

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.017

根据 MODIS 数据研究海岸河口水域上升流现象

徐福敏, 李 婷

(河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于 MODIS 数据反演得到 Mackenzie 河口 2007 年 8—9 月海洋表面温度分布, 结合该河口 Pelly 气象站实测风速、风向数据, 分析 Mackenzie 河口水域的上升流特点, 重点分析上升流的产生条件、发展、强度, 以及它们随纬度、风向及风速的变化关系。结果表明: 当东向风($160^{\circ}\sim 200^{\circ}$)吹刮时间长于半天时, 即有上升流产生, 且东风时(180°)最强烈; 东向风持续吹刮时, 风速越大, 上升流现象越强烈、影响范围越广。

关键词: 海表温度分布; 上升流; MODIS 数据; Mackenzie 河口

中图分类号: P731.21 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2013)05-0466-05

Study of upwelling phenomenon in estuaries and coasts based on MODIS data

XU Fumin, LI Ting

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

Abstract: Based on remote sensing data from a moderate-resolution imaging spectroradiometer, the sea surface temperature (SST) of the Mackenzie Estuary in August and September of 2007 was obtained using MODIS data, and the characteristics of the upwelling phenomenon, especially the relationships between the generation, development, strength of upwelling, the latitude, wind direction, and wind speed were analyzed, combined with the wind factors at the Pelly Station during this period. The results show that, when the easterly wind ($160^{\circ}\sim 200^{\circ}$) lasts more than half a day in the summer, upwelling will appear, and it will be strongest with an easterly wind direction of 180° . The upwelling will be stronger and affect a wider range when the wind speed is higher.

Key words: sea surface temperature distribution; upwelling; MODIS data; Mackenzie Estuary

海洋升降流研究对于气候变化^[1-2]、海洋环境、渔业养殖和社会经济均具有重大意义^[3]。上升流可以把海底丰富的营养物质带到海洋上层, 是渔场形成的主要条件^[4-5]。海岸河口水域上升流的产生、发展与风有密切关系。笔者根据升降流理论, 利用中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据反演加拿大西北部高纬度 Mackenzie 河口水域海洋表面温度; 结合当地实测风速、风向数据综合分析上升流产生条件、发展、强度, 以及它们随纬度、风向及风速的变化关系, 并分析上升流异常现象产生的原因, 以期为当地社区生态、渔业和海洋环境提供科学依据。

1 MODIS 数据反演处理方法

MODIS 是美国国家航空航天局(NASA)新一代对地观测系统(EOS)中搭载在 TERRA 和 AQUA 卫星上的重要传感器^[6-7], 它的多波段数据可以同时提供反映地表面状况、云边界、云特性、海洋水色、地表温度、云顶温度和大气温度等信息。笔者基于 MODIS 数据(第 31, 32 波段), 采用多通道分裂窗算法反演海洋表面温度。原始 MODIS 数据(来源于 NASA 的 MODIS 网站)及常用的算法模式见文献[8-10]。

收稿日期: 2012-10-13
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAB03B01)
作者简介: 徐福敏(1967—), 女, 天津人, 教授, 博士, 主要从事海岸海洋水动力研究。E-mail: fmxu@hhu.edu.cn

2 海岸河口水域上升流原理

2.1 上升流基本理论

海岸河口水域上升流基本运动方程为^[11]

$$\begin{cases} A_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \\ A_1 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - fu = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \end{cases} \tag{1}$$

对于与海岸成 β 角的直线风系生成的上升流,边界条件为

$$\begin{cases} \rho A_z \frac{\partial u}{\partial z} = -\tau_x & \rho A_z \frac{\partial v}{\partial z} = -\tau_y & (0 \leq x \leq L) & z = 0 \text{ (海面)} \\ u = v = 0 & & & z = h \text{ (海底)} \\ u = v = 0 & & & x = 0 \text{ (海岸)} \\ u = v = 0 & \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 & & x \rightarrow \infty \text{ (远离海岸)} \end{cases} \tag{2}$$

式中: u, v, w ——垂直于岸线方向、平行于岸线方向、沿水深方向的水质点运动速度; ζ ——自由水位; A_z, A_1 ——垂直和水平湍流黏滞系数; f ——科氏力; ρ ——海水密度; τ_x ——垂直于海岸的风应力; τ_y ——平行于海岸的风应力; L ——直线风系宽度。

设 xOz 平面流函数 $\psi(x, z)$ 为文献[11]中流函数的实部:

$$\psi(x, z) = \frac{4\pi\tau_x}{\rho f} \varphi_x(x, z) + \frac{4\pi\tau_y}{\rho f} \varphi_y(x, z) \tag{3}$$

其中

$$f = 2\omega \sin\varphi$$

式中: ω ——地转角速度; φ_x, φ_y ——与离岸距离、水深有关的量在 x 和 y 方向上的投影^[11]; φ ——地理纬度。

平面流速度为

$$u = -\frac{\partial \psi}{\partial z} \quad w = \frac{\partial \psi}{\partial x} \tag{4}$$

由式(3)可知,流函数由两部分组成,一部分由 τ_x 决定,另一部分由 τ_y 决定。对于平行于海岸的直线风系($\tau_x=0$),其流函数为式(3)的特殊情况。因此,非平行于海岸的直线风系与平行于海岸的直线风系导致的近岸流动相似。

2.2 上升流现象与风系及岸线交角、地理纬度的关系

对于与岸线交角为 β 的风系,由式(3)可得其上升流垂直质量运输为

$$M = \int_0^x \rho w dx = \rho \int_0^x \frac{\partial \psi}{\partial x} dx = \rho \psi(x, z) \tag{5}$$

当 $\varphi_x(x, z), \varphi_y(x, z)$ 取最大负值时 M 有最大值,此时将 $\tau_x = \tau \sin\beta, \tau_y = \tau \cos\beta$ 代入式(5)得

$$M = (-0.0355 \sin\beta - 0.090 \cos\beta) \frac{4\pi\tau}{f} \tag{6}$$

式中 τ 为风应力。

根据式(6)绘出 M 随 β 的变化曲线,如图 1 所示。由图 1 可知, $\beta=21.5^\circ$ 时上升流最强烈;较强上升流产生的角度区域为 $0^\circ \sim 40^\circ$;由于式(6)分母有 f 项,因此纬度越低,上升流越强。

3 Mackenzie 河口上升流

Mackenzie 河口水域位于加拿大西北部,北纬 $52^\circ 13' \sim 69^\circ 09'$ 、西经 $108^\circ 11' \sim 134^\circ 05'$ 之间。Mackenzie 河的众多南部支流(主要有 19 条)向北流入 Mackenzie 河口,继而向北进入 Beaufort 海。Mackenzie 河口靠近北极,地理位置独特,冰期较长,全年大部分时间被海冰覆盖。每年 6 月初海冰开始融化,随温度逐渐升高,

海冰融化范围变大,开冰季节一般为7—11月。夏秋季 Mackenzie 河将南部高温淡水(15℃以上)带入低温的 Mackenzie 河口和 Beaufort 海,一薄层低密度、高温淡水像羽流一样浮于低温海水之上,同时向外海扩散。此时 Mackenzie 河口水域海洋表面温度普遍较高(一般高于10℃),而低密度、高温淡水之下却依然是低温海水。若该水域发生上升流,上升流会使下层低温海水上翻,上升流产生水域的海洋表面温度便会低于周围海洋表面温度。

3.1 观测数据

本文采用数据为 National Climate Data and Information Archive 提供的 Pelly 气象站(-135.43°W,69.62°N)的观测风资料,Pelly 气象站地理位置见图2(a)。由风速、风向观测数据可知,Mackenzie 河口主要风向为东南风与西北风,其中东南风最常见(30%),常见风速为4~6 m/s,月峰值达14 m/s;西北风发生频率相对较小(20%~25%),但风速较大,常见风速为6~8 m/s,月峰值达26 m/s^[12-13]。本文根据2007年8—9月 Mackenzie 河口海洋表面温度的 MODIS 数据和此期间 Pelly 气象站观测风资料研究该河口水域上升流特征,重点分析上升流的产生条件、发展、强弱,以及它们随纬度、风向及风速的变化关系。

3.2 结果及分析

根据预处理后的 MODIS 数据反演得到 Mackenzie 河口2007年8—9月海洋表面温度(T_{SST})分布。图2为典型日(8月22日、23日、29日和31日)Mackenzie 河口海洋表面温度分布,图3为8月18日至9月1日 Pelly 气象站观测的风速、风向(风向采用笛卡尔坐标系,0°为西风,逆时针旋转)。

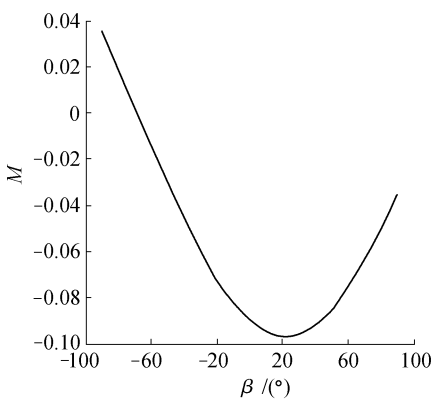


图1 β 对上升流的影响
Fig. 1 Impact of angle between wind direction and coastline (β) on upwelling

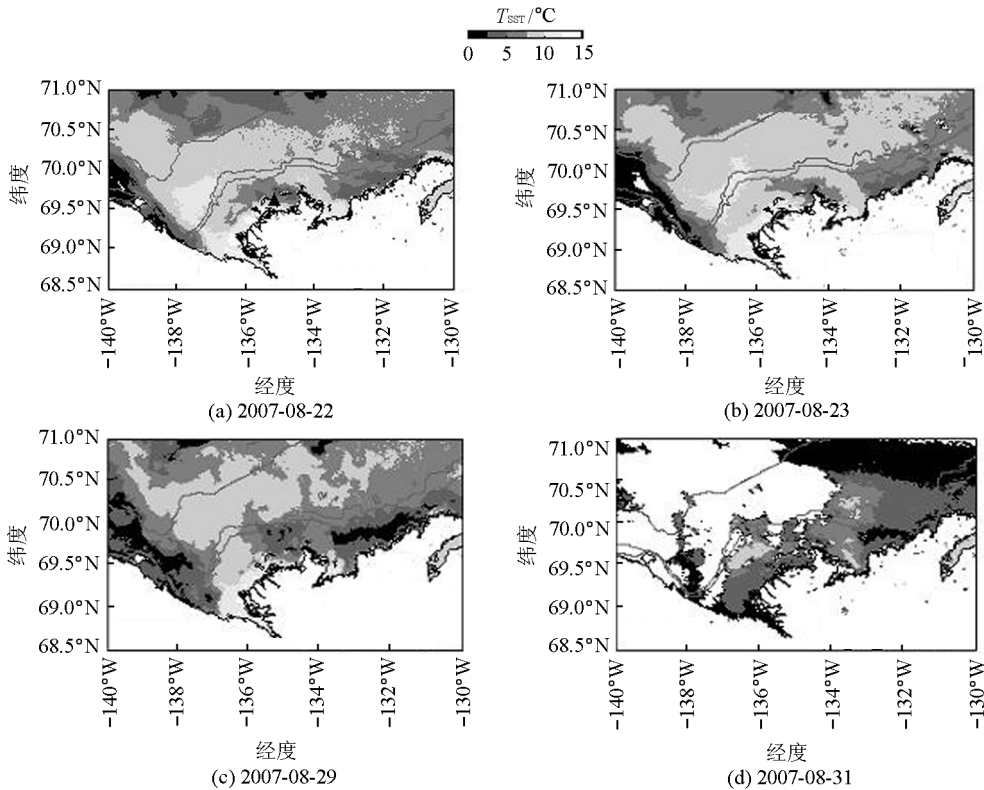


图2 Mackenzie 河口海洋表面温度分布
Fig. 2 SST distribution of Mackenzie Estuary

一般来说,低纬度海域上升流现象较强烈,高纬度海域上升流现象较弱。然而图2表明位于高纬度的 Mackenzie 河口夏季存在明显、强烈的上升流现象。

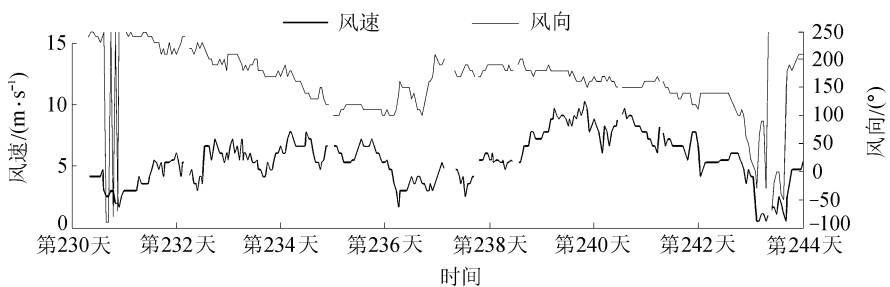


图 3 2007 年 8 月 18 日至 9 月 1 日 (第 230 ~ 244 天) Pelly 气象站风速、风向

Fig. 3 Wind speed and direction at Pelly Station from August 18 to September 1, 2007

图 2(a)(b)分别为第 234 ~ 235 天 Mackenzie 河口海洋表面温度分布,可以看出在近岸处有上升流产生,下层低温海水上翻造成局部海洋表面温度降低,上升流产生范围在近海水域至 20 m 等深线附近。图 3 表明在上升流产生的前 2 d(第 232 ~ 234 天)主要风向为东向风($160^{\circ} \sim 200^{\circ}$),风速约为 7 m/s,风吹刮时间长于 2 d。风向在第 235 天时由东南转为偏南(100° 左右)。由此可见,东向风长时间吹刮会产生上升流,当风向偏离东风时上升流现象将减弱。

图 2(c)为第 241 天海洋表面温度分布,此时冷水上翻现象相当明显。图 3 显示,在此上升流现象产生之前东风为主的风吹刮时间长于 4 d,风速较大(8 m/s 左右),风向接近于正东风(180°),此时上升流范围超过 20 m 等深线。风向在第 243 天时已转向西北($-20^{\circ} \sim -60^{\circ}$),风向变化较大,风速较小(2 m/s 左右),图 2(d)显示此时上升流现象已消失。

由此可见,Mackenzie 河口水域在东向风长时间吹刮时会产生上升流,正东风时最强,其他风向不能产生上升流。由于 Mackenzie 河口岸线自然角度为 200° ,可知 Mackenzie 河口 $160^{\circ} \sim 200^{\circ}$ 的风向适于产生较强上升流,二者相一致。同时风速大小也影响上升流强度和范围,东风持续风速越大,上升流强度越强、影响范围越大。

4 特例分析

Mackenzie 河口海洋动力条件复杂,河口径流、近海海冰、波浪、水流、内波等对上升流的存在均有影响。本文研究中第 217 天(2007-08-05) Mackenzie 河口海洋表面温度分布(图 4)显示无上升流产生,但其对应的第 213 ~ 218 天 Pelly 气象站风速、风向表明,在此之前东风已经持续长时间(图 5),这显然与理论及第 3 节的资料分析结果相悖。

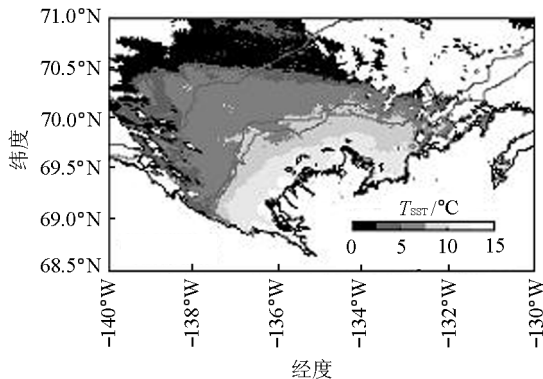


图 4 2007 年 8 月 5 日 Mackenzie 河口海洋表面温度分布

Fig. 4 SST distribution of Mackenzie Estuary in August 5, 2007

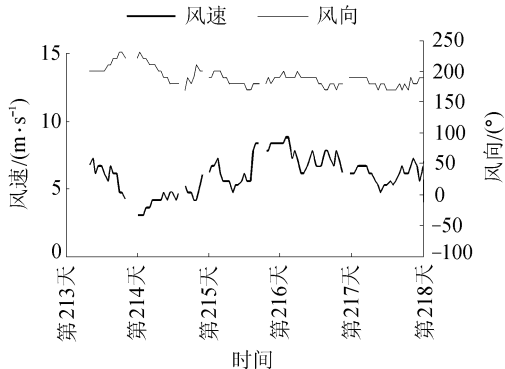


图 5 2007 年 8 月 1—6 日 Pelly 气象站风速、风向

Fig. 5 Wind speed and direction at Pelly Station from August 1 to 6, 2007

海冰数据显示 2007 年 8 月 5 日 Mackenzie 河口与外海相接处仍有大面积海冰未完全融化,东风吹过的海面仍有部分海冰存在,因此表层温度较高的低盐水难以产生离岸流动,从而阻碍底层低温海水的上升流动,不能形成上升流。虽然此时南部 Mackenzie 河的径流量仍然较大,高温、低密度淡水覆盖在海水,但是近岸海冰的封锁使 Mackenzie 河口开敞水域面积受限制,因此长时间的持续东向风无法形成上升流,可见上

升流的形成和当地海域综合物理海洋环境紧密相关。

5 结 论

基于升降流理论,利用 MODIS 数据反演海洋表面温度,结合相应的实测风速、风向探讨了 Mackenzie 河口夏秋季(2007 年 8—9 月)上升流与风场的关系以及上升流产生的条件、强弱、范围等。结果表明:

a. 上升流与纬度、风向、风速等因素有关。Mackenzie 河口虽处于高纬度区域,但持续东风使该水域产生上升流。当东风风吹刮时间长于半天,即有上升流产生。一般情况下,正东风(180°左右)所致上升流最强,东向偏南(160°~180°)与东向偏北(180°~200°)风也能产生显著上升流。吹刮时间不足或其他风向均不能产生上升流。

b. 持续东风吹刮条件下,风速越大产生的上升流越强,底层冷水上翻现象越明显。上升流产生的范围一般为沿岸到 20 m 等深线附近,较强东向风引起的上升流会越过 20 m 等深线处到达 30 m 等深线附近。

c. 由于 Mackenzie 口水域复杂的海洋环境条件,很多海洋动力因素影响到上升流的产生和强度。例如当近海的冰未完全融化导致河口开敞水域面积受限制,此时即使有长时间持续的东向风也无法产生上升流。总之,需要多因素综合研究海岸河口水域的上升流现象。

参考文献:

[1] 顾润源, 刘晓东, 白桦. 厄尔尼诺研究的进展和现状[J]. 宁夏大学学报, 1990, 11(3): 83-91. (GU Runyuan, LIU Xiaodong, BAI Hua. Advances and present conditions in El Nino[J]. Journal of Ningxia University, 1990, 11(3): 83-91. (in Chinese))

[2] 张月丛, 孟宪锋. 厄尔尼诺和拉尼娜的成因及其对中国气候的影响[J]. 承德民族师专学报, 2005, 25(2): 59-60. (ZHANG Yuecong, MENG Xianfeng. El Nino and La Nina weather to China the causes and the influence of climate[J]. Journal of Chengde Teachers' College for Nationalities, 2005, 25(2): 59-60. (in Chinese))

[3] 吕新刚. 黄东海上升流机制数值研究[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所, 2010.

[4] 赵保仁, 李徽翡, 杨玉玲. 长江口海区上升流现象的数值模拟[J]. 海洋科学集刊, 2003, 45: 64-76. (ZHAO Baoren, LI Huifei, YANG Yuling. Numerical simulation of upwelling in the Changjiang River Mouth area[J]. Studia Marina Sinica, 2003, 45: 64-76. (in Chinese))

[5] 赵保仁, 任广法, 曹德明, 等. 长江口上升流海区的生态环境特征[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 327-333. (ZHAO Baoren, REN Guangfa, CAO Deming, et al. Characteristics of the ecological environment in upwelling area adjacent to the Changjiang River estuary[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2001, 32(3): 327-333. (in Chinese))

[6] 张春桂, 陈家金, 谢怡芳, 等. 利用 MODIS 多通道数据反演近海海表温度[J]. 气象, 2008, 34(3): 30-36. (ZHANG Chungui, CHEN Jiajin, XIE Yifang, et al. Retrieval of sea surface temperature in coastal region by using MODIS multi-channel data[J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(3): 30-36. (in Chinese))

[7] 张春桂, 张星, 曾银东, 等. 台湾海峡海表面温度的遥感反演及精度检验[J]. 海洋学报, 2008, 30(2): 153-160. (ZHANG Chungui, ZHANG Xing, ZENG Yindong, et al. Retrieval and validation of sea surface temperature in the Taiwan Strait using MODIS data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2008, 30(2): 153-160. (in Chinese))

[8] 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))

[9] 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))

[10] 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.

[11] 叶安乐, 李凤歧. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992: 252-280.

[12] FISSEL D B, MARKO J R, Álvarez M S. The changing met-ocean and ice conditions in the Beaufort Sea: implications for Offshore Oil and Gas[C]//GHUNG J S. Annual meeting of the International Society of Offshore and Polar Engineers(ISOPE). Osaka:[s. n.], 2009: 1-8.

[13] HUDAK D R, YOUNG M C. Storm climatology of the southern Beaufort Sea[J]. Atmosphere-Ocean, 2001, 40(2): 145-148.