



滇东会泽地区筇竹寺组黑色岩系古环境、物源及构造背景:来自稀土元素地球化学的指示

程涌^{1,2},文义明¹,聂琪¹,罗开²,张金梁¹,和东浩¹,刘洋¹,伍伟¹

1. 昆明冶金高等专科学校 冶金与矿业学院, 云南 昆明 650033

2. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

文章编号: 1001-6872(2024)04-0058-13

DOI: 10.19719/j.cnki.1001-6872.2024.04.05

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/51.1143.td.20240925.1134.002>

引用格式: 程涌, 文义明, 聂琪, 等. 滇东会泽地区筇竹寺组黑色岩系古环境、物源及构造背景: 来自稀土元素地球化学的指示[J]. 矿物岩石, 2024, 44(4): 58-70.

CHENG Yong, WEN Yiming, NIE Qi, *et al.* Paleoenvironmental, provenance, and tectonic setting of the Qiongzhusi Formation black shale series in Huize area, eastern Yunnan: insights from rare earth element geochemistry[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2024, 44(4): 58-70.

【摘要】 滇东地区早寒武世广泛发育的黑色岩系不仅是页岩气勘探的潜在层位,也具有显著的矿产勘探前景。本研究以会泽地区下寒武统筇竹寺组的黑色岩系为对象,通过系统的采样和稀土元素(REE)分析,旨在揭示其古环境、构造背景和物源,从而为矿床勘查和页岩气评价提供地质依据。分析结果显示,黑色岩系的稀土总量(Σ REE)含量介于 $26.11 \times 10^{-6} \sim 272.82 \times 10^{-6}$ 之间,表现出轻稀土元素富集、重稀土元素平坦的配分特征,伴随中度的负Eu异常和轻度的负Ce异常,与大陆上地壳稀土元素配分模式相似。样品的 Σ REE从下部到上部总体有所增加,揭示了沉积期间总体较为温暖潮湿的气候特征。 δ Ce值和 Ce_{anom} 值表明,筇竹寺组形成于沉积水体较深的贫氧环境。 $(Eu/Sm)_N-(Sm/Yb)_N$ 二元图解及微量元素特征指示了该黑色岩系受到了富金属热水作用的轻微影响。通过综合分析 δ Eu、 δ Ce、 Σ REE及其他地球化学参数,推断筇竹寺组黑色岩系母岩主要为长英质岩石。稀土元素特征参数的对比进一步表明,该黑色岩系的构造背景为大陆岛弧环境。综合研究揭示了该黑色岩系沉积于扬子地块西南缘的局限海盆,受到康滇古陆陆源碎屑、还原性沉积环境及海洋海底富金属热水的共同作用。本研究不仅增进了对筇竹寺组黑色岩系形成机制的理解,也为该地区矿产资源勘探提供了新的视角。

【关键词】 筇竹寺组;黑色岩系;稀土元素;地球化学

0 引言

稀土元素(REE)作为地壳中普遍存在的一类独

特元素,因其在地球化学过程中表现出的稳定性和较低的反应活性而备受关注^[1]。这些元素在地壳岩石中的分布极为广泛,并且在多样的地质变迁中保持了它们的原始特征。正因如此,稀土元素已成为

收稿日期:2024-04-28;改回日期:2024-08-11

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:41672073);云南省科技厅科技计划项目(编号:202401AT070047);昆明冶金高等专科学校基金(编号:2022xjy23)

第一作者简介:程涌,男,35岁,副教授(博士),矿产普查与勘探专业,研究方向:沉积盆地金属与油气资源。E-mail:cheng_yong1988@163.com

通信作者:文义明,男,38岁,副教授(硕士生导师),智能采矿工程专业,研究方向:矿山地质与智慧矿山。E-mail:kmcymw@163.com

解析沉积盆地物质来源、重建古环境条件、追溯古构造活动以及评估古气候变化等地质研究的关键指标^[2,3],其应用在学术界和勘探领域均得到了充分肯定。近年来,一些学者运用稀土元素的特殊性质对泥页岩等沉积矿产开展了较深入的研究工作^[4~6],获取了丰富的地质信息和基础资料,以探索成矿机制和服务于矿产的勘探开发。

下寒武统筇竹寺组(c_1q)是我国重要的页岩气开发层位之一,对其的研究主要集中于四川盆地,且已经发现了良好的天然气显示,展现出巨大的勘探前景。研究表明,滇东曲靖一会泽地区筇竹寺组黑色岩系也具有良好的页岩气勘探前景^[7]。前人对其成藏地质条件^[8,9]、储层特征^[10,11]、形成环境^[12]等进行了一些探索性研究,而对物质来源、母岩特征以及构造背景还缺乏较为深入的认识。相邻的贵州地区已取得下寒武统筇竹寺组黑色岩系找矿的重大突破,如全球第一的贵州天柱超大型重晶石矿床^[13]、贵州遵义下寒武统黑色岩系 Ni-Mo 多金属矿床等^[14]。滇东地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系成矿条件较好,具有较大勘探前景,但有待取得勘探突破^[15,16]。

为探讨滇东下寒武统黑色岩系的古环境、构造背景和物源,对研究区筇竹寺组黑色岩系样品进行了稀土元素地球化学测试,以期为该地区黑色岩系矿床勘查和页岩气选区评价提供一定的地质依据。

1 地质背景

华南板块由扬子和华夏两个地块组成,自 Rodinia 超大陆解体以来直至寒武纪早期,其一直作为一个被浩瀚海洋所环绕的独立板块游荡于北半球中纬度区域^[17]。本次研究关注的滇东区域属于扬子地块的西南边缘,大地构造位置处于环太平洋地质构造带和特提斯-喜马拉雅地质构造带的交汇处,紧邻欧亚板块与印度板块的碰撞边界(图 1a)^[18]。地质历史上,随着冈瓦纳大陆与欧亚大陆的相互作用,包括腾冲地块、保山地块、兰坪-思茅地块以及印度地块在内的多个地块逐渐拼合,共同塑造了该地区错综复杂的地质构造框架。区域内显著的断裂活动包括 SN 向的元谋-绿汁江断裂和小江断裂, NW 向的垭都-紫云断裂,以及 NE 向的弥勒-师宗断裂。

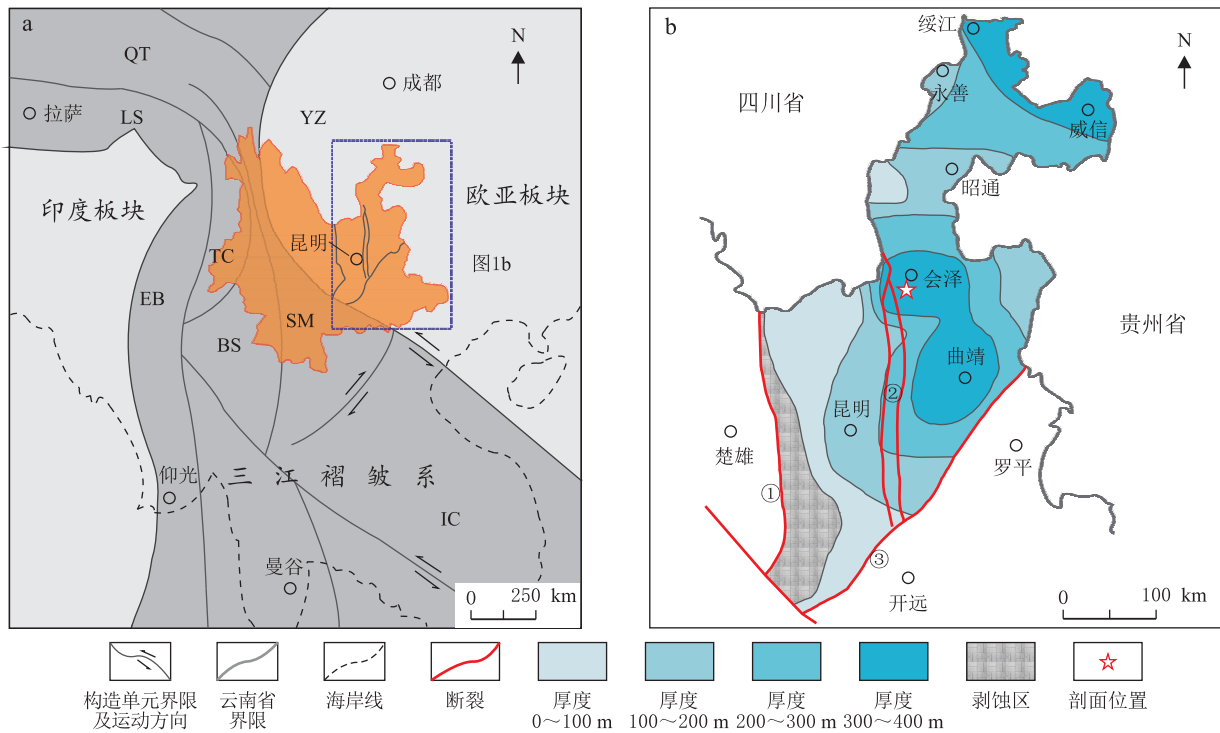


图 1 研究区大地构造格架及筇竹寺组分布特点

Fig. 1 Geotectonic framework and distribution characteristics of the Qiongzhusi Formation in the study area
a. 研究区大地构造位置图(据文献[19]修改); b. 下寒武统筇竹寺组等厚图(据文献[20]修改); YZ. 扬子地块; QT. 羌塘地块; LS. 拉萨地块; EB. 东缅地块; TC. 腾冲地块; BS. 保山地块; SM. 思茅地块; IC. 印支地块; ①. 元谋-绿汁江断裂; ②. 小江断裂; ③. 弥勒-师宗断裂。

研究区大致经历了以下几个阶段的构造演化阶段(张志斌等):(1)晚太古宙-中、晚元古代早期双层

基底形成阶段;(2)早震旦世(850~700 Ma)大陆裂谷阶段;(3)晚震旦世-古生代末被动大陆边缘阶段;

(4)晚二叠世-晚三叠世地幔柱活动及陆内裂谷阶段;(5)晚三叠世晚期-白垩纪前陆盆地,造山带阶段;(6)古近纪-第四纪现代地质地貌构造形成阶段。筇竹寺组沉积时,随着裂陷作用的进行,发生大规模海侵形成广阔的陆表海。研究区在昭通-会泽-曲靖一线形成了局限海盆,其东部与广阔的上扬子陆表海相接。该套筇竹寺组黑色岩系岩性主要为灰黑-灰绿色页岩、粉砂质页岩、黑色碳质页岩以及泥质粉砂岩^[7,19]。

2 样品与测试

2.1 剖面特点

本次研究选择会泽县大海乡老林村下寒武统筇竹寺组剖面为研究对象(图 1b)。筇竹寺组与下伏下寒武统渔户村组(c_1y)整合接触,与上覆下寒武统沧浪铺组(c_1c)亦整合接触。由于沿线公路的揭露,该剖面出露良好,岩石较新鲜。根据岩性差异将筇竹寺组分为 13 层,所测得其总厚度 394.68 m(图 2)。现将实测剖面地层特征描述如下:

上覆地层

下寒武统沧浪铺组(c_1c)

(15)厚层状浅黄色中细粒长石石英砂岩,夹薄层黄绿色页岩,交错层理发育,界限上下岩性差异明显。未到底。…………… >15.40 m

整合接触

下寒武统筇竹寺组(c_1q)

(14)中-薄层黄绿色页岩,块状构造,黏土含量高,岩性较软。…………… 8.60 m

(13)中-厚层灰绿色页岩,块状构造,黏土含量高,岩性较软。…………… 12.64 m

(12)中-厚层灰黑色页岩,块状构造,常风化破碎块。…………… 19.56 m

(11)薄层状深灰色粉砂质页岩,块状构造,常风化竹叶状。…………… 17.92 m

(10)薄层状灰绿色页岩,块状构造。…………… 20.60 m

(9)中-厚层黑色页岩,发育水平层理。…………… 15.84 m

(8)中薄-中厚层炭质页岩,块状构造。…………… 12.72 m

(7)厚层状深灰-灰黑色粉砂岩,发育水平层理,夹有黄色砂质条带。…………… 134.64 m

(6)中厚层黑色粉砂质白云岩,块状构造。…………… 20.16 m

(5)中薄层黑色泥质灰岩,夹泥质泥质白云岩,块状构造为主,可见不明显的水平纹层,中间夹有一层灰绿色页岩。…………… 68.12 m

(4)中厚-厚层黑色粉砂质泥岩,块状构造。…………… 32.16 m

(3)中厚层浅黄色中细粒石英砂岩。…………… 12.04 m

(2)中厚-厚层黑色泥质粉砂岩,块状构造。…………… 19.68 m

整合接触

下伏地层

下寒武统渔户村组(c_1y)

(1)蓝灰色磷块岩夹硅质灰岩、钙质页岩、砂质白云岩。未到底。…………… >10.44 m

2.2 样品与测试

该统筇竹寺组剖面连续沉积,发育完整。本次野外采样工作中考虑到不同的颜色、结构和构造特点,从底部到顶部间隔一定距离采取了 21 块样品。取样时,挖除受到一定程度风化的表层岩石,以保证样品的新鲜。经过仔细观察分析后,挑选出 14 件代表性样品开展全岩微量元素测试(图 2)。

在分析测试之前将样品用玛瑙研钵研磨成 200 目的粉末,然后送至武汉上谱分析科技有限责任公司进行稀土元素分析。测试仪器为 Agilent 7700e 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)。测试方法参照国家标准《硅酸盐岩石化学分析方法》(GB/T 14506.30-2010)。样品前处理的详细流程、测试精度等参考文献^[19]。

3 结果

会泽地区筇竹寺组黑色岩系样品稀土元素测试结果表明(表 1),稀土总量(ΣREE)变化较大,介于 $26.11 \times 10^{-6} \sim 272.82 \times 10^{-6}$ 之间,平均值为 137.95×10^{-6} 。其中,碳酸盐岩类和粉砂岩类 ΣREE 含量较低,分别为 $26.11 \times 10^{-6} \sim 105.30 \times 10^{-6}$ (平均 59.74×10^{-6}) 和 $73.56 \times 10^{-6} \sim 160.84 \times 10^{-6}$ (平均 121.97×10^{-6})。页岩类 ΣREE 含量总体较高,为 $80.15 \times 10^{-6} \sim 272.82 \times 10^{-6}$,平均值为 180.60×10^{-6} 。尽管样品 ΣREE 绝对含量变化较大,在球粒陨石(图 3a)与北美页岩(NASC)(图 3b)标准化配分型式图中整体表现较一致,但样品 Qy2 和 Qy3 可能因含有碳酸盐矿物组分的干扰而出现

了一定的差异。轻、重稀土含量比值($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值常用于探讨样品中REE的总体分异状况。样品的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 值最大为9.96,最小为3.43,平均6.94; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于3.02~11.78之间,平均值为7.97。这反映轻稀土元素与重稀土元素之间的分异程度较高。

相对于球粒陨石,轻稀土元素与重稀土元素的

分离程度分别通过 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值和 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值来表征。筇竹寺组黑色岩系样品 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值的波动范围从2.40至6.57,其算术平均值为4.08,这反映出轻稀土元素之间发生了较为显著的分异。而 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 比值的最大值为1.99,最小值为0.97,平均值为1.43,这表明重稀土元素的分异程度相对较低。 δEu 值介于0.57~0.76之间,平均值

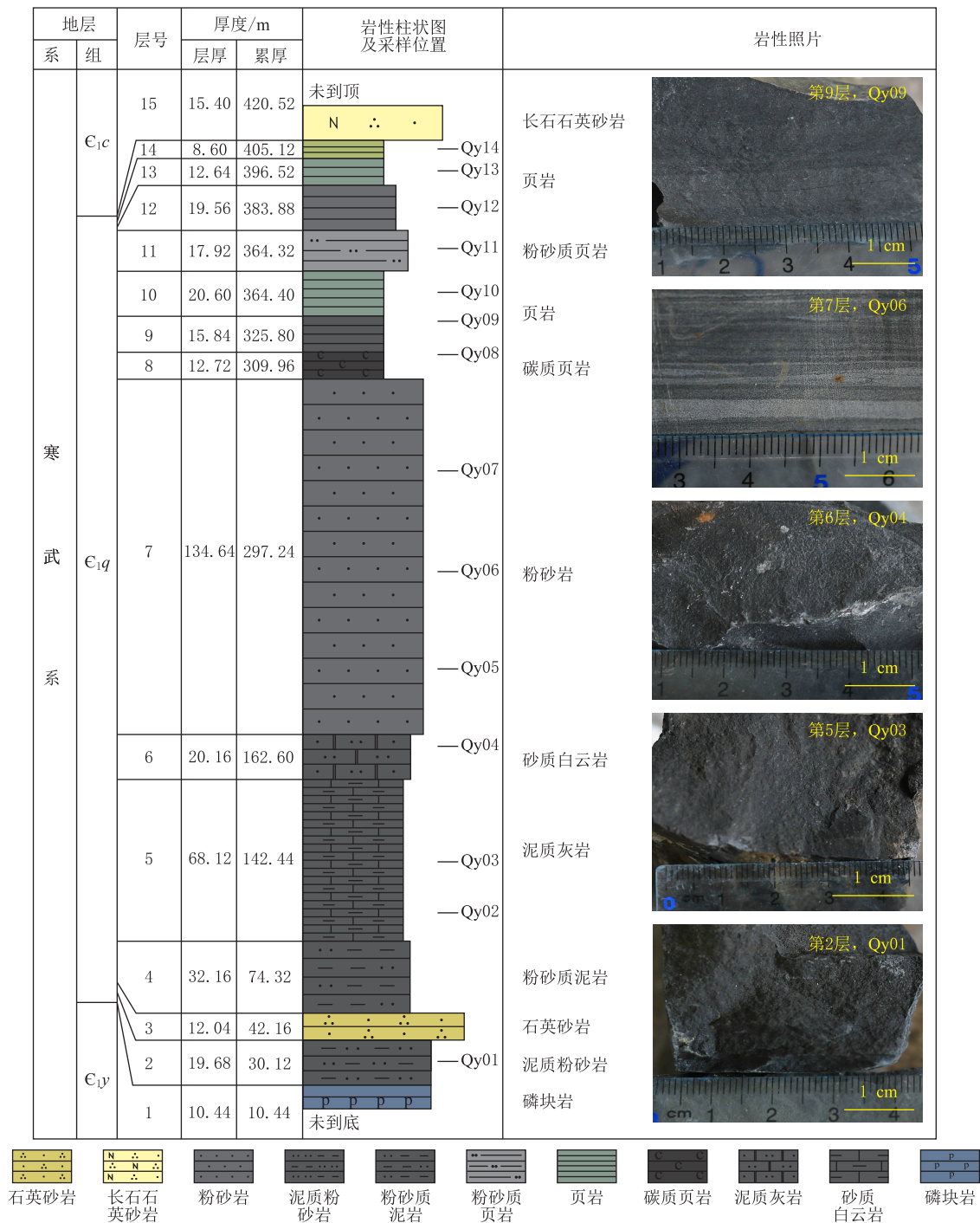


图2 滇东会泽地区筇竹寺组黑色岩系地层柱状图及采样位置

Fig. 2 Stratigraphic column and sampling location of the Qiongzhusi Formation black rock series in Huize area, eastern Yunnan Province

C_{1y}, 下寒武统渔户村组; C_{1q}, 下寒武统筇竹寺组; C_{1c}, 下寒武统沧浪铺组。

表 1 筇竹寺组黑色岩系稀土元素数据、 $w(B)/10^{-6}$ 及其重要参数Table 1 Rare earth element (in $[\times 10^{-6}]$) geological data and important parameters for the Qiongzhusi formation black rock series

元素/参数	Qy-01	Qy-02	Qy-03	Qy-04	Qy-05	Qy-06	Qy-07	Qy-08	Qy-09	Qy-10	Qy-11	Qy-12	Qy-13	Qy-14	最小值	最大值	平均值
	泥质粉砂岩	泥质灰岩	泥质灰岩	砂质白云岩	粉砂岩	粉砂岩	粉砂岩	炭质页岩	页岩	页岩	粉砂质页岩	页岩	页岩	页岩			
La	19.88	8.03	33.70	10.99	27.83	22.78	34.17	14.77	28.39	57.51	47.92	32.68	44.58	44.16	8.03	57.51	30.53
Ce	24.37	6.13	24.35	17.18	52.84	44.04	66.13	25.97	52.88	113.23	88.22	65.18	84.07	84.65	6.13	113.23	53.52
Pr	3.17	1.18	4.78	2.11	6.53	5.42	7.67	3.02	6.06	13.38	9.81	7.47	9.38	9.76	1.18	13.38	6.41
Nd	12.71	5.06	18.98	8.29	25.99	22.01	29.63	13.54	22.32	51.89	37.13	29.13	35.39	36.96	5.06	51.89	24.93
Sm	2.60	1.00	3.23	1.80	5.22	4.70	5.27	3.87	4.36	9.98	6.75	5.91	6.30	7.21	1.00	9.98	4.87
Eu	0.58	0.25	0.95	0.35	1.16	1.05	1.21	0.91	1.00	1.94	1.38	1.19	1.34	1.40	0.25	1.94	1.05
Gd	2.67	1.25	4.58	1.85	4.97	4.43	4.92	3.99	4.22	8.14	5.95	5.22	5.89	5.95	1.25	8.14	4.57
Tb	0.43	0.19	0.72	0.30	0.79	0.73	0.76	0.74	0.72	1.16	0.95	0.81	0.91	0.92	0.19	1.16	0.72
Dy	2.69	1.20	4.91	1.82	4.62	4.33	4.39	4.78	4.47	6.50	5.73	4.88	5.51	5.47	1.20	6.50	4.38
Ho	0.57	0.27	1.27	0.41	0.96	0.92	0.89	1.06	0.95	1.25	1.14	0.98	1.13	1.11	0.27	1.27	0.92
Er	1.68	0.80	3.82	1.22	2.71	2.60	2.53	3.22	2.82	3.55	3.24	3.01	3.21	3.10	0.80	3.82	2.68
Tm	0.25	0.10	0.51	0.17	0.39	0.38	0.38	0.48	0.43	0.50	0.48	0.44	0.48	0.49	0.10	0.51	0.39
Yb	1.71	0.58	3.06	1.18	2.70	2.57	2.50	3.31	2.93	3.31	3.24	2.95	3.16	3.05	0.58	3.31	2.59
Lu	0.26	0.08	0.45	0.17	0.40	0.39	0.39	0.48	0.42	0.48	0.48	0.45	0.48	0.47	0.08	0.48	0.39
Σ LREE	63.32	21.64	85.98	40.71	119.58	100.00	144.08	62.07	115.01	247.93	191.21	141.58	181.07	184.13	21.64	247.93	121.31
Σ HREE	10.25	4.47	19.32	7.11	17.55	16.34	16.76	18.07	16.97	24.89	21.22	18.74	20.77	20.55	4.47	24.89	16.64
Σ REE	73.56	26.11	105.30	47.81	137.12	116.34	160.84	80.15	131.98	272.82	212.43	160.32	201.84	204.68	26.11	272.82	137.95
Σ LREE/ Σ HREE	6.18	4.84	4.45	5.73	6.82	6.12	8.60	3.43	6.78	9.96	9.01	7.56	8.72	8.96	3.43	9.96	6.94
(La/Yb) _N	7.87	9.41	7.45	6.30	6.98	6.01	9.26	3.02	6.57	11.78	10.02	7.49	9.57	9.82	3.02	11.78	7.97
(Ce/Yb) _N	3.69	2.75	2.06	3.77	5.07	4.45	6.86	2.03	4.69	8.88	7.06	5.72	6.91	7.20	2.03	8.88	5.08
(La/Sm) _N	4.82	5.06	6.57	3.84	3.35	3.05	4.08	2.40	4.10	3.62	4.47	3.48	4.45	3.85	2.40	6.57	4.08
(Gd/Yb) _N	1.26	1.75	1.21	1.27	1.49	1.39	1.59	0.97	1.17	1.99	1.48	1.43	1.51	1.58	0.97	1.99	1.43
δ Ce	0.67	0.43	0.41	0.81	0.91	0.92	0.95	0.89	0.93	0.95	0.93	0.97	0.94	0.94	0.41	0.97	0.83
δ Eu	0.67	0.68	0.76	0.57	0.69	0.69	0.71	0.70	0.71	0.64	0.65	0.64	0.66	0.64	0.57	0.76	0.67
Ce_{anom}	-0.15	-0.36	-0.37	-0.06	-0.01	-0.01	0.01	-0.04	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01	-0.03	-0.15	-0.36
Sm/Nd	0.20	0.20	0.17	0.22	0.20	0.21	0.18	0.29	0.20	0.19	0.18	0.20	0.18	0.20	0.20	0.20	0.20

注: Σ LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu; Σ HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu; Σ REE = Σ LREE + Σ HREE; δ Ce = $2 \times Ce_N / (La_N + Gd_N)$; Ce_{anom} (铈异常指数) = $\lg(3Ce_N / (2La_N + Nd_N))$; 下标 N 为球粒陨石标准化数据 Boynton; 测试单位: 武汉上谱分析科技有限责任公司; 测试时间: 2017-08-03。

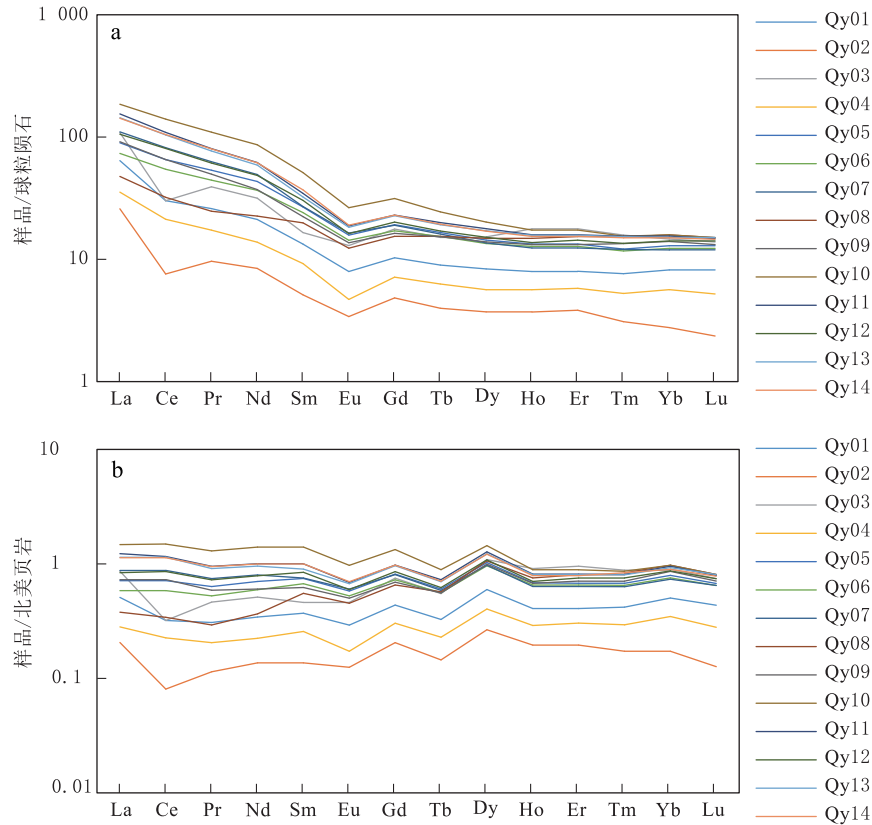


图3 滇东会泽地区筇竹寺组黑色岩系稀土元素标准化模式图

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of the Qiongzhusi Formation black shale series in Huize area, eastern Yunnan Province
a. 球粒陨石标准化模式图; b. 北美页岩标准化模式图。

为 0.67, 具有显著的负异常。δCe 值最大为 0.97, 最小为 0.41, 平均 0.83, 具有轻度负异常。综上, 筇竹寺组黑色岩系稀土元素配分模式总体较为一致, 呈现轻稀土富集、重稀土平坦、中度 Eu 负异常和轻度 Ce 负异常特征, 这与大陆上地壳稀土元素配分型式相似^[21]。

4 讨论

4.1 成岩作用影响

碎屑沉积物沉积以后, 在经历成岩作用过程中, 其元素地球化学组成会受到一定程度的改造 (Shields and Stille)。因此, 在应用元素地球化学成分特征追踪沉积岩物源之前很有必要开展成岩作用探讨, 此外应结合多种地球化学参数综合判定方能得到可靠的结论 (闫臻等)。一些稀土元素特征常用于研究成岩作用对碎屑沉积岩化学成分影响强弱程度, 譬如在成岩作用中会造成 δCe 和 ΣREE 呈正相关、δCe 和 (Dy/Sm)_N 呈负相关以及 δCe 和 δEu 呈较好的相关性, 且相关性随着成岩作用对化学成分影响的增强而增加^[22]。

本研究样品的 δEu-δCe (图 4a) 图解和 ΣREE-δCe (图 4b) 图解未呈现出明显的相关性。(Dy/Sm)_N-δCe 图解 (图 4c) 中, 样品数据呈现出负相关的趋势, 但相关性较差。这表明该筇竹寺组黑色岩系样品化学成分组成未明显受到后期成岩作用的改造, 其形成时期的源区信息和化学组成得到了较好地保留。因此, 可以用该黑色岩系的元素地球化学特征来反映物源区成分及构造背景。

4.2 古环境分析

沉积物 REE 总量受控于古气候因素, 温暖潮湿的气候条件具有较高的 ΣREE, 而寒冷干旱的气候条件具有较低的 ΣREE^[23]。滇东会泽地区筇竹寺组黑色岩系大部分样品的 ΣREE 较低。黑色岩系岩性复杂, 其含有的碳酸盐矿物和粗碎屑组分具有较低的 REE 含量, 致使全岩的 REE 含量偏低。在剖面上, 样品的 ΣREE 从下部到上部总体有所增加 (图 5)。考虑到剖面下部的样品主要为碳酸盐岩类和碎屑组分较多的粉砂质岩类, ΣREE 变化规律揭示古气候会受到一定的干扰。结合之前微量元素 Sr/Cu 比值变化规律显示, 筇竹寺组沉积期间总体较为温暖潮湿的气候特征, 剖面下部较低的 ΣREE

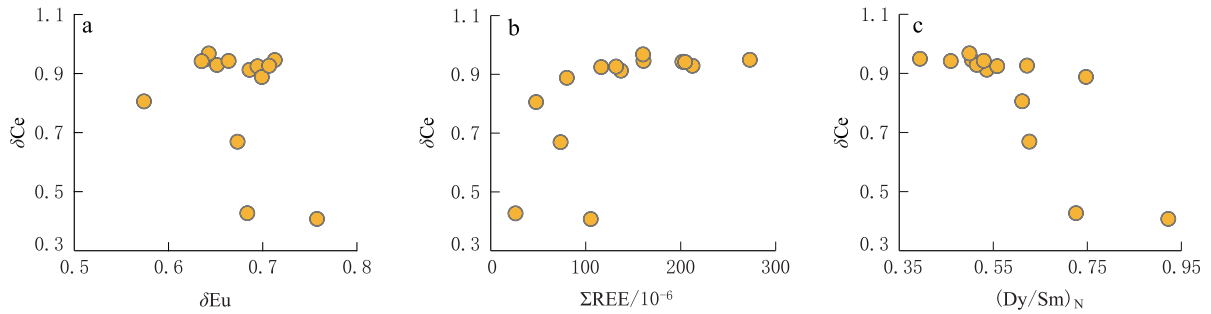


图4 会泽地区筇竹寺组黑色岩系稀土元素相关性图解

Fig. 4 Correlation diagram of rare earth elements of Qiongzhusi formation black shale series in Huize area
a. δEu - δCe 关系图; b. ΣREE - δCe 关系图; c. $(\text{Dy}/\text{Sm})_N$ - δCe 关系图

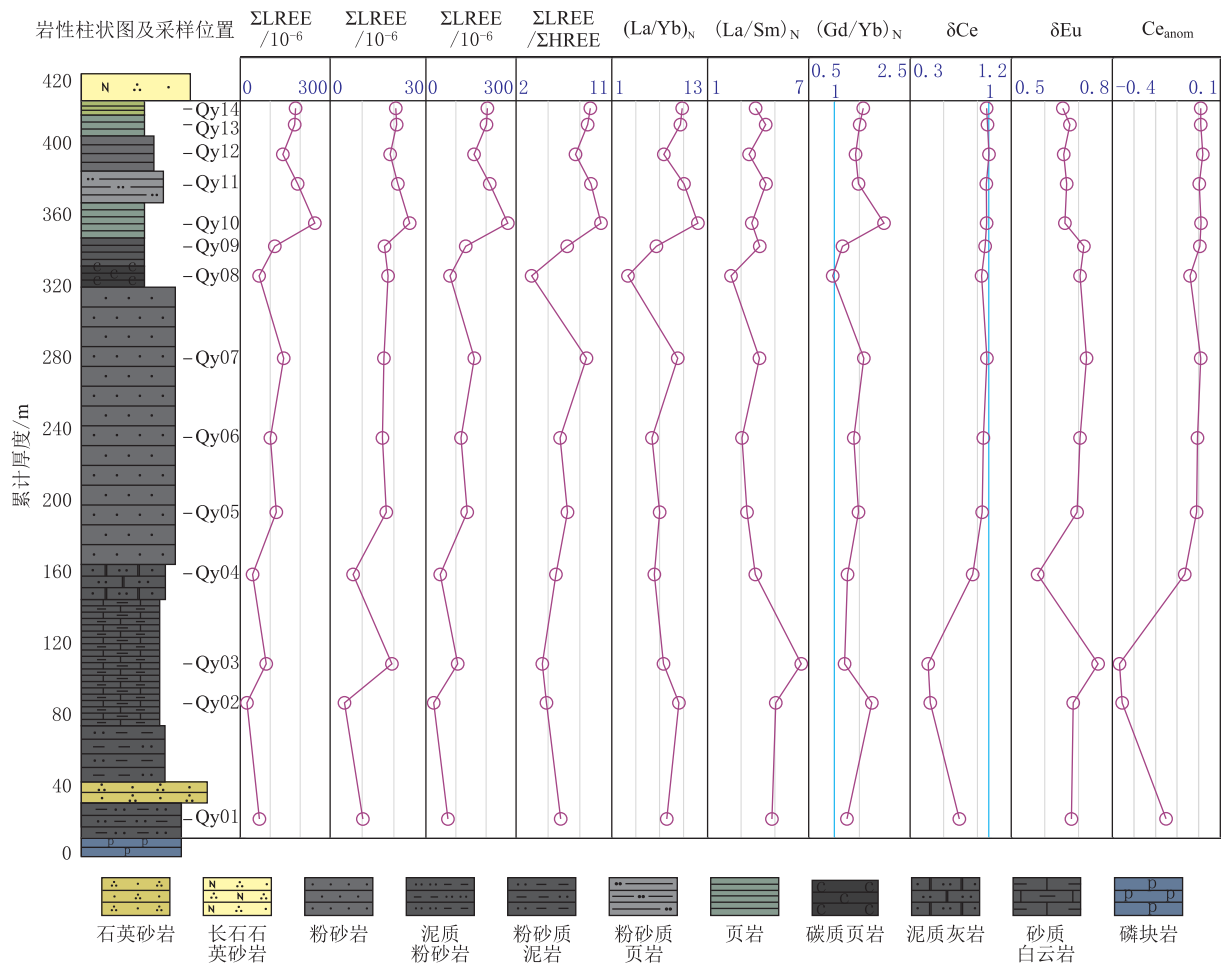


图5 会泽地区筇竹寺组黑色岩系地球化学参数垂向演化图

Fig. 5 Vertical distribution of geochemical parameters of Qiongzhusi Formation black shale series in Huize area

表明沉积早期经历了短暂的炎热干旱气候^[19]。

此外,REE 特征在揭示沉积水体的深度和氧化还原条件方面也获得了很好的应用。在 REE 中,Ce 是一种对氧化还原敏感的变价元素(Ce^{3+} 和 Ce^{4+}),常用于反映沉积水体的氧化还原条件。Bery 研究认为水体深度可用 δCe 值来反映,沉积水体越深、越缺氧的条件下 δCe 值越小。Elderfield and Creaves 提出铈异常指数($\text{C}_{\text{e}_{\text{anom}}}$)用于判断古水

质的氧化还原条件,以 -0.1 为界,高于此值时表示 Ce 富集,代表缺氧的还原环境,而低于此值时,表示 Ce 亏损,代表氧化环境。杨兴莲等认为随着沉积水体深度的增加,沉积物的 ΣREE 越高。筇竹寺组 δCe 值为 0.41 ~ 0.97 (平均 0.83), $\text{C}_{\text{e}_{\text{anom}}}$ 值为 -0.37 ~ 0.02 (平均 -0.03), ΣREE 总体略低于北美页岩(表 1,图 5)。综合认为筇竹寺组黑色岩系形成于沉积水体较深的贫氧环境。

海底沉积水体常混入热水流体。为了研究混入正常海水的热流体比例, Alexander *et al* 提出了 $(Eu/Sm)_N-(Sm/Yb)_N$ 二元图解(图 6)。筇竹寺组黑色岩系样品投于此二元图中的位置接近海水-水成铁锰质地壳范围, 且显示仅有少量热水作用。此外, 元素异常(富集 Si, Fe, Mn, P, Cu, Pb, Zn, B, As, Ba, Sr, Sb, U, Se 等元素)是热水沉积区别于正常沉积物的重要标志(闫臻等)。微量元素研究表明筇竹寺组黑色岩系较富集 Pb, Zn, Cu 等金属元素^[20], 可能是受到了富金属热水作用的轻微影响。

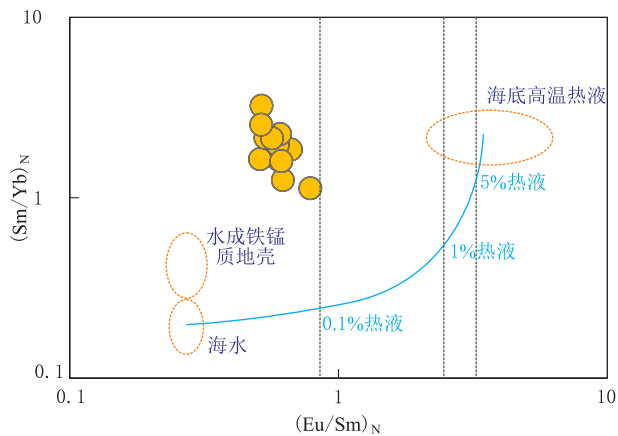


图 6 会泽地区筇竹寺组黑色岩系 $(Eu/Sm)_N-(Sm/Yb)_N$ 图解

Fig. 6 $(Eu/Sm)_N$ versus $(Sm/Yb)_N$ diagram of Qiongzhusi Formation black shale series in Huize area

4.3 物源属性

岩石的 REE 特征在风化、搬运和沉积过程中得以较为完整地保留。与原始地幔相比, 上地壳中的大离子亲石元素含量显著较高, 这导致了轻稀土元素在上地壳中的富集以及重稀土元素的相对亏损。同时, 由于缺乏有效的分馏机制, 上地壳的重稀土元素分布趋于均一。值得注意的是, 由于稀土元素的分异行为, 铕(Eu)在下地壳中呈现富集趋势, 而在上地壳中则相对缺乏。根据筇竹寺组黑色岩系稀土元素配分模式(图 3)可知, 其源岩来自于上地壳。在岩浆结晶分异过程中, Eu 主要富集于斜长石, 导致残余岩浆演化出的花岗质岩石亏损 Eu。体系内地球化学状态常被 Eu 含量特征所记录, 因此常用 Eu 相关参数示踪物质。从 δEu 值特征(表 1, 图 3)来看, 筇竹寺组黑色岩系的源岩更倾向于花岗质岩石。

元素 Gd 和 Yb 具有相对稳定的地球化学性质, 沉积物沉积之后其 Gd 和 Yb 的含量几乎不受后期各种地质作用的影响, 因而 $(Gd/Yb)_N$ 值常用于沉积岩母岩性质的判别。元素的分异作用对地球历史

上岩石形成过程中的钆(Gd)含量产生了显著影响, 导致随着地质时代的年轻化, 结晶岩石中的 Gd 含量趋于减少。相应地, $(Gd/Yb)_N$ 比值亦随着地层年代的变新而降低。据研究, 太古宙岩石的 $(Gd/Yb)_N$ 比值通常大于 2, 而元古宙以来岩石的该比值则小于 2^[24]。会泽地区筇竹寺组黑色岩系 $(Gd/Yb)_N$ 值介于 0.97~1.99 之间, 平均 1.43(表 1, 图 5), 指示其源区为后太古代地层。

Sm/Nd 比值也常用于沉积岩物源示踪, 地幔、大洋玄武岩、各类沉积岩和壳源花岗岩类的 Sm/Nd 值范围分别为 0.26~0.375、0.234~0.425 和 <0.3 ^[25]。会泽地区筇竹寺组黑色岩系的 Sm/Nd 值介于 0.17~0.29 之间, 平均值为 0.20, 可见其沉积物源区物质主要为壳源花岗岩类和沉积岩。

在 $La/Yb-\Sigma REE$ 源岩判别图解中(图 7a), 会泽地区筇竹寺组黑色岩系样品有 4 个落入沉积岩区, 大部分落入沉积岩、花岗岩和碱性玄武岩的混合区域。La/Th-Hf 判别图解可对不同构造环境沉积物物源进行判别, 会泽地区筇竹寺组黑色岩系样品大部分落入长英质物源区, 少量落入长英质/基性岩混合物源区(图 7b)。随着沉积物的改造以及锆石的富集, 沉积岩的 Zr/Sc 值逐渐增加, 而其 Th/Sc 值反映了物源区的平均比值, 因此 Th/Sc-Zr/Sc 图解(图 7c)也可以区分源岩属性。从图中可以看出, 样品点落入安山岩和长英质火山岩之间。Co/Th-La/Sc 判别图解中(图 7d), 有 1 个样品比较离散, 其余均落入长英质火山岩附近。综上, 会泽地区筇竹寺组黑色岩系主要来源于长英质岩石。

4.4 物源构造背景

Bhatia 的研究中对具有明确构造背景的杂砂岩和泥岩进行了深入的地球化学特性分析, 从而归纳出稀土元素及其特征参数在各类构造环境中的典型值(表 2)。通过对比, 会泽地区筇竹寺组黑色岩系稀土元素特征与大陆岛弧的特征参数最为接近, 反映了大陆岛弧的构造背景。

Bhatia and Crook 通过对砂岩和泥质砂岩的稀土元素及微量元素的深入分析, 识别出了与其相关的 4 种主要的构造环境: 大洋岛弧(OIA)、大陆岛弧(CIA)、活动大陆边缘(ACM)和被动大陆边缘(PCM)。La, Th, Co, Sc 和 Zr 等元素因其在地球化学上的稳定性而被广泛用于判别岩石的构造背景, 通常通过三端元图解法来揭示源岩的构造特性。在 La-Th-Sc 三端元图解(图 8a)中, 大部分样本归类于大陆岛弧的特征范围, 而两个特定的样本(Qy2 和

Qy3,泥质灰岩)则表现出较大的离散性,这可能是由于自生碳酸盐矿物的稀释效应所致。在 Th-Co-Zr/10 图解(图 8b)中,样本的分布较为分散。然而, Th-Sc-Zr/10 图解(图 8c)显示,大多数样本集中在大陆岛弧的区域。这些结果综合表明,研究区的源岩构造背景很可能是大陆岛弧环境。

4.5 沉积模式

海洋与陆地的分布状况以及构造运动共同决定了陆地风化产物的来源,这些因素对沉积环境和沉积相的分布产生了显著影响。追溯至早寒武世,本

研究的区域位于扬子地块的西南边缘,属于一个位于板块内部的稳定克拉通盆地。该区域被三面的古陆所环绕:西北部为泸定—西昌的古陆,西南部是滇中古陆,而东南部则是牛首山古陆(武希彻等;唐良栋),其中前两者通常合称为康滇古陆。康滇古陆的寒武纪地层缺失,而中奥陶世或志留纪地层则直接覆盖在更古老的震旦纪地层或元古代地层之上。在这些古陆的边缘,发现了红色粉砂岩和泥岩等沉积物,这些沉积物的存在证实了川滇古陆和滇中古陆的真实性。

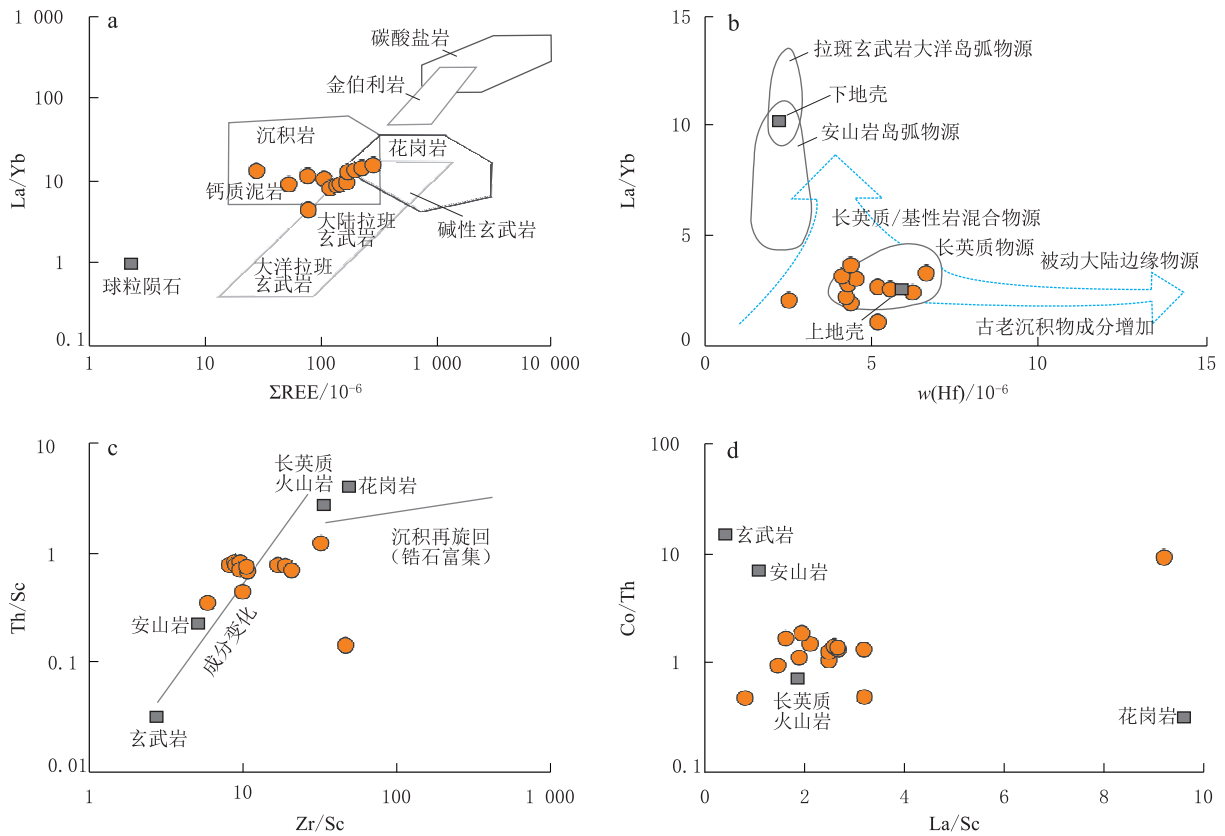


图 7 会泽地区筇竹寺组黑色岩系物源判别图解

Fig. 7 Provenance discrimination diagrams of black rock series of the Qiongzhusi Formation in Huize Area
a. $\Sigma\text{REE-La/Yb}$ 关系图; b. Hf-La/Th 关系图; c. Zr/Sc-Th/Sc 关系图; d. La/Sc-Co/Th 关系图。

表 2 会泽地区筇竹寺组黑色岩系与不同构造环境杂砂岩稀土元素特征参数对比

Table 2 Comparison of rare earth element characteristic parameters between Qiongzhusi Formation black rock series and graywackes in different tectonic settings

构造环境	大洋岛弧	大陆岛弧	安第斯型大陆边缘	被动大陆边缘	筇竹寺组
物源类型	未切割的岩浆弧	切割岩浆弧	隆升的基底	克拉通内部构造高地	黑色岩系
La	8.00±1.70	27.00±4.50	37.0	39.00	30.53
Ce	19.00±3.70	59.00±8.20	78.0	85.00	53.52
δEu	1.04±0.11	0.79±0.13	0.6	0.56	0.67
ΣREE	58.00±10.00	146.00±20.00	186.0	210.00	137.95
ΣLREE/ΣHREE	3.80±0.90	7.70±1.70	9.1	8.50	6.94
La/Yb	4.20±1.30	11.00±3.60	12.5	15.90	11.79
(La/Yb) _N	2.80±0.90	7.50±2.50	8.5	10.80	7.97

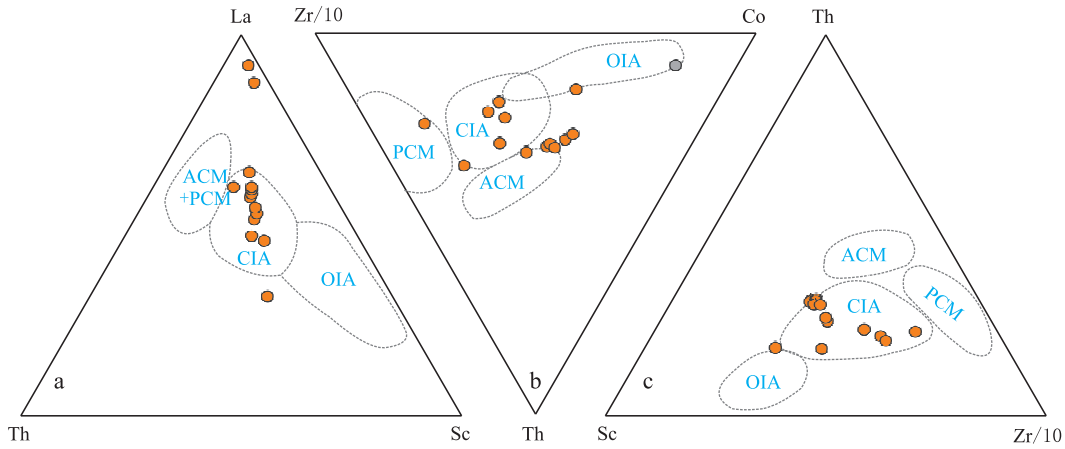


图8 会泽地区筇竹寺组黑色岩系构造背景判别图解

Fig. 8 Tectonic setting discrimination diagrams of black rock series of the Qiongzhusi formation in Huize area
a. La-Th-Sc 三端员图; b. Th-Co-Zr/10 三端员图; c. Th-Sc-Zr/10 三端员图; OIA. 大洋岛弧; CIA. 大陆岛弧; ACM. 活动大陆边缘; PCM. 被动大陆边缘。

由于这些地区缺少砂岩和砾岩等粗颗粒沉积岩,这表明当时的地形相对平坦,因此主要的碎屑物质也以粉砂和泥质为主(冯增昭等;苏奎等^[27])。至于区域南部的牛首山古陆,由于寒武纪地层的缺失,泥盆纪地层直接覆盖在震旦纪地层或元古代地层之上,且边缘沉积相不甚发育,这使得牛首山古陆的具体存在时期仍有待进一步的探讨(冯增昭等;苏奎等^[27])。在早寒武世广泛海侵的背景下,牛首山古陆即使在筇竹寺组沉积时期露出水面,面积也不大,可能是个小岛,能提供的陆源碎屑物质毕竟有限。会泽地区下寒武统黑色岩系主要岩性为粉砂岩和泥页岩,可见陆源碎屑物质主要来源于康滇古陆。

康滇地区自古元古代至新元古代期间,经历了多期岩浆活动,其中新元古代的岩浆活动尤为显著^[28]。古元古代的岩浆活动主要发生在~1.70 Ga,如东川群、河口群和大红山群中出露的基性至酸性火山岩,以及侵入这些地层的基性岩脉和岩体。中元古代时期,扬子陆块西南缘发生了大规模的岩浆活动,主要集中在~1.5 Ga和~1.0 Ga 2个时期,其中晚期的岩浆活动更为强烈。昆阳群、直林群、会理群和登相营群等地均出露有基性至酸性火山岩地层。新元古代时期,扬子陆块西南缘的岩浆岩分布更为广泛,活动从920 Ma一直持续到740 Ma。这一时期的岩浆岩主要以中酸性为主,同时伴有基性至超基性岩体和岩脉。在该地区也存在多期的大陆岛弧构造背景^[26]。如会理盆地最初在大陆裂谷环境中沉积,而在天宝山组沉积期间转变为活动大陆边缘环境;直林盆地和昆阳盆地在初始

阶段同样为大陆裂谷环境,随后逐渐过渡到被动大陆边缘环境,并在海资哨组和美党组沉积期间转变为活动大陆边缘环境。由此可见,大洋板块的多次俯冲作用促成了大陆岛弧长英质岩石的形成,这些岩石为筇竹寺组的沉积提供了丰富的物源。

筇竹寺组沉积时期,滇东会泽地区处于扬子西南缘的局限海盆,沉积水体较深,总体处于贫氧条件,比较有利于有机质的保存(图9)。该时期古气候温暖潮湿,康滇古陆长英质岩石风化提供了丰富的陆源碎屑。同时,盆底深大断裂活动诱发的热水活动携带有一定量的Pb, Zn, Cu等金属。在较还原的条件下,陆源碎屑、有机质和一些金属硫化物一起沉积形成了该黑色岩系。

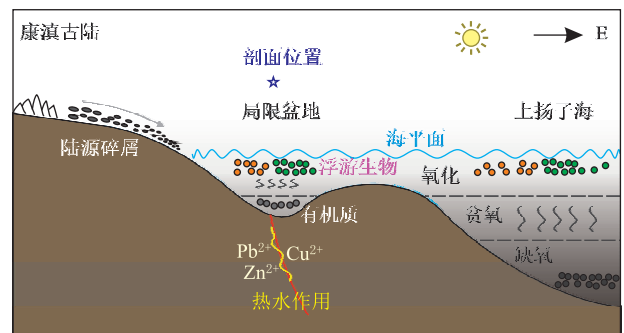


图9 会泽地区筇竹寺组黑色岩系形成模式图

Fig. 9 Genetic model of the Qiongzhusi Formation black rock series in Huize area

5 结 论

(1) 筇竹寺组黑色岩系的 Σ REE含量变化较大,表现出轻稀土元素富集、重稀土元素平坦的配分

模式,具有中度的 Eu 负异常和轻度的 Ce 负异常,与大陆上地壳稀土元素配分型式相似。

(2)筇竹寺组黑色岩系形成于温暖潮湿的气候条件,沉积水体较深且处于贫氧环境,其物源主要为

长英质岩石,源区构造背景为大陆岛弧环境。

(3)该黑色岩系沉积于扬子地块西南缘的局限海盆,受到康滇古陆陆源碎屑、还原性沉积环境及海洋海底富金属热水的共同作用。

参考文献

- [1] 余海东,范宏瑞,胡芳芳,等. 稀土元素在热液中的迁移与沉淀[J]. *岩石学报*,2018,34(12):3567-3581.
SHE Haidong, FAN Hongrui, HU Fangfang, *et al.* Migration and precipitation of rare earth elements in the hydrothermal fluids[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2018, 34(12):3567-3581.
- [2] 马风华,张 勇,潘进礼,等. 六盘山盆地白垩系马东山组泥页岩稀土元素地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*,2021,67(1):209-217. DOI:10.16509/j.georeview.2021.01.017
MA Fenghua, ZHANG Yong, PAN Jinli, *et al.* Geochemical characteristics of rare earth element and their geological significance of mud-shale in Cretaceous Madongshan formation, Liupanshan basin[J]. *Geological Review*,2021,67(1):209-217.
- [3] 范惠珺,胡煜昭,程 涌,等. 贵州烂泥沟金矿区中三叠统许满组、边阳组沉积地球化学及古环境特征[J]. *矿物岩石*,2022,42(2):60-70. DOI:10.19719/j.cnki.1001-6872.2022.02.06
FAN Huijun, HU Yuzhao, CHENG Yong, *et al.* Characteristics of middle Triassic Xuman and Bianyang formations in Lannigou gold deposit, Guizhou province[J]. *Mineralogy and Petrology*,2022,42(2):60-70.
- [4] FANG C, ZHANG C, HUANG N, *et al.* Geological significance of rare earth elements in marine shale of the upper permian Dalong formation in the lower Yangtze region, south China [J]. *Minerals*,2023,13(9):1195. DOI:10.3390/min13091195
- [5] HAI L, XU Q, MU C, *et al.* Geochemical characteristics and geologic significance of rare earth elements in oil shale of the Yan'an formation in the Tanshan area, in the Liupanshan basin, China[J]. *Interpretation*,2021,9:843-854. DOI:10.1190/INT-2020-0232.1
- [6] 翟常博,牟传龙,梁 薇,等. 鄂西地区二叠系孤峰组—大隆组沉积演化及其页岩气地质意义[J]. *矿物岩石*,2021,41(4):114-124. DOI:10.19719/j.cnki.1001-6872.2021.04.11
ZHAI Changbo, MOU Chuanlong, LIANG Wei, *et al.* Sedimentary evolution characteristics of permian Gufeng formation-Dalong formation in western Hubei province and its geological significance for the geological survey of shale gas[J]. *Mineralogy and Petrology*,2021,41(4):114-124.
- [7] 程 涌,聂 琪,夏建波,等. 云南省富有机质页岩的形成环境及分布[J]. *地质与资源*,2018,27(6):514-521. DOI:10.13686/j.cnki.dzyzy.2018.06.003
CHENG Yong, NIE Qi, XIA Jianbo, *et al.* Formation environment and distribution of organic-rich shales in Yunnan province[J]. *Geology and Resources*,2018,27(6):514-521.
- [8] 张海涛,张 颖,朱炎铭,等. 云南省下寒武统筇竹寺组页岩气地质成藏条件探讨[J]. *中国石油勘探*,2017,22(3):88-95.
ZHANG Haitao, ZHANG Ying, ZHU Yanming, *et al.* Geological conditions for shale gas accumulation in lower Cambrian Qiongzhusi formation, Yunnan, China[J]. *Petroleum Exploration*,2017,22(3):88-95.
- [9] 张 聪,包书景,石砥石,等. 云南曲靖地区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏地质条件及有利区预测[J]. *海相油气地质*,2017,22(1):69-74.
ZHANG Cong, BAO Shujing, SHI Dishu, *et al.* Geological conditions for shale gas accumulation and favorable area prediction in Qujing of eastern Yunnan[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*,2017,22(1):69-74.
- [10] 李 昂,丁文龙,张国良,等. 滇东地区马龙区块筇竹寺组海相页岩储层特征及对比研究[J]. *地学前缘*,2016,23(2):176-189. DOI:10.13745/j.esf.2016.02.018
LI Ang, DING Wenlong, ZHANG Guoliang, *et al.* Reservoir characteristics of marine shale in the Malong block of eastern Yunnan Province and comparison analysis[J]. *Earth Science Frontiers*,2016,23(2):176-189.
- [11] 白名岗,张 聪,杨玉茹,等. 滇东曲靖地区下寒武统筇竹寺组泥页岩储层特征研究[J]. *地质力学学报*,2017,23(6):838-845.
BAI Minggang, ZHANG Cong, YANG Yuru, *et al.* The characteristics of shale reservoir from Qiongzhusi formation in lower Cambrian in Qujing area, eastern Yunnan province, China; a case study of well Quye No. 1. [J]. *Journal of Geomechanics*,2017,23(6):838-845.
- [12] 姜永果,王 艳,徐 恒,等. 云南马龙—沾益地区富铜镍黑色岩系岩石地球化学特征[J]. *矿产勘查*,2019,10(12):3045-3046.

- JIANG Yongguo, WANG Yan, XU Heng, *et al.* Rocky geochemical characteristics of the black rocks rich in molybdenum and nickel in Malong-Zhanyi area, Yunnan[J]. **Mineral Exploration**, 2019, 10(12):3045-3046.
- [13] 韩善楚, 胡凯, 曹剑. 贵州天柱早寒武世黑色岩系重晶石矿床有机地球化学研究[J]. **地球化学**, 2014, 43(4):386-398. DOI:10.19700/j.0379-1726.2014.04.009
- HAN Shanchu, HU Kai, CAO Jian, *et al.* Organic geochemistry of barite deposits hosted in the early Cambrian black shales from the Tianzhu county, Guizhou province[J]. **Geochimica**, 2014, 43(4):386-398.
- [14] 周洁, 胡凯, 边立曾, 等. 贵州遵义下寒武统黑色岩系 Ni-Mo 多金属矿地球化学特征及成矿作用[J]. **矿床地质**, 2008, 27(6):742-750.
- ZHOU Jie, HU Kai, BIAN Lizeng, *et al.* Geochemical characteristics and ore-forming processes of Ni-Mo polymetallic deposits in lower Cambrian black shale, Zunyi, Guizhou province[J]. **Mineral Deposits**, 2008, 27(6):742-750.
- [15] 陈艳霞, 崔银亮, 廖剑锋, 等. 云南下寒武统黑色岩系矿床研究现状及相关找矿问题探讨[J]. **矿物学报**, 2013, 33(4):637-642. DOI:10.16461/j.cnki.1000-4734.2013.04.032
- CHEN Yanxia, CUI Yinliang, LIAO Jianfeng, *et al.* Research and ore prospecting problem of the lower Cambrian black series in Yunnan province, China[J]. **Acta Mineralogica Sinica**, 2013, 33(4):637-642.
- [16] 程涌, 蹇龙, 唐果, 等. 滇东会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系微量元素异常特征及成矿意义[J]. **有色金属工程**, 2020, 10(12):90-98.
- CHENG Yong, JIAN Long, TANG Guo, *et al.* Trace element anomaly characteristics and metallogenic significance of the lower Cambrian Qiongzhusi formation from Huize area, eastern Yunnan province[J]. **Nonferrous Metals Engineering**, 2020, 10(12):90-98.
- [17] TAHATA M, UENO Y, ISHIKAWA T, *et al.* Carbon and oxygen isotope chemostratigraphies of the Yangtze platform, South China: Decoding temperature and environmental changes through the Ediacaran[J]. **Gondwana Research**, 2013, 23(1):333-353. DOI:10.1016/j.gr.2012.04.005
- [18] 陈跃昆, 廖宗廷, 陈军. 滇西兰坪-思茅盆地 TSM 分析[M]. 中国地质大学出版社, 2009:1-268.
- CHEN Yuekun, LIAO Zongting, CHEN Jun, *et al.* **TSM analysis of Lanping-Simao basin, west Yunnan**[M]. China University of Geosciences Press, 2009:1-268.
- [19] 程涌, 胡煜昭, 李丕优, 等. 滇东会泽地区下寒武统筇竹寺组黑色岩系微量元素地球化学特征及其古环境演化[J]. **地质找矿论丛**, 2019, 34(3):416-422.
- CHENG Yong, HU Yuzhao, LI Piyou, *et al.* The geochemical characteristics of trace elements and paleoenvironmental evolution of black rock series in the lower Cambrian Qiongzhusi formation from Huize area, eastern Yunnan province[J]. **Contributions to Geology and Mineral Resources Research**, 2019, 34(3):416-422.
- [20] CHENG Y, LIU W, WU W, *et al.* Geochemical characteristics of the lower Cambrian Qiongzhusi formation in Huize area, east Yunnan; implications for paleo-ocean environment and the origin of black rock series[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2021, 14(20):2081. DOI:10.1007/s12517-021-08433-0
- [21] 陈梦雅, 聂逢君. 开鲁盆地宝龙山地区姚家组物源及铀源分析: 来自地球化学特征及碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. **矿物岩石**, 2023, 43(4):33-48. DOI:10.19719/j.cnki.1001-6872.2023.04.04
- CHEN Mengya, NIE Fengjun. Provenance and uranium source analysis of the Yaojia formation in the Baolongshan area, Kailu basin: Evidence from geochemistry and detrital zircon U-Pb geochronology [J]. **Mineralogy and Petrology**, 2023, 43(4):33-48.
- [22] 张建军, 牟传龙, 周恩恩, 等. 滇西户撒盆地芒棒组第三段泥岩地球化学特征: 物源及其风化作用[J]. **矿物岩石地球化学通报**, 2017, 36(4):574-581.
- ZHANG Jianjun, MOU Chuanlong, ZHOU Kenken, *et al.* Geochemistry of the Mangbang formation mudstones of the Husa basin, western Yunnan; implications for provenance and source weathering[J]. **Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry**, 2017, 36(4):574-581.
- [23] 熊林芳. 鄂尔多斯盆地盐 56 井长 7 段泥页岩稀土元素地球化学特征分析[J]. **地下水**, 2015, 37(3):206-208.
- XIONG Linfang. Geochemical characteristics of rare earth elements in shale of Chang 7 member of Well Yan 56, Ordos Basin[J]. **Ground water**, 2015, 37(3):206-208.
- [24] 毛光周, 刘池洋. 地球化学在物源及沉积背景分析中的应用[J]. **地球科学与环境学报**, 2011, 33(4):337-348.
- MAO Guangzhou, LIU Chiyang. Application of geochemistry in provenance and depositional setting analysis[J]. **Journal of Earth Sciences and Environment**, 2011, 33(4):337-348.
- [25] 刘彬, 王学求. 长江中下游地区早古生代沉积岩地球化学特征及其构造背景与物源分析[J]. **大地构造与成矿学**, 2018, 42(1):163-176. DOI:10.16539/j.ddgzyckx.2018.01.011
- LIU Bin, WANG Xueqiu. Geochemistry of early Paleozoic sedimentary rocks in the middle-lower reaches of the Yangtze River and its constrains on tectonic setting and provenance[J]. **Geotectonica et Metallogenia**, 2018, 42(1):163-176.

- [26] 孙 力. 扬子陆块西南缘中-新元古代沉积盆地构造演化及其地质意义[D]. 中国地质大学, 2022:1-203.
SUN Li. Tectonic evolution of the Meso-Neoproterozoic sedimentary basins and its geological significance on the southwestern margin of the Yangtze Block[D]. China University of Geosciences, 2022:1-203.
- [27] 苏 奎,金振奎,杜宏宇,等. 中上扬子地区早寒武世梅树村期岩相古地理[J]. 科技导报,2009,27(10):26-31.
SU Kui,JIN Zhenkui,DU Hongyu, *et al.* Lithofacies palaeogeography of the Meishucun age in the middle and upper Yangtze region[J]. **Science & Technology Review**,2009,27(10):26-31.
- [28] 朱利岗. 云南武定地区铁-铜-金-铀-稀土矿成矿作用与成矿动力学[D]. 中国地质大学(北京),2019.
ZHU Ligang. The ore genesis and geodynamic setting of the Fe-Cu-Au-U-REE deposits in the Wuding region, Yunnan Province, SW China. [D]. China University of Geosciences (Beijing), 2019.

PALEOENVIRONMENTAL, PROVENANCE, AND TECTONIC SETTING OF THE QIONGZHUSI FORMATION BLACK SHALE SERIES IN HUIZE AREA, EASTERN YUNNAN: INSIGHTS FROM RARE EARTH ELEMENT GEO-CHEMISTRY

CHENG Yong^{1,2}, WEN Yiming¹, NIE Qi¹, LUO Kai², ZHANG Jinliang¹, HE Donghao¹, LIU Yang¹, WU Wei¹

1. *Faculty of Metallurgy and Mining Engineering, Kunming Metallurgy College, Kunming, Yunnan 650033, China;*
2. *School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China*

Abstract: The Early Cambrian black rock series, extensively developed in the eastern Yunnan region, represents a potential horizon for shale gas exploration and offers significant prospects for mineral exploration. This study focuses on the black rock series of the Qiongzhusi Formation from the Lower Cambrian in the Huize area, to elucidate its paleoenvironment, tectonic setting, and provenance through systematic sampling and rare earth element (REE) analysis, aiming to provide clues for mineral bed exploration and shale gas assessment. The study's findings indicate that the total content of rare earth elements (ΣREE) in the black rock series ranges from 26.11×10^{-6} to 272.82×10^{-6} , characterized by an enrichment of light rare earth elements and a relatively flat distribution of heavy rare earth elements. This pattern is further supported by moderate negative europium anomalies and slightly negative cerium anomalies, closely aligning with the typical upper continental crustal REE distribution. An upward increase in ΣREE from the base to the top of the section suggests a climate that was predominantly warm and humid during the depositional phase. The δCe and cerium anomaly indices indicate that the Qiongzhusi Formation formed in a deeper, anoxic aquatic environment. Additionally, the $(\text{Eu}/\text{Sm})_N$ - $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$ bivariate plot and trace element signatures subtly suggest the influence of metalliferous hydrothermal activity on the black rock series. A comprehensive assessment of δEu , δCe , ΣREE , and supplementary geochemical parameters lead to a conclusion that the source rocks of the Qiongzhusi Formation black rock series are felsic rocks. The comparative analysis of REE characteristic parameters further suggests that the tectonic setting of this black rock series is consistent with a continental island arc environment. The findings reveal that the black rock series deposited in a confined basin at the southwestern margin of the Yangtze block, influenced by clastic input from the Kangdian ancient land, a restricted sedimentary environment, and metalliferous hot water from the ocean floor. This research not only enhances our understanding of the formation mechanism of the Qiongzhusi Formation black rock series but also offers a new perspective for aiding mineral resource exploration in the region.

Keywords: Qiongzhusi Formation; Black Rock Series; Rare Earth Elements (REE); Geochemistry

ISSN 1001-6872(2024)04-0058-13; CODEN:KUYAE2

Synopsis of the first author: CHENG Yong, male, 35 years old, an associate professor (PhD) of mineral exploration and prospecting. Now he is engaged in the research of metal and oil-gas resources in sedimentary basin.