

渤海海峡限制性地形对现代沉积体系分布的控制

黄于婷^{1,2}, 单新^{2,3}, 石学法^{2,3}, 乔淑卿^{2,3}, 徐笑梅⁴, 潘海东⁵, 蓝涛², 高建华¹

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023

2. 自然资源部第一海洋研究所海洋地质与成矿作用重点实验室, 山东青岛 2660061

3. 青岛海洋科技中心海洋地质过程与环境功能实验室, 山东青岛 266237

4. 自然资源部东海预报减灾中心, 上海 200136

5. 自然资源部第一海洋研究所海洋环境科学与数值模拟重点实验室, 山东青岛 266061

摘要 【目的】海峡周边发育一系列与其限制性地形相关的沉积体系, 具有独特的沉积相特征和分布规律。现有研究多聚焦宽度较小的海峡(小于 50 km), 其沉积作用以潮流为主。然而, 随着海峡宽度增加, 水动力过程更为复杂, 沉积过程有待揭示。【方法】本研究以渤海海峡(浅水海峡, 宽度 106 km)为研究对象, 基于大量表层沉积物粒度数据、四条浅地层剖面以及区域海洋动力模型(模拟 2020 年 12 月—2021 年 2 月冬季流场), 分析了渤海海峡沉积动力过程及其对沉积物分布的控制。【结果】海峡南部、北部沉积动力差异显著, 北部为高能环境, 以侵蚀作用为主, 而南部相对低能, 以沉积作用为主。渤海海峡表层沉积物类型多样, 沉积物粒径分布呈现北粗南细, 海峡狭窄处粗、两边细的分布格局。海峡北部围绕老铁山水道发育大型砂质涨潮流三角洲, 但退潮流三角洲不明显, 反映了进出老铁山水道的潮流不均一性。海峡南部发育两类沉积体系: (1) 因黄河的巨量供给, 在鲁北沿岸流的作用下沿山东半岛形成山东泥楔体系; (2) 由于海峡南部岛屿的遮挡和充足细粒沉积物供给, 形成了小型冲刷槽和小型砂质涨潮流三角洲体系。【结论】研究结果证实了海峡复杂的限制性地形对区域沉积动力和沉积体系分布的显著控制作用。

关键词 潮流沉积; 海峡沉积; 沉积动力模拟; 区域海洋动力模型; 渤海海峡

第一作者简介 黄于婷, 女, 1998 年出生, 硕士研究生, 海洋沉积学, E-mail: hyt@fio.org.cn

通信作者 石学法, 男, 研究员, E-mail: xfshi@fio.org.cn

高建华, 男, 教授, E-mail: jhgao@nju.edu.cn

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

0 引言

海峡作为连接两个开阔海域的天然狭长水上通道^[1], 在全球海洋系统中扮演着至关重要的角色。海峡的开启与关闭直接影响周边海水的交换、温度、盐度等关键要素, 甚至对全球洋流循环产生深远影响, 是全球海洋水循环的关键节点。海峡及其周边的沉积物记录了洋流路径及强度演化、古地理演替和古气候变化, 是研究古气候、古海洋、古地理的重要“档案”。

海峡地貌侧向收窄、横截面积变小, 展现限制性海岸地形, 导致通过其流体的能量增强, 因而在海峡周边形成一系列与限制性地形相关的沉积体^[2-3]。这些沉积体的展布、沉积相特

收稿日期: 2024-10-24; 收修改稿日期: 2024-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42472164); “中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金”资助项目(2024S01)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42472164; Basic Scientific Fund for National Public Research Institutes of China, No. 2024S01]

征不同于三角洲、陆架等环境，是一类独特的沉积体系^[1]。

海峡依据水深大小可以划分为深水海峡和浅水海峡。考虑到第四纪海平面变化的幅度，将水深 100 米作为深水海峡与浅水海峡的分界线^[2]。即使在冰期、海平面较低时期，深水海峡仍能维持稳定的洋流。浅水海峡则因水深较浅，受海平面变化影响较大。已有研究充分强调了潮流对于浅水海峡周边沉积体的塑造作用。但实际上，除潮流外，单向的洋流（海流）也对浅水海峡的沉积过程产生重要影响，并可形成顺洋流方向的加积体^[4]。除了水深，海峡的宽度也会显著影响海峡内的动力机制^[4-5]。对于浅水海峡而言，海峡宽度的增加是否会导致潮流作用减弱而洋流作用增强，进而引起沉积产物类型的转变，有待进一步研究。

渤海海峡作为连接渤海和黄海的重要水道，不仅是两个海之间物质交换的枢纽，更是我国环渤海地区经济发展的关键通道。海峡内岛屿众多，水道交错，地形地貌复杂多样，导致沉积动力条件呈现出显著的空间差异^[6]。在复杂动力的作用下，渤海海峡发育了一系列独特的沉积体系。以往研究多集中于物质运输^[7-9]、地层发育^[10-11]、水动力条件^[6,12-14]等方面，部分研究还关注了渤海海峡北部的潮流沉积体系^[15-17]，或南部的“山东泥楔”^[18-22]。然而，鲜有研究将渤海海峡南部和北部沉积体系作为整体开展研究，更缺乏海峡限制性地形对沉积体系控制作用的系统性探讨。本文以渤海海峡周边沉积为对象，旨在通过分析海峡沉积动力，深入探讨海峡限制性地形对现代沉积体系的控制作用，以期揭示渤海海峡沉积过程的复杂性和多样性。

1 区域地质背景

1.1 地形特点

渤海海峡北至辽东半岛南端—老铁山西南角，南至山东半岛蓬莱登州头，海峡最窄处的宽度约 106 km（图 1a）^[6]。海峡整体的地貌特点为北深南浅（图 1b）^[6,23-25]。以北隍城岛为界，可将渤海海峡划分为南、北两部分。北部主要为老铁山水道，是我国海岸带侵蚀最深、规模最大的冲刷槽，由北部冲刷槽、南部冲刷槽和中部隆起带三个侵蚀地貌单元构成（图 1c）。老铁山水道水深约为 45~86 m，南北宽度约为 41 km，东西长约 77 km。海峡南部岛屿散布，从北到南依次分布有北隍城岛、南隍城岛、砣矶岛、小黑山岛、大黑山岛、北长山岛和南长山岛等，将渤海海峡南部分割成若干小水道，其中，南长山岛与山东半岛之间存在一侵蚀槽，称为登州水道，水深约为 20~30 m。登州水道西侧发育有砂质浅滩，即登州浅滩，宽度为 5~7 km（图 1d）。

1.2 海峡沉积

黄、渤海沉积物主要来源于周边入海河流的供给，包括黄河、海河、滦河、辽河和鸭绿江等，它们在河口区堆积形成三角洲。渤海海峡北部发育有典型的潮流动力沉积地貌，由老铁山水道、辽东沙脊和渤中沙席组成^[15-17]，其中辽东沙脊和渤中沙席构成海峡北部的涨潮流三角洲，反映了强烈的潮流对沉积物的塑造（图 1a）。在渤海海峡南部，黄河携带的大量细粒泥沙穿过海峡南部向东扩散，包围山东半岛，在沿岸形成了广阔的滨岸泥质带（也称为“山东泥楔”）（图 1a）^[18-22]。

1.3 海峡水动力

渤海海峡的沉积物输运与区域水动力条件密切相关。潮流是黄、渤海海域重要的沉积营力^[26]，以半日潮为主，海峡内的潮流方向呈现与海岸平行的东西向，涨潮流自东向西，退潮流则自西向东。

除潮流外，渤海海峡还受到沿岸流、波浪等作用。渤海海峡及其邻近海区的环流表现出冬强夏弱的季节性变化，余流较小，远小于本区潮流流速^[27]。海峡周边的环流系统主要由黄海暖流和鲁北沿岸流等流系组成（图 1a）。冬季黄海暖流通过渤海海峡北部向西进入渤海，受到渤海西岸阻挡后演化为南、北两支，北支沿辽东湾北上，南支则沿渤海湾南下，与鲁北沿岸流等汇合，经由渤海海峡南部流出渤海^[28]。

目前对渤海海峡冬季水交换空间特征的普遍认识为“北进南出”^[7,29-30]，即黄海水从海峡北部流入渤海，渤海水从海峡南部流出渤海。在西边界流和东亚季风驱动下的复杂环流体系的作用下，形成了渤海海峡及其邻近海区“夏储冬输”的输运格局^[31-33]，即沉积物主要在冬季输运。

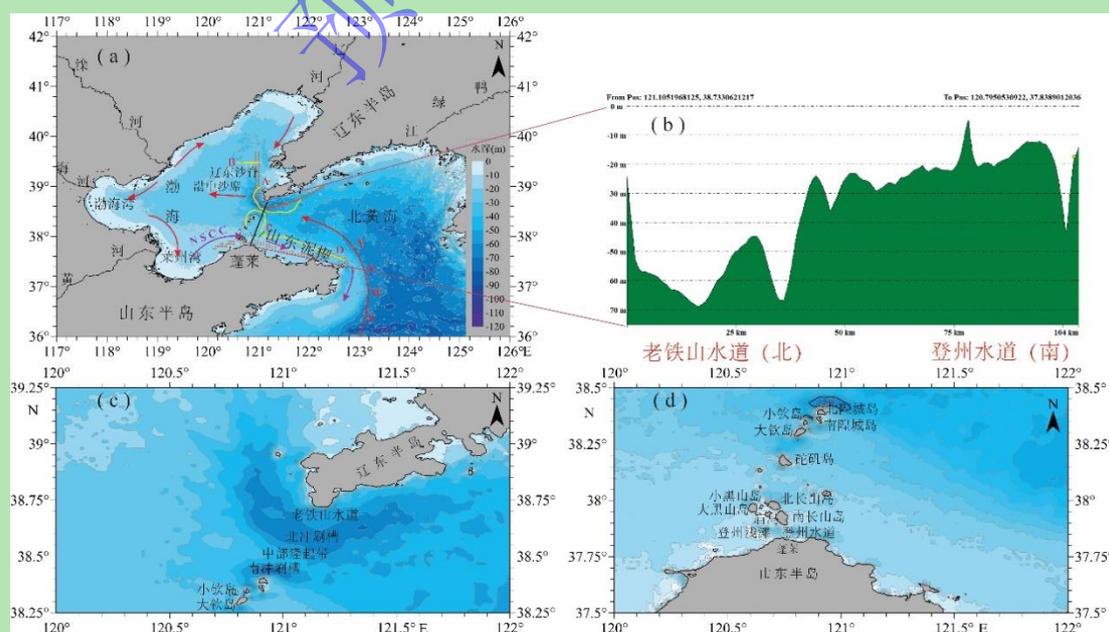


图 1 渤海海峡海底地形图

(a) 渤海海峡及其邻区地理概况, 周边较大的河流包括黄河、海河、滦河、辽河、鸭绿江等。环流系统由黄海暖流 (YSWC) 和鲁北沿岸流 (NSCC) 组成。黄色实线表示浅地层剖面测线位置; (b) 渤海海峡从北到南的水深剖面, 黑色实线表示水深剖面位置; (c) 渤海海峡北部海底地形; (d) 渤海海峡南部海底地形

Fig.1 Bathymetric map of the Bohai Strait.

(a) Map showing bathymetry of the Bohai Strait and its surrounding rivers, including the Yellow, Hai, Luan, Liao, and Yalu rivers. The current system is composed of the Yellow Sea Warm Current (YSWC) and the North Shandong Coastal Current (NSCC). The seismic profiles are shown by yellow lines; (b) Depth profile of the Bohai Strait from northern part to southern part, and it is shown by black line; (c) Bathymetric map of the northern part of the Bohai Strait; (d) Bathymetric map of the southern part of the Bohai Strait.

2 材料与方 法

2.1 区域海洋模拟系统设置

区域海洋模拟系统 (ROMS) 被广泛用于模拟沿海和区域海洋动力学特征, 本研究采用该模型模拟研究区冬季的水动力特征, 并通过分析其潮流和总余流 (海流+潮余流) 的特征, 揭示渤海海峡的沉积物搬运过程。

本次模型范围覆盖渤海和黄海, 纬度范围为 $30^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$, 经度范围为 $117^{\circ}\sim 128^{\circ}\text{E}$ (图 2), 水平分辨率约为 $3\text{ km}\times 3\text{ km}$, 垂直层数为 20 层。模型水深数据由 General Bathymetric Chart of the Oceans (<https://www.gebco.net>) 的 15 弧秒分辨率地形数据插值而成。初始场和边界场 (南向和东向, 频率为每 12 小时) 数据来自于 HYCOM+NCODA Global $1/12^{\circ}$ 分析数据 (GLBy0.08/expt_93.0, <https://www.hycom.org>), 包括三维温度、盐度和流场。大气强迫资料来自欧洲中期天气预报中心 [European Center for Medium-Range Weather Forecasts (<https://www.ecmwf.int>)] 的 ERA5 资料, 包括海面风、平均海平面压力、气温、相对湿度、降水和净辐射 (短波和长波) 等, 空间分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$, 时间间隔为 3 小时。潮汐强迫资料来自 TPX09 潮汐模式导出的 8 个主要分潮 (分别为 M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1 和 Q1) [34-35]。模型的具体运行时间为 2020 年 11 月—2021 年 4 月, 模型从 2020 年 11 月 1 日 00:00:00 开始运行, 第一个月用于模型自适应, 在 2020 年 12 月的时候模型结果已达稳定状态。本研究对 2020 年 12 月—2021 年 2 月 (冬季) 共 3 个月的模型结果进行分析。详细的模型验证和模型结果见 Xu 等的成果 [36]。

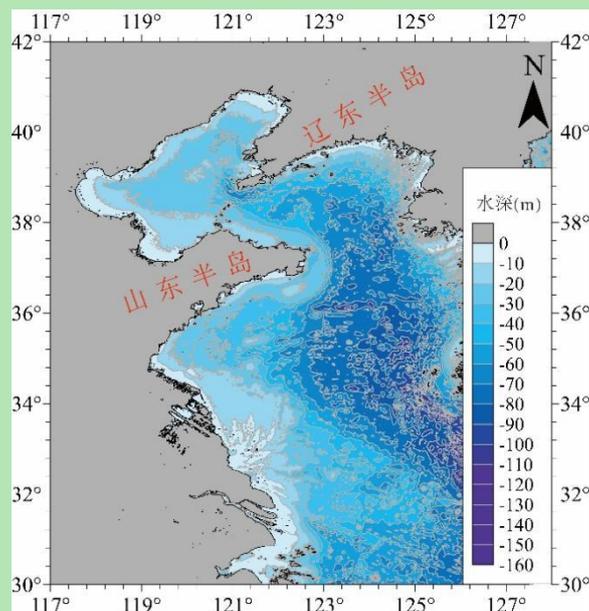


图2 ROMS 模型范围示意图

Fig.2 Extent of the modeling result [Regional ocean modeling system (ROMS)].

2.2 表层沉积物粒度数据

渤海海峡海底表层沉积物粒度数据来源于 2004—2012 年中国近海海洋综合调查与评价专项在渤海和北黄海的部分调查数据，选用了研究区内的 6707 个站位的表层沉积物粒度参数，结果参考了石学法等的成果^[37]。

2.3 浅地层剖面

为了查明渤海海峡的沉积体展布特点，2023 年 5 月—6 月利用自然资源部第一海洋研究所内共享航次，使用“向阳红 18 船”高分辨率 Topas PS18 (0.5~6.0 kHz) 浅地层剖面仪系统(0.5~12 kHz)采集了 4 条浅地层剖面数据，测线位置见图 1a，并利用 Triton SB-Interpreter 软件对浅地层剖面数据进行处理。

2.4 分析方法

总余流通常指考虑了水动力的潮周期性变化之后，流体运动的净效应，主要包括潮余流、风生余流等。本次模拟分别累加 12 月至 2 月的深度平均流速的东分量 (\bar{u}) 和北分量 (\bar{v})，采用公式 (1) 和 (2) 计算得到平均累计值 \bar{u} 和 \bar{v} ，代表了流体的净运动方向和速度，余流的大小和方向分别对应 U_{res} 和 θ 。计算过程如下：

$$\bar{u} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T u(t) \quad (1)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T v(t) \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{\bar{v}}{\bar{u}} \right) \quad (3)$$

$$U_{res} = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (4)$$

根据 Du 等^[38]的研究成果,合理假设沉积物输运通量与流速的三次方成正比,可以设想,输运量越大则在此位置的侵蚀越强,因此该参数也反映了侵蚀强度。在东(X)和北(Y)方向上12月-2月平均的输沙量为:

$$qx = \frac{1}{T} \int_0^T k[u(t)^2 + v(t)^2] u(t) dt \quad (5)$$

$$qy = \frac{1}{T} \int_0^T k[u(t)^2 + v(t)^2] v(t) dt \quad (6)$$

这个表达式计算的是冬季3个月的平均沉积物通量 qx 、 qy ,其中 k 为常数。

3 结果

3.1 渤海海峡表层沉积物粒度特征

渤海海峡及其附近海域表层沉积物类型多样(图3a),其中粗粒沉积主要分布在海峡北部、滦河三角洲前缘、黄河三角洲前缘、莱州湾的极浅水区域以及辽东湾的外侧。渤海海峡最粗的沉积物位于老铁山水道。细颗粒沉积物主要分布在山东半岛沿岸区域、渤海湾和渤海中部砂质沉积的外侧(西北侧)(图3a)。

3.1.1 海峡北部沉积物粒度特征

海峡北部的沉积物粒度较粗,以砂质沉积物为主。不同粒径的沉积物呈现有序展布,粒径范围在 -1Φ - 8Φ 之间。老铁山水道内的沉积物粒度最粗,部分站位沉积物含砾石;进入渤海后,辽东沙脊和渤中沙席(位置见图1a)的粒度相对老铁山水道较细,以砂质沉积为主,平面呈现扇形分布(图3b),砂平均含量高达60%以上;继续向外侧,砂质沉积物演变为泥质沉积,并围绕平面扇状砂质沉积呈带状展布。从老铁山水道向北黄海方向,粗颗粒沉积物含量快速降低,以粉砂质沉积为主(图3b)。

3.1.2 海峡南部沉积物粒度特征

与海峡北部相比,海峡南部沉积物较细,以粉砂为主(黏土质粉砂和砂质粉砂),粉砂含量在60%~80%之间(图3c)。来自黄河的细颗粒物质经过渤海海峡南部,围绕山东半岛呈带状展布,沉积物展布具备自西向东变细的整体趋势,且粒径大小分布比较集中(分选较好),平均粒径为 6Φ 左右,主要由粉砂和黏土组成。山东沿岸泥质带经过登州海峡时,部分站位的沉积物粒径突然变粗(图4b),出登州海峡后,粒径恢复原有趋势。登州水道同老铁山水道一样,水道内沉积物粒度较水道两侧的粒度粗,且距离水道越远,沉积物逐渐细化(图4a、b),形成了沉积物粒度水道粗、水道两边较细的分布格局。

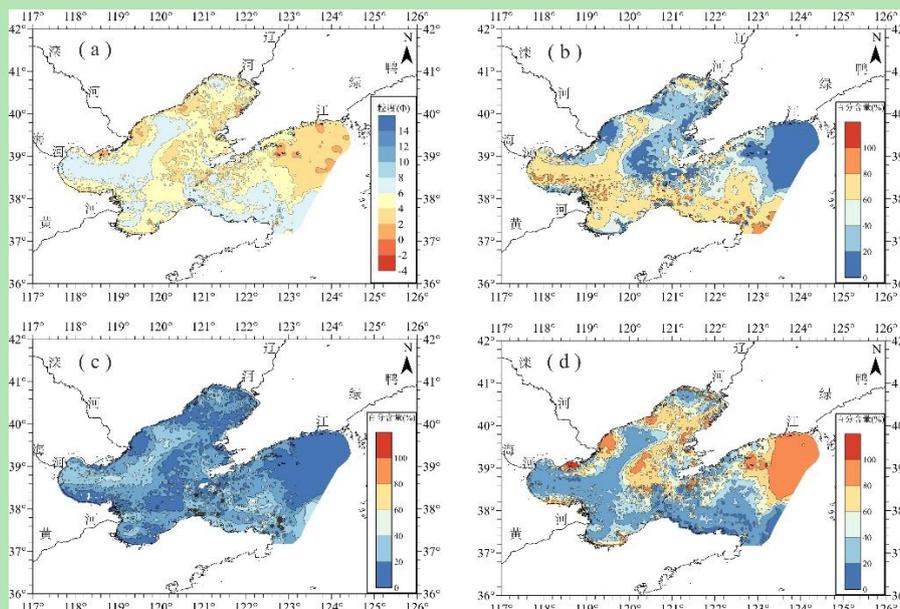


图3 渤海海峡及其周边区域表层沉积物粒度及物质组成平面分布

(a)平均粒径; (b)砂含量; (c)粉砂含量; (d)黏土含量

Fig.3 Grain and sediment composition distribution in the surface sediment of the Bohai Strait and its surrounding areas.

(a) mean grain, percentage content of (b) sand, (c) silt, and (d) clay.

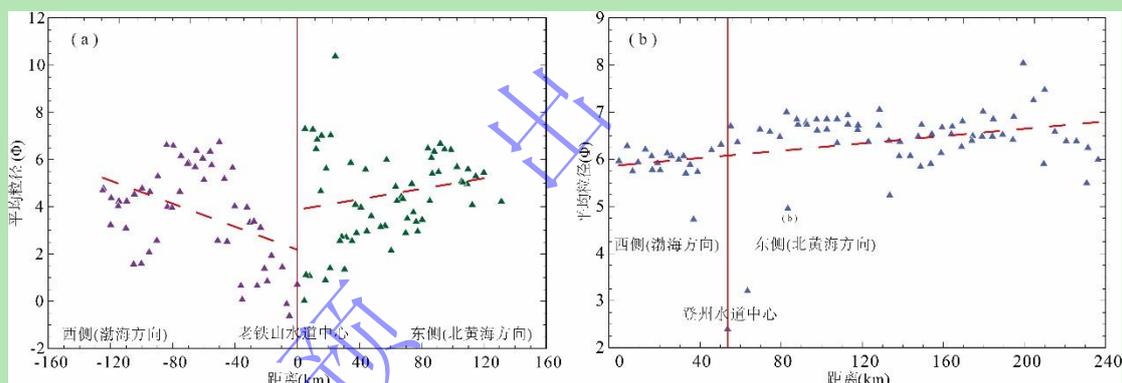


图4 渤海海峡北部与南部的表层沉积物的平均粒径分布 (具体站位见图 1a, 为橙色圆点)

(a) 老铁山水道及其邻近区域粒度平面变化; (b) 登州水道及其邻近区域粒度平面变化

Fig.4 Mean grain distribution in (a) Laotieshan Channel; (b) Dengzhou Channel and its adjacent area.

3.2 浅地层剖面的沉积特征

基于前人钻孔资料以及对本次研究浅地层剖面的解析,本文中所提及的海峡北部与南部的沉积体系均为全新世(11.5 ka B.P.)以来的沉积^[19]。过渤海海峡的浅地层剖面展现了海峡北部与海峡南部截然不同的沉积体系展布特征和沉积体内部地层叠加样式(图5)。

3.2.1 渤海海峡北部沉积体系

海峡北部老铁山水道是海峡地貌最深的区域,围绕辽东半岛呈长条状展布。过老铁山水道的浅地层剖面展示了该区域侵蚀强烈,长条状强烈侵蚀区域向东西方向过渡的过程中,床砂底形由沟槽状侵蚀地貌向沙丘迁移区演化(图5a)。

从老铁山水道至渤海湾内部, 侵蚀和沙丘迁移区逐渐演变为沉积物堆积区。该堆积区由数条沙坝(图 5b) 以及外侧的沙席和更外侧的泥质带组成。这些长条形沙坝也称为辽东浅滩沙脊(位置见图 1a), 沿老铁山水道的长轴呈发散状分布, 暗示其形成与流经老铁山水道的潮流有密切的关系。正因如此, 前人将这些沙坝解释为潮流沙脊^[15]。潮流沙脊向外, 沙坝形态逐渐消失, 过渡为平坦的沙席和更外侧的泥质带。

在老铁山水道的另一侧(北黄海方向), 浅地层剖面并没有显示出与辽东浅滩沙脊(“涨潮三角洲”) 对应的“退潮三角洲”。进入北黄海后, 老铁山水道的侵蚀与沙丘迁移区演变为侵蚀区, 虽然与老铁山水道相比, 侵蚀相对较弱, 但全新世地层的缺失仍然指示了强水动力背景和弱沉积物供给。

3.2.2 渤海海峡南部沉积体系

海峡南部的沉积体系展布样式与北部截然不同, 南部主要分布细粒沉积体系。经海峡南部的浅地层剖面展示了泥楔在经过海峡时表现为侵蚀或沙丘迁移(图 5c)。穿过海峡地形限制后, 沉积体恢复为泥质楔形体的外形, 沉积体内部以垂向加积和向海方向前积反射为特征^[21](图 5d)。

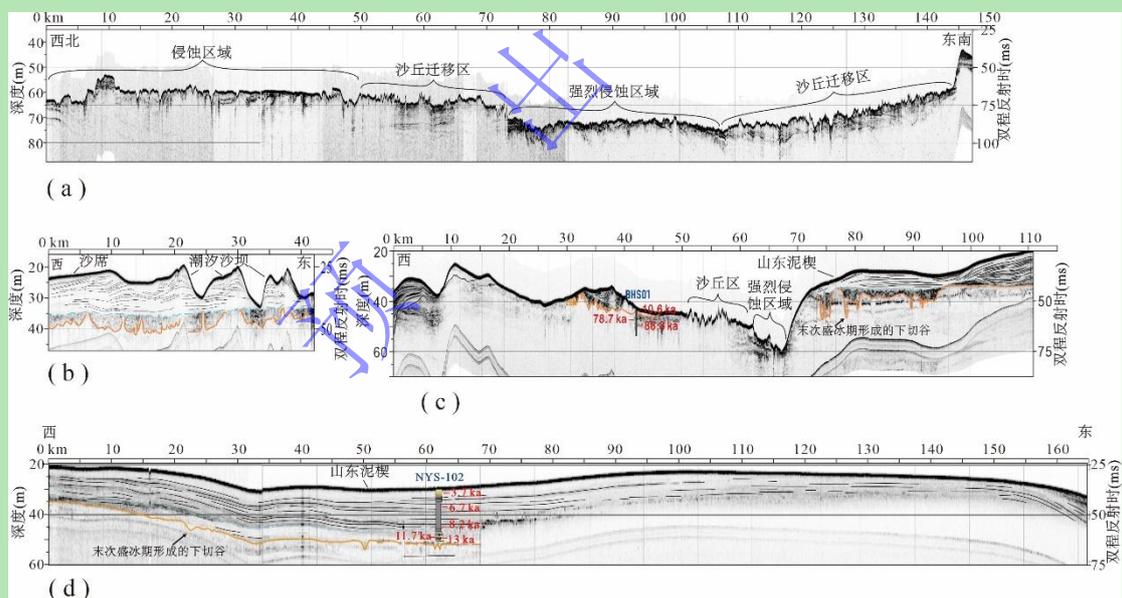


图 5 渤海海峡及其邻近区域典型地层剖面(图 5a-d 剖面测线位置分别对应图 1a 黄色实线 A-D)

(a) 过渤海海峡北部老铁山水道; (b) 过渤海海峡北部涨潮三角洲; (c) 过海峡南部; (d) 过渤海海峡南部山东泥楔

Fig.5 Typical seismic profiles in the Bohai Strait and its adjacent area

(a) Through the Laotieshan Channel of the northern part of Bohai Strait, (b) Through the northern flood tidal delta of the Bohai Strait, (c) Through the southern part of the Bohai Strait, and (d) Through the Shandong mud wedge of the southern part of the Bohai Strait

3.3 渤海海峡水动力

渤海海峡及其附近海域潮流以半日潮为主, M2 是黄、渤海最主要分潮。受科里奥利力

和海峡两侧的海岸线形态及地形的影响^[18]，海峡潮流强度出现强烈的不对称性，渤海海峡北部涨潮流（由黄海向渤海方向）占优势（图 6b~d），而南部潮流的不对称性不明显，涨、落潮流速大小相近（图 6j~l）。无论海峡北部或南部，潮流经过海峡最狭窄部位的流速最大（图 6b, c, j, k），且狭窄部位以近东西向的往复流为主（图 7）。总体来说，从海峡狭窄区域向海峡两侧，除了潮流速度降低外，潮流运动方式也发生了改变，潮流椭圆的椭率逐渐变大（图 7），由往复流向旋转流转变。为了更加详细地了解区域水动力条件的空间分布，对渤海海峡的潮流（图 6, 7）、余流（图 8）和沉积物搬运能力（图 9）进行分析，取得结果如下。

3.3.1 渤海海峡北部水动力

海峡北部强涨潮流主要位于老铁山水道内，也是黄、渤海海域潮流最强的区域，最大涨潮流流速大于 1.6 m/s（图 6b, c），潮流往复性强（图 7）。强往复潮流对老铁山水道底部海床产生强烈的冲刷与侵蚀，塑造了老铁山水道的负地形特点，形成了深冲刷槽（图 1c）。涨潮流通过老铁山水道进入渤海内逐渐减弱，呈辐射状向北和西北方向发散（图 6b~d）。北向潮流受到辽东半岛西侧岸线地形的限制，潮流方向平行于岸线，流速较大并保持较强的往复性（图 7），如辽东沙脊的最大流速达 0.8~1.2 m/s（图 6d）。西北向潮流进入渤海中部，由于解除了地形限制（横截面积增加），流速快速下降，如渤中沙席最大流速为 0.6~0.8 m/s（图 6d），流速普遍小于辽东沙脊，以旋转流为主。潮流椭圆的变化展示了潮流运动方式由往复流向旋转流转化（图 7）。

除潮流外，环流也是影响区域沉积体系分布的重要动力（图 8）。黄渤海冬季环流以潮余流和风生流为主^[27]，图 8 展示了渤海海峡冬季环流的空间分布，可以看出冬季环流主要由黄海暖流和沿岸流等流系组成，并且清晰地观察到黄海暖流从 123° E 附近向北流入北黄海，随后通过海峡北部的老铁山水道进入渤海，在受到渤海西岸阻挡后分为南北两支：一支沿着辽东湾向北，一支沿着渤海湾向南，与管秉贤等研究结果一致^[28]。此外，为了更好地解释区域水动力对沉积物的搬运情况^[39-40]，本研究对区域的物质搬运能力进行了计算，结果如图 9 所示，除老铁山水道以侵蚀为主外，其他区域的物质输运能力普遍较弱，以沉积为主。

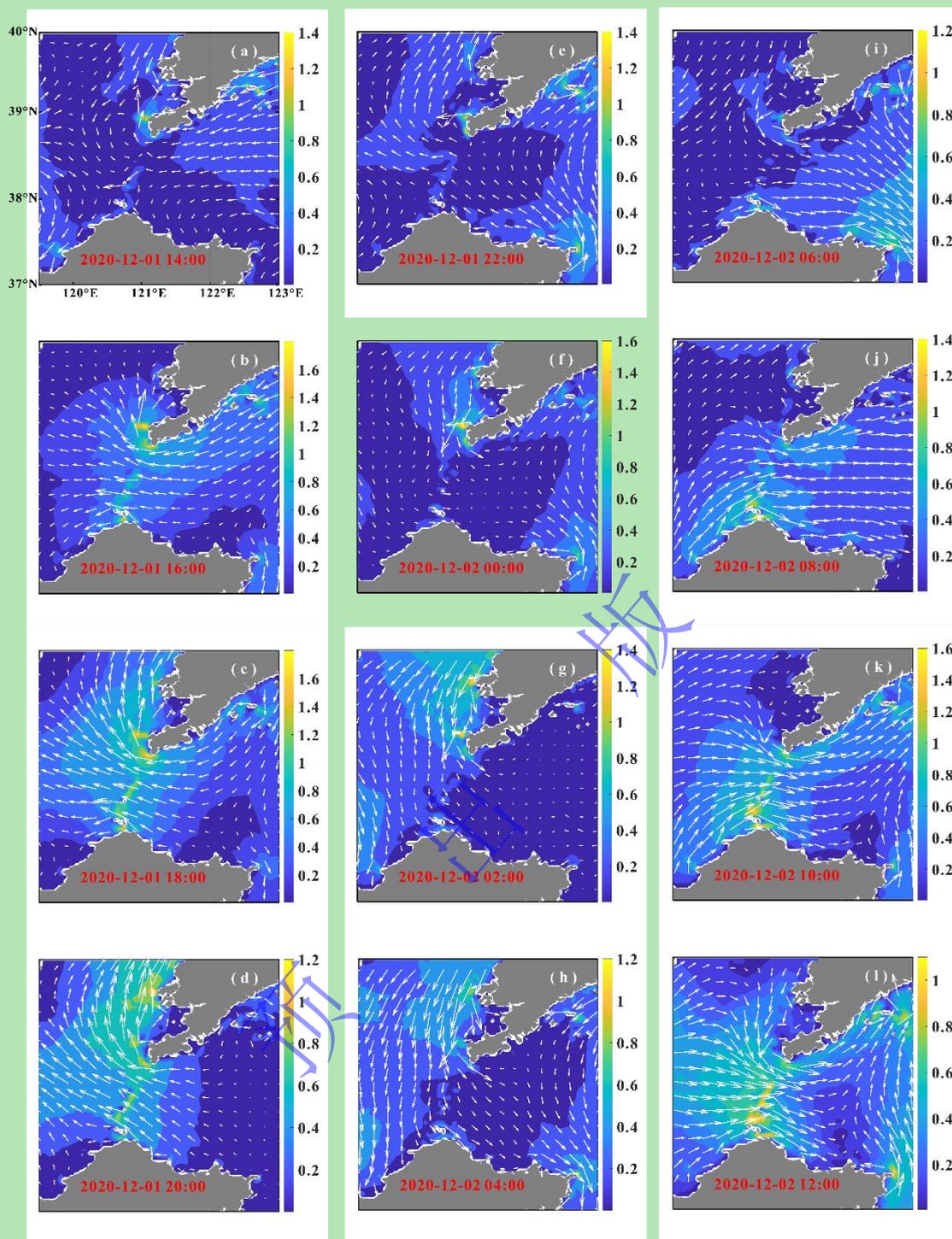


图6 渤海海峡潮流分布

本图展示了24小时的潮流演化，具体时间：2020.12.01 14:00-2020.12.02 12:00，时间间隔为2小时；右侧颜色条表示潮流流速，单位为m/s；(a)-(f)代表涨潮期(自东向西)；(g)-(l)代表退潮期(自西向东)；图(b)和图(c)显示老铁山水道最大涨潮流大于1.6 m/s，图(k)显示最大退潮流出现在登州水道，为1.6 m/s

Fig.6 Tidal current distribution around the Bohai Strait.

The figure illustrates the evolution of tidal currents over a 24-hour period, specifically from 14:00 on December 1, 2020, to 12:00 on December 2, 2020, with a 2-h time interval. The color bar on the right indicates the current speed, with units in m/s. a-f represent the flooding tide (from east to west), g-l represent the ebb tide (from west to east). (b) and (c) show that the maximum flood tidal current in the Laotieshan Channel exceeds 1.6 m/s, (k) shows that the maximum ebb current occurs in the Dengzhou Channel, measuring 1.6 m/s

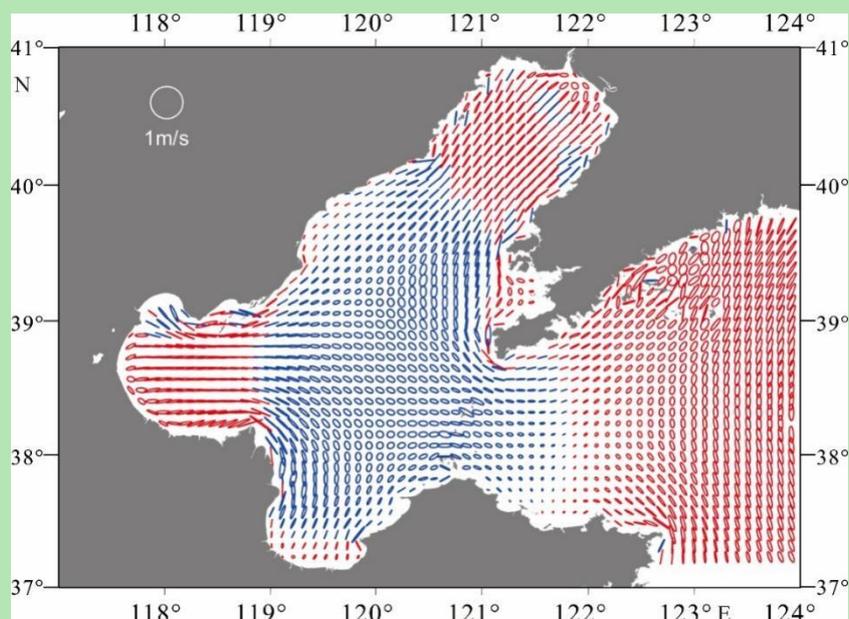


图7 渤海海峡平均 M2 潮流椭圆分布 (2020 年 12 月—2021 年 2 月)

左上角的圆圈代表 1 m/s；椭圆半长轴表示 M2 分潮的流速，蓝色（红色）表示顺（逆）时针旋转；潮流椭圆越扁，表示往复性越强；老铁山水道和辽东沙脊主要为往复流、渤中沙席主要为旋转流

Fig.7 Distribution of depth-averaged tidal current ellipses for the M2 constituent around the Bohai Strait.

The circle in the upper left corner represents a speed of 1 m/s. The semi-major axis of the ellipse represents the current velocity of the M2 tidal constituent. The blue (red) represents the tidal ellipses rotating clockwise (anticlockwise). The more elongated the tidal ellipse, the stronger the oscillation. The Laotieshan Channel and Liaodong Sand Ridge mainly exhibit reciprocating flow, whereas the Bozhong Sand Sheet primarily features rotary flow

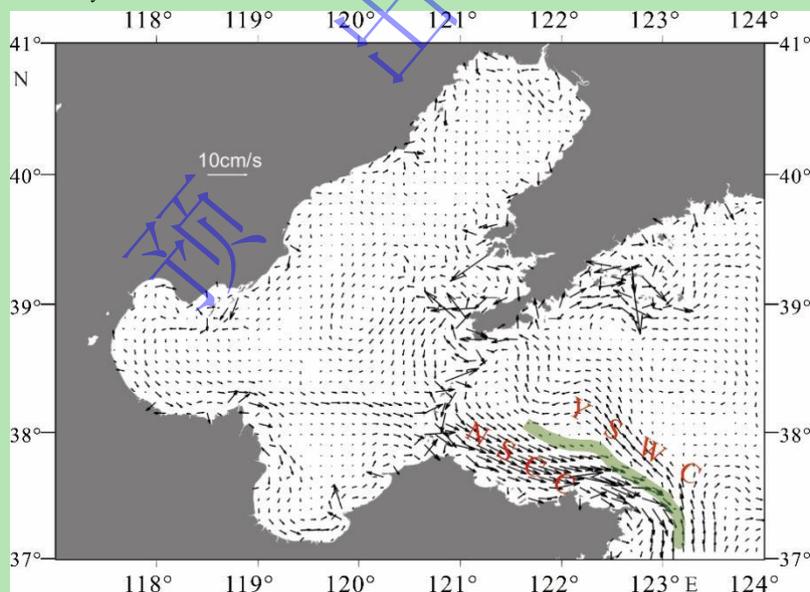


图8 渤海海峡冬季平均余流分布

绿色部分表示锋面位置，为黄海暖流（YSWC）和鲁北沿岸流（NSCC）的交界；余流较小，一般小于 10 cm/s

Fig.8 Distribution of average residual currents around the Bohai Strait in winter

The green area indicates the position of the front, representing the boundary between the Yellow Sea Warm Current (YSWC) and North Shandong Coastal Current (NSCC). The residual flow is relatively small, less than 10 cm/s

3.3.2 渤海海峡南部水动力

与海峡北部大范围分布的强涨潮流相比，海峡南部的潮流整体较弱（图6），由于庙岛

群岛（图 1d）造成的峡道效应，登州水道附近水动力最强，最大潮流流速可达 1.6 m/s（图 6k），流速向东西两侧的黄渤海海域递减，尤其是蓬莱以东的山东泥楔和北黄海中部泥质带为弱潮流区，一般潮流流速不超过 0.6 m/s（图 6）。潮流椭圆结果（图 7）显示登州水道附近以近东西向的强往复流为主，向两侧黄渤海海域往复性减弱。对比南部涨潮（图 6a-e）和退潮（图 6h-l）的潮流流速空间分布，涨落潮的流速不对称性对比海峡北部而言不够明显，结合余流（图 8）分析，可以发现南部水流的净运动趋势为自西向东，与沉积物的搬运方向一致（图 9）。

海峡南部岛屿众多，岛屿与水道交错分布，复杂的地形导致区域水动力条件十分复杂，余流方向杂乱无规律（图 8），且岛屿对冬季北向风产生显著的屏障作用，如大黑山岛和北长山岛的北部水动力强于大黑山岛和南长山岛的南部（图 6b~d、j~l）。

山东半岛沿岸流冬强夏弱，以鲁北沿岸流为主，平均流速一般小于 10 cm/s，其他区域流速普遍小于 5 cm/s。东向的鲁北沿岸流与黄海暖流在北黄海形成显著的锋面（图 8），阻碍了黄河运输的物质向外扩散，图 9 显示锋面位置区域物质运输能力十分弱，主要输运区集中在山东半岛沿岸。

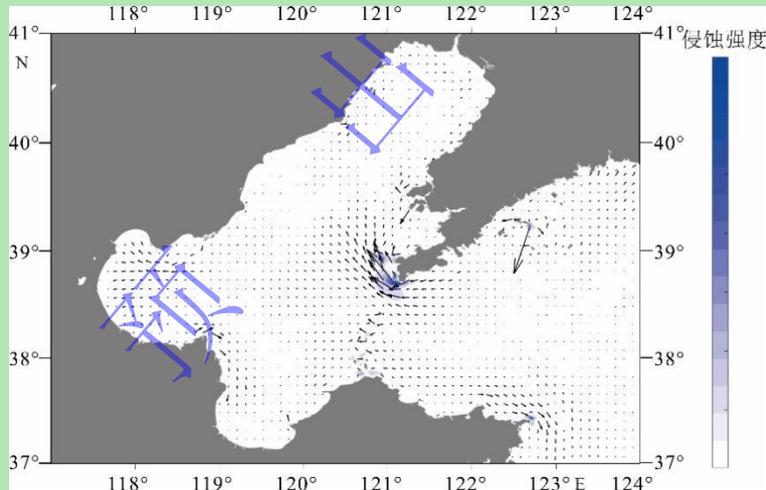


图 9 渤海海峡冬季物质运输方向与能力图

颜色越深，侵蚀越强；箭头大小和方向表示搬运能力的大小和方向；侵蚀主要发生在老铁山水道以及登州水道

Fig.9 Sediment transport trend and capacity map of Bohai Strait in winter

The darker the color, the stronger the erosion; the size and direction of the arrows indicate the magnitude and direction of the sediment transport capacity. Erosion is mainly distributed in the Laotieshan and Dengzhou channels

4 讨论

已有研究表明，渤海海峡及其周边区域沉积物的平面展布和沉积体系分布受控于物质来源、海平面变化、海底地形和区域水动力条件等因素^[41]。物质来源决定了沉积物的原始面貌，潮流、波浪、环流等水动力不断作用于河流供给的沉积物，改变和塑造沉积物的分布格

局^[41-42]。由于本文的研究对象为现代渤海海峡沉积物（全新世高海平面以来，即海平面几乎没有明显变化），因此本文主要探讨沉积物供给和区域水动力条件对沉积体系分布的控制作用。

4.1 沉积物供给对渤海海峡沉积物分布的控制作用

渤海海峡的南部和北部沉积物供给量截然不同，因而在海峡的南部、北部形成了形态、内部构型、沉积物分布、沉积物厚度完全不同的沉积体系展布特点。

4.1.1 渤海海峡北部

海峡北部周围缺乏大型入海河流，潜在的沉积物供给河流为鸭绿江、辽河、滦河等，它们供给的沉积物通量分别约为 1.95、18.49、22.68 Mt/yr，仅约为黄河沉积物通量的 4%^[43]。这些区域性河流供给的沉积物主要在河口堆积形成三角洲。由于三角洲的规模较小，因此对渤海海峡北部海域的泥沙贡献量也较少。与海峡南部受到黄河的巨量泥沙供给相比，海峡北部的老铁山水道东、西两侧处于相对“饥饿”状态，即沉积物来源匮乏。这一特点在浅地层剖面 and 沉积物粒度分布等数据中得到了充分印证（图 3, 5）：（1）老铁山水道内几乎没有现代沉积物，现今海底以侵蚀剩余的老地层为主（图 5a）；（2）老铁山水道西北部的涨潮流三角洲厚度较薄，厚度仅为 0~10 m（图 5b）；（3）沉积物粒度平面分布图展示了老铁山水道内以粗粒沉积为主，这可能是由于老铁山水道内潮流较强且细粒沉积物的供给速率小，被强潮流/海流冲刷带进渤海内部，形成涨潮三角洲（辽东沙脊和渤中沙席及西北侧的泥质条带）（图 3a）；（4）老铁山水道东侧由于供给少且退潮流相比涨潮流较弱（图 6），因此在老铁山水道东侧没有形成规模明显的退潮三角洲（图 10）。

4.1.2 渤海海峡南部

渤海南部的供给河流为世界级大河—黄河，其建坝前沉积物通量可达 1100 Mt/yr^[44]，为全球沉积物供给量最大的河流。黄河中的沉积物主要来自黄土高坡的侵蚀，因而其沉积物以粉砂为主。渤海海峡南部是黄河物质输向北黄海的重要通道，山东泥楔内的沉积物（60%以上）主要来自黄河的供给^[45]。该泥质带面积约为 36 111.11 km²，沉积体的体积约 300~439.51 km³^[22,46]，沉积体最大厚度可达 40 m^[19]，是世界上平面面积和体积最大的泥质带/泥楔之一。

总体来说，与渤海北部的“饥饿”状态不同，海峡南部的沉积物供给充足：（1）即便在渤海海峡南部小岛之间的狭窄通道内，仍有现代沉积物堆积^[40]；（2）渤海海峡南部的泥质体厚度是北部沉积体厚度的 2~4 倍（图 5b）；（3）海峡南部东、西两侧均为厚度较大的泥楔，而海峡北部仅在老铁山西侧有沉积体聚集，且厚度较薄（图 5c）。

4.2 水动力条件对渤海海峡沉积物分布的控制作用

除沉积物供给外,区域的水动力条件也对海峡沉积物的形态、内部构型和沉积物分布产生不可忽视的影响^[2]。海峡沉积物可能受到潮流、波浪、海洋环流的综合作用^[47]。

4.2.1 海峡北部

海峡北部以潮流运动为主,潮流从老铁山水道进入渤海后发生四个显著变化:(1)潮流的流向由近东西向转变为北向和西北方向,潮流将老铁山水道内沉积物向渤海方向搬运并堆积下来;(2)随着潮流能量减弱,流速逐渐降低,导致潮流携带沉积物的能力下降,粗颗粒先沉积下来(图 3b),在老铁山水道北侧形成涨潮流三角洲,即辽东沙脊和渤中沙席,细颗粒后沉积下来,在更外围形成了泥质环带(图 3d);(3)辽东沙脊和渤中沙席二者的成因主要差异在于潮流的运动方式(往复流和旋转流)和流速:当潮流椭圆率绝对值小于 0.4 时,较强往复流有利于沙脊的形成和发育;当椭圆率绝对值大于 0.4 时,旋转流有利于沙席的形成和发育^[5];(4)流体的运动方式发生改变:涨潮流通过狭窄的老铁山水道,由于横截面积变小,促使潮流往复性增强;而从狭窄的海峡过渡到相对开阔的水域后,地形限制的解除,会使得潮流往复性变弱,因此潮流运动形式由老铁山水道的往复流转变为渤中沙席区域的旋转流;(5)由于受到辽东半岛西侧地形限制的影响,辽东沙脊处的潮流在流出渤海海峡后继续保持往复流运动状态。总体来看,渤海海峡限制性地形导致潮流增强,形成大片粗颗粒沉积区,主要包括老铁山水道、辽东沙脊和渤中沙席,老铁山水道附近主要为含砾沉积物,甚至有侵蚀残留老地层出露(图 5a),辽东沙脊和渤中沙席沉积物主要为砂和粉砂质砂。

不难看出,海峡潮流的方向(如渤海海峡北部)为平行于岸线,而其他海岸的潮流则大致垂直于岸线。潮流方向的差异导致海峡沉积体系平行岸线分布,不同于其他海岸垂直于岸线的三角洲分布样式^[5]。海峡最狭窄部位以砾石和裸露基岩为主,大于 2 mm,而涨潮流三角洲以砂质沉积为主,因此展现与海岸三角洲相似的近端粗,远端细的特点。

4.2.2 海峡南部

在黄河强供给的背景下,渤海海峡南部独特的地形导致了与海峡北部不同的水动力条件。

1) 潮流、波浪、沿岸流和锋面对海峡南部沉积分布的影响

在海峡最狭窄部位周边,海峡南部与海峡北部一样,呈往复流。由于海峡南部水深较浅,平均水深只有 18 m,海水流动受风的影响较大^[48],冬季频繁爆发的强劲西北季风产生的大浪导致大量泥沙再悬浮^[49]。在潮流、沿岸流和波浪的共同作用下,悬浮泥沙经渤海海峡南部向黄海输送^[18,50],形成一条沿山东半岛北部分布的高悬沙带,对表层沉积物分布格局和输运特征产生深刻的影响^[51]。

黄海暖流与鲁北沿岸流在山东半岛近海交汇，形成了一个显著的切变锋面系统^[52-54]。这一锋面系统不仅是水团交界线，还对近岸物质向外海的输运起到了重要的屏障作用，有效地阻隔了黄河输送泥沙向外海扩散。对锋面两侧水体的悬浮体研究发现，两侧水体的浊度截然不同，鲁北沿岸流侧较黄海暖流侧的水体浊度高。这一观测结果有力地证明了锋面的阻挡作用：大部分物质被锋面限制在近岸一侧，难以越过锋面进入外海^[55]。

2) 海峡南部的地形对海峡沉积动力的影响

渤海海峡南部岛屿与水道构成了沟脊相间的崎岖地形，地形起伏剧烈^[56]，沉积作用更为复杂：（1）岛屿北侧的迎浪面以侵蚀为主，图 1d 展示了大黑山岛和北长山岛北侧均有冲刷槽的存在；（2）群岛内部受岛屿的掩护，以淤积状态为主，潮流流速普遍小于 30 cm/s^[57]；（3）岛屿之间会形成小规模的水流涡旋，从而影响岛屿内的沉积物分布^[58]；（4）岛屿对北向风的阻挡作用导致登州水道南北两岸波浪强度不同，南岸更易受到强浪的影响，水动力条件强于水道北岸，从而形成南粗北细的沉积物分布格局。而在东西方向上，峡道中部由于流速最大，向东西两侧流速减小，因而形成了水道内沉积物粗、向两侧细化的分布格局。随着搬运距离增加，分选逐渐变好（图 4b）。

4.3 渤海海峡与其他潮控海峡的对比

潮控海峡以潮流形成的沉积为主，目前研究程度较高^[2,59]。对比和总结世界范围内的典型潮控海峡可以发现：（1）潮控海峡三维规模较小，通常为浅水海峡，且海峡形状较为简单，如双漏斗形；（2）与较大型海峡相比，流体类型更加单一，沉积动力主要为潮流。

海峡的大小和形状对通过海峡的流体产生重要影响^[2]。海峡狭窄点的横截面积最小，导致通过的流体增强，例如，Longhitano^[60]对意大利南部更新世卡坦扎罗海峡的沉积序列进行研究，发现横截面积更小的低海平面时期，海峡内的潮流作用更明显，而随着海平面逐渐上升，横截面积变大，潮流作用逐渐减弱甚至消失。该结果表明海峡横截面积的大小控制着海峡潮流的激活、停止和强弱。此外，Reynaud^[61]发现中新世 Bonifacio 盆地迅速沉降导致了 Corsica-Sardinia 海峡的贯通，导致沉积相由非潮流沉积向潮流沉积转变。

海峡的横截面积主要与海峡的深度和宽度有关，在许多现代潮控海峡中，无论水深大小，都发生了潮流放大的现象。经调研，潮控海峡的最大水深可达 350 m（库克海峡）（表 1）。除库克海峡外，多数潮控海峡为浅水海峡（水深小于 100 m），表明水深在一定程度上控制了潮流的强弱^[60]。同时，海峡的宽度也是影响海峡沉积作用的重要因素^[5]。当海峡宽度大于 100 km，可称为海道，海道内以单向的海流/洋流为主，主要发育等深流沉积；当海峡宽度小于 50 km，潮流的作用逐渐凸显，海峡内可发育大量潮流形成的沉积^[60]。表 1 和表 2 总结

了潮控海峡的三维指标和流速，随着海峡变得更宽，潮流的影响逐渐减弱，而海流的作用增强。与较窄海峡相比，宽阔海峡通常潮流能量较低。

表 1 典型潮控海峡的规模及流速^[2]

Table 1 Scale and speed of typical tidal straits

典型潮控海峡	长度 /km	宽度 /km	深度 /m	最大潮流流速 / (m/s)
多佛海峡	40	30-40	<64	2.5 ^[2]
琼州海峡	80	>20	<114	1.7 ^[62]
库克海峡	120	>22	<350	3.4 ^[63]
金门海峡	5	1.5~3.8	<113	2.5 ^[64]
墨西拿海峡	40	3~15	>90	3 ^[65]

表 2 典型海流型海峡的规模^[2]

Table 2 Scale of typical current straits

典型海流型海峡	长度/km	宽度/km	深度/m
佛罗里达海峡	720	45-145	>715
莫桑比克海峡	1 200	430~1 000	>3 000
望加锡海峡	470	130~370	1 500~2 300

Longhitano^[59]针对潮控海峡开展研究，建立了潮控海峡沉积模式。潮控海峡在最狭窄区域以侵蚀为主，通常裸露基岩，狭窄区域两侧为粗颗粒砂质涨、落潮三角洲，在涨、落潮三角洲外侧存在低能泥质沉积。潮控海峡的一个显著特点是涨落潮流均使用同一个通道，速度大致相等但方向相反，然而对现代潮控海峡的观测表明，任何出口的潮流对海峡的影响都是强烈不对称的，这是由于在每个潮汐周期中涨落潮流加速和减速的相互作用，一般潮汐海峡的涨潮流总是大于落潮流，因为涨潮流来自潮汐最大值区，优势潮流通过狭窄处收缩而得到周期性放大^[66]，涨潮流和退潮流的不对称导致“进”和“出”不对等的输运通量^[67]。因此，在潮控海峡中，净输沙路径在空间上具有明显的双向性，通常会在海峡两个进、出口附近形成不对称的涨、落潮三角洲^[66]，典型例子包括墨西拿海峡、琼州海峡、金门海峡等。此外，潮控海峡的长度和宽度较小，由于海峡两侧的海岛规模小，岛上河流输沙量和流量也相应较小，所以潮控海峡的主要沉积物来源为海峡海底的侵蚀。

渤海海峡现代沉积体系空间分布图显示，渤海海峡比潮控海峡的宽度更大（图 10），与潮控海峡相比，渤海海峡水体进、出海峡的主要通道不一致，呈现“北进南出”的水体交换格局。同时，渤海海峡北部和南部的潮流差异明显，北部以强涨潮流为优势，南部以落潮流为优势（图 6），因此渤海海峡两岸的沉积相分布呈现明显的空间分异性（图 10）。在强

涨潮流的作用下，海峡北部向渤海一侧发育了典型潮流沉积体系（涨潮三角洲）^[15]。海峡南部在巨量的黄河泥沙供应下，在山东半岛沿岸发育了大型的沿岸泥质带。Xue *et al*^[18]认为该泥质带本质为渤海海峡退潮三角洲，和海峡北部的涨潮三角洲构成渤海海峡两侧完整的潮汐沉积体系。但笔者认为山东泥楔并非为“退潮三角洲”，原因是山东半岛沿岸为潮流弱流区，而沿岸流较为强盛（如鲁北沿岸流—冬季流幅宽广，最大流速可达 30 cm/s^[68]），所以沉积体向东展布主要为沿岸流的作用。另外，泥楔与其他退潮三角洲最本质的区别为组成物质是粉砂和黏土，而不是砂质沉积物。假若没有黄河的巨量细粒物质供给，山东半岛沿岸靠黄海一侧也许会形成小型砂质退潮地貌^[18]。

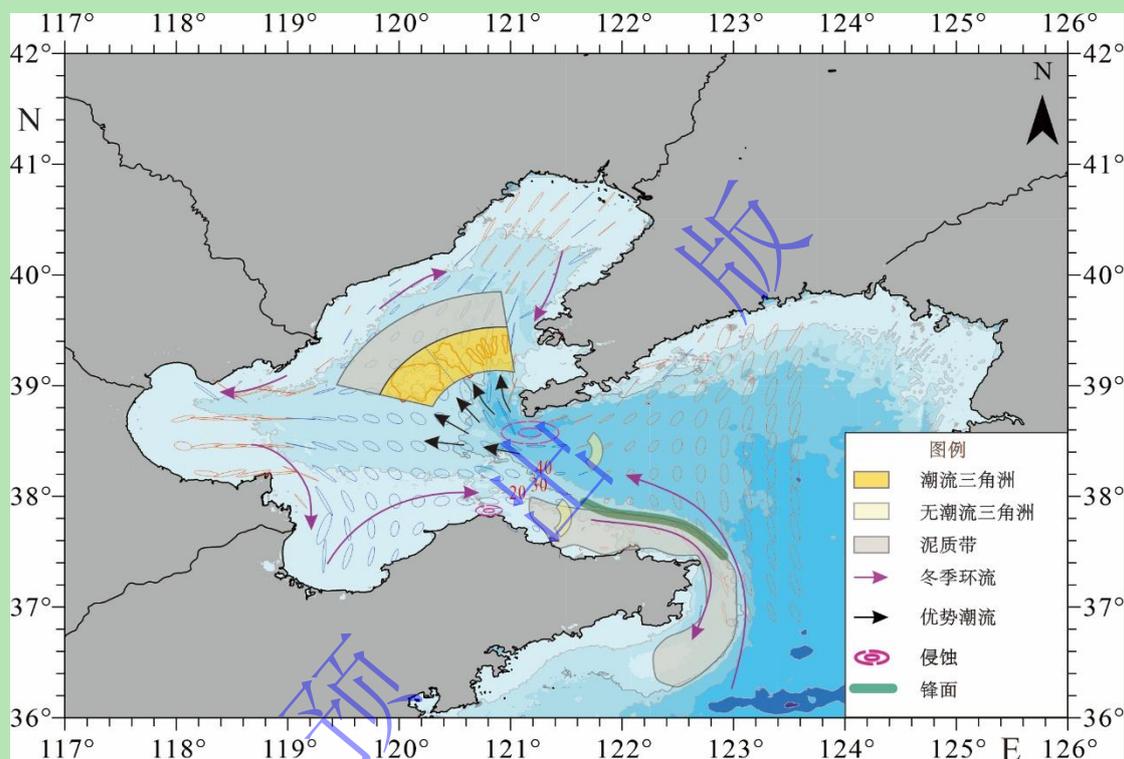


图 10 渤海海峡现代沉积体系分布

海峡北部沉积体系主要由老铁山冲刷槽、由辽东沙脊和渤中沙席组成的涨潮流三角洲和三角洲外围的泥质带三部分组成，海峡南部主要由登州水道和山东泥楔组成，山东泥楔主要分布在 0~30 m 水深；粉色圆圈越大，表示侵蚀越强；锋面(绿色)主要分布在山东泥楔外围，抑制黄河物质向外输送；图中标注了 20 m、30 m 和 40 m 等深线

Fig.10 Distribution of the modern sedimentary system around the Bohai Strait.

The northern sedimentary system of the Bohai Strait is composed of three parts: the Laotieshan scour channel, the flood tidal delta formed by the Liaodong Sand Ridge and Bozhong Sand Sheet, and the outer muddy belt surrounding the delta. In the southern part of the strait, the Shandong mud wedge is distributed at water depths of 0~30 m; the larger the pink circle, the stronger the erosion. The front (green) is distributed around the Shandong mud wedge, inhibiting the outward transport of sediment from the Yellow River. The water depth contours of 20, 30, and 40 m are labeled

5 结论

(1) 渤海海峡北部沉积体系主要受潮流的塑造作用，潮流在老铁山水道流速最大，形

成了渤、黄海最深的侵蚀槽，进入渤海后潮流逐渐变弱，且由往复流演替为旋转流，形成渤中沙席和辽东沙脊，由老铁山水道向黄海方向的潮流没有形成明显的潮流三角洲。老铁山水道东、西两端潮流三角洲大小、厚度的巨大差异反映了进、出老铁山水道潮流的不对称性。

(2) 渤海海峡南部复杂的地形导致沉积作用较为复杂：一方面，在各岛屿之间主要发育小型侵蚀槽（水道），反映岛屿之间限制性地形增强潮流的强度，离开限制性地形（如登州水道）后，潮流逐渐变弱，携带的粗颗粒沉积物堆积下来形成潮流三角洲（如登州浅滩）；另一方面，在黄河的强沉积物供给的背景下，细颗粒沉积物在由风驱动沿岸流的作用下过渤海海峡并沿山东半岛分布，形成世界上最大的泥楔之一——山东半岛沿岸泥楔。复杂的海洋动力场同时塑造了两类沉积体系，既反映了弱背景场沿岸流的连续输运和建设能力，也反映了强动力场潮流对于局部地形和沉积体的建设和侵蚀作用。

(3) 渤海海峡独特的沉积体系是地形、大河供给和复杂海洋动力系统相互作用的综合结果。限制性地形（如水道、岛屿、浅滩）改变了流体运动，影响沉积物类型；黄河的巨量泥沙主要影响南部，北部则受小型河流间接影响，导致南北沉积物来源差异显著；潮流、沿岸流、波浪和环流等海洋动力因素相互耦合，进一步塑造了海峡的沉积格局。

(4) 渤海海峡的沉积作用与沉积产物既有海峡（<100 km 宽）的特点，也有海道（>100 km 宽）的特征。海峡北部展现潮控海峡的特点，海峡南部则表现了海道内海流（风驱动沿岸流）沉积为主的特征，因此渤海海峡与典型潮控海峡的沉积体系存在一定差异，不能完全归类于潮控海峡。渤海海峡宽度（106 km）介于海峡与海道的分类临界值（100 km），比一般潮控海峡宽，随着限制性通道的宽度增加，潮流的强度逐渐变弱，而海流的强度（或通过性）逐渐变强。本研究强调了海峡宽度对于浅水海峡内沉积体系的控制机理。

致谢 诚挚感谢南京大学于谦老师在论文撰写过程提供的指导以及三位审稿人对本文提出了诸多宝贵的意见和建议。

参考文献 (References)

- [1] 单新, 李顺利, 石学法, 等. 海峡沉积研究进展[J]. 古地理学报, 2022, 24(6): 1058-1071. [Shan Xin, Li Shunli, Shi Xuefa, et al. A review of strait sedimentology[J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(6): 1058-1071.]
- [2] Dalrymple R W. A review of the morphology, physical processes and deposits of modern straits[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2023, 523(1): 17-83.
- [3] Dalrymple R W. Facies Models 4[M]. St. John's, Newfoundland: Geological Association of Canada, 2010: 201-231.
- [4] Shan X, Dalrymple R W, Shi X F, et al. Taiwan Strait: An ocean-current-dominated shallow-water setting with a river-fed detached muddy contourite deposit[J]. Sedimentology, 2025, 72(2): 507-532.
- [5] Rossi V M, Longhitano S G, Olariu C, et al. Straits and seaways: End members within the continuous spectrum of the dynamic connection between basins[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2023, 523(1): 85-109.

- [6] 姜胜辉, 王楠, 成海燕, 等. 渤海海峡水动力分布特征研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(S1): 66-73. [Jiang Shenghui, Wang Nan, Cheng Haiyan, et al. The study on hydrodynamic distribution characteristics of the Bohai strait[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(S1): 66-73.]
- [7] Cheng P, Gao S, Bokuniewicz H. Net sediment transport patterns over the Bohai Strait based on grain size trend analysis[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 60(2): 203-212.
- [8] Wu X, Wu H, Wang H J, et al. Novel, repeated surveys reveal new insights on sediment flux through a narrow strait, Bohai, China[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(10): 6927-6941.
- [9] Wang C H, Liu Z Q, Harris C K, et al. The impact of winter storms on sediment transport through a narrow strait, Bohai, China[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(6): e2020JC016069.
- [10] 陈晓辉, 张训华, 李铁刚, 等. 渤海海峡及周边海域浅地层结构及地层声速的拾取[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(1): 69-76. [Chen Xiaohui, Zhang Xunhua, Li Tiegang, et al. Shallow stratigraphic sequences and their acoustic velocity in the Bohai Strait and surrounding areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(1): 69-76.]
- [11] 刘忠亚, 彭轩明, 赵铁虎, 等. 渤海海峡及邻区活动断裂分布及其活动特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(1): 87-97. [Liu Zhongya, Peng Xuanming, Zhao Tiehu, et al. The distribution and activities of active faults in the Bohai Strait and its adjacent areas[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2016, 36(1): 87-97.]
- [12] Li Y F, Wolanski E, Zhang H. What processes control the net currents through shallow straits? A review with application to the Bohai Strait, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 158: 1-11.
- [13] Zhang Z X, Qiao F L, Guo J S, et al. Seasonal changes and driving forces of inflow and outflow through the Bohai Strait[J]. Continental Shelf Research, 2018, 154: 1-8.
- [14] Lian Z, Wei Z X, Wang Y G, et al. Tidal current and energy flux in the Bohai Strait (China) based on multi-month in-situ observations[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 104(S1): 362-370.
- [15] Liu Z X, Xia D X, Berne S, et al. Tidal deposition systems of China's continental shelf, with special reference to the eastern Bohai Sea[J]. Marine Geology, 1998, 145(3/4): 225-253.
- [16] 刘振夏, 夏东兴, 王揆洋. 中国陆架潮流沉积体系模式[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(2): 141-147. [Liu Zhenxia, Xia Dongxing, Wang Kuiyang. Tidal depositional systems and patterns of China's continental shelf[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(2): 141-147.]
- [17] 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. [Liu Zhenxia, Xia Dongxing, Tang Yuxiang, et al. Tidal depositional systems of eastern Bohai sea of Holocene[J]. Science in China (Series B), 1994, 24(12): 1331-1338.]
- [18] Xue C T, Qin Y C, Ye S Y, et al. Evolution of Holocene ebb-tidal clinoform off the Shandong Peninsula on East China Sea shelf[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 177: 478-496.
- [19] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2007, 236(3/4): 165-187.
- [20] 王安国, 张训华, 李广雪, 等. 山东半岛近岸海区全新世泥质沉积体研究现状[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(10): 52-58. [Wang Anguo, Zhang Xunhua, Li Guangxue, et al. A review of the sedimentation of the Holocene clinoform off Shandong Peninsula[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(10): 52-58.]
- [21] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2004, 209(1/2/3/4): 45-67.
- [22] Liu J P, Milliman J D, Gao S. The Shandong mud wedge and post-glacial sediment accumulation in the Yellow Sea [J]. Geo-Marine Letters, 2001, 21(4): 212-218.
- [23] 刘建华, 王庆, 仲少云, 等. 渤海海峡老铁山水道动力地貌及演变研究[J]. 海洋通报, 2008, 27(1): 68-74. [Liu Jianhua, Wang Qing, Zhong Shaoyun, et al. Study on dynamic geomorphology and evolution of the Lao Tieshan channel, the Bohai strait[J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(1): 68-74.]

- [24] 陈义兰, 吴永亭, 刘晓瑜, 等. 渤海海底地形特征[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 75-82. [Chen Yilan, Wu Yongting, Liu Xiaoyu, et al. Features of seafloor topography in the Bohai Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2013, 31(1): 75-82.]
- [25] 齐富康, 边昌伟, 徐景平. 渤海海峡沉积物输运的参数化计算[J]. 海洋学报, 2020, 42(3): 83-96. [Qi Fukang, Bian Changwei, Xu Jingping. Parameterization of sediment transport in the Bohai Strait[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 42(3): 83-96.]
- [26] 鲍献文. 东中国海环流及其相关动力过程的模拟与分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003: 1-168. [Bao Xianwen. Simulation and analysis of the East China Sea circulation and its related dynamic processes[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003: 1-168.]
- [27] 毕聪聪. 渤海环流季节变化及机制分析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 1-79. [Bi Congcong. A numerical study on the seasonal variability and dynamic mechanism of circulation in the Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013: 1-79.]
- [28] 管秉贤, 丁文兰, 李长松. 渤海黄海表层海流图[M]. 北京: 中国科学院海洋研究所, 1977: 1-13. [Guan Bingxian, Ding Wenlan, Li Changsong. The surface currents Map of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[M]. Beijing: Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, 1977: 1-13.]
- [29] Li G S, Wang H L, Li B L. A model study on seasonal spatial-temporal variability of the Lagrangian Residual Circulations in the Bohai Sea[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, 15(3): 273-285.
- [30] Lu J, Qiao F L, Wang X H, et al. A numerical study of transport dynamics and seasonal variability of the Yellow River sediment in the Bohai and Yellow seas[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 95(1): 39-51.
- [31] Bi N S, Yang Z S, Wang H J, et al. Seasonal variation of suspended-sediment transport through the southern Bohai Strait[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 239-247.
- [32] Yang Z S, Ji Y J, Bi N S, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 93(3): 173-181.
- [33] 石学法, 胡利民, 乔淑卿, 等. 中国东部陆架海沉积有机碳研究进展: 来源、输运与埋藏[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(3): 313-327. [Shi Xuefa, Hu Limin, Qiao Shuqing, et al. Progress in research of sedimentary organic carbon in the East China Sea: Sources, dispersal and sequestration[J]. *Advances in Marine Science*, 2016, 34(3): 313-327.]
- [34] Egbert G D, Bennett A F, Foreman M G G. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1994, 99 (C12): 24821-24852.
- [35] Egbert G D, Erofeeva S Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(2): 183-204.
- [36] Xu X M, Gao J H, Shi Y, et al. Cross-front transport triggered by winter storms around the Shandong Peninsula, China[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2022, 9: 975504.
- [37] 石学法, 刘焱光, 乔淑卿, 等. 渤海、黄海和东海沉积物类型图[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 1-106. [Shi Xuefa, Liu Yanguang, Qiao Shuqing, et al. Sediment type map of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2021: 1-106]
- [38] Du Z Y, Yu Q, Wang Y W, et al. Two-dimensional tide-induced residual sand transport: Applications to the Jiangsu coast, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 245: 106991.
- [39] 尹延鸿, 周青伟. 渤海东部地区沉积物类型特征及其分布规律[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(2): 47-54. [Yin Yanhong, Zhou Qingwei. Characteristics and distribution of sediment types in eastern Bohai sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(2): 47-54]
- [40] 蒋东辉, 高抒, 程鹏. 渤海海峡沉积物输运的数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 553-561. [Jiang Donghui, Gao Shu, Cheng Peng. Modelling sediment transport in the Bohai Strait[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 553-561.]
- [41] 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. 中国地质, 2020, 47(5): 1447-1462. [Mei Xi, Li Xuejie, Mi Beibei, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments[J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1447-1462.]
- [42] Hu R J, Liu W K, Li J R, et al. Non-negligible contribution from coastal erosion to sedimentation around the archipelago: A case study of Miaodao Archipelago[J]. *Marine Geology*, 2024, 469: 107241.

- [43] 程天文, 赵楚年. 我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响[J]. 海洋学报(中文版), 1985, 7(4): 460-471. [Cheng Tianwen, Zhao Chunian. Runoff volumes and sediment discharges of large rivers in China and their influence on the coastal zone[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(4): 460-471.]
- [44] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. The Journal of Geology, 1983, 91(1): 1-21.
- [45] 齐君, 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. [Qi Jun, Li Fengye, Song Jinming. Sedimentation rate and flux of the North Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(2): 9-14.]
- [46] 孙佃奇. 山东半岛近岸海区全新世楔形泥质沉积体识别及形态分析[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2012: 1-85. [Sun Dianqi. The recognition and morphology of the Shandong Cliniform in offshore area[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012: 1-85.]
- [47] 薛春汀, 张勇. 中国近岸海区沿岸流和海岸流对沉积物的搬运[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(1): 1-7. [Xue Chunting, Zhang Yong. Sediment transportation of longshore current and coastal current in China littoral zone[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(1): 1-7.]
- [48] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮流及其对沉积物分布的影响[J]. 海洋与湖沼, 1995, 26(5): 466-473. [Zhao Baoren, Zhuang Guowen, Cao Deming, et al. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 26(5): 466-473.]
- [49] 朱玉荣. 潮流场对渤、黄、东海陆架底质分布的控制作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 7-13. [Zhu Yurong. The controlling role of tidal current regime in the distribution patterns of bottom sediments in the continental shelves of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(2): 7-13.]
- [50] Park S C, Lee H H, Han H S, et al. Evolution of Late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2000, 170(3/4): 271-288.
- [51] 刘成, 胡日军, 朱龙海, 等. 庙岛群岛海域沉积动力环境分区及沉积物输运趋势[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(8): 24-33. [Liu Cheng, Hu Rijun, Zhu Longhai, et al. Dynamic environment division and sediment transport trend in the area off Miaodao Islands[J]. Marine Geology Frontiers, 2018, 34(8): 24-33.]
- [52] Liu X, Chiang K P, Liu S M, et al. Influence of the Yellow Sea warm current on phytoplankton community in the central Yellow Sea[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2015, 106: 17-29.
- [53] Shi Y, Gao J H, Sheng H, et al. Cross-front sediment transport induced by quick oscillation of the yellow sea warm current: Evidence from the sedimentary record[J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(1): 226-234.
- [54] Yang Z S, Liu J P. A unique yellow river-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea[J]. Marine Geology, 2007, 240(1/2/3/4): 169-176.
- [55] 王勇智, 张永强, 孙惠凤. 山东半岛东部海域悬浮体分布季节变化及其冬季输送通量研究[J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 541-549. [Wang Yongzhi, Zhang Yongqiang, Sun Huifeng. Seasonal variation of suspended matter distribution and flux in coastal waters of eastern Shandong peninsula[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 541-549.]
- [56] 徐晓达, 曹志敏, 张志珣, 等. 渤海地貌类型及分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(6): 171-179. [Xu Xiaoda, Cao Zhimin, Zhang Zhixun, et al. The types and distribution pattern of geomorphology in the Bohai Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2014, 34(6): 171-179.]
- [57] 张伟. 渤海海峡南部海域地貌特征及控制因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014: 1-170. [Zhang Wei. Study on the geomorphological characteristic and controlling factors in the southern Bohai strait[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014: 1-170.]
- [58] 王庆, 仲少云, 刘建华, 等. 山东庙岛海峡的峡道动力地貌[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(2): 17-24. [Wang Qing, Zhong Shaoyun, Liu Jianhua, et al. The channel dynamic geomorphology of Miaodao strait, Shandong, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2006, 26(2): 17-24.]
- [59] Longhitano S G. A facies-based depositional model for ancient and modern, tectonically-confined tidal straits[J]. Terra Nova, 2013, 25(6): 446-452.

- [60] Longhitano S G, Chiarella D, Muto F. Three-dimensional to two-dimensional cross-strata transition in the Lower Pleistocene Catanzaro tidal strait transgressive succession (southern Italy)[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(7): 2136-2171.
- [61] Reynaud J Y, Ferrandini M, Ferrandini J, et al. From non-tidal shelf to tide-dominated strait: The Miocene Bonifacio Basin, southern Corsica[J]. *Sedimentology*, 2013, 60(2): 599-623.
- [62] 侍茂崇, 陈春华, 黄方, 等. 琼州海峡冬末春初潮流余流场特征[J]. *海洋学报*, 1998, 20(1): 1-10. [Shi Maochong, Chen Chunhua, Huang Fang, et al. Characteristics of tidal current and residual current in the Qiongzhou straits in Period between end of winter and beginning of spring[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(1): 1-10.]
- [63] Stevens C L, Smith M J, Grant B, et al. Tidal energy resource complexity in a large strait: The Karori Rip, Cook Strait[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 33: 100-109.
- [64] Barnard P L, Hanes D M, Lescinski J, et al. Monitoring and modeling nearshore dredge disposal for indirect beach nourishment, Ocean Beach, San Francisco[C]//Proceedings of the 30th international conference coastal engineering 2006. Singapore: World Scientific, 2007, 4: 4192-4204.
- [65] Longhitano S G. Between Scylla and Charybdis (part 1): The sedimentary dynamics of the modern Messina Strait (central Mediterranean) as analogue to interpret the past[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 185: 259-287.
- [66] Longhitano S G, Chiarella D. Tidal straits: Basic criteria for recognizing ancient systems from the rock record[J]. *Regional Geology and Tectonics (Second Edition)*, 2020, 1: 365-415.
- [67] Allen J R L. Sand waves: A model of origin and internal structure[J]. *Sedimentary Geology*, 1980, 26(4): 281-328.
- [68] 王辉. 东海和南黄海冬季环流的斜压模式[J]. *海洋学报*, 1995, 17(2): 21-26. [Wang Hui. Baroclinic model of winter circulation in the East China Sea and South Yellow Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1995, 17(2): 21-26.]

Control of Restrictive Topography in the Bohai Strait on Modern Sedimentary System Distribution

HUANG YuTing^{1,2}, SHAN Xin^{2,3}, SHI XueFa^{2,3}, QIAO ShuQing^{2,3}, XU XiaoMei⁴, PAN HaiDong⁵, LAN Tao², GAO JianHua¹

1.School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. Key Laboratory of Marine Geology and Metallogeny, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China

3.Laboratory for Marine Geology, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao, Shandong 266237, China

4.East China Sea Forecast Center, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200136, China

5.Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract: [Objective] The formation of sedimentary systems within straits is intricately linked to the unique topographical constraints that influence both facies characteristics and sediment distribution patterns. Although current research mainly focuses on narrow straits (less than 50 km wide), where sedimentation is dominated by tidal processes, wider straits introduce more complex hydrodynamic dynamics, leaving many aspects of the sedimentation processes yet to be fully understood. [Methods] This study focuses on the Bohai Strait (a shallow strait with a width of 106 km) and is based on an extensive dataset of surface sediment grain sizes, combined with four shallow seismic profiles, to characterize the sedimentary environment within the Bohai Strait. Additionally, a regional ocean modeling system (ROMS) simulation was employed for winter (December 2020–February 2021) to better understand the hydrodynamic processes influencing sediment dynamics and control over sediment distribution within and surrounding the Bohai Strait. [Results] Our results reveal significant differences in sediment dynamics between the northern and southern parts of the strait. The northern region exhibits a

high-energy environment dominated by erosion, whereas the southern region displays a lower-energy environment conducive to deposition. Surface sediment types vary spatially, with coarser grains predominating in the north and narrow regions, with finer grains observed on both sides (east–west) and in the south. A large-scale, sandy flood-tidal delta appears around the Laotieshan Channel in the north. The asymmetric tidal currents flowing in and out of the channel are likely responsible for this feature, and ebb-tidal delta is not prominent. In contrast, the southern part of the strait exhibits two distinct sedimentary systems:(1) Shandong Mud Wedge: This system lies along the coast of the Shandong Peninsula, shaped by the substantial sediment supply from the Yellow River and the influence of coastal currents. (2) Scour Troughs and Sandy Tidal Deltas: These smaller features are attributed to the protective effect of islands present in the southern strait, combined with the abundant supply of fine-grained sediments. [Conclusions] This study highlights the critical role of the complex topography of the strait in the confinement in shaping regional sediment transport dynamics and the resulting distribution of sedimentary systems.

Keywords: tidal deposition; strait deposition; sedimentary dynamics simulation; regional ocean modeling system; Bohai Strait

