

影响长江口毗邻海域低氧区多种时间尺度变化的水文因素

周 锋^{1,2,*}, 黄大吉^{1,2}, 倪晓波¹, 宣基亮¹, 张 经³, 竺可欣¹

(1. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室/国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012; 2. 浙江大学海洋科学与工程学系, 杭州 310027;
3. 河口海岸国家重点实验室/华东师范大学, 上海 200062)

摘要:对 2006 年 6 月、8 月和 10 月与 1999 年 8 月在长江口向东至 125°E、27°30′—33°30′N 之间海域(统称长江口毗邻海域)开展的 4 次多学科综合海洋调查资料进行分析,了解长江口毗邻海域低氧现象的季节变化、年间变化及其与水团变化的关系。研究再次发现该海域存在长江口和浙江近海 2 处低氧水体、且 2 处低氧水体具有不同的季节演替和年际变化特征:长江口附近海域低氧水体的溶解氧浓度低、覆盖的面积大,低氧持续时间相对较短、溶解氧浓度的季节变化较大;浙江沿海低氧水体面积较小、溶解氧浓度的季节变化较小、但持续时间较长(6—10 月份);2 处水体低氧现象的年际变化均很显著。长江口毗邻海域的多种水动力因素及其相互作用导致了水团消长的季节和年际变化,并与该海域低氧现象的季节和年际变化具有较好的关联。季节性跃层的成长是近底层低氧形成的必要条件,而水团迁移和消长过程及其季节和年际变动是导致低氧区不同时间尺度变化的重要物理因素。针对 2006 年与 1999 年夏季长江口低氧区的显著变化给出观测证据,提出该时期内长江口的水团结构发生了变化,是导致低氧核心区的位置偏北的主要动力原因。2006 年和 1999 年夏季长江口附近低氧水体的年际变化与同时期叶绿素高浓度区的位置变动是一致的,也为此期间水团消长情况提供了证据。

关键词:长江冲淡水;台湾暖流;层化;水团;低氧

Hydrographic analysis on the multi-time scale variability of hypoxia adjacent to the Changjiang River Estuary

ZHOU Feng^{1,2,*}, HUANG Daji^{1,2}, NI Xiaobo¹, XUAN Jiliang¹, ZHANG Jing³, ZHU Kexin¹

1 State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics/Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2 Department of Ocean Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

3 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research/East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract: The extremely low concentration of dissolved oxygen (DO) phenomenon, also known as hypoxia if $DO \leq 2$ mg/L, is extraordinary significant in the near bottom water of the Changjiang River Estuary and its adjacent waters in summer. The area of hypoxic zone in this region has a clear trend of increasing during last decades. The spatial distribution of hypoxic zone shows a significant inter-annual variability. Most of published work has mainly concentrated on the formation of hypoxia while only a few attentions have been paid on the mechanism of hypoxia variability and its association with dynamical factors. To understand the evolution and variability of hypoxia and their relationship with the hydrographic conditions in the above area, data collected during four interdisciplinary cruises in June, August and October 2006 and in August 1999 were comparatively analyzed in this paper. The hypoxia off the Changjiang River Estuary was not significant in early summer (June) but already disappeared in early autumn (October). By contrast it continued along the coastal waters off Zhejiang Province throughout three cruises in 2006. In mid-summer (August), there were two hypoxic zones co-existed in the investigating areas as in 1999. It was obvious that these two low DO zones evolved in different ways with different

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2006CB400603);国家自然科学基金(40706018,40776021);浙江省自然科学基金(Y507229);科技部支撑计划(2008BAC42B02);国家海洋局青年海洋科学基金(2010011);国家专项资助(908-ZC-I-01, 908-01-BC06)

收稿日期:2010-01-26; 修订日期:2010-06-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhoufeng@sio.org.cn

seasonality. The area of the north hypoxic zone was significantly larger even though it took place later. In the meantime, the DO concentration there was much lower than that of the south part, but endured for a relatively short time. The inter-annual variability was also much stronger especially for the north hypoxic zone. A comparison was conducted to show those variations between the mid-summer of 1999 and 2006 were unprecedentedly large marked by the enormous intensification of northward spreading of the hypoxic zone in 2006. The prominent multi-time scale variability of the hypoxia is associated with variable physical forcing. (1) The seasonal evolution of hypoxia is relevant to the corresponding changes of thermo- and hydro-dynamic factors. The development of vertical stratification is necessary for the formation of the bottom hypoxic condition. (2) The competition among various waters masses, like the Changjiang Diluted Water (CDW) and the Taiwan Warm Current Water (TWCW), result in migrations of hypoxic zone in different years. The distribution of satellite observed sea surface chlorophyll *a* provides supporting evidence for the changes of waters masses. According to these observations, the 3D primitive equation model-Regional Ocean Modeling Systems (ROMS)-was applied to the East China Sea to examine the variability of the CDW with the agency of sea surface salinity. A set of numerical simulations were conducted to understand the individual and joint effects of three forcing: wind, river runoff and the Kuroshio. The significant disparity between 1999 and 2006 can be explained by the CDW retreat and/or the TWCW expansion induced by these factors, i. e. the change of the wind fields, the tremendous reduction of the freshwater runoff and variant intrusion of the TWCW. Among of which, the changing wind forcing plays the dominant role to the changed CDW. This paper suggests that more attentions need to be paid on the roles of hydrography played on the hypoxia formation and evolutions.

Key Words: Changjiang Diluted Water; Taiwan Warm Current Water; water mass; stratification; hypoxia

海水中的氧气是海洋生物维持生命的基础,一般当水体中的溶解氧浓度低至 2—3 mg/L 的时候就会影响多数鱼类的生存;当浓度更低时甚至连耐氧能力较强的底栖类生物也难以存活^[1]。Grantham 等^[2]报道了于加利福尼亚沿海拍摄到的底层低氧海域中鱼类死亡的现象。由于低氧对海洋生态系统中生物和生物多样性的不良影响,甚至有研究将海洋中的低氧区比作“死亡区”^[3]。最近, Vaquer-Sunyer 还认为以往对于低氧临界值的判断偏低,低氧造成的实际危害可能还被低估了^[4]。历史上,近海陆架和河口区域较低的底层溶解氧现象也时有发生。但近几十年来,某些海域低溶解氧现象变得较为突出,主要是低氧发生的频率逐渐升高、或发生的海域面积增大、或发生时的溶解氧浓度更低,有关现象引起学界的高度重视^[1,3,5-7]。国外较早就对低氧现象开始关注,譬如从 20 世纪 80 年代中期开始至今,美国就对墨西哥湾北部低氧频发海域进行了持续监测^[1];并有一系列研究和评估^[8-10],然后通过物理或统计模型等方式研究缓解低氧现象需要采取的策略^[11-15]。模式试验认为把密西西比河输入的氮通量减小到一定程度可起到降低低氧发生频率的作用,但如果考虑气候变化的影响,则必须较模拟更为严格的控制营养物质的输入^[11]。在我国,近海低溶解氧现象的发现可追溯至 20 世纪的 50—60 年代,但当时低氧或接近低氧的状况仅发生在长江口^[16-17]和珠江口的极少数站点^[18],且后续缺乏长期的、针对性的观测、研究和评估。1999 年夏季观测时,长江口毗邻海域的低氧水体已有相当大的面积^[19]。在随后的几年观测中,长江口毗邻海域的低氧状况仍不容乐观,面积较大且有上升趋势,并呈现出较大的季节和年际变化特征^[20-22]。在总体上,对长江口毗邻海域低氧形成及其时空变率的生态和动力机制尚未完全清晰。

低氧现象的形成是个复杂的过程,受到多种因素的共同影响。Diaz 根据全球 40 多个海域低氧现象的统计分类和评估,认为富营养化是导致近海低氧现象趋于严重的主要原因^[6]。这其中除了生物和化学过程之外,物理因素在低氧现象的形成、维持和破坏中也有重要作用。(1) 跃层的形成阻碍了表层(溶解氧相对高)和底层(溶解氧相对低)水体的交换,如长江口外海的高温、低盐的表层长江冲淡水 and 底层北上的台湾暖流高盐、低温水形成较强的温度和盐度层化成为垂向溶解氧交换的障碍^[19-20];而珠江口则由于水深较浅、大风过程频发等原因无法形成持续时间较久的大面积低氧^[23]。(2) 平流过程对营养盐和有机质的输运作用,影响表

层或者近表层浮游植物或者底层有机质的空间分布,如 Wei 等根据次表层浊度极小值的现象,认为引起长江口毗邻海域低氧的底层有机质主要不是来自长江输入,而是源于南方海区的向北输送^[21];Zhang 等认为长江河口及其临近海域富营养化除了受陆源影响外,富营养的黑潮次表层水的入侵亦是原因之一^[24]。(3)上升流携带外源性低溶解氧、高营养盐含量的水体入侵:前者使溶解氧背景值相对偏低,更易发生低氧现象;后者会加剧富营养化并可使藻华多发,从而使底层有机碎屑增多,其分解需要消耗更多溶解氧,如加利福尼亚近海的缺氧就属于这种情况^[2];在东海陆架边缘,高营养盐的黑潮次表层水涌升也会给我国近海带来磷含量相对丰富的水体^[25-26]。具体到不同海域,低氧现象发生的主要机制也不完全相同。根据 Rabouille 等对长江、珠江、美国密西西比河和法国罗纳河的比较分析,虽然这 4 条河的营养盐浓度相似,但是仅长江和密西西比河口外的夏季低氧比较显著(面积大且时间持久),他们认为可能有 4 种差异导致四条河的外海溶解氧形势的区别,分别是初级生产力、底层水滞留时间、层化持续时间和河口外陆架的地理形状^[27]。石晓勇等^[28]分析了春季长江口毗邻海域物理和生化等多种要素的观测资料,认为春季藻华和径流所带来的有机质的分解和底层水体交换速度缓慢促使研究海域底层在春季就可形成溶解氧偏低的情况,此后有机质沉降逐渐增加,并随水团扩张,导致底层溶解氧浓度越来越低、且面积逐渐扩大。但是,长江口毗邻海域的低氧究竟如何随季节发展,此前尚无系统研究。由于长江口毗邻海域坐落着多处经济渔场,其中包括我国最大的舟山渔场,研究该海域低氧现象的形成过程、变化机制、低氧造成的长期影响等方面的内容不仅具有学术价值,也有重要的社会意义。

为此,在“东、黄海生态系统动力学与生物资源可持续利用”项目支持的 1999 年夏季长江口观测基础上,2006 年“我国近海生态系统食物产出的关键过程及其可持续机理”项目又在长江口以东、125°E 以西,纬度 27°30′—33°30′N 之间的海域内(统称“长江口毗邻海域”)先后进行 3 个航次的多学科综合的低氧专题调查,为多角度了解长江口外海低氧区的特点,特别是低氧的不同时间尺度的演变过程,提供了基础资料。为了叙述方便、且便于与历史研究比较,把溶解氧浓度不超过 3 mg/L 的状态才称为低氧,其中将小于等于 2 mg/L 又称为缺氧或者低氧核心。张莹莹等^[29]已经揭示 2006 年 8 月份长江口毗邻海域缺氧区具有南、北双区域特征(图 1),与 1999 年同期^[19]一致,并分析了该海域的地球化学特征,从营养盐角度探讨低氧发生的原因,认为长江径流携带的营养盐导致的富营养化加剧了研究海域氧的亏损。但是,研究海域的富营养状况可能不仅仅是,甚至主要不是由陆源营养盐引起的,穿越陆架的黑潮涌升水也会给陆架带来磷含量相对丰富的水体^[24-26],也可能是长江口毗邻海域富营养化的主要因素之一^[21]。

前期的工作已经从数值模拟的角度证实了典型年份之间动力驱动因素的显著差异会导致长江口毗邻海域水团的重大变化,并对低氧分布造成影响^[30]。本文从航次观测资料出发,分析了 4 个航次长江口毗邻海域低氧的季节演变和年际变化,通过同期的水团分析了解不同时间尺度的水团变化与低氧变化的相关性,并通过卫星观测海表叶绿素资料和数值模式结果进一步做了验证。

1 数据和方法

现场观测共 4 个航次,时间跨度分别为 2006 年 6 月 1 日至 13 日、8 月 15 日至 31 日、10 月 2 日至 14 日和 1999 年 8 月 20 日至 29 日,通过“北斗号”科学考察

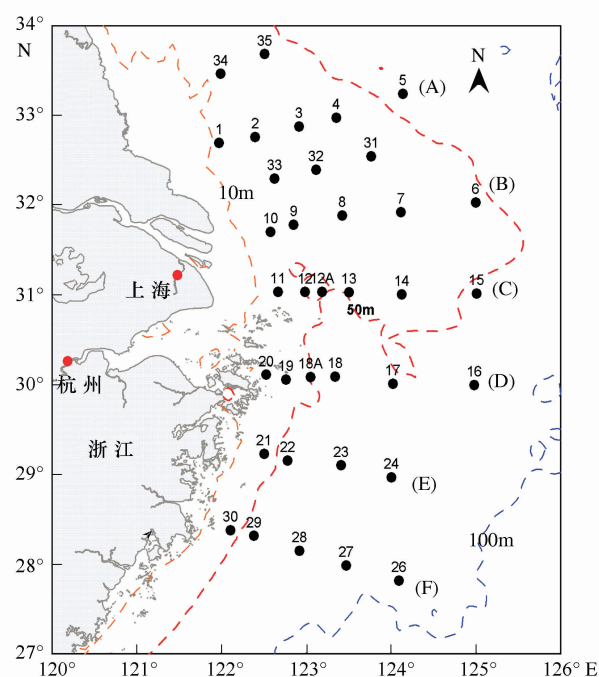


图 1 长江口毗邻海域低氧观测区域和站位

Fig. 1 Schematic map of *in situ* investigating areas, locations of sampling stations and cross sections

虚线为等深线,字母为断面编号

船在长江口毗邻海域获得温度、盐度、深度和溶解氧资料(图1)。其中2006年3个航次的温度、盐度和深度资料由采样频率为8Hz的Seabird 25型的CTD仪获取;1999年航次由采样频率为2Hz的Seabird 19型CTD仪获取。2006年的溶解氧数据有两组数据:其一是化学小组采用Winkler方法和便携式探头测定,其中Winkler方法准确性较高,是国标(GB 17378.4—1998,现已更新至GB 17378.4—2007)规定的分析方法(以下简称化学溶解氧),水样层次分别取在表层、跃层上界、跃层中部和跃层下界、底层等5层,若水深较浅且无明显跃层则通常采3层;另一组溶解氧数据由CTD仪器上增配的SBE 43溶解氧探头获得(以下简称CTD溶解氧),因为具有较高的采样频率,且准确度较高,其误差仅为真值的2%左右,所以可获取垂向分辨率较高的溶解氧垂向剖面资料。经过比较,3个航次的CTD溶解氧数据有一定程度的系统误差,但是与化学溶解氧资料具有较好的相关性(图2),因此可根据化学溶解氧资料进行线性校正。实际处理时按照垂向剖面资料进行逐站、逐层校正,使两者在相同层次完全一致,其他则分段分别进行线性插值。有关2006年8月的溶解氧分布亦可参阅张莹莹等^[29]文献;1999年8月溶解氧资料可参阅李道季等^[19]的文献。

除现场观测外,另采用“渤海、黄海、东海海洋图集”水文分册(简称“图集”)^[31]的温度、盐度资料作为多年平均值,以了解1999年和2006年研究海域动力环境的相对变化情况。长江径流量均来自中国水文水资源科学数据共享网提供的大通水文站的每日观测记录(<http://www.hydrodata.gov.cn>)。1999年夏季叶绿素资料采用SeaWiFS,2006年由于MODIS也具有叶绿素观测,因此采用SeaWiFS和MODIS的融合资料,两者相互补充而具有更好的空间覆盖率。

2 结果和分析

2.1 低氧现象的时空演变特征

2.1.1 底层溶解氧分布的季节变化

2006年6月长江口北部和东北部海域的底层溶解氧浓度较高(图3),多数站位均大于4 mg/L,没有出现大规模低氧现象。而在浙江中南部的E和F断面的近岸西侧已出现浓度低至2.5 mg/L的站位,并在30—50 m等深线之间呈现狭长的带状分布。溶解氧浓度从浙江南部沿岸的低氧区向东北方向增大,一直延伸到50 m水下河谷以北浅水处。

2006年8月份的底层溶解氧浓度(图3)平均远远低于6月份。除A、C断面个别站超过4.0 mg/L之外,其他站位的溶解氧浓度都低于3.5 mg/L。低氧现象主要出现于长江口外北侧水深大于20 m的海域,北端幅度较宽、向南逐渐缩小,在靠近浙江沿海的象山港外20 m以深海域也有小范围的低氧区出现。32°N以北的海域低氧最为严重,大面积较大,最低位于3号站(122°54.72'E,32°54.36'N),仅1.0 mg/L。以2.0 mg/L估算,低氧核心区面积约为 $1.96 \times 10^4 \text{ km}^2$,超过1999年夏季的 $1.37 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中96%以上面积位于长江口附近,其余位于浙江近海;以3.0 mg/L估算,低氧面积约为 $8.52 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。而且如果不考虑观测站位的限制,实际发生低氧范围可能会向北覆盖更广的海域。

2006年10月份时,长江口北侧的底层低氧现象已经完全消失,所有站位上的溶解氧浓度都超过4.0 mg/L(图3)。然而,浙江中南部的部分海域仍保持低氧的状态,位置与6月份相近、较8月份偏南。另外,位于舟山以东、50 m以深的18号站(123°20.52'E,30°5.40'N)在本航次中溶解氧浓度仍然低至1.8 mg/L。

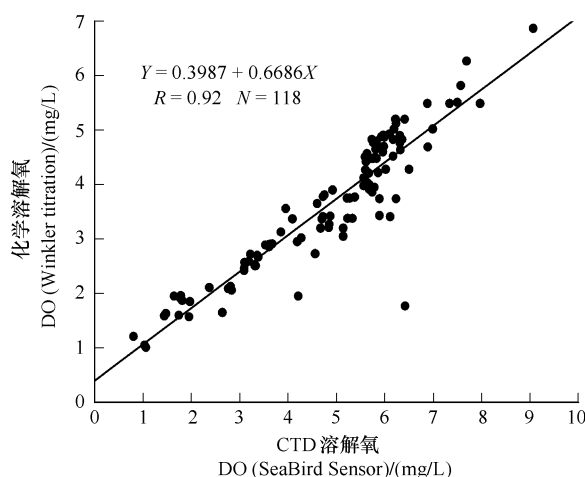


图2 长江口毗邻海域溶解氧浓度的线性回归校正

Fig. 2 Linear calibration of DO by the regression between the DO sensor and Winkler titration

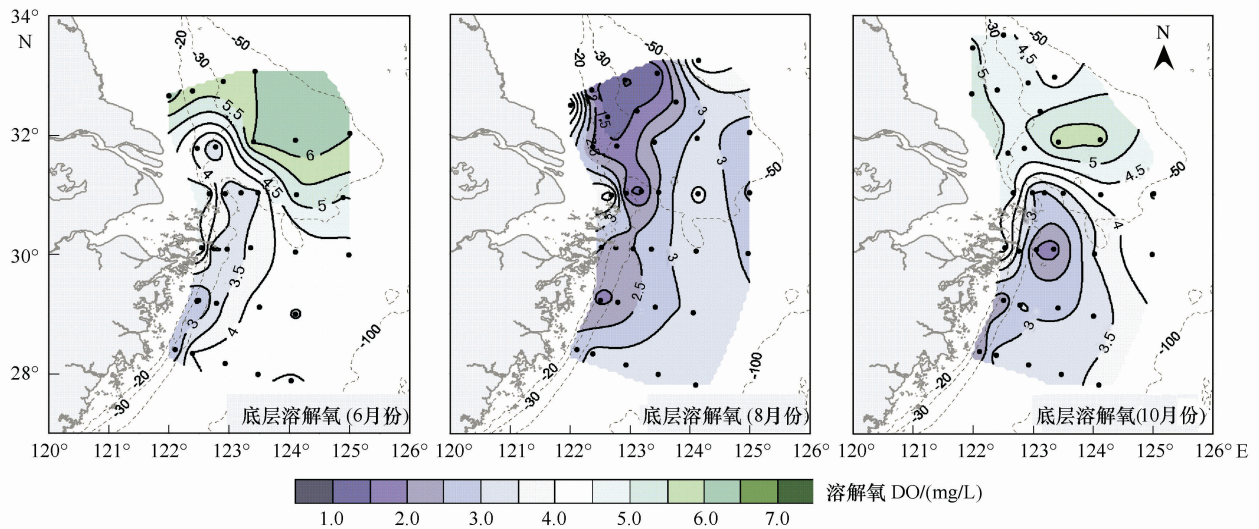


图3 底层溶解氧浓度的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of bottom DO concentration

从左至右分别为2006年6月、8月和10月资料

2.1.2 底层溶解氧分布的年际变化

图4是2006年低氧现象最为显著的8月航次与1999年夏季同期的航次进行对比的结果,其中左图为低氧核心区块的比较,右图则为低氧区的比较^[30]。这两个时期的低氧分布既有相似之处,但是差异更为明显。相似之处是:两个时期的长江口毗邻海域的低氧核心区均可划分为南、北两块区域,即分别位于长江口附近和浙江沿海,长江口附近的低氧核心区面积大、浓度低,后者面积小、浓度相对较高。但是,两个低氧核心区的分布形态和地理位置都有明显差异。1999年8月北部低氧核心区块基本位于长江口附近,而2006年同期则主

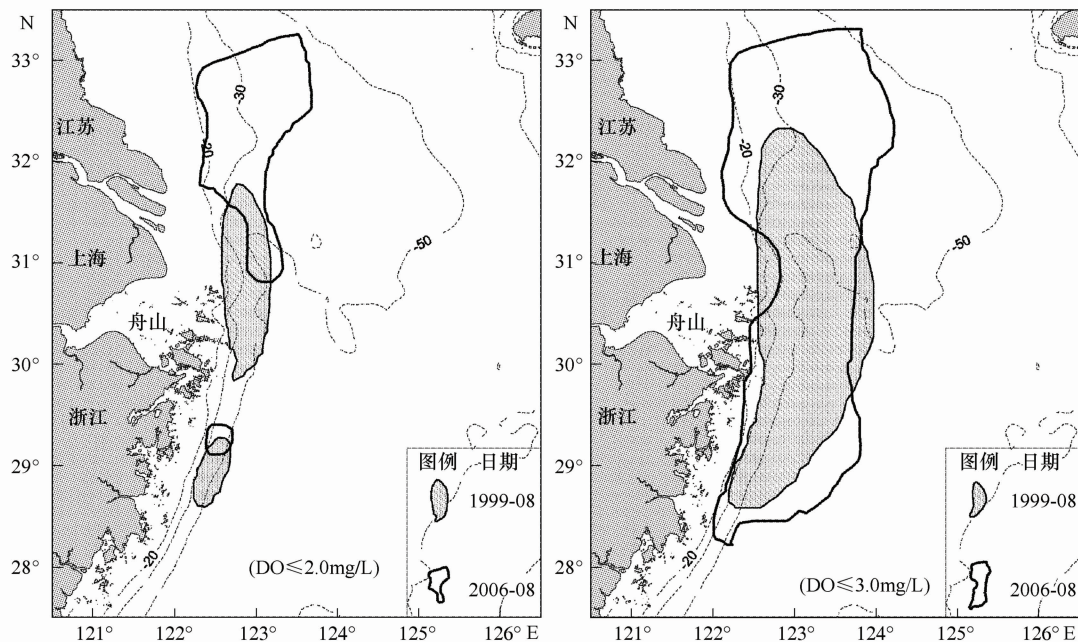


图4 1999年8月和2006年8月底层低氧核心区的比较

Fig. 4 Comparisons of bottom hypoxic zone between Aug 1999 and Aug 2006

根据文献^[19,30]重绘

要位于长江口北侧、面积大幅度增加。相反,南部低氧核心区块面积有一定缩小趋势。右图表明低氧区范围也有向长江口北部扩展的趋势、面积也有所增大,这与低氧核心区的变化特点也是吻合的,但变化幅度相对较小。如果结合其他年份的低氧观测资料^[20-22]作比较,长江口附近低氧区的年际变化是相当显著的。

2.1.3 温度、盐度和溶解氧浓度的断面特征

按照低氧现象最为显著的 8 月航次资料,研究海域的低氧核心区主要可以划分为南、北两个区块,其中 C 断面和 E 断面可分别代表北部和南部区块。图 5 和图 6 为两条断面的温度、盐度和溶解氧剖面在 3 个航次中的变化。

2006 年 6 月份,长江口以东断面(图 5)的温跃层正在生成,但层化仍然较弱;盐度则受长江冲淡水影响,层化则较为明显;溶解氧具有较强的层化,底部溶解氧浓度仅略高于 3.0 mg/L 的值。8 月份,温跃层增强;盐度受外海高盐水逼近的影响,层化较前期减弱;溶解氧层化显著增强,主要是因为水下河谷附近的近底层已出现较大范围和较厚的低氧区。10 月份,断面的温度、盐度和溶解氧层化都已明显减弱,其中温度跃层是由于表、底层的温度均升高而削弱的;盐度是由于近岸低盐水收缩,外海高盐水在水平方向扩张,而底层高盐水体核心(盐度 > 34.0)反而有所缩小,盐度等值线也基本上沿铅直方向;表层和底层溶解氧均有所升高,底层低氧水体变薄、变小。C 断面的底层水体低氧的形成与跃层的发展,尤其是温度跃层的发展具有良好的同步性;盐度层化与此关联程度反而较低,譬如 8 月份盐度层化反而较 6 月份更弱。在长江这样的大河河口,盐度的异常变化是一个值得关注的现象。

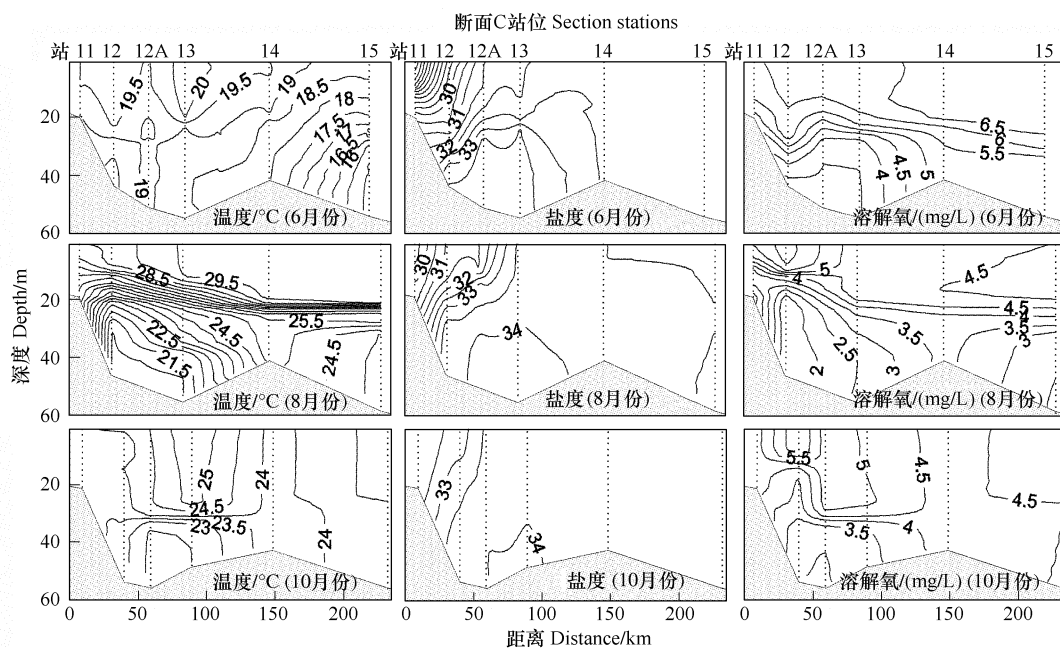


图5 断面 C 的 6 月份、8 月份和 10 月份温度、盐度、溶解氧分布

Fig. 5 Distribution of temperature, salinity and DO along the cross section C

浙江沿海附近(图 6),6 月份,浙江中南部外海的温跃层较薄,且深度较深,在断面左侧站位等温线上翘至表层,有冷水涌升的迹象,底层温度最低为 19℃;盐度层化厚,且从表层至 40 m 左右都有较大的梯度;溶解氧在 20 m 以下具有较强的层化,底层溶解氧浓度低至 2.5 mg/L 左右,位于断面左侧。8 月份,温跃层增强,跃层增厚且上界变浅,底层温度降低至 18℃,等温线也是左端上翘;盐度层化梯度显著增强,但变浅且厚度变小;溶解氧跃层变深、变薄,浓度最低值位于左面左端第二个站位(22 号站)的近底层,浓度小于 1.5 mg/L。10 月份,温度跃层明显减弱,底层温度升至 19℃,断面左端仍然有等温线上翘、露顶的迹象;盐度层化梯度较 8 月份有一定的增强,但表层淡水主要位于断面左侧即近岸处的 20 m 以浅,外海水较前两个航次都更显著的占据了陆架的大部分海域;溶解氧层化有一定加强,主要是表层溶解氧升高、而近岸侧底部仍有低氧现象,但

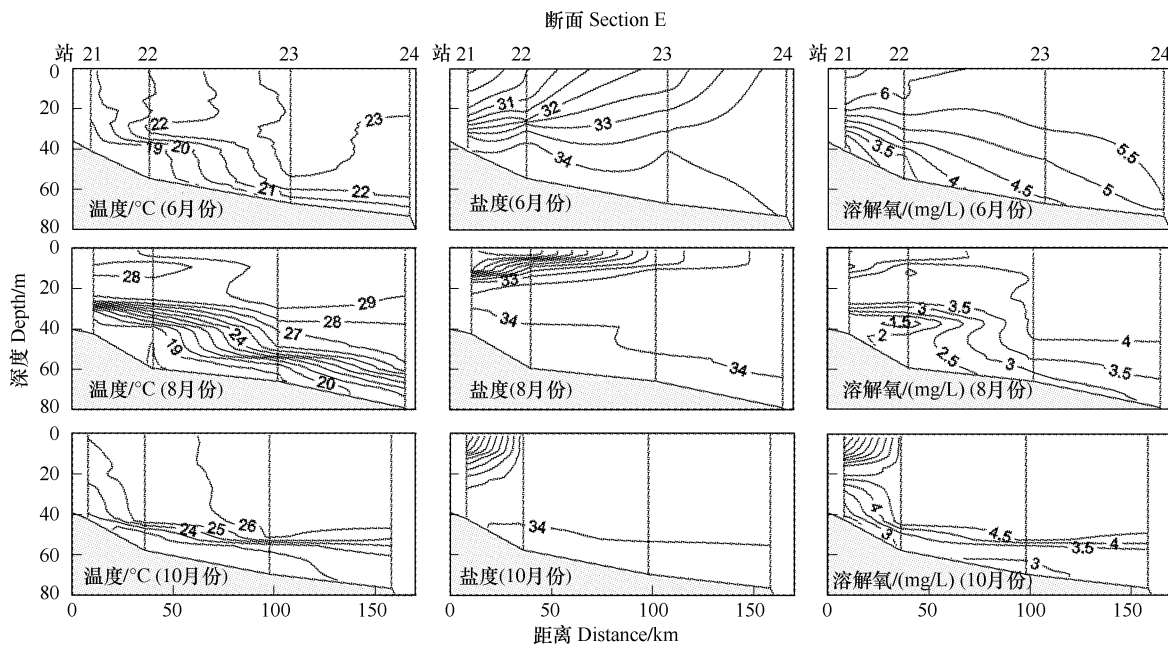


图6 断面 E 的 6 月、8 月和 10 月温度、盐度、溶解氧分布

Fig. 6 Distribution of temperature, salinity and DO along the cross section E

低氧范围和厚度均缩小。E 断面温度和盐度层化的发展与低氧形成也是一致的,但是上升流是另一个较为显著的现象。樊安德等^[32]亦曾报道 1981 年 6 月、8 月和 10 月相同海域的温度、盐度、营养盐、溶解氧的观测结果,浙江沿海最低底层溶解氧出现于 8 月份,浓度小于 3.4 mg/L,底层高营养盐和低溶解氧浓度的水体涌升的迹象在 20 m 左右非常清晰。上升流携带低浓度溶解氧的外海水涌升可能是造成 8 月份 E 断面右侧中层水 (22 站 40 m 附近) 低氧现象的主要因素,这与 C 断面的底层低氧有一定的差异。

综合 3 个航次,研究海域南、北两块区域的水团和低氧的发展都有显著的季节变化特征,但两块区域特征不太相同;与往年同期也有一定的差异。首先,6 月份时 C 断面盐度低于 E 断面;但到 8 月份和 10 月份,E 断面的盐度却低于 C 断面,表明 2006 年 8 月的长江淡水向南分支较强,淡水较多的沿浙江近岸南下;而往年这段时期多为北分支较强,如图集资料^[31]。其次,E 断面溶解氧特征表明浙江沿海陆架的底层溶解氧在 3 个航次均较低,从内陆架至中陆架都是如此,但在不同季节低氧核心区水平位置略有不同,并可在中层水出现低氧现象;而长江口外的低氧主要在水下河谷的近底层。第三,在 E 断面低氧现象最为显著的 8 月份,其底层低温和高盐特征来自南方水体,譬如 F 断面的底层温度较 E 断面更低、盐度则更高。

2.2 动力因素的变化及其对水团影响

低氧分布区块的这种季节和年际变化可能与影响本海域环流的各动力要素的季节和年际变化有关。在长江口附近,长江径流量、风场、黑潮或者台湾暖流、黄海沿岸流等都是影响本海域的动力因素^[33-35]。数值模式方面的研究已经发现 1999 年和 2006 年的长江径流量、风场和黑潮及其分支流量存在显著差异,并可能会造成淡水向长江口北侧扩展的更远^[30]。而在研究海域南部的浙江沿海一带,夏季沿岸的上升流是一个显著的现象。根据以往研究,风和台湾暖流对上升流的形成均有贡献^[36]。台湾暖流虽是由于其冬季相对近岸水的高温特性而得名,但在夏季,底层的台湾暖流是相对低温的,是由入侵的黑潮次表层水和台湾海峡水混合形成的^[37]。以浙江沿海低氧较为显著的 8 月份为例,也是底层台湾暖流入侵最为显著的时候,如 8 月底层水的低温、高盐特征相对 6 月份和 10 月份都更为明显。因此,需要了解各动力因素不同时间内的变化和相对重要性。

2.2.1 长江径流量及长江冲淡水的季节和年际变化

长江每年携带大量的淡水入海,是驱动研究海域的重要动力因子。同时,长江也携带大量营养盐和有机

质,对邻近海域的生态环境具有重要影响。长江淡水入海后与周边水体混合形成长江冲淡水。长江流量不仅有明显的季节变化,也有很强的年际变化。表 1 是以 1999 年和 2006 年为例表明长江流量在不同年份之间的巨大差异。

相对多年平均长江径流量,2006 年夏季和秋季的长江流量都显著偏低。2006 年 1—4 月长江流量与历史均值基本持平,其中 3 月略偏高;5—6 月份则较平均值偏低 8.5%;7—8 月份平均流量降 31.0%,显著偏低;9—10 月份平均流量更是减弱 55.9%。1999 年夏季前期与多年平均持平;但 7—8 月份均值偏高 42.3%;而 9—10 月份平均值仍偏高 22.0%。

长江流量的变化也使径流入海后形成的长江冲淡水分布有较大的差异。图 7 为历史月平均的 6 月份,8 月份和 10 月份的海表盐度与 2006 年 3 个航次和 1999 年 8 月航次期间的表层盐度的比较。历史上的文献资料^[38-40]通常依据某些特殊的盐度等值线如 26,30 和 31 来确定锋面的位置和冲淡水的扩展范围,以下也采用类似方法进行分析。

在多年平均情况下,6 月份长江淡水离开江口之后,向东北和东南两个方向扩展形成一定的“舌形”,但主要是向东北方向扩展,少量淡水被携带沿浙江沿岸向南;到 8 月份向南的“舌形”冲淡水锋面消失,冲淡水主体先是基本向东北方向扩展,然后在 33°N 附近折向东南,31 的低盐水可达到济州岛附近;10 月份冲淡水已退回至长江口沿岸,无明显的“舌形”锋面,南向沿岸流已充分发展,浙江南部沿岸锋外的盐度达 34 左右。但是,2006 年的情形与上述情况有显著差异:6 月份,26 盐度线显著减弱,但是浙江南部沿岸盐度偏低,显示有更多的长江淡水被携带向南;8 月份,冲淡水的结构较历史月平均有很大的变化,表层淡水在长江口南北两侧形成类似“S”形的锋面,江口东侧和北侧表层盐度较历史 8 月份均值高 5 以上,长江口南侧的近岸海域有范围很广的低盐水,盐度范围 28.5—29.5,与多年平均的海表盐度图大不相同;10 月份,长江冲淡水则退回至沿岸附近,形态与多年平均类似,但是盐度值偏高。同时,亦可将 2006 年 8 月与 1999 年 8 月的表层盐度进行比较。对大部分调查海域而言,后者较前者显著偏低,且盐度梯度更强。以 26 盐度等值线为例,后者最远可达 123.5°E 附近,较前者和历史月平均线都扩散的更远;以 30 盐度线位置为例,后者亦较前者和历史月均线向东扩展更远,尤其是向江口东南方向扩展到 100 m 等深线附近,远超过前者和历史月均线的位置。总体而言,表层盐度的分布说明了长江径流量对研究海域的重要影响,而 1999 年和 2006 年又是其中两个对比极为显著的年份。

虽然 2006 年 8 月长江流量显著偏低,研究海域大部分的表层盐度显著偏高,但是在调查海域的东北角海域,2006 年 8 月的表层盐度反而较 1999 年同期和多年平均都低 1—2。以往研究认为径流量偏小有利于冲淡水向东北偏北方向扩展^[35]。据研究,这是风场、台湾暖流和径流量等多种因素共同驱动的结果^[30]。

表 1 1999,2006 年和多年平均长江大通站流量的比较

Table 1 Comparison of runoff at the Datong hydrological station among 1999, 2006 and multi-annual

项目 Item	5—6 月份 May—Jun.		7—8 月份 Jul. —Aug.		9—10 月份 Sep. —Oct.	
	流量	变化	流量	变化	流量	变化
	Runoff/(m ³ /s)	Change ratio/%	Runoff/(m ³ /s)	Change ratio/%	Runoff/(m ³ /s)	Change ratio/%
多年平均 Multi-annual	37794	—	46919	—	38558	—
1999 年	37981	0.5%	66754	42.3%	47060	22.0%
2006 年	34573	-8.5%	32353	-31.0%	17011	-55.9%

注:其中变化都相对多年平均值而言

2.2.2 黑潮和台湾暖流的影响

除了径流量的巨大变化对研究海域有显著影响之外,台湾暖流亦是影响本海区水团和环流的不容忽视的因素之一。夏季的底层台湾暖流是由黑潮次表层水和台湾海峡水混合组成的,而表层水主要来自台湾海峡^[37],并在东海陆架上可分为内侧和外侧分支^[41],以往的观测表明台湾暖流水能够到达长江口附近^[40]。2006 年 3 个航次期间的水团变化已经在本文 2.1.3 部分做了介绍,以下只对 1999 年 8 月和 2006 年 8 月的台

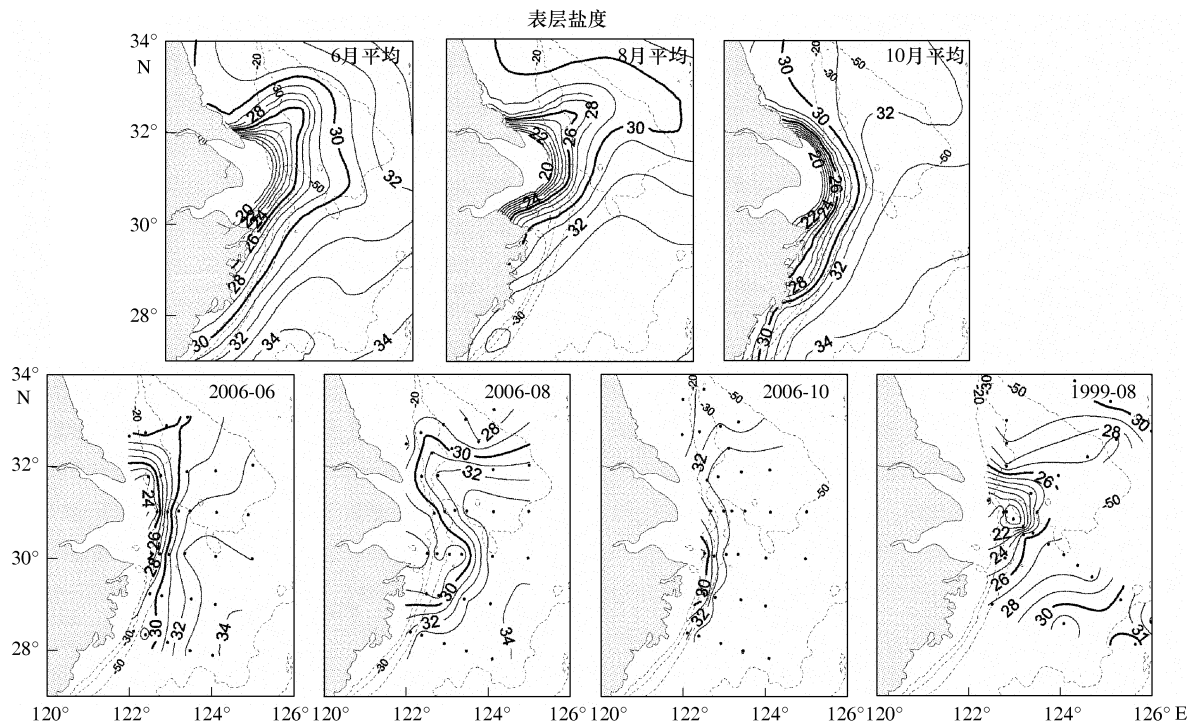


图7 长江口外多年平均的6月、8月和10月海表盐度^[31]和2006年的6月、8月和10月海表盐度以及1999年8月的对比(对盐度等值线26,30,31加粗实线显示)

Fig. 7 Comparison of sea surface salinity in Jun., Aug. and Oct. among multi-annual, 2006 and 1999

湾暖流扩展形态的年际变化作比较分析。

图8给出了两个年份观测的底层温度和盐度分布。2006年8月,低温、高盐的底层海水以舌状分布在研究海域的50 m等深线以东,其温度和盐度属性与夏季台湾暖流一致,是台湾暖流沿陆架北上入侵形成。以123°E为例,33盐度水舌最北分布在长江口外50 m河谷以北,约在32°N附近被一股高温、低盐的水团所阻。该高温、低盐的水团是由长江冲淡水 and 来自苏北的沿岸流共同形成,其核心温度高于24°C、盐度低于30。在海域的东北,则是黄海海槽西侧的低温、高盐水。而在1999年8月,亦以123°E为例,33等盐线仅到达31.5°N,等盐线顶端相对50 m河谷东偏,温度等值线也没有类似2006年8月的舌形分布。长江口外50 m以深河谷1999年8月的温度约为23°C,而2006年8月则仅22°C。因此,从底层温度和盐度反映的台湾暖流形态而言,1999年8月的台湾暖流到达长江口附近的势力要弱于2006年同期。但必须指出,由于缺少同时期台湾

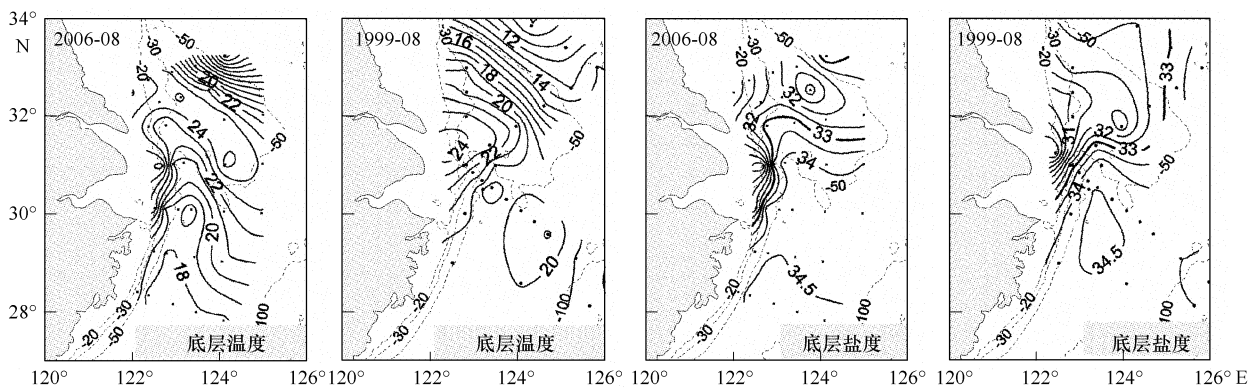


图8 1999年8月和2006年8月的底层温度、底层盐度分布

Fig. 8 Distributions of bottom temperature and salinity in Aug 1999 and 2006

暖流上游的黑潮及台湾海峡内的流量数据,这里只是从水文分布做了些推测,但不能排除长江冲淡水的减弱使台湾暖流相对增强的因素。

3 讨论和结论

3.1 表层叶绿素分布

水动力变化导致长江口毗邻海域低氧区年际变化的途径可通过影响营养盐的扩散和分布产生。长江径流和黑潮次表层水分别是影响研究海域的两大营养源来源之一^[24,26]。大量的营养盐为长江口周围海域浮游植物旺发提供了条件^[42]。由于1999年和2006年夏季是两个对比特征非常显著的年份,也可通过卫星观测的表层叶绿素的分布发现一些端倪。图9是MODIS和SeaWiFS卫星资料观测到的两个低氧航次前期长江口外海表层叶绿素浓度平均值。考虑到浮游植物的生命周期约为2周,死亡后有一定的时间沉降并分解,因此对航次前约30d内的表层叶绿素浓度进行平均。两个时间段内的叶绿素浓度分布的主要特点是:在长江口以南,2006年的叶绿素浓度高值区分布主要在沿岸,而1999年的叶绿素浓度高值区分布向东扩张较远;长江口以北,2个年份的叶绿素浓度高值分布范围皆向东扩张较远,但2006年的浓度更高,且向东北方向扩张趋势更为显著。尽管对近岸浑浊水体遥感反演的表层叶绿素资料的准确度会存在一定的局限性,但其分布趋势还是具有一定的合理性。从上述资料分析,叶绿素高值区的空间分布的不同年份间变化与低氧区的年间变化趋势是一致的。

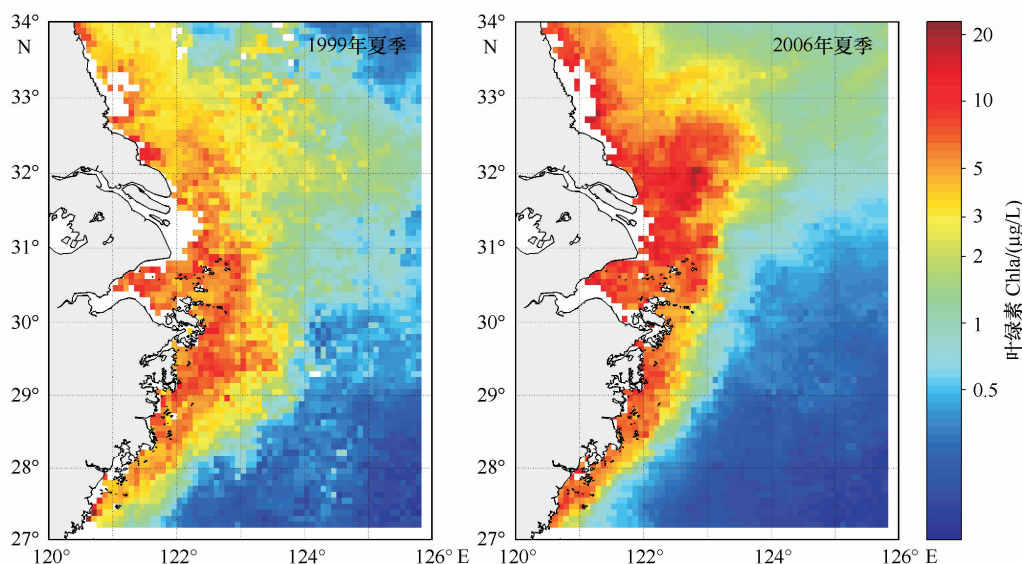


图9 1999年和2006年夏季长江口外表层叶绿素分布的比较

Fig. 9 Comparison of 30-day mean sea surface Chl a adjacent to the Changjiang River Estuary before summer hypoxia events in summer of 1999 and 2006

均为7月20日至8月20日的平均值

3.2 流场分布

数值模式方面的研究结果也可以为本文工作提供佐证。一个包含潮流、长江径流的三维原始方程模式 Regional Ocean Modelling Systems (ROMS) 已被应用于渤、黄、东海,并针对1999年和2006年的长江径流、风场和开边界流量的因素变化造成的长江口毗邻海域环流和水团变化进行了比较研究^[30]。图10分别为上述2个年度的8月份平均的表层、底层流场及其流场变异($\Delta U = U_{2006} - U_{1999}$, 其中 U 为流速矢量)结果。1999年8月长江口附近及其南侧流场表明淡水离开口门之外向南分支较强,而向北分支相对较弱,这与图7的表层盐度分布趋势一致;浙江沿海远岸海域的流场则主要为东向流,在126°E移动才转为东北向流,这与大量长江冲淡水的阻挡有关,也与东北向的风场有关;而近岸海域则为明显向南流。2006年8月表层流场与此有很大差异:长江冲淡水的向南分支虽然也较强,但弱于1999年同期;而向北分支则显著强于1999年同期;浙江沿海

的远岸海域主要为东北向流;近岸的南向流则比 1999 年同期更强。底层流场总体上弱于表层流场,分布形态与表层相似。长江口口门之内 1999 年冲淡水更强,2006 年偏弱;浙江沿海的沿岸流特征不明显,主要是北上的台湾暖流,且 2006 年强于 1999 年;不仅如此,2006 年台湾暖流甚至扩展至 $33^{\circ}30'N, 122^{\circ}30'E$ 附近,而 1999 年仅能局限在长江口以东、 $32^{\circ}N$ 以南。

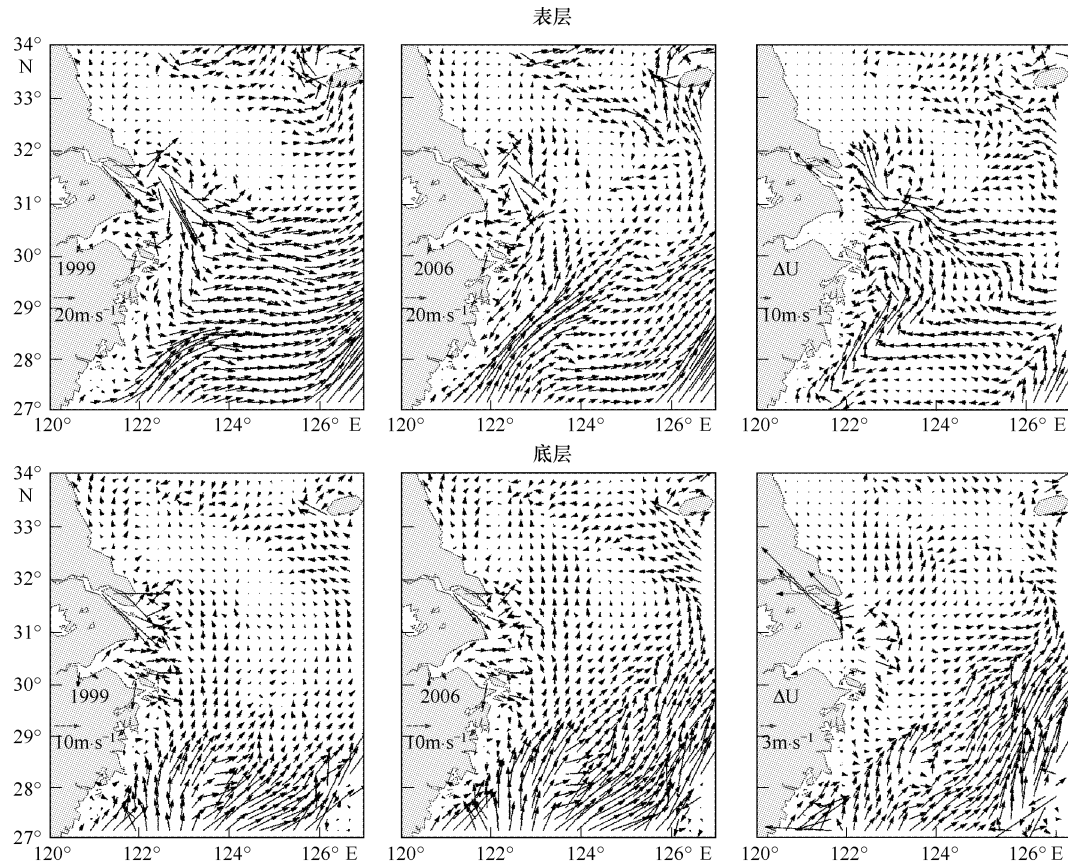


图 10 模拟的 1999 年 8 月和 2006 年 8 月平均的长江口毗邻海域表层和底层流速及其流速差

Fig. 10 Modeled current fields at surface and bottom layers in 1999 and 2006, and their difference between these two periods

通过 2006 年 6 月、8 月和 10 月在长江口毗邻海域先后进行的 3 次多学科综合海洋调查,并将 2006 年 8 月和 1999 年同期进行比较,确认研究海域存在着两处不同特征的低氧水体,其核心区分别位于 $32^{\circ}N$ 以北的长江口北部和浙江近海;两处低氧水体在面积、持续时间、季节演变和水动力环境等方面均存在较大差异。长江口毗邻海域的南、北两处低氧核心区块并不是在所有航次中都能被发现。原因有多种,既可能是航次站位设计所限或者观测覆盖面不足;也可能是研究海域动力环境的多种时空尺度的变化所导致。这些都表明低氧形成及其变异的复杂多变性。在低氧发展过程中,温度和盐度共同作用的浮力层化也不断发展,尤其是水体的垂向温度层化结构演变与低氧形成过程具有良好的关联。另一方面,不同月份和年份之间低氧水平分布的差异则与水团的相应时间尺度的变化有关。譬如:2006 年夏季较 1999 年同期的低氧区向北扩展增强的现象在水团分布上有明显的体现,并受到如长江径流量、黑潮与台湾暖流和风场等动力因素的影响。具体到研究海域北部,长江冲淡水是影响陆源性营养盐和水团分布的主要水团,受长江径流、风场和台湾暖流变化等因素影响。而在研究海域南部,沿岸上升流是显著动力现象,除了风场和台湾暖流之外,黑潮流量变化对本海域影响相对更为明显。需要指出的是,仅从本文的水文资料分析中尚无法确定导致长江口毗邻海域低氧核心区变化的各因素的定量影响,也无法弄清各因素之间的相对重要性。但是,通过了解水动力环境及其不同尺度时间的变化,我们可以从另一个角度了解研究海域生源要素的输运过程和导致富营养化的主要因素,从而采取相应的对策来应对低氧现象。

致谢: 低氧专题研究航次首席科学家吴莹、邓兵和张桂玲等老师给予大力支持;任景玲、朱卓毅、张磊、张莹莹等人提供溶解氧的比测和校正数据;现场观测由北斗号科学考察船提供支持;秦涛协助采集 3 个航次的 CTD 和溶氧等数据;冯旭文研究员提供国内外低氧研究和进展资料;NASA 提供 MODIS、SeaWiFS 等卫星资料 (<ftp://oceans.gsfc.nasa.gov/>)

References:

- [1] Rabalais N N, Turner R E. Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: description, causes and change//Nancy N. Rabalais, R. Eugene Turner eds. Coastal Hypoxia: Consequences for Living Resources and Ecosystems. Washington, D. C. : American Geophysical Union, 2001: 1-36.
- [2] Grantham B A, Chan F, Nielsen K J, Fox D S, Barth J A, Huyer A, Lubchenco J, Menge B A. Upwelling-driven nearshore hypoxia signals ecosystem and oceanographic changes in the northeast Pacific. *Nature*, 2004, 429(6993): 749-754.
- [3] Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science*, 2008, 321(5891): 926-929.
- [4] Vaquer-Sunyer R, Duarte C M. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2008, 105(40): 15452-15457.
- [5] Officer C B, Biggs R B, Taft J L, Cronin L E, Tyler M A, Boynton W R. Chesapeake Bay anoxia: origin, development, and significance. *Science*, 1984, 223(4631): 22-27.
- [6] Diaz R J. Overview of hypoxia around the world. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 275-281.
- [7] Rowe G T. Seasonal hypoxia in the bottom water off the Mississippi River delta. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(2): 281-290.
- [8] Rabalais N N, Turner R E, Dortch Q, Justic D, Bierman Jr V J, Wiseman Jr W J. Nutrient-enhanced productivity in the northern Gulf of Mexico: past, present and future. *Hydrobiologia*, 2002, 475-476: 39-63.
- [9] Rabalais N N, Turner R E, Scavia D. Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River. *BioScience*, 2002, 52(2): 129-142.
- [10] Turner E, Rabalais N, Justic D. Gulf of Mexico Hypoxia: Alternate States and a Legacy. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(7): 2323-2327.
- [11] Justic D, Rabalais N N, Turner R E. Simulated responses of the Gulf of Mexico hypoxia to variations in climate and anthropogenic nutrient loading. *Journal of Marine Systems*, 2003, 42(3/4): 115-126.
- [12] Scavia D, Rabalais N N, Turner R E, Justic D, Wiseman J W. Predicting the response of Gulf of Mexico hypoxia to variations in Mississippi River nitrogen load. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(3): 951-956.
- [13] Scavia D, Justic D, Bierman J V J. Reducing hypoxia in the Gulf of Mexico: advice from three models. *Estuaries*, 2004, 27(3): 419-425.
- [14] Turner R E, Rabalais N N, Justic D. Predicting summer hypoxia in the northern Gulf of Mexico: riverine N, P, and Si loading. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 52: 139-148.
- [15] Rabalais N N, Turner R E, Sen G B, Boesch D F, Chapman P, Murrell M C. Hypoxia in the northern Gulf of Mexico: does the science support the plan to reduce, mitigate, and control hypoxia?. *Estuaries and Coasts*, 2007, 30(5): 753-772.
- [16] Gu H K. The maximum value of dissolved oxygen in its vertical distribution in the Yellow Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1980(2): 70-79.
- [17] Tian R C, Hu F X, Martin J M. Summer Nutrient Fronts in the Changjiang (Yangtze River) Estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1993, 37(1): 27-41.
- [18] South China Sea Institute Of Oceanography C A O S. Cruise report in the South China Sea (II). Beijing: Science Press, 1985: 278-281.
- [19] Li D J, Zhang J, Huang D J, Wu Y, Liang J. Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. *Science in China Series, D-Earth Sciences*, 2002, 45(12): 1137-1146.
- [20] Chen C C, Gong G C, Shiah F K. Hypoxia in the East China Sea: one of the largest coastal low-oxygen areas in the world. *Marine Environmental Research*, 2007, 64(4): 399-408.
- [21] Wei H, He Y, Lia Q, Liu Z, Wang H. Summer hypoxia adjacent to the Changjiang Estuary. *Journal of Marine Systems*, 2007, 67(3/4): 292-303.
- [22] Zou J J, Yang G, Liu J H, Shi X F, Fang X S. Distribution characteristics of dissolved oxygen in the sea area adjacent to the Changjiang River Estuary in September. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(1): 65-73.
- [23] Yin K, Lin Z, Ke Z. Temporal and spatial distribution of dissolved oxygen in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1935-1948.
- [24] Zhang J, Liu S M, Ren J L, Wu Y, Zhang G L. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf. *Progress In Oceanography*, 2007, 74(4): 449-478.
- [25] Chen C A, Wang S. Carbon, alkalinity and nutrient budgets on the East China Sea continental shelf. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C9): 20675-20686.
- [26] Chen C A. The Kuroshio intermediate water is the major source of nutrients on the East China Sea continental shelf. *Oceanologica Acta*, 1996, 19: 523-527.
- [27] Rabouille C, Conley D J, Dai M H, Cai W J, Chen C T A, Lansard B, Green R, Yin K, Harrison P J, Dagg M, McKee B. Comparison of

- hypoxia among four river-dominated ocean margins: The Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhone rivers. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12):1527-1537.
- [28] Shi X Y, Wang X L, Lu R, Sun X. Distribution of dissolved oxygen and pH in frequent hab area of the East China Sea in spring 2002. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(5):404-412.
- [29] Zhang Y Y, Zhang J, Wu Y, Zhu Z Y. Characteristics of dissolved oxygen and its affecting factors in the Yangtze Estuary. *Environmental Science*, 2007, 28(8):1649-1654.
- [30] Zhou F, Xuan J L, Ni X B, Huang D J. A preliminary study on variations of the Changjiang diluted Water between August 1999 and 2006. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(4):1-12.
- [31] Chen D X. Marine atlas of Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea, hydrology. Beijing: China Ocean Press, 1992: 13-96.
- [32] Fan A D, Wang Y H, Dong H L. "Plume" center distribution of chemical parameters in the coastal upwelling zone off Zhejiang in summer. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1987, 18(1):86-95.
- [33] Zhao B R. On the turning mechanism of the Changjiang Diluted Water. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(5):600-610.
- [34] Bai X Z, Wang F. Numerical study on the mechanism of the expansion of the Changjiang River Diluted Water in Summer. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(6):593-603.
- [35] Zhu J R, Ding P X, Hu D X. Observation of the diluted water and plume front off the Changjiang River estuary during august 2000. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(3):249-255.
- [36] Liu X B, Su J L. Numerical study of the coastal upwelling and coastal front along the Zhejiang Province. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(3):305-314.
- [37] Weng X C, Wang C M. A preliminary study on the T-S characteristics and the origin of Taiwan Warm Current in summer. *Studia Marina Sinica*, 1984, 21:113-133.
- [38] Mao H L, Kan Z J, Lan S F. A preliminary study of the Yangtze Diluted Water and its mixing processes. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, 5(3):183-206.
- [39] Hu F X, Hu H, Gu G C, Su C, Gu X J. Salinity fronts in the Changjiang River Estuary. *Oceanologia et Limnologia Sinica Supplement*, 1995, 26(5):23-31.
- [40] Beardsley R C, Limburner R, Yu H S, Cannon G A. Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 1985, 4:57-76.
- [41] Su J L, Pan Y Q. A preliminary study of shelf circulation dynamics north of Taiwan. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(1):1-14.
- [42] Ning X R, Shi J X, Cai Y M, Liu C G. Biological productivity front in the Changjiang Estuary and the Hangzhou Bay and its ecological effect. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(6):96-106.

参考文献:

- [16] 顾宏堪. 黄海溶解氧垂直分布中的最大值. *海洋学报*, 1980, (2):70-79.
- [18] 中国科学院南海海洋研究所. 南海海区综合调查研究报告(二)//VI:调查海区的海水化学. 北京: 科学出版社, 1985: 278-281.
- [19] 李道季, 张经, 黄大吉, 吴莹, 梁俊. 长江口外氧的亏损. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(8):686-694.
- [22] 邹建军, 杨刚, 刘季花, 石学法, 方习生. 长江口邻近海域九月溶解氧的分布特征. *海洋科学进展*, 2008, 26(1):65-73.
- [28] 石晓勇, 王修林, 陆茸, 孙霞. 东海赤潮高发区春季溶解氧和 pH 分布特征及影响因素探讨. *海洋与湖沼*, 2005, 36(5):404-412.
- [29] 张莹莹, 张经, 吴莹, 朱卓毅. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究. *环境科学*, 2007, 28(8):1649-1654.
- [30] 周锋, 宣基亮, 倪晓波, 黄大吉. 1999 年与 2006 年间夏季长江冲淡水变化动力因素的初步分析. *海洋学报*, 2009, 31(4):1-12.
- [31] 陈达熙. 渤海、黄海、东海海洋图集-水文. 北京: 海洋出版社, 1992: 13-96.
- [32] 樊安德, 王玉衡, 董恒霖. 浙江沿岸上升流区夏季海水化学要素的“羽状”中心分布特征. *海洋与湖沼*, 1987, 18(1):86-95.
- [33] 赵保仁. 长江冲淡水的转向机制问题. *海洋学报*, 1991, 13(5):600-610.
- [34] 白学志, 王凡. 夏季长江冲淡水转向机制的数值试验. *海洋与湖沼*, 2003, 34(6):593-603.
- [35] 朱建荣, 丁平兴, 胡敦欣. 2000 年 8 月长江口外海区冲淡水和羽状锋的观测. *海洋与湖沼*, 2003, 34(3):249-255.
- [36] 刘先炳, 苏纪兰. 浙江沿岸上升流和沿岸锋面的数值研究. *海洋学报*, 1991, 13(3):305-314.
- [37] 翁学传, 王从敏. T-S 点聚的初步研究和夏季台湾暖流的起源. *海洋科学集刊*, 1984, 21:113-133.
- [38] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨. *海洋与湖沼*, 1963, 5(3):183-206.
- [39] 胡方西, 胡辉, 谷国传, 苏诚, 顾学俊. 长江河口盐度锋. *海洋与湖沼增刊*, 1995, 26(5):23-31.
- [41] 苏纪兰, 潘玉球. 台湾以北陆架环流动力学初步研究. *海洋学报*, 1989, 11(1):1-14.
- [42] 宁修仁, 史君贤, 蔡显明, 刘诚刚. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应. *海洋学报*, 2004, 26(6):96-106.