

doi:10.3799/dqkx.2016.042

陆相断陷盆地煤与油页岩共生组合及其层序地层特征

王东东^{1,2}, 李增学^{1,2}, 吕大炜^{1,2*}, 刘海燕^{1,2}, 王平丽^{1,2}, 冯婷婷²

1. 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东青岛 266590

2. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

摘要: 为了研究陆相断陷盆地煤层与油页岩共生发育的地质现象, 采用沉积学、构造地质学、能源地质学和层序地层学的相关理论和方法对煤与油页岩共生发育特征进行了研究。研究发现: 陆相断陷盆地煤层与油页岩主要存在5种共生组合类型; 煤和油页岩的发育均需要稳定的构造和较少的陆源碎屑物质供应, 共生发育的煤和油页岩中均含有高等植物和藻类; 盆地基底的幕式构造活动对煤和油页岩发育的沉积环境及其转化起到主要控制作用, 气候条件、陆源碎屑物质注入、有机质供应等起到次要控制作用; 在层序地层格架下, 各种煤与油页岩共生组合均可发育在湖扩张体系域, 从体系域早期到晚期、从滨湖到湖中心, 共生组合中煤层厚度逐渐减小, 油页岩厚度逐渐增大; 而早期高水位体系域, 则主要发育厚度大、分布稳定的油页岩—煤层组合。可见, 盆地基底幕式构造活动、沉积环境演化、气候条件、陆源碎屑物质注入、有机质供应等因素共同控制了陆相断陷盆地煤与油页岩的共生发育, 且共生组合主要发育在湖扩张体系域和早期高水位体系域。

关键词: 共生组合; 幕式构造; 沉积环境转换; 层序地层格架; 陆相断陷盆地; 沉积学。

中图分类号: P539.2

文章编号: 1000-2383(2016)03-0508-15

收稿日期: 2015-10-13

Coal and Oil Shale Paragenetic Assemblage and Sequence Stratigraphic Features in Continental Faulted Basin

Wang Dongdong^{1,2}, Li Zengxue^{1,2}, Lü Dawei^{1,2*}, Liu Haiyan^{1,2}, Wang Pingli^{1,2}, Feng Tingting²

1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Shandong 266590

2. College of Earth Science & Engineering Shandong University of Science and Technology, Shandong 266590

Abstract: In order to research the geological phenomenon of coal and oil shale paragenetic development in continental fault basin, sedimentology, tectonics, energy geology, sequence stratigraphy related theories and methods are used for studying coal and oil shale paragenetic development characteristics. The study found that five types of coal and oil shale association exist in continental fault basin; The development of coal seam and oil shale similarly need stable tectonic and fewer terrigenous detrital material supply, and organic matter composition both contain higher plants debris and algae in paragenetic coal seam and oil shale; The basin basement episodic tectonic activity mainly controls the sedimentary environment development and evolution of coal seam and oil shale; The climate conditions, terrigenous detrital material supply and organic matter supply are secondary control effect; In sequence stratigraphic framework, all kinds of coal and oil shale symbiosis combination could developed in lake expand system tracts, from early to late, from the lakeside to center, the thickness of coal seam gradually reduce, and the thickness of the oil shale gradually increase; In early high water system tracts, the large thickness and stable distribution of oil shale and coal paragenetic assemblage was mainly developed. Visible, the factors of basin basement episodic tectonic activity, sedimentary environment evolution, climate condition, terrigenous detrital material supply, organic matter supply factors collectively control the coal and oil shale paragenetic development characteristics in continental fault basin, and those paragenetic assemblage mainly appear in lake expand system tracts and early high water system tracts.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41272172); 高等学校博士学科点专项科研基金(No. 20123718110004); 山东科技大学人才引进科研启动基金项目(No. 2013RCJJ008); 国家自然科学基金项目(No. 41402086)。

作者简介: 王东东(1983—), 男, 博士, 主要从事煤地质学、层序地层学方面的教学和研究。E-mail: wdd02_1@163.com

* **通讯作者:** 吕大炜, E-mail: lvdawei95@163.com

引用格式: 王东东, 李增学, 吕大炜, 等, 2016. 陆相断陷盆地煤与油页岩共生组合及其层序地层特征. 地球科学, 41(3): 508-522.

Key words: paragenetic association; episodic tectonic; sedimentary environment transformation; sequence stratigraphic framework; continental faulted basin; sedimentology.

随着社会对能源需求的不断增加,多能源综合勘探越来越受到人们的重视.研究发现,在能源盆地中往往不止发育一种能源,而是多种能源共生.煤盆地中,油页岩与煤层共生是常见的现象(如黄县盆地、依兰盆地、抚顺盆地等),且与煤层共伴生的油页岩往往品质较好(如黄县盆地).煤炭是我国的主体能源之一,而煤地质学的研究也较为深入;油页岩作为油气重要的补充资源,其研究程度也相对较高(Eugster and Surdam, 1957; Bradley and Eugster, 1969; Desborough, 1978; 刘招君和柳蓉, 2005; 柳蓉, 2007; 孟庆涛, 2010; 刘招君等, 2012; Sun *et al.*, 2013; 贾建亮等, 2014).然而,煤与油页岩形成的地质条件差别较大,二者共生共存势必要有独特的地质环境,但这方面的研究却较为薄弱.煤与油页岩的共生机制及其赋存规律的研究,是对能源地质学理论的一个有益补充,并且能够对多能源综合勘探提供理论指导,具有重要的理论和实际意义.本文以典型的煤与油页岩共生煤盆地为例,着重从层序地层学的角度,研究层序地层格架下煤与油页岩共生发育的特征及其赋存规律,阐明其成因机理,并为多能源综合预测与勘探提供理论指导.

关于油页岩的定义,在不同时期、不同行业领域差别比较大.刘招君等(2007)提出“油页岩(又称油母页岩)是一种高灰分的固态可燃有机沉积岩,低温干馏可获得页岩油,含油率大于 3.5%,有机质含量较高,主要为腐泥型和混合型(腐殖型—腐泥型和腐

殖型—腐殖型),其发热量一般不小于 4.18 MJ/kg”.笔者赞同上述定义,由于本文主要从沉积学的角度研究油页岩的成因特征,故本文中提到的油页岩还需要再附加一定的条件,即必须具有页理.

1 典型的煤与油页岩共生组合

国内外煤与油页岩共生盆地较多,研究发现煤与油页岩的共生组合主要出现在陆相断陷盆地中,拗陷盆地中很少有这种共生组合的发育,且陆相断陷盆地中煤与油页岩共生组合主要存在 5 种类型(图 1)(地层自上而下):(1)煤层/油页岩组合(C-OS),如黄县盆地古近系、内蒙古金宝屯矿区下白垩同协尔苏组;(2)油页岩/煤层组合(OS-C),如抚顺盆地始新统计军屯组、依兰盆地古近系达连河组;(3)油页岩/煤层/油页岩组合(OS-C-OS),如依兰盆地古近系达连河组、儋州盆地新近系长坡组;(4)煤层/油页岩/煤层组合(C-OS-C),如依兰盆地古近系达连河组、儋州盆地新近系长坡组等;(5)油页岩/其它沉积/煤层组合(OS-M/S-C),如依兰盆地古近系达连河组.煤、油页岩均有各自发育的地质条件,且两者发育的地质条件差异较大;这些不同类型共生类型的煤与油页岩共生组合存在和发育,反映了特殊的地质条件类型及其演化的多变性和规律性.因此,研究煤与油页岩共生及其不同组合类型的发育机理,需要从多地区、多角度深入研究.

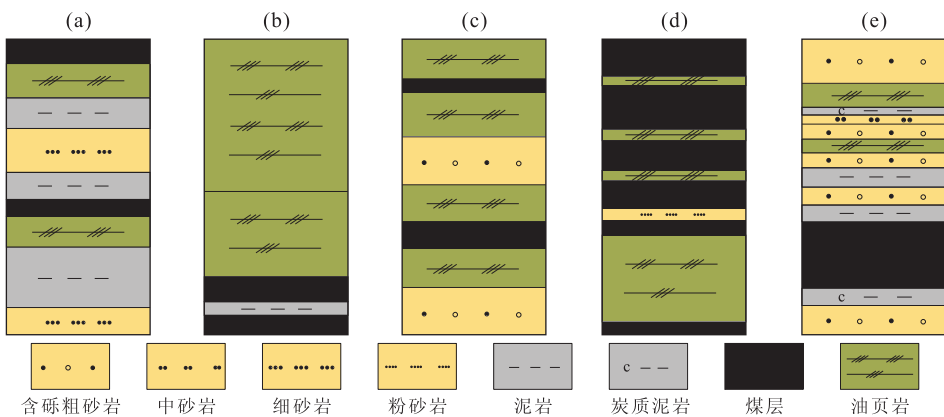


图 1 5 种典型的煤与油页岩共生组合类型

Fig. 1 Types of coexistence of coal and oil shale

a. 煤层/油页岩共生组合(C-OS); b. 油页岩/煤层共生组合(OS-C); c. 油页岩/煤层/油页岩共生组合(OS-C-OS); d. 煤层/油页岩/煤层共生组合(C-OS-C); e. 页岩/其它沉积/煤层共生组合(OS-M/S-C)

2 煤与油页岩共生组合的沉积特征

2.1 煤、油页岩发育条件比较分析

根据煤地质学的基本理论,煤是由泥炭演化而来,而泥炭则是来源于泥炭沼泽中植物的残骸,这些植物主要为木本或草本高等植物,也有一部分低等植物,如藻类等(E. 斯塔赫,1990).泥炭沼泽的发育,一般要求温暖湿润的气候条件和较为稳定的构造条件.泥炭沼泽是处于水域和陆地之间的一种过渡形态,水体较浅,常年覆水,生长着大量的喜湿性植物,且沼泽中有泥炭生成.陆源碎屑物质的注入,会破坏泥炭沼泽的沉积平衡;当泥炭沼泽的陆源碎屑物质供应被某种机理切断,更有利于泥炭沼泽的成煤作用持续发生.

油页岩主要由粘土纹层和有机质纹层组成,有机质来源包括湖泊自身生产力(低等浮游生物,主要为藻类)和陆源碎屑植物供应(张大江等,1985;刘洋,2008;罗霞等,2011;王平等,2013),这与煤的物质来源有重叠的部分,不同有机质的含量差别较大.湖泊自生浮游生物(藻类)的生长随着季节性的变化(如温度,水体的季节性循环与混合等)而波动,甚至在某一季节勃发,这在海洋和现代湖泊都非常常见(Kelts,1988;吴国璋等,1998;刘传联等,2001;朱光有等,2005).如,风暴携带的富含铁离子等养分的矿物质进入湖泊,可以导致浮游生物的勃发(Riboulleau *et al.*,2003).浮游生物(藻类)勃发有以下特点(刘洋,2008):(1)藻类勃发可以产生极高的生产力;(2)藻类勃发是单(属)种生长(Sancetta,1996);(3)藻类勃发具有季节性(Hecky and Fee,1981),在同一水体中,不同的藻类(甚至不同属种)可以相继勃发(Hay *et al.*,1990);(4)藻类勃发造成的直接后果是以纹层的形式沉积下来(Kemp,1996),不但不同的藻类纹层可以组成韵律,而且藻类纹层可以与陆源碎屑或碳酸盐矿物纹层组成韵律;(5)在湖泊中,藻类勃发还可诱发表层水体碳酸盐沉积(Kelts,1988).

油页岩发育的水体深度变化较大,可深可浅,最关键的是水体能够发生分层.研究者围绕着绿河组的 Wilkins Peak 段油页岩开展了大量的研究,先后建立分层湖模式(Bradley and Eugster,1969)、干盐湖模式(Eugster and Surdam,1973)、干盐湖复合体模式(Surdam and Stanley,1980)、生物化学分层湖模式(Desborough,1978)和外因分层湖模式(Boyer,1982)等.这些模式都突出了水体分层的重要

性,认为水体分层作用是生油岩有机质堆积的必要因素.湖水分层的原因是由于湖水内部密度的变化,这种密度变化可以是由温度引起的热分层,也可以是由盐度引起的化学分层.温度引起的热分层性质随湖泊位置不同而变化,水体较深时,利于长期出现温度分层;盐度分层一般是比较稳定的,如果有海水等高密度水体注入,也可以导致湖水形成较稳定的盐度分层(Riboulleau *et al.*,2003;王冠民,2005),如黄县盆地李家崖组油页岩沉积期有海水的注入形成盐度分层(许圣传等,2006),东营凹陷沙河街组干旱气候下的盐度分层和潮湿气候条件下的温度分层(邓宏文和钱凯,1993).不管是盐度分层还是温度分层,都需要有一定的水体深度(刘东生等,1998).但是,一定的水体深度是水体发生分层的必要条件而非充分条件,即水体分层需要有一定的水深,但是有了一定的水深,却不一定能发生水体分层.如瑞士 Lugano 湖在水深 270 m 的湖底仍是周期性富氧的,而雷州半岛的玛珥湖在水深 8~13 m 处就出现了温跃层(储国强等,2000).湖水的分层主要受气候条件、水体深度、湖流(入注水流)和盐度的影响.气候的干冷、温湿影响了湖水表层水温、水体深浅和分层性质的好坏;陆源碎屑注入、湖流都影响着湖水分层的稳定性,入注的陆源碎屑、水体可以使水体分层减弱甚至消失.油页岩的发育可以出现在干旱的气候条件下,如美国典型的绿河组油页岩;也可以出现在温暖湿润的气候条件下,如我国广东茂名盆地、山东黄县盆地(王炳山等,2001)、桐柏吴城盆地(周珍琦等,2006)、广西钦县盆地(严焕榕等,2002)、辽宁抚顺盆地(刘洋,2008)、黑龙江依兰盆地等(柳蓉等,2012);可知与煤共生的油页岩,如茂名盆地、广西钦县盆地、黄县盆地、抚顺盆地依兰盆地等均发育在温暖潮湿的气候条件下.此外,油页岩的发育也需要较为稳定的构造环境(王冠民,2005;刘洋,2008).

综上所述,湖水分层和浮游生物(藻类)的周期性勃发,是形成油页岩的最关键控制因素.但这些因素是油页岩发育的必要条件而非充分条件,油页岩的发育还要受到气候冷暖干湿、碳酸盐含量高低、有机质丰度、有机质保存等因素影响.

煤与油页岩的发育一般需要相对稳定的构造、温暖湿润的气候、较丰富的有机质供应、一定的水深和较少的陆源碎屑物质供应,且二者的物质来源均含有高等植物和低等植物(藻类).不同的是,煤的发育一般为浅覆水的沼泽环境,而油页岩发育的环境水深变化幅度较大,最主要的是湖水能够出现稳定

的分层现象;其次,成煤质料以高等植物为主,油页岩的物质来源主要为低等植物,如藻类。

研究发现,在煤与油页岩共生组合中,靠近煤层的油页岩中高等植物组分含量较高。同样,靠近油页岩的煤层中,低等植物(藻类)的含量也较高,表现为富氢化(王真奉等,2007),反映了煤与油页岩之间的转换的过渡状态。

上述分析可知,煤和油页岩的发育条件虽然有较大差距,但也有很多相同点或重叠的部分,在一定条件下,二者的发育条件可以发生转换,进而发育煤与油页岩共生组合(柳蓉等,2012;李莹,2013;王东东等,2013);不同类型的煤与油页岩共生组合的出现,反映了二者沉积环境转化的多样性。

2.2 煤与油页岩共生组合发育的沉积特征

研究发现,古湖泊盆地发展过程中受构造沉降、沉积物供应量、气候条件等因素控制,这些因素明显地影响了湖水面升降。沉积盆地往往经历了枯水期—丰水期—枯水期的周期性变化。在枯水期湖棚区以冲积沉积体系为主,在丰水期则可以形成滨浅湖或半深/深湖沉积体系;再次转向枯水期时,则再次发育冲积沉积和滨浅湖沉积体系(王东坡和刘立,1994)。在陆相断陷盆地中,控制沉积物充填的最主要因素是构造(冯有良等,2000;于兴河等,2007),盆地沉积建造的形成和演化主要受控于构造事件或幕式构造旋回(王孔伟等,2007),断裂活动通过控制基底升降运动直接制约着盆地沉积物堆积(邓宏文等,2008)。湖相沉积旋回(韵律)则是盆地构造旋回(或波动)的间接响应(陶明华等,2007)。不同层次的构造活动控制了盆地内部多层次的沉积充填特征(焦养泉等,1996),短周期幕式构造沉降对陆相断陷盆地高频沉积旋回起到明显的控制作用(任拥军等,2005)。构造沉降速度较快时,沉积物(含泥炭)供给速率远小于可容空间增加速率,利于发育油页岩;构造沉降缓慢时,可容空间增加速率与泥炭堆积速率大致均衡,利于发育煤层。研究发现,断裂构造明显控制了油页岩和煤的发育、厚度、展布等特征,如广东茂名盆地油页岩地层走向与构造线一致,油页岩和煤层和厚度互为消长,且与次级凹陷发育规律一致(李殿超等,2006);抚顺盆地的同沉积基底断裂控制了油页岩的厚度和分布,复杂的构造控制了煤和油页岩的分段厚度(刘洋,2008)。以上可知,陆相断陷盆地的幕式构造活动在很大程度上控制了沉积物的类型及其充填与演化,进而在特定的构造条件下可以发育煤与油页岩旋回性的沉积序列。

从盆地演化、构造活动、沉积作用的角度,可以分析出不同类型煤与油页岩共生组合的沉积过程及其发育与演化规律:

(1)油页岩/煤层共生组合(OS-C)。即油页岩作为煤层的直接顶板,这种组合一般发育在盆地演化早期。煤层发育时期,盆地构造较稳定,水体较浅,发育泥炭沼泽;由于盆地演化早期构造较活跃,构造突发性沉降会导致水体迅速加深,泥炭沼泽被淹没在较深的水下;且水体的加深阻断了陆源碎屑物质注入,在温度、盐度等条件下发生密度分层,藻类的季节性勃发提供丰富的有机质,进而发育油页岩。如抚顺盆地古近系,古城子组煤与油页岩共生组合(许圣传等,2012)(图2)。

(2)煤层/油页岩/煤层共生组合(C-OS-C)与油页岩/煤层/油页岩共生组合(OS-C-OS)。这两种组合常伴生出现,组成煤与油页岩交互沉积,一般发育在盆地演化早—中期。该时期盆地沉降较快,构造较活跃,周期性的发生幅度不大的构造升降,且每期升降的时间间隔不长,导致了湖水深浅快速变化,这就造成了多期不同类型共生组合的出现。如果盆地处于构造稳定期且地势较低平,利于发育泥炭沼泽而形成煤层;构造快速小幅度沉降导致盆地水体突然变深,即发生湖泛作用,泥炭沼泽迅速被湖水淹没,成煤作用终止;之后,进入构造稳定期,水体较稳定,小幅度的构造沉降造成的水深较为适中,利于发生稳定分层;由于水体较浅,光合作用较强,藻类季节性勃发,为油页岩发育提供丰富的物质基础。之后,构造发生一定幅度的抬升,盆地水体快速变浅,再次转入泥炭沼泽环境,发育煤层。这样便造成了煤层/油页岩/煤层共生组合(C-OS-C)。同样的过程,如果盆地沉降较快,水体相对较深,则发育油页岩沉积;之后构造抬升,水体变浅,进入泥炭沼泽环境,发育煤层;之后构造再次沉降,水体再次变深,再次发育油页岩;这样便形成了油页岩/煤层/油页岩共生组合(OS-C-OS)。这两种类型的组合可以多次重复出现,甚至可以出现煤层与油页岩互层的现象,这两种共生组合中,一般煤层和油页岩的厚度都不太大,有的甚至是很薄的层,或者厚度稍大的油页岩夹薄煤层,或厚度稍大的煤层夹油页岩,但也不排除有些地区某种岩层的厚度较大,这主要与该岩层发育的持续时间有关。这两种共生组合在黑龙江依兰盆地达连河组、海南儋州盆地长坡组、山东黄县盆地李家崖组等地区均可以见到这种组合形式(图2)。

(3)煤层/油页岩共生组合(C-OS)。即油页岩作

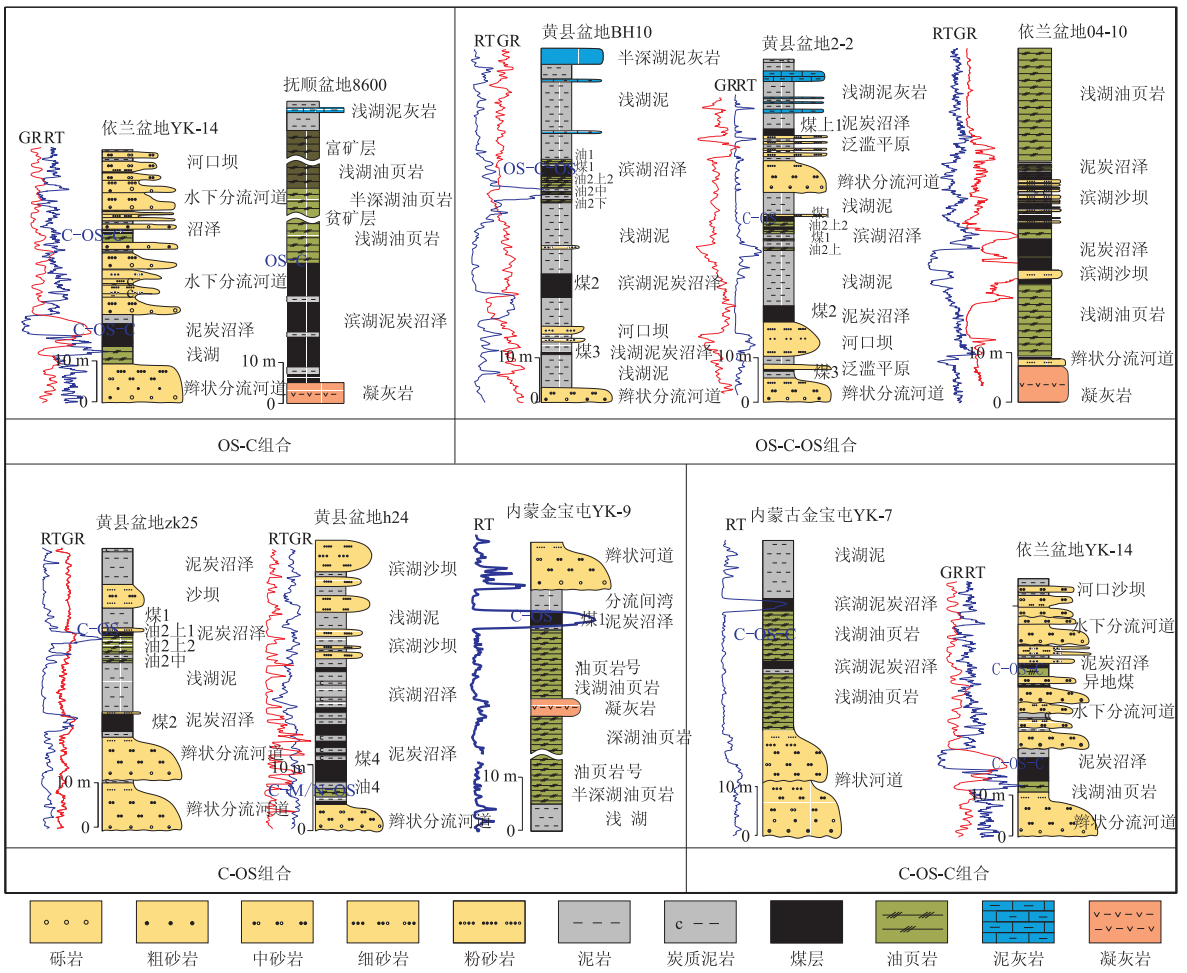


图 2 典型的煤与油页岩共生沉积序列

Fig. 2 Typical co-deposition sequence of coal and oil shale

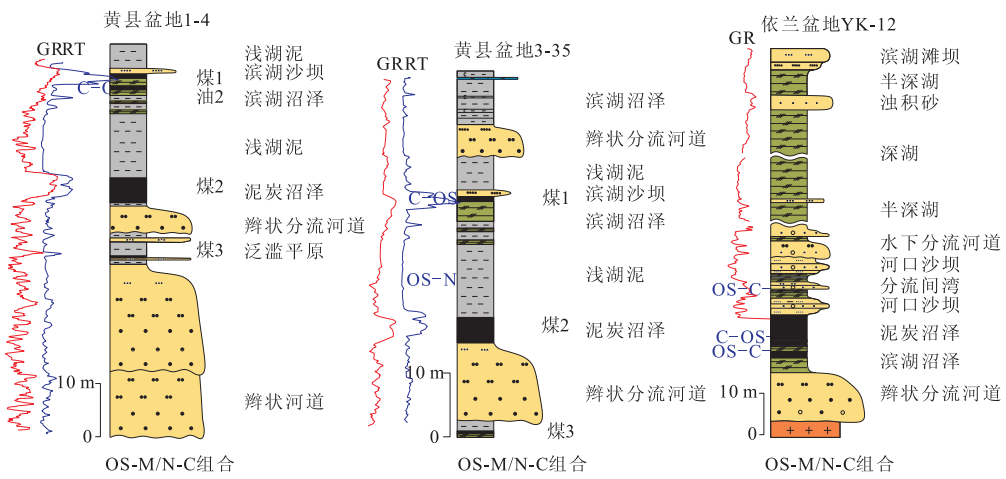


图 3 典型的煤与油页岩共生沉积序列

Fig. 3 Typical co-deposition sequence of coal and oil shale

图例同图 2

为煤层的直接底板, 这种组合一般发育在盆地的演化晚期. 该组合一般是厚煤层沉积在厚层油页岩之上. 油页岩沉积时期, 湖水较深且较稳定, 湖水分层

稳定, 藻类季候性勃发, 有机质供应充分, 发育了厚度较大、品质较好的油页岩; 随着盆地逐渐进入演化晚期, 沉积物不断充填, 构造逐渐抬升, 湖泊逐渐萎

缩,原来的半深湖、浅湖环境转为湖沼泥炭沼泽,进而发育煤层;盆地发育晚期构造较稳定,导致了煤层的厚度一般较大.如内蒙古金宝屯矿区协尔苏组煤与油页岩组合(图2),在厚层油页岩之上沉积了厚度较大、稳定性好的煤层.

(4)油页岩/其它沉积/煤层共生组合(OS-M/S-C).该组合实际上是煤层与油页岩之间有其他地层沉积,但是油页岩仍发育在煤系地层中,说明二者有一定的共生关系,但是关系又不是很大.煤层和油页岩间的其它沉积完全可以为沉积环境的过渡提供足够的时间和空间,所以这种共生组合的出现实际上是很容易理解的.这种共生组合类型在山东黄县盆地李家崖组、黑龙江依兰盆地达连河组、陕西彬县地区瓦窑堡组、甘肃民、盆地窑街组等都有发育(图3).

3 煤与油页岩共生层系的层序地层学特征

3.1 煤与油页岩共生层系的关键层序地层界面

发育煤与油页岩共生组合陆相断陷盆地中的层序界面,与其层序界面以其它陆相断陷盆地并无区别,主要存在的层序界面类型有:(1)构造运动界面一区域性不整合面;(2)古风化暴露面,包括古土壤和植物根土层;(3)河流回春作用与河床滞留沉积底界面;(4)沉积特征的转换面;(5)生物数量和种群的突变;(6)地球化学标志,如微量元素含量突变等(吴冲龙等,1998).

然而,在有油页岩发育的陆相断陷盆地的凝缩段研究,一直是一个热点.在陆相湖泊层序地层分析中,油页岩往往被视为层序的凝缩段,代表了水体最深、最细粒的饥饿沉积(魏魁生和徐怀大,1994;王东坡和刘立,1994).如依兰盆地达连河组厚层油页岩段底部与煤层过渡的位置,代表了最大湖泛期的凝缩段沉积(刘志逊,2007;柳蓉,2007).凝缩段的粘土矿物和有机质的含量相对增加,导致对微量元素的吸附作用增大,且沉积物中微量元素普遍明显富集,Sr、Ba、Cu、Zn、Ga、Ni、Co等富集,而Mn贫乏(于炳松,1995),如抚顺盆地油页岩富矿段下部(柳蓉,2007);此外,凝缩段 $\delta^{13}\text{C}$ 表现为低峰值,可能与密集段中富 ^{12}C 、高有机碳含量有关,反映了海平面的上升(于炳松,1995),如依兰盆地达连河组含凝缩段 $\delta^{13}\text{C}$ 则表现为低峰值(柳蓉,2007).

但是,油页岩层并不都是凝缩段,特别是在油页

岩层数较多的地层中:如果在一个层序内,油页岩层为容纳空间由增加到减少的转折点(退积与加积或进积的转折点),那么该油页岩层的底界就可代表最大洪泛面;如果在一个层序内,油页岩层之上尚有厚层的其他密集段(如黑色泥页岩等)存在,那么该油页岩层就只能代表一次较大的洪泛面,而不代表最大洪泛面(带),因此不能作为区分体系域的标志(刘立和王东坡,1996).

3.2 煤与油页岩共生层系的层序地层格架划分

结合陆相断陷盆地沉积充填特征,笔者倾向于陆相断陷湖盆层序的四分法划分方案,结合以往的层序四分方案(张世奇和纪友亮,1996;董清水等,2003;Catuneanu *et al.*, 2009;刘招君等,2002,2013),本研究将煤与油页岩共生发育的陆相断陷湖盆层序划分为低水位体系域(LST)、湖扩张体系域(EST)、早期高水位体系域(EHST)和晚期高水位体系域(LHST).水进和水退两个过程及低水位和高水位两个状态所构成的湖平面(基准面)变化阶段决定了层序内沉积体系的构成和时空配置(图4).在相应的层序地层单元中形成了一个进积、一个退积和两个加积型的准层序组,且不同的准层序组中,其沉积体系呈有规律的空间组合与发育.

Bohacs *et al.* (2000)通过对古湖泊的研究发现:(1)有机质富集在湖泛面之上,尤其在最大湖泛面附近;(2)湖扩张体系域早期阶段虽然通常被改造,但是含有异常丰富的化石;湖扩张体系域晚期或早期高水位体系域,发育凝缩层,几乎不含粗的陆源碎屑,有机质丰富,并且连续性好.因此,表明了油页岩容易富集在湖扩张体系域和早期高水位体系域中,而煤层也最容易出现在湖扩张体系域和早期高水位体系域中(李增学等,1996;邵龙义等,2009).

通过对众多煤与油页岩共生盆地进行层序地层分析发现,湖扩张体系域最有利于煤与油页岩共生组合的发育,5种共生组合均可以出现,煤层与油页岩厚度相对较小但层数较多,分布范围较广泛如依兰盆地始新世达连河组煤与油页岩组合(图4);早期高水位体系域也能发育一定程度的煤与油页岩共生组合,一般油页岩厚度较大,分布范围最广,如内蒙古金宝屯矿区下白垩统协尔苏组煤与油页岩组合;低水位体系域可以发育小范围的煤与油页岩共生组合,共生组合种类较少,煤层和油页岩厚度都较小,分布范围也较小,如抚顺盆地始新世古城子组、计军屯组煤与油页岩组合(柳蓉,2007).

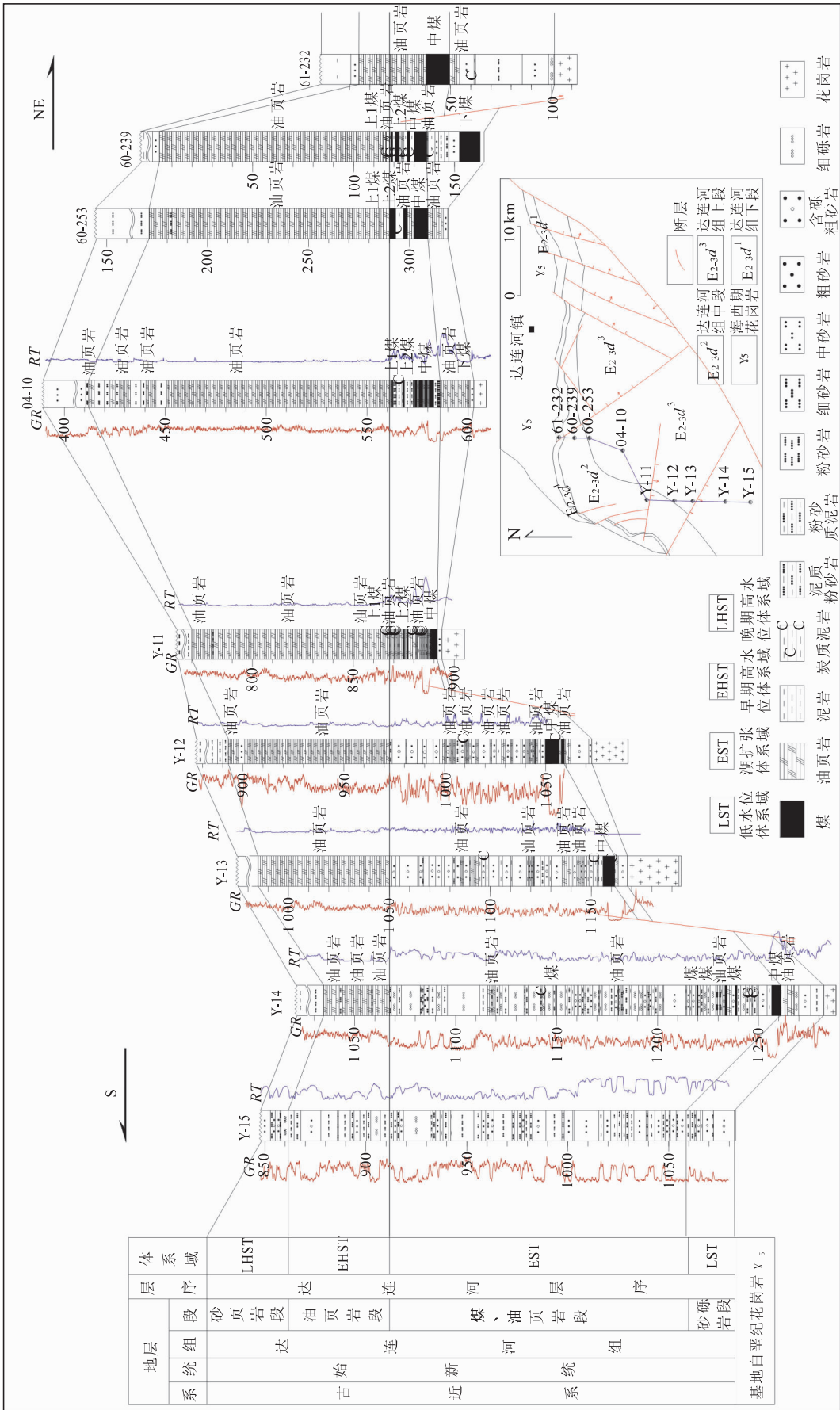


图 4 依兰盆地古近系层序地层划分与对比剖面(砂页岩段有所简化, 纵轴为深度单位:m)
 Fig. 4 Paleogene system sequence stratigraphic division and correlation section in Yilan basin

4 煤与油页岩共生特征及其沉积模式

4.1 不同体系域内煤与油页岩共生发育特征

通过对含煤盆地煤与油页岩共生盆地进行层序地层分析发现,湖扩张体系域最有利于煤与油页岩共生组合的发育,早期高水位体系域发育厚度大、范围广的油页岩,低水位体系域则发育厚度中等一薄、分布局限的油页岩,煤层发育较差;晚期高水位体系域几乎不发育煤与油页岩及其共生组合。

(1)低水位体系域(LST). 该时期一般只发育厚度相对较大但分布范围较局限的油页岩,很少发育煤与油页岩共生组合(图 4、7);但在局部地区,低水位期构造沉降相对较快,也可以发育规模不大的煤与油页岩共生组合,如依兰盆地 4-10 孔低水位体系域发育了煤层/油页岩/煤层组合,下部煤层厚度非常小(0.49 m),油页岩厚度较大(14.36 m),上部煤层厚度稍大(1.18 m)(图 4). 该时期水位较低,水平面较为稳定,可容空间产生速率缓慢,不利于煤的发育;在水体相对较深的部位,利于出现水体分层,在湖泊自身生产力和陆源碎屑植物供应下,可以发育一定厚度的油页岩;随着 A/S 比值逐渐减小,可容空间逐渐减小,水体逐渐变浅,油页岩发育逐渐结束,形成单独的油页岩层。

(2)湖扩张体系域(EST). 该时期可以发育各种煤与油页岩共生组合(图 4、6、7). 该时期幕式活动的构造运动使得湖泛作用周期性发生. 构造运动引发湖泛而使得湖平面快速上升,水体快速变深,可容空间迅速增大,陆源碎屑注入被限制在湖滨地区,碎屑物质供应不足, A/S 比值迅速增大;一定的水深利于发生稳定的水体分层,加之藻类的季候性勃发,可为油页岩发育提供条件. 湖泛结束后,水体逐渐变浅,湖泊的外围地区演化为滨湖泥炭沼泽,高等植物繁盛, A/S 比值快速减小,在油页岩上部堆积了泥炭层并最终演化成煤层,即形成煤层/油页岩组合(C-OS). 如果泥炭沼泽持续发育到下一期湖泛作用发生,则在泥炭层上沉积油页岩,最终演变为油页岩/煤层/油页岩组合(OS-C-OS). 在滨湖泥炭沼泽发育过程中,构造运动引发湖泛,使得湖平面快速上升,可容空间迅速增大,泥炭堆积快速的过渡为油页岩沉积,则发育油页岩/煤层组合(OS-C);湖泛作用结束,水体逐渐变浅,滨湖泥炭沼泽再次发育,在油页岩上部再次堆积泥炭,最终演变为煤层/油页岩/煤层组合(C-OS-C). 当煤的发育和油页岩的发育是两个相对独立的过程时,两者之间发育其他岩性沉

积物的现象也是较常见的,即油页岩/其他沉积/煤层组合(OS-N/S-C).

该时期频繁的幕式构造活动,导致了可容空间的频繁变化,沉积物供应也随之变化很大,使得 A/S 比值变化也非常迅速,使得沉积环境可以在短期内发生转换,利于煤与油页岩的交互式发育,常表现为岩层层数较多、单层厚度较小的特征。

该时期,在湖泊外围湖泛作用难以淹没的地区,一般不能形成油页岩;在湖泊中部,在湖泛结束后水体仍然较深的部位,一般不能发育泥炭沼泽,即不能形成煤层;这些部位难以发育煤与油页岩共生组合。

(3)早期高水位体系域(EHST). 该时期利于厚层煤层/油页岩组合发育,分布范围最广(图 7). 该时期盆地湖平面和湖岸线相对较稳定,陆源碎屑物质供应也较稳定, A/S 比值变化不大. 该时期湖泊

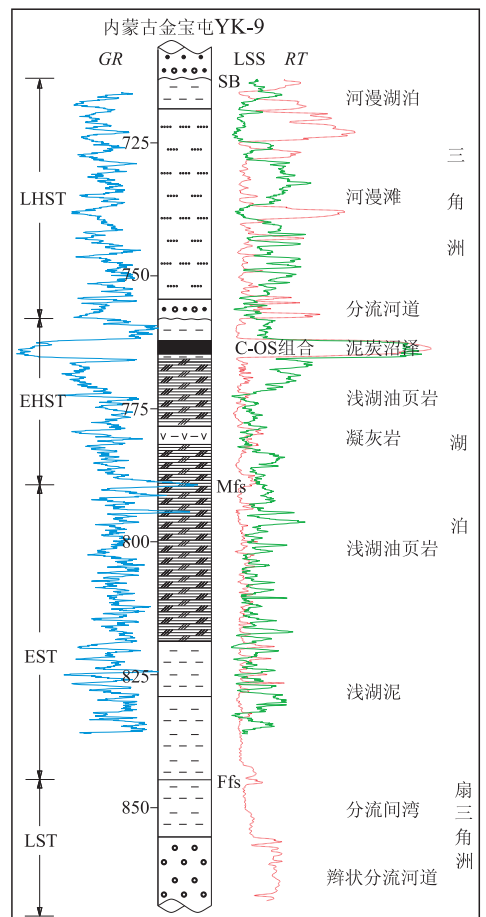


图 5 内蒙古金宝屯矿区下白垩统协尔苏组煤与油页岩共生发育特征(纵轴深度单位:m)

Fig. 5 Lower cretaceous Xie'ersu Formation coal and oil shale symbiotic development characteristics of Jin Baotun mining, Inner Mongolia

图例同图 4

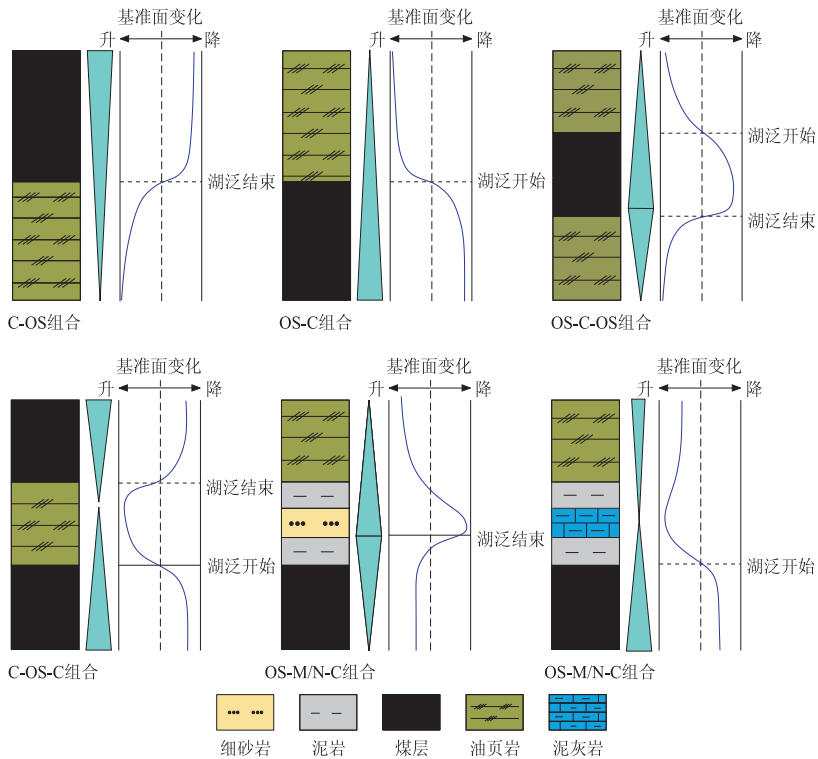


图 6 典型煤与油页岩共生组合的基准面变化特征

Fig. 6 Development characteristics of coexistence of coal and oil shale in different system tracts

中水体深度较大,陆源碎屑物注入仅能影响到滨湖地区,较大的水深易于出现较稳定的水体分层,温暖湿润的古气候利于藻类季候性勃发和陆源碎屑植物的供应;该时期湖泊中利于发育厚度较大的油页岩,向湖岸方向油页岩逐渐变薄、尖灭;而在湖泊的滨岸地区利于发育泥炭沼泽,形成厚度较大的煤层,向湖泊中部煤层逐渐变薄、尖灭;随着陆源碎屑物质不断向湖充填,泥炭沼泽也随之向湖心迁移,在油页岩上部不断堆积泥炭,进而发育煤层/油页岩组合(C-OS)(图 5、6、7). 在适宜的条件下,该组合可以遍布几乎整个湖泊,且煤层/油页岩组合较稳定,岩层厚度一般较大,如内蒙古金宝屯矿区该时期的煤与油页岩共生组合中,油页岩单层厚度可达 11 m,单煤层厚度可达 5.46 m,且分布非常稳定.

(4)晚期高水位体系域(LHST). 该时期几乎不发育煤与油页岩共生组合(图 4、5),但不排除局部小型洼地内发育二者共生组合的可能. 该时期湖泊已经基本消亡了,主要发育各种三角洲或河流沉积,该时期可以发育一些泥炭沼泽,但油页岩的发育条件很难满足,如一定深度的水体以发生水体分层等,故很难出现二者的共生组合.

4.2 层序地层格架下煤与油页岩共生发育模式

煤与油页岩共生发育受到众多地质条件的影

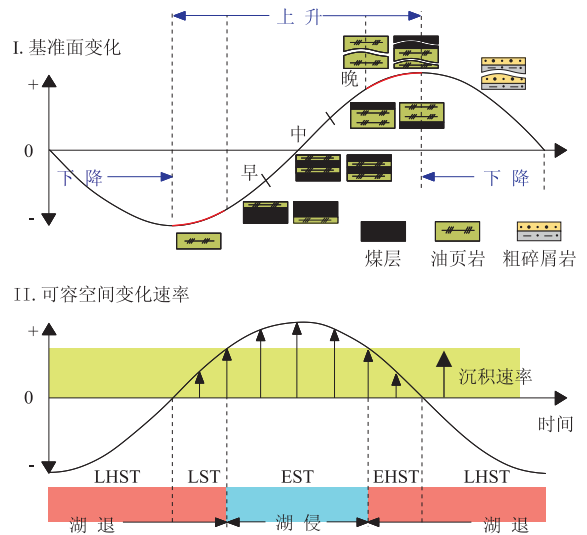


图 7 不同体系域内煤与油页岩共生发育特征

Fig. 7 Base level change characteristics of typical coexistence of coal and oil shale

响,如气候条件、构造活动、水体分层、陆源碎屑物质注入、有机质供应等,多种因素共同作用导致了煤与油页岩多种组合样式的出现及其发育的规律性. 在陆相断陷盆地层序地层格架下,煤与油页岩共生组合主要发育在湖扩张和早期高水位体系域,不同体系域中发育的煤与油页岩共生组合特征各异(图 9).

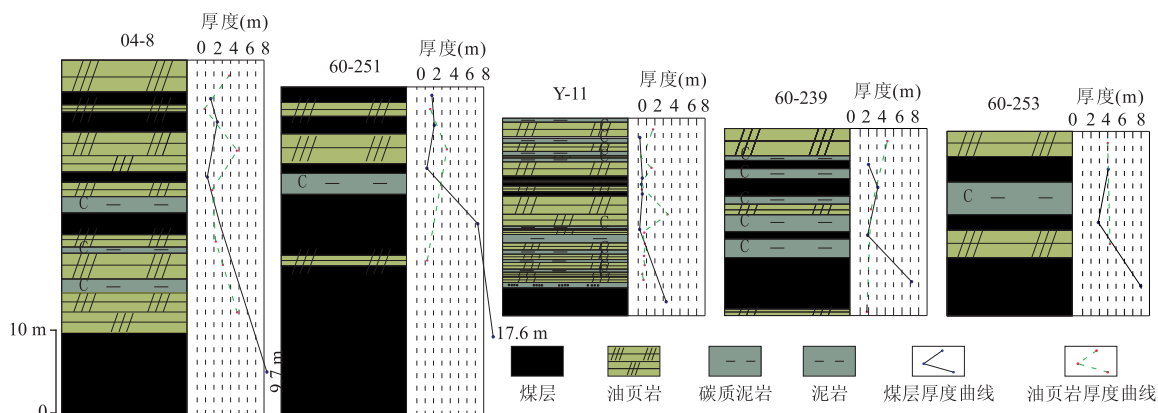


图 8 湖扩张体系域煤层与油页岩厚度垂向变化(依兰盆地达连河组)

Fig. 8 Vertical variation of coal and oil shale thickness in expanding system tract (Dalianhe formation, Yilan basin)

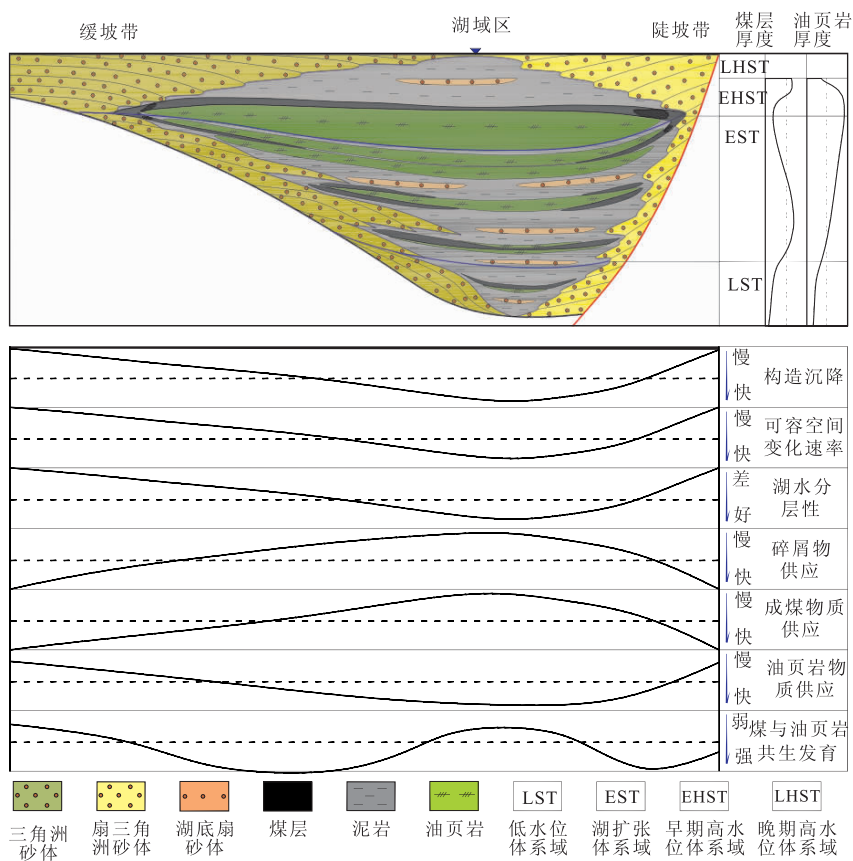


图 9 陆相断陷盆地层序地层格架下煤与油页岩共生发育模式

Fig. 9 Coal and oil shale coexisting model of the sequence stratigraphic framework in continental rift basin

湖扩张体系域最有利于煤与油页岩共生组合发育,5 种煤与油页岩共生组合均可在本体系域出现。湖扩张体系域沉积过程中,可容空间变化速率较快,且湖水的扩张具有多期性和短暂性,导致了煤层和油页岩层数多、厚度小的特征。湖扩张体系域的早期和晚期,可容空间变化速率相对要慢许多。所以,在垂向上,在湖扩张体系域早期,水体相对较浅,易发

育薄油页岩—厚煤层组合,中期水体深度适中,易发育厚度相当的煤层与油页岩组合,晚期水体相对较深,易发育薄煤层—厚油页岩组合;即从湖扩张体系域的早期到晚期,煤层厚度逐渐减小,油页岩厚度则逐渐增大(图 8);在横向上,煤与油页岩共生组合大都出现在水体深度适宜且能够快速频繁转换的部位(图 4、9),水体太深不利于泥炭沼泽的发育,水体太

浅不利于油页岩的发育,水体深度如果不能快速转换,则煤与油页岩之间容易出现其他沉积类型;从滨湖到湖泊中心,不同共生组合类型发育的部位没有特定的规律性,这与构造的发育与活动有一定的关系,但就某一种共生组合而言,从湖滨向湖心方向煤层厚度逐渐变薄,最后分叉、尖灭;油页岩则相反,在滨湖地区不太发育,向湖心方向厚度逐渐增大。在陆相断陷盆地中,没有发现煤与油页岩相变的现象;而在鲁西地区兖州煤田太原组沉积期为陆表海盆地环境,该时期发育的 15 上煤横向相变为油页岩,为罕见的现象。此外,煤与油页岩共生组合容易出现在陆源碎屑物质供应较少的部位,大量的陆源碎屑物质供应,使得湖水难以出现稳定的水体分层,则难以具有发育油页岩的条件;在陆源碎屑供应较少的部位或时期,利于发育煤与油页岩共生组合,常表现为共生组合上下部岩石主要为泥岩等细粒沉积,如黄县盆地李家崖组;在特殊的情况下,油页岩也可以与粗碎屑沉积物直接接触,如依兰盆地达连河组(图 4、图 9)。

早期高水位体系域,沉积环境较稳定,湖泊水体较深,湖泊中部往往发育该层序内厚度最大的油页岩层,向湖岸方向油页岩逐渐变薄、尖灭;在滨湖平原地区则发育该层序内厚度最大的煤层,向湖泊中部逐渐减薄、尖灭。但是,随着陆源碎屑物质不断向湖泊充填,泥炭沼泽也随之向湖中心方向迁移,在油页岩沉积之上堆积了泥炭层,并最终发育厚度大、稳定性好的煤层/油页岩共生组合(C-OS)。

5 结论

(1)煤与油页岩共生发育现象主要出现在陆相断陷盆地中,煤与油页岩共生主要存在 5 种组合形式(地层自上而下):煤层/油页岩组合(C-OS)、油页岩/煤层组合(OS-C)、油页岩/煤层/油页岩组合、煤层/油页岩/煤层组合(C-OS-C)、油页岩/其他沉积/煤层组合(OS-M/S-C);这些共生组合反映了成煤环境与油页岩发育环境转换类型的多样性。

(2)通过对比前人的分析结果可知,煤和油页岩的发育环境都需要有稳定的构造条件、较少的陆源碎屑物质供应,且有机质来源均可以由陆源高等植物和低等生物组成。但是,与成煤泥炭沼泽相比,油页岩形成的水深环境变化幅度较大,最关键是要能形成稳定的水体分层;与煤的成煤质料相比,油页岩的有机质主要来源于季候性勃发的藻类。在煤与油

页岩过渡的部位,油页岩中高等植物组分含量较高,煤层中低等植物(藻类)的含量也较高,表现为富氢化,反映了煤与油页岩之间的转换的过渡状态。煤与油页岩的发育环境、有机质来源等有不少共同的部分,为煤和油页岩发育环境的相互转化提供了地质上的可能性。

(3)煤与油页岩共生大都出现在陆相断陷盆地中,而陆相断陷盆地中构造活动对盆内沉积物的充填起了主要的控制作用,特别是短周期幕式构造沉降对盆内高频沉积旋回起到明显的控制作用。正是这些短期的构造活动,引发了煤与油页岩沉积环境的快速转换,进而促使了煤与有油页岩共生组合在合适的构造阶段和构造部位发育。

(4)在层序地层格架下,不同体系域内煤与油页岩的发育特征各不相同,煤与油页岩共生组合主要发育在湖扩张体系域和早期高水位体系域。低水位体系域沉积期,在地势低洼处可以发育厚度不大、分布局限的油页岩,并向隆起区尖灭;湖扩张体系域沉积期,各种煤与油页岩共生组合类型均可以发育,且组合特征呈现纵向和横向上规律性变化:从体系域早期到晚期、从滨湖到湖中心,共生组合中煤层厚度逐渐减小,油页岩厚度逐渐增大,共生组合类型也发生变化;早期高水位体系域沉积期,主要发育厚度巨大、分布稳定的油页岩,油页岩之上常发于厚煤层作为顶板;晚期高水位体系域沉积期基本不发育煤层和油页岩。

References

- Bohacs, K. M., Carroll, A. R., Neal, J. E., et al., 2000. Lake Basin Type, Source Potential, and Hydrocarbon Character: An Integrated Sequence-Stratigraphic-Geochemical Framework. In: Gierlowski-Kordesch, E. H., Kelts, K. R., eds., *Lake Basins through Space and Time*. AAPG studies in Geology, U. S. A., 3-33.
- Boyer, B. W., 1982. Green River Laminites: Does the Playa-Lake Model Really Invalidate the Stratified-Lake Model? *Geology*, 10 (6): 321. doi: 10. 1130/0091 - 7613 (1982)10<321:grldtp>2. 0. co;2
- Bradley, W. H., Eugster, H. P., 1969. Geochemistry and Palaeontology of the Trona Deposits and Associated Authigenic Minerals of the Green River Formation of Wyoming. *US Geological Survey Professional Paper*, 496-B:17.
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J. P., et al., 2009. Towards the Standardization of Sequence Stratigraphy.

- Earth Science Reviews*, 92(1-2): 1-33. doi:10.1016/j.earscirev.2008.10.003
- Chu, G. Q., Liu, J. Q., Liu, D. S., 2000. Identification and Significance of China and Erhai Lake Two Sedimentary Laminae. *Chinese Science Bulletin*, 45(14): 1553-1556 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. W., Guo, J. Y., Wang, R. J., et al., 2008. Tectono-Sequence Stratigraphic Analysis in Continental Faulted Basins. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. W., Qian, K., 1993. Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis. Gansu Science and Technology Press, Lanzhou (in Chinese).
- Desborough, G. A., 1978. A Biogenic-Chemical Stratified Lake Model for the Origin of Oil Shale of the Green River Formation: An Alternative to the Playa-Lake Model. *Geological Society of America Bulletin*, 89(7): 961. doi:10.1130/0016-7606(1978)89<961:abslmf>2.0.co;2
- Dong, Q. S., Liu, Z. J., Fang, S., et al., 2003. On the Feasibility of the Four Division Scheme about Continental Sequence Stratigraphy. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 324-327 (in Chinese with English abstract).
- Eugster, H. P., Surdam, R. C., 1973. Depositional Environment of the Green River Formation of Wyoming: A Preliminary Report. *Geological Society of America Bulletin*, 84(4): 1115. doi:10.1130/0016-7606(1973)84<1115:deotgr>2.0.co;2
- Feng, Y. L., Li, S. T., Xie, X. N., 2000. Dynamics of Sequence Generation and Sequence Stratigraphic Model in Continental Rift-Subsidence Basin. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 119-132 (in Chinese with English abstract).
- Hay, M. E., Duffy, J. E., Paul, V. J., et al., 1990. Specialist Herbivores Reduce Their Susceptibility to Predation by Feeding on the Chemically Defended Seaweed *Avrainvillea Longicaulis*. *Limnology and Oceanography*, 35(8): 1734-1743. doi:10.4319/lo.1990.35.8.1734
- Hecky, R. E., Fee, E. J., 1981. Primary Production and Rates of Algal Growth in Lake Tanganyika. *Limnology and Oceanography*, 26(3): 532-547. doi:10.4319/lo.1981.26.3.0532
- Jia, J. L., Liu, Z. J., Bechtel, A., 2014. Major factors Controlling Formation of Oil shale in Nenjiang Formation of Songliao Basin. *Earth Science*, 39(2): 174-186 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y. Q., Zhou, H. M., Liu, S. F., et al., 1996. Faulted Basin Multi-Layer Episodic Rifting and Sedimentary Response to Early Three Century—The Nanpu Rift Basin as An Example. *Earth Science*, 21(6): 69-72 (in Chinese with English abstract).
- Kelts, K., 1988. Environments of Deposition of Lacustrine Petroleum Source Rocks: An Introduction. In: Fleet, A. J., Kelts, K., Talbot, M. R., eds., Lacustrine Petroleum Source Rocks; Oxford. *Geological Society Special Paper*, 40: 3-26.
- Kemp, A. E. S., 1996. Palaeoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments. Geological Society Special Publication, London.
- Li, D. C., Zhu, J. W., Yan, H. R., et al., 2006. Sedimentary Characteristics and Distribution Rule of Oil Shale in Maoming Basin in Guangdong Province. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 36(6): 938-943 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y., 2013. Huangxian Formation Sedimentary Evolution and Paragenesis of Coal and Oil Shale in Huangxian Basin. *Coal Geology of China*, (6): 6-9, 15 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. X., Li, S. C., Wei, J. C., 1996. Types of Parasequence and Law of Coal Accumulation of Coal-Bearing Sequence in the Paleozoic Epicontinental Sea Basin of Western Shandong Coalfield. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(3): 40-48 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. L., Xu, J. L., Wang, P. X., 2001. Algal Blooms: The Primary Mechanism in the Formation of Lacustrine Petroleum Source Rocks. *Geological Review*, 47(2): 207-210 (in Chinese with English abstract).
- Liu, D. S., Liu, J. Q., Lu, H. Y., 1998. Progress in High-Resolution Paleoenvironment Research from Maar Lake. *Quaternary Sciences*, 18(4): 289-296 (in Chinese).
- Liu, F., 2008. Analysis of Oil Shale Characteristics and Depositional Environment of the Jijuntun Formation of Eocene in Fushun Basing (Dissertation). Jilin University, Jilin (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Wang, D. P., 1996. Depositional Environments of Lacustrine Oilshales and Its Sequence Stratigraphy Significance. *Experimental Petroleum Geology*, 18(3): 311-316 (in Chinese with English abstract).
- Liu, R., 2007. Research on Oil Shale Characteristics and Metallogenic Mechanism of Cenozoic Fault Basins in Eastern Northeast Region (Dissertation). Jilin University, Jilin (in Chinese with English abstract).
- Liu, R., Liu, Z. J., Liu, S. Y., et al., 2012. Coal and Oil Shale Occurrence Characteristic and Metallogenic Regularity

- in Yilan Basin. *Journal of China Coal Society*, 37(5): 776—781 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. J., Dong, Q. S., Wang, S. M., et al., 2002. Introduction to Continental Sequence Stratigraphy and Application. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, Z. J., Hu, F., Sun, P. C., et al., 2013. Re-Discussion on the Four Division Scheme about Continental Sequence Stratigraphy and Its Application on Oil and Gas Exploration. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 43(1): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. J., Liu, R., 2005. Oil Shale Resource State and Evaluating System. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 315—323 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. J., Meng, Q. T., Jia, J. L., et al., 2012. Metallogenic Regularity of Oil Shale in Continental Basin; Case Study in the Meso-Cenozoic Basins of Northeast China. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 42(5): 1286—1297 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. J., Yang, H. L., Dong, Q. S., et al., 2007. Oil Shale in China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, Z. X., 2007. The Characteristics, Genetics and Resources Potential of Oil Shale in Dalianhe Mining Area of Yilan, Heilongjiang (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Luo, X., Zhu, X. M., Tan, M. Y., 2011. Characteristics and Forming Environment of Oil Shale in Changle Shandong Five. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 18(4): 32—34 (in Chinese with English abstract).
- Meng, Q. T., 2010. Research on Petrologic and Geochemical Characteristics of Eocene Oil Shale and Its Enrichment Regularity, Huadian Basin (Dissertation). Jilin University, Jilin (in Chinese with English abstract).
- Ren, Y. J., Wang, G. M., Ma, Z. P., et al., 2005. Control of Short-Period Episodic Rifting to Sedimentation of High-Frequency Cycle in Continental Rift-Subsidence Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(4): 672—676 (in Chinese with English abstract).
- Riboulleau, A., Baudin, F., Deconinck, J. F., et al., 2003. Depositional Conditions and Organic Matter Preservation Pathways in an Epicontinental Environment: The Upper Jurassic Kashpir Oil Shales (Volga Basin, Russia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 197(3—4): 171—197. doi: 10. 1016/s0031—0182(03)00460—7
- Sancetta, C., 1996. Laminated Diatomaceous Sediments: Controls on Formation and Strategies for Analysis. Geological Society, London, Special Publications, 116(1): 17—21. doi: 10. 1144/gsl.sp. 1996. 116. 01. 03
- Shao, L. Y., Lu, J., Wang, H., et al., 2009. Developments of Coal Measures Sequence Stratigraphy in China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 904—914 (in Chinese with English abstract).
- Stach, E., 1990. Stach Coal Petrology Course. Translated by Yang, Q. et al., China Coal Industry Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Sun, P. C., Sachsenhofer, R. F., Liu, Z. J., et al., 2013. Organic Matter Accumulation in the Oil Shale- And Coal-Bearing Huadian Basin (Eocene; NE China). *International Journal of Coal Geology*, 105: 1—15. doi: 10. 1016/j. coal. 2012. 11. 009
- Surdam, R. C., Stanley, K. O., 1980. The Stratigraphic and Sedimentologic Framework of the Green River Formation, Wyoming. *Guidebook to Annual Field Conference*, 205—221.
- Tao, M. H., Han, C. Y., Tao, L., 2007. Analysis on the Formational Mechanism of Depositional Cycles. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(4): 505—510 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B. S., Yu, J. F., Sun, Y. Z., et al., 2001. Analysis on Peat Swamp Types from Huangxian Tertiary Brown Coal and Oil Shale Bearing Basin. *Coal Geology & Exploration*, 29(5): 1—3 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. D., Li, Z. X., Wang, Z. F., et al., 2013. Paleogene Coal and Oil Shale Paragenetic Features and Sequence Stratigraphic Framework in Yilan Basin, Heilongjiang. *Coal Geology of China*, (12): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. P., Liu, L., 1994. Sequence Stratigraphy in Continental Rift Basins. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, (3): 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. M., 2005. The Sedimentary Control to Mudstone and Shale of High-Frequency Cycle by Paleoclimate Change-Taking the Eocene in Jiyang Depression as an Example (Dissertation). Chinese Academy of Sciences, Guangzhou (in Chinese with English abstract).
- Wang, K. W., Zhang, F., Lin, D. C., 2007. The Control of Tectonic Activities on Sedimentation in Tangyuan Fault Depression Basin. *Petroleum Geology and Engineering*, 21(6): 7—10 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. L., Li, Z. X., Lv, D. W., et al., 2013. Analysis on Palaeoclimate and Metallogenic Materials of Typical Basins under Co-Occurring Circumstances of Coal and Oil Shale. *Coal Geology of China*, (12): 8—11 (in Chinese with English abstract).

- Wang, Z. F., Lin, M. Y., Wang, B. S., 2007. Maceral and Geochemical Characteristics of Coal Seam and Oil Shale in Huangxian Basin. *Coal Geology & Exploration*, 35(4): 12—14 (in Chinese with English abstract).
- Wei, K. S., Xu, H. D., 1994. Sequence Stratigraphic Features of Cretaceous Nonmarine Sediments in Erlian Basin. *Earth Science*, (2): 181—193 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. L., Yuan, Y. B., Li, S. H., 1998. The Synsedimentary Structure Framework and its Controls on the Thickness of Extra Thick Coal Bed & Oil Thale, Fushun Basin, China. *Coal Geology & Exploration*, 26(6): 3—8 (in Chinese with English abstract).
- Wu, G. X., Zhu, W. L., Huang, Z. J., et al., 1998. Research on Phytoplankton and Organic Matter in the Lacustrine Sediments and Hydrocarbon Source Conditions. *Journal of Tongji University*, 26(1): 105 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. C., Dong, Q. S., Yan, L. P., et al., 2006. The Characteristics and the Formation Mechanism of the Oil Shale in Huangxian Faulted Basin, Shandong Province. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 36(6): 954—958 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S. C., Liu, Z. J., Dong, Q. S., et al., 2012. Deposition and Sedimentary Evolution of Coal, Oil Shale and Evaporite-Bearing Strata in Terrestrial Basins. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(2): 296—303 (in Chinese with English abstract).
- Yan, H. R., Zhu, J. W., Li, D. C., et al., 2006. Formation Condition and Exploitation Prospect of Oil Shale in Renziping Exploration Area, Qinxian Basin, Guangxi Province. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 36(6): 986—990 (in Chinese with English abstract).
- Yu, B. S., 1995. Geochemical Markers of the Condensed Sections. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 205—209 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. H., Jiang, H., Li, S. L., et al., 2007. Depositional Filling Models and Controlling Factors on Mesozoic and Cenozoic Fault Basins of Terrestrial Facies in Eastern China—A Case Study of Dongying Sag of Jiyang Depression. *Lithologic Reservoirs*, 19(1): 39—45 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. J., Huang, D. F., Li, J. C., 1985. A Preliminary Study of Biomarkers in Fushun and Moming Oil Shales and Faulty Coals and their Geochemical Significance. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 4(2): 1—18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Ji, F. L., 1996. An Approach to the Sequence Stratigraphic Models of the Fault-Depression Lake Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 23(5): 20—23, 82 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. Q., Dong, Q. S., Hou, G. F., et al., 2006. The Forming Environment and Sedimentary Evolution of the Oil Shale Intergrowing with Salt Alkali Mine—With the Oil Shale Deposit of Wucheng, Tongbai Basin as an Example. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 36(6): 1001—1005 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., Zhang, S. C., et al., 2005. Characteristics and Origin of Deep Lake Oil Shale of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Jiyang Depression. *Journal of Palaeogeography*, 7(1): 59—69 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Stach, E., 1990. 斯塔赫煤岩学教程. 杨起等, 译. 北京: 煤炭工业出版社.
- 储国强, 刘嘉麒, 刘东生, 2000. 中国玛珥湖中两种沉积纹层的辨识及意义. *科学通报*, 45(14): 1553—1556.
- 邓宏文, 郭建宇, 王瑞菊, 等, 2008. 陆相断陷盆地的构造层序地层分析. *地学前缘*, 15(2): 1—7.
- 邓宏文, 钱凯, 1993. 沉积地球化学与环境分析. 兰州: 甘肃科学技术出版社.
- 董清水, 刘招君, 方石, 等, 2003. 论陆相层序地层学四分方案的可行性. *沉积学报*, 21(2): 324—327.
- 冯有良, 李思田, 解习农, 2000. 陆相断陷盆地层序形成动力学及层序地层模式. *地学前缘*, 7(3): 119—132.
- 贾建亮, 刘招君, Bechtel, A., 等, 2014. 松辽盆地嫩江组油页岩发育控制因素. *地球科学*, 39(2): 174—186.
- 焦养泉, 周海民, 刘少峰, 等, 1996. 断陷盆地多层次幕式裂陷作用与沉积充填响应——以南堡老第三纪断陷盆地为例. *地球科学*, 21(6): 69—72.
- 李殿超, 朱建伟, 严焕榕, 等, 2006. 广东省茂名盆地油页岩的沉积特征及分布规律. *吉林大学学报: 地球科学版*, 36(6): 938—943.
- 李莹, 2013. 黄县盆地黄县组沉积演化及煤与油页岩共生. *中国煤炭地质*, (6): 6—9, 15.
- 李增学, 李守春, 魏久传, 1996. 鲁西煤田内陆表海含煤层序的小层序类型及煤聚积规律. *沉积学报*, 14(3): 40—48.
- 刘传联, 徐金鲤, 汪品先, 2001. 藻类勃发——湖相油源岩形成的一种重要机制. *地质论评*, 47(2): 207—210.
- 刘东生, 刘嘉麒, 吕厚远, 1998. 玛珥湖高分辨率古环境研究的新进展. *第四纪研究*, 18(4): 289—296.
- 刘洋, 2008. 抚顺盆地始新统军屯组油页岩特征及其沉积

- 环境分析(硕士学位论文). 吉林: 吉林大学.
- 刘立, 王东坡, 1996. 湖相油页岩的沉积环境及其层序地层学意义. 石油实验地质, 18(3): 311—316.
- 刘招君, 董清水, 王嗣敏, 等, 2002. 陆相层序地层学导论与应用. 北京: 石油工业出版社.
- 刘招君, 胡菲, 孙平昌, 等, 2013. 再论陆相三级层序内四分方案及其在油气勘探中的应用. 吉林大学学报: 地球科学版, 43(1): 1—12.
- 刘招君, 柳蓉, 2005. 中国油页岩特征及开发利用前景分析. 地质前缘, 12(3): 315—323.
- 刘招君, 孟庆涛, 贾建亮, 等, 2012. 陆相盆地油页岩成矿规律: 以东北地区中、新生代典型盆地为例. 吉林大学学报: 地球科学版, 42(5): 1286—1297.
- 刘招君, 杨虎林, 董清水, 等, 2007. 中国油页岩. 北京: 石油工业出版社.
- 刘志逊, 2007. 黑龙江依兰煤田达连河矿区油页岩性质、成因与资源潜力(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 柳蓉, 2007. 东北地区东部新生代断陷盆地油页岩特征及成矿机制研究(博士学位论文). 吉林: 吉林大学.
- 柳蓉, 刘招君, 柳世友, 等, 2012. 依兰盆地煤与油页岩赋存特征及成矿规律研究. 煤炭学报, 37(5): 776—781.
- 罗霞, 朱筱敏, 谭明友, 2011. 山东昌乐五图油页岩特征及形成环境. 油气地质与采收率, 18(4): 32—34.
- 孟庆涛, 2010. 桦甸盆地始新统油页岩岩石地球化学特征及富集规律研究(博士学位论文). 吉林: 吉林大学.
- 任拥军, 王冠民, 马在平, 等, 2005. 试论短周期幕式构造沉降对陆相断陷盆地高频沉积旋回的控制. 沉积学报, 23(4): 672—676.
- 邵龙义, 鲁静, 汪浩, 等, 2009. 中国含煤岩系层序地层学研究进展. 沉积学报, 27(5): 904—914.
- 陶明华, 韩春元, 陶亮, 2007. 旋回性沉积序列的形成机理分析. 沉积学报, 25(4): 505—510.
- 王炳山, 余继锋, 孙玉壮, 等, 2001. 黄县盆地褐煤与油页岩的泥炭沼泽类型分析. 煤田地质与勘探, 29(5): 1—3.
- 王东东, 李增学, 王真奉, 等, 2013. 黑龙江依兰盆地古近系煤与油页岩共生特点及层序地层格架. 中国煤炭地质, (12): 1—7.
- 王东坡, 刘立, 1994. 大陆裂谷盆地层序地层学的研究. 岩相古地理, (3): 1—9.
- 王冠民, 2005. 古气候变化对湖相高频旋回泥岩和页岩的沉积控制(博士学位论文). 广州: 中国科学院.
- 王孔伟, 张帆, 林东成, 2007. 汤原断陷构造活动对沉积的控制. 石油地质与工程, 21(6): 7—10.
- 王平丽, 李增学, 吕大伟, 等, 2013. 典型盆地煤与油页岩共生成矿物质及古气候分析. 中国煤炭地质, (12): 8—11.
- 王真奉, 林明月, 王炳山, 2007. 黄县盆地古近纪煤与油页岩的有机岩石学和地球化学特征及形成条件. 煤田地质与勘探, 35(4): 12—14.
- 魏魁生, 徐怀大, 1994. 二连盆地白垩系非海相沉积层序地层特征. 地球科学, (2): 181—193.
- 吴冲龙, 袁艳斌, 李绍虎, 1998. 抚顺盆地同沉积构造及其对煤和油页岩厚度的控制. 煤田地质与勘探, 26(6): 3—8.
- 吴国璋, 朱伟林, 黄正吉, 等, 1998. 湖相沉积浮游藻类及有机质类型与烃源研究. 同济大学学报: 自然科学版, 26(1): 105.
- 许圣传, 董清水, 闫丽萍, 等, 2006. 山东黄县断陷盆地油页岩特征及生成机制. 吉林大学学报: 地球科学版, 36(6): 954—958.
- 许圣传, 刘招君, 董清水, 等, 2012. 陆相盆地含煤、油页岩和蒸发盐地层单元沉积演化. 吉林大学学报(地球科学版), 42(2): 296—303.
- 严焕榕, 朱建伟, 李殿超, 等, 2006. 广西钦县盆地稔子坪勘查区油页岩形成条件及开发前景. 吉林大学学报: 地球科学版, 36(6): 986—990.
- 于炳松, 1995. 密集段的地球化学标志. 矿物学报, 15(2): 205—209.
- 于兴河, 姜辉, 李胜利, 等, 2007. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素——以济阳拗陷东营凹陷为例. 岩性油气藏, 19(1): 39—45.
- 张大江, 黄第藩, 李晋超, 1985. 抚顺、茂名油页岩和劣质煤中生物标记烃及其地化意义的初步研究. 大庆石油地质与开发, 4(2): 1—18.
- 张世奇, 纪发亮, 1996. 陆相断陷湖盆层序地层学模式探讨. 石油勘探与开发, 23(5): 20—23, 82.
- 周珍琦, 董清水, 厚刚福, 等, 2006. 与盐碱矿共生的油页岩形成环境及沉积演化——以桐柏吴城盆地油页岩矿床为例. 吉林大学学报: 地球科学版, 36(6): 1001—1005.
- 朱光有, 金强, 张水昌, 等, 2005. 济阳拗陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油面岩的特征及成因. 古地理学报, 7(1): 59—69.