

文章编号: 1001-6112(2019)01-0121-06

doi: 10.11781/syzydz201901121

陕西铜川地区延长组长7油页岩 无机地球化学特征及古环境恢复

乔世海^{1,2,3}, 李玉宏^{1,3}, 郭望³, 张云鹏³, 王勇⁴

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100037;

3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054; 4. 山东鲁南瑞虹化工仪器有限公司, 山东滕州 277500)

摘要:为研究陕西铜川地区三叠系延长组长7段油页岩沉积时水体的盐度、氧化还原条件、深度、湖底热液活动情况以及古气候等沉积古环境特征, 对该区长7段油页岩岩心样品进行了地球化学特征分析。该区长7段油页岩Sr含量为 198.28×10^{-6} , Sr/Ba均值为0.39, V/Ni值为4.50, Walker法计算“相当硼”含量大部分样品低于 200×10^{-6} , 最低值接近 40×10^{-6} , 表明长7油页岩形成于微咸—淡水、厌氧还原环境; 钴元素定量计算显示其为最大水深40~70 m的深湖—半深湖相; Sr/Cu值平均为4.28, 属温湿—半湿润气候条件; P、Cu、Co、Ni、V、Rb等元素富集, REE总量低, HREE富集, Ce表现为负异常, La/Yb—REE图解样品点大部分落在玄武岩、花岗岩和沉积岩的交会区内等, 反映沉积时期湖底有热液沉积作用的存在。

关键词:无机地球化学; 古环境; 油页岩; 延长组; 三叠系; 铜川地区; 陕西

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Inorganic geochemical characteristics and paleoenvironment of Chang 7 oil shale in Yanchang Formation, Tongchuan area, Shaanxi Province

QIAO Shihai^{1,2,3}, LI Yuhong^{1,3}, GUO Wang³, ZHANG Yunpeng³, WANG Yong⁴

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100037, China;

3. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

4. Shandong Lunan Ruihong Chemical Co., Ltd., Tengzhou, Shandong 277500, China)

Abstract: The geochemistry of shale core samples from the 7th member (Chang 7) of Triassic Yanchang Formation were analyzed in order to study the characteristics of sedimentary palaeoenvironment such as salinity, redox condition, depth, hydrothermal activity and palaeoclimate when the Chang 7 member was deposited in the Tongchuan area, Shaanxi Province. The content of Sr is 198.28×10^{-6} , Sr/Ba is 0.39, V/Ni is 4.50, the equivalent boron content by the Walker method in most samples is less than 200×10^{-6} , and the lowest value is about 40×10^{-6} . Based on the above characteristics, it can be concluded that the Chang 7 oil shale was deposited in a brackish fresh water and anaerobic environment. The quantitative determination of cobalt indicated that the sedimentary environment was a lake with a maximum water depth of 40–70 m. The average Sr/Cu ratio is 4.28, which means that the paleoclimate was warm-wet and semi-humid. P, Cu, Co, Ni, V and Rb were enriched. The total REE was low, and the HREE was enriched. Ce showed a negative anomaly. Most of the La/Yb—REE plots were located near the intersection of basalt, granite and sedimentary rocks. All these characteristics strongly confirmed the existence of hydrothermal sedimentation in the lake.

Key words: inorganic geochemistry; paleoenvironmental restoration; oil shale; Yanchang Formation; Triassic; Tongchuan area; Shaanxi Province

油页岩是指含油率大于3.5%、发热量一般不小于4.18 MJ/kg的高灰分固体可燃有机沉积岩,

低温干馏可获得页岩油。鄂尔多斯盆地南部是我国油页岩资源最丰富的地区之一, 其中三叠系延长

收稿日期: 2018-09-20; 修订日期: 2018-12-17。

作者简介: 乔世海(1989—), 男, 硕士生, 石油天然气地质专业。E-mail: qiaosh517@gmail.com。

通信作者: 李玉宏(1968—), 男, 高级工程师, 从事石油勘探开发研究。E-mail: L1763@tom.com。

基金项目: 国家科技重大专项“西北地区中生界陆相典型页岩气赋存方式与富集规律研究”(2016ZX05034001-006)和陕西省自然科学基金“柴北缘侏罗纪盆地构造演化关键问题研究: 以红山地区为例”(2018JM4031)资助。

组是盆地内最具资源潜力的油页岩产出层位^[1]。该油页岩具有厚度较大、油页岩段集中、分布稳定、含油率高、为厚层中品级油页岩的特征;估算分布面积为 $1.08 \times 10^4 \text{ km}^2$, 预测远景资源量为 $3\ 866 \times 10^8 \text{ t}$, 干馏页岩油远景资源量为 $179 \times 10^8 \text{ t}$, 具有形成大型—特大型油页岩产地的资源潜力^[2-3]。

鄂尔多斯盆地延长组长 7 油页岩主要形成于深湖相、半深湖—浅湖相环境,是古构造、古气候、古沉积环境共同影响下形成的^[4]。本文通过对样品元素地球化学的分析,获得了丰富的沉积环境和各种地质作用,如热液活动、火山喷发活动等方面的信息,研究了样品发育环境、形成机制以及分布规律,旨在该区页岩油的开发提供参考。

1 研究区长 7 沉积背景

研究区位于鄂尔多斯盆地东南部,早二叠世前以海相沉积为主,进入早二叠世,海水逐渐由东、西、南三面退出;至早三叠世中、晚期,受内蒙兴安地槽褶皱回返和抬升、盆地西缘“古陆架”活动加剧、秦祁海槽完全关闭的影响,鄂尔多斯形成北高、西高、中间低向东开口的内陆盆地,开始了大型内陆沉积盆地阶段。上三叠统延长组长 7 沉积期,鄂尔多斯盆地发生了延长组沉积以来的最大湖泛,深湖区范围明显扩大。其中,长 7³湖盆达到鼎盛,深湖区范围最大,东北部达吴起—甘泉—富县—洛川一线,西南部达镇原—径川—长武—旬邑一线,从长 7³—长 7²—长 7¹,深湖线逐渐向深湖区收缩^[5](图 1)。

2 样品采集与分析方法

针对陕西南部铜川地区延长组烃源岩发育特征,重点对何 2 井、何 3 井长 7 段油页岩进行了样品采集和研究。共采集油页岩样品 45 块,对这些样品进行了详细的微量元素和稀土元素含量分析。地球化学样品的加工及测试均在西安地质调查中心实验测试中心完成。主要实验仪器为全谱直读等离子体光谱仪 ICP 和等离子体质谱仪 ICP-MS。

3 岩石化学组成特征

长 7 油页岩的微量元素测试结果显示,Mo 的含量为 80×10^{-6} , V 为 176×10^{-6} , Cu 为 119×10^{-6} , U 为 40×10^{-6} (均为平均含量)。相比于中国东部页岩中各种微量元素的平均含量(图 2),铜川油页岩中强烈富集 Mo 和 U,比较富集 Cu、Pb、Cd、W、Sr、V 和 Tl;其中,相比于中国东部页岩中的元素克拉克值,Mo 含量约为其 93 倍,U 含量则为其 13 倍,其余元素含量均与其相似。大部分样品的 U/Th > 1,表明本区长 7 沉积期可能存在湖底热液活动;元素 V/Ni 均大于 1,反映其沉积环境主要为厌氧环境。

利用稀土元素分析结果绘制了研究区油页岩与球粒陨石、北美页岩标准化配分模式(图 3)。研究区油页岩中的稀土总量(REE)范围为 $(106.14 \sim 203.78) \times 10^{-6}$,平均为 153.33×10^{-6} ,相对于北美页岩的含量 (200.21×10^{-6}) 较低,反映了有机质快速堆积、陆源细碎屑补给速度慢的半深湖—深湖相沉积特征。LREE/HREE 的值为 2.61~4.37(北美页

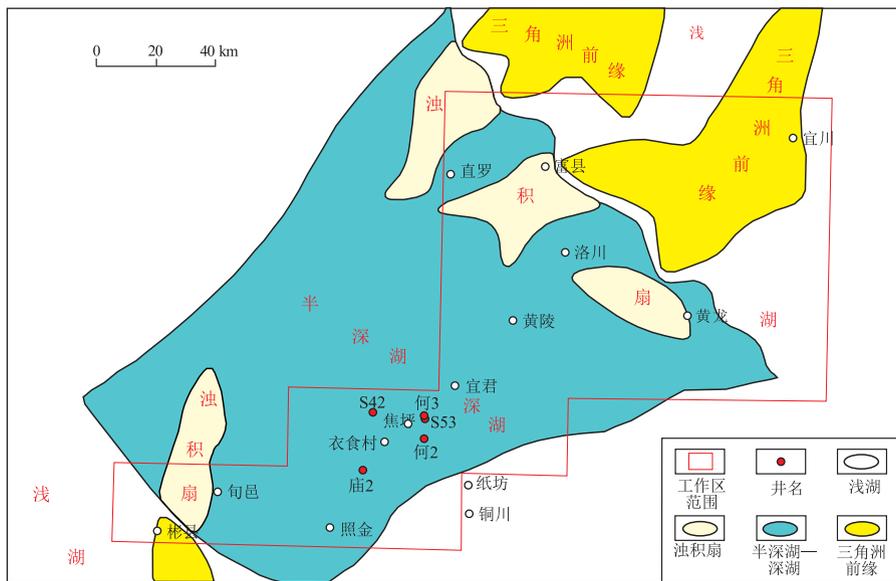


图 1 陕西铜川地区晚三叠世延长组长 7 沉积相

Fig.1 Sedimentary facies of Triassic Chang 7 member in Tongchuan area, Shaanxi Province

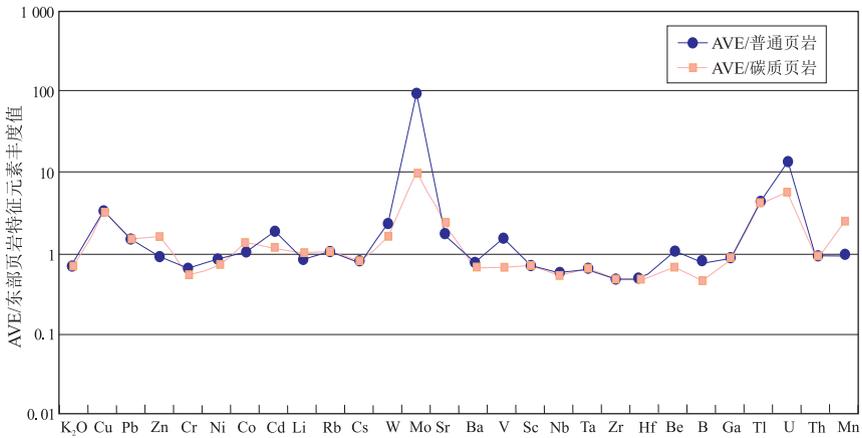


图 2 陕西铜川地区长 7 油页岩特征元素与中国东部页岩特征元素含量对比

AVE 表示研究区油页岩特征元素含量平均值;普通页岩和碳质页岩分别表示中国东部页岩特征元素含量平均值

Fig.2 Comparison of trace element contents between Chang 7 oil shale in Tongchuan area, Shaanxi Province and shale in East China

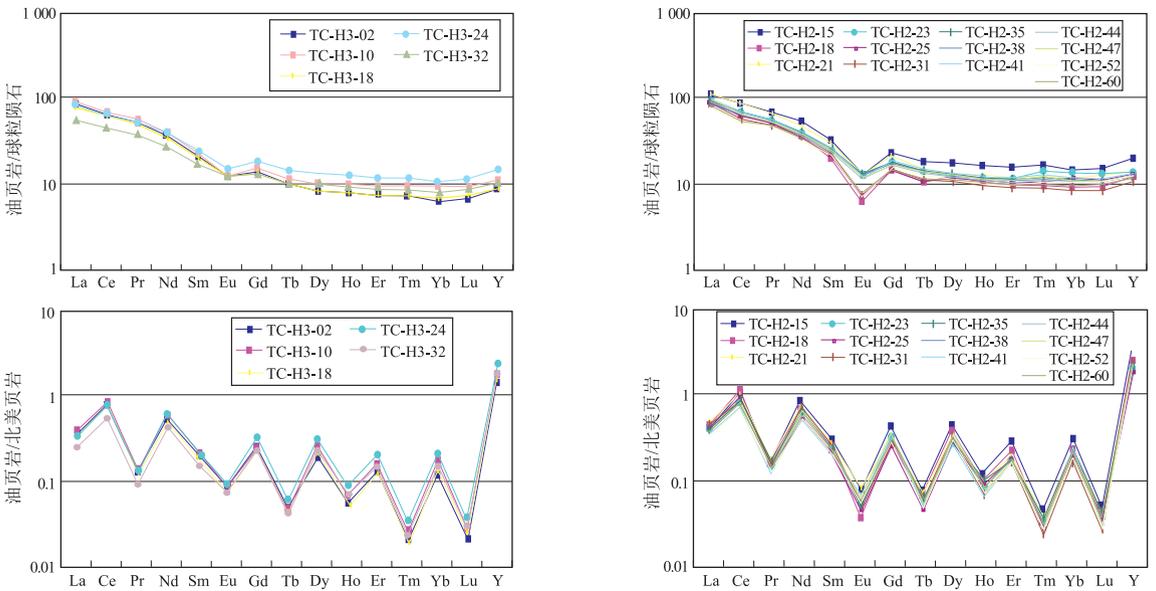


图 3 陕西铜川地区长 7 油页岩稀土元素与球粒陨石及北美页岩标准化配分模式

Fig.3 Chondrite standard and NASC normalized distribution patterns of Chang 7 oil shale in Tongchuan area, Shaanxi Province

岩为 7.5), $(La/Yb)_N$ 为 6.76~13.23; 稀土元素球粒陨石标准化图解具有稀土分布模式曲线向右倾的特点, 这些特征共同标志着轻稀土元素相对富集型。 δEu 为 0.40~1.01, 大于 1.0 的样品 1 个, 具较明显的负异常。 所有油页岩分析样品的稀土元素分布模式图解一致性非常好, 较好地反映了稳定的物源和沉积环境。

4 成矿期古环境恢复

4.1 古盐度

4.1.1 Walker 法

硼元素对于古盐度反映比较敏感, 利用 Walker 法(又称“相当硼”法)取“相当硼”的值是常用定量判别方法。 研究区长 7 油页岩的“相当硼”值较低,

大部分样品低于 200×10^{-6} , 最低值接近 70×10^{-6} (图 4), 说明沉积环境以微咸—淡水沉积为主。

4.1.2 锶/钡法 (Sr/Ba)

Sr/Ba 比值常作为古盐度的判别标志^[6-10], 研究区样品的 Sr/Ba 值为 0.17~0.85, 其中大于 0.6 的样品 3 个, 平均 0.39(小于 0.6), 因此判断长 7 沉积期水体环境为陆相微咸水—淡水环境。

4.1.3 微量元素 Sr 含量

Sr 值也可以用来判别古盐度, 咸水中 Sr 的含量一般为 $(800 \sim 1000) \times 10^{-6}$, 淡水中为 $(100 \sim 300) \times 10^{-6}$ ^[11]。 长 7 油页岩样品分析结果表明, Sr 含量最大值为 446×10^{-6} , 最小值 74.7×10^{-6} , 平均 198.28×10^{-6} , 因此判断沉积水体为淡水环境。

综上所述, 微量元素特征总体反映了研究区沉

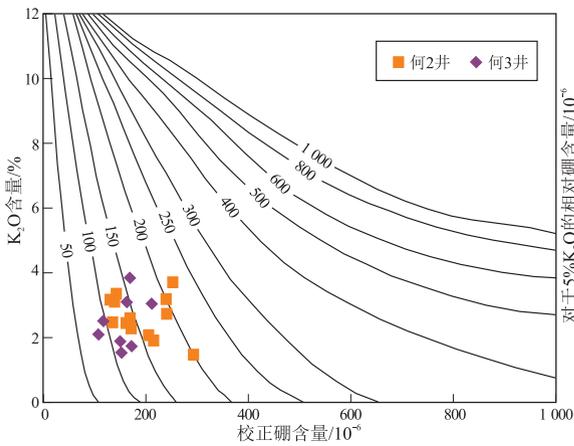


图 4 陕西铜川地区长 7 油页岩 Walker 法硼含量及校正硼含量

Fig.4 Boron content and calibrated boron content by Walker method of Chang 7 oil shale in Tongchuan area, Shaanxi Province

积水体以微咸—淡水为主。

4.2 湖盆氧化—还原条件

根据前人研究成果^[12-13],微量元素 V、Ni 等的富集特征对沉积环境的氧化还原条件较敏感,通常认为,还原环境的 V/Ni 比值大于 1,氧化环境的 V/Ni 比值小于 1。长 7 油页岩样品分析结果显示, V/Ni 值最大为 20.39,最小为 1.64,平均 4.50,均大于 1,显示长 7 油页岩形成于厌氧还原环境。

4.3 湖盆水体深度

恢复盆地古水深的常见方法有生态分析法和遗迹化石标志^[14]。元素地球化学研究结果表明,元素在沉积分异过程中会因为离岸距离的不同而呈现不同的聚集和分散特征,因此可根据该特征进行判别水体深度^[15]。

4.3.1 元素组合法

通常, Cl、Br、Ag、Cd、Mo、Mn、Cu、Co 和 Ba 等元素的富集反映了深水沉积物的特征。NICHOLLS 提出^[12],当 $Mo > 5 \times 10^{-6}$, $Co > 40 \times 10^{-6}$, $Cu > 90 \times 10^{-6}$, $Ba > 1000 \times 10^{-6}$, $Ce > 100 \times 10^{-6}$, $Pr > 10 \times 10^{-6}$, $Nd > 50 \times 10^{-6}$, $Ni > 150 \times 10^{-6}$, $Pb > 40 \times 10^{-6}$,特别是伴生有含量小于 1×10^{-6} 的 U 和含量小于 3×10^{-6} 的 Sn 时,其沉积深度可能大于 250 m,为半深海环境。

研究区 Co 含量为 15.64×10^{-6} , Cu 为 75.41×10^{-6} , Ba 为 515.33×10^{-6} , Ce 为 69.52×10^{-6} , Pr 为 8.09×10^{-6} , Nd 为 29.46×10^{-6} , Ni 为 32.67×10^{-6} , Pb 为 35.60×10^{-6} , U 为 23.11×10^{-6} 。与 NICHOLLS 提出的这些元素的标准值比,研究区这些微量元素的含量明显落在浅水沉积物的元素含量范围内,反映了长 7 油页岩沉积时的湖盆水介于半深湖—深湖环境。

4.3.2 钴元素定量研究古水深

通过沉积相分析和古生物资料综合判断,可以定性地、半定量地确定古水深。沉积岩中钴元素 (Co) 的含量可以用来定量计算古水深^[16-17]。其计算公式如下:

$$V_s = V_o \frac{N_{Co}}{S_{Co} - t T_{Co}} \quad (1)$$

$$h = \frac{3.05}{V_s^{1.5}} \times 10^5 \quad (2)$$

式中: V_s 为某样品沉积速率; V_o 为当时正常湖泊泥岩的沉积速率,取 $0.15 \sim 0.3 \text{ mm/a}$; N_{Co} 为正常湖泊沉积物中钴的丰度,为 20×10^{-6} ; S_{Co} 为样品中钴的丰度,为 15.64×10^{-6} ; t (t 为物源 Co 对样品的贡献值,因为稀土元素在地表岩石中的分布较为稳定,所以 t 可以通过比值求得) = 样品中镧的含量/陆源碎屑岩中镧的平均丰度,为 $35.33/38.99$; T_{Co} 为陆源碎屑岩中钴的丰度,为 4.68×10^{-6} ; h 为古水深。

通过上述方法计算,延长组长 7 段当时古水深范围为 $40 \sim 70 \text{ m}$ 。

综合上述几种研究方法,认为陕西南部铜川地区长 7 段油页岩沉积时为半深湖—深湖环境,水体深度约为 $40 \sim 70 \text{ m}$ 。

4.4 古气候

前人的研究结果显示,古气候环境可以通过 Sr/Cu 和气候指数 C [$C = (Fe + Mn + Cr + Ni + V + Co) / (Ca + Mg + Sr + Ba + K + Na)$] 来表现^[18]。Sr/Cu 值介于 $1.3 \sim 5.0$ 之间时为温湿—半湿润环境,在 5.0 左右时为半湿润—半干热环境,大于 5.0 时为半干热—干热环境;气候指数 C 在 $0.8 \sim 1.0$ 时为温湿环境, $0.6 \sim 0.8$ 时为半湿润, $0.4 \sim 0.6$ 时为半湿润—半干热环境, $0.2 \sim 0.4$ 时为半干热环境,小于 0.2 时为干热环境。

长 7 油页岩的 Sr/Cu 值介于 $0.68 \sim 19.38$ 之间,平均 4.28 ; 其气候指数 C 值为 0.84 , 综合显示该区古气候为温湿—半湿润气候。

4.5 湖底热液活动

沉积物中异常的地球化学元素常被用来作为判别热液沉积存在与否和热液成因的重要标志。

4.5.1 微量元素含量

据已有研究成果表明, P、Cu、Co、Ni、V、Rb 等元素的富集,往往与热液流体活动有直接的关系,说明该有机质沉积岩沉积过程中有热液流体的参与^[19-21]。此外,化学性质相似的碱金属元素 Sr 和 Ba, 其 Ba/Sr 比值不仅可以判断沉积水体的盐

度,而且可以作为衡量热液流体作用的尺度;当Ba/Sr值大于1时,其值越大,越能反映热液流体作用的影响程度^[20]。

从主要微量元素分析结果来看,研究区长7油页岩中的Cu、Co、Ni、V、Rb等元素含量相对标准值明显富集(图2);Ba/Sr值变化于1.18~5.78,平均值2.88,说明沉积时存在湖底热液流体活动。

4.5.2 稀土元素配分模式

前人大量研究表明,热液沉积物的稀土元素具有以下特征:REE总量低,Ce负异常,Eu正异常,HREE有富集的趋势。而正常水成沉积物的特征为:REE含量高,LREE>HREE,Ce常为正异常,Eu负异常不明显,HREE不会发生富集^[22-24]。长7油页岩的稀土元素REE总量低,重稀土(HREE)有富集,Ce表现为负异常等,均证明研究区存在热液沉积作用。

将样品稀土元素分析结果投入La/Yb—REE图解中(图5),样品点大部分落在玄武岩、花岗岩和沉积岩的交会区内,反映了长7油页岩沉积时存在湖底热液影响^[25]。湖盆快速扩张期的基底断裂活动是产生湖底热液活动的动力学因素^[26]。

5 结论

(1)无机地球化学分析结果表明,陕西铜川地区延长组长7油页岩主要发育于湖相微咸水—淡水、厌氧还原环境。

(2)长7油页岩沉积时主要为深湖—半深湖相,水体最大深度为40~70 m;该时期的温湿—半湿润气候条件使得生物繁茂发育,提供了丰富的沉积有机质。

(3)长7油页岩沉积时,湖底热液活动的存在为生物的繁殖提供了丰富的营养物质和能量,并促

进缺氧环境形成,有利于有机质的保存。富集的有机质供应和良好的保存条件,推动了长7优质油页岩的大规模发育。

参考文献:

- [1] 李玉宏,张文,武富礼,等.陕西省铜川—黄陵地区延长组长7油页岩特征及资源潜力[J].西安科技大学学报,2016,36(5):647-656.
LI Yuhong, ZHANG Wen, WU Fuli, et al. Characteristics and resource potential of oil shale in Chang 7 of Yanchang Formation in Tongchuan-Huangling area, Shaanxi Province [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2016, 36(5): 647-656.
- [2] 李玉宏,李金超,姜亭,等.鄂尔多斯盆地何家坊地区三叠系油页岩特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(1):65-71.
LI Yuhong, LI Jinchao, JIANG Ting, et al. Characteristics of the Triassic oil shale in the Hejiafang area, Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(1): 65-71.
- [3] 李玉宏,姜亭,武富礼,等.陕西铜川—延安地区油页岩及油气资源特征[J].中国地质调查,2016,3(1):20-25.
LI Yuhong, JIANG Ting, WU Fuli, et al. Characteristics of oil shale and oil gas resources in the Tongchuan-Yan'an area, Shaanxi Province [J]. Geological Survey of China, 2016, 3(1): 20-25.
- [4] 卢进才,李玉宏,魏仙样,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7油层组油页岩沉积环境与资源潜力研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2006,36(6):928-932.
LU Jincan, LI Yuhong, WEI Xianyang, et al. Research on the depositional environment and resources potential of the oil shale in the Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(6): 928-932.
- [5] 庞军刚,李文厚,肖丽.陕北地区延长组坳陷湖盆浅湖与深湖亚相的识别特征[J].兰州大学学报(自然科学版),2009,45(6):36-40.
PANG Jungang, LI Wenhui, XIAO Li. Identifying characteristics of shallow lake and deep lake of Yanchang Formation depressed type lacustrine basin in Shanbei area [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(6): 36-40.
- [6] 郑荣才,柳梅青.鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J].石油与天然气地质,1999,20(1):20-25.
ZHENG Rongcai, LIU Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25.
- [7] 文华国,郑荣才,唐飞,等.鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J].矿物岩石,2008,28(1):114-120.
WEN Huaguo, ZHENG Rongcai, TANG Fei, et al. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 Member in the Gengwan region, Ordos Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 114-120.
- [8] 李进龙,陈东敬.古盐度定量研究方法综述[J].油气地质与

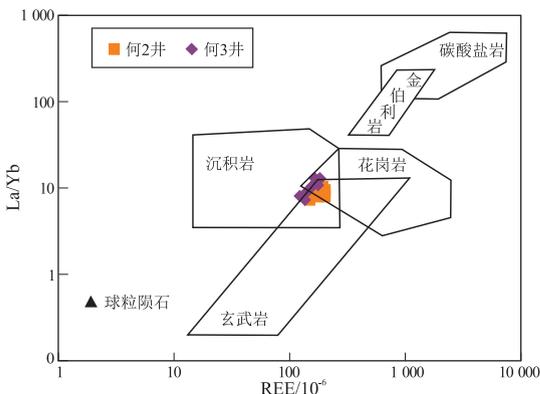


图5 陕西铜川地区长7油页岩La/Yb—REE图解

Fig.5 La/Yb-REE diagram of Chang 7 oil shale in Tongchuan area, Shaanxi Province

- 采收率, 2003, 10(5): 1-3.
- LI Jinlong, CHEN Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10(5): 1-3.
- [9] 李成凤, 肖继风. 用微量元素研究胜利油田东营盆地沙河街组的古盐度[J]. *沉积学报*, 1988, 6(4): 100-107.
- LI Chengfeng, XIAO Jifeng. The application of trace element to the study on paleosalinities in Shahejie Formation of Dongying Basin Shengli Oilfield [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1988, 6(4): 100-107.
- [10] 王敏芳, 焦养泉, 王正海, 等. 沉积环境中古盐度的恢复: 以吐哈盆地西南缘水西沟群泥岩为例[J]. *新疆石油地质*, 2005, 26(6): 719-722.
- WANG Minfang, JIAO Yangquan, WANG Zhenghai, et al. Recovery paleosalinity in sedimentary environment: an example of mudstone in Shuixigou Group, southwestern margin of Turpan-Hami Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2005, 26(6): 719-722.
- [11] 王益友, 吴萍. 江浙海岸带沉积物的地球化学标志[J]. *同济大学学报*, 1983(4): 79-87.
- WANG Yiyu, WU Ping. Geochemical criteria of sediments in the coastal area of Jiangsu and Zhejiang provinces [J]. *Journal of Tongji University*, 1983(4): 79-87.
- [12] 李春荣, 陈开远. 潜江凹陷盐湖层序地层岩石地球化学古环境研究[J]. *海洋石油*, 2004, 24(3): 25-29.
- LI Chunrong, CHEN Kaiyuan. The research of ancient environment of rock geochemistry and sequence stratigraphy on saline lake, Qingjiang Depression [J]. *Offshore Oil*, 2004, 24(3): 25-29.
- [13] 李广之, 胡斌, 邓天龙, 等. 微量元素 V 和 Ni 的油气地质意义[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(1): 13-17.
- LI Guangzhi, HU Bin, DENG Tianlong, et al. Petroleum geological significance of microelements V and Ni [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(1): 13-17.
- [14] 陈建强, 周洪瑞, 王训练. 沉积学及古地理学教程 [M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- CHEN Jianqiang, ZHOU Hongrui, WANG Xunlian. *Sedimentology and sedimentary palaeogeography* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [15] NICHOLLS G D. Trace elements in sediments: an assessment of their possible utility as depth indicators [J]. *Marine Geology*, 1967, 5(5/6): 539-555.
- [16] 吴智平, 周瑶琪. 一种计算沉积速率的新方法: 宇宙尘埃特征元素法 [J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 395-399.
- WU Zhiping, ZHOU Yaoqi. Using the characteristic elements from meteoritic dust in strata to calculate sedimentation rate [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 395-399.
- [17] 周洪瑞, 王自强, 崔新省, 等. 华北地台南部中新元古界层序地层研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- ZHOU Hongrui, WANG Ziqiang, CUI Xinsheng, et al. Study of the neoproterozoic strata on the southern of the North China Platform [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999.
- [18] 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义 [J]. *沉积学报*, 1997, 15(1): 65-70.
- WANG Suiji, HUANG Xingzhen, TUO Jincan, et al. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(1): 65-70.
- [19] MARCHIG V, GUNDLACH H, MÖLLER P, et al. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments [J]. *Marine Geology*, 1982, 50(3): 241-256.
- [20] 葛朝华, 韩发. 广东大宝山矿床喷气: 沉积成因地质地球化学特征 [M]. 北京: 北京科学技术出版社, 1987.
- GE Chaofa, HAN Fa. Geochemical characteristics of jet-sedimentary deposition in the Dabaoshan Deposit, Guangdong [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1987.
- [21] 孙省利, 高兆奎, 魏晓辉, 等. 西成铅锌成矿带泥盆系硅质岩地质地球化学特征与热水沉积成矿 [J]. *西北地质*, 2000, 33(2): 1-7.
- SUN Shengli, GAO Zhaokui, WEI Xiaohui, et al. Geological and geochemical characteristics of Devonian Chert from Xicheng Leadzinc ore belt and hot water sedimentary ore formation [J]. *Northwestern Geology*, 2000, 33(2): 1-7.
- [22] RONA P A, BOSTRÖM K, LAUBIER L, et al. Hydrothermal processes at seafloor spreading centers [M]. Boston, MA: Springer, 1983.
- [23] 贾智彬, 侯读杰, 孙德强, 等. 热水沉积判别标志及与烃源岩的耦合关系 [J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(6): 1025-1034.
- JIA Zhibin, HOU Dujie, SUN Deqiang, et al. Hydrothermal sedimentary discrimination criteria and its coupling relationship with the source rocks [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(6): 1025-1034.
- [24] 张位华, 姜立君, 高慧, 等. 贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22(2): 174-178.
- ZHANG Weihua, JIANG Lijun, GAO Hui, et al. Study on sedimentary environment and origin of black siliceous rocks of the Lower Cambrian in Guizhou Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 174-178.
- [25] 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 Liqin, 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.
- [26] 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等. 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*, 2003, 30(5): 1-5.
- ZHAO Wenzhi, HU Suyun, WANG Zecheng, et al. Key role of basement fault control on oil accumulation of Yanchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(5): 1-5.