

引用格式:张毅,万俊雨,刘子驿,等.成烃生物特征及烃源岩发育影响因素:以鄂尔多斯盆地乌拉力克组为例[J].油气藏评价与开发,2026,16(3):544-555.

ZHANG Yi, WAN Junyu, LIU Ziyi, et al. Characteristics of hydrocarbon-generating organisms and influencing factors of source rock development: A case study of Wulalike Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(3): 544-555.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025487

成烃生物特征及烃源岩发育影响因素 ——以鄂尔多斯盆地乌拉力克组为例

张毅^{1,2,3}, 万俊雨^{1,2,3}, 刘子驿^{1,2,3}, 朱建辉^{1,2,3}, 李春堂⁴, 张威⁴, 王萍^{1,2,3}

(1. 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126; 2. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏无锡 214126; 3. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 江苏无锡 214126; 4. 中国石化华北油气分公司, 河南郑州 450006)

摘要:鄂尔多斯盆地西缘发育的乌拉力克组是中国北方页岩气勘探开发的重要层位,具有普遍含气、局部富集的特征。探寻乌拉力克组优质烃源岩的发育影响因素,对现阶段油气勘探工作具有重要指导意义。本次研究以盆地西缘北段的石峡谷剖面 and 南段的银洞官庄剖面的乌拉力克组页岩为研究对象,系统开展了烃源岩地球化学特征、成烃生物组成及古海洋环境演化研究,建立了乌拉力克组沉积模式,明确了优质烃源岩发育的影响因素。研究结果表明:①烃源岩主要发育于乌拉力克组底部,总有机碳(TOC)含量整体偏低,热演化程度处于成熟—高成熟阶段,整体生烃潜力较低;②乌拉力克组生物组合包含浮游藻、笔石、底栖藻、藻类孢子囊和放射虫,进一步研究证实,烃源岩层段的成烃生物主要为浮游藻类体及其降解碎片,笔石和底栖藻碎片含量较少;③微量元素地球化学指标显示,乌拉力克组页岩沉积于缺氧的水体环境,但古生产力水平整体偏低,西缘北段沉积水体为缺氧滞留环境,西缘南段沉积水体深度较浅,缺氧程度较弱。综合分析认为,乌拉力克组页岩有机质富集受古海洋生产力和水体氧化还原环境的双重影响,古海洋生产力水平整体偏低是烃源岩有机质丰度偏低的主要原因,而局部区域的水体氧化还原环境对有机质的保存效率发挥着更显著的调控作用。

关键词:鄂尔多斯盆地;乌拉力克组;页岩;成烃生物;烃源岩

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Characteristics of hydrocarbon-generating organisms and influencing factors of source rock development: A case study of Wulalike Formation, Ordos Basin

ZHANG Yi^{1,2,3}, WAN Junyu^{1,2,3}, LIU Ziyi^{1,2,3}, ZHU Jianhui^{1,2,3}, LI Chuntang⁴, ZHANG Wei⁴, WANG Ping^{1,2,3}

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 2. Sinopec Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 3. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 4. Sinopec North China Oil and Gas Company, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: The Wulalike Formation developed in the southwest margin of the Ordos Basin is an important shale gas exploration and development horizon in northern China, characterized by general gas occurrence and local enrichment. Exploring the influencing factors of the development of high-quality source rocks in the Wulalike Formation has important guiding significance for current oil and gas exploration. This study focused on the Wulalike Formation shale from the Shixiagu cross-section in the northern part and the Yindongguanzhuang cross-section in the southern part of the western margin of the basin. A systematic investigation was conducted on the geochemical characteristics of source rocks, the composition of hydrocarbon-generating organisms, and the evolution of the paleoceanic environment to establish the sedimentary model of the Wulalike Formation and identify the influencing factors of the development of high-quality source rocks. The results showed that: (1) The source rocks were primarily developed at the bottom of the Wulalike Formation, with overall low total organic carbon (TOC) content. The thermal maturity ranged from mature to highly mature, and the overall hydrocarbon generation potential was relatively low. (2) The biotic assemblage of the Wulalike Formation included planktonic algae, graptolites, benthic algae, algal sporangia, and radiolarians. Further study confirmed that the hydrocarbon-generating organisms in the source rock intervals were

收稿日期:2025-11-19。

第一作者简介:张毅(1988—),男,博士,工程师,主要从事成烃生物和油气地质研究。地址:江苏省无锡市滨湖区蠡湖大道2060号,邮政编码:214126。E-mail: zhangyi_2017.syky@sinopec.com

基金项目:中国石化科技部项目“中西部三大叠合盆地及周缘资源评价”(P23244);中国石化科技部项目“中国石化‘十四五’资源评价方法与数据库建设”(P23230)。

mainly planktic algae bodies and their degraded fragments, with lower contents of graptolites and benthic algae fragments. (3) Trace element geochemical indicators showed that the Wulalike Formation shale was deposited in an anoxic water environment, but the paleoproductivity level was overall low. The sedimentary water body in the northern part of the western margin was anoxic and stagnant, while the sedimentary water body depth in the southern part of the western margin was shallower, with a weaker degree of anoxia. Comprehensive analysis indicates that the organic matter enrichment in the Wulalike Formation shale is influenced by both paleo-marine productivity and the redox conditions of the water body. The overall low paleo-marine productivity level is the primary reason for the low organic matter abundance in the source rocks, while the local redox environment plays a more significant role in regulating the preservation efficiency of organic matter.

Keywords: Ordos Basin; Wulalike Formation; shale; hydrocarbon-generating organisms; source rock

目前,海相页岩气已成为中国天然气增储上产的重要领域之一。四川盆地除涪陵、威远、长宁等页岩气田实现规模化商业开发外,太阳山地区浅层页岩气、丁山—东溪地区深层页岩气也取得了勘探突破,展示了南方海相页岩气良好的勘探前景^[1-4]。鄂尔多斯盆地西缘发育上奥陶统乌拉力克组笔石页岩,该套页岩是中国北方页岩气勘探开发的核心目标。近年来,乌拉力克组海相页岩气勘探取得重大突破,中国石油长庆油田多口井试气获气流响应,部分井获低产气流。其中,忠4井试气获得 $4.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,忠平1井试气获得井口无阻流量 $26.48 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产气流,且该井实现94 d持续稳产;马家滩、棋盘井地区亦有多口钻井获高产工业气流,该区域已落实2个含气富集区^[5-7]。中国石化华北油气分公司宁古1井钻遇灰质页岩50 m,气测全烃净增值率达0.98%,该井钻遇的灰质页岩段亦有望成为新的勘探突破点。

“乌拉力克组”页岩在鄂尔多斯盆地西缘呈“L”型分布。乌海—同心一带沿用“乌拉力克组”命名;平凉—陇县—岐山一带称作“平凉组”。前人研究认为,该组页岩有机质丰度高、类型好,具备优质烃源岩潜力^[8-9]。尽管针对乌拉力克组页岩气勘探已初有成效,但该领域研究起步较晚,关于这套优质烃源岩特征及成因的系统研究较为薄弱,整体仍处于探索阶段。成烃生物作为油气原始物质来源,具有鲜明的时代特征和环境特异性,在油气勘探领域具有重要意义^[10]。本文以鄂尔多斯盆地西缘北段石峡谷剖面 and 南段银洞官庄剖面的乌拉力克组页岩为研究对象,拟系统开展烃源岩地球化学特征分析、成烃生物组成识别及烃源岩沉积模式等研究,为盆地西缘海相页岩气勘探取得突破提供理论支撑。

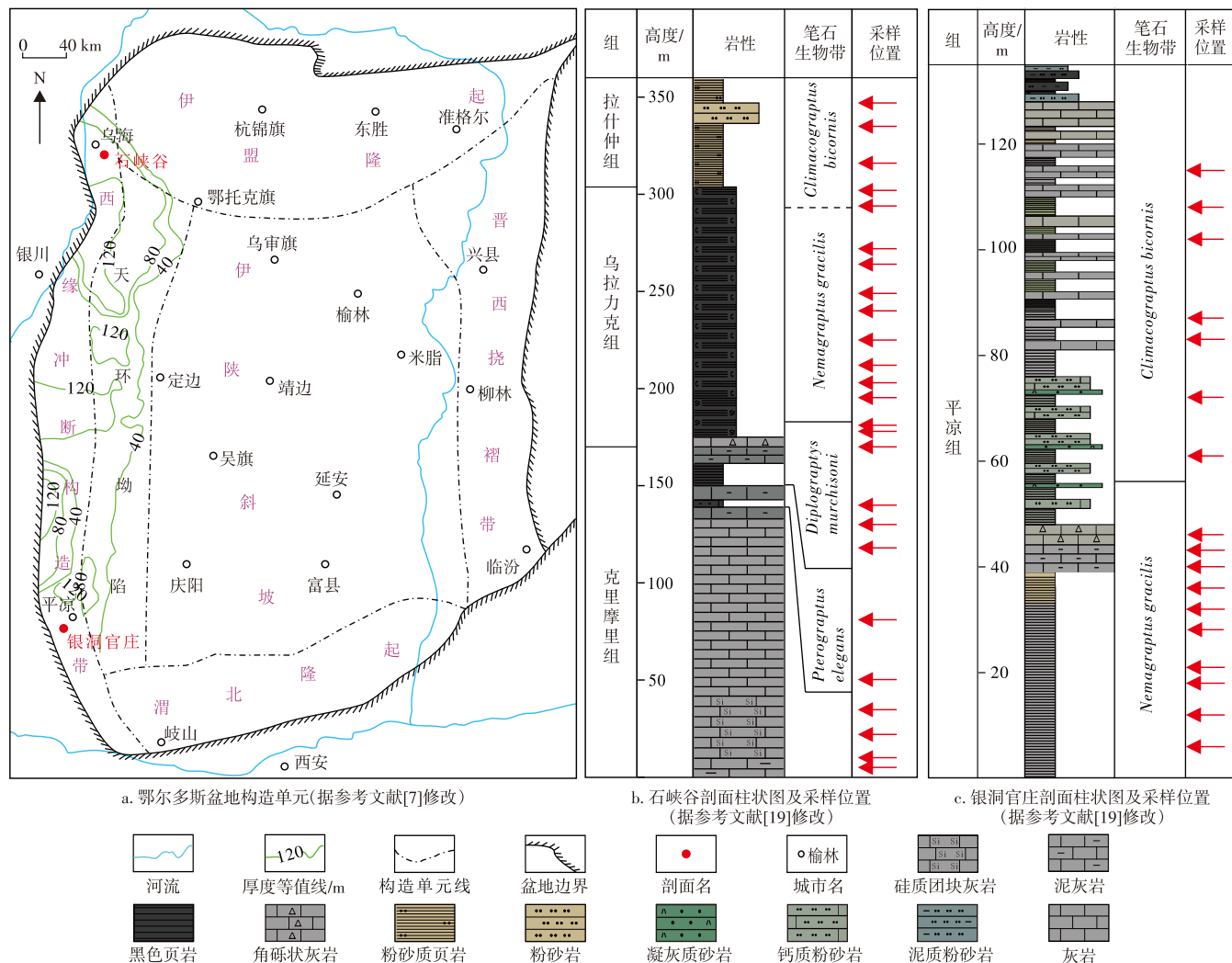
1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通西部基底上的一个稳定沉降、凹陷迁移、扭动明显的多旋回叠合含油气盆地^[11-14]。目前,在石油地质界及生产实践中,该盆地划分为6个一级构造单元:伊盟隆起、渭北隆起、西缘冲断构造带、晋西挠褶带、天环凹陷及伊陕斜坡(图1a)。鄂尔多斯盆地的构造和沉积演化史复杂,中奥陶世盆地主体

与西缘、西南缘发生显著沉积分异:主体部分继承性发育区域性碳酸盐台地相沉积,西南缘则主要发育台地边缘礁、台地前缘斜坡及深水斜坡—海槽相沉积。奥陶纪末期的加里东运动使鄂尔多斯盆地主体抬升成陆,遭受风化剥蚀,而盆地西南缘仍持续接受沉积,沉积厚度一般为数百米,最大厚度可达1 000 m^[14-15]。

本次研究以盆地西缘北段石峡谷剖面和西缘南段银洞官庄剖面为研究对象(图1a)。石峡谷剖面是鄂尔多斯盆地西缘北段的一条重要代表性剖面,自下而上依次发育中奥陶统桌子山组(O_2z)、克里摩里组(O_2k),上奥陶统乌拉力克组(O_3w)、拉什仲组(O_3l)(图1b)。本剖面克里摩里组以薄板状灰岩为主(图2a),顶部发育黑色笔石页岩;乌拉力克组整体为黑色笔石页岩(图2c),底部发育厚约1 m的角砾状灰岩(图2b),拉什仲组为灰黄色粉砂质泥岩。银洞官庄剖面位于甘肃省平凉市银洞官庄一带,仅发育上奥陶统平凉组(O_3p)(图1c),是平凉组的正层型剖面。该剖面以浅灰褐色块状砾屑灰岩为标志层,其下部主要为灰黑色泥岩,偶夹薄层灰色灰岩,含笔石(图2d、图2f);砾屑灰岩上部为灰色钙质粉砂岩、灰色灰岩及黄绿—灰绿色页岩(图2e)。

银洞官庄剖面作为上奥陶统底界金钉子候选剖面,前人已对其开展过系统的生物地层学研究^[16-17]。该剖面笔石生物带自下而上可划分为*Nemagraptus gracilis*(纤细丝笔石)带和*Climacograptus bicornis*(双刺栅笔石)带。其中,*Nemagraptus gracilis*带是上奥陶统桑比阶首个笔石带,其底界与平凉组(乌拉力克组)底部相吻合。受近年来乌拉力克组海相页岩气勘探取得突破的影响,已有学者针对鄂尔多斯盆地西缘的笔石地层开展研究。陈旭等^[19]将乌海地区大石门剖面的笔石带自下而上划分为*Pterograptus elegans*(精美翼笔石)带、*Didymograptus munchisoni*(莫氏双笔石)带和*Nemagraptus gracilis*带。其中,*Didymograptus munchisoni*带为中奥陶统达瑞威尔阶最顶部的笔石带,其与上覆的*Nemagraptus gracilis*带界线,位于乌拉力克组底部含砾灰岩之上3 m处。综合分析表明,鄂尔多斯盆地西缘北段乌拉力克组与南段平凉组(以下统称为乌拉力克组)的底部为同期沉积物,均归属于上奥陶统桑比阶底部的*Nemagraptus gracilis*带。



注: *Pterograptus elegans* 为精美翼笔石带, *Diplograptus murchisoni* 为莫氏双笔石带, *Nemagraptus gracilis* 为纤细丝笔石带, *Climacograptus bicornis* 为双刺栅笔石带。

图1 鄂尔多斯盆地构造单元划分及剖面柱状图

Fig. 1 Division of structural units and stratigraphic columns of Ordos Basin

2 样品及实验方法

本次研究采集了石峡谷剖面 25 件样品(涵盖 O_2k 、 O_3w 、 O_3l 层位)及银洞官剖面庄 17 件样品,对所有样品开展残余总有机碳(TOC)含量、全岩岩石热解,同时对部分典型样品开展笔石反射率及微量金属元素测试。上述测试均在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所完成,测试流程均严格遵循相关国家标准或行业标准。

此外,本次研究对 2 条剖面样品开展的成烃生物研究,镜下分析主要采用岩石薄片观察和扫描电子显微镜观察 2 种方法。其中,岩石薄片观察采用徕卡 DM4500P 偏光/荧光显微镜;扫描电子显微镜观察采用荷兰 FEI 公司 QUANTA 200 型扫描电子显微镜。样品处理流程为:将样品破碎成 2~3 cm 小块,选取上下表面平整的新鲜岩块进行镀导电膜处理,随后将样品放入扫描电镜样品

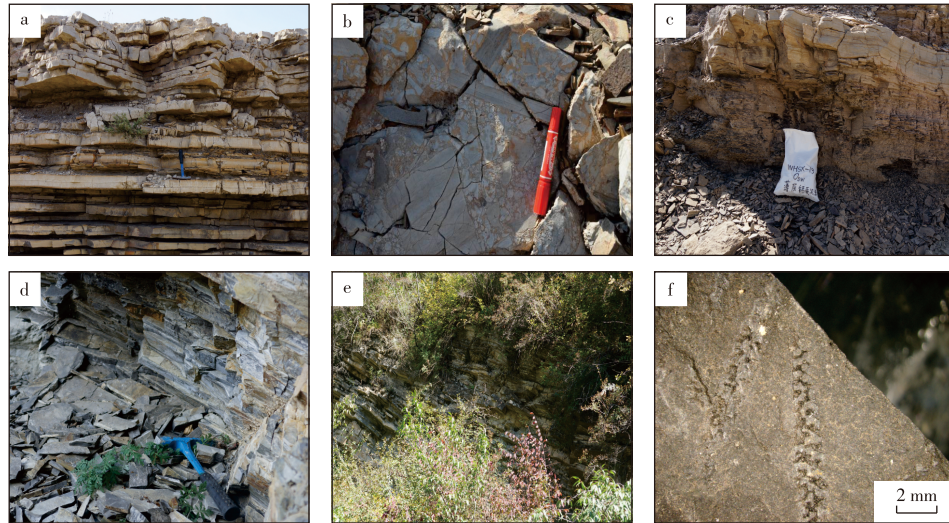
室进行成烃生物观察。

3 烃源岩地球化学特征

最新钻井、地震资料和笔石鉴定结果表明:乌拉力克组整体厚度分布稳定,呈“北厚南薄”的特征,盆地西缘北段厚度介于 80~120 m;中段厚度显著减薄,约为 40~60 m;南段厚度则稳定在 100 m 左右(图 1a)^[7-9]。乌拉力克组烃源岩多发育于该组底部,岩性以黑色笔石页岩为主,为广海陆棚相沉积产物^[7]。

3.1 有机质丰度

目前,岩石中总有机碳含量与生烃潜量(S_1+S_2)是反映样品有机质丰度的常用指标。TOC 含量是烃源岩评价的一个重要指标,同时作为页岩生气的物质基础,决定了页岩的生烃强度。席胜利等^[7]研究发现,鄂尔多斯



注:a为石峡谷剖面克里莫里组薄板状灰岩;b为石峡谷剖面乌拉力克组底部角砾状灰岩;c为石峡谷剖面乌拉力克组底部黑色笔石页岩;d为银洞官庄剖面乌拉力克组底部黑灰色页岩;e为银洞官庄剖面乌拉力克组上部黄绿色页岩;f为角状古栅笔石,采自石峡谷剖面乌拉力克组。

图2 野外剖面特征

Fig. 2 Characteristics of outcrop cross-sections

盆地西缘乌拉力克组钻井样品的TOC含量介于0.12%~3.71%,生烃潜量(S_1+S_2)介于0.03~1.63 mg/g(表1)。

地球化学测试结果显示,石峡谷剖面页岩TOC含量分布介于0.10%~1.09%。其中,克里莫里组顶部平均值为0.39%;乌拉力克组页岩平均值为0.69%;银洞官庄剖面乌拉力克组页岩TOC含量介于0.10%~0.81%,平均值为0.43%。热解数据显示:石峡谷剖面(S_1+S_2)较低,平均值为0.01 mg/g;银洞官庄剖面(S_1+S_2)介于0.03~3.58 mg/g,平均值为1.15 mg/g(表1)。

3.2 热成熟度

镜质体反射率(R_o)是评估有机质成熟度的重要指标。然而,镜质体主要来源于志留纪以来才出现的高等植物的木质素,下古生界样品往往无法采用 R_o 表征其有机质成熟度。王晔等^[20]对四川盆地五峰组—龙马溪组笔石页岩的成熟度研究提出,当笔石类化石随机反射率小

于4%时,其数值分布较为集中,该指标更适合作为下古生界样品有机质成熟度的评价指标。

BERTRAND等^[21]以加拿大Gaspé Belt古生界海相地层页岩为研究对象,系统分析了笔石反射率和 R_o 的等效关系,并建立了笔石反射率小于3%条件下的换算公式。鄂尔多斯盆地乌拉力克组同样为海相页岩,且笔者通过镜下观察发现了大尺寸笔石颗粒(图3i、图3j)。因此,本次研究采用该换算公式计算等效镜质体反射率,以此评价研究区样品的有机质成熟度,具体换算公式为:

$$R_{equ} = 0.9376 \times G_{Ro} + 0.0278 \quad (1)$$

式中: R_{equ} 为等效镜质体反射率,%; G_{Ro} 为实测笔石反射率,%。

结果显示:石峡谷地区乌拉力克组 R_{equ} 介于0.99%~1.44%,平均值为1.28%;银洞官庄地区 R_{equ} 平均值为0.73%(表1),整体处于成熟—高成熟阶段。

表1 鄂尔多斯盆地乌拉力克组有机地球化学特征

Table 1 Organic geochemical characteristics of Wulalike Formation in Ordos Basin

井号/剖面	层位	$\omega(\text{TOC})/\%$	$(S_1+S_2)/(\text{mg/g})$	$R_{equ}/\%$	样品数	备注
忠平1	O_3w	(0.12~1.32)/0.63	(0.09~1.63)/0.35	1.86	50/50/10	
忠探1	O_3w	(0.75~3.71)/1.48	(0.07~0.59)/0.36	1.90	16/5/4	数据引自参考文献[8]
梁探1	O_3w	(0.14~0.74)/0.50	(0.03~0.09)/0.06	1.95	13/13/7	
银探1	O_3w	(0.67~1.52)/0.92	(0.06~1.32)/1.03	1.87	22/5/3	
石峡谷	O_3w	(0.36~1.09)/0.69	(0~0.01)/0.01	1.28	12/11/7	本研究实测
	O_2k	(0.10~1.07)/0.39	(0~0.01)/0.01	1.28	10/11/7	
银洞官庄	O_3w	(0.10~0.81)/0.43	(0.03~3.58)/1.15	0.73	18/17/7	

注: $\omega(\text{TOC})$ 为总有机碳含量,%; S_1+S_2 为生烃潜量,单位mg/g; R_{equ} 为等效镜质体反射率,%; $\omega(\text{TOC})$ 、 (S_1+S_2) 数据意义为范围/平均值; R_{equ} 数据意义为平均值;样品数数据意义为 $\omega(\text{TOC})/(S_1+S_2)/R_{equ}$ 。

4 成烃生物特征

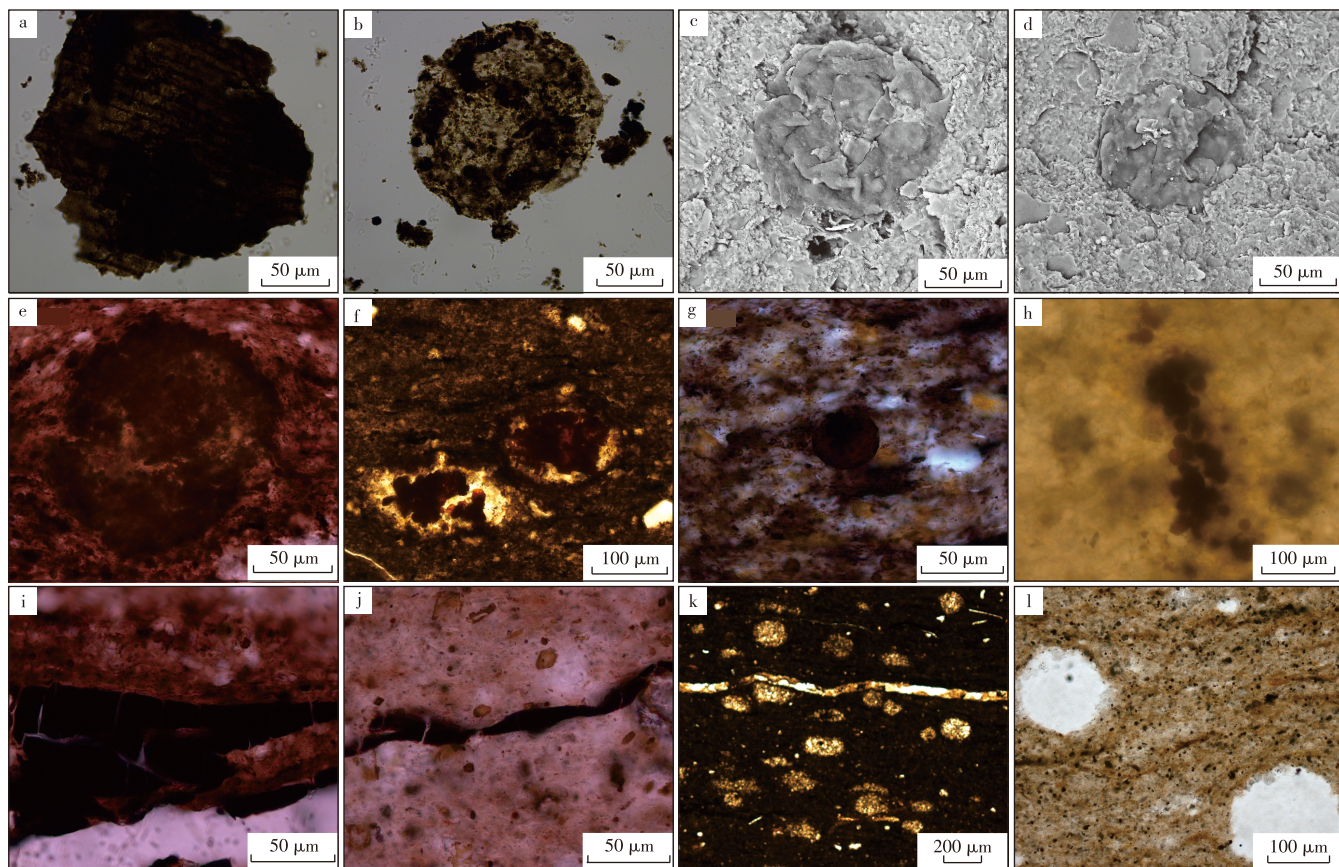
前人研究认为,乌拉力克组干酪根 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 -26.50% ~ -32.32% ,有机显微组分以腐泥组和动物有机组分为主,壳质组含量较少,干酪根类型整体为 I—II₁型^[5,22]。尽管多数学者认为乌拉力克组页岩富含笔石^[5,22],但鲜有学者对其成烃生物类型及其组合开展系统研究。

成烃生物是油气形成的原始母质,也是海相优质烃源岩发育的物质基础,其组成特征可直接影响烃源岩有机质的类型和丰度^[23]。本文通过岩石光薄片观察、干酪根涂片镜下鉴定及扫描电镜分析发现,乌拉力克组成烃生物以浮游藻类(疑藻类)和笔石类为主,伴生少量底栖藻碎片和藻类孢子囊。底栖藻个体较大,本次研究仅发现个别底栖藻碎片,形状不规则,直径大于 $100\ \mu\text{m}$,单偏光下呈深棕色,隐约可见组织结构(图3a)。浮游藻为有机质壁化石,个体较小,多呈圆球状至椭球状,生烃潜力较强,主要包括:光面球藻(*Leiosphaeridia*) (图3b—图

3d),直径约 $50\ \mu\text{m}$,光滑圆球状,单偏光下呈淡黄色,扫描电镜背散射环境下呈黑色,表现出碳质膜壳的特征,化石边缘可见少量褶皱;部分光面球藻化石具有瘤状突起,因受到压实作用呈椭圆形,直径 $50\sim 100\ \mu\text{m}$,单偏光下为棕色(图3e—图3f)。藻类孢子囊主要为圆球状,但个体较小,直径约 $20\sim 30\ \mu\text{m}$,单偏光下为深棕色,可呈串珠状集群产出(图3g—图3h)。

笔石类动物在奥陶纪海洋生物群落中占据重要地位,其壳体主要由高分子蛋白质构成,在成熟度较低时是优质的生烃母质^[24],本次研究中发现,笔石壳体单偏光下为黑色,宽度介于 $10\sim 40\ \mu\text{m}$,长度一般超过 $100\ \mu\text{m}$,且可见清晰的分段结构。此外,部分样品中发现大量放射虫化石,放射虫呈圆球状或近圆球状,个体直径约 $100\ \mu\text{m}$,呈集群状产出(图3k—图3l)。

从成烃生物演化趋势来看(图4),克里摩里组以藻类碎片为主,且底栖藻碎片含量大于浮游藻碎片,这一特征可能和动荡的浅水环境相关,克里摩里组顶部出现浮游藻碎片和笔石,指示水体逐渐加深的变化趋势。乌拉力克组底部及平



注:a为银洞官庄剖面乌拉力克组,底栖藻碎片,单偏光;b为银洞官庄剖面乌拉力克组,光面球藻,单偏光;c—d为银洞官庄剖面乌拉力克组,光面球藻,扫描电镜;e—f为石峡谷剖面乌拉力克组,光面球藻,单偏光;g—h为石峡谷剖面乌拉力克组,藻类孢子囊,单偏光;i—j为石峡谷剖面乌拉力克组,笔石类化石,单偏光;k为石峡谷剖面乌拉力克组,放射虫化石,单偏光;l为银洞官庄剖面乌拉力克组,放射虫化石,单偏光。

图3 鄂尔多斯盆地乌拉力克组有机显微组分及成烃生物照片

Fig. 3 Photos of organic macerals and hydrocarbon-generating organisms in Ordos Basin Wulalike Formation

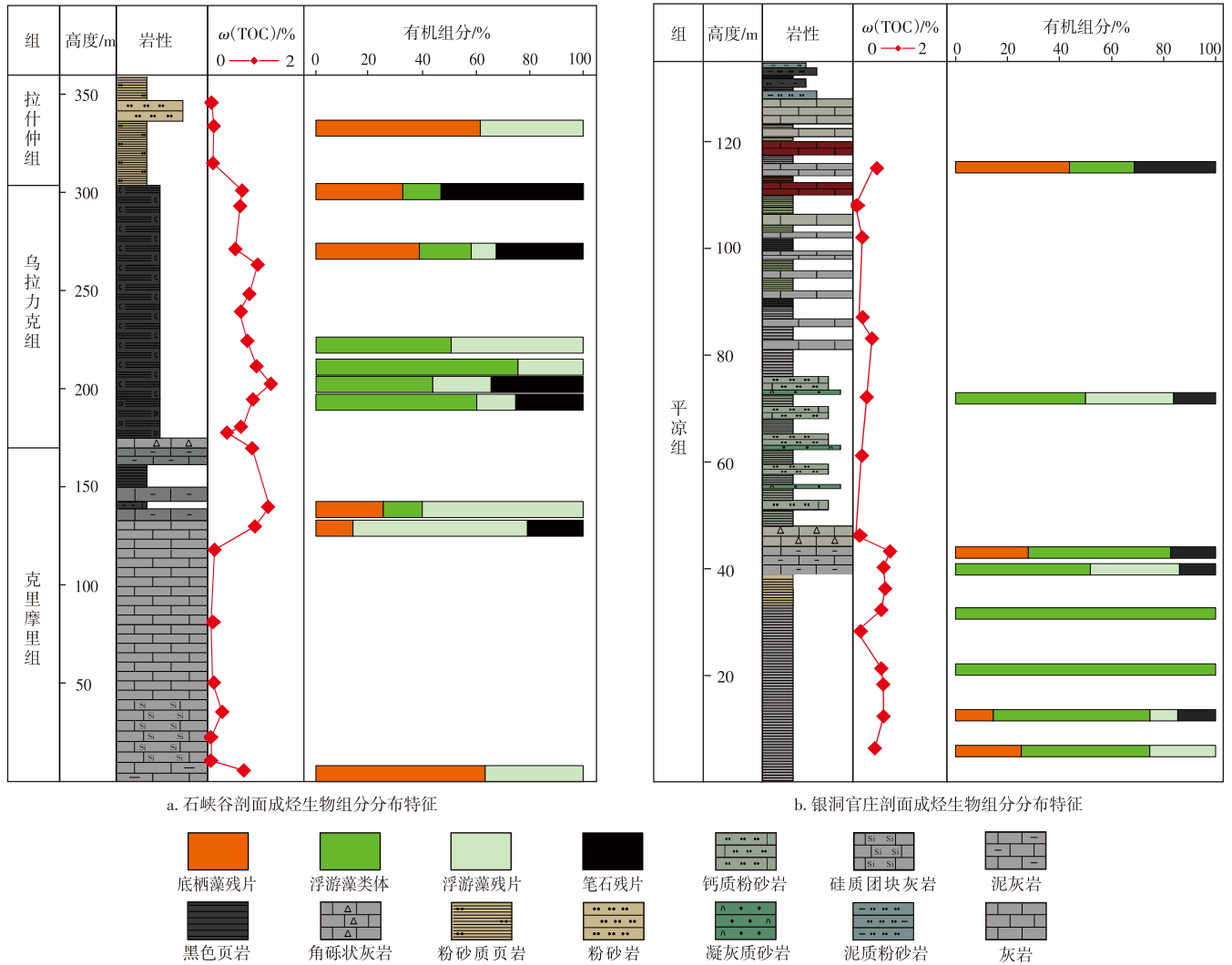


图4 鄂尔多斯盆地石峡谷剖面与银洞官庄剖面成烃生物组分分布特征

Fig. 4 Distribution characteristics of hydrocarbon-generating organism components in Shixiagu and Yindongguanzhuang cross-sections, Ordos Basin

凉组底部,即烃源岩发育核心层段,成烃生物整体以浮游藻类体及其碎片为主,部分样品中伴生适量笔石类和放射虫化石,底栖藻较少,表明此时海水进一步加深导致底层水体含氧量下降,底栖生物难以生存。乌拉力克组顶部至拉什仲组(平凉组中上部)浮游藻含量减少,底栖藻碎片与笔石含量逐渐增加,指示海平面逐渐下降,水体含氧量随之逐渐升高。

纵观整个剖面,鄂尔多斯盆地西南缘乌拉力克组成烃生物丰度较高,但种类较为单一,以光面球藻的繁盛发育为特征,不同的研究方法均证实该藻属的普遍存在。此类低分度、高丰度的成烃生物组合可见于上扬子地区龙马溪组第8小层^[25]。

5 烃源岩发育模式

5.1 古海洋环境分析

沉积有机碳埋藏以及烃源岩有机质保存受到多种因

素控制,一般认为古海洋的氧化还原环境与生产力在有机质沉积和埋藏过程中均起到关键性作用。烃源岩研究中常选用微量元素含量或比值作为古海洋环境的代用指标,使用时应注意对微量元素的陆源成分进行扣除,公式为:

$$E_{xs} = E_{total} - \omega(Ti_{total}) \times (E/\omega(Ti))_{PAAS} \quad (2)$$

式中: E_{xs} 为某元素非陆源成分的质量分数,%; E_{total} 为实验测得该元素的总质量分数,%; $\omega(Ti)$ 为实测Ti元素的质量分数,%; $(E/\omega(Ti))_{PAAS}$ 为后太古宙澳大利亚页岩中该元素与Ti质量分数的比值^[26]。

铀(U)、钒(V)等氧化还原敏感元素常被用来表征古水体氧化还原环境:氧化环境的水体中,这类元素以溶解态存在;当水体转为还原状态时,则形成沉淀保存进入沉积物^[27-28]。此外,还有部分敏感元素与非敏感元素的比值也常用来表征水体氧化还原环境,如V/Cr比值:当V/Cr比值小于2.00时,水体处于氧化环境;大于4.25时,水体

处于缺氧环境;介于2.00~4.25,为次氧化环境^[29]。海洋生产力是指海洋通过同化作用合成有机物的能力,是烃源岩形成和发育的重要物质基础。铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)等元素在氧化的水体中与有机质或铁锰氧化物共生,当有机质被分解后,这些元素会释放至孔隙水中,随后在缺氧条件下形成各自的硫化物而沉积下来,所以Cu、Zn、Ni常用来表征还原条件下沉积的黑色页岩所对应的古海洋生产力^[30]。

利用VISTA MPX电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES),对石峡谷剖面与银洞官庄剖面样品开展了

元素地球化学分析,相关的微量元素数据见表2。

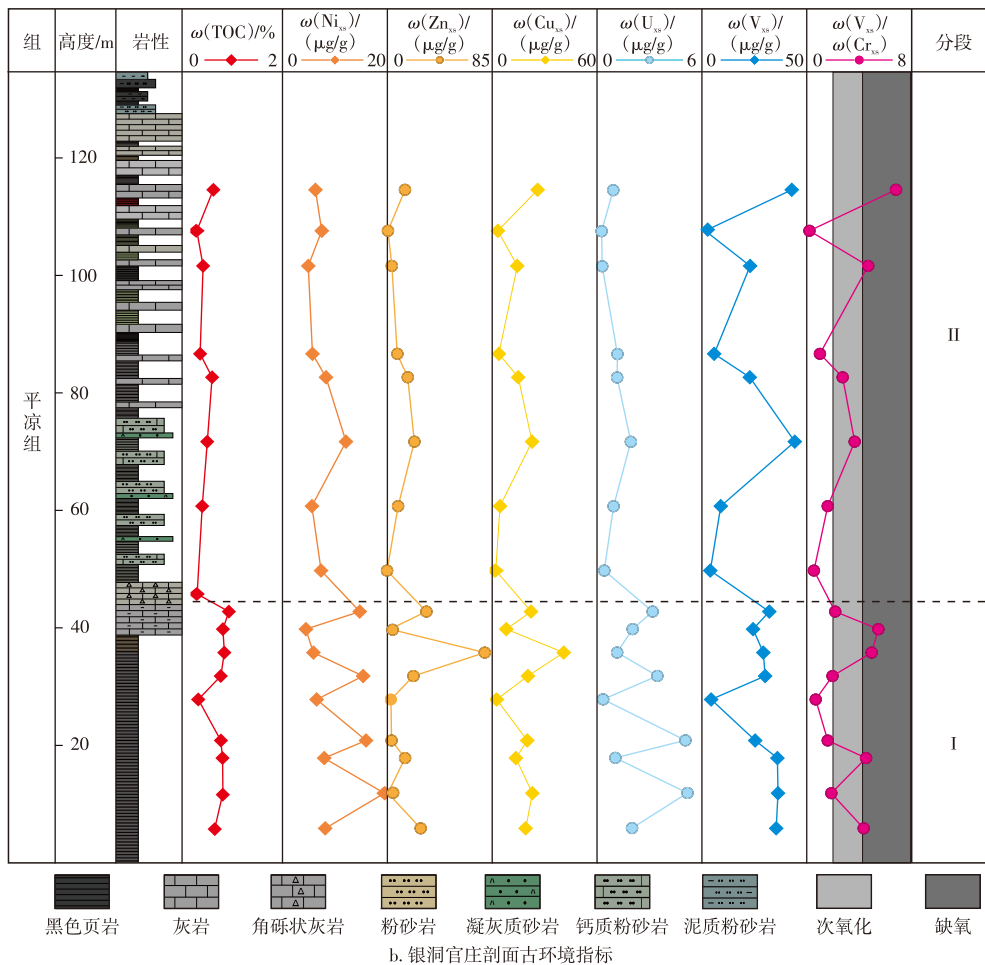
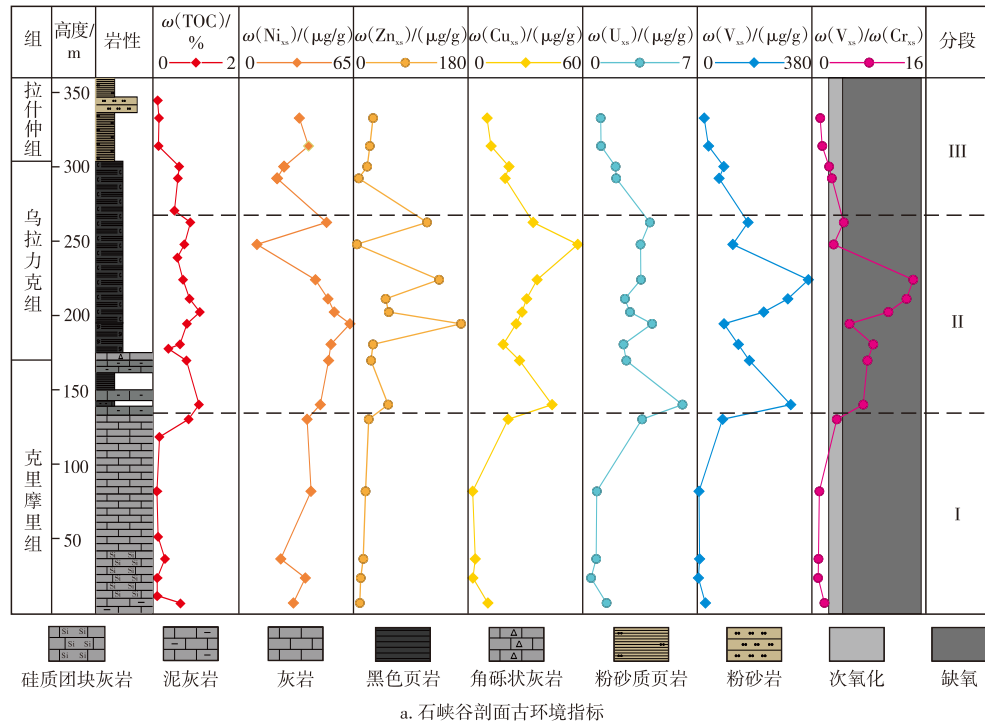
石峡谷剖面地球化学指标变化趋势可分为3段(图5a): I段各项指标参数均较低,古生产力指标铜、锌、镍生源值(Cu_{xs} 、 Zn_{xs} 、 Ni_{xs})质量分数平均值为7.7、19.1、34.4 $\mu\text{g/g}$,氧化还原指标铀、钒生源值(U_{xs} 、 V_{xs})质量分数平均值为1.4、22.8 $\mu\text{g/g}$, V_{xs}/Cr_{xs} 比值平均值为1.53,指示较低的古生产力和氧化一次氧化的水体环境; II段为各指标高值区, Cu_{xs} 、 Zn_{xs} 、 Ni_{xs} 质量分数平均值为33.5、70.8、46.7 $\mu\text{g/g}$, U_{xs} 、 V_{xs} 质量分数平均值为3.6、209.1 $\mu\text{g/g}$, V_{xs}/Cr_{xs} 比值平均为7.7,此段古生产力相对较高,处于缺氧的水体环境,

表2 鄂尔多斯盆地石峡谷剖面与银洞官庄剖面样品部分微量元素数据

Table 2 Partial trace element data of samples from Shixiagu and Yindongguanzhuang cross-sections in Ordos Basin

样品编号	地质年代	$\omega(\text{Ti})/\%$	$\omega(\text{Ni})/(\mu\text{g/g})$	$\omega(\text{Zn})/(\mu\text{g/g})$	$\omega(\text{Cu})/(\mu\text{g/g})$	$\omega(\text{U})/(\mu\text{g/g})$	$\omega(\text{V})/(\mu\text{g/g})$	$\omega(\text{Cr})/(\mu\text{g/g})$
WHSX-24	O_3l	0.28	59.58	69.79	32.95	2.53	92.12	70.33
WHSX-23	O_3l	0.28	64.90	64.84	35.13	2.55	106.62	76.57
WHSX-22	O_3w	0.25	48.85	57.34	42.52	3.32	151.41	83.11
WHSX-21	O_3w	0.15	35.29	29.23	31.79	2.81	109.35	53.16
WHSX-19	O_3w	0.20	68.07	143.80	50.74	5.14	218.38	74.51
WHSX-18	O_3w	0.17	25.62	11.22	71.41	4.40	160.04	69.73
WHSX-16	O_3w	0.16	57.68	156.52	49.09	4.36	407.10	54.52
WHSX-15	O_3w	0.16	64.79	72.49	43.64	3.38	339.19	51.26
WHSX-14	O_3w	0.13	65.76	73.47	38.87	3.55	251.92	43.94
WHSX-13	O_3w	0.11	73.40	185.02	34.65	4.83	116.99	37.70
WHSX-12	O_3w	0.12	62.86	47.06	28.05	3.09	165.21	37.17
WHSX-10	O_2k	0.12	62.21	45.17	37.25	3.30	203.69	44.94
WHSX-9	O_2k	0.24	67.85	87.96	63.68	7.32	369.05	86.55
WHSX-8	O_2k	0.11	48.96	39.85	30.30	4.21	112.09	44.76
WHSX-6	O_2k	0.02	42.64	21.69	3.99	0.96	10.74	9.18
WHSX-4	O_2k	0.04	27.39	21.00	7.05	1.03	17.89	15.97
WHSX-3	O_2k	0.01	38.90	13.32	3.59	0.58	7.30	7.07
WHSX-1	O_2k	0.12	41.94	27.08	20.40	2.08	57.05	37.49
YDGZ-17	O_3w	0.18	23.10	40.27	41.29	1.94	88.74	43.17
YDGZ-16	O_3w	0.01	8.72	2.26	4.36	1.22	4.93	5.09
YDGZ-15	O_3w	0.12	15.86	20.55	24.27	1.36	52.87	26.27
YDGZ-14	O_3w	0.06	11.50	17.05	9.10	1.67	21.56	10.96
YDGZ-13	O_3w	0.12	19.44	33.78	25.03	1.67	53.18	30.51
YDGZ-12	O_3w	0.19	29.81	49.30	38.93	2.28	92.57	47.23
YDGZ-11	O_3w	0.07	12.18	18.82	10.47	1.62	26.88	14.65
YDGZ-10	O_3w	0.01	8.00	0.83	2.63	2.24	5.80	5.13
YDGZ-9	O_3w	0.21	33.88	61.26	39.62	2.74	84.31	48.49
YDGZ-8	O_3w	0.30	32.32	45.23	33.37	3.56	100.40	59.95
YDGZ-7	O_3w	0.19	23.30	105.88	56.75	2.25	76.72	37.63
YDGZ-6	O_3w	0.17	30.79	44.93	34.46	2.19	72.12	40.35
YDGZ-5	O_3w	0.03	9.13	6.85	5.00	2.25	11.53	8.02
YDGZ-4	O_3w	0.16	30.90	26.52	33.70	2.32	66.23	35.68
YDGZ-3	O_3w	0.19	25.71	41.78	29.70	2.82	84.46	40.26
YDGZ-2	O_3w	0.20	37.51	28.48	39.44	3.20	85.65	44.91
YDGZ-1	O_3w	0.19	25.13	53.27	34.58	2.72	81.69	42.34

注: $\omega(\text{Ti})$ 、 $\omega(\text{Ni})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{U})$ 、 $\omega(\text{V})$ 、 $\omega(\text{Cr})$ 分别为钛、镍、锌、铜、铀、钒、铬的质量分数。



注： $\omega(\text{Cu}_{\text{xs}})$ 、 $\omega(\text{Zn}_{\text{xs}})$ 、 $\omega(\text{Ni}_{\text{xs}})$ 、 $\omega(\text{U}_{\text{xs}})$ 、 $\omega(\text{V}_{\text{xs}})$ 、 $\omega(\text{Cr}_{\text{xs}})$ 分别为铜、锌、镍、铀、钒、铬生源值的质量分数。

图5 鄂尔多斯盆地石峡谷剖面 and 银洞官庄剖面古环境指标纵向分布

Fig. 5 Longitudinal distribution of paleoenvironmental indicators in Shixiagu and Yindongguanzhuang cross-sections, Ordos Basin

也是本剖面 TOC 含量的高值; III 段各指标再度回落至低值区间, Cu_{xs} 、 Zn_{xs} 、 Ni_{xs} 质量分数平均值为 15.7、21.4、30.3 $\mu\text{g/g}$, U_{xs} 质量分数平均值为 1.56 $\mu\text{g/g}$, $\text{V}_{\text{xs}}/\text{Cr}_{\text{xs}}$ 比值介于 1.1~2.7, 指示此段古生产力较低, 沉积环境为次氧化至氧化。

银洞官庄剖面各项地球化学指标变化趋势可分为 2 段(图 5b), I 段为 TOC 含量高值段, 各项指标含量也较高, Cu_{xs} 质量分数分布范围为 8.0~41.0 $\mu\text{g/g}$, Zn_{xs} 质量分数介于 0.5~78.9 $\mu\text{g/g}$, Ni_{xs} 质量分数介于 4.4~15.9 $\mu\text{g/g}$, 平均值分别为 18.9、20.2、10.9 $\mu\text{g/g}$; 氧化还原指标 U_{xs} 、 V_{xs} 质量分数平均值分别为 1.7、28.2 $\mu\text{g/g}$ 。II 段各项指标含量均有所降低, Cu_{xs} 、 Zn_{xs} 、 Ni_{xs} 质量分数平均值降低至 11.5、10.5、7.2 $\mu\text{g/g}$, 氧化还原指标 U_{xs} 、 V_{xs} 质量分数平均值也降低至 1.2、19.2 $\mu\text{g/g}$ 。但从 $\text{V}_{\text{xs}}/\text{Cr}_{\text{xs}}$ 比值和 $\text{V}_{\text{xs}}/(\text{V}_{\text{xs}} + \text{Ni}_{\text{xs}})$ 比值来看, 剖面下段水体氧化还原环境比较稳定, 基本处于次氧化—缺氧状态, 剖面上段环境变化较大, 在氧化至缺氧环境之间波动。

5.2 有机质富集主控因素

有机质是油气生成的物质基础, 烃源岩的形成与有机质的富集过程紧密相关。前人针对中国多套主力海相烃源岩的研究表明, 有机质富集主要受古海洋氧化还原

环境和古生产力的控制^[31-34]。张艳妮等^[33]采用元素地球化学方法分析了乌拉力克组页岩的沉积环境, 认为乌拉力克组沉积期水体为缺氧且强滞留的环境, 但整体古生产力水平较低, 这与本文的成烃生物研究结果相一致。乌拉力克组疑源类分异度低但丰度高, 以光面球藻 (*Leiosphaeridia*) 为代表的浮游藻是成烃生物的主要组成部分(图 4), 这与四川盆地龙马溪组第 8 小层的主要成烃生物类型相似。五峰组及龙马溪组底部(第 1、3 小层)具有高 TOC 含量、高古生产力的特点, 其成烃生物组合亦表现出高分异度、高丰度的特征; 而龙马溪组上部(第 8 小层) TOC 含量显著降低, 成烃生物演化为以光面球藻为主体的组合^[25], 这可能是由于较低的古生产力水平难以支撑复杂的生态系统, 导致古海水中的浮游藻类的种类进一步减少。

为进一步探讨古海洋氧化还原环境与古生产力对乌拉力克组有机质保存的影响, 本文选取典型地球化学指标与 TOC 含量进行相关性分析。结果表明, TOC 含量与 Cu_{xs} 和 Zn_{xs} 等古生产力指标具有一定相关性, 而与表征氧化还原环境的 V_{xs} 和 U_{xs} 的相关性更显著(图 6)。这说明古生产力和氧化还原环境均会影响页岩 TOC 含量, 且有机质保存主要受氧化还原条件的控制。综合分析认为, 乌拉力克组沉积期古海洋古生产力水平偏低, 同时由沉

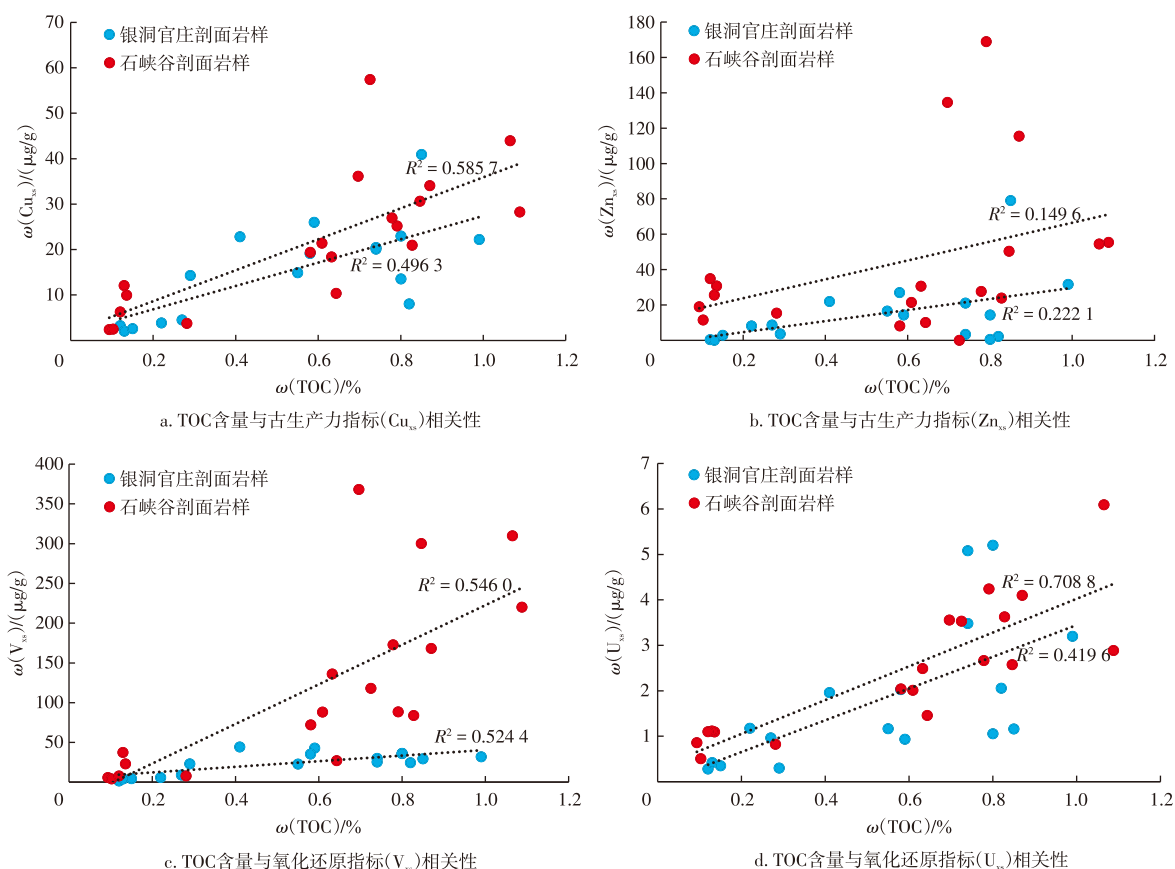


图6 总有机碳含量与古环境指标相关性

Fig. 6 Correlation between total organic carbon content and paleoenvironmental indicators

积期氧化还原条件的分异作用,是该组样品 TOC 含量整体偏低的主要原因。

5.3 烃源岩发育模式

烃源岩的沉积过程和发育特征受地质历史时期特定环境的影响。针对目前已成功实现商业开发的五峰组—龙马溪组页岩,中国学者已开展大量研究,普遍认为该套烃源岩沉积于滞留、缺氧且古生产力水平较高的水体环境^[34-35]。同时,火山活动对五峰组—龙马溪期古海洋的高古生产力和强还原环境具有明显的促进作用:一方面,火山灰可以提供营养物质,促进海洋生物繁盛,提升古生产力;另一方面,高频次的火山活动有利于水体缺氧环境的形成^[36]。

晚奥陶世时期,加里东运动导致鄂尔多斯盆地主体隆升为陆,并长期遭受风化剥蚀,仅盆地西缘仍持续接受沉积。盆地西缘北段和中段由碳酸盐台地前缘斜坡快速过渡为大陆斜坡—深水盆地沉积相,南段则发育具有生物礁镶边的台地型沉积体系。在内蒙古乌海地区,乌拉力克组岩性均为黑色笔石页岩,代表了一套水体稳定的深水海槽相沉积;在甘肃平凉地区,该组岩性以泥页岩、泥质粉砂岩和泥晶灰岩为主,代表了大陆斜坡—海槽相沉积^[14-15]。

王振涛等^[37]在鄂尔多斯盆地南缘多个剖面均发现火山活动相关的沉积记录,这表明该地区在晚奥陶世受北秦岭及北祁连火山弧喷发的影响。虽然火山活动可能为古海洋提供一定的营养元素,但盆地西缘南段的平凉银洞官庄剖面沉积位置靠近庆阳古陆,沉积水体偏浅(有机质成熟度较低,约为0.76%),且古海洋环境缺氧程度较盆地西缘更弱(银洞官庄剖面 U_{xs} 和 V_{xs} 质量分数均低于石峡谷剖面),导致大量有机质被分解。盆地西缘北段位于中央古隆起西侧,远离盆地西南缘北祁连或北秦岭海,距离火山喷发区较远,受火山灰影响较弱,且石峡谷剖面亦未发现明显的火山活动遗迹。此外,石峡谷剖面乌拉力克组整体为陆棚相深水沉积,缺氧且强滞留的水体环境虽有利于有机质保存,但也导致古陆和海底洋流携带的营养物质供给不足,限制了古海洋生产力水平的提升(图7)。

综上所述,乌拉力克组页岩有机质的保存主要受控于古生产力和沉积保存条件(即氧化还原环境)。研究区古生产力水平偏低,导致乌拉力克组页岩样品的 TOC 含量整体不高,成烃生物类型相对单一,亦可佐证其古生产力水平较低。在此背景下,古海洋氧化还原环境对有机质保存的影响更为显著,局部区域发育的缺氧环境可以进一步促进有机质保存。

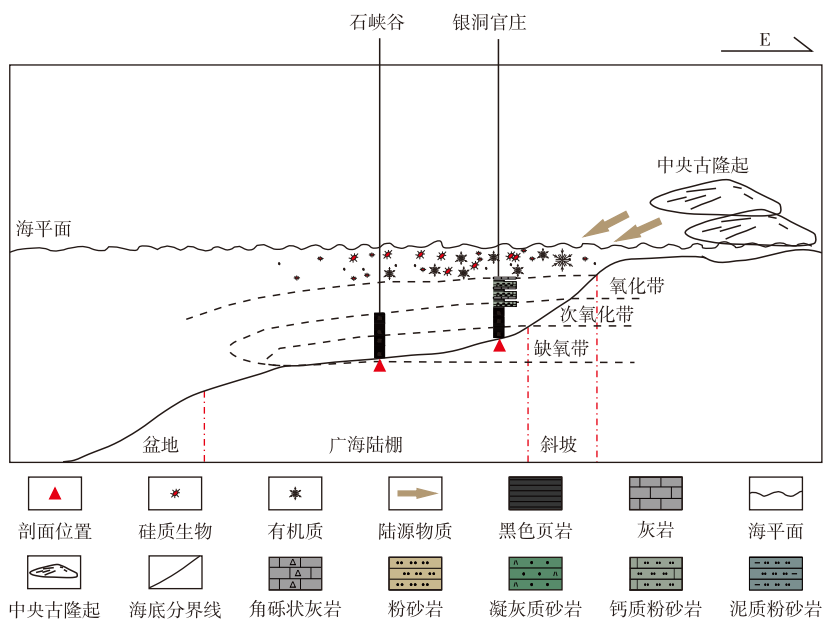


图7 鄂尔多斯盆地西缘乌拉力克组烃源岩发育模式

Fig. 7 Source rock development pattern of Wulalike Formation in western margin of Ordos Basin

6 结论

1) 鄂尔多斯盆地西南缘乌拉力克组烃源岩 TOC 含量较低(平均0.43%~1.48%),原始生烃潜量较差(S_1+S_2

平均0.01~1.15 mg/g),成熟度整体处于成熟—高成熟阶段(平均约0.70%~1.95%),总体生烃潜力较低。

2) 乌拉力克组成烃生物包含浮游藻、笔石、底栖藻和藻类孢子囊,个别样品中可见球形放射虫;烃源岩层段的成烃生物组合以浮游藻、笔石、放射虫为主。该组成烃生

物整体丰度较高,但种类较为单一。

3)微量元素指标与成烃生物分析结果表明,乌拉力克组烃源岩沉积于古海洋低古生产力、缺氧的环境中。有机质富集受古生产力和氧化还原环境的共同控制,其中古海洋低生产力是导致该组有机质丰度低的主要原因。在此背景下,局部水体的氧化还原环境对有机质的保存效应影响更为显著。

参考文献

- [1] 郭旭升,赵永强,申宝剑,等.中国南方海相页岩气勘探理论:回顾与展望[J].地质学报,2022,96(1):172-182.
GUO Xusheng, ZHAO Yongqiang, SHEN Baojian, et al. Marine shale gas exploration theory in Southern China: Review and prospects [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 172-182.
- [2] 郭旭升,胡东风,俞凌杰,等.页岩自封闭性与页岩气保存的微观机理研究[J].石油实验地质,2023,45(5):821-831.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, YU Lingjie, et al. Study on the micro mechanism of shale self-sealing and shale gas preservation[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 821-831.
- [3] 何希鹏,王凯,何贵松,等.复杂构造带常压页岩气开发刻度区建立及其意义[J].天然气工业,2025,45(3):16-35.
HE Xipeng, WANG Kai, HE Guisong, et al. Establishment of calibrated area of normal pressure shale gas development in complex structure belts and its significance[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(3): 16-35.
- [4] 郭彤楼.中国页岩气发展的回顾与思考:从志留系到寒武系[J].油气藏评价与开发,2025,15(3):339-348.
GUO Tonglou. Review and reflection on shale gas development in China: From Silurian to Cambrian[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(3): 339-348.
- [5] 付锁堂,付金华,席胜利,等.鄂尔多斯盆地奥陶系海相页岩气地质特征及勘探前景[J].中国石油勘探,2021,26(2):33-44.
FU Suotang, FU Jinhua, XI Shengli, et al. Geological characteristics of Ordovician marine shale gas in the Ordos Basin and its prospects [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 33-44.
- [6] 席胜利,莫午零,刘新社,等.鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩气勘探潜力:以忠平1井为例[J].天然气地球科学,2021,32(8):1235-1246.
XI Shengli, MO Wuling, LIU Xinshe, et al. Shale gas exploration potential of Ordovician Wulalike Formation in the western margin of Ordos Basin: Case study of Well Zhongping 1[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(8): 1235-1246.
- [7] 席胜利,刘新社,黄正良,等.鄂尔多斯盆地中奥陶统乌拉力克组页岩油气富集条件及勘探方向[J].天然气工业,2023,43(3):12-22.
XI Shengli, LIU Xinshe, HUANG Zhengliang, et al. Enrichment characteristics and exploration direction of shale oil and gas in Wulalike Formation of Middle Ordovician in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(3): 12-22.
- [8] 陈孟晋,宁宁,胡国艺,等.鄂尔多斯盆地西部平凉组烃源岩特征及其影响因素[J].科学通报,2007,52(增刊1):78-85.
CHEN Mengjin, NING Ning, HU Guoyi, et al. Characteristics and influencing factors of source rocks of Pingliang Formation in western Ordos Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Suppl. 1): 78-85.
- [9] 倪春华,周小进,王果寿,等.鄂尔多斯盆地南缘平凉组烃源岩沉积环境与地球化学特征[J].石油与天然气地质,2011,32(1):38-46.
NI Chunhua, ZHOU Xiaojin, WANG Guoshou, et al. Sedimentary environment and geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Pingliang Formation, southern margin of the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 38-46.
- [10] 秦建中,申宝剑,陶国亮,等.优质烃源岩成烃生物与生烃能力动态评价[J].石油实验地质,2014,36(4):465-472.
QIN Jianzhong, SHEN Baojian, TAO Guoliang, et al. Hydrocarbon-forming organisms and dynamic evaluation of hydrocarbon generation capacity in excellent source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 465-472.
- [11] 马立涛,吴鹏,杨江浩,等.鄂尔多斯盆地东部深部煤系储层微观孔隙结构特征及启示[J].油气藏评价与开发,2025,15(2):217-226.
MA Litao, WU Peng, YANG Jianghao, et al. Microscopic pore structure characteristics and implications of deep coal measure reservoirs in eastern Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2): 217-226.
- [12] 陈明君,唐星宇,王玉斌,等.鄂尔多斯盆地东缘低压致密砂岩气储层敏感性实验研究[J].油气藏评价与开发,2025,15(6):983-994.
CHEN Mingjun, TANG Xingyu, WANG Yubin, et al. Sensitivity experimental study of low-pressure tight sandstone gas reservoirs in eastern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(6): 983-994.
- [13] 何发岐,李俊庞,高一龙,等.鄂尔多斯盆地西南缘断缝体油藏开发特征与潜力[J].油气藏评价与开发,2024,14(5):667-677.
HE Faqi, LI Junlu, GAO Yilong, et al. Development characteristics and potential of fault-fracture reservoir in southwest margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(5): 667-677.
- [14] 刘景平,谢仕英,柳克琪,等.鄂尔多斯盆地的演化叠加与含油气性:中国大陆板块内部一个大型盆地原型分析[J].石油与天然气地质,1986,7(4):356-367.
LIU Jingping, XIE Shiyong, LIU Keqi, et al. Evolution stacking and hydrocarbon potential of the Ordos Basin: Prototypel analysis of a huge basin in Chinese continenta plate[J]. Oil & Gas Geology, 1986, 7(4): 356-367.
- [15] 张福礼.鄂尔多斯盆地早古生代复合的古构造体系与天然气[J].地质力学学报,2002,8(3):193-200.
ZHANG Fuli. Compound ancient tectonic system and natural gas of Early Paleozoic in Ordos Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(3): 193-200.
- [16] FINNEY S C, BERGSTROM S M, CHEN X, et al. The Pingliang section, Gansu Province, China: Potential as stratotype for the base of the *Nemagraptus gracilis* Biozone and the base of the global Upper Ordovician[J]. Acta Universitatis Carolinae-Geologica, 1999, 43(1/2): 73-75.
- [17] 王志浩, BERGSTROM S M, 甄勇毅,等.甘肃平凉晚奥陶世平凉组牙形刺的新发现及其意义[J].微体古生物学报,2013,30(2):123-131.
WANG Zhihao, BERGSTROM S M, ZHEN Yongyi, et al. New discovery of conodonts from the Upper Ordovician Pingliang Formation, Gansu, China and its significance[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2013, 30(2): 123-131.

- [18] WANG Z H, BERGSTRÖM S M, ZHEN Y Y, et al. On the integration of Ordovician conodont and graptolite biostratigraphy: New examples from Gansu and Inner Mongolia in China[J]. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 2013, 37(4): 510-528.
- [19] 陈旭, 张元动, GOLDMAN D, 等. 中国西北地区奥陶系达瑞威尔阶至凯迪阶的笔石研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2017.
CHEN Xu, ZHANG Yuandong, GOLDMAN D, et al. *Darriwilian to Katian(Ordovician) Graptolites from Northwest China*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2017.
- [20] 王晔, 邱楠生, 仰云峰, 等. 四川盆地五峰—龙马溪组页岩成熟度研究[J]. *地球科学*, 2019(3): 953-971.
WANG Ye, QIU Nansheng, YANG Yunfeng, et al. Thermal maturity of Wufeng-Longmaxi Shale in Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 2019 (3): 953-971.
- [21] BERTRAND R, MALO M. Source rock analysis, thermal maturation and hydrocarbon generation in Siluro-Devonian rocks of the Gaspé Belt basin, Canada[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2001, 49(2): 238-261.
- [22] 孙宜朴, 王传刚, 王毅, 等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统平凉组烃源岩地球化学特征及勘探潜力[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(2): 162-168.
SUN Yipu, WANG Chuangang, WANG Yi, et al. Geochemical characteristics and exploration potential of Middle Ordovician Pingliang Formation in the Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(2): 162-168.
- [23] 谢小敏, 腾格尔, 秦建中, 等. 贵州凯里寒武系底部硅质岩系生物组成、沉积环境与烃源岩发育关系研究[J]. *地质学报*, 2015, 89(2): 425-439.
XIE Xiaomin, TENG Genger, QIN Jianzhong, et al. Depositional environment, organisms components and source rock formation of siliceous rocks in the base of the Cambrian Niutitang Formation, Kaili, Guizhou[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(2): 425-439.
- [24] 穆恩之. 中国笔石的研究[J]. *古生物学报*, 1980, 19(2): 143-151.
MU Enzhi. Researches on the graptolithina of China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1980, 19(2): 143-151.
- [25] 叶萌萌, 潘安阳, 张毅, 等. 涪陵地区五峰组—龙马溪组黑色页岩有机质特征及成烃生物分析[J]. *微体古生物学报*, 2023, 40(4): 317-326.
YE Mengmeng, PAN Anyang, ZHANG Yi, et al. Organic matter composition and hydrocarbon biogenic analysis on the black shale of the Wufeng-Longmaxi Formations in Fuling area[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2023, 40(4): 317-326.
- [26] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. United States: Blackwell Scientific Pub., Palo Alto, CA, 1985.
- [27] 韦恒叶. 古海洋生产力与氧化还原指标: 元素地球化学综述[J]. *沉积与特提斯地质*, 2012, 32(2): 76-88.
WEI Hengye. Productivity and redox proxies of Palaeo-oceans: An overview of elementary geochemistry[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2012, 32(2): 76-88.
- [28] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, BAUDIN F, et al. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum-uranium covariation: Applications to Mesozoic paleoceanography[J]. *Chemical Geology*, 2012, 324-325: 46-58.
- [29] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian(Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A.[J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/2/3): 65-82.
- [30] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [31] 曹光耀, 刘宇, 周小琳, 等. 川西南地区五峰组—龙马溪组沉积环境及有机质富集模式[J]. *地球科学与环境学报*, 2023, 45(5): 1227-1245.
CAO Guangyao, LIU Yu, ZHOU Xiaolin, et al. Sedimentary environment and accumulation pattern of organic matter in Wufeng-Longmaxi Formations in the Southwestern Sichuan, China[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2023, 45(5): 1227-1245.
- [32] 张毅, 郑书荣, 高波, 等. 四川广元上寺剖面上二叠统大隆组有机质分布特征与富集因素[J]. *地球科学*, 2017, 42(6): 1008-1025.
ZHANG Yi, ZHENG Shucan, GAO Bo, et al. Distribution characteristics and enrichment factors of organic matter in Upper Permian Dalong formation of Shangsi section, Guangyuan, Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 2017, 42(6): 1008-1025.
- [33] 张艳妮, 李荣西, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系乌拉力克组页岩沉积环境及有机质富集机制[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(9): 3401-3417.
ZHANG Yanni, LI Rongxi, XI Shengli, et al. Sedimentary environments and organic matter enrichment mechanism of Ordovician Wulalike Formation shale, western Ordos Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(9): 3401-3417.
- [34] 李艳芳, 邵德勇, 吕海刚, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J]. *石油学报*, 2015, 36(12): 1470-1483.
LI Yanfang, SHAO Deyong, LYU Haigang, et al. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2015, 36(12): 1470-1483.
- [35] 吴蓝宇, 陆永潮, 蒋恕, 等. 上扬子区奥陶系五峰组—志留系龙马溪组沉积期火山活动对页岩有机质富集程度的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 806-816.
WU Lanyu, LU Yongchao, JIANG Shu, et al. Effects of volcanic activities in Ordovician Wufeng-Silurian Longmaxi period on organic-rich shale in the Upper Yangtze area, South China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 806-816.
- [36] 卢贤志, 沈俊, 郭伟, 等. 中上扬子地区奥陶纪—志留纪之交火山作用对有机质富集的影响[J]. *地球科学*, 2021, 46(7): 2329-2340.
LU Xianzhi, SHEN Jun, GUO Wei, et al. Influence of mercury geochemistry and volcanism on the enrichment of organic matter near the Ordovician Silurian transition in the Middle and Upper Yangtze [J]. *Earth Science*, 2021, 46(7): 2329-2340.
- [37] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘奥陶纪火山活动记录: 来自陕甘地区平凉组钾质斑脱岩地球化学和锆石年代学的信息[J]. *岩石学报*, 2015, 31(9): 2633-2654.
WANG Zhentao, ZHOU Hongrui, WANG Xunlian, et al. Volcanic event records at the southwestern Ordos Basin: The message from geochemical and zircon U-Pb geochronology of K-bentonites from Pingliang Formation, Shaanxi and Gansu region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(9): 2633-2654.