鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7段富有机质页岩中藻类化石的发现及地质意义

www.geojournals.cn/georev

袁伟[1)],柳广弟[2)],袁红旗[1)]

1)东北石油大学地球科学学院,黑龙江大庆,163318;2)中国石油大学(北京)地球科学学院,北京,102249

内容提要:鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7段富有机质页岩是该盆地中生界含油系统的主力烃源岩,其有机质丰度高,类型好,具有巨大的生烃潜力。该套烃源岩中有机质的富集很大程度上取决于长7期的高古生产力及其提供的充足的有机质。长7期藻类勃发的存在已被多数学者所接受,但是目前还缺乏直观、有力的证据。笔者等通过薄片和扫描电镜观察、能谱分析,在长7段的脉状黄铁矿附近和碳酸盐结核中发现了属种单一、分布丰度高的藻类化石,它们呈现出近似球状的轮廓,在中部分布着一条裂缝。这些藻类化石的发现具有重要的地质意义,它为长7期的藻类勃发提供了很好的证据,也为该时期热液活动的重要作用提供了有力的支撑。

关键词:黄铁矿;碳酸盐结核;营养元素;藻类勃发;热液活动;上三叠统延长组长7段;鄂尔多斯盆地

鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7段泥页岩的有机质丰度高、类型好、生烃潜力巨大,是该盆地中生界含油系统的主力烃源岩(杨华和张文正,2005;张文正等,2008, 2015;邱欣卫,2011;熊林芳,2015;袁伟等,2019)。前人研究表明,长7沉积期的有机质富集主要受高湖泊古生产力的控制(邱欣卫,2011;熊林芳,2015;王磊,2015;Zhang Wenzheng et al., 2017;袁伟,2018;袁伟等,2019; Yuan Wei et al., 2020)。长7沉积期构造活动强烈,火山、热液活动频发,这为湖泊水体输送了大量的营养物质(如P、Fe、Cu、Zn等元素),从而促进了生物(主要是藻类)的勃发,提高了湖泊的初始生产力(张文正等,2009,2010;邱欣卫,2011;熊林芳,2015;王磊,2015;Zhang Wenzheng et al., 2017;袁伟,2018;袁伟等,2019;Yuan Wei et al., 2020)。从近期发表的文献来看,多数学者已接受和认可了鄂尔多斯盆地长7沉积期存在生物勃发的现象(张文正等,2009,2010;邱欣卫,2011;熊林芳,2015;王磊,2015;Zhang Wenzheng et al., 2017;袁伟,2018;袁伟等,2019;Yuan Wei et al., 2020)。刘传联等(2001)总结归纳了藻类勃发的特点,认为:①藻类勃发是单属种生长,具有排它性,单属种可以通过遮盖光线、排泄有毒物质或因具有极高的生长速率而抑制其他浮游藻类的生长;②藻类勃发具有季节性,其直接后果是在沉积物中形成藻类或无定形有机质纹层。从延长组长7段富有机质页岩的薄片来看,其富含大量的有机质纹层(邱欣卫,2011;袁伟等,2019;Yuan Wei et al., 2020),说明长7沉积期确实存在藻类勃发的可能性。由于长7沉积期偏氧化的底水条件(Yuan Wei et al., 2017; Chen Ruiqian et al., 2019, 2020),落入湖底的藻类被降解破坏,有机质主要以无定形的形式存在。因此,到目前为止,几乎没有在长7段富有机质页岩中发现大量藻类化石的报道。笔者等通过53块样品的薄片和扫描电镜观察、能谱分析,在长7段富有机质页岩中发现了数量较多、品种单一、保存较好的藻类化石,这为该时期存在藻类勃发提供了直观、有力的证据,加深了对长7段有机质富集机理的理解。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台的西部,是我国第二大沉积盆地,油气资源非常丰富(邱欣卫,2011;熊林芳,2015)。鄂尔多斯盆地晚三叠世的构造演化主要受印支运动的控制,在该时期,盆地南缘的秦岭急剧隆升,导致盆地内部快速下沉,从而引起了延长组内部构造和环境的突变(Yuan Wei et al.,

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41772127)和东北石油大学人才引进科研启动项目(编号:1305021845)的成果。
收稿日期:2022-03-08;改回日期:2022-05-22;网络首发:2022-06-20;责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.06.091
作者简介:袁伟,男,1988年生,博士,硕士生导师,主要从事烃源岩形成机理、形成环境及相关地球化学研究;Email: gujingyw@qq.com。

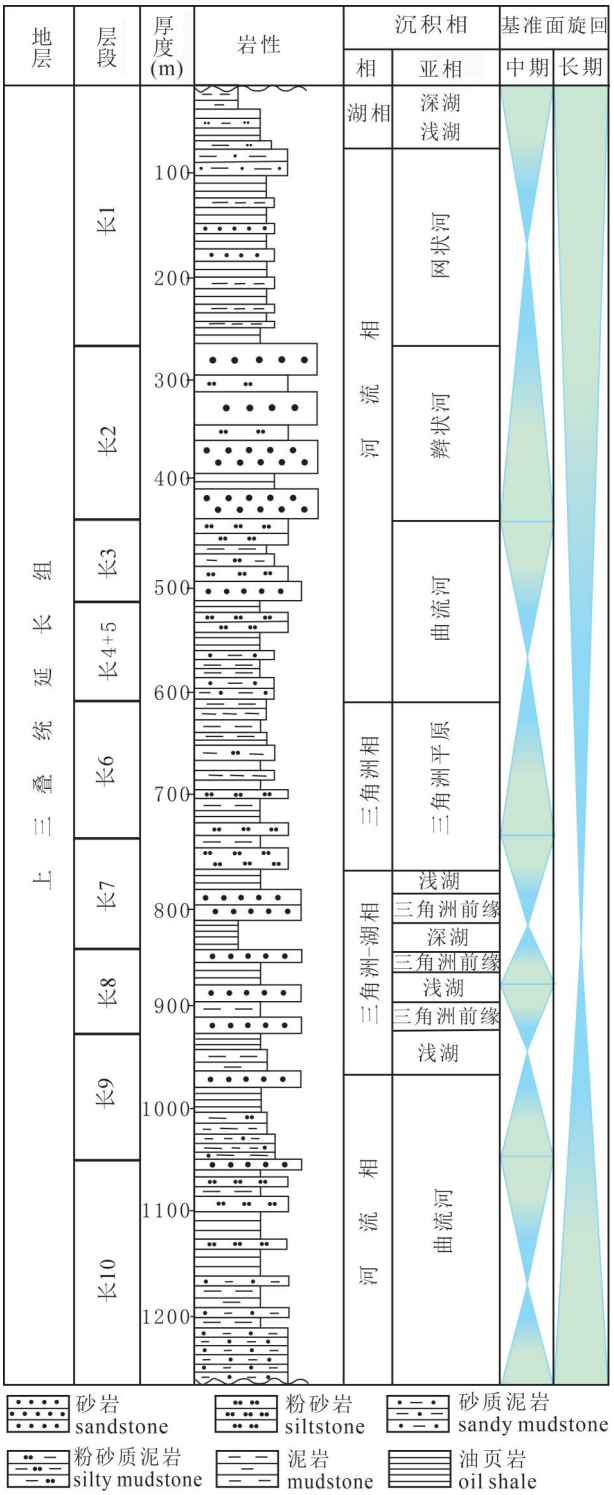


图 1 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组沉积演化综合柱状图(据 Qiu Xinwei et al., 2015)

Fig. 1 Comprehensive histogram of sedimentary evolution of Yanchang Formation in Ordos Basin (after Qiu Xinwei et al., 2015)

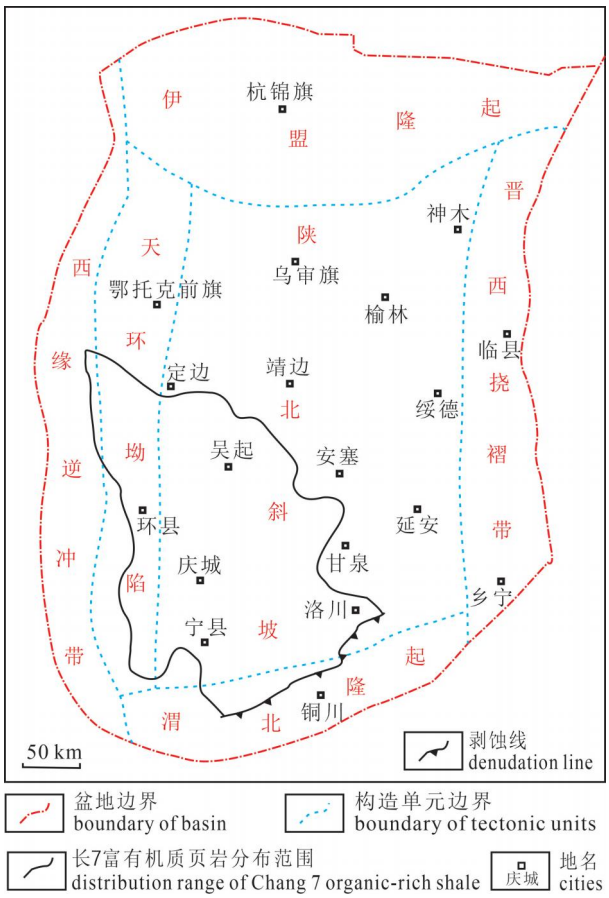


图 2 鄂尔多斯盆地地理位置及构造单元划分(据袁伟等,2019)

Fig. 2 Geographical location and division of tectonic units in Ordos Basin(from Yuan Wei et al., 2019&)

2017, 2020)。近几年来,学者们在长 7 段沉积物中发现了许多沉积现象,如震积岩、凝灰岩夹层和一些与热液流体有关的特征矿物(包括脉状黄铁矿、脉状碳酸盐岩、白铁矿、石膏和锰结核等)(夏青松和田景春,2007;夏青松等,2007;李元昊等,2008;邓秀芹等,2009;陈安清等,2011;杨华和邓秀芹,2013)。这些沉积现象很好的反映了该时期强烈的构造活动,并且有学者把它们看作是对印支运动 I 幕的响应(邓秀芹等,2009)。

鄂尔多斯盆地在晚三叠世延长组为陆相淡水湖泊沉积,发育一套河流—三角洲—湖泊的陆源碎屑沉积体系,总厚度约为 1000 ~ 1300 m(图 1)(Qiu Xinwei et al., 2015)。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 到长 1),其中长 7 油层组是富有机质页岩发育的主要层段,总厚度约为 80 ~ 120 m(Qiu Xinwei et al., 2015;Yuan Wei et al., 2017)。延长组长 7 段富有机质页岩主要分布在伊陕斜坡西南部和天环坳陷南部(图 2),其分布面积超过 10^5 km^2(Qiu Xinwei

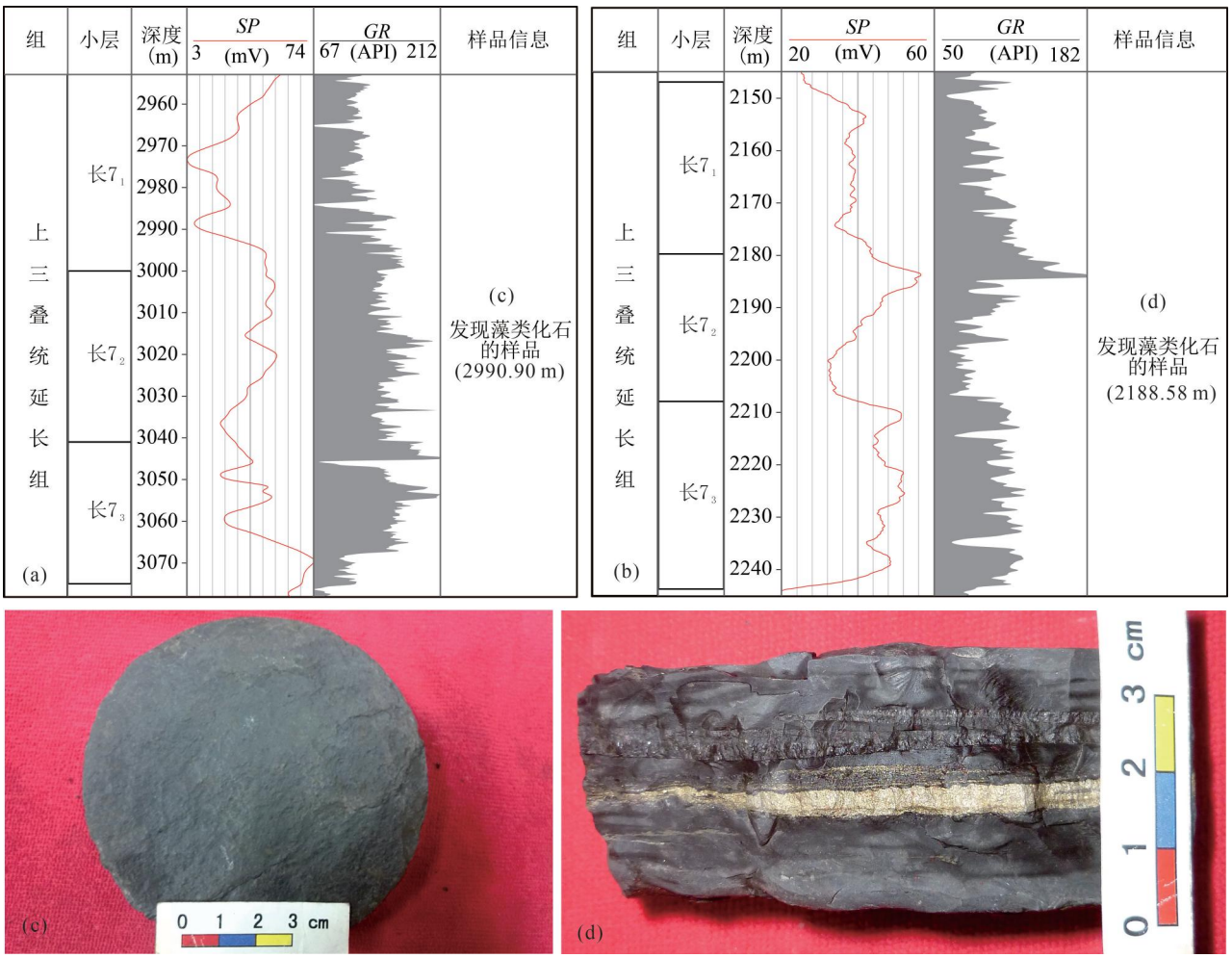


图 3 鄂尔多斯盆地盐 56 井(a)、新 36 井(b)综合柱状图及含化石样品(c)和(d)

Fig. 3 Comprehensive histogram of the wells Yan-56 (a) and Xin-36 (b), and samples containing fossils (c—d) in Ordos Basin

et al., 2015)。长 7 段富有机质页岩的 *TOC* 含量高,主要分布范围为 6% ~ 14%,最高可达 30% ~ 40%,有机质主要来源于湖泊自生的水生生物,类型主要为 I 型和 II_1 型,氢指数的分布为 150 ~ 600 mg/g,表明这套烃源岩具有非常高的生油气能力(杨华和张文正, 2005; 张文正等, 2008, 2015; 邱欣卫, 2011;熊林芳,2015;袁伟等,2019)。

2　样品及分析方法

笔者等研究的样品取自长庆油田西峰岩心库,样品层位均为延长组长 7 段。取样井 11 口,共计采集样品 53 块。其中发现有藻类化石的样品只有 2 块,分别位于盐 56 井(2990.90 m)和新 36 井(2188.58 m)(图 3)。

笔者等研究所采取的分析方法包括薄片观察、扫描电镜观察和能谱分析。薄片的制备和观察在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室进行。薄片观察使用的仪器是 Leica DM4500P 光学显微镜,并用其附带的拍照设备进行拍照。扫描电镜观察和能谱分析在中国石油大学(北京)能源材料微结构实验室进行。扫描电镜观察的样品首先需要进行磨平、抛光、镀金等预处理,之后再放入 Quanta 200F 场发射扫描电镜进行观察,并用其附带的能谱分析仪对观测到的藻类化石的不同组成部分进行元素成分和含量的分析。

3　结果与讨论

3.1　藻类化石的分布与特征

鄂尔多斯盆地延长组长 7 段富有机质页岩中藻类化石的发现具有一定的偶然性,其分布也具有特

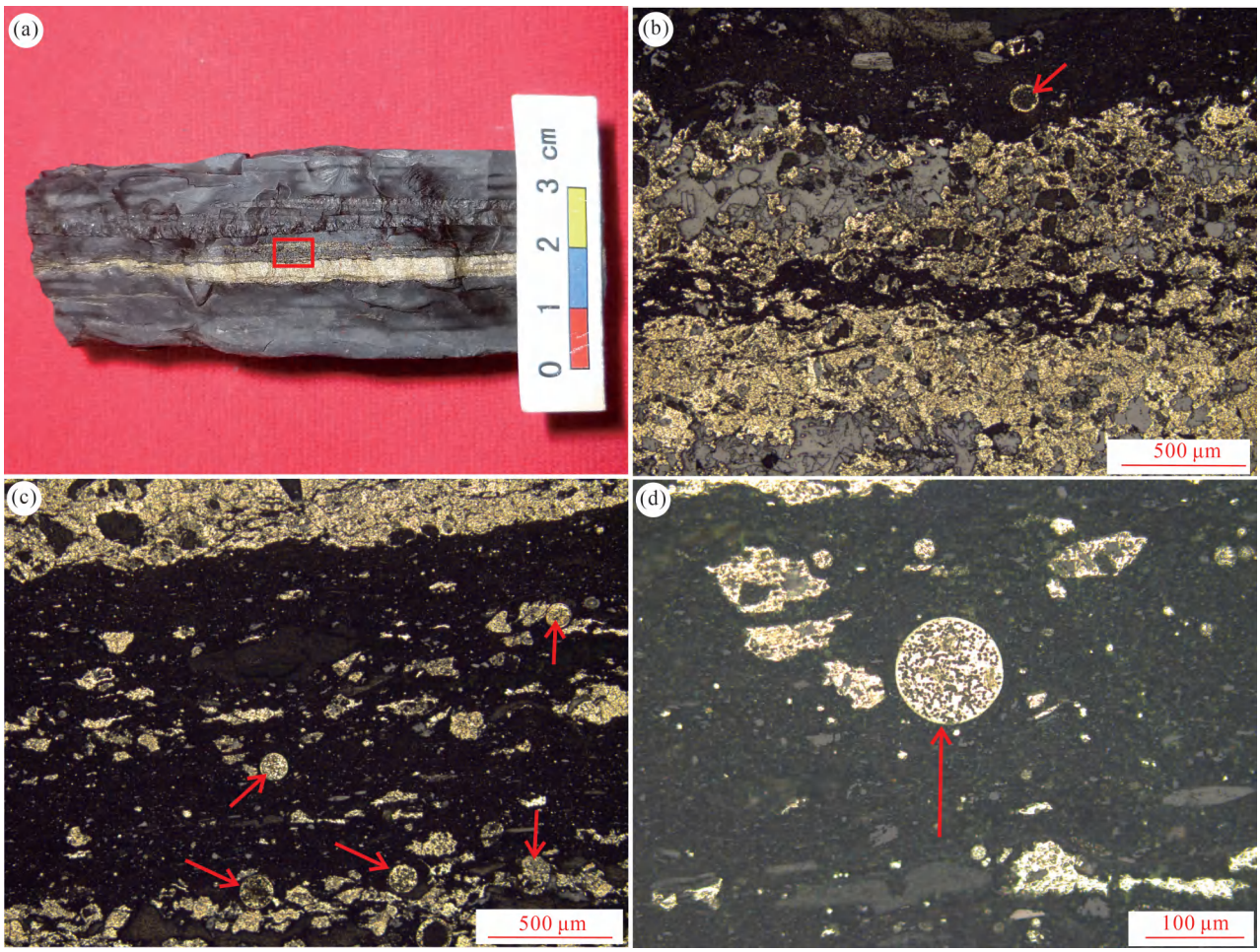


图 4 鄂尔多斯盆地长 7 段富有机质页岩中脉状黄铁矿的显微特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of pyrite vein in the Chang-7 organic-rich shale, Ordos Basin

(a)脉状黄铁矿,新 36 井,长 7_3, 2188.58 m;(b)岩心照片 a 中脉状黄铁矿在显微镜下的特征,黄铁矿显示出非均质、无定形的特征,之间含有其他矿物杂质(灰色部分);(c)脉状黄铁矿边部细小的无定形黄铁矿和圆球状黄铁矿(箭头所指);(d)圆球状黄铁矿的放大显示,其内部分布着密集的小黑点

(a) Pyrite vein, the well Xin-36, Chang-7_3 sub-Member, 2188.58 m; (b) the microscopic characteristics of pyrite vein in Fig. 4a, showing that pyrite is heterogeneous and amorphous with other mineral impurities (gray part); (c) fine amorphous pyrite and spheroidal pyrite at the edge of pyrite vein (indicated by the arrow); (d) the enlargement of spheroidal pyrite shows that dense small black spots are distributed inside it

殊性。由于长 7 沉积期偏氧化的底水环境(Yuan Wei et al., 2017;Chen Ruiqian et al., 2019, 2020),藻类死亡之后的遗体在进入沉积物埋藏保存之前,遭到了很大程度的降解破坏,所以很难有完整的藻类化石保存下来。研究区所发现的藻类化石,基本都赋存在黄铁矿和碳酸盐结核中。正是由于同沉积期或成岩作用早期发生的黄铁矿化和碳酸盐结核的形成,才使得这些藻类化石避免了降解破坏,从而得以保存下来。

(1)赋存在黄铁矿中的藻类化石。对新 36 井的脉状黄铁矿(图 4a)进行薄片观察时,在其边缘发现了许多圆球状的黄铁矿(图 4b—d),直径约为 80 ~100 μm。开始的时候,笔者以为它们是在成岩阶段形成的草莓状黄铁矿(同沉积的草莓状黄铁矿粒径较小,一般小于 5.0 ± 1.7 μm,而成岩草莓状黄铁矿粒径较大(Wilkin et al., 1996, 1997;董杰等,2017))。但是经放大之后观察发现,其内部分布着密集的小黑点(图 4d),之间则被黄铁矿充填,这与草莓状黄铁矿具有明显的区别(草莓状黄铁矿内部为粒度均一的黄铁矿晶体(Wilkin et al., 1996, 1997;董杰等,2017)。

通过进一步的扫描电镜观察发现,圆球状黄铁矿中的这些小黑点具有非常相似的形态特征,它们呈现出近似球状的轮廓,在其中部则分布着一条裂

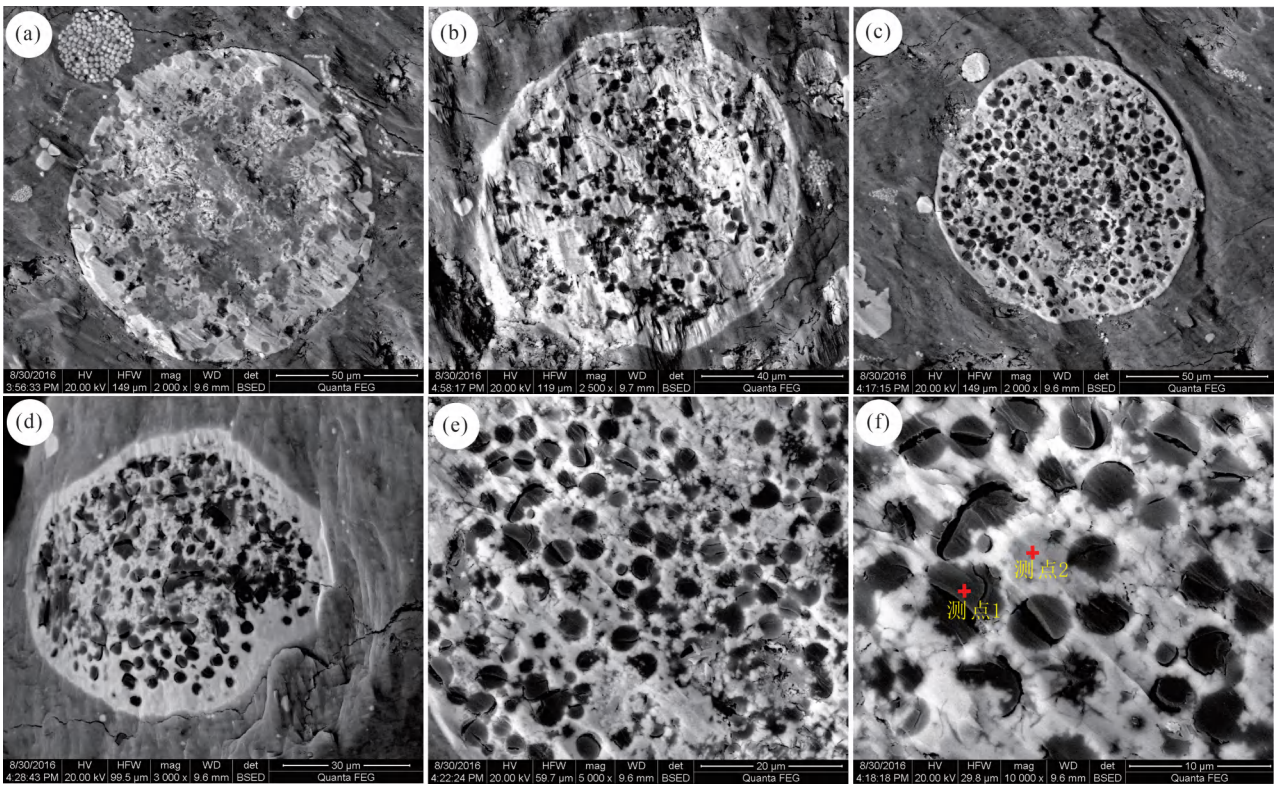


图 5 鄂尔多斯盆地长 7 段富有机质页岩中圆球状黄铁矿的扫描电镜照片

Fig. 5 SEM photos of spheroidal pyrites in the Chang-7 organic-rich shale, Ordos Basin

(a)盐 56 井,2990.90 m;(b)—(f)新 36 井,2188.58 m

(a) The well Yan-56, 2990.90 m; (b)—(f) the well Xin-36, 2188.58 m

缝,其直径变化不大,主要分布范围约为 8~10 μm,大小相对均匀(图 5)。能谱分析显示,这些小黑点的主要元素是碳,说明其为有机物质,而它们周边的物质则主要是硫和铁,为黄铁矿充填物(图 6)。经南京古生物研究所学者的初步鉴定,这些小黑点为藻类化石,但是其具体是哪一属种,目前尚还无法确定。除了新 36 井之外,在盐 56 井的一个样品中的黄铁矿中也发现了类似的藻类化石,但是其丰度相对较低(图 5a),而其他样品中则没有发现。

(2)赋存在碳酸盐结核中的藻类化石。除了黄铁矿中的藻类化石之外,鄂尔多斯盆地长 7 富有机质页岩中的碳酸盐结核也包含了大量的藻类化石。长 7 段页岩中的碳酸盐结核分为灰岩结核和白云岩结核(图 7a、b),呈透镜状、椭球状或条带状分布,多为顺层发育于围岩之中,未切穿层理,其上下岩层发生弯曲,是成岩早期阶段的产物(董杰等,2017;马瑶等,2018)。通过镜下观察发现,碳酸盐结核中分布着大量的圆形球粒,这些球粒的大小较为均匀,粒径主要分布范围为 10~20 μm,多富集成条带状(图 7c—f)。碳酸盐结核中的这些球粒基本都被方解石化或白云石化,但是很多球粒的内部或边缘仍残留着大量的有机质(图 7c—f 中黑色部分),说明它们具有生物的成因。董杰等(2017)在研究鄂尔多斯盆地长 7 富有机质页岩中的碳酸结核时,认为它们的形成与微生物的代谢活动有关,而碳酸盐结核中的方解石和白云石球粒的形成可能是蓝藻细胞方解石化或白云石化的结果。目前笔者等可以基本确定的是,这些球粒的形成与生物密切相关,并且在方解石化或白云石化之后,仍很好的保存着生物的原始轮廓,应为某种生物的化石。根据其分布特征、属种的单一性、地质背景,结合前面黄铁矿中藻类化石的分布特征,笔者认为碳酸盐结核中的这些球粒也是某种藻类的化石,但是从粒径大小来看,其种类应该和黄铁矿中的不同,它们可能是不同时期藻类勃发的产物。

(3)两者的比较。相似点:①赋存在黄铁矿和碳酸盐结核中的藻类化石都具有相近的外形特征,即都表现为球粒状且中部发育有一条裂缝(在图

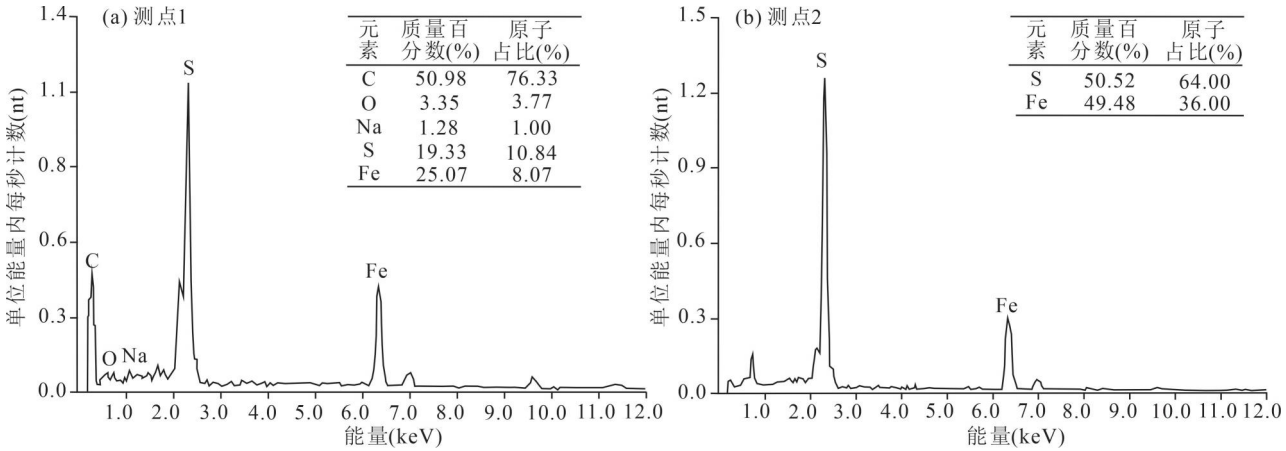


图 6 图 5(f)中测点的能谱分析

Fig. 6 Energy spectrum analysis of the measuring points in fig. 5(f)

7d—e 中可以大致看清楚裂缝)。②赋存在黄铁矿和碳酸盐结核中的藻类化石都表现出大小相对均匀且属种单一的特征。③两者都含有有机质(图 6、图 7f)。

不同点:①两种藻类化石的赋存位置不同,即分别在黄铁矿和碳酸盐结核中。然而,正是由于这些藻类的遗体被黄铁矿化、方解石化或白云石化才避免了后期的氧化降解,从而很好的保存了下来。②两种藻类化石的大小有一些区别,赋存在黄铁矿中的藻类化石要比碳酸盐结核中的小一些,这可能是由于它们生长发育的时期不一样。

3.2 地质意义

鄂尔多斯盆地长 7 段富有机质页岩中藻类化石的发现,具有重要的地质意义,其主要包括两个方面。

(1)为长 7 期的藻类勃发提供证据。鄂尔多斯盆地延长组长 7 段泥页岩中的有机质异常富集,这一现象被多数学者认为是长 7 期湖泊发生藻类勃发,初始生产力高所导致的结果(张文正等,2009,2010;邱欣卫,2011;熊林芳,2015;王磊,2015;Zhang Wenzheng et al., 2017;袁伟,2018;袁伟等,2019;Yuan Wei et al., 2020)。大量的有机质供给是有机质在沉积物(岩)中富集的物质基础。在供应充足的前提下,即使是长 7 沉积期存在着偏氧化的底水环境(Yuan Wei et al., 2017;Chen Ruiqian et al., 2019, 2020),有机质也不会完成被降解,从而在沉积物(岩)中富集;并且有机质的降解是一个耗氧的过程,所以大量有机质的输入可以促使底水缺氧环境的形成(Yuan Wei et al., 2020)。因此,长 7 期的藻类勃发可能是该时期有机质富集的重要控制因素。但是,长 7 期是否存在藻类勃发,目前还没有较为直接、有力的证据,只是基于长 7 段泥页岩中的有机质纹层和有机质丰度所做的推测。而保存在黄铁矿和碳酸盐结核中的藻类化石的发现,尤其是这些化石所显示出的属种的单一性、高丰度的分布,为长 7 期的藻类勃发提供了直观、有力的证据,并证实了之前的推测,这对加深该时期有机质富集机理的理解具有非常重要的意义。

(2)为长 7 期热液活动的营养作用提供支撑。学者们在研究鄂尔多斯盆地长 7 期的藻类勃发时,认为其存在着一定的诱发机制。从现代湖泊和海洋中的藻类勃发现象来看,营养元素、光照、温度、盐度和 PH 值等是其重要的控制因素,而其中水体的富营养化则是其最重要的条件(张慧芳等,2016)。前人研究认为,长 7 沉积期的火山、热液活动向湖泊水体中输送了大量的营养物质,造成了水体的富营养化,从而促使了藻类的勃发(张文正等,2009,2010;邱欣卫,2011;熊林芳,2015;王磊,2015;Zhang Wenzheng et al., 2017;袁伟,2018;袁伟等,2019;Yuan Wei et al., 2020)。对于火山、热液活动与古生产力或有机质富集关系的研究,基本都是从主微量元素、同位素、有机质丰度等指标入手,分析它们之间的相关关系,从而探讨火山、热液活动对古生产力或有机质富集的影响。这些研究成果虽然有一定的可信度和说服力,但是不够直观和可靠。本次研究中所发现的藻类化石,其所赋存的矿物(脉状黄铁矿和碳酸盐结核)都与热液活动密切相关。尤其是碳酸盐结核,其形成时期为同沉积期或成岩阶段

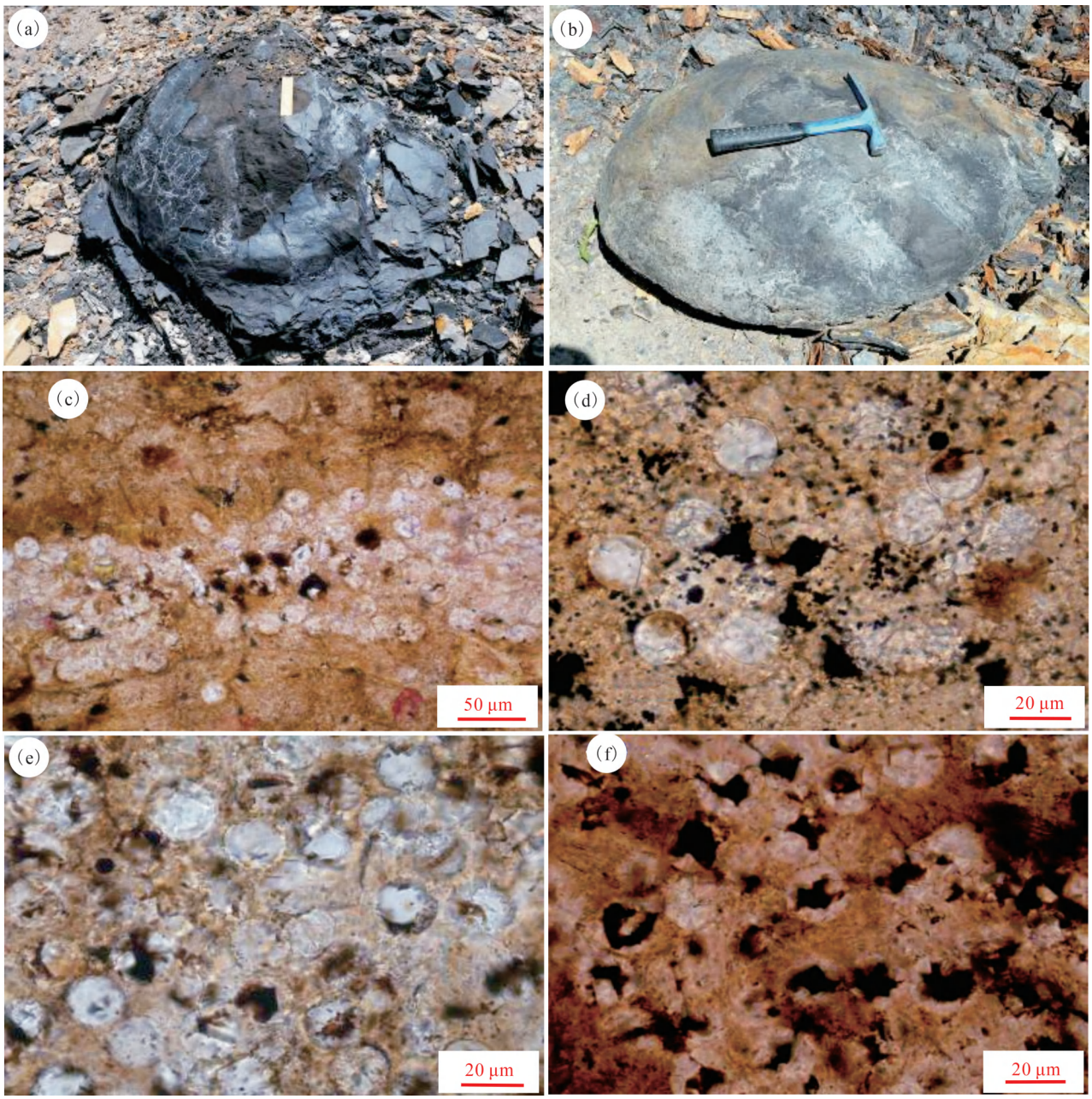


图 7 鄂尔多斯盆地长 7 富有机质页岩中的碳酸盐结核及藻类化石(据董杰等,2017)

Fig. 7 Carbonate nodules and algae fossils in the Chang-7 organic rich shale, Ordos Basin (from Dong Jie et al., 2017&)

早期,并且与生物活动密切相关,因此,其中所赋存的大量藻类生物与该时期的热液活动具有很好的相关性。因此,藻类化石的发现可以为长 7 期热液活动的营养作用起到一定的支撑作用。

4　结论

(1)在长 7 段富有机质页岩中的脉状黄铁矿附近和碳酸盐结核中,因黄铁矿化、方解石化和白云石化等作用,藻类化石被完好的保存了下来。这些藻类化石具有属种单一、分布丰度高的特点。

(2)鄂尔多斯盆地延长组长 7 段富有机质页岩中藻类化石的发现,具有重要的地质意义。它不仅可以为长 7 期的藻类勃发提供直接、有力的证据,也可以为长 7 期热液活动的营养作用提供支撑。

参　考　文　献　/　References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈安清, 陈洪德, 侯明才, 楼章华, 徐胜林, 李洁, 苏中堂. 2011. 鄂尔多斯盆地中—晚三叠世事件沉积对印支运动 I 幕的指示.

地质学报, 85(10): 1681~1689.
邓秀芹, 李文厚, 刘新社, 庞锦莲, 刘鑫. 2009. 鄂尔多斯盆地中三叠统与上三叠统地层界线讨论. 地质学报, 83(8): 1089~1095.
董杰, 胡作维, 袁效奇, 贺静, 李云, 王玉龙. 2017. 鄂尔多斯盆地南缘长7油层组碳酸盐结核的特征及石油地质意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 44(5): 553~564.
李元昊, 刘池洋, 王秀娟. 2008. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组震积岩特征研究. 沉积学报, 26(5): 772~778.
刘传联, 徐金鲤, 汪品先. 2001. 藻类勃发—湖相油源岩形成的一种重要机制. 地质评论, 47(2): 207~209.
马瑶, 李文厚, 刘江斌, 李智超. 2018. 鄂尔多斯盆地南缘铜川地区三叠系延长组油页岩中"钙质结核"的成因初探. 地质科学, 53(2): 458~469.
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. 博士论文, 导师: 刘池阳, 西安: 西北大学.
王磊. 2015. 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. 硕士论文, 导师: 刘池阳, 西安: 西北大学.
夏青松, 田景春, 黄昌武. 2007. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组震积岩识别标志研究. 成都理工大学学报(自然科学版), 34(3): 312~316.
夏青松, 田景春. 2007. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组震积岩的发现及地质意义. 沉积学报, 25(2): 246~252.
熊林芳. 2015. 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. 博士论文, 导师: 刘池阳. 西安: 西北大学.
杨华, 邓秀芹. 2013. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响. 石油勘探与开发, 40(5): 513~520.
杨华, 张文正. 2005. 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. 地球化学, 34(2): 147~154.
袁伟. 2018. 鄂尔多斯盆地延长组长7段富有机质页岩形成机理. 博士论文, 导师: 柳广弟. 北京: 中国石油大学(北京).
袁伟, 柳广第, 徐黎明, 牛小兵. 2019. 鄂尔多斯盆地延长组7段有机质富集主控因素. 石油与天然气地质, 40(2): 326~334.
张慧芳, 吴欣松, 王斌, 段云江, 屈洋, 陈德飞. 2016. 陆相湖盆沉积有机质富集机理研究进展. 沉积学报, 34(3): 463~477.
张文正, 杨华, 杨奕华, 孔庆芬, 吴凯. 2008. 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. 地球化学, 37(1): 59~64.
张文正, 杨华, 彭平安, 杨奕华, 张辉, 石小虎. 2009. 晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩发育的影响. 地球化学, 38(6): 573~582.
张文正, 杨华, 解丽琴, 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. 石油勘探与开发, 37(4): 424~429.
张文正, 杨华, 杨伟伟, 吴凯, 刘飞. 2015. 鄂尔多斯盆地延长组长7湖相页岩油地质特征评价. 地球化学, 44(5): 505~515.
Chen Anqing, Chen Hongde, Hou Mingcai, Lou Zhanghua, Xu Shenglin, Li Jie, Shu Zhongtang. 2011&. The Middle—Late Triassic events sediments in Ordos Basin: Indicators for episode I of the Indosinian movement. Acta Geologica Sinica, 85(10): 1681~1689.
Chen Ruiqian, Liu Guangdi, Shang Fei, Cao Yushun. 2019. Nitrogen isotope compositions of the Upper Triassic Chang 7 Shale, Ordos Basin, North China: Implications for depositional redox conditions. Marine and Petroleum Geology, 109: 279~290.
Chen Ruiqian, Liu Guangdi, Shang Fei, Cao Yushun. 2020. Variations in hydrocarbon generating potential of the Chang 7 shale: Evidence from pyrite morphology and sulfur isotope. Journal of Petroleum Science and Engineering, 195,107747.
Deng Xiuqin, Li Wenhou, Liu Xinshe, Pang Jinlian, Liu Xin. 2009&. Discussion on the Stratigraphic Boundary between Middle Triassic and Upper Triassic. Acta Geologica Sinica, 83(8): 1089~1095.
Dong Jie, Hu Zuowei, Yuan Xiaoqi, He Jing, Li Yun, Wang Yulong. 2017&. The carbonate concretions of Chang 7 and their hydrocarbon significance in southern Ordos Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science &Technology Edition), 44(5): 553~564.
Li Yuanhao, Liu Chiyang, Wang Xiujuan. 2008&. Discovery and significance of seismites in Late Tertiary Yanchang Formation of Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 26(5): 772~778.
Liu Chuanlian, Xu Jinli, Wang Pinxian. 2001&. Algal Blooms: the primary mechanism in the formation of lacustrine petroleum source rocks. Geological Review, 47(2): 207~209.
Ma Yao, Li Wenhou, Liu Jiangbin, Li Zhichao. 2018&. A preliminary discussion on the origin of "calcareous concretion" in oil shale of Yanchang Formation in Tongchuan area, southern Ordos Basin. Chinese Journal of Geology, 53(2): 458~469.
Qiu Xinwei. 2011&. Characteristics and dynamic settings of Yanchang period hydrocarbon-rich depression in Ordos basin, China. Doctoral Dissertation, Supervisor: Liu Chiyang. Xi'an: Northwest University.
Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Wang Feifei, Deng Yu, Mao Guangzhou. 2015. Trace and rare earth element geochemistry of the Upper Triassic mudstones in the southern Ordos Basin, Central China. Geological Journal, 50: 399~413.
Wang Lei. 2015&. The recovery of the paleoproductivity in the period of Chang 7 in Ordos Basin and its control factors. Master's Dissertation, Supervisor: Liu Chiyang. Xi'an: Northwest University.
Wilkin R T, Barnes H L. 1997. Formation processes of framboidal pyrite. Geochimica et Cosmochimica Acta, 61(2): 323~339.
Wilkin R T, Barnes H L, Brantley S L. 1996. The size distribution of framboidal pyrite in modern sediments: an indicator of redox conditions. Geochimica et Cosmochimica Acta, 60(20): 3897~3912.
Xia Qingsong, Tian Jingchun, Huang Changwu. 2007&. Study on the recognition marks of seismites in Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science &Technology Edition), 34(3): 312~316.
Xia Qingsong, Tian Jingchun. 2007&. Characteristics and Geological Significance of Seismites of the Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 25(2): 246~252.
Xiong Linfang. 2015&. Formation environment of the high quality source rocks in basin of depression-type: an example from Chang 7 source rock in Ordos Basin. Doctoral Dissertation, Supervisor: Liu Chiyang. Xi'an: Northwest University.
Yang Hua, Deng Xiuqin. 2013&. Deposition of Yanchang Formation deep-water sandstone under the control of tectonic events, Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development, 40(5): 513~520.
Yang Hua, Zhang Wenzheng. 2005&. 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. Geochimica, 34(2): 147

~154.

Yuan Wei. 2018. Formation mechanism of the organic-rich shales in the 7th member of Yanchang Formation, Ordos Basin. Doctoral Dissertation, Supervisor: Liu Guangdi. Beijing: China University of Petroleum.

Yuan Wei, Liu Guangdi, Stebbins A, Xu Liming, Niu Xiaobing, Luo Wenbin, Li Chaozheng. 2017. Reconstruction of redox conditions during deposition of organic-rich shales of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 486: 158~170.

Yuan Wei, Liu Guangdi, Xu Liming, Niu Xiaobing. 2019&. Main controlling factors for organic matter enrichment in Chang 7 member of the Yanchang Formation, Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 40(2): 326~334.

Yuan Wei, Liu Guangdi, Zhou Xiaoxing, Xu Liming, Li Chaozheng. 2020. Palaeoproductivity and organic matter accumulation during the deposition of the Chang 7 organic - rich shale of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China. Geological Journal 55: 3139~3156.

Zhang Huifang, Wu Xinsong, Wang Bin, Duan Yunjiang, Qu Yang, Chen Defei. 2016&. Research progress of the enrichment mechanism of sedimentary organics in lacustrine basin. Acta Sedimentologica Sinica, 34(3): 463~477.

Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Yihua, Kong Qingfen, Wu Kai. 2008&. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin. Geochimica, 37(1): 59~64.

Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Ping'an, Yang Yihua, Zhang Hui, Shi Xiaohu. 2009&. The Influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin. Geochimica, 38(6): 573~582.

Zhang Wenzheng, Yang Hua, Xie Liqin, Yang Yihua. 2010&. Lake-bottom hydrothermal activities and their influences on the high-quality source rock development: A case from Chang 7 source rocks in Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development, 37(4): 424~429.

Zhang Wenzheng, Yang Hua, Yang Weiwei, Wu Kai, Liu Fei. 2015&. Assessment of geological characteristics of lacustrine shale oil reservoir in Chang7 Member of Yanchang Formation, Ordos Basin. Geochimica, 44(5): 505~515.

Zhang Wenzheng, Yang Weiwei, Xie Liqin. 2017. Controls on organic matter accumulation in the Triassic Chang 7 lacustrine shale of the Ordos Basin, central China. International Journal of Coal Geology, 183: 38~51.

Discovery of algal fossils in the Chang-7 organic-rich shale of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin and its geological significance

YUAN Wei[1)], LIU Guangdi[2)], YUAN Hongqi[1)]

1) *College of Geoscience, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang*, 163318;

2) *College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing*, 102249

Objectives: The Chang-7 organic-rich shale in the Upper Triassic Yanchang Formation of Ordos Basin, with high abundance of organic matter and good type, is the main source rock of Mesozoic oil system, which has great hydrocarbon generation potential. The enrichment of organic matter in this unit mainly depends on the high paleoproductivity and the sufficient supply of organic matter during the Chang-7 sedimentary period. Many researchers have accepted the occurrence of algal bloom in the Chang-7 period, but there are still no direct and powerful evidences to prove it. In this study, algal fossils characterized by single species and high abundance are found in carbonate nodules and the vicinity of vein pyrite, which provides a good evidence for the algal bloom and strong support for the nutrition of hydrothermal activities during the Chang-7 period.

Methods: Microscope and scanning electron microscopy (SEM) are used to observed algae fossils. Energy spectrum analyzer is used to analyze the element composition of algae fossils. Thin section observation is carried out at the State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing). SEM observation and energy spectrum analysis are carried out the Microstructure Laboratory for Energy Materials, China University of Petroleum (Beijing).

Results: Many algal fossils have been found on the edge of vein pyrite. They are single species, densely distributed and rich in organic matter.

Conclusion: In the vicinity of vein pyrite and carbonate nodules in Chang-7 organic-rich shale, algal fossils have been well preserved due to pyritization, calcitization and dolomitization. These algal fossils are characterized

by single genus and species, and high distribution abundance. The discovery of algae fossils has important geological significance. It can not only provide direct and powerful evidence for algae bloom during the Chang-7 sedimentary period, but also provide support for the nutritional role of hydrothermal activities in the same period.

Keywords: pyrite; carbonate nodules; nutrient element; algae bloom; hydrothermal activity; Chang-7 Member, Yanchang Formation, Upper Triassic; Ordos Basin

Acknowledgements: This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41772127), Scientific research start-up project of talent introduction of Northeast Petroleum University (No. 1305021845).

First author: YUAN Wei, male, born in 1988, lecturer and master supervisor of College of Geoscience, Northeast Petroleum University, mainly engaged in the research on the formation mechanism, formation environment, and related geochemistry of source rocks; Email: gujingyw@ qq. com

Manuscript received on: 2022-03-08; Accepted on: 2022-05-22; Network published on: 2022-06-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 06. 091 **Edited by**: LIU Zhiqiang