

环渤海湾西部 石炭系一二叠系层序地层 及聚煤作用研究

HUANBOHAIWAN XIBU
SHITANXI—ERDIEXI CENGXU DICENG
JI JUMEI ZUOYONG YANJIU

邵龙义 何志平 鲁 静 著

地 质 出 版 社

环渤海湾西部 石炭系一二叠系层序地层 及聚煤作用研究

邵龙义 何志平 鲁 静 著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书以环渤海湾西部(河北、北京、天津)的石炭纪—二叠纪含煤岩系为例,探讨了近海型含煤岩系层序地层格架中的厚煤层分布及古土壤发育特征。提出研究区在晚石炭世—早二叠世早期为滨外陆棚和障壁—潟湖体系,早二叠世晚期—中二叠世以三角洲体系为主,晚二叠世以河流和湖泊沉积体系为主。识别出古新成土、古潜育土、古有机土、古变性土、古旱成土、古老成土和古氧化土等7种类型古土壤,并据此推测该区晚石炭世—早二叠世为潮湿气候,中二叠世变为长湿短干气候,晚二叠世演化为半干旱气候。将石炭系—二叠系划分为7个三级复合层序和20~25个四级层序。提出四级层序中煤层一般形成于海侵体系域中的海侵过程;在三级复合层序中,障壁—潟湖体系中泥炭堆积速率小于可容空间增加速率,厚煤层主要形成于可容空间增加速率最小的海侵面附近,如太原组8号煤层,同时该煤层在研究区有“北厚南薄”的分布趋势;在冲积平原和三角洲平原背景中,泥炭堆积速率大于可容空间增加速率,厚煤层主要形成于可容空间增加速率最大的最大海泛面附近,如山西组的2号煤层,同时该煤层在研究区有“北薄南厚”的分布趋势。本书作为克拉通含煤盆地层序地层学实例,希望能对煤系层序地层学及聚煤作用模式研究有所贡献。

本书可供煤田地质、油气地质、沉积学等领域的科技人员、大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

环渤海湾西部石炭系—二叠系层序地层及聚煤作用研究 / 邵龙义, 何志平, 鲁静著. —北京: 地质出版社, 2008.5

ISBN 978-7-116-05668-8

I. 环… II. ①邵…②何…③鲁… III. ①渤海湾—石炭纪—地层层序—研究②渤海湾—二叠纪—地层层序—研究③渤海湾—石炭纪—煤系—成矿条件—研究④渤海湾—二叠纪—煤系—成矿条件—研究 IV. P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 043024 号

组稿编辑: 刘亚军

责任编辑: 夏军宝 祁向雷

责任校对: 关风云

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)82324508 (邮购部); (010)82324578 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 889mm × 1194mm $\frac{1}{16}$

印 张: 11.75 插页: 3

字 数: 400 千字

版 次: 2008 年 5 月北京第 1 版 · 第 1 次印刷

定 价: 60.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-05668-8

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

序

我很高兴看到邵龙义教授这本专著即将付梓。

邵龙义教授多年来从事含煤岩系沉积学、层序地层学方面的教学和科研工作,在煤炭资源聚集与赋存规律研究方面成果显著。邵龙义教授早在作研究生期间,就在对我国南方早石炭世和晚二叠世近海克拉通盆地岩相古地理及聚煤规律的研究中提出用以表示横跨不同相区的大面积聚煤的“幕式聚煤作用”。在其后来的多项研究中针对含煤岩系沉积学及层序地层学进行了深入研究,发现在盆地基底沉降速率较小的滨海平原靠陆一侧,由于泥炭堆积速率大于基准面速率,厚煤层倾向于在最大海泛面附近聚集;而在盆地基底沉降速率较大的靠海一侧,泥炭堆积速率小于基准面抬升速率,厚煤层倾向于在海侵面附近形成。据此提出了一个不同的近海克拉通盆地层序地层格架内厚煤层的分布模式。在对黔桂一带晚二叠世碳酸盐岩台地聚煤作用的研究中,提出了包括台地总体变浅成煤、台内滩丘变浅成煤以及台地边缘浅滩变浅成煤等碳酸盐岩台地三种聚煤模式,提出碳酸盐岩型煤系煤层的地球化学特征及成因。

在本部专著中,邵龙义教授和他的课题组成员利用测井、岩心及露头数据进行了渤海湾盆地石炭系—二叠系层序地层学和古土壤学研究,并着重探讨了近海盆地层序格架内厚煤层的形成和古土壤的发育特征,在研究区石炭系—二叠系中识别出滨外陆棚、障壁—潟湖、三角洲、河流和湖泊等5大沉积体系;将环渤海湾西部石炭系—二叠系划分为7个三级复合层序,20~25个四级层序;发现三级复合层序Ⅱ的厚煤层主要形成于三级初始海泛期,而三级复合层序Ⅲ的厚煤层主要形成于三级最大海泛期的新认识。依据古土壤宏观特征、微观特征和地球化学特征,识别出古新成土、古潜育土、古有机土、古变性土、古旱成土、古老成土和古氧化土等7种类型古土壤;根据古土壤在剖面上的发育规律,绘制了古气候变化曲线,提出从晚石炭世温暖潮湿气候向晚二叠世的炎热干燥的长周期的气候变化是大陆漂移引起的结果,降雨特征有长湿短干—半湿半旱—短湿长干的变化,而其间一些短周期气候变化则是与区域性海侵—海退旋回有关的基准面变化的产物。该书的含煤岩系层序地层学工作方法为聚煤作用规律分析提供了新的研究思路,首次系统地把古土壤的发育和赋存特征引入到煤系层序地层的研究中是一个创新。

诚然,本专著还有某些不足之处,如关于近海克拉通盆地层序发育的构造控制以及古土壤的研究方法等方面还有待于进一步探索和完善。

总之,该专著原始资料翔实、分析有据、结论可信,在等时地层格架内厚煤层的聚集和古土壤分布特征方面有独到的见解,该专著的出版在丰富我国近海盆地聚煤理论的同时,也必将为该区煤炭资源的勘探和科学开发提供理论依据。

张盼龙

2008年3月于中国矿业大学(北京)

前言

在过去 30 年间,有关层序地层学理论和方法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层序的概念发展到如今的比地震地层具有更高分辨率的“高分辨率层序地层学 (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地质资料的预测,并且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。总之,层序地层在力求反映全球海平面(基准面)变化规律的同时,也为油气和煤田勘探提供了一种强大的具预测功能的相分析工具。中国华北地区在石炭纪—二叠纪为一大型陆表海聚煤盆地,从陆到海沉积相带发育齐全,标志层及含煤旋回性发育良好。该聚煤盆地中蕴藏着丰富的煤炭资源,有较好的沉积学、地层学、构造地质学及煤田地质学研究基础。本书选择环渤海湾西部的河北、北京和天津地区的石炭系—二叠系进行沉积相、层序地层及古土壤学研究,研究成果作为克拉通含煤盆地层序地层学实例,希望能对煤系层序地层学及聚煤作用模式研究有所贡献。

本书着重探讨了环渤海湾西部的石炭纪—二叠纪的层序地层格架中的厚煤层分布及古土壤发育特征。提出该区在晚石炭世—早二叠世早期为滨外陆棚和障壁—潟湖体系,早二叠世晚期—中二叠世以三角洲体系为主,晚二叠世以河流和湖泊沉积体系为主。识别出古新成土、古潜育土、古有机土、古变性土、古旱成土、古老成土和古氧化土等 7 种类型古土壤,并据此推测该区晚石炭世—早二叠世为潮湿气候,中二叠世变为长湿短干气候,晚二叠世演化为半干旱气候,晚二叠世末期湿度又有所增加。将石炭系—二叠系划分为 7 个三级复合层序和 20~25 个四级层序。煤系层序地层研究表明,四级层序中煤层一般形成于海侵体系域中的海侵过程,在三级复合层序中,障壁—潟湖体系中泥炭堆积速率小于可容空间增加速率,厚煤层主要形成于可容空间增加速率最小的海侵面附近,如太原组 8 号煤层,同时该煤层在研究区有“北厚南薄”的分布趋势;在冲积平原和三角洲平原背景中,泥炭堆积速率大于可容空间增加速率,厚煤层主要形成于可容空间增加速率最大的最大海泛面附近,如山西组的 2 号煤层,同时该煤层在研究区有“北薄南厚”的分布趋势。

本书研究工作得到国家 973 项目专题(2006CB202202)、国家自然科学基金项目(40172050, 40672103)、教育部新世纪优秀人才支持计划(2004)及优秀青年教师资助计划(2001)、中石油“九五”科技项目(渤海湾盆地及外围深层层序及岩相古地理研究,课题负责人:马永生及田海芹)、中石油“十五”科技项目(渤海湾盆地石炭系—二叠系石油地质研究与有利地区选择,课题负责人:赵长毅)、国土资源部全国危机矿山接替资源找矿项目(200700000)及中石化前瞻性课题(2007)(中国北方地区岩相古地理地质背景研究,课题负责人:王明镇和邵龙义)等科研项目的资助。

参加本书科研工作的有硕士研究生窦建伟(94级)、杨利军(97级)、李瑞军(99级)、肖正辉(01级)及博士生何志平(02级)。本书由邵龙义、何志平、鲁静撰写,全书由邵龙义统稿。张鹏飞教授对全书进行了审阅,并为本书作序。

本书的研究工作得到中国矿业大学(北京)资源与地球科学系师生的支持,野外工作得到

河北煤田地质局、中国石油勘探开发研究院等单位的协助，韩德馨院士以及张鹏飞、金奎励、田宝霖、梅美棠、任德貽等教授对研究工作进行了悉心指导，彭苏萍院士、曹代勇教授、刘钦甫教授、唐跃刚教授及王延斌教授对本书给予了帮助及支持，河北煤田地质局的武清海、孟逢源等教授级高级工程师对野外地质调查工作进行了具体指导，并提供了宝贵的地层及煤层对比等方面的资料。笔者在此对上述单位及专家表示衷心感谢。

该书的出版得到了国家973项目专题(2006CB202202)及国家自然科学基金项目(40672103)的资助。

由于作者水平有限，书中或有欠妥之处，敬请读者不吝指正。

作 者

2008年4月

Abstract

The western peri-Bohai bay (WPB) area in this book includes Hebei Province, Beijing City and Tianjin City. It is located in the east part of the central to northern zones of the North China platform. Tectonically the North China platform constitutes a part of the Sino-Korea Platform. It has experienced an Archean to Early Proterozoic crystalline basement stage, and a Middle and New Proterozoic faulting trough stage, an Early and Late Palaeozoic cratonic basin stage and an Mesozoic and Cenozoic inland rifting basin stage.

The Late Carboniferous and Permian in the WPB area is composed of the Benxi Formation (Late Carboniferous), Taiyuan Formation (Late Carboniferous to Early Permian), Shanxi Formation (Early Permian), Xiashihezi Formation (Middle Permian), Shangshihezi Formation (Middle to Late Permian), and Shiqianfeng Formation (Late Permian). The Benxi and Taiyuan Formations are composed of interbedded marine and non-marine coal-bearing strata dominated by the dark grey bioclastic limestone, mudstone, siltstone, sandstone, and coals. The Shanxi, Xiashihezi and Shangshihezi Formations are represented by the paralic coal-bearing strata consisting of the light grey to dark grey and purple sandstones, siltstones, mudstones, and coals. The Shiqianfeng Formation is composed of an inland lacustrine succession which is dominated by the light-grey and red-purple sandstone, siltstone and mudstones.

Sedimentology and sequence stratigraphy of the Permo-Carboniferous in the western peri-Bohai bay (WPB) area were investigated using data from well logs, cores, and outcrops, with the emphasises on the palaeosols and the distribution of thick coals in the sequence stratigraphic framework. Four aspects are focused in this book:

1. Lithofacies and depositional systems

1) A total of 18 types of lithofacies are recognised by the characteristics of lithology and depositional structures described in the outcrop and borehole sections, ranging from conglomerates, sandstones, siltstones, mudstones, limestones, and coals.

2) Five main depositional systems are identified, including the offshore carbonate shelf system, barrier-lagoonal systems, deltaic system, fluvial system and lacustrine system. The Late Carboniferous and early Early Permian was dominated by the offshore carbonate shelf and barrier-lagoonal systems, the late Early Permian to Middle Permian were dominated by a deltaic system, and the Late Permian was dominated by the fluvial and lacustrine systems.

3) Palaeosols, lithologies, clay mineralogy and geochemistry of the Permo-Carboniferous strata in the vertical sections reveal that the palaeoclimates had an overall trend from humid to arid in a fluctuating way during the Permo-Carboniferous in the WPB area. This trend was mainly controlled by transgression, palaeogeography and palaeotectonics, among which palaeotectonics played the dominated role.

2. High-resolution sequence stratigraphy and the relationship between the thick coal seams and the sequence stratigraphic framework

1) Totally 7 third-order composite sequences (CS) and 20-25 fourth-order sequences were developed in the Permo-Carboniferous in the WPB area, with each composite sequence having a division of lowstand sequence set (LSS), transgressive sequence set (TSS), and highstand sequence set (HSS). CS I – CS III were developed with the TSS and HSS in most area, and the LSS was only locally developed. CS IV and CS V were developed with the LSS, TSS and HSS in the whole WPB area, in which the LSS is mainly composed of the incised channel fill deposits. CS VI was developed with all three sequence sets in the southern Hebei, while in other areas just LSS and lower part of TSS were preserved. CS VII was partially found in the southern Hebei.

2) The palaeogeographic maps have been reconstructed based on the contour maps of a variety of palaeogeographic parameters for each composite sequence. These parameters include the thickness and percentages of sandstones, conglomerates, limestones, coals and carbonaceous mudstones, as well as the thickness ratio of sandstones to mudstones. During deposition of CS I, the offshore carbonate shelf covered the eastern part of research areas and the tidal flat and lagoon covered the western part, with a northeasterly marine transgression. During deposition of CS II, the deltaic plain occurred in the northern part, with the marine transgression from the southeast. During deposition of CS III, the northern and southern areas were occupied by a fluvial environment, and in the middle part by an inter-delta bay, the tidal flat occupied the southeast areas. During deposition of CS IV, the southeast part was covered by deltaic plain and the other areas were occupied by fluvial environments. Palaeogeographic outline of CS V was similar to CS IV, but the former showed that the southeastern part was covered by deltaic plain and lacustrine settings.

3) Developing models of the fourth-order sequence and the third-order composite sequence in the fluvial-deltaic plain and the delta-barrier-lagoon-offshore shelf systems are discussed with the lithological characteristics, depositional cycles, combination of facies and their vertical variations. In the fluvial – upper deltaic plain environment, the LSS is composed of stacking braid channel fills or extensively spread sheet-like sandstones, the HSS beneath the sequence boundary is characterised by the isolated channels sandstones, and the TSS is generally stacked by the fourth-order sequences composed of the flood basin mudstones and the crevasse splay siltstones. In the inter-fluvial areas without channels, sequence boundaries were developed with the palaeosols and coincided with the transgressive surface.

4) The thick coals tend to be formed when the peat accumulation rates are well balanced by the accommodation development rates. In a third-order sequence stratigraphic framework, the rates of the fourth-order sea-level rise are slower at the transgressive surface than at the maximum flooding surface; accordingly, the rates of accommodation development at the transgressive surface are slower than those at the maximum flooding surface. The No.8 coal of the Taiyuan Formation was formed in the barrier-lagoon and offshore shelf settings and was developed at the transgressive surface of the composite sequence II, where the lower peat accumulation rate was balanced by the slower accommodation creation rate. In contrast, the No.2 coal of the Shanxi Formation was formed in a fluvial-delta setting, and was developed at the maximum flooding surface of the composite sequence III, where the higher peat accumulation rate was balanced by the higher accommodation creation rate. The coal in the fourth-order sequence represented by “seat earth-coal-marine limestone” could be formed during the “lag time” of marine deposits, and during the “lag time”, development of balanced accommodation creation rates and peat accumulation rates would favor the accumulation of thick coals.

3. Palaeosols and their implications in palaeoclimatic and sequence stratigraphic analyses

1) Seven types of palaeosols are recognised by the macro-structures, color, micro-morphology, clay mineralogy and geochemical characteristics at the Shabagou section and in the borehole DP1 section. They are palaeoaddendosols, palaeogleysols, palaeohistosols, palaeovertisols, palaeoaridisols, palaeoeldisols and palaeooxisols.

2) Palaeoclimates can be reflected by the palaeosol types. In the PWB area, the Late Carboniferous to the Early Permian were developed with the palaeoaddendosols, palaeogleysols, and palaeohistosols, reflecting a relatively humid palaeoclimate; The Middle Permian was developed with the palaeogleysols, palaeohistosols, and palaeovertisols, reflecting a long humid and short arid to semi-arid palaeoclimate; The early Late Permian was developed with the palaeoaridisols, palaeoeldisols and palaeooxisols, representing an arid palaeoclimate; The late Late Permian was developed by the palaeoeldisols and palaeogleysols, representing a semi-arid palaeoclimate. The overall long-term trend of palaeoclimates from the humid to arid was attributed to the plate tectonics, while the short-term fluctuation of the palaeoclimates between humid and arid was due to periodical marine transgression.

3) Palaeosols show a distinct distribution in the fourth-order sequence stratigraphic framework of different

depositional settings. In the transitional setting, the TST was developed with the palaeoaddendosols, palaeooxisols (containing siderites), palaeogleysols and palaeohistosols, while the HST was developed with the palaeoaddendosols and palaeohistosols. In the fluvial environment, the LST was developed with the palaeoaridisols and palaeooxisols; the TST was developed with the palaeohistosols, palaeovertisols, palaeooxisols, palaeoaridisols and palaeoeldisols; and the HST was developed with the palaeoeldisols and palaeovertisols.

4. Application of the wavelet transformation in the sequence stratigraphy

1) A proper decomposition scale of wavelet can be found by comparing the multi-scaled wavelet decomposition of the GR logging data with the deposition-cycle analysis. The high-frequency signal with such a decomposition scale can be used to effectively divide depositional cyclic units.

2) A high-frequency signal can be selected by comparing the analyzing result of sequence stratigraphy with the multi-level decomposition of GR logging data, which will adjust the division of sequence stratigraphic units based on the geological data. The curves stacked by different -scale high-frequency signals corresponding to stratigraphic units can be used to analyse the movement of base level.

Key words: high-resolution sequence stratigraphy; palaeosols; palaeoclimate; Permian, Carboniferous; North China.

目 次

序	
前 言	
Abstract	
0 含煤岩系沉积学及层序地层学进展	(1)
0.1 含煤岩系沉积学研究历史	(1)
0.2 海平面变化与聚煤作用关系的研究	(2)
0.3 层序地层格架下成煤模式研究	(3)
0.4 关于“海相层滞后时段聚煤”	(4)
0.5 煤和含煤岩系沉积学的展望	(4)
1 区域地质概况	(6)
1.1 区域构造背景	(6)
1.1.1 华北聚煤盆地结构	(7)
1.1.2 华北聚煤盆地古构造及古地理演化	(8)
1.2 区域地层特征	(9)
1.2.1 岩石地层单位及空间分布	(9)
1.2.2 煤岩层对比	(16)
1.2.3 年代地层划分与对比	(17)
1.3 小结	(18)
2 环渤海湾西部石炭系—二叠系沉积体系及沉积相	(19)
2.1 岩相类型及其特征	(19)
2.1.1 碎屑岩岩相类型及其特征	(19)
2.1.2 碳酸盐岩岩相类型及其特征	(22)
2.2 沉积体系及其沉积相特征	(22)
2.2.1 河流沉积体系及沉积相	(23)
2.2.2 三角洲沉积体系及沉积相	(25)
2.2.3 障壁—潟湖沉积体系及沉积相	(29)
2.2.4 湖泊沉积体系及沉积相	(31)
2.2.5 滨外碳酸盐岩陆棚沉积体系及沉积相	(31)
2.2.6 关于煤层形成环境	(31)
2.3 沉积环境的演化	(32)
2.3.1 微量元素分布特征	(32)
2.3.2 沉积环境演化	(33)
2.4 石炭纪—二叠纪古气候特征	(34)
2.4.1 古气候判别标志	(34)
2.4.2 石炭纪—二叠纪气候演化	(38)

2.4.3 古气候变化原因分析	(38)
2.5 小结	(39)
3 环渤海湾西部石炭系—二叠系层序地层格架	(40)
3.1 层序地层学研究现状	(40)
3.1.1 层序地层学简介	(40)
3.1.2 高分辨率层序地层学研究现状	(41)
3.1.3 含煤岩系高分辨率层序地层学研究现状	(42)
3.1.4 华北盆地石炭系—二叠系层序地层研究现状	(43)
3.1.5 本书采用的层序地层学术语体系	(44)
3.2 层序关键界面识别	(46)
3.2.1 三级复合层序边界	(46)
3.2.2 四级层序边界	(48)
3.2.3 初始海泛面与最大海泛面	(48)
3.3 重点剖面点(井)高分辨率层序地层分析	(49)
3.3.1 邢台矿区 DP1 钻孔高分辨率层序地层分析	(50)
3.3.2 临城沙坝沟露头剖面高分辨率层序地层分析	(52)
3.3.3 天津宝坻水 3 钻孔高分辨率层序地层分析	(55)
3.4 石炭系—二叠系层序地层模式	(58)
3.4.1 河流—上三角洲平原层序地层模式	(58)
3.4.2 下三角洲平原—障壁—潟湖—滨外陆棚体系层序地层模式	(61)
3.5 石炭系—二叠系层序地层划分对比	(65)
3.5.1 晚石炭世障壁潟湖体系的层序地层(复合层序 I)特征	(65)
3.5.2 早二叠世早中期滨岸带层序地层(复合层序 II、III)特征	(66)
3.5.3 早二叠世晚期—晚二叠世早期河流体系的层序地层(复合层序 IV、V、VI)特征	(68)
3.5.4 晚二叠世晚期河流—湖泊体系层序地层(复合层序 VII)特征	(70)
3.6 层序地层格架下的厚煤层聚集模式	(70)
3.6.1 石炭系—二叠系煤层在层序地层格架中的分布特征	(70)
3.6.2 层序地层格架中厚煤层成因分析	(70)
3.7 基于层序地层格架的岩相古地理及其演化特征	(72)
3.7.1 岩相古地理图编图思路与步骤	(72)
3.7.2 环渤海湾西部石炭系—二叠系不同层序的岩相古地理特征	(74)
3.7.3 环渤海湾西部石炭系—二叠系古地理演化	(108)
3.8 小结	(109)
4 小波变换在层序地层研究中的应用	(111)
4.1 小波变换基本原理	(111)
4.1.1 小波变换的由来及其特点	(111)
4.1.2 一维连续小波变换	(112)
4.1.3 小波多尺度分解	(114)
4.2 小波变换沉积旋回单元的划分	(114)
4.2.1 测井曲线的选择	(114)
4.2.2 根据小波变换高频成分划分沉积旋回单元	(115)
4.3 GR 曲线小波变换高频成分的基准面意义	(117)

4.3.1 DP1 钻孔 GR 曲线小波变换高频成分的基准面意义	(118)
4.3.2 巨 1 井 GR 曲线小波变换高频成分的基准面意义	(120)
4.4 小结	(123)
5 古土壤及其古气候和层序地层学意义	(124)
5.1 土壤学的有关概念	(124)
5.1.1 土壤的形成	(124)
5.1.2 土壤形态与土壤剖面	(125)
5.1.3 土壤的分类	(126)
5.1.4 土壤发育程度与土壤成熟度的概念	(126)
5.2 古土壤及其研究方法	(128)
5.2.1 古土壤的基本概念	(128)
5.2.2 古土壤分类	(130)
5.2.3 古土壤的研究意义	(132)
5.2.4 古土壤研究方法	(133)
5.3 河北南部石炭系—二叠系古土壤特征	(134)
5.3.1 河北南部石炭系—二叠系古土壤的识别标志	(134)
5.3.2 河北南部石炭系—二叠系古土壤类型及特征	(141)
5.4 古土壤的古气候意义	(151)
5.5 古土壤在四级层序中的分布	(152)
5.5.1 晚石炭世本溪组四级层序中的古土壤	(152)
5.5.2 早二叠世早期太原组四级层序中古土壤	(153)
5.5.3 早二叠世晚期山西组四级层序中的古土壤	(153)
5.5.4 中二叠世早期下石盒子组四级层序中的古土壤	(154)
5.5.5 中二叠世晚期上石盒子组四级层序中的古土壤	(154)
5.5.6 晚二叠世早期上石盒子组四级层序中的古土壤	(155)
5.5.7 古土壤类型与体系域的关系	(157)
5.6 小结	(158)
6 结论	(160)
参考文献	(162)
附表 1 河北临城沙坝沟剖面岩样粘土矿物相对含量数据表	(168)
附表 2 邢台矿区 DP1 钻孔岩样粘土矿物相对含量数据表	(170)
附表 3 河北临城沙坝沟剖面常量元素相对含量数据表	(171)
附表 4 邢台矿区 DP1 钻孔岩样常量元素相对含量数据表	(174)

0 含煤岩系沉积学及层序地层学进展

0.1 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“三角洲迁移模式阶段”(Rahmani等,1984;陈钟惠,1988;Riegel,1992;张鹏飞等,1993)。

20世纪初,当Udden(1912)明确提出海侵—海退旋回是造成北美上石炭统含煤岩系中岩性单元规律性重复现象的原因之后,便立即引起地质学家对含煤岩系旋回性沉积的广泛兴趣。Weller(1930)、Wanless和Weller(1932)及Wanless和Shepard(1936)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。在南斯拉夫数学家米兰柯维奇提出地球轨道参数变化周期后,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的。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。

20世纪60年代,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纪含煤地层研究,他们对比研究了阿巴拉契亚地区石炭纪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(Ferm和Coleman,1963;Ferm,1974),从此便开始了“三角洲迁移模式”阶段的历史。Ferm(1974)和Horne等(1978)将阿巴拉契亚地区石炭纪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、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(Young,1955)、河流—三角洲模式(Ferm和Horne,1979)、冲积扇模式(Heward,1978)、砂质辫状河模式(Haszeldine等,1980)、湖泊模式(Ayers和Kaiser,1984)、风成沙丘模式(Richardson,1985)以及碳酸盐岩台地模式(张鹏飞等,1983;Shao Longyi等,1998)。这些成煤模式对成煤环境特征、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它旋回机制的争论,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20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。20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,从前寒武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20世纪80年代末期。1988年,C.K.威尔格斯等主编特刊《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)、Posamentier等(1988)、Van Wagoner等(1990)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区域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它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,即一些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,层序地层学的出现开辟了煤和含煤岩系沉积学研究的新篇章。

0.2 海平面变化与聚煤作用关系的研究

煤层形成于沼泽环境,这是不争的事实。但随着认识的深入,自从 Ferm、Horne 等人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,我国学者先后对我国西南、华南、华北、西北等地区(中国煤田地质总局,1996~1999),对石炭纪一二叠纪、中生代、新生代等不同时期的含煤岩系的沉积环境、沉积古地理及聚煤规律进行了系统分析,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,泥炭沉积并不是与局部的陆源碎屑沉积供给同时发生,在沼泽发育阶段,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化石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;陈世悦等,1995;邵龙义等,2000)。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, 2007; Hamilton 等, 1994)。近来的一系列研究(Diessel, 1992; Hamilton 等, 1994)表明,有相当一部分煤层可能形成于海平面抬升过程,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与上覆的陆源碎屑沉积物一起,常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。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,从而又促进厚的泥炭层的堆积。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(4~100a 堆积 1mm (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抬升。因此,发育较好的煤层一般都形成于最大海泛期。Hamilton 等(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 Ferm (1976) 解释为三角洲模式形成的大面积分布(数百平方公里)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(数十公里)分布的厚煤层(厚度大于2m),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分布广泛的厚煤层形成于海水达到高位期间,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。

0.3 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、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。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,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)。

“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。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等,1996; Diessel, 2000; Gibling等, 2004; Shao等, 2003; Turner等, 2004; Davies等, 2005; Izart等, 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)、挥发分产率以及氢与碳的相对原子质量比等指标向上增加,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)。

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中的情况一样,中部最薄的三_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,上部位于高位层序组顶部的三_上煤层虽然有一定厚度,但因其灰分含量及夹研层厚度过大而没有开采价值(邵龙义等,2003)。

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。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。

0.4 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,北方石炭纪海相灰岩与其上、下沉积物在相序上不连续。后来一些学者进一步将突发型海侵引申到聚煤作用,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。

邵龙义等(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“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并形成了红树林泥炭层,最终的层序是不整合面—红树林泥炭层—海相碳酸盐沉积,这一看法可能解释了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。

一个典型的海平面上升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,在低水位期,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,在海侵造成的基准面不断抬升的过程中,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,发育潟湖泥岩、潮坪沉积及古土壤;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相碳酸盐岩沉积并没有马上沉积下来,而是有一段滞后的时间,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”。

0.5 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:

首先,是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起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。

其次,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。

第三,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。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。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,在剖面呈有规律变化;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。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。

最后, 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。例如英国的 David Large (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柯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。