

# 鄂尔多斯盆地南缘上石炭统本溪组泥岩元素地球化学特征及沉积环境启示

胡芸冰<sup>1,2</sup>, 刘 燕<sup>3,4</sup>, 郭英海<sup>1,2</sup>, 刘文香<sup>3,4</sup>, 张治波<sup>1,2</sup>, 杨晓凯<sup>1,2</sup>

(1.中国矿业大学 资源与地球科学学院,江苏 徐州 221116;

2.中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室,江苏 徐州 221116;

3.中国石油长庆油田分公司 勘探开发研究院,陕西 西安 710018;

4.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,陕西 西安 710018)

**摘 要:**为揭示鄂尔多斯盆地高桥-宜川地区本溪组的沉积环境,选取研究区本溪组 2 口探井的泥岩样品,采用 ICP-MS 对其进行主微量元素测试,结果显示,研究区泥岩的微量元素环境指标特征参数差别较大,说明其形成于不同的沉积环境;稀土元素球粒陨石标准化曲线呈右倾弱 Eu 负异常的 V 型特征,微量元素地壳标准化曲线特征表现一致。表明鄂尔多斯盆地东南缘的本溪组物源来自地壳。高桥地区以陆相淡水-海水为主,形成于温湿-氧化环境,海平面变化较为频繁;宜川地区以咸水-海水为主,形成于温湿-干旱-温湿的弱氧化环境,高桥地区的沉积环境更为复杂。

**关键词:**元素地球化学;古水温;氧化还原环境;本溪组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P595

文献标志码:A

## Elemental geochemical characteristics of mudstones in Upper Carboniferous Benxi Formation in southern Ordos Basin and their enlightenment to sedimentary environment

HU Yunbing<sup>1,2</sup>, LIU Yan<sup>3,4</sup>, GUO Yinghai<sup>1,2</sup>, LIU Wenxiang<sup>3,4</sup>,  
ZHANG Zhibo<sup>1,2</sup>, YANG Xiaokai<sup>1,2</sup>

(1. School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. Key Laboratory of Coalbed Methane Resources & Reservoir Formation Process of Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3. Exploration and Development Research Institute of Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China;

4. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China)

**Abstract:** To reveal the sedimentary environment of Benxi Formation in Gaoqiao-Yichuan Area of Ordos Basin, this study selected mudstone samples of Benxi Formation from two exploratory wells in the study area and tested their main trace elements by using ICP-MS. The results show that the characteristic parameters of trace element environment indexes of mudstones in the Gaoqiao and Yichuan Areas differ greatly and their formation environments are different too. The rare earth element spheroidal meteorite standardization shows a V-shaped feature with a weak Eu-negative anomaly of right dip, and the trace element crustal standardization curves are consistent, indicating that the source of Benxi Formation at the southeastern margin of Ordos Basin is from the crust. Dominated by terrestrial freshwater-seawater, the Gaoqiao Area is formed in a warm-wet-oxidizing environment with more frequent sea level

收稿日期:2021-03-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41772130);长庆油田分公司勘探开发研究院项目(ZY19-XA408-FW852)

作者简介:胡芸冰(1988—),男,甘肃临洮人,博士研究生,主要从事储层沉积学方面研究. E-mail: yunbinghu@cumt.edu.cn

郭英海(1963—),男,河北威县人,教授,博士,主要从事煤、油、气地质研究,本文通信作者. E-mail: gyhai@163.com

changes, whereas the Yichuan Area, dominated by brackish water-seawater, is formed in a warm-wet-arid-warm-wet weakly oxidizing environment. The sedimentary environment in the Gaoqiao Area is relatively more complex.

**Key words:** element geochemistry; paleo-water temperature; redox environment; Benxi Formation; Ordos Basin

沉积岩中的微量元素含量与其成岩环境有密切联系,沉积岩与其周围的水体介质常发生元素吸附与交换,因此微量元素含量及相关元素的比值可用于古环境的恢复研究<sup>[1]</sup>。稀土元素的化学性质不活泼,稳定性较强,沉积岩中稀土配分模式主要取决于母岩性质,当母岩为泥质岩时,稀土元素的继承性较好,是分析沉积古环境的指示剂,也是研究物源区的良好示踪剂<sup>[2]</sup>。

鄂尔多斯盆地位于华北稳定克拉通沉积盆地,作为秦岭造山带北侧重要的多种能源聚集盆地,是煤-油气-铀资源富集区。在古生代到中生代地层中均有油气资源发现,尤其是中生代的石油资源和古生代的天然气资源<sup>[3]</sup>。古环境的研究对明确油气资源的形成环境具有重要意义,前人已对研究区沉积环境进行了探讨。吴海燕等<sup>[4]</sup>对研究区马家沟组膏盐岩的沉积环境进行研究,建立了沉积演化模式,对油气勘探具有指导意义;何白新<sup>[5]</sup>认为研究区本溪组沉积体系包括陆表海潮汐-三角洲复合体系、混积潮坪-陆棚体系、滨海平原聚煤体系和间歇性暴露风化淤化体系;赵振宇等<sup>[6]</sup>认为本溪组发育晋祠和畔沟两套有利的勘探砂体;陈晶等<sup>[1]</sup>认为鄂尔多斯盆地东南部本溪组到石盒子组沉积地球化学特征指示其形成于弱还原-还原环境,且还原性有逐渐减弱的趋势,气候为温暖湿润的海相咸水环境,山西组及下石盒子组以陆相淡水沉积为主,本溪组水体较浅;胡鹏等<sup>[7]</sup>和张治波等<sup>[8]</sup>对鄂尔多斯盆地东南部本溪组和延长组长6地层水化学性质进行研究,认为本溪组趋于封闭的还原环境有利于天然气的保存。

前人研究多集中在马家沟组储层成因及环境、本溪组致密砂岩的沉积体系等分析,但对盆地东南缘本溪组沉积环境的研究相对薄弱。因此,本研究通过对盆地东南部高桥陕434井和宜川地区宜51井石炭系本溪组泥岩系统采样,结合其岩石学、微量元素和稀土元素特征,揭示本溪组古沉积环境和古气候特征,并进一步探讨盆地东南缘本溪组的沉积环境。

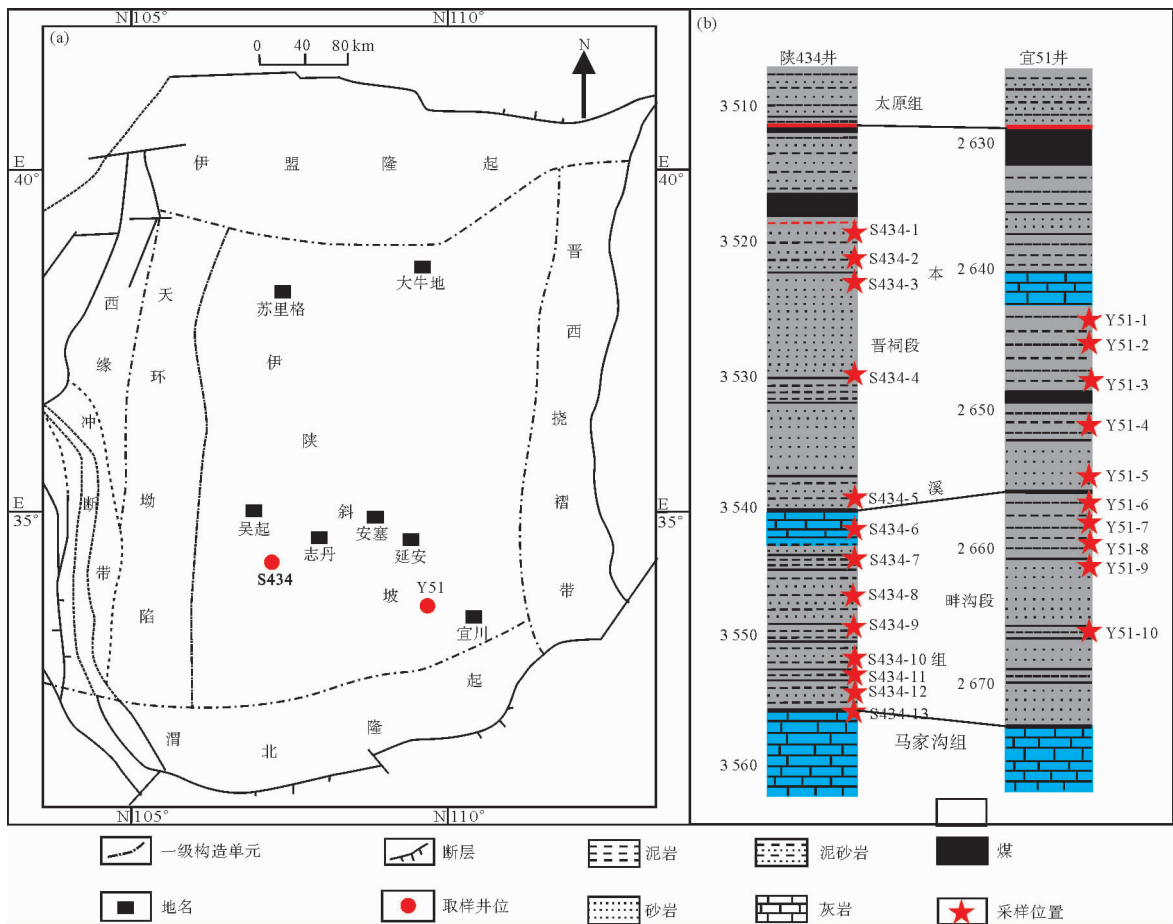
## 1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北台地西部,近似矩形的大地构造单元内,四周被断裂所控制,东部边界受吕梁山隆起带控制,南部与渭河地堑相连,西部以桌子山、惠安-沙井子断裂带与河套弧形构造带西南翼、六盘山弧形构造带东翼连接,北部以南缘断裂与河套地堑连接<sup>[9]</sup>。盆地构造格局形成于中晚三叠世,稳定于喜马拉雅运动期<sup>[10]</sup>,总体构造样式表现为南部和北部隆起、东部升高、西部逆冲,西侧的天环向斜与中部的西倾斜坡连接,盆地周边深层构造复杂,但盖层自下而上构造简单,类型较单一<sup>[6]</sup>,区域构造分为六个一级构造单元:中部的陕北斜坡,东部的晋西挠褶带,西部的天环坳陷,西部边缘的逆冲断裂带,北部的伊盟隆起带,南部的渭北隆起带<sup>[8]</sup>。

研究区为陕北斜坡东南部宜川和高桥地区(图1)。通过对高桥和宜川地区陕434和宜51井石炭系本溪组钻井岩芯观察(图2),发现研究区本溪组岩性以灰黑色-浅灰色泥岩和灰色砂岩为主,细砂岩中可见岩屑富集层、泥质条带(图2(a)、图2(c)),浅灰色泥岩中常含黄铁矿结核(图2(b))和滑动面构造(图2(d)),深灰色泥岩中见黄铁矿条带(图2(e)),砂泥界面见冲刷接触(图2(f))。岩性以泥岩、砂岩及灰岩为主,并富含黄铁矿,表明研究区本溪期为海陆交互相环境,泥砂沉积多变,说明沉积环境变化频繁。

## 2 样品及实验

将研究区陕434和宜51井石炭系本溪组的23件新鲜泥岩样品破碎,放入玛瑙钵研磨至200目,装入样品袋,送至中国石油化工股份有限公司胜利油田勘探开发研究院石油地质测试中心,采用美国PerkinElmer公司生产的NexION300D电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)进行分析,实验测试严格遵守《硅酸盐岩化学分析方法:GB/T 14506—2010》标准。样品预处理:①将200目样品置于105℃烘箱中烘干12h;②称取样品粉末50mg置于Teflon溶样弹中;③依次缓慢加入1.5mL高纯HNO<sub>3</sub>、1.5mL高纯HF和0.1mL高



(a) 采样位置图; (b) 陕 434 井和宜 51 井本溪组岩性及采样层位

图 1 鄂尔多斯盆地地质简图和采样位置图

Fig. 1 Regional geological schematic diagram and sampling location map of Ordos Basin



(a) 细砂岩中碳质泥线; (b) 浅灰色泥岩含黄铁矿结核; (c) 砂泥互层界限; (d) 活脱面构造; (e) 泥岩中含黄铁矿条带; (f) 砂泥岩冲刷接触面

图 2 鄂尔多斯盆地高桥-宜川地区本溪组岩芯照片

Fig. 2 Core photos of Benxi Formation in Gaoqiao-Yichuan Area, Ordos Basin

纯  $\text{HClO}_4$  (结核结壳中加入 3 mL 高纯  $\text{HNO}_3$  和 1 mL 高纯  $\text{HCl}$ ); ④将 Teflon 溶样弹放入钢套, 拧紧后置于 190 °C 烘箱中加热 48 h; ⑤待溶样弹冷却, 开盖后置于 140 °C 电热板上蒸干, 然后加入 3 mL  $\text{HNO}_3$  并蒸干; ⑥加入 3 mL 体积分数为 50% 的高纯  $\text{HNO}_3$ , 加盖及钢套密闭, 在 190 °C 的烘箱中保持 12 h。⑦冷却后, 将提取液移至 100 mL 干净的 PET (聚酯) 瓶中, 加入 1 mL 的 (Rh+Re) 双内标溶液 (浓度 1 mg/L), 用 Milli-Q 稀释至 100 g, 使 Rh 和 Re 的浓度为 10 ng/mL, 待上机测定。样品分析的精密度和准确度同文献 [10], 然后在室内温度 20 °C、相对湿度 30% 的环境下, 进行微量元素和稀土元素测试, 相对误差 < 10%。

### 3 结果

对高桥、宜川地区本溪组 23 件泥岩样品的 Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Mo、Ba、W、Pb、Th、U、Ta、Hf 等 18 种微量元素进行测试分析, 结果如表 1、表 2 所示。将微量元素值与黎彤<sup>[11]</sup>的地壳微量元素标准化蛛网图对比, 发现高桥和宜川地区均具有富集 Mo、Th、U 的微弱右倾特征 (图 3)。

表 1 鄂尔多斯盆地东南部泥岩微量元素测试结果

Tab.1 Test results of trace elements in mudstones in the southeastern Ordos Basin

$10^{-6}$

样品编号	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Mo	Ba	W	Pb	Th	U	Ta	Hf
Y51-1	17.7	123.0	103.0	39.4	72.7	35.1	133.0	20.3	81.5	152.0	1.42	308	1.81	32.0	17.0	4.4	1.7	2.4
Y51-2	24.6	146.0	108.0	11.9	38.1	43.8	159.0	22.7	109.0	168.0	1.25	360	2.76	15.7	18.0	4.8	1.8	2.0
Y51-3	22.8	217.0	178.0	25.5	90.9	51.9	60.2	36.1	164.0	205.0	1.52	437	3.23	43.6	23.7	4.0	2.3	2.9
Y51-4	21.6	157.0	124.0	20.9	52.2	49.2	68.9	28.4	151.0	128.0	2.11	395	2.68	10.8	21.5	4.5	1.6	2.0
Y51-5	16.8	187.0	192.0	33.3	106.0	37.1	29.2	38.3	26.1	101.0	13.80	105	2.37	78.1	30.9	8.3	2.6	4.4
Y51-6	22.6	147.0	102.0	104.0	104.0	60.1	35.6	21.1	92.9	79.8	1.96	390	2.01	30.3	15.4	3.3	1.6	1.4
Y51-7	31.3	179.0	143.0	4.5	37.9	11.2	14.4	35.3	5.3	46.4	0.38	25	2.94	8.3	27.5	10.2	2.4	5.9
Y51-8	22.3	220.0	134.0	57.1	133.0	31.5	27.8	27.8	63.0	94.2	2.97	218	2.97	86.6	22.3	7.5	2.1	3.1
Y51-9	31.0	275.0	196.0	53.0	94.8	41.3	38.5	41.8	108.0	91.0	2.30	534	3.93	69.3	28.6	7.0	2.6	3.9
Y51-10	34.8	384.0	583.0	17.8	96.5	131.0	48.6	41.9	86.5	119.0	6.98	241	2.32	110.0	32.4	31.3	2.3	4.0
S434-1	21.1	158.0	129.0	17.9	77.8	27.9	98.0	37.6	38.2	147.0	1.98	119	2.19	27.9	15.3	5.9	1.2	3.7
S434-2	26.3	171.0	105.0	20.3	42.0	52.0	125.0	32.7	67.8	342.0	1.39	170	2.28	29.8	16.5	6.3	1.1	3.8
S434-3	22.6	161.0	129.0	14.6	46.1	37.9	40.0	30.0	149.0	155.0	1.16	484	3.01	12.9	22.7	3.3	2.0	2.2
S434-4	18.8	169.0	145.0	5.8	41.5	33.5	71.1	30.5	51.7	158.0	1.19	203	3.99	12.4	23.6	9.3	1.9	7.6
S434-5	20.8	155.0	131.0	18.2	78.2	28.4	100.0	38.9	39.0	150.0	2.05	121	3.33	30.0	19.8	6.5	1.9	5.2
S434-6	20.9	236.0	142.0	4.8	16.2	14.3	26.9	37.8	149.0	299.0	0.66	389	3.21	34.2	22.6	5.3	1.7	4.1
S434-7	21.6	248.0	139.0	4.7	15.6	14.6	27.7	38.5	157.0	310.0	0.63	394	3.16	33.7	23.1	5.3	1.8	4.2
S434-8	16.6	154.0	110.0	20.5	62.9	26.8	66.0	36.5	21.6	175.0	3.61	73	2.03	30.7	21.6	11.7	1.5	6.4
S434-9	12.1	111.2	58.3	9.6	14.8	14.5	24.8	18.8	66.7	177.2	1.23	197	0.99	14.1	11.7	2.4	0.7	5.9
S434-10	8.3	70.3	43.9	5.7	34.5	16.3	32.1	21.3	41.4	361.5	4.85	146	1.55	24.0	17.1	5.4	1.1	4.9
S434-11	9.6	74.8	45.6	6.2	34.8	18.2	39.3	21.2	40.1	429.8	4.65	420	1.65	26.8	18.2	4.6	1.2	5.3
S434-12	10.3	77.5	50.8	7.2	40.6	20.0	41.8	24.0	41.6	415.3	5.01	400	1.82	27.1	19.8	5.8	1.3	5.6
S434-13	9.3	71.0	44.9	6.2	36.9	16.9	35.2	21.2	40.5	385.7	4.65	363	1.53	24.3	17.2	5.2	1.1	4.9
平均值	20.2	169.2	136.4	22.1	59.5	35.4	58.4	30.6	77.9	203.9	2.95	282	2.51	35.3	21.2	7.1	1.7	4.2
地壳值 <sup>[10]</sup>	18.0	140.0	110.0	25.0	89.0	63.0	94.0	18.0	78.0	480.0	1.30	390	1.10	12.0	5.8	1.7	1.6	1.5

表 2 鄂尔多斯盆地东南部泥岩稀土元素测试结果

10<sup>-6</sup>

Tab. 2 Test results of rare earth elements in mudstones in the southeastern Ordos Basin

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/ HREE	LaN/ YbN	δEu	δCe
Y51-1	56.7	112.0	13.2	51.8	8.4	1.3	6.4	1.0	5.5	1.1	3.3	0.6	3.6	0.5	28.8	265.5	243.4	22.1	11.03	1.08	0.98	1.38
Y51-2	54.6	103.0	12.3	46.5	8.6	1.7	7.6	1.3	6.6	1.3	3.7	0.7	4.0	0.6	35.8	252.5	226.7	25.8	8.78	0.95	1.15	1.35
Y51-3	52.7	70.3	7.8	25.6	3.2	0.6	2.4	0.4	1.9	0.4	1.4	0.3	1.9	0.3	10.3	169.2	160.2	9.0	17.88	1.91	1.17	1.20
Y51-4	68.9	128.0	15.4	62.4	12.9	2.4	10.0	1.4	6.0	1.1	3.0	0.5	2.9	0.4	29.7	315.1	290.0	25.1	11.57	1.62	1.19	1.33
Y51-5	42.1	76.2	7.9	27.4	4.6	0.9	3.9	0.7	4.1	0.8	2.3	0.4	2.7	0.4	19.3	174.4	159.1	15.3	10.41	1.08	1.22	1.44
Y51-6	44.1	83.1	9.7	39.1	7.9	1.7	6.6	1.1	5.1	0.9	2.5	0.4	2.3	0.3	23.1	204.9	185.6	19.3	9.60	1.30	1.32	1.37
Y51-7	36.7	64.4	8.0	27.9	5.2	0.6	5.4	1.3	8.9	1.9	5.5	1.0	5.5	0.8	45.0	173.1	142.9	30.3	4.72	0.46	0.66	1.28
Y51-8	218.0	564.0	105.0	589.0	156.0	7.7	115.0	12.9	38.9	5.3	13.0	1.8	10.9	1.6	24.3	426.2	399.5	26.7	14.97	1.67	1.46	1.19
Y51-9	99.2	178.0	19.1	58.5	7.2	0.9	6.3	0.9	5.0	1.1	3.6	0.7	4.4	0.6	30.6	385.7	363.0	22.7	15.99	1.56	0.77	1.40
Y51-10	88.8	164.0	19.1	65.5	8.0	1.3	7.0	1.2	6.5	1.3	3.9	0.7	4.4	0.7	144.0	372.3	346.7	25.6	13.54	1.39	0.98	1.36
S434-1	62.8	109.0	12.9	51.2	8.7	2.1	6.9	1.2	6.1	1.3	4.1	0.8	5.1	0.7	35.7	273.0	246.7	26.3	9.38	0.85	1.51	1.31
S434-2	61.7	112.0	13.2	50.6	8.9	2.0	6.7	1.1	6.0	1.3	4.0	0.8	5.0	0.8	40.1	274.2	248.4	25.8	9.63	0.85	1.45	1.34
S434-3	67.4	127.0	14.7	55.6	10.0	1.8	7.3	1.1	5.3	1.0	2.8	0.5	2.9	0.4	27.6	297.8	276.5	21.3	12.98	1.63	1.17	1.37
S434-4	58.0	113.0	12.4	44.4	7.9	1.6	7.6	1.3	7.1	1.5	4.7	0.6	4.1	0.7	44.7	264.9	237.3	27.6	8.61	0.98	1.18	1.43
S434-5	51.2	115.0	12.3	47.9	9.6	1.9	8.6	1.5	7.3	1.3	3.5	0.6	3.3	0.5	36.9	264.4	237.9	26.5	8.98	1.08	1.18	1.54
S434-6	98.7	192.0	21.9	79.0	11.9	2.4	8.8	1.2	6.2	1.1	3.3	0.6	3.6	0.5	28.7	431.2	405.9	25.3	16.02	1.89	1.29	1.40
S434-7	102.0	188.0	22.4	80.0	12.1	2.4	8.9	1.3	6.2	1.2	3.3	0.6	3.6	0.5	29.8	432.5	406.9	25.5	15.93	1.98	1.29	1.34
S434-8	56.7	143.0	13.1	47.9	8.7	1.2	5.6	1.0	4.9	1.1	3.4	0.5	3.1	0.5	26.8	290.7	270.7	20.0	13.52	1.25	0.94	1.77
S434-9	50.4	103.5	11.1	38.5	6.7	1.4	5.7	1.0	4.5	1.0	3.0	0.5	2.8	0.4	27.4	230.4	211.5	18.9	11.18	1.24	1.24	1.49
S434-10	32.9	69.7	6.7	22.9	4.5	0.9	4.1	0.7	3.7	0.8	2.3	0.4	2.3	0.4	21.9	152.1	137.5	14.6	9.44	1.00	1.12	1.60
S434-11	33.4	73.5	6.9	24.8	4.5	0.9	4.4	0.7	3.8	0.8	2.3	0.4	2.3	0.4	21.4	159.1	144.0	15.1	9.56	1.00	1.15	1.65
S434-12	34.9	75.2	7.4	26.3	5.0	1.0	4.6	0.8	4.1	0.9	2.5	0.4	2.6	0.4	24.7	166.3	149.9	16.4	9.12	0.92	1.13	1.59
S434-13	30.6	67.5	6.6	23.0	4.3	0.9	4.3	0.7	3.8	0.8	2.2	0.4	2.5	0.3	22.8	148.0	132.9	15.1	8.82	0.86	1.12	1.61
最大值																432.5	406.9	30.3	17.88	1.98	1.51	1.77
最小值																148.0	132.9	9.0	4.72	0.46	0.66	1.19
平均值																266.2	244.5	21.8	11.38	1.24	1.16	1.42

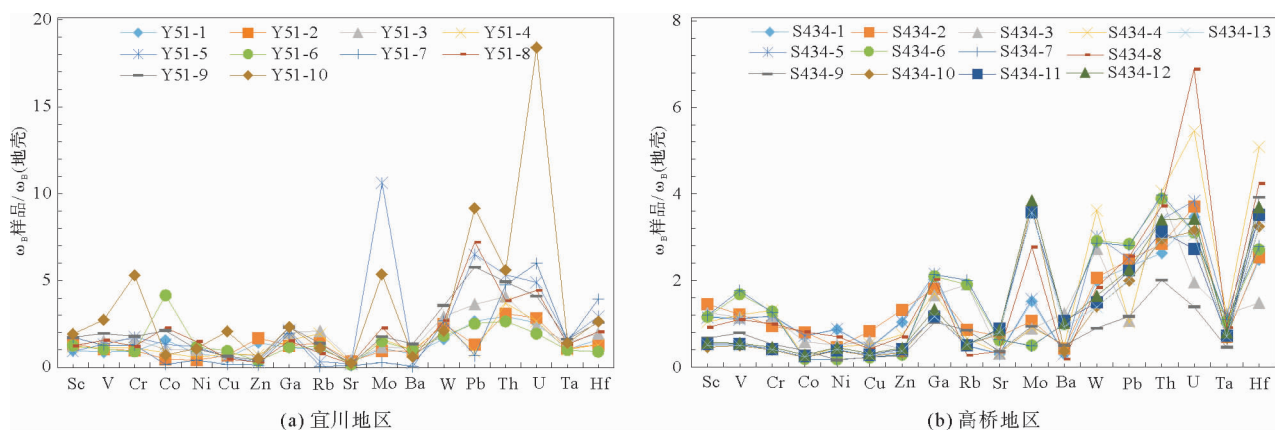


图3 宜川与高桥地区地壳微量元素标准化蛛网图

Fig. 3 Standardization cobweb map of trace elements in the crust of Yichuan and Gaoqiao Area

沉积岩中稀土元素含量与物源、沉积环境和成岩作用关系密切,可被用于沉积岩物源示踪以及揭示岩石沉积环境及成因<sup>[11]</sup>。研究区 23 件泥岩样品 $\Sigma$ REE 值介于  $432.47 \times 10^{-6} \sim 147.99 \times 10^{-6}$ , 平均  $266.23 \times 10^{-6}$ ; LREE 值介于  $406.93 \times 10^{-6} \sim 132.91 \times 10^{-6}$ , 平均  $244.48 \times 10^{-6}$ ; HREE 值为  $30.27 \times 10^{-6} \sim 8.96 \times 10^{-6}$ , 平均  $21.75 \times 10^{-6}$ ; LREE/HREE 值介于  $17.88 \sim 4.72$ , 平均 11.38;  $La_N/Yb_N$  值为  $1.98 \sim 0.46$ , 平均 1.24;  $\delta Eu$  值介于  $1.51 \sim 0.66$ , 平均 1.160;  $\delta Ce$  为  $1.77 \sim 1.19$ , 平均 1.42。对其进行球粒陨石标准化分析,发现高桥、宜川均具有右倾 Eu 负异常的“V”字型模式曲线特征,不同的是宜川地区曲线一致性较差(图 4(a)),而高桥地区曲线特征一致性好(图 4(b)),表明宜川地区物源来自不同方向,为多物源的混合区,而高桥地球物源较为单一。

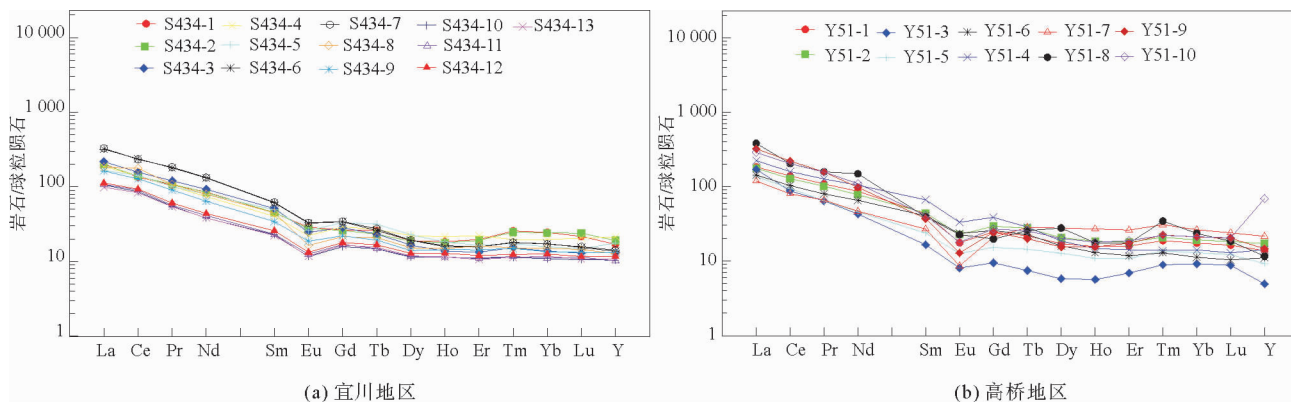


图4 高桥和宜川地区本溪组泥岩稀土元素球粒陨石标准化曲线图

Fig. 4 Standardized graphs of rare earth element chondrites in mudstones of Benxi Formation in Gaoqiao and Yichuan Area

#### 4 讨论

微量元素中的 Co、Ni、Ba、V、Cu、Sr、Th、Cr 等对环境变化灵敏,其含量比值可用来指示其形成的古环境特征,因此,可用  $Sr/Ba$ 、 $Sr/Cu$ 、 $V/Cr$ 、 $U/Th$ 、 $Ni/Co$ 、 $Cu/Zn$  及  $T(T = (y - 2.578) / -80.8, y = Sr)$  指示沉积地层形成时的古环境和古气候<sup>[12-16]</sup>。研究区本溪组泥岩的微量元素特征比值如表 3 所示。

表 3 鄂尔多斯盆地东南缘本溪组泥岩微量元素特征比值

Tab. 3 Characteristic ratios of trace elements in mudstones of Benxi Formation in the southeastern margin of Ordos Basin

地区	样品编号	Sr/Ba	Sr/Cu	V/Cr	Ni/Co	U/Th	Cu/Zn	T/℃
宜川地区	Y51-1	0.49	4.33	1.19	1.85	0.26	0.26	30.02
	Y51-2	0.47	3.84	1.35	3.20	0.27	0.28	29.83
	Y51-3	0.47	3.95	1.22	3.56	0.17	0.86	29.37
	Y51-4	0.32	2.60	1.27	2.50	0.21	0.71	30.32
	Y51-5	0.96	2.72	0.97	3.18	0.27	1.27	30.66
	Y51-6	0.20	1.33	1.44	1.00	0.22	1.69	30.92
	Y51-7	1.85	4.14	1.25	8.44	0.37	0.78	31.33
	Y51-8	0.43	2.99	1.64	2.33	0.34	1.13	30.74
	Y51-9	0.17	2.20	1.40	1.79	0.24	1.07	30.78
	Y51-10	0.49	0.91	0.66	5.42	0.97	2.70	30.43
	平均值	0.59	2.90	1.24	3.33	0.33	1.08	30.44
高桥地区	S434-1	1.24	5.27	1.22	4.35	0.39	0.28	30.09
	S434-2	2.01	6.58	1.63	2.07	0.38	0.42	27.67
	S434-3	0.32	4.09	1.25	3.16	0.15	0.95	29.99
	S434-4	0.78	4.72	1.17	7.11	0.39	0.47	29.95
	S434-5	1.24	5.28	1.18	4.30	0.33	0.28	30.05
	S434-6	0.77	20.91	1.66	3.38	0.23	0.53	28.21
	S434-7	0.79	21.23	1.78	3.33	0.23	0.53	28.07
	S434-8	2.41	6.53	1.40	3.07	0.54	0.41	29.74
	S434-9	0.90	12.19	1.91	1.54	0.20	0.59	29.71
	S434-10	2.48	22.15	1.60	6.08	0.31	0.51	27.43
	S434-11	1.02	23.56	1.64	5.58	0.26	0.46	26.59
	S434-12	1.04	20.79	1.53	5.65	0.30	0.48	26.77
	S434-13	1.06	22.85	1.58	6.00	0.30	0.48	27.13
	平均值	1.23	13.55	1.50	4.28	0.31	6.38	28.57

4.1 古盐度

Sr 比 Ba 迁移能力强,当淡水与海水混和时,淡水中的  $Ba^{2+}$  与海水中的  $SO_4^{2-}$  结合生成  $BaSO_4$  沉淀,而  $SrSO_4$  溶解度较高可迁移到远海,通过生物途径沉淀下来。因此,Sr 质量分数与 Ba 质量分数的比值随远离海岸而逐渐增大,依据该比值的大小可定性反映古盐度并进行沉积环境的恢复。一般来讲,淡水沉积物中  $Sr/Ba < 1$ ,海相沉积物的  $Sr/Ba > 1$ ,半咸水相  $Sr/Ba$  值为  $1.0 \sim 0.5$ 。文献[17]认为锶钡比值随盐度增高而增大,粘土或泥岩的  $Sr/Ba > 1$  为海洋沉积, $< 1$  为大陆沉积。刘小康等<sup>[18]</sup>认为  $Sr/Ba > 1.0$  为海相咸水, $0.6 \sim 1.0$  之间为半咸水相, $< 0.6$  为陆相淡水。宜川地区本溪组泥岩的  $Sr/Ba$  除个别样品如 Y51-7 较高外,其余大都在  $0.17 \sim 0.96$ ,平均为  $0.59$ ,为陆相淡水到半咸水环境(图 5(a));而高桥地区本溪组泥岩的  $Sr/Ba$  为  $0.32 \sim 2.48$ ,平均为  $1.23$ ,水体盐度较高,为半咸水-海相咸水环境(图 5(b))。表明本溪组时期鄂尔多斯盆地东南缘的宜川地区有淡水的混入,而高桥地区淡水的混入较少,以海相咸水环境为主。

## 4.2 古气候和古地温

古气候研究的常用方法有微量元素比值法和孢粉组合特征法<sup>[19]</sup>,其中 Sr/Cu 常被作为气候温湿和干热的重要指标,余继峰等<sup>[20]</sup>认为 Sr/Cu 介于 1~10 指示温湿气候,>10 指示干热气候。田景春等<sup>[21]</sup>利用 Sr 元素的质量分数(y)和温度(T)的关系来估算古水温,即  $y = 2\,578 - 80.8T$ 。宜川地区本溪组泥岩 Sr/Cu 为 0.9~4.55,平均 2.90,在 1~10 之间,表明处于温湿环境(图 6(a))。高桥地区泥岩 Sr/Cu 范围 4.09~22.85,平均 13.55,在 1~10 和 >10 范围内(图 6(b)),纵向上呈温湿气候-干热气候-温湿气候的周期变化,表明高桥地区本溪组气候变化具有周期性从温湿到干热的转换。另外,可根据 Sr 元素含量计算古地温,高桥地区本溪组古温度为 26.59~30.09℃,平均值为 28.57℃,表明高桥地区古温度变化较大,而宜川地区的古温度为 29.37~31.33℃,平均 30.44℃,表明宜川地区本溪组古温度变化范围较小,气候相对稳定。鄂尔多斯盆地东南缘宜川和高桥地区本溪组泥岩的 Sr/Cu 和古温度研究表明,盆地东缘晚石炭世本溪期的气候总体较为干热,尽管宜川地区本溪期处于潮湿的环境,但古温度和高桥地区相差不大,平均温度仅相差 2℃左右,其湿润环境可能是由于宜川地区处于深水区,远源物质输送较多,而高桥地区水体较浅,以周围的近源物质输送沉积为主。

## 4.3 氧化还原环境

微量元素的 V/Cr、U/Th、Ni/Co 及 Cu/Zn 等参数对沉积岩形成过程中的氧化还原条件敏感,常被用于指示沉积物形成的氧化还原环境。其中,V/Cr 常被用作含氧量指标,一般认为 V/Cr<2 为含氧环境,2~4.25 为贫氧条件,>4.25 为次氧至缺氧条件<sup>[22]</sup>。U 在强还原条件下以不溶的  $U^{4+}$  形式存在,造成沉积物中大量富含 U 元素,随着沉积环境变为含氧环境,则以可溶的  $U^{6+}$  形式存在流体中。Th 比较稳定,不受水体氧化还原条件的影响,所以常用 U/Th 值反映沉积岩氧化还原条件,一般认为 U/Th>1.25 代表缺氧环境,0.75~1.25 为贫氧环境,<0.75 为氧化环境<sup>[14,22]</sup>。Ni/Co 是判断沉积物沉积时期的水体氧化还原程度的

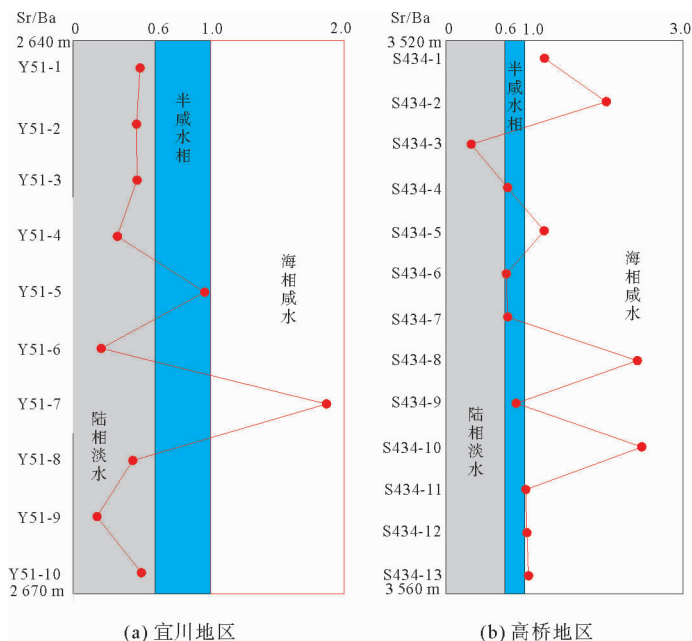


图5 鄂尔多斯盆地东南缘本溪组泥岩古盐度变化特征

Fig. 5 Paleosalinity variation characteristics of mudstones of Benxi Formation in the southeastern margin of Ordos Basin

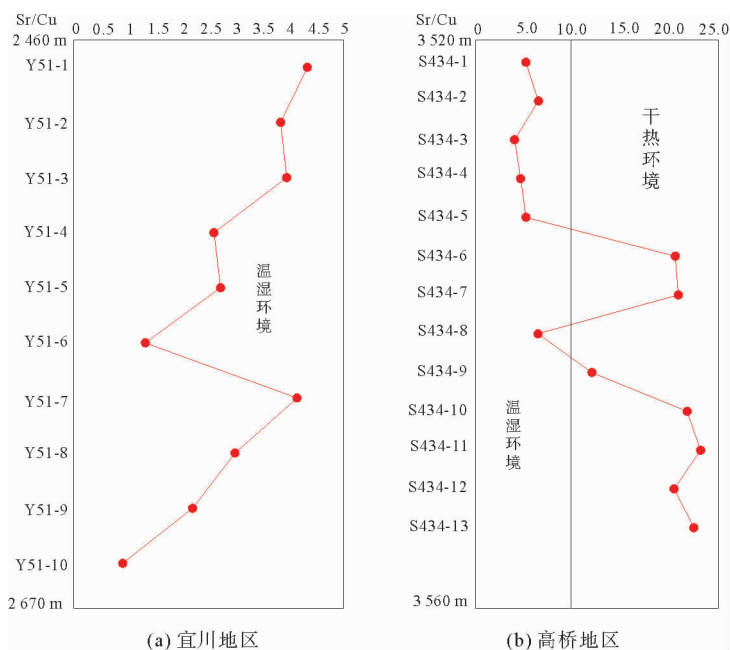


图6 鄂尔多斯盆地本溪组气候变化特征

Fig. 6 Climate change characteristics of Benxi Formation in Ordos Basin

重要参数。Ni 在  $H_2S$  存在的还原环境中以硫化物形式沉淀,而在氧化环境中以离子形式存在。Co 在氧化环境中以  $Co^{2+}$  离子溶于流体,在缺氧环境中以固溶体进入自生黄铁矿<sup>[22]</sup>,常把  $Ni/Co < 5$  为氧化环境,  $5 \sim 7$  为贫氧环境,  $> 7$  为次氧至缺氧环境<sup>[17]</sup>。田景春等<sup>[21]</sup>认为  $Cu/Zn$  值  $< 0.21$  为还原环境,  $0.21 \sim 0.35$  为弱还原环境,  $0.35 \sim 0.50$  为还原-氧化环境。

通过对鄂尔多斯盆地东南缘高桥和宜川地区石炭统本溪组泥岩微量元素 V/Cr、U/Th、Ni/Co 和 Cu/Zn 比值(图 7)特征研究发现,高桥和宜川地区本溪组泥岩 V/Cr 值范围分别为  $0.66 \sim 1.64$ 、 $1.17 \sim 1.9$ ,平均值  $1.24$ 、 $1.50$ ,均  $< 2$ 。U/Th 值范围分别为  $0.15 \sim 0.39$ 、 $0.17 \sim 0.97$ ,平均值  $0.31$ 、 $0.33$ ,虽然 U/Th 变化范围较大,但整体上均  $< 0.75$ 。Ni/Co 值范围分别为  $1.54 \sim 7.11$ 、 $1.00 \sim 8.44$ ,平均值  $4.28$ 、 $0.33$ ,其值变化范围较大,但大多数样品 Ni/Co 值都  $< 5$ 。Cu/Zn 比值分别为  $0.28 \sim 0.95$ 、 $0.26 \sim 2.7$ ,平均值  $6.38$ 、 $1.08$ ,整体  $> 0.35$ 。因此,认为鄂尔多斯盆地东南缘高桥和宜川地区均属于含氧的氧化环境,但是氧化程度及变化频次略有差异,可能受本溪期海侵作用所致。宜川地区经历了弱氧化  $\rightarrow$  强氧化  $\rightarrow$  弱氧化  $\rightarrow$  强氧化  $\rightarrow$  弱氧化的演变过程,而高桥地区经历了弱氧化  $\rightarrow$  强氧化  $\rightarrow$  弱氧化  $\rightarrow$  氧化 4 个演化阶段。

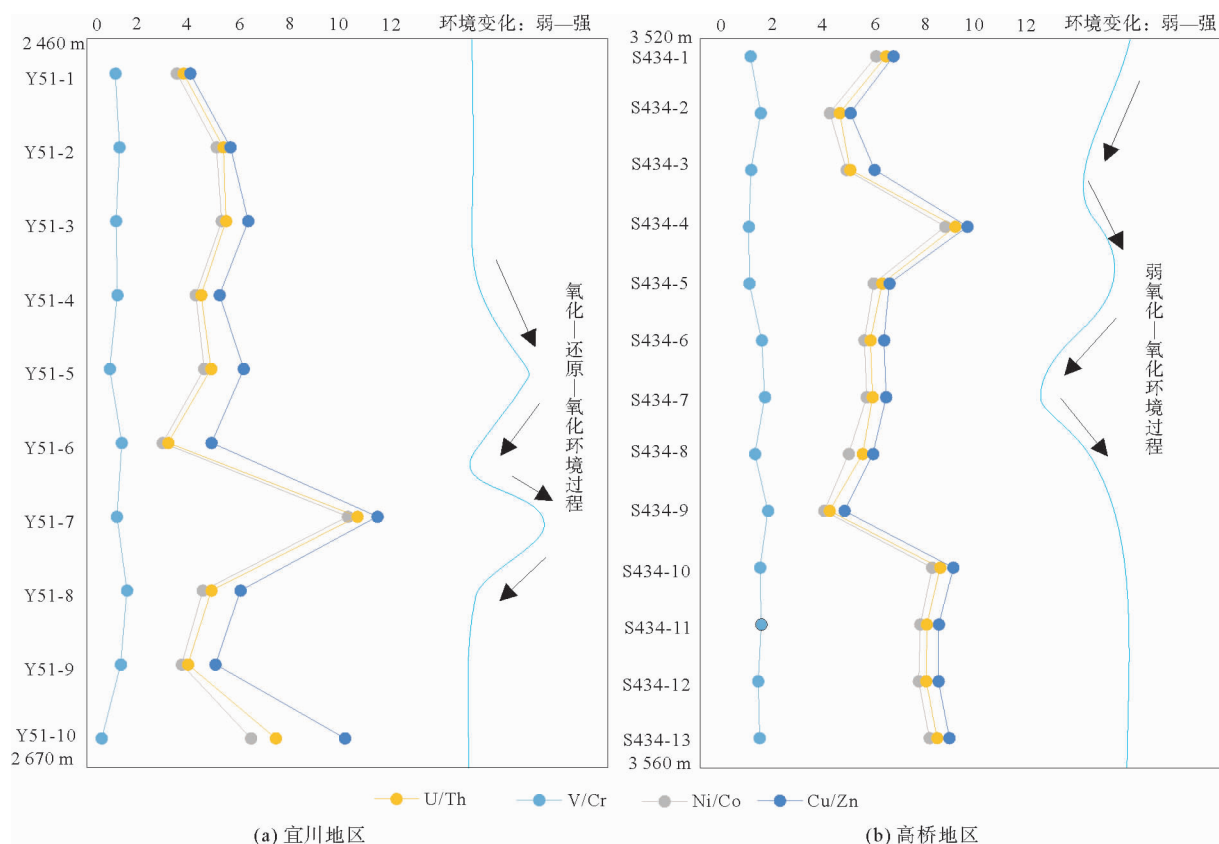


图 7 鄂尔多斯盆地东南缘本溪组泥岩微量元素氧化还原特征图

Fig. 7 Redox characteristics of trace elements in mudstones of Benxi Formation in the southeastern margin of Ordos Basin

## 5 结论

1) 通过研究区泥岩微量元素的 Sr/Ba 比值,认为高桥地区在本溪组时期为开放环境,水体整体表现为陆相淡水到海相咸水并存的环境,表明高桥地区为盆地水体较浅部位;而宜川地区本溪组以海水环境为主,位于水体较深部位,受陆相淡水影响较小。

2) 通过研究区本溪组泥岩的 Sr/Cu 比值和古水温研究,认为高桥地区在本溪组时期气候处于温湿环

境,且古水温相对变化较大;而宜川地区则处于温湿→干旱→温湿的周期性变化环境,古水温变化较小。

3) 研究区本溪组泥岩 V/Cr、U/Th、Ni/Co 及 Cu/Zn 特征研究表明,宜川地区在本溪组时期水体为淡水-海水的氧化环境,且古气候较为稳定,处于深水环境;而高桥地区受到海水的入侵作用,盐度发生周期性变化,可能与海平面的变化同步进行,古气候在温湿-干热-温湿间周期性变化,以氧化环境为主,反映了海平面边缘的浅水环境,易受到大气环境影响。

#### 参考文献:

- [1] 陈晶, 黄文辉, 何明倩. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组-下石盒子组泥岩元素地球化学特征[J]. 现代地质, 2018, 32(2): 240-250.  
CHEN Jing, HUANG Wenhui, HE Mingqian. Elemental geochemistry characteristics of mudstones from Benxi Formation to Lower Shihezi Formation in southeastern Ordos Basin[J]. Geoscience, 2018, 32(2): 240-250.
- [2] 毛光周, 刘晓通, 安鹏瑞, 等. 无机地球化学指标在古盐度恢复中的应用及展望[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 92-102.  
MAO Guangzhou, LIU Xiaotong, AN Pengrui, et al. Application and outlook of inorganic geochemical indexes reconstruction of palaeosalinity[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(1): 92-102.
- [3] 白云来, 赵应成, 徐东, 等. 陕西铜川-黄陵地区油页岩地质特征及利用前景[J]. 现代地质, 2010, 24(1): 158-165.  
BAI Yunlai, ZHAO Yingcheng, XU Dong, et al. Geological characteristics and developing-prospecting prospects of oil shale in Tongchuan-Huangling District, Shaanxi Province[J]. Geoscience, 2010, 24(1): 158-165.
- [4] 吴海燕, 梁婷, 曹红霞, 等. 延安地区奥陶系马家沟组上组合膏盐岩成盐沉积演化模式研究[J]. 地质学报, 2020, 94(12): 3819-3829.  
WU Haiyan, LIANG Ting, CAO Hongxia, et al. Study of the salt-formation and sedimentary evolution model of the Upper Ordovician Majiagou Formation in the Yan'an Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(12): 3819-3829.
- [5] 何白新. 鄂尔多斯盆地演化与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [6] 赵振宇, 郭彦如, 王艳, 等. 鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J]. 特种油气藏, 2012, 19(5): 15-20.  
ZHAO Zhenyu, GUO Yanru, WANG Yan, et al. Study progress in tectonic evolution and paleogeography of Ordos Basin[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2012, 19(5): 15-20.
- [7] 胡鹏, 于兴河, 王娇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部本溪组地层水化学特征与天然气成藏意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 92-100.  
HU Peng, YU Xinghe, WANG Jiao, et al. Chemical characteristics of Benxi Formation water and its significance for natural gas accumulation in Southeast Ordos Basin[J]. Journal of Northwestern University (Natural Sciences Edition), 2017, 47(1): 92-100.
- [8] 张治波, 刘腾, 李丽荣, 等. 鄂尔多斯盆地 CD 区块长 6 地层水化学性质及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2017, 37(3): 61-68.  
ZHANG Zhibo, LIU Teng, LI Lirong, et al. Chemical characteristics and geological significance of Chang 6 Formation water in CD Area of Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2017, 37(3): 61-68.
- [9] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化一改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006(5): 617-638.  
LIU Chiyang, ZHAO Hongge, GUI Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006(5): 617-638.
- [10] LIU Y S, ZONG K Q, KELEMEN P B, et al. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: Subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates[J]. Chemical Geology, 2008, 247(1/2): 133-153.
- [11] 黎彤. 化学元素的地球丰度[J]. 地球化学, 1976(3): 167-174.  
LI Tong. Chemical element abundance in the Earth and its major shells[J]. Geochimica, 1976(3): 167-174.
- [12] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies[J]. Chemical Geology, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [13] ZHANG T G, WIESLAW T, JIANG S Y, et al. Major oceanic redox condition change correlated with the rebound of marine animal diversity during the Late Ordovician[J]. Geology, 2011, 39(7): 675-678.
- [14] XU G, HANNAH J L, BINGEN B, et al. Digestion methods for trace element measurements in shales: Paleoredox proxies examined[J]. Chemical Geology, 2012, 324: 132-147.
- [15] PI D H, LIU C Q, SHIELDS-ZHOU G A, et al. Trace and rare earth element geochemistry of black shale and kerogen in

- the Early Cambrian Niutitang Formation in Guizhou Province, South China: Constraints for redox environments and origin of metal enrichments[J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 218-229.
- [16] HU J, LI Q, FANG N Q, et al. Geochemical characteristics of the Permian sedimentary rocks from central uplift zone, Qiantang Basin, Tibet: Insight into source-area weathering, provenance, recycling, and tectonic setting[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015, 8: 5373-5388.
- [17] 张治波, 朱志军, 王文锋, 等. 滇西兰坪盆地中-新生代蒸发岩元素地球化学特征及其形成环境[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2019, 49(2): 356-379.
- ZHANG Zhibo, ZHU Zhijun, WANG Wenfeng, et al. Geochemical characteristics and formation environment of Mesozoic and Cenozoic evaporative rocks in Lanping Basin, Western Yunnan[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science edition)*, 2019, 49(2): 356-379.
- [18] 刘小康, 张治波, 朱志军, 等. 兰坪盆地古近系云龙组元素地球化学特征及其古环境的恢复[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 109-117.
- LIU Xiaokang, ZHANG Zhibo, ZHU Zhijun, et al. Geochemical characteristics of elements in the Paleogene Yunlong Formation and the restoration of paleoenvironment in Lanping Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 109-117.
- [19] 赵秀丽, 张祥玉, 章磊, 等. 黄海末次盛冰期以来古环境的演化-来自孢粉组合的证据[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(6): 10-21.
- ZHAO Xiuli, ZHANG Xiangyu, ZHANG Lei, et al. Paleoenvironmental evolution since the Last Glacial Maximum in Yellow Sea: Evidence from sporopollen assemblages[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 39(6): 10-21.
- [20] 余继峰, 曹慧涛, 付文钊, 等. 胶莱盆地止凤庄组、红土崖组微量元素地球化学特征及古环境分析[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(2): 1-11.
- YU Jifeng, CAO Huitao, FU Wenzhao, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental analysis of trace elements of Zhifengzhuang and Hongtuya formations in Jiaolai Basin[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 40(2): 1-11.
- [21] 田景春, 张翔. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- TIAN Jingchuan, ZHANG Xiang. *Sedimentary geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [22] HE T, LU S, LI W, et al. Geochemical characteristics and effectiveness of thick, black shales in southwestern depression, Tarim Basin[J/OL]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 185. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106607.

(责任编辑:高丽华)