

文章编号: 1000-0550(2013)03-0440-10

惠州凹陷 HZ21 钻孔珠江组地球化学特征 及其物源指示意义^①

余 焯¹ 张昌民¹ 李少华¹ 施和生² 杜家元^{1,2} 王 莉³

(1. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室 长江大学地球科学学院 武汉 430100;

2. 中国海洋石油(中国)有限公司深圳分公司 广州 510240; 3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田胜利采油厂 山东东营 257061)

摘 要 通过对珠江口盆地惠州凹陷 HZ21 井珠江组碎屑岩的主量元素、微量元素和稀土元素进行综合分析,发现研究区碎屑岩中 MnO、Na₂O、P₂O₅ 和 TiO₂ 含量与 PAAS 中这几种组分的含量相近,但是,与 PAAS 相比,研究区碎屑岩富集 SiO₂, 贫 Al₂O₃、Fe₂O₃、K₂O 和 MgO。泥岩中亲石元素 Ba 的含量略低于上地壳丰度,而远高于下地壳丰度;过渡元素 Cr 的含量略高于上地壳丰度,而远低于下地壳丰度;不相容元素 Th 的含量略高于上地壳丰度值,远远高于下地壳丰度。砂岩中亲石元素 Ba 的含量与上地壳丰度相近,但远高于下地壳丰度;不相容元素 Th 在 NSQ1、NSQ2 层序略低于上地壳丰度值,在 NSQ3、NSQ4 层序中则高于上地壳丰度值。REE 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,且在 NSQ1、NSQ2 中, Eu 异常值大于 PAAS 的 Eu 异常值,而 NSQ3、NSQ4 的 Eu 异常值小于 PAAS 的 Eu 异常值。主量元素比值和非迁移性微量元素图解显示源岩以长英质岩石为主, NSQ1、NSQ2 层序以沉积岩钙质泥岩物源为主,而 NSQ3、NSQ4 层序为花岗岩、碱性玄武岩和沉积岩钙质泥岩混合物源的特点。从 SiO₂-K₂O/Na₂O-La-Th-Sc 判别图及 Ce 异常值的分析认为,源区的构造背景具有被动大陆边缘的特征。Al₂O₃/Na₂O 比值及化学蚀变指数(CIA)反映了该地区整体处于湿热气候条件,但 NSQ1、NSQ2 层序湿热程度较高,风化程度较强,而 NSQ3、NSQ4 层序湿热程度较低,风化程度较弱。

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

第一作者简介 余焯 男 1983 年出生 博士研究生 储层沉积学 E-mail: yuye1983@163.com

通讯作者 张昌民 E-mail: zcm@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P595 **文献标志码** A

近年来,元素地球化学在理论和应用方面取得了迅速发展,成为近代地球化学研究不可缺少的一部分^[1]。沉积物中的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]。因此研究碎屑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,碎屑岩的某些化学成分也可以反映物源区的古风化特征,为古气候的恢复提供地球化学方面的依据。前人对珠江口盆地物源分析及古气候环境做了不少研究,邵磊^[4]、庞雄^[5]通过沉积物地球化学元素分析,认为南海北部地区沉积物成分在渐新世末(23.8 Ma)发生了剧烈的变化,白云凹陷由浅水陆架转变为深水陆坡环境,其沉积物物源由渐新世近源的华南沿海花岗岩为主转变为中新世远源的

华南内陆沉积岩为主。同时,南海地区构造比较复杂,不同学者研究思路、方法及手段的差异,关于南海北部大陆边缘的构造属性和构造演化序列还存在明显的分歧,一些学者认为该边缘具有较强的构造活动和岩浆活动,与被动大陆边缘相对稳定的特点相悖,从而称其为“准被动大陆边缘”^[6]。虽说南海北部地壳的减薄方式、断裂样式及盆地充填序列与经典的大西洋型被动大陆边缘有差别,经历了多期裂隙过程,但是绝大多数学者都认为南海北部属被动大陆边缘环境^[7,8]。对于古气候环境,不同学者也提出了不同观点,唐松等^[9]根据黏土矿物组合特征及其含量变化认为,在 32.8~15.5 Ma 各黏土矿物含量的分配特征代表了相对比较暖湿的气候条件,自 15.5 Ma 来南海处于总体降温的过程,并显示 3 Ma 存在较大规模的降温事件,与底栖有孔虫氧同位素资料反映的气候信息具很好的对比性。而吴国璋^②以古生物孢粉资

①国家“十二五”重大专项(编号:2011ZX05023-002)资助

②吴国璋,番禺地区珠江组与珠海组界线及沉积环境.中海油深圳分公司内部研究报告,2004.

收稿日期:2012-04-10;收修改稿日期:2012-07-13

料作为研究基础,认为珠江口盆地渐新世为比较干凉的气候条件,到中新世则表现为明显的湿热气候条件。在上述针对整个珠江口盆地大的物源特征及古气候特点研究成果的基础上,为了进一步详细了解惠州凹陷新近纪珠江组(23.8~16.5 Ma)地球化学特征及其物源的演化特点,本文根据 HZ21 钻井碎屑岩的主、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了探讨。

1 地质背景

珠江口盆地是我国南海北部最大的中生代沉积盆地,它是在拉张断陷基础上发育起来的大陆边缘断陷盆地,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五个构造单元,各个构造单元又细分为若干个凹陷和低隆起^[10]。惠州凹陷次级构造单元位于北部拗陷带(珠一拗陷)中部,是南海东部海域最富烃的凹陷之一,其新近纪珠江组是该区油气勘探的主要目的层(图1)。通过惠州凹陷沉积区的沉积记录的研究表明,珠江组沉积时期主要发育了一套三角洲—滨岸沉积体系,三角洲沉积体系主要发育在凹陷西北部和东部,而滨岸沉积体系主要发育在凹陷南部^[11,12]。

HZ21 井位于惠州凹陷南部靠东沙隆起北坡附近,根据地震反射界面对比追踪及单井岩性特征,其珠江组自下而上划分为5个三级层序(图1)。其中, NSQ1 层序以厚层中—细粒石英砂岩为主,岩层中可

见平行层理、冲洗交错层理,含海绿石、云母,分选较好到中等,属前滨临滨亚相。NSQ2 层序下部为砂岩和泥岩互层,见沙纹层理、交错层理,含介壳类化石、藻团块,上部以泥岩、粉砂质泥岩为主,属临滨—滨外陆棚亚相。NSQ3 层序以泥岩、粉砂质泥岩及泥质粉砂岩为主,岩层中可见水平层理,含海绿石,可见生物钻孔及生物扰动,为滨外陆棚沉积。NSQ4 层序为块状层理、水平层理泥岩,见生物钻孔及生物扰动,夹薄层状粉—细砂岩,属滨外陆棚沉积。NSQ5 层序下部由泥岩、粉砂质泥岩及泥质粉砂岩组成,上部为中—厚层状砂岩夹泥岩组成,测井曲线表现为明显的漏斗形,为滨外陆棚—三角洲外前缘沉积。

2 样品及分析

为了详细了解珠江组垂向上的沉积地球化学特征及其物源的演化特征,笔者自下而上在剖面上采集了岩芯样品21件,其中 NSQ1 层序有4件, NSQ2 层序有10件, NSQ3 层序有2件, NSQ4 层序有5件(注: NSQ5 层序未取芯,因此,没做地球化学元素分析)。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, 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

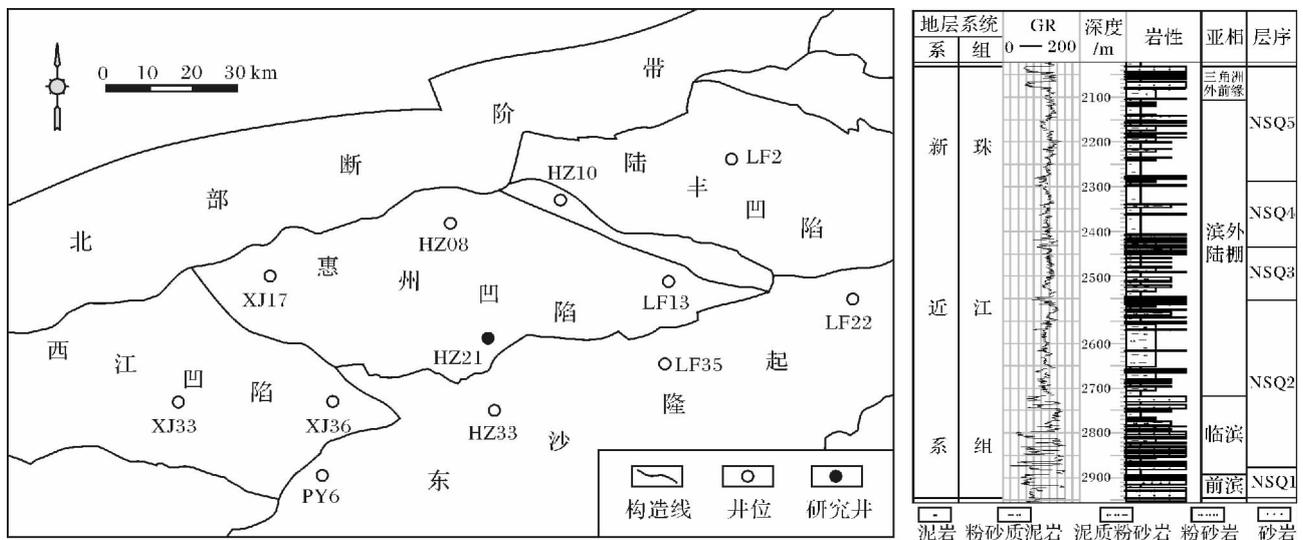


图1 珠江口盆地惠州凹陷构造略图及 HZ21 井珠江组柱状图

Fig.1 Simplified tectonic map of the Huizhou Depression in the Pearl River Mouth Basin and columnar section of the Zhujiang Formation in Well HZ21

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、表2和表3。

3 地球化学特征

3.1 主量元素特征

HZ21井珠江组碎屑岩的主量元素分析结果和相关比值见表1。从表1中可以看出,珠江组碎屑岩中泥岩的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 K_2O 含量相对较高,平均含量分别为73.53%、15.63%、4.54%和3.29%,其中 SiO_2 含量以NSQ1层序较高,平均含量为75.52%, Al_2O_3 含量以NSQ4层序最高,为16.09%,而 Fe_2O_3 则以NSQ2和NSQ4含量较高,分别为4.69%和4.84%。与澳大利亚太古宇页岩(PAAS)主量元素相比,HZ21井珠江组碎屑岩泥岩中富 SiO_2 ,贫 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 和 MgO ,而 MnO 、 Na_2O 、 P_2O_5 和 TiO_2 相差不大(PAAS

数据来自Taylor,1985)。 SiO_2 富集的程度较高,而 SiO_2 主要赋存在花岗岩及酸性岩浆岩中,说明研究区珠江组母岩类型以花岗岩或酸性岩浆岩为主。一般来讲,Al和K元素富集于长石和伊利石、高岭石等黏土矿物中^[13], Al_2O_3 和 K_2O 的亏损与这些矿物含量较少有关。碎屑岩中砂岩的主量元素与泥岩具有类似的特点,同样, SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 K_2O 含量相对较高,平均含量分别为82.92%、6.40%、2.29%和2.29%。值得注意的是,在NSQ1和NSQ2这两个层序砂岩中CaO富集,而在NSQ3和NSQ4这两个层序中砂岩CaO亏损,且MgO在NSQ1和NSQ2中亏损得少,而在NSQ3和NSQ4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NSQ1、NSQ2这两个层序与NSQ3、NSQ4两个层序沉积环境存在差异或母岩性质发生了变化。

表1 珠江组碎屑岩主量元素含量及元素比值(%)

Table 1 Major element contents and element ratios of clastic rock in Zhujiang Formation(%)

层位	样品号	岩性	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	SiO_2	$\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$	CIA	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$
NSQ4	21	泥岩	16.09	0.26	4.84	3.22	1.34	0.03	0.99	0.07	0.93	72.21	0.20	17.24	74.16	16.25
	20	砂岩	7.65	0.33	2.63	2.72	0.33	0.01	0.67	0.04	0.30	85.32	0.36	25.89	62.17	11.42
	19	砂岩	9.58	0.25	3.37	2.68	0.60	0.02	0.92	0.05	0.51	82.01	0.28	18.68	66.21	10.41
	18	砂岩	6.96	0.19	2.55	2.28	0.39	0.01	0.58	0.03	0.35	86.67	0.33	19.85	64.86	12.00
	17	砂岩	6.87	0.16	2.43	2.37	0.36	0.01	0.66	0.04	0.36	86.75	0.34	19.28	63.60	10.41
		砂岩 平均值	7.77	0.23	2.75	2.51	0.42	0.01	0.71	0.04	0.38	85.19	0.33	20.93	64.21	11.06
NSQ3	16	砂岩	7.46	0.19	2.23	2.30	0.48	0.01	0.94	0.04	0.50	85.85	0.31	14.94	63.00	7.94
	15	砂岩	11.13	0.20	3.97	2.63	0.89	0.03	1.36	0.07	0.66	79.06	0.24	16.78	67.11	8.18
		砂岩 平均值	9.29	0.20	3.10	2.46	0.69	0.02	1.15	0.06	0.58	82.46	0.27	15.86	65.06	8.06
NSQ2	14	泥岩	18.29	0.19	5.17	3.67	1.48	0.05	0.40	0.07	0.84	69.84	0.20	21.66	78.61	45.73
	13	泥岩	16.12	0.37	5.12	3.29	1.66	0.07	0.46	0.11	0.90	71.91	0.20	17.88	76.31	35.04
	12	泥岩	12.45	0.12	2.83	2.88	0.80	0.01	0.45	0.05	0.76	79.63	0.23	16.31	75.26	27.67
	11	泥岩	16.30	0.40	4.70	3.23	1.16	0.03	0.56	0.07	0.75	72.80	0.20	21.68	75.97	29.11
	10	砂岩	3.40	8.84	2.45	1.43	4.88	0.09	0.15	0.03	0.08	78.66	0.42	44.44	62.49	22.67
	9	砂岩	5.41	0.11	1.45	2.19	0.12	0.01	0.36	0.01	0.11	90.22	0.40	48.71	62.97	15.03
	8	泥岩	14.09	0.30	5.98	3.02	1.28	0.05	0.45	0.10	0.82	73.90	0.21	17.18	75.53	31.31
	7	泥岩	17.96	0.30	4.34	3.75	1.66	0.04	0.42	0.08	1.01	70.44	0.21	17.74	77.20	42.76
	6	砂岩	2.91	26.92	0.99	1.07	0.50	0.03	0.18	0.04	0.11	67.26	0.37	27.62	62.46	16.17
	5	砂岩	5.25	0.32	1.58	2.42	0.10	0.01	0.44	0.01	0.14	89.73	0.46	38.52	57.17	11.93
		泥岩 平均值	15.87	0.28	4.69	3.31	1.34	0.04	0.46	0.08	0.85	73.09	0.21	18.74	76.48	35.27
	砂岩 平均值	4.24	9.05	1.62	1.78	1.4	0.04	0.28	0.02	0.11	81.47	0.41	39.82	61.27	16.45	
NSQ1	4	泥岩	11.97	0.28	3.32	2.66	0.65	0.02	0.59	0.09	0.49	79.94	0.22	24.68	73.28	20.29
	3	泥岩	17.36	0.14	4.60	3.93	1.59	0.03	0.41	0.06	0.78	71.09	0.23	22.16	76.94	42.34
	2	砂岩	5.92	3.54	1.48	3.06	1.48	0.02	0.38	0.02	0.10	84.00	0.52	58.08	56.41	15.58
	1	砂岩	4.20	7.16	2.36	2.35	3.89	0.06	0.32	0.04	0.07	79.56	0.56	61.56	53.93	13.13
		泥岩 平均值	14.67	0.21	3.96	3.30	1.12	0.03	0.5	0.08	0.64	75.52	0.23	23.42	75.11	31.31
	砂岩 平均值	5.06	5.35	1.92	2.71	2.69	0.04	0.35	0.03	0.09	81.78	0.54	59.82	55.17	14.35	
	PAAS	18.88	1.29	7.18	3.68	2.19	0.11	1.19	0.16	0.99	62.40					

注: CIA 为化学蚀变指数; PAAS 为澳大利亚太古宇页岩。

3.2 微量元素特征

惠州凹陷 HZ21 井珠江组碎屑岩的微量元素分析结果见表 2。由表 2 可知, 珠江组碎屑岩泥岩中微量元素纵向上变化规律不是很明显, 但是还是存在少许的区别, 特别是 NSQ1 层序, V、Cr、Co、Rb、Sr、Zr 及 Ba 等元素其平均含量相对较低。与大陆上地壳微量元素值相比, HZ21 井珠江组碎屑岩泥岩微量元素中亲石元素 Ba 略低, 而远远高于下地壳丰度值; 过渡元素 Cr 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, 说明研究区沉积物母岩类型中有基性和超基性岩石混入的特点; 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, 说明研究区沉积岩母岩类型以中酸性岩石为主; 高强度场元素 Zr、Hf、Nb、Ta 略低于上地壳丰度值或相当, 远高于下地壳丰度值; 低强度场元素 Rb、Ba、Th、U 略高于上地

壳丰度或相当, 远高于下地壳丰度值, 而 Sr 则相反, 略低于下地壳丰度值, 远低于上地壳丰度值, 这可能与 Sr 离子半径相对较小, 容易以游离态形式被地表水或地下水带走有关。而珠江组碎屑岩砂岩中微量元素纵向上变化规律相对明显些, 主要表现为 V、Cr、Co、Rb、Zr 及 Hf 等元素在 NSQ1、NSQ2 层序中的平均值明显比 NSQ3、NSQ4 两层序的平均值低。与大陆上地壳微量元素相比, HZ21 井珠江组碎屑岩砂岩微量元素中亲石元素 Ba 的含量与上地壳丰度相近, 但远高于下地壳丰度值; 不相容元素 Th 在 NSQ1、NSQ2 层序中略低于上地壳丰度值, 在 NSQ3、NSQ4 层序中则相对高于上地壳丰度值, 而 Th 常富集在中酸性岩石中, 说明研究区在 NSQ3、NSQ4 层序中沉积物母岩类型以中酸性岩石为主, 在 NSQ1、NSQ2 层序中则可能混杂有其它类型的沉积物母岩。

表 2 珠江组碎屑岩微量元素含量(μg/g)

Table 2 Trace element contents of clastic rock in Zhujiang Formation(μg/g)

层位	样品号	岩性	Sc	V	Cr	Co	Cu	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Th	U
NSQ4	21	泥岩	14.98	135.94	101.65	10.69	38.18	202.11	144.73	213.30	24.86	557.04	7.77	2.19	25.07	5.33
	20	砂岩	3.97	59.37	44.39	3.58	11.52	166.61	99.00	83.32	9.56	432.78	3.14	0.92	12.28	4.19
	19	砂岩	7.59	64.99	56.07	5.21	12.60	151.53	105.45	247.70	15.18	440.14	9.20	1.36	17.89	3.94
	18	砂岩	4.45	51.80	40.77	3.93	17.15	132.43	77.44	112.89	12.05	781.86	4.49	1.10	9.84	3.88
	17	砂岩	4.90	41.45	29.49	4.40	9.73	130.92	71.62	210.85	12.28	411.68	8.29	1.29	17.93	3.93
		砂岩平均值	5.23	54.4	42.68	4.28	12.75	145.37	88.38	163.69	12.27	516.62	6.28	1.17	14.49	3.99
	NSQ3	16	砂岩	5.34	40.32	48.17	6.07	8.32	121.34	95.51	278.51	15.32	471.30	10.62	1.44	38.49
15		砂岩	9.61	77.27	71.22	8.89	14.58	146.96	130.49	315.29	19.86	595.34	11.97	1.71	19.90	4.15
		砂岩平均值	7.48	58.79	59.70	7.48	11.45	134.15	113.00	296.90	17.59	533.32	11.29	1.57	29.19	5.22
NSQ2	14	泥岩	17.67	156.13	103.02	16.47	55.52	247.08	107.02	197.56	25.20	472.10	7.35	2.40	32.14	7.57
	13	泥岩	16.65	147.24	96.73	29.79	42.23	217.58	111.72	228.22	23.69	426.50	8.75	2.17	27.70	5.56
	12	泥岩	13.02	110.46	81.49	8.62	20.68	199.95	89.36	359.75	25.10	445.04	14.06	2.46	28.52	6.34
	11	泥岩	15.30	128.82	91.61	12.69	33.22	234.79	134.41	252.16	24.96	526.37	10.10	2.39	31.30	5.84
	10	砂岩	2.30	45.77	44.49	3.65	10.02	94.31	147.86	32.82	4.63	460.48	1.54	0.55	6.67	1.17
	9	砂岩	2.95	31.77	29.04	4.17	10.86	150.26	51.99	75.11	5.42	707.03	3.17	0.66	7.73	1.55
	8	泥岩	17.40	139.43	96.75	26.23	43.45	205.34	104.62	224.64	23.12	421.78	8.90	2.18	30.45	6.34
	7	泥岩	14.80	137.72	95.03	13.49	32.78	200.51	99.59	199.18	22.30	376.76	7.40	3.96	25.68	4.71
	6	砂岩	1.72	18.20	31.97	3.62	3.03	50.68	426.75	25.27	3.20	126.81	0.95	0.69	16.13	1.63
	5	砂岩	1.27	11.25	18.15	1.63	20.26	93.87	54.19	25.40	4.28	996.91	1.18	0.54	3.87	1.19
		泥岩平均值	15.81	136.63	94.11	17.88	37.98	217.54	107.79	243.59	24.06	444.76	9.43	2.59	29.30	6.06
	砂岩平均值	2.06	26.75	30.91	3.27	11.04	79.28	170.20	39.65	4.38	572.81	1.71	0.61	8.6	1.39	
NSQ1	4	泥岩	6.99	54.62	36.01	3.89	11.38	128.04	54.78	109.62	11.83	267.20	4.37	1.25	14.40	2.81
	3	泥岩	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
	2	砂岩	2.60	23.03	51.67	2.91	21.45	104.08	66.57	33.87	4.88	336.42	1.56	0.51	6.85	0.89
	1	砂岩	1.12	20.43	21.50	3.46	17.52	87.05	51.91	19.32	2.92	563.57	0.82	0.38	4.56	0.66
		泥岩平均值	11.15	89.73	60.52	8.1	35.68	175.76	63.95	136.02	15.6	332.64	5.21	1.54	19.43	3.9
		砂岩平均值	1.86	21.73	36.59	3.19	19.49	95.57	59.24	26.60	3.9	450.00	1.19	0.45	5.71	0.78
	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 and McLennan^[14]。

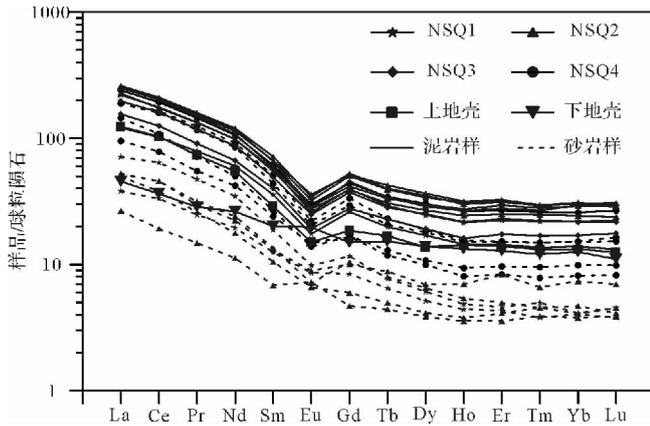


图2 珠江组碎屑岩球粒陨石标准化的 REE 配分图
Fig. 2 Chondrite-normalized REE distribution patterns for the clastic rock in the Zhujiang Formation

3.3 稀土元素特征

惠州凹陷 HZ21 井珠江组碎屑岩样品的稀土元素丰度、均值及相关参数计算结果见表 3。从表 3 可以看出,珠江组碎屑岩泥岩的稀土元素丰度变化较小,仅在 NSQ1 和 NSQ2 下部泥岩 Σ REE 较低外,其余都在 290 $\mu\text{g/g}$ 左右波动。而珠江组碎屑岩砂岩的稀土元素丰度变化非常大,主要表现为 NSQ1、NSQ2 的 Σ REE 远低于 NSQ3、NSQ4 层序的值,且 NSQ1 和 NSQ2 平均丰度十分接近,NSQ3 和 NSQ4 平均丰度也相差不大,说明从 NSQ1 到 NSQ4 这 4 个层序中碎屑岩的主体物源区发生较大的变化,即 NSQ1、NSQ2 和 NSQ3、NSQ4 可能来自不同的物源。

经球粒陨石标准化后,除 NSQ2 层序出现 1 砂岩样品 Eu 显著正异常外,各层序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,但是不同层位稀土元素分布模式也存在一定的差别。泥岩中指示轻重稀土元素分异程度的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 在 8.07 ~ 9.83 之间,各层序平均值除 NSQ2 略低于 PAAS 的值(9.2)外,NSQ1 和 NSQ4 平均值与 PAAS 值相当;指示轻稀土元素分异程度的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 在 3.41 ~ 4.38 之间,变化范围相对较小,除 NSQ1 平均值较低外,其余平均值都在 3.95 左右;指示重稀土元素分异程度的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 在 1.41 ~ 1.84 之间,其平均值除 NSQ1 略大点外,其余层序相差不大;Eu 负异常则都相差不大,其各层序平均值为 0.56 或 0.57,低于 PAAS 的 Eu 异常(0.66)。砂岩中稀土元素的特征比泥岩相对较明显,变化范围也相对较大,其中指示轻重稀土元素分异程度的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 在 6.89 ~ 17.34 之间,平均值则以 NSQ1、NSQ4

大于 NSQ2、NSQ3;指示轻稀土元素分异程度的 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 在 3.17 ~ 5.43 之间,平均值则相差不大;指示重稀土元素分异程度的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 在 1.34 ~ 2.77 之间,其中以 NSQ1 平均值较大,为 2.51;Eu 负异常则存在两个明显的趋势,NSQ1、NSQ2 大于 PAAS 的 Eu 异常(0.66),而 NSQ3、NSQ4 则明显小于 PAAS 的 Eu 异常值。

4 物源分析

物源分析是确定盆地演化的首要条件,物源物质成分的变化反映了盆地边缘造山带的隆升与盆地沉降的关系。通过对沉积物的岩石学特征、地球化学特征及沉积物的含量变化趋势研究,可以揭示盆地充填物的物源区性质、大地构造环境和沉积物充填方向,为沉积体系分析、岩相古地理的重建提供重要的依据^[15,16]。本文从沉积物碎屑岩的元素地球化学分析入手,对物源区性质、构造背景、古风化作用及古气候进行了探讨。

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。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。利用上述元素的相关特征,Allegre 1978 年提出了利用 $\text{La}/\text{Yb}-\Sigma$ REE 的源岩属性判别图解^[17],而 Gu 等 2002 年提出了利用 $\text{Co}/\text{Th}-\text{La}/\text{Sc}$ 的源岩属性判别图解^[18],从而对碎屑岩样品的原始属性进行分析(图 3)。从图 3a 中可以看出,砂岩样品在 NSQ1 和 NSQ2 层序以沉积岩钙质泥岩物源为主,而 NSQ3 和 NSQ4 层序为花岗岩、碱性玄武岩和沉积岩钙质泥岩混合物源组成;泥岩样品则都落在花岗岩、碱性玄武岩和沉积岩钙质泥岩的混合物源区,可能与泥质岩的悬浮远距离搬运沉积有关(即多个物源的细粒沉积物都搬运到这里沉积),同时也说明研究区母岩类型复杂的特点。在 $\text{Co}/\text{Th}-\text{La}/\text{Sc}$ 图解(图 3b)上,研究区的碎屑岩样品主要落在长英质火山岩和花岗岩之间,且泥岩样品主要偏向于长英质火山岩,而砂岩样品则处于中间位置,反映源岩以长英质岩为主,并有花岗岩混入的特点。

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 LREE 富集、HREE 含量相对稳定和明显的负 Eu 异常的特

点^[19, 20]。惠州凹陷 HZ21 井珠江组各层序的碎屑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几乎一致, 说明研究区沉积岩的原始物质来自上地壳。

K_2O/Al_2O_3 值可以用来确定碎屑岩源区岩石的成分, 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^[21]。研究区珠江组碎屑岩砂岩的 K_2O/Al_2O_3 值在 0.24 ~ 0.56 之间, 其平均值为 0.38, 表明母岩中碱性长石的含量较低; 而泥岩中的 K_2O/Al_2O_3 值相对较低, 其平均值为 0.21, 估计与其泥岩本身固有的性质有关, 同时指出该参数仅对砂岩样品敏感的特点。Girty 等 1996 年认为^[22], 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 之间时, 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。研究区珠江组碎屑岩砂岩的 Al_2O_3/TiO_2 值为 14.94 ~ 61.56, 在

NSQ1 和 NSQ2 层序的值相对较高, 其平均值分别为 59.82 和 39.82, NSQ3、NSQ4 层序的值相对较小, 其中以 NSQ3 最小, 其平均值为 15.86, 表明其物源主要来源于长英质岩石, 且在 NSQ3 层序可能还有少量的镁铁质岩石; 泥岩的 Al_2O_3/TiO_2 值为 16.31 ~ 24.68, 与 19 ~ 28 区间对应长英质岩石相近, 说明源区以长英质岩石为主。

综上所述可知, 惠州凹陷珠江组沉积物主要来自上地壳的长英质岩石, 但 NSQ1、NSQ2 两个层序与 NSQ3、NSQ4 两个层序的母岩性质及元素地球化学特征存在一定差别, 可能来自不同的物源区, 与前人针对整个珠江口盆地研究的结果略有差别^[4, 5], 这可能与珠江口盆地珠江组时期的一次最大的海侵有关, 该海侵范围较广, 使惠州凹陷南部的东沙隆起全部覆盖水面之下, 从而使物源从东沙隆起转向西北部华南大陆, 即珠江组下段 (NSQ1、NSQ2) 物源来自南部东沙隆起, 珠江组上段 (NSQ3、NSQ4) 物源来自西北部华南大陆^[23]。

表 3 珠江组碎屑岩稀土元素含量及元素比值 (μg/g)

Table 3 REE contents and element ratios of clastic rock in Zhujiang Formation (μg/g)

层位	样品号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE/HREE	δCe	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N
NSQ4	21	泥岩	56.27	116.55	12.90	47.97	8.97	1.67	8.66	1.25	7.36	1.48	4.26	0.63	4.20	0.65	36.63	309.44	3.75	1.06	0.57	9.06	3.95	1.67
	20	砂岩	34.01	65.39	6.39	22.68	3.95	0.78	3.28	0.43	2.41	0.45	1.33	0.19	1.33	0.20	10.39	153.19	6.66	1.09	0.64	17.34	5.43	2.01
	19	砂岩	44.26	95.65	10.38	38.41	6.44	1.15	5.78	0.75	4.37	0.84	2.39	0.36	2.47	0.40	19.93	233.59	5.26	1.09	0.56	12.09	4.32	1.89
	18	砂岩	22.37	47.21	4.90	19.09	3.53	0.82	3.33	0.47	2.61	0.52	1.54	0.23	1.60	0.24	12.74	121.20	4.21	1.11	0.72	9.43	3.99	1.68
	17	砂岩	44.66	99.43	11.07	41.71	7.44	1.23	6.57	0.84	4.56	0.86	2.42	0.36	2.46	0.37	20.60	244.61	5.26	1.10	0.53	12.25	3.78	2.16
		砂岩 平均值	36.33	76.92	8.19	30.47	5.34	1.00	4.74	0.62	3.49	0.67	1.92	0.29	1.97	0.3	15.92	188.15	5.35	1.1	0.61	12.78	4.38	1.94
NSQ3	16	砂岩	36.53	75.66	8.09	30.21	5.89	1.08	5.46	0.83	4.64	0.90	2.75	0.41	2.76	0.43	22.59	198.23	3.86	1.08	0.57	8.93	3.91	1.60
	15	砂岩	46.22	97.24	10.53	39.47	7.24	1.40	7.34	1.03	6.09	1.21	3.64	0.54	3.54	0.53	30.87	256.89	3.69	1.08	0.58	8.81	4.02	1.68
		砂岩 平均值	41.37	86.45	9.31	34.84	6.56	1.24	6.40	0.93	5.37	1.05	3.20	0.47	3.15	0.48	26.73	227.56	3.78	1.08	0.58	8.87	3.97	1.64
NSQ2	14	泥岩	59.89	120.99	13.21	49.03	8.62	1.61	8.20	1.21	7.25	1.53	4.67	0.68	4.71	0.71	37.17	282.29	3.83	1.05	0.58	8.59	4.38	1.41
	13	泥岩	58.76	121.77	13.50	52.16	9.81	2.01	10.06	1.54	8.86	1.76	5.16	0.72	4.91	0.74	43.24	291.77	3.35	1.06	0.61	8.08	3.77	1.66
	12	泥岩	60.59	125.84	13.90	53.33	9.67	1.56	8.93	1.24	7.01	1.48	4.41	0.65	4.78	0.70	35.04	294.10	4.12	1.06	0.50	8.56	3.95	1.51
	11	泥岩	59.22	126.43	13.54	51.71	9.77	1.81	9.89	1.43	8.23	1.73	5.04	0.71	4.96	0.75	41.50	295.21	3.54	1.09	0.56	8.07	3.82	1.62
	10	砂岩	11.62	22.98	2.32	8.01	1.54	0.37	1.17	0.18	1.00	0.21	0.65	0.11	0.66	0.11	4.91	50.94	5.21	1.08	0.81	11.89	4.75	1.44
	9	砂岩	12.20	27.73	2.63	10.12	1.92	0.50	1.97	0.32	1.69	0.39	1.32	0.16	1.20	0.17	8.98	62.32	3.40	1.20	0.78	6.89	3.99	1.34
	8	泥岩	61.19	127.12	14.18	54.39	10.52	1.92	10.35	1.45	8.51	1.67	4.97	0.71	5.03	0.71	41.38	302.74	3.60	1.06	0.56	8.22	3.66	1.67
	7	泥岩	53.22	104.99	11.85	44.50	8.06	1.54	7.68	1.11	6.52	1.36	3.99	0.60	3.94	0.58	33.46	249.94	3.78	1.03	0.59	9.12	4.16	1.58
	6	砂岩	12.34	27.56	2.81	10.87	1.99	0.40	2.06	0.29	1.58	0.30	0.79	0.11	0.76	0.10	7.29	61.95	4.22	1.15	0.60	10.99	3.91	2.20
	5	砂岩	6.24	11.58	1.32	5.08	1.01	0.40	0.92	0.16	0.93	0.20	0.56	0.09	0.61	0.09	4.89	29.21	3.03	0.99	1.26	6.89	3.90	1.22
		泥岩 平均值	58.81	121.19	13.36	50.85	9.41	1.74	9.19	1.33	7.73	1.59	4.71	0.68	4.72	0.70	38.63	286.01	3.70	1.06	0.57	8.44	3.96	1.58
		砂岩 平均值	10.60	22.46	2.27	8.52	1.62	0.42	1.53	0.24	1.30	0.28	0.83	0.12	0.81	0.12	6.52	51.11	3.97	1.11	0.86	9.17	4.14	1.55
NSQ1	4	泥岩	28.45	61.60	7.03	27.35	5.25	0.98	5.14	0.72	4.13	0.80	2.29	0.33	2.26	0.32	19.76	146.64	3.66	1.07	0.57	8.49	3.41	1.84
	3	泥岩	51.73	106.44	11.92	44.59	8.33	1.45	7.80	1.06	5.99	1.20	3.55	0.53	3.56	0.54	29.98	248.67	4.14	1.05	0.54	9.83	3.91	1.78
	2	砂岩	16.74	38.69	4.22	15.72	2.76	0.55	2.29	0.28	1.48	0.27	0.73	0.12	0.67	0.11	6.19	84.62	6.48	1.13	0.65	16.88	3.82	2.77
	1	砂岩	8.94	20.07	2.20	8.83	1.84	0.48	1.65	0.23	1.25	0.24	0.68	0.09	0.65	0.09	5.84	45.21	3.87	1.11	0.84	9.58	3.17	2.25
			泥岩 平均值	40.09	84.02	9.48	35.97	6.79	1.22	6.47	0.89	5.06	1.00	2.92	0.43	2.91	0.43	24.87	197.66	3.90	1.06	0.56	9.16	3.66
		砂岩 平均值	12.84	29.38	3.21	12.28	2.30	0.52	1.97	0.26	1.37	0.26	0.71	0.11	0.66	0.10	6.02	64.92	5.18	1.12	0.75	13.23	3.50	2.51

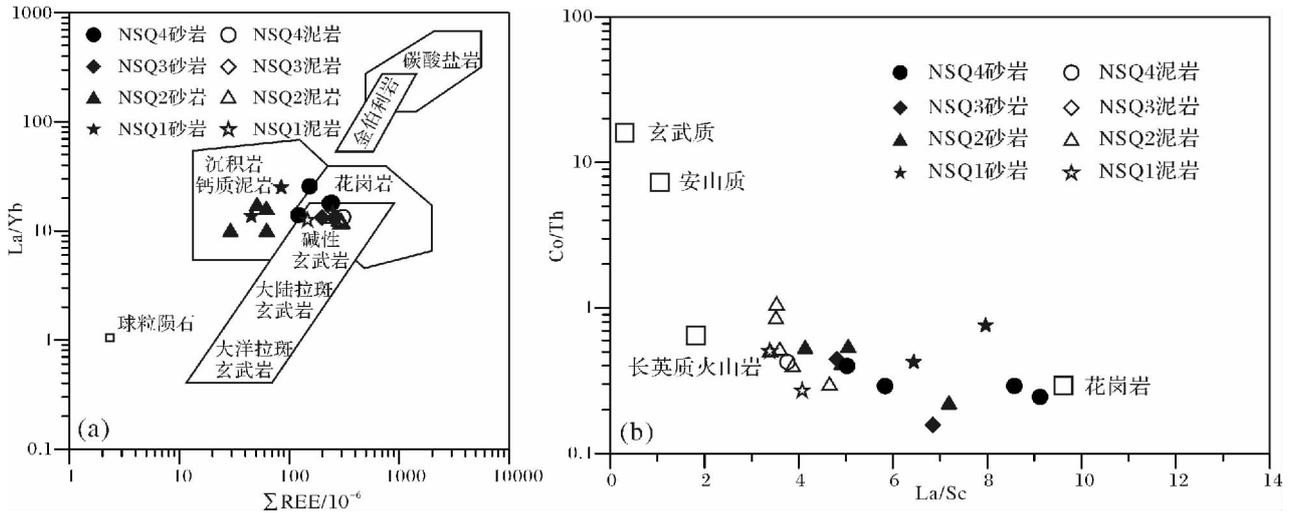


图3 珠江组碎屑岩物源属性判别图(a 据 Allegre ,1978; b 据 Gu 等 2002)

Fig.3 Discrimination diagram for provenance attribute of clastic rock in Zhujiang Formation(a: after Allegre ,1978; b: after Gu *et al.* 2002)

4.2 构造背景判别

Roser 对世界不同地区已知的构造背景的古代砂岩、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^[24]。在 SiO_2-K_2O/Na_2O 构造背景判别图解(图4)上,惠州凹陷 HZ21 井珠江组碎屑岩砂岩和泥岩样品点都落在被动大陆边缘区域,表明研究区珠江组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、Sc、Zr 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^[25]。鉴于此,Bhatia 通过对东澳大利亚 5 个已知构造背景的古代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 4b),研究区碎屑岩砂岩和泥岩样品主要落在大陆边缘区域内或其附近区域,因此,属大陆边缘环境。

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 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^[26],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

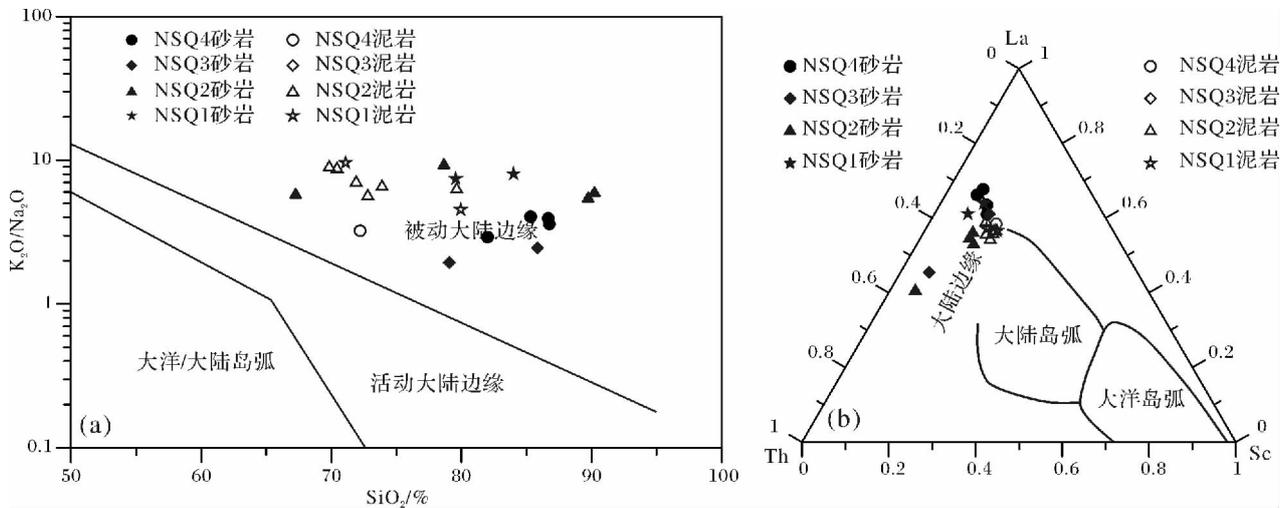


图4 珠江组碎屑岩构造背景判别图(a 据 Roser 等 ,1986; b 据 Bahtia 等 ,1986)

Fig.4 Discrimination diagram for tectonic setting of clastic rock in Zhujiang Formation(a: after Roser *et al.* ,1986; b: after Bahtia *et al.* ,1986)

地为中等 Ce 负异常 δCe 为 0.55; 大陆边缘区(陆块 1 000 km 之内)的 Ce 异常消失或为正异常, δCe 为 0.90 ~ 1.30。从表 3 中可以看出, 惠州凹陷珠江组各层序碎屑岩砂岩和泥岩的 δCe 值(以北美页岩作为标准化值)均介于 0.99 ~ 1.20 之间, 且各层序砂岩和泥岩的 δCe 平均值都在 1.1 左右, 为大陆边缘环境。

从上述各元素地球化学研究结果综合认为, 惠州凹陷 HZ21 井沉积物物源来自被动大陆边缘环境, 与前人研究结果一致^[7, 8], 同时, 也反映了元素地球化学对于判断构造背景具有可行性的特点。

4.3 古风化作用及对古气候的指示

化学风化作用常常影响着碎屑岩的化学组成。在风化过程中, 稳定的阳离子被保存在风化产物中(如 Al^{3+} , Ti^{4+} 等), 而不稳定的阳离子往往流失(如 Na^+ , Ca^{2+} , K^+ 等)。元素的丢失程度取决于化学风化强度的大小。Nesbitt 提出可以用 CIA 指数来确定物源区的化学风化程度^[27], 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, 其表达通式为: $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)] \times 100$, 式中化学成分的含量均为摩尔数, 化学蚀变指数越大, 说明母岩化学风化程度越高。由于硅酸盐矿物中 CaO 与 Na_2O 通常以 1:1 的比例存在, 所以 McLennan 认为: 当 CaO 的摩尔数大于 Na_2O 时, CaO^* 的摩尔数可以取 Na_2O 的摩尔数; 而当 CaO 的摩尔数小于 Na_2O 时, 则 CaO^* 的摩尔数就取 CaO 的摩尔数^[28]。从表 1 中可以看出, 惠州凹陷 HZ21 井珠江组碎屑岩砂岩的 CIA 指数在 53.93 ~ 67.11 之间, 其中以 NSQ1 层序 CIA 指数相对较低, 平均值为 55.17, 而其余层序平均值则都大于 61; 泥岩的 CIA 指数则在 73.28 ~ 78.61 之间, 其平均值为 75.92, 说明其物源区化学风化相对较强, 同时也可以推断珠江组沉积时期物源区可能处于一个湿热的气候条件。

同时, 在岩石的风化过程中, 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, 因此 Al_2O_3/Na_2O 比值也可以很好的反映风化作用的强弱^[29]。从表 1 中可以看出, 惠州凹陷 HZ21 井珠江组碎屑岩砂岩在 NSQ1、NSQ2 两层序中的 Al_2O_3/Na_2O 比值明显比 NSQ3、NSQ4 两层序大, 且碎屑岩泥岩的 Al_2O_3/Na_2O 比值在 NSQ1、NSQ2 两层序分别为 31.31 和 35.27, 远大于 NSQ4 层序的 16.25, 说明 NSQ1、NSQ2 层序物源区风化作用强于 NSQ3、NSQ4 层序, 即表现为 NSQ1、NSQ2 层序气候比较湿热、NSQ3、NSQ4 层序湿热程度

相对较弱的特点。

5 讨论与结论

(1) 本文以 HZ21 井的地球化学资料对惠州凹陷珠江组物源属性进行了探讨, 存在一定的局限性, 但是 NSQ1、NSQ2 和 NSQ3、NSQ4 砂泥岩主量元素、微量元素及稀土元素都存在一定的差异性, 说明主体物源区发生了一定的变化, 即珠江组下段(NSQ1、NSQ2)来自一个源区, 而珠江组上段(NSQ3、NSQ4)来自另外一个源区。

(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) 珠江组物源母岩类型相对复杂, 且表现为在 NSQ1、NSQ2 层序以沉积岩钙质泥岩物源为主, 而 NSQ3、NSQ4 层序为花岗岩、碱性玄武岩和沉积岩钙质泥岩混合物源的特点。

(4) 造山带周缘盆地碎屑岩岩石地球化学具有构造背景的继承性, 一些稳定性相对较好、在风化搬运和沉积过程中很少受其他地质作用影响的元素能很好地揭示源区的构造背景, 惠州凹陷珠江组碎屑岩地球化学特征揭示其源区构造背景具有被动大陆边缘的特征。

(5) 惠州凹陷珠江组时期物源区整体处于湿热的气候条件, 但 NSQ1、NSQ2 层序湿热程度较高, 风化程度较强, 而 NSQ3、NSQ4 层序湿热程度较低, 风化程度较弱。

参考文献(References)

- 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 Jinliang, Zhang Xin. The element geochemical features of ancient oceanic sedimentary environments in the Silurian Period in 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 Yingchang, Wang Yanzhong, Xu Taoyu, 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 geo-

- chemistry 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 邵磊, 庞雄, 陈长民, 等. 南海北部渐新世末沉积环境及物源突变事件[J]. *中国地质*, 2007, 36(6): 1022-1031 [Shao Lei, Pang Xiong, Chen Changmin, *et al.* Terminal Oligocene sedimentary environments and abrupt provenance change event in the northern South China Sea [J]. *Geology in China*, 2007, 34(6): 1022-1031]
 - 5 庞雄, 陈长民, 邵磊, 等. 白云运动: 南海北部渐新统-中新统重大地质事件及其意义[J]. *地质论评*, 2007, 53(2): 145-150 [Pang Xiong, Chen Changmin, Shao Lei, *et al.* Baiyun Movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the northern South China Sea and its implications [J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 145-150]
 - 6 Feng Z Q, Miao W C. Structure and hydrocarbon potential of the para-passive continental margin of the northern South China Sea [C]// *Geology and Geophysics of Continental Margin*. AAPG Memoir 53, 1992: 27-41
 - 7 Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Sea Basin [C]// Hayes D E ed. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*. Geophysical Monography, 1980 23: 89-104
 - 8 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化历史 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(2): 1-13 [Yao Bochu. Tectonic evolution of the South China Sea in Cenozoic [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1996, 16(2): 1-13]
 - 9 唐松 邵磊 赵泉鸿. 南海渐新世以来粘土矿物的演变特征及意义 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 337-342 [Tang Song, Shao Lei, Zhao Quanhong. Characteristics of clay mineral in South China Sea since Oligocene and its significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 337-342]
 - 10 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 [Chen Changmin, Shi Hesheng, Xu Shice, *et al.* The Conditions of Hydrocarbon Accumulation of the Tertiary Petroleum System in the Pearl River Mouth Basin [M]. Beijing: Science Press, 2003]
 - 11 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动模式 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2000, 25(5): 542-546 [Liang Xing, Wang Xuesheng, Zhang Renquan, *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]
 - 12 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 Xiaoyu, Zheng Rongcai, Wei Qinlian, *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]
 - 13 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 Shuangjian, Wang Qingchen. 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]
 - 14 Taylor S R, McLennan S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 117-140
 - 15 赵红格, 刘池洋. 物源分析方法及研究进展 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(3): 409-415 [Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(3): 409-415]
 - 16 徐亚军, 杜运生, 杨江海. 沉积物物源分析研究进展 [J]. *地质科技情报*, 2007, 26(3): 26-31 [Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. Prospects of sediment provenance analysis [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(3): 26-31]
 - 17 Allegre C T. Quantitative models of trace planet [J]. *Earth Planet Science Letters*, 1978, 38(1): 1-25
 - 18 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
 - 19 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. *现代地质*, 2006, 20(3): 449-456 [Liu Shilin, Liu Yunhua, Lin Ge, *et al.* REE geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Neogene, Nanpu Sag, Bohai Basin [J]. *Geoscience*, 2006, 20(3): 449-456]
 - 20 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
 - 21 Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: Source-area weathering and provenance [M]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 2401-2416
 - 22 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
 - 23 余焯, 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 Changmin, Zhang Shangfeng, *et al.* Research on source direction of Neogene Zhujiang Formation in Huizhou Depression [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2012, 19(1): 17-21]
 - 24 Roser B P and Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O / Na₂O ratio [J]. *Journal of Geology*, 1986, 94: 635-650
 - 25 Bhatia M R and Crook KAW. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contribution Mineral Petrology*, 1986 92: 181-193
 - 26 Murry R W. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18: 268-271
 - 27 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate mo-

- tions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717
- 28 McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101: 295-303
- 29 徐方建, 陈世悦, 操应长 等. 近 4400 年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义 [J]. *沉积学报* 2010 28(6): 1198-1205 [Xu Fangjian, Chen Shiyue, Cao Yingchang, *et al.* Geochemical records and geological significance of the continental shelf sediments in the northern South China Sea since 4400 a [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1198-1205]

Geochemical Characteristics and Provenance Indication of the Zhujiang Formation in Well HZ21 at the Huizhou Depression

YU Ye¹ ZHANG Chang-min¹ LI Shao-hua¹ SHI He-sheng²
DU Jia-yuan^{1 2} WANG Li³

(1. Key Laboratory of Oil and Gas Resource and Exploration Technology, MOE School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100; 2. Shenzhen Branch of CNOOC Ltd., Guangzhou 510240; 3. Shengli Production Plant of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying, Shandong 257061)

Abstract: It has been found that the components of MnO, Na₂O, P₂O₅ and TiO₂ in the clastic rock of the Zhujiang Formation in well HZ21 at the Huizhou Depression, Pearl River Mouth Basin are similar to those in PAAS through a comprehensive analysis on the major elements, trace elements and rare earth elements. Compared with PAAS, a fact that the clastic rock of the Zhujiang Formation is richer in SiO₂ while poorer in Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O and MgO. Referring to the mudstone, the content of Ba is slightly lower than the supracrustal abundance, but it is far higher than lowercrustal abundance; the content of Cr is slightly higher than the supracrustal abundance, but it is far lower than lowercrustal abundance; the content of Th is higher than the supracrustal abundance, and it is far greater than lowercrustal abundance. As regards to the sandstone, the content of Ba is similar to the supracrustal abundance, but it is far higher than lowercrustal abundance; the content of Th is slightly lower than the supracrustal abundance in NSQ1 and NSQ2 while it is far greater than supracrustal abundance in NSQ3 and NSQ4. The REE distribution pattern is similar to that of the upper continental crust, characterized by enrichment of LREE, uniform of HREE and negative Eu anomalies. Eu anomalous value of NSQ1 and NSQ2 is higher than the Eu anomalous value of PASS and it has the opposite situation in NSQ3 and NSQ4. The ratios of major element and the diagrams of non-migration trace elements show that the source rocks are mainly felsic, and the principal source of detritus in NSQ1 and NSQ2 are derived from the sedimentary rock and calcareous mudstone, and the principal source of detritus in NSQ3 and NSQ4 are derived from composition of the granite, alkali basalt, sedimentary rock and calcareous mudstone. According to SiO₂-K₂O/Na₂O, La-Th-Sc discrimination diagrams and the anomalies of Ce, it can be inferred that the tectonic setting of the provenance is similar to that of passive continental margin. The value of Al₂O₃/Na₂O and chemical index of alteration (CIA) suggest that it was warm-wet climate in the area, but the degree of damp-heat was relatively higher in NSQ1 and NSQ2, and that is one of the reason why the intensity of weathering was relatively strong. But, it has an opposite situation in NSQ3 and NSQ4: the warm-wet degree was relatively lower and the intensity of weathering was relatively weak.

Key words: Pearl River Mouth Basin; Huizhou Depression; Zhujiang Formation; geochemical characteristics; provenance analysis