

doi: 10.12029/gc20210326006

文明征, 田立柱, 张少同, 杨朋, 李勇, 王福, 王振豪. 2025. 河北乐亭县祥云岛海域悬浮沉积物分布规律与近岸海流作用[J]. 中国地质, 52(2): 745–755.

Wen Mingzheng, Tian Lizhu, Zhang Shaotong, Yang Peng, Li Yong, Wang Fu, Wang Zhenhao. 2025. Distribution of suspended sediments and action of nearshore currents in Xiangyun Island, Laoting County, Hebei Province[J]. Geology in China, 52(2): 745–755(in Chinese with English abstract).

## 河北乐亭县祥云岛海域悬浮沉积物分布规律 与近岸海流作用

文明征<sup>1,2,3</sup>, 田立柱<sup>1,2,3</sup>, 张少同<sup>4</sup>, 杨朋<sup>1,2,3</sup>, 李勇<sup>1,2</sup>, 王福<sup>1,2,3</sup>, 王振豪<sup>5</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局海岸带地质环境重点实验室, 天津 300170; 3. 天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室, 天津 300170; 4. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 5. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘要:**【研究目的】河北祥云岛沿岸海滩分布有优质天然细沙, 是著名的沿海旅游沙岛, 对该海域悬浮沉积物浓度和近岸流速开展同步调查研究, 对祥云岛及其近海工程的生态环境具有重要意义。【研究方法】采用船载走航式声学多普勒流速剖面仪(ADCP)对该海域的流速、流向进行连续剖面测量, 同时根据仪器记录的背向散射强度定性讨论该海域悬浮沉积物分布情况。【研究结果】(1)祥云岛海域海流以平行于岸线为主, 具有明显的往复性, 该海域涨潮流大于落潮流, 涨潮流沿向岸方向逐渐减弱, 祥云岛西南部局部落潮流存在向岸方向增强的现象; (2)祥云岛海域在平潮向落潮过渡期间, 海流转向始于底部海水, 且海流转向与潮位变化具有一定的滞后性。(3)背向散射强度数据表明, 祥云岛近岸海域存在明显的悬浮沉积物高浓度层, 悬沙沉积物浓度沿向岸方向增加; 平行于祥云岛岸线方向, 悬浮沉积物浓度由东北向西南方向逐渐降低。【结论】祥云岛近岸海域在海流作用下, 悬浮沉积物沿祥云岛岸线由东北向西南运移, 是导致祥云岛岸线在东北段侵蚀、西南段淤积的主要原因之一。

**关键词:** 近岸海流; 流速; 悬浮沉积物; 岸线蚀退; 背向散射; 走航式 ADCP; 祥云岛; 河北省; 海洋地质调查工程

**创新点:** 利用船载走航式 ADCP 开展流速、流向及悬浮沉积物浓度的同步测量, 阐明了祥云岛海域悬浮沉积物分布规律与近岸海流的作用。

中图分类号: P731 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0745-11

## Distribution of suspended sediments and action of nearshore currents in Xiangyun Island, Laoting County, Hebei Province

WEN Mingzheng<sup>1,2,3</sup>, TIAN Lizhu<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Shaotong<sup>4</sup>, YANG Peng<sup>1,2,3</sup>, LI Yong<sup>1,2</sup>,  
WANG Fu<sup>1,2,3</sup>, WANG Zhenhao<sup>5</sup>

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. CGS Key Laboratory of Coast Geo-environment, Tianjin, 300170, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental Safety, Tianjin 300170, China; 4. Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China; 5. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural

收稿日期: 2021-03-26; 改回日期: 2021-05-21

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20211301, 121201006000182401) 资助。

作者简介: 文明征, 男, 1988 年生, 博士生, 研究方向为海洋环境地质; E-mail: wmingzheng@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 王福, 男, 1979 年生, 研究员, 从事现代沉积物测年与海岸带地质环境研究; E-mail: wfu@cgs.cn。

*Resources, Qingdao 266061, Shandong, China)*

**Abstract:** This paper is the result of marine geological survey engineering.

**[Objective]** There are high-quality natural fine sand distributed along the coast of Xiangyun Island in Hebei, which is a famous coastal tourist island. Simultaneous investigation and research on the concentration of suspended sediments and nearshore current in this area is of great significance to the ecological environment of Xiangyun Island and its nearshore engineering. **[Methods]** The current velocity and flow direction of the sea area were continuously profiled by ship-borne Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), and the distribution of suspended sediments in the sea area was qualitatively discussed according to the backscatter intensity recorded by the instrument. **[Results]** (1) The current in Xiangyun bay is mainly parallel to the coastline, which has obvious reciprocation. The magnitude of flood current was obviously larger than ebb current, the flood current was gradually weakened along the shore direction, however the ebb current in the southwest of Xiangyun bay increased along the shore direction; (2) During the transition from flat tide to ebb tide in Xiangyun Island sea area, the current turning starts from the bottom water, and the current turning and tide level change have certain lag; (3) The data of backscatter intensity shows that: there was a high concentration layer in Xiangyun bay coastal area, and the concentration increases along the shore direction, and the concentration of suspended sediment gradually decreases from northeast to southwest. **[Conclusions]** Xiangyun Island coastal waters under the action of the tidal current, suspended sediment along Xiangyun Island shoreline from northeast to southwest, is the main reason for the Xiangyun Island in the northeast section erosion and the southwest section deposition.

**Key words:** coastal current; flow rate; suspended sediment; shoreline erosion; backscatter; shipborne ADCP; Xiangyun Island; Hebei Province; marine geological survey engineering

**Highlights:** The synchronous measurement of current velocity, direction, and suspended sediment concentration were carried out using ship-borne ADCP, elucidating the distribution characteristics of suspended sediment in the Xiangyun Island sea area and the action of nearshore currents.

**About the first author:** WEN Mingzheng, male, born in 1988, doctor candidate, majors in marine environmental geology; E-mail: [wmingzheng@mail.cgs.gov.cn](mailto:wmingzheng@mail.cgs.gov.cn).

**About the corresponding author:** WANG Fu, male, born in 1979, researcher, mainly engaged in modern sediment dating and coastal geological environment research; E-mail: [wfu@cgs.cn](mailto:wfu@cgs.cn).

**Fund support:** Supported by the projects of China Geological Survey (No. DD20211301, No.121201006000182401).

## 1 引 言

流速、流向及悬浮沉积物浓度对海洋物理、生物、化学要素的循环具有重要影响,是研究浅海及河口地区泥沙输运、物质运移的基本要素。同步获取研究区全剖面的流速、流向及悬浮沉积物浓度对于理解悬浮沉积物输运过程、预测营养盐及污染物的迁移和归宿等问题具有重要的意义。传统的测流方法常采用单点式流速仪,对测点不同深度流速进行逐点测量以获得整个剖面的流速;悬浮沉积物浓度的测量常采用取样过滤称重法,该方法不但费时费力,而且在时间和空间的分辨率有限。

声学技术在海洋观测领域的发展应用,使得海洋水文要素的测量有了质的改变,声学多普勒剖面流速仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)能够快速获得某个完整剖面的流速、流向等参数,同

时仪器同步记录的声学背向散射强度可间接计算所测海域悬浮沉积物浓度的分布情况,为海洋泥沙动力输运的研究提供可靠的数据支撑。声学法具有不采样、水体不受扰动、精度高等特点,已被广泛应用于海洋水文要素测量中(Simpson, 2001; Yorke and Oberg, 2002; Ha and Maa, 2008; Salehi and Strom, 2011; 张英豪和赖锡军, 2014; Li et al., 2019)。船载走航式 ADCP 是指将 ADCP 搭载在调查船上,结合精准的导航系统,在船只走航过程中对所测海域的海流进行连续全剖面测量,具有不扰动流场、测量历时短、测量范围大、充分利用航时等特点,已被广泛应用到江河湖海的流速、流量测量中。如 1997 年三峡工程大江截流和 2002 年三峡工程明渠截流(杨丰和杨俊青, 2004),以及广东北江飞来峡工程截流等(刘勇胜和黄程鹏, 2014),杭州湾跨海大桥、港珠澳大桥等工程也均使用 ADCP 进行了流速测量(刘彦祥, 2016)。

祥云岛位于乐亭县东南部,京唐港与北港之间的沿海地带,岸滩分布有优质天然细沙,是著名的沿海旅游沙岛。祥云岛外海 7~15 m 等深线海域建有海洋牧场,占海面积 1333 hm<sup>2</sup>。近年来,祥云岛受人为活动及海洋水动力条件影响,沿岸不同区域均出现了不同程度的侵蚀现象(陈文超等, 2016; 汪翡翠等, 2021; 陈永胜等, 2024); 与此同时,海洋牧场等近岸工程的建设带来的环境效应逐渐受到重视,如崔雷等(2017)通过耦合二维浅水水动力数值模型及物质输运数值模型,对京唐港填海工程中周边潮流场及悬浮沉积物运移进行模拟研究,并分析了对海域水质环境的影响。因此,对祥云岛海域流速、流向及悬浮沉积物浓度的快速同步调查,对祥云岛及其近海工程的生态环境具有重要意义。本文通过船载走航式 ADCP 在祥云岛海域进行现场海流、悬浮沉积物全剖面测量,为该海域海洋动力、泥沙输运及祥云岛岸线演化等海洋过程的研究提供支撑。

## 2 现场调查

### 2.1 ADCP 测流原理

ADCP 基于多普勒原理(刘德铸, 2010; 张春海和董晓冰, 2013),通过测定声波入射到海水中微颗粒背向散射在频率上的多普勒频移,从而得到不同水深水体的运动速度。所谓声学多普勒效应是指当物体相对于声源有径向位移时,导致观测到的声源发生改变的现象。多普勒频移与散射粒子速度之间的关系为:

$$F_d = 2F \frac{V}{C}$$

式中:  $F_d$  为声学多普勒频移;  $F$  为发射声波的频率;  $V$  为颗粒物沿声束方向的相对速度;  $C$  为声波在海水中的传播速度,式中“2”是因为 ADCP 发射并接收回波,所以多普勒频移加倍。假定水体中颗粒物的运动速度和水流速度一致,ADCP 通过跟踪颗粒物的运动,测定水流相对于 ADCP 的速度,此速度扣除船速后,即可得到水流的绝对速度(杨锦坤等, 2009)。

此外,由于散射 ADCP 发射波的颗粒物主要是悬浮沉积物,ADCP 同步接收水中散射体的回波强度信号的大小能够间接反映水中悬浮沉积物浓度(杨惠丽等, 2017)。利用 ADCP 背向散射强度反演

悬浮沉积物含量是一种便捷、高效的方法,其非干扰式的测量特性更易获得真值。自 Deines (1999) 提出了声学多普勒剖面仪测得的背向散射强度与悬浮沉积物含量的关系后,许多学者也逐步开展了利用 ADCP 的背向散射强度反演悬浮沉积物含量的研究(Glenn et al., 1999; Hoitink and Hoekstra, 2005; Merckelbach, 2006; Gunawan et al., 2010)。已有研究表明源声波散射强度的大小与散射水体中的悬浮物浓度的大小成正比(Thorne and Campbell, 1992),在受潮流、潮汐作用强烈的近岸海域,利用回归公式反演的悬浮沉积物浓度与实测数据的平均误差小于 20%(姬厚德等, 2018)。对于有限海域,泥沙类型和粒径相对均一情况下,声学散射强度与泥沙浓度的关系可简化为公式:

$$\lg(C) = K_1 E + K_2$$

其中  $C$  为悬浮沉积物浓度,  $E$  为回波强度,  $K_1$ 、 $K_2$  为拟合因子,通过现场泥沙浓度和回波强度的回归分析来标定(Farmer, 1998)。

### 2.2 调查区域及测线布置

祥云岛长约 13 km,呈 NE-SW 走向,岛屿面积 20.68 km<sup>2</sup>,属于离岸沙坝岛。祥云岛东北段为潮汐通道,现已人为改造,西南端为大清河口;东部靠海侧建有简易的人工沙堤,中西部靠海侧残留低缓沙丘。潮间带的沙滩面积约为 0.64 km<sup>2</sup>,潮滩平均坡度 3°~8°。沉积物以浅黄色、黄棕色的细沙为主,平均粒径  $M_z$  介于 2.06~2.34 $\phi$ ,分选系数介于 0.24~0.47(陈文超等, 2016; 文明征等, 2020; 梅西等, 2020)。

2019 年 7 月 25 至 28 日,在祥云岛海域开展走航式 ADCP 测量。如图 1 所示本次测量共设计 12 条测线,其中测线 L1~L10 垂直于岸滩分布,平均测线长度约 8.0 km;测线 L11、L12 平行于祥云岛分布,平均测线长度为 17.5 km。由于祥云岛潮间带平缓,近岸段水深较浅,测量船容易发生触底的危险。为确保调查过程中设备和人员的安全,选择高潮位时间段进行垂直于岸线的测线测量。根据中国地质调查局天津地质调查中心在津冀沿海的潮汐站监测系统(李勇等, 2021),各测线测量时间与潮位对应关系如图 2 所示。

### 2.3 参数设置

走航式 ADCP 测量采用美国 TRDI 公司生产

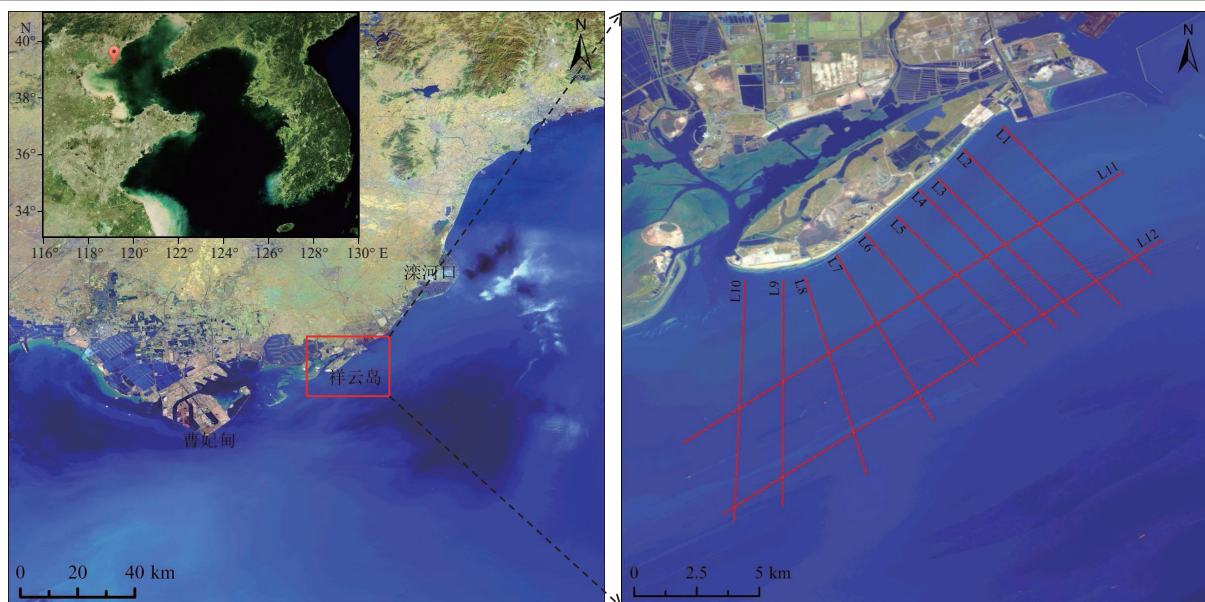


图 1 测量海域及测线分布示意图  
Fig.1 Schematic diagram of survey sea area and survey line

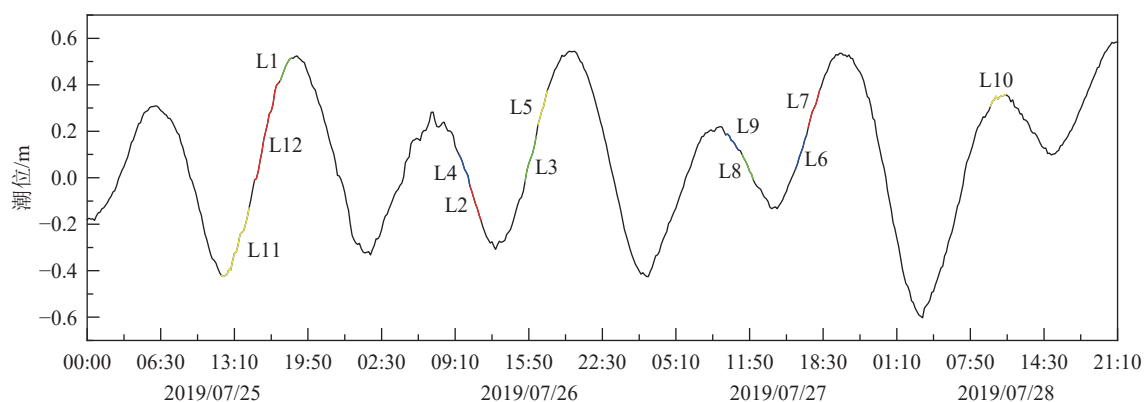


图 2 测量期间的潮位数据(不同颜色显示相应调查测线的潮位信息)  
Fig.2 Tide level data during the survey period (Different colors show the tide level of the corresponding survey line)

的瑞江牌(WHR600)声学多普勒流速剖面仪,具有 4 个换能器,主要技术指标有:工作频率 600 kHz;换能器发射角度 20°测速范围为 $\pm 0.01 \sim \pm 10$  m/s(水平方向),速度分辨率 0.25 cm/s;测深范围:0.75~100 m。本次调查过程中 ADCP 换能器入水深度为 1.10 m,波束角为 20°;水流层数设置为 50,层厚 0.50 m,第一层中心位置为 1.96 m。

### 3 结果与分析

祥云岛位于半封闭的渤海内部,潮汐类型属于不规则半日潮,测量期间平均潮差 0.79 m。测线 L1、L3、L5~L7 及 L10~L12 测量期间为涨潮期;测

线 L2、L4、L8 及 L9 测量期为落潮期(图 2)。

#### 3.1 测量结果质量控制

现场流速测量过程中受风浪等环境的干扰,测量数据会出现明显的噪点。因此,数据分析前需要将这部分数据剔除。为控制测量数据质量,本次调查将满足回波强度(Echo Intensity)为 50~200 counts,相关系数(correlation)为 50~200,良好百分比检验参数大于 50% 的数据作为有效数据,其余数据予以剔除(杨锦坤等,2009)。通常认为 ADCP 单次回波所测的流速误差比较大,一般使用一段时间的平均流速来表示某一点或时刻的流速,ADCP 流速的平均时间可根据具体情况而定(吴云帆等,2014)。本

次测量数据中参与平均的呬集合数为 20(测量时船速约 2.1 m/s, 相当于平均时长为 1 min, 平均距离约 50 m)。

### 3.2 祥云岛海域流速特征

#### 3.2.1 海流流向特征

走航式 ADCP 获得沿测线方向的全水深流速, 为更直观地显示剖面流速流向特征, 本文选取表、中、底不同深度的海流进行分析。如图 3 所示, 测线 L5 不同深度水层(水深 2.21 m、6.21 m、10.21 m)的航迹和流速矢量图结果表明, 在涨、落潮阶段海流流向在不同深度水层的流向基本保持一致。对海流流向沿深度方向求均值, 如图 4 所示: 测线 L1、L3、L5 和 L7 为涨潮期(图 4a), 涨潮流为 SW 方向; 测线 L2、L4 和 L8 为落潮期(图 4b), 落潮流为 NE 方向。因此, 祥云岛外海域流向具有明显的往复特征, 海流流向以 NE-SW 为主, 基本与祥云岛岸线平行。

图 2 潮位信息显示, 测线 L9 测量时间为平潮转落潮期, 其全水深平均流向并没有表现为明显的 NE 方向(图 4b), 测线 L9 不同深度水层航迹和流速矢量结果如图 5 所示, 在浅表层(2.96 m 水深), 近岸段流速方向为 NE 向, 沿离岸方向流速方向为 SW 向, 水深 4.96 m 水层流速矢量表明离岸段流向为 SW 向, 水深 9.96 m 水层显示流速流向在整个测

线上均表现为 NE 方向, 与落潮流的方向保持一致。这表明在平潮转为落潮期间, 海流转向始于底部海水, 且海流转向与潮位变化具有一定的滞后性。为更清晰地描述这一问题, 取测线 L9 不同等深线处海流流向数据绘制流向剖面分布图, 如图 6 所示: 相对水深(流速测量点水深/全水深)大于 0.5 时, 海流流向为 NE 向, 小于 0.5 是海流流向为 SW 向; 测线 L9 由近岸向离岸方向测量, 潮位逐渐由平潮转为落潮, 沿等深线增加方向(离岸方向), 流速转向的相对深度逐渐减小, 再次证明该海域平潮转为落潮期间海流转向始于底层海水。

#### 3.2.2 海流流速特征

本文选取涨落潮期间典型剖面流速幅值进行对比分析, 测线 L1、L3、L6 和 L10 为涨潮期、测线 L4 和 L8 为落潮期, 各测线流速幅值剖面分布如图 7 所示。涨潮期间, 测线 L1 位于祥云岛东北端, 离岸方向距离海底约 11 m 高度处有一层相对稳定的高流速层, 流速可达 0.7~0.8 m/s, 向祥云岛滩面方向水深逐渐变浅, 水深小于 11 m 时, 该高流速层减弱; 测线 L10 位于祥云岛西南端, 其流速特征与测线 L1 类似, 流速沿向岸方向逐渐降低; 测线 L3 流速幅值相对均匀, 垂向和向岸方向流速变化不明显; 测线 L6 流速幅值沿向岸方向呈现明显减小的趋势。结果表明: 涨潮流流速沿向岸方向逐渐减

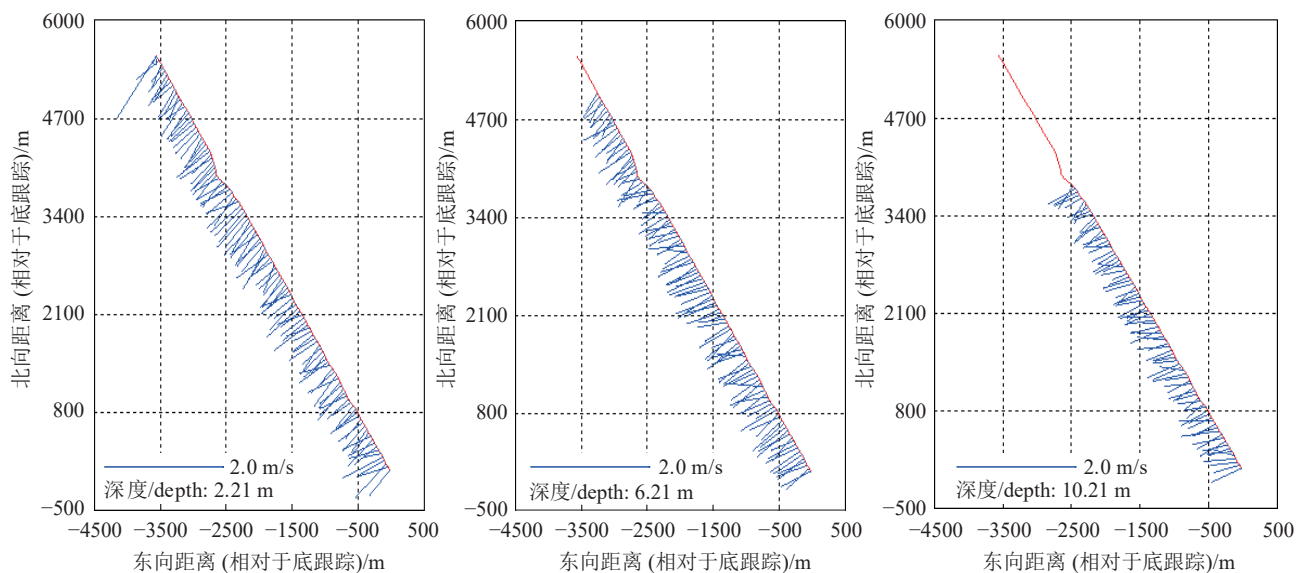


图 3 测线 L5 不同深度水层航迹(红线所示)和流速矢量图

底跟踪, ADCP 通过接收和处理由河底或海底的回波信号获得船速的方法

Fig.3 Track (red line) and velocity vector graph of different water depths of line L5

Bottom tracking, ADCP is a method of obtaining ship speed by receiving and processing echo signals from the river bottom or seafloor

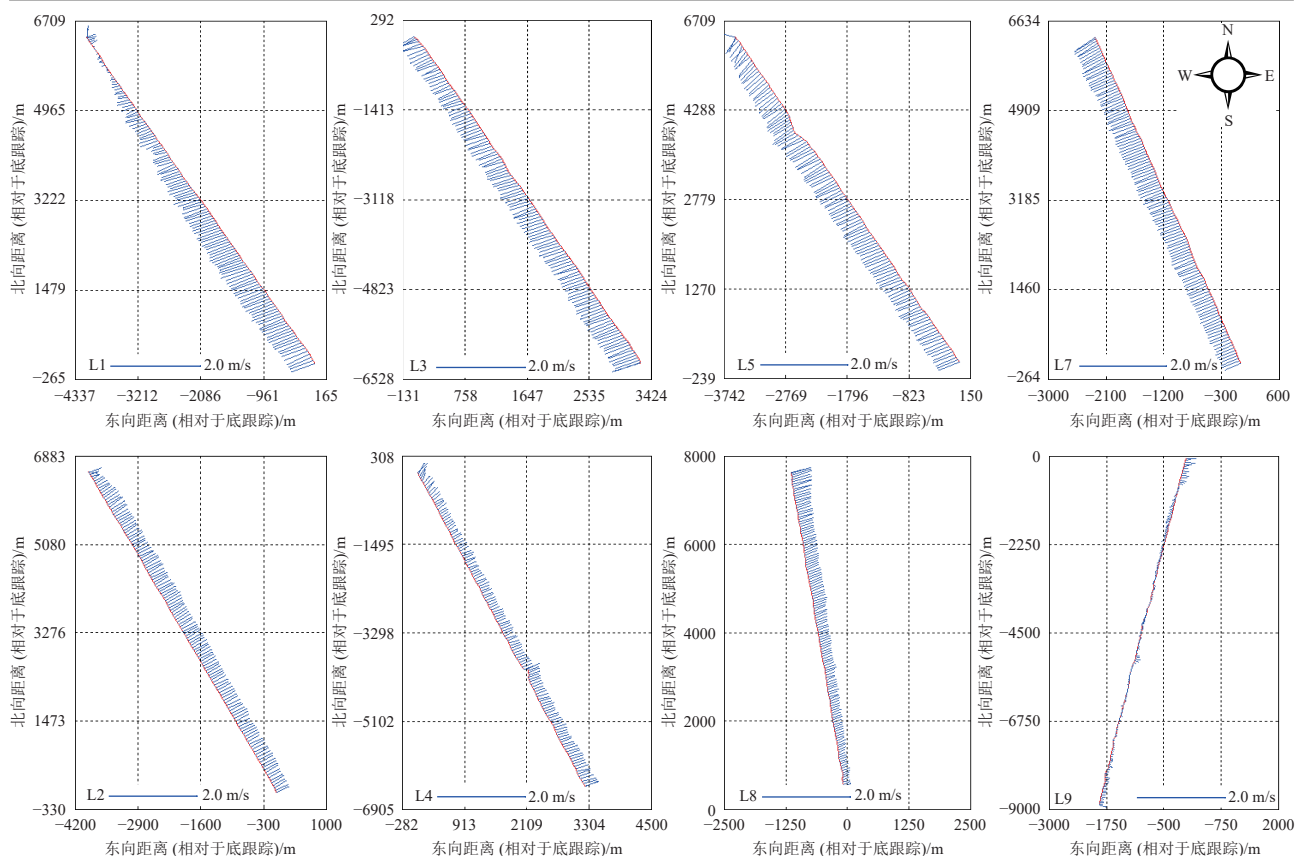


图4 航迹(红线所示)和流速矢量图  
Fig.4 Vector graph of track (red line) and velocity

小;相对于祥云岛东北和西南段,中部流速幅值整体偏小,测线 L3 和 L6 涨潮流离岸端流速可达到 0.5 m/s 以上。测线 L4 和 L8 位于祥云岛中部,其流速幅值明显小于测线 L3 和 L6,祥云岛岸段落潮流速明显低于涨潮流速,而测线 L8 在近岸段的流速要明显大于离岸段。

测线 L11 与 L12 均位于涨潮期,涨潮过程中测线 L12 在时间上更接近于 L1 和 L10(图 2)。以测线 L12 为例(图 7)平行于祥云岛方向,涨潮期间祥云岛东北端存在明显的高流速层,高流速层位于距离海底约 11 m 处,这与测线 L1 的测量结果是一致的。为更直观地展现高流速层的分布形态,本文以测线 L1 为例,取测线 L1 中不同等深线(14.46 m、11.46 m 和 7.46 m)处的流速剖面进行对比(图 8)。离岸方向等深线测量点数值越大,14.46 m 处流速剖面结构表现为抛物线型,表明该处存在明显的高流速层,向岸方向,水深减小(7.46 m),流速剖面垂向分布趋于均匀,11.46 m 处为过渡段,流速剖面表现为斜直线型。

### 3.3 祥云岛近岸悬浮沉积物分布

本次测量中未进行同步取样测试,未能建立背向散射强度与悬浮沉积物的回归公式。如前所述,ADCP 记录的声学背向散射强度数据能够在一定程度上定性反映祥云岛周边海域的悬浮沉积物分布情况。本次测量中船载走航式 ADCP 记录了航测过程中的背向散射强度,以涨潮期间测线 L1、L5、L10 及 L12 为例,如图 9 所示。

涨潮期间祥云岛不同位置背向散射强度剖面的分布结果(图 9)显示,祥云岛近底普遍存在一层高悬浮沉积物层,且向岸方向悬浮沉积物浓度逐渐增加。图 10 为测线 L1 中不同等深线处(14.46 m、11.46 m 和 7.46 m)的背向散射强度分布对比图,更直观地反映了悬浮沉积物向岸方向增加的现象。测线 L12 平行于祥云岛方向,沿 NE 方向在近底逐渐出现一层悬浮沉积物层,高悬浮沉积物浓度层的出现与流速分布(图 7,测线 L12)具有很好的一致性;水体中悬浮沉积物的维持需要一定的流速,流速幅值为 0.30~0.60 m/s 时,水体中更容易形成一层

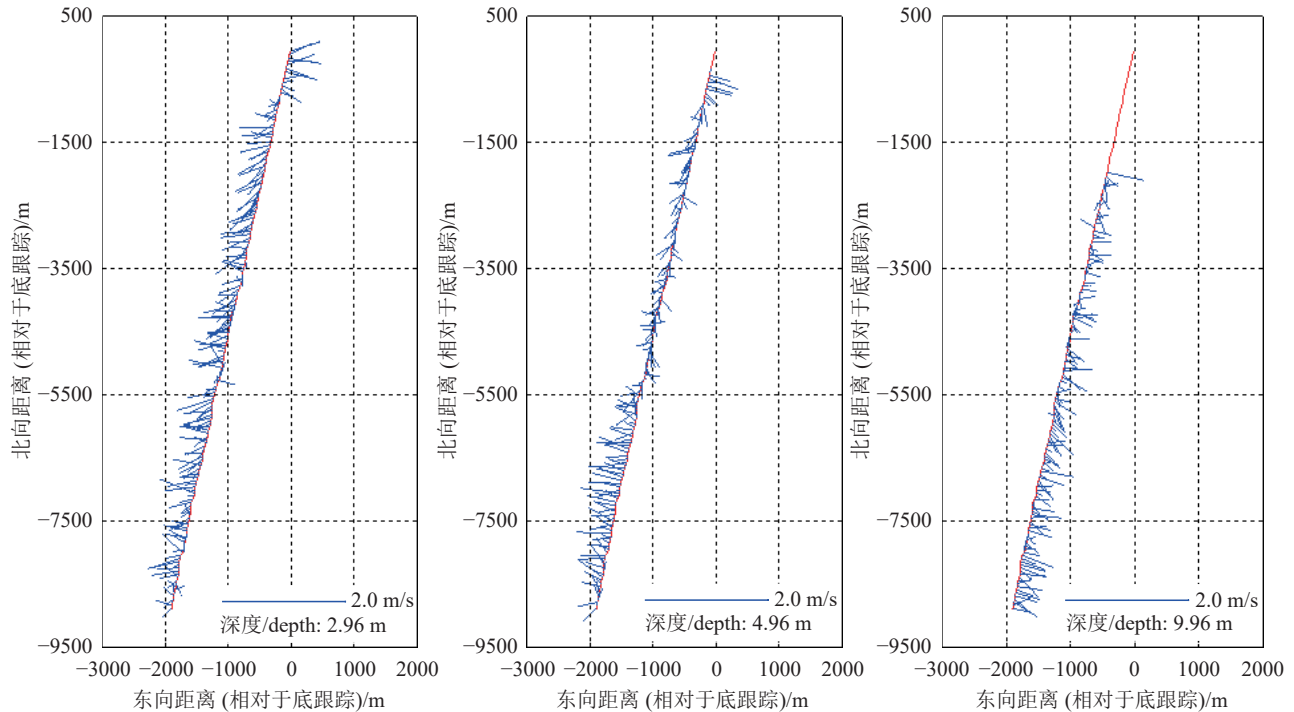


图 5 测线 L9 不同深度水层航迹(红线所示)和流速矢量图

Fig.5 Track (red line) and velocity vector graph of different water depths of line L9

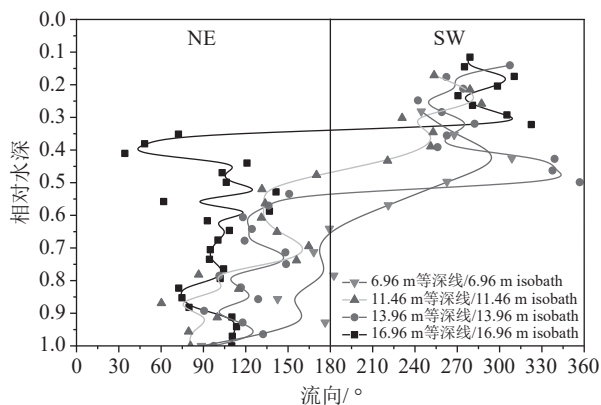


图 6 测线 L9 不同等深线处海流流向剖面图

Fig.6 Profile of current direction at different Isobaths of line L9

稳定的悬浮沉积物层。沿祥云岛岸线由东北向西南方向, 流速降低相应的悬浮沉积物浓度也降低, 表明悬浮沉积物在向西南方向输运过程中发生沉积。

### 3.4 悬浮沉积物输运对岸线蚀退的影响

祥云岛是滦河早期从大清河口、长河口入海时建造的沙坝(高善明, 1981), 自滦河迁徙改道北移入海之后, 陆源泥沙来源断绝, 加之京唐港的修建, 港口防沙堤不断向海延伸, 截断了沿岸泥沙的补给,

之后祥云岛岸线急剧退化。研究表明 1987—2000 年, 祥云岛岸线呈现出北部侵蚀、南部淤积的状态, 岸线变化速率分别为  $-9.20 \sim +10.40$  m/a; 2000 年以后, 北部约 1500 m 砂质岸线转变为港口围堤, 被京唐港扩建、祥云湾码头占用, 在沿岸流作用下祥云岛东北段泥沙向西南段运移, 引起西南段淤积(邢容容等, 2017)。邱若峰等(2010)指出祥云岛西南端的金沙岛岸段, 自 1987 年以来向海拓展 22 m, 该岸段向海推进的一个重要原因在于人为的吹沙造陆, 使得该岸段泥沙补给充足(陈文超等, 2016)。本文测量结果显示祥云岛近海海域涨潮流速(SW 向)大于落潮流速(NE 向)且祥云岛东北端悬浮沉积物大于西南段悬浮沉积物。这表明目前祥云岛近岸海域的悬浮沉积物整体沿 NE—SW 方向进行运移, 与目前祥云岛岸线的侵蚀现状是一致的。

此外, 祥云岛海洋牧场于 2007 年开始申报建设, 牧场位于京唐港西南的祥云湾外海海域, 水深 7~15 m 等深线范围内。海洋牧场建设在其规划海域内投放了包括水泥沉箱、水泥铸块、花岗岩石礁、钢筋板框、船礁等在内的各类人工渔礁共计约 20 万  $\text{m}^3$ (王湛, 2018)。人工渔礁的投放必然对近

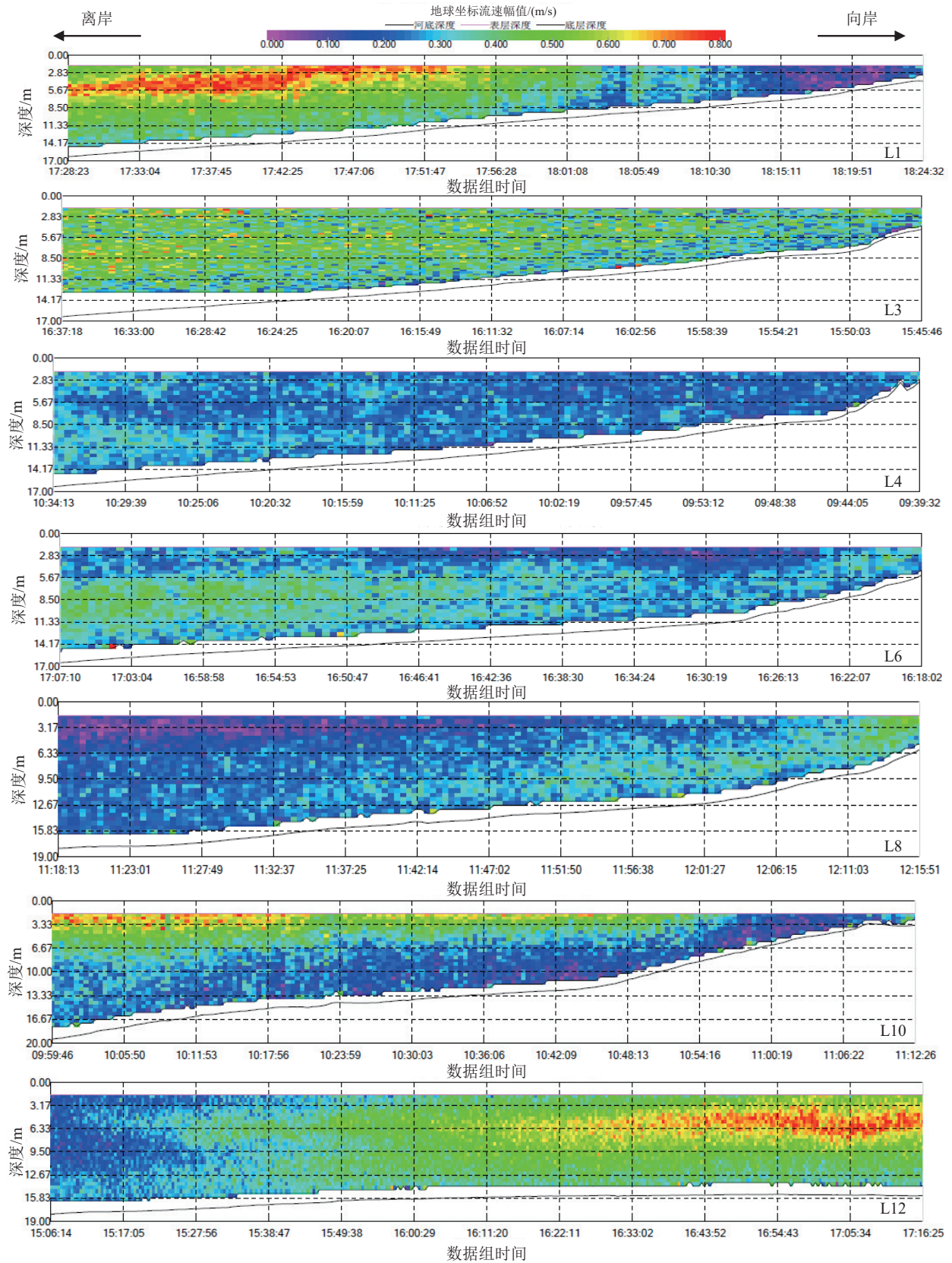


图7 调查测线流速幅值剖面分布图  
 Fig.7 Velocity profile magnitude of lines  
<http://geochina.cgs.gov.cn> 中国地质, 2025, 52(2)

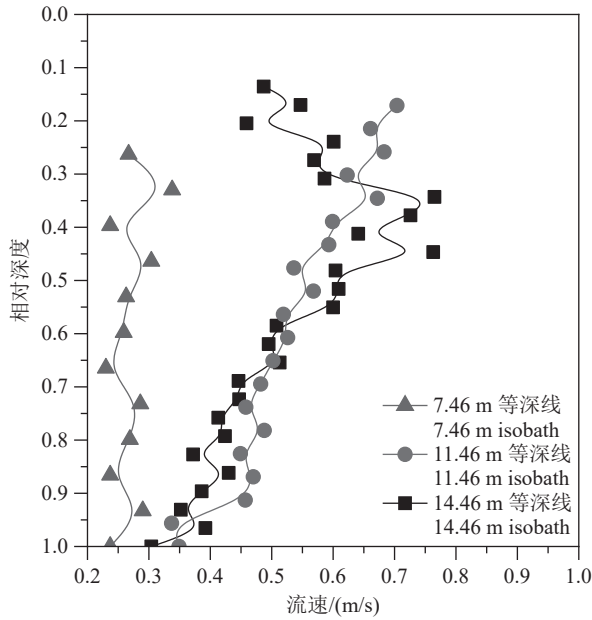


图 8 测线 L1 不同等深线处流速剖面  
Fig.8 Velocity profile at different isobaths of line L1

岸海域的流场产生影响,天津地质调查中心 2018 年的模拟结果显示,人工渔礁的投放仅对投放区周围两倍面积范围内的流场有影响,并导致明显的侵蚀淤积现象<sup>①</sup>。但该结果尚缺乏现场实测数据支撑,有关海洋牧场建设对海域流场的影响,还需要后续海洋牧场建成后的持续跟踪调查。

## 4 结 论

利用走航式 ADCP 在祥云岛海域开展流速、流向及悬浮沉积物浓度等水文要素测量,该方法较传统的定点观测和取样测试,具有不扰动流场、测量历时短、测量范围大、充分利用航时等特点,效率大幅提升。测量结果显示:

(1)祥云岛海域海流以平行于岸线为主,具有明显的往复性,该区域涨潮流明显大于落潮流,涨潮流沿向岸方向逐渐减弱,祥云岛西南部局部落潮流存在向岸方向增强的现象。

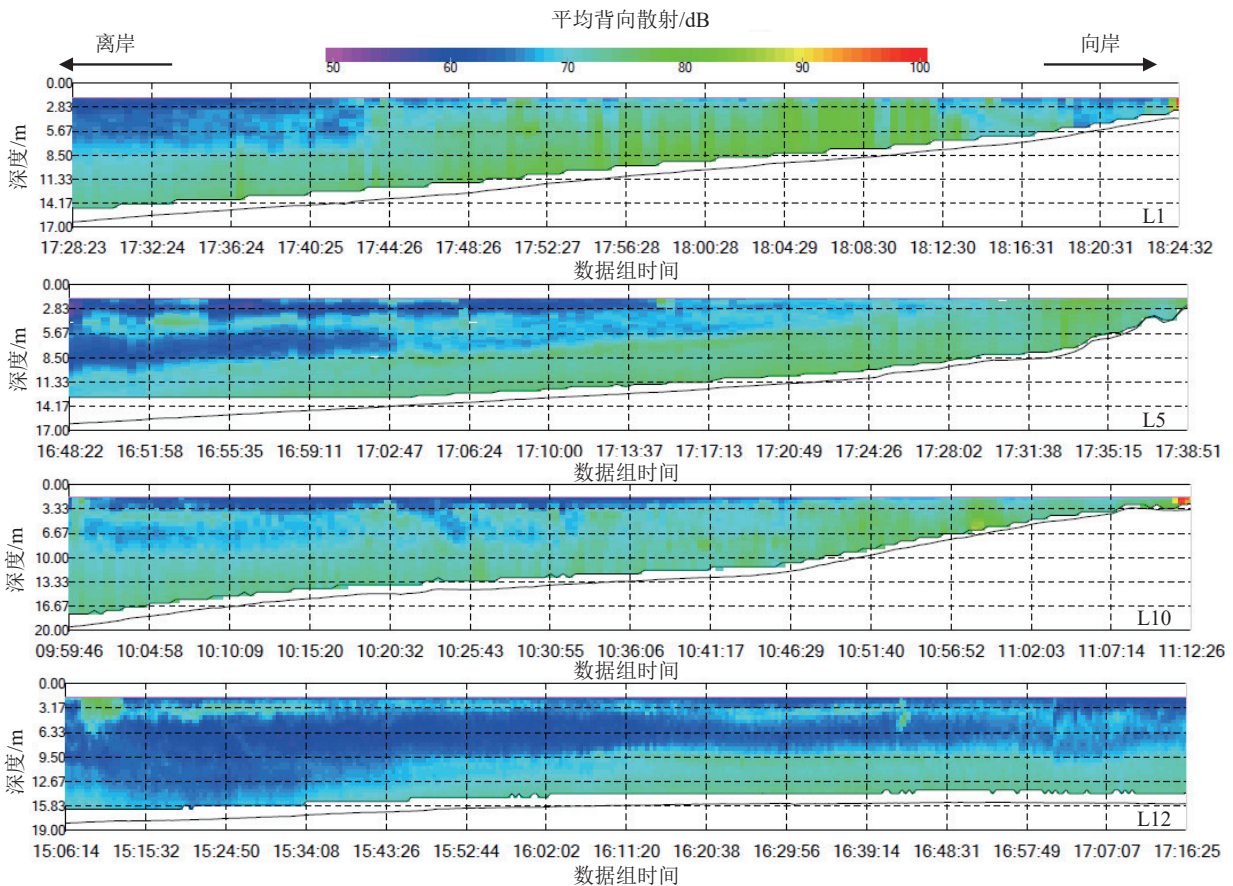


图 9 背向散射强度  
Fig.9 Backscatter intensity of ADCP

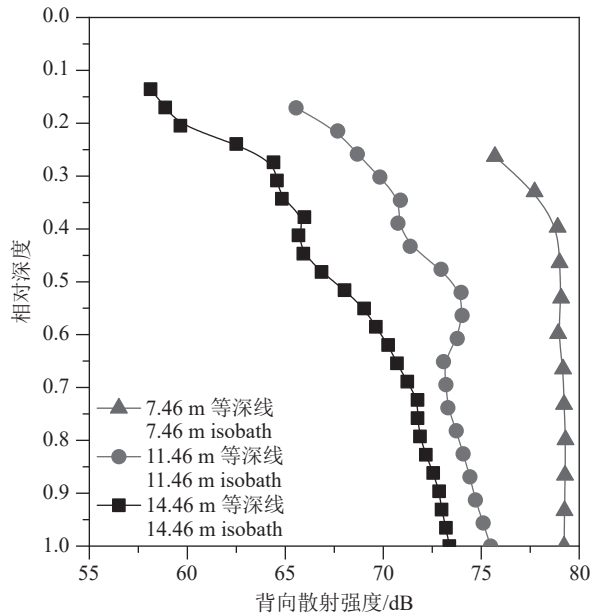


图 10 测线 L1 不同等深线处背向散射强度  
Fig.10 Backscatter intensity at different isobaths of line L1

(2) 祥云岛海域在平潮向落潮过渡期间, 海流转向始于底部海水, 且海流转向与潮位变化具有一定的滞后性。

(3) 测量期间背向散射强度数据表明, 祥云岛近岸海域存在明显的高浓度层, 且沿向岸方向浓度增加, 平行于祥云岛岸线方向, 悬浮沉积物浓度由东北向西南方向逐渐降低。

(4) 祥云岛近岸海域在涨落潮流的作用下, 悬浮沉积物沿祥云岛岸线由东北向西南运移, 是导致祥云岛岸线在东北段侵蚀、西南段淤积的主要原因之一。

## 注释

①李勇, 文明征, 杨朋. 2019. 津冀沿海海洋侵蚀淤积调查项目进展报告 [R]. 天津: 中国地质调查局天津地质调查中心, 20–25.

## References

- Chen Wenchao, Qiu Ruofeng, Xing Rongrong, Gong Lixin, Liu Xiujin. 2016. Beach erosion and deposition under storm and defense measures[J]. Preface to Marine Geology, 32(11): 40–46 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yongsheng, Hu Yipan, Jiang Xingyu, Li Jianfen, Shang Zhiwen, Fang Jing, Wang Fu. 2024. Time correlation between MIS5a transgression and global sea level change of the second Marine layer in the coastal lowland of Bohai Bay[J]. Geology in China, 51(6): 2056–2065.
- Cui Lei, Sun Qinbang, Jiang Hengzhi, Yu Datao, Chen Zhaolin, Zhang Chong. 2017. Numerical simulation study on environmental effects of suspended sediment in reclamation projects—Taking the rights base project of tangshan maritime safety administration as an example[J]. Pearl River, 38(11): 15–19,49 (in Chinese with English abstract).
- Deines K L. 1999. Backscatter estimation using broadband acoustic doppler current profilers[C]// IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement, 249–253.
- Farmer D. 1998. Fundamentals of acoustical oceanography[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 79(34): 408–408.
- Gao Shanming. 1981. Facies and sedimentary model of the Luan river delta[J]. Acta Geographica Sinica, 36(3): 303–314 (in Chinese with English abstract).
- Glenn P H, Peter D T, David F, Sarah E J, David P. 1999. Comparison between ADCP and transmissometer measurements of suspended sediment concentration[J]. Continental Shelf Research, 19(3): 421–441.
- Gunawan B, Sterling M, Knight D W. 2010. Using an acoustic doppler current profiler in a small river[J]. Water and Environment Journal, 24(2): 147–158.
- Ha H, Maa J. 2008. Evaluation of acoustic doppler velocimeters (ADV) and pulse coherent acoustic doppler profiler (pcadp) in estimating suspended sediment concentration[J]. AGU Fall Meeting Abstracts.
- Hoitink A J F, Hoekstra P. 2005. Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measurements in a mud-dominated environment[J]. Coastal Engineering, 52(2): 103–118.
- Ji Houde, Lin Yihui, Tu Zhenshun, Lan Yinyu, Sun Qinqin. 2018. Studies on adaptability of ADCP echo intensity to suspended sediment measurement[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, (5): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Li W J, Yang S F, Yang W, Xiao Y, Fu X H, Zhang S S. 2019. Estimating instantaneous concentration of suspended sediment using acoustic backscatter from an ADV[J]. International Journal of Sediment Research, 34(5): 422–431 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Wen Mingzheng, Yang Peng, Tian Lizhu, Hu Yunzhuang, Wang Fu. 2021. Construction of "Atmosphere–Land–Sea" comprehensive geological survey and observation system in Tianjin and Hebei coastal zone[J]. North China Geology, 44(4): 40–46 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dezhu. 2010. Research on Key Techniques of Acoustic Doppler Flow Velocity Measurement [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 61–65(in Chinese).
- Liu Yanxiang. 2016. Review on development of ADCP technology and its application[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 36(2): 45–49 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongsheng, Huang Chengpeng. 2014. Application of ADCP in hydrological measuring of the inland site of nuclear power plant[J]. Journal of Changjiang Engineering Vocational College, (1): 12–14 (in Chinese with English abstract).
- Mei Xi, Li Xuejie, Mi Beibei, Zhao Li, Wang Zhongbo, Zhong Hexian,

- Yang Hao, Huang Xiangtong, He Mengying, Xiong Wei, Zhang Yong. 2020. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments[J]. *Geology in China*, 47(5): 1447–1462 (in Chinese with English abstract).
- Merckelbach L M A. 2006. Model for high-frequency acoustic doppler current profiler backscatter from suspended sediment in strong currents[J]. *Continental Shelf Research*, 26(11): 1316–1335.
- Qiu Ruofeng, Yang Yanxiong, Zhang Jiabo, Su Dapeng. 2010. Dawanggang beach dynamic analysis and ecologic reconstruction[J]. *Marine Geology Letters*, 26(4): 13–18 (in Chinese with English abstract).
- Salehi M, Strom K. 2011. Using velocimeter signal to noise ratio as a surrogate measure of suspended mud concentration[J]. *Continental Shelf Research*, 31(9): 1020–1032.
- Simpson M R. 2001. Discharge Measurements using A Broadband Acoustic Doppler Current Profiler[M]. Washington D C: US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Thorne P D, Campbell S C. 1992. Backscattering by a suspension of spheres[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 92(2): 978–986.
- Wang Feicui, Yang Peng, Shi Pei Xin, Shang Zhiwen, Xiao Guoqiang, Wang Fu. 2021. Research on the status of Hebei Province's coastline in 2019 based on landsat OLI images[J]. *North China Geology*, 44(4): 35–39 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhan. 2018. Primary productivity survey of Xiangyun Bay marine ranch demonstration zone[J]. *Hebei Fisheries*, (5): 33–36 (in Chinese).
- Wen Mingzheng, Chen Tian, Hu Yunzhuang, Li Yong, Shan Hongxian, Jia Yonggang. 2020. Sediment resuspension of bottom boundary layer under waves and currents[J]. *Haiyang Xuebao*, 42(3): 97–106 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yunfan, Wu Zhongding, Li Zhanqiao. 2014. Shipborne ADCP Data Processing[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 34(6): 36–39, 42 (in Chinese with English abstract).
- Xing Rongrong, Liu Xiujin, Qiu Ruofeng, Zhang Jiabo, Chen Wenchao, Li Na. 2017. Analysis of recent erosion and deposition evolution of sandy shoreline in Tangshan City[J]. *Marine Environmental Science*, 36(1): 101–106, 113 (in Chinese with English abstract).
- Yang Feng, Yang Junqing. 2004. Brief introduction on the technology of discharge measurement by ADCP[J]. *Journal of China Hydrology*, 24(2): 58–59 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huili, Luo Huixian, Yu Shi. 2017. Study on application of echo amplitude of ADCP to estimation on sediment concentration of river suspended load[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 48(1): 106–110 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jinkun, Xiang Wenxi, Wei Guanghao, Ji Fengying. 2009. Research of data processing and quality control for vessel mounted ADCP[J]. *Marine Science Bulletin*, 28(6): 101–105 (in Chinese with English abstract).
- Yorke T H, Oberg K A. 2002. Measuring river velocity and discharge with acoustic doppler profilers[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13(5/6): 191–195.
- Zhang Chunhai, Dong Xiaobing. 2013. Research of acoustic doppler current theory and its application[J]. *Jilin Water Resources*, (11): 17–19 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yinghao, Lai Xijun. 2014. Test of vertical flow-velocity distribution using ADCP on ship-borne floating platform[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 31(12): 124–128 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈文超, 邱若峰, 邢容容, 宫立新, 刘修锦. 2016. 基于强浪下的祥云岛岸滩侵蚀特征及防护措施[J]. *海洋地质前言*, 32(11): 40–46.
- 崔雷, 孙钦帮, 姜恒志, 于大海, 陈兆林, 张冲. 2017. 填海工程悬浮物对海域环境影响的数值模拟研究——以中国海监唐山维权执法基地建设工程为例[J]. *人民珠江*, 38(11): 15–19, 49.
- 高善明. 1981. 全新世滦河三角洲相和沉积模式[J]. *地理学报*, 36(3): 303–314.
- 姬厚德, 林毅辉, 涂振顺, 蓝尹余, 孙芹芹. 2018. ADCP 回波信号在悬浮泥沙测量中的适应性研究[J]. *海洋湖沼通报*, (5): 25–31.
- 李勇, 文明征, 杨朋, 田立柱, 胡云壮, 王福. 2021. 津冀沿海“空陆海”综合地质调查与观测体系建设[J]. *华北地质*, 44(4): 40–46.
- 刘德铸. 2010. 声学多普勒流速测量关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 61–65.
- 刘彦祥. 2016. ADCP 技术发展及其应用综述[J]. *海洋测绘*, 36(2): 45–49.
- 刘勇胜, 黄程鹏. 2014. ADCP 在内陆核电厂址水文观测中的应用[J]. *长江工程职业技术学院学报*, (1): 12–14, 11.
- 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 赵利, 王中波, 钟和贤, 杨浩, 黄湘通, 何梦颖, 熊伟, 张勇. 2020. 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*, 47(5): 1447–1462.
- 邱若峰, 杨燕雄, 张甲波, 苏大鹏. 2010. 打网岗岸滩动态分析与生态修复[J]. *海洋地质动态*, 26(4): 13–18.
- 汪翡翠, 杨朋, 施佩歆, 商志文, 肖国强, 王福. 2021. 基于 Landsat OLI 影像的河北省 2019 年海岸线现状[J]. *华北地质*, 44(4): 35–39.
- 王湛. 2018. 祥云湾海洋牧场示范区初级生产力调查[J]. *河北渔业*, (5): 33–36.
- 文明征, 陈天, 胡云壮, 李勇, 单红仙, 贾永刚. 2020. 波浪作用下海底边界层沉积物再悬浮与影响因素研究[J]. *海洋学报*, 42(3): 97–106.
- 吴云帆, 吴中鼎, 李占桥. 2014. 船载 ADCP 资料处理[J]. *海洋测绘*, 34(6): 36–39, 42.
- 邢容容, 刘修锦, 邱若峰, 张甲波, 陈文超, 李娜. 2017. 唐山市砂质岸线近期冲淤演变分析[J]. *海洋环境科学*, 36(1): 101–106, 113.
- 杨丰, 杨俊青. 2004. 多普勒法测流技术简介[J]. *水文*, 24(2): 58–59.
- 杨惠丽, 罗惠先, 于爽. 2017. 利用 ADCP 回波强度估算河流悬移质含沙量的应用研究[J]. *水利水电技术*, 48(1): 106–110.
- 杨锦坤, 相文玺, 韦广昊, 纪风颖. 2009. 走航 ADCP 数据处理与质量控制方法研究[J]. *海洋通报*, 28(6): 101–105.
- 张春海, 董晓冰. 2013. 声学多普勒测流原理及应用研究[J]. *吉林水利*, (11): 17–19.
- 张英豪, 赖锡军. 2014. 基于船载式浮动平台的 ADCP 垂线流速分布测验研究[J]. *长江科学院院报*, 31(12): 124–128.