

王庆同, 赵吉圆, 王海根, 等. 渤海海峡西南部海底沉积物重矿物组成与物源[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(6): 22-31.

WANG Qingtong, ZHAO Jiyuan, WANG Haigen, et al. Composition and provenance of heavy minerals in surface sediments in the southwestern Bohai Strait[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(6): 22-31.

# 渤海海峡西南部海底沉积物重矿物组成与物源

王庆同<sup>1</sup>, 赵吉圆<sup>2</sup>, 王海根<sup>1</sup>, 杨鹏<sup>1</sup>, 宇星辰<sup>1</sup>, 张家浩<sup>1</sup>, 毛方松<sup>1</sup>, 刘金庆<sup>2\*</sup>

(1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000; 2 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266579)

**摘要:**渤海海峡是黄渤海交接地带, 周边岛屿散布, 地形条件复杂, 沉积物类型丰富, 是研究海洋动力系统的热点地区之一。通过对 32 个表层沉积物的重矿物分析, 研究了渤海海峡西南部海域的重矿物组成、分布和物质来源。结果表明, 研究区矿物组合为普通角闪石-绿帘石-黑云母-褐帘石, 可将其划分成 3 个矿物分区。庙岛群岛矿物区 (I 区) 为普通角闪石-绿帘石-钛铁矿-石榴子石矿物组合, 物质主要来自庙岛群岛岛屿冲刷物; 中部矿物区 (II 区) 为普通角闪石-绿帘石-黑云母矿物组合, 主要来源于黄河物质; 西部矿物区 (III 区) 为普通角闪石-绿帘石-黑云母-褐帘石矿物组合, 是黄河物质、山东半岛及庙岛群岛岛屿冲刷物的混合物。不同来源的物质在海洋动力综合作用下进行搬运、沉积, 最终导致了矿物组合分区之间的物质差异。

**关键词:**渤海海峡; 重矿物分布; 组合分区; 物源

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.259

## 0 引言

重矿物是研究海洋沉积物的一种重要手段, 蕴含着物质来源、运移趋势和矿物分异等信息, 可反映海洋水动力条件、沉积特征和环境演化规律<sup>[1-2]</sup>。重矿物比重较大, 性质稳定, 不易被破坏, 能抵抗较强的风化, 在运移沉积的过程中可以较好地保留物源区的特征<sup>[3]</sup>。重矿物的成分主要受母岩性质和外力地质作用等因素的影响<sup>[4]</sup>。重矿物的分布受水动力条件的影响, 而重矿物自身的物理性质 (如比重、粒径、形状) 及化学性质等因素也会制约重矿物的分布<sup>[5]</sup>。

渤海海峡处在山东半岛和辽东半岛之间, 北至老铁山角, 南到蓬莱登州角, 平均水深约为 25 m, 最大水深 > 80 m<sup>[6]</sup>。渤海海峡沉积物类型主要分为砂、

泥质砂、粉砂质砂、砂质粉砂、砂质泥 5 种, 其沉积物主要来源于陆源碎屑和黏土组分, 其次是生物碎屑组分, 粒度效应是影响元素分布的主要因素<sup>[7-9]</sup>。前人通过黏土矿物<sup>[10]</sup>、稀土元素<sup>[11]</sup>、矿物组成和粒度分布<sup>[12-13]</sup>等揭示出渤海海底物质大多来自于黄河, 黄河入海沉积物的颗粒大小及其运移的方向会显著地影响渤海的沉积物分布。北黄海东部海域, 其沉积物主要来自鸭绿江<sup>[14]</sup>。山东半岛近岸海域的沉积物主要来自于沿岸流搬运的黄河物质<sup>[10]</sup>。此外, 前人利用重矿物分析研究了大连湾近海地区<sup>[15]</sup>、黄海地区<sup>[16]</sup>和渤海湾北部地区<sup>[17]</sup>的物质来源, 但对本地区的研究尚有不足。对渤海海峡西南部的底质类型, 矿物分布以及物质来源都有待深入探讨。

因此, 本文拟通过重矿物分析方法, 研究渤海海峡西南部表层沉积物的重矿物组成和分布规律, 通过对比周边矿物组合差异, 探讨黄河及周边源区物质对沉积物物源的影响, 加深对渤海海峡西南部海域沉积作用和沉积环境的科学认识。

## 1 研究区概况

渤海海峡位于中国黄渤海分界处, 其南侧是山

收稿日期: 2022-09-09

资助项目: 中国地质调查局项目“渤海海峡南部海岸带 1:5 万综合地质调查”(DD20211578); 国家自然科学基金(41706074)

作者简介: 王庆同(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海岸带综合地质调查与研究工作。E-mail: wangqingtong@sohu.com

\* 通讯作者: 刘金庆(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事海洋地质科研与教学工作。E-mail: jinjingliu@hotmail.com

东半岛, 北侧是辽东半岛。渤海海峡南部水深较浅, 向北水深逐渐增大<sup>[18-19]</sup>。其中, 蓬莱登州角到砣矶岛之间海水较浅, 平均水深 20 m, 砣矶岛至大钦岛逐渐变深, 水深可达 35~40 m, 老铁山水道水深较深, 最深可超过 90 m<sup>[20]</sup>。研究区(37.893 7°—38.189 1°N, 120.317 8°—120.682 4°E)位于南、北长山岛以西, 覆盖大黑山岛附近海区和部分渤海海域。研究区西南部为海湾堆积平原地貌, 地势较平缓, 沉积物类型主要为粉砂质砂和砂质粉砂, 大多源自黄河和山东半岛沿岸, 水深一般 < 20 m, 全新世沉积厚度一般介于 5~10 m。海湾堆积平原向外延伸是地势平缓的陆架堆积平原, 海底沉积物主要为砂质粉砂、粉砂和砂。水下浅滩地貌主要分布在研究区东北部和大黑山岛周围<sup>[21]</sup>。渤海海峡附近海域

是规则半日潮, 据渤海附近验潮站的数据, 渤海平均潮差的变化范围为 0.16~2.71 m, 其中, 龙口平均潮差为 0.92 m, 最大潮差为 2.87 m; 蓬莱平均潮差为 1.06 m, 最大潮差为 1.69 m<sup>[22]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

2021 年 9 月下旬, 利用箱式取样器对渤海海峡西南部海底表层沉积物进行采集, 选取上部 0~5 cm 进行取样, 每个站位样品不少于 1000 g, 密封于双层聚乙烯袋内, 共获得 32 个样品(图 1), 送至实验室进行低温冷冻保存。

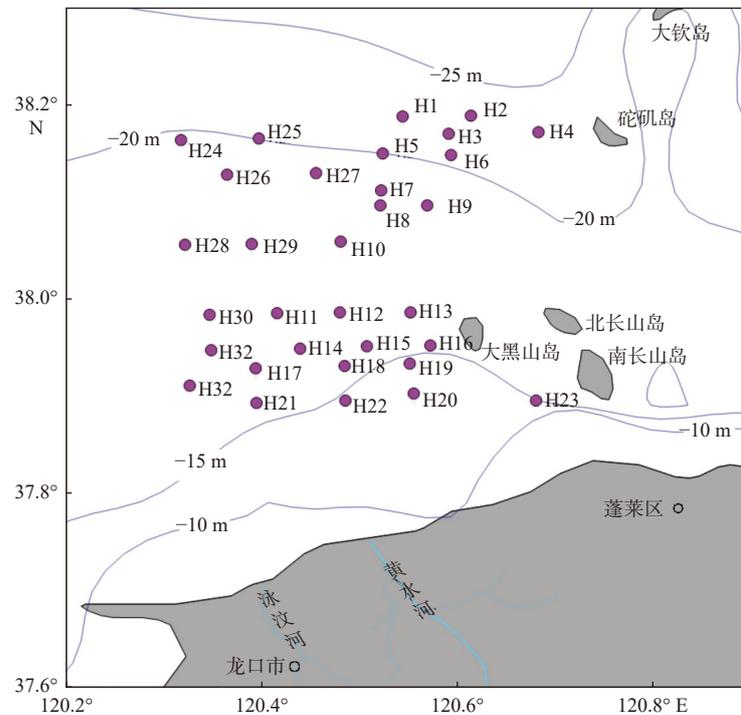


图 1 渤海海峡西南部表层沉积物取样位置

Fig. 1 Location of sampling sites for surface sediments in the southwestern Bohai Strait

### 2.2 测试方法

取原始样品 100~200 g, 烘至干燥, 然后称其重量, 取适量沉积物样于容器中, 加水浸泡, 利用 63~125  $\mu\text{m}$  孔径的铜筛进行分选<sup>[23]</sup>。筛选出该粒级以后烘干称重, 计算其质量分数; 取 1~2 g 分选好的样品, 用三溴甲烷重液分离后烘干称重, 计算重矿物的质量分数。在体视镜下使用条带数颗粒法, 鉴定每个样品不少于 300 个颗粒数, 计算重矿物的颗粒百分含量<sup>[23]</sup>。

Q 型聚类分析采用 IBM SPSS 26 软件。使用 Ward 法聚类, 选取欧氏距离平方计算距离, 数据经标准化后得到聚类谱系图<sup>[24]</sup>, 结合研究区水动力条件和沉积特征, 对研究区进行分区。

## 3 结果

### 3.1 重矿物组成与分布

研究区沉积物共鉴定出重矿物 24 种, 以普通

角闪石和绿帘石为主,平均含量分别为 47.44% 和 26.77%,两者占重矿物含量的 74.21%(表 1)。黑云母和褐帘石的平均含量分别为 6.19% 和 4.04%(表 1)。石榴子石和风化云母平均含量为 2%~3%(表 1)。其他矿物如钛铁矿、褐铁矿、斜黝帘石、白云母等出现频率较高,平均含量均在 1%~2% 波动(表 1);而透闪石、阳起石、磁铁矿、赤铁矿、自生黄铁矿、普通辉石、紫苏辉石、白钛石、磷灰石、矽线石、榍石、锆石、电气石、岩屑、金红石等含量

极少,仅出现在个别样品中。

为了便于分析,依据重矿物的特征可将研究区主要重矿物分为闪石类矿物(普通角闪石、透闪石和阳起石)、金属类矿物(钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿和赤铁矿)、帘石类矿物(绿帘石、褐帘石和斜黝帘石)、云母类矿物(黑云母、白云母和风化云母)和稳定矿物(白钛石、磷灰石、矽线石、榍石、锆石、电气石、金红石和石榴子石)5类。自生黄铁矿作为典型的特征矿物,与重矿物特征指数(不稳定矿物

表 1 渤海海峡西南部表层沉积物重矿物含量

Table 1 Contents of heavy minerals in the surface sediments of the southwestern Bohai Strait

	全区(32)			I 区(3)	II 区(6)	III 区(23)	砂质粉砂(26)	粉砂(5)	砂(1)
	最小值	最大值	平均值						
粒级	12.67	99.99	44.51	42.96	61.62	40.26	35.71	79.55	98.17
重矿物	0.23	5.77	0.93	2.79	0.73	0.74	0.73	0.98	5.77
普通角闪石	34.54	61.18	47.44	38.38	47.12	48.70	48.22	45.55	36.53
透闪石	0.00	1.74	0.50	0.42	0.58	0.50	0.55	0.32	0.26
阳起石	0.00	2.13	0.70	0.59	0.87	0.67	0.74	0.63	0.00
钛铁矿	0.00	19.95	1.17	8.05	0.21	0.52	0.57	0.51	19.95
磁铁矿	0.00	2.55	0.55	1.85	0.82	0.31	0.56	0.18	2.07
赤铁矿	0.00	2.12	0.46	0.00	0.23	0.59	0.48	0.49	0.00
褐铁矿	0.00	5.08	1.21	0.32	0.40	1.54	1.30	0.98	0.00
自生黄铁矿	0.00	2.27	0.11	0.00	0.42	0.04	0.12	0.05	0.00
普通辉石	0.00	1.99	0.20	0.00	0.39	0.18	0.21	0.18	0.00
绿帘石	18.67	37.27	26.77	31.49	21.53	27.52	27.27	24.89	23.06
褐帘石	1.29	8.35	4.04	3.30	3.53	4.27	3.99	4.64	2.33
斜黝帘石	0.00	4.77	1.20	0.57	1.59	1.18	1.14	1.67	0.52
黑云母	0.00	36.78	6.19	0.89	13.02	5.10	5.61	10.39	0.26
白云母	0.00	5.10	1.23	0.00	3.12	0.89	1.27	1.26	0.00
风化云母	0.00	8.43	2.22	0.09	3.37	2.20	2.18	2.89	0.00
磷灰石	0.00	2.45	0.65	0.91	0.05	0.77	0.77	0.12	0.26
榍石	0.00	3.89	0.98	3.27	0.41	0.83	0.93	0.64	3.89
锆石	0.00	2.07	0.36	1.27	0.29	0.26	0.31	0.30	2.07
电气石	0.00	0.83	0.23	0.25	0.14	0.25	0.26	0.12	0.00
金红石	0.00	2.70	0.19	0.00	0.48	0.14	0.21	0.11	0.00
石榴子石	0.00	10.05	2.46	7.85	0.33	2.31	2.37	1.76	8.29
风化碎屑	0.00	3.42	0.29	0.17	0.18	0.34	0.25	0.48	0.52
生物碎屑	0.00	4.07	0.44	0.00	0.35	0.52	0.29	1.34	0.00
闪石类	36.21	62.11	48.64	39.38	48.56	49.87	49.51	46.50	36.79
帘石类	23.55	43.18	32.01	35.36	26.66	32.97	32.40	31.21	25.91
辉石类	0.00	1.99	0.24	0.00	0.58	0.19	0.24	0.30	0.00
金属类矿物	0.00	22.02	3.39	10.22	1.67	2.95	2.91	2.16	22.02
云母类	0.00	37.36	9.64	0.98	19.51	8.19	9.06	14.54	0.26
ZTR	0.00	2.94	0.78	1.52	0.91	0.65	0.78	0.54	2.07
稳定矿物	0.57	16.24	5.04	13.80	2.03	4.68	5.04	3.13	14.51

注:表内无特别标注的数据均为平均值,表头括号内数据代表样品数量。

与稳定矿物比值)单独描述分析。

重矿物在分析粒级中所占的比重很低, 平均含量仅为 0.93%, 变化范围为 0.23%~5.77%, 其高值区分布在大黑山岛东南部海区(图 2a)。

闪石类矿物, 平均含量为 48.64%, 变化范围为 36.21%~62.11%。以 50% 等值线为界, 中部海域为高值区被砂质粉砂覆盖, 含量>55%; 低值区主要出现在研究区东西两侧海域, 分布范围较广, 含量<45%(图 2b)。普通角闪石含量最多, 多呈柱状或粒状, 绿色、少数为褐色, 次棱角状, 少数风化较强, 平均含量为 47.44%, 中部高值区含量>52%, 东西两侧低值区含量<46%(图 3a)。

金属类矿物, 平均含量为 3.39%, 其变化范围为 0~22.02%, 高值区主要分布在大黑山岛东南部海域, 含量>10%(图 2c)。金属类矿物以褐铁矿和钛铁矿为主, 其中褐铁矿呈粒状、土状、皮壳状, 黄褐色、暗褐色, 有一定硬度, 性软, 平均含量为 1.21%, 变化范围为 0~5.08%, 其高值区分布在研究区西南角和大黑山岛西南部海域, 分布范围较小, 其他区域含量明显较低(图 3b)。

帘石类矿物, 平均含量为 32.01%, 含量变化范围为 23.55%~43.18%, 高值区主要呈斑块状出现在研究区东北部、西北部和大黑山岛西南部海域, 含量>35%, 低值区主要出现在研究区中部和西南部海域, 含量<29%(图 2d)。帘石类矿物以绿帘石为主, 呈粒状、柱状, 黄绿色、淡黄色、近无色, 次棱角状, 平均含量为 26.77%, 变化范围为 18.67%~37.27%, 高值区主要呈斑块分布在研究区西北和东北海域以及大黑山岛南部, 含量>30%, 低值区位于研究区中部和西南海域, 含量<24%(图 3c); 褐帘石平均含量为 4.04%, 变化范围为 1.29%~8.35%, 高值区主要呈斑状分布在研究区东北部海域, 含量>5.5%, 低值区主要分布在研究区西北部和中部海域, 含量<3.5%(图 3d)。

云母类矿物, 平均含量 9.64%, 含量范围为 0~37.36%, 高值区主要分布在大黑山岛以西和西南部海域, 含量>15%, 其他海域含量明显较低(图 2e)。黑云母多呈片状、板状, 绿色、少数褐色, 次棱角片状, 有一定风化, 平均含量为 6.19%, 变化范围为 0~36.78%, 高值区主要呈斑状分布在西南部海域, 含量>12%, 其他海域含量较低, 含量>8%(图 3e); 白云母多呈片状、板状, 无色, 次棱角状、片状, 平均含量为 1.23%, 最大值为 5.1%, 高值区主要呈斑状分布在东北部和西南部海域, 含量>3%, 低值区主

要分布在西北部和南部海域, 含量<1.5%(图 3f); 风化云母多呈片状、板状, 灰绿色、褐黄色, 次棱角片状, 风化强, 平均含量为 2.22%, 变化范围为 0~8.43%, 高值区主要呈斑状分布在大黑山岛的西北部海域, 含量>5%, 其他地区含量较低, 含量<3%(图 3g)。

稳定矿物组合, 平均含量为 5.04%, 变化范围为 0.57%~16.24%, 高值区主要出现在研究区东北部和东南部海域, 含量>10%, 分布范围较小, 其他区域含量明显较低, 一般<8%(图 2f)。稳定矿物组合以石榴子石为主, 石榴子石呈粒状、不规则粒状, 粉红色, 次棱角状, 平均含量为 2.46%, 最大值为 10.05%, 高值区主要分布在研究海域的东北部和东南部, 分布范围较小, 含量>6%, 研究海域其他地区含量较低, 大部分海域含量<4%(图 3h)。

不稳定矿物(闪石类、帘石类和辉石类矿物)与稳定矿物组合的比值(UM/SM), 可以代表矿物的风化程度, 反映沉积物的搬运距离和沉积动力环境<sup>[25]</sup>。UM/SM 高值区主要出现在研究区南部海域, 比值>40, 最高比值可达 155.5(图 2g), 说明该区矿物风化程度较低, 水动力条件弱, 许多不稳定矿物能够保存下来。

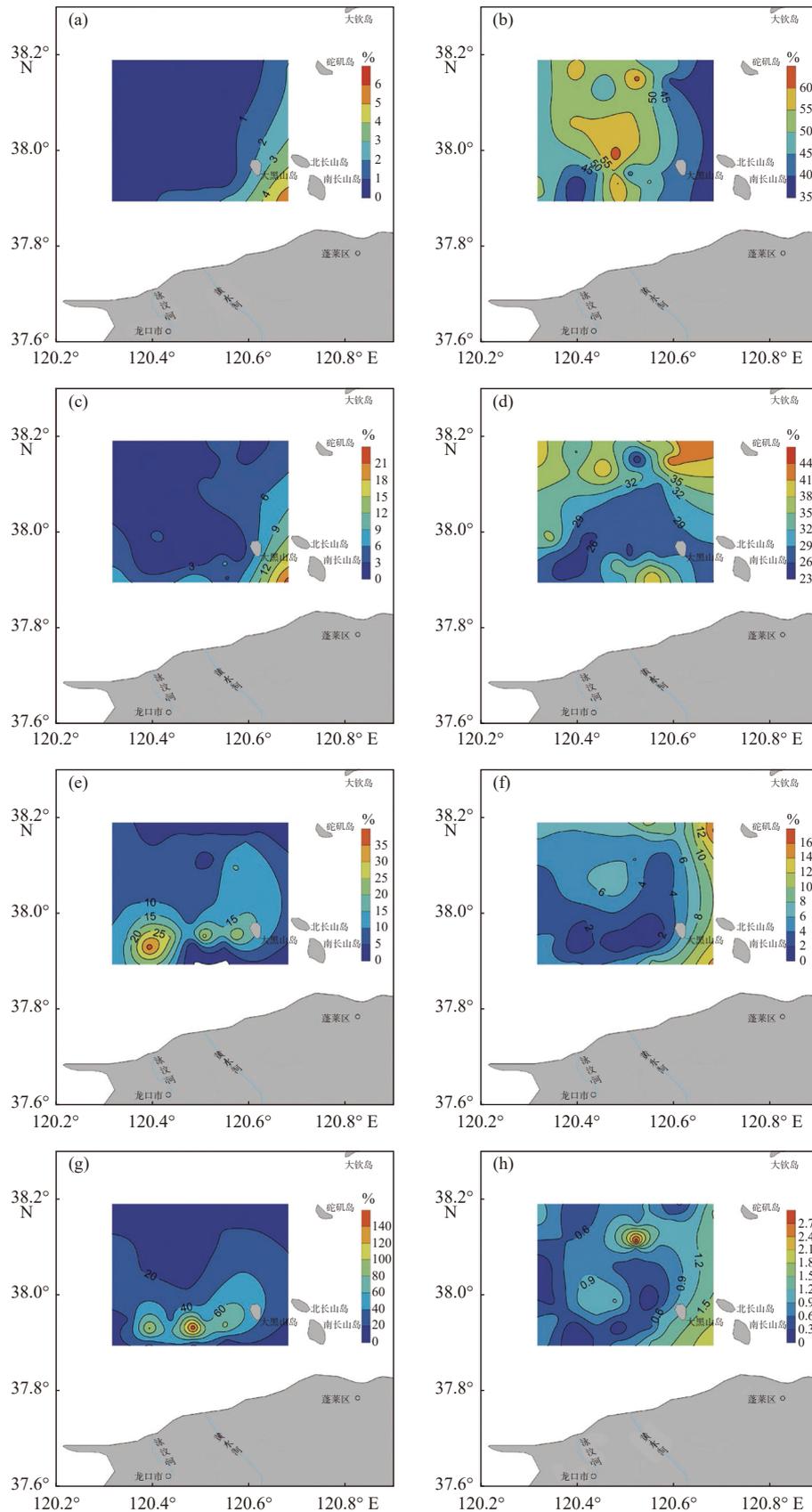
ZTR 指数, 是指金红石、电气石和锆石三种矿物的总含量, 一般用其表示沉积物的成熟度。研究区 ZTR 指数平均值为 0.78, 最大值为 2.94%, 表明研究区沉积物成熟度普遍较低。高值区主要分布在研究海域北部和东南部, 其他地区含量较低(图 2h)。

自生黄铁矿, 呈莓球状、生物壳内膜状、粒状, 铜黄色、灰褐色, 较新鲜、半氧化, 平均含量为 0.11%, 最大值为 2.27%。自生黄铁矿容易形成, 但是不容易富集, 需要沉积物颗粒细、水动力较弱和沉积环境适宜等<sup>[2]</sup>。本研究区沉积物粒度较粗, 不利于自生黄铁矿的沉积, 这也是导致其含量较低的原因之一。

### 3.2 重矿物组合分区

综合重矿物的主要变量, 以研究区 24 种主要矿物作为变量, 对研究区 32 个样品以 Q 型聚类的数学方法进行聚类分析, 获得 3 个重矿物组合分区(图 4)。各分区重矿物含量变化明显, 具有各自不同的矿物组合特点。

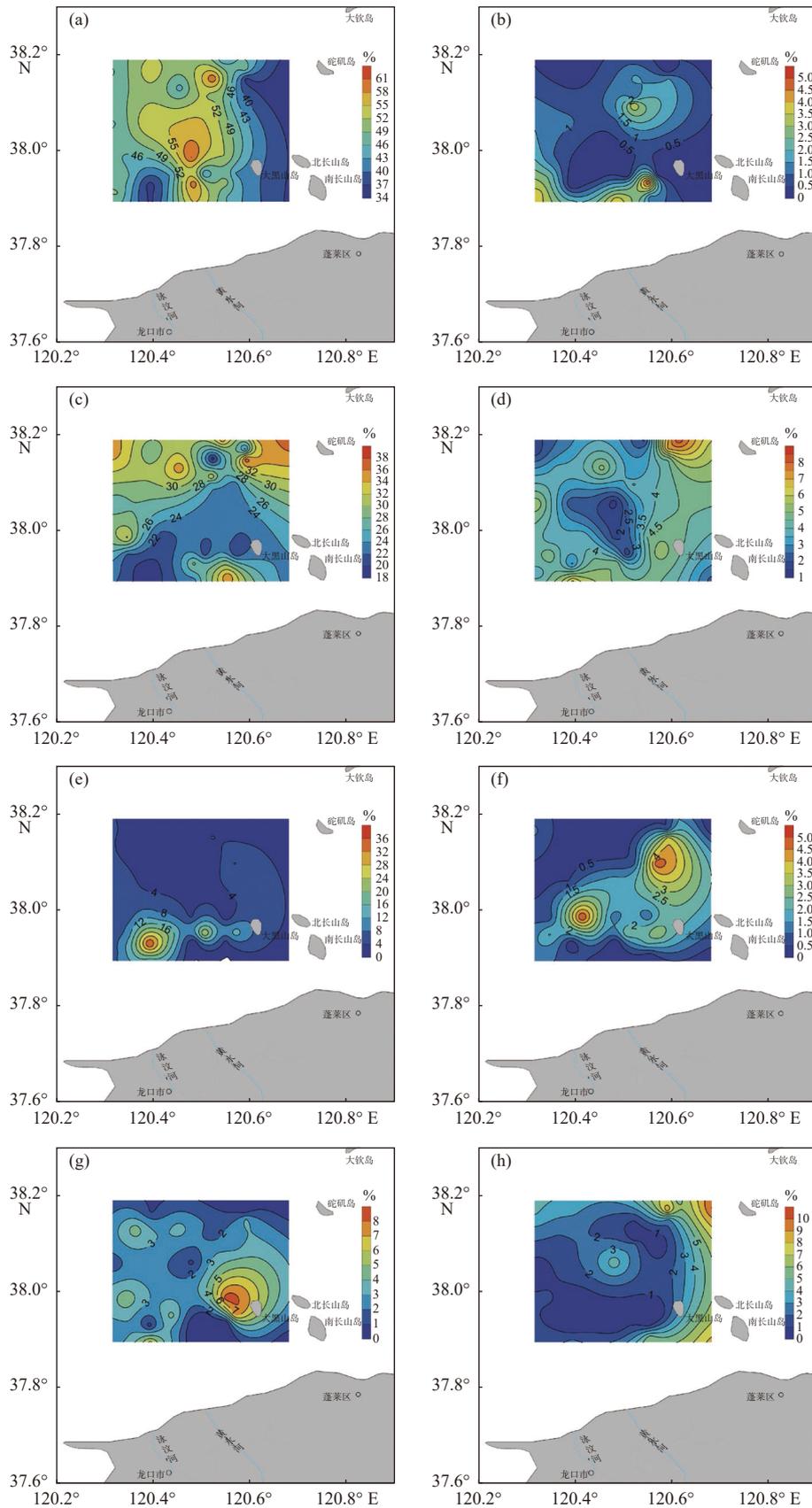
I 区: 样品数 3 个, 大黑山岛矿物区(图 4)。以普通角闪石和绿帘石为主要矿物, 钛铁矿、石榴子石、褐帘石和楣石的含量次之, 其含量分别为



(a)重矿物含量;(b)闪石类;(c)金属类矿物;(d)帘石类;(e)云母类;(f)稳定矿物;(g)不稳定矿物/稳定矿物;(h)ZTR指数

图2 渤海海峡西南部重矿物组合含量分布

Fig.2 Distributions of heavy mineral assemblages in surface sediments of the southwestern Bohai Strait



(a) 普通角闪石; (b) 褐铁矿; (c) 绿帘石; (d) 褐帘石; (e) 黑云母; (f) 白云母; (g) 风化云母; (h) 石榴子石

图 3 渤海海峡西南部重矿物含量分布

Fig.3 Distributions of heavy minerals in surface sediments of the southwestern Bohai Strait

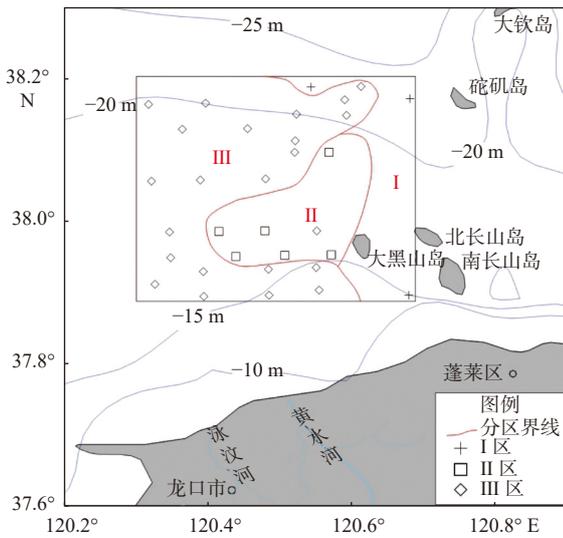


图4 渤海海峡西南部表层沉积物重矿物组合分区

Fig.4 Heavy mineral assemblage provinces in the southwestern Bohai Strait

38.38%、31.49%、8.05%、7.85%、3.30% 和 3.27%。本区的重矿物含量、金属类矿物、帘石类矿物和稳定矿物的含量都为全区最高,含量分别为 2.79%、10.22%、35.36% 和 13.80%,而闪石类矿物和云母类矿物平均含量都为全区最低,含量分别为 39.38% 和 0.98%。

II区:样品数 6 个,中部矿物区(图 4)。本区优势矿物组合为普通角闪石和绿帘石,其含量分别为 47.12% 和 21.53%。其次,黑云母、褐帘石、风化云母和白云母的含量也较高,其含量分别为 13.02%、3.53%、3.37% 和 3.12%。本区的重矿物含量全区最低,含量为 0.73%,而云母类矿物的含量全区最高,含量为 19.51%,闪石类矿物的含量也较高,含量为 48.56%,帘石类矿物、稳定矿物和金属类矿物的含量为全区最低,含量分别为 26.66%、2.03% 和 1.67%。

III区:样品数 23 个,西部矿物区(图 4),大致呈“C”字型沿研究区北部、西部和南部延伸。以普通角闪石和绿帘石为主,黑云母和褐帘石次之,其含量分别为 48.70%、27.52%、5.10% 和 4.27%。重矿物含量较低,含量为 0.74%,而闪石类矿物含量在全区最高,含量为 49.87%,帘石类矿物含量也较高,含量为 32.97%,云母类矿物、稳定矿物和金属类矿物的含量较低,分别为 8.19%、4.68% 和 2.95%。

## 4 讨论

海域重矿物的分布特征与沉积物来源和海洋沉积作用密切相关,其中,沉积物来源受河流域

母岩性质、风化作用、河流泥沙输入量、海岸岛屿冲刷物和海底沉积物再悬浮搬运等多种因素的影响,而海洋沉积作用又会受到重矿物颗粒自身的物理化学性质、海底地形地貌和海洋动力条件等因素的制约<sup>[25-27]</sup>。

### 4.1 重矿物组成与含量变化

从表 2 可知,渤海海峡西南部表层沉积物中重矿物的平均含量仅为 0.93%,远低于黄河及莱州湾沉积物(1.5%),同样低于长江水下三角洲物质(5.1%)。沉积物中重矿物以普通角闪石和绿帘石为优势矿物,石榴子石、锆石、钛铁矿等比重大、硬度高的矿物含量较低,黑云母等片状矿物的含量较高,普通角闪石和帘石类等不稳定矿物的含量较高,表明研究区水动力条件较弱,无法搬运石榴子石、锆石、钛铁矿等比重较大的矿物在此沉积。由于黑云母等片状矿物比重小、硬度低,闪石类和帘石类矿物不稳定,容易被水流搬运冲蚀而不易沉积,最终在水动力较弱的环境下沉降<sup>[23]</sup>。此外,研究区角闪石和绿帘石等矿物颗粒大多呈棱角状、次棱角状,表面较新鲜,磨圆度差,表明矿物成熟度低,搬运距离短,受海洋动力影响小<sup>[2,28]</sup>。普通角闪石和绿帘石平均含量高,也表明沉积物供应充足。

长江河流重矿物组合为片状矿物(28%)-白云石(26%)-普通角闪石(24.2%),白云石为其特征矿物<sup>[2]</sup>,与渤、黄海地区的矿物组合差异巨大。黑云母在黄河河流、黄河口和莱州湾的含量都是最高的,矿物组合均为云母-普通角闪石-绿帘石<sup>[2,29]</sup>。

从沉积物类型中各矿物的含量分布看,砂的重矿物含量最高,平均含量为 5.77%;砂质粉砂和粉砂中重矿物含量较低,均<1%。砂质粉砂中普通角闪石、褐铁矿和绿帘石含量最高,分别为 48.22%、1.30% 和 27.27%;而绿黑云母和风化云母等在粉砂中含量最高,分别为 10.39% 和 14.54%;钛铁矿、磁铁矿、榍石和石榴子石等矿物在砂中含量最高,分别为 19.95%、2.07%、3.89% 和 8.29%。自生黄铁矿、白云母、风化云母和辉石类矿物只出现在粉砂和砂中。这些分布特征表明,矿物含量明显受控于沉积物类型(表 1)。

### 4.2 物质来源

受物源、沉积环境和矿物自身物理化学性质等因素的制约,不同海域具有不同的矿物组合特征。根据研究区和周边海区的矿物组合特点,选取片状

表 2 研究区及周边地区重矿物含量

Table 2 Contents of main heavy minerals in the study area and surrounding areas

	全区(32)	I 区(3)	II 区(6)	III 区(23)	黄河口 <sup>[29]</sup> (N=19)	长江水下三角洲 <sup>[30]</sup> (N=145)	山东半岛近海 <sup>[29]</sup> (N=73)	辽东半岛近海 <sup>[31]</sup> (N=25)
重矿物	0.93	2.79	0.73	0.74	2.4	5.1	1.2	2.5
普通角闪石	47.44	38.38	47.12	48.70	16.9	33.3	35.7	37.0
钛铁矿	1.17	8.05	0.21	0.52	0.2	1.5	1.3	6.5
磁铁矿	0.55	1.85	0.82	0.31	—	0.2	5.8	2.0
赤铁矿	0.46	0.00	0.23	0.59	2.0	4.5	2.4	—
褐铁矿	1.21	0.32	0.40	1.54	17.1	2.9	2.3	—
自生黄铁矿	0.11	0.00	0.42	0.04	0.1	0.9	2.2	0.4
普通辉石	0.20	0.00	0.39	0.18	3.8	4.8	3.6	—
绿帘石	26.77	31.49	21.53	27.52	27.1	27.3	29.5	14.7
黑云母	6.19	0.89	13.02	5.10	16.8	0.9	3.9	—
白云母	1.23	0.00	3.12	0.89	8.8	4.5	8.2	—
片状矿物	9.64	0.98	19.51	8.19	30.2	10.9	16.4	19.4
磷灰石	0.65	0.91	0.05	0.77	—	0.4	—	0.6
楣石	0.98	3.27	0.41	0.83	—	0.4	—	1.6
锆石	0.36	1.27	0.29	0.26	—	0	—	0.3
石榴子石	2.46	7.85	0.33	2.31	—	0.5	—	8.5
石榴子石+锆石+楣石	3.80	12.40	1.03	3.40	0.9	0.9	3.3	10.4

注: 表头括号内数据代表样品数量, 表内“—”代表无数据。

矿物、绿帘石和稳定矿物组合(石榴子石、锆石、楣石和钛铁矿)进行三角图投点(图 5)。其中, 片状矿物含量越高, 说明水动力条件较弱, 受黄河物质影响越大; 绿帘石含量越高, 说明陆源碎屑输入量较大; 稳定矿物含量越高, 说明受近源物质影响较大, 水动力改造越强。

(1) 庙岛群岛矿物区 (I 区)

该区底质类型为粉砂质砂和砂。该矿物区重矿物含量、金属类矿物和稳定矿物的含量偏高, 而闪石类和云母类矿物的平均含量较低, 说明长山水道的水动力较强。因为海底沉积物经浪流反复淘

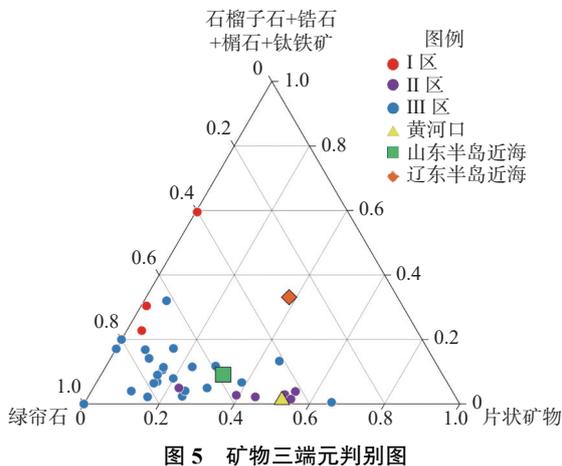


图 5 矿物三元判别图

洗冲刷, 大量细粒物质被带走, 剩下较粗的、比重大的颗粒物沉积下来, 导致石榴子石、楣石和钛铁矿等相对稳定的矿物变得富集<sup>[23]</sup>。庙岛群岛矿物区与黄河口、莱州湾海区的矿物特征有明显的差异。

庙岛群岛由石英岩组成, 千枚岩和板岩仅在少数岛屿出现<sup>[32]</sup>, 大黑山岛除了有石英岩和千枚岩, 在其西北部的老黑山还出露有新生代火山岩<sup>[33]</sup>, 这些变质岩和火山岩有较多石榴子石、钛铁矿等重矿物。通过对比周边海区沉积物(表 2), 黄河口和山东半岛海区沉积物中重矿物含量均低于该区, 钛铁矿和石榴子石的含量也较低(图 6)。这些重矿物特征都表明庙岛群岛矿物区主要受近源影响, 主要是庙岛群岛岛屿冲刷物。

(2) 中部矿物区 (II 区)

本区海水运动受到大黑山岛、北长山岛和南长山岛等岛屿的阻碍, 水动力条件弱, 因而导致黑云母等片状矿物含量较高, 但是稳定矿物含量较低。该区底质类型包括粉砂质砂和粉砂。在矿物三元投点图(图 6)中可以看出, 该区物质以高含量的片状矿物与 I 区和 III 区相区别, 与黄河物质有很高的相似性, 结合上述其他矿物特征, 推测该区物质主要来自于黄河, 同时也有山东半岛岛屿冲刷物的影响。

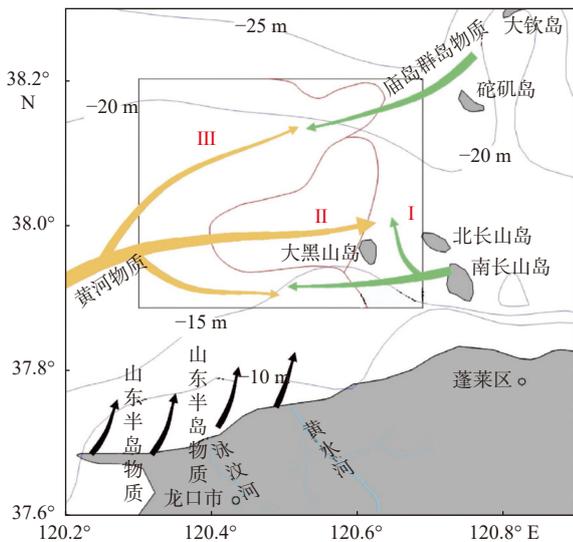


图6 渤海海峡西南部重矿物组合分区和沉积物运移趋势  
Fig.6 Provinces of heavy mineral assemblage and transport trend of sediment in the southwestern Bohai Strait

### (3) 西部矿物区(Ⅲ区)

该区底质类型包括粉砂质砂和粉砂。本区片状矿物和不稳定矿物含量较高,而稳定矿物含量较低,且南部有较高的UM/SM值( $>50$ ),表明矿物风化程度弱,大量不稳定矿物在相对较弱的水动力环境下沉积。结合各分区重矿物含量特征可知(表1),金属类矿物、帘石类、云母类、稳定矿物等数值均介于大黑山岛矿物区和中部矿物区之间,在矿物三端元投点图(图6)中,Ⅲ区投点较为分散且分布在Ⅰ区和Ⅱ区之间,表明本区沉积物是黄河物质、山东半岛和庙岛群岛岛屿冲刷物的混合物。

## 5 结论

(1)渤海海峡西南部海域沉积物中重矿物含量低,平均为0.93%,共鉴定出重矿物24种。重矿物优势矿物为普通角闪石、绿帘石、黑云母和褐帘石,它们的含量分别为47.44%、26.77%、6.19%和4.04%。

(2)渤海海峡西南部海域共分出3个矿物组合区:庙岛群岛矿物区(Ⅰ区)、中部矿物区(Ⅱ区)和西部矿物区(Ⅲ区)。其中,庙岛群岛矿物区(Ⅰ区)沉积物主要来自庙岛群岛岛屿冲刷物;中部矿物区(Ⅱ区)物质主要来自黄河物质和山东半岛岛屿冲刷物;西部矿物区(Ⅲ区)物质是黄河物质、山东半岛和庙岛群岛岛屿冲刷物的混合物。

### 参考文献:

[1] 袁萍. 渤海表层沉积物的空间分布及其与物源和沉积动力环境

的关系[D]. 青岛:中国海洋大学,2015.

- [2] 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京:海洋出版社,2008:1-476.
- [3] 彭治超,付星辉,刘俊超,等. 沉积物源分析方法及研究进展[J]. 西安文理学院学报(自然科学版),2017,20(1):116-121.
- [4] MORTON A C, HALLSWORTH C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 241-256.
- [5] MORTON A C, HALLSWORTH C. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1/4): 3-29.
- [6] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京:科学出版社,1985:1-233.
- [7] 张伟,周连成,吴建政,等. 渤海海峡南部海域表层沉积物分布特征及控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质,2015,35(5):19-28.
- [8] 虞义勇,褚宏宪,杨慧良,等. 渤海海峡表层沉积物常量元素分布特征及其地质意义[J]. 海洋地质前沿,2019,35(9):52-62.
- [9] 成海燕,姜胜辉,张超,等. 渤海海峡表层沉积物地球化学特征[J]. 海洋地质前沿,2020,36(8):19-28.
- [10] 虞义勇,王永红,李日辉,等. 渤海西部表层沉积物中黏土矿物分布特征及物源指示[J]. 海洋地质与第四纪地质,2017,37(1):51-58.
- [11] 蓝先洪,李日辉,密蓓蓓,等. 渤海东部和黄海北部表层沉积物稀土元素的分布特征与物源判别[J]. 地球科学,2016,41(3):463-474.
- [12] 王伟伟,付元宾,李树同,等. 渤海中部表层沉积物分布特征与粒度分区[J]. 沉积学报,2013,31(3):478-485.
- [13] 张剑,李日辉,王中波,等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质,2016,36(5):1-12.
- [14] 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):530.
- [15] 李艳,李安春,黄朋. 大连湾近海表层沉积物重矿物组合分布特征及其物源环境指示[J]. 海洋地质与第四纪地质,2011,31(6):18-19.
- [16] 张尧,韩宗珠,艾丽娜,等. 黄海全新世泥质体表层沉积物重矿物特征及其指示意义[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2018,48(11):108-118.
- [17] 韩宗珠,衣伟虹,李敏,等. 渤海湾北部沉积物重矿物特征及物源分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2013,43(4):73-79.
- [18] 陈义兰,吴永亨,刘晓瑜,等. 渤海海底地形特征[J]. 海洋科学进展,2013,31(1):75-82.
- [19] 侯方辉,王保军,孙建伟,等. 渤海海峡跨海通道新构造运动特征及其工程地质意义[J]. 海洋地质前沿,2016,32(5):25-30.
- [20] 陆凯,褚宏宪,孙军,等. 渤海海峡跨海通道地区海洋地质调查研究进展[J]. 地质通报,2021,40(2/3):287-297.
- [21] 刘忠亚. 渤海海峡跨海通道工程区区域地壳稳定性评价[D]. 北京:中国地质科学院,2016.
- [22] 金玉休. 渤海东部潮流地貌及控制因素[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [23] 刘金庆,张勇,印萍,等. 青岛近岸海域表层沉积物重矿物分

- 布及物源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(1): 69-78.
- [24] 王昆山, 石学法, 林振宏. 南黄海和东海北部陆架重矿物组合分区及来源[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21(1): 31-40.
- [25] 高建华, 高抒, 董礼先, 等. 鸭绿江河口地区沉积物特征及悬沙输送[J]. *海洋通报*, 2003, 22(5): 26-33.
- [26] 陈丽蓉, 栾作峰, 郑铁民, 等. 渤海沉积物中的矿物组合及其分布特征的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1980(1): 46-64.
- [27] 石学法. 海洋沉积环境研究的基本思想[J]. *海洋科学*, 1992(2): 22-24.
- [28] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1989: 1-289.
- [29] 王昆山, 石学法, 蔡善武, 等. 黄河口及莱州湾表层沉积物中重矿物分布与来源[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(6): 1-8.
- [30] 王昆山, 王国庆, 蔡善武, 等. 长江水下三角洲沉积物的重矿物分布及组合[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(1): 7-12.
- [31] 申顺喜, 陈丽蓉, 徐文强. 黄海沉积物中的矿物组合及其分布规律的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1984(3): 240-250.
- [32] 曹家欣. 山东庙岛列岛与蓬莱沿岸地貌[J]. *海洋学报(中文版)*, 1989(5): 602-610.
- [33] 黄朋, 付永涛, 李安春, 等. 山东蓬莱大黑山岛碱性火山岩地球化学特征[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(1): 91-96.

## Composition and provenance of heavy minerals in surface sediments in the southwestern Bohai Strait

WANG Qingtong<sup>1</sup>, ZHAO Jiyuan<sup>2</sup>, WANG Haigen<sup>1</sup>, YANG Peng<sup>1</sup>, YU Xingchen<sup>1</sup>,  
ZHANG Jiahao<sup>1</sup>, MAO Fangsong<sup>1</sup>, LIU Jinqing<sup>2\*</sup>

(1 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China;

2 College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** The Bohai Strait is the channel connecting the Bohai Sea to the Yellow Sea for material and energy exchange, which has complex topographical conditions and abundant sediment types. It is one of the hotspots to study the marine dynamic systems. Thirty-two surface sediments collected in 2021 from the southwestern Bohai Strait were analyzed on the heavy minerals in terms of their composition, distribution, and provenance. Results show that the mineral assemblages were characterized by hornblende-epidote-biotite-orthite and they were from three mineral assemblages/provinces: the Miaodao Islands (I) has a hornblende-epidote-ilmenite-garnet assemblage derived mainly from the scours of the Miaodao Islands, the Central Zone (II) has a hornblende-epidote-biotite assemblage largely attributed to the Yellow River materials, and the Western Zone (III) has a hornblende-epidote-biotite-orthite assemblage that is a mixture of the Yellow River sediments and scours from the Shandong Peninsula and Miaodao Islands. Materials from different sources were transported and deposited under overall marine forces, which eventually resulted in the differences in mineral assemblages of the area.

**Key words:** Bohai Strait; heavy mineral distribution; assemblage province; provenance