

赣西南下寒武统杂砂岩地球化学特征和沉积环境

郑 宁¹, 刘燕学¹, 丁孝忠¹, 李廷栋¹, 耿树方¹, 程木伟², 钱丽欣³

ZHENG Ning¹, LIU Yan-xue¹, DING Xiao-zhong¹, LI Ting-dong¹,

GENG Shu-fang¹, CHENG Mu-wei², QIAN Li-xin³

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 3. 辽河油田勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010

1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;*

3. *Exploration and Development Research Institute of Liaohe Oilfield Company, CNPC, Panjin 124010, Liaoning, China*

摘要:赣西南地区早寒武世发育巨厚的砂泥质复理石沉积, 砂岩杂基含量普遍大于 15%, 以杂砂岩为主。赣州市、井冈山市和萍乡市 3 个地区杂砂岩的主量、微量、稀土元素含量和组合特征表明, 赣西南下寒武统杂砂岩具有较高的 SiO_2 含量, 高的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值, 较低的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值和 CaO 含量; 微量元素含量接近中国东部上地壳值, 富集大离子亲石元素; 稀土元素具有 LREE 富集、Eu 亏损明显的特征。综合分析推测, 物源剥蚀区为华夏陆块, 其北缘显示为被动大陆边缘的地球化学特征, 赣西南地区海水较深, 且自南向北略微加深。

关键词:赣西南; 下寒武统; 地球化学; 被动大陆边缘; 华夏陆块

中图分类号: P534.41; P595

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2012)07-1115-11

Zheng N, Liu Y X, Ding X Z, Li T D, Geng S F, Cheng M W, Qian L X. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi Province. *Gological Bulletin of China*, 2012, 31(7): 1115-1125

Abstract: In Lower Cambrian, thick sandy and muddy flysch deposits were distributed in southwestern Jiangxi Province. The matrix of the sand possesses more than 15%, and hence most of the sand is greywacke. This paper is focused on the compositions and assemblages of major, trace and rare earth elements of greywacke in Ganzhou, Jinggangshan and Pingxiang. Studies show that the greywacke has relatively high SiO_2 content, high $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})$ ratios and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratios, and comparatively low $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ratios and $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ ratios as well as lower CaO content. The trace earth elements are similar to those in the upper crust of eastern China, with the enrichment of the large ion radius elements. The rare earth elements are characterized by rich LREE and obvious negative Eu anomaly. It is held that the provenance was from Cathaysia Block. Geochemical characteristics indicate that the northern edge of this area belonged to a passive continental-margin tectonic environment. The sea water somewhat got deeper from south to north.

Key words: southwestern Jiangxi Province; Lower Cambrian; geochemical characteristics; passive continental-margin; Cathaysia Block

赣西南地区下寒武统广泛发育着一套巨厚浅变质的砂岩与板岩组成的复理石沉积(图 1)^[1-3]。自 20 世纪 50 年代以来经系统的区域地质调查和专题研究, 本区地质研究程度获得大幅度提高, 但关于该套

复理石的物源方向和本区大地构造属性的认识一直存在很大分歧^[4]。一种说法认为其物源来自北部, 属于华南-扬子板块南侧的被动大陆边缘; 也有学者认为其物源来自南部的华夏地块, 属于华夏地块北

收稿日期: 2012-01-17; 修订日期: 2012-05-14

资助项目: 中国地质调查局项目《西太平洋大陆边缘深部过程与成矿作用》(编号: 1212010733802)、《中国地层构造区划与区域地质调查综合集成》(编号: 1212011120117)和《中国构造区划及其在全国地质志中的应用》(编号: 121201112011)

作者简介: 郑宁(1983-), 女, 在读博士, 从事区域地质与区域矿产研究。E-mail: zhengningliao@163.com

缘大陆斜坡^[5-7];此外还有活动陆缘与被动陆缘之争。由于不同的板块构造过程和沉积构造环境赋予沉积岩各自独特的地球化学指纹,因此地球化学元素的分析和对比研究,对恢复沉积环境、反演其大地构造属性具有一定的指示意义。在赣西南地区范围内,此方面的研究多集中在井冈山地区^[8-9],而萍乡地区未见报道。针对这一情况,本次对赣西南地区赣州市(剖面1)、井冈山市(剖面2)、萍乡市(剖面3)的3条剖面(图1)进行了地球化学样品采集和室内分析测试。在岩石地球化学和沉积学理论的指导下,对各地区杂砂岩样品的主量、微量和稀土元素的地球化学特征进行了分析,并对研究区自南向北的3条剖面进行一些对比性研究,在华南地区早寒武世的沉积环境和大地构造背景方面取得了一些新的认识和结论。

1 区域构造地质背景

华夏陆块约在1800Ma前经闽浙运动形成,其西侧为华南洋,与扬子陆块隔海相望^[10-14]。1050~900Ma受大洋板块俯冲作用的影响^[15],在扬子陆块东南缘形成一系列火山-侵入岩岛链状隆起,即“江南古岛弧”或沟-弧-盆活动陆缘带^[16-17]。晋宁运动晚期古华南洋逐渐关闭,华夏陆块与扬子陆块碰撞,但并未完全闭合,形成江绍缝合带,碰撞的晚期曾发生一次大规模的左旋走滑韧性剪切作用^[18],华夏陆块向东北方向运动。晋宁运动结束后,华南地区被南华纪—志留纪万余米厚的沉积物所充填^[19-20],并于奥陶纪至泥盆纪初形成独特的加里东期华南造山带,最终使华夏陆块与扬子陆块成为一个统一的整体^[21]。

赣西南所在的地区属华夏地层区(图1)。震旦系—志留系为连续性沉积,分布广泛。根据江西地调院2009年提出的早古生代地层分区方案,赣西南地区包括崇义地层小区和井冈山地层小区,属于华夏地层区内的桂湘赣地层分区(图1)。震旦纪—早古生代主要为浅变质砂泥岩组成的复理石沉积^[5]。震旦系以浅变质陆源碎屑岩沉积为主,见沉凝灰岩及变细碧岩—石英角斑岩,上部发育硅质岩或大理岩透镜体,含微古植物化石,地层厚度大于5000m;寒武系自下而上分为牛角河组(ϵ_1)、高滩组(ϵ_2)、水石组(ϵ_3),主要是绿片岩相的砂岩、板岩,上部发育灰岩,富含小型腕足类和海绵骨针。奥陶系岩性主要为变余砂岩、板岩、炭硅质板岩互层,较寒武纪时期

炭硅质成分增多。志留系在华南地层区不发育。

2 地球化学特征

沉积岩是指在地壳表层的条件下,由母岩的风化产物、火山物质、有机物质等原始物质成分,经搬运作用、沉积作用、成岩作用及沉积后作用而形成的一类岩石。沉积岩的形成过程同时也是地壳中元素再分配的过程,因此沉积岩地球化学元素含量与组合特点,是分析古地理环境和当时大地构造背景的重要线索。笔者对赣西南地区下寒武统进行了系统采样,在室内显微镜下初步观察、鉴定的基础上,选取其中24件杂砂岩样品(杂基含量高于15%)进行了主量、微量和稀土元素的测试分析和研究。其中,赣州市样品共10件,采集于赣州市崇义县麟潭镇华山寒武系下统牛角河组剖面,进行主量元素测定的样品6块,微量、稀土元素测定的样品4件;靠近井冈山市的样品共7件,采集于吉安市永新县坳南乡剖面,测定了4件样品的主量元素和5件样品的微量、稀土元素含量;萍乡市样品共7件,采集于萍乡市湘东区东桥镇剖面,测定主量、微量和稀土元素样品5件。

试验全部由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,主量元素CaO、FeO使用50mL滴定管方法检测,SiO₂使用电子分析天平检测,Al₂O₃、TiO₂、Fe₂O₃、P₂O₅采用分光光度计检测,K₂O、Na₂O采用火焰光度计测试,MnO采用WFX-110B原子吸收分光光度计检测;微量、稀土元素采用X Serise等离子体质谱仪,B元素利用WP-1光栅色谱仪完成。

2.1 主量元素特征

本次对研究区赣州市(6件)、井冈山市(4件)、萍乡市(5件)共15件杂砂岩样品进行主量元素分析,分析结果如表1所示。样品的SiO₂含量均较高,为70.15%~84.60%(平均值约为78.26%);Al₂O₃/SiO₂、Fe₂O₃/MgO值较低,平均值分别约为0.15%、1.46%;Al₂O₃/(CaO+Na₂O)、K₂O/Na₂O值均较高,平均值分别约为30.0%、14.83%;CaO含量较低,为0.08%~0.45%(平均值约0.18%)。

2.2 微量元素特征

沉积物中某些特征微量元素化学性质比较稳定,从物源区风化剥蚀后,在搬运、沉积、成岩过程中基本不发生改变,因此沉积后可以代表被搬运来的沉积岩的陆源组分,能够起到示踪沉积过程和追踪

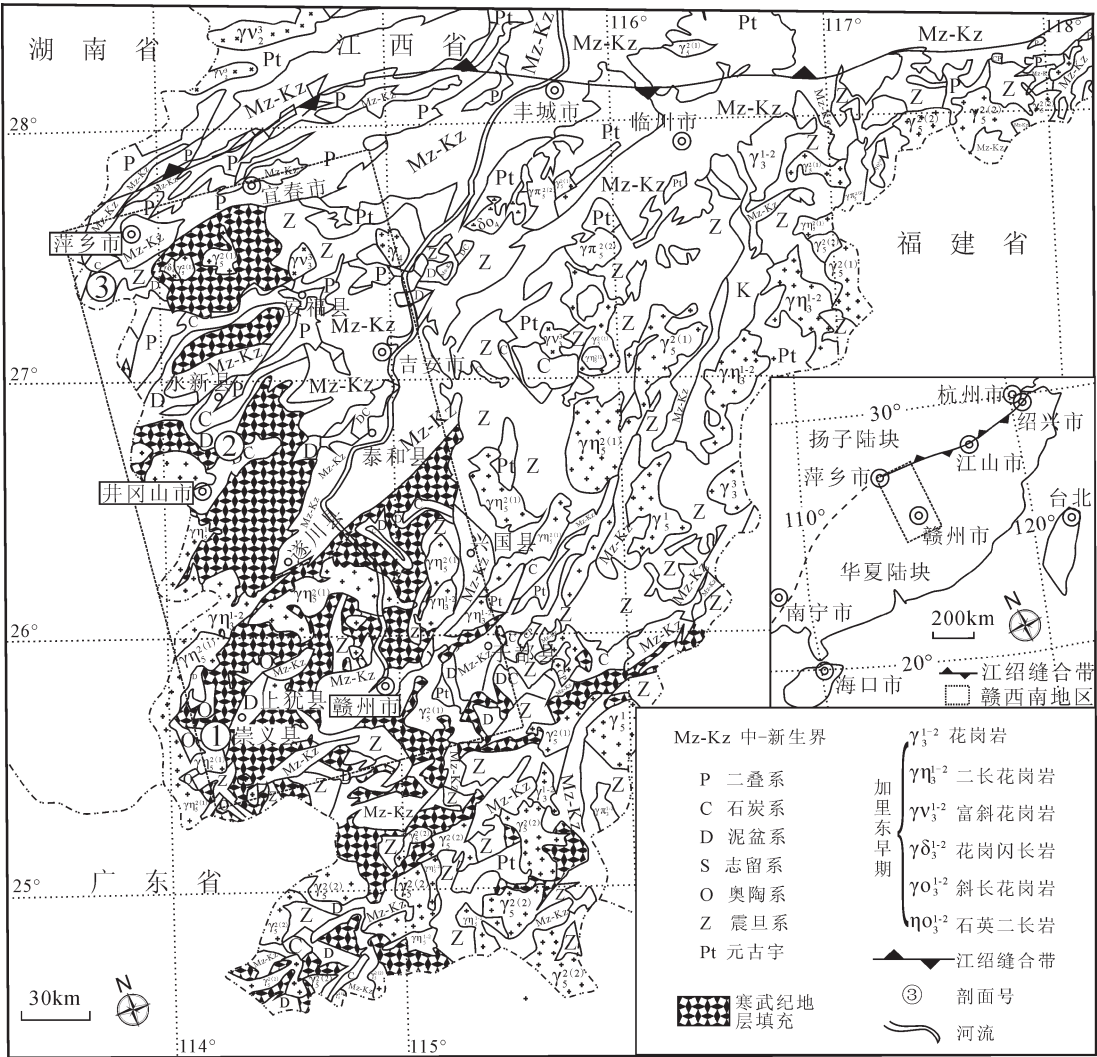


图 1 赣西南地区寒武系分布图(底图据参考文献[22]修改)
Fig. 1 Distribution of Cambrian rocks in southwestern Jiangxi Province

物源区的作用。目前, Sr、Ba、V、Ni 等微量元素的含量及其相关比值的大小与变化常被用于研究古沉积环境特征。本次对赣西南地区下寒武统 14 件杂砂岩样品的 21 种微量元素进行了分析, 结果见表 2。与高山等^[23]发表的大陆上地壳微量元素值相比(表 3), 大离子亲石元素 Li、Rb 和亲硫元素 Zn、Pb、Cu 略偏高; 亲石元素 W、Be、Nb、Th 和亲硫元素 Ga 接近中国东部上地壳丰度值; 亲石元素 Sc、Ba、Sr 和亲铁元素 Cr 含量较上地壳丰度略微偏低, 其中 Sr 值可能因淋滤作用对其影响较大而偏低, Cr 偏低可能是受其在成岩过程中化学性质活泼所致。总体来看, 微量元素含量接近于中国东部上地壳值, 其物源是上地壳剥蚀而来的物质。

2.3 稀土元素特征

普遍认为稀土元素(REE)具非迁移性, 沉积岩中仅受源区岩石中的稀土元素丰度和源区风化条件的控制, 搬运、沉积和成岩作用过程中对于沉积物 REE 含量的改变比较微小, 因此源区岩石中的 REE 特征能够被可靠地保存在沉积物中^[24-26], 所以砂岩中的 REE 特征被广泛用作判别源区岩石的主要标志, 而对于沉积学中关于构造环境的分析更为有效。本次稀土元素的含量、特征比值见表 2, 稀土元素含量总体较高, ΣREE 为 200.26×10⁻⁶~295.7×10⁻⁶, 平均 245.59×10⁻⁶。轻稀土元素富集, LREE/HREE 值高, 为 5.92~8.77(平均值为 7.45), La_N/Yb_N 值范围在 5.92~8.77 之间(平均值为 7.45)。重稀土元素分配曲

表 1 赣西南下寒武统杂砂岩主量元素分析结果

Table 1 Major elements of Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi Province															%
样 号	1-1	1-2	1-3	1-4	1-9	1-10	2-4	2-5	2-9	2-11	3-1	3-4	3-5	3-8	3-9
SiO ₂	75.05	81.28	82.46	82.61	84.60	83.86	78.16	78.56	74.74	80.33	74.15	72.67	70.15	78.68	76.65
TiO ₂	0.57	0.67	0.67	0.60	0.62	0.55	0.72	0.62	0.67	0.52	0.92	0.87	0.87	0.65	0.67
Al ₂ O ₃	10.43	11.29	10.36	10.07	7.55	9.23	12.26	11.59	13.01	10.95	15.66	13.97	13.48	11.33	12.35
Fe ₂ O ₃	2.68	1.84	1.71	2.38	2.21	2.09	3.51	2.14	0.80	0.58	0.95	1.52	6.59	3.45	2.91
FeO	4.80	1.54	1.57	1.22	1.45	1.09	0.45	2.25	4.08	2.44	2.27	4.49	2.06	0.92	1.74
MnO	0.19	0.03	0.02	0.07	0.05	0.03	0.25	0.03	0.03	0.02	0.02	0.06	0.06	0.14	0.11
MgO	5.26	1.35	1.29	1.27	1.05	0.96	1.08	1.43	1.89	1.42	1.59	2.60	3.71	1.53	1.71
CaO	0.20	0.08	0.13	0.19	0.13	0.16	0.30	0.11	0.45	0.17	0.08	0.25	0.19	0.16	0.13
Na ₂ O	0.04	0.13	0.07	0.04	1.06	1.04	1.17	1.26	1.84	0.91	0.08	0.10	0.08	0.87	1.86
K ₂ O	0.71	1.75	1.67	1.50	1.22	0.93	2.02	1.93	2.34	2.46	4.23	3.25	2.64	2.20	1.79
P ₂ O ₅	0.07	0.04	0.06	0.05	0.06	0.07	0.09	0.07	0.15	0.18	0.04	0.22	0.18	0.06	0.07
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.14	0.14	0.13	0.12	0.09	0.11	0.16	0.15	0.17	0.14	0.21	0.19	0.19	0.14	0.16
FeO/MgO	0.91	1.15	1.22	0.95	1.37	1.13	0.41	1.57	2.16	1.72	1.43	1.73	0.55	0.60	1.02
Al ₂ O ₃ / (CaO+Na ₂ O)	44.02	54.10	52.43	43.61	6.35	7.71	8.37	8.45	5.67	10.06	103.28	39.35	49.47	10.94	6.20
K ₂ O/Na ₂ O	17.81	13.99	25.15	34.51	1.16	0.90	1.73	1.54	1.27	2.70	55.72	31.10	31.50	2.52	0.96

注:主量元素数据为扣除烧失量后换算成 100%后的值

线平坦,Gd_N/Yb_N为 1.26~1.73,平均值为 1.48。具有显著的 Eu 负异常,Eu 亏损明显,δEu 值为 0.58~0.67,平均值为 0.62。Ce 异常弱,δCe 值为 1.04~0.75 (平均值为 0.91)。本区 REE 分布模式具有轻稀土元素富集、重稀土元素相对平坦、Eu 亏损明显的特征,图解(图 2)中分配曲线明显呈右倾型,与典型的后太古宙页岩和上地壳相似^[26],反映其来源于上地壳。Taylor 等^[26]认为,随着地壳分异作用的进行 REE 总量将增加,轻稀土元素(LREE)逐渐富集,Eu 负异常趋于明显,因而研究区下寒武统稀土元素特点正反映它们的物源区岩石经历了较为明显的分异作用^[9]。本区赣州市、井冈山市和萍乡市砂岩具有相似的 REE 分布模型,说明它们具有比较一致的物源(图 2-b)。

3 沉积环境探讨

由于地球化学元素在沉积岩形成的全过程中都存在变化,因此应用地球化学数据在沉积学的研究中必然具有多解性。那么在以地球化学特征为依据来判别沉积环境的时候,任何一个参数都有其局限性,必须综合利用^[25,27]。下面将就本区地球化学特征与沉积环境研究的关系进行一些讨论。

(1)物源方向。根据前人的研究,可将水生元素 Mn 和陆源元素 Ti 的比值作为离岸距离的标志^[24],在现代沉积中太平洋沉积物大陆架外 Mn/Ti 值大于 0.1,呈现随距离增加而该值逐渐增大的趋势。赣州市地区 Mn/Ti 值约为 0.101,井冈山地区约为 0.105,萍乡地区为 0.113,呈现由南向北逐渐增大的趋势,表明相应地区受陆源的影响逐渐减弱,物源区应为南部的华夏陆块,且逐渐向北推进。

(2)物源成分。杂砂岩物源区成分分析对于确定其形成的沉积环境、构造背景意义重大。本文通过下面 2 种方法进行讨论:①Ba/Sr 比值。Ba/Sr 平均值较高,达到约为 15.0,高于中国东部上地壳值,说明本区物源来自上地壳(表 4),而该比值较高的原因是本区 Sr 值较低,可能受其在物源隆起区强烈风化作用的影响。②主量元素判别函数。Roser 等^[28]提出的主量元素判别函数图解,其中:

判别函数因子 1=-1.773TiO₂+0.607Al₂O₃+0.76Fe₂O₃(总)
-1.5MgO+0.616CaO+0.509Na₂O-1.224K₂O-9.09

判别函数因子 2=0.445TiO₂+0.07Al₂O₃-0.25Fe₂O₃(总)
-1.142MgO+0.438CaO+4.75Na₂O+1.426K₂O-6.861

根据这 2 个判别式计算数据成图可区分出 4 种物源区类型:长英质火成物源区和石英岩沉积物源区、中

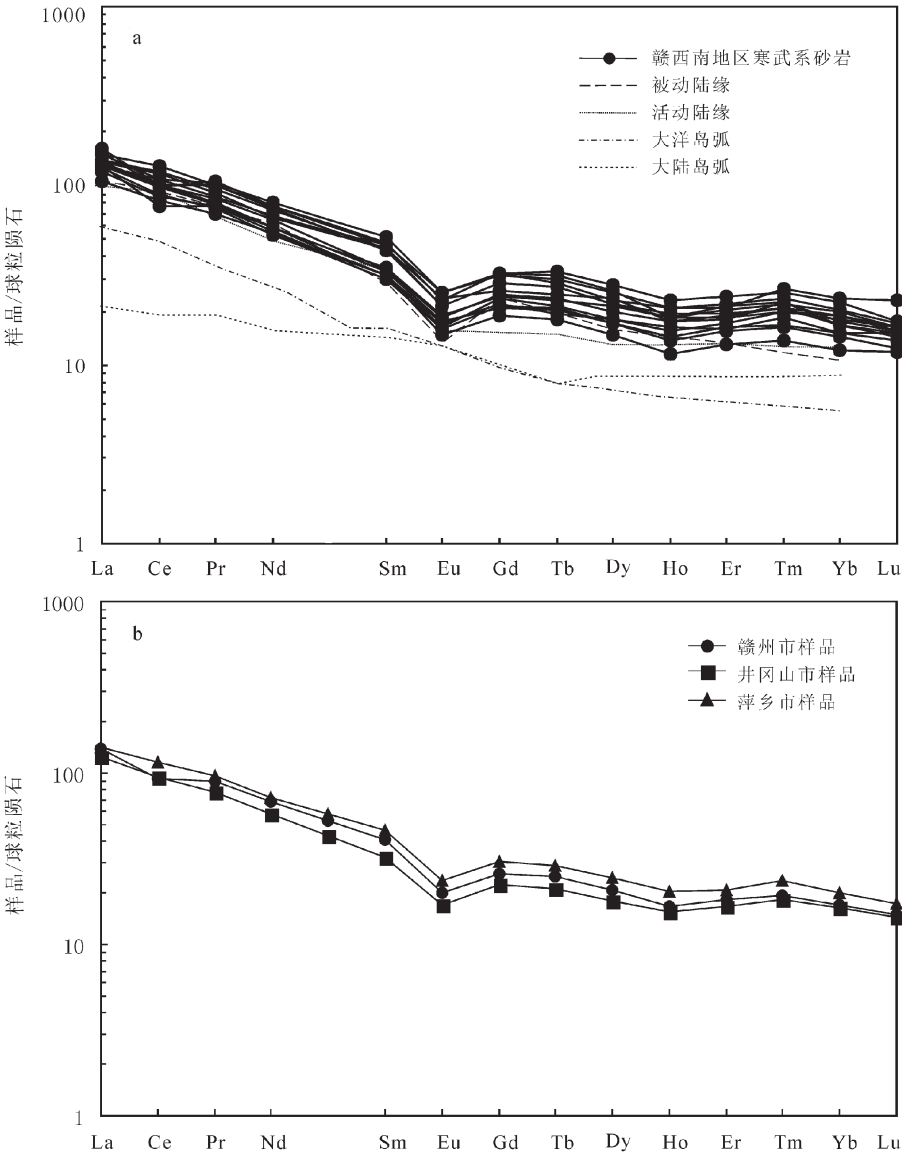


图 2 赣西南下寒武统杂砂岩稀土元素球粒陨石标准化曲线(球粒陨石标准化参数数据参考文献[26])
Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi

性岩火成物源区和镁铁质火成物源区^[28-29]。根据本区判别函数的计算投点(图 3),可见大部分点均落于石英岩沉积物源区内,极少部分点落于长英质火成物源区内,且落点并不邻近其它区,有明显的集中分区性,显示出较稳定的性质。

(3)古水深变化。由于本区鲜见标志性古生物化石且沉积层经历年代久远的变质变形作用等因素的影响,关于华南地区寒武系古水深一直存在“深”、“浅”之争和水体深度变化规律之争,终未有定论。针对这两方面的争议,本次对研究区下寒武统样品地

球化学主量、微量和稀土元素的含量、比值及其变化进行了一些研究。

首先,关于“深、浅”这一争议,通过以下 3 个方面来论证:①Ce、Eu 含量。从稀土元素球粒陨石标准化曲线(图 2)中 Ce 的含量来看,基本上不存在负异常或弱的负异常,呈平滑曲线,也显示沉积环境为还原环境;而 Eu 呈明显的负异常,表明沉积环境为咸水环境。因此可推断本区处于相对较深的海水水体中。②对不同深度水体微量元素进行对比。杂砂岩中微量元素不仅代表母岩中的继承性特征,而且在

不断沉降沉积过程中与沉积环境中的水体元素丰度趋同。从表 5 中淡水、海水和远洋粘土微量元素含量可见,赣西南地区的微量元素丰度与远洋粘土环境

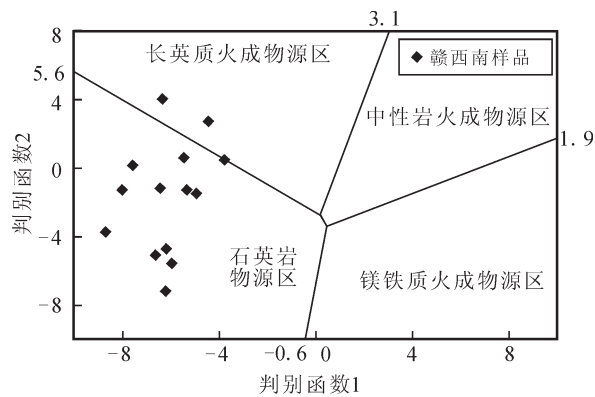


图 3 赣西南下寒武统杂砂岩主量元素判别函数限定物源区特征图解(底图据参考文献[28]修改)

Fig. 3 Provenance diagrams based on discriminant functions of major element compositions of Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi Province

含量非常接近,与淡水和海水环境明显不同,因此可推断本区应为远洋深水环境。③ $V/(V+Ni)$ 值的变化。前人研究认为碎屑岩中过渡金属元素 $V/(V+Ni)$ 比值可以作为古缺氧环境的判识标志^[30],因为相对于 Ni 来说,V 聚集在强烈还原的富硫化氢环境中,因此 $V/(V+Ni)$ 值的变化主要由氧化还原电位控制。当 $V/(V+Ni)<0.46$ 时,为富氧环境; $0.46<V/(V+Ni)<0.54$ 对应贫氧环境;当比值大于 0.54 时,为厌氧环境,表明水体较深或水体流动不畅。本区由南向北,赣州市该比值约为 0.694,井冈山地区约 0.756,萍乡地区 0.769,平均值大于 0.54,属于深水形成的厌氧环境。且由南向北比值逐渐增大,指示还原程度的渐强,说明在研究区内由南向北水体深度逐渐加深或更为接近水体循环条件差的滞留区域。

其次,关于研究区内水体深度变化规律这一问题,上述 $V/(V+Ni)$ 的变化规律已有涉及,下面结合 Mn、FeO 含量的变化进行讨论。结合前人的研究和本次地质剖面观察结果,认为本区下寒武统 Mn 元

表 2 赣西南下寒武统杂砂岩微量、稀土元素分析结果														
Table 2 Trace elements and REE compositions of Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi														10 ⁻⁶
样号	1-5	1-6	1-7	1-8	2-6	2-7	2-8	2-9	2-11	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
B	53.33	70.83	67.09	61.85	36.51	23.19	46.35	59.28	30.83	42.34	63.12	87.01	39.97	42.40
V	99.09	112.77	110.70	98.91	89.13	78.22	126.81	86.90	71.93	118.26	148.50	117.27	124.20	125.46
Cr	68.33	85.91	100.93	72.29	66.51	62.62	89.23	66.47	57.13	84.33	63.99	65.30	60.65	60.73
Ni	59.00	47.60	47.74	33.16	27.64	24.69	29.04	38.74	23.18	51.55	43.43	40.37	27.24	29.35
Cu	49.55	53.57	51.31	42.03	34.88	23.90	33.32	44.63	32.46	83.14	32.72	57.91	39.30	32.00
Pb	55.39	67.13	24.89	115.62	20.27	23.38	23.45	19.08	17.51	30.63	10.10	5.98	37.54	13.90
Zn	284.70	352.30	181.20	419.90	63.27	62.37	131.10	103.80	77.51	64.90	99.30	125.30	79.46	110.80
Sr	25.13	28.03	52.99	57.39	58.27	72.15	81.20	80.04	42.67	33.05	42.41	33.19	42.91	41.94
Li	76.02	66.96	67.56	55.62	36.99	30.36	50.09	37.10	29.99	33.17	75.67	75.51	57.07	80.64
Ba	532.58	685.08	726.18	600.16	540.14	504.86	683.94	464.02	488.30	1065.68	712.89	623.04	733.39	597.17
Ga	19.48	23.11	24.53	19.51	17.06	14.99	23.74	17.38	14.81	21.63	22.01	19.73	20.59	20.58
Rb	114.00	155.50	148.80	113.40	150.30	113.80	183.30	122.00	127.30	170.30	129.50	122.70	129.30	109.60
Mo	0.48	0.36	0.50	0.38	0.17	0.25	0.54	0.33	0.51	0.95	0.21	0.19	0.39	0.25
W	1.89	2.31	2.39	1.84	1.91	1.63	2.88	1.79	1.23	3.08	4.48	2.78	3.77	3.84
Be	2.67	3.70	3.31	2.57	2.65	2.27	3.57	2.27	1.86	3.36	2.92	2.67	2.67	2.60
Sc	12.51	14.70	15.09	12.79	11.37	10.13	15.96	11.19	10.07	16.83	15.14	14.49	14.02	13.62
Nb	14.82	16.99	19.50	16.21	17.04	15.10	20.73	16.96	7.46	21.87	17.88	15.95	16.90	16.29
Cs	9.83	12.79	13.39	10.43	6.37	4.91	7.20	5.18	6.33	9.36	7.22	6.94	7.09	5.95
Ta	1.37	1.63	1.78	1.57	1.64	1.43	1.78	1.48	0.79	1.65	1.51	1.30	1.41	1.29
U	3.55	4.40	5.02	4.86	3.82	3.80	5.13	4.55	7.39	4.44	2.54	1.73	2.35	2.66
Th	15.31	18.46	18.46	18.42	20.11	22.74	20.57	20.46	22.36	17.44	16.44	15.76	16.85	15.98
Th/Sc	1.22	1.26	1.22	1.44	1.77	2.25	1.29	1.83	2.22	1.04	1.09	1.09	1.20	1.17

续表 2

样 号	1-5	1-6	1-7	1-8	2-6	2-7	2-8	2-9	2-11	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
Cr/Ni	1.16	1.80	2.11	2.18	2.41	2.54	3.07	1.72	2.46	1.64	1.47	1.62	2.23	2.07
Sc/Ni	0.21	0.31	0.32	0.39	0.41	0.41	0.55	0.29	0.43	0.33	0.35	0.36	0.51	0.46
Sc/Cr	0.18	0.17	0.15	0.18	0.17	0.16	0.18	0.17	0.18	0.20	0.24	0.22	0.23	0.22
La	47.38	58.45	44.01	54.38	39.16	47.23	48.57	45.92	49.40	55.67	47.20	54.98	51.37	49.16
Ce	73.90	96.52	82.24	103.15	79.51	93.91	96.52	84.48	96.05	95.28	103.32	124.40	116.09	112.12
Pr	10.66	13.96	10.60	14.06	9.57	10.76	11.51	10.26	10.96	14.60	11.84	13.98	13.07	12.41
Nd	39.45	53.89	41.52	57.35	38.34	42.04	45.62	38.14	41.56	54.76	48.38	55.23	52.04	47.37
Sm	7.27	10.07	8.06	12.05	7.33	7.65	7.90	7.03	7.25	10.96	10.74	11.07	10.35	10.24
Eu	1.29	1.86	1.63	2.21	1.48	1.54	1.62	1.38	1.42	2.22	2.20	2.01	1.86	2.04
Gd	5.76	8.80	7.30	10.03	6.61	6.38	7.62	6.45	7.22	9.71	9.98	9.86	8.72	8.03
Tb	1.04	1.57	1.33	1.82	1.12	1.18	1.37	1.21	1.24	1.74	1.93	1.66	1.56	1.43
Dy	5.60	8.23	8.08	9.85	6.84	6.53	7.49	6.58	6.76	9.72	10.71	8.77	8.39	8.86
Ho	0.99	1.56	1.57	1.58	1.37	1.24	1.50	1.18	1.30	1.78	1.97	1.77	1.64	1.49
Er	3.22	4.61	5.25	5.10	3.94	4.01	4.65	3.89	4.24	5.20	6.05	5.50	4.82	4.49
Tm	0.49	0.71	0.80	0.78	0.66	0.59	0.74	0.58	0.71	0.94	0.90	0.84	0.75	0.80
Yb	2.97	4.49	4.37	4.94	3.75	3.74	4.65	3.52	4.64	5.83	5.55	5.00	4.09	4.14
Lu	0.45	0.61	0.59	0.63	0.57	0.52	0.62	0.47	0.59	0.88	0.67	0.65	0.55	0.58
Σ REE	200.46	265.32	217.36	277.91	200.26	227.30	240.37	211.09	233.34	269.28	261.44	295.72	275.30	263.15
LREE	179.95	234.74	188.06	243.19	175.39	203.13	211.74	187.22	206.64	233.48	223.68	261.67	244.78	233.34
HREE	20.51	30.58	29.30	34.72	24.88	24.18	28.63	23.88	26.70	35.80	37.76	34.05	30.52	29.81
LREE/HREE	8.77	7.68	6.42	7.01	7.05	8.40	7.39	7.84	7.74	6.52	5.92	7.69	8.02	7.83
La _N /Yb _N	10.78	8.79	6.80	7.44	7.05	8.54	7.05	8.82	7.19	6.45	5.75	7.43	8.48	8.02
Gd _N /Yb _N	1.57	1.59	1.35	1.65	1.43	1.38	1.33	1.49	1.26	1.35	1.46	1.60	1.73	1.57
δ Eu	0.59	0.59	0.64	0.60	0.64	0.65	0.63	0.62	0.60	0.64	0.64	0.58	0.58	0.67
δ Ce	0.75	0.77	0.87	0.86	0.94	0.95	0.93	0.88	0.94	0.77	1.00	1.03	1.03	1.04

注:球粒陨石标准化参数数据参考文献[26],表中数据均为平均值

表 3 赣西南地区下寒武统杂砂岩与中国东部上地壳微量元素对比
Table 3 Comparison of trace elements between the Lower Cambrian greywacke
in southwestern Jiangxi Province and the upper crust of eastern China

10⁻⁶

元 素	Zn	Rb	Li	Pb	Cu	V	Th	Cs	Nb	U	Ga	W	Be	Ta	Ni	Mo	Cr	B	Ba	Sc	Sr
赣州市样品	309.5	132.9	66.5	65.8	49.1	105.4	17.7	11.6	16.9	4.5	21.7	2.1	3.1	1.6	46.9	0.4	81.9	63.3	636	13.8	40.9
井冈山市样品	87.6	139.3	36.9	20.7	33.8	90.6	21.2	6	15.5	4.9	17.6	1.9	2.5	1.4	28.7	0.4	68.4	39.2	536.3	11.7	66.9
萍乡市样品	96	132.3	64.4	19.6	49	126.7	16.5	7.3	17.8	2.7	20.9	3.6	2.8	1.4	38.4	0.4	67	55	746.4	14.8	38.7
中国东部上地壳		82.0	20.0	18.0	32.0	98.0	9.0	3.6	12.0	1.6	18.0	0.9	2.0	0.7	38.0	0.8	80.0	28.0	678.0	150.0	266.0

注:中国东部上地壳数据据参考文献[23],表中数据均为平均值

素比较富集,本次在剖面 1 附近下寒武统即见到约 3cm 黑色高含锰岩层。前人研究^[31]普遍认为,从海岸到深海,随着水体的加深,Mn 元素将逐渐富集。本区赣州市 Mn 元素平均含量为 0.071,向北至萍乡市逐渐增加到 0.085,证明水体深度向北逐渐加深,但总体深度变化不大,均为较深水环境。将反映还原环

境的 FeO 在 3 个地区的含量对比发现,赣州市(1.94)—井冈山市(2.30)—萍乡市(2.30),反映自南向北,水体还原环境增强。通过以上对地球化学特征的研究和探索,结合此前笔者在沉积学方面的研究成果^[32]和放射虫的发现^[33],认为本区应属于半深水—深水环境,且水体由南向北逐渐加深。

4 大地构造属性

华夏古陆北缘寒武纪大地构造属性属于“被动陆缘”、“活动陆缘”、“岛弧”一直没有明确的结论,其中原因颇多。笔者认为,该套地层厚度巨大,相对研究难度也较大,很可能存在不同于经典大地构造演化模式的情况。本次通过对以下一些元素含量、元素判别式进行分析和探讨,初步认为华夏北缘地球化学特征接近被动大陆边缘,具体分为以下 5 个方面。

(1)通过元素含量与各构造环境参数对比判断。本文将赣西南 3 个取样区下寒武统样品主量、微量、稀土元素的相应数据与前人研究各大地构造环境数据进行对比(表 4),总体来看本区样品中杂砂岩岩石化学参数的平均值与前人研究的各构造环境中的参数并不完全相同,极少部分主量元素和稀土元素具有活动大陆边缘的特征,但总体特征明显不同于岛弧,各项参数显示其特征更类似于被动大陆边缘。尤其稀土元素丰度值均高于 Taylor 等^[26]发表的被动大陆边缘数据。由于母岩在能够充分风化的稳定环境中稀土元素丰度会逐渐积累提高,被动大陆边缘的“稳定”有力地提供了这一条件,因而判断本区更具备被动大陆边缘环境的特征。

(2) K_2O/Na_2O-SiO_2 和 $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ 判别图。据 Roser 等^[28]提出的这 2 种判别图,可以判断 3 种大地构造背景:被动大陆边缘、活动大陆边缘和大洋岛弧。本区样品投点大部分落于被动大陆边缘构造区内(图 4-a),少部分点落于活动大陆边缘区内,图 4-b 中全部点均落在被动大陆边缘构造区范围内,因而本区应划为被动大陆边缘环境。

(3) $(Fe_2O_3+MgO)/TiO_2$ 和 $(Fe_2O_3+MgO)/(Al_2O_3/SiO_2)$ 判别图解。产于大洋弧、大陆弧,活动大陆边缘和被动大陆边缘的现代砂岩,其 $(Fe_2O_3+MgO)/TiO_2$ 和 (Al_2O_3/SiO_2) 值变化多样。Bhatia^[25]提出这 2 类大地构造环境判别图(图 5)。本区样品投点大多落于被动大陆边缘和活动大陆边缘区的上方,极少落于大陆岛弧和大洋岛弧范围内(图 5-a);图 5-b 中样品点主要位于活动大陆边缘和被动大陆边缘范围内,仍有极少样品位于构造区范围外。根据判别式可知,本区具备被动大陆边缘和活动大陆边缘的地球化学特征,仅有 2 个点反映了岛弧特征。

(4)稀土元素含量配分图。从稀土元素球粒陨石标准化配分模式(图 2)可见,赣西南早寒武世杂砂岩的 REE 分布模式与被动大陆边缘十分相似,明显不同于大陆岛弧和大洋岛弧。

(5) SiO_2 含量变化。稳定沉积区发育的杂砂岩的 SiO_2 含量较高,活动区杂砂岩中含量降低。本区 SiO_2 含量呈现由南向北逐渐减少的趋势,赣州市(81.64%)—井冈山市(77.95%)—萍乡市(74.46%),Ti、Al 等其它造岩元素含量变化趋势相反(表 4),说明早寒武世华夏陆块北缘与扬子陆块之间的相对构造活跃区处于萍乡地区或以北,即活动性由南向北稍有增强。

在利用沉积物化学组成判别沉积盆地古构造环境的过程中,应注意到主要有 2 个方面影响二者关系的因素:一是物源区的物质组成,二为风化、搬运、沉积和成岩后生作用。因此,对地球化学元素分析时,应考虑到沉积岩既具备物源区继承性构造环境特征,又具备同沉积时期的构造环境信息。这就可以

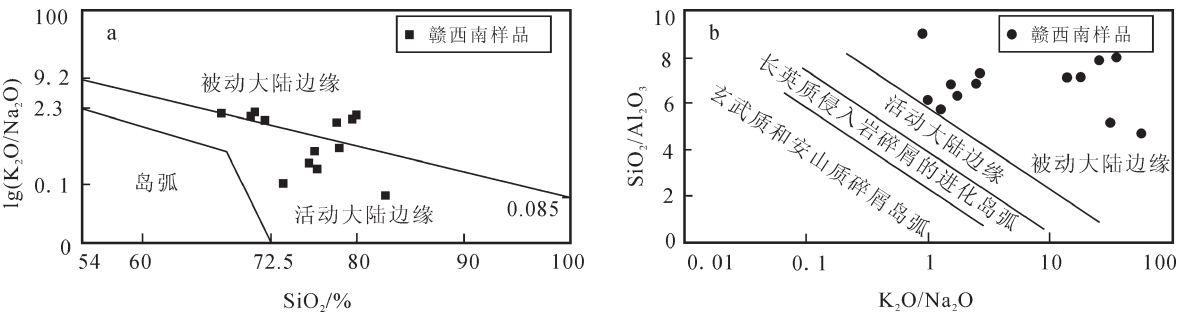


图 4 赣西南下寒武统杂砂岩 K_2O/Na_2O-SiO_2 (a) 和 $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ (b) 构造环境判别图解(底图据参考文献[29])

Fig. 4 Tectonic setting discrimination diagram of K_2O/Na_2O-SiO_2 (a) and $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ (b) for Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi Province

表 4 赣西南地区下寒武统样品与不同构造环境中杂砂岩地球化学参数对比

Table 4 Comparison of geochemical parameters between Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi Province and greywacke in various tectonic settings

分析项	大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘	中国东部上地壳	赣州市样品平均值	井冈山市样品平均值	萍乡市样品平均值
SiO ₂	58.83	70.69	73.86	81.95	65.46	81.64	77.95	74.46
TiO ₂	1.06	0.64	0.46	0.49	0.65	0.61	0.63	0.80
FeO	5.52	3.05	1.58	1.76	4.50	1.94	2.30	2.30
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.29	0.20	0.18	0.10	0.20	0.12	0.15	0.18
FeO/MgO	1.51	1.55	1.28	1.27	2.05	1.12	1.46	1.07
K ₂ O/Na ₂ O	0.39	0.61	0.99	1.60	0.94	15.59	1.81	24.36
Th/U	2.10	4.60	4.80	5.60	5.77	3.99	4.56	6.54
Rb/Sr	0.05	0.65	0.89	1.19	0.31	3.72	2.18	3.51
Ba/Sr	0.95	3.55	3.80	4.70	2.55	17.44	8.39	19.83
La	8.20	27.00	37.00	39.00	34.80	51.06	46.06	51.68
Ce	19.40	59.00	78.00	85.00	66.40	88.95	90.09	110.24
Σ REE	58.00	146.00	186.00	210.00		240.26	222.47	272.98
δ Eu	1.04	0.80	0.60	0.55	0.73	0.60	0.63	0.62

注:中国东部上地壳数据据参考文献[23];大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘和被动大陆边缘数据据参考文献[25][34];主量元素含量单位为%,微量和稀土元素单位为 10⁻⁶

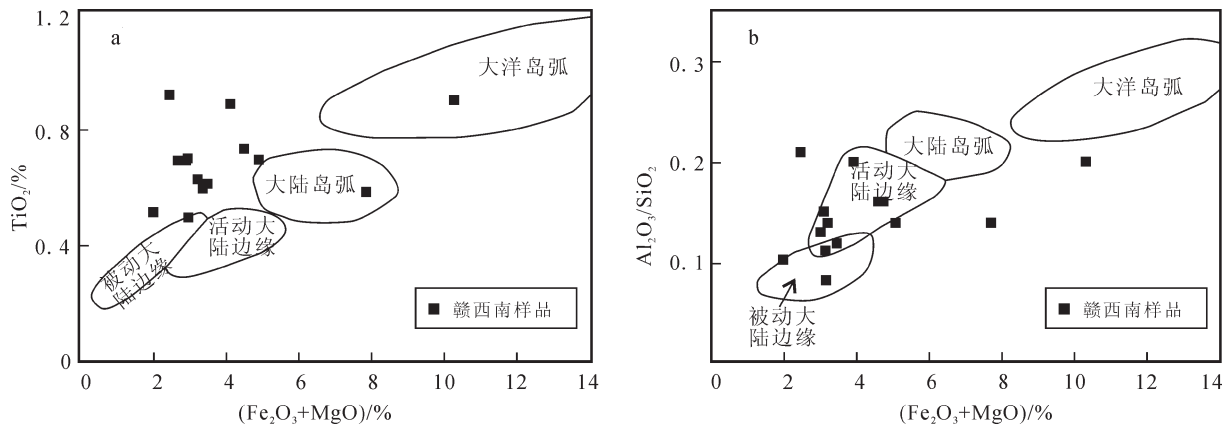


图 5 赣西南下寒武统杂砂岩 (Fe₂O₃+MgO)/TiO₂(a)和 (Fe₂O₃+MgO)/(Al₂O₃/SiO₂)(b) 构造环境判别图解 (底图据参考文献 [25])

Fig. 5 Tectonic setting discrimination diagram of (Fe₂O₃+MgO)/TiO₂ (a) and (Fe₂O₃+MgO)/(Al₂O₃/SiO₂)(b) for Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi Province

解释为何本区少量样品的地球化学元素具备活动大陆边缘的环境特征。其次,普遍认为被动大陆边缘的重要构造性质之一即“稳定”,但实际上所谓的“稳定”是在整个被动大陆边缘发展过程中相对而言的,在某一时期可能存在一定的活动性,这也将导致一部分沉积物中的地球化学特征反映活动大陆边缘环

境的特征。早寒武世华南盆地是在晋宁运动中华夏陆块向扬子陆块俯冲后形成的海盆^[32],具有窄陆棚、陡陆坡的特征,因而物源自华夏古陆剥蚀后,经过较短的搬运即快速沉积下来,类似于活动大陆边缘的短距离搬运模式,很可能导致本区发育的杂砂岩具有活动大陆边缘环境的地球化学特征。

表 5 赣西南地区下寒武统样品与不同水体地球化学参数对比

Table 5 Comparison of geochemical parameters between the Lower Cambrian greywacke in southwestern Jiangxi Province and various water bodies

10⁻⁶

元素	赣州市样品 平均值	井冈山市样品 平均值	萍乡市样品 平均值	河水	海水	远洋粘土
V	105.37	90.60	126.74	9×10 ⁻⁴	1.2×10 ⁻³	120.00
Cr	81.86	68.39	67.00	1×10 ⁻³	2×10 ⁻⁴	90.00
Ni	46.87	28.66	38.39	3×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁴	230.00
Pb	65.76	20.74	19.63	1×10 ⁻³	2×10 ⁻⁶	30.00
Zn	309.53	87.61	95.95	2×10 ⁻²	4×10 ⁻⁴	200.00
Sr	40.89	66.87	38.70	7×10 ⁻²	7.60	18.00
Li	66.54	36.91	64.41	3×10 ⁻³	0.17	57.00
Ga	21.66	17.60	20.91	9×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁵	20.00
Rb	132.93	139.34	132.28	1×10 ⁻³	12.00	110.00
W	2.11	1.89	3.59	3×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁵	1.00
Be	3.06	2.52	2.85	1×10 ⁻⁵	2×10 ⁻⁷	2.60
Sc	13.77	11.74	14.82	4×10 ⁻⁶	6.7×10 ⁻⁷	19.00
Nb	16.88	15.46	17.78	-	<5×10 ⁻⁵	14.00
Cs	11.61	6.00	7.31	2×10 ⁻⁵	2.9×10 ⁻⁴	6.00
Ta	1.59	1.43	1.43	-	<2.5×10 ⁻⁶	1.00
Ti	4080.75	3851.89	5135.48	3×10 ⁻³	<9.6×10 ⁻⁴	4600.00
U	4.46	4.94	2.74	4×10 ⁻⁵	3.1×10 ⁻³	2.60
Th	17.66	21.25	16.49	<1×10 ⁻⁴	6×10 ⁻⁸	13.40
La	51.06	46.06	51.68	4.8×10 ⁻⁵	4.5×10 ⁻⁶	42.00
Pr	12.32	10.61	13.18	7.3×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶	10.00
Nd	48.05	41.14	51.56	3.8×10 ⁻⁵	4.2×10 ⁻⁶	41.00
Sm	9.36	7.43	10.67	7.8×10 ⁻⁶	8.0×10 ⁻⁷	8.00
Eu	1.75	1.49	2.07	1.5×10 ⁻⁶	1.5×10 ⁻⁷	1.80
Gd	7.97	6.86	9.26	8.5×10 ⁻⁶	1×10 ⁻⁶	8.30
Tb	1.44	1.23	1.66	1.2×10 ⁻⁶	1.7×10 ⁻⁷	1.30
Dy	7.94	6.84	9.29	7.2×10 ⁻⁶	1.1×10 ⁻⁶	7.40
Ho	1.42	1.32	1.73	1.2×10 ⁻⁶	2.8×10 ⁻⁷	1.50
Er	4.54	4.15	5.21	4.2×10 ⁻⁶	9.2×10 ⁻⁷	4.10
Tm	0.69	0.66	0.85	6.1×10 ⁻⁷	1.3×10 ⁻⁷	0.57
Yb	4.19	4.06	4.92	3.6×10 ⁻⁶	9.0×10 ⁻⁷	3.80
Lu	0.57	0.55	0.67	6.4×10 ⁻⁷	1.47×10 ⁻⁷	0.55

注：河水、海水、远洋粘土数据据参考文献[26]

5 结 论

(1)主量元素分析显示赣西南地区下寒武统杂砂岩具备高的 SiO₂ 含量和 Al₂O₃/(CaO+Na₂O)、K₂O/Na₂O 值,较低的 Al₂O₃/SiO₂、Fe₂O₃/MgO 值和 CaO 含量;岩性主要以石英杂砂岩为主,总体显示为远岸泥质含量较高的还原环境下的产物。

(2)微量元素含量显示富集大离子亲石元素,稀土元素球粒陨石标准化分配模式显示典型的具有 LREE 富集、Eu 亏损明显的特征,接近上地壳值,物源应来自上地壳。

(3)根据地球化学元素特征对沉积环境和大地构造背景的系列分析可做下述推测:Mn/Ti 比值判断物源应自南向北推进;Ba/Sr 值和主量元素判别

函数分析结果显示物源为来自上地壳的石英岩区;根据对Ce、Mn、FeO、Eu含量和 $V/(V+Ni)$ 值的分析,认为早寒武世时期赣西南地区普遍位于水体较深的咸水还原环境中,由南向北水体还原环境渐强,深度略有加深。

(4)部分元素与大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘、被动大陆边缘环境参数对比,主量元素(Fe_2O_3+MgO)/ TiO_2 、(Fe_2O_3+MgO)/(Al_2O_3/SiO_2)判别图解和稀土元素含量配分图显示,赣西南具备被动大陆边缘的地球化学特征,部分样品反映了活动大陆边缘特征,总体可明显与岛弧环境相区别。

综合上述可知,赣西南地区下寒武统杂砂岩物源来自华夏陆块,华夏陆块北缘可能为被动大陆边缘环境,研究区内水体较深,由南向北海盆略有加深,并且活动性稍有增强。

致谢:在野外工作中江西省地质调查研究院宋志锐高级工程师、蒋金晶硕士给予帮助,中国地质科学院地质研究所宋天锐研究员、纪伟强博士在室内研究工作中给予指导和帮助,刘训研究员、游国庆副研究员、何幼斌教授、王军研究员、祝立人院长、黄志忠高级工程师、吕少俊高级工程师在工作开展前后给予支持和帮助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1]程裕淇.中国区域地质概论[M].北京:地质出版社,1994:448-476.
- [2]冯增昭,彭勇民,金振奎,等.中国南方寒武纪和奥陶纪岩相古地理[J].北京:地质出版社,2001:1-221.
- [3]江西省地质矿产局.江西省区域地质志[M].北京:地质出版社,1985:1-20.
- [4]胡受奚,徐金芳.区域成矿规律对华南大地构造属性的联系[J].中国地质,2008,35(6):1045-1053.
- [5]刘宝珺,许效松,潘杏南,等.中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M].北京:科学出版社,1993:1-236.
- [6]刘宝珺,许效松.中国南方岩相古地理图集[M].北京:科学出版社,1994:1-188.
- [7]刘宝珺.中国南方震旦纪—三叠纪岩相古地理图集[M].北京:科学出版社,1995:16-91.
- [8]沈渭洲,舒良树,向磊,等.江西井冈山地区早古生代沉积岩的地球化学特征及其对沉积环境的制约[J].岩石学报,2009,25(10):2442-2458.
- [9]吉磊.赣西南早古生代砂岩的化学成分及其大地构造意义[J].沉积学报,1993,11(3):25-30.
- [10]任纪舜,姜春发,张正坤,等.中国大地构造及其演化[M].北京:科学出版社,1980:1-116.
- [11]武铁山.华北晚前寒武纪(中、新元古代)岩石地层单位及多重划分对比[J].中国地质,2002,29(2):147-154.
- [12]章泽军,张志,张雄华.论华南前震旦纪浅变质岩区填图中存在的问题与填图方法[J].中国地质,2002,29(2):218-221.
- [13]高林志,丁孝忠,曹茜,等.中国晚前寒武纪年表和年代地层序列[J].中国地质,2010,37(4):1014-1020.
- [14]舒良树,施央申,郭令智,等.江南中段板块—地体构造与碰撞造山运动学[M].南京:南京大学出版社,1995:1-174.
- [15]汤加富.华南变质基底组成、边界与构造演化[J].安徽地质,1994,4(12):104-111.
- [16]郭令智,施央申,马瑞士,等.华南大地构造格架和地壳演化[C]//国际交流地质学术论文集(构造地质:地质力学).北京:地质出版社,1980:109-116.
- [17]郭令智,施央申,马瑞士,等.中国东南部地体构造的研究[J].南京大学学报(自然科学版),1984,20(4):732-739.
- [18]Shu Liangshu, Charvet Jacques. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang—Shexian ductile shear zone(Jiangnan region, South China)[J]. Tectonophysics, 1996, 267(14): 291-302.
- [19]舒良树,周新民.中国东南部晚中生代构造格架[J].地质论评,2002,48(3):249-260.
- [20]夏文杰,杜森官,徐新煌,等.中国南方震旦纪岩相古地理与成矿作用[M].北京:地质出版社,1994:1-86.
- [21]吴富江,张芳荣.华南板块北缘东段武功山加里东期花岗岩特征及成因探讨[J].中国地质,2003,30(2):166-172.
- [22]吴安国,焦秉正,聂国邻.中国地质图集—江西省地质[M].北京:地质出版社,2002:202.
- [23]高山,骆庭川,张本仁,等.中国东部地壳的结构和组成[J].中国科学(D辑),1999,29(3):204-213.
- [24]中国科学院地球化学研究所.高等地球化学[M].北京:科学出版社,2006:284-332.
- [25]Bhatia M R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones[J]. Journal of Geology, 1983, 91: 611-627.
- [26]Taylor S R, McLennan S H. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Black-well, 1985: 117-140,312.
- [27]于炳松,乐昌硕.沉积岩物质成分所蕴含的地球深部信息[J].地学前缘,1998,5(3):105-112.
- [28]Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone—mudstone suites determined using discriminant function analysis of major—element data[J]. Chemical Geology, 1988, 67: 119-140.
- [29]Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone—mudstone suites using SiO_2 content and K_2O/Na_2O ratio[J]. Journal of Geology, 1986, 94: 635-650.
- [30]王争鸣.缺氧沉积环境的地球化学标志[J].甘肃地质学报,2003,12(2):55-58.
- [31]刘燕学,宋天锐.辽东半岛复州湾十三里台组地球化学特征及沉积环境探讨[J].沉积学报,2009,27(5):1018-1026.
- [32]郑宁,李廷栋,耿树方,等.赣西南地区寒武纪沉积构造环境分析[J].中国地质,2011,38(6):1152-1164.
- [33]郑宁,李廷栋,刘训,等.华南造山带下寒武统和中奥陶统发现放射虫[J].中国地质,2012,39(1):260-265.
- [34]Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. Contrib. Mineral. petrol., 1986,92:181-193.