

# 广西大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩—泥岩的地球化学特征及沉积—构造环境分析

杜晓东<sup>1,2</sup> 邹和平<sup>1,2</sup> 苏章歆<sup>1</sup> 劳妙姬<sup>1</sup> 陈诗艾<sup>1</sup> 丁汝鑫<sup>1,2</sup>

(1.中山大学地球科学系,广东 广州 510275;2.广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室,广东 广州 510275)

**摘要:**大瑶山—大明山地区位于钦杭结合带西南段,是研究华南大地构造问题的关键部位。对区内寒武纪地层中采集的 27 件砂岩、泥岩样品进行了主量元素、微量元素测试和地球化学特征分析。结果表明,样品普遍具有较高的  $Al_2O_3/TiO_2$ (11.95~36.26, 平均 20.81)、低  $Rb/Cs$ (13.02~68.27, 平均 32.21, 接近上地壳值)和低  $Cr/Zr$ (0.14~1.15, 平均 0.59) 比值。在砂岩—泥岩物源判别函数和  $Ni-TiO_2$ 、 $Th/Sc-La/Sc$ 、 $La/Th-Hf$  图解中,投点特征均显示大瑶山—大明山寒武纪沉积岩的物源以上地壳长英质、石英质岩石为主,含有少量的火成物源及古老再循环沉积物。通过微量元素蛛网图、稀土元素配分图和  $La-Th-Sc$ 、 $K_2O/Na_2O-SiO_2$  等图解判别,再根据大部分样品的  $\delta Eu$  值(变化于 0.47~0.68, 平均 0.58);  $\delta Ce$ (0.61~1.10, 平均 0.89);  $Tb/Yb$ (0.21~0.41, 平均 0.34);  $La/Sc$ (1.45~7.66, 平均 3.97);  $Th/U$ (3.37~11.18, 平均 5.80) 等特征,及其与不同构造环境参数进行对比,并结合浅水沉积标志、沉积古地理及区域地质和地球化学资料分析,认为研究区寒武纪碎屑岩成分主要代表了被动大陆边缘浅海环境物源,早古生代岩石中不存在反映“华南洋”洋壳成分的地球化学证据。

**关键词:**沉积岩;物源;构造环境;寒武纪;大瑶山—大明山

**中图分类号:** P534.41; P597.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)04-1112-17

## 1 前言

砂岩、泥岩、粉砂岩等陆源碎屑沉积岩经历了风化、剥蚀、搬运、沉积等自然分选作用,被当做出露的上陆壳岩石均匀混合的产物,因此它们经常被用来研究上陆壳的特征<sup>[1-3]</sup>。其所含的一些不活动元素在水体中具有以下特征:分配系数低、滞留时间短、流失难度大、元素比值稳定。这些特征就为研究物源区的地球化学特征、沉积环境分析提供了依据<sup>[4-7]</sup>。随着使用频率和广度的增加,这些研究方法也不断得到补充和完善,成为进行地质研究的有效途径之一。

在华南新元古代以来的大地构造研究中,一个存在很大争议的问题是晋宁运动(大约 800 Ma)之

后华夏地块与扬子地块之间是否还存在“华南洋”?

一派学者认为:晋宁运动只导致了华南洋东段消失,其西段则一直延续到加里东运动末期<sup>[8-11]</sup>。此派学者认为,华南在早古生代存在具有洋壳性质的盆地,但因为盆地上方覆盖了巨厚的沉积地层,所以洋盆在消减过程中没有形成沟弧盆体系及蛇绿岩套<sup>[12-16]</sup>。

另一派学者则认为:在四堡运动和晋宁运动中,扬子地块与华夏地块的碰撞拼贴使华南洋消失,自此就形成了统一的华南地块,其为 Rodinia 超大陆的重要组成部分。加里东运动及其之后,华南地块发生了多次裂解,但这只是地壳范围内的伸展减薄,并没有达到上地幔的深度<sup>[17-27]</sup>。

广西大瑶山—大明山地区位于“钦杭结合

收稿日期:2013-01-25;改回日期:2013-05-13

基金项目:中国地质调查局地质大调查项目(1212011121064)资助。

作者简介:杜晓东,男,1986年生,硕士生,构造地质学专业;E-mail:110362826@qq.com。

通讯作者:邹和平,男,1956年生,博士,研究员,构造地质学专业;E-mail:adszhp@mail.sysu.edu.cn。

带”<sup>[10,28-29]</sup>西南段,区内寒武系广泛出露,是解剖上述晋宁运动(~800 Ma)之后华夏地块与扬子地块之间是否还存在“华南洋”这一争议的重要窗口。前人对该区加里东期岩相古地理特征做过讨论<sup>[30]</sup>,但从沉积岩地球化学特征研究寒武纪物源性质和沉积—构造背景仍相对薄弱。本文拟从大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩、泥岩地球化学特征分析入手,对上述有争议问题进行探讨。

## 2 区域地质概况及样品描述

大瑶山—大明山地区出露的地层以寒武系、泥盆系为主。寒武系主要有黄洞组及小内冲组杂砂岩、页岩等,泥盆系莲花山组和那高岭组的砂岩、页岩、底砾岩呈角度不整合接触覆于其上。区域上的主要断裂呈 NE-NEE 向,对本区影响较大的断裂主要有凭祥—大黎断裂带、灵山断裂带、博白—岑溪断裂带(图 1)。本次工作在广西梧州、郁南、荔浦、蒙山、平南、桂平、南宁、扶绥等地,对寒武纪砂泥岩进行了系统调查观测和采样。样品采集地点覆盖了大瑶山—大明山地区的大部分区域,具有较广泛的代

表性。所分析的 27 件样品,其中砂岩主要为灰白及灰色,中粒—粉砂质结构,块状构造,主要矿物有石英(40%~80%)、长石(0~10%)、云母(5%~15%),粒径为 0.005~1 mm,分选中等,呈次棱角状—次圆状(图版 1、2);粉砂岩为灰黄或灰白色,粉砂质结构,块状构造,主要矿物有石英(50%~70%),云母(5%~15%),长石(5%),分选较好,呈棱角—次棱角状,可见云母定向排列(图版-3);泥岩主要为灰色及灰黄色,泥状结构,块状构造,以粘土矿物为主,部分样品含少量石英质粉砂(图版-4、5)。

## 3 地球化学分析

岩石样品在中国科学院广州地球化学研究所和中山大学广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室进行主量元素及微量元素测试(其中,主量元素全部在中国科学院地球化学研究所测试;带星号样品的微量元素在中国科学院地球化学研究所测试,未标记样品的微量元素测试在中山大学广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室完成)。对粒度<200 目的样品进行烘干(100℃,3 h)、烧失(950℃,1.5

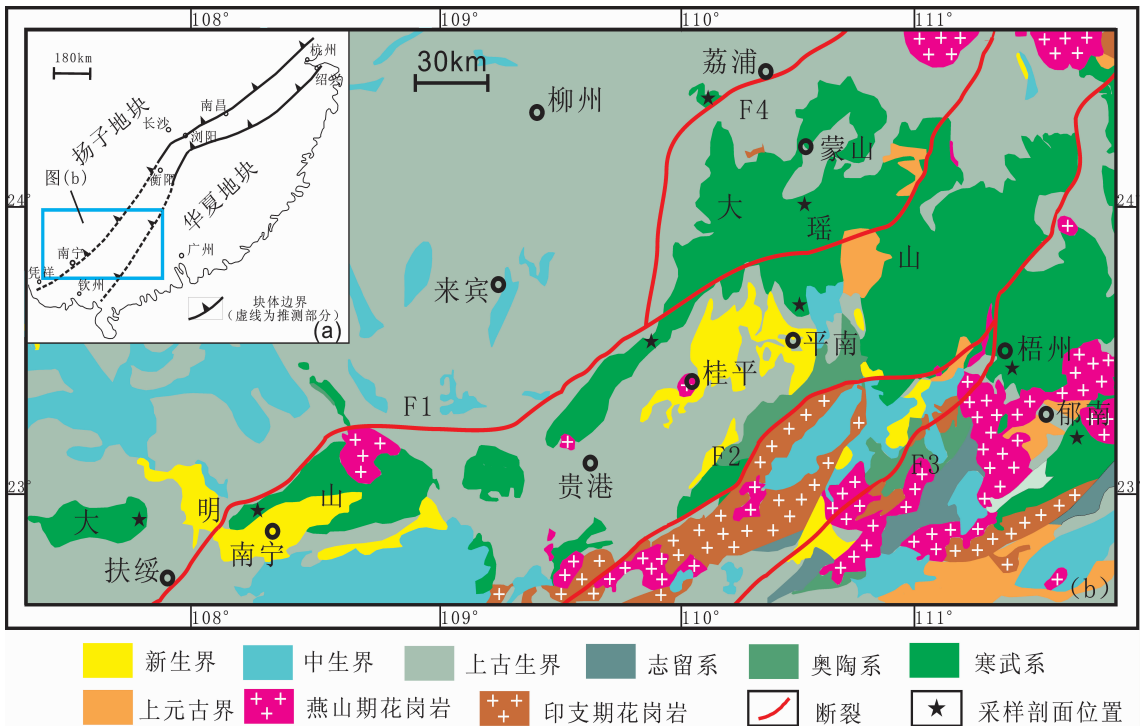
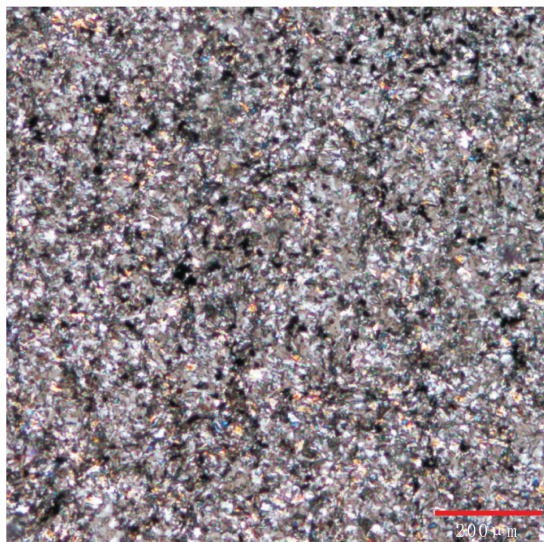
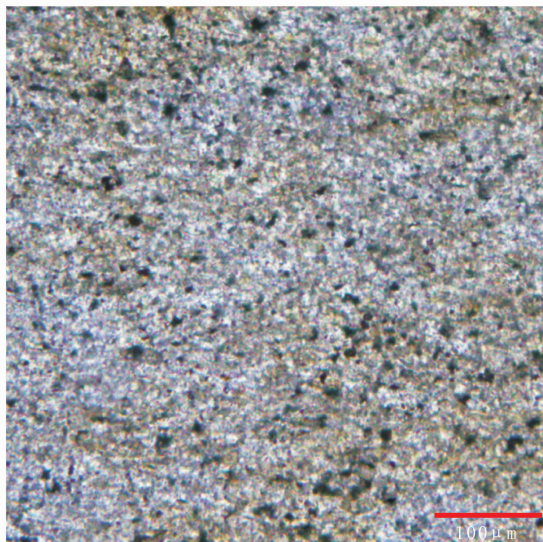
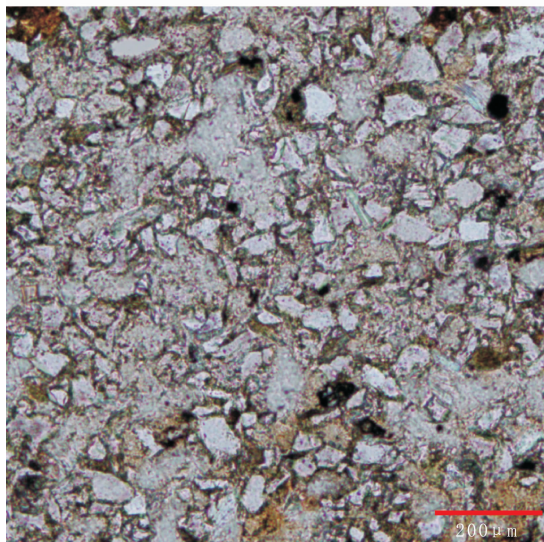
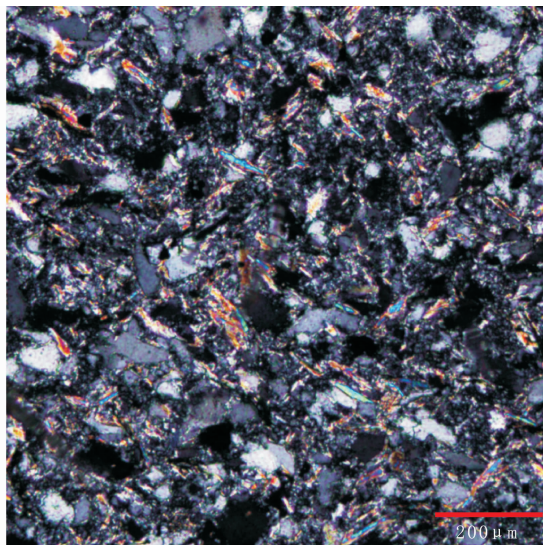
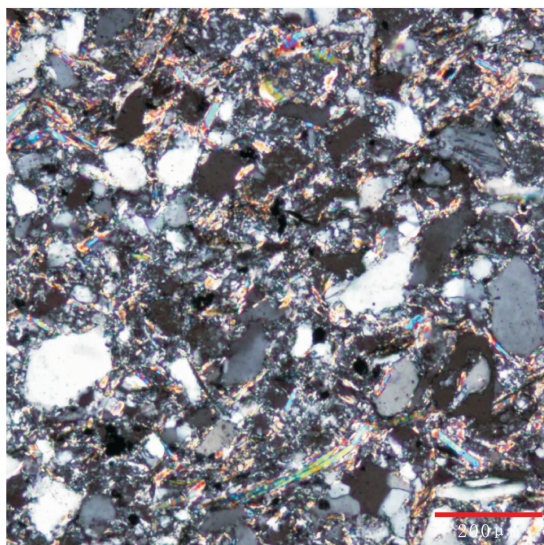


图 1 大瑶山—大明山地区所处大地构造位置(a)和区域地质略图(b)并示采样剖面位置分布(a 图据文献<sup>[29]</sup>修改)

Fig.1 Tectonic settings of Daoaoshan-Damingshan area(a, modified after Reference [27])and geological sketch map showing sampling profile locations(b)

图版



1	2
3	4
5	

- 1 黄洞口组砂岩，正交偏光
- 2 黄洞口组砂岩，正交偏光
- 3 黄洞口组粉砂岩，单偏光
- 4 黄洞口组泥岩，单偏光
- 5 小内冲组泥岩，正交偏光

h)、烧制玻璃片之后,采用 Rigaku 100e 型荧光光谱仪(XRF)进行主量元素分析,分析精度优于 1%~5%<sup>[31-32]</sup>;微量元素均采用 Perkin-Elmer Sciex Elan 6000 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析,分析精度优于 3%~5%,详细流程参照刘颖等<sup>[33]</sup>。

测试结果见表 1。

### 3.1 主量元素特征

大瑶山—大明山地区寒武纪砂泥岩元素组成特征及数据统计分析(表 2)表明,样品间的元素组成变化非常显著。

风化程度、矿物分选、变质作用等是影响岩石主量元素组成的主要因素,尤其对活动性大的元素影响尤为强烈<sup>[34-36]</sup>。Nesbitt 等<sup>[37]</sup>提出的 CIA 指数(chemical index alteration)可以表征物源区的风化程度。研究区内样品的 CIA 指数平均值为 72.34,说明源区的风化程度为中—高等。A-CN-K 图解(图 2)反映了样品主要是斜长石向伊利石、绢云母等粘土矿物的转化。

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值反映沉积岩的成熟度,研究区样品的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值大部分变化于 2~7,平均 4.5(表 2),区间较小,说明这些样品成熟度相近。而反映沉积岩淋滤程度的  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  比值变化范围非常大(0.75~99.38),部分样品  $\text{Na}_2\text{O}$  含量 < 0.1%,推测是风化作用使钠发生了淋滤丢失。

### 3.2 微量元素特征

在微量元素上地壳标准化值蛛网图上(图 3),研究区样品普遍表现为:亏损 Nb、Sr、P、Ti;富集 Th、La、Nd、Sm、Cr。这些特征与被动大陆边缘的样品相似,具有成熟大陆壳的特点。

### 3.3 稀土元素特征

研究区内样品稀土元素组成中的  $\Sigma \text{REE}$ 、LREE/HREE、(La/Yb)N、 $\delta \text{Eu}$ 、 $\delta \text{Ce}$  变化比较明显(表 3)。但总的来看,各样品稀土元素特征非常相似,具有 LREE 富集、Eu 亏损明显、Ce 弱负异常的特征。稀土元素的球粒陨石标准化蛛网图(图 4)分布模式呈明显右倾型,与上地壳和后太古宙页岩相似<sup>[1]</sup>,说明它们来自上地壳。

## 4 物源及沉积—构造背景的地球化学分析

源区岩石类型、风化作用、搬运过程、沉积分选等是影响沉积物各种元素含量的主要因素,并且这些因

素还与沉积盆地的构造环境有很大关系<sup>[40-41]</sup>。正因为如此,沉积岩的化学组成在物源性质及岩石沉积—构造背景分析方面起到了不可替代的作用<sup>[342-45]</sup>。

### 4.1 物源性质的地球化学判别

结合前文对大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩、泥岩主量元素、微量元素和稀土元素特征的分析,进一步利用  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 、Cr/Zr、Rb/Cs 元素对比值及砂岩—泥岩判别函数、Ni-TiO<sub>2</sub>、Th/Sc-La/Sc、La/Th-Hf 图解对样品的物源性质进行了探讨,认为本区寒武纪地层的物源以上地壳长英质、石英质岩石为主,并且含有少量的火成物源及古老再循环沉积物。具体分析如下:

(1)根据 Girty 等<sup>[46]</sup>的研究,若沉积物来源于镁铁质岩石,则  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 < 14$ ;若来源于长英质岩石,则  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  介于 19~28。区内样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  比值(表 2)介于 11.95~36.26(平均为 20.81)。绝大部分样品比值介于 19~28,说明物源以长英质岩石为主,少量为铁镁质岩石。

Cr 主要赋存于铬铁矿,Zr 主要赋存于锆石中,Cr/Zr 比值代表了物源区中镁铁质与长石英岩石的比例<sup>[47]</sup>。研究区内的样品总体具有 Cr/Zr 低(0.14~1.15,平均 0.59)的特点(表 2),亦表明物源主要为长英质岩石。

(2)根据 McDonough 等<sup>[48]</sup>的研究,Rb/Cs 比值在洋中脊玄武岩(80)、下地壳(60)、上地壳(30)三种环境中逐渐降低。本区样品的 Rb/Cs 为 13.02~68.27,平均值 32.21,接近上地壳值,并且未达到洋中脊玄武岩数值。由此推断,它们主要来源于上地壳,且没有地幔成分加入。

(3)Roser 和 Korsch<sup>[49]</sup>根据 Ti、Al、Fe、Mg、Ca、Na 和 K 的氧化物建立的判别函数(F1,F2),将物源区分为长英质、中性岩、镁铁质火成物源区及石英岩沉积物源区。研究区样品的投点大部分位于石英岩沉积物源区(图 5-a),少量为长英质火成岩物源区。另外,本区砂泥岩的 Ni 含量为  $5.01 \times 10^{-6} \sim 108.3 \times 10^{-6}$ ,TiO<sub>2</sub> 含量为 0.17%~1.02%。在 Floyd et al.<sup>[50]</sup>的 Ni-TiO<sub>2</sub> 图解上(图 5-b),投点主要位于长英质区域、泥岩、砂岩区域及其附近,明显远离镁铁质区域,都反映其物源为长英质岩石区,兼有成熟的再循环沉积物的特征。

(4)在 Th/Sc-La/Sc 图解<sup>[51]</sup>中,研究区样品大部分投点位于上地壳平均成分附近(图 6-a)。在 Hf—

表 1 大瑶山—大明山地区寒武纪砂泥岩的主要元素(%)和微量元素( $10^{-6}$ )分析结果  
Table 1 Major elements (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) of Cambrian sandstones and mudstones from Dayaoshan-Damingshan area

样号	14-1	14-2	14-3	15-1	128-4*	731-4	731-8	731-9	731-10	801-2	801-3	801-5	802-1	802-3
岩性	砂岩	砂岩	泥岩	砂岩	砂岩	砂岩	泥岩	粉砂岩	粉砂岩	泥岩	砂岩	粉砂岩	砂岩	泥岩
取样构造位置	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山
SiO <sub>2</sub>	74.52	88.98	54.94	86.93	75.80	86.75	61.70	70.30	86.57	63.56	74.49	77.97	73.31	61.72
TiO <sub>2</sub>	0.55	0.17	0.88	0.48	0.57	0.68	0.90	0.76	0.57	0.98	0.72	1.02	0.71	0.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.47	6.22	24.89	6.07	10.57	8.95	21.19	14.55	6.81	22.10	13.30	12.25	13.42	22.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.74	1.70	8.84	1.85	4.83	0.67	6.84	7.30	2.32	4.86	5.45	4.63	5.63	6.53
MnO	0.02	0.01	0.03	0.01	0.06	0.00	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05
MgO	1.58	0.54	2.77	0.80	1.99	0.34	2.51	1.96	0.48	2.29	1.97	1.27	2.15	2.68
CaO	0.10	0.04	0.02	1.06	1.47	0.04	0.26	0.27	0.19	0.02	0.06	0.03	0.19	0.02
Na <sub>2</sub> O	2.60	0.68	0.09	0.10	2.07	0.10	1.12	2.32	0.82	0.09	1.36	0.08	1.56	0.08
K <sub>2</sub> O	2.11	1.36	7.39	1.74	1.91	2.29	5.22	2.19	1.83	5.95	2.29	2.37	2.59	5.60
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.04	0.16	0.83	0.10	0.04	0.13	0.17	0.11	0.05	0.11	0.21	0.14	0.03
LOI	3.31	1.53	5.87	1.92	1.62	2.06	4.85	4.15	1.76	4.63	3.25	4.34	2.74	5.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.18	0.07	0.45	0.07	0.14	0.10	0.34	0.21	0.08	0.35	0.18	0.16	0.18	0.36
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.81	1.99	79.50	17.04	0.92	22.44	4.65	0.95	2.22	65.81	1.68	30.89	1.66	65.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(CaO+Na <sub>2</sub> O)	4.99	8.65	212.40	5.24	2.99	63.72	15.33	5.63	6.75	203.54	9.38	111.31	7.65	220.46
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16	0.22	0.30	0.29	0.18	0.26	0.25	0.15	0.27	0.27	0.17	0.19	0.19	0.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	24.38	36.26	28.13	12.56	18.42	13.13	23.54	19.22	11.95	22.62	18.45	12.00	18.88	24.17
ClA	66.64	70.04	75.19	60.41	56.46	76.66	72.63	68.55	64.91	76.89	73.39	81.62	70.08	78.12
Sc	10.39	3.63	24.91	7.44	9.45	10.18	20.33	13.99	7.35	19.75	13.10	14.63	13.31	24.81
Cr	57.18	176.90	118.90	45.88	60.48	55.88	117.30	72.50	154.20	112.10	70.78	88.52	151.20	136.40
Co	29.79	5.08	15.88	46.94	11.93	57.75	6.21	10.38	3.66	7.88	35.24	36.91	12.61	12.89
Ni	71.14	32.03	64.79	95.69	27.49	106.30	42.44	46.27	10.71	33.42	76.29	79.14	40.88	51.32
Rb	91.35	55.09	330.10	69.62	90.13	87.77	233.60	93.67	67.49	248.80	100.90	107.30	118.40	267.00
Sr	70.17	27.70	6.67	49.44	115.20	18.48	37.59	75.91	50.94	17.74	40.06	19.66	55.86	22.87

续表 1

样号	14-1	14-2	14-3	15-1	128-4*	731-4	731-8	731-9	731-10	801-2	801-3	801-5	802-1	802-3
岩性	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	粉砂岩	粉砂岩	粉砂岩	泥岩	砂岩	粉砂岩	砂岩	泥岩
取样构造位置	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山
Y	47.59	15.79	53.97	86.89	21.30	24.52	24.84	40.47	27.72	41.11	50.11	42.55	33.90	30.21
Zr	158.8	104.0	103.3	439.7	142.1	390.70	150.0	216.4	357.3	181.6	268.0	647.4	257.9	177.8
Nb	10.14	3.44	17.10	8.75	8.20	11.41	16.23	13.34	10.00	15.49	12.75	18.44	12.94	18.06
Cs	1.75	0.81	5.45	4.66	5.88	6.74	7.52	2.48	1.11	9.60	3.43	3.84	5.04	10.08
Ba	448.0	238.7	913.5	147.8	324.5	769.6	1461	978.4	533.8	1099	465.6	547.1	548.2	1210
Hf	4.13	2.73	2.96	10.90	4.19	9.62	3.95	5.59	8.91	5.00	6.63	15.94	6.92	4.77
Th	12.07	6.60	29.12	10.93	9.60	25.29	20.56	15.27	25.17	18.45	17.01	40.79	17.39	23.65
La	55.30	27.79	73.12	39.95	28.24	73.96	47.18	57.57	51.36	90.35	49.31	93.80	51.72	46.20
Ce	66.42	36.08	112.20	108.40	56.00	104.20	90.32	103.70	95.78	109.10	84.72	170.80	98.14	92.12
Pr	11.47	5.44	16.46	14.59	6.55	14.23	10.44	11.92	10.78	19.37	11.22	20.48	11.21	10.81
Nd	42.81	19.23	59.82	69.89	26.14	48.53	37.12	43.20	38.09	74.14	43.95	72.32	40.76	39.21
Sm	8.88	3.78	11.90	20.40	5.01	8.39	6.64	8.20	6.83	14.04	9.07	12.94	7.91	7.19
Eu	1.83	0.72	2.41	4.35	1.03	1.29	1.07	1.69	1.03	2.61	1.81	1.99	1.50	1.31
Gd	9.21	3.48	11.14	19.87	4.43	7.11	5.69	7.85	6.19	12.60	9.21	11.20	7.35	6.13
Tb	1.36	0.49	1.62	3.03	0.70	0.92	0.78	1.19	0.86	1.63	1.35	1.48	1.10	0.82
Dy	7.64	2.71	9.22	16.66	4.20	4.80	4.36	6.98	4.86	8.56	7.72	7.92	6.42	4.72
Ho	1.47	0.51	1.79	2.91	0.86	0.86	0.88	1.37	0.95	1.57	1.55	1.50	1.23	0.99
Er	4.09	1.39	5.10	7.19	2.32	2.39	2.63	3.86	2.77	4.45	4.40	4.37	3.51	3.11
Tm	0.57	0.19	0.73	0.88	0.34	0.33	0.40	0.56	0.41	0.64	0.63	0.64	0.51	0.49
Yb	3.48	1.16	4.53	4.93	2.14	2.15	2.71	3.45	2.69	4.14	3.92	4.19	3.14	3.39
Lu	0.53	0.17	0.70	0.69	0.32	0.33	0.42	0.49	0.41	0.64	0.60	0.64	0.45	0.57
ΣREE	182.7	103.1	192.9	136.3	195.1	207.7	210.6	215.1	215.6	217.1	223.0	138.3	223.7	228.3
LREE/HREE	6.59	9.21	7.92	4.59	8.04	13.27	10.79	8.79	10.65	9.04	6.81	11.66	8.92	9.73
(La/Yb) <sub>N</sub>	11.39	17.26	11.57	5.81	9.48	24.65	12.49	11.96	13.70	15.66	9.02	16.05	11.83	9.76
δ Eu	0.52	0.47	0.52	0.49	0.52	0.53	0.54	0.56	0.56	0.58	0.58	0.50	0.59	0.59
δ Ce	0.74	0.61	0.76	0.61	0.85	0.87	0.91	0.91	0.92	0.92	0.92	0.68	0.94	0.95

续表 1

样号	802-5	802-6	803-3	803-4	803-5	804-1	804-2	804-3	804-4	12729 -1*	12729 -4*	12729 -5*	12729 -6*
岩性	泥岩	砂岩	泥岩	砂岩	泥岩	砂岩	泥岩	泥岩	砂岩	砂岩	泥岩	泥岩	粉砂岩
取样构造位置	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大明山	大明山	大明山	大明山
SiO <sub>2</sub>	58.21	83.14	59.86	69.89	57.20	83.22	69.76	58.53	76.13	82.35	57.15	63.81	76.79
TiO <sub>2</sub>	0.91	0.59	0.89	0.66	0.89	0.70	0.92	0.97	0.63	0.70	0.94	0.83	0.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21.83	8.37	21.58	13.87	23.06	12.43	20.99	23.42	11.08	13.00	24.86	20.56	14.25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.50	3.41	8.30	7.79	8.12	0.64	1.75	6.80	4.31	0.35	7.83	5.39	4.05
MnO	0.07	0.03	0.06	0.07	0.06	0.00	0.01	0.03	0.06	0.01	0.01	0.03	0.01
MgO	3.65	1.05	3.14	2.49	3.31	0.45	1.13	3.20	1.63	0.56	1.50	2.22	0.96
CaO	0.18	0.32	0.10	0.83	0.29	0.03	0.02	0.05	1.43	0.08	0.04	0.03	0.04
Na <sub>2</sub> O	0.76	1.50	0.35	1.64	0.74	0.10	0.05	0.52	2.44	0.10	0.11	0.10	0.10
K <sub>2</sub> O	5.66	1.22	5.52	2.49	6.09	2.30	5.24	6.41	1.83	2.38	7.16	6.58	2.41
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.11	0.12	0.15	0.16	0.02	0.02	0.11	0.17	0.02	0.13	0.08	0.11
LOI	4.66	1.97	4.78	4.11	4.70	3.40	4.66	6.36	3.16	3.08	5.51	4.15	4.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.38	0.10	0.36	0.20	0.40	0.15	0.30	0.40	0.15	0.16	0.44	0.32	0.19
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	7.48	0.81	15.96	1.52	8.20	22.17	99.38	12.32	0.75	23.07	67.68	63.08	23.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(CaO+Na <sub>2</sub> O)	23.37	4.61	48.95	5.62	22.28	90.05	299.9	40.94	2.86	72.50	172.4	151.6	98.43
K <sub>2</sub> O/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.26	0.15	0.26	0.18	0.26	0.18	0.25	0.27	0.17	0.18	0.29	0.32	0.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	24.05	14.06	24.23	21.15	25.94	17.84	22.89	24.02	17.52	18.60	26.32	24.78	16.63
CIA	73.91	65.72	76.23	66.77	73.37	82.03	78.33	74.76	56.26	81.80	75.62	73.61	83.29
Sc	23.41	9.43	23.43	13.05	23.22	11.93	17.78	26.89	12.06	9.44	24.38	20.38	11.51
Cr	132.4	43.86	120.0	109.4	128.2	68.99	141.8	135.4	54.73	60.06	126.3	105.3	63.60
Co	27.42	59.47	8.37	23.06	27.69	35.56	0.86	15.86	41.89	19.55	5.20	10.68	22.33
Ni	60.06	108.30	51.52	57.95	59.74	67.25	5.09	49.21	80.59	37.70	29.03	40.81	59.89
Rb	263.5	55.94	267.2	114.3	282.8	120.3	219.3	262.6	81.37	119.3	366.6	331.8	103.0
Sr	18.98	48.97	14.78	47.17	24.05	9.33	12.25	16.86	140.70	47.75	20.99	10.49	18.22
Y	32.63	25.65	24.77	37.80	19.82	23.48	32.16	30.88	26.03	22.56	49.57	20.66	49.15
Zr	131.1	289.1	118.7	205.5	118.6	263.2	178.9	152.8	274.5	167.9	124.0	121.6	443.5

续表 1

样号	802-5	802-6	803-3	803-4	803-5	804-1	804-2	804-3	804-4	12729 -1*	12729 -4*	12729 -5*	12729 -6*
岩性	泥岩	砂岩	泥岩	砂岩	泥岩	砂岩	泥岩	泥岩	砂岩	砂岩	泥岩	泥岩	粉砂岩
取样构造位置	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大瑶山	大明山	大明山	大明山	大明山
Cs	8.52	2.08	8.13	3.42	11.93	2.69	5.16	6.70	4.01	8.06	15.19	13.50	4.24
Ba	1123	244.7	1256	608.1	1227	347.2	1247	1337	495.4	1394	1564	1237	486.1
Hf	3.65	7.43	3.23	5.23	3.22	6.74	4.79	4.08	6.87	5.06	3.86	3.68	12.64
Th	22.86	22.38	24.21	14.78	23.25	14.88	18.14	25.56	17.94	17.82	28.29	23.84	29.61
U	5.01	3.72	4.89	3.09	5.16	1.88	3.60	5.42	2.91	2.37	6.72	2.44	2.65
La	46.68	46.44	40.21	50.30	39.23	43.42	49.94	53.02	43.56	54.20	89.79	29.54	87.05
Ce	89.11	90.68	75.05	94.00	78.50	84.10	99.25	104.3	83.50	92.34	121.30	56.22	161.3
Pr	10.35	9.95	9.18	10.99	8.95	9.29	11.07	11.97	9.37	11.34	18.97	7.03	20.29
Nd	38.21	35.26	32.68	40.21	32.39	33.29	38.72	44.10	33.83	41.47	71.06	25.20	76.12
Sm	7.46	6.45	6.05	8.06	6.07	5.95	6.98	7.83	6.20	6.65	13.04	4.09	14.09
Eu	1.35	1.05	1.07	1.50	1.11	0.95	1.39	1.31	1.18	1.35	2.22	0.65	2.72
Gd	6.99	5.77	5.42	7.49	5.32	5.18	6.26	7.19	5.59	5.20	11.41	3.31	11.40
Tb	1.00	0.81	0.78	1.09	0.72	0.70	0.91	0.99	0.79	0.74	1.69	0.53	1.68
Dy	5.80	4.53	4.36	6.30	3.87	3.97	5.35	5.55	4.51	4.29	9.37	3.39	9.66
Ho	1.13	0.89	0.86	1.23	0.74	0.79	1.09	1.11	0.88	0.88	1.92	0.76	1.95
Er	3.33	2.60	2.60	3.46	2.32	2.34	3.22	3.29	2.56	2.41	5.15	2.24	5.01
Tm	0.50	0.39	0.41	0.49	0.38	0.34	0.48	0.50	0.38	0.36	0.75	0.38	0.74
Yb	3.20	2.52	2.77	2.98	2.68	2.23	3.14	3.32	2.41	2.13	4.64	2.53	4.48
Lu	0.52	0.39	0.46	0.43	0.45	0.34	0.48	0.54	0.37	0.32	0.71	0.44	0.66
ΣREE	228.5	229.5	234.9	245.0	252.0	269.5	181.9	310.7	313.7	343.9	352.0	397.2	404.3
LREE/HREE	8.60	10.61	9.30	8.74	10.08	11.14	9.90	9.90	10.17	12.71	8.88	9.04	10.16
(La/Yb) <sub>N</sub>	10.46	13.21	10.40	12.11	10.50	13.96	11.39	11.45	12.94	18.25	13.88	8.37	13.94
δEu	0.59	0.60	0.60	0.60	0.61	0.63	0.51	0.63	0.64	0.64	0.65	0.66	0.68
δCe	0.95	0.95	0.96	0.97	0.97	0.97	0.69	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	1.10

注:主微量元素含量为分配烧失量之后的值。CIA =  $Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O) \times 100^{100}$ 。



表 2 大瑶山-大明山地区寒武纪砂岩-泥岩元素组成特征统计

Table 2 Statistics of element composition of Cambrian sandstones and mudstones in Dayaoshan-Damingshan area

	SiO <sub>2</sub> /%	TiO <sub>2</sub> /%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO) /%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O
Min	54.94	0.17	6.07	0.91	0.07	0.75
Max	88.98	1.02	24.89	12.15	0.45	99.38
Avg	71.61	0.76	15.76	6.74	0.24	23.78
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / (CaO+Na <sub>2</sub> O)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub>	∑REE/10 <sup>-6</sup>	LREE/HREE	(La/Yb) <sub>N</sub>	δ Eu
Min	2.86	11.95	103.14	4.59	5.81	0.47
Max	299.94	36.26	404.26	13.27	24.65	0.68
Avg	70.80	20.81	238.99	9.45	12.65	0.58
	δ Ce	Th/U	La/Sc	Th/Sc	La/Th	Ti/Zr
Min	0.61	3.37	1.69	0.93	1.24	9.58
Max	1.10	11.18	9.32	5.49	4.90	105.44
Avg	0.89	5.80	4.61	1.99	2.78	33.41
	Rb/Sr	Ba/Sr	Cr/Zr	Rb/Cs	Tb/Yb	CIA
Min	0.58	2.82	0.14	13.02	0.21	56.26
Max	49.46	136.87	1.15	60.75	0.41	83.29
Avg	9.47	41.07	0.59	34.04	0.34	72.34

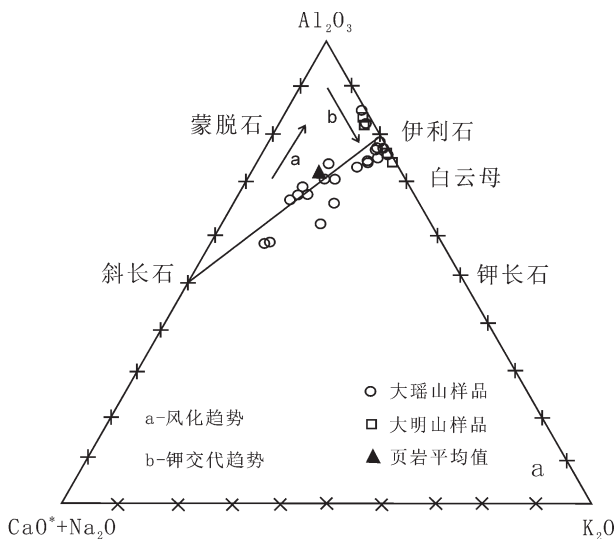


图 2 大瑶山-大明山地区寒武纪砂岩-泥岩 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO\*+Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O 摩尔分数三角图解 (图解据文献[34])  
Fig.2 Ternary plot of molecular proportions Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO\*+Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O for Cambrian sandstones and mudstones in Dayaoshan-Damingshan area (diagram after Reference[32])

La/Th 图解<sup>[40]</sup>中,样品投点的分布情况也再次说明本区寒武纪地层的源区以上地壳、长英质源区为主,并且含有少量的古老沉积组分。

4.2 沉积-构造环境分析

陆源沉积物的化学组成受到源区成分、风化条件、搬运方式、成岩作用等多种因素的影响,而这些因素又被沉积盆地的构造环境控制,使沉积岩具有自身所特有的地球化学指纹。因此,利用沉积岩中某些元素的特征可以获取沉积盆地构造环境信息<sup>[42-43]</sup>。

研究区内样品的 Th/U、La/Sc、Th/Sc、Ti/Zr、Rb/Sr、Ba/Sr 元素对的比值(表 3)明显高于上地壳值及中国东部上地壳值,并与被动大陆边缘的参数更为接近。

结合 δ Ce、δ Eu、Tb/Yb、La/Sc、La/Th、Th/U 等数据,微量元素蛛网图、稀土元素配分图、La-Th-Sc、K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解,认为本区寒武纪沉积岩形成于被动大陆边缘环境,并没有幔源物质的加入。

(1)Klinkhammer 等<sup>[53]</sup>的研究认为:Ce 在大陆边

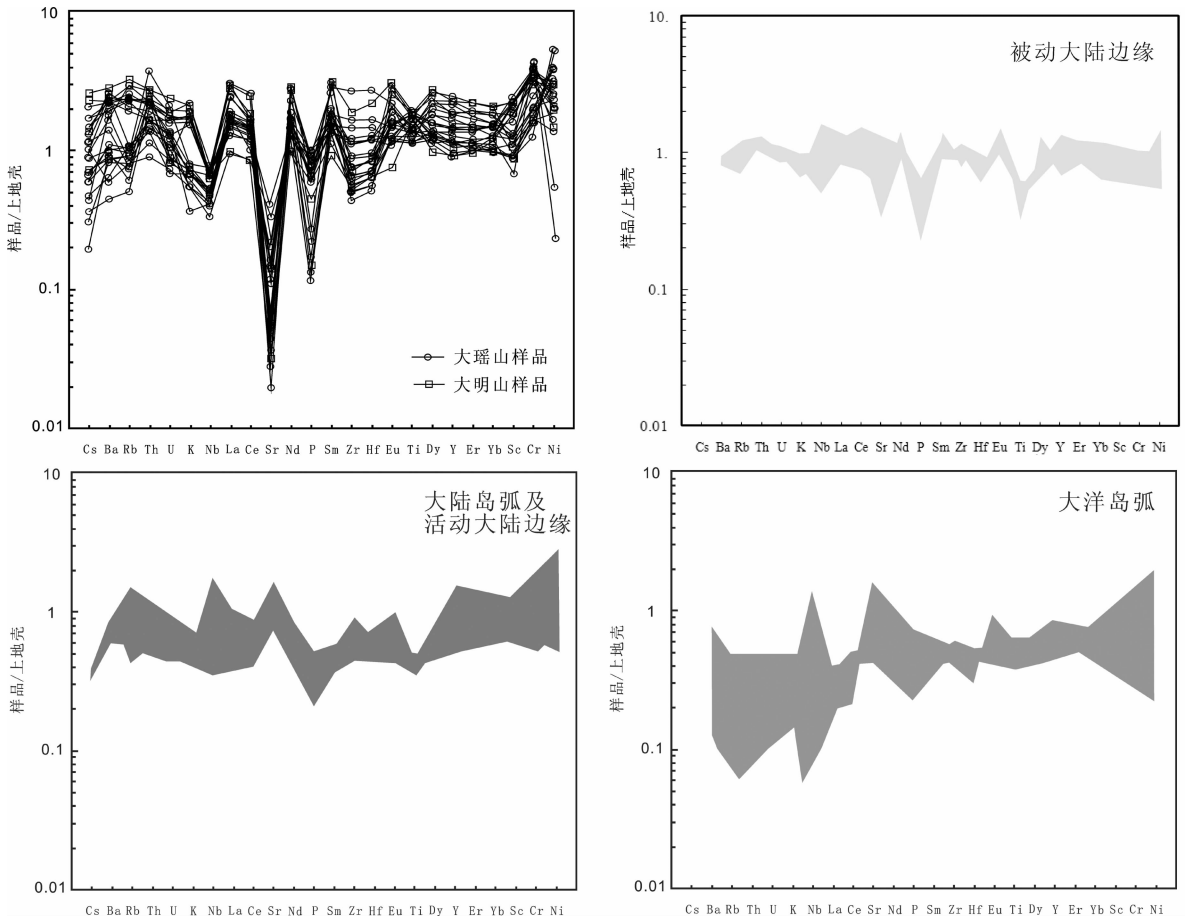


图 3 大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩-泥岩微量元素蛛网图及其与不同构造环境<sup>[38]</sup>对比  
(上地壳标准化数据引自 Taylor and McLennan<sup>[1]</sup>)

Fig.3 Trace element spider diagrams for Cambrian sandstones and mudstones in Dayaoshan-Damingshan area and comparison with different tectonic settings<sup>[38]</sup>  
(normalizing data after Taylor and McLennan<sup>[1]</sup>)

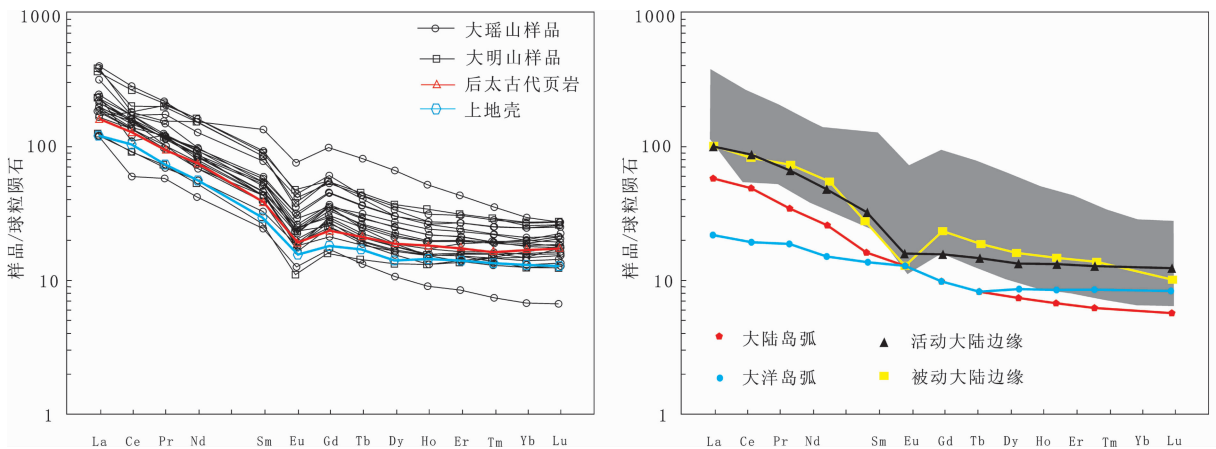


图 4 大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩-泥岩稀土元素元素配分图及其与不同构造环境<sup>[38]</sup>的比较  
(球粒隕石标准化值据 Sun and McDonough<sup>[39]</sup>)

Fig.4 REE spider diagrams for Cambrian sandstones and mudstones in Dayaoshan-Damingshan area and comparison with different tectonic settings<sup>[38]</sup>  
(normalizing data after Sun and McDonough<sup>[39]</sup>)

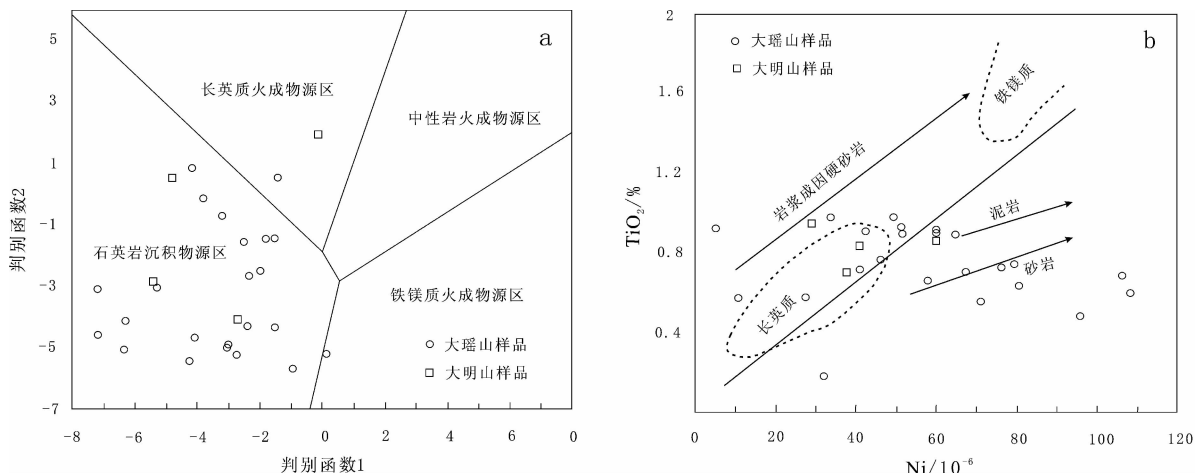


图5 大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩-泥岩主要元素的物源判别函数图解<sup>[49]</sup>(a)及Ni-TiO<sub>2</sub>图解<sup>[50]</sup>(b)  
 Fig.5 Provenance discrimination function diagram of major elements(a)and plots of Ni-TiO<sub>2</sub>(b)for Cambrian sandstones and mudstones in Dayaoshan-Damingshan area

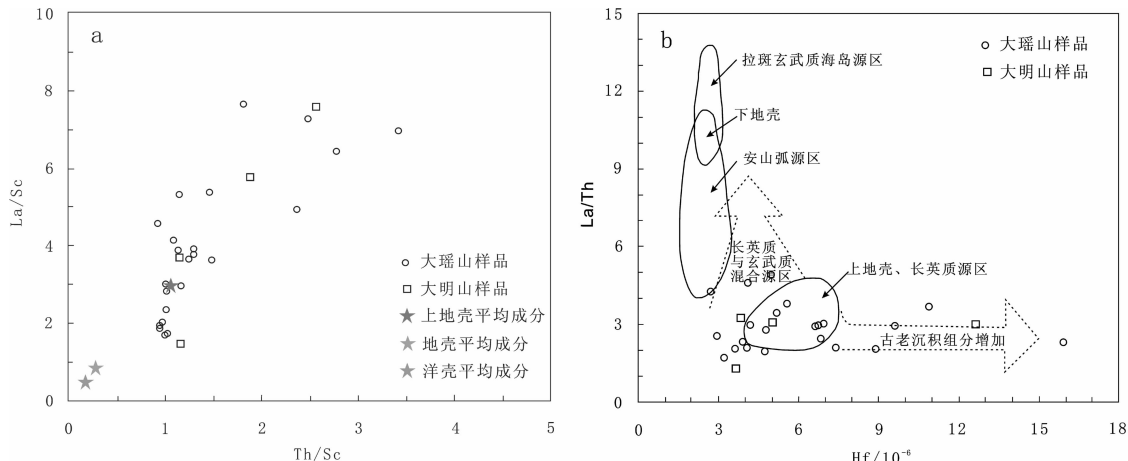


图6 大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩-泥岩微量元素比值Th/Sc-La/Sc图解<sup>[51]</sup>(a)和La/Th-Hf图解<sup>[44]</sup>(b)  
 Fig.6 Diagrams of La/Sc-Th/Sc(a)and La/Th-Hf(b)for Cambrian sandstones and mudstones in Dayaoshan-Damingshan area

表3 大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩、泥岩与不同构造环境沉积岩的化学组成对比

Table 3 Comparison of chemical composition of Cambrian sandstones and mudstones between Dayaoshan-Damingshan area and different tectonic settings

参数	研究区样品平均值	被动大陆边缘	活动大陆边缘	大陆岛弧	大洋岛弧	PAAS	上地壳	中国东部上地壳
SiO <sub>2</sub> /%	71.61	81.95	73.86	70.69	58.83	62.80	66	65.46
TiO <sub>2</sub> /%	0.76	0.49	0.46	0.64	1.06	1.00	0.5	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /%	15.76	8.41	12.89	14.04	17.11	18.90	15.2	13.65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +MgO/%	6.74	2.89	4.63	6.79	11.73	9.35	6.7	7.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	0.24	0.10	0.18	0.20	0.29	0.30	7.15	0.20
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	23.78	1.60	0.99	0.61	0.39	3.08	0.23	0.94
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /(CaO+Na <sub>2</sub> O)	70.8	4.15	2.56	2.42	1.72	7.56	0.87	2.25
La/10 <sup>-6</sup>	54.05	39	37	27	8.2	38	30	34.8
Ce/10 <sup>-6</sup>	94.73	85	78	59	19.4	80	64	66.4
ΣREE	239	210	186	146	58	183	146	
LREE/HREE	9.45	8.5	9.1	7.7	3.8	9.45	9.47	
(La/Yb)N	12.65	15.9	12.3	11	4.2	9.2	9.2	10.42
δEu	0.58	0.55	0.60	0.80	1.04	0.66	0.65	0.73
Th/U	5.80	5.6	4.8	4.6	2.1		3.8	5.77
Ti/Zr	33.41	6.74	15.3	19.7	56.8	28.6	15.8	20.5
Rb/Sr	9.47	1.19	0.89	0.65	0.05	0.8	0.32	0.31
Ba/Sr	41.07	4.7	3.8	3.55	0.95	3.25	1.57	2.55

注:构造环境参数引自 Bhatia<sup>[51]</sup>;后太古宙平均页岩(PAAS)及上地壳值引自 Taylor and McLennan<sup>[1]</sup>,中国东部上地壳数据引自 GAO Shan et al.<sup>[52]</sup>。

缘处呈现弱负异常或正异常(0.84~0.93),在开阔大洋处呈现明显负异常(0.56 左右),在洋中脊附近则呈现更为明显的负异常(0.28 左右)。由表 1 可见,本区砂泥岩的  $\delta C_e$  为 0.61~1.10,平均为 0.89,总体显示弱的负异常或正异常,说明该区为大陆边缘附近的环境。

(2)地幔与地壳的物质成分有非常明显的差异,一些元素的异常及元素对比值对幔源物质加入的反映非常敏感<sup>[45,54]</sup>。当有幔源物质加入时, $\delta Eu > 1$ 、 $Tb/Yb > 1$ 、 $La/Sc < 2.8$ 、 $La/Th < 2.8$ 、 $Th/U < 3.8$ 。从表 2 可以看出,本区寒武纪砂泥岩的  $Eu$  负异常明显,大部分  $\delta Eu$  值低于 0.65 (0.47~0.68, 平均 0.58); $Tb/Yb$  明显小于 1 (0.21~0.41, 平均 0.34); $La/Sc$  大于 2.8 (1.45~7.66, 平均 3.97); $Th/U$  大于 3.8 (3.37~11.18, 平均 5.80)。上述参数呈现与有幔源物质加入时相反的特征,所以研究区为形成于陆壳基底上的成分,没有幔源物质加入。

(3)研究区寒武纪沉积岩的稀土元素和微量元素与大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘以及被动大陆边缘的(图 3~4)的比较显示,本区在沉积期处于被动大陆边缘环境。

(4)在 Bhatia 等<sup>[42]</sup>提出的  $La-Th-Sc$  构造环境判别图解中(图 7-a),研究区样品投点位于大陆岛弧、主动大陆边缘、被动大陆边缘区域及其附近;在 Roser 等<sup>[43]</sup>提出的判别沉积盆地构造的  $SiO_2-K_2O/Na_2O$

$Na_2O$  图解中(图 7-b),绝大部分投点落入被动大陆边缘区域,少数点位于活动大陆边缘或两者分界线上。

岩石类型是影响构造环境评判的要素之一。活动大陆边缘和岛弧盆地通常由同期形成的安山质火山岩及侵入岩提供来源,其中形成的砂泥岩常具有显著区别于被动大陆边缘的地球化学特征;而被动大陆边缘环境的物源更为广泛和复杂,物源区母岩中包含的更早期岛弧或活动大陆边缘环境的地球化学信息可能在后期岩石中体现出来<sup>[4]</sup>。上述图解表明,本区大多数样品的主、微量元素投点显示具有被动大陆边缘特征,但部分样品数据显示为活动大陆边缘和岛弧背景。其中的原因可能是,虽然研究区寒武系沉积于被动大陆边缘环境,但当时的物源区中存在更早期的活动大陆边缘或岛弧背景下形成的火成岩,因此,部分沉积物继承了物源区先前构造背景的地球化学信息。

## 5 讨论

本文通过上述对大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩-泥岩地球化学特征分析,认为区内在寒武纪为被动大陆边缘或陆内裂谷环境,并无洋壳的存在。这一推论,还得到以下证据的支持:

笔者在研究区藤县东荣镇南面 G321 公路旁的寒武系中,发现了砂岩包裹泥岩碎屑、交错层理、斜层理、泥砾等浅水沉积环境的标志(图 8)。

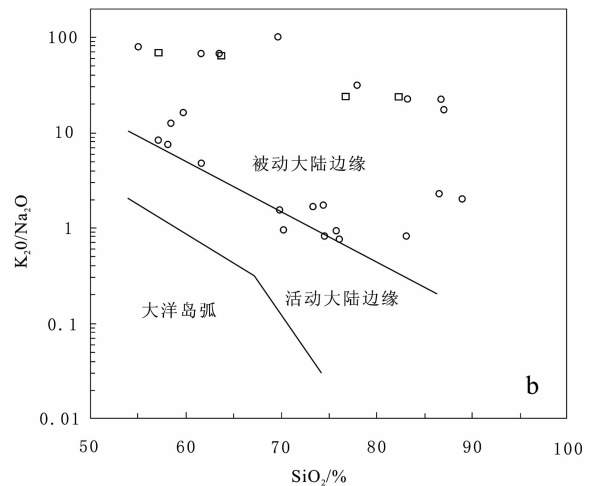
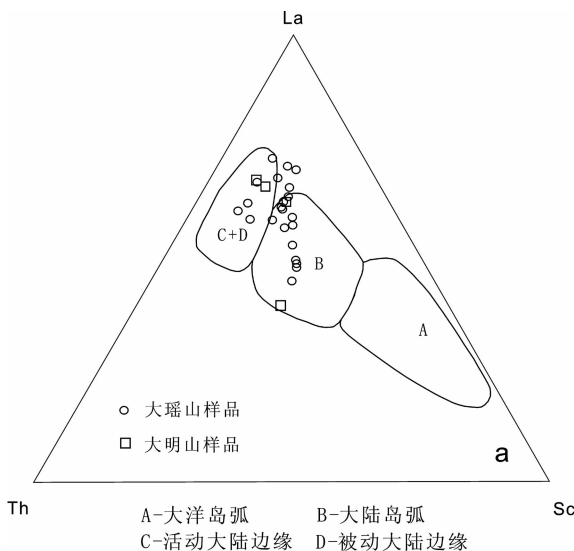


图 7 大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩-泥岩  $La-Th-Sc$  构造环境判别图解<sup>[42]</sup>(a)和  $K_2O/Na_2O-SiO_2$  图解<sup>[43]</sup>(b)  
Fig.7 Diagrams of  $La-Th-Sc$  showing tectonic setting discrimination(a)and plots  $K_2O/NA_2O-SiO_2$  (b)for Cambrian sandstones and mudstones in Dayaoshan-Damingshan area

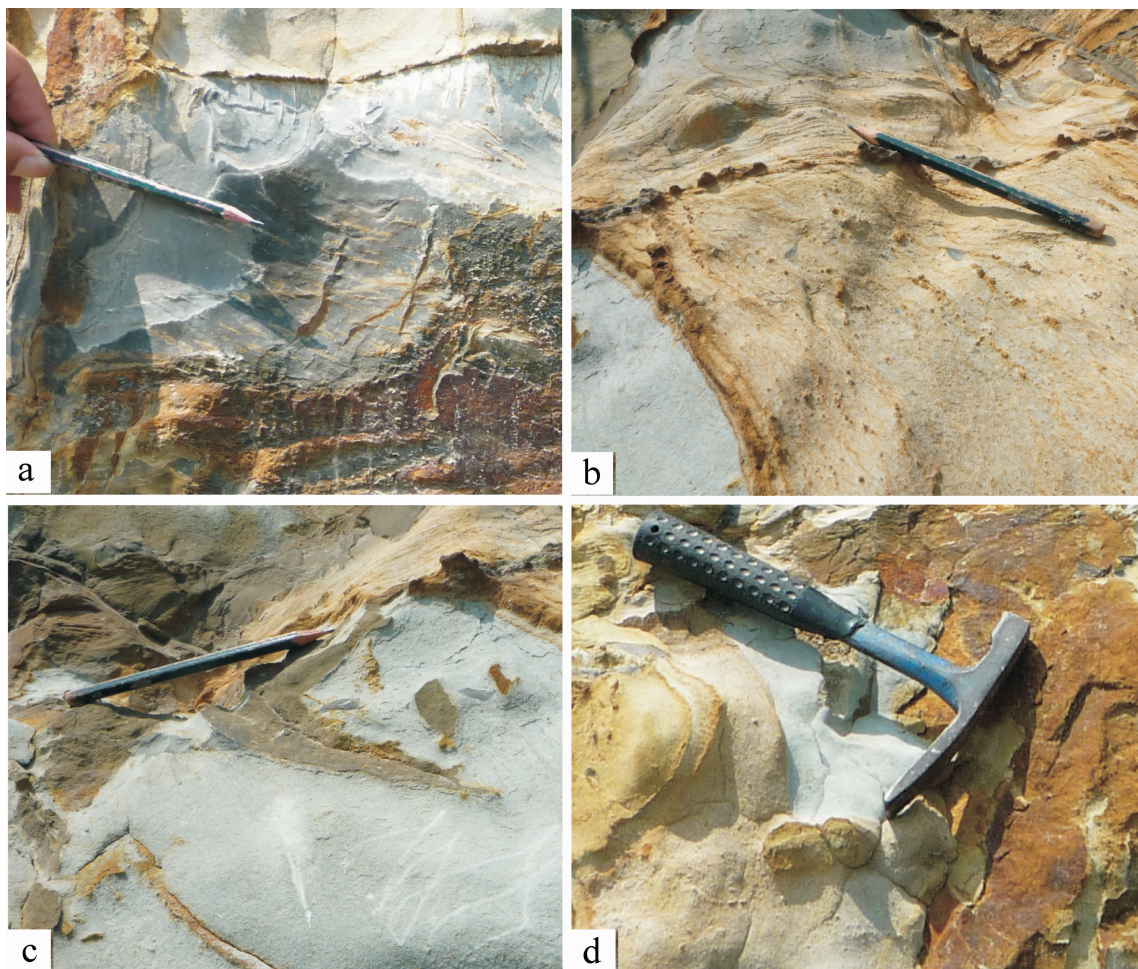


图 8 藤县东荣镇附近(N23°45.257',E110°39.170')寒武纪地层中的浅水沉积标志  
Fig.8 Marks of shallow-sea deposits in Cambrian strata near Dongrong Town, Tengxian County, Guangxi  
(N23°45.257'E110°39.170')

以往放射虫化石的研究认为,赣东北的蛇绿岩形成于古生代。但近年来,对钦杭结合带东段蛇绿岩、大洋花岗岩、超基性岩等进行的古生物、同位素测年方面的研究显示,赣东北蛇绿岩形成于新元古代而不是古生代,华南洋于古生代并不存在<sup>[21,23,55-57]</sup>。

生物地层学、古生态学、沉积古地理等方面的研究显示,扬子地块到华夏地块于早古生代是连续统一的陆内海盆,两者之间并不存在深海槽和大洋<sup>[18,58-61]</sup>。

在花岗岩形成的构造背景方面,张芳荣等<sup>[62]</sup>、张菲菲等<sup>[63]</sup>、张苑等<sup>[64]</sup>、Zhang F. et al.<sup>[65]</sup>的研究认为,华南地区古生代花岗岩的物源为地壳物质,并没有幔源物质加入,此类花岗岩是陆内构造运动的产物。

位于钦杭结合带东侧的湘东南和江西井冈山地区早古生代沉积岩的地球化学特征<sup>[38,66]</sup>也表明,古生

代沉积盆地为被动大陆边缘的陆内裂谷环境。

各种浅海地质现象,如砂泥岩互层夹碳酸盐岩地层,腹足类和腕足类等浅海生物化石,波痕、泥砾、斜层理等浅海沉积构造<sup>[21,30,67-68]</sup>,都说明这些地区的早古生代沉积盆地为浅海环境,而不是大洋。

## 6 结 论

(1)大瑶山—大明山地区寒武纪砂岩—泥岩具有高  $Al_2O_3/TiO_2$  和低  $Rb/Cs$ 、 $Cr/Zr$  比值,样品的投点在砂岩—泥岩物源判别函数图解、 $Ni-TiO_2$ 、 $Th/Sc-La/Sc$ 、 $La/Th-Hf$  图解中主要处于上地壳、长英质岩石区域内。地球化学特征表明,本区寒武纪沉积物的物源区以上地壳长英质、石英质岩石为主,含有少量的火成物源及古老再循环沉积物。

(2) 根据研究区寒武纪砂岩—泥岩的  $\delta Ce$ 、 $\delta Eu$ 、Tb/Yb、La/Sc、La/Th、Th/U 等数据以及微量元素、稀土元素蛛网图、La—Th—Sc、 $K_2O/Na_2O-SiO_2$  图解的投点,并结合浅海沉积构造证据和区域生物地层学、古生态学、花岗岩形成背景等资料分析,认为大瑶山—大明山地区在寒武纪时不是深海槽或大洋,而是位于被动大陆边缘的浅海盆地。

**致谢:** 中国地质科学院李锦轶研究员对本课题研究进行指导并对本文初稿提出修改建议,匿名评审专家和编辑对本文修改提出了宝贵意见,谨致诚挚谢意。

### 参考文献 (References):

- [1] Taylor SR, McLennan. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication, 1985: 2-57.
- [2] Condie K C, Wronkiewicz D J. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution[J]. Earth Planet Sci. Lett., 1990, 97(3/4): 256-267.
- [3] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic greywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. Sedimentary Geology, 1985, 45: 97-113.
- [4] McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. Journal of Geology, 1991, 99: 1-21.
- [5] McLennan S M. Weather and global denudation [J]. Geology, 1993, 101: 295-303.
- [6] Lev S M, McLennan S M, Meyers W J, et al. A petrographic approach for evaluating trace element mobility in a blackshale [J]. Journal of Sedimentary Research, 1998, 68: 970-980.
- [7] Savoy L E, Srenvenson R K, Mounoy E W. Provenance of upper Devonian—Lower Carboniferous Migeoclinal strata, Southeastern Canadian Cordilera: Link between tectonics and sedimentation [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70: 181-193.
- [8] 水涛. 中国东南边缘大陆古基底构造演化 [J]. 科技通报, 1987, 3(5): 32-34.  
Shui Tao. The continental ancient basement structure evolution of the southeastern edge of China [J]. Science and Technology Bull., 1987, 3(5): 32-34 (in Chinese).
- [9] 水涛. 中国东南大陆基底构造格局 [J]. 中国科学, 1988, (4): 415-422.  
Shui Tao. The pattern of continental basement of Southeastern China [J]. Science in China, 1988, (4): 415-422 (in Chinese).
- [10] 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.  
Liu Baojun, Xu Xiaosong, Pan Xingnan, et al. Sedimentary Crustal Evolution and Metallogenesis of the South China Palecontinent [M]. Beijing: Science Press, 1993: 1-236 (in Chinese).
- [11] Wang H Z, Mo X X. An outline of the tectonic evolution of China [J]. Episodes, 1995, 18 (1-2): 6-16.
- [12] 蒲心纯, 周浩达, 王熙林, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理与成矿作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.  
Pu Xinchun, Zhou Haoda, Wang Xilin, et al. Cambrian Lithofacies Paleogeography and Mineralization in South China [J]. Beijing: Geological Publishing House, 1993 (in Chinese).
- [13] 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 等. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分 [J]. 地球科学, 1999, 24(1): 1-12.  
Yin Hongfu, Wu Shunbao, Du Yuansheng, et al. South China defined as part of Tethyan Archipelagic Ocean System [J]. Earth Science, 1999, 24(1): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- [14] 尹福光, 许效松, 万方, 等. 华南地区加里东期前陆盆地演化过程中的沉积响应 [J]. 地球学报, 2001, 22(5): 425-428.  
Yin Fuguang, Xu Xiaosong, Wan Fang, et al. The sedimentary response to the evolutionary process of Caledonian foreland basin system in South China [J]. Acta Geoscientific Sinica, 2001, 22(5): 425-428 (in Chinese with English abstract).
- [15] 万方, 尹福光, 许效松, 等. 华南加里东运动演化过程中烃源岩的成生 [J]. 矿物岩石, 2003, 23(6): 82-86.  
Wan Fang, Yin Fuguang, Xu Xiaosong, et al. The formation of hydrocarbon resources during the evolution of South China in Caledonian [J]. J. Mineral Petrol., 2003, 23(6): 82-86 (in Chinese with English abstract).
- [16] 陈洪德, 侯明才, 许效松, 等. 加里东期华南的盆地演化与层序格架 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2006, 33(1): 1-8.  
Chen Hongde, Hou Mingcai, Xu Xiaosong, et al. Tectonic evolution and sequence stratigraphic frame work in South China during Caledonian [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, 33(1): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王剑, 刘宝珺, 潘桂棠. 华南新元古代裂谷盆地演化—Rodinia 超大陆解体的前奏 [J]. 矿物岩石, 2001, 21(3): 135-145.  
Wang Jian, Liu Baojun, Pan Guitang. Neoproterozoic rifting history of South China—significance to Rodinia supercontinent break up [J]. Mineral Petrol., 2001, 21 (3): 135-145 (in Chinese with English abstract).
- [18] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带 [J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 418-431.  
Shu Liangshu. Predevonian tectonic evolution of south China from Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt Geological [J]. Journal of China Universities, 2006, 12(4): 418-431 (in Chinese with English abstract).
- [19] 卢成忠, 顾明光. 杭州南部新元古代双峰式火山岩的厘定及其构造意义 [J]. 中国地质, 2007, 34(4): 565-571.  
Lu Chengzhong, Gu Mingguang. Definition of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the south of Hangzhou and its tectonic significance [J]. Geology in China, 2007, 34 (4): 565-571 (in Chinese with English abstract).

- [20] 王淼, 舒良树. 武夷山新元古代蛇绿混杂岩岩石地球化学特征[J]. 中国地质, 2007, 34(4):572-583.  
Wang Miao, Shu Liangshu. Rock geochemical characteristics of the Neoproterozoic Wuyishan ophiolite mélangé [J]. *Geology in China*, 2007, 34(4): 572-583 (in Chinese with English abstract).
- [21] 舒良树, 于津海, 贾东, 等. 华南东段早古生代造山带研究[J]. 地质通报, 2008, 27(10):1581-1594  
Shu Liangshu, Yu Jinhai, Jia Dong, et al. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27 (10):1581-1593 (in Chinese with English abstract)
- [22] 舒良树. 华南构造演化的基本特征 [J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.  
Shu Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block [J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31 (7):1035-1053(in Chinese with English abstract).
- [23] Xianhua Li, Wuxian Li, Zhengxiang Li, et al. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China; Constraints from SHRIMP U - Pb zircon ages, geochemistry and Nd - Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 2009:1-12.
- [24] Michel Faure, Liangshu Shu, Bo Wang et al. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China[J]. *Terra Nova*, 2009, 21(5):360-368.
- [25] 郝义, 李三忠, 金宠, 等. 湘赣桂地区加里东期构造变形特征及成因分析[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(2):166-180.  
Hao Yi, Li Sanzhong, Jin Chong, et al. Caledonian Structural Characteristics and Mechanism in Hunan - Jiangxi - Guangxi [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2010, 34 (2):166-180 (in Chinese with English abstract).
- [26] 向磊, 舒良树. 华南东段前泥盆纪构造演化:来自碎屑锆石的证据[J]. 中国科学(D辑), 2010, 40(10):1377-1388.  
Xiang Lei, Shu Liangshu. Pre-Devonian tectonic evolution of the eastern South China Block; Geochronological evidence from detrital zircons [J]. *Sciences in China (Ser.D)*, *China Earth Sci.*, 2010, 40(10):1377-1388(in Chinese).
- [27] Shu Liangshu, Michel Faure, Yu Jinhai, et al. Geochronological and geochemical features of the Cathaysia block (South China): New evidence for the Neoproterozoic breakup of Rodinia [J]. *Precambrian Research*, 2011, 187:263-276.
- [28] 王鸿祯, 杨巍然, 刘本培. 华南地区古大陆边缘构造史 [M]. 武汉:武汉地质学院出版社, 1986.  
Wang Hongzhen, Yang Weiran, Liu Bengpei. *Tectonic History of the Ancient Continental Margins of South China* [M]. Wuhan: Wuhan University of Geology Press, 1986(in Chinese).
- [29] 杨明桂, 梅勇文. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征[J]. 华南地质与矿产, 1997, (3):52-59.  
Yang Minggui, Mei Yongwen. Characteristics of geology and matatlization in the Qingzhou - Hangzhou Paleoplate Juncture [J]. *Geology and Mineral Resources of Southern China*, 1997, (3): 52-59 (in Chinese with English abstract).
- [30] 陈懋弘, 梁金城, 张桂林, 等. 加里东期扬子板块与华夏板块西南段分界线的岩相古地理制约[J]. 高校地质学报. 2006, 12(1): 111-122.  
Chen Maohong, Liang Jincheng, Zhang Guilin, et al. Lithofacies paleogeographic constraints of southwestern boundary between Yangtze and Cathaysian plates in Caledonian [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12 (1):111-122 (in Chinese with English abstract).
- [31] Goto A, Tatsumi Y. Quantitative analysis of rock samples by an X-ray fluorescence spectrometer [J]. *The Rigaku Journal*, 1994, 11:40-59.
- [32] 李献华, 祁昌实, 刘颖, 等. 扬子块体西缘新元古代双峰式火山岩成因: Hf 同位素和 Fe/Mn 新制约 [J]. 科学通报, 2005, 50(19):2155-2160.  
Li Xianhua, Qi Changshi, Liu Ying, et al. Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the western Yangtze block; Hf isotopes and new constraints in Fe/Mn [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(19): 2155-2160 (in Chinese).
- [33] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. 地球化学, 1996, 25(6):552-558.  
Liu Ying, Liu Haicheng, Li Xianhua. Simultaneous and precise determination of 40 trace element in rock samples using ICP-MS [J]. *Geochimica*, 1996, 25 (6):552-558 (in Chinese with English abstract).
- [34] Nesbitt H W, Fedo C M, Young G M. Quartz and feldspar stability, steady and non-steady-state weathering and petrogenesis of siliciclastic sands and muds [J]. *Journal of Geology*, 1997, 105:172-191.
- [35] Fralick P W, Kronberg B I. Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock source [J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 113:111-124.
- [36] Condie K C, Dengate J, Culler R L. Behavior of rare earth element in a paleoweathering profile on granodiorite in the front range, Colorado, USA [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, 59: 279-294.
- [37] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299:715-717.
- [38] 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.  
Shen Weizhou, Shu Liangshu, Xiang Lei, et al. Geochemical characteristics of Early Paleozoic sedimentary Rocks in the Jinggangshan area, Jiangxi Province and the constraining to the sedimentary environment [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25 (10):2442-2458 (in Chinese with English abstract).
- [39] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A.D and Norry M.J (eds.). *Magmatism in ocean*

- basins. *Geol.Soc.London.Spec.Publ.*,1989, 42:313–345.
- [40] Blatt H, Middleton G V, Murray R. Origin of sedimentary rocks [M]. Englewood Cliffs, NJ:Prentice–Hall, 1980:1–782.
- [41] Bhatia MR. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *Journal of Geology*, 1983, 91:611–627.
- [42] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywacks and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Mineral Petrol.*, 1986, 92:181–193.
- [43] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone–mudstone suite using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio [J]. *Journal of Geology*, 1986, 94(5):635–650.
- [44] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *Geol.Soc. London*, 1987, 144:531–542.
- [45] McLennan S M, Taylor S R, McCulloch M T, et al. Geochemical and Nd–Sr isotopic composition of deep–sea turbidites: Crustal evolution and plate tectonic associations[J]. *Geochim.Cosmochim. Acta*,1990, 54(7):2015–2050.
- [46] Girty G H, Ridge D L, Knaack C, et al. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1):107–118.
- [47] Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola Supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0Ga old continental craton [J]. *Geochemistry Cosmochim. Acta*,1989, 53:1537–1549.
- [48] McDonough W F, Sun S S, Ringwood A E, et al. Potassium, rubidium and cesium in the earth and moon and the evolution of the mantle of the earth [J]. *Geochemistry Cosmochim. Acta*, 1992, 56:1001–1012.
- [49] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone – mudstone suits determined using discriminant function analysis of major–element data[J]. *Chem.Geol.*,1988, 67:119–139.
- [50] Floyd P A, Winchester J A, Park R G. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland [J]. *Precambrian Research*,1989, 45:203–214.
- [51] Creaser RA, Erdmegg P. Tectonic affinity of Nisutn and Anvil assemblage strata from the Teshn tectonic zone, northern Canadian Cordillera: Constraints from neodymium isotope and geochemical evidence[J]. *Tectonics*, 1997, 16:107–121.
- [52] Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, et al. Tstructure and composition of the continental crust in east China [J]. *Science in China*,1999, 42(2):129–140.
- [53] Klinkhammer G, Eldcrfield H, Hudson A. Rare earth elements in seawater hydrothermal vents [J]. *Nature*, 1993, 305 (5931):185–188.
- [54] 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.
- Yu Bingsong, Yue Changshuo. Some information about the inner earth Contained in composition of sedimentary rocks [J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5 (3):105–112 (in Chinese with English abstract).
- [55] 李玉净, 杨群, 尹磊明, 等. 赣东北蛇绿混杂岩带和变质岩系中“放射虫硅质岩”的再研究[J]. *高校地质学报*, 2006, 12(1):98–105.
- Wang Yujing, Yang Qun, Yin Leiming. The putative "Radiolarian Cherts" from ophiolitic and metamorphic complexes in northeast Jiangxi: A re–examination [J]. *Geological Journal of China Universities*,2006, 12 (1):98–105 (in Chinese with English abstract).
- [56] 李武显, 李献华. 赣东北蛇绿岩中的埃达克型花岗岩—地球化学和 Nd 同位素证据[J]. *高校地质学报*, 2004, 10(2):199–208.
- Li Wuxian, Li Xianhua. Adakitic granites within the NE Jiangxi ophiolites, South China—Geochemical and Nd isotopic evidence [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(2):199–208 (in Chinese with English abstract).
- [57] Li Wuxian, Li Xianhua, Li Zhengxiang, et al. Obduction–type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. *Gondwana Research*, 2008, 13(3):288–301.
- [58] 戎嘉余, 黄冰, 詹仁斌, 等. 华东志留纪最早期的华夏正形贝动物群及其宏演化意义[J]. *古生物学报*, 2008, 47(2):141–167.
- Rong Jiayu, Huang Bing, Zhan Renbin, et al. The earliest Silurian Cathaysiorthis Fauna (Brachiopods) of East China and its evolutionary significance [J]. *Journal of Paleontology*, 2008, 47(2):141–167(in Chinese with English abstract).
- [59] 张鹏飞. 中扬子地区古生代构造古地理格局及其演化 [D]. 中国石油大学博士论文:121–147.2009.
- Zhang Pengfei. Pattern and Evolution of Paleozoic Tectono – Palaeogeography in the Middle Yangtze Region [D]. Doctoral Dissertation of China University of Petroleum, 2009:121–147 (in Chinese with English abstract).
- [60] 陈世悦, 张鹏飞, 杨怀宇. 湘西北江坪地区志留系风暴沉积特征及意义[J]. *古地理学报*, 2009, 11(1):51–57.
- Chen Shiyue, Zhang Pengfei, Yang Huaiyu. Silurian storm deposits in Jiangping area, northwestern Hunan Province: Characteristics and geological significances [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11 (1):51–57 (in Chinese with English abstract).
- [61] 李聪, 陈世悦, 张鹏飞, 等. 华南加里东期陆内构造属性探讨[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(5):18–24.
- Li Cong, Chen Shiyue, Zhang Pengfei, et al. Research of South China Caledonian intracontinental tectonic attribute [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2010, 34 (5):18–24 (in Chinese with English abstract).
- [62] 张芳荣, 舒良树, 王德滋, 等. 华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. *地学前缘*, 2009, 16(1):248–260.
- Zhang Fangrong, Shu Liangshu, Wang Dezi, et al. Discussions on the tectonic setting of Caledonian granitoids in the eastern segment



- of South China[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 248-260 (in Chinese with English abstract).
- [63] 张菲菲, 王岳军, 范蔚茗, 等. 湘东-赣西地区早古生代晚期花岗岩体的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年研究[J]. 地球化学, 2010, 39(5):414-426.  
Zhang Feifei, Wang Yuejun, Fan Weiming, et al. LA-ICPMS zircon U-Pb geochronology of late Early Paleozoic granites in eastern Hunan and western Jiangxi Provinces, South China [J]. Geochimica, 2010, 39(5):414-426(in Chinese with English abstract).
- [64] 张苑, 舒良树, 陈祥云. 华南早古生代花岗岩的地球化学、年代学及其成因研究—以赣中南为例[J]. 中国科学(D 辑), 2011, 41(8):1061-1079.  
Zhang Yuan, Shu Liangshu, Chen Xiangyun. Geochemistry, geochronology, and petro-genesis of the early Paleozoic granitic plutons in the central-southern Jiangxi Province, China [J]. Sci. China (Ser.D), 2011, 41(8):1061-1079(in Chinese with English abstract).
- [65] Zhang Feifei, Wang Yuejun, Zhang Aimei, et al. Geochronological and geochemical constraints on the petrogenesis of Middle Paleozoic (Kwangian) massive granites in the eastern South China Block [J]. Lithos, 2012, 03(011):1-21.
- [66] 柏道远, 周亮, 王先辉, 等. 湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代—早古生代构造背景的制约 [J]. 地质学报, 2006, 81(6):755-771.  
Bai Daoyuan, Zhou Liang, Wang Xianhui, et al. Geochemistry of Nanhua-Cambrian sandstones in southeastern Hunan, and its Constraints on Neoproterozoic-Early Paleozoic tectonic setting of South China [J]. Acta Geol. Sinica, 2006, 81(6):755-771(in Chinese with English abstract).
- [67] 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1984.  
Jiangxi Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Jiangxi Province [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1984(in Chinese).
- [68] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1985.  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1985(in Chinese).

## Geochemical characteristics and sedimentary-tectonic setting of the Cambrian sandstones and mudstones in Dayaoshan-Damingshan area, Guangxi

DU Xiao-dong<sup>1,2</sup>, ZOU He-ping<sup>1,2</sup>, SU Zhang-xin<sup>1</sup>,  
LAO Miao-ji<sup>1</sup>, CHEN Shi-ai<sup>1</sup>, DING Ru-xing<sup>1,2</sup>

(1. Department of Earth Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, Guangdong, China)

**Abstract:** The Dayaoshan-Damingshan area is located in the southwestern section of the Qinzhou-Hangzhou juncture between the Yangtze Block and the Cathayian Block. The study of the early Paleozoic sedimentary environment and tectonic setting of this area is a key to understanding the geotectonic problems in South China. Major and trace elements of 27 pieces of samples from Cambrian sandstones and mudstones in this area were analyzed and discussed. The samples generally have high ratios of  $Al_2O_3/TiO_2$  (in the range of 11.95~36.26, 20.81 on average) and lower ratios of Rb/Cs (in the range of 13.02~68.27, 32.21 on average) and Cr/Zr (ranging 0.14~1.15, averagely 0.59). Geochemical characteristics, such as the plots of Ni-TiO<sub>2</sub>, Th/Sc-La/Sc and La/Th-Hf, indicate that the Cambrian sediments in the Dayaoshan-Damingshan area were mainly sourced from the upper crustal felsic quartz rocks, with the addition of a small amount of igneous sources and ancient recirculation sediments. The distribution of trace and rare-earth elements and the data of La-Th-Sc, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>,  $\delta$  Ce,  $\delta$  Eu, Tb/Yb, La/Sc, La/Th, Th/U as well as the comparison with different tectonic settings show that the study area belonged to a passive continent-marginal setting. In addition, such evidence as the marks of shallow-sea deposits, the data of sedimentary palaeogeography, regional geology and geochemistry suggests that during the Early Paleozoic there existed no geochemical evidence for the so called "ancient ocean in South China".

**Key words:** sedimentary rock; sources; tectonic settings; Cambrian; Dayaoshan-Damingshan area

**About the first author:** DU Xiao-dong, male, born in 1986, master candidate, majors in tectonic geology; E-mail: 110362826@qq.com.