

彭光荣, 石创, 龙祖烈, 等. 珠江口盆地恩平 21 洼文昌组泥岩元素地球化学特征及其与有机质富集的关系[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(6): 65-74.

PENG Guangrong, SHI Chuang, LONG Zulie, et al. Relationship between element geochemical characteristics and organic matter enrichment of Wenchang Formation mudstones in Enping Sub-sag 21, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(6): 65-74.

珠江口盆地恩平 21 洼文昌组泥岩元素地球化学特征及其与有机质富集的关系

彭光荣^{1,2}, 石创^{1,2*}, 龙祖烈^{1,2}, 吴静^{1,2}, 熊万林^{1,2}, 朱定伟^{1,2}, 马宁^{1,2}

(1 中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 深圳 518054; 2 中海石油深海开发有限公司, 深圳 518054)

摘要:泥岩的元素特征能够较好地保存于原始沉积记录。为了明确恩平 21 洼文昌组泥岩元素地球化学特征及其与有机质富集的关系, 选择 YJ-1 井文昌组 10 个泥岩岩屑样品, 开展有机碳、常量元素和微量元素测试。在分析常量、微量元素地球化学特征的基础上, 利用元素地球化学方法, 系统分析洼陷文昌期古气候、古水深、古氧相和古生产力等古环境指标。文昌组泥岩元素平均含量对 UCC(Upper Continental Crust) 做标准化处理, 恩平 21 洼文昌组泥岩具有富集 Al_2O_3 、 K_2O 和 MnO , 贫 CaO 、 MgO 和 Na_2O ; 富 Li 、 Be 、 Zn 、 Rb 、 Cs 、 Ba 、 Pb 、 Th 和 U , 贫 Sr 、 V 和 Cr 的特征。古环境指标显示恩平 21 洼文昌期气候属于温暖湿润-温热潮湿, 湖泊水深相对较深, 纵向水深变化小, 水体分布稳定, 水体以还原环境为主, 古生产力相对较高, 但纵向差异大。泥岩有机碳含量与古生产力参数相关性较差, 而与水体还原性之间具有较好的正相关关系, 表明有机质富集受控于水体的氧化还原程度, 水体还原条件有利于有机质的保存, 有机质富集属于“保存模式”。进一步分析显示, 古气候条件是文昌组有机质富集的关键性因素, 温热潮湿的气候对湖泊生产力有一定的积极影响, 同时降水量较大, 湖泊水体较深, 有利于湖底还原环境的形成和保持, 进而有利于有机质的保存。

关键词:有机质富集; 沉积环境; 元素地球化学; 文昌组; 恩平 21 洼; 珠江口盆地

中图分类号: P736; P744.4

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.233

0 引言

泥质岩中的元素具有良好的化学稳定性, 在岩石风化、搬运和沉积过程中会发生规律性的分散和富集, 使得元素的含量或不同元素间的比值出现规律性变化^[1-3]。利用泥质岩中元素含量或比

值来表征沉积古环境变化, 恢复古气候、古水深、古氧相和古生产力等环境指标已在油气勘探领域广泛应用^[4-5]。

恩平 21 洼位于珠江口盆地珠三坳陷阳江凹陷东北部, 近年来围绕着恩平 21 洼发现多个小型油气藏, 证实了洼陷的生烃潜力, 恩平 21 洼已成为珠江口盆地(东部)勘探热点区^[6-8]。阳江凹陷历时 40 年经过多轮勘探研究, 连续发现多个中小型油气藏, 成为珠江口盆地近期获得油气勘探重大突破的新区^[7-8]。近年来前人对阳江凹陷开展了大量石油地质条件研究, 包括凹陷烃源发育、构造演化、沉积充填、圈闭条件和油气藏特征分析等^[5-11], 相关研究认为文昌组地层中深湖相富有机质泥岩是该地区主要烃源岩^[11]; 裂陷成盆阶段多期走滑拉分叠合, 为烃源岩形成创造物质空间^[9]; 文昌组沉积期湖泊处

收稿日期: 2022-08-26

资助项目: 中国海洋石油集团总公司“十四五”重大科技项目“陆缘裂谷盆地深层/超深层油气成藏条件与成藏机制研究——珠江口盆地珠一坳陷”(KJGG2022-0403)

作者简介: 彭光荣(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油气地质与油气勘探综合研究工作. E-mail: penggr@cnooc.com.cn

* 通讯作者: 石创(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气成藏和资源评价研究工作. E-mail: shichuang@cnooc.com.cn

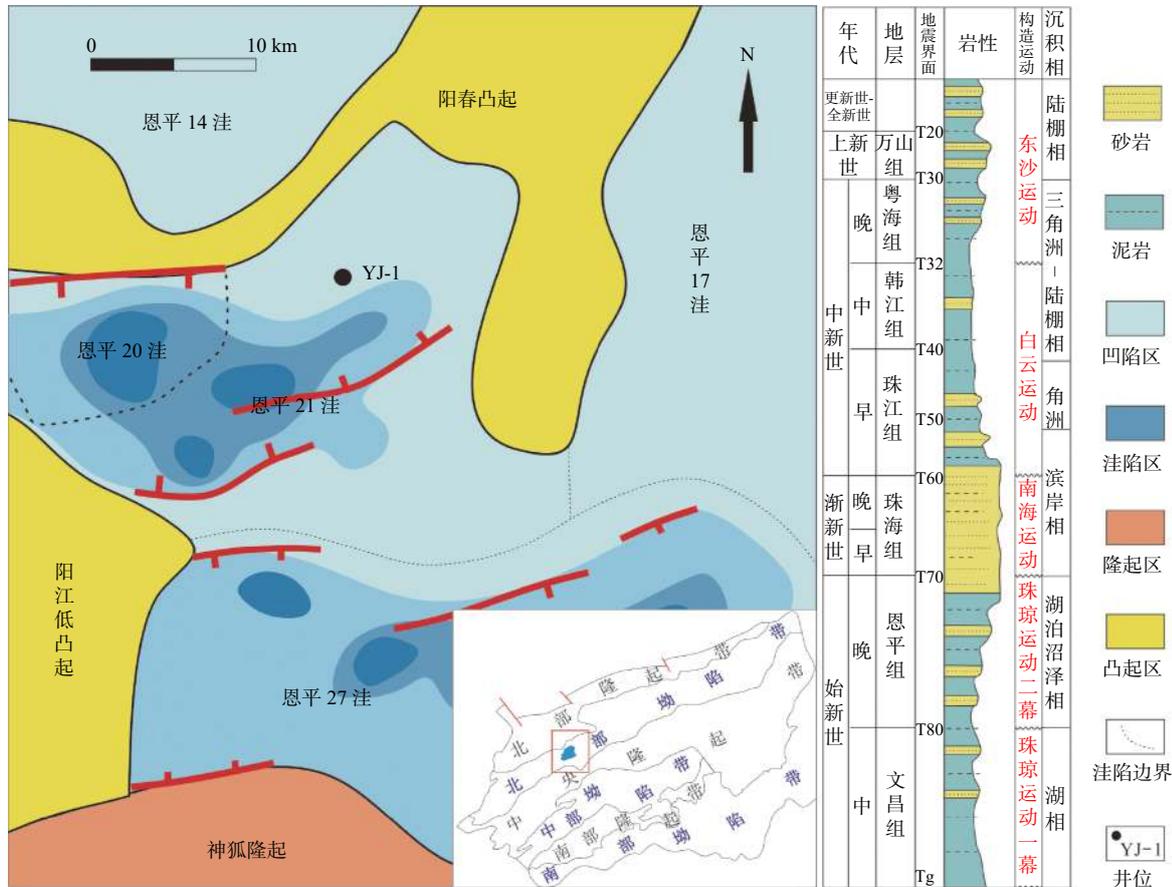
于盆广水深的欠补偿沉积环境,物源局限,烃源岩质量受周缘分散砂体物源输入影响小,有利于烃源岩的形成与发育^[9-10]。目前,关于文昌组烃源岩的发育环境研究程度较低,为此,笔者运用烃源岩元素地球化学分析方法,分析恩平 21 洼文昌组泥岩元素地球化学特征,系统研究文昌组烃源岩发育的古环境,进而探讨恩平 21 洼文昌组泥岩有机质富集的主控因素,本研究可为恩平 21 洼资源评价和油气勘探提供地质依据。

1 区域地质概况

阳江凹陷位于珠江口盆地北部坳陷带中珠三坳陷东北端,处于阳江—统暗沙走滑断裂带内。东侧受 NE—SW 向断层控制,阳江凹陷是在以古生代浅变质岩和沉积岩为主的基底上发育的 NE—SW 向的长条状洼陷^[12]。恩平 21 洼位于阳江凹陷东端,北邻恩平 14 洼,南接恩平 27 洼,东侧为恩平 17 洼,

西部毗邻恩平 20 洼,总面积约 280 km²。

阳江凹陷具有“下断上拗、下陆上海”的构造沉积特征,下部断陷结构自下而上发育文昌组和恩平组 2 套陆相沉积地层,是阳江凹陷烃源岩的发育层系。文昌组自下而上又分为文三段、文二段和文一段,恩平组自下而上分为恩四段、恩三段、恩二段和恩一段。恩平 21 洼文昌组沉积末期,受珠江运动二幕影响造成洼陷东北部发生大规模构造抬升,使洼陷东北部遭受强烈剥蚀,缺失文一段地层和部分恩平组地层^[10]。洼陷文昌组主要为中深湖相、浅湖相及三角洲相沉积,恩平组主要为浅湖相和三角洲相沉积,已钻井油源对比和泥岩岩石热解分析显示原油主要源自文昌组中深湖相泥岩,其次为文昌组和恩平组浅湖相泥岩,文昌组中深湖相泥岩有机质富集^[6-7,11]。上部坳陷结构自下而上发育海相沉积的珠海组、珠江组、韩江组、粤海组、万山组和第四系地层(图 1)。



据参考文献 [5] 修编

图 1 珠江口盆地恩平 21 洼区域位置及地层划分

Fig.1 Tectonic setting and stratigraphic column of Enping Sub-sag 21, Pearl River Mouth Basin

2 样品采集与分析测试

为分析恩平 21 洼文昌组元素地球化学特征及烃源岩沉积环境,选取恩平 21 洼 YJ-1 井文昌组 10 个泥岩岩屑样品进行元素测试。由于文昌组沉积晚期洼陷东北部发生大规模构造抬升,使洼陷东北部遭受强烈剥蚀,造成 YJ-1 井处缺失文一段和恩平组。10 个样品取样深度约为 3 050~3 400 m,样品 1—5 为文二段泥岩岩屑样品,样品 6—10 为文三段泥岩岩屑样品(图 2)。所有样品使用德国飞驰公司生产的 PULVERISETTE6 行星式球状研磨仪粉碎研磨至 200 目以下的粉末。总有机碳含量测试温度为 26 ℃、相对湿度为 50%,采用 GB/T 19145—2003 沉积岩中总有机碳的测定准则,利用美国力可公司生产的 CS230 碳硫分析仪,偏差 <0.5%。常/微量元素测定在温度 21 ℃、相对湿度 54% 的条件下,依据 GB/T 14506.29—2010 标准进行,其中,常量元素测试采用荷兰帕纳科公司生产的 Axios MAX X 射线荧光光谱仪,偏差 <0.05%,微量元素测试采用美国赛默飞公司生产的 ELEMENT XR 等离子体质谱仪,偏差 <0.1%。样品处理、泥岩总有机碳含量分析和常/微量元素含量测试均在中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油深圳实验中心完成。

3 实验结果

3.1 有机碳分布特征

文昌组泥岩有机碳含量为 2.17%~6.00%,平均

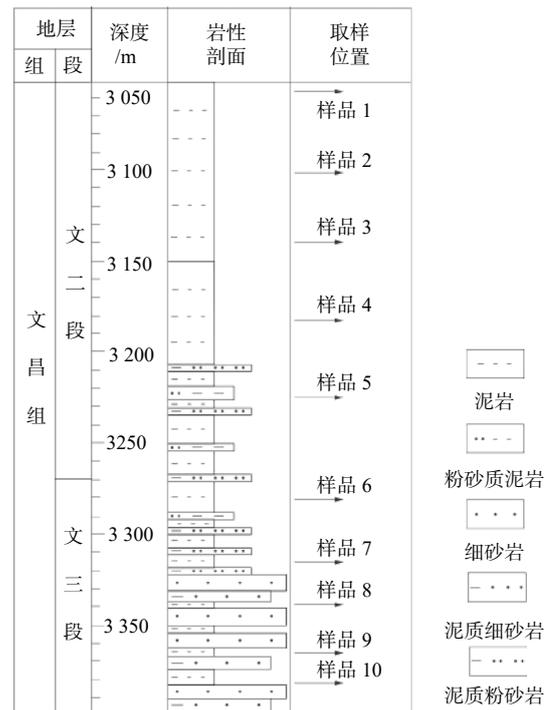


图 2 恩平 21 洼 YJ-1 井取样位置

Fig.2 Sampling positions of Well YJ-1 in Enping Sub-sag 21 值为 3.09%, 其中,文二段泥岩样品有机碳含量为 2.30%~3.13%,平均值为 2.63%;文三段泥岩有机碳含量为 2.17%~6.00%,平均值为 3.56%。

3.2 文昌组泥岩常量元素特征

恩平 21 洼 YJ-1 井文昌组泥岩主要成分是 SiO_2 和 Al_2O_3 , 2 种成分总含量约为 74.83%~85.12%, 其中, SiO_2 含量最高, 含量为 50.55%~64.51%; 其次为 Al_2O_3 , 含量为 15.65%~26.82%; 其他元素含量从大到小依次为 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 TiO_2 、 Na_2O 、 CaO 、 P_2O_5 和 MnO , 其中 MgO 、 TiO_2 、 Na_2O 、 CaO 、 P_2O_5 和 MnO 含量普遍 <1%(表 1)。

表 1 恩平 21 洼 YJ-1 井泥岩有机碳及常量元素测试结果

Table 1 Amount of organic carbon and major elements of mudstones samples of Well YJ-1 in Enping Sub-sag 21

样号	深度/m	TOC	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	MnO	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	SiO_2
1	3 058	2.43	15.65	1.44	4.27	4.08	0.84	0.12	0.51	0.11	0.53	64.51
2	3 103	2.82	22.25	0.34	5.76	3.94	0.89	0.12	0.62	0.18	0.63	55.94
3	3 143	2.45	22.26	0.31	5.98	3.51	0.89	0.19	0.59	0.19	0.62	55.46
4	3 183	2.3	22.90	0.44	6.50	3.70	0.94	0.18	0.60	0.21	0.64	53.85
5	3 228	3.13	21.35	0.48	5.77	3.59	0.92	0.17	0.60	0.22	0.59	56.47
6	3 283	3.48	22.15	0.47	6.03	3.64	0.96	0.13	0.66	0.20	0.65	55.18
7	3 318	2.66	24.28	0.38	6.73	4.20	1.00	0.19	0.63	0.17	0.72	50.55
8	3 333	2.17	26.82	0.35	4.05	4.44	0.78	0.07	0.49	0.12	0.78	52.94
9	3 378	3.49	22.34	0.26	3.96	3.35	0.68	0.06	0.32	0.05	0.62	56.17
10	3 393	6.00	23.20	0.17	1.71	2.74	0.40	0.02	0.23	0.04	0.61	61.92
UCC	/	/	15.40	3.59	5.04	2.80	2.48	0.10	3.27	0.15	0.64	66.60

注: TOC 为总有机碳含量, UCC 为全球平均大陆上地壳成分, UCC 数据参考文献[13-15]。

运用全球平均大陆上地壳常量元素含量对恩平 21 注文昌组泥岩常量元素进行标准化,结果显示:恩平 21 注文昌组泥岩常量元素具有 Al_2O_3 、 K_2O 和 MnO 相对较富集, CaO 、 MgO 和 Na_2O 亏损明显, Fe_2O_3 、 P_2O_5 、 TiO_2 和 SiO_2 含量与大陆上地壳相近(图 3A)。

3.3 文昌组泥岩微量元素特征

恩平 21 注 YJ-1 井文昌组泥岩微量元素标准化后结果显示:文昌组泥岩微量元素 Li、Be、Zn、Rb、Cs、Ba、Pb、Th 和 U 较富集(图 3B),富集元素中 Ba、Zn 和 Rb 含量相对较高,分别为 979.53~3 047.43、84.02~149.97 和 124.09~199.80 $\mu\text{g/g}$,其他富集元素含量普遍 < 70 $\mu\text{g/g}$ (表 2); V、Cr、Co、Ni、Cu、Sr 和 Mo 相对亏损(图 3B),亏损元素中 Sr、V 和 Cr 含量相对较高,分别为 55.29~118.11、34.60~77.35 和 7.79~37.67 $\mu\text{g/g}$,其他亏损元素含量普遍 < 15 $\mu\text{g/g}$ (表 2); Ga、Zr 和 Tl 含量与大陆上

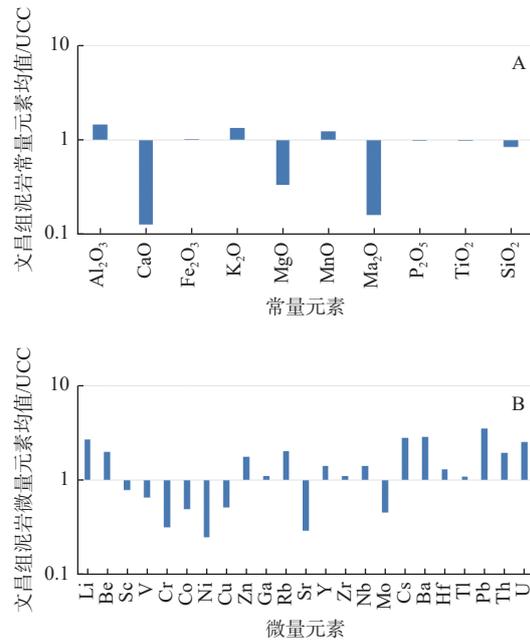


图 3 标准化后恩平 21 注文昌组常量元素和微量元素含量
Fig.3 The normalized concentration of major and trace elements in Enping Sub-sag 21

表 2 恩平 21 注 YJ-1 井泥岩微量元素测试结果

Table 2 Amount of trace elements of mudstones samples of Well YJ-1 in Enping Sub-sag 21

样号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	UCC
深度/m	3 058	3 103	3 143	3 183	3 228	3 283	3 318	3 333	3 378	3 393	/
Li	58.67	60.21	55	50.44	51.07	46	70.72	80.29	57.33	110.08	24
Be	3.42	4.53	4.38	4.16	4.74	3.9	5.18	4.67	3.21	3.16	2.1
Sc	9.52	11.64	11.6	11.41	11.91	10.82	13.23	11.59	9.58	7.53	14
V	60.75	70.11	71.54	69.64	74.45	63.54	77.35	60.33	53.43	34.6	97
Cr	33.28	31.14	31.6	29.53	32.76	30.29	37.67	30.63	25.85	7.79	92
Co	7.4	8.88	9.2	8.88	9.34	8.09	10.34	9.01	9.24	3.92	17.3
Ni	11.77	11.93	12.05	11.25	12.53	11.31	14.65	15.29	11.53	3.83	47
Cu	11.45	15.5	16.83	16.17	17.45	14.67	17.56	14.09	13.17	5.88	28
Zn	90.1	113.47	115.65	114.68	135.28	118.44	149.97	138.76	110.06	84.02	67
Ga	15.48	19.76	19.15	18.81	20.52	17.68	22.6	22.96	18.08	18.44	17.5
Rb	193.82	182.17	160.05	156.09	179.98	153.58	193.1	199.8	143.41	124.09	84
Sr	118.11	102.85	92.31	90.3	108.01	83.08	108.09	103.49	64.06	55.29	320
Y	24.36	30.4	26.99	27.68	31.16	27.86	35.66	33.47	32.3	22.14	21
Zr	213.88	209.6	204.63	204.73	213.34	200.82	207.91	221.75	191.65	242.62	193
Nb	13.78	15.77	15.12	14.55	16.6	14.85	18.73	22.73	17.05	17.57	12
Mo	0.34	0.79	0.86	1.05	1.01	0.62	0.85	0.4	0.65	0.17	1.5
Cs	16.5	13.6	12.48	11.6	13.35	11.26	13.64	13.55	14.22	14.02	4.9
Ba	1737.42	1061.04	979.53	1159.48	2289.83	1323.55	1927.97	3047.43	1981.67	2257.21	628
Hf	6.79	6.95	6.7	6.74	7.01	6.63	6.94	6.99	6.17	7.59	5.3
Tl	0.92	1.02	0.97	0.94	1.03	0.91	1.13	1.03	1.02	0.66	0.9
Pb	44.44	46	44.32	46.79	62.51	52.97	75.74	67.09	77.64	75.22	17
Th	15.64	22.66	21.1	20.1	21.33	19.37	25.15	20.65	18.97	18.93	10.5
U	5.15	8.4	8.02	7.52	7.71	7	8.2	5.82	5.32	4.55	2.7

注:UCC为全球平均大陆上地壳成分。

地壳相近(图 3B)。

4 古沉积环境恢复

4.1 古气候

古气候对沉积水体的氧化还原条件和湖泊生产力具有一定的控制作用, 影响沉积物中元素分布及其相对含量^[16-17]。环境气候与风化作用之间存在较强的相关性, NESBITT 和 YOUNG^[18] 提出应用化学蚀变指数(chemical index of alteration, CIA) 来反映化学风化程度。为消除钾的交代作用的影响, HARNOIS^[19] 提出应用化学风化作用指数(chemical index of weathering, CIW) 来判断化学风化程度。

CIA 的计算公式为:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + K_2O + CaO^*)] \times 100$$

CIW 的计算公式为:

$$CIW = [Al_2O_3 / (CaO^* + Na_2O + Al_2O_3)] \times 100$$

式中: 氧化物为摩尔质量百分比;

CaO* 为硅酸盐矿物中的 CaO 摩尔含量。

CIA 值越高反映硅酸盐矿物中 Ca、K 和 Na 从母岩中淋失越多, 化学风化越强, CIW 值越高, 表明物源区风化程度越强, 古气候越趋于温热潮湿^[19-20]。

CaO* 的计算采用 MCLENNAN^[21] 提出的校正方法:

$$CaO_{\text{剩余}} = CaO - (10/3) \times P_2O_5$$

式中氧化物为摩尔质量百分比, 如果 CaO_{剩余} 小于 Na₂O 的摩尔质量百分比, 则 CaO_{剩余} 即为 CaO*, 如果 CaO_{剩余} 大于 Na₂O 的摩尔质量百分比, 则 CaO* 等于 Na₂O 的摩尔质量百分比。通过计算的 CIA 值可判断环境气候条件, 寒冷干燥气候条件下 CIA 值 < 70%, 温暖湿润气候条件下 CIA 值为 70%~80%, 温热潮湿的热带气候条件下 CIA 值一般为 80%~100%^[22]。

CIA 值计算结果显示: 文昌组泥岩 CIA 值为 72.0%~86.7%, 均值为 80.8%; 文二段泥岩 CIA 值为 72.0%~82.0%, 均值为 79.1%; 文三段泥岩 CIA 值为 80.4%~86.7%, 均值为 82.5%。CIW 值计算结果显示: 文昌组泥岩 CIW 值为 90.35%~97.54%, 均值为 94.76%; 文二段泥岩 CIW 值为 90.35%~95.41%, 均值为 93.87%; 文三段泥岩 CIW 值为 93.85%~97.54%, 均值为 95.65%。CIW 值分析结果与 CIA 值一致, 显示文昌组气候主体为温热潮湿, 文二段沉积期湿热程度低于文三段沉积期, 且文二段沉积末期气候转变为温暖湿润(图 4)。研究区古生物特征显示文昌组沉积物中花粉组合为常绿栎粉和榆粉, 反映文昌组沉积期洼陷周缘分布有常绿

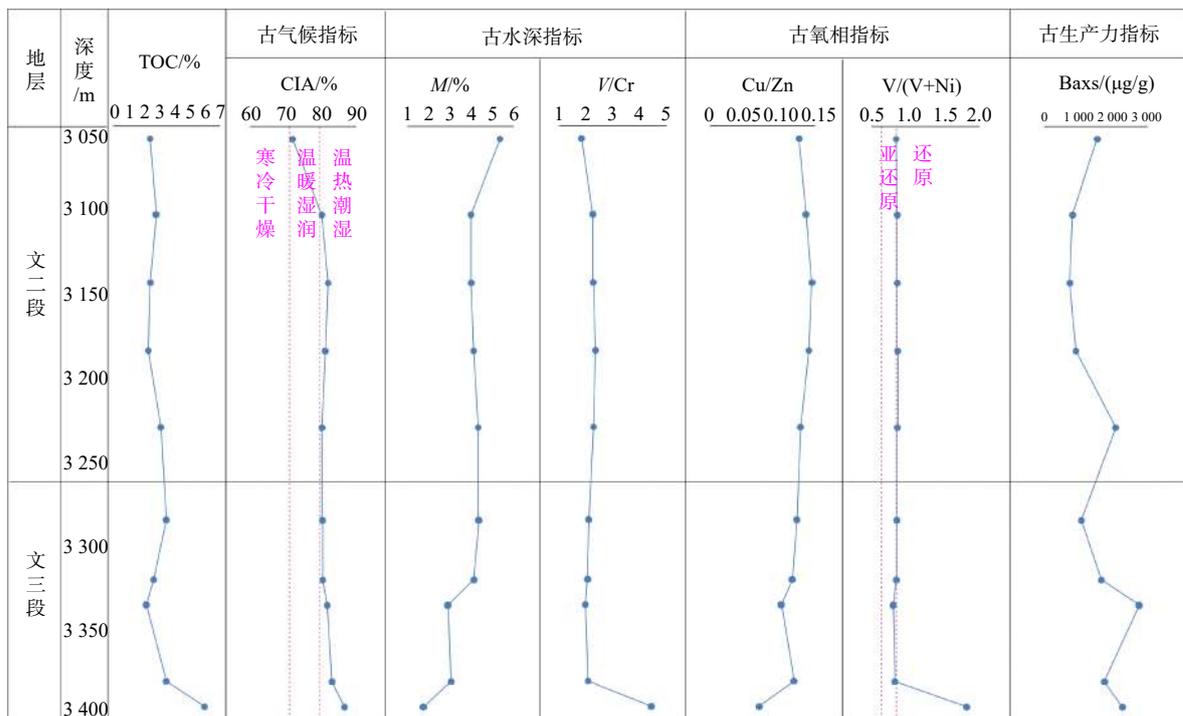


图 4 恩平 21 洼 YJ-1 井文昌组泥岩古水深、古气候、古氧相和古生产力地球化学参数纵向变化

Fig. 4 Vertical variation of geochemical parameters of paleo-water depth, paleo-climate conditions, paleo-oxygenation facies and paleo-productivity of Wenchang Formation mudstones of Well YJ-1 in Enping Sub-sag 21

落叶阔叶混交林,气候条件温暖湿润-温热潮湿。

4.2 古水深

CIA 值和 CIW 值纵向变化表明文昌期古风化作用总体呈减弱趋势,文二段沉积中期略有增强,降水强度总体呈降低趋势,推测文昌组沉积期水深总体呈变浅趋势,部分时期略有增加。通过元素地球化学方法进一步明确古水深变化。研究表明沉积物在沉积过程中会发生规律性的分散和聚集,一些元素的含量和比值可较好指示古水深变化。沉积物中 Mg 和 Al 的含量随水深发生规律性改变,其中 Mg 含量随水深增加而减少,而 Al 的含量随水深增加而增加,可运用 M 值(MgO/Al_2O_3) $\times 100$ 来表征水深变化, M 值越小反映水深越深^[3];Cr 在浅水区氧化环境下容易富集,而 V 易于富集在深水区还原条件下,因而可以使用 V/Cr 判断沉积环境水体深浅,V/Cr 越大表明水体越深^[16]。

文昌组泥岩 M 值为 1.74%~5.35%,均值为 3.79%,V/Cr 为 1.83~4.44,均值为 2.36。其中,文二段泥岩 M 值为 3.99%~5.35%,均值为 4.35%,V/Cr 为 1.83~2.36,均值为 2.19;文三段泥岩 M 值为 1.74%~4.35%,均值为 3.23%,V/Cr 为 1.97~4.44,均值为 2.53。显示文昌组自下而上 M 值总体呈增大趋势,V/Cr 总体呈减小趋势,在文二段沉积中期, M 值略有降低,V/Cr 略有增加(图 4),表明文昌组沉积期水深总体呈变浅趋势,文二段沉积中期水深略有增加。

4.3 古氧相

沉积岩中 Cu、Zn、V 和 Ni 等元素含量受水体氧化还原状态控制明显。Cu 和 Zn 为铜族元素,因水体环境还原性差异在沉积作用过程中会产生分离,由于水体环境氧化性增强,水体环境由 Zn 富集向 Cu 富集转变,因此,利用 Cu/Zn 比值反应水体环境的氧化还原情况,水体还原性越强则 Cu/Zn 越小^[3,23]。受水体氧化还原条件影响,V 和 Ni 元素含量也有规律性变化,还原条件下 Ni 元素容易被吸附富集形成沉淀,而氧化条件下 V 元素容易与沉积物结合形成沉淀,研究认为 V/(V+Ni) 比值 < 0.60 为氧化环境,V/(V+Ni) 比值介于 0.60~0.84 为亚还原环境,水体分层弱,V/(V+Ni) 比值 > 0.84 ,代表还原环境、水体有分层^[3,24]。

文昌组泥岩 V/(V+Ni) 比值为 0.80~1.82,均值为

0.94,Cu/Zn 比值为 0.07~0.15,均值为 0.12。其中,文二段泥岩 V/(V+Ni) 比值为 0.84~0.86,均值为 0.85,Cu/Zn 为 0.13~0.15,均值为 0.14;文三段泥岩 V/(V+Ni) 比值为 0.80~1.82,均值为 1.03,Cu/Zn 为 0.07~0.12,均值为 0.11。总体显示文昌组沉积期水体环境偏还原,同时,文昌组自下而上 V/(V+Ni) 比值总体呈减小趋势,Cu/Zn 总体呈增大趋势(图 4),表明文昌期水体还原性总体逐渐减弱,部分时期可能略有增强,文三段沉积时期水体还原性总体强于文二段沉积时期。

文昌组泥岩饱和烃色谱测试结果显示文昌组泥岩姥鲛烷/植烷(Pr/Ph)普遍 < 3 ,反映文昌组沉积期沉积环境偏还原。Pr/Ph 越小反映水体环境还原性越强^[25]。文二段泥岩 Pr/Ph 为 1.59~3.59,均值为 2.75;文三段泥岩 Pr/Ph 为 1.63~2.76,均值为 2.25,显示文三段沉积时期水体还原性总体强于文二段沉积时期,这一结果与元素分析结果一致。

4.4 古生产力

水体的生产力水平是影响有机质富集的关键因素,高古生产力水平的水体环境可为优质烃源岩发育提供大量有机质,同时部分有机质可消耗水体中的氧气,利于形成缺氧环境^[26-27]。Ba 元素是研究较早的古生产力指标,Ba 元素在水体中保留时间长,保存效率高,与水体生产力具有较好的相关性^[28]。一般通过生物成因 Ba 来反映水体古生产力变化,生物成因 Ba 可由沉积物中实测 Ba 扣除陆源沉积 Ba 后获得^[29],其校正公式为:

$$Baxs = Ba_{\text{样品}} - (Ba/Ti)_{\text{PAAS}} \times Ti_{\text{样品}}$$

式中: Baxs 为生物成因 Ba 含量, $\mu\text{g/g}$;

$Ba_{\text{样品}}$ 为样品实测 Ba 含量, $\mu\text{g/g}$;

$Ti_{\text{样品}}$ 为样品实测钛含量, $\mu\text{g/g}$;

$(Ba/Ti)_{\text{PAAS}}$ 为太古宙晚期澳大利亚页岩 PAAS (Post Archean Australian shale) 中 Ba 和 Ti 平均含量的比值,其中, Ba 和 Ti 的 PAAS 值分别为 650 和 10 000 $\mu\text{g/g}$ 。

计算得到文昌组泥岩 Baxs 值为 738~2 741,均值为 1 551;其中,文二段泥岩 Baxs 值为 738~2 061,均值为 1 210;文三段泥岩 Baxs 值为 1 071~2 741,均值为 1 891。Baxs 值纵向变化显示文昌期水体古生产力水平变化较大(图 4),计算结果表明文三段沉积时期水体古生产力水平相对较高。

研究显示,Al/Ti 比值可用于南海地区水体古生

产力研究,比值越高反映古生产力水平越高^[30]。文昌组泥岩 Al/Ti 比值为 25.97~33.46,均值为 30.75;文二段泥岩 Al/Ti 比值为 25.97~32.05,均值为 30.45;文三段泥岩 Al/Ti 比值为 29.61~33.46,均值为 31.05。Al/Ti 比值分析结果与 Baxs 值一致,显示文三段沉积期水体古生产力水平总体高于文二段沉积期。

5 有机质富集控制因素讨论

5.1 有机质富集与古氧相和古生产力的关系

水体的氧化还原条件和古生产力水平是影响有机质富集的重要因素,通过研究烃源岩有机碳含量与古氧相参数和古生产力指标之间的相关关系,可揭示恩平 21 洼烃源岩有机质富集的关键性控制因素。

V/(V+Ni)和 Cu/Zn 比值能够表征环境的氧化还原条件,V/(V+Ni)比值越高表明环境还原性越强,而 Cu/Zn 比值越高反映环境氧化性越强^[23-24]。由图 4 可以发现,纵向上 V/(V+Ni)的变化趋势与 TOC 变化趋势一致,而与 Cu/Zn 的变化趋势相反;V/(V+Ni)比值与 TOC 之间存在一定的正相关关系,相关系数约为 0.44,而 Cu/Zn 比值与 TOC 之间存

在较强的负相关关系,相关系数约为 0.63(图 5),表明随着环境还原性的增强,泥岩 TOC 增加,环境的氧化还原条件控制了有机质的富集。

YJ-1 井文昌组部分泥岩样品古生产力指标 Baxs 和 Al/Ti 较高,但 TOC 并未明显高于其他样品,甚至低于其他样品(图 4)。统计显示恩平 21 洼 YJ-1 井文昌组泥岩 Baxs 和 Al/Ti 比值与 TOC 之间存在较弱的正相关关系,相关系数分别约为 0.12 和 0.30(图 5)。上述分析结果表明,较高的古生产力水平仅为恩平 21 洼文昌组泥岩有机质的输入提供前提条件,并不是该地区文昌组泥岩有机质富集的主要控制因素,在较高的古生产力背景下,水体氧化还原条件控制着有机质的富集,水体还原环境有利于藻类和细菌的发育,而对陆地高等植物的输入有一定限制作用^[16]。YJ-1 井文昌组烃源岩生物标志化合物具有高 C₃₀4-甲基甾烷、低 Ts、低奥利烷、低重排藿烷及低树脂化合物等特征,揭示文昌组烃源岩有机质以水生藻类为主,为珠江口盆地典型中深湖相烃源岩^[11]。同时,还原条件下有利于有机质的保存,综合元素分析和生标特征,恩平 21 洼文昌组泥岩中有机质的富集属于“保存模式”。

5.2 有机质富集的主控因素

湖泊水体的氧化还原条件与水体深度具有相关性^[3]。图 6 显示古氧相参数 V/(V+Ni)与 M 值之

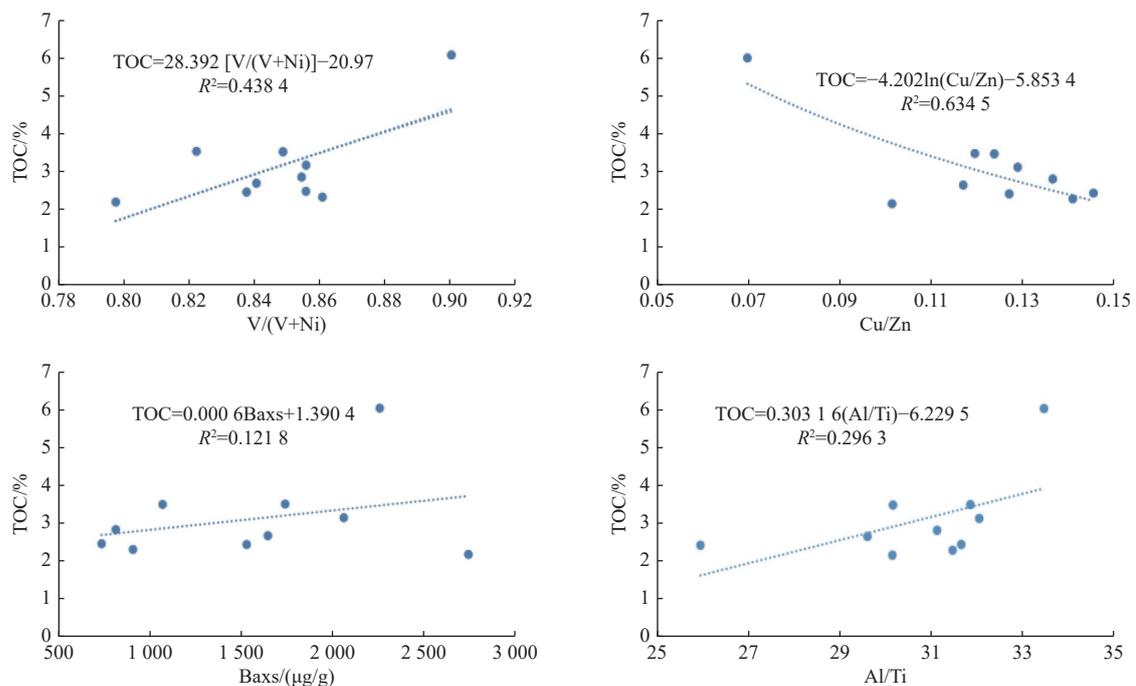


图 5 恩平 21 洼 YJ-1 井泥岩古氧相和古生产力与有机碳含量的关系

Fig.5 Relationship between paleo-oxygenation facies, paleo-productivity and TOC of mudstones samples of Well YJ-1 in Enping Sub-sag 21

间呈较强的负相关关系,而与 V/Cr 之间呈较强的正相关关系,相关系数分别约为 0.65 和 0.97; Cu/Zn 与 M 值之间呈较强的正相关关系,而与 V/Cr 之间呈较强的负相关关系,相关系数分别约为 0.71 和 0.62。古氧相参数与古水深参数相关关系较强,表明恩平 21 洼泥岩沉积时期水体环境的氧化还原条件受水深影响明显。水深的增加有利于隔绝空气中的氧气,造成深水区水体含氧量降低,有利于还

原环境的保持,进而有利于藻类和细菌的发育,以及有机质的保存。

当气候温热潮湿时,易造成降水量大于蒸发量,湖泊沉积水体水深相对增加^[16],因此,古气候条件会影响湖泊水体深度,进而影响沉积水体的氧化还原条件。恩平 21 洼 YJ-1 井泥岩古气候参数 CIA 值与古水深参数 M 值之间存在较好的负相关关系,相关系数约为 0.77; 而与 V/Cr 之间存在一定的正

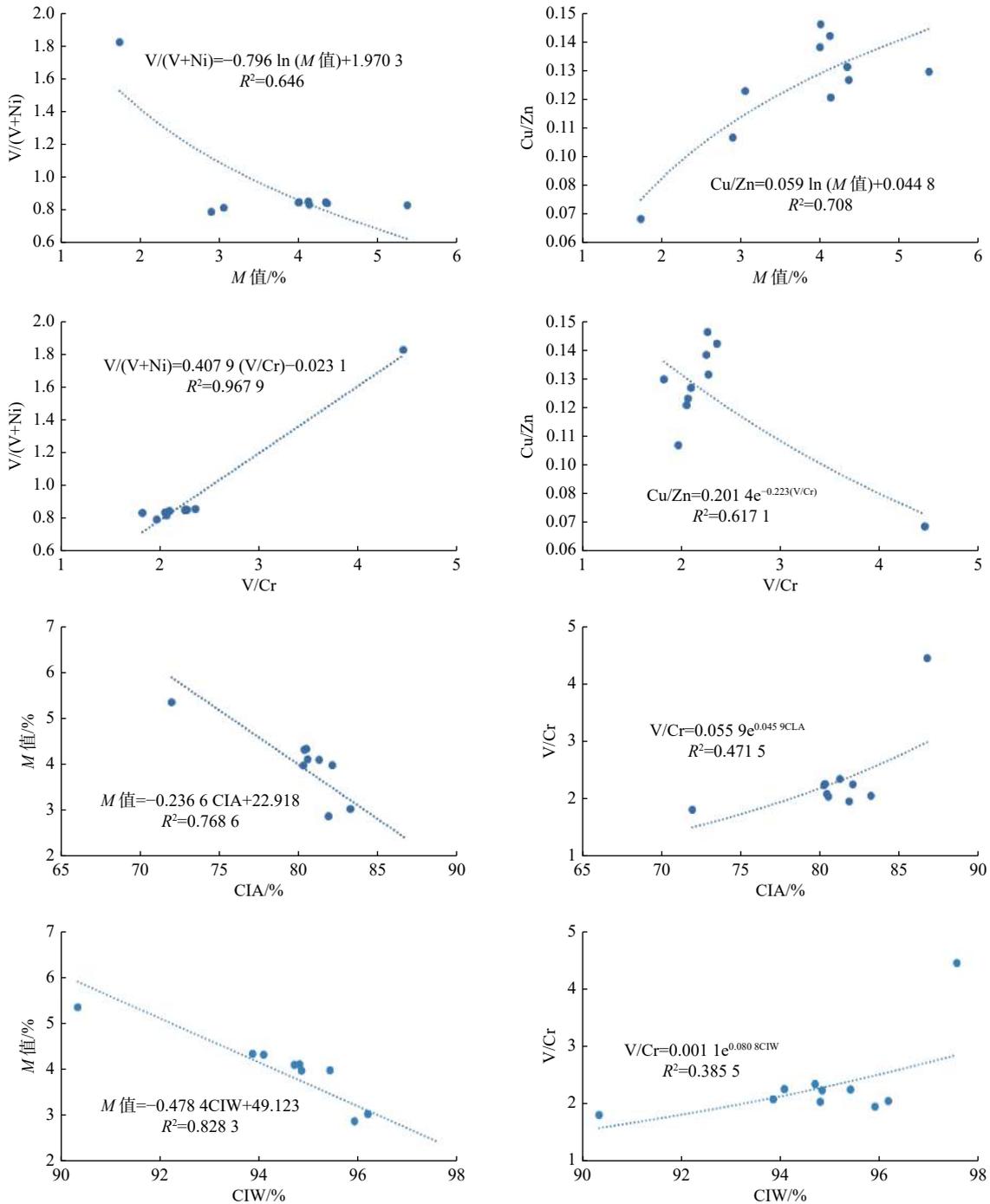


图 6 恩平 21 洼 YJ-1 井泥岩古水深同古氧相及古气候的关系

Fig.6 Relationship between paleo-water depth, paleo-oxygenation facies and paleo-climate conditions of mudstones samples of Well YJ-1 in Enping Sub-sag 21

相关关系,相关系数约为 0.47; CIW 值与古水深参数 M 值之间存在较好的负相关关系,相关系数约为 0.83; 而与 V/Cr 之间存在一定的正相关关系,相关系数约为 0.39(图 6)。前文已论述恩平 21 洼文昌组沉积期气候特征为温暖湿润-温热潮湿,该环境条件有利于湖盆中藻类发育和陆地上植物生长,为优质烃源岩发育提供充足的物质基础。CIA 值和 CIW 值指示文昌组沉积期古风化作用总体较强,降雨量相对较大,沉积水体深度较深,水体含氧量较低,有利于藻类和细菌的发育,不利于陆地高等植物的输入。同时,还原环境下有利于有机质的保存^[31]。烃源岩生标特征显示恩平 21 洼主要发育有机质贡献以水生藻类为主的中深湖相烃源岩^[11]。

综上,阳江东凹恩平 21 洼文昌组古气候条件是文昌组沉积期有机质富集的主要控制因素,温热潮湿的气候对湖泊生产力有一定的积极影响,同时降水量较大,湖泊水体较深,有利于湖底还原环境的形成和保持,进而有利于有机质的保存。

6 结论

(1)对比 UCC 常、微量元素含量,恩平 21 洼文昌组泥岩具有富集 Al_2O_3 、 K_2O 和 MnO , 贫 CaO 、 MgO 和 Na_2O , 富 Li 、 Be 、 Zn 、 Rb 、 Cs 、 Ba 、 Pb 、 Th 和 U , 贫 Sr 、 V 和 Cr 的特征。

(2)恩平 21 洼文昌组沉积期湖泊水深相对较深,纵向水深变化小,水体分布稳定,水体以还原环境为主,古生产力相对较高,但纵向差异大。泥岩有机碳含量与古生产力参数相关性较差,而与古氧相参数之间具有较好的相关性,水体还原性越强,泥岩有机碳含量越高,显示恩平 21 洼泥岩有机质富集受控于水体的氧化还原程度,还原条件下有利于有机质的保存,有机质富集属于“保存模式”。

(3)恩平 21 洼文昌组沉积期气候属于温热潮湿,古气候条件是文昌组有机质富集的关键性控制因素。温热潮湿的气候对湖泊生产力有一定的积极影响,同时造成降水量较大,湖泊水体较深,有利于湖底还原环境的形成和保持,进而有利于有机质的保存。

参考文献:

[1] 宋春晖,鲁新川,邢强,等. 临夏盆地晚新生代沉积物元素特征与古气候变迁[J]. *沉积学报*, 2007, 25(3): 409-416.
[2] 程岳宏,于兴河,韩宝清,等. 东濮凹陷北部古近系沙三段地球化学特征及地质意义[J]. *中国地质*, 2010, 37(2): 357-366.

[3] 陈斌,李勇,邓涛,等. 晚三叠世龙门山前陆盆地须家河组泥页岩沉积环境及有机质富集模式[J]. *地质科学*, 2019, 54(2): 434-451.
[4] 石创,龙祖烈,朱俊章,等. 珠江口盆地白云凹陷恩平组泥岩元素地球化学特征及环境指示意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(5): 79-86.
[5] 石创. 珠江口盆地阳江东凹文昌组泥岩稀土元素特征及其地质意义[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 1-11.
[6] 彭光荣,张向涛,许新明,等. 南海北部珠江口盆地阳江凹陷油气勘探重要发现与认识[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(3): 267-279.
[7] 田立新,张向涛,彭光荣,等. 珠江口盆地阳江凹陷石油地质特征及成藏主控因素[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(1): 13-22.
[8] 刘军,彭光荣,朱定伟,等. 珠江口盆地阳江凹陷东部地区断控成藏条件[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 123-130.
[9] 吴静,张晓钊,白海军,等. 珠江口盆地阳江凹陷中新统潮控体系及其岩性圈闭勘探意义[J]. *地球科学*, 2021, 46(10): 3673-3689.
[10] 汪晓萌,彭光荣,吴静,等. 珠江口盆地恩平 21 洼文昌组沉积期原型盆地及其对优质烃源岩的控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 158-167.
[11] 熊万林,龙祖烈,朱俊章,等. 阳江凹陷恩平 21 洼不同沉积环境烃源岩发育特征及成藏贡献[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(5): 50-56.
[12] 刘欣颖,吴静,朱定伟,等. 珠江口盆地多期走滑构造与叠合型拉分盆地: 以阳江东凹为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 6-19.
[13] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell, 1985: 312.
[14] RUDNICK R L, SHAN S. *Composition of the Continental Crust*[M]//*Treatise on Geochemistry: The Crust*. Oxford: Elsevier-Pergamon, 2004: 1-64.
[15] WEDEPOHL K H. Environmental influences on the chemical composition of shales and clays[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1971, 8(71): 305-333.
[16] 尹锦涛,俞雨溪,姜呈馥,等. 鄂尔多斯盆地张家滩页岩元素地球化学特征及与有机质富集的关系[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1544-1556.
[17] MAKEEN Y M, MOHAMMED H H, WAN G A. The origin type and preservation of organic of the Barremian-Aptian organic-rich shales in the Muglad Basin, Southern Sudan, and their relation to paleoenvironment and paleoclimate conditions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 65: 187-197.
[18] NESBITT H W, YOUNG G M. Early Proterozoic climate and plate motion inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299: 715-717.
[19] HARNOIS L. The CIW index: a new chemical index of weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55(3/4): 319-322.
[20] NESBITT H W, YOUNG G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1984, 48: 1523-1534.
[21] MCLENNAN S M. Weathering and global denudation[J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2): 295-303.

- [22] 冯连君, 储雪蕾, 张同钢, 等. 莲沱砂岩—南华大冰期前气候转冷的沉积记录[J]. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2387-2393.
- [23] 郭艳琴, 余芳, 李洋, 等. 鄂尔多斯盆地东部石盒子组盒8沉积环境的地球化学表征[J]. *地质科学*, 2016, 51(3): 872-890.
- [24] JONES B J, MANNING A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation palaeoredox conditions in ancient mudstone[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [25] 王志勇, 孟任祥, 王作栋, 等. 吐哈盆地台北凹陷侏罗系煤系源岩地球化学分类及意义[J]. *沉积学报*, 2010, 12(6): 1238-1243.
- [26] 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 中国海相烃源岩发育控制因素[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3): 39-48.
- [27] 罗情勇, 钟宁宁, 朱雷, 等. 华北北部中元古界洪水庄组埋藏有机碳与古生产力的相关性[J]. *科学通报*, 2013, 58(11): 1036-1047.
- [28] DYMOND J, SUESS E, LYLE M. Barium in deep-sea sediment: a geochemical proxy for paleoproductivity[J]. *Paleoceanography*, 1992, 7: 163-181.
- [29] TIMOTHY D A, CALVERT S E. Systematics of variations in excess Al and Al/Ti in sediment from the central equatorial Pacific[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(2): 127-130.
- [30] 任景玲, 张经, 刘素美. 以Al/Ti比值为地球化学示踪剂反演海洋古生产力的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(12): 1314-1320.
- [31] 刘占红, 李思田, 辛仁臣, 等. 地层记录中的古气候信息及其与烃源岩发育的相关性: 以渤海黄河口凹陷古近系为例[J]. *地质通报*, 2007, 26(7): 830-840.

Relationship between element geochemical characteristics and organic matter enrichment of Wenchang Formation mudstones in Enping Sub-sag 21, Pearl River Mouth Basin

PENG Guangrong^{1,2}, SHI Chuang^{1,2*}, LONG Zulie^{1,2}, WU Jing^{1,2}, XIONG Wanlin^{1,2}, ZHU Dingwei^{1,2}, MA Ning^{1,2}

(1 Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen 518054, China; 2 CNOOC Deepwater Development Ltd., Shenzhen 518054, China)

Abstract: The elements of mudstones can well preserve the original sedimentary records. To define the element geochemical characteristics of the Wenchang Formation mudstones in Enping Sub-sag 21 and its relationship with enrichment of organic matter, 10 debris samples of the mudstones from well YJ-1 were collected, on which geochemical tests of organic carbon, major elements and trace elements were conducted. The geochemical characteristics of major and trace elements were examined, and paleo-environmental indicators such as paleo-climate, paleo-water depth, paleo-oxygenation facies, and paleo-productivity of the Wenchang Formation in the subsag were systematically analyzed. Compared with the content of major and trace elements in the Upper Continental Crust (UCC), major elements of the Wenchang Formation mudstones in Enping Sub-sag 21 are relatively enriched in Al₂O₃, K₂O, and MnO, and poor in CaO, MgO, and Na₂O. Trace elements are rich in Li, Be, Zn, Rb, Cs, Ba, Pb, Th, U, and poor in Sr, V, and Cr. Paleoenvironmental indicators show that climate of Enping Sub-sag 21 in the Wenchang period was warm-moist to warm-humid. The paleo-lake was relatively deep and stable. Redox environment of the lake was mainly sub-reductive. Paleo-productivity of the lake was relatively high, and the vertical difference was significant. Correlation between organic carbon content of mudstones and paleo-productivity parameters is poor, but there is a good positive correlation with reducibility of the lake. Enrichment of organic matter was controlled by oxidation-reduction degree of the lake. Reduction condition of the lake was conducive to the preservation of organic matter. Enrichment of organic matter belongs to the "preservation mode". Further analysis shows that paleo-climate is the key factor for enrichment of organic matter in the Wenchang Formation. Warm and humid climate has a certain positive impact on productivity of the lake. Meanwhile, the precipitation was large, and the lake was deep, which was conducive to a reducing environment at the lake bottom, and thus conducive to the preservation of organic matter.

Key words: organic matter enrichment; depositional environment; element geochemistry; Wenchang Formation; Enping Sub-sag 21; Pearl River Mouth Basin