

贵州北部五峰组烃源岩沉积环境及页岩气资源潜力*

何洪茜^{1,2}, 肖加飞^{1▲}, 杨海英¹, 兰青¹, 黄明亮¹

(¹ 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; ² 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 黔北上奥陶统五峰组黑色泥岩层段的 Mo、V、U 的富集系数都大于 1, Ce 异常的平均值为 -0.07, 说明泥岩形成于缺氧环境, 特定元素比值 (V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni) 和 Ce/La) 显示泥岩形成于贫氧-缺氧环境。总体上, 五峰组黑色泥岩沉积环境的特点是水体相对较深、沉积速率较低、呈贫氧-缺氧状态。五峰组黑色泥岩的 TOC 含量变化于 1.31%~2.89% 之间, 平均值为 1.98%; 镜质组反射率 (Ro) 变化于 1.93~2.25 之间, 平均值为 2.07, 反映有机质已达成熟-过成熟的干气阶段; 有效厚度多在 10 m 之下, 脆性矿物含量 15%~35% 之间, 埋深大概在 0~4000 m。这些特征表明五峰组黑色泥岩层段具备一定的形成页岩气的条件, 具有形成页岩气藏的可能性, 但由于厚度较薄, 其页岩气资源远景目前尚不能确定。

关键词: 五峰组, 地球化学, 沉积环境, 页岩气资源潜力, 黔北

中图分类号: P618.12 文献标识码: A 文章编号: 1003-6563(2022)02-0059-06

Sedimentary environment and shale gas resource potential of source rocks of Wufeng Formation in northern Guizhou*

HE Hongxi^{1,2}, XIAO Jiafei^{1▲}, YANG Haiying¹, LAN Qing¹, HUANG Mingliang¹

(¹ State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; ² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The enrichment coefficients of Mo, V and U in the black mudstone of Upper Ordovician Wufeng Formation in northern Guizhou are all greater than 1, and the mean Ce anomaly is -0.07, which indicates that the mudstone was formed in an anoxic environment. The ratios of specific elements (V/Cr, Ni/Co, V/(V+Ni) and Ce/La) indicate that the mudstone was formed in a hypoxic-anoxic environment. On the whole, the sedimentary environment of the black mudstone of Wufeng Formation is characterized by relatively deep water, low deposition rate and hypoxic-anoxic state. The TOC content of the black mudstone of Wufeng Formation varies from 1.31% to 2.89%, with an average of 1.98%. The vitrinite reflectance (Ro) varies from 1.93 to 2.25, with an average of 2.07, indicating that the organic matter has reached the dry gas stage from mature to over-mature. The effective thickness is less than 10 m, the content of brittle minerals is 15% to 35%, and the buried depth is about 0 to 4000 m. These characteristics indicate that the black mudstone interval of Wufeng Formation has certain conditions for shale gas formation, and has the possibility of forming shale gas reservoirs. However, due to its thin thickness, the shale gas resource prospect is uncertain at present.

Keywords: Wufeng Formation, geochemistry, sedimentary environment, shale gas resource potential, northern Guizhou

0 引言

沉积环境是沉积岩特征的决定因素,而沉积岩特征是沉积环境的物质表现。因此,对页岩气烃源岩进行沉积环境分析,有助于阐明页岩气烃源岩的形成背景和形成条件。

对于不断增加的能源需求和日益增大的气候变化压力,清洁能源备受关注^[1-4],作为天然气家族的新成员,页岩气更具特色。

页岩气是一种清洁高效的新型的油气资源,具有自生、自储和储层致密的特点,是典型的低丰度、大规模分布式的非常规天然气资源。

中国有页岩气显示的盆地或区域较多,大致分为海相和陆相两种类型。其中,华南志留系龙马溪组和寒武系筇竹寺组页岩有机质含量高、厚度大,页岩气资源潜力最大^[5-7]。

贵州早古生代地层系列中,发育了三套黑色页岩层段(早寒武世牛蹄塘组、晚奥陶世五峰组和早志留世龙马溪组)^[8],是页岩气赋存的良好载体。五峰组页岩层段由于厚度较薄,过去对其作为烃源岩的关注较少。

本文在阐述五峰组页岩层段地球化学特征的基础上,分析了其沉积环境,并对这一层段的页岩气资源潜力进行了探讨,这将为进一步研究黔北地区页岩气的赋存及开发利用提供一些基础资料。

1 地质背景

据程裕淇(1994)的大地构造分类方案^[9],贵州地壳大地构造位置主体属扬子陆块,南东缘尚跨及南华活动带。黔北地区位于扬子陆块内部,主要发育早古生代和中生代地层,表层构造变形较强烈。

上奥陶统五峰组,主要分布在贵州北部,即大致分布在毕节燕子口-遵义-石阡以北地区(图1),主要为黑、灰黑色极薄层-薄层状炭质泥岩、含炭质硅质泥岩夹钙质、粉砂质泥岩,顶部时见(一般0.5~2 m)深灰色薄-中厚层泥质灰岩、生物屑灰岩。黑色泥岩层段,富含笔石化石,俗称五峰页岩,为一套低能的沉积缓慢的凝缩段沉积。区域上泥岩层段以黑色、含炭质为其主要特征。因有较高的有机质含量,整套沉积物都能作烃源岩^[10],生物以笔石占

绝对优势,且丰度高,亦常被称为五峰笔石页岩。厚度多在10 m以下,一般厚3~6 m,但一些地方相对较厚(图1),例如,毕节下水厚9.2 m,桐梓红花园厚7.4 m,道真巴鱼上村厚7.3 m,遵义板桥厚11.4 m,松桃火烧寨最厚,近16 m。

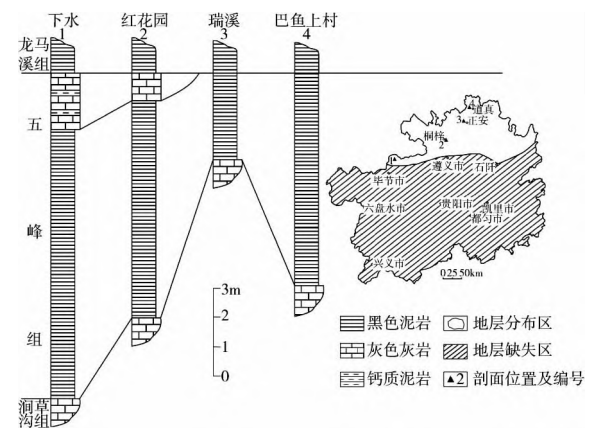


图1 黔北五峰组剖面的分布和对比

Fig. 1 Distribution and correlation of sections of Wufeng Formation in northern Guizhou

扬子区在奥陶纪时,位于南半球的低纬度地区^[11],南部为黔中隆起。五峰组泥岩多呈层状,具毫米级纹层或片状页理构造,沉积缓慢,沉积速率为0.78 m/Ma^[12]。生物以浮游的笔石为主,其次为壳薄、个体小的腕足类、双壳类及三叶虫等,有时可见硅质海绵骨针和放射虫等^[11]。

2 分析结果

黑色泥岩的主量元素和微量元素的测试分析,在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。黑色泥岩的有机碳、热解和镜质组反射率等的分析测试,在河南理工大学完成。

2.1 元素地球化学特征

2.1.1 主量元素地球化学特征

将五峰组泥岩的4个剖面(下水剖面3件,红花园剖面4件,瑞溪剖面1件,巴鱼上村剖面1件)的主量元素分析结果的平均值列于表1。

从表1可以看出,各剖面主量元素平均含量及总平均含量与澳大利亚后太古代页岩(PAAS)平均值(Taylor, 1985)相比,五峰组黑色泥岩总体上具有

稍为富集的 SiO₂ 和 CaO, 稍为亏损的 Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO 和 Na₂O, 而明显亏损的 MnO、K₂O 和 P₂O₅ 的平均值与 PAAS 接近。

表 1 研究区五峰组泥岩主量元素

Tab. 1 Major elements of the mudstone of Wufeng Formation in the study area

剖面名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	LOI	Σ
毕节下水	53.79	16.03	5.08	2.45	5.52	0.48	5.15	0.04	0.12	0.73	10.34	99.71
红花园	76.75	9.33	1.87	0.93	0.2	0.34	2.61	0.01	0.08	0.49	7.47	100
正安瑞溪	68.05	12.97	1.89	1.33	0.13	0.21	3.79	0.01	0.34	0.73	9.88	99.32
巴鱼上村	77.24	9.48	2.26	1.04	0.42	0.26	2.44	0.01	0.08	0.47	5.73	99.43
总平均值	68.96	11.95	2.78	1.44	1.57	0.32	3.50	0.01	0.15	0.61	8.36	99.62
PAAS	62.80	15.90	6.50	2.20	1.30	1.20	3.70	0.11	0.16	1.00	6.00	99.9

2.1.2 微量元素地球化学特征

从表 2 可看出, 研究区剖面的 Mo、V、U、Th 含量平均值较北美页岩 (NASC) 平均值高, 而 Cr、Co、Ni 和 Sr 含量平均值较北美页岩平均值低。

表 2 研究区五峰组泥岩微量元素

Tab. 2 Trace elements in the mudstone of Wufeng Formation in the study area

剖面名称	V	Mo	U	Cr	Co	Ni	Sr	Ba	Th
毕节下水	174	22.04	10.67	104.4	15.63	73.3	106.43	631.67	21.03
红花园	615	18.92	11.37	91.35	5.36	67.63	40.25	381.25	12.91
瑞溪	282	1.28	10.2	145	3.63	43.9	54.2	590	20.3
巴鱼上村	199	2.43	4.34	117	4.14	33.3	38.4	777	12.7
平均值	318	11.17	9.15	114.44	7.19	54.53	59.82	594.98	16.74
NASC	130	2.60	2.66	124.50	25.70	58.00	142.00	636.00	12.30

2.1.3 稀土元素地球化学特征

从表 3 可以看出研究区五峰组泥岩 ΣREE 的平均值为 224 × 10⁻⁶, 明显高于北美页岩 (NASC) 的平均值 (160 × 10⁻⁶)。剖面的稀土总量以瑞溪最高 (331 × 10⁻⁶), 而巴鱼上村最低 (136 × 10⁻⁶), 毕节下水和桐梓红花园剖面的 ΣREE 都高于北美页岩 ΣREE。研究区五峰组泥岩的 LREE/HREE 比值为 6.05 ~ 9.48, 表明轻稀土较重稀土富集; 北美页岩标准化的稀土配分曲线呈大致水平型 (图 2); 几个剖面的 La/Yb 和 (La)_N / (Yb)_N 与北美页岩接近; 几个剖面都显示了微弱的负 Ce 异常和负 Eu 异常。

表 3 研究区五峰组泥岩稀土元素

Tab. 3 Rare earth elements in the mudstone of Wufeng Formation in the study area

剖面名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
毕节下水	55.37	100.27	11.88	44.78	8.42	1.54	7.50	1.09	6.29	1.23
红花园	37.63	65.55	8.58	32.98	6.48	1.21	5.98	0.91	5.41	1.08
瑞溪	62.3	127	15.4	62.4	14.6	2.66	14.3	2.17	13.2	2.57
巴鱼上村	31.4	55.0	6.47	22.8	3.89	0.789	3.59	0.58	3.85	0.856
总平均值	47.2	87.53	10.78	41.56	8.54	1.59	8.03	1.22	7.36	1.47
NASC	31.5	66.5	7.9	27	5.9	1.18	5.2	0.79	5.8	1.04

剖面名称	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	ΣLREE/ΣHREE	La/Yb	(La) _N / (Yb) _N	Ce/Ce*	Eu/Eu*
毕节下水	3.75	0.54	3.44	0.51	257.67	9.48	17.50	1.65	0.92	0.92
红花园	2.97	0.42	2.68	0.41	172.23	7.68	14.00	1.32	0.87	0.91
瑞溪	6.85	0.968	6.00	0.914	331.22	6.05	10.39	0.98	0.97	0.86
巴鱼上村	2.67	0.44	3.01	0.47	135.82	7.79	10.44	0.98	0.91	0.99
总平均值	4.06	0.59	3.78	0.58	224.24	7.75	13.08	1.23	0.92	0.92
NASC	3.40	0.50	2.97	0.44	160.12	6.95	10.61	1.00	1.00	1.00

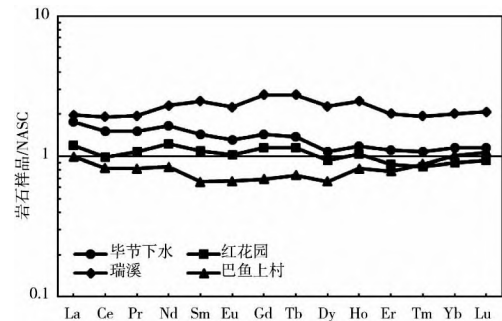


图 2 五峰组黑色的稀土配分曲线

Fig. 2 REE distribution curves in the black mudstone of Wufeng Formation

2.2 泥岩的有机地球化学特征

将研究区五峰组泥岩的有机碳、岩石热解及镜质组反射率分析结果列于表 4, 由表 4 可以看出: 研究区 TOC (总有机碳) 变化于 1.31% ~ 2.89% 之间, 平均值为 1.98%; T_{max} (热解峰温) 变化于 529.4 ~ 545.3 °C 之间, 平均值为 538.9 °C; S₀ (含气量) 值变化于 0.0007 ~ 0.001 mg/g 之间, 平均值为 0.0009 mg/g; S₁ (可溶烃) 变化于 0.0009 ~ 0.001 mg/g 之间, 平均值为 0.0009 mg/g; S₂ (热解烃) 变化于 0.098 ~ 0.111 mg/g 之间, 平均值为 0.103 mg/g; S₄ (残余有机碳) 变化于 16.00 ~ 34.725 mg/g 之间, 平均值为 23.765 mg/g; Ro (镜质组反射率) 变化于

1.93% ~2.25% 之间,平均值为 2.07%。

表 4 研究区五峰组泥岩有机碳、热解及
镜质组反射率分析结果

Tab. 4 Analysis results of organic carbon, pyrolysis and vitrinite
reflectance of the mudstone of Wufeng Formation

剖面名称	TOC /%	T _{max} / (°C)	S ₀ / (mg/g)	S ₁ / (mg/g)	S ₂ / (mg/g)	S ₄ / (mg/g)	R _o
毕节下水	1.31	529.4	0.0009	0.0009	0.102	16.00	1.93
红花园	2.89	542.07	0.0010	0.0009	0.111	34.725	2.03
巴鱼上村	1.742	545.3	0.0007	0.0010	0.098	20.866	2.25
平均值	1.98	538.93	0.0009	0.0009	0.103	23.765	2.07

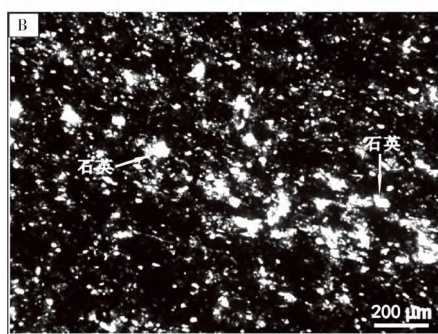
3 五峰组黑色泥岩的沉积环境

3.1 五峰组泥岩沉积标志

该组岩石颜色深,呈灰黑-黑色;岩石粒度较细,多为泥岩(图 3(a)),并具泥质结构(图 3(b));岩层薄,多为极薄层-薄层;普遍具水平层理。总体上,为一套海侵体系域沉积。



(a) 泥岩的露头



(b) 泥岩的结构

图 3 桐梓县红花园五峰组黑色泥岩

Fig. 3 The black mudstone of Wufeng Formation in
Honghuayuan, Tongzi County

3.2 五峰组泥岩地球化学标志

岩石的一些氧化还原敏感元素及比值,能够较好地反映环境的氧化还原状态。现将五峰组泥岩有关的元素富集系数和比值及参数列于表 5。

根据元素富集系数(EF)的计算公式^[13],元素 X 的富集系数为: $EF_X = (X/Al_{\text{样品}}) / (X/Al_{\text{PAAS}})$, 如果 $EF_X > 1$, 那么元素 X 相对澳大利亚后太古代平均页岩(PAAS)富集; $EF_X < 1$, 表明它是亏损的。从表 5 可以看出, Mo、V、U 的富集系数都大于 1, 特别是 Mo, 富集程度更高。氧化还原敏感元素 Mo、V、U 通常富集在缺氧还原的沉积中, 因此, 表明沉积物沉积在缺氧还原的条件下。

表 5 研究区五峰组黑色泥岩有关元素富集系数及比值

Tab. 5 Enrichment coefficients and ratios of related elements
in the mudstone of Wufeng Formation

剖面名称	EF _{Mo}	EF _V	EF _U	V/Cr	Ni/Co	V / (V + Ni)	Ce / La	δCe
下水	22.81	3.48	1.15	1.69	4.78	0.7	1.82	-0.07
红花园	41.43	7.48	8.52	7.13	13.28	0.89	1.74	-0.1
瑞溪	1.57	4.03	2.23	1.94	12.09	0.87	2.03	-0.05
巴鱼上村	4.08	2.35	2.23	1.7	8.04	0.86	1.75	-0.07
平均值	17.47	4.34	3.53	3.12	9.55	0.83	1.84	-0.07

$V/Cr < 2$ 表示富氧环境, $2 < V/Cr < 4.25$ 指示贫氧环境, $V/Cr > 4.25$ 代表缺氧环境^[14]。研究区五峰组黑色泥岩的 V/Cr 为 1.69 ~ 7.13, 平均值为 3.12, 指示一种贫氧-缺氧的环境条件。

$Ni/Co < 5$ 表示富氧环境, $5 < Ni/Co < 7$ 指示贫氧环境, $Ni/Co > 7$ 代表缺氧环境^[14]。研究区五峰组黑色泥岩的 Ni/Co 为 4.78 ~ 13.28, 平均值为 9.55, 指示一种贫氧-缺氧的环境条件。

$V/(V + Ni)$ 比值的变化通常用来指示水体的氧化还原程度, 较高的 $V/(V + Ni)$ 比值 (> 0.6), 表明了弱分层的贫氧水柱^[14-17], 研究区五峰组黑色泥岩具有较高的 $V/(V + Ni)$ 比值 (0.7 ~ 0.89, 平均值为 0.83), 说明形成于缺氧环境。

Ce/La 比值也能较好地指示沉积物的氧化还原条件, Ce/La 比值 < 1.5 为富氧环境, Ce/La 比值为 1.5 ~ 1.8, 为贫氧环境, Ce/La 比值 > 2 为厌氧环境^[18-19]。研究区五峰组黑色泥岩的 Ce/La 比值为 1.74 ~ 2.03, 平均值为 1.84, 指示研究区黑色泥岩

形成于贫氧-缺氧环境。

Ce 异常能较好地反映环境的氧化还原状态,其技术公式为: $\delta Ce = \log [3Ce_N / (2La_N + Nd_N)]$, 以北美页岩标准化,若 $\delta Ce > -0.1$, 为 Ce 的富集,指示缺氧还原的古水体环境;若 $\delta Ce < -0.1$, 为 Ce 的亏损,指示氧化的古水体环境^[20]。研究区黑色泥岩的 δCe 为 $-0.05 \sim -0.1$, 平均值为 -0.07 , 说明岩石形成于缺氧还原的环境。

综合上述沉积标志和地球化学标志,表明五峰组黑色泥岩沉积环境的特点是水体相对较深、沉积速率较低、呈贫氧-缺氧还原状态。

4 五峰组泥岩的页岩气资源潜力

根据有关研究,有利页岩气远景区需具备 4 个基本特征:①有机碳含量高;②成熟度达生气阶段以上;③有效厚度大;④脆性矿物含量丰富。其中,有机碳含量、热成熟度、有效厚度是页岩气形成的三大基本要素^[21]。

页岩气资源远景区基本评价参数:通常有机碳(TOC)含量在 2% 以上;有机质成熟度(R_o)一般在 1.1 以上;页岩的有效厚度一般在 15 m 以上,TOC 低的页岩厚度一般在 30 m 以上;脆性矿物含量大于 30% ~ 40%^[22-23]。

根据上述这些指标和要素,对区内五峰组黑色炭质泥岩的页岩气资源潜力,作一简要分析。

(1) 有机碳含量:从研究区毕节下水、桐梓红花园、道真巴鱼上村剖面黑色炭质泥岩有机碳含量平均值的情况来看,红花园剖面黑色泥岩有机碳含量最高(为 2.89%),其次为巴鱼上村剖面有机碳含量(为 1.74%),毕节下水剖面的有机碳含量较低,仅为 1.31%。总体来看,研究区黑色炭质泥岩的有机碳含量都在 1% 以上。

(2) 成熟度:几个剖面黑色炭质泥岩的镜质组反射率分别为 1.93(毕节下水)、2.03(红花园)、2.25(巴鱼上村)。根据丰国秀和陈盛吉^[24]及肖贤明^[25]的划分方案,研究区五峰组炭质泥岩已达高成熟-过成熟的干气阶段。在岩石热解分析中,研究区五峰组炭质泥岩有机质热解峰温(T_{max})分别为 529.43 °C(毕节下水)、542.07 °C(红花园)、545 °C(巴鱼上村),也说明研究区五峰组炭质泥岩的演化已进入了高成熟-过成熟阶段,与镜质组反射率反映的成熟度一致。

(3) 有效厚度:研究区五峰组黑色炭质泥岩的厚度有变化,且厚度多在 10 m 以下,部分地方相对较厚,如遵义板桥厚 11.4 m,松桃火烧寨厚近 16 m。

(4) 脆性矿物含量:研究区脆性矿物主要为石英,一般呈粒状,分选性和磨圆度差,含量一般在 15% ~ 35% 之间。

(5) 埋深情况:根据研究区地层保存状况,五峰组上覆地层主要为志留系、二叠系、三叠系和侏罗系。再根据各时代地层厚度,其埋深大概在 0 ~ 4000 m。

综合上述页岩气形成要素特征,研究区奥陶系上统五峰组黑色炭质泥岩具备一定的形成页岩气的条件,具有形成页岩气藏的可能性。但由于厚度较薄,其页岩气资源远景目前尚不能确定。

5 结论

(1) 五峰组黑色泥岩层段的 Mo、V、U 的富集系数都大于 1, Ce 异常的平均值为 -0.07 , 说明泥岩形成于缺氧环境,特定元素比值(V/Cr 、 Ni/Co 、 $V/(V+Ni)$ 和 Ce/La) 显示泥岩形成于贫氧-缺氧环境。总体上,五峰组黑色泥岩沉积环境的特点是水体相对较深、沉积速率较低、呈贫氧-缺氧状态。

(2) 五峰组黑色泥岩总有机碳(TOC)含量平均值为 1.98%;镜质组反射率(R_o)平均值为 2.07,反映有机质已达成熟-过成熟的干气阶段;有效厚度多在 10 m 以下,脆性矿物含量在 15% ~ 35% 之间,埋深大概在 0 ~ 4000 m。这些特征表明五峰组黑色泥岩层段具备一定的形成页岩气的条件,具有形成页岩气藏的可能性,但由于厚度较薄,其页岩气资源远景目前尚不能确定。

参考文献【REFERENCES】

- [1] 张树伟. 能源经济环境模型研究现状与趋势评述[J]. 能源技术经济, 2010, 22(2): 43-49.
- [2] 张栋. 15% 发展目标下的我国非化石能源发展研究[J]. 能源技术经济, 2010, 22(6): 14-20.
- [3] 李南翔, 赵勇. 关于低碳经济的几点思考[J]. 能源技术经济, 2010, 22(8): 1-3.
- [4] 杨元华. 未来能源发展十大趋势[J]. 能源技术经济, 2011, 23(2): 1-4.
- [5] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.

- [6] 邹才能,董大忠,王礼教,等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发,2010,37(6): 641-653.
- [7] 张大伟. 加快中国页岩气勘探开发和利用的主要路径[J]. 天然气工业,2011,31(5): 1-5.
- [8] 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社,1987: 50-143.
- [9] 程裕淇. 中国区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社,1994: 371-373.
- [10] 万方,尹福光,许效松,等. 华南加里东运动演化过程中烃源岩的生成[J]. 矿物岩石,2003,23(2): 82-86.
- [11] 周明魁,王汝植,李志明,等. 中国南方奥陶-志留纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社,1993: 61-66.
- [12] 肖传桃,李建明,郭成贤. 中上扬子地区五峰组沉积环境的再认识[J]. 四川地质学报,1996,16(4): 294-298.
- [13] 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.
- [14] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [15] JOACHIMSKI M M, OSTERTAG - HENNING C, PAN-COST R D, et al. Water column anoxia, enhanced productivity and concomitant changes in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{34}\text{S}$ across the Frasnian - Famennian boundary (Kowala - Holy Cross Mountains/Poland)[J]. *Chemical geology*, 2001, 175(1/2): 109-131.
- [16] 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, USA[J]. *Chemical geology*, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [17] ZHANG T, TRELA W, 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.
- [18] 黄喜峰,钱壮志,逯东霞,等. 贺兰山中南段奥陶系米钵山组的沉积环境与构造背景分析[J]. 地球学报,2009,30(1): 65-71.
- [19] 李珉,牛志军,赵小明,等. 鄂西地区泥盆系-石炭系泥质岩沉积地球化学特征及沉积环境研究[J]. 华南地质与矿产,2011,27(3): 238-249.
- [20] WRIGHT J, SCHRADER H, HOLSER W T. Paleoredox variations in ancient oceans recorded by rare earth elements in fossil apatite[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1987, 51(3): 631-644.
- [21] 董大忠,程克明,王玉满,等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. 石油与天然气地质,2010,31(3): 288-299.
- [22] 李玉喜,乔德武,姜文利,等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报,2011,30(2/3): 308-317.
- [23] 李延钧,刘欢,刘家霞,等. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报,2011,33(2): 28-34.
- [24] 丰国秀,陈盛吉. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率的关系[J]. 天然气工业,1988,8(8): 20-24.
- [25] 肖贤明,毛鹤龄. 从各向异性壳质组的发现论壳质组在煤化过程中的光性演变[J]. 沉积学报,1991,9(1): 87-95.

收稿日期: 2021-09-25; 修回日期: 2021-10-09

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合字基础(2017)1194); 国家自然科学基金项目(41972095)。

作者简介: 何洪茜(1997-),女,硕士研究生,研究方向: 沉积矿产。

▲通讯作者: 肖加飞(1961-),男,博士,研究员,从事沉积地球化学及沉积矿产研究。