

doi:10.3799/dqkx.2017.027

山东灵山岛莱阳群粉砂岩地球化学特征及意义

张振凯¹, 周瑶琪¹, 彭甜明¹, 于珊珊¹, 岳会雯¹, 周腾飞¹, 刘加召²

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 山东省第八地质矿产勘查院, 山东日照 276826

摘要: 灵山岛下部莱阳群重力流沉积地层以其巨厚的沉积规模, 独特的沉积特征受到国内外地质学界越来越多的重视。但目前, 该套地层的源区风化程度、物源性质、物源区构造背景及沉积环境尚不明确, 通过对灵山岛下部莱阳群粉砂岩进行岩相学分析、主量元素 XRF 测试、稀土及微量元素 ICP-MS 测试, 结果显示: 粉砂岩 SiO_2 含量较低 (平均 51.78%), Fe_2O_3^T 含量较高 (平均 5.73%), Na_2O 平均含量为 2.74%, K_2O 平均含量为 2.79%; 通过主量元素投图分析, 样品归类为杂砂岩及岩屑砂岩; 样品 ΣREE 为 $153.00 \times 10^{-6} \sim 254.38 \times 10^{-6}$, 平均为 201.65×10^{-6} , 高于 PAAS 及 UCC, 富集轻稀土元素, 贫重稀土元素, 具有中等程度 Eu 负异常, 弱 Ce 负异常; 相对于 UCC, 样品富集大离子亲石元素, 弱富集高场强元素, 亏损过渡组元素。样品 ICV 值高 (>0.84)、为初次循环沉积, CIA 值低 (<65) 表明源区风化强度低, 物源为长英质物质及少量古地壳再旋回物质, 物源区大地构造背景为大陆岛弧与活动大陆边缘, 沉积环境为海相还原环境且莱阳期为干热气候。此外, 应用对 REE 元素进行归类统计的方法来推测物源区, 分析表明样品物源区最有可能为胶南群与蓬莱群地层。

关键词: 灵山岛; 莱阳群; 地球化学; 沉积环境。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2017)03-0357-21

收稿日期: 2016-09-05

Geochemical Characteristics and Signatures of Siltstones from Laiyang Group at Lingshan Island, Qingdao, Shandong

Zhang Zhenkai¹, Zhou Yaoqi¹, Peng Tianming¹, Yu Shanshan¹, Yue Huiwen¹, Zhou Tengfei¹, Liu Jiazhao²

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Eighth Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, Rizhao 276826, China

Abstract: Gravity flow deposits of Laiyang Group at the lower part of Lingshan island attract an increasing attention of geologists at home and abroad because of its huge thickness and unique sedimentary features. However, its weathering degree, characteristics and structural setting of provenance, and depositional environment still remain in dispute. In this study, major elements, rare earth elements and trace elements contents of the siltstones from Laiyang Group at Lingshan Island were examined by XRF and ICP-MS. It is found that siltstones are characterized by relatively low contents of SiO_2 (avg. 51.78%) and high contents of Fe_2O_3^T (avg. 5.73%); average contents of Na_2O and K_2O of siltstones are 2.74% and 2.79%, respectively, the siltstones are classified as litharenites and greywackes; ΣREE contents of the samples are $153.00 \times 10^{-6} - 254.38 \times 10^{-6}$ (avg. 201.65×10^{-6}), which are higher than those of UCC and PAAS; the pattern of REE is characterized by LREE enrichment, HREE depletion, moderately negative Eu abnormality and weakly negative Ce abnormality; compared with UCC, samples are enriched in LILEs, weakly enriched in HFSEs and depleted in transitional elements. Index of Compositional Variability (ICV) values of siltstones in Lingshan Island are high, which indicates the source materials are mainly primary cycle sediments, Chemical Index of Alteration (CIA) values are relatively low, which suggests that the weathering intensity of provenance is low. Element analysis indicates that felsic rocks serve as the main source rocks, including small amounts of contributions from recycled orogenic belt materials; tectonic settings of provenance belong to active continental margin and continental island arc;

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41272123); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (No.15CX06011A).

作者简介: 张振凯 (1988-), 男, 博士研究生, 主要从事地球化学及大地构造方面研究. ORCID: 0000-0001-6019-6947. E-mail: 804459147@qq.com

引用格式: 张振凯, 周瑶琪, 彭甜明, 等. 2017. 山东灵山岛莱阳群粉砂岩地球化学特征及意义. 地球科学, 42(3): 357-377.

sedimentary environment is reducing marine environment and paleoclimate of Laiyang Period was arid. It is original for the authors to apply the statistical analysis method to determine the provenance regions more precisely according to the features of REEs, and it is concluded that the source rocks are most likely from Jiaonan Group and Penglai Group.

Key words: Lingshan island; Laiyang Group; geochemistry; sedimentary environment.

0 引言

灵山岛位于青岛市黄海海域(图 1a),为挤压掀斜成因岛屿(栾光忠等,2010).以灵山岛中部发育的一套巨厚流纹岩为标志层,流纹岩下部地层为下白垩统莱阳群,流纹岩之上发育青山群(山东省第四地质矿产勘查院,2003;Wang *et al.*,2014;周瑶琪等,2015a)(图 1b).自灵山岛下部复理石沉积及滑塌褶皱层被发现以来,灵山岛受到越来越多的地质学者们的重视.吕洪波等(2011,2012,2013)根据灵山岛下部发育的地层为韵律良好的薄层细砂岩、粉砂岩与泥质岩互层这一特征判断该套地层为远源浊积岩,并依据砂岩中发育的剪节理结合灵山岛所处大地构造位置,推断这套地层沉积背景为华北板块、扬子板块在晚中生代尚未碰撞拼合的残余洋盆.张海春等(2013)在灵山岛下部复理石地层中发现与海水活动有关的沟鞭藻碎片和膜状藻类碎片,结合碎屑

锆石及孢粉组合,认为灵山岛下部发育的地层是晚中生代海相浊积岩,且因其沉积特征与胶莱盆地莱阳群存在明显差异,建议将其命名为灵山岛组.钟建华(2013)则通过对这套浊积岩中发育的多尺度滑动、滑塌构造、砂级叠瓦构造、沟模、炭屑等的研究,指出灵山岛下部发育的不是远源浊积岩,而是一套陆内浅水三角洲沉积,构造背景与残余洋盆无关.邵珠福等(2014a,2014b)根据浊积岩中的砂级颗粒支撑叠瓦构造,结合沉积构造和岩性、岩相组合的研究,判断灵山岛的沉积岩形成于陆内较浅水三角洲环境,与板块碰撞无关.周瑶琪等(2015a)在近年来对青岛、海阳、日照等地同期地层沉积特征的研究,结合区域重磁资料和锆石测年数据,发现了“山东东部近海晚中生代裂陷盆地”,认为灵山岛莱阳群为海相沉积裂陷盆地的产物,而非残余洋盆.Yang and Loon(2016)依据在船厂剖面发现的特殊的布丁构造,认为这种软变形构造为伸展背景下的产物,支持了周瑶琪等(2015a)关于裂陷盆地的观点.此外,一

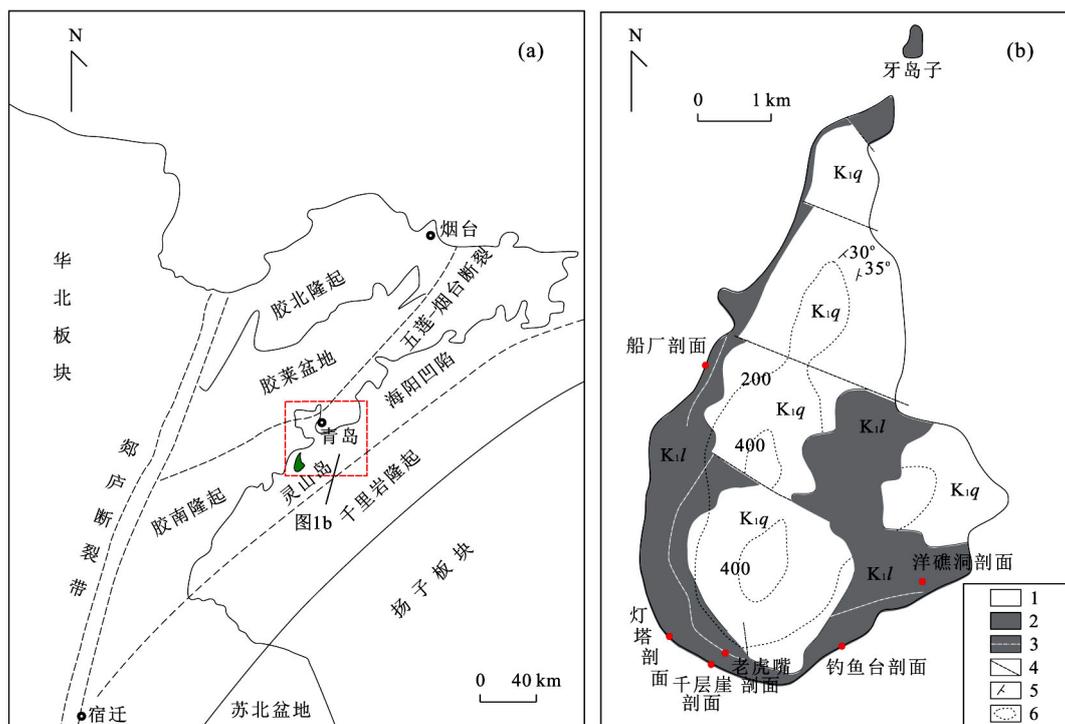


图 1 灵山岛大地构造位置及地质简图

Fig.1 The sketch showing geotectonic position and geologic framework of Lingshan island

1. 下白垩统青山群; 2. 下白垩统莱阳群; 3. 白色流纹质熔岩; 4. 断层; 5. 地层产状; 6. 地形等高线; 据栾光忠等修改(2010)

些学者对灵山岛地层沉积特征、构造演化做了大量报道(王安东等,2013,2014;董晓朋等,2013,2014;葛毓柱等,2015;李杰等,2015;周瑶琪等,2015b)。

由此可见,关于灵山岛的一个争论的焦点是大地构造背景,早白垩世为华北克拉通破坏的峰期,中国东部发育一系列裂陷盆地,如松辽盆地、胶莱盆地、苏北—南黄海盆地。若以灵山岛为代表的这一盆地为挤压背景下的残余洋盆,则与早白垩世整体为伸展构造活动的大背景相矛盾,因而残余洋盆这一观点似乎欠妥。另一个争论的焦点为灵山岛莱阳期的沉积环境,海相的支撑证据为各类化石,而陆相的支撑证据为灵山岛莱阳群中的镜煤条带、叠瓦构造以及流体特征等沉积特征,而现今通过化石和沉积特征都无法确定其沉积环境。

源区岩石成分、影响源区风化状态的环境因素、风化持续时间、搬运机制、沉积环境和沉积后过程共同制约着碎屑岩的地球化学特征(Johnsson,1993),因而能够利用碎屑岩的主量元素、微量元素和稀土元素的含量及其特征比值分析物源区(Etemad-Saeed *et al.*,2011;Cao *et al.*,2012;Armstrong-Altrin *et al.*,2013;2015)、揭示源区古风化条件和沉积环境等(Chakrabarti *et al.*,2009;Saxena and Pandit,2012)。前人从岩石学、矿物学、沉积学、锆石年代学对这套岩层做了大量的工作,而关于其地球化学特征却一直未有报道。笔者选取灵山岛莱阳群浊积岩中的粉砂岩为研究对象,在地球化学元素测试的基础上,对粉砂岩的主量元素、微量元素和稀土元素含量和某些特征元素的比值进行讨论,旨在为研究区物源分析和沉积环境的研究提供一个新的视角。

1 地质背景与样品分析

笔者在详细的野外踏勘基础上,将灵山岛沉积地层自下而上划分为6个单元:(1)莱阳群浊积岩层,灰色砂岩与黑色泥、粉砂岩的薄互层,内部发育有大型滑塌褶皱和丰富的软沉积物变形构造;(2)莱阳群滨浅海沉积地层:主要由灰色生物碎屑灰岩、灰白色石英砂岩构成;(3)莱阳群浊积岩层,灰色砂、泥岩的不等厚薄互层,内部见软沉积物变形构造,顶部发生角岩化;(4)青山群白色流纹岩层,厚度为3~20 m,呈现自东南向西北逐渐减薄的趋势;(5)青山群陆相碎屑岩层,夹多层玄武岩、火山碎屑流沉积;(6)青山群巨厚火山碎屑岩、火山熔岩层。针对岛上莱阳群出露情况,笔者选取了四条地层出露较好的、

具有代表性的剖面,即:钓鱼台剖面、灯塔剖面、千层崖剖面、船厂剖面(如图1b所示)。灵山岛的地层划分以白色流纹岩为标准,老虎嘴剖面处流纹岩最厚,约15 m,该套流纹岩向北西方向尖灭,流纹岩之下为莱阳群。其中在船厂剖面可见约1 m厚的白色流纹岩直接覆盖于浊积岩之上,因而将其作为莱阳群最顶部的沉积地层;千层崖剖面距老虎嘴剖面处白色流纹岩层约50 m,千层崖剖面下部地层通过一个大型褶皱与灯塔剖面相连(周瑶琪等,2015a),故灯塔剖面地层位于千层崖剖面地层之下;钓鱼台剖面位于岛的西南侧(如图1b所示),距上部白色流纹岩层约70 m,且笔者经过野外勘查发现钓鱼台剖面上部地层可与千层崖地层进行对比,因而认为钓鱼台剖面下部出露的约11 m厚的地层为最下部地层。综合分析,各剖面在垂向上的接触关系由下往上依次为,钓鱼台剖面、灯塔剖面、千层崖剖面、船厂剖面。莱阳群发育状况如图2所示。

莱阳群最下部地层为钓鱼台剖面,该剖面主要为灰色薄/中层砂岩与灰黑色粉砂岩/泥岩韵律性互层构成,地层产状多变,细砂岩中见正粒序层理、球枕构造,火焰状构造。钓鱼台剖面地层之上为灯塔剖面,与钓鱼台剖面相比,灯塔剖面整体具有“层薄粒度细”的特点,主要由多个极薄层/薄层的细砂岩—粉砂岩、泥岩的沉积旋回组成,局部夹中、厚层砂岩,剖面底部砂泥岩单层厚度较薄,顶部较厚。砂岩发育正粒序层理,以及重荷模、软双重构造同沉积断层等沉积构造,泥岩中炭质丰富,见大量镜煤条带。灯塔剖面之上发育千层崖剖面,该剖面主要是灰色薄/中层砂岩与灰黑色薄层粉砂岩—泥质粉砂岩韵律性互层构成,地层在垂向和侧向分布均很稳定,且地层的单层厚度与灯塔剖面相比显著变厚,发育粒序层理、槽模、液化角砾岩、水下非构造裂缝等沉积构造。此外,在该剖面局部层位粉砂岩中可见呈斑点状或条带状产出的硫化物(黄铁矿、闪锌矿),表明这些粉砂岩是缺氧还原、较深水环境中原地堆积的产物。千层崖剖面地层之上为船厂剖面,该剖面地层也是由灰色砂岩与灰黑色粉砂岩韵律性互层构成,但是地层厚度不稳定、变化较大,砂岩层厚度介于几毫米至80 cm之间,极薄层、薄层、中层、厚层砂岩皆可见到,中薄粉砂岩以块状层理为主,粒序层理发育并不明显,砂岩中发育槽模、荷重模、软布丁构造、负载—球枕构造、同沉积断层等,泥岩发育水平层理、网状收缩裂缝。该剖面以发育大量不同类型的软沉积变形构造为特征。

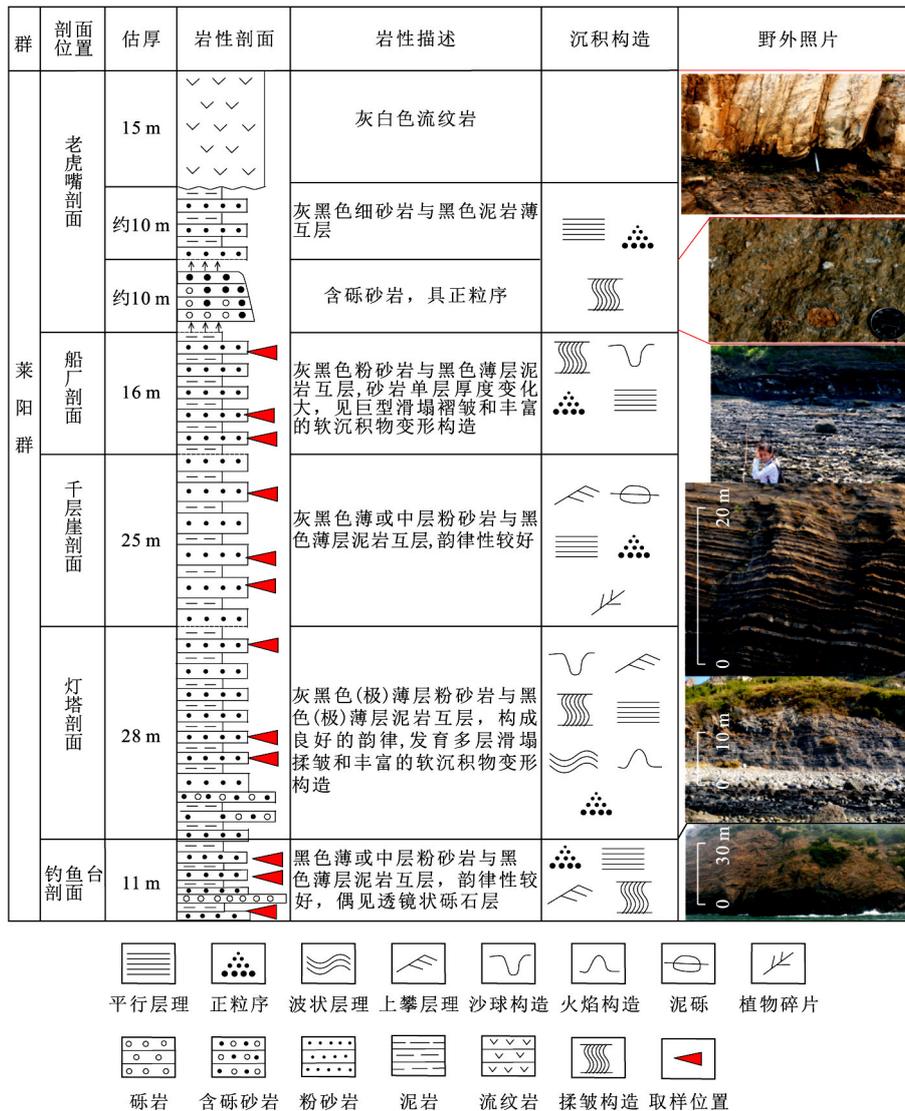


图 2 灵山岛莱阳群地层综合柱状图

Fig.2 Lithostratigraphy of Laiyang Group in Lingshan island

笔者在每个剖面各选取 3 个新鲜样品进行了测试, 沉积物的粒度会影响碎屑岩的化学成分(徐方建等, 2009), 为保证地球化学数据的可比性, 测试样品全部为低密度浊流所形成的粉砂岩, 取样位置如图 2 所示. 样品加工及地球化学测试在山东省第八地质矿产勘察院实验室完成, 主量元素依据国家标准 GB/T14506.28-2010, 选取无水四硼酸锂/偏硼酸锂熔融-X 射线荧光光谱法(XRF)测定(设备型号: Axios), 标准样品为岩石成分分析标准样品 GBW07106, GBW07107, GBW07108, GBW07120, 及水系沉积物成分分析标准物质 GBW07302a, GBW07304a, GBW07308a, 分析误差小于 5%; 稀土元素及微量元素利用氢氟酸和硝酸在封闭溶样器中溶解, 之后电热板上蒸发赶尽氢氟酸, 再用硝酸密封

溶解, 稀释后再用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)(设备型号: ICAP Qc)外标法直接测定, 使用与主量元素测定相同的标准物质作为质量监控样, 分析误差低于 5%.

2 粉砂岩岩石特征

2.1 岩石学特征

本次研究所选取的钓鱼台、灯塔、千层崖、船厂剖面典型粉砂岩镜下特征如图 3 所示. 灯塔粉砂岩为不等粒粉砂质结构(图 3a), 分选较好, 碎屑颗粒主要为石英, 其次为长石, 长石以正长石为主, 常发生绿泥石化, 少见斜长石. 碎屑呈次圆-圆状. 填隙物主要为粘土矿物, 少量钙质胶结物. 千层崖粉砂岩

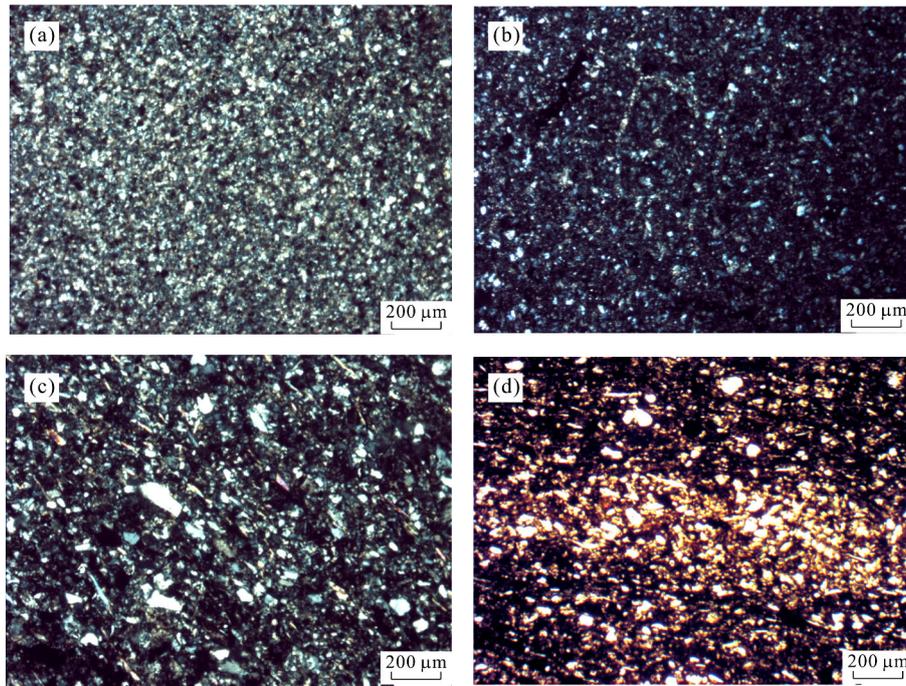


图 3 灵山岛莱阳群粉砂岩镜下特征

Fig.3 The micrograph feature of siltstones in Lingshan island

a. 灯塔剖面典型粉砂岩镜下照片(正交光); b. 千层崖剖面典型粉砂岩镜下照片(正交光); c. 船厂剖面典型粉砂岩镜下照片(正交光); d. 钓鱼台剖面典型粉砂岩镜下照片(单偏光)

表 1 灵山岛莱阳群粉砂岩主量元素分析结果(%)

Table 1 Major element contents (%) of siltstones from Laiyang Group at Lingshan island

样品号	船厂剖面			千层崖剖面			灯塔剖面			钓鱼台剖面			平均值
	CC-1	CC-2	CC-3	QCY-1	QCY-2	QCY-3	DT-1	DT-2	DT-5	DYT-1	DYT-2	DYT-3	
SiO ₂	55.55	55.98	54.72	46.48	49.54	50.59	53.82	52.73	59.92	46.56	48.57	46.85	51.78
Al ₂ O ₃	13.60	13.34	14.77	13.44	13.29	13.78	14.46	15.31	17.73	12.11	11.56	11.82	13.77
FeO	3.35	2.55	3.73	3.93	3.89	3.98	3.30	3.46	3.20	4.31	4.20	4.42	3.69
Fe ₂ O ₃	0.83	1.72	1.30	3.02	3.16	1.31	1.99	2.23	1.21	0.90	0.78	1.03	1.62
Fe ₂ O ₃ ^T	4.55	4.56	5.45	7.39	7.48	5.74	5.66	6.07	4.77	5.69	5.45	5.95	5.73
MgO	2.63	2.69	4.13	3.81	3.80	3.99	3.65	3.84	2.91	4.20	4.04	4.25	3.66
CaO	6.13	6.36	5.56	6.70	6.51	7.60	5.26	5.98	1.57	10.70	10.32	10.71	6.95
Na ₂ O	3.10	3.29	2.22	2.78	3.05	3.14	2.18	2.54	2.33	2.62	2.77	2.83	2.74
K ₂ O	2.52	2.52	3.41	2.58	2.58	2.70	3.06	3.22	4.19	2.28	2.19	2.28	2.79
MnO	0.08	0.06	0.05	0.09	0.06	0.07	0.06	0.05	0.02	0.17	0.13	0.13	0.08
TiO ₂	0.68	0.37	0.39	0.65	0.37	0.37	0.71	0.41	0.48	0.63	0.32	0.34	0.48
P ₂ O ₅	0.24	0.12	0.10	0.20	0.10	0.10	0.46	0.25	0.09	0.22	0.10	0.11	0.17
LOI	10.21	10.53	8.97	10.83	11.20	11.45	10.27	9.53	5.89	13.62	14.17	14.22	10.91
Total	98.92	99.52	99.36	94.50	97.54	99.08	99.23	99.55	99.55	98.31	99.14	98.99	98.64
ICV	1.45	1.49	1.44	1.79	1.79	1.71	1.42	1.44	0.92	2.17	2.18	2.24	1.67
CIA	51.25	49.61	57.32	52.94	50.85	50.99	57.95	56.40	61.21	52.19	50.17	50.08	53.41
F ₁	-0.26	0.29	-2.50	0.21	0.73	-0.04	-2.15	-0.64	-2.91	0.31	0.53	0.87	-0.46
F ₂	1.10	1.25	-1.17	-1.12	-0.94	0.08	-1.23	-0.57	0.18	-0.15	-0.16	-0.11	-0.24

注: Fe₂O₃^T = Fe₂O₃ + 1.111 3 × FeO, 总和不包括 Fe₂O₃^T 含量; F₁, F₂ 函数系数数据 Roser and Korsch(1988); ICV = Fe₂O₃ + K₂O + Na₂O + CaO + MgO + MnO + TiO₂ / Al₂O₃ (百分含量); CIA = [(Al₂O₃ / (Al₂O₃ + CaO* + Na₂O + K₂O))] × 100 (摩尔量), CaO* 为硅酸盐矿物中的 CaO 含量, 不包含碳酸盐与磷灰石中的 CaO.

为不等粒粉砂质结构(图 3b), 分选较差, 碎屑颗粒主要为石英, 其次为长石, 存在较少云母及石英岩岩

屑. 碎屑呈次棱角一次圆状. 填隙物主要为黏土矿物. 船厂粉砂岩为含粗粉砂的中粉砂质结构(图 3c), 分

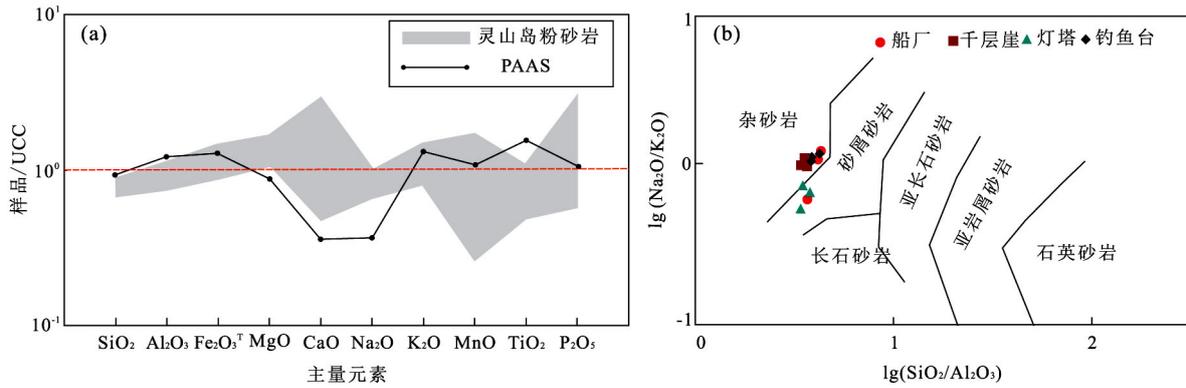


图 4 主量元素上地壳标准化蛛网图及砂岩化学成分分类

Fig.4 Normalization of major elements to upper continental crust and chemical classification diagrams discriminating sediments
图 a. UCC 数据据 Rudnick and Gao(2003); PAAS 数据 Taylor and McLennan(1985); 图 b 底图据 Prettijohn and Potter(1972)

选差, 颗粒主要为石英、长石、云母, 对比其他剖面, 船厂粉砂岩云母含量高, 云母呈半定向排列, 黏土矿物含量低. 碎屑颗粒呈棱角一次棱角状. 钓鱼台粉砂岩为粗粉砂结构(图 3d), 分选中等, 成分主要为石英、长石, 其次为白云母, 呈半定向状, 见少量变质岩岩屑及安山岩岩屑. 碎屑颗粒呈次棱角一次圆状.

通过镜下鉴定可知, 所选样品虽同为粉砂岩, 但是各剖面典型粉砂岩在矿物含量、粒度、结构等方面仍存在差异. 这可能由不同的沉积过程及源区物质的差异所造成.

2.2 地球化学特征

2.2.1 主量元素

灵山岛莱阳群粉砂岩主量元素成分列于表 1. 粉砂岩的 SiO_2 含量为 46.85%~59.92%, 平均为 51.78%, 低于 UCC 及 PAAS(图 4a); Al_2O_3 平均含量为 13.77%, 接近 UCC; $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 含量较高, 为 4.55%~7.39%, 平均为 5.73%, 高于 UCC, 且 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ 与 SiO_2 显示负相关性; Na_2O 平均含量为 2.74%, 低于 UCC, K_2O 平均含量为 2.79%, 接近 UCC 含量, 样品 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.77~1.54, 平均 1.06, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值主要由钾长石和斜长石的相对含量控制, K_2O 的含量普遍大于 Na_2O 的含量, 与镜下鉴定的结果一致; MgO 的含量为 2.63%~4.25% (平均为 3.66); CaO 的含量为 1.57%~10.7%, 平均为 6.95, 高于 UCC 及 PAAS 值, 可能与成岩过程中的钙质胶结有关.

主量元素可以作为判定沉积岩分类、成分成熟度的依据. SiO_2 含量主要受石英含量控制, Al_2O_3 含量则是黏土矿物和长石的含量的反映, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值可作为判别成分成熟度的指标(Potter, 1978). 所测样品的具有很窄的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值分布范围为 3.46~4.20, 平均为 3.78, 接近岩浆岩 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$

值(3~5), 成熟的沉积岩 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值大于 5(Roser *et al.*, 1996), 反映了灵山岛粉砂岩未成熟的性质. $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值也是判别成分成熟度的标识(Pettijohn and Potter, 1972). 图 4b 显示灵山岛粉砂岩归类为杂砂岩、岩屑砂岩.

2.2.2 微量元素

样品微量元素含量和特征参数见表 2, 过渡族元素为亲铁镁的微量元素, 在本研究中过渡组元素(Ni, Cr, Sc, V)相对于上地壳展现出了不同程度的亏损(图 5). 除 QCY-1、QCY-2 两个样品的 Ni 含量偏高之外, 其与样品 Ni 含量均较低(平均 37.13×10^{-6}), 低于 UCC(= 47×10^{-6})、NASC(= 58×10^{-6})、PAAS(= 55×10^{-6}). Cr, V, Sc 相对于 UCC 表出现弱亏损至若富集的特征. 总之, 这些过渡族元素未表现出明显富集的特征, 由于过渡族元素在后期过程中可有效保持源岩的地球化学特征, 因而以强烈富集过渡族元素为特征的铁镁质岩石不可能是灵山岛粉砂岩的主要源岩.

大离子亲石元素(LILE) Cs, Rb, Ba, Sr, U 以 UCC 为标准化如图 5 所示, 除 DYT-3 样品轻微弱亏损之外, Rb 相对于 UCC 表现出弱富集的特征. Cs, U 含量相对于 UCC 具有明显的富集特征, 且变化范围较大. Ba 含量相对于 UCC 弱富集, 且变化范围较小. Sr 含量变化范围大, 除 DY-5 样品相对于 UCC 弱亏损之外, 其余样品均表现为不同程度的 Sr 富集.

在绝大多数岩浆过程中高场强元素(HFSE)表现为不相容的特性, 因此 HFSE 在长英质岩石中较铁镁质岩石更为富集. 在图 5 中, Ta, Nb, Yb, Hf, Y, Th 表现出相似的分布特征, 均显示为相比于 UCC 具弱富集的特征. Zr 和 Ti 的含量与 UCC 含量类似, 进一步说明在灵山岛粉砂岩中无选择性富集碎

表 2 灵山岛莱阳群粉砂岩微量及稀土元素分析结果(10^{-6})

Table 2 Trace elements contents of siltstones from Laiyang Group at Lingshan island

样品号	船厂剖面			千层崖剖面			灯塔剖面			钓鱼台剖面			平均值
	CC-1	CC-2	CC-3	QCY-1	QCY-2	QCY-3	DT-1	DT-2	DT-5	DYT-1	DYT-2	DYT-3	
Li	34.47	32.17	78.12	56.98	54.28	58.03	61.22	58.45	66.57	41.75	41.45	44.65	52.35
Be	2.09	2.10	2.56	2.64	2.58	2.31	3.35	3.22	4.11	1.94	1.88	1.70	2.54
Sc	11.57	8.90	10.17	11.54	10.96	10.34	14.45	14.94	14.47	14.56	10.32	10.53	11.90
V	74.14	80.88	87.42	94.91	94.47	91.10	128.24	130.07	124.54	60.93	62.93	65.87	91.29
Cr	52.29	56.46	67.39	99.58	102.51	81.04	95.33	101.83	90.46	52.13	56.46	64.05	76.63
Co	12.66	11.95	19.83	32.64	31.60	25.05	11.77	11.58	12.16	18.32	18.82	22.50	19.07
Ni	19.51	21.47	29.83	87.09	91.11	32.39	25.12	27.16	30.13	25.32	27.29	29.08	37.13
Cu	19.24	21.57	26.41	30.83	33.00	30.95	26.16	28.21	36.07	25.43	27.61	32.33	28.15
Zn	80.40	75.62	75.70	94.20	97.42	89.18	80.14	84.96	116.03	102.00	107.50	106.84	92.50
Ga	17.86	17.95	20.30	25.42	27.66	21.00	23.68	26.33	31.10	19.04	21.40	16.94	22.39
Rb	97.84	94.68	117.24	118.61	114.76	93.16	132.86	128.33	156.04	88.83	86.10	73.95	108.53
Sr	438.14	429.52	285.55	528.90	528.69	503.00	315.10	311.85	151.55	825.92	830.07	736.54	490.40
Y	21.89	21.63	24.23	25.10	27.77	26.36	32.48	31.64	25.83	32.43	29.37	28.06	27.23
Cs	7.85	8.27	14.13	7.34	8.05	8.03	11.17	11.77	11.82	4.95	4.90	5.72	8.67
Ba	620.59	628.52	625.97	987.70	984.03	839.13	837.46	831.57	1021.56	730.52	733.87	679.20	793.34
La	40.55	32.60	36.87	49.43	38.88	35.74	46.98	50.72	54.28	46.01	46.03	41.56	43.31
Ce	70.87	65.25	75.92	82.79	79.98	71.32	96.31	106.05	104.02	89.05	87.88	81.64	84.26
Pr	8.37	8.51	9.16	9.95	9.85	9.10	12.17	13.59	12.39	10.66	11.40	10.09	10.44
Nd	31.96	27.82	32.51	38.48	33.71	30.50	48.47	48.76	41.93	39.96	38.98	35.53	37.38
Sm	6.17	4.81	5.90	6.70	6.06	5.99	8.67	8.91	7.19	7.04	6.94	6.36	6.73
Eu	1.12	1.05	1.12	1.40	1.40	1.29	1.93	2.03	1.35	1.63	1.73	1.59	1.47
Gd	4.51	4.34	4.97	5.69	5.45	5.07	7.47	8.13	5.70	6.05	6.32	5.63	5.78
Tb	0.73	0.71	0.79	0.92	0.90	0.82	1.19	1.30	0.89	0.98	1.04	0.93	0.93
Dy	3.63	3.44	3.81	4.66	4.24	3.95	5.86	6.16	4.24	4.89	4.99	4.55	4.53
Ho	0.71	0.65	0.79	0.90	0.80	0.82	1.11	1.15	0.82	0.96	0.98	0.87	0.88
Er	2.06	2.01	2.22	2.59	2.45	2.30	3.13	3.35	2.60	2.79	2.84	2.69	2.59
Tm	0.31	0.34	0.37	0.39	0.39	0.36	0.47	0.53	0.43	0.41	0.47	0.44	0.41
Yb	1.94	2.05	2.28	2.43	2.54	2.36	2.93	3.18	2.86	2.48	2.70	2.73	2.54
Lu	0.32	0.33	0.35	0.39	0.38	0.35	0.46	0.53	0.43	0.40	0.47	0.44	0.40
Tl	0.62	0.58	0.78	0.83	0.83	0.66	0.74	0.81	0.93	0.61	0.69	0.60	0.72
Pb	16.49	17.36	25.99	25.85	27.97	31.83	12.82	14.64	23.87	20.38	22.09	23.20	21.87
Bi	0.33	0.31	0.34	0.36	0.36	0.36	0.38	0.37	0.42	0.28	0.28	0.31	0.34
Th	13.85	14.06	16.13	16.36	16.31	17.28	15.50	16.88	22.14	13.72	14.46	15.51	16.02
U	6.42	5.80	3.51	6.11	5.69	5.82	8.08	7.84	3.21	5.18	5.17	5.14	5.66
Nb	14.22	13.44	13.82	16.99	16.90	11.47	15.04	15.34	17.81	13.04	13.84	10.41	14.36
Ta	1.21	1.11	1.01	1.14	1.00	0.80	0.99	1.05	1.25	1.08	1.07	0.73	1.04
Zr	231.08	219.41	212.95	213.05	204.59	220.96	202.09	221.79	200.12	217.67	210.04	179.22	211.08
Hf	7.69	6.39	5.40	6.84	6.23	5.13	6.51	6.60	5.69	6.78	6.30	4.90	6.20
B	158.00	199.00	149.00	151.00	125.00	141.00	169.00	149.00	175.00	157.00	103.00	122.00	149.83
Zr/Hf	30.05	34.34	39.46	31.16	32.86	43.11	31.06	33.61	35.18	32.10	33.35	36.56	34.40
Zr/Th	16.68	15.61	13.20	13.02	12.54	12.79	13.04	13.14	9.04	15.86	14.53	11.56	13.42
La/Th	2.93	2.32	2.29	3.02	2.38	2.07	3.03	3.00	2.45	3.35	3.18	2.68	2.73
La/Y	1.85	1.51	1.52	1.97	1.40	1.36	1.45	1.60	2.10	1.42	1.57	1.48	1.60
Th/Sc	1.20	1.58	1.59	1.42	1.49	1.67	1.07	1.13	1.53	0.94	1.40	1.47	1.37
Sc/Ni	0.59	0.41	0.34	0.13	0.12	0.32	0.58	0.55	0.48	0.57	0.38	0.36	0.40
Sc/Cr	0.22	0.16	0.15	0.12	0.11	0.13	0.15	0.15	0.16	0.28	0.18	0.16	0.16
Cr/Ni	2.68	2.63	2.26	1.14	1.13	2.50	3.79	3.75	3.00	2.06	2.07	2.20	2.43
Ni/Co	1.54	1.80	1.50	2.67	2.88	1.29	2.14	2.35	2.48	1.38	1.45	1.29	1.90
La/Yb	20.86	15.88	16.20	20.34	15.29	15.17	16.03	15.93	18.99	18.54	17.03	15.23	17.12
Rb/Sr	0.22	0.22	0.41	0.22	0.22	0.19	0.42	0.41	1.03	0.11	0.10	0.10	0.30
Th/U	2.16	2.42	4.60	2.68	2.87	2.97	1.92	2.15	6.90	2.65	2.80	3.02	3.09
La/Sc	3.50	3.66	3.62	4.28	3.55	3.46	3.25	3.39	3.75	3.16	4.46	3.95	3.67
Co/Th	0.91	0.85	1.23	2.00	1.94	1.45	0.76	0.69	0.55	1.33	1.30	1.45	1.20
Zr/Y	10.55	10.15	8.79	8.49	7.37	8.38	6.22	7.01	7.75	6.71	7.15	6.39	7.91
B/Ga	8.85	11.08	7.34	5.94	4.52	6.71	7.14	5.66	5.63	8.25	4.81	7.20	6.93
Ga/Rb	0.18	0.19	0.17	0.21	0.24	0.23	0.18	0.21	0.20	0.21	0.25	0.23	0.21
ΣREE	173.26	153.91	177.04	206.71	187.04	169.97	237.16	254.38	239.13	213.31	212.77	195.08	201.65
LREE	159.05	140.04	161.48	188.74	169.88	153.93	214.53	230.06	221.17	194.35	192.96	176.78	183.58
HREE	14.22	13.87	15.56	17.96	17.16	16.03	22.63	24.33	17.97	18.96	19.81	18.29	18.07
L/H	11.19	10.10	10.38	10.51	9.90	9.60	9.48	9.46	12.31	10.25	9.74	9.66	10.21
(La/Yb) _N	1.54	1.17	1.20	1.50	1.13	1.12	1.18	1.18	1.40	1.37	1.26	1.12	1.26
(La/Sm) _N	0.95	0.98	0.91	1.07	0.93	0.87	0.79	0.83	1.10	0.95	0.96	0.95	0.94
(Gd/Yb) _N	1.40	1.28	1.32	1.42	1.30	1.30	1.54	1.54	1.21	1.48	1.41	1.25	1.38
δEu	1.00	1.08	0.97	1.07	1.15	1.10	1.13	1.12	1.00	1.18	1.23	1.25	1.11
δCe	0.89	0.90	0.95	0.86	0.94	0.91	0.93	0.93	0.93	0.93	0.88	0.92	0.91
Ce _{anom}	-0.06	-0.01	-0.01	-0.08	0.00	-0.01	-0.03	-0.01	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.03

注: L/H 为轻重稀土比值; 下标 N 表示元素相对于 PAAS 标准化, 下标 anom 表示元素相对于北美页岩标准化; $\delta\text{Eu} = 2 \times \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)$, $\delta\text{Ce} = 2 \times \text{Ce}_N / (\text{La}_N + \text{Nd}_N)$, 该式中 N 为 PAAS 标准化, 球粒陨石值参考 Taylor and McLennan (1985); $\text{Ce}_{\text{anom}} = \lg[3\text{Ce}_N / (2\text{La}_N + \text{Nd}_N)]$, 该式中 N 为北美页岩标准化, 北美页岩值参考 Gromet *et al.* (1984).

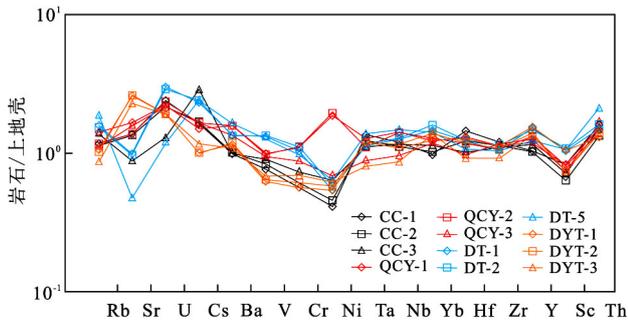


图 5 微量元素上地壳标准化蛛网图

Fig.5 Trace elements spider-diagram normalized to average upper continental crustal values

标准化值据 Rudnick and Gao(2003)

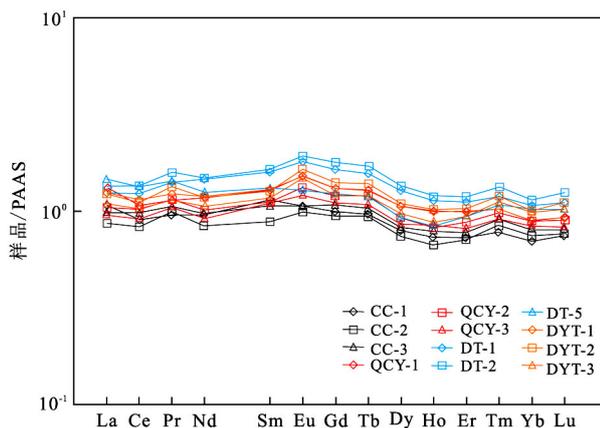


图 6 灵山岛莱阳群粉砂岩 REE 分布模式

Fig.6 Chondrite-normalized REE diagrams of the Laiyang Group siltstones in Lingshan island

标准化值据 Taylor and McLennan (1985)

屑锆石和钛铁矿(如金红石、榍石).此外,锆石随沉积岩的成熟度增加而富集,Zr 含量类似 UCC 可推断灵山岛粉砂岩成分成熟度为未成熟一半成熟.

2.2.3 稀土元素 样品稀土元素含量和特征参数见表 2,以 PAAS 标准化,样品稀土元素配分模式如图 6 所示.样品 ΣREE 为 $153 \times 10^{-6} \sim 254.38 \times 10^{-6}$,平均为 201.65×10^{-6} ,与大陆上地壳(UCC)及澳大利亚后太古代页岩(PAAS)相比,绝大多数样品的稀土总量均高于 UCC(148.14)及 PAAS(184.77),反映样品相对富集稀土元素的特征.样品 LREE/HREE 均值为 10.21,高于 PAAS(9.49)和 UCC(9.56)的比值, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均值为 1.26,高于 PAAS,表明样品轻稀土元素强烈富集. $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 的平均值为 0.94,略低于 PASS; $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 的平均值为 1.38,高于 PASS,表明样品相对于 PASS 具有较低的轻稀土分异度和较高的重稀土分异.全部样

品的 Eu 均显示弱负异常至中等正异常($\delta\text{Eu} = 0.97 \sim 1.25$,均值为 1.11).样品具有弱的 Ce 异常($\delta\text{Ce} = 0.86 \sim 0.95$,均值为 0.91).

3 讨论

以上的测试数据反映出灵山岛样品具有相似特征,暗示它们具有相对统一的源区.控制碎屑岩组成的系统具有复杂性,从源区到沉积甚至是成岩的过程中相当多的地质过程可以对沉积物组成进行改造.因此,在确定碎屑岩源区和构造背景之前,首先要分析可能会对碎屑岩地化特征改造的地质作用(Johnsson,1993).

3.1 沉积旋回与源区风化条件

沉积岩的主量元素组成可以为沉积物搬运过程中的物质循环和源区风化强度提供重要信息.Cox *et al.*(1995)提出的成分变异指数(ICV)与 Nesbitt and Young(1982)提出的化学风化蚀变指数(CIA)的联合使用可以判断沉积旋回及源区风化强度(Long *et al.*,2012).

沉积物在循环过程中非粘土性矿物的降低与粘土性矿物的增长,或者第一次循环碎屑输入量的降低,都将导致 ICV 值降低.ICV > 0.84 的碎屑岩由长石、角闪石、辉石等主要造岩矿物组成,这种岩石经常作为第一次旋回的沉积物沉积于构造活动区;而 ICV < 0.84 的碎屑岩由伊利石、高岭石、白云母等典型蚀变矿物组成,形成于构造活动平静环境,此背景下第一次循环沉积物的再循环十分发育(Cox *et al.*,1995).灵山岛粉砂岩 ICV 值为 0.92~2.24,平均为 1.67,大于 0.84(表 1),同样大于 PAAS(ICV=0.85),说明了灵山岛粉砂岩地球化学未成熟的性质,其为初次旋回的沉积物,沉积再循环作用未改变样品地球化学特征,因而可以利用化学风化蚀变指数来讨论源区风化条件.

Nebitt and Young(1982)提出的化学风化蚀变指数(CIA)不仅可以用来判断源区化学风化程度,而且可以用来评价源岩总体成分、成岩作用和源区构造背景.灵山岛粉砂岩样品的 CIA 值分布于 49.61~61.21,均值为 53.41(表 1),样品数据总体构成了由上地壳出发向伊利石方向发展的演化线,但不平行于三角图的 A-CN 边,因此数据偏离了理想风化趋势线(IWT)(Nebitt and Young,1984).演化线向伊利石方向偏转是沉积后发生钾长石化的典型特征(Fedo *et al.*,1995),也是沉积物在成岩作用中

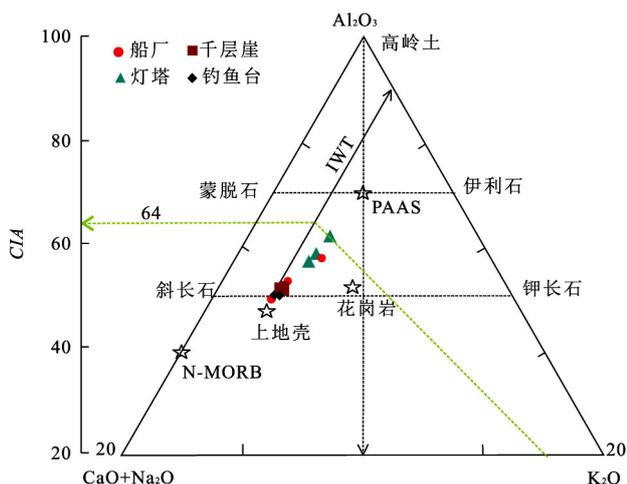


图 7 灵山岛莱阳群粉砂岩 $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$ 关系
 Fig.7 $Al_2O_3-(CaO+Na_2O)-K_2O$ molecular proportion for siltstone from Laiyang Group at Lingshan island
 底图据 Nebitt and Young(1982)

的普遍现象(Hossain *et al.*, 2010).成岩过程中的钾长石化降低了 CIA 值,沉积物原始的 CIA 值可以由 K_2O 顶点出发的射线经过数据点与 IWT 的交点确定(Fedo *et al.*, 1995).经过对钾校正后的 CIA 最大值为 64(如图 7 所示),该值明显低于 PAAS 的 CIA 值(70~75),因此说明弱的源区风化作用.

源区的大地构造环境也可以对 CIA 值产生影响,经历稳定持续风化所形成的高而均一的 CIA 值形成于稳定的构造条件(Nesbitt *et al.*, 1997).反之,由于源区的风化条件处于非稳态条件,活动的隆升区可以造成沉积物中 CIA 值变化较大.样品最大的 CIA 值与样品数据在 A-CN-K 图中所形成的演化线暗示灵山岛莱阳期沉积物来源于非稳定的风化条件与活动的构造背景.

Th/U 比值可以有效的揭示源区风化条件和沉积物旋回,岩石在风化过程中 U^{6+} 会发生流失,而 Th 的含量则基本不变,随着风化强度及沉积旋回的增加, Th/U 比值会升高(Floyd and Leveridge, 1987; McLennan *et al.*, 1993).灵山岛莱阳群粉砂岩的 Th/U 值较小,均值为 3.19,均低于上地壳(约为 3.8)与 PAAS(约为 4.7),指示了源区岩石风化程度较低.此外, Ga/Rb 值均小于 0.25 与 K_2O/Al_2O_3 值介于 0.19~0.24 也反映了源区弱的风化条件(Roy and Roser, 2013).

综上所述,本次研究所选取的粉砂岩的地球化学成分主要受源区岩石的控制,且源区未经历强烈的化学风化作用,成岩后作用对元素的地球化学示

踪影响不大,可以作为物源讨论的对象.

3.2 物源分析

由于研究区粉砂岩未经过强的风化作用($CIA < 70$),未经历沉积再循环($ICV > 0.84$),且为化学成分未成熟阶段($SiO_2/Al_2O_3 < 6$),因而依据这套粉砂岩的地球化学特征讨论其源区特征是可靠的.

3.2.1 主量元素分析

Al_2O_3/TiO_2 比值被认为是反映沉积岩源岩性最有效的指标.Hayashi *et al.* (1997)指出砂岩和泥岩的 Al_2O_3/TiO_2 比值基本与源岩的比值保持一致.在通常情况下,Al 与 Ti 在粉砂/页岩与它们的源岩中的分异微乎其微,可能是由于绝大多数 Ti 赋存在风化中的岩石中绿泥石(和其他泥质)中,或以硅质矿物中的钛铁矿包裹体出现,而不是分散的钛铁矿的形式出现(Hayashi *et al.*, 1997).因此, Al_2O_3/TiO_2 比值被证明是一种有效源岩判别标准,特别是当源岩为岩浆岩时.灵山岛粉砂岩的 Al_2O_3/TiO_2 平均值为 31.01,接近长英质火成岩,指示该套粉砂岩的源岩主要来自长英质火成岩源区.

粉砂岩源区的判别也可应用 Roser and Korsch (1988)提出的源区判别方法进行讨论,该方法根据主量元素特征将源区划分为 4 种类型,即:铁镁质源区(P1),中性源区(P2),长英质源区(P3)及富含石英质沉积岩物源区(P4).灵山岛莱阳群粉砂岩样品主要落在 P3 区,少部分落入 P4 区(图 8),表明莱阳群物源主要来自酸性火成岩区,有少部分古老沉积物成分加入.

3.2.2 微量元素分析

研究区粉砂岩普遍具有低的不相容的过渡族微量元素(Ni, Cr, V, Sc)含量(图 5),可以排除源区有大量铁镁质岩石的暴露(Zimmermann and Bahlburg, 2003).沉积物中的某些不活泼微量元素(如 La, Th, Hf)不因搬运与成岩作用而改变,而长英质与铁镁质岩石中 La, Th, Hf 等元素存在显著差异,因而可以利用其含量及比值推测源岩成分(Cullers, 1995).根据 Floyd and Leveridge (1987)提出的 La/Th-Hf 物源属性判别图解,样品投点绝大多数位于长英质物源区,且集中于上地壳周围(图 9),只有一个船厂剖面样品落入长英质物源与被动大陆物源混合区,指示该样品中存在古老沉积物的信息.La/Th-Hf 物源分析的结果同样显示灵山岛莱阳群粉砂岩物源主要来自酸性火成岩区,有少部分古老沉积物成分加入.

Eu 异常可以作为反映体系内的地球化学状态重要指标,并可作为区分物质来源的重要参数,如:

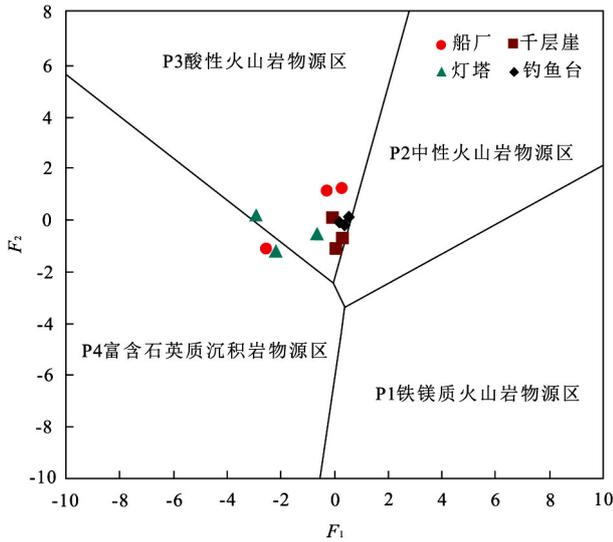


图 8 主量元素源区判别

Fig.8 Major element provenance discriminant plot
 $F_1 = (-1.773\text{TiO}_2) + (0.607\text{Al}_2\text{O}_3) + (0.760\text{Fe}_2\text{O}_3^T) + (-1.500\text{MgO}) + (0.616\text{CaO}) + (0.509\text{Na}_2\text{O}) + (-1.224\text{K}_2\text{O}) + (-9.090)$;
 $F_2 = (0.445\text{TiO}_2) + (0.070\text{Al}_2\text{O}_3) + (-0.250\text{Fe}_2\text{O}_3^T) + (-1.142\text{MgO}) + (0.438\text{CaO}) + (1.475\text{Na}_2\text{O}) + (1.426\text{K}_2\text{O}) + (-6.861)$;
 底图据 Roser and Korsch(1988)

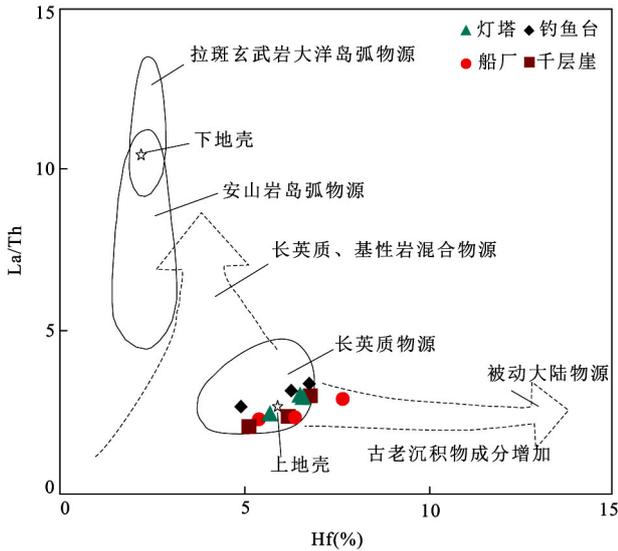


图 9 灵山岛莱阳群粉砂岩 La/Th-Hf 图解

Fig.9 La/Th-Hf plot for the provenance of the siltstone from Laiyang Group in Lingshan
 修改自 Floyd and Leveridge(1987)

大多数花岗岩和长英质变质岩以及来自大陆源区的沉积岩等存在明显 Eu 负异常(赵梦等,2013;田洋等,2015).灵山岛莱阳群粉砂岩的 $\delta\text{Eu} = 0.61 \sim 0.80$,均值为 0.70,显示中等负异常,记录了源岩的 Eu 亏损.表明它们的源岩主要为长英质岩石.稀土

元素在各种地质作用中具有良好的稳定性(Bhatia, 1985;杨江海等,2008),沉积物能够很好的继承源区岩石的 REE 特征,因而比较适合用来判断源区性质(Bhatia,1983;Gromet *et al.*,1984).本次研究的样品具有较高的 LREE/HREE 比值,同样表明其源岩主要为长英质岩石.La/Sc、Co/Th 比值能够有效地反映源区平均成分,可作为区分铁镁质—长英质物质的指标(Taylor and McLennan,1985;和政军等,2003;Wang *et al.*,2013).在 Co/Th-La/Sc 图解中(图 10),粉砂岩样品的 La/Sc 分布于 3.4~4.5,Co/Th 分布于 0.69~1.99,在 Co/Th-La/Sc 图中投点集中于长英质火山岩和花岗岩之间.同样也说明了源岩主要为长英质岩石.

3.3 源岩构造背景

前人广泛应用沉积岩的地球化学成分来对沉积盆地的构造背景进行判别(Neubauer and Mader, 2004; Yan *et al.*, 2006; 宋春彦等, 2013; Wu and Fu, 2014).然而碎屑岩的组分及地球化学特征具有源区构造背景的继承性,碎屑岩的地球化学特征所反映的构造背景不能代表碎屑岩形成时的构造环境,其揭示的是碎屑岩源岩形成时的构造背景(Li *et al.*, 2006; 李双应等, 2008).

3.3.1 主量元素与构造背景 把灵山岛莱阳群粉砂岩与澳大利亚不同构造背景的显生宙碎屑岩进行对比, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 图解 (Maynard *et al.*, 1982)显示,所有点均投到 A1 区(图 11a),说明灵山岛莱阳群粉砂岩的源岩形成于具长英质源区

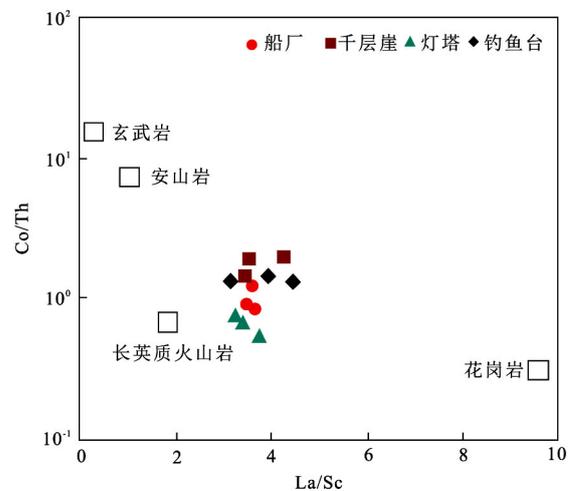


图 10 灵山岛莱阳群粉砂岩 Co/Th-La/Sc 图解

Fig.10 Co/Th-La/Sc plot for the provenance of the siltstone from Laiyang Group in Lingshan island
 修改自 Gu *et al.*(2002)

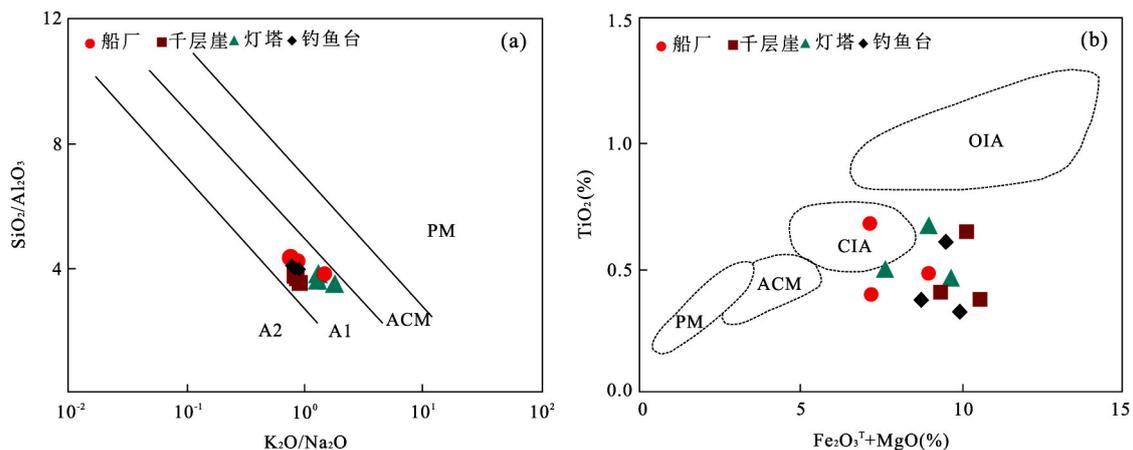


图 11 主量元素构造环境判别图解

Fig.11 Major elements discrimination diagram to indicate the tectonic setting

ACM.活动大陆边缘;PM.被动大陆边缘;CIA.大陆岛弧;OIA.大洋岛弧;A1.具长英质源区演化弧;A2.源区为玄武质和安山质的弧;图 a 据 Maynard *et al.*(1982);图 b 据 Bhatia(1983)

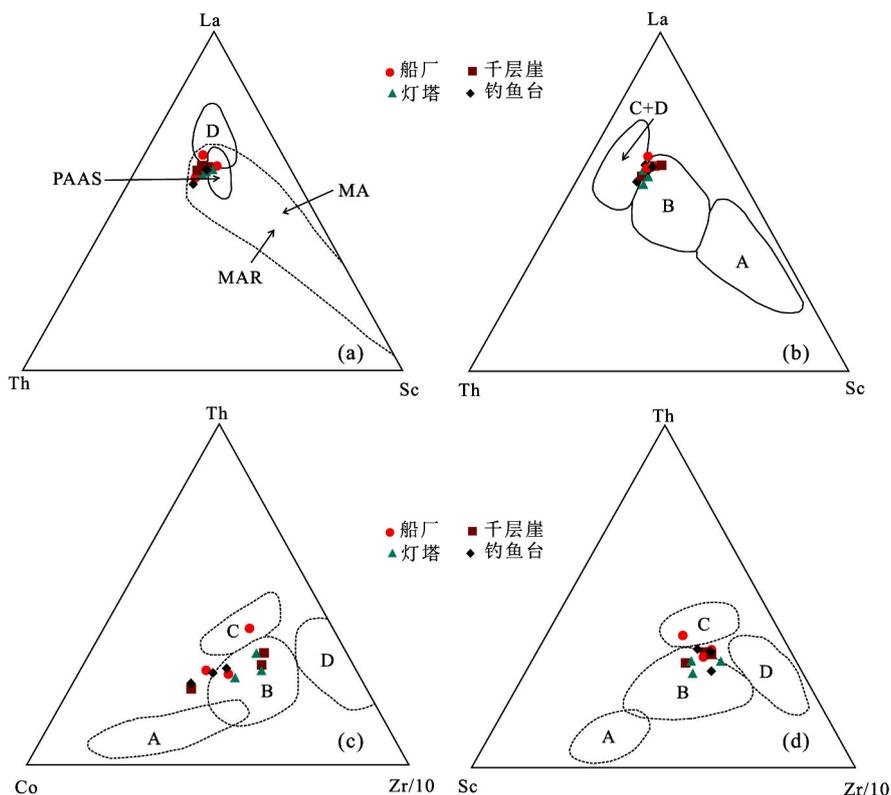


图 12 灵山岛莱阳群粉砂岩源岩构造背景判别图

Fig.12 Trace element plots of siltstones from Laiyang Group in Lingshan island for tectonic discrimination

PAAS.后台古代澳大利亚页岩;MA.理想安山岩;MAR.岩浆弧;A.大洋岛弧;B.大陆岛弧;C.活动大陆边缘;D.被动大陆边缘;图 a 据 Girty *et al.*(1993);图 b~d 据 Bhatia and Crook(1986)

演化弧的构造背景.图 11b 显示,样品分布于大陆岛弧周围,说明灵山岛莱阳群粉砂岩源岩的构造环境为大陆岛弧.

3.3.2 微量元素与构造背景 La、Th、Zr 为强不相

容元素,Sc、Co 为强相容元素,且这几种微量元素在天然水体中很难溶解,风化搬运和沉积成岩作用对其影响很小,能够很好的反映源区的地球化学性质,可以根据他们的含量及比值对物源区特征及构造背

景进行判别 (Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; Girty *et al.*, 1993; 廖婉琳等, 2015). Bhatia and Crook (1986) 及 Girty *et al.* (1993) 所建立的一系列 La/Th-Co/Sc/Th-Sc/Zr 图解可以清晰地区分大洋岛弧、大陆岛弧、活动大陆边缘及被动大陆边缘 4 种构造环境. 本次研究利用 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10 图解对灵山岛莱阳群粉砂岩进行了投图分析 (图 12). 投点结果显示, 在图 12a 中可以发现投点集中, 主要落入大陆岛弧区域, 有小部分落入大陆岛弧与大陆边缘交界处. 在图 12b 中, 所有样品均集中于活动大陆边缘与大陆岛弧交界处. 在图 12c 中, 处一个样品落入活动大陆边缘区域, 其余样品均分布于大陆岛弧周围. 在图 12d 中, 同样只有一个样品落入了活动大陆边缘区域, 其余样品均分布于大陆岛弧周围. 综上 4 个微量元素判别图解可知灵山岛粉砂岩源岩几乎全部来自大陆岛弧区域, 可能掺杂了很小部分的活动大陆边缘的物质.

3.3.3 稀土元素与构造背景 Bhatia (1985) 和 Bhatia and Crook (1986) 提出的 REE 参数比较敏感的揭示了不同构造背景下沉积盆地的特征. 通过与大洋岛弧、大陆岛弧、安第斯型陆缘、被动陆缘的相关 REE 参数对比 (表 3), 灵山岛粉砂岩的 La、Ce、 Σ REE 接近被动大陆边缘, LREE/HREE 具有活动大陆边缘特征, δ Eu、La/Yb、(La/Yb)_N 最具大陆岛弧特征. 考虑到被动大陆边缘的物源可以包括较多的大陆岛弧的地球化学信息 (柏道远等, 2007), 因此, REE 特征值反映了灵山岛粉砂岩的源岩构造背景为大陆岛弧及活动大陆边缘, 对应的物源来自切割的岩浆弧与隆升的基底. 该结论与由主量元素、微量元素得出的结论一致.

3.4 统计分析方法在物源区判别中的应用

数理统计中的判别分析是根据观测到的样品的

若干数量特征对样品进行归类, 判断其属性的预测的一种多元统计分析方法 (何晓群, 2008). 其基本原理大致为: 建立判别函数, 给出判别准则, 最后将待判样品带入判别函数进行判别. 依据建立判别函数方法的不同, 分为距离判别与 Bayes 判别. Bayes 判别法又可归为两类: 最大后验概率法与最小误判损失法. 还有一种先对样品进行投影后采用距离判别的方法, 即 Fisher 判别法, 这 3 种方法是判别分析常采用的方法 (任志娟, 2006; 张文彤, 2006; 陈希慎和曹慧珍, 2008).

REE 元素有从源区经过风化、搬运、沉积、成岩过程中几乎不会发生改变的特性, 因而沉积岩中的 REE 特征保存着源区的 REE 组成特征, 统计学原理上可以用来进行归类分析, 以 14 个 REE 元素可以建立 14 个变量的判别标准. 根据前人的认识 (吕洪波等, 2013; Wang *et al.*, 2014), 灵山岛物源可能来自胶北隆起、苏鲁造山带以及扬子板块. 为了判别分析具有更高的置信度, 笔者搜集了灵山岛周边自古元古代 TTG 岩系至中生代岩浆岩的 8 个地质体 188 套 REE 数据, 其中胶南群收集 29 套数据, 取样地点为青岛仰口、诸城桃行、日照岚山, 岩性包括片麻岩、糜棱岩、榴辉岩、变辉长岩、榴辉岩、花岗片麻岩 (胡建等, 2009; 李敏, 2011; 朱学强等, 2013); 荆山群搜集 50 套数据, 取样地点为海阳所、荣成, 岩性包括片麻岩、榴辉岩、花岗片麻岩 (宋明春等, 1995; 薛怀民等, 2006; 刘利双等, 2015); 粉子山群收集 7 套数据, 取样地点为莱州、莱西、禄格庄, 岩性包括副片麻岩、斜长角闪岩、混合岩、大理岩 (Tang *et al.*, 2006, 2007); 海州群搜集 41 套数据, 取样地点为白虎山、红土山、青龙山、千里岩、连云港、海州, 岩性包括片岩、片麻岩榴辉岩、花岗片麻岩 (李敏, 2011; Zhou *et al.*, 2012; 陈伊翔, 2013); 中生代岩浆岩搜

表 3 灵山岛粉砂岩与不同构造环境砂岩稀土元素特征参数的对比

Table 3 Comparison REE characteristics of siltstones in Lingshan island with sandstones in different tectonic settings

构造环境	大洋岛弧	大陆岛弧	安第斯型大陆边缘	被动大陆边缘	灵山岛粉砂岩
物源类型	未切割的岩浆弧 (10^{-6})	切割岩浆弧 (10^{-6})	隆升的基底 (10^{-6})	克拉通内部构造高地 (10^{-6})	平均值 (10^{-6})
La	8±1.7	27±4.5	37	39	43.31
Ce	19±3.7	59±8.2	78	85	84.26
δ Eu	1.04±0.11	0.79±0.1	0.6	0.56	0.70
Σ REE	58±10	146±20	186	210	201.65
LREE/HREE	3.8±0.9	7.7±1.7	9.1	8.5	10.21
La/Yb	4.2±1.3	11.0±3.6	12.5	15.9	17.12
(La/Yb) _N	2.8±0.9	7.5±2.5	8.5	10.8	12.28

注: 大洋岛弧、大陆岛弧、安第斯型大陆边缘、被动大陆边缘数据据 Bhatia (1985); Bhatia and Crook (1986).

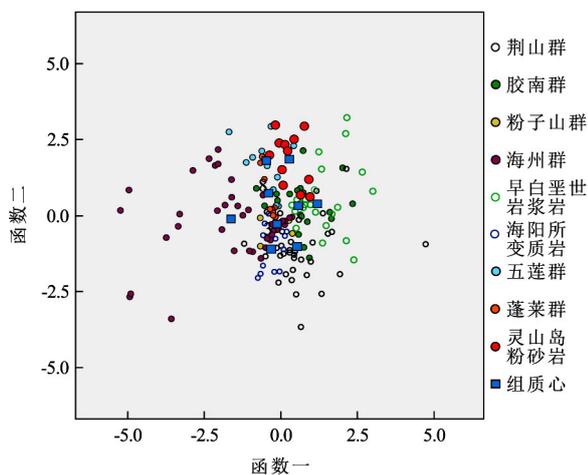


图 13 Bayes 分类判别

Fig.13 Bayes classification diagram

集 29 套数据, 取样地点为郭家岭岩体、灵山岛、崂山、胶莱盆地、玲珑岩体、昆嵛山岩体 (Zhang *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2015); TTG 岩系 12 套数据, 采样点为海阳所, 岩性为麻粒岩、角闪岩、榴辉麻粒岩 (Guo and Zhai, 2002); 五莲群搜集 11 套数据, 采样点为日照五莲, 岩性为糜棱状花岗岩、片麻状花岗岩 (Huang *et al.*, 2006); 蓬莱群搜集 7 套数据, 取样地点为栖霞, 岩性为片岩、板岩、石英砂岩 (Li *et al.*, 2007). 样本总体的岩性涵盖变质岩、岩浆岩, 空间上覆盖了扬子板块北缘—苏鲁地体—胶北隆起。

由以上分析可知, 通过 REE 进行统计分析的样本总体足够大, 利用 REE 的数理统计方法追溯沉积岩的物源区在地质概念和数学概念上是可行的. 因此, 本次研究尝试利用数理统计中的 Bayes 判别方法来更加精确追溯物源区。

应用数理统计软件 SPSS (statistical product and solutions) 可以更加方便的处理该问题, 通过 SPSS 中 Discriminant 功能, 使用 Bayes 判别作为标准, 经过操作可以得到 8 个源区的判别函数系数 (内部资料), 如表 4 所示, 根据判别系数可以写出 Bayes 判别函数的具体形式如下式所示:

$$f(\text{待判样品})_{\text{荆山群}} = 0.055\text{La} + 0.071\text{Ce} + (-1.854)\text{Pr} + \dots + (-2.148)\text{Lu} + (-4.104);$$

$$f(\text{待判样品})_{\text{胶南群}} = 0.069\text{La} + 0.040\text{Ce} + (-0.324)\text{Pr} + \dots + 2.083\text{Lu} + (-5.124);$$

以此类推, 计算 12×14 矩阵与 14×8 矩阵相乘的结果, 得出的实测样品的 Bayes 判别系数如表 5 所示, 利用 Bayes 判别系数可以直接进行样品的归类判别, 最大的一个值对应的分组代表判别分组. 利用

SPSS 软件, 在经过统计分析的基础上, 可以做出 Bayes 分类判别图 (图 13), 该图可以直观的给出各组组质心, 各组分布范围. 图 13 表明各组之间的区分度较大, 因而得出的归类判别结果是可信的. 灵山岛样品较为集中的分布于 9 号组质心周围, 且灵山岛组组质心距离 3 号组质心 (粉子山群)、4 号组质心 (海州群)、6 号组质心 (海阳所变质岩) 较远. 该分布特征与通过计算所得的结果一致。

由计算可知, DYT-1、DYT-2、DT-1 这 3 个样品最有可能的物源区为胶南群, DYT-3、QYC-1、QYC-2、QYC-3、DT-2、CC-1、CC-3 这 7 个样品最可能的物源区为蓬莱群, DT-5 最有可能的物源区为五莲群, CC-2 最有可能的物源区为荆山群. 灵山岛样品物源主要来源为: 胶南群与蓬莱群, 而与粉子山群、海州群, 早白垩世岩浆岩关系不密切。

3.5 古环境分析

地球化学特征对于反演沉积环境特征具有重要意义 (周刚等, 2012), 伴随岩石地球化学分析手段的发展, 利用沉积岩在沉积—成岩过程中常量、微量及稀土元素的迁移、富集规律来分析古沉积环境已成为重要的研究手段. 本次研究中通过多种地化指标的综合运用, 对沉积环境氧化还原状态、沉积介质的古盐度、古气候进行了探讨。

3.5.1 沉积环境氧化还原状态的地球化学示踪

Ce_{anom} 指数可作为判别古水介质氧化还原状态的重要指标, 在水体缺氧还原环境中, Ce 富集, $Ce_{\text{anom}} > -0.1$; 在水体氧化环境中, Ce 亏损, $Ce_{\text{anom}} < -0.1$ (Raiswell *et al.*, 1988; 王欣欣等, 2014). 灵山岛粉砂岩样品 Ce_{anom} 值为 $-0.08 \sim -0.01$, 平均 -0.03 (表 2), 均大于 -0.1 , 指示其沉积时水体呈缺氧的还原环境. $V/(V+Ni)$ 值同样可以有效的揭示沉积水体的氧化还原状态, 一般以 $V/(V+Ni) > 0.46$ 代表还原环境, $V/(V+Ni) < 0.46$ 代表氧化环境 (Hatck and Leventhal, 1992). 粉砂岩 $V/(V+Ni)$ 值为 $0.51 \sim 0.84$, 平均 0.71 , 大于 0.46 , 同样说明莱阳期沉积水体为还原环境. 影响 Fe 离子价态的因素较多, 如 Eh 、 ph 值等, 使得利用 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值判别沉积环境氧化还原状态的可信度降低, 但仍可把 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值可作为辅助指标进行判别分析 (邱海鸥等, 2010; 熊小辉和肖加飞, 2011), 研究区样品的 Fe^{2+}/Fe^{3+} 值为 $1.37 \sim 5.97$, 平均为 2.53 , 大于 1 , 说明莱阳期沉积环境为还原环境。

各地球化学指标均反映莱阳期沉积水体环境为还原环境, 且灵山岛莱阳群油积岩中存在大量原生

表 4 Bayes 判别函数的标准化系数

Table 4 Standardized coefficients of Bayes discriminant function

	荆山群	胶南群	粉子山群	海州群	中生代岩浆岩	TTG 岩系	五莲群	蓬莱群
La	0.055	0.069	0.078	0.024	0.014	0.042	0.082	-0.003
Ce	0.071	0.040	0.023	-0.022	0.070	0.088	-0.045	-0.016
Pr	-1.854	-0.324	0.562	0.886	0.203	-1.217	2.049	1.059
Nd	0.362	-0.053	-0.166	-0.276	-0.130	0.139	-0.568	-0.325
Sm	-1.646	-1.691	-2.095	0.178	-1.003	-2.895	0.589	0.311
Eu	0.988	1.341	3.738	0.929	2.684	2.724	0.548	0.416
Gd	1.699	2.121	0.073	-0.354	0.265	1.597	-0.475	0.186
Tb	3.131	6.572	0.637	1.209	0.973	5.615	3.014	4.752
Dy	-0.734	3.624	2.542	1.649	1.715	4.939	4.972	3.297
Ho	-9.315	-23.509	-5.786	-6.086	-4.370	-16.735	-18.924	-20.573
Er	4.830	-2.937	-3.630	-3.069	-2.637	-4.343	-8.198	-4.416
Tm	13.327	27.889	29.701	11.097	25.040	27.184	27.649	26.890
Yb	-3.148	-1.168	1.608	2.561	-0.055	-0.566	2.885	1.530
Lu	-2.148	2.083	-18.650	-2.750	-14.854	-4.873	-1.694	-1.339
常数	-4.104	-5.124	-4.088	-4.824	-5.104	-6.668	-5.868	-3.498

表 5 Bayes 判别系数

Table 5 Bayes discriminant coefficients

	荆山群	胶南群	粉子山群	海州群	中生代岩浆岩	TTG 岩系	五莲群	蓬莱群
DYT-1	-3.59	-3.31	-5.21	-6.80	-5.37	-8.02	-6.73	-3.38
DYT-2	-3.24	-1.47	-5.88	-6.30	-5.23	-6.51	-5.49	-1.83
DYT-3	-7.26	-5.48	-5.63	-5.71	-6.41	-10.98	-5.02	-2.51
QCY-1	-6.17	-5.00	-5.93	-6.33	-6.40	-10.36	-5.72	-2.74
QCY-2	-4.57	-1.69	-3.56	-4.91	-4.88	-7.06	-3.35	-0.54
QCY-3	-6.04	-2.90	-4.58	-4.65	-5.20	-10.19	-1.79	-0.22
DT-1	-1.18	3.08	0.12	-0.23	0.01	-0.94	2.62	3.00
DT-2	-2.24	1.56	-0.35	-0.81	-0.89	-2.43	1.92	2.24
DT-5	-1.93	2.22	-0.49	0.17	-0.10	-3.53	4.08	3.28
CC-1	-1.82	-0.84	-3.68	-2.42	-2.58	-4.94	-0.95	-0.29
CC-2	0.28	1.95	-1.50	-1.93	-1.10	-1.37	-0.29	0.20
CC-3	-1.82	-0.84	-3.68	-2.42	-2.58	-4.94	-0.95	-0.29

黄铁矿,更进一步印证了沉积环境为还原环境。

3.5.2 沉积水体古盐度分析 水体中硼(B)含量与水体盐度存在线性关系,且 B 元素对沉积介质盐度反映最为敏锐,因而可以根据沉积物 B 含量推断沉积水体的古盐度.淡水相沉积岩 B 含量小于 80×10^{-6} ,海陆过渡相沉积岩介于 $80 \times 10^{-6} \sim 120 \times 10^{-6}$,海相沉积岩 B 含量大于 100×10^{-6} (Degens *et al.*, 1957). 本次测试样品的 B 含量为 $103 \times 10^{-6} \sim 199 \times 10^{-6}$,平均含量为 149×10^{-6} ,均大于 100×10^{-6} .指示灵山岛莱阳期沉积环境为海相环境. B 元素富集于海相沉积物中,而 Ga 元素则富集于淡水沉积物中,因而沉积物的 B/Ga 比值也是可靠的古水体盐度判别指标.高盐度的海相或咸水环境 $B/Ga > 4.5$;海陆过渡相或半咸水沉积环境 B/Ga 值在 $3.3 \sim 4.5$ 之间;低盐度的淡水环境 $B/Ga < 3.3$

(吴少波, 2001; 李福来等, 2009). 灵山岛粉砂岩的 B/Ga 值介于 $4.52 \sim 11.08$,平均为 6.93,均大于 4.5,同样指示灵山岛粉砂岩沉积环境为海相环境。

$100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值也可作为判定沉积水体盐度的指标(张士三, 1988),淡水沉积环境 $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1$;为海陆过渡环境 $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值介于 $1 \sim 10$;海水环境 $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 $10 \sim 100$.样品的 $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值为 $16.43 \sim 35.99$,平均 27.14,均大于 10,表明其沉积环境为海水环境. $\text{CaO}/(\text{Fe}+\text{CaO})$ 值也是反映海水盐度的重要指标(雷卞军等, 2002),该值小于 0.2 为低盐度, $0.2 \sim 0.5$ 为中等盐度,大于 0.5 为高盐度.测试样品 $\text{CaO}/(\text{Fe}+\text{CaO})$ 值为 $0.25 \sim 0.65$,平均 0.53,绝大多数数值均大于 0.5.表明海水的盐度为中高盐度。

灵山岛粉砂岩的 Th 含量为 $13.72 \times 10^{-6} \sim$

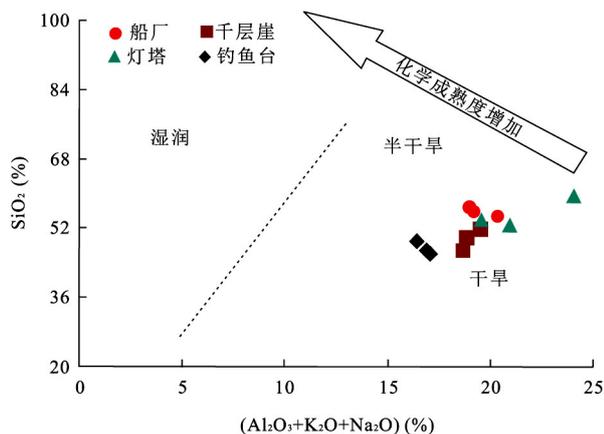


图 14 SiO_2 -($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 古气候判别图

Fig.14 Bivariate SiO_2 wt.% versus ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) wt.% palaeoclimate discrimination diagram
底图据 Suttner and Dutta(1986)

22.14×10^{-6} (平均为 16.02×10^{-6}); U 的含量为 $3.21 \times 10^{-6} \sim 8.03 \times 10^{-6}$ (平均为 5.66×10^{-6}), Th/U 值为 1.92~6.90 (平均为 2.83). 现在多以 Th/U=7 为界, 小于 7 为海相沉积, 大于 7 为陆相淡水沉积 (邓平, 1993; 陶树等, 2009). 以此标准划分, 灵山岛莱阳群粉砂岩属于海相沉积.

通过对 B、B/Ga、 $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Th/U 等地球化学特征指标的分析, 笔者得出的结论一致, 均显示灵山岛莱阳期沉积环境为海相环境.

3.5.3 古气候的地球化学分析 Suttner and Dutta (1986) 提出的 SiO_2 vs ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 双变量图可以用来限定碎屑岩沉积时的气候条件. 如图 14 所示, 灵山岛粉砂岩投点均位于干旱气候区域. 特征元素的比值包含重要的古气候信息 (贾艳艳等, 2015), Lerwan and Maynard (1982) 提出 Sr/Cu 值介于 1.3~5.0 时为温湿气候, 大于 5.0 时为干热气候. 也有学者 (刘刚和周东升, 2007; 谢尚克等, 2010) 将温湿气候的比值范围定在 1~10, 研究区粉砂岩的 Sr/Cu 值为 10.08~32.48, 均大于 10, 表明莱阳期为干热气候.

4 结论

(1) 灵山岛莱阳群粉砂岩的 SiO_2 含量较低, Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 含量接近 UCC, MgO、CaO 含量高于 UCC, 主量元素成分显示灵山岛粉砂岩为杂砂岩与岩屑砂岩. 样品富大离子亲石元素、轻稀土元素, 亏损重稀土元素, 高场强元素接近 UCC 值. 样品

成分变异指数 (ICV) 较高, 说明其为初次旋回沉积物, 未受到再沉积作用的影响. 反映源区风化程度的参数 (CIA、Th/U、Ga/Rb) 均较低, 说明源区风化作用弱.

(2) 通过对粉砂岩 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值、 F_1 - F_2 物源判别, 微量元素特征比, REE 特征, La/Th-Hf 图解投点, Co/Th-La/Sc 图解投点的分析, 反映源岩主要为长英质物质, 存在有少部分古老沉积物的加入.

(3) 样品的主量和微量元素判别图解及稀土元素特征值表明灵山岛粉砂岩的源岩形成背景主要为大陆岛弧, 其次为活动大陆边缘. 本次研究尝试对 REE 元素进行统计归类, 借用 SPSS 软件进行判别分析, 结果指示灵山岛粉砂岩的物源区最可能为胶南群及蓬莱群地层.

(4) 通过对 Ce_{anom} 指数、 $V/(V + \text{Ni})$ 值、 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 值等特征值的讨论, 表明灵山岛粉砂岩沉积时的环境为还原环境. B 元素含量、B/Ga 比值、 $100\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值等特征指标显示灵山岛粉砂岩沉积环境为海相咸水环境. SiO_2 -($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 图解、Sr/Cu 值指示莱阳期为干热气候.

References

- Armstrong-Altrin, J. S., Machain-Castillo, M. L., Rosales-Hoz, L., et al., 2015. Provenance and Depositional History of Continental Slope Sediments in the Southwestern Gulf of Mexico Unraveled by Geochemical Analysis. *Continental Shelf Research*, 95: 15–26. doi: 10.1016/j.csr.2015.01.003
- Armstrong-Altrin, J. S., Nagarajan, R., Madhavaraju, J., et al., 2013. Geochemistry of the Jurassic and Upper Cretaceous Shales from the Molango Region, Hidalgo, Eastern Mexico: Implications of Source-Area Weathering, Provenance, and Tectonic Setting. *Comptes Rendus Geoscience*, 345: 185–202. doi: 10.1016/j.crte.2013.03.004
- Bai, D. Y., Zhou, L., Wang, X. H., et al., 2007. Geochemistry of Nanhua-Cambrian Sandstone in Southeastern Hunan, and Its Constraints on Neoproterozoic-Early Paleozoic Tectonic Setting of South China. *Acta Geological Sinica*, 81(6): 755–771 (in Chinese with English abstract).
- Bhatia, M. R., 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611–627. doi: 10.1086/628815
- Bhatia, M. R., 1985. Rare Earth Element Geochemistry of Australian Paleozoic Graywackes and Mudrocks: Provenance and Tectonic Control. *Sedimentary Geology*, 45(1–2): 97–113. doi: 10.1016/0037-0738(85)90025-9

- 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. doi: 10.1007/BF00375292
- Cao, J., Wu, M., Chen, Y., et al., 2012. Trace and Rare Earth Element Geochemistry of Jurassic Mudstones in the Northern Qaidam Basin, Northwest China. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 72(3): 245–252. doi: 10.1016/j.chemer.2011.12.002
- Chakrabarti, G., Shome, D., Bauluz, B., et al., 2009. Provenance and Weathering History of Mesoproterozoic Clastic Sedimentary Rocks from the Basal Gulcheru Formation, Cuddapah Basin, India. *Journal of the Geological Society of India*, 74: 119–130. doi: 10.1007/s12594-009-0096-7
- Chen, X. Z., Cao, H. Z., 2008. Discriminant Analysis and Application of SPSS. *Science Technology and Engineering*, 8(13): 3567–3574 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. X., 2013. Crustal Anatexis during Continental Collision: Evidence from Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Sulu Orogen (Dissertation). University of Science and Technology of China, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940. doi: 10.1016/0016-7037(95)00185-9
- Cullers, R. L., 1995. The Controls on the Major- and Trace-Element Evolution of Shales, Siltstones and Sandstones of Ordovician to Tertiary Age in the Wet Mountains Region, Colorado, U. S. A.. *Chemical Geology*, 123(1): 107–131. doi: 10.1016/0009-2541(95)00050-V
- Degens, E. T., Williams, E. G., Keith, M. L., et al., 1957. Environmental Studies of Carboniferous Sediments Part I: Geochemical Criteria for Different Marine from Freshwater Shales. *AAPG*, 41(11): 2427–2455.
- Deng, P., 1993. The Application of Trace Amount of Elements in the Exploration of Oil and Gas. *Petroleum Exploration and Development*, 20(1): 27–32 (in Chinese with English abstract).
- Dong, X. P., Lu, H. B., Zhang, X., et al., 2013. Stage Analysis on the Soft-Sediment Deformation in the Early Cretaceous Flysch, Lingshan Island, Shandong Province. *Geological Review*, 59(6): 1060–1067 (in Chinese with English abstract).
- Dong, X. P., Lu, H. B., Zhang, X., et al., 2014. Slump Scarp Outcrop in Early Cretaceous Flysch, North of Lingshan Island, Qingdao, Shandong. *Geological Review*, 64(4): 771–779 (in Chinese with English abstract).
- Etemad-Saeed, N., Hosseini-Barzi, M., Armstrong-Altrin, J. S., 2011. Petrography and Geochemistry of Clastic Sedimentary Rocks as Evidences for Provenance of the Lower Cambrian Lalun Formation, Posht-E-Badam Block, Central Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 61(2): 142–159. doi: 10.1016/j.jafrearsci.2011.06.003
- Fedo, C. M., Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23(10): 921–924. doi: 10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2
- 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*, 144(4): 1–542.
- Forth Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, 2003. Regional Geology of Shandong Province. Shandong Cartographic Publishing House, Jinan (in Chinese).
- Ge, Y. Z., Zhong, J. H., Fang, X. F., et al., 2015. Study on Internal Sedimentary and Structural Features of the Slump Body in Lingshan Island, Qingdao, Shandong. *Geological Review*, 61(3): 634–644 (in Chinese with English abstract). doi: 10.16509/j.georeview.2015.03.016
- Girty, G. H., Hanson, A. D., Yoshinobu, A. S., et al., 1993. Provenance of Paleozoic Mudstones in a Contact Metamorphic Aureole Determined by Rare Earth Element, Th and Sc Analyses, Sierra Nevada, California. *Geology*, 21(4): 363–366. doi: 10.1130/0091-7613(1993)021<0363:POPMA>2.3.co;2
- Gromet, L. P., Haskin, L. A., Korotev, R. L., et al., 1984. The “North American Shale Composite”: Its Compilation, Major and Trace Element Characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(12): 2469–2482. doi: 10.1016/0016-7037(84)90298-9
- Gu, X. X., Liu, J. M., Zheng, M. H., et al., 2002. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Turbidites in Hunan, South China: Geochemical Evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393–407. doi: 10.1306/081601720393
- Guo, J. H., Zhai, M. G., 2002. Petrochemistry and Geochemistry of HP Metabasites from Haiyangsuo in Sulu UHP Belt of Eastern China. *Science China Earth Sciences*, 45(1): 21. doi: 10.1360/02yd9003

- Hatck, J.R., Leventhal, J.S., 1992. Relationship between Inferred Redox Potential of the Depositional Environmental and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone Wabaunsee County, Kansas U.S.A., *Chemical Geology*, 99(1-3): 65-82. doi:10.1016/0009-2541(92)90031-Y
- Hayashi, K., Hiroyuki, F., Heinrich, H.D., et al., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga Sedimentary Rocks from North-eastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(19): 4115-4137. doi: 10.1016/S0016-7037(97)00214-7
- He, X.Q., 2008. Multivariate Statistical Analysis. Renmin University of China Press, Beijing, (9): 105-112 (in Chinese).
- He, Z.J., Li, J.T., Mo, S.G., et al., 2003. Tectonic Setting and Provenance of Sandstones in Froeland Basin of Mohe. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1219-1226 (in Chinese).
- Hossain, H.M., Roser, B.P., Kimura, J.I., 2010. Petrography and Whole-Rock Geochemistry of the Tertiary Sylhet Succession, Northeastern Bengal Basin, Bangladesh; Provenance and Source Area Weathering. *Sedimentary Geology*, 228(3-4): 171-183. doi:10.1016/j.sedgeo.2010.04.009
- Hu, J., Qiu, J.S., Xu, X.S., et al., 2009. I- and A-Type Composite Gneissic Metagranites in Lanshan Area, Shandong Province: Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implication. *Acta Petrologica Sinica*, 25(2): 282-296 (in Chinese with English abstract).
- Huang, J., Zheng, Y.F., Zhao, Z.F., et al., 2006. Melting of Subducted Continent: Element and Isotopic Evidence for a Genetic Relationship between Neoterozoic and Mesozoic Granitoids in Sulu Orogen. *Chemical Geology*, 229: 227-256. doi:10.1016/j.chemgeo.2005.11.007
- Jia, Y.Y., Xing, X.J., Sun, G.Q., et al., 2015. The Paleogene-Neogene Paleoclimate Evolution in Western Sector of Northern Margin of Qaidam Basin. *Earth Science*, 40(12): 1955-1967 (in Chinese with English abstract).
- Johnsson, M.J., 1993. The System Controlling the Composition of Clastic Sediments. *Geological Society of America Special Papers*, 284: 1-20. doi:10.1130/SPE284-p1
- Lei, B.J., Que, H.P., Hu, N., 2002. Geochemistry and Sedimentary Environments of the Palaeozoic Siliceous Rocks in Western Hubei. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 22(2): 71-79 (in Chinese with English abstract).
- Li, F.L., Qu, X.Y., Liu, L., et al., 2009. Sedimentary Environment on Upper Permian Linxi Group in Inner Mongolia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(2): 265-272 (in Chinese with English abstract). doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2009.02.004
- Li, J., Jin, A.W., Hou, G.T., et al., 2015. Study on Early Cretaceous Stress Fields and Geological Significance of Lingshan Island. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 51(6): 1069-1077 (in Chinese with English abstract).
- Li, M., 2011. The Basement Features and Dynamic Evolution Mechanism of the Qianliyan Uplift, South Yellow Sea (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Y., Li, R.W., Meng, Q.R., Wang, D.X., et al., 2006. Radiometric Dating of Sediments Derived from Metamorphic Rocks of the Dabie Orogenic Belt in the Jurassic and Early Cretaceous. *Progress in Nature Science*, 16(1): 194-202. doi:10.1080/10020070612330084
- Li, S.Y., Meng, Q.R., Li, R.W., et al., 2008. Characteristics of Material Components from the Lower Cretaceous Laiyang Formation in Jiaolai Basin, Shandong Province, Eastern China and Constraints to the Provenance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2395-2406 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.H., Chen, F., Guo, J.H., Li, Q.L., et al., 2007. South China Provenance of the Lower-Grade Penglai Group North of the Sulu UHP Orogenic Belt, Eastern China: Evidence from Detrital Zircon Ages and Nd-Hf Isotopic Composition. *Geochemical Journal*, 41(1): 29-45.
- Liao, W.L., Xiao, L., Zhang, L., et al., 2015. Provenance and Tectonic Settings of Early Carboniferous Sedimentary Strata in Western Juggar, Xinjiang. *Earth Science*, 40(3): 485-503 (in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2015.039
- Liu, G., Zhou, D.S., 2007. Application of Microelements Analysis in Identifying Sedimentary Environment. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(3): 307-314 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L.S., Liu, F.L., Liu, P.H., et al., 2015. Geochemical Characteristics and Metamorphic Evolution of Metamafic Rocks from Haiyangsuo Area, Sulu Ultra-Pressure Metamorphic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 31(10): 2863-2888 (in Chinese with English abstract).
- Long, X., Yuan, C., Sun, M., et al., 2012. Geochemistry and Nd Isotopic Composition of the Early Paleozoic Flysch Sequence in the Chinese Altai, Central Asia: Evidence for a Northward-Derived Maifc Souce and Insight into Nd Model Ages in Accretionary Orogen. *Gondwana Research*, 22(2): 554-566. doi:10.1016/j.gr.2011.04.009
- Lü, H.B., Zhang, H.C., Wang, J., 2013. The Discovery of Huge Slide Block in Mesozoic Turbidite at Jiaonan, Shandong. *Geological Review*, 58(1): 80-81 (in Chinese).

- Lü, H. B., Wang, J., Zhang, H. C., 2011. Discovery of the Late Mesozoic Slump Beds in Lingshan Island, Shandong, and a Pilot Research on the Regional Tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 85 (6): 938 – 946 (in Chinese with English abstract).
- Lü, H. B., Zhang, H. C., Wang, J., 2013. Early Cretaceous Flysch is not Deposits of Intracratonic Delta—Answer Professor Zhong. *Geological Review*, 59(1): 11–14 (in Chinese).
- Luan, G. Z., Li, A. L., Wang, J., et al., 2010. The Geological Origin Division of the Main Sea Island in Qingdao Area and Environment Analysis. *Periodical of Ocean University of China*, 40 (8): 111 – 116 (in Chinese with English abstract).
- Maynard, J. B., Valloni, R., Yu, H. S., 1982. Composition of Modern Deep-Sea Sands from Arc-Related Basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 10(1): 551–561, doi:10.1144/GSL.SP.1982.010.01.36
- McLennan, S. M., Hemming, S., Mcdaniel, D. K., et al., 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance, and Tectonics. Geological Society of America Special Papers, 21–40, doi:10.1130/SPE284–p21
- Nebitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299 (5885): 715 – 717, doi:10.1038/299715a0
- Nebitt, H. W., Young, G. M., 1984. Prediction of some Weathering Trends of Plutonic and Volcanic Rocks Based on Thermodynamic and Kinetic Considerations. *Geochimica et Cosmochim Acta*, 48 (7): 1523 – 1534, doi:10.1016/0016-7037(84)90408-3
- Neubauer, F., Mader, D., 2004. Provenance of Palaeozoic Sandstones from the Carnic Alps (Austria): Petrographic and Geochemical Indicators. *International Journal of Earth Sciences*, 93 (2): 262 – 281, doi:10.1007/s00531-004-0391-x
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., 1972. Sand and Sandstone. Springer, New York.
- Potter, P. E., 1978. Petrology and Chemistry of Modern Big River Sands. *The Journal of Geology*, 86(4): 423–449, doi:10.1086/649711
- Qiu, H. O., Sun, W., Tang, Z. Y., et al., 2010. Geochemical Characteristics of the Oma Section in the Tibetan Gyirong Basin and Its Implications on Environment Change. *Earth Science*, 35 (5): 789 – 802 (in Chinese with English abstract).
- Raiswell, R., Buckley, F., Bern, R. A., 1988. Degree of Pyritization of Iron as a Paleoenvironmental Indicator of Bottom-Water Oxygenation. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 58(5): 812–819.
- Ren, Z. J., 2006. The Correct Use of Discriminant Analysis Method by SPSS. *Statistics and Decision*, 3: 157 (in Chinese).
- Roser, B. P., Cooper, R. A., Nathan, S., et al., 1996. Reconnaissance Sandstone Geochemistry, Provenance, and Tectonic Setting of the Lower Paleozoic Terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand. *Journal of Geology and Geophysics*, 39 (1): 1 – 16, doi:10.1080/00288306.1996.9514690
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67(1–2): 119 – 139, doi:10.1016/0009-2541(88)90010-1
- Roy, D. K., Roser, B. P., 2013. Climatic Control on the Composition of Carboniferous-Permian Gondwana Sediments, Khalaspir Basin, Bangladesh. *Gondwana Research*, 23 (3): 1163–1171, doi:10.1016/j.gr.2012.07.006
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3 (1): 1 – 23, doi:10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
- Saxena, A., Pandit, M. K., 2012. Geochemistry of Hindoli Group Metasediments, SE Aravalli Craton, NW India: Implications for Palaeoweathering and Provenance. *Journal of the Geological Society of India*, 79 (3): 267–278, doi:10.1007/s12594-012-0045-8
- Shao, Z. F., Zhong, J. H., Li, Y., et al., 2014a. Characteristics and Sedimentary Processes of Lamina-Controlled Sand-Particle Imbricate Structure in Deposits on Lingshan Island, Qingdao. *Science in China (Series D)*, 44 (8): 1761–1776 (in Chinese).
- Shao, Z. F., Zhong, J. H., Li, Y., et al., 2014b. The Sedimentary Characteristics and Environment Analysis of Late Mesozoic Gravity Flows in Lingshan Island. *Geological Review*, 60 (3): 555–566 (in Chinese with English abstract).
- Song, C. Y., Wang, J., Fu, X. G., et al., 2013. Geochemical Characteristic and Signatures of the Sandstones from Zangxiahe Formation in Qiangtang Basin. *Earth Science*, 38(3): 508–518 (in Chinese with English abstract).
- Song, M. C., Wang, L. M., Wang, L. Z., et al., 1995. Ludong Rongcheng Gneiss and Its Origin. *Shandong Geology*, 11(2): 32–44 (in Chinese with English abstract).
- Suttner, L. J., Dutta, P. K., 1986. Alluvial Sandstone Composition and Paleoclimate. I. Framework Mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56 (3): 329 – 345, doi:10.1306/212F8909-2B24-11D7-8648000102C1865D
- Tao, S., Tang, D. Z., Zhou, C. W., et al., 2009. Element Geochemical Characteristics of the Lower Assemblage Hy-

- drocarbon Source Rocks in Southeast Sichuan-Central Guizhou (Chuandongnan-Qianzhogn) Region and Its Periphery Area and Their Implications to Sedimentary Environments. *Geology in China*, 36(2): 397–403 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2006. Zircon SHRIMP U-Pb Dating, C and O Isotopes for Impure Marbles from the Jiaobei Terrane in the Sulu Orogen; Implication for Tectonic Affinity. *Precambrian Research*, 144(1): 1–18. doi: 10.1016/j.precamres.2005.10.003
- Tang, J., Zheng, Y. F., Wu, Y. B., et al., 2007. Geochronology and Geochemistry of Metamorphic Rocks in the Jiaobei Terrane: Constraints on Its Tectonic Affinity in the Sulu Orogen. *Precambrian Research*, 152(1): 48–82. doi: 10.1016/j.precamres.2006.09.001
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell Press, London.
- Tian, Y., Xie, G. G., Wang, L. Z., et al., 2015. Provenance and Tectonic Settings of Triassic Xujiahe Formation in Qiyueshan Area, Southwest Hubei: Evidence from Petrology, Geochemistry and Zircon U-Pb Ages of Clastic Rocks. *Earth Science*, 40(12): 2021–2036 (in Chinese with English abstract).
- Wang, A. D., Zhou, Y. Q., Yan, H., et al., 2013. Characteristics of Soft-Sediment Deformation Structures of the Early Cretaceous in Lingshan Island of Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 15(5): 717–728 (in Chinese with English abstract).
- Wang, A. D., Zhou, Y. Q., Zhang, Z. K., et al., 2014. Characteristics and Significance of Underwater Non-Tectonic Cracks in Laiyang Group of Lingshan Island, Shandong Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 321–328 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B. Q., Wang, W., Zhou, M. F., 2013. Provenance and Tectonic Setting of the Triassic Yidun Group, the Yidun Terran, Tibet. *Geoscience Frontiers*, 4(6): 765–777. doi: 10.1016/j.gsf.2013.02.007
- Wang, J., Chang, S. C., Lu, H. B., et al., 2014. Detrital Zircon U-Pb Age Constraints on Cretaceous Sedimentary Rocks of Lingshan Island and Implications for Tectonic Evolution of Eastern Shandong, North China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 96: 27–45. doi: 10.1016/j.jseaes.2014.09.002
- Wang, J., Chang, S. C., Wang, K. L., et al., 2015. Geochronology and Geochemistry of Early Cretaceous Igneous Units from the Central Sulu Orogenic Belt; Evidence for Crustal Delamination during a Shift in the Regional Tectonic Regime. *Journal of Asian Earth Sciences*, 112: 49–59. doi: 10.1016/j.jseaes.2015.09.009
- Wang, X. X., Zheng, R. C., Yan, G. Q., et al., 2014. The Mudstone Sedimentary Environment and Provenance Analysis Based on the Geochemical Evidence of Rare Earth Elements: Take Chang 9 Oil-Bearing Layer in Longdong Area of Ordos Basin as an Example. *Natural Gas Geoscience*, 25(9): 1387–1394 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. B., 2001. Sedimentary Facies and Depositional Model of Wulabo Formation, Upper Permian Series in Bogeda Piedmont Depression, Junggar Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(3): 333–339 (in Chinese with English abstract).
- Wu, T. Y., Fu, Y. T., 2014. Cretaceous Deepwater Lacustrine Sedimentary Sequences from the Northernmost South China Block, Qingdao, China. *Journal of Earth Science*, 25(2): 241–251. doi: 10.1007/s12583-014-0418-6
- Xie, S. K., Wang, Z. J., Wang, J., et al., 2010. Trace Element Geochemistry of the Middle and Upper Ordovician Strata in the Guanyinqiao Section, Qijiang, Chongqing. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30(4): 60–65 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, X. H., Xiao, J. F., 2011. Geochemical Indicators of Sedimentary Environments—A Summary. *Earth and Environment*, 39(3): 405–413 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. J., Li, A. C., Wan, S. M., et al., 2009. Terrigenous Mineral Constrains on the Grain-Size Distribution and Geochemical Composition of Sediments in the Inner Shelf of the East China Sea. *Earth Science*, 34(4): 613–622 (in Chinese with English abstract).
- Xue, H. M., Liu, F. L., Meng, F. C., 2006. Major and Trace Element Geochemistry of Granitic Gneisses from Sulu Orogen, Eastern Shandong Peninsula: Evidence for a Neoproterozoic Active Continental Margin in the Northern Margin of the Yangtze Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1779–1790 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Z., Wang, Z. Q., Wang, T., et al., 2006. Provenance and Tectonic Setting of Clastic Deposits in the Devonian Xicheng Basin, Qinling Orogen, Central China. *Journal of Sedimentary Research*, 76(3): 557–574. doi: 10.2110/jsr.2006.046
- Yang, J. H., Du, Y. S., Xu, Y. J. Two Suits of Sandstones in the Lower Paleozoic at Jingtai, Eastern North Qinlian: Trace and Rare Earth Elements Characteristics and Tectonic Setting. *Journal of Paleogeography*, 10(4): 395–408 (in Chinese with English abstract).
- Yang, R. C., van Loon, A. J. T. V., 2016. Early Cretaceous Slumps and Turbidites with Peculiar Soft-Sediment Deformation Structures on Lingshan Island (Qingdao, Chi-

- na) Indicating a Tensional Tectonic Regime. *Journal of Asian Earth Sciences*, 129 (2016): 206 – 219. doi: 10.1016/j.jseaes.2016.08.014
- Zhang, H.C., Lü, H.B., Li, J.G., et al., 2013. The Lingshanda Formation: A New Lithostratigraphic Unit of the Early Cretaceous in Qingdao, Shandong, China. *Journal of Stratigraphy*, 37(2): 216 – 222 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., et al., 2010. Postcollisional Magmatism: Geochemical Constraints on the Petrogenesis of Mesozoic Granitoids in the Sulu Orogen, China. *Lithos*, 119(3–4): 512–536. doi: 10.1016/j.lithos.2010.08.005
- Zhang, S.S., 1988. Application and Research of Mg/Al Ratio in the Sedimentary Rocks. *Bulletin of Mineral Geochemistry*, 7(2): 112–113 (in Chinese).
- Zhang, W. T., 2006. Advanced SPSS Statistical Analysis Tutorial. Advanced Education Press, Beijing. (12): 261 – 277 (in Chinese).
- Zhao, M., Shao, L., Liang, J.S., et al., 2013. REE Character of Sediment from the Paleo-Red River and Its Implication of Provenance. *Earth Science*, 38(S1): 61 – 69 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, J.H., 2013. Is Mesozoic Sedimentary Rocks of Lingshan Island Deep Water Distal Turbidite or Intracontinental Delta Deposits? Discuss with Professor Lu. *Geological Review*, 58(6): 1180 – 1182 (in Chinese).
- Zhou, G., Zheng, R.C., Luo, P., et al., 2012. Geological Events and Their Geochemical Responses of the Permian-Triassic Boundary, Huaying, Eastern Sichuan. *Earth Science*, 37 (Suppl.1): 101 – 110 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., Zhang, Z. K., Liang, W. D., et al., 2015a. Late Mesozoic Tectono-Magmatic Activities and Prototype Basin Restoration in Eastern Shandong Province, China. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 137 – 156 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., Zhang, Z. K., Xu, H., et al., 2015b. Soft-Sediment Deformation Structures in the Sediments at Lingshan Island. *Marine Geology Frontiers*, 31(4): 42 – 54 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. Q., Wang, G., Yang, S. P., 2013. Geochemistry of the Baoshan-Taoping Eclogite in the Middle Section of Sulu Orogenic Belt. *Geology and Resources*, 22(1): 41 – 49 (in Chinese with English abstract).
- Zimmermann, U., Bahlburg, H., 2003. Provenance Analysis and Tectonic Setting of the Ordovician Clastic Deposits in the Southern Puna Basin, NW Argentina. *Sedimentology*, 50 (6): 1079 – 1104. doi: 10.1046/j.1365-3091.2003.00595.x
- ### 附中文参考文献
- 柏道远, 周亮, 王先辉, 等, 2007. 湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代—早古生代构造背景的制约. *地质学报*, 81(6): 755–771.
- 陈希倩, 曹慧珍, 2008. 判别分析与 SPSS 的使用. *科学技术与工程*, 8(13): 3567–3574.
- 陈伊翔, 2013. 大陆碰撞过程中地壳深熔作用: 苏鲁造山带超高压变质岩研究(博士学位论文). 合肥: 中国科学技术大学.
- 邓平, 1993. 微量元素在油气勘探中的应用. *石油勘探与开发*, 20(1): 27–32.
- 董晓朋, 吕洪波, 张星, 等, 2013. 山东灵山岛早白垩世复理石软沉积物变形期次解析. *地质论评*, 2013, 59(6): 1060–1067.
- 董晓朋, 吕洪波, 张星, 等, 2014. 灵山岛北端早白垩世复理石中的滑塌断崖. *地质论评*, 60(4): 771–779.
- 葛毓柱, 钟建华, 樊晓芳, 等, 2015. 山东灵山岛滑塌体内部沉积及构造特征研究. *地质论评*, 61(3): 634–644.
- 何晓群, 2008. 多元统计分析. 北京: 中国人民大学出版社, (9): 105–112.
- 和政军, 李锦铁, 莫中国, 等, 2003. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析. *中国科学(D 辑)*, 33(12): 1219–1226.
- 胡建, 邱检生, 徐夕生, 等, 2009. 山东岚山 I 型与 A 型复合片麻状变质花岗岩: 年代学, 地球化学及其构造指示意义. *岩石学报*, 25(2): 282–296.
- 贾艳艳, 邢学军, 孙国强, 等, 2015. 柴北缘西段古—新近纪古气候演化. *地球科学*, 40(12): 1955–1967.
- 雷卞军, 阙洪培, 胡宁, 等, 2002. 鄂西古生代硅质岩的地球化学特征及沉积环境. *沉积与特提斯地质*, 22(2): 71–79.
- 李福来, 曲希玉, 刘立, 等, 2009. 内蒙古东北部上二叠统林西组沉积环境. *沉积学报*, 27(2): 265–272.
- 李杰, 金爱文, 侯贵廷, 等, 2015. 灵山岛早白垩世构造应力解析及区域地质意义. *北京大学学报(自然科学版)*, 51(6): 1069–1077.
- 李敏, 2011. 南黄海千里岩隆起基底性质及动力学演化机制(硕士学位论文). 青岛: 中国海洋大学.
- 李双应, 孟庆任, 李任伟, 等, 2008. 山东胶莱盆地下白垩统莱阳组物质组分特征及其对源区的制约. *岩石学报*, 24(10): 2395–2406.
- 廖婉琳, 肖龙, 张雷, 等, 2015. 新疆西准噶尔早石炭世沉积地层的物源及构造环境. *地球科学*, 40(3): 485–503.
- 刘刚, 周东升, 2007. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用. *石油实验地质*, 29(3): 307–314.
- 刘利双, 刘福来, 刘平华, 等, 2015. 苏鲁超高压变质带中海阳所地区变基性岩的地球化学性质及变质演化特征. *岩石学报*, 31(10): 2863–2888.
- 栾光忠, 李安龙, 王建, 等, 2010. 青岛主要海岛成因分类及其

- 地质环境分析.中国海洋大学学报:自然科学版,40(8):111-116.
- 吕洪波,王俊,张海春,2011.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.地质学报,85(6):938-946.
- 吕洪波,张海春,王俊,等,2012.山东胶南灵山岛晚中生代油积岩中发现巨大滑积岩块.地质论评,58(1):80-81.
- 吕洪波,张海春,王俊,等,2013.灵山岛早白垩世复理石不是陆内三角洲沉积——答钟建华教授.地质论评,59(1):11-14.
- 邱海鸥,孙文,汤志勇,等,2010.西藏吉隆盆地沃马剖面元素地球化学特征及环境指示意义.地球科学,35(5):789-802.
- 任志娟,2006.SPSS中判别分析方法的正确使用.统计与决策,(3):157.
- 山东省第四地质矿产勘查院,2003.山东省区域地质.济南:山东省地图出版社.
- 邵珠福,钟建华,李勇,等,2014a.青岛灵山岛纹层控制的砂级颗粒支持叠瓦构造的发现及其意义.中国科学(D辑),44(8):1761-1776.
- 邵珠福,钟建华,李勇,等,2014b.青岛灵山岛晚中生代重力流沉积特征及环境分析.地质论评,60(3):555-566.
- 宋春彦,王剑,付修根,等,2013.羌塘盆地藏夏河组砂岩地球化学特征及意义.地球科学,38(3):508-518.
- 宋明春,王来明,王兰中,等,1995.鲁东荣成片麻岩套及其成因.山东地质,11(2):32-44.
- 陶树,汤达祯,周传祯,等,2009.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.中国地质,36(2):397-403.
- 田洋,谢国刚,王令占,2015.鄂西南齐岳山须家河组物源及构造背景:来自岩石学、地球化学和锆石年代学的制约.地球科学,40(12):2021-2036.
- 王安东,周瑶琪,闫华,等,2013.山东省灵山岛早白垩世软沉积物变形构造特征.古地理学报,15(5):717-728.
- 王安东,周瑶琪,张振凯,等,2014.山东灵山岛莱阳群水下非构造裂缝特征及意义.地球学报,35(3):321-328.
- 王欣欣,郑荣才,闫国强,等,2014.基于稀土元素地球化学特征的泥岩沉积环境及物源分析——以鄂尔多斯盆地陇东地区长9油层组泥岩为例.天然气地球科学,25(9):1387-1394.
- 吴少波,2001.博格达山前凹陷上二叠统乌拉泊组沉积相及沉积模式.沉积学报,19(3):333-339.
- 谢尚克,汪正江,王剑,等,2010.綦江观音桥上奥陶统微量元素地球化学特征.沉积于特提斯地质,30(4):60-65.
- 熊小辉,肖加飞,2011.沉积环境的地球化学示踪.地球与环境,39(3):405-413.
- 徐方建,李安春,万世明,等,2009.东海内陆架陆缘物质矿物组成对粒度和地球化学成分的制约.地球科学,34(4):613-622.
- 薛怀民,刘福来,孟繁聪,2006.苏鲁造山带胶东区段花岗岩片麻岩类的常量与微量元素地球化学:扬子克拉通北缘新元古代活动大陆边缘的证据.岩石学报,22(7):1779-1790.
- 杨江海,杜远生,徐亚军,2008.北祁连东段景泰地区下古生界两套砂岩微量元素和稀土元素特征及其大地构造意义.古地理学报,10(4):395-408.
- 张海春,吕洪波,李建国,等,2013.山东青岛早白垩世新地层单位:灵山岛组.地层学杂志,37(2):216-222.
- 张三士,1988.沉积岩层中镁铝含量比的研究及其应用.矿物岩石地球化学通报,7(2):112-113.
- 张文彤,2006.SPSS统计分析高级教程.北京:高等教育出版社,(12):261-277.
- 赵梦,邵磊,梁建设,等,2013.古红河沉积物稀土元素特征及其物源指示意义.地球科学,38(增刊1):61-69.
- 钟建华,2013.灵山岛中生代沉积岩是深水远源浊积岩,还是陆内三角洲沉积?与吕洪波教授商榷.地质论评,58(6):1180-1182.
- 周刚,郑荣才,罗平,等,2012.川东华蓥二叠系—三叠系界线地层地质事件与元素地球化学响应.地球科学,37(增刊1):101-110.
- 周瑶琪,张振凯,梁文栋,等,2015a.山东东部晚中生代构造—岩浆活动及原型盆地恢复.地学前缘,22(1):137-156.
- 周瑶琪,张振凯,许红,等,2015b.灵山岛沉积物软变形构造特征.海洋地质前沿,31(4):42-54.
- 朱学强,王冠,杨仕鹏,2013.苏鲁造山带中段宝山—桃行榴辉岩地球化学特征.地质与资源,22(1):41-49.