

鄂尔多斯盆地南缘上奥陶统平凉组浅钻中古岩溶洞穴的发现及其意义

金晓辉¹, 张军涛¹, 孙冬胜¹, 丁茜¹, 杨佳奇²

[1. 中国石化石油勘探开发研究院 构造与沉积储层实验室, 北京 100083;

2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083]

摘要:鄂尔多斯盆地南缘(鄂南)奥陶系具有与盆地中东部完全不同的沉积、岩溶环境和岩溶储层特征,其中设计的一口浅钻井揭示了碎屑物质充填岩溶洞穴的存在。浅钻钻遇上石炭统本溪组 and 上奥陶统平凉组两套地层,本溪组岩性为铝土质泥岩,平凉组主要颗粒灰岩和藻灰岩,并夹有多套泥岩层。利用矿物成分、主量元素、微量元素和稀土元素特征,对比分析了两套泥岩的来源、风化蚀变程度、氧化还原环境、气候和古构造环境。结果表明,本溪组泥岩代表了更高的风化程度,平凉组泥岩沉积时所处的还原环境比本溪组泥岩更强,两套泥岩都反映了晚古生代海陆过渡的沉积环境、变化频繁的气候环境以及活动大陆边缘-大陆岛弧的构造背景。平凉组泥岩形成时间为鄂南隆升阶段湿润岩溶发育期,为风化蚀变的陆源碎屑,代表了前石炭纪岩溶期洞穴和暗河堆积。结合泥岩段上、下裂缝普遍发育的特征,认为鄂南地区曾经存在过岩溶裂缝-洞穴系统,虽然浅钻仅仅钻遇了代表着已经被碎屑堆积充填的洞穴,但可以推测在合适的古地貌位置可能存在残余的裂缝洞穴,是未来进行油气勘探值得期待的领域。

关键词:地球化学;泥岩;洞穴;古岩溶;本溪组;平凉组;上奥陶统;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Discovery and significance of the Ordovician paleo-karst caves in shallow drilling in the southern Ordos Basin

Jin Xiaohui¹, Zhang Juntao¹, Sun Dongsheng¹, Ding Qiang², Yang Jiaqi¹

[1. Laboratory of Structural and Sedimentological Reservoir Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: The Ordovician sedimentary and karst environment as well as karst reservoir characteristics in the southern margin are completely different from those in the central-east of Ordos Basin. A shallow well drilled into the southern margin revealed the existence of karst caves filled with clastic rocks. Two sets of strata were recognized as the Benxi and Pingliang Formations, with the former dominated by bauxite mudstone and the latter by grainstone and algal limestone interbedded with multiple sets of mudstone layers. Mineral composition, major element, trace element and rare earth element analyses were carried out to compare the source, weathering alteration degree, redox environment, climate and paleo-tectonic environment of the two sets of mudstones. The results show that the Benxi Formation mudstones are of higher-degree weathering and the Pingliang Formation mudstones were deposited in a more reductive setting. The sedimentary environment of both sets represents a transition from sea to land with frequent climate changes against tectonic backgrounds of active continental edge and continental island-arc in the Late Paleozoic. The Pingliang Formation mudstones of terrigenous clast origin that represents cavities and underground river deposits in the pre-Carboniferous karst period, deposited during wet karst development stage when the southern Ordos Basin were uplifting. Considering the widespread fractures at the upper and lower parts of the formations, we suggest that a karst fracture-cavity system once existed in the southern Ordos Basin. Although the caves revealed by the well are filled with clasts, it can be inferred that

收稿日期:2021-01-11;修订日期:2021-04-26。

第一作者简介:金晓辉(1964—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail: jinxh.syky@sinopec.com。

通讯作者简介:孙冬胜(1964—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。E-mail: sunds.syky@sinopec.com。

基金项目:中国科学院A类战略性先导项目(XDA14010201);国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003,42072177);国家科技重大专项(2017ZX05005)。

there may be residual fractures and cavities at certain paleomorphological locations in the southern Ordos Basin, which are of great value to future oil and gas exploration.

Key words: geochemistry, mudstone, cavity, paleo-karst, Benxi Formation, Pingliang Formation, Upper Ordovician, Ordos Basin

岩溶型储层是碳酸盐岩储层最重要的类型之一^[1]。塔河油田是中国最大、最重要的古岩溶型油田,其最主要的储集空间是岩溶缝洞^[2]。近年来发现的顺北油田和安岳气田也与岩溶有着千丝万缕的联系^[3]。

鄂尔多斯盆地靖边气田奥陶系也以岩溶型储层为主^[4]。奥陶系经历了长达1.3亿年的岩溶持续时间,形成了独特易溶的含膏层系,强烈的岩溶改造表现为广泛发育的角砾岩,但难以见到岩溶洞穴^[5-8]。储集空间多为含膏云岩段的膏溶铸模孔和白云岩段的晶间(溶)孔^[9-10],仅在西缘地区克里摩里组(马家沟组六段)和北缘的马家沟组四段灰岩中发现仍残存岩溶缝洞^[11]。

鄂尔多斯盆地南缘(鄂南)的岩溶环境与盆地中东部有明显的差异,中东部前石炭纪出露马家沟组含膏层系、地势低洼起伏较小^[12];而鄂南前石炭纪出露地层以中-上奥陶统为主,岩性多为纯净的灰岩和白云岩,古地貌处于岩溶高地,地势较高,起伏较大^[13]。因此,在鄂南奥陶系岩溶表现特征如何,是否存在经典的岩溶裂缝-溶洞,目前区域内钻井较少,野外剖面改造复杂,这些问题仍难以完全解决。

为了分析鄂南奥陶系岩溶特征,在铜川市印台区陈炉镇上店村设计了一口浅钻井——铜钻1井(图

1),设计进尺为200 m,但在钻井过程中发生严重井漏,故完钻深度为159 m,全井段取心,钻遇地层为本溪组和平凉组(图2)。本文试图通过该井岩心的岩石学和地球化学分析,来探寻鄂南地区岩溶模式,进而能够为鄂南下古生界勘探提供一些帮助。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地南缘奥陶系以碳酸盐岩发育为特征,地层自下而上划分为下奥陶统冶里组和亮甲山组,中奥陶统马家沟组,以及上奥陶统平凉组和背锅山组。

早奥陶世冶里组-亮甲山组沉积期,海水开始由东南侵入鄂尔多斯盆地,岩性以白云岩为主。到中奥陶统马家沟组沉积期,海水基本遍布整个鄂尔多斯盆地,形成了广阔的浅水陆表海碳酸盐岩沉积,发育有一套膏盐岩-碳酸盐岩沉积层系^[14-15]。马家沟组沉积晚期,秦岭海槽向北持续俯冲,南缘坡度明显增大,水体加深,开始向活动大陆边缘转化^[16-17]。晚奥陶世受加里东运动的影响,鄂尔多斯盆地除西南缘有平凉组和背锅山组沉积外,其他区域整体抬升为陆地。平凉组沉积期和背锅山组沉积期,在南缘主要发育有生物丘(礁)相和滩相灰岩沉积(图1),在较深水区则以泥灰岩沉积为主^[18]。

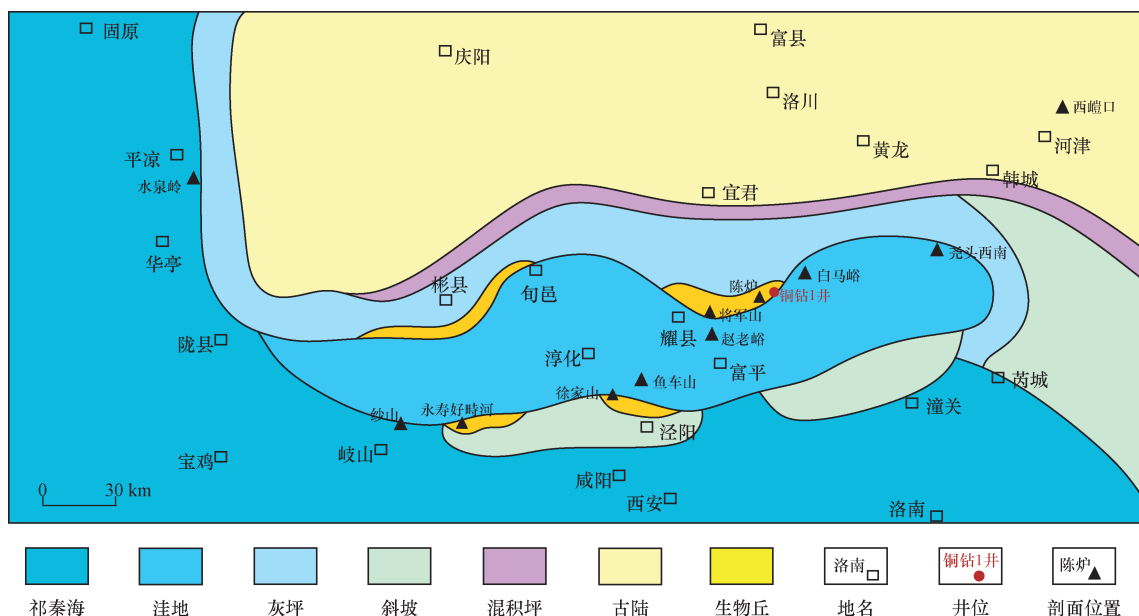


图1 鄂尔多斯盆地南缘平凉组沉积时期沉积相展布

Fig. 1 Sedimentary facies distribution of the Pingliang Formation in the southern margin of the Ordos Basin

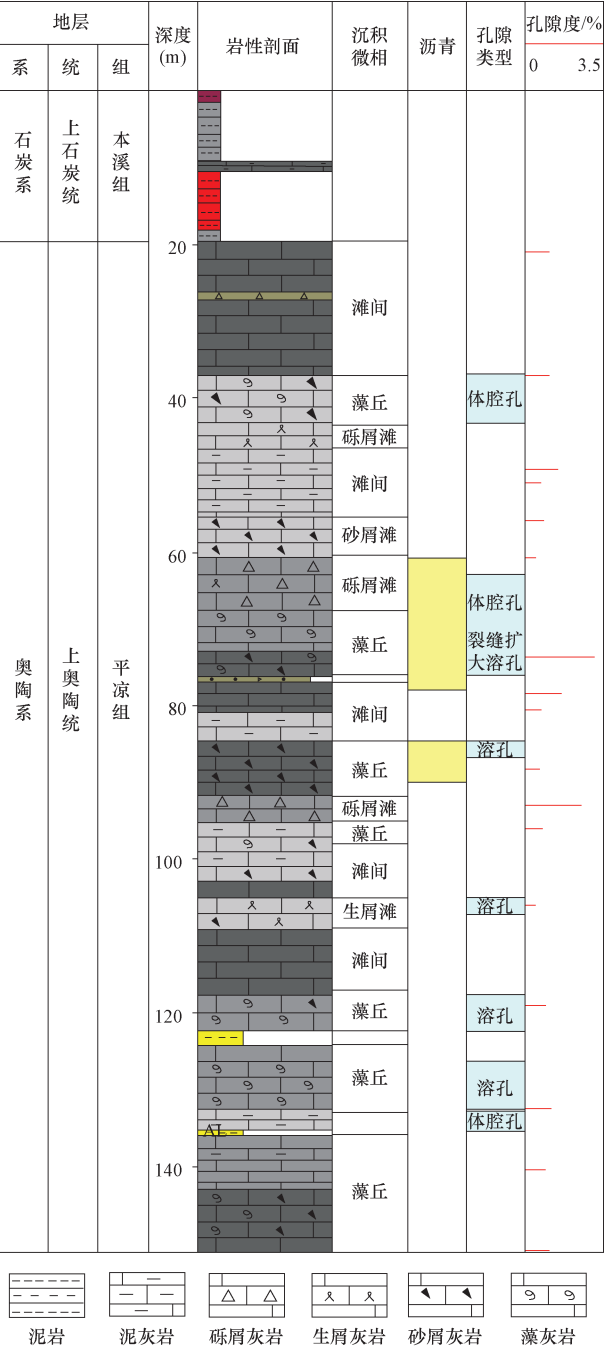


图 2 鄂尔多斯盆地南缘铜钻 1 井综合柱状图
Fig. 2 Stratigraphic column from the Well Tongzuan 1 in the southern margin of the Ordos Basin

奥陶纪末—石炭纪,随着秦岭的持续俯冲,鄂尔多斯南缘不断隆升,致使奥陶系部分被剥蚀。直至本溪组沉积时,南缘又开始接受碎屑岩沉积^[12]。

浅钻井位置处于盆地南缘,有上奥陶统平凉组灰岩沉积,后期被剥蚀,之上被本溪组铝土矿沉积覆盖(图 1)。本次研究在系统的岩心观察基础上,选取合适的样品,进行了显微薄片观察、矿物组成 X 衍射分析、主量和微量以及稀土元素的分析。

2 实验结果

2.1 岩石学特征

钻遇的奥陶系平凉组岩石类型为多套垂向叠置的丘—滩体,根据岩性可细分为 95 个小层,整体表现为砾屑灰岩、砂屑灰岩、生屑灰岩和藻灰岩互层(图 2,图 3)。

砾屑灰岩中,砾屑多为圆形或椭圆形,原始成分主要是藻灰岩,多呈水平状分布;砂屑灰岩中,砂屑的形状不规则,成分主要为球粒(图 3a);藻灰岩中,藻类呈粘结状不规则,藻类间多为亮晶胶结(图 3b);生屑灰岩中,生屑主要为海绵碎屑,生物碎屑之间多为亮晶胶结(图 3c)。

平凉组主要储集空间为溶孔和裂缝。溶孔多为裂缝、粒间孔和生物体腔孔的溶蚀扩大形成,多为方解石充填,部分溶孔之中可见有等轴纤维状方解石,其后则为粒状粗晶方解石,充填物中也有少量的白云石和沥青。裂缝有水平缝和高角度裂缝,水平裂缝一般都比较细,由方解石充填;而垂直裂缝则相对较宽,多为方解石充填,但尤其在有黄色砂泥岩夹层附近,垂直和高角度裂缝多发育,且见有黄色泥质和方解石充填。

在整个井段可见有 5 段黄色砂泥岩层(图 2)。第一段为第 61 回次底部,可见黄灰色泥岩呈楔状分布在纹层状泥灰岩之中,厚度约为 10 cm,其上下高角度裂缝发育,裂缝向上逐渐变少(图 3b)。第二段发育在第 53 回次,为黄色泥岩夹层,厚度约为 56 cm,其中还能见到灰岩角砾,其上、下均为生屑灰岩,且裂缝、溶孔都较为发育,多被乳白色方解石充填,高角度裂缝中还可见泥质充填。第三段泥岩段最厚,厚度可达 1.83 m,发育在第 51 回次,其上、下分别为生屑灰岩和藻灰岩,裂缝发育,垂直裂缝先有黄铁矿,后又有黄色泥质和方解石充填,最宽的裂缝可达 2 cm。第四段发育在第 43 回次,为黄色泥岩,上、下岩层为纹层状藻灰岩和砾屑灰岩,溶孔和裂缝多被方解石和沥青充填,也见有黄色泥质充填。第五段发育在第 39 回次,分为两段,下段为灰绿色泥岩,厚度为 14 cm,上段分为黄色含砾砂岩,厚度为 71 cm,中间夹有厚度为 36 cm 的含生屑灰岩,裂缝发育有黄色泥质充填。而上、下地层为砾屑和生屑灰岩,岩石裂缝发育,破碎严重,有方解石和沥青充填。

上覆的本溪组为杂色的铝土质泥岩,对应取心第 1—11 回次,颜色有红色、灰色和褐红色等,夹有灰岩角砾和褐铁矿。

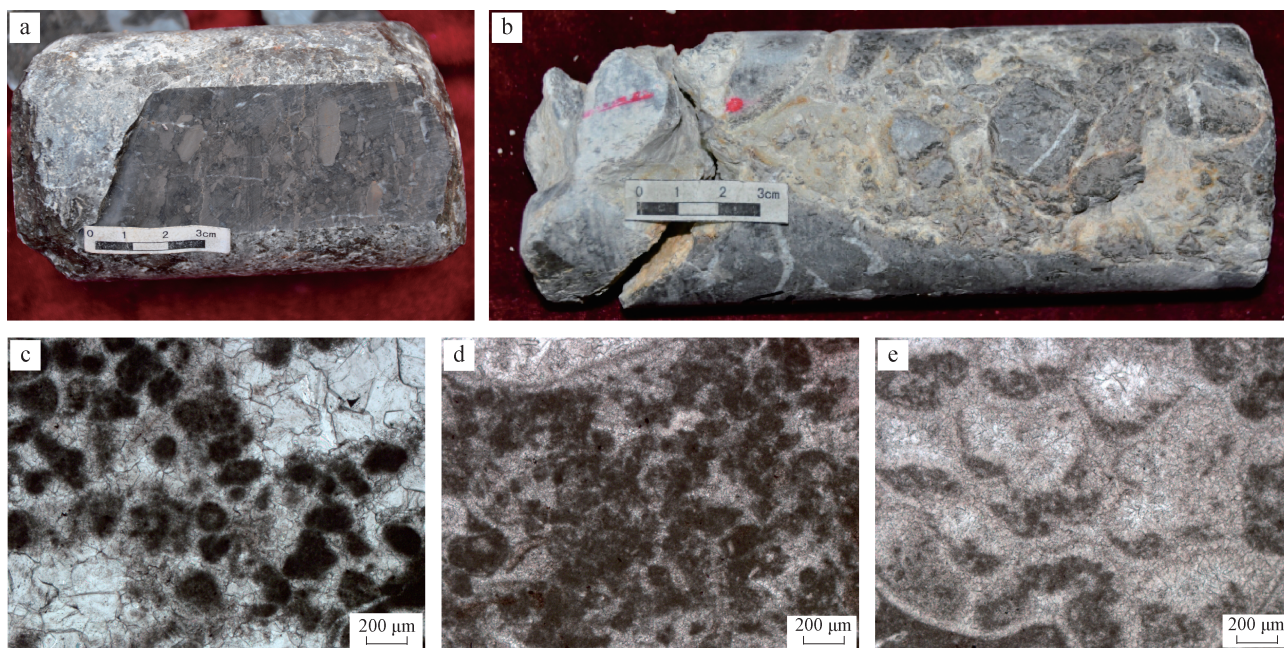


图3 鄂尔多斯盆地南缘铜钻1井平凉组岩石学特征

Fig. 3 Petrology characteristics of the Pingliang Formation in Well Tongzuan 1 in the southern margin of the Ordos Basin

- a. 砾屑灰岩,角砾成分不均一,形状不规则,第24回次第5块,埋深43 m;b. 角砾状灰岩,粒间有泥质充填,第61回次第15,16块,埋深158 m;
c. 球粒灰岩,粒间亮晶胶结,埋深85 m,单偏光;d. 藻粘结灰岩,埋深102 m,单偏光;e. 海绵灰岩,生物体腔孔内有方解石充填,示顶底结构,埋深56 m,单偏光

2.2 矿物成分

为了分析平凉组和本溪组泥岩的差异性,利用X衍射分析泥岩的矿物组成和元素组成。

本溪组泥岩样品TZ1-1—TZ1-9以及TZ1-12的主要矿物组成包括硬水铝石、粘土矿物、锐钛矿、石英和方解石,部分样品含有针铁矿和赤铁矿,而TZ1-10样品以粘土矿物和赤铁矿为主,TZ1-11最靠近奥陶系,显示具有较高的方解石含量。

平凉组泥岩的矿物组成与本溪组有较大差异,TZ1-14,TZ1-15,TZ1-17,TZ1-19以及TZ1-20主要矿物成分有粘土矿物、方解石和石英,可能含有少量的锐钛矿。

2.3 主量和微量元素组成

不同层位泥岩层的元素分析也能显示这些岩层的差异。

本溪组泥岩中, Al_2O_3 含量除了TZ1-10为18.71%外,其余样品都较高,均在31.45%之上,最高可达49.61%; SiO_2 含量在13.26%~40.94%,含量低于20%的样品(TZ1-1和TZ1-9)对应较高的 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量,对应矿物组成上,赤铁矿和三水铝石含量较高。 CaO 的含量在0.21%~3.72%,除了(TZ1-4

和TZ1-5)外, $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的比值都较低,为0.010~0.007。本溪组具有较高的Th/U值,在3.86~10.40; V/Ni 值也较高,为1.65~8.36; Sr/Ba 值在0.32~5.36; V/Sc 值较低,为3.92~7.57(图4)。

而奥陶系平凉组的泥岩与上覆本溪组泥岩在矿物成分上有较大的差异,呈现出两种类型。第一种类型以TZ1-14和TZ1-17为代表,有较高的CaO含量(分别为15.82%和25.97%),而 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量相对较低(分别为1.10%,1.09%和16.44%,22.12%)。但 $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 的比值较其他类型的泥岩高,分别为0.46,0.17。第二种类型 SiO_2 含量较高,在46.67%~50.39%,CaO含量较低,仅为0.64%~0.71%,以TZ1-18,TZ1-19和TZ1-20为代表。 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量要明显高于上一种类型。总体上,平凉组泥岩Th/U值、 V/Ni 值和 Sr/Ba 值略低于本溪组泥岩,其中Th/U值在1.76~4.85, V/Ni 值在1.48~3.34, Sr/Ba 值在0.95~1.86。 V/Sc 值则高于本溪组泥岩,为7.52~20.45(图4)。

奥陶系灰岩与泥岩层系相比,除CaO外,其他元素含量都非常低。Th/U, V/Ni , Sr/Ba 和Th/U值与泥岩差别较大。Th/U值在0.16~0.18, V/Ni 值在0.43~0.46, Sr/Ba 值在48.41~60.53, V/Sc 在2.6~10.64(图4)。

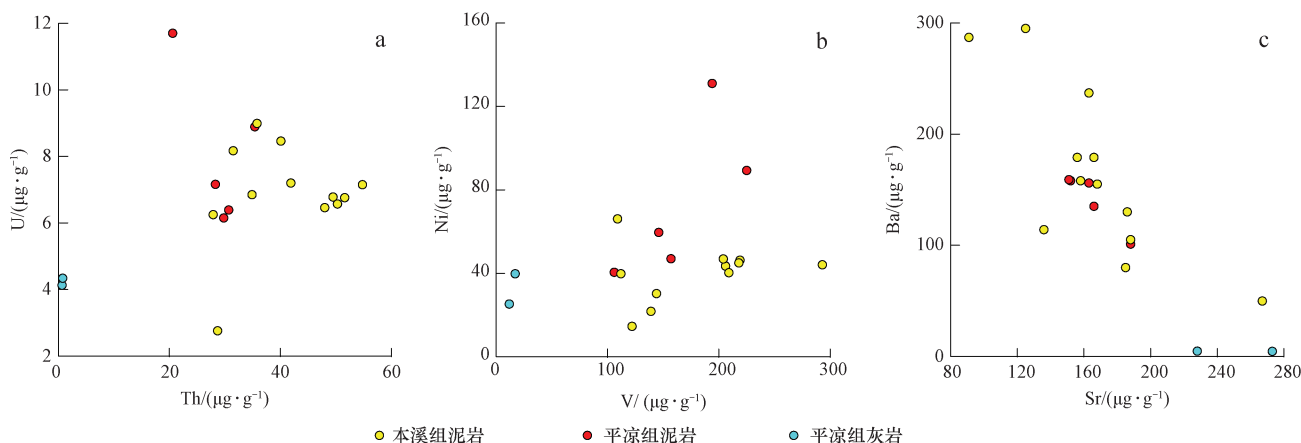


图4 鄂尔多斯盆地南缘铜钻1井平凉组与本溪组微量元素含量

Fig. 4 Trace element content of the Pingliang and Benxi Formations in Well Tongzuan 1 in the southern margin of the Ordos Basin

a. U 和 Th 含量交会图; b. Ni 和 V 含量交会图; c. Ba 和 Sr 含量交会图

2.4 稀土元素组成

不同层位的稀土元素也存在差异。本溪组泥岩具有较高的稀土元素含量,其中 TZ1 - 10 具有最高的 Σ REE, LREE 和 HREE 值(分别为 1 063.36 $\mu\text{g/g}$, 782.65 $\mu\text{g/g}$, 280.71 $\mu\text{g/g}$)外, Σ REE 值整体在 260.63 ~ 472.77 $\mu\text{g/g}$, LREE 值在 238.74 ~ 428.95 $\mu\text{g/g}$, HREE 在 21.62 ~ 44.33 $\mu\text{g/g}$ (图5)。

平凉组泥岩略低于本溪组泥岩稀土元素含量, Σ REE 值在 193.09 ~ 290.03 $\mu\text{g/g}$, LREE 值在 171.21 ~ 259.50 $\mu\text{g/g}$, HREE 在 21.88 ~ 43.69 $\mu\text{g/g}$ (图5)。灰岩的稀土含量相对较低, Σ REE 在 8.60 ~ 41.48 $\mu\text{g/g}$, LREE 含量在 7.02 ~ 28.00 $\mu\text{g/g}$, HREE 在 1.58 ~ 13.48 $\mu\text{g/g}$ 。

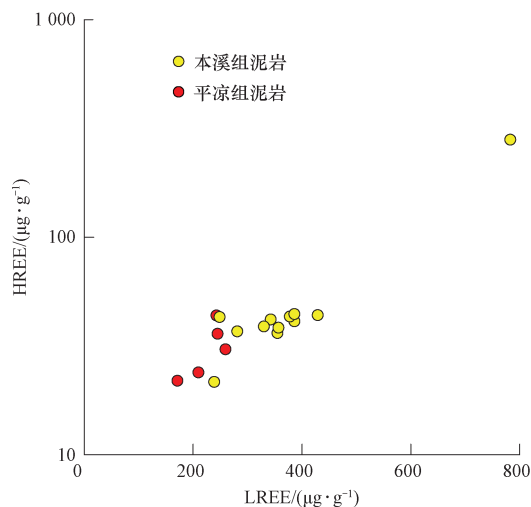


图5 鄂尔多斯盆地南缘铜钻1井不同层系泥岩轻稀土和重稀土值

Fig. 5 The values of light rare earth elements (LREEs) and heavy rare earth elements (HREEs) in mudstones of different sequences in Well Tongzuan 1 in the southern margin of the Ordos Basin

3 讨论

3.1 铝土质泥岩成因

浅钻钻遇的上部铝土矿物层在鄂南地区广泛分布,西起铜川市黄堡镇,东至韩城市龙湾村,东西长约 200 km,南北宽 3 ~ 10 km^[19]。浅钻所在的上店村,就出露有厚层的铝土矿层,层厚可达 20 余米,杂色,具有明显的分层性。稍远处的铜川陈炉剖面能见到铝土矿层与平凉组的接触关系,风化壳面参差不齐,有一较大的凹坑,坑深约 10 m,宽约 5 m,其中有黄色铝土矿充填,其附近裂缝及溶孔都非常发育。

铝土矿层在纵向上可分为 3 段:下段以铁质粘土岩为主,中段以铝质粘土岩、铝土矿和粘土岩为主,上段岩性主要为含炭泥质粉砂岩夹煤线。钻井钻遇的铝土质泥岩层处于矿层的中下段,矿物组分常见硬水铝

石,也能见到大量的赤铁矿层。

虽然关于本溪组铝土质泥岩的成因目前还存在争议,但多数观点认为主要形成于碳酸盐岩地层的风化和残积^[20]。代表了湿热环境中高风化产物,成矿过程是一个易溶物质带出、难溶组分硅铝质残留下来形成铝土矿的成矿系统,该系统最为重要的作用是湿热气候下水对地表物质的持续长期淋滤、带走其他物质的过程^[20]。在铝土质泥岩中仍能见到方解石残余,具有一定的 CaO。

3.2 泥岩变异与蚀变程度

平凉组的泥岩样品中 TZ1 - 18, TZ1 - 19 和 TZ1 -

20 等样品的物相分析显示含有石英,具有较高的 SiO_2 含量,说明其陆源碎屑物质含量较高。而与本溪组泥岩的差异性,可能与泥岩形成时间、环境的差异有关。矿物分析显示这些泥岩层不含硬水铝石,方解石含量较高,TZ1-14 和 TZ1-17 的 CaO 含量较高,其风化程度相对本溪组泥岩较低。

成分变异指数 (ICV) 可以用来判断物源区物质是否经历再循环沉积^[21],其计算方程为

$$ICV = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO}_2 + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3 \quad (1)$$

当 $ICV > 1$ 时,表明其含粘土矿物较少,属构造活动时期的初始沉积;当 $ICV < 1$ 时,表明其含较多粘土矿物,可能经历了再沉积作用或是强烈风化条件下的初始沉积。平凉组和本溪组的铝土质泥岩 ICV 值均远小于 1,说明这两组的泥岩都经历了强烈的风化岩溶作用改造。

化学蚀变指数 (CIA)^[22-23] 可用来评价其化学蚀变程度的强弱,其计算方程为

$$CIA = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \quad (2)$$

式中:成分含量为摩尔分数,其中 CaO 仅为硅酸盐中 CaO ,即全岩中的 CaO 减去碳酸盐矿物中的 CaO 的摩尔分数。对于 CaO^* 的计算和校正,Mclenanal(1993)提出:如果 CaO 含量小于 Na_2O 含量,则采用 CaO^* 摩尔分数;反之,则采用 Na_2O 作为 CaO 摩尔分数。本溪组泥岩 CIA 值略有变化,除 TZ-10 和 TZ1-11 略低外(0.80 和 0.81),其他泥岩值位于 0.90~0.99,显示其强烈的化学风化程度,与研究区在泥盆纪—石炭纪的气候相吻合。平凉组泥岩 CIA 值多在 0.86~0.90,总体上略低于本溪组泥岩值,也显示其强烈的化学风化程度^[22]。两者都形成于炎热潮湿的环境,风化程度较高,铝土质泥岩风化程度更高。

本溪组相较平凉组泥岩具有更高的轻稀土和重稀土值(图 5),也说明而本溪组泥岩风化程度更高^[21]。

总之,本溪组泥岩具有更高的风化程度,说明其经历了更长时间的风化作用改造,而平凉组泥岩虽然也经历了强烈的风化作用改造,但时间可能短于本溪组。

3.3 氧化还原条件

Th/U 值常被用来作氧化—还原条件的判别指标,在缺氧环境中为 0~2,氧化环境中可以达到 8^[24]。本溪组铝土质泥岩明显具有较高的 Th/U 值,范围在 3.86~10.40(图 6),说明其形成于氧化环境,而奥陶

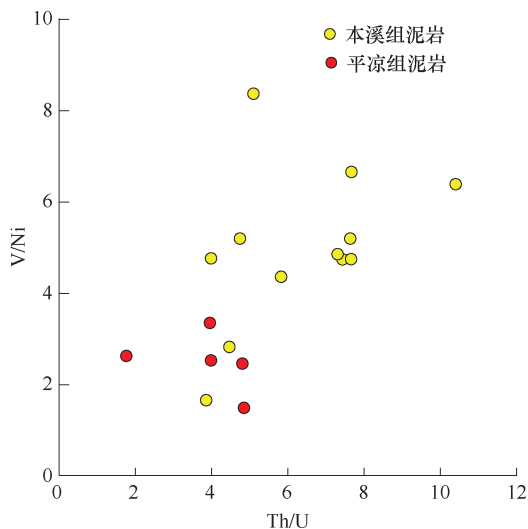


图 6 鄂尔多斯盆地南缘铜钻 1 井两组不同层系泥岩的 Th/U 与 V/Ni 交会图

Fig. 6 The intersection of Th/U and V/Ni of mudstones of different strata in Well Tongzuan 1 in the southern margin of the Ordos Basin

系内部的泥岩 Th/U 值较本溪组略低,在 1.76~4.85(图 6),说明其形成于相对缺氧或还原环境中; V 优先富集在沉积物中^[25-26],其富集程度也常被用来反映水体的氧化还原环境。 V/Sc 、 V/Ni 和 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 值常被用来反映 V 的富集程度。平凉组的泥岩明显比本溪组铝土质泥岩 V/Sc 值高(图 6),反映其形成于更缺氧的环境。本溪组泥岩的 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 值,除两个样品为 0.62 和 0.77,其他样品均高于 0.82,而平凉组泥岩的值略低,主要分布在 0.60~0.77,也说明奥陶系泥岩形成于更加缺氧的环境。

综合对比两组泥岩可以发现,平凉组泥岩的形成环境要比本溪组泥岩还原性更强。结合发育的位置,平凉组泥岩可能形成于相对封闭的暗河环境之中,而本溪组泥岩则形成于相对开放的地表径流残积环境中。

3.4 气候环境

Sr/Ba 比值反映古盐度的变化^[24],一般来说, Sr/Ba 比值大于 1 为海相沉积,而小于 1 则为陆相沉积,本溪组和平凉组泥岩值都在 1 左右波动(图 7),可能说明两者都属于海陆交互的沉积环境。

Sr/Cu 值介于 1.3~5.0 指示潮湿气候,而大于 5.0 则指示干旱气候^[24]。两套泥岩中,本溪组泥岩值在 1.60~19.9,说明气候频繁在潮湿和干旱之间变化;而平凉组泥岩值在 3.28~6.53(图 7),说明处于相对湿润的环境。

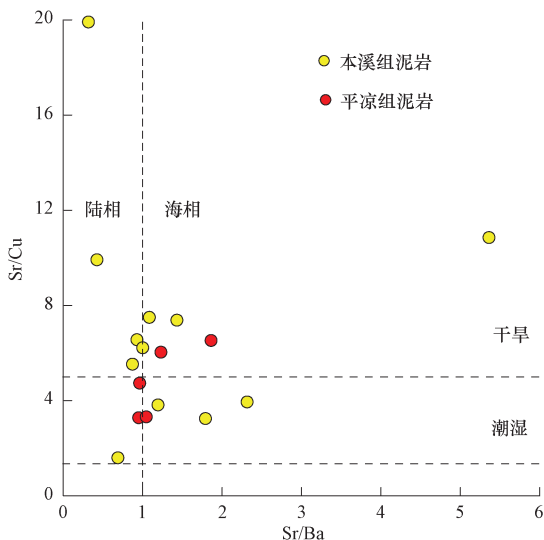


图7 鄂尔多斯盆地南缘铜钻1井两组不同层系泥岩 Sr/Ba 与 Sr/Cu 交会图

Fig. 7 The intersection of Sr/Ba and Sr/Cu of mudstones in the two sets in Well Tongzuan 1 in the southern margin of the Ordos Basin

总体上,两套泥岩的沉积环境非常相似,对应了鄂南地区晚古生代海陆过渡的沉积环境,平凉组泥岩沉积时的气候可能比本溪组泥岩沉积时更为湿润,既是岩溶发育的高峰期,也是岩溶洞穴的主要形成期。

3.5 构造背景

利用 La - Th - Sc 和 Th - Sc - Zr/10 图解可以用来判别泥岩的构造背景^[24]。本溪组和平凉组泥岩的 La - Th - Sc 和 Th - Sc - Zr/10 显示出构造沉积背景

非常相似(图8),说明两组泥岩均来源于活动大陆边缘-大陆岛弧,结合前石炭纪构造沉积环境,鄂南地区正当时处于秦岭板块向下俯冲至华北板块的活动大陆边缘-大陆岛弧环境。

3.6 演化过程

通过对本溪组和平凉组泥岩的分析,可以推断鄂南奥陶系加里东期岩溶至少存在两个重要的过程。岩溶中期,形成了大量洞穴,地下暗河系统发育,并伴有陆源碎屑泥岩沉积;随着岩溶的推进,泥岩逐渐增多,部分暗河系统被碎屑物质完全充填,形成了铜钻1井揭示的平凉组泥岩夹层(图9a),但仍可能存在残余的洞穴空间和孔、洞、缝系统。岩溶后期,地貌已经基本被夷平,主要表现为奥陶系上覆本溪组铝土质泥岩残积(图9b)。

4 结论

1) 鄂南地区浅钻钻遇本溪组和平凉组两套地层,本溪组岩性为铝土质泥岩,平凉组为颗粒灰岩和藻灰岩,夹杂多套泥岩层。

2) 两套泥岩都具有较高的风化蚀变程度,本溪组泥岩代表了更高的风化程度,而平凉组泥岩经历风化改造的时间短于本溪组,形成时间要早于本溪组泥岩;平凉组泥岩形成于还原性更强、且相对封闭的地下环境,而本溪组泥岩的形成环境则是相对开放的地表。

3) 两套泥岩的沉积环境为晚古生代海陆过渡环境,气候变化频繁。平凉组泥岩沉积时期的气候可能

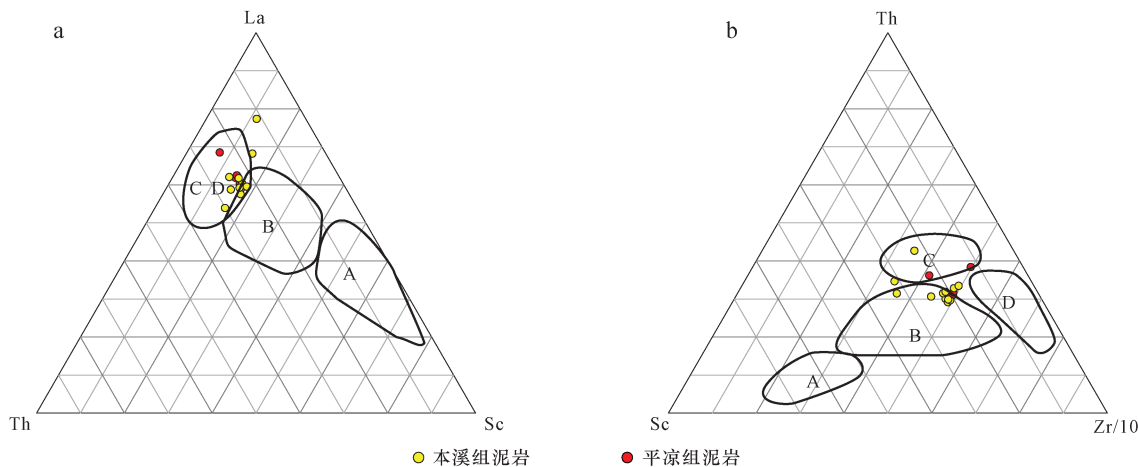


图8 鄂尔多斯盆地南缘铜钻1井两组泥岩的 La - Th - Sc 和 Th - Sc - Zr/10 图解

Fig. 8 La-Th-Sc and Th-Sc-Zr/10 diagrams of mudstones in the two sets in Well Tongzuan 1 in the southern margin of the Ordos Basin

a. La - Th - Sc 图解; b. Th - Sc - Zr/10 图解

A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘

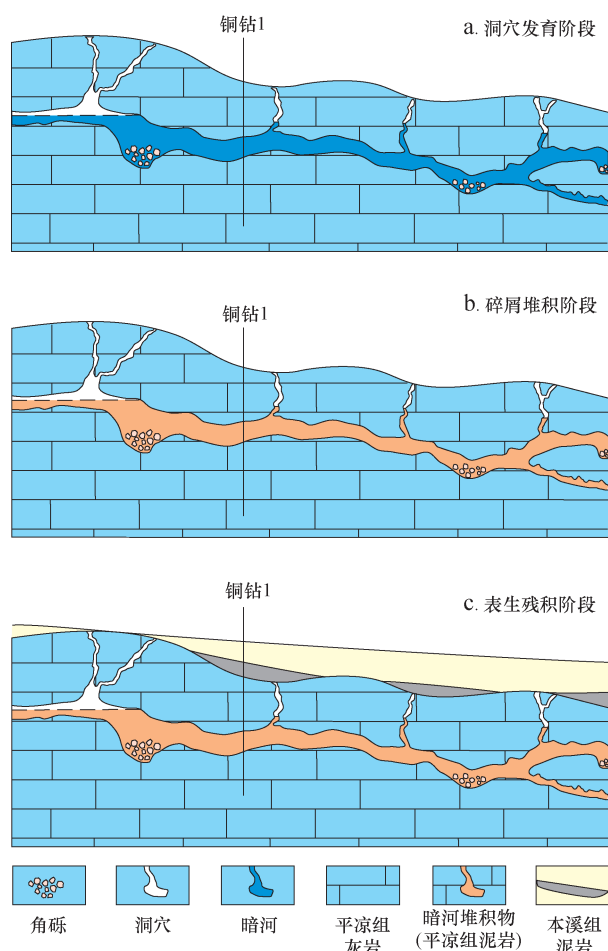


图9 鄂尔多斯盆地南缘平凉组顶部岩溶演化模式

Fig.9 Karst evolution pattern of the Pingliang Formation in the southern margin of the Ordos Basin

要比本溪组泥岩沉积时更为湿润,是岩溶发育的高峰期,也是岩溶洞穴的主要形成期。同时,两套泥岩具有相似的构造背景,都处于晚古生代的活动大陆边缘—大陆岛弧环境。

4) 平凉组泥岩形成于地下较还原环境、湿润岩溶发育期、鄂南隆升阶段,成分为经历了风化蚀变的陆源碎屑,可能代表了前石炭纪岩溶期洞穴和暗河堆积。结合泥岩段上下裂缝普遍发育的情况,说明鄂南地区曾经存在过岩溶裂缝—洞穴系统,虽然浅钻钻遇了代表坍塌破坏的洞穴,但可以推测在合适的古地貌位置,鄂南地区可能存在残余的裂缝洞穴,应该是鄂南地区值得期待的勘探领域(图9c)。

参考文献

- [1] Loucks RG. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications [J]. AAPG Bulletin, 1999, 83: 1795–1834.
- [2] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1–12.

- Qi Li xin, Yun Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1–12.
- [3] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(2): 207–216.
- Jiao Fangzheng. Significance and prospect of ultra- deep carbonate fault- karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207–216.
- [4] 罗清清, 刘波, 姜伟民, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马家沟组五段白云岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 102–115.
- Luo Qingqing, Liu Bo, Jiang Weimin, et al. Diagenesis and pore evolution of dolomite reservoir in the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 102–115.
- [5] 何江, 方少仙, 侯方浩, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田中奥陶统马家沟组岩溶型储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 350–356.
- He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. Characteristics of karst reservoirs in the middle Ordovician Majiagou Formation of gas fields in the central Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 350–356.
- [6] 李振宏, 胡健民. 鄂尔多斯盆地构造演化与古岩溶储层分布[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 640–647+655.
- Li Zhenhong, Hu Jianmin. Structural evolution and distribution of Paleokarst reservoirs in the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 640–647+655.
- [7] 丁晓琪, 张峭楠, 潘怀孝, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系“垮塌”型岩溶储层发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 210–217.
- Ding Xiaochi, Zhang Shaonan, Pan Huaixiao, et al. Development patterns of collapse- type karst reservoirs in the Ordovician of Daniudi gasfield, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 210–217.
- [8] 张军涛, 金晓辉, 李淑筠, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段孔隙充填物类型与成因[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(5): 684–690.
- Zhang Juntao, Jin Xiaohui, Li Shuyun, et al. Types and origin of pore-fillings from the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(5): 684–690.
- [9] 张军涛, 何治亮, 岳小娟, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组五段富铁白云石成因[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 776–783.
- Zhang Juntao, He Zhiliang, Yue Xiaojuan, et al. Genesis of iron- rich dolostones in the 5th member of the Majiagou Formation of the Ordovician in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 776–783.
- [10] 何治亮, 马永生, 张军涛, 等. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 1–14.
- He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhang Juntao, et al. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 1–14.
- [11] 杜金虎, 李相博, 包洪平, 等. 鄂尔多斯盆地中新元古界一下古生

- 界天然气成藏地质条件及勘探新领域[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 820–835.
- Du Jinhu, Li Xiangbo, Bao Hongping, et al. Geological conditions of natural gas accumulation and new exploration areas in the Mesoproterozoic to Lower Paleozoic of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 820–835.
- [12] 姚泾利, 王兰萍, 张庆, 等. 鄂尔多斯盆地南部奥陶系古岩溶发育控制因素及展布[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 56–65.
- Yao Jingli, Wang Lanping, Zhang Qing, et al. Controlling factor and distribution of Paleo-karst development in Ordovician of southern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 56–65.
- [13] 夏明军, 戴金星, 邹才能, 等. 鄂尔多斯盆地南部加里东期岩溶古地貌与天然气成藏条件分析[J]. 石油勘探与开发, 2007(3): 291–298+315.
- Xia Mingjun, Dai Jinxing, Zou Caineng, et al. Caledonian karst palaeogeomorphology and the forming condition of gas pool, southern Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007(3): 291–298+315.
- [14] 冯增昭, 鲍志东. 鄂尔多斯奥陶纪马家沟组岩相古地理[J]. 沉积学报, 1999(1): 3–5.
- Feng Zengzhao, Bao Zhidong. Lithofacies paleogeography of Majiagou age of Ordovician in Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999(1): 3–5.
- [15] 魏柳斌, 陈洪德, 郭玮, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗—靖边古隆起对奥陶系盐下沉积与储层的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 391–400+521.
- Wei Liubin, Chen Hongde, Guo Wei, et al. Wushen-Jingbian Paleouplift and its control on the Ordovician subsalt deposition and reservoirs in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 391–400+521.
- [16] 江小均, 任纪舜, 周鼎武, 等. 东秦岭加里东期沉积—构造演化过程[J]. 地球科学, 2019, 44(1): 88–108.
- Jiang Xiaojun, Ren Jishun, Zhou Dingwu, et al. The Caledonian tectonic-sedimentary evolution process in eastern Qinling orogenic belt [J]. Earth Science, 2019, 44(1): 88–108.
- [17] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 150–172.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Dong Yunpeng, et al. Rethinking of the Qinling Orogen [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 150–172.
- [18] 袁路朋, 周洪瑞, 景秀春, 等. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶系碳酸盐微相及其沉积环境分析[J]. 地质学报, 2014, 88(3): 421–432.
- Yuan Lupeng, Zhou Hongrui, Jing Xiuchun, et al. Microfacies and facies analysis of the Ordovician carbonates in the south margin of the Ordos basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(3): 421–432.
- [19] 陈连红, 王瑞廷, 刘维东. 陕西省渭北铝土矿地质特征及找矿前景分析[J]. 西北地质, 2010, 43(3): 93–98.
- Chen Lianhong, Wang Ruiting, Liu Weidong. Geological characteristics and prospecting perspective of Weibei Bauxite Deposits, Shanxi Province [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(3): 93–98.
- [20] 陈旺. 豫西石炭纪铝土矿成矿系统[D]. 博士论文. 中国地质大学(北京), 2009.
- Chen Wang. Carboniferous bauxite ore-forming system, western Henan [D]. A dissertation submitted to China University of Geosciences for doctoral Degree, 2009.
- [21] 田洋, 赵小明, 王令占, 等. 鄂西南利川三叠纪须家河组地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示[J]. 岩石学报, 2015, 31(1): 261–272.
- Tian Yang, Zhao Xiaoming, Wang Lingzhan, et al. Geochemistry of clastic rocks from the Triassic Xujiahe Formation, Lichuan area, southwestern Hubei; Implications for weathering, provenance and tectonic setting [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015 31(1): 261–272.
- [22] 牟传龙, 葛祥英, 余谦, 等. 川西南地区五峰—龙马溪组黑色页岩古气候及物源特征: 来自新地2井地球化学记录[J]. 古地理学报, 2019, 21(5): 835–854.
- Mu Chuanlong, Ge Xiangying, Yu Qian, et al. Palaeoclimatology and provenance of black shales from Wufeng—Longmaxi Formations in southwestern Sichuan Province: From geochemical records of Well Xindi-2 [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(5): 835–854.
- [23] 徐小涛, 邵龙义. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素[J]. 古地理学报, 2018, 20(3): 515–522.
- Xu Xiaotao, Shao Longyi. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance [J]. Journal of Palaeogeography, 2018, 20(3): 515–522.
- [24] 陈松, 傅雪海, 桂和荣, 等. 皖北新元古界望山组灰岩微量元素地球化学特征[J]. 古地理学报, 2012, 14(6): 813–820.
- Chen Song, Fu Xuehai, Gui Herong, et al. Geochemical characteristics of trace elements in limestone of the Neoproterozoic Wangshan Formation in northern Anhui Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(6): 813–820.
- [25] Calvert and Pedersen, 1993. Geochemistry of Recent oxic and anoxic marine sediments; Implications for the geological record [J]. Marine Geology, 1993, 113: 67–88.
- [26] Kimura H, Watanabe Y. Ocean anoxia at the Precambrian – Cambrian boundary [J]. Geology, 2001, 29(11): 995–998.

(编辑 张亚雄)