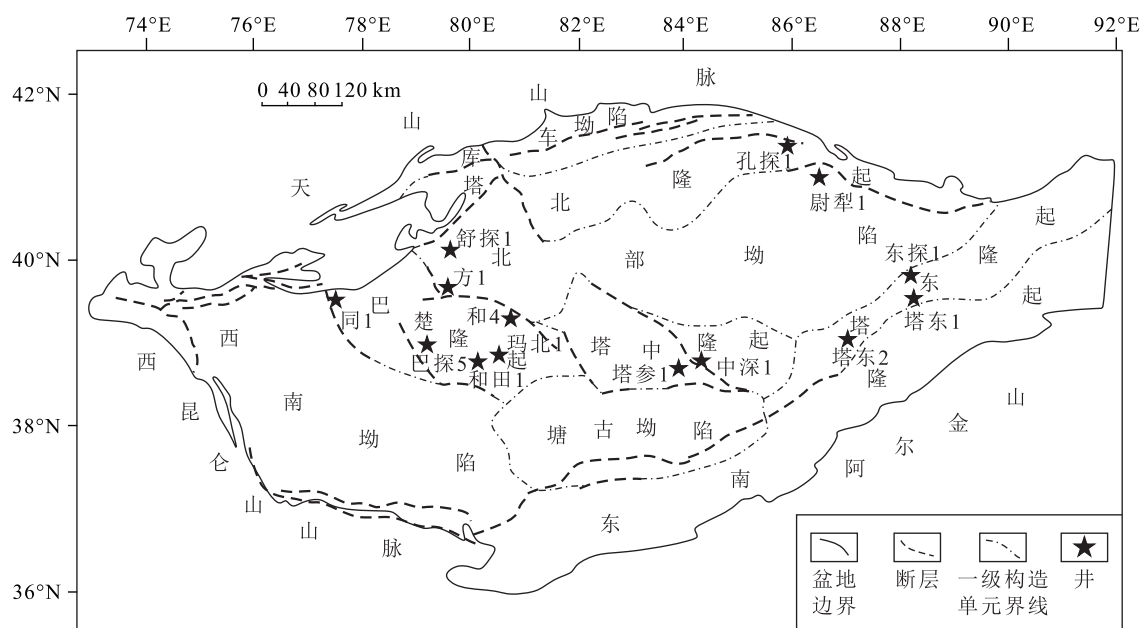


图 1 塔里木盆地构造单元划分与资料井井位分布

Fig. 1 Tectonic units of Tarim Basin and distribution of data wells

的加里东运动^[22]、海西运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动都对盆地结构有重大改造。

寒武系—中奥陶统沉积旋回,加里东中期运动 I 幕乃至后续构造运动都没有造成中—下寒武统的剥蚀,是进行波动分析的理想层段。

2 资料与分析方法

2.1 资料

本次波动分析采用 GR 测井曲线,第一组曲线来自中央构造带的巴楚隆起和塔中隆起(图 2),第二组曲线来自塔东隆起和塔北隆起(图 3)。GR 测井曲线是以深度和 γ 值的大小展示的,为了进行时间域的周期提取,需要将深度转换成时间。因此,按照中寒武世 8 Ma、吾松格尔组和肖尔布拉克组或西大山组 12 Ma、玉尔吐斯组 21 Ma 的时间间隔,将

对应 GR 曲线拉开,得到自然伽马值对地质时间的变化曲线(图 2、图 3)。

2.2 经验模态法 GR 曲线分解

从曲线上分解波动要素可以有多种方法,本次研究采用 Hilbert-Huang 变换方法(HHT)。该方法是 1998 年由 Huang 等首先提出来的一种信号处理方法^[23],用于现实中非线性、非平稳信号的处理与分析。该方法的前提是经验模态分解。所谓经验模态分解就是通过一种特定的滤波方法把原始数据分解成由高频(细节成分)到低频(基本成分)的一系列本征模态函数(IMF)。由于不同的本征模态函数分别刻画了原始信号中不同目标的信号成分,因此借助经验模态分解分析,有可能从信号曲线中分离出不同频率的信号成分,进而求得波动周期。

经验模态分解包括:①曲线的预处理,由于原

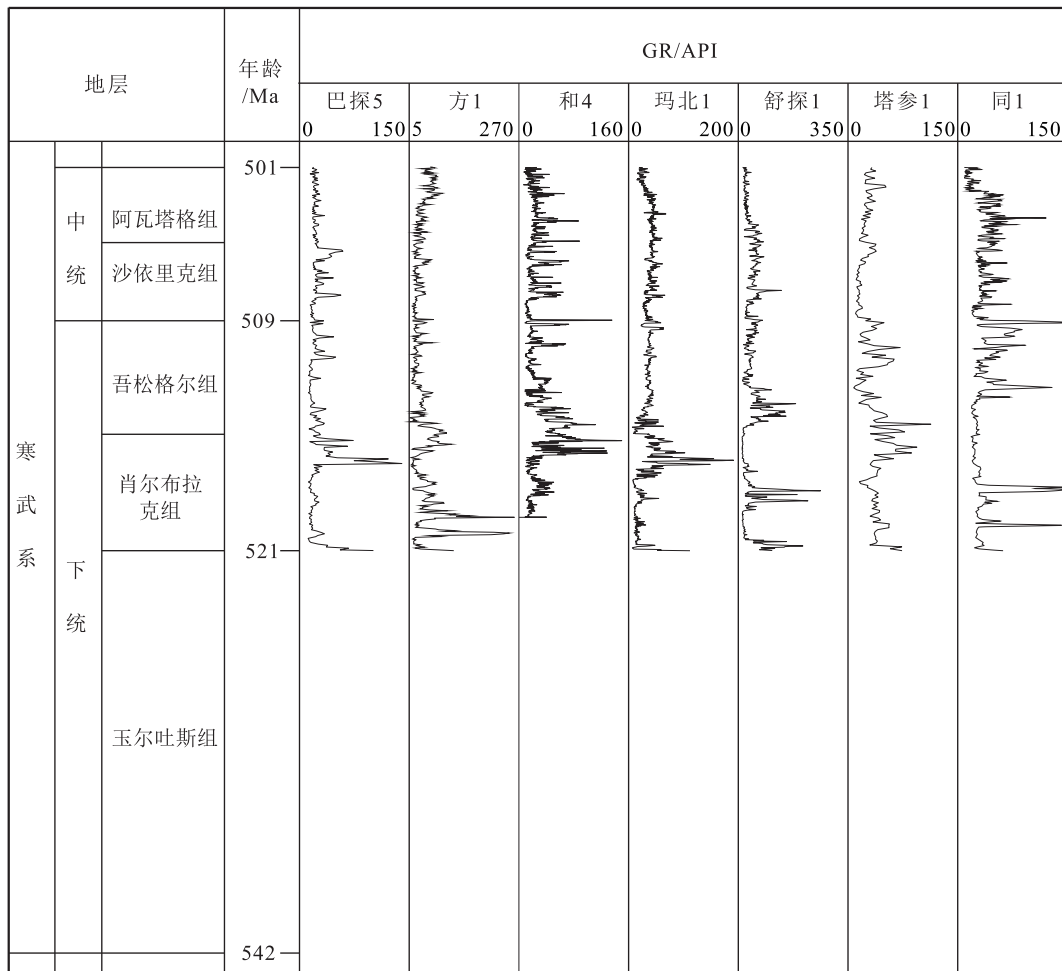


图 2 塔里木盆地中央构造带伽马测井曲线

Fig. 2 Gamma well logging curves in central tectonic belt of Tarim Basin

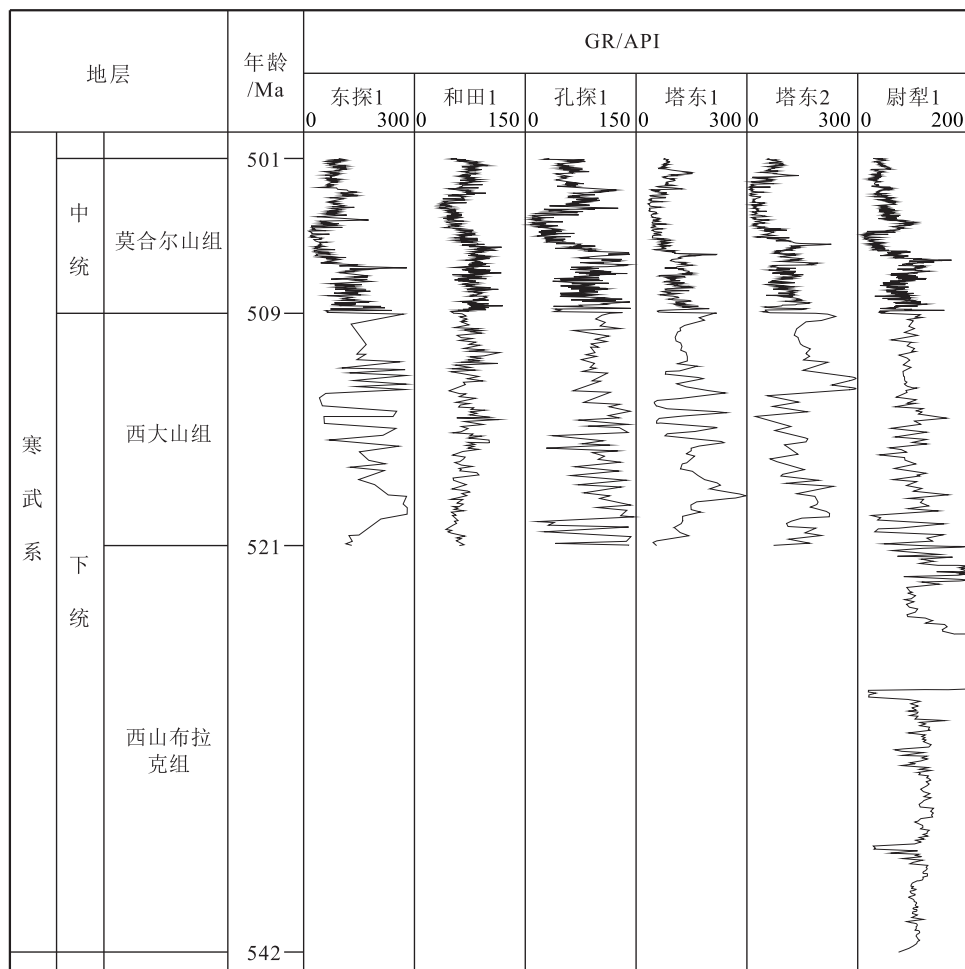


图3 塔里木盆地东北部伽马测井曲线

Fig. 3 Gamma well logging curves in northeastern part of Tarim Basin

始曲线数据点较少,不便于运算,因此首先对数据点进行插值处理,如以 1 Ma 为间隔对原始数据进行插值;②滑动窗口平滑处理,为了便于经验模态分解,借鉴滑动窗口处理方法,如用窗口值 5 对曲线进行平滑处理;③经验模态分解与周期拟合及平衡校验,程序采用 IDL 编程实现。

3 分解步骤及结果

3.1 伽马测井曲线数字化

本次共有 13 口井的伽马测井数据,由于原始数据为图片数据,无法直接应用,因此首先需要进行数字化处理。通过多次试验,设置采样间距为 0.02 Ma。

3.2 经验模态分解与本征模态函数选取

经验模态分解是通过一种特定的滤波方法把原始数据分解成由高频(细节成份)到低频(基本成份)

的一系列本征模态函数。通过分析 IMF 特征,可以了解信号中的频率及其变化特征。由于采样间距为 0.02 Ma,因此前面几个本征模态函数(高频成分)主要反映的是原始数据中的噪声或周期非常小的信号。通过分析,前面 1 个(IMF1)频率非常高,因此认为是噪音影响,故去除。因此从 IMF2 开始提取周期,最小周期约 0.1 Ma 左右。而最后一个为剩余信号,反映的是数据变化的总趋势,故也不进行拟合。

3.3 曲线拟合与周期提取

如前所述,在周期拟合过程中,不拟合 IMF1,而最后一个剩余值一般为单调函数,也不用于周期的拟合。按照此方法,分别对每一个本征模态函数进行周期拟合,得到每一个本征模态函数包含的主要周期,并对周期进行统计,得到主要的波动周期,然后根据振幅、初始相位写出每一个周期函数。

3.4 结果分析

从 13 口井的本征模态函数中共提取了 62 个周期,周期从 0.1~16.8 Ma,每个周期的频数如表 1 所示,根据表 1 统计结果,对周期适当合并,绘制对应的统计直方图,如图 4 所示。

从表 1 及图 4 可知,周期频数存在 3 个峰值,即约 0.3 Ma、2 Ma 和 11 Ma。

4 讨论

中国沉积盆地分析证明,沉积物沉积速率存在约 220 Ma、100 Ma、65 Ma、30 Ma、10 Ma 的周期^[3-5]。220 Ma 周期与银河年一致或与软流圈对流周期一致,100 Ma 周期与板块碰撞周期相关,65 Ma 周期与太阳系穿越银道面周期或与地内物质熔融周期相关。也有研究指出,60~120 Ma 周期与陆壳下的地幔热周期相关^[2]。30 Ma 是各种地质作用耦合最好的旋回周期,该周期与太阳系在银道面一侧的时间或与地外地内其他周期相关^[3,24]。对于 10 Ma

的周期,文献涉及的较少,可能与太阳能量周期^[1,3,25]或地球自转角速度变化^[25]或星际云团的相遇有关^[26]。

从塔里木盆地中下寒武统分离出了约 0.3 Ma、2 Ma 和 11 Ma 的周期,按高庆华^[24]的划分标准,这些周期也属于中韵律段。0.3 Ma 的峰值大致对应地球轨道偏心率的 40 万年周期性变化^[27-29]。2 Ma 周期对应正层序(三级)周期^[2],与冰川型海平面变化或与银河系中的太阳系向奥特星云靠近有关^[30]。11 Ma 周期应属于上述 10 Ma 周期,与太阳能量变化、与地球自转角速度变化或与星际云团的相遇有关。

从深海岩心^[6]、碳酸盐岩^[7]和冰心^[8]中找到了 2 万年、4 万年和 10 万年的周期。这些周期属于中韵律段,即为气候变化的米兰科维奇周期,分别对应地球的自转轴进动变化周期、地球黄道与赤道的交角变化周期和地球公转轨道的偏心率变化周期。

总之,从盆地沉积物、深海岩心等可以得到不同时限长度的周期,结合威尔格斯^[31]对沉积层序的周期划分方案,提出了本文关于盆地沉积物分离出的周期的划分方案(表 2)。形成这些周期的原因目前仍是推测性的,有些与银河系有关,如银河年、太阳能量变化;有些与太阳系有关,如地球轨道偏心率变化等;有些则与地球本身内部变化有关,如地壳下地幔热周期。

5 结论

本次基于塔里木盆地 13 口钻遇中—下寒武统钻井的自然伽马测井曲线,利用波动分析方法,获得

表 1 提取周期统计结果

Table 1 Cycles filtered from GR curves

| 序号 | 周期 | 频数 | 序号 | 周期 | 频数 | 序号 | 周期 | 频数 |
|----|-----|----|----|-----|----|----|------|----|
| 1 | 0.1 | 67 | 22 | 2.2 | 3 | 43 | 6.3 | 2 |
| 2 | 0.2 | 65 | 23 | 2.4 | 7 | 44 | 6.6 | 2 |
| 3 | 0.3 | 82 | 24 | 2.5 | 4 | 45 | 6.7 | 1 |
| 4 | 0.4 | 63 | 25 | 2.7 | 4 | 46 | 7.4 | 1 |
| 5 | 0.5 | 49 | 26 | 2.9 | 5 | 47 | 7.8 | 1 |
| 6 | 0.6 | 30 | 27 | 3.2 | 2 | 48 | 8.3 | 1 |
| 7 | 0.7 | 38 | 28 | 3.4 | 7 | 49 | 8.5 | 1 |
| 8 | 0.8 | 22 | 29 | 3.7 | 4 | 50 | 9 | 1 |
| 9 | 0.9 | 15 | 30 | 3.8 | 1 | 51 | 9.5 | 1 |
| 10 | 1 | 21 | 31 | 3.9 | 2 | 52 | 9.8 | 1 |
| 11 | 1.1 | 12 | 32 | 4.1 | 7 | 53 | 10.2 | 1 |
| 12 | 1.2 | 13 | 33 | 4.2 | 1 | 54 | 10.7 | 2 |
| 13 | 1.3 | 7 | 34 | 4.4 | 3 | 55 | 11 | 1 |
| 14 | 1.4 | 4 | 35 | 4.8 | 1 | 56 | 11.5 | 1 |
| 15 | 1.5 | 16 | 36 | 4.9 | 3 | 57 | 11.9 | 1 |
| 16 | 1.6 | 3 | 37 | 5 | 2 | 58 | 12.2 | 1 |
| 17 | 1.7 | 7 | 38 | 5.1 | 1 | 59 | 13.2 | 1 |
| 18 | 1.8 | 2 | 39 | 5.4 | 1 | 60 | 13.9 | 1 |
| 19 | 1.9 | 11 | 40 | 5.6 | 1 | 61 | 15.1 | 1 |
| 20 | 2 | 1 | 41 | 5.8 | 1 | | | |

表 2 周期划分及原因

Table 2 Cycle divisions and their mechanisms

| 周期/Ma | | 原因 |
|-------|---------|-------------------------------|
| 一级 | 220 | 银河年,软流圈对流周期 |
| | 120~60 | 陆壳下地幔热周期,板块碰撞周期 |
| 二级 | 40~30 | 太阳系在银道面一侧的时间,其它地内地外因素 |
| | 11~10 | 太阳能量变化周期,地球自转角速度变化周期,星际云团相遇周期 |
| 三级 | 2 | 冰川型海平面变化周期,太阳系向奥特星云靠近周期 |
| 四级 | 0.3~0.1 | 地球公转轨道偏心率变化周期 |
| | 0.04 | 地球黄道与赤道的交角变化周期 |
| | 0.02 | 地球的自转轴进动变化周期 |

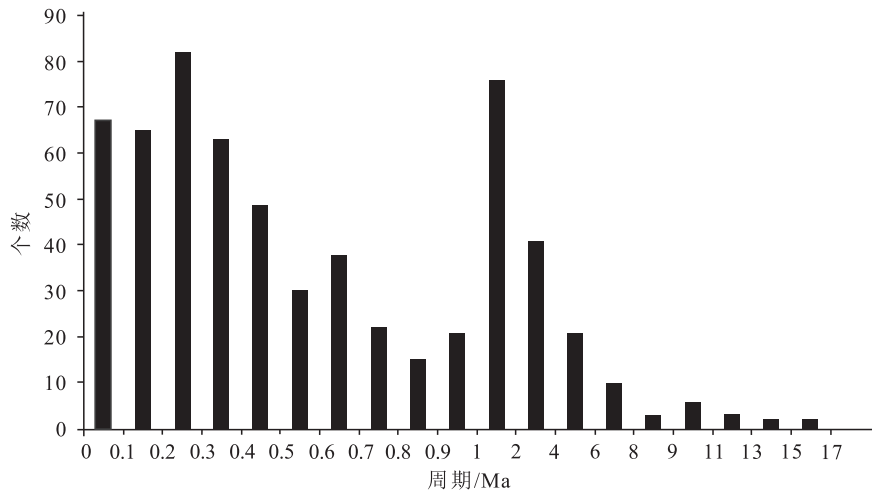


图4 提取周期分布直方图

Fig. 4 Histogram of filtered cycles

了0.3 Ma、2 Ma和11 Ma的周期,这些周期除丰富了先前盆地沉积波动研究已经获得的普遍存在的周期外,更进一步证明了约10 Ma周期的存在。2 Ma的周期也是显著的,为塔里木盆地古老碳酸盐岩高频层序划分和成因认识可提供参考。

根据本次周期分离结果,结合先期盆地沉积波动研究,将沉积波动周期分为四级,分别对应220~60 Ma、40~10 Ma、2 Ma和0.3~0.02 Ma,这些周期对研究天文事件的变化周期和盆地层序地层旋回周期都有参考意义。

致谢:项目研究过程中,中国石化西北油田分公司提供了自然伽马测井资料,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Tomschey O, Benkó F. Geological and cosmogonic cycles as reflected by the new law of universal cyclicity [M]. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1985: 1-400.
- [2] 王鸿祯. 地球的节律与大陆动力学的思考[J]. 地学前缘, 1997, 4(3/4): 1-12.
- [3] 张一伟, 李京昌, 金之钧, 等. 中国含油气盆地波状运动特征研究[J]. 地学前缘, 1997, 4(3/4): 305-311.
- [4] Jin Z J, Zhang Y W, Chen S P. Tectono-sedimentary wave processes in Tarim basin, Northwest China[J]. Science in China (Series D), 2005, 35: 530-539.
- [5] Chen S P, Jin Z J, Wang Y, et al. Sedimentation rate rhythms: evidence from filling of the Tarim Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(4): 1264-1275.
- [6] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages[J]. Science, 1976, 194(4270): 1121-1132.
- [7] Parka J, Oglesby R J. Milankovitch rhythms in the Cretaceous: A GCM modelling study [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1991, 90(4): 329-355.
- [8] Petit J R. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica[J]. Nature, 1999, 399(3): 429-436.
- [9] Osmond J K, Ivanovich M. Uranium-series Mobilisation and Surface Hydrology [C]// Ivanovich M, Harmon R S. Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Science. Oxford: Clarendon Press, 1992: 259-289.
- [10] Johan H V, Postma G. Astronomically forced variations in gamma-ray intensity: Late Miocene hemipelagic successions in the eastern Mediterranean basin as a test case[J]. Geology, 1996, 24(1): 15-18.
- [11] Schnyder J, Ruffell A, Deconinck J F, et al. Conjunctive use of spectral gamma-ray logs and clay mineralogy in defining late Jurassic-early Cretaceous palaeoclimate change (Dorset, U.K.) [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 229(4): 303-320.
- [12] 吴欣松, 郭娟娟, 黄永建, 等. 松辽盆地晚白垩世古气候变化的测井替代指标[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 103-110.
- [13] 梁文君, 肖传桃, 代城建, 等. 自然伽马曲线应用于古气候、古环境研究——以柴达木盆地七个泉地区古近—新近纪地层为例[J]. 矿产与地质, 2015, 29(5): 698-702.
- [14] 吴崇筠, 薛叔浩. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.
- [15] 杨平, 陈晔, 刘泽纯. 柴达木盆地自然伽马曲线在古气候及沉积环境研究中的应用[J]. 古地理学报, 2003, 5(1): 94-102.
- [16] Herbert T D. Long climatic time series from sediment physical property measurements[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1991, 61(7): 1089-1108.
- [17] 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): 379-282.
- [18] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于米兰科维奇理论的高精度旋回

- 识别与划分——以南图尔盖盆地 Ary301 井中侏罗统为例[J]. 沉积学报, 2017, 35(3): 436-447.
- [19] 吴林, 管树巍, 任荣, 等. 前寒武纪沉积盆地发育特征与深层烃源岩分布——以塔里木新元古代盆地与下寒武统烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(6): 905-915.
- [20] 任荣, 管树巍, 吴林, 等. 塔里木新元古代裂谷盆地南北分异及油气勘探启示[J]. 石油学报, 2017, 38(3): 255-266.
- [21] 石开波, 刘波, 姜伟民, 等. 塔里木盆地南华纪—震旦纪构造—沉积格局[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 862-877.
- [22] 汤良杰. 略论塔里木盆地主要构造运动[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2): 108-114.
- [23] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1998, 454: 903-995.
- [24] 高庆华. 地壳运动问题[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-194.
- [25] Ezer D, Cameron A G W. Effects of sudden mixing in the solar core on solar neutrinos and ice ages[J]. Nature, 1972, 240: 180-182.
- [26] Napier W M. Evidence for cometary bombardment episodes [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, 366(3): 977-982.
- [27] 李前裕, 田军, 汪品先. 认识偏心率周期的地层古气候意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(5): 519-528.
- [28] 汪品先. 低纬过程的轨道驱动[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 694-701.
- [29] 刘复刚, 王建, 张富, 等. 地球轨道偏心率 40 万年和 10 万年周期的行星驱动[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 25-33.
- [30] 史晓颖. 35 Ma——地质历史上一个重要的自然周期[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1996, 21(3): 235-242.
- [31] 威尔格斯 C K(编). 徐怀大, 等(译). 层序地层学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 1-200.