

鄂尔多斯盆地延长组7段有机质富集主控因素

袁伟^{1,2}, 柳广弟¹, 徐黎明³, 牛小兵³

[1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 3. 中国石油 长庆油田分公司, 陕西 西安 710021]

摘要:鄂尔多斯盆地延长组7段(长7段)富有机质页岩中的有机碳含量呈异常高值,其有机质的富集从根本上来说是受古构造、古气候、古沉积环境和事件作用综合控制的。对这些控制因素进行分析,并探讨了他们在富有机质页岩形成过程中的作用。结果表明:长7段沉积期强烈的构造活动对有机质的富集起到了非常重要的作用,一方面导致盆地整体沉降,湖盆面积扩大,从而使得可容空间增大;另一方面诱发了多期的火山和湖底热液活动,并借此向湖泊中输送了大量的营养物质。充足的生长空间、丰富的营养物质和适宜的气候条件使得水生生物异常繁盛(湖泊初始生产力极高),这为富有机质页岩的形成提供了丰富的物质基础。尽管长7段沉积期氧化-亚氧化的底水环境不利于有机质的保存,但是在供给量充足的前提下,仍然使得大量的有机质保存了下来,从而造成了有机质在沉积物中的大量富集。

关键词:火山活动;湖底热液;古构造;古气候;古沉积环境;页岩;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Main controlling factors for organic matter enrichment in Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin

Yuan Wei^{1,2}, Liu Guangdi¹, Xu Liming³, Niu Xiaobing³

[1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. College of Geoscience, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710021, China]

Abstract: The TOC content of organic-rich shales in Chang 7 member of the Yanchang Formation in Ordos Basin is abnormally high. The organic matter enrichment is essentially controlled by a combination of paleostructures, paleoclimate, paleosedimentary environments and events. We have analyzed these controlling factors and discussed their roles in the formation of organic-rich shales of the study area. The results show that the strong tectonic activity in the depositional period of Chang 7 member played a very important role in its enrichment of organic matter. Firstly, it led to a wide-scale subsidence of the whole basin and to an expansion of the lake water surface, producing more accommodation space. Furthermore, it induced multi-stage volcanic and submerged hydrothermal activities, and thereby delivered a large amount of nutrients to the lake. Sufficient growth space, rich nutrients supply and suitable climatic conditions have made aquatic organisms flourish (the lacustrine primary productivity was extremely high), which has provided a rich material basis for the formation of organic-rich shales. Although the oxydic-suboxydic bottom-water environment in Chang 7 sedimentary period is not ideal to the preservation of organic matter, a large number of organic matters are still preserved due to adequate influx, resulting in the enrichment of organic matter in the sediments.

Key words: volcanic activity, submerged hydrothermal fluid, paleostructure, paleoclimate, paleosedimentary environment, shale, Yanchang Formation, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地延长组7段(长7段)富有机质页岩是该盆地中生代含油系统中最重要的烃源岩,为延长

组、甚至上部延安组的油气聚集提供了充足的油源。这套富有机质页岩含有大量的有机质,其总有机碳

收稿日期:2018-01-22;修订日期:2018-08-20。

第一作者简介:袁伟(1988—),男,博士,烃源岩形成机理、形成环境及相关地球化学。E-mail: gujingyw@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41772127);国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239003)。

(TOC)含量一般为6%~14%,最高可达30%以上^[1],这在国内外的湖相盆地中是非常少见的。这种有机质含量异常高的情况可能与长7段页岩形成时期特殊的地质背景和沉积环境有关。富有机质页岩的形成本质是有机质在沉积物中的富集,这一过程受多种因素的综合影响。前人的研究表明有机质供给、保存和沉积速率是有机质富集的主要控制因素^[2-10]。鄂尔多斯盆地中沉积的有机质基本上属于盆内自生的低等水生植物,陆源输入很少,因此其有机质供给主要与湖泊的初级生产力有关。有机质的保存主要与湖盆底水的氧化还原条件有关,一般还原程度越强,越有利于有机质的保存^[3-4]。而沉积速率对有机质富集的影响则较为复杂,既可以促进有机质富集,也可以对沉积物中的有机质起稀释作用^[4,11]。古生产力的大小、氧化还原程度的强弱及沉积速率的大小又受到古构造、古气候、古沉积环境和事件作用的影响。因此,古构造、古气候、古沉积环境和事件作用是控制鄂尔多斯盆地长7段富有机质页岩形成的根本性因素。本文将对这些因素逐个进行分析,探讨它们是如何影响有机质供给、有机质保存和沉积速率,并进而控制富有机质页岩形成的。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台的西部,是一个多旋回沉积型克拉通类含油气盆地,也是中国第二大沉积盆地,具有巨大的资源潜力^[12-13]。在中生代之前,鄂尔多斯盆地属于华北克拉通的一部分,到三叠世晚期,鄂尔多斯盆地从浅海沉积过渡为陆相淡水湖泊沉积^[13-15]。上三叠统延长组发育一套河流-三角洲-湖泊的陆源碎屑沉积体系^[16],总厚度约为1 000~1 300 m^[17]。根据标志层、沉积旋回、岩性组合,延长组从下到上可以划分为10个油层组(长10—长1),其中长7油层组(长7段)是富有机质页岩发育的主要层段,也是本次研究的对象。长7段主要由粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、油页岩及凝灰岩(火山灰蚀变物)夹层构成,总厚度约为80~120 m。长7段富有机质页岩主要分布在陕北斜坡东南部和天环坳陷南部(图1),其分布面积超过10⁵ km²^[17]。

2 有机质富集主控因素

2.1 古构造

鄂尔多斯盆地在晚三叠世的构造活动主要受印支运动的控制。在长7沉积期的初始阶段,盆地南缘的

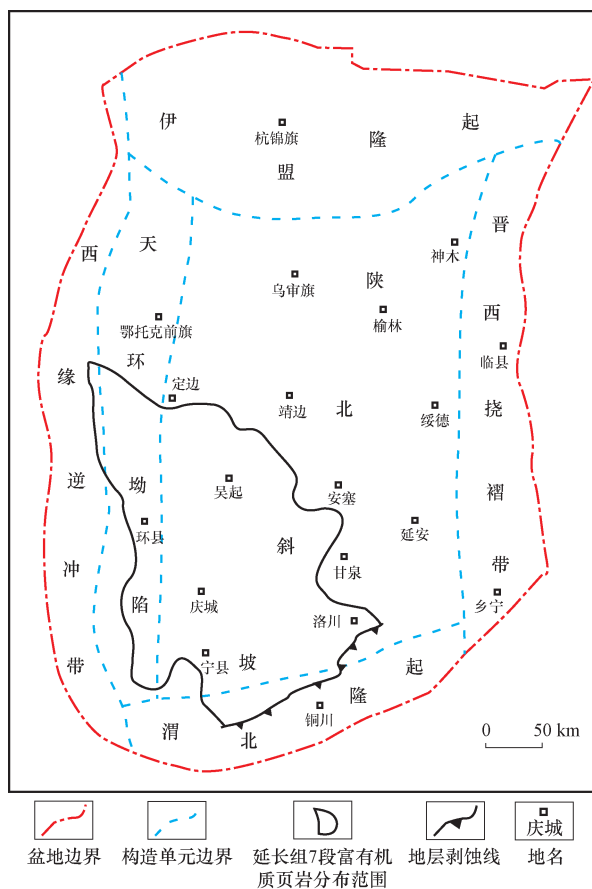


图1 鄂尔多斯盆地地理位置及构造单元划分

Fig. 1 Geographical location and division of structural units in the Ordos Basin

秦岭山脉在印支运动的作用下快速隆升,而盆地内的东南部则迅速下陷。近年来,许多研究表明延长组长8到长7沉积期之间存在着构造突变,并认为这种构造的变化是对印支运动I幕的响应^[18-19],构造突变主要体现在以下几个方面。

1) 湖盆底型变化

长8段沉积之前湖盆宽缓,并不存在陡坡,长7段沉积初期湖盆才开始变陡,形成南陡北缓的沉积格局^[20]。

2) 沉积环境变化

长8段沉积期主要发育河流-三角洲沉积,而长7段沉积期的湖泊面积急剧扩大(为最大湖泛期),水体变深,主要发育湖相泥质沉积^[21]。

3) 岩性变化

长8段的岩性为灰绿色、灰色细砂岩夹暗色泥岩、粉砂岩,而长7段的岩性主要为暗色泥岩、油页岩夹粉、细砂岩、薄层凝灰岩^[22]。长8段砂岩中的岩屑、石英、长石的含量基本相等,且不含白云石碎屑,而长7段砂岩中的岩屑、石英、长石的含量差异较大,并普遍含有

白云石碎屑,说明其物源变化较大,没有继承性^①。

4) 强烈构造活动

长7段富有机质页岩中存在许多的震积岩(图2a—c)和广泛分布的薄层或纹层状凝灰岩(图2d,e),并且也发现了许多热液存在的证据(如脉状黄铁矿)(图2f)。这些事件沉积现象反映了长7段沉积期火山和热液活动等事件作用频发,而火山和热液活动往往是强烈构造活动最直接的体现。

鄂尔多斯盆地长8段与长7段沉积期之间强烈的构造活动一方面使得湖盆快速沉降,水体深度增加,湖盆面积扩大,增大了湖盆的可容空间,另一方面强烈的

构造活动所诱发的火山、地震活动通过火山灰沉积物和湖底热液向湖盆水体提供了大量生物生长所需的营养物质,可以促使生物的勃发,提高湖泊的初始生产力。因此,构造活动对鄂尔多斯盆地长7段富有机质页岩的形成有巨大的影响。

2.2 古气候

2.2.1 古纬度

傅强等^[23]通过古地磁分析,恢复了鄂尔多斯盆地晚三叠世延长期的古纬度,认为鄂尔多斯盆地延长组沉积时期湖盆的古纬度为北纬31.03°,比现在所处的

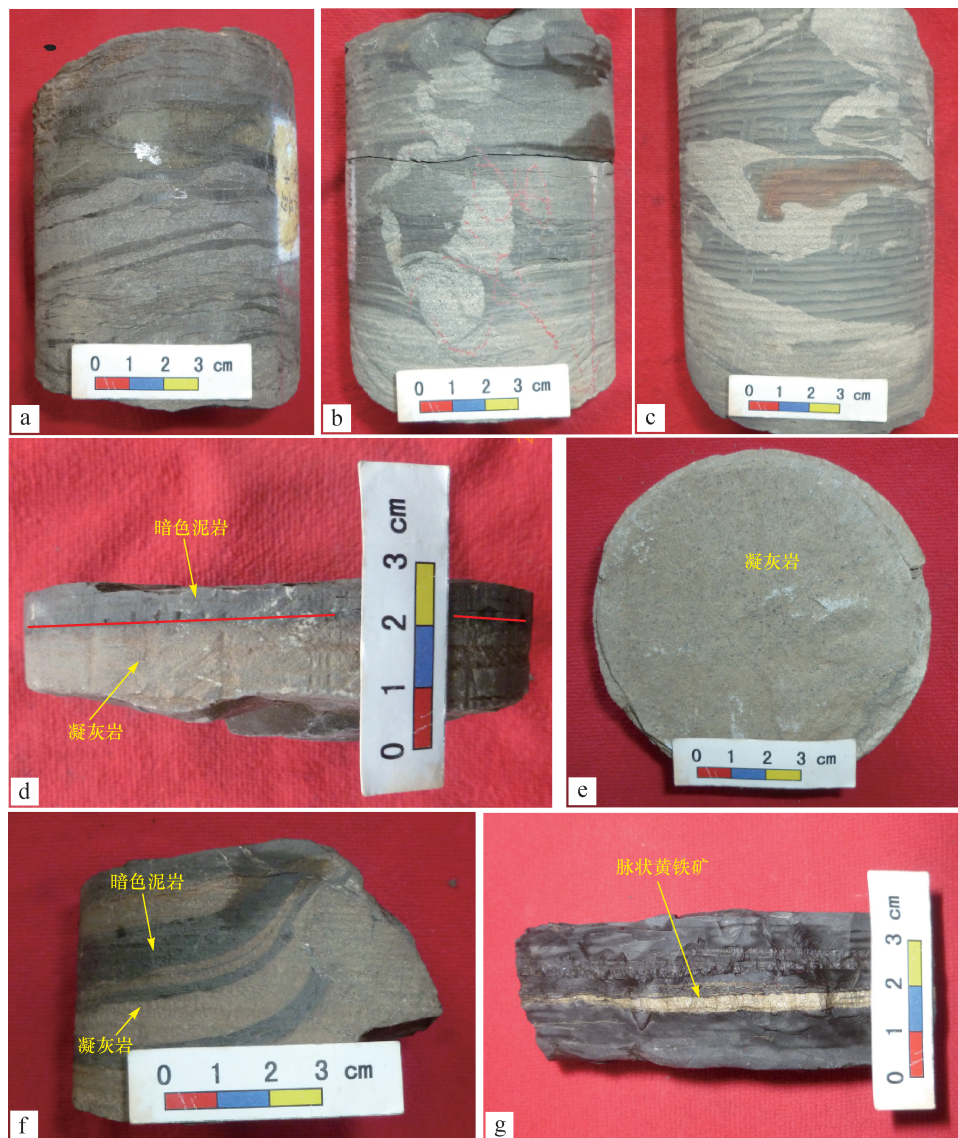


图2 鄂尔多斯盆地延长组7段岩心照片

Fig. 2 Core photographs of the 7th member of the Yanchang Formation, Ordos Basin

a. 震积岩,镇388井,埋深2 038.54 m; b. 震积岩,宁76井,埋深1 738.40 m; c. 震积岩,宁76井,埋深1 775.55 m; d. 薄层凝灰岩,宁76井,埋深1 730.00 m; e. 凝灰岩,午100井,埋深2 015.22 m; f. 凝灰岩与暗色泥岩互层,并发生了构造变形,午100井,埋深1 914.13 m; g. 富有机质页岩夹脉状黄铁矿,新36井,埋深2 188.58 m

① 贺静.《岩石薄片分析技术及应用》学术讲座,2017.

纬度(35.1°)偏南4°多,相当于现在长江沿线一带的位置,因此,其温度与湿度均相对较高。

2.2.2 孢粉分析

Ji^[24]通过对鄂尔多斯盆地陇东地区长8—长7段的孢粉分析和植物群特征的研究,认为晚三叠世长8—长7段沉积期为持续温暖潮湿的古气候。王磊^[25]也对鄂尔多斯盆地南部区域长7段的露头 and 岩心样品进行了孢粉分析,其孢粉组合特征也表明,长7段富有机质页岩沉积期为热带—亚热带温暖潮湿的古气候。从以上两个地区的孢粉分析结果来看,其古气候特征显示出很好的相似性,这可能与盆地当时所处的古纬度有关。由此可以推测,鄂尔多斯盆地在长7沉积期可能都处于热带—亚热带温暖潮湿的古气候条件之下。

2.2.3 气候指数

从元素上来说,在潮湿气候条件下,沉积物(岩)中Fe, Mn, Cr, V, Ni 和 Co 等元素含量较高,而在干燥气候条件下,由于水分的蒸发,水介质的碱性增强, Ca, Mg, K, Na, Sr 和 Ba 被大量析出形成各种盐类沉积在水底,所以它们的含量相对较高^[26]。赵增义^[26]利用这两类元素的比值定义了气候指数“C”值:

$$C = \frac{\sum (Fe + Mn + Cr + Ni + V + Co)}{\sum (Ca + Mg + Sr + Ba + K + Na)}$$

建立了划分标准(表1),并以此来对古气候进行恢复。

利用鄂尔多斯盆地长7段富有机质页岩样品的元素分析数据,计算了气候指数“C”值,并结合TOC含量数据,绘制了两者之间的关系图(图3)。从图中可以看出,研究区大部分样品的气候指数值大于0.8,属于潮湿的气候条件;少部分样品的气候指数值介于0.6~0.8,属于半潮湿的气候条件;只有极个别样品的气候指数值小于0.6。图3表明鄂尔多斯盆地长7沉积期整体属于潮湿的气候条件。而且气候指数“C”值与TOC含量呈正相关关系,说明气候条件越潮湿,越有利于富有机质页岩的形成。

综上可知,鄂尔多斯盆地晚三叠世长7段沉积期具有温暖潮湿的古气候条件,其一方面可以提供充足的光照,另一方面可以维持水体表层的温度,这些都有利于水生生物的生长和繁盛,提高湖泊的初级生产力。

表1 气候条件划分标准^[26]

Table 1 Standards for climate classification^[26]

气候指数(C)	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
气候条件	干燥	半干燥	半干燥—半潮湿	半潮湿	潮湿

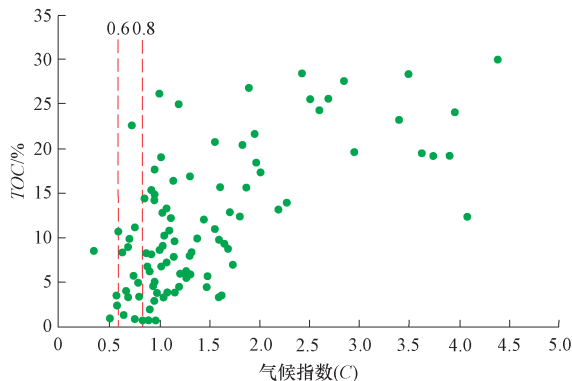


图3 鄂尔多斯盆地长7段气候指数(C)与TOC含量的关系

Fig. 3 The relationship of climate proxy “C” and TOC content of Chang 7 member in the Ordos Basin
(图中红色虚线分别表示 C=0.6 和 C=0.8)

2.3 古沉积环境

2.3.1 古盐度

锶(Sr)、钡(Ba)、硼(B)和镓(Ga)等微量元素在不同盐度水体中的溶解度相差很大,因此它们可以用来判断水体的盐度^[25]。Sr在咸水中的含量一般为 $(800 \sim 1\,000) \times 10^{-6}$,在淡水中的含量为 $(100 \sim 300) \times 10^{-6}$;而Sr/Ba比值大于1为咸水,在0.6~1为半咸水,小于0.6为淡水环境^[25]。B在咸水中的含量一般大于 100×10^{-6} ,在半咸水中的含量为 $(60 \sim 100) \times 10^{-6}$,在淡水中的含量小于 60×10^{-6} ;而B/Ga比值大于3.3为咸水,小于3.3为淡水环境^[25]。

通过对鄂尔多斯盆地长7段富有机质页岩的微量元素分析(表2)得知,延长组长7¹、长7²和长7³小层的Sr平均值分别为 269.6×10^{-6} , 193.5×10^{-6} 和 236.6×10^{-6} , Sr/Ba的平均值分别为0.35, 0.28和0.38; B平均值分别为 65.3×10^{-6} , 14.0×10^{-6} 和 46.1×10^{-6} , B/Ga的平均值分别为2.84, 0.64和2.72。结合上述的判断标准,可以判断鄂尔多斯盆地长7段沉积过程中湖盆水体为淡水环境。

表2 鄂尔多斯盆地长7段古盐度参数

Table 2 Paleo-salinity parameters of Chang 7 member in the Ordos Basin

层位	Sr 平均值			B 平均值		
	Sr 含量/ 10^{-6}	Sr/Ba 样品个数		B 含量/ 10^{-6}	B/Ga 样品个数	
长7 ¹	269.6	0.35	55	65.3	2.84	1
长7 ²	193.5	0.28	56	14.0	0.64	9
长7 ³	236.2	0.38	82	46.1	2.72	7
长7	233.3	0.34	193	30.3	1.63	17

2.3.2 氧化还原环境

前人利用不同的方法对鄂尔多斯盆地长7段沉积期的沉积环境进行了研究,但是其结果是相互矛盾的:有机地化指标(如 Pr/Ph 值、伽马蜡烷含量)表明湖盆底水是氧化的^[27],而微量元素指标(如 $V/(V+Ni)$, U/Th , V/Sc)则反映出缺氧环境的特征^[25,27-28]。由于沉积物中的微量元素含量受陆源碎屑、初级生产力、有机质来源和早期成岩作用等多种因素和机理的控制,因此,根据微量元素指标来判断氧化还原条件有可能是不可靠的^[29]。对于鄂尔多斯盆地长7沉积期来说,其构造活动强烈,火山、热液活动频发^[20,28],致使该时期的微量元素来源非常复杂,所以微量元素指标在长7期可能并不适用。此外,微量元素指标很难判断氧化还原界面的位置是在沉积物中还是在水体之中^[29]。因此,笔者在之前的研究中,利用草莓状黄铁矿的平均直径(图4)、有机碳含量与磷(P)含量的摩尔比值($C_{TOC}:P$)及黄铁矿矿化度(DOP)对鄂尔多斯盆地长7沉积期的底水环境进行了判识,其结果表明长7期的底水主要为氧化-亚氧化、并伴有间歇性还原的环境^[30]。张文正等^[31]的最新研究成果也表明鄂尔多斯长7期的底水环境是氧化的,并且氧化-还原界面可能与沉积物-水界面一致。

2.3.3 古水深

对鄂尔多斯盆地长7段沉积期的古水深,已有一些学者进行了研究。陈全红^[32]通过对大量沉积构造及介形虫的统计分析,推测长7段湖盆鼎盛时期的最大水深可达60 m。

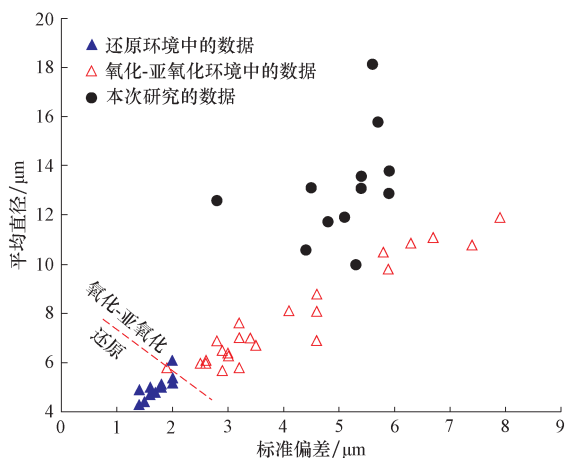


图4 草莓状黄铁矿的平均直径和标准偏差交汇图^[30]

Fig. 4 Crossplot showing the mean diameter and the diameter standard deviation of the framboidal pyrite^[30]

邱欣卫^[28]根据长7段油页岩的 U/Th 值,对长7段沉积期的古水深进行了恢复,并认为湖盆的水体深度为60~100 m。但是这一研究结果的可靠性仍值得商榷,因为其古水深计算方法的主要两点假设之一(即随水体深度的增加,还原环境增强,古水深与 U/Th 值呈线性正相关关系),笔者认为是不成立的。因为对于鄂尔多斯盆地长7段富有机质页岩来说,其U元素主要赋存于胶磷矿中^[33-34],而胶磷矿又往往是在氧化的底水环境下富集而成^[30]。因此,U元素在氧化的底水条件下也可以发生聚集, U/Th 值与还原强度(或古水深)并不是呈线性相关的。而且由于长7期的火山、热液活动提供了丰富的U源,致使长7段富有机质页岩中的U具有异常高值的特征^[27],那么根据 U/Th 值所计算的古水深也可能会偏大。

此外,从鄂尔多斯盆地长7富有机质页岩的薄片中发现了许多瓣鳃类化石(图5)。这些化石壳体个体较小,壳体差异大,呈长椭圆形、椭圆形、近卵形、斜三角形和近菱形等,并且在长7¹-长7³小层均有分布。瓣鳃类化石通常指示开阔的浅湖(深度10~35 m)环境^[35],这说明鄂尔多斯盆地长7段沉积期的水体深度可能不会太深。并且从湖盆底水的氧化还原条件来看,长7段沉积期主要为氧化-亚氧化的底水环境,其可能的成因之一就是水体深度偏浅。而至于水体深度具体的定量评价,目前尚无法确定。

综上所述,淡水的环境限制了非淡水生物的生长,而只适合淡水的藻类、鱼类和瓣鳃类等生物的生长。由于水体深度偏浅等原因,湖泊的底水环境以氧化-亚氧化为主,这种环境会增加沉积有机质的消耗,不利于有机质的保存。

2.4 事件作用

2.4.1 火山活动

鄂尔多斯盆地长7期的火山活动向湖盆中输送了大量的火山灰沉积物。根据鄂尔多斯盆地长7段富有机质页岩样品、凝灰岩样品及长8段页岩样品的元素分析数据,结合收集的公开发表且与研究区凝灰岩性质相似的中酸性新鲜火山灰的成分数据^[11],对他们中的P和Fe含量进行了对比分析(表3)。统计结果表明,长7段富有机质页岩的 P_2O_5 和 TFe 含量分别为0.08%~6.24%,2.97%~19.15%,平均值分别为0.40%和8.00%。与北美页岩(P_2O_5 和TFe含量的平均值分别为0.13%和5.66%^[36])和长8段页岩(P_2O_5 和TFe含量的平均值分别为0.08%和4.62%)相比,长7段富有机质页岩具有高 P_2O_5 和

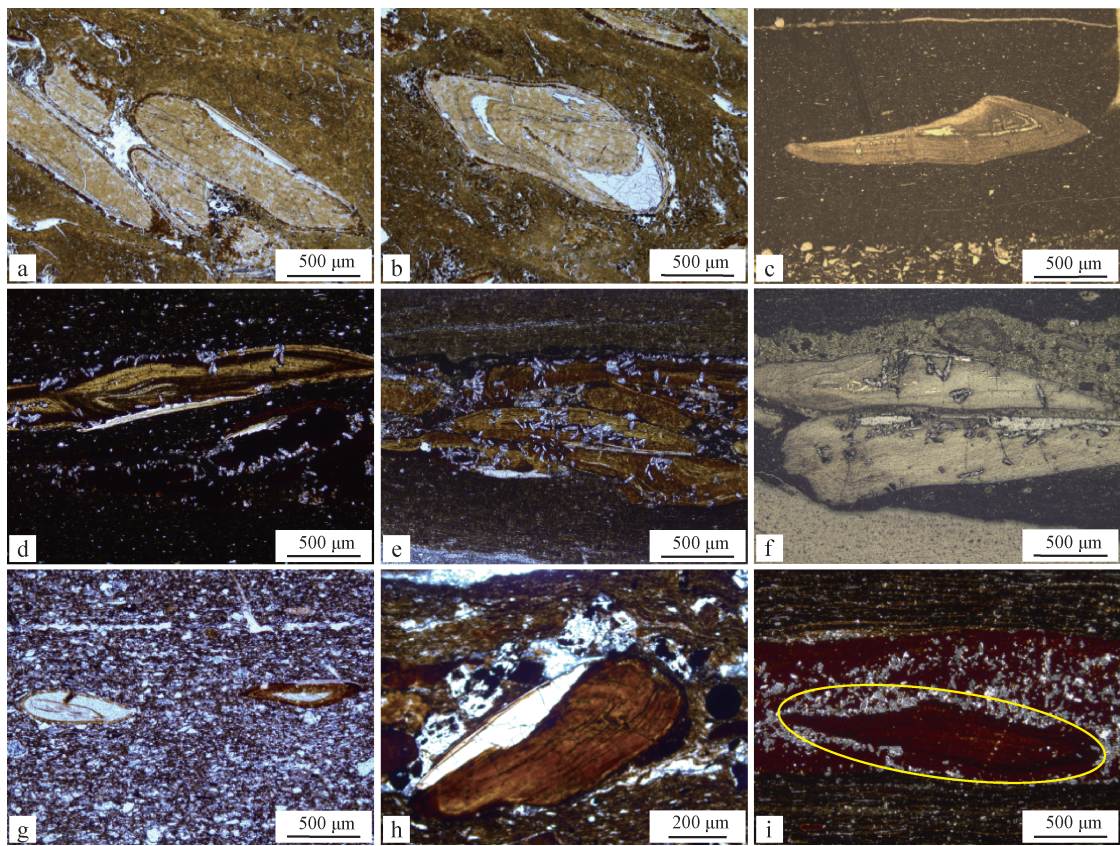


图 5 鄂尔多斯盆地长 7 段富有机质页岩中的瓣鳃类化石

Fig. 5 The lamellibranchia fossils in the Chang 7 organic-rich shales, Ordos Basin

a, b. 午 100 井, 埋深 2 002.20 m, 长 7³ 段; c. 午 100 井, 埋深 1 991.80 m, 长 7³ 段; d. 午 100 井, 埋深 1 916.90 m, 长 7¹ 段; e. 午 100 井, 埋深 1 914.85 m, 长 7¹ 段; f. 元 423 井, 埋深 2 402.17 m, 长 7² 段; g. 新 36 井, 埋深 2 174.60 m, 长 7³ 段; h. 新 36 井, 埋深 2 188.56 m, 长 7³ 段; i. 庄 62 井, 埋深 1 943.00 m, 长 7³ 段

表 3 鄂尔多斯盆地凝灰岩、页岩与新鲜火山灰、北美页岩
主量元素均值对比

Table 3 Comparison of mean content of major elements
in tuffs and shales of Ordos Basin with those in fresh
volcanic ash and North American shales

岩性	主量元素含量/%								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
北美页岩	64.80	0.70	16.90	5.66	2.86	3.63	1.14	3.97	0.13
长 8 页岩	61.19	0.74	18.15	4.62	1.82	0.23	1.43	3.35	0.08
长 7 富有机质页岩	52.14	0.62	16.08	8.00	1.76	1.40	1.16	2.78	0.40
长 7 凝灰岩	63.61	0.31	21.63	1.76	1.29	0.42	1.30	2.67	0.08
新鲜火山灰	62.11	0.65	15.98	5.60	1.98	4.81	4.32	1.83	0.27

TFe 含量的特征。然而,长 7 段凝灰岩的 P₂O₅ 和 TFe 含量分别为 0.02%~0.36%,0.77%~8.28%,平均值分别为 0.08%和 1.76%,它比新鲜火山灰的 P₂O₅ 和 TFe 含量(平均值分别为 0.27%和 5.60%)明显低很多。

一些新鲜火山灰的溶解实验表明,当火山灰进入水中之后,能够快速(分钟级)释放大量的 P、Fe 和其他各种离子^[37-39]。由此可知,火山灰的 P 和 Fe 含量会在沉积过程中出现损失。这些 P₂O₅ 和 TFe 含量的数据表明,当火山灰沉积时,P 和 Fe 元素从火山灰中转移到了湖盆水体之中,并通过生物地球化学循环保存到了之后形成的富有机质页岩中。因此,造成了长 7 段凝灰岩中 P 和 Fe 含量低而富有机质页岩中 P 和 Fe 含量高的现象。并且长 7 段富有机质页岩的 TOC 含量与 P₂O₅ 和 TFe 含量具有正相关关系(图 6)。这表明长 7 期火山活动提供的火山灰沉积物可能控制了 P₂O₅ 和 TFe 含量的分布,从而进一步影响了富有机质页岩的形成。

2.4.2 湖底热液活动

对于鄂尔多斯盆地延长组,尤其是长 7 段的湖底热液活动,已经有许多学者关注并进行了相关研究,发现了大量证实热液活动的矿物岩石学证据、主微

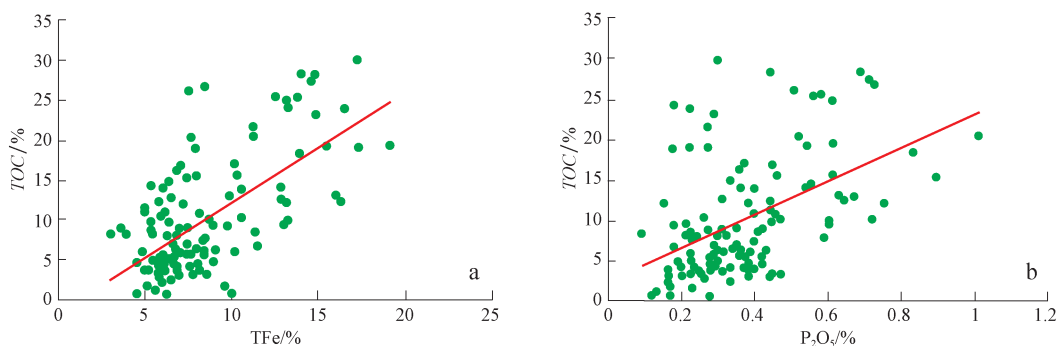


图6 鄂尔多斯盆地长7富有机质页岩TOC含量与 P_2O_5 (a)和TFe(b)含量关系

Fig. 6 Correlation of TOC contents with P_2O_5 (a) and TFe(b) contents of the Chang 7 organic-rich shales, Ordos Basin

量元素和同位素地球化学证据,并在此基础上探索了湖底热液活动与长7段富有机质页岩形成的关系^[20,28,40-42]。

张文正等^[40]认为热液流体中含有丰富的P, N, Cu, Fe, Mo和Mn等生物所需的营养元素,鄂尔多斯盆地长7期的湖底热液活动一方面可以向湖盆水体中输送大量的营养物质,另一方面也可以提高水体的温度,形成适宜生物生长的古水温条件。丰富的营养物质和适宜的生长环境为生物的繁盛(古生产力的提高)提供了有利的条件。

由于富有机质页岩中的 $Al/(Al + Fe + Mn)$ 和 $(Fe + Mn)/Ti$ 比值可以反映热液活动的存在情况^[41-42],在典型的热液沉积中, $Al/(Al + Fe + Mn)$ 比值通常小于0.4,而 $(Fe + Mn)/Ti$ 比值则要大于15^[42]。因此,可以根据这两者的数据与对应的TOC含量的关系来推断热液活动对有机质富集的影响。贺聪等^[41]研究了热液指标 $Al/(Al + Fe + Mn)$ 、 $(Fe + Mn)/Ti$ 与古生产力指标 P/Al 、 P/Ti 和氧化还原指标TS(总硫)的关系,发现热液指标与古生产力指标、氧化还原指标均具有较好的相关关系,说明湖底热液活动可能有助于提高湖泊的古生产力和促进底水缺氧环境的形成。此外,他们还分析了热液指标 $Al/(Al + Fe + Mn)$ 、 $(Fe + Mn)/Ti$ 与富有机质页岩中TOC含量的关系,发现它们也表现出较好的相关性,说明热液活动与富有机质发育之间具有密切的关系,即湖底热液活动的存在可以促进页岩有机质的富集^[41]。

2.4.3 事件作用的影响

鄂尔多斯盆地长7沉积期的事件作用主要为火山、湖底热液活动。火山灰沉积物和湖底热液流体对长7段富有机质页岩形成的影响归结起来主要有以下两点。

1) 提供营养物质,提高初级生产力

火山灰沉积物在沉降过程中,其吸附的气体或某

些组分会在水体之中发生溶解,并释放出大量的营养物质(如P和Fe),从而促进生物的繁盛。而湖底热液除了其自生所携带的营养物质之外,它也可以把湖底之前沉积的富营养组分带入水体表层,重新被生物所利用。TOC与P, Fe含量和热液指标显示出良好的相关关系,说明火山灰沉积物和湖底热液流体的营养作用(或施肥作用)在富有机质页岩的形成过程中起到了重要的控制作用。

2) 改变湖盆底水的氧化还原条件

在火山喷发或湖底热液活动时期,由于它们提供了充足的营养供给,湖泊往往具有极高的初始生产力,从而导致沉入湖底的有机质也相应增加。有机质的降解是一个耗氧的过程,大量有机质的降解造成了底水的缺氧环境。鄂尔多斯盆地长7沉积期湖盆底水间歇性还原的特征可能就是由间歇性的火山和湖底热液活动所引起的。

3 结论

1) 鄂尔多斯盆地延长组长7段富有机质页岩的形成,不是由某一种因素所决定的,而是由古构造、古气候、古沉积环境和事件作用等多因素相互耦合、共同影响的。这些因素综合控制了湖泊有机质的供给和沉积有机质的保存,从而造成了长7段富有机质页岩的形成。

2) 在长7沉积期,强烈的构造活动一方面导致盆地整体沉降,湖盆面积扩大,从而使得可容空间增大;另一方面诱发了多期的火山和湖底热液活动,并通过火山灰沉积物和热液流体向湖泊中输送了大量的营养物质。充足的生长空间、丰富的营养物质和适宜的气候条件使得水生生物异常繁盛(湖泊初始生产力极高),这为富有机质页岩的形成提供了丰富的物质基础。尽管长7期氧化-亚氧化的底水环境会对沉积有

机质起到很大的破坏作用,但是在供给量充足的前提下,有机质的降解量远小于其输入量,从而使得大量的有机质保存了下来,并造成了有机质在沉积物中的大量富集。

参 考 文 献

- [1] 杨华,张文正.论鄂尔多斯盆地长7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:地质地球化学特征[J].地球化学,2005,34(2):147-154.
Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low-penetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry[J]. *Geochimica*, 2005, 34(2): 147-154.
- [2] 孙平昌.松辽盆地东南部上白垩统含油页岩系有机质富集环境动力学[D].长春:吉林大学,2013.
Sun Pingchang. Environmental dynamics of organic accumulation in the oil shale bearing layers in the Upper Cretaceous, Southeast Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [3] 丁修建.小型断陷湖盆高丰度烃源岩形成机理及其对成藏的控制—以二连盆地为例[D].北京:中国石油大学(北京),2014.
Ding Xiujian. Formation mechanism of effective source rock and its control on hydrocarbon accumulation in small faulted lacustrine basin: A case study of Erlian Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2014.
- [4] 丁修建,柳广弟,查明,等.沉积速率与烃源岩有机质丰度关系—以二连盆地为例[J].天然气地球科学,2015,26(6):1076-1081.
Ding Xiujian, Liu Guangdi, Zha Ming, et al. Relationship between sedimentation rate and organic matter abundance of source rocks: A case study of Erlian Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(6): 1076-1085.
- [5] Calvert T F. Anoxia vs. productivity: what controls the formation of organic carbon rich sediments and sedimentary rocks? [J] *AAPG Bulletin*, 1990, 4(74): 454-466.
- [6] Arthur M A, Dean W E. Organic matter production and preservation and evolution of anoxia in the Holocene Black Sea[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(4): 395-411.
- [7] Arthur M A, Sagemen B B. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient depositions[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1994, 22: 499-551.
- [8] Tyson R V. Sedimentation rate, dilution, preservation and total organic carbon: Some results of a modelling study[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(11): 333-339.
- [9] Hetenyi M, Sajgo C, Veto I, et al. Organic matter in a low productivity anoxic intraplatform basin in the Triassic Tethys[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, 35(11-12): 1201-1219.
- [10] Gallego-Torres D, Martinez R F, Paytan A, et al. Pliocene-Holocene evolution of depositional conditions in the eastern Mediterranean: Role of anoxia vs. productivity at time of sapropel deposition[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 246(2-4): 424-439.
- [11] 袁伟,柳广弟,罗文斌,等.鄂尔多斯盆地长7段富有机质页岩中磷灰石类型及其成因[J].天然气地球科学,2016,27(8):1399-1408.
Yuan Wei, Liu Guangdi, Luo Wenbin, et al. Species and formation mechanism of apatite in the 7th member of Yanchang Formation organic-rich shale of Ordos Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(8): 1399-1408.
- [12] 杨华,邓秀芹.构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响[J].石油勘探与开发,2013,40(5):513-520.
Yang Hua, Deng Xiuqin. Deposition of Yanchang Formation deep-water sandstone under the control of tectonic events, Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(5): 513-520.
- [13] Qiu X W, Liu C Y, Mao G Z, et al. Late Triassic tuff intervals in the Ordos Basin, Central China: their depositional, petrographic, geochemical characteristics and regional implications[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2014, 80: 148-160.
- [14] Wan Y S, Xie H Q, Yang H, et al. Is the Ordos block Archean or Paleoproterozoic in age? Implications for the Precambrian evolution of the North China Craton[J]. *American Journal of Science*, 2013, 313: 683-711.
- [15] 张文正,杨华,杨奕华,等.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,2008,37(1):59-64.
Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang 7 high quality source rock in Ordos Basin[J]. *Geochimica*, 2008, 37(1): 59-64.
- [16] 武富礼,李文厚,李玉宏,等.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组三角洲沉积及演化[J].古地理学报,2004,6(3):307-314.
Wu Fuli, Li Wenhui, Li Yuhong, et al. Delta sediments and evolution of the Yanchang Formation of Upper Triassic in Ordos Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(3): 307-314.
- [17] Qiu X W, Liu C Y, Mao G Z, et al. Major, trace and platinum-group element geochemistry of the Upper Triassic nonmarine hot shales in the Ordos Basin, Central China[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 53: 42-52.
- [18] 陈安清,陈洪德,侯明才,等.鄂尔多斯盆地中一晚三叠世事件沉积对印支运动I幕的指示[J].地质学报,2011,85(10):1681-1689.
Chen Anqing, Chen Hongde, Hou Mingcai, et al. The middle-late Triassic event sediments in Ordos Basin: Indicators I for episode of the Indosinian movement[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10): 1681-1689.
- [19] 邓秀芹,李文厚,刘新社,等.鄂尔多斯盆地中三叠统与上三叠统地层界线讨论[J].地质学报,2009,83(8):1089-1095.
Deng Xiuqin, Li Wenhui, Liu Xinshe, et al. Discussion on the stratigraphic boundary between Middle Triassic and Upper Triassic[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(8): 1089-1095.
- [20] 熊林芳.坳陷型富烃凹陷优质烃源岩的形成环境—以鄂尔多斯盆地长7烃源岩为例[D].西安:西北大学,2015.
Xiong Linfang. Formation environment of the high quality source rocks in basin of depression-type: An example from Chang-7 source rock in Ordos Basin, China[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [21] 杨华,赛伟坦,刘显阳,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析[J].沉积学报,2010,28(2):254-262.

- Yang Hua, Dou Weitan, Liu Xianyang, et al. Analysis on sedimentary facies of Chang 7 Member in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 254 – 262.
- [22] 邓秀芹. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组超低渗透大型岩性油气藏成藏机理研究[D]. 西安: 西北大学, 2011.
- Deng Xiuqin. Accumulation mechanism research on ultra-low permeability and large scale lithological reservoirs of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [23] 傅强, 孙喜天, 刘永斗. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆特征恢复及地质意义[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(11): 1537 – 1540.
- Fu Qiang, Sun Xitian, Liu Yongdou. Geological significance and re-establishment of basin character in Late Triassic of Ordos Basin[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2009, 37(11): 1537 – 1540.
- [24] Ji L M, Meng F W. Palynology of Yanchang Formation of Middle and Late Triassic in Eastern Gansu Province and Its Paleoclimatic Significance[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2006, 17(3): 209 – 220.
- [25] 王磊. 鄂尔多斯盆地延长组长7期湖盆古生产力恢复及其控制因素分析[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- Wang Lei. The recovery of the paleoproductivity in the period of Chang 7 in Ordos Basin and its control factors[D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [26] 赵增义, 赵建华, 王海静, 等. 准噶尔盆地微量元素的分布特征及其应用[J]. *天然气勘探与开发*, 2007, 30(2): 29 – 32.
- Zhao Zengyi, Zhao Jianhua, Wang Haijing, et al. Distribution characteristics and applications of trace elements in Junggar Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2007, 30(2): 29 – 32.
- [27] Yang H, Zhang W Z, Wu K, et al. Uranium enrichment in lacustrine oil source rocks of the Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39: 285 – 293.
- [28] 邱欣卫. 鄂尔多斯盆地延长组富烃凹陷特征及其形成的动力学环境[D]. 西安: 西北大学, 2011.
- Qiu Xinwei. Characteristics and dynamic settings of Yanchang period hydrocarbon-rich depression in Ordos Basin, China[D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [29] Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chemical Geology*, 2006, 232: 12 – 32.
- [30] Yuan W, Liu G D, Stebbins A, et al. Reconstruction of redox conditions during deposition of organic-rich shales of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 486: 158 – 170.
- [31] Zhang W Z, Yang W W, Xie L Q. Controls on organic matter accumulation in the Triassic Chang 7 lacustrine shale of the Ordos Basin, central China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017, 183: 38 – 51.
- [32] 陈全红, 李文厚, 高永祥, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组深湖沉积与油气聚集意义[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 2004, 37(增刊): 39 – 48.
- Chen Quanhong, Li Wenhong, Gao Yongxiang, et al. Deep lake sedimentary and significance of hydrocarbon accumulation in Upper Triassic Yanchang Formation of Ordos Basin[J]. *Chinese Science Series D: Earth Science*, 2004, 37(supplement): 39 – 48.
- [33] 张本浩. 鄂尔多斯盆地延长组长7烃源岩铀富集的地质地球化学特征及其成因探讨[D]. 西安: 西北大学, 2011.
- Zhang Benhao. The geochemistry characteristics and the occurrence reason of the U-rich source rocks in Chang 7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2011.
- [34] 秦艳, 张文正, 彭平安, 等. 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*, 2009, 25(10): 2469 – 2476.
- Qin Yan, Zhang Wenzheng, Peng Ping'an, et al. Occurrence and concentration of uranium in the hydrocarbon source rocks of Chang 7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2469 – 2476.
- [35] 杨友运. 鄂尔多斯淡水湖盆成因机制与沉积环境研究[R]. 西安, 2016.
- Yang Youyun. Study on genesis mechanism and sedimentary environment of freshwater lake in Ordos Basin[R]. Xi'an, 2016.
- [36] Gromet L P, Dymek R F, Haskin L A, et al. The 'North America shale composite': its compilation, major and trace element characteristic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48: 2469 – 2482.
- [37] Duggen S, Croot P, Schacht U, et al. Subduction zone volcanic ash can fertilize the surface ocean and stimulate phytoplankton growth: evidence from biogeochemical experiments and satellite data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(L01612): 1 – 5.
- [38] Witham C S, Oppenheimer F, Horwell C J. Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2005, 141: 299 – 326.
- [39] Frogner P, Gislason S R, Oskarsson N. Fertilizing potential of volcanic ash in ocean surface water[J]. *Geology*, 2001, 29: 487 – 490.
- [40] 张文正, 杨华, 解丽琴, 等. 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*, 2010, 37(4): 424 – 429.
- Zhang Wenzheng, Yang Hua, Xie Liqing, et al. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(4): 424 – 429.
- [41] 贺聪, 吉利明, 苏奥, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组热水沉积作用与烃源岩发育的影响[J]. *地学前缘*, 2017, 24: 1 – 9.
- He Cong, Ji Liming, Su Ao, et al. Relationship between hydrothermal sedimentation process and source rock development in the Yanchang Formation, south Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24: 1 – 9.
- [42] He C, Ji L M, Wu Y D, et al. Characteristics of hydrothermal sedimentation process in the Yanchang Formation, south Ordos Basin, China: Evidence from element geochemistry[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 345: 33 – 41.