

引用格式:冯乔,张耀,徐子苏,等.胶莱盆地早白垩世瓦屋组、水南组元素地球化学特征与古环境分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(1):20-34.

FENG Qiao, ZHANG Yao, XU Zisu, et al. Geochemical characteristics and paleoenvironmental analysis of dark fine grained rocks of Wawukuang and Shuinan formations in Jiaolai basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(1): 20-34.

胶莱盆地早白垩世瓦屋组、水南组元素地球化学特征与古环境分析

冯 乔¹, 张 耀¹, 徐子苏¹, 田方正¹, 杨 勃², 张 懿²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油天然气股份有限公司 青海油田公司勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202)

摘 要:胶莱盆地莱阳群瓦屋组和水南组多以页岩和砂岩为主,见部分灰岩。采用波长色散 X 荧光光谱仪、等离子体光谱仪等对研究区岩石样品进行元素地球化学测试,根据样品的主量、微量、稀土元素含量及相关元素比值,探讨瓦屋组、水南组的古沉积环境。得到以下结论:瓦屋组、水南组 SiO_2 、 MgO 、 CaO 含量较高,水南组部分样品 Al_2O_3 含量超过 10%,且两套地层都表现出较明显的轻稀土元素富集特征;利用 Sr/Ba 、 Rb/K 、 V/Ni 、 Th/U 、 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 、 U/Th 、 Eu/Eu^* 、 Ce/Ce^* 、 Sr/Cu 等一系列环境判别指标,结合近期研究成果和野外地质特征认为,瓦屋组具明显的海相沉积特征,形成于干热和氧化环境,水南组也具有海相沉积特征,形成于干热和还原环境。

关键词:瓦屋组;水南组;元素地球化学;沉积环境;分析指标;剖面特征

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)01-0020-15

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.01.003

Geochemical Characteristics and Paleoenvironmental Analysis of Dark Fine Grained Rocks of Wawukuang and Shuinan Formations in Jiaolai Basin

FENG Qiao¹, ZHANG Yao¹, XU Zisu¹, TIAN Fangzheng¹, YANG Bo², ZHANG Yi²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Exploration and Development Research Institute of

Qinghai Oil Field Company, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: The strata of Wawukuang and Shuinan Formations in Laiyang Group, Jiaolai Basin are mainly composed of shale and sandstone with some limestone. This paper conducted the element geochemistry test of the rock samples in the study area by using WD-XRF, ICP-MS and other instrument and discussed the palaeoenvironment of Wawukuang and Shuinan Formations based on the content of major, trace and rare earth element and the ratio of related elements in the samples. After research, it came to the following conclusions: The contents of SiO_2 , MgO and CaO are relatively higher in Wawukuang and Shuinan Formations, and the content of Al_2O_3 in some samples of Shuinan Formation amounts to more than 10%. Both the sets of strata show the obvious enrichment of light rare earth elements.

收稿日期:2017-07-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41428201)

作者简介:冯 乔(1963—),男,四川达州人,教授,博士,主要从事石油地质和油气地球化学方面的研究。

E-mail:342853438@qq.com

张 耀(1992—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事地球化学方面的研究。

By using a series of environmental criteria such as Sr/Ba, Rb/K, V/Ni, Th/U, U/Th, Eu/Eu*, Ce/Ce*, and Sr/Cu, and by combining with previous studies and field section characteristics, it is found that the strata of both Wawukuang and Shuinan Formations show obvious marine sedimentary characteristics formed in dry, hot and oxidized environments.

Key words: Wawukuang formation; Shuinan formation; element geochemistry; depositional environment; analysis of indicators; the section characteristics

胶莱盆地下白垩统莱阳群中的瓦屋组和水南组为一套细粒碎屑沉积物,前人多认为是河流-湖泊相沉积。如彭楠等^[1-2]认为瓦屋组主要以河流相沉积为主,水南组以湖泊相沉积为主,早白垩世沉积环境相对温暖湿润。李守军等^[3]在灵山岛下白垩统发现鱼类化石 *Lecoptera sinensis* Woodward 和叶枝介化石 *Yan-jiestheria* Chen, 也认为早白垩世胶莱盆地的地层属于陆相沉积。但张松梅等^[4]曾在莱阳群发现绒枝藻海相化石。张振凯等^[5]对灵山岛莱阳群粉砂岩的研究中,认为莱阳期的沉积环境为海相沉积,气候较干热;许红等^[6]在灵山岛的岩石薄片中发现较多海绿石,X 射线分析结果表明绿泥石占 20%,为海相沉积环境。上述信息表明胶莱盆地中生界并不是单纯的河流-湖泊相沉积环境,可能发育海相沉积。

沉积岩中部分元素的含量特征、配分模式及演化历程,可以较明显地记录沉积环境的变化^[7]。由于一些主量、微量、稀土元素对环境的变迁较为敏感,因此可作为判别沉积环境的标志^[7-8]。本文主要从元素地球化学分析着手,通过对胶莱盆地莱阳群瓦屋组、水南组泥质岩的主量、微量、稀土元素等研究,结合野外地质剖面特征,探讨样品地球化学特征与沉积环境的关系,为正确认识该区沉积环境变迁提供重要证据。

1 地质特征分析

胶莱盆地位于华北克拉通东南缘,东南与苏鲁造山带相邻,北侧为胶北隆起,西以郯庐断裂带分界^[9-12](图 1)。白垩系自下而上分为莱阳群、青山群和王氏群。莱阳群自下而上分别为:瓦屋组、林寺山组、止凤庄组、水南组、龙旺庄组和曲格庄组,其间为整合接触关系,上部被青山群后组覆盖^[13](图 2)。

瓦屋组主要以黄绿、灰黄色细砂岩、页岩为主,夹薄层灰岩,底部含有少量砾岩,常见植物、鱼类、昆虫、叶肢介等热河类动植物化石,上部与止凤庄组或林寺山组呈整合接触,下部与荆山群呈不整合接触。莱阳市龙旺庄镇瓦屋村一带为标准剖面^[9](图 2)。

水南组主要是以灰黑色页岩、粉砂岩为主,少量灰黄色细砂岩、灰褐色粉砂岩及薄-中层状灰色灰岩等,地层中常见动植物化石^[9]。莱阳地区水南组整合覆于止凤庄组之上、伏于龙旺庄组之下,总体上表现为地层颜色较深、粒度较细(图 2)。

野外观察莱阳群底部瓦屋组和中部水南组发育暗色细粒沉积。主要表现为:①碎屑颗粒总体较细,细砂-泥质级,灰黑色页岩极其发育(图 3(a)、(b)、(c)),说明是形成于远离物源区的安静水体环境;②水平层理发育,横向延伸稳定,表明沉积水动力条件较弱(图 3(a)、(b)、(c));③瓦屋组纹层状页岩中夹多层薄层灰岩(图 3(d)),灰泥顶面发育干裂构造(图 3(e)),属潮坪沉积;④瓦屋组纹层状页岩中夹含石膏的泥质层(图 3(f)),为潟湖沉积;⑤水南组以黑色页岩为主,水平层理发育,为深水沉积(图 3(a)、(b)、(c));⑥水南组中夹中层状灰色灰岩(图 3(g)、(h)),层厚稳定,为深水沉积;⑦水南组中见低幅度宽缓波痕(图 3(i)),可能为风暴浪对海底沉积物的扰动形成。总体上,上述沉积构造反映了从滨浅海逐渐过渡到大陆斜坡沉积环境。

2 地球化学特征及沉积环境分析

共采集样品 13 件,其中瓦屋组的瓦屋组 5 件,发城镇东(即水南村)水南组 5 件,灵山岛水南组 3 件,样品岩性均为灰绿色、灰黑色的细粒岩石。样品的主量元素、微量元素、稀土元素分析在河北省廊坊市中铁物探勘察有限公司进行。主量元素采用波长色散 X 荧光光谱仪(分析精度 $\leq 0.5\%$)和容量法测量,微量和稀土元素采用等离子体质谱仪分析得到,分析精度 $\leq 1\%$ 。分析结果见表 1、2。

2.1 主量元素

样品中 SiO₂ 含量最高:水南组为 12.20%~56.00%,平均 37.58%;瓦屋组为 15.00%~28.00%,平

均 26.47%(表 1)。

Al₂O₃ 含量较高:水南组 4.00%~15.00%,平均 9.44%;瓦屋夬组 4.50%~10.00%,平均 6.80%,表明两组地层陆源物质含量丰富(表 1)。

CaO 含量也较高:水南组 w-12、w-10 和 w-07 含量都超过 20%,钙质丰富,其余样品都小于 10%;瓦屋夬组除 w-02 样品为 14.86%外,其余都大于 20%,接近 30%,钙质含量同样较高(表 1)。

MgO 含量较高:水南组 2.00%~18.00%,平均 9.86%,样品 w-13、w-12、w-10、w-07 超过 10%;瓦屋夬组只有 w-04 和 w-02 超过 10%,其余都很低,平均 5.43%(表 1)。

两组样品都含有少量 Na₂O、K₂O、MnO、TiO₂、P₂O₅,且大部分含量都少于 1%。Fe 元素含量较低,水南组 Fe³⁺ 仅为 0.15%~4.70%,平均 1.96%;Fe²⁺ 含量为 0.8%~3%,大部分样品都超过 2%,平均 2.20%。瓦屋夬组 Fe³⁺ 为 1.40%~4.66%,平均 2.77%;Fe²⁺ 为 0.26%~2.70%,平均 1.04%(表 1)。

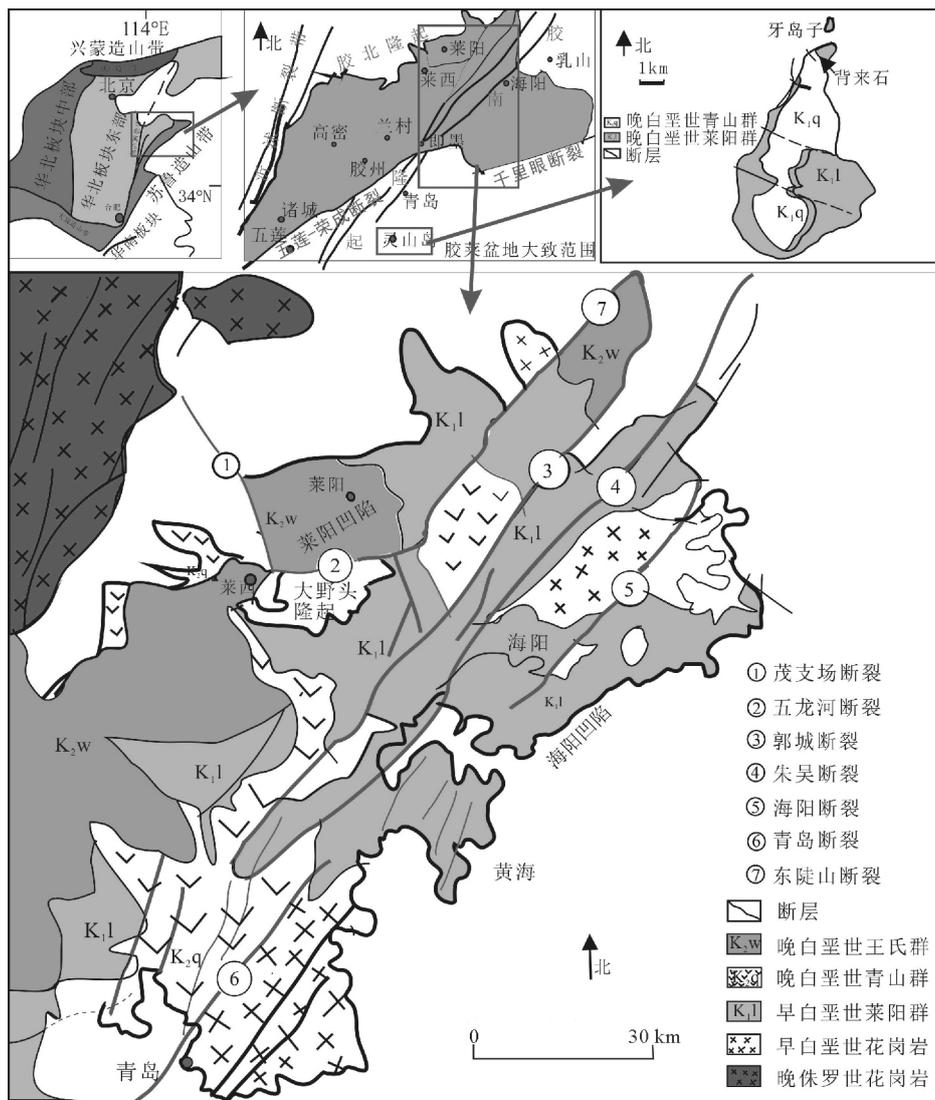


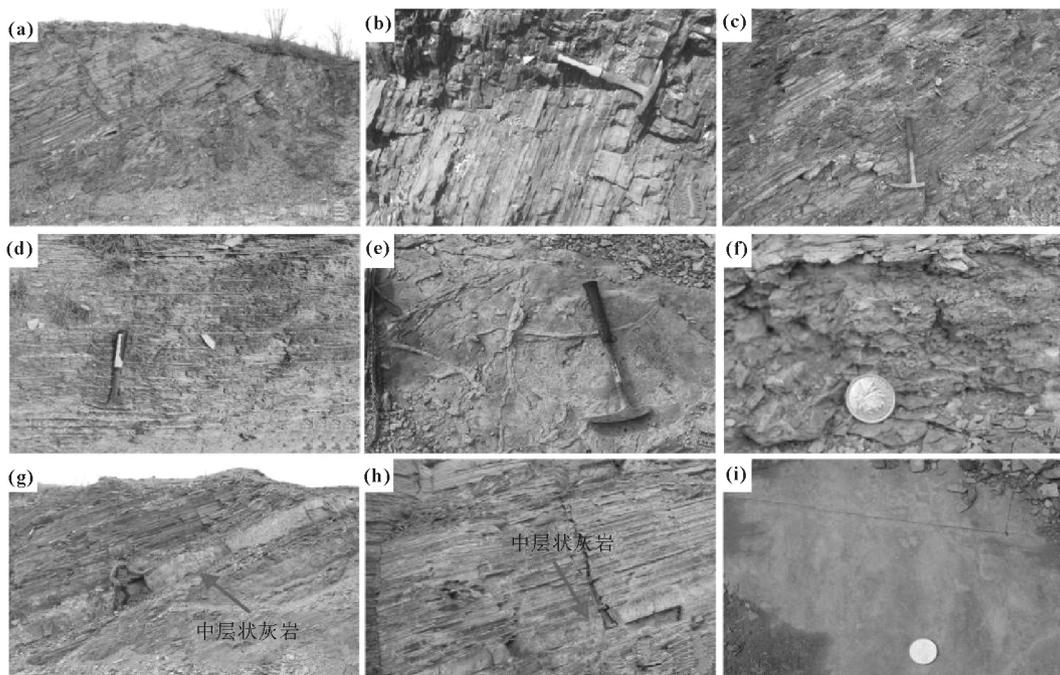
图 1 胶莱盆地及研究区构造简图

Fig. 1 The Structural diagram of Jiaolai Basin and its study area

曲格庄组		K _{1q}		灰紫色、灰色砂岩、砂砾岩为主，普遍含较多火山物质夹砾岩、黄绿色粉砂岩、泥岩	<i>Nakanuranaia-Sphaerium</i> 双壳类动物群
龙旺庄组		K _{1lw}		灰紫色、灰绿色中细粒砂岩夹粉砂岩、粗砂岩，发育交错层理、泥裂及波痕构造	
水南组		K _{1s}		灰黑色页岩、粉砂岩夹灰褐、灰黄色细砂岩、粉砂质微晶灰岩、含丰富动植物化石	莱阳昆虫动物群 <i>Yanjiestheria</i> 叶枝介动物群 <i>Sinamia</i> sp. 中华弓鲭鱼 <i>Cicatricosisporites-Class</i> <i>opollis-Piceapollenites</i> 孢粉组合 莱阳植物群
止风庄组	二段	K _{1z²}		沙岩为主夹砾岩	
	一段	K _{1z¹}		灰褐色中厚层粗粒岩、紫红色中厚层含砾岩屑砂岩夹少量的砂岩	
林山寺组		K _{1l}		灰紫色厚层复成分粗-巨砾岩为主夹中细粒砂岩及粗砂岩	
瓦屋芥组		K _{1w}		灰黄色中薄层泥质粉砂岩、页岩	<i>Diastheria</i> 叶肢介动物群

图 2 研究区地层岩性柱状图(据山东省地质调查院)

Fig. 2 The stratigraphic lithologic histogram of the study area



注:因风化作用影响,地表露头岩石的颜色、沉积构造没有灵山岛在潮汐冲刷后清晰。

图 3(a)、(b)、(c) 黑色页岩,水平层理,深水沉积, K_{1s}, 水南村; 图 3(d) 灰色页岩夹薄层灰岩,水平层理,潮坪沉积, K_{1w}, 瓦屋芥村; 图 3(e) 灰泥中的干裂构造,潮坪沉积, K_{1w}, 瓦屋芥村; 图 3(f) 灰色页岩中夹含石膏层,潟湖沉积, K_{1w}, 瓦屋芥村; 图 3(g)、(h) 黑色页岩中夹中层灰岩,层厚稳定, K_{1s}, 水南村; 图 3(i) 低幅度波痕, K_{1s}, 水南村

图 3 胶莱盆地早白垩世黑色岩系沉积构造组合图

Fig. 3 The sedimentary structure assemblage of Early Cretaceous black rock series in Jiaolai basin

表 1 瓦屋夼组、水南组样品主量元素含量

Tab.1 The contents the major elements of Wawukuang and Shuinan formations

%

地层	瓦屋夼组					水南组							
	瓦屋夼村					发城镇东(水南村)					灵山岛		
剖面	w-01	w-02	w-03	w-04	w-05	w-06	w-07	w-08	w-09	w-10	w-11	w-12	w-13
SiO ₂	27.06	30.14	31.36	16.25	27.56	51.81	12.28	55.88	50.13	17.79	50.10	14.05	21.05
Al ₂ O ₃	5.91	8.47	7.86	4.64	7.14	14.68	4.06	16.42	14.83	4.95	10.93	4.10	5.51
Fe ₂ O ₃	4.04	4.24	2.31	2.80	5.68	6.41	2.21	7.65	4.97	3.03	3.49	2.53	3.05
MgO	1.61	11.77	1.22	11.69	0.89	2.36	17.61	3.16	2.10	15.65	4.30	18.38	15.37
CaO	30.16	14.86	27.51	27.50	28.55	8.62	23.85	2.81	8.72	20.16	10.80	20.61	18.05
Na ₂ O	0.59	0.85	1.17	0.27	0.68	2.13	0.46	2.68	3.39	1.71	2.62	1.29	1.72
K ₂ O	1.02	2.11	1.48	0.52	1.81	3.02	0.58	4.25	3.34	0.68	1.84	0.44	0.69
MnO	0.07	0.11	0.13	0.08	0.27	0.08	0.08	0.03	0.06	0.13	0.11	0.07	0.14
TiO ₂	0.18	0.33	0.25	0.16	0.22	0.58	0.11	0.82	0.58	0.15	0.40	0.16	0.19
P ₂ O ₅	0.08	0.15	0.13	0.07	1.59	0.14	0.12	0.14	0.15	0.08	0.13	0.11	0.13
FeO	0.26	2.68	0.89	0.33	1.03	2.01	0.82	3.00	1.04	2.62	3.05	2.38	2.68
LOI	27.06	30.14	31.36	16.25	27.56	51.81	12.28	55.88	50.13	17.79	50.10	14.05	21.05

在样品主量元素 NASC 标准化蛛网图中(图 4),水南组样品曲线趋势基本相同,且大部分样品表现出明显的 Mg、Ca 元素富集, Mg 具有亲海性,因此水南组具有明显的海相特征, w-09、w-10、w-12、w-13 样品 K 元素明显亏损;瓦屋夼组样品走势基本相同, Ca 元素呈富集状态,部分样品表现出 Mg 富集,即具有海相特征,且 w-05 样品 P 元素比其他 4 组明显增多,且在瓦屋夼组发现叶肢介及植物化石, P 是生物必须元素,因此该样品可能受生物因素影响较大。

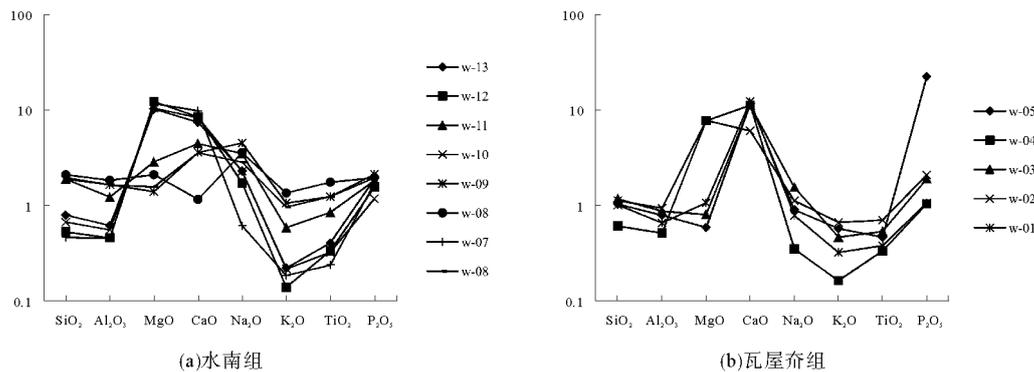


图 4 样品主量元素 NASC 标准化蛛网图

Fig. 4 The NASC-normalized main elements pattern of the samples

2.2 微量元素特征

瓦屋夼组、水南组样品的微量元素见表 2。微量元素蛛网图见图 5(NASC 标准化数据引自文献[14]), 大部分样品微量元素的变化趋势基本相似。

水南组(图 5(a)): Sr、Ba、La 的平均值分别为 857.25×10^{-6} 、 837.42×10^{-6} 、 31.47×10^{-6} , 均大于北美页岩的含量, 其余元素都小于北美页岩。除 w-08 和 w-06 样品部分元素变化有差异外, 其他 6 组的变化趋势基本相似, 仅变化幅度略有不同, 其中 w-07、w-12、w-13 样品波动较大。w-08、w-06 样品中, U、Sr 表现为明显亏损, 其他 6 组相对富集, 尤其 Sr 元素富集明显; Ce、Sm、La 元素富集, 其他 6 组为亏损。因此, 水南组微量元素特征为 U、Sr、Eu、Sc 较明显富集, Rb、Sm、Ce、Y、Yb、Cr、Co、Cu 亏损。

表 2 瓦屋组、水南组样品微量、稀土元素含量

Tab. 2 The content of trace elements and rare earth elements in Wawukuang and Shuinan formations 10^{-6}

地层	瓦屋组					水南组							
剖面	瓦屋组村					发城镇东(水南村)					灵山岛		
样品	w-01	w-02	w-03	w-04	w-05	w-06	w-07	w-08	w-09	w-10	w-11	w-12	w-13
Li	22.56	36.43	26.95	17.03	17.13	59.85	26.21	74.44	44.33	10.98	41.36	17.10	12.98
Be	0.71	1.28	0.95	0.83	1.92	1.96	1.02	2.23	1.48	0.79	1.18	0.77	1.39
Sc	19.00	17.15	16.94	16.34	18.10	16.17	16.83	14.62	16.01	18.89	12.50	16.20	13.66
V	41.62	76.31	47.12	33.02	54.03	83.95	29.62	107.70	99.04	49.43	56.55	49.42	54.42
Cr	28.73	42.99	33.39	20.69	28.56	68.06	20.05	93.10	71.35	21.99	39.54	17.63	24.56
Co	22.60	5.83	6.09	6.21	18.15	8.04	4.67	13.59	18.12	4.33	10.88	4.41	3.67
Ni	40.69	22.70	21.50	18.02	34.59	37.16	15.43	44.07	47.35	12.88	23.38	12.18	12.95
Cu	15.60	17.38	18.67	11.24	36.55	31.38	10.47	40.38	45.43	10.62	16.63	6.23	10.46
Zn	56.53	49.86	39.36	30.05	157.60	82.57	26.05	105.90	78.15	22.89	58.69	24.90	31.38
Ga	6.42	11.28	8.97	5.17	7.96	18.75	4.71	25.07	18.99	5.14	12.00	3.88	4.81
Rb	59.79	112.30	74.22	59.04	92.71	125.40	39.40	144.40	112.50	30.27	70.98	23.05	29.39
Sr	292.50	545.40	351.30	280.20	492.00	128.40	252.00	93.98	659.40	792.80	739.40	702.00	490.00
Nb	4.45	7.66	6.15	4.05	5.16	13.53	3.79	16.98	13.05	3.48	9.36	4.32	4.34
Mo	3.20	1.27	2.03	1.12	0.70	0.43	1.17	1.99	8.84	1.07	4.12	1.86	3.50
In	0.04	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07	0.04	0.07	0.07	0.02	0.05	0.04	0.02
Cs	6.39	10.11	9.45	6.37	5.92	8.03	4.52	6.92	9.55	1.35	6.35	2.84	2.23
Ba	188.01	280.06	177.15	148.97	679.66	505.02	293.07	723.94	655.55	556.99	366.71	223.02	375.03
Hf	1.14	2.25	1.78	1.10	1.39	4.18	1.18	4.43	3.94	1.86	4.01	1.67	2.35
Ta	0.53	0.74	0.72	0.55	0.61	1.16	0.51	1.31	1.11	0.44	0.82	0.49	0.47
W	1.69	2.18	1.73	1.59	2.93	3.01	2.18	4.00	3.09	2.33	2.11	2.50	2.75
Tl	0.77	0.73	0.91	0.84	0.90	0.77	0.60	0.84	0.83	0.26	0.61	0.94	0.23
Pb	20.43	26.80	10.04	14.45	50.35	13.63	11.72	27.45	38.38	7.70	19.04	8.56	3.55
Bi	0.54	0.42	0.42	0.37	1.29	0.49	0.54	0.51	0.76	0.14	0.33	0.44	0.35
Th	5.47	7.71	6.94	4.16	30.97	12.70	3.76	16.45	24.05	4.26	9.44	3.32	5.42
U	1.39	3.11	3.23	2.64	67.78	2.11	2.29	2.22	5.88	2.11	2.68	1.42	2.21
La	23.62	29.81	33.10	12.31	22.54	47.69	12.64	58.89	55.31	14.37	33.26	12.95	16.66
Ce	41.32	62.06	58.81	24.29	44.32	88.96	25.78	107.00	110.30	26.56	64.09	25.99	32.00
Pr	5.67	6.95	6.28	2.53	5.22	11.19	2.83	12.38	12.51	3.17	7.23	2.77	3.72
Nd	21.64	25.85	22.38	9.31	20.58	41.33	10.39	44.52	46.77	11.79	26.26	10.23	13.81
Sm	3.94	4.75	3.96	1.77	4.52	7.52	1.90	7.92	8.91	2.13	4.71	1.81	2.57
Eu	1.10	1.30	1.03	0.59	1.48	1.72	1.71	1.76	1.87	0.63	1.21	0.70	1.45
Gd	4.27	4.77	4.16	1.86	4.96	7.14	1.96	7.51	8.88	2.11	4.53	1.78	2.51
Tb	0.72	0.74	0.61	0.28	0.95	1.08	0.28	1.12	1.36	0.32	0.67	0.27	0.37
Dy	4.18	3.89	3.25	1.50	6.15	5.50	1.44	5.80	6.97	1.69	3.60	1.40	1.98
Ho	0.87	0.76	0.66	0.30	1.41	1.06	0.28	1.12	1.31	0.33	0.70	0.27	0.38
Er	2.85	2.45	2.14	1.08	4.85	2.99	1.27	3.27	3.87	0.99	2.12	1.26	1.15
Tm	0.35	0.30	0.27	0.13	0.75	0.40	0.11	0.45	0.51	0.14	0.30	0.12	0.17
Yb	2.20	1.89	1.81	0.82	5.25	2.56	0.73	2.91	3.25	0.92	1.93	0.78	1.09
Lu	0.33	0.28	0.27	0.13	0.85	0.39	0.11	0.43	0.49	0.14	0.30	0.12	0.17
Y	30.90	21.09	19.58	8.71	43.79	28.85	7.81	30.32	32.72	9.35	18.97	7.43	11.03

瓦屋夼组(图 5(b)):U、Sr、Sc 平均含量分别为 15.63、392.29、17.51 $\mu\text{g/g}$,均大于 NASC 的数据。w-01、w-05 样品变化和其他 3 组有较大差异,w-02、w-03、w-04 变化基本相同,但 5 组样品微量元素的变化趋势基本相似。其中,w-05 样品 U 元素明显富集,因部分植物对 U 具有一定吸收作用,而 w-05 样品采集处植物化石丰富,因此造成该样品 U 的富集明显。瓦屋夼组微量元素 Ba~Ho 的含量总体均少于北美页岩的含量。所有样品中,U、Sr、Eu、Sc、Rb 较为富集,其中 w-05 样品中的 U 极为富集,Th、Ce、Sm、Yb、Cr 亏损。

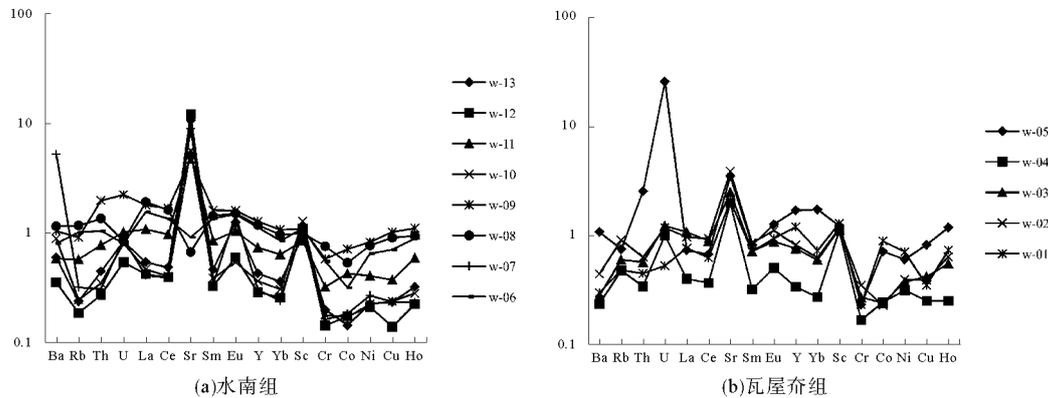


图 5 样品微量元素 NASC 标准化蛛网图

Fig. 5 The NASC-normalized trace element pattern of the samples

2.3 稀土元素特征

岩石中稀土元素的分布特征常用 LREE/HREE 即轻稀土元素含量/重稀土含量比值衡量,比值越大,说明轻稀土元素越富集,元素的分异程度越大。同样,也可利用 La_N/Sm_N 、 Gd_N/Yb_N 的比值特征反应样品中轻重稀土的富集程度,前者比值越大,则说明轻稀土元素越富集;后者比值越小,说明重稀土元素越富集^[15]。本文球粒陨石标准化数据引自文献^[16]。

瓦屋夼组(图 6(b)、6(d)):稀土元素含量较高,为 55~146 $\mu\text{g/g}$ (表 2),但都没超过北美页岩的稀土元素总量。从微量、稀土元素含量及比值(表 3)可以明显看出, $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ 较大(3.90~9.60)(表 3), La_N/Sm_N 也较大(3.10~5.30),平均值 4.10,且大部分样品比值都大于北美页岩的 3.5; Gd_N/Yb_N 为 0.70~2.10,平均值 1.61,大部分样品都大于北美页岩的 0.8,可知轻稀土元素较富集,重稀土元素变化较平稳,轻、重稀土元素分异大,与白垩纪云南思茅盆地、Kopet-Dagh 盆地^[17-18]等变化较为相似。在瓦屋夼组样品球粒陨石标准化配分图中, $\text{La} \sim \text{Eu}$ 等轻稀土元素右倾,轻稀土元素富集(图 6)。瓦屋夼组样品具有微弱的 La (1.10~1.25)和 Ce 负异常(0.89~1.00)(表 4),这是现代海水的重要特征^[19]。在其稀土元素 NASC 标准化配分曲线中(图 6),w-05 样品与其他 4 组样品出现明显差异,这条曲线呈左倾趋势,显示出重稀土元素富集,其他 4 组基本轻微右倾,轻稀土元素富集,并且变化不大,这可能是由于 w-05 样品所在地区地层沉积时,沉积环境发生了较大改变。

水南组(图 6(a)、6(c)):稀土元素含量较高,为 60~265 $\mu\text{g/g}$,平均 144.12 $\mu\text{g/g}$,w-09、w-08、w-06 均超过北美页岩的稀土元素总含量(表 2),Eu 负异常(表 3),且具备现代海水稀土元素的 La 正异常(1.10~1.25)和 Ce 负异常(0.89~1.00)的重要特征^[19]。 $\sum\text{LREE}/\sum\text{HREE}$ 较大,为 8.80~10.30(表 3); La_N/Sm_N 也较大为 3.90~4.70,多数高于北美页岩的 3.5; Gd_N/Yb_N 为 1.80~2.30,大于北美页岩的 0.8,并且在球粒陨石标准化配分图中,轻稀土元素明显右倾(图 6),重稀土元素变化趋于平稳,说明轻稀土元素较富集,轻、重稀土元素分异较明显。在稀土元素 NASC 标准化配分图中(图 6),8 组折线都有微弱的右倾趋势,同样显示出稀土元素富集,w-09 样品的 Eu 波动出现“V”型,Eu 亏损,其余 7 组样品标准化 Eu 都显示为富集现象,所有样品的波动形式基本相似,但存在数值上的细微差异,说明其沉积环境基本类似,可能由于淋滤作用或是其他一些环境因素发生轻微改变等因素造成部分样品元素含量较高。

表 3 沉积环境指标分析

Tab. 3 The sedimentary environment index analysis

地层	瓦屋组						水南组									
	瓦屋村						发城镇东(水南村)					灵山岛				
	样品	w-01	w-02	w-03	w-04	w-05	平均	w-06	w-07	w-08	w-09	w-10	平均	w-11	w-12	w-13
ΣREE	113.05	145.79	138.72	56.91	123.81	115.65	219.52	61.42	255.06	262.30	65.29	172.72	150.92	60.44	78.03	96.46
ΣLREE	97.29	130.72	125.56	50.81	98.65	100.60	198.41	55.25	232.47	235.67	58.65	156.09	136.76	54.45	70.21	87.14
ΣHREE	15.76	15.07	13.16	6.10	25.16	15.05	21.11	6.17	22.59	26.64	6.64	16.63	14.16	5.99	7.82	9.32
L/H	6.17	8.67	9.54	8.33	3.92	7.33	9.40	8.95	10.29	8.85	8.84	9.27	9.66	9.09	8.98	9.24
Sr/Ba	1.56	1.95	1.98	1.88	0.72	1.62	0.25	0.38	0.13	1.01	1.42	0.64	2.02	7.63	3.97	4.54
Rb/K*	5.83	5.32	5.01	11.42	5.11	6.54	4.15	6.78	3.40	3.36	4.46	4.43	3.86	5.27	4.23	4.45
V/Ni	1.02	3.36	2.19	1.83	1.56	1.99	2.26	1.92	2.44	2.09	3.84	2.51	2.42	4.06	4.20	3.56
Th/U	3.93	2.48	2.15	1.58	0.46	2.12	6.02	1.64	7.40	4.09	2.02	4.23	3.53	2.33	2.45	2.77
lgm	1.44	2.14	1.19	2.40	1.09	1.65	1.21	2.64	1.28	1.15	2.50	1.76	1.59	2.65	2.45	2.23
Y/Ho	30.67	35.48	27.75	29.89	29.11	31.10	27.12	27.35	28.28	27.10	24.92	27.98	27.90	26.98	27.83	28.87
V/(V+Ni)	0.51	0.77	0.69	0.65	0.61	0.64	0.69	0.66	0.71	0.68	0.79	0.71	0.71	0.80	0.81	0.77
V/Cr	1.45	1.78	1.41	1.60	1.89	1.62	1.23	1.48	1.16	1.39	2.25	1.50	1.43	2.80	2.22	2.15
Ni/Co	1.80	3.90	3.53	2.90	1.91	2.81	4.62	3.30	3.24	2.61	2.97	3.35	2.15	2.76	3.53	2.81
U/Th	0.25	0.40	0.47	0.63	2.19	0.79	0.17	0.61	0.14	0.24	0.50	0.33	0.28	0.43	0.41	0.37
Mg/Ca	0.05	0.79	0.04	0.42	0.03	0.27	0.27	0.74	1.12	0.24	0.78	0.63	0.40	0.89	0.85	0.71
Ce/Ce*	0.83	1.00	0.92	0.99	0.95	0.94	0.90	1.00	0.91	0.97	0.91	0.94	0.95	1.00	0.94	0.96
La/La*	1.13	1.14	1.34	1.27	1.22	1.22	1.12	1.17	1.22	1.18	1.20	1.18	1.19	1.23	1.18	1.20
Eu/Eu*	0.81	0.83	0.77	0.99	0.95	0.87	0.71	2.68	0.69	0.63	0.90	1.12	0.79	1.18	1.73	1.23
La _N /Sm _N	3.77	3.95	5.26	4.37	3.14	4.10	3.99	4.18	4.68	3.90	4.25	4.20	4.44	4.51	4.08	4.35
Gd _N /Yb _N	1.57	2.03	1.86	1.82	0.76	1.61	2.25	2.18	2.08	2.21	1.85	2.11	1.89	1.84	1.86	1.86
Sr/Cu	18.75	31.38	18.82	24.93	13.46	21.47	4.09	119.58	2.33	14.51	74.65	43.03	44.46	273.19	142.45	153.37
Fe ²⁺ /Fe ³⁺	0.07	1.72	0.63	0.13	0.22	0.56	0.46	0.59	0.64	0.27	6.36	1.67	6.83	15.43	7.20	9.82

注:上表 Rb/K' 为 1000 * Rb/K, lgm 中的 m 为 100 * (MgO/Al₂O₃), L/H 为 ΣLREE/ΣHREE

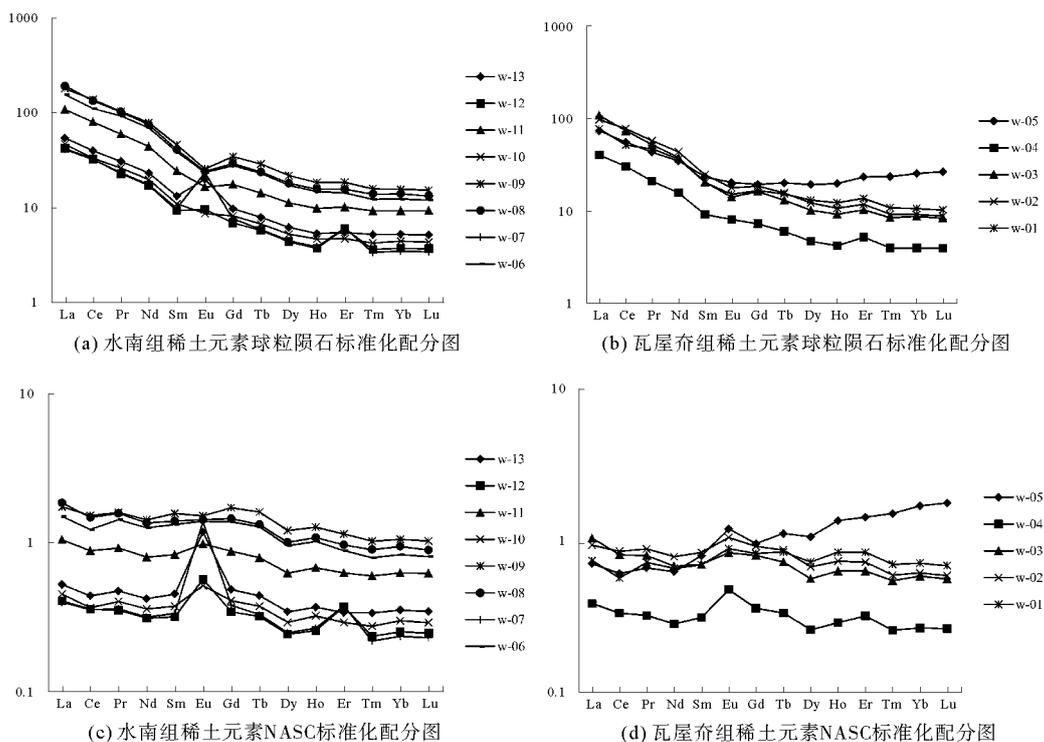


图 6 样品稀土元素配分图

Fig. 6 The REE pattern of the samples

2.4 沉积环境分析

在进行瓦屋夼组、水南组沉积特征分析时,不仅要研究样品中各元素之间的关系和差异性,还要对各元素的分布特征和比值进行分析,以此来推断沉积区沉积环境特征,即古盐度特征、古氧化还原特征和古气候特征等。

2.4.1 古盐度

1) Sr/Ba

自然水中 Sr 比 Ba 溶解度高, Sr 迁移得更远, Sr/Ba 比值可间接地反映陆相沉积与海相沉积的区别^[7-8,20-22],因此 Sr/Ba 是判别古盐度的灵敏标志。淡水沉积物中 Sr/Ba 小于 1,而海相沉积物中其值大于 1,当比值介于 0.5~1.0 时,为半咸水相沉积,小于 0.5 为微咸水相沉积^[23]。研究区瓦屋夼组样品 Sr/Ba 值为 0.72~2.00,平均值 1.62,显示海相沉积特征。水南组(灵山岛)样品 Sr/Ba 值为 2.02~7.63,平均值 4.54,同样显示海相沉积特征;发城镇东(即水南村)样品 Sr/Ba 为 0.10~1.50,平均值 0.64,为咸水沉积(图 7)。

2) Rb/K

Rb/K 也是判断沉积区古盐度特征常用的指标。考虑到 Rb 与 K 元素的值不在一个数量级上,因此利用 $1000 \times Rb/K$ 进行判别: $1000 \times Rb/K > 6$,为海相沉积环境; $4 < 1000 \times Rb/K < 6$ 为微咸水相; < 4 为淡水相^[22,24]。瓦屋夼组 $1000 \times Rb/K$ 值为 5~11.5,平均值 6.5,显示了水体古盐度从微咸水相到正常海相的变化;水南组(发城镇东)的 $1000 \times Rb/K$ 值为 3.30~6.80,平均值 4.43,指示了水南组为微咸水相沉积;而灵山岛样品 $1000 \times Rb/K$ 为 3.90~6.90,平均值 4.45,同样指示为微咸水相沉积(图 7)。

3) $m = 100 \times (MgO/Al_2O_3)$

因 Mg 是典型的亲海元素,而 Al 是典型的陆源元素,故 $m = 100 \times (MgO/Al_2O_3)$ 常用来分析水体古盐度。 $m < 1$ 指示淡水沉积环境,即陆相沉积; $1 < m < 10$ 则显示为海陆过渡相; $10 < m < 500$ 为海相沉积环境; $m > 500$ 为陆表海环境^[8,20,25]。由于数值差别较大,故对 m 取对数,即 lgm 。相应地, $lgm < 0$ 指示淡水沉积环境; $0 < lgm < 1$ 为海陆过渡相; $1 < lgm < 2.70$ 为海相沉积环境; $lgm > 2.70$ 为陆表海环境。瓦屋夼组 lgm 为 1.18~2.40,平均值 2.20,为海相沉积特征;水南组(发城镇东) lgm 为 1.15~2.65,平均值 1.76,同样为海相沉积环境;水南组(灵山岛) lgm 为 1.60~2.66,平均值 2.23,为海相沉积环境(图 7)。

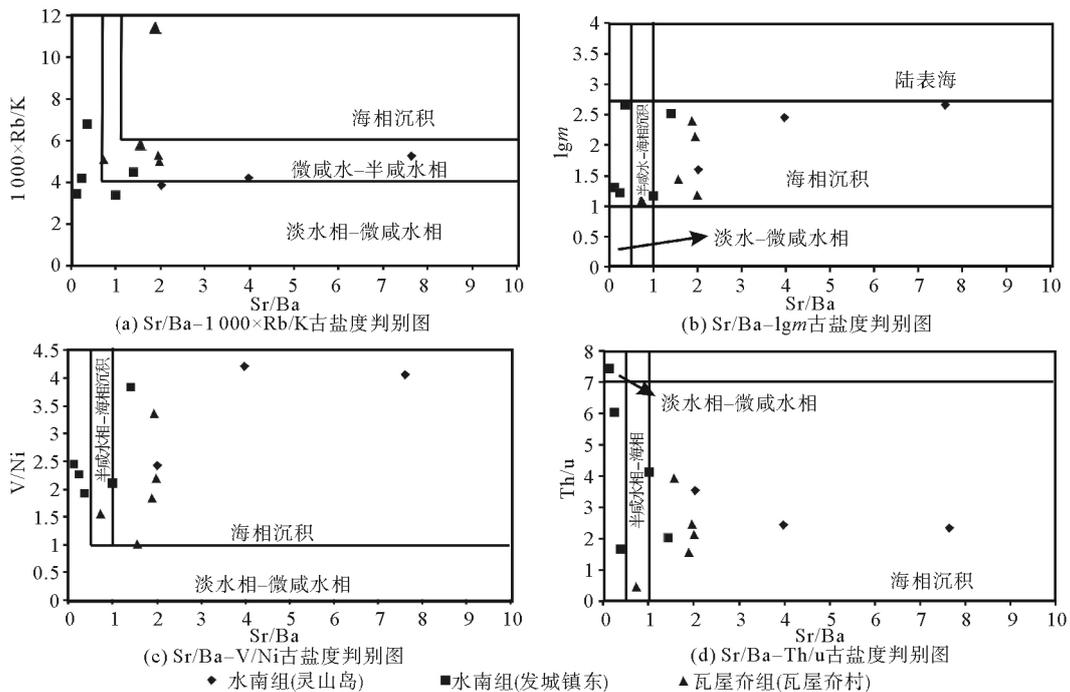


图 7 瓦屋夼组、水南组古盐度分析判别图

Fig. 7 The paleosalinity discriminant diagrams of Wawukuang and Shuinan formations

4) V/Ni 和 Th/U

前人^[26-27]也曾利用 V/Ni 和 Th/U 的值来研究沉积环境的古盐度特征,认为当 V/Ni 大于 1 时,为海相沉积环境,小于 1 为陆相沉积环境^[26];Th/U 大于 7 为陆相沉积环境,小于 7 为海相沉积环境^[27]。研究区瓦屋组样品中,V/Ni 值为 1.02~1.60,平均值明显大于 1,显示海相沉积特征;Th/U 值为 0.40~2.20,平均值 2.12,为海相沉积环境(图 7)。水南组(发城镇东)V/Ni 值为 2.08~3.85,平均 2.51,为海相沉积特征;灵山岛样品 V/Ni 值 2.42~4.20,平均值为 3.56,显示为海相沉积环境;发城镇样品 Th/U 比值除了 w-08 样品为 7.40,大于 7 外,其余均小于 7,平均值为 4.23,为海相沉积;灵山岛的样品 Th/U 比值均小于 7,显示海相沉积特征。

成岩作用可以改变 Ce 异常值,引起 Ce 异常值与 Eu 异常值、 Σ REE 较好的相关性^[1],即影响沉积环境。经分析其相关关系不明显,并且 $(La/Sm)_N > 0.35$, $(La/Sm)_N$ 与 Ce 异常相关性也很小,说明样品所受物源物质和成岩作用影响较为有限^[28]。而且瓦屋组与水南组样本具备现代海水中的 La 正异常和 Ce 负异常特征。

通过上述参数分析表明,瓦屋组、水南组均为海相沉积。并且在这两套地层中也曾发现过环节动物或帚虫动物的居住潜穴遗迹,而此遗迹常出现在海相环境和陆相淡水环境^[29]。野外考察中,发现瓦屋组夹多层薄碳酸盐岩层,发育斜层理、水平层理;水南组发育水平纹层、鲍马序列。

因此,通过上述指标综合分析认为,瓦屋组、水南组均为海相沉积地层,其中瓦屋组为潮坪沉积,水南组为深水沉积。

2.4.2 古气候

1) Mg/Ca

利用元素地球化学特征也可分析沉积区的古气候特征,通常用 Mg/Ca 的值^[20,30]。一般认为,当 K^+ 、 Na^+ 等易溶性盐类不参与沉淀时,Mg/Ca 值越高说明气候越干燥炎热;而当 K^+ 、 Na^+ 等易溶性盐类参与沉淀时,其 Mg/Ca 低值与 K^+ 、 Na^+ 的相对高值(沉积物中 Na_2O 、 K_2O 值相对低)共同指示干热气候^[30]。

2) MgO/CaO

瓦屋组样品中,MgO/CaO 值为 0.03~0.80,平均值较小,为 0.27, Na_2O 和 K_2O 含量平均值为 0.71%和 1.40%,有少量可溶性盐类沉积,水中仍有大量的 K^+ 、 Na^+ 等可溶性离子说明瓦屋组是在较为干热气候下形成。水南组(发城镇东)样品中,MgO/CaO 的值为 0.24~1.13,平均值较低,为 0.63;而 Na_2O 和 K_2O 含量平均值分别为 2.07%和 2.37%,可溶性盐类也参与了沉淀,而水中的 K^+ 、 Na^+ 等可溶性离子仍然很多,说明水南组(发城镇东)地层形成时气候较干旱炎热。灵山岛样品中,MgO/CaO 为 0.40~0.90,平均值较低为 0.71, Na_2O 和 K_2O 平均含量分别为 1.88%和 0.99%,水中 K^+ 、 Na^+ 等可溶性离子仍较多,所以灵山岛的水南组地层沉积时环境也比较干热(图 8)。

3) Sr/Cu

Sr/Cu 值也常用来分析沉积地区的古气候特征^[20,31]。当 Sr/Cu 值介于 1~10 之间,表明沉积区为温湿气候,大于 10 为干热气候^[31]。瓦屋组样品 Sr/Cu 值为 13~32,水南组形成于较干热的气候平均值为 21,显示为干热气候;水南组(发城镇东)Sr/Cu 值为 2~120,平均值为 75;灵山岛样品 Sr/Cu 值为 45~274,平均值为 154,显示为干热气候。

综上所述,瓦屋组、水南组地层在沉积时,气候比较炎热干燥。

2.4.3 古氧化还原环境

选取对氧化还原敏感的元素来进行分析,

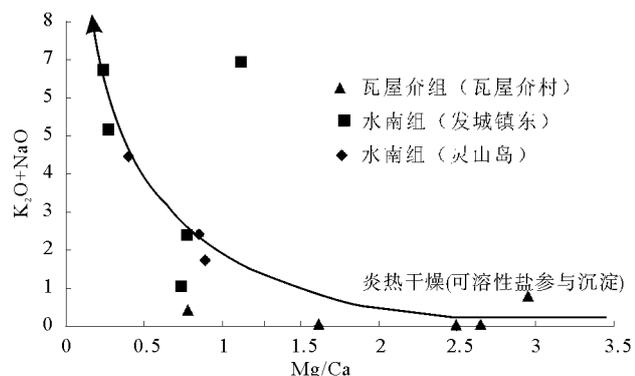


图 8 瓦屋组、水南组气候判别图

Fig. 8 The climate discriminant diagrams of Wawukuang and Shuinan formations

是进行沉积环境氧化还原性判断的首要步骤。一般认为 V, Cd, Cr, Co, Cu, U 和 Zn, Fe, Cu 等主量、微量元素对环境氧化-还原的改变较为敏感^[32]。因此采用 V/Cr、Ni/Co、V/(V+Ni)、Fe²⁺/Fe³⁺、U/Th、Ce/Ce*、Eu/Eu* 等进行分析(表 3)。

1) Fe²⁺/Fe³⁺

主量元素中通常使用 Fe²⁺/Fe³⁺ 的比值来研究沉积环境的氧化还原性。Fe²⁺/Fe³⁺ < 1 指示氧化环境, 等于 1 为中性环境, 大于 1 为还原环境^[20]。研究区瓦屋乔组样品 Fe²⁺/Fe³⁺ 值介于 0.07~1.73, 平均值为 0.56, 属于弱氧化环境; 水南组(发城镇东)样品 Fe²⁺/Fe³⁺ 值为 0.27~6.36, 平均值 1.67, 为还原环境; 灵山岛 Fe²⁺/Fe³⁺ 值为 6.83~15.43, 平均值为 9.82, 同样为还原环境(图 9)。

2) V/Cr

通常认为高含量的 V 显示还原环境^[32]。因 V 在有机质中首先被结合, Cr 通常出现在沉积物碎屑中, 所以 V/Cr 可用作沉积环境含氧量的分析。V/Cr < 2 为含氧环境即氧化环境, V/Cr 值介于 2~4.25 之间为贫氧环境, V/Cr > 4.25 为缺氧环境^[31]。研究区瓦屋乔组样品中, V/Cr 值介于 1.40~1.90, 均小于 2, 平均值为 1.63, 显示为含氧环境; 水南组(发城镇东) V/Cr 值为 1.16~2.26, w-10 样品大于 2, 平均值 1.50, 小于 2, 为贫氧—氧化环境; 灵山岛 V/Cr 为 1.43~2.90, 平均值为 2.15, 为贫氧环境(图 9)。

3) Ni/Co

Ni 在还原环境下通常形成硫化物沉淀(水体中存在 H₂S), 而在氧化环境中则以 Ni⁺ 形式存在^[33]。在氧化环境下 Co 可以 Co²⁺ 离子的形式溶于水, 也可在还原环境下以固溶体的形式进入自生黄铁矿^[33]。因此 Ni/Co 的值可用于氧化还原特征的判断。Ni/Co < 5 为氧化环境, Ni/Co 值介于 5~7 为贫氧环境, Ni/Co > 7 为次氧至缺氧环境^[32]。瓦屋乔组样品中, Ni/Co 值介于 1.90~4.00, 平均值为 2.81, 显示为氧化环境; 水南组(发城镇东)样品 Ni/Co 介于 2.60~4.70, 平均值为 3.35, 均小于 5, 因此 Ni/Co 的指标指示水南组(发城镇东)地层是在氧化环境下形成; 灵山岛样品 Ni/Co 同样小于 5, 为氧化环境(图 9)。

4) V/(V+Ni)

V/(V+Ni) 值也是常用来判断沉积环境氧化还原性的指标^[34]。样品在还原条件下, 水体中的 V 比 Ni 以更有效的有机络合物形式沉淀下来。V/(V+Ni) > 0.84 为静海相还原环境, 比值介于 0.54~0.84 为缺氧环境, 0.46~0.60 为贫氧环境^[35]。研究区瓦屋乔组样品 V/(V+Ni) 为 0.50~0.78, 平均值为 0.64, 显示为缺氧环境; 水南组(发城镇东) V/(V+Ni) 介于 0.65~0.80, 平均值为 0.71, 同样显示为缺氧环境; 水南组(灵山岛) V/(V+Ni) 为 0.71~0.81, 平均值为 0.77, 为缺氧环境(图 9)。

5) U/Th

U/Th 值可反映沉积氧化还原条件。在强还原条件下, U 不溶于水而在沉积物中大量富集, 也可在强氧化条件下以可溶的 U₆⁺ 形式存在; 而 Th 在水体中惰性较强, 不受水体氧化还原条件的影响^[32]。U/Th > 1.25 代表缺氧环境, 介于 0.75~1.25 代表贫氧环境, U/Th < 0.75 代表氧化环境^[36]。瓦屋乔组样品, U/Th 值为 0.25~2.2, 其中只有 w-05 号样品的值大于 2, 其余均小于 0.75, 因此瓦屋乔组为氧化环境; 水南组(发城镇)样品中, U/Th 值为 0.14~0.61, 均小于 0.75, 平均值为 0.33, 为氧化环境; 灵山岛的 U/Th 值为 0.28~0.43, 平均值为 0.37, 同样为氧化环境(图 9)。

6) Ce/Ce* 和 Eu/Eu*

稀土元素具有稳定性^[37]。在沉积环境分析判别中常用到 Ce 异常和 Eu 异常, 即 Ce/Ce* 和 Eu/Eu*^[15]。当处于氧化环境时, Ce/Ce* < 1, 沉积物中的 Ce 显示负异常; Ce/Ce* > 1 为正异常, 指示次氧或缺氧环境。同理 Eu/Eu* < 1, Eu 负异常, 显示为氧化环境; Eu/Eu* > 1, Eu 正异常, 为还原环境^[16, 27, 38]。

研究区样品中, 瓦屋乔组样品 Ce/Ce* 比值为 0.83~1.1, 平均值为 0.94, Ce 为负异常, 显示氧化环境; 水南组(发城镇东)样品的 Ce/Ce* 值为 0.89~1.00, 平均值为 0.94, Ce 负异常, 显示水南组为氧化环境; 灵山岛 Ce/Ce* 值为 0.94~1.00, 平均值为 0.96, 为氧化环境。瓦屋乔组样品的 Eu/Eu* 为 0.81~0.99, 平均值为 0.87, 显示为氧化环境; 水南组(发城镇东) Eu/Eu* 为 1.12, 指示还原环境; 灵山岛的 Eu/Eu* 值在 0.79~1.73, 平均值 1.23, 为还原环境(图 9)。

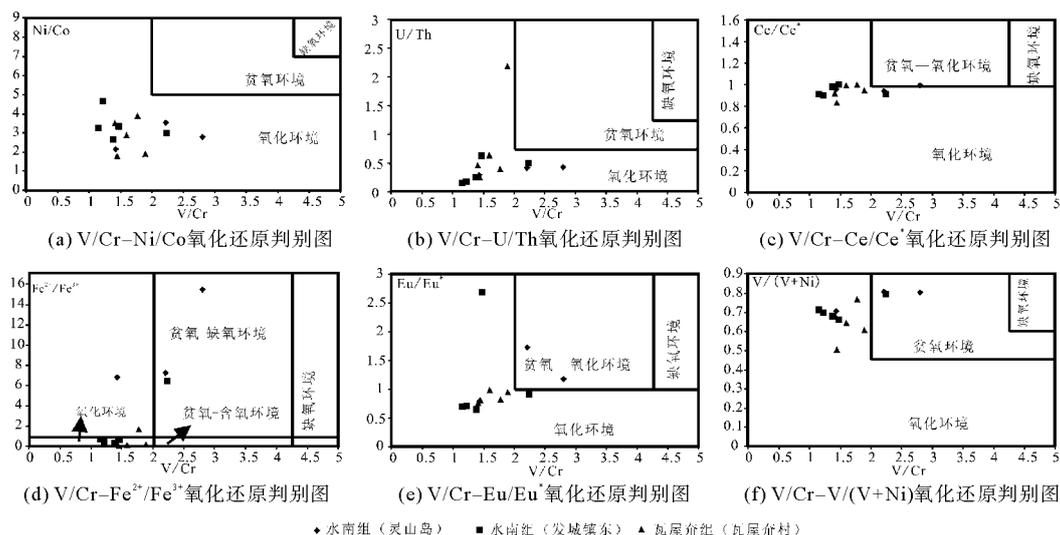


图 9 瓦屋组、水南组氧化还原判别图

Fig. 9 The redox discriminant diagrams of Wawukuang and Shuinan formations

通过上述指标分析所得到的结果与地质现象不完全相符。因此,判断沉积区的氧化还原性,不能仅依靠地球化学指标,还要结合样本所在地层特征以及地质背景分析。虽然大部分微量、稀土指标均指示两组地层形成于氧化环境中,但瓦屋组样品所在地层颜色呈浅色调,多以灰黄、灰绿为主, Fe^{2+}/Fe^{3+} 的值介于 0.07~1.75,并且只有 w-02 样品大于 1,平均值为 $0.56 < 1$,通常情况下为弱氧化环境;而水南组样品所在地层多呈深色调,暗色泥岩发育,有机质含量丰富,TOC 含量在 1.51%~1.67%^[39], Fe^{2+}/Fe^{3+} 的值介于 0.27~15.43,变化范围较大,平均值为 4.73,因此水南组地层是在还原环境下形成的。

3 结论

1) 瓦屋组、水南组样品中 SiO_2 、 MgO 、 CaO 含量均很高,受陆源物质入侵明显,岩石钙化明显。两组地层中,轻稀土元素较富集,且具有明显的 La 正异常和 Ce 负异常,符合现代海水的特征,且 $(La/Sm)_N$ 、Eu 异常、 ΣREE 与 Ce 异常无明显相关性。

2) 根据 Sr/Ba 、 Rb/K 、 $m=100 \times (MgO/Al_2O_3)$ 、 V/Ni 、 Th/U 值分析,结合地层特征,得出瓦屋组、水南组地层均属于海相沉积地层,并且瓦屋组为潮坪沉积,水南组为深水沉积。

3) 在进行研究区氧化还原环境分析时, Ni/Co 、 U/Th 、 Ce/Ce^* 等环境判别指标解释虽然相吻合,但在分析时应结合样品所在层位特征进行研究, Fe^{2+}/Fe^{3+} 、 V/Cr 、 $V/(V+Ni)$ 、 Eu/Eu^* 指标得到的结果相似,瓦屋组地层颜色总体上呈现浅色调,水南组地层则呈现为暗色调,且有机质含量丰富。综合分析认为,瓦屋组地层应是在弱氧化环境下沉积形成的,水南组则是在还原条件下沉积的。

4) 利用 Mg/Ca 值和沉积物中 Na 、 K 等可溶性盐类含量特征,以及 Sr/Cu 的比值关系,认为瓦屋组和水南组地层在沉积时,气候都较干燥炎热。

参考文献:

- [1] 彭楠,柳永清,旷红伟,等.胶莱盆地早白垩世胶莱盆地沉积物源分析及地质意义[J].中国地质,2015,42(6):1793-1810.
PENG Nan, LIU Yongqing, KUANG Hongwei, et al. Provenance of Early Cretaceous Laiyang group in Jiaolai basin and its significance[J]. Geology in China, 2015, 42(6): 1793-1810.
- [2] 柳永清,旷红伟,彭楠,等.山东胶莱盆地白垩纪恐龙足迹与骨骼化石埋藏沉积相与古地理环境[J].地质前缘,2011,18(4):9-24.
LIU Yongqing, KUANG Hongwei, PENG Nan, et al. Sedimentary facies of dinosaur trackways and bonebeds in the Cretaceous Jiaolai basin, eastern Shandong, China, and their paleogeographical implications[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18

- (4):9-24.
- [3]李守军,张祥玉,赵秀丽,等.山东省青岛市灵山岛下白垩统中发现鱼类和叶肢介化石[J].地质论评,2017,63(1):1-6.
LI Shoujun,ZHANG Xiangyu,ZHAO Xiuli,et al. Discovery of fish and conchostracan fossils in Lower Cretaceous in Lingshan island,Qingdao,Shandong[J]. Geological Review,2017,63(1):1-6.
- [4]张松梅,程立人,刘典涛.胶南地区莱阳群绒枝藻化石的发现[J].长春科技大学学报,2001,31(3):209-212.
ZHANG Songmei,CHENG Liren,LIU Diantao. Some discovery of dasycladaceae fossils from Laiyang group in Jiaonan region[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology,2001,31(3):209-212.
- [5]张振凯,周瑶琪,彭甜明,等.山东灵山岛莱阳群粉砂岩地球化学特征及意义[J].地球科学,2017,42(3):357-377.
ZHANG Zhenkai,ZHOU Yaoqi,PENG Tianming,et al. Geochemical characteristics and signatures of siltstones from Laiyang group at Lingshan island,Qingdao,Shandong[J]. Earth Science,2017,42(3):357-377.
- [6]许红,卢树参,葛和平,等.南黄海盆地白垩系油气赋存特征与2类烃源岩[J].海洋地质前沿,2015,31(4):13-20.
XU Hong,LU Shushen,GE Heping,et al. The occurrence and distribution characteristics of Cretaceous in the South Yellow Sea basin and the two types of source rocks[J]. Marine Geology Frontiers,2015,31(4):13-20.
- [7]胡俊杰,李琦,李娟,等.羌塘盆地角木日地区二叠系碳酸盐岩元素地球化学特征及其对古沉积环境的指示[J].高校地质学报,2014,20(4):520-527.
HU Junjie,LI Qi,LI Juan,et al. Geochemical characteristics and its application to depositional environment analysis of Permian carbonates in Jiaomuri area,Qiangtang basin[J]. Geological Journal of China Universities,2014,20(4):520-527.
- [8]王鹏万,陈子料,李娴静,等.黔南坳陷上震旦统灯影组地球化学特征及沉积环境意义[J].现代地质,2011,25(6):1059-1065.
WANG Pengwan,CHEN Ziliao,LI Xianjing,et al. Geochemical characteristics and environmental significance of Dengying formation of Upper Sinian in Qiannan depression[J]. Geoscience,2011,25(6):1059-1065.
- [9]姜同海.胶莱盆地构造特征及演化[D].青岛:山东科技大学,2005.
- [10]王安东,周瑶琪,闫华,等.山东省灵山岛早白垩世软沉积物变形构造特征[J].古地理学报,2013,15(5):717-728.
WANG Andong,ZHOU Yaoqi,YAN Hua,et al. Characteristics of soft-sediment deformation structures of the Early Cretaceous in Lingshan island of Shandong province[J]. Journal of Palaeogeography,2013,15(5):717-728.
- [11]张岳桥,李金良,张田,等.胶莱盆地及其邻区白垩纪古新世沉积构造演化历史及其区域动力学意义[J].地质学报,2008,82(9):1229-1257.
ZHANG Yueqiao,LI Jinliang,ZHANG Tian,et al. Cretaceous to Paleocene tectono-sedimentary evolution of the Jialai basin and the contiguous areas of the Shandong Peninsula(North China) and its geodynamic implications[J]. Acta Geologica Sinica,2008,82(9):1229-1257.
- [12]佟彦明.胶莱盆地构造演化研究[D].武汉:中国地质大学,2007.
- [13]王沛成,安郁宏.鲁东地区十多年来基础地质研究的主要成果和进展[J].山东地质,1996,12(1):8-23.
WANG Peicheng,AN Yuhong. Main achievement and progress of the basic geological research over last ten years in eastern Shandong region[J]. Geology of Shandong,1996,12(1):8-23.
- [14]GROMET L P,DYMEK R F,HASKIN L A,et al. The "North American Shale Composite": Its compilation, major and trace element characteristics[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta,1984,48(12):2469-2482.
- [15]李军,桑树勋,林会喜,等.渤海湾盆地石炭—二叠系稀土元素特征及其地质意义[J].沉积学报,2007,25(4):589-596.
LI Jun,SANG Shuxun,LIN Huixi,et al. REE characteristics and its geological significance of the Permian-Carboniferous in Bohaiwan basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica,2007,25(4):589-596.
- [16]TAYLOR S R,MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[J]. Physics of the Earth & Planetary Interiors,1986,42(3):196-197.
- [17]石海岩,苗卫良,马海洲,等.云南思茅盆地白垩纪—古新世碎屑岩地球化学特征及地质意义[J].现代地质,2016,30(3):541-549.
SHI Haiyan,MIAO Weiliang,MA Haizhou,et al. Geochemistry of Cretaceous-Palaeocene detrital rocks in Simao basin, Yunnan Province and its geological significances[J]. Geoscience,2016,30(3):541-549.
- [18]MORTAZAVI M,MOUSSAVI-HARAMI R,MAHBOUBI A,et al. Geochemistry of the Late Jurassic-Early Cretaceous shales(Shunjuh Formation) in the intracontinental Kopet-Dagh basin, northeastern Iran: Implication for provenance, source

- weathering, and paleoenvironments[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014, 7(12): 5353-5366.
- [19] VANKRANENDONX M J, WEBB G E, KAMBER B S. Geological and trace element evidence for a marine sedimentary environment of deposition and biogenicity of 3.45 Ga stromatolitic carbonates in the Pilbara Craton, and support for a reducing Archaean ocean[J]. *Geobiology*, 2003, 1(2): 91-108.
- [20] 熊小辉, 肖加飞. 沉积环境的地球化学示踪[J]. *地球与环境*, 2011, 39(3): 405-414.
XIONG Xiaohui, XIAO Jiafei. Geochemical indicators of sedimentary environments: A summary[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(3): 405-414.
- [21] 杜庆祥, 郭少斌, 沈晓丽, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷南部古近系沙河街组一段古水体特征[J]. *古地理学报*, 2016, 18(2): 173-183.
DU Qingxiang, GUO Shaobin, SHEN Xiaoli, et al. Palaeo-water characteristics of the Member 1 of Paleogene Shahejie formation in southern Nanpu sag, Bohai Bay basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 18(2): 173-183.
- [22] 叶黎明, 齐天俊, 彭海燕. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 202-210.
YE Liming, QI Tianjun, PENG Haiyan. Depositional environment analysis of Shanxi formation in Eastern Ordos basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 202-210.
- [23] 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地化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, 7(2): 21-60.
WANG Yiyu, GUO Wenying, ZHANG Guodong. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing group (Paleogene), Jintu depression, Kiangsu province[J]. *Journal of Tongji University*, 1979, 7(2): 21-60.
- [24] 刘英俊, 曹励明. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1-110.
- [25] 严兆彬, 郭福生, 潘家永. 碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用[J]. *地质找矿论丛*, 2005, 20(1): 53-65.
YAN Zhaobin, GUO Fusheng, PAN Jiayong. The carbonate rocks C, O, and Sr isotopic compositions are in paleoclimate, applications in the study of ancient marine environment[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2005, 20(1): 53-65.
- [26] 徐国盛, 李仲东, 罗小平, 等. 石油与天然气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [27] 黄隆基. 放射性测井原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.
- [28] SHOLKOVITZ E R, LANDING W M, LEWIS B L. Ocean particle chemistry—the fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(6): 1567-1579.
- [29] 李日辉, 张光威. 山东莱阳盆地早白垩世莱阳群的遗迹化石[J]. *古生物学报*, 2001, 40(2): 252-261.
LI Rihui, ZHANG Guangwei. A preliminary study of nonmarine trace fossils from the Laiyang group (Early Cretaceous), Laiyan basin, Eastern China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2001, 40(2): 252-261.
- [30] WILDER P, QUIMBY M S, ERDTMANN B D. The wholerock cerium anomaly: A potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of anoxic facies[J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 101(1/2): 43-53.
- [31] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3): 307-314.
LIU Gang, ZHOU Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: Taking Qianjiang formation in the Jianghan basin as an example[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2007, 29(3): 307-314.
- [32] JOMES B, MANNTING A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of paleoredox conditions in ancient mudstones[J]. *Chemical Geology*, 1994, 111(1/2/3/4): 111-129.
- [33] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T, et al. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies[J]. *Chemical Geology*, 2006, 232(1/2): 12-32.
- [34] ARTHUR M A, SAGEMAN B B. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits [C]//WHETHERILL G W, ALBEE A L, BURKE K C. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1994, 22: 449-551.
- [35] HATCH J R, LEVENTHAL J S. 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[J]. *Chemical Geology*, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [36] WIGNALL P B. *Black shales*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [37] MURRA J W, BREWER P G. Mechanisms of removal of manganese, iron and other trace elements from seawater[M]. Am-

sterdam;Elsevier,1977:238-291.

[38]ELDERFIELD H,GREAVES M J. The rare earth elements distribution in seawater[J]. *Nature*,1982,296:214-219.

[39]刘鹏,朱炎铭,王怀勳,等. 胶莱盆地水南组页岩气成藏条件与勘探方向[J]. *断块油气田*,2016,23(1):1-5.

LIU Peng,ZHU Yanming,WANG Huaimeng,et al. Shale gas pooling conditions and exploration targets of Shuinan formation in Jiaolai basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*,2016,23(1):1-5.

(责任编辑:傅 游)

(上接第 19 页)

[39]杨言辰,韩世炯,孙德有,等. 小兴安岭-张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究[J]. *岩石学报*,2012,28(2):227-235.

YANG Yanchen,HAN Shijiong,SUN Deyou,et al. Geological and geochemical features and geochronology of porphyry molybdenum deposits in the Lesser Xing'an Range-Zhangguangcai Range metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2012,28(2):227-235.

[40]陈静,孙丰月,潘彤,等. 黑龙江霍吉河钼矿成矿地质特征及花岗闪长岩年代学、地球化学特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*,2012(增):207-215.

CHEN Jing,SUN Fengyue,PAN Tong,et al. Geological features of Huojihe molybdenum deposit in Heilongjiang,and geochronology and geochemistry of mineralized granodiorite[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*,2012(S):207-215.

[41]许文良,葛文春,裴福萍,等. 东北地区中生代火山作用的年代学格架及其构造意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*,2008,27(增1):153.

XU Wenliang,GE Wenchun,PEI Fuping,et al. Geochronological frame of Mesozoic volcanism in NE China and its significance[J]. *Bulletin of Mineralogy,Petrology and Geochemistry*,2008,27(S1):153.

[42]裴福萍,许文良,杨德彬,等. 华北克拉通东北缘岩石圈深部物质组成的不均一性:来自吉林南部中生代火山岩元素及 Sr-Nd 同位素地球化学的证据[J]. *岩石学报*,2009,25(8):1962-1974.

PEI Fuping,XU Wenliang,YANG Debin,et al. Heterogeneity of Late Mesozoic deep lithosphere beneath the northeastern North China Craton:Evidence from elemental and Sr-Nd isotopic geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in the southern Jilin Province,China[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2009,25(8):1962-1974.

[43]徐美君,许文良,王枫,等. 小兴安岭西北部早侏罗世花岗质岩石的年代学与地球化学及其构造意义[J]. *岩石学报*,2013,29(2):354-368.

XU Meijun,XU Wenliang,WANG Feng,et al. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the northwestern Lesser Xing'an Range,NE China and its tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*,2013,29(2):354-368.

(责任编辑:傅 游)