

文章编号: 1000-0550(2013)01-0020-12

黔北地区下寒武统底部黑色页岩沉积环境条件 与源区构造背景分析^①

李娟¹ 于炳松¹ 郭峰²

(1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室 北京 100083; 2. 西澳大利亚大学工程计算机与数学学院 西澳大利亚 6009)

摘要 为了深入探讨黔北地区下寒武统底部黑色页岩的沉积环境条件和源区构造背景,对黔北地区下寒武统牛蹄塘组黑色页岩进行系统采样,对其微量元素和稀土元素地球化学特征进行了系统分析。研究表明,微量元素中高的 $w_V/(w_{Ni} + w_V)$ 和 U/Th 比值等反映该区黑色页岩形成于海域开阔的还原环境。区内黑色页岩样品中 Mo、Sb、U、Cd、V、Ba、Tl、Ni、W、Cr、Cs、Cu、Zn、Bi 等元素的高富集以及正 Eu 异常和较低的 Co/Zn 比值均反映了黔北下寒武统底部黑色页岩受到深部热液活动的影响。根据主、微量和稀土元素组合及比值特征可以看出黔北地区下寒武统底部黑色页岩的源岩具有花岗岩、沉积岩和玄武岩等多成因性质。源区构造背景以被动大陆边缘为主,由于受深部热液活动的影响,也显示大陆岛弧构造背景的特征。

关键词 黑色页岩 微量元素 稀土元素 沉积环境 构造背景

第一作者简介 李娟 女 1990 年出生 硕士研究生 油气储层预测和地球化学 E-mail: 214540162@qq.com

通讯作者 于炳松 E-mail: yubs@cugb.edu.cn

中图分类号 P512.2 P595 **文献标志码** A

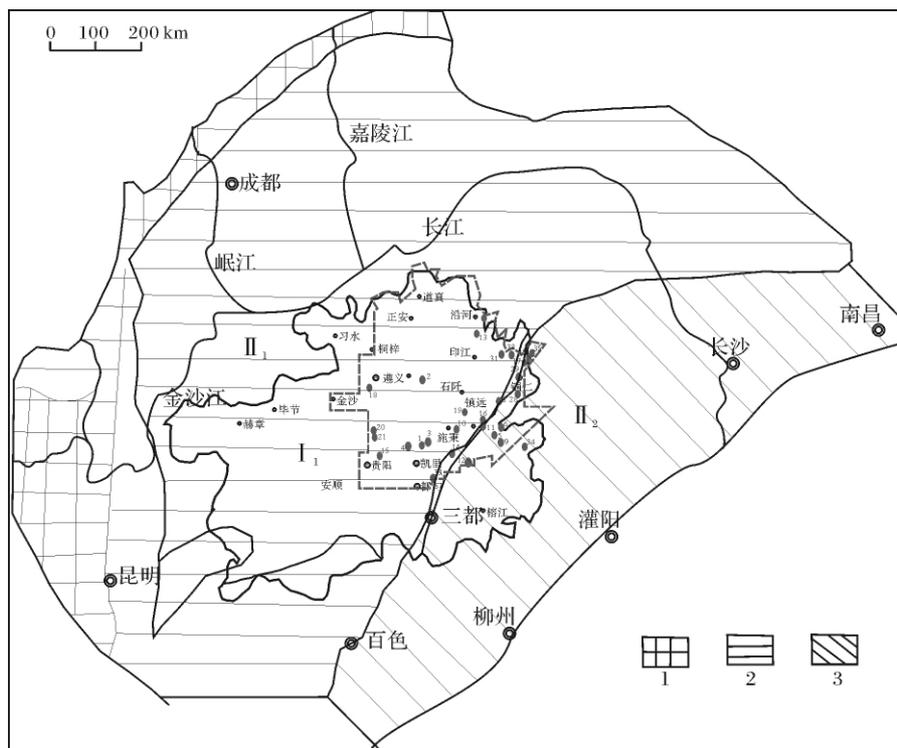
0 引言

黑色页岩是一种特殊的岩层,以富集亲铜、亲铁、铂族和稀土等元素为特点,形成于一定的古环境、古地理和古气候条件下^[1];大量文献及实际生产证明^[2-4],很多大型矿床(如铜、钼、镍的多金属矿床)与黑色岩系有关。黔北地区下寒武统黑色岩系分布稳定,有机碳含量高,埋藏深度小,与美国东部页岩气成藏的地质条件有着一定的相似之处^[5]。因此,对黔北黑色岩系的研究,一方面对于探讨多类矿床的成因具有重要的意义;另一方面,对于我国的非常规天然气资源——页岩气的评价与勘探开发更具有重要的理论与实际意义。

随着分析技术的不断提高,岩石中微量元素的检测下限不断降低,从而使得微量元素地球化学特征起着越来越重要的作用。尤其是稀土元素,他们的分馏情况能灵敏的反映地质—地球化学作用的性质,因而是很好的示踪剂^[6-9]。近些年来,稀土元素地球化学被广泛用于岩石成因、成矿物源、源区母岩性质和构造背景分析等中^[10-15]。黔北地区下寒武统牛蹄塘组

底部为黑色硅质岩,下部为黑色高碳质页岩,中上部为黑色碳质页岩粉砂岩及灰绿色砂质页岩粉砂岩,该套黑色页岩,分布广泛^[16];范德廉等^[13]通过对扬子地台前寒武—寒武纪界限附近的黑色岩系研究发现铽异常现象,认为它是稀罕事件;李胜荣^[14]研究认为湘黔地区下寒武统牛蹄塘组黑色岩系是汲取有武陵期和雪峰期岩浆岩成分的热水和正常海水混合沉积产物;叶杰等^[3]认为黑色岩系作为地史上反复出现的时限沉积相,反映了环境的突变及环境事件,构成了许多重要矿床的赋矿岩系;陈兰等^[15]研究表明黔北地区黑色岩系热演化程度高,并处于成熟—过成熟阶段,其沉积环境为强还原、缺氧条件,有机碳同位素发生 4.3% 偏移量,代表该时期缺氧事件的存在。因此中国南方寒武系底部黑色页岩在岩石学、地层学、古生物学、矿床学等方面研究程度较深,而通过其地球化学特征探讨该套黑色页岩形成的沉积环境以及源区的构造背景的研究工作较为薄弱。本文主要对其地球化学特征进行研究分析,揭示该套黑色页岩形成的沉积环境以及源区的构造背景,以为页岩气的勘探和开发提供一定的地质依据。

^①国土资源部油气资源战略研究中心项目:全国页岩气资源战略调查先导试验区—黔北地区页岩气资源战略调查与选区(2009GYXQ15-03)资助
收稿日期:2012-02-10; 收修改稿日期:2012-04-16



1. 克拉通古陆区; 2. 克拉通沉积区; 3. 大陆边缘区; I₁ 扬子陆块; II₁ 扬子克拉通沉积区; II₂ 扬子东南大陆边缘

图 1 中国南方寒武纪构造古地理图^[19] (虚线框内为研究区域, ⊙ • 点为采样点)

Fig. 1 Paleogeography map of lower Cambrian Niutitang Formation in the southern part of China

本次研究区域位于黔北地区, 主要包括遵义市和铜仁地区的全部、黔东南苗族侗族自治州的西北地区 (图 1 所示)。

1 区域地质概况

贵州地区晚震旦世, 陆缘下沉, 海水进一步向西北超覆, 大体在铜仁—三都一线西北的扬子古陆上形成地台型碳酸盐和陆源碎屑沉积。该线的东南则逐渐过渡为具前复理石特点的深海碳硅质沉积。早古生代, 贵州地壳性质及构造格局与晚震旦世大体相同: 铜仁—三都的西北继续呈现着浅海地台构造环境; 东南侧仍为弧后深海盆。早古生代末的广西运动使得弧后盆地褶皱上升 (形成华南褶皱带) 与西北侧的扬子准地台合并。自此贵州全境形成大陆性地壳^[16, 17]。

贵州省位于我国西南云贵高原的东北部, 其大地构造位置特殊, 主体为扬子陆块 (图 1)。刘宝珺^[18] 把中国南方曾出现的盆地分为十三个类型, 黔北寒武纪沉积盆地类型属于扬子东南被动大陆边缘沉积盆地。早寒武世早期, 南方大陆的拉张活动达到高潮, 泛大陆解体, 海底扩张导致全球海平面快速上

升, 造成扬子碳酸盐台地第一次被淹没。海平面的上升带来了上升洋流, 使陆架边缘下部海水柱形成还原环境, 扬子板块边缘海域发育黑色岩系、扬子板块克拉通上海水变深, 为黑色页岩覆盖^[19]。本文的研究对象就是黔北下寒武统牛蹄塘组的这套黑色页岩。

2 样品采集与测试

为了研究黔北地区黑色页岩的相关地球化学特征, 以为黔北地区页岩气的评价开发提供一定的依据, 本次研究主要以黔北下寒武统牛蹄塘组黑色页岩为对象。在系统测量野外剖面时进行采样, 进而从涉及到黔北每一个区县的 20 余剖面样品中选择牛蹄塘组底部较新鲜的黑色页岩进行相关测试, 另外还有一部分样品是野外工作时采集的点样品。选择样品的另一个原则是尽量涉及到黔北的每一个区县。据此我们最终选择了 20 个样品进行黏土矿物及全岩 X 衍射分析测试、微量元素 (包括稀土元素) 测试。

黏土矿物及全岩 X 衍射分析测试是由华北石油勘探开发研究院在温度为 24℃, 相对湿度为 35% 的条件下, 依据 SY/T 5163—1995、SY/T 5983—94 标准, 采用 D8 DISCOVER 型 X 射线衍射仪进行测试完

成的;微量元素是由核工业北京地质研究院在温度为20℃,相对湿度为30%的条件下,依据DZ/T0223—2001标准,采用电感耦合等离子体质谱(ICP—MS)法完成的。其中ICP—MS的检出下限为ppb级次,且很少发生质谱谱线重叠,是比较理想的稀土元素测试手段。

3 测试结果

3.1 黑色页岩矿物组成

粘土矿物及全岩X衍射分析测试结果如下表1。全岩定量分析结果中,样品中主要以石英和粘土矿物为主:石英含量在34%~78%之间,平均含量为56%;粘土含量在8%~52%,平均含量为28%;碳酸盐矿物含量较少,但在个别样品中(QB-35)含量较高;黄铁矿含量平均在6%之间,大部分手标本中可以观察到。粘土矿物中主要以伊利石和伊/蒙混层为主,其中伊利石含量在8%~91%,平均为59%;伊/蒙混层含量在30%左右,间层比为26%。

3.2 黑色页岩微量元素地球化学

黔北地区下寒武统底部黑色页岩样品微量元素分析结果如表2。与上地壳元素丰度相比,Mo、Sb、U、Cd的浓集系数分别为132、19、19和17,强烈富

集;V、Ba、Tl、Ni、W的浓集系数分别为9、8、5、4.7、4,中等富集;Cr、Cs、Cu、Zn、Bi等浓集系数也大于2,弱富集;而Sr和Re的浓集系数分别为0.4和0.3,强烈亏损;Co弱亏损。

3.3 黑色页岩稀土元素地球化学特征

研究样品稀土元素分析结果见表3,特征参数见表4。研究区黑色页岩中稀土元素的含量与上地壳丰度^[20]相差不大,总体趋势基本一致。

本区内稀土元素的总量较高,平均为168.35 μg/g,其中轻稀土平均在150.01 μg/g,重稀土仅为18.35 μg/g。

δEu反映Eu的异常程度。Eu属变价元素,一般情况下,Eu³⁺和其他稀土元素性质相似,但是在还原条件下部分Eu³⁺还原成Eu²⁺,因Eu²⁺碱性度与REE³⁺整体差别较大而发生分离^[21]。本区内δEu值0.64~4.04,平均为1.25。出现明显的正异常。

δCe是表征样品中Ce相对其他REE分离程度的参数,在氧化条件下Ce可呈四价而与其他三价的REE分离,在风化过程中,Ce⁴⁺在弱酸环境条件下极易水解在原地滞留下来,使淋出的溶液中贫Ce^[21]。本区内δCe值在0.58~0.92之间,平均为0.85,负异常。

表1 黔北地区下寒武统底部黑色页岩样品粘土矿物及全岩X衍射分析结果

Table 1 Results of clay mineral and total rock X-ray-diffraction of lower Cambrian black shale in the northern Guizhou Province

分析 编号	样品 编号	粘土矿物相对含量/%						全岩定量分析/%							
		K	C	I	I/S	%S	C/S	黏土总量	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	重晶石
1	QB-01	6		54	40	65		33	63	2			2		
2	QB-02	4		91	5	45		27	57		7				9
3	QB-03	1		65	34	15		33	53	2	12				
4	QB-05	10		83	7	25		10	71	4	10		5		
5	QB-06	1		72	27	30		8	78	3	6				5
6	QB-07		12	58	30	20		11	58		15		11		5
7	QB-08		12	66	22	20		35	60		3				2
8	QB-09		3	74	23	10		21	57	2	11				9
9	QB-10	9		57	34	60		26	52	4	18				
10	QB-11	2	3	68	27	20		27	52		8	4	5		4
11	QB-12	2	1	59	38	15		30	43	1	8		8	6	4
12	QB-13		15	71	14	10		52	43		5				
13	QB-19	7	15	54	24	10		35	49		5	11			
14	QB-20	4		48	48	10		26	58		16				
15	QB-21	4	3	30	63	40		45	54		1				
16	QB-24	14		42	44	55		40	44		1		7		8
17	QB-25	28	3	29	40	25		30	67		1				2
18	QB-27	7		64	29	15		23	71		6				
19	QB-32	1		79	20	5		47	51		2				
20	QB-35	30	6	8			66	8	34			5	49		4
	平均值	8	7	59	30	26		28	56	3	8	7	12	6	3

表 2a 黔北地区下寒武统底部黑色页岩样品微量元素分析结果($\mu\text{g/g}$)Table 2a Results of trace elements of lower Cambrian black shale in the northern Guizhou Province($\mu\text{g/g}$)

序号	样品编号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Nb	Mo	Cd	In
1	QB-01	19.0	2.2	10.2	3436.0	205.0	2.2	87.1	26.0	119.0	12.6	81.7	58.9	8.5	151.0	0.438	0.042
2	QB-02	13.8	1.8	9.7	484.0	104.0	16.1	152.0	93.5	232.0	11.1	64.8	63.4	8.4	94.5	0.522	0.046
3	QB-03	18.4	2.8	13.7	162.0	116.0	21.2	176.0	63.4	108.0	18.0	88.5	208.0	13.3	107.0	1.600	0.065
4	QB-05	33.6	2.2	18.9	124.0	151.0	1.8	9.2	51.7	17.5	22.5	126.0	79.8	16.8	2.5	0.051	0.036
5	QB-06	19.1	2.8	5.8	137.0	76.1	10.6	131.0	68.3	19.4	11.3	58.3	69.7	7.1	148.0	0.455	0.023
6	QB-07	88.1	3.3	16.7	134.0	98.2	19.4	78.8	70.2	104.0	22.5	163.0	196.0	13.2	19.7	0.564	0.085
7	QB-08	31.8	2.4	15.6	201.0	86.7	7.2	32.3	55.4	72.5	20.9	132.0	70.5	12.9	19.4	0.127	0.084
8	QB-09	24.2	3.9	14.4	207.0	136.0	17.2	131.0	66.1	121.0	17.2	96.3	111.0	10.7	93.4	2.620	0.057
9	QB-10	19.6	2.1	8.4	154.0	106.0	0.9	8.5	8.9	17.5	17.4	94.4	134.0	12.4	26.1	0.080	0.029
10	QB-11	44.7	2.1	13.0	134.0	85.5	16.1	94.1	74.7	158.0	16.9	111.0	553.0	11.7	39.1	2.300	0.061
11	QB-12	27.4	2.5	10.4	3420.0	161.0	19.6	487.0	117.0	1053.0	14.4	85.2	329.0	9.1	379.0	12.100	0.051
12	QB-13	58.4	3.1	14.1	167.0	108.0	24.5	49.4	61.2	152.0	23.9	154.0	248.0	14.3	2.6	0.455	0.084
13	QB-18	31.2	2.3	16.2	1076.0	127.0	1.1	57.8	14.0	29.3	24.1	155.0	25.6	13.7	66.0	0.270	0.040
14	QB-20	18.2	2.4	11.2	179.0	102.0	1.2	49.4	11.1	20.8	19.8	91.6	75.6	15.7	66.5	0.361	0.036
15	QB-21	55.1	2.6	15.5	311.0	101.0	3.0	28.5	26.8	26.6	22.4	138.0	49.2	13.4	22.7	0.188	0.069
16	QB-24	95.2	2.7	14.7	432.0	95.7	19.7	176.0	93.7	179.0	18.9	121.0	66.7	10.3	59.3	2.590	0.063
17	QB-25	37.5	2.5	14.4	607.0	118.0	3.7	117.0	38.4	107.0	19.7	84.3	89.3	14.4	97.9	0.357	0.065
18	QB-27	15.7	1.3	4.6	97.0	73.7	3.3	68.6	13.5	12.4	9.9	56.6	92.6	8.4	159.0	0.212	0.021
19	QB-32	14.3	3.1	23.6	184.0	120.0	1.7	8.4	34.4	39.4	28.4	207.0	44.2	15.3	8.7	0.144	0.098
20	QB-35	25.1	2.9	12.3	1086.0	130.0	1.7	40.1	17.9	24.7	20.1	107.0	91.2	10.3	29.8	0.138	0.029
	平均值	34.5	2.6	13.2	636.0	115.1	9.6	99.1	50.3	130.7	18.6	110.8	132.8	12.0	79.6	1.280	0.050
	上地壳丰度	20.0	1.9	10.0	70.0	44.0	12.0	21.0	17.0	63.0	18.0	95.0	300.0	13.0	0.6	0.075	0.040
	浓集系数	1.7	1.3	1.3	9.0	2.6	0.8	4.7	3.0	2.1	1.0	1.2	0.4	0.9	132.7	17.050	1.360

表 2b 黔北地区下寒武统底部黑色页岩样品微量元素分析结果($\mu\text{g/g}$)Table 2b Results of trace elements of lower Cambrian black shale in the northern Guizhou Province($\mu\text{g/g}$)

序号	样品编号	Sb	Cs	Ba	Ta	W	Re	Tl	Pb	Bi	Th	U	Zr	Hf	Rb/Sr	U/Th	V/(Ni + V)
1	QB-01	18.4	5.8	2446	0.659	3.4	0.436	2.6	31.9	0.339	8.6	39.2	170	4.7	1.4	4.6	0.98
2	QB-02	9.6	4.0	2552	0.569	3.0	0.098	2.1	47.3	0.269	7.8	45.5	140	3.6	1.0	5.8	0.76
3	QB-03	1.7	4.2	2678	0.924	4.3	0.025	3.2	31.6	0.322	13.9	72.2	293	7.7	0.4	5.2	0.48
4	QB-05	1.1	12.1	3036	1.140	3.4	0.006	0.6	11.6	0.313	12.4	4.0	275	7.4	1.6	0.3	0.93
5	QB-06	1.3	2.6	4877	0.481	5.3	0.054	4.7	21.2	0.233	5.6	92.7	112	2.7	0.8	16.6	0.51
6	QB-07	0.9	10.1	818	1.040	2.6	0.008	1.7	33.8	0.678	18.1	10.0	181	4.8	0.8	0.6	0.63
7	QB-08	0.9	7.8	754	0.964	2.3	0.029	1.3	23.5	0.383	14.1	6.6	191	5.2	1.9	0.5	0.86
8	QB-09	1.8	4.9	5478	0.802	6.6	0.069	5.1	29.6	0.258	11.1	93.1	198	5.3	0.9	8.4	0.61
9	QB-10	1.2	4.0	7129	0.889	4.0	0.012	1.9	20.1	0.227	12.8	13.1	239	6.5	0.7	1.0	0.95
10	QB-11	1.1	12.1	2656	0.918	2.3	0.032	2.0	25.2	0.473	12.9	20.7	187	5.1	0.2	1.6	0.59
11	QB-12	14.7	6.8	32275	0.685	3.5	0.700	5.9	24.8	0.272	9.0	58.2	165	4.1	0.3	6.5	0.88
12	QB-13	0.9	10.7	8555	1.100	2.2	0.006	1.1	21.6	0.423	13.9	3.9	220	6.1	0.6	0.3	0.77
13	QB-18	10.7	13.7	2788	1.050	2.7	0.192	3.4	31.7	0.474	14.0	22.6	231	6.2	6.1	1.6	0.95
14	QB-20	2.6	7.6	986	1.160	2.8	0.031	3.4	33.6	0.424	8.4	33.8	319	9.0	1.2	4.0	0.78
15	QB-21	2.7	9.8	754	1.020	2.2	0.044	4.3	18.3	0.525	14.5	22.2	235	6.3	2.8	1.5	0.92
16	QB-24	3.1	10.9	786	0.747	2.5	0.124	4.5	24.7	0.489	11.2	48.6	190	5.0	1.8	4.3	0.71
17	QB-25	2.5	5.9	6781	1.080	2.3	0.308	4.9	26.0	0.421	13.4	46.1	288	7.5	0.9	3.4	0.84
18	QB-27	2.0	2.5	2259	0.581	6.2	0.067	0.8	24.7	0.397	6.6	41.2	128	3.3	0.6	6.3	0.59
19	QB-32	1.1	13.0	1824	1.210	2.6	0.029	1.6	32.6	0.572	18.3	8.7	242	6.7	4.7	0.5	0.96
20	QB-35	7.2	6.1	14370	0.784	3.8	0.144	1.4	25.5	0.524	11.4	23.9	186	4.8	1.2	2.1	0.96
	平均值	4.3	7.7	5190	0.890	3.4	0.120	2.8	26.9	0.400	11.9	35.3	209	5.6	1.5	3.8	0.78
	上地壳丰度	0.2	3.3	640	0.850	0.8	0.450	0.6	18.0	0.160	9.5	1.8	170	4.8			
	浓集系数	19.4	2.3	8	1.050	4.2	0.270	5.1	1.5	2.510	1.3	19.6	1	1.2			

表3 黔北地区下寒武统底部黑色页岩样品稀土元素分析结果($\mu\text{g/g}$)Table 3 Results of rare earth elements of lower Cambrian black shale in the north of Guizhou Province($\mu\text{g/g}$)

序号	样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
1	QB-01	29.9	44.4	6.5	26.1	4.6	1.48	4.36	0.82	4.95	1.07	3.28	0.526	3.12	0.503	37.9
2	QB-02	30.8	49.9	6.7	27.8	5.4	1.47	5.11	0.91	5.10	1.06	3.33	0.502	3.18	0.516	38.7
3	QB-03	40.6	71.6	9.3	37.1	7.1	2.05	6.71	1.14	6.30	1.25	3.77	0.615	3.72	0.586	40.5
4	QB-05	60.6	66.6	11.7	44.4	5.8	1.38	3.71	0.80	5.69	1.40	4.79	0.896	6.01	1.020	45.9
5	QB-06	27.7	40.7	4.5	16.6	2.9	1.35	2.65	0.49	2.95	0.70	2.10	0.331	1.95	0.307	32.0
6	QB-07	44.9	78.6	9.5	35.8	6.5	1.31	5.61	0.99	5.20	0.99	3.01	0.484	3.04	0.494	28.5
7	QB-08	39.2	72.0	8.6	32.2	5.4	1.13	4.59	0.88	4.82	0.96	2.91	0.482	3.14	0.49	27.5
8	QB-09	37.7	67.1	8.3	32.9	6.4	2.44	6.07	1.11	6.20	1.27	3.71	0.598	3.55	0.567	45.8
9	QB-10	38.6	68.2	8.3	31.2	5.2	2.33	4.09	0.64	3.44	0.71	2.09	0.338	2.22	0.352	21.8
10	QB-11	37.8	68.5	7.9	30.7	5.9	1.65	5.27	0.93	5.27	1.04	3.11	0.509	3.25	0.502	31.3
11	QB-12	33.3	49.3	7.1	29.2	5.6	7.49	5.66	0.98	5.68	1.21	3.66	0.562	3.40	0.549	44.1
12	QB-13	32.1	58.1	6.8	24.9	4.2	2.37	3.72	0.68	3.76	0.77	2.43	0.425	2.79	0.438	22.2
13	QB-18	47.0	82.4	9.8	37.1	5.9	1.45	4.23	0.68	4.25	0.95	3.01	0.510	3.55	0.550	31.6
14	QB-20	52.0	89.9	10.9	38.0	4.4	0.92	3.21	0.56	3.53	0.78	2.60	0.486	3.00	0.482	25.0
15	QB-21	40.7	72.9	8.7	32.7	5.1	1.04	4.14	0.76	4.67	0.96	3.07	0.531	3.51	0.563	29.3
16	QB-24	32.9	63.0	8.2	35.2	7.6	1.54	6.88	1.21	6.26	1.22	3.47	0.526	3.40	0.513	37.6
17	QB-25	41.1	68.9	8.3	30.4	4.6	2.18	3.69	0.65	4.04	0.84	2.81	0.517	3.21	0.517	25.9
18	QB-27	30.2	50.0	4.8	17.1	2.1	0.87	2.04	0.31	1.94	0.42	1.40	0.237	1.55	0.241	16.2
19	QB-32	44.0	69.0	10.3	40.2	7.7	1.72	5.95	1.05	5.75	1.11	3.47	0.615	4.01	0.670	29.9
20	QB-35	35.1	58.1	7.0	26.3	3.7	3.47	3.62	0.61	3.88	0.86	2.80	0.504	3.21	0.541	29.5
	平均值	38.8	64.5	8.2	31.3	5.3	1.98	4.57	0.81	4.68	0.98	3.04	0.510	3.24	0.520	32.1
	上地壳丰度	33.0	64.0	7.3	28.0	5.0	1.12	4.40	0.67	4.00	0.80	2.30	0.340	2.20	0.330	18.0

表4 黔北地区下寒武统底部黑色页岩稀土元素特征参数

Table 4 REE characteristic parameters of lower Cambrian black shale in the north of Guizhou Province

样品编号	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	La_N/Yb_N	δEu	δCe
QB-01	131.59	112.96	18.63	6.06	5.57	0.99	0.75
QB-02	141.74	122.03	19.71	6.19	5.63	0.85	0.81
QB-03	191.85	167.76	24.09	6.96	6.34	0.89	0.87
QB-05	214.82	190.50	24.32	7.83	5.86	0.85	0.58
QB-06	105.22	93.73	11.49	8.16	8.26	1.48	0.81
QB-07	196.43	176.61	19.82	8.91	8.58	0.65	0.89
QB-08	176.79	158.52	18.27	8.68	7.26	0.67	0.92
QB-09	177.86	154.78	23.08	6.71	6.17	1.18	0.89
QB-10	167.79	153.91	13.88	11.09	10.11	1.48	0.89
QB-11	172.34	152.46	19.88	7.67	6.76	0.89	0.92
QB-12	153.65	131.95	21.70	6.08	5.69	4.04	0.75
QB-13	143.43	128.42	15.01	8.56	6.69	1.79	0.92
QB-18	201.38	183.64	17.74	10.35	7.70	0.84	0.89
QB-20	210.76	196.11	14.64	13.39	10.08	0.72	0.88
QB-21	179.31	161.11	18.20	8.85	6.74	0.67	0.90
QB-24	171.89	148.41	23.48	6.32	5.62	0.64	0.91
QB-25	171.71	155.43	16.28	9.55	7.44	1.57	0.87
QB-27	113.27	105.13	8.14	12.91	11.33	1.26	0.92
QB-32	195.50	172.87	22.63	7.64	6.38	0.75	0.76
QB-35	149.70	133.68	16.02	8.35	6.36	2.86	0.86
平均值	168.35	150.01	18.35	8.51	7.23	1.25	0.85

4 讨论

4.1 沉积环境条件

从微量元素的分析结果中可以看出 黔北地区下寒武统底部黑色页岩微量元素中以亲硫元素 (Sb、Cd、Cu、Zn、Tl) 为主, 亲氧元素 Sr 强烈亏损, 因而可以看出当时还原环境占主导地位。特别注意的是 U 元素, 其浓集系数为 3.98, 有机质是 U 的强吸附剂, 地层中的有机质含量一般与 U 成正相关^[22], 说明本区内页岩的有机质含量比较高, 而有机质转化的重要条件是缺氧的还原条件。另外, 据研究表明^[23] 反映黑色页岩形成特定环境的元素共生组合一般 U—Cu—Pb—Zn—Cd—Ag—Au—V—Mo—Ni—As—Bi—Sb, 本次测试结果基本与之一致。以上分析可以看出 黔北地区下寒武统底部的黑色页岩形成于低能还原环境中。

Wingnall 给出了沉积环境 $w_v / (w_{Ni} + w_v)$ 的标志值^[24], $w_v / (w_{Ni} + w_v)$ 为 1 ~ 0.83 时为静海环境, 0.83 ~ 0.57 时为缺氧环境, 0.57 ~ 0.46 为氧化环境, < 0.46 为更氧化环境, 说明地层中 $w_v / (w_{Ni} + w_v)$ 是判断氧化还原环境的一个地球化学指标。黔北下寒武统底部黑色岩系样品中 $w_v / (w_{Ni} + w_v)$ 最高为 0.98, 最低为 0.48, 平均为 0.78, 显示为静海缺氧环境, 有利于黑色页岩的生成。

铀在表生作用中非常活泼, 容易氧化成较易溶解的铀酰络离子, 在水的作用下发生迁移, 所以在低能环境下铀较易富集, 含量较高。而钍在自然界中仅作为不易溶解的四价离子存在, 表生条件下以机械迁移为主, 并能在残积物、冲积物和滨海沉积区发生富集, 较易存在于高能条件下。因此, U/Th 比值能反映地

球化学沉积环境, 且海相地层 U/Th 比值一般大于 0.2^[25]。本区内, U/Th 值最低为 0.28, 最高为 16.64, 平均在 3.76 (表 2b), 比值特别高, 是典型的还原环境。

从微量元素的分析来看 黔北地区下寒武统底部黑色岩系形成于特定的成岩环境中, 为了进一步探究这种特定的成岩环境, 我们对该区页岩的稀土元素进行球粒陨石标准化和北美页岩标准化。通过对相关参数的分析来探讨黔北地区下寒武统黑色页岩的地球化学特征及其沉积环境。已有的研究^[26] 表明, 泥质岩中的稀土含量在沉积岩中最高 (海洋锰结核和磷酸盐除外)。世界不同地区后太古代页岩, 稀土元素地球化学参数很相近, 稀土元素分布模式互相平行。本文所研究样品其球粒陨石^[27] 和北美页岩^[28] 标准化后的稀土分布模式如图 2 和图 3。

稀土元素的总量对于判断岩石的原岩特征和区分岩石类型有重要意义。从其球粒陨石标准化后的配分曲线上也可以看出, 曲线为右倾的 L 型, 轻稀土明显富集, 重稀土段趋于平缓 (图 2), 这与典型的后太古代页岩的稀土组成特征基本一致。究其原因, 沉积作用过程中所发生的稀土元素分离起主要作用的是稀土元素的水合和吸附络合物的溶解性, 轻稀土较易被风化形成的黏土物质吸附而富集在悬浮物中, 而页岩则比较容易富集这种黏土物质, 于是就出现了这种轻稀土明显富集的特点。轻重稀土的比值能较好的反映 REE 的分异程度, 本区内轻重稀土比值大, 一般在 6 ~ 12 之间, 显示为壳幔源物质沉积特征。

4.2 深部物源的影响

研究区内 20 个样品中八个样品的 δEu 值大于 1, QB-12 的值达到 4.04 之多, 平均为 1.25。

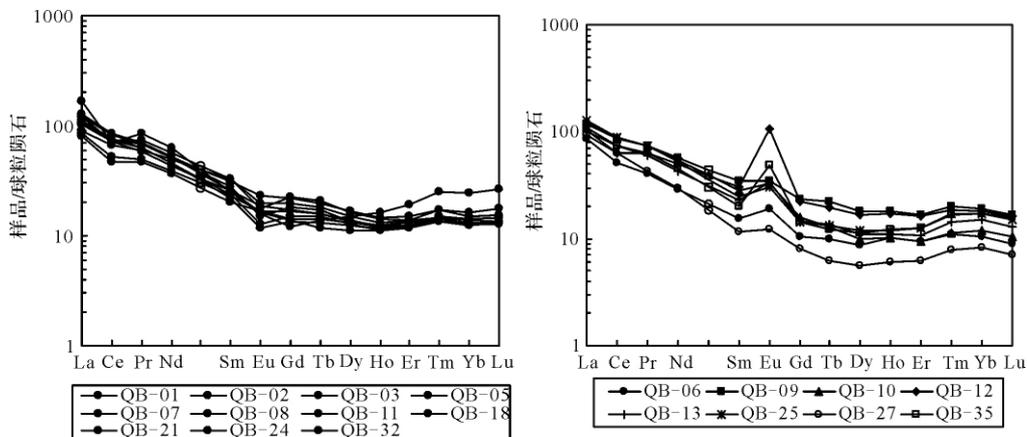


图 2 黔北地区下寒武统底部黑色页岩球粒陨石标准化分布模式

Fig. 2 Chondrite normalized REE patterns of lower Cambrian black shale in the north of Guizhou Province

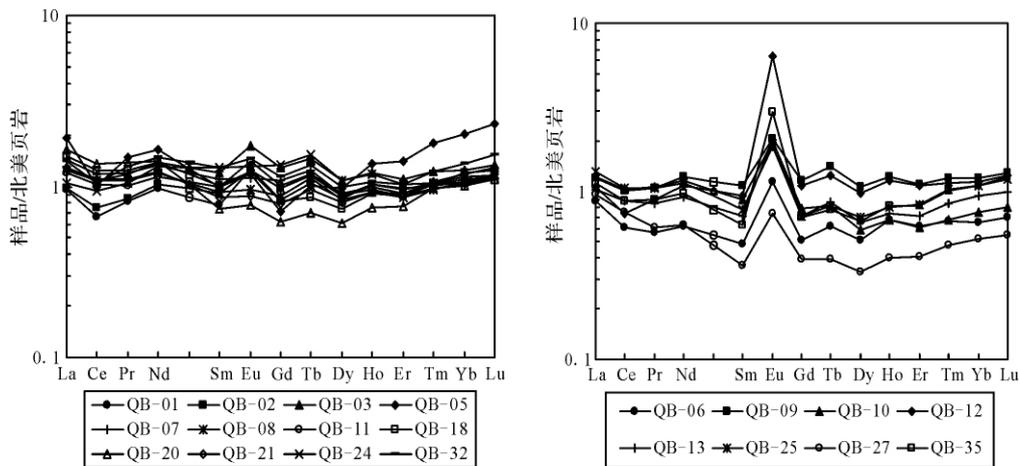


图 3 黔北地区下寒武统底部黑色页岩北美页岩标准化分布模式图

Fig. 3 NASC normalized REE patterns of lower Cambrian black shale in the north of Guizhou Province

Dulski (1994) 认为通过 ICP—MS 所测得正 Eu 异常应该考虑到 Ba 元素的干扰。由此,我们做出 δEu 随 Ba 元素含量变化的关系图。由图 4 可见, δEu 与 Ba 元素含量成正相关关系,拟合度为 0.944,相关性较好,还可以看出 Ba 元素含量在 3 000 $\mu\text{g/g}$ 以下时 δEu 随 Ba 变化不显著,且此时 δEu 的值在 1.0 以下,随着 Ba 的不断增大, δEu 与之成正相关的关系较明显。

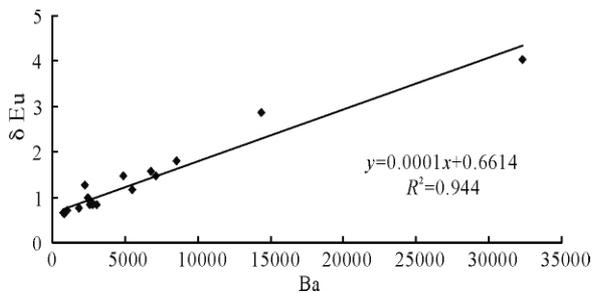


图 4 δEu 随 Ba 元素含量变化

Fig. 4 Diagram of correlation between δEu and Ba

高异常的 Eu 值除了受到实验中钇元素的影响外,笔者认为这可能与深部热液活动有关。Fryer 等提出正 Eu 异常的产生是还原条件下 Eu^{3+} 转变成 Eu^{2+} 所致,然而,研究证实是在氢氧化铁沉淀的环境中 Eu^{3+} 是主要的;同时,一般的海水也不具备促使还原的值。因此太古代的条带状铁硅质建造的异常被解释为强还原的热液流体注入或大洋玄武岩经受海底蚀变而继承了来源区的特征。本研究区内正 Eu 异常反映了深部热液活动的影响。因此稀土元素地球化学可以为热液活动的存在提供一定的依据。

另外,Mo、Sb、U、Cd、V、Ba、Tl、Ni、W、Cr、Cs、Cu、Zn、Bi 等的高富集和 Sr、Re 的强烈亏损也可能与热液活动有关^[29,30]。黔北下寒武统牛蹄塘组黑色页岩中元素的相对富集和亏损也表明,在沉积的过程中可能由于深部热液的活动混入了这些元素。

Co/Zn 比值可以作为区分热液来源和正常自生来源的敏感指标^[31]。热液来源的 Co/Zn 比值较低,平均为 0.15;而其他铁锰结核一般在 2.5。研究区内 Co/Zn 比值平均为 0.12,显示热液成因特点。

Th/Sc 和 Th/U 比值平均分别为 0.93 和 0.86,这与上地壳中相应元素的比值(1 和 3.8)以及地壳中黏土岩(1 和 3.4)的平均比值^[32]相比明显偏低,这也说明了来自深部的铁镁物质物源的存在。

4.3 源区构造背景

4.3.1 物源分析

黔北地区下寒武统黑色页岩的化学组分中石英含量在 34%~78% 之间,平均含量为 56%,且斜长石的含量明显大于钾长石,说明沉积物来自富钠长石的母岩区,而钠长石是酸性岩的主要矿物组合,这说明了该区物源的酸性岩性质。但是由于有些样品石英的含量比较低,处在基性岩的范畴内,说明其受深部热液活动的影响而具有基性岩的性质,也说明了母岩的混合成因。

从微量元素上看,Condie^[33]提出了 Th—Hf—Co 物源判别图解。黔北地区样品投点图母岩处于长英质火成岩区和页岩区(如图 5 所示),说明该区既具有被动大陆边缘的物源特征又具有长英质岛弧的物源特征。

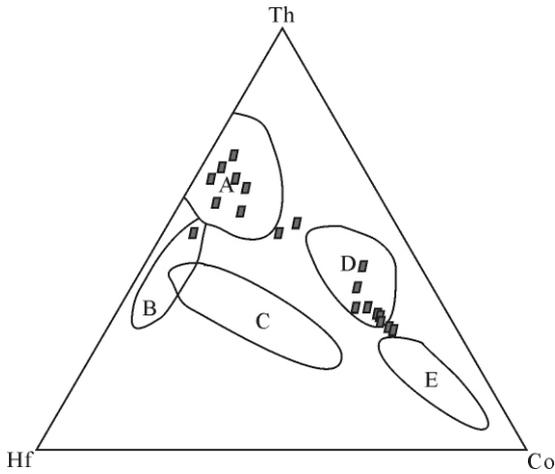


图 5 稀土 Th—Hf—Co 物源判别图解(据 Condie^[33])

A. 长英质火成岩; B. 板内石英岩; C. 长石砂岩;
D. 页岩(平均地壳); E. 杂砂岩(岛弧)

Fig. 5 Th-Hf-Co provenance discrimination diagram(after Condie , 1989)

A. felsic volcanic rocks; B. quartzite from cratonic basin; C. feldspar sandstones; D. shale (average upper continental crust); E. graywackes (arcs)

稀土元素的总量对于判断岩石的原岩特征和区分岩石类型上有重要意义。稀土元素的分布模式是指示盆地沉积源区性质的很好的指标^[34, 35]。图 2 中各样品的稀土分布模式总体平行呈一致变化,有些样品出现异常,说明研究区的黑色页岩具有相对类似的物源,深部热液活动提供了丰富的物质来源。

沉积岩对其母岩的稀土元素具有很强的继承性,其中表征 Eu 异常程度的 δEu 在稀土元素地球化学参数中占有较重要的地位,可作为鉴别母岩物质来源的重要参数。若母岩为花岗岩,沉积岩多具负 Eu 异常;若母岩为玄武岩,沉积岩多为无 Eu 异常^[36]。研究区内 δEu 变化较大,从 0.64 到 4.04,平均为 1.25,说明该区黑色页岩的母岩具有混合成因的性质。

为进一步探讨这种关系,我们以 $w_{(\Sigma REE)}$ 为横坐标、 $w_{(La)}/w_{(Yb)}$ 为纵坐标,采用对数坐标系成图并与已知母岩的落点区域对比(图 6),结果显示样品多数落于沉积岩、花岗岩和碱性玄武岩的交汇区附近,反映了母岩岩性的混合成因。

4.3.2 构造环境分析

研究表明,碎屑沉积岩地球化学特征在很大程度上受到其所处构造背景的控制,因此不同构造背景下形成的碎屑岩具有不同的地球化学特征。

Roser 等^[38]提出的 K_2O/Na_2O-SiO_2 构造背景判别图解。黔北地区下寒武统黑色页岩样品投点图

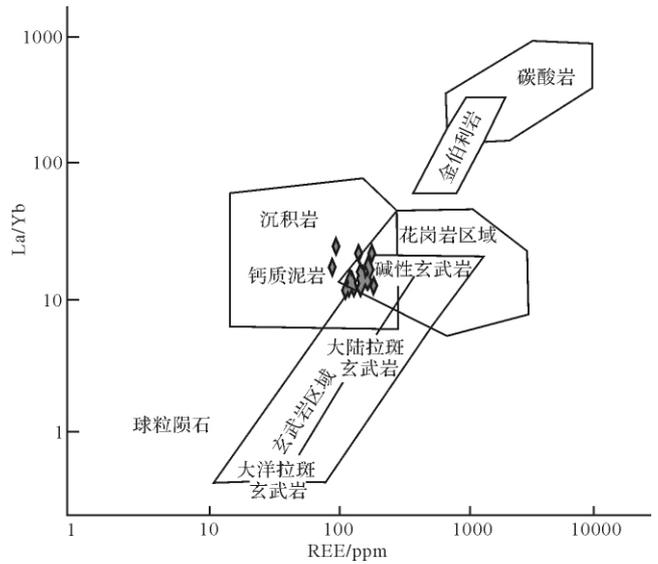


图 6 研究区页岩 $w_{(REE)}-w_{(La)}/w_{(Yb)}$ 图解

(底图据 Allegre 等^[36])

Fig. 6 $w_{(REE)}$ vs $w_{(La)}/w_{(Yb)}$ diagram of black shale in the study area (based on Allegre , et al. , 1974)

(图 7) 可以看出,本区内构造背景主要以被动大陆边缘为主,兼有活动大陆边缘和大陆岛弧的构造背景的性质。这种多相的构造背景与上文分析的深部热液活动的影响是密切相关的。

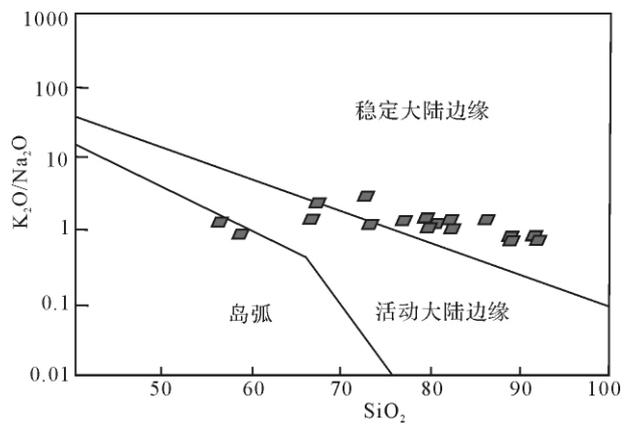


图 7 $SiO_2-(K_2O/Na_2O)$ 构造背景判别图解

(据 Roser 等^[38])

Fig. 7 $SiO_2-(K_2O/Na_2O)$ tectonic discrimination diagram (after Roser , et al. , 1988)

一些微量元素如 Th、Sc、Zr、Hf 等因为有很好的稳定性^[39],所以他们之间的组合特征也能够用于分析沉积盆地的构造背景。Bhatia^[40]研究得出对于大洋岛弧构造背景,沉积岩中的 La/Th 为 6.7 ± 2.0 ,而

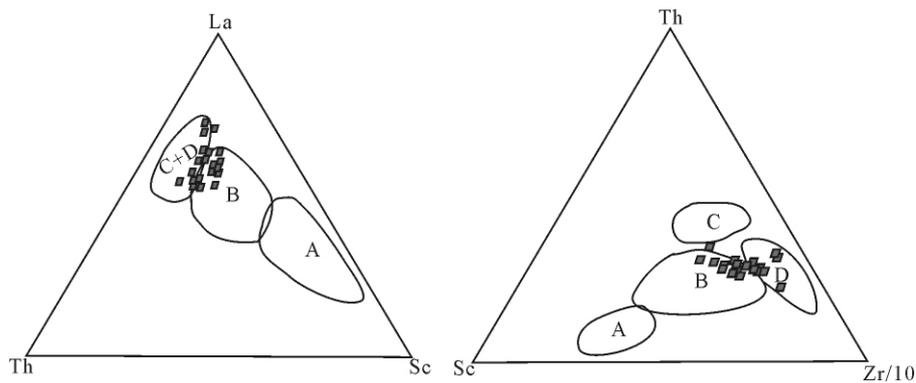


图 8 La—Th—Sc 和 Th—Sc—Zr/10 构造背景判别图解(据 Bhatia 等^[41])

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

Fig. 8 La—Th—Sc and Th—Sc—Zr/10 tectonic discrimination diagram (after Bhatia, *et al.*, 1986)

A. oceanic island arc; B. continental island arc; C. active continental margin; D. passive continental margin

Hf 的含量约为 $2 \mu\text{g/g}$; 对于大陆岛弧构造背景, La/Th 的值约为 4.5, Hf 的含量约为 $4 \sim 5 \mu\text{g/g}$; 对于大陆边缘构造背景(包括活动大陆边缘和被动大陆边缘), La/Th 约为 2.6, Hf 的含量一般大于 $5 \mu\text{g/g}$ 。本次研究样品的 La/Th 值 2.31 ~ 4.97 之间, Hf 的含量介于 $2.72 \sim 7.70 \mu\text{g/g}$ 之间, 说明黔北地区黑色页岩的物源区有大陆边缘和大陆岛弧的构造背景。另外, 在微量元素 La—Th—Sc 和 Th—Sc—Zr/10 判别图解上(图 8, Bhatia, *et al.*, 1986) 也得到了相似的结论。

Bhatia 1985 年^[37] 曾以澳大利亚东部的资料为基础, 总结了判断沉积盆地构造环境的稀土元素特征(表 5), 认为来自大洋岛弧构造背景、源区为未切割的岩浆弧的沉积物, 具有低的稀土总量、弱的轻稀土富集和基本无负铕异常的特征; 来自大陆岛弧构造背景、源区为切割岩浆弧的沉积物, 有较高的稀土总量和中等的轻稀土富集、弱的 Eu 负异常; 而来自安第斯型活动大陆边缘、被动大陆边缘、地台和克拉通内构造高地的沉积物, 有高的稀土总量、轻稀土富集和明显的负 Eu 异常。通过以上比较可以看出, 本区内样品参数多数落在被动大陆边缘的构造背景范围

内, 但是 Ce、 ΣREE 和 δEu 却与大陆岛弧和活动大陆边缘的构造背景较为接近, 因此可以判断黔北地区以被动大陆边缘的构造背景为主。而存在的大陆岛弧和活动大陆边缘的构造背景, 我们可以用深部物源的影响作为解释。早寒武世早期, 南方大陆的拉张活动达到高潮, 海底扩张导致地幔深部物质上涌, 使得该区黑色页岩在地球化学组成上保留了大陆岛弧构造背景的性质, 这也可以从微量元素的分析得到论证。

赵振华等研究^[42] 认为不同构造环境的沉积岩中 Eu 异常表现不同: 被动大陆边缘的沉积物是由多次再循环的沉积碎屑、古老侵入岩及变质岩组成, 他们的稀土组成与太古宙之后页岩的平均值相似, 富轻稀土, Eu 为负异常; 相反, 活动大陆边缘沉积物的源区主要为分异程度低的火山岩, 其特点是相对富重稀土, 无 Eu 亏损。本区内页岩样品的 δEu 除了部分样品因为受到深部物源的影响, 其他大部分为负异常, Eu 特征与被动大陆边缘的沉积物 Eu 的特征一致, 说明黔北地区下寒武统底部的黑色页岩有被动大陆边缘构造环境。

从研究区的地质背景上看, 贵州统一的大陆地壳

表 5 黑色页岩样品均值和不同构造背景沉积盆地杂砂岩的 REE 特征比较

Table 5 REE characteristics of sample mean of black shale in the study area and graywackes from different tectonic settings

构造背景	源区类型	$w_{(\text{La})}$	$w_{(\text{Ce})}$	$w_{(\Sigma\text{REE})}$	$w_{(\text{La})}/w_{(\text{Yb})}$	$w_{(\text{LREE})}/w_{(\text{HREE})}$	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	Eu/Eu^*
大洋岛弧	未切割的岩浆弧	8 + 1.7	19 + 3.7	58 + 10	4.2 + 1.3	3.8 + 0.9	2.8 + 0.9	1.04 + 0.11
大陆岛弧	切割的岩浆弧	27 + 4.5	59 + 8.8	146 + 20	11.0 + 3.6	7.7 + 1.7	7.5 + 2.5	0.79 + 0.13
安第斯型大陆边缘	基底隆起	37	78	186	12.5	9.1	8.5	0.6
被动大陆边缘	克拉通内构造高地	39	85	210	15.9	8.5	10.8	0.56
	样品均值	38.8	64.4	168.4	14.4	8.5	8.4	1.2

注: 单位为 $\mu\text{g/g}$

是从中元古宙晚期到早古生代末 通过大陆边缘活动带的向洋迁移实现的。早古生代早期,大陆边缘及稳定大陆地区浅海范围内的沉积活动兼而有之^[16]。这为上述分析提供了依据。

5 结论

黔北地区下寒武统底部黑色页岩样品主要以石英和黏土矿物为主,石英含量平均为 55.75%,黏土矿物含量平均为 28.35%,以伊利石为主,副矿物主要是黄铁矿。研究区黑色页岩样品的的稀土总量较高,轻重稀土分异明显,轻稀土明显富集, Eu 正异常明显, Ce 出现负异常。

黔北地区下寒武统底部黑色岩系样品中 $w_V / (w_{Ni} + w_V)$ 最高为 0.98,最低为 0.48,平均为 0.78,显示为静海缺氧环境; U/Th 比值平均在 3.76 左右,比值特别高,是典型的还原环境;样品的 Ce 亏损的出现反映了原岩沉积时的环境是干燥气候的环境。这些都说明了研究区的黑色页岩形成的沉积环境是静海缺氧的还原环境。

研究区黑色页岩样品中 Mo、Sb、U、Cd、V、Ba、Tl、Ni、W、Cr、Cs、Cu、Zn、Bi 等的高富集和 Sr、Re 的强烈亏损以及正 Eu 异常和较低的 Co/Zn 比值均反映了黔北地区下寒武统底部黑色页岩受到深部热液活动的影响。

根据主、微量元素和稀土元素组合及比值特征可以看出黔北地区下寒武统底部黑色页岩的源岩具有花岗岩、沉积岩和玄武岩等多成因性质;源区构造背景以被动大陆边缘的构造背景为主,因为受到深部热液活动的影响,也显示出大陆岛弧的构造背景的特征。

参考文献 (References)

- 杨剑,易发成,侯兰杰. 黔北地区下寒武统黑色岩系形成环境和地球化学研究[J]. 矿物学报, 2004, 24(3): 286-291 [Yang Jian, Yi Facheng, Hou Lanjie. Genesis and petrogeochemistry characteristics of lower Cambrian black shale series in northern Guizhou[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(3): 286-291]
- 陈南生,杨秀珍,刘德汉,等. 我国南方下寒武统黑色岩系及其中的层状矿床[J]. 矿物地质, 1982, 2: 39-51 [Chen Nansheng, Yang Xiuzhen, Liu Dehan, et al. Lower Cambrian black argillaceous and arenaceous rock series in the south China and its association stratiform deposits[J]. Mineral Deposit, 1982, 2: 39-51]
- 叶杰,范德廉. 黑色岩系型矿床的形成作用及其在我国的产出特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2000, 19(2): 95-102 [Ye Jie, Fan Delian. Characteristics and mineralization of ore deposits related to black shale series[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2000, 19(2): 95-102]
- 李胜荣,高振敏. 湘黔寒武系底部黑色岩系贵金属元素来源示踪[J]. 中国科学: D 辑, 2000, 30(2): 169-174 [Li Shengrong, Gao Zhenmin. Precious metal's origin of black rock series of lower Cambrian in Hunan and Guizhou[J]. Science in China: Series D, 2000, 30(2): 169-174]
- 王兰生,邹春燕,郑平,等. 四川盆地古生界存在页岩气的地球化学依据[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 59-62 [Wang Lansheng, Zou Chunyan, Zheng Ping, et al. Geochemical evidence of shale gas existed in the Lower Paleozoic Sichuan basin[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 59-62]
- 于炳松,陈建强,刘兴武,等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面下寒武统底部硅质岩微量元素和稀土元素地球化学及其沉积背景[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 59-64 [Yu Bingsong, Chen Jianqiang, Liu Xingwu, et al. Rare earth and trace element patterns in bedded-cherts from the bottom of the Lower Cambrian in the Northern Tarim Basin, Northwest China: implication for depositional environments[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 59-64]
- 于炳松,裘愉卓,李娟. 扬子地块西南部晚元古至三叠纪沉积地球化学演化[J]. 沉积学报, 1997, 15(4): 127-133 [Yu Bingsong, Qiu Yuzhuo, Li Juan. Sedimentary geochemical evolution from Upper Proterozoic to Triassic in southwest Yangtze Massif[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(4): 127-133]
- 陈德潜. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金地质出版社, 1990: 45-89 [Chen Deqian. Geochemistry of Practical REE [M]. Beijing: Metallurgy Geological Publishing House, 1990: 45-89]
- 王中刚,于学元. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 247 [Wang Zhonggang, Yu Xueyuan. Geochemistry of Practical REE [M]. Beijing: Science Press, 1989: 247]
- 刘士林,刘蕴华,林轲,等. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(3): 454-455 [Liu Shilin, Liu Yunhua, Lin Ke, et al. REE geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Neogene, Nanpu Sag, Bohai Basin[J]. Geoscience, 2006, 20(3): 454-455]
- 杨国臣,于炳松,陈建强,等. 川西前陆盆地上侏罗统一白垩系泥质岩稀土元素地球化学[J]. 现代地质, 2010, 24(1): 146-148 [Yang Guochen, Yu Bingsong, Chen Jianqiang, et al. Geochemical research on rare earth elements of argillaceous rocks of Upper-Jurassic and Cretaceous in the western Sichuan foreland basin[J]. Geoscience, 2010, 24(1): 146-148]
- 裘愉卓,于炳松,李娟. 扬子地块西南部地球化学异常层与地壳演化和成矿作用[J]. 矿物学报, 1997, 17(4): 369-375 [Qiu Yuzhou, Yu Bingsong, Li Juan. Geochemically abnormal horizons and their relations to crustal evolution and mineralization in Southwest Yangtze massif[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1997, 17(4): 369-375]
- 范德廉,叶杰,杨瑞英,等. 扬子地台前寒武—寒武纪界限附近的地质事件和成矿作用[J]. 沉积学报, 1987, 5(3): 81-95 [Fan Delian, Ye Jie, Yang Ruiying, et al. The geological events and mineralization near the boundary line of Precambrian and Cambrian in Yangtze Platform[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1987, 5(3): 81-

- 95]
- 14 李胜荣,高振敏. 湘黔地区牛蹄塘组黑色岩系稀土特征——兼论海相热水沉积岩稀土模式[J]. 矿物学报, 1995, 15(2): 225-229 [Li Shengrong, Gao Zhenming. REE character of black rock series of Niutitang Formation in Hunan and Guizhou: simultaneous discussion on the REE model of hydrothermal rocks in sea facies [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1995, 15(2): 225-229]
 - 15 陈兰,钟宏,胡瑞忠,等. 湘黔地区早寒武世黑色页岩有机碳同位素组成变化及其意义[J]. 矿物岩石, 2006, 26(1): 81-85 [Chen Lan, Zhong Hong, Hu Ruizhong, et al. Composition of organic carbon isotope of early Cambrian black shale in the Xiang-Qian area and its significances [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2006, 26(1): 81-85]
 - 16 贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[Z]. 北京:地质出版社, 1987:49-60 [Bureau of Geology and Mineral Resources in Guizhou Province. Regional Geology of Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 49-60]
 - 17 冯增昭,彭勇民,金振奎,等. 中国南方寒武纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 2001, 3(1): 1-14 [Feng Zengzhao, Peng Yongmin, Jin Zhenkui, et al. Lithofacies paleogeography of the Cambrian in South China [J]. Journal of Paleogeography, 2001, 3(1): 1-14]
 - 18 刘宝瑁,周铭魁,王汝植. 中国南方早古生代古地理轮廓及构造演化[R]. 中国地质科学院院报, 1990: 96-98 [Liu Baojun, Zhou Mingkui, Wang Ruzhi. Early Palaeozoic palaeogeography and tectonic evolution of South China [R]. China Geological Academy of Sciences Report, 1990: 96-98]
 - 19 蒲心纯,周浩达,王熙林,等. 中国南方寒武系岩相古地理与成矿作用[M]. 北京:地质出版社, 1993:61-160 [Pu Xinchun, Zhou Haoda, Wang Xilin, et al. Mineralization and Lithofacies Paleogeography of the Cambrian in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 61-160]
 - 20 鄢明才,迟清华,顾铁新,等. 中国东部地壳元素丰度与岩石平均化学组成研究[J]. 物探与化探, 1997, 21(6): 451 [Yan Mingcai, Chi Qinghua, Gu Tiexin, et al. Chemical compositions of continental crust and rocks in eastern China [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 21(6): 451]
 - 21 韩吟文,马振东. 地球化学[M]. 北京:地质出版社, 2003:196-202 [HanYinwen, Ma Zhendong. Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 196-202]
 - 22 石玉春,阎明. 四川盆地华莹山地层剖面放射性特征及其找油气意义[J]. 南京大学学报:地球科学版, 1993, 5(2): 254-257 [ShiYuchun, Yan Ming. Radioactive features and oil significance of Huaying profile in Sichuan basin [J]. Journal of Nanjing University: the Earth Science Edition, 1993, 5(2): 254-257]
 - 23 蒋敬业. 应用地球化学[M]. 中国地质大学出版社, 2006:18-19 [Jiang Jingye. Applied Geochemistry [M]. China University of Geosciences Press, 2006: 18-19]
 - 24 Wingnall P B. Black Shales [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994: 45-89
 - 25 李昌年. 微量元素及其在岩石学中的应用[M]. 武汉:武汉地质学院出版社, 1953:26-77 [Li Changnian. Trace Elements and Its Application in Petrology [M]. Wuhan: Wuhan Geological Institute Publishing House, 1953: 26-77]
 - 26 Haskin L A, Haskin M A, Pry F A, et al. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths [C] // Abrens L H. Origin and Distribution of the Elements Pergamon, Oxford, 1968: 889-912
 - 27 Haskin M A, Haskin L A. Rare earth in European shales: a redetermination [J]. Science, 1966, 154: 507-509
 - 28 Taylor S R. Geochemistry of loess, continental crustal composition and crustal modal ages [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47: 1897-1904
 - 29 Micjael Steiner, et al. Submarine-hydrothermal exhalative ore layers in black shales from South China and associated fossils-insights into a Lower Cambrian facies and bio-evolution [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2001, 169: 165-191
 - 30 王益友,郭文莹,张国栋. 几种地化标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报, 1979, 7(2): 51-60 [Wang Yiyou, Guo Wenyong, Zhang Guodong. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jinhu Depression, Jiangsu Province [J]. Journal of Tongji University, 1979, 7(2): 51-60]
 - 31 Toth J R. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron [J]. Geological Society of American Bulletin, 1980, 91: 44-54
 - 32 中国科学院地球化学研究所. 简明地球化学手册[M]. 北京:科学出版社, 1977:63-72 [Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. Concise Geochemical Manual [M]. Beijing: Science Press, 1977: 63-72]
 - 33 Condie K C. Geochemical Changes in Basalts and Andesites Across the Archean-Proterozoic Boundary: Identification and Significance [J]. Lithos, 1989, 23: 1-18
 - 34 McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. Reviews in Mineralogy, 1989, 21: 169-200
 - 35 McLennan S M, Hemming S R, Taylor S R, et al. Early Proterozoic crustal evolution: geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North American [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 1153-1177
 - 36 刘英俊,曹励明. 元素地球化学导论[M]. 北京:地质出版社, 1987:34-56 [Liu Yingjun, Cao Liming. Element Geochemical Introduction [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 34-56]
 - 37 Bhatia M R. Rare earth elements geochemistry of Australian Paleozoic graywacks and mudstones: provenance and tectonic control [J]. Sedimentary Geology, 1985, 45: 97-113
 - 38 Roser B, Korsch R. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J]. Chemical Geology, 1988, 67(1-2): 119-139
 - 39 MacLean W H, Barrert T J. Lithogeochemical techniques using immobile elements [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1993, 48: 109-133
 - 40 Bhatia M R, Taylor S R. Trace-element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia [J]. Chemical Geology, 1981, 33(1/2): 115-125

- 41 Bhatia M R , Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basin [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology ,1986 ,92(2) : 181-193
- 42 赵振华. 锗地球化学特征的控制因素 [J]. 南京大学学报: 地球科学版 ,1993 ,5(2) : 271 [Zhao Zhenhua. Geochemistry control factors of Ge [J]. Journal of Nanjing University: the Earth Science Edition , 1993 ,5(2) : 271]

Depositional Setting and Tectonic Background Analysis on Lower Cambrian Black Shales in the North of Guizhou Province

LI Juan¹ YU Bing-song¹ GUO Feng²

(1. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources , China University of Geosciences , Beijing 100083;

2. Engineering ,Computing and Mathematics Faculty , University of Western Australia , Western Australia , 6009)

Abstract: In order to discuss depositional setting and its tectonic background of the black shale and on the base of the researched 20 profiles , we chose 20 samples collected from bottom of lower Cambrian in the north of Guizhou Province to test and analyze clay minerals , X-ray diffraction of the rock minerals and trace elements (including REE) . Current study shows that the main minerals are quartz whose average content are 55.75% , and clay minerals whose average content are 28.35% , Among which , the average content of illite is 59% and the main accessory mineral is pyrite in the bottom of lower Cambrian in the north of Guizhou Province; Σ REE is very high and the differentiation between LREE and HREE is distinct which LREE is enriched and Eu is positive anomaly and Ce is negative anomaly; the average ratio of $W_V / (W_{Ni} + W_V)$ and U/Th is respectively 0.78 and 3.76 and the depleted Ce together reflect that Black shale in the north of Guizhou Province forms in reduction environment with stable crust , transgression sea climax and open sea area; the enrichment of trace elements Mo , Sb , U , Cd , V , Ba , Tl , Ni , W , Cr , Cs , Cu , Zn , Bi , strongly depleted Sr , Re , positive Eu anomaly and the lower Co/Zn ratio of the Black shale in the north of Guizhou Province are most likely due to a hydrothermal input; . By the contrast of major elements , trace elements and REE parameters , a conclusion can drawn that in research areas source rocks are mainly sedimentary rocks and granitic rocks with a few locally-involved basalt components , the tectonic setting is mainly passive continental margin and partly continental island arc because of hydrothermal input.

Key words: black shale; trace elements; REE; depositional setting; tectonic setting