doi:10.3799/dqkx.2016.111

0608号台风"桑美"过境前后对长江口外海域环境的影响

陈 斌[1,2],王 凯[3],刘 健[1,2],高 飞[1,2]

1.国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室,山东青岛 266071
2.青岛海洋地质研究所,山东青岛 266071
3.中国科学院海洋研究所,山东青岛 266071

摘要: 台风是短期改变海洋环境的重要动力因素,会对近岸河口环境产生巨大的影响.基于0608号台风"桑美"过境前后长江口外海域多个站位的调查资料,分析了台风过境前后长江口外海域温度、盐度、浊度等环境要素的变化.结果表明:在台风引起的水体平流输运和垂向混合作用下,长江口外海域的温度、盐度、浊度等结构发生了较大改变.表层水体的温度降低,盐度增大;底层水体温度升高,盐度降低;温跃层厚度增大,层结构强度减弱;东部海域的盐跃层基本消失,温盐跃层对营养盐垂向输运的限制减弱,导致叶绿素a浓度值升高;台湾暖流底层冷水明显向近岸涌升,近岸上升流特征更为显著,同时台湾暖流底层冷水的中心位置向东偏移;水体浊度减小,尤其是近岸水深较浅海域,细颗粒沉积物被强平流作用输运.

关键词: 长江口;台风;温度;盐度;叶绿素a;浊度;海洋地质.

中图分类号: P731 **文章编号:** 1000-2383(2016)08-1402-11 **收稿日期:** 2015-11-30

The Impact of Super Typhoon Saomai (0608) on the Offshore Environment near the Yangtze Estuary

Chen Bin[1,2], Wang Kai[3], Liu Jian[1,2], Gao Fei[1,2]

1. *Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology of Ministry of Land and Resources*, *Qingdao* 26607, *China*
2. *Qingdao Institute of Marine Geology*, *Qingdao* 266071, *China*
3. *Institute of Oceanology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Qingdao* 266071, *China*

Abstract: Typhoon is an important dynamic factor for short-term changes in the marine environment, which have a huge impact on the coastal estuarine environment. Based on the filed observation offshore near Yangtze Estuary before and after the typhoon "Saomai", the variations of water environment factors were analyzed in horizontal and vertical distribution. The results show that the temperature, salinity, chlorophyll a and turbidity changes were largely due to the advection transport and vertical mixing in the water body caused by the typhoon. The surface water temperature decreased and salinity increased, whereas the bottom water temperature increased and salinity decreased. The thickness of thermocline increased and stratifications got weaker than those before the typhoon, and the halocline almost disappeared in eastern area. The vertical transport of nutrient enhanced, causing an increase of the chlorophyll a. After the typhoon, the bottom cold water from the Taiwan warm current rose clearly in coastal area, and the upwelling feature was more significant, and the center of the Taiwan warm current in the bottom shifted eastward. The water turbidity decreased, especially in the shallow coastal waters, fine-grained sediments were flow transported by stronger advection.

Key words: Yangtze Estuary; typhoon; temperature; salinity; chlorophyll a; turbidity; marine geology.

长江口至浙江海域几乎每年都受台风过境的影响,台风的中心低气压和巨大的风应力会使海洋上下层水体之间发生强烈混合和流辐散,使水体发生剧烈的水平和垂向运动,台风带来的大量降雨,也会

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 41330964);科技基础性工作专项项目(No. 2013FY112200).
作者简介: 陈斌(1979-),男,副研究员,博士.主要从事河口海岸沉积动力及环境演变方面研究.E-mail: chenbin1007@hotmail.com

引用格式: 陈斌,王凯,刘健,等,2016.0608号台风"桑美"过境前后对长江口外海域环境的影响.地球科学,41(8): 1402-1412.

导致河口径流量瞬时增大,大量的陆源物质被携带入海,使河口环境发生改变. 总之,台风是短期改变海洋环境的重要动力因素,会对近岸河口环境产生巨大的影响.

台风对海洋环境的影响已成为国际研究的热点,然而在台风登陆期间,气候及海洋环境异常恶劣,人们几乎很难通过获取台风过程中的海上实测数据来研究台风对海洋环境的影响(Shiah *et al*., 2000; Wren and Leonard, 2005). 随着观测设备和技术的不断发展,比如海洋浮标、海床基监测系统等设备,以及卫星遥感、三维数值模型等技术,已经被大量地应用于科学研究中. 台风过境时,强烈的气旋性风应力使水体强烈混合,并加速海洋和大气之间的热交换(Fujii *et al*., 2002),显著改变了海洋的温度、盐度、浊度和生态要素分布特征(Chen *et al*., 2003; Herbeck *et al*., 2011),例如强烈风场的水平运动会改变水体的温度和盐度分布,会使海表面温度、盐度、浊度等降低(Wang *et al*., 2011),同时也会使海水化学性质、水质、海洋生物等要素在短时间内发生急剧变化(Yang *et al*., 2011;李小倩等, 2014). 台风引发的强大底应力会使底层沉积物发生强烈的再悬浮,改变海底地貌特征,影响悬浮物的输运和沉积(Williams and Rose, 2001; Lugo-Fernández and Gravois, 2010). 本次研究利用 2006 年 0608 号台风“桑美”过境前后的两次观测资料,通过对比分析主要环境要素的变化,系统地研究了台风对河口近岸及邻近海域的环境影响,该研究可弥补以往对此认识的不足,并为深入了解台风对海洋环境产生的变化提供帮助.

1　资料与方法

2006 年 8 月份,中国科学院海洋研究所“科学三号”调查船在长江口海域开展了两个航次的调查工作(图 1). 第一个航次在台风过境前,2006 年 8 月 1～4 日,完成了 33 个站位、6 个断面调查,调查期间海况良好,东南风,风速小于 7.5 m/s,波高小于 1.5 m(数据来自上海气象局);第二个航次在台风过境后,2006 年 8 月 20～22 日,完成了 35 个站位、6 个断面调查,调查期间海况较为恶劣,偏东风,风速超过 12.5 m/s,波高 2.0 m,由于现场风速较大,故调查范围小于台风过境前. 剖面数据采集使用日本 JFE 公司生产的 AAQ1183 直读式多参数 CTD,采集参数包括温度(误差≤0.002 ℃)、盐度(误差≤0.03)、浊度(误差≤0.3 FTU)以及叶绿素(误差≤0.1 μg/L).

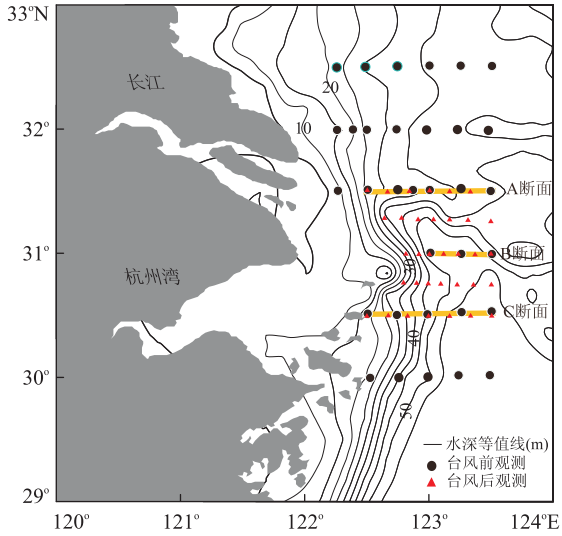

图 1　研究海域地形与调查站位

Fig. 1　Topographic sketch of study area and station locations

黄线为观察断面位置

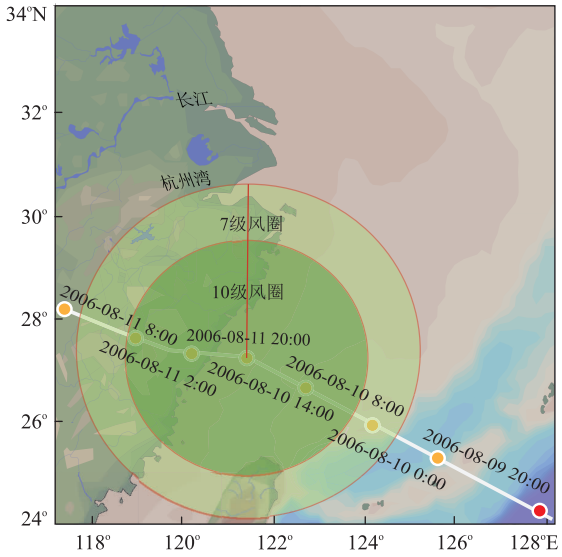

图 2　台风桑美路径

Fig. 2　Tracks of typhoon “Saomai”

0608 号台风“桑美”于 2006 年 8 月 5 日晚在关岛东南方的西北太平洋洋面上生成(图 2),生成后以 20～25 km/h 的速度向西北方向移动,强度逐渐加强,7 日上午 8 时加强为强热带风暴,7 日下午 2 时加强为台风,9 日上午 1 时加强为强台风,9 日下午 6 时继而加强为超强台风,并于 9 日晚进入东海海面,移动速度加快,增至 30 km/h 左右,于 10 日下午 5 时 25 分在浙江省温州市苍南县南部沿海登陆,登陆时中心附近最大风力有 17 级(60 m/s),中

心附近最低气压为92 kPa,其登陆时的风速很大,被称为建国以来登陆中国大陆最强的台风,虽然长江口海域距离台风中心有一定的距离,但受到台风的影响依然很大."桑美"登陆后继续向西北偏西方向移动,强度迅速减弱,11日上午在江西戈阳县境内减弱为热带低压,11日晚在湖北境内逐渐消失.

2 研究结果

2.1 台风过境前温度、盐度、叶绿素、浊度平面分布特征

所研究海域表层水温在8月份达全年最高(苗振清等,1995),平均温度为27.4 ℃,最高水温可达29.0 ℃,分布较均匀,东西温差大于南北温差.舟山群岛海域上升流特征比较明显,底层冷水在上升流的携带下与表层水混合(胡明娜和赵朝方,2008),致使靠近舟山群岛的西南海域温度较低,而东南海域则受北上的台湾暖流表层高温水影响,水温较高(图3a_1).底层海水温度经向分布均匀,纬向差异较大,台湾暖流底层冷水区已形成冷舌由南向北延伸,最低水温小于19.0 ℃,冷水舌前端已经到达研究海域中北部,海域南部温度明显低于北部(图3a_2).

盐度的分布呈典型的夏季分布特征,研究海域的盐度主要受长江冲淡水和台湾暖流高盐水的影响,其表层盐度为5.0~32.0,呈东南部高、西北部低的特点,最低盐度位于长江口海域,最低仅有5.0(图3b_1),低盐长江冲淡水流出口门后,随即朝东北方向运动,这也是长江冲淡水的一种常见路径.以往研究表明长江冲淡水在向外输运时,在口门附近受到口外羽状锋阻挡,分为两支向外运移(Beardsley *et al.*,1985;朱建荣和沈焕庭,1997),一支向东南,另一支向东北偏北,这两支的强弱主要受径流量的影响,径流量大时,朝东南运移的支流就较强;径流量小时,则朝向东北输运的支流强.在本研究中,2006年8月长江冲淡水朝东南向的输运偏弱,而东北向的输运强,2006年中国泥沙河流公报统计结果显示长江大通站径流量为28 935 m^3/s,显著低于大通站近50年来8月份的平均值43 000 m^3/s,这表明径流量偏小确实有利于长江冲淡水朝东北向输运;另外夏季台湾暖流向北能力增强,同时在东南季风的作用下,也有利于长江径流出口门后转向东北.底层盐度分布较为平均,变化范围在32.5~34.0(图3b_2),明显高于表层,长江冲淡水对底层影响并不明显,台湾暖流高盐水从底层楔入北向扩展程度大于上层水,故底层盐度呈现南高北低的分布特征.

表层叶绿素a的最大值出现在长江冲淡水东北向区域,由北向南呈现带状分布特征,表层叶绿素a浓度为0.20~25.00 μg/L(图3c_1);而底层的叶绿素a浓度较低,分布也较为均匀,浓度为0.15~2.20 μg/L(图3c_2).表层高浓度叶绿素a的中心恰好位于长江冲淡水朝东北向运移的路径上,两者的位置部分重合表明该高浓度的叶绿素a可能受到了长江冲淡水携带的大量营养盐产生的富营养化影响.

浊度的分布具有明显的河口海域分布特点,从河口海域到远海浊度呈递减趋势,表层浊度为0.2~15.0 FTU(图3d_1),高值区在长江口,且10.0 FTU的浊度等值线向东不超过122.5°E,表明夏季长江入海的大量细颗粒泥沙主要沉积在河口区.由于泥沙的沉降作用和底床泥沙的再悬浮作用导致底层水体含沙量远高于表层,底层水体浊度为0.5~50.0 FTU(图3d_2),其等值线基本平行于海岸线,底床泥沙分布以长江口和杭州湾为中心,呈扇面状沿陆架向外海扩展,但由于北上台湾暖流阻隔作用较为明显,使得研究海域东部为低浊度区,高值区则靠近杭州湾口,表明除了长江泥沙沿陆坡向东南输运之外,该海域底床泥沙的再悬浮对底层水体含沙量的贡献也很大,杭州湾口底层水体10.0 FTU的浊度等值线已经可以达到123°E.总体来看,夏季除了河口海域外,其他海域特别是123°E以东海域的浊度变化不大,不超过5.0 FTU.

2.2 台风过境前温度、盐度、叶绿素、浊度断面分布特征

由于调查的断面较多,本文仅以台风前后两次重复观测的结果,以由北至南的A、B、C三条断面为例进行分析.如图4所示,长江口外海区存在明显的温跃层及盐跃层,底层水温低于表层,盐度高于表层,说明长江冲淡水对底层影响较小,也表明该海域可能存在低温高盐水从底部入侵河口.3条断面均体现出在近岸(西部)的表层水温度要低于远岸(东部)水温,结合图3a_1和3a_2的温度表底层分布特征分析,笔者认为存在两种可能:一是浙江沿岸夏季低温水向北运移并与当地水体混合,致使研究海域西部上层水体温度降低,而夏季该区域附近基本为暖水,浙江海域水体的低温不可能是由海温平流引起的,只能是台湾暖流底层低温水受垂向对流作用向上混合所致,位于该区的C断面19.0 ℃等温度线和34.0等盐度线向上翘,表明该处存在上升流现象,胡明娜和赵朝方(2008)利用遥感方法对浙江海域低

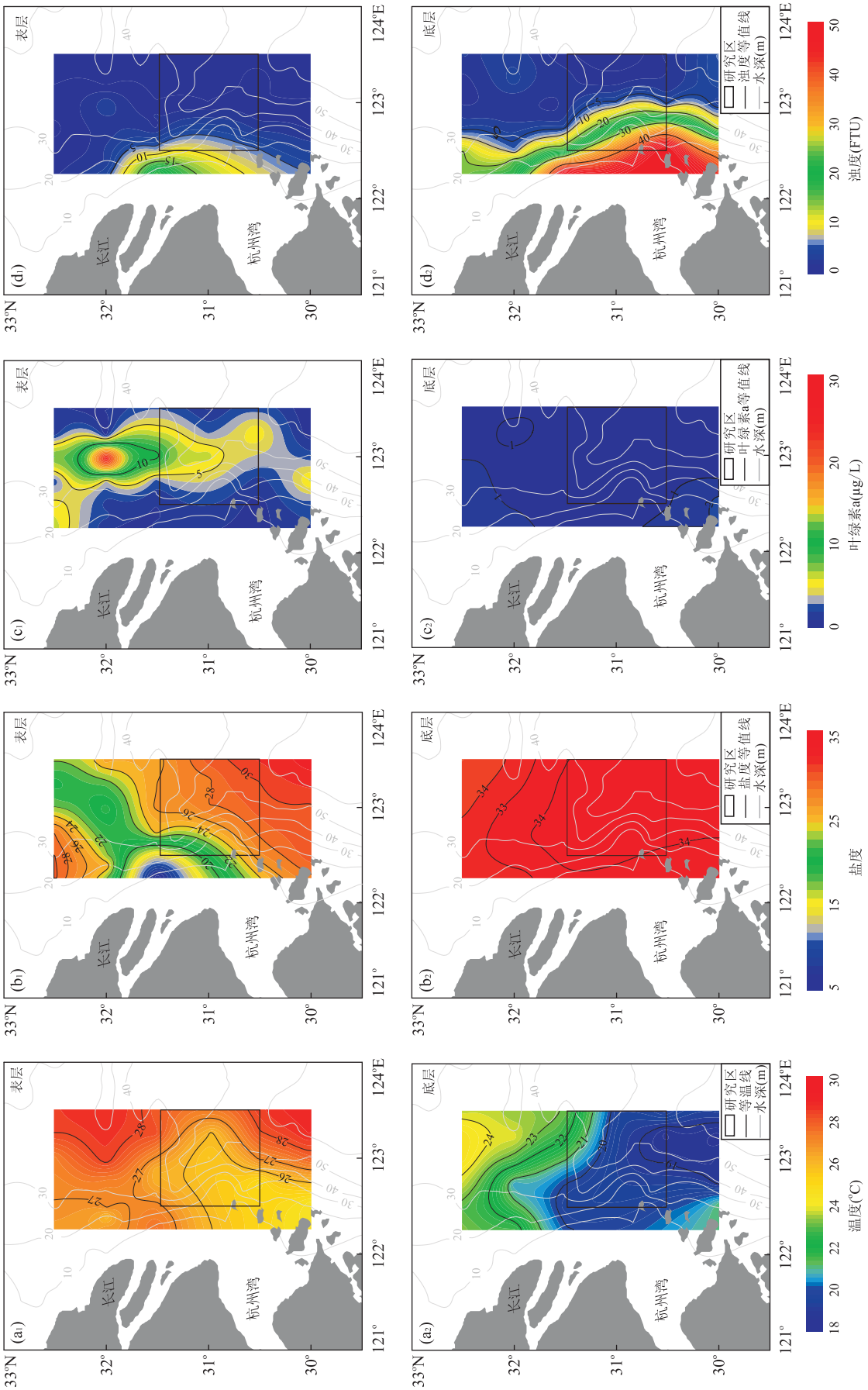

图 3　台风前研究海域温度、盐度、叶绿素a和浊度平面(表层、底层)分布

Fig. 3　Temperature, salinity, chlorophyll a and turbidity distributions in the surface and bottom layers of study area before typhoon “Saomai”

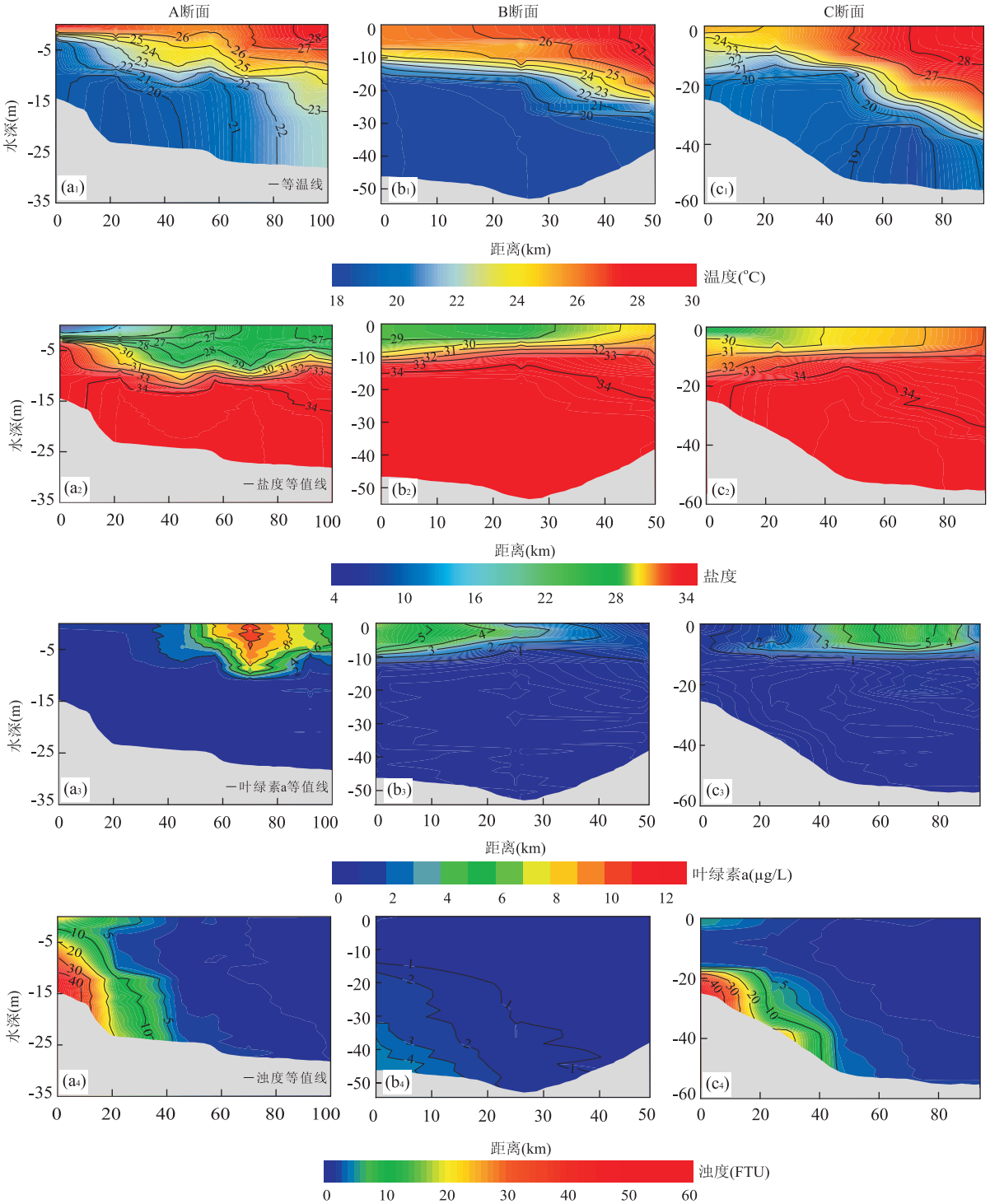

图 4　台风前 A、B、C 断面的温度、盐度、叶绿素 a 和浊度分布

Fig. 4　Temperature, salinity, chlorophyll a and turbidity distributions in A, B and C sections before typhoon "Saomai"

温区分布特征进行的分析研究也阐明了这一观点；二是长江口海域存在上升流将底层的冷水向上抬升所致，该区是台湾暖流与径流交汇的前缘区，处于大陆架迅速下降并趋于平缓的坡底处，也就是长江三角洲前缘低凹处，高盐台湾暖流在这里与径流混合后温度小范围上升，位于该区 A 断面的 20.0 ℃等温度线和 34.0 等盐度线也向上翘，表明底层水体沿陆坡有一定的涌升，但难以到达表层，表层水体仍然主要由长江冲淡水控制，强烈的层化作用限制了表层水体与底层水体的交换. 前人研究认为上升流的分布区域大致在 122°20′～123°10′E、31°00′～32°00′N(赵保仁等，2001)，该上升流是由斜压效应、

正压效应、底层 Ekman 效应和倾斜的地形相互作用产生的(Zhu, 2003). 低盐的长江冲淡水及钱塘江水从研究海域的西部表层入侵,3 条断面的表层水体盐度均呈现近岸底、远岸高的特征,在纬向上呈南高北低. 同时底部水体被台湾暖流底层低温、高盐水所控制,温度可低于 19.0 ℃,盐度超过 34.0. 从叶绿素 a 的 3 条断面垂向分布来看,叶绿素 a 的高浓度区沿 123°E 经向分布(周伟华等,2004). 在表层高浓度叶绿素 a 的区域存在着较强的温跃层和盐跃层,限制了表层高浓度水体向底层扩散,因而底层叶绿素 a 的浓度值较小. 随着水深的增加,浊度持续增大,近底层可达极大值. 31.5°N 的 A 断面泥沙分布为细颗粒的泥沙随上层水体向东扩散,而颗粒较粗的泥沙沉降过程中向外扩散,同时底床泥沙在动力作用下进入底层水体,混合沉降中的泥沙沿陆坡向外输运,范围不超过 123°E;B 断面缺少 123°E 以西的站位,且断面水深较大,故整体浊度较低;而位于钱塘江口 C 断面的西部水体浊度梯度较大,上层水体(15 m 以上)浊度小于 10.0 FTU,而底层浊度大于 40.0 FTU,表明在夏季,长江入海泥沙大多在中下层水体向南输运,同时钱塘江口的底床再悬浮泥沙在底层水体的携带下向外输运,范围也不超过 123°E.

2.3　台风过境后温度、盐度、叶绿素、浊度平面分布特征

台风登陆 10 天后,水体表层温度略小于风前,平均温度为 26.5 ℃,最高水温为 28.0 ℃(图 5a_1),台风带来的降温效应正逐步消退,西部海域依然受上升流携带的台风暖流底层冷水的影响,温度等值线基本平行岸线向外海增大. 台风带来的混合作用尚未消退,底层水温明显高于风前,台风暖流底层冷水特征更为直观(图 5a_2).

台风前后,研究海域水体盐度差异较大. 虽然台风带来的降雨会稀释表层水体,但在剧烈的垂向混合作用下,风后表层水体盐度要大于风前(图 5b_1),底层盐度显著减小,但表层盐度依然低于底层盐度,盐度等值线平行岸线向外海增大,在研究海域的东南区域存在台湾高盐水的入侵,在底层尤为明显(图 5b_2).

如图 5c_1 和 5c_2 所示,台风过境后,水体表层叶绿素 a 浓度升高,分布趋势与台风过境前略同,但底层水体叶绿素 a 浓度明显增大,台风期间的强动力条件使水体的垂直混合加强,并将较深层冷水区域中的磷酸盐、硝酸盐带到真光层,从而造成了浮游植物即叶绿素 a 浓度的增长.

风后表层浊度小于风前,最大值仅为 2.0 FTU(图 5d_1),底层浊度与风前比较,输运范围大大增加,其 10.0 FTU 等值线基本与风前 5.0 FTU 等值线重合(图 5d_2),这是由于台风对近底层水体的扰动、搅拌,产生了更大的湍流,增加了床面拖曳力即床面剪切应力,海底沉积泥沙在数倍于一般波浪状况条件下的底部剪切应力作用下大量再悬浮,极大地增加了水体中的泥沙含量,但在台风过境后几天内,水体的悬沙会迅速落淤,同时台风也对泥沙完成了一次分选,大量细颗粒运动性较强的泥沙被输运到较远的区域,这也可能是风后表层水体浊度较低的原因,此外台风带来的降雨也会使表层水体的浊度降低.

2.4　台风过境后温度、盐度、叶绿素、浊度断面分布特征

台风过境后,温度、盐度、叶绿素及浊度断面均发生了较大的变化(图 6). A 断面西部近岸处的温跃层厚度增大,最西部温跃层甚至消失,台湾暖流底层冷水在该断面入侵的位置基本不变,但受混合作用的影响,温度略高于台风过境前. B、C 断面上层水体混合程度较高,特别是东部上层水体温度基本一致,维持在 27 ℃左右,两个断面的西部底层冷水体均有明显的抬升现象,导致该处温跃层厚度变薄,同时底层冷水温度要低于风前 1 ℃左右. C 断面底层冷水区位置与台风过境前相比略向东移动. 各断面盐度变化较为明显,上层低盐水体与风前相比大大减少,西部水体混合作用较强,盐跃层基本消失. 另外在台风前各断面受淡水影响程度由大到小依次是 A、B、C 断面,然而在台风过境后,距离长江口最远的 C 断面西部上层水体受淡水影响范围却最大,其次是 B 断面,A 断面受淡水影响最弱. 断面的叶绿素 a 在台风的影响下,原本的结构也被打乱,A 断面和 B 断面西部明显有长江入海营养盐贡献,造成断面西部叶绿素 a 浓度升高,在台风带来的强混合作用下,各断面的叶绿素 a 出现向下层水体运动的趋势. 台风过境后,水体整体浊度降低,尤其是 A 断面浊度明显低于风前浊度,B 断面浊度变化不大,但混合作用增强,断面西部浊度垂向上呈梯度减小. 与风前相比,C 断面底层浊度高值区沿陆架略向东移动.

3　讨论

3.1　台湾暖流对研究海域的影响

夏季的台湾暖流水具有台湾海峡水和黑潮次表

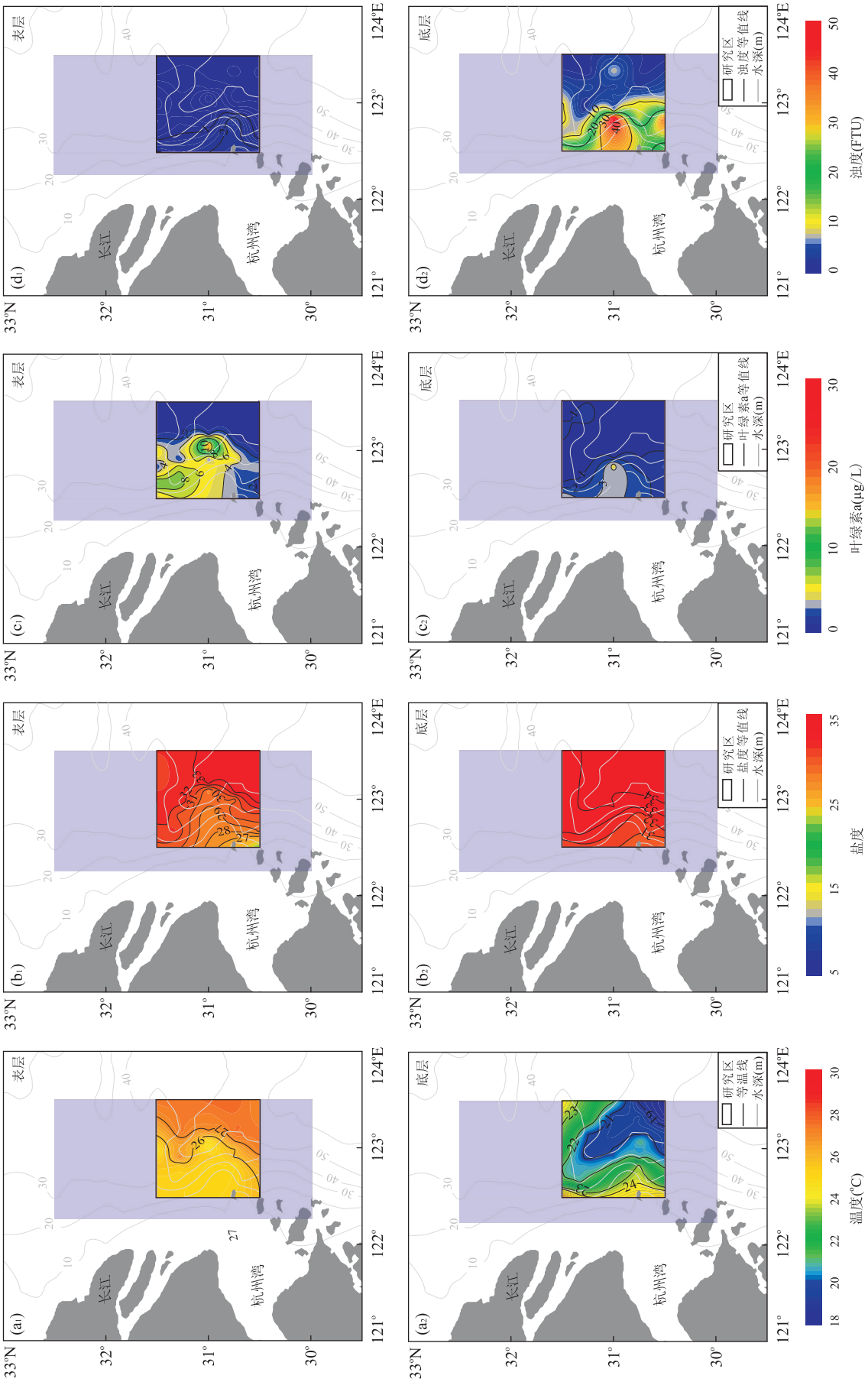

图 5 台风后研究海域温度、盐度、叶绿素a和浊度平面(表层、底层)分布

Fig. 5 Temperature, salinity, chlorophyll a and turbidity distributions in the surface and bottom layers of study area after typhoon "Saomai"

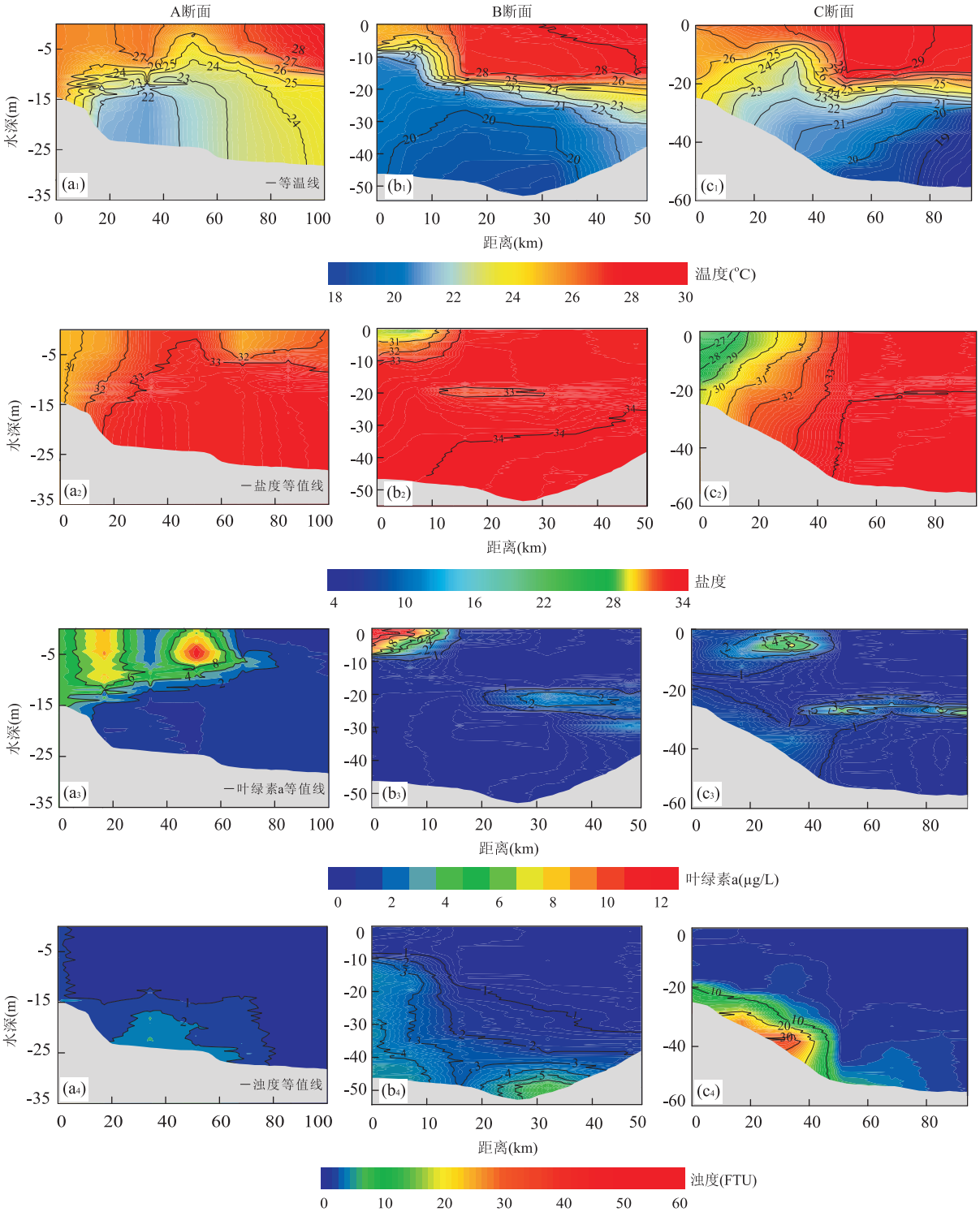

图 6　台风后 A、B、C 断面的温度、盐度、叶绿素 a 和浊度分布

Fig. 6　Temperature, salinity, chlorophyll a and turbidity distributions in A, B and C sections after typhoon “Saomai”

层涌升水两个来源,分别构成台湾暖流的表层水和底层水(石晓勇等,2013). 夏季台湾暖流底层水具有低温、高盐特性. 本次调查资料表明,研究区与其毗邻的水体相比温度明显偏低,但盐度的差异并不十分显著. 北上台湾暖流底层冷水区已形成冷舌由南向北延伸,入侵研究海域中南部,最远已超过 32°N(图 3a$_2$). 同时在舟山群岛和长江口海域上升流的作用下,垂向对流作用将台湾暖流底层低温水向上混合,使东北部的表层水体温度降低. 长江冲淡水出口门后沿表层水体向东扩散(图 3b$_2$),在 122.5°～123.0°E

受到北上的台湾暖流高盐水舌的顶托向东北方向扩散，而叶绿素 a 的高浓度中心也正好位于东北（图 $3c_2$），两者的位置重叠说明该区域上层水体的高浓度叶绿素 a 可能受长江冲淡水带来的大量营养盐产生的富营养化影响较大. 台湾暖流为含沙量很低的“清洁”水体，它的北上会阻碍长江入海物质向东扩散，含沙量基本以 123.5°E 为界，以西为高浊度水体，以东为低浊度水体（图 $3d_2$）.

台风过境前的断面分布（图 4）表明温盐跃层的厚度由南向北逐渐变薄，反映了底层低温高盐的台湾暖流水在北上过程中沿海底爬升. 位于长江口处的 A 断面温度和盐度特征表明，由于存在上升流形成的垂向环流，靠近河口一侧（断面西部），水体的温跃层和盐跃层厚度普遍较薄，只有 5 m 左右；而在其远岸一侧，即在该上升流区的东侧，其温跃层和盐跃层厚度可达 10 m. 图 4 中也显示叶绿素 a 的分布范围与长江冲淡水扩散范围存在一定的差别，只是高浓度区位于长江冲淡水的扩散路径上，并没有像长江冲淡水一样形成羽状锋，笔者根据杨德周等（2009）的数值试验认为，沿岸流、台湾暖流等的营养盐输入和上升流从海底输入的营养盐对该叶绿素 a 高浓度区的贡献要大于长江口. 浊度断面上显示在断面东部水体浊度几乎为 0，在以台湾暖流为“洁净”水体的水动力以及温盐结构的阻隔作用下，大量入海泥沙只分布在沿岸一带，无法向其邻近海域扩散，体现了长江口入海泥沙“夏储”的特点（杨作升等，1992）.

3.2 台风过境后台湾湾暖流温盐等结构的变化

如图 6 所示，在台风“桑美”过境引起的水体混合作用下，研究海域的水体温度、盐度结构产生了显著的变化. 中低层水体由于表层暖水的向下混合，温度会升高，而在底层冷水的上涌作用下，表层水体的温度则会下降. 在台风的强烈搅拌作用下，上层水体剧烈混合，导致温跃层的厚度增加，近岸底层的等温线明显上凸，下层冷水向近岸涌升形成上升流的迹象显著，说明在台风影响下. 上升流特征可能更为显著. 风后盐度断面特征显示，与风前相比，台湾暖流底层冷水的中心位置向东偏移，在断面 C 处显得尤为明显，34.0 等盐度线明显东移. 表层水体盐度升高，底层盐度降低，除了台风带来的垂向混合作用影响之外，台风对下层水体平流输运作用的影响也不可忽视，但本文对台风在短时间内是否会改变或影响长江冲淡水的扩散机制不做讨论. 温度、盐度等水体结构的显著变化必然也会对水体浮游植物的生长产生一定的影响，进而引起水体叶绿素 a 浓度的变化. 台风过境后，研究海域整体上叶绿素 a 浓度呈现升高的趋势，这与以往类似的研究结论相同，其均证实台风会导致原有的水体叶绿素 a 浓度增加（Wetz and Paerl，2008）. 温跃层会限制水体营养盐的垂向输运（Behrenfeld *et al*.，2006），台风前温跃层上部形成叶绿素 a 的高值区，温跃层下部为低值区，浓度值小于 1 μg/L. 台风过境后，温跃层位置下降，混合作用增强，其对营养盐垂向输运的限制也相应减弱，导致叶绿素 a 浓度值升高，且有向下输运的趋势.

台风过境后，长江口外海域的浊度整体呈降低的趋势，长江口 A 断面的浊度在台风过境后急剧减小，这可能是由于上升流的增强导致长江口外悬沙锋内移造成的，另外在台风过境时，有大量的悬浮泥沙在水体中，细颗粒的物质在动力作用下向外输运，颗粒较粗的泥沙在台风过境后迅速落淤，而长江入海泥沙对水体的补给也需要一定的时间，故此时水体的浊度较小，此外浅水区域受到台风的影响相对更大，在 A 断面和 C 断面的浅水区的浊度变化也相应较大. C 断面的浊度分布表明，底层泥沙有沿着陆架向东加速运动的趋势，笔者推断应为台风过境后的调查航次，海况仍较为恶劣，风浪较大，故影响底层浊度变化的主要因素是底床泥沙的再悬浮. B 断面的水深较大，距岸也较远，受到影响不大，仅在断面中部有少量的再悬浮现象.

4 结论

（1）夏季台湾暖流底层冷水区形成的冷水舌由南向北延伸，长江口外海域的温跃层及盐跃层的深度由南向北逐渐变薄，底层低温高盐的台湾暖流水在北上过程中沿海底爬升.

（2）长江冲淡水流出口门后向东扩散，受到北上的台湾暖流高盐水舌的顶托向东北方向扩散，台湾暖流的营养盐输入和上升流从海底输入的营养盐对研究海域叶绿素 a 浓度影响较大.

（3）在台风带来的混合作用下，长江口外海域水体表层温度降低，盐度升高；底层温度升高，盐度降低. 下层冷水明显向近岸涌升，台湾暖流底层冷水的中心位置向东偏移. 同时温跃层厚度增大，层结构强度减弱；东部海域的盐跃层基本消失，其对营养盐垂向输运的限制也相应减弱，导致叶绿素 a 浓度值升高，且存在向下混合的趋势.

（4）台风过境后，长江口外海域的上升流增强导

致长江口外悬沙锋内移,以及细颗粒的物质的大量向外输运造成浊度整体降低,调查过程中,风浪较大带来的再悬浮导致部分断面底层浊度增大.

致谢:审稿人及本刊编辑对本文提出了宝贵的意见和建议,在此一并致谢!

References

Beardsley, R. C., Limeburner, R., Yu, H., et al., 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4(1－2): 57－76. doi: 10.1016/0278－4343(85)90022－6

Behrenfeld, M. J., O'Malley, R. T., Siegel, D. A., et al., 2006. Climate-Driven Trends in Contemporary Ocean Productivity. *Nature*, 444(7120): 752－755. doi: 10.1038/nature05317

Chen, C. T. A., Liu, C. T., Chuang, W. S., et al., 2003. Enhanced Buoyancy and Hence Upwelling of Subsurface Kuroshio Waters after a Typhoon in the Southern East China Sea. *Journal of Marine Systems*, 42(1－2): 65－79.

Fujii, T., Maeda, J., Ishida, N., et al., 2002. An Analysis of a Pressure Pattern in Severe Typhoon Bart Hitting the Japanese Islands in 1999 and a Comparison of the Gradient Wind with the Observed Surface Wind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12－15): 1555－1568. doi: 10.1016/S0167－6105(02)00270－2

Herbeck, L. S., Unger, D., Krumme, U., et al., 2011. Typhoon-Induced Precipitation Impact on Nutrient and Suspended Matter Dynamics of a Tropical Estuary Affected by Human Activities in Hainan, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(4): 375－388. doi: 10.1016/j.ecss.2011.05.004

Hu, M. N., Zhao, C. F., 2008. Upwelling in Zhejiang Coastal Areas during Summer Detected by Satellite Observations. *Journal of Remote Sensing*, 12(2): 297－304 (in Chinese with English abstract).

Li, X. Q., Liu, Y. D., Zhou, A. G., et al., 2014. Sulfur and Oxygen Isotope Compositions of Dissolved Sulfate in the Yangtze River during High Water Period and Its Sulfate Source Tracing. *Earth Science*, 39(11): 1547－1554 (in Chinese with English abstract).

Lugo-Fernández, A., Gravois, M., 2010. Understanding Impacts of Tropical Storms and Hurricanes on Submerged Bank Reefs and Coral Communities in the Northwestern Gulf of Mexico. *Continental Shelf Research*, 30(10－11): 1226－1240. doi: 10.1016/j.csr.2010.03.014

Miao, Z. Q., Li, P., Shui, B. N., 1995. Hydrologic Characteristics of Zhejiang Fishing Grounds in the Summer-Autumn. *Journal of Zhejiang College of Fisheries*, 14(1): 14－19 (in Chinese with English abstract).

Shi, X. Y., Li, H. M., Wang, H., et al., 2013. Taiwan Warm Current and Its Impact on the Areas of Frequent Harmful Alga Bloom in the East China Sea in Summer. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 44(5): 1208－1215 (in Chinese with English abstract).

Shiah, F. K., Chung, S. W., Kao, S. J., et al., 2000. Biological and Hydrographical Responses to Tropical Cyclones (Typhoons) in the Continental Shelf of the Taiwan Strait. *Continental Shelf Research*, 20(15): 2029－2044. doi: 10.1016/s0278－4343(00)00055－8

Wang, X. D., Han, G. J., Qi, Y. Q., et al., 2011. Impact of Barrier Layer on Typhoon-Induced Sea Surface Cooling. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 52(3): 367－385. doi: 10.1016/j.dynatmoce.2011.05.002

Wetz, M. S., Paerl, H. W., 2008. Estuarine Phytoplankton Responses to Hurricanes and Tropical Storms with Different Characteristics (Trajectory, Rainfall, Winds). *Estuaries and Coasts*, 31(2): 419－429. doi: 10.1007/s12237－008－9034－y

Williams, J. J., Rose, C. P., 2001. Measured and Predicted Rates of Sediment Transport in Storm Conditions. *Marine Geology*, 179(1－2): 121－133. doi: 10.1016/s0025－3227(01)00191－8

Wren, P. A., Leonard, L. A., 2005. Sediment Transport on the Mid-Continental Shelf in Onslow Bay, North Carolina during Hurricane Isabel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63(1－2): 43－56. doi: 10.1016/j.ecss.2004.10.018

Yang, D. Z., Yin, B. S., Yu, Z. M., et al., 2009. Study on the Character of Distribution of Chlorophyll-a off the Changjiang River and Its Sources of Nutrients. *Acta Oceanologica Sinica*, 31(1): 10－19 (in Chinese with English abstract).

Yang, T. N., Lee, T. Q., Meyers, P. A., et al., 2011. The Effect of Typhoon Induced Rainfall on Settling Fluxes of Particles and Organic Carbon in Yuanyang Lake, Subtropical Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(6): 1171－1179. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.07.016

Yang, Z. S., Guo, Z. G., Wang, Z. X., et al., 1992. The Macro Pattern of Suspended Matter Transport to Eastern Deep Sea in Yellow Sea and East Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 4(2): 81－90 (in Chinese).

Zhao, B. R., Ren, G. F., Cao, D. M., et al., 2001. Characteristics of the Ecological Environment in Upwelling Area Adjacent to the Changing River Estuary. *Oceanologia et*

Limnologia Sinica, 32(3): 327－333 (in Chinese with English abstract).

Zhou, W. H., Yuan, X. C., Huo, W. Y., et al., 2004. Distribution of Chlorophyll a and Primary Productivity in the Adjacent Sea Area of Changjiang River Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 26(3): 143－150 (in Chinese with English abstract).

Zhu, J. R., 2003. Dynamic Mechanism of the Upwelling on the West Side of the Submerged River Valley off the Changjiang Mouth in Summertime. *Chinese Science Bulletin*, 48(24): 2754－2758. doi: 10.1007/bf02901770

Zhu, J. R., Sheng, H. T., 1997. Mechanism of Expansion of Changjiang Diluted Water. East China Normal University Press, Shanghai (in Chinese).

附中文参考文献

胡明娜,赵朝方,2008.浙江近海夏季上升流的遥感观测与分析.遥感学报,12(2): 297－304.

李小倩,刘运德,周爱国,等,2014.长江干流丰水期河水硫酸盐同位素组成特征及其来源解析.地球科学,39(11): 1547－1554.

苗振清,李平,水柏年,1995.夏秋汛浙江渔场的水文特征.浙江水产学院学报,14(1): 14－19.

石晓勇,李鸿妹,王颢,等,2013.夏季台湾暖流的水文化学特性及其对东海赤潮高发区影响的初步探讨.海洋与湖沼,44(5): 1208－1215.

杨德周,尹宝树,俞志明,等,2009.长江口叶绿素分布特征和营养盐来源数值模拟研究.海洋学报,31(1): 10－19.

杨作升,郭志刚,王兆祥,等,1992.黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局.海洋学报,4(2): 81－90.

赵保仁,任广法,曹德明,等,2001.长江口上升流海区的生态环境特征.海洋与湖沼,32(3): 327－333.

周伟华,袁翔城,霍文毅,等,2004.长江口邻域叶绿素a和初级生产力的分布.海洋学报,26(3): 143－150.

朱建荣,沈焕庭,1997.长江冲淡水扩展机制.上海:华东师范大学出版社.

* *

《地球科学》
2016年9月 第41卷 第9期 要目预告

地幔转换带条件下岩石矿物波速测量方法:超声波与多面砧技术的结合…………周春银等
湘中紫云山岩体暗色微粒包体的成因:岩相学、全岩及矿物地球化学证据…………曾认宇等
浙西大铜坑斑岩型钨钼矿床成岩成矿年代学…………胡开明等
细颗粒粘滑运动的能量耗散与释放试验…………崔德山等
火星古湖泊研究的现状、问题与展望…………赵健楠等
基于岩体结构特征的高速远程滑坡致灾范围评价…………葛云峰等
新疆西准噶尔哈山地区佳木河组的重新厘定及地质意义…………李永军等
莺歌海盆地黄流组浅海重力流砂体物源分析及油气地质意义…………黄银涛等