第 10卷 第 6期
2008年 12月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY

Vol. 10 No. 6
Dec 2008

文章编号: 1671 - 1505 (2008) 06 - 0561 - 10

近海型含煤岩系沉积学及层序地层学研究进展*

邵龙义 鲁 静 汪 浩 张鹏飞 韩德馨

中国矿业大学 (北京) 资源与地球科学系, 北京 100083

摘 要 层序地层学是近 20年来发展起来的一门新的方法学科, 并在聚煤作用分析中得到广泛应用。作者就近海型含煤岩系沉积学研究历史以及煤系层序地层学研究方法及有关问题进行探讨, 认为近海环境的聚煤作用实际上是海平面 (基准面) 上升过程中发生的, 同时提出煤层厚度受泥炭堆积速率与可容空间增加速率的控制: 靠陆一侧冲积平原和三角洲平原沉积环境中, 厚煤层主要出现在最大海泛面位置; 而靠海一侧障壁—潟湖或碳酸盐岩台地沉积环境中, 厚煤层主要出现在初始海泛面的位置; 但就整个三级复合层序来说, 层序中厚度最大、分布最广的煤层主要分布于可容空间增加速率最大的最大海泛面附近的位置。对于中国晚古生代近海型煤系中常见的“根土岩—煤—石灰岩”序列, 聚煤作用发生于海相石灰岩“滞后时段”, 即在海侵之后、海相石灰岩层真正沉积下来之前的时段, 这一时段可容空间增加速率与泥炭堆积速率平衡, 有利于聚煤作用发生。

关键词 近海型含煤岩系 沉积学 层序地层 聚煤模式

第一作者简介 邵龙义, 男, 1964年生, 1989年毕业于中国矿业大学 (北京), 获博士学位。现为中国矿业大学 (北京) 资源与地球科学系教授, 博士生导师, 主要从事沉积学和煤田地质学教学和研究工作。电话: 010 - 62331248转 8523; E-mail: shaol@cumtb.edu.cn。

中图分类号: TE121.3 **文献标识码**: A

Advances in sedimentology and sequence stratigraphy of paralic coal measures

Shao Longyi Lu Jing Wang Hao Zhang Pengfei Han Dexin

Department of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083

Abstract Sequence stratigraphy is a newly developed methodological subject over last two decades and it has obtained significant application in coal accumulation analysis. This paper discussed the brief history of sedimentological research, coal sequence stratigraphy research methods and related aspects of the paralic coal measures. Paralic setting is characterized by the vast flat topography and the frequent marine transgression, which is favorable for the multi-staged coal accumulations. In this setting, coal accumulation mainly occurs in the process of sea level (base level) rise and the coal seam thickness is controlled by the peat accumulation rate in balance with the rate of accommodation creation. On the landward of the paralic setting which is represented by alluvial plain and delta plain environments, thick seams tend to be formed at late transgressive systems tract or early highstand systems tract around the maximum flooding surface. In contrast, on the seaward of the paralic setting which is represented by the barrier - lagoon or carbonate platform sedimentary environments, the thick seams tend to occur at the early transgressive systems

*国家 973项目 (编号: 2006CB202202) 及国家自然科学基金项目 (编号: 40172050, 40672103) 资助

收稿日期: 2007 - 08 - 20 **改回日期**: 2008 - 09 - 15

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

tract around the transgressive surface (initial flooding surface) or the late highstand systems tract. In a third-order composite sequence, the thickest and most widely distributed coal seams are mainly distributed near the maximum flooding surface. It is proposed that the coal in the "seat earth-coal-marine limestone" successions was formed during the "lag time" of marine limestone deposits - prior to the real deposition of carbonates after transgression. During this "lag time", the development of balanced accommodation creation rates and peat accumulation rates might favor the accumulation of thick coals.

Key words paralic coal measures, sedimentology, sequence stratigraphy, coal accumulation model

About the first author Shao Longyi, born in 1964, graduated and obtained his Ph.D. degree from China University of Mining and Technology (Beijing) in 1989. Now he is a professor of geology at the Department of Resources and Earth Sciences of China University of Mining and Technology (Beijing), with main research interests in sedimentology and coal geology.

煤和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。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，并已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基础方法和手段。这一新的沉积学和地层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以崭新的面貌迅猛地向前发展。在中国，海平面变化与聚煤作用的关系早就为人们所注意（韩德馨和杨起，1980），含煤岩系层序地层学研究在过去的10余年间得到突飞猛进的发展（李思田，1993；李增学，1994；陈世悦和刘焕杰，1994；程爱国等，2001）。中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（邵龙义等，1992；郝黎明等，2000）、海侵过程成煤（李宝芳等，1999；葛格林等，1999）、海侵事件成煤（李增学等，1996，2001）以及海相层滞后时段聚煤（Shao Longyi *et al*，2003b）等理论。作者将在含煤岩系沉积学研究历史回顾的基础上，对中国有关煤和煤系的沉积学和层序地层学研究进展做一概要介绍，以期能对中国含煤岩系层序地层分析起到促进作用。

1 含煤岩系沉积学研究历史

回顾含煤岩系沉积学的研究历史，可以看出煤系沉积学的发展经历了"旋回层阶段"和"沉积模式阶段"（Rahmani and Flores，1984；陈钟惠，1988；Riegel，1992；张鹏飞等，1993）。

上世纪初，Udden（1912）注意到伊利诺伊州中部的宾西法尼亚纪岩石的旋回性重复现象，并把一个煤层的底面到另一个煤层的底面之间的地层序列定义为一个完整的旋回层序。其后，Stout等（1928）在俄亥俄州也注意到宾西法尼亚纪岩石的重复性现象，提出用旋回性沉积模式来解释宾西法尼亚纪岩石的成因。Weller（1930，1931）进一步发展了Udden（1912）和Stout等（1928）的概念，根据沉积作用旋回性将伊利诺伊州的宾西法尼亚纪地层划分为多个组，Wanless和Weller（1932）进一步强调这些旋回性的广泛的横向连续性及其在地层对比上的实用价值，正式提出"旋回层"（Cyclothem）一词，并将其归因于地壳运动引起的海侵—海退。其中，Weller（1930）的单个旋回性的岩性组（即Wanless和Weller于1932年定义的旋回层）从上至下由以下岩性单元组成：铁质页岩—海相石灰岩—钙质页岩—碳质页岩—煤—根土岩—"淡水"石灰岩—砂质含云母页岩—砂岩—不整合面。

南斯拉夫数学家米兰科维奇（Milankovitch，1941）从全球尺度上研究日射量与地球气候之间关系后，提出著名的米兰科维奇天文理论，认为地球轨道偏心率、黄赤交角及岁差等三要素变化引起的到达北半球中高纬度夏季日射量变化，是造成冰期—间冰期旋回的根本原因，同时计算出了地球轨道参数变化周期（米兰科维奇旋回）。基于米兰科维奇天文理论，Weller等又进一步认识到"含煤旋回层"与轨道参数变化有关，地球轨道参数变化引起的冰控海平面变化是含煤旋回层的主控因素，从此便拉开了含煤岩系研究史上的"旋回层时代"的序幕。尽管后来曾有许多学者发现含煤岩系旋回

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

层中的沉积单元构成与 Weller (1930) 及 Wanless 和 Weller (1932) 当初的“理想旋回层”之间有许多差异并发现这些差异主要是构造背景及沉积环境的区域性差异造成, 但是 Weller (1930) 的旋回层概念在几十年时间内一直强烈地影响着含煤岩系沉积学的研究, 对基于标准旋回层岩性组合特征来寻找可采煤层起到了积极作用。

到上世纪 60年代, 当 Fisk (1960) 及其学生把现代密西西比河三角洲研究成果用于阿巴拉契亚地区的宾夕法尼亚系含煤地层研究, 他们对比研究了阿巴拉契亚地区石炭系含煤岩系和密西西比三角洲沉积后认为, 阿巴拉契亚地区石炭系旋回层中简单的海侵、海退过程可以用与现代密西西比河三角洲相类似的三角洲朵叶的退积、进积过程来解释。至此, 人们才认识到河道决口、分流河道摆动、砂坝的迁移以及其他一些幕式或周期性作用等自旋回过程也可造成旋回层现象 (Fenn, 1976), 从此便开始了“沉积模式 (三角洲迁移模式) 阶段”阶段的历史。特别是 Fenn (1976) 和 Horne 等 (1978) 将阿巴拉契亚地区石炭系阿勒格尼组沉积相划分为冲积平原、上三角洲平原、下三角洲平原、障壁后潟湖和障壁岛等类型, 概括出著名的阿勒格尼组三角洲沉积模式, 提出上、下三角洲平原过渡带形成的煤层具有一定的厚度和横向连续性, 从而最具勘探价值。到目前为止已提出了各种成煤模式, 包括滨岸障壁潟湖模式、河流—三角洲模式、冲积扇模式、砂质辫状河模式、湖泊模式、风成沙丘模式等, 中国学者还提出多堡岛成煤模式 (刘焕杰等, 1987)、泥炭坪成煤模式 (刘焕杰, 1982) 及碳酸盐岩台地综合成煤模式 (张鹏飞等, 1983; Shao Longyi *et al*, 1998) 等。这些成煤模式为成煤环境特征、煤层发育特征以及基本控制机理提供了解释基础。这一阶段虽然存在着旋回层的自旋回与他旋回机制的争论, 但是无论是旋回层理论还是后来的沉积模式理论都为煤系沉积学的发展起了巨大的推动作用。

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的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、Krumbein、Dapples等人创造性地将北美稳定克拉通上的地层记录, 包括从前寒武纪晚期至全新世的地层, 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, Wilgus等 (1988) 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, 标志着层序地层学的诞生。Van Wagoner等 (1988, 1990)、Posamentier等 (1988) 以及 Mitchum 等 (1991) 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, 建立起地层划分对比的新方法, 从而也为含煤岩系自旋回机制与他旋回机制之间的争论增添新的内容。在层序地层学思想的影响下, 越来越多的煤田地质学家注意到类似于河道决口、三角洲迁移等的自旋回机制只能解释那些与 Weller (1930) 理想旋回层不一致的局部变化或分布局限的沉积特征, 而不能解释那些大量存在的在整个盆地范围甚至全球性分布的沉积特征或旋回层的成因, 后者显然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、旋回性沉积模式及盆地演化等提供可靠依据, 进而也可推动聚煤作用理论的发展。因此, 也可以说, 层序地层学的出现将开辟煤和含煤岩系沉积学研究的新篇章。

2 海平面变化与聚煤作用的关系

煤层形成于泥炭沼泽环境这是不争的事实, 但是随着认识的深入, 自从 Fenn (1976)、Horne等 (1978) 针对阿巴拉契亚山区石炭纪含煤岩系, 建立起著名的阿勒格尼三角洲聚煤模式后, 含煤岩系沉积模式的研究突飞猛进, 20世纪 80年代以来, 中国学者先后对中国西南、华南、华北、西北等地区 (煤炭科学研究院地质勘探分院等, 1987; 张鹏飞等, 1987; 中国煤田地质总局, 1996a, 1996b, 1997, 1999; 张泓等, 1998), 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 (邵龙义等, 2006), 同时还对成煤环境进行了比较沉积学研究 (刘焕杰等, 1997), 总结出中国含煤岩系的各种沉积模式。这些成果对特定地区、特

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

定层位的沉积格架及沉积古地理的认识起到了关键的作用。

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。事实上，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，在大多数情况下，在近海地区的沼泽发育阶段，局部的陆源碎屑供应已经被某种机理切断了 (McCabe, 1984)，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。同时也注意到大部分厚煤层横跨不同相区而大面积广泛分布，提出幕式聚煤作用模式，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 (邵龙义等，1992，1999; 陈世悦和刘焕杰，1995)。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。

事实上，在过去的煤田地质勘探过程中，大面积稳定分布的厚煤层作为含煤地层中的一个等时面已经受到大多数煤田地质工作者的肯定 (邵龙义等，1992，1993; Diessel, 1992; Hamilton *et al*, 1994; Diessel *et al*, 2007)。近来的一系列研究 (Diessel, 1992; Hamilton *et al*, 1994) 表明，有相当一部分煤层可能形成于海平面上升过程，即海侵过程成煤。大面积分布的可采煤层及其上覆海相层或含海相动物化石层，常与上覆的陆源碎屑沉积物一起，构成典型海陆过渡相含煤岩系旋回层，它们一般是异旋回因素控制的结果，这些异旋回机制包括气候变化、沉积物供给的变化、与岩石圈载荷变化有关的沉降速率的变化以及相对海平面的变化。

盆地范围分布的含煤旋回层很可能与受全球海平面波动控制的基准面变化有关。据研究，泥炭聚集速率比大多数正常的基底沉降速率都要快，尤其对凸起泥炭地更是这样 (McCabe, 1984)，泥炭沼泽只有当相对海平面上升变快的时候或者潜水面由于某种特殊原因而突然上升的时候才会沉没，煤层与下伏沉积物之间在时间上有一个明显的沉积间断 (邵龙义等，1998)。Ramsbottom (1979) 曾用全球海平面波动模式解释英国南威尔士煤田含煤岩系沉积作用，他认为潜水面的上升 (由海平面上升引起) 阻碍沼泽的排水体系而有效地防止有机质的氧化，从而又促进厚泥炭层的堆积。Hartley (1993) 认为盆地范围的基准面变化受全球海平面变化的驱动并且控制着那些盆地范围分布的煤层及含煤旋回层的形成，甚至主张以往曾被认为对含煤岩系沉积作用起主要作用的含煤盆地三角洲朵叶的进积和迁移作用也可能是受基准面变化的控制。

考虑到煤层堆积速率极快 (4～100年堆积1，mm (McCabe, 1984))，所以厚煤层的堆积需要有持续存在的可容空间以容纳快速堆积的煤层 (泥炭)，适合成煤的最大可容空间的持续保持需要有潜水面和基准面的不断抬升，这种基准面的抬升又离不开海平面的上升，因此，发育较好的煤层一般都形成于最大海泛期。Hamilton 和 Tadros (1994) 还提出与基准面变化有关的大面积分布的厚煤层的底面可作为成因地层层序的一种边界，即最大海泛面。Flint等 (1995) 在解释美国 Kentucky东部宾夕法尼亚纪 Breathitt群的层序地层特征时，认为曾被 Fenn (1976) 解释为三角洲模式形成的大面积分布 (数百平方千米) 的厚煤层，实际上是潜水面上升以及伴随碎屑沉积物供给因基准面上升而中止时期的沉积，并认为在靠陆地方向的一些大面积 (数十平方千米) 分布的厚煤层 (厚度大于 2，m) 代表与最大海泛面相当的最大海泛带的层序地层位置。Heckel (1995) 的研究也表明，阿巴拉契亚地区宾夕法尼亚纪的分布广泛的厚煤层形成于海水达到高位期期间，这些厚煤层代表与西部远处 (如 Illinois和 Kansas地区) 高水位期海相单元等时的滨岸低地沉积。

3 层序地层格架下成煤模式研究

若将形成煤层的滨岸平原视为坡度一定且地形平缓的理想状态，则当在一个三级海平面升降旋回中，在海平面从最低点向最高点运动的阶段，有利于煤层发育的过渡环境将向陆地方向迁移；而在海平面从最高点向最低点运动的阶段，有利于煤层形成的过渡环境将向海的方向迁移 (图 1)。同时，在三级海平面变化的过程中还伴有四级海平面的升降运动，在每一个四级海平面旋回中，当海平面上升导致地下水位上升，形成泥炭沼泽。由于在这种理想状态下，煤层的横向延展性在不同时期是一样的，因此海平面变化的不同阶段形成的煤层，其厚度存在一定差异 (邵龙义等，2003，2008)。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

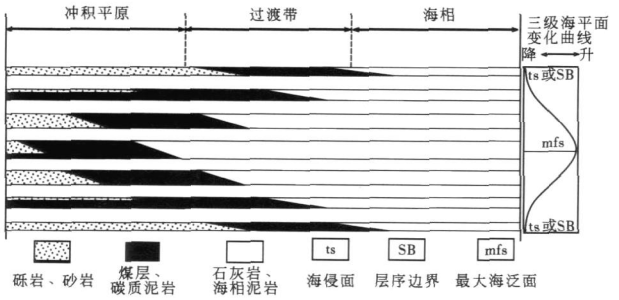


图 1　三级相对海平面变化过程中近海平原背景中聚煤中心迁移示意图（据邵龙义等，2008修改）

Fig. 1　Schematic diagram showing shifting of coal-accumulating centers in a paralic setting during the third-order relative sea levelhange (modified from Shao Longyi *et al*, 2008)

“可容空间”概念的提出是层序地层模式发展的一个关键点。在沼泽中，可容空间可定义为泥炭所能堆积的最大高度（Posamentier *et al*, 1988; Flint *et al*, 1995）。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（Petersen *et al*, 1996; Diessel, 2000; Shao Longyi *et al*, 2003a, 2003b; Gibling *et al*, 2004; Turner and Re Chardson, 2004; Davies *et al*, 2005; Izart *et al*, 2006）。Bohacs和 Suter（1997）及 Holz等（2002）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。邵龙义等（2003）进一步提出，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，例如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的特征，镜质体反射率、结构镜质体含量、煤中硫的同位素比值及 TPI指数等指标向上减少；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细粒沉积（如泥岩、页岩、碳酸盐岩等）（Diessel, 1992）。

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，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岩台地背景中形成的含煤岩系，情况则完全相反。滨外陆棚或碳酸盐岩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，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岩台地背景中，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Ⅲ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$_{上}$煤底面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（Shao Longyi *et al*, 2003a, 2003b）。

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 1）。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

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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，有助于对层序地层格架进行精细划分。

4 关于“海相层滞后时段聚煤”

何起祥等（1991）认为华北石炭纪的海侵属于突发型海侵，认为中国北方石炭纪海相灰岩与其上、下沉积物在相序上不连续，后来李增学等（2001）进一步将突发型海侵引伸到聚煤作用，提出海侵事件成煤。张鹏飞等（2001）提出不同意见，他们对山西太原西山上石炭统太原组的 7、8、11号煤层及其顶板灰岩的地化特征、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，亦即海侵过程成煤。

近年来，Shao Longyi等（2003）提出了“海相层滞后时段聚煤”的思想，即煤层形成于海平面上升过程中的海相石灰岩沉积“滞后时段”，滞后时段（Lag Time）指在海平面上升至碳酸盐岩台地之上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，全新世冰期后海平面上升到佛罗里达陆棚上之后，碳酸盐并没有马上沉积下来，而是在数千年之后才沉积下来，在这数千年甚至更长的滞后时段中，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，这一看法可解释中国晚古生代大部分以石灰岩为煤层顶板的含煤旋回层成因。

图 2可以用来说明一个典型的海平面升降旋回中含煤层序形成过程中海平面变化与聚煤作用的关系（邵龙义等，2008），在低水位期（海平面①），海平面位置较低，基底暴露，广泛发育以根土岩为代表的古土壤，代表一段时间的沉积间断；在重新海侵初期（海平面②），在海侵造成的基准面不断

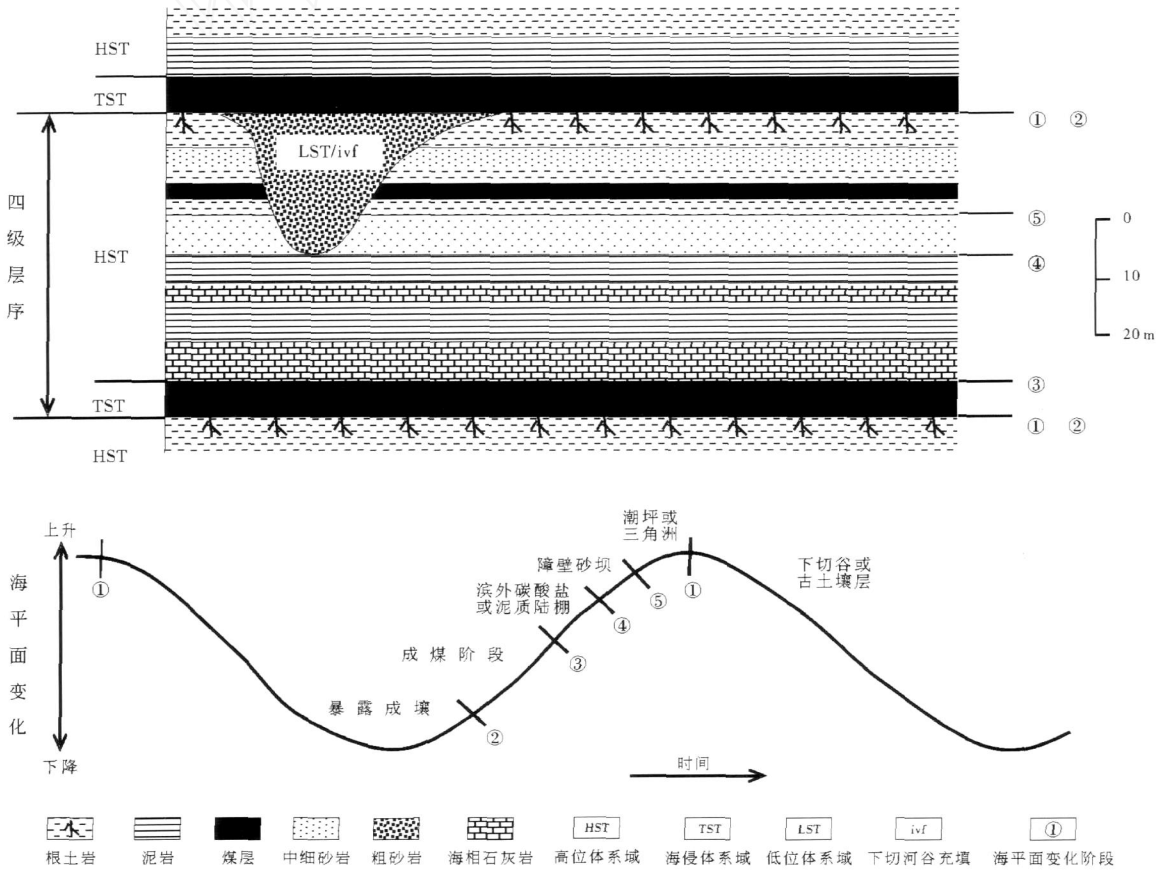


图 2 一个含煤旋回形成过程中的海平面变化与聚煤作用的关系示意图（据邵龙义等，1999，2007修改）

Fig. 2 Relationship between sea level changes and coal accumulation during the formation of a coal - bearing parasequence (modified from Shao Longyi *et al*, 1999, 2007)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

抬升的过程中, 聚煤沼泽中的可容空间也不断增加, 形成大面积广泛展布的泥炭层; 随着海平面不断抬升到高位期 (海平面 ③), 海平面上升速率增加, 泥炭的堆积速率跟不上海平面抬升速率, 泥炭发育中止, 其上发育海相石灰岩或滨外陆棚泥质岩; 以后海平面抬升速率变慢, 水体变浅, 发育障壁岛砂岩 (海平面 ④)、潟湖相、潮坪相或三角洲相砂岩、粉砂岩和泥岩 (海平面 ⑤); 此后的海平面下降又导致基底暴露, 发育古土壤 (可能会伴随有下切谷发育), 从而开始发育另一旋回。在海平面抬升到陆棚上 (海平面 ②) 海相碳酸盐岩并没有马上沉积下来, 而是有一段滞后的时间 (海平面 ③), 在碳酸盐岩沉积"滞后时段"里, 正好泥炭堆积下来, 即发生聚煤作用, 也就是说, 煤层—石灰岩的组合是一个连续的海侵过程, 煤层形成于"海相层滞后时段"。

5 煤和含煤岩系沉积学的展望

煤和含煤岩系沉积学还有许多方面值得深入研究:

1) 如何建立合理可信的高分辨率层序地层格架, 如何利用高分辨率层序地层分析方法建立出更具预测能力的聚煤模式, 除常规的沉积学分析外, 前人曾经讨论过利用古土壤、煤相以及煤层的碳同位素分析层序地层格架及古气候演化, 已经取得一定效果。

2) 在建立含煤岩系高分辨率层序地层格架的基础上, 进行高分辨率的岩相古地理恢复, 分析有利的聚煤作用区以及富煤带的迁移规律。研究成果一方面可以丰富和推进聚煤作用理论的研究, 另一方面也可以为煤炭资源预测提供理论指导。

3) 煤中的有害物质在煤炭利用过程中对环境的危害, 已经受到地质学家的高度重视 (雒昆利等, 2008), 那么如何从沉积学及层序地层学角度对这些有害组分的分布特征进行预测, 亦是摆在煤田地质学家面前的重要任务; Shao Longyi 等 (2003a, 2003b) 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和 Ni 等在剖面呈有规律变化, 这些研究预示着人们应该能够依据层序地层学理论寻找优质的工业煤层。

4) 如何从煤及煤系中的有机质的特征进一步提取古气候及基准面变化的信息, 例如, Large等 (2003, 2004) 利用煤层的碳同位素组成及 V/I比值在煤层剖面的变化规律来研究泥炭地的古气候及水文特征对米兰科维奇轨道参数旋回的响应以及全球碳循环, 以及据此建立起精确的时间尺度并计算有机碳的聚集速率等, 亦是目前研究的热点。

参 考 文 献

陈世悦, 刘焕杰. 1994. 华北石炭二叠纪层序地层学研究特征 [J]. 岩相古地理, 14(5): 11 - 20.

陈世悦, 刘焕杰. 1995. 华北晚古生代层序地层模式及其演化 [J]. 煤田地质与勘探, 23(5): 1 - 5.

陈钟惠. 1988. 煤和含煤岩系沉积环境 [M]. 湖北武汉: 中国地质大学出版社, 162.

程爱国, 等. 2001. 中国聚煤作用系统分析 [M]. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1 - 343.

韩德馨, 杨起. 1980. 中国煤田地质学 (下册) [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 415.

郝黎明, 邵龙义, 时宗波, 等. 2000. 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, 2(4): 12 - 19.

何起祥, 业治铮, 张明书, 等. 1991. 受限陆表海的海侵模式 [J]. 沉积学报, 9(1): 1 - 10.

李宝芳, 温显端, 李贵东. 1999. 华北石炭、二叠系高分辨层序地层分析 [J]. 地学前缘, 6(增刊): 81 - 94.

李思田, 李祯, 林畅松, 等. 1993. 含煤盆地层序地层分析的几个基本问题 [J]. 煤田地质与勘探, 21(4), 1 - 8.

李增学, 魏久传, 韩美莲. 2001. 海侵事件成煤作用 ——一种新的聚煤模式 [J]. 地球科学进展, 16(1): 120 - 124.

李增学, 魏久传, 王明镇. 1996. 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, 16(5): 1 - 11.

李增学. 1994. 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, 9(6): 65 - 70.

刘焕杰. 1982. 潮坪成煤环境初论 ——三汇坝地区晚二叠世龙潭组含煤建造沉积环境模式 [J]. 中国矿业学院学报, (2): 61 - 71.

刘焕杰, 贾玉如, 龙耀珍, 等. 1987. 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, 5(3): 73 - 80.

刘焕杰, 桑树勋, 施健. 1997. 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, 203.

雒昆利, 李会杰, 牛彩香, 等. 2008. 中国西南地区二叠纪乐平世陆生生物大灭绝期煤中砷和硒的演化及古环境意义 [J]. 古地理学报, 10(4): 385 - 394.

煤炭科学研究院地质勘探分院, 山西省煤炭地质勘探公司. 1987. 太原西山含煤地层沉积环境 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 633.

彭格林, 钟蓉, 唐伟忠. 1999. 华北地台西缘晚石炭世—早二叠世海水进退及其与聚煤作用的关系 [J]. 古地理学报, 1(2): 18 - 27.

邵龙义, 陈家良, 李瑞军, 等. 2003. 广西合山晚二叠世碳酸盐岩型煤

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系层序地层分析[J]. 沉积学报, 21(1):168 - 174.
邵龙义,肖正辉,何志平,等. 2006. 晋东南沁水盆地石炭二叠纪煤岩系古地理及聚煤作用研究[J]. 古地理学报, 8(1):43 - 52.
邵龙义,窦建伟,张鹏飞. 1998. 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, 26(1):4 - 9.
邵龙义,何志平,鲁静. 2008. 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, 174.
邵龙义,张鹏飞,窦建伟,等. 1999. 含煤岩系层序地层分析的新认识—兼论河北晚古生代层序地层格架[J]. 中国矿业大学学报, 28(1):20 - 24.
邵龙义, 张鹏飞, 刘钦甫, 等. 1992. 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, 38(1):52 - 59.
邵龙义, 张鹏飞, 田宝霖,等. 1993. 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]. 地学探索, 8: 1 - 11.
张泓, 李恒堂, 熊存卫,等. 1998. 中国西北侏罗纪含煤地层与聚煤规律[M]. 北京:地质出版社, 1 - 316.
张鹏飞,金奎励,吴涛,等. 1997. 吐哈盆地煤沼沉积环境和煤成油[M]. 北京:煤炭工业出版社, 269.
张鹏飞,刘焕杰,卓越,等. 1983. 试论局限台地碳酸盐岩型含煤建造——桂中马滩一带合山组的某些沉积特征[J]. 沉积学报, 1(3):16 - 28.
张鹏飞,彭苏萍,邵龙义,等. 1993. 含煤岩系沉积环境分析[M]. 北京:煤炭工业出版社, 284.
张鹏飞,邵龙义,代世锋. 2001. 华北地台晚古生代海侵模式雏议[J]. 古地理学报, 3(1):15 - 24.
中国煤田地质总局. 1996a. 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, 362.
中国煤田地质总局. 1996b. 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, 547.
中国煤田地质总局. 1997. 华北地台晚古生代煤地质学研究[M]. 山西太原:山西科学技术出版社, 433.
中国煤田地质总局. 1999. 华南二叠纪含煤盆地特征及聚煤规律[M]. 江西南昌:江西科学技术出版社, 379.

References

Bohacs K, Suter J. 1997. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: Fundamental controls and paralic examples[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 81: 1 612 - 1 639.

Chen Shiyue, Liu Huanjie. 1994. Carboniferous Permian sequence stratigraphy in North China [J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 14(5):11 - 20(in Chinese with English abstract).

Chen Shiyue, Liu Huanjie. 1995. Sequence stratigraphic models and their evolution of Late Palaeozoic in North China[J]. Coal Geology & Exploration, 23(5):1 - 5(in Chinese with English abstract).

Chen Zhonghui. 1988. Sedimentary Environments of Coal and Coal-bearing Measures[M]. Hubei Wuhan: China University of Geoscience Press, 162(in Chinese).

Cheng Aiguo, *et al*. 2001. Analysis of Coal Accumulation System in China [M]. Jiangsu Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1 - 343(in Chinese with English abstract).

China National Administration of Coal Geology. 1996a. Sedimentary Environments and Coal Accumulation of Late Permian Coal Formations in Western Guizhou, Southern Sichuan and Eastern Yunnan[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 277(in Chinese).

China National Administration of Coal Geology. 1996b. Coal Accumulation and Coal Resource Evaluation of Ordos Basin[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 1 - 437(in Chinese with English abstract).

China National Administration of Coal Geology. 1997. Coal Geology of the Late Palaeozoic in North China Platform[M]. Shanxi Taiyuan: Shanxi Science and Technology Publishing House, 433(in Chinese).

China National Administration of Coal Geology. 1999. Characteristics and Coal Accumulation of the Late Permian Coal Basin in South China[M]. Jiangxi Nanchang: Jiangxi Science and Technology Publishing House, 379(in Chinese).

Davies R, Diessel C, Howell S, *et al*. 2005. 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, 61: 13 - 33.

Diessel C F K. 1992. Coal-bearing Depositional Systems——Coal Facies and Depositional Environments[M]. Springer-verlag.

Diessel C F K. 2007. Utility of coal petrology for sequence-stratigraphic analysis[J]. International Journal of Coal Geology, 70: 3 - 34.

Diessel C F K, Boyd R, Wadsworth J, *et al*. 2000. On balanced and unbalanced accommodation/peat accumulation ratios in the Cretaceous coals from Gates Formation, Western Canada, and their squence-stratigraphic significance[J]. International Journal of Coal Geology, 43: 143 - 186.

Ferm J C. 1976. Depositional models in coal exploration and development [C]. In: Sasena R S(ed). Sedimentary environments and hydrocarbons. AAPG/NOGS short course, New Orleans Geological Society: 60 - 78.

Fisk H N. 1960. Recent Mississippi River sedimentation and peat accumulation, Compte Rendu du Quat. Congr. Pour l'avancement des Etudes de Strat. et de Geol. du Carbonifere Heerlen, Sept: 15 - 20, 187 - 199.

Flint S S, Aitken J F, Hampson G. 1995. Application of sequence stratigraphy to coal-bearing coastal plain successions: Implications for the UK coal measures[C]. In: Whateley M K G, Spears D A (eds). European Coal Geology. Geological Society, London, Special Publication, (82):1 - 16.

Gibling M R, Saunders K I, Tibert N E, *et al*. 2004. Sequence sets, high-accommodation events and the coal window in the Carboniferous Sydney Coalfield, Atlantic Canada[C]. In: Pashin J C, Gastaldo R A (eds). Sequence Stratigraphy, Paleoclimate, and Tectonics of Coal-bearing Strata. AAPG Studies in Geology, (51): 169 - 197.

Hamilton D S, Tadros N Z. 1994. Utility of coal seams as genetic stratigraphic sequence boundaries in non-marine basins: An example from the Gunnedah Basin, Australia[J]. AAPG Bull, 78: 267 - 286.

Han Dexin, Yang Qi. 1980. Coalfield Geology of China, Vol. II[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 415(in Chinese).

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Hao Liming, Shao Longyi, Shi Zongbo, *et al*. 2000. The application of depostional cycle frequency curve to episodic coal accumulation: With an example from the Upper Permian in Southwest China[J]. Journal of Palaeogeography, 2(4): 12 - 19 (in Chinese with English abstract).

He Qixiang, Ye Zhizheng, Zhang Mingshu, *et al*. 1991. Transgression model of restricted epicontinental sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 9(1): 1 - 10 (in Chinese with English abstract).

Hartley A J. 1993. A depositional model for the Mid-Westphalian A to Late-Westphalian B Coal Measures of South Wales[J]. Journal of the Geological Society, 150: 1 121 - 1 136.

Heckel P H. 1995. Glacial-eustatic base-level—Climatic model for late Middle to Late Pennsylvanian coal-bed formation in the Appalachian basin[J]. Journal of Sedimentary Research, B65(3): 348 - 356.

Holz M, Kalkreuth W, Banerjee I. 2002. Sequence stratigraphy of paralic coal-bearing strata: An overview[J]. International Journal of Coal Geology, 48: 147 - 179.

Horne J C, Ferm J C, Caruccio, *et al*. 1978. Depositional models in coal exploration and mine planning in Appalachian region[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 62: 2 379 - 2 411.

Institute of Geological Exploration of CCMRI, Shanxi Provincial Coal Exploration Company. 1987. Sedimentary of Taiyuan Xishan Coal Basin[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 633 (in Chinese).

Izart A, Sachsenhofer R F, Privalov, *et al*. 2006. Stratigraphic distribution of macerals and biomarkers in the Donets Basin: Implications for paleoecology, paleoclimatology and eustacy[J]. International Journal of Coal Geology, 66(1 - 2): 69 - 107.

Large D J, Jones T F, Briggs J, *et al*. 2004. Orbital tuning and correlation of 1.7 my of continuous carbon storage in an early Miocene peatland[J]. Geology, 32(10): 873 - 876.

Large D J, Jones T F, *et al*. 2003. High-resolution terrestrial record of orbital climate forcing in coal[J]. Geology, 31(4): 303 - 306.

Li Baofang, Wen Xianduan, Li Guidong. 1999. High resolution sequence stratigraphy analysis on Permo-Carboniferous in North China platform[J]. Earth Science Frontiers, 6(Supplement): 81 - 94 (in Chinese with English abstract).

Li Sitian, Li Zhen, Lin Changsong, *et al*. 1993. Some fundamental problems about sequence stratigraphic analysis of coal basin[J]. Coal Geology & Exploration, 21(4): 1 - 8 (in Chinese with English abstract).

Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Han Meilian. 2001. Coal formation in transgressive events—A new pattern of coal accumulation[J]. Advances in Earth Science, 16(1): 120 - 124 (in Chinese with English abstract).

Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Wang Mingzhen. 1996. Sequence stratigraphic framework and sea-level changes in the Late Palaeozoic epicontinental basin in northern China[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 16(5): 1 - 11 (in Chinese with English abstract).

Li Zengxue. 1994. Sequence stratigraphical analysis of epicontinental coal accumulating basin-research advances in epicontinental coal accumulating basin of north China[J]. Advances in Earth Science, 9(6): 65 - 70 (in Chinese with English abstract).

Liu Huanjie. 1982. A preliminary study of coal-forming environment of tidal flats - models of sedimentary environment of Upper Permian coal-bearing Longtan Formation in Sanhuiba[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2(2): 61 - 71 (in Chinese with English abstract).

Liu Huanjie, Jia Yuru, Long Yaozhen, *et al*. 1987. The features of the barrier island systems of the epeiric sea and their event deposits of coal-bearing formations in Carboniferous of North China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 5(3): 73 - 80.

Liu Huanjie, Sang Shuxun, Shi Jian. 1997. Comparative Sedimentology Research on Coal-forming Environments—Mangrove Tidal Flats and Mangrove Peats in the Hainan Island of South China Sea[M]. Jiangsu Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1 - 203 (in Chinese with English abstract).

Luo Kunli, Li Huijie, Niu Caixiang, *et al*. 2008. Evolution of arsenic and selenium of coals during mass extinction of land species in the Permian in southwestern China and its palaeoenvironmental significance[J]. Journal of Palaeogeography, 10(4): 385 - 394 (in Chinese with English abstract).

McCabe P J. 1984. Depositional models of coal and coal-bearing strata[C]. In: Rahamani R A, Flores R M (eds). Sedimentology of coal and coal-bearing sequences. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 7: 13 - 42.

Milankovitch M. 1941. Kanon der Erdbestrahlungen und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. Belgrade[J]. New English Translation by Nikola Pantic. 1998. Canon of Insolation and the Ice Age Problem. Alven Global, 636.

Mitchum R M, Van Wagoner J C. 1991. High-frequency sequences and their stacking patterns: Sequence stratigraphic evidence of high-frequence eustatic cycles[J]. Sedimentary Geology, 70: 131 - 160.

Peng Gelin, Zhong Rong, Tang Weizhong. 1999. The relationship between the coal accumulating process and the Late Carboniferous-early Early Permian marine transgression regression on the western maigin of the North China Platform[J]. Journal of Palaeogeography, 1(2): 18 - 27 (in Chinese with English abstract).

Petersen H I, Rosenberg P, Andsbjerg J. 1996. Organic geochemistry in relation to the depositional environments of Middle Jurassic coal seams, Danish Central Graben, and implications for hydrocarbon generative potential[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 80(1): 47 - 62.

Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition I-conceptual framework[C]. In: Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G, *et al* (eds). Sea-levelchanges: An integerated approach. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 42: 109 - 124.

Rahmani R A, Flores R M. 1984. Sedimentology of coal and coal-bearing sequences of North-America: A historical review[C]. In: Rahmani R A, Flores R M (eds). Special publication of the Internation-

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

al Association of Sedimentologists 7, Blackwell, 3 - 10.

Ramsbottom W H. 1979. Rates of transgression and regression in Carboniferous of NW Europe[J]. Journal of the Geological Society of London, 136: 147 - 153.

Riegel W. 1991. Coal Cyclotherms and Some Models for Their Origin[M]. In: Einsele G, Ricken W, Seilacher A (eds). Cycles and Events in Stratigraphy. New York: Springer, Berlin Heidelberg, 733 - 750.

Shao Longyi, Chen Jialiang, Li Ruijun, *et al* 2003. A sequence stratigraphic interpretation on Late Permian Carbonate Coal Measures in the Heshan Coal Field, Southern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 21(1): 168 - 174 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, Dou Jianwei, Zhang Pengfei 1998. The status and prospect of sedimentology and sequence stratigraphy research on the coal bearing strata[J]. Coal Geology & Exploration, 26(1): 4 - 9 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, He Zhiping, Lu Jing 2008. Sequence stratigraphy and Coal Accumulation of the Carboniferous and Permian in the Western Peri-BohaiBay Area of the Northern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 174 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, Xiao Zhenghui, He Zhiping, *et al* 2006. Palaeogeography and coal accumulation for coal measures of the Carboniferous Permian in Qinshui Basin, southeastern Shanxi Province[J]. Journal of Palaeogeography, 8(1): 43 - 52 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, Tim Jones, Rod Gayer, *et al* 2003a. 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, 55: 1 - 26.

Shao Longyi, Zhang Pengfei, *et al* 1998. Late Permian coal-bearing carbonate successions in southern China: Coal accumulation on carbonate platforms[J]. International Journal of Coal Geology, 37(3 - 4): 235 - 256.

Shao Longyi, Zhang Pengfei, Gayer R A, *et al* 2003b. Coal in a carbonate sequence stratigraphic framework: The Late Permian Heshan Formation in central Guangxi, southern China[J]. Journal of Geological Society London, 160: 285 - 298.

Shao Longyi, Zhang Peifei, Liu Qinfu, *et al* 1992. The lower Carboniferous Ceshui Formation in central Hunan, South China: Depositional sequences and episodic coal accumulation[J]. Geological Review, 38(1): 52 - 59 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, Zhang Pengfei, Tian Baolin, *et al* 1993. Sequence stratigraphy of coal-bearing strata and sea-level fluctuation for the Late Permian in Zhina area, western Guizhou Province, China[J]. Geoscience Exploration, 8: 1 - 11 (in Chinese with English abstract).

Shao Longyi, Zhang Peifei, Dou Jianwei, *et al* 1999. New considerations on coal measures sequence stratigraphy—A case study of the Late Paleozoic coal measures in southern Hebei[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 28(1): 20 - 24 (in Chinese with English abstract).

Stout W. 1928. Some features of the Monongahela series (abs.)[J]. Ohio J. Sci, 28: 153.

Turner B R, Richardson D. 2004. Geological controls on the sulphur content of coal seams in the Northumberland Coalfield, Northeast England[J]. International Journal of Coal Geology, 60(2 - 4): 169 - 196.

Udden J A. 1912. Geology and mineral resources of the Peoria quadrangle, Illinois[J]. U. S. Geol Surv. Bull, 506: 103.

Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, *et al* 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in welllogs, cores, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies[J]. Am. Assoc. Pet. Geol., Methods in exploration series, 7: 55.

Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, *et al* 1988. An overview of the Fundamentals of Sequence Stratigraphy and Key Definitions[C]. In: Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G, *et al* (eds). Sea-level Changes: An Integrated Approach. SEPM Special Publication, 42: 39 - 46.

Wanless H R, Shepard F P. 1936. Sea level and climatic changes related to Late Paleozoic cycles[J]. Geol. Soc. Amer. Bull, 47: 1 177 - 1 206.

Wanless H R, Weller J M. 1932. Correlation and extent of Pennsylvanian cyclotherms[J]. Geol. Soc. Amer. Bull, 43: 1 003 - 1 016.

Weller J M. 1930. Cyclic sedimentation of the Pennsylvanian period and its significance[J]. Journal of Geology, 38: 97 - 135.

Weller J M. 1931. The conception of cyclical sedimentation during the Pennsylvanian Period[C]. In: Papers presented at the Quarter Centennial Celebration of the Illinois State Geological Survey. 111. Geol. Surv. Bull, 60, 163 - 177.

Wilgus C K, Posamentier H W, Ross C A, *et al* 1988. Sea-levelchanges: An integerated approach[C]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 42: 47 - 70.

Zhang Hong, Li Hengtang, Xiong Cunwei, *et al* 1998. Jurassic Coal Bearing Strata and Coal Accumulation of Northwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 316 (in Chinese with English abstract).

Zhang Pengfei, Jin Kuili, Wu Tao, *et al* 1997. Study on sedimentology and coal-derived oil from Jurassic coal-bearing series in Tuha (Turpan-Hami) Basin, northwestern China[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 269 (in Chinese with English abstract).

Zhang Pengfei, Liu Huanjie, Zhuo Yue, *et al* 1983. The coal-bearing formation of carbonate type in restricted platform - some sedimetary characteristics of Heshan Formation in the Matan region of central Guangxi[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1(3): 16 - 28 (in Chinese with English abstract).

Zhang Pengfei, Peng Suping, Shao Longyi, *et al* 1993. Depositional Environments of Coal-bearing Successions[M]. Beijing: China Coal Industry Press, 284 (in Chinese).

Zhang Pengfei, Shao Longyi, Dai Shifeng 2001. Discussions on the transgression model of the Late Palaeozoic in the North China Platform[J]. Journal of Palaeogeography, 3(1): 15 - 24 (in Chinese with English abstract).

(责任编辑 郑秀娟)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net