

文章编号: 1009-3850(2012)01-0044-06

藏北雁石坪夏里组高频岩相旋回的驱动机制研究

文 军¹, 伊海生^{1,2}, 邱余波¹, 吴池华¹, 龚大兴¹

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: Walsh 频谱分析引用不连续的方波代替傅里叶频谱分析中连续的正弦波和余弦波, 由于 Walsh 函数的不连续性, 它广泛应用于地层旋回周期的检测。藏北雁石坪地区中侏罗统夏里组发育一套以砂岩、泥岩为主的高频岩相旋回, 在地层颜色上也表现出较好的旋回性。对该组地层岩性和颜色进行 Walsh 频谱分析对比发现, 岩性频谱曲线及颜色频谱曲线的主频周期与米兰科维奇旋回周期之间均具有极好的对应关系, 认为海平面的周期性变化是夏里组高频岩相旋回的驱动机制。同时根据岩性旋回频谱和颜色旋回频谱计算得出夏里组的沉积速率约为 0.111m/ka, 沉积持续时间约为 3.689Ma。

关键词: 夏里组; Walsh 频谱分析; 米兰科维奇旋回; 高频岩相旋回

中图分类号: P512.2

文献标识码: A

引言

高频沉积旋回是米兰科维奇地球运动周期的产物, 在第四纪之前的沉积物中, 高频层序与天文周期同样有着密切的关系^[1]。目前, 分析地层中的米兰科维奇旋回主要有两种方法: 一是利用准确地层时间域的测年数据进行分析; 另一种是间接分析的方法, 即在缺乏准确测年数据的情况下, 基于沉积环境对气候变化的响应在时间域和空间域是一组不同周期函数的叠加, 并且这种复杂的叠加形式会保存在地层中。如果空间域和时间域的叠加形式符合同一模式, 则可以利用空间域的旋回分析代替时间域的周期分析, 通常应用频谱分析来实现。自然界中地层内岩性之间多存在一个清晰的界面, 说明岩性变化通常为突变的, 从一种岩性渐变到另一种岩性而界面模糊的情况少见, 所以可以认为不同岩性之间存在一定的不连续性。Walsh 频谱分析引用不连续的方波代替傅里叶频谱分析中连续的正弦波和余弦波, 在处理不连续的时间序列方面具

有很好的效果。

青藏高原北部的唐古拉山北坡雁石坪地区夏里组, 发育有良好的高频岩相旋回。夏国清^[2]对该组米级旋回层序的成因类型、叠置规律以及它的成因机制的研究表明, 夏里组保存着米兰科维奇旋回。在没有夏里组的准确地层年代的情况下, 本文通过对该组 409.5m 地层剖面(图 1)岩性和颜色进行 Walsh 频谱分析, 意在探讨夏里组高频岩相旋回的驱动机制。

1 地质背景

位于西藏北部及青海南部的羌塘盆地是我国第二大海相沉积盆地, 其大地构造位置处于特提斯-喜马拉雅巨型构造域的东段。盆地北部边界为可可西里-金沙江缝合带, 南部边界为班公湖-怒江缝合带^[3]。据青海省 1:20 万区域地质调查资料, 依据大量化石组合, 结合岩相组合、岩性特征、沉积旋回的研究, 将唐古拉山地区雁石坪群划分为 6 个组, 从下向上依次为雀莫错组(J_2q)、玛托组(J_2m)、

收稿日期: 2011-09-14; 改回日期: 2011-09-23

作者简介: 文军(1986-), 男, 硕士研究生, 从事沉积地质学研究

资助项目: 国家自然科学基金项目: 青藏高原北部东昆仑山新生代构造隆升的沉积碎屑记录(40972084)

温泉组(J_2w)、夏里组(J_2x)、索瓦组(J_3s)和扎窝茸组(J_3z)^[4]。



图1 雁石坪夏里组剖面位置图

Fig. 1 Location of the measured section in the Xiali Formation in the Yanshiping area

夏里组以发育一套砂岩和泥岩为主的高频岩相旋回为特征,在地层颜色上表现为紫红色与灰绿色呈韵律互层,含少量双壳类和腕足类化石组合及陆生植物化石: *Protocardia congnata* (Sowerby), *Anisocardia tenera* (Sowerby), *Modiolus bipartus*, *Modiolus acuticarinatus*, *Astarte multiformis*, *Pronoella* sp., *Sowerbya triangularis* 等属种,均为生存于半咸水环境的广盐性双壳类,是潮坪沉积环境中常见的属种^[5]。水动力条件以潮汐为主,主要为细砂、粉砂和泥沉积,层理常见沙纹层理,以及波痕、潮汐交错层理、脉状层理以及羽状交错层理,沉积特征指示潮坪环境^[6]。根据沉积物特点,划分为泥坪沉积、混合坪沉积和砂坪沉积^[7]。泥坪沉积岩性以紫红色泥岩、粉砂质泥岩为主,多为块状,局部夹绿灰色薄层状细砂岩。泥岩矿物成分主要为泥质,含少量方解石、白云石及黄铁矿,有时夹有风暴带来的生物介壳。混合坪沉积岩性主要为紫红色、灰绿色细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩与泥灰岩互层,局部夹含生屑泥晶灰岩。细砂岩、粉砂岩主要碎屑成分为石英,分选好,次棱角-次圆状,孔隙式胶结,普遍含少量锆石、电气石等稳定重矿物。砂坪沉积主要岩性为灰绿色细砂岩、粉砂岩夹泥质粉砂岩。碎屑颗粒成分以石英为主,分选好,孔隙式胶结,含黄铁矿。可见低角度冲洗交错层理、楔型交错层理,平行层理发育,层面构造主要为波痕。

2 Walsh 频谱分析

频谱分析技术是研究周期性现象中最常用的一种统计分析方法,它可以从数据上客观地对地层旋回进行识别,这些数据包含旋回的震荡参数,称作时间序列,是通过恒定时间间隔和空间间隔观察统计得到的^[8]。比如碳酸盐氧同位素比率的时间序列确定其自更新世以来的时间间隔为2000年,或者% CaCO_3 值确定石灰岩/页岩序列的间隔为2cm。在沉积学上,频谱分析曾被用来确定纹泥沉积中的太阳黑子旋回、砂岩交错层理构造中的小潮/春潮旋回以及远洋灰岩/页岩序列中的轨道旋回或者说米兰科维奇旋回^[9]。

时间序列所表现出的连续性和不连续性取决于其处理模式。大多数频谱分析模式所引用的参数可以处理在一定限制条件下的任意值,形成一套连续的时间序列,如傅里叶分析通常适合于这样的时间序列。然而,分析模式在只能涵盖部分环境地层信息(如正常磁极或磁极倒转,灰岩沉积或页岩沉积)的情况下,就会形成阶梯状或者不连续的时间序列^[10]。Beauchamp^[11]认为,不连续的时间序列适合应用 Walsh 频谱分析。这种分析方法采用 Walsh

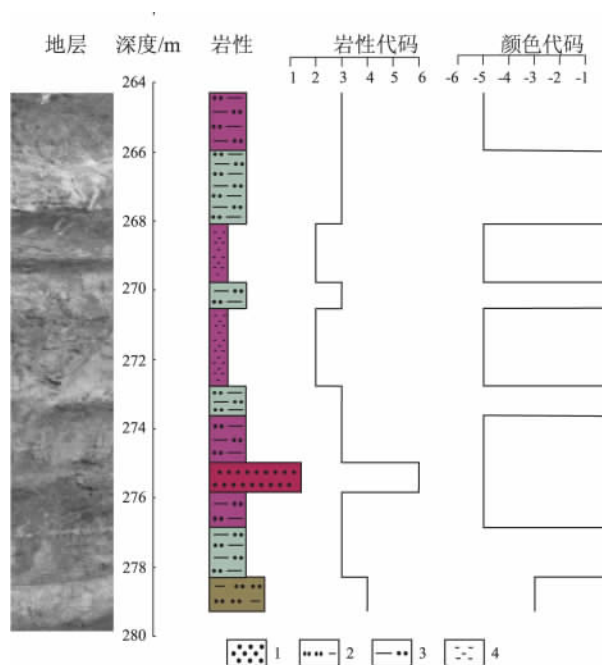


图2 岩性代码、颜色代码示意图

1. 细砂岩; 2. 泥质粉砂岩; 3. 粉砂质泥岩; 4. 泥岩

Fig. 2 Sketch to show the lithological codes and tinctorial codes for the study area

1 = fine-grained sandstone; 2 = muddy siltstone; 3 = silty mudstone; 4 = mudstone

函数的方波代替傅里叶分析中连续的正弦波和余弦波。由于所使用函数的不连续性,时间序列的突然结束对于频谱没有任何影响,不存在吉布斯现象。

夏里组剖面共分 298 层(409.5m),其中砂岩层和泥岩层共 282 层(391.5m),泥灰岩 16 层(18m)。该组高频岩相旋回主要是砂岩和泥岩的旋回,所以选取 282 层砂岩层和泥岩层做岩性、颜色频谱分析。在进行 Walsh 频谱分析之前,需要对岩性信息和颜色信息做数字化转换^[10],以 1 代表泥岩、-1 代表砂岩、0.5 代表灰绿色、-0.5 代表紫红色(图 2);岩性代码和颜色代码均在纵向上与剖面地层深度对应,实现时间序列以方波形式表现(图 3)。为了得到典型的频谱分析效果,必须给予时间序列一个恒定的采样间隔,鉴于研究剖面中最薄层为 6cm,设定采样间隔为 5cm,略小于最薄层^[12],在 AnalySeries 软件中对关于岩性和颜色的时间序列分别内插,内插值为 0.05,于是各得到一个新的时间序列,采样数均为 7830。采用 PAST 软件进行 Walsh 频谱分析,应用 Paste 功能将具有 5cm 采样间隔的时间序列导入软件,调用 Time 程序, Walsh transform 窗口,结果如图 4 所示。图 4a、4b 为频率域中能量图,纵坐标代表能量,每个能量集中的地方表示一个周期峰值,横坐标表示频率。将横坐标取倒数,转化为相应的波长,纵坐标不变,得到图 4c、4d 波长-能量图。

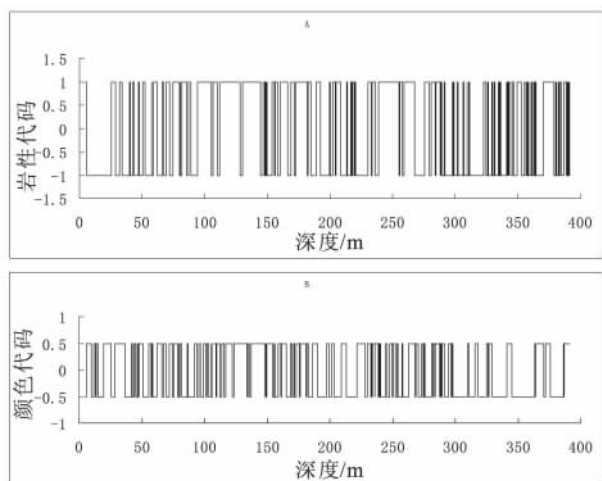


图 3 代码—深度关系图(A:岩性代码;B:颜色代码)

Fig. 3 Relationship between the codes and depths in the study area

A. Lithological codes; B. Tinctorial codes

3 讨论

对保存在地层中的米兰科维奇旋回进行研究

时,通常利用地层中旋回厚度的峰值之比和天体轨道周期之比进行比较,如果两者的比值有很好的相似性,也就是说在空间域和时间域的叠加模式相同,那么就认为这样的地层旋回是由天体轨道的周期性变化引起的^[13]。

根据 Berger^[14]计算的地质历史时期米兰科维奇旋回周期的变化,求得侏罗纪时期的岁差周期为 21.3ka 和 17.6ka,轴斜率周期为 50.6ka 和 38.0ka,偏心率周期为恒定的 400ka,123ka 和 95ka(表 1A)。图 4a 显示能量在高频带 1、2 和 3 处出现 3 个强振幅的频谱峰,根据设定的采样间隔为 5cm,以 1m 为标准换算得到 1、2 和 3 处对应的频率分别为 0.537、0.171 和 0.073,即位置 1 处对应的波长为 1.862m,位置 2 对应的波长为 5.851m,位置 3 处对应的波长为 13.653m(图 4c),与米兰科维奇旋回周期之间具有较好的对应性(表 1B),所以,频率 0.537 处(位置 1),即波长 1.862m,谱峰与岁差周期 17.6ka 对应;频率 0.171 处(位置 2),即波长 5.851m,谱峰与轴斜率周期 50.6ka 对应;频率 0.073 处(位置 3),即波长 13.653m,谱峰与短偏心率周期 123ka 对应。在图 4b 中可以检测到 2 个主要的谱峰,应用同样的方法(表 1C),高频带 3 处频率为 0.073,波长为 13.653m,与短偏心率周期 123ka 对应;高频带 2 处频率为 0.122,波长为 8.197m,也可与轴斜率周期 50.6ka 对应;位置 1 处谱峰不明显。可见,夏里组的岩性旋回频谱曲线及颜色旋回频谱曲线的主频周期与米兰科维奇旋回周期之间均具有很好的对应关系。因此可以认为,米兰科维奇旋回是影响夏里组高频岩相旋回发育的主要因素,海平面周期性的变化决定着雁石坪地区夏里组高频岩相旋回的发生、发展和定格。能量值越大,表明该周期的沉积旋回在底层中出现得越频繁^[1]。结合图 4 分析发现,最大能量值均发生在位置 3 处,表明雁石坪地区夏里组的米兰科维奇旋回短偏心率周期的平均能量强度明显较岁差周期和轴斜率周期的平均能量强度高。因此,可以认为短偏心率周期是影响夏里组高频旋回的最主要原因。

在图 4b 中,2、3 处两个主峰与图 4a 中 2、3 处的两个主峰具有极好的对应关系。但是图 4a 中的谱峰 1 在图 4b 中虽然有所显示,但是不明显,仅为一个略微凸起的小波峰,可能为噪音影响或者野外对颜色的识别误差所致。因此,认为在对高频岩相旋回中米兰科维奇旋回的识别中,岩性旋回较颜色

旋回具有更好的可靠性。也就是说,颜色旋回可以在一定程度上反映地层中保存的米兰科维奇旋回信息,但是可能误差较大或者不能完全识别。这是因为岩石的颜色受矿物类别、风化作用等因素影响,可能会呈现出一定的假色,造成识别上面的误差,不如岩性稳定。

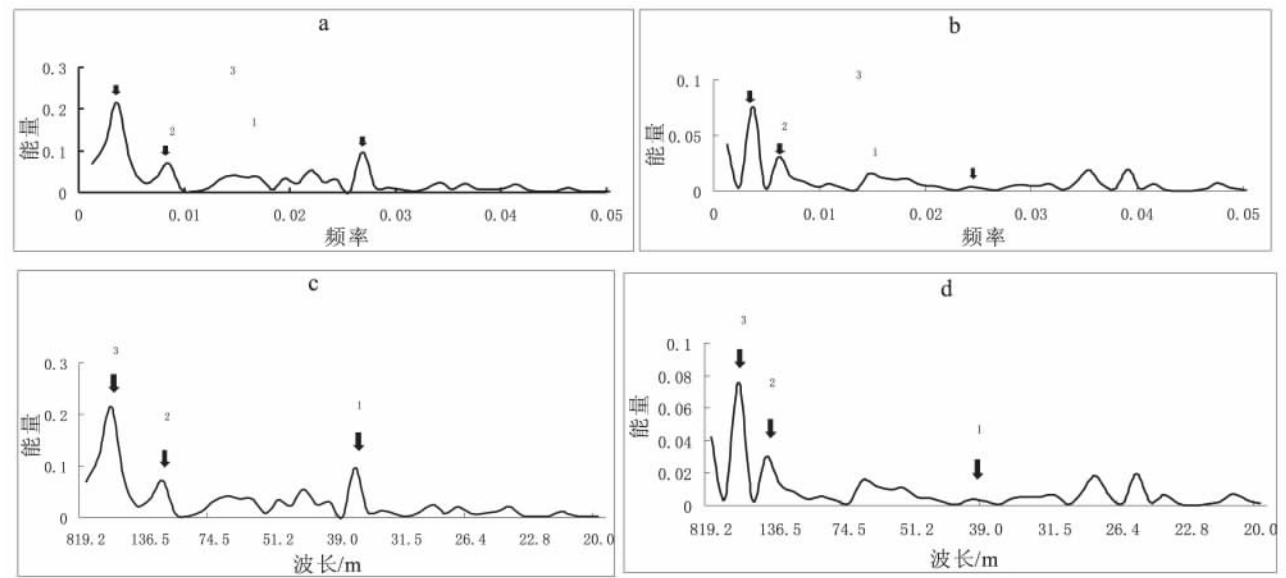


图4 雁石坪地区夏里组岩性(a、c)、颜色(b、d) Walsh 频谱图

Fig. 4 Walsh spectral analysis of lithology(a and b) and tinture(c and d) in the Xiali Formation in the Yanshiping area

表 1 标准米兰科维奇旋回周期比率与夏里组主频波峰比率对照表

Table 1 Comparison of the Jurassic standard Milankovitch cycles period ratios and main spectral peaks ratios for the Xiali Formation in the Yanshiping area

	17.6	21.3	38	50.6	95	123	400
17.6	1	0.826291	0.463158	0.347826	0.185263	0.143089	0.044
21.3	1.210227273	1	0.560526	0.420949	0.224211	0.173171	0.05325
38	2.159090909	1.784038	1	0.750988	0.4	0.308943	0.095
50.6	2.875	2.375587	1.331579	1	0.532632	0.411382	0.1265
95	5.397727273	4.460094	2.5	1.87747	1	0.772358	0.2375
123	6.988636364	5.774648	3.236842	2.43083	1.294737	1	0.3075
400	22.72727273	18.77934	10.52632	7.905138	4.210526	3.252033	1

(A)

	1.862	5.851	13.653
1.862	1	0.318236	0.13638
5.851	3.14232	1	0.428551
13.653	7.332438	2.333447	1

(B)

	1.949	8.197	13.653
1.949	1	0.2377	0.142753
8.197	4.205747	1	0.600381
13.653	7.005131	1.665609	1

(C)

短偏心率旋回强能量团的周期厚度除以其时间(123ka) 即为沉积速率^[15]。通过岩性和颜色频谱分析,短偏心率旋回强能量团的周期厚度均为 13. 653m,计算得到夏里组的平均沉积速率为 0. 111m/ka,野外实测该组地层总厚度为 409. 5m,于是可以得到雁石坪地区夏里组地层沉积持续时间

约为 3. 689Ma。陈兰等^[5]对夏里组 *Anisocardia tenera-Modiola biparta* 化石组合的研究表明夏里组属于卡洛夫阶,其下温泉组为巴通阶,其上索瓦组为基末里阶-牛津阶。从标准地质年代表^[16、17]查得中侏罗统卡洛夫阶持续时间约为 3. 5Ma。对比发现,本次分析计算结果 3. 689Ma 与理论值具有较好

的对应性。

4 结论

(1) 应用 Walsh 频谱分析,在缺乏测井数据等信息,仅有实测剖面资料的情况下,同样可以对地层中的旋回信息进行检测。Walsh 频谱分析技术为米兰科维奇旋回的识别提供了一个简单快捷的新方法。

(2) 根据 Walsh 频谱分析,检测到雁石坪地区夏里组地层中保存着 17.6ka、50.6ka 和 123ka 3 种级别的沉积旋回周期和地质记录。米兰科维奇旋回是夏里组高频岩相旋回发育的主要驱动机制,短偏心率周期是最主要的影响因素。海平面的周期性变化决定着雁石坪地区夏里组高频岩相旋回的发生、发展和定格。

(3) 地层的岩性相对其颜色更易识别,具有更好的稳定性。因此,在应用 Walsh 频谱分析对地层中米兰科维奇旋回进行识别时,颜色旋回可以在一定程度上反映地层中保存的米兰科维奇旋回信息。但是可能误差较大或者不能完整识别,以岩性旋回为依据较以颜色旋回为依据更准确。根据本文 Walsh 频谱分析,计算得到夏里组平均沉积速率约为 0.111m/ka,沉积持续时间约为 3.689Ma,与该组所对应的卡洛夫阶持续时间 3.5Ma 具有极好的对应性,可见 Walsh 频谱分析具有较好的准确性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 夏国清,伊海生,黄华谷,等.藏北雁石坪地区夏里组米级沉积旋回及成因[J].成都理工大学学报(自然科学版),2010,37(2):133-139.
- [3] 余光明,王成善.西藏特提斯沉积地质[M].北京:地质出版社,1990.1-12.
- [4] 青海省地质矿产局.青海省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [5] 陈兰,伊海生,胡瑞忠,等.羌塘盆地侏罗纪双壳类化石组合及古环境[J].成都理工大学学报(自然科学版),2005,3(5):466-473.
- [6] 曾允孚,夏文杰.沉积岩石学(M).北京:地质出版社,1986.
- [7] 张忠民.羌塘盆地侏罗系夏里组沉积相及模式[J].大庆石油学院学报,1998,22(4):13-15.
- [8] PRIESTLEY M B. Spectral Analysis and Time Series[M]. New York: Academic Press,1981.
- [9] HERBERT T D, FISCHER A G. Milankovitch climatic origin of mid-Cretaceous black shale rhythms in central Italy[J]. Nature, 1986, 321: 739-743.
- [10] GRAHAM P WEEDON. The detection and illustration of regular sedimentary cycles using Walsh power spectra and filtering, with examples from the Lias of Switzerland [J]. Journal of the Geological Society, 1989, 146: 133-144.
- [11] BEAUCHAMP K A. Applications of Walsh and Related Functions, with an Introduction to Sequency Theory [M]. New York: Academic Press, 1984.
- [12] BADENAS B, AURELL M, RODRI GEUZ-TOVER F J et al. Sequence stratigraphy and bedding rhythms of an outer ramp limestone succession(Late Kimmeridgian, Northeast Spain) [J]. Sedimentary Geology, 2003, 161: 153-174.
- [13] 张小会,赵重远.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组米兰科维奇旋回的确定[J].石油与天然气地质,2002,23(4):372-375.
- [14] BERGER A, LOUTER M F, DEHANT V. Pre-quaternary Milankovitch frequencies[J]. Nature, 1989, 342(9):133.
- [15] 郑兴平,罗平.川东渝北飞仙关组的米兰克维奇周期及其应用[J].2004,27(1):16-19.
- [16] 章森贵,严慧君.“国际地层表”与 GSSP[J].地层学杂志,2005,29(2):188-203.
- [17] GRADSTEIN F M et al. A new Geological Time Scale. With special reference of Precambrian and Neogene [J]. Episodes, 2001, 27(2):83-100.

The driving mechanism of the high-frequency lithofacies cycles in the Middle Jurassic Xiali Formation in the Yanshiping area , northern Xizang

WEN Jun¹ , YI HAI-sheng^{1,2} , QIU Yu-bo¹ , WU Chi-hua¹ , GONG Da-xing¹

(1. *Institute of Sedimentary Geology , Chengdu University of Technology , Chengdu 610059 , Sichuan , China*; 2. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation , Chengdu University of Technology , Chengdu 610059 , Sichuan , China*)

Abstract: The Walsh spectral analysis employs the discontinuous square waves or Walsh function instead of the continuous sine and cosine waves of the Fourier analysis. Because the Walsh function is discontinuous itself , the Walsh spectral analysis is widely used in detecting the periods in stratigraphic cycles. A succession of high-frequency lithofacies cycles composed of sandstone and mudstone occur in the Middle Jurassic Xiali Formation in the Yanshiping area , northern Xizang. According to the analysis of lithology and tinctures using the Walsh power spectra and filtering , the significant peak periods on both lithology and dinctorial spectra are in a very good correspondence with the Milankovitch cycles. The sea-level periodic changes are interpreted as the driving mechanism of the high-frequency lithofacies cycles in the Xiali Formation. The sedimentary duration of the whole Xiali Formation is about 3.689 Ma , with a sedimentary rate of about 0.111 m/ka.

Key words: Xiali Formation; Walsh spectral analysis; Milankovitch cycles; high-frequency lithofacies cycles