

涠洲岛东南部海域高浓度氮和磷的来源分析*

Tracking the Source of High Concentration Nitrogen and Phosphorus Water in the Southeast of Weizhou Island

侍茂崇¹, 陈波²

SHI Mao-chong¹, CHEN Bo²

(1. 中国海洋大学, 山东青岛 266003; 2. 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)

(1. Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266003, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Coastal Marine Environmental Science, Guangxi Academy of Sciences, Nanning, Guangxi, 530007, China)

摘要: 远离陆地的涠洲岛, 是广西近海发生赤潮次数最多的海域。据现有调查资料显示, 该海域氮含量属于二类水质, 磷含量也时有超标, 琼州海峡显然是其东南部大量氮磷物质的重要输送通道。本文通过分析多年的漂流瓶漂流路径图, 然后结合数值计算结果, 得出结论: 琼州海峡西行水, 主要来自珠江口和粤西沿岸, 该地区的污染物质, 包括氮磷等营养要素, 可能是涠洲岛附近高浓度氮磷的主要来源。

关键词: 涠洲岛 琼州海峡 氮磷物质 珠江口

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)03-0237-08

Abstract: Weizhou Island is far from mainland, however, the occurrence of red tides is the most in Guangxi offshore. Survey data showed that the water grade was the second according to the content of nitrogen, while the content of phosphorus was frequently excessive. There were high concentration nitrogen and phosphorus water sources in the southeast of Weizhou Island. Apparently, Qiongzhou Strait was an important delivery channel. This paper analyzed the trajectories of long term drift bottles and then calculated the numerical results. It concluded that the water mass of westward current in Qiongzhou Strait came mainly from the Pearl River Estuary and the western coast of Guangdong Province, which may be the source of high concentration nitrogen and phosphorus water in the Weizhou Island.

Key words: Weizhou Island, Qiongzhou Strait, nitrogen and phosphorus substances, Pearl River Estuary

0 引言

北部湾位于南海西北部, 介于 17°~21.5°N 和 105.6°~110°E, 北临广西壮族自治区, 东靠广东省雷州半岛和海南岛, 西靠越南民主共和国; 南与南海

相通, 以海南岛莺歌嘴与越南来角之间的连线为界; 湾内平均深度约为 50 m, 最大水深不超过 100 m。北部湾地处亚热带, 季风特征明显, 冬半年盛行东北季风, 风力较强而稳定, 夏半年盛行西南季风。涠洲岛位于北部湾东北部, 北海市正南方约 37 km 处, 总面积 24.74 km², 是广西离岸的最大岛屿。

赤潮是指海洋水体中某些微小的浮游植物、原生动物或细菌, 在一定的环境条件下突发性增殖和聚集, 引发一定范围和一段时间内水体变色现象。赤潮的危害很大, 主要体现在以下 3 个方面^[1,2]: 第一, 赤潮对海洋生态平衡的破坏。赤潮发生初期, 水体出现

收稿日期: 2015-05-10

作者简介: 侍茂崇(1937-), 男, 教授, 主要从事海洋环境研究。

* 广西自然科学基金项目(2012GXNSFEA053001)和广西科学研究与技术开发计划项目(1355007-13)资助。

高叶绿素、高溶解氧、高化学耗氧量,引起周围海洋环境因素剧烈改变,破坏了水体的生态平衡。第二,赤潮对海洋渔业和水产资源的破坏。赤潮发生初期,藻类生物大量繁殖,引起经济藻类变色或腐烂,其分泌出的粘液,黏附于鱼类鳃部妨碍其呼吸,引起鱼类缺氧死亡。赤潮发生后期,藻类大量死亡后,有些赤潮生物体内还会释放大量有害气体和毒素,导致鱼类和其他海洋生物中毒死亡。第三,赤潮对人类健康的危害。有些赤潮生物的生物性毒素富集在鱼虾贝类中,如果人类不慎摄食,轻则中毒,严重可导致死亡。

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(图1),1995~2011年发生赤潮12次,钦州湾和廉州湾累计发生5次;涠洲岛赤潮发生7次,占广西近海赤潮总数的58.3%。钦州湾和廉州湾赤潮发生可能是因为近岸工业污水的排放。而涠洲岛离最近的广西北海岸线有37 km,岛上没有任何工业设施,周围水域向来以“干净水质”自诩,但现已成为赤潮高发区。

本文试图通过分析多年的漂流瓶漂流路径图,并结合数值计算结果,分析涠洲岛东南部高浓度氮和磷的来源。

1 涠洲岛赤潮发生与高含量氮、磷物质的关系

赤潮形成的原因十分复杂,不同海域、不同季节、不同环境等都会影响赤潮的生成。但是,学术界普遍认为,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。赤潮生物利用氮、磷等营养元素大量繁殖和积聚,在合适的水文、气象条件下,就会引发赤潮。

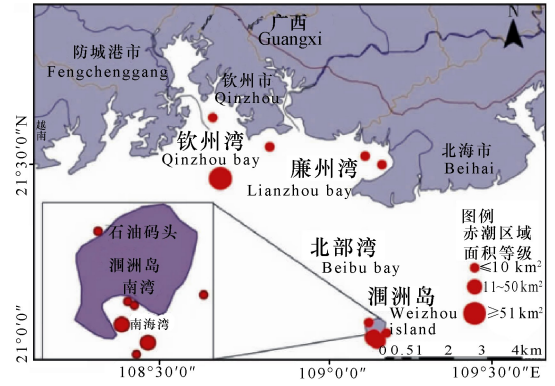


图1 北部湾北部发生赤潮海域及其面积

Fig. 1 Red tides area in the northern Beibu Gulf
吴敏兰^[3]于2011年4月和8月,在北部湾北部海域进行了2个航次的调查,测定了各种水文、化学和生物要素,发现涠洲岛东南部水体中氮、磷等营养元素的含量最高(图2)。

从图2可以看出,北部湾北部 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的平均含量分别为 $0.54 \mu\text{mol/L}$ 、 $6.25 \mu\text{mol/L}$ 和 $1.14 \mu\text{mol/L}$ ($\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的高值区分别位于琼州海峡入口处),与广西沿岸相比,分别高出4倍,6倍,5倍。

同样,文献^[3]的测定结果表明,磷的含量也是涠洲岛东南部海域最高(图3)。

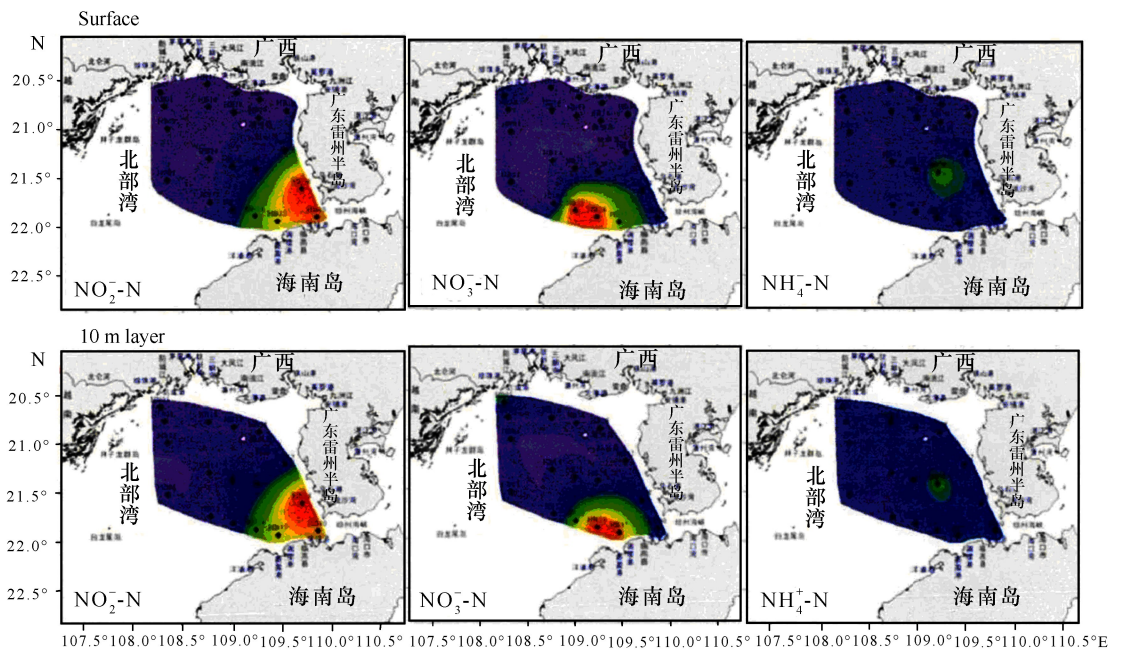


图2 北部湾北部夏季 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平面分布^[3]

Fig. 2 The horizontal distribution of $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in the north of Beibu Gulf in summer

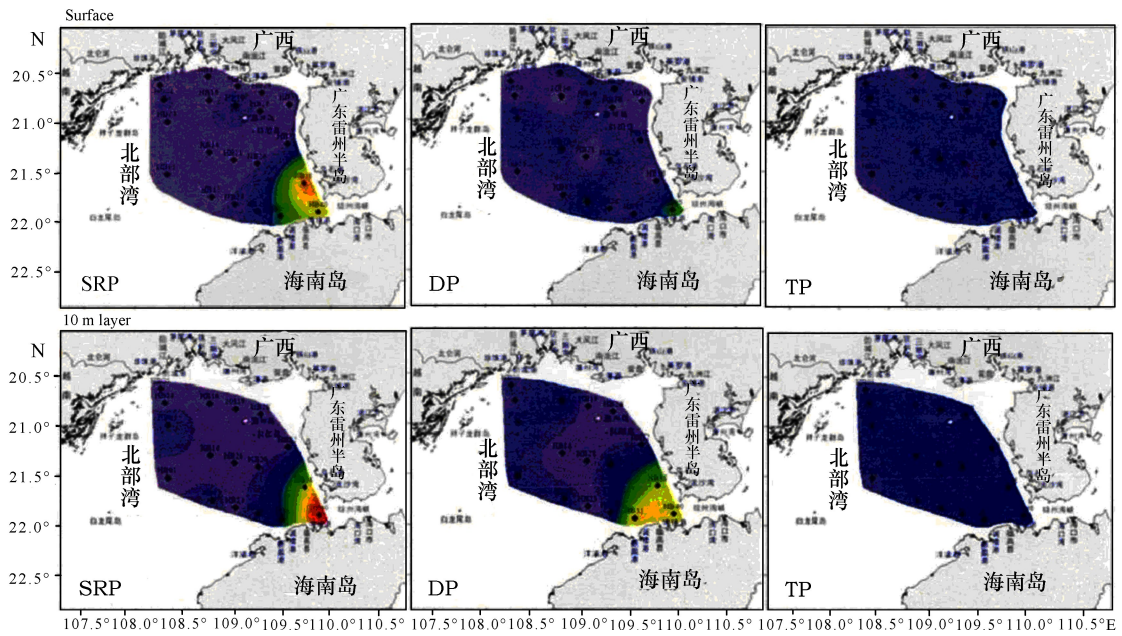


图3 北部湾北部海域春季SRP、DP、TP的平面分布^[3]

Fig. 3 The horizontal distribution of SRP, DP and TP in the northern Beibu Gulf in spring

由图3可以看出,活性磷酸盐(SRP)、溶解态磷(DP)、总磷(TP)的平均含量分别为 $0.061 \mu\text{mol/L}$ 、 $0.263 \mu\text{mol/L}$ 和 $0.840 \mu\text{mol/L}$ 。含量的高值区均在琼州海峡入口处。琼州海峡处SRP、DP、TP分别高于广西沿岸6倍,4倍,2倍。

根据张少峰等^[4]的研究,涠洲岛赤潮基本都发生在4~7月,即雨季来临之前。这时气温、海水温度增加,海平面气压、相对湿度下降,风速减弱容易诱发赤潮,说明海洋水文气象要素条件是赤潮发生的重要启动因子。图3结果也已显示,氮磷的高值区来自琼州海峡。然而,琼州海峡两岸可以形成大量的氮磷营养元素并向西输送的工业污染源不多,由此可见,这些营养要素来自更远的水域。对于南海与北部湾之间通过琼州海峡进行水交换,已有很多论述结果^[5~11]。但是,对于琼州海峡东向的南海水来源,则鲜有报道。

2 涠洲岛东南部高浓度氮、磷元素来源分析

2.1 漂流瓶观测结果分析

最早研究南海与北部湾之间水交换的团队是南海海洋研究所水文气象室。他们于1964~1971年进行了8年的抛掷漂流瓶试验,共回收3600多张漂流卡(放在漂流瓶中,捡到者可在卡上写上捡拾时间、地点并寄回)。鉴于漂流瓶在海面漂移轨迹很难被了解,所以依据一个漂流瓶的起讫地点来确定它实际的漂移路线非常困难。但是,当用大量的漂流瓶资料,分析多年同一月份的漂流瓶运动趋势,来大致判断各月份的漂流瓶移动路线,还是有较高的可信度。

2.1.1 冬季(12~2月)

冬季(图4~6),广东沿海及北部湾内漂流瓶大都是西南向漂移。这种漂移反应了东北季风的影响,具体描述如下:

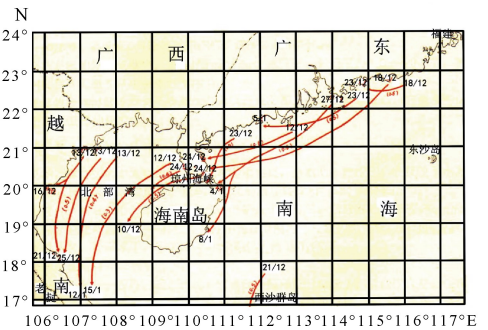


图4 12月漂流瓶轨迹

Fig. 4 The trajectories of drifting bottles in December

轨迹两端数字分别为投放和捡拾日期,分母为月,分子为日,轨迹曲线中带括号内数字为平均漂移速度(节),下同。

Digits in the ends of trajectories are the delivery and picking up date respectively, The denominator is the month and The numerator is the day. Digits in brackets are average drift velocity (unit: knot), the same below.

(1) 汕头至珠江口近岸海域所投放的漂流瓶,均沿着海岸线向西南漂移。其中大多数漂流瓶先后漂移到雷州半岛东岸和琼州海峡南岸,只有少量瓶子漂移到海南岛东部。

(2) 珠江口至雷州半岛水域,均沿着海岸线向西南漂移。其中大多数漂流瓶先后漂移到雷州半岛东岸、琼州海峡及海南岛东部沿岸,只有少量瓶子穿过琼州海峡抵达海南岛西北部沿岸或者抵达越南沿岸。

(3) 琼州海峡中漂流瓶自东向西漂移,西出海峡

后,有的抵达海南岛西北部沿岸或者抵达越南沿岸。海峡中漂移速度为 10~17 cm/s,最大约 20 cm/s。

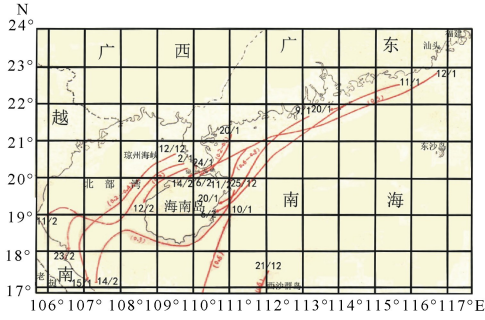


图 5 1月漂流瓶轨迹

Fig. 5 The trajectories of drifting bottles in January

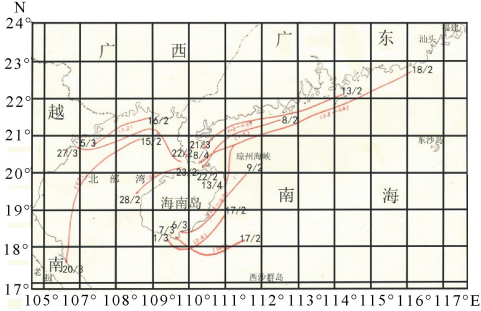


图 6 2月漂流瓶轨迹

Fig. 6 The trajectories of drifting bottles in February

2.1.2 春季(3~5月)

春季(图 7~9)是漂流瓶漂移的转换季节,不仅前后期有所不同,甚至一些海区近岸和外海漂移方向相反,漂移速度也逐渐降低。具体来说:

(1)汕头至珠江口近岸海域所投放的漂流瓶,均沿着海岸线向西南漂移。3,4月漂移速度为 13~17 cm/s;5,6月漂移速度减少到 7 cm/s。外海,5,6月漂移方向转向东北。

(2)珠江口至雷州半岛水域,3月份均沿着海岸线向西南漂移,与冬季相似。其近岸漂移速度为 13~20 cm/s,外海漂移速度降至 7 cm/s。4~6月上半月,在近岸地带(约 56 km),漂流瓶仍以 13~20 cm/s 速度向西南漂移;北部湾北部(20° N 以北),漂流瓶以气旋方式沿着广西、越南沿海运动。涠洲岛附近出现气旋式涡旋。4,5月,甚至出现漂流瓶从海南岛东部绕过海南岛南段再向北,抵达洋浦和涠洲岛的反气旋式绕岛环流。而本区外面漂流瓶则转向东北漂移,漂移速度约 10~16 cm/s。雷州半岛东部出现气旋涡。

(3)琼州海峡中漂流瓶自东向西漂移,漂移速度约 7~13 cm/s。向西出海峡后,有的抵达海南岛西北部沿岸或者抵达越南沿岸。海峡中漂移速度为 10~17 cm/s,最大约 20 cm/s。

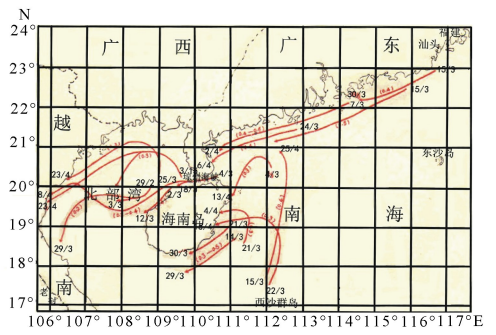


图 7 3月漂流瓶轨迹

Fig. 7 The trajectories of drifting bottles in March

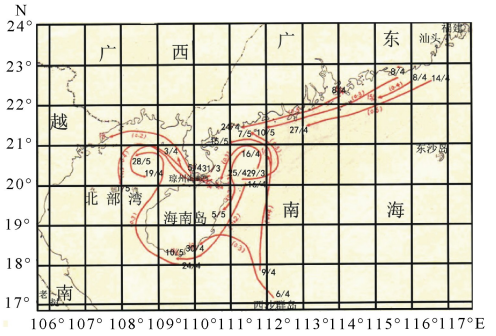


图 8 4月漂流瓶轨迹

Fig. 8 The trajectories of drifting bottles in April

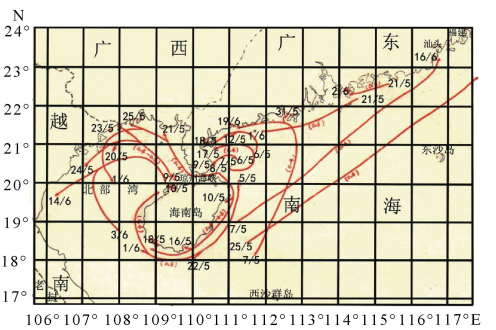


图 9 5月漂流瓶轨迹

Fig. 9 The trajectories of drifting bottles in May

2.1.3 夏季(6~8月)

夏季(图 10~12)是漂流瓶反向漂移的季节,漂移速度也逐渐增强。具体来说:

(1)汕头至珠江口近岸海域所投放的漂流瓶,均沿着海岸线向东北漂移,进入台湾海峡,再至闽浙沿海,漂移速度为 20~23 cm/s。6月中旬,在粤西海陵岛投放的漂流瓶,13 d 后即抵达粤东海门水域,漂移速度达 30 cm/s。

(2)珠江口至雷州半岛水域,有两种情况发生:在粤西近岸水域(不超过 28 km),漂流瓶大多数沿着海岸线向西南漂移,到达雷州半岛东部,还有部分漂流瓶到达琼州海峡的南岸,漂移速度约 10~17 cm/s。当本地区正遇台风,且刮偏北风时,漂移速度大大增加。例如,1966 年 7 月在澳门附近投放的漂流瓶,4 d

内到达粤西电白,漂流速度近 60 cm/s。在近雷州半岛东部,似乎还存在一个较大的气旋涡。而粤西沿岸 28 km 之外,漂流瓶漂流方向与近岸相反,向东北漂移,平均速度 10~17 cm/s。

(3)在琼州海峡中释放的漂流瓶,6 月上半月仍然向西,而在下半月则向东移,可以持续到 8 月上半月。这是一年中仅有的现象,其平均速度为 7~13 cm/s。但是,漂流资料表明,表层漂流并不稳定。这是由于风场改变而引起的,特别是台风等大型天气过程的出现,势必破坏了琼州海峡中正常的漂移状态。例如,1966 年 7 月 28 日,在琼州海峡东口外面抛掷的漂流瓶,一直沿海峡向西漂移,8 月 7 日在海峡西口外被捡拾,漂移速度达 13 cm/s。这是由于 8 月 1~3 日,在海南岛崖县登陆的台风影响所致。

(4)北部湾北部漂流瓶漂移路径,呈气旋式漂移,漂移速度为 7~13 cm/s。6 月漂移速度为 13 cm/s,8 月速度降低到 7 cm/s。

(5)在 20°N 以南北部湾内,位于越南沿岸漂流瓶向南漂移,漂移速度为 7~13 cm/s。而海南岛以西海面上漂流瓶则向北或东北漂移,其速度约为 7~13 cm/s。

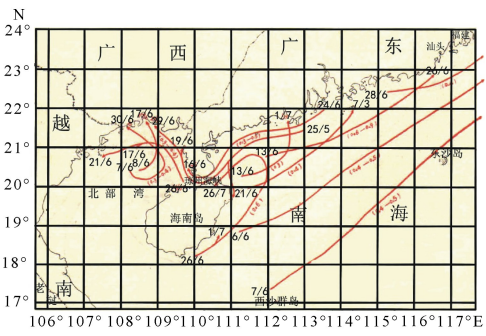


图 10 6 月漂流瓶轨迹

Fig. 10 The trajectories of drifting bottles in June

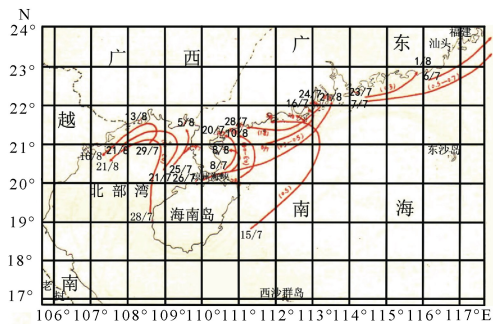


图 11 7 月漂流瓶轨迹

Fig. 11 The trajectories of drifting bottles in July

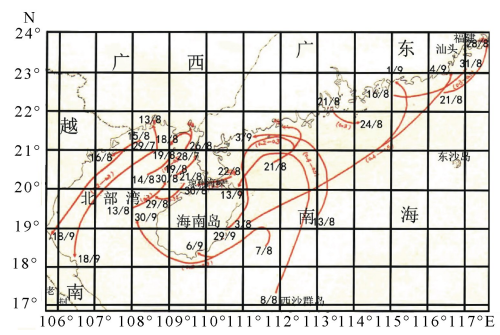


图 12 8 月漂流瓶轨迹

Fig. 12 The trajectories of drifting bottles in August

2.1.4 秋季(9~11月)

自 9 月中旬开始,绝大部分漂流瓶都呈西向漂流态势,只有个别年份中 9 月下旬仍有漂流瓶向东北漂移(图 13~15),具体来讲:

(1)汕头至珠江口近岸海域所投放的漂流瓶,均沿着海岸线向西南漂移,平均漂移速度 13~23 cm/s。

(2)珠江口至雷州半岛水域所投放的漂流瓶,均沿着海岸线向西南漂移,平均漂移速度 13~23 cm/s。

(3)在琼州海峡中投放的漂流瓶,均沿着海峡向西南漂移,平均漂移速度 13~17 cm/s。

(4)北部湾北部漂流瓶漂移路径有几种形式:9 月下半月,漂流瓶以缓慢速度(7 cm/s)向西漂移。10 月份漂流瓶则向西南漂移,其速度为 10~17 cm/s。在越南沿岸,漂流瓶均南下,其速度为 10~20 cm/s。而海南岛西部沿海,漂流瓶则向北漂移,其速度 7~13 cm/s。北部湾湾口中部的漂流瓶则向西移。

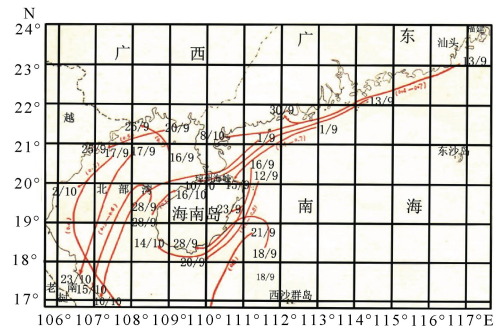


图 13 9 月漂流瓶轨迹

Fig. 13 The trajectories of drifting bottles in September

漂流瓶投放与回收确实可以粗略地描述不同季节表层海流(余流)的漂移方向、流速和大致轨迹。20 世纪 60 年代以前,许多国家在近海都使用类似的漂流物来研究近海海流复杂的漂流轨迹,但是这种方法存在明显的缺陷。

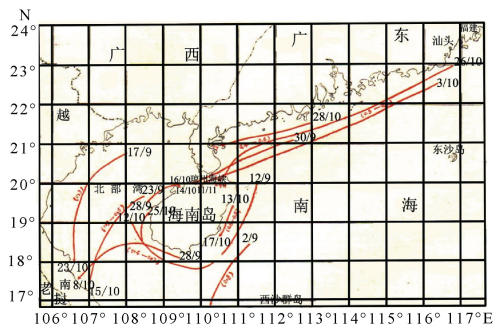


图 14 10月漂流瓶轨迹

Fig. 14 The trajectories of drifting bottles in October

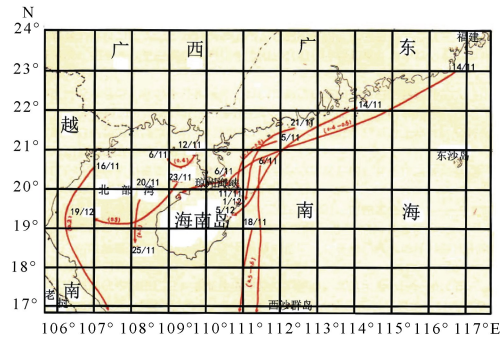


图 15 11月漂流瓶轨迹

Fig. 15 The trajectories of drifting bottles in November

(1) 抛掷地点可以准确地知道,但是回收的方式多种多样,因此带来许多不确定性:如漂流瓶在岸边偶然捡拾到,那么它到达岸边的时间无法确定。这就涉及到漂流平均速度的计算;有的漂流瓶是渔船拖网上来,但是,渔船准确位置难以确定。故估算的误差自然很大。

(2) 漂流瓶流路的绘制是根据始、终两点位置,再根据自己对流况的简单历史知识,“半想象”中绘制出来,而实际流路可能要复杂很多。

(3) 漂流瓶是在海面 10 cm 深度之内随波逐流,它与风的关系密切,并不代表整个水层都是如此运动。

因此,自从卫星问世之后,表层测流就从漂流瓶式过渡到漂流浮标式,漂流浮标的位置,随时传入卫星接收器,再传入使用者手中。这样无论漂移方向、速度和路径都会比较精确。当然,最有效的方法是用仪器观测和数值计算相结合,彼此验证,最后得到合理的结果。但是,在当时历史条件下,通过大量投放漂流瓶,历时较长的重复观测,其统计规律也有一定的可信度,后面的数值计算也证明了这一点。

2.2 数值计算结果分析

丁扬^[12]给出了 1989 年 4~9 月南海海流的数值

计算结果。其模型为马萨诸塞大学和伍兹霍尔研究所联合开发的 Global-FVCOM 模型。模型的外界强迫包括:(1)8 个分潮的平衡潮驱动($M_2, S_2, N_2, K_2, K_1, P_1, O_1$ 和 Q_1), (2)海表面风应力, (3)海表面的净热通量和短波辐射, (4)海边面气压梯度, (5)蒸发和降水率, (6)河流淡水。之所以选择 1989 年进行计算,是因为这一年资料最为齐全。虽然只有一年,还是具有一定代表性。从图 16 可以看出如下规律:

(1) 4~8 月,珠江口是海流一个分界点:珠江口以东,水流流向东北;珠江口以西,水流流向西南,到了雷州半岛东缘,转而向南,其中一部分通过琼州海峡,进入北部湾。

(2) 在 6~9 月,琼州海峡东部出现一个明显的气旋涡。6 月最弱,8,9 月最强,气旋涡最大直径超过 100 km。

(3) 9 月,粤东和粤西沿岸流一致,都成为西南流。

(4) 在近岸西南向流的南面,则是逆向的东北流。

(5) 琼州海峡 4~9 月平均的表层海流都是向西的。

(6) 与前面漂流瓶分析结果具有很多的一致性: 6~8 月,汕头至珠江口近岸海域所投放的漂流瓶,均沿着海岸线向东北漂移;珠江口至雷州半岛水域,有两种情况发生,在粤西近岸水域(不超过 28 km),大都沿着海岸线向西南漂移,到达雷州半岛东部,还有部分漂流瓶到达琼州海峡的南岸。而粤西沿岸 28 km 之外,漂流瓶漂流方向与近岸相反,向东北漂移。在雷州半岛东部,似乎还存在一个较大的气旋涡。

(7) 追源溯流,东部南海水主要来自珠江口及以西的粤西沿岸。珠江口海域是我国经济活动频繁、人类活动和自然因素交汇冲突集中的大河口海域之一。随着珠江三角洲经济的迅速发展,珠江口海域不仅大量接纳了毗邻沿岸地区直接排放的污水,还接收通过各种大小径流携带入海的污染物。同时,珠江口海域大规模的水产养殖业,也是其重要的污染物来源之一。珠江口水质污染最突出的问题是营养盐,特别是无机氮。大部分水域的无机氮浓度基本上超过了三类海水水质标准,无机磷浓度也部分超标。2001~2005 年,共出现 30 次赤潮,平均每年 6 次。

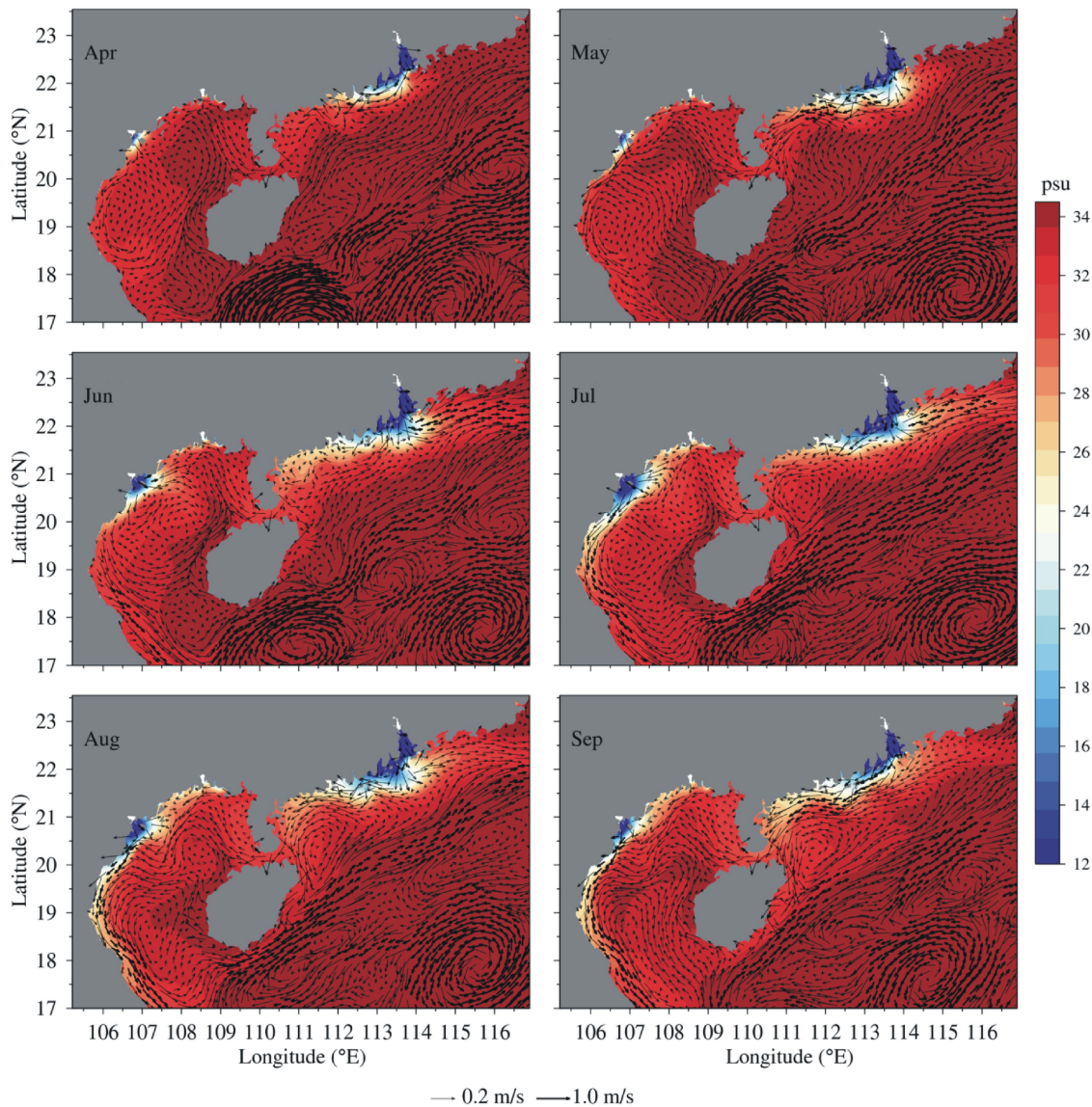


图 16 数值模拟的南海北部 1989 年 4~9 月月的平均的表层环流和盐度分布^[12]

Fig. 16 Model-simulated surface currents and salinity from April to September, 1989 in the Northern South China Sea

3 结论

通过分析多年的漂流瓶漂流路径图,并结合数值计算结果,得出如下结论:(1)涠洲岛赤潮多发与该海域大量氮磷营养物质有关。(2)这些丰富的氮磷营养要素,是通过琼州海峡从东部南海输运而来。(3)溯源溯流,东部南海水主要来自珠江口及以西的粤西沿岸。(4)要解决广西沿岸水污染,控制赤潮发生,除了控制广西近海排污,还要控制珠江口及粤西沿岸的源头污染物。

参考文献:

[1] 李士虎,吴建新,李庭古,等. 赤潮的危害、成因及对策[J]. 水利渔业,2003(6):38-39,54.
Li S H, Wu J X, Li T G, et al. Harm, cause and counter-

measure of red tide[J]. Reservoir Fisheries, 2003(6): 38-39, 54.

[2] 全先庆,曹善东. 赤潮的危害、成因及防治[J]. 山东教育学院学报,2002(2):87-88,91.

Quan X Q, Cao S D. Harm, cause and control of red tide [J]. Journal of Shandong College for Education, 2002 (2): 87-88, 91.

[3] 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,2014.

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, 2014.

[4] 张少峰,李武全,林明裕,等. 涠洲岛海域赤潮发生与海洋水文气象关系初步研究[J]. 广西科学,2009(2):200-202.

Zhang S F, Li W Q, Lin M Y, et al. Preliminary studies

- on the relationship between red tide in the sea area of Weizhou Island and marine hydrometeorology[J]. *Guangxi Sciences*, 2009(2):200-202.
- [5] Shi M C, Chen C S, Xu Q C, et al. The role of the Qiongzhou Strait in the seasonal variation of the South China Sea circulation[J]. *Jour Physic Ocean*, 2002, 32(1):103-121.
- [6] 侍茂崇, 陈春华, 荒方, 等. 琼州海峡冬末春初朝余流场特征[J]. *海洋学报*, 1998, 20(1):1-4.
Shi M C, Chen C H, Huang F, et al. Characteristics of tidal current and residual current in the Qiongzhou Straits in period between end of winter and beginning of spring[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(1):1-4.
- [7] 薛惠洁, 柴扉, 徐亚丹, 等. 南海海流数值计算[C]//国家海洋局编. 中国海洋学文集. 第13集. 北京: 海洋出版社, 2001:8-10.
Xue H J, Cai F, Xu Y D, et al. A circulation model of South China Sea[C]//Edited by State Oceanic Administration People's Republic of China, *China Oceanography Corpus*, 13th. Beijing: Maritime Press, 2001:8-10.
- [8] 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. *海洋学报*, 2003, 25(6):1-8.
Yang S Y, Bao X W, Chen C S, et al. Analysis on characteristics and mechanism of current system in west coast of Guangdong Province in the summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(6):1-8.
- [9] 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 variation characteristics of residual currents in the Qiongzhou Strait[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(2):12-17.
- [10] 杨士瑛, 陈波, 李培良. 用温盐资料分析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 Strait in summer in terms of temperature and salinity data[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006(1):1-7.
- [11] Gao J S, Xue H J, Chai F, et al. Modeling the circulation in the Gulf of Tonkin, South China Sea[J]. *Ocean Dynamics*, 2013, 63(8):979-993.
- [12] 丁洋. 基于观测和数值模型的南海北部陆架海环流和陆架陷波研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Ding Y. Observational and Model Studies of the Continental Shelf Circulation and Coastal Trapped Waves in the Northern South China Sea[D]. Qindao: Ocean University of China, 2014.

(责任编辑: 尹 闯)