2019 年 8 月，第 25 卷，第 4 期，598-609 页
August 2019，Vol. 25，No.4， pp. 598-609

高 校 地 质 学 报
Geological Journal of China Universities

DOI: 10.16108/j.issn1006-7493.2019006
引用格式：宗毅，沈玉林，秦勇，金军，刘近帮，仝根成，郑俊，张一杰. 2019. 基于米氏旋回的黔西盘县上二叠统煤系高频层序研究 [J]. 高校地质学报，25（4）：598-609

基于米氏旋回的黔西盘县上二叠统煤系高频层序研究

宗 毅[1,2,3]，沈玉林[2,3*]，秦 勇[2,3]，金 军[4,5]，刘近帮[2,3]，仝根成[2,3]，郑 俊[4,5]，张一杰[2,3]

1. 江苏煤炭地质局 江苏长江地质勘查院，南京 210000；
2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院，徐州 221116；
3. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室，徐州 221008；
4. 贵州省煤田地质局，贵阳 550009；
5. 贵州省煤层气页岩气工程技术研究中心，贵阳 550009

摘要：上二叠统记录了地质历史时期最大规模的生物灭绝事件和最深刻的环境变化。对上二叠统的层序地层格架进行精细描绘，建立高分辨率的地层序列，是深入了解此次事件及其演化的基础和关键。基于钻测井、岩心观测及地球化学分析测试结果等资料综合分析，并运用小波分析技术，对黔西盘县上二叠统煤系进行了米氏旋回的识别和划分，结果表明，研究区上二叠统煤系记录了稳定的米兰科维奇旋回，天文轨道周期对其沉积过程具有明显影响，由长、短偏心率、地轴斜率和岁差周期引起的地层旋回厚度分别为 16.06~17.24 m、5.39~5.70 m、2.11~2.15 m、1.12~1.21 m，长偏心率周期对地层中沉积旋回的控制和影响最强。对长、短偏心率周期进行滤波分析后，建立了上二叠统煤系“浮动”天文年代标尺，为约束同沉积火山事件层（Tonstein）的形成及其持续时限提供了年代学依据。以区域等时对比效果明显的长偏心率旋回为标尺，并结合旋回沉积序列、旋回界面特征等，将上二叠统煤系划分为 4 个三级层序，并进一步划分为 16 个四级层序（对应于中期旋回），建立了研究区高频层序地层格架。

关键词：米兰科维奇旋回；小波分析；天文年代标尺；高频层序；上二叠统；盘县
中图分类号：P618.11　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006-7493（2019）04-598-12

High Frequency Cyclic Sequence Based on the Milankovitch Cycles in Upper Permian Coal Measures in Panxian, Western Guizhou Province

ZONG Yi[1,2,3], SHEN Yulin[2,3*], QIN Yong[2,3], JIN Jun[4,5], LIU Jinbang[2,3], TONG Gencheng[2,3], ZHENG Jun[4,5], ZHANG Yijie[2,3]

1. Jiangsu Bureau of Coal Geology, Changjiang Geological Prospecting Institute, Nanjing 210000, China;
2. School of Resource and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 2211161, China;
3. Key Laboratory of CBM Resource and Reservoir-Formation Process, China Ministry of Education, Xuzhou 221008, China;
4. Coal Mine Exploration of Guizhou Province, Guiyang 550009, China;
5. Guizhou Research Center of Shale Gas and CBM Engineering Technology, Guiyang 550009, China

Abstract: The Upper Permian recorded the greatest mass extinction events and the most dramatic environmental changes in geological history. Fine description of stratigraphic framework and the establishment of high-resolution stratigraphic sequence of the Upper

收稿日期：2019-01-15；**修回日期：**2019-03-13
基金项目：国家自然基金项目（41672146；41872168）；国家科技重大专项项目（2016ZX05044-002-001）联合资助
作者简介：宗毅，男，1993 年生，硕士研究生，主要从事测井地质学研究；E-mail: zy9110310@163.com
***通讯作者：**沈玉林，男，1981 年生，教授，主要从事沉积学、地层学研究；E-mail: yulinsh@163.com

Permian have been the key and foundation to in-depth understanding of these events and evolutions. Based on comprehensive analyses of well logging, core observation, and geochemical testing results, this study performs the sequence stratigraphic division of the Upper Permian coal measures on Milankovitch cycles using wavelet analysis in Panxian, western Guizhou Province. Results show that well-preserved Milankovitch cycles were contained in the measures. The sedimentary process of coal measures was obviously affected by astronomical orbital period. The thickness of 16.06–17.24 m, 5.39–5.70 m, 2.11–2.15 m and 1.12–1.21 m were affected by long eccentricity (405 ka), short eccentricity (123 ka), obliquity (44 ka) and precession (21 ka), respectively. Among the four controlling factors, the long eccentricity had the strongest effect on the coal measures of Milankovitch cycles. A "floating" astronomical time scale was established by filtering the long and short eccentricity cycles, which provided geo-chronological constraints on the formation and duration of the synsedimentary volcanic event layers (known as Tonsteins). Finally, taking the long eccentricity cycles as isochronous section and combined with the sedimentary succession and characteristics of cycle boundaries, the Upper Permian coal measures in the study area can be divided into four third-order sequences and sixteen fourth-order sequences. These help to establish the regional high-frequency cyclic sequence framework.

Key words: Milankovitch Cycles; wavelet analysis; astronomical time scale; high-frequency cyclic sequence; the Upper Permian; Panxian

Corresponding author: SHEN Yulin, Professor; E-mail: yulinsh@163.com

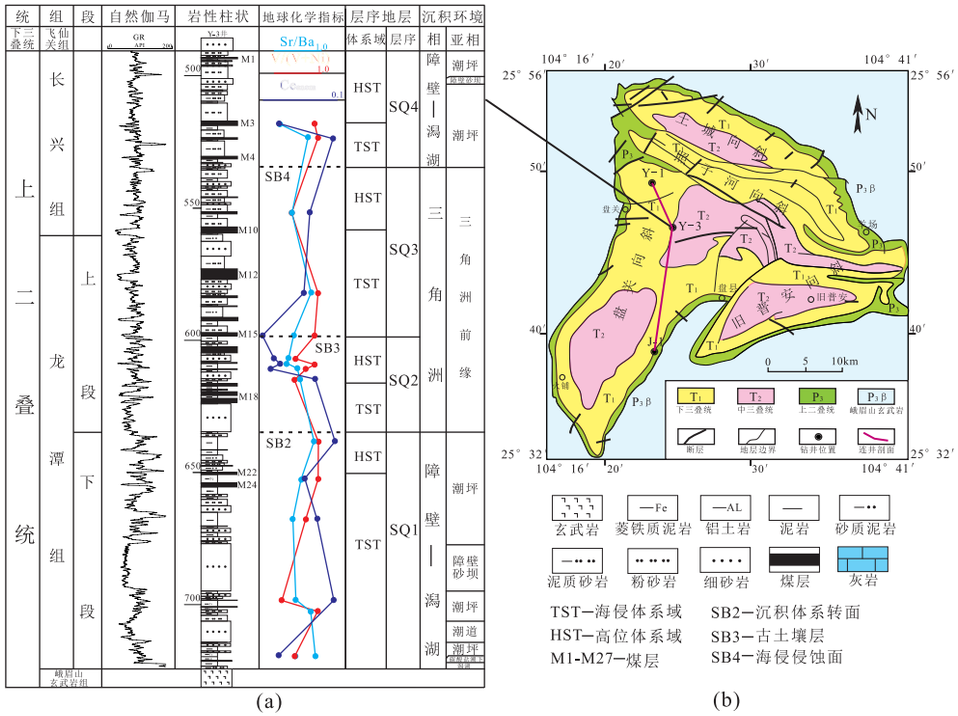
发生于二叠纪—三叠纪之交的生物大灭绝是显生宙以来五次灭绝事件中规模最大的一次，又被称为“大灭绝”（Nakazawa and Runnegar, 1973; Yin, 1983; Hallam and Miller, 1988; Erwin, 1994; Benton et al., 2003; 殷鸿福和宋海军, 2013）。而晚二叠世作为二叠纪—三叠纪界限（PTB）事件的前奏，其地层记录必定蕴含了该事件演化的诸多信息。因此，对上二叠统的层序地层格架进行精细的描绘，建立其高分辨率的地层序列，将成为深入了解此次事件及其演化的基础和关键。黔西地区上二叠统发育完全且保存较好，是进行层序地层研究的理想地区和层位（殷鸿福, 1994; 夏文臣等, 1994; 邵龙义和张鹏飞, 1997; Jin et al., 2006）。前人以 Vail 经典层序地层学理论和方法开展黔西上二叠统层序地层研究（王成善等, 1999; 王鸿祯等, 2000; 梅冥相等, 2005; Wang et al., 2011; 沈玉林等, 2012），但对于层序内部高频信息的提取有限（陈代钊, 1997）。虽然将米兰科维奇旋回引入层序地层研究，但仅限于三级层序及体系域识别和划分（袁学旭等, 2013; Yuan et al., 2013）。这显然阻碍了人们对黔西上二叠统记录的地质过程如全球气候变化、火山活动事件或其他重大地质事件响应等的更深入的认识。

日地天文轨道周期（米兰科维奇周期）因具有数字年龄值分辨率高、相对误差小的属性，可将地层特征、成因和年龄值的研究融为一体，被广泛应用于旋回地层学研究和高精度的“天文年代表”的刻画（龚一鸣等, 2004; Hinnov, 2003; Hilgen et al., 2013）。因此，本文基于黔西盘县地区上二叠统煤系钻井测井数据的小波分析，开展了详细的旋回地层学研究，建立了上二叠统煤系“浮动”天文年代标尺，并将米兰科维奇旋回理论引入高频层序地层划分中，旨在为高频层序单元的划分和对比提供一种新的有效方法。

1　地质背景

盘县地区位于上扬子地块滇东—黔中隆起中部，包括盘关向斜、旧普安向斜、土城向斜及照子河向斜，盘县 Y-1 井、Y-3 井、J-1 井为区内的全取芯煤田钻井，均位于盘关向斜东翼（图 1），钻遇地层自上而下为下三叠统飞仙关组、上二叠统煤系长兴组和龙潭组。研究区上二叠统煤系为碳酸盐潮坪—障壁—潟湖—浅水三角洲沉积环境下发育的陆源碎屑岩夹碳酸盐岩的含煤混合海陆过渡相沉积（沈玉林等，2012），不整合于底部峨眉山玄武岩之上，顶界为二叠系和三叠系的分界面，长兴组整合于龙潭组之上，沉积连续且保持较好。钻孔岩心揭示龙潭组主要由灰、深灰、灰黄色泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩和煤层组成，夹碳质泥岩及少量钙质泥岩，未见碳酸盐岩，其中主要煤层有 M7–M32 煤；长兴组主要以灰、深灰色泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩和煤层为主，主要煤层有 M1–M6 煤。

依据盘县地区生物地层和年代地层资料、钻井垂向沉积序列及元素地球化学等特征，在区内上二叠统煤系识别 5 个三级层序界面，由底到顶分



（a）盘县地区上二叠统沉积相及层序地层综合柱状图；（b）盘县地区构造纲要及地层分布图

图1 黔西盘县地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of Panxian, western Guizhou Province

别为区域不整合面、沉积体系转换面、古土壤层（沉积间断暴露面）、海侵侵蚀面、平行不整合面（徐彬彬和何明德，2003），由此将上二叠统煤系划分为4个三级层序，层序结构由海侵体系域和高位体系域构成，低位体系域不发育（图1a）。

2 数据选择和处理方法

理论上说，与气候波动相关的成分均可作为识别米氏旋回的替代指标（石广玉和刘玉芝，2006）。自然伽马（GR）测井数据作为对沉积环境反映敏感的资料，能最敏感的反映出沉积物中泥质含量的变化，而泥质含量与气候变化导致的沉积物颗粒的粒度粗细直接相关，可作为指示气候变化的代用指标，是米兰科维奇旋回分析的理想数据（Liu et al.，2001；Prokoph et al.，2001）。因此，本次使用GR测井数据作为替代性指标进行地层旋回分析，测井的测量间距为0.05 m。研究区上二叠统煤系的GR数据范围在20~300 API，变化范围较大，其中低值与地层中的砂岩对应，高值与黑色泥岩对应，显示出较好的旋回性变化。

基于Matlab软件，采用了连续小波分析和频谱分析的技术方法，来识别和确定与天文轨道气候旋回相关的沉积旋回信息。连续小波分析（CWT）具有时频局部化和多尺度分析的特点，对高频信号具有较高的时间分辨率，能够提供各种频率强度（尺度因子）随时间或深度变化的信息。频谱分析可以将测井数据的时间（深度）域转换到频率域，估算随时间变化的各类周期信息的频率和长度。本文中连续小波分析和频谱分析分别采用Morlet小波和快速傅里叶变换法（FFT）进行分析计算。

3 米氏旋回的识别和确定

米氏旋回不同周期成分因其在某段地质历史时期具有稳定的比值，通常能通过（长、短）偏心率、斜率及岁差之间特有的比例关系（约为1:2:5:20）来识别地层中的米氏旋回（Hinnov，2003；Weedon，2003）。若能够从保存在地层的旋回信息中找到与米氏旋回周期比率相等的关系，就可以认为此旋回是米氏旋回的响应。

本文根据Berger等和Laskar等计算的地质历史时期米兰科维奇地球轨道参数变化（Berger et al.，

1992；Laskar et al.，2004），计算求取得出的二叠系偏心率旋回周期以及斜率和岁差旋回周期分别为405 ka、123 ka和95 ka、44 ka和35 ka、21 ka和17 ka（李凤杰等，2007；Wu et al.，2013），其相互之间的比值为1.00:0.30:0.23:0.11:0.08:0.05:0.04。本次研究以这些理论轨道周期及其比值为基准。

首先利用Matlab软件对测井数据进行消噪、归一化等预处理，然后选用尺度因子a与周期T之间有对应关系的周期函数Morlet小波作为小波母函数，对研究区多口钻井上二叠统煤系的GR测井数据进行连续小波变换，得出一系列与尺度相对应的小波系数，对小波系数取绝对值后平均化得出小波系数的模平均值曲线（图2）。由图2可以看出，模均值曲线中存在5个极值点（275、150、68、30、15）即为测井信号中的优势周期，运用米氏周期最佳匹配分析的方法，剔除和选择识别出来的优势周期，确定出各井中理想米氏旋回的小波尺度分别为15、30、68、275，其比例（1:2:4.6:18.3）与米氏周期之比基本吻合，误差在允许范围之内（低于5%）（金之钧等，1999）。

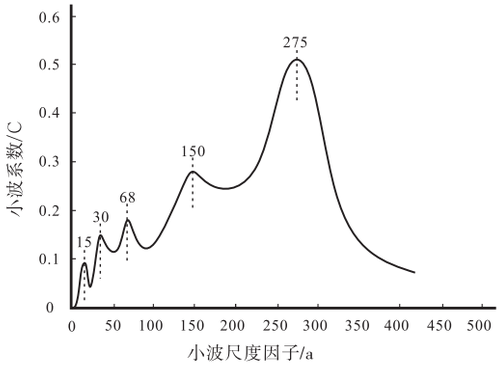


图2　小波系数的模均值曲线

Fig. 2　Model mean curve of wavelet coefficients

通过对盘县Y-1井、Y-3井、J-1井三口钻井的GR测井数据进行频谱分析，结果表明均存在4个优势频率点，分别对应于提取的小波尺度的频率强度，通过其对应的频率值即可计算得出优势旋回厚度：Y-1井中优势旋回厚度分别为1.21 m、2.14 m、5.54 m、17.24 m（图3），Y-3中优势旋回厚度分别为1.18 m、2.11 m、5.39 m、16.06 m（图4），J-1井中优势旋回厚度分别为1.12 m、2.15 m、5.70 m、16.99 m（图5），各钻井中提取的优势旋回厚度基本一致。研究区Y-1井、Y-3井和J-1井各旋回厚度比值分别1:0.32:0.12:0.06、1:0.33:0.13:0.07、1:0.33:0.12:0.06，与理论米氏周期之间存在的比率（1.00:0.30:0.11:0.05）基本一致（误差低于5%），表明上二叠统煤系中沉积旋回与米兰科维奇旋回对应关系较好，因此认为旋回厚度16.06~17.24 m、5.39~5.70 m、2.11~2.15 m、1.12~1.21 m分别对应于长偏心率（405 ka）、短偏心率（123 ka）、斜率（44 ka）和岁差周期（21 ka）。

依据不同米氏周期的旋回厚度，可以估算出持续沉积时限、平均沉积速率及地层完整性等沉积旋回信息，从而判断盘县地区各钻井中米氏周期对沉积旋回层的影响程度（表1）。研究区晚二叠世整体为潟湖—潮坪到三角洲前缘的沉积环境，沉积记录较为持续且稳定，有利于米氏旋回的识别和保存。由表1可知：研究区三口钻井上二

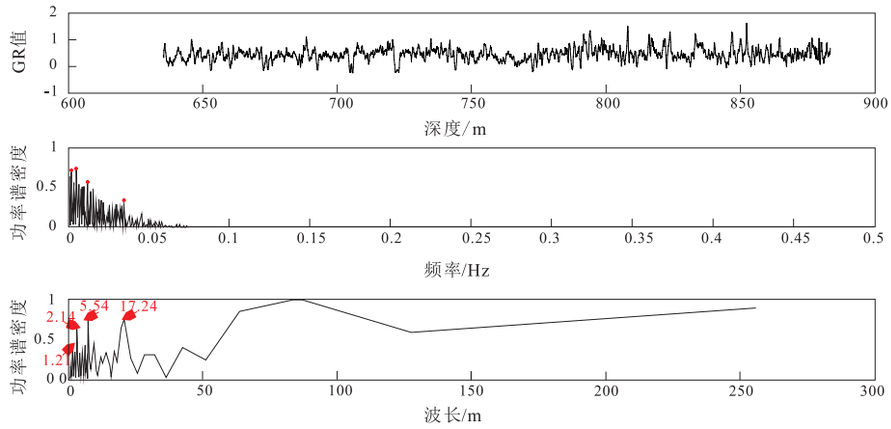


图3　盘县Y-1井上二叠统米氏旋回响应周期厚度图

Fig. 3　Thickness of Milankovitch cycle of the Upper Permian in Panxian Y-1 well

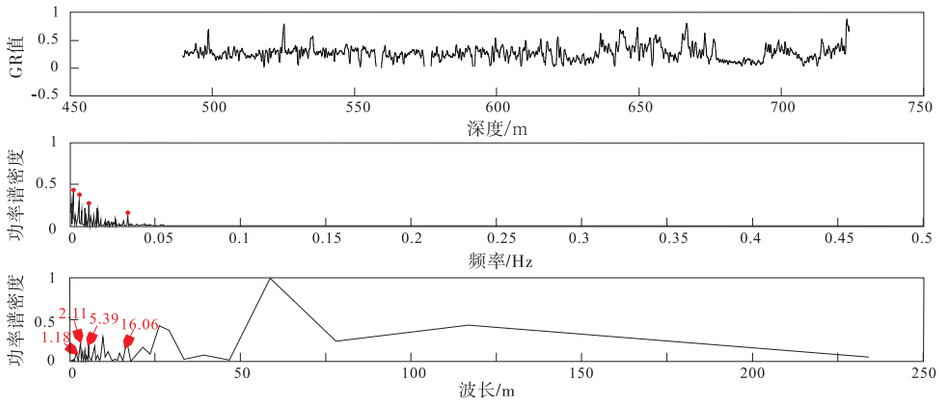


图4 盘县Y-3井上二叠统米氏旋回响应周期厚度图

Fig. 4 Milankovitch cycle thickness of the Upper Permian in Panxian Y-3 well

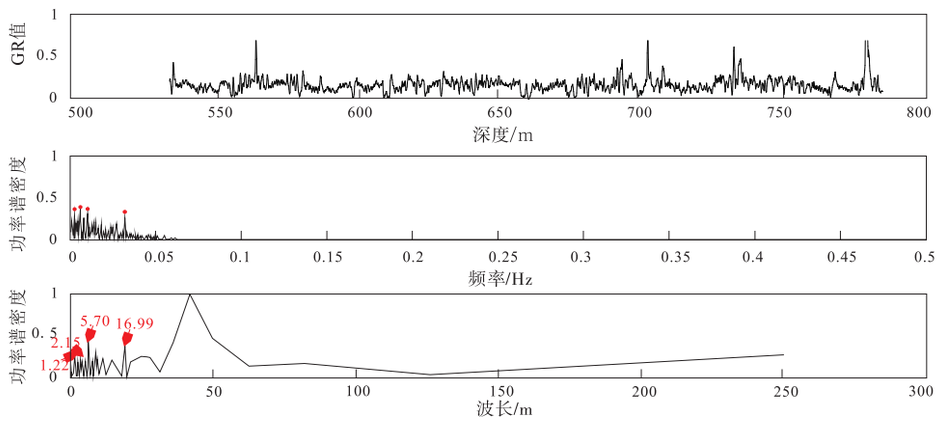


图5 盘县J-1井上二叠统米氏旋回响应周期厚度图

Fig. 5 Milankovitch cycle thickness of the Upper Permian in Panxian J-1 well

表1 盘县钻井上二叠统米氏旋回相关数据统计

Table 1 Statistics of data related to Milankovitch cycles in the Late Permian of Panxian wells

钻井编号	分析层段/m	理论周期/ka	旋回数量	旋回厚度/m	持续沉积时限/ka	沉积速率/(m/ka)		地层完整性
						按旋回	平均值	
J-1	535.5~783.5 (248 m)	405	15	16.99	6075	0.042	0.041	0.97
		123	48	5.7	5904	0.046	0.042	0.91
		44	132	2.15	5808	0.049	0.043	0.87
		21	241	1.22	5061	0.058	0.049	0.84
Y-1	630~887 (257 m)	405	16	17.24	6480	0.043	0.040	0.93
		123	52	5.54	6396	0.045	0.040	0.89
		44	142	2.14	6248	0.049	0.041	0.85
		21	254	1.21	5334	0.058	0.048	0.84
Y-3	490~724.1 (234.1 m)	405	16	16.06	6480	0.040	0.036	0.91
		123	51	5.39	6273	0.044	0.037	0.85
		44	140	2.11	6160	0.048	0.038	0.79
		21	252	1.18	5292	0.056	0.044	0.79

注:地层完整性为平均沉积速率与按旋回求出的沉积速率的比值,表示不同尺度(或分辨率)下沉积地层的连续性(Yu et al., 2008)

叠统煤系中米氏旋回保存普遍较好;J-1井上二叠统煤系中保存的长偏心率、短偏心率、斜率和岁差旋回的个数分别为15、48、132、241,Y-1井和Y-3井的分别为16、52、142、254和16、51、

140、252，各钻井中保存的长偏心率、短偏心率、斜率和岁差旋回的个数整体差距较小；长偏心率、短偏心率、斜率和岁差的其地层完整性分别为 0.91~0.97、0.85~0.91、0.79~0.87、0.79~0.84。可以看出随着尺度的减小（或时间分辨率的增大），地层完整性变小，连续性变差。据此推测，研究区上二叠煤系不存在大尺度时间的沉积间断，沉积连续性较好，符合整体的沉积背景。其中以长偏心率的地层完整性和响应程度最高，说明研究区上二叠统煤系中长偏心率旋回完整性合理且较好，表明长偏心率周期对地层中沉积旋回的控制和影响最强，可在全区进行稳定识别和对比。

4　讨论

4.1　晚二叠世“浮动”天文年代标尺

精确的年代标尺是进行层序地层分析的基础和关键。传统的层序地层主要依据古生物特征、放射性元素定年、磁性反转等标志来进行数字定年。但因生物地层和磁性地层等年龄控制点较少且连续性较低，据此获取的年龄值通常分辨率较低、误差较大，外在影响因素较多，且相关实验价格昂贵。而记录在沉积地层中的天文轨道周期信号因其稳定性，易于从与气候变迁相关的替代指标中提取出来，可作为强有力的定年工具（Hinnov and Ogg，2007；Hinnov，2003；吴怀春等，2011；黄春菊，2014）。因此，从地层记录中的沉积旋回提取出天文轨道周期旋回，将沉积旋回或古气候的替代性指标调谐到理论天文轨道参数的目标曲线上，通过测井数据的深度信号与时间信号（序列）的校准，便可获得高分辨率的天文年代标尺（ATS），其年代分辨率可达 20~400 ka（吴怀春等，2008；2017）。

研究表明盘县地区晚二叠世沉积记录了稳定的米兰科维奇旋回，以长偏心率周期（405 ka）信号最强最稳定。据此，本文以米兰科维奇旋回保存完整的 Y-1 井 GR 测井数据中提取的 405 ka 长偏心率周期小波滤波曲线为天文调谐曲线，短偏心率周期（123 ka）小波滤波曲线为辅助曲线，建立上二叠统煤系的“浮动”天文年代标尺。据 2017 年最新国际地质年表的 PTB（二叠纪—三叠纪）顶界面年龄值为 252.17±0.06 Ma，这里上二叠统的顶界面年龄采用 252.17 Ma，在盘县 Y-1 井上二叠统煤系中识别出 16 个长偏心率周期和 52 个短偏心率周期，沉积时限约为 6.48 Ma，推算出上二叠统含煤地层底界面年龄约为 258.65 Ma（图 6）。我们依据前人研究得出的黔西威宁县剖面中—上二叠统界线黏土岩的锆石 U-Pb 定年结果，并厘定出黔西晚二叠世含煤地层底界面年龄为 258.1±0.6 Ma（徐义刚等，2013），与“浮动”天文标尺建立的年龄值基本一致。

研究表明黔西地区晚二叠世期间发生了多期碱性—中酸性的火山灰降落事件，并在含煤地层中广泛发育同沉积火山灰蚀变层（Tonstein），常呈微层—薄层产于煤层或顶底板中，在二叠系—三叠系界线附近、M1、M5、M6、M7、M13、M27 等煤层中均有发现，可见高温β石英、锆石、透长石等指示火山成因的原生矿物（王小川等，1996；顾尚义，2006；周义平和任友谅，1994）。晚二叠世“浮动”天文年代标尺的建立可对 Tonstein 的形成时限进行约束，为沉积期各种地质事件的形成及其持续时限提供了年代学依据。例如，根据建立的上二叠统煤系“浮动”天文年代标尺，可以推断出 M6 中的 Tonstein 的形成时限为 253.39~252.98 Ma 之间（图 6）。

4.2　高频层序地层划分和对比

4.2.1　旋回界面的综合识别

根据高分辨率层序地层学理论，四级层序界面为长偏心率天文轨道周期控制和影响的气候变化所引起的基准面升降变化以及物源供给的变化而形成的层序界面（郑荣才和彭军，2002），顶、底界面可能对应于夏半年日照量最低的冰期，多发育于剖面结构中由反粒序向正粒序的转换界面，在野外地质剖面中较易识别，主要表现为间歇暴露面、较大规模的侵蚀冲刷面或与之相关的整合面，而且在同一次级盆地或沉积体系内具有极好的等时性和对比性（郑荣才等，2001）。

通过测井信号的小波分析特征、岩性组合、沉积相构成、沉积地球化学特征等综合研究，研究区上二叠统煤系中四级层序界面的识别标志主要为小波系数曲线和时频波谱图的突变面、冲刷侵蚀标志、古土壤层及根土岩、沉积地球化学响应面等特征界面，具体识别特征如下。

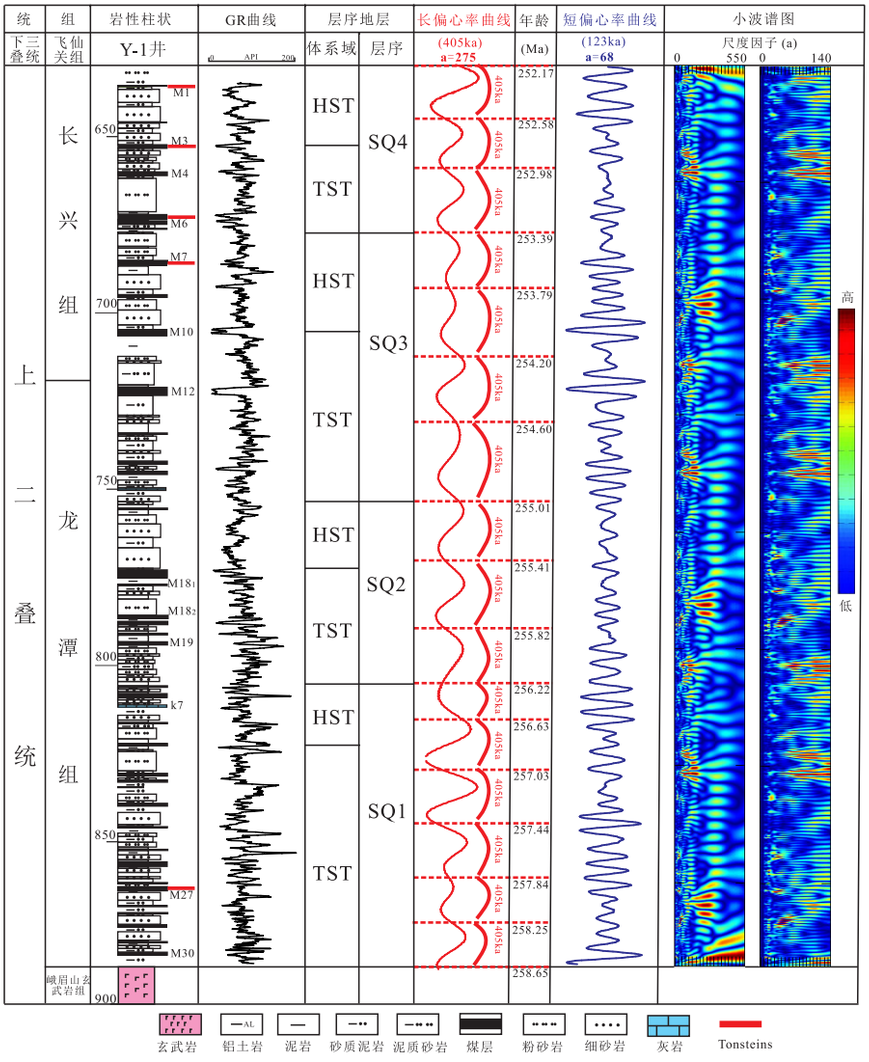


图6 盘县Y-1井上二叠统煤系“浮动”天文年代标尺

Fig. 6 “Floating” astronomical timescale of the Upper Permian coal-bearing strata in Panxian Y-1 well

（1）岩性识别标志

在黔西盘县地区晚二叠世海陆过渡相地层中，四级层序界面的识别主要为以下几个方面：①冲刷侵蚀标志，在研究区上二叠统煤系岩心中较为发育，此类界面主要为研究区大范围发育的（水下）分流河道（图7a）或潮道（图7b）冲刷所形成的界面，界面起伏不平，界面上下岩性岩相均存在明显差异，一般为上粗下细，界面底部富含泥砾，总体上具有向上变细的正旋回沉积特征，这种冲刷现象或代表基准面下降于地表之下的侵蚀冲刷作用，或代表基准面上升时的水进冲刷面；②古土壤层及根土岩，多在煤层底板处发育（图7a），代表了一段时期内的沉积间断，为地表暴露和上下沉积环境有明显相变的主要标志，可作为四级层序界面或海侵面；③煤层的发育与海平面变化密切相关，分布范围较为广泛的厚煤层则可能发育于最大海泛面或其附近，其顶板可作为最大海泛面或基准面旋回（四级层序）升降的转换面。

（2）测井信号的小波分析及旋回界面特征

在测井基准面旋回分析中，GR数据的小波分析能够提取出多分辨率（尺度）的小波系数曲线和直观的时频波谱图，其小波系数曲线在形态上的振荡特征可反映出垂向上沉积物粒度、水动力条件等的变化；波谱图中不同形态特征和结构的能量团的变化，反映出不同时期的沉积环境的差

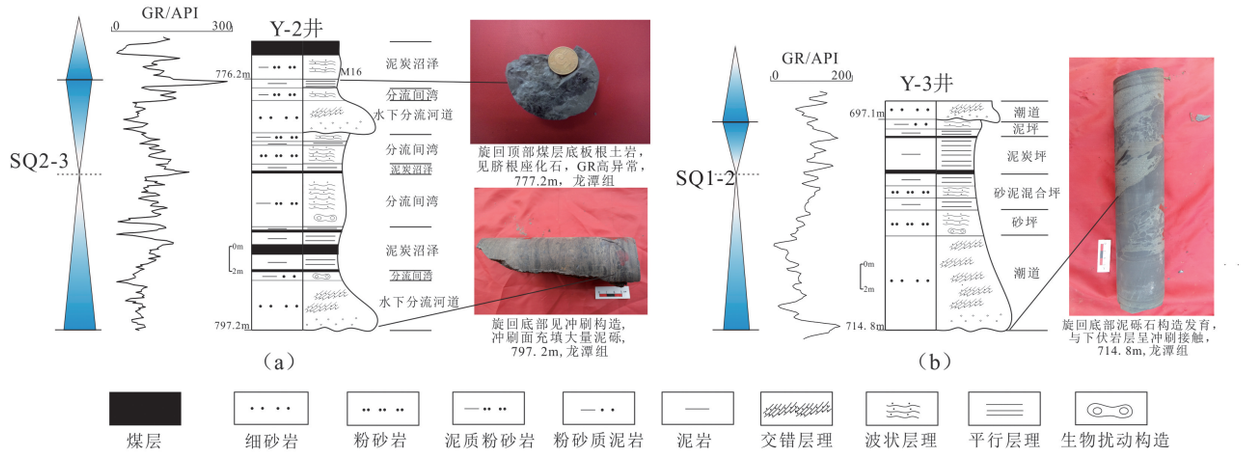


图7　黔西盘县地区上二叠统四级层序界面主要特征

Fig. 7　Characteristics of fourth-order sequence boundary in the Upper Permian of Panxian

异性（王志坤等，2008；余继峰等，2011）。在一个完整的中期旋回（四级层序）中，随着基准面的上升，沉积物粒度逐渐变细，泥质含量增加，能谱图中能量团总体上为由大尺度向小尺度偏移，说明在沉积过程中沉积速率、砂泥比逐渐变小，体现了退积式旋回的岩性变化特征，而岁差旋回小波系数的振幅逐渐升高，反映出沉积水动力条件相对较弱、水体变深的沉积环境（图8）。相反地，能谱图中能量团由小尺度向大尺度变化，表明沉积速率及砂泥比向上逐渐增大，反映出沉积水体变浅、沉积物粒度变粗及基准面下降的进积式旋回沉积特征，对应地岁差旋回小波系数的振幅逐渐降低（图8）。小波系数曲线振荡特征与岩性变化相对应，岁差旋回的小波曲线振荡较为剧烈部位对应于泥岩层，而振荡较平缓部分对应着砂岩层，而在基准面上升与下降的转换面为小波系数曲线振荡剧烈的位置，在研究区多为泥岩或煤层（图8）。

基于测井数据的小波分析及识别特征，由于旋回界面上下沉积环境或相邻地质体之间存在较大差异，在能谱图中显示为两个较强能量团出现“碰头”或间断的现象，可以作为识别旋回界面的标志（贾珍臻等，2013），而各尺度小波系数曲线周期性振荡剧烈的位置，代表各级的突变点和突变区域，亦反映沉积环境的突变，是一种层序界面的响应（图8）。因此，可以利用能谱带尺度及小波曲线振荡的变化规律来识别旋回界面。

（3）旋回界面的元素地球化学响应特征

通过对盘县上二叠统泥岩微量及稀土元素特征分析和研究（表2），结果表明层序界面及其附近泥岩的地球化学参数存在多处异常波动面，与层序界面（SB1、SB2、SB3、SB4）存在较为明显的响应（图9）。由小波划分中期旋回的原理可知，中周期旋回是由偏心率长周期导致的气候

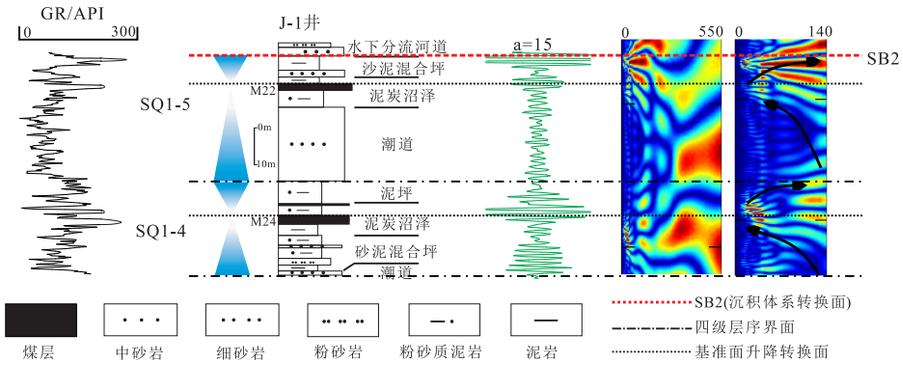


图8　旋回叠加模式的连续小波曲线及能谱图识别特征

Fig. 8　Recognizable characteristics of continuous wavelet curve and energy spectrum of amplitude cycle superimposed pattern

表2 黔西盘县Y-3井上二叠统泥岩稀土元素含量(×10⁻³)及地球化学参数

Table 2 Contents of rare earth elements (×10⁻³) and geochemical parameters of Upper Permian mudstones in Panxian Well Y-3

样品编号	深度/m	LREE	HREE	∑REE	L/HREE	$(La/Yb)_N$	Ce_{anom}	Sr/Ba	V/(V+Ni)	Sr/Cu
P-1	720.7	312.59	35.56	348.15	8.79	11.10	−0.05	1.14	0.76	1.38
P-2	703.6	228.19	30.25	258.44	7.54	9.24	−0.06	0.98	0.90	0.88
P-3	699.7	95.55	25.48	121.03	3.75	3.33	−0.11	0.62	0.66	1.69
P-4	666.9	356.65	38.56	395.21	9.25	11.00	−0.02	0.56	0.83	3.26
P-5	653.8	202.78	42.85	245.63	4.73	5.91	−0.19	0.77	0.92	3.71
P-6	641.6	214.65	25.57	240.22	8.40	12.68	−0.11	0.95	0.91	2.82
P-7	623.5	243.99	22.19	266.18	10.99	16.15	−0.05	0.72	0.74	2.24
P-8	614.5	160.24	24.53	184.77	6.53	7.75	−0.12	0.66	0.83	3.32
P-9	609.2	184.42	22.82	207.23	8.08	10.49	0.04	0.42	0.89	1.05
P-10	608.3	335.93	35.23	371.16	9.54	11.69	−0.01	0.45	0.76	3.71
P-11	598.7	393.08	26.27	419.35	14.96	20.54	0.11	0.58	0.88	1.79
P-12	577.2	266.87	24.30	291.16	10.98	17.31	0.01	0.98	0.91	1.49
P-13	552.2	437.62	35.88	473.51	12.20	16.42	0.05	0.54	0.88	2.24
P-14	531.4	593.10	46.27	639.37	12.82	18.07	0.11	0.83	0.68	2.63
P-15	520.1	105.58	9.93	115.50	10.64	13.76	−0.07	0.26	0.87	2.90

注：LREE=La+Ce+Pr+Nd+Sm+Eu；HREE=Gd+Tb+Dy+Ho+Er+Tm+Yb+Lu；∑RRE=LREE+ HREE；L/H为LREE与HREE的比值；$(La/Yb)_N$为元素球粒陨石标准化值的比值；$Ce_{anom}=\log_3 3Ce_{N*}/(2La_{N*}+Nd_{N*})$，N为元素球粒陨石标准化值，N*为北美页岩(NASC)元素标准化值；微量及稀土元素测试(ICP-MS)由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成

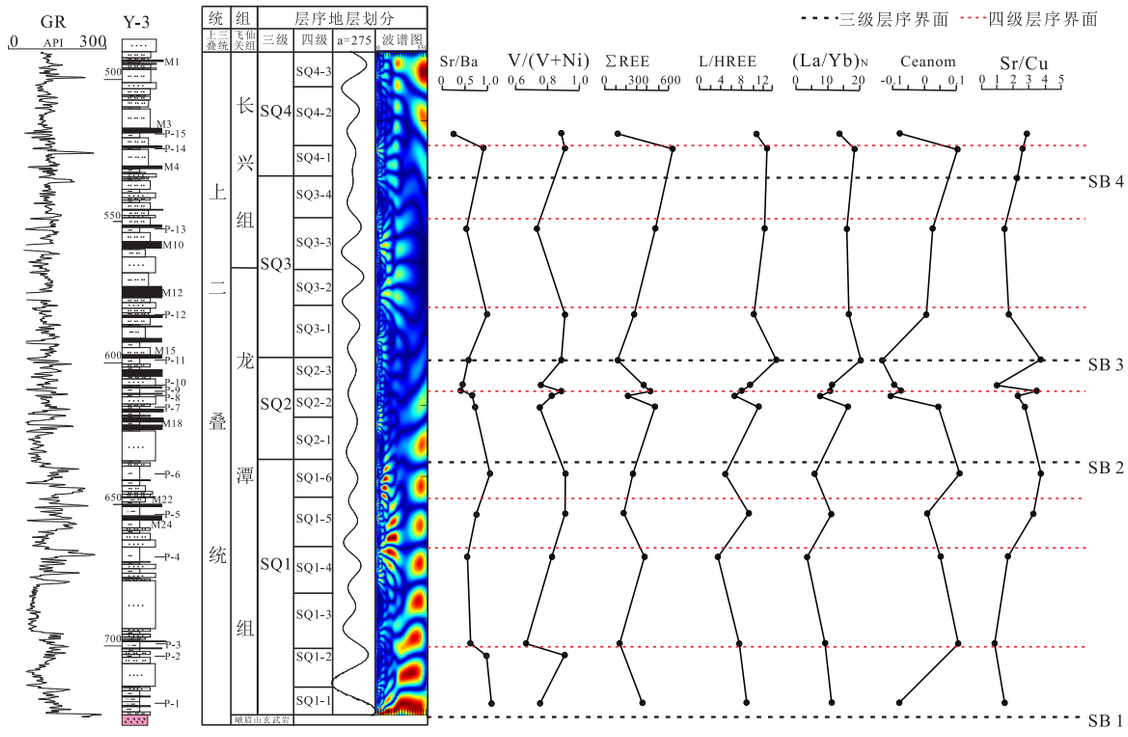


图9 Y-3井高频旋回划分及元素地球化学特征垂向变化

Fig. 9 Division of high-frequency cycles and vertical variations of elemental geochemistry in Well Y-3

冷、暖变化过程中形成的由某个或两个相邻相带组成长期旋回中的次级水进—水退沉积旋回所组成，其驱动机制为米氏天文周期所引起的冰川型海平面变化。在盘县Y-3井548.5 m、557.1 m、609.8 m、701.2 m等处，旋回界面上、下的地球化学指标∑REE、w(L/HREE)及$(La/Yb)_N$、Sr/Ba、V/

(V+Ni)、Ce_{anom}等值存在一定程度的突变，反映出界面上、下水体深度及氧化还原条件等沉积环境的变化，与小波分析划分的旋回界面相吻合（图9），如557.1 m处的SQ3-1与SQ3-2旋回界面为水下分流河道冲刷面，界面之上∑REE、w(L/HREE)、(La/Yb)N等值升高，与海平面下降导致的稀土元素物源供给增加及稀土元素分馏作用增强有关，Sr/Ba、V/(V+Ni)比值降低和Ce_{anom}值的升高指示了古水体的盐度及还原条件的减弱（图9）。

综上所述，基于测井信号的小波分析特征，可以快速且准确识别层序界面的位置，可为层序划分提供一定的依据，但对于层序界面性质及其特征，仍需结合综合垂向沉积序列、岩性特征及沉积地球化学特征等进行综合识别和分析。

4.2.2　高频层序地层格架

基于米兰科维奇周期对上二叠统高频层序的控制作用，以区域等时对比效果明显的长偏心率旋回曲线为标尺，并结合旋回沉积序列、旋回界面综合识别结果等，在研究区三级层序格架内进行高频层序划分和对比。将上二叠统划分为4个三级层序（即SQ1、SQ2、SQ3、SQ4），并进一步划分为16个四级层序（其中层序SQ1可划分SQ1-1、SQ1-2、SQ1-3、SQ1-4、SQ1-5、SQ1-6等6个四级层序），可能受到沉积过程差异性和钻井位置不同的影响，各钻井米兰科维奇旋回发育情况各异（如J1井SQ1层序顶部SQ1-6旋回因上部的分流河道冲刷侵蚀而保存较差），但划分结果整体一致（图10）。据此，此次分析的结果能够用于指导黔西晚二叠世海陆过渡相地层的高频层序划分，为地层的精细对比奠定基础。

5　结论

（1）通过对黔西盘县上二叠统测井数据进行连续小波变换和频谱分析，发现沉积地层中米兰科维奇旋回特征明显，地层旋回厚度比值与米兰科维奇旋回的周期比值之间具有很好的对应关系，因此，可以认为米氏旋回是控制上二叠统高频旋回发育的主要因素，其中以长偏心率周期的影响最强。由长偏心率（405 ka）、短偏心率

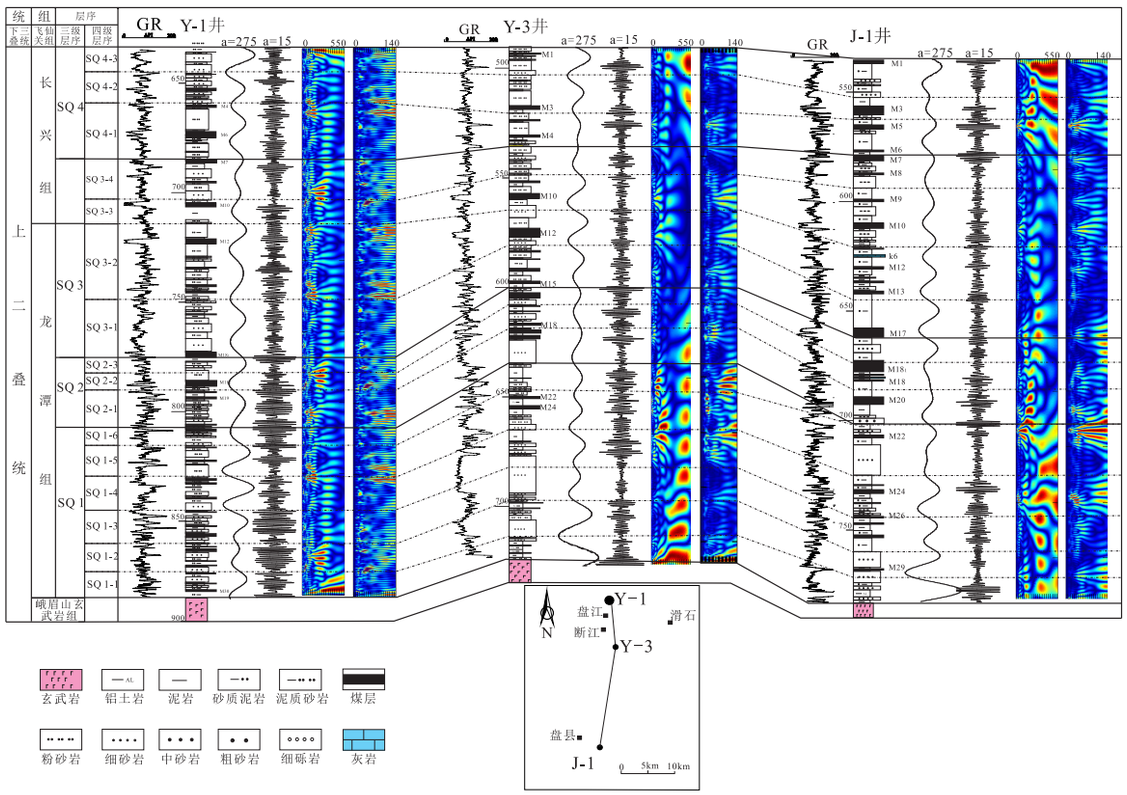


图10　黔西盘县地区上二叠统高频层序地层格架

Fig. 10　Stratigraphic framework of high-frequency sequences of the Upper Permian in Panxian County

（123 ka）、斜率（44 ka）和岁差周期（21 ka）引起的地层旋回厚度分别为16.06~17.24 m、5.39~5.70 m、2.11~2.15 m、1.12~1.21 m。

（2）通过对上二叠统GR测井曲线进行滤波分析，提取出长偏心率周期（405 ka）小波滤波曲线为天文调谐曲线，短偏心率周期（123 ka）小波滤波曲线为辅助曲线，建立了上二叠统煤系“浮动”天文年代标尺。在研究区上二叠统含煤地层中识别出16个长偏心率周期和52个短偏心率周期，估算出其沉积时限约为6.48 Ma，推算出含煤地层底界面年龄约为258.65 Ma。基于地层中稳定发育的米兰科维奇旋回对高频层序的控制作用，以区域等时对比效果明显的长偏心率旋回作为高频层序划分的时间标尺，并结合旋回沉积序列、旋回界面特征等，将上二叠统划分为4个三级层序，并进一步划分为16个四级层序，建立了研究区上二叠统煤系高频层序地层格架。

（3）黔西盘县上二叠统煤系“浮动”天文年代标尺和高频层序地层格架建立，有助于实现黔西海陆过渡相地层的高精度对比，以及对同沉积火山事件和生物灭绝事件的形成时限做出精确的估计。同时，为确定黔西地区晚二叠世各期的界线年龄提供重要参考，与其他华南地区形成对比。

参考文献（References）：

陈代钊. 1997. 河流沉积占优势地层中高频层序地层—以贵州盘县西部龙潭组为例[J]. 地质科学，32(4): 432–444.

龚一鸣，徐冉，汤中道，等. 2004. 广西上泥盆统轨道旋回地层与牙形石带的数字定年[J]. 中国科学（D辑），34(7): 635–643.

顾尚义. 2006. 煤系地层中火山灰蚀变粘土研究综述[J]. 贵州地质，23(2): 114–118.

黄春菊. 2014. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状[J]. 地学前缘，21(2): 48–66.

贾珍臻，林承焰，远光辉. 2013. 基于高分辨率层序地层学的测井曲线小波分析模型[J]. 现代地质，27(2): 397–404.

金之钧，范国章，刘国臣. 1999. 一种地层精细定年的新方法[J]. 地球科学，24(4): 379–382.

李凤杰，郑荣才，罗清林，等. 2007. 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，36(6): 805–810.

梅冥相，马永生，邓军，等. 2005. 滇黔桂盆地及其邻区石炭纪至二叠纪层序地层格架及三级海平面变化的全球对比[J]. 中国地质，32(1): 13–22.

邵龙义，张鹏飞. 1997. 论幕式聚煤作用及含煤岩系层序地层学研究[C]// 中国石油学会层序地层学及其在油气勘探开发中的应用学术研讨会.

沈玉林，秦勇，郭英海，等. 2012. 黔西上二叠统含煤层气系统特征及其沉积控制[J]. 高校地质学报，18(3): 427–432.

石广玉，刘玉芝. 2006. 地球气候变化的米兰科维奇理论研究进展[J]. 地球科学进展，21(3): 278–285.

王成善，陈洪德，寿建峰，等. 1999. 中国南方二叠纪层序地层划分与对比[J]. 沉积学报，17 (4): 499–509.

王鸿祯，史晓颖，王训练，等. 2000. 中国层序地层研究[M]. 广州: 广东科技出版社.

王志坤，钟建华，郑希民. 2008. 基于小波振幅谱和复小波相位谱的高分辨率层序划分[J]. 石油学报，29(6): 865–869.

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

吴怀春，张世红，黄清华. 2008. 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，15(4): 159–169.

吴怀春，钟阳阳，房强，等. 2017. 古生代旋回地层学与天文地质年代表[J]. 矿物岩石地球化学通报，36(5): 750–770.

夏文臣，周杰，葛立刚，等. 1994. 华南二叠—三叠系的成因地层序列及古特提斯海重建[J]. 地球科学: 中国地质大学学报，19(5): 663–675.

徐彬彬，何明德. 2003. 贵州煤田地质[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社.

徐义刚，何斌，罗震宇，等. 2013. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报，32(1): 25–39.

殷鸿福，宋海军. 2013. 古、中生代之交生物大灭绝与泛大陆聚合[J]. 中国科学（D辑），43(10): 1539–1552.

殷鸿福. 1994. 二叠系—三叠系研究的进展[J]. 地球科学进展，9(2): 1–10.

余继峰，于泳，付文钊，等. 2011. 测井数据Matlab插值与地质旋回性分析应用[J]. 煤炭学报，36(10): 1679–1682

袁学旭，郭英海，沈玉林，等. 2013. 以米兰科维奇周期为约束的层序地层划分研究[J]. 煤炭科学技术，41(12): 105–109.

郑荣才，彭军，吴朝容. 2001. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报，19(2): 249–255.

郑荣才，彭军. 2002. 陕北志丹三角洲长6油层组高分辨率层序分析与等时对比[J]. 沉积学报，20(1): 92–100.

周义平，任友谅. 1994. 滇东黔西晚二叠世煤系中火山灰蚀变粘土岩的元素地球化学特征[J]. 沉积学报，12(2): 123–132.

Benton M J and Twitchett R J. 2003. How to kill (almost) all life: the end-Permian extinction event [J]. Trends in Ecology & Evolution, 18(7): 358–365.

Berger A, Loutre M F and Laskar J. 1992. Stability of the astronomical frequencies over the earth's history for Paleoclimate studies [J]. Science, 255(5044): 560–566.

Erwin D H. 1994. The Great Paleozoic Crisis: Life and Death in the Permian [M]. New York: Columbia University Press.

Hallam A and Miller A I. 1988. Extinction and survival in the Bivalvia [C]// Larwood G P, eds, Extinction and Survival in the Fossil Record Oxford: Clarendon Press.

Hilgen F J, Krijgsman W, Langereis C G, et al. 2013. Breakthrough made in dating of the geological record [J]. Eos Transactions American

Geophysical Union, 78(28): 285–289.

Hinnov L A and Ogg J G. 2007. Cyclostratigraphy and the astronomical time scale [J]. Stratigraphy, 4(2–3): 239–251.

Hinnov L A. 2003. New perspectives on orbitally forced stratigraphy [J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 28(1): 419–475.

Jin Y G, Shen S Z, Henderson C M, et al. 2006. The global stratotype section and point (GSSP) for the boundary between the Capitanian and Wuchiapingian Stage (Permian) [J]. Episodes, 29(4): 253–262.

Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. 2004. A Long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth [J]. Astronomy & Astrophysics, 428 (1): 261–285.

Liu Z, Ye C and Yuan L. 2001. The paleoclimate change of Qaidam Basin during the last 2.85 Ma recorded by Gamma-ray logging [J]. Science in China(D), 44(2): 133–145.

Nakazawa K and Runnegar B. 1973. The Permian–triassic boundary: A crisis for bivalves? [C]// Logan A, Hills L V, eds. The Permian and Triassic systems and their mutual boundary, memoirs Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists.

Prokoph A, Villeneuve M, Agterberg F P, et al. 2001. Geochronology and calibration of global Milankovitch cyclicity at the Cenomanian-Turonian boundary [J]. Geology, 29(6): 523–526.

Wang H, Shao L Y, Hao L M, et al. 2011. Sedimentology and sequence stratigraphy of the Lopingian (Late Permian) coal measures in southwestern China [J]. International Journal of Coal Geology, 85(10): 168–183.

Weedon G. 2003. Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy [M]. Cambridge: Cambridge University Press.

Wu H, Zhang S, Hinnov L A, et al. 2013. Time-calibrated Milankovitch cycles for the late Permian [J]. Nature Communications, 4(1): 2452.

Yin H F. 1983. Bivalves near the Permian-Triassic boundary in south China [J]. Journal of Paleontology, 59(3): 572–600.

Yu J F, Sui F G, Li Z X, et al. 2008. Recognition of Milankovitch cycles in the stratigraphic record: application of the CWT and the FFT to well-log data [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 18(4): 594–598.

Yuan X, Guo Y, Yu J, et al. 2013. Correlation and analysis of well-log sequence with Milankovitch cycles as rulers: a case study of coal-bearing strata of late Permian in western Guizhou [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 23(4): 563–568.