

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyb.20180717.002

覃仙玲, 陈波. 广西沿海赤潮多发区高浓度氮磷营养元素来源探讨[J]. 广西科学院学报, 2018, 34(3): 222-227.

QIN X L, CHEN B. The source of high concentration of nitrogen and phosphorus nutrient in Guangxi high frequency algal bloom areas[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2018, 34(3): 222-227.

广西沿海赤潮多发区高浓度氮磷营养元素来源探讨^{*}

The Source of High Concentration of Nitrogen and Phosphorus Nutrient in Guangxi High Frequency Algal Bloom Areas

覃仙玲, 陈波^{**}

QIN Xianling, CHEN Bo

(广西科学院, 广西近海海洋环境科学重点实验室, 广西南宁 530007)

(Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

摘要:【目的】探讨广西沿海赤潮多发区氮磷营养元素的来源, 分析广西沿海赤潮发生的影响因素, 为预防或减少赤潮灾害发生、保护海洋生态环境提供科学依据。【方法】现场调查以钦州湾海域为研究对象, 测定表层海水的溶解态氮(DN)、溶解态磷(DP)含量并分析其分布特征, 结合历史资料追溯高浓度 DN、DP 来源及污染物输运过程。【结果】钦州湾内高浓度 DN、DP 分布区与入海陆源工业污染排放区不一致, 离工业污染区近的地方 DN、DP 浓度偏低, 而离工业污染区远的地方 DN、DP 浓度反而偏高。【结论】广西主要入海河流各类污染物的增加以及不同的海域通过动力途径输送而来的海水可能是广西沿海赤潮多发区的高浓度氮磷营养元素的主要来源。

关键词: 赤潮 溶解态氮磷 涠洲岛 广西沿海 琼州海峡

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2018)03-0222-06

Abstract:【Objective】In order to investigate the influencing factors of algal blooms in Guangxi coastal, and prevent or reduce the algal bloom disaster and provide a scientific basis for the protection of marine ecological environment the sources of nitrogen and phosphorus nutrition in high frequency algal bloom areas of Guangxi were analyzed.【Methods】The dissolved nitrogen (DN) and dissolved phosphorus (DP) in surface water in Qinzhou Bay were analyzed, and their spatial distribution characteristics were investigated. Combining with historical data, the high sources of DN, DP and the transport process of pollutants were analyzed.【Results】Investigations revealed that the distribution of high concentrations of DN and DP in Qinzhou Bay was not consistent with the pollution discharge area of the industry. The concentration of DN and DP was lower near the industrial polluted area, while it was higher in the water far from the polluted area.

【Conclusion】The increase of pollutants of river inflow and the waters from different sea areas by hydrodynamics may be the main source of high concentration of nitrogen and phosphorus in Guangxi high frequency algal bloom areas.

Key words: algal blooms, dissolved nitrogen and phosphorus, Weizhou Island, Guangxi coast, Qiongzhou Strait

收稿日期: 2018-04-30

作者简介: 覃仙玲(1989—), 女, 助理研究员, 主要从事海洋微生物生理生态学研究。

* 广西科学院基本科研业务费资助项目(15YJ22HY07), 广西重点研发计划项目(桂科 AB16380282)和国家自然科学基金项目(41576024)资助。

** 通信作者: 陈波(1953—), 男, 研究员, 主要从事海洋动力学研究, E-mail: cbgkxy@163.com。

0 引言

【研究意义】近年来,随着沿海工业及养殖业的发展,广西沿海附近水域海水质量有下降趋势,水体的富营养化程度增加,几乎每年都有赤潮现象发生,而且呈现次数增多、规模变大、危害性增加、时间变长等特点。此外,广西沿海赤潮发生具有与其他海域不同的特点:广西沿海赤潮多发区域具有远离陆地和远离工业污染区的特点,有别于人们对赤潮发生机制的普遍认识,比如远离陆地的涠洲岛是赤潮的多发区域。赤潮发生与水体富营养化密切相关,而氮、磷是浮游植物生长的基本营养物质^[1],探究赤潮多发区的氮磷营养元素分布特征及其来源对分析该海域赤潮的发生原因具有重要意义。**【前人研究进展】**目前,对广西沿海赤潮发生研究最多的主要集中在赤潮生理生态学与理化因子的调查^[2-6],很少涉及到赤潮发生与高浓度氮、磷水体形成机制的问题,对赤潮发生缺少综合、深入的研究。**【本研究切入点】**近年来,随着沿海工业及养殖业的发展,广西沿岸附近水域海水质量有下降趋势,赤潮频发。据统计,1995—2011年广西沿海赤潮发生12次(图1)。其中,钦州湾和廉州湾累计发生5次,而涠洲岛赤潮发生次数高达7次,涠洲岛赤潮次数占广西近海赤潮总数58.3%^[7]。氮磷营养元素是赤潮发生的物质基础,钦州湾和廉州湾赤潮发生可能与近岸工业污水的排放、海水受到污染有关。但涠洲岛离最近的广西北海岸线距离有37 km,且岛上无工业设施,其赤潮高发原因可能与水体中氮磷营养元素的来源有关。**【拟解决的关键问题】**通过现场调查数据并结合历史资料分析,追溯广西沿海赤潮多发区高浓度氮、

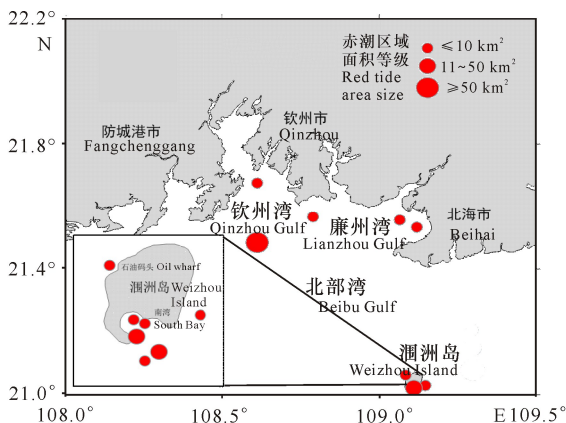


图1 1995—2011年北部湾北部发生赤潮海域及其面积(仿自侍茂崇^[7])

Fig. 1 Red tides area in the northern Beibu Gulf in 1995—2011(modified from SHI^[7])

磷元素来源及污染物输运途径,探寻赤潮产生的主要原因,在对赤潮生态环境调查基础上及时对赤潮发生灾害做出预警并提出有效的控制对策,为预防或减少赤潮灾害发生、保护海洋生态环境提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样站位与样品采集

2015年9月至2016年1月,在防城港核电站取水口海域连续发生长达约4个月棕囊藻赤潮。赤潮的暴发严重威胁核电站循环水系统的安全运行。

分别于2015年11月30日和12月10日在防城港核电站邻近海域(图2)采样进行溶解态氮(DN)、溶解态磷(DP)的分析,每次采集8个站位(1—8号)的表层水样(0.5 m),其中1—5号站位代表钦州湾西岸海域,6—8号站位代表东岸海域。水样采集后置于冰箱中冷冻保存,到达实验室后立即进行处理、测定。

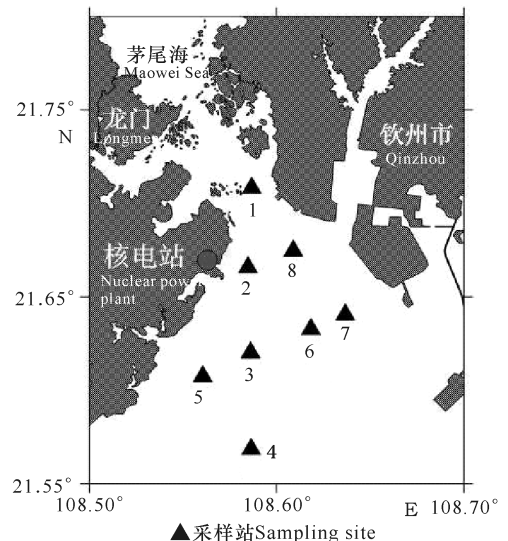


图2 防城港核电站临近海域采样站位置

Fig. 2 The study area and sampling sites in the water around Guangxi Nuclear Power Plant

1.2 测定方法

水样先经 $0.45\ \mu\text{m}$ 的滤膜过滤后,滤液采用碱性过硫酸钾在高压灭菌锅中进行消解(121°C , 1.5 h),之后按照《海洋调查规范》(GB 17378.4—2007)中硝酸盐及磷酸盐的测定方法完成检测,即得DN、DP的数据。

2 结果与分析

2015年11月30日和12月10日在对防城港核电站取水口及其邻近海域调查中测得DN的平均

值分别为 $24.77 \mu\text{mol/L}$ 和 $19.36 \mu\text{mol/L}$, DP 的平均值分别为 $0.45 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.39 \mu\text{mol/L}$ 。西岸(防城港市近岸)海域的 DN 和 DP 均要高于东岸附近海域(图 3),尤其是在核电站取水口附近的 2 号站位具有最高值。11 月份调查中,西岸海域的 1-5 号站位的 DN、DP 平均值分别为 $26.91 \mu\text{mol/L}$ 和

$0.49 \mu\text{mol/L}$,而在靠近东岸 6-8 号站位的 DN、DP 平均值分别为 $21.19 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.38 \mu\text{mol/L}$; 12 月 1-5 号站位的 DN、DP 平均值分别为 $19.36 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.43 \mu\text{mol/L}$,6-8 号站位的 DN 与 DP 平均值分别为 $16.07 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.33 \mu\text{mol/L}$ 。

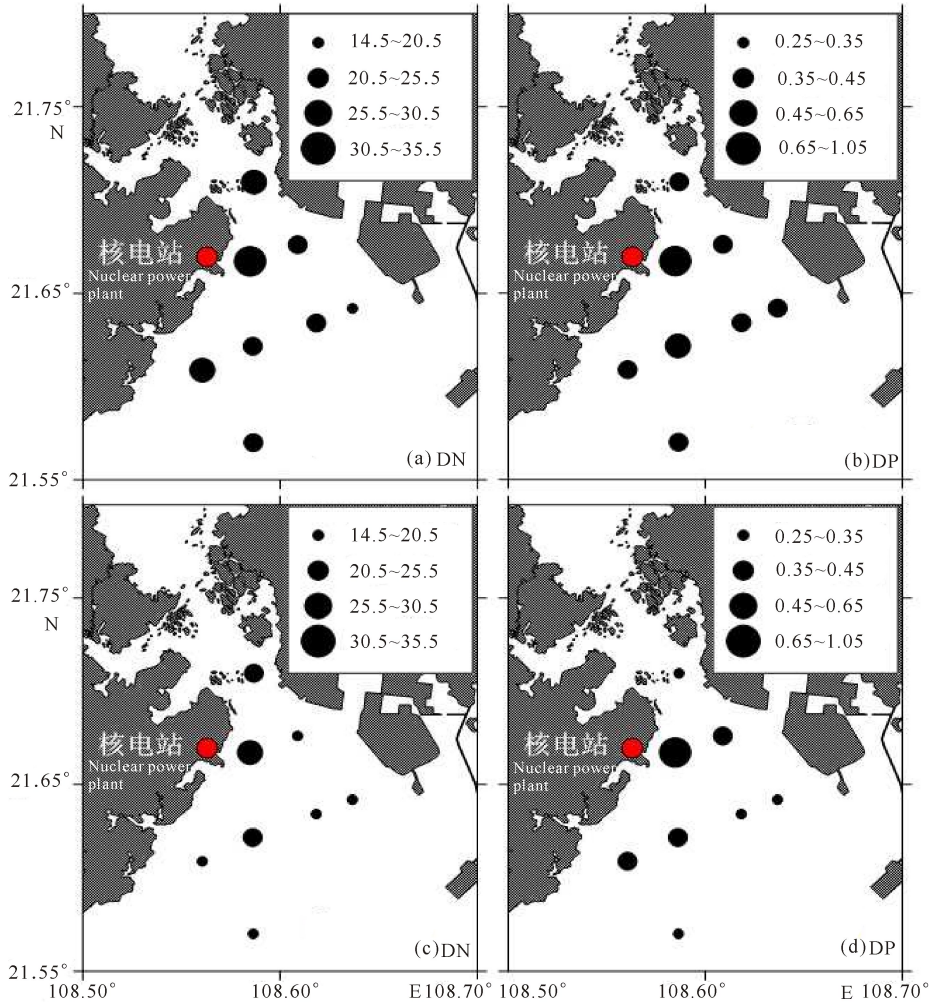


图 3 广西核电站邻近海域 2015 年 11 月份(a,b)和 12 月份(c,d)溶解态氮、磷元素分布图($\mu\text{mol/L}$)

Fig. 3 The distribution of dissolved nitrogen(DN) and phosphorus (DP) in the water around Guangxi Nuclear Power Plant in November(a,b) and December(c,d) 2015 ($\mu\text{mol/L}$)

3 讨论

3.1 广西赤潮多发区高浓度溶解态氮、磷的分布特征

赤潮作为一种自然现象,其发生受到多种因素的影响,如人类活动、水文条件和大尺度的气候变化等。人类活动造成近岸水体污染导致氮、磷含量增加是暴发赤潮的重要因素^[8]。此外,海洋温度上升等大尺度的气候变化也对赤潮的发生产生一定的影响^[9-10]。据文献报道,由风或降雨带来的含铁的沙尘的输入,被认为是某些铁限制区赤潮暴发的主要

原因^[11]。当前研究普遍认为,赤潮生物的存在和水体的富营养化是形成赤潮的基础因素。

在 2015 年发生球形棕囊藻赤潮的核电厂取水口及邻近海域的调查中发现, DN 与 DP 的高值区主要集中在钦州湾西岸海域,而不是东岸的工业污染区。两次监测中, DN、DP 高值区的位置一直基本保持不变,显然这一现象不能仅用西面陆源污染输入多而东面陆源污染输入少来解释。因为最近几年,钦州湾东岸布有石化、炼油、冶金、机械制造等产业项目,而西岸(核电站附近)没有任何的工业设施和污染项目,球形棕囊藻赤潮发生于核电厂试运行还

不到一个月的时间,所以可推测该海域的高浓度氮磷营养可能由别的海域输送而来。

对于赤潮频发的涠洲岛海域,吴敏兰^[12]于2011年4月和8月对北部湾北部海域进行了两个航次的调查,发现该海域的氮含量属于二类水质,磷含量时有超标现象。氮和磷的高浓度都分布在涠洲岛东南部,其中,夏季 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 以及春季活性磷酸盐(SRP)、溶解态磷(DP)、总磷(TP)的高值区位于琼州海峡入口处,高出广西沿岸海域数倍。广西沿海赤潮高发区远离工业污染区以及远离陆地的特点可能与海水中氮磷分布有关,对于赤潮高发区氮磷的来源进行了以下的探讨。

3.2 广西主要入海流域各类污染物入海量增加是高浓度氮磷的主要来源之一

广西沿海海洋环境质量状况向来保持良好。广西海洋环境监测中心站监测数据显示^[13]，“十五”期间,广西近岸海域一、二类海水水质比例达86.4%,环境功能区水质达标率为90.9%。然而,随着近年来海洋开发速度加快,临海工业项目的增多,近岸海域环境污染程度明显加强。2001年近岸海域的化学需氧量、活性磷酸盐、铜的污染指数分别为0.36,0.18,0.08,到了2012年三者污染指数分别上升至0.40,0.26和0.11,虽然还保持在相对较低含量水平,但却具有了显著性的上升趋势;水体富营养化指标由2001年的0.17上升到2012年的1.09,富营养化水平也由贫营养型向轻度富营养转变。在一些重要的河口、港湾及沿岸,出现水质环境质量下降、生态系统退化、水质异常等现象。

水质环境质量下降及异常现象主要原因是入海河口海水水质超标和海水养殖污染等。入海河流水质对海水水质具有较大影响,如茅尾海海域有钦江、茅岭江注入,廉州湾海域有南流江、大风江注入,这两个海域COD、氮、磷浓度相比高于其它海域,特别是茅尾海海域,无机氮普遍超标。2012年,在对广西9条入海河流的水质监测中发现,入海河流携带的入海污染物,如高锰酸盐、总氮、总磷、石油类、重金属等均比以往年份明显增加。除茅岭江入海河口水质多年来基本能达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)Ⅲ类标准外,其余监测断面的水质均不同程度出现超标,甚至有五类、劣五类水质情况出现,超标因子主要有氨氮、总磷、COD等。入海流域各类污染物入海量不断增加造成入海河口海水水质超标现象严重;其次是海水养殖污染;2012年,排入广西海域的污染物总量为98 330 t,其中河流携带

入海的污染物量最多,占入海污染物总量82.2%,而海水养殖污染物入海量占入海污染物总量12.1%。此外,还有临海工业污染、船舶污染等。

3.3 琼州海峡水体西向运输带来高浓度氮、磷营养元素

广西沿海赤潮灾害的研究工作起步较晚,主要集中在近10年间,目前尚缺乏关于赤潮形成的海洋动力机制的研究。关于北部湾的环流研究,早在1964年的《中越合作北部湾海洋综合调查报告》指出:在冬季强劲的东北季风驱动下,在湾内形成一个逆时针的环流;夏季由于西南季风占主导地位,湾内形成顺时针环流,海水由北部湾通过琼州海峡向东进入南海。后来也有诸多的研究成果^[14-16],这些成果在夏季的环流形式和琼州海峡的输运方向问题上存在争议。一种观点认为琼州海峡水交换在西南风作用下,从西向东运输;而另一种观点则和上述相反。杨仕瑛等^[17]发现夏季涠洲岛附近的盐度变化特征与琼州海峡中部和琼州海域的盐度变化特征相一致,证实了夏季粤西沿岸海水通过琼州海峡进入北部湾。陈达森等^[18]和陈波等^[19]通过多年的琼州海峡海流实测资料研究潮余流场的季节性变化特征,结果表明该水域全年余流方向总趋势是由东向西的,从水交换状况上看,水体也呈现向西运输的趋势。除了观测研究外,也有很多学者利用数值模型对北部湾的环流进行了分析。袁叔尧和邓九仔^[20]、孙洪亮等^[21]、夏华永等^[16]对北部湾的风生环流和密度环流进行了模拟,研究结果表明北部湾环流终年为逆时针,夏季琼州海峡水体主要是西向输运。高劲松等^[22-23]和侍茂崇^[24]通过POM模式在南海西北部建立三维后报模型,充分考虑日平均的风场、热通量以及6个分潮之后,数值模拟结果表明:北部湾东北部环流则受局地风场和琼州海峡流的共同作用。广西沿岸流除受到港湾地形局部影响外,沿岸流常年也以向西为主^[25-30]。综上所述,广西沿海赤潮高发区高浓度的氮磷营养元素可能是由琼州海峡东部南海水西向输送而来。

4 结论

广西沿海赤潮发生与高浓度氮、磷水体的来源有密切关系,钦州湾内DN、DP分布特征为在离工业污染区近的海域DN、DP浓度偏低,而离工业污染区远的西岸海域DN、DP浓度反而偏高。广西沿海入海污染物入海量及工业污染排放量的增多,可能会产生较高浓度的氮、磷营养元素分布区,这些海

域与涠洲岛附近的高浓度氮磷营养元素可能是通过动力途径从不同的海面西向输送而来。赤潮作为一种海洋生态灾害对近海环境和生物资源、人类健康和生命安全及沿海经济发展构成了严重威胁,是国际社会共同关注的生态灾害和重大海洋环境问题之一。广西对赤潮灾害形成机制的研究仍为空白,更缺乏行之有效的治理技术和减灾方法。深入开展赤潮形成机制的研究,探究广西近岸高浓度氮、磷水体的形成机制与赤潮发生的关系,有助于防止或减少广西海域生态环境的影响和社会经济的损失,以及为广西北部湾经济区社会经济的可持续发展提供更好的保障。

参考文献:

- [1] 桓清柳,庞仁松,周秋伶,等. 深圳近岸海域氮、磷营养盐变化趋势及其与赤潮发生的关系[J]. 海洋环境科学,2016,35(6):908-914.
HUAN Q L, PANG R S, ZHOU Q L, et al. Variation trends of nitrogen and phosphorus and the relationship with HABs in Shenzhen coastal waters[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(6): 908-914.
- [2] 韦蔓新,赖廷和,何本茂. 涠洲岛水域生物理化环境特征及其相互关系[J]. 海洋科学,2003,27(2):67-71.
WEI M X, LAI T H, HE B M. The biological and physical and chemical characteristics of environment and their mutual relationships in the waters of Weizhou Island[J]. Marine sciences, 2003, 27(2): 67-71.
- [3] 韦蔓新,何本茂,赖廷和. 廉州湾赤潮形成期间 pH 值和溶解氧的时空分布及其与环境因素的关系[J]. 广西科学,2004,11(3):221-224.
WEI M X, HE B M, LAI T H. The temporal and spatial distribution of pH value and DO and their relation with the environmental factors during the formation of the algal bloom in Lianzhou Bay[J]. Guangxi Sciences, 2004, 11(3): 221-224.
- [4] 邱绍芳,赖廷和,庄军莲. 涠洲岛南湾港海域发生铜绿微囊藻赤潮实例分析[J]. 广西科学,2005,12(4):330-333.
QIU S F, LAI T H, ZHUANG J L. A case analysis of the *Microcystis aeruginosa* red tide occurring in the sea field of Nanwan Harbor, Weizhou Island[J]. Guangxi Sciences, 2005, 12(4): 330-333.
- [5] 刘国强,史海燕,魏春雷,等. 广西涠洲岛海域浮游植物和赤潮生物种类组成的初步研究[J]. 海洋通报,2008,27(3):43-48.
LIU G Q, SHI H Y, WEI C L, et al. Preliminary studies on phytoplankton and red tide organism composition in the coastal water of the Weizhou Island, Guangxi[J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(3): 43-48.
- [6] 李小敏,张敬怀,刘国强. 涠洲岛附近海域一次红海束毛藻赤潮生消过程分析[J]. 广西科学,2009,16(2):188-192.
- LI X M, ZHANG J H, LIU G Q. Studies of a *Trichodesmium erythraeum* red tide in sea area near Weizhou Island Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2009, 16(2): 188-192.
- [7] 侍茂崇,陈波. 涠洲岛东南部海域高浓度氮和磷的来源分析[J]. 广西科学,2015,22(3):237-244.
SHI M C, CHEN B. Tracking the source of high concentration nitrogen and phosphorus water in the south-east of Weizhou Island[J]. Guangxi Sciences, 2015, 22(3): 237-244.
- [8] LAM C W Y, HO K C. Red tides in Tolo Harbor, Hong Kong[C]//In Red tides: Biology, environmental science and toxicology. Okaichi T, Anderson D M, Nemoto T (eds). New York, Amsterdam, London: Elsevier, 1989: 49-52.
- [9] SELLNER K G, DOUCETTE G J, KIRKPATRICK G J, et al. Harmful algal blooms: Causes, impacts and detection[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2003, 30: 383-406.
- [10] FRANCES M, VAN D. Marine algal toxins: Origins, health effects, and their increased occurrence[J]. Environmental Health Perspectives, 2000, 108 (Supplement 1): 133-141.
- [11] WALSH J J, JOLLIFF J K, DARROW B P, et al. Red tides in the Gulf of Mexico: Where, when, and why? [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (C11003): 1-46.
- [12] 吴敏兰. 北部湾北部海域营养盐的分布特征及其对生态系统的影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
WU M L. The distribution feature of nutrients and the study of their influence on ecosystem in the northern Beibu Gulf [D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
- [13] 广西近岸海域水环境质量变化及保护对策研究报告[R]. 南宁: 广西海洋环境监测中心站, 2013.
The research report water of the change of environment quality and protection countermeasures in Guangxi inshore sea area [R]. Nanning: Guangxi Marine Environment Monitoring Center, 2013.
- [14] 钟欢良. 北部湾北部春季环流分析[J]. 海洋通报, 1995, 14(1): 81-85.
ZHONG H L. Analysis of circulations in northern part of Beibu Gulf of south China sea in spring[J]. Marine Science Bulletin, 1995, 14(1): 81-85.
- [15] 孙洪亮, 黄卫民, 赵俊生. 北部湾潮致、风生和热盐余流的三维数值计算[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(5): 561-568.
SUN H L, HUANG W M, ZHAO J S. Three-dimensional numerical simulation of tide-induced, wind driven and thermohaline residual currents in the Beibu Bay[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2001, 32(5): 561-568.
- [16] 夏华永, 李树华, 侍茂崇. 北部湾三维风生流及密度流模拟[J]. 海洋学报, 2001, 23(6): 11-23.

- XIA H Y, LI S H, SHI M C. A 3-D numerical simulation of wind-driven currents in the Beibu Gulf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(6):11-23.
- [17] 杨仕瑛, 陈波, 李培良. 用温盐资料研究夏季南海水通过琼州海峡进入北部湾的特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2006, (1):1-7.
- YANG S Y, CHEN B, LI P L. A study of the characteristics of water transport from the south China sea into Beibu Bay via the Qiongzhou Strain in summer in terms of temperature and salinity data[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006, (1):1-7.
- [18] 陈达森, 陈波, 严金辉, 等. 琼州海峡余流场季节性变化特征[J]. *海洋湖沼通报*, 2006(2):12-17.
- CHEN D S, CHEN B, YAN J H, et al. The seasonal variaton characteristics of residual currents in the Qiongzhou Strait[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(2):12-17.
- [19] 陈波, 严金辉, 王道儒, 等. 琼州海峡冬季水量输运计算[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(3):357-364.
- CHEN B, YAN J H, WANG D R, et al. The transport volume of water through the Qiongzhou Strait in the winter season[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2007, 37(3):357-364.
- [20] 袁叔尧, 邓九仔. 南海北部内孤立波数学模型[J]. *热带海洋*, 1999, 18(3):16-23.
- YUAN S Y, DENG J Z. Mathematical model of internal solitary waves in northern South China Sea[J]. *Tropic Oceanology*, 1999, 18(3):16-23.
- [21] 孙洪亮, 黄卫民. 北部湾潮汐潮流的三维数值模拟[J]. *海洋学报*, 2001, 23(2):1-8.
- SUN H L, HUANG W M. Three-dimensional numerical simulation for tide and tidal current in the Beibu Guf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(2):1-8.
- [22] 高劲松, 陈波. 北部湾冬半年环流特征及驱动机制分析[J]. *广西科学*, 2014, 21(1):64-72.
- GAO J S, CHEN B. Analysis on characteristics and formation mechanism of the winter boreal circulation in the Beibu Gulf[J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(1):64-72.
- [23] 高劲松, 陈波, 何小英, 等. 海南岛西岸上升流与暖池的数值研究[J]. *广西科学*, 2014, 21(4):331-337.
- GAO J S, CHEN B, HE X Y, et al. Numerical study on the upwelling and warm pool off the western coast of Hainan Island[J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(4):331-337.
- [24] 侍茂崇. 北部湾环流研究述评[J]. *广西科学*, 2014, 21(4):313-324.
- SHI M C. Study comments on circulation in Beibu Gulf[J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(4):313-324.
- [25] 陈波, 邱绍芳, 葛文标, 等. 广西沿岸主要海湾潮流的数值计算[J]. *广西科学*, 2001, 8(4):295-300.
- CHEN B, QIU S F, GE W B, et al. Numerical calculation about the tidal currents in the main bays of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 2001, 8(4):295-300.
- [26] 陈波, 邱绍芳, 葛文标. 广西沿岸主要海湾余流场的数值模拟[J]. *广西科学*, 2001, 8(3):227-231.
- CHEN B, QIU S F, GE W B. Numerical simulation of residual current field of key bays along the coast of Guangxi[J]. *Guangxi Sciences*, 2001, 8(3):227-231.
- [27] 陈波, 侍茂崇, 邱绍芳. 广西主要港湾余流特征及其对物质运输的影响[J]. *海洋湖沼通报*, 2003, 1:13-21.
- CHEN B, SHI M C, QIU S F. Characteristics of residual currents and their influence on the material transportation in five main bays of Guangxi coast[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2003, 1:13-21.
- [28] 陈波, 李培良, 侍茂崇, 等. 北部湾潮致余流和风生海流的数值计算与实测资料分析[J]. *广西科学*, 2009, 16(3):346-352.
- CHEN B, LI P L, SHI M C, et al. Numerical computation and analysis of observational data of tide-induced residual currents and wind-driven currents in Beibu Bay[J]. *Guangxi Sciences*, 2009, 16(3):346-352.
- [29] 鲍献文, 陈波, 侍茂崇, 等. 钦州湾三维潮流数值模拟[J]. *广西科学*, 2004, 11(4):375-384.
- BAO X W, CHEN B, SHI M C, et al. The numerical value simulation of the three dimensional tide of the Qinzhou Bay[J]. *Guangxi Sciences*, 2004, 11(4):375-384.
- [30] 陈波, 侍茂崇, 郭佩芳, 等. 北部湾北部潮流谱分析和余流特征研究[J]. *广西科学*, 2014, 21(1):54-63.
- CHEN B, SHI M C, GUO P F, et al. Analysis of tidal current spectrum and study of residual current in northern Beibu Gulf[J]. *Guangxi Sciences*, 2014, 21(1):54-63.

(责任编辑:符支宏)