

基于 Aquarius 卫星数据的孟加拉湾海表盐度分析

王 静¹, 储小青², 苏 楠¹, 汪 娟¹

(1. 中山大学 地理科学与规划学院 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东 广州 510275;
2. 中国科学院 南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广东 广州 510301)

摘要: 海洋表面盐度(Sea Surface Salinity, SSS)是海洋的重要物理和化学参量, SSS 的时空分布与全球大洋环流和水汽循环密切相关。本文基于美国国家航空航天局(NASA)发射的 Aquarius 卫星 3a 的 SSS 遥感数据, 给出了孟加拉湾及其附近海域海表盐度的空间分布特征, 并重点分析了影响孟加拉湾海表盐度变化的可能因素。研究结果从一个侧面说明了利用 Aquarius 卫星遥感观测海洋大尺度盐度变化的可行性。

关键词: 孟加拉湾; Aquarius 盐度卫星计划; 海表盐度

中图分类号: P731.12 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2015)03-0066-05

doi: 10.11759/hyxx20141013002

盐度是影响海洋密度、热力和动力结构特征的重要因子, 是评估海洋水循环的重要标尺^[1-2], 它不仅与全球海洋的温盐环流密切相关, 而且也是海洋生物生存环境和初级生产力的主要决定因子之一。受观测技术的制约, 人们对全球大洋海表面盐度(Sea Surface Salinity, SSS)的观测和认识程度远远落后于海表温度(Sea Surface Temperature, SST)。随着卫星遥感技术的发展, 大范围、准同步的全球大洋 SSS 的观测成为了现实。目前, 国际上两个大的盐度遥感研究计划正在执行, 即欧洲的 SMOS(Soil Moisture Ocean Salinity)计划和美国国家航空航天局(NASA)的水瓶座卫星(Aquarius)计划, 两颗盐度遥感卫星分别于 2009 年 11 月和 2011 年 6 月发射。SMOS 卫星目前已经绘制出较为精确的陆地湿度变化图和海洋的盐度分布图, 而随着 Aquarius 卫星盐度数据的不断获取, 该卫星也将引起海洋研究者的重视。Aquarius / SAC-D 卫星是一颗搭载了 L 波段主被动联合微波遥感仪器的卫星, 其主要科学目的是进行全球海洋盐度的观测, 该卫星数据的空间分辨率为 150 km, 并且在时间分辨率为 30 d、考虑所有传感器和地球物理模型的随机误差和偏差前提下, 盐度观测精度可达到 0.2 psu^[3-4]。

孟加拉湾作为东北印度洋的边缘海, 是印度洋的一个重要组成部分。它位于印度洋北部 5°~22°N, 80°~95°E, 面积约 217.2×10⁴ km², 平均水深 2 586 m, 向南开口(图 1)。作为印度洋水汽北向输送的重要通道, 孟加拉湾的海洋水文要素的变化与我国大陆的干旱、洪涝等气候异常密切相关, 就此国内学者已有

相关的大量研究成果^[5-7], 而对卫星遥感获得的大范围、准同步盐度观测资料的利用, 无疑会有助于进一步深刻理解这一海域的海气相互作用过程及其对我国气候变化的影响。因此, 本文尝试利用 Aquarius 卫星计划获取的 2011 年 8 月~2014 年 9 月的盐度资料, 给出孟加拉湾及其附近海域的 SSS 空间分布特征和季节变化特征, 并分析其可能成因, 以期为这一海域的相关研究提供参考。

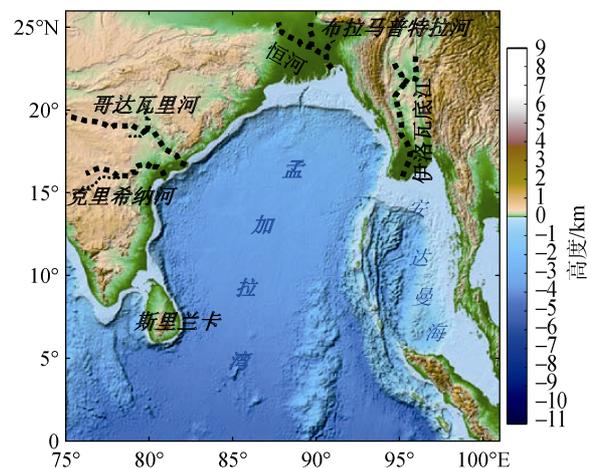


图 1 孟加拉湾地形图

Fig. 1 Bathymetry of the Bay of Bengal

收稿日期: 2014-10-13; 修回日期: 2015-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号 41276108); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11010203)

作者简介: 王静(1966-), 女, 安徽枞阳人, 副教授, 博士, 主要从事海洋卫星遥感应用研究, 电话: 020-84115833, Email: wjing@mail.sysu.edu.cn

1 资料及处理方法

本文选用 NASA 制作的 Aquarius Level 3 Version 3.0 数据集中的孟加拉湾海域(0°~25°N, 75°~100°E)的逐月盐度资料, 分析 SSS 的空间分布特征以及季节性变化特征, 其数据空间分辨率为 1°×1°。海表月平均流场来自美国国家海洋和大气管理局(NOAA)制作的融合流场数据(Ocean Surface Current Analyses-Real time, OSCAR), 为了和盐度数据一致, 选用的时间跨度为 2011 年 8 月~2014 年 9 月, 空间分辨率为 1°×1°。

2 孟加拉湾海域 SSS 的分布特征分析

2.1 孟加拉湾海域月平均 SSS 分布特征

图 2 为孟加拉湾及其附近海域的表层盐度分布图, 结果显示: 湾内东北近岸海域表层海水盐度较低, 盐度值基本在 33 psu 以下, 湾内西部海域靠近斯里兰卡以及湾口与印度洋分界处盐度值较高, 一般高于 34 psu。孟加拉湾海域的盐度值随时间变化的范围为 28~35 psu, 1 月时, 孟加拉湾北部沿岸海域盐度最低可至 29 psu(16°~20°N, 90°~93°E 附近), 15°N

以北的海域盐度整体较低, 基本处于 32 psu 以下, 这一近岸海域主要受到位于湾北部的布拉马普特河和恒河径流影响。孟加拉湾淡水来源包括降水和径流。印度东岸附近年降水量高达 1 000 mm, 安达曼海及其北部沿岸区域年降水量甚至超过 3 000 mm。除了这两条最主要的径流来源, 注入该湾的主要河流还有伊洛瓦底江、克里希纳河和哥达瓦里河(图 1), 它们的年净流量依次为 607×10^9 、 388×10^9 、 257×10^9 、 50×10^9 、 $13 \times 10^9 \text{ m}^3$ [8]。2~5 月, 孟加拉湾西北部盐度逐渐升高。4 月与 3 月相比, 孟加拉湾西北部低盐水体有呈顺时针运动的趋势, 这与此时西北部一个顺时针的环流有关。5、6 月时, 斯里兰卡东北部盐度有所降低, 这可能与西南季风的暴发而引起的降雨空间分布有关。而斯里兰卡以南海域的盐度明显增加应该与夏季环流引起的阿拉伯海域的高盐水向东输送有关。

夏季风暴暴发后, 盐度变化比较明显的区域是位于湾内东北沿岸海域以及西南部靠近斯里兰卡及孟加拉湾与印度洋分界处, 东北沿岸海域盐度值从 7 月开始下降(15°N 以北), 9~12 月可低至 28 psu, 这一海域有布拉马普特河、恒河以及伊洛瓦底河的海

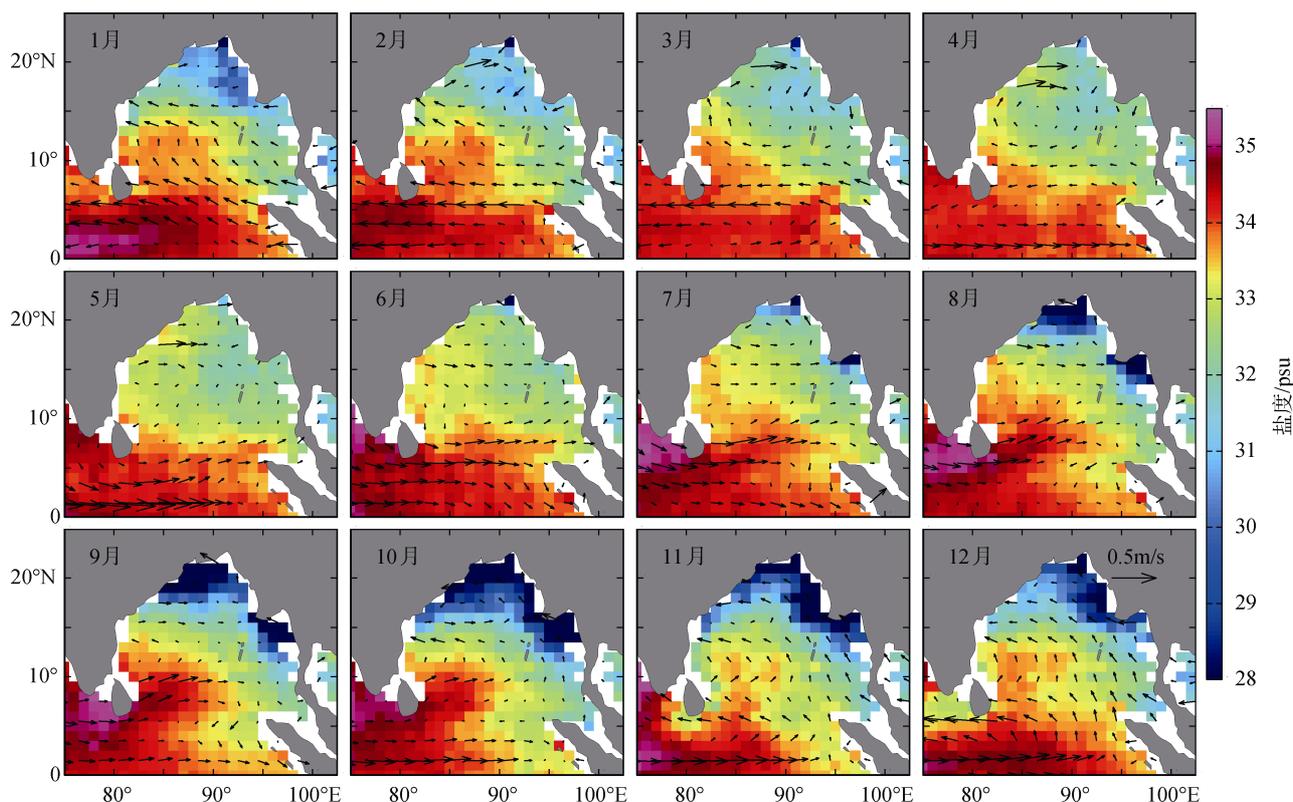


图 2 孟加拉湾海域逐月 SSS 以及流场分布

Fig. 2 Monthly SSS and ocean surface currents in the Bay of Bengal

口, 夏季来自陆地的淡水径流补给是造成该地区表层海水盐度偏低的主要因素。斯里兰卡附近及印度东部沿海海域也呈现出小范围下降, 但是相比上半年, 可以明显看出盐度整体较高, 这与阿拉伯海的高盐度海水经过斯里兰卡向孟加拉湾输送有关。6~9月夏季风期间, 孟加拉湾受西南季风控制, 表层海水在西南季风海流的输送下由阿拉伯海沿斯里兰卡进入孟加拉湾, 导致孟加拉湾中部盐度较高。

2.2 孟加拉湾不同季节 SSS 分布特征

采用 2011 年 8 月~2014 年 9 月的 Aquarius 卫星数据资料处理得到孟加拉湾 SSS 的季节平均分布状况(如图 3)如下:

春季, 孟加拉湾北部沿着缅甸海岸海域的盐度为 31~33 psu, 湾口以南盐度较高(>33 psu), 湾内高盐区域位于西部, 这与湾口以南高盐沿印度东岸入侵湾内有关^[9]。

夏季, 孟加拉湾盐度空间分布总体格局与春季相似, 但东北与西南的盐度差异进一步加大, 北部

沿岸海域盐度骤减且低盐海水向东移动, 表明雨季到来, 河水径流的影响更为突出。受夏季西南季风的影响, 湾口以南盐度大于 34 psu。

秋季, 是南亚季风由夏季风转换为冬季风的过渡时期, 盐度空间分布显示, 东北与西南的盐度差异进一步加大, 湾内北部沿岸以及安达曼海区域盐度较低(<32 psu), 低盐区沿着安达曼海及湾顶分布。

冬季, 湾内盐度的分布表现出南北梯度减小的趋势, 在大约 15°N 以北海域的盐度有所增加, 而在斯里兰卡东部约 85°E 附近海域的盐度有明显下降。

总体来说, 孟加拉湾及其附近海域的盐度分布体现为盐度由湾顶向湾口递增的趋势, 湾外赤道海域盐度最高。除了海表热通量和赤道流系的影响外, 径流及印度季风漂流的影响是影响孟加拉湾及其附近海域 SSS 季节变化的主要因素。其中季节性径流的影响主要表现在湾北部沿岸, 夏、秋季节之间变化较为明显。印度季风漂流的入侵发生在夏、秋季, 此间斯里兰卡岛附近可清晰看到其输送的阿拉伯海高盐海水。

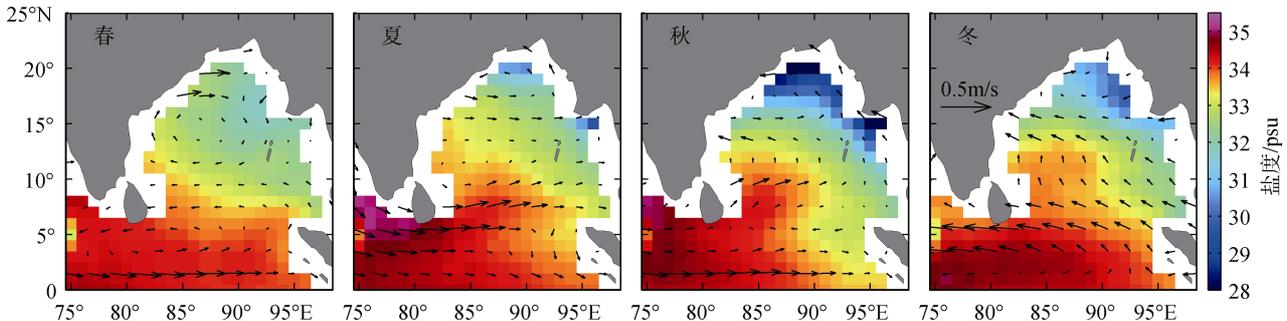


图 3 孟加拉湾不同季节 SSS 以及流场分布

Fig. 3 Seasonal variation of SSS and ocean surface currents in the Bay of Bengal

2.3 SSS 时空分布特征的影响因素分析

根据全球径流数据中心(GRDC)提供的孟加拉湾主要河流的径流量数据(图 4)可以看出, 几条主要河流的径流量从 6 月开始加大, 至 8 月时达到最大值, 对比孟加拉湾海域 SSS 逐月变化可以看出(图 5), 夏季孟加拉湾平均盐度达到最大值, 径流量的加大本应使湾内盐度值降低, 但结果却截然相反, 那么, 是什么原因造成了孟加拉湾盐度的这一变化呢?

孟加拉湾淡水来源包括降水和径流。印度东岸附近年降水量高达 1000 mm, 安达曼海及其北部沿岸区域年降水量甚至超过 3000 mm^[9], 气候态年平均降水量大于蒸发量, 海表获得淡水。受季风影响, 径流量季节分布不均, 大的径流量出现在夏季, 其

中位于湾北部的布拉马普特河和恒河水量最为丰富。由于降水大大超过蒸发作用, 加之大量淡水注入, 夏季湾北部表层层化明显, 出现障碍层^[10]。冬季淡水径流量虽然大大减少, 在湾北部表层仍出现层化, 并产生逆温现象。障碍层的形成, 使孟加拉湾海域垂向处于较稳定的层结状态。

由以上分析可知, 孟加拉湾表层盐度的季节变化不能完全由海表淡水通量来解释。受地理位置因素的影响, 孟加拉湾南部海域夏季表层盐度升高主要由海洋平流输送引起, 其余月份盐度降低, 10~12 月主要由海表淡水通量主导。热带北印度洋表层盐度变化最显著的海域是阿拉伯海东南部和孟加拉湾南部^[11]。阿拉伯海东南海域冬季表层盐度降低以及

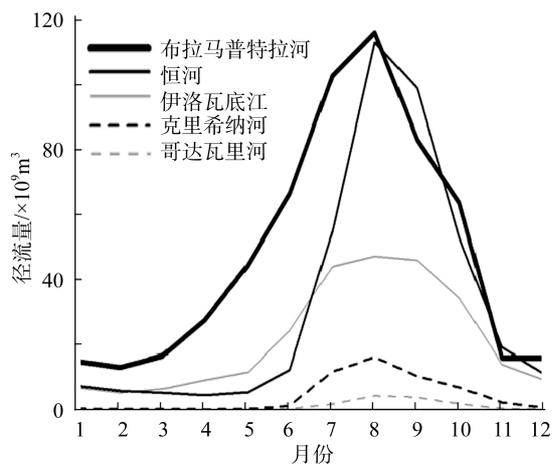


图 4 孟加拉湾主要河流径流量的气候态逐月变化

Fig. 4 Monthly mean runoffs of major rivers emptying into the Bay of Bengal

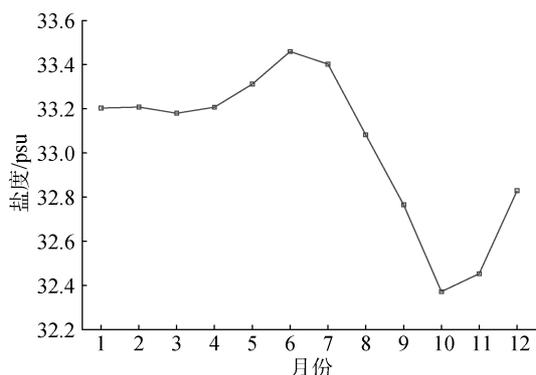


图 5 孟加拉湾海域(77°~98°E, 0~23°N)SSS 逐月变化

Fig. 5 Monthly mean SSS in the Bay of Bengal (77°~98°E, 0~23°N)

孟加拉湾南部海域夏季表层盐度升高体现了北印度洋东、西两个海盆之间水体交换的季节特性。张玉红^[11]的研究结果显示, 热带印度洋中部东、西水交换存在两个相互独立的过程, 即赤道过程(2°S-2°N)和北印度洋过程(4°~6°N)。其中北印度洋过程主要受季风影响, 11月~次年3月表现出很强的低盐水向西输送, 5~9月则为高盐水向东输送, 冬季风期间的输送较强, 年平均有低盐水向西输送。

3 结论

本文采用 3a 的 Aquarius 卫星遥感数据分析了孟加拉湾及其邻近海域的表层海水盐度的逐月及季节分布特征, 在空间上, 孟加拉湾表层盐度的分布在各季节皆呈现出由湾顶向湾口递增的趋势。

本文进一步探讨了孟加拉湾海域海表盐度变化在不同时段的主要影响因素。由于孟加拉湾南口完

全向印度洋敞开, 季风环流对其盐度影响显著, 具体表现为: 夏季风期间, 西南季风海流从阿拉伯海流向孟加拉湾, 造成孟加拉湾夏季盐度的升高。而径流的影响主要体现在湾北部沿岸海域。

由于盐度遥感在空间范围和时间尺度上的优势, 卫星遥感获得的表层盐度数据将在海洋的水循环特征、热力结构变化等研究方面发挥重要作用, 同时, 进一步提高盐度反演精度也将是卫星海表盐度遥感的重要课题之一。

参考文献:

- [1] Schmitt R W. Double diffusion in oceanography[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1994, 26: 255-285.
- [2] Webster P J. The role of hydrological processes in ocean-atmosphere interactions[J]. Reviews of Geophysics, 1994, 32(4): 427-476.
- [3] Dinnat E, LeVine D M. Impact of sunglint on salinity remote sensing: An example with the Aquarius radiometer[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10): 3137-3150.
- [4] Lagerloef G, Colomb F R, LeVine D M, et al. The Aquarius/SAC-D mission: Designed to meet the salinity remote sensing challenge[J]. Oceanography, 2008, 21(1): 68-81.
- [5] 罗邵华, 金祖辉, 陈烈庭. 印度洋和南海海温与长江中下游夏季降水的相关分析[J]. 大气科学, 1985, 9(3): 314-320.
- [6] 晏红明, 肖子牛, 王灵. 孟加拉湾季风活动与云南 5 月降雨量[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 624-630.
- [7] 鲁亚斌, 解明恩, 谢三勇. 孟加拉湾水汽输送异常对云南 5 月降水的影响[J]. 云南地理环境研究, 2004, 16(1): 19-24.
- [8] 邱云, 李立. 孟加拉湾上层环流研究综述[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 593-603.
- [9] 邱云. 孟加拉湾上层环流及其变异研究[D]. 厦门大学, 2007.
- [10] Pankajakshan T V, Gopalakrishna P M, Muraleedharan G V, et al. Surface layer temperature inversion in the Bay of Bengal[J]. Deep Sea Research I, 2002, 49: 1801-1818.
- [11] 张玉红, 热带北印度洋和赤道海区东西水交换及其年变化[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2010.

Analysis of the sea surface salinity in the Bay of Bengal based on Aquarius data

WANG Jing¹, CHU Xiao-qing², SU Nan¹, WANG Juan¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301, China)

Received: Oct., 13, 2014

Key words: the Bay of Bengal; Aquarius/SAC-D; sea surface salinity

Abstract: Sea surface salinity (SSS) is an important physical and chemical parameter because its distribution is connected with the general circulation and water cycle in the world. Based on three years of satellite remote sensing data from Aquarius Mission of American National Aeronautics and Space Administration, the spatial and temporal distributions of the SSS in the Bay of Bengal and its adjacent waters are presented in this paper, and the related factors that influence the characteristics of the SSS are further analyzed. This study has demonstrated the feasibility of revealing the large-scale variability of the SSS using the Aquarius data.

(本文编辑: 李晓燕)