

山东东部白垩系莱阳群沉积地层与有机质特征

周瑶琪^{1,2,3}, 辜洋建^{1,2,3}, 周腾飞^{1,2,3}, 岳会雯⁴, 李曼洁^{1,2,3}, 尹兴城^{1,2,3}, 梁 钊^{1,2,3},
曹梦春^{1,2,3}, 董诗绘^{1,2,3}

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与
探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 深地资源勘查理论与技术协同创新中心, 山东 青岛 266580;
4. 德国波茨坦地学研究中心, 德国 波茨坦 D-14473]

摘要: 为了解山东东部白垩系莱阳群沉积地层, 研究有机质特征, 在对灵山岛、崂山垭口—八仙墩及胶莱盆地的典型剖面地层野外踏勘的基础上, 结合灵山岛元素地球化学、胶莱盆地有机地球化学的相关研究成果, 采用了沉积学、沉积地球化学、有机地球化学的研究方法手段, 系统研究了灵山岛莱阳群地层的有机质特征。胶莱盆地早白垩世莱阳期主要发育一套河湖相及冲积扇相的陆相沉积地层, 有机地球化学研究表明, 其水南段烃源岩样品主要为腐泥型(I型)和腐殖腐泥型(II₁型), 已进入生烃门限, 处于热演化成熟阶段; 而灵山岛、崂山垭口—八仙墩早白垩世莱阳期则主要发育深水重力流、深水牵引流为主的海相沉积地层, 对灵山岛粉砂岩和页岩进行元素地球化学研究指示了其沉积环境为海相还原环境, 且有机地球化学研究表明, 灵山岛样品为腐殖型(III型)和腐殖腐泥型(II₁型), 处于高成熟到过成熟阶段, 灵山岛浊积岩可能已经完成了生排烃过程。

关键词: 有机质特征; 沉积地层; 莱阳群; 胶莱盆地; 山东东部

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Sedimentary strata and organic matter features of the Cretaceous Laiyang Group in eastern Shandong Province

Zhou Yaoqi^{1,2,3}, Gu Yangjian^{1,2,3}, Zhou Tengfei^{1,2,3}, Yue Huiwen⁴, Li Manjie^{1,2,3}, Yin Xingcheng^{1,2,3},
Liang Zhao^{1,2,3}, Cao Mengchun^{1,2,3}, Dong Shihui^{1,2,3}

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China;
3. Collaborative Innovation Center for Deep Resources Exploration Theory and Technology, Qingdao, Shandong 266580, China; 4. GFZ German Research Centre for Geoscience, Section 3.2 Organic Geochemistry, D-14473 Potsdam, Germany]

Abstract: The organic matter features of the Laiyang Group in Lingshan Island were systematically studied by means of sedimentology, sedimentary geochemistry and organic geochemistry and integrating with typical outcrop observation in Lingshan Island, Laoshan Yakou-Baxiandun area and Jiaolai Basin and the previous research on the elemental geochemistry of Lingshan Island and the organic geochemistry of Jiaolai Basin. In Jiaolai Basin, the terrestrial strata of fluvial and lacustrine facies and alluvial fan facies were developed in the Early Cretaceous Laiyang period. The organic geochemistry studies on the deposits show that the source rock samples from the Shuinan section are mainly of saprolite (Type I) and humus and saprolite (Type II₁), have entered the hydrocarbon generation threshold and are in the thermal mature stage; while in the Lingshan Island, Laoshan Yakou-Baxiandun areas, marine strata dominated by deep sea gravity flow and deep water traction current deposits were developed in the Early Cretaceous Laiyang period. Meanwhile the elemental geochemical studies on siltstones and shales of Lingshan Island reveal that its sedimentary setting is a marine reducing environment, and the organic geochemical research shows that samples from Lingshan Island belong to the humic (Type III) and humic and sapropel (Type II₁) types in high to over mature stage, and the turbidites of Lingshan Island may have completed the process of hydrocarbon generation and expulsion.

收稿日期: 2018-09-13; 修订日期: 2018-10-10。

第一作者简介: 周瑶琪(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 地球化学及盆地动力学。E-mail: zhouyq@upc.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(GZH201200510); 山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC1608); 十三五科技部基础项目(2017FY201407-1)。

Key words: organic feature, sedimentary stratum, Laiyang Group, Jiaolai Basin, eastern Shandong Province

山东东部地区(图1)位于华北地区东部,大地构造位置上属于苏鲁造山带中段,位于华北与扬子克拉通的结合部分。区内发育两个晚中生代盆地,分别为胶莱盆地和山东东部近海裂陷盆地^[1-2]。

灵山岛(图2)位于山东东部近海地区黄海海域内,海拔513.6 m,是中国北方第一高岛,总面积约7.66 km²。栾光忠等^[3]研究认为灵山岛为挤压掀斜型岛屿,主要由NWW-SEE向构造应力的挤压作用,岩层倾斜,形成岩层倾斜的单面山型海岛。吕洪波等^[4]在灵山岛发现早白垩世复理石沉积及滑塌褶皱层,此后,众多学者对灵山岛的软沉积物变形构造^[1,4-11]、沉积相^[12]、有机地球化学^[13]、水下非构造裂缝^[14]、地层时代^[1,15-16]、沉积环境及构造特征^[1,3-4,7,16-23]等进行了大量的研究及讨论。此外,前人通过对滑塌褶皱、软布丁构造、不对称负载构造等软沉积物变形构造的分析认为,浊积岩沉积时,存在一个SE高,NW低的古斜坡,水体东南浅西北深,重力流来自SE方向^[1,4]。

崂山垭口-八仙墩(图3)位于青岛市区以东约40 km沿海处,西邻崂山,东临黄海,付永涛等^[24]和吴

拓宇等^[25]对青岛垭口至八仙墩剖面沉积岩的研究发现,该套层系是活动大陆边缘的海相浊积岩,且存在水体深浅交替变化的特征,推测其为南黄海盆地上奥陶统在盆地边缘的露头,且形成于扬子板块向华北板块俯冲过程期间或者是其后扬子板块陆壳上部盖层向华北板块仰冲就位过程中;王俊等^[26]对八仙墩地区发育的浊积岩的变质石英砂岩进行碎屑锆石测年,认为其沉积年龄上限为晚中生代。付永涛等^[24]、赵广涛等^[27]发现崂山碱性花岗岩侵入此套地层中,因此判定该套地层形成时代早于碱性花岗岩。而周瑶琪等^[1]对此套地层中的凝灰质铝土岩层的测年后发现,其与灵山岛流纹岩测得的时代相当,认为此剖面的该层以下的地层属莱阳群。

1 盆地分布与沉积地层特征

1.1 盆地分布特征

1.1.1 胶莱盆地

胶莱盆地为晚中生代陆相残留盆地,河湖相及冲积相沉积,位于郯庐断裂带以东,属鲁东隆起区中部,东北部延伸入黄海以千里岩断裂和千里岩隆起相连,下白垩统莱阳群在地表出露并超覆在苏鲁造山带之上^[28-30]。西部与郯庐断裂带相连,郯庐断裂带控制着盆地西部边界,由数个地堑和地垒构造组成。南部则与胶南隆起相邻,以五莲-荣城断裂为界,北部的胶北隆起与其成接触关系。山东东部地区在白垩纪共经历了莱阳期、青山期和王氏期3次伸展时期,在胶莱盆地对应形成了上白垩统王氏群、青山群和下白垩统莱阳群3套沉积序列^[31-32]。根据盆地残留的构造特征,胶莱盆地主要分为7个构造单元,分别为:牟平-即墨断裂带、海阳凹陷、莱阳凹陷、大野头凸起、高密凹陷、柴沟地垒和诸城凹陷(图1)。其中,高密凹陷可以划分为夏格庄洼陷、平度洼陷、李党家-马山凸起、高密洼陷等相对独立的构造单元^[32]。

1.1.2 山东东部近海裂陷盆地

山东东部近海裂陷盆地与胶莱盆地同时期发育,为一规模较大的海相盆地,呈凹陷相间的构造格局^[1],北部以五莲-烟台断裂为界与胶莱盆地相邻,西接胶南隆起,东邻胶莱盆地的海阳凹陷,南部为南黄海西北海域,其范围可能延伸至千里岩隆起和南黄海盆地。

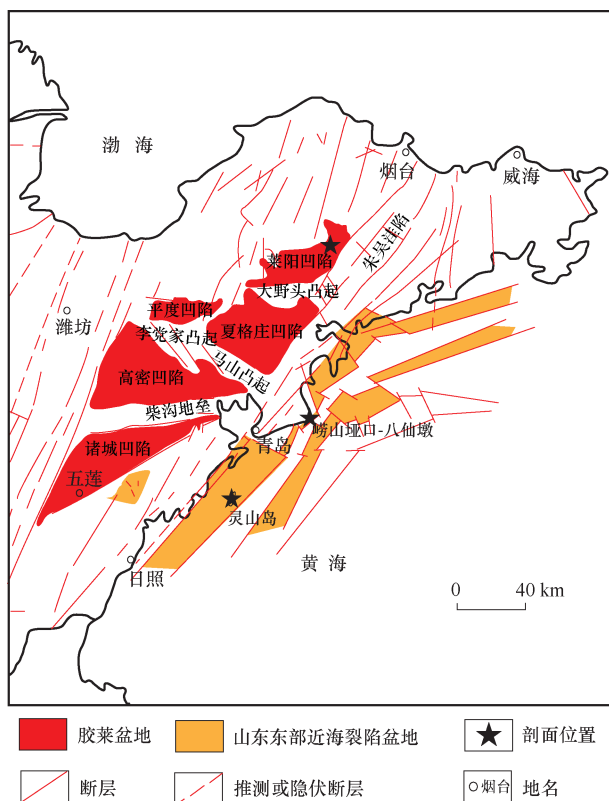


图1 山东东部地区构造简图(据文献[2]修改)

Fig.1 Structural diagram of eastern Shandong Province (modified from reference[2])

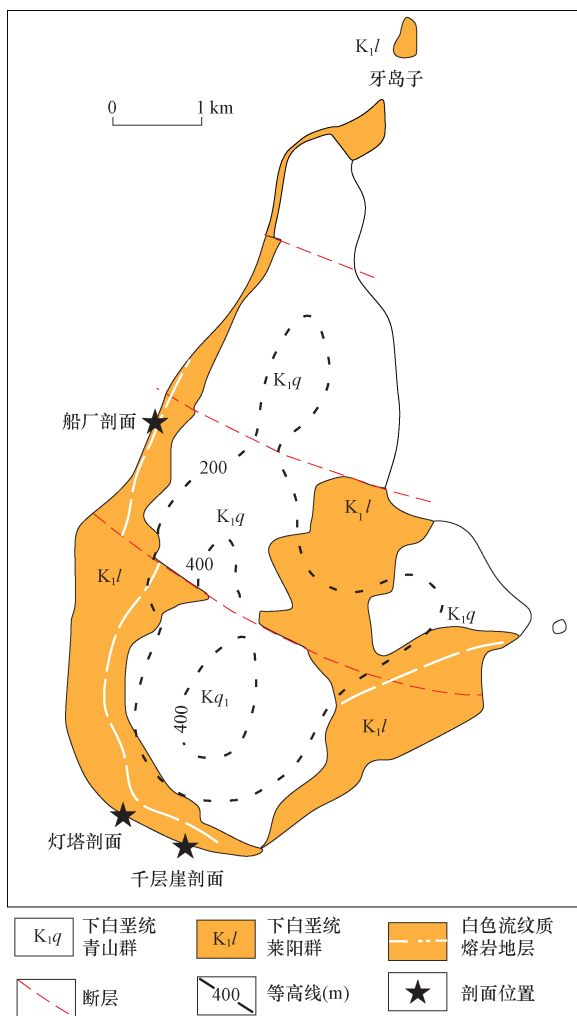


图2 灵山岛地质简图(据文献[7]修改)

Fig. 2 Geologic sketch map of Lingshan Island
(modified from reference[7])

该区域发育多条断裂,北侧为五莲-烟台断裂,南侧紧邻千里岩断裂,西侧为郯庐断裂带(图1)。灵山岛和崂山垭口-八仙墩对山东东部近海裂陷盆地内莱阳群地层揭露情况较好,本文对灵山岛和崂山垭口-八仙墩进行分析研究,并重点对灵山岛浊积岩进行有机地球化学和元素地球化学分析,同时结合胶莱盆地水南段的地层特征、有机地球化学与元素地球化学,综合分析山东东部地区莱阳群沉积环境与有机质特征。

1.2 沉积地层特征

胶莱盆地莱阳群整体表现为一套河湖相及冲积扇相沉积,是一个比较完整的水进-水退旋回,地层中泥岩较发育,碳酸盐岩含量较少,其地层标准剖面位于瓦屋夤-修家沟一带。胶莱盆地莱阳群可划分为6个段,自下而上分别命名为:道仙庄段、止凤庄段、马耳山段、水南段、龙王庄段和曲格庄段^[13,33],地层柱状图如

图4,整体上,地层上部从上到下粒度逐渐变细,反映水体逐渐变深的过程,下部地层从上到下粒度逐渐变粗,反映水体逐渐变浅的过程。其中,水南段是半深湖相、深湖相沉积(图4),该段的岩性以粉砂岩、粉砂质泥岩为主(图5),含有丰富的动植物化石,由于处于弱还原环境到还原环境,沉积岩有机质含量高,颜色深,在泥质粉砂岩中泥质含量高,颗粒较细,母质类型较好,是该区主力烃源岩层系^[13,33]。研究表明,莱阳凹陷和平度-夏格庄凹陷是胶莱盆地源岩发育最好的区域,有机质丰度可达好、较好烃源岩标准,类型以I型、II₁型为主,且处于热演化成熟阶段,因此是胶莱盆地油气勘探的有利区域^[33],水南段发育的富有机质泥页岩较厚,埋深适中,有机质丰度、成熟度中等,含气量高,储层裂隙发育。

灵山岛地层主要发育下白垩统莱阳群浊积岩以及青山群陆源碎屑岩及火山岩、火山碎屑岩层,其中,莱阳群主要出露于岛北侧的背来石剖面、西北侧的船厂剖面、西南侧的灯塔剖面、千层崖剖面以及东南侧的钓鱼台剖面,这些剖面对山东东部近海地区下白垩统有较完整的沉积记录^[9],灵山岛莱阳群地层柱状图如图6—图8所示。整体上,地层主要由砂岩和泥岩互层组成,粒度由上到下逐渐变细,反映水体逐渐变深的过程,如图8所示,但由于灵山的露头有限,只揭露莱阳群地层上部,而下部地层未见底。

船厂剖面厚约12 m,发育灰色细砂岩与灰黑色泥岩韵律性互层,地层厚度变化较大,粒序层理发育不明显。剖面发育拉伸线理、沟模、槽模、荷重模、软布丁构造、负载-球枕构造、同沉积断层等沉积构造。其发育一层巨型滑塌褶皱和丰富的软沉积物变形构造^[23]。灯塔剖面厚约8 m,发育有多个极薄层/薄层的细砂岩-粉砂岩/泥岩的沉积旋回,局部夹中/厚层细砂岩,剖面底部砂泥岩单层厚度较薄,顶部较厚,整体表现为“层薄粒度细”的特点。剖面发育重荷模、软双重构造、液化底劈、负载及火焰状构造、液化角砾岩、泄水构造、同沉积断层等沉积构造。千层崖剖面厚约20 m。发育灰黄色砂岩层和灰黑色细粒沉积物。地层的单层厚度与粒度较灯塔剖面都明显变厚,通常表现为侵蚀基底和正粒序层理。剖面中发现重荷模、沟模、槽模、液化角砾岩、负载-火焰状构造、水下非构造裂缝等沉积构造。

在灯塔剖面 and 千层崖剖面中,浊积岩序列都由表现出向上变厚和向上变粗的单元构成的层序组成。这些层序与 Mutti 等^[34]在1978年提出的“砂岩朵叶体”相似,这种“砂岩朵叶体”由1 m左右的砂岩组合构

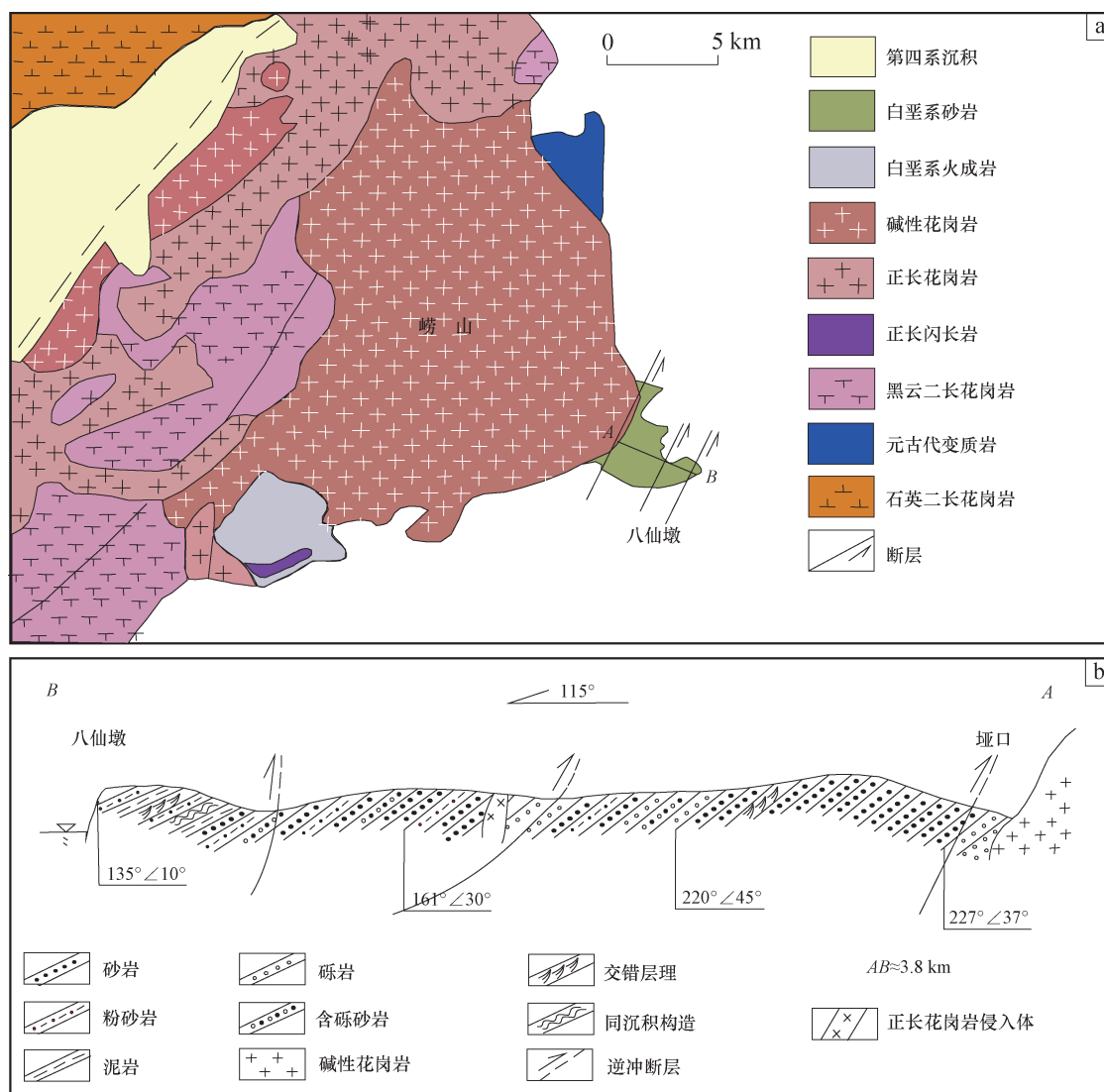


图3 崂山垭口-八仙墩地质简图(据文献[28]修改)

Fig. 3 Geologic sketch map of Laoshan Yakou-Baxiandun areas(modified from reference[8])

a. 崂山垭口-八仙墩地质简图;b. 崂山垭口-八仙墩地层剖面图

成,形成于外扇沉积环境。灯塔剖面的砂岩层和泥岩层较千层崖薄,表明灯塔剖面的沉积环境更靠近盆地。

崂山垭口-八仙墩(图3,图7,图8)发育一套浅变质碎屑岩地层,厚度可达2 km,以灰绿色砂岩与泥岩的薄互层为主,夹有砾岩、粉砂岩、硅质岩、凝灰岩,地层柱状图如图7和图8,整体上,地层上部从上到下粒度逐渐变粗,反映水体逐渐变浅的过程,下部地层从上到下粒度逐渐变细,反映水体逐渐变深的过程。从NW到SE方向,地层年龄逐渐增大,粒度也随之变大,地层倾向为SE和SW方向,倾角为10°~45°,只在与花岗岩接触带附近发生变质作用,其余岩层基本保留了各种原生沉积构造,发育底模构造、同沉积变形、水平层理、粒序层理等^[20,28]。Wang J等^[28]研究认为八仙墩NW方向具夹层砾岩的近岸海相砂岩和SE方向

具同沉积滑塌褶皱和交错层理的半深海浊积岩,表明了沉积环境从深海到浅海的持续变化。Wu T等^[35]研究认为八仙墩主要由粉砂岩、砂岩和泥岩组成,其沉积地层主要由深湖相斜坡和湖盆的深水碎屑和浊流沉积物组成,并推断该沉积岩属于早期白垩纪深水湖相沉积序列,此外,通过对比八仙墩地层与莱阳群在构造背景、沉积时代和沉积物源上的相似之处,推断八仙墩是胶莱盆地早莱阳期的沉积中心之一。

综上所述(图5),山东东部近海裂陷盆地内灵山岛主要发育深水重力流沉积,包括砂质滑塌沉积、碎屑流、浊积沉积、混合事件沉积等,整体上呈现一套水体向上变浅的岩性序列,崂山垭口-八仙墩主要发育一套浅变质碎屑岩,整体为海相浊积岩相沉积;而胶莱盆地主要发育一套浅水陆相沉积,包括河流相、冲积扇相、三

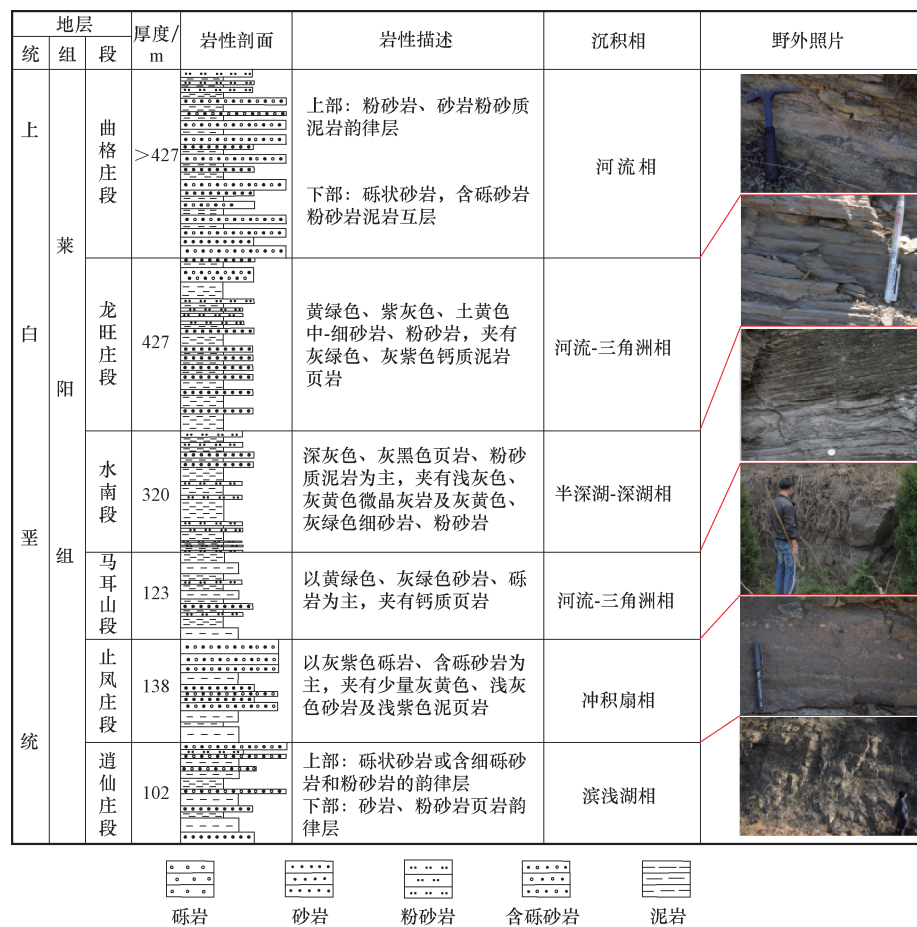


图 4 胶莱盆地莱阳群地层综合柱状图

Fig. 4 Stratigraphic column of the Laiyang Group in Jiaolai Basin

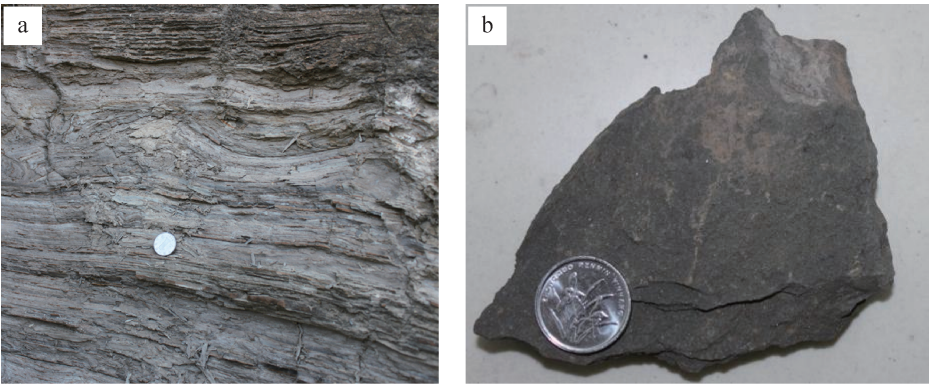


图 5 胶莱盆地水南段黑色粉砂岩

Fig. 5 Black siltstones from the Shuinan section of Jiaolai Basin

a. 水南段黑色粉砂岩野外照片;b. 水南段黑色粉砂岩样品

角洲相与深湖－半深湖相的岩性组合序列,二者在沉积相与沉积环境上有着明显差异。

2 海相深水沉积特征

2.1 海相沉积

对灵山岛粉砂岩样品进行元素地球化学研究^[23]发

现,灵山岛莱阳群粉砂岩的 SiO₂ 含量较高(33.07% ~ 55.56%),平均为 50.12%; Al₂O₃ 含量介于 8.81% ~ 15.62%。SiO₂/Al₂O₃ 可作为指示碎屑岩成熟度的重要标志,Roser 等^[36]认为成熟的沉积岩的 SiO₂/Al₂O₃ 值大于5,所测样品的 SiO₂/Al₂O₃ 值为 3.36 ~ 4.27,平均 3.71,因此,灵山岛粉砂岩属未成熟。SiO₂ 含量较低,平均为 51.78%,Fe₂O₃ 含量较高,平均为 5.73%,

Na₂O 平均含量为 2.74%, K₂O 平均含量为 2.79%; Ce_{anom} 值为 -0.08 ~ -0.01, 平均为 -0.03 (> -0.1), 指示其沉积时水体呈还原环境; B 含量为 (103 ~ 199) × 10⁻⁶, 平均含量为 149 × 10⁻⁶, 均大于 100 × 10⁻⁶, 表明海相环境; B/Ga 值为 4.52 ~ 11.08, 平均为 6.93, 为海相环境 (>4.5); 100 MgO/Al₂O₃ 值为 46.43 ~ 35.99, 平均 27.14, 为海相环境 (>10); CaO/(Fe + CaO) 值为 0.25 ~ 0.65, 平均 0.53, 绝大多数值均大于 0.5, 为中高盐度咸水环境; Th/U 值为 1.92 ~ 6.90, 平均 2.83, 为海相沉积 (<7); V/(V + Ni) 值为 0.51 ~ 0.84, 平均 0.71, 表明还原环境 (>0.46); Fe²⁺/Fe³⁺ 值为 1.37 ~ 5.97, 平均 2.53, 表明还原环境 (>1); 以上均表明灵山岛粉砂岩沉积环境为海相还原环境^[23]。

对灵山岛页岩样品进行微量元素地球化学研究^[37]发现, 样品中 B 元素含量为 (82.734 ~ 174.672) × 10⁻⁶, 而海相沉积中 B 元素含量一般为 (80 ~ 125) × 10⁻⁶, 古盐度(S_p)通过 Adamas 公式 (S_p = 0.097 7 B - 7.043) 计算, 为 1.040‰ ~ 10.022‰, 属咸水环境; Sr 浓度高, 为

(229.197 ~ 408.056) × 10⁻⁶, 表明海相沉积 (>160 × 10⁻⁶); V 浓度为 (78.165 ~ 115.089) × 10⁻⁶, 介于海相沉积(86 × 10⁻⁶)和陆相沉积 (>110 × 10⁻⁶); B/Ga 值为 4.347 ~ 7.732, 为海相沉积 (>4.2); Sr/Ba 值为 0.296 ~ 0.709, 大多高于 0.35, 表明海相沉积 (>0.35); Rb/Sr 值为 0.299 ~ 0.663, 也可推断出海相沉积以及潮湿的古气候; Cu/Zn 值为 0.235 ~ 0.390, 表明弱还原环境; V/(V + Ni) 值为 0.724 ~ 0.800, 表明弱还原环境; 以上均表明灵山岛页岩为海相还原环境^[37]。

2.2 深水沉积

灵山岛发育多套重力流沉积组合, 主要为块体的整体滑动、连续的滑塌变形、砂质碎屑流、浊流沉积, 在灵山岛发现黑色页岩、异重岩、浊积岩、碎屑岩和滑塌岩等 5 种岩相以及 5 个中期基准面旋回^[19,38]。灵山岛莱阳群地层自下而上依次发育(半深海-深海)滑塌浊积岩相—浊积岩辫状水道相—浊积岩相—冲积扇相(图 6)。浊积岩主要分布在灯塔和千层崖剖面, 通

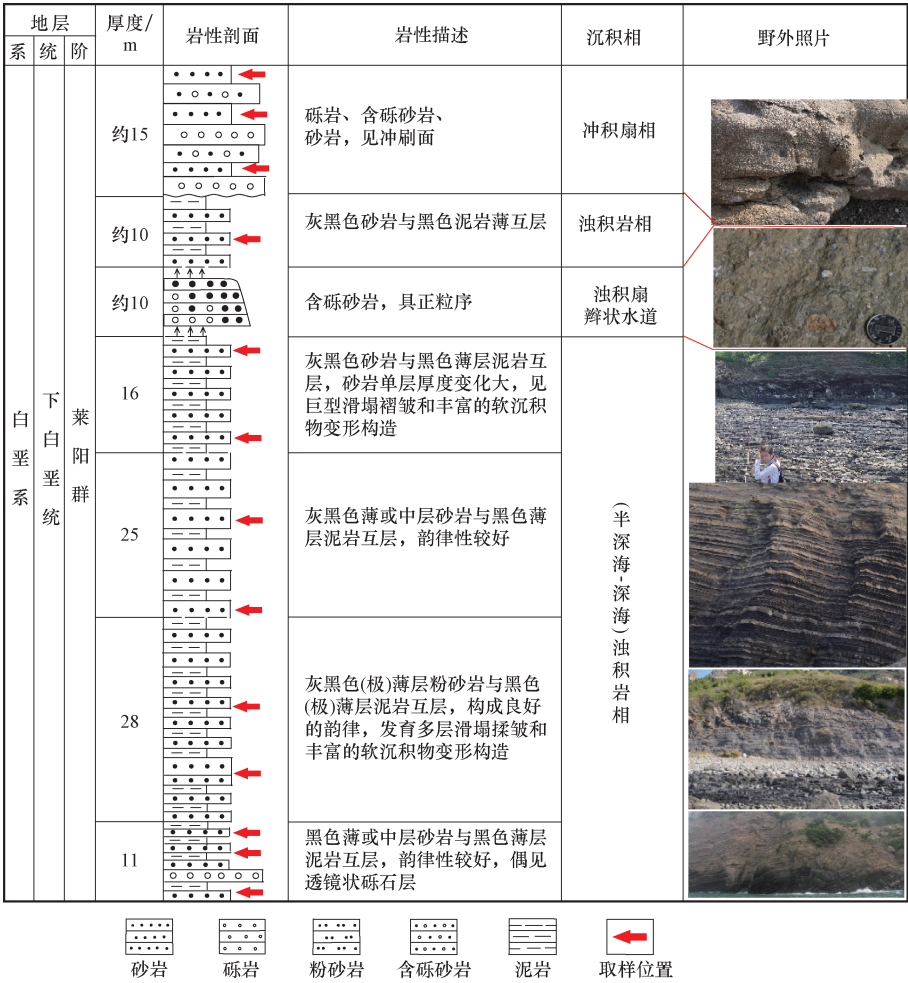


图 6 灵山岛莱阳群柱地层综合状图

Fig. 6 Stratigraphic column of the Laiyang Group in Lingshan Island

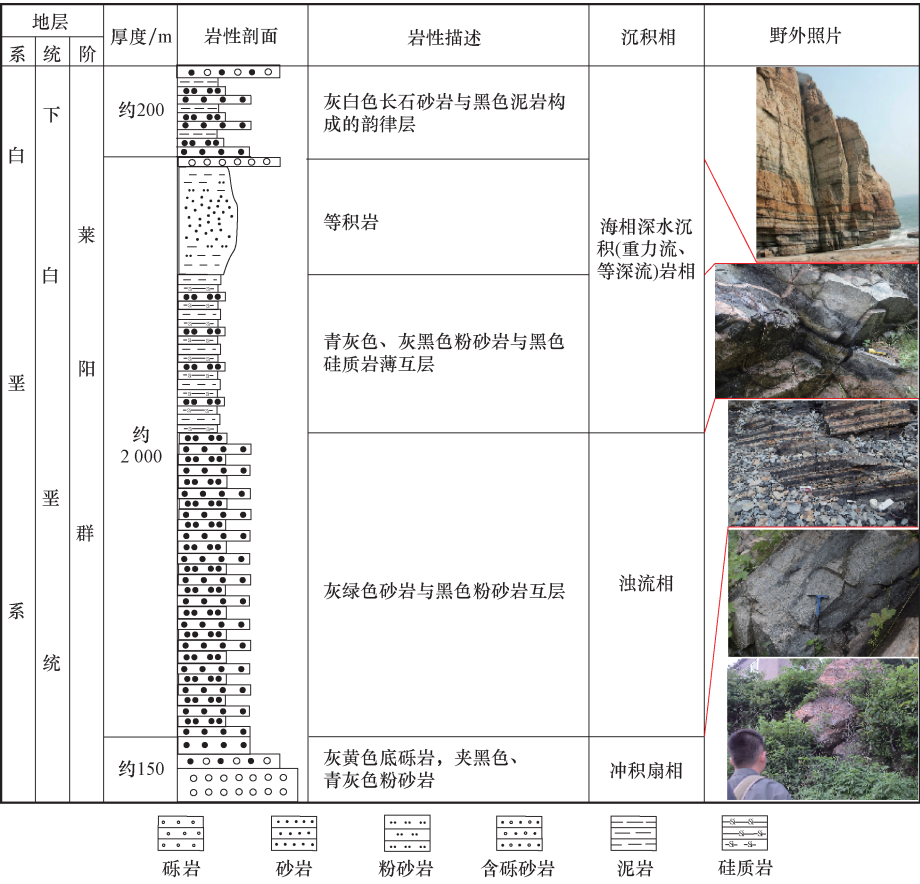


图 7 崂山垭口-八仙墩莱阳群地层综合柱状图

Fig. 7 Stratigraphic column of the Laiyang Group in Laoshan Yakou-Baxiandun areas

常为砂岩与粉砂岩及泥岩的互层,细粒浊积岩占大多数且都是毫米级的水平薄层,这些细粒异地沉积物无法从悬浮沉降的原始沉积物中区分出来。沟模和槽模常见于砂质浊积岩的下层层面上,局部浊积岩以滑塌形式再沉积,滑塌体大小不一,发育很多软沉积变形构造。

深水环境地质特征复杂,深水泥沙重力流在海相和湖相环境中形成厚层的粗碎砂岩及细粒沉积物,具有“触发-运输-沉积”的综合过程,形成混合事件层(HEBs)^[39-40]。HEBs 指在单一的泥沙重力流事件中混合的深水重力流沉积,包括浊度流、泥石流和少量的过渡流。灵山岛发育 3 种混合型事件层(HEBs)、碎屑岩和浊积岩^[39]。HEB1 是在粘性泥石流的基础上由颗粒重排形成的,基底为块状砂岩,其上被泥质砂岩覆盖;HEB2 基底为正粒序砂岩,其上为泥质粉砂岩,顶部被粉砂岩覆盖;HEB3 由低密度浊流减速后沉积形成,基底为块状砂岩,其上被泥质砂岩覆盖,上部单元为含植物碎屑和稀有泥质碎屑的泥石流沉积;泥沙重力流演化过程为从近端泥石流演变为浊度流,在远端泥石流演变为浊度流,浊流转化为泥石流的结果形成

了 HEBs(图 9)。HEB1 发育位置相对近缘,HEB2 为上游段孔隙率高、渗透率高的砂岩沉积,由高密度浊度流沉积形成,而 HEB3 的发育表明潜在的烃源岩的分布^[39]。

3 样品采集与测试方法

为研究山东东部近海裂陷盆地莱阳群沉积环境与有机质特征,采集灵山岛粉砂岩样品 13 块进行有机地球化学分析,选取 9 块样品进行元素地球化学分析,取样层位如图 6。

有机碳测定和氯仿沥青“A”测定在中国石化华东分公司实验研究中心完成,有机碳测定根据 SY/T 5735—1995《沉积岩中有机碳的测定》完成,将测试样品磨碎至小于 0.2 mm,称取试样约 1.00 g,放入盛有过量稀盐酸的容器中,放入 60~70℃的水浴锅中恒温加热、溶样 2 h 以上,直到反应完成。用蒸馏水将溶样后的样品洗净并进行干燥,最后用碳硫测定仪测定残余有机碳的含量。氯仿沥青“A”的抽提则是根据 SY/T 5118—2005《岩石中氯仿沥青的测定》完

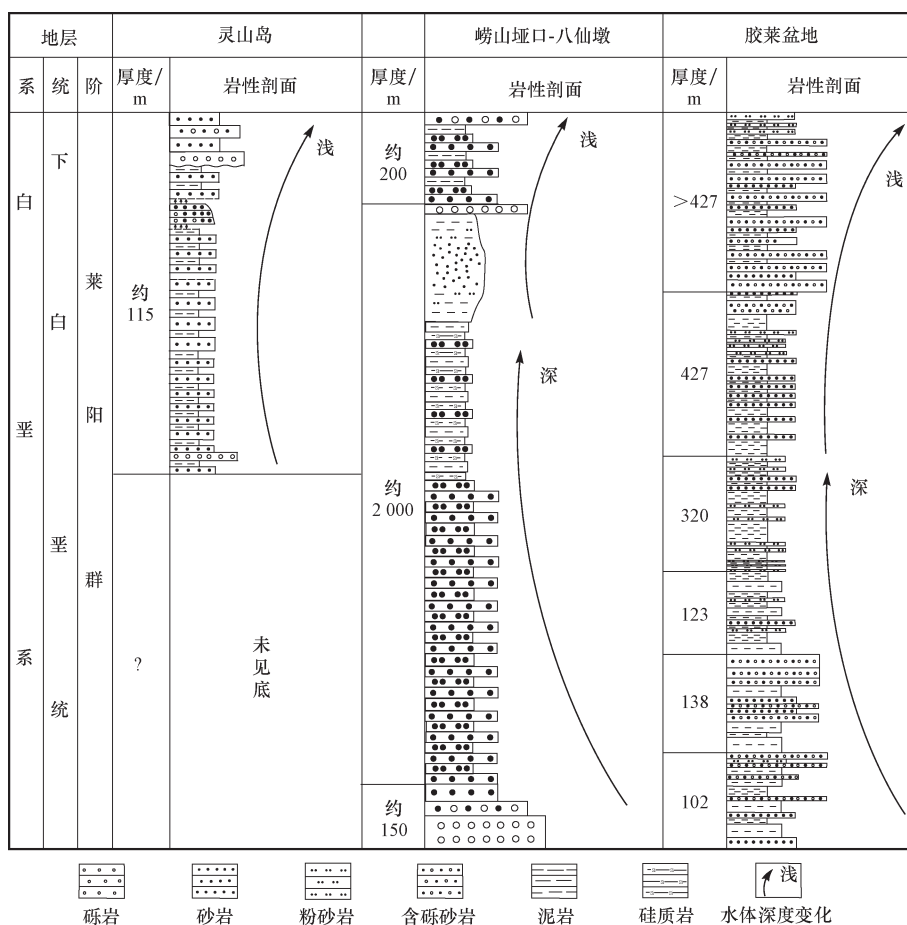


图8 灵山岛、崂山垭口-八仙墩与胶莱盆地莱阳群地层综合柱状图对比

Fig. 8 Comparison of the stratigraphic columns of the Laiyang Group in Lingshan Island, Laoshan Yakou-Baxiandun areas with that in Jiaolai Basin

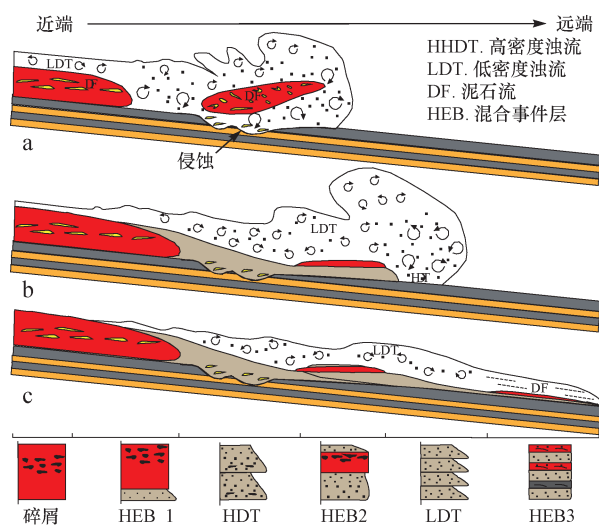


图9 灵山岛深水沉积物重力流演化规律(据文献[39]修改)

Fig. 9 Evolution patterns of deep water gravity flow deposits in Lingshan Island (modified from reference [39])

- a. 泥石流运动及高密度浊度流侵蚀; b. 颗粒重排于基底的泥石流沉积及与泥石流相关的高密度浊度流沉积, 由上倾泥质基底侵蚀引起; c. 沉积的低密度浊度和泥石流造成的低密度浊度流减速。

成,在样品进行干燥并粉碎后,放在装有脱硫铜片和氯仿的容量瓶中,进行72 h以上的抽提,直至抽提液荧光减弱至荧光3级以下。浓缩抽提物后,在小于或等于40℃的温度下,恒重后得到氯仿沥青“A”的质量。

4 分析测试结果

4.1 有机质丰度

有机碳含量(*TOC*)测定结果如图10。有机碳含量(*TOC*)最低约为0.4%,最高约为2.4%,平均值约为1.1%。好烃源岩、中等烃源岩、差烃源岩和非烃源岩的标准分别为1.0%,0.6%~1.0%及0.4%~0.6%。灵山岛样品的*TOC*含量分布如图11,由图11可知,共有20块达到烃源岩标准,其中17块达到好和中等烃源岩标准,占比达到81%,3块达到差烃源岩标准,占比达到14%。

灵山岛样品的氯仿沥青“A”含量极低,为0.002 2%~

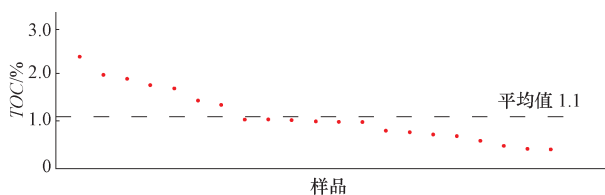


图10 灵山岛样品总有机碳含量(TOC)

Fig. 10 TOC of samples from Lingshan Island

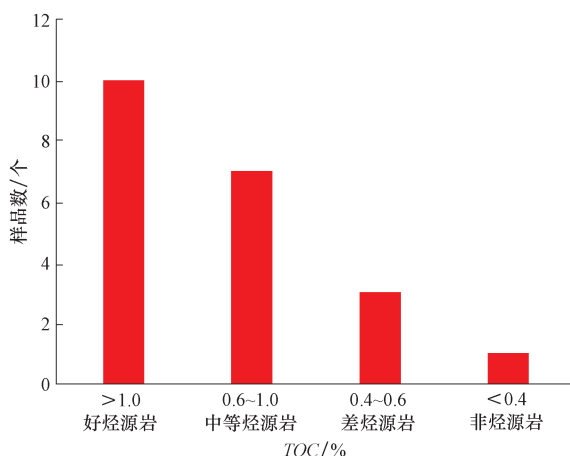


图11 灵山岛地区样品总有机碳含量(TOC)分布直方图

Fig. 11 Histogram of TOC of the samples from Lingshan Island

0.004 6%, 平均值为 0.003 4%; 而样品的生烃潜量($S_1 + S_2$)为 0.13 ~ 0.36 mg/g, 平均值为 0.24 mg/g。热演化程度和露头风化的影响可能是导致氯仿沥青“A”含量极低的重要原因。灵山岛样品热演化程度高, 通过干酪根热解形成的可溶有机质含量少, 大部分成为不溶于有机溶剂的气态烃和沥青而散失, 且露头样品长期遭受野外风化使得其中的有机质发生改变或损失。

结合前人对胶莱盆地水南段烃源岩有机碳的测试结果, 胶莱盆地水南段样品 TOC 含量较高, TOC 含量平均大于 0.5%, 整体可达好、中等烃源岩标准。水南段井下样品共 190 块, 有 87 块达到好和中等烃源岩标准, 占比达到 46%, 有 28 块达到差烃源岩, 占比达到 15%, 水南段露头样品共 169 块, 有 69 块达到好和中等烃源岩标准, 占比达到 41%, 有 20 块达到差烃源岩, 占比达到 12%^[33,41], 水南段井下样品有机碳含量普遍高于露头样品有机碳含量, 井下样品达到中等烃源岩和好烃源岩标准的岩样比例高于水南段露头岩样, 露头样品中非烃源岩的比例高于井下样品非烃源岩比例。

胶莱盆地水南段烃源岩氯仿沥青“A”含量为

0.014 3% ~ 0.056 8%, 平均值为 0.035 5%, 井下样品共 61 块, 有 33 块达到好和中等烃源岩标准, 占比达到 54%, 有 26 块达到差烃源岩, 占比达到 43%, 水南段露头样品共 39 块, 有 14 块达到好和中等烃源岩标准, 占比达到 36%, 有 19 块达到差烃源岩, 占比达到 49%, 水南段样品的生烃潜量($S_1 + S_2$)为 0.38 ~ 1.71 mg/g, 平均值为 2.55 mg/g^[33,41-42]。达到烃源岩标准的井下样品为 97%, 由于露头样品长期遭受野外风化, 达到烃源岩标准较井下样品低, 为 85%。胶莱盆地水南段生烃潜量($S_1 + S_2$)也显示有机质丰度较高, 井下样品的生烃潜量要大于露头样品的生烃潜量, 大部分沉积岩具有较好的潜在生油能力, 有利于油气的生成。岩石热解分析表明样品生烃潜量较小, 与丰度指标相比生烃潜量明显偏低, 可能是受风化和成熟度影响。虽然达到好和较好烃源岩标准的样品数量明显低于用有机碳作为标准的数量, 这是地表风化作用以及成熟度影响的结果, 但总体表明水南段有潜在的烃源岩发育^[13,33,41]。

综上所述, 山东东部近海裂陷盆地内灵山岛样品总体达到中等 - 好烃源岩标准, 胶莱盆地水南段生烃潜量较好, 达到中等 - 好烃源岩标准, 且灵山岛达到中等 - 好烃源岩标准的样品比例较胶莱盆地水南段高。

4.2 有机质类型

通过热解分析对灵山岛样品有机质类型进行测定, 氢指数低于 120 mg/g 为腐殖型(Ⅲ型), 灵山岛样品的氢指数(HI)最低值为 6 mg/g, 最高值为 47 mg/g, 为腐殖型(Ⅲ型)。全岩显微组分分析表明, 该套地层中有机显微组分含量约占全岩的 0.5% ~ 1.2%, 以无结构镜质组、镜屑体和贫氢次生组分等来源于高等植物的组分为主, 其中贫氢次生组分极其微小, 多小于 1 μm, 几乎不见壳质组分、腐泥组分及富氢次生组分, 因此测得的 HI 值极低。老虎嘴剖面的类型指数为 -61.8%, 为腐殖型(Ⅲ型)。钓鱼台剖面类型指数为 83%, 为腐泥型(Ⅰ型)。洋礁洞、船厂、千层崖剖面类型指数大于 90%, 为腐泥型(Ⅰ型)。其中船厂剖面类型指数为 97.1%, 有机质类型最好。灯塔剖面的测试样品类型指数差距大, 分别为 86.4% 和 -28.6%, 为腐泥型(Ⅰ型)和腐殖型(Ⅲ型)。故灵山岛有机质类型为腐泥型(Ⅰ型)和腐殖型(Ⅲ型)。

露头观察发现了大量的肉眼可见的植物碎屑, 但显微组分中角质体普遍缺失。由于大多数的植物叶片的上部和下部表皮都覆盖有角质层, 因而对角质体的缺失作出如下两种假设^[43]: ①角质体在搬运过程中受

到砂粒磨损而从叶片上脱离;②成岩过程中对角质体的损耗。但由于角质体物理性质稳定,对酸有较强的化学抵抗性,在成岩过程中或成岩后作用中,镜质体优先被酸溶蚀,从而使得角质层选择性保存。在现代 Mahakam 三角洲沉积中也发现了由于砂质颗粒而造成树叶的部分角质体被移除的现象^[44]。因此,长距离搬运过程中的颗粒之间,尤其是砂质颗粒对叶片角质组的磨损作用可能造成了角质体显微组分的缺失。

结合前人对胶莱盆地水南段显微组分测试发现,水南段干酪根分为腐泥型(Ⅰ型)和腐殖腐泥型(Ⅱ₁型),其中以腐泥型(Ⅰ型)为主。干酪根显微组分特征反映了水南段有机质来源复杂,既有低等生物,也有高等植物,藻类等水生生物都是烃源岩中有机质的主要贡献者,高等植物尤其是其富氢组分对沉积有机质的影响很小,干酪根元素分析取自于莱阳凹陷的样品有机质类型几乎全为Ⅲ型。氯仿沥青“A”组成显示高烷烃含量和非烃含量,但是具有含量较低的沥青质,还含有较高的饱和烃/芳香烃的值,有机质类型以腐泥型为主,还包括腐殖腐泥型。

综合各项指标可知,灵山岛样品为腐泥型(Ⅰ型)和腐殖型(Ⅲ型),以腐泥型(Ⅰ型)为主,胶莱盆地水南段样品主要为腐泥型(Ⅰ型)和腐殖腐泥型(Ⅱ₁型),属于从腐泥型向腐殖型过渡的类型。

4.3 有机质成熟度

对灵山岛样品的热解峰温进行测定, $T_{\max}$ 值为 458 ~ 540 ℃,平均 491 ℃, $T_s/(T_m + T_s)$ 值均大于 0.4, $C_{29}\alpha\alpha\alpha - 20S/(20S + 20R)$ 为 0.26 ~ 0.46,而 $C_{29}\beta\beta/(\alpha\alpha + \beta\beta)$ 为 0.38 ~ 0.58,镜质体反射率 R_o 为 1.04% ~ 3.62%,说明此区域样品已经处于高成熟到过成熟阶段。而随着热演化成熟度增高,热解生成的可溶有机质含量减小且不断排出,因此,热演化成熟度增高对灵山岛浊积

岩生烃潜量及氯仿沥青“A”的测定结果产生了较大影响,而对残余有机质 TOC 的测定结果影响却极小^[45]。同时,野外露头样品长期遭受风化也会使得生烃潜量($S_1 + S_2$)及氯仿沥青“A”等指标显著下降。因此,根据($S_1 + S_2$)值及氯仿沥青“A”含量对灵山岛浊积岩的生烃潜量进行判断并不可靠,而灵山岛浊积岩的普遍较高的有机碳含量表明该区域的有机质丰度较高,具有一定的生气潜力。

热解法判断胶莱盆地莱阳凹陷水南段的热解峰温($T_{\max}$)为 448 ℃,属于成熟阶段,腐殖腐泥型(Ⅱ₁类)。但是热解分析表明,部分样品的 S_2 值很小,单从氢指数指标来看有机质类型以Ⅲ型为主,主要是因为露头样品遭受了长期的风化,尤其是对于有机碳含量低的样品更是如此,为此在研究中应该主要选用有机质丰度高的样品进行讨论^[33,41]。

镜质体反射率目前被认为是研究有机质成熟度的最佳参数之一,一般认为, R_o 为 0.5% 时即进入了生油门限^[33]。水南段岩样的镜质体反射率有很大差别,牟平-即墨断裂带地区的岩样有机质热演化程度较高,镜质体反射率值分别为 2.3%,1.92% 和 1.75%,具有高成熟阶段和过成熟阶段的特征。该地区的热演化程度高可能和牟平-即墨断裂带有比较活跃的构造和岩浆活动有关,并不是原始的盆地埋藏作用造成的。在莱阳凹陷的西北部,如山前店、黄崖底等地区,水南段测试样品镜质体反射率值为 0.71% ~ 0.86%,达到成熟阶段早期阶段的标准^[13,41-42]。

灵山岛与胶莱盆地有机地化特征见表 1,综上所述参数表明说明灵山岛样品为腐殖型(Ⅲ型)和腐殖腐泥型(Ⅱ₁型),已经处于高成熟到过成熟阶段,灵山岛浊积岩可能已经完成了生排烃过程,胶莱盆地水南段样品主要为腐泥型(Ⅰ型)和腐殖腐泥型(Ⅱ₁型),达到成熟阶段(图 12),且已进入生烃门限,处于热演化成熟阶段。

表 1 灵山岛与胶莱盆地有机地化特征对比

Table 1 Comparison of organic geochemical characteristics between Lingshan Island and Jiaolai Basin

地化参数	灵山岛		胶莱盆地
	海相还原环境		陆相湖盆环境
有机碳含量(TOC)/%	0.4 ~ 2.4, 平均值 1.1(中等—好烃源岩)		平均值 > 0.5(中等—好烃源岩)
有机质丰度	氯仿沥青“A”含量/%		0.014 3 ~ 0.056 8, 平均值 0.035 5
	生烃潜量($S_1 + S_2$)/(mg · g ⁻¹)		0.38 ~ 1.71, 平均 2.55
有机质类型	干酪根类型	腐泥型(Ⅰ型)和腐殖型(Ⅲ型),以腐泥型为主	腐泥型(Ⅰ型)向腐殖腐泥型(Ⅱ ₁ 型)过渡类型
有机质成熟度	热解峰温($T_{\max}$)/℃	458 ~ 540, 平均值 491(高成熟阶段)	448(成熟阶段)
	镜质体反射率(R_o)/%	1.04 ~ 3.62(高成熟阶段)	0.71 ~ 0.86(成熟阶段早期)

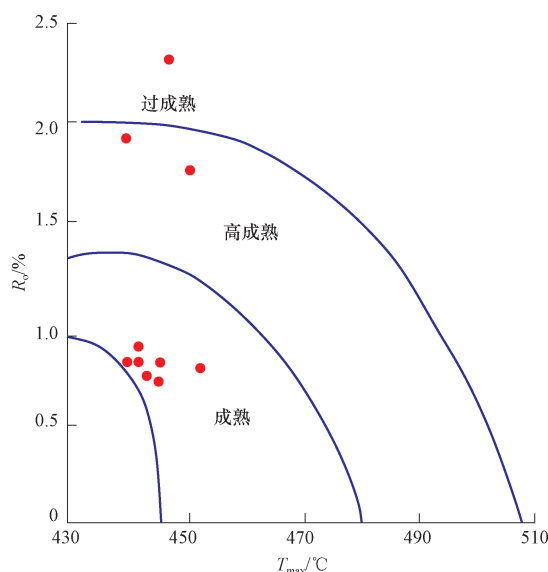


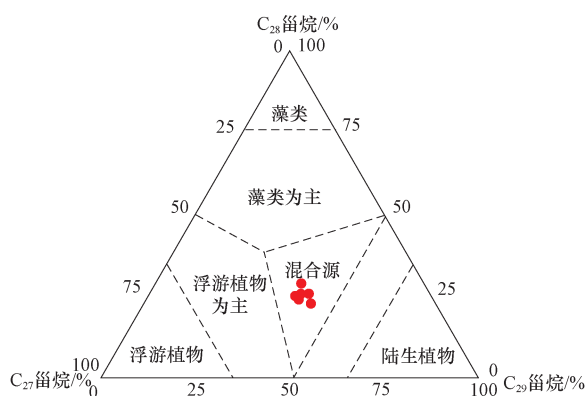
图12 胶莱盆地热演化阶段示意图

Fig. 12 Schematic diagram showing the thermal evolution stages in Jiaolai Basin

4.4 生物标志化合物

灵山岛样品的正构烷烃的分布呈单峰型,主峰碳以 C_{22} 为主,水生生物与陆源生物贡献比 $nC_{21}/nC_{22}+$ 为 0.19~0.82,均小于 1,仅千层崖剖面样品大于 1,说明灵山岛浊积岩中有机质既有高等植物的输入又有低等水生生物的贡献,且陆源有机质输入相对较丰富。 C_{27} , C_{28} , C_{29} 甾烷呈“V”字型分布,同时结合灵山岛样品在 $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 甾烷三角图投点(图 13)可知,其有机质来源为混源,且陆源高等植物的贡献相对较高。

原油或沉积物中高丰度的奥利烷往往是由于被子植物来源的有机质的输入,被子植物在晚白垩世逐渐繁盛,通常也可作为时代的指示标志,但 Moldowan

图13 灵山岛样品 $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ 甾烷三角图Fig. 13 Ternary diagram of sterane $C_{27}-C_{28}-C_{29}$ of samples from Lingshan Island

等^[46]也报道了大量的奥利烷在早于晚白垩世的地层中出现。莱阳群浊积岩沉积时间早于 Aptian 期,但其中也检测出一定含量的奥利烷,其奥利烷指数为 0.04 左右,但鉴于早白垩世被子植物并不繁盛,因此,0.04 的奥利烷指数可能仍可作为陆源输入的标志。

结合上述所讨论的正构烷烃、甾烷、奥利烷等生标指数,并结合其他的一些生标参数,例如,三环萜烷/ $17\alpha(H)-C_{30}$ 藿烷平均为 0.6 左右,规则甾烷/ $17\alpha(H)-C_{30}$ 藿烷比值集中在 1.9 左右, C_{26}/C_{25} 三环萜烷为 0.9~1,可知此套莱阳群浊积岩的有机质来源为陆源高等植物和低等水生生物混源,并显现出一定的陆源高等植物优势。

不同参数计算出的同一层位的陆源有机质的贡献比不同,灵山岛样品的有机显微组分主要以来源于高等植物的组分为主,而几乎不见低等水生生物的贡献,且氢指数极低,其表征陆源高等植物对于有机质的贡献量要远远高于通过生物标志化合物所作出的判断。但参数总体表明陆源有机质的贡献要高于水生有机质的贡献。这可能是由于大部分陆源有机质相对于海相有机质结构复杂,难以被微生物所降解;即使对相同结构的陆相和海相有机质,陆源有机质受杂基的选择性保护使其相对难以降解的原因。其内在的化学稳定性和物理保护的结合使得陆源有机质相对于海相有机质更易于保存,该保存差异性在其他区域的浊积岩的显微组分等有机地化分析中也被证实。就深水浊积岩而言,它在形成过程中本就先行接受了较高比例的混积陆源有机质,加之相对低等水生生物来源有机质更强抗降解的能力,因此,其中陆源有机质成分得以更多得以保存下来显然可能性更高是事实。

胶莱盆地莱阳群绝大部分样品 C_{29} 甾烷的 $20S/20S+20R$ 和 $\beta\beta/\beta\beta+\alpha\alpha$ 值都大于 0.4,表明烃源岩已经进入生油门限。藿烷类化合物均以 C_{30} 藿烷含量最高,大部分样品的 Σ 升藿烷/ C_{30} 藿烷值大于 1.0。 C_{31} 藿烷的 $22S/22R+22S$ 均已达到平衡值, C_{30} 莫烷/藿烷大部分小于 0.2, Tm/Ts 均小于 1.5,这些都表明烃源岩已经达到了生油门限。样品中伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值为 0.23~0.93,尤其是水南段含量较高,比我国东部新生代的淡水湖盆中的值略高,与柴达木盆地新生代盐湖接近。这表明莱阳凹陷在道仙庄段沉积期大至为淡水到微咸水湖泊,而水南段沉积期在湖盆中央较深水区可能具有明显的水体分层和较高的盐度。烃源岩样品中三环萜烷的碳数分布为 $C_{19} \sim C_{28}$,一般以 C_{21} 或 C_{23} 为主峰,三环萜烷/藿烷值为 0.15~1.19。通常认为三环萜烷与藻类和细菌生源有关,也有研究指出咸

水环境可能比淡水环境更可能产生三环萜类化合物^[41-42],这都与胶莱盆地源岩的形成条件相符。

5 结论

1) 通过对山东东部近海灵山岛、崂山垭口-八仙墩和胶莱盆地典型剖面的沉积特征分析,发现灵山岛、崂山垭口-八仙墩早白垩世莱阳期发育深水重力流、深水牵引流为主的海相沉积地层,胶莱盆地则同期主要发育一套河湖相及冲积扇相的陆相沉积地层。

2) 通过对灵山岛莱阳群粉砂岩进行元素地球化学测试,B/Ga 值为 5.00~11.86,100 MgO/Al₂O₃ 值为 15.78~71.62,Th/U 值为 2.85~4.73,CaO/(Fe+CaO) 值为 0.51~0.90,V/(V+Ni) 值为 0.51~0.84,Fe²⁺/Fe³⁺ 值为 1.37~5.97,表明灵山岛粉砂岩沉积环境为海相还原环境。对灵山岛页岩样品进行微量元素地球化学研究,B 含量为(82.734~174.672)×10⁻⁶,古盐度为 1.040‰~10.022‰,Sr 浓度为(229.197~408.056)×10⁻⁶,V 浓度为(78.165~115.089)×10⁻⁶,B/Ga 值为 4.347~7.732,Sr/Ba 值为 0.296~0.709,Rb/Sr 值为 0.299~0.663,Cu/Zn 值为 0.235~0.390,V/(V+Ni) 值为 0.724~0.800,表明灵山岛页岩为海相还原环境。

3) 利用有机地球化学的测试分析手段,针对灵山岛 21 块沉积岩样品进行有机质丰度、有机质类型、有机质成熟度及生物标志化合物的相关分析,分析结果表明,灵山岛样品 TOC 含量较高,达到好和中等烃源岩标准,氯仿沥青“A”含量低,主要受热演化程度高和野外露头风化的影响,热解分析测定灵山岛样品有机质类型为腐殖型(Ⅲ型),全岩显微组分分析表明,灵山岛样品有机显微组分含量约占 0.5%~1.2%,以无结构镜质组、镜屑体和贫氢次生组分等来源于高等植物的组分为主,其中贫氢次生组分极其微小,几乎不见壳质组分、腐泥组分及富氢次生组分,灵山岛样品的热解峰温测定结果表明样品已经处于高成熟到过成熟阶段。

参 考 文 献

[1] 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.
Zhou Yaoqi, Zhang Zhengkai, Liang Wendong, et al. Late Mesozoic tectono-magmatic activities and prototype basin restoration in Eastern Shandong Province, China [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(1):137-156.

[2] 张振凯,周瑶琪,梁文栋,等. 山东灵山岛早白垩世构造演化及地质意义[J]. 海洋地质前沿,2016,32(4):1-10.
Zhang Zhenkai, Zhou Yaoqi, Liang Wendong, et al. Early cretaceous tectonic evolution of Lingshan Island in Shandong province and its geologic significance [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(4):1-10.

[3] 栾光忠,李安龙,王建,等. 青岛主要海岛成因分类及其地质环境分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2010,40(8):111-116.
Luan Guangzhong, Li Anlong, Wang Jian, et al. The geological origin division of the main sea island in Qingdao area and environment analysis [J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(8):111-116.

[4] 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.
Lu Hongbo, Wang Jun, Zhang Haichun. Discovery of the late mesozoic slump beds in Lingshan Island, Shandong and a pilot research on the regional tectonics [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(6):938-946.

[5] 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移岩块[J]. 地质论评,2012,58(1):80-81.
Lu Hongbo, Zhang Haichun, Wang Jun, et al. Giant landslides found in the Late Mesozoic turbidites in Lingshan Island, Jiaonan, Shandong [J]. Geological Review, 2012, 58(1):80-81.

[6] 梁钊,周瑶琪. 山东省灵山岛下白垩统浊积岩中与滑塌作用相关的软沉积物变形构造[J]. 地球科学,2017,42(10):1715-1724.
Liang Zhao, Zhou Yaoqi. Soft sediment deformation structures related to slumping in Lower Cretaceous turbidite in Lingshan Island, Shandong Province [J]. Earth Science, 2017, 42(10):1715-1724.

[7] 王安东,周瑶琪,闫华,等. 山东省灵山岛早白垩统软沉积物变形构造特征[J]. 古地理学报,2013,15(5):717-728.
Wang Andong, Zhou Yaoqi, Yan Hua, et al. Characteristics of soft sediment deformation structures of the Early Cretaceous in Lingshan Island of Shandong Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5):717-728.

[8] 邵珠福,钟建华,李勇,等. 青岛灵山岛晚中生代重力流沉积特征及环境分析[J]. 地质论评,2014,60(3):555-566.
Shao Zhufu, Zhong Jianhua, Li Yong, et al. The sedimentary characteristics and environmental analysis of Late Mesozoic gravity flows in Lingshan Island. Geological Review [J]. 2014, 60(3):555-566.

[9] 周瑶琪,周腾飞,张振凯,等. 山东省灵山岛下白垩统青山群火山地震软沉积物变形构造特征及成因机制[J]. 古地理学报,2017,19(4):567-582.
Zhou Yaoqi, Zhou Tengfei, Zhang Zhenkai, et al. Characteristics and formation mechanism of soft-sediment deformation structures related to volcanic earthquakes of the Lower Cretaceous Qingshan Group in Lingshan Island, Shandong Province [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(4):567-582.

[10] Yang R, Fan A, Han Z, et al. An upward shallowing succession of gravity flow deposits in the Early Cretaceous Lingshanda Formation, Western Yellow Sea [J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4):1553-1554.

[11] Liang Z, Zhou Y, Van L A J. Soft-sediment deformation structures in-

- duced by rapid sedimentation in Early Cretaceous turbidites, Lingshan Island, eastern China [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2018, 55(2): 118–129.
- [12] 于姗姗. 山东东部近海晚中生代裂陷盆地沉积相研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.
Yu Shanshan. Research on the Sedimentary Facies of Late Mesozoic Rift Basin in the Offshore Area of Eastern Shandong [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [13] 刘杨. 山东近海地区下白垩统沉积岩有机地球化学特征[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2014.
Liu Yang. Organic geochemical characteristics of Lower Cretaceous sedimentary in the offshore area of Shandong [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [14] 王安东, 周瑶琪, 张振凯, 等. 山东灵山岛莱阳群水下非构造裂缝特征及意义[J]. 地球学报, 2014, 35(3): 321–328.
Wang Andong, Zhou Yaoqi, Zhang Zhenkai, et al. Characteristics and significance of underwater non-tectonic cracks in Laiyang Group of Lingshan Island, Shandong Province [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35(3): 321–328.
- [15] Wang J, Chang S C, Lu H B, et al. Detrital zircon U–Pb age constraints on Cretaceous sedimentary rocks of Lingshan Island and implications for tectonic evolution of Eastern Shandong, North China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 96: 27–45.
- [16] 张海春, 吕洪波, 李建国, 等. 山东青岛早白垩世新地层单位——灵山岛组[J]. 地层学杂志, 2013, 37(2): 216–222.
Zhang Haichun, Lu Hongbo, Li Jianguo, et al. The Ling Shan Dao Formation: a new lithostratigraphic unit of the Early Cretaceous in Qingdao, Shandong, China [J]. Journal of Stratigraphy, 2013, 37(2): 216–222.
- [17] 吕洪波, 张海春, 王俊, 等. 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[J]. 地质论评, 2013, 59(1): 11–14.
Lu Hongbo, Zhang Haichun, Wang Jun, et al. The Early Cretaceous Flysch in Lingshan Island is not an intracontinental delta deposit—Answering Professor Zhong Jianhua [J]. Geological Review, 2013, 59(1): 11–14.
- [18] 钟建华. 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[J]. 地质论评, 2012, 58(6): 1180–1182.
Zhong Jianhua. Is the Mesozoic sedimentary rock of Lingshan Island a deep-water distant turbidite or an intra-continental delta? —Discussing with Professor Lu Hongbo [J]. Geological Review, 2012, 58(6): 1180–1182.
- [19] 邵珠福, 钟建华, 李勇, 等. 青岛灵山岛纹层控制的砂级颗粒支撑叠瓦构造的发现及其意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1761–1776.
Shao Zhufu, Zhong Jianhua, Li Yong, et al. Characteristics and sedimentary processes of lamina-controlled sand-particle imbricate structure in deposits on Lingshan Island, Qingdao, China [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(8): 1761–1776.
- [20] 杨仁超. 灵山岛早白垩世重力流沉积类型与沉积环境探讨[C] // 中国地质学会. 中国地质学会2015学术年会论文. 北京: 中国地质学会, 2015.
Yang Renchao. Discussion on types and sedimentary environment of the Early Cretaceous gravity flow deposits on Lingshan Island [C] // Geological Society of China Abstract of The 2015 Annual Meeting of Geological Society of China. Beijing: The 2015 Annual Meeting of Geological Society of China, 2015.
- [21] 刘菲菲, 周瑶琪, 许红, 等. 灵山岛成因特征、类型及其地质构造意义[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(3): 33–40.
Liu Feifei, Zhou Yaoqi, Xu Hong, et al. Origin of the Lingshan Island and Geotectonic Significance [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(3): 33–40.
- [22] 李守军, 张祥玉, 赵秀丽, 等. 山东省青岛市灵山岛下白垩统中发现鱼类和叶肢介化石[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 1–6.
Li Shoujun, Zhang Xiangyu, Zhao Xiuli, et al. Discovery of fish and conchostracan fossils in Lower Cretaceous in Lingshan Island, Qingdao, Shandong [J]. Geological Review, 2017, 63(1): 1–6.
- [23] 张振凯, 周瑶琪, 彭甜明, 等. 山东灵山岛莱阳群粉砂岩地球化学特征及意义[J]. 地球科学, 2017, 42(3): 357–377.
Zhang Zhenkai, Zhou Yaoqi, Peng Tianming, et al. Geochemical characteristics and signatures of siltstones from Laiyang Group at Lingshan Island, Qingdao, Shandong [J]. Earth Science, 2017, 42(3): 357–377.
- [24] 付永涛, 虞子治. 青岛垭口—八仙墩变质海相碎屑岩的属性 and 构造指示意义[J]. 地质科学, 2010, 45(1): 207–227.
Fu Yongtao, Yu Ziye. Attributes and tectonic implications of the metamorphic marine clastic rocks in the Yakou-Baxiandun, Qingdao [J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(1): 207–227.
- [25] 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.
Wu Tuoyu, Zhao Shujuan, Fu Yongtao. Petrogeochemical characteristics and its implication for hydrocarbon of the Lower Paleozoic marine siliclastic rocks in Baxiandun, Qingdao [J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(4): 1156–1169.
- [26] 王俊. 青岛崂山垭口白垩纪海相地层碎屑锆石 U-Pb 年龄[C] // 中国矿物岩石地球化学学会. 中国矿物岩石地球化学学会第14届学术年会论文集, 北京: 中国矿物岩石地球化学学会, 2013: 1.
Wang Jun. Cretaceous zircon U-Pb age of the Cretaceous marine strata in the Laoshan Yakou, Qingdao. [C] // Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Abstract Paper of the 14th Annual meeting of the Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Beijing: Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013: 1.
- [27] 赵广涛, 王德滋, 曹钦臣. 崂山花岗岩岩石地球化学与成因[J]. 高校地质学报, 1997(1): 2–4, 6, 9–16.
Zhao Guangtao, Wang Dezi, Cao Qinchun. The geochemistry and genesis of the Laoshan granitoids, Shandong province [J]. Geological Journal of China Universities, 1997(1): 2–4, 6, 9–16.
- [28] Wang J, Chang S C, Lin P, et al. Evidence of Early Cretaceous transpression in the Sulu orogenic belt, eastern China [J]. Tectonophysics, 2016, 687(?): 44–55.
- [29] 张岳桥, 李金良, 柳宗泉, 等. 胶莱盆地深部拆离系统及其区域构造意义[J]. 石油与天然气地质, 2006(4): 504–511.
Zhang Yueqiao, Li Jinliang, Liu Zongquan, et al. Detachment systems in deep of Jiaolai basin and their regional tectonic significance [J].

- Oil & Gas Geology, 2006(4):504–511.
- [30] 张岳桥, 赵越, 董树文, 等. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J]. 地学前缘, 2004(3):123–133.
- Zhang Yueqiao, Zhao Yue, Dong Shuwen, et al. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in Eastern China and adjacent areas and their geodynamic background[J]. Earth Science Frontiers, 2004(3):123–133.
- [31] Zhang Y, Dong S, Shi W. Cretaceous deformation history of the middle Tan-Lu fault zone in Shandong Province, eastern China[J]. Tectonophysics, 2003, 363(3–4):243–258.
- [32] 张岳桥, 董树文, 赵越, 等. 华北侏罗纪大地构造: 综评与新认识[J]. 地质学报, 2007(11):1462–1480.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, et al. Jurassic tectonics of North China: a Synthetic View [J]. Acta Geologica Sinica, 2007(11):1462–1480.
- [33] 刘华, 李凌, 吴智平. 胶莱盆地烃源岩分布及有机地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2006(6):574–580, 585.
- Liu Hua, Li Ling, Wu Zhiping. Distribution and organic geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the jiaolai basin petroleum[J]. Geology & Experiment, 2006(6):574–580, 585.
- [34] Mutti E, Lucchi F R. Turbidites of the northern Apennines: introduction to facies analysis [J]. International Geology Review, 1972, 20(2):125–166.
- [35] Wu T, Fu Y. Cretaceous deepwater lacustrine sedimentary sequences from the Northernmost South China Block, Qingdao, China[J]. Journal of Earth Science, 2014, 25(2):241–251.
- [36] Roser B P, Cooper R A, Nathan S, et al. Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance, and tectonic setting of the lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1996, 39(1):1–16.
- [37] Yang R, Fan A, Han 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, 2017, 91(1):367–368.
- [38] Yang R, Vam L A J. 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.
- [39] Yang T, Cao Y, Friis H, et al. Origin and evolution processes of hybrid event beds in the Lower Cretaceous of the Lingshan Island, Eastern China[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2018;1–18.
- [40] 秦雁群, 计智锋, 万仑坤, 等. 海相深水碎屑岩层序地层学理论进展及关键问题[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1):12–21.
- Qin Yanqun, Ji Zhifeng, Wan Lunkun, et al. Theory progress and key issues of deep water marine clastic sequence stratigraphy[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1):12–21.
- [41] 任拥军, 查明. 胶莱盆地东北部白垩系烃源岩有机地球化学特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003(5):16–20, 2.
- Ren Yongjun, Zha Ming. Organic geochemistry characteristics of cretaceous source rocks in northeast Jiaolai Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2003(5):16–20, 2.
- [42] 张领军, 辛巍. 胶莱盆地水南组页岩有机地球化学特征[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(1):9–12.
- Zhang Lingjun, Xin Wei. Organic geochemical characteristics of water group shale in Jiaolai Basin[J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(1):9–12.
- [43] Saller A, Lin R, Dunham J. Leaves in turbidite sands: The main source of oil and gas in the deep-water Kutei Basin, Indonesia[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(10):1585–1608.
- [44] Gastaldo R A, Allen G P, Huc A Y. Detrital peat formation in the tropical Mahakam River delta, Kalimantan, eastern Borneo: Sedimentation, plant composition, and geochemistry[J]. Geological Society of America Special Papers, 1993, 286:107–118.
- [45] 李志明, 钱门辉, 黎茂稳, 等. 中-低成熟湖相富有机质泥页岩含油性及赋存形式——以渤海湾盆地渤南洼陷罗63井和义21井沙河街组一段为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3):448–456.
- Li Zhiming, Qian Menhui, Li Maowen, et al. Oil content and occurrence in low–medium mature organic-rich lacustrine shales: A case from the 1st member of the Eocene-Oligocene Shahejie Formation in Well Luo-63 and Yi-21, Bonan Subbasin, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3):448–456.
- [46] Moldovan J M, Dahl J, Huizinga B J, et al. The molecular fossil record of oleanane and its relation to angiosperms[J]. Science, 1994, 265(5173):768–771.

(编辑 张亚雄)