

复杂动力条件下台州近海余流季节性特征及其对 污染物运移的影响

袁行知¹, 许雪峰^{1,2}, 俞亮亮¹, 李 燃¹

(1.自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 2.自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 浙江 杭州 310012)

摘 要:本文以台州近海为研究区域,选取各季节代表性月份的实测数据,分析不同季节污染物的分布规律,研究表明,秋季(10月)水质最差,无机氮和活性磷酸盐的劣四类水质面积分别占台州近岸海域面积的45.33%、33.48%。以天文潮和风压场作为驱动力构建数值模型,模拟了近岸海域各季节代表性月份的月平均余流场,结果表明,秋季(10月)大陈岛东侧海域平均余流流速最大,为12.09 cm/s,当余流为南向流时,近岸海域的受污染程度比余流为北向流时更严重。此外,在大陈岛东侧海域发现了“余流通道”的存在,当余流为南向流时,“余流通道”中心位置偏西,污染物浓度的东西向梯度较大;当余流为北向流时,“余流通道”的中心位置偏东,污染物浓度的东西向梯度较小。根据余流流速和污染物秋季(10月)、冬季(3月)的分布特点可以发现,污染物沿岸的扩散趋势随南向余流流速的增大而增强。受地形影响,台州近岸海域北部尤其是西北部,各季节的水质情况都比较差。

关键词:台州; 余流; 季节特征; 污染物运移

中图分类号: X143; X55

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2023)04-0589-08

Seasonal characteristics of offshore residual currents in Taizhou under complicated dynamic conditions and their influence on pollutant transport

YUAN Xingzhi¹, XU Xuefeng^{1,2}, YU Liangliang¹, LI Ran¹

(1.Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China; 2.Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, MNR, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Taking the offshore of Taizhou as the study area, we selected the measured data of representative months in each season and analyzed the distribution pattern of pollutants in different seasons, the data showed that the worst water quality in autumn (October) could account for 45.33% and 33.48% of the model area in terms of inorganic nitrogen and active phosphate respectively. A numerical model was constructed using astronomical tide and wind pressure field as the driving force to simulate the monthly average residual current field in the nearshore area for each representative month of the season. The results showed that the average residual current velocity in the east side of Dachen Island in autumn (October) was 12.09 cm/s, and the pollution level in the nearshore area was more serious when the residual current was southward than when the residual current was northward. In addition, the existence of “residual flow channel” was found in the east side of Dachen Island. When the residual flow was southward flow, the center of the “residual flow channel” was

收稿日期: 2022-12-07, 修订日期: 2023-01-17

基金项目: 国家重点研发专项(2018YFB1501901); 浙江省自然科学基金项目(LQ20D060003)

作者简介: 袁行知(1999—), 男, 河南洛阳人, 硕士, 主要从事河口近岸水动力数值模拟研究, E-mail: yuanxingzhi6@163.com

通信作者: 许雪峰(1981—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事河口近岸水动力数值模拟研究, E-mail: xuxuefeng1981@163.com

westward, and the east-west gradient of pollutant concentration was larger; when the residual flow was northward flow, the center of the “residual flow channel” was eastward, and the east-west gradient of pollutant concentration was smaller. Based on the analysis of the distribution of residual flow velocity and the distribution characteristics of pollutants in autumn (October) and winter (March), it was found that the trend of pollutant dispersion along the coast increased with the increase of southward residual flow velocity; influenced by the topography, the water quality in the northern part of Taizhou near-shore sea, especially in the northwestern part, was worse in all seasons.

Key words: Taizhou; residual flow; seasonal characteristics; pollutant transport

椒江口为典型山溪性强潮河口^[1], 河口外分布有大陈岛、东矾列岛等众多岛屿, 近岸区域水体流向复杂, 台州海域所在的东海大陆架位于东亚季风区, 冬季和夏季分别受强烈的东北季风和较弱的西南季风控制^[2], 海域整体流向也存在明显的季节特征, 区域内动力条件复杂。余流是指实测海流中去掉周期性天文分潮的部分^[3], 余流流向通常是污染物扩散运移的方向^[4], 余流特征是沉积物、营养物和污染物净运输的指标^[5], 因此, 分析海域的余流特征有助于掌握余流对海域内的污染物运移的影响规律。

对于余流特征的研究, 不同学者做了大量的工作^[6-11]。李若华等^[12]利用枯季大潮期钱塘江河口的观测数据, 分析了余流和水深、潮差之间的关系; 王平等^[13]基于三维 FVCOM 模型研究了象山港内余流的结构特征, 得出港内余流环流特征明显的结论; 陈元杰等^[14]通过三维数值模拟计算了中国东部海域余流并分析了其形成机制; 刘鑫仓等^[15]通过数值模型研究了胶州湾潮流余流和物质输送之间的关系; 孙振宇等^[16]利用对大亚湾及周边海域的海流观测资料, 分析了余流的分布特征和季节变化; 而对于余流的影响因素, Callies 和 Poul 的研究表明^[17-18], 余流变化和余流场会受风向、潮波和海底地形的影响。整体而言, 前人的成果大多注重余流自身特征或其形成机理的研究^[19-20], 也有学者将余流和污染物输送结合起来进行分析, 但这些研究区域主要集中于海湾^[15,21-22]。本文以台州近海为研究区域(图1), 分析了无机氮和活性磷酸盐在不同季节(月)的分布状况, 并在分析了台州近岸海域不同季节(月)余流特征的基础上, 对污染物分布和余流之间的关系进行了说明, 以期余流和污染物运移的结合研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本文的研究区域为台州近岸海域。台州东部沿海大陆海岸线长 740 km, 从北向南分布的主要海湾和河口为三门湾、椒江口-台州湾、乐清湾, 在航次调查中, 调查海域海水水深为 3.0 ~ 32.0 m, 均值为 12.6 m。

1.2 数据来源与处理

无机氮、活性磷酸盐数据来源于台州市海洋环境监测中心, 采样时间为 2018 年冬季(3月)、春季(5月)、夏季(8月)、秋季(10月), 共选取台州近岸海域 99 个调查站点, 水质调查站位置如图 1 所示。

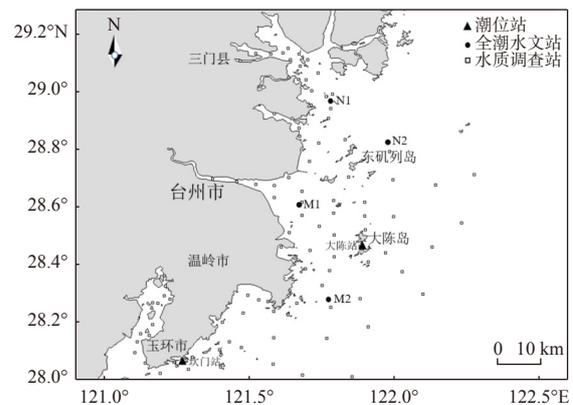


图1 研究区域

Fig. 1 Study area

当水深小于 10 m 时, 仅采表层样品; 当水深为 10 ~ 25 m 时, 采表、底两层样品; 当水深为 25 ~ 50 m 时, 采表层、10 m 和底层三层样品, 采样方法依据《海洋监测规范 第 3 部分: 样品采集、贮存于运输》(GB 17378.3-2007)。依据水质的实测数据, 采用克里金插值法对台州近岸海域无机氮和活性磷酸盐的分布情况进行插值。

1.3 余流计算方法

使用验证后的模型对整个浙江近岸海域的区域进行流场模拟。选取2018年冬季(3月)、春季(5月)、夏季(8月)、秋季(10月)作为研究时段,分别计算这四个季节对应的代表性月份的流场,其次对各个代表性月份的流场在U、V方向上分别平均,最后将平均后的流场进行合并,得到一个月的余流场分布情况。

2 结果与讨论

2.1 污染物实测数据分析

根据实测数据,建立2018年台州近岸海域3月、5月、8月、10月(分别代表冬、春、夏、秋四季)无机氮和活性磷酸盐浓度分布图(图2和

图3),采用单因子水质分类标准对海域水质进行划分。从图中可以看出,以无机氮和活性磷酸盐作为污染物指标,春、夏两季海水水质明显好于秋、冬两季;其中,夏季最好,秋季最差。无机氮和活性磷酸盐两类污染物浓度均呈由陆地向海洋递减的分布,与活性磷酸盐的分布稍有不同,台州近岸海域西北部受无机氮污染情况更为严重,表现为受无机氮控制的劣四类水域面积大于受活性磷酸盐控制的劣四类水质面积。各类水质面积占台州近岸海域总面积的比例如下,夏季一类水质的海域面积均在75%以上(无机氮为76.02%,活性磷酸盐为81.66%),而冬季一类水质的海域面积基本为零(无机氮为0,活性磷酸盐为0.22%),两种污染物在不同季节、不同水质占台州近岸海域总面积的比例见表1。

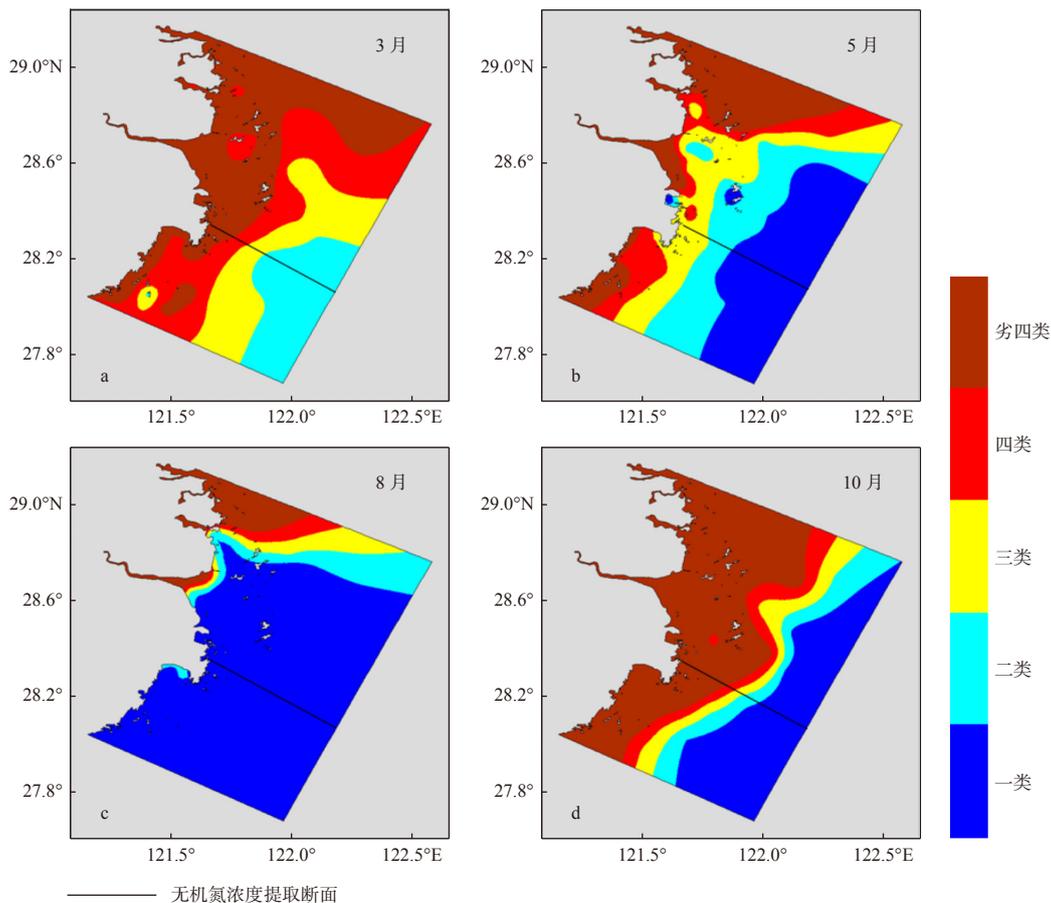


图2 2018年实测无机氮分布图

Fig. 2 Measured inorganic nitrogen distribution in 2018

2.2 余流特征及其对污染物分布的影响

余流是海流中除去周期性潮流后的剩余部

分^[23],余流对近岸物质的输送有重要作用,根据上文可知,不同季节无机氮和活性磷酸盐的分布

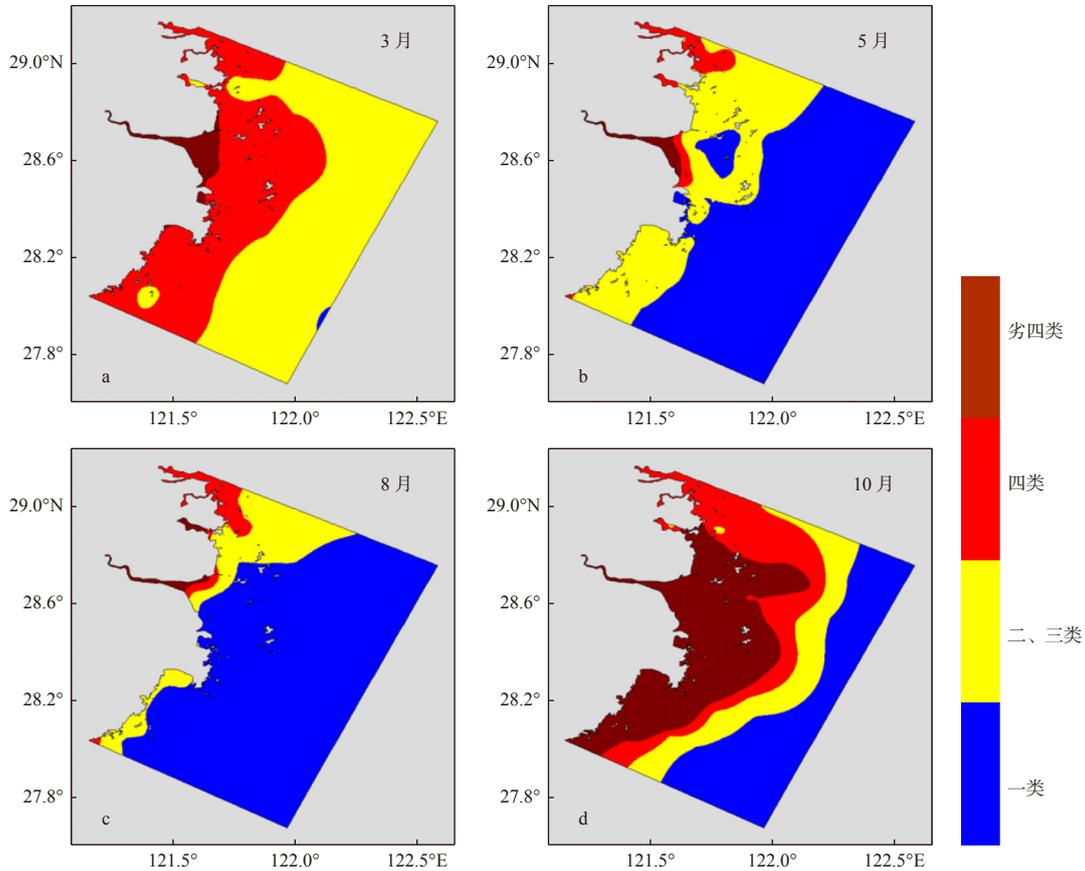


图 3 2018 年实测活性磷酸盐分布图

Fig. 3 Measured labile phosphate distribution in 2018

表 1 各污染物水质类别面积占比 (%)

Tab.1 Area share of each pollutant water quality category

		一类	二类	三类	四类	劣四类
无机氮	3月(冬)	0	16.43	19.07	26.15	38.35
	5月(春)	29.58	21.07	18.28	11.05	20.02
	8月(夏)	76.02	9.08	4.87	2.71	7.32
	10月(秋)	28.79	10.13	7.99	7.76	45.33
		一类	二、三类	四类	劣四类	
活性磷酸盐	3月(冬)	0.22	55.74	41.03	3.01	
	5月(春)	65.15	29.77	3.75	1.33	
	8月(夏)	81.66	13.67	3.66	1.01	
	10月(秋)	30.28	15.69	20.55	33.48	

特征有显著性差异,通过近岸海域的余流特征可以研究污染物在不同季节的分布差异及成因。

建立包含整个浙江近岸海域在内的大尺度模型对台州近岸海域流场进行模拟,水深及网格划分如图 4 所示,最大网格边长为 20000 m,最小网格边长为 300 m,节点数为 67412 个,单元数

为 129338 个,模型计算步长取 0.02 ~ 60 s。外海开边界采用潮位预报方法,具体如下:

$$\eta(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{11} A_n \cos(\sigma_n t + V_n - G_n) + r \quad (1)$$

式中: A_0 为平均海面高程; σ_n 为分潮圆频率; V_n 为分潮迟角; A_n 、 G_n 为调和常数; r 为非周期性

水位变化, 11个分潮包括8个常用的分潮(K1、O1、P1、Q1、K2、M2、N2、S2)和3个浅水分潮(M4、M6、MS4)。风压场采用欧洲中期天气预报中心(European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的再分析数据, 空间分辨率为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$, 时间间隔为6h。

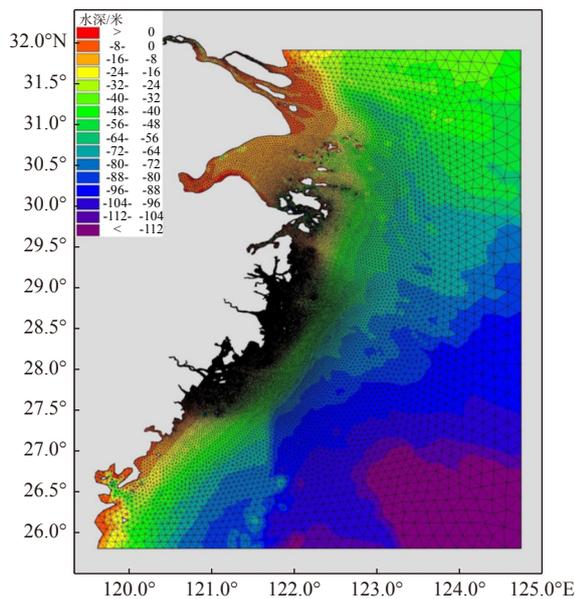


图4 模型网格及地形

Fig. 4 Model grid and terrain

利用模型中台州海域内的两个潮位站和四个全潮水文站对数学模型进行验证(图5、图6)。从潮位验证结果可见, 大小潮各潮位站模型潮位与实测潮位过程吻合, 模型的涨落潮历时、相位与实测资料基本一致; 流速、流向验证过程与实

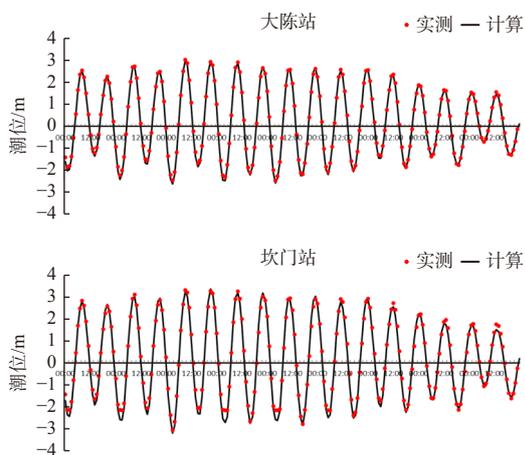


图5 潮位验证

Fig. 5 Verification of tidal level

测过程的吻合也较好(因篇幅所限, 仅给出大潮期流速、流向验证结果), 说明模型采用的物理参数和计算参数基本合理, 计算方法可靠, 成功反演了台州海域的潮流运动特性。

对为期一个月的流场进行平均, 得到3月(3月1日0时—4月1日0时)、5月(5月1日0时—6月1日0时)、8月(8月1日0时—9月1日0时)以及10月(10月1日0时—11月1日0时)的平均余流场如图7所示。台州近岸海域秋、冬季(10月、3月)余流整体为南向流, 春、夏季(5月、8月)余流整体为北向流。在图7所示的流场中, 大陈岛西侧由于受岸线和众多岛屿的影响, 余流方向较为杂乱, 大陈岛东侧余流整体流向则较为一致; 在大陈岛东侧至台州近岸海域东侧边界这一区域内, 统计了各月平均余流流速, 其中, 10月平均余流流速最大, 为12.09 cm/s, 5月平均余流流速最小, 为2.10 cm/s, 3月和8月平均余流流速分别为2.69 cm/s和3.97 cm/s。

比较不同月份的污染物分布及其对应的余流流场可以发现, 当余流为南向流时, 台州近岸海域污染情况较严重, 四类 and 劣四类水质面积占据台州近岸海域面积的大部分(表1), 而当余流为北向流时情况则相反。从两种污染物在不同月份分布的整体情况来看, 台州近岸海域北部受污染的情况较南部更为严重。

对4个月余流场做进一步分析发现, 大陈岛东侧至台州近岸海域东边界区域内始终有一个“余流通道”, 即图7a~图7d中黑色虚线区域。从“余流通道”中心所处的位置并结合余流场各月份余流流向可以看出, 当余流为北向流时, “余流通道”中心位置偏东; 当余流为南向流时, “余流通道”中心位置偏西。考虑到地转偏向力在北半球向右, 因此, 这一现象应当是潮流在运动中受地转偏向力影响的结果。

以二类、三类和四类水质分布区域为研究对象, 对比无机氮和活性磷酸盐在不同季节(月)的分布情况, 可以发现, 两类污染物的分布具有一定的共性。以无机氮分布特点为例对其进行说明, 活性磷酸盐的分布特点类似: 秋季(10月)二类、三类和四类水质区域均呈狭长的条带状, 东西向宽度十分狭窄, 且三种水质的分布宽度较为

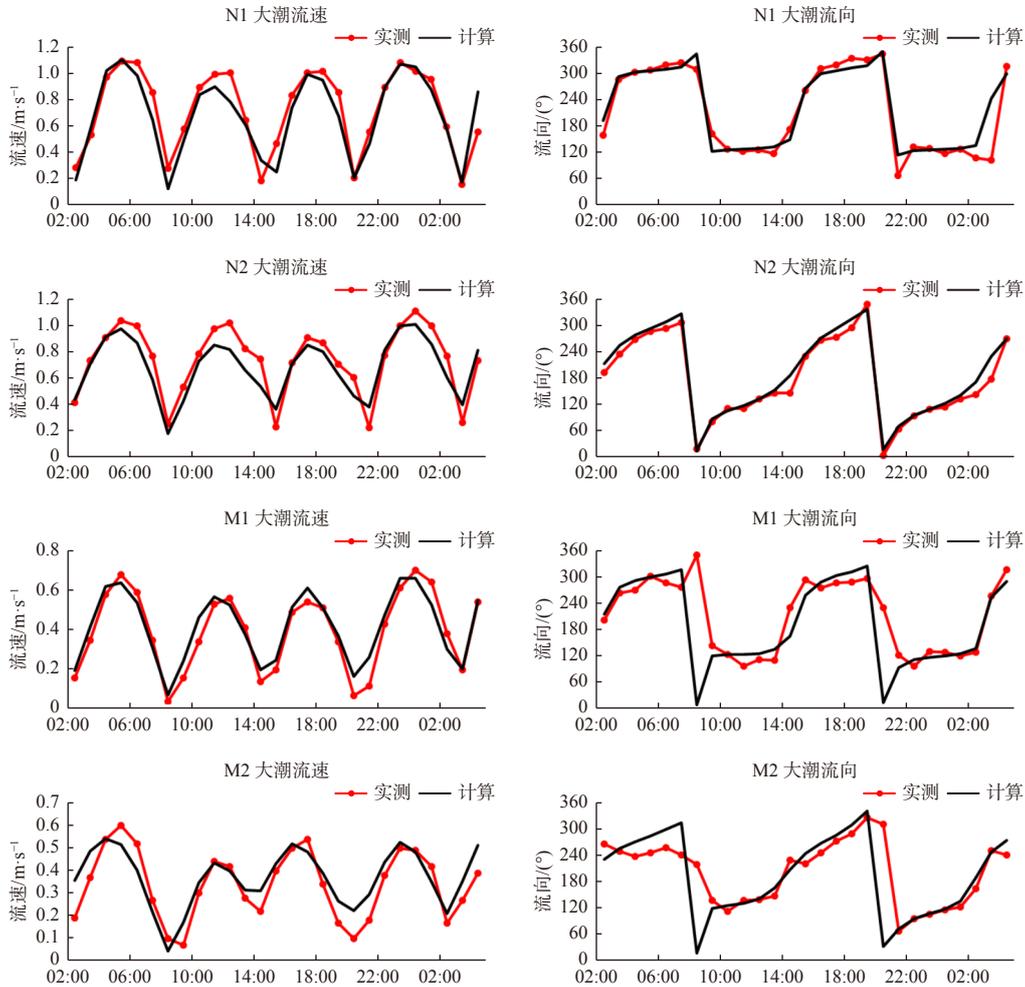


图6 潮流验证

Fig. 6 Verification of tidal current

一致;冬季(3月)三种水质的分布形状变得不规则,东西向宽度均有增加,台州近岸海域内一类水质的分布面积为零;春季(5月)椒江口南侧区域三种水质分布区域也呈较规则的条带状,但东西向宽度较秋季(10月)增加明显;夏季(8月)受台州近岸海域南侧水质良好的北向流影响,三种水质分布区域主要集中在台州近岸海域的北部区域,且近岸海域水质情况是四个季节(月)中最好的。在无机氮实测分布图中选取一垂直岸线的断面(断面位置见图2),无机氮浓度沿程分布如图8所示,拟合线由实测数据进行线性拟合得到。从图8中可以看出,秋季(10月)和冬季(3月)污染物浓度东西向梯度明显大于春季(5月)和夏季(8月)。

对不同季节(月)余流场流向和“余流通道”的分布位置进行分析,可以得出三种水质

(二类、三类和四类)分布的形成原因。秋季(10月),强烈的南向流携带受污染的水体南下,在向台州近岸海域输送污染物的同时,由于其流速快,使近岸污染物有更强(相对于3月)的沿岸输送趋势。这一方面增大了台州近岸海域受污染的程度,表现为劣四类水质面积占台州近岸海域总面积的45.33%,在四个季节中占比最大;另一方面使污染物的沿岸分布相较于冬季(3月)更加均匀。冬季(3月),南向流向台州近岸海域输送污染物,由于流速减小,污染物沿岸输送的趋势减弱,在台州近岸海域获得更长的停留时间,其向外海扩散的时间也同步增加,变相加强了污染物向外海扩散的趋势,这就可以解释为什么秋季(10月)三种水质(二类、三类和四类)的分布区域狭长,污染物浓度东西向梯度大,而冬季(3月)三种水质(二类、三类和四类)的分布区

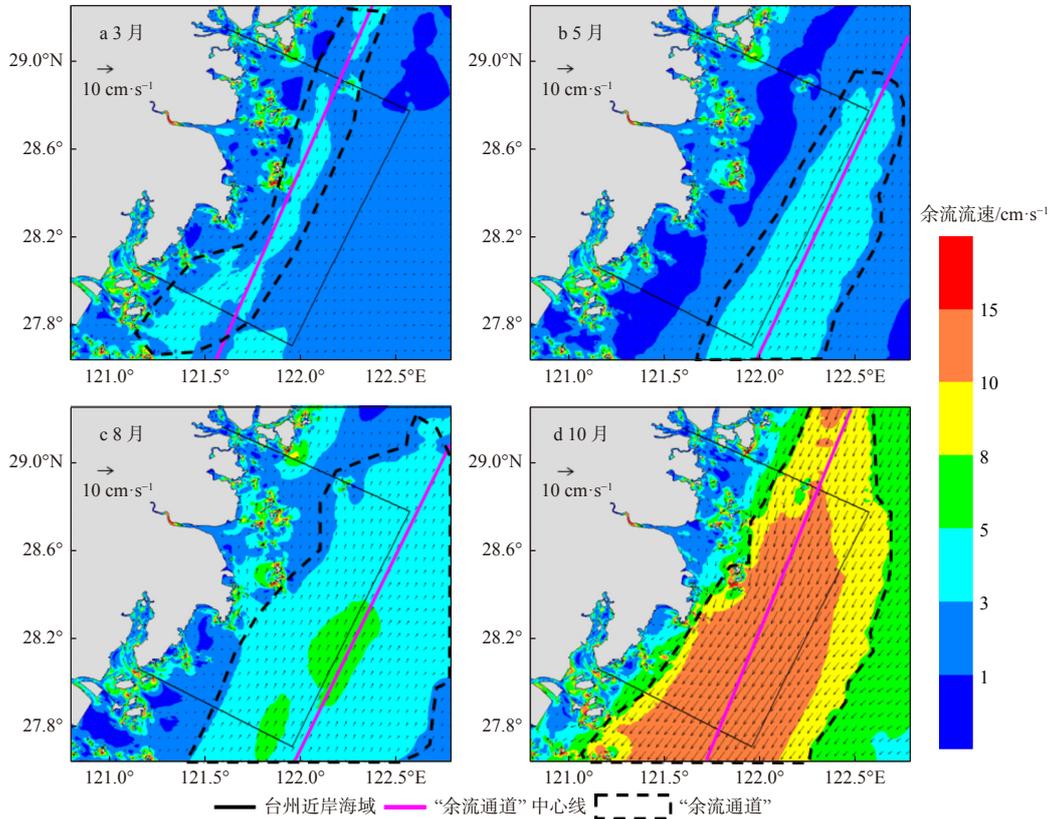


图7 各月平均余流场

Fig. 7 Average residual flow field in each month

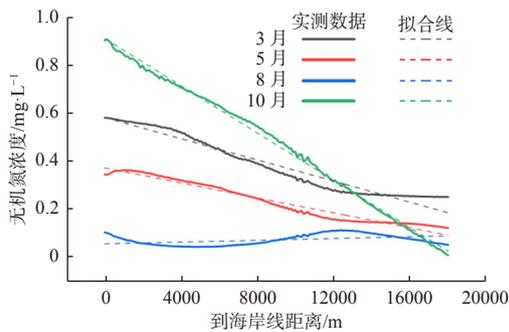


图8 各季节代表性月无机氮断面浓度分布

Fig. 8 Cross-section concentration distribution of inorganic nitrogen in representative months of each season

域东西向变宽且形状不规则, 污染物东西向梯度减小。春季(5月), 余流场方向转为北向, 北向流携带优质水体北上, 优质水体在稀释了近岸海域的污染物的同时, 还抵御了北部区域污染物向南扩散, 改善了近岸海域的水质状况。夏季(8月), 余流方向仍为北向, 且一类水质区域面积占台州近岸海域面积的76.02%, 表明春季(5月)到夏季(8月)北向余流持续改善了台州近

岸海域的水质。台州近岸海域北部, 夏季(8月)与春季(5月)污染物分布情况相似, 虽然夏季(8月)水质优于春季(5月), 但夏季(8月)和春季(5月)台州近岸海域北部区域整体的受污染情况都较为严重, 表明北向余流改善台州近岸海域北部尤其是西北部水质的能力较弱。本文认为造成上述现象的原因如下: 由于受大陈岛及其北侧岛屿的阻碍, 这些岛屿东侧及北侧的余流流速明显减小, 流速降低削弱了余流输送污染物的能力, 导致台州近岸海域北部尤其是西北部在春季(5月)和夏季(8月)受污染的程度比同时期其他区域更为严重。

3 结论

(1)不同季节无机氮和活性磷酸盐在台州近岸海域具有相似分布特征。台州近岸海域夏季(8月)水质最好, 一类水质区域面积占比分别达76.02%(无机氮)和81.66%(活性磷酸盐); 秋季(10月)水质最差, 劣四类水质区域面积占比

分别为45.33%(无机氮)和33.48%(活性磷酸盐)。整体来看,椒江口和大陈岛及两者的北部区域受污染情况比其南部更为严重。

(2)台州近岸海域春季(5月)和夏季(8月)平均余流为北向,秋季(10月)和冬季(3月)平均余流为南向。就平均余流流速而言,秋季(10月)余流流速最大,为12.09 cm/s。当平均余流为南向流时,台州近岸海域的污染情况比余流为北向流时严重。对不同季节(月)的余流场进行分析,发现台州近岸海域存在“余流通道”。当平均余流场向北时,“余流通道”中心位置偏东,污染物浓度东西向梯度较小;当余流场向南时,“余流通道”中心位置偏西,污染物浓度东西向梯度较大。

(3)南向流会携带污染物进入台州近岸海域,导致水体中的污染物浓度增大。当南向流流速增大时,污染物沿岸输送趋势明显;当南向流流速减小时,则污染物沿岸输送趋势减弱,但向外海扩散的趋势加强。北向流能够稀释水体中的污染物,减轻水体受污染的程度。

(4)受大陈岛及其北侧岛屿的阻碍,北向流的平均余流流速在这些岛屿的东侧及北侧小于周围地区,导致春季(5月)和夏季(8月)台州近岸海域西北部区域的受污染情况比其他地区严重。

参考文献:

- [1] 张新周,陈星,窦希萍,等.山溪性强潮河口最大浑浊带形成机制及其模拟[J].*水科学进展*,2019,30(1):84-92.
- [2] 王建丰,司广成,于非.台湾暖流变化特征及机制研究进展[J].*海洋科学*,2020,44(5):141-148.
- [3] 魏诗晏,杨伟,赵亮.荣成外海海流特征及影响因素[J].*海洋科学*,2022,46(4):55-66.
- [4] 王丹,宋德海,严聿晗,等.广西北海银滩海域实测海流特征和悬沙输运分析[J].*海洋湖沼通报*,2020(5):16-25.
- [5] REN L, YANG L N, PAN G W, et al. Characterizing residual current circulation and its response mechanism to wind at a seasonal scale based on high-frequency radar data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(18): 4510.
- [6] 陈波,陈宪云,牙韩争,等.防城港湾及其邻近海域潮流和余流特征研究[J].*海洋湖沼通报*,2020(3):16-23.
- [7] 唐燕玲,徐卢笛,贺治国,等.洋山海域三维潮流和余流特征的数值模拟[J].*浙江大学学报:工学版*,2019,53(2):315-324.
- [8] 卢燕,李泽文,李淑江,等.海南万宁近岸余流特征分析[J].*海洋科学进展*,2017,35(1):53-61.
- [9] 林其良,黄大吉,宣基亮.浙闽沿岸潮余流的空间变化[J].*海洋学研究*,2015,33(4):30-36.
- [10] SABHAN, LABANIA H M D, MUDIN Y, et al. Modeling of tidal current and residual currents patterns in Tomori Bay, North Morowali Regency, Central Sulawesi province[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2021, 1763(1): 012025.
- [11] MIAO Q S, YANG J K, YANG Y, et al. Observation and analysis of tidal and residual current in the North Yellow Sea in the spring[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 121(5): 052040.
- [12] 李若华,唐子文,谢东风.强潮作用下钱塘江河口潮流特征研究[J].*人民长江*,2021,52(5):8-12,49.
- [13] 王平,陈伟斌,邹文峰,等.象山港潮流结构及水体半交换时间数值研究[J].*海洋环境科学*,2018,37(1):107-115.
- [14] 陈元杰,程鹏.中国东部海域潮汐余流特征及其动力分析[J].*海洋通报*,2021,40(4):396-409.
- [15] 刘鑫仓,刘艳玲,迟万清,等.胶州湾潮流和物质输送之间的关系[J].*海洋湖沼通报*,2019(2):10-17.
- [16] 孙振宇,陈照章,杨龙奇,等.大亚湾及周边海区潮流和余流的季节变化特征[J].*厦门大学学报:自然科学版*,2020,59(2):278-286.
- [17] CALLIES U, GASLIKOVA L, KAPITZA H, et al. German Bight residual current variability on a daily basis: principal components of multi-decadal barotropic simulations[J]. *Geo-Marine Letters*, 2017, 37(2): 151-162.
- [18] POUL H M, BACKHAUS J, DEGHANI A, et al. Effect of subseabed salt domes on Tidal Residual currents in the Persian Gulf[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 2016, 121(5): 3372-3380.
- [19] 万凯,鲍献文,姚志刚,等.沙埕港湾口断面潮流及余流特征分析[J].*海洋与湖沼*,2014,45(4):669-675.
- [20] 周炜,宣基亮,黄大吉.桑沟湾邻近海域岬角潮流涡对其产生机理[J].*海洋学研究*,2020,38(3):10-20.
- [21] 韩松林,梁书秀,孙昭晨.狭海湾象山港三维污染物运移特征的数值模拟[J].*海洋通报*,2014,33(5):511-518.
- [22] 王平,张宁川.大连湾保守污染物迁移三维模型及应用[J].*海洋通报*,2013,32(3):265-274.
- [23] 侯万里.长江口水动力与冲淡水数值模拟[D].南京:南京信息工程大学,2021.