

琼东南盆地崖北凹陷崖城组煤系烃源岩 发育环境及控制因素

成 晨, 高 亮

(中国石油大学 胜利学院, 山东 东营 257061)

摘 要: 依据沉积环境控制烃源岩发育理论, 研究了琼东南盆地崖北凹陷崖城组煤系烃源岩的发育环境及主控因素, 并建立了研究区崖城组煤系烃源岩的发育模式。崖城组煤系烃源岩主要形成于半咸水、还原-弱还原的扇三角洲平原河道间泥炭沼泽环境和半咸水、弱还原-弱氧化的潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽环境。沉积环境、古气候条件、相对海平面变化以及古构造控制煤系烃源岩的发育, 其中沉积环境控制着煤系烃源岩中有机质类型、有机质丰度、显微组分及煤层的厚度, 古气候条件提供了煤系烃源岩发育的物质基础, 相对海平面变化影响着煤系烃源岩的展布及保存条件, 古构造则是聚煤盆地形成、演化的主要控制因素。崖城组煤系烃源岩有两种发育模式, 一是在扇三角洲平原河道间泥炭沼泽环境中水体的还原性起主导作用, 二是在潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽中高生物生产率起主导作用。

关键词: 发育环境; 控制因素; 煤系烃源岩; 崖城组; 崖北凹陷; 琼东南盆地

中图分类号: P588.2; P618.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2017)01-0070-10

Depositional environment and controlling factors of coal measures source rocks of Yacheng Formation in Yabei depression of Qiongdongnan basin

CHENG Chen and GAO Liang

(Shengli College, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: The primary hydrocarbon source rocks of Yabei depression in Qiongdongnan basin are coal measures of Yacheng Formation. On the basis of the theory that depositional environment controls the formation of coal measures source rocks, the depositional environments and controlling factors of coal measures source rocks were studied, and the development models of coal measures source rocks were established. The depositional environments of coal measures source rocks were saline-reducing peat swamps of the braided river delta plain and saline-oxidative peat swamps of tidal flat. The controlling factors of coal measures were depositional environments which governed the abundance and types of organic matters, microscopic constituents, and thickness of coal measures, paleo-climate which provided material background for the development of source rocks, sea level which controlled the distributive characteristics of coal measures within the strata and the perversion condition, and paleo-structure which determined formation and evolution of specific basins. There are two development models of coal measures source rocks of Yacheng Formation in Yabei depression: one is peat swamps of tidal flat in which the reduction played the leading role; the other is peat swamps of the braided river delta plain in which the high productivity was the most effective factor.

收稿日期: 2014-03-17; 接受日期: 2016-11-11

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05023-001-008)

作者简介: 成 晨(1989-), 男, 硕士, 助教, 主要进行油气与沉积地质方面的研究, E-mail: chengchen0119@126.com。

Key words: depositional environment; controlling factor; coal measures source rock; Yacheng Formation; Yabei depression; Qiongdongnan basin

Fund support: National Science and Technology Major Project (2011ZX05023-001-008)

琼东南盆地崖北凹陷具有丰富的油气资源,其中渐新统崖城组煤系烃源岩因为有机质丰度较高具有重大的生烃意义(黄保家等,2000;于晓果等,2000;李明兴等,2000)。对于崖北凹陷崖城组的沉积相、成煤环境、构造演化以及有机质地球化学特征,前人已经做了一些研究,提出了一些有益的认识(张功成等,2010,2012;李莹等,2011;刘海燕等,2012;吴玉坤等,2013)。然而,基于详细钻井、测井及地震资料支撑的单井的精细研究工作有待进一步开展。针对烃源岩的发育,生物生产率和水体的还原条件为其提供了物质基础和保存环境(Moore and Demaison, 1980; Pedersen and Calvert, 1990; Tyson and Pearson, 1991; Dymond *et al.*, 1992; Francois *et al.*, 1995; Hedges and Keil, 1995; 施春华等, 2001; 万晓樵等, 2003; 陈践发等, 2006), 但 Moore 和 Demaison(1980)认为还原条件只有利于保存烃源岩中富氢的有机质,而对烃源岩的发育起决定性作用的是沉积环境,其控制着烃源岩的有机质类型、有机质丰度及显微组分等(张水昌等,2005;张宝民等,2007;李天义等,2008)。本文依据沉积环境控制烃源岩发育理论,利用研究区 P1 井详细的钻井、测井和地震资料研究了琼东南盆地崖北凹陷崖城组煤系烃源岩发育环境及主控因素,并建立了崖北凹陷崖城组煤系烃源岩的发育模式。

琼东南盆地位于海南岛东南部海域,南海北部大陆边缘西北部,是新生代形成的 NE 向伸展盆地。本文研究区琼东南盆地崖北凹陷位于盆地北部坳陷带的西段(图 1)。该凹陷北部为琼东南盆地 5 号断裂带,受该断裂带和周缘凸起的共同控制,崖北凹陷北部形成了地势较陡的陡坡带,中部形成了地势相对较深的深洼带,南部和东南部形成地势平缓的缓坡带。始新世发育时期崖北凹陷构造应力以拉张应力为主,到渐新世早期地层沉积时,由先前的拉张应力向挤压应力转化,由裂陷逐渐过渡为坳陷(刘海燕等,2012),其中崖城组即发育于该过渡期。此时凹陷周边被凸起所环绕,对崖北凹陷起到遮挡作用,使凹陷处于一个半封闭状态,仅在陵水低凸起附近通过几处潮道与海连通,因此其主要为半封闭滨海相环境。崖城组三段主要发育扇三角洲环境,崖城组

一、二段主要发育潮坪-泻湖环境(李莹等,2011;张功成等,2012;吴玉坤等,2013)。

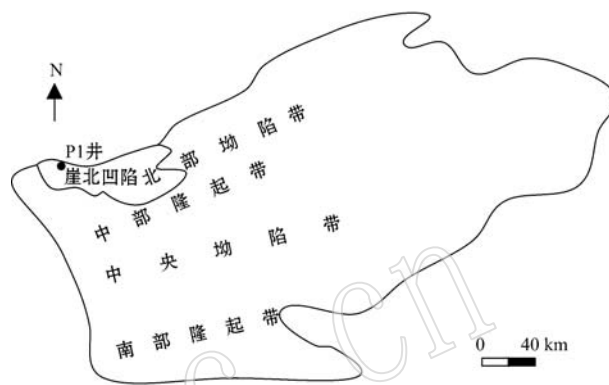


图 1 琼东南盆地崖北凹陷位置图

Fig. 1 The location of Yabei depression in Qiongdongnan basin

1 崖北凹陷崖城组煤系烃源岩特征

煤系烃源岩是指以煤或炭质泥岩为主的烃源岩,其有机质一般来源于陆生高等植物,该类烃源岩成熟后以生气为主,兼生少量石油。崖北凹陷崖城组煤系烃源岩最大厚度 900 m,其中崖城组三段煤系烃源岩厚度最大,以煤为主,煤层多而薄,发育范围较广;崖城组二段煤系烃源岩以煤和暗色泥岩为主,煤层少而厚,分布范围局限;崖城组一段煤系烃源岩以煤和暗色泥岩为主(图 2),煤层少而薄分布范围局限。

根据煤系烃源岩热解实验结果,崖城组煤系烃源岩干酪根类型为Ⅱ₂型和Ⅲ型,煤和炭质泥岩有机质丰度为 23.2%~43.3%,暗色泥岩有机质丰度为 0.12%~1.53%(表 1),烃源岩都已进入成熟阶段。另外煤岩组分鉴定显示,煤系烃源岩有机显微组分中镜质组含量最高,部分源岩含有较多的壳质组(表 2)。

2 崖北凹陷崖城组煤系烃源岩发育环境

2.1 崖城组沉积环境

通过分析钻井岩芯、古生物、微量元素、测井及地震资料,在琼东南盆地崖北凹陷崖城组中识别出扇三角洲平原、泻湖-潮坪两种沉积相类型。

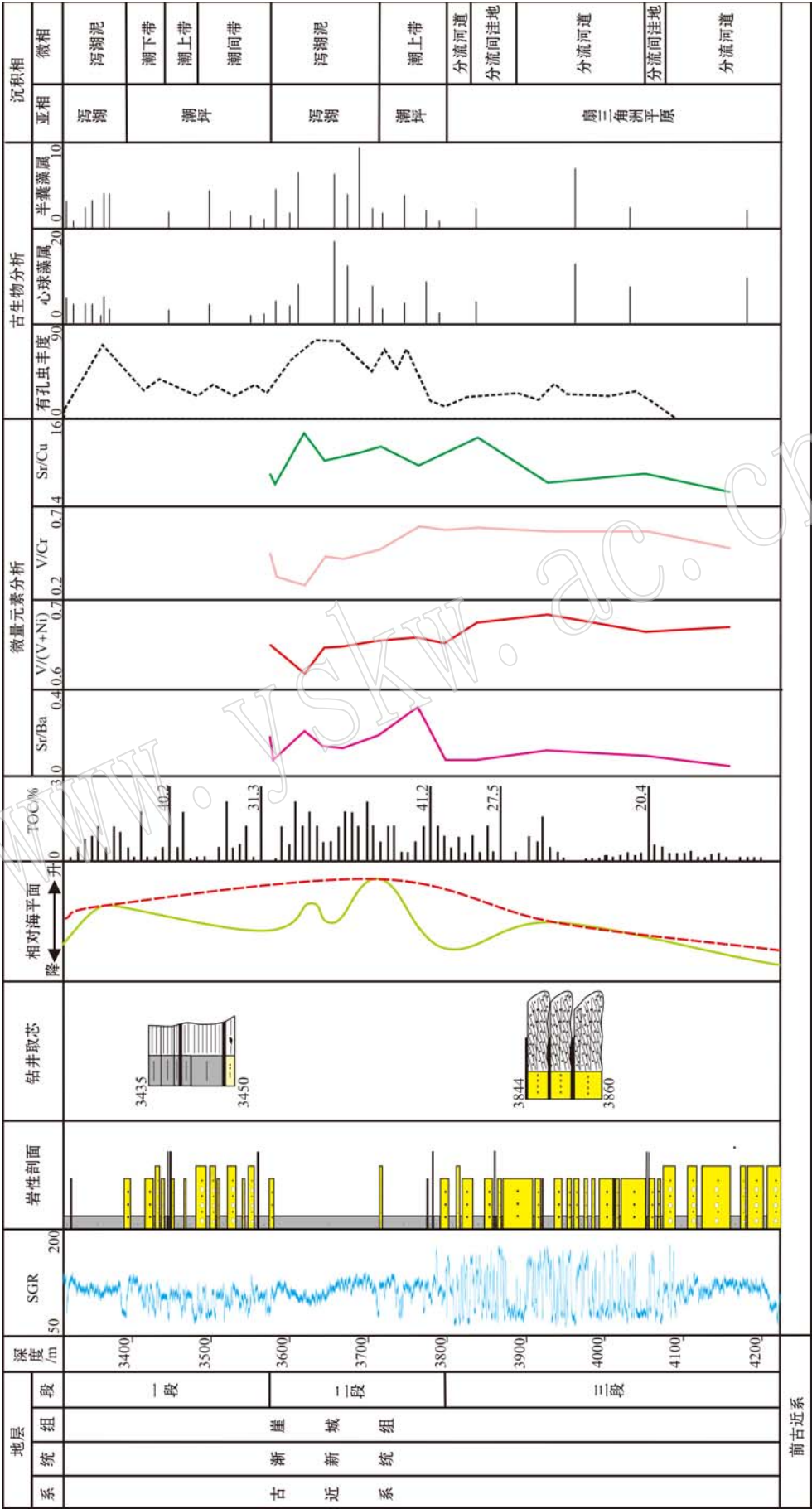


图 2 崖北凹陷 P1 井崖城组沉积相分析柱状图
Fig. 2 Sedimentary facies columnar section of well P1 in Yabei depression

表 1 崖北凹陷崖城组煤系烃源岩有机质丰度及成熟度

Table 1 Content and maturity of organic matter of coal measures source rocks in Yacheng Formation of Yabei depression

岩性	TOC/%	R ₀ /%
煤或炭质泥岩	23.2~43.3	0.9~1.1
暗色泥岩	0.12~1.53	

注：TOC 为有机碳丰度，R₀ 为镜质体反射率。

扇三角洲平原是崖三段的沉积主体，以发育辫状分流河道以及分流间洼地为特征。其中辫状分流

河道微相为由灰白色砂砾岩、砂岩组成的复合性水道沉积，碎屑颗粒分选性差，粒度呈双众数分布(图 3)，底冲刷面上依次出现含泥砾的砾岩或砂砾岩、大型槽状或楔状交错层理的砂砾岩或粗砂岩、含泥质条带的砂岩和具波纹层理的细砂岩，总体构成向上变细的序列。海相生物化石如有孔虫、心球藻属等含量少。该环境为淡水环境，对应的 Sr/Ba 值较小，自然伽马测井曲线表现为齿化的箱状，底部突变，曲线来回波动较大(图 2)。

表 2 崖北凹陷崖城组煤系烃源岩地化组分含量

$\varphi_B/\%$

Table 2 Content of geochemical components of coal measures source rocks in Yacheng Formation of Yabei depression

层位	岩性	TMCS ₃ (含矿物沥青基质)	TMC(不含矿物沥青基质)	V(镜质组)	I(惰质组)	E(壳质组)	SC(腐泥组)	S ₃ (矿物沥青基质)
崖一段	煤或炭质泥岩	59.8	44.1	43.8	0.1	0	0.2	15.7
崖二段	煤或炭质泥岩	30.13	14.35	12.63	0.59	11.13	0	5.78
	暗色泥岩	3.49	3.49	3.49	0	0	0	0
崖三段	煤或炭质泥岩	18.1	16.8	16	0.1	0.7	0	1.3
	暗色泥岩	0.2	0.2	0.1	0	0	0.1	0

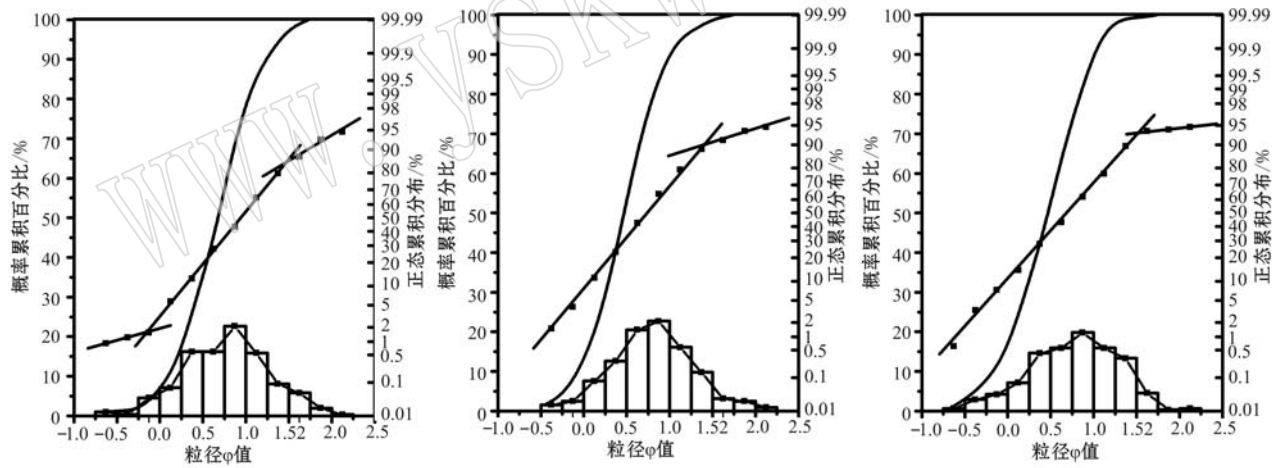


图 3 琼东南盆地崖北凹陷 P1 井崖城组三段砂岩粒度概率累积曲线

Fig. 3 The grain cumulative relative curve of sandstone in well P1 of Yacheng Formation

泻湖-潮坪相在琼东南盆地崖北凹陷崖城组发育较广，是崖城组一、二段的沉积主体，沉积物主要是细砂岩与薄层粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩灰层，分选好，以脉状、透镜状层理为代表的潮汐层理发育，同时发育水平层理及一些小型交错层理，垂向上粒度变细。含有丰富的海相生物化石，如有孔虫等。水体为半咸水环境，相应 Sr/Ba 值较大，测井曲线表现为微齿化的钟形，曲线来回波动较小(图 2)。

从地震剖面图来看，崖三段呈杂乱的反射结构，

同相轴不连续，具高-中振幅、中-低频率的特征，指示其可能为扇三角洲环境；崖一、二段呈无反射结构或亚平行反射结构，同相轴较连续，低振幅，其可能为泻湖-潮坪环境(图 4)。

2.2 成煤环境

地质历史时期，泻湖、半深湖及浅海环境易形成优质的烃源岩(苗建宇等, 2005; 蔡勋育等, 2005; 李新景等, 2009)，因此烃源岩的形成需要特定的沉积环境。研究区的钻井在崖城组地层取芯不多，且取

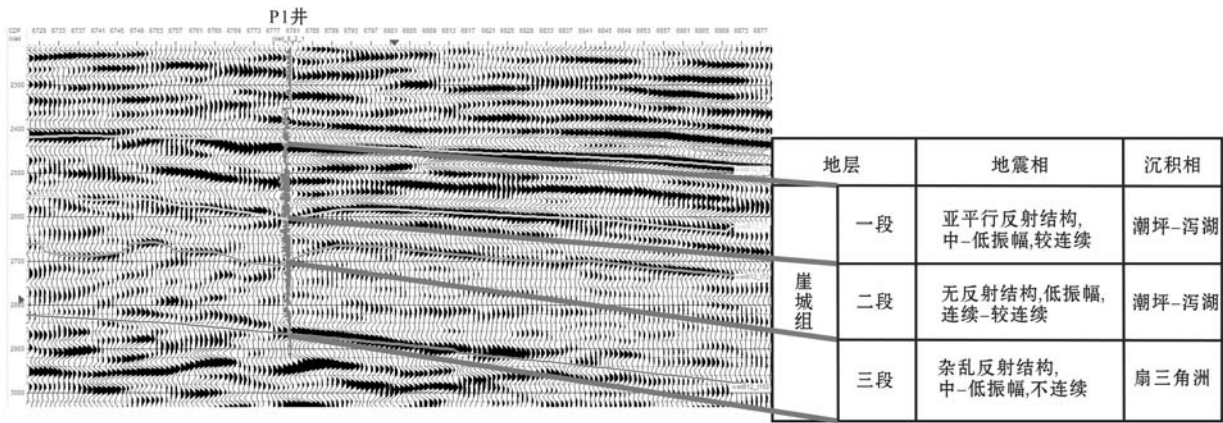


图 4 琼东南盆地崖北凹陷 P1 井崖城组地震相特征
Fig. 4 Seismic facies of well P1 in Yacheng Formation of Yabei depression in Qiongdongnan basin

到煤样的钻井更是罕见, 仅 P1 钻井的取芯段见到几层较薄的煤层, 以下就重点研究这几个薄煤层的发育环境。

2.2.1 扇三角洲平原河道间泥炭沼泽环境

在 P1 井崖三段的上部取到岩芯, 深度为 3 844 ~ 3 860 m, 岩芯钻遇 3 层煤, 含煤岩石组合岩性主要为含砾砂岩、细砾岩, 分选性和磨圆度差, 发育大型交错层理; 镜下观察粒度较粗, 以石英为主, 长石、岩屑等较为富集, 指示近缘沉积; 粒度分析显示出标准的两段式, 指示该砂体为河道沉积; 有孔虫、海相沟鞭藻等海相化石相对丰度较高, 说明此取芯段沉积时受到了海水的影响; 同时, P1 井位于崖北凹陷的陡坡带, 崖城组沉积时古地形较为陡峭。综合各种因素分析认为该取芯段为扇三角洲平原上的河道及河道间环境, 取芯段中的煤层是扇三角洲平原河道间泥炭沼泽环境的产物。其中煤层底板为根土岩, 发白且成破碎状, 可以见到残留的植物根痕, 反映了煤层原地堆积的特点, 煤层顶板为砂砾岩, 冲刷现象指示与煤层呈冲蚀接触(图 5), 河流的冲刷作用终止了泥炭的堆积。地质历史时期, 海水短暂退却后, 平原上低洼的地区逐渐沼泽化, 泥炭开始堆积, 随后海平面上升, 河流的冲刷终止了泥炭的堆积, 继而发生成煤作用形成煤层。

2.2.2 潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽环境

在 P1 井崖一段下部取到岩芯, 岩芯深度 3 435 ~ 3 450 m, 同样钻遇 3 层煤, 煤层厚度 0.5 ~ 1 m, 含煤组合发育于潮上带-潮间带环境, 岩性为中砂岩、泥页岩夹煤线, 可见波状、透镜状层理的潮上带-潮间带沉积及具变形层理的潮间带潮道沉积, 镜下照

片显示成分成熟度小于 10%, 测井曲线呈钟形, 海相生物化石含量丰富。其中潮上带-潮间带泥炭沼泽沉积岩性主要以煤层和暗色泥岩为主, 其中煤层底板为具砂纹层理的泥质粉砂岩, 不含植物根茎化石, 镜下照片显示粉砂岩磨圆度不高, 且煤岩煤质分析显示为微镜煤和微镜惰煤组合(张功成等, 2010), 反映了煤层具有异地、微异地搬运的特点。煤层顶板为具生物扰动的粉砂岩, 与煤层明显接触, 反映了沉积环境的迅速变化, 镜下照片可见红色的铁质沉积物(图 6), 说明当时水体富氧程度较高。地质历史时期, 潮坪潮上带和潮间带泥炭坪常常暴露于地表, 利于泥炭沼泽的发育, 当海平面上升, 水体加深, 泥炭终止了堆积, 开始发生成煤作用形成煤层。当水动力较强时, 水流会冲刷堆积的泥炭, 随着水动力变弱, 所携带的泥炭便发生堆积, 形成异地成煤。

2.3 沉积水体介质条件

沉积水体介质条件即包括水体的盐度和氧化-还原程度等, 它们在不同的沉积环境中表现不同, 研究沉积水体介质条件也是探讨有机质富集的重要方面。一般认为, 淡水环境的 Sr/Ba 值较低, 而海水中该值较高。通过对 P1 井的微量元素分析发现, 崖城组 Sr/Ba 值介于 0.1 到 0.3 之间(图 2), 考虑到取芯样品的新鲜程度较差, 测出的地化数据偏低, 指示崖城组地层沉积时的水体可能为半咸水环境。不同的沉积水体介质条件下, 可以形成具有明显不同的生物标志化合物组合特征, 前人(曾国寿等, 1990)认为半咸水环境以低碳数为主, 主峰主要是 nC_{21} , 由表 3 可以看出崖城组地层沉积时主要为半咸水环境, 综合分析, 崖城组沉积物形成于半咸水的沉积水

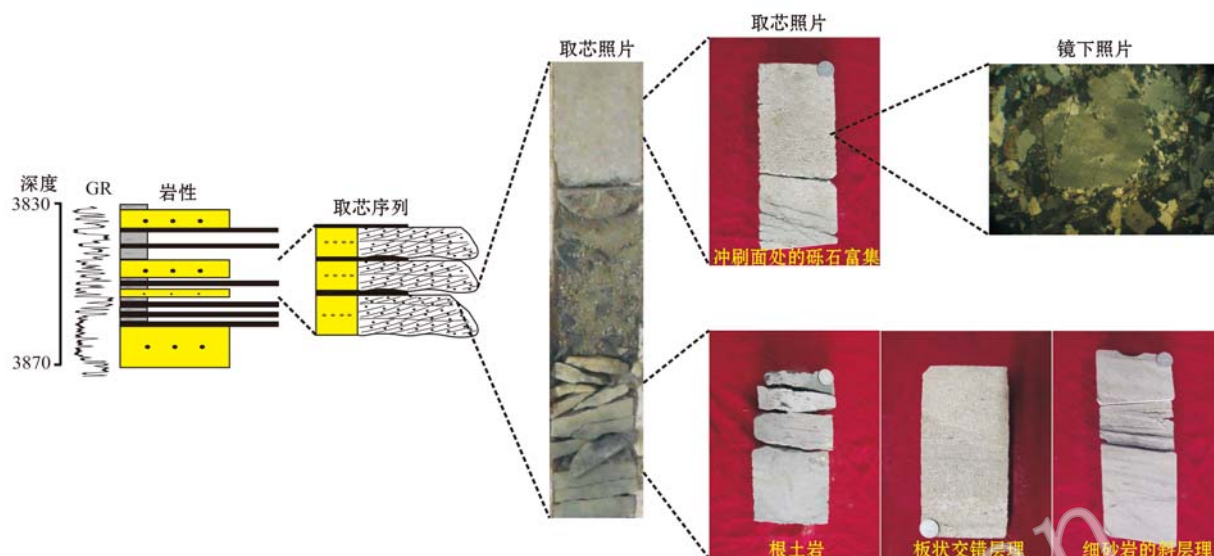


图 5 扇三角洲平原河道间泥炭沼泽成煤环境

Fig.5 The peat swamps of the braided river delta plain environments of coal measures

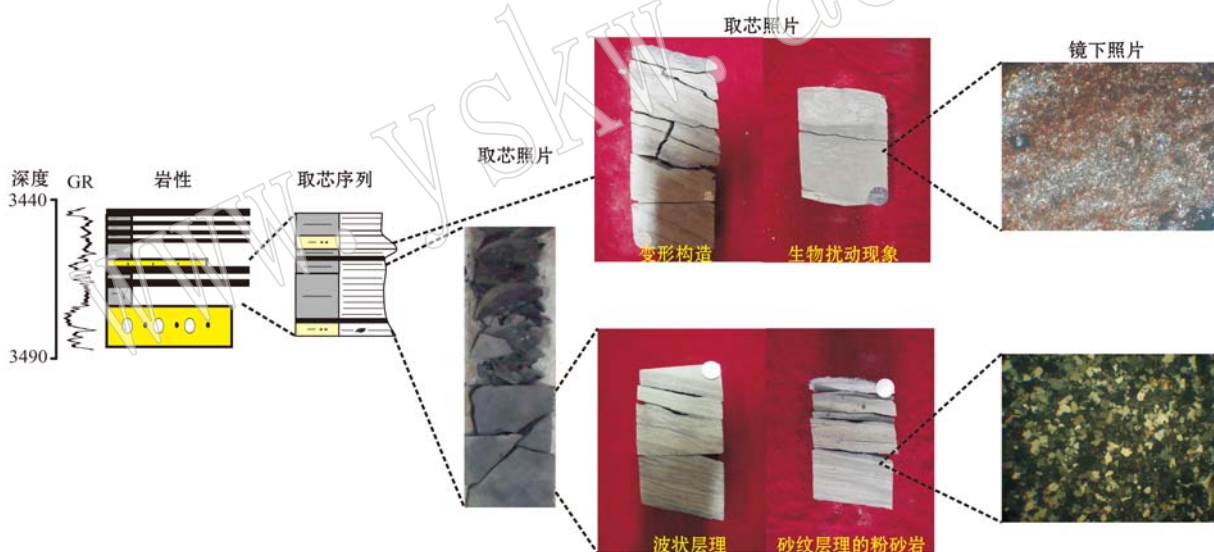


图 6 潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽成煤环境

Fig.6 The peat swamps of tidal flat environments of coal measures

体环境中。

水体的氧化-还原程度决定着有机质的保存情况,研究表明 $V/(V+Ni)$ 值、 V/Cr 值以及 Pr/Ph (姥植比) 值对环境的氧化-还原程度有判别作用 (Jones and Manning, 1994)。在崖北凹陷扇三角洲平原泥炭沼泽环境的泥岩样品中, $V/(V+Ni)$ 值介于 0.65 到 0.7 之间, V/Cr 值介于 0.6 到 0.7 之间 (图 2), Pr/Ph 值为 3.2 (表 3), 表明崖城组扇三角洲平原泥炭沼泽环境以还原-弱还原条件为主; 在崖北凹陷潮

坪潮上带-潮间带泥炭沼泽环境的泥岩样品中, $V/(V+Ni)$ 值介于 0.6 到 0.65 之间, V/Cr 值介于 0.2 到 0.5 之间 (图 2), Pr/Ph 值介于 2 到 2.4 之间 (表 3), 可以得到崖城组潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽环境以弱还原-弱氧化条件为主。由此得出, 崖北凹陷崖城组地层沉积时期, 沉积水体介质在扇三角洲平原泥炭沼泽中表现为半咸水、还原-弱还原环境, 而在潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽中表现为半咸水、弱氧化-弱还原环境。

表 3 崖北凹陷崖城组煤系烃源岩生物标志化合物统计表

Table 3 Content of biological compounds of coal measures source rocks in Yacheng Formation of Yabei depression

层位	深度/m	$nC_{21}-/nC_{22}+$	$(nC_{21}+nC_{22})/$ $(nC_{28}+nC_{29})$	C-max(主峰碳)	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈
崖一段	3 372.3	2.11	2.36	nC ₂₁	2	2.53	1.09
崖二段	3 724.1	1.87	2.21	nC ₂₁	2.4	1.32	0.88
崖三段	3 859.6	1.23	1.75	nC ₂₁	3.2	3.13	1.34

2.4 沉积环境控制煤系烃源岩的发育

适宜的沉积古地理环境为沼泽发育、植物繁殖和泥炭聚集提供了天然场所,进而控制着煤系烃源岩的空间展布、有机质丰度和显微组分等。

崖三段沉积时期,崖北凹陷处于断陷早期,水体相对较浅,主要发育扇三角洲相沉积体系,扇三角洲平原沉积相相对较广,其中煤系烃源岩主要形成于扇三角洲平原河道间泥炭沼泽环境,再加上此时期构造运动相对平稳,煤系烃源岩的分布范围较广。扇三角洲平原分流河道的往复迁移频繁,对前期的沉积具有侵蚀破坏作用,因而形成的煤层较薄且多呈分叉状分布。该环境下形成的煤系烃源岩显微组分在全岩中所占的比例很低,主要仍为镜质组(表 2),同时可见小型藻类,反映了水下沉积环境,但有机质含量低,可能与水体流动性弱或陡坡带不利于有机质沉积有关,从而导致有机质丰度相对较低,生烃潜力较差。

崖一、二段沉积时期,凹陷处于断陷活动剧烈期,差异构造活动导致断陷区域海平面相对持续上升,沉积环境以潮坪-泻湖体系为主,泥炭沼泽环境相对不发育,可能仅在凹陷南侧潮上带-潮间带有薄煤层局部分布,而潮坪潮上带-潮间带环境中,若泥炭堆积速率和海平面上升的速率一致时,堆积的泥炭层较厚,易形成厚煤层,若二者速率不一致时,形成的煤层一般较薄。该类型煤系烃源岩显微组分以镜质组为主,富氢组分含量较多(表 2),有机质丰度相对较高,生烃潜力好,因为突发性海侵背景下沉积的崖二段泻湖相泥岩中含有大量无定性有机质和浮游藻类,可作为优质烃源岩的重要补充。

3 崖北凹陷崖城组煤系烃源岩发育的主控因素

沉积环境从根本上控制着煤系烃源岩的发育,因而地质历史时期下沉积环境的控制因素同样控制着煤系烃源岩的发育(李会军等,2004),其中古气候

条件提供了煤系烃源岩发育的物质基础,相对海平面变化影响着煤系烃源岩的展布情况及保存条件,古构造则是具体聚煤盆地形成和演化的主要控制因素。

3.1 古气候条件

琼东南盆地古新世和始新世处于比较干燥炎热的中亚热带型气候,一方面不利于植物的发育,另一方面使得植物遗体分解速度加快,导致煤系烃源岩有机质的物质来源减少,烃源岩发育较差。始新世-渐新世早期,全球经历了一次降温事件,使得炎热干燥的气候变为适宜植物繁盛的温暖潮湿气候,由所测的 Sr/Cu 值(王随继等,1997)也可以看出,植物大量繁殖,为煤系烃源岩发育提供了丰富的有机质来源。到中渐新世距今 29 Ma 发生了一次较大幅度的降温(吴国瑄等,2003),陵水期气候变得冷而干燥,限制了古植物的大量繁殖,使得该时期煤系烃源岩发育较差。

3.2 相对海平面变化

相对海平面变化影响着煤系烃源岩的展布情况及保存条件。一般认为,地化资料和古生物资料可以推断某地质历史时期相对海平面的变化情况。当海平面上升、水体加深时,Sr/Ba 值升高,有孔虫丰度以及心球藻属、半囊藻属等海相生物化石含量升高,由此得出崖北凹陷崖城组海平面变化情况(图 2)。结合测井资料,可以看出 7 层煤中 6 层煤发育于海平面上升过程中,仅有 1 层煤发育于海平面下降过程中,即本区主要为海侵成煤。障壁体系在海侵初期逐渐泥炭沼泽化,泥炭在随后的大规模海侵中很快处于还原环境,继而形成煤系烃源岩。从海平面变化角度,海侵煤发生在海退与海进的转换时期,位置受滨海线的控制。由煤系烃源岩热解实验得到的有机质丰度可以看出源岩有机质丰度高时主要处于研究区海平面较高位置时期(图 2)。该时期凹陷内部覆水程度深,较好地隔绝了氧气与堆积泥炭的接触,形成利于煤系烃源岩保存下来的还原环境。

综上所述,地质历史时期,在海平面位置较高且

正处于海侵过程中时易形成高丰度的煤系烃源岩，这与人总结的高丰度烃源岩形成于最大海侵时海域面积最大时期的观点不谋而合(邵龙义等, 2008, 2009)。

3.3 古构造

古构造是作用于聚煤盆地诸多因素中的主导因素,从构造观点出发,可以把聚煤盆地看作为一种特殊的构造形迹。煤层的形成常常出现在一场剧烈的地壳运动之后,聚煤盆地也往往分布于稳定陆块的前缘活动带,或隆起造山带的前缘拗陷带(王双明等,1999; 程爱国等,2001)。琼东南盆地处于欧亚板块南缘的活动带,且崖城组发育期正好处于盆地断陷高峰期之后,崖北凹陷为盆地内发育的次级半地堑凹陷,即为小型的断陷盆地,因此崖北凹陷崖城组沉积时期易发生聚煤作用。

4 崖北凹陷崖城组煤系烃源岩发育模式

崖北凹陷崖城组发育时期,古气候条件、相对海平面变化和古构造影响着沉积环境中的生物生产率及氧化还原程度,进而控制着煤系烃源岩的发育。张长江等(2012)总结出 P、Cr、Ni、Cu、Zn 等元素为生物发育的营养型元素,元素含量越高反映出具有越高的生物生产率。由图 7 可以看出崖三段扇三角洲河道间泥炭沼泽形成的煤系烃源岩生物生产率较低,而崖二段潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽形成的煤系烃源岩生物生产率较高。

由此可以得到崖北凹陷崖城组煤系烃源岩两种发育模式:一是扇三角洲平原河道间泥炭沼泽环境中水体的还原程度起到了主导作用,还原条件使得

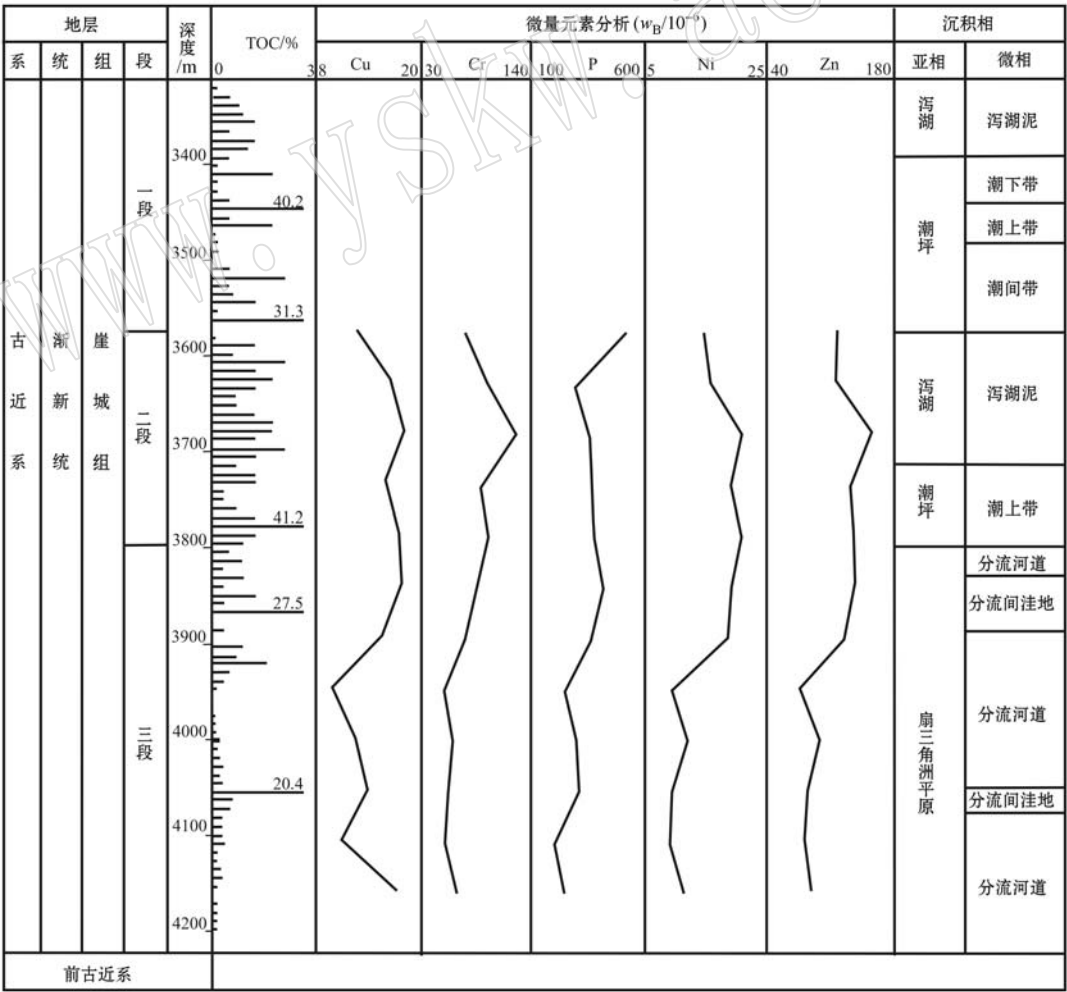


图 7 P1 井微量元素纵向分布特征
Fig.7 The vertical distribution of rare elements in well P1

含量较少的动植物遗体等有机质较好地保存下来,形成煤系烃源岩;二是潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽环境中高生物生产率为主导作用,尽管水体呈弱氧化性,但由于生物生产率高,使得煤系烃源岩的形成成为可能。

5 结论

(1) 崖北凹陷崖城组煤系烃源岩主要形成于半咸水、还原-弱还原的扇三角洲平原河道间泥炭沼泽环境和半咸水、弱还原-弱氧化的潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽环境。

(2) 崖北凹陷崖城组发育时期,沉积环境、古气候条件、相对海平面变化以及古构造控制煤系烃源岩的发育,其中适宜的沉积环境为沼泽发育、动植物繁殖和泥炭聚集提供了天然场所,进而控制着煤系烃源岩中有机质类型、有机质丰度、显微组分及煤层的厚度,古气候条件提供了煤系烃源岩发育的物质基础,相对海平面变化影响着煤系烃源岩的展布情况及保存条件,古构造则是聚煤盆地形成和演化的主要控制因素。

(3) 由煤系烃源岩发育环境及主控因素,得出了崖北凹陷崖城组煤系烃源岩的两种发育模式,一是在扇三角洲平原河道间泥炭沼泽环境中水体的还原性起主导作用,二是在潮坪潮上带-潮间带泥炭沼泽环境中高生物生产率为主导因素。

References

- Cai Xunyu, Wei Baodong and Zhao Peirong. 2005. The charactorisic of marine source rocks in the south[J]. *Natural Gas Industry*, 25(3): 20~22, 193~194(in Chinese).
- Chen Jianfa, Zhang Shuichang, Sun Shengli, *et al.* 2006. The main developing factors of high quality source rocks of marine carbonate[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(3): 467~472(in Chinese).
- Cheng Aiguo and Wei Zhendai. 2001. Sequence stratigraphy and coal accumulation of Late Paleozoic coal basins in North China[J]. *Coal Geology*, 13(2): 8~9, 12, 117(in Chinese).
- Dymond J, Suess E and Mitch L. 1992. Barium in deep-sea sediment: A geochemical proxy for paleoproductivity[J]. *Paleoceanography*, 7(2): 163~181.
- Francois R, Honjo S, Manganini S J, *et al.* 1995. Biogenic barium fluxes to the deep sea: Implications for paleoproductivity reconstruction[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(2): 289~303.
- Hedges J I and Keil R J. 1995. Sedimentary organic matter preservation: an assessment and speculative synthesis[J]. *Marine Chemistry*, 49(2~3): 81~115.
- Huang Baojia and Dong Weiliang. 2000. Identification mark of coal-type gas in Ying-Qiong basin[J]. *Natural Gas Industry*, 20(1): 23~27 (in Chinese).
- Jones B J and Manning A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 111(1): 111~129.
- Li Huijun, Wu Tairan, Wu Bo, *et al.* 2004. The controlling factors of deep clastic reservoir in China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 23(4): 76~82(in Chinese).
- Li Mingxing, He Jiaxiong and Chen Weihuang. 2000. Identification mark of coal-type gas in Ying-Qiong basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 14(6): 33~40(in Chinese).
- Li Tianyi, He Sheng and Yang Zhi. 2008. The main developing factors and depositional environment of marine high quality source rocks[J]. *Geological Science and Technology Information*, 27(6): 63~70(in Chinese).
- Li Xinjing, Lü Zonggang, Dong Dazhong, *et al.* 2009. Geological conditions of shale gas in North America[J]. *Natural Gas Industry*, 29(5): 27~32, 135~136(in Chinese).
- Li Ying, Zhang Gongcheng, Lü Dawei, *et al.* 2011. Developing environment of coal and depositional characteristics of Yacheng formation in Qiongdongnan Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 39(1): 1~5 (in Chinese).
- Liu Haiyan, Lü Dawei, Li Zengxue, *et al.* 2012. Tectonic evolution and depositional environment of Qiongdongnan Basin[J]. *Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 31(5): 86~92(in Chinese).
- Miao Jianyu, Zhao Jianshe, Li Wenhui, *et al.* 2005. The depositional environment of source rocks in the south of Erdos Basin[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science)*, 35(6): 771~776(in Chinese).
- Moore G T and Demaison G J. 1980. Anoxic environment and oil source bed genesis[J]. *Organic Geochemistry*, 2(1): 9~31.
- Pedersen T F and Calvert S E. 1990. Anoxia vs Productivity: what controls the formation of organic-carbon-rich sediments and sedimentary rocks? [J]. *Aapg Bulletin*, 74(4): 454~466.
- Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, *et al.* 2008. Offshore-type coal-bearing strata sedimentology and sequence stratigraphy Progress[J]. *Palaeogeography*, 10(6): 561~570(in Chinese).
- Shao Longyi, Lu Jing, Wang Hao, *et al.* 2009. China coal measures sequence stratigraphy progress[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 904~914(in Chinese).
- Shi Chunhua, Huang Qiu and Yan Jiaxin. 2001. Geochemistry of anoxic environment of Qixia Formation in Laibin[J]. *Geology-Geochemistry*, 29(4): 35~39(in Chinese).
- Tyson R V and Pearson T H. 1991. Modern and ancient continental shelf anoxia[J]. *Geological Society of Special Publication*, 58(1): 1~11.

- 470~482.
- Wan Xiaojiao, Liu Wencan, Li Guobiao, *et al.* 2003. Cretaceous black shale and dissolved oxygen content——A case study in southern Tibet[J]. *Geology in China*, 30(1): 36~47(in Chinese).
- Wang Shuangming and Zhang Yuping. 1999. Tectonic evolution and coal law in erdos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(S1): 147~155 (in Chinese).
- Wang Suiji and Huang Xingzhen. 1997. Paleoclimate and evolution of trace elements of Hetao Formation in Qinyang depression[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(1): 65~70(in Chinese).
- Wu Guoxuan, Qin Jungan and Mao Shaozhi. 2003. Pollen records of Oligocene deep-sea phase in South China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 48(17): 1 868~1 871(in Chinese).
- Wu Yukun, Hu Mingyi, Liu Zhifeng, *et al.* 2013. Distribution of coal measures and depositional facies of Yacheng forming in Yabei depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 24(3): 582~590(in Chinese).
- Yu Xiaoguo and Fu Ning. 2000. Characteristics of oil and gas in Ya13-1 gasfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 27(1): 42~45, 13~14(in Chinese).
- Zeng Guoshou and Xu Menghong. 1990. *Petroleum Geochemistry*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- Zhang Baomin, Zhang Shuichang, Bian Lizeng, *et al.* 2007. Development mode of marine quality source rocks of Neoproterozoic-Lower Paleozoic[J]. *Chinese Science Bulletin*, (A01): 58~69(in Chinese).
- Zhang Changjiang, Liu Guangxiang, Zeng Huasheng, *et al.* 2012. The controlling factors and developing environment of Permian source rocks in Chuanku[J]. *Natural Gas Geoscience*, 23(4): 626~635(in Chinese).
- Zhang Gongcheng, He Yuping and Shen Huailei. 2012. Distribution of coal measures of Yacheng forming in Yabei depression[J]. *Natural Gas Geoscience*, 23(4): 654~661(in Chinese).
- Zhang Gongcheng, Li Zengxue, He Yuping, *et al.* 2010. Geochemistry of coals in Qiongdongnan[J]. *Natural Gas Geoscience*, 21(5): 693~699(in Chinese).
- Zhang Shuichang, Zhang Baomin, Bian Lizeng, *et al.* 2005. The developing factors of marine source rocks in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 39~48(in Chinese).
- 黄保家,董伟良. 2000. 南海莺-琼盆地煤型气的鉴别标志及气源识别[J]. *天然气工业*, 20(1): 23~27.
- 李会军,吴泰然,吴波,等. 2004. 中国优质碎屑岩深层储层控制因素综述[J]. *地质科技情报*, 23(4): 76~82.
- 李明兴,何家雄,陈伟煌. 2000. 莺-琼盆地天然气成因类型及气源剖析[J]. *中国海上油气*, 14(6): 33~40.
- 李天义,何生,杨智. 2008. 海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析[J]. *地质科技情报*, 27(6): 63~70.
- 李新景,吕宗刚,董大忠,等. 2009. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. *天然气工业*, 29(5): 27~32, 135~136.
- 李莹,张功成,吕大炜,等. 2011. 琼东南盆地崖城组沉积特征及成煤环境[J]. *煤田地质与勘探*, 39(1): 1~5.
- 刘海燕,吕大炜,李增学,等. 2012. 琼东南盆地构造演化与含煤沉积作用研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 31(5): 86~92.
- 苗建宇,赵建设,李文厚,等. 2005. 鄂尔多斯盆地南部烃源岩沉积环境研究[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 35(6): 771~776.
- 邵龙义,鲁静,汪浩,等. 2008. 近海型含煤岩系沉积学及层序地层学研究进展[J]. *古地纪学报*, 10(6): 561~570.
- 邵龙义,鲁静,汪浩,等. 2009. 中国含煤岩系层序地层学研究进展[J]. *沉积学报*, 27(5): 904~914.
- 施春华,黄秋,颜佳新. 2001. 广西来宾栖霞组缺氧沉积环境地球化学特征[J]. *地质地球化学*, 29(4): 35~39.
- 万晓樵,刘文灿,李国彪,等. 2003. 白垩纪黑色页岩与海水含氧量变化——以西藏南部为例[J]. *中国地质*, 30(1): 36~47.
- 王双明,张玉平. 1999. 鄂尔多斯侏罗纪盆地形成演化和聚煤规律[J]. *地学前缘*, 6(S1): 147~155.
- 王随继,黄杏珍. 1997. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. *沉积学报*, 15(1): 65~70.
- 吴国瑄,覃军干,茅绍智. 2003. 南海深海相渐新统孢粉记录[J]. *科学通报*, 48(17): 1 868~1 871.
- 吴玉坤,胡明毅,刘志峰,等. 2013. 琼东南盆地崖北凹陷崖城组沉积相及煤系烃源岩分布[J]. *天然气地球科学*, 24(3): 582~590.
- 于晓果,傅宁. 2000. 崖13-1气田油气混合特征研究[J]. *石油勘探与开发*, 27(1): 42~45, 13~14.
- 曾国寿,徐梦虹. 1990. *石油地球化学*[M]. 北京:石油工业出版社.
- 张宝民,张水昌,边力曾,等. 2007. 浅析中国新元古-下古生界海相烃源岩发育模式[J]. *科学通报*, (A01): 58~69.
- 张长江,刘光祥,曾华盛,等. 2012. 川西地区二叠系烃源岩发育环境及控制因素[J]. *天然气地球科学*, 23(4): 626~635.
- 张功成,何玉平,沈怀磊. 2012. 琼东南盆地崖北凹陷崖城组煤系烃源岩分布及其意义[J]. *天然气地球科学*, 23(4): 654~661.
- 张功成,李增学,何玉平,等. 2010. 琼东南盆地煤地球化学特征[J]. *天然气地球科学*, 21(5): 693~699.
- 张水昌,张宝民,边力曾,等. 2005. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. *地学前缘*, 12(3): 39~48.

附中文参考文献

- 蔡勋育,韦宝东,赵培荣. 2005. 南海海相烃源岩特征分析[J]. *天然气工业*, 25(3): 20~22, 193~194.
- 陈践发,张水昌,孙省利,等. 2006. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素[J]. *地质学报*, 80(3): 467~472.
- 程爱国,魏振岱. 2001. 华北晚古生代聚煤盆地层序地层与聚煤作用关系的探讨[J]. *中国煤田地质*, 13(2): 8~9, 12, 117.