

惠州凹陷珠江组泥岩地球化学特征及其地质意义

余 烨¹, 张昌民¹, 李少华¹, 朱 锐¹, 杜家元^{1,2}, 王 莉³

(1. 长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北武汉 430100;

2. 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广东广州 510240; 3. 中石化胜利油田胜利采油厂, 山东东营 257061)

摘要:为深入探讨珠江口盆地惠州凹陷珠江组沉积时期物源属性、源区构造背景及沉积环境特征,以 8 口井 18 个泥岩样品的主量元素、微量元素和稀土元素测试数据为基础,对珠江组沉积物中泥岩的地球化学元素特征进行综合分析。结果表明:珠江组源岩以上地壳以长英质岩石为主,其中东部区域为长英质和基性岩的混合物源,西部区域为长英质物源,南部区域为长英质物源和被动大陆边缘物源;东部区域的物源具有活动大陆边缘的构造背景,西部和南部区域的物源具有被动大陆边缘的构造背景;南部区域处于还原条件,水体较深,西部区域水体次深,而东部区域处于氧化条件,水体相对较浅;东部区域盐度较高,而西部和南部区域盐度较低;珠江组沉积时期研究区处于湿热的气候条件,其中西部和南部区域湿热程度较高,东部区域湿热程度较低。

关键词:珠江口盆地; 惠州凹陷; 珠江组; 地球化学特征; 物源分析; 沉积环境

中图分类号:P 512.22; P 595

文献标志码:A

Geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Zhujiang formation of Huizhou depression

YU Ye¹, ZHANG Chang-min¹, LI Shao-hua¹, ZHU Rui¹, DU Jia-yuan^{1,2}, WANG Li³

(1. MOE Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resource in Yangtze University, Wuhan 430100, China;

2. Shenzhen Branch of CNOOC Limited, Guangzhou 510240, China;

3. Shengli Oil Production Plant of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257061, China)

Abstract: In order to further discuss provenance attribute, tectonic setting and sedimentary environment of Zhujiang formation in the Huizhou depression of Pearl River Mouth Basin, geochemical elements of mudstones in Zhujiang formation were comprehensively analyzed based on experimental data of the major elements, trace elements and rare earth elements of the 18 samples from 8 wells. The results show that the parent rocks of Zhujiang formation are mainly supracrustal felsic rocks. The principal sources of detritus in the eastern region are derived from the mixed source of felsic and basic rocks, the principal sources of detritus in the western region are derived from the felsic source, and the principal sources of detritus in the southern region are derived from the felsic source and passive margin source. The tectonic setting of the eastern provenance is similar to that of active continental margin, and the tectonic settings of the western and southern provenance are similar to that of passive continental margin. The sedimentary water during Zhujiang formation period in the southern region was relatively deep and in reduction condition. The sedimentary water in the western region was medium. The sedimentary water in the eastern region was relatively shallow and in oxidation condition. The salinity of the eastern region was higher while the salinity of the western and southern region was lower in Zhujiang formation. There was a warm-wet climate condition in the Zhujiang formation, but the warm-wet degree was relatively higher in the western and southern region, and at the same time it was relatively lower in the eastern region.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Huizhou depression; Zhujiang formation; geochemical characteristics; provenance analysis; sedimentary environments

元素地球化学方法最初主要应用于火山岩的研究,目前其判别环境领域扩展到了沉积岩,并在研究地质过程、构造背景、沉积物物源及沉积环境中得到了广泛应用^[1]。沉积物中有些特征元素化学性质比较稳定,主要受物源控制,相对独立于沉积环境和成岩过程,在风化剥蚀、搬运、沉积及成岩过程中其含量基本保持不变,使沉积区和物源区具有一定的对比性,可作为良好的物源指示元素^[2-3]。因此,研究沉积岩的化学成分对于追溯物源区性质和判别其构造背景具有积极的意义。同时,元素在地层中迁移富集,不仅取决于元素自身的物理化学性质,而且还受到古气候、古环境等外界条件的影响^[4]。地层中元素的分配、比值变化及组合都在一定程度上指示了古气候环境的演化,因此,可以利用沉积物中元素地球化学的变化特征来分析沉积环境。笔者以珠江口盆地惠州凹陷新近系珠江组地球化学元素分析结果为基础,对泥质岩的主量元素、微量元素及稀土元素组分含量和某些特征元素的比值进行探讨,为研究区物源判别及其沉积环境识别提供可借鉴的理论方法。

1 地质背景

珠江口盆地位于欧亚、印度洋和太平洋三大板块交汇的南海北部大陆架上,是在拉张断陷基础上发育起来的中新生代断陷盆地,自北向南依次划分为北部断阶带、北部拗陷带、中央隆起带、南部拗陷带和南部隆起带等5个北东向构造单元,各个构造单元又细分为若干个凹陷和低隆起^[5]。盆地先后经历了晚白垩纪—早渐新世多幕断陷裂谷阶段、晚渐新世—中中新世裂后断拗转换沉降阶段和晚中新世后断块升降阶段三大构造演化阶段,多幕断陷裂谷阶段沉积包括神狐组、文昌组和恩平组,裂后断拗转换沉降阶段沉积包括珠海组、珠江组和韩江组,断块升降阶段沉积包括粤海组、万山组和第四纪地层^[5-6]。惠州凹陷次级构造单元位于北部拗陷带(珠一拗陷)中部(图1),是南海北部海域最富烃的凹陷之一,其新近系珠江组是该区油气勘探的主要目的层。珠江组沉积时期主要发育了一套三角洲—滨岸沉积体系,三角洲沉积主要发育在惠州凹陷西北部 and 东部,而滨岸沉积主要发育在惠州凹陷南部^[7-9]。

2 样品及分析

为了详细了解珠江组泥岩的地球化学特征、物

源演化规律及其古沉积环境特征,在前期珠江组物源方向研究成果^[10]的基础上,笔者在惠州凹陷选取了8口井,分三个区块对珠江组泥岩进行取样分析,其中西部1口井,3个泥岩样品;东部2口井,5个泥岩样品;南部5口井,10个泥岩样品。所有样品首先压碎至200目,然后在高温炉中保持650℃恒温2h以剔除有机质及沉积物内黏土矿物中的层间水,采用HF+HNO₃混合酸处理。样品中主量元素采用电感耦合等离子光谱仪(IRIS ADVANTAGE ICP-AES),微量元素采用电感耦合等离子质谱仪(VGX7 ICP-MS),分析中使用国际标样(GSR5、GSR6、GSR9)、空白样品进行校正,样品精确度及准确度由国际标样及空白样品监控。样品处理及测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成,测试数据分别见表1~3。

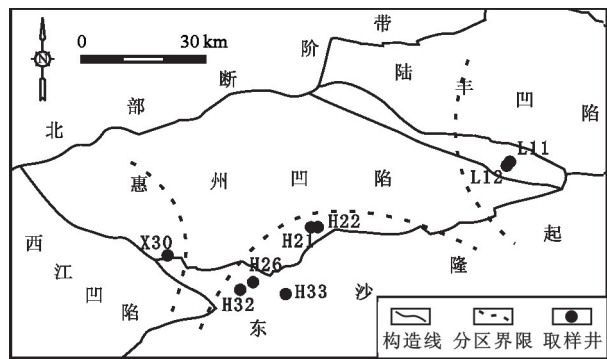


图1 惠州凹陷构造略图及取样井位图

Fig. 1 Simplified tectonic map of Huizhou depression and diagram of sampled well location

3 泥岩地球化学特征

3.1 主量元素特征

从表1中可以看出,珠江组泥岩中的SiO₂和Al₂O₃含量普遍较高,总平均含量分别为69.92%和13.59%,其中SiO₂含量以西部和南部区域较高,平均含量分别为74.00%和74.16%,而东部区域SiO₂含量相对较低,平均值为68.99%。Al₂O₃含量表现为同样的特点,西部和南部区域较高,而东部区域含量偏低。与澳大利亚太古宇页岩(PAAS)主量元素相比,研究区珠江组泥岩富SiO₂,贫Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O、MgO和Na₂O(PAAS数据来自Taylor和McLennan,1985)。SiO₂主要赋存在花岗岩等酸性岩浆岩中,SiO₂富集的程度较高,说明研究区珠江组母岩类型以花岗岩等酸性岩浆岩为主,而Al和K元素常富集于长石和伊利石、高岭石等黏土矿物中^[11],Al₂O₃和K₂O的亏损与这些矿物含量较少有关。值

得注意的是,在东部区域 CaO 特别富集,而在西部区域和南部区域 CaO 则存在亏损;且 MgO 在东部区域中亏损得少,而西部和南部区域中亏损得多,Ca

一般与碳酸盐岩有关、Mg 则主要存在于基性岩中,说明这 3 个区域沉积环境存在差异或母岩性质发生了变化。

表 1 珠江组泥岩主量元素含量及元素比值

Table 1 Major element contents and element ratios of mudstone in Zhujiang formation																	%	
区块	井号	深度 H/km	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	MnO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SiO ₂	K ₂ O/ Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ / TiO ₂	MgO/ CaO *	f _{ClA}	a	b
西部 区域	X30	2.2613	16.21	0.27	6.15	3.02	1.39	0.05	0.57	0.06	0.85	71.41	0.19	19.05	5.15	73.64	0.22	8.58
	X30	2.4396	14.64	0.33	4.69	2.99	1.40	0.03	0.84	0.07	0.82	74.18	0.20	17.83	4.19	77.47	0.23	9.59
	X30	2.6821	12.28	1.47	4.57	2.59	1.33	0.05	0.51	0.08	0.72	76.42	0.21	17.16	2.61	73.26	0.05	10.81
	平均值		14.38	0.69	5.13	2.87	1.37	0.04	0.64	0.07	0.80	74.00	0.20	18.01	3.98	74.79	0.17	9.66
东部 区域	L11	2.3781	8.24	26.36	3.40	1.80	1.45	0.05	0.46	0.08	0.34	57.82	0.22	23.95	3.18	70.47	0.02	17.61
	L11	2.3800	9.69	22.44	4.10	2.19	2.04	0.05	0.56	0.09	0.44	58.40	0.23	22.02	3.66	69.70	0.02	21.07
	L11	2.3810	11.18	18.02	4.00	2.49	2.60	0.05	0.63	0.09	0.51	60.43	0.22	22.07	4.12	70.02	0.02	23.27
	L12	2.5061	13.84	20.46	3.06	2.75	1.70	0.04	0.52	0.06	0.50	57.08	0.20	27.69	3.28	74.70	0.03	12.29
	L12	2.5087	9.51	20.86	2.86	2.19	2.13	0.04	0.64	0.08	0.47	61.23	0.23	20.42	3.31	67.94	0.02	22.37
	平均值		10.49	21.63	3.48	2.28	1.98	0.04	0.56	0.08	0.45	58.99	0.22	23.23	3.51	70.57	0.02	19.32
南部 区域	H21	2.9245	15.42	0.24	5.46	3.65	1.29	0.03	0.56	0.07	0.81	72.47	0.24	19.05	5.36	74.35	0.32	8.37
	H22	2.9350	17.36	0.14	4.60	3.93	1.59	0.03	0.41	0.06	0.78	71.09	0.23	22.16	11.16	76.94	0.51	9.16
	H26	2.3372	17.69	0.21	5.38	3.46	1.57	0.07	0.37	0.12	0.797	0.34	0.20	22.48	7.32	78.81	0.34	8.90
	H26	2.3938	17.57	0.16	4.35	3.61	1.35	0.02	0.50	0.10	0.79	71.55	0.21	22.17	8.42	77.75	0.52	7.68
	H32	2.8440	13.63	0.18	6.19	2.84	0.75	0.03	0.64	0.06	0.74	74.94	0.21	18.33	4.21	75.35	0.38	5.51
	H32	2.8463	11.84	0.09	3.73	2.88	0.62	0.02	0.51	0.05	0.62	79.63	0.24	19.26	6.65	74.10	0.70	5.27
	H32	2.8557	15.58	0.11	5.45	3.42	1.01	0.04	0.56	0.06	0.85	72.93	0.22	18.27	9.60	76.36	0.77	6.47
	H33	2.2380	11.80	0.20	3.96	3.10	0.75	0.02	0.59	0.06	0.71	78.80	0.26	16.56	3.85	71.55	0.30	6.40
	H33	2.2539	15.06	0.26	5.03	3.39	0.79	0.02	0.62	0.05	0.74	74.04	0.23	20.47	3.05	74.42	0.29	5.24
	H33	2.3400	13.16	0.17	5.55	3.37	0.73	0.05	0.36	0.06	0.76	75.79	0.26	17.21	4.31	74.25	0.35	5.57
平均值			14.91	0.18	4.97	3.37	1.05	0.03	0.51	0.07	0.76	74.16	0.23	19.60	6.39	75.39	0.45	6.86
总平均值			13.59	6.22	4.58	2.98	1.36	0.04	0.55	0.07	0.68	69.92	0.22	20.34	5.19	73.95	0.28	10.79
PAAS			18.88	1.29	7.18	3.68	2.19	0.11	1.19	0.16	0.99	62.40						

注:MgO/CaO 中 CaO 为 CaO 或者 Na₂O 的含量(当 CaO 的摩尔数大于 Na₂O 时,取 Na₂O 的值,小于 Na₂O 时,取 CaO 的值);f_{ClA} 为化学蚀变指数;a=1 000×(Sr/Ca);b=100×(MgO/Al₂O₃);PAAS 为澳大利亚太古宇页岩。

3.2 微量元素特征

由表 2 可知珠江组泥岩微量元素区域上变化规律很明显,主要体现在东部的 Sc、V、Cr、Zr、Nb、Ba、Th 及 U 等元素其平均含量相对较低,而 Sr 元素含量相对较高。与大陆上地壳微量元素值相比,研究区珠江组泥岩微量元素中亲石元素 Ba 含量较低,但高于下地壳丰度值。过渡元素 Cr 含量略高于上地壳丰度值,而远远低于下地壳丰度值,而 Cr 通常富集于基性和超基性岩石中,说明研究区相对上地壳而言也存在基性和超基性岩石。不相容元素 Th 含量高于上地壳丰度值,远远高于下地壳丰度值,而 Th 常富集在中酸性岩石中,说明研究区以中酸性岩石为主。高强场元素 Zr、Hf、Nb 含量在东部接近下地壳丰度、远低于上地壳丰度值;而在西部和南部则相反,其含量接近上地壳丰度、远高于下地壳丰度值。低强场元素 Rb、Th、U 含量略高于上地壳丰度或与其相当,远高于下地壳丰度值;而 Sr 含量在东部远高于上地壳丰度值,在西部和南部则远低于下地壳丰度值,说明东部和西部、南部沉积环境存在差

异或母岩性质不同。

3.3 稀土元素特征

从表 3 可以看出,研究区泥岩的稀土元素丰度变化较大,最大值与最小值相差悬殊,反映了母岩源区具有多源性的特点,但是在不同区域上平面规律很明显。主要表现在南部的 ΣREE 相对最大,其平均值为 212.42×10⁻⁶;而西部区域的 ΣREE 次之,其平均值为 183.7×10⁻⁶;东部的 ΣREE 相对较小,其平均值为 134.89×10⁻⁶,说明研究区这 3 个区域的沉积物可能来自不同的物源区或者遭受了不同的分异作用。

经球粒陨石标准化后,各样品数据除分异程度不一样外,各区域稀土元素的分布模式相似(图 2),均表现为轻稀土元素富集,重稀土元素分布平坦, Eu 显著负异常。指示轻重稀土元素分异程度的 (La/Yb)_N 为 8.3~11.69,各区域平均值除南部略低于 PAAS 的值(9.2)外,西部和东部平均值都大于 PAAS 值,且东部 (La/Yb)_N 的平均值为 11.31;指示轻稀土元素分异程度的 (La/Sm)_N 为 3.54~4.62,

变化范围相对较小,且平均值都在 4 左右;指示重稀土元素分异程度的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 1.4 ~ 2.1,东部平均值相对较大,为 2.01,而西部和南部平均值都约为 1.6;Eu 负异常在东部和西部相对高点,其平均值分别为 0.61 和 0.6,而在南部平均值相对低点,整体都略低于 PAAS 的 Eu 异常(0.66)。

表 2 珠江组泥岩微量元素含量

Table 2 Trace element contents of mudstone in Zhujiang formation

10⁻⁶

区块	井号	深度 H/km	Sc	V	Cr	Co	Cu	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U	V/Cr	Sr/Ba
西部区域	X30	2.2613	12.37	105.49	70.78	14.10	30.38	164.09	60.56	139.19	18.60	393.67	5.25	1.82	18.59	3.77	1.49	0.15
	X30	2.4396	11.12	91.38	69.20	12.10	69.07	144.99	75.50	149.09	17.58	361.44	5.81	1.73	18.37	3.81	1.32	0.21
	X30	2.6821	9.37	78.41	55.47	10.17	24.37	134.94	73.12	173.07	15.03	296.13	6.46	1.43	15.20	3.54	1.41	0.25
	平均值		10.95	91.76	65.15	12.12	41.27	148.01	69.73	153.78	17.07	350.41	5.84	1.66	17.39	3.71	1.41	0.20
东部区域	L11	2.3781	6.01	44.91	37.84	6.97	16.49	81.42	561.69	64.95	8.03	174.25	2.43	0.73	10.01	2.02	1.19	3.22
	L11	2.3800	7.30	53.38	47.43	8.59	15.58	95.31	488.28	77.51	9.66	188.88	2.92	0.84	10.82	2.12	1.13	2.59
	L11	2.3810	8.27	60.51	55.62	8.55	11.83	109.85	430.20	83.07	11.06	218.40	3.20	0.95	12.39	2.54	1.09	1.97
	L12	2.5061	10.51	80.79	58.33	8.86	17.19	142.51	591.64	92.38	12.94	282.81	3.47	1.52	19.51	3.15	1.38	2.09
	L12	2.5087	8.32	58.52	53.90	8.88	62.48	108.37	512.51	91.28	12.12	233.90	3.44	1.23	12.68	2.55	1.09	2.19
	平均值		8.08	59.62	50.63	8.37	24.71	107.49	516.86	81.84	10.76	219.65	3.09	1.05	13.08	2.48	1.17	2.41
南部区域	H21	2.9245	11.79	99.27	68.24	8.79	27.16	173.19	77.32	147.63	17.38	351.57	5.63	1.59	20.29	4.56	1.45	0.22
	H22	2.9350	15.30	124.83	85.02	12.31	59.97	223.47	73.12	162.41	19.37	398.08	6.04	1.82	24.46	4.99	1.47	0.18
	H26	2.3372	14.18	117.86	74.06	14.13	37.00	180.33	73.77	133.23	16.60	349.49	5.01	1.54	22.32	4.22	1.59	0.21
	H26	2.3938	13.38	112.57	73.62	8.29	39.55	181.20	83.18	125.36	17.81	370.68	4.56	1.67	23.12	4.07	1.53	0.22
	H32	2.8440	11.72	93.68	62.86	6.23	25.51	160.85	67.39	203.37	19.28	356.70	7.90	2.22	22.86	5.72	1.49	0.19
	H32	2.8463	9.34	70.38	50.67	4.22	16.80	154.60	65.47	197.49	15.56	347.57	7.93	1.56	21.48	4.12	1.39	0.19
	H32	2.8557	13.28	117.29	82.74	7.86	27.43	189.82	81.38	219.49	20.86	423.10	8.35	1.98	23.94	5.40	1.42	0.19
	H33	2.2380	9.61	77.25	56.57	6.34	14.71	158.98	59.76	184.82	17.95	474.86	7.18	1.84	18.43	4.31	1.37	0.13
	H33	2.2539	11.63	207.96	91.27	7.70	20.26	181.80	74.67	161.18	19.06	594.10	6.06	1.73	22.21	4.81	2.28	0.13
	H33	2.3400	11.13	101.70	70.09	8.41	30.65	167.68	58.70	157.32	17.62	423.68	5.96	1.70	20.89	6.23	1.45	0.14
	平均值		12.14	112.28	71.51	8.43	29.90	177.19	71.48	169.23	18.15	408.98	6.46	1.76	22.00	4.84	1.54	0.18
	总平均值		10.81	94.23	64.65	9.03	30.36	152.97	194.90	142.38	15.92	346.63	5.42	1.55	18.75	4.00	1.42	0.80
	上地壳		11.00	60.00	35.00	10.00	25.00	112.00	350.0	190.00	25.00	550.00	5.80	2.20	10.70	2.80		
	下地壳		36.00	285.00	235.00	35.00	90.00	5.30	230.0	70.00	6.00	150.00	2.10	0.60	1.06	0.28		

注:上、下地壳丰度引自 Taylor 和 McLennan^[12]。

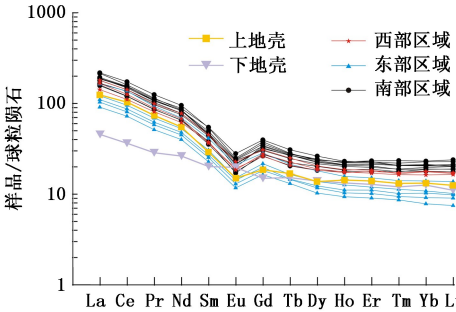


图 2 珠江组泥岩球粒陨石标准化的 REE 配分图

Fig.2 Chondrite-normalized REE distribution patterns for mudstone in Zhujiang formation

3.4 多元统计分析

在上述各主量、微量及稀土元素特征描述介绍的基础上,从样品数据结果出发,利用多元统计分析方法对研究区珠江组泥岩样品的地球化学数据进行统计分析。聚类分析是研究分类问题的一种多元统计方法,其实质是根据样品或变量之间的相似程度或亲疏关系将其逐步分类的方法。不同沉积区的沉积物,由于母岩类型和沉积环境的不同,其地球化学

元素组成必然存在一定差异,因此,利用样品聚类分析可以对同一时期的沉积物是否来自同一个母岩区或同一个沉积环境进行区分。以不同井各深度点 18 个泥岩样品的主量、微量及稀土元素共 39 种元素(数据来自表 1、2、3)进行 Q 型聚类分析,从惠州凹陷珠江组泥岩地球化学元素 Q 型聚类谱图(图 3)上看,所有样品明显地被分为 2 个样品区,即东部区

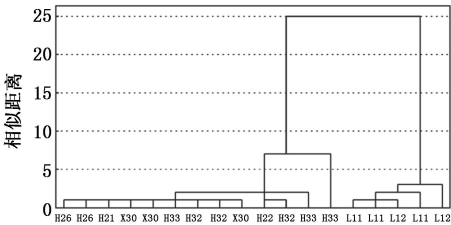


图 3 珠江组泥岩地球化学元素 Q 型聚类谱图

Fig.3 Q-type cluster plots of geochemical elements of mudstone in Huizhou depression

域的 L 井区和西部、南部区域的 X、H 井区,说明东部区域 L 井区与西部、南部区域的 X、H 井区存在一定的差别,可能来自于不同的母岩类型或形成于不

同的沉积环境。

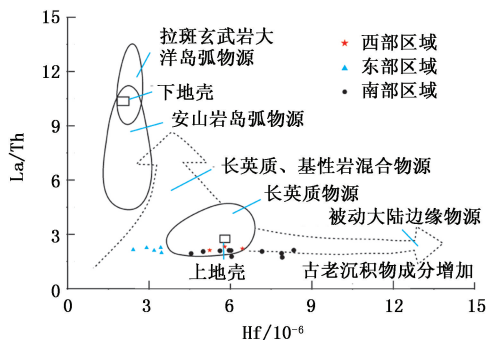
表 3 珠江组泥岩稀土元素含量及元素比值

Table 3 REE contents and element ratios of mudstone in Zhujiang formation														10 ⁻⁶
区块	井号	深度 <i>H</i> /km	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
西部区域	X30	2.261 3	39.58	77.39	8.48	31.86	5.61	1.12	5.38	0.78	4.69	0.98	2.95	0.44
	X30	2.439 6	42.76	87.04	9.45	36.37	6.92	1.32	6.36	0.94	5.21	1.06	3.05	0.43
	X30	2.682 1	33.80	67.98	7.73	28.83	5.77	1.08	5.73	0.85	4.82	1.00	2.82	0.42
	平均值		38.71	77.47	8.55	32.36	6.10	1.17	5.82	0.86	4.91	1.01	2.94	0.43
	井号	深度 <i>H</i> /km	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	δCe	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N		
	X30	2.261 3	3.04	0.44	25.07	182.74	3.75	1.04	0.62	9.34	4.55	1.46		
	X30	2.439 6	3.01	0.43	25.76	204.34	3.98	1.06	0.61	10.20	3.99	1.75		
	X30	2.682 1	2.77	0.42	25.87	164.02	3.25	1.03	0.57	8.74	3.78	1.71		
	平均值		2.94	0.43	25.57	183.70	3.66	1.04	0.60	9.43	4.11	1.64		
	井号	深度 <i>H</i> /km	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	δCe	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N		
东部区域	L11	2.378 1	21.64	44.42	4.90	18.74	3.49	0.68	3.38	0.49	2.62	0.53	1.50	0.22
	L11	2.380 0	24.57	49.57	5.54	21.06	3.89	0.75	3.75	0.54	2.99	0.59	1.69	0.24
	L11	2.381 0	26.18	53.46	5.92	22.49	4.15	0.83	4.07	0.55	3.14	0.63	1.84	0.26
	L12	2.506 1	38.82	84.17	8.88	32.47	6.34	1.22	5.84	0.80	4.61	0.89	2.51	0.36
	L12	2.508 7	28.90	58.64	6.58	24.75	4.69	0.88	4.47	0.62	3.51	0.72	1.99	0.29
	平均值		28.02	58.05	6.36	23.90	4.51	0.87	4.30	0.60	3.37	0.67	1.91	0.27
	井号	深度 <i>H</i> /km	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	δCe	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N		
	L11	2.378 1	1.33	0.19	13.62	104.14	3.93	1.06	0.61	11.63	4.00	2.10		
	L11	2.380 0	1.56	0.23	14.82	116.96	3.99	1.04	0.60	11.29	4.08	1.99		
	L11	2.381 0	1.75	0.25	15.82	125.53	3.99	1.05	0.62	10.73	4.07	1.92		
南部区域	L12	2.506 1	2.38	0.35	21.62	189.66	4.37	1.11	0.61	11.69	3.95	2.03		
	L12	2.508 7	1.85	0.26	17.61	138.13	3.97	1.04	0.59	11.23	3.98	2.00		
	平均值		1.77	0.26	16.70	134.89	4.05	1.06	0.61	11.31	4.02	2.01		
	井号	深度 <i>H</i> /m	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
	H21	2.924 5	42.63	87.01	9.76	36.40	7.02	1.25	6.55	1.01	5.82	1.19	3.55	0.53
	H22	2.935 0	51.73	106.44	11.92	44.59	8.33	1.45	7.80	1.06	5.99	1.20	3.55	0.53
	H26	2.337 2	45.99	94.93	10.71	41.45	8.39	1.63	8.17	1.16	6.69	1.31	3.78	0.53
	H26	2.393 8	45.07	93.77	10.22	39.33	7.19	1.39	6.95	1.01	5.70	1.18	3.40	0.48
	H32	2.844 0	44.90	91.25	10.16	39.05	6.97	1.14	7.07	1.03	6.16	1.27	3.75	0.56
	H32	2.846 3	37.34	73.55	8.16	30.78	5.86	0.99	5.67	0.83	5.15	1.04	3.12	0.45
	H32	2.855 7	51.01	98.50	10.91	39.86	7.12	1.26	6.67	1.00	6.04	1.29	3.87	0.60
	H33	2.238 0	38.05	74.12	8.22	30.57	5.46	1.03	5.45	0.77	4.66	1.01	2.92	0.46
	H33	2.253 9	39.66	83.48	9.24	35.20	6.72	1.37	6.25	0.93	5.50	1.15	3.28	0.48
	H33	2.340 0	44.36	93.06	10.43	39.13	7.58	1.41	7.41	1.05	6.19	1.26	3.66	0.53
	平均值		44.07	89.61	9.97	37.64	7.06	1.29	6.80	0.98	5.79	1.19	3.49	0.52
	井号	深度 <i>H</i> /km	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	δCe	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N		
	H21	2.924 5	3.52	0.54	29.25	206.77	3.54	1.05	0.56	8.68	3.92	1.54		
	H22	2.935 0	3.56	0.54	29.98	248.67	4.14	1.05	0.55	10.43	4.01	1.81		
	H26	2.337 2	3.49	0.52	31.72	228.73	3.54	1.05	0.60	9.44	3.54	1.94		
	H26	2.393 8	3.23	0.48	28.64	219.39	3.86	1.07	0.60	10.02	4.05	1.78		
	H32	2.844 0	3.88	0.58	32.62	217.77	3.40	1.05	0.50	8.30	4.16	1.51		
	H32	2.846 3	3.20	0.48	26.88	176.64	3.34	1.03	0.53	8.36	4.12	1.46		
	H32	2.855 7	3.95	0.61	33.35	232.69	3.64	1.02	0.56	9.27	4.62	1.40		
	H33	2.238 0	3.05	0.45	25.47	176.20	3.56	1.03	0.58	8.94	4.50	1.48		
	H33	2.253 9	3.36	0.51	26.96	197.13	3.63	1.07	0.65	8.47	3.81	1.54		
	H33	2.340 0	3.62	0.52	29.64	220.21	3.64	1.06	0.57	8.79	3.78	1.69		
	平均值		3.49	0.52	29.45	212.42	3.63	1.05	0.57	9.07	4.05	1.61		

4 地质意义探讨

4.1 物源区性质分析

稀土元素、Th、Sc 和高场强元素在水中停留时间短,几乎全部进入了沉积物中,这些相容和不相容元素的比例能够区分碎屑岩中长英质、镁铁质来源的成分^[13]。相对于基性岩,长英质岩石中 La 和 Th 含量高,而 Co、Sc 和 Cr 则富集于基性岩中。因此,利用上述元素的相关特征,Floy and Leveridge 提出了利用 La/Th-Hf 的源岩属性判别图解^[14](图 4



(a)),而 Gu 等^[15]提出了利用 Co/Th-La/Sc 的源岩属性判别图解(图 4(b)),从而对碎屑岩样品的原始属性进行分析。从图 4(a)中可以看出,东部区域的泥岩样品主要落在长英质和基性岩的混合物源区,西部区域泥岩落在长英质物源区,南部区域泥岩落在长英质物源区和被动大陆边缘物源区。从图 4(b)中可以看出,研究区珠江组的泥岩样品主要落在长英质火山岩和花岗岩之间,且靠近长英质火山岩的区域,反映源岩以长英质岩为主,可能有花岗岩混入的特点。

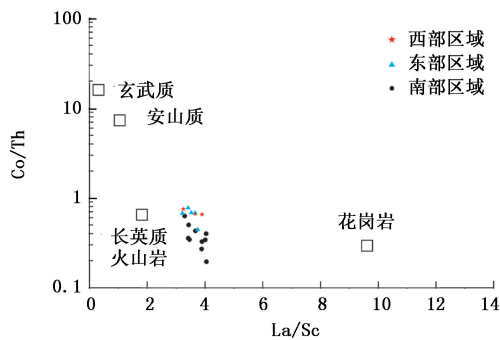


图 4 珠江组泥岩物源属性判别图

Fig. 4 Discrimination diagram for provenance attribute of mudstone in Zhujiang formation

在指示盆地沉积源区性质的指标中,稀土元素特征是很好的标志,其中稀土元素分布模式是最可靠的指标。相关研究表明,上地壳组分具有轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)含量相对稳定和明显的负 Eu 异常的特点^[16]。珠江组不同区域的泥岩经球粒陨石标准化后,稀土元素分布表现为富轻稀土元素、重稀土元素含量均一、Eu 元素具明显的负异常(图 2),这与上地壳中稀土元素的分布形态相似,说明研究区沉积岩的原始物质来自上地壳,但可能遭受了一定的分异作用。

K_2O/Al_2O_3 值可以用来确定泥岩源区岩石的成分,在碱性长石中, K_2O/Al_2O_3 值为 0.4 ~ 1.0,在伊利石中约为 0.3,在其他黏土矿物中接近于 0^[17]。研究区珠江组泥岩的 K_2O/Al_2O_3 值在 0.19 ~ 0.26 之间,其平均值为 0.22,表明母岩中碱性长石的含量较低。Girty 等^[18]认为,沉积物中 Al_2O_3/TiO_2 值小于 14 时,沉积物物源可能来源于镁铁质岩石,而 Al_2O_3/TiO_2 值在 19 ~ 28 时,物源可能来源于花岗闪长质和英云闪长质(或安山质和流纹质)岩石。研究区珠江组泥岩的 Al_2O_3/TiO_2 值为 16.56 ~ 27.67,东部和南部的值相对较高,其平均值分别为 23.23 和 19.6,西部的值相对较小,其平均值为 18.01,表明其物源主要来源于长英质岩石,且西部可能有少

量的镁铁质岩石。

4.2 构造背景判别

Roser 和 Korsch^[19]根据对世界不同地区已知构造背景的古砂岩、泥岩及现代砂泥岩沉积物的主量元素特征的分析,认为主量元素的 K_2O/Na_2O 比值是反映构造环境的最有效的指标,提出了 SiO_2-K_2O/Na_2O 构造背景判别图解。惠州凹陷东部区域的珠江组泥岩样品点落在活动大陆边缘区域,而西部和南部区域样品点都落在被动大陆边缘区域(图 5(a)),表明研究区东部区域珠江组时期的物源区具有活动大陆边缘的构造背景,西部和南部区域珠江组时期的物源区具有被动大陆边缘的构造背景。

陆源碎屑中的微量元素及稀土元素与主量元素相比,稳定性相对较好,特别是 La、Th、Sc 等元素,在风化搬运和沉积过程中很少受其他地质作用的影响,因此,陆源碎屑微量元素特征可以研究源区类型及其大地构造背景。鉴于此,Bhatia 和 Crook^[20]通过对东澳大利亚 5 个已知构造背景的古杂砂岩的微量元素的地球化学特征研究,提出了非迁移性微量元素 La-Th-Sc 组成的构造背景判别图解。应用 Bhatia 的构造背景判别图解(图 5(b)),研究区珠江组泥岩样品主要落在大陆边缘区域内,属大陆边缘环境。

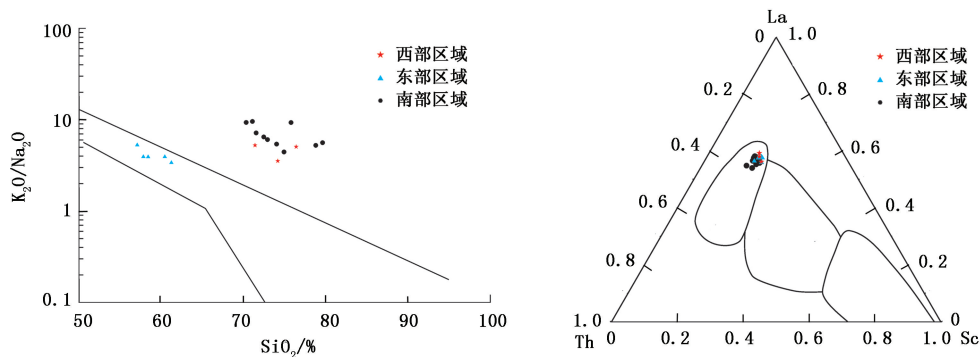


图5 珠江组碎屑岩构造背景判别图

Fig.5 Discrimination diagram for tectonic setting of mudstone in Zhujiang formation

稀土元素特征常被用来判断现代和古沉积物的构造背景或物源区性质。Murry^[21]对加利福尼亚海岸圣弗兰西斯科湾侏罗纪和白垩纪的燧石和页岩的研究表明,Ce异常与沉积盆地的构造背景有关,以北美页岩作为标准化值,距洋脊顶400 km之内的扩张脊附近,有明显的Ce负异常, δCe 为0.29;大洋盆地中等Ce负异常, δCe 为0.55;大陆边缘区(陆块1000 km之内)的Ce异常消失或为正异常, δCe 为0.90~1.30。惠州凹陷珠江组各区域泥岩的 δCe 值(以北美页岩作为标准化值)均为1.02~1.11,且西部、东部和南部区域其平均值分别为1.04、1.06和1.05,属大陆边缘区。

4.3 沉积环境分析

不同成因的泥岩在物质来源、沉积环境及物理化学条件等方面存在差异,故不同环境的泥岩岩石化学成分必然有所不同,其相关化学特征值及比值也会存在明显的差异^[22]。古水深、古盐度及古气候是古沉积环境的一个很好的体现,因此利用元素地球化学特征比值对它们进行研究对于了解古沉积环境具有重要的意义。

(1)古水深。Veizer指出,Sr是沉积相分析的有力工具,其 a 值更能体现沉积相变化的特点^[23]。从表1中可以看出,西部区域中 a 值为0.05~0.23,平均值为0.17;东部区域中为0.02~0.03,平均值为0.02;南部区域中为0.29~0.77,平均值为0.45。 a 值具有随着沉积环境水体的加深、其值显著变大的规律,说明研究区珠江组沉积时期南部水体较深,西部和东部区域水体相对较浅。

大量研究表明,V元素在还原条件下易于富集,而Cr元素在氧化条件下易于富集,因此在氧化条件下V/Cr比值低,反之在还原环境中比值较高,从而判断沉积环境水体的深浅^[24]。从表2中可以看出,西部区域中V/Cr比值为1.32~1.49,平均值为

1.41;东部区域中V/Cr比值为1.09~1.38,平均值为1.17;南部区域中V/Cr比值为1.37~2.28,平均值为1.54;说明研究区珠江组时期南部区域处于还原条件,水体较深,西部区域水体次深,而东部区域处于氧化条件,水体相对较浅。

(2)古盐度。根据沉积岩层中MgO的亲海性和 Al_2O_3 的亲陆特征,可以建立镁铝比值 b 来判断水体盐度的咸淡^[25](表1)。沉积环境由淡水向海水过渡时, b 值会随着水体盐度的增大而增加,淡水沉积环境 $b<1$,陆海过渡性沉积环境 b 为1~10,海水沉积环境 b 为10~500,陆表海环境(或泻湖碳酸盐岩沉积环境) $b>500$ 。由表1可知,研究区西部和南部区域珠江组的 b 值绝大多数在1~10之间,仅个别在10~500之间,说明它们属陆海过渡沉积环境。东部区域珠江组 b 值相对较高,其平均值为19.32,这可能与东部区域当时的古地理环境有关。由于珠江口盆地海水是从西南部进入惠州凹陷的^[26],故珠江组沉积时期惠州凹陷东部为一个相对半封闭的环境,盐度相对较高,表现为海水沉积环境。

元素Sr/Ba比是分辨陆相和海相环境最常用的一个指标^[27],研究表明,Sr元素在河水中的含量为 7×10^{-8} $\mu g/g$,而在海水里浓度增大为 7.6×10^{-6} $\mu g/g$,相反,Ba元素在河水含量为 2×10^{-8} $\mu g/g$,在海水中略有减小,为 1.4×10^{-8} $\mu g/g$,因此Sr/Ba值可以用作盐度标志,值越大反映的古盐度越高。从表2来看,研究区西部和南部区域Sr/Ba值相对较小,其平均值分别为0.2和0.18;而东部区域Sr/Ba值较大,平均值为2.41;说明研究区珠江组时期东部区域盐度较高,而西部和南部盐度较低。

(3)古气候。在风化过程中,比较活泼的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 很容易被淋滤出来,而 Al^{3+} 、 Ti^{4+} 等不活泼元素则在风化产物中富集,鉴于此,Nesbitt^[28]提出用 f_{CIA} 指数来确定物源区的化学风化程度,该指数是目

前被广泛应用于确定物源区风化特征的化学指标,且化学蚀变指数越大,说明母岩化学风化程度越高。从表1中可以看出,惠州凹陷珠江组泥岩的 f_{CIA} 指数为67.94~78.81间,其中以东部区域指数相对较低,平均值为70.57;而西部和南部区域相对较高,其平均值分别为74.79和75.39;说明研究区珠江组时期整体化学风化相对较强,且西部和南部的风化程度较东部高,同时也可以推断珠江组沉积时期研究区处于湿热的气候条件,但是西部和南部区域湿热程度较高、东部区域湿热程度较低。

MgO/CaO值是气候变化的良好指示剂,高值指示干热气候,低值指示潮湿气候,但在碱层层位时则相反。由于碱层的成分是碳钠盐岩,当钠盐开始沉淀时,水介质中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 由于充分沉淀浓度已很低,况且 Mg^{2+} 的活动性比 Ca^{2+} 差得多,二者相比,前者几乎消耗殆尽,故岩层中MgO/CaO值表现为低值或极低值^[4]。由于泥岩中沉淀有大量的硅酸盐矿物,而硅酸盐矿物中CaO与 Na_2O 通常以1:1的比例存在,其余的CaO可能来自母岩的碳酸盐岩岩屑或者后期的成岩作用,所以McLennan^[29]认为:当CaO的摩尔数大于 Na_2O 时,其值可以取 Na_2O 的值;而当CaO的摩尔数小于 Na_2O 时,就取CaO的值。从表1中可以看出,研究区珠江组 K_2O 含量较高,平均值达到了3.0%,说明研究层位都属于碱层层位,因此MgO/CaO高值指示潮湿气候,而低值指示干热气候。如表1所示,在惠州凹陷珠江组MgO/CaO值整体较高,总平均值为5.19,说明研究区珠江组沉积时期为相对潮湿的气候条件,而东部区域和西部区域MgO/CaO值相对较低,南部区域MgO/CaO值略微高些,反映了研究区珠江组沉积时期各区域气候条件存在少许差异。

5 结 论

(1)惠州凹陷珠江组各区域泥岩主量元素、微量元素及稀土元素都存在一定的差异,且多元统计分析结果显示各区域元素特征差别较大,说明研究区珠江组时期沉积物物源复杂,其中东部区域为长英质和基性岩的混合物源,西部区域为长英质物源,南部区域为长英质物源和被动大陆边缘物源。

(2)主量元素比值和非迁移性微量元素图解表明,研究区珠江组源区主要由长英质岩石组成,稀土元素分布模式与上地壳相似,轻稀土元素富集,重稀土元素均一,Eu负异常,说明源岩来自上地壳并经受了一定分异作用的影响。

(3)惠州凹陷珠江组泥岩地球化学特征揭示东部区域珠江组时期的物源区具有活动大陆边缘的构造背景,西部和南部区域珠江组时期的物源区具有被动大陆边缘的构造背景。

(4)据锶钙比值 $1000 \times (Sr/Ca)$ 和V/Cr值分析,珠江组时期南部区域处于还原条件,水体较深,西部区域水体次深,而东部区域处于氧化条件,水体相对较浅;据镁铝比值 $100 \times (MgO/Al_2O_3)$ 和Sr/Ba值分析得出,珠江组时期东部区域盐度较高,而西部和南部盐度较低;据 f_{CIA} 值和MgO/CaO值的分析,珠江组沉积时期研究区处于湿热的气候条件,其中西部和南部区域湿热程度较高、东部区域湿热程度较低。

参考文献:

- [1] 张金亮,张鑫.塔里木盆地志留系古海洋沉积环境的元素地球化学特征[J].中国海洋大学学报,2006,36(2):200-208.
ZHANG Jin-liang, ZHANG Xin. The element geochemical features of ancient oceanic sedimentary environment s in the Silurian period in the Tarim Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006,36(2):200-208.
- [2] 操应长,王艳忠,徐涛玉,等.特征元素比值在沉积物物源分析中的应用:以东营凹陷王58井区沙四上亚段研究为例[J].沉积学报,2007,25(2):230-238.
CAO Ying-chang, WANG Yan-zhong, XU Tao-yu, et al. Application of the ratio of characteristic elements in provenance analysis: a case study from the upper part of the fourth member of the Shahejie Fm in the W58 area, Dongying depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007,25(2):230-238.
- [3] BOULTER C A, HOPKINSON L, INESON M G, et al. Provenance and geochemistry of sedimentary components in the Volcano-Sedimentary Complex, Iberian Pyrite Belt: discrimination between the sill—sediment-complex and volcanic-pile models [J]. Journal of Geological Society, 2004,161:103-115.
- [4] 宋明水.东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J].矿物岩石,2005,25(1):67-73.
SONG Ming-shui. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of southern ramp, Dongying depression[J]. J Mineral Petrol, 2005,25(1):67-73.
- [5] 陈长民,施和生,许仕策,等.珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M].北京:科学出版社,2003.
- [6] 崔莎莎,何家雄,陈胜红,等.珠江口盆地发育演化特征及其油气成藏地质条件[J].天然气地球科学,2009,20(3):384-391.

- CUI Sha-sha, HE Jia-xiong, CHEN Sheng-hong, et al. Development characteristics of Pearl River Mouth Basin and its geological conditions for oil and gas accumulation [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2009, 20(3): 384-391.
- [7] 李潇雨, 郑荣才, 魏钦廉, 等. 珠江口盆地惠州凹陷 HZ25-3-2 井珠江组沉积相特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2007, 34(3): 251-258.
- LI Xiao-yu, ZHENG Rong-cai, WEI Qin-lian, et al. Characters of the sedimentary facies of Paleogene Zhujiang formation in Huizhou depression, Zhujiangkou Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2007, 34(3): 251-258.
- [8] 梁杏, 王旭升, 张人权, 等. 珠江口盆地东部第三纪沉积环境与古地下水流模式[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(5): 542-546.
- LIANG Xing, WANG Xu-sheng, ZHANG Ren-quan, et al. Tertiary sedimentary environments and palaeo-groundwater flow patterns in eastern Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(5): 542-546.
- [9] 李胜利, 于兴河, 张志杰. 珠江口盆地西江 30-2 油田新近系中新统沉积微相及层序地层分析[J]. 古地理学报, 2004, 6(1): 30-40.
- LI Sheng-li, YU Xing-he, ZHANG Zhi-jie, et al. Sedimentary microfacies and sequence stratigraphy of the Miocene of Neogene in Xijiang 30-2 Oilfield, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 30-40.
- [10] 余烨, 张昌民, 张尚锋, 等. 惠州凹陷新近系珠江组物源方向研究[J]. 断块油气田, 2012, 19(1): 17-21.
- YU Ye, ZHANG Chang-min, ZHANG Shang-feng, et al. Research on source direction of Neogene Zhujiang formation in Huizhou depression [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2012, 19(1): 17-21.
- [11] 李双建, 王清晨. 库车坳陷第三系泥岩地球化学特征及其对构造背景和物源属性的指示[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 25(3): 221-229.
- LI Shuang-jian, WANG Qing-chen. Geochemical characteristics of Tertiary mudstones in Kuqa depression and their implications to tectonic setting and provenance attribute [J]. *Acta Petrologica ET Mineralogica*, 2006, 25(3): 221-229.
- [12] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 117-140.
- [13] 白宪洲, 何明友, 王玉婷, 等. 四川若尔盖地区西康群地球化学特征及其物源区和古风化程度分析[J]. 现代地质, 2010, 24(1): 151-157.
- BAI Xian-zhou, HE Ming-you, WANG Yu-ting, et al. On the geochemical characteristics, provenance and palaeoweathering degree of Triassic Xikang Group in Ruergai Area in Sichuan Province [J]. *Geoscience*, 2010, 24(1): 151-157.
- [14] FLOYD P A, LEVERIDGE B E. Tectonic environment of Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones [J]. *Geological Society of London Journal*, 1987, 144: 531-542.
- [15] GU X X, LIU J M, ZHENG M H, et al. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72: 393-407.
- [16] MCLENNAN S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1989, 21: 169-200.
- [17] WRONKIEWICZ D J, CONDIE K C. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance [M]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 2401-2416.
- [18] Girty G H, RIDGE D L, KNAACK C. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 107-118.
- [19] ROSER B P and KORSCH R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio [J]. *Journal of Geology*, 1986, 94: 635-650.
- [20] BHATIA M R and CROOK K A W. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1986, 92: 181-193.
- [21] MURRY R W. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18: 268-271.
- [22] 冯胜斌, 周洪瑞, 燕长海, 等. 东秦岭二郎坪群硅质岩地球化学特征及其沉积环境意义[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 675-682.
- FENG Sheng-bin, ZHOU Hong-rui, YAN Chang-hai, et al. The geochemical characteristics of cherts of Erlangping group in East Qinling and their sedimentary environment importance [J]. *Geoscience*, 2007, 21(4): 675-682.
- [23] VEIZER J, DEMOVIC R. Strontium as a tool for facies

- analysis[J]. *Sedimentary petrology*, 1974,44(1):93-115.
- [24] 杨振宇,沈渭洲,郑连弟. 广西来宾蓬莱滩二叠纪瓜德鲁普统:乐平统界线剖面元素和同位素地球化学研究及地质意义[J]. *地质学报*,2009,83(1):1-15.
YANG Zhen-yu, SHEN Wei-zhou, ZHENG Lian-di. Elements and isotopic geochemistry of Guadalupian; Lopingian Boundary profile at the Penglaitan section of Laibin, Guangxi Province, and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009,83(1):1-15
- [25] 汪凯明,罗顺社. 燕山地区中元古界高于庄组和杨庄组地球化学特征及环境意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*,2009,28(4):356-364.
WANG Kai-ming, LUO Shun-she. Geochemical characteristics and environmental significance of Gaoyuzhuang and Yangzhuang formations in Yanshan region[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2009, 28(4):356-364.
- [26] 杨少坤,黄丽芬,李希宗,等. 珠江口盆地特殊层序地层模式及其对勘探的指导意义[J]. *中国海上油气(地质)*,1996,10(3):137-143.
YANG Shao-kun, HUANG Li-fen, LI Xi-zong, et al. Special sequential stratigraphic pattern in the Pearl River Mouth Basin and its significance to exploration[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1996,10(3):137-143.
- [27] JARVIS I, MURPHY A M, GALE A S. Geochemistry of pelagic and hemipelagic carbonates: criteria for identifying systems tracts and sea-level change[J]. *Journal of Geological Society*, 2001,158:685-696.
- [28] 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.
- [29] MCLENNAN S W. Weathering and global denudation [J]. *Journal of Geology*, 1993,101:295-303.
- (编辑 刘为清)