

渤海东部和黄海北部表层有用重砂资源及影响因素

黄 龙, 耿 威, 王中波, 蓝先洪, 孟祥君, 陆 凯, 李日辉*

(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, 青岛 266071;

国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室, 青岛 266071;

中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛 266071; 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘 要:通过对渤海东部和黄海北部海域 234 个表层沉积物样品进行重矿物鉴定, 计算了独居石、石榴石、钛铁矿和锆石 4 种有用重砂矿物的品位并分析了异常分布特征, 结果显示, 异常品位主要富集在渤海海峡北部、辽东半岛东南侧和北黄海南部海域。粒度分析表明, 在砂质含量越高、分选性越好的沉积物中重砂矿物越利于富集; 矿物组分主要来自鸭绿江、辽东半岛东南侧海岸和长山列岛冲刷物质、老铁山水道侵蚀物质及全新世前残留沉积物质; 水动力条件影响明显: 沿岸流有效搬运了近源河流的输入物质, 北黄海强潮流促进了重矿物砂矿的形成富集, 而黄海暖流则有效限制了黄河源细粒物质的扩散, 对已富集区域起到了重要保护作用。

关键词:表层沉积物; 有用重砂; 异常品位; 渤海东部; 黄海北部

中图分类号: P744.2

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2016.05006

海砂资源作为海洋矿产的重要组成部分, 是仅次于海底石油天然气的第 2 大矿产资源, 近半个世纪以来受到各个国家的广泛重视^[1]。我国海岸线绵长, 砂质海岸的长度约占 1/4, 近岸和大陆架浅海区蕴藏着丰富的砂矿资源^[2]。目前, 在海底砂矿的开发中, 滨海砂矿的调查相对较多, 已查明的我国滨海砂矿资源储量可达 30 多亿吨, 锆石、钛铁矿、独居石、建筑用砂等 10 余种砂矿资源

已广泛开发应用到各行各业中, 在高新技术与新材料开发中发挥了重大作用^[3]。随着经济发展对矿产资源的大量需求, 陆地矿产资源的锐减枯竭, 滨海岸线环境保护压力的日渐增大, 寻找开发浅海砂矿资源的优势将越来越凸显。

浅海重砂矿物是海砂资源的重要组成部分。近年来, 多位学者已对部分中国近海区重矿物砂矿资源分布进行了调查研究, 取得了很多成果。谭启新等宏观研究了我国的海洋砂矿, 并划分了 10 余个成矿带, 介绍了我国滨浅海的砂矿分布规律^[4], 在南沙海槽南部^[5]、台湾海峡西部^[3]、东海陆架^[6]等部分浅海区均有针对表层重砂矿资源的评价研究。

渤海、黄海为半封闭的陆架浅海, 研究海域跨越渤海东部及黄海北部海域, 海底地形比较复杂, 分布有水下岸坡、台地、岛礁、潮流沙脊、浅滩、海峡、陆架平原和陆架洼地等地貌单元^[7], 具有丰富

收稿日期: 2016-02-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41506083, 41040041, 41206053, 41076018); 中国地质调查局地质调查项目(GZH200800501, GHZ201300501, GHZ201400201, GHZ201500-201, GHZ201400205); 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室开放基金项目(MRE201406)

作者简介:黄 龙(1983—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事海洋地质、矿产研究工作。E-mail: huanglong0128@qq.com

* **通讯作者:**李日辉(1961—), 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋地质研究工作。E-mail: rihuiliqd@yahoo.com.cn

的矿产资源^[8]。前人已对渤海和黄海的部分海域表层沉积物碎屑矿物进行了相关研究,并分析了物质来源^[9-11]。对海砂资源的调查和研究主要集中在山东近岸及辽东湾内的滨浅海海域^[12,13],对浅海重砂资源的调查程度较低。本文利用渤海东部和黄海北部海域取样间隔较密集的调查数据进行连片分析,在重矿物分析的基础上讨论独居石、石榴石、钛铁矿和锆石 4 种重砂资源富集状况及其影响因素。

1 样品和方法

本文所鉴定的 234 个表层样品是青岛海洋地质研究所委托“勘 407 号”和“县渔 1 号”调查船于 2008—2010 年间完成采集的,使用箱式采样器海底取样,取箱体顶部的表层沉积物(0~5 cm)进行分析。取样位置分布如图 1 所示。

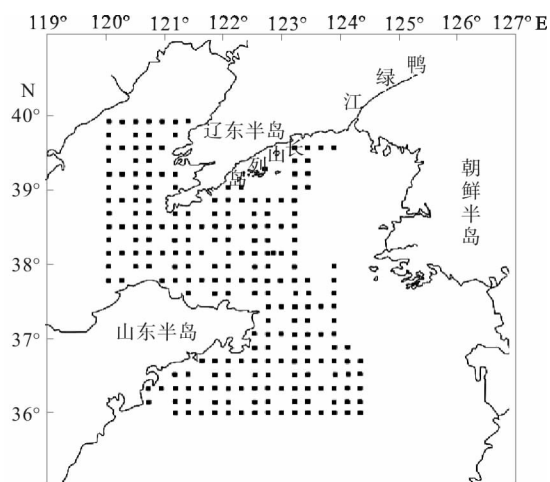


图 1 调查研究海域和站位设置

Fig. 1 The study area and sample locations

1.1 重矿物分析

重矿物分析流程如下:取 100~150 g 沉积物样品称重、烘干,然后在清水中浸泡 24 h 后,用孔径为 0.063 和 0.125 mm 的双层铜筛淘洗得到 0.063~0.125 mm 粒级的组分,样品再次烘干后用缩分法选取 3~4 g,加三溴甲烷(CHBr_3)重液分离(重液密度为 2.89 g/cm^3),分离后再烘干称重,得到轻、重矿物,再分别称重得此粒级碎屑矿物质量百分含量。重矿物的鉴定研究工作借助于

双目立体镜和偏光显微镜油浸法,辅以微化试验进行鉴定和统计。采用条带数颗粒法计数,每个样品鉴定矿物颗粒数在 300 颗以上,以实际鉴定的颗粒数为 100%,分别求得沉积物中不同重矿物的颗粒百分含量。

1.2 粒度分析

样品粒度分析按海洋地质调查技术规范要求进行,取 10 g 干样,分别用 10% 的 H_2O_2 和 0.1 mol/L 的 HCl 浸泡,以消除有机质和自生盐酸的影响。采用 Malvern 公司 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定,粒级标准采用尤登—温德华氏等比制 Φ 值粒级标准表示,粒度参数计算采用 Folk 和 Ward 粒度计算公式^[14]。

2 结果

2.1 沉积物类型及粒级组分分布

研究海域底质沉积物类型较为简单,按 Folk 分类方案主要有粉砂、砂质粉砂、粉砂质砂、砂及少量含砾沉积物^[15]。表层沉积物粒径变化较大,按颗粒粒径可划分为砂($-1\Phi\sim4\Phi$)、粉砂($4\Phi\sim8\Phi$)、黏土($>8\Phi$)3 种组分,各粒级分布如图 2 所示。三者粒级百分含量平均值分别为 35%、52%、13%。①砂粒级的百分含量分布如图 2a 所示,其含量变化很大,分布范围为 0~97%,但是砂含量的高值区($>50\%$)分布面积较小,主要位于辽东半岛东南侧西朝鲜湾潮流沙脊区的西缘及北黄海南侧海底陆架平原区,呈 SN 向分布,另外在渤海海峡北部老铁山水道附近及渤海中浅滩海域也有小面积分布;②粉砂粒级的百分含量分布如图 2b 所示,其含量范围为 3%~76%。含量高值区($>60\%$)面积较大,与砂的低值区分布比较一致,主要分布在环山东半岛周围和北黄海的西部及南黄海中北部海域;③黏土粒级的百分含量分布如图 2c 所示,其含量分布在 0~31%之间。含量 $>20\%$ 的区域仅分布在南黄海中北部海域。从表层沉积物粒度组分总体组成来看,主要以粉砂组分为主,黏土组分含量最少,但是砂质组分在局部含量较高。呈现为北粗南细、东西两侧较粗的分布格局。

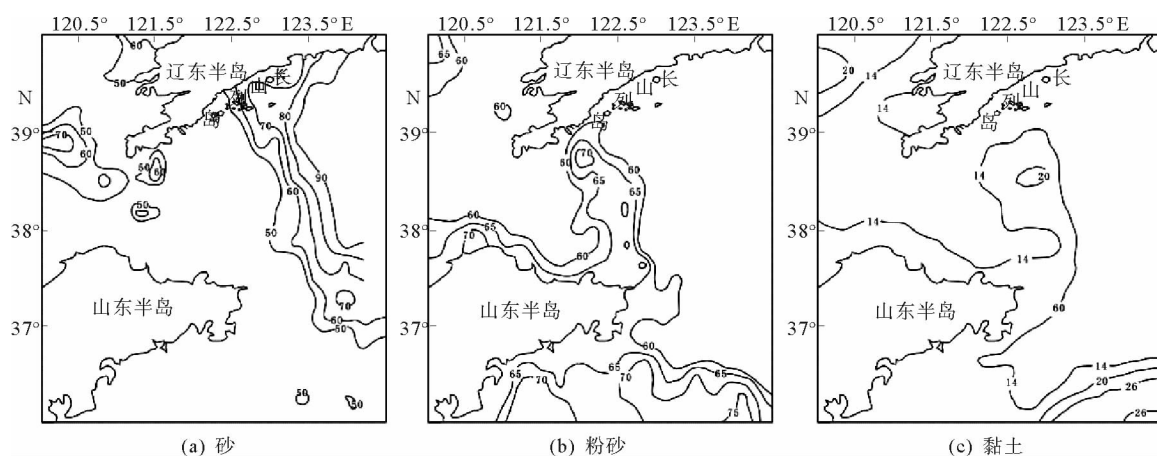


图 2 表层沉积物砂(a)、粉砂(b)、黏土(c)百分含量分布

Fig. 2 The grain size compositions of the surface sediments

2.2 重矿物组成与目的重砂矿物

在渤海东部和黄海北部海域 234 个表层沉积物中共鉴定出重矿物 40 余种,主要分布于环辽东半岛海域、渤海东部海域、西朝鲜湾外围海域和北黄海陆架中部海域。鉴定结果表明,重矿物常见的有(>5%)普通角闪石、绿帘石、石榴石和黑云母;其次为(1%~5%)白云母、岩屑、赤铁矿、透闪石—阳起石、自身黄铁矿、钛铁矿、(斜)黝帘石、白钛石、电气石、磷灰石、生物碎屑;含量较少(<1%)但局部富集的矿物有榍石、磁铁矿、绿泥石、独居石、单斜辉石、碳酸盐、锆石、金红石、十字石、风化云母、磷钇矿、自生重晶石、蓝晶石、斜方辉石、金云母、蓝闪石、磁赤(褐)铁矿、黄玉、锐钛矿、砂线石、褐帘石、铬铁矿、海绿石、红柱石、黄河矿、符山石、宇宙尘、黄铁矿等。重砂矿物赋存于各种矿物的组合群体中,研究区内含量较高的有用重矿物是独居石、石榴石、钛铁矿和锆石,这 4 种重矿物也是渤海东部和黄海北部海域重砂资源的目标矿种。

2.3 重砂矿物的品位及分布

2.3.1 品位计算

分析结果显示:在渤海东部和黄海北部海域表层沉积物中 0.125~0.063 mm 粒级的重矿物含量平均为 2.55%,最高值为 15.38%,是重矿物富集的主要粒级。

沉积物中的重矿物含量可以用颗粒百分含

量、重量百分含量和品位来表示,其中,品位是对全岩中重矿物含量进行评价的最好指标。参照国土资源部《矿产资源储量划分标准》(2000 年)和《海洋地质调查规范》(1992 年)砂矿品位评价要求,按照 1975 年《海洋调查规范》的公式计算独居石、石榴石、钛铁矿和锆石的品位。在计算品位时,独居石、石榴石、钛铁矿和锆石的比重分别取 5.2、4.2、4.6 和 4.4,每立方米沉积物的干重以 1 800 kg 计。鉴定重矿物时只统计了优势粒级的重矿物百分含量,所以计算出的品位值较全岩偏低,故可适当降低品位要求^[6]。各有用重砂矿物品位级别按表 1 来划分。

表 1 各有用重砂矿物品位级别(据文献[5,16])

Table 1 Grades of different valuable heavy mineral sand (from references [5,16])

品位等级	品位/g·m ⁻³			
	钛铁矿	石榴石	锆石	独居石
工业品位	15 000	6 000	2 000	300
边界品位	10 000	4 000	1 000	100
异常品位	2 500	1 000	250	50

2.3.2 品位分布

独居石是异常站位出现最多的重砂矿物,异常分布面积最大(图 3a)。异常品位站位共计 58 个,平均品位值 165 g/m³,边界品位的站位多达 33 个,8 个站位达到了工业品位。圈闭的异常区呈不规则斑块状连片分布,分别位于渤海海峡北

部海域、辽东半岛东南侧海域和北黄海南部海域,位于渤海海峡北部海域和辽东半岛东南侧海域的异常较显著,部分站位达工业品位。其余的异常均以个体站位出现,呈斑点状零星散布。

石榴石是异常站位仅次于独居石的重砂矿物,异常面积较大(图 3b)。异常站位共计 53 个,平均品位值 2 528 g/m³,8 个站位在边界品位以上。圈闭的异常区分布情况与独居石相似,4 处规模较大,呈不规则斑块状连片分布,以位于北黄海南端 124°E 附近的异常区最显著,均值可达 3 433 g/m³,其中异常区内个别站位可达工业品位以上,最大品位值为 14 345 g/m³。其余的异常

站位呈零星分布。
钛铁矿异常品位较少,共出现 7 个,品位值较低,均值为 3 460 g/m³,异常区呈斑块状分布(图 3c)。分别位于渤海东部海域、辽东半岛南侧近岸海域和北黄海南部海域。

锆石异常站位共出现 2 个,分布面积较小(图 3d),呈斑块状分布于北黄海南端 124°E 附近,品位值较高,其平均品位值可达 1 551 g/m³,其中 1 个站位达工业品位以上。

4 种重砂矿物异常品位的空间分布关系比较密切,其中尤以独居石和石榴石的异常分布显著(图 3、表 2)。通过异常分布位置来看,往往都是几种矿物相互伴生。总体来看,重砂矿物主要分布在 3 处海域:渤海海峡北部、辽东半岛东南侧和北黄海南部 124°E 附近。

3 讨论

重砂矿物的富集受到多种条件的影响,其中沉积状况、物质来源和水动力条件是最主要的制约因素。

3.1 沉积状况

沉积物粒度分布是物质来源和输移路径的综合反映^[17],也是影响重砂矿物富集的一个重要因素。世界上大部分陆架区的钛铁矿、锆石等重砂矿物赋存于细砂和粗粉砂中^[3]。我国在东海、南海等浅海陆架海域已发现的有用重矿物高含量区也受沉积物粒级影响较大,主要在砂质沉积物中富集^[13]。

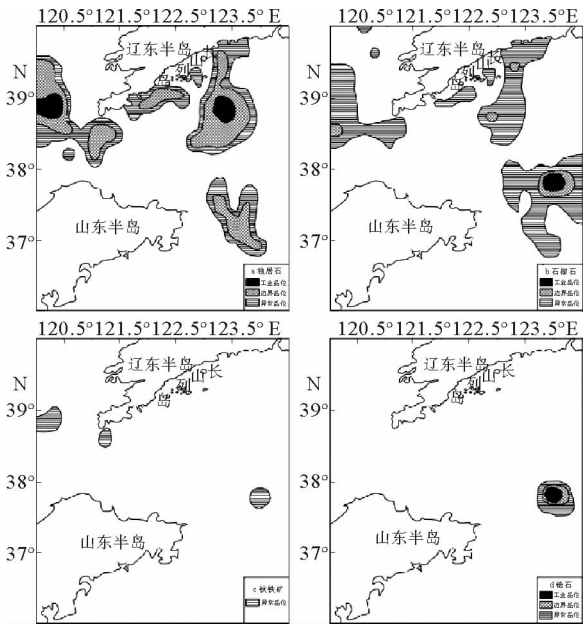


图 3 研究区有用重砂矿物品位分布
Fig. 3 Grade of valuable heavy minerals in the studied area

表 2 重矿物品位值与沉积物砂组分含量(%)、平均粒径(Φ)、分选系数(σ)关系
Table 2 Relation between grades of heavy mineral and sand(%),median diameter(Φ),sorting coefficient(σ) in sediments

	异常品位			边界品位			工业品位		
	砂含量均值 %/个数	Φ 均值/个数	σ 均值/个数	砂含量均值 %/个数	Φ 均值/个数	σ 均值/个数	砂含量均值 %/个数	Φ 均值/个数	σ 均值/个数
独居石	46.67/(58)	4.68/(58)	1.92/(58)	47.52/(33)	4.63/(33)	1.89/(33)	57.81/(8)	4.20/(8)	1.82/(8)
石榴石	50.60/(52)	4.50/(52)	1.92/(52)	59.19/(8)	4.52/(8)	1.72/(8)	93.40/(1)	2.04/(1)	0.85/(1)
锆石	64.93/(3)	3.60/(3)	1.85/(3)	93.40/(1)	2.04/(1)	0.85/(1)			
钛铁矿	65.38/(8)	3.75/(8)	1.81/(8)						

对研究区4种重砂矿物品位值与沉积物中砂质含量(%)均值、平均粒径(Φ)均值、分选系数(σ)均值相关关系进行统计(表2)。重砂矿物异常级以上站位沉积物中砂含量均值介于46.67%~93.40%,平均粒径(Φ)均值介于4.68 Φ ~2.04 Φ ,分选系数(σ)均值介于1.92~0.85之间。单种矿物品位值的大小与沉积物中砂含量呈正相关性,而与平均粒径和分选系数存在负相关性,说明砂质含量越高、分选性越好的沉积物中越利于重砂矿物的富集。结合图2、3来看,异常级以上品位重砂矿物赋存的位置与砂质含量高值区(>50%)的范围大致相当,也很好地反映了重砂矿物富集受粗粒沉积物分选集中过程的影响。

3.2 物质来源

成矿物质来源是重砂矿物形成的物质基础,研究区紧挨山东半岛、辽东半岛和朝鲜半岛,属半封闭海域,表层沉积物主要依靠陆源河流输入、海底和沿岸侵蚀物质及部分前全新世残留沉积物质^[18]。注入研究区的主要河流有黄河、辽东半岛近岸河流及部分朝鲜半岛河流。其中,黄河是周边物源输入量最大的河流,年均输沙量超过 10^9 t,绝大部分泥沙沉积在河口三角洲区,其中约1%的细颗粒悬移质组分被输运过渤海海峡进入北黄海,黄河输出物质主要影响渤海的中南部、北黄海南部和南黄海中部海域,是研究区内细颗粒沉积区的主要物质来源。环山东半岛泥质区是黄河物质向外海输运而产生的规模巨大的物质汇,最厚处可达40 m^[19];北黄海南部和南黄海中部的细颗粒沉积区主要为冷涡沉积,物源也是以现代黄河沉积物为主^[20]。尽管黄河输入量巨大,但研究区内的重砂矿物主要富集在渤海海峡北部、辽东半岛东南侧和北黄海南端124°E附近,说明受黄河物源的影响比较微弱。辽东半岛东南侧海域分布的重砂矿物主要是石榴石和独居石,受辽东半岛近岸河流物源的影响较大^[10],齐军等^[21]计算柱状样沉积通量发现辽东半岛东南沿岸海域接受了较多的鸭绿江物质,李艳等^[22]通过对北黄海的碎屑矿物特征研究,详细划分辽东半岛东南沿岸海域矿物来源,认为长山列岛以东海域,靠近西朝鲜湾潮流沙脊沉积区,碎屑矿物主要来源于鸭绿江

和部分改造的残留沉积,而辽东半岛南岸长山列岛一大连湾附近海岸为基岩岬湾海岸,风浪作用强,海岸侵蚀强烈,陆域水土流失严重^[23],碎屑矿物主要是近海沿岸及附近岛屿冲刷物质近源堆积而成^[22]。渤海海峡北部分布的重砂矿物富集在老铁山水道附近的辽东半岛南岸潮流沙脊末端和辽东浅滩潮流沙脊末端及部分渤中浅滩沙席上,以石榴石、独居石和钛铁矿为主,与辽东浅滩矿物亚区的重矿物特征一致^[9],较早的研究观点认为是残留沉积的一部分^[24]。刘振夏等^[25]通过渤海东部世潮流沉积体系研究发现,物质来自老铁山水道的侵蚀堆积。北黄海南端中部海域分布的重砂矿物,包括石榴石、独居石、锆石和钛铁矿,富集在黄海陆架平原上,大量的研究认为物源主要是末次盛冰期以来的河口—滨岸相残留沉积物^[26]。

3.3 水动力条件

水动力条件是影响重砂矿物富集的关键因素之一,渤海东部和黄海北部海域主要发育了黄海暖流、沿岸流和潮流(图4)。

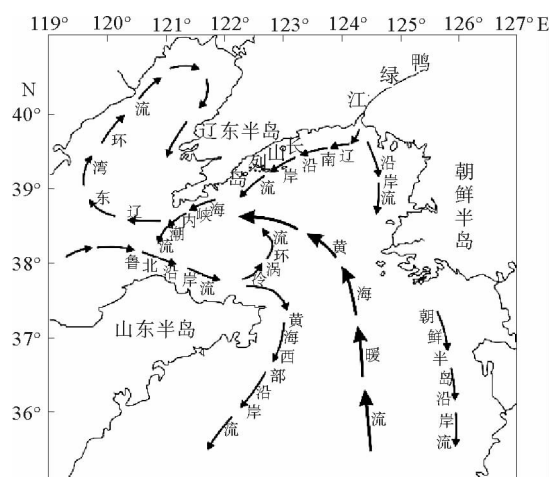


图4 研究区海域流系分布示意图

(据文献[15,27]修改)

Fig. 4 The distribution of the current system in the studied area (modified from references [15,27])

黄海暖流是控制黄海水团分布和沉积作用最重要的水动力因素^[27],具有高温高盐的特点,流向终年向北,冬强夏弱,流速一般为5~10 cm/s^[28];李铁刚等^[29]通过探讨末次冰期以来黄海暖流系统发现,冬季山东半岛沿岸流与黄海暖流间有剪

切作用;王勇智等^[30]认为,夏季北黄海冷水团与沿岸流间也形成了剪切锋面,这些剪切锋面均对黄河源的细粒物质起到了阻隔作用,保护了富集在北黄海南侧中间海域的重砂矿物。

辽东半岛南侧沿岸流由鸭绿江等近岸输入的冲淡水组成,大致平行海岸流向渤海海峡,流向终年稳定,夏季受降雨影响,流速超过 10 cm/s,冬季受东北风影响,长山列岛海域流速也可达 10 cm/s^[18],主要为辽东半岛南侧长山列岛以东海域分布的重砂矿物提供了物质来源。而环山东半岛一侧发育的沿岸流,有冬强夏弱的特点,冬季流速可达 44 cm/s,夏季一般低于 20 cm/s^[18],主要携带黄河源的细粒沉积物越过渤海海峡进入黄海,对重砂矿物的富集起了破坏作用。

潮流作用在研究区的影响显著。高速的潮流足以使悬移质组分起动并迁移,使矿物成分再次发生物理和化学分异,比重小的、不稳定的组分被迁移,比重较大、成分较稳定的矿物就滞留在原地^[6]。末次盛冰期以来,伴随着阶段性海侵过程,潮流、波浪等高能往复流对北黄海陆架平原处残留的河口—滨岸相沉积物进行了不同程度的后期改造^[26]。而北黄海现代潮流作用较强, M_2 分潮流椭圆率 <0.4 ,呈现往复流性质^[25]。已有的潮流数据显示,辽东半岛至西朝鲜湾海域,潮差可达 4~10 m^[18],辽东半岛东南近岸流速为 60~100 cm/s,西朝鲜湾海域可达 120 cm/s^[28],这种高速的潮流导致了辽东半岛南侧和北黄海陆架平原处来自于鸭绿江物质、沿岸和岛屿冲刷侵蚀物质及全新世海侵前残留沉积物质的分选、搬运和再沉积过程,推进了重矿物组分的分选富集,有利于重矿物砂矿的形成。潮流作用不仅影响重砂矿物的富集,在部分海域还提供成矿物质的来源。分布在渤海海峡北部的重砂矿物恰好就分布在老铁山水道两侧,受潮流的影响最大,此处潮流经过老铁山水道,水道内实测流速最大为 350 cm/s^[31],因水道处水量集中,水道变窄,潮流增强,海底和近岸侵蚀强烈,侵蚀厚度可达 40 m^[32]。刘振夏等^[25]研究发现,涨潮流侵蚀海底物质向西进入渤海,随着流速减弱形成涨潮流三角洲,后经过往复潮流和旋转潮流的改造,形成辽东浅滩潮流沙脊和渤中浅滩潮流沙席。而落潮流则侵蚀海底物质进入北黄海,因地形拓宽流速减弱导致就近堆积

或随潮流作用转向 NE 输运,最后在往复潮流作用下在辽东半岛西南侧形成侵蚀型或侵蚀—堆积型潮流沙脊^[31]。

4 结论

通过对渤海东部和黄海北部海域 234 个表层样重矿物分析,共鉴定出重矿物 40 余种,其中独居石、石榴石、钛铁矿和锆石含量较高,是该海域主要的重砂矿物。

重砂矿物异常区主要分布在辽东半岛东南侧、渤海海峡北部和北黄海南侧 124°E 附近海域,4 种重砂矿物异常品位的空间分布关系比较密切,尤以独居石和石榴石的异常分布显著,独居石 58 个异常站位,石榴石 53 个异常站位,多呈连片分布,而钛铁矿和锆石异常站位相对较少,呈斑点状分布较多。

粒度分析表明,在砂质含量越高、分选性越好的沉积物中重砂矿物越利于富集。成矿物质主要来自辽东半岛东南侧近岸河流、海岸和岛屿冲刷物质、老铁山水道侵蚀物质及全新世前残留沉积物质。水动力条件影响明显,沿岸流有效地搬运了近源河流的输入物质,北黄海强潮流有利于重矿物砂矿的形成富集,而黄海暖流则有效限制了黄河源细粒物质的扩散,对已富集区域起到了重要保护作用。

参考文献:

- [1] 王圣洁,刘锡清,李学杰,等. 滨、浅海沉积砂砾石资源的利用潜力[J]. 海洋地质动态,1997,13(11):1-3.
- [2] 高莲凤,李文平,要惠芳. 山东近海砂矿资源分布特征及成因[J]. 太原理工大学学报,2007,38(4):348-351.
- [3] 沈若慧,周定成,廖连招. 台湾海峡西部海底有用重砂高品位分布与找矿意义[J]. 台湾海峡,1999,18(2):131-139.
- [4] 谭启新. 中国的海洋砂矿[J]. 中国地质,1998,4:23-26.
- [5] 陈忠,颜文,古森昌,等. 南沙海槽南部表层重砂矿物及其成矿远景[J]. 海洋地质与第四纪地质,2003,23(1):13-18.
- [6] 黄龙,张志珣,杨慧良. 东海陆架北部表层有用重砂资源形成条件及成矿远景[J]. 海洋地质前沿,2012,28(7):10-16.
- [7] 刘忠臣,刘保华,黄振宗,等. 中国近海及邻近海域地形地貌[M]. 北京:海洋出版社,2005:132-136.
- [8] 李家彪. 中国区域海洋学——海洋地质学[M]. 北京:海洋

- 出版社,2012:76-204.
- [9] 王利波,李 军,赵京涛,等.辽东湾表层沉积物碎屑矿物组合分布及其对物源和沉积物扩散的指示意义[J].海洋学报,2014,36(2):66-74.
- [10] 高建华,李 军,汪亚平,等.鸭绿江河口及近岸海域沉积物中重矿物组成、分布及其沉积动力学意义[J].海洋学报,2009,31(3):84-94.
- [11] 王利波,李 军,赵京涛,等.辽东湾周边河流沉积物碎屑矿物组成及其物源意义[J].沉积学报,2013,31(4):663-671.
- [12] 金庆煊.海底矿产[C].北京:清华大学出版社,2001:9-176.
- [13] 谭启新,孙 岩.中国滨海砂矿[M].北京:科学出版社,1988:33-142.
- [14] 黄 龙,张志珣,耿 威,等.闽浙沿岸东部海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J].海洋地质与第四纪地质,2014,12(6):175-183.
- [15] 蓝先洪,密蓓蓓,李日辉,等.渤海东部和黄海北部沉积物中重金属分布特征[J].中国环境科学,2014,34(10):2660-2668.
- [16] 金秉福,林振宏,时振波,等.东海外陆架晚更新世沉积物中的有用重矿物及其资源潜力[J].古地理论,2004,6(3):372-379.
- [17] 程 鹏,高 抒.北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输运趋势[J].海洋与湖沼,2000,31(6):604-615.
- [18] 陈晓辉.北黄海陆架晚第四纪地层结构与物源环境演变研究[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2014.
- [19] 李 艳.北黄海末次冰消期以来沉积特征及物源环境指示[D].青岛:中国科学院海洋研究所,2011.
- [20] 王 伟,李安春,徐方建,等.北黄海表层沉积物粒度分布特征及其沉积环境分析[J].海洋与湖沼,2009,40(5):525-531.
- [21] 齐 军,李凤业,宋金明,等.北黄海沉积速率及其沉积通量[J].海洋地质与第四纪地质,2004,24(2):9-14.
- [22] 李 艳,李安春,黄 朋.大连湾近海表层沉积物重矿物组合特征及其物源环境指示[J].海洋地质与第四纪地质,2011,31(6):13-20.
- [23] 李培英,杜 军,刘乐军,等.中国海岸带灾害地质特征及评价[M].北京:海洋出版社,2007.
- [24] 刘锡清.中国陆架的残留沉积[J].海洋地质与第四纪地质,1987,7(1):1-14.
- [25] 刘振夏,夏东兴,汤毓祥,等.渤海东部全新世潮流沉积体系[J].中国科学(B辑),1994,24(12):1331-1338.
- [26] 李绍全,刘 健,王圣洁,等.南黄海东侧陆架冰消期以来的海侵沉积特征[J].海洋地质与第四纪地质,1997,17(4):1-12.
- [27] 刘 健,李绍全,王圣洁,等.末次冰消期以来黄海海平面变化与黄海暖流的形成[J].海洋地质与第四纪地质,1999,19(1):13-23.
- [28] 李乃胜,赵松龄,鲍 瓦西里耶夫.西北太平洋边缘海地质[M].哈尔滨:黑龙江教育出版社,2001.
- [29] 李铁刚,江 波,孙荣涛,等.末次冰期以来东黄海暖流系统的演化[J].第四纪研究,2007,27(6):945-954.
- [30] 王勇智,乔璐璐,杨作升,等.夏、冬季山东半岛东北部沿岸悬浮物输送机制的初步研究[J].泥沙研究,2012(5):49-57.
- [31] 陈晓辉,张训华,李日辉,等.辽东半岛南海域潮流沙脊及影响因素[J].海洋地质与第四纪地质,2013,33(1):11-17.
- [32] 刘振夏,汤毓祥,王揆洋,等.渤海东部潮流动力地貌特征[J].黄渤海海域,1996,14(1):11-19.

CHARACTERISTICS AND INFLUENCE FACTORS OF VALUABLE HEAVY MINERALS IN SURFACE SEDIMENTS OF THE EASTERN BOHAI SEA AND THE NORTHERN YELLOW SEA

HUANG Long, GENG Wei, WANG Zhongbo, LAN Xianhong, MENG Xiangjun, LU Kai, LI Rihui*

(Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China; Key Laboratory of Coastal Wetland Biogeosciences, China Geological Survey, Qingdao 266071, China; Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China)

Abstract: In this paper, we synthetically analyzed the heavy sands picked out from the 234 surface sediment samples taken from the Eastern Bohai Sea and the Northern Yellow Sea. It seems that the heavy minerals of monazite, garnet, ilmenite and zircon are economically valuable and thus their grades are measured and calculated. High grade areas are located in the northern Bohai Strait, the

southeast Liaodong Peninsula and the southern North Yellow Sea. Grain size analysis indicates that the sediments are high in sand content with better sorting. It is inferred that the Yalu River, south-east coast of the Liaodong Peninsula, Changshan Archipelago, Laotieshan Channel and the relict deposits before the Holocene are provenances of the heavy minerals. The enrichment of valuable heavy sands depends upon hydrodynamic conditions, such as, a) coastal current, which effectively transported the sediments from proximal rivers; b) strong tidal current from the north Yellow Sea, which worked for the enrichment of heavy placer minerals; c) the Yellow Sea warm current, which effectively constrained the diffusion of fine grained material from the Yellow River and protected the enrichment region of valuable heavy minerals.

Key words: surface sediments; valuable heavy minerals; anomaly grade; eastern Bohai Sea; northern Yellow Sea

~~~~~  
(上接第 12 页)

## GEOPHYSICAL FIELD AND LITHOSPHERE OF THE LIAODONG BAY

ZHAO Weina<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xunhua<sup>2,3,4</sup>, MENG Xiangjun<sup>2,3,4</sup>, WU Zhiqiang<sup>2,3,4\*</sup>

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, China;

3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 4 Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resource and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The Liaodong bay is a Cenozoic continental rift developed along the Tanlu Fault. The deep structure constrains the shallow. A detailed summarization and an integrated analysis of gravity field, magnetic field, seismic wave, heat flow, geothermal distribution and lithosphere speed are made for the Laodong bay in the paper. The study demonstrates that the Liaodong Bay is characterized by high deep gravity, relatively low heat flow with shallow Curie isothermal surface and intra-crustal and intra-mantle high conductive layers. The lower average velocity of Pn wave in this area may owe its origin to the heat flow intrusion into the top of upper mantle. Based on the direction of fast wave towards NE-trend, it is inferred that the strike slipping of eastern Liaodong bay is weaker than that of the Laizhou Bay and the Bozhong with the western Liaodong Bay as the weakest close to zero. The crust of the Liaodong Bay is obviously thinning and the uplifted Curie isothermal surface corresponds to the crust thinning area. It is very likely that the extensional detachment occurs in the process of crust thinning.

**Key words:** geophysical field; lithosphere; Liaodong Bay