

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.013

Mackenzie 三角洲风暴相关的海岸水动力现象

徐福敏,苗琪,姜静

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏南京 210098)

摘要: 针对西北风和东风这 2 种强风在 Mackenzie 三角洲开敞水域时期占主导地位的特点,运用 SWAN 模型对 1 次西北向风暴过程中的风暴浪进行模拟,并基于实测风、流数据和 MODIS 数据对 2 次东风引起的海岸水动力现象进行分析。结果表明:西北向风暴影响水域中上层的波浪和强流,引起明显的波浪增水和波能耗散;东向风暴可以引起从海表到海底的强流,甚至强度较弱的持续东风都可以引起上升流和水体混合;西北风和东风都会使水底的细小泥沙发生运动。

关键词: Mackenzie 三角洲;SWAN 模型;风暴浪;上升流;西北风;东风;海岸水动力现象

中图分类号:P731.21 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)02-0177-06

Coastal hydrodynamic phenomena generated by the storm in waters off Mackenzie Delta

XU Fumin, MIAO Qi, JIANG Jing

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Northwest and east wind events are two major types of strong winds that dominate waters off Mackenzie delta during open water summer seasons. A storm from the northwest during the Oct. 2008 storm is selected, and the SWAN model is applied to simulate the generated storm waves in waters off the delta during this storm. Also, the coastal hydrodynamic phenomena caused by east wind events are analyzed based on the observed wind, current data and MODIS data. The results show that, northwest storms generate strong waves that impact the delta waves and strong currents in the upper and middle layers of ocean, inducing the obvious wave set-up and wave dissipation. East storm winds cause the strong currents from the surface to the bottom of ocean, and even mild sustaining east winds can cause the upwelling and mixing in waters off the delta. In addition, both the northwest and east winds can lift the fine sediment at the bottom.

Key words: Mackenzie Delta; SWAN model; storm waves; upwelling; northwest storm; east storm; hydrodynamic phenomena

Mackenzie 三角洲(图 1)是一个巨大的、相关连接的河网,Mackenzie 河的众多南部支流(主要有 19 条)经过地势较低的三角洲平原向北流入 Mackenzie 河口,继而进入 Beaufort 海,河流泥沙输运量大,海岸地区地势平坦宽阔。Mackenzie 三角洲的海岸水动力现象相当复杂,淡水羽流每年随着春季径流达到顶峰,随后逐渐减弱,夏季高温淡水覆盖在下层的低温海水上,并在水平方向延伸几百千米到 Beaufort 海南部。Beaufort 海南部除了 7—11 月受到强天气系统的极大影响为开冰季节,其余时间基本完全被浮冰覆盖。

Small^[1]对 Tuktoyaktuk 站(图 1)1971—2007 年间每年 8 月的每小时海表观测风进行统计分析,得到的风玫瑰图表明本地区常风向和强风向主要是西北向和东向。西北向风暴极具破坏性,持续西北大风生成的强浪和风暴潮引起了严重的海岸侵蚀和盐水入侵,导致地下水被污染以及从三角洲海岸地区到距离海岸

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B01);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0456);中央高校基本科研业务费专项(2017B635X14)

作者简介:徐福敏(1967—),女,教授,博士,主要从事海岸海洋水动力研究。E-mail:fmxu@hhu.edu.cn

引用本文:徐福敏,苗琪,姜静. Mackenzie 三角洲风暴相关的海岸水动力现象[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(2):177-182.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.02.013.

30 km的陆域范围内大量植被遭到破坏。对于东风风暴情况, Pickart 等^[2]研究了导致上升流的风暴特性,发现东风在 Beaufort 海南部更易于产生上升流, Mulligan 等^[3]发现中等强度东风(风速 $5 \sim 10 \text{ m/s}$)都足以诱发表层温度较高淡水的离岸流动和底层低温海水的向岸流动,从而导致 Mackenzie 三角洲近岸海水的温度和盐度变化显著。

随着全球气候变化,北极圈发生的风暴将更频繁、强烈。北极冰川正以每 10 年 11% 的速度不断缩小^[4],导致 Mackenzie 三角洲将有更加广阔的开敞水域范围和更长的开敞水域时期。这意味着 Mackenzie 三角洲水域将遭遇更加危险的风暴、海浪和风暴潮,河道泛滥、泥沙输运、海岸侵蚀和地形变化等问题也越发严重。因此,风暴引起 Mackenzie 三角洲的水动力的精细研究对上述问题是十分必要的。

缺乏系统的观测资料使 Mackenzie 三角洲水域的水动力研究受到限制^[5]。已有研究揭示了一些重要的海岸水动力物理现象,如 Small^[1]和 Zhang 等^[6]关于天气特征和北极涡旋特性的研究, Hudak 等^[7]对风暴气候特征的研究, Khandekar 等^[8]关于波候和风暴海浪的研究, Marsh 等^[9]、Happer 等^[10]的风暴潮研究, 时健等^[11]关于河口海岸水动力非静压数学模型的研究,以及其他相关的水动力特征研究^[2,4,12-15]。以往的研究缺少对不同来向的大风对三角洲水域引起的水动力现象的讨论,本文在前人研究的基础上,结合观测数据(风、浪、流)分析、MODIS 数据反演海表温度以及数值模型模拟等多种研究方法,探究 Mackenzie 三角洲水域 2 种频发的大风类型所诱发的海岸水动力现象,即西北向风暴引发的风暴波和东风风暴导致的上升流和强水体混合。

1 2008 年 10 月 5—10 日的西北向风暴

2008 年 10 月 5—10 日发生一次典型的从西北方向进入 Mackenzie 三角洲水域的风暴。该风暴期间的观测数据有 Pelly 气象站的风数据以及 Site 1 和 Site 11 处的波浪数据, Pelly 气象站 (-135.43°W , 69.62°N) 位于三角洲水域的中心区域, Site 1 (-133.75°W , 70.33°N) 和 Site 11 (-137.05°W , 69.77°N) 分别位于水深 55 m 和 33 m 处。从 Pelly 气象站在风暴期间的逐时观测风数据以及 Site 1 和 Site 11 观测的最大有效波高和谱峰周期可以看出, Site 1 的观测有效波高和谱峰周期最大值分别为 4.5 m 和 11 s, Site 11 的观测有效波高和谱峰周期最大值分别为 4.1 m 和 10 s。

根据 Pelly 气象站测得的风速和风向(图 2)可以发现, 风暴风向沿逆时针方向改变, 从 SE、E、NE、N、NW、W、SW、S 向逐渐变化到 SE 向。根据风向将风暴分为 3 个阶段: 第一阶段风向从 SE、E、NE 向一直变化至 N 向, 第二阶段风向来自 NW 向, 第三阶段的风向从 W、SW、S 向一直变化至 SE 向。第一阶段(2008 年 10 月 6 日 7:00 前)的观测风速从 2 m/s 增加到 13 m/s , 第三阶段(2008 年 10 月 8 日以后)的观测风速从 15 m/s 减小到 2 m/s 。在第二阶段(2008 年 10 月 6 日 7:00 至 10 月 8 日 11:00)期间, 风速超过 16 m/s 的时间持续了 52 h, 风向一直维持在 $270^\circ \sim 290^\circ$ (从西北方向吹向三角洲)的范围内, 而相应的有效波高和谱峰周期逐渐增大, 直到峰值。

2 2008 年 10 月风暴波的模拟

2.1 SWAN 模型设置

采用 SWAN 模型^[16]模拟 2008 年 10 月风暴期间三角洲水域的波浪。图 1 所示模拟区域, 采用笛卡尔坐标系以确保准确模拟近岸浅水的波浪增水, 左下角和右下角的经纬度坐标分别是 68.69°N 、 -137.997°W 和

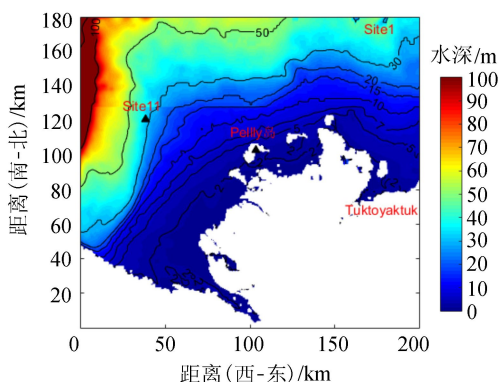


图 1 Mackenzie 三角洲水域示意图

Fig.1 Waters off Mackenzie Delta

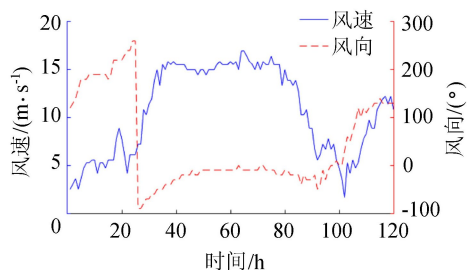


图 2 2008-10-05T00:00—2008-10-10T00:00 Pelly 气象站的观测风速和风向

Fig.2 Observed winds at the Pelly Station from 2008-10-05T00:00 to 2008-10-10T00:00

68.69°N、-133.053°W。 x 轴(东西方向)和 y 轴(南北方向)的网格长度分别是 200 km 和 183 km, 网格分辨率为 500 m×500 m。频率分为 32 个, 频率范围为 0.041 18 ~ 1 Hz, 方向划为 36 等分。模拟计算时间从 2008 年 10 月 5—10 日, 时间步长为 5 min。

模型中的物理量包括风能输入、白浪耗散、非线性波-波相互作用、底摩擦、深度诱导破碎。以三角洲水域观测资料为基础的浅水波研究表明^[5]; Collins^[17] 拖曳理论模型的系数选为 0.006, Battjes 等^[18] 公式中水深变化引起的波浪破碎系数选为 0.55。风能输入采用 Cavaleri 等^[19] 的方法, 白波耗散采用 Komen 等^[20] 的方法。三波和四波非线性相互作用计算采用 1996 年 Eldeberky^[21] 提出的集总三波近似方法 (LTA) 和 1985 年 Hasselmann 等^[22] 提出的离散相互作用近似方法 (DIA)。

模型运行所需的地形数据采用最新的海洋测深数据与三角洲浅水水域的 ETOPO1 数据相结合。将 Pelly 气象站的逐时观测风速用于驱动模型, Site1 (位于计算区域的北边界) 的实测波浪作为边界条件。在三角洲的沿海浅水区, 风暴潮对波浪模拟的准确性至关重要, 因此波浪模拟时根据 Tuktoyaktuk 站所记录的风暴潮增水 (峰值为 1.45 m) 从 200 m 深的水域到海岸区域进行风暴潮增水线性插值, 来考虑风致风暴潮对波浪模拟的影响。

2.2 模拟结果和分析

图 3 中 Site11 的模拟有效波高和谱峰周期, 与观测数据对比结果良好, 可见数值模拟结果合理。通过模型的模拟结果, 可以深入了解三角洲水域西北向风暴期间的波浪破碎区、波浪强度、波浪增水以及风暴波对海底的影响。图 4 给出了波高峰值时刻(2008 年 10 月 8 日 5:00)的波浪增(减)水(正值为增水、负值为减水)、深度诱导破碎引起的能量耗散、波浪水质点底部轨迹速度最大值的均方根和有效波高的分布场。

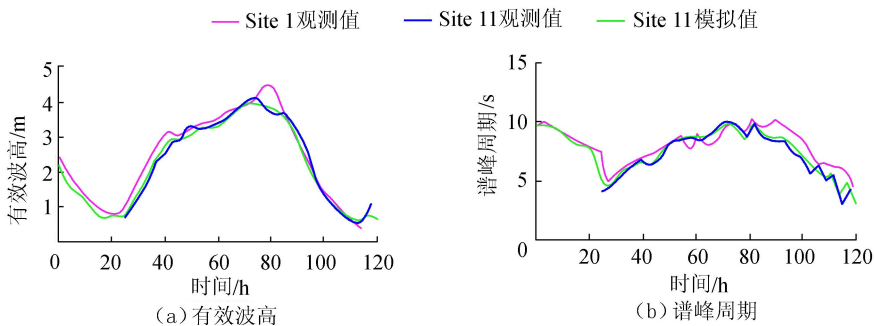


图 3 2008-10-05T00:00—2008-10-10T00:00 有效波高和谱峰周期的观测值和模拟值
Fig.3 Observed waves and simulated waves from 2008-10-05T00:00 to 2008-10-10T00:00

很明显,波浪增水和水质点轨道速度随着水深的减小而增加,深度诱导破碎引起的能量耗散从 20 m 等深线处开始发生,在 7 ~ 15 m 等深线之间最大,有效波高随着水深的减小而逐渐减小。Mackenzie 三角洲近岸波浪破碎区沿着 15 m 等深线,在 10 ~ 20 m 等深线范围内,该区域同时也是最大波浪减水和最大深度诱导破碎引起的能量耗散发生的区域。波浪增水从等深线 15 m 处开始,在靠近海岸(0.2 m 水深)处达到最大值。近岸最大底部波浪运动速度达到 0.16 m/s,深度诱导破碎引起的能量耗散发生在 5 ~ 20 m 等深线内。

3 东风对三角洲水域的影响

运用 2 种方法来研究东风对三角洲水域的影响:第一种是基于观测数据的分析,将东风与西北风作用期间的风、流观测数据进行对比;第二种是中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据反演 Mackenzie 三角洲水域海洋表面温度 (SST),建立 SST 与 Mackenzie 三角洲水域持续东风之间的关系^[23-25]。

3.1 1999 年秋季东风引起的强流

Site1 处(55 m)的声学多普勒流速剖面仪 (ADCP) 可以对该处水表到水底的流速进行观测,垂直方向上共有 12 个深度单元,其中 2 个靠近水表深度单元数据不可靠。图 4(a) 为从 1999 年 9 月 21 日 0:00 到 10 月 11 日 0:00 的 ADCP 断面流速,图 4(b) 为 6 号深度单元测得的水流流向和流速,且流向以地磁参考 (即该坐标系下 0° 对应实际的 34.1°, 顺时针方向为正) 来表示。

可以发现,Site1 处潮流流速总是小于 0.1 m/s,即使在大潮期间也是如此。观测期间共发生 2 次风暴天气,一次是发生在 1999 年 9 月 25 日左右的西北向风暴,另一次是从 1999 年 10 月 7 日开始的东风风暴。图 5 为

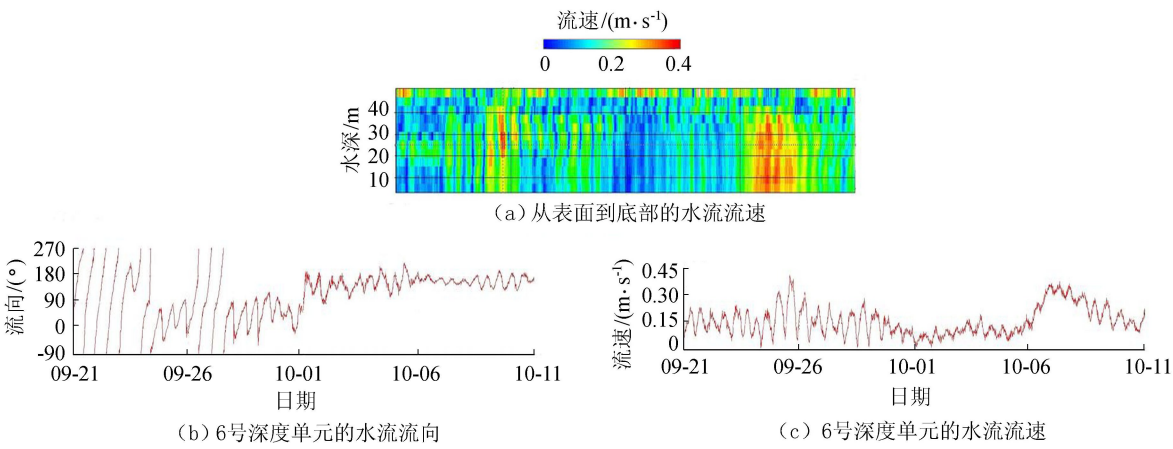


图4 1999年秋季 Mackenzie 三角洲水域 Site1 的观测水流

Fig.4 Observed currents at Site 1 station in waters off the Mackenzie Delta in 1999

Pelly 气象站 2 次风暴期间的观测风速和风向,西北向风暴期间风速在 16 ~ 18 m/s 之间的持续时间超过 16 h,东风风暴期间风速在 32 h 内逐渐从 7.5 m/s 增加到 13 m/s。2 次风暴过程均导致流速超过 0.3 m/s,区别在于西北向风暴引起中层和上层水流流速增大,而中等强度的东风使海表到底部的流速同时增大。

与西北向风暴相比,东风风暴强度较小,但其影响了从水表到水底的水流流速,且流速增大明显、持续时间更长,从而导致从海表到海底强烈的水体混合。

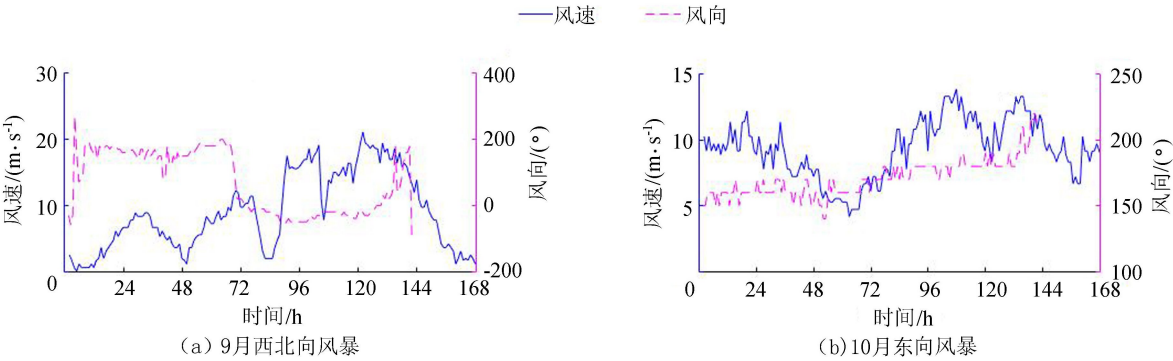


图5 1999 年风暴期间 Pelly 气象站的风速和风向

Fig.5 Observed velocities and directions at pelly station during two storms in 1999

3.2 持续东风引起的上升流

Mackenzie 三角洲位于高纬度地区,三角洲水域东风频发。理论上,一般强度的持续东风都可以导致上升流。当 Mackenzie 河的高温淡水与贝福特海的低温盐水相互作用时,高温淡水将覆盖在低温盐水的上部。因此,SST 分布可以让人们更加深入地了解三角洲水域的上升流。根据预处理后的 MODIS 数据反演得到 Mackenzie 三角洲水域 SST 分布。图 6 为 Tuktoyaktuk 测站 2007 年 8 月 5 日(YD216,表示 2007 年的第 216 天,以下类似)至 9 月 5 日(YD247)的实测风向和风速,图 7 为 2007 年 8 月 20—23 日(YD231-234)和 2007 年 8 月 26—30 日(YD237-241)2 次持续东风后的 SST 图像。

很显然,这 2 次强度不大的持续东风导致的上升流,使得深层冷水上升到了表层,分离了海岸的高温淡水和离岸地区的淡水羽流,影响范围到西经 126°左右。8 月 26—30 日的东风风速更大,上升流更加强烈,影响范围向海面延伸至 5 ~ 30 m 等深线外。

4 Mackenzie 三角洲西北风和东风对水底的影响

当底部的切应力总和大于一个临界值时,细小的底部泥沙将被带起并随着水流流动而转移。本文中所研究的 2 次西北向风暴(1999 年 9 月和 2008 年 10 月),底部的总流速均超过了 0.35 m/s(2008 年的西北向风暴导致近底部的水质点轨道速度超过了 0.15 m/s(图 4(c));潮流流速小于 0.1 m/s;1999 年的西北向风暴引起底部风暴潮流速大于 0.2 m/s(图 5)。对于 1999 年 10 月的东风暴,水底流速也大于 0.35 m/s(图 5)。

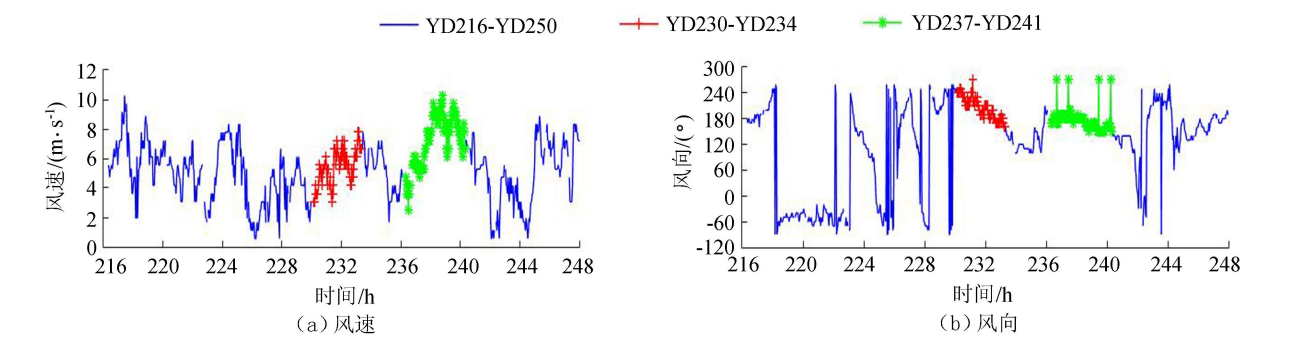


图 6 2007 年 8 月 5 日至 9 月 5 日 (YD216-YD247) Tuktoyaktuk 测站的实测风向和风速

Fig. 6 Observed winds at Tuktoyaktuk from 0000UTC Aug. 5 to 0000UTC Sept. 5 (YD 216-YD 247) , 2007

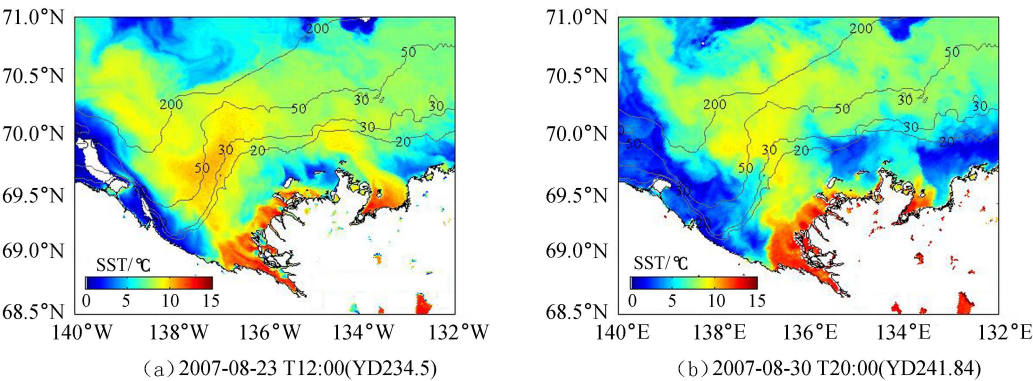


图 7 2 次持续东风后的 SST 分布

Fig. 7 SST distributions after two sustaining east wind events

因此,西北向风暴和东向风暴都可以导致底层的水流流速超过 0.35 m/s,足以使三角洲水域细小的底部泥沙发生运动。

强度不大的持续东风诱发的上升流使得水表到水底的水体混合,可以预见更强的持续东风会在三角洲水域更大的海域范围内导致更加强烈的水流和物质交换。由此可见,在开敞水域时期,海面浮冰最少时三角洲的海岸线、形貌和地势变化都与这些环境水动力因素紧密相关。

5 结 语

Mackenzie 三角洲在开敞水域时期强西北向风暴和东向风暴频发,引起一系列水动力现象。通过对实测风、浪、流和卫星等数据的多重分析,结合数值模拟对三角洲水域风暴相关的海岸水动力现象进行探究,结果表明:(a)西北向风暴产生的强浪影响了三角洲水域中上层的波浪和强流,引起明显的波浪增、减水和波能耗散,对浅水区域海底产生强烈的波浪作用。海浪破碎区位于大约 15 m 等深线处。河床底部细小泥沙在强水流和波浪共同作用下极易发生运动。(b)东向风暴引起了从海表到海底、足以扰乱底部细小泥沙的强流,甚至强度较弱的持续东风都可以在三角洲水域引起上升流和水体混合。

由于加拿大 Beaufort 海和 Mackenzie 三角洲复杂独特的海洋环境,近岸的海岸水动力现象受到气候、冰层、河川径流、降雪、潮汐等众多因素影响。因此,河流、河口、近岸和 Beaufort 海的相互作用,三角洲风暴-冰-浪-风暴潮相互作用的模型耦合效应,短期和长期的海岸线和地势改变等问题还有待探究。

参考文献:

[1] SMALL D. Beaufort coast wind climatology and case study of a high wind event[D]. Montreal: McGill University, 2009.

[2] PICKART R S, MOORE G W K, TORRES D J, et al. Upwelling on the continental slope of the Alaskan Beaufort Sea: storms, ice, and oceanographic response[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2009, 114(9) :427-428.

[3] MULLIGAN R P, PERRIE W, SOLOMON S. Dynamics of the Mackenzie River plume on the inner Beaufort shelf during an open water period in summer[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2010, 89(3) :214-220.

- [4] SERREZE M C, HOLLAND M M, STROEVE J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. *Science*, 2007, 315: 1533-1536.
- [5] XU Fumin, PERRIE W, SOLOMON S. Shallow water dissipation processes for wind waves off the Mackenzie Delta[J]. *Atmosphere-Ocean*, 2013, 51(3):296-308.
- [6] ZHANG Xiangdong, WALSH J E, ZHANG J, et al. Climatology and interannual variability of Arctic cyclone activity: 1948-2002[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(12):2300-2317.
- [7] HUDAK D R, YOUNG J M C. Storm climatology of the southern Beaufort Sea[J]. *Atmosphere Ocean*, 2002, 40(2):145-158.
- [8] KHANDEKAR M L, SWAIL V R. Storm waves in Canadian waters: a major marine hazard[J]. *Atmosphere-Ocean*, 1995, 33(2):329-357.
- [9] MARSH P, SCHMIDT T. Influence of a Beaufort Sea storm surge on channel levels in the Mackenzie Delta[J]. *Arctic*, 1993, 46(1):35-41.
- [10] HAPPER J R, HENRY R F, STEWART G G. Maximum storm surge elevations in the Tuktoyaktuk region of the Canadian Beaufort Sea[J]. *Arctic*, 1988, 41(1):48-52.
- [11] 时健, 郑金海, 严以新, 等. 河口海岸水动力非静压数学模型研究述评[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 167-174. (SHI Jian, ZHENG Jinhai, YAN Yixin, et al. Review of non-hydrostatic numerical models for estuarial and coastal hydrodynamics[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(2):167-174. (In Chinese))
- [12] 徐福敏, 李婷. 根据 MODIS 数据研究海岸河口水域上升流现象[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(5):466-470. (XU Fumin, LI Ting. Study of upwelling phenomenon in estuaries and coasts based on MODIS data [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2013, 41(5):466-470. (in Chinese))
- [13] AAGAARD K, ROACH A T. Arctic ocean-shelf exchange: measurements in Barrow Canyon[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(18), 163-175.
- [14] 诸裕良, 徐秀枝. 北太平洋海浪特征分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(6):550-557. (ZHU Yuliang, XU Xiuzhi. Analysis of wave characteristics in North Pacific Ocean [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(6):550-557. (In Chinese))
- [15] 季海嘉, 任春平, 蒋利君. 规则波致剪切波的时空变化[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(1):51-57. (JI Haijia, REN Chunping, JIANG Lijun. Temporal and spatial variations of shear waves under regular waves [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2016, 44(1):51-57. (In Chinese))
- [16] RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N. A spectral model for waves in the near shore zone[J]. *Coastal Engineering*, 1994, 1(24), 68-78.
- [17] COLLINS J I. Prediction of shallow-water spectra [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1972, 77(15):2693-2707.
- [18] BATTJES J A, JANSSEN J P F M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves[C]//ASCE. Proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering. Hamburg: ASCE, 1978: 569-587.
- [19] CAVALERI L, RIZZOLI P M. Wind wave prediction in shallow water: theory and applications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(C11):10961-10974.
- [20] KOMEN G J, HASSELMANN K. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1984, 14(8):1271-1285.
- [21] ELDEBERKY Y. Nonlinear transformation of wave spectra in the nearshore[D]. Delft: Delft University of Technology, 1996.
- [22] HASSELMANN S, HASSELMANN K, ALLENDER J H, et al. Computations and parameterizations of the linear energy transfer in a gravity wave spectrum[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1985, 15: 1369-1377.
- [23] 刘良明, 周军元. MODIS 数据的海洋表面温度反演[J]. 地理空间信息, 2006, 4(2):7-9. (LIU Liangming, ZHOU Junyuan. Using MODIS imagery to map sea surface temperature[J]. *Geospatial Information*, 2006, 4(2):7-9. (in Chinese))
- [24] 郑嘉淦, 李继龙, 杨文波. 利用 MODIS 遥感数据反演东海海域海表温度的研究[J]. 海洋渔业, 2006, 28(2):141-146. (ZHENG Jiagan, LI Jilong, YANG Wenbo. Retrieval of SST in the east China sea with MODIS remote sensing data[J]. *Marine Fisheries*, 2006, 28(2):141-146. (in Chinese))
- [25] 刘玉洁, 杨忠东, 王长耀, 等. MODIS 遥感信息处理原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2001:293-294.