

刘菲菲, 周瑶琪, 许汉华, 等. 山东东部日青威盆地晚中生代沉积岩元素地球化学特征及沉积环境[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(10): 22-33.
LIU Feifei, ZHOU Yaoqi, XU Hanhua, et al. Geochemical constraints on depositional environment of Late Mesozoic sedimentary rocks from the Ri-Qing-Wei Basin in the East Shandong[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(10): 22-33.

山东东部日青威盆地晚中生代沉积岩 元素地球化学特征及沉积环境

刘菲菲¹, 周瑶琪^{2*}, 许汉华³, 李曼洁⁴

(1 滨州学院建筑工程学院, 滨州 256600; 2 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580;

3 中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司, 昆明 650051; 4 中国石化胜利油田分公司胜利采油厂, 东营 257000)

摘 要:发育在苏鲁造山带上的山东东部日青威盆地是晚中生代以来形成的规模较大的裂陷盆地, 其独特的沉积特征有别于周缘其他同期陆相断陷盆地, 备受沉积学界的广泛关注。为了解日青威盆地沉积期(包括莱阳期和青山期)古盐度、古气候和氧化还原条件等沉积环境特征, 对盆地灵山岛、崂山、诸城桃林、海阳丁字湾和即墨周戈庄 5 个典型剖面沉积岩样品开展主量、微量和稀土元素地球化学分析。5 个典型剖面的沉积岩 SiO_2 和 Al_2O_3 含量较低, 平均值分别为 52.13% 和 13.06%, 而 Fe_2O_3 含量较高, 平均值为 6.14%; ΣREE 平均值为 199.15×10^{-6} , 稍高于澳大利亚后太古宙页岩(PAAS), 富集轻稀土元素, 相对亏损重稀土元素, 具有弱铕(Eu)正异常; 相对于上地壳(UCC), 样品富集大离子亲石元素, 亏损过渡族元素。Sr/Ba 和 Mg/Ca 值表明, 自莱阳期至青山期, 沉积水体趋向于由咸水/半咸水向微咸水环境的变化; Sr/Cu 值、 $\Sigma(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Cr}+\text{V}+\text{Ni}+\text{Co}) / \Sigma(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}+\text{Na}+\text{Sr}+\text{Ba})$ 值和 $\text{SiO}_2-(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 双变量图解表明, 莱阳期和青山期均为干燥气候; V/(V+Ni) 和 Ce 异常表明, 莱阳期和青山期沉积水体环境以分层不明显的还原环境为主。综合以上研究表明: 日青威盆地莱阳期—青山期古盐度的转变以及干燥气候和还原环境对于揭示盆地的沉积演化过程有着重要的地质意义。

关键词: 苏鲁造山带; 日青威盆地; 晚中生代; 元素地球化学; 沉积环境

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.157

0 引言

山东东部近海地区在大地构造上位于苏鲁造山带上, 属于华北陆块与扬子陆块碰撞结合的东部地段, 晚中生代受到苏鲁造山带造山后构造体系与古太平洋板块俯冲的双重影响, 发生了大规模的伸展裂陷作用^[1-2]。周瑶琪等^[2]首次提出“山东东部

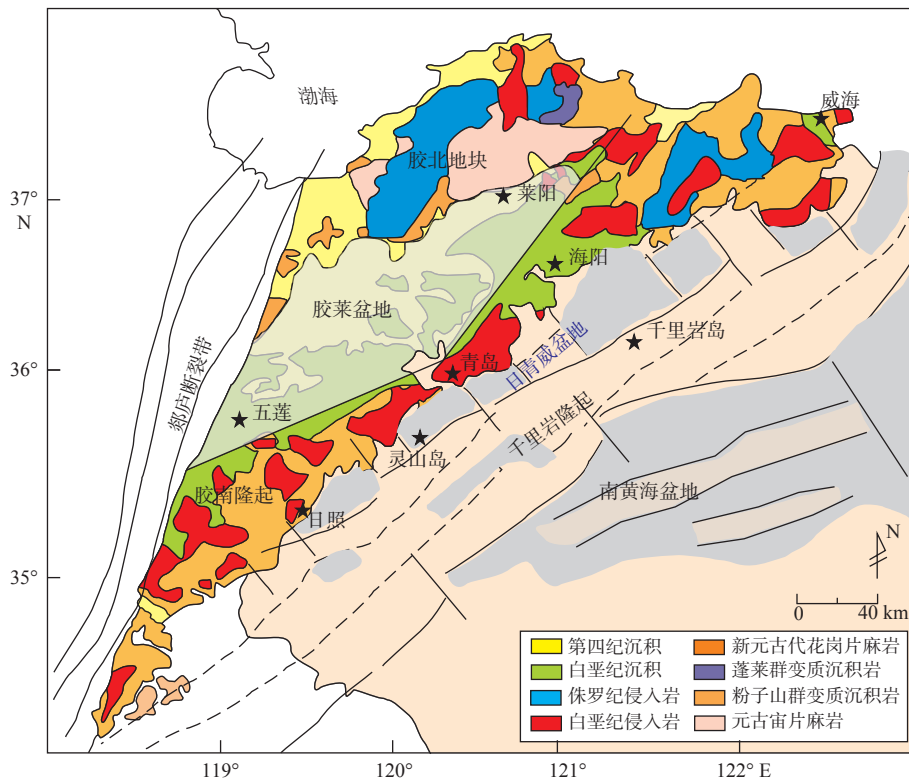
海域晚中生代裂陷盆地”的理念, 推测山东东部海域可能存在一个较大规模呈 NE 向展布的晚中生代裂陷盆地, 现命名为“日青威盆地”^[1-4](图 1), 且其沉积环境与邻近胶莱盆地、北黄海盆地和南黄海盆地存在明显差别。前人曾将该盆地出露的沉积地层归属于胶莱盆地, 其是发育在胶莱盆地边缘的露头^[5], 但随着海相纹枝藻植物化石、鲍马序列和远源浊积岩的发现, 另有学者推测其为海相沉积地层^[6-7]; 近几年来, 青岛灵山岛地区深水浊积岩的新发现^[8-10], 引起了其属于陆相沉积环境还是海相沉积环境的争议, 例如灵山岛地层的软沉积变形构造和浊积岩的沉积地球化学特征判定其为海相深水沉积^[11-12], 但狼鳍鱼和叶肢介化石的发现则指示了陆相沉积的属性^[13], 而陆相动植物化石碎片在大陆边缘地区会随着浊流沉积搬运至海域沉积, 因此,

收稿日期: 2022-05-16

资助项目: 山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC1608); 校级科研项目(801002019089)

作者简介: 刘菲菲(1983—), 女, 博士, 讲师, 主要从事地球化学及大地构造学方面的研究工作。E-mail: 172659967@qq.com

* 通讯作者: 周瑶琪(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地球化学及盆地动力学方面的研究工作。E-mail: zhouyq@upc.edu.cn

图 1 山东东部近海区域地质概况^[2]Fig.1 The geological map of the nearshore area in the East Shandong^[2]

据少量化石判定其沉积环境属性仍有局限性,且随浊流搬运而来的陆源植物碎屑会使海水盐度低于正常海水^[14]。因此,日青威盆地沉积环境的研究对于深入揭示该盆地地层的沉积背景、沉积相和沉积演化等具有非常重要的意义。

沉积环境的早期研究主要通过沉积岩中保留的原生沉积结构、构造及所含的古生物化石等来识别,然而沉积岩主微量元素和稀土元素能较好地保存古环境信息,因此目前一般利用元素地球化学特征指标(例如主微量元素和稀土元素的质量分数及其比值变化)判别沉积古环境,该方法是沉积学研究中的重要手段。选取山东东部日青威盆地的灵山岛、崂山、桃林、丁字湾、周戈庄 5 个典型剖面沉积岩为研究对象,利用沉积介质环境比较敏感的主微量元素和稀土元素比值指标(参数)作为判断盆地沉积环境总体面貌的依据,本研究对于揭示日青威盆地的沉积演化过程具有重要的地质意义。

1 地质背景

日青威盆地发育在苏鲁造山带之上,其构造格局主体呈 NE—SW 向狭长展布,以五莲-青岛断裂带、即墨-牟平断裂带为西北部边界,以千里岩断

裂带为东南部边界。该盆地发育的晚中生代沉积地层直接不整合覆盖于苏鲁超高压变质岩系及燕山期花岗岩岩系之上。晚中生代地层自下而上分别为莱阳群、青山群、王氏群。莱阳群属于晚侏罗世—早白垩世早期沉积,岩性主要以深水重力流沉积岩、黑色硅质碎屑岩与砂泥岩互层为典型代表;青山群属于早白垩世晚期沉积,岩性主要以大量的火山熔岩流、火山碎屑岩为典型代表,而王氏群地层由于盆地形成后期受到的隆升剥蚀现象严重,并没有发现露头剖面。笔者重点选取了日青威盆地上的灵山岛、崂山垭口、诸城桃林、海阳市丁字湾、即墨周戈庄 5 个典型剖面(图 2)进行踏勘并采集样品,各剖面地层沉积特征如下^[15]:

灵山岛剖面主要由莱阳群和青山群组成,以中上部出露的火山爆发碎屑岩层为划分标志,其下部出露的为下白垩统莱阳群地层,上部出露的为下白垩统青山群地层。灵山岛出露的地层大致可分为 7 个沉积单元,最下部单元为重力流沉积,主要发育灰黑色砂岩-泥岩互层,具有多层滑塌褶皱和软沉积物变形特征;中下部单元发育含砾砂岩,往上发育细砂岩-泥岩薄互层;中部单元发育砂砾岩段和火山碎屑堆积,往上发育巨厚的白色流纹岩;上部单元发育砾岩-砂岩-泥岩旋回夹 3 套玄武岩和火山碎屑

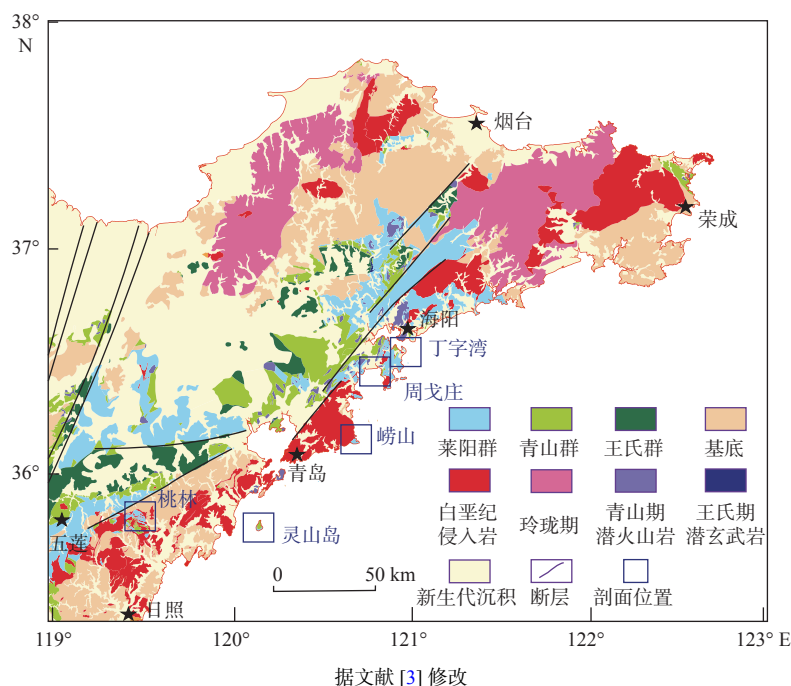


图 2 野外典型剖面位置分布

Fig.2 Distribution of typical profiles in the field

流沉积;顶部单元发育火山熔岩、火山碎屑岩等。

崂山剖面主要由莱阳群和青山群地层组成,自下至上发育有青山湾、垭口、八仙墩剖面地层。以八仙墩剖面底部的凝灰质粉砂岩层为划分标志,其上部出露的地层为青山群,下部出露的为莱阳群。青山湾剖面底部以砾岩为主,其上主要为粗砂夹粉砂岩。垭口剖面较青山湾剖面粒度明显变细,以安山质火山碎屑岩层为界,其下部主要发育灰绿色砂岩与黑色粉砂岩互层;上部地层分为 2 段,下段发育以砂岩、粉砂岩为主的等积岩,上段则发育砾岩-砂岩-粉砂岩-泥岩互层组成的韵律沉积,且夹硅质岩。八仙墩剖面以厚层粉砂岩与薄层泥岩的沉积旋回为特征,可见平行层理。

诸城桃林剖面主要由莱阳群和青山群地层组成,以流纹岩层之下的砂岩-粉砂岩层为划分标志,砂岩-粉砂岩层之下的为莱阳群,其上为青山群。莱阳群底部为砂砾岩层,且夹杂有闪长岩侵入体,往上为硅质岩夹粉砂岩;中部为具有独特的灰白色粉砂岩-青灰色粉砂岩-黑色硅质粉砂岩互层,可见潮汐韵律层理;上部为粉砂岩-泥岩互层。

丁字湾剖面由莱阳群地层组成,整体以黑色硅质粉砂岩-青灰色粉砂岩-灰白色粉砂岩薄互层为主,夹黑色硅质岩及泥岩薄互层,偶见薄层页岩与砂岩透镜体,粉砂岩层为块状构造。

周戈庄剖面主要由少量的莱阳群和青山群地

层组成。依据中部凝灰岩的锆石年龄和岩相组合特征辨别,该剖面底部的莱阳群地层厚约 10 m,发育有灰绿色泥质粉砂岩与紫红色粉砂岩的互层,可见块状构造、平行层理;粉砂岩层之上整体为青山群地层,主要发育砂岩、砾岩、灰岩、火山岩,整体以砂岩为主,底部为砂岩和含砾粗砂岩,中部夹有 3.2 m 厚的侵入岩和火山岩。

2 样品分析

本文测试的样品来源于桃林剖面莱阳群和青山群沉积岩(岩性分别为杂砂岩和砂岩)以及丁字湾剖面莱阳群下部和上部的沉积岩(岩性分别为杂砂岩和粉砂岩),总共 4 个样品进行了主微量和稀土元素测试。元素地球化学分析在山东省物化探勘查院岩矿测试中心完成,分别采用美国 Perkin Elmer 公司的 AvioTM200 型电感耦合等离子体发射光谱(ICP-OES)测试 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 、 P_2O_5 和 TiO_2 等主量元素,以及采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测试 Ni、Cu、Co、Cr、V、Zn、Rb、Ba、Sr、Cs、Pb、Th、U、Zr 等微量元素和 La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu 等稀土元素。样品破碎后研磨至 200 目,然后装袋备用。分析步骤为:准确称取烘干后的 0.04 g 样品置于聚四氟乙烯内胆中,

再加入 1.5 mL 氢氟酸和 0.5 mL 硝酸, 密封内胆, 放入到防腐高效溶样罐套内, 在高温烘箱(温度为 150 ℃)中加热 12 h。待其冷却后取出聚四氟乙烯内胆, 再加入 0.25 mL 高氯酸, 将其放在电热板(温度为 150 ℃)上, 蒸至近干。在内胆中加入 1 mL 高纯水和 1 mL 硝酸, 密封后, 再次置于不锈钢套内, 于聚四氟乙烯内胆中溶解 6 h。冷却后, 取出聚四氟乙烯内胆, 并将转移溶液放入到聚乙烯瓶中, 并用高纯水稀释至大约 40 mL, 将其摇匀待测。仪器稳定后, 测试标准溶液, 制备标准曲线, 然后测试标准物质, 并在测试过程中, 每隔 5 个样品用标准参考物质进行校正, 并进行平行样分析, 所测样品相对标准偏差均 < 5%, 分析方法精密度良好, 样品测试结果准确可信。

除了上述的测试数据, 笔者还收集了课题组内部已发表的各剖面沉积岩元素地球化学数据^[12,16-17]。不同剖面的沉积岩岩性略有不同, 其中, 灵山岛剖面莱阳群沉积岩的岩性为粉砂岩, 崂山剖面、桃林和丁字湾剖面莱阳群沉积岩的岩性均为硅质粉砂岩, 周戈庄剖面青山群沉积岩的岩性为灰岩。笔者进一步整理了所有沉积岩样品, 并将其归属于莱阳群和青山群。莱阳群沉积岩样品来源于灵山岛剖面、崂山剖面、桃林剖面(除 16TL-9)和丁字湾剖面, 而青山群沉积岩样品来源于周戈庄剖面和桃林剖面的 16TL-9 样品。

3 元素地球化学特征

3.1 主量元素

研究区沉积岩主量元素成分列于表 1。总体来看, 多数主量元素含量在区域上与全球平均大陆地壳(UCC)值^[18-21]均在一个数量级范围内, 仅有个别元素与 UCC 值相比出现明显的异常。研究区样品主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 , 其中 SiO_2 的含量最高, 为 10.77%~65.56%, 平均值为 52.13%; Al_2O_3 次之, 含量为 3.92%~18.7%, 平均值为 13.06%, 反映了样品所在地区输入的黏土矿物含量有所不同; SiO_2 和 Al_2O_3 平均含量均低于 UCC; 而 Fe_2O_3 含量为 2.33%~12.66%, 平均值为 6.14%, 高于 UCC。 Na_2O 平均含量为 2.51%, 低于 UCC; K_2O 平均含量为 2.82%, 与 UCC 含量一致, 各样品 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值介于 0.30~4.29, 平均值为 1.38, 这可能是由于样品中钾长石、黑云母等含钾矿物含量不同, 即碎屑成

分差异所致。 MgO 的含量为 1.38%~5.28%(平均值 3.50%), CaO 的含量为 1.57%~44.08%(平均值 10.33%), 高于 UCC, 可能与成岩过程中的钙质胶结有关。各样品 $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值(除样品 16TL-2 外)介于 0.09~0.29, 平均为 0.21, < 0.3, 表明沉积岩中主量元素主要由黏土矿物控制^[21]。

3.2 微量元素

研究区沉积岩微量元素分析结果见表 2。岩石微量元素的上地壳标准化蛛网图如图 3 所示, 可看出岩石中过渡族元素(Ni、Cu、Co、Cr、V)相对于上地壳 UCC 表现出不同程度的亏损。除 QCY-1、QCY-2 样品的 Ni 元素含量偏高之外, 其余样品 Ni 含量均较低(平均 24.14×10^{-6}), 低于 UCC(47×10^{-6}), 而元素 Cu、Co、Cr、V 相对于 UCC 表现出弱亏损至弱富集的特征, 总而言之, 过渡族元素并未表现出明显的富集特征。大离子亲石元素(LILE) Rb、Ba、U、Sr、Cs 含量波动范围较大, 但是相对于 UCC 仍具有明显的富集特征。沉积岩中微量元素 Sr 含量一般与主量元素 Ca 密切相关, 介于 151.55%~852%, 平均值为 469.45%, 高于 UCC。高场强元素 Th 相比于 UCC 呈现弱富集的特征, 而 Zr 的含量相对于 UCC 表现出不同程度的亏损。

3.3 稀土元素

研究区沉积岩稀土元素分析结果见表 3, 以澳大利亚后太古代页岩(PAAS)为标准化, 岩石稀土元素的配分模式如图 4 所示。样品 ΣREE 的含量介于 107.50×10^{-6} ~ 272.87×10^{-6} , 平均值为 199.15×10^{-6} , 稍高于 PAAS(184.77×10^{-6}), 反映样品相对富集稀土元素的特征。LREE/HREE 均值为 10.61, 高于 PAAS(9.49)的比值, 表明岩石中轻稀土元素强烈富集。 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ 范围为 0.68~1.78, 平均 1.05, 低于 PAAS; $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 范围 0.85~2.52, 平均 1.44, 低于 PAAS; $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 范围 1.13~1.70, 平均 1.40, 略高于 PASS, 表明样品相对于 PASS 具有较高的重稀土分馏程度; δEu 介于 0.87~1.47, 平均 1.09, 反映微弱的 Eu 正异常。

4 讨论

4.1 古盐度判别

古盐度反映了地质历史时期海平面的变化, 其

表 1 日青威盆地沉积岩主量元素分析结果

Table 1 Contents of major elements of sedimentary rocks in Ri-Qing-Wei Basin

剖面	样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	资料来源
灵山岛	CC-1	55.55	13.6	4.55	2.63	6.13	3.1	2.52	0.08	0.68	0.24	文献[12]
	CC-2	55.98	13.34	4.56	2.69	6.36	3.29	2.52	0.06	0.37	0.12	文献[12]
	CC-3	54.72	14.77	5.45	4.13	5.56	2.22	3.41	0.05	0.39	0.1	文献[12]
	QCY-1	46.48	13.44	7.39	3.81	6.7	2.78	2.58	0.09	0.65	0.2	文献[12]
	QCY-2	49.54	13.29	7.48	3.8	6.51	3.05	2.58	0.06	0.37	0.1	文献[12]
	QCY-3	50.59	13.78	5.74	3.99	7.6	3.14	2.7	0.07	0.37	0.1	文献[12]
	DT-1	53.82	14.46	5.66	3.65	5.26	2.18	3.06	0.06	0.71	0.46	文献[12]
	DT-2	52.73	15.31	6.07	3.84	5.98	2.54	3.22	0.05	0.41	0.25	文献[12]
	DT-5	59.92	17.73	4.77	2.91	1.57	2.33	4.19	0.02	0.48	0.09	文献[12]
	DYT-1	46.56	12.11	5.69	4.2	10.7	2.62	2.28	0.17	0.63	0.22	文献[12]
	DYT-2	48.57	11.56	5.45	4.04	10.32	2.77	2.19	0.13	0.32	0.1	文献[12]
	DYT-3	46.85	11.82	5.95	4.25	10.71	2.83	2.28	0.13	0.34	0.11	文献[12]
崂山	LS-C-1	59.6	15.66	2.67	3.73	5.7	4.47	1.35	0.03	0.69	0.15	文献[16]
	LS-C-2	61.32	8.14	2.94	4.3	2.4	1.88	1.47	0.04	0.66	0.18	文献[16]
	LS-C-3	61.82	14.14	2.95	4.32	5.57	3.13	3.09	0.04	0.67	0.18	文献[16]
	LS-C-4	61.05	13.91	9.69	3.44	8.38	1.75	3.73	0.11	0.64	0.24	文献[16]
	LS-C-5	65.25	14.68	8.64	2.27	4.96	2.13	3.84	0.07	0.64	0.26	文献[16]
	LS-C-6	59.85	13.67	8.94	4.87	9.12	1.8	3.85	0.12	0.61	0.24	文献[16]
桃林	16TL-2	54.66	15.19	4.88	4.25	9.03	3.32	7.06	0.12	0.58	0.17	本研究
	16TL-9	64.15	16.02	2.69	2.72	2.94	5.66	3.13	0.03	0.42	0.11	本研究
	TL-15	57.86	16.72	11.44	4.78	4.48	2.48	3.19	0.07	0.71	0.2	文献[16]
	TL-22	58.01	16.31	8.47	4.35	6.22	1.76	3.71	0.07	0.71	0.19	文献[16]
	TL-35	57.29	16.87	11.80	4.52	5.24	2.36	3.28	0.06	0.43	0.2	文献[16]
	TL-38	59.29	14.41	9.62	4.3	7.88	2.15	4.11	0.09	0.36	0.19	文献[16]
丁字湾	16DZW-1	64.58	12.99	6.05	1.38	5.07	3.1	1.62	0.09	0.72	0.19	本研究
	16DZW-3	63.74	13.83	3.80	2.93	7.06	3.33	3.27	0.1	0.6	0.21	本研究
	DZW-1	53.24	18.7	12.66	5.28	2.92	3.21	3.66	0.05	0.83	0.21	文献[16]
	DZW-4	65.56	12.44	7.00	2.49	6.88	3.01	2.24	0.11	0.53	0.21	文献[16]
	DZW-6	64.47	13.1	8.46	2.85	6.43	2.92	3	0.11	0.56	0.22	文献[16]
周戈庄	17JM-1	25.5	5.76	3.97	4.29	31.68	0.45	0.82	0.38	0.26	0.12	文献[17]
	17JM-2	13.61	5.11	2.33	1.71	41.51	0.31	1.33	0.36	0.22	0.09	文献[17]
	17JM-3	10.77	3.92	2.45	1.47	44.08	0.31	0.94	0.42	0.17	0.1	文献[17]
	17JM-4	17.42	4.17	2.41	1.46	40.1	0.46	0.93	0.4	0.18	0.1	文献[17]
UCC		66.6	15.4	5.04	2.48	3.59	3.27	2.8	0.1	0.64	0.15	文献[18]

在恢复沉积古地理环境研究中具有重要的地位, Sr/Ba 和 Mg/Ca 比值可作为反映沉积时期古盐度的判别指标^[22-25]。

(1) Sr/Ba 比值

Sr 元素比 Ba 元素迁移能力强, Sr、Ba 元素主要以重碳酸盐的形式存在于淡水中, 随着盐度的升高, Ba 元素与 SO₄²⁻ 离子先结合生成 BaSO₄ 沉淀, 而 Sr²⁺ 仍保留在水体中, 继续向远海迁移, 最后经由生物作用聚合沉淀下来。因此, 沉积物中 Sr/Ba 比

值与古盐度有较好的正相关关系。前人研究认为^[23,25], 一般 Sr/Ba 值 > 1 代表海相沉积, Sr/Ba 值 < 1 代表陆相沉积; 再进一步细分, Sr/Ba 值介于 0.6~1.0 为半咸水沉积, Sr/Ba 值 < 0.6 为微咸水沉积。

日青威盆地沉积岩中主微量元素比值结果(表 4)显示, 灵山岛剖面沉积岩 Sr/Ba 值为 0.15~1.13, 均值为 0.65, 指示半咸水沉积; 崂山剖面样品 Sr/Ba 值为 0.5~1.5, 均值为 0.69, 指示半咸水沉积; 桃林剖面样品 Sr/Ba 值为 0.43~0.68, 均值为 0.54,

表 2 日青威盆地沉积岩微量元素分析结果

Table 2 Contents of trace elements of sedimentary rocks in Ri-Qing-Wei Basin

10 ⁻⁶																资料来源
剖面	样品号	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Cs	Ba	Pb	Th	U	Zr	
灵山岛	CC-1	74.14	52.29	12.66	19.51	19.24	80.40	97.84	438.14	7.85	620.59	16.49	13.85	6.42	231.08	文献[12]
	CC-2	80.88	56.46	11.95	21.47	21.57	75.62	94.68	429.52	8.27	628.52	17.36	14.06	5.80	219.41	文献[12]
	CC-3	87.42	67.39	19.83	29.83	26.41	75.70	117.24	285.55	14.13	625.97	25.99	16.13	3.51	212.95	文献[12]
	QCY-1	94.91	99.58	32.64	87.09	30.83	94.20	118.61	528.90	7.34	987.70	25.85	16.36	6.11	213.05	文献[12]
	QCY-2	94.47	102.51	31.60	91.11	33.00	97.42	114.76	528.69	8.05	984.03	27.97	16.31	5.69	204.59	文献[12]
	QCY-3	91.10	81.04	25.05	32.39	30.95	89.18	93.16	503.00	8.03	839.13	31.83	17.28	5.82	220.96	文献[12]
	DT-1	128.24	95.33	11.77	25.12	26.16	80.14	132.86	315.10	11.17	837.46	12.82	15.50	8.08	202.09	文献[12]
	DT-2	130.07	101.83	11.58	27.16	28.21	84.96	128.33	311.85	11.77	831.57	14.64	16.88	7.84	221.79	文献[12]
	DT-5	124.54	90.46	12.16	30.13	36.07	116.03	156.04	151.55	11.82	1021.56	23.87	22.14	3.21	200.12	文献[12]
	DYT-1	60.93	52.13	18.32	25.32	25.43	102.00	88.83	825.92	4.95	730.52	20.38	13.72	5.18	217.67	文献[12]
	DYT-2	62.93	56.46	18.82	27.29	27.61	107.50	86.10	830.07	4.90	733.87	22.09	14.46	5.17	210.04	文献[12]
	DYT-3	65.87	64.05	22.50	29.08	32.33	106.84	73.95	736.54	5.72	679.20	23.20	15.51	5.14	179.22	文献[12]
崂山	LS-C-1	87.90	60.50	8.10	27.30	6.90	23.90	36.00	852.00	-	568.00	3.64	16.70	3.33	174.00	文献[16]
	LS-C-2	78.70	56.60	7.50	21.60	9.10	24.70	60.00	603.00	-	1110.00	3.72	11.50	2.29	201.00	文献[16]
	LS-C-3	75.60	58.00	7.10	21.80	6.10	24.80	58.00	588.00	-	1115.00	3.73	10.80	2.11	194.00	文献[16]
	LS-C-4	80.80	52.80	13.50	26.70	12.50	89.00	131.00	409.00	6.11	811.00	16.80	11.90	1.78	86.00	文献[16]
	LS-C-5	85.70	53.20	11.30	22.70	12.50	76.40	121.00	475.00	6.56	853.00	23.30	10.70	1.52	72.40	文献[16]
	LS-C-6	78.20	51.70	14.00	26.50	9.80	86.70	132.00	440.00	6.02	857.00	20.20	12.00	1.69	76.40	文献[16]
桃林	16TL-2	91.62	50.21	10.20	26.80	24.08	108.57	269.52	621.66	2.64	913.96	52.60	14.97	4.53	200.29	本研究
	16TL-9	46.50	22.68	6.69	9.84	15.25	29.57	76.32	456.11	0.80	1001.55	12.52	14.03	3.09	199.36	本研究
	TL-15	112.00	74.90	16.20	39.20	22.60	94.60	170.00	446.00	11.70	919.00	8.77	17.80	3.75	166.00	文献[16]
	TL-22	102.00	68.00	17.10	38.90	14.30	112.00	143.00	668.00	3.99	986.00	33.00	16.80	3.56	132.00	文献[16]
	TL-35	89.30	44.80	33.20	31.70	28.30	59.60	139.00	398.00	9.50	929.00	11.30	18.50	3.77	209.00	文献[16]
	TL-38	75.10	39.10	44.10	22.30	14.10	97.10	127.00	459.00	7.40	869.00	68.30	15.80	3.32	236.00	文献[16]
丁字湾	16DZW-1	72.23	49.28	13.60	17.82	73.15	76.53	66.08	454.09	1.85	426.12	9.99	9.44	1.77	261.75	本研究
	16DZW-3	71.68	40.38	8.62	16.40	13.19	57.54	74.60	473.21	1.59	1100.75	15.18	10.40	2.06	221.23	本研究
	DZW-1	122.00	81.20	19.80	43.70	10.70	80.60	160.00	448.00	6.56	897.00	7.59	20.80	3.49	196.00	文献[16]
	DZW-4	57.70	41.60	11.00	19.10	34.70	66.80	70.10	536.00	1.27	777.00	10.10	8.65	1.60	55.80	文献[16]
	DZW-6	64.30	43.50	16.00	19.10	32.80	61.00	88.80	450.00	3.04	931.00	12.30	9.52	1.61	54.90	文献[16]
周戈庄	17JM-1	54.18	28.85	7.28	13.30	12.60	52.07	43.76	236.77	8.64	2337.98	33.45	5.17	3.96	64.30	文献[17]
	17JM-2	48.99	29.83	6.50	12.95	12.42	36.14	103.03	204.44	20.91	216.50	17.00	5.80	4.74	61.20	文献[17]
	17JM-3	45.47	23.99	5.12	12.53	10.17	24.60	62.86	205.03	16.31	1578.67	12.11	4.18	3.50	45.90	文献[17]
	17JM-4	42.64	22.22	4.86	10.85	9.00	27.58	53.69	184.07	13.41	249.59	10.56	5.74	2.73	51.00	文献[17]
UCC		82	628	10.5	2.7	320	193	67	28	47	17.3	92	97	17.5	17	文献[18]

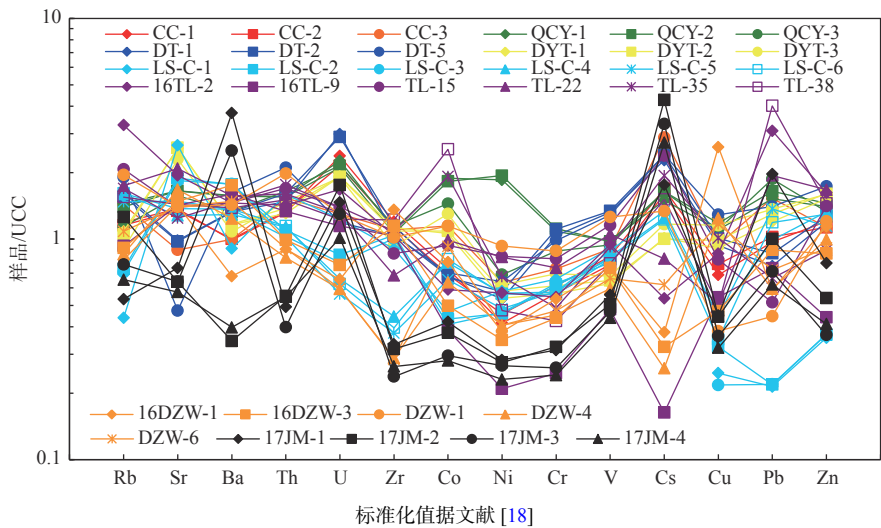


图 3 微量元素上地壳标准化蛛网图

Fig.3 Spider diagram of the trace elements normalized to average upper continental crustal values

表 3 日青威盆地沉积岩稀土元素分析结果

Table 3 Contents of REE elements of sedimentary rocks in Ri-Qing-Wei Basin

10 ⁻⁶																	资料来源
剖面	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	
灵山岛	CC-1	40.55	70.87	8.37	31.96	6.17	1.12	4.51	0.73	3.63	0.71	2.06	0.31	1.94	0.32	173.25	文献[12]
	CC-2	32.60	65.25	8.51	27.82	4.81	1.05	4.34	0.71	3.44	0.65	2.01	0.34	2.05	0.33	153.91	文献[12]
	CC-3	36.87	75.92	9.16	32.51	5.90	1.12	4.97	0.79	3.81	0.79	2.22	0.37	2.28	0.35	177.06	文献[12]
	QCY-1	49.43	82.79	9.95	38.48	6.70	1.40	5.69	0.92	4.66	0.90	2.59	0.39	2.43	0.39	206.72	文献[12]
	QCY-2	38.88	79.98	9.85	33.71	6.06	1.40	5.45	0.90	4.24	0.80	2.45	0.39	2.54	0.38	187.03	文献[12]
	QCY-3	35.74	71.32	9.10	30.50	5.99	1.29	5.07	0.82	3.95	0.82	2.30	0.36	2.36	0.35	169.97	文献[12]
	DT-1	46.98	96.31	12.17	48.47	8.67	1.93	7.47	1.19	5.86	1.11	3.13	0.47	2.93	0.46	237.15	文献[12]
	DT-2	50.72	106.05	13.59	48.76	8.91	2.03	8.13	1.30	6.16	1.15	3.35	0.53	3.18	0.53	254.39	文献[12]
	DT-5	54.28	104.02	12.39	41.93	7.19	1.35	5.70	0.89	4.24	0.82	2.60	0.43	2.86	0.43	239.13	文献[12]
	DYT-1	46.01	89.05	10.66	39.96	7.04	1.63	6.05	0.98	4.89	0.96	2.79	0.41	2.48	0.40	213.31	文献[12]
	DYT-2	46.03	87.88	11.40	38.98	6.94	1.73	6.32	1.04	4.99	0.98	2.84	0.47	2.70	0.47	212.77	文献[12]
	DYT-3	41.56	81.64	10.09	35.53	6.36	1.59	5.63	0.93	4.55	0.87	2.69	0.44	2.73	0.44	195.05	文献[12]
崂山	LS-C-1	38.90	82.10	8.99	31.20	5.80	1.22	5.48	0.76	4.48	0.86	2.42	0.38	2.46	0.35	185.40	文献[16]
	LS-C-2	31.80	72.10	8.85	33.20	6.54	1.32	5.84	0.89	5.07	0.99	2.73	0.45	2.69	0.38	172.85	文献[16]
	LS-C-3	30.80	69.40	8.71	32.80	6.54	1.29	5.70	0.87	5.01	0.94	2.62	0.42	2.69	0.36	168.15	文献[16]
	LS-C-4	49.00	88.40	10.50	38.80	6.82	1.36	5.81	1.02	5.27	1.03	2.91	0.40	2.83	0.43	214.58	文献[16]
	LS-C-5	46.50	85.80	9.94	37.20	6.50	1.40	5.56	0.94	4.88	0.93	2.63	0.35	2.45	0.40	205.48	文献[16]
	LS-C-6	49.30	89.80	10.40	38.70	6.71	1.34	5.96	0.98	5.01	0.97	2.77	0.41	2.77	0.45	215.57	文献[16]
桃林	16TL-2	53.86	92.31	10.49	37.26	6.66	1.42	5.46	0.90	4.38	0.94	2.49	0.38	2.44	0.37	219.36	本研究
	16TL-9	46.56	79.93	9.15	32.07	5.56	1.13	4.56	0.72	3.53	0.77	2.03	0.32	2.00	0.30	188.63	本研究
	TL-15	56.40	104.00	11.80	44.30	7.72	1.51	6.70	1.13	5.69	1.12	3.07	0.42	3.06	0.49	247.41	文献[16]
	TL-22	54.10	101.00	11.70	42.20	7.35	1.69	6.24	1.03	5.33	1.05	2.92	0.40	2.69	0.43	238.13	文献[16]
	TL-35	54.60	109.00	12.10	43.50	6.92	1.49	6.39	0.98	5.03	0.95	2.68	0.41	2.82	0.43	247.30	文献[16]
	TL-38	41.40	89.70	9.50	33.60	5.67	1.21	5.11	0.77	3.91	0.74	2.09	0.33	2.20	0.37	196.60	文献[16]
丁字湾	16DZW-1	64.72	108.08	12.33	43.53	7.76	1.62	6.16	0.96	4.52	0.93	2.39	0.36	2.20	0.32	255.88	本研究
	16DZW-3	50.88	92.96	10.74	39.80	7.35	1.67	5.71	0.88	4.22	0.91	2.41	0.37	2.27	0.34	220.51	本研究
	DZW-1	59.80	110.00	12.30	45.30	7.52	1.31	6.61	1.10	5.94	1.21	3.40	0.50	3.54	0.59	259.12	文献[16]
	DZW-4	48.40	86.30	10.10	36.90	6.39	1.42	5.31	0.88	4.23	0.84	2.33	0.31	2.11	0.32	205.84	文献[16]
	DZW-6	45.30	81.20	9.63	36.10	6.46	1.42	5.48	0.87	4.43	0.85	2.42	0.32	2.25	0.35	197.08	文献[16]
周戈庄	17JM-1	26.30	44.90	5.30	19.30	3.40	1.00	3.00	0.40	2.20	0.40	1.20	0.20	1.30	0.20	109.10	文献[17]
	17JM-2	34.50	46.30	5.50	18.80	3.30	0.70	2.80	0.40	2.00	0.40	1.10	0.20	1.10	0.20	117.30	文献[17]
	17JM-3	47.80	54.80	7.20	24.00	3.90	0.70	3.60	0.50	2.40	0.50	1.30	0.20	1.40	0.20	148.50	文献[17]
	17JM-4	37.80	56.10	6.50	23.40	4.20	1.00	3.70	0.50	2.50	0.50	1.40	0.20	1.40	0.20	139.40	文献[17]
PAAS		38.2	79.6	8.83	33.9	5.55	1.08	4.66	0.77	4.68	0.99	2.85	0.41	2.82	0.43	184.77	文献[19]

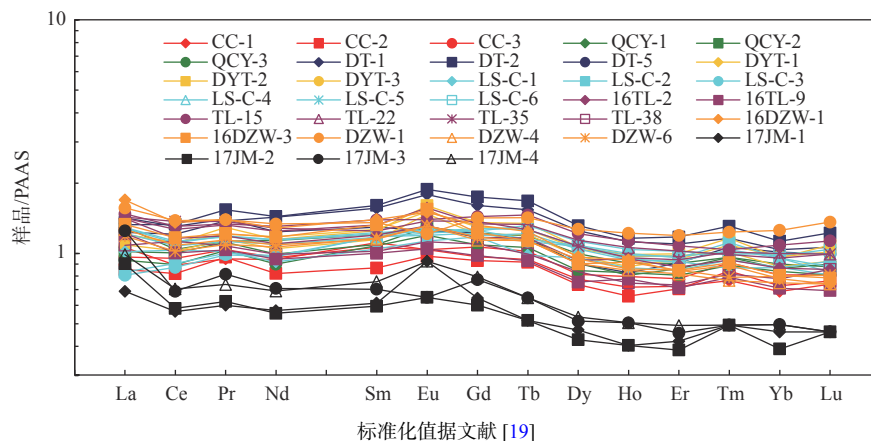


图 4 岩石 REE 分布模式

Fig.4 Chondrite-normalized REE distribution of the rocks

表 4 日青威盆地沉积岩中部分主微量元素比值
Table 4 The major and trace element ratios of sedimentary rocks in Ri-Qing-Wei Basin

剖面	地层时代	样品号	Sr/Ba	Mg/Ca	Sr /Cu	c	V/(V+Ni)	Ce/Ce*
灵山岛	莱阳群	CC-1	0.71	0.36	22.77	0.15	0.79	0.79
	莱阳群	CC-2	0.68	0.36	19.91	0.16	0.79	0.86
	莱阳群	CC-3	0.46	0.62	10.81	0.22	0.75	0.89
	莱阳群	QCY-1	0.54	0.48	17.16	0.21	0.52	0.76
	莱阳群	QCY-2	0.54	0.49	16.02	0.21	0.51	0.89
	莱阳群	QCY-3	0.60	0.44	16.25	0.17	0.74	0.86
	莱阳群	DT-1	0.38	0.58	12.05	0.23	0.84	0.88
	莱阳群	DT-2	0.38	0.54	11.05	0.24	0.83	0.89
	莱阳群	DT-5	0.15	1.56	4.20	0.22	0.81	0.85
	莱阳群	DYT-1	1.13	0.33	32.48	0.10	0.71	0.85
	莱阳群	DYT-2	1.13	0.33	30.06	0.11	0.70	0.83
	莱阳群	DYT-3	1.08	0.33	22.78	0.13	0.69	0.86
崂山	莱阳群	LS-C-1	1.50	0.55	123.48	0.13	0.76	0.93
	莱阳群	LS-C-2	0.54	1.51	66.26	0.10	0.78	0.96
	莱阳群	LS-C-3	0.53	0.65	96.39	0.10	0.78	0.95
	莱阳群	LS-C-4	0.50	0.34	32.72	0.14	0.75	0.81
	莱阳群	LS-C-5	0.56	0.38	38.00	0.13	0.79	0.82
	莱阳群	LS-C-6	0.51	0.45	44.90	0.13	0.75	0.82
桃林	莱阳群	16TL-2	0.68	0.40	25.82	0.12	0.77	0.78
	青山群	16TL-9	0.46	0.78	29.90	0.06	0.83	0.78
	莱阳群	TL-15	0.49	0.90	19.73	0.18	0.74	0.83
	莱阳群	TL-22	0.68	0.59	46.71	0.14	0.72	0.83
	莱阳群	TL-35	0.43	0.72	14.06	0.15	0.74	0.89
	莱阳群	TL-38	0.53	0.46	32.55	0.14	0.77	0.96
丁字湾	莱阳群	16DZW-1	1.07	0.23	6.21	0.18	0.80	0.76
	莱阳群	16DZW-3	0.43	0.35	35.89	0.09	0.81	0.82
	莱阳群	DZW-1	0.50	1.52	41.87	0.20	0.74	0.83
	莱阳群	DZW-4	0.69	0.30	15.45	0.10	0.75	0.80
	莱阳群	DZW-6	0.48	0.37	13.72	0.11	0.77	0.80
周戈庄	青山群	17JM-1	0.10	0.11	18.79	0.04	0.80	0.77
	青山群	17JM-2	0.94	0.03	16.46	0.22	0.79	0.63
	青山群	17JM-3	0.13	0.03	20.16	0.05	0.78	0.54
	青山群	17JM-4	0.74	0.03	20.45	0.18	0.80	0.69

指示微咸水沉积;丁字湾剖面样品 Sr/Ba 值为 0.43~1.07,均值为 0.63,指示半咸水沉积;周戈庄剖面样品 Sr/Ba 值为 0.10~0.94,均值为 0.48,指示微咸水沉积。整体上该盆地沉积水体环境为半咸水-微咸水。

根据不同的地层沉积时代,莱阳期样品 Sr/Ba 值为 0.15~1.50,均值为 0.64,指示半咸水环境;青山群样品 Sr/Ba 值为 0.10~0.94,均值为 0.47,指示微咸水环境。莱阳期到青山期 Sr/Ba 比值的变化反映了沉积期水体由半咸水向微咸水环境的变化。

(2) Mg/Ca 比值

淡水中 Ca 离子含量一般高于 Mg 离子,咸水

中 Mg 离子含量多高于 Ca 离子,因而, Mg/Ca 比值常作为判别淡水和咸水沉积的指标^[24]。Mg/Ca 值≤0.25 代表微咸水沉积;0.25<Mg/Ca 值≤0.50 代表半咸水沉积;0.50<Mg/Ca 值≤1.00 代表咸水沉积;Mg/Ca 值>1.00 代表深海沉积。

日青威盆地沉积岩中主微量元素比值结果(表 4)显示,灵山岛剖面样品 Mg/Ca 值为 0.33~1.56,均值为 0.53,指示咸水沉积;崂山剖面样品 Mg/Ca 值为 0.34~1.51,均值为 0.65,指示咸水沉积;桃林剖面样品 Mg/Ca 值为 0.40~0.90,均值为 0.64,指示咸水沉积;丁字湾剖面样品 Mg/Ca 值为 0.23~

1.52, 均值为 0.55, 指示咸水沉积; 周戈庄剖面样品 Mg/Ca 值为 0.03~0.11, 均值为 0.05, 指示微咸水沉积。除周戈庄剖面所反映的微咸水沉积外, 该盆地主体为咸水沉积环境。

根据不同的地层沉积时代, 莱阳群样品 Mg/Ca 值为 0.27~1.85, 均值为 0.69, 指示咸水沉积; 青山群样品 Mg/Ca 值为 0.03~0.78, 均值为 0.20, 指示微咸水沉积。莱阳期到青山期 Mg/Ca 比值的变化反映了沉积期水体由咸水向微咸水环境的变化。

综上所述, Sr/Ba 和 Mg/Ca 指标均显示盆地莱阳期到青山期沉积水体在由咸水/半咸水向微咸水环境变化。张振凯等^[12]通过对灵山岛莱阳群粉砂岩的 B 元素含量、B/Ga 比值等特征指标判定盆地莱阳期沉积环境为海相咸水环境, 与本文的结果大体相符。

4.2 古气候判别

元素地球化学指标如 Sr/Cu 等元素比值是判断沉积环境古气候变化的重要参数。

(1) Sr/Cu 比值

Sr/Cu 比值对古气候的变化较为敏感, 通常认为, Sr 元素是喜干型元素的典型代表, 较低含量的 Sr 元素指示潮湿气候, 较高含量的 Sr 元素代表干旱气候。一般认为, Sr/Cu 值介于 1~10 代表温湿气候, Sr/Cu 值 > 10 代表干热气候; 也有学者认为 Sr/Cu 值处于 1.3~5 指示温湿气候, Sr/Cu 值 > 5 指示干热气候^[25]。

日青威盆地沉积岩中主微量元素比值结果(表 4)显示, 灵山岛剖面样品 Sr/Cu 值为 4.20~32.48, 均值为 17.96, 指示干热气候; 崂山剖面样品 Sr/Cu 值为 32.72~123.48, 均值为 66.96, 指示干热气候; 桃林剖面样品 Sr/Cu 值为 14.06~46.71, 均值为 28.13, 指示干热气候; 丁字湾剖面样品 Sr/Cu 值为 6.21~41.87, 均值为 22.63, 指示干热气候; 周戈庄剖面样品 Sr/Cu 值为 16.46~20.45, 均值为 18.97, 指示干热气候。整体上该盆地为干热气候。

根据不同的地层沉积时代, 莱阳群样品 Sr/Cu 值介于 4.20~123.48, 均值为 31.05; 青山群样品 Sr/Cu 值为 16.46~29.90, 均值为 21.15。莱阳群和青山群的 Sr/Cu 比值均指示当时为干热气候。

(2) 其他元素比值

潮湿气候条件下形成的沉积岩中 Fe、Mn、Cr、V、Ni、Co 等元素具有较高的含量; 在干燥气候条件下, 由于水分大量蒸发导致水体的碱性逐渐增强,

水体中大量析出的 Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba 等元素沉积至水底, 因此该条件下形成的沉积岩中以上元素含量较高。利用以上 2 类元素的含量比值 $c = \sum(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{V} + \text{Ni} + \text{Co}) / \sum(\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na} + \text{Sr} + \text{Ba})$ 可计算气候的指数。该公式已被前人成功应用到盆地(诸如鄂尔多斯盆地、辽河盆地、柴达木盆地、胶莱盆地等)的古气候环境分析中^[22,24-27], 其判别标准为: $c \leq 0.2$ 指示干燥气候; $0.2 < c \leq 0.4$ 指示半干燥气候; $0.4 < c \leq 0.6$ 指示半干燥-半潮湿气候; $0.6 < c \leq 0.8$ 指示半潮湿气候; $c > 0.8$ 指示潮湿气候。

日青威盆地沉积岩中主微量元素比值结果(表 4)显示, 灵山岛剖面样品 c 值为 0.10~0.24, 均值为 0.18, 指示干燥气候; 崂山剖面样品 c 值为 0.10~0.14, 均值为 0.12, 指示干燥气候; 桃林剖面样品 c 值为 0.06~0.18, 均值为 0.13, 指示干燥气候; 丁字湾剖面样品 c 值为 0.09~0.20, 均值为 0.13, 指示干燥气候; 周戈庄剖面样品 c 值为 0.04~0.22, 均值为 0.12, 指示干燥气候。整体上该盆地的古环境为干燥气候。

根据不同的地层沉积时代, 莱阳群沉积岩样品 c 值为 0.09~0.24, 均值为 0.15; 青山群样品 c 值为 0.04~0.22, 均值为 0.11。因此, 莱阳群和青山群古环境应为干燥气候。

(3) SiO_2 与 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 双变量图

SUTTNER 和 DUTTA^[28]于 1986 年针对河流相砂岩化学成熟度变化提出的 SiO_2 与 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 双变量图可以用来限定碎屑岩沉积时的气候条件。张振凯等^[12]根据该双变量图解成功应用到灵山岛粉砂岩中, 判定其古环境为干旱气候。基于上述成果, 本文将灵山岛、崂山、桃林、丁字湾、周戈庄 5 个典型剖面的沉积岩样品投点到 SiO_2 与 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 双变量图中(图 5)。灵山岛、桃林和丁字湾剖面的沉积岩样品均位于干旱气候区域, 崂山剖面的沉积岩样品仅一个点位于半干旱气候区域, 其余均位于干旱气候区域, 周戈庄剖面的沉积岩样品基本位于半干旱气候区域。由此可见, 该盆地的古环境整体上为干旱-半干旱气候。

综上所述, Sr/Cu 值、其他元素比值(c 值)以及 SiO_2 与 $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 双变量图解均显示该盆地在莱阳群和青山群沉积期为干燥气候。

4.3 氧化还原环境的判别

沉积物中部分微量和稀土元素含量明显受氧化还原条件的控制, 因而这些元素比值是判别古沉

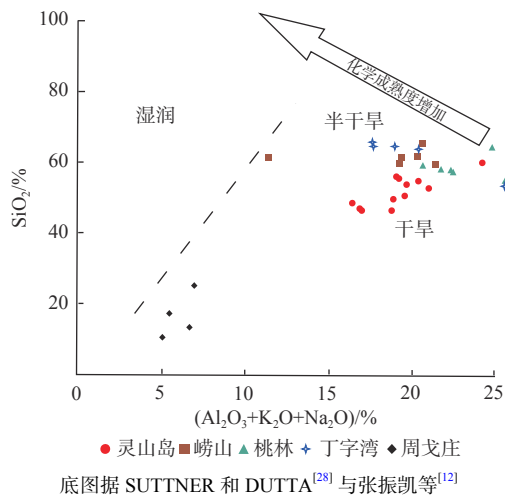


图 5 SiO_2 与 $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 古气候判别图

Fig.5 Palaeoclimate discrimination by bivariate $\text{SiO}_2\%$ versus $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})\%$

积水体的氧化还原环境的重要研究方法之一。其中, 微量元素 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值以及稀土元素特征 Ce 异常在指示沉积环境的氧化还原状态方面具有显著的效果。

(1) $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值

V 和 Ni 元素同属于铁族元素, 它们的离子价态随氧化还原条件的不同而发生变化, 通常在氧化环境下 V 易吸附富集在沉积物形成沉淀, 而在还原条件下 Ni 易与沉积物结合发生沉淀。因此, 微量元素 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值变化被作为反映当时沉积水体氧化还原环境的重要指标。一般认为, $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值 >0.84 代表了沉积水体分层以及底层水体中出现硫化氢的还原环境; $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.60\sim0.84$ 代表了沉积水体分层不明显的贫氧环境; $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.46\sim0.60$ 代表了沉积水体分层弱的富氧环境^[23-25,29]。

日青威盆地沉积岩中主微量元素比值结果(表 4)显示, 灵山岛剖面样品 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.51\sim0.84$, 均值为 0.72, 指示贫氧环境; 崂山剖面样品 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.75\sim0.79$, 均值为 0.77, 指示贫氧环境; 桃林剖面样品 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.72\sim0.83$, 均值为 0.76, 指示贫氧环境; 丁字湾剖面样品 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.74\sim0.81$, 均值为 0.77, 指示贫氧环境; 周戈庄剖面样品 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.78\sim0.80$, 均值为 0.79, 指示贫氧环境。整体上该盆地为沉积水体分层不强的贫氧环境, 沉积岩是在还原环境条件下沉积形成的。

根据不同的地层沉积时代, 莱阳群样品 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.51\sim0.84$, 均值为 0.75; 青山群样品

$\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值为 $0.78\sim0.83$, 均值为 0.80。莱阳期到青山期 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值均表明盆地沉积时水体为分层不强的贫氧环境。

(2) Ce 异常

稀土元素中 Ce 元素在不同的沉积环境下产生正或负的异常。陆源物质大多数为 Ce 正异常, 而洋盆环境中多数为 Ce 的负异常, 因为洋盆中 Ce^{3+} 易被氧化成 Ce^{4+} 并被铁锰氧化物所吸附, 从而造成海水中 Ce 亏损。因此, 稀土元素 Ce 异常特征被作为沉积环境氧化还原条件的判别指标。通常认为, $\text{Ce}/\text{Ce}^*>1$ 为正异常, 指示氧化环境; $\text{Ce}/\text{Ce}^*<1$ 为负异常, 指示还原环境^[23-25,29]。

日青威盆地沉积岩中主微量元素比值结果(表 4)显示, 灵山岛剖面样品 Ce 异常为 $0.76\sim0.89$, 均值为 0.85, 指示还原环境; 崂山剖面样品 Ce 异常为 $0.81\sim0.96$, 均值为 0.88, 指示还原环境; 桃林剖面样品 Ce 异常为 $0.78\sim0.96$, 均值为 0.84, 指示还原环境; 丁字湾剖面样品 Ce 异常为 $0.76\sim0.83$, 均值为 0.80, 指示还原环境; 周戈庄剖面样品 Ce 异常为 $0.54\sim0.77$, 均值为 0.66, 指示还原环境。整体上该盆地中的沉积岩是在还原环境条件下沉积形成的。

根据不同的地层沉积时代, 莱阳群沉积岩样品 Ce 异常为 $0.76\sim0.96$, 均值为 0.85; 青山群样品 Ce 异常为 $0.54\sim0.78$, 均值为 0.68。莱阳期到青山期 Ce 异常均表明盆地沉积时水体为还原环境。

综上所述, $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值和 Ce 异常均显示盆地莱阳期和青山期以分层不强的还原环境为主。该结果不仅与张振凯等^[12] 分析的灵山岛粉砂岩沉积环境较为一致, 而且灵山岛中存在大量原生黄铁矿, 且沉积岩中有机碳含量较高^[4,12], 更进一步印证了沉积环境为还原环境。

5 结论

(1) 日青威盆地沉积岩元素地球化学特征表明, SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 平均含量均低于 UCC, K_2O 含量接近 UCC, 而 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 含量高于 UCC; 样品过渡族元素(Ni、Cu、Co、Cr、V)相对于上地壳 UCC 表现出不同程度的亏损, 但样品大离子亲石元素相对富集; 样品富集轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 具有微弱的 Eu 正异常。

(2) 古盐度指标 Sr/Ba 和 Mg/Ca 的比值指示莱阳期沉积水体为咸水或半咸水环境, 青山期则为微

咸水环境;古气候指标 Sr/Cu 比值和元素 c 值表明莱阳期和青山期均为干燥气候环境;氧化还原条件指标 $V/(V+Ni)$ 比值和 Ce 异常反映莱阳期和青山期盆地沉积时的环境为还原环境。

参考文献:

- [1] 周瑶琪,周腾飞,马昌前,等.山东东部早白垩世青山期穿地壳岩浆系统与热隆滑脱成盆[J].地球科学,2018,43(10):3373-3390.
- [2] ZHOU T F, ZHOU Y Q, SØAGER N, et al. Late Mesozoic rifting and its deep dynamic mechanisms in the central Sulu Orogenic Belt: records from Lingshan Island[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65: 1751-1771.
- [3] 周瑶琪,张振凯,梁文栋,等.山东东部晚中生代构造-岩浆活动及原型盆地恢复[J].地学前缘,2015,22(1):137-156.
- [4] ZHOU T F, ZHOU Y Q, ZHAO H J, et al. Depositional setting and enrichment mechanism of organic matter of Lower Cretaceous shale in Ri-Qing-Wei Basin in the central Sulu Orogenic Belt[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 9: 808916.
- [5] 山东省第四地质矿产勘查院.山东省区域地质[M].济南:山东省地图出版社,2003:1-970.
- [6] 付永涛,虞子冶.青岛垭口-八仙墩变质海相碎屑岩的属性和构造意义[J].地质科学,2010,45(1):207-227.
- [7] 吴拓宇,赵淑娟,付永涛.青岛八仙墩海相碎屑岩的岩石地球化学特征及其油气研究意义[J].地质科学,2010,45(4):1156-1169.
- [8] 吕洪波,张海春,王俊,等.山东胶南灵山岛晚中生代浊积岩中发现巨大滑积岩块[J].地质论评,2012,58(1):80-81.
- [9] 吕洪波,王俊,张海春.山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探[J].地质学报,2011,85(6):938-946.
- [10] 钟建华.灵山岛中生代沉积岩是深水源源浊积岩、还是陆内三角洲沉积?:与吕洪波教授商榷[J].地质论评,2012,58(6):1180-1182.
- [11] YANG R, LOON A V. Early Cretaceous slumps and turbidites with peculiar soft-sediment deformation structures on Lingshan Island (Qingdao, China) indicating a tensional tectonic regime[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 129: 206-219.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] YANG R C, FAN A P, HAN Z Z, et al. A marine or continental nature of the deltas in the Early Cretaceous Lingshanda Formation: evidences from trace elements[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2017, 91(1): 367-368.
- [15] 刘菲菲,周瑶琪,张振凯,等.山东东部近海地区日青威盆地晚中生代地层沉积特征[J].海洋地质前沿,2021,37(3):22-32.
- [16] 许汉华.山东东部近海晚中生代莱阳群硅质岩成因及沉积环境研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2016.
- [17] 李曼洁,周瑶琪,周腾飞,等.山东即墨地区下白垩统灰岩地球化学特征及沉积环境分析[J].地质与资源,2020,29(2):126-134.
- [18] RUDNICK R L, GAO S. Composition of the Continental Crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2003, 3(1): 1-23.
- [19] TAYLOR 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: 321.
- [20] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 1995, 33(2): 241-265.
- [21] MCLENNAN S M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2013, 2(4): 1-24.
- [22] 马焕矣,刘池洋,张龙,等.鄂尔多斯盆地延长组长7段沉积岩元素地球化学特征及沉积环境分析[J].现代地质,2019,33(4):872-882.
- [23] 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.
- [24] 张文伟.基于主(微)量元素分析法的细粒沉积岩沉积环境判别:以大民屯凹陷安福屯地区沈352井沙四下亚段为例[J].东北石油大学学报,2017,41(4):99-106.
- [25] 彭治超,李亚男,张孙玄琦,等.主微量元素地球化学特征在沉积环境中的应用[J].西安文理学院学报(自然科学版),2018,21(3):108-111.
- [26] 张静雅.胶莱盆地莱西地区上白垩统古环境记录[D].兰州:兰州大学,2020.
- [27] CAO J, WU M, CHEN Y, et al. Trace and rare earth element geochemistry of Jurassic mudstones in the northern Qaidam Basin, northwest China[J]. *Chemie Der Erde-geochemistry*, 2012, 72(3): 245-252.
- [28] SUTTNER L J, DUTTA P K. Alluvial sandstone composition and paleoclimate. I. Framework mineralogy[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1986, 56(3): 329-345.
- [29] 陶树,汤达祯,周传祯,等.川东南-黔中及其周边地区下组合烃源岩元素地球化学特征及沉积环境意义[J].中国地质,2009,36(2):397-403.

Geochemical constraints on depositional environment of Late Mesozoic sedimentary rocks from the Ri-Qing-Wei Basin in the East Shandong

LIU Feifei¹, ZHOU Yaoqi^{2*}, XU Hanhua³, LI Manjie⁴

(1 School of Architectural Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, China; 2 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3 Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry Co. Ltd., Kunming 650051, China;

4 Shengli Oil Production Plant of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: Ri-Qing-Wei (Rizhao-Qingdao-Weihai) Basin in the eastern Shandong Peninsula, which was developed in the Sulu Orogen, is a large-scale rift basin formed since Late Mesozoic. The unique sedimentary features in the basin are different from adjacent terrestrial rift basins in the same period, which have received great attention from sedimentologists recently. To study the paleosalinity, paleoclimate, and redox conditions in the deposition period (the Laiyang and Qingshan Period) in the Ri-Qing-Wei Basin, the geochemical (major, trace and rare earth elements (REEs)) characteristics of sedimentary rocks samples from five field typical profiles situated in the Lingshan Island, Laoshan, Taolin, Dingzi Bay, and Zhougezhuang areas, respectively, were analyzed. The samples are characterized by relatively low content of SiO_2 and Al_2O_3 (avg. 52.13% and 13.06%, respectively) and high contents of Fe_2O_3 (avg. 6.14%). ΣREE contents of the samples (avg. 199.15×10^{-6}) are higher than those of UCC. The patterns of REE are characterized by LREE enrichment, HREE depletion, and weakly positive Eu abnormality. Compared with UCC, the samples are enriched in LILEs and depleted in transitional elements. The values of Sr/Ba and Mg/Ca indicate that the water body of deposition during the Laiyang-Qingshan period was from saline/semi-saline to weakly saline water. The value of Sr/Cu , $\Sigma(\text{Fe}+\text{Mn}+\text{Cr}+\text{V}+\text{Ni}+\text{Co})/\Sigma(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}+\text{Na}+\text{Sr}+\text{Ba})$, and bivariate SiO_2 - $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ diagram show that the deposition period was in a dry climate environment, and $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ and Ce abnormality indicate that the deposition period was dominated by a reducing condition. The above comprehensive studies show that the transformation of palesalinity, dry climate and eductive environment of the basin have important geological significance for revealing the process of sedimentary evolution in this area.

Key words: Sulu Orogen; Ri-Qing-Wei Basin; Late Mesozoic; geochemical characteristics; depositional environment