

多元聚煤理论体系及聚煤模式

李增学, 吕大炜, 王东东, 刘海燕, 王平丽, 刘莹

山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

摘要: 煤地质学经过长期的发展和多种成煤理论相继提出, 已进入一个多元化的繁盛阶段。但是, 聚煤理论研究中还有很多科学问题仍需进一步深入, 如海侵(水进)过程中煤的聚积机理、聚煤盆地形成与演化过程中板块构造的控煤作用、煤与其共生矿产的共生机理以及含煤系统理论等, 都与煤聚积、聚煤盆地各种非常规能源矿产资源研究密切相关, 而理论研究的滞后也影响了能源矿产资源的预测、评价。造成这种现状的原因是不同聚煤理论适用范围具有一定的局限性。鉴于此, 本文在系统、全面的理解各种聚煤理论的基础上, 提出了多元聚煤理论体系及聚煤模式, 认为多元成煤理论体系是以泥炭沼泽堆积样式为中心, 盆地水域体制为阐明聚煤作用机制的基本点, 其核心思想是阐明各种因素的相互作用与影响, 成煤机制的交叉、包含, 而不是孤立地看一个具体问题, 聚煤盆地层序地层不同体系域聚煤差异性为聚煤理论的支撑格架, 古植物、古气候、古构造和古地理分析为构建聚煤理论体系的四个基本条件, 各种地质因素的相互牵制、多种事件(如突发性水侵事件、构造事件、火山事件等)的影响, 聚煤模式的多样性和聚煤作用过程与机制多元性等, 构成了多元成煤理论体系的内核, 并强调该体系构建的四个统一: 聚煤理论体系的完整性与协同性的统一、独创性与转化性的统一、继承性与发展性的统一、理论性与实践性的统一, 阐明不同聚煤机制及其相互关系。多元聚煤理论不是将不同成煤理论或观点的简单集合, 而是深入阐明各种因素的影响、动态与静态交叉机理、各种条件的融合、聚煤盆地内外各种作用的相互牵制与耦合等。

关键词: 多元聚煤理论体系; 聚煤模式; 聚煤盆地; 相互作用; 层序地层

中图分类号: P618.11; P618.130.21 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2015.03.02

The Multiple Coal-forming Theoretical System and Its Model

LI Zeng-xue, LÜ Da-wei, WANG Dong-dong, LIU Hai-yan, WANG Ping-li, LIU Ying

Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Mineral (SDUST), Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590

Abstract: After a long period of development and with the presentation of various coal-forming theories, the coal geology has entered into a diversified flourishing stage. However, it is necessary to further study such coal-forming theories as coal-forming mechanism during transgression, the influence of plate tectonics on coal-forming during the formation and evolution of basins, the association mechanism of coal and its coexisting and associated minerals and the coal-bearing system theory, which are all closely related to the study of coal-accumulation and unconventional energy resource in the coal-forming basin. The insufficient theoretical study caused by the limitations of every coal-forming theory, however, has affected the prediction and estimation of energy resource. Hence, this paper has presented the multiple coal-forming theoretical system and coal-forming pattern based on systematical and comprehensive understanding of various coal-forming theories. The authors hold that the central idea of this theoretical system lies in the peat accumulation patterns and the water system changes. The interactions between coal-forming multi-factors are illustrated in this theoretical system without explaining each problem separately. The difference of coal-forming system tracts is the main fundamental

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41272172; 40872100; 41202070; 41402086)、山东省自然科学基金项目(编号: ZR2013DQ019)、山东省优秀中青年科学家科研奖励基金计划项目(编号: BS2011SF017)和山东省高等学校科技计划项目(编号: J14LH06)联合资助。

收稿日期: 2014-11-30; 改回日期: 2015-01-27。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 李增学, 男, 1954年生。教授。主要从事煤地质学、聚煤盆地层序地层学研究工作。E-mail: lizengxue@126.com。

principle of the supporting framework. There are four basic conditions, namely paleobotany, paleoclimate, paleostructure, and paleoevents (transgression events, tectonic events, volcanic eruption event, etc.). The characteristics of multiple coal accumulation model and different types of coal-forming process as well as mechanism become the main core contents. Four uniformities are emphasized, which are integrity and cooperativeness, originality and convertibility, succession and expansibility, theoretical property and practicalness. On such a basis, the coal-forming mechanism and its relations are explained. It is thus held that the multiple coal-forming theoretical systems include the detailed relations between different factors, the mechanism of dynamic and static conditions, the fusion of different theories, and the coupling principles of many kinds of processes.

Key words: multiple coal-forming theoretical system; coal accumulation model; coal-accumulating basin; interaction; sequence stratigraphy

1 煤地质学基本理论问题及面临的挑战

煤地质学是地质学科体系中的一个重要而又古老的学科。地质相关学科新思想、新理论与新方法的不断提出,对煤地质学产生了深远的影响,如沉积学、层序地层学、盆地分析等学科,对解决煤地质领域的科学问题起到了重要的促进作用,使古老的煤地质科学产生了新的活力(McCabe, 1987; Holz, 1998; 邵龙义等, 1998; 李增学等, 2003)。近年来,与煤有关的能源(如煤层气、煤成气、煤系页岩气等)的研究与开发,极大地促使了煤地质学的发展(Wang, 2012),也使煤地质学的基础理论及其资源预测理论呈现了多元化的趋势。但迄今为止,煤地质学研究仍然局限于解释和阐述煤田勘探与开发中的各种地质现象,仍然是围绕着固体煤的有关研究,这使其理论进展明显滞后于其它地学学科。与煤及煤层有关的天然气资源(如煤层气、煤系页岩气)的研究,使得煤地质学涉及到的科学问题大量增加。煤地质学作为相关交叉学科的基础或支撑,其理论与模式需要进行全面的总结、完善、提升和发展,以形成具有强大生命力的科学体系(Milici et al., 2009; 李增学等, 2011)。

煤地质学(这里与传统的“煤田地质学”同义)学科理论的形成与发展,凝聚了几代煤地质学家和从事煤炭勘探与开发的科技工作者与工程技术人员的智慧,成为地球科学系统中的重要学科分支之一。但是,随着煤地质学新理论、新认识的不断出现,以及与煤地质密切相关的新资源(如页岩气等)的发现,煤地质学的有关理论也面临如下一些亟待解决的问题。

(1)煤地质学中描述性内容较多,理论提升欠缺。如煤岩、煤质部分,微观描述与地质背景和成煤作用机制的结合虽然已有不少研究成果(Greb et al., 1996; Querol et al., 1999; Siavalas et al., 2009),但整体理论的提升高度还不够。随着与煤系有关的资源的发现与开采,煤岩及煤体特征的精细描述性

内容已相当丰富和完善(Speight, 2005; Diessel, 2007),但对于其形成理论的研究则比较薄弱。如何将煤的微观世界与宏观的聚煤作用机制、盆地背景等结合起来,目前还缺乏系统、完整、科学的理论阐述。

(2)自 20 世纪 90 年代以来,聚煤作用机制的理论与实践获得很大进展,有些理论是突破性的和开创性的。但是,这些理论或观点之间的包容性和关联性较弱,这就削弱了一种新理论、新观点的生命力。任何新理论、新观点的提出都是基于一种特殊的背景和条件,而这种背景和条件是有可能相互转化的;因此,看起来对立的理论或观点实际上可能存在着某种有机关联。如煤及煤层的形成,传统的认识以陆相的海(水)退成煤理论占主导;近年来有不少学者探讨了新的聚煤理论,如海侵过程成煤(Diessel, 1992)、幕式成煤(邵龙义等, 1992)、海侵事件成煤(李增学等, 2001)、风暴异地煤(胡益成等, 1997)、聚煤型式的多样性(桑树勋等, 2001)、海相层滞后时段成煤(邵龙义等, 2003)等理论,极大地丰富了煤地质学基础理论。但是,对一个学科而言这理论仍然存在一些相互矛盾及理论系统性欠缺的问题。

(3)煤地质学与相近学科的交叉、融合、容纳、追踪和原始发现不够。煤地质学汲取、引进相近学科理论后的发展与创新不够。煤地质学融入了沉积学等相近学科的理论,如沉积体系、层序地层、盆地分析等,这无疑是有益的;但是,与相近学科理论的融合与发展深度不够,尚没有体现出煤地质学的特色。

(4)继承与完善不够,没有形成一个学科特色鲜明的理论体系。已有的理论和基础知识,阐述深度不够,发展极为缓慢。煤地质学成煤理论的一些基本学说(或假说),如“原地堆积说、异地堆积说、微异地堆积说”等基础理论,还是比较单薄,理论性并不强。这些已有的认识和学说,只有与盆地分析、层序地层学、油气地质学等学科深入地融合、发展,才能在聚煤规律的合理解释和矿产资源的有效预测

方面产生质的飞跃。

2 聚煤环境及沉积体系类型的多元性特点

沉积体系与体系域是沉积学和盆地分析的重要概念,在煤地质学中则赋予了新的内涵,即沉积体系、体系域与煤聚积、煤层形成的有机联系。一般来说,沉积体系是与某些现象或与推测的环境、沉积作用有密切成因联系的三维空间岩相组合。同一时间内具有一定联系且相邻的沉积体系则称为体系域。不同体系域内部都存在着沉积环境的相互转换,这个过程可能形成了一些有利聚煤的环境。聚煤环境可以同时存在于不同的沉积环境,也可以存在于同一沉积环境的不同时期;聚煤环境可以由不同的沉积环境共生转换而来,也可以是同一种沉积环境的不同演化阶段。

2.1 煤的沉积环境与沉积过程的多元性

泥炭的形成与堆积可以在多种环境下发生,沉积过程复杂、成因多元化。这里涉及到煤地质学中的一个重要概念——“泥炭沼泽”。需要指出的是,泥炭聚积成煤的场所不一定是泥炭沼泽(McCabe, 1987; Moore et al., 2003),所以,“泥炭沼泽相”的确定必须慎重。只有证明泥炭堆积是在“原地”发生,煤层与泥炭沼泽相才具有成因上的对应关系。

一般说来,泥炭沼泽形成于水域和陆地过渡带环境(图 1)。在空间上,泥炭沼泽可以形成于多种沉积体系中(Wang et al., 2011),呈现分带性(Moore et al., 2003)。在时间上,受水体进退的影响,泥炭沼泽的发育位置和类型也会发生迁移或交替(McCabe, 1987; Moore et al., 2003)。从沉积学角度看,聚煤作用的形式多样,这些聚煤形式可以同时出现在一个体系域内,煤层垂向上相互叠加、横向上交错转化。在一套含煤地层之中可以出现不同成煤环境单元形成的多套煤层,如华北晚石炭—早二叠世含煤岩系,具有典型的成煤类型多样性特点(桑树勋等, 2001),而且在空间上呈现多旋回性。从根本上说来,盆地属性转换影响了盆地内沉积体系的配置,沉积体系

配置的变化又直接影响到了成煤环境单元的转换(表 1)。

2.2 事件沉积多元性

聚煤作用中的事件沉积主要包括幕式构造/沉积事件、风暴事件、海侵事件、火山事件等沉积,这些事件沉积在聚煤过程中或多或少对成煤作用过程有一定的影响(表 2)。

2.2.1 幕式构造/沉积事件

陆相断陷盆地具有不同级别的幕式构造演化的特征,控制了相应的沉积旋回(吴冲龙等, 1994),而盆地的充填序列表现出阶段性及区域性间断,记录了幕式运动的周期及相应的构造事件。一般说来,形成陆相断陷盆地最基本的因素就是幕式构造,盆地充填沉积则是对构造作用的直接响应。构造作用不仅控制沉积物的充填厚度和地层的旋回性,而且控制沉积体系类型和内部沉积构成(王华等, 1994),进而控制着泥炭沼泽的发育及泥炭堆积作用(邵龙义等, 2003)。

2.2.2 火山事件

火山事件形成的火山事件层具有延展性、瞬时性和等时性的特点(桑树勋等, 1999a, b; Pfefferkorn et al., 2007)。火山事件在沉积时对聚煤作用主要有 2 个方面影响,一是火山事件沉积后,为古植物提供了良好的土壤,有利于植物的生长;二是火山事件沉积能够中断成煤作用,如鲁西石炭二叠纪煤层中呈突变接触的薄层粘土岩夹矸,表征着火山地质事件(火山灰降落)导致煤的沉积过程中发生过突然短暂的中断(Pfefferkorn et al., 2007; 韩作振等, 2000)。

2.2.3 突发性海侵事件

突发海侵事件可分为两类:一是盆地背景使得海侵过程非常短暂而呈现出“事件”的性质(何起祥等, 1991),如晚古生代华北大型陆表海盆地;二是突发事件导致海水突然向陆地进犯,如构造突发事件、海啸、风暴潮等形成或引发的海侵事件。本文主要指的是地史上的陆表海突发性海侵事件,由于陆表海盆地基底比较平缓,相对海平面微小的上升,就

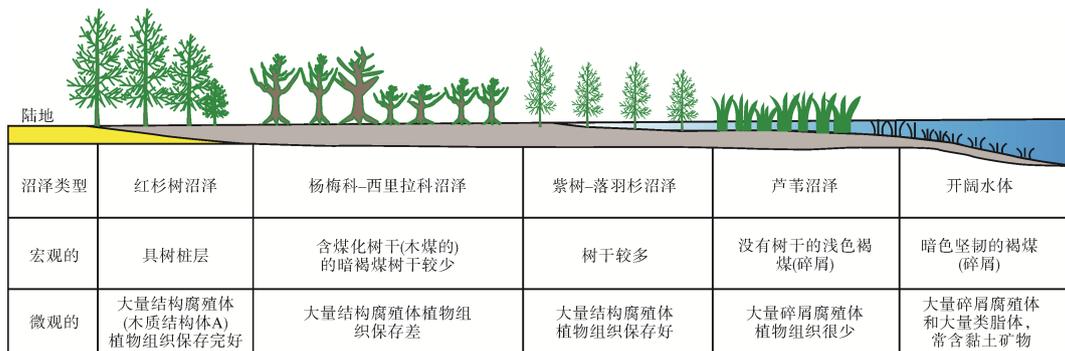


图 1 德国上莱茵湾中新世木质褐煤类型的相应泥炭沼泽堆积场所

Fig. 1 Accumulation space of peat swamp of Miocene lignite type in upper Rhine bay of Germany

表 1 不同沉积环境控制下的多元成煤特点

Table 1 Multi-coal forming characteristics under the control of different depositional environments

相组	相	富煤相带	煤层特征
陆相组	冲积扇	扇间洼地, 中扇朵叶体间, 扇尾和扇前外侧与河湖的过渡带	扇间洼地、朵叶间洼地, 形成不稳定较厚煤层; 扇尾地带利于形成连续性好的薄煤, 是最有利的成煤场所, 见图2-a
	辫状河	河道之间、心滩、辫状河废弃河道	辫状河建设期, 河道之间可发育薄而局限的煤层; 辫状河废弃期, 可以发育较厚、较广泛的煤层, 见图2-b
	曲流河	河漫沼泽、废弃河道充填沼泽和河道边缘地带沼泽	河漫沼泽环境有利于发育稳定性好的煤层; 废弃河道充填沼泽可发育较局限的煤层; 河道边缘地带泄水条件差的沼泽, 易于发育顺河流方向延伸的煤层, 见图2-c
	网结河	网结河与扇前辫状水系之间、网结河道间	聚煤条件优于曲流河, 在废弃阶段常形成大范围的泥炭沼泽; 在网结河道间或网结河与扇前辫状水系之间可形成厚煤层, 见图2-d
	湖相扇(辫状河)三角洲	三角洲平原废弃河道、泛滥平原; 扇前和扇间洪积-冲积平原	泛滥平原、废弃河道, 聚煤条件较好; 扇前和扇间洪积-冲积平原, 纵向网结河发育时, 含煤性较好; 浅水湖泊周缘的扇三角洲, 平原较发育, 含煤性好, 见图2-e
	湖相	滨湖平原地带; 湖泊三角洲地带; 湖湾地带	湖泊三角洲平原、湖湾可发育厚度大、稳定性差的煤层; 滨湖平原可发育分布较广、厚度小的煤层, 且向湖盆方向逐渐尖灭, 见图2-f
过渡相组	三角洲	分流河道间泛滥盆地, 废弃的朵叶体, 分流间湾	河流-上三角洲河道间可出现稳定性差的厚煤层, 低硫分; 下、上三角洲平原的过渡带可发育厚度大、稳定性好的煤层, 中硫分; 下三角洲平原分流河道两侧可发育稳定性差的煤层, 高硫分, 见图2-g
	辫状河三角洲	分流河道间泛滥盆地, 废弃的朵叶体, 分流间湾	煤层多平行河道展布, 近河岸出现煤层分岔、变薄, 低硫分(邵龙义等, 1994); 分流间湾可发育厚度大、连续性好的煤层, 中-高硫分, 见图2-h
	扇三角洲	分流河道间泛滥盆地, 废弃的朵叶体, 分流间湾	建设阶段, 扇三角洲平原可发育分布局限的薄煤层, 低硫分; 破坏阶段, 不利于煤的发育; 废弃阶段, 利于成煤作用发生, 从扇三角洲朵叶体边缘到三角洲平原, 发育煤层层数减少, 单层厚度增大, 中-高硫分, 见图2-i
海相组	浅海	直接覆盖于浅海沉积上, 异地煤	浅海顶部具有极少量煤层, 多为异地堆积, 高硫分, 见图2-j
	潮坪	潮上带和潮间带上部的泥炭沼泽	潮上带和潮间带上部, 泥炭沼泽较发育, 利于发育煤层, 中-高硫分, 见图2-k
	障壁岛-潟湖	障壁坪、滩、环潟湖潮坪带, 潮汐三角洲, 冲越扇	障壁岛内侧潮坪可发育平行于障壁砂体、稳定性差的煤层; 潟湖淤浅沼泽化利于大范围发育厚煤层; 煤层中-高硫分, 见图2-l
	无障壁海岸	海岸沙丘, 前滨, 后滨	海岸沙丘常有植被生长, 可形成较薄的煤层。前滨上部可形成煤层, 风暴流较弱时, 形成较厚煤层; 风暴流较强时, 形成薄煤层与砂岩相间。煤层中-高硫分, 见图2-m

表 2 含煤充填沉积中事件沉积对泥炭堆积机制的多元性影响

Table 2 Multi-influence of event deposits on the peat accumulation in coal-succession

事件沉积类型	堆积机制
幕式构造/沉积	幕式构造/沉积变化速率(沉降)远大于泥炭堆积速率时, 不利于泥炭堆积; 幕式构造/沉积变化速率(沉降)等于泥炭堆积速率, 利于泥炭堆积。构造的幕式作用导致聚煤作用的阶段性, 构造活动时与稳定时期的聚煤作用范围、强度都不同
火山事件	突发的火山事件及其沉积作用, 导致聚煤作用终止, 使煤层分叉或形成煤层夹矸(Pfefferkorn et al., 2007)。另一方面, 火山事件发生过后, 火山碎屑沉积可能为古植物提供了良好的土壤, 有利于植物的生长(韩作振等, 2000)
突发性海侵事件	突发性海侵事件终止泥炭堆积、破坏聚煤环境, 但也使已经形成的泥炭被保存下来而最终成煤(李增学等, 2003)。盆地边缘处, 泥炭沼泽被海水侵扰并被搬运至浅海, 形成了泥炭的异地堆积
风暴事件	破坏滨岸带或潮坪潟湖等区域原地堆积泥炭层, 携带部分泥炭至正常浪基面或风暴浪基面之下异地堆积(胡益成等, 1997)

会淹没非常广阔的区域甚至整个盆地, 造成了海侵具有突发性的特点, 这对于终止泥炭沼泽发育和泥炭保存具有重要意义(李增学等, 2003)。海侵事件也能够一定程度上侵扰盆地边缘的泥炭沼泽, 如波浪搬运泥炭, 进而形成异地煤。

2.2.4 风暴事件

风暴事件沉积的研究已有 40 多年的历史, 取得了不少突破性成果, 建立了风暴流理论。风暴事件沉积在滨海或滨湖地区较常见。风暴潮侵入到滨

海地区的泥炭沼泽内, 其携带的碎屑物可以暂时中止泥炭的堆积, 进而形成煤层中的海相夹矸; 当风暴潮退去时也可携带泥炭至正常浪基面乃至风暴浪基面以下堆积, 形成异地煤。如河南太原组滨海潮下带的风暴异地煤(胡益成等, 1997)。风暴异地煤的顶底板一般为湖相或海相沉积, 煤层里面含有海相或湖相生物化石(王华等, 1999)。

2.3 泥炭堆积成煤机制

根据泥炭沼泽发育与泥炭堆积场所之间的关

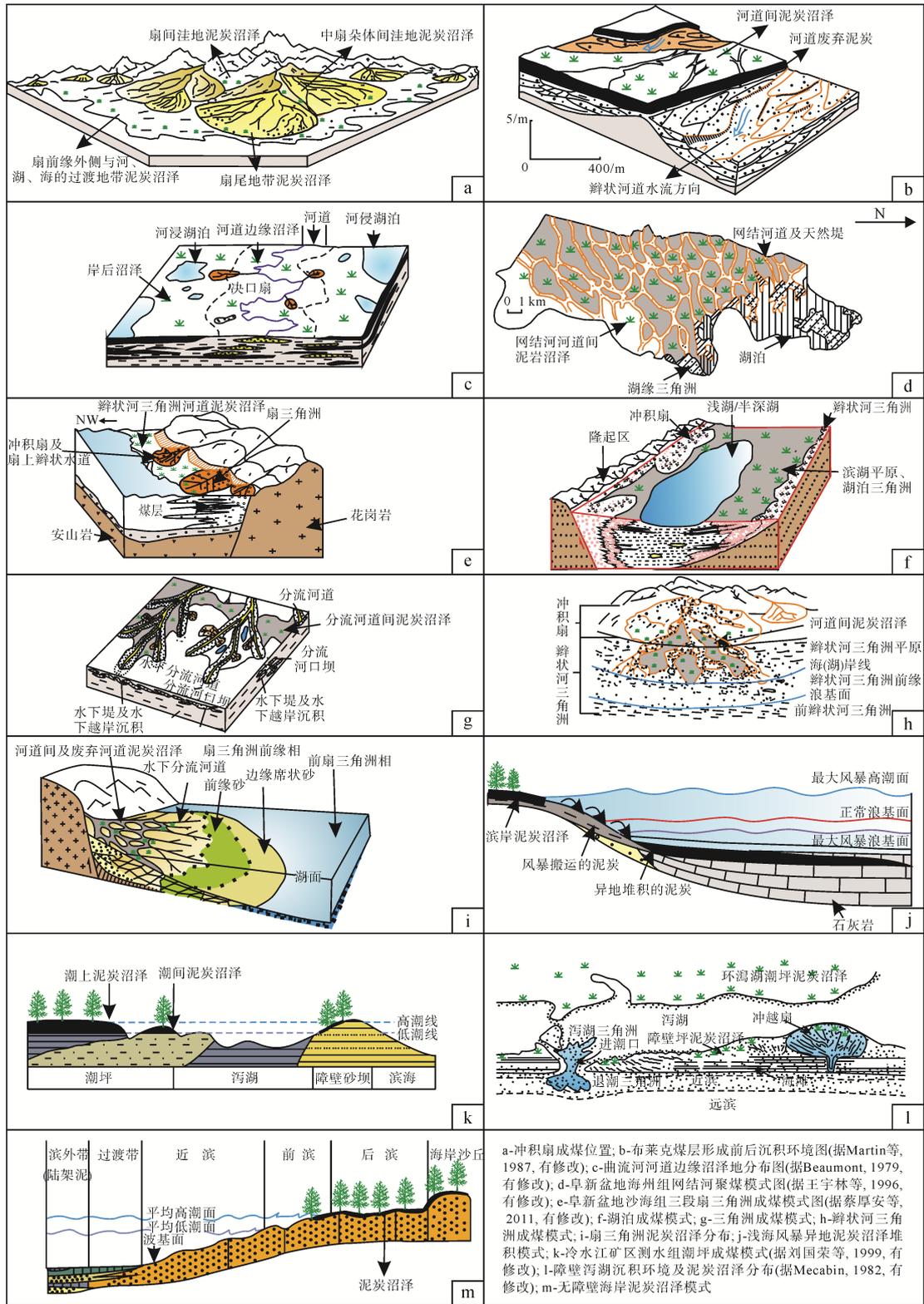


图 2 不同沉积环境控制下的成煤示意图

Fig. 2 Model of coal formation under the control of different depositional environments

a-location of the alluvial fan-coal; b-sedimentary environment before and after the formation of the Black Coal Seams(modified after Martin et al., 1987); c-distribution of the swampland along the meandering stream(modified after Beaumont, 1979); d-coal accumulating mode of the anastomosing river in the Haizhou Formation of the Fuxin Basin (modified after WANG et al., 1996); e-coal accumulating mode of the fan-delta in 3rd Member of the Shahai Formation in the Fuxin Basin(modified after CAI et al., 2011); f-coal accumulating mode of lakes; g-coal accumulating mode of deltas; h-coal accumulating mode of braided river delta; i-distribution of peatbogs in the fan-delta; j-stacking pattern of allochthonous peatbogs generated by storms in shallow sea; k-coal accumulating mode of tidal flat in the Ceshui Formation of the Lengshuijiang ore district(modified after LIU et al., 1999); l-sedimentary environment of barrier lagoons and distribution of peatbogs(modified after Mecabin, 1982); m-mode of peatbogs along the coast without barriers

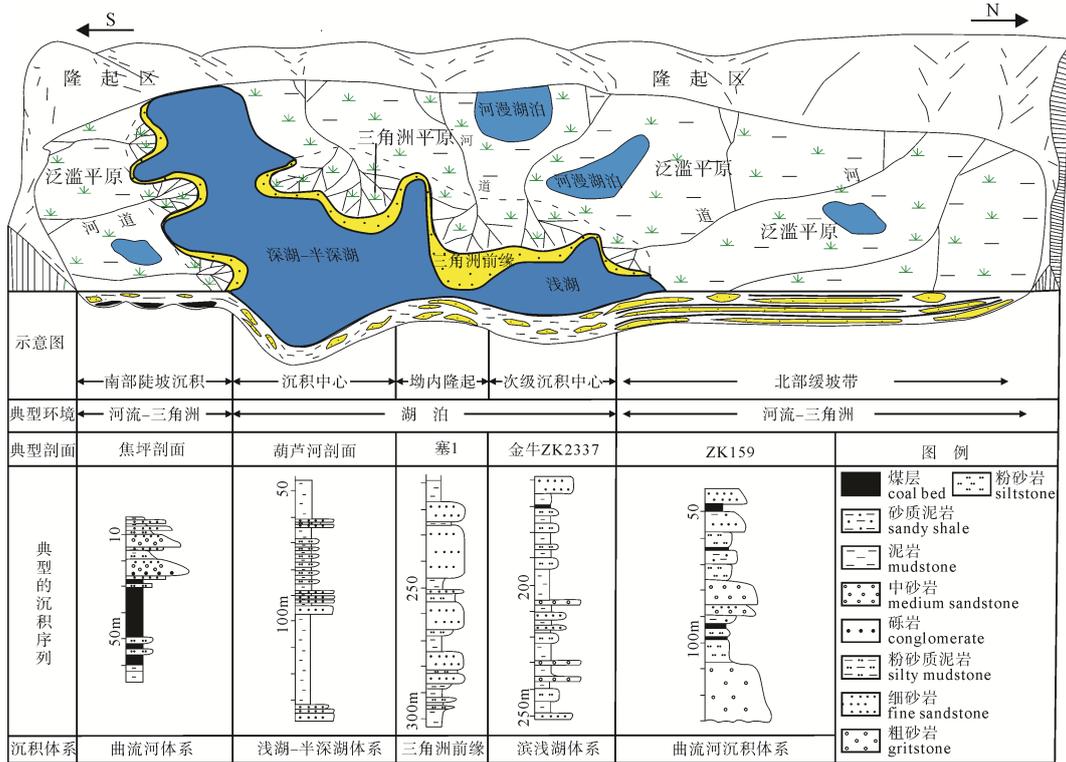


图3 鄂尔多斯盆地延安组沉积成煤模式图(S-N向)(据王东东, 2012)
Fig. 3 Coal accumulation model of Yan'an Formation of Ordos basin (after WANG, 2012)

系, 可以划分出原地堆积成煤和异地堆积成煤两种机制, 同一个聚煤盆地可能存在一种或两种泥炭堆积机制。

2.3.1 原地堆积成煤机制及其条件

煤层发育的地方也是泥炭沼泽发育的地方, 即原地堆积成煤。该成煤机制研究主要包括适宜植物生长与泥炭保存的古气候、古地理及古构造背景。该成煤机制可以分为活动碎屑体系不同阶段环境单元的局部泥炭沼泽化成煤(分流间湾、滨海潮坪泥炭沼泽化)和碎屑体系废弃后的泥炭沼泽化成煤(河道、湖泊及泻湖泥炭沼泽化)。不同的沉积环境演化, 形成了植物发育与泥炭保存的空间。

2.3.2 异地堆积成煤机制及其条件

异地堆积成煤是指泥炭保存成煤的地方并不是植物生长的地方, 其间经历了长距离的搬运。该成煤机制必须要有搬运体系, 且搬运体系能够为泥炭找到适宜其堆积与保存的场所。异地成煤实际上属于事件沉积, 因为其经过事件性碎屑流体搬运和再沉积, 煤层顶底板均为深水沉积物, 如水下重力流沉积或者海相灰岩沉积。在现实煤田地质勘探中, 经常可以发现异地煤与原地煤共生发育的现象(王华等, 1999), 这与沉积环境转换有关。

3 沉积盆地及其聚煤作用机制的多元性

按照盆地所处的位置, 可以划分为陆相盆地

类、过渡相盆地类和海相盆地类; 陆相盆地一般分为断陷盆地和坳陷盆地(有时二者共存或转化)、河流-泛滥盆地类型; 过渡相盆地类包括三角洲盆地、扇三角洲盆地以及辫状河三角洲盆地类型; 海相盆地类主要指边缘海盆地和陆表海盆地。不同盆地类型或同一盆地类型的不同演化阶段, 聚煤作用的发生过程是不同的(Garces et al., 1997)。盆地属性的多元性造成了煤层发育的多元性。

3.1 陆相盆地类

陆相盆地中成煤作用主要是受到湖体扩张与萎缩的控制。当盆地发生超覆扩张时, 煤层形成于水进体系域, 一般发育在滨湖平原或滨湖三角洲, 属于活动碎屑体系成煤; 从构造演化角度看, 属于阶段性成煤; 当湖体扩张终止, 湖泊周围泥炭沼泽发育, 并逐渐向盆地中心扩张, 此时属于水退成煤, 煤层形成于高水位体系域。陆相盆地中的火山事件对成煤作用也有一定的影响。

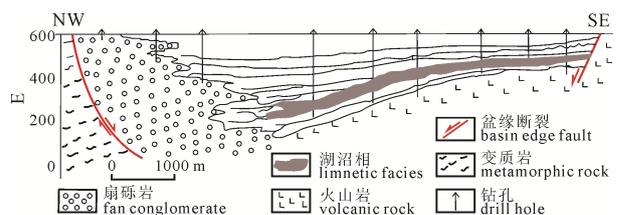


图4 浅水断陷盆地成煤——霍林河盆地 (据李思田, 1988)

Fig. 4 Coal accumulation model of shallow graben basin in Huolinhe Basin of Inner Mongolia (after LI et al., 1998)

3.1.1 坳陷盆地

陆相坳陷盆地沉积基底比较稳定,湖盆水体扩张与萎缩主要发生在滨湖及滨湖三角洲区域(王东东, 2012)。湖水扩张期,滨湖平原泥炭沼泽逐渐向陆地迁移,发生水进成煤作用;湖水萎缩期,滨湖平原泥炭沼泽逐渐向湖泊迁移,甚至整个湖泊淤积变浅,可以发生大强度的聚煤作用。在湖水扩张、萎缩过程中发育的煤层稳定性均较好,易于区域对比(图 3)。

3.1.2 断陷盆地

断陷盆地根据水深特征可分为两种类型:浅覆水断陷湖盆和深覆水断陷盆地,不同类型的断陷盆地中,聚煤作用具有显著的差异性。

浅覆水断陷湖盆中的煤层可遍布整个湖盆,且湖区煤层厚度最大,为湖泊扩张或萎缩期聚煤作用的结果,也可能存在异地煤,这种盆地成煤条件较好(李思田, 1988, 图 4)。深覆水断陷盆地中的煤层发育在湖泊周缘,成煤强度差异较大。单断型盆地的长轴两端常发育大规模的扇三角洲、辫状河三角洲,利于大范围的聚煤作用;在短轴方向的缓坡带,常发育大规模的扇三角洲、辫状河三角洲等,利于大范围的聚煤作用;陡坡带常发育规模较小的扇三角洲,成煤范围较小。地堑型盆地往往不于泥炭沼泽发育,成煤作用较差。在湖盆的萎缩阶段,湖泊的成煤强度会相应增大(图 2f)。

3.1.3 河流-泛滥盆地

河流-泛滥盆地泥炭沼泽主要发育在岸后泛滥盆地,曲流河的河漫沼泽和牛轭湖沼泽是最有利的成煤场所(Zhang et al., 1997)。河道稳定的河漫沼泽形成的煤层厚度大、分布广、稳定性好,以原地堆积成煤为主。河道不稳定的河漫沼泽形成的煤层分布局限、稳定性差,局部由于河流或洪水决口而形成了微异地煤。辫状河的聚煤强度是有限的,较厚的煤层一般发育在废弃的辫状河体系(邵龙义等, 1994)。网结河的聚煤强度较大,可在废弃阶段形成巨厚煤层(图 2d)。

3.2 过渡相盆地类

过渡相盆地类主要是指向海过渡的三角洲、扇三角洲或辫状河三角洲盆地,沉积动力学条件较为复杂;三角洲盆地发育煤层以华北中二叠世过渡相盆地最为典型,扇三角洲和辫状河三角洲盆地成煤主要发育于古近纪或新近纪的近海断陷盆地中(如琼东南盆地),以三角洲盆地成煤最好。

3.2.1 三角洲盆地成煤特征

三角洲盆地是以三角洲沉积为主要特色的过渡相盆地。根据古代成煤三角洲环境的研究,可将河控三角洲平原划分为上三角洲平原、下三角洲平原及其过渡带。上三角洲平原分流河道能量高、规

模大,泥炭沼泽育范围小而稳定(马维俊, 1989),在河道间低洼处可形成厚度较大、稳定性较差的煤层,在平行河道方向煤层连续性好;决口扇的出现可以造成煤层分岔;若分流河道的废弃,则泥炭沼泽扩展,成煤环境扩大。下三角洲平原河道显著分支、分流间湾发育,海水及潮汐水影响显著。泥炭堆积多沿河道近堤岸地带分布,且成煤环境从狭窄的近堤岸地带逐渐向分流间湾环境扩展,平行河道方向煤层连续性略好。过渡带的分流间湾发育且大部分已被沉积物所充填,为成煤提供了广阔的平缓台地,可发于分布广、厚度大,总体沿沉积走向伸展的煤层。三角洲环境以原地堆积成煤为主,也可能有部分泥炭被风暴刨蚀、搬运到浅海等地区成煤。

三角洲沉积环境中 2 个大的成煤阶段:一是活动碎屑体系成煤阶段,主要是指三角洲平原分流间湾泥炭沼泽化成煤;二是活动碎屑体系废弃成煤,在三角洲废弃阶段,整个三角洲都可以发育稳定性较好的泥炭沼泽;当相对海平面上升时,泥炭堆积终止并被保存下来。

3.2.2 扇三角洲盆地成煤特征

扇三角洲盆地通常有较好的含煤性,扇三角洲平原广阔平坦的地貌特征及废弃阶段构造活动相对稳定,为泥炭沼泽的发育提供了有利条件(李增学等, 2010)。泥炭沼泽首先在废弃的扇三角洲平原和三角洲边缘平原区发育,随后向近端和远端蔓延,聚煤面积逐渐扩大。聚煤条件最好的是近海三角洲体系,其次是纵向水系发育的扇前和扇间洪积-冲积平原体系。

3.3 海相盆地类

海相盆地形成的煤层主要是发育于滨岸区(Wightman et al., 1993)。滨岸带成煤一般出现在两个地区,即障壁-潟湖区和潮坪区;障壁-潟湖成煤主要发育在障壁内侧的障壁坪和淤浅的潟湖区,为潟湖逐渐废弃成煤;该时期形成的煤层一般位于高水位体系域顶部。在障壁后潟湖淤浅沼泽化形成的煤层长轴平行于障壁岛砂体延伸方向;煤层分布较广泛、厚度变化较大。潮坪区成煤主要出现在潮上带和潮间带上部,为海侵过程成煤,煤层位于海侵体系域(Diessel, 1992)。

3.4 陆表海盆地

陆表海盆地是海相盆地中的特殊类型,如华北与华南晚古生代大型陆表海盆地。由于晚古生代陆表海盆地的特殊古地理背景(陈世悦等, 2011),海侵过程常具快速侵进的特点,具有“事件”性质(何起祥等, 1991; 李增学等, 2003),在沉积记录上表现为水体深度截然不同的沉积组合直接接触,其间具明显的相序缺失(非侵蚀间断缺失),海侵层在时空上

表3 不同聚煤盆地煤层分布特点及堆积机制

Table 3 Distribution characteristics and accumulation mechanisms in different coal-bearing basins

与聚煤有关的盆地类型	聚煤沉积环境	煤层分布特点	堆积机制	典型实例
陆相盆地类	坳陷盆地	围绕湖泊中心煤层呈环带状发育, 由湖中心无煤区向盆缘煤层厚度呈薄-厚-薄的变化趋势, 湖泊外围的河流泛滥平原煤层厚且稳定, 湖泊三角洲、滨湖平原、冲积扇区煤层薄且不稳定	大部分地区为原地堆积成煤, 在风暴作用、异常气候条件导致的突发性洪水侵入下, 浅湖-半深湖区可能有异地堆积成煤	鄂尔多斯中生代盆地
	断陷盆地	盆地的缓坡带发育较厚的煤层, 向盆地中心变薄分叉; 盆地中心也可出现厚煤层(含异地成分), 向盆缘变薄、尖灭; 在湖盆演化晚期, 可能出现整个湖盆淤浅成煤	在滨湖、湖泊三角洲区为原地堆积成煤; 在浅湖-半深湖区可能由于风暴、洪水或水下重力流作用而出现异地堆积成煤	内蒙古霍林河古近纪盆地
	河流-泛滥盆地	稳定的河道间沼泽或河漫湖泊淤浅区煤层厚度大、分布广、稳定性好; 不稳定的河道间形成的煤层分布局限、稳定性差。网结河废弃也能形成煤层	以原地堆积成煤为主。局部由于河流作用在泛滥盆地内造成了微异地或洪水决口导致异地堆积成煤	辽宁铁法盆地
过渡相盆地类	三角洲盆地	上三角洲平原可形成沿河道展布、范围局限的厚煤层; 过渡带-下三角洲平原, 在平行于分流河道堤岸地带煤层较厚, 向分流间湾逐渐尖灭	上三角洲平原及过渡区以原地堆积为主。下三角洲平原发现泥炭沼泽被风暴波浪刨蚀搬运的痕迹	中二叠世华北中北部盆地
	扇三角洲盆地	煤层主要发育于扇三角洲平原和滨湖(海)平原区, 纵向水系发育的扇前与扇间洪积-冲积平原体系, 成煤作用较强	靠近扇三角洲前缘可出现风暴或重力流作用造成的异地堆积成煤	古近纪琼东南盆地
	辫状河三角洲盆地	煤层主要发育于辫状河三角洲平原分流河道间, 向盆地方向逐渐减薄、尖灭	靠近辫状河三角洲前缘可出现风暴或重力流作用造成的异地堆积成煤	滇东黔西晚二叠世辫状河三角洲盆地
海相盆地类	滨海平原的潮坪、障壁坪、淤浅的潟湖	煤层主要发育于潮上带和潮间带上部, 平行古海岸线煤层稳定性好; 环潟湖坪和淤浅阶段的潟湖区, 成煤作用较强	以原地堆积成煤为主, 潮下带可出现风暴作用造成的异地堆积成煤	滇湘赣早石炭世盆地
击表海盆地*	潮坪及障壁坪、淤浅的潟湖	煤层主要发育于潮上带和潮间带上部, 煤层分布广、稳定性好; 障壁海岸的环潟湖坪和淤浅阶段潟湖区, 成煤作用较强	以原地堆积成煤为主, 潮下带可出现风暴作用造成的异地堆积成煤	华北晚石炭世一早二叠世盆地

注: *由于陆表海盆地的发育及其充填演化具有特殊性, 其聚煤作用特点也具有独特性, 因此单独将其划为一种聚煤盆地类型。

具有较好的稳定性和等时性。陆表海盆地发育大型的潮坪、障壁-潟湖沉积, 成煤类型复杂多样, 大都为海侵过程成煤(李宝芳等, 1999); 在华北晚古生代陆表海盆地含煤地层中常见到大面积的海相石灰岩直接覆盖在煤层之上, 且具有多旋回性, 这种突发性海侵对泥炭沼泽的中止、泥炭的保存起到了主控作用, 突发性海侵控制下的成煤作用又称为海侵事件成煤(李增学等, 2003); 陆表海盆地受活动碎屑体系控制, 水退阶段在物源区附近地势低洼的潮坪或障壁-潟湖环境往往可以发育对比性差、分布局限的煤层, 常作为盆地充填序列终止的标志, 位于高水位体系域。陆表海盆地中以原地堆积成煤为主, 局部可能发育异地煤(胡益成等, 1997)。

综上, 不同盆地类型的聚煤沉积环境不同, 煤层分布特征、堆积机制等均有不同, 见表3。

4 层序地层学与聚煤作用旋回机制的多元性

层序地层学引入到含煤地层中来, 成为煤地质

学中的一个重要的发展(Gastaldo et al., 1993; Schlager, 2004), 并为成煤理论带来了新的研究思路(吕大伟等, 2010; Lv et al., 2014)。不同属性的聚煤盆地中, 受多种地质因素的综合影响, 其层序的沉积体系单元构成不同; 不同沉积体系域因其沉积动力条件差异, 出现不同的聚煤机制, 从而形成了含煤旋回的多样性。

根据层序地层单元划分, 可以划分出高水位体系域成煤、海(水)进体系域成煤及低水位体系域成煤。不同盆地内不同沉积环境在不同体系域形成的煤差异较大。

4.1 低水位体系域成煤

低水位体系域成煤沉积环境普遍较差。陆相盆地水体范围有限, 成煤沉积相带较窄; 冲积区成煤相带集中在河流下切谷周边稳定而局限河漫滩的环境; 冲积扇或扇三角洲成煤相带集中在扇端或扇三角洲平原; 河流下切谷内或扇朵叶体间洼地等形成的煤层稳定性较差。过渡相盆地中, 低水位体系域成煤主要是在下三角洲平原—过渡带环境之中, 且逐

渐向陆迁移。海相盆地中,煤层主要发育在滨岸带的障壁潟湖、潮坪、滨海平原等地区的泥炭沼泽内。

4.2 海(水)侵体系域成煤

陆相盆地水进体系域表现为湖体向陆地侵袭的过程,煤层主要发育在滨湖平原、湖泊三角洲,煤层围绕湖泊去呈环带状展布;湖侵作用造成泥炭沼泽向陆迁移,形成的煤层具有一定的穿时性(Diessel et al., 2000)。当湖体动荡频繁或出现风暴潮时,部分泥炭被搬运至半深湖-深湖保存下来,形成异地煤。过渡相盆地主要是受到海侵作用影响,泥炭沼泽随海侵作用逐渐向陆迁移,煤层广泛分布于三角洲平原,三角洲朵叶体间洼地煤层厚度较大,常出现煤层与海相层直接接触的组合。海相盆地煤层主要发育在滨海平原、潮坪、障壁-潟湖等环境。随着海侵作用进行,成煤相带逐渐向陆迁移,煤层分布广泛,常常煤层与海相沉积直接接触(鲁静等, 2010)。由于滨海风暴作用,部分泥炭被搬运到浅海保存下来成为异地煤。

海侵过程成煤强调了相对缓慢的海(水)侵作用能够形成泥炭沼泽并且持续的将泥炭保存下来,进而形成海侵煤层(Diessel, 2010; Holz et al., 2002)。在海侵体系域内可以看到多套穿时的海侵煤层与海相层交互沉积,并且向陆地方向超覆。聚煤作用与海侵规模、次数等有关,煤层与海侵层组合规模和期次代表了海侵的规模和次数。海(水)侵体系域成煤则是统指陆相环境、海相环境和过渡环境,由于海侵(水进)作用形成的泥炭沼泽且泥炭被保存,这样形成的煤层都被称为海(水)侵体系域成煤。其中,海侵事件成煤属于海侵体系域成煤的一种特殊类型。

4.3 高水位体系域成煤

高水位体系域分为两个阶段,早期稳定加积期和晚期进积期。陆相盆地在高水位体系域稳定加积期,煤层主要形成于冲积扇体间、河道间、扇缘或泛滥湖泊及三角洲平原区域,该时期可容空间最大,聚煤作用范围最广。在进积期,成煤相带向盆地中心迁移,成煤环境较稳定、范围较广,煤层对比性好。深湖-半深湖环境可能发育一定的异地煤。过渡相盆地在高水位体系域稳定加积期,煤层主要形成于上三角洲平原分流河道间,煤层发育较差;再进积期,煤层广泛在废弃三角洲朵叶体等地区。该体系域中,成煤相带逐渐向海迁移,煤层相对较厚、分布广泛。在三角洲的废弃阶段可以发育大范围的聚煤作用。海相盆地稳定加积期,滨海平原、潮坪、潟湖坪等地区均发育泥炭沼泽,并且范围逐渐扩大,形成分布广、厚度大的煤层。在进积期,成煤相带向海方向迁移,潮坪-潟湖泥炭沼泽范围逐渐扩大,出现废弃体系成煤。在浅海区域内可出现煤层风暴潮等形成的异地煤。

5 多元聚煤理论体系的建立

5.1 多元聚煤理论体系建立的基本原则和立论基础

地质历史中的聚煤作用和规律不能用一种学说或机理完全解释清楚,必须找到各种因素中的关键因素,剖析其关键作用机制;一个理论在某种盆地或条件下解释聚煤作用是科学的、合理的和具有实际价值的,而在另一种背景或条件下则可能不适用。任何模式和理论都有其适用条件,这在多元聚煤理论体系中非常重要。几个关键点构成了构建多元聚煤理论的基本原则:聚煤理论体系的完整性与协同性的统一、独创性与转化性的统一、继承性与发展性的统一、理论性与实践性的统一。

聚煤理论体系的完整性与协同性的统一:多元聚煤理论体系是在继承的基础上发展而来的,它是各种聚煤理论系统性和完整性的整合与概括。该体系含有的若干聚煤理论相互影响、互为依托,这些成煤理论都是强调不同盆地背景下多种环境或事件作用等成煤理论的完整性;这些理论组成都立足于成煤的条件(水域转换及古气候、古构造、古植物等);聚煤理论体系的完整性,不但体现在沉积环境、盆地属性、盆地演化阶段(层序地层)等方面,更体现在相互作用成煤方面。但任何理论都是要发展的,多元聚煤理论体系也不是一成不变的,而是随着新成果、新模式、新理论的出现而协同发展的。系统性、完整性与创新理论的协同发展是一个学科具有生命力的体现。因此,聚煤理论体系完整性与协同性的统一体现在全面系统性和动态性等方面。

独创性与转化性的统一:不同聚煤盆地属性不同、背景与所处的气候带不同、盆地深部过程与沉积充填机制不同,根据具体盆地及某一演化阶段获得聚煤规律的认识具有独特性,理论的升华也具体独创性。但任何事物都具有多面性,当条件改变时,聚煤模式与机制也可能发生转化。这就是说,多元聚煤理论不是每种成煤理论的简单集合,其核心思想是阐明各种因素的相互作用与影响,成煤机制的交叉、包含,而不是孤立地看一个具体问题。如“海侵事件成煤”的模式与理论源于大型陆表海聚煤盆地的研究,有其独特的背景条件和聚煤作用过程。随着陆表海盆地的逐步废弃和盆地属性的转变,发生海侵事件的条件没有了,那么这一模式和理论就不适用了。但是“事件”与聚煤作用之间是否存在某种成因联系,则是其它聚煤盆地研究可以借鉴的。因此,成煤理论的独特性在条件发生改变后而改变,并不意味着原有模式和理论存在错误,而是在条件转化后,如何在借鉴的基础上进行追踪和发展。这体现出多元聚煤理论体系的开放性与创新性相统一。

继承性与发展性的统一:聚煤理论体系继承性

体现在基本点的继承和多种成煤理论的本质关键点的交叉和继承。任何理论创新都是有基础与适用条件的,以往煤田地质科研工作者把煤层作为水退的产物,往往把煤层放在一个沉积旋回的顶部。这成为传统煤地质学的理论支撑点。随着“海侵过程成煤”、“海侵事件成煤”、“幕式成煤”、“风暴异地成煤”等成煤模式和理论的提出,“成煤多样性”研究的不断进展,传统理论受到巨大挑战。但这并不能否定传统成煤理论存在的合理性和正确性。同样的道理,大量不同类型异地煤的发现,并不能否定原地煤成因机制的合理性。继承性与发展性又是相互统一、互为补充的,现有聚煤理论在继承已有理论的本质关键点基础上,通过补充与完善新的关键点或将已有的关键点进行交叉,则发展转化成新的聚煤理论。这就是继承性与发展、创新性的统一。

理论性与实践性的统一:煤炭地质勘探、资源预测与新赋煤区块的寻找是检验聚煤理论正确与否的标准,聚煤理论体系中的任何理论与模式都来源于实践,理论升华的成果又必须接受实践的检验。即多元聚煤理论体系中的各种理论都是煤地质研究人员从实践中总结出来的,并在实践中得到了验证。理论要做到与时俱进,就必须紧密结合煤田地质勘探与找煤实践。因此,多元成煤理论体系理论性与实践性强调的是可读性与可操作性的结合,通过实践可以丰富并证明理论的合理性和先进性,而成熟的理论可以指导资源预测和勘探实践。

5.2 多元聚煤理论体系的基本内核及构建

基于上述对聚煤模式多样性和聚煤作用理论多元性的分析,以及在此基础上形成的多元聚煤理论体系的内核,按照本文提出多元聚煤理论体系建

立的基本原则和立论基础,构建了多元聚煤理论体系格架(图 5),并阐明各种作用关系。

多元成煤理论的基本内核是:一个中心(泥炭堆积样式)、一个基本点(水域体制)、一个基本框架(层序地层格架内不同体系域聚煤差异性)、四个基本条件(古植物、古气候、古构造和古地理)的相互牵制、多种影响因素(如突发性水侵事件、构造事件、火山事件等)的相互作用,强调聚煤作用模式的多样性与聚煤作用过程与机制的多元性。

在实际煤地质研究与工作中,往往根据相关煤地质学知识判断煤层形成的盆地属性,如陆相盆地成煤、过渡相盆地成煤及近海盆地成煤,无论哪种盆地成煤,其内部沉积体系配置、沉积物供给、构造体制特点等都可能有利于成煤作用的发生,只要其沉积体系及沉积环境满足一定的泥炭堆积与保存关系。需要强调的是,聚煤盆地层序地层学的分析思路与方法多元聚煤理论的重要组成部分。

6 结束语

(1)多元成煤理论不是每种成煤理论的简单集合,其核心思想是阐明各种因素的相互作用与影响,成煤机制的交叉、包含,而不是孤立地看一个具体问题。

(2)以泥炭沼泽堆积样式为中心,盆地水域体制为阐明聚煤作用机制的基本点,聚煤盆地层序地层不同体系域聚煤差异性为聚煤理论的支撑格架,古植物、古气候、古构造和古地理分析为构建聚煤理论体系的四个基本条件,各种地质因素的相互牵制、多种事件(如突发性水侵事件、构造事件、火山事件等)的影响,聚煤模式的多样性和聚煤作用过程与机制多元性等,构成了多元成煤理论体系的内核。

(3)着眼于多元成煤理论体系的发展和应用,多元聚煤理论体系的构建强调四个统一,即聚煤理论体系的完整性与协同性的统一、独创性与转化性的统一、继承性与发展性的统一、理论性与实践性的统一。

(4)地质事件对聚煤作用影响的分析成为聚煤理论的重要支撑点,国内外很多实例表明,含煤充填沉积中的事件沉积占有重要地位,一些地质事件成为揭开聚煤作用过程和寻找聚煤规律的钥匙。

参考文献:

陈世悦,徐凤银,刘焕杰. 2001. 华北晚古生代层序地层与聚煤规律[M]. 东营:石油大学出版社:1-12.
 韩作振,余继峰,王秀英,孙电,刘芳. 2000. 鲁西石炭纪事件沉积岩石学特征[J]. 煤田地质与勘探,28(4):1-3.
 何起祥,业冶铮,张明书,李浩. 1991. 受限陆表海的海侵模式[J]. 沉积学报,9(1):1-9.
 胡益成,廖玉枝,徐世球. 1997. 南华北晚石炭世风暴事件及其对聚煤作用的影响[J]. 地球科学-中国地质大学学报,22(1):

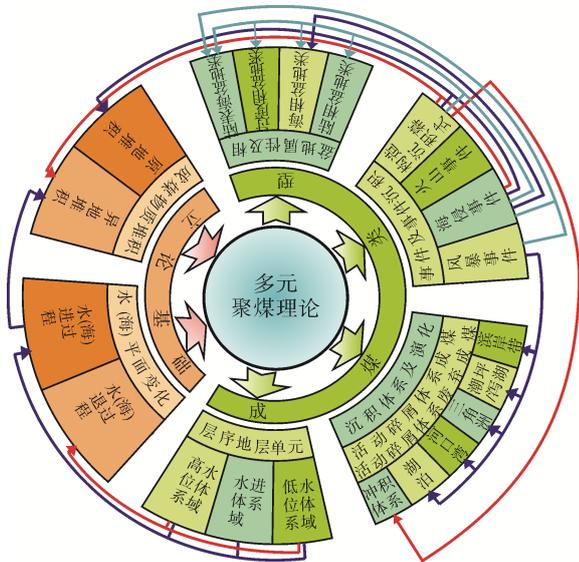


图 5 聚煤盆地多元成煤理论体系及相互作用因素
 Fig. 5 Multiple coal-forming theoretical system and interaction elements

46-50.

- 李宝芳, 温显瑞, 李贵东. 1999. 华北石炭、二叠系高分辨率层序地层分析[J]. 地学前缘, 6(增): 81-93.
- 李思田. 1988. 断陷盆地分析与煤聚积规律[M]. 北京: 地质出版社: 1-41.
- 李增学, 何玉平, 刘海燕, 吕大炜. 2010. 琼东南盆地崖城组煤的沉积学特征与聚煤模式[J]. 石油学报, 31(4): 542-547.
- 李增学, 吕大炜, 周静, 刘海燕, 王平丽, 魏久传, 余继峰. 2011. 含煤系统理论及其模式[J]. 地球学报, 32(6): 659-667.
- 李增学, 魏久传, 韩美莲. 2001. 海侵事件成煤作用——一种新的成煤模式[J]. 地球科学进展, 16(1): 120-125.
- 李增学, 余继峰, 郭建斌, 韩美莲. 2003. 陆表海盆地海侵事件成煤作用机制分析[J]. 沉积学报, 21(2): 288-295.
- 鲁静, 邵龙义, 李文灿, 黄尊灵, 邵凯, 汪浩, 李猛, 王伟超. 2010. 层序格架内障壁海岸沉积体系古地理背景下聚煤作用[J]. 煤炭学报, 31(1): 78-85.
- 吕大炜, 李增学, 魏久传, 刘海燕, 吴立荣. 2010. 基于不同成煤理论的含煤地层层序划分[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 34(4): 49-56.
- 马维俊. 1989. 贵州纳雍地区含煤地层中一种新型分流河道沉积[J]. 科学通报, (6): 443-445.
- 桑树勋, 陈世悦, 刘焕杰. 2001. 华北晚古生代成煤环境与成煤模式多样性研究[J]. 地质科学, 36(2): 212-221.
- 桑树勋, 刘焕杰, 贾如玉, 杨志刚. 1999b. 华北中部太原组火山事件层与煤层对比——火山事件层的沉积学研究及展布规律(II)[J]. 中国矿业大学学报, 28(2): 108-112.
- 桑树勋, 刘焕杰, 贾如玉. 1999a. 华北中部太原组火山事件层与煤层对比——火山事件层的沉积学研究及展布规律(I)[J]. 中国矿业大学学报, 28(1): 46-49.
- 邵龙义, 陈家良, 李瑞军. 2003. 广西合山晚二叠世碳酸盐岩型煤层层序地层分析[J]. 沉积学报, 21(1): 168-173.
- 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和展望[J]. 煤田地质与勘探, 26(1): 4-9.
- 邵龙义, 张鹏飞, 陈代钊, 罗忠. 1994. 滇东黔西晚二叠世早期辫状河三角洲沉积体系及其聚煤特征[J]. 沉积学报, 12(4): 132-139.
- 邵龙义, 张鹏飞, 刘钦甫, 郑茂杰. 1992. 湘中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.
- 王东东. 2012. 鄂尔多斯盆地中侏罗世延安组层序-古地理与聚煤规律[D]. 北京: 中国矿业大学(北京).
- 王华, COUREL L. 1994. 法国蒙索盆地的断裂活动与泥炭(煤)堆积的关系[J]. 煤田地质与勘探, 22(5): 1-6.
- 王华, 吴冲龙, COUREL L, GUIRAUD M. 1999. 法国、中国断陷盆地厚煤层堆积机制分析[J]. 地学前缘, 6: 157-165.
- 吴冲龙, 柴柱, 要庆军, 李绍虎, 李思田. 1994. 抚顺盆地的同沉积构造演化及其控煤控岩作用[J]. 矿床地质, 13(增刊): 58-60.
- DIESSEL C F K. 1992. Coal-bearing Depositional Systems[M]. Berlin: Springer.
- 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. 2010. The stratigraphic distribution of inertinite[J]. International Journal of Coal Geology, 81: 251-268.
- DUAN Du-juan, ZHAO Cun-liang, QIN Shen-jun. 2011. Coal petrological and coal facies characteristics of the No. 2 seam from Huangling mine, Shanxi Province, China[J]. Energy exploration & exploitation, 29(5): 647-666.
- GARCÉS B L V, ELIZABETH G-K, BRAGONIER W A. 1997. Pennsylvanian continental cyclothem development: no evidence of direct climatic control in the Upper Freeport Formation (Allegheny Group) of Pennsylvania (northern Appalachian Basin)[J]. Sedimentary Geology, 109: 305-319.
- GREB S F, GERALD A. 1996. Weisenfluh.Paleoslumps in coal-bearing strata of the Breathitt Group (Pennsylvanian), Eastern Kentucky Coal Field, U.S.A[J]. International Journal of Coal Geology, 31: 115-134.
- HAN Zuo-zhen, YU Ji-feng, WANG Xiu-ying, SUN Dian, LIU Fang. 2000. Characteristics of Sedimentary Petrography in Carboniferous Events of Western Shandong[J]. Coal Geology & Exploitation, 28(4): 1-3(in Chinese with English abstract).
- WANG Hao, SHAO Long-yi, HAO Li-ming, ZHANG Peng-fei, GLASSPOOL I J, WHEELLEY J R, WIGNAL P B, YI Tong-sheng, ZHANG Ming-quan, HILTON J. 2011. Sedimentology and sequence stratigraphy of the Lopingian(Late Permian) coal measures in southwestern China[J]. International Journal of Coal Geology, 85: 168-183.
- HE Qi-xiang, YE Zhi-zheng, ZHANG Ming-shu, LI Hao. 1991. Transgression Model of Restricted Epicontinental Sea[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 9(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- 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.
- HU Yi-cheng, LIAO Yu-zhi, XU Shi-qiu. 1997. Late Carboniferous storm events and the effects on coal-accumulation in Southern North China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 22(1): 46-50(in Chinese with English abstract).
- ISBELL J L, CUNEO N R. 1996. Depositional framework of Permian coal-bearing strata, southern Victoria Land, Antarctica[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 125: 217-238.
- JERRETT R M, DAVIES R C, HODGSON D M, FILNT S S, CHIVERREL R C. 2011. The significance of hiatal surfaces in coal seams[J]. Journal of the Geological Society, 168: 629-632.
- KALKREUTH B W, DAVIES E H. 1996. Coal seam splits and transgressive-regressive coal couplets: A key to stratigraphy of high-frequency sequences[J]. Geology, 24(11): 1001-1004.
- LI Bao-fang, WEN Xian-duan, LI Gui-dong. 1999. High resolution sequence stratigraphy analysis on Permo-carboniferous in North China Platform[J]. Earth Science Frontiers, 6(supl): 81-93(in Chinese).
- LI Si-tian. 1988. Fault basin analysis and coal accumulation[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LI Zeng-xue, HE Yu-ping, LIU Hai-yan, LV Da-wei. 2010. Sedimentology characteristics and coal-forming models in Yacheng Formation of Qiongdongnan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 31(4): 542-547.
- LI Zeng-xue, LÜ Da-wei, ZHOU Jing, LIU Hai-yan, WANG

References:

- CHEN Shi-yue, XU Feng-yin, LIU Huan-jie. 2001. Sequence stata and coal accumulation of the late Palaeozoic in the north China[M]. 2000. Dongying: Petroleum University Publishing House(in Chinese).
- CHESNUT D R. 1996. Geologic framework for the coal-bearing rocks of the Central Appalachian Basin[J]. International Journal of Coal Geology, 31: 55-56.
- DIESSEL C, BOYD R, WADSWORTH J, LECKIE D, CHALMERS G. 2000. 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, 43: 143-186.

- Ping-li, WEI Jiu-chuan, YU Ji-feng. 2011. Theory and Model of Coal-bearing System[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(6): 659-667(in Chinese with English abstract).
- LI Zeng-xue, WEI Jiu-chuan, HAN Mei-lian. 2001. Coal Formation in Transgressive Events—A New Pattern of Coal Accumulation[J]. *Advance in Earth Sciences*, 16(1): 120-125(in Chinese with English abstract).
- LI Zeng-xue, YU Ji-feng, GUO Jian-bin, HAN Mei-lian. 2003. Analysis coal formation under transgression events and its mechanism in epicontinental sea basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 288-295(in Chinese with English abstract).
- LU Jing, SHAO Long-yi, LI Wen-can, HUANG Zun-ling, SHAO Kai, WANG Hao, LI Meng, WANG Wei-chao. 2010. Paleogeographic evolution and coal accumulation under sequence stratigraphic framework of a barrier coast[J]. *Journal of China Coal Society*, 31(1): 78-85(in Chinese with English abstract).
- LÜ Da-wei, LI Zeng-xue, WEI Jiu-chuan, LIU Hai-yan, WU Li-rong. 2010. Sequence division of coal strata based on different coal accumulation theory[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 34(4): 49-56(in Chinese with English abstract).
- MA Wei-jun. 1989. A kind of new type of distributary channel deposit in coal-bearing strata in Nayong area of Guizhou province[J]. *Chinese Science Bulletin*, (6): 44-445(in Chinese).
- MCCABE P J. 1987. Facies studies of coal and coal-bearing strata[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 32: 51-66.
- HOLZ M. 1998. The Eo-Permian coal seams of the Paran basin in southernmost Brazil: An analysis of the depositional conditions using sequence stratigraphy concepts[J]. *International Journal of Coal Geology*, 36: 141-163.
- MILICI R C, WARWICK P D, CECIL C B. 2009. Coal system analysis: A new approach to the understanding of coal formation, coal quality, environmental considerations, and coal as a source rock for hydrocarbon[EB/OL]. http://gsa.confex.com/gsa/2001AM/finalprogram/session_596.htm.
- MOORE T A, SHEARER J C. 2003. Peat/coal type and depositional environment—are they related?[J]. *International Journal of Coal Geology*, 56: 233-252.
- PFEFFERKORN H W, WANG J. 2007. Early Permian coal-forming floras preserved as compressions from the Wuda District (Inner Mongolia, China)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 69: 90-102.
- QUEROL X, ALASTUEY A, LOPEZ-SOLER A, PLANAA F, ZENG Rong-shu, ZHAO Jie-hui, ZHUANG Xin-guo. 1999. Geological controls on the quality of coals from the West Shandong mining district, Eastern China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 42: 63-88.
- GASTALDO R A, DEMKO T M, LIU Yue-jin. 1993. Application of sequence and genetic stratigraphic concepts to Carboniferous coal-bearing strata: an example from the Black Warrior basin, USA[J]. *Geol Rundsch*, 82: 212-226.
- SANG Shu-xun, CHEN Shi-yue, LIU Huan-jie. 2001. Study on Diversity of Late Paleozoic Coal-forming Environments and Models in North China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 212-221(in Chinese with English abstract).
- SANG Shu-xun, LIU Huan-jie, JIA Ru-yu, YANG Zhi-gang. 1999b. Volcanic Event Strata and Correlation of Coals and Rocks of Taiyuan Formation in Central North China—Sedimentary Study of Volcanic Event Strata and Their Distribution(II)[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 28(2): 108-112(in Chinese with English abstract).
- SANG Shu-xun, LIU Huan-jie, JIA Ru-yu. 1999a. Volcanic Event Strata and Correlation of Coals and Rocks of Taiyuan Formation in Central North China —Sedimentary Study of Volcanic Event Strata and Their Distribution(I)[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 28(1): 46-49(in Chinese with English abstract).
- SCHLAGER W. 2004. Fractal nature of stratigraphic sequences[J]. *Geology*, 32: 185-188.
- SHAO Long-yi, CHEN Jia-liang, LI Rui-jun. 2003. A Sequence Stratigraphic Interpretation on Late Permian Carbonate Coal Measures in the Heshan Coal Field, Southern China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 168-173(in Chinese with English abstract).
- SHAO Long-yi, DOU Jian-wei, ZHANG Peng-fei. 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 Long-yi, ZHANG Peng-fei, CHEN Dai-zhao, LUO Zhong. 1994. Braided Delta Depositional System and Coal Accumulation During Early Late Permian Period in Eastern Yunnan and Western Guizhou, Southwest China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 12(4): 132-139(in Chinese with English abstract).
- SHAO Long-yi, ZHANG Peng-fei, LIU Qin-fu, ZHENG Mao-jie. 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).
- SIAVALAS G, LINOU M, CHATZIAPOSTOLOU A, KALAITZIDIS S, PAPAETHYMIU H, CHRISTANIS K. 2009. Palaeoenvironment of Seam I in the Marathousa Lignite Mine, Megalopolis Basin(Southern Greece)[J]. *International Journal of Coal Geology*, 78: 233-248.
- SPEIGHT J G. 2005. Handbook of Coal Analysis[M]. A John Wiley & Sons, INC: 0-166.
- WANG Dong-dong. 2012. Sequence-palaeogeography and Coal-accumulation of the Middle Jurassic Yanan Formation in Ordos Basin[D]. Beijing: China University of Mining & Technology(Beijing).
- WANG Hua, COUREL L. 1994. Block model and their relationship to peat(coal) accumulation in faulted coal basin of Montceau, France[J]. *Coal Geology & Exploration*, 22(5): 1-6(in Chinese with English abstract).
- WANG Hua, WU Chong-long, COUREL L, GUIRAUD M. 1999. Analysis on accumulation mechanism and sedimentary conditions of thick coalbeds in Sino-France faulted coal basins[J]. *Geoscience Frontiers*, 6: 157-165(in Chinese with English abstract).
- WIGHTMAN W G, SOTT D B, MEDIOLI F S, GIBLING M R. 1993. Carboniferous marsh foraminifera from coal-bearing strata at the Sydney basin, Nova Scotia: A new tool for identifying paralic coal-forming environments[J]. *Geology*, 21: 631-634.
- WU Chong-long, CHAI Zhu, YAO Qing-jun, LI Shao-hu, LI Si-tian. 1994. The syndeposition tectonic evolution and the function to control the coal and the rock from Fushun Coal Field[J]. *Mineral Deposits*, 13(S1): 58-60(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhou-liang, SUN Ke-qin, YIN Jia-run. 1997. Sedimentology and sequence stratigraphy of the Shanxi Formation (Lower Permian) in the northwestern Ordos Basin, China: an alternative sequence model for fluvial strata[J]. *Sedimentary Geology*, 112: 123-136.