

# 鄂尔多斯盆地延长期湖盆充填类型与 优质烃源岩的发育

邱欣卫<sup>1, 2)</sup>, 刘池洋<sup>2)\*</sup>

1)中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室, 广东广州 510640;

2)西北大学大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

**摘要:** 湖盆充填类型是盆地构造及古气候的综合反映, 对优质烃源岩的发育有重要控制作用。在综合分析延长组优质烃源岩沉积环境的基础上, 认为长<sub>9<sub>1</sub></sub>、长<sub>7<sub>3</sub></sub>、长<sub>7<sub>2</sub>-7<sub>1</sub></sub>烃源岩发育期湖盆都表现为平衡充填类型, 但有机质丰度及规模有较大差别, 因此进一步细分长<sub>9<sub>1</sub></sub>期为平衡充填三角洲前缘-深湖相组合沉积体系, 长<sub>7<sub>3</sub></sub>期为平衡充填深湖相沉积体系, 长<sub>7<sub>2</sub>-7<sub>1</sub></sub>期为平衡充填浊流-深湖相组合沉积体系, 并指出长<sub>7<sub>3</sub></sub>期湖盆充填类型发育最优质烃源岩, 进而重点探讨了其形成环境。本文认为盆地沉降过程与古气候变化主要控制优质烃源岩的沉积和保存条件, 而湖盆原始生产力则与火山灰沉积和深部流体关系密切。综合长<sub>7<sub>3</sub></sub>期盆山耦合关系、湖盆充填类型、沉积岩相组合等, 指出强水动力体系(浊流沉积、三角洲)对有机质起稀释作用, 重点强调了火山灰沉积和深部流体带来的营养物质有利于提高湖盆原始生产力, 进而初步揭示了长<sub>7<sub>3</sub></sub>优质烃源岩的发育模式。这一认识为进一步研究陆相拗陷湖盆优质烃源岩的充填类型及发育规律提供了可借鉴的研究实例。

**关键词:** 优质烃源岩; 充填类型; 火山灰; 深部作用; 延长期; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.32; TE122.112 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2014.01.13

## Lake-basin Filling Types and Development of High Quality Hydrocarbon Source Rocks in Ordos Basin in Late Triassic Yanchang Period

QIU Xin-wei<sup>1, 2)</sup>, LIU Chi-yang<sup>2)\*</sup>

1) State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry,  
Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640;

2) State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069

**Abstract:** Lake-basin filling types response to the basin structures and plaeoclimate and control the development of high quality hydrocarbon source rocks. Based on comprehensive analysis of the depositional environment of Chang<sub>9<sub>1</sub></sub>, Chang<sub>7<sub>3</sub></sub> and Chang<sub>7<sub>2</sub>-7<sub>1</sub></sub> source rocks, the authors recommend a balanced-fill type for these source rocks. However, as the abundance of organic matter and the scale of resource of these source rocks are different, the further subdivision of the balanced-fill type is needed. It is subdivided into delta front-deep lake, purely deep lake and turbidites-deep lake sedimentary systems corresponding to Chang<sub>9<sub>1</sub></sub>, Chang<sub>7<sub>3</sub></sub> and Chang<sub>7<sub>2</sub>-7<sub>1</sub></sub> source rocks respectively. A discussion on the forming setting of excellent hydrocarbon source rocks was made. The authors point out that the basin subsidence and the climate controlled the sedimentation and preservation of source rocks, and the primary productivity was closely related to the surrounding volcanic activity and deep fluids. Integrating the relationship of basin and mountain, lake-basin filling types and lithofacies assemblage, the authors

本文由国家自然科学基金项目(编号: 90814005; 41203043)和国家科技重大专项(编号: 2011ZX05001-004)联合资助。

收稿日期: 2013-05-23; 改回日期: 2013-10-27。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 邱欣卫, 男, 1982年生。博士后。主要从事盆地动力学方向研究。E-mail: qxweilt@126.com。

\*通讯作者: 刘池洋, 男, 1953年生。教授。主要从事盆地动力学、石油地质与勘探方向研究。E-mail: lcy@nwu.edu.cn。

provide an ideal model for the development of Chang<sub>7</sub> excellent hydrocarbon source rocks. This study emphasizes that the strong dynamic of water (such as turbidity current or delta) might have diluted the basin and embarrassed the enrichment of organic matter, whereas the nutrition elements from volcanic ash or deep fluid might have enhanced the production of organic matter. This understanding gives an example for further study of lake-basin filling types and development of high quality hydrocarbon source rocks in similar continental depression basins.

**Key words:** high quality hydrocarbon source rocks; lake-basin filling types; volcanic ash; deep effects; Yanchang periods; Ordos basin

陆相湖盆烃源岩的发育受湖盆原始生产力、有机质沉积速率和保存条件等因素控制(Katz, 2001, 2005)。其中湖盆原始生产力受纬度(Cecil, 1990)、浊流(Dean, 1981)、营养物质(Kelts, 1988)、水化学条件(特殊离子、盐度、酸碱度)等制约(Warren, 1986; Kruge et al., 1990; Katz, 2001), 而有机质沉积速率和保存条件是盆地构造演化和古气候的综合反映(Carroll et al., 1999, 2001), 这些因素共同制约着湖盆充填类型。因此对湖盆充填类型的详细划分有助于预测优质烃源岩的时空分布特征(Bohacs et al., 2000, 2003)。鄂尔多斯盆地延长组近年油气发现不断取得新的突破, 得益于对优质烃源岩时空分布及其潜力评价的详细研究(杨华等, 2010), 目前已识别出长 7 和长 9 油层组两套主要烃源岩, 其中长 7 为 主力优质烃源岩(张文正等, 2008b; 王传远等, 2008)。本文将通过对鄂尔多斯盆地延长组的湖盆充填类型的深入分析, 对比关键层系烃源岩的充填特征, 阐述最优质烃源岩的发育背景, 为预测陆相坳陷湖盆优质烃源岩的分布及规模提供了重要的研究实例。

鄂尔多斯盆地现今被周围山系所围限, 可称为具有“墙”的盆地(Carroll et al., 2010), 盆地和山系之间被一系列新生代断陷盆地所隔(图 1)。盆地北部的古亚洲洋最迟沿天山—兴蒙褶皱构造体系于石炭纪—中二叠世(C—P<sub>2</sub>)关闭(张国伟等, 2002; 沈玉林等, 2008); 裂变径迹研究表明盆地东部的吕梁山最早在晚侏罗世才开始有小规模隆升(赵俊峰等, 2009); 而盆地西南部的六盘山地区大致在中新世晚期开始抬升(刘池洋等, 2005, 2006), 说明盆地北、东、西部对印支期鄂尔多斯盆地演化影响较弱。盆地南部的秦岭地区是在先期构造演化基础上从晚元古代到中生代早期作为古特提斯洋的北翼分支逐渐发展演化出两个有限洋盆, 包括华北、扬子板块及其间的秦岭微板块, 并沿商丹和勉略两个主缝合带俯冲消减, 最终在中晚三叠世碰撞造山(张国伟等, 2001), 对两侧中生代盆地演化起控制作用。

受秦岭碰撞造山过程的影响, 鄂尔多斯盆地中晚三叠世古地理面貌总体呈北高南低、水体北浅南

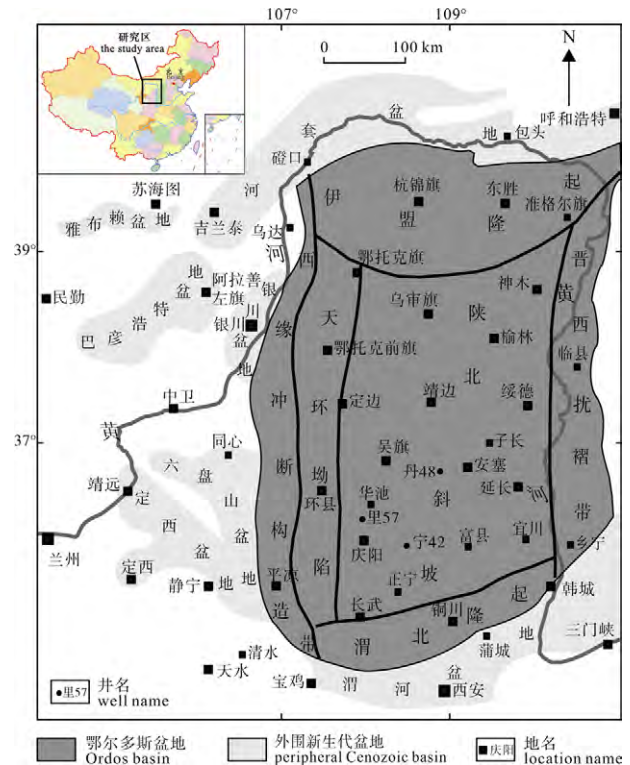


图 1 鄂尔多斯盆地构造单元及外围盆地分布图

Fig. 1 Structural units of Ordos basin and peripheral basins

深、沉积北薄南厚的特征, 沉积中心大致平行于秦岭造山带展布(刘池洋等, 2006)。中上三叠统延长组厚约 1000~1300 m, 发育了一套以河湖相沉积为主的陆源碎屑岩系, 经历了一个完整的陆相湖盆演化发展过程, 从早期的湖盆沉陷到湖盆扩张的鼎盛时期, 再到湖盆的缩小和再扩张, 直至晚三叠世末期盆地萎缩、湖盆消亡。根据油田勘探开发需要又从上往下分为 10 个油层组, 分别称为长 1 至长 10, 各油层组之间为整合接触, 发育长 1、长 4+5、长 7、长 9 烃源岩, 但优质烃源岩主要分布于长 9、长 7 油层组, 也是本文研究的层段。

## 1 陆相湖盆充填类型划分

Carroll 等(1999, 2001)和 Bohacs 等(2000, 2003)通过对大量现代和古代湖泊沉积体系研究, 指出湖泊沉积体系普遍包括河流-湖泊相、波动深湖相和蒸发相岩性组合, 并对应于过充填、平衡充填和欠充填三种湖

盆类型, 同时认为可容空间变化和沉积物+水充填的相对平衡速率对湖盆特征、形态和分布有控制作用, 而可容空间的变化主要与构造沉降有关, 沉积物+水则受控于气候条件, 因此, 对湖泊充填类型的划分实质是划分不同古构造和古气候条件下形成的不同沉积岩相组合, 从而揭示烃源岩形成的古环境。

Bohacs 等(2000, 2003)在对全球大量现代湖泊充填类型研究的基础上, 认为沉积物中有机质的富集因素与湖盆有机质生产量、消耗量以及对有机质的稀释量有关, 提出了影响不同湖盆充填类型生产量、消耗量、稀释量的影响因素(表 1), 并总结为如下相关关系式, 即:

$$\text{有机质富集度} = (\text{生产量} - \text{消耗量}) / \text{稀释量}$$

从关系式可以看出, 在湖泊环境中任何使有机质生产量达到最大, 而消耗量和稀释量最小的条件都有利于有机质富集。这一关系式简要地把有机质富集因素联系在一起。由于不同的湖盆充填类型具有不同的有机质生产量、消耗量和稀释量及其控制因素, 从而使有机质的富集程度不同, 导致烃源岩优劣存在差异。

## 2 延长期优质烃源岩发育期湖盆充填类型

为了探讨延长期湖盆充填类型与烃源岩发育的关系, 本文对已证实的长 7 和长 9 烃源岩进行对比分析, 有机质丰度指标来自于张文正等(2008a, b)公开发表的数据。由于 Carroll 等(1999)建立的湖盆充填模式划分方案相对较粗、尺度较大, 简单套用难于精细刻画长 7 和长 9 期湖盆充填类型, 而长 7 和长 9 段整体为深湖相主导下的三角洲前缘或浊流沉积体系, 表现为波动深湖相组合特征, 所以有必

要对这两套烃源岩发育的相组合进一步细分。

### 2.1 长 9<sub>1</sub> 期平衡充填三角洲前缘-深湖相组合

以丹 48 井为例分析长 9<sub>1</sub> 岩相组合及充填类型(图 2)。长 9<sub>1</sub> 段发育灰黑色泥页岩、灰绿色泥岩、深灰色粉砂质泥岩和灰白色粉砂岩和细砂岩, 是一次重要的湖侵期(刘超等, 2009; 喻建等, 2010), 构成半深湖-深湖与三角洲沉积为主的波动深湖相组合。长 9<sub>1</sub> 初期湖进体系域以辫状河三角洲前缘沉积为主, 可容空间增大速率大于沉积物+水的充填速率, 为退积型序列, 垂向上由细砂岩向粉砂质泥岩演化, 可容空间有逐渐增大的趋势; 长 9<sub>1</sub> 中期湖侵阶段发育半深湖-深湖相沉积, 可容空间增大速率近似等于沉积物+水的充填速率, 为加积型序列, 发育“李家畔”油页岩; 长 9<sub>1</sub> 晚期湖退体系域以曲流河三角洲前缘沉积为主, 可容空间增大速率小于沉积物+水的充填速率, 为进积型序列, 垂向上由油页岩向细砂岩演化, 可容空间有逐渐变小的趋势, 继而演化为长 8 期的过充填河流-湖泊相组合。因此, 可以把长 9<sub>1</sub> 段划分为三角洲前缘-深湖相亚组合, 其中三角洲前缘亚相沉积对有机质起稀释作用。长 9<sub>1</sub> 初期湖进体系域主要反映了构造沉降增加, 可容空间变大, 在子丹一带形成沉积中心; 而长 9<sub>1</sub> 晚期构造沉降幅度变化不大, 却逐渐向较强水动力体系发育, 指示湖退体系域可能受气候影响更密切, 物源充沛, 三角洲不断发生进积作用。

平衡充填三角洲前缘-深湖相发育的长 9<sub>1</sub> 烃源岩有机质丰度 TOC 平均为 5.0%, 氯仿沥青“A”平均为 0.9%, 生烃潜量(S1+S2)为 15.9 mg/g, 氢指数(HI)为 259 mg/g, 干酪根类型为 II<sub>1</sub>-II<sub>2</sub> 型, 属于较好烃源岩(表 2)。

表 1 影响陆相湖盆有机质富集因素(据 Bohacs et al., 2000)  
Table 1 Controlling factors on organic-rich rock development in lakes (after Bohacs et al., 2000)

湖盆类型	生产量	消耗量	稀释量	烃源岩潜力
过充填	(1)营养物质的增加(+); (2)新鲜水的输入(-); (3)湖盆体积增大(-)	(1)湖底氧含量增加(-); (2)风搅动均质性水体(-); (3)冷的底流(-); (4)紊流增加(-)	(1)大量陆源碎屑(-); (2)与大量陆源碎屑物质的交换(±)	TOC: <1%~7%; HI: 50~600 mg/g; 有机质类型: I / II 混合型; 相对较厚(<几十米)
平衡充填	(1)营养物质的增加(+); (2)周期性干旱导致营养物富集(+); (3)湖盆更多体积处于透光区(+)	(1)相对封闭的湖盆和周期性干旱促使密度分层(+); (2)大量有机质生产消耗底部氧(+)	(1)变化但相对较少的陆源物质输入(+); (2)很少与陆源有机质发生物质交换(+); (3)周期性洪泛或涌流带来大量陆源碎屑物质(-)	TOC: <1%~30%; HI: 500~700 mg/g; 有机质类型: 大部分型, 少量型; 相对较薄(1~10 m)
欠充填	(1)营养物质的增加或减少(±); (2)周期性干旱导致营养物富集(-); (3)对溶解生物遗体的水体快速浓缩(-); (4)水体有效生产时间有限(-)	(1)周期性干旱氧化(-); (2)周期性新鲜水体的输入, 增加氧含量(-)	(1)半干旱气候导致碎屑物质输入量最高(-); (2)最小的陆源有机质输入(+); (3)由于矿物沉淀导致充填量增加(+)	TOC: <0.5%~20%; HI: 650~1150 mg/g; 有机质类型: 型; 相对较薄(几米)

注: (+)表示有利于有机质富集; (-)表示不利于有机质富集; (±)表示对有机质富集影响不确定。TOC 为有机质丰度; HI 为氢指数。

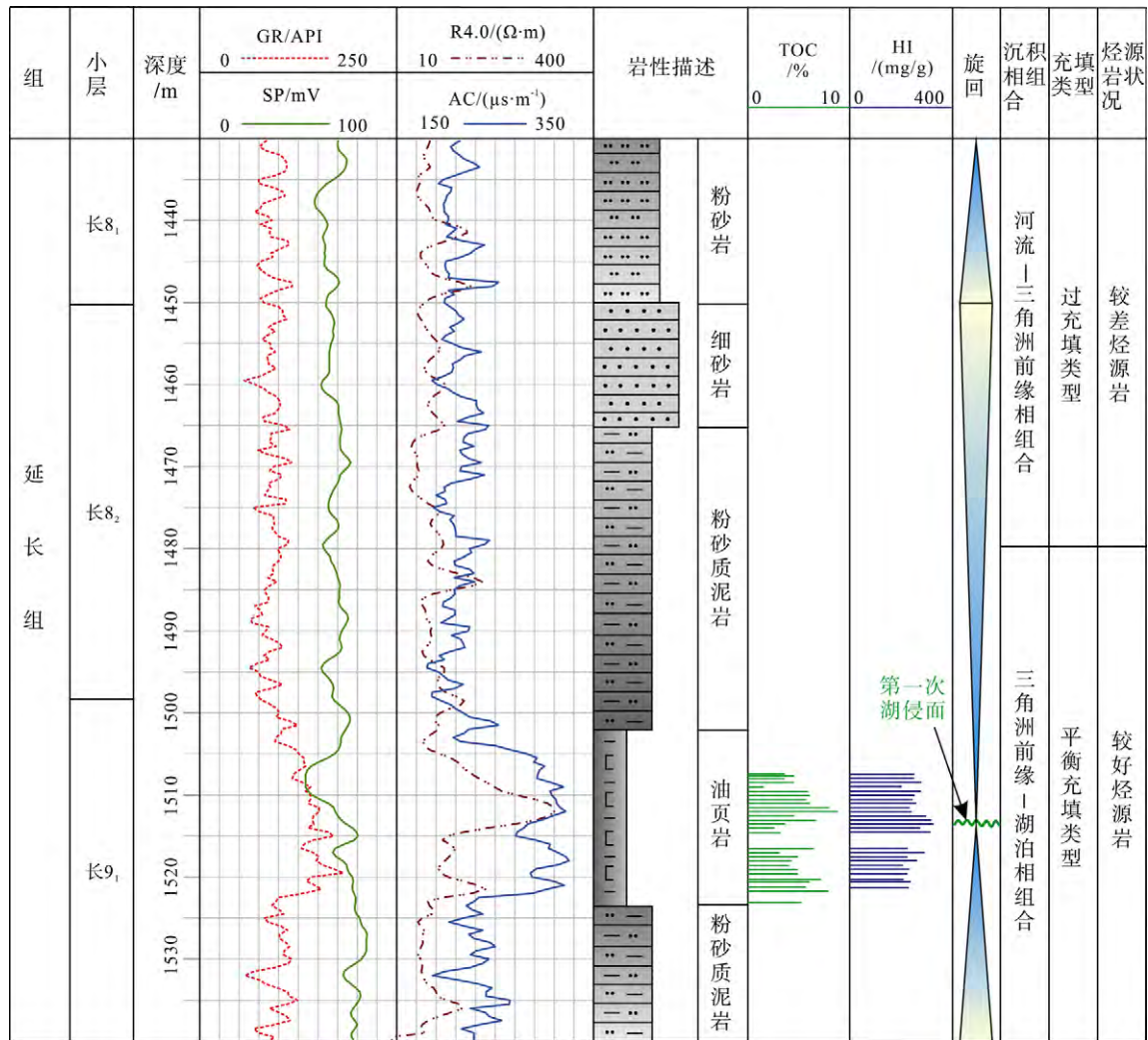


图2 丹48井单井岩相组合及充填类型分析

Fig. 2 Analyses of well Dan48 facies associations and basin filling type

## 2.2 长7<sub>3</sub>期平衡充填深湖相组合

以里57井为例分析长7<sub>3</sub>烃源岩形成期岩相特征及充填类型(图3)。长7<sub>3</sub>段发育灰黑色泥岩、烃源岩,深灰色泥岩和灰绿色粉砂质泥岩夹薄层火山灰沉积物,浊积砂体零星分布,代表了延长期湖盆最大洪泛面发育期,烃源岩最厚可达60 m,构成深湖-半深湖相为主的波动深湖相组合。湖泛期发育半深湖-深湖相沉积,可容空间增大速率近似等于沉积物+水的充填速率,为加积型序列,发育“张家滩”页岩。重力流相对不发育、三角洲相对退积,对湖盆中有机质的稀释作用较小。因此,可以把长7<sub>3</sub>段划分为深湖相岩相亚组合。

长7<sub>3</sub>烃源岩发育期一个重要的充填特征是火山灰沉积物(邱欣卫等,2011),表现为薄层(0.2~40 cm)火山灰夹于烃源岩中(如宜川露头剖面,图4A),薄片中也观察到火山灰蚀变晶屑与有机质纹层互层现象(图4B)。现代火山灰对海洋环境影响研究表明,火山灰沉积可以给海洋提供活性铁,对海洋表层具有“施肥”效应,从而造成高营养(高

P)低叶绿素(低Fe)(HNLC)地区藻类的勃发,显著提高海洋原始生产力(Langmann et al., 2010)。延长组长7<sub>3</sub>优质烃源岩中P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量较高,在0.13%~1.15%之间,平均为0.57%(邱欣卫,2011),同时优质烃源岩中发现有大量胶磷矿(秦艳等,2009),而火山灰在水解、蚀变成岩过程中提供P的能力有限(Felitsyn et al., 2002),指示了优质烃源岩形成期水体本身应该含P量较高,或有其它物源输入(深部流体),说明长7<sub>3</sub>湖水较富营养。那么延长期火山灰是否带来了活性Fe呢?

通过对长7<sub>3</sub>优质烃源岩主量元素分析结果表明,总铁(TFe)含量在5.86%~12.78%之间,平均9.86%,具有富铁特征。从延长组优质烃源岩、火山灰沉积物总铁(TFe)-SiO<sub>2</sub>关系图解中(图5A)也可以看出,长7<sub>3</sub>优质烃源岩中铁含量明显高于火山灰沉积物,暗示了火山灰中的Fe可能发生了迁移;同时岩芯(图5B)和扫描电镜(SEM)下观察到众多黄铁矿(图5C)。由于整个延长组沉积环境基本一致,而其它油层组泥岩并不存在Fe的富集,最大的差别就

是沉积物中火山灰层数的多寡, 因此长7<sub>3</sub>期丰富的火山灰应该是Fe的重要来源。反映了鄂尔多斯盆地长7<sub>3</sub>优质烃源岩发育期可能也类似于海洋环境中高营养(高P)低叶绿素地区(低Fe), 火山灰带来的铁在类似HNLC地区具有“施肥”效应, 从而可能

促使了延长期藻类勃发, 提高了湖盆原始生产力, 而我们在优质烃源岩薄片确实观察到藻类的存在(图4C), 同时前人在长7优质烃源岩的岩芯和显微镜下也观察到大量宏观藻类(孔庆芬, 2007), 都印证了长7期可能存在藻类勃发。而藻类勃发是湖相烃

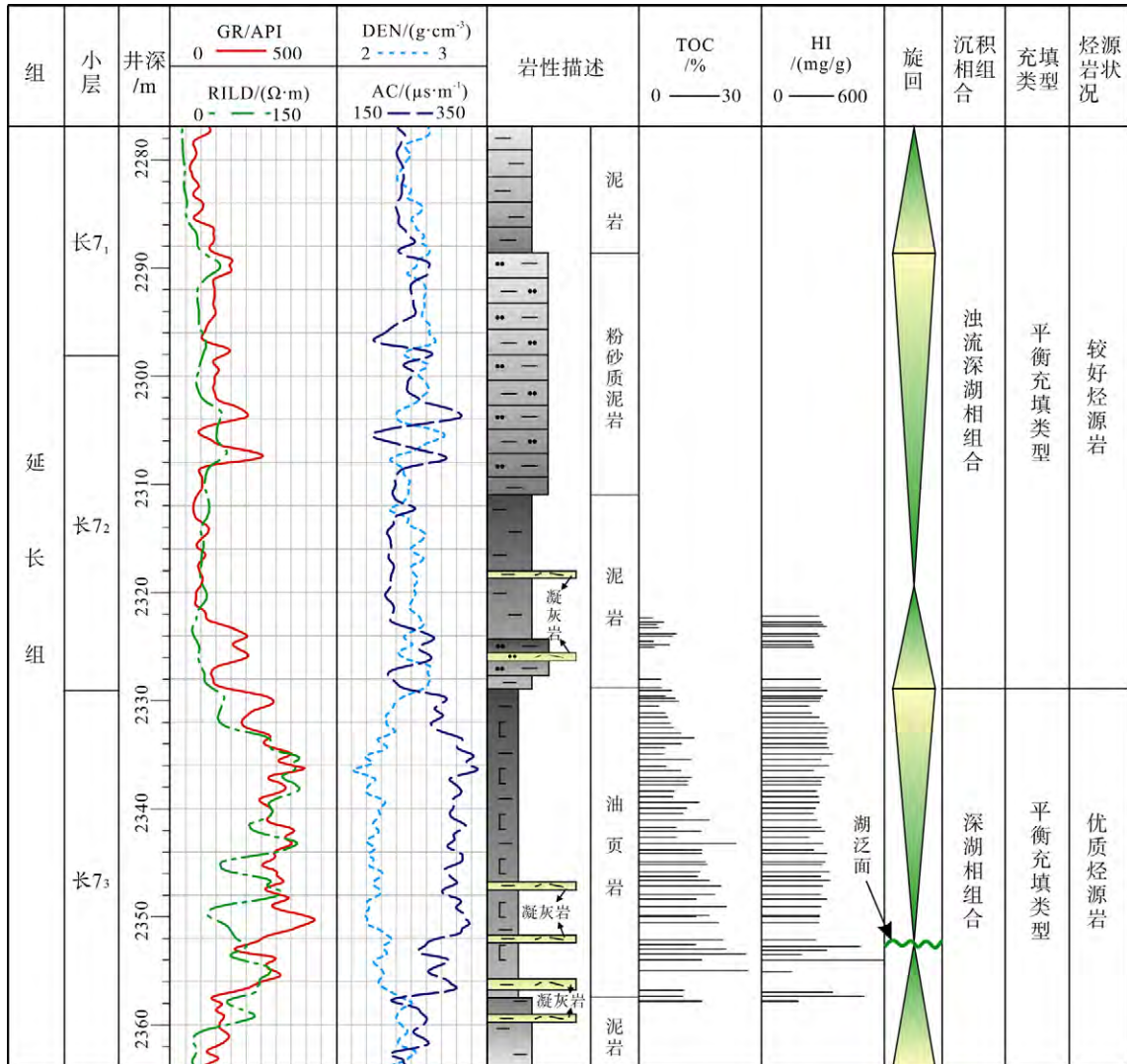


图3 里57井单井岩相组合及充填类型分析  
Fig. 3 Analyses of well Dan48 facies associations and basin filling type

表2 延长组充填模式与烃源岩发育状况  
Table 2 Basin filling model and source rocks development of Yanchang Formation

岩相组合	充填类型	层位	岩相亚组合	层序特征	典型沉积构造	岩性	有机质丰度				有机质类型	烃源岩情况
							TOC/%	“A”/%	S1+S2/(mg/g)	HI/(mg/g)		
波动深湖相	平衡充填	长7 <sub>2</sub>	油流-深湖相	沉积物+水总量略大于沉降量, 向进积方向发育	鲍马序列槽模、火焰状构造	泥岩、粉砂质泥岩 细砂岩	5.3	0.6	16.2	280	II <sub>1</sub> -II <sub>2</sub>	较好烃源岩
		长7 <sub>3</sub>					深湖相	沉积物+水总量与沉降量相近或略小于沉降量, 为加积层序	水平层理 虫孔	油页岩 凝灰岩	13.8	1.2
	长9 <sub>1</sub>	三角洲前缘-深湖相	沉积物+水总量略大于沉降量, 向进积方向发育	水平层理	泥岩、粉砂质泥岩	5.0	0.9	15.9	258	II <sub>1</sub> -II <sub>2</sub>	较好烃源岩	

源岩形成的重要机制之一(刘传联等, 2001)。因此, 我们认为长 7<sub>3</sub> 期火山灰沉积物充填是提高湖盆原始生产力的重要因素。

另外, 受秦岭印支期造山过程影响, 可能促使盆地深部软流圈波动上隆, 导致长 7<sub>3</sub> 期湖盆沉降幅度最大、沉降速率最快, 基底断裂得以复活(赵文智

等, 2003), 有利于深部物质沿基底断裂上涌。通过对长 7<sub>3</sub> 优质烃源岩的岩石矿物学研究, 发现了一系列深部流体作用的证据, 如 Fe 质结核和硅质互层(图 6A), Mn 结核(图 6B), Ir 异常结构(图 6C), 白铁矿(图 6D), 硬石膏(图 6F), 自生石英(图 6E)等, 以及众多指示深部流体作用的地球化学指标(邱欣

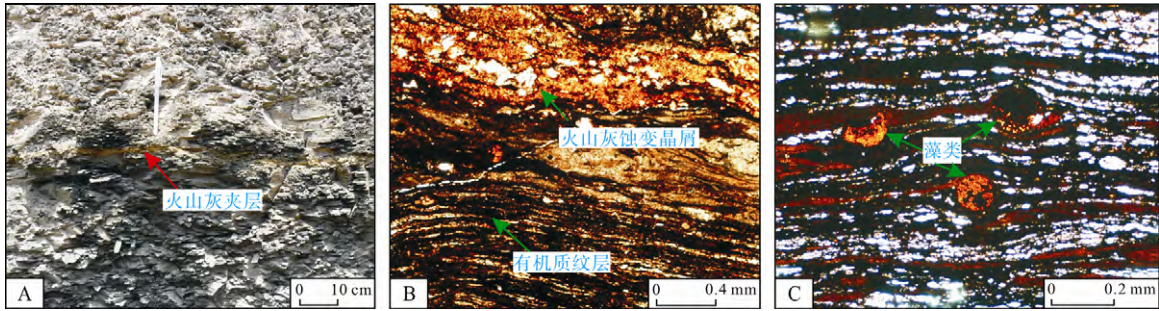


图 4 火山灰沉积物与长 7<sub>3</sub> 优质烃源岩互层及烃源岩中藻类

Fig. 4 Volcanic ash sediment interlayer with Chang7<sub>3</sub> high quality hydrocarbon source rock and algae

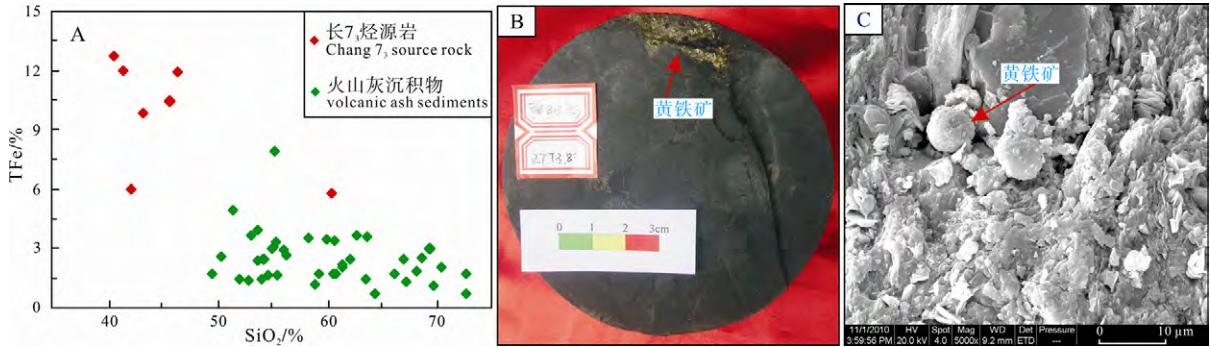


图 5 长 7<sub>3</sub> 优质烃源岩 Fe 富集

Fig. 5 Chang7<sub>3</sub> high quality hydrocarbon source rock enriched in iron

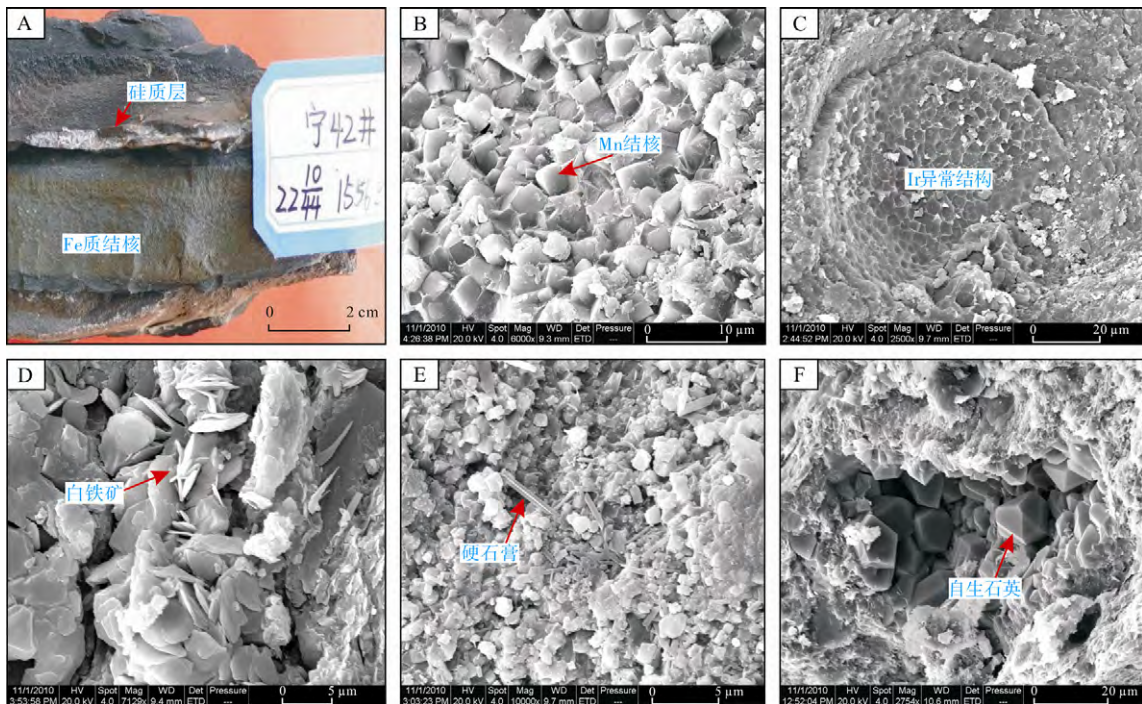


图 6 长 7<sub>3</sub> 期深部流体作用的岩石矿物学证据

Fig. 6 Rock and minerals evidence of Chang7<sub>3</sub> high quality hydrocarbon source rock for deep fluid

卫, 2011), 尽管有些证据存在一定的多解性, 但都能用深部流体作用来解释, 同时张文正等(2010)也发现了一些深部热水作用的地质地球化学证据。因此, 我们认为上涌的深部流体也可能带来 Mn、Fe、P、Mo、Cu 等营养物质, 也有利于提高湖盆原始生产力, 进而促使有机质富集。

平衡充填并伴随火山灰沉积和深部流体注入的深湖相长<sub>7</sub>烃源岩有机质丰度 TOC 平均为 13.8%, 氯仿沥青“A”平均为 1.2%, 生烃潜量(S1+S2)为 50.2 mg/g, 氢指数(HI)为 310 mg/g, 干酪根类型为 I-II<sub>1</sub> 型, 属于优质烃源岩(表 2), 也是已被证实的鄂尔多斯盆地中生代主要油藏的主力烃源岩(张文正等, 2008b; Ji et al., 2010)。

### 2.3 长<sub>7</sub><sub>2</sub>—长<sub>7</sub><sub>1</sub>期平衡充填浊流-深湖相组合

从图 2 可以看出, 长<sub>7</sub><sub>2</sub>—长<sub>7</sub><sub>1</sub>段发育灰黑色泥岩、深灰色泥岩和灰绿色粉砂质泥岩夹薄层火山灰沉积物, 浊积岩较发育, 砂体规模大, 向湖盆中心延伸距离远, 湖盆面积仍较大, 三角洲向湖盆中心进积, 构成半深湖-深湖相与浊流沉积共存的波动深湖相组合。长<sub>7</sub><sub>2</sub>湖进体系域发育半深湖-深湖相沉积, 可容空间增大速率近似等于沉积物+水的充填速率, 发育加积型泥岩和湖底浊积扇; 长<sub>7</sub><sub>1</sub>湖退体系域发育浅湖和进积型三角洲, 可容空间增大速率小于沉积物+水的充填速率。因此, 可以把长<sub>7</sub><sub>2</sub>—长<sub>7</sub><sub>1</sub>段划分为浊流-深湖相岩相亚组合。

长<sub>7</sub><sub>2</sub>—长<sub>7</sub><sub>1</sub>期继承了长<sub>7</sub><sub>3</sub>期的坳陷格局, 构造沉降起主要控制作用, 秦岭造山带抬升并向盆地挤压, 促使基底相对抬升, 三角洲相对进积, 物源充足, 加上周缘构造活动加强, 有利于形成浊积岩(陈全红等, 2006; 卢龙飞等, 2006), 对湖盆稀释作用增强, 不利于有机质富集; 周缘火山喷发形成的火山灰沉积夹层在长<sub>7</sub><sub>2</sub>—长<sub>7</sub><sub>1</sub>段仍有记录, 但规模明显小于长<sub>7</sub><sub>3</sub>期, 火山灰的沉积同样有利于提高有机质生产量。

平衡充填浊流-深湖相及局部火山灰沉积的长<sub>7</sub><sub>2</sub>—长<sub>7</sub><sub>1</sub>烃源岩有机质丰度 TOC 平均为 5.3%, 氯仿沥青“A”平均为 0.6%, 生烃潜量(S1+S2)为 16.2 mg/g, 氢指数(HI)为 280 mg/g, 干酪根类型为 I<sub>1</sub>-I<sub>2</sub> 型, 属于较好烃源岩(表 2)。

上述分析可以看出, 长<sub>7</sub><sub>3</sub>期沉降幅度最大、火山灰沉积层较多、深部流体作用明显, 发育最优质烃源岩; 长<sub>7</sub><sub>2</sub>—长<sub>7</sub><sub>1</sub>期, 构造沉降起主要控制作用, 气候影响较小, 发育较好烃源岩; 而长<sub>9</sub><sub>1</sub>早期构造沉降起控制作用, 晚期气候条件对沉积物+水的控制作用明显, 发育有机质丰度略低于长<sub>7</sub><sub>2</sub>—长<sub>7</sub><sub>1</sub>期的较好烃源岩。

## 3 长<sub>7</sub><sub>3</sub>优质烃源岩发育模式

中晚三叠世扬子与华北板块碰撞, 秦岭碰撞造山带形成, 盆地沉降幅度最大, 导致可容空间增大, 有利于细粒沉积物发育, 并且随着沉降幅度的增大, 导致缺氧环境的形成, 消耗量降低使有机质得以最大量被保存。同时长<sub>7</sub><sub>3</sub>期湖盆沉积中心向南西方向迁移并大致平行于造山带展布, 从长<sub>7</sub>期开始造山带成为盆地的主要物源之一(刘池洋等, 2006; 王建强, 2010), 说明优质烃源岩的分布与造山过程关系密切。温湿的古气候导致降水与蒸发处于平衡(Ji et al., 2010), 并且沉积物+水的总量与总沉降量也基本一致, 湖盆表现为相对封闭状态, 湖平面增大时陆源物质输入减少, 使有机质的稀释量减小, 保证了尽可能多的有机质保存。

长<sub>7</sub><sub>3</sub>优质烃源岩形成期的火山灰沉积和深部热液流体带来了大量的营养元素(如上提到的 Fe、P、Cu、Mo、Mn 等), 这些元素的足量供给, 可能类似于 2008 年美国阿拉斯加州 Aleutian 岛弧区的 Kasatochi 火山喷发(大量 Fe 供给)促使藻类短时间内的勃发效应(Langmann et al., 2010), 从而大大提高了湖盆原始生产力, 最终有利于优质烃源岩的发育。由于有机质的富集受其生产量、消耗量和稀释量共同制约, 而生产量、消耗量和稀释量等因素主要受盆地构造演化和古气候控制。

综合上述分析, 本文给出了鄂尔多斯盆地长<sub>7</sub><sub>3</sub>优质烃源岩发育的理想模式(图 7): 盆地北部的阴山山脉最迟在中晚二叠世已经隆升, 印支期持续向盆地提供物源, 对延长期优质烃源岩的形成贡献不大。而对湖盆延长期演化产生重要影响的是南部的秦岭造山带, 秦岭山脉的隆升促使盆地的相对沉降, 改变了沉积物源的格架, 使盆地西南部方向成为又

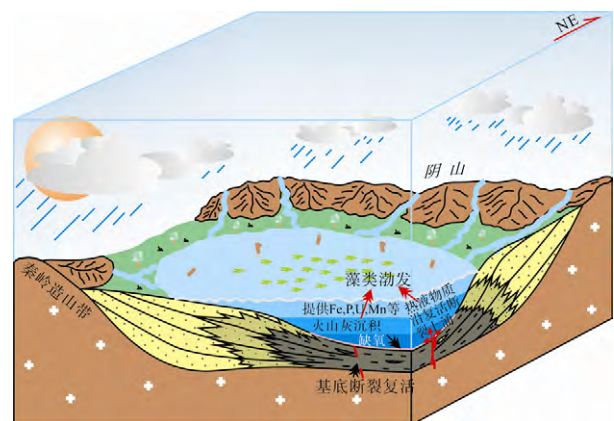


图 7 延长组长<sub>7</sub>优质烃源岩形成背景模式图  
Fig. 7 Model of Chang7 high quality hydrocarbon source rock forming background

一重要物源区,同时山脉的隆升也导致气候变得温暖、湿润,雨量充沛,对造山带物质的剥蚀搬运增强,并且有利于动植物繁盛。另一方面秦岭碰撞造山过程本身是深部物质和能量汇聚、叠加与交换的过程,陆壳增厚使岩浆作用活跃,在局部地区可能发生火山喷发作用,火山灰在湖盆中沉积,带来大量营养物质导致藻类勃发,提高有机质原始生产量;并促使湖盆深部形成缺氧环境,有机质消耗量较低,有利于保存。同时深部物质也可能以对流的形式在盆地内部表现为局部上隆,复活的基底断裂可能成为深部流体上涌的通道,这些深部流体带来的营养元素也可能对生物勃发有贡献。由于这一时期湖盆宽阔,可容空间最大,沉降速率与沉积物+水的充填速率基本一致,浊流沉积不发育,有机质稀释量最低。因此长 $T_3$ 期有机质生产量的增加、消耗量和稀释量的降低,共同促使了优质烃源岩的形成,其形成背景受盆地沉降、气候、周邻火山活动及深部流体等因素综合控制。

## 4 结论

鄂尔多斯盆地延长组优质烃源岩形成期发育的湖盆充填类型包括:长 $9_1$ 期为平衡充填三角洲前缘-深湖相组合;长 $T_3$ 期为平衡充填深湖相组合;长 $T_2$ —长 $T_1$ 期为平衡充填浊流-深湖相组合。长 $T_3$ 期沉降幅度最大,火山灰夹层较发育,深部流体作用明显,发育最优质烃源岩;长 $T_2$ —长 $T_1$ 期,构造沉降起主要控制作用,气候影响较小,发育较好烃源岩;而长 $9_1$ 早期构造沉降起控制作用,晚期气候条件对沉积物+水的控制作用明显,发育有机质丰度略低于长 $T_2$ —长 $T_1$ 期的较好烃源岩。

综合分析认为晚三叠世秦岭碰撞造山过程导致盆地基底沉降,以及温暖潮湿的古气候对湖盆充填类型及优质烃源岩的发育起控制作用,而火山灰沉积和深部热流体的输入有利于藻类勃发,促使有机质富集,从而提升湖盆原始生产力,对长 $T_3$ 优质烃源岩的形成有重要贡献。

## 参考文献:

- 陈全红,李文厚,郭艳琴,梁积伟,崔军平,张道锋. 2006. 鄂尔多斯盆地南部延长组浊积岩体系及油气勘探意义[J]. 地质学报, 80(5): 656-663.
- 孔庆芬. 2007. 鄂尔多斯盆地延长组烃源岩有机显微组分特征[J]. 新疆石油地质, 28(2): 163-166.
- 刘超,王震亮,刘池洋,孙国智. 2009. 鄂尔多斯盆地延长组延长组流体包裹体特征[J]. 地球学报, 30(2): 215-220.
- 刘池洋,赵红格,桂小军,岳乐平,赵俊峰,王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质

学报, 80(5): 617-638.

- 刘池洋,赵红格,王锋,陈洪. 2005. 鄂尔多斯盆地西缘(部)中生代构造属性[J]. 地质学报, 79(6): 738-747.
- 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[J]. 地质论评, 47(2): 207-210.
- 卢飞龙,史基安,蔡进功,王金鹏,赵欣,王琪. 2006. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组浊流沉积及成因模式[J]. 地球学报, 27(4): 303-309.
- 秦艳,张文正,彭平安,周振菊. 2009. 鄂尔多斯盆地延长组长7段富铀烃源岩的铀赋存状态与富集机理[J]. 岩石学报, 25(10): 2469-2476.
- 邱欣卫,刘池洋,毛光周,吴柏林. 2011. 鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物岩石地球化学特征[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 36(1): 139-150.
- 邱欣卫. 2011. 鄂尔多斯盆地延长期富烃凹陷特征及其形成的动力学环境(博士学位论文)[D]. 西安: 西北大学.
- 沈玉林,郭英海,李壮福,孙粉锦. 2007. 鄂尔多斯盆地北部苏里格庙含油气区上古生界层序地层研究[J]. 地球学报, 28(1): 72-78.
- 王传远,段毅,杜建国. 2008. 鄂尔多斯盆地西峰油田原油芳烃地球化学研究[J]. 地球学报, 29(5): 613-618.
- 王建强. 2010. 鄂尔多斯盆地南部中生代演化-改造及盆山耦合关系(博士学位论文)[D]. 西安: 西北大学.
- 杨华,窦伟坦,刘显阳,张才利. 2010. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J]. 沉积学报, 28(2): 254-263.
- 喻建,杨亚娟,杜金良. 2010. 鄂尔多斯盆地晚三叠世延长组湖侵期沉积特征[J]. 石油勘探与开发, 37(2): 181-187.
- 张国伟,董云鹏,裴先治,姚安平. 2002. 关于中生代环西伯利亚陆内构造体系域问题[J]. 地质通报, 21(4-5): 198-201.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社.
- 张文正,杨华,李善鹏. 2008a. 鄂尔多斯盆地长 $9_1$ 湖相优质烃源岩成藏意义[J]. 石油勘探与开发, 35(5): 557-562.
- 张文正,杨华,杨奕华,孔庆芬,吴凯. 2008b. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 37(1): 59-64.
- 张文正,杨华,谢丽琴,杨奕华. 2010. 湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响——以鄂尔多斯盆地长7烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 37(4): 424-429.
- 赵俊峰,刘池洋,王晓梅,黄雷. 2009. 吕梁山地区中—新生代隆升演化探讨[J]. 地质论评, 55(5): 663-672.
- 赵文智,胡素云,汪泽成,董大忠. 2003. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 30(5): 1-5.

## References:

- BOHACS K M, CARROLL A R, NEAL J E, MANKIEWICZ P J. 2000. Lake-basin type, source potential, and hydrocarbon character: an integrated sequence stratigraphic geochemical framework//Gierlowski-Kordesch E H, Kelts K R. Lake basins through space and time[J]. AAPG Studies in Geology, 46: 3-34.
- BOHACS K M, CARROLL A R, NEAL J E. 2003. Lessons from



- large lake systems-Thresholds, nonlinearity, and strange attractors[J]. GSA Special Paper, 370: 75-90.
- CARROLL A R, BOHACS K M. 1999. Stratigraphic classification of ancient lakes: Balancing tectonic and climatic controls[J]. *Geology*, 27(2): 99-102.
- CARROLL A R, BOHACS K M. 2001. Lake-type controls on petroleum source rock potential in nonmarine basins[J]. *AAPG Bulletin*, 85(6): 1033-1053.
- CARROLL A R, GRAHAM S A, SMITH M E. 2010. Walled sedimentary basins of China[J]. *Basin Research*, 22: 17-32.
- CECIL C B. 1990. Paleoclimate controls on stratigraphic repetition of chemical and siliciclastic rocks[J]. *Geology*, 18: 533-536.
- CHEN Quan-hong, LI Wen-hou, GUO Yan-qin, LIANG Ji-wei, CUI Jun-ping, ZHANG Dao-feng. 2006. Turbidite systems and the significance of petroleum exploration of Yanchang formation in Southern Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 656-663(in Chinese with English abstract).
- DEAN W E. 1981. Carbonate minerals and organic matter in sediments of modern north temperate hard-water lakes//Ehridge F G, FLORES R M. Recent and ancient nonmarine depositional environments-Models for exploration[J]. *Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Special Publication*, 31: 213-231.
- FELITSYN S B, KIRIANOV V Y. 2002. Mobility of phosphorus during the weathering of volcanic ashes[J]. *Lithology and Mineral Resources*, 37(3): 275-278.
- JI Li-ming, YAN Kui, MENG Fan-wei, ZHAO Min. 2010. The oleaginous *Botryococcus* from the Triassic Yanchang Formation in Ordos basin, Northwestern China: Morphology and its paleoenvironmental significance[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 38: 175-185.
- KATZ B J. 2001. Lacustrine basin hydrocarbon exploration-current thoughts[J]. *Journal of Paleolimnology*, 26: 161-179.
- KATZ B J. 2005. Controlling factors on source rock development-A review of productivity, preservation, and sedimentation rate[J]. *SEPM Special Publication*, 82: 7-16.
- KELTS K. 1988. Environments of deposition of lacustrine petroleum source rocks- an introduction//Fleet A-J, Kelts K & Talbot M-R, Lacustrine Petroleum Source Rocks[J]. *Geological Society Special Publication*, 40: 3-26.
- KONG Qing-fen. 2007. The organic maceral characteristic of Yanchang source rock in Ordos basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 28(2): 163-166(in Chinese with English abstract).
- KRUGE M A, HUBERT J F, AKES R J, MERINEY P A. 1990. Biological markers in lower Jurassic synrift lacustrine black shales, Hartford basin, Connecticut, USA[J]. *Organic Geochemistry*, 15: 281-289.
- LANGMANN B, ZAKSEK K, HORT M, DUGGEN S. 2010. Volcanic ash as fertiliser for the surface ocean[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 10: 3891-3899
- LIU Chao, WANG Zhen-liang, LIU Chi-yang, SUN Guo-zhi. 2009. Characteristics of Fluid Inclusions in Yanchang Formation of the Yanchang Oilfield, Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(2): 215-220(in Chinese with English abstract).
- LIU Chi-yang, ZHAO Hong-ge, GUI Xiao-jun, YUE Le-ping, ZHAO Jun-feng, WANG Jian-qiang. 2006. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(5): 617-638(in Chinese with English abstract).
- LIU Chi-yang, ZHAO Hong-ge, WANG Feng, CHEN Hong. 2005. Attributes of the Mesozoic structure on the west margin of the Ordos basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 738-747(in Chinese with English abstract).
- LIU Chuan-lian, XU Jin-li, WANG Pin-xian. 2001. Algal blooms: the primary mechanism in the formation of lacustrine petroleum source rocks[J]. *Geological Review*, 47(2): 207-210(in Chinese with English abstract).
- LU Long-fei, SHI Ji-an, CAI Jin-gong, WANG Jin-peng, ZHAO Xin, WANG Qi. 2006. Triassic Turbidity Current Deposit and Genetic Model of Yanchang Formation of Xifeng Oilfield, Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(4): 303-309(in Chinese with English abstract).
- QIN Yan, ZHANG Wen-zheng, PENG Ping-an, ZHOU Zhen-ju. 2009. Occurrence and concentration of uranium in the hydrocarbon source rocks of Chang7 member of Yanchang formation, Ordos basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2469-2476(in Chinese with English abstract).
- QIU Xin-wei, LIU Chi-yang, MAO Guang-zhou, WU Bo-lin. 2011. Petrological-geochemical characteristics of volcanic ash sediments in Yanchang formation in Ordos basin[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 36(1): 139-150(in Chinese with English abstract).
- QIU Xin-wei. 2011. Characteristics and dynamic settings of Yanchang period hydrocarbon-rich depression in Ordos basin[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- SHEN Yu-lin, GUO Ying-hai, LI Zhuang-fu, SUN Fen-jin. 2007. Sequence Stratigraphy Study of the Upper Paleozoic of Suligemiao Oil and Gas-bearing Area, North Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 28(1): 72-78(in Chinese with English abstract).
- WANG Chuan-yuan, DUAN Yi, DU Jian-guo. 2008. Geochemical Characteristics of Aromatic Hydrocarbon in Crude Oils from the Xifeng Oilfield of the Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 29(5): 613-618(in Chinese with English abstract).
- WANG Jian-qiang. 2010. Mesozoic-Cenozoic basin evolution-reforming and basin-mountain coupling in southern Ordos basin[D]. Xi'an: Northwest University(in Chinese with English abstract).
- WARREN J K. 1986. Shallow water evaporite environments and their source rock potential[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 56: 442-454.
- YANG Hua, DOU Wei-tan, LIU Xian-yang, ZHANG Cai-li. 2010. Analysis on sedimentary facies of member 7 in Yanchang formation of Triassic in Ordos basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(2): 254-263(in Chinese with English abstract).
- YU Jian, YANG Ya-juan, DU Jin-liang. 2010. Sedimentation during the transgression period in Late Triassic Yanchang Formation, Ordos basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 37(2): 181-187(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-wei, DONG Yun-peng, PEI Xian-zhi, YAO An-ping.

- 2002, On the Meso-Cenozoic circum-Siberian intracontinental tectonic system[J]. Geological Bulletin of China, 21(4-5): 198-201(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Guo-wei, ZHENG Ben-ren, YUAN Xue-cheng, XIAO Qing-hui. 2001. Qinling continental orogenic belt and continental dynamics[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, LI Shan-peng. 2008a. Hydrocarbon accumulation significance of Chang<sub>7</sub><sup>1</sup> high quality lacustrine source rocks of Yanchang Formation, Ordos basin[J]. Petroleum exploration and development, 35(5): 557-562(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, XIE Li-qin, YANH Yi-hua. 2010. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high quality source rock development: A case from Chang<sub>7</sub> source rocks in Ordos basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 37(4): 424-429(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Wen-zheng, YANG Hua, YANG Yi-hua, KONG Qing-fen, Wu Kai. 2008b. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang<sub>7</sub> high quality source rocks in Ordos basin[J]. Geochimica, 37(1): 59-64(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Jun-feng, LIU Chi-yang, WANG Xiao-mei, HUANG Lei. 2009. Uplifting and evolution characteristics in the Lvliang mountain and its adjacent area during the Meso-Cenozoic[J]. Geological Review, 55(5): 663-672(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Wen-zhi, HU Su-yun, WANG Ze-cheng, DONG Da-zhong. 2003. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 30(5): 1-5(in Chinese with English abstract).

## 中国地球深部探测专项在美举行专场新闻发布会 SinoProbe Special Press Conference Held in the United States

2013年12月9日,美国地球物理年会(AGU)新闻中心举行了中国地球深部探测专项(SinoProbe)专场新闻发布会——“SinoProbe:一个前所未有的洞察地球最大大陆的科学计划”(SinoProbe: An Unprecedented View Insight Earth's Largest Continent)。

美国地球物理学会是世界上最著名的地球科学学会之一,每年的秋季年会规模均达到2万人左右,成为世界上规模最大、层次最高的地学交流会。而在美国地球物理学会年会上举行中国科研项目的新闻发布会还是第一次。

AGU公众新闻部主任 Peter Weiss 先生向美国科学新闻记者和有关杂志编辑介绍了主持发布会的 SinoProbe 首席科学家、中国地质科学院副院长董树文研究员, SinoProbe-03 首席、中国地质科学院矿产资源研究所吕庆田研究员,以及美国斯坦福大学 Simon Kelemperer 教授和密苏里大学 Mian Liu 教授。

董树文研究员首先发布了 SinoProbe 专项研究背景和主要进展,特别是科学发现和技术进步。重点介绍了中国政府以“实施地壳探测工程,提升对地球认知、矿产资源勘查和地质灾害预警水平”为目的,2008—2012年由国土资源部组织地壳探测工程的培育性专项“深部探测技术与实验研究”(SinoProbe-I),中国地质科学院负责实施。由中国不同部门约1500多名科学家和工程师,以及研究生参加了深部探测专项的9个项目和49个课题。5年来探测并获得了海量地球深部高质量科学数据和一系列重要发现,包括:完成6156 km长的深反射地震剖面,覆盖全国大陆的大地电磁阵列探测(华北和青藏高原 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ )、全国地球化学78种元素的基准网、重点矿集区立体探测、局域地应力深孔监测网、12口科学钻和地球物理验证孔2万米进尺、建立了数千万有限单元计算平台,自主研发万米科学钻机、无人机航磁系统、大功率电磁仪和移动数据综合处理系统等。首次获得青藏高原腹地的MOHO和下地壳反射,已经发表了600多篇科学论文、获得发明专利52个,国际合作进展顺利,先后在AGU(2009—2013)、国际地质大会(IGC, 2012)和欧洲地学大会(EGU, 2013)等国际会议上广泛交流,主持发起了“国际岩石圈结构探测研讨会”(北京, 2011),均产生良好的反响。

SinoProbe 这是连续第五年参加 AGU 会议,今年由 SinoProbe 牵头主持了“岩石圈结构深部探测”主题有3个展板专场,并在会展中心设立了专项的展台,集中展示专项5年来的成果,受到热情关注。

本刊编辑部 采编