

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.023>



湖北鹤峰走马镇地区牛蹄塘组岩石地球化学特征： 物源、古风化、沉积环境和构造背景

何谋恂^{1,2}, 丁振举^{1,2*}, 王翔³, 万禹⁴

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学固体矿产勘查国家级实验教学示范中心, 湖北武汉 430074
3. 中国建筑材料工业地质勘查中心湖北总队, 湖北武汉 430070
4. 中国地震局地震研究所, 湖北武汉 430071

摘要: 鹤峰地区位于湘西-鄂西地区层控铅锌多金属成矿带内, 不仅是我国“扬子型”铅锌矿床重要产区之一, 也是我国页岩气资源重要的远景区, 为了探讨区内分布的寒武系下统牛蹄塘组黑色岩系沉积物物质来源及其成熟度、古风化特征、沉积环境以及岩石形成的构造环境, 对产于鹤峰县走马镇地区下寒武统牛蹄塘组中下部的黑色岩系开展了岩石学和岩石化学成分分析, 结果显示: 走马镇地区牛蹄塘组岩石的主量元素含量变化比较大, 上下不同层位样品化学成分相差较大, 其中下部地层除了 SiO_2 和 P_2O_5 含量高于 PAAS 值外, 其他组分均低于 PAAS 值. 强烈富集 U、Cr, 而亏损 Th, 具有较高的 Ni/Co 值和较低的 V/Cr 值. REE 总量略高于 PAAS, 具有明显的 Ce 负异常和弱-微弱的 Eu 负异常以及略偏大的 Y/Ho 比值. 而上部地层中 Al_2O_3 含量明显高于下部地层, 与 PAAS 相比, 除了 SiO_2 和 Na_2O 略微富集外, 其他组分全部亏损. 强烈富集 V、U 和 Ba, 明显亏损 Zn、Th、Ni 和 Rb, Ni/Co 比值低而 V/Cr 比值高且变化范围大. REE 总量与下部地层相差不大, 弱-微弱的 Ce 和 Eu 的负异常, Y/Ho 比值比下部地层更接近火成岩和陆源碎屑岩值. 结果表明该套岩石为陆源碎屑岩和中性火山岩, 在潮湿-半干旱的气候条件下经过强烈的风化作用, 沉积于被动大陆边缘构造环境下的缺氧-贫氧、局部贫氧-次氧化的海水中, 有热水沉积物的参与.

关键词: 牛蹄塘组; 岩石学; 地球化学; 物源; 沉积环境; 构造背景; 鄂西鹤峰.

中图分类号: P53

文章编号: 1000-2383(2023)09-3280-16

收稿日期: 2022-11-17

Geochemical Characteristics of Niutitang Formation in Zoumazhen Area, Hefeng, Hubei Province: Provenance, Paleoweathering, Sedimentary Environment and Tectonic Setting

He Mouchun^{1,2}, Ding Zhenju^{1,2*}, Wang Xiang³, Wan Yu⁴

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. National Demonstration Center for Experimental Mineral Exploration Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Hubei Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Wuhan 430070, China
4. Institute of Seismology, China Earthquake Administrator, Wuhan 430071, China

基金项目: 中国地质调查局项目 (No. 12120114016601).

作者简介: 何谋恂 (1965—), 男, 副教授, 博士, 主要从事成矿流体研究. ORCID: 0000-0003-1763-8273, E-mail: hemch@126.com

*** 通讯作者:** 丁振举, E-mail: dingzhenju@cug.edu.cn

引用格式: 何谋恂, 丁振举, 王翔, 万禹, 2023. 湖北鹤峰走马镇地区牛蹄塘组岩石地球化学特征: 物源、古风化、沉积环境和构造背景. 地球科学, 48(9): 3280—3295.

Citation: He Mouchun, Ding Zhenju, Wang Xiang, Wan Yu, 2023. Geochemical Characteristics of Niutitang Formation in Zoumazhen Area, Hefeng, Hubei Province: Provenance, Paleoweathering, Sedimentary Environment and Tectonic Setting. *Earth Science*, 48(9): 3280—3295.

Abstract: The Hefeng area is located in the stratabound-type Pb-Zn polymetallic metallogenic belt in the junctional zone between western Hunan and western Hubei. It is not only one of the important producers of “Yangtze-type” Pb-Zn deposits, but also an important prospecting area of shale gas resources in China. In order to discuss the provenance, paleoweathering, sedimentary environment and tectonic setting of the Niutitang Formation, the petrology and petrochemistry of the black rock series in the middle and lower part of the Niutitang Formation in Zouma Town of Hefeng County are analyzed. The contents of major elements in the rock vary significantly, and the chemical composition of the samples from different layers is quite different. Except for SiO_2 and P_2O_5 , most of the compositions in the lower layer are lower than the PAAS value. The rocks are strongly enriched in U and Cr, but depleted in Th. They have high Ni/Co ratios and low V/Cr ratios. The total amount of REE is slightly higher than that of PAAS, with obvious Ce negative anomaly, weak Eu negative anomaly, and slightly larger Y/Ho ratio. The content of Al_2O_3 in the upper stratum is significantly higher than that in the lower strata. Compared with PAAS, most of the components are depleted except SiO_2 and Na_2O . The rocks are strongly enriched in V, U, and Ba, obviously depleted in Zn, Th, Ni, and Rb, with low Ni/Co ratios and high V/Cr ratios. The content of the total amount of REE is similar to that of the lower strata with the weak negative anomalies of Ce and Eu, and the Y/Ho ratios are similar to the values of igneous and terrigenous clastic rocks. It is considered that the Niutitang Formation were originated from terrigenous clastic rocks and neutral volcanic rocks, which have undergone strong weathering under humid to semi-arid climatic conditions, and were deposited in the palaeogeographic anoxic/dysoxic environment in the passive continental margin setting.

Key words: Niutitang Formation; petrology; geochemistry; provenance; sedimentary environment; tectonic setting; Hefeng County.

0 引言

黑色岩系又称黑色页岩,是一种形成于缺氧或贫氧环境的、具有一定沉积学、古生态学和地球化学特征黑色细粒泥质岩的沉积组合(Tyson, 1987);岩石以富含有机质和多种金属元素为特征,不仅仅是很好的烃源岩,也是很多金属矿床的矿源层(何谋恂等, 2021)。

黑色岩系广泛分布于中国、印度、巴基斯坦、伊朗、法国、英格兰、阿曼、俄罗斯、蒙古、澳大利亚、加拿大和美国等世界各国。而且发育时代比较广,从元古代到新生代都有出露(范德廉, 1988)。尤以下寒武统的黑色岩系最为重要,该套岩石不仅层位稳定,而且具有全球等时性规模。我国黑色岩系主要分布在扬子地块和塔里木地块,其中,扬子地块下寒武统黑色岩系因其分布广、层位稳定、沉积厚度大、TOC及Ni-Mo-PGE、Pb、Zn、Ag等多种有用元素含量高而引起国内地质学界的广泛关注,前人也对其开展了多项科学研究,并取得了不少成果和新认识(姜月华等, 1994;游先军, 2010;Cao *et al.*, 2013;刘安等, 2013;Shi *et al.*, 2014;Han *et al.*, 2015;张廷山等, 2015;李军等, 2019;王健等, 2020;李琪琪等, 2021)。但这些研究主要集中在湘西、贵州、川西和渝东等地区,而且主要围绕着与页岩气成藏特征和潜力评价有关的岩石学、岩石地球化学、古生物学、古沉积环境等方面,而对该套地层

的沉积物物源、古气候及古风化特征以及形成时的古构造环境等方面少有涉及。

鄂西鹤峰县位于湘西-鄂西地区层控铅锌多金属成矿带内,不仅是我国“扬子型”铅锌矿床重要产区之一(曹亮等, 2013),也是我国页岩气资源重要的远景区(李海等, 2016)。区内分布有下寒武统牛蹄塘组和上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组2套黑色碳质页岩。前人对区内黑色岩系与金属成矿和油气成藏的关系开展了大量的研究,取得了一些新成果(王鹏万等, 2014;何庆等, 2019)。本文在野外地质调查的基础上,对鹤峰县走马镇地区下寒武统牛蹄塘组黑色岩系开展岩石化学成分分析,限定该套岩石沉积物物质来源及其成熟度,并分析古风化特征与沉积环境,探讨岩石形成时的构造环境,丰富了区域成矿成藏研究资料。

1 区域地质背景

鹤峰县走马镇地区构造位置处于北东向的湘鄂西冲断褶皱带的宜都鹤峰复背斜带。区域构造总体表现为由箱状背斜和线状向斜相间的“隔槽式”结构(图1a),背斜核部主要出露寒武系-奥陶系,基底新元古界部分卷入,向斜核部主要为上古生界及中生界。后罗迪尼亚超级大陆的裂解,使华南联合古大陆进入裂陷、坳陷与周缘前陆盆地发育时期(王清晨和蔡立国, 2007;徐政语等, 2013)。震旦纪-早古生

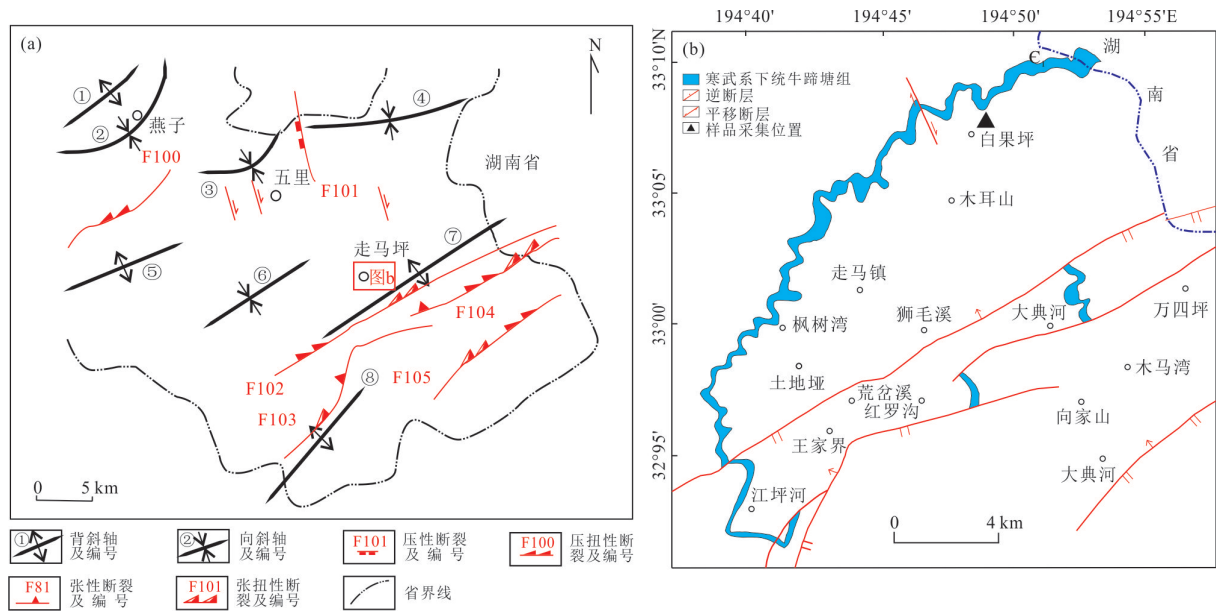


图 1 区域构造纲要图(a)及采样位置(b)

Fig.1 Regional structure outline map (a) and sampling location (b)

①麻泥山背斜,②来凤-鹤峰向斜,③长岭向斜,④铁家岭向斜,⑤二坪背斜,⑥雄鸡坪向斜,⑦走马-东山峰背斜,⑧增壁台背斜. F100为燕家河断裂;F101为八方界断裂;F102为孟家沟-清官渡断裂;F103为自生桥断裂;F104为碑垭-官屋场断裂;F105为南里坪断裂. 图b据湖北省地质局第二地质大队,2015,湖北省鹤峰县走马地区铅锌多金属矿调查评价

代早期(Z-O₂)区内为克拉通海相盆地和被动大陆边缘盆地;晚奥陶世-志留纪(O₃-S)为克拉通内坳陷盆地及发育在克拉通之上的隆后盆地(牟传龙等,2011).早寒武世及晚奥陶世-早志留世,区内发生了两次海侵,相应地沉积了两套区域性暗色泥页岩(李艳霞等,2011).其中,早寒武世,整个湘鄂西地区处于陆棚环境,沉积了一套由上升洋流带来的磷质物质和广泛分布的牛蹄塘组黑色页岩;中晚奥陶世至早志留世,为局限的陆棚环境,形成了上奥陶统五峰组及下志留统龙马溪组黑色泥页岩.

2 样品采集与实验方法

2.1 样品采集

本次采样剖面位于恩施州鹤峰县走马镇白果坪,采样坐标为北纬 29°53'15",东经 110°27'27" (图 1b);剖面起点为牛蹄塘组与灯影组的分界面,剖面真厚度为 20.5 m,分 3 段导线完成测量(其中导线 1 所取样品编号为 BGP-1,导线 2 编号所取样品为 BGP-3,导线 3 所取样品编号为 BGP-4).采集层位为研究区内牛蹄塘组中下部层位,地层岩性、剖面特征及采样点分布见图 2.

2.2 岩性特征及地层分布

区内寒武系下统牛蹄塘组分布于走马-东山峰

背斜南西倾伏端的江坪河至走马-东山峰背斜北西翼中坪一带,呈连续带状展布(图 1b),延伸至湖南省境内,南西倾伏端及北西翼厚 130~230 m,在背斜南东翼龙王庙至自生桥一线零星出露,厚度薄,一般小于 100 m.下部岩性为黑色含碳硅质岩、硅质页岩、含碳水云母页岩、含磷结核泥岩,夹少量白云岩透镜体;中部为黑色水云母页岩、碳质页岩、粉砂质页岩;顶部为灰黑色灰岩夹碳质泥岩,水平层理,含三叶虫、海绵骨针等.

2.3 分析方法

主量元素分析由国土资源部武汉矿产资源监督检测中心完成.碎样前先切除表面风化层,对样品进行破碎处理,选取新鲜无次生脉体岩块,然后在振动式磨样机内磨至 200 目以下.主量元素测试每件样品 50 g 左右,采用 X 射线荧光熔片法(XRF),即将 4.0 g 四硼酸锂与 0.4 g 样混合后置于 AAG50 熔样器上制成玻璃后在 X 荧光仪上测定.使用的标样有:GSR-1、GSR-2、GSR-3、GSR-4、GSR-5、GSR-6.标样精度一般可控制在 1%~8%.

微量和稀土元素测试在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,仪器为美国 Agilent 公司的 Agilent 7500a 等离子体质谱仪(ICP-MS).分析步骤和方法为:首先称取粉碎至大约 200 目的岩石粉末 50 mg 于 Teflon 溶样器中;然后采用

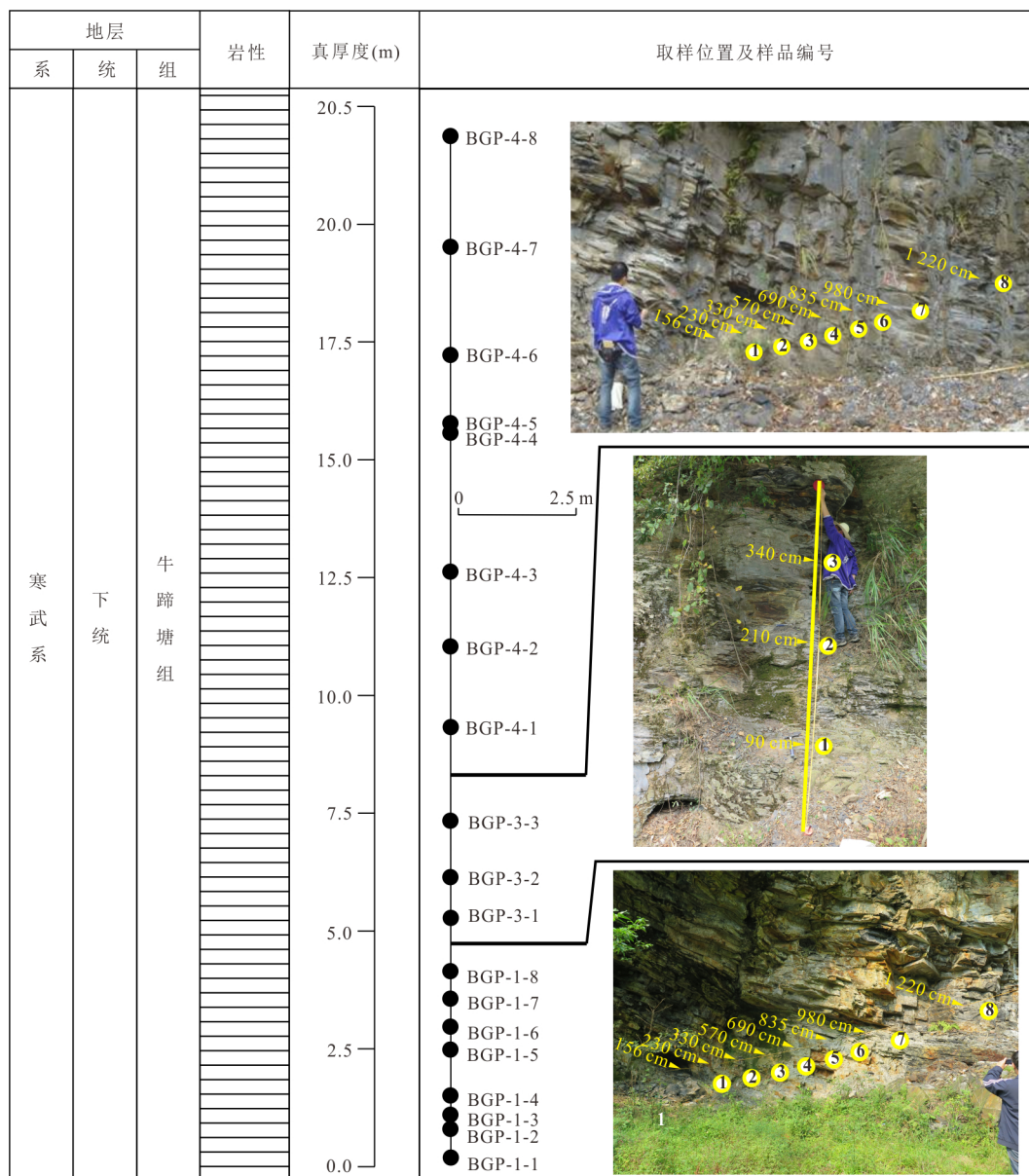


图2 地层柱状图及采样位置
Fig.2 Stratigraphic histogram and sampling location

Teflon 溶样弹将样品用 1.5 mL HF+1.5 mL HNO₃ 在 195 ℃ 条件下消解 48 h; 最后将在 120 ℃ 条件下蒸干除 Si 后的样品用 2% HNO₃ 稀释 2 000 倍, 定容于干净的聚酯瓶中, 待仪器测定. 所用标样为 BHVO-2、AGV-2、BCR-2、GSP-2 等, 标样精度一般可控制在 3% 以内.

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素元素特征

主量元素分析结果见表1, 从表中可见, 岩石的主量元素含量变化比较大, 其中, SiO₂ 含量为

60.21%~73.59%, 平均 62.8%, Al₂O₃ 含量为 6.01%~14.63%, 平均为 10%, TiO₂ 含量 0.32%~0.90%, 平均 0.57, Fe₂O₃^T 含量 1.17%~5.42%, 平均为 3.09%, MnO 含量 0.004%~0.020%, 平均 0.007%, CaO 含量为 0.04%~4.43%, 平均为 0.54%, MgO 含量为 0.62%~1.85%, 平均为 1.11%, Na₂O 含量 0.05%~2.16%, 平均为 1.67%, K₂O 含量为 1.71%~3.49%, 平均为 2.61%, P₂O₅ 含量为 0.03%~2.76%, 平均为 0.29%. 上部(导线 2+3)层位样品中除了 Al₂O₃ 含量明显比下部(导线 1)层位样品高(平均含量分别为 12.58% 和 7.09%)外, 其他组分含量相差不大.

表 1 岩石主量元素含量(%)

Table 1 Major elements compositions for the study samples (%)

成分	导线 1														导线 2+3				PAAS 平均值
	BGP-1-1	BGP-1-2	BGP-1-3	BGP-1-4	BGP-1-5	BGP-1-6	BGP-1-7	BGP-1-8	平均值	BGP-3-1	BGP-3-2	BGP-3-3	BGP-4-1	BGP-4-2	BGP-4-3	BGP-4-4	BGP-4-5	BGP-4-6	
SiO ₂	69.46	64.94	68.26	69.29	69.36	60.21	66.94	73.59	67.76	63.48	65.26	68.6	68.83	73.14	72.31	70.60	66.86	65.44	68.28
Al ₂ O ₃	6.01	6.45	6.59	6.77	6.86	9.38	8.10	6.57	7.09	11.92	12.83	11.59	12.47	11.59	12.44	11.28	14.46	14.63	12.58
TiO ₂	0.32	0.34	0.37	0.38	0.42	0.54	0.56	0.37	0.41	0.90	0.64	0.56	0.78	0.68	0.70	0.64	0.75	0.79	0.72
Fe ₂ O ₃ ^T	3.59	3.94	3.23	3.43	3.29	5.42	3.67	3.14	3.71	1.82	1.59	2.66	1.17	1.51	1.28	3.57	5.71	3.48	2.53
MnO	0.020	0.016	0.004	0.006	0.005	0.016	0.004	0.007	0.010	0.003	0.006	0.006	0.005	0.004	0.004	0.005	0.010	0.010	0.11
CaO	1.97	4.43	0.45	0.37	0.37	0.57	0.19	0.41	1.10	0.11	0.04	0.04	0.06	0.08	0.05	0.04	0.04	0.04	0.06
MgO	1.30	0.91	1.16	1.12	0.88	1.35	0.63	0.62	1.00	0.79	1.29	1.28	1.33	0.99	1.05	1.03	1.23	1.85	1.20
Na ₂ O	0.41	0.58	0.05	0.11	0.54	0.82	1.19	0.79	0.56	2.16	1.09	0.76	1.28	1.16	1.26	1.47	1.15	1.67	1.33
K ₂ O	1.74	1.91	2.13	2.15	2.01	2.61	2.16	1.71	2.05	2.99	3.44	3.08	3.11	2.84	3.08	2.60	3.49	3.25	3.10
P ₂ O ₅	0.55	2.76	0.35	0.25	0.13	0.16	0.04	0.14	0.55	0.12	0.05	0.11	0.04	0.04	0.03	0.05	0.06	0.06	0.16
H ₂ O ⁺	2.09	2.15	2.97	2.90	3.50	2.95	2.50	1.98	2.63	3.16	3.60	3.63	3.71	2.74	3.11	2.82	2.91	2.89	3.17
CO ₂	1.15	0.69	0.07	0.09	0.07	0.23	0.05	0.14	0.31	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.03
LOST	14.38	13.46	15.66	14.83	15.46	18.43	15.99	12.10	15.04	15.28	13.03	10.44	10.40	7.34	7.41	8.39	5.68	8.45	6.00
Total	103.0	102.6	101.3	101.7	102.9	102.7	102.0	101.6	102.2	102.8	102.9	102.8	103.2	102.1	102.7	102.5	102.4	102.6	104.59
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	18.53	19.03	17.99	17.97	16.48	17.39	14.52	17.61	17.44	13.28	20.20	20.59	15.98	17.02	17.74	17.73	19.24	18.63	17.82
Al/Ti	16.35	16.79	15.88	15.86	14.54	15.35	12.81	15.54	15.39	11.72	17.82	18.17	14.10	15.02	15.66	15.64	16.98	16.44	15.73
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	11.56	10.06	10.36	10.23	10.12	6.42	8.26	11.20	9.78	5.32	5.09	5.92	5.52	6.31	5.82	6.26	4.62	4.47	5.48
K ₂ O/Na ₂ O	4.29	3.28	40.00	20.20	3.73	3.19	1.81	2.16	9.83	1.38	3.15	4.03	2.42	2.44	2.45	1.78	3.04	1.94	2.51
K ₂ O/Al ₂ O ₃	0.29	0.30	0.32	0.32	0.29	0.28	0.27	0.26	0.29	0.25	0.27	0.27	0.25	0.25	0.25	0.23	0.24	0.22	0.25
ICV	1.50	1.83	1.07	1.06	1.04	1.15	0.97	1.02	1.21	0.66	0.58	0.68	0.56	0.57	0.54	0.77	0.80	0.70	0.65
Al ₂ O ₃	0.058 9	0.063 3	0.064 6	0.066 4	0.067 2	0.092 0	0.079 5	0.064 4	0.070 0	0.116 9	0.125 8	0.113 6	0.122 2	0.113 7	0.121 9	0.110 5	0.141 8	0.143 4	0.12
CaO*	0.006 5	0.009 4	0.000 9	0.001 7	0.005 7	0.009 0	0.003 0	0.006 4	0.010 0	0.001 1	0.000 4	0.012 3	0.000 8	0.001 1	0.000 7	0.000 4	0.000 3	0.000 3	0.00
Na ₂ O	0.006 5	0.009 4	0.000 9	0.001 7	0.008 7	0.013 2	0.019 2	0.012 8	0.010 0	0.034 8	0.017 6	0.012 3	0.020 7	0.018 8	0.020 3	0.023 7	0.018 5	0.027 0	0.02
K ₂ O	0.018 5	0.020 3	0.022 7	0.022 9	0.021 4	0.027 8	0.023 0	0.018 2	0.020 0	0.031 8	0.036 6	0.032 8	0.033 0	0.030 2	0.032 8	0.027 7	0.037 1	0.034 6	0.03
CIA	65.12	61.78	72.58	71.58	65.19	64.80	63.74	63.31	66.01	63.32	69.75	66.43	69.16	69.40	69.41	68.14	71.71	69.85	68.57
PIA	75.57	69.54	96.06	92.67	75.99	74.33	71.75	70.73	78.33	70.32	83.23	76.65	80.61	80.74	80.97	77.54	84.76	79.94	79.42
CJW	81.84	77.09	97.41	95.07	82.29	80.58	78.14	77.10	83.69	76.49	87.49	82.18	85.07	85.10	85.33	82.16	88.29	84.01	84.01
CJW'	90.02	87.06	98.69	97.47	88.52	87.44	80.54	83.45	89.15	77.04	87.71	90.21	85.53	85.82	85.73	82.38	88.44	84.15	85.22

注: Al₂O₃、CaO^{*}、Na₂O、K₂O 的单位为 moles; ICV (index of compositional variation) 和 CIA (chemical index of alteration) 据 Nesbitt and Young (1982); PIA (plagioclase index of alteration) 据 Fedo *et al.* (1995); CJW (chemical index of weathering) 据 Harnois (1988); CJW' 据 Culvers (2000)。

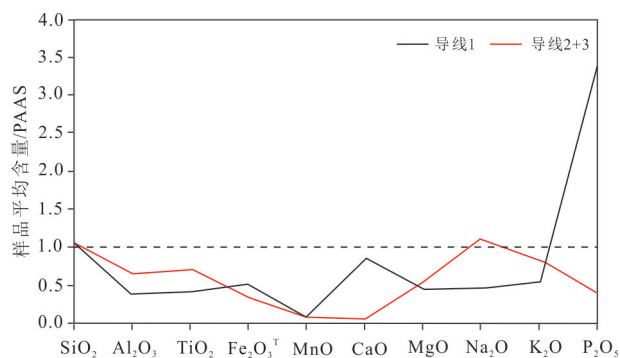


图3 岩石主量元素PAAS标准化分布

Fig.3 Distribution of PAAS normalized abundances of major for the study samples

与PAAS相比,下部地层岩石除了 P_2O_5 强烈富集, SiO_2 与PAAS基本相当外,其他组分都表现出不同程度的亏损.而上部地层中除了 SiO_2 和 Na_2O 轻度富集外,其他组分也表现为亏损(图3).

3.2 微量元素地球化学特征

微量元素含量分析结果见表2,从表中可知,岩石中除了Th、Rb、Hf和Zr元素的平均含量略低于PAAS外,其他元素的平均含量均高于PAAS.在PAAS标准化蛛网图上(图4),样品富集U和Ba,而相对亏损Th和Rb.并且下部样品明显富集Cr,上部样品富集V.不同样品中微量元素含量变化比较大,尤其是Zn、Cr、Co和V四种元素在不同样品中含量相差达到1~2个数量级.其他元素含量变化都在一个数量级以内.下部样品具有较高的Ni/Co比值,除了一件样品值小于1外,其他样品值均大于1,最高达12.31,平均为6.62,上部样品大部分小于1,平均值为1.27.下部样品与上部

样品相比具有比较低的V/Cr值(分别为0.10~3.13和2.45~63.75),平均值分别为1.07和17.69.而上下不同层位样品的 $V/(V+Ni)$ 值相差不大,变化比较稳定,介于0.39~0.99,均值为0.77.

3.3 稀土元素地球化学特征

稀土元素分析结果见表3,从表中可知,稀土元素总量 ΣREE 为 $121.65 \times 10^{-6} \sim 321.8 \times 10^{-6}$,平均值为 202.65×10^{-6} ,而且上下不同层位稀土总量几乎完全相同,均高于PAAS稀土总量(183×10^{-6}). $LREE/HREE=0.92 \sim 4.43$,除1个样品小于1外,其他样品全部大于1,均值2.71,远小于PAAS均值(9.52),轻、重稀土分异程度较低. La_N/Yb_N 为4.10~13.25,均值为8.65, δEu 和 δCe 变化范围很小,均值分别为0.56和0.8, Y/Ho 变化范围为27~40,均值为33.其中,不同层位样品中稀土总量基本相当,相比较而言,下部层位样品中 La_N/Yb_N 、 δCe 和 $LREE/HREE$ 均略小于上部层位(上下层平均值分别为6.4和10.66、0.65和0.94、1.66和3.64),而 δEu 和 Y/Ho 略高于上部层位(上下层平均值分别为0.59和0.53、37和30).在PAAS标准化配分模式图上(图5),上部层位样品呈略微右倾而下部层位样品呈略微左倾的近平坦状分布,下部层位样品具有较强的Ce负异常和弱-微弱的Eu负异常.而上部层位则有弱的Eu负异常,Ce异常不明显.

4 讨论

4.1 岩石矿物成分特征

岩石主量元素成分含量变化能反映岩石矿物

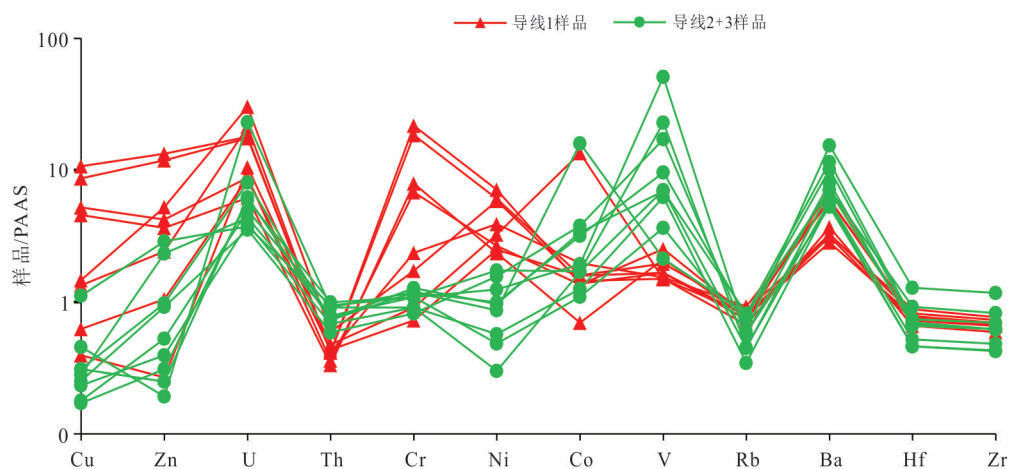


图4 微量元素PAAS标准化蛛网图

Fig.4 PAAS-normalized trace element spider diagram

表 2 牛蹄塘组黑色岩系微量元素含量(10⁻⁶)
Table 2 Trace elements compositions for the study samples (10⁻⁶)

元素	导线 1								导线 2+3											
	BGP- 1-1	BGP- 1-2	BGP- 1-3	BGP- 1-4	BGP- 1-5	BGP- 1-6	BGP- 1-7	BGP- 1-8	平均值	BGP- 3-1	BGP- 3-2	BGP- 3-3	BGP- 4-1	BGP- 4-2	BGP- 4-3	BGP- 4-4	BGP- 4-5	BGP- 4-6	平均数	
Cu	228.71	261.53	534.30	433.16	66.72	73.11	19.67	31.14	206.04	22.76	15.42	15.46	8.54	8.91	11.60	12.57	55.74	14.06	18.34	
Zn	310.24	358.85	1 134.03	1 009.30	206.00	446.09	22.66	89.12	447.04	16.29	21.14	83.08	26.33	44.68	33.50	78.01	245.55	198.79	83.04	
Pb	20.01	19.43	23.66	26.51	18.93	17.32	17.44	16.45	19.97	12.34	16.84	20.54	14.81	10.38	23.44	20.69	17.13	14.89	16.78	
U	19.20	27.20	55.60	54.30	66.40	93.90	32.60	27.00	47.03	71.50	19.25	25.00	18.40	15.30	12.10	10.95	11.60	13.50	21.96	
Th	4.84	5.24	6.06	6.03	6.06	8.66	6.94	6.35	6.27	13.35	10.65	10.85	14.50	13.25	10.00	8.55	13.75	11.45	11.82	
V	1 220	1 050	9 860	7 650	3 440	2 580	1 060	940	3 475	547	1 040	1 440	319	250	224	225	230	293	507.56	
Cr	870	750	2 390	2 030	260	190	100	80	833.75	130	130	140	120	100	100	90	120	120	116.67	
Ni	129.00	146.40	390.90	333.70	215.00	322.60	179.10	137.50	231.78	47.66	54.64	53.18	26.67	31.41	16.47	86.06	95.61	68.57	53.36	
Co	15.95	31.16	31.76	36.75	45.29	33.34	309.30	36.32	67.48	367.10	72.87	77.57	25.22	28.86	39.04	87.23	39.30	44.41	86.84	
Ag	0.35	0.29	0.31	0.24	0.37	0.26	0.29	0.27	0.30	0.25	0.54	0.61	0.95	0.91	2.33	2.04	2.68	6.36	1.85	
V	317	379	250	293	230	225	224	250	271	319	1 440	1 040	547	940	1 060	2 580	3 440	7 650	2 113	
Mo	28.70	48.80	33.28	28.52	27.27	31.18	24.67	41.44	32.98	64.05	133.00	92.18	51.63	37.16	140.90	177.50	164.10	92.09	105.85	
Rb	121.00	126.00	126.00	138.00	147.50	107.50	129.50	117.50	126.63	129.00	121.50	130.00	96.00	55.20	71.60	91.20	72.20	93.60	95.59	
Ba	2 040	2 130	1 845	2 100	3 890	2 400	3 860	4 560	2 853.13	4 640	6 600	7 470	10 000	3 620	4 540	5 200	3 780	3 430	5 475.56	
Hf	3.60	4.10	3.90	4.40	3.90	3.30	3.80	3.60	3.83	4.60	3.50	3.70	6.40	2.30	3.40	3.30	2.60	2.30	3.57	
Zr	138	153	141	161	146	124	140	141	143	173	130	146	246	90	130	131	101	89	137.33	
Ta	1.00	1.10	1.10	1.20	1.10	1.00	1.10	1.10	1.09	1.20	0.80	0.90	1.10	0.80	0.80	0.70	0.70	0.70	0.86	
Ni/Co	8.09	4.70	12.31	9.08	4.75	9.68	0.58	3.79	6.62	0.13	0.75	0.69	1.06	1.09	0.42	0.99	2.43	1.54	1.01	
Cu/Zn	0.74	0.73	0.47	0.43	0.32	0.16	0.87	0.35	0.51	1.40	0.73	0.19	0.32	0.20	0.35	0.16	0.23	0.07	0.40	
V/(V+Ni)	0.71	0.72	0.39	0.47	0.52	0.41	0.56	0.65	0.55	0.87	0.96	0.95	0.95	0.97	0.98	0.97	0.97	0.99	0.96	
V/Cr	0.36	0.51	0.10	0.14	0.88	1.18	2.24	3.13	1.07	2.45	11.08	7.43	4.56	9.40	10.60	28.67	28.67	63.75	18.51	
U/Th	3.97	5.19	9.17	9.00	10.96	10.84	4.70	4.25	7.26	5.36	1.81	2.30	1.27	1.15	1.21	1.28	0.84	1.18	1.82	

表 3 牛蹄塘组黑色岩系稀土元素分析结果(10 ⁻⁶)																							
Table 3 Rare earth elements compositions for the study samples (10 ⁻⁶)																							
导线号	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	Y/ Ho	La _N / Yb _N	δEu	δCe
导线 1	BGP-1-1	26.2	27.4	5.69	22.8	4.40	0.88	5.52	0.88	5.84	1.46	4.43	0.62	3.65	0.57	57	167.34	87.37	79.97	39	4.84	0.55	0.52
	BGP-1-2	40.9	43.6	10.00	44.4	9.85	2.34	12.55	1.84	10.75	2.49	7.09	0.91	5.42	0.81	95	287.55	151.09	136.46	38	5.09	0.64	0.50
	BGP-1-3	45.3	43.3	10.40	44.3	8.86	1.88	11.50	1.86	12.15	3.02	9.13	1.23	7.29	1.08	121	321.80	154.04	167.76	40	4.19	0.57	0.46
	BGP-1-4	36.5	39.2	8.95	36.4	7.42	1.53	8.96	1.39	9.06	2.21	6.49	0.96	5.44	0.83	87	252.35	130.00	122.35	39	4.52	0.57	0.51
	BGP-1-5	26.2	38.6	5.37	20.0	3.58	0.68	3.63	0.59	3.76	0.94	2.69	0.40	2.39	0.37	34	142.80	94.43	48.37	36	7.39	0.57	0.74
	BGP-1-6	31.8	50.6	6.93	27.1	5.04	1.09	5.13	0.80	5.02	1.20	3.54	0.51	3.22	0.49	40	181.97	122.56	59.41	33	6.66	0.65	0.79
	BGP-1-7	31.4	52.2	6.69	24.6	3.87	0.72	3.20	0.49	3.15	0.74	2.27	0.33	2.02	0.30	29	160.78	119.48	41.30	39	10.48	0.61	0.83
	BGP-1-8	21.0	36.8	4.51	17.5	3.24	0.60	3.54	0.54	3.29	0.74	2.06	0.29	1.77	0.27	26	121.65	83.65	38.00	34	8.00	0.54	0.87
平均值		32.41	41.46	7.32	29.64	5.78	1.22	6.75	1.05	6.63	1.60	4.71	0.66	3.90	0.59	60.81	204.53	117.83	86.70	37.29	6.40	0.59	0.65
导线 2+3	BGP-3-1	51.8	85.7	9.74	34.3	5.71	0.82	5.50	0.94	5.96	1.40	4.29	0.59	3.60	0.54	51	262.19	188.07	74.12	37	9.70	0.44	0.86
	BGP-3-2	32.2	61.6	7.01	24.8	4.14	0.59	3.27	0.53	3.30	0.77	2.41	0.39	2.37	0.37	25	168.75	130.34	38.41	32	9.16	0.47	0.95
	BGP-3-3	28.3	51.8	6.20	21.1	3.55	0.59	2.78	0.51	3.13	0.74	2.26	0.36	2.32	0.36	22	145.80	111.54	34.26	29	8.22	0.55	0.90
	BGP-4-1	42.9	81.2	8.87	31.0	4.52	0.72	3.58	0.58	3.67	0.84	2.41	0.38	2.28	0.33	24	207.38	169.21	38.17	29	12.69	0.53	0.95
	BGP-4-2	37.3	70.7	7.73	26.5	4.20	0.66	3.20	0.55	3.41	0.77	2.22	0.33	2.08	0.32	23	182.77	147.09	35.68	30	12.09	0.53	0.95
	BGP-4-3	39.9	74.2	8.07	27.6	4.22	0.61	3.19	0.57	3.52	0.76	2.24	0.35	2.03	0.31	22	189.87	154.60	35.27	29	13.25	0.49	0.94
	BGP-4-4	32.2	62.1	6.82	24.1	3.81	0.64	3.34	0.55	3.33	0.78	2.29	0.33	1.98	0.30	22	164.77	129.67	35.10	28	10.96	0.54	0.96
	BGP-4-5	44.0	89.1	10.20	40.6	8.63	1.86	8.45	1.28	7.39	1.55	4.23	0.62	3.74	0.55	45	267.40	194.39	73.01	29	7.93	0.66	0.98
导线 2+3	BGP-4-6	43.4	83.0	9.58	35.4	6.17	1.03	4.74	0.74	4.17	0.92	2.62	0.38	2.45	0.34	25	219.94	178.58	41.36	27	11.94	0.56	0.94
	平均值	39.11	73.27	8.25	29.49	4.99	0.84	4.23	0.69	4.21	0.95	2.77	0.41	2.54	0.38	28.86	200.99	155.94	45.04	30.11	10.66	0.53	0.94

组成及其风化程度,Moosavirad *et al.*(2011)研究认为,如果原岩碎屑中斜长石的数量较少或者碎屑物在搬运过程中遭受了较强烈风化作用,那么岩石成分中就会出现 Na₂O、CaO 的亏损;同样,如果碎屑中层状硅酸盐和铁镁质矿物较少,那么岩石中就会出现 K₂O、TiO₂和 Fe₂O₃^T的亏损.本次研究样品中,除了下部地层样品中 Na₂O 含量与 PAAS 值基本相当外,CaO、K₂O、TiO₂和 Fe₂O₃^T均表现为亏损,说明该套地层中层状硅酸盐和铁镁质矿物含量较少,并且经历过较强烈的风化作用.

Wronkiewicz and Condie (1987)对南非 Witwatersrand Supergroup 太古代页岩开展了地球化学成分

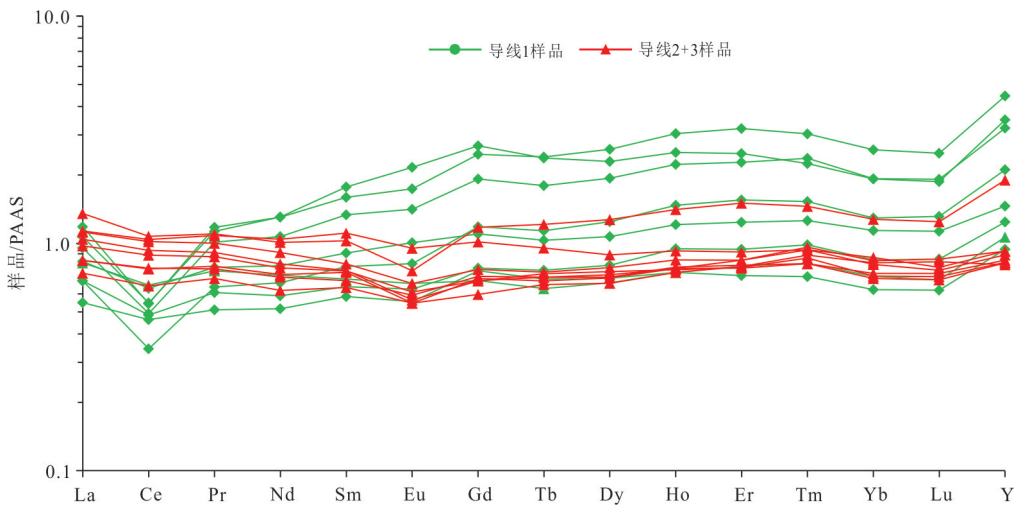


图5 牛蹄塘组黑色岩系稀土元素PAAS标准化配分模式
Fig.5 PAAS-normalized REE patterns for the study samples
PAAS数据来源于 McLennan *et al.*(1989)

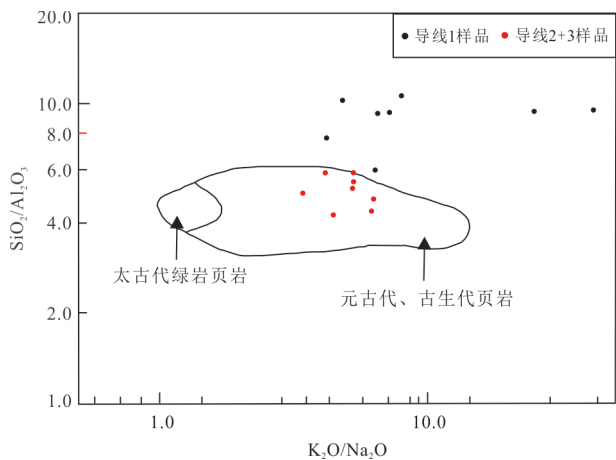


图6 页岩SiO₂/Al₂O₃-K₂O/Na₂O年龄判别图
Fig.6 Bivariate SiO₂/Al₂O₃ vs. K₂O/Na₂O age discrimination diagram for shales
底图据 Wronkiewicz and Condie(1987)

研究,发现利用SiO₂/Al₂O₃-K₂O/Na₂O双变量图可判断页岩年龄.在SiO₂/Al₂O₃-K₂O/Na₂O页岩年龄判别图上(图6),本文样品点分布比较分散;其中,下部地层投影点全部落在元古代-古生代页岩范围内,而上部地层样品落在其外围,样品中SiO₂/Al₂O₃比值总体比较大,个别样品具有比较高的K₂O/Na₂O比值.

对于页岩来讲,其主量元素成分主要由黏土矿物决定,相对来说非黏土硅酸盐矿物对其成分的影响明显小得多(Moosavirad *et al.*, 2011).Cox *et al.* (1995)提出了用岩石化学组成变化指数(ICV)来定性界定岩石中主要矿物组成的方法,其表达式为

$$ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO) / Al_2O_3$$
并且认为如果 $ICV < 1$,表示岩石主要由高岭石、伊利石和白云母等黏土矿物组成,而 $ICV > 1$,则代表岩石主要由斜长石、钾长石、角闪石和辉石矿物组成.本次研究中,下部样品(导线1)ICV值和变化范围都明显比上部(导线2+3)样品值要大,分别为0.97~1.83和0.65~0.80,平均分别为1.08和0.65,说明下部岩石主要由斜长石、钾长石、角闪石和辉石等非黏土硅酸盐矿物组成,而上部岩石主要由高岭石、伊利石和白云母等黏土矿物组成.Cox *et al.* (1995)还认为,黏土类矿物中K₂O/Al₂O₃比值较小,一般 < 0.3 ,而长石类矿物中K₂O/Al₂O₃比值比较大,一般为0.3~0.9.本次测试的不同部位样品中K₂O/Al₂O₃相差不大,变化范围较小,介于0.22~0.32,平均值为0.27,其中只有两件样品值大于0.3,说明岩石中黏土矿物含量明显比含钾矿物(钾长石、云母类)要多得多.

4.2 沉积物物源

一般来说,正常火成岩中Al主要存在于长石类矿物中,而Ti则主要存在于橄榄石、辉石、角闪石、黑云母以及钛铁矿等铁镁质矿物中,在铁镁质火成岩(岩石中SiO₂=45%~52%)中Al₂O₃/TiO₂比值为3~8,中性火成岩(SiO₂=53%~66%)中Al₂O₃/TiO₂比值为8~21,长英质火成岩(SiO₂=66%~76%)中Al₂O₃/TiO₂比值为21~70.但对于一些超镁铁质岩来说,尽管它们SiO₂含量不高,但有比较大的Al₂O₃/TiO₂比值,为了消除这种影响,必须对样品进行校正,由于Al和Ti两种元素是稳定元素

且化学性质相似,它们在风化残余及其搬运过程中一般保持不变,因此可以根据 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值,利用下列公式来校正岩石中 SiO_2 的含量:
 $\text{SiO}_2(\%) = 39.34 + 1.2578(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2) - 0.0109(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2)^2$ (Hayashi *et al.*, 1997),并根据校正后的 SiO_2 含量来判断其源岩的岩石类型.本次研究样品中经校正后的 SiO_2 含量变化范围比较小,主要集中于 54.12%~60.62%,平均为 58.1%,表明该套岩石的源岩为中性火成岩.

利用岩石主量元素、微量元素和稀土元素可以进一步判断源岩岩石类型(Roser and Korsch, 1988; Floyd *et al.*, 1989, 1990; McLennan, 1993).Roser and Korsch(1988)根据岩石中稳定和易迁移元素的含量构建了双变量判别图,其中判别函数 $D_1 = 0.607 \times \text{Al}_2\text{O}_3 - 1.773 \times \text{TiO}_2 + 0.76 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^T - 1.5 \times \text{MgO} + 0.616 \times \text{CaO} + 0.509 \times \text{Na}_2\text{O} - 1.22 \times \text{K}_2\text{O} - 9.09$; 判别函数 $D_2 = 0.445 \times \text{TiO}_2 + 0.07 \times \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.25 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^T - 1.142 \times \text{MgO} + 0.432 \times \text{Na}_2\text{O} - 1.426 \times \text{K}_2\text{O} - 6.861$,在双变量判别图上(图7),上下不同层位的样品投影点比较集中,全部落在石英质沉积岩区,说明样品源岩为石英质沉积岩.

现有研究表明,不同来源的沉积物中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 有比较明显的差别, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 3.6$,表明其物源主要由陆源提供,反之,则表明沉积物有生物或热水作用的补充.本次研究样品中, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值全部大于 3.6,相对而言,下部层位的样品比上部层位的样品具有更高的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值,平均值分别为

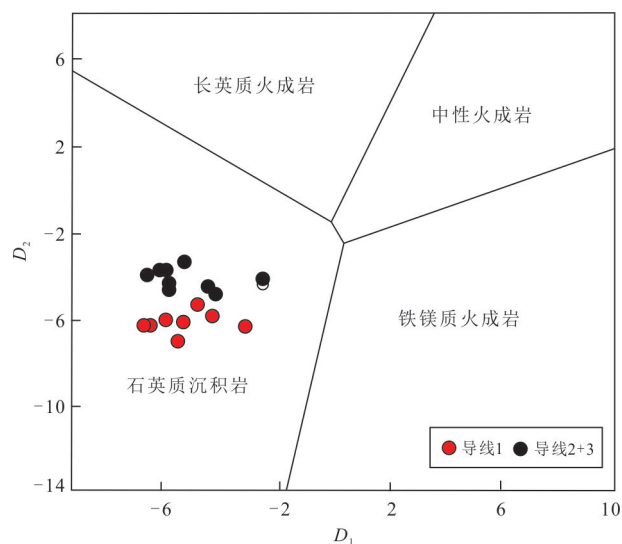


图7 页岩的物源判别图

Fig.7 Provenance discrimination diagram for shales

底图据 Roser and Korsch (1988)

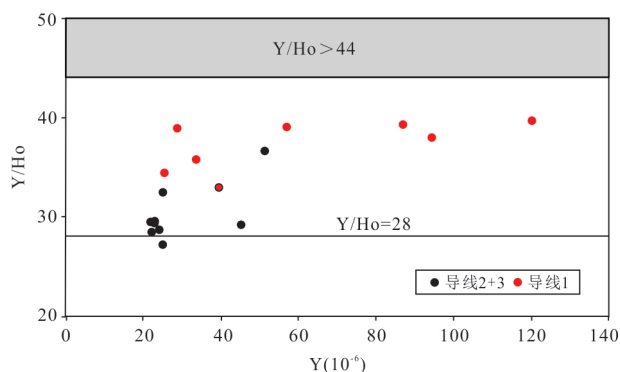


图8 牛蹄塘组黑色岩系 Y-Ho 协变关系

Fig.8 Y-Ho covariant diagram for study samples

9.78 和 5.48,说明牛蹄塘组物源主要来自陆源,可能有生物或热水沉积物的参与.

Y 和 Ho 是两种地球化学性质非常相似的稀土元素,它们在很多地质过程中具有一致的富集规律,因此, Y/Ho 比较稳定.一般火成岩和陆源碎屑沉积物中的 Y/Ho 值比较稳定(约为 26~28),而海水的 Y/Ho 比值变化比较大,常介于 44~74,并且随着海水深度的减小、陆源碎屑物的增加而减小,所以, Y/Ho 的比值可以用来示踪物源.本次研究样品中 Y/Ho 值介于 27~40,均值为 33,总体介于陆源碎屑物与海水之间(图8),下部地层中的 Y/Ho 比值比上部地层中要高(平均值分别为 37.25 和 30),说明牛蹄塘组物源主要来自陆源碎屑物,但其沉积过程中可能有海底热液沉积物的参与(Bau, 1996; Jiang *et al.*, 2006),尤其是下部地层受海水热液作用影响更大.

现有研究还表明,从大陆边缘到大洋深处,沉积物中 Al_2O_3 的含量逐渐降低,并且到达洋中脊达到最小(Boström *et al.*, 1973),因此,沉积物中 Al_2O_3 的含量不仅是重要的物源示踪组分,也是沉积物沉积环境的重要判断指标.本次分析的 17 件样品, Al_2O_3 含量普遍较低,远低于 PAAS 值(18.9%).尤其是下部地层 Al_2O_3 含量低于上部地层,含量范围分别为 6.01%~9.38% 和 11.28%~14.63%,平均值分别为 7.09% 和 12.58%.岩石中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值介于 13.28~20.59,平均为 17.64,上下不同层位地层相差不大.说明它们形成于远离克拉通的古地理位置.同时, Al/Ti 比值介于 11.7%~18.17%,平均值为 15.57%,上下不同层位地层数值相差不大.这些特征明显指示有火山物质的加入,并且形成于生长弧或弧后盆地(Fyffe and Pickerill, 1993).

4.3 古风化特征

源岩的化学风化强度是受源岩化学成分、风化持续时间、气候条件以及大地构造抬升速率等因素控制,上地壳中 75% 的不稳定成分是由长石和火山玻璃构成,它们经化学风化后形成黏土矿物(Nesbitt and Young, 1984, 1989; Taylor and McLennan, 1985; Fedo *et al.*, 1995). 在源岩风化过程中 Ca、Na 和 K 元素被大量释放出来. 因此,它们在风化壳或沉积物中的残留量是源岩化学风化强度评价的敏感指标(Nesbitt *et al.*, 1997),一般认为,如果没有成岩后外来含碱质流体的改造,那么($K_2O + Na_2O$)和 K_2O/Na_2O 被认为是评价源岩风化强度的可靠指标(Lindsey, 1999; Roy and Smykatz-Kloss, 2007). 很多学者利用岩石中活动和稳定元素氧化物(Na_2O 、 CaO 、 K_2O 和 Al_2O_3)的含量开展过岩石风化程度量化评价研究,如 Nesbitt and Young(1982)的化学蚀变指数 CIA 法($CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$)、Fedo *et al.* (1995)的斜长石蚀变指数法(PIA)($PIA = [(Al_2O_3 - K_2O) / ((Al_2O_3 - K_2O) + CaO^* + Na_2O)] \times 100$)、Harnois (1988)化学风化指数法(CIW)($CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O)] \times 100$)以及 Cullers (2000)针对富碳酸盐的硅质碎屑岩而改进的化学风化指数法(CIW')($CIW' = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O)] \times 100$). 上述等式中 CaO^* 为 CaO 在硅酸盐中的含量,不包括碳酸盐、磷酸盐等中的 CaO 含量,具体的计算方法,参见 McLennan (1993),所有氧化物的含量均为摩尔数. 研究表明 CIA、CIW 和 PIA 小于 50 表示岩石未经风化, $CIA = 50 \sim 60$, $PIA = 50 \sim 69$ 指示岩石经历了初级风化; $CIA = 60 \sim 80$, $PIA = 69 \sim 86$ 指示岩石经历了中等强度的风化; $CIA = 80 \sim 100$, $PIA = 86 \sim 100$ 指示岩石经历了强烈风化. 由于 K 在风化过程中变化较为复杂,既可被淋滤,也可在风化残留物中保存下来,因此,不管是 CIA 法还是 CIW 法都难以准确表征岩石的风化强度,相对来说 PIA 法可能更准确些.

本次研究样品中,岩石的 CIA 值为 61.78~72.58, 平均为 67.37, PIA 值为 69.54~96.06, 平均值为 78.90, CIW 值为 77.10~97.41, 平均值为 83.86, 并且不同层位样品这 3 个参数相差不大,反映出它们所处的环境和所经历的过程是相同的. 综合这些评价参数特征,笔者认为本区牛蹄塘组源岩经历了中-强程度的风化.

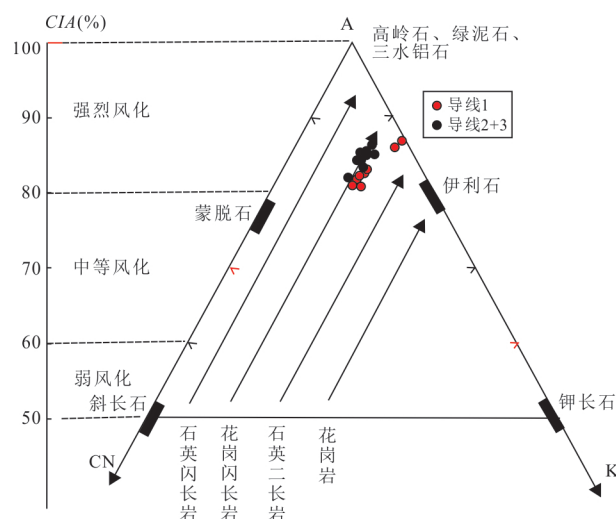


图9 页岩 A-CN-K 图

Fig.9 A-CN-K ternary diagram showing weathering trend
底图据 Fedo *et al.* (1995)、Nesbitt *et al.* (1984); A. Al_2O_3 ; CN. $CaO^* + Na_2O$; K. K_2O

$Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O$ (A-CN-K) 三角图解可以用来评价火成岩和沉积岩源岩的风化历史(Nesbitt and Young, 1982; Fedo *et al.*, 1995),在 A-CN-K 图上(图 9),本次研究样品投点分布比较集中,并且靠近高岭石+绿泥石+三水铝石一端,样品点总体呈现平行于 A-CN 线呈线状分布,说明牛蹄塘组黑色岩系在成岩过程中并未受到钾质交代的影响,并且样品投影点均沿着花岗闪长岩的风化线演化,指示其源岩可能为花岗闪长岩. 利用样品在 A-CN-K 图上的投影结果还可以反推样品真实的 CIA 值,从而准确判定源岩的风化强度,具体做法是通过 K 端元与样品点连线的反向延长线与对应类型的未发生交代作用的风化趋势线的交点值所对应的 CIA 值即为样品真实的 CIA 值,从图 9 可以看出,样品投影点全部位于强烈风化区域,说明牛蹄塘组源岩经历了强烈程度的风化.

4.4 沉积物成熟度与沉积环境

众所周知,沉积岩的风化指数可以为源岩地区构造活动以及气候研究提供有用信息. 一般来说,构造变动稳定和温暖、潮湿的气候有利于化学风化的进行. Suttner and Dutta (1986)提出了用 SiO_2 与 $(Al_2O_3 + K_2O + Na_2O)$ 二元图解来表征硅质碎屑岩形成时的气候条件.

在古气候判别图上(图 10),本次研究样品投影点明显分为两群,下部地层样品投影点主体落在潮湿气候区域,少部分落在半干旱区域,而上部地层样品投影点则全部落在半干旱气候区,说明牛蹄塘

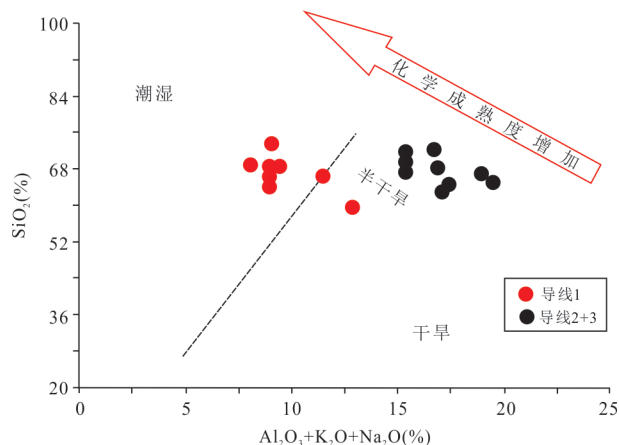


图 10 SiO_2 -($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)古气候判别图

Fig.10 Bivariate SiO_2 vs. ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) palaeoclimate discrimination diagram

底图据 Suttner and Dutta (1986)

组中下部地层早期沉积于潮湿-半干旱的气候条件,而晚期沉积于半干旱的气候条件,这种气候条件与源岩风化程度强烈相吻合。

沉积碎屑岩中 Ni、Co、V、Cr 等氧化-还原敏感元素的含量可以用来评判沉积时的氧化-还原环境。Jones and Manning (1994) 认为,在氧化环境下,岩石中 $\text{Ni}/\text{Co} < 5$ 并且 $\text{V}/\text{Cr} < 2$ 。缺氧环境下, $\text{Ni}/\text{Co} > 7$, $\text{V}/\text{Cr} > 4.25$, $\text{Ni}/\text{Co} = 5 \sim 7$ 代表着贫氧-次氧化环境。同样, Hatch and Leventhal (1992) 认为,岩石中 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 在贫氧环境下比值介于 0.46~0.60,缺氧环境下为 0.54~0.72 之间。本次研究中,下部层位样品 Ni/Co 比值明显比上部层位样品要大(变化范围分别为 0.58~12.31 和 0.13~2.43;平均值为 6.62 与 1.01);而上部层位样品 V/Cr 比值比下部层位样品要大(变化范围分别为 0.10~3.13 与 2.45~63.75;平均值分别为 10.7 与 18.51);同样,上部层位样品 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 比值比下部层位样品要略大(变化范围分别为 0.39~0.71 与 0.87~0.99;平均值分别为 0.55 与 0.96)。上述结果显示,牛蹄塘组下部层位地层沉积于贫氧-次氧化环境,而上部层位地层总体处于缺氧环境,在 Ni/Co - $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 古氧化还原环境判别图上(图 11),上部层位样品数据点集中于缺氧区域,而下部层位样品数据点相对比较分散,缺氧、贫氧及次氧化环境都有,表现为贫氧-次氧化环境。

4.5 构造背景

不同构造环境下形成的碎屑岩具有不同的地球化学特性,因此,可以通过碎屑岩的地球化学成分分析来判断其形成时的构造背景(Bhatia, 1983;

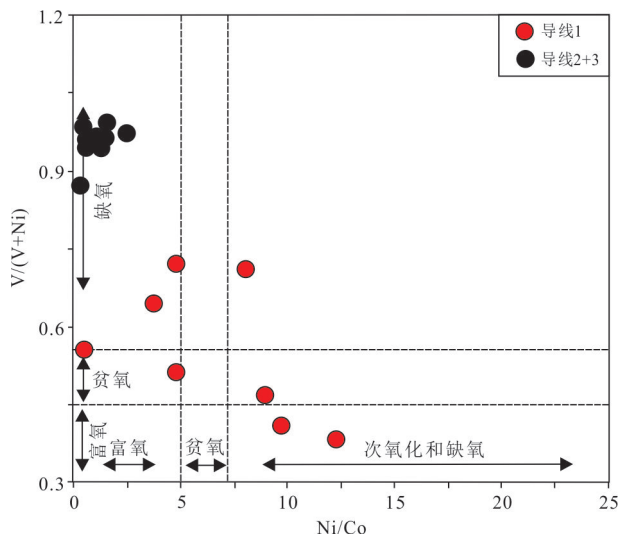


图 11 Ni/Co - $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 古氧化还原条件判别图

Fig.11 Paleo redox conditions by Ni/Co vs. $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$

底图据 Awan *et al.* (2020)

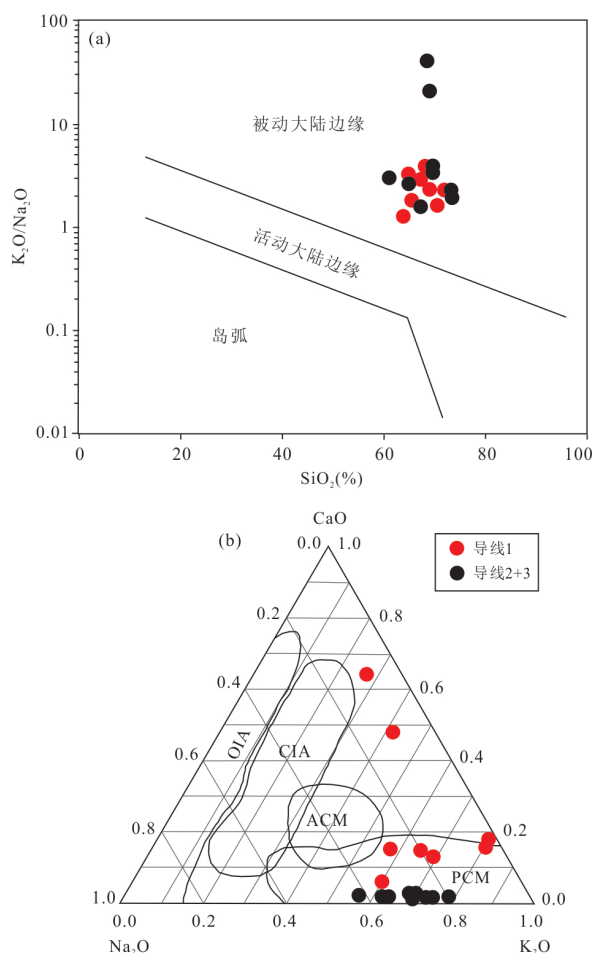


图 12 主量元素构造背景判别图解

Fig.12 Tectonic discrimination plots using major elements
a. $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ - SiO_2 图解,底图据 Roser and Korsch (1986); b. Na_2O - CaO - K_2O 图解,底图据 Bhatia and Crook (1986); CIA. 大陆岛弧; OIA. 大洋岛弧; PCM. 被动大陆边缘; ACM. 活动大陆边缘

Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1986). 在 Roser and Korsch (1986) 的 K_2O/Na_2O-SiO_2 双变量判别图上(图 12a), 所有样品投影点全部集中落在被动大陆边缘区域, 同样, 在 Bhatia and Crook (1986) 的 $CaO-Na_2O-K_2O$ 三角判别图上(图 12b), 上部层位样品集中落在被动大陆边缘区域, 而下部层位样品主体落在被动大陆边缘区域, 个别落在外围, 综合显示牛蹄塘组沉积于被动大陆边缘环境。

对于扬子地台东南缘的大地构造背景, 众多学者都开展过相关研究(段太忠等, 1988; Hsü *et al.*, 1990), 并提出了多种板块构造模式(刘宝珩和许效松, 1994; 王剑, 2000; Li *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2007; 王剑等, 2012), 总体认为, 该区构造演化经历了南华裂谷(820~635 Ma)、被动大陆边缘(635~488 Ma)和闭合造山(488~420 Ma)三个阶段。Awan *et al.* (2020) 对湘西地区牛蹄塘组形成的构造背景研究也认为区内牛蹄塘组主要形成于被动大陆边缘环境, 少量形成于活动大陆边缘。这些认识与本次研究所得结论一致。

5 结论

本文通过对鄂西鹤峰县走马镇地区牛蹄塘组开展岩石地球化学成分研究, 对其沉积物来源、古风化条件、形成时的环境以及构造背景等方面得到了以下几点认识:

(1) 牛蹄塘组黑色岩系源岩主要为陆源碎屑岩, 少量为中性火成岩。形成于远离克拉通的缺氧-贫氧、局部贫氧-次氧化的古地理环境, 并且从早到晚海水深度逐渐变浅。

(2) 牛蹄塘组黑色岩系为正常海水沉积, 但受到了热水沉积作用的影响, 尤其是下部层位沉积时热水沉积作用更为明显。

(3) 牛蹄塘组黑色岩系早期沉积于潮湿-半干旱的气候条件, 而晚期变为半干旱的气候条件, 源岩经历了强烈程度的风化作用。

(4) 牛蹄塘组黑色岩系形成于被动大陆边缘。

致谢: 野外工作期间得到了湖北省地质局第二地质大队杨登银、钟建彪、郝志敏、方喜林等的大力支持和帮助。两位审稿专家对本文提出了许多有益的建议, 在此一并表示感谢!

References

Awan, R. S., Liu, C. L., Gong, H. W., *et al.*, 2020. Paleo-

Sedimentary Environment in Relation to Enrichment of Organic Matter of Early Cambrian Black Rocks of Niutitang Formation from Xiangxi Area China. *Marine and Petroleum Geology*, 112: 104057. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104057>

Bau, M., 1996. Controls on the Fractionation of Isovalent Trace Elements in Magmatic and Aqueous Systems: Evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and Lanthanide Tetrad Effect. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123 (3): 323–333. <https://doi.org/10.1007/s004100050159>

Bhatia, M. R., 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611–627. <https://doi.org/10.1086/628815>

Bhatia, M. R., Crook, K. A. W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181–193. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>

Boström, K., Kraemer, T., Gartner, S., 1973. Provenance and Accumulation Rates of Opaline Silica, Al, Ti, Fe, Mn, Cu, Ni and Co in Pacific Pelagic Sediments. *Chemical Geology*, 11(2): 123–148. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(73\)90049-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(73)90049-1)

Cao, L., Duan, Q. F., Peng, S. G., *et al.*, 2013. Metallogenic Characteristics and Prospecting Progress of the Yangtze Type Lead-Zinc Deposit. *Geology and Mineral Resources of South China*, 29(4): 308–317 (in Chinese with English abstract).

Cao, J., Hu, K., Zhou, J., *et al.*, 2013. Organic Clots and Their Differential Accumulation of Ni and Mo within Early Cambrian Black-Shale-Hosted Polymetallic Ni-Mo Deposits, Zunyi, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 531–536. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2012.11.002>

Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (14): 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)

Cullers, R. L., 2000. The Geochemistry of Shales, Siltstones and Sandstones of Pennsylvanian-Permian Age, Colorado, USA: Implications for Provenance and Metamorphic Studies. *Lithos*, 51(3): 181–203. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(99\)00063-8](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(99)00063-8)

Duan, T. Z., Zeng, Y. F., Gao, Z. Z., 1988. Analysis of Tectonic Evolution of Paleo-Continental Margin in South China. *Oil & Gas Geology*, 9(4): 410–420 (in

- Chinese with English abstract).
- Fan, D. L., 1988. Geological Events and Mineralization. *Chinese Geology*, 15(11): 22—25 (in Chinese with English abstract).
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Palaeoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23(10): 921. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1995\)0230921:uteopm>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1995)0230921:uteopm>2.3.co;2)
- Floyd, P. A., Franke, W., Shail, R., et al., 1990. Provenance and Depositional Environment of Rhenohercynian Synorogenic Greywacke from the Giessen Nappe, Germany. *Geologische Rundschau*, 69: 611—626 (in German).
- Floyd, P. A., Winchester, J. A., Park, R. G., 1989. Geochemistry and Tectonic Setting of Lewisian Clastic Metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland. *Precambrian Research*, 45(1—3): 203—214. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(89\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0301-9268(89)90040-5)
- Fyffe, L. R., Pickerill, R. K., 1993. Geochemistry of Upper Cambrian-Lower Ordovician Black Shale along a Northeastern Appalachian Transect. *Geological Society of America Bulletin*, 105(7): 897—910. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1993\)1050897:gouclo>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1993)1050897:gouclo>2.3.co;2)
- Han, T., Zhu, X. Q., Li, K., et al., 2015. Metal Sources for the Polymetallic Ni-Mo-PGE Mineralization in the Black Shales of the Lower Cambrian Niutitang Formation, South China. *Ore Geology Reviews*, 67: 158—169. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.11.020>
- Harnois, L., 1988. The CIW Index: A New Chemical Index of Weathering. *Sedimentary Geology*, 55(3—4): 319—322. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(88\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0037-0738(88)90137-6)
- Hatch, J. R., Leventhal, J. S., 1992. Relationship between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. *Chemical Geology*, 99(1—3): 65—82. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90031-Y](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90031-Y)
- Hayashi, K. I., Fujisawa, H., Holland, H. D., et al., 1997. Geochemistry of ~ 1.9 Ga Sedimentary Rocks from Northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115—4137. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00214-7)
- He, M. C., Ding, Z. J., Wei, L. X., et al., 2021. Geochemical Characteristics and Metallogenic Significance of Lower Permian Shuangqiaozi Formation in Taiping Mountains, Heilongjiang Province. *Earth Science*, 46(5): 1537—1553 (in Chinese with English abstract).
- He, Q., He, S., Dong, T., et al., 2019. Pore Structure Characteristics and Controls of Lower Cambrian Niutitang Formation, Western Hubei Province. *Petroleum Geology & Experiment*, 41(4): 530—539 (in Chinese with English abstract).
- Hsü, K. J., Li, J. L., Chen, H. H., et al., 1990. Tectonics of South China: Key to Understanding West Pacific Geology. *Tectonophysics*, 183(1—4): 9—39. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90186-C](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90186-C)
- Jiang, S. Y., Chen, Y. Q., Ling, H. F., et al., 2006. Trace- and Rare-Earth Element Geochemistry and Pb-Pb Dating of Black Shales and Intercalated Ni-Mo-PGE-Au Sulfide Ores in Lower Cambrian Strata, Yangtze Platform, South China. *Mineralium Deposita*, 41(5): 453—467. <https://doi.org/10.1007/s00126-006-0066-6>
- Jiang, Y. H., Yue, W. Z., Ye, Z. Z., 1994. Anoxic Event, Black Shales and Related Mineral Resources: Taking the Lower Palaeozoic in Southern China as an Example. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 3(5): 272—278 (in Chinese with English abstract).
- Jones, B., Manning, D. A. C., 1994. Comparison of Geochemical Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Chemical Geology*, 111(1—4): 111—129. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90085-X)
- Li, H., Liu, A., Wei, K., et al., 2016. Geological Characteristic of Cambrian Black Shale and Prediction of Shale Gas Prospective Area in Western Hubei Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 32(2): 117—125 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Gao, J. B., Wei, H. R., et al., 2019. Division and Contrast of Metallogenic Sequence in the Base of Cambrian Black Rock Series in Guizhou Province. *Geology and Exploration*, 55(2): 508—518 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. Q., Lan, B. F., Li, G. Q., et al., 2021. Element Geochemical Characteristics and Their Geological Significance of Wufeng-Longmaxi Formation Shales in North Margin of the Central Guizhou Uplift. *Earth Science*, 46(9): 3172—3188 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. X., Lin, J. H., Long, Y. K., et al., 2011. Exploration Prospect of Gas-Bearing Marine Mudstone-Shale in Lower Palaeozoic in the Central Yangtze Area, China. *Geological Bulletin of China*, 30(S1): 349—356 (in Chinese with English abstract).

- Li, Z. X., Li, X. H., Kinny, P. D., et al., 2003. Geochronology of Neoproterozoic Syn-Rift Magmatism in the Yangtze Craton, South China and Correlations with other Continents: Evidence for a Mantle Superplume that Broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(1–4): 85–109. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00208-5](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00208-5)
- Lindsey, D. A., 1999. An Evaluation of Alternative Chemical Classifications of Sand-Stones. U. S. Geological Survey, Denver.
- Liu, A., Li, X. B., Wang, C. S., et al., 2013. Analysis of Geochemical Feature and Sediment Environment for Hydrocarbon Source Rocks of Cambrian in West Hunan-Hubei Area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 1122–1132 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., Xu, X. S., 1994. Atlas of the Lithofacies and Palaeogeography of South China (Sinian-Triassic). Science Press, Beijing (in Chinese).
- McLennan, S. M., 1993. Weathering and Global Denudation. *The Journal of Geology*, 101(2): 295–303. <https://doi.org/10.1086/648222>
- McLennan, S. M., McCulloch, M. T., Taylor, S. R., et al., 1989. Effects of Sedimentary Sorting on Neodymium Isotopes in Deep-Sea Turbidites. *Nature*, 337(6207): 547–549. <https://doi.org/10.1038/337547a0>
- Moosavirad, S. M., Janardhana, M. R., Sethumadhav, M. S., et al., 2011. Geochemistry of Lower Jurassic Shales of the Shemshak Formation, Kerman Province, Central Iran: Provenance, Source Weathering and Tectonic Setting. *Geochemistry*, 71(3): 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2010.10.001>
- Mu, C. L., Zhou, K. K., Liang, W., et al., 2011. Early Paleozoic Sedimentary Environment of Hydrocarbon Source Rocks in the Middle-Upper Yangtze Region and Petroleum and Gas Exploration. *Acta Geologica Sinica*, 85(4): 526–532 (in Chinese with English abstract).
- Nesbitt, H. W., Fedo, C. M., Young, G. M., 1997. Quartz and Feldspar Stability, Steady and Non-Steady-State Weathering, and Petrogenesis of Siliciclastic Sands and Muds. *The Journal of Geology*, 105(2): 173–192. <https://doi.org/10.1086/515908>
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1989. Formation and Diagenesis of Weathering Profiles. *Journal of Geology*, 97(2): 129–147. <https://doi.org/10.1086/629290>
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1984. Prediction of Some Weathering Trends of Plutonic and Volcanic Rocks Based on Thermodynamic and Kinetic Considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523–1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299(5885): 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67(1–2): 119–139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio. *Journal of Geology*, 94(5): 635–650. <https://doi.org/10.1086/629071>
- Roy, P. D., Smykatz-Kloss, W., 2007. REE Geochemistry of the Recent Playa Sediments from the Thar Desert, India: An Implication to Playa Sediment Provenance. *Geochemistry*, 67(1): 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2005.01.006>
- Shi, C. H., Cao, J. A., Hu, K., et al., 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: 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.007>
- Suttner, L. J., Dutta, P. K., 1986. Alluvial Sandstone Composition and Paleoclimate, I. Framework Mineralogy. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 56(3): 329–345. <https://doi.org/10.1306/212f8909-2b24-11d7-8648000102c1865d>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford.
- Tyson, B., 1987. The Petrography and Geochemistry of Komatiite Flows from the Abitibi Greenstone Belt and a Model for Their Formation-Comments. *Lithos*, 20(2): 181–182. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(87\)90006-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(87)90006-5)
- Wang, J., 2000. Neoproterozoic Rifting History of South China: Significance to Rodinia Breakup. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, J., Duan, T. Z., Xie, Y., et al., 2012. The Tectonic Evolution and Its Oil and Gas Prospect of Southeast Margin of Yangtze Block. *Geological Bulletin of China*, 31(11): 1739–1749 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Qi, F. C., Li, Z. X., et al., 2020. Geological Features and Metallogenic Age of Unconventional Uranium Resources of Black-Rock Series in Northwestern

- Hunan. *Uranium Geology*, 36(1): 28—33 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. W., Zou, C., Liu, Y. Z., et al., 2014. Shale Gas Exploration Prospect Evaluation in the Hefeng Block of the Western Hubei and Hunan Provinces. *Geological Science and Technology Information*, 33(6): 104—109 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q. C., Cai, L. G., 2007. Phanerozoic Tectonic Evolution of South China. *Acta Geologica Sinica*, 81(8): 1025—1040 (in Chinese with English abstract).
- Wronkiewicz, D. J., Condie, K. C., 1987. Geochemistry of Archean Shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: Source-Area Weathering and Provenance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(9): 2401—2416. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90293-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90293-6)
- Xu, Z. Y., Yao, G. S., Huang, L., et al., 2013. Risk Analysis and Play Evaluation of Marine Residual Basins in South China. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(1): 9—16, 23 (in Chinese with English abstract).
- You, X. J., 2010. Research on the Ni-Mo-V Deposits in Lower Cambrian Black Series in Western Hunan (Dissertation). Central South University, Changsha (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T. S., Wu, K. Y., Yang, Y., et al., 2015. Evidence of Microbial Origin of Organic Matters of Niutitang Shale Gas Reservoir. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 37(2): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Zhang, S. B., Zhao, Z. F., et al., 2007. Contrasting Zircon Hf and O Isotopes in the Two Episodes of Neoproterozoic Granitoids in South China: Implications for Growth and Reworking of Continental Crust. *Lithos*, 96(1—2): 127—150. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2006.10.003>
- 附中文参考文献**
- 曹亮, 段其发, 彭三国, 等, 2013. 扬子型铅锌矿的成矿特征及找矿进展. 华南地质与矿产, 29(4): 308—317.
- 段太忠, 曾允孚, 高振中, 1988. 根据沉积历史分析华南古大陆边缘的构造演化. 石油与天然气地质, 9(4): 410—420.
- 范德廉, 1988. 地质事件与成矿. 中国地质, 15(11): 22—25.
- 何谋忞, 丁振举, 魏连喜, 等, 2021. 黑龙江省太平岭地区下二叠统双桥子组岩石地球化学特征及其成矿意义. 地球科学, 46(5): 1537—1553.
- 何庆, 何生, 董田, 等, 2019. 鄂西下寒武统牛蹄塘组页岩孔隙结构特征及影响因素. 石油实验地质, 41(4): 530—539.
- 姜月华, 岳文浙, 业治铮, 1994. 华南下古生界缺氧事件与黑色页岩及有关矿产. 有色金属矿产与勘查, 3(5): 272—278.
- 李海, 刘安, 危凯, 等, 2016. 鄂西地区寒武系黑色页岩地质特征及页岩气远景预测. 华南地质与矿产, 32(2): 117—125.
- 李军, 高军波, 魏怀瑞, 等, 2019. 贵州寒武系底部黑色岩系成矿序列划分与对比. 地质与勘探, 55(2): 508—518.
- 李琪琪, 蓝宝锋, 李刚权, 等, 2021. 黔中隆起北缘五峰-龙马溪组页岩元素地球化学特征及其地质意义. 地球科学, 46(9): 3172—3188.
- 李艳霞, 林娟华, 龙幼康, 等, 2011. 中扬子地区下古生界海相泥-页岩含气勘探远景. 地质通报, 30(S1): 349—356.
- 刘安, 李旭兵, 王传尚, 等, 2013. 湘鄂西寒武系烃源岩地球化学特征与沉积环境分析. 沉积学报, 31(6): 1122—1132.
- 刘宝珺, 许效松, 1994. 中国南方岩相古地理图集: 震旦纪—三叠纪. 北京: 科学出版社.
- 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等, 2011. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探. 地质学报, 85(4): 526—532.
- 王剑, 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化: 兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京: 地质出版社.
- 王剑, 段太忠, 谢渊, 等, 2012. 扬子地块东南缘大地构造演化及其油气地质意义. 地质通报, 31(11): 1739—1749.
- 王健, 漆富成, 李治兴, 等, 2020. 湘西北黑色岩系非常规铀资源成矿地质特征及成矿时代. 铀矿地质, 36(1): 28—33.
- 王鹏万, 邹辰, 刘月早, 等, 2014. 湘鄂西地区鹤峰区块页岩气勘探前景评价. 地质科技情报, 33(6): 104—109.
- 王清晨, 蔡立国, 2007. 中国南方显生宙大地构造演化简史. 地质学报, 81(8): 1025—1040.
- 徐政语, 姚根顺, 黄羚, 等, 2013. 中国南方海相残留盆地勘探风险分析与选区评价. 石油实验地质, 35(1): 9—16, 23.
- 游先军, 2010. 湘西下寒武统黑色岩系中的镍钼钒矿研究(博士学位论文). 长沙: 中南大学.
- 张廷山, 伍坤宇, 杨洋, 等, 2015. 牛蹄塘组页岩气储层有机质微生物来源的证据. 西南石油大学学报(自然科学版), 37(2): 1—10.