

利用自然伽马能谱测井识别碳酸盐岩高频层序 ——以塔里木盆地塔中地区 T1 井良里塔格组为例

高达^{1,2} 林畅松³ 胡明毅^{1,2} 黄理力⁴

(1.长江大学地球科学学院 武汉 430100;2.长江大学沉积盆地研究中心 武汉 430100;
3.中国地质大学(北京)海洋学院 北京 100083;4.中国石油杭州地质研究院 杭州 310023)

摘要 碳酸盐岩系地层中普遍发育高频层序,且与四级、五级层序界面伴生的早期岩溶作用对油气储层的改善十分关键,然而基于测井资料如何客观的识别和划分高频层序是学界不断探索的难点问题。论文选取塔里木盆地塔中地区的 T1 井,利用自然伽马能谱测井中 Th/U(钍/铀)比值曲线,使用滑动平均滤波和小波变换等方法,对上奥陶统良里塔格组开展了高频层序研究。结果表明,Th/U 比值曲线滑动平均滤波处理后,能清晰、客观地反映沉积旋回,其比值的增加指示沉积水体加深、泥质增多,比值减少指示沉积水体变浅、泥质减少;该井良里塔格组可划分为 3 个三级层序、8 个四级层序和 32 个五级层序,三~五级层序分别与小波变换得出一维离散曲线的振荡趋势非常吻合,四级和五级层序极有可能分别反映了米兰科维奇旋回中地球偏心率长周期旋回(0.4 Ma)和短周期旋回(0.1 Ma);连井对比表明塔中地良里塔格组下部的三级和四级层序发育具有明显差异,这种差异受控于良里塔格组沉积前古地貌形态;储层发育段均与四级、五级层序界面有关,塔中地区东部更易发育有利的储层。研究结果对于依据测井资料开展碳酸盐岩高频层序研究具有理论意义,对于建立区内的高精度层序地层格架进而预测礁滩相储层分布具有实际意义。

关键词 高频层序 自然伽马能谱测井 小波变换 良里塔格组 塔里木盆地

第一作者简介 高达 男 1990 年出生 博士 讲师 层序地层学及沉积学 E-mail: gaoda18@gmail.com

中图分类号 P539.2 P588.2 **文献标识码** A

0 引言

高频层序是指发育在三级层序内部的四级层序、五级层序以及更低级别的层序^[1-2],对沉积地层的高频层序或高频旋回的研究已成为层序地层学和旋回地层学研究的热点。由米兰科维奇天文旋回造成的高频海平面变化被认为是高频层序形成的驱动因素,其中四级层序可相当于准层序组或中期基准面旋回,五级层序可相当于准层序或短期基准面旋回^[2-6]。越来越多的研究表明,四级、五级层序界面往往与高频海平面下降造成的碳酸盐岩早期岩溶(同生期、准同生期岩溶)密切相关,进而对改善储层孔隙度起到至关重要的作用^[7-10]。但是,在深部地震资料的精度和连续的岩芯资料不足的情况下,如何依据测井曲线有效识别高频层序界面、建立高频层序格架,成为准确预测早期岩溶型碳酸盐岩储层所面临的关键问题。

自然伽马能谱测井能够同时反映地层中的铀

(²³⁸U)、钍(²³²Th)和钾(⁴⁰K)等三种放射性元素的含量,各元素的曲线及元素比值曲线在碳酸盐岩层序地层研究方面应用更为有效^[11]。Th 和 K 的含量主要反映碳酸盐岩中的陆源碎屑成分(主要为黏土),且二者通常具有较好的相关性;U 的富集则通常与有机碳含量及成岩过程(如白云石化)相关,其分布不均一性突出,且与 Th 和 K 的相关性都较低^[12-13]。碳酸盐台上的海侵或淹没界面表现为快速的 Th 和 K 含量的增加,Th 和 K 的含量可以被用来对比碳酸盐台地和盆地沉积,分析海平面变化趋势^[14]。元素的比值变化可以指示海平面升降或沉积基准面变化,如 U/Th 比值曲线上,高 U/Th 值部分指示正常海退,低 U/Th 值部分反映海侵过程^[13];Th/K 值增大可指示基准面降低,反之代表基准面上升,可用来划分高频层序^[15-18]。

小波变换被誉为“数学显微镜”,能够同时将信号的时间和频率信息识别出来,从而更准确地得到不

收稿日期:2015-11-13;收修改稿日期:2016-03-13

基金项目:国家自然科学基金(41502104,41372126,41130422);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2011CB201100-03) [Foundation: National Nature Science Foundation of China, No. 41502104,41372126,41130422; Nation Key Basic Research Project (973 Project), No. 2011CB201100-03]

同时频的数字信号的变化规律^[19]。对自然伽马曲线进行小波变换是旋回地层学的主要技术,在识别和分析米兰科维奇天文旋回方面取得了很好的效果^[20-23]。这种方法能将不同级次的地层旋回性变化分别体现出来,因此也被很好地应用在层序地层学的研究中^[24-26]。

论文使用了塔中地区钻穿良里塔格组的T1井的自然伽马能谱测井资料,在分析对比Th、U、K参数特征的基础上,主要使用Th/U比值曲线,经过滑动平均方法对平滑处理后,主要依据对Th/U曲线小波变换结果综合分析,确定了不同级别层序的划分方案。研究结果证明使用Th/U比值来分析碳酸盐岩层序是切实可行的,对于依据测井资料开展碳酸盐岩高频层序研究具有重要的理论意义,对于建立区内的高精度层序地层格架进而预测有利储层分布具有重要的实际意义。

1 区域地质概况

塔中地区位于塔里木盆地的中部,晚奥陶世形成了大规模的孤立碳酸盐台地(面积达 $1 \times 10^4 \text{ km}^2$)。受中奥陶世末期西北高、东南低的古构造地貌形态的控制,台地早期沉积向向西北方向上超,台地沉积具有西北薄、东南厚的趋势^[27-30]。台地向东北方向与满加尔坳陷相邻,过渡为深水盆地沉积。良里塔格组与下伏中—上奥陶统鹰山组呈微角度不整合接触,与上覆桑塔木组泥岩整合接触,也被解释为台地淹没不整合界面^[30]。依据钻井和地震的综合约束,将良里塔格组划分为3个三级层序,其中下部的SQ1和SQ2

发育完整的海侵体系域和高位体系域,地震上表现为两套明显的加积和前积体;上部的SQ3仅发育海侵体系域^[31-32]。

塔中地区晚奥陶世沿塔中I号断裂带发育的台地边缘礁滩相沉积构成了区内重要的油气储层,大量前人研究表明,受同沉积期高频海平面下降造成的早期(同生期或准同生期)岩溶作用是礁滩相储层改善的关键^[7-8,33],因此识别良里塔格组内部的高频层序界面,进而建立高精度的层序地层格架,是预测早期岩溶型储层的关键。

论文研究主要使用了位于塔中I号断裂带中段、晚奥陶世台地边缘带的T1井的钻井数据,该井钻穿良里塔格组(5 240~5 590 m)。根据伽马曲线和岩相特征,易将良里塔格组分为3个岩性段:底部含泥灰岩段主要由灰色、绿灰色含泥晶灰岩、粒泥灰岩和泥粒灰岩构成;中部颗粒灰岩段主要发育浅灰色颗粒灰岩、生物礁灰岩和泥粒灰岩;上部泥质条带灰岩段主要发育含泥质条带的深灰色泥粒灰岩、粒泥灰岩。

2 自然伽马能谱测井特征

2.1 测井曲线基本参数特征

表1详细总结了T1井的自然伽马能谱测井基本参数特征。该井的泥质条带灰岩的GR值最高,平均值为61.35 API,颗粒灰岩的GR值最低,平均为28.96 API。从各元素的含量来看,Th值在全井段的变化范围较大,颗粒灰岩段的Th值变化范围和平均值最小,泥质条带灰岩的Th值平均值将近颗粒灰岩段的2倍;U和K含量在全井段变化范围都不大。

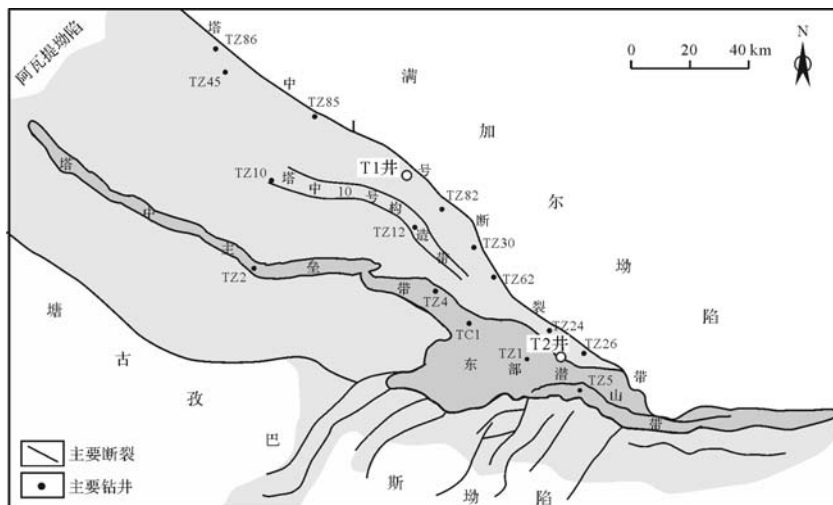


图1 塔中地区构造纲要图

Fig.1 Tectonic framework of Tazhong area

表1 塔中地区 T1 井良里塔格组自然伽马能谱测井基本特征

Table 1 Natural gamma ray logging data of the Lianglitage Formation, Well T1, Tazhong area

	深度/m	GR/API	Th/10 ⁻⁶	U/10 ⁻⁶	K/%	Th/U
全井段	5 240~5 590	14.67~114.03(37.80)	1.49~15.49(4.51)	0.29~4.48(1.15)	0.39~2.93(1.09)	0.85~22.45(4.49)
泥质条带灰岩段	5 240~5 293	24.95~114.03(61.35)	1.86~15.50(7.18)	0.49~3.69(1.62)	0.57~2.93(1.54)	0.91~19.92(4.97)
颗粒灰岩段	5 293~5 373	14.67~52.53(28.96)	1.49~7.36(3.25)	0.48~1.88(1.11)	0.39~1.32(0.85)	1.07~11.79(3.19)
含泥灰岩段	5 373~5 590	17.17~81.83(34.87)	1.60~11.84(4.26)	0.29~4.48(1.04)	0.53~2.05(1.05)	0.85~22.45(4.81)

注:括号内为平均值。

测井曲线图中可以直观看到各条曲线的特征变化。GR 曲线在底部含泥灰岩段呈现出中等的锯齿化,中部颗粒灰岩整体较为平滑,上部泥质条带灰岩段整体呈钟型,向顶部呈现出剧烈振荡的特征。U 曲线和 K 曲线在良里塔格组的中下部均表现为中等齿化的特征,在含泥灰岩段为强烈齿化特征。Th 曲线的变化幅度比 GR、U 和 K 曲线都更明显,在良里塔格组底界突然增大,在内部也表现出多个清晰的钟形和漏斗形曲线形态的叠加,向顶部明显呈现阶梯式增长。

对 GR、Th、U 和 K 四组数据的两两之间相关性进行了分析(表 2),结果显示 GR 值与 Th、K 的相关性最高,而与 U 的相关系数较低;在 Th、U、K 三者之间,Th 和 K 的相关性非常好;Th 和 U、K 和 U 的相关性均较差。分析表明,Th 和 K 是自然伽马的主要贡献者,U 的变化对 GR 值的影响不明显。

表2 塔中地区 T1 井良里塔格组 GR、Th、U、K 等测井参数相关系数

Table 2 Correlation coefficients between GR, Th, U, and K value of the Lianglitage Formation, Well T1, Tazhong area

	GR/API	Th/API	U/API	K/%
GR	1			
Th	0.962 6	1		
U	0.784 2	0.642 8	1	
K	0.970 7	0.955 7	0.667 1	1

2.2 划分层序的测井曲线选取

通过对比曲线的特征不难发现, Th 曲线可以更清晰地指示碳酸盐岩中的泥质含量的变化,从而更好地反映沉积旋回。而 U 和 K 的曲线变化对沉积旋回的指示不明显。由于 Th 和 K 相关性极高,对地层中沉积组分变化具有一致的反映,而 U 与 Th 相关性较差,因此进一步制作了 Th/U 比值曲线来划分层序。

从 Th/U 曲线可看出,其反映的整体趋势和 Th 曲线较为相似,同时能更清晰地反映沉积界面。但是出现许多 Th/U 比的异常高值带来的曲线“毛刺”现

象(图 3),这是由于自然伽马能谱测井仪记录了一些极低的 U 值造成的,给识别层序界面带来了困难。滑动平均滤波法能够有效地去除测井曲线中的与地层性质无关的毛刺现象,同时能够保留反映地层特性的有用成分,是一种常用的测井曲线平滑处理方法^[34-35]。本文采用线性函数平滑法对原始的 Th/U 曲线进行平滑处理,该方法的处理公式为(1)式,其中 T_i 表示待平滑的数值点,并取该点前后共 $2m+1$ 个数值点参与平均计算。最终选取 51 点滑动平均(即 $m=25$),得到的曲线(Th/U_Ma)整体质量明显提高(图 3)。

$$T_i = \frac{1}{2m+1} \sum_{k=-m}^m T_{i+k} \quad (1)$$

2.3 小波变换结果

为了更客观地确定层序界面的级别、区分不同级别的层序,研究使用了 Matlab 软件中的小波分析工具箱,对 T1 井的 Th/U 曲线进行了小波变换。选取了前人使用的 Morlet、Daubechies、Dmey 等不同小波分别实验^[36-38],发现 Dmey 小波对 Th/U 曲线分解和重构的结果对沉积旋回的反映效果最佳。Meyer 小波函数为公式(2),其小波波形为图 2。用该小波对 Th/U 曲线变换得到 12 条一维离散小波曲线(d1-d12)。对比发现其中的 d7、d9 和 d10 三条小波曲线的振荡趋势与原始的 Th/U 曲线反映的沉积旋回结构有相当高的匹配度。

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sin \left[\frac{\pi}{2} \theta \left(\frac{3}{2\pi} |\omega| - 1 \right) \right] e^{j\frac{\omega}{2}}, & \frac{2\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{4\pi}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cos \left[\frac{\pi}{2} \theta \left(\frac{3}{4\pi} |\omega| - 1 \right) \right] e^{j\frac{\omega}{2}}, & \frac{4\pi}{3} \leq |\omega| \leq \frac{8\pi}{3} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

3 层序地层特征

3.1 三级层序及其界面特征

从 Th/U 和 Th 曲线上明显看出,在 5 470~5 590

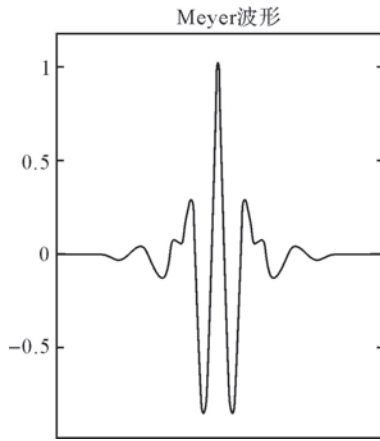


图2 Meyer小波波形(引自张荣茜^[38])

Fig.2 Graphic of the Meyer wavelet (after Zhang^[38])

变化周期,向顶部测井值总体增大,小波变换得到的d10曲线直观地体现了这种宏观变化。总体反映了在良里塔格组沉积期,存在两次完整的海进—海退旋回,在沉积末期海平面持续上升。

据此,将良里塔格组划分为3个三级层序(自下而上分别为SQ1、SQ2和SQ3)。其中,SQ1和SQ2的下半段均以Th值和Th/U比值阶梯式增大为特征,以发育泥晶灰岩和含泥灰岩为主,解释为海侵体系域(TST);上半段测井值呈现阶梯式减小,以发育厚层颗粒灰岩和泥粒灰岩为主,解释为高位体系域(HST);SQ3仅发育TST,Th值和Th/U比值均为全井段最大,主要发育富含泥质条带的厚层泥质灰岩,指示碳酸盐沉积因海平面快速上升而渐趋终止。

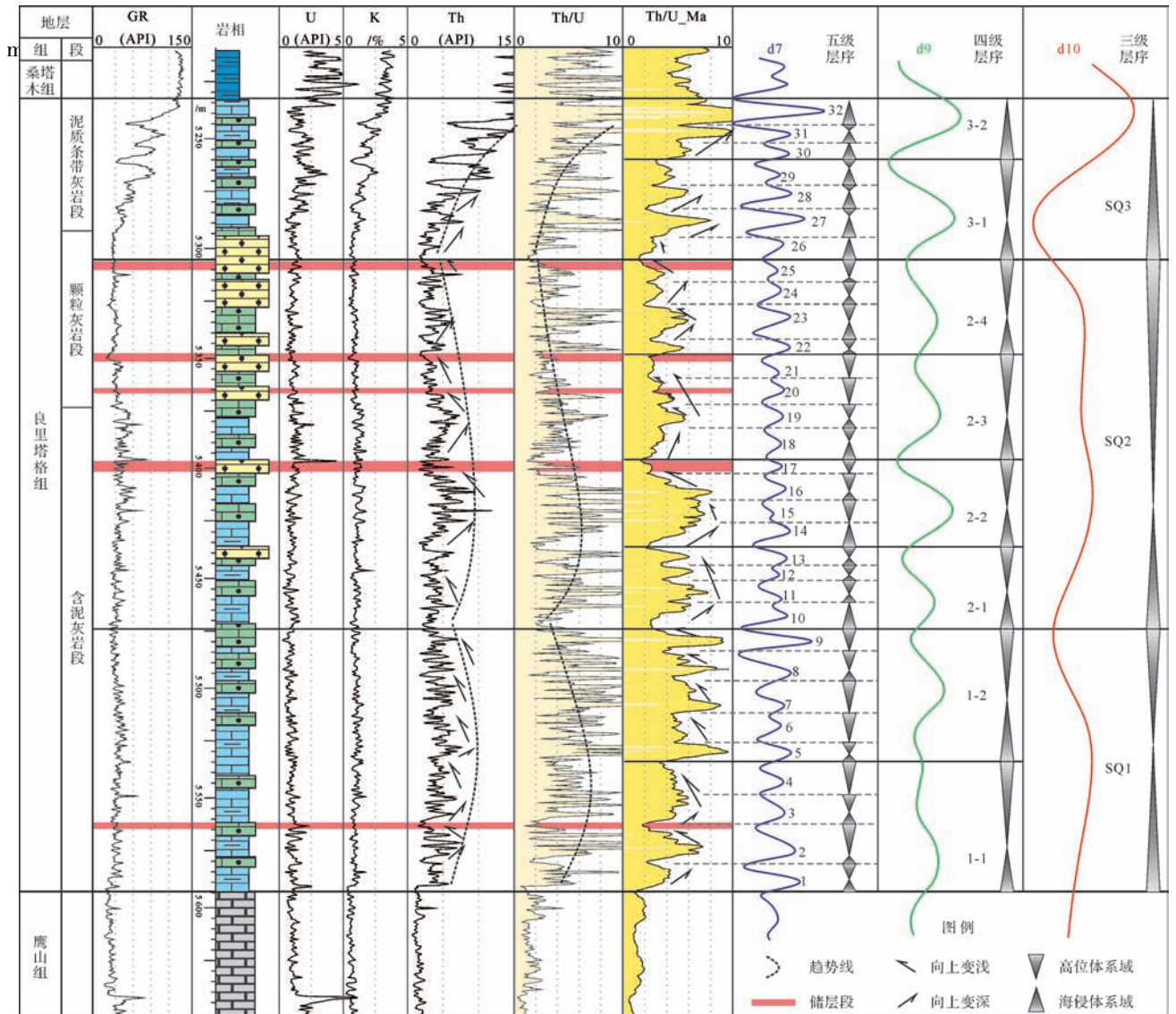


图3 塔中地区T1井良里塔格组高频层序划分方案

Fig.3 High-frequency sequence stratigraphy of the Lianglitage Formation, Well T1, Tazhong area

3.2 四级层序及其界面特征

根据滑动平均法处理后得到的 Th/U_{Ma} 曲线,可在三级层序内部,清晰地识别出多个 Th/U 比值由突然增大到逐渐减小的变化旋回。这种旋回变化又与小波变换得到的 d9 曲线的振荡趋势极为吻合。这些沉积旋回应为三级层序内发育的四级层序。

据此,可将 SQ1 进一步划分为 2 个四级层序(1-1 和 1-2),将 SQ2 划分为 4 个四级层序(2-1、2-2、2-3 和 2-4),将 SQ3 划分为 2 个四级层序(3-1 和 3-2),T1 井良里塔格组内部共发育 8 个四级层序。这些四级层序界面均表现为 Th/U 比值由减小渐变或突变至增大,通常为泥粒灰岩、颗粒灰岩岩相组合向泥灰岩、泥晶灰岩岩相组合的突变,反映沉积背景由正常水退至快速水进的转变过程。四级层序的下部多为 Th/U 比值突然增大、向上逐渐变小或阶梯式减小,内部发育多个泥灰岩、泥粒灰岩和颗粒灰岩的岩相组合。顶部的四级层序(SQ3-2)中 Th/U 比值持续增大,岩相组合为泥灰岩和泥粒灰岩互层,且向顶部泥灰岩厚度变大,反映台地向上淹没的沉积演变过程。

3.3 五级层序及其界面特征

根据 Th/U 比所反映的水进—水退沉积旋回,进一步可在每个四级层序内部进一步划分出多个沉积旋回。这些旋回下部 Th/U 值突然增大、向上逐渐减小,指示沉积水体由突然加深至缓慢变浅的过程。这种变化趋势与小波分析所得到的 d7 曲线非常吻合。

这些发育在四级层序内部的沉积旋回解释为五级层序。各四级层序以发育 4 个五级层序为主,T1 井良里塔格组内部共发育 32 个五级层序。五级层序的界面处主要表现为 Th/U 值由低值突然增大,指示快速水进,岩相由含颗粒或颗粒质灰岩向泥灰岩突变。

不同四级层序内的五级层序表现出不同的叠置型式,反映沉积背景和沉积过程的差异。如四级层序 1-2 内发育多个向上变浅的加积—进积型五级层序,反映了环潮坪背景;四级层序 2-1 和 2-2 以潮下带相对低能的泥质灰岩、粒泥灰岩沉积为主,反映较深水的沉积背景;四级层序 2-3 和 2-4 则反映潮下带浪基面附近发育的多套向上变浅的高能颗粒滩。

3.4 层序地层对比格架

利用以上方法对位于塔中地区东部的 T2 井进行层序地层划分,得出的三级和四级层序结构与 T1 井可以很好地对比(图 4)。晚奥陶世良里塔格组沉积早期,连井对比上显示 T2 井的良里塔格组地层厚度

明显大于 T1 井。两口钻井的 d9 和 d10 曲线分别与四级和三级层序有良好地对应。T2 井层序 SQ1 的厚度明显大于 T1 井,下部多发育 3 个四级层序,上超于古隆起之上;层序 SQ2 的厚度差异明显减小,且内部均发育 3 个四级层序;SQ3 及内部的四级层序亦可对比。连井层序结构的差异进一步证实了良里塔格组沉积早期(SQ1 沉积期)古地貌西高东低的显著差异,晚期古地貌差异减弱,台地地形趋于均一化。

4 高频层序对米兰科维奇旋回的响应

通过分析自然伽马能谱测井中的 Th/U 比值曲线反映的沉积界面和沉积旋回特征,结合小波变换结果确定了 T1 井良里塔格组发育 3 个三级层序、8 个四级层序和 32 个五级层序(图 3)。四级、五级层序的个数比值恰好为 1:4,极有可能分别反映了米兰科维奇旋回的偏心率长周期(0.4 Ma)和偏心率短周期(0.1 Ma)。据此估算,塔中地区中部 T1 井区良里塔格组的沉积时限应为 3.2 Ma,塔中地区东部 T2 井区的沉积时限则应为 4.4 Ma。而前人研究表明,在塔中地区晚奥陶世沉积前,塔中古隆起边缘和中部高地的地形高差可达近 300 m^[27-29],因此不同井区良里塔格组下部 SQ1 层序及其内部的四级层序发育存在差异^[30-31]。

5 高频层序对有利储层的控制

在四级、五级层序的顶部,由于短暂的海平面下降而发生的早期岩溶对碳酸盐岩礁、滩型储层的改善起到重要作用已经成为共识^[7-10,39]。针对良里塔格组的微相研究表明,在台地边缘向上变浅的高频层序的上部普遍发育颗粒滩和生物礁等高能的微相类型^[31-33],高频层序界面附近的早期大气淡水成岩透镜体对良里塔格组礁滩型储层的溶蚀改造作用是广泛发育的^[7-8,33,40]。

T1 井的储层解释结果表明,有利的储层段均与四级和五级层序界面有关(图 3)。Th/U 比值从高值突然减小的界面是海平面明显下降所形成的,在这些界面附近应为早期淡水成岩透镜体发育的层位,同时岩溶作用可能造成局部的 U 异常。同时,在以颗粒滩为主的层序中,储层发育更好。连井对比显示 T2 井的四级层序平均厚度(68.5 m)明显大于 T1 井的四级层序的平均厚度(43.9 m),这反映出,与塔中地区西部相比,塔中地区东部具有更高的碳酸盐生长率,生物礁和颗粒滩的发育更优,因此在海平面下降的背

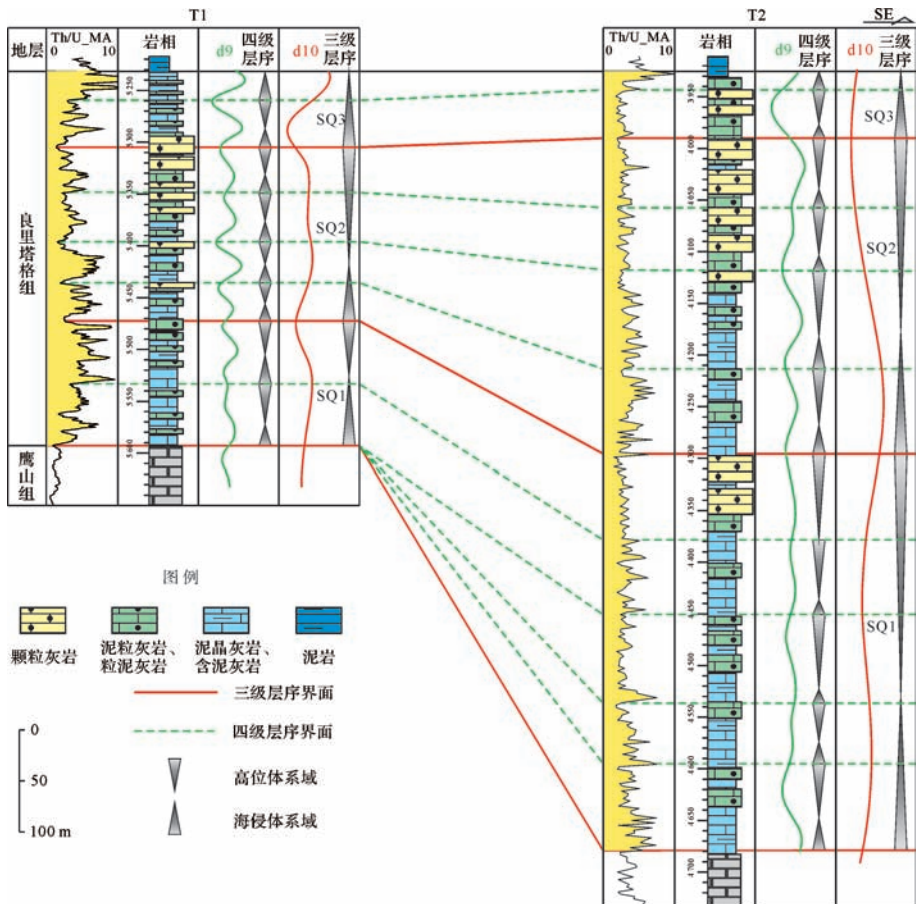


图4 塔中地区T1井和T2井良里塔格组小波变换结果与层序地层对比剖面图(钻井位置见图1)

Fig.4 Wavelet transition result and sequence stratigraphy correlation of the Lianglitage Formation between Well T1 and Well T2 (the location of wells refers to Fig.1)

景下更易形成优质储层。

6 结论

(1) 塔中地区良里塔格组的自然伽马能谱测井具有Th值和K值的相关性极好,且二者与U值的相关性较差的特点;制作Th/U比值曲线并使用滑动平均滤波处理后,能清晰、客观地反映沉积旋回;并结合对Th/U曲线进行Dmey小波变换得到的各条一维离散小波曲线,将T1井良里塔格组划分为3个三级层序、8个四级层序和32个五级层序。

(2) 四级和五级层序的个数比(1:4)表明二者极有可能分别反映了米兰科维奇旋回中地球偏心率的长周期旋回(0.4 Ma)和短周期旋回(0.1 Ma),据此可估T1井区的良里塔格组沉积时限约为3.2 Ma;连井对比表明受晚奥陶世良里塔格组沉积前古地貌控制,良里塔格组下部SQ1及其内部的四级层序存在较大差异;塔中地区东部具有更高的碳酸盐岩生长率

更易形成良好储层。

(3) 四级、五级层序的顶面Th/U比值的明显降低和U值的异常指示着可能的大气水成岩透镜体的发育,有利储层的形成同时依赖于早期的岩相类型。客观的四级、五级等高频层序划分结果对于精确预测礁滩相早期岩溶型储层具有重要意义。

参考文献 (References)

- 1 Mitchum R M Jr, Van Wagoner J C. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles[J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 70(2/3/4): 131-160.
- 2 Goldammer R K, Lehmann P J, Dunn P A. The origin of high-frequency platform carbonate cycles and third-order sequences (Lower Ordovician El Paso Gp, west Texas): constraints from outcrop data and stratigraphic modeling[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63(3): 318-359.
- 3 吴兴宁,赵宗举.塔中地区奥陶系米级旋回层序分析[J]. *沉积学报*, 2005, 23(2): 310-315. [Wu Xingning, Zhao Zongju. Analyses of

- Ordovician meter-scale cyclic-sequence in Tazhong area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2): 310-315.]
- 4 林畅松. 沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 849-862. [Lin Changsong. Sequence and depositional architecture of sedimentary basin and process responses[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 849-862.]
- 5 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 249-255. [Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implication[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 249-255.]
- 6 Tucker M, Garland J. High-frequency cycles and their sequence stratigraphic context: orbital forcing and tectonic controls on Devonian cyclicity, Belgium[J]. *Geologica Belgica*, 2010, 13(3): 213-240.
- 7 刘嘉庆, 李忠, 韩银学, 等. 塔里木盆地塔中上奥陶统碳酸盐台地高频层序控制的早期成岩作用及其对储层分布的影响[J]. *岩石学报*, 2010, 26(12): 3629-3640. [Liu Jiaqing, Li Zhong, Han Yinxue, et al. Early diagenesis in high-frequency sequence framework of the Upper Ordovician carbonate platform in Tazhong, Tarim Basin and its influence on reservoir distribution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(12): 3629-3640.]
- 8 刘忠宝, 于炳松, 李廷艳, 等. 塔里木盆地塔中地区中上奥陶统碳酸盐岩层序发育对同生期岩溶作用的控制[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 103-109. [Liu Zhongbao, Yu Bingsong, Li Tingyan, et al. Sequence development controls on Syngensis karst of the Middle-Upper Ordovician carbonate in Tazhong area, Tarim Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 103-109.]
- 9 Ronchi P, Ortenzi A, Borromeo O, et al. Depositional setting and diagenetic processes and their impact on the reservoir quality in the late Viséan - Bashkirian Kashagan carbonate platform (Pre-Caspian Basin, Kazakhstan)[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(9): 1313-1348.
- 10 Saller A H, Dickson J A D, Matsuda F. Evolution and distribution of porosity associated with subaerial exposure in Upper Paleozoic platform limestones, west Texas[J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83(11): 1835-1854.
- 11 阳孝法, 林畅松, 杨海军, 等. 自然伽马能谱在塔中地区晚奥陶世碳酸盐岩层序地层分析中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2010, 45(3): 384-391. [Yang Xiaofa, Lin Changsong, Yang Haijun, et al. Application of natural gamma ray spectrometry in analysis of Late Ordovician carbonate sequence stratigraphic analysis in middle Tarim Basin[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2010, 45(3): 384-391.]
- 12 Bábek O, Kalvoda J, Cossey P, et al. Facies and petrophysical signature of the Tournaisian/Viséan (Lower Carboniferous) sea-level cycle in carbonate ramp to basinal settings of the Wales-Brabant massif, British Isles[J]. *Sedimentary Geology*, 2013, 284-285: 197-213.
- 13 Ehrenberg S N, Svänå T A. Use of spectral gamma-ray signature to interpret stratigraphic surfaces in carbonate strata: An example from the Finnmark carbonate platform (Carboniferous-Permian), Barents Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(2): 295-308.
- 14 Bábek O, Příkryl T, Hladil J. Progressive drowning of carbonate platform in the Moravo-Silesian Basin (Czech Republic) before the Frasnian/Famennian event: Facies, compositional variations and gamma-ray spectrometry[J]. *Facies*, 2007, 53(2): 293-316.
- 15 郑兴平, 罗平. 川东渝北飞仙关组的米兰科维奇周期及其应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2004, 27(1): 16-19. [Zheng Xingping, Luo Ping. Analysis and application of Milankovitch cycles on Feixianguan Formation, Northeast Sichuan Basin, China[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2004, 27(1): 16-19.]
- 16 邬光辉, 成丽芳, 于红枫, 等. 塔中上奥陶统台缘带高频层序地层特征与储层纵向分布[J]. *新疆地质*, 2011, 29(2): 203-206. [Wu Guanghui, Cheng Lifang, Yu Hongfeng, et al. The characteristics and its affects to reservoirs of high-frequency sequence of Upper Ordovician platform margin in Tazhong area[J]. *Xinjiang Geology*, 2011, 29(2): 203-206.]
- 17 郑兴平, 周进高, 吴兴宁. 碳酸盐岩高频层序定量分析技术及其应用[J]. *中国石油勘探*, 2004, 9(5): 26-30. [Zheng Xingping, Zhou Jin'gao, Wu Xingning. High-frequency sequence quantitative analysis technology of carbonate rock and its application[J]. *Marine Petroleum Geology*, 2004, 9(5): 26-30.]
- 18 赵宗举, 陈轩, 潘懋, 等. 塔里木盆地塔中—巴楚地区上奥陶统良里塔格组米兰科维奇旋回性沉积记录研究[J]. *地质学报*, 2010, 84(4): 518-536. [Zhao Zongju, Chen Xuan, Pan Mao, et al. Milankovitch cycles in the Upper Ordovician Lianglitage Formation in the Tazhong-Bachu area, Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 518-536.]
- 19 任金锋, 廖远涛, 孙鸣, 等. 基于小波变换的高精度层序地层定量划分研究及其应用[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(5): 2651-2658. [Ren Jinfeng, Liao Yuantao, Sun Ming, et al. A method for quantitative division of sequence stratigraphy with high-resolution based on wavelet transform and its application[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(5): 2651-2658.]
- 20 刘洋, 吴怀春, 张世红, 等. 珠江口盆地珠—坳陷韩江组—万山组旋回地层学[J]. *地球科学*, 2012, 37(3): 411-423. [Liu Yang, Wu Huaichun, Zhang Shihong, et al. Cyclostratigraphy research on the Hanjiang-Wanshan Formations in Zhuyi depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Earth Sciences*, 2012, 37(3): 411-423.]
- 21 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]. *地学前缘*, 2008, 15(4): 159-169. [Wu Huaichun, Zhang Shihong, Huang Qinghua. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao Basin of Northeast China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(4): 159-169.]
- 22 Wu Huaichun, Zhang Shihong, Hinnov L A, et al. Cyclostratigraphy and orbital tuning of the terrestrial upper Santonian - Lower Danian in Songliao Basin, northeastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 407: 82-95.
- 23 伊海生. 沉积旋回叠置形式的波形分析及旋回层序划分方法[J]. *沉积学报*, 2015, 33(5): 855-864. [Yi Haisheng. The waveform analysis of cyclic stacking patterns in sedimentary successions and detection methods of cyclostratigraphic sequences[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(5): 855-864.]
- 24 王贵文, 徐敬领, 杨宁, 等. 小波分析在沉积层序划分及等

- 时对比中的应用[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 70-77. [Wang Guiwen, Xu Jingling, Yang Ning, et al. Using wavelet frequency analysis to divide sedimentary sequence cycles and isochronous correlation[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 70-77.]
- 25 赵伟, 姜在兴, 邱隆伟, 等. 小波分析划分层序单元的地质学理论基础、方法与应用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(4): 436-441. [Zhao Wei, Jiang Zaixing, Qiu Longwei, et al. Geological concept, method and application of sequence unit identification through wavelet analysis[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(4): 436-441.]
- 26 朱剑兵, 纪友亮, 赵培坤, 等. 小波变换在层序地层单元自动划分中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 84-86. [Zhu Jianbing, Ji Youliang, Zhao Peikun, et al. Application of wavelet transform in auto-identify units of stratigraphy sequence[J]. Petroleum Exploration & Development, 2005, 32(1): 84-86.]
- 27 彭莉, 刘小平, 林畅松, 等. 塔中隆起晚奥陶世古地貌及其沉积相特征[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 767-772. [Peng Li, Liu Xiaoping, Lin Changsong, et al. Late Ordovician palaeogeomorphology and its sedimentary facies characteristics in central Tarim uplift[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6): 767-772.]
- 28 林畅松, 李思田, 刘景彦, 等. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 210-218. [Lin Changsong, Li Sitian, Liu Jingyan, et al. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim Basin during the Paleozoic major evolutionary stages[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1): 210-218.]
- 29 Lin Changsong, Yang Haijun, Liu Jingyan, et al. Distribution and erosion of the Paleozoic tectonic unconformities in the Tarim Basin, Northwest China: significance for the evolution of paleo-uplifts and tectonic geography during deformation[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 46: 1-19.
- 30 Yang Xiaofa, Lin Changsong, Yang Haijun, et al. Depositional architecture of the late Ordovician drowned carbonate platform margin and its responses to sea-level fluctuation in the northern slope of the Tazhong region, Tarim Basin[J]. Petroleum Science, 2010, 7(3): 323-336.
- 31 左璠璠, 林畅松, 高达, 等. 塔中地区西北部良里塔格组沉积特征及其演化规律[J]. 现代地质, 2014, 28(5): 1008-1016. [Zuo Fanfan, Lin Changsong, Gao Da, et al. Sedimentary characteristics and their evolution of Lianglitage Formation in northwestern Tazhong area[J]. Geoscience, 2014, 28(5): 1008-1016.]
- 32 Gao Da, Lin Changsong, Yang Haijun, et al. Microfacies and depositional environments of the Late Ordovician Lianglitage Formation at the Tazhong Uplift in the Tarim Basin of Northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 83: 1-12.
- 33 高达, 林畅松, 杨海军, 等. 塔中地区良里塔格组沉积微相及其对有利储层的控制[J]. 地球科学, 2013, 38(4): 819-831. [Gao Da, Lin Changsong, Yang Haijun, et al. Microfacies of Late Ordovician Lianglitage Formation and their control on favorable reservoir in Tazhong area[J]. Earth Science, 2013, 38(4): 819-831.]
- 34 雍世和, 孙宝佃. 用滑动平均滤波法消除测井曲线上的毛刺干扰[J]. 华东石油学院学报, 1983(1): 11-19. [Yong Shihe, Sun Baodian. Smoothing out the sawtooth interference on the log curves by the method of moving average filter[J]. Journal of China University of Petroleum, 1983(1): 11-19.]
- 35 郭余峰. 自然伽马能谱的平滑滤波处理[J]. 大庆石油学院学报, 2003, 27(3): 113-114, 117. [Guo Yufeng. The disposal of gentle filter on natural gamma energy spectrum[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2003, 27(3): 113-114, 117.]
- 36 赵伟, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 小波分析在高精度层序单元划分中的应用[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2009, 33(2): 18-22. [Zhao Wei, Qiu Longwei, Jiang Zaixing, et al. Application of wavelet analysis in high-resolution sequence unit division[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2009, 33(2): 18-22.]
- 37 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: 地球科学版, 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.]
- 38 张荣茜. 塔北隆起西南部白垩系沉积层序演化及有利储层相带预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. [Zhang Rongxi. Deposition and stratigraphic sequence development and evolution of cretaceous of the southwestern Tabei Uplift and potential reservoir prediction[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2013.]
- 39 于炳松, 樊太亮, 黄文辉, 等. 层序地层格架中岩溶储层发育的预测模型[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 41-45. [Yu Bingsong, Fan Tailiang, Huang Wenhui, et al. Predictive model for karst reservoirs in sequence stratigraphic framework[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 28(4): 41-45.]
- 40 屈海洲, 王振宇, 杨海军, 等. 礁滩相碳酸盐岩岩溶作用及其对孔隙分布的控制——以塔中东部上奥陶统良里塔格组为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 552-558. [Qu Haizhou, Wang Zhenyu, Yang Haijun, et al. Karstification of reef-bank facies carbonate rock and its control on pore distribution: A case study of Upper Ordovician Lianglitage Formation in eastern Tazhong area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 552-558.]

Using Spectral Gamma Ray Log to Recognize High-frequency Sequences in Carbonate Strata: A case study from the Lianglitage Formation from Well T1 in Tazhong area, Tarim Basin

GAO Da^{1,2} LIN ChangSong³ HU MingYi^{1,2} HUANG LiLi⁴

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. Basin Analysis Center, Yangtze University, Wuhan 430100, China;

3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: High-frequency sequences are commonly developed in carbonate strata, and eogenetic karst related to fourth- to fifth- order sequence boundaries are of great importance to the improvement of carbonate reservoir quality. However, how to identify high-frequency sequences objectively is a generally acknowledged issue which has been long been explored. In this study, we analyze the high-frequency sequences of the Lianglitage Formation in the Tazhong area of Tarim Basin, by using the natural gamma ray logging data and utilizing moving average filtering and wavelet transformation methods. Th/U ratio log, after moving average filtering process, can clearly and objectively reflect the depositional cycles, with its increase indicating the deepening of depositional environment and the concentration of clay, and its decrease indicating the shallowing of depositional environment and purer limestone deposits. The Lianglitage Formation in this well can be divided into three third-order sequences, eight fourth-order sequences, and 32 fifth-order sequences, the sea-level change reflected by various rank sequences are well coincided with the three one-dimensional discrete curves derived from wavelet transform analysis. Correlation between wells indicates the third- and fourth- order sequences of the lower part of the Lianglitage Formation vary between different areas in the Tazhong Uplift, and the differences attribute to the distinct paleogeomorphology of the Tazhong Uplift before Late Ordovician. The fourth- and fifth- order sequences are believed to reflect the eccentricity long periods and short periods, respectively, in Milankovitch cycles. The reservoir units in the well are all related to the fourth- and fifth- sequence boundaries. The results of this study are of great significance of analyzing high-frequency sequences in carbonate strata based on well-logging data, as well as forecasting favorable reservoirs in a high-resolution sequence framework in this area.

Key words: high-frequency sequence; spectral gamma-ray log; wavelet transformation; Lianglitage Formation; Tazhong area; Tarim Basin