

doi:10.3799/dqkx.2016.087

鄂尔多斯盆地南部延长组层序地层格架 中烃源岩特征及控制因素

周翔¹, 何生^{1*}, 陈召佑², 刘萍³, 王芙蓉¹

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国石化华北分公司勘探开发研究院, 河南郑州 450006

3. 中国石油大庆油田分公司采油五厂, 黑龙江大庆 163000

摘要: 三叠系延长组是鄂尔多斯盆地中生界重要的含油气层位, 属典型的岩性油藏, 具有含油层位多、成藏关系复杂的特点, 其中烃源岩发育特征对岩性油藏分布具有重要的控制作用。基于露头 and 测井资料, 将鄂尔多斯盆地南部延长组自下而上划分为 SQ1、SQ2 和 SQ3 三个三级层序, 研究了层序地层格架控制下烃源岩的发育特征及其控制因素。研究结果表明: 主力烃源岩赋存于湖侵体系域, 以长 7 段为代表, 属湖泊扩张至最大湖泛期物源补给欠补偿时半深湖—深湖相沉积, 缺乏大量陆源碎屑注入而发育腐泥组占绝对优势的高有机质丰度烃源岩。高位体系域亦发育有烃源岩, 如长 9 段和长 6-4+5 段, 属最大湖泛期后物源补给超过基准面上升而向湖盆推进的滨湖相、浅湖相沉积, 陆源碎屑输入致其表现为腐植型占优势且具较高有机质丰度的烃源岩。油源对比显示延长组油源主要来自晚三叠世延长组最大湖泛期形成的长 7 段湖侵体系域, 说明不同体系域烃源岩对延长组油藏的贡献存在差异。层序地层沉积动力背景下体系域可容纳空间垂向与侧向变化, 不仅决定体系域内部沉积相类型展布, 更直接控制体系域内烃源岩有机质丰度和类型。研究层序地层格架中不同体系域内烃源岩赋存的差异性, 有助于在层序沉积背景下预测和评价盆地内烃源岩分布规律。

关键词: 鄂尔多斯盆地南部; 三叠系延长组; 层序地层学; 烃源岩; 石油地质。

中图分类号: P618.130.2

文章编号: 1000-2383(2016)06-1055-12

收稿日期: 2015-12-12

Characteristics and Controlling Factors of Source Rocks in Yanchang Formation Sequence Framework, Ordos Basin

Zhou Xiang¹, He Sheng^{1*}, Chen Zhaoyou², Liu Ping³, Wang Furong¹

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Exploration and Production Research Institute, Huabei Company, SINOPEC, Zhengzhou 450006, China

3. The 5th Oil Production Plant, Daqing Oilfield Company, PetroChina, Daqing 163000, China

Abstract: The Triassic Yanchang Formation, the most important oil and gas horizon in Ordos Basin, is a typical lithologic reservoir characterized by mass oil-bearing and complex hydrocarbon accumulation, and characteristics of its source rocks are the main controlling factors of lithologic reservoir distribution. Based on outcrops and well log data, this paper divides the Yanchang Formation into three sequences including SQ1, SQ2 and SQ3 upwards to research the characteristics and controlling factors of source rocks within sequence framework. The results show that the primary source rock occurred in expansive system tract, and is characterized by Chang7 source rock belonging to semi-deep lake and deep lake underfilled type deposits during the lake maximum flood period; meanwhile, the sapropel-type kerogen source rocks with a higher organic matter abundance are dominant due to the lack of terrigenous clastic supply. There are also source rocks in highstand system tract such as Chang9 and Chang6 to Chang 4+5 belonging to the deposition of lake-shore, shallow lake facies, in which terrigenous clastic supply

基金项目: 国家科技重大专项项目(No. 2016ZX05005-001); 高等学校学科创新引智计划资助项目(No. B14031)。

作者简介: 周翔(1988-), 男, 博士研究生, 从事储层地质与有机地球化学方面的研究工作。E-mail: zhouxiang2206@163.com

* **通讯作者:** 何生, E-mail: shenghe@cug.edu.cn

引用格式: 周翔, 何生, 陈召佑, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地南部延长组层序地层格架中烃源岩特征及控制因素. 地球科学, 41(6): 1055-1066.

makes humic type source rock dominant also with a relative high organic matter abundance. The crude oil of Yanchang Formation in the study area is primarily from Chang7 within expansive systems tract during maximum flooding period of Late Triassic according to crude oil correlation, which implies that contributions of source rocks in different system tracts to Yanchang reservoir vary. The vertical and lateral change of accommodation under sequence stratigraphic sedimentary dynamics setting not only decides the distribution of sedimentary facies types, but also directly controls the abundance and type of organic materials within system tracts. The difference of source rock occurrences between system tracts in sequence framework facilitates prediction and evaluation of distribution laws of source rocks in the sedimentary setting of basin.

Key words: southern Ordos basin; Triassic Yanchang Formation; sequence stratigraphy; source rock; petroleum geology.

自 20 世纪 70 年代 Vail 提出层序地层学基本概念和方法以来,层序地层学已成为油气勘探中广泛应用的技术(姜在兴,2010),通过钻井、地震、露头资料分析识别地层中各种关键性地质界面,建立沉积盆地等时地层格架,进行沉积体系展布、沉积特征及储集层分布预测和描述已成为油气勘探领域重要的途径和手段(常艳艳等,2014;朱伟林等,2015).而应用层序地层学进行的烃源岩质量评价及其形成控制因素研究则相对薄弱(李美俊和周东升,2003),国外学者对这方面的研究则较早(Passey *et al.*, 1990;Pasley *et al.*, 1991;Katz and Pratt, 1993;Tobias *et al.*, 2001),并认识到烃源岩发育与层序格架具有良好的对应关系.Creaney and Passy (1993)和 Herbin *et al.* (1995)应用层序地层学解释了海相烃源岩中 TOC 在垂向上的变化规律,认为最大海泛面附近烃源岩有机质丰度远高于层序内其他部位.Peters *et al.* (2000)通过建立曼哈坎三角洲和麦加锡斜坡地球化学层序地层模型,识别出高水位体系域平原煤层、低水位体系域煤系页岩、水进体系域烃源岩等多套烃源岩,认识到不同体系域内烃源岩有机质类型存在明显差异.Isaksen *et al.* (2002)研究发现不同体系域烃源岩中原始沉积有机质的差异导致相应烃类产物的不同,形成于海侵体系域中的泥质烃源岩以藻类输入为主,其烃类产物以油为主,生烃能力最好.针对我国陆相湖盆水体浅、多物源、相变快、湖平面升降变化频繁的地质特点,前人也进行了相关研究,但这些研究主要集中在烃源岩地化特征描述及利用层序格架进行烃源岩分布预测上(龚丽等,2014;吴文祥等,2015),对不同体系域内烃源岩质量差异及其形成控制因素的研究相对较少,而体系域内可容纳空间变化、沉积环境差异是造成烃源岩有机质丰度和类型不同的根本原因(刘洛夫等,2002;赵彦德等,2008).因此开展层序格架内烃源岩研究,探讨不同体系域内烃源岩地球化学特征差异及其成因,对盆地内烃源岩分布预测及油气成藏贡献评价具有重要意义.本文采用有机地

球化学、有机岩石学和沉积学相结合的研究手段,在建立层序地层格架的基础上,以层序和体系域为地层单位,探讨了层序地层格架内烃源岩有机地球化学特征差异及其形成控制因素.

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,是一个形成于太古界稳定基底上的“稳定沉降、拗陷迁移、扭动明显”的多旋回沉积型克拉通盆地.上三叠统延长组是内陆拗陷湖盆发育阶段沉积的一套厚为 1 000~1 500 m 的河流—湖泊相地层,也是盆地内最重要的含油层系,发育多套有利生储盖的组合配置.前人根据沉积旋回、岩性组合及凝灰岩标志层将延长组自下而上划分为 10 个油层组,其中长 9—长 4+5 油层组沉积的巨厚层状暗色泥岩、碳质泥岩、油页岩是延长组最重要的烃源岩(张文正等,2008),也是控制延长组岩性油藏分布的关键(屈红军等,2011).研究区位于天环拗陷南端(图 1),紧邻三叠系湖盆沉积中心,延长组暗色泥岩厚达 300 m,具有良好的勘探前景.

2 延长组层序地层特征研究

2.1 层序界面类型

层序界面识别是层序地层学研究的重要内容,正确识别不同级次层序顶底界面是层序划分的基础和前提(王华等,2010).中生界延长组是鄂尔多斯盆地内重要的含油气层位,具有丰富的油气资源和有利的生储盖组合条件,笔者根据盆地周边华亭—纳水河延长组剖面观察,结合盆地内岩心和测井资料,认为延长组内层序界面识别标志主要有:由构造运动造成的延长组顶底区域不整合面;由河道或三角洲分流河道对下伏地层强烈冲刷侵蚀作用形成的不整合界面(图 2a, 2c);岩性—岩相突变面及区域性水进形成的最大湖泛面(图 2b, 2d).

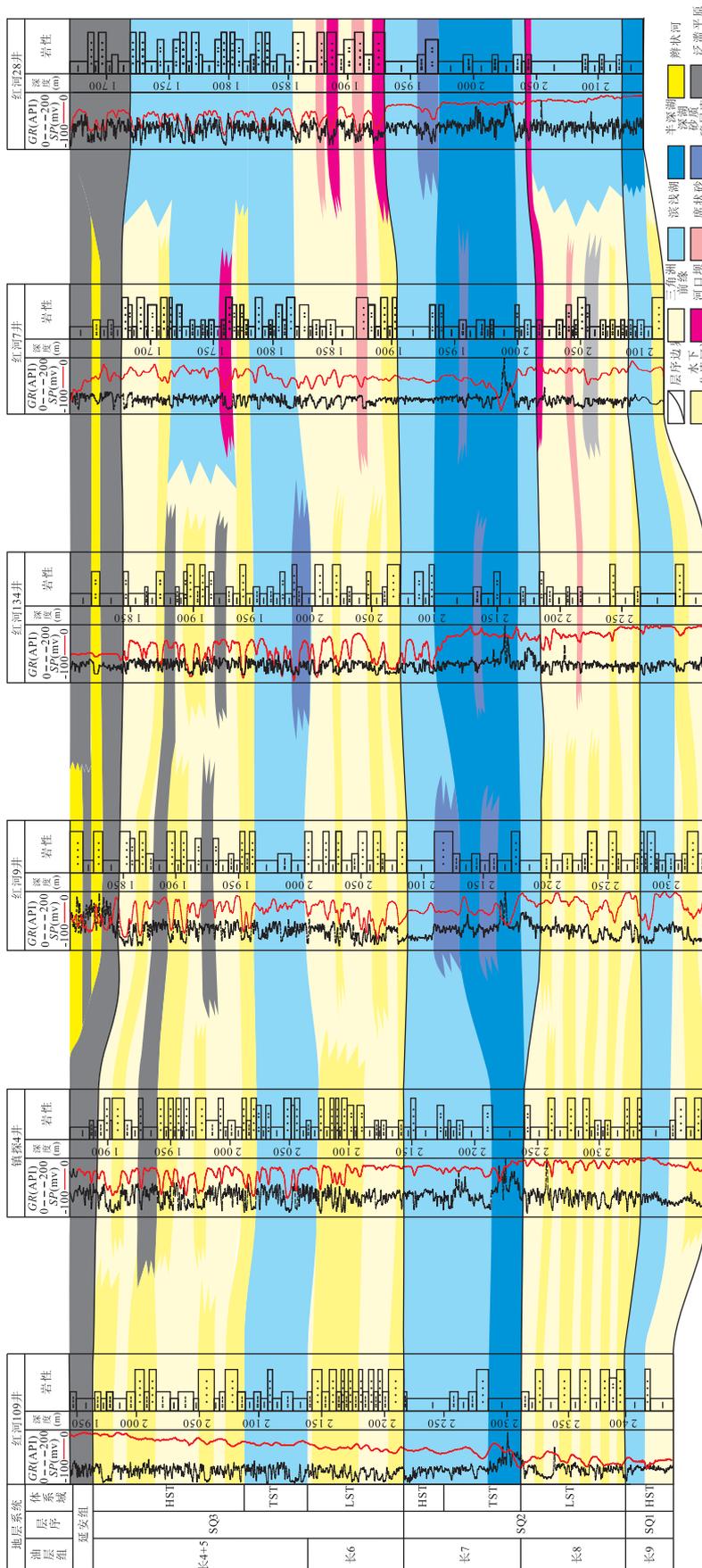


图3 研究区延长组层序地层对比剖面
 Fig. 3 Sequence stratigraphic profile of the Yanchang Formation in study area

剖面位置见图1, 岩性图例同图1

者结合层序界面特征将延长组自下而上划为 3 个三级层序(图 1),分别对应湖盆的形成、发展和萎缩消亡. SQ1 层序顶底边界分别为下伏纸坊组顶部不整合面及长 8 底部冲刷侵蚀面,发育湖盆初始扩张期冲积扇、辫状河三角洲沉积,沉积厚度为 200~300 m. SQ2 层序顶界为长 6 底部冲刷侵蚀面,代表湖盆发育鼎盛时期滨浅湖、半深湖—深湖相以及盆缘局部辫状河三角洲沉积,厚度为 300~400 m;其中,长 7 油页岩为该层序特征沉积层段. SQ3 层序顶界为延安组底部不整合面,发育湖盆抬升萎缩期滨浅湖、泛滥平原和三角洲沉积,厚度为 200~300 m(图 3).

3 层序地层烃源岩地球化学特征

3.1 烃源岩有机质丰度

烃源岩中丰富的有机质是形成油气藏的物质基础,有机质丰度与烃源岩岩性具有良好的相关性,由岩石类型及其组合变化形成的垂向沉积韵律是造成烃源岩有机质丰度非均质性的根本原因(李丕龙, 2004). 延长组烃源岩以深灰色、灰黑色湖相泥岩、碳

质泥岩、油页岩为主,非均质性较强,不同层序体系域内均有发育,其中 SQ1、SQ3 层序高位体系域和 SQ2 层序湖侵体系域烃源岩分布范围较广、质量较好,是研究区主力烃源岩发育层段. 不同层序样品测试数据的统计结果表明, SQ1 高位体系域烃源岩以灰色、深灰色泥岩为主, TOC 和 S_1+S_2 值分布范围较为广泛,平均值分别为 2.98% 和 12.36 mg/g, 氯仿沥青“ A ”和总烃含量较高,分别为 0.23% 和 850.39 $\mu\text{g/g}$, 总体上为中等—好烃源岩(表 1, 图 4).

SQ2 层序湖侵体系域烃源岩以灰黑色泥岩和灰褐色油页岩为主,有机质丰度最高, TOC 和 S_1+S_2 平均值分别为 8.16% 和 35.42 mg/g, 氯仿沥青“ A ”和总烃含量分别为 0.51% 和 1 299.36 $\mu\text{g/g}$, 均达到好烃源岩标准. SQ3 层序高位体系域烃源岩以深灰色、灰黑色泥岩、碳质泥岩为主,有机质丰度相对较低, TOC 和 S_1+S_2 平均值分别为 1.52% 和 2.62 mg/g, 氯仿沥青“ A ”和总烃值分别为 0.09% 和 245.23 $\mu\text{g/g}$, 属中等—好烃源岩. 其中 SQ2 层序湖侵体系域半深湖—深湖相烃源岩有机质丰度明显高于 SQ1 层序高位体系域三角洲前缘和 SQ3 层序

表 1 研究区不同层序主力烃源岩有机质丰度分布

Table 1 Organic matter abundance distribution of primary source rocks within different sequences in study area

烃源岩类型	TOC(%)		$S_1+S_2(\text{mg/g})$		沥青“ A ” (%)		总烃含量($\mu\text{g/g}$)		评价结果
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	
SQ3-HST	0.32~15.10	1.52	0.19~74.83	0.83	0.02~0.72	0.09	4.58~598.81	245.23	中等-好烃源岩
SQ2-EST	0.28~34.91	8.16	0.10~125.04	35.42	0.04~1.28	0.51	35.42~4 539.06	1 299.36	好烃源岩
SQ1-HST	0.23~21.59	2.98	0.18~66.03	12.36	0.02~0.70	0.23	53.73~3 763.99	850.39	中等-好烃源岩

注: SQ3-HST 的 TOC、 S_1+S_2 值和沥青“ A ”测试样品数均为 31 个, 总烃含量测试样品数为 14 个; SQ2-EST 的 TOC 和 S_1+S_2 值测试样品数均为 47 个, 沥青“ A ”和总烃含量测试样品数均为 20 个; SQ1-HST 的 TOC 和 S_1+S_2 值测试样品数均为 27 个, 沥青“ A ”和总烃含量测试样品数均为 12 个.

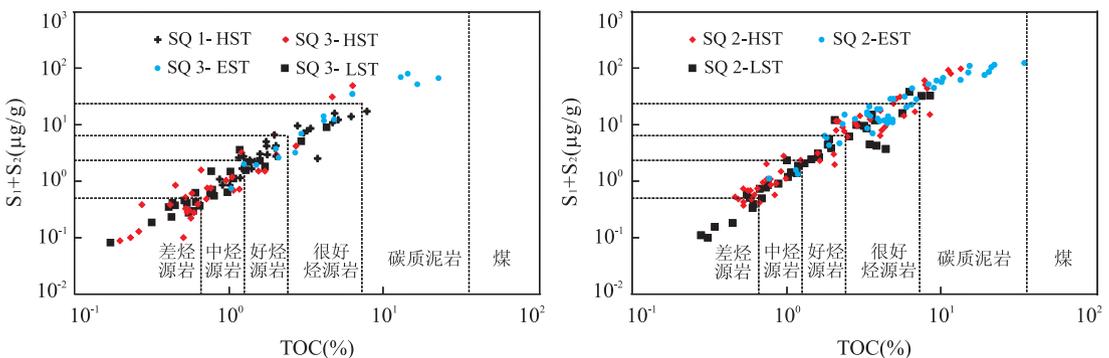


图 4 研究区不同层序内主力烃源岩 TOC 与 S_1+S_2 关系

Fig. 4 Relationships between TOC and S_1+S_2 in primary source rocks within different sequences in study area

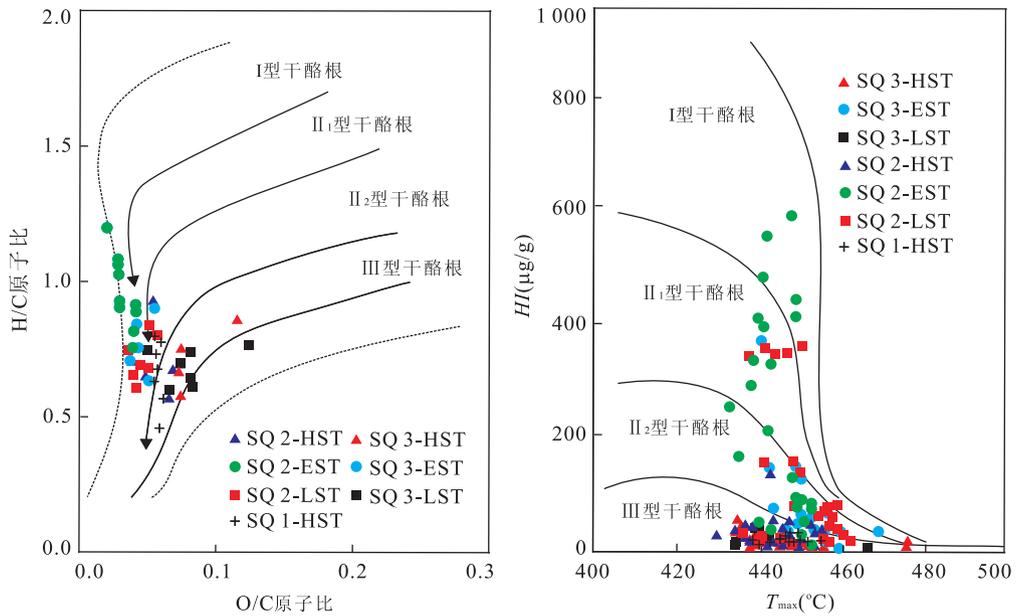


图 5 研究区不同层序主力烃源岩干酪根元素组成及热解参数分类

Fig. 5 Classification of kerogen elementary composition and pyrolysis parameter of primary source rocks within different sequences in study area

泛滥平原、滨浅湖相烃源岩。

3.2 烃源岩有机质类型

丰富的有机质能否生成油气取决于有机质的类型及其所经历的热演化程度,不同类型的有机质生烃能力和烃类产物存在差异(蔡希源,2012),是烃源岩研究的重要内容。干酪根的元素分析和岩石热解分析表明延长组不同层序烃源岩有机质类型较好,总体以 II_1 和 II_2 型为主,其中形成于三角洲前缘、泛滥平原、滨浅湖沉积环境中的SQ1、SQ3层序高位体系域烃源岩母质中陆源高等植物含量较高,干酪根以 II_2 、III型为主(图5);形成于半深湖—深湖相环境中的SQ2层序湖侵体系域烃源岩母质中浮游藻类和低等水生生物含量较高,干酪根以 II_1 、 II_2 型为主,部分为I型。

3.3 烃源岩有机显微组分

延长组烃源岩中含丰富的富氢有机显微组分,不同层序烃源岩有机显微组分组成存在明显差异。SQ1层序高位体系域烃源岩干酪根中壳质组含量最高(图6),为46.2%~51.2%,镜下可见大量孢子体、树脂体和藻类体,腐泥组含量较低,为15%~22%,镜质组含量为20%~28%,表明陆源高等植物对烃源岩母质具有重要贡献。SQ2层序湖侵体系域烃源岩干酪根显微组分中腐泥组、壳质组等有利于生烃的富氢显微组分含量高,其中腐泥组以腐泥无定形体和藻类体为主,含量为34%~42%,明显

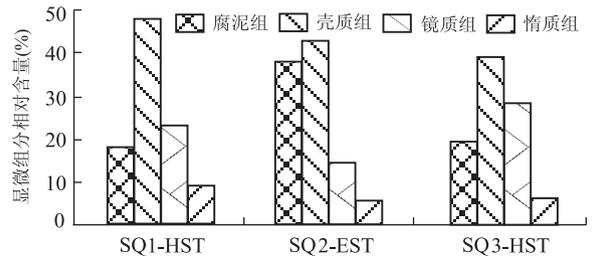


图 6 研究区不同层序主力烃源岩有机显微组分百分含量
Fig. 6 The percent content of organics maceral in primary source rocks within different sequences in study area

高于SQ1、SQ3层序高位体系域烃源岩,壳质组含量为38%~46%,镜质组和惰质组含量较低,分别为20%~25%和6%~12%,表明烃源岩母质以低等水生生物为主。SQ3层序高位体系域烃源岩干酪根中镜质组和惰质组含量分别为20.3%~25.8%和8.6%~18.8%,镜下可见未完全降解的植物碎屑及碎屑镜质体,是高等植物的表皮、维管组织经微生物强烈降解的产物,腐泥组含量较低,为12.5%~25.6%,表明烃源岩母质中陆源高等植物含量较高。

4 烃源岩生烃差异及油源对比

李美俊等(2005)利用层序地层学建立精确、有效的等时地层格架,将传统地球化学中以组段为单位的烃源岩研究细化为以层序、体系域甚至准层序

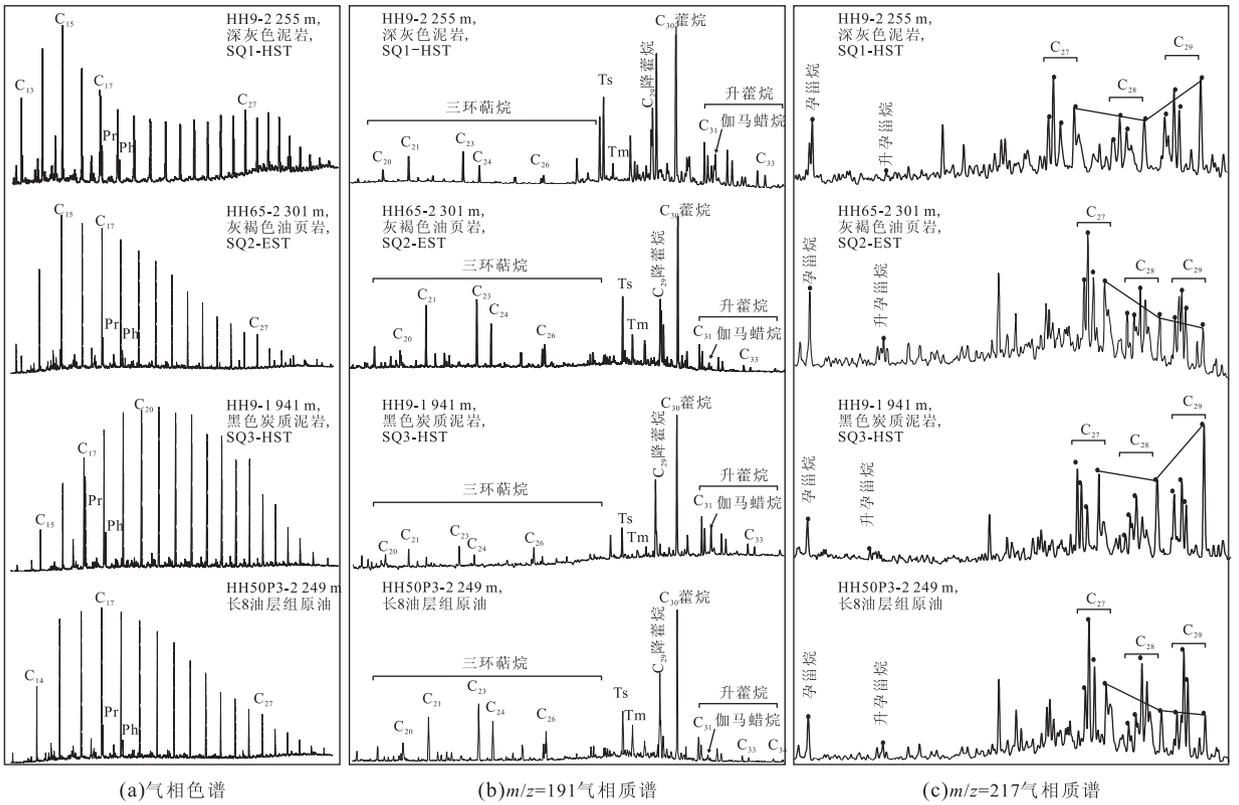


图 7 延长组原油及烃源岩正构烷烃及甾、萜烷特征

Fig. 7 Characteristics of *n*-alkane steranes and terpanes in crude oil and source rocks of Yanchang Formation

组级别,极大地提高了油源对比精度. 延长组不同层序、体系域烃源岩生物标志化合物特征表明各层序内烃源岩母质类型存在差异,具有不同的生烃特征. (1)SQ1 层序高位体系域烃源岩正构烷烃分布完整,饱和烃色谱呈前高双峰型(图 7),主峰碳分布于 $nC_{15} \sim nC_{17}$, $\sum C_{21+22} / \sum C_{28+29}$ 比值为 0.76~2.23, Pr/Ph 值为 0.92~2.85; 萜烷以五环三萜烷含量最高,三环萜烷含量较低,伽马蜡烷指数为 0.08~0.36,表明 SQ1 层序高位域烃源岩形成于淡水条件下弱氧化—弱还原环境中; 甾烷中孕甾烷、升孕甾烷含量较高,同时含有一定量的 4-甲基甾烷,规则甾烷分布呈“V”字形,且 C_{29} 规则甾烷相对含量略高于 C_{27} 规则甾烷,表明母质具低等水生生物、藻类、陆源高等植物混源的特点,且陆源高等植物略占优势,烃源岩同时具有腐殖型和腐泥型两种有机质类型. (2) SQ2 层序湖侵体系域烃源岩正构烷烃分布呈前高单峰型,主峰碳分布于 $nC_{15} \sim nC_{17}$, $\sum C_{21+22} / \sum C_{28+29}$ 比值为 0.86~2.96, Pr/Ph 值为 0.34~1.85; 萜烷中三环萜烷含量较高,为 0.62~1.73,伽马蜡烷指数为 0.02~0.19,表明 SQ2 层序湖侵体系域源岩形成于还原条件下的淡水湖相沉积环境中; 甾烷中孕甾烷、升孕甾烷和 4-甲基甾烷含量较高,

规则甾烷分布呈偏“L”形, C_{27} 规则甾烷相对含量高于 C_{29} 规则甾烷,表明母质中低等水生生物和菌藻类含量较高,有机质类型以腐泥型为主,生烃潜力较高. (3) SQ3 层序高位体系域烃源岩正构烷烃碳数分布呈前高单峰型,主峰碳分布于 $nC_{19} \sim nC_{21}$, $\sum C_{21+22} / \sum C_{28+29}$ 比值为 0.49~2.32, Pr/Ph 值为 0.46~2.67; 萜烷中三环萜烷含量较低,为 0.22~0.89,伽马蜡烷指数为 0.07~0.28,表明 SQ3 层序高位体系域烃源岩形成于微咸水的弱氧化—还原环境中,母质中高等植物含量较高; 甾烷中孕甾烷、升孕甾烷和 4-甲基甾烷含量较低,规则甾烷分布呈反“L”型, C_{29} 规则甾烷相对含量高于 C_{27} 规则甾烷,表明母质为陆源高等植物和浮游藻类混源,且陆源高等植物占绝对优势,以腐殖型有机质为主.

延长组不同层位原油碳数分布均呈前高单峰型,主峰碳分布于 $nC_{15} \sim nC_{17}$, $\sum C_{21+22} / \sum C_{28+29}$ 为 2.56~3.5, Pr/Ph 值为 1.42~1.67; 萜烷中三环萜烷含量较高,其中表征藻类等低等水生生物来源的 $C_{23} \sim C_{29}$ 三环萜烷含量大于 C_{23} 之前的化合物含量,伽马蜡烷指数为 1.58~2.29,表明原油形成于淡水—微咸水沉积环境中; 延长组不同层位原油中均含有丰富的孕甾烷、升孕甾烷和 4-甲基甾烷,(孕甾

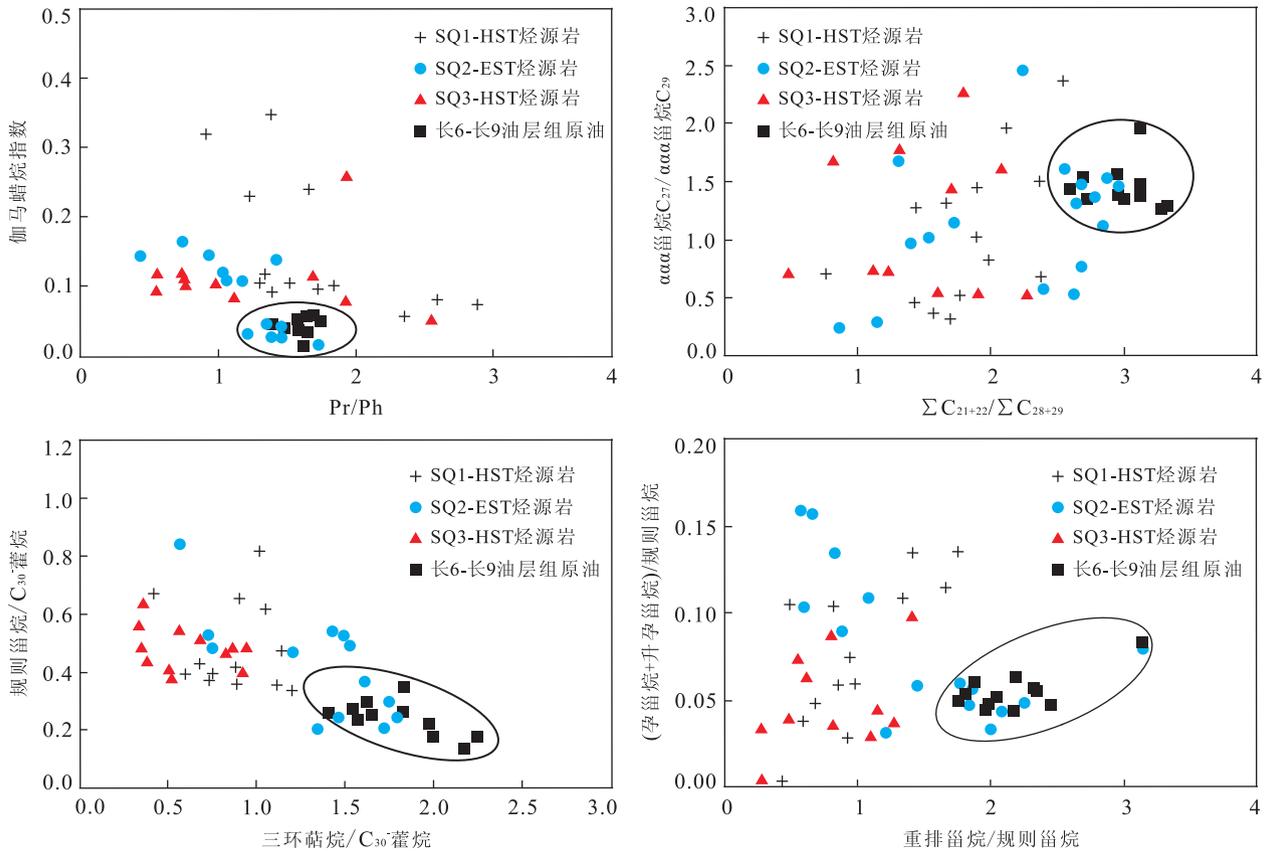


图 8 延长组原油及不同层序烃源岩生物标志化合物参数分布

Fig. 8 Biological marker distribution of crude oil and source rock in Yanchang Formation

烷+升孕萘烷)/规则萘烷和 4-甲基萘烷/规则萘烷分别为 0.04~0.08 和 0.03~0.05, 规则萘烷以 C_{27} 含量最高, 其次是 C_{29} 规则萘烷, 呈偏“L”形分布, 表明原油母质以低等水生生物、菌藻类为主, 同时混入了部分高等植物, 这与 SQ2 层序湖侵体系域暗色泥岩生标特征非常相似, 与 SQ3 层序和 SQ1 层序高位体系域烃源岩存在差异. 综合多种生标参数, 笔者认为 SQ2 层序湖侵体系域中形成于最大湖泛期的灰褐色油页岩与延长组原油具有亲缘关系(图 8), 是延长组主要油源岩, 对油气成藏贡献最大.

5 层序格架中的烃源岩发育控制因素

烃源岩的发育受构造背景、古气候、古生产力、沉积物供给、氧化还原条件等一系列因素影响(姚永坚等, 2013; 谢其锋等, 2014), 其中由相对湖平面升降控制的可容纳空间变化及沉积充填特征差异是形成不同层序、体系域中烃源岩有机质丰度规律性变化的主要原因, 也是造成不同层序、体系域内烃源岩地球化学特征差异的根本因素.

5.1 可容纳空间变化控制有机质丰度的垂向变化

层序格架特征与烃源岩发育具有良好的对应关系, 垂向上有机质丰度分布受可容纳空间及沉积物供给条件控制. (1) 湖盆发育早期, 相对湖平面较低, 可容纳空间较小, 沉积充填速率相对较高, 沉积物以砂质沉积为主, 有机质含量较低, 同时水体较浅, 偏氧化环境不利于有机质的保存, 因此低位体系域很少或基本不发育烃源岩. (2) 随着相对湖平面上升, 湖盆沉积范围扩大、水体加深、可容纳空间持续增加, 而沉积物供给速率远小于可容纳空间的增长速率, 注入湖水中的陆源碎屑物质相对减少, 同时在较高的古生产力条件下, 烃源岩有机质丰度增加. 最大湖泛期附近盆地内可容纳空间达到最大时, 在陆源碎屑供给不足和沉积速率极低的条件下, 形成富有机质的凝缩段沉积, 烃源岩中 TOC、 $S_1 + S_2$ 、HI 均达到最大, 如图 9 中 SQ2 层序湖侵体系域烃源岩的有机质丰度明显高于同一层序低位体系域和高位体系域. (3) 最大湖泛期之后, 物源补给超过湖平面上升, 陆缘碎屑注入增加, 消耗高位期递减增加的可容纳空间以及湖侵期剩余的可容纳空间, 盆缘腐质型、

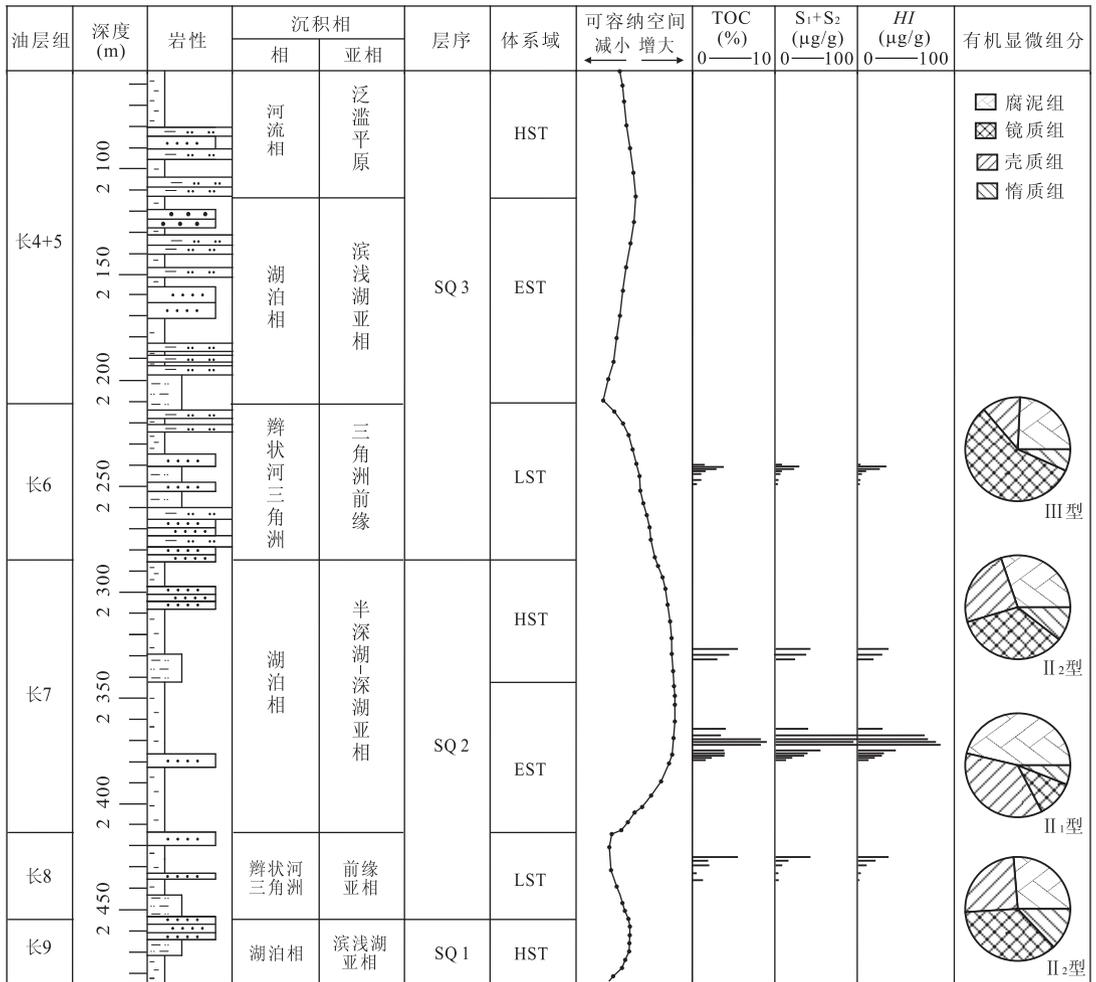


图 9 研究区 HH3 井层序内烃源岩特征综合柱状图

Fig. 9 Sequence stratigraphic column of source rock in HH3 well in study area

岩性图例同图 1

盆内腐泥型与过渡区混合型有机质共存,致使高位体系域发育较高丰度的 II₂ 型烃源岩. 可容纳空间最大的湖侵期有利于烃源岩发育,主要为腐泥型有机质含量高、分布范围广、沉积厚度大的暗色泥岩和油页岩,是陆相湖盆的有利烃源岩发育层段;最大湖泛期之后的高位充填早期亦有混合型烃源岩发育,后期随可容纳空间逐渐减少而以发育储层为主;低位期受限于可容纳空间,少或不发育大规模烃源岩层段.

5.2 沉积环境差异决定烃源岩品质

沉积环境差异是沉积时水动力条件、沉积介质特征、有机质供给等因素的综合反映,也是决定烃源岩品质的主要原因(Carroll and Bohacs, 2001;李红敬等,2012;彭金宁等,2014;李浩等,2015). 通常水动力条件弱、沉积物处于氧化还原界面以下的沉积环境有利于烃源岩保存,相应的烃源岩中有机质丰

度也较高. 岩心观察及地化特征对比表明(表 2): (1)低位体系域中三角洲前缘和高位体系域晚期泛滥平原沉积时水体较浅,沉积物颜色较浅,生物扰动强烈,岩心中常见垂直层面分布的居住迹、逃逸迹,反映沉积时水动力条件相对较强,Pr/Ph 值为 1.68~2.96,基本处于氧化-还原界面附近,不利于有机质的保存,烃源岩中有机碳含量也相对较低;(2)湖侵体系域中半深湖-深湖沉积时水体深度较大,其中 SQ2 层序湖侵体系域沉积时古水深为 50~120 m(庞军刚等,2014),岩心中普遍发育薄层凝灰岩,最厚可达 1 m,表明其沉积时水动力条件极弱,且在较深的水体中形成了良好的还原环境,有利于沉积有机质的保存,相应的烃源岩中有机碳含量最高;(3)高位体系域早期滨浅湖沉积水体深度增加,水动力条件较弱,生物活动明显减弱,以平行层面的觅食迹、漫游迹为主,沉积物颜色明显加深,Pr/Ph

表 2 延长组不同沉积环境中烃源岩地球化学特征

Table 2 The geochemical characteristic of source rock in different sediment environment of Yanchang Formation

分析样品			有机质丰度			类型	显微组分(%)				生标参数		
井号	层序	沉积相	TOC (%)	S ₁ +S ₂ (mg/g)	沥青 "A"		腐泥组	壳质组	镜质组	惰质组	C ₂₁ ⁻ /C ₂₂ ⁺	aaa20RC ₂₇ /C ₂₉	Pr/Ph
HH78	SQ3	泛滥平原	6.05	21.19	0.09	II ₂	30	24	35	10	0.72	1.28	1.59
HH3	SQ3	泛滥平原	1.78	6.42	0.40	II ₂	40	27	30	4	0.89	1.38	1.65
HH66	SQ3	泛滥平原	3.74	1.44	0.02	III	24	12	57	7	0.52	2.43	2.93
HH66	SQ2	半深湖	6.93	28.12	0.25	II ₁	44	31	19	6	1.11	1.47	1.53
HH65	SQ2	半深湖	10.10	59.26	0.67	II ₁	46	36	11	6	1.24	1.50	1.45
HH9	SQ2	半深湖	7.49	31.45	0.29	II ₂	34	36	25	6	1.14	1.45	1.72
HH3	SQ2	半深湖	9.04	47.35	0.30	II ₁	44	31	21	5	0.84	1.27	1.40
HH5	SQ2	半深湖	34.90	125.00	0.84	II ₁	44	31	18	6	0.88	1.34	1.48
HH28	SQ1	滨浅湖	1.93	7.71	0.01	II ₂	30	19	36	24	0.51	2.62	1.92
HH3	SQ1	滨浅湖	3.90	27.12	0.27	II ₂	33	18	36	13	0.78	1.60	1.63
HH5	SQ1	滨浅湖	5.58	21.11	0.16	II ₂	33	18	36	14	0.72	1.86	1.69
HH9	SQ1	滨浅湖	3.92	17.36	0.43	II ₁	44	11	35	10	0.59	1.96	1.74
HH3	SQ1	三角洲前缘	1.31	2.00	0.02	II ₂	26	25	36	13	0.57	1.93	1.66
HH65	SQ1	三角洲前缘	0.58	0.51	0.01	II ₂	28	31	21	20	0.55	1.93	2.72
HH5	SQ1	三角洲前缘	2.01	3.78	0.03	II ₂	37	15	23	25	0.62	1.95	1.68

值普遍小于 2, 以弱氧化—弱还原环境为主, 有机碳含量相对较高。

层序发育过程中受沉积环境影响的生物种类和生物繁衍, 是造成同一层序不同体系域内烃源岩有机质类型出现差异的关键。低位体系域三角洲前缘和高位体系域晚期泛滥平原沉积时, 沉积有机质中陆源高等植物含量较高, 岩心中可见大量顺层理分布的植物叶片、根茎化石及少量异地搬运的薄层煤岩, 干酪根类型以 III、II₂ 型为主。高位体系域早期滨浅湖沉积中浮游藻类、低等水生生物对沉积有机质贡献较大, 同时受河流携带的陆源碎屑物质注入影响, 有机质中混入部分陆源高等植物, 以 II₂、II₁ 型干酪根为主。湖侵体系域半深湖—深湖沉积时水生浮游生物尤其是浮游藻类的大量繁殖为烃源岩的发育提供了充足的有机质供给, 同时受湖底浊流搅混作用影响, 有机质中混入少量陆源有机质, 主要发育 II₁、I 型干酪根, 该环境也是最有利于形成烃源岩的沉积环境。

6 结论

(1) 综合测井、岩心、露头资料, 笔者将鄂尔多斯盆地南部延长组划分为 3 个层序, 不同层序体系域内均有烃源岩发育, 以 SQ1 层序、SQ3 层序高位体系域和 SQ2 层序湖侵体系域烃源岩分布范围较广、质量较好, 是研究区主要烃源岩发育层段。

(2) 有机地球化学、有机岩石学对比结果表明,

SQ2 层序湖侵体系域烃源岩有机质丰度高, 有机质类型以 II₁、I 型为主, 显微组分中富氢的腐泥组分含量较高, 生烃潜力较高; SQ1 层序、SQ3 层序高位体系域烃源岩有机质丰度较高, 有机质类型以 II₂、III 型为主, 镜质组、壳质组含量较高, 生烃潜力较差。

(3) 不同体系域烃源岩母质来源、生烃特征存在差异, 其中 SQ2 层序湖侵体系域晚期灰褐色油页岩与延长组原油具有良好的亲缘关系, 是延长组原油的主力烃源岩, 对成藏贡献最大。

(4) 湖平面变化控制的可容纳空间及沉积物供给决定了沉积物中有机质含量, 是形成垂向上烃源岩有机质丰度规律性变化的主要原因; 不同沉积环境中有机质供给和水动力条件控制了有机质类型和保存条件, 造成了平面上烃源岩地球化学特征的差异性分布。

References

- Cai, X. Y., 2012. Hydrocarbon Generation-Expulsion Mechanisms and Efficiencies of Lacustrine Source Rocks: A Case Study from the Dongying Sag, Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 33(3): 329—345 (in Chinese with English abstract).
- Carroll, A. R., Bohacs, K. M., 2001. Lake-Type Controls on Petroleum Source Rock Potential in Nonmarine Basins. *AAPG Bulletin*, 85 (6): 1033—1053. doi: 10.1306/8626ca5f-173b-11d7-8645000102c1865d
- Chang, Y. Y., Lin, C. S., Zhou, X. H., et al., 2014. Depositional Sequences and Prediction of Favorable Reservoir Sand of

- Shahejie Formation of Liaoxi Depression. *Earth Science*, 39 (10): 1471—1480 (in Chinese with English abstract).
- Chen, F., Hu, G. Y., Sun, L. C., et al., 2012. Characteristics of Sedimentary Facies and Evolution in Sequence Stratigraphic Framework of the Upper Triassic Yanchang Formation in Southern Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 14 (3): 321—330 (in Chinese with English abstract).
- Creaney, S., Passy, Q. R., 1993. Recurring Patterns of Total Organic Carbon and Source Rock Quality within a Sequence Stratigraphic Framework. *AAPG Bulletin*, 77 (3): 386—401. doi: 10.1306/bdff8c18-1718-11d7-8645000102c1865d
- Gong, L., Zhu, H. T., Shu, Y., et al., 2014. Distribution of Middle-Deep Lacustrine Source Rocks within Sequence Stratigraphic Framework of Wenchang Formation in Enping Depression, the Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 39 (5): 546—556 (in Chinese with English abstract).
- Herbin, J. P., Fernandez-Martinez, J. L., Geyssant, J. R., et al., 1995. Sequence Stratigraphy of Source Rocks Applied to the Study of the Kimmeridgian/Tithonian in the North-West European Shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 12: 177—194. doi: 10.1016/0264-8172(95)92838-n
- Isaksen, G. H., Patience, R., Van, G. G., 2002. Hydrocarbon System Analysis in a Rift Basin with Mixed Marine and Nonmarine Source Rocks: The South Viking Graben, North Sea. *AAPG Bulletin*, 86(4): 557—592.
- Jiang, Z. X., 2010. Studies of Depositional Systems and Sequence Stratigraphy: The Present and the Future. *Oil & Gas Geology*, 31(5): 535—541 (in Chinese with English abstract).
- Katz, B. J., Pratt, L. M., 1993. Source Rocks in a Sequence Stratigraphic Framework. AAPG, Tulsa.
- Li, H., Lu, J. L., Zuo, Z. X., et al., 2015. Controlling Factors of High-Quality Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Southern Changling Depression. *Oil & Gas Geology*, 36(2): 209—218 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. J., Xie, X. N., Huang, J. H., et al., 2012. Main Factors Controlling the Formation of Excellent Marine Source Rocks in Permian Maokou Formation of Northwest Sichuan, China. *Earth Science*, 37 (1): 171—180 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. J., Li, S. T., Yang, L., et al., 2005. Sequence Stratigraphic Geochemistry and Its Application to Hydrocarbon Exploration. *Earth Science Frontiers*, 12(3): 219—226 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. J., Zhou, D. S., 2003. Sequence Stratigraphic Geochemistry—A New Progress of Geochemistry. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(5): 487—497 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. L., 2004. The Organic-Rich Hydrocarbon Source Rocks and Their Resource Potentials in Jiyang Depression. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 317—321 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L. F., Kang, Y. S., Qi, X. F., et al., 2002. Evolution on Source Rocks in the Jurassic Sequence Strigraphic Frameworks of the Junggar Basin, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(4): 687—694 (in Chinese with English abstract).
- Pang, J. G., Li, S., Yang, Y. Y., et al., 2014. Study Process of Origin of Fine-Grained Sedimentary Rocks in Deep-Water Area of Lacustrine Basin: Taking Yanchang Formation in Ordos Basin as an Example. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(6): 706—724 (in Chinese with English abstract).
- Pasley, M. A., Gregory, W. A., Hart, G. F., 1991. Organic Matter Variations in Transgressive and Regressive Shales. *Organic Geochemistry*, 17(4): 483—509. doi: 10.1016/0146-6380(91)90114-Y
- Passey, Q. R., Greaney, S., Kulla, J. B., 1990. A practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs. *AAPG Bulletin*, 74(5): 1777—1794.
- Peng, J. N., Zhang, M., Liu, G. X., et al., 2014. Sedimentary Environments and Controlling Factors of Permian Source Rocks in Northeastern Sichuan Basin: A Case Study of Muguakou Profile in Chengkou. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(1): 95—101 (in Chinese with English abstract).
- Peters, K. E., Snedden, J. W., Sulaeman, A., et al., 2000. A New Geochemical-Sequence Stratigraphic Model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 84(1): 12—44.
- Qu, H. J., Yang, X. C., Cao, J. Z., et al., 2011. Oil Accumulation Rules in Deep Zones of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 32(2): 243—248 (in Chinese with English abstract).
- Tobias, H. D., Payenberg, Mial, A. D., 2001. A New Geochemical-Sequence Stratigraphic Model for the Mahakam Delta and Makassar Slope, Kalimantan, Indonesia; Discuss. *AAPG Bulletin*, 86(6): 1098—1101.
- Wang, H., Liao, Y. T., Lu, Y. C., et al., 2010. Sequence Architecture Styles of Cenozoic Continental Rift Basins in East China. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 41(1): 277—285 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. L., Li, W. H., Li, Y. H., et al., 2004. Delta Sediments and Evolution of the Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 6(3):

307—315 (in Chinese with English abstract).

Wu, W. X., Zhang, H. X., Li, Z. D., et al., 2015. Sequence Stratigraphic Geochemistry and Its Application in Evaluation of Source Rocks: Taking Beier Sag of Hailar Basin as an example. *Oil & Gas Geology*, 36(4): 701—710 (in Chinese with English abstract).

Xie, Q. F., Zhou, L. F., Liu, Y., 2014. Geochemistry and Geological Signification of Permian Source Rocks in Yili Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 35(1): 50—57 (in Chinese with English abstract).

Yang, Y. Y., Zhang, P. B., Zhang, Z. Y., 2005. Sedimentary Features and Sequence Evolution of Braided River Delta of Chang 8 Oil Formation of Xifeng Oil Field in Ordos Basin. *Geological Science and Technology Information*, 24(1): 45—48 (in Chinese with English abstract).

Yao, Y. J., Lü, C. P., Kang, S. Y., et al., 2013. Characteristics of Hydrocarbon Source Rocks and Their Main Controlling Factors in Southeast Asia. *Earth Science*, 38(2): 367—378 (in Chinese with English abstract).

Zhang, W. Z., Yang, H., Li, S. P., 2008. Hydrocarbon Accumulation Significance of Chang91 High-Quality Lacustrine Source Rocks of Yanchang Formation, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 35(5): 557—568 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y. D., Liu, L. F., Zhang, Z. H., et al., 2008. Distribution and Hydrocarbon Generation of the Eocene Source Rocks in a Sequence Stratigraphic Framework in the Nanpu Sag Bohai Bay Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(6): 1077—1085 (in Chinese with English abstract).

Zhu, W. L., Wang, Z. F., Mi, L. J., et al., 2015. Sequence Stratigraphic Framework and Reef Growth Unit of Well Xike-1 from Xisha Islands. *Earth Science*, 40(4): 677—687 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

蔡希源, 2012. 湖相烃源岩生排烃机制及生排烃效率差异性——以渤海湾盆地东营凹陷为例. *石油与天然气地质*, 33(3): 329—345.

常艳艳, 林畅松, 周心怀, 等, 2014. 辽西凹陷北洼沙河街组沉积层序结构与有利砂体分布. *地球科学*, 39(10): 1471—1480.

陈飞, 胡光义, 孙立春, 等, 2012. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组层序地层格架内沉积相特征与演化. *古地理学报*, 14(3): 321—330.

龚丽, 朱红涛, 舒誉, 等, 2014. 珠江口盆地恩平凹陷文昌组层序格架中中—深湖相烃源岩空间展布规律及发育模式. *地球科学*, 39(5): 546—556.

姜在兴, 2010. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势. *石油与天然气地质*, 31(5): 535—541.

李浩, 陆建林, 左宗鑫, 等, 2015. 长岭断陷南部断陷层湖相优质烃源岩发育控制因素. *石油与天然气地质*, 36(2): 209—218.

李红敬, 解习农, 黄俊华, 等, 2012. 川西北二叠系茅口组海相优质烃源岩发育控制因素. *地球科学*, 37(1): 171—180.

李美俊, 李思甜, 杨龙, 等, 2005. 层序地层地球化学及其在油气勘探中的作用. *地学前缘*, 12(3): 219—226.

李美俊, 周东升, 2003. 层序地层地球化学——地球化学研究的新进展. *石油实验地质*, 25(5): 487—497.

李丕龙, 2004. 济阳坳陷“富集有机质”烃源岩及其资源潜力. *地学前缘*, 11(1): 317—321.

刘洛夫, 康永尚, 齐雪峰, 等, 2002. 准格尔盆地侏罗系层序地层格架中的烃源岩评价. *沉积学报*, 20(4): 687—694.

庞军刚, 李赛, 杨友运, 等, 2014. 湖盆深水区细粒沉积成因研究进展——以鄂尔多斯盆地延长组为例. *石油实验地质*, 36(6): 706—724.

彭金宁, 张敏, 刘光祥, 等, 2014. 川东北地区二叠系烃源岩沉积环境及控制因素——以城口木瓜口剖面为例. *石油实验地质*, 36(1): 95—101.

屈红军, 杨县超, 曹金舟, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深层油气聚集规律. *石油学报*, 32(2): 243—248.

王华, 廖远涛, 陆永潮, 等, 2010. 中国东部新生代陆相断陷盆地层序的构成样式. *中南大学学报(自然科学版)*, 41(1): 277—285.

武富礼, 李文厚, 李玉宏, 等, 2004. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化. *古地理学报*, 6(3): 307—315.

吴文祥, 张海翔, 李占东, 等, 2015. 层序地层地球化学方法在烃源岩评价中的应用——以海拉尔盆地贝尔凹陷为例. *石油与天然气地质*, 36(4): 701—710.

谢其锋, 周立发, 刘羽, 2014. 伊犁盆地二叠系烃源岩地球化学特征及其地质意义. *石油学报*, 35(1): 50—57.

杨友运, 张蓬勃, 张忠义, 2005. 鄂尔多斯盆地西峰油田长 8 油组辫状河三角洲沉积特征与层序演化. *地质科技情报*, 24(1): 45—48.

姚永坚, 吕彩萍, 康永尚, 等, 2013. 东南亚地区烃源岩特征与主控因素. *地球科学*, 38(2): 367—378.

张文正, 杨华, 李善鹏, 2008. 鄂尔多斯盆地长 91 湖相优质烃源岩的成藏意义. *石油勘探与开发*, 35(5): 557—568.

赵彦德, 刘洛夫, 张枝焕, 等, 2008. 南堡凹陷古近系层序地层格架中烃源岩分布与生烃特征研究. *沉积学报*, 26(6): 1077—1085.

朱伟林, 王振峰, 米立军, 等, 2015. 南海西沙西科 1 井层序地层格架与礁生长单元特征. *地球科学*, 40(4): 677—687.