旋回频率曲线在幕式聚煤作用研究中的应用 ——以西南地区上二叠统为例*

郝黎明 邵龙义 时宗波 张鹏飞 (中国矿业大学(北京校区)资源开发工程系,北京 100083)

摘 要 海平面的变化是旋回性沉积作用的重要控制因素。在克拉通盆地滨海平原沉积背景中,海岸线附近的沉积环境受海平面变化影响最为明显,旋回性沉积作用易留下证据。而在远离海岸线的内陆或滨外较深水地区,海平面的变化一般难以引起沉积环境的明显变化,因而其旋回性沉积作用不甚明显。反映在旋回的数量上,海岸线附近的旋回数目比远离海岸线地区的旋回数目要多得多。海岸线附近一般是最有利的聚煤场所,所以某一时期的旋回频率曲线中的峰值所在地区即是该时期聚煤中心所在位置。在三级海平面变化范围内,从低位、海侵到高位层序组,旋回峰值区会随着海平面的变化而变化,据此可以识别聚煤中心的迁移规律。本文在介绍了海平面变化与聚煤作用的关系及旋回频率曲线的方法原理基础上,利用旋回频率曲线法研究了西南地区晚二叠世的幕式聚煤作用,划分了不同级别的聚煤作用幕,识别出了不同时期聚煤作用幕的聚煤范围。此外,通过对比不同期次的聚煤作用幕,得出了不同期聚煤作用幕聚煤中心的迁移规律。依据高分辨率层序地层学原理,将贵州西部晚二叠世含煤岩系划分为3个三级复合层序及16个四级层序,每个三级复合层序中又分为低位、海侵和高位层序组,在此基础上,进一步建立了不同层序组及不同复合层序的旋回频率曲线,并根据其峰值的位置分析了相应聚煤中心的变化。

关键词 旋回频率曲线 幕式聚煤作用 层序地层学 晚二叠世 贵州省 第一作者简介 郝黎明,男,1973 年生,博士研究生,主要从事沉积学和层序地层学研究。

近年来,海侵过程成煤已经为多数学者所认同^[1-5],层序地层学方法也已经被尝试用于聚煤规律的研究。层序地层格架的建立为研究聚煤中心的迁移规律、幕式聚煤作用以及在聚煤盆地中进一步寻找富煤带等提供了科学依据。本文拟利用旋回频率曲线法研究西南地区晚二叠世的幕式聚煤作用。

旋回频率曲线是指在一个沉积倾向方向上不同位置的沉积旋回数量分布曲线,它是根据 海平面变化对旋回性沉积作用的影响的原理,并在层序地层格架分析基础之上建立的。根据 含煤盆地的旋回频率曲线可以有效地判定古海岸线位置、聚煤中心位置及有利的聚煤区等。

1 幕式聚煤作用

所谓海侵过程成煤,是指聚煤作用主要发生于海平面上升阶段,此时区域基准面随着海平面的上升而上升,从而提供了有利于成煤的可容空间,使得厚煤层得以聚集。研究表明,在海

^{*} 国家自然科学基金(49772129)资助项目部分成果。

收稿日期:2000年6月30日 改回日期:2000年7月17日

泛期可能形成一个沉积旋回中分布最广泛的煤层,而且在最大海泛期可能形成沉积旋回中最厚的煤层或灰岩层^[2,3]。对桂中晚二叠世海相碳酸盐岩型煤系的研究表明,最大海泛期在碳酸盐台地背景中可能形成沉积旋回中最薄的煤层^[6]。对于海陆过渡相环境,有关的研究表明,海陆过渡相三角洲环境中的煤(泥炭)一般堆积于高位沼泽中(raised mires)^[7],这种高位沼泽的发育与海侵密切相关。更进一步的研究表明,大面积分布的、以海相石灰岩或含化石泥岩为顶板的含煤旋回中的煤层多是在海平面抬升过程中形成的^[8]。晚二叠世期间,西南地区(滇东、黔西、川南等地)为典型的克拉通盆地海陆过渡相环境,在这一地区,最大海泛期能够形成向陆地方向延伸最广泛的煤层或灰岩层^[5]。

1992年,邵龙义等在研究中国南方石炭、二叠系时,注意到海陆交互相环境中的一些厚煤层横跨不同相区呈大面积分布(数百至数千平方公里),同时也注意到有些大面积连续展布的煤层的形成环境与煤层下伏沉积物的沉积环境并没有必然的联系,提出了"幕式聚煤作用(episodic coal accumulation)"概念^[4,9],用以表示这种横跨不同相区的大面积的聚煤作用。这种大范围的聚煤作用是由区域性的甚至全球性的海平面(基准面)变化引起的,它可以跨越不同的亚环境、不同的沉积相带甚至不同的盆地。这一理论强调海平面幕式上升期间滨岸平原环境的聚煤作用和幕式聚煤作用的同期性。

幕式聚煤作用和海平面变化密切相关。在幕式聚煤作用发生期间,一次沉积事件和其中所包含的若干个次一级的沉积事件都可能形成具有一定分布规模的煤层。大规模的海侵事件(如三级或二级海侵事件)所形成的煤层常常具有大区域的或盆地范围的分布规模,而在次一级海侵过程(如四级或四级以下的海侵事件)中形成的煤层则具有较小区域的分布规模。前者相当于层序地层学和成因地层学中的最大海泛期沉积,后者则相当于一个正常的海泛面沉积。因此,大范围分布的厚煤层多是主要幕式聚煤期的产物,代表最大海泛面沉积,而较小范围展布的煤层则是次一级幕式聚煤作用期的产物,代表正常海泛面沉积。在两次大规模海侵事件之间,可能会发生多次的次级海侵事件,形成多个次级的聚煤作用幕,而多个次级聚煤作用幕的叠加则形成了更高级别的聚煤作用幕。

幕式聚煤作用与层序地层学原理相结合,可以划分出对应于不同级别海平面变化的聚煤作用幕,并在层序地层格架中预测一次海平面变化旋回中聚煤中心的迁移规律及煤层的展布规模等。

2 旋回频率曲线叠加法的原理与工作方法

旋回频率曲线叠加法是基于这样的事实提出的,在克拉通盆地滨岸地区,由海平面变化引起的沉积环境的变化对于聚煤作用有着重要的影响,正如幕式聚煤作用理论所强调的,在海平面上升期间,滨岸地区的聚煤作用是极为重要的。因为在这一地区,海平面的升降会导致沉积环境发生相应的改变,而正是这种改变,使本来不具备成煤条件的地区有可能变为有利的聚煤区,也可以使本来有利成煤的地区变为不利成煤的地区。

在岸线向陆方向,海平面的抬升为泥炭堆积提供了合适的可容空间。如果海平面(基准面)的抬升速率与泥炭的堆积速率相适应,泥炭就可持续堆积,形成较厚的煤层。这种情况一般出现在海平面上升速度较快的情况下^[10]。在此期间,有利的聚煤区就可形成,直到海平面抬升速率大大超过泥炭堆积速率,泥炭被淹没为止。

在岸线向海方向,海平面的下降会使本来不适于泥炭堆积的淹没区变浅,甚至出露地表, 形成暴露面。当海平面再次抬升时,如果海平面抬升速率和泥炭的堆积速率配置得当,泥炭即 可发生持续堆积,这样的地区也可成为有利的聚煤区,这种情况一般出现在海平面上升速率较 低的情况下。

一般来说,在海平面上升期间,滨岸地区不论是靠陆一侧,还是靠海一侧,都可能呈现旋回性的沉积特征。反之,在远离岸线的陆地和海水较深地区,海平面的一般变化难以使其沉积环境发生相应的改变,有利的聚煤环境难以出现,在这种情况下,能够形成的含煤沉积旋回的个数也就较少,从而形成较为稳定、单一的沉积序列。

考虑到上述因素,通过研究不同地区钻孔(或野外实测剖面)的旋回性,可以了解到海平面变化的信息。通过对比多个这样的点上的信息,就可以直观地得到一个区域范围内海平面的变化情况,进而了解该地区的聚煤中心的迁移规律以及聚煤作用幕的分布范围。

旋回频率曲线叠加法可按以下工作流程进行:①选取合适的钻孔或野外实测剖面,依据各种等时性标志,建立区域性层序地层格架,一般要求建立到四级层序或准层序;②分别统计剖面上各钻孔四级层序内的五级含煤旋回个数,以钻孔点(剖面点)位置为横坐标,钻孔点(剖面点)的五级含煤旋回个数为纵坐标,绘制横向上每个四级层序中五级含煤旋回个数的分布情况图,可做成多条四级层序的含煤旋回频率曲线;③四级层序的含煤旋回频率曲线的峰值地区(旋回个数最多处)代表了四级海岸线附近的位置,是有利的聚煤区,同时也代表四级聚煤中心;不同期次四级层序的含煤旋回频率曲线的对比,可以反映出四级海平面的升降情况,从而反映出四级聚煤中心的迁移情况;④叠加多个不同期次四级层序的含煤旋回频率曲线可构成三级复合层序的含煤旋回频率曲线;多个不同期次三级复合层序的含煤旋回频率曲线对比可反映出三级海平面变化的情况,从而反映出三级聚煤中心的变迁。

利用这种方法可以较为准确地确定各级别海平面变化所波及的范围,从而划分各聚煤作用幕、确定聚煤中心,同时可以较为准确地判断各级海侵的最大海泛面,并进一步预测富煤带的特征。

3 应用实例:西南地区晚二叠世聚煤作用幕的变迁

3.1 高分辨率层序地层格架的建立

研究区主要为贵州中西部地区,它们在构造上属于晚古生代华南板块克拉通盆地的一部分。本区上二叠统岩石地层分为:龙潭组(吴家坪组、宣威组中下段)和长兴组(汪家寨组、大隆组和宣威组上段)。其中龙潭组又被细分为上段和下段。从年代地层来看,龙潭组和长兴组分别属于晚二叠世龙潭阶和长兴阶[11]。

晚二叠世本区沉积环境总体趋势是自西向东,受海水的影响依次增大。

- (1) 黔西西部(水城一盘县盘关地区) 本区以细砂岩、粉砂质泥岩为主,砂岩成熟度较低,层理较发育,并富含植物化石碎片、菱铁矿结核。碳酸盐岩含量很少,共含煤层 20 层以上,煤层平均厚度不大,一般在 1.5 m 以下。本区以上三角洲平原河流沉积体系为主。
- (2) 黔西中部(六枝一织金地区) 本区以细砂岩、粉砂岩、煤为主,并含一定数量的碳酸盐岩。煤层层数达 37 层以上。砂岩中见微波状层理、羽状交错层理、潮汐纹层等,含植物化石碎片,菱铁矿结核。含 13 层灰岩标志层,见动物化石。本区为下三角洲平原潮坪体系。

(3) 黔西东部(安顺轿子山及其以东地区) 本区碳酸盐岩含量大大增高,常见巨厚灰岩层,含丰富的动物化石。碎屑岩以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,见缓波状层理和水平层理等,常见菱铁质结核,偶见植物化石碎片。在安顺轿子山地区含煤 16~19 层,至贵阳一带尚不足 10 层。显然,本区已属碳酸盐岩台地和碎屑岩潮坪过渡环境。

关于西南地区晚二叠世高分辨率层序地层的研究,我们共选取了研究区内 11 个钻孔及野外实测剖面建立横向对比剖面,自西向东分别是:威宁哈喇河实测剖面、水城大湾 P11-3 钻孔、水城汪家寨实测剖面、水城老鹰山 CKI-1 钻孔、纳雍坐拱 19-3 钻孔、织金珠藏实测剖面、安顺轿子山实测剖面、平坝谷豹 CK53-8 钻孔、贵阳都拉营实测剖面、贵定闻江寺剖面及福泉凤山 CT8 钻孔,具体位置见图 1 所示。

在高频旋回研究的基础之上,本区可识别出 16 个四级含煤层序,而四级含煤层序由其内部的五级含煤旋回叠置而成。在四级含煤层序中,各层序以根土岩为顶,煤和海相层为底(如果有下切谷充填沉积发育时,则四级层序底界位于下切谷充填沉积的底部)。其中,煤层代表海侵体系域沉积,上覆的石灰岩和碎屑岩为高水位体系域沉积。四级最大海泛面沉积物为上覆于煤层的灰岩层底界。

四级层序以不同的叠置方式构成 3 个三级复合层序(即层序 I、层序 II 和层序 III),按其叠置方式可在每个三级复合层序中识别出低位层序组(LS)、海侵层序组(TS)和高位层序组(HS)。每一个三级复合层序底界为厚层的下切谷砂体组,而三级最大海泛面则为向陆地方向(西)展布最广的碳酸盐岩层或含化石泥岩层(图 1)。

总体层序格架特征为:在西部威宁至水城汪家寨一带,层序 I 内高位层序组发育不完整或被上覆的下切河流砂体切割和充填,本区煤层数量少且薄,主要发育在层序 III 的海侵层序组和高位层序组内;中部纳雍至织金一带,层序发育最为完整,沉积旋回性最好,四级层序组组合完整,界面清晰,煤层数量多且厚度较大,低位层序组、海侵层序组和高位层序组内均发育有煤层,但以海侵层序组内为主;安顺至贵阳一带,层序发育较完整,低位层序组厚度变薄,煤层数量剧降,煤层主要发育在高位层序组内,个别发育在海侵层序组内;贵阳以东地区,基本为连续的碳酸盐岩沉积,几乎无煤层发育,沉积旋回性不明显。

3.2 旋回频率曲线的建立

限于篇幅,本文仅讨论三级复合层序及三级复合层序中各层序组级别的旋回频率曲线特征。研究区层序地层格架建立之后,统计了3个三级复合层序内各层序组的五级含煤旋回数(表1),在此基础上,作出了三级复合层序内各层序组的含煤旋回频率曲线(图2—图4)。

图 2一图 4 中,各曲线的最大值处代表当时的聚煤中心,即聚煤作用最活跃的地区,这 3 幅图分别反映了各个三级复合层序内的三级层序组级别的聚煤中心迁移状况。实际上,图中的每条曲线代表了一个对应于三级层序组级别的聚煤作用幕。分析可知,层序 I 内聚煤作用幕的迁移规律为:织金珠藏一纳雍坐拱一纳雍坐拱;层序 II 内聚煤作用幕的迁移规律为:纳雍坐拱一水城老鹰山一纳雍坐拱;层序 III 内聚煤作用幕的迁移规律为:纳雍坐拱一水城汪家寨。

叠加每个三级复合层序内三级层序组级别的含煤旋回频率曲线,可以得到3条三级复合层序的含煤旋回频率曲线(图5);叠加这3条三级复合层序的含煤旋回频率曲线,得到了研究区内整个晚二叠世期间的含煤旋回频率曲线(图5)。其中,每一条三级复合层序的含煤旋回频率曲线代表了一个三级聚煤作用幕的聚煤范围,其最大值处代表了三级聚煤作用中心的位



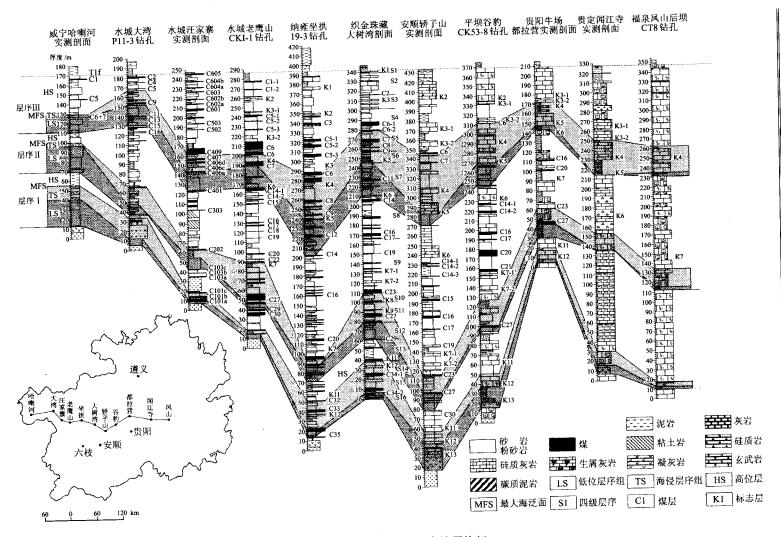


图 1 贵州西部晚二叠世层序地层格架 Fig.1 The sequence stratigraphic framework of the Late Permian in western Guizhou

| | 表1 | 贵州西部3 | 个三级复合层 | 序及层序组内五级含煤旋回数 |
|--|----|-------|--------|---------------|
|--|----|-------|--------|---------------|

| Table 1 Number of fifth-order coal | lv c | veles | in eacl | ı of | three | third-order | semience sets in | western (| Cuizhou |
|------------------------------------|------|-------|---------|------|-------|-------------|------------------|-----------|---------|
|------------------------------------|------|-------|---------|------|-------|-------------|------------------|-----------|---------|

| | | 哈喇河 | 大湾 | 汪家寨 | 老鹰山 | 坐拱 | 珠藏 | 轿子山 | 谷豹 | 都拉营 | 闻江寺 | 凤山 |
|----|----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|-----|----|
| Ш | HS | 3 | 4 | 11 | 7 | 6 | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| | TS | 1 | 2 | 4 | 1 | 6 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | LS | 0 | 3 | 0 | 1 | 4 | 2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| II | HS | 0 | 5 | 3 | 12 | 13 | 11 | 10 | 7 | 2 | 0 | 0 |
| | TS | 0 | 0 | 0 | 6 | 2 | 5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| | LS | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| I | HS | 0 | 1 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| | TS | 0 | 0 | 2 | 1 | 4 | 3 | Ó | 1 | 0 | 1 | 1 |
| | LS | 0 | 0 | 0 . | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 숌 | 计 | 4 | 15 | 23 | 31 | 42 | 33 | 18 | 13 | 3 | 2 | 2 |

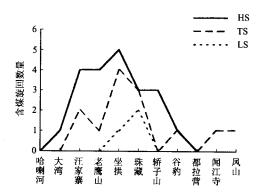


图 2 层序 I 中 3 条三级层序组级别的 含煤旋回频率曲线

Fig. 2 Three coaly cycle frequency curves corresponding to third-order sequence sets of composite sequence I

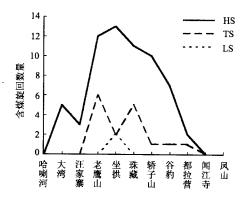


图 3 层序 II 中 3 条三级层序组级别的 含煤旋回频率曲线

Fig. 3 Three coaly cycle frequency curves corresponding to third-order sequence sets of composite sequence II

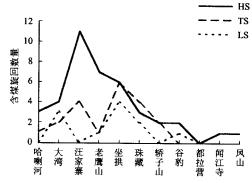


图 4 层序 III 中 3 条三级层序组级别的 含煤旋回频率曲线

Fig.4 Three coaly cycle frequency curves corresponding to third-order sequence sets of composite sequence III

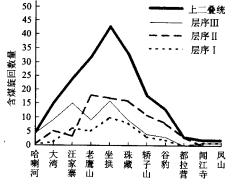


图 5 3条三级复合层序级别的及整个上二叠统的 含煤旋回频率曲线

Fig. 5 Three coaly cycle frequency curves corresponding to third-order composite sequences and a coaly cycle frequency curve corresponding to the whole Late Permian

置。分析图 5 中 3 条三级复合层序含煤旋回频率曲线和上二叠统含煤旋回频率曲线可知:研究区晚二叠世期间三级聚煤中心的迁移规律为:纳雍坐拱地区及织金珠藏地区(层序 I)→水城老鹰山及纳雍坐拱地区(层序 III);在整个晚二叠世期间,本区最主要的聚煤地区是以纳雍坐拱和织金珠藏为中心的区域。

4 结论

- (1)旋回频率曲线直观地反映了沉积旋回在横向上的变化特征和变化规律,可用来有效地 判定古海岸线位置、聚煤中心位置及有利的聚煤区等。
- (2)将旋回频率曲线应用于西南地区晚二叠世含煤盆地幕式聚煤作用研究中,结果表明,本区晚二叠世可划分出 3 个对应于三级复合层序的三级聚煤作用幕,而每个三级聚煤作用幕内包含有 3 个对应于三级层序组级别的聚煤作用幕。三级聚煤中心的迁移是三级层序组级别的聚煤中心迁移的叠加结果,受三级海平面变化的控制,三级聚煤中心迁移规律为:纳雍坐拱地区及织金珠藏地区(层序 I)→水城老鹰山及纳雍坐拱地区(层序 II)→水城汪家寨及纳雍坐拱地区(层序 III);次一级(对应三级层序组级别)聚煤作用幕的迁移规律为:织金珠藏→汪家寨→坐拱(层序 I),轿子山→老鹰山→坐拱(层序 II),坐拱→汪家寨→坐拱(层序 III)。本区晚二叠世整体来看,聚煤中心是以纳雍坐拱和织金珠藏为中心的区域。

参考文献

- 1 Arditto P A. A sequence stratigraphic analysis of the Late Permian succession in the southern Coalfield, Sydney Basin, New South Wales. Australian Journal of Earth Sciences, 1991, 38: 125 ~ 137
- 2 Aitken J F, Flint S S. The application of high resolution sequence stratigraphy to fluvial systems: A case study from the Upper Carboniferous Breathitt Group, eastern Kentucky, USA. Sedimentology, 1995, 42: 3 ~ 30
- 3 Flint S S, Aitken J F, Hampson G. Application of sequence stratigraphy to coal-bearing coastal plain successions: implications for the UK coal measures. In: Whateley M K G, Spears D A, eds. European Coal Geology. London: Geological Society, Special Publication, 1995, (82): 1~16
- 4 邵龙义,张鹏飞,刘钦甫,郑茂杰.湘中下石炭统测水组沉积层序及幕式聚煤作用.地质论评,1992,38
- 5 Shao Longyi, Hao Liming, Yang Lijun, Zhang Pengfei, Tian Baolin. High resolution sequence stratigraphy of the Late Permian coal measures in southwestern China. In: Xie H, Golosinski TS, eds. Mining Science and Technology '99. Rotterdam; A. A. Balkema, 1999. 239 ~ 242
- 6 Shao Longyi, Hao Liming. A sequence stratigraphic model for carbonate coal measures; An example from the Late Permian Heshan Formation in central Guangxi. Programme with Abstracts, the XIV International Congress on the Carboniferous-Permian. Alberta; University of Calgary, 1999. 132
- 7 McCabe P J. Depositional models of coal and coal-bearing strata. In: Rahamani R A, Flores R M, eds. Sedimentology of Coal and Coal-bearing Sequences. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 1984, 7: 13 ~ 42
- 8 Diessel C F K. Coal-bearing depositional systems—coal facies and depositional environments. New York; Springer-Verlag, 1992
- 9 邵龙义,张鹏飞,田宝霖,谢晓东,刘崇荣. 黔西织纳地区晚二叠世含煤岩系层序地层及海平面变化.地学

探索,1993,第8辑:1~10

- 10 Aitken J F. Coal in a sequence stratigraphic framework. Geoscientist, 1994, 4(5): $9 \sim 12$
- 11 田宝霖,张鹏飞,邵龙义,金奎励,任德贻,梅美棠.川南、黔西、滇东晚二叠世煤田分布规律与沉积环境.北京:中国矿业大学北京校区内部研究资料,1990

THE APPLICATION OF DEPOSITIONAL CYCLE FREQUENCY CURVE TO EPISODIC COAL ACCUMULATION: WITH AN EXAMPLE FROM THE UPPER PERMIAN IN SOUTHWEST CHINA

Hao Liming Shao Longyi Shi Zongbo Zhang Pengfei (Department of Resource Development Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

Abstract

Sea level changes are one of the important controlling factors for cyclic sedimentation. In cratonic coastal plain settings, depositional environments in the vicinity of the shoreline are very easily to be influenced by sea level changes, resulting in obvious cyclic sedimentation, while depositional environments far away from the shoreline, either landward or seaward, do not vary much with sea level changes. As a result, the cycles in the shoreline area show higher frequency than those in the area far away from the shoreline. Generally, the shoreline area is the favorable site for coal accumulation, so the area with the maximum number of depositional cycles is the coal accumulation center. Therefore, in a cycle frequency curve, the maximum frequency is corresponding to the coal accumulation center. However, location of this maximum frequency varies from lowstand, transgressive to highstand sequence sets in a third-order sea level change. This variation allows us to identify migrating regularity of the coal accumulation center. According to the high resolution sequence stratigraphic analysis, the Late Permian in western Guizhou is subdivided into 3 third-order composite sequences and 16 fourth-order sequences, and each third-order composite sequence is composed of lowstand, transgressive and highstand sequence sets. In this paper, cycle frequency curves corresponding to different sequence sets and different composite sequences are reconstructed and migrating regularity of the coal accumulation center are analyzed.

Key words cycle frequency curve, episodic coal accumulation, sequence stratigraphy, Late Permian, Guizhou Province

About the first author Hao Liming, born in 1973, obtained his MSc from the University of Petroleum (Beijing) in 1998, is currently a Ph.D. student at China University of Mining and Technology, and is engaged in sedimentology and sequence stratigraphy.

(责任编辑:穆惠珍)