

尼日尔 Termit 盆地 Yogou 组泥岩地球化学特征及沉积背景

汤望新,姜在兴,刘若涵,王旭影

[中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083]

摘要:Yogou 组泥岩是 Termit 盆地主要的烃源岩之一。为了揭示 Termit 盆地 Yogou 组沉积时期物源属性、物源区的构造背景及其沉积环境,通过对 4 口井 20 块泥岩样品的主量元素、微量元素和稀土元素测试,对 Yogou 组泥岩的元素地球化学特征进行了综合分析。结果显示:Yogou 组上部以被动大陆边缘物源为主,下部以长英质物源为主,物源区处于大陆岛弧的构造背景条件下。Yogou 组中-上部沉积时期水体盐度相对较低,为海陆过渡相沉积;Yogou 组下部沉积时期水体盐度较高,为海相沉积。*CIA* 指数、*Sr/Cu* 值等指标表明,Yogou 组沉积时期研究区处于湿热的气候条件; $V/(V+Ni)$ 等指标说明,Yogou 组沉积时期水体处于厌氧环境。

关键词:物源;地球化学;沉积环境;Yogou 组;Termit 盆地

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geochemical characteristics and deposition environment of the Yogou Formation mudstone in the Termit Basin, Niger

Tang Wangxin, Jiang Zaixing, Liu Ruohan, Wang Xuying

[College of Energy Resource, University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract:Yogou Formation mudstone is one of the main hydrocarbon source rocks in the Termit Basin. In order to reveal the sediment source provenance attribute, tectonic setting and sedimentary environment of the Yogou Formation, geochemical elements of mudstones in the Yogou Formation were comprehensively analyzed, based on experimental data of the major elements, trace elements and rare earth elements of the 20 samples from 4 wells. The results show that the provenances of the upper Yogou Formation are derived from a passive margin source, while the provenances of the lower Yogou Formation are derived from a felsic source. The tectonic setting of the Yogou Formation provenance is similar to continental island arc. Water body during the deposition middle-upper Yogou Formation appears to have relatively lower salinity, in a marine-continental transition environment. The water body during the deposition of lower Yogou Formation appears to have relatively higher salinity, marine environment. According to *CIA* index and *Sr/Cu* ratio, the climate was warm-wet and water body was in the anaerobic environment based on the ratio of $V/(V+Ni)$ during the Yogou Formation period.

Key words:provenance, geochemistry, sedimentary environment, Yogou Formation, Termit Basin

目前,元素地球化学分析方法广泛应用于沉积物物源、构造背景以及沉积环境分析中^[1],沉积岩中某些化学性质稳定的元素(如 Si, Th, Sc, Zr, Hf 等),主要受物源本身的影响,这些特征元素在风化、搬运、沉积和成岩作用过程中含量基本保持不变。因此,这些特征元素可以作为沉积区和物源区对比的良好指标^[2-3],

对于追踪物源区属性和判别物源区的构造背景 also 具有重要意义。

此外,沉积物中如 V, Cr, Ni, Co, U 等元素的含量,不仅取决于元素本身的物理化学性质,而且还受到古沉积环境的影响^[4],沉积物地球化学特征则反映了古沉积环境及其演化信息^[5]。因此,可以应用沉积岩中

收稿日期:2015-10-08;修订日期:2017-05-15。

第一作者简介:汤望新(1985—),男,博士研究生,沉积学理论与应用。E-mail:zhuifeng982@163.com。

通讯作者简介:姜在兴(1962—),男,博士、教授,沉积学。E-mail:jiangzx@cugb.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05029)。

的元素地球化学的变化特征对其沉积环境进行分析。尼日尔 Termit 盆地目前勘探程度较低,资料较少,对其上白垩统 Yogou 组沉积时期的物源及沉积环境研究具有许多争议,本文拟从 Yogou 组泥岩的地球化学特征来探讨该时期的沉积背景。

1 地质背景

Termit 盆地位于尼日尔东部,是中西非裂谷系中最大的白垩纪—古近纪裂谷盆地之一,盆地北部与 Tefidet, Kafa, Grein, Tener 盆地相连,南部与 Bornu 盆地相邻。盆地发育于前泛非期变质基底之上,呈北西—南东延伸,南北长约 300 km,东西宽 60~110 km,盆地沉积物厚度超过 12 000 m(图 1)^[6]。下白垩统为 300~2 500 m 厚的陆相碎屑岩,上白垩统为 800~4 200 m 厚的浅海相页岩、砂岩、粉砂岩夹薄层碳酸盐岩,自下而上划分为 Donga 组、Yogou 组及 Madama 组,其中 Yogou 组包括 YS3, YS2, YS1 等 3 个层序。本研究将 YS3 定义为 Yogou 组上部,YS2 和 YS1 定义为 Yogou 组下部。新生代地层为 350~2 500 m 厚的页岩及陆相砂岩,为河流相沉积。Termit 盆地早白垩世—古近纪经历

了“裂谷—拗陷—裂谷”的构造演化,表现为叠合型裂谷盆地,早白垩世为明显的裂陷期,晚白垩世为拗陷期。

2 样品来源及分析方法

本研究针对 Termit 盆地 Helit-1, Tehi-1, Dibeilla-1, Ounissou-1 这 4 口井(图 1)上白垩统 Yogou 组取样,共采集 20 块新鲜未风化的泥岩样品。常量元素是使用荷兰 Philips 生产的 PW2404 型号 X-射线荧光光谱仪(XRF)测定,检测精度优于 5%。微量元素和稀土元素是使用 Finnigan-MAT 研发的 ELEMENT 型号高分辨率电感耦合等离子质谱仪(HR-ICP-MS)测定,检测精度优于 10%。以上样品测试都是在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

3 分析结果

3.1 常量元素特征

Termit 盆地上白垩统 Yogou 组泥岩常量元素分析

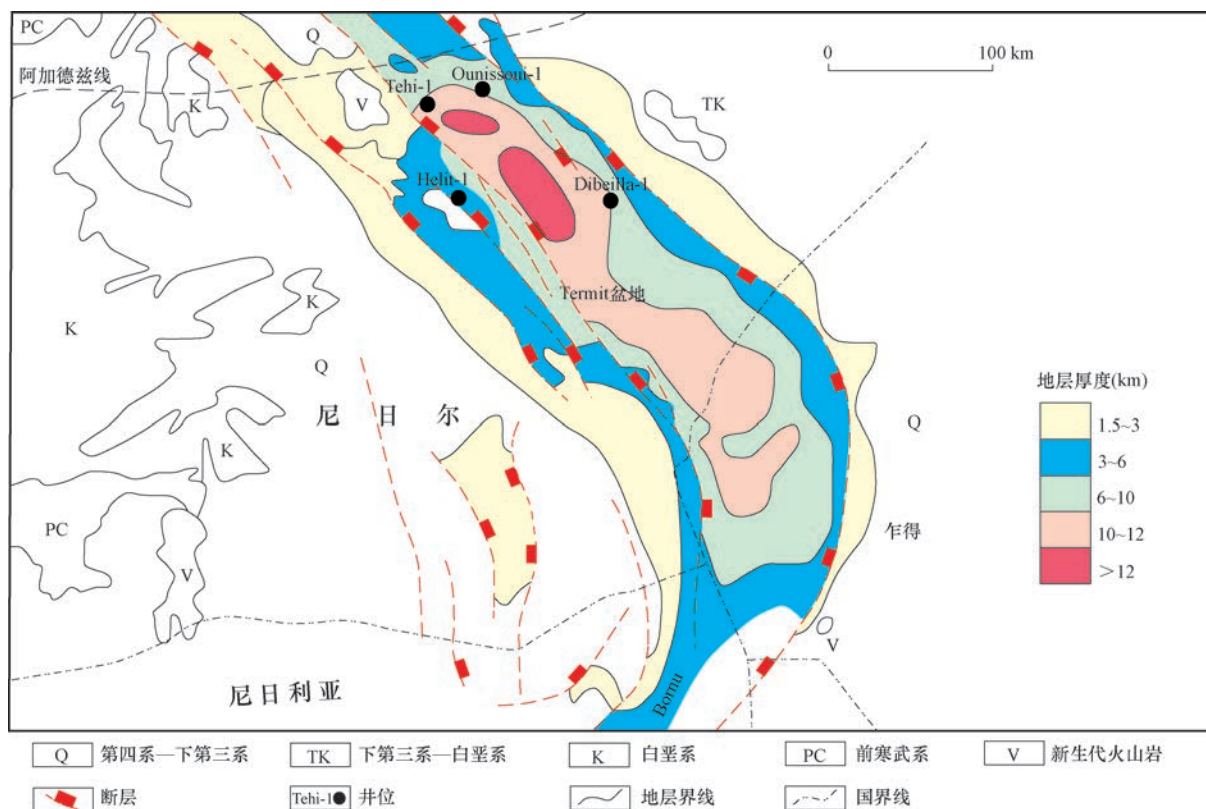


图 1 Termit 盆地地层厚度及取样井位

Fig. 1 Stratigraphic isopach of the Termit Basin and the location of sampling wells

结果和特征元素比值见表1。样品的主量元素平均值与澳大利亚太古宇页岩(PAAS)主量元素^[7]相比,研究区Yogou组上部泥岩富集 TiO_2 (1.198%), 贫 TFe_2O_3 (3.08%), MgO (0.89%), CaO (0.201%), Na_2O (0.711%), MnO (0.021%) 和 P_2O_5 (0.069%), 泥岩的 SiO_2 (62.4%), K_2O (2.85%) 和 Al_2O_3 (18.68%) 含量与PAAS的含量相似;Yogou组下部泥岩贫 SiO_2 (54.66%), CaO (0.447%), K_2O (2.46%) 和 MnO (0.035%), 泥岩的 Al_2O_3 (19.99%), TFe_2O_3 (7%), MgO (2.09%), Na_2O (0.94%), TiO_2 (0.99%) 和 P_2O_5 (0.149%) 含量与PAAS的含量相似。

3.2 微量元素特征

Termit盆地Yogou组泥岩微量元素含量与澳大利亚太古宇页岩(PAAS)相比,具有相近的含量(Ba元素除外),Yogou组泥岩的Ba元素含量(平均值 $14\,145.5 \times 10^{-6}$)明显高于澳大利亚太古宇页岩(PAAS)Ba的含量(650.0×10^{-6})(表2)。

3.3 稀土元素特征

研究区泥岩样品的稀土总量($\sum \text{REE}$)相对较高,分布范围在 $97.95 \times 10^{-6} \sim 277.08 \times 10^{-6}$,平均为 202.13×10^{-6} ,与PAAS的稀土元素总量 183×10^{-6} 相近。 $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值为2.98~4.35,指示轻重稀土元素分异程度的 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为6.97~10.40,轻稀土元素分异程度的指标 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为2.67~4.42,重稀土元素分异程度的指标 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为1.43~2.14, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} > (\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$,说明轻稀土元素比重稀土元素更加富集。 δEu 为0.72~0.97,具有轻微的负铕异常(表3)。

通过球粒陨石标准化处理后,从稀土元素配分曲线图中可以看出,所有样品的稀土元素配分模式相似(图2),均表现为轻稀土元素相对富集,重稀土元素平坦分布的特征。

4 讨论

4.1 物源区性质分析

$\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值常用来指示细粒碎屑岩源区岩石的成分,粘土矿物及长石的 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值具有显著的差异。在碱性长石中, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值介于0.4~1.0,在伊利石中为0.3左右,而在其他粘土矿物中其值趋近于0^[8]。而泥质岩中 $w(\text{K}_2\text{O})/$

$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值大于0.5,表明其母岩中有一定含量的碱性长石。 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值小于0.4时,表明其母岩中碱性长石含量较少^[9]。Termit坳陷Yogou组泥岩的 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值为0.06~0.20,上部泥岩和下部泥岩 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均值分别为0.16和0.13,盆地西侧和盆地东侧样品平均值分别为0.16和0.10,二者都小于0.4,说明母岩中碱性长石含量较低。

沉积岩的 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 比值小于14,指示其沉积物母岩可能为铁镁质岩石^[10],而 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{TiO}_2)$ 比值介于19~28时,其母岩可能为花岗闪长质和英云闪长质(或者安山质和流纹质)岩石^[11]。研究区Yogou组上部泥岩 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为9.69~36.97,平均为17.49,表明其物源为长英质岩石,且有铁镁质岩石的混入;Yogou组下部泥岩 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为14.30~26.05,平均为20.49,表明其物源为长英质岩石和安山质岩石。

泥岩中的微量元素可以揭示沉积岩的物源属性信息。相对于基性岩,La和Th富集于长英质岩石中,而基性岩中Co,Sc和Cr较为富集。基于这些元素在风化过程中极高的稳定性,其比值可指示物源的组分特征^[11-13]。故此,本研究将泥岩的非迁移元素特征比值

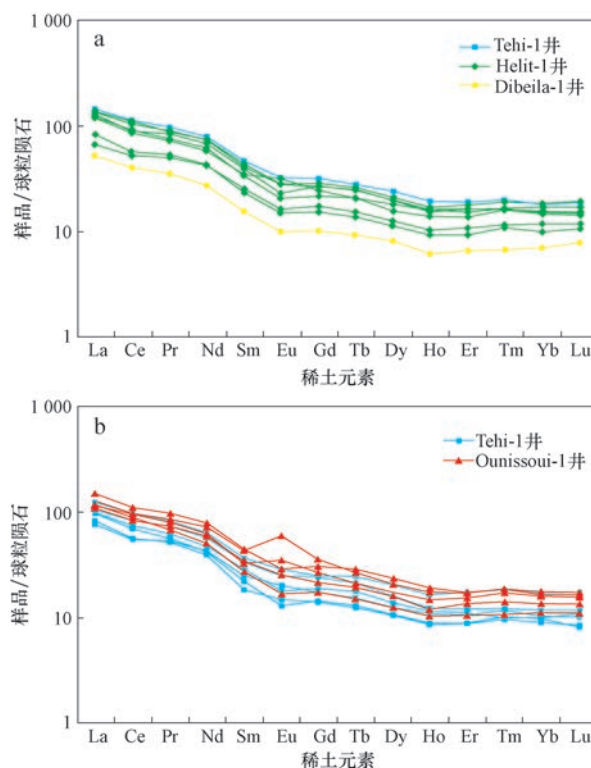


图2 Termit盆地Yogou组泥岩球粒陨石标准化REE配分图

Fig. 2 Chondrite-normalized REE distribution patterns of mudstone in the Yogou Formation, Termit Basin

a. Yogou组上部; b. Yogou组下部

表 1 Termit 盆地 Yogou 组泥岩常量元素含量及特征元素含量比值
Table 1 Major element contents and ratios of mudstone in the Yogou Formation, Termit Basin

井号	深度/m	组分含量/%											特征组分含量比值					层位			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	TF _{e2} O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失量	总和	K ₂ O/Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	MgO/CaO *	MnO/TiO ₂		CIA	β	
Dibeila-1	3 061	57.17	22.29	4.75	0.98	0.33	0.16	2.98	0.02	2.00	0.19	8.97	99.85	0.13	11.15	6.07	0.01	85.54	4.41	Yogou 组 上部	
Helit-1	2 123	65.18	15.45	2.48	0.68	0.38	0.33	2.95	0.03	1.02	0.04	10.97	99.51	0.19	15.15	2.07	0.03	78.27	4.43		
Helit-1	2 140	71.97	14.49	1.86	0.61	0.14	0.26	2.83	0.02	1.20	0.05	6.51	99.94	0.20	12.08	4.38	0.02	79.43	4.23		
Helit-1	2 160	73.98	13.11	2.32	0.85	0.13	1.11	2.18	0.02	1.17	0.04	5.05	99.96	0.17	11.21	6.44	0.02	74.73	6.48		
Helit-1	2 175	58.18	21.33	1.82	0.78	0.16	0.65	3.37	0.01	0.87	0.06	12.74	99.97	0.16	24.60	4.62	0.01	80.90	3.66		
Helit-1	2 212	54.21	21.39	5.32	0.88	0.17	0.66	2.91	0.05	1.00	0.07	13.33	99.99	0.14	21.39	5.33	0.05	82.46	4.11		
Helit-1	2 244	72.81	12.70	2.26	0.65	0.15	1.67	2.08	0.02	1.31	0.05	6.23	99.92	0.16	9.69	4.31	0.01	70.64	5.13		
Helit-1	2 258	60.27	20.54	4.02	1.21	0.19	1.13	2.87	0.02	1.49	0.08	8.07	99.90	0.14	13.79	6.37	0.02	79.43	5.89		
Tehi-1	2 271	48.64	26.80	2.85	0.81	0.15	0.42	3.49	0.01	0.73	0.05	16.03	99.97	0.13	36.97	5.45	0.01	84.96	3.01		
Tehi-1	2 412	44.50	21.19	1.44	0.56	0.25	0.46	2.81	0.01	1.12	0.06	27.04	99.43	0.13	18.92	2.26	0.01	83.28	2.63		
平均值																					
Tehi-1	2 505	60.44	17.30	7.47	1.26	0.32	1.03	2.62	0.03	1.21	0.14	8.03	99.84	0.15	14.30	3.91	0.02	77.15	7.28	Yogou 组 下部	
Tehi-1	2 650	57.54	18.35	7.78	2.69	0.68	0.94	3.12	0.03	0.87	0.27	7.60	99.87	0.17	21.07	3.94	0.04	74.84	14.66		
Tehi-1	2 770	54.16	20.03	8.60	2.89	0.84	0.86	2.91	0.03	0.97	0.33	8.25	99.88	0.15	20.59	3.42	0.03	76.96	14.43		
Tehi-1	2 965	55.42	19.65	6.82	2.69	0.56	0.72	3.46	0.03	0.96	0.16	9.25	99.72	0.18	20.55	4.80	0.03	76.71	13.69		
Tehi-1	3 025	55.88	18.75	7.01	3.14	0.30	0.67	3.09	0.03	0.90	0.08	9.95	99.80	0.16	20.88	10.57	0.03	78.95	16.75		
Oumissoui-1	2 554	58.94	18.55	7.06	1.64	0.29	1.28	2.15	0.08	0.98	0.12	8.37	99.46	0.12	18.95	5.58	0.08	78.85	8.84		
Oumissoui-1	2 575	57.34	19.67	7.84	2.12	0.40	1.29	2.19	0.02	0.98	0.14	7.80	99.79	0.11	20.13	5.31	0.02	79.01	10.78		
Oumissoui-1	2 605	55.55	20.81	5.56	2.31	0.61	1.27	1.62	0.05	0.86	0.15	10.94	99.85	0.08	21.11	3.81	0.05	80.78	11.10		
Oumissoui-1	2 635	48.35	25.31	9.24	1.83	0.30	0.68	1.52	0.05	1.19	0.10	11.42	99.99	0.06	21.27	6.06	0.04	88.40	7.23		
Oumissoui-1	2 650	53.19	20.24	8.13	1.88	0.36	1.11	1.60	0.03	0.78	0.10	10.31	97.73	0.08	26.05	5.24	0.04	82.76	9.29		
平均值																					
													0.13	20.49	5.26	0.04	79.44	11.40			

注:表中 CaO* 为 CaO 或者 Na₂O 含量(当 CaO 的摩尔数大于 Na₂O 时,取 Na₂O 的值;小于 Na₂O 时,取 CaO 的值)。

CIA(化学蚀变指数) = $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$; $\beta = 100(\text{MgO} / \text{Al}_2\text{O}_3)$ 。

PAAS 为澳大利亚太古宙标准页岩,PAAS 组分含量, SiO₂ 为 62.80%, Al₂O₃ 为 18.90%, TF_{e2}O₃ 为 7.18%, MgO 为 2.19%, CaO 为 1.29%, Na₂O 为 1.19%, K₂O 为 3.68%, MnO 为 0.11%, TiO₂ 为 0.99%, P₂O₅ 为 0.16%, 烧失量为 6.00%。

表 2 Termit 盆地 Yogou 组泥岩微量元素含量及特征微量元素含量比值
Table 2 Trace element contents and ratios of mudstone in the Yogou Formation, Termit Basin

井号	深度/ m	微量元素含量/10 ⁻⁶														特征微量元素含量比值							层位						
		Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Sr	Mo	Ba	Th	U	Zr	Hf	La/ Th	Co/ Th	La/ Sc	Th/ Sc	Th/ Cr	Sr/ Cu	B/ Ga		Zr/Y	V/(V + Ni)				
Dibeila-1	3 061	23.80	180.00	136.00	23.70	57.00	39.20	32.00	61.80	1.32	982.00	14.30	5.43	390.00	9.82	3.69	1.66	2.21	0.60	0.11	1.58	1.31	8.76	0.76	Yogou 组上部				
Helit-1	2 123	16.90	131.00	140.00	10.50	27.80	50.20	19.60	79.40	1.52	6 663.00	12.10	3.79	343.00	9.44	3.58	0.87	2.56	0.72	0.09	1.58	2.62	9.27	0.82					
Helit-1	2 140	20.00	125.00	92.10	15.10	33.30	42.30	20.50	51.30	1.64	1 362.00	13.10	2.66	422.00	11.50	3.53	1.15	2.31	0.66	0.14	1.21	1.81	12.00	0.79					
Helit-1	2 160	13.40	95.60	82.90	6.15	20.60	28.60	16.70	78.30	0.47	1 432.00	11.50	3.76	360.00	9.67	4.32	0.53	3.71	0.86	0.14	2.74	2.27	9.76	0.82					
Helit-1	2 175	16.80	169.00	110.00	24.00	50.90	43.10	25.10	52.80	1.32	863.00	8.89	2.30	280.00	7.19	2.74	2.70	1.45	0.53	0.08	1.23	1.49	14.70	0.77					
Helit-1	2 212	19.10	157.00	118.00	19.70	50.40	31.40	28.80	73.00	0.90	630.00	7.69	2.58	259.00	6.48	3.94	2.56	1.59	0.40	0.07	2.32	1.71	13.10	0.76					
Helit-1	2 244	11.70	92.90	92.50	24.00	36.50	23.10	14.70	95.40	1.38	1 686.00	11.30	3.39	408.00	10.70	3.94	2.12	3.80	0.97	0.12	4.13	2.51	12.50	0.72					
Helit-1	2 258	21.00	167.00	123.00	42.80	68.60	38.00	28.10	86.80	1.11	1 685.00	13.80	4.14	403.00	10.70	3.62	3.10	2.38	0.66	0.11	2.28	1.62	10.20	0.71					
Tehi-1	2 271	16.70	166.00	116.00	6.31	36.10	70.00	31.80	75.40	1.52	832.00	9.47	3.12	224.00	5.96	2.02	0.67	1.14	0.57	0.08	1.08	1.27	23.20	0.82					
Tehi-1	2 412	17.50	136.00	91.40	6.68	27.00	40.60	25.00	57.40	1.44	3 391.00	8.36	2.53	398.00	8.65	3.34	0.80	1.59	0.48	0.09	1.41	4.64	20.10	0.83					
平均值		1.61 2.28 0.64 0.10 1.96 2.13 13.36 0.78																											
Tehi-1	2 505	18.40	140.00	106.00	28.40	52.30	33.60	23.00	76.20	2.13	2 760.00	12.40	4.81	360.00	9.30	3.67	2.29	2.47	0.67	0.12	2.27	3.12	9.09	0.73	Yogou 组下部				
Tehi-1	2 650	18.00	154.00	104.00	20.50	45.70	24.80	24.50	124.00	2.15	1 294.00	9.94	3.48	235.00	6.15	3.65	2.06	2.02	0.55	0.10	5.00	3.90	8.08	0.77					
Tehi-1	2 770	20.80	253.00	160.00	21.60	49.10	28.10	26.40	117.00	2.63	553.00	9.47	3.37	178.00	4.59	3.81	2.28	1.74	0.46	0.06	4.16	3.86	6.79	0.74					
Tehi-1	2 965	18.70	180.00	134.00	16.90	46.10	28.60	25.50	123.00	2.00	1 720.00	10.10	1.68	197.00	4.67	2.97	1.67	1.60	0.54	0.08	4.30	3.87	11.50	0.80					
Tehi-1	3 025	18.10	158.00	108.00	27.50	57.80	40.30	24.10	142.00	3.50	545.00	10.60	4.57	172.00	4.29	3.31	2.59	1.94	0.59	0.10	3.52	3.15	8.35	0.73					
Oumissoui-1	2 554	19.70	138.00	106.00	22.10	45.30	33.30	25.00	83.90	0.79	6 704.00	11.80	3.39	323.00	8.59	3.59	1.87	2.15	0.60	0.11	2.52	2.28	9.07	0.75					
Oumissoui-1	2 575	19.30	135.00	97.20	18.40	40.10	28.70	25.30	122.00	1.12	3 542.00	10.90	3.57	262.00	6.43	3.67	1.69	2.07	0.56	0.11	4.25	2.80	8.79	0.77					
Oumissoui-1	2 605	18.20	157.00	112.00	15.60	38.30	29.80	27.40	181.00	1.42	686.00	14.50	3.36	207.00	5.53	2.96	1.08	2.36	0.80	0.13	6.07	4.53	8.81	0.80					
Oumissoui-1	2 635	26.00	131.00	108.00	22.70	67.60	37.20	24.00	109.00	0.62	1 114.00	13.60	4.59	370.00	9.39	4.06	1.67	2.12	0.52	0.13	2.93	2.19	8.79	0.66					
Oumissoui-1	2 650	22.10	137.00	115.00	22.40	58.80	37.60	28.90	126.00	0.93	2 444.75	12.40	4.48	373.00	9.60	3.81	1.81	2.14	0.56	0.11	3.35	2.50	9.66	0.70					
PAAS		16.00	150.00	110.00	23.00	55.00	50.00	20.00	200.00	1.00	650.00	14.60	3.10	210.00	5.00														
平均值		1.90 2.06 0.59 0.10 3.84 3.22 8.89 0.76																											

表 3 Termit 盆地 Yogou 组泥岩稀土元素含量及特征稀土元素含量比值
Table 3 REE contents and ratios of mudstone in the Yogou Formation, Termit Basin

井号	深度/ m	稀土元素含量/10 ⁻⁶														特征稀土元素含量比值						层位			
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	ΣLREE	ΣHREE	ΣLREE/ ΣHREE	Eu/ Eu _N *		(La/ Yb) _N	(La/ Sm) _N	(Gd/ Yb) _N
Dibeila-1	3 061	52.70	109.00	13.30	55.60	10.70	2.81	9.81	1.63	9.24	1.65	4.69	0.70	4.52	0.72	44.50	277.08	187.77	26.11	3.15	0.84	7.88	3.10	1.76	
Helit-1	2 123	43.30	82.50	9.85	41.40	7.94	2.78	7.43	1.20	6.68	1.35	3.82	0.60	4.20	0.65	37.00	213.88	203.02	27.49	2.98	1.11	6.97	3.43	1.43	
Helit-1	2 140	46.20	86.20	11.40	48.30	8.92	2.00	8.11	1.42	7.55	1.37	4.05	0.58	3.83	0.58	35.10	230.51	226.03	27.64	3.24	0.72	8.15	3.26	1.72	
Helit-1	2 160	49.70	100.00	12.40	52.10	9.40	2.43	8.21	1.45	7.61	1.31	4.08	0.59	3.82	0.57	36.90	253.67	118.48	18.36	3.50	0.85	8.79	3.33	1.74	
Helit-1	2 175	24.40	50.00	6.81	30.10	5.75	1.42	5.34	0.89	4.76	0.89	2.71	0.41	2.92	0.44	19.00	136.84	86.78	11.17	3.17	0.78	5.65	2.67	1.48	Yogou组 上部
Helit-1	2 212	30.30	54.00	7.31	30.30	5.26	1.31	4.66	0.79	4.33	0.79	2.31	0.38	2.45	0.41	19.80	144.59	128.48	16.11	3.58	0.81	8.36	3.63	1.54	
Helit-1	2 244	44.50	87.60	10.40	44.20	7.71	1.79	6.56	1.21	6.00	1.18	3.40	0.56	3.59	0.54	32.60	219.24	196.20	23.04	3.53	0.77	8.38	3.63	1.48	
Helit-1	2 258	50.00	106.00	11.90	52.00	9.91	2.44	8.75	1.51	8.04	1.46	4.40	0.68	4.59	0.74	39.50	262.42	232.25	30.17	3.33	0.80	7.36	3.18	1.54	
Tehi-1	2 271	19.10	38.80	4.85	19.60	3.56	0.87	3.08	0.54	3.08	0.52	1.65	0.24	1.75	0.30	9.67	97.95	200.27	26.31	4.16	0.80	7.38	3.38	1.43	
Tehi-1	2 412	27.90	52.50	7.25	30.30	5.78	1.75	5.30	0.90	4.77	0.93	2.68	0.42	2.55	0.39	19.80	143.42	181.45	22.55	3.32	0.97	7.39	3.04	1.68	
Tehi-1	2 505	45.50	92.60	11.30	45.00	8.33	2.49	7.62	1.43	7.76	1.41	4.32	0.66	4.27	0.66	39.60	233.35	125.48	17.94	3.03	0.96	7.20	3.44	1.45	
Tehi-1	2 650	38.30	80.00	9.96	40.70	7.72	2.15	7.41	1.24	6.01	1.06	3.03	0.44	2.90	0.45	29.10	201.37	180.38	17.93	3.46	0.87	8.92	3.12	2.07	
Tehi-1	2 770	36.10	71.50	8.47	33.80	6.59	1.55	5.70	1.03	5.26	0.97	2.78	0.36	2.47	0.42	26.20	177.00	242.10	31.64	3.50	0.77	9.88	3.45	1.87	
Tehi-1	2 965	30.00	53.80	7.12	27.60	4.27	1.29	4.28	0.72	4.00	0.73	2.21	0.34	2.23	0.32	17.20	138.92	218.25	31.55	3.87	0.92	9.09	4.42	1.56	
Tehi-1	3 025	35.10	65.90	7.66	29.70	5.11	1.12	4.38	0.75	4.09	0.76	2.20	0.36	2.43	0.31	20.60	159.88	244.11	32.97	4.03	0.72	9.76	4.32	1.46	
Oumissoui-1	2 554	42.40	91.70	11.00	44.60	7.52	3.05	8.17	1.23	6.65	1.27	3.84	0.61	3.95	0.60	35.60	226.58	205.22	28.13	3.23	1.19	7.25	3.55	1.68	Yogou组 下部
Oumissoui-1	2 575	40.00	79.70	9.94	41.60	8.01	2.20	6.58	1.13	6.09	1.02	3.35	0.50	3.37	0.51	29.80	204.00	178.83	22.54	3.47	0.93	8.02	3.14	1.58	
Oumissoui-1	2 605	42.90	84.70	9.32	35.70	6.31	1.45	5.29	0.87	4.69	0.88	2.62	0.38	2.78	0.42	23.50	198.31	158.01	18.99	4.35	0.77	10.40	4.28	1.54	
Oumissoui-1	2 635	55.20	105.00	13.40	55.80	10.20	2.50	9.29	1.67	8.97	1.62	4.37	0.66	4.40	0.66	42.10	273.74	124.08	14.84	3.28	0.78	8.48	3.41	1.71	
Oumissoui-1	2 650	47.20	93.10	11.80	51.20	9.79	5.16	10.90	1.54	9.97	1.47	4.26	0.66	4.12	0.62	38.60	249.80	144.59	15.29	3.11	1.53	7.74	3.03	2.14	

表 4 Termit 盆地 Yogou 组泥岩特征微量元素含量比值^[12]

Table 4 Trace elements ratios of mudstone in the Yogou Formation, Termit Basin^[12]

元素比	UCC	LUC	OC	Yogou 组 上部	Yogou 组 下部	Yogou 组 平均值
Co/Th	0.935	33.330	200.000	1.61	1.90	1.76
La/Sc	2.700	0.300	0.100	2.28	2.06	2.17
Th/Sc	0.97	0.029	0.935	0.64	0.59	0.61
Th/Cr	0.31	0.005	0.001	0.10	0.10	0.10

注:UCC 为 上地壳;LUC 为 下地壳;OC 为 洋壳。

(Co/Th, La/Sc, Th/Sc, Th/Cr) 与大陆上地壳 (UCC)、大陆下地壳 (LUC)、洋壳 (OC) 相应的特征比值对比 (表 4), 发现 Yogou 组泥岩样品的微量元素特征比值与大陆上地壳 (UCC) 的特征比值相近, 而与大陆下地壳 (LUC)、洋壳 (OC) 的特征比值相差较大。为了更好地阐明源岩属性, 本次研究采用了 Floy & Leveridge^[14] 提出的 La/Th-Hf 源岩属性判别图解及 Gu et al^[15] 提出的 Co/Th-La/Sc 源岩属性判别图解 (图 3), 对样品的物源区属性进行了揭示。由 La/Th-Hf 图中可以看出, Yogou 组上部泥岩样品主要落在被动大陆边缘物源区, 下部泥岩样品主要分布于长英质物源区和被动大陆边缘物源区; 由 Co/Th-La/Sc 图解可以看出, 研究区 Yogou 组泥岩样品主要分布于长英质火山岩和安山岩之间, 且偏向长英质火山岩的区域, 反映源岩以长英质岩石为主, 有安山岩的部分混入。

在沉积物源区的示踪指标中, 稀土元素配分模式是最为可靠的指标。上地壳岩石的稀土元素具有轻稀土元素相对富集、重稀土元素平坦分布和 Eu 的负异常的特征。如果泥岩中的碎屑组分来自上地壳, 泥岩中稀土元素的配分模式应该和上地壳的稀土元素配分模式相一致^[7]。研究区泥岩样品经球粒陨石标准化后,

稀土元素分布明显表现出轻稀土元素富集、重稀土元素含量稳定、Eu 元素的轻微负异常的特征 (图 2), 这与上地壳的稀土元素配分模式相似, 表明研究区泥岩的原始物质来源于上地壳。

4.2 构造背景判别

Roser 和 Korsch^[11] 根据对世界不同地区已知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 K_2O/Na_2O-SiO_2 构造背景判别图解。从 K_2O/Na_2O-SiO_2 判别图解中看出, 绝大部分样品数值都位于岛弧区域 (图 4)

Bhatia^[16-17] 认为陆源碎屑中的微量元素具有较高的稳定性, 例如 La, Th, Zr, Sc 等元素, 不容易受到风化搬运和沉积成岩的改造的影响。因此, 可以利用陆源碎屑中的微量元素地球化学特征来研究源区类型及其大地构造背景。Bhatia 和 Crook^[17-18] 通过对东澳大利亚 5 个已知构造背景的古代杂砂岩套的微量元素地球化学特征进行研究, 建立了一种物源区类型及大地构造背景的判别标准。根据 Bhatia 的构造背景判别图解 (图 5), 在 La-Th-Sc 及 Th-Sc-Zr/10 图解中本次研究样品绝大多数落在大陆岛弧区, 在 Th-Co-Zr/10 图解中样品大部分落在大陆岛弧区, 部分样品落在大陆岛弧和大洋岛弧的重叠区, 表明研究区 Yogou 组时期的物源区具有大陆岛弧的构造背景。

4.3 沉积环境分析

4.3.1 离岸距离 (古水深)

MnO/TiO₂ 比值可以用来判别沉积环境受到陆源

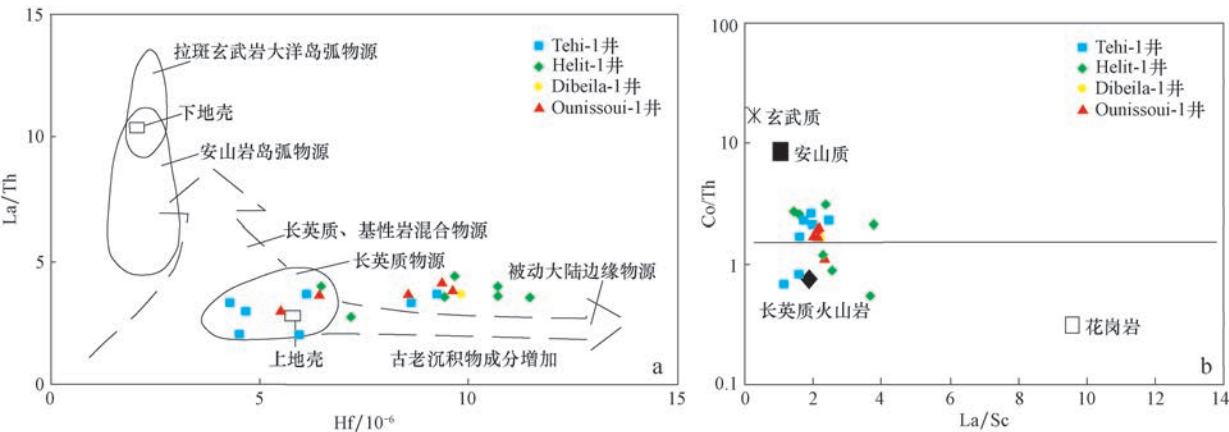


图 3 Termit 盆地 Yogou 组泥岩物源属性判别

Fig. 3 Identification for provenance attribute of mudstone in the Yogou Formation, Termit Basin
a. La/Th-Hf 源岩属性判别图解; b. Co/Th-La/Sc 源岩属性判别图解

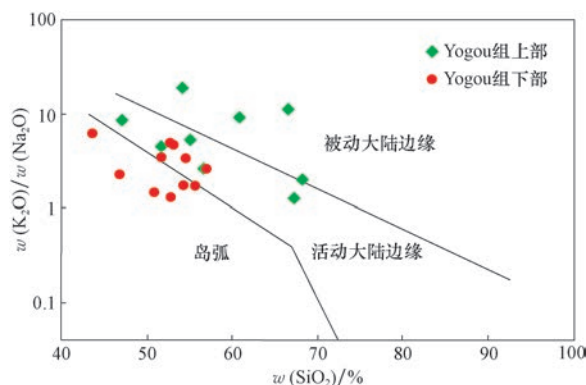


图4 Termit 盆地 Yogou 组泥岩常量元素构造背景揭示

Fig. 4 Major elements indication of tectonic setting in the Yogou Formation mudstone, Termit Basin

物质影响程度。这是因为如果没有热液流体的影响, Mn 几乎是均一地沉积,而 TiO_2 含量则随着陆源物质输入的减少而降低^[19]。由表1可知,研究区 Yogou 组中、上部 MnO/TiO_2 平均值为 0.02,相对较低,表明 Yogou 组中上部沉积时期受到陆源物质的影响相对较大,而 Yogou 组下部 MnO/TiO_2 平均值为 0.04,相对较高,表明 Yogou 组下部沉积时期受到陆源物质的影响相对较小。

Zr/Y 比值是指示沉积区域离陆源区距离远近的重要指标。Zr/Y 比值低,指示离陆源区较远、海水较深的沉积环境,反之则表示离陆源区较近、海水较浅的沉积环境^[20-21]。研究区 Yogou 组上部泥岩 Zr/Y 值平均为 13.36,而 Yogou 组下部泥岩 Zr/Y 值平均为 8.89。Yogou 组上部泥岩 Zr/Y 值明显比下部泥岩 Zr/Y 值高,表明 Yogou 组上部沉积时期水体相对较浅、离陆源区较近,Yogou 组下部沉积时期水体相对较深、离陆源区较远。

4.3.2 古盐度

汪凯明等^[22]依据沉积岩中 Al_2O_3 的亲陆性和 MgO 的亲海特性,建立了 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = \beta$ 值来判别水体盐度的变化。沉积水体由淡水向海水逐渐转变时, β 值随着水体的咸化而逐渐增大。在淡水沉积条件下, $\beta < 1$;在海陆过渡沉积水体中, $1 < \beta < 10$;在海水沉积环境中, $10 < \beta < 500$;在陆表海沉积环境或者泻湖沉积环境中, $\beta > 500$ 。由表1可知,研究区 Yogou 组上部 β 值介于 2.63~6.48,平均值为 4.40,代表海陆过渡沉积环境。Yogou 组下部 β 值范围在 7.23~16.75,平均值为 11.40,代表海相沉积环境。

B 和 Ga 相比,硼酸盐溶解度大,迁移能力强,海相泥质沉积物中含量较高,Ga 的活动性低,易于沉淀,多

富集在淡水沉积物中^[23-24]。因此泥岩的 B/Ga 比值,可以有效指示古盐度,B/Ga 比值增大,反映古盐度增加。由表2可知,研究区 Yogou 组上部 B/Ga 值相对较低,平均值为 2.13,Yogou 组下部 B/Ga 值相对较高,平均值为 3.22,同样表明 Yogou 组下部沉积时期的水体比其上部沉积时期水体的盐度要高。

4.3.3 古气候

泥岩的 $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 比值较高代表干热气候,比值较低指示温湿气候^[25-26],但在碱层出现层位该比值不但不是高值,反而呈现低值。因为碱层主要是碳钠盐岩,当钠盐开始沉淀时,水介质中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 由于充分沉淀其浓度已经很小,而且 Mg^{2+} 的活动性比 Ca^{2+} 活动性差很多,二者相比, Mg^{2+} 几乎消耗殆尽,岩层中 $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 比值呈现出低值或极低值^[4,27]。因此要对 $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 比值的气候指标进行完善,即当钠盐、钾盐等易溶性盐类不参与沉淀时, $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 的高值表明干热气候,而当易溶性盐类参与沉淀时,其低值 K^+ 和 Na^+ 的相对高值共同指示干热气候。由于泥岩中含有较多的硅酸盐矿物,而 CaO 与 Na_2O 在硅酸盐矿物中通常以 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。因此 McLennan^[28]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,则取 CaO 的值。由表1可以看出,研究区 Yogou 组 K_2O 和 Na_2O 含量较高,平均值分别为 2.64% 和 0.83%,表明研究地层属于碱层, $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 高值指示温湿气候,其低值指示干热气候。由表1可知盆地 Yogou 组上部泥岩 $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 平均值为 4.73,Yogou 组下部泥岩 $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 平均值为 5.26,比值均较高,表明 Yogou 组沉积时期气候条件相对温湿,而且 Yogou 组上、下部泥岩沉积时期气候相似,变化不大。

物源区的古风化作用程度能够指示古气候。在风化过程中,源岩中的 Na, K 和 Ca 等易迁移元素被淋滤出来进入新的沉积物中,而 Al 和 Ti 等难迁移元素则在风化残余物中富集^[29]。基于此, Nesbitt^[30]利用 CIA 指数来揭示物源区的化学风化程度,CIA 指数越大,说明物源区的化学风化作用越强,气候湿热程度越高。从表1可以看出,研究区 Yogou 组泥岩的 CIA 指数为 70.64~88.40,平均值为 79.70,说明研究区 Yogou 组沉积时期总体化学风化程度较高,气候湿热。

Sr/Cu 比值是判断古气候的重要指标^[31],通常认为 Sr/Cu 值位于 1.3~5.0 指示潮湿气候,而大于 5.0

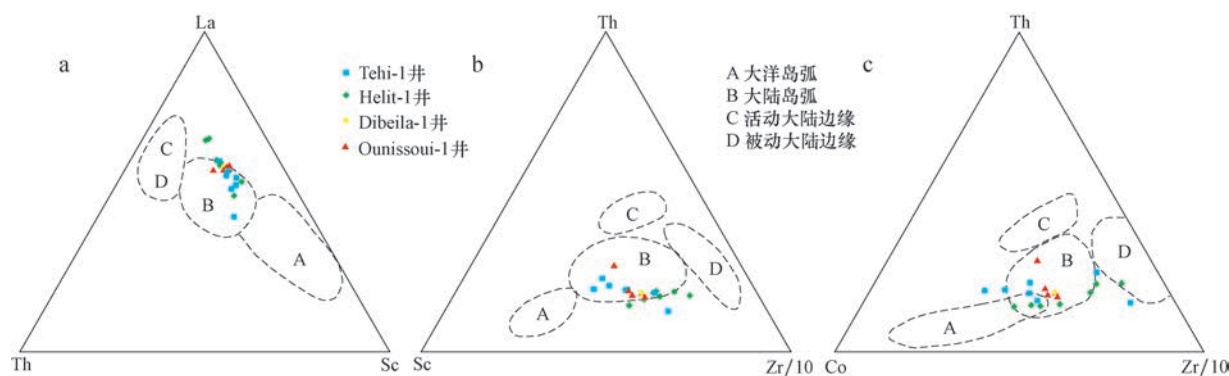


图 5 Termit 盆地 Yogou 组泥岩微量元素构造背景揭示

Fig. 5 Trace elements indication of tectonic setting in the Yogou Formation mudstone, Termit Basin

a. La - Th - Sc 判别图解; b. Th - Sc - Zr/10 判别图解; c. Th - Co - Zr/10 判别图解

则指示干旱气候^[26]。如表 2 所示,研究区 Yogou 组泥岩 Sr/Cu 值介于 1.1 ~ 6.1,绝大部分在 1.3 ~ 5.0,指示研究区 Yogou 组沉积时期盆地总体处于潮湿的气候条件下,与 $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 值得出的结论一致。

4.3.4 氧化-还原条件

地球化学示踪是研究氧化还原条件的重要方法,沉积环境的氧化-还原条件对 U, V, Mo, Cr, Co 和 Ba 等微量元素在沉积物中的富集程度有明显的控制作用,这些元素易向还原性的水体和沉积物中发生迁移并自生富集^[32-34]。由于自然氧化-还原反应使得同一元素的不同价态或其共生元素间发生分离,并重新分配。其基本规律表现为:氧化条件下, U, Mo, V, Ce 和 S 等呈高价态 (U^{6+} , Mo^{6+} , V^{5+} , Ce^{4+} , S^{6+}) 易发生迁移,还原条件下呈低价态 (U^{4+} , Mo^{4+} , V^{3+} , Ce^{3+} , S^{2-}) 易发生沉淀,而 Fe, Eu 等元素在氧化条件下呈高价 (Fe^{3+} , Eu^{3+}) 易沉淀,还原条件下呈低价 (Fe^{2+} , Eu^{2+}) 易迁移。而在含 H_2S 的缺氧环境中, Fe, Cu, Zn 和 Cd 等亲硫元素容易以硫化物的形式产生沉淀。因此,能够应用这些对氧化-还原条件极其敏感的微量元素来恢复古海洋氧化还原条件^[35]。

Hatch 等^[36]由北美黑色页岩的研究指出,金属 (Cd, Mo, V, Zn) 含量较高, $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni}) \geq 0.54$,表明厌氧的环境,金属含量较低, $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 为 0.46 ~ 0.60,表明贫养的环境。研究区 Yogou 组上部泥岩 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 为 0.71 ~ 0.83,平均值为 0.78; Yogou 组下部泥岩 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 为 0.66 ~ 0.84,平均值为 0.76。刘邦等^[37]对 Termit 盆地上奥陶统 Yogou 组泥岩样品显示较高的伽马蜡烷指数 (0.15 ~ 0.41) 和低的 Pr/Ph 比值,表明 Yogou 组沉积时期水体处于厌氧环境。

5 结论

1) Termit 盆地 Yogou 物源以长英质物源和被动大陆边缘物源的混合来源。Yogou 组上部物源和下部物源有显著差异, Yogou 组上部以被动大陆边缘物源为主, Yogou 组下部以长英质物源为主。

2) 研究区 Yogou 组源区主要由长英质岩石组成,稀土元素配分模式与上地壳一致,具有轻稀土相对富集、重稀土平坦分布, Eu 的负异常的特征,指示其母岩由上地壳岩石演化而来。

3) Termit 盆地 Yogou 组泥岩地球化学特征揭示 Yogou 组沉积时期的物源区具有大陆岛弧的构造背景。

4) 依据 Zr/Y 、 MnO/TiO_2 比值及 $\text{V}/(\text{V} + \text{Ni})$ 值分析, Yogou 组上部沉积时期水体较浅,受到陆源物质影响相对较大,水体呈厌氧条件; Yogou 组下部沉积时期水体较深,受到陆源物质影响相对较小,水体也呈厌氧条件。据镁铝比值 $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = \beta$ 及 B/Ga 值分析表明, Yogou 组上部沉积时期水体盐度相对较低,为海陆过渡相沉积环境; Yogou 组下部沉积时期水体盐度相对较高,为海相沉积环境。据 $w(\text{MgO})/w(\text{CaO})$ 值、CIA 指数及 Sr/Cu 值分析, Yogou 组沉积时期研究区处于湿热的气候条件下。

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 Jinliang, Zhang Xin. The element geochemical features of ancient oceanic sedimentary environments in the Silurian period in the Tarim Basin[J]. Periodical of Ocean University of China, 2006, 36(2): 200-208.
- [2] 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 sedimentary complex and volcanic-pile models [J]. *Journal of Geological Society*, 2004, 161: 103–115.
- [3] 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.
- [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 Mingshui. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of southern ramp, Dongying depression [J]. *J Mineral Petrol*, 2005, 25(1): 67–73.
- [5] 蔡观强, 郭峰, 刘显太, 等. 沾化凹陷新近系沉积岩地球化学特征及其物源指示意义 [J]. *地质科技情报*, 2007, 26(6): 17–23.
- Cai Guanqiang, Guo Feng, Liu Xiantai, et al. Geochemical characteristics of Neogene sedimentary rocks from Zhanhua Sag and its implication for provenance [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6): 17–23.
- [6] 刘邦, 潘校华, 万乾坤, 等. 东尼日尔 Termit 盆地构造演化及古近系油气成藏主控因素 [J]. *石油学报*, 2012, 33(3): 394–403.
- Liu Bang, Pan Xiaohua, Wan Lunkun, et al. Structural evolution and main controlling factors of the Paleogene hydrocarbon accumulation in Termit Basin, eastern Niger [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2012, 33(3): 394–403.
- [7] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell, 1985: 1–312.
- [8] Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: Source-area weathering and provenance [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51: 2401–2416.
- [9] Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mud-rock chemistry in southwestern United States [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2919–2940.
- [10] 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.
- [11] Roser B P, 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.
- [12] Cullers R L, Basu A, Suttner L. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, USA [J]. *chem. geol.*, 1988, 70: 335–348.
- [13] Girty G H, Hanson A D, Yoshinobu A S, et al. Provenance of Paleozoic mudstones in a contact metamorphic aureole determined by rare earth element, Th, and Sc analyses, Sierra Nevada, California [J]. *Geology*, 1993, 21(4): 363–366.
- [14] Floyd P A and 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] Bhatia M R, Taylor S R. Trace element geochemistry and sedimentary provinces: study from the Tasman geosyncline, Australia [J]. *Chemical Geology*, 1981, 33(1/2): 115–125.
- [17] Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of greywackes and tectonic discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92: 181–193.
- [18] Bhatia M R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstone [J]. *International Geology Review*, 1983, 91: 611–627.
- [19] Sugisaki R, Yamamoto K and Adachi M. Triassic bedded cherts in central Japan are not pelagic [J]. *Nature*, 1982, 298: 644–647.
- [20] 江纳言, 贾蓉芬, 王子玉, 等. 下扬子区二叠纪古地理和地球化学环境 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 42–47.
- Jiang Nayan, Jia Rongfen, Wang Ziyu, et al. Permian palaeogeography and geochemical environment in lower Yangtze region, China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 42–47.
- [21] 南君亚, 周德全, 叶健骝, 等. 贵州二叠纪–三叠纪古气候和古海洋环境的地球化学研究 [J]. *矿物学报*, 1998, 18(2): 239–249.
- Nan Junya, Zhou Dequan, Ye Jianliu, et al. Geochemistry of paleoclimate and paleocean environment during Permian-Triassic in Guizhou province [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1998, 18(2): 239–249.
- [22] 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 Kaiming, Luo Shunshu. 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.
- [23] Keith M L, Degens E T. Geochemical indicators of marine and fresh water sediments [M]. New York: Abelson Wiley & Sons, 1959: 38–61.
- [24] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用 [J]. *同济大学学报*, 1979, 2: 51–60.
- Wang Yiyu, Guo Wenyin, Zhang Guodong. Application of some geochemical indication in determining of sedimentary environment of the Funing Group (Paleogene), Jin-Hu Depression, Jiangsu province [J]. *Journal of Tongji University*, 1979, 2: 51–60.
- [25] Lerman A. Lakes: Chemistry, Geology and Physics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978: 1–300.
- [26] 王继随, 黄杏珍, 妥进才, 等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义 [J]. *沉积学报*, 1997, 15(1): 65–70.
- Wang Suiji, Huang Xingzhen, Tuo Jincai, et al. Evolutional characteristics and their paleoclimate significance of trace elements in the Hetaoyuan Formation, Biyang depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1997, 15(1): 65–70.