文章编号:1000-0550(2017)05-1016-16

再论中国含煤岩系沉积学研究进展及发展趋势

邵龙义1,王学天1,鲁静1,王东东2,侯海海1

1.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083
 2.山东科技大学地球科学与工程学院,山东青岛 266590

摘 要 过去 30 年间,在层序地层学及旋回地层学等沉积学理论引入中国后,中国学者在含煤岩系沉积学研究方面取得了长足的进步,相继提出幕式聚煤作用、海侵过程成煤作用、海侵事件成煤作用以及超厚煤层的多阶段泥炭地叠加成因模式等基于层序地层学理论及可容空间概念的聚煤模式,并将可进行区域对比的等时性地层单元(层序)与传统岩相古地理研究相结合,重建中国各聚煤期等时性岩相古地理,进行富煤带及聚煤中心迁移规律分析。随着煤层气及煤系页岩气等非常规天然气勘探的不断深入,煤相及沉积有机相研究作为煤及泥质岩生烃潜力评价的重要方法重新受到关注。"含煤系统"概念将含煤盆地中各种地质信息进行融合与集成,包括古泥炭堆积的原始特征、含煤岩系的地层格架及煤层丰度、煤中硫含量与分布特征、煤变质程度或煤阶等。近年来,煤层作为"深时"古气候信息的载体,成为当前研究热点之一,特别是煤中丝质体含量可用来研究古泥炭地火灾事件及大气氧含量变化,米兰科维奇旋回理论作为一种有效的"深时"时间尺度度量方法,可用来研究古泥炭地的碳聚集速率及其所反映的净初级生产力与大气 CO₂变化趋势。未来含煤岩系沉积学将会进一步加强研究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与煤系非常规天然气资源预测模式,以及煤层在地球长、短周期气候变化旋回中的地质意义。

关键词 含煤岩系;煤炭资源;沉积学;超厚煤层的多阶段泥炭地叠加成因模式;"深时"古气候;发展战略 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: ShaoL@ cumtb.edu.cn 中图分类号 P618.11 文献标识码 A

0 引言

含煤岩系沉积学的发展经历了旋回层、沉积模式 和层序地层学3个研究阶段^[1]。Weller^[2]提出的"旋 回层"概念将海平面周期性变化与含煤地层周期性 变化进行联系,为含煤岩系及煤层对比提供了理论依 据;Ferm^[3]与 Horne et al.^[4]提出阿勒格尼三角洲聚 煤模式,认识到沉积环境对聚煤作用的影响,随后各 种聚煤模式被相继提出[5],与此同时中国学者提出 多堡岛聚煤模式[6]、潮坪聚煤模式[7]及碳酸盐台地 综合聚煤模式^[8]等。层序地层学概念体系^[9]将全球 海平面周期性变化与局部沉积自旋回很好的结合起 来,其中"可容空间"概念的提出对深入理解聚煤作 用具有重要意义^[10]。目前,层序地层学作为一种盆 地分析方法在聚煤作用[1,11]、超厚煤层成因[12]、古地 理^[13]、煤相^[14]及有机相^[15]、含煤系统及含煤层气系 统[16-17]以及清洁煤地质[18-19]等研究方面均得到了广 泛应用。近年来,米兰科维奇旋回理论作为一种可靠

的"深时"地层时间尺度度量方法^[20-21],在含煤岩系 "深时"古气候研究中也得到了广泛的应用^[22-23]。

本文从含煤岩系层序—古地理与聚煤规律、煤相 及沉积有机相、含煤系统及含煤层气系统、洁净煤沉 积学以及含煤岩系"深时"古气候记录等五个方面对 近 30 年来的中国含煤岩系沉积学研究进展进行总 结,并对中国含煤岩系沉积学今后的发展方向提出建 议。

1 含煤岩系层序—古地理与聚煤规律

1.1 聚煤作用及其控制因素

层序地层学的出现极大地推动了聚煤作用理论的发展,层序地层学与旋回地层学相结合,能够为含煤岩系对比提供等时性地层格架,"可容空间"概念为进一步理解聚煤作用机理提供了理论基础。受层序地层概念的启发,我国学者针对不同级别沉积层序及体系域的煤层分布特征,相继提出幕式聚煤作用^[24-25]、盆控型泥炭沼泽体系^[26]、海侵过程成煤作用^[27]、海侵事件成煤作用^[11]、海相层滞后阶段聚煤

收稿日期: 2017-02-13; 收修改稿日期: 2017-06-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41572090,41402086);国家科技重大专项(2016ZX05027-001)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41572090, 41402086; National Science and Technology Major Project, No.2016ZX05027-001]

作用^[1, 28]等基于层序地层学理论的聚煤模式,并将 可区域对比的等时性地层单元(层序)与岩相古地理 研究相结合,对我国主要聚煤期进行层序—岩相古地 理重建、聚煤中心迁移规律分析和富煤带的预 测^[13, 29-33]。

可容空间在经典层序地层学中被定义为"可供 潜在沉积物堆积的所有空间",泥炭地中的可容空间 可定义为泥炭所能堆积的最大高度^[10],而煤层厚度 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^[34]。过慢的基准面上升速率难以保证泥 炭堆积所需的可容空间,而过快的基准面上升速率使 得泥炭堆积速率难以匹配可容空间增加速率,导致泥 炭地很快被水体淹没,从而难以于形成厚度较大的煤 层;只有适宜的基准面上升速率才能维持可容空间增 加速率与泥炭堆积速率之间的相对平衡状态,从而形 成厚度较大的煤层^[34]。

我国学者在实践中发现这种泥炭堆积速率与可 容空间增加速率的平衡,在不同的古地理背景下有不 同的表现,煤层厚度在垂向上具有不同的变化特 征^[28]。在近物源的盆地上倾方向,沉降幅度较小、河 流冲积体系或三角洲沉积体系发育,陆源供给相对充 分而多处于补偿或过补偿状态,造成泥炭聚集速率往 往大于可容空间增加速率,此时,只有基准面上升速 率足够快、可容空间快速增加时,可容空间增加速率 与泥炭堆积速率才能够长时期保持平衡,厚煤层在最 大海泛面附近发育。反之,在远物源的盆地下倾方 向,沉降幅度较大、滨外陆棚、碳酸盐台地等沉积环境 发育,陆源碎屑供给相对缺乏而多处于欠补偿状态, 造成泥炭聚集速率往往小于可容空间增加速率,在基 底变浅或暴露后基准面再次上升过程中才可能出现 泥炭堆积速率与可容空间增加速率相平衡的情况.厚 煤层在海侵体系域早期初始海泛面附近发育[1](图 1)。对不同聚煤环境中可容空间与泥炭堆积关键因 素的研究表明,在低可容空间背景的河流—三角洲环 境,厚煤层一般形成于下三角洲平原和间湾湖泊演化 来的泥炭地环境[35],而在可容空间相对较高的障壁 海岸体系中,厚煤层一般形成于障壁岛——瀉湖以及潮 坪演化而来的泥炭地环境^[36]。

聚煤期陆相盆地构造活动相对稳定,气候变化通 过影响盆地和流域径流深度和植被发育程度控制着 湖水面变化与沉积物供给速率,进而导致盆地内成煤 泥炭地与陆源碎屑沉积体系的交替演化,是驱动沉积 环境演化的主要因素^[14,37]。干热气候条件下植被覆 盖差,低降水量及高蒸发量使基准面处于低位,盆地 处于过补偿阶段,河流—三角洲冲积体系砂、砾岩发 育,泥炭地不发育。温暖潮湿气候条件下,植被覆盖 裸露基岩并发育古土壤层,水土保持能力强,陆源体 系废弃,基准面上升,冲积体系中发育暴露—弱覆水 的泥炭地环境,盆地总体处于平衡补偿阶段,泥炭能 够连续堆积。但持续温暖湿润的气候及过多的降水 量会使盆地进入欠补偿充填的湖泛期,聚煤作用终 止。之后气候在次一级旋回中变干热,基准面下降使 得沉积界面间歇暴露及弱覆水的条件再次出现,盆地 可再次沼泽化。随着气候转为持续干热,沉积供给随 着降水、植被覆盖的减少及水土流失的增强而增加, 基准面下降,河流三角洲陆源碎屑体系复活,聚煤作 用结束。因此,陆相含煤岩系的地层结构及煤层发育 程度受到长、短周期气候条件的显著控制。

1.2 超厚煤层成因模式

随着层序地层学理论在聚煤作用分析中的应用 不断深入,人们对超厚煤层成因又有了新的认 识^[12,38]。Shearer *et al*.^[39]认为超厚的泥炭层为多个 独立的泥炭体系叠置而成,提出了叠置泥炭地序列理 论。Jerrett *et al*.^[40]在超厚煤层中识别出不同类型的 间断面,根据可容空间增加速率与泥炭聚集速率之间 的关系,将间断面划分为暴露间断面和淹没间断面 (图 2A),强调超厚煤层是由间断面(层序界面)分割 的多个泥炭地体系聚集的煤层复合体,超厚煤层的形 成可经历过多次沉积间断。

国内学者通过煤相指标、显微组分类型、煤质特征^[41],在鄂尔多斯盆地南部延安组一段超厚煤层中 识别出水进型、水退型沉积间断面(图2B),提出超厚 煤层是包含许多间断面或沉积转换面的煤层复合体, 由多期泥炭地相互叠加形成,据此建立了鄂尔多斯盆 地超厚煤层的多阶段泥炭地叠置成因模式(图 2C)^[12]。泥炭地随着水进、水退而迁移,在水进阶 段,泥炭地整体向陆地方向迁移,煤岩特征表现为镜 质组含量变高、惰质组含量变低的特征,在向盆地沉 积中心一侧(图2C,c处),代表水体较深的碎屑物质 会替代泥炭堆积形成夹矸;在水退阶段,泥炭地整体 表现出水退序列,若缺乏碎屑物质供应,则形成水退 型间断面,煤岩特征表现为惰质组含量较高、镜质组 含量较低,在向陆一侧沉积界面可能遭受暴露,若存 在碎屑物质供应,则形成煤层夹矸(图2C,a处)。

超厚煤层成因除了多阶段泥炭地叠加成因观点 外,国内外还存在着异地堆积成因观点^[38,42]。在抚



a.不同可容空间层序格架中的煤厚变化规律;b.广西晚二叠世海相合山组; c.沁水盆地石炭—二叠世过渡相太原组及山西组; d.川 东陆相晚三叠世陆相须家河组七段

Fig.1 Coal accumulation pattern under different systems tracts and various accommodation settings

a. A model showing variation of the thickness of coals in a sequence stratigraphic framework in response to the balance between the rates in creation of accommodation space and the rates in peat accumulation. b. Coal distribution in a carbonate platform setting, with case from the Late Permian Heshan Formation in Guangxi. c. Coal distribution in the transitional setting with case from Taiyuan and Shanxi Formation, Permo-Carboniferous, Qinshui Basin. d. Coal distribution in a lacustrine basin with case from Late Triassic Xujiahe Formation in eastern Sichuan Basin

顺、先锋等陆相断陷盆地中超厚煤层中发育的水下重 力流沉积、泥石流沉积、同沉积变形构造等特征,说明 煤层聚集期间受到风暴、滑塌等极端事件的影响而再 次搬运、堆积,据此提出一系列超厚煤层的异地—微 异地成因模式^[38,42],但是,异地堆积成煤模式还应结 合煤岩学、地球化学、孢粉学等方面的证据来进一步 完善。

1.3 基于层序地层格架的岩相古地理及聚煤规律研究

岩相古地理分析是聚煤规律分析的重要手段,层 序地层学为古地理分析提供了等时性地层格架,通过 编制层序—古地理图可以进行富煤带、富煤中心分布 与迁移等规律研究。层序—岩相古地理图即是在层 序地层学理论的指导下,以层序、体系域或其顶底界 面为编图单元编制的等时性岩相古地理图^[43]。这种 编图法能够较为完善地反映区域沉积、构造、事件作 用及成矿特征,使岩相古地理图能够更好的对矿产分 布规律进行预测。岩相古地理图的编制方法主要有 地层图法和等时面法^[44],以及能源矿产勘探中广泛 应用的岩性参数等值线法或"单因素分析多因素综 合作图法"^[45]。





A.巨厚煤层内部间断面成因机制及识别^[12,40];B.鄂尔多斯盆地南部延安组4煤层水进、水退型界面划分^[12];C.多煤层叠加形成超厚 煤层模式^[12]

Fig.2 Multi-phase mire stacking model for accumulation of the super-thick coals

A.Genetic mechanism and identification marks of hiatal surface in the super-thick coal seam $^{[12, 40]}$; B.Surfaces representing transgression and regression in the No. 4 coal of the Yan'an Formation of southern Ordos Basin $^{[12]}$; C.Multiple coal seam stacking model for super-thick seam formation $^{[12]}$

我国学者自 20 世纪 90 年代就开始尝试恢复各聚煤 期的含煤岩系层序—古地理面貌,为矿产资源预测及 成矿作用分析奠定了基础。在近年来完成的新一轮 煤炭资源普查中,通过层序—古地理方法相继恢复了 华北石炭—二叠纪^[30]、华南晚二叠世^[13]、华南晚三 叠世^[29]、西北侏罗纪^[46-48]、东北早白垩世^[49]等不同 时代的层序—古地理格局,并分析了不同构造条件及 沉积环境下厚煤层在垂向地层格架中展布规律、富煤 带或富煤中心在横向古地理格局中的分布规律及其演 化特征,为我国煤炭资源预测提供了理论支撑。

综上所述,聚煤作用受到层序地层格架与古地理 沉积环境的综合影响,煤层厚度受泥炭堆积速率与可 容空间增加速率的控制。气候条件在陆相盆地中对 聚煤作用以及含煤岩系的沉积特征起到重要的控制 作用。超厚煤层的形成可能由不同成因的多期煤层 叠加形成,包括小型陆相断陷盆地中的异地—微异地 搬运成因以及更为普遍的原地堆积成因等。等时性 的层序—古地理方法在含煤岩系沉积环境及聚煤规 律中得到了有效应用,近年来层序地层学理论得到了 进一步的发展及完善^[50],特别是对不同气候条件(温 室、冰室及其过渡期)^[51]、不同类型大陆边缘^[52]中层 序地层样式的讨论。源—汇系统方法的兴起则使得 对沉积物由物源区到沉积区的完整动力机制、沉积收 支平衡以及环境信号在沉积路径系统中传播与保存 的研究成为可能^[53-54],因而在未来有望在更精准的 层序—古地理格架中对聚煤规律进行研究。

煤相及沉积有机相 2

煤相及沉积有机相亦是含煤岩系沉积学研究的 重要内容,特别是在预测煤系烃源岩(煤和富有机质 泥岩)的空间分布及生烃潜力时具有重要意义。

煤相研究 2.1

煤相即煤的沉积相,反映某一成煤沼泽环境中煤 的原始成因类型。煤相分析通过研究煤的岩石学、地 球化学特征及成煤植物类型来确定成煤沼泽类型及 其演化过程^[55]。热姆丘日尼科夫于 1951 年首次提 出煤相的概念,即成煤条件、成煤过程及成煤物质的 综合特征,将煤相概括为沼泽相与湖泊相,划分出干 燥森林沼泽相、深积水沼泽相、河漫流水沼泽相、滨海 咸水淤塞潟湖相、淡水植物丛生湖泊相或淤塞湖泊相 五种类型,涅菲捷耶娃^[56]在该分类基础上结合煤层 顶底板及夹矸岩性将煤相划分为大陆煤相及滨海煤 相两大类。Teichmüller^[57]综合古植物学和煤岩学方 法划分出森林沼泽、苔藓沼泽、芦苇沼泽及含水生植 物开阔水域四种沼泽类型。

煤岩学中的显微煤岩组分及显微煤岩类型的研 究是煤相研究的根本基础[55],显微组分的保存特征 能够反映泥炭堆积时植物的分解程度、堆积速度和覆 水条件^[58],一般认为镜质组形成于强覆水还原条件, 惰质组形成于氧化条件,而壳质组的形成则主要取决 于成煤植物特征及沼泽水位状况。Diessel^{59]}根据沼 泽类型、泥炭堆积条件和沼泽沉积环境的关系建立了 联系煤相与沉积环境的煤相指数,即凝胶化作用指数 (GI=(镜质体+粗粒体)/(丝质体+半丝质体+惰屑 体))和组织保存指数(TPI=(结构镜质体+均质镜质 体+丝质体+半丝质体)/(基质镜质体+粗粒体+惰屑 体))。GI指数为煤中凝胶化组分与丝炭化组分之 比,能够反映成煤沼泽水位的变化情况和植物遗体的 凝胶化程度,高GI值表示泥炭沼泽相对潮湿,反之则 相对干燥。TPI 指数是指在镜质组和惰质组中有结 构的显微组分与无结构的显微组分之比,反映植物组 织的破坏程度和木本植物在成煤植物中的比例。此 外,TPI还在一定程度上反映了成煤环境的pH值,因 为在低 pH 值环境里, 微生物的活动性比较弱, 植物 组织得以保存完好,导致 TPI 值相对较高。煤相指数 与成煤沼泽的关系如表1所示。

中国学者应用 GI 和 TPI 的概念对中国各聚煤期 的煤相进行研究,在吐哈盆地侏罗纪煤层中划分出干 燥森林沼泽相、湿地森林沼泽相、覆水森林沼泽相、较 深覆水森林沼泽相、芦苇沼泽相和湖沼相,此外煤相 特征在成煤沼泽微环境及沼泽演化过程研究中得到 广泛应用[14,60-64]。对我国东海陆架西湖凹陷古近纪 煤层的研究^[65]显示其中惰质组含量较低,较高的 GI 值反映成煤时凝胶化作用强烈,因而成煤沼泽气候潮 湿、覆水程度较高。根据 TPI 值与 GI 值并结合沉积 环境与煤岩特征对煤相类型进行划分,将 TPI=1 作 为高位森林沼泽和芦苇沼泽的划分界限,GI=50作 为浅覆水和深覆水相的划分界限,识别出研究区识别 出4种不同的煤相类型:1)覆水森林沼泽相,2)深覆 水森林沼泽相,3)芦苇沼泽相,4)湖沼相^[65]。垂向上 煤相变化较频繁,下部平湖组以覆水森林沼泽相和深 覆水森林沼泽相为主,上部花港组以湖沼相和芦苇沼 泽相为主(图3)。

随着层序地层学的发展,人们逐渐认识到基准面

	-	
	高 TPI	低 TPI
高 GI	 (1)灰分较高或与表生碎屑夹矸互层时,为森林泥炭地(芦苇沼泽); (2)在灰分较低时为森林化、持续湿润的高位沼泽。 (3)由于沉降速率较高,植物组织腐殖化作用中等、凝胶化作用强。 	 (1)芦苇或淡水芦苇环境中的木质组分在缓慢沉降条件下强烈分解 形成的森林泥炭地; (2)树木稀少、草本植物为主的沼泽; (3)持续湿润条件下生长有草本植物的高位沼泽,灰份低,无夹矸 条带。 (4)芦苇或淡水芦苇植物,植物组织腐殖化程度高、凝胶化作用强
低 GI	(1)灰分较高时为间歇性干燥森林沼泽;(2)灰分较低或中等时为森林化高位沼泽。(3)植物组织腐植化和凝胶化作用中等。	 (1)缓慢沉降时为间歇性干旱沼泽,由原地生长的植物在有氧条件 下分解形成 (2)水下条件,泥炭异地搬运形成 (3)缓慢沉降条件下,相对干旱的高位沼泽

 Table 1
 Relationships between coal facies indices and conditions of coal formation (Diessel, 1992)

表 1 煤相指数与成煤环境的关系(Diessel, 1992)

	¥. 4. 4. W		***	*** ** ** **	
				THE FRE	Ľr
煤相	干燥森林沼泽相 (未识别)	覆水森林沼泽相	深覆水森林沼泽相	芦苇沼泽相	湖沼相
聚	沉积环境	潮控三角洲、 辫状河三角洲	潮坪、 潮控三角洲	滨浅湖、潮坪、 辫状河三角洲	滨浅湖、潮坪
煤	覆水深度	浅	较浅	较深	深
· · · · · · · ·	水动力条件	停滞	较停滞	较停滞	停滞
特征	氧化还原性	还原	还原	弱还原	还原
ш	植物类型	高等植物	高等植物	草本植物	藻类植物
	V+I(%)	92	89	91	93
141	E(%)	8	11	9	7
深岩	灰份含量	低	低	中	高
学	硫分含量	低	低	中	高
行征	煤中矿物含量	7.9	9.9	10.5	11
	TPI	>1	>1	<1	<1
	GI	<50	>50	<50	>50
有机	有机质类型	$III-II_2$	III — II_2	II_2 — II_1	II_2 — II_1
相及 生侭	生烃性	气	气	气、油	气、油
潜力	$S_1+S_2(mg/g)$	100~250	100~300	150~400	150~300
	西部斜城 平面分布范围 中央反转	西部斜坡带	西次凹及两侧	西部斜坡带	西部斜坡带
		中央反转带		中央反转带	中央反转带

图 3 西湖凹陷煤相类型与聚煤环境、煤岩学特征及生烃潜力关系

Fig.3 Relationships between the coal facies and the coal formation condition, coal petrology, and hydrocarbon potential

及可容空间变化对煤相发育特征有明显的控制作 用^[66]。相对海平面的变化控制着泥炭的堆积及煤质 特征,最大海泛面附近水位较高,缺氧条件及海水的影 响使得煤层中富氢镜质组、类脂组(壳质组)及黄铁矿 含量较高,而这些组分在海(湖)侵体系域初期或高位 体系域末期海(湖)平面相对静止—缓慢上升时期的 含量较低^[66]。在国内,煤相参数在晋北石炭二叠 纪^[67]、准噶尔盆地侏罗纪^[68]、柴达木北缘盆地侏罗 纪^[14]含煤岩系层序地层研究中得到很好的应用。

在应用显微煤岩组分进行煤相分析时,还需注意 近年来有关显微煤岩组分成因的争论,例如有证据表 明地质记录及煤层中的惰质组显微组分主要是野火 事件中不完全燃烧的产物^[69],与泥炭地覆水深度及 氧化还原性无关。因此,在利用煤相反映基准面变化 时,还需要具体问题具体分析。

2.2 煤系富有机质泥页岩有机相研究

近年来的页岩气的勘探开发激发了人们对富有 机质泥页岩的生烃潜力的研究兴趣,沉积有机相分析 则是泥页岩生烃潜力研究的重要手段^[70]。沉积有机 相主要指是烃源岩沉积环境在岩石学和地球化学方 面的综合反映,其空间配置受到沉积盆地中层序地层 格架及沉积环境的控制。有机相的明确概念由 Rogers^[71]提出,用以描述烃源岩中的有机质含量、有机质 类型、产油气率和油气性质等关系,他认为有机相类 似沉积相,可跨越时间而不受地层或岩石单位的限 制,有机质丰度、有机质类型和沉积环境是确定有机 相的必要条件,尤以有机质类型最为关键。Jones et al.^[72-73]划分出4种主要有机相(A、B、C、D)和3种过 渡有机相(AB、BC、CD),其中主要有机相对应的地质 意义分别为:A.缺氧的淡水或湖水环境:B.含一定陆 源有机质,有机质丰度较低;C.以陆源物质为主:D.高 氧化性—再旋回沉积。该分类方案充分考虑了有机 质来源、沉积环境、保存环境等控制因素,强调了干酪 根的连续性聚集。Tyson^[74]将有机相定义为"包含特 定有机组分的沉积体,可通过显微镜识别或具有特定 的有机地球化学特征"。金奎励等[75]认为有机相具 有岩石学和地球化学的双重属性,可以通过有机成分 进行反映。金奎励在对吐哈盆地侏罗纪煤系烃源岩 研究的过程中,将煤系炭质泥岩有机相划分为4个类 型,即干燥或富养沼泽相、森林沼泽相、活水沼泽相和 开阔水体相。该方案突出有机岩石学和地球化学研究 的相互结合,与 Jones 的方案具有对应关系,对含煤盆 地烃源岩评价具有重要意义。此外,其他国内学者的 分类方案有的将有机相与沉积相进行结合^[76],有的根 据可溶有机质、干酪根碳同位素、有机质丰度、有机质 类型及热变质程度等方面^[77]综合确定。

层序地层学的发展为有机相研究注入了新的活 力,有机相的关键控制因素包括气候条件、陆源有机 质产量、海相有机质表面生产率,古氧化体制以及海 平面变化等,据此可得出泥质烃源岩有机相在层序格 架内的分布规律^[78]:低位体系域内以 C-D 相为主,早 期陆源有机质易受到氧化,陆源有机质供应局限于再 沉积形成的盆底扇,生烃潜力较弱;海侵体系域由于 相对海平面上升,陆源物质供应迅速减少,有机质保 存条件较好,有机相以 BC-B 相为主,由于通常厚度 较大,是最有资源潜力的烃源岩;在海侵末期凝缩层 附近,含有丰富的底栖和浮游生物组合,缺氧环境中 可形成有利生油的(B-AB-A)有机相组合,但由于地 层厚度通常较薄,资源潜力相对较低;高位体系域早 期陆源供给尚不充分,可形成 BC-C-CD 有机相,高位 体系域晚期陆源物质供应较强,沉积速率较高,海相 有机质稀释,形成 C-CD 相,生烃潜力减弱。将层序 地层格架与有机相结合,是预测有利于生烃的有机相 的重要手段。

3 洁净煤的沉积学控制

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^[79-80]。我国学者 从洁净煤角度系统研究了全国范围内煤中硫及潜在 有害微量元素的分布规律、赋存状态、富集机理及其 在煤炭加工利用过程中的迁移规律与环境效应,并构 建了煤炭资源洁净潜力评价体系,圈定了我国不同洁 净等级煤炭资源分布范围^[81]。对我国煤中硫含量分 布地质成因的研究表明.硫含量高低明显受到沉积环 境的影响,碳酸盐台地沉积背景下易形成高有机硫 煤^[82]:海陆过渡相中易形成以硫铁矿硫为主的中高 硫煤和高硫煤;陆相沉积的煤层硫分含量一般较低, 但受硫源供给的影响^[18];此外煤中硫含量还与物源 供给距离存在一定关系,靠近古陆的煤层硫含量较 低,反之煤层硫含量较高。在层序地层格架下对煤层 煤岩煤质变化特征的研究表明,基准面变化控制了泥 炭地的水介质条件,进而控制了煤质变化特征,在下 切谷等层序界面处的煤层全硫含量相对较低,而最大 海泛面处煤层全硫含量则相对较高,受基准面变化的 影响,煤中Si、Al、Ca、K、Sr、P等元素在垂向剖面中会

呈规律性变化^[81,83]。煤的岩石学组成煤质特征在很 大程度上受到成煤条件的控制,因而基于成煤条件可 建立优质煤分类标准与评价方式,以及不同煤分类的 首选利用方式^[82]。近年来,煤中共伴生矿产资源及 有元素的成因类型、赋存状态和利用评价受到了广泛 关注^[84-85],如煤一锗、煤一镓、煤一锂、煤一铀、煤一 铌、煤—稀土元素等煤型稀有金属矿床,其中一些矿 产的形成及富集与同生沉积作用有关,包括物源碎屑 供给、火山灰沉积、沉积环境特征和海水的影响。

4 含煤系统及含煤层气系统

4.1 含煤系统

含煤系统是近年来煤田地质学的一个新概念,主 要是考虑煤的聚集受多种因素的影响 这些因素既相 互独立,又相互联系、相互制约,构成了一个复杂的聚 煤作用系统^[86]。赵忠新等^[87]主张的含煤系统,其基 本要素有物源、聚煤环境和地下热流,相关成煤作用 包括泥炭的原地堆积—异地搬运作用、煤层的埋藏作 用和成煤阶段的热变质作用。Warwick et al.^[88]定义 的"含煤系统(coal system)",进一步将煤地质学各分 支学科统一进行研究,利用"含煤系统分析方法"对 含煤盆地中各种地质信息进行组织与集成。将"含 煤系统"定义为成煤史相同或相近的若干个煤层或 煤层群,界定含煤系统的标志主要有:1)古泥炭堆积 的原始特征,2)含煤岩系的地层格架,3)主要含煤地 层中的煤层丰度,4)反映古泥炭堆积沉积环境和古 气候条件的煤中硫含量分布特征,5)煤变质程度或 煤级。

李增学等^[17]认为"含煤系统"是含煤岩系、煤层 及煤系共伴生矿产形成、保存及成藏的自然系统,根 据含煤系统中各组成部分的地质作用及其研究意义, 将含煤系统分为煤系地层格架、煤层(群)形态、煤变 质、赋煤区块、煤层气成藏和煤系游离气成藏 6 个子 系统。晋香兰等^[89]根据层序地层格架与地层完整程 度、沉积古地理轮廓与煤层厚度、煤层埋深与煤的变 质程度等指标,将鄂尔多斯盆地侏罗系含煤系统在平 面上划分为9个成煤系统单元,并对成煤系统在资源 评价中的意义进行了展望。

4.2 含煤层气系统

煤层气系统是近年来基于含油气系统的概念提出的,目的是将煤层气形成过程中复杂的自然现象和 地质作用表述得更加具有层次感和系统化。煤层气 系统的核心思想就是将煤层气的生、储、盖、运、聚、保 等一系列成藏过程作为整体进行综合研究^[16,90-91],这 个成藏过程一般上包括形成煤层气富集的各种静态 因素和动态因素,静态因素包括煤层的空间分布、煤 岩煤质及生气特征、煤储层含气量、煤层顶底板及封 盖条件等^[92-93];而动态因素则包括构造发育史、埋藏 史、热演化史、水动力场、古应力场等^[94]。因此,煤层 气系统是煤层和其中的煤层气富集所必须的一切地 质要素和作用所组成的天然系统^[95-97]。

煤层气系统的垂向分隔一般以水动力封闭为 主^[98],即不同煤层气系统之间具有相对独立的水力 联系。在黔西上二叠统以三角洲—潮坪—潟湖体系 沉积为主的含煤岩系中,低渗隔水阻气层的分布受到 层序格架控制,煤层甲烷平均含量及含气量梯度呈现 出波动式变化,可在垂向上划分出多套相对独立的含 煤层气系统,因此有学者提出多层叠置独立含煤层气 系统的观点^[16]。进一步研究表明,隔水阻气层主要 为最大海泛面附近的海相泥岩及低渗岩层,其平面展 布受到沉积环境显著控制,三角洲平原中偏氧化环境 使得最大海泛面附近的泥岩封堵性较低,使得相对孤 立的含气组合连通构成相对统一、结构简单的含气系 统;而三角洲前缘中低渗岩层相对发育,垂向含煤层 气系统较为复杂(图4)^[99]。

就沉积环境对含煤层气系统的控制作用而言,主 要表现在以下三个方面:一是对煤层厚度及其展布特 征的控制;二是对煤储层中煤岩煤质及微裂隙等相关 非均质性的控制;三是对煤层围岩(区域盖层)及其 岩相组合的控制,最终体现在对煤储层孔渗性和富集 条件的控制^[99]。多层叠置独立含煤层气系统体现了 以上控制作用的第三个方面,这是由黔西晚二叠世内 克拉通盆地背景过渡相沉积环境所决定的。由此获 得启发,在其他聚煤环境中或者在上述控制作用第 一、第二方面,是否还存在其他类型的含煤层气系统, 从而为煤层气资源的勘探开发提供更准确的科学 依据。

5 含煤岩系中"深时"古气候信息

作为地质时期泥炭地发育的产物,煤的形成经历 了气候条件、构造特征、水平面升降、泥炭地类型、成 煤物质、营养条件、地史重大事件和日地轨道周期旋 回等变化,这些变化会直接或间接地记录在煤层当 中,使其成为"深时"古生态、古环境及古气候信息的 重要载体。近年来我国学者在利用含煤岩系古土壤 研究古气候^[100-101]、利用显微煤岩组分丝质体含量研 究古泥炭地火灾事件及大气氧含量^[22]、利用煤层中 的米兰科维奇旋回周期研究古泥炭地碳聚集速率及 大气 CO₂变化趋势^[23]等方面进行了深入研究。

含煤岩系中的古土壤能够作为深时古气候的良 好标志^[102]。邵龙义等^[100]在渤海湾石炭—二叠系盆 地中依据古土壤及地球化学特征,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 和古氧化土七种古土壤类型,根据古土壤在垂向剖面 中的发育规律恢复了气候变化曲线,提出从晚石炭世 到晚二叠世由温暖潮湿至炎热干燥的长周期气候变 化是板块漂移的结果,具有长湿短干—半湿半干—短 湿长干的降水特征,而短周期气候变化则是区域性基 准面变化的结果。Yang et al.^[101]通过对河南永城下 二叠统煤及其含煤岩系中泥质岩矿物成分进行化学 风化指数研究,发现风化程度与纬度之间具有相关



图 4 运行相关内阁八阳(云南乡内省承运(示纪侯氏(诏化玉林寺,2012,有修议) Fig.4 Simplified model of coalbed methane-bearing system restricted by the water-resisting and impermeable gas barrier in the sequence stratigraphic framework (modified from Shen, *et al.*, 2012)

性,借助现代风化指数—温度之间的关系,认为早二 叠世冰室期的高—低纬度之间温差值约为20°C。

传统煤岩学教程认为煤中惰质组的成因包括野 火不完全燃烧、真菌降解、氧化脱水等,如今,越来越 多的学者通过燃烧实验证明煤中的惰质组主要是火 焚事件不完全燃烧形成的产物^[69]。Scott *et al.*^[69]认 为借助含煤岩系中惰质组含量不仅可以反推古野火 事件频繁程度还能估算古大气氧含量水平,于是对世 界范围内各个地质时期煤中惰质组的含量进行了统 计,并利用非线性回归方法计算出了 400 Ma 以来的 大气氧含量水平。Glasspool *et al.*^[103]又进一步修订 了该模型并重新计算了古大气氧含量,与运用地球化 学方法计算出的大气氧含量不同,基于惰质组含量计 算出的氧含量浮动范围相对较小,精度略有提高。 Shao *et al.*^[22]对中国西南地区晚二叠世末期煤中惰 质组含量进行了高分辨率采样研究,借助此模型计算 出当时大气氧含量水平为 27%(图5)。



大气氧含量[22]



泥炭地作为地球系统中重要的碳库在全球碳循 环中扮演着重要角色。煤中的碳主要来自泥炭地发 育时期植物生长过程中通过光合作用固定的碳。因 此,对煤中碳的聚集速率研究有助于了解泥炭地发育 时期植物的聚碳效应^[23],进而了解地质历史时期碳 循环特征,从而为古气候研究提供帮助。米兰科维奇

旋回理论是古环境研究中重要的时间"度量"工具。 Large et al. [104-105]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,并据此建立起精确的时间尺度并计算有机 碳的聚集速率等。国内学者针对晚二叠世及早白垩 世煤层进行地球物理测井信号频谱分析,识别出米兰 科维奇旋回信号并获得相应的周期参数[106-107]。对 晚二叠世贵州普安17号煤层的研究发现,测井信号 所反映出的煤层灰分含量变化受泥炭地发育时期的 米兰科维奇轨道的偏心率、斜率及岁差周期的驱动 (图 6)。以煤层剖面中识别出的轨道周期为时间尺 度,结合煤层厚度可计算出泥炭地的碳聚集速率及对 应的净初级生产力(NPP)^[23],基于晚二叠世、晚石炭 世、早白垩世和现代热带泥炭地的 NPP 与各个时期 大气成分的对比结果显示,大气中的二氧化碳和氧气 含量对陆相生态系统的净初级生产力具有关键性的 控制作用。此外,研究表明影响生产力水平的因素主 要为大气中 CO,浓度,而 CO,浓度又是影响气候变化 主导因素,因此认为煤可以作为研究古气候变化媒 介[106]。

6 含煤岩系沉积学研究展望

煤在今后若干年内仍将继续作为我国支柱能源, 通过含煤岩系沉积学及岩相古地理研究,寻找更多的 优质煤炭资源,满足我国经济社会发展的需要,仍然 是摆在煤田地质学面前的艰巨任务。煤炭资源开发 利用过程中所产生的环境问题,例如土壤及大气污染 等,亦需要通过沉积学的手段进行研究,提出污染防 止措施。此外,煤作为一种特殊的沉积岩,其中蕴含 的古环境演化以及地球历史演化的各种信息,特别是 "深时"古气候信息,亦应受到重视。

针对以上方面,笔者建议中国含煤岩系沉积学在 今后应更加注重以下方面的研究:

(1) 加强含煤岩系层序地层格架及聚煤模式研究

中国的含煤岩系层序地层学研究目前还主要限 于内克拉通盆地海陆过渡相地层,对陆相含煤盆地的 层序地层学研究还比较薄弱。可容空间理论如何用 于克拉通盆地、前陆盆地、裂谷盆地等不同类型含煤 盆地,建立不同构造背景的含煤盆地的层序地层模 式,仍是今后需要加强研究的问题。

(2) 加强中国聚煤规律研究

中国的地质历史上的聚煤期次较多,有工业价值



图 6 贵州普安 17 号煤层 GR 测井信号中识别出的米兰科维奇周期^[106]

Fig.6 Milankovitch cycles recognized in geophysical loggings of the No. 17 coal at the Pu'an County of Guizhou Province^[106]

的煤层从早石炭世、晚石炭世、二叠纪、晚三叠世、 早一中侏罗世、早白垩世、古近纪到新近纪都有分布, 不同聚煤期的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格架及聚煤模 式进行深入研究,为各聚煤区的找煤勘探提供理论依 据,特别是为中国东部深部煤炭资源的勘探开发提供 理论指导。

(3)加强洁净煤沉积学研究,进行优质煤炭资源 预测

中国作为世界上最大的煤炭生产和煤炭消费国 家,煤炭的开发利用过程会带来一系列社会和环境问 题,特别是燃煤造成的大气污染以及灰霾天气,已经 受到地质学家的高度重视。对我国煤中硫含量分布 的地质原因研究表明,煤的硫含量受到沉积环境及古 地理的影响显著。因此,有必要系统地从沉积学及层 序地层角度研究煤中硫及有害微量元素的聚集规律 及赋存特征,对我国煤炭资源洁净潜力进行评价。

(4)加强煤层气及煤系页岩气资源勘查沉积学 及有益矿产沉积学研究

含煤岩系非常规天然气(煤系气)是煤田地质研

究的又一热点领域,煤层气、页岩气、致密砂岩气的研 究与含煤岩系沉积学密切相关,沉积环境通过控制生 烃组分、有机质类型而控制烃源岩(煤、煤系泥岩)的 生烃潜力,同时沉积环境还通过控制储盖层分布特征 而控制煤系气的聚集成藏。因此,含煤岩系煤层气、 页岩气等勘查评价离不开含煤沉积学研究,特别是与 沉积学结合密切的含煤系统以及含煤层气系统,将会 更加收到重视。近年来在含煤岩系发现的可燃冰、砂 岩型铀矿、稀有气体氦气、煤中有益元素(或共伴生 矿产)等相关矿产资源勘查,也须与沉积学研究密切 结合。

(5)加强含煤岩系"深时"古气候及地质事件信息研究

煤作为一种重要而特殊的沉积岩,蕴含着丰富的 "深时"地质信息,记录了聚煤期的气候条件、泥炭地 类型、成煤物质、碎屑物质注入、水平面变化、营养条 件、构造特征、极端事件、天体周期旋回等信息。当前 这方面的研究热点包括煤的惰质组显微组分含量反 映古泥炭地火灾事件、生态体系以及大气氧含量的变 化,煤层在地质历史长周期变化过程中的表现特征、 古泥炭地古气候对米兰柯维奇旋回的响应及其对全 球碳循环的影响,基于含煤岩系地质信息建立高分辨 率"深时"时间尺度框架等。

参考文献(References)

- [1] 邵龙义,鲁静,汪浩,等.中国含煤岩系层序地层学研究进展
 [J]. 沉积学报,2009,27(5):904-914. [Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, et al. Developments of coal measures sequence stratigraphy in China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5):904-914.]
- [2] Weller J M. Cyclical sedimentation of the pennsylvanian period and its significance[J]. The Journal of Geology, 1930, 38(2): 97-135.
- [3] Ferm J C. Depositional models in coal exploration and development [C]//Saxena R S. Sedimentary environments and hydrocarbons. New Orleans, Louisiana: New Orleans Geological Society, 1976: 60-78.
- Horne J C, Ferm J C, Caruccio F T, et al. Depositional models in coal exploration and mine planning in Appalachian region [J].
 AAPG Bulletin, 1978, 62(12): 2379-2411.
- [5] 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.[Han Dexin, Yang Qi. China Coal Geology: Volume II
 [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1980.]
- [6] 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. [Liu Huanjie, Jia Yuru, Long Yaozhen, et al. 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, 1987, 5(3): 73-80.]
- [7] 刘焕杰. 潮坪成煤环境初论—三汇坝地区晚二迭世龙潭组含煤 建造沉积环境模式[J]. 中国矿业学院学报,1982(2):61-71.
 [Liu Huanjie. A preliminary study of coal-forming environment of tidal flats-models of sedimentary environment of upper Permian coalbearing Longtan Formation in Sanhuiba[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1982(2):61-71.]
- [8] Shao L Y, Zhang P F, Ren D Y, et al. Late Permian coal-bearing carbonate successions in southern China: coal accumulation on carbonate platforms[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 37(3/4): 235-256.
- [9] Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, et al. Sea-level changes: an integrated approach [M]. SPEM, Special Publication, 1988, 42: 1-407.
- [10] Flint S, Aitken J, 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. European coal geology. Geological Society of London, Special Publication, 1995, 82: 1-16.
- [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. [Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Han Meilian. Coal formation in transgressive events—a new pattern of coal accumulation[J]. Advances in Earth Science, 2001, 16(1): 120-124.]

- [12] 王东东,邵龙义,刘海燕,等. 超厚煤层成因机制研究进展[J]. 煤炭学报,2016,41(6):1487-1497. [Wang Dongdong, Shao Longyi, Liu Haiyan, et al. Research progress in formation mechanisms of super-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(6): 1487-1497.]
- [13] 邵龙义,高彩霞,张超,等.西南地区晚二叠世层序——古地理 及聚煤特征[J]. 沉积学报,2013,31(5):856-866. [Shao Longyi, Gao Caixia, Zhang Chao, et al. Sequence-palaeogeography and coal accumulation of late Permian in southwestern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5):856-866.]
- [14] 鲁静,邵龙义,杨敏芳,等. 陆相盆地沼泽体系煤相演化、层序 地层与古环境[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2473-2481. [Lu Jing, Shao Longyi, Yang Minfang, et al. Coal facies evolution, sequence stratigraphy and palaeoenvironment of swamp in terrestrial basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2473-2481.]
- [15] 姚素平,张科,胡文瑄,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积有 机相[J].石油与天然气地质,2009,30(1):74-84,89. [Yao Suping, Zhang Ke, Hu Wenxuan, et al. Sedimentary organic facies of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(1): 74-84, 89.]
- [16] 秦勇,熊孟辉,易同生,等.论多层叠置独立含煤层气系统:以 贵州织金—纳雍煤田水公河向斜为例[J].地质论评,2008,54 (1):65-70. [Qin Yong, Xiong Menghui, Yi Tongsheng, et al. On unattached multiple superposed coalbed—methane system: in a case of the Shuigonghe syncline, Zhijin—Nayong coalfield, Guizhou[J]. Geological Review, 2008, 54(1): 65-70.]
- [17] 李增学,吕大炜,周静,等.含煤系统理论及其模式[J].地球学报,2011,32(6):659-667. [Li Zengxue, Lü Dawei, Zhou Jing, et al. Theory and model of coal-bearing system[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2011, 32(6): 659-667.]
- [18] 唐跃刚,贺鑫,程爱国,等.中国煤中硫含量分布特征及其沉积 控制[J].煤炭学报,2015,40(9):1977-1988. [Tang Yuegang, He Xin, Cheng Aiguo, et al. Occurrence and sedimentary control of sulfur in coals of China [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(9): 1977-1988.]
- [19] Shao L Y, Zhang P F, Gayer R A, et al. Coal in a carbonate sequence stratigraphic framework: the upper Permian Heshan Formation in central Guangxi, southern China[J]. Journal of the Geological Society, 2003, 160(2): 285-298.
- [20] 孙枢,王成善."深时"(Deep Time)研究与沉积学[J]. 沉积学报,2009,27(5):792-810. [Sun Shu, Wang Chengshan. Deep Time and sedimentology[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5):792-810.]
- [21] 吴怀春,张世红,冯庆来,等. 旋回地层学理论基础、研究进展 和展望[J]. 地球科学,2011,36(3):409-428. [Wu Huaichun, Zhang Shihong, Feng Qinglai, et al. Theoretical basis, research advancement and prospects of cyclostratigraphy[J]. Earth Science, 2011, 36(3): 409-428.]
- [22] Shao L Y, Wang H, Yu X H, et al. Paleo-fires and atmospheric oxygen levels in the latest Permian: evidence from maceral compo-

sitions of coals in eastern Yunnan, southern China [J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2012, 86(4): 949-962.

- [23] Wang H, Shao L Y, Large D J, et al. Constraints on carbon accumulation rate and net primary production in the Lopingian (Late Permian) tropical peatland in SW China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2011, 300 (1/2/3/4): 152-157.
- [24] 邵龙义,张鹏飞,刘钦甫,等. 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, 1992, 38(1):52-59. [Shao Longyi, Zhang Pengfei, Liu Qinfu, et al. The lower Carboniferous Ceshui formation in Central Hunan, South China: depositional sequences and episodic coal accumulation [J]. Geological Review, 1992, 38(1):52-59.]
- [25] Yang R C, Han Z Z, Li Z X, et al. Base-level cycles and episodic coal accumulation—case study of Dongsheng Coalfield in Ordos Basin[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 16(4): 439-442.
- [26] 程保洲.山西晚古生代沉积环境与聚煤规律[M].太原:山西 科学技术出版社,1992. [Cheng Baozhou. Late Paleozoic sedimentary environments and coal accumulation in Shanxi [M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1992.]
- [27] 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]. 地学前缘,1999,6(S1);81-94. [Li Baofang, Wen Xianduan, Li Guidong. High resolution sequence stratigraphy analysis on the Permo-carboniferous in North China Platform [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(S1); 81-94.]
- [28] 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. [Shao Longyi, Chen Jialiang, Li Ruijun, et al. A sequence stratigraphic interpretation on Late Permian carbonate coal measures in the Heshan coal field, southern China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 168-174.]
- [29] 邵龙义,李英娇,靳凤仙,等. 华南地区晚三叠世含煤岩系层 序—古地理[J]. 古地理学报,2014,16(5):613-630. [Shao Longyi, Li Yingjiao, Jin Fengxian, et al. Sequence stratigraphy and lithofacies palaeogeography of the late Triassic coal measures in South China[J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(5):613-630.]
- [30] 邵龙义,董大啸,李明培,等. 华北石炭—二叠纪层序-古地理及 聚煤规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1725-1734. [Shao Longyi, Dong Daxiao, Li Mingpei, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of the Carboniferous-Permian in the North China Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1725-1734.]
- [31] 鲁静,邵龙义,孙斌,等.鄂尔多斯盆地东缘石炭—二叠纪煤系 层序—古地理与聚煤作用[J].煤炭学报,2012,37(5):747-754. [Lu Jing, Shao Longyi, Sun Bin, et al. Sequence-paleogeography and coal accumulation of Carboniferous-Permian coal measures in the eastern Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 747-754.]
- [32] 邵龙义,张超,闫志明,等.华南晚二叠世层序—古地理及聚煤

规律[J]. 古地理学报,2016,18(6):905-919. [Shao Longyi, Zhang Chao, Yan Zhiming, et al. Sequence-palaeogeography and coal accumulation of the late Permian in South China[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(6): 905-919.]

- [33] 高迪,邵龙义,李柱. 三江盆地早白垩世层序古地理与聚煤作用研究[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(5):746-752. [Gao Di, Shao Longyi, Li Zhu. Sequence-paleogeography and coal accumulation of early Cretaceous in Sanjiang Basin, northeastern China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(5): 746-752.]
- [34] Bohacs K M, Suter J. Sequence stratigraphic distribution of coaly rocks: fundamental controls and paralic examples[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(10): 1612-1639.
- [35] 鲁静,邵龙义,汪浩,等.低可容空间河流三角洲沉积层序与聚 煤模式[J].中国矿业大学学报,2012,41(2):268-275.[Lu Jing, Shao Longyi, Wang Hao, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation of fluvial delta under low accommodation conditions[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(2): 268-275.]
- [36] 鲁静,邵龙义,李文灿,等. 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,2012,37(1):78-85. [Lu Jing, Shao Longyi, Li Wencan, et al. Paleogeographic evolution and coal accumulation under sequence stratigraphic framework of a barrier coast[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 78-85.]
- [37] 鲁静,杨敏芳,邵龙义,等. 陆相盆地古气候变化与环境演化、 聚煤作用[J]. 煤炭学报,2016,41(7):1788-1797. [Lu Jing, Yang Minfang, Shao Longyi, et al. Paleoclimate change and sedimentary environment evolution, coal accumulation: a middle Jurassic terrestrial[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1788-1797.]
- [38] 吴冲龙,李绍虎,王根发,等. 先锋盆地超厚优质煤层的异地成 因模式[J]. 沉积学报,2006,24(1):1-9. [Wu Chong-long, Li Shaohu, Wang Genfa, et al. Genetic model about the extra-thick and high quality coalbed in Xianfeng Basin, Yunnan province, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 1-9.]
- [39] Shearer J C, Staub J R, Moore T A. The conundrum of coal bed thickness: a theory for stacked mire sequences[J]. Journal of Geology, 1994, 102(5): 611-617.
- [40] Jerrett R M, Davies R C, Hodgson D, et al. The significance of hiatal surfaces in coal seams [J]. Journal of the Geological Society, 2011, 168(3): 629-632.
- [41] 庄军.鄂尔多斯盆地南部巨厚煤层形成条件[J].煤田地质与 勘探,1995,23(1):9-13. [Zhuang Jun. Formation condition of thick coal seam in South Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 1995, 23(1): 9-13.]
- [42] 吴冲龙. 抚顺盆地的滑积煤及超厚煤层的成因模式[J]. 科学通报, 1994, 39 (23): 2175-2177. [Wu Chonglong. The genetic models of sliding coal and extra-thick coal seam in Fushun Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(23): 2175-2177.]
- [43] 田景春,陈洪德,覃建雄,等. 层序—岩相古地理图及其编制

[J]. 地球科学与环境学报,2004,26(1);6-12. [Tian Jingchun, Chen Dehong, Qin Jianxiong, et al. Case study of sequence-based lithofacies-paleogeography research and mapping of South China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(1): 6-12.]

- [44] 刘宝珺,曾允孚. 岩相古地理基础和工作方法[M]. 北京:地质 出版社,1985. [Liu Baojun, Zeng Yunfu. Lithofacies palaeogeography and working methods [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985.]
- [45] 冯增昭. 单因素分析多因素综合作图法——定量岩相古地理 重建[J]. 古地理学报,2004,6(1):3-19. [Feng Zengzhao. Single factor analysis and multifactor comprehensive mapping method——reconstruction of quantitative lithofacies palaeogeography [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(1): 3-19.]
- [46] 刘天绩,邵龙义,曹代勇,等. 柴达木盆地北缘侏罗系煤炭资源 形成条件及资源评价[M]. 北京:地质出版社,2013. [Liu Tianji, Shao Longyi, Cao Daiyong, et al. Formation conditions and resource evaluation of Jurassic coal resources in the northern margin of Qaidam Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.]
- [47] 王佟,邵龙义.中国西北地区侏罗纪煤炭资源形成条件及资源 评价[M].北京:地质出版社,2013. [Wang Tong, Shao Longyi. Formation conditions and resource evaluation of Jurassic coal resources in northwestern China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.]
- [48] 王东东,邵龙义,李智学,等.鄂尔多斯盆地延安组层序地层格架与煤层形成[J].吉林大学学报(地球科学版),2013,43(6): 1726-1739. [Wang Dongdong, Shao Longyi, Li Zhixue, et al. Sequence stratigraphic framework and coal formation of Yan' an Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1726-1739.]
- [49] 邵凯,邵龙义,曲延林,等.东北地区早白垩世含煤岩系层序地 层研究[J].煤炭学报,2013,38(S2):423-433. [Shao Kai, Shao Longyi, Qu Yanlin, et al. Study of sequence stratigraphy of the Early Cretaceous coal measures in northeastern China[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S2): 423-433.]
- [50] Catuneanu O, Abreu V, Bhattacharya J P, et al. Towards the standardization of sequence stratigraphy [J]. Earth-Science Reviews, 2009, 92(1/2): 1-33.
- [51] Sømme T O, Helland-Hansen W, Granjeon D. Impact of eustatic amplitude variations on shelf morphology, sediment dispersal, and sequence stratigraphic interpretation: icehouse versus greenhouse systems[J]. Geology, 2009, 37(7): 587-590.
- [52] Helland-Hansen W, Steel R J, Sømme T O. Shelf genesis revisited[J]. Journal of Sedimentary Research, 2012, 82(3): 133-148.
- [53] Walsh J P, Wiberg P L, Aalto R, et al. Source-to-sink research: economy of the Earth's surface and its strata[J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 1-6.
- [54] Helland-Hansen W, Sømme T O, Martinsen O J, et al. Deciphering Earth's natural hourglasses: perspectives on source-to-sink analysis[J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86 (9):

1008-1033.

- [55] 韩德馨,任德贻,王延斌,等.中国煤岩学[M]. 徐州:中国矿业 大学出版社,1996. [Han Dexin, Ren Deyi, Wang Yanbin, et al. Coal petrology of China[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1996.]
- [56] 涅菲捷耶娃 Л. П. 煤岩成分与煤层形成环境[M]. 王在霞,译. 北京:煤炭工业出版社,1959.[Nefejeeva L P. Coal macerals and coal depositional environments[M]. Wang Zaixia, Trans. Beijing: Coal Industry Press, 1959.]
- [57] Teichmüller M. The genesis of coal from the viewpoint of coal petrology[J]. International Journal of Coal Geology, 1989, 12(1/2/ 3/4): 1-87.
- [58] 王绍清,唐跃刚. 神东矿区煤岩学特征及煤相[J]. 中国煤田地质,2007,19(5):4-7,15. [Wan Shaoqing, Tang Yuegang. Coal petrological characteristics and coal facies in Shendong Mining Area [J]. Coal Geology of China, 2007, 19(5): 4-7, 15.]
- [59] Diessel C F K. The correlation between coal facies and depositional environments [C]//Proceedings of the 20th symposium of the advances in the study of the Sydney Basin. Australia: University of Newcastle, 1986: 19-22.
- [60] 汤达祯,杨起,周春光,等.华北晚古生代成煤沼泽微环境与煤 中硫的成因关系研究[J].中国科学(D辑):地球科学,2000, 30(6):584-591.[Tang Dazhen, Yang Qi, Zhou Chunguang, et al. Genetic relationships between swamp microenvironment and sulfur distribution of the late Paleozoic coals in North China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2000, 30(6): 584-591.]
- [61] 代世峰,任德贻,李生盛,等.内蒙古准格尔黑岱沟主采煤层的煤相演替特征[J].中国科学(D辑):地球科学,2007,37(增刊1):119-126.[Dai Shifeng, Ren Deyi, Li Shengsheng, et al. Coal facies evolution of the main minable coal-bed in the Heidaigou Mine, Jungar coalfield, Inner Mongolia, northern China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2007, 37(Suppl. 1): 119-126.]
- [62] 许福美,黄文辉,吴传始,等. 顶峰山矿区 39 号煤层的煤岩学 与煤相特征[J]. 煤炭学报,2010,35(4):623-628. [Xu Fumei, Huang Wenhui, Wu Chuanshi, et al. Coal petrology and facies of coal seam No. 9 from Dingfengshan mining district, Longyong coalfield, Fujian province, China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 623-628.]
- [63] 张冀,韦波,田继军,等. 新疆哈密三塘湖特大整装煤田中一下 保罗统煤层煤质及煤相特征[J]. 地质学报,2015,89(5):917-930. [Zhang Ji, Wei Bo, Tian Jijun, et al. Characteristics of coal quality and coal facies of middle-lower Jurassic coal seam in large ready coalfield of the Santanghu Basin, Hami, Xinjiang[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(5): 917-930.]
- [64] 聂浩刚,赵峰华,李玉宏. 浅析吐哈盆地侏罗纪煤的煤相特征
 [J]. 新疆地质,2016,34(1):144-149. [Nie Haogang, Zhao Fenghua, Li Yuhong. Analysis on coal facies characteristics of Jurassic coal in Turpan-Hami Basin, Xinjiang [J]. Xinjiang Geology, 2016, 34(1): 144-149.]
- [65] 周倩羽. 西湖凹陷古近系煤沉积环境及生烃潜力研究[D]. 北

京:中国矿业大学(北京),2016. [Zhou Qianyu. The depositional environments and hydrocarbon generation potential of the Paleogene coals in the Xihu depression [D]. Beijing, China University of Mining & Technology, Bejing, 2016.]

- [66] Petersen H I, Andsbjerg J. Organic facies development within Middle Jurassic coal seams, Danish Central Graben, and evidence for relative sea-level control on peat accumulation in a coastal plain environment[J]. Sedimentary Geology, 1996, 106(3/4): 259-277.
- [67] 秦勇,王文峰,李壮福,等.海侵作用影响下的高分辨煤相序列及其古泥炭沼泽发育模式:以山西北部安太堡上石炭统太原组11号煤层为例[J].地质学报,2008,82(2):234-246. [Qin Yong, Wang Wenfeng, Li Zhuangfu, et al. High-resolution coal facies sequence and peat paleo-bog pattern during the transgression [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(2):234-246.]
- [68] 毛婉慧,庄新国,周继兵,等. 煤相参数在煤层层序划分中的应用:以新疆准东煤田帐南西矿区为例[J]. 煤田地质与勘探, 2011,39(1):6-10. [Mao Wanhui, Zhuang Xinguo, Zhou Jibing, et al. Application of coal facies parameters in sequence stratigraphic division of coal seams: with Zhangnanxi coal district, Junggar Basin as example[J]. Coal Geology & Exploration, 2011, 39(1): 6-10.]
- [69] Scott A C, Glasspool I J. Observations and experiments on the origin and formation of inertinite group macerals [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(1/2/3): 53-66.
- [70] Wang D D, Shao L Y, Li Z X, et al. Hydrocarbon generation characteristics, reserving performance and preservation conditions of continental coal measure shale gas: a case study of Mid-Jurassic shale gas in the Yan'an Formation, Ordos Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 145: 609-628.
- [71] Rogers M A. Application of organic facies concepts to hydrocarbon source rock evaluation [C]//Proceeding of the 10th World petroleum congress. Bucharest, Romania: World Petroleum Congress, 1980.
- [72] Jones R W. Comparison of carbonate and shale source rocks [J].AAPG Bulletin, 1984, 68(4): 163-180.
- [73] Jones R W. Organic facies [M]//Brooks J, Welte D. Advances in petroleum geochemistry. London: Academic Press, 1987: 1-90.
- [74] Tyson R V. Sequence-stratigraphical Interpretation of Organic Facies Variations in Marine Siliciclastic Systems; General Principles and Application to the Onshore Kimmeridge Clay Formation, UK [C]// Hesselbo S P, Parkinson D N. Sequence Stratigraphy in British Geology, Geological Society, London, Special Publications, 1996, 103, 75-96.
- [75] 张鹏飞,金奎励,吴涛,等. 吐哈盆地含煤沉积与煤成油[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1997. [Zhang Pengfei, Jin Kuili, Wu Tao, et al. Study on sedimentology and oil source from Jurassic coal-bearing series in Tuha Basin, northwestern China[M]. Beijing; Coal Industry Press, 1997.]
- [76] 郭迪孝,胡民. 陆相盆地沉积有机相分析[M]. 北京:地质出版 社,1989. [Guo Dixiao, Hu Min. Sedimentary organic phase analysis of continental basin [M]. Beijing: Geological Publishing

House, 1989.]

- [77] 黄籍中.干酪根的稳定碳同位素分类依据[J].地质地球化学, 1988(3):66-68.[Huang Jizhong. Stable carbon isotope classification of kerogen[M]. Geology and Geochemistry, 1988(3): 66-68.]
- [78] 郝黎明,邵龙义. 基于层序地层格架的有机相研究进展[J]. 地质科技情报,2000,19(4):60-64. [Hao Liming, Shao Longyi.
 Study advance of organic facies and its distribution in sequence frame[J]. Geological Science and Technology Information, 2000, 19(4):60-64.]
- [79] 唐书恒,秦勇,姜尧发,等.中国洁净煤地质研究[M].北京:地 质出版社,2002. [Tang Shuheng, Qin Yong, Jiang Yaofa. Geological study on clean coal of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.]
- [80] 邵龙义,宋晓焱,郑继东,等.煤矿区大气颗粒物及煤炭固体废物物理化学特征及生物活性研究[M].北京:科学出版社, 2017. [Shao Longyi, Song Xiaoyan, Zheng Jidong, et al. Physicochemistry and bioreactivity of airborne particles and solid wastes in coal-mining areas[M]. Beijing: Science Press, 2017.]
- [81] 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,2008,10(6):561-570. [Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, et al. Advances in sedimentology and sequence stratigraphy of paralic coal measures [J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(6): 561-570.]
- [82] 李小彦,王杰玲,赵平.鄂尔多斯盆地优质煤的分类与评价[J]. 煤田地质与勘探,2007,35(4):1-4. [Li Xiaoyan, Wang Jieling, Zhao Ping. Classification and evaluation of the high quality coal in Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2007, 35(4): 1-4.]
- [83] Shao L Y, Jones T, Gayer R, 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, 2003, 55(1): 1-26.
- [84] 代世峰,任德贻,周义平,等. 煤型稀有金属矿床:成因类型、赋 存状态和利用评价[J]. 煤炭学报,2014,39(8):1707-1715.
 [Dai Shifeng, Ren Deyi, Zhou Yiping, et al. Coal-hosted rare metal deposits: genetic types, modes of occurrence, and utilization evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1707-1715.]
- [85] Sun Y Z, Zhao C L, Li Y H, et al. Li distribution and mode of occurrences in Li-bearing coal seam #6 from the Guanbanwusu Mine, Inner Mongolia, northern China[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2012, 30(1): 109-130.
- [86] 中国煤田地质总局.中国聚煤作用系统分析[M].徐州:中国 矿业大学出版社,2001. [China National Administration of Coal Geology. Analysis on the System of Coal Accumulation in China [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2001.]
- [87] 赵忠新,王华,甘华军,等. 含煤系统[J]. 煤田地质与勘探, 2002,30(2):12-15. [Zhao Zhongxin, Wang Hua, Gan Huajun, et al. Coal system[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(2):

12-15.]

- [88] Warwick P D. Coal systems analysis: a new approach to the understanding of coal formation, coal quality and environmental considerations, and coal as a source rock for hydrocarbons [M]// Warwick P D. Coal systems analysis, Geological Society of America Special Paper 387, Colorado: GSA Inc., 2005: 1-8.
- [89] 晋香兰,张泓.鄂尔多斯盆地侏罗系成煤系统[J].煤炭学报, 2014,39(S1):191-197. [Jin Xianglan, Zhang Hong. Jurassic coal system in the Ordos Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 191-197.]
- [90] Su X B, Lin X Y, Zhao M J, et al. The upper Paleozoic coalbed methane system in the Qinshui Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(1): 81-100.
- [91] 刘焕杰,秦勇,桑树勋. 山西南部煤层气地质[M]. 徐州:中国 矿业大学出版社,1998. [Liu Huanjie, Qin Yong, Sang Shuxun. Geology of coalbed methane in southern Shanxi, China [M]. Xuzhou; China University of Mining and Technology Press, 1998.]
- [92] Ayers W B Jr. Coalbed gas systems, resources, and production and a review of contrasting cases from the San Juan and Powder River basins[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1853-1890.
- [93] Strapoć D, Mastalerz M, Schimmelmann A, et al. Variability of geochemical properties in a microbially dominated coalbed gas system from the eastern margin of the Illinois Basin, USA[J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 76(1/2): 98-110.
- [94] 吴世祥. 试论煤层气系统[J]. 中国海上油气(地质),1998,12
 (6):390-393. [Wu Shixiang. Preliminary discussion on coalbed gas system[J]. China Offshore Oil and Gas, 1998, 12(6): 390-393.]
- [95] 倪小明,苏现波,张小东. 煤层气开发地质学[M]. 北京:化学 工业出版社,2009. [Ni Xiaoming, Su Xianbo, Zhang Xiaodong. Coalbed methane development geology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.]
- [96] 徐国盛,李仲东,罗小平,等.石油与天然气地质学[M].北京: 地质出版社,2012. [Xu Guosheng, Li Zhongdong, Luo Xiaoping, et al. Petroleum and natural gas geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.]
- [97] 朱志敏,杨春,沈冰,等. 煤层气及煤层气系统的概念和特征 [J]. 新疆石油地质,2006,27(6):763-765. [Zhu Zhimin, Yang Chun, Shen Bing, et al. The definition and characteristics of coalbed methane and coalbed methane system[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(6): 763-765.]
- [98] 朱志敏,沈冰,路爱平,等. 阜新盆地白垩系阜新组煤层气系统 [J]. 石油勘探与开发,2007,34(2):181-186. [Zhu Zhimin,

Shen Bing, Lu Aiping, et al. Cretaceous Fuxin Formation coalbed methane system in Fuxin Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 181-186.]

- [99] Shen Y L, Qin Y, Guo Y H, et al. Characteristics and sedimentary control of a coalbed methane-bearing system in Lopingian (late Permian) coal-bearing strata of western Guizhou province [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 33: 8-17.
- [100] 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,2008. [Shao Longyi, He Zhiping, Lu Jing. Study on Carboniferous-Permian sequence stratigraphy and coal accumulation in the west of Bohai Bay[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.]
- [101] Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. Global continental weathering trends across the Early Permian glacial to postglacial transition: correlating high- and low-paleolatitude sedimentary records [J]. Geology, 2014, 42(10): 835-838.
- [102] Cecil C B. Paleoclimate controls on stratigraphic repetition of chemical and siliciclastic rocks [J]. Geology, 1990, 18(6): 533-536.
- [103] Glasspool I J, Scott A C, Waltham D, et al. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 756.
- [104] Large D J, Marshall C. Use of carbon accumulation rates to estimate the duration of coal seams and the influence of atmospheric dust deposition on coal composition[J]. Geological Society, London, Special Publication, 2015, 404(1): 303-315.
- [105] Large D J. A 1.16 Ma record of carbon accumulation in western European peatland during the Oligocene from the Ballymoney Lignite, northern Ireland [J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164(6): 1233-1240.
- [106] 邵龙义,汪浩,Large D J. 中国西南地区晚二叠世泥炭地净初级生产力及其控制因素[J]. 古地理学报,2011,13(5):473-480. [Shao Longyi, Wang Hao, Large D J. Net primary productivity and its control of the late Permian peatlands in southwestern China [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(5): 473-480.]
- [107] 闫志明,邵龙义,王帅,等. 早白垩世泥炭地净初级生产力及 其控制因素:来自二连盆地吉尔嘎郎图凹陷 6 号煤的证据
 [J]. 沉积学报,2016,34(6):1068-1076. [Yan Zhiming, Shao Longyi, Wang Shuai, et al. Net primary productivity and its control factors of early Cretaceous peatlands: Evidence from No. 6 Coal in the Jiegalangtu sag of the Erlian Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(6): 1068-1076.]

A Reappraisal on Development and Prospect of Coal Sedimentology in China

SHAO LongYi¹, WANG XueTian¹, LU Jing¹, WANG DongDong², HOU HaiHai¹

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China
 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China

Abstract: Over last three decades, since the theory of sequence stratigraphy was introduced into China, Chinese scholars have made a great progress in coal sedimentology. A number of coal accumulation models has been proposed based on the study of sequence stratigraphy of coal-bearing series, including the episodic coal accumulation, the coal accumulation in transgressive progress, the coal accumulation in transgressive event, and the multi-phase mire stacking model for accumulation of super-thick coals. The synchronous sequence stratigraphic units were combined with the lithofacies paleogeography, which have promoted the reconstruction of paleogeography of different coal-accumulating periods. The coal-rich zones of different coal-accumulating periods were predicted based on analysis of migration of coal-accumulating centers in sequence stratigraphic framework. The study of coal facies and sedimentary organic facies as an important tool in source rock assessment has been focused in the exploration of the coalbed methane and shale gas resources. The concept "coal system" has been proposed to integrate various kinds of information of coal basins, including the original characteristics of peat, the stratigraphic framework of coal-bearing series, abundances of coal seams, and sulfur contents in coal in terms of depositional environments and paleoclimates, and metamorphic degree or ranks of coals. In recent years, coal, as an important archive of geo-information, has been used in the study of the "deep-time" paleoclimates. Inertinite macerals of coal have been used to infer the fire events of the paleo-mires in relation to the paleo-atmospheric oxygen levels. Milankovitch cycles identified in coal seams have been used to time the coal deposition and to estimate the carbon accumulation rates of paleo-mires as well as the global CO₂ trends. Future studies of coal sedimentology will be focused on the sequence stratigraphic pattern of different tectonic coal basins, and the prediction model of high-quality coal resources and unconventional gases (coalbed methane and shale gas) in the sequence stratigraphic framework. The further efforts will also be put on the significance of coals in the study of long-term and short-term paleoclimate variation of the earth.

Key words: coal-bearing series; coal resources; sedimentology; multi-phase mire stacking model for accumulation of super-thick coal; "deep-time" paleoclimates; development strategy