

## 黔东南州下寒武统黑色页岩稀土元素地球化学特征

侯东壮<sup>1,2</sup>, 吴湘滨<sup>1,2</sup>, 刘江龙<sup>1,2</sup>, 吴德华<sup>1,2,3</sup>, 葛丽萍<sup>1,2</sup>

- (1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
3. 湖南城市学院 城市建设系, 益阳 413000)

**摘要:** 采用等离子质谱仪(ICP-MS)对三穗和黄平下寒武统斜坡相黑色页岩稀土元素含量进行分析。结果表明: 稀土总量为  $68.28 \times 10^{-6}$ ~ $252.00 \times 10^{-6}$ , 平均含量为  $133.16 \times 10^{-6}$ ;  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  的比值是 2.38~5.70, 轻稀土元素较重稀土元素富集。 $\delta\text{Eu}=0.49\sim0.75$ , 推测沉积温度低于 250 °C;  $\delta\text{Ce}=0.34\sim0.85$ , 反映岩石是在相对缺氧的海水环境条件下沉积。岩石(La/Sm)<sub>N</sub>的比值是 1.77~3.31, 代表有地下深部物质加入。黑色页岩稀土的球粒陨石配分曲线为向右倾斜, 而其北美页岩组合样标准化曲线明显呈近于水平或左倾。结合 La/Ce 和 La/Yb-REE 判别图解, 推断黔东南州黑色页岩形成于一种干燥缺氧较深浅海环境, 并在形成过程中有热液参与。

**关键词:** 稀土元素; 地球化学特征; 黑色页岩; 下寒武统; 黔东南州

中图分类号: P595; O614.33

文献标志码: A

## Geochemical characteristics of rare earth elements in Lower Cambrian black shale in Southeast Qian

HOU Dong-zhuang<sup>1</sup>, WU Xiang-bin<sup>1,2</sup>, LIU Jiang-long<sup>1,2</sup>, WU De-hua<sup>1,2,3</sup>, GE Li-ping<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallogenesis Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Department of Urban Construction, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

**Abstract:** The abundances of rare earth elements (REE) of the black shale on the slope facies from Lower Cambrian in Sansui and Huangping were measured by using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results show that the total REE content is  $68.28 \times 10^{-6}$ ~ $252.00 \times 10^{-6}$ , the average one is  $133.16 \times 10^{-6}$ ; the ratio of  $\Sigma\text{LREE}$  to  $\Sigma\text{HREE}$  is 2.38~5.70, which shows that LREE are relatively more intensive than HREE.  $\delta\text{Eu}=0.49\sim0.75$ , which shows that the deposition temperature is below 250 °C.  $\delta\text{Ce}=0.34\sim0.85$ , which reflects that a rock deposits under the condition of relatively hypoxic sea. The ratio of rock (La/Sm)<sub>N</sub> is between 1.77 and 3.31, which represents that it has added with the materials from deep resource. The chondrite normalized patterns of black shale incline to the right, the North American shale normalized REE patterns of siliceous rocks are nearly flat or left. Combined with the discrimination diagrams of La/Ce and La/Yb-REE, the black shale of Southeast Qian formed in a dry, hypoxia and shallow sea, with the participation of some hydrothermal fluids in the formation process.

**Key words:** rare earth element; geochemical characteristics; black shale; Lower Cambrian system; Southeast Qian

南方下寒武统的黑色页岩中赋存着钒、磷、钡、铂等金属资源和石油、天然气等油气资源, 受到国内

外学者的广泛关注。早期研究主要集中在岩相学、岩石学等方面, 自 SCHLANGER 和 JENKYN<sup>[1]</sup>提出大洋

缺氧事件以来, 李胜荣等<sup>[2]</sup>、吴朝东等<sup>[3]</sup>、雷加锦等<sup>[4]</sup>、杨剑等<sup>[5]</sup>、潘家永等<sup>[6]</sup>和肖启云等<sup>[7]</sup>通过分析湘黔浅水区黑色岩系的地球化学特征来研究其形成原因, 李胜荣等<sup>[8]</sup>和罗泰义等<sup>[9]</sup>探讨了遵义地区黑色岩系中贵金属的物质来源, 杨瑞东等<sup>[10]</sup>通过对遵义地区古热液喷口生物群生物特征研究来探讨黑色岩系的成因, 彭军等<sup>[11]</sup>、张位华等<sup>[12]</sup>和江永宏等<sup>[13]</sup>对湘黔地区硅质岩的成因及沉积环境进行研究, 陈华勇等<sup>[14]</sup>和吕惠进等<sup>[15]</sup>就黑色岩系中形成矿床类型<sup>[14-15]</sup>等方面进行了深入的研究。

湘黔地区沉积岩的沉积相包括斜坡相和海滨相, 目前李胜荣等<sup>[2]</sup>、吴朝东等<sup>[3]</sup>、杨剑等<sup>[5]</sup>、肖启云等<sup>[7]</sup>和江永宏等<sup>[13]</sup>的研究主要集中在海滨相, 仅杨兴莲<sup>[16]</sup>对斜坡相中黑色岩系进行较为笼统的研究。本文作者对贵州东部斜坡相地区黄平、岑巩、三穗、镇远和天柱等地的黑色页岩进行主量元素地球化学特征研究, 并选取三穗台烈镇剖面和黄平平溪镇剖面进行系统的稀土元素地球化学研究, 探讨该区前寒武纪的沉积环境。

## 1 区域地质概况

黔东南州位于贵州省东部, 新元古代至寒武纪初, 在构造拉张的背景下形成了扬子地台、华南海的构造格局<sup>[17]</sup>。在寒武纪早期, 全球海平面上升, 发生了全球性大洋缺氧事件, 大面积沉积黑色页岩, 并按岩相古地理变化划分为扬子区、过渡区和江南区<sup>[18]</sup>, 其中扬子区为浅水区, 江南区属于深水区, 本区涉及到沉积相为深水相的斜坡相和盆地相。从元古界至第四系地层在区内均有不同程度出露。受到武陵运动、雪峰运动、加里东运动、华力西-印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动<sup>[19]</sup>的叠加改造作用, 构造较为复杂, 褶皱和断裂较为发育。贵州深部断裂构造主要由近南北向的松桃-榕江断裂、赫章-盘县断裂和近东西向的六盘水-镇远断裂等3条深大断裂<sup>[20]</sup>组成的, 其中松桃-榕江断裂和六盘水-镇远断裂这2条深大断裂经过研究区, 和研究区关系较为密切。岩浆岩在区内较不发育, 仅有零星的基性和超基性岩浆出露。最为重要的矿产是磷矿、汞矿、锰矿、重晶石和金矿。

## 2 岩石化学特征

黑色页岩碳质含量较高, 在显微镜下很难确定其结构和成分, 用X衍射对样品分析, 黑色页岩中含量

最高的矿物是石英、伊利石, 其次是高岭石和重晶石, 还含有少量的石膏、方解石、磷灰石及长石。

### 2.1 主量元素地球化学特征

本次在区内共采集10个样品, 采样地点为黔东南州的岑巩、镇远、天柱、黄平、三穗等县。采取剖面刻槽取样的方法, 每个样品质量在2 kg以上。然后把同地区的样品取等量混合, 经破碎后, 细磨至粒度小于74 μm, 由长沙矿冶研究院采用化学全分析进行测定得出, 黔东南州牛蹄塘组黑色页岩主要化学成分见表1。黑色页岩以SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为主, 由于本次在黄平采集的黑色页岩为硅质页岩, 在天柱采集的为薄层状含泥质较多的页岩, 致使黄平、岑巩的硅质含量较高, 天柱、镇远较低; CaO+MgO的含量是0.92%~5.07%, 整体含量低, 黑色页岩中Na<sub>2</sub>O含量低于K<sub>2</sub>O含量, 在岑巩和镇远的黑色页岩中硫含量较高, 碳含量普遍较高, 其中镇远达9.4%。

### 2.2 稀土元素地球化学特征

选取黄平县平溪镇和三穗县台烈镇2个黑色页岩代表性的剖面, 进行分岩性刻槽取样, 共采集5个样品, 每个样品质量在2 kg以上, 其中黄平-3是平溪镇剖面的黑色页岩; 三穗-1为平溪镇剖面顶部的钙质页岩, 三穗-2为平溪镇剖面上部的薄层状黑色页岩, 三穗-3为平溪镇剖面中部的泥质岩, 三穗-4为平溪镇剖面下部的中厚层硅质页岩(采样剖面如图1), 每个样品质量在2 kg以上, 经破碎后, 细磨至粒度小于74 μm。稀土元素含量由长沙矿冶研究院分析检测中心使用ICP-MS测试得出, 黑色页岩的稀土元素地球化学特征见表2。区内岩石稀土总含量在68.28×10<sup>-6</sup>

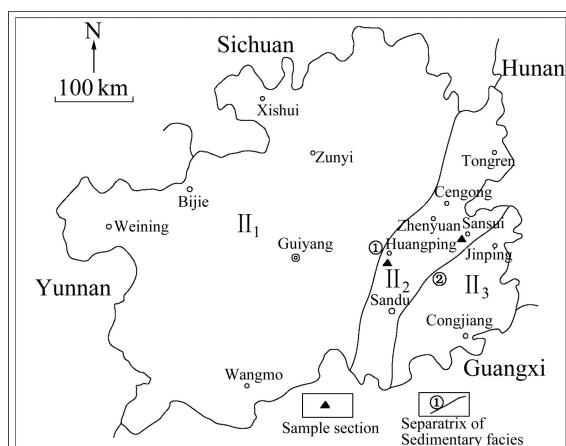


图1 研究剖面地理位置图

Fig. 1 Geological map showing section locality of Southeast Qian: II<sub>1</sub>—Seashore facies; II<sub>2</sub>—Slope facies; II<sub>3</sub>—Basin facies

表1 黔东南州下寒武统黑色岩系化学成分表

Table 1 Chemical component of black shale of Lower Cambrian series of Southeast Qian (mass fraction, %)

地点	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	TFe	CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	C
黄平	71.5	10.3	2.46	0.77	2.32	0.22	0.79	0.01	0.13	2.13	0.89	0.24	2
岑巩	68.5	12.2	1.53	0.58	1.52	0.61	0.39	0.02	0.10	0.89	0.64	5.5	2.7
三穗	64.7	9.9	3.87	0.94	3.44	0.26	0.66	0.02	0.33	2.56	0.62	0.5	5.7
镇远	61.3	6.4	3.02	1.34	3.15	4.24	0.83	0.03	0.3	2.14	0.37	2.9	9.4
天柱	54.4	12.6	10.5	1.01	8.15	3.60	0.83	0.02	0.10	1.83	0.63	0.76	2.3

表2 黔东南州下寒武统黑色岩系稀土元素含量

Table 2 REE of black shale of Lower Cambrian series of Southeast Qian (mass fraction,  $10^{-6}$ )

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
黄平-3	17.2	32.9	4.91	15.7	6.17	1.16	13.5	0.36	2.03	0.62	1.45	0.19	1.34	0.21
三穗-1	14.2	18.0	4.27	17.8	3.32	0.56	3.66	0.42	2.21	0.57	1.45	0.22	1.45	0.21
三穗-2	20.6	26.3	6.58	26.9	8.28	1.52	10.6	1.18	5.72	1.41	4.06	0.57	3.66	0.52
三穗-3	46.8	50.6	13.4	58.3	16.1	2.08	23.0	3.23	17.9	4.83	11.8	1.80	10.6	1.45
三穗-4	21.2	16.0	5.79	25.8	7.76	2.03	20.3	1.40	8.33	2.48	6.65	1.08	6.96	1.04

至  $252.00 \times 10^{-6}$  之间, 平均含量为  $133.16 \times 10^{-6}$ , 明显低于北美页岩稀土总量( $200.21 \times 10^{-6}$ )<sup>[21]</sup>, 稀土元素含量以三穗页岩中部的稀土含量最多, 大部分稀土元素都在此层富集。

### 3 稀土元素的地球化学参数分析

#### 3.1 REE 配分曲线及指示意义

$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  的比值反映轻、重稀土的分馏程度, 区内  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  的比值为 2.38~5.70(见表 3), 说明轻稀土较为富集, 小于北美黑色页岩的  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=7.5$ <sup>[21]</sup>, 但比湘西和黔北地区的黑色岩系中的比值(1.48~3.51)<sup>[22]</sup>大。

参照稀土元素球状陨石标准化配分模式图(见图 2), 稀土曲线大体上是朝右倾斜, 倾斜度较大,  $(\text{La/Yb})_{\text{N}}=2.01 \sim 8.49 > 1$ ; 这与湘黔其他地区配分曲线<sup>[22]</sup>相同。与重稀土曲线相比, 轻稀土曲线右倾比较明显。铈元素常呈现明显负异常, 以上特征与海相热水沉积特征符合。推测湘黔地区下寒武统的黑色岩系中稀土元素是由正常海水与海底喷流热液混合形成的产物。岩层各部的稀土曲线近于平行, 推测其源区一致。经北美页岩组合样标准化曲线呈近于水平或左倾

(见图 3), 整体上呈近水平状分布, 该标准化图具有明显的 Ce 负异常、微弱的 Eu 正异常, 与较典型的海相沉积物稀土配分曲线相似。

根据 La/Ce 的比值可以确认岩石的氧化还原条件及相应的沉积环境, La/Ce 比值为 2.8 时, 沉积物是由热液结壳或古代海水造成的; La/Ce 比值为 0.25 时, 沉积物为 Fe-Mn 热水成因造成的。当海相沉积物中 La/Ce 比值小于 1 时, 认为其沉积过程受到热水作用的影响<sup>[25]</sup>。区内所测 La/Ce 比值为 0.52~1.33, 仅在黄平页岩下部大于 1, 在 La—Ce 关系图(见图 4)上, 数据点均落在 0.25~2.80 之间的区域, 大约在两条线的中间, 反映本区黑色岩系受到一定程度的热水沉积作用的影响。在 La/Yb—REE 关系图(见图 5)上, 本区数据投点绝大部分落在沉积岩和玄武岩的过渡区域, 侧面证明其在沉积过程中有热水活动的参与。

根据  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  比值确认海底岩石成岩物质来源, 当  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} > 1$  时, 表明成岩物质来源有地幔柱或异常物质加入; 而区内岩石  $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$  的比值为 1.77~3.31, 代表成岩物质中有地下深部物质加入。这与稀土元素标准化配分模式图所得出的环境指示意义一致。表明区内早寒武世黑色页岩是正常海水与热水沉积作用的混合产物, 沉积物源部分来自循环的热的海水。

表3 黔东南州下寒武统黑色岩系稀土元素特征参数

Table 3 Characteristic value of REE in black shale of Lower Cambrian series of Southeast Qian

项目	$\Sigma\text{REE}/10^{-6}$	$\Sigma\text{LREE}/10^{-6}$	$\Sigma\text{HREE}/10^{-6}$	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	$(\text{La/Yb})_N$	$(\text{Tb/Yb})_N$	$\delta\text{Ce}$	$\delta\text{Eu}$
黄平	100.84	81.14	19.69	4.12	8.49	1.04	0.85	0.54
三穗-1	68.28	58.09	10.19	5.70	6.45	1.11	0.55	0.75
三穗-2	117.81	90.11	27.70	3.25	3.72	1.24	0.53	0.75
三穗-3	252.00	177.38	74.62	2.38	2.91	1.17	0.48	0.49
三穗-4	126.88	78.63	48.25	1.63	2.01	0.78	0.34	0.66

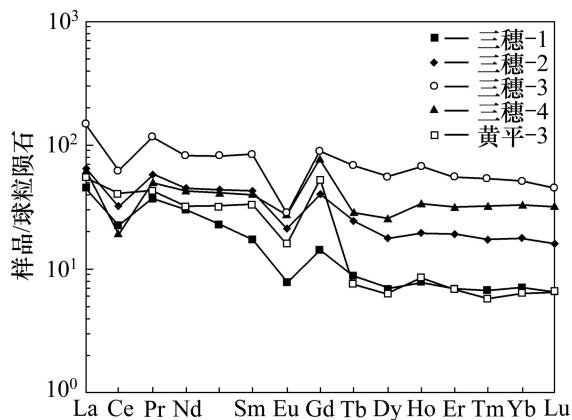


图2 稀土元素球状陨石标准化配分模式图

Fig. 2 Standardized mode of distribution of REE in way of chondritic meteorite

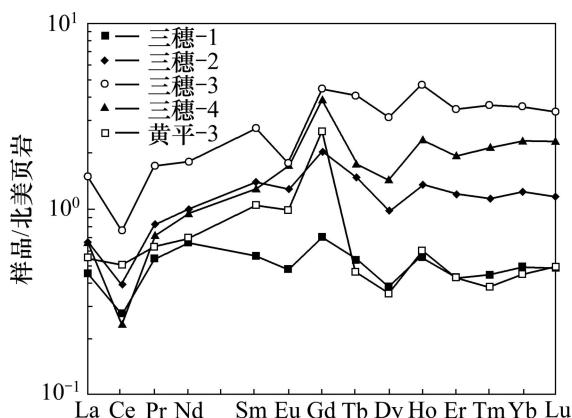


图3 稀土元素北美页岩标准化配分图

Fig. 3 Standardized mode of distribution of REE in way of North American shale

### 3.2 Eu 异常

沉积岩中铕异常与成岩温度有关, 当温度大于 250 °C 时, Eu 相对于其它稀土元素可能发生显著分馏, Eu 以二价态的络合物存在, 导致热流体 Eu 正异常; 当温度小于 250 °C 时, Eu<sup>2+</sup>只能存在于强还原强碱性的环境下存在<sup>[26]</sup>。Eu 以 Eu<sup>2+</sup>形式存在时常会形成 Eu 正异常, 反之则形成 Eu 负异常。在本文中, Eu 异

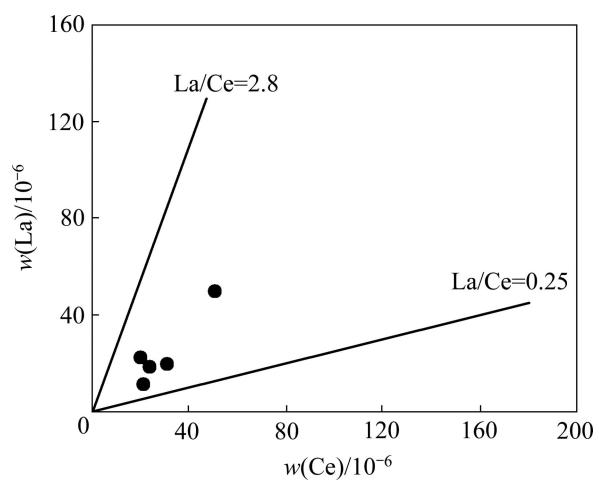


图4 黔东南州黑色页岩 La—Ce 关系图(据文献[23]修改)

Fig. 4 La—Ce diagram for black shale of Southeast Qian (Modified from Ref. [23])

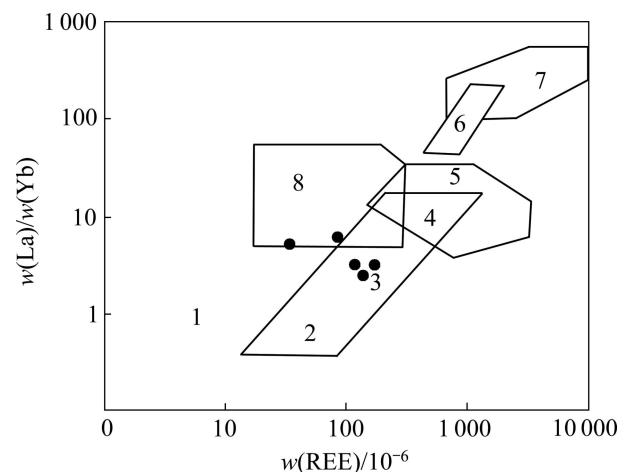


图5 黔东南州黑色页岩的 La/Yb—REE 图(底图据文献[24]修改)

Fig. 5 La/Yb—REE diagram for black shale of Southeast Qian (Base map modified from Ref.[24]): 1—Chondrite; 2—Oceanic tholeiite; 3—Continental tholeiitic; 4—Alkalic basalt; 5—Granite; 6—Kimberlite; 7—Carbonatite; 8—Sedimentary rocks

常值的计算公式为  $\delta\text{Eu} = 2\text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$ , 区内  $\delta\text{Eu}$  的含量在 0.49~0.75 范围内, Eu 呈负异常, 表明沉积岩形成的温度为低温, 即低于 250 °C。其中三穗页岩中部的  $\delta\text{Eu}$  明显小于上部和下部的, 说明热液喷流经历了由强变弱再变强的过程。与被动大陆边缘的沉积物 Eu 的特征一致, 推测区内沉积环境为被动大陆边缘构造环境。

### 3.3 Ce 异常

Ce 元素对外界氧化-还原条件变化较为敏感, 可以反映岩石形成的氧化还原环境及海水的深浅, 常用 Ce 异常值解释古沉积环境和海平面的变化<sup>[16, 24]</sup>。Ce 是变价元素, Ce<sup>4+</sup>在氧化环境中较难溶解, 当 Ce<sup>4+</sup>所处的环境转变为缺氧环境时, Ce 元素会被激活以 Ce<sup>3+</sup>形式溶解在水中, 使得铈元素在海水中由负异常向正异常转化, 则铈表现为负异常。Ce 异常值越小, 说明水体越缺氧, 水体就越深; Ce 异常越大, 说明水体越富氧, 水体就越浅。MORAD 和 FELITSYN<sup>[27]</sup>认为 (La/Sm)<sub>N</sub> 的比值大于 0.35 时,  $\delta\text{Ce}$  就可作为沉积岩的沉积环境指示剂。在本文中, Ce 异常值的计算公式为  $\delta\text{Ce} = \lg[3\text{Ce}_N / (2\text{La}_N + \text{Nd}_N)]$ , 区内  $\delta\text{Ce}$  值为 0.33~0.83, 平均值为 0.54, 小于北美页岩中的  $\delta\text{Ce}$  值 0.94, Ce 元素呈现负异常。由  $\delta\text{Eu}$  可知, 研究区黑色岩系形成于缺氧的还原环境, Ce 表现负异常, 表明本区黑色岩系形成于干燥气候条件下、海水有相当深度的环境中, 推测黑色页岩是在干燥气候的相对深陆棚还原的环境下形成的。在三穗剖面上测得的  $\delta\text{Ce}$  值由上部往下部逐渐降低, 表明研究区可能经历了大陆斜坡到大洋盆地的沉积环境, 推测该区在寒武纪初可能发生过一次海侵。

## 4 结论

1) 黑色页岩以 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为主, 黄平的硅质含量较高, 天柱含量较低; 黑色页岩在岑巩和镇远的硫含量较高, 碳含量普遍较高; 样品中 CaO+MgO 的含量整体含量低, 可能是海相成因造成的。

2) 区内黑色页岩中稀土总量在  $68.28 \times 10^{-6}$  至  $252.00 \times 10^{-6}$  之间, 整体来说稀土总量偏高; 在剖面上中部稀土含量最高, 说明热水喷流作用经历了由弱到强再到弱的过程。 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  的比值为 2.38~5.70, 说明轻稀土较为富集。

3) 稀土元素球状陨石标准化配分曲线朝右倾斜,

并且 Ce 的明显负异常。本区 Ce 的负异常  $\delta\text{Ce} = 0.34\sim0.85$ , 均值为 0.50, 反映岩石沉积环境为相对缺氧的深海环境条件。 $\delta\text{Eu}$  的值在 0.49~0.75 之间, Eu 呈负异常, 与被动大陆边缘的特征相似, 表明沉积岩是在低于 250°C 的低温环境下在大陆边缘形成的。

4) 在黑色岩系稀土元素北美页岩组合样标准化模式图上, 显示出 Ce 负异常, 北美页岩组合样标准化曲线近于水平, 具有海相热水沉积特征。

5) La—Ce 关系图和 La/Yb—REE 关系图也表明区内黑色页岩是在有热液参与的海相沉积环境下形成的。

## REFERENCES

- [1] SCHLANGER S O, JENKYNS H C. Cretaceous oceanic anoxic events: Cause and consequences[J]. Geo Mijnbouw, 1976, 55: 179~184.
- [2] 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 Sheng-rong, GAO Zhen-min. REE characteristics of black rock series of the Lower Cambrian Niutitang formation in Hunan-Guizhou provinces, China, with a discussion on the REE patterns in marine hydrothermal sediments[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1995, 15(2): 225~229.
- [3] 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1999, 18(1): 26~39.  
WU Chao-dong, YANG Cheng-yun, CHEN Qi-ying. The origin and geochemical characteristics of Upper Sinian-Lower Cambrian black shales in Western Hunan[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1999, 18(1): 26~39.
- [4] 雷加锦, 李任伟, TOBSCHALL H J, 潘英英, 方家虎. 扬子地台南缘早寒武世黑色岩系中形态硫特征及成因意义[J]. 中国科学(D辑), 2000, 30(6): 592~601.  
LEI Jia-jin, LI Ren-wei, TOBSCHALL H J, PU Ying-ying, FANG Jia-hu. Characteristics of sulfur species and their implications in Lower Cambrian black shales from southern margin of Yangtze Platform [J]. Science in Chinese(Series D), 2000, 30(6): 592~601.
- [5] 杨剑, 易发成, 侯兰杰. 黔北黑色岩系的岩石地球化学特征和成因[J]. 矿物学报, 2004, 24(3): 285~289.  
YANG Jian, YI Fa-cheng, HOU Lan-jie. Genesis and petrogeochemistry characteristics of Lower Cambrian black shale series in Northern Guizhou [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(3): 285~289.
- [6] 潘家永, 马东升, 曹双林, 夏菲, 陈少华, 吴凯. 华南Pc-C 过渡期深水相剖面的碳、氧同位素记录[J]. 地球学报, 2005, 26(增刊): 182~185.

- PAN Jia-yong, MA Dong-sheng, CAO Shuang-lin, XIA Fei, CHEN Shao-hua, WU Kai. Carbon and oxygen isotopic records from the deep-water facies sections of the Precambrian-Cambrian transitional period[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(Supplement): 182–185.
- [7] 肖启云, 李胜荣, 蔡克勤. 湘黔下寒武统黑色岩系不同矿物组合中的铂族元素特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1083–1091. XIAO Qi-yun, LI Sheng-rong, CAI Ke-qin. Features of platinum-group elements in different mineral assemblages in the Lower Cambrian black rock series in Hunan and Guizhou[J]. *Geology in China*, 2006, 33(5): 1083–1091.
- [8] 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 Sheng-rong, GAO Zhen-min. Tracing the sources of the noble metal elements in the bottom of Cambrian black rock series in Hunan and Guizhou[J]. *Science in China(Series D)*, 2000, 30(2): 169–174.
- [9] 罗泰义, 宁兴贤, 罗远良, 李晓彪, 凌荣祥, 姚林波. 贵州遵义早寒武黑色岩系底部 Se 的超常富集[J]. 矿物学报, 2005, 25(3): 275–282. LUO Tai-yi, NING Xing-xian, LUO Yuan-liang, LI Xiao-biao, LING Rong-xiang, YAO Lin-bo. Super-enrichment of Se in the bottom black shales Lower Cambrian at Zunyi, Guizhou province, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2005, 25(3): 275–282.
- [10] 杨瑞东, 朱立军, 高慧, 张位华, 姜立君, 王强, 鲍森. 贵州遵义松林寒武系底部热液喷口及与喷口相关生物群特征[J]. 地质论评, 2005, 51(5): 481–492. YANG Rui-dong, ZHU Li-jun, GAO Hui, ZHANG Wei-hua, JIANG Li-jun, WANG Qiang, BAO Miao. A study on characteristics of the hydrothermal vent and relating biota at the Cambrian bottom in Songlin, Zunyi County, Guizhou Province[J]. *Geological Review*, 2005, 51(5): 481–492.
- [11] 彭军, 夏文杰, 伊海生. 湘西晚期寒武纪层状硅质岩的热水沉积地球化学标志及其环境意义[J]. 岩相古地理, 1999, 19(2): 29–37. PENG Jun, XIA Wen-jie, YI Hai-sheng. Geochemical characteristics and depositional environments of the Late Precambrian bedded siliceous rocks in Western Hunan[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1999, 19(2): 29–37.
- [12] 张位华, 姜立君, 高慧, 杨瑞东. 贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 174–178. ZHANG Wei-hua, JIANG Li-jun, GAO Hui, YANG Rui-dong. Study on sedimentary environment and origin of black siliceous rocks of the Lower Cambrian in Guizhou Province[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(2): 174–178.
- [13] 江永宏, 李胜荣. 湘、黔地区前寒武—寒武纪过渡时期硅质岩生成环境研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 622–629.
- JIANG Yong-hong, LI Sheng-rong. A study of the fluid environment of silicalite of transitional Precambrian-Cambrian age in Hunan and Guizhou provinces[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(4): 622–629.
- [14] 陈华勇, 张增杰. 湘西北黑色岩系中矿产资源的综合利用[J]. 地质与勘探, 2001, 37(3): 32–35. CHEN Hua-yong, ZHANG Zeng-jie. The multipurpose use of mineral resource of black shale in the northwest Hunan [J]. *Geology and Prospecting*, 2001, 37(3): 32–35.
- [15] 吕惠进, 王建. 浙西寒武系底部黑色岩系含矿性和有用组分的赋存状态[J]. 矿床地质, 2005, 24(5): 567–574. LÜ Hui-jin, WANG Jian. Ore potential and modes of occurrence of associated elements in lower Cambrian black shale of Western Zhejiang[J]. *Mineral Deposits*, 2005, 24(5): 567–574.
- [16] 杨兴莲, 朱茂炎, 赵云龙, 张俊明, 郭庆军, 皮道会. 黔东震旦系—下寒武统黑色岩系稀土元素地球化学特征[J]. 地质论评, 2008, 54(1): 3–15. YANG Xing-lian, ZHU Mao-yan, ZHAO Yuan-long, ZHANG Jun-ming, GUO Qing-jun, PI Dao-hui. REE geochemical characteristics of the Ediacaran-Lower Cambrian black rock series in Eastern Guizhou[J]. *Geological Review*, 2008, 54(1): 3–15.
- [17] 姜月华, 岳文浙, 业治铮. 华南下古生界缺氧事件与黑色页岩及有关矿产[J]. 有色金属矿产与勘查, 1994, 3(5): 272–278. JIANG Yue-hua, YUE Wen-zhe, YE Zhi-zheng. Anoxic event, black shales and related mineral resources: Taking the lower palaeozoic in Southern China as an example[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 1994, 3(5): 272–278.
- [18] 贵贵州省地质矿产局. 贵贵州省区域地质志: 地质矿产部地质专报(区域地质第7号) [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 25–50. Guizhou Bureau of Geological and Mineral Resources. Region geology of Guizhou Province: Ministry of geology and mineral resources geological bulletin(Regional geological No.7) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 25–50.
- [19] 项礼文. 中国地层(4): 中国的寒武系[M]. 北京: 地质出版社, 1981: 23–36. XIANG Li-wen. Stratigraphy of China(4): Cambrian of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1981: 23–36.
- [20] 冯学仕, 王尚彦. 贵州省区域矿床成矿系列与成矿规律[M]. 北京: 地质出版社, 2004: 8–10. FENG Xue-shi, WANG Shang-yan. Minerogenetic series and minerogenetic law in Guizhou Province, China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 8–10.
- [21] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 135–206. CHEN De-qian, CHEN Gang. Practical rare earth elements geochemistry[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996: 135–206.
- [22] 杨剑. 黔北地区下寒武统黑色岩系形成环境与地球化学研

- 究[D]. 西安: 长安大学, 2009: 92-96.
- YANG Jian. Study on the formation environment and geochemistry of Lower Cambrian black shale series, Northern Guizhou Province, China[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009: 92-96.
- [23] TOTH J R. Deposition of submarine crusts rich in manganese and iron[J]. Geological Society of America Bulletin, 1980, 91: 44-54.
- [24] 朱笑青, 王中刚. 冲绳海槽热水区沉积物的地球化学特征 [C]//胡瑞忠. 矿床地球化学研究. 北京: 地震出版社, 1994: 108-112.
- ZHU Xiao-tian, WANG Zhong-gang. Geochemical characteristics of sediment at hot water region in the Okinawa Trough[C]//HU Rui-zhong. Study on Geochemistry. Beijing:
- Earthquake Publishing House, 1994: 108-112.
- [25] HOGDAHL O T, MELSON S, BOWEN V T. Neutron activation analysis of lanthanide elements in seawater[J]. Advances in Chemistry, 1968, 73: 308-325.
- [26] 涂光炽. 低温地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 163-175.
- TU Guang-zhi. Low temperature geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1998: 163-175.
- [27] MORAD S, FELITSYN S. Identification of primary Ce-anomaly signatures in fossil biogenic apatite: Implication for the Cambrian oceanic anoxia and phosphogenesis[J]. Sedimentary Geology, 2001, 143: 259-264.

(编辑 何学锋)