

北部湾东北部水团分布及季节变化分析*

曹振轶¹ 鲍敏¹ 管卫兵^{1,2} 陈琪¹

(1. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室 自然资源部第二海洋研究所 杭州 310012; 2. 浙江大学 海洋学院 舟山 316021)

摘要 基于 2016 年 9 月—2017 年 8 月北部湾海域棕囊藻调查 9 个航次的温度、盐度和密度等水文数据, 通过 K-mean 动态聚类分析方法分析了研究海域水团的分布及季节变化过程。根据温盐资料将研究海域的海水类型分为低温高盐的陆架底层水团、陆架表层混合水团和低盐沿岸水团。通过 20°10'N 断面上多期次的温盐分布特征揭示了北部湾整体上逆时针环流在北部湾东侧陆坡的存在; 通过大面水文调查的结果揭示琼州海峡的余流特征, 并结合卫星漂流浮标运动轨迹揭示了珠江冲淡水对研究海区水团分布的影响。本研究丰富了对北部湾东北部水团分布和季节变化的认知, 对研究该海域赤潮发生、发展规律有指导意义。

关键词 北部湾; 温盐分布; 水团; 环流

中图分类号 P731 doi: 10.11693/hyh20190100007

北部湾是位于南海西北部的一个半封闭边缘海, 三面为陆地和岛屿包围, 通过南面的湾口和东边的琼州海峡与南海相连, 是水质优良的海湾和重要的渔场。每年 11 月至翌年 4 月为东北季风控制, 5—9 月主要受西南季风影响, 水体的温盐结构呈现明显的季节变化。近年来随着沿海经济发展、涉海工程的增加, 北部湾海域水体质量呈下降趋势, 赤潮频发, 给社会的生产、生活带来诸多不便, 例如 2015 年秋冬季节, 球形棕囊藻赤潮堵塞电厂循环水过滤系统, 影响电厂安全生产(陈波等, 2018)。了解北部湾的水文特征及其演变规律有助于研究北部湾赤潮发生、发展的规律, 可为环境保护提供科学依据。

依托大规模的现场调查、遥感资料和数值模型等手段, 众多科学家对北部湾复杂多变的水文环境开展了研究。20 世纪 50 年代末 60 年代初开展的中越联合北部湾海洋综合调查, 奠定了北部湾海洋研究的基础, 随后的调查都受客观因素影响局限在北部湾东部海域(侍茂崇, 2014), 20 世纪 80—90 年代的海岸带和海涂资源综合调查、海岛综合调查, 以及

2005—2011 年开展的近海环境综合调查对北部湾的水文环境、环流结构有了进一步的认识。陈波(1986)根据北部湾有关海洋调查的水文资料, 采用“水团浓度混合法”将北部湾的水体划分为沿岸水、外海水和混合水, 并对北部湾水系的形成及其性质进行了初步探讨。姜景忠等(1997)利用 1994 年 5—6 月观测的水文资料将北部湾北部海域的水团细化分为琼州海峡水、底层冷水团、琼西暖流水、北部混合水。陈胜利(2008, 2009)等分别通过温盐频率统计和聚类分析的方法将北部湾冬季和夏季的水团划分为近岸冲淡水、混合水、外海上层水、外海次表层水等水团。吴敏兰(2014)利用 2011 年春夏观测的水文、化学、生物要素对北部湾北部海域的水团分布进行模糊聚类分析。以上研究中由于调查区域广, 且北部湾海域水团分析复杂多变, 因此将北部湾北部海区分布最广的混合水划分为一个整体水团。侍茂崇等(2015)借助漂流瓶和数值模式的结果研究了涠洲岛附近高营养盐的来源, 结果表明其源头来自珠江和粤西沿岸水。北部湾的水团分布受到沿岸径流、琼州海峡过来的粤西

*国家重点研发计划项目, 2017YFC1404300 号; 中国科学院战略性先导科技专项专题, XDA11020304 号; 全球变化与海气相互作用专项, GASI-IPOVAI-04 号; 卫星海洋环境动力学国家重点实验室自主项目, SOEDZZ1805 号, SOEDZZ1802 号。曹振轶, 副研究员, E-mail: zhenyicao@163.com

通信作者: 鲍敏, 副研究员, E-mail: minbao@sio.org.cn

收稿日期: 2019-01-11, 收修改稿日期: 2019-03-28

沿岸水和南海水进入北部湾共同作用, 季节转化带来的风、太阳辐照的变化与潮汐动力交织。由于采用的资料不同和分析方法的不同, 对一些科学问题的认识也不尽相同(杨士瑛等, 2006; 高劲松等, 2015)。本项研究利用时间上四季延续、空间上分布广阔的多期次水文调查数据, 对北部湾东北海域的水文特性和水团季节过程进行研究, 对水团来源进行了动力学上的探讨。

1 数据与方法

1.1 数据

本文所使用的 CTD(Conductivity-temperature-depth)数据来自海洋专项重点任务“近海生态灾害成因分析与应对措施”项目的北部湾棕囊藻航次。研究海区为北部湾北部 20°—21.75°N, 108.25°—110.5°E 范围的海域。观测的时间涵盖了 2016 年 9 月—2017 年 8 月, 共执行了 9 个航次, 观测站位分布见图 1, 具体航次信息见表 1。利用经过检定的 Sea-Bird 公司 19Plus CTD 仪测定现场水体的温度、盐度和密度等参数, 通过 Sea-Bird 公司提供的流程和软件进行质量控制后插值得到 1m 间隔的剖面数据, 用于后续的分析研究。

1.2 水体分析方法

水团分析方法是分析水团形成特性、分布规律的方法, 目前多采用相似分析、聚类分析和判别分析等方法进行。本项研究中采用的 K-means 方法是聚类分析方法的一种, 具有高效、简便的特点。其基本原理

是以欧氏距离作为相似度测度, 求解数据点到对应某一聚类中心向量 V 最优分类, 采用误差平方和最小作为评价指标数, 最终满足同一聚类中的对象相似度较高, 不同聚类中的对象相似度较低。聚类结果与水团分析“内同外异”的要求相契合, 在南海等海域的水团分析中得到了应用(靳姗姗, 2017)。K-means 方法计算时不指定初始聚类中心, 随机产生初始聚类中心, 因此不同计算方案结果会有不同的聚类结果, 要根据水团聚类的地理分布挑选符合实际的聚类结果; K-means 方法对偏离中心过远的离散点、孤立点敏感, 在具体计算中当盐度小于 24 时通过将原始值赋值为 24 处理; 考虑到盐度较温度的保守型较好, 更有利于区分不同性质的水团, 在计算欧氏距离时通常将盐度的权重提高; 夏季北部湾冷水团发育, 沿海径流量增大时, 适当降低盐度的权重。

2 结果

由表 1 可知航次调查的时间为 2016 年 9 月—2017 年 8 月, 可以涵盖了北部湾海域整年的气象、海洋环境变化。由于 2017 年 1 月航次海况恶劣, 缺测站位较多, 不利于对调查海区内水团分析, 2017 年 2 月航次调查有部分站位表层的水温受太阳辐射影响增温明显, 故将 12 月作为冬季代表月份, 其他季节参考前人的研究, 将 3 月作为春季代表月份, 8 月作为夏季代表月份, 11 月作为秋季代表月份, 分析温度、盐度和水团属性的季节分布特征。

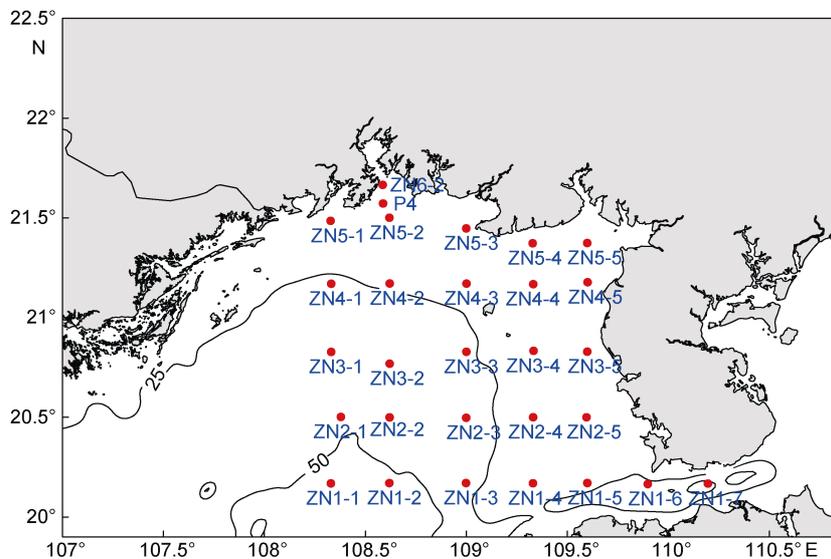


图 1 航次调查站位及水深图
Fig.1 Sampling sites and bathymetric map

表 1 2016—2017 年北部湾调查航次时间
Tab.1 Information of cruise from 2016—2017 in the Beibu Gulf

| 航次 | 海上作业时间(年-月-日) | 备注 |
|------|-----------------------|---------------------------|
| 第一航次 | 2016-09-23—2016-09-29 | 测站全 |
| 第二航次 | 2016-11-11—2016-11-16 | 测站全 |
| 第三航次 | 2016-12-09—2016-12-15 | 测站全 |
| 第四航次 | 2017-01-14—2017-01-19 | 缺 ZN1-1 ZN2-1 ZN3-1 ZN4-3 |
| 第五航次 | 2017-02-20—2017-02-28 | 测站全 |
| 第六航次 | 2017-03-20—2017-03-28 | 测站全 |
| 第七航次 | 2017-04-19—2017-04-27 | 测站全 |
| 第八航次 | 2017-06-05—2017-06-11 | 测站全 |
| 第九航次 | 2017-08-04—2017-08-12 | 缺 ZN1-1 ZN2-1 |

将海表以下 2m 的表层温度和离海底 2m 处底层温度作为代表层次进行温度季节变化的分析。冬季, 北部湾北部表层和底层温度(图 2a、图 2b)呈现北低南高的格局, 且表底温度接近, 梯度变化小, 是典型的冬季水文分布格局。北部近岸海域温度普遍低于 21°C, 最低温度出现在钦州湾口, 为 19.5°C; 最高温度出现在最南部, 为 23.9°C。该温度格局的形成是因为冬季气温低, 造成海面失热, 垂向混合均匀, 近岸水体水深浅, 热容小, 受陆地影响大, 降温快, 造成近岸水体温度普遍低于远海水体。春季, 北部湾处于季节转换期, 太阳辐射增强有利于表层水温(图 2c)的上升, 而研究区域不同站位观测时间不一致, 造成白天作业的站位表层水温高。因此表层温度规律性不强。较之表层, 底层温度(图 2d)规律性较好。最高温度出现在铁山港及附近海域, 外海继续延续冬季格局, 在间歇冷空气作用下水温持平或略有下降。夏季, 整体来看, 表层(图 2e)和底层(图 2f)温度都呈现北高南低的格局, 且南北温度差别变小。表层水温除了琼州海峡部分站位, 大部分海区在 30°C 以上。底层低水温区出现在深水区, 最低为 25.9°C, 最高温度出现在铁山港外。此时温度跃层明显, 平均跃层深度在 20—30m。秋季, 整体来看, 表层(图 2g)和底层(图 2h)温度呈现北低南高的格局。表层, 钦州湾外温度在 24°C 以下, 南部海域温度在 26—27°C 之间。底层, 近岸海域温度在 24°C 以下, 南部深水海域温度在 24°C 左右。且高温区出现在琼州海峡及其西口, 以 25°C 温度等值线为例, 沿北部湾东侧等深线向北扩展。

将海表以下 2m 的表层盐度和离海底 2m 处底层盐度作为代表层次进行盐度季节变化的分析。冬季, 表层(图 3a)和底层(图 3b)盐度都呈现深水区盐度高, 浅水区盐度低的格局。无论表层还是底层, 盐度最大

值都出现在离岸最远或者较远的海域, 最小值都在钦州湾内。表层盐度最大值为 32.9, 出现 ZN2-1 站, 最小值为 25.5, 出现在钦州湾内。底层盐度最大值为 33.5, 最小值为 28.2, 出现站位与表层相同。底层盐度等深线近似沿着水深等值线分布。结合温盐分布特征, 揭示了沿底层 30m 等深线有外海的高温高盐水入侵。春季, 表层盐度(图 3c)分布呈现北低南高, 盐度低值区局限在钦州湾和铁山港, 盐度的高值区出现在研究海区深水区海域, 表底层盐度较冬季略有下降。夏季, 表层盐度(图 3e)呈现北低南高的格局, 铁山港和钦州湾盐度均小于 26, 反应了受附近入海径流的影响。底层(图 3f)32.5 盐度等值线自西南向东北方向, 指示了水体运动的趋势。秋季, 表层盐度(图 3g)呈现北低南高的格局, 与夏季相比, 钦州湾受径流影响区明显缩窄, 局限在湾口, 南部海区盐度普遍高于 32, 但表层和底层(图 3h)32.5 盐度分布范围明显西偏。

最后, 参考前人研究成果, 将北部湾北部海域的水团大体分成三大类四小类, 分别为沿岸水、陆架深层水和陆架混合水, 其中陆架混合水根据来源不同, 分成来自琼州海峡方向的陆架混合水和由南海进入研究海域逐步变性而成的陆架混合水, 通过 K-mean 方法计算得到研究区不同季节四类水体的隶属关系叠加在 T-S 点聚图, 如图 4 所示。冬季, 水体垂向混合加强, 温盐参数在垂向上变化小, 表底层水团(图 5a、图 5b)的隶属关系大致相同, 其中在水深>30m 表底层均为陆架深层水的性质, 广西沿岸的站位为沿岸水, 两者之间的广阔海域包括琼州海峡的站位均为陆架混合水。春季, 由于表层海水升温, 同一站位表层和底层的水团性质(图 5c、图 5d)不尽相同。表层大部分站位为高水温的陆架混合水, ZN1-3 的仍保持陆架深层水的性质, 冬季的低温陆架混合水退缩在

研究区的 Zn5-1 和琼州海峡西口附近的几个站位; 底层水体性质主要为低温陆架混合水, 只有广西沿岸的几个站位高水温的陆架混合水, 深水区的 ZN1-1、ZN1-2 和 ZN1-3 仍保持陆架深层水的性质。夏季, 由于表层海水升温及沿岸入海径流的影响, 同一站位表层的水团性质不尽相同。表层(图 5e)广西沿岸的诸多站位为盐度低于 28 的沿岸水, 外海为盐度介于 28—32 的混合水, 水体性质为高温高盐的陆架混合水; 底层水体性质(图 5f)主要为深度大于 30m 的低温高盐陆架深层水, 广西沿岸的几个站位低盐的沿岸水, 其他站位均为高温高盐的陆架混合水。秋季, 由于受大气降温影响, 近岸站位表层海水温度下降明显, 表层(图 5g)沿岸水分布在广西沿岸的站位, 外围为盐度介于 30—32 的陆架混合水; 底层水体性质(图 5h)主要为深度大于 30m 的低温高盐陆架底层水, 广西沿岸的几个站位为低盐的沿岸水, 其他站位均为相对高温高盐的陆架混合水。

3 讨论

3.1 北部湾环流对水团演化的影响

通过对四个季节底层盐度的分析发现, 盐度最高值不是出现在水深最深的站位 ZN1-1, 因此进一步分析了 9 个航次沿 $20^{\circ}10'N$ 琼州海峡断面的温盐分布。图 6 是 2017 年 3 月、4 月和 6 月的断面温盐分布剖面图, 进一步证实了盐度最大值通常在海南岛西侧的陆坡站位。姜景忠等(1997)在分析 1994 年 5 月的水文资料时将分布在北部湾中冷水团外缘的海南岛西侧的陆坡上的高温高盐水团命名为“琼西暖水”。Chen 等(2015)在 POM 海洋模式的基础上建立了一个浪-潮-流耦合的海洋模式, 用于研究北部湾冷水团的季节变化及其机制, 通过该海洋模式揭示了北部湾冷水团形成于三月, 成熟于六、七月, 十月渐次消退的过程。海洋模式计算得到的流场和流函数表明春季和夏季冷水团周围都存在逆时针方向环流, 从机理上解释了海南岛西侧陆坡上的高温高盐水的来源和动力机制。受调查区域范围的影响, 研究区出现的高盐水团可认为是“琼西暖水”向北的继续延伸, 与周围环境水团混掺, 盐度较“琼西暖水”特征值 34 有所减低, 温度上暖水性质不明显。

图 7 是 11 月和 12 月航次沿 $20^{\circ}10'N$ 琼州海峡断面的温盐分布剖面图, 在北部湾冷水团不发育的季节, 北部湾东侧的陆坡仍然稳定的存在高盐水团, 因为秋冬季环境降温的作用, 该水团与周边水团在温

度上表现为暖水特征。综上所述, 由温盐资料可以揭示北部湾东侧的陆坡存在着一支由外海进入北部湾内的海流, 可以视为北部湾终年逆时针环流的一部分。

3.2 琼州海峡余流对水团演化的影响

琼州海峡是北部湾与南海之间物质交换的重要通道, 一直以来众多学者通过现场观测和数值模拟等手段对琼州海峡的余流大小及方向进行了研究, 受观测资料长度以及数学模型计算范围、边界条件等不同条件的影响。得到的结论也不尽相同, 尤其是夏季琼州海峡的余流方向各家得到的结论截然相反。Shi 等(2002)通过近 40 年的实测资料分析认为琼州海峡终年存在着西向平均余流。张国荣等(2009)通过分析琼州海峡西口附近的长期锚系站的资料认为, 在春夏季西南风作用下可以存在东向流动, 在夏季 15m 以浅的水体中是东北向流动, 15m 以下为西南向流动。Gao 等(2013)通过数学模型解释在夏季琼州海峡可存在东向的流动。通过比较 2017 年 6 月航次表层盐度(图 8a)和 2017 年 8 月航次表层盐度(图 8b)分布可以发现, 以 32 和 32.5 等盐度线的分布范围来看, 8 月份上述特征等盐度线明显向东及东北扩展。图 9 是沿 $20^{\circ}10'N$ 琼州海峡断面 2017 年 6 月份和 8 月份航次测量得到的密度分布剖面图, 可以看出来琼州海峡西侧的密度要高于东侧的密度。综合图 8 和图 9 的结果反映了西南季风作用下北部湾内的水体运动趋势, 这与苏纪兰等(2005)中认为琼州海峡夏季存在东向海流的研究结论相契合。高劲松等(2015)通过数值模型的敏感性实验发现夏季北部湾北部环流主要受季风控制。通过位涡收支分析, 进一步发现北部湾北部的气旋式环流为正的风应力旋度驱动。

对于秋冬季琼州海峡的余流性质, 众多研究者的认识则接近一致, 认为琼州海峡余流是自东向西。侍茂崇(2014)通过分析漂流瓶数据研究了北部湾环流的概况, 由于漂流瓶方法本身的特点对水体运动的中间过程无法量化研究。借助本项研究中密集的水文大面站观测和同步的表层卫星漂流浮标资料可以揭示水体运动的特征。图 10 是 2016 年 9 月份航次的表层盐度分布图, 31 盐度等值线在北部湾内呈现内凹的特征; 图中红线是 9 月 24 日在琼州海峡西口释放的卫星追踪的漂流浮标运动轨迹, 虽然在 9 月 28 日—10 月 4 日期间信号丢失, 但结合卫星漂流浮标整体的运动轨迹与 31 等盐度线的分布, 可以认为等盐度线的分布特征揭示了粤西沿岸流携带的珠江冲淡水穿越琼州海峡进入北部湾海域。

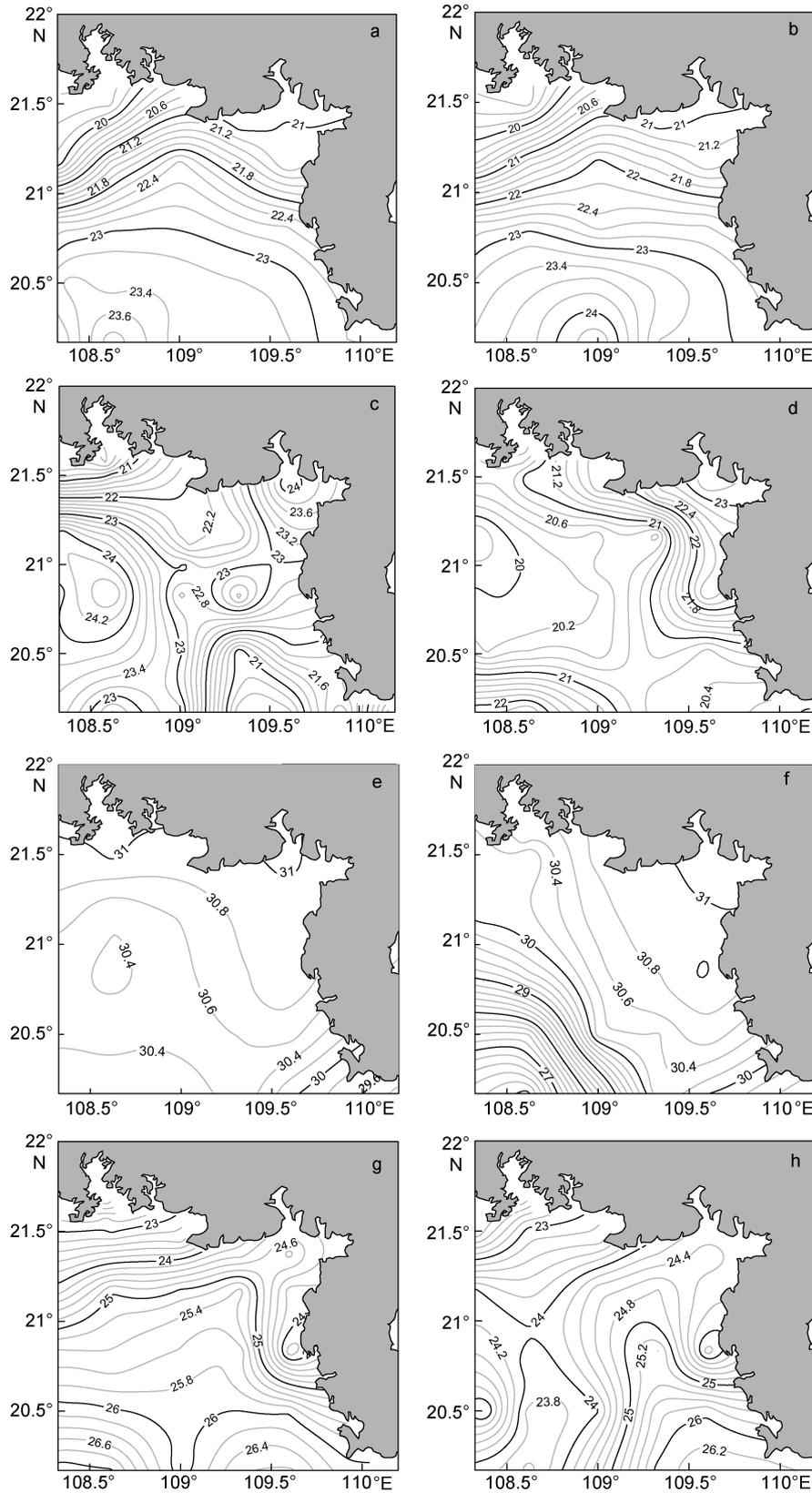


图2 表层、底层温度的四季变化特征

Fig.2 The seasonal variation of surface and bottom temperature

注: a 和 b 分别为冬季表层与底层, c 和 d 分别为春季表层与底层, e 和 f 分别为夏季表层与底层, g 和 h 分别为秋季表层与底层

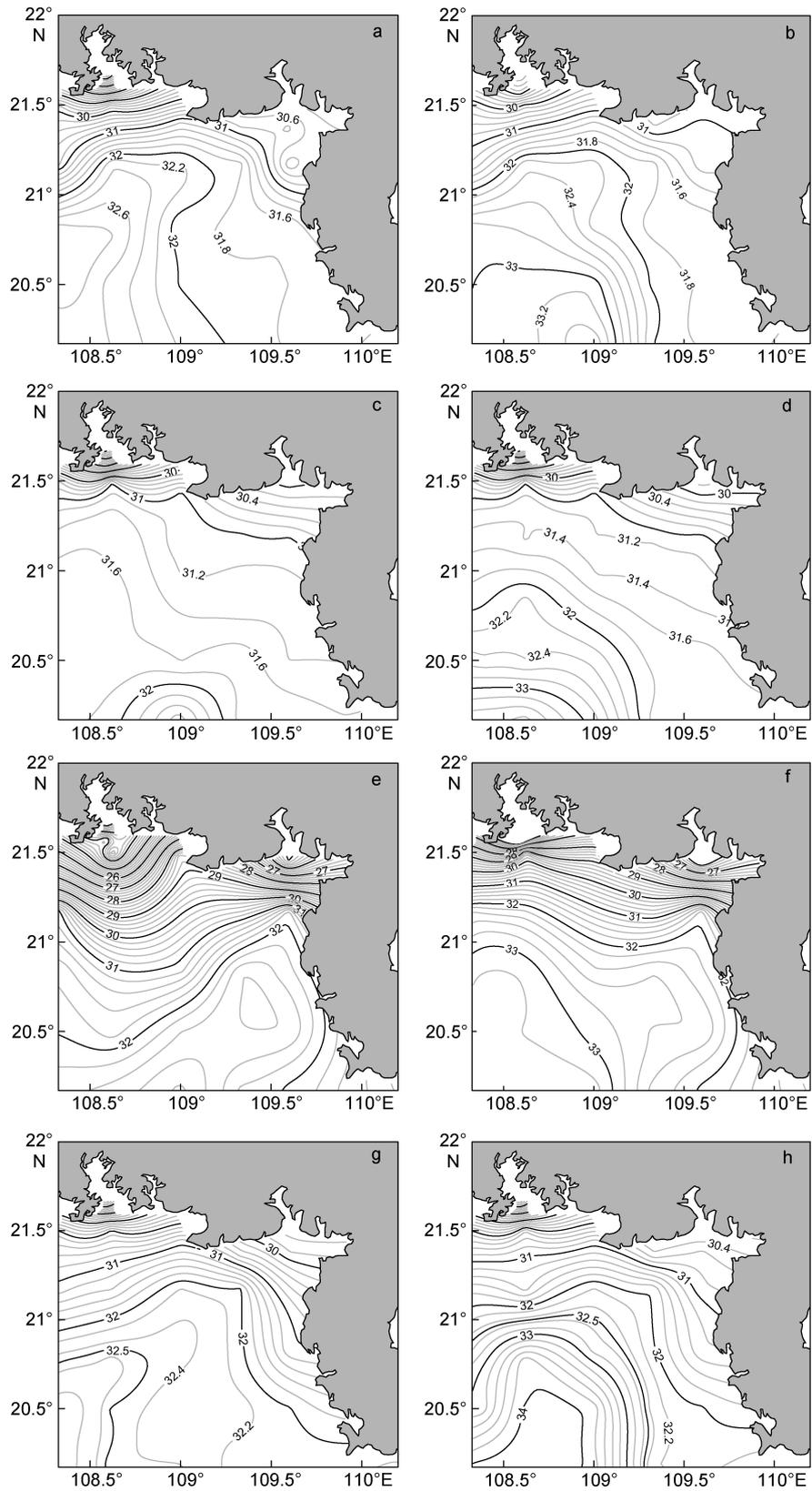


图3 表层、底层盐度的四季变化特征

Fig.3 The seasonal variation of surface and bottom salinity

注: a 和 b 分别为冬季表层与底层, c 和 d 分别为春季表层与底层, e 和 f 分别为夏季表层与底层, g 和 h 分别为秋季表层与底层

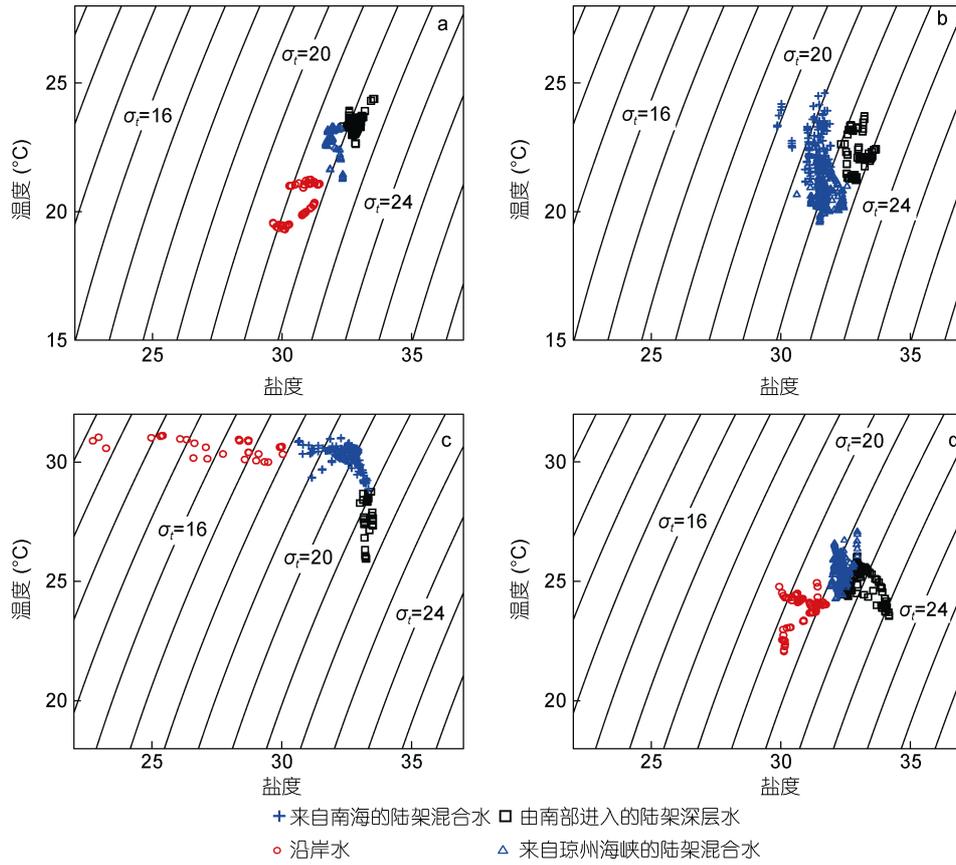
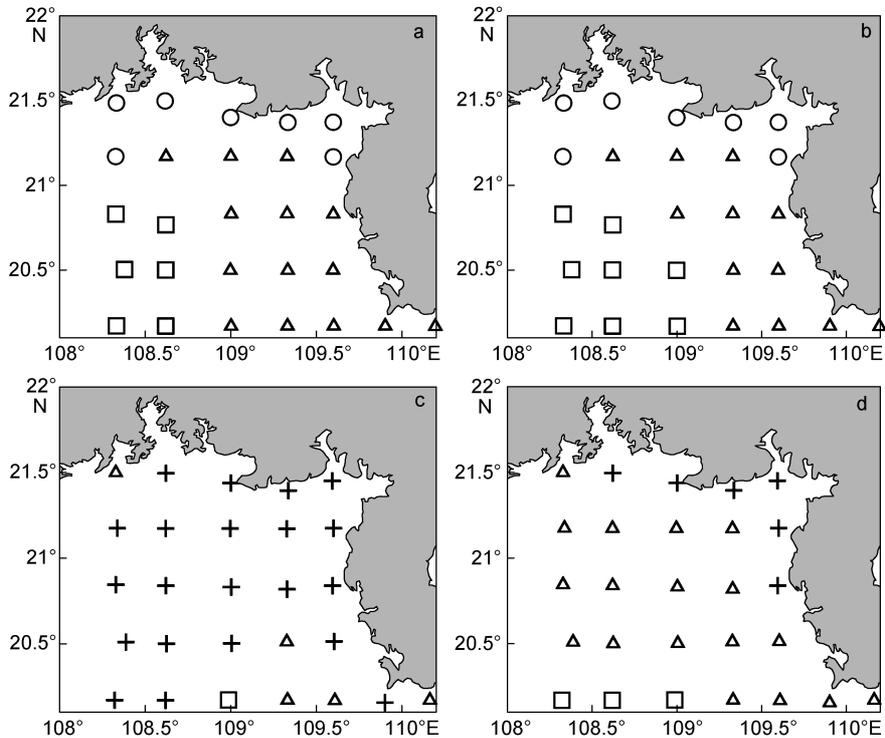


图 4 四个季节测站观测数据的温盐点聚及水团分析图

Fig.4 Temperature vs salinity diagram and water mass distribution from all hydrographic stations in four season
注: a. 冬季, b. 春季, c. 夏季, d. 秋季; σ_t 表示位势密度, 直线表示等位密线



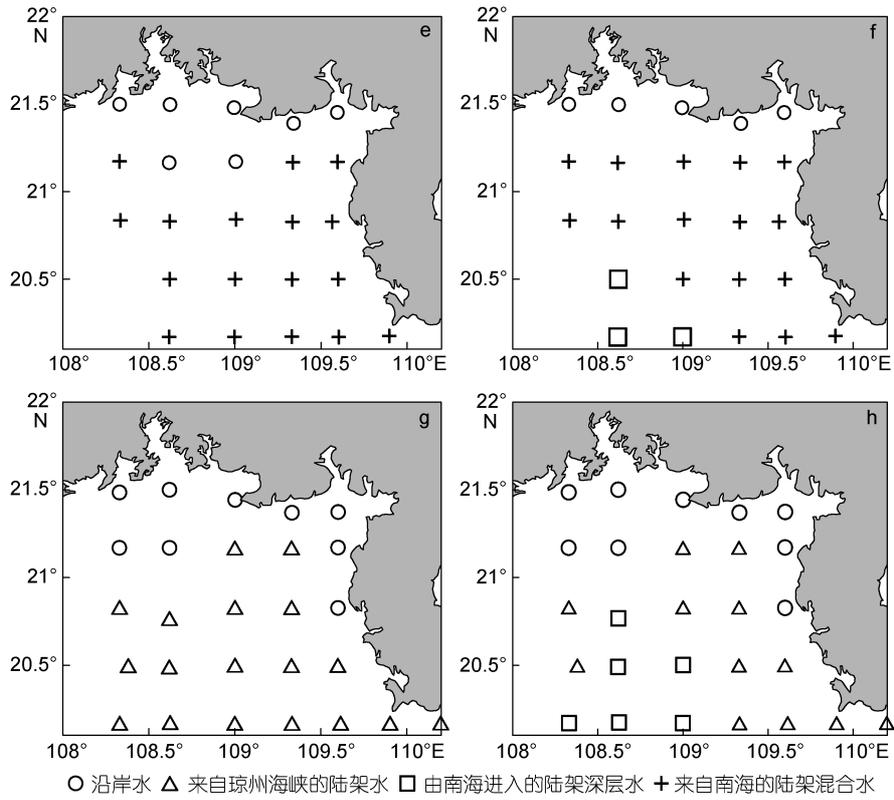


图 5 表层、底层水团属性分布

Fig.5 The seasonal variation of water mass distribution at surface and bottom

注: a 和 b 分别为冬季表层与底层, c 和 d 分别为春季表层与底层, e 和 f 分别为夏季表层与底层, g 和 h 分别为秋季表层与底层

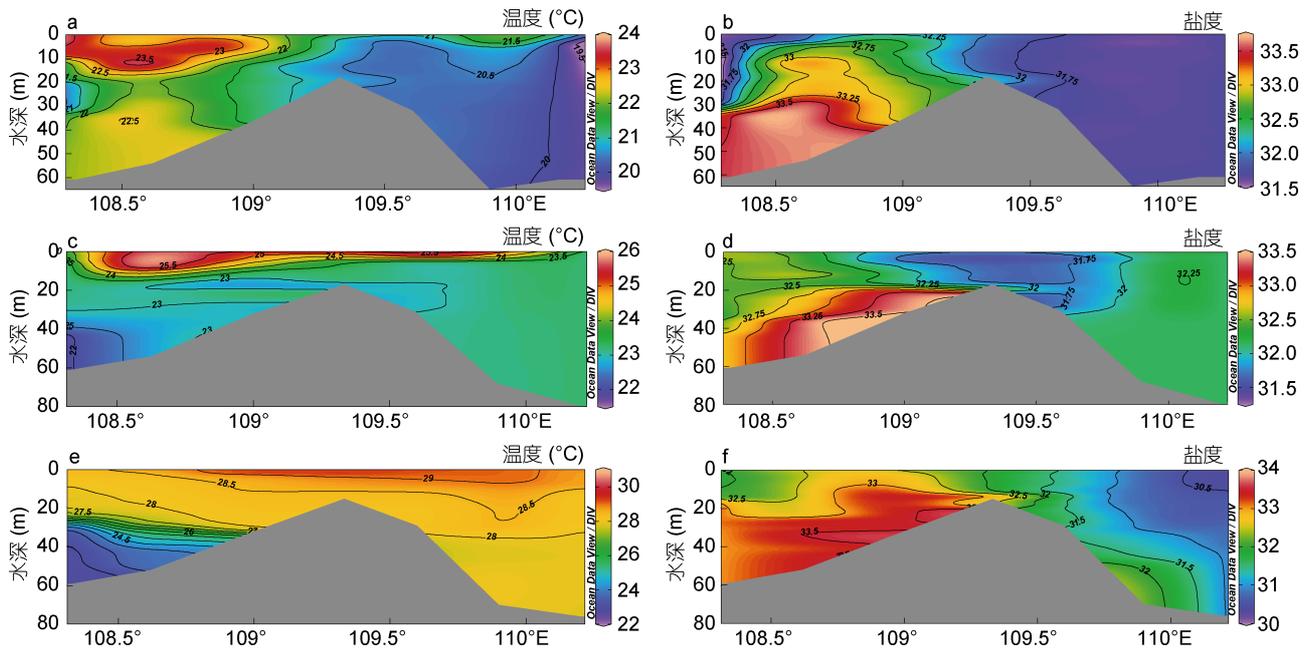


图 6 3 月(a、b)、4 月(c、d)和 6 月(e、f)琼州海峡断面的温盐分布图

Fig.6 The vertical profiles of temperature and salinity distributions in the Qiongzhou Strait

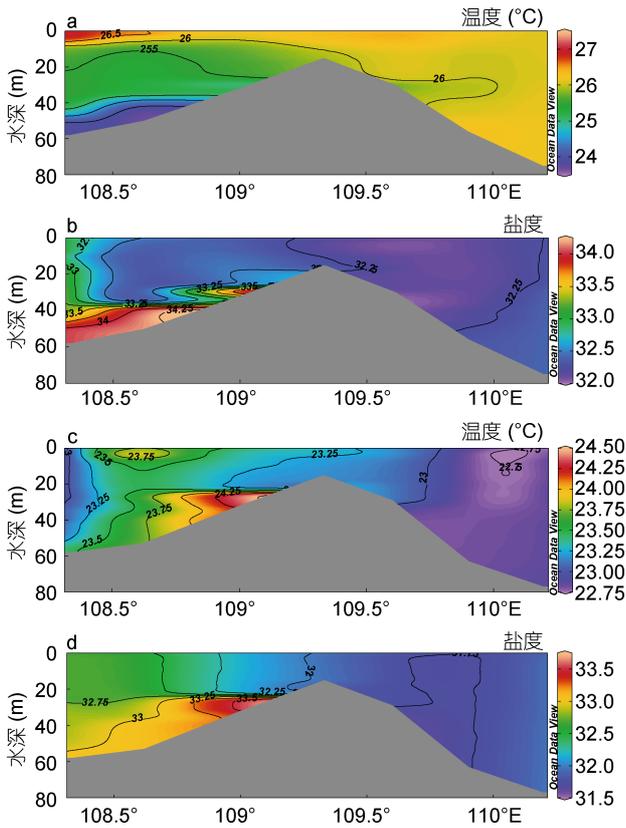


图7 11月(a、b)、12月(c、d)月琼州海峡断面的温盐分布图
 Fig.7 The thermohaline profile at the Qiongzhou Strait in November (a, b) and December (c, d)

通过比较纯风生流和锚系观测余流, 张国荣等(2009)认为琼州海峡余流成因可分解成低频的风生流部分和“背景流”, 余流既受到天气过程的影响, 又受到潮致余流、密度流和临近河流淡水注入的影响, 情况复杂多变。随着观测技术手段的进步, 今后可借助地波雷达、海洋声层析(Zhu *et al.*, 2015)和卫星漂流浮标等手段获取不同季节琼州海峡整体余流情况。

4 结论

通过对北部湾北部海域多期的水文观测揭示了北部湾东北海域的水团演变规律。

冬季表底层水体的隶属关系大致相同, 其中在水深>30m表底层均为陆架深层水的性质, 广西沿岸的站位为沿岸水, 在两者之间的广阔海域包括琼州海峡的站位均为陆架混合水。由于春季表层海水升温, 水团分布呈现复杂的分布特征: 陆架深层水只存在 ZN1-1、ZN1-2 和 ZN1-3 等站位所在的 20°10'N, 109°E 以西深水区的底层, 冬季的低温陆架混合水范围大幅缩小, 退缩在研究区的西北和琼州海峡西口附近的几个站的表层和大部分站的底层, 大部分的表层站位及广西沿岸的几个浅水站位整体上表现为高温的陆架混合水。由于夏季表层海水持续升温及沿岸入海径流的影响, 水团呈现复杂分布特征: 广西沿岸盐度低于 28 的沿岸水, 外围为盐度介于 28—32 的相对高温高盐的陆架混合水。深度大于 30m 站位的底层水体性质主要为低温高盐陆架底层水。秋季表层海水温度下降明显, 但水团分布上仍继承了夏天的分布格局: 沿岸水分布在广西沿岸的站位, 外围为相对高温高盐的陆架混合水, 深度大于 30m 站位的底层水体性质主要为低温高盐陆架底层水。

通过 20°10'N 断面不同月份航次的观测揭示了北部湾底层东部陆坡存在一支由外海沿等深线进入北部湾的高盐海水, 动力上反映了北部湾底层终年存在逆时针环流。结合卫星追踪的漂流浮标运动轨迹和表层盐度分布特征揭示了秋季粤西沿岸流携带珠江冲淡水通过琼州海峡进入北部湾。

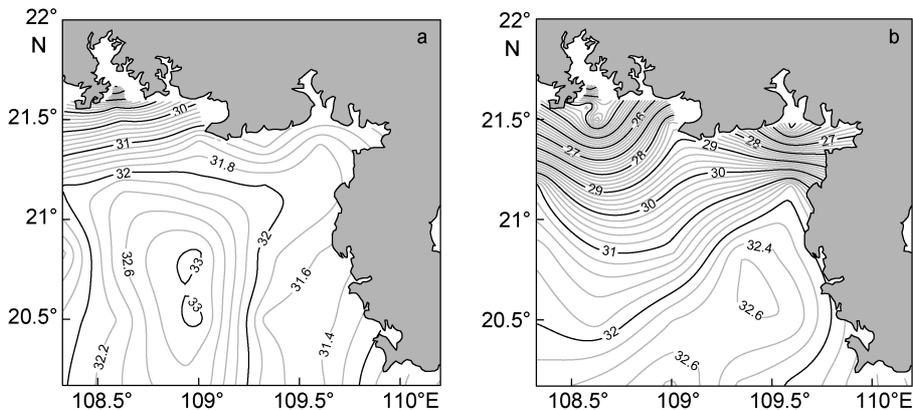


图8 6月(a)、8月(b)航次表层盐分布图
 Fig.8 The surface salinity distribution in the June (a) and August (b) field surveys

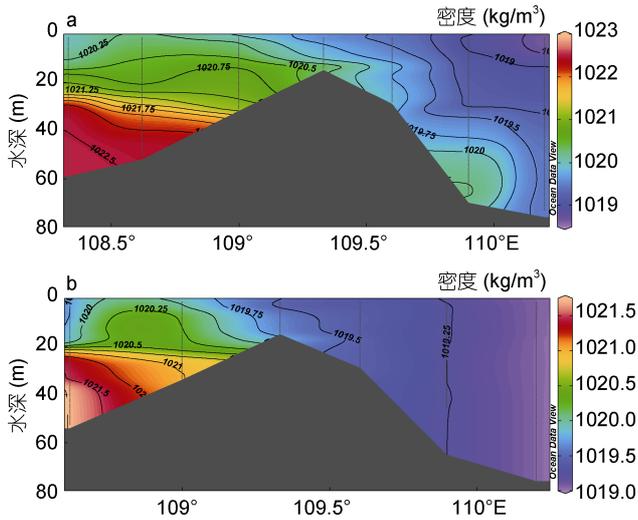


图9 6月(a)、8月(b)航次琼州海峡断面的密度分布图
 Fig.9 The section density profiles in the June (a) and August (b) field surveys

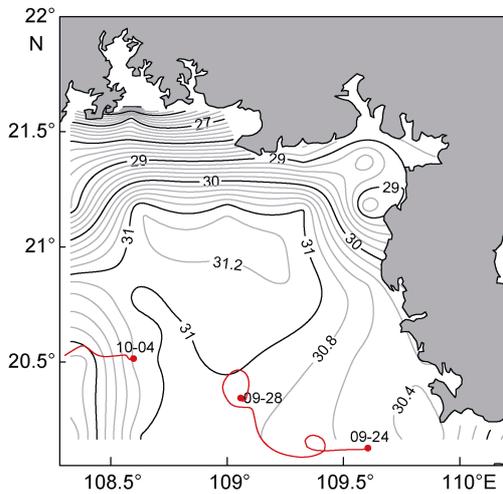


图10 2016年9月航次表层盐度分布及卫星漂流浮标轨迹图(红色曲线)

Fig.10 The surface salinity distribution of the September, 2016 field survey and the trajectories of two satellite-tracking drifters (red curve)

致谢 航次调查工作得到“近海生态灾害成因分析与应对措施”项目组全体调查人员和海顺六号、海科六八号调查船全体工作人员的配合。审稿人对论文初稿提出了建设性意见, 特此致谢。

参 考 文 献

苏纪兰, 袁业力, 2005. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社

杨士瑛, 陈波, 李培良. 2006. 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. 海洋湖沼通报, (1): 1—7

吴敏兰, 2014. 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. 厦门: 厦门大学硕士学位论文

张国荣, 马腾, 潘伟然等, 2009. 琼州海峡西口低频流动特征及其季节风场的响应分析. 见: 李炎, 胡建宇. 北部湾海洋科学研究论文集(第2辑). 北京: 海洋出版社, 64—76

陈波, 1986. 北部湾水系形成及其性质的初步探讨. 广西科学院学报, 2(2): 92—95

陈波, 竺利波, 2018. 广西海洋科学研究回顾与展望. 广西科学, 25(1): 1—9, 14

陈胜利, 胡建宇, 朱佳等, 2008. 2006年夏季北部湾东部海区水团的分析. 见: 胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学研究论文集(第1辑). 北京: 海洋出版社, 88—97

陈胜利, 胡建宇, 孙振宇等, 2009. 2006年冬季北部湾东部海区的水团分析. 见: 李炎, 胡建宇. 北部湾海洋科学研究论文集(第2辑) 北京: 海洋出版社, 120—126

侍茂崇, 2014. 北部湾环流研究述评. 广西科学, 21(4): 313—324

侍茂崇, 陈波, 2015. 涠洲岛东南部海域高浓度氮和磷的来源分析. 广西科学, 22(3): 237—244

姜景忠, 朱兆方, 1997. 春末夏初北部湾的水文特征. 见: 第十一届全国水动力学研讨会暨第四届全国水动力学学术会议. 无锡: 中国力学学会, 200—207

高劲松, 陈波, 侍茂崇, 2015. 北部湾夏季环流结构及生成机制. 中国科学: 地球科学, 45(1): 99—112

靳姗姗, 2017. 基于 K—means 聚类分析的南海水团分布及其季节变化研究. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所硕士学位论文

Chen Z H, Qiao F L, Xia C S *et al*, 2015. The numerical investigation of seasonal variation of the cold water mass in the Beibu Gulf and its mechanisms. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(1): 44—54

Gao J S, Xue H J, Chai F *et al*, 2013. Modeling the circulation in the Gulf of Tonkin, South China Sea. *Ocean Dynamics*, 63(8): 979—993

Shi M C, Chen C S, Xu Q C *et al*, 2002. The role of Qiongzhou Strait in the seasonal variation of the South China Sea circulation. *Journal of Physical Oceanography*, 32(1): 103—121

Zhu X H, Zhu Z N, Guo X Y *et al*, 2015. Measurement of tidal and residual currents and volume transport through the Qiongzhou Strait using coastal acoustic tomography. *Continental Shelf Research*, 108: 65—75

WATER-MASS EVOLUTION AND THE SEASONAL CHANGE IN NORTHEAST OF THE BEIBU GULF, CHINA

CAO Zhen-Yi¹, BAO Min¹, GUAN Wei-Bing^{1,2}, CHEN Qi¹

(1. *State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China*; 2. *Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China*)

Abstract Hydrological data were collected in nine field surveys in the Beibu Gulf, Guangxi, South China between September in 2016 and August in 2017, in which temperature, salinity, and density data were measured. The K-mean dynamic clustering method was applied to study the water mass distribution and evolution. According to the different sources of water, seawater were classified into three types, i.e., the bottom mixed shelf water with low temperature and high salinity, the surface mixed shelf water, and the coastal water with low salinity. An anticlockwise circulation was confirmed along the 20°10'N section in the eastern slope of Beibu Gulf as shown by hydrological data, and so did the residual current in the Qiongzhou Strait. In addition, with the help of satellite tracking surface drifters, the impact of the Zhujiang (Pearl) River diluted water on the study region was revealed. This research enriched the understanding of the distribution and seasonal variation of water masses in the northeastern Beibu Gulf. It was instructive to study the occurrence and development of red tide in this area.

Key words the Beibu Gulf; distribution of temperature and salinity; water mass; circulation