# 黔北下寒武统黑色岩系的沉积环境与地球化学响应

付勇<sup>1)</sup>,周文喜<sup>1,2)</sup>,王华建<sup>2)</sup>,谯文浪<sup>4)</sup>,叶云涛<sup>2,3)</sup>,江冉<sup>1)</sup>,

王晓梅<sup>2)</sup>,苏劲<sup>2)</sup>,李迪<sup>1,2)</sup>,夏鹏<sup>1)</sup>

1) 贵州大学资源与环境工程学院,贵阳,550025;

2)油气地球化学重点实验室,中国石油勘探开发研究院,北京,100083;

3) 造山带与地壳演化教育部重点实验室/北京大学地球与空间科学学院,北京,100871;

4) 贵州省地矿局 102 地质大队,贵州遵义,563003

内容提要:下寒武统黑色岩系在我国华北、华南及塔里木盆地等广泛发育,但富有机质泥页岩的分布特征及其 控制因素未有定论。本文对黔北地区下寒武统牛蹄塘组(及同时期地层)不同沉积相带典型剖面中的富有机质泥 页岩及其上下层位进行了地球化学分析,识别出寒武纪早期不同沉积相带氧化还原环境的明显差异。台内凹陷相 主要岩性为黑色页岩,底部为不等厚的薄层磷块岩和硅质岩或硅磷质结核,沉积的黑色页岩厚度大,有机质丰度 高,V、Ni、Mo、U等微量元素显著富集,反映了贫氧-缺氧环境,以及短暂动态的硫化环境,Mo/TOC反映了其为局 限盆地特征;上斜坡相为贫氧到氧化的沉积环境,但更多地是表现为氧化的沉积环境,其中牛蹄塘期存在局部的硫 化环境,沉积的黑色页岩厚度小,但有机质丰度最高,V、Ni、Mo、U等微量元素的富集程度较低;盆地相为黑色硅质 岩与富有机质的黑色硅质页岩间互沉积,同期沉积厚度较小,有机质丰度相对较低,V和U的富集程度大于台内凹 陷相,而 Ni和 Mo 的富集程度则低于台内凹陷相,指示了缺氧环境,期间伴随有贫氧和短暂的氧化环境存在,且可 能存在局部的硫化环境,Mo/TOC反映了中等的局限程度。总的来说,黔北下寒武统黑色岩系的有机质丰度、厚度 以及微量元素富集程度等特征主要受控于不同的氧化还原环境。

关键词:下寒武统;牛蹄塘组;黑色岩系;沉积环境;地球化学特征;黔北

寒武纪是地质历史上重要的转折时期(Jin et al.,2016;LiWenzheng et al.,2019),该时期的地 质事件是很多科学领域研究的前沿课题。扬子地块 下寒武统黑色岩系是一套整合或不整合沉积于埃迪 卡拉纪末期白云岩(及同期的沉积岩)之上的富有机 质沉积,主要由富有机质的黑色泥页岩、硅质岩及碳 酸盐岩组成。根据最新在贵州东部地区牛蹄塘组底 部和湖南西部地区留茶坡组获得年代学证据,这套 黑色岩系的沉积时限始于542.6Ma(Chen et al., 2015)。古生物地层、同位素地层和年代地层的证据 显示,这套黑色岩系在我国西北的塔里木盆地、华南 的整个上中下扬子地区以及华北的大部分地区等均 有发育,其等时地层大约相当于塔西北的玉尔吐斯 组(Zhu Guangyou et al., 2016)、塔东的西山布拉 克组(Cai Xiyao et al., 2014)、四川盆地的筇竹寺组 (Zou Caineng et al., 2014)、峡东的水井沱组(Jiang et al., 2012)、湘中的小烟溪组(Xiang Lei et al., 2015)、皖南-浙西-赣东北的荷塘组(Yang Aihua et al., 2008)、华北的马店组(Tao Shizhen et al., 2014)、辽东地区的雨台山组(Liu Dezheng, 1986) 等。因此,这套黑色岩系的分布具有极大的广泛性 和等时性,代表着一次全球范围内的富有机质沉积。

该黑色岩系地层厚度大,TOC含量高,且在多 个地区均发现其底部富含磷块岩(或磷质结核)和

作者简介:付勇,男,博士后,副教授,主要从事沉积学、沉积地球化学、沉积矿床学研究。Email:byez1225@126.com。

引用本文:付勇,周文喜,王华建,谯文浪,叶云涛,江冉,王晓梅,苏劲,李迪,夏鹏. 2021. 黔北下寒武统黑色岩系的沉积环境与地球化学 响应. 地质学报, 95(2): 536~548, doi: 10.19762/j. cnki. dizhixuebao. 2021102.
 Fu Yong, Zhou Wenxi, Wang Huajian, Qiao Wenlang, Ye Yuntao, Jiang Ran, Wang Xiaomei, Su Jin, Li Di, Xia Peng. 2021. The relationship between environment and geochemical characteristics of black rock series of Lower Cambrian in northern Guizhou. Acta Geologica Sinica, 95(2): 536~548.

注:本文为国家自然科学基金项目(编号 41763006、U1812402、42002166),中国地质调查局中国矿产地质志项目(编号 DD20190379-80)资助成果。

收稿日期:2020-03-23;改回日期:2020-09-24;网络发表日期:2020-10-22;责任编委:邱楠生;责任编辑:周健。

Ni-Mo-PGE 等多金属矿层(Cao et al., 2013; Shi et al., 2014; Han et al., 2015; Fu et al., 2016; Xia Peng et al., 2020),并由此形成了下寒武统最为特征的两个化学标志层。由于这套地层演化历史悠久,成熟度普遍较高,且富含硅质、白云石等脆性矿物,被认为是重要的页岩气勘探层位之一。因此,下寒武统黑色岩系的区域分布特征、有机质富集机理和页岩气勘探潜力等得到了学术界的广泛关注。

已有研究表明,不同地区下寒武统黑色岩系发 育的有利因素和分布特征可能截然不同。例如,在 塔里木盆地,黑色岩系的发育是受上升洋流和盆地 缺氧环境的控制,因此主要分布于陆棚斜坡相和深 水盆地相(Zhu Guangyou et al., 2016; Guo Chuntao et al., 2019)。在四川盆地,黑色岩系的发 育受古裂陷槽控制,因此其分布范围也与古裂陷槽 的走向有关(Zou Caineng et al., 2014)。在下扬子 地区,黑色岩系的沉积与海底热液形成的富营养海 水和底部的缺氧环境有关(Wu et al., 1999; Lehmann et al., 2007; Chen et al., 2009; Wang et al., 2015)。而在南华北地区,黑色岩系的形成 则与海平面上升有关,其分布特征受控于当时的大 地构造和古地理环境(Tao Shizhen et al., 2014)。 可见,有关这套黑色岩系全球性广泛发育的共性控 制因素并未得到合理的解释。

富有机质黑色岩系的发育意味着有机质的富 集, 而有机质的富集则取决于高的初始生产力 (Sageman et al., 2003; Gallego-Torres et al., 2007)、良好的有机质保存条件以及适合的沉积速率 (Mort et al., 2007)。高的初始生产力主要来自于 海水表层的浮游生物,多与风化强度、大陆水动力、 营养物输入、陆表径流、上升洋流等因素有关,也可 能与火山喷发或海底热液导致的表层海水富营养化 有关(Arthur et al., 1998; Jenkyns, 2010)。良好 的有机质保存环境一般是指贫氧、缺氧或硫化的还 原环境,代表着底层海水的缺氧环境和低的有机质 降解(Wei et al., 2012)。沉积速率的变化一般与 陆源碎屑的输入量和生物成因石英、白云石等脆性 矿物的形成有关,多与黑色岩系的沉积相特征和海 平面高度有关。因此,富有机质黑色岩系的发育和 时空分布可能与海水富营养化程度、古海洋缺氧程 度以及古地理环境等密切相关。

早寒武世,黔北地区发育台地相、斜坡相和盆地 相区,且在不同沉积相区均发育有黑色岩系,是研究 富有机质黑色岩系发育和时空分布的受控因素的典 型代表。本文以黔北牛蹄塘组黑色泥页岩及同时期 的沉积物为研究对象,通过分析不同相带下的有机 质富集程度和地球化学特征,探究下寒武统黑色岩 系的沉积环境与有机质及微量元素富集程度之间的 关系。

## 1 地质背景

扬子克拉通形成于新元古代早期江南造山运动 期间扬子地块与华夏陆块的碰撞作用,在埃迪卡拉 纪一早寒武世形成被动大陆边缘盆地(Shu et al., 2011; Charvet, 2013)。由于差异沉降作用,其内可 能发育数个台内凹陷盆地(洼地)及东南方向的大规 模开放盆地。自浅水向盆地方向,岩相组合由以碳 酸盐岩为主过渡为碎屑岩、硅质岩(Guo et al., 2007; Chen et al., 2009; Yeasmin et al., 2016)(图 1)。早寒武世,全球海平面上升,灯影期的碳酸盐台 地遭到广泛的淹没,牛蹄塘期,在大规模海侵背景 下,形成了以细粒硅质沉积为主的陆架环境。快速 海侵后保存了之前的地形地貌(图 2b),因此形成的 淹没台地控制了后续的沉积作用(Yeasmin et al., 2016),黑色岩系直接不整合或整合沉积于灯影期的 自云岩或同时期的硅质岩上。

## 2 地层序列及样品采集

本次研究对金沙岩孔(YK)、遵义松林大竹流 水(DZLS)、遵义松林中南黑沙坡(HSP)、湄潭茅坪 梅子湾(MP)和瓮安永和(YH)等台内坳陷相剖面, 上斜坡相的铜仁松桃道坨 ZK102 和盆地相的天柱 大河边 ZK205 等代表性露头剖面和岩芯的下寒武 统沉积岩进行了系统取样(图1),重点采集黑色页 岩样品。其中,YK 剖面未见顶底,岩性为黑色页岩 (图 2a),下伏地层为灯影组白云岩,采样位置对应 于牛蹄塘组底部或下部,厚度 25.1m,采集样品 15 个;DZLS 剖面见底未见顶,自下而上依次为灯影组 白云岩、牛蹄塘组硅质岩夹磷质结核、黑色页岩(图 2b),采样位置对应于牛蹄塘组底部,厚度 10.9m, 采集样品 18个;HSP 剖面见底未见顶,自下而上依 次为灯影组白云岩、牛蹄塘组磷块岩、硅质岩、黑色 页岩(图 2c,2d),采样位置对应于牛蹄塘组底部,厚 度 10.5m,采集样品 21个;MP 剖面见底未见顶,自 下而上依次为灯影组白云岩、牛蹄塘组黑色页岩(图 2e),采样位置对应于牛蹄塘组底部,厚度 25.2m,采 集样品 10个;YH 剖面见底未见顶,自下而上依次 为灯影组白云岩、牛蹄塘组硅质岩夹磷质结核、黑色



图 1 黔北下寒武统不同沉积相带的岩性柱状图(a,据 Zhou Wenxi, 2017 修改)和扬子地块埃迪卡拉纪— 寒武纪古地理图(b,据 Yeasmin et al., 2016 修改)

Fig. 1 The lithology histogram of different sedimentary facies of the Early Cambrianin northern Guizhou (a, modified from Zhou Wenxi, 2017) and simplified paleoenvironmental map during the Edicaran—Early Cambrian in Yangtze block (b, modified from Yeasmin et al., 2016)

页岩(图 2f),采样位置对应于牛蹄塘组底部,厚度 43.9m,采集样品 34 个。道坨 ZK102 为全剖面,自 下而上依次为灯影组硅化白云岩(12.7m)、牛蹄组 黑色页岩(17.4m)(底部含磷质结核(图 2g))、九门 冲组(65.9m)黑色碳质页岩与灰岩互层(图 1),采集 样品 190 个。天柱 ZK205 见底未见顶,自下而上依 次为 陡山 沱 组 白 云 岩 和 黑 色 页 岩、留 茶 坡 组 (65.4m)的黑色硅质岩和黑色硅质页岩(上部含磷 质结核(图2h))、九门冲组(47.60m)黑色碳质泥岩 (图1),采集样品110个。研究区不同剖面的寒武 系底部均含有一层磷块岩或磷质结核,因此可对不 同沉积相带的地层进行横向上的对比,结果显示,下 寒武统底部同时期沉积的黑色岩系中台内凹陷相区 厚度最大(所有实测剖面均未见顶),斜坡相次之,盆



图 2 黔北下寒武统野外露头剖面及岩芯照片

Fig. 2 Outcrop and core photographs of lower Cambrian of northern Guizhou
(a) 一金沙 YK 剖面;(b) 一遵义 DZLS 剖面;(c) 一遵义 HSP 剖面;(d) 一遵义 HSP 剖面黑色页岩;
(e) 一湄潭 MP 剖面;(f) 一瓮安 YH 剖面;(g) 一道坨 ZK102 岩志;(h) 一天柱 ZK205 岩志
(a) 一YK section; (b) 一DZLS section; (c) —HSP section; (d) —black shale HSP section; (e) —MP section;

(f)—YH section; (g)—ZK102 well; (h)—ZK205 well

地相厚度最小(图1)。

本研究采集了内坳陷相剖面、上斜坡相和盆地 相等不同相带的早寒武世黑色岩系上下层位的沉积 物样品,并进行同步对比分析。

3 分析方法及实验结果

#### 3.1 分析方法

露头和岩芯样品均去除表面污染物,选取内部 新鲜岩石,用纯水清洗后烘干。用碳化钨研磨盘碎 样后,筛分出粒度小于 200 目的粉末。每个样品粉 碎后均使用石英砂对研磨盘进行清洗以消除交叉污 染。选用同一批处理的样品粉末进行总有机碳 (TOC)含量和微量元素分析。

TOC 含量分析在中国石油勘探开发研究院石 油地质实验研究中心完成,样品粉末先用 5%的盐 酸处理,去除掉其中的碳酸盐,然后用 LECO CS-230 碳硫分析仪测定 TOC。微量元素的测试分析 在中国科学院高能物理研究所完成,将样品粉末用 盐酸和氢氟酸处理,分别去除碳酸盐岩和硅质成分, 赶酸仪 赶酸后,用 2%的稀硝酸稀释定容,再用 Thermo fisher X2 ICP-MS 测定微量元素含量。

### 3.2 实验结果

#### 3.2.1 有机质丰度

分析结果显示,位于台内坳陷相的下寒武统黑 色页岩的有机碳丰度普遍较高,所有样品的 TOC 含量均大于 1.0%。YK、DZLS、HSP、MP 和 YH 等露头剖面的 TOC 均值分别为 2.79%、5.78%、 7.29%、4.52%和 5.95%(表 1),最高 TOC 分别高 达 4.00%、10.20%、12.70%、6.15%和 11.50%,均 达到有效烃源岩标准(TOC > 1.0%)(Zhang Shuichang et al., 2002)。露头台内坳陷相的牛蹄 塘组下部黑色页岩 TOC 均值为 5.47%,YH 地区 的有效烃源岩厚度大于 44m。上斜坡相的 ZK102 牛蹄塘组黑色页岩的 TOC 均值为 6.40%,最高 TOC 为 28.00%,TOC>1.0%的有效烃源岩连续 厚度为 17.4m。盆地相的 ZK205 留茶坡组上部和 九门冲组下部夹层黑色页岩的 TOC 均值分别为 4.10%和 4.65%,最高 TOC 分别为 8.70%和 6.69%,有效烃源岩连续厚度大于 47m。

与下寒武统黑色岩系相对比,上斜坡相 ZK102 的灯影组硅化白云岩的 TOC 均值仅为 0.08%,九 门冲组黑色页岩与灰岩间互沉积的 TOC 均值为 1.37%,其中黑色页岩 TOC 均值为 2.39%,灰岩 TOC 均值为 0.36%。盆地相的 ZK205 留茶坡组硅 质岩的 TOC 均值为 0.76%。可见,其上下层位的 沉积物有机质丰度均明显低于下寒武统黑色岩系。

## 3.2.2 微量元素(Mo、V、U、Ni)

下寒武统黑色岩系及上下层段沉积物的 Mo、 V、U等微量元素分析结果见表 1。在台内坳陷相 的 DZLS、HSP、YK 等地区的牛蹄塘组黑色页岩中, V 的平均含量均可达 0.4%(以  $V_2O_5$  计,下同)以 上,最高 V 含量则分别高达 1.46%、1.02%、 1.26%。以钒矿开采的边界品位 0.5% 计,这三个 地区的黑色页岩中的钒含量均达到了钒矿层的品位 标准,且有效矿层厚度分别为 4m 以上(未见顶)、 4m、18m 以上(未见顶底)。在深水盆地相的 ZK205,夹层黑色页岩的 V 含量较高,均值可达 0.30%,最高可达 1.47%。然而,能达到边界品位 标准的黑色页岩厚度较薄,总厚度不超过 2m,且与 黑色页岩互层的厚层硅质岩中 V 含量较低(< 0.05%),并不适宜工业开采。位于上斜坡相的 ZK102,牛蹄塘组黑色页岩中 V 的平均含量仅为 0.04%,最高仅为 0.22%,上覆地层九门冲组黑色 页岩和灰色灰岩,以及下伏地层灯影组硅化白云岩 中的 V 含量更低,普遍低于 0.03%,远低于台内坳 陷相和盆地相早寒武世黑色页岩中的 V 含量。

Mo 和 Ni 的含量变化与 V 较为类似。台内坳 陷相牛蹄塘组黑色页岩中 Mo 和 Ni 的最高含量均 为 HSP 地区,平均含量分别可达 266.4µg/g 和 358.4µg/g,其中 HSP-15 样品 Mo、Ni 含量分别高 达 3514µg/g 和 1090µg/g,代表了台内坳陷相的 Ni-Mo 多金属层。盆地相 ZK205 黑色页岩中 Mo 和 Ni 平均含量分别为 70.1 $\mu$ g/g 和 113.8 $\mu$ g/g,最高 含量为 153 $\mu$ g/g 和 375 $\mu$ g/g,与台内坳陷相的均值 含量接近。上斜坡相 ZK102 黑色页岩中的 Mo 和 Ni 含量最低,平均含量分别为 29.4  $\mu$ g/g 和 71.6  $\mu$ g/g,最高含量仅为 75.7 $\mu$ g/g 和 123 $\mu$ g/g,与盆地 相的均值含量接近。与早寒武世黑色页岩相对比, 灯影组硅化白云岩、留茶坡组硅质岩和九门冲组灰 色灰岩的 Mo、Ni 含量均明显降低。

与 V、Mo、Ni 不同的是,本文研究中所测定的 最高 U 含量为 210.4 $\mu$ g/g,来自于盆地相的 ZK205。其中该地区黑色页岩的平均 U 含量为 28.4 $\mu$ g/g,高于台内坳陷相 HSP 地区的 22.9 $\mu$ g/g、 MP 地区的 21.3 $\mu$ g/g 和上斜坡相 ZK102 的 10.0 $\mu$ g/g,且 U 含量超过 20 $\mu$ g/g 的富有机质黑色 页岩厚度达 8.5 m。在所有的研究剖面中,ZK205 的铀含量最高、厚度最大,表明 U 的富集主要出现 在盆地相,其次为台内坳陷相,上斜坡相的富集程度 最低。与 V、Mo、Ni 相同的是,灯影组硅化白云岩、 留茶坡组硅质岩和九门冲组灰色灰岩的 U 含量均 明显低于早寒武世的黑色页岩。

表 1 黔北地区下寒武统黑色岩系及上下沉积物的 TOC 和微量元素的均值含量 Table 1 Average TOC and trace elements contents in the Early Cambrian black shale and

沉积相	剖面/岩芯	层位	岩性	样品数目	TOC(%)	$Sc(\mu g/g)$	$Mo(\mu g/g)$	$V(\mu g/g)$	$Ni(\mu g/g)$	$\mathrm{U}(\mu\mathrm{g}/\mathrm{g})$
台内坳陷相	YK	牛蹄塘组 底部	黑色页岩	15	2.79	7.39	21.0	493	94.3	8.9
	DZLS		黑色页岩	18	5.78	2.53	61.6	2217	111.0	13.2
	HSP		黑色页岩	21	7.29	4.95	266.4	2441	358.4	22.9
	MP		黑色页岩	10	4.52	2.66	59.3	624	64.7	21.3
	ΥH		黑色页岩	34	5.95	1.31	38.6	4449	63.7	12.6
上斜坡相	ZK102	九门冲组	灰色灰岩	64	0.36	7.73	3.8	101	35.6	3.5
			黑色页岩	64	2.39	6.76	20.2	142	62.6	6.5
		牛蹄塘组	黑色页岩	37	6.40	20.5	29.4	252	71.6	10.0
		灯影组	硅化白云岩	20	0.08	14.0	0.37	78.8	37.1	1.08
盆地相	ZK205	九门冲组底部	黑色页岩	30	4.65					
		留茶坡组	黑色页岩	57	4.10	12.1	70.1	1671	113.8	28.4
		留茶坡组	黑色硅质岩	19	0.76	15.3	10.3	291	23.5	7.1

its surrounding rock from northern Guizhou

## 4 讨论

## 4.1 有机质与微量元素

扬子地区下寒武统牛蹄塘组黑色岩系中存在大量的化石(小壳化石、海绵骨针化石、碳质薄膜、印模化石、放射虫、菌类、藻类和疑源类),其中牛蹄塘组底部磷块岩中丰富的小壳动物化石被认为是寒武纪生命大爆发首幕(Yang Ruidong et al., 2004; Zheng Shiwen, 2014)。因此,推断当时海洋生产力 普遍较高,特别是在斜坡区或隆起区(如道坨 ZK102牛蹄塘组上覆地层的灰岩与黑色页岩间互 沉积,图 1),海水中有机质的产量和通量都很高。 黑色岩系富含黏土矿物和有机质,有机质在元素迁 移、聚集及成矿过程中扮演了重要角色,是微量元素 (如 V、Ni、Mo、U、Se、Sb 等)富集的载体(Yang Jian, 2009),有机质的沉积常伴随着很多氧化还原 敏感金属元素的富集(Passier et al., 1997; Arnaboldi et al., 2003)),与有机质一起在成岩过 程中被矿化(Rimmer et al., 2004)。Lott et al. (1999)对华南 Ni-Mo 矿石流体包裹体进行研究,认 为是古海洋中细菌和藻类富集了 Mo 和 V。生物标 志化合物(正烷烃、类异戊二烯烃、萜类化合物和甾 类化合物)也指示了有机质来源主要为菌类和藻类 (Chen Lan, 2006; Yang Jian, 2009; He Jinxian et al., 2011; Yang Ping et al., 2012)。有些微量元 素还是生物生长所必需的营养元素,如Ni、V、Mo 等。已有研究表明,海洋中无论是活体的还是已经 死亡了的浮游生物都会通过络合物的形式使金属元 素富集(Zheng Shiwen, 2014)。因此,黑色岩系有 机质的丰度与 Ni、Mo、V、U 等微量元素存在一定的 正相关性(图 3),在一定程度上,可以通过黑色岩系 中微量元素的富集程度来推测当时海洋的生产力。 为了比较微量元素在沉积物中的富集程度,使用公 式计算其富集系数,计算公式: $X_{\text{EF}} = \left[ (X/S_{\text{C}})_{\#_{\text{H}}} \right]$ (X/Sc)<sub>PAAS</sub>](Cheng et al., 2016),其中微量元素均 采用后太古宙澳大利亚页岩平均组分(PAAS)进行 标准化,这里的 X 和 Sc 分别代表元素 X 和 Sc 的质 量百分数,这个富集系数能够反映出沉积物样品中 的 X 元素相对于全球页岩 X 元素平均值的富集程 度。当 $X_{\text{EF}} > 3$ 时,表明X元素富集,当 $X_{\text{EF}} > 10$ 时,表明X元素大量的富集(Algeo et al., 2009)。 研究区下寒武统黑色岩系微量元素(Mo、U、V、Ni) 的富集系数变化见图3,微量元素在黑色页岩中富 集程度最大,其次在硅质岩中较富集,在灰岩富集程 度最小。

然而,微量元素和有机质的相关性并不是恒定 不变的。从本研究关注的黔北地区下寒武统黑色页 岩中可以看出,不同沉积相带有机质丰度和微量元 素的富集程度各有差异。如图 3,除了少部分数据 点异常以外,大部分数据点的 TOC 与微量元素(V、 Ni、Mo、U)含量在纵向上呈一定程度的正相关。台 内凹陷相牛蹄塘组剖面自下而上(图 4a),YK 剖面 TOC 变化平缓,微量元素整体上变化也较平缓; DZLS 剖面 TOC 和微量元素含量由底部往上整体 呈一定的趋势递减;HSP 剖面 TOC 和微量元素变 化基本一致,在中部 Ni-Mo 层附近均出现最大值 (除 V 以外);MP 剖面有机质变化较小,微量底部元 素变化幅度较大,中上部趋势与 TOC 基本一致; YH 剖面上部 TOC 变化较小(上部未做元素分析), 下部 TOC 与微量元素变化呈一定的正相关性。上



图 3 黔北地区下寒武统黑色岩系及上下沉积物 TOC 与氧化还原敏感元素相关图 Fig. 3 The correlation between TOC and redox sensitivity elements in the Early Cambrian black shale and its surrounding rock from northern Guizhou





斜坡相(ZK102)自下而上灯影组 TOC 和微量元素 的含量均很低,牛蹄塘组 TOC 和微量元素含量都 高,且与 Mo 和 U 的正相关性最好,V 和 Ni 的变化 不是很明显,九门冲组相关性较好,均是黑色页岩含 量高而灰岩含量低(图 4b),整体上上斜坡相的 TOC 与微量元素呈现由低一高一低的富集趋势,反 映了 海 水 由 浅一深一浅 的 变 化 过 程。盆 地 相 (ZK205)自下而上表现为留茶坡组 TOC 与微量元 素的波动较大,整体上呈很好的相关性,而九门冲组 TOC 的变化幅度较小(未做元素分析)(图 4b)。

虽然不同沉积相的有机质和微量元素在纵向上

均存在一定变化,但是整体上仍然能反映不同沉积 相带对有机质和微量元素的富集特征。在上斜坡相 中,V、Ni、Mo、U四种元素的富集程度均为最低;在 盆地相中,V和U的富集程度大于台内凹陷相,而 Ni和Mo的富集程度则低于台内凹陷相。这表明, 有机质和微量元素的富集程度明显受到沉积相带的 控制。

#### 4.2 氧化还原条件

沉积环境的氧化还原程度影响有机质和微量元 素的富集。由于不同氧化还原敏感元素的敏感度有 差异,通过这种差异可以对水体的氧化还原环境进 行判定。V 和 U 在沉积物中的富集代表着缺氧环 境,而Ni和Mo的异常富集常与H<sub>2</sub>S环境的形成 有关(Algeo et al., 2009; Glass et al., 2013),当 Mo的富集程度小而 U 和 V 富集时,可能指示了水 体为缺氧环境,当 Mo、U、V 均富集时水体才为硫化 环境(Tribovillard et al., 2006)。同样 V/Cr 值也 能反映水体的氧化还原环境,当 V/Cr<2 为氧化,2 ~4.25 为贫氧,>4.25 时为缺氧(Jones et al., 1994)。因此,可以通过微量元素(Mo、U、V 和 Ni) 在沉积物中的富集程度及 V/Cr 比值来判断古沉积 环境。数据分析显示(图 4),台内凹陷相中,YK 剖 面底部 Mo、U、V 的富集系数(以下全简称为 Mo<sub>EF</sub>、 U<sub>EF</sub>和 V<sub>EF</sub>)均>3,其中 Mo<sub>EF</sub>高达 68,且 V/Cr> 4.25,可能为缺氧硫化环境,往上 V/Cr 值指示为贫 氧环境,局部出现 Moer、Uer 和 Ver 值波动,因此可 能存在动态硫化环境,上部可能出现短暂的氧化; DZLS 剖面的 V/Cr 值指示主要为贫氧到缺氧环境, 含有两次极短期的氧化, Moer、Uer和 Ver 值反映可 能存在多次短暂硫化环境,顶部在野外剖面中为 Ni-Mo 矿层的老硐,应该也是硫化环境,但是数据 出现异常,可能样品已风化;HSP 剖面 V/Cr 值反 映主要为缺氧环境,除了底部部分可能为氧化以外, Mo<sub>FF</sub>、U<sub>FF</sub>和 V<sub>FF</sub>值整体较高(可达 20 以上),变化 较大,其中 Mo<sub>EF</sub> 最大达到 29490, 推测为 Ni-Mo 矿 层,环境为硫化; MP 剖面 V/Cr 值变化较大,下部 主要反映为贫氧-缺氧,上部以氧化为主,More、UFF 和Ver值反映了中部出现了不同程度短暂硫化环 境;YH 剖面 V/Cr 值反映主要为贫氧-缺氧环境,底 部可能出现短暂的氧化, More 、Ure 和 Vre 值反映的 硫化环境特征与 Jin et al. (2016)对瓮安剖面的研 究结论相似,反映了当时台内凹陷中 Mo、U、V 等微 量元素有足够大的储库,应该受水体的局限影响较 小。上斜坡相 ZK102 的 V/Cr 值反映了牛蹄塘组 主要为贫氧-缺氧环境,中部部分为氧化环境, Mo<sub>EF</sub>、U<sub>EF</sub>和 V<sub>EF</sub> 值反映了底部和上部可能出现局 部硫化;与之相比,其下伏地层灯影组为氧化环境, 上覆九门冲组主要为氧化-贫氧环境。盆地相 ZK205的 V/Cr 值反映了留茶坡组主要为缺氧环 境,中上部可能出现贫氧-氧化环境, MoEF、UEF和 Ver值反映了局部可能出现了硫化环境。

同样也有研究表明, Mo 和 U 这两种极其敏感 的氧化还原敏感元素的地球化学有很多极为重要的 相似和不同之处。Mo 在氧化水体中的溶解度非常 高,只有在铁-锰氢氧化物的水体中或硫化环境的沉 积物中相当富集(Cheng et al., 2015), 而 U 在沉积 物中的富集只与缺氧条件有关, Mo 能以颗粒传输 方式向沉积物中富集,而U却不会通过这种方式富 集。因此, Mo 和 U 往往在缺氧-硫化环境在沉积物 中富集,自生 Mo-U 共变关系可以作为低氧海洋系 统中的特殊的氧化还原指标(Algeo et al., 2012b; Tribovillard et al., 2012),用以判断水体中的缺氧-硫化条件。为了进一步验证不同沉积相带黑色页岩 的沉积环境,本研究选取了不同沉积相带黑色页岩 样品的 Mo 和 U 的富集系数进行作图分析(图 5)。 台内凹陷相牛蹄组黑色页岩样品和盆地留茶坡组黑 色硅质样品中 Mo 和 U 较为富集。除 5 个数据点 在 0.3 倍海水附近外, Mo/U 比值几乎位于 3 倍海 水左右(3×海水),部分数据点位于颗粒传输区域, 部分数据点位于硫化环境区域;上斜坡相的样品的 Mo和U富集程度较低,Mo/U比值比率在正常海 水与3倍海水(3×海水)间变化,也有颗粒传输机制 的参与,主要表现为弱氧化-缺氧环境;盆地相的样 品 Mo/U 比值主要位于缺氧与硫化之间,也有颗粒 传输机制的参与,说明了盆地内水体并不是很深,底 部可能出现短暂的硫化特征。





Fig. 5  $Mo_{EF}$  and  $U_{EF}$  covariation for black shale of Early Cambrian in northern Guizhou (the base map modified from Tribovillard et al. , 2012)

V/(V+Ni)比值也可以作为反映水体的氧化 还原环境的指标,V/(V+Ni)≤0.46 为氧化、0.57 ~0.46 贫氧、0.57 ~0.83 缺氧、1 ~0.83 硫化 (Wingnall, 1994)。对黑色页岩的 V/(V+Ni)作图 分析(图 6),研究区台内凹陷相的 V/(V+Ni)值大 部分在 0.83 以上,表现为硫化环境。盆地相的 V/







(V+Ni)比值波动较大,从贫氧到硫化均有分布,表明盆地相沉积环境存在动态变化特征。上斜坡相多数样品的 V/(V+Ni)比值多在 0.57~0.83 之间,表现为缺氧的沉积环境。

综合以上的氧化还原判定指标,基本可以确定, 早寒武世的黔北地区,台内坳陷相的底部沉积环境 主要为贫氧-缺氧环境,以及短暂动态的硫化环境。 上斜坡相的底部水体环境可能受海平面升降和上升 洋流的影响,表现为贫氧到氧化的沉积环境,但更多 表现为氧化的沉积环境,其中牛蹄塘期存在局部的 硫化环境。盆地相主要为缺氧环境,期间伴随有贫 氧和短暂的氧化环境存在,且可能存在局部的硫化 环境(图 7)。

## 4.3 古沉积环境的受限制程度

黑色页岩中 Mo 的富集程度主要取决于当时海



图 7 黔北不同沉积相带下寒武统黑色岩系的沉积环境

Fig. 7 The environment of black rock series of different sedimentary facies in the Early Cambrian of northern Guizhou

洋中 Mo 储库的大小, 而该储库受风化输入量和不 同沉积环境下 Mo 的扣留量共同控制(Scott et al., 2008)。Mo在沉积物中的富集程度还与盆地内海 水的交换速率有关,沉积物中的 Mo 与海水中的有 机质丰度呈正相关关系( $M_{O_{\#_{H}}} = M_{O_{\#_{H}}} \times TOC$ ) (Algeo et al., 2012a),因此 Mo/TOC 可以去除 TOC 对 Mo 的富集效应,可以指示水体中 Mo 有效 值。另外,当水体为缺氧环境时,Mo/TOC 值还可 以用来判断水体的受限制程度(Algeo et al., 2006; Scott et al., 2008). Algeo et al. (2006), Tribovillard et al. (2012)对开放程度不同的缺氧-硫化海洋盆地的沉积物中的 Mo/TOC 值作过详细 的研究,发现 Mo/TOC 值在强烈局限的黑海约为 4.5、半局限较强的挪威 Framvaren 峡湾约为 9、局 限程度较轻的委内瑞拉中北部 Cariaco 盆地约 25、 较开放的加拿大 Saanich 海湾约 45,进而提出了判 断水体开放程度的 Mo/TOC 值标准,即开放性盆地 >35、半局限盆地为15~35、局限盆地<15。

选取黑色页岩的 Mo/TOC 与 V/(V+Ni)值作 图分析(图 6),可以得出台内坳陷相的 YK、DZLS、 HSP、MP、YH 等地区的 Mo/TOC 平均值分别为 7.5、11.9、13.4、13.1、5.4,表现为先增加,再降低的 趋势。数据投点反映了黔北地区的上寒武统台内坳 陷相为局限盆地沉积,YK 和 YH 地区可能为台内 坳陷的边缘,DZLS、MP 和 HSP 地区则可能是台内 坳陷的中部区域。以 Mo/TOC 值反映的该局限盆 地整体受限制程度为 10.3,接近于挪威 Framvaren 峡湾;盆地相 ZK102 的 Mo/TOC 均值为 17.8,反映 了其局限性中等,居于挪威 Framvaren 峡湾和委内 瑞拉中北部 Cariaco 盆地的局限程度之间。上斜坡 相 ZK102 的 Mo/TOC 值变化范围较大,可能受上 升洋流或表层海水循环的影响,在沉积过程中水体 变化较大。

## 5 结论

本文通过对华南扬子地台黔北下寒武统不同沉 积相带黑色岩系具有代表性的露头剖面和岩芯进行 取样研究,认为黔北地区在早寒武世经历了台内沉 降,由埃迪卡拉纪的台地-斜坡-盆地相沉积转变为 台内凹陷-斜坡-盆地的沉积模式。在寒武纪早期, 不同沉积相带具有不同的氧化还原状态,而且沉积 的黑色岩系表现出不同的岩性组合特征及其氧化还 原状态,其中,台内凹陷相沉积环境为贫氧-缺氧,以 及短暂动态的硫化环境,水体较局限,沉积的黑色页 岩厚度大,有机质丰度高;上斜坡相的沉积环境为贫 氧-氧化,但更多地表现为氧化的沉积环境,其中牛 蹄塘期存在局部的硫化环境,同期沉积的黑色页岩 厚度最小,但有机质丰度最高;盆地相主要为缺氧环 境,期间伴随有贫氧和短暂的氧化环境存在,且可能 存在局部的硫化环境,水体局限性中等,黑色页岩的 厚度最大,但有机质丰度相对较低。总的来说,黔北 下寒武统黑色岩系的有机质丰度、厚度以及微量元 素的富集等主要受控于不同沉积相带的沉积环境。

**致谢:**感谢中国科学院地质与地球物理研究所 陈代钊研究员、周锡强副研究员的指导以及梁厚鹏 和李安玉等人在野外露头工作中的帮助。

#### References

- Algeo T J, Lyons T W. 2006. Mo-total organic carbon covariation in modern anoxic marine environments: Implications for analysis of paleo-redox and paleo-hydrographic conditions. Paleoceanography, 21(21): 279~298.
- Algeo T J, Morford J, Cruse A. 2012a. Reprint of: Newapplications of trace metals as proxies in marine paleoenvironments. Chemical Geology, 324~325(2): 1~5.
- Algeo T J, Rowe H. 2012b. Paleoceanographic applications of trace metal concentration data. Chemical Geology,  $324 \sim 325$ : 6  $\sim 18$ .
- Algeo T J, Tribovillard N. 2009. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation. Chemical Geology, 268(3~4): 211~225.
- Arnaboldi M, Meyers P A. 2003. Geochemical evidence for paleoclimatic variations during deposition of two Late Pliocene sapropels from the Vrica section, Calabria. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 190(1): 257~271.
- Arthur M A, Dean W E, Laarkamp K. 1998. Organic carbon accumulation and preservation in surface sediments on the Peru margin. Chemical Geology, 152(3): 273~286.
- Cai Xiyao, Dou Liwei, Jiang Huashan, Yu Tengxiao, Cao Zicheng. 2014. Classification and correlation of Cambrian in eastern Tarim Basin. Petroleum Geology & Experiment, 36(5): 539~ 545 (in Chinese with English abstract).
- Cao J, Hu K, Zhou J, Shi C, Bian L, Yao S. 2013. Organic clots and their differential accumulation of Ni and Mo within earlyCambrian black-shale-hosted polymetallic Ni-Mo deposits, Zunyi, South China. Journal of Asian Earth Sciences, 62: 531  $\sim$ 536.
- Charvet J. 2013. The Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic evolution of the South China Block: An overview. Journal of Asian Earth Sciences, 74(18): 198~209.
- Chen D, Wang J, Qing H, Yan D, Li R. 2009. Hydrothermal venting activities in the early Cambrian, South China: petrological, geochronological and stable isotopic constraints. Chemical Geology, 258(3~4): 168~181.
- Chen D, Zhou X, Fu Y, Wang J G. 2015. New U-Pb zircon ages of the Ediacaran-Cambrian boundary strata in South China. Terra Nova, 27(1): 62~68.
- Chen Lan. 2006. Sedimentology and geochemistry of the Early Cambrian black rock series in the Hunan-Guizhou area, China. PhD thesis of the Institute of Geochemistry of the Chinese Academy of Sciences,  $1 \sim 89$  (in Chinese with English abstract).
- Cheng M, Li C, Zhou L, Algeo T J, Zhang F, Romaniello S, Jin C S, Lei L D, Feng L J, Jiang S Y. 2016. Marine Mo biogeochemistry in the context of dynamically euxinic mid-depth

waters: A case study of the lower Cambrian Niutitang shales, South China. Geochmica et Cosmochimica Acta, 183:  $79 \sim 93$ .

- Cheng M, Li C, Zhou L, Xie S. 2015. Mo marine geochemistry and reconstruction of ancient ocean redox states. Science China: Earth Sciences, 58(12): 1~11.
- Fu Y, Dong L, Li C, Qu W, Pei H, Qiao W, Shen B. 2016. New Re-Os isotopic constrains on the formation of the metalliferous deposits of the lower Cambrian NiutitangFormation. Journal of Earth Science, 27(2), 271~281.
- Gallego-Torres D, Martínez-Ruiz F, Paytan A, Jiménez-Espejo F J, Ortega-Huertas M. 2007. Pliocene-holocene evolution of depositional conditions in the eastern mediterranean: role of anoxia vs. productivity at time of sapropel deposition. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 246: 424 ~439.
- Glass J B, Chappaz A, Eustis B, Heyvaert A C, Waetjen D P, Hartnett H E, Anbar A D. 2013. Molybdenum geochemistry in a seasonally dysoxic Mo-limited lacustrine ecosystem. Geochimica et Cosmochimica Acta, 114(4): 204~219.
- Guo Chuntao, Dong Shunli, Li Zhong. 2019. Detrital zircon U-Pb geochronology of Upper Cambrian-Lower Silurian sandstone in the Wushi area, northeastern margin of Tarim basin: implications for provenance system and tectonic evolution. Acta Geologica Sinica, 93(11): 2759~2769 (in Chinese with English abstract).
- Guo Q, Shields G A, Liu C, Strauss H, ZhuM, Pi D, Goldberg T, Yang X L. 2007. Trace element chemostratigraphy of two Ediacaran-Cambrian successions in South China: Implications for organosedimentary metal enrichment and silicification in the Early Cambrian. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 254: 328~349.
- Han T, Zhu X, Li K, Jiang L, Zhao C, Wang Z. 2015. Metal sources for the polymetallic Ni-Mo-PGE mineralization in the black shales of the lowerCambrian Niutitang Formation, South China. Ore Geology Reviews, 67: 158~169.
- He Jinxian, Duan Yi, Zhang Xiaoli, Wu Baoxiang. 2011. Geologic characteristics and hydrocarbon resource implication of the black shale in Niutitang Formation of the Lower Cambrian, Guizhou Province. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 26 (3): 37  $\sim$  42 + 8 (in Chinese with English abstract).
- Jenkyns H C. 2010. Geochemistry of oceanic anoxic events. Geochemistry Geophysics Geosystems, 11(3):  $427 \sim 428$ .
- Jiang G, Wang X, Shi X, Xiao S, Zhang S, Dong J. 2012. The origin of decoupled carbonate and organic carbon isotope signatures in the early Cambrian (ca. 542-520Ma) Yangtze platform. Earth and Planetary Science Letters, 317~318(2): 96~110.
- Jin C, Li C, Algeo T J, Planavsky N J, Cui H, Yang X L, Zhao Y L, Zhang X L, Xie S C. 2016. A highly redox-heterogeneous ocean in South China during the early Cambrian (~529-514? Ma): implications for biota-environment co-evolution. Earth and Planetary Science Letters, 441: 38~51.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. Chemical Geology, 111: 111~129.
- Lehmann B, Nägler T F, Holland H D, Wille M, Mao J, Pan J, Ma D, Dulski P. 2007. Highly metalliferous carbonaceous shale and Early Cambrian seawater. Geology, 35: 403~406.
- Li Wenzheng, Zhang Jianyong, Hao Yi, Ni Chao, Tian Han, Zeng Yiyang, Yao Qianying, Shan Shujiao, Cao Jiiang, Zou Qian. 2019. Characteristics of carbon and oxygen isotopic, paleoceanographic environment and their relationship with reservoirs of the Xixiangchi Formation, southeastern Sichuan basin. Acta Geologica Sinica, 93(2): 487 ~ 500 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dezheng, 1986. Correlation and division of Lower Cambrian in Liaoning Province, Journal of Stratigraphy, 10(3): 169~177 (in Chinese with English abstract).

- Mort H, Jacquat O, Adatte T, Steinmann P, FöLlmi K, Matera V, Berner Z, Stüben D. 2007. TheCenomanian/Turonian anoxic event at the Bonarelli level in Italy and Spain: enhanced productivity and/or better preservation? Cretaceous Research, 28(4): 597~612.
- Passier H F, Middelburg J J, de Lange G J, Böttcher M E. 1997. Pyrite contents, microtextures, and sulfur isotopes in relation to formation of the youngest eastern mediterranean sapropel. Geology, 25(6): 519~522.
- Rimmer S M, Thompson J A, Goodnight S A, Robl T L. 2004. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 215(1-2): 125~154.
- Sageman B B, Murphy A E, Werne J P, Straeten C A V, Hollander D J, Lyons T W. 2003. A tale of shales: the relative roles of production, decomposition, and dilution in the accumulation of organic-rich strata, middle-upper Devonian, Appalachian Basin. Chemical Geology, 195(1-4): 229~273.
- Scott C, Lyons T W, Bekker A, Shen Y, Poulton S W, Chu X, Anbar A D. 2008. Tracing the stepwise oxygenation of the Proterozoic ocean. Nature, 452(7186): 456~459.
- Shi C, Cao J, Hu K, Bian L, Yao S, Zhou J, Han S C. 2014. New understandings of Ni-Mo mineralization in early Cambrian black shales of South China: Constraints from variations in organic matter in metallic and non-metallic intervals. Ore Geology Reviews, 59(4): 73~82.
- Shu L S, Faure M, Yu J H, Jahn B M. 2011. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia. Precambrian Research, 187(3~4): 263~276.
- Tao Shizhen, Liu Deliang, Li Changwei, Cao Gaoshe, Li Zhensheng, Hu Suyun, Qin Shengfei, Gao Xiaohui, Liu Quanyou, Deng Guorong, Wu Xianghua, Li Guangzhi, HuBin. 2014. Exploration frontiers of unexplored shale layer in new district, north China block: Source rock and its gas system of Madian Formation of Lower Cambran in the southern part of North China Block (SNCB). Natural Gas Geoscience, 25(11): 1767~1780 (in Chinese with English abstract).
- Tribovillard N, Algeo T J. Baudin F, Riboulleau A. 2012. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenumuranium covariation, applications to Mesozoicpaleoce anography. Chemical Geology, 324~325: 46~58.
- Tribovillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update. Chemical Geology, 232(1-2): 12~32.
- Wang D, Struck U, Ling H F, Guo Q J, Shields-Zhou G A, Zhu M Y, Yao S P. 2015. Marine redox variations and nitrogen cycle of the early Cambrian southern margin of the Yangtze platform, South China: Evidence from nitrogen and organic carbon isotopes. Precambrian Research, 267: 209~226.
- Wei H, Chen D, Wang J, Yu H, Tucker M E. 2012. Organic accumulation in the lower ChihsiaFormation (middle Permian) of South China: Constraints from pyrite morphology and multiple geochemical proxies. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 353-355: 73~86.
- Wingnall P B. 1994. Black Shales. Oxford: Clarendon Press, 45  ${\sim}89.$
- Wu C D, Chen Q Y, Lei J J. 1999. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the upper Sinian to the lower Cambrian, southwest of China. Acta Petrologica Sinica, 15(3): 453~462.
- Xia Peng, Fu Yong, Yang Zhen, Guo Chuan, Huang Jinqiang, Huang Mingyong. 2020. Relationship between sedimentary environment and organic matter accumulation of Niutitang black shale in Zhenyuan, northern Guizhou. Acta Geologica Sinica, 94(3): 947~956 (in Chinese with English abstract).
- Xiang Lei, Cai Chunfang, He Xunyun, Jiang Lei, Yuan Yuyang, Wang Tiankai, Jia Lianqi. 2015. Ocean redox state evolution

and its controlling factors during Cambrian Terreneuvian Epoch: Evidence from Lijiatuo section, South China. Earth Science, 40 (7): 1197  $\sim$  1214 (in Chinese with English abstract).

- Yang Jian. 2009. Study on the formation environment and geochemistry of Lower Cambrian black shale series, northern Guizhou Province, China. PhD thesis of Chang'An University,  $1 \sim 132$  (in Chinese with English abstract).
- Yang Ping, Wang Zhengjiang, Xie Yuan, Du Qiuding, Chen Houguo, He Yongzhong. 2012. The biomarker characteristics and sedimentary environment of Lower Cambrian Niutitang Formation source rock in northern Guizhou. Geological Bulletin of China, 31 (11): 1910 ~ 1921 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ruidong, Mao Jiaren, Zhang Weihua, Jiang Lijun, GaoHui. 2004. Fossil preservation and palaeoecological research in Early Cambrian black shale. Acta Sedimentologica Sinica, 22(4): 664-671 (in Chinese with English abstract).
- Yeasmin R, Chen D, Fu Y, Wang J, Guo Z, Guo C. 2016. Climatic-oceanic forcing on the organic accumulation across the shelf during the early Cambrian (age 2 through 3) in the midupper Yangtze block, NE Guizhou, South China. Journal of Asian Earth Sciences, 134: 365~386.
- Zhang Shuichang, Liang Digang, Zhang Dajiang. 2002. Evaluation criteria for Paleozoic effective hydrocarbon source rocks. Petroleum Exploration and Development, 29(2): 8~12 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Shiwen. 2014. Biological mineralization at the bottom of Cambrian Niutitang Formation of Tianmen Mountain in Hunan. Master's thesis of Chengdu University of Technology,  $1 \sim 33$  (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenxi. 2017. Sedimentary environment and geochemical characteristics of the lower Cambrian black rock series in northern Guizhou. Master's thesis of Guizhou University, 1~ 66 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guangyou, Chen Feiran, Chen Zhiyong, Zhang Ying, Xing Xiang, Tao Xiaowang, Ma Debo. 2016. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin. Natural Gas Geoscience, 27 (1): 8∼21 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunchun, Wang Zecheng, Zhang Baomin, Wei Guoqi, Wang Tongshan, Yao Genshuns, Deng Shenghui, Liu Jingjiang, Zhou Hui, Xu Anna, Yang Zhi, Jiang Hua, Gu Zhidong. 2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 41 (3): 278 ~ 293 (in Chinese with English abstract).

#### 参考文献

蔡习尧,窦丽玮,蒋华山,余腾孝,曹自成. 2014. 塔里木盆地塔东

地区寒武系划分与对比.石油实验地质,36(5):539~545.

- 陈兰. 2006. 湘黔地区早寒武世黑色岩系沉积学及地球化学研究. 中国科学院地球化学研究所博士学位论文,1~89.
- 郭春涛,董顺利,李忠. 2019. 塔里木盆地西北缘乌什地区上寒武统-下志留统碎屑锆石 U-Pb 年代学及对物源体系和构造演化的指示.地质学报,93(11):2759~2769.
- 何金先,段毅,张晓丽,吴保祥.2011.贵州地区下寒武统牛蹄塘组 黑色页岩地质特征及其油气资源意义.西安石油大学学报(自 然科学版),26(3):37~42.
- 李文正,张建勇,郝毅,倪超,田瀚,曾乙洋,姚倩颖,山述娇,曹 脊翔,邹倩. 2019. 川东南地区洗象组碳氧同位素特征、古海洋 环境及其与储集层的关系.地质学报,93(2):487~500.
- 刘德正.1986.辽宁下寒武统对比与划分.地层学杂志,10(3):169 ~177.
- 陶士振,刘德良,李昌伟,曹高社,李振生,胡素云,秦胜飞,高晓辉, 刘全有,邓国荣,吴向华,李广志,胡斌. 2014. 华北陆块新区 新层页岩气潜在勘探新领域——南华北下寒武统马店组烃源 岩及其含气系统.天然气地球科学,25(11):1767~1780.
- 夏鹏, 付勇, 杨镇, 郭川, 黄金强, 黄明勇. 2020. 黔北镇远牛蹄塘 组黑色页岩沉积环境与有机质富集关系. 地质学报, 94(3): 947~956.
- 向雷,蔡春芳,贺训云,姜磊,袁余洋,汪天凯,贾连奇.2015. 华 南李家沱剖面寒武纪纽芬兰世海水氧化还原性质演化及其驱 动因素.地球科学,40(7):1197~1214.
- 杨爱华,朱茂炎,张俊明. 2008. 皖南、浙西寒武系黄柏岭组和荷塘 组的年代地层学研究. 地层学杂志, 32(4): 343~352+455.
- 杨剑. 2009. 黔北地区下寒武统黑色岩系形成环境与地球化学研究. 长安大学博士学位论文,1~132.
- 杨平,汪正江,谢渊,杜秋定,陈厚国,贺永忠. 2012. 黔北下寒武 统牛蹄塘组烃源岩的生物标志物特征和沉积环境.地质通报, 31(11):1910~1921.
- 杨瑞东,毛家仁,张位华,姜立君,高慧.2004.贵州早寒武世早期 黑色页岩中生物化石保存及生态学研究.沉积学报,22(4): 664~671.
- 张水昌,梁狄刚,张大江. 2002. 关于古生界烃源岩有机质丰度的 评价标准. 石油勘探与开发, 29(2): 8~12.
- 郑世雯. 2014. 湖南天门山寒武系牛蹄塘组底部生物成矿. 成都理 工大学硕士学位论文,1~33.
- 周文喜.2017. 黔北地区下寒武统黑色岩系的沉积环境与地球化学 研究.贵州大学硕士学位论文,1~66.
- 朱光有,陈斐然,陈志勇,张颖,邢翔,陶小晚,马德波. 2016. 塔 里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征. 天然气地球科学,27(1):8~21.
- 邹才能,杜金虎,徐春春,汪泽成,张宝民,魏国齐,王铜山,姚根顺,邓胜徽,刘静江,周慧,徐安娜,杨智,姜华,谷志东. 2014.四川盆地震旦系一寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现.石油勘探与开发,41(3):278~293.

# The relationship between environment and geochemical characteristics of black rock series of Lower Cambrian in northern Guizhou

FU Yong<sup>\*1)</sup>, ZHOU Wenxi<sup>1,2)</sup>, WANG Huajian<sup>2)</sup>, QIAO Wenlang<sup>4)</sup>, YE Yuntao<sup>2,3)</sup>, JIANG Ran<sup>1)</sup>, WANG Xiaomei<sup>2)</sup>, SU Jin<sup>2)</sup>, LI Di<sup>1,2)</sup>, XIA Peng<sup>1)</sup>

1) College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025;

2) Key Laboratory of Petroleum Geochemistry, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing, 100083;

3) Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences,

Peking University, Beijing, 100871;

4) 102 Geological Brigade of Guizhou Bureau of Geology and Mineral, Zunyi, Guizhou, 563003

\* Corresponding author: byez1225@126.com

#### Abstract

The lower Cambrian black rock series are widely distributed in North China, South China, and Tarim basin, but the controlling factors and distribution characteristics of organic-rich mudstone and shale are still being debated. In this study, we collected samples of the Niutitang Formation (or its time-equivalent) from eight typical profiles of different sedimentary environments and carried out integrated geochemical analyses. The results suggest that different sedimentary environments are characterized by different redox conditions during the early Cambrian. Sediment lithologies of the inner platform are mainly black shales with some thinly bedded phosphatic rocks and cherts or phosphate/chert nodules. The black shales are thick and have high abundance of organic matter. Trace elements (V, Ni, Mo and U) of black shale from the inner platform facies are significantly enriched, which indicate sulfidic environment. Mo/TOC reflects a restricted water column. The upper slope settings may have developed under sulfidic-suboxic dynamic water masses. The thickness of black shales is small, but organic matter abundance is the most high. Trace elements (V, Ni, Mo and U) enrichments are low and Mo/TOC data suggest a moderately restricted water column. Basin facies strata are composed of interbedded black chert and black siliceous shale, which are thin and have low organic matter abundance. The enrichment factors of V and U are higher than those in the inner platform, but for Ni and Mo, their EF values are relatively lower. The majority of the basinal strata were deposited in anoxic conditions; however, the fluctuation of Mo/TOC may reflect ephemeral upwelling activities. In conclusion, the thickness, organic matter abundance and enrichment of trace elements of the lower Cambrian black rock series in northern Guizhou are mainly controlled by the belts of different sedimentary environment and different redox states.

Key words: Lower Cambrian; Niutitang Formation; black rock series; sedimentary environment; geochemical characteristics; northern Guizhou