

苏北东台坳陷古新统阜宁组三段微量、稀土元素地球化学特征及其地质意义



王旭影¹⁾, 姜在兴²⁾

www.
geojournals.cn/georev

1) 唐山学院土木工程学院, 河北唐山, 063000; 2) 中国地质大学能源学院, 北京, 100083

内容提要: 沉积岩的微量、稀土元素对沉积环境的水介质变化有着较高的敏感度, 对于研究古环境、沉积物源性质和构造背景方面具有重要的意义。前人对于东台坳陷元素地球化学方面的研究相对薄弱, 利用元素地球化学资料解释古环境和源区性质方面的研究尚属空白。本文以苏北东台坳陷古新统阜宁组三段 20 件泥岩样品为研究对象, 对其进行微量、稀土元素测定, 并分析其地球化学特征及所揭示的地质意义。结果表明: ① Sr 含量、Sr/Cu、Rb/Sr、La_n/Yb_n 比值指示干热气候; Li、Sr、Ni、Ga 微量元素含量和 Sr/Ba 比值均指示淡水—半咸水的水体环境, 整体以淡水环境为主, 偶有咸水注入盆地, 局部为半咸水环境; 而 V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Th、 δCe 指示氧化—弱还原的水体环境。② Co/Th—La/Sc、La/Th—Hf 判别图解和稀土元素配分模式, 表明阜宁组三段沉积岩应来自于上地壳的长英质物质。③ La—Th—Sc、Th—Co—Zr/10 和 Th—Sc—Zr/10 构造背景判别图解反映了大陆岛弧与活动大陆边缘的构造背景, 且与 Bhatia 不同构造背景杂砂岩的微量、稀土元素特征值的对比分析结果一致。

关键词: 苏北东台坳陷; 古新统阜宁组; 微量元素; 稀土元素; 地球化学特征

沉积岩中某些微量元素能反映水体介质的盐度、氧化还原性等特征, 如 Li、Sr、Ni、Ga、Sr 等能够指示古盐度(田景春等, 2016), V、Cr、Co、Ni 等能够指示氧化还原条件(Hatch et al., 1992; Jones et al., 1994)。稀土元素的溶解度低, 且化学性质非常稳定, 其组成及配分模式受风化、剥蚀、搬运、再沉积及成岩作用的影响很小。沉积物中的稀土元素主要受控于母岩, 可以反映物源成分、沉积环境、构造背景的变化等(Bhatia, 1985; Bhatia et al., 1986)。随着元素地球化学的发展, 学者们通过微量与稀土元素的含量、比值、特征值、配分模式、判别图解等, 开展元素地球化学分析, 已经得到地质界的广泛关注。

苏北东台坳陷经历了近半个世纪的勘探历史, 目前已进入中、高勘探程度阶段。古新统阜宁组三段(以下简称阜三段)成藏条件优越, 勘探潜力大, 是东台坳陷重要的勘探目的层, 受到了广泛的关注。阜三段沉积时期, 苏北盆地的构造格局为建湖隆起分割南北, 东台坳陷和盐阜坳陷为两个相对独立的湖盆体系(王旭影, 2017; 韩元红等, 2018)。东台坳陷阜三段已经积累了一定程度的研究, 主要集中在年代地层与构造演化(陈友飞等, 1993; 刘玉瑞,

2010; 朱光等, 2013)、古地理演化(柯光明等, 2006; 傅强等, 2007)、油气成藏(邱旭明, 2003; 刘玉瑞, 2011)、物源与沉积体系(王旭影, 2017; 韩元红等, 2018)等方面。而关于元素地球化学方面, 王旭影(2017)在对阜三段物源体系的研究中, 利用稀土元素含量及特征参数对构造背景进行了判别, 认为构造背景更接近于活动大陆边缘背景, 但是缺少更全面的对比论证。另外, 利用元素地球化学资料解释古环境和源区性质方面的研究尚属空白。基于此, 本文通过对苏北东台坳陷阜三段泥岩微量元素和稀土元素分析, 研究其元素地球化学特征及地质意义, 旨在揭示阜三段沉积时期东台坳陷的古气候、古盐度和氧化还原条件, 重建沉积古环境, 并探讨源区物源性质和构造背景。

1 地质背景

苏北盆地位于江苏省东北部, 属于苏北—南黄海盆地的陆上部分, 是一个中、新生代陆相箕状断陷盆地, 面积约为 35000 km²。苏北盆地被建湖隆起分为南北两大坳陷, 分别为东台坳陷和盐阜坳陷。东台坳陷西临张八岭隆起, 东至南黄海海岸, 北接建

注: 本文为唐山学院博士创新基金(编号: tsxybc201816)的成果。

收稿日期: 2020-07-27; 改回日期: 2021-01-28; 网络首发: 2021-02-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.02.006

作者简介: 王旭影, 女, 1987 年生, 博士, 讲师, 主要从事沉积地质研究; Email: wxy87121@126.com。

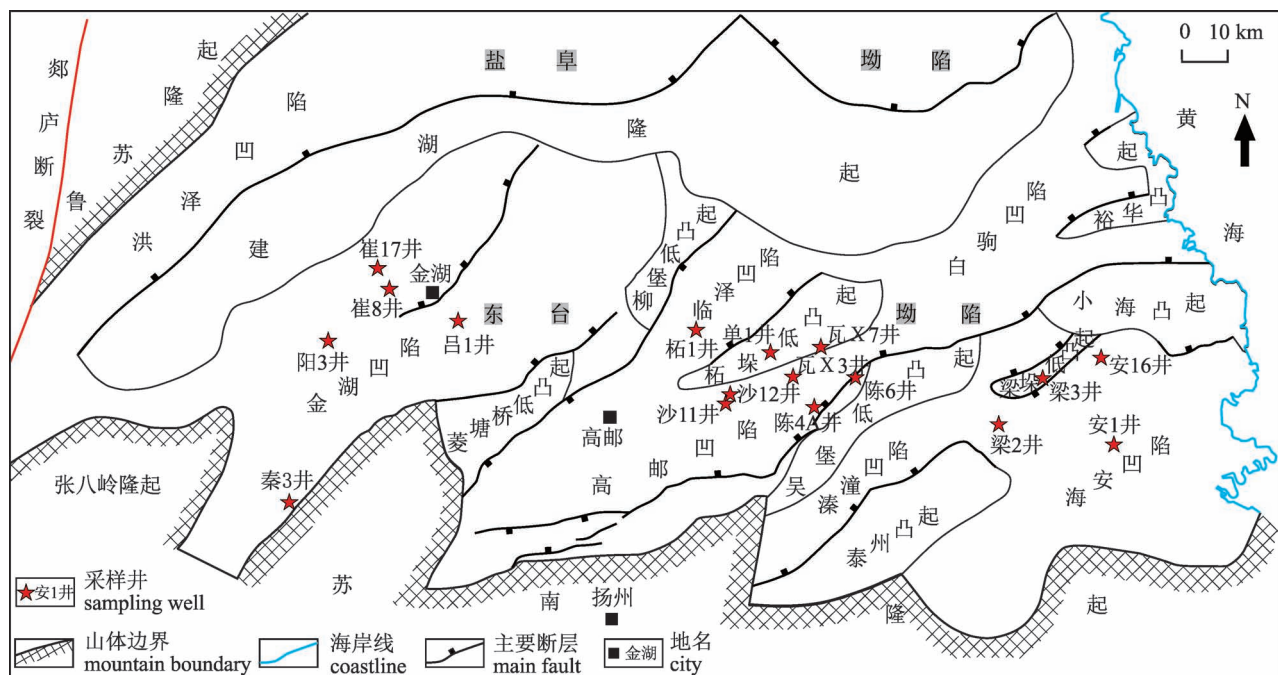


图1 苏北盆地东台拗陷构造单元及采样井位置

Fig. 1 Tectonic units and sampling well location in Dongtai Depression, Subei Basin

湖隆起,南临苏南隆起(图1)。东台拗陷又可以划分为6个凹陷(金湖、高邮、海安、临泽、溱潼和白驹凹陷),8个凸起(菱塘桥、柳堡、柘垛、吴堡、梁垛低凸起和泰州、小海、裕华凸起)。凹陷主要呈北东向展布,都属于南陡北缓、南断北超、南深北浅的不对称箕型,其中高邮、金湖、海安3个凹陷是油气勘探和油气发现的主力探区。

苏北盆地内覆盖在第四系之下的上白垩统泰州组—新近系地层广泛发育(邱旭明等,2006),自下而上包括,上白垩统泰州组(K_2t),古近系古新统阜宁组(E_1f)、始新统戴南组(E_2d)和三垛组(E_2s),新近系盐城组(N_y),缺失古近系渐新统(E_3)。阜宁组(E_1f)自下而上又分为阜一段(E_{1f1})、阜二段(E_{1f2})、阜三段(E_{1f3})和阜四段(E_{1f4}),阜三段(E_{1f3})为本文研究的目的层。阜三段沉积时期,建湖隆起南侧位于迎风缓坡带,波浪作用强烈,形成了广阔的滨浅湖区,主要发育滨浅湖滩坝沉积(图2)。

2 样品采集和分析测试

样品共20个,来自东台拗陷17口钻井岩芯,全部位于阜三段,采样井位置如图1所示,岩性为泥岩或粉砂质泥岩。采样受取芯井勘探部署和岩芯保存情况的限制,主要分布于金湖凹陷、高邮凹陷和海安

凹陷。采样时尽可能地在各凹陷内均匀采集,同时尽量避免成岩作用的影响。对样品进行微量元素和稀土元素的测试分析,采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)仪器,均在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成。各标准样品(GSR-4, SCo-1, GSR-1, BHVO-2)及空白样品所测的元素线性良好,分析误差基本小于5%,相同样品的测试结果一致,测试结果准确可信。

3 地球化学特征

3.1 微量元素特征

东台拗陷阜三段泥岩样品微量元素数据见表1。微量元素上陆壳标准化蛛网图见图3a。样品中Cu、Ga、Rb、Zr、Ba、Hf、U元素含量与上陆壳平均丰度相当,Li、Cs、Cr、V、Sc、Co、Ni、Th元素含量略高于上陆壳平均丰度,只有Sr元素表现为亏损。高场强元素Th(均值14.35 $\mu\text{g/g}$)相对富集,Th主要富集在长英质岩石中。Li(均值55.58 $\mu\text{g/g}$)、Cs(均值9.68 $\mu\text{g/g}$)、Co(均值16.45 $\mu\text{g/g}$)、Ni(均值34.2 $\mu\text{g/g}$)相对富集,说明泥质含量较高。沉积岩中Sr含量一般与主量元素Ca密切相关,Sr富集与Ba亏损在一定程度上可以反映水体的高咸化特征,研究区样品Sr含量(136.52~295.33 $\mu\text{g/g}$,均值207.83

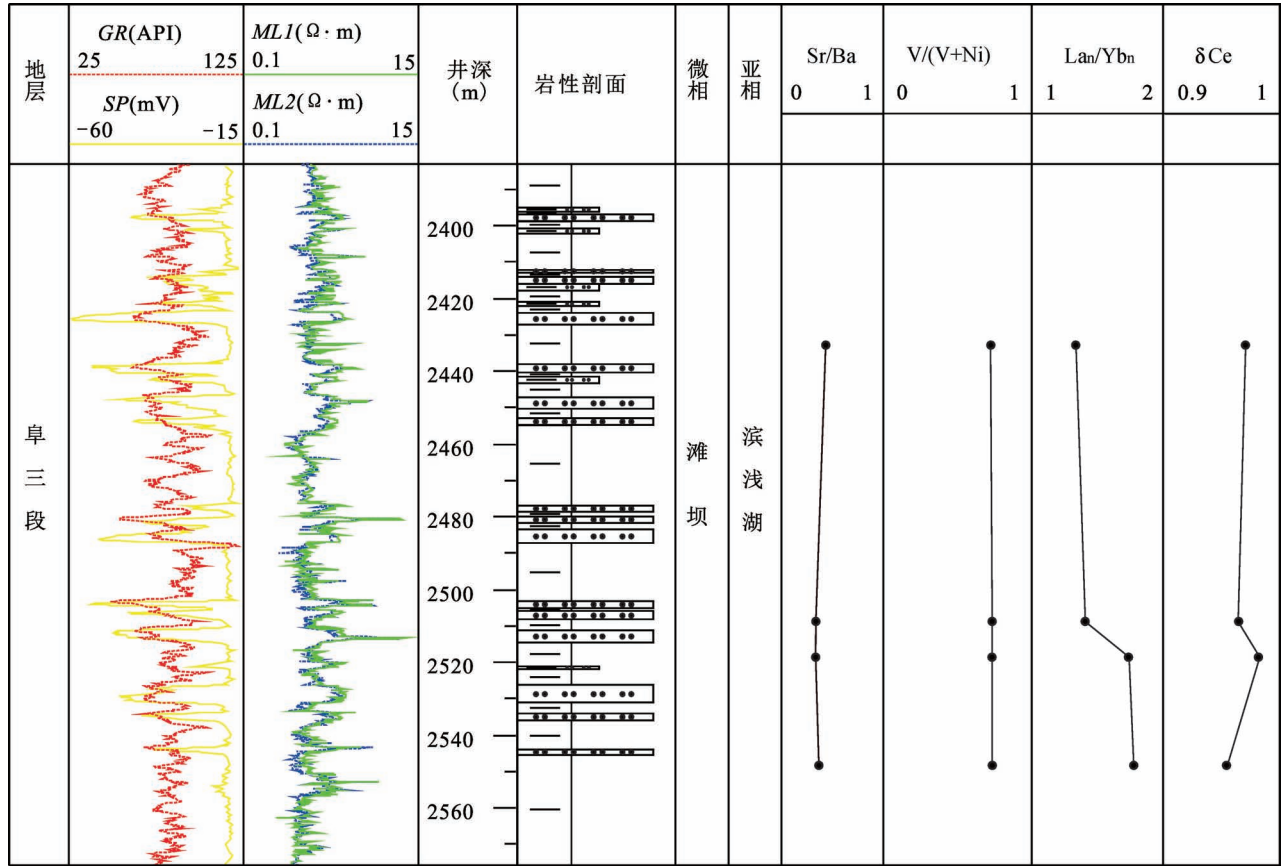


图 2 苏北盆地东台坳陷阜三段梁 3 井综合柱状图

Fig. 2 Generalized column of Well Liang 3 of the 3rd Member of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin

μg/g)均低于上陆壳平均丰度值(350 μg/g),表现为Sr亏损,Ba与上陆壳相似,反映水体咸化度较低。

3.2 稀土元素特征

东台坳陷阜三段泥岩样品稀土元素数据见表 2。Σ REE 为 171.86 ~ 266.96 μg/g, 均值 221.34

μg/g,高于大陆上陆壳Σ REE 的均值(146.4 μg/g),接近北美页岩的均值(173.2 μg/g)。LREE/HREE 值为 7.91~11.26,均值为 9.83,反映研究区样品轻稀土元素富集,重稀土元素相对亏损。La_N/Yb_N 为 8.04~12.39,均值为 10.1,反映研究区样品轻、重稀土元素分异程度较大。δEu为0.65~0.89,

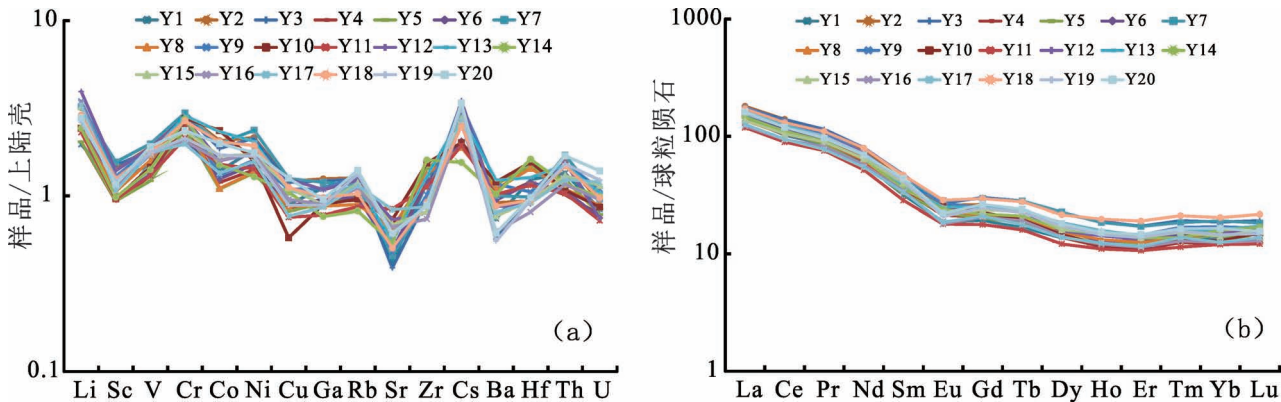


图 3 苏北盆地东台坳陷阜三段微量元素、稀土元素曲线特征(a:微量元素上陆壳标准化蛛网图;b:稀土元素配分模式)
Fig. 3 Curve characteristics of trace elements and rare earth elements of the 3rd Member of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin (a:Upper continental crust normalized trace elements patterns; b:REE distribution patterns)

表 1 苏北盆地东台坳陷阜三段微量元素含量 (×10⁻⁶) 及比值

Table 1 Trace element contents (×10⁻⁶) and ratios of the 3rd Member of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin

样品 编号	井名	深度 (m)	Li	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Ga	Rb	Sr	Zr	Cs	Ba	Hf	Th	U	Sr Cu	Rb Sr	Sr Ba	V V+Ni	Cr	Ni Co	U Th	Co Th	Th Sc	Zr Hf
Y1	安 16	3412.00	39.27	13.12	91.21	91.18	13.88	36.72	22.35	18.81	144.06	146.68	226.76	10.67	409.60	7.18	14.41	2.35	6.56	0.98	0.36	0.71	1.00	2.65	0.16	0.96	1.10	31.58
Y2	梁 2	1931.68	63.88	15.79	113.40	102.73	20.62	42.99	30.24	21.25	141.94	169.94	176.47	12.30	502.45	5.42	16.55	2.63	5.62	0.84	0.34	0.73	1.10	2.09	0.16	1.25	1.05	32.53
Y3	梁 3	2432.65	54.77	16.40	108.76	101.91	18.61	42.67	29.84	20.75	140.20	136.52	183.09	12.68	313.32	5.83	16.67	2.18	4.58	1.03	0.44	0.72	1.07	2.29	0.13	1.12	1.02	31.38
Y4	梁 3	2544.94	40.64	10.25	78.09	89.37	11.93	28.10	20.65	15.78	105.70	200.47	226.29	7.29	539.76	6.92	10.84	2.19	9.71	0.53	0.37	0.74	0.87	2.36	0.20	1.10	1.06	32.68
Y5	梁 2	1906.80	40.72	10.30	73.12	84.31	10.92	27.00	20.48	15.40	111.35	215.95	272.29	7.39	641.35	8.51	13.25	2.20	10.55	0.52	0.34	0.73	0.87	2.47	0.17	0.82	1.29	31.99
Y6	安 1	2458.00	57.27	10.51	79.48	74.44	12.50	30.18	21.78	16.28	109.53	172.26	225.14	7.60	520.11	6.90	11.44	2.10	7.91	0.64	0.33	0.72	1.07	2.41	0.18	1.09	1.09	32.65
Y7	瓦 X3	2899.53	64.57	17.16	118.80	103.84	19.88	47.35	31.37	20.32	129.17	159.69	180.12	9.41	551.74	5.70	18.25	2.69	5.09	0.81	0.29	0.71	1.14	2.38	0.15	1.09	1.06	31.58
Y8	单 1	1867.86	48.66	11.69	95.39	96.05	11.02	27.21	21.86	14.89	99.84	229.17	252.12	6.99	600.27	8.31	11.69	2.46	10.49	0.44	0.38	0.78	0.99	2.47	0.21	0.94	1.00	30.32
Y9	沙 12	2076.55	69.19	14.18	111.51	96.94	13.10	31.96	27.30	18.62	145.75	167.26	192.75	12.24	643.37	6.11	16.43	3.06	6.13	0.87	0.26	0.78	1.15	2.44	0.19	0.80	1.16	31.54
Y10	陈 6	1828.03	48.59	10.58	87.47	96.99	23.57	31.73	14.48	15.23	107.52	257.43	292.23	7.44	659.62	9.02	11.53	2.42	17.78	0.42	0.39	0.73	0.90	1.35	0.21	2.04	1.09	32.39
Y11	瓦 X7	2483.20	46.09	10.50	78.39	74.78	15.12	28.53	18.94	13.24	97.03	295.33	213.60	7.15	560.89	6.67	11.05	2.03	15.60	0.33	0.53	0.73	1.05	1.89	0.18	1.37	1.05	32.03
Y12	柘 1	1269.80	78.73	15.33	113.18	96.94	15.90	34.80	31.21	18.41	137.59	257.03	152.74	12.92	477.96	5.22	16.66	2.09	8.24	0.54	0.54	0.76	1.17	2.19	0.13	0.95	1.09	29.25
Y13	沙 11	2256.86	66.50	13.59	103.05	100.33	23.24	40.89	26.87	16.66	130.16	192.92	246.45	10.51	675.86	7.38	16.03	2.91	7.18	0.67	0.29	0.72	1.03	1.76	0.18	1.45	1.18	33.39
Y14	陈 4A	2738.30	48.57	10.79	84.83	96.26	15.02	25.69	26.18	13.01	92.04	189.10	304.46	5.74	561.94	9.38	12.44	2.77	7.22	0.49	0.34	0.77	0.88	1.71	0.22	1.21	1.15	32.45
Y15	崔 17	1346.10	64.50	13.04	103.91	82.40	16.87	34.52	27.83	15.08	132.70	240.64	154.88	10.16	423.28	5.44	13.94	3.21	8.65	0.55	0.57	0.75	1.26	2.05	0.23	1.21	1.07	28.49
Y16	崔 8	1623.00	68.07	12.37	103.05	71.48	15.94	34.69	23.83	15.19	123.82	233.41	140.77	9.67	345.94	4.70	12.43	2.66	9.80	0.53	0.67	0.75	1.44	2.18	0.21	1.28	1.00	29.96
Y17	阳 3	1389.60	65.59	11.78	105.86	69.23	13.46	31.39	19.22	14.66	128.06	292.04	164.81	9.83	443.19	5.30	13.23	3.35	15.20	0.44	0.66	0.77	1.53	2.33	0.25	1.02	1.12	31.10
Y18	吕 1	1751.18	57.74	13.75	106.04	93.61	20.40	38.75	27.94	16.62	115.07	176.63	174.46	9.26	481.25	5.48	15.83	2.73	6.32	0.65	0.37	0.73	1.13	1.90	0.17	1.29	1.15	31.83
Y19	秦 3	2305.80	52.52	13.30	106.03	74.64	17.10	33.59	22.09	15.06	149.19	209.58	168.17	11.89	304.77	5.48	16.25	3.44	9.49	0.71	0.69	0.76	1.42	1.96	0.21	1.05	1.22	30.66
Y20	秦 3	2304.94	55.74	12.81	114.62	82.60	19.87	35.33	31.54	16.23	156.59	214.61	167.96	12.54	339.08	5.67	18.12	3.88	6.80	0.73	0.63	0.76	1.39	1.78	0.21	1.10	1.41	29.60
UCC			20	11	60	35	10	20	25	17	112	350	190	3.7	550	5.8	10.7	2.8										

注:UCC 指上陆壳平均丰度值(赵振华,1997)。

表 2 苏北盆地东台坳陷阜三段稀土元素含量 (×10⁻⁶) 及比值

Table 2 REE contents (×10⁻⁶) and ratios of the 3rd Member of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin

样品 编号	井名	深度 (m)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	La Sc	La Th	La Yb	La _n Yb _n	La _n Yb _N	Σ REE	LREE HREE	δCe	δEu
Y1	安 16	3412.00	44.52	83.35	9.83	34.67	6.06	1.36	4.98	0.79	4.46	0.87	2.53	0.43	2.82	0.42	3.39	3.09	15.78	1.53	10.42	197.11	10.39	0.93	0.76
Y2	梁 2	1931.68	56.81	113.25	12.60	44.80	8.10	1.86	6.78	1.09	5.64	1.06	3.10	0.51	3.15	0.50	3.60	3.43	18.01	1.75	11.89	259.26	10.87	0.99	0.78
Y3	梁 3	2432.65	55.43	113.21	13.17	47.70	9.06	1.94	7.78	1.33	7.15	1.37	3.66	0.64	3.89	0.62	3.38	3.33	14.26	1.38	9.42	266.96	9.09	0.98	0.71
Y4	梁 3	2544.94	45.69	89.97	10.44	36.64	6.59	1.55	5.30	0.89	4.50	0.83	2.31	0.42	2.49	0.40	4.46	4.22	18.39	1.78	12.14	208.01	11.14	0.96	0.81
Y5	梁 2	1906.80	45.39	87.03	9.80	33.73	6.24	1.62	5.21	0.87	4.72	0.88	2.60	0.45	3.03	0.43	4.41	3.43	14.98	1.45	9.89	201.99	10.11	0.97	0.88
Y6	安 1	2458.00	46.95	96.29	10.95	39.04	7.08	1.74	5.74	0.94	5.20	0.93	2.75	0.47	3.06	0.47	4.47	4.10	15.34	1.49	10.13	221.61	10.33	0.99	0.84
Y7	瓦 X3	2899.53	48.43	98.31	11.47	41.19	8.07	2.04	7.64	1.33	7.35	1.34	3.66	0.62	3.98	0.59	2.82	2.65	12.17	1.18	8.04	236.01	7.91	0.98	0.80

样品 编号	井名	深度 (m)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$\frac{La}{Sc}$	$\frac{La}{Th}$	$\frac{La}{Yb}$	$\frac{La_n}{Yb_n}$	$\frac{La_N}{Yb_N}$	ΣREE	$\frac{LREE}{HREE}$	δCe	δEu
Y8	单1	1867.86	42.98	84.81	10.29	37.40	6.78	1.72	5.44	0.95	4.99	0.95	2.68	0.45	3.23	0.55	3.68	3.68	13.29	1.29	8.78	203.22	9.56	0.94	0.87
Y9	沙12	2076.55	55.70	106.76	12.38	43.41	7.94	1.94	6.42	1.08	5.90	1.09	3.08	0.56	3.54	0.54	3.93	3.39	15.73	1.52	10.38	250.35	10.27	0.95	0.84
Y10	陈6	1828.03	50.64	97.63	11.41	38.61	6.88	1.82	5.83	0.92	4.76	0.86	2.38	0.43	2.70	0.49	4.78	4.39	18.77	1.82	12.39	225.37	11.26	0.95	0.89
Y11	瓦X7	2483.20	37.37	72.58	8.67	30.82	5.46	1.29	4.60	0.76	3.95	0.80	2.27	0.38	2.50	0.39	3.56	3.38	14.95	1.45	9.87	171.86	9.98	0.94	0.80
Y12	柘1	1269.80	52.21	103.24	11.63	42.67	7.08	1.81	6.30	1.09	5.09	1.03	2.83	0.51	3.14	0.50	3.41	3.13	16.65	1.61	10.99	239.14	10.67	0.98	0.83
Y13	沙11	2256.86	51.01	101.20	11.59	41.43	7.20	1.81	6.44	1.09	5.97	1.14	3.06	0.51	3.38	0.56	3.75	3.18	15.08	1.46	9.96	236.39	9.67	0.97	0.82
Y14	陈4A	2738.30	45.97	89.91	10.46	38.24	6.85	1.72	5.64	0.99	5.22	1.08	2.90	0.46	3.29	0.55	4.26	3.69	13.95	1.35	9.21	213.29	9.59	0.96	0.86
Y15	崔17	1346.10	43.03	85.35	10.28	38.73	7.66	1.61	6.12	1.10	5.25	1.12	2.95	0.51	2.94	0.52	3.30	3.09	14.63	1.42	9.66	207.17	9.10	0.95	0.73
Y16	崔8	1623.00	38.52	75.98	9.37	34.16	6.61	1.30	5.34	0.91	4.56	0.87	2.42	0.43	2.61	0.42	3.11	3.10	14.78	1.43	9.76	183.50	9.45	0.94	0.68
Y17	阳3	1389.60	39.83	76.69	8.88	32.59	6.41	1.35	5.43	0.84	4.49	0.90	2.47	0.46	2.61	0.45	3.38	3.01	15.23	1.48	10.06	183.39	9.39	0.95	0.70
Y18	吕1	1751.18	54.04	106.28	12.66	47.39	8.94	2.06	7.63	1.31	7.00	1.43	4.06	0.71	4.24	0.70	3.93	3.41	12.74	1.23	8.41	258.45	8.54	0.95	0.77
Y19	秦3	2305.80	49.43	97.27	11.42	42.29	8.00	1.50	6.36	1.06	5.63	1.05	2.94	0.52	3.04	0.48	3.72	3.04	16.29	1.58	10.75	230.98	9.96	0.96	0.65
Y20	秦3	2304.94	50.90	97.06	11.11	41.21	8.37	1.60	6.80	1.13	5.90	1.11	3.11	0.55	3.44	0.50	3.97	2.81	14.81	1.44	9.78	232.79	9.33	0.96	0.65

注: La_n/Yb_n 表示 La 和 Yb 经球粒陨石标准化后的比值; La_N/Yb_N 表示 La 和 Yb 经球粒陨石标准化后的比值; ΣREE 表示稀土元素总量; $LREE/HREE$ 表示轻、重稀土元素含量之比; $LREE/HREE = (La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu) / (Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu)$; $\delta Ce = Ce_N / (La_N \times Pr_N)^{1/2}$; $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$ 。

均值为 0.78, 明显的 Eu 负异常。δCe 为 0.93 ~ 0.99, 均值为 0.96, 呈轻微 Ce 负异常。

采用 Leedey 球粒陨石平均值除以 1.2 作为标准值(赵志根, 2000), 对稀土元素含量进行标准化处理, 配分模式见图 3b。阜三段样品具有类似的配分模式: 表现为明显的“右倾”, 轻稀土元素富集, 重稀土元素亏损; La—Eu 轻稀土元素段, 配分曲线陡、斜率大, 表明轻稀土元素之间具有较高的分馏程度; Gd—Lu 重稀土元素段, 配分曲线平坦、斜率小, 表明重稀土元素之间分馏程度较低; Eu 处呈明显的“谷”状, 存在 Eu 的负异常, Ce 轻微负异常。

Shiekds 等研究认为成岩作用可以导致 δCe、δEu 具有良好的相关性, δCe 与 ΣREE 正相关, 以及 δCe 与 Dy_N/Sm_N 负相关(Shields et al., 2001)。东台坳陷样品中 δCe 与 δEu、δCe 与 ΣREE、δCe 与 Dy_N/Sm_N 均无相关性, 说明成岩作用对样品稀土元素影响不明显(图 4)。

4 地质意义讨论

4.1 古环境

4.1.1 古气候

陆相沉积盆地中, 高含量的 Sr 元素往往与干旱炎热条件下的湖水浓缩沉积有关。Sr 元素含量和 Sr/Cu 值常被用于古气候恢复。通常认为, 温湿气候中, Sr 元素含量低, Sr/Cu 值为 1.3 ~ 5.0; 干热气候中, Sr 元素含量高, Sr/Cu 值大于 5(Lermanm, 1978; 张天福等, 2016)。样品中 Sr 元素含量为 136.52 ~ 295.33 μg/g, 均值为 207.83 μg/g, 含量整体偏高, Sr/Cu 值为 4.58 ~ 17.78, 均值为 8.94, 仅 1 个样品比值小于 5, 其余样品均大于 5。从 Sr 元素含量和 Sr/Cu 值分析来看, 反映阜三段为干热的气候环境。

在风化作用中, Sr 元素比较容易淋失, 而 Rb 元素相对稳定(陈骏等, 2001)。温湿气候中, 降水较多, 风化作用较强烈, Sr 元素容易发生淋失, 从而使 Rb/Sr 值升高; 干热气候中, 降水较少, 风化作用较弱, 沉积岩中残留更多的 Sr 元素, 使 Rb/Sr 值相对降低(叶荷等, 2010; 张文防等, 2012)。换言之, Rb/Sr 高值指示温湿气候, 低值指示干热气候。样品中 Rb/Sr 值为 0.33 ~ 1.03, 均值为 0.63, 比值相对较低, 反映干热的气候环境。

此外, La 和 Yb 分别是轻稀土元素和重稀土元素的指标性元素, La_n/Yb_n 表征轻重稀土之间分异程度, 其高值代表轻稀土元素相对富集, 低值代

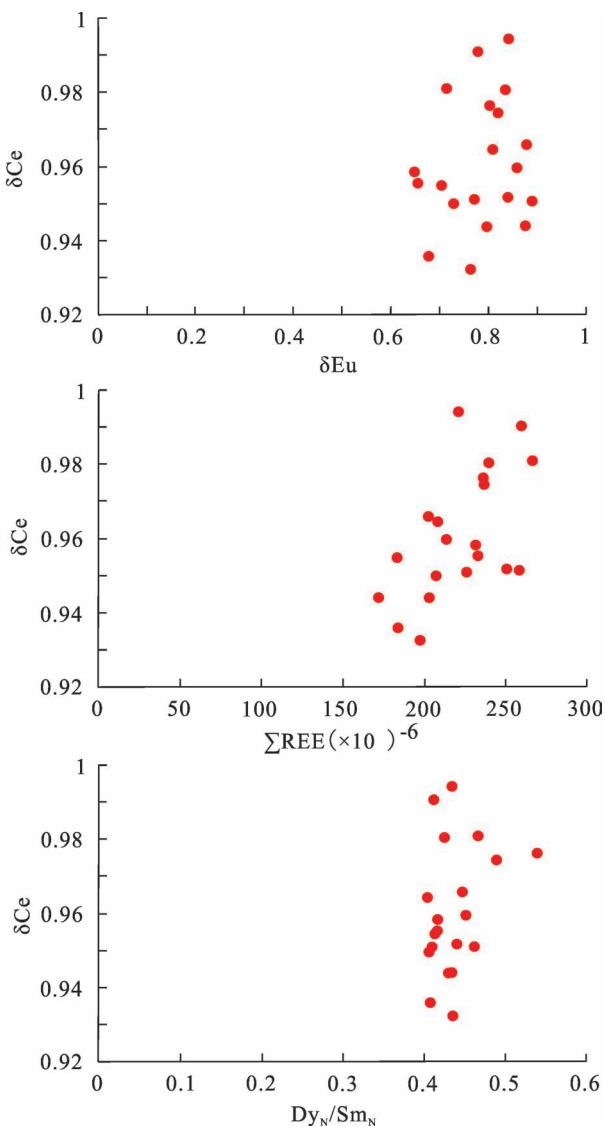


图 4 苏北盆地东台坳陷阜三段 δEu — δCe 、 δCe — ΣREE 及 δCe — $\text{Dy}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}$ 图解

Fig. 4 δEu — δCe , δCe — ΣREE and δCe — $\text{Dy}_\text{N}/\text{Sm}_\text{N}$ diagrams of the 3rd Member of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin

表重稀土元素相对富集。在温暖湿润的条件下,由于风化作用和生物作用,重稀土元素比轻稀土元素更容易在溶液中形成碳酸盐和有机络合物而优先被溶解迁移,造成轻稀土元素在风化残余物中富集(陈骏等,1996)。因此, $\text{La}_\text{n}/\text{Yb}_\text{n}$ 的高值指示温湿的气候环境,低值指示干热的气候环境(张虎才等,2009;沈立建等,2015)。样品中 $\text{La}_\text{n}/\text{Yb}_\text{n}$ 值为 1.18~1.82,均值为 1.48,数值整体偏低,反映沉积时干热的程度较高。

综合 Sr 含量、 Sr/Cu 、 Rb/Sr ,以及 $\text{La}_\text{n}/\text{Yb}_\text{n}$ 值的分析,4 种判别参数对东台坳陷阜三段的古气候的反映基本一致,即整个阜三段沉积时期以干热气候为主。

4.1.2 古盐度

Li、Sr、Ni、Ga 等微量元素的含量对水体盐度的变化有很好的指示作用。研究表明,咸水环境中,Li 元素含量大于 150 $\mu\text{g}/\text{g}$,Sr 元素含量为 800~1000 $\mu\text{g}/\text{g}$,Ni 元素含量大于 40 $\mu\text{g}/\text{g}$,Ga 元素含量小于 8 $\mu\text{g}/\text{g}$;淡水环境中,Li 元素含量小于 90 $\mu\text{g}/\text{g}$,Sr 元素含量为 100~500 $\mu\text{g}/\text{g}$,Ni 元素含量为 20~25 $\mu\text{g}/\text{g}$,Ga 元素含量大于 17 $\mu\text{g}/\text{g}$ (田景春等,2016)。样品中 Li 元素含量为 39.27~78.73 $\mu\text{g}/\text{g}$,均值为 56.58 $\mu\text{g}/\text{g}$,所有样品均小于 90 $\mu\text{g}/\text{g}$,反映淡水沉积环境。样品中 Sr 元素含量为 136.52~295.33 $\mu\text{g}/\text{g}$,均值为 207.83 $\mu\text{g}/\text{g}$,样品均为 100~500 $\mu\text{g}/\text{g}$,反映淡水沉积环境。样品中 Ni 元素含量为 25.69~47.35 $\mu\text{g}/\text{g}$,均值为 34.2 $\mu\text{g}/\text{g}$,绝大部分样品含量小于 40 $\mu\text{g}/\text{g}$,反映淡水—半咸水沉积环境。样品中 Ga 元素含量为 13.01~21.25 $\mu\text{g}/\text{g}$,均值为 16.58 $\mu\text{g}/\text{g}$,样品均大于 8 $\mu\text{g}/\text{g}$,反映淡水—半咸水沉积环境。根据统计结果(表 3),从 Li、Sr、Ni、Ga 微量元素的含量来看,所分析的样品主要来自于淡水—半咸水沉积环境。

通常 Sr 元素比 Ba 元素的溶解度更大,Sr 比 Ba 的迁移能力也要更强,随着水体盐度的增加,Sr 和 Ba 逐渐以硫酸盐的形式沉淀,其中 BaSO_4 优先沉淀,当水体盐度增大到一定程度时, SrSO_4 才沉淀。 Sr/Ba 值与古盐度成正比相关,为湖泊水体古盐度判别的有效参数(郑荣才等,1999;李进龙等,2003)。一般来说,咸水环境中, Sr/Ba 值大于 1;半咸水环

表 3 苏北盆地东台坳陷古盐度的微量元素判别参数及样品数据统计
Table 3 Paleo-salinity trace element identification parameters and sample data in Dongtai Depression, Subei Basin

判别参数	参考文献	咸水	半咸水	淡水	样品数据	
					区间	均值
$\text{Li}(\times 10^{-6})$	田景春等, 2016	>150	90~150	<90	39.27~78.73	56.58
$\text{Sr}(\times 10^{-6})$		800~1000	500~800	100~500	136.52~295.33	207.83
$\text{Ni}(\times 10^{-6})$		>40	25~40	20~25	25.69~47.35	34.2
$\text{Ga}(\times 10^{-6})$		<8	8~17	>17	13.01~21.25	16.58
Sr/Ba	王益友等, 1983	>1	0.6~1	<0.6	0.26~0.69	0.44

境中, Sr/Ba 值为 0.6~1.0; 淡水环境中, Sr/Ba 值小于 0.6 (王益友等, 1983)。据统计(表 3), 样品中 Sr/Ba 值为 0.26~0.69, 均值为 0.44, 其中, 16 个样品比值小于 0.6, 4 个样品比值为 0.6~1.0, 反映整体表现为淡水—半咸水沉积环境, 以淡水环境为主, 偶有咸水注入盆地, 局部为半咸水环境, 这与 Li、Sr、Ni、Ga 元素含量判断的结果一致。

4.1.3 古氧化还原条件

Hatch 等(1992)、Jones 等(1994)通过研究典型黑色泥页岩中 V、Cr、Co、Ni 等微量金属元素对氧化还原环境的示踪作用, 提出了相应的量化判识标准, 已被国内外学者广泛采用。缺氧还原环境中, V/(V+Ni) 值大于 0.84, V/Cr 值大于 4.25, Ni/Co 值大于 7; 贫氧环境中, V/(V+Ni) 值为 0.60~0.84, V/Cr 为 2.00~4.25, Ni/Co 为 5~7 之间; 富养氧化环境中, V/(V+Ni) 小于 0.6, V/Cr 小于 2, Ni/Co 小于 5 (Hatch et al., 1992; Jones et al., 1994)。研究区样品中 V/(V+Ni) 值为 0.71~0.78, 均值为 0.74, 小于 0.84; V/Cr 值为 0.87~1.53, 均值为 1.12, 小于 2; Ni/Co 值为 1.35~2.65, 均值为 2.13, 小于 5。根据判别参数 V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co 值的判别分析, 阜三段沉积水体属于氧化—弱氧化环境。

氧化还原环境不同会导致 U 和 Th 的赋存状态不同。氧化环境下, Th⁴⁺ 较易溶解, 还原环境下, U⁴⁺ 不溶于水, 而 U⁶⁺ 易溶。因此, 可以利用 U/Th 判断沉积环境的氧化—还原状态。缺氧还原环境中 U/Th 值大于 1.25; 氧化环境中 U/Th 值较低, 一般小于 0.75 (Wignall et al., 1996)。样品中 U/Th 值为 0.13~0.25, 均值为 0.19, 小于 0.75, 反映沉积时水体状态总体为氧化环境。

稀土元素中 Ce 元素具有变价的性质。氧化环境中, Ce 易被氧化成 Ce⁴⁺ 而被铁锰等氧化物胶体吸附, 导致水体中 Ce 亏损而沉积物中 Ce 富集; 还原

环境中, 随着铁锰等氧化物的溶解, Ce⁴⁺ 被还原成 Ce³⁺ 释放, 导致沉积物中 Ce 富集 (杨守业等, 1999)。Ce 异常可以灵敏的反映沉积环境的氧化还原条件, δCe 值大于 1 为正异常, 表示还原环境; δCe 值小于 0.95 为负异常, 表示氧化环境 (王中刚等, 1989)。样品中 δCe 值为 0.93~0.99, 均值为 0.96, 样品全部小于 1, 整体接近于判别的临界值 0.95, 可以判断, 当时沉积环境为氧化—弱氧化性。

利用微量、稀土元素判断氧化还原环境的方法很多, 本文综合利用 V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Th、δCe 5 种判别参数进行判别分析 (表 4), 结果显示东台坳陷阜三段沉积时期为氧化—弱还原的水体环境。

4.2 源区性质

过渡族元素 Sc、Cr、Co 等往往富集在镁铁质基性岩石中, 而高场强元素 La、Zr、Th 等则富集在长英质岩石中, 这些元素的比值能很好地区分源岩岩性

基于此, Gu 等提出 Co/Th—La/Sc 的源岩属性判别图解 (Gu et al., 2002), Floy and Leveridge 提出了利用 La/Th—Hf 的源岩属性判别图解 (Floyd et al., 1987)。利用 Co/Th—La/Sc 判别图解对阜三段泥岩样品进行投点 (图 5a), 样品点主要落在长英质火山岩区域, 反映源区主要为长英质岩石。在 La/Th—Hf 判别图解上 (图 5b), 大多数样品投点落在长英质源区范围内, 并且有古老沉积物的混入, 这与 Co/Th—La/Sc 判别图解的分析结果一致。

在指示盆地沉积源区性质的指标中, 稀土元素的配分模式是比较可靠的指标。源自上地壳的稀土元素具有轻稀土元素富集、重稀土元素含量稳定和明显的 Eu 负异常等特征。东台坳陷阜三段泥岩样品的稀土元素配分模式相似, 属于轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型, La—Eu 轻稀土段较陡, Gd—Lu 重稀土段平缓, 存在明显的 Eu 负异常, Ce 轻微负异常 (图 3b)。这种配分模式与上地壳的配分模式基本一致, 表明其沉积物源来源于上地壳。

综合 Co/Th—La/Sc、La/Th—Hf 判别图解及稀土元素配分模式的分析, 认为东台坳陷阜三段的原始物质应来自于上地壳的长英质物质。据调研, 阜三段沉积时期, 张八岭隆起和建湖隆起均为物源区, 张八岭隆起主要出露中生界中酸性火成岩和新元古界变质岩基底 (曹洋等, 2010; 张妮等, 2012), 建湖隆起向

表 4 苏北盆地东台坳陷氧化还原环境的微量、稀土元素判别参数及样品数据统计

Table 4 Identification parameters and sample data of trace and rare earth elements in redox environment in Dongtai Depression, Subei Basin

判别参数	参考文献	还原	贫氧	氧化	样品数据	
					区间	均值
V/(V+Ni)	Hatch et al., 1992	>0.84	0.6~0.84	<0.6	0.71~0.78	0.74
V/Cr	Jones et al., 1994	>4.25	2~4.25	<2	0.87~1.53	1.12
Ni/Co		>7	5~7	<5	1.35~2.65	2.13
U/Th	Wignall et al., 1996	>1.25		<0.75	0.13~0.25	0.19
δCe	王中刚等, 1989	>1		<0.95	0.93~0.99	0.96

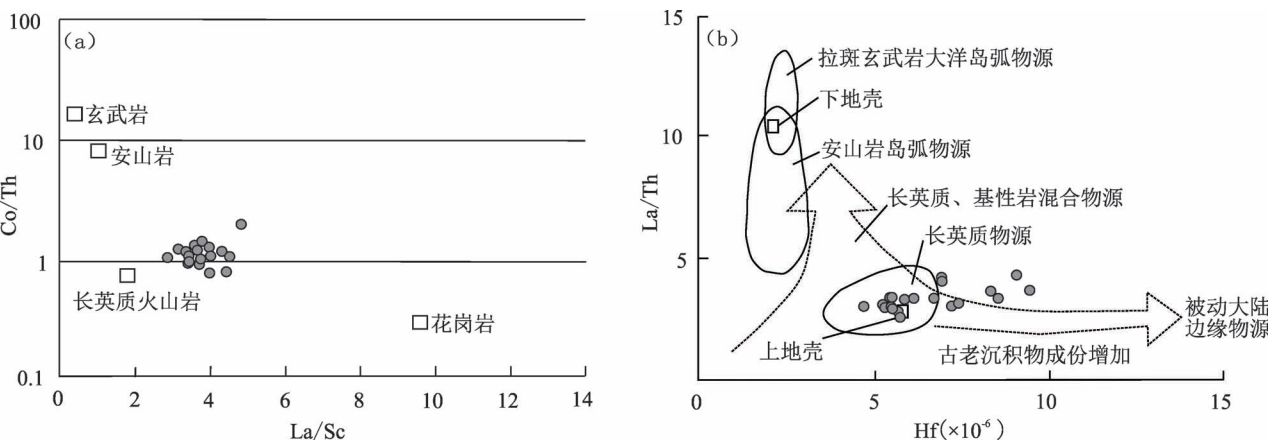


图 5 苏北盆地东台拗陷阜三段 Co/Th—La/Sc 及 La/Th—Hf 判别图解
(底图 a 据 Gu et al. ,2002;底图 b 据 Floyd et al. ,1987)

Fig. 5 Co/Th—La/Sc, La/Th—Hf diagrams of the 3rd Member of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin
(a, modified from Gu et al. ,2002; b, modified from Floyd et al. ,1987)

南以中酸性火成岩、石英岩和花岗岩为主(王旭影, 2017)。

4.3 构造背景

沉积岩的地球化学成分与构造背景之间存在着必然联系,可以用来区分构造环境。Bhatia 等通过对已知构造背景的杂砂岩地球化学特征分析,指出

La、Ce、Nd、Y、Th、Zr、Hf、Nb、Ti、Co 和 Sc 等微量、稀土元素能够有效的判别构造背景,并提出了一系列元素特征值和判别图来鉴别被动大陆边缘、活动大陆边缘、大洋岛弧和大陆岛弧等构造背景(Bhatia, 1985;Bhatia et al. ,1986)。

与 Bhatia 不同构造背景杂砂岩的微量元素特征值进行对比,可以得出,阜三段泥岩微量元素特征值总体上接近大陆岛弧构造背景,Th、Zr、Hf、La/Sc 值介于大陆岛弧和活动大陆边缘(表 5)。泥岩的稀土元素含量比同期沉积的杂砂岩高 20%左右,因此需要将研究区泥岩的稀土元素特征值除以 1.2 进行校正(李双应等,2003;李福来等,2016),校正后的稀土元素特征值可直接与 Bhatia 总结的稀土元素特征值进行对比。对比发现,阜三段泥岩 La、Ce、ΣREE 值更接近活动大陆边缘,而 LREE/HREE、La/Yb、La_N/Yb_N、δEu 值介于大陆岛弧与活动大陆边缘之间(表 5)。综合对比结果,可以认为阜三段沉积岩源区的构造背景为大陆岛弧和活动大陆边缘。

根据 Bhatia 和 Crook 提出的 La—Th—Sc、Th—Co—Zr/10 和 Th—Sc—Zr/10 源区构造背景判别图解(Bhatia et al. ,1986),对阜三段泥岩样品进行

表 5 苏北盆地东台拗陷阜三段泥岩与不同构造背景杂砂岩的微量、稀土元素特征值比较

Table 5 Comparison of trace and rare earth element values between the mudstones of the 3rd Member of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin, and heterogeneous sandstones in different tectonic settings

构造背景	大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘	研究区均值
Th(×10 ⁻⁶)	2. 27±0. 7	11. 11±1. 1	18. 8±3	16. 7±3. 5	14. 35
Zr(×10 ⁻⁶)	96±20	229±27	179±33	298±80	205. 78
Hf(×10 ⁻⁶)	2. 1±0. 6	6. 3±2. 0	6. 8	10. 1	6. 53
Sc(×10 ⁻⁶)	19. 5±5. 2	14. 8±1. 7	8±1. 1	6±1. 4	12. 86
V(×10 ⁻⁶)	131 ± 40	89 ± 13. 7	48±5. 9	31±9. 9	98. 81
Co(×10 ⁻⁶)	18±6. 3	12±2. 7	10±1. 7	5±2. 4	16. 45
Rb/Sr	0. 05±0. 05	0. 65±0. 33	0. 89±0. 24	1. 19±0. 4	0. 63
La/Sc	0. 55±0. 22	1. 82±0. 3	4. 55±0. 8	6. 25±1. 35	3. 77
Th/Sc	0. 15±0. 08	0. 85±0. 13	2. 59±0. 5	3. 06±0. 8	1. 12
Zr/Hf	45. 7	36. 3	26. 3	29. 5	31. 37
La(×10 ⁻⁶)	8±1. 7	27±4. 5	37	39	39. 78 *
Ce(×10 ⁻⁶)	19±3. 7	59±8. 2	78	85	78. 18 *
ΣREE(×10 ⁻⁶)	58±10	146±20	186	210	184. 45 *
LREE/HREE	3. 8±0. 9	7. 7±1. 7	9. 1	8. 5	8. 19 *
La/Yb	4. 2±1. 3	11±3. 6	12. 5	15. 9	12. 74 *
La _N /Yb _N	2. 8±0. 9	7. 5±2. 5	8. 5	10. 8	8. 42 *
δEu	1. 04±0. 11	0. 79±0. 13	0. 6	0. 56	0. 65 *

注:特征值数据据 Bhatia,1985;Bhatia et al. ,1986; * 为矫正值。

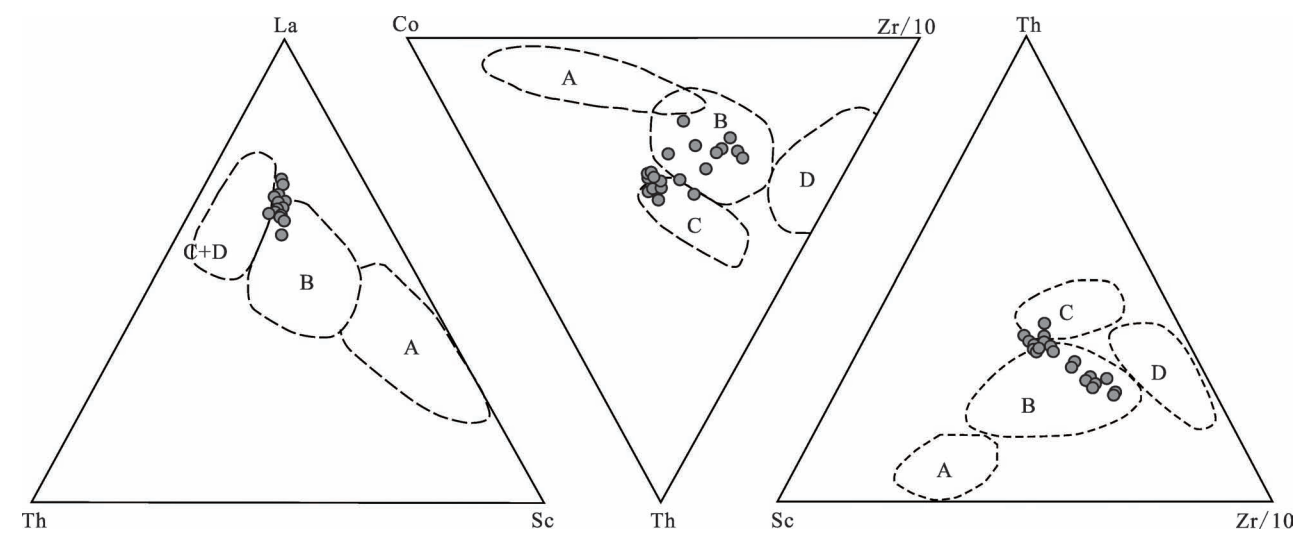


图 6 苏北盆地东台坳陷阜宁组三段 La—Th—Sc($\times 10^{-6}$)、Th—Co—Zr/10($\times 10^{-6}$)及 Th—Sc—Zr/10($\times 10^{-6}$) 判别图解 (底图据 Bhatia et al. ,1986)

Fig. 6 La—Th—Sc ($\times 10^{-6}$), Th—Co—Zr/10 ($\times 10^{-6}$), Th—Sc—Zr/10 ($\times 10^{-6}$) diagrams of the 3rd Member of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin(modified from Bhatia et al. ,1986)

A—大洋岛弧;B—大陆岛弧;C—活动大陆边缘;D—被动大陆边缘

A—oceanic island arc; B—continental island arc; C—active continental margin; D—passive continental margin

投点(图 7)。在 La—Th—Sc 判别图上,样品点主要靠近大陆岛弧和大陆边缘源区。在 Th—Co—Zr/10 判别图和 Th—Sc—Zr/10 判别图上,样品点主要落在大陆岛弧和活动大陆边缘及其附近。微量元素判别图解总体反映了源区为大陆岛弧与活动大陆边缘的构造背景,此分析结果与 Bhatia 特征值的对比结果一致。

5 结论

通过苏北东台坳陷古新统阜宁组三段泥岩样品微量和稀土元素分析,研究了其元素地球化学特征及地质意义,得到以下认识:

(1)东台坳陷阜宁组三段泥岩样品中 Li、Cs、Cr、V、Sc、Co、Ni、Th 等微量元素富集,Sr 元素亏损。 Σ REE 高于大陆上陆壳 Σ REE 均值,接近北美页岩均值。稀土元素具有相似的配分模式,属于轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型,存在明显的 Eu 负异常,Ce 轻微负异常。

(2)Sr 含量、Sr/Cu、Rb/Sr、La_n/Yb_n 值,反映阜宁组三段沉积时期以干热气候为主。Li、Sr、Ni、Ga 微量元素含量,以及 Sr/Ba 值,指示淡水—半咸水沉积环境,整体以淡水环境为主,偶有咸水注入盆地,局部为半咸水环境。综合 V/(V+Ni)、V/Cr、Ni/Co、U/Th、 δ Ce 5 种判别参数对氧化还原环境进行判别

分析,结果显示阜宁组三段为氧化—弱还原的水体环境。

(3)Co/Th—La/Sc、La/Th—Hf 判别图解及稀土元素配分模式,说明阜宁组三段的原始物质来自于上地壳的长英质物质。与 Bhatia 不同构造背景杂砂岩的微量、稀土元素特征值进行对比,可以认为阜宁组三段源区的构造背景为大陆岛弧和活动大陆边缘。La—Th—Sc、Th—Co—Zr/10 和 Th—Sc—Zr/10 构造背景判别图解,与 Bhatia 特征值的对比结果一致,总体反映了源区为大陆岛弧与活动大陆边缘的构造背景。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

曹洋,牛漫兰,谢成龙,谢文雅,王敬欣. 2010. 郯庐断裂带张八岭隆起北段晚中生代岩体的成因. 合肥工业大学学报(自然科学版), 33(3): 415~420.

陈骏,汪永进,陈旸,刘连文,季峻峰,鹿化煜. 2001. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义. 地质学报, 75(2): 259~266.

陈骏,王洪涛,鹿化煜. 1996. 陕西洛川黄土沉积物中稀土元素及其它微量元素的化学淋滤研究. 地质学报, 70(1): 61~72.

陈友飞,严钦尚,许世远. 1993. 苏北盆地沉积环境演变及其构造背景. 地质科学, 28(2): 152~160.

傅强,李益,张国栋,刘玉瑞. 2007. 苏北盆地晚白垩世—古新世海

- 侵湖泊的证据及其地质意义. 沉积学报, 25(3): 380~385.
- 韩元红, 徐旭辉, 陆建林, 朱建辉, 彭金宁, 武英利, 邱岐, 王东燕. 2018. 苏北东台坳陷阜宁组沉积演化数模物源分析. 沉积学报, 36(4): 722~730.
- 柯光明, 郑荣才, 石和. 2006. 苏北盆地古近纪构造—层序岩相古地理特征与演化. 中国地质, 33(6): 1305~1311.
- 李福来, 肖飞, 孟凡超, 任泽樱. 2016. 内蒙古索伦地区上二叠统林西组碎屑岩地球化学特征及其对物源的指示意义. 吉林大学学报(地球科学版), 46(6): 1769~1780.
- 李进龙, 陈东敬. 2003. 古盐度定量研究方法综述. 油气地质与采收率, 10(5): 1~3.
- 李双应, 岳书仓, 杨建, 贾志海. 2003. 皖北新元古代刘老碑组页岩的地球化学特征及其地质意义. 地质科学, 38(2): 241~253.
- 刘玉瑞. 2010. 苏北后生断陷层序地层格架与沉积体系. 复杂油气藏, 3(1): 10~31.
- 刘玉瑞. 2011. 苏北盆地油藏类型与成因机制探讨. 油气地质与采收率, 18(4): 6~9.
- 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强. 2006. 苏北盆地上白垩统一第三系层序地层与沉积演化. 北京: 地质出版社: 1~11.
- 邱旭明. 2003. 苏北盆地断块圈闭分类及油气成藏特征. 石油与天然气地质, 24(4): 371~374.
- 沈立建, 刘成林, 王立成. 2015. 云南兰坪盆地云龙组上段稀土、微量元素地球化学特征及其环境意义. 地质学报, 89(11): 2036~2045.
- 田景春, 张翔. 2016. 沉积地球化学. 北京: 地质出版社: 63~64.
- 王旭影. 2017. 北盆地古近系阜三段沉积体系研究. 导师: 姜在兴. 北京: 中国地质大学(北京)博士学位论文: 1~124.
- 王益友, 吴萍. 1983. 江浙海岸带沉积物的地球化学标志. 同济大学学报, (4): 79~87.
- 王中刚, 于学元, 赵振华. 1989. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社: 91~92.
- 杨守业, 李从先. 1999. REE 示踪沉积物物源研究进展. 地球科学进展, 14(2): 164~167.
- 叶荷, 张克信, 季军良, 梁美艳, 张键钰, 徐亚东, 陈奋宁. 2010. 青海循化盆地 23.1~5.0 Ma 沉积地层中常量、微量元素组成特征及其古气候演变. 地球科学—中国地质大学学报, 35(5): 811~820.
- 张虎才, 张文翔, 常凤琴, 杨伦庆, 雷国良, 杨明生, 蒲阳, 类延斌. 2009. 稀土元素在湖相沉积中的地球化学分异—以柴达木盆地贝壳堤剖面为例. 中国科学 D 辑(地球科学), 39(8): 1160~1168.
- 张妮, 林春明, 周健, 陈顺勇, 刘玉瑞, 董桂玉. 2012. 苏北盆地高邮凹陷始新统戴南组一段稀土元素特征及其物源指示意义. 地质论评, 58(2): 369~378.
- 张天福, 孙立新, 张云, 程银行, 李艳锋, 马海林, 鲁超, 杨才, 郭根万. 2016. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义. 地质学报, 90(12): 3454~3472.
- 张文防, 戴霜, 刘海娇, 陈世强, 张永全, 张莉莉, 张瑞, 汪禄波. 2012. 六盘山地区下白垩统红色绿色泥岩地球化学特征及气候环境. 地球科学进展, 27(11): 1236~1244.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社: 222.
- 赵志根. 2000. 不同球粒陨石平均值对稀土元素参数的影响. 标准化报道, 21(3): 15~16.
- 郑荣才, 柳梅青. 1999. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究. 石油与天然气地质, 20(1): 20~25.
- 朱光, 姜芹芹, 朴学峰, 谢成龙. 2013. 基底断层在断陷盆地断层系统发育中的作用: 以苏北盆地南部高邮凹陷为例. 地质学报, 87(4): 441~452.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contributions to Mineralogy and Petrology, 92(2): 181 ~ 193.
- Bhatia M R. 1985. Rare earth elements geochemistry of Australian Paleozoic graywacks and mudstones: provenance and tectonic control. Sedimentary Geology, 45: 97 ~ 113.
- Cao Yang, Niu Manlan, Xie Chenglong, Xie Wenya, Wang Jingxin. 2010. Discussion of petrogenesis on late mesozoic intrusions from the northern segment of Zhangbaling uplift belt along the Tan-Lu fault. Journal of Hefei University of Technology, 33(3): 415~420.
- Chen Jun, Wang Hongtao, Lu Huayu. 1996. Behaviours of REE and other trace elements during pedological weathering: evidence from chemical leaching of loess and paleosol from the Luochuan Section in central China. Acta Geologica Sinica, 70(1): 61 ~ 72.
- Chen Jun, Wang Yongjin, Chen Yang, Liu Lianwen, Ji Junfeng, Lu Huayu. 2001. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for palaeomonsoon climate. Acta Geologica Sinica, 75(2): 259 ~ 266.
- Chen Youfei, Yan Qinshang, Xu Shiyan. 1993. Evolution of the sedimentary environments in north Jiangsu Basin and its tectonic setting. Scientia Geologica Sinica, 28(2): 152 ~ 160.
- Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. Journal of the Geological Society of London, 144(4): 531 ~ 542.
- Fu Qiang, Li Yi, Zhang Guodong, Liu Yurui. 2007. Evidence of transgression lake of Subei Basin during Late Cretaceous and Paleocene Epoch and its geological significance. Acta Sedimentologica Sinica, 25(3): 380 ~ 385.
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H, Tang J X, Qi L. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: geochemical evidence. Journal of Sedimentary Research, 72(3): 393 ~ 407.
- Han Yuanhong, Xu Xuhui, Lu Jianlin, Zhu Jianhui, Peng Jinning, Wu Yingli, Qiu Qi, Wang Dongyan. 2018. Provenance system of Funing Formation in Dongtai Depression, Subei Basin: insight from 3D stratigraphic forward modeling. Acta Sedimentologica Sinica, 36(4): 722 ~ 730.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA. Chemical Geology, 99: 65 ~ 82.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geological indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. Chemical Geology, 111: 111 ~ 129.
- Ke Guangming, Zheng Rongcai, Shi He. 2006. Lithofacies and paleogeography of Paleogene tectonic sequences in the Subei Basin and their evolution. Geology in China, 33(6): 1305 ~ 1311.
- Lernann A. 1978. Lakes: Chemistry, Geology, Physics. Berlin: Springer-Verlag: 79 ~ 83.
- Li Fulai, Xiao Fei, Meng Fanchao, Ren Zeyang. 2016. Geochemical characteristics and implication for Provenance of Upper Permian Linxi Formation clastic rocks in Solonker Area, Inner Mongolia. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 46(6): 1769 ~ 1780.
- Li Jinlong, Chen Dongjing. 2003. Summary of quantified research method on paleosalinity. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 10(5): 1 ~ 3.

- Li Shuangying, Yue Shucang, Yang Jian, Jia Zhihai. 2003&. Geochemical characteristics and implications of Neoproterozoic shales from the Liulaobei Formation in North Anhui. *Chinese Journal of Geology*, 38(2): 241 ~ 253.
- Liu Rurui. 2010&. Sequence-stratigraphic framework and depositional system in Subei epigenetic-faulted basin. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 3(1): 10 ~ 31.
- Liu Yurui. 2011&. Feature and genesis of reservoir fluid distribution in Subei epigenetic-faulted basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 18(4): 6 ~ 9.
- Qiu Haijun, Xu Zhiqin, Qiao Dewu. 2006&. Progress in the study of the tectonic evolution of the Subei basin, Jiangsu, China. *Geological Bulletin of China*, 25(9~10): 1117 ~ 1120.
- Qiu Xuming, Liu Yurui, Fu Qiang. 2006&. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Upper Cretaceous—Tertiary in Subei Basin. Beijing: Geological Press; 1 ~ 11.
- Qiu Xuming. 2003&. Classification of fault-block traps and characteristics of petroleum reservoiring in Subei Basin. *Oil & Gas Geology*, 24(4): 371 ~ 374.
- Shen Lijian, Liu Chenglin, Wang Licheng. 2015&. Geochemical characteristics of rare Earths and trace elements, of the Upper Yunlong Formation in Lanping Basin, Yunnan and its environments significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2036 ~ 2045.
- Shields G, Stille P. 2001. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as paleoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites. *Chemical Geology*, 175: 29 ~ 48.
- Tian Jingchun, Zhang Xiang. 2016#. *Sedimentary Geochemistry*. Beijing: Geology Press; 63 ~ 64.
- Wang Xuying. 2017&. Study on the Sedimentary System of the Third Member of Paleogene Funing Formation in the Subei Basin. Tutor: Jiang Zaixing. Beijing: China University of Geosciences (PhD. thesis); 1 ~ 124.
- Wang Yiyu, Wu Ping. 1983&. Geochemical criteria of sediments in the coastal area of Jiangsu and Zhejiang Provinces. *Journal of Tongji University*, (4): 79 ~ 87.
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. 1989#. *Rare Earth Element Geochemistry*. Beijing: Science Press; 91 ~ 92.
- Wignall P B, Twitchett R J. 1996. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction. *Science*, 272: 1155 ~ 1158.
- Yang Shouye, Li Congxian. 1999&. Research progress in Ree tracer for sediment source. *Advance in Earth Sciences*, 14(2): 164 ~ 167.
- Ye He, Zhang Kexin, Ji Junliang, Liang Meiyang, Zhang Jianyu, Xu Yado, Chen Fenning. 2010&. Major and trace element characters of the sediments and paleoclimatic evolution during about 23.1 ~ 5.0 Ma in Xunhua Basin, Qinghai. *Earth Science — Journal of China University of Geosciences*, 35(5): 811 ~ 820.
- Zhang Hucai, Zhang Wunxiang, Chang Fengqin, Yang Luning, Lei Guoliang, Yang Mingsheng, Pu Yang, Lei Yanbin. 2009#. Geochemical fractionation of rare earth elements in lacustrine deposits from Qaidam Basin. *Sci. Chin. Ser. D—Earth Sci.*, 39(8): 1160 ~ 1168.
- Zhang Ni, Lin Chunming, Zhou Jian, Chen Shunying, Liu Yurui, Dong Guiyu. 2012&. REE characteristics of the 1st Member of Eocene Dainan Formation in Gaoyou Depression of north Jiangsu Basin, and its significance in Provenance instruction. *Geological Review*, 58(2): 369 ~ 378.
- Zhang Tianfu, Sun Lixin, Zhang Yun, Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Ma Hailin, Lu Chao, Yang Cai, Guo Genwan. 2016&. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formation in the northern margin of Ordos Basin and their paleo environmental implications. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3454 ~ 3472.
- Zhang Wenfang, Dai Shuang, Liu Haijiao, Chen Shiqiang, Zhang Yongquan, Zhang Lili, Zhang Rui, Wang Lubo. 2012&. The geochemistry of the Early Cretaceous red and green mudstones, Liupanshan group, Liupanshan area and its implications on the climate. *Advances in Earth Science*, 27(11): 1236~1244.
- Zhao Zhenhua. 1997#. *Principles of Trace Element Geochemistry*. Beijing: Science Press; 222.
- Zhao Zhigen. 2000&. Effect of different chondrite on the parameter of rare-earth elements. *Reporting of Standardization*, 21(3): 15 ~ 16.
- Zheng Rongcai, Liu Meiqing. 1999&. Study on palaeosalinity of Chang-6 oil reservoir set in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 20 ~ 25.
- Zhu Guang, Jiang Qinqin, Piao Xuefeng, Xie Chenglong. 2013&. Role of basement faults in faulting system development of a rift basin: an example from the Gaoyou Sag in Southern Subei Basin. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 441 ~ 452.

Geochemical characteristics of trace and rare earth elements in the 3rd Member of Paleocene Funing Formation in Dongtai Depression, North Jiangsu Basin, and their geological significance

WANG Xuying¹⁾, JIANG Zaixing²⁾

1) College of Civil Engineering, Tangshan University, Tangshan, Hebei, 063000;

2) College of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083

Objectives: The trace elements and rare earth elements in sedimentary rocks are highly sensitive to changes in the water medium of the sedimentary environment, and are of great significance to the study of the paleoenvironment, sediment source properties and tectonic background. Previous studies on the element geochemistry of the Dongtai Depression, North Jiangsu Basin (Subei Basin), are relatively weak, and the use of element geochemical data to explain the paleoenvironment and provenance is blank to now.

Methods: The paper takes 20 mudstone samples from the 3rd Member of the Paleocene Funing Formation in Dongtai Depression as the research object, carries on the determination of trace elements and rare earth elements, and analyzes their geochemical characteristics and the geological significance revealed.

Results and Conclusions: ① Sr, Sr/Cu, Rb/Sr, La_n/Yb_n indicate dry and hot climates, and Li, Sr, Ni, Ga, Sr/Ba indicate freshwater—brackish water environment. V/(V+Ni), V/Cr, Ni/Co, U/Th, and δCe indicate oxidation—weakly reducing water environment. The overall water environment is mainly freshwater, occasionally saltwater is injected into the basin, and local is brackish water. ② Co/Th—La/Sc, La/Th—Hf discriminant diagrams and rare earth elements distribution patterns reflect the original sedimentary materials from the upper crust. ③ La—Th—Sc, Th—Co—Zr/10, and Th—Sc—Zr/10 discrimination diagrams generally reflect the tectonic setting of continental island arcs and active continental margins. The comparison results between the characteristics of the trace elements and rare earth elements in the sandstones of different structural backgrounds listed by Bhatia and the samples in the study area also reached the same conclusion.

Keywords: Dongtai Depression, North Jiangsu Basin(Subei Basin); the Paleocene Funing Formation; trace element; rare earth element; geochemical characteristics

Acknowledgements: This study was supported by the Tangshan College Doctoral Innovation Fund (No. tsxybc201816)

First author: WANG Xuying, female, born in 1987, Ph. D., lecturer, majored in sedimentary geology; Email: wxy87121@126.com

Manuscript received on: 2020-07-27; **Accepted on:** 2021-01-28; **Network published on:** 2021-02-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 02. 006 **Edited by:** LIU Zhiqiang

(上接第 339 页)

水文地质环境地质部等:青海共和干热岩试采
规模化压裂造储和定向钻探成功实施

由中国地质调查局水文地质环境地质部、水文地质环境地质调查中心牵头组织实施的青海共和盆地干热岩勘查试采取得突破性进展和成效。一是成功实现我国首例干热岩规模化储层建造,达到规模化储层改造目标。二是实施两眼多靶点干热岩定向深井,创国内首例。三是系统建立干热岩储层描述与裂隙预测,以及多重改造体积定量界定方法。四是自主探索形成干热岩压裂复杂缝网构建与控制、高效控震、储层成像等规模化储层建造技术。五是探索形成了一套高温硬岩高效定向钻进技术。

叶建良等:我国率先利用水平井技术完成
天然气水合物试验性试采

由中国地质调查局广州海洋地质调查局叶建良牵头组织实施的海域天然气水合物第二轮试采,创造了“产气总量 86.14×10⁴ m³,日均产气量 2.87×10⁴ m³”两项新的世界纪录,取得了迈向产业化进程的重大标志性成果;突破了从“垂直井”到“水平井”开采的核心关键技术;实现了从“探索性试采”向“试验性试采”的重大跨越,创新形成了水合物矿体精细刻画、浅软地层高曲率水平井钻井、动力导向套管下入、未固结储层精细改造、泥质粉砂储层高精度防砂、井中举升与温压精准测控等水合物水平井试采的技术工艺体系;创建了独具特色的环境监测体系,进一步验证了天然气水合物绿色开发可行;自主创新形成的六大类 32 项技术,增强了深海探测与开发能力,总体达到国际领先水平,为产业化提供了有力保障。

云露等:塔里木盆地顺北超深断溶体油气藏富集
理论与关键技术取得重大进展

由以中国石油化工股份有限公司西北油田分公司云露、

漆立新为核心骨干的科技攻关团队,通过持续攻关研究,实现了顺北超深断溶体气藏富集理论与关键技术的重大进展,支撑了 1.0 Gt 级的顺北油气田勘探开发持续扩大。创新提出了早寒武世缓坡相优质烃源岩发育模式和冷盆、超深、古老海相烃源岩生烃模式,明确了盆地油气资源结构序列;创新建立了超深断溶体油气藏“寒武多期供烃、构造破裂控储、原地垂向输导、晚期成藏为主、走滑断裂控富”成藏新模式;阐明了克拉通盆地走滑断裂控制的“储—圈—运—藏—富”五元一体成藏机理。该成果丰富了中国海相油气成藏理论,实现了我国海相油气勘探类型新突破,总体达到国际领先水平。

朱茂炎等:澄江动物群“麒麟虾”的发现揭秘
节肢动物起源之谜

中国科学院南京地质古生物研究所朱茂炎研究员领导的“寒武纪大爆发”研究团队在云南约 518 Ma 前的澄江动物群中,发现了解答“节肢动物起源之谜”的关键过渡型化石——“麒麟虾”,研究成果发表于《自然》杂志。麒麟虾这一造型奇异的五眼虾形动物嵌合了奇虾类等多种节肢动物祖先类型和真节肢动物的形态特征,填补了节肢动物起源过程中的核心缺失环节,为节肢动物主要演化创新的起源提供了关键参考点。该研究同时解答了节肢动物第一对附肢的同源性和演化路径问题,并为解析早期节肢动物之间的演化关系提供了重要信息。这一发现给生物进化论增添了一个强有力的过渡型化石证据。

[中国地质学会秘书处 供稿 章雨旭 编辑]

The 2020 's top 10 geoscientific achievements of the Geological Society of China