

徐波,刁慧,王宁,等.东海盆地丽水凹陷古新统微量元素地球化学特征及其指示意义[J].海洋地质前沿,2022,38(12):64-74.

XU Bo, DIAO Hui, WANG Ning, et al. Geochemical characteristics and indicative significance of trace elements in the Paleocene in Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(12): 64-74.

东海盆地丽水凹陷古新统微量元素地球化学特征及其指示意义

徐波¹,刁慧²,王宁¹,何俊辉¹,施佳铖¹,胡碧瑶¹,周晓林¹

(1 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司中海油实验中心,上海 200941;

2 中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335)

摘要:通过对丽水凹陷近些年完钻的多口探井开展微量元素地球化学分析,系统探讨了研究区古新统古盐度、古气候、古水深、氧化还原环境以及古生产力特征,为厘清凹陷内优质烃源岩形成及发育主控因素起到积极作用。研究认为,丽水凹陷古新统离物源区较近,相对富集 Li、Ti、V、Zn、Ga、Rb、Ba、Hf、Th 元素,Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Sr、Nb、Zr、Ta、U 元素则相对亏损(对比岩石圈上地壳微量元素含量),其母岩主要与酸性岩浆岩有关。由 Li、Sr、Ni、Ga 元素含量以及 Sr/Ba 值指示古新统整体处于淡水-半咸水的环境,水体深度较浅。Sr/Cu 值的变化指示古新统气候整体表现为干热的气候条件,但垂向上呈现一定的差异,其中古新统中早期处于炎热干旱的气候条件,晚期则为温湿-干热-温湿的交替变化气候。由 Ni/Co、V/Sc 以及 Mo 含量等参数指示古新统处于弱氧化-弱还原的沉积环境。利用 Ba 元素的生物含量($w(\text{Ba}_{\text{生物}})$)分析古新统的生产力情况,认为其整体生产力水平较高,具有较高的生烃潜力,尤其是灵峰组生产力最高,勘探潜力较大。古新统烃源岩有机质含量与古生产力参数、氧化还原性参数、古盐度参数之间呈现较好的相关性,指示沉积环境的诸多因素会对凹陷内优质烃源岩的发育起到协同控制作用。

关键词:古新统;烃源岩;有机质富集;微量元素;沉积环境;主控因素;丽水凹陷

中图分类号:P744.4

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.117

0 引言

东海陆架盆地是中国近海面积最大的中、新生代沉积盆地,其中最具勘探潜力的 2 个凹陷分别为西湖凹陷和丽水凹陷。丽水凹陷勘探工作始于 20 世纪 50 年代,整体勘探程度较低,目前仅发现几个规模较小的含油气构造,建成 1 个油气田。前人针对丽水凹陷开展了许多卓有成效的油气地质研究,其中陈晓东等^[1]认为月桂峰组虽然是凹陷内主力烃源岩,但属于非典型湖相烃源岩,需要突破传统的中-深湖相沉积环境发育有效烃源岩的认识;侯国

伟等^[2]依据源-汇研究成果,进一步识别了丽水凹陷的物源、汇聚通道以及控砂模式;葛和平等^[3-4]和申雯龙等^[5]对丽水凹陷油气成藏研究指出,凹陷经历了 2 次成藏过程,其中保存条件是制约其成藏的最关键因素;刘俊海等^[6]对丽水凹陷古新统沉积环境进行了初步的探讨,认为古新统早期为还原环境和干热气候,而在晚期为弱还原-还原-弱还原变化的沉积环境,气候表现为温湿-干热-温湿的交替变化特征。综上所述^[1-6],丽水凹陷油气地质条件相对复杂,加之勘探程度较低,造成各种地质要素关系认识仍然不足,尤其是针对烃源岩发育的主控因素研究仍不够深入,直接制约着勘探的成效。通过梳理前人研究成果发现,针对丽水凹陷沉积环境特征的研究成果较少,本文通过对丽水凹陷近年来新钻探井的元素地球化学分析,详细探讨了古新统水体沉积环境特征,进一步摸清了烃源岩有机质富集的主控因素,为烃源岩研究提供了新的思路,也为凹

收稿日期: 2022-04-19

资助项目: 中国海洋石油集团公司科研条件平台建设项目“生烃热模拟实验平台建设”(CNOOC-KJPTGCS 2020-01)

作者简介: 徐波(1988-),男,硕士,工程师,主要从事油气地球化学实验及应用研究工作。E-mail: xubo10@cnooc.com.cn

陷有利勘探区带优选提供了新的研究手段。

1 地质背景

丽水凹陷位于东海陆架盆地西部坳陷带的西南端, 整体表现为 NE-SW 走向。凹陷可划分为丽西次凹、丽东次凹、丽南次凹、丽南凸起和灵峰潜山带, 共计 5 个亚二级和三级构造单元^[5,7-8](图 1)。

断陷期和断坳转换期沉积的古新统为丽水凹陷的主力烃源岩, 其从上到下分别为明月峰组、灵峰组和月桂峰组^[5](图 2)。明月峰组以灰色、灰黑色泥岩为主, 夹薄层细砂岩, 局部灰色泥岩与粉砂质泥岩或泥质粉砂岩互层。其中明月峰组以灰色泥岩及粉砂岩为主, 局部发育薄煤层。灵峰组可分为上下两段, 上段以灰色、灰黑色泥岩为主; 下端以粒度较粗的砂岩为主, 夹灰色泥岩。月桂峰组以灰色、灰黑色泥岩为主, 夹厚度较薄的细砂岩。

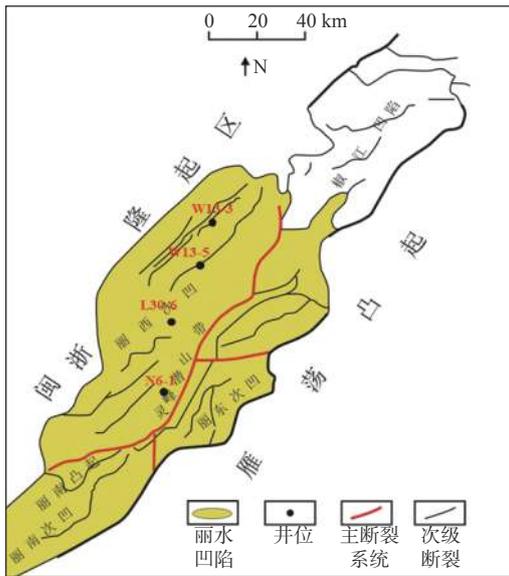


图 1 丽水凹陷区域地质图^[1]

Fig.1 The tectonic setting of the Lishui Sag^[1]

2 样品测试

本次以丽水凹陷古新统烃源岩为研究对象, 选取近年来完钻的 4 口探井共计 80 块岩屑及岩芯样品, 开展元素地球化学分析。微量元素分析参照国标 GB/T 14506.30-2010 要求, 进行消解处理后, 使用 PerkinElmer NexION 350X 电感耦合等离子体质谱仪进行测试。测试条件为: 载气 99.999% 氦气, ICP-MS 入射功率 1 150 W, 反射功率 2.0 W, 进样速度 24 r/min, 采样时间 65.00 s, 扫描方式为跳峰, 测

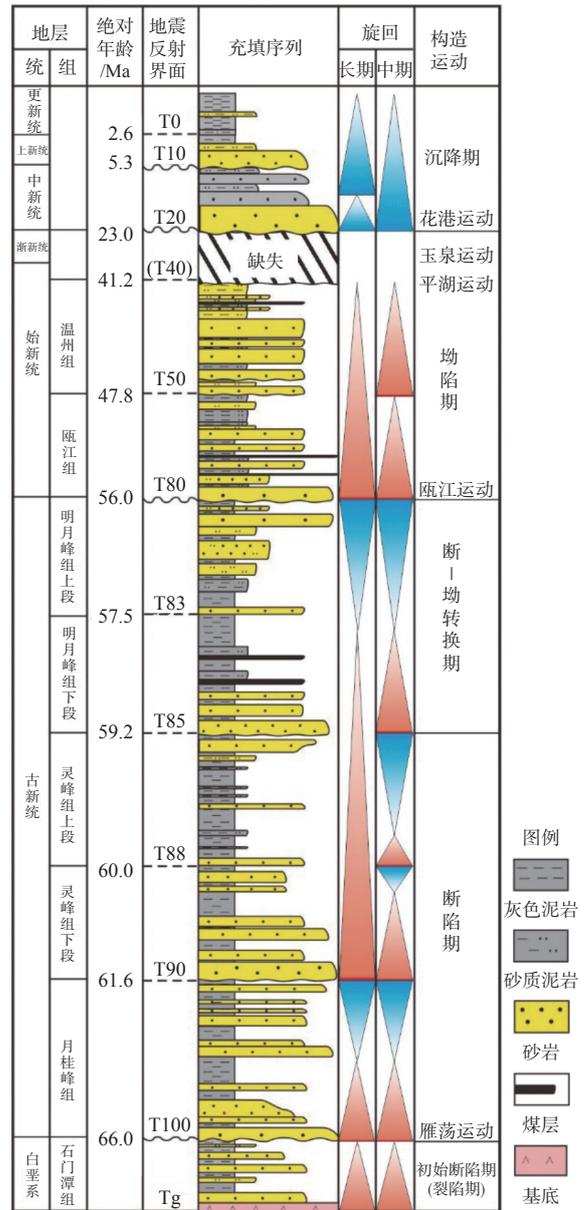


图 2 丽水凹陷地层综合柱状图^[1]

Fig.2 Integrated stratigraphic column of the Lishui Sag^[1]

试精度为 0.01 μg/g。有机碳分析按照 GB/T 19145-2003 要求, 使用 CS230 碳硫分析仪进行测定, 测试精度为 0.001%, 所有测试均由中海油实验中心上海实验中心完成。

3 古新统微量元素地球化学特征

富集系数能够有效指示地层中微量元素的富集与亏损情况^[9], 通过对比岩石圈上地壳微量元素含量, 采用富集系数法(富集系数(CC)=样品微量元素含量/岩石圈上地壳微量元素含量)分析丽水凹陷古新统各层段泥岩样品中微量元素的富集与亏损情况(表 1)。

表1 古新统样品微量元素地球化学参数汇总

Table 1 Summary of trace element geochemical parameters of the Paleocene samples

井名	深度/m	层位	TOC/%	Sr/($\mu\text{g/g}$)	Mo/($\mu\text{g/g}$)	Sr/Ba	Rb/Sr	Sr/Cu	Ni/Co	V/Sc	U/Th	δU	$T_{\text{古水温}}/(^{\circ}\text{C})$	$w(\text{Ba}_{\text{生物}})/(\mu\text{g/g})$
L30-6	1 981		1.11	67.8	0.7	0.04	1.47	7.22	9.54	3.19	0.18	0.70	31.07	1 470.4
	2 081		0.43	138.5	13.1	0.11	0.90	9.47	0.74	3.31	0.19	0.72	30.19	1 079.1
	2 131		0.41	98.4	0.6	0.16	1.24	9.95	0.61	4.11	0.15	0.61	30.69	430.6
	2 151		5.19	25.2	2.7	0.05	4.16	1.90	1.29	6.19	0.22	0.80	31.59	151.9
	2 201		0.83	173.3	1.3	0.30	0.81	18.49	3.45	7.28	0.16	0.66	29.76	330.6
	2 257		1.37	116.3	1.3	0.06	1.31	9.06	1.44	6.64	0.18	0.70	30.47	1 539.4
	2 305		0.51	116.1	2.5	0.15	1.31	13.50	0.54	4.62	0.17	0.68	30.47	551.1
	2 235		0.59	136.0	1.0	0.26	0.82	12.58	0.97	5.70	0.16	0.64	30.22	347.3
	2 517		0.78	191.4	0.6	0.35	0.67	21.71	1.50	4.21	0.15	0.63	29.54	322.5
	2 561		0.57	148.5	0.9	0.25	0.84	16.29	1.30	3.23	0.17	0.67	30.07	363.9
	2 573		-	194.0	1.2	0.04	0.89	14.81	3.50	11.34	0.11	0.78	29.50	5 859.1
	2 615	明月峰组	-	347.0	2.3	0.05	0.33	24.44	4.98	12.15	0.12	0.93	27.61	2 059.6
2 655		-	391.0	1.6	0.09	0.31	32.31	3.67	28.63	0.21	0.81	27.07	771.8	
2 711		-	209.0	0.7	0.07	0.86	12.74	5.08	21.63	0.12	0.88	29.32	6 664.9	
2 735		-	234.0	1.4	0.06	0.50	17.08	3.79	22.54	0.17	0.72	29.01	662.6	
2 775		1.40	335.0	3.8	0.08	0.51	19.59	5.22	33.14	0.22	0.88	27.76	4 319.7	
2 777		-	372.0	2.1	0.08	0.50	21.14	4.03	11.66	0.29	0.69	27.30	6 267.3	
2 855		1.93	486.0	1.1	0.08	0.39	16.99	4.36	10.54	0.22	0.78	25.89	4 136.0	
2 097		-	319.1	1.2	0.05	0.40	33.25	0.87	6.03	0.26	0.50	27.96	2 700.2	
2 145		-	236.3	7.1	0.11	0.54	27.30	2.05	3.42	0.19	0.53	28.98	3 804.2	
2 217		-	230.7	3.0	0.23	0.56	25.77	1.71	5.93	0.26	0.76	29.05	3 852.1	
2 317		-	184.8	1.3	0.03	0.56	18.76	1.61	7.84	0.17	0.54	29.62	4 080.1	
2 367		0.96	171.0	1.7	0.17	0.65	15.79	1.51	8.31	0.21	0.68	29.79	5 411.0	
L30-6	2 611		0.66	175.6	0.9	0.27	0.95	20.82	2.94	4.78	0.12	0.54	29.73	385.9
	2 661		0.76	129.0	1.5	0.28	0.96	14.61	2.37	6.61	0.17	0.67	30.31	250.5
	2 711		0.98	118.2	1.1	0.17	1.26	15.24	2.09	6.44	0.16	0.66	30.44	442.7
2 895		-	193.0	0.8	0.07	0.54	14.73	4.55	12.52	0.16	0.86	29.52	2 120.8	
2 935		-	309.0	0.8	0.11	0.50	16.52	5.04	13.87	0.15	0.90	28.08	1 140.3	
2 975		-	273.0	0.9	0.10	0.62	18.32	3.53	8.48	0.18	0.86	28.53	922.6	
3 015		-	225.0	1.6	0.03	0.81	15.20	4.02	13.54	0.24	0.90	29.12	9 889.0	
3 055		-	277.0	1.8	0.08	0.44	19.10	2.37	10.06	0.16	0.80	28.48	1 416.6	
3 099		1.86	267.0	2.2	0.08	0.45	18.80	2.43	10.48	0.19	0.79	28.60	2 840.5	
3 145		2.56	202.0	2.1	0.06	0.64	17.55	1.95	8.55	0.09	0.74	29.41	7 614.9	
3 181		-	209.0	1.8	0.07	0.67	16.39	1.96	8.69	0.14	0.75	29.32	3 288.0	
3 213	灵峰组	-	247.0	1.4	0.04	0.52	20.86	2.29	10.54	0.16	0.82	28.85	2 644.8	
3 263		-	242.0	3.4	0.06	0.55	21.34	1.69	8.76	0.19	0.69	28.91	2 043.2	
3 297		-	217.0	3.9	0.05	0.62	19.43	2.21	16.72	0.29	0.79	29.22	822.7	
3 335		2.00	242.0	2.2	0.06	0.60	20.34	2.87	11.07	0.25	0.85	28.91	2 582.1	
3 383		1.64	224.0	2.2	0.04	0.59	21.75	1.95	9.66	0.28	0.75	29.13	2 390.0	
3 419		-	199.0	1.7	0.03	0.58	16.05	2.11	9.77	0.25	0.76	29.44	2 322.4	
3 457		-	225.0	2.2	0.02	0.62	10.71	2.14	9.77	0.27	0.74	29.12	7 675.7	
3 533		-	198.0	2.3	0.03	0.84	11.19	1.69	7.49	0.22	0.85	29.46	3 184.0	
3 575		1.43	175.0	1.8	0.17	1.01	10.54	2.18	9.21	0.22	1.10	29.74	3 053.0	
3 629		1.51	160.0	1.3	0.05	0.89	8.08	1.41	8.21	0.19	0.82	29.93	3 060.2	
3 655		-	168.0	1.3	0.09	0.80	10.31	1.46	7.48	0.20	0.82	29.83	2 908.3	

续表 1

井名	深度/m	层位	TOC/%	Sr/($\mu\text{g/g}$)	Mo/($\mu\text{g/g}$)	Sr/Ba	Rb/Sr	Sr/Cu	Ni/Co	V/Sc	U/Th	δU	$T_{\text{古水温}}/(\text{°C})$	$w(\text{Ba}_{\text{生物}})/(\mu\text{g/g})$
	2 445		-	151.3	1.4	0.06	0.81	15.38	1.13	8.01	0.23	0.66	30.03	5 514.3
	2 497		1.12	189.8	0.8	0.13	0.76	16.14	1.53	7.64	0.18	0.62	29.56	3 870.3
	2 587		-	349.6	2.0	0.28	0.21	28.29	1.08	8.87	0.22	0.70	27.58	3 838.3
	2 659		-	420.1	1.4	0.04	0.18	16.98	2.49	12.54	0.24	0.83	26.71	3 637.0
	2 777		-	297.0	0.8	0.17	0.40	18.03	1.46	7.83	0.20	0.66	28.23	4 771.9
W13-3	2 861		1.57	248.1	0.9	0.08	0.45	20.59	1.35	8.56	0.20	0.74	28.83	5 615.9
	2 977		2.12	304.7	4.4	0.04	0.33	6.93	5.04	7.30	0.20	0.44	28.14	9 952.9
	2 076			285.1	2.6	0.08	0.38	25.67	0.90	6.74	0.25	0.59	28.38	5 700.0
	3 145		1.87	218.9	1.1	0.08	0.45	18.57	1.18	7.30	0.41	0.64	29.20	404.3
	3 191		1.32	185.5	1.3	0.08	0.63	15.92	1.11	8.15	0.23	0.73	29.61	2 454.9
	3 261		-	225.7	0.9	0.21	0.36	21.11	1.06	8.99	0.23	0.94	29.11	1 492.3
	2 805		1.06	203.1	1.5	0.22	0.66	4.21	3.27	6.70	0.30	0.94	29.39	210.5
	2 885		1.07	154.5	1.2	0.17	0.16	3.04	10.04	1.96	0.14	0.58	29.99	674.8
	2 945		1.31	250.4	1.8	0.10	0.43	10.15	5.95	3.78	0.20	0.75	28.81	2 078.7
W13-5	2 995		1.24	280.7	1.6	0.24	0.38	7.14	8.16	5.26	0.44	1.14	28.43	676.3
	3 035		1.04	285.5	2.6	0.10	0.44	9.15	4.68	5.60	0.22	0.79	28.37	2 405.0
	3 125		1.17	371.9	2.3	0.11	0.30	12.31	5.33	5.60	0.22	0.79	27.30	2 961.5
	3 185		2.05	363.9	3.5	0.05	0.26	12.64	5.14	5.77	0.25	0.85	27.40	7 484.6
	3 220		1.01	474.2	2.0	0.31	0.29	13.79	3.83	3.05	0.32	0.99	26.04	923.0
	3 697		1.44	167.0	2.3	0.06	0.94	10.50	1.49	8.33	0.21	0.78	29.84	3 081.1
N6-1	3 737		1.55	175.0	2.3	0.06	0.71	12.87	1.63	8.00	0.27	0.85	29.74	2 512.9
	3 777		2.39	156.0	3.7	0.06	0.97	8.04	1.57	8.83	0.25	0.80	29.98	1 224.8
	3 829		2.50	147.0	5.0	0.03	0.92	10.58	1.66	9.14	0.31	0.80	30.09	720.7
	3 319		-	197.1	2.0	0.06	0.53	20.45	0.18	3.32	0.21	0.78	29.47	421.5
	3 365		1.77	226.0	1.8	0.08	0.38	25.82	0.25	3.65	0.21	0.89	29.11	2 220.6
W13-3	3 411		1.53	273.7	1.9	0.18	0.44	24.08	0.58	8.19	0.25	0.86	28.52	2 760.4
	3 539	月桂峰组	-	180.6	1.7	0.17	0.80	14.52	0.33	9.37	0.22	0.96	29.67	2 077.9
	3 621		-	170.9	1.3	0.22	0.82	15.30	0.38	7.66	0.22	0.78	29.79	3 938.2
	3 264		1.16	94.5	1.5	0.07	0.64	0.59	2.42	1.95	0.41	1.10	30.74	814.5
	3 340		0.85	342.2	1.0	0.21	0.24	13.70	3.10	1.81	0.24	0.84	27.67	1 010.1
	3 360		0.92	217.3	2.6	0.12	0.35	6.99	3.94	3.25	0.36	1.04	29.22	1 157.7
W13-5	3 430		1.04	68.4	1.3	0.05	1.28	3.06	3.29	0.50	0.36	1.04	31.06	853.0
	3 440		0.99	156.0	1.6	0.12	0.48	6.05	2.54	1.83	0.33	0.99	29.97	693.6
	3 445		0.95	161.7	0.8	0.12	0.60	6.09	2.81	1.73	0.28	0.91	29.90	794.8
	3 480		1.02	140.4	2.9	0.10	0.31	5.07	3.02	3.01	0.34	1.01	30.17	855.7

注:“-”表示未开展TOC分析。

由丽水凹陷古新统泥岩富集系数分析(图 3), 古新统地层表现出明显 Li、Ti、V、Zn、Ga、Rb、Ba、Hf、Th 元素的富集, 尤其是 Ba 元素含量是上地壳含量的数倍, 这可能与地层古生产力以及沉积期受海水或蒸发作用的影响有关。Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Sr、Nb、Zr、Ta、U 元素则表现出相对亏损的特征。

其中 Ti、Rb、Sc 等微量元素属于典型的亲陆元素, 被广泛用于识别物源的远近, 其元素含量越低, 指示越远离物源区^[10]。丽水凹陷古新统明月峰

组样品中 Ti 含量均值 2 954.3 $\mu\text{g/g}$, Rb 含量均值为 135.2 $\mu\text{g/g}$; 灵峰组样品中 Ti 含量均值 3 470.0 $\mu\text{g/g}$, Rb 含量均值为 124.31 $\mu\text{g/g}$; 月桂峰组 Ti 含量均值为 2 049.3 $\mu\text{g/g}$, Rb 含量均值为 105.2 $\mu\text{g/g}$, 对比发现古新统样品中 Ti 和 Rb 元素的含量均比较高, 相对于上地壳含量呈现相对富集的特征, 指示研究区近物源的特点。

通常情况下, Zr 元素和 Hf 元素之间会呈现亲密伴生的特点, 常被用于判断岩石的成因和物源^[10]。

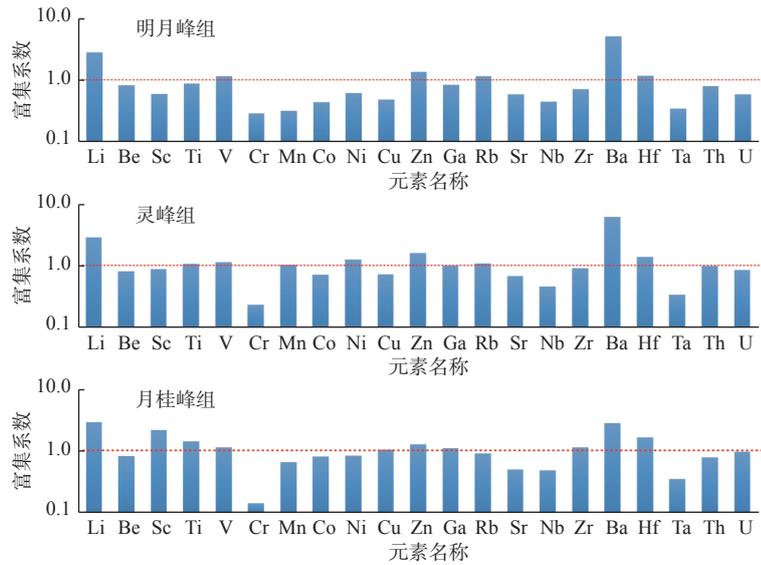


图3 丽水凹陷古新统泥岩中微量元素富集系数 (CC) 柱状图

Fig.3 Trace element concentration coefficients (CC) histogram of the Paleocene mudstone in the Lishui Sag

由表2可以看出,从超基性岩-基性岩-中性岩-酸性岩,岩石样品的 Zr/Hf 值呈现逐渐减小的趋势。丽水凹陷古新统样品的 Zr 含量为 33.1~373.0 $\mu\text{g/g}$, 均值 175.6 $\mu\text{g/g}$; Hf 含量为 1.7~10.4 $\mu\text{g/g}$, 均值为 5.5 $\mu\text{g/g}$; Zr/Hf 值为 19.4~72.2, 平均值为 31.9, 均与花岗岩的数值比较接近,说明研究区古新统的母岩主要与酸性岩浆岩有关。

4 微量元素特征及地质意义

岩石中微量元素相对稳定,通过探究其含量以及元素之间的组合特征,能够有效指示沉积过程中水

表2 不同岩石的 Zr、Hf 含量及其比值^[10]

岩石类型	样品号	Zr/($\mu\text{g/g}$)	Hf/($\mu\text{g/g}$)	Zr/Hf
纯橄榄岩	DST-1	3	0.01	300
橄榄岩	PCC-1	7	0.06	117
玄武岩	JB-1	300	3.5	86
玄武岩	BCR-1	190	4.7	40
辉绿岩	W-1	105	2.67	39
安山岩	AGV-1	225	5.2	43
花岗岩闪长岩	GSP-1	500	15.9	31
花岗岩闪长岩	JG-1	160	3.5	46
花岗岩	G-1	210	5.2	40
花岗岩	G-2	300	7.35	41
花岗岩	GM	145	4.7	31
花岗岩	NIM-G	300	12	25
正长岩	NIM-S	30	0.6	50
古新统样品		33.1~373.0 均值175.6	1.7~10.4 均值5.5	19.4~72.2 均值31.9

体深度、盐度、物源、气候以及氧化-还原条件的变化。

4.1 古盐度

古盐度能够有效指示古湖泊水介质条件,对恢复研究区古地理和古气候条件异常重要^[10-11]。水体盐度的高低会对古湖泊中生物的生长及繁殖速率产生重要的影响。研究表明,微量元素中的 Li、Ni、Sr、Ga 等元素对水体的盐度较为敏感,具有较好的指示作用^[10-13]。通常情况下,在淡水环境和咸水环境中,元素的含量存在明显的差异(表3)。

表3 不同水体环境微量元素含量划分指标

Table 3 Classification benchmarks of trace element content in different water environments

微量元素	咸水环境含量/($\mu\text{g/g}$)	淡水环境含量/($\mu\text{g/g}$)
Li	>150	<90
Sr	800~1000	100~500
Ni	>40	<25
Ga	<8	>17

丽水凹陷古新统明月峰组样品中 Li 含量为 20.1~98.0 $\mu\text{g/g}$, 均值为 58.8 $\mu\text{g/g}$; Sr 含量为 25.2~486.0 $\mu\text{g/g}$, 均值为 214.0 $\mu\text{g/g}$; Ni 含量为 0.58~31.5 $\mu\text{g/g}$, 均值为 12.7 $\mu\text{g/g}$; Ga 含量为 6.73~21.0 $\mu\text{g/g}$, 均值为 14.7 $\mu\text{g/g}$ 。灵峰组样品中 Li 含量为 34.1~101.0 $\mu\text{g/g}$, 均值为 58.5 $\mu\text{g/g}$; Sr 含量为 118.2~474.2 $\mu\text{g/g}$, 均值为 242.3 $\mu\text{g/g}$; Ni 含量为 5.54~53.2 $\mu\text{g/g}$, 均值为 18.4 $\mu\text{g/g}$; Ga 含量为 8.96~30.3 $\mu\text{g/g}$, 均值为 17.4 $\mu\text{g/g}$ 。月桂峰组样品中 Li 含量为 39.8~77.8 $\mu\text{g/g}$, 均值为 60.4 $\mu\text{g/g}$; Sr 含量为

68.4~342.2 $\mu\text{g/g}$, 均值为 179.6 $\mu\text{g/g}$; Ni 元素含量为 1.04~54.0 $\mu\text{g/g}$, 均值为 17.2 $\mu\text{g/g}$; Ga 含量为 15.5~23.7 $\mu\text{g/g}$, 均值为 19.4 $\mu\text{g/g}$ 。参照表 3 的划分标准, 由 Li 含量和 Sr 含量关系图(图 4a) 指示丽水凹陷古新统整体为淡水环境, 由 Ni 含量和 Ga 含量关系

图(图 4b) 可以发现, 除 W13-5 井的少数样品 Ni 含量较高、处于咸水区域外, 其他样品均落于淡水或淡水-半咸水区域。综合认为, 丽水凹陷古新统处于偏淡化的淡水-半咸水的水体环境, W13-5 井的水体盐度偏高, 可能与其受到局部海侵的影响有关。

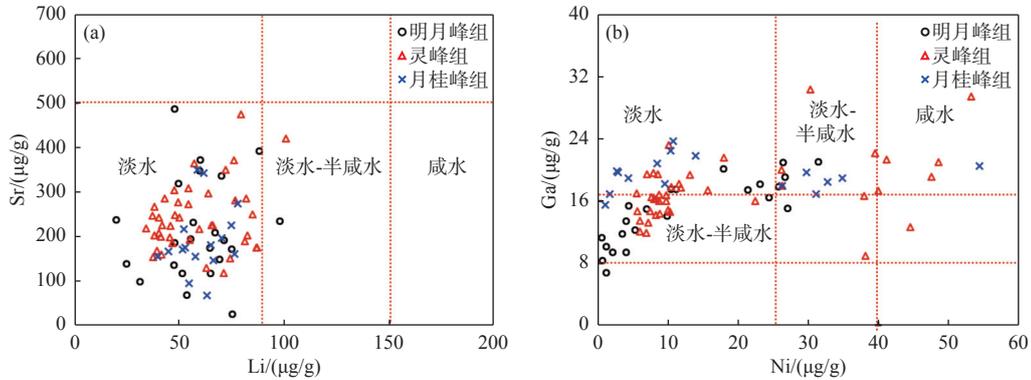


图 4 丽水凹陷古新统样品 Li-Sr、Ni-Ga 元素含量关系

Fig.4 The diagram of Li vs Sr content (a) and Ni vs Ga content (b) of the Paleocene mudstone in the Lishui Sag

此外, Sr 含量和 Sr/Ba 值也是指示古盐度的有效参数(表 4)。通常情况下, 陆相和过渡相沉积环境中 Ba 含量普遍高于海相沉积环境^[11-13]。丽水凹陷明月峰组样品中 Sr 含量为 25.2~486.0 $\mu\text{g/g}$, 均值为 214.0 $\mu\text{g/g}$; Sr/Ba 值为 0.03~0.35, 均值为 0.12; 灵峰组样品中 Sr 含量为 118.2~474.2 $\mu\text{g/g}$, 均值为 242.3 $\mu\text{g/g}$; Sr/Ba 值为 0.02~0.31, 均值为 0.11; 月桂峰组样品中 Sr 含量为 94.5~342.2 $\mu\text{g/g}$, 均值为 179.6 $\mu\text{g/g}$; Sr/Ba 值为 0.03~0.22, 均值为 0.11。由 Sr 含量和 Sr/Ba 值之间关系图(图 5), 认为古新

统整体上处于偏淡化的淡水-半咸水的环境, 这与前文通过元素含量判别水体盐度的结果完全吻合。

4.2 古气候

古气候条件不仅会对降水量、水体分层以及沉积充填方式产生重要影响, 还直接控制着盐度的变化^[13-15]。Sr、Cu 和 Rb 等元素含量受气候影响变化显著, 通常情况下, 温暖潮湿气候条件下, Sr 含量普遍偏低; 在炎热干旱气候条件下, Sr 含量则偏高。研究认为^[14-17], 当 Sr/Cu 值介于 1.3~5.0 时, 指示温暖潮湿的气候条件; 当 Sr/Cu 值介于 5.0~10.0, 指示半潮湿-半干旱的气候条件; 当比值 >10.0 时, 则指示炎热干旱的气候条件。而 Rb/Sr 值的变化规律恰好相反, 处于干旱和寒冷气候时, Rb/Sr 值较低, 温暖潮湿气候时, Rb/Sr 值较高。

表 4 水体古盐度微量元素判别指标^[11-13]

Table 4 Criteria for the discrimination of trace elements of ancient salinity

判断指标	淡水	半咸水	咸水
Sr 含量/ $\mu\text{g/g}$	<300	300~500	>500
Sr/Ba	<0.6	0.6~1.0	>1.0

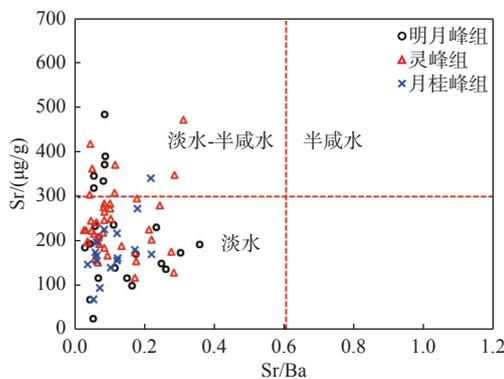


图 5 丽水凹陷古新统样品 Sr/Ba 值和 Sr 含量关系

Fig.5 Relationship between Sr/Ba and Sr content of the Paleocene mudstone in the Lishui Sag

研究发现, 丽水凹陷古新统明月峰组样品 Sr/Cu 值为 1.91~33.3, 均值为 17.4; Rb/Sr 值为 0.31~4.16, 均值为 0.89; 灵峰组 Sr/Cu 值为 3.0~28.3, 均值为 15.5; Rb/Sr 值为 0.16~1.26, 均值为 0.57; 月桂峰组 Sr/Cu 值为 0.60~25.8, 均值为 11.5; Rb/Sr 值为 0.24~1.28, 均值为 0.65。结合 Sr/Cu 值、Rb/Sr 值与地质年代的关系图(图 6), 可以推断丽水凹陷古新统沉积时期气温较高, 呈现干热的气候特征, 但垂向上呈现出一定的差异。其中, 古新统中早期的明月峰组和灵峰组处于炎热干旱的气候条件, 而古新统晚期的则表现为温湿-干热-温湿的交替变化气候, 该研究成果与李俊海等^[6]早期的研究成果一致。

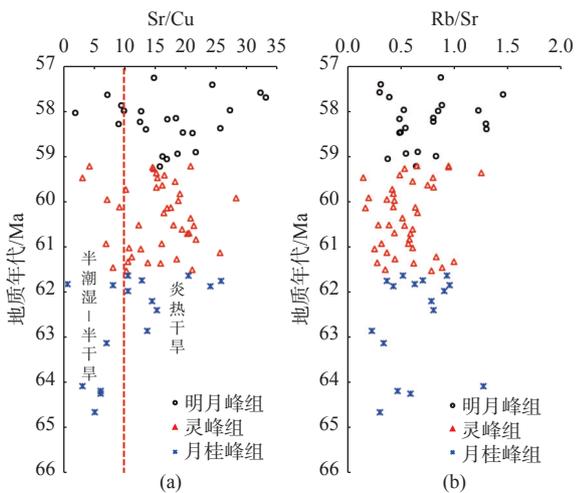


图6 古新统样品 Sr/Cu 和 Rb/Sr 与地质年代关系

Fig.6 Relationship between Sr/Cu and Rb/Sr of the Paleocene samples and geological age

4.3 古水深

微量元素在沉积过程中会产生不同类型的分异作用,同时水深也会对元素的聚集和分散产生直接影响^[16-20]。NICHOLLS^[21]研究指出,若沉积物中痕量元素含量超过以下浓度时,即 Ba>1 000 μg/g、Ni>150 μg/g、Cu>90 μg/g、Pb>40 μg/g、Co>40 μg/g、Mo>5 μg、特别是伴有 U<1 μg/g,其形成的水体深度可能超过 250 m。

古新统明月峰组样品 Ba 含量均值为 2954.3 μg/g、Ni 含量均值为 12.66 μg/g、Cu 含量均值为 12.50 μg/g、Pb 含量均值为 25.29 μg/g、Co 含量均值为 4.53 μg/g、Mo 含量均值为 2.31 μg/g、U 含量均值为 1.69 μg/g。灵峰组样品 Ba 含量均值为 3270.0 μg/g、Ni 含量均值为 25.7 μg/g、Cu 含量均值为 18.63 μg/g、Pb 含量均值为 32.09 μg/g、Co 含量均值为 7.32 μg/g、Mo 含量均值为 1.79 μg/g、U 含量均值为 2.44 μg/g。月桂峰组样品 Ba 含量均值为 2 049.3 μg/g、Ni 含量均值为 17.2 μg/g、Cu 含量均值为 27.2 μg/g、Pb 含量均值为 38.80 μg/g、Co 含量均值为 8.30 μg/g、Mo 含量均值为 2.10 μg/g、U 含量均值为 2.80 μg/g。对比发现除了 Ba 元素和 U 元素含量高于标准值,其他的元素均远低于标准值,由此推断丽水凹陷古新统沉积时期水体较浅。

4.4 古水温

本次引用前人的经验公式($T=(2\ 578-Sr)/80.8$),通过利用 Sr 含量计算古水温^[22]。由表 1 中丽水凹陷古新统样品的 $T_{\text{古水温}}$ 数据,明月峰组 $T_{\text{古水温}}$ 为 25.9~31.6 °C,均值为 29.3 °C;灵峰组 $T_{\text{古水温}}$ 为

26.0~30.4 °C,均值为 28.9 °C;月桂峰组 $T_{\text{古水温}}$ 为 27.7~31.1 °C,均值为 29.7 °C。由于大气降水中通常会含有少量金属 Sr 元素,而经验公式未充分考虑大气降水中 Sr 对结果的影响,所以丽水凹陷古新统样品实际 $T_{\text{古水温}}$ 应低于计算的温度值。笔者认为通过计算值可以初步推断古新统整体处于温暖的气候环境,且沉积环境相对稳定。

4.5 氧化还原条件

研究表明,水体的氧化-还原条件对烃源岩中有机质的形成和发育会产生直接影响,一般认为缺氧偏还原的水体环境更加利于有机质的保存和发育。在沉积过程中,地层中的 V、Cr、Ni、Co、U、Sc、Mo 等金属元素由于处于不同的氧化还原条件,其元素的含量会产生明显的分异,能够作为判识古湖泊氧化还原条件的有效参数^[16-26]。

Ni/Co、V/Sc 经常被用来作为判断古缺氧环境的有效标志(表 5),Ni/Co<5.0、V/Sc<9.0 为氧化环境,Ni/Co 值介于 5.0~7.0、V/Sc 值在 9.0~30.0 为氧化-还原的过渡环境,Ni/Co>7.0、V/Sc>30.0 为厌氧的还原环境。由图 7a 可以发现,仅有 2 个样品的 Ni/Co 值>7.0,其他样品处于氧化和氧化-还原环境的区域,指示丽水凹陷古新统沉积水体整体处于偏氧化的氧化-还原环境。

U 元素在水体环境中不稳定,容易与还原性物质发生化学反应,生成稳定的化合物;而 Th 元素的络合物在弱碱性的环境中易发生水解反应,生成氢氧化物沉淀,两者的化学性质差别较大,能够有效判识氧化还原状态。通常情况下,当 $\delta U>1$,指示沉积水体为缺氧环境;当 $\delta U<1$,则指示正常的水体环境。当 $U/Th>1.25$ 时,指示沉积水体为还原环境;当 $0.75<U/Th<1.25$ 时,指示其为过渡环境;当

表 5 古新统样品氧化还原参数分布

Table 5 Distribution of redox parameters of the Paleocene samples

元素	古新统		
	明月峰组	灵峰组	月桂峰组
Ni/Co	0.54~9.54	0.90~10.04	0.18~3.94
	2.77(23)	2.93(41)	1.82(16)
V/Sc	3.19~33.14	1.96~16.72	0.50~9.37
	10.07(23)	8.35(41)	5.04(16)
U/Th	0.11~0.29	0.09~0.44	0.21~0.41
	0.19(23)	0.22(23)	0.28(16)
δU	0.50~0.93	0.44~1.14	0.78~1.10
	0.71(23)	0.78(41)	0.90(16)

注:最小值~最大值
平均值(样品数量)

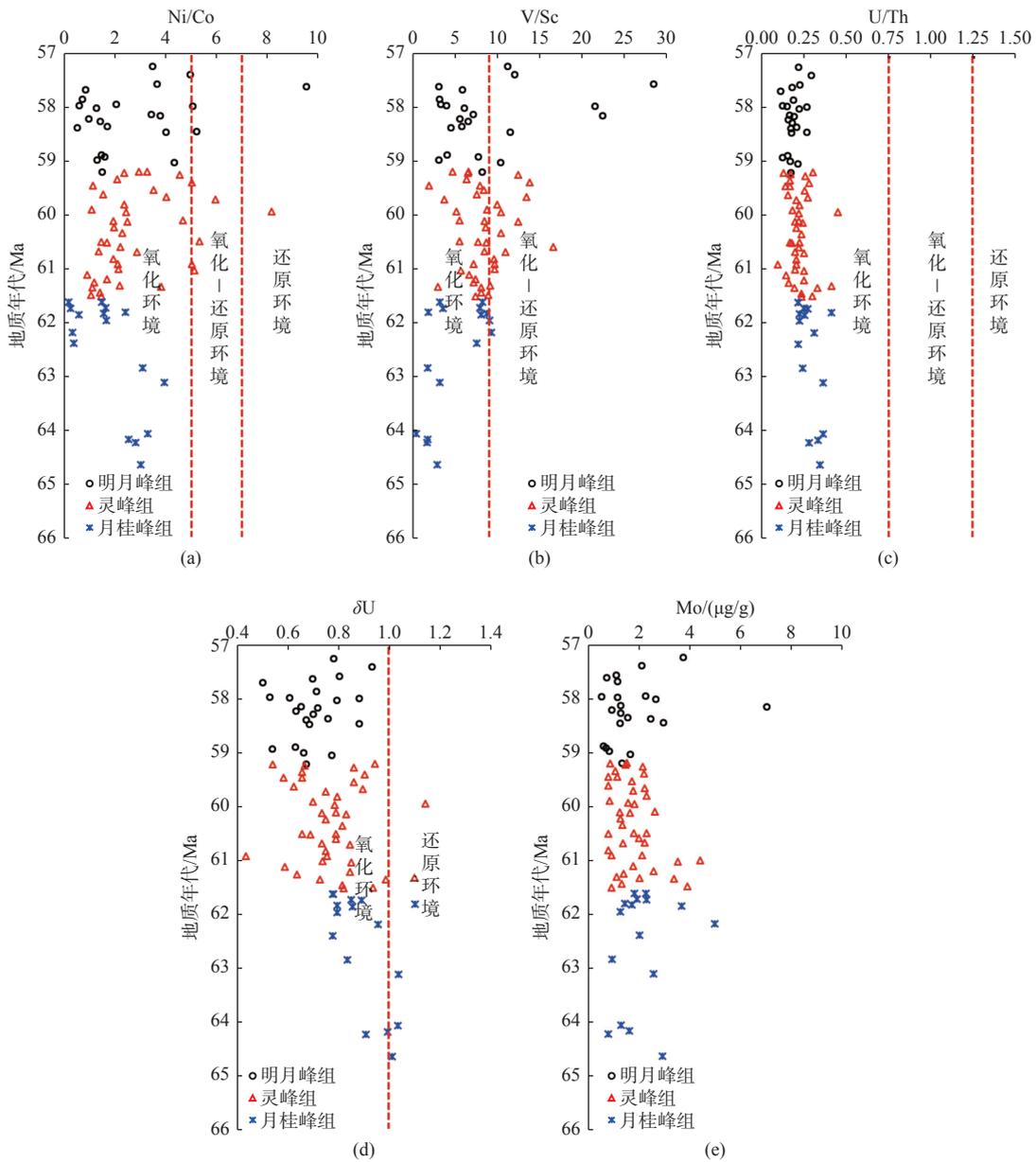


图 7 古新统样品氧化还原参数与地质年代关系

Fig.7 Relationship between redox parameters and geological time of the Paleocene samples

U/Th<0.75 时, 指示处于富氧的氧化环境。由图 7c、d 可以发现, 丽水凹陷古新统样品中 Th 元素含量相对较高, 全部 80 个样品的 U/Th 值均<0.75, 绝大多数样品 (92%) δU 值<1.0, 均指示丽水凹陷古新统处于偏氧化的氧化-还原环境。

研究认为缺氧条件下, Mo 元素会被硫酸盐还原作用分解产生的硫化氢所固定, 生成 MoS₂ 沉淀或以固溶体形式进入黄铁矿, 造成 Mo 元素的富集。因此, 高含量的 Mo 元素是厌氧环境的有效指标。丽水凹陷古新统样品 Mo 元素含量均比较低, 均值仅为 2.0 μg/g, 指示当时的沉积水体环境还原性较弱。

综上所述, 认为丽水凹陷古新统整体处于偏氧化的氧化-还原的沉积水体环境, 该结果与前文关于

水体的盐度和水深的讨论相吻合。

4.6 古生产力

古生产力是指生物在地质历程中通过能量循环过程固定能量的速率, 为烃源岩形成及发育的提供重要的物质基础^[27-29]。Cu、Zn、Ba 等金属元素含量与生产力水平有着密不可分的关系, 这些与生物生长发育有密切联系的营养元素的富集, 通常暗示其具有较高的生产力。

金属 Ba 元素主要来源于生物和陆源输入, 其含量的高低是指示古生产力的重要参数, 但生产力的评价必须扣除陆源输入的影响^[27]。本次研究通过利用陆源输入的 Ti 元素参考以下公式, 来扣除样

品中陆源输入 Ba 含量的影响。

$$w(X_{\text{生物}}) = w(X_{\text{总量}})w(T_{i\text{总量}})[w(X)/w(Ti)]_{\text{PAAS}} \quad (1)$$

式中: $w(X_{\text{生物}})$ 为样品中 X 元素的生物含量;

$w(X_{\text{总量}})$ 为样品中 X 元素的测定总含量;

$w(Ti_{\text{总量}})$ 为样品中 Ti 元素的测定总含量;

$[w(X)/w(Ti)]_{\text{PAAS}}$ 为新太古代澳大利亚页岩中 X 元素与 Ti 元素平均含量的比值。

PAAS 中金属 Ba 含量为 $650 \mu\text{g/g}$, Ti 元素含量为 $6000 \mu\text{g/g}$ [28]。

通常情况下, 当 $w(X_{\text{生物}}) > 0$, 指示该元素相对 PAAS 呈海相自生富集; 当 $w(X_{\text{生物}}) < 0$, 则指示该元素来源于陆源输入。

丽水凹陷古新统明月峰组样品的 $w(\text{Ba}_{\text{生物}})$ 为 $151.9 \sim 6664.9 \mu\text{g/g}$, 均值为 $2485.9 \mu\text{g/g}$; 灵峰组样品的 $w(\text{Ba}_{\text{生物}})$ 为 $210.5 \sim 9952.9 \mu\text{g/g}$, 均值为 $3113.8 \mu\text{g/g}$; 月桂峰组样品的 $w(\text{Ba}_{\text{生物}})$ 为 $421.5 \sim 3938.2 \mu\text{g/g}$, 均值为 $1571.1 \mu\text{g/g}$ 。通常情况下, 当 $1000 \mu\text{g/g} < w(\text{Ba}_{\text{生物}}) < 5000 \mu\text{g/g}$ 时, 指示高生产力的沉积环境; 当 $200 \mu\text{g/g} < w(\text{Ba}_{\text{生物}}) < 1000$

$\mu\text{g/g}$ 时, 指示沉积环境具有中等生产力 [22,27-30]。综合分析发现, 研究区明月峰组、灵峰组以及月桂峰组 $w(\text{Ba}_{\text{生物}})$ 平均值均 $> 1000 \mu\text{g/g}$, 指示丽水凹陷古新统地层整体生产力水平较高, 具有较高的生烃潜力。通过垂向对比, 认为灵峰组生产力水平最高, 明月峰组次之, 月桂峰组低于前两者, 该结果与前人研究结果吻合 [6], 指示灵峰组具有较高的勘探前景。

4.7 烃源岩发育影响因素分析

韦恒叶 [30] 研究认为, 生产力和偏还原的保存条件是海烃源岩中有机碳相对富集的 2 个最重要因素, 但对比前人研究结果 [27-30], 发现有机质富集是一个非常复杂的物理-化学过程, 无论是初级生产力情况、氧化还原环境、湖泊水体的古水深、古盐度、古气候, 还是陆源碎屑输入等因素都可能对有机质富集程度产生重要影响, 直接控制着优质烃源岩的形成与发育。结合前文关于沉积环境的研究结果, 进一步探讨丽水凹陷古新统烃源岩有机质富集与沉积环境之前的耦合关系。

由有机质含量与生源钡含量的相关性(图 8a)

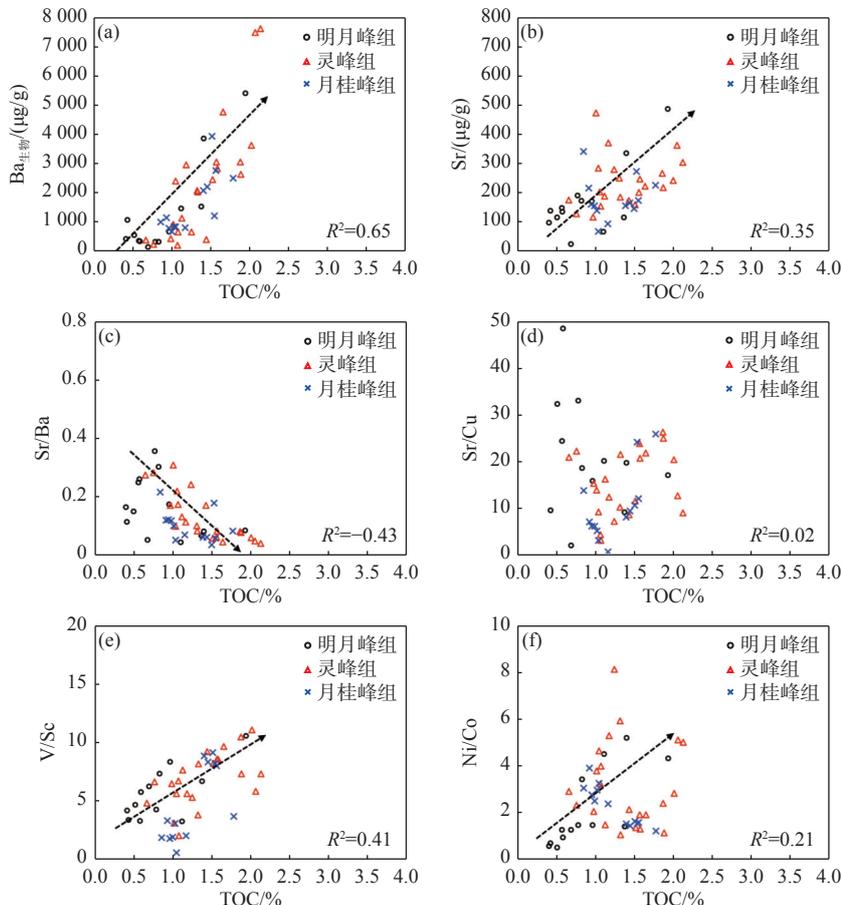


图 8 古新统样品中微量元素地化参数与 TOC 关系

Fig.8 Relationship between geochemical parameters of trace elements and the TOC of the Paleocene mudstone

可以发现,两者呈现明显的正相关性,相关系数(R^2)达到了0.65,指示古生产力是控制丽水凹陷古新统有机质富集的主控因素之一。由有机质含量与Sr丰度(图8b)、有机质含量与Sr/Ba值(图8c)的相关性可以发现,前者呈现明显的正相关性,相关系数 R^2 为0.35;后者则呈现出明显的负相关性,相关系数 R^2 为-0.43,指示咸水环境有利于有机质的富集。由有机质含量与Sr/Cu值的相关性(图8d)可以发现,两者没有明显的相关性,指示古气候条件对丽水凹陷古新统有机质富集影响相对较弱。由有机质含量与氧化还原参数的相关性(图8e、f)可以发现,均呈现出较好的相关性,相关系数分别为0.41和0.21,指示氧化还原环境对丽水凹陷有机质富集有直接影响,缺氧还原的环境更有利于有机质的富集。综上所述,丽水凹陷古新统烃源岩有机质富集机理较为复杂,主要受到高的古生产力、湖泊古盐度以及氧化还原条件的协同控制,直接控制着优质烃源岩的发育。

5 结论

(1)本次研究通过元素地球化学成果的有效应用,对丽水凹陷古新统地层的沉积环境进行了系统的探讨,认为古新统整体处于淡水-半咸水和弱氧化-弱还原的沉积水体环境,水体深度较浅;气候总体表现为干热的特征,但垂向上呈现一定的差异,其中古新统中早期处于炎热干旱的气候条件,晚期则处于为温湿-干热-温湿的交替变化气候。

(2)丽水凹陷古新统烃源岩的有机质含量与 $w(\text{Ba}_{\text{生物}})$ 、Sr含量、Sr/Ba值以及氧化还原参数之前多呈现出较好的相关性,指示有机质富集主要受到高的古生产力、湖泊古盐度以及氧化还原条件等因素的协同控制。

(3)综合有机质含量及微量元素地球化学特征分析认为丽水凹陷古新统整体生产力较高,具有较高的生烃潜力,其中灵峰组生产力水平最高,有着良好的勘探前景。

参考文献:

- [1] 陈晓东,蒋一鸣,漆滨汶,等.东海丽水凹陷古新统非典型湖相烃源岩及油气特征[J].海洋地质前沿,2021,37(4):25-38.
- [2] 侯国伟,刘金水,蔡坤,等.东海丽水凹陷古新统源-汇系统及控砂模式[J].地质科技情报,2019,38(2):65-74.
- [3] 葛和平,陈志勇,方来富,等.丽水凹陷油气成藏期次探讨[J].中国海上油气(地质),2003,17(1):44-50.
- [4] 葛和平,陈晓东,刁慧,等.东海盆地丽水凹陷原油地球化学特征及油源分析[J].中国海上油气,2012,24(4):8-12,31.
- [5] 申雯龙,漆滨汶.东海盆地丽水凹陷有效烃源岩判定及分布预测[J].地质科技通报,2020,39(3):77-88.
- [6] 刘俊海,吴志轩,于水,等.丽水凹陷古新统微量元素地球化学特征及其地质意义[J].中国海上油气,2005,17(1):8-11.
- [7] 周士科,徐长贵.轴向重力流沉积:一种重要的深水储层:以东海盆地丽水凹陷明月峰组为例[J].地质科技情报,2006,25(5):57-62.
- [8] 田兵,庞国印,王琪,等.叠合断陷盆地油气成藏条件分析:以东海丽水-椒江凹陷为例[J].岩性油气藏,2012,24(5):32-37.
- [9] 梁万乐,李贤庆,魏强,等.库车坳陷北部山前带中生界泥岩元素地球化学特征及其沉积环境意义[J].矿业科学学报,2019(5):375-383.
- [10] 刘钦甫,杨晓杰,丁述理.华北晚古生代煤系高岭岩微量元素和稀土元素地球化学研究.地球化学,1998,27(2):196-203
- [11] 邓宏文,钱凯.沉积地球化学与环境分析[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1993:18-28.
- [12] 李进龙,陈东敬.古盐度定量研究方法综述[J].油气地质与采收率,2003,10(5):1-3.
- [13] 文华国,郑荣才,唐飞,等.鄂尔多斯盆地耿湾地区长6段古盐度恢复与古环境分析[J].矿物岩石,2008,28(1):114-120.
- [14] 孔凡翠,杨瑞东,魏怀瑞,等.贵州威宁草海第四系窑上组沉积物微量元素地球化学特征及其古环境意义[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(5):117-126.
- [15] 张才利,高阿龙,刘哲,等.鄂尔多斯盆地长7油层组沉积水体及古气候特征研究[J].天然气地球科学,2011,22(4):582-587.
- [16] 范玉海,屈红军,王辉,等.微量元素分析在判别沉积介质环境中的应用:以鄂尔多斯盆地西部中区晚三叠世为例[J].中国地质,2012,39(2):382-389.
- [17] 张茂盛,廖健德,刘清明,等.微量元素在地质沉积环境中的应用[J].广西师范大学学报:自然科学版,2003,21(1):19-21.
- [18] 王永炜,李荣西,高胜利,等.渤海湾盆地黄骅坳陷湖相碳酸盐岩微量元素特征及沉积环境[J].石油实验地质,2017,39(6):849-857.
- [19] 颜佳新,徐四平,李方林.湖北巴东栖霞组缺氧沉积环境的地球化学特征[J].岩相古地理,1998,18(6):27-31.
- [20] 吴朝东,杨承运,陈其英.湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义[J].岩石矿物学杂志,1999,18(1):26-39.
- [21] NICHOLLS G D. Trace elements in sediments: an assessment of their possible utility as depth indicators[J]. Marine Geology, 1967, 5(5/6): 539-555.
- [22] 徐博,曾文倩,刁慧,等.东海盆地西湖凹陷平湖组微量稀土元素对古生产环境的指示意义[J].海洋地质与第四纪地质,2021,41(3):72-84.
- [23] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [24] 谢国梁,沈玉林,赵志刚,等.西湖凹陷平北地区泥岩地球化学特征及其地质意义[J].地球化学,2013,42(6):599-610.

- [25] 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 等. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1774-1786.
- [26] 彭海艳, 陈洪德, 向芳, 等. 微量元素分析在沉积环境识别中的应用: 以鄂尔多斯盆地东部二叠系山西组为例[J]. 新疆地质, 2006, 24(2): 202-205.
- [27] 田正隆, 陈绍勇, 龙爱民. 以Ba为指标反演海洋古生产力的研究进展[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(3): 78-86.
- [28] TATLOR S R, MCLENNAN S M. The continental Crust: its composition and evolution: an examination of the Geochemical record preserved in sedimentary rocks[M]. Oxford: Blackwell, Scientific Publications, 1985: 312.
- [29] 陈慧, 解习农, 李红敬, 等. 利用古氧相和古生产力替代指标评价四川上寺剖面二叠系海相烃源岩[J]. 古地理学报, 2010, 12(3): 324-333.
- [30] 韦恒叶. 古海洋生产力与氧化还原指标: 元素地球化学综述[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(2): 76-88.

Geochemical characteristics and indicative significance of trace elements in the Paleocene in Lishui Sag, East China Sea Basin

XU Bo¹, DIAO Hui², WANG Ning¹, HE Junhui¹, SHI Jiacheng¹, HU Biyao¹, ZHOU Xiaolin¹

(1 CNOOC Central Laboratory, CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Shanghai 200941, China;

2 Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: Trace elements of the Paleocene strata from several exploration wells in the Lishui Sag were analyzed and the characteristics of paleosalinity, paleoclimate, redox environment, paleowater depth, and paleoproductivity were systematically discussed, to identify the main factors of the formation and development of high-quality source rocks in the sag. Results show that the Paleocene strata are relatively enriched in Li, Ti, V, Zn, Ga, Rb, Ba, Hf, and Th elements, but relatively depleted in Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Sr, Nb, Zr, Ta, and U elements in comparison to those in the upper crust of the earth. The parent rocks are mainly related to acidic magmatic rocks. The paleoenvironment of the Paleocene deposits was a relatively shallow fresh-brackish water as indicated by the contents of Li, Sr, Ni, Ga, and Sr/Ba. The paleoclimate was dry and hot with a certain vertical variation as revealed by the changes in Sr/Cu ratio. The paleoclimate in the early-middle Paleocene was hot and arid, and the late Paleocene was in alternation from warm-humid, dry-hot, to warm-humid. The paleo-depositional redox condition was weakly oxidized to weakly reduced as unveiled by Ni/Co, V/Sc and Mo contents. The paleo-productivity was relatively high with high hydrocarbon generation potential. In particular, Lingfeng Formation has the highest productivity and greater exploration potential. It is found that the content of total organic carbon of the Paleocene samples is positively correlated with paleoproductivity parameters, redox conditions, water salinity parameters, and paleoclimate parameters. Many factors indicating sedimentary environment play a synergistic role in controlling the development of high-quality source rocks in the Lishui Sag.

Key words: Paleocene; source rock; organic matter enrichment; trace elements; depositional environment; main controlling factor; Lishui Sag