

文章编号: 1000-0550(2009) 05-0904-11

中国含煤岩系层序地层学研究进展¹

邵龙义 鲁 静 汪 浩 张鹏飞

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院 北京 100083)

摘 要 层序地层学理论为人们理解聚煤作用模式提供了新的思路。通过近二十年的研究,人们认识到含煤岩系旋回性与不同级别的全球海平面变化规律密切相关,认识到有工业价值的煤层形成于基准面(海平面)抬升过程,相继提出幕式聚煤作用、海侵过程成煤、事件成煤作用、海相层滞后阶段聚煤等基于层序地层分析的聚煤作用理论。同时概括出层序地层格架下基于可容空间增加速率与泥炭堆积速率的关系的厚煤层聚集模式。今后的研究将会进一步对不同构造背景下的含煤岩系层序地层格架样式、层序地层格架下的优质煤炭资源聚集模式、煤层在地球演化的长周期过程中的地质意义等方面进行探索,此外,针对中国五大聚煤区的成煤时期及盆地构造背景的特殊性,中国学者还会进一步总结其层序地层格架样式以及聚煤模式,并将其用于指导中国优质煤炭资源预测。

关键词 含煤岩系 层序地层 聚煤模式

第一作者简介 邵龙义 男 1964 年出生 博士 教授 沉积学和煤田地质学 E-mail shao@cumt.edu.cn

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

近年来,层序地层学作为一种新的盆地分析方法,受到广大地质学家尤其是油气地质学家的重视,有关高分辨层序地层学技术的研究如雨后春笋般的涌现出来,层序地层学已从原来的地震地层学的概念发展到如今的比地震地层分辨率更高的以研究第四和第五级准层序为主的“高分辨率层序地层学研究方法”(High Resolution Sequence Stratigraphy)。尤其是露头规模的高分辨率层序地层学的研究已经成功地用于地下相及矿产资源的预测,已经在很大程度上改进了人们对岩相几何形态及储层分布格架的认识的准确性。总之,层序地层学已经发展成油气勘探及科学研究的一种强大的、具预测功能的相分析工具手段。这些新的沉积学研究方法已渗透到含煤岩系研究中,并促使含煤岩系沉积学迅猛地向前发展^[1-6]。

中国学者在含煤岩系层序地层学研究虽只有短短的十余年时间,但是已经取得令人瞩目的研究成果^[7-10]。我国学者针对近海型煤系层序地层分析的方法原理进行了大量实例研究,对聚煤模式有了进一步的认识,例如提出幕式聚煤作用^[11-13]、盆控型泥炭沼泽体系^[14]、海侵过程成煤^[15]、海侵事件成煤^[16-17]以及海相层滞后时段聚煤^[5,6,18]等理论。对陆相含煤盆地层序地层学亦进行了尝试性研究^[19-22]。本文即在对国内外含煤岩系层序地层学成果进行分析的基础上,对含煤岩系层序地层学研究进展及层序地层格

架下的聚煤模式做一概要总结。

1 含煤岩系层序地层学研究简史

层序地层学(Sequence Stratigraphy)主要是研究以侵蚀面、无沉积面或与其可对比的整合面为界的,成因上相关的地层之间的相互关系,它是研究可在全球范围内确定年代地层格架的方法的学科。层序地层学中的四个基本控制因素是全球海平面变化、盆地沉降、沉积物供给以及气候变化^[23],其中,盆地沉降作用与全球海平面变化相结合则会导致相对海平面变化,相对海平面变化进一步控制可容空间的变化,后者与沉积物供给相结合控制了沉积层序的形成。

层序地层学孕育于上世纪 40 年代, Sloss 在 1948 年北美地质学会年会关于沉积相和地质历史研讨会上提出以区域不整合面划分的北美地台的“地层层序”,这标志着“层序”这一概念的萌发。上世纪 50 年代末和 60 年代初, Sloss, K umbein, D apples 等人创造性地将北美稳定克拉通上的地层记录,从前寒武纪晚期至全新世地层划分成以区域不整合面为边界的 6 套地层层序,并把层序定义为“比群和超群更高一级的岩石地层学单位”。系统的层序地层学理论诞生于上世纪 80 年代末期, 1988 年, 威尔格斯等^[24]主编特刊《海平面变化综合分析》以及 Sangree, Van Wagoner 和 Mitchum 等人发表的层序地层学文献, 标

¹ 国家重点基础研究发展规划项目(批准号: 2006CB202202)及国家自然科学基金项目(批准号: 40672103, 40172050, 49772129, 49202028)资助。
收稿日期: 2009-07-22 收修修改稿日期: 2009-08-27

志着层序地层学的诞生。Van Wagoner 等^[25, 26]、Posamentier 等^[27]以及 Mitchum^[28]提出层序地层学的概念体系, 将旋回层的全球性特征与自旋回局部性变异的灵活性很好地结合起来, 为建立全球性等时地层格架及全球性盆地演化提供了坚实的理论基础^[29, 30]。

层序地层学研究主要包括两个方面的内容: 一是全球绝对海平面变化曲线的建立和对比^[23, 29, 30]; 二是在等时性地层序列中的岩性特征预测。在第一个方面, Haq 在提出中生代全球变化曲线的基础上, 进一步总结出古生代的海平面变化曲线, 特别是充分考虑了不同学者在不同地区所获得的古生物、古地磁及放射性等测年资料的应用。尽管全球性海平面变化曲线受到不少学者的质疑和批评, 但是在那些年代资料很少或根本就没有年代资料的盆地中, 全球海平面变化曲线对这些地区的层序地层划分还是有价值的。第二个方面, 层序地层学作为盆地分析及岩相预测方面, 以及作为揭示盆地充填历史工具方面, 有其明显的优势, 目前已经有大量的研究对不同构造背景的盆地的层序地层模式进行了探讨。层序的概念其实也经历了多次的反复, 最近, Catuneanu 等^[31, 32]针对不

同层序地层学派观点, 集中对层序地层的概念、方法及层序控制机理进行了系统总结, 在 Posamentier/Van Wagoner/Haq 等的观点的基础上, 重新厘定了层序的概念, 以一次基准面旋回中的强迫海退结束、海退结束、海侵结束、强迫海退开始等四次事件为界, 将一个层序划分为低位正常海退 (LNR)、海侵 (T)、高位正常海退 (HNR) 以及强迫海退 (FR) 等体系域类型, 从而使得层序的概念更加清晰化 (图 1)。

受层序地层学理论的影响, 煤田地质工作者亦对煤及含煤岩系的形成进行了重新思考, McCabe^[33]提出煤层形成与其底板的根土岩没有必然的成因联系, 提出厚层的低灰、低硫煤层形成于突起的泥炭地。基于对北美东部的阿巴拉契亚地区的宾夕法尼亚纪^[1, 2, 34, 35]、北美西部白垩纪^[36]、欧洲北部地区的宾夕法尼亚纪^[37]及侏罗纪^[38]、澳洲东部的二叠纪^[39, 40]等, 许多地质学家都已认识到有工业价值的煤层形成于基准面抬升过程, 大多数大面积分布的厚煤层常常出现在最大海侵点处或其附近^[34, 41, 2]。总之, 在层序地层学思想的影响下, 煤田地质学家注意到含煤岩系中大量存在的在整个盆地范围甚至全球性分布的沉

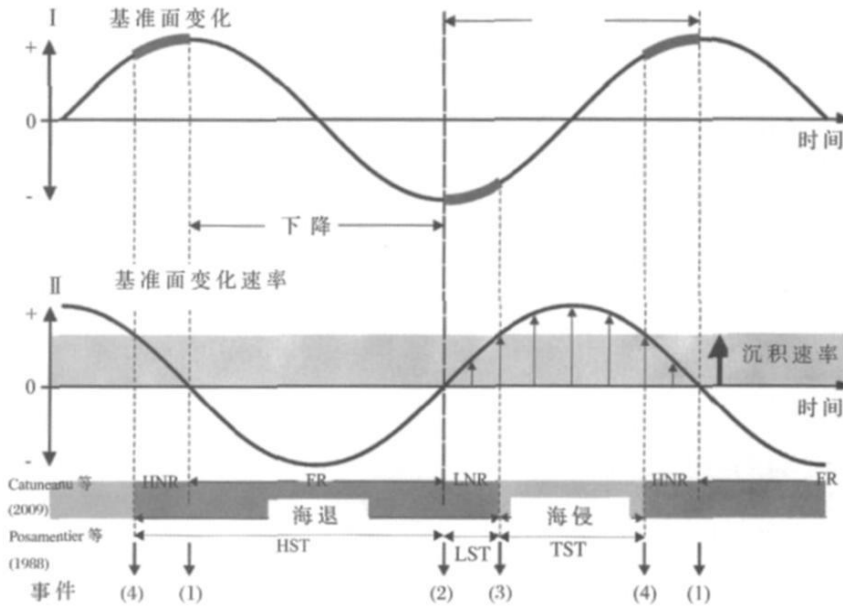


图 1 层序地层中受滨岸带的基准面变化和沉积作用相互作用而限定的海侵、正常海退及强迫海退的概念模式

(据 Catuneanu 2006 Catuneanu 等, 2009 有修改)

FR - 强迫海退; LNR - 低位正常海退; HNR - 高位正常海退。基准面旋回中的四次事件:

(1) 强迫海退开始; (2) 强迫海退结束; (3) 海退结束; (4) 海侵结束。

Fig 1 Concepts of transgression, normal regression, and forced regression, as defined by the interplay of base-level changes and sedimentation at the shoreline (modified after Catuneanu 2006 and Catuneanu et al., 2009)

FR-forced regression LNR-low stand normal regression HNR-high stand normal regression The four events of the base-level cycle:

(1) onset of forced regression (2) end of forced regression (3) end of regression (4) end of transgression

积特征或煤层的成因,只能用盆地动力机制或其他一些异旋回机制来解释。层序地层学与旋回地层学相结合,所建立的层序地层格架、旋回序列及其所反映的海平面变化规律等,则可为含煤岩系年代地层、旋回性沉积模式、盆地演化及盆地中岩相分布等的分析提供可靠依据。因此,也可以说,层序地层学的出现极大地推动了聚煤作用理论的发展。

2 基于层序地层格架的成煤模式研究

含煤岩系沉积学研究经历了旋回层、沉积模式及现在的层序地层学等研究阶段^[42 43 5]。Fem^[44]、Home等^[45]针对阿巴拉契亚山区晚石炭世含煤岩系,建立起著名的阿勒格尼三角洲聚煤模式,此后,包括河流—三角洲、障壁—泻湖、潮坪、湖泊等在内的各种含煤岩系沉积模式被提出。20世纪80年代以来,我国学者利用沉积模式理论先后对我国华南、华北、西北、东北、滇藏等聚煤区,从石炭—二叠纪、中生代、新生代等不同时期的含煤岩系的沉积环境、沉积相古地理及聚煤规律进行了系统分析,总结出我国南方早石炭世障壁岛—泻湖成煤模式、南方晚二叠世三角洲—潮坪—碳酸盐台地成煤模式、华北石炭二叠纪的多堡岛成煤模式及河流—三角洲成煤模式、西北侏罗纪湖盆及湖泊三角洲成煤模式、东北白垩纪的断陷湖盆成煤模式^[46-57]。同时还对成煤环境进行了比较沉积学研究^[58],总结出中国含煤岩系的各种沉积模式。这些成果对认识中国各聚煤区的沉积古地理及聚煤规律、以及全国范围的煤田预测起到了关键的作用。

但是,以前的成煤模式多是强调泥炭形成于与活跃的陆源碎屑沉积作用带相邻的低位沼泽地区,这些模式不能解释含煤岩系的一系列特征,例如:为什么广泛分布的煤层以旋回性的方式出现在岩石序列中?被研究的煤层的顶、底板岩性及其在盆地范围内是如何变化的?为什么煤层向某一特定方向尖灭或分叉?为什么同一层煤的煤质会有很大变化以及如何变化的?特别是煤层在沉积序列中的位置以及煤层的一些特性在垂向上和横向上如何变化——只能通过煤岩学和地球化学特征与层序地层构架相结合才能回答^[59]。McCabe^[60]对沉积模式理论提出异议,认为这些立足于活动碎屑沉积体系的含煤岩系沉积模式需要做重要的修正,提出泥炭沉积并不总是与局部的陆源碎屑沉积供给同时发生的,在泥炭聚集期间,局部的陆源碎屑供应已经被某种机理切断了。此外,煤层之下的古土壤(根土岩)代表着基底暴露事件,说

明聚煤作用发生之前曾有过比较长时间的间断,聚煤作用与煤层下伏岩层的沉积环境(如河流冲积平原、三角洲平原等)并没有直接的联系^[14 33 43 60 61],近海型煤田聚煤最有利的沉积环境都处于陆表海的滨海地带,包括后滨泥炭沼泽沉积区、三角洲平原泥炭沼泽沉积区及陆屑潮上带泥炭坪及泥炭沼泽沉积区^[57]。Diessel^[4]提出大面积分布的以海相石灰岩或含海相化石的泥岩为顶板的含煤旋回层序中,煤层多是在海侵过程中形成的。海平面抬升不仅为泥炭聚集提供可容空间,而且可以降低河流梯度,使携带陆源碎屑的河流收缩到成煤沼泽之外^[2]。

中国学者也注意到大部分厚煤层横跨不同相区而大面积广泛分布,亦说明煤层的聚集与特定的陆源碎屑供给无直接联系,同时也强调一次聚煤作用幕的同时性,提出幕式聚煤作用模式^[11-13 61]。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一次幕式聚煤作用的同期性。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(如四级或四级以上的海侵事件)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,多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,并预测聚煤中心的迁移,煤层的展布规模等^[62]。

何起祥等^[6]注意到北方石炭纪海相灰岩与其上、下沉积物在相序上不连续,提出华北石炭纪的海侵属于突发型海侵,为研究中国晚古生代海侵机理提供了新的思路。后来李增学等^[17]进一步将突发型海侵引申到聚煤作用,提出海侵事件成煤模式,认为泥

炭堆积发生于大规模海侵之前的海平面振荡作用期间, 是海侵沉积序列的开始, 注意到煤层与其直接上覆的海相灰岩为一种事件沉积组合, 这种使泥炭被快速淹没且处于深水环境的发生过程是一种突发性的事件, 因此, 煤层与海相灰岩间的海侵面是等时的, 煤层和其顶板海相灰岩也是等时沉积层。认为海侵事件对聚煤作用起控制作用, 但泥炭堆积并非事件, 海侵事件成煤模式中的海相层与煤层间没有海侵过程所对应的完整沉积序列, 即相序不完整, 这一界面可为划分高分辨层序及其内部单元提供重要依据^[17]。

张鹏飞等^[64]对山西太原西山上石炭统太原组的 7 & 11 号煤层及其顶板灰岩的地质特征、煤核和生物化石进行分析, 发现煤层形成过程中明显地受到海水影响, 煤层上覆石灰岩形成中亦有淡水参与, 说明煤层及其顶板灰岩在相序上是连续的, 其海侵模式应是渐进型海侵。邵龙义等^[5 6 65]对海陆过渡相的以海相石灰岩为煤层顶板的含煤岩系层序地层研究, 注意到“根土岩—煤层—海相石灰岩”旋回的成因, 提出“海相灰岩层滞后时段聚煤”的观点, 即煤层形成于海平面上升过程中的“碳酸盐沉积滞后时段”中, “滞后时段 (Lag Time)”指在海平面上升至碳酸盐台地之后到碳酸盐真正开始沉积之前的一段时间, 很多学者研究发现, 全新世最后一次冰期后海平面上升到佛罗里达陆棚上之后, 碳酸盐并没有立即沉积下来, 而是在数千年之后才沉积下来^[66], 在这数千年的“滞后时段”中, 红树林泥炭则大量发育, 形成了红树林泥炭层, 最终的层序是沉积间断面—红树林泥炭层—海相碳酸盐沉积。与此类似, 我国晚古生代近海型含煤岩系的“根土岩—沉积间断面—煤层—海相石灰岩”旋回的亦可能代表着一次海平面下降形成古土壤层之后, 缓慢海侵过程中堆积了早期的泥炭层和晚期的正常海相石灰岩层。煤层与上覆的石灰岩海相层是一个连续的海侵过程^[64]。

以上表明, 层序地层学理论的出现进一步深化了人们对聚煤作用及聚煤规律的认识, 出现了基于层序地层格架分析的聚煤作用模式, 极大地促进了含煤岩系沉积学的发展。

3 近海型含煤岩系层序地层格架下的厚煤层分布模式研究

层序地层格架下厚煤层的分布模式是煤田地质一个研究热点^[3 37 59 67]。“可容空间”是层序地层格架模式的一个关键控制因素, 可容空间变化速率与沉

积物堆积速率的平衡关系控制了层序的结构。可容空间指的是盆地底面到基准面 (= 近似于海平面) 之间的空间。如果全球海平面上升或者发生构造沉降, 可容空间将增大。在沼泽中, 可容空间可定义为泥炭所能堆积的最大高度^[2 27]。值得注意的是, 控制煤层厚度的因素不是可容空间增加量的绝对大小, 而是可容空间增加的速率, 可容空间增加速率的变化在层序地层格架中具有一定的规律性, 因而煤层厚度在层序地层格架中亦应有一定规律可循。

Bohacs 和 Suter^[3]及 Holz 等^[59]提出煤层厚度取决于可容空间增长速率与泥炭聚集速率之间的相对平衡状态。过慢的相对海平面上升速率, 难以保证泥炭堆积所需的可容空间, 因此难以形成厚煤层, 相反, 过快的海平面上升速率, 使得泥炭堆积速率又难以追赶上可容空间增加速率, 从而造成泥炭沼泽很快被海水淹没, 结果也难于形成厚煤层。只有适度的海平面上升速率, 才能保证可容空间增加速率与泥炭堆积速率之间的相对平衡关系, 使泥炭能持续堆积, 从而形成巨厚煤层, 可容空间增加速率与泥炭堆积速率比值达到 1~ 1.18 时最有利于厚煤层的形成^[3]。因此, 可容空间增加速率与泥炭堆积速率的比率决定了一个海平面旋回中煤层 (泥炭层) 的几何厚度变化特征。在 Bohacs 和 Suter 的层序地层格架中煤层几何形态和厚度预测模型 (图 2) 中, 由于低位体系域可容空间产生速度是高位体系域可容空间产生速度的镜像, 因而低位体系域和高位体系域的煤层在几何分布形态和厚度上都比较相似, 都为中等厚度、连续分布的煤层; 海侵体系域初期和末期, 可容空间增加速率与泥炭聚集速率平衡, 此时有利于形成厚且孤立的煤层, 海侵体系域中期则因可容空间增加速率过快而形成的煤层较薄且不连续。但是事实上, 最大海泛面的位置并不是位于海侵体系域的中部, 而是位于图 2A 中的 4 和 5 阶段相交的位置, 实际情况应该是, 当没有沉积物供给或供给速率极低时, 最大海泛面位于海平面上升与下降的转折点亦即海平面的最高点, 而沉积物供给速率较高时, 最大海泛面会逐渐靠近海平面上升拐点 (R), 在含煤岩系中沉积物供给速率一般都相对较高, 最大海泛面位置与 R 点位置一般极为接近, 正常的情况下可以将二者近似地理解为同一位置, 即海侵体系域和高位体系域交界的最大海泛面位置。针对该模式图, 正确的理解应该是聚煤作用强度围绕着最大海泛面在海侵体系域和高位体系域表现为镜像分布^[6]。在层序地层格架中, 这种可容空间增加

速率与泥炭堆积速率的平衡所在的时间段即是厚煤层的位置。依据这一机理可以建立起层序地层格架中的厚煤层分布模式。

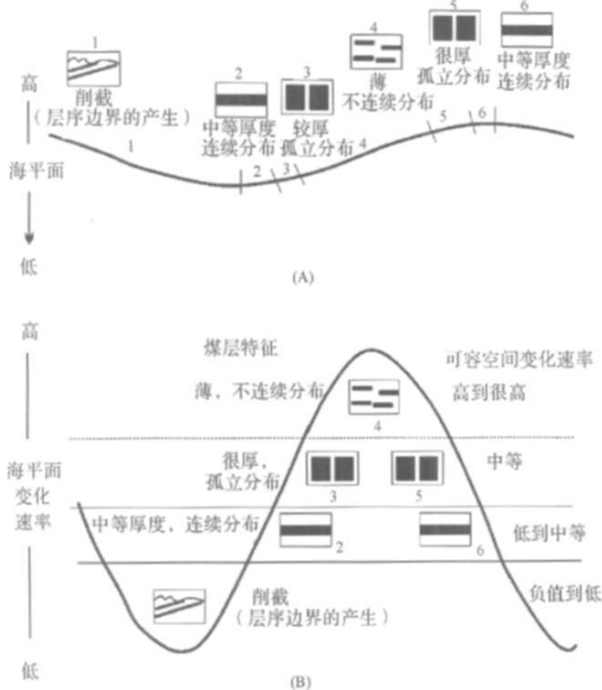


图 2 层序地层格架基准面变化速率与在给定泥炭聚集速率的情况下的煤层厚度及几何形态关系的预测模型 (Bohacs 和 Suter 1997)

Fig 2 Relation of rate of change of base level to coal thickness and geometry for a given peat production rate in a sequence stratigraphic framework (Bohacs 和 Suter 1997)

邵龙义等^[65]的研究提出,不同古地理背景下及不同体系域中,可容空间增加速率与泥炭聚集速率的平衡关系是不同的,因此所形成的煤层不只是在厚度上不同,而且煤岩煤质特征也会有所不同(图 3)。在距物源区较近的冲积体系或滨海平原过渡相靠陆一侧的背景下,因有丰富的陆源碎屑供给而常常处于补偿或过补偿状态,即图 3b 中的 $R_P > R_A$,只有当海平面(基准面)上升速率相当大、可容空间快速增加时,即相当于最大海泛带位置,相对海平面上升速率/可容空间增加速率才会与泥炭堆积速率保持平衡,适于泥炭层堆积的可容空间可以持续很长时间,从而形成巨厚煤层。与此相反,对于远离陆源区的滨外陆棚或碳酸盐台地背景中形成的含煤岩系,情况则完全相反。滨外陆棚或碳酸盐台地环境一般缺乏陆源碎屑供给,沉积速率一般低于海平面上升速率,所以盆地多处于欠补偿状态,只有当一次海平面下降一定幅度

使基底变浅或暴露之后海平面重新上升过程中才会产生适于泥炭层堆积的可容空间。在这种背景下(图 3b 中的 $R_A > R_P$),相对上升较慢的海平面才会维持适于泥炭层堆积的可容空间长时间存在以形成较厚煤层,相反,海平面上升速度过快,大大超过泥炭堆积速率时,水体则会变深而不适于植物生长,其结果是适于泥炭层堆积的可容空间不能长期存在,从而只能形成厚度较小的煤层。因此,在滨外陆棚和碳酸盐台地背景中,厚度较大的煤层可能只会在海侵面处形成,而在最大海泛面处形成的煤层,其厚度往往较小。正如广西合山煤田晚二叠世的层序④中情况一样,中部的最薄的三_中煤底板代表最大海泛带底部沉积,底部最厚的四_上煤底板代表初始海泛带即海侵面。相比较而言,上部位于高位体系域顶部的三_上煤层虽然有一定厚度,但因其灰分含量及夹矸层厚度过大而没有开采价值^[18 68]。

综上所述,从相对海平面(基准面)升降分析,泥炭堆积速率和可容空间增加速率之比控制了厚煤层的展布:在滨海平原靠陆一侧以河流作用为主的环境,厚煤层形成于最大海泛面附近,而在滨海平原靠海一侧,厚煤层形成于海侵面附近(图 3)。此外,基准面变化控制了泥炭地的水介质条件,从而亦控制了煤质变化特征,通过层序地层分析可以预测煤层的煤岩煤质变化特征。在一个层序地层格架中,了解到煤层的分布习性,有助于我们对层序地层格架进行精细划分。

4 内陆湖盆层序格架下的厚煤层分布模式

内陆湖盆背景下的层序地层格架及厚煤层分布模式目前的研究还比较薄弱。内陆湖盆可分为拗陷型盆地和断陷型盆地,下面分别以柴达木北缘盆地的侏罗纪含煤岩系及四川攀枝花地区宝鼎盆地的晚三叠世含煤岩系为例给予论述。

拗陷型盆地与被动大陆边缘的近海型含煤岩系类似,其中的大面积分布的煤层亦主要形成于可容空间增加速率与泥炭堆积速率保持平衡或略高于泥炭堆积速率时^[21]。由于陆相含煤盆地影响可容空间的因素(如古气候、基底沉降、湖平面变化等)远比海相地层复杂,煤层在层序格架内的发育也具有多样性。在柴达木北缘盆地的大煤沟地区的侏罗纪含煤岩系,从曲流河冲积平原到湖泊环境,层序与煤层的发育呈有规律变化(图 4 和图 5):

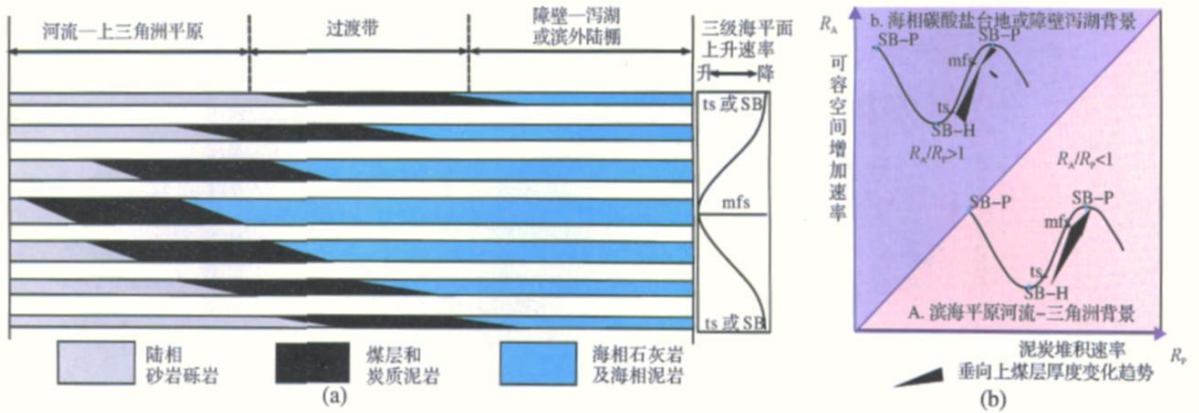


图 3 近海背景下含煤岩系中厚煤层分布模式(a)及可容空间增加速率与泥炭堆积速率平衡关系(b) (据邵龙义等,2003,2008 修改)

Fig.3 Model of coal-accumulation of the coal-bearing strata (a) and the peat accumulation rate in balance with the rate of accommodation creation (b) in a paralic setting

SB:层序界面,SB-P: Posamentier and Allen (1999)所指的层序界面; SB-H: Hunt and Tucker (1992)所指的层序界面; ts:海侵面;mfs:最大海泛面

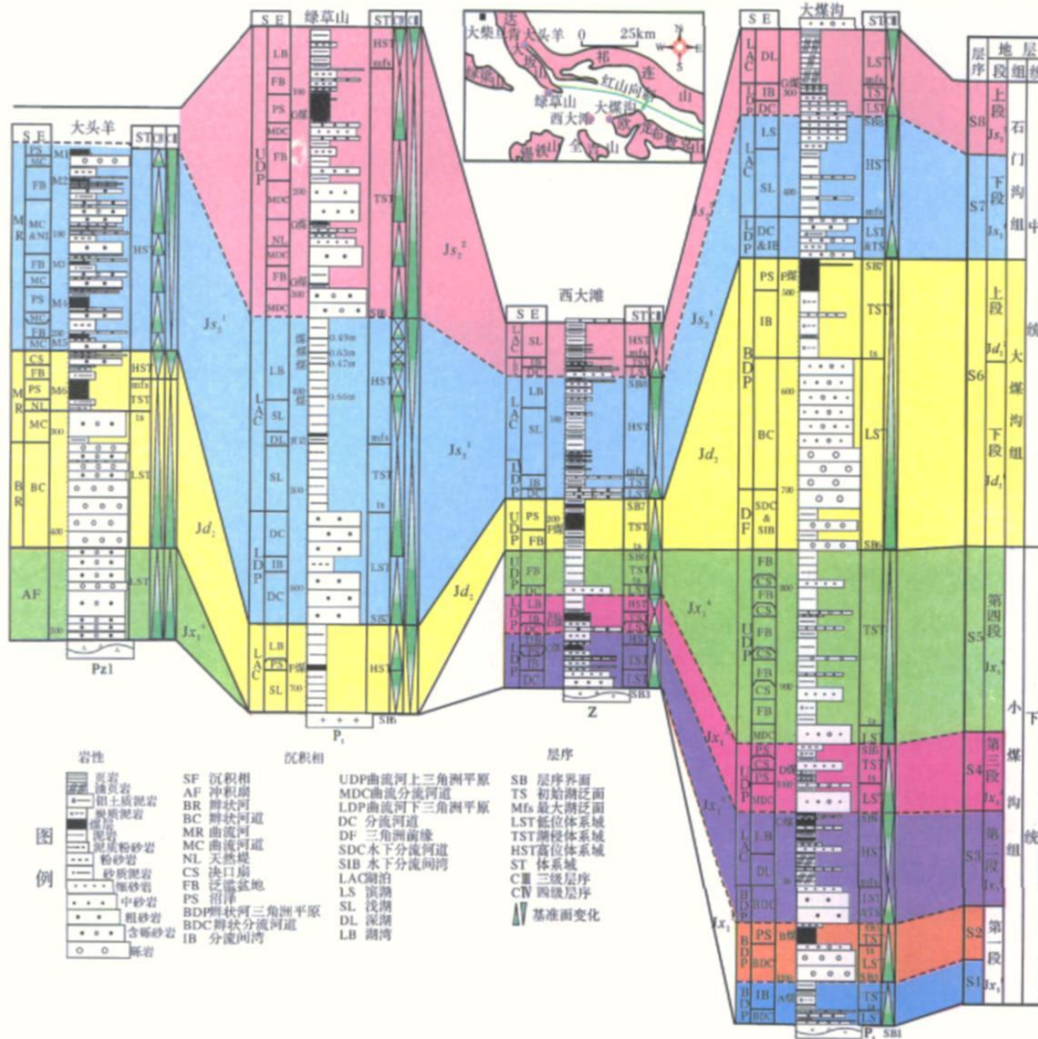


图 4 柴达木北缘盆地大柴沟地区早中侏罗世含煤岩系沉积相及层序地层对比图 (鲁静等,2006)

Fig.4 Cross section showing sedimentary facies and sequence stratigraphic framework of the Early-Middle Jurassic coal measures in Dameigou region of the northern Qaidam basin (Lu Jing et al., 2006)

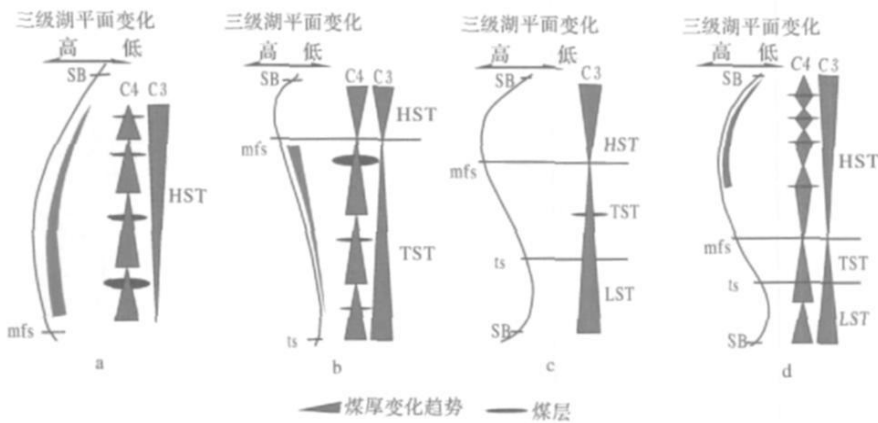


图 5 柴达木北缘盆地大煤沟地区早中侏罗世含煤岩系层序格架内煤层发育特征 (鲁静等, 2006)

a 曲流河冲积平原; b 曲流河上三角洲平原; c 下三角洲平原; d 下三角洲平原—湖泊

Fig 5 Map showing the characteristics of coal accumulation in the sequence framework of the Early-Middle Jurassic coal measures in Damogou region of the northern Qaidam basin (Lu Jing *et al.*, 2006)

1) 在曲流河冲积平原 (图 5a), 三级层序主要由多个四级层序基准面上升半旋回低位体系域和湖侵体系域叠置组成, 自下而上四级层序低位体系域砂岩层数和厚度增多、增大, 而湖侵体系域煤层和粉砂岩等细碎屑岩较少, 总体它们构成三级层序基准面下降半旋回的高位体系域 (如大头羊层序 \times)。此时, 煤层的发育于四级层序的湖侵体系域, 自下而上煤层厚度减小趋势明显, 厚煤层靠近底部最大湖泛面发育。

2) 在曲流河上三角洲平原 (图 5b), 三级层序主要由多个四级层序基准面上升半旋回低位体系域和湖侵体系域叠置组成, 但自下而上四级层序低位体系域砂岩层数和厚度减少、较薄, 而湖侵体系域煤层和粉砂岩等细碎屑岩增多、增厚, 总体构成三级层序的湖侵体系域 (如西大滩层序 \times), 而三级层序高位体系域发育较差。此时, 煤层的也主要发育于四级层序的湖侵体系域, 但自下而上煤层厚度增大趋势明显, 厚煤层靠近顶部最大湖泛面发育。

3) 在下三角洲平原 (图 5c), 三级层序低位体系域、湖侵体系域和高位体系域均发育, 基本为一对称旋回, 三级层序内四级层序不发育 (如西大滩层序 $\textcircled{4}$ 和层序 $\textcircled{5}$)。煤层通常发育于三级层序湖侵体系域, 煤层呈中厚层状, 横向连续、厚度稳定, 大部分可采。

4) 下三角洲平原—湖泊环境 (图 5d), 三级层序以高位体系域为主, 其次为湖侵体系域和低位体系域。高位体系域中后期由多个四级层序基准面上升半旋回湖侵体系域和基准面下降半旋回高位体系域叠置而成, 煤层发育于每个四级层序湖侵体系域下部, 煤层底板为四级层序初始湖泛面。自下而上, 煤

层厚度减薄, 煤层间距也逐渐缩小 (如绿草山层序 \times)。

但是内陆断陷型盆地, 其层序格架及聚煤模式有明显的不同之处。在内陆断陷盆地, 可容空间增加速率 (基准面上升速率) 主要受控于与构造有关的盆地基底沉降速率, 断陷盆地不同位置盆地基底沉降速率差异较大, 总体上表现为由控盆地断裂带一侧的盆地陡坡带向盆地缓坡带方向, 基底沉降速率变小, 相应地盆地可容空间增加速率 (基准面上升速率) 也表现为由盆地陡坡带向盆地缓坡带逐渐减慢。再从沉积物供给速率看, 断陷盆地物源主要来自两个, 即盆地陡坡带的主要物源和盆地缓坡带的次要物源, 并且横向上沉积物供给速率由盆地边缘向盆地中心呈逐渐降低趋势。可容空间产生速率与沉积物供给速率两者综合作用的结果是, 断陷盆地陡坡带和缓坡带沉积物供给速率往往会大于可容空间增加速率, 而在盆地陡坡带和缓坡带过渡地区 (大致的盆地沉积中心) 可容空间增加速率与沉积物供给速率保持平衡, 进而造成断陷盆地沉降中心与沉积中心的不一致^[22]。

平面上断陷盆地聚煤中心主要位于地形平坦、剩余可容空间大小适中、新增可容空间产生速率中等的三角洲平原环境。在盆地稳定断陷期, 聚煤中心主要位于新增可容空间产生速率中等的三角洲平原古地理单元, 从盆地缓坡带到陡坡带, 聚煤强度曲线呈双峰分布 (图 6)。在盆地萎缩断陷期, 聚煤中心向新增可容空间产生速率相对较快的湖泊古地理单元迁移, 从盆地缓坡带到陡坡带, 聚煤强度曲线呈单峰分布。因此, 从盆地边缘到沉积中心等时地层格架下岩相、

沉积相和聚煤作用有规律的迁移为断陷盆地煤矿区深部和矿区外围煤炭资源勘探提供了科学依据和指导。

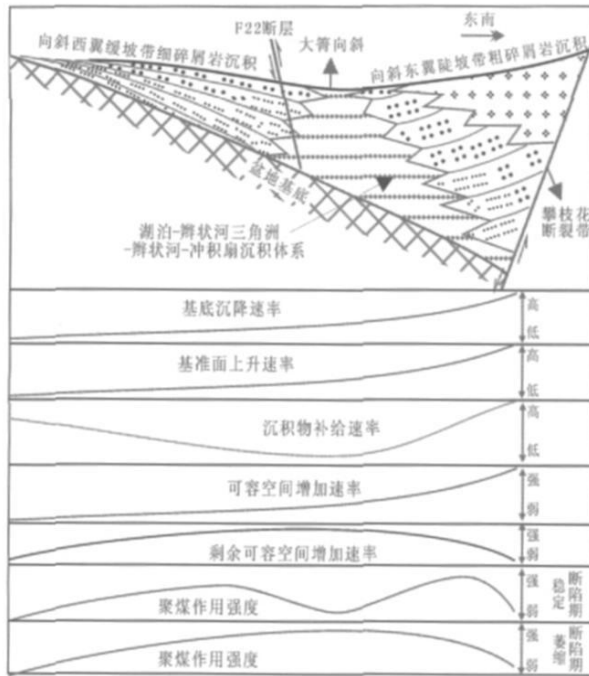


图 6 四川宝鼎断陷盆地层序格架下聚煤作用特征 (鲁静, 等, 2009 有修改)

Fig 6 Sketch map showing the coal accumulation in the sequence stratigraphic framework of the Baoding faulting basin (Lu Jing *et al.*, 2009)

5 层序地层格架中的煤岩煤质变化规律

目前进行含煤岩系层序地层分析时,人们在关注煤层在层序中的位置的同时,也注意到层序地层格架中因受古地理位置及可容空间变化的控制,显微煤岩组分及煤质(如硫含量)亦有规律性的变化^[69-71]。煤的性质如煤层厚度、煤质(如灰分、硫含量)、显微煤岩组成都受成煤植物类型、埋藏速度、沉积供应速率和基准面变化速率等因素的控制,而这些因素又都受到海平面变化、气候、构造作用等决定地层层序的他旋回过程的控制^[35, 37, 38 & 70-72]。

Diesse^[4, 37]将煤的形成与沉积体系域联系在一起探讨了层序地层学中所描述的海进、海退煤层的矿物学及地球化学特征。当可容空间增加速率大于泥炭堆积速率时,煤层剖面会表现出一系列海侵煤的特征, Diesse^[4]指出海侵煤会表现为,镜质体反射率、结

构镜质体含量、煤中硫的同位素比值及结构保存指数(TPI)等指标向上减少;结构镜质体的荧光强度、镜质体含量、黄铁矿及硫含量、煤中的碎屑显微组分(如反映异地和微异地搬运的碎屑惰性体和碎屑镜质体)、挥发分产率以及 H/C 原子比等指标向上增加,煤层顶板经常为深覆水海相或湖相细粒沉积(如泥岩、页岩、碳酸盐岩等)。相反,如果可容空间增加速率小于泥炭堆积速率时,煤层剖面会表现出一系列正常海退的特征,上述指标会出现相反的变化趋势。

Petersen 等^[38]在研究丹麦中央地堑中侏罗统煤层沉积环境时,通过对岩芯样品的有机岩石学及有机地球化学手段,识别出了发育于低位体系域晚期及海侵体系域早期的“海退型煤”(regressive coal)和发育于海侵体系域晚期及高位体系域早期的“海侵型煤”(transgressive coal)。这里所说的“海退型煤”并非是在海退时形成,而是在海平面缓慢上升期形成,“海侵型煤”是在海平面迅速上升期形成。据他们的分析,“海侵型煤”代表了泥炭在持续饱和水、缺氧并且可能受海相条件影响的情况下聚集而成,而“海退型煤”是在含氧量上升的阶段形成。这表明基准面上升的速度强烈地影响到泥炭的聚集,并在煤层的有机地化特征上表现出来,在海平面快速上升期间形成的煤层,其煤层的氢指数、类脂组含量、含硫量、沥青含量、抽提率、 $\delta^{13}\text{C}$ 以及 $S_1 + S_2$ 都比海平面相对静止—缓慢上升时期形成的煤层要高,而 R_m 、 Pr/Ph 比以及 C_{29} 甾烷等含量则比后者要低。Davies 等^[72]从煤岩组分的纵向及横向变化规律来研究近海型煤层形成过程中的可容空间变化的影响。Izart 等^[71]从顿涅茨煤田研究表明,最大海泛期沉积的煤层富含源于藻类的 C_{29} 甾烷,而来源于高等植物木材的 C_{29} 甾烷含量较低。

邵龙义等在研究广西合山组碳酸盐岩型煤系时就注意到,在层序界面处的煤层全硫含量相对较低,而在最大海泛面处的煤层全硫含量则相对较高,相应的一些有害元素如 As Cd Cr Cu Ni 等在剖面有规律变化^[18, 61],郝黎明^[62]在研究贵州西部晚二叠世煤系层序地层时发现,六枝矿区六号煤层 $\delta^{13}\text{C}$ 及 S 含量有向上增加的趋势,云南东北部镇雄煤田的 5 号煤亦有 S 含量向上增高的趋势(邵龙义,昭通科研报告),这些研究预示着人们有可能依据层序地层学理论寻找优质的工业煤层。

6 含煤岩系层序地层学研究展望

(1) 中国的含煤岩系层序地层学研究目前还主

要限于克拉通盆地海陆过渡相地层,对陆相含煤盆地的层序地层学研究还相对比较薄弱。此外,还没有关于克拉通盆地、前陆盆地、裂谷盆地等不同类型含煤盆地的层序地层格架模式,这方面的研究在今后急需加强;

(2) 中国的地质历史上的聚煤期次复杂,有工业价值的煤层从早石炭世、晚石炭世、二叠纪、晚三叠世、早中侏罗世、早白垩世、古近纪、新近纪都有分布,聚煤作用有明显的地质分区,如东北、华北、西北、华南及滇藏等聚煤区,今后的研究需要对不同聚煤区的不同聚煤期的层序地层样式进行深入研究,提出各聚煤区的基于层序地层格架模式,为各聚煤区的找煤勘探提供理论依据,特别是中国东部深部煤炭资源的勘探开发提供理论指导;

(3) 燃煤造成的环境及健康危害受到人们的重视,如何利用层序地层学理论对煤中的有害物质的分布特征进行预测,寻找优质煤炭资源,亦是层序地层学与煤田地质学结合的热点课题;

(4) 煤作为一种特殊的沉积岩,其中蕴含这丰富的地球演化信息,如何从煤及煤系中的岩石学、地球化学、地球物理学特征中提取古气候及基准面变化的信息,分析煤层在地质历史长周期变化过程中的表现特征以及古泥炭地的古气候及水文特征对米兰柯维奇轨道参数旋回的响应以及全球碳循环,并依据这些数据建立起精确的时间尺度等,亦是目前研究的热点。

参考文献 (References)

- Gibling M R, Bird D J. Late Carboniferous cyclothem s and alluvial paleovalleys in the Sydney Basin [J]. Nova Scotia Geological Society of America Bulletin, 1994, 106: 105-117
- Flint S S, Aiken J F, Hampson G. Application of sequence stratigraphy to coal-bearing coastal plain successions: implications for the UK coal measures [C] // Whateley M K G, Spears D A, eds. European Coal Geology. Geological Society, London. Special Publication, 1995, 82: 1-16
- Bohacs K, Suter J. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: Fundamental controls and paralic examples [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81: 1612-1639
- Diesse L C F K. Coal-bearing depositional systems—coal facies and depositional environments [M]. Springer-verlag, 1992
- 邵龙义, 何志平, 鲁静. 环渤海湾西部石炭系—二叠系层序地层及聚煤作用研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2008a: 174
- 邵龙义, 鲁静, 汪浩, 等. 近海型含煤岩系沉积学及层序地层学研究进展 [J]. 古地理学报, 2008b, 10(6): 561-570
- 李思田, 程守田, 杨士恭, 等. 鄂尔多斯盆地东北部层序地层学及沉积体系分析 [M]. 北京: 地质出版社, 1992
- 邵龙义, 张鹏飞, 田宝霖, 等. 黔西织纳地区晚二叠世含煤岩系层序地层及海平面变化 [J]. 地质探索, 1993, 8: 1-11
- 李增学. 内陆表海聚煤盆地的层序地层分析—华北内陆表海聚煤盆地的研究进展 [J]. 地球科学进展, 1994, 9(6): 65-70
- 陈世悦, 刘焕杰. 华北石炭—二叠纪层序地层学研究特征 [J]. 岩相古地理, 1994, 14(5): 11-20
- 邵龙义, 张鹏飞, 刘钦甫, 等. 湘中地区下石炭统测水组沉积层序及幕式聚煤作用 [J]. 地质论评, 1992, 38(1): 52-59
- 郝黎明, 邵龙义, 时宗波, 等. 旋回频率曲线在幕式聚煤作用中的研究—以西南地区上二叠统为例 [J]. 古地理学报, 2000a, 2(4): 12-19
- Yang Renchao, Han Zuozhen, Li Zengxue, et al. Base-level cycles and episodic coal accumulation—Case study of Dongsheng Coal field in Ordos Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology (English Edition), 2006, 16(4): 439-442
- 山西煤田地质局. 山西晚古生代沉积环境与聚煤规律 [M]. 山西科学技术出版社, 1992: 253
- 李宝芳, 温显端, 李贵东. 华北石炭、二叠系高分辨层序地层分析 [J]. 地质前缘, 1999, 6(增刊): 81-94
- 李增学, 魏久传, 王明镇. 华北南部晚古生代陆表海盆地层序地层格架与海平面变化 [J]. 岩相古地理, 1996, 16(5): 1-11
- 李增学, 魏久传, 韩美莲. 海侵事件成煤作用——一种新的聚煤模式 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(1): 120-124
- Shao Longyi, Zhang Pengfei, Gayer R A, et al. Coal in a carbonate sequence stratigraphic framework: the Late Permian Heshan Formation in central Guangxi, southern China [J]. Journal of Geological Society London, 2003b, 160: 285-298
- 吴因业. 煤层——一种陆相盆地中的成因层序边界 [J]. 石油学报, 1996, 17(4): 28-35
- 杨明慧, 夏文臣. 非海相前陆盆地含煤沉积层序地层分析——以柴达木盆地大煤沟侏罗系剖面为例 [J]. 煤田地质与勘探, 1998, 26(3): 1-5
- 鲁静, 邵龙义, 刘天绩, 等. 柴北缘大煤沟地区侏罗纪含煤岩系层序地层学研究 [J]. 西北大学学报, 2006, 36(专刊): 32-37
- 鲁静, 邵龙义, 魏克敏, 等. 扬子准地台西缘宝鼎断陷盆地层序格架下古地理演化与聚煤作用 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(4): 433-437
- Vail P R, Mitchum Jr R M, Thompson III S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: part 3—relative changes of sea level from coastal onlap [C] // Payton C E, ed. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir, 1977, 26: 63-81
- Wilgus C K, Posamentier H W, Ross C A, et al. eds. Sea-level changes: an integrated approach [J]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 1988, 42: 47-70
- Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions [C] // Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, et al. eds. Sea-Level Changes: An Integrated Approach. SEPM Special Publication, 1988, 42: 39-46
- Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic

- sequence stratigraphy in wells, cores and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies [J]. *AAPG, Methods in exploration series*, 1990, 7: 55
- 27 Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition I— conceptual framework [C] // Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, *et al* eds. *Sea-level changes: an integrated approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 1988, 42: 109-124
- 28 Mithum R M, Van Wagoner J C. High-frequency sequences and their stacking patterns: Sequence stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles [J]. *Sedimentary Geology*, 1991, 70: 131-160
- 29 Haq B U, Hardenbol J, Vail P R. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 million years ago to present) [J]. *Science*, 1987, 235: 1156-1166
- 30 Haq B U, Schutter S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes [J]. *Science*, 2008, 322: 64-68
- 31 Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy [M]. Elsevier, Amsterdam, 2006: 375
- 32 Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, *et al* (28 authors), Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 92: 1-33
- 33 McCabe P J. Depositional models of coal and coal-bearing strata [C] // Rahmani R A, Flores R M, eds. *Sedimentology of Coal and Coal-Bearing Sequences*. International Association of Sedimentologists. Special Publication, 1984, 7: 13-42
- 34 Aiken 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 [J]. *Sedimentology*, 1995, 42: 3-30
- 35 Gibling M R, Saunders K J, Tibert N E, *et al*. Sequence sets, high-accommodation events and the coal window in the Carboniferous Sydney Coalfield, Atlantic Canada [C] // Pashin J C, Gastaldo R A, eds. *Sequence Stratigraphy, Paleoclimate, and Tectonics of Coal-bearing Strata*. AAPG Studies in Geology, 2004, 51: 169-197
- 36 Plint A G, McCarthy P J, Faccini U F. Nonmarine sequence stratigraphy: Uplip expression of sequence boundaries and systems tracts in a high-resolution framework, Cenomanian Dunvegan Formation, Alberta foreland basin, Canada [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85: 1967-2001
- 37 Düssel C F K, Boyd R, Wadsworth J, *et al*. On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulation ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, Western Canada, and their sequence-stratigraphic significance [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2000, 43: 143-186
- 38 Petersen H I, Rosenberg P, Andsbjerg J. Organic geochemistry in relation to the depositional environments of middle Jurassic coal seams, Danish Central Graben, and implications for hydrocarbon generative potential [J]. *AAPG Bulletin*, 1996, 80(1): 47-62
- 39 Hamilton D S, Tadros N Z. Utility of coal seams as genetic stratigraphic sequence boundaries in non-marine basins: an example from the Gunnedah basin, Australia [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78: 267-286
- 40 Fielding C R, Bann K L, Trueman J D. Resolving the architecture of a complex low-accommodation unit using high-resolution sequence stratigraphy and ichnology: The Late Permian Freitag Formation in the Denison Trough, Queensland, Australia [C] // MacEachern J A, Bann K L, Gingras M K, *et al* eds. *Applied Ichnology: SEPM Short Course Notes*, 2007, 52: 1-30
- 41 Aiken J F, Flint S S. High-frequency sequences and the nature of incised-valley fills in fluvial systems of the Breathitt Group (Pennsylvanian), Appalachian Foreland Basin, eastern Kentucky [C] // Dalrymple R W, Boyd R, Zaitlin B A, eds. *Incised Valley Systems: Origin and Sedimentary Sequences*. SEPM Special Publication, 1994, 51: 353-368
- 42 Rahmani R A, Flores R M. Sedimentology of coal and coal-bearing sequences of North America: a historical review [C] // Rahmani R A, Flores R M, eds. *Special publication of the International Association of Sedimentologists*. Blackwell, 1984, 7: 3-10
- 43 邵龙义, 龚建伟, 张鹏飞. 含煤岩系沉积学和层序地层学研究现状与展望 [J]. *煤田地质与勘探*, 1998, 26(1): 4-9
- 44 Fern J C. Depositional models in coal exploration and development [C] // Sasena R S, ed. *Sedimentary environments and hydrocarbons*. AAPG/NOGS short course. New Orleans Geological Society, 1976: 60-78
- 45 Home J C, Fern J C, Caucci *et al*. Depositional models in coal exploration and mine planning in Appalachian region [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 62: 2379-2411
- 46 韩德馨, 杨起. 中国煤田地质学 (下册) [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1980: 415
- 47 中国煤田地质总局. 黔西川南滇东晚二叠世含煤地层沉积环境与聚煤规律 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996a: 362
- 48 中国煤田地质总局. 鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996b: 547
- 49 中国煤田地质总局. 华北地台晚古生代煤地质学研究 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1997: 433
- 50 中国煤田地质总局. 华南二叠纪含煤盆地特征及聚煤规律 [M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1999: 379
- 51 中国煤田地质总局 (程爱国主编). 中国聚煤作用系统分析 [M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 343
- 52 煤炭科学研究院地质勘探分院, 山西省煤田地质勘探公司著. 太原西山含煤地层沉积环境 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1987: 633
- 53 张鹏飞, 金奎励, 吴涛, 等. 吐哈盆地煤沼沉积环境和煤成油 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997: 269
- 54 张鹏飞, 刘焕杰, 卓越, 等. 试论局限台地型碳酸盐岩型含煤建造—桂中马滩一带台山组的某些沉积特征 [J]. *沉积学报*, 1983, 1(3): 16-28
- 55 刘焕杰, 贾玉如, 龙耀珍, 等. 华北石炭纪含煤建造的陆表海堡岛体系特点及其事件沉积 [J]. *沉积学报*, 1987, 5(3): 73-80
- 56 张泓, 李恒堂, 熊存卫, 等. 中国西北侏罗纪含煤地层与聚煤规律 [M]. 北京: 地质出版社, 1998: 1-316
- 57 钟蓉, 傅泽明. 华北地台晚石炭世—早二叠世海水进退与厚煤带分布关系 [J]. *地质学报*, 1998, 72(1): 64-75

- 58 刘焕杰, 桑树勋, 施健. 成煤环境的比较沉积学研究—海南岛红树林潮坪与红树林泥炭 [M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1997: 203
- 59 Holz M, Kalkreuth W, Banerjee I. Sequence stratigraphy of paralic coal-bearing strata: an overview [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2002, 48: 147-179
- 60 陈钟惠. 煤和含煤岩系沉积环境 [J]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1988: 162
- 61 邵龙义. 湘中地区下石炭统沉积学及层序地层学研究 [D]. 中国矿业大学北京研究生部博士学位学位论文, 1989: 208
- 62 郝黎明. 克拉通盆地含煤岩系高分辨率层序地层学研究—以贵州西部上二叠统为例 [D]. 中国矿业大学 (北京校区) 博士学位论文, 2000: 119
- 63 何起祥, 业治铮, 张明书, 等. 受限陆表海的海侵模式 [J]. *沉积学报*, 1991, 9(1): 1-10
- 64 张鹏飞, 邵龙义, 代世峰. 华北地台晚古生代海侵模式议 [J]. *古地理学报*, 2001, 3(1): 15-24
- 65 邵龙义, 陈家良, 李瑞军, 等. 广西合山晚二叠世碳酸盐岩型煤系层序地层分析 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 168-174
- 66 Harris P M, Kerans C, Behou D G. Ancient outcrop and modern examples of platform carbonate cycles: implications for subsurface correlation and understanding reservoir heterogeneity [C] // Loucks R G, Sarg J F, eds. *Carbonate Sequence Stratigraphy: Recent Developments and Applications*. AAPG Memoirs, 1993, 57: 475-492
- 67 Diessel C F K. Utility of coal petrology for sequence-stratigraphic analysis [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2007, 70: 3-34
- 68 Shao Longyi, Tim Jones, Rod Gayer, *et al*. Petrology and geochemistry of the high-sulphur coals from the Upper Permian carbonate coal measures in the Heshan Coalfield, southern China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2003a: 1-26
- 69 Wadsworth J, Boyd R, Diessel C, *et al*. Stratigraphic style of coal and non-marine strata in a high accommodation setting: Falher Member and Gates Formation (Lower Cretaceous), western Canada [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2003, 51(3): 275-303
- 70 Turner B R, Richardson D. Geological controls on the sulphur content of coal seams in the Northumberland Coalfield, Northeast England [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2004, 60(2-4): 169-196
- 71 Izart A, Sachsenhofer R F, Privally *et al*. Stratigraphic distribution of macerals and biomarkers in the Donets Basin: implications for paleoecology, paleoclimatology and eustasy [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 66(1-2): 69-107
- 72 Davies R, Diessel C, Howell J, *et al*. Vertical and lateral variation in the petrography of the Upper Cretaceous Sunnyside coal of eastern Utah, USA - Implications for the recognition of high-resolution accommodation changes in paralic coal seams [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005, 61(1-2): 13-33

Developments of Coal Measures Sequence Stratigraphy in China

SHAO Long-yi LU Jing WANG Hao ZHANG Peng-fei

(College of Geological Sciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083)

Abstract Sequence stratigraphy provides a new clue for the coal geologists to understand coal accumulation mechanism. After two decades studies in coal measures sequence stratigraphy, coal geologists realize that cyclicality in coal measures is closely related to the global sea level changes and that industrial coals in geological history were mainly accumulated during a base-level (sea level) rise. New coal accumulation models based on sequence stratigraphy theory were put forward by Chinese coal geologists, including episodic coal accumulation, transgressive process coal accumulation, event coal accumulation, and coal accumulation during a lag time of marine limestone beds. In the meantime, distribution model of thick coal seams in a sequence stratigraphic framework is outlined based on the balance between the peat accumulation rate and the accommodation creation rate. Future studies of coal measures sequence stratigraphy will focus on the sequence stratigraphic pattern of different tectonic coal basins, prediction of high-quality coal distribution with sequence stratigraphy model, and the significance and implications of coals in the long-term evolution of Earth. Chinese coal geologists will put more efforts on the sequence stratigraphic pattern and coal accumulating model for the five coal accumulating provinces and will use sequence stratigraphy theory to find more high-quality coal resources.

Key words coal measures, sequence stratigraphy, coal accumulation model