

长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究

张莹莹, 张经, 吴莹, 朱卓毅

(华东师范大学河口海岸科学研究院, 上海 200062)

摘要: 根据 2006-06、2006-08、2006-10 对长江口及其毗邻海域的大面调查, 分析航次 B 断面上的溶解氧及营养盐的分布特征, 并对长江口外溶解氧低值的成因及其与海水稳定性、营养盐的关系进行初步探讨. 结果表明, 在 6 月航次中, DO 值随着离岸距离的增加而逐渐增加, 底层的 DO 值低于表层. 8 月份长江口及其邻近水域底层明显出现低氧状态, DO 的最低值仅为 $1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 该断面表观耗氧量 AOU 一般在 $2.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 有氧的亏损发生, 形成原因主要是海水层状结构稳定水交换较弱和有机物分解耗氧. 10 月份, 海水层状结构发生变化, 上下水层的垂直混合作用加剧, B 断面 DO 分布随着离岸距离的增加逐渐增加. 相关性分析显示, 表底层的 ΔDO 与 $\frac{\Delta\sigma}{\Delta Z}$ 、 ΔNO_3^- 和 ΔDIP 都达到显著相关的水平. 其中 ΔDO 与 $\frac{\Delta\sigma}{\Delta Z}$ 呈极显著的正相关, 而与 ΔNO_3^- 、 ΔDIP 呈显著负相关关系. 长江径流 N、P 污染物输入的不断增加为低氧区域表层浮游植物的生长提供了丰富的营养盐, 从而加剧了该水域的氧亏损.

关键词: 溶解氧(DO); 低氧区; 长江口; 表观耗氧量(AOU)

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)08-1649-06

Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Yangtze Estuary

ZHANG Ying-ying, ZHANG Jing, WU Ying, ZHU Zhuo-yi

(Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China)

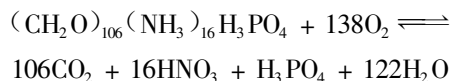
Abstract: The cruises on hypoxia research were carried out in the Yangtze Estuary and adjacent area of the East China Sea on June, August and October, 2006. DO, stability and the concentration of nitrate and phosphate in the section B were analyzed. The result indicates that there is distinct difference among the concentration of DO in the section B of the three cruises. The DO distribution is higher in surface water but lower in bottom. The oxygen minimum value ($1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) is found at the bottom in August, and the apparent oxygen utilization (AOU) is higher than $2.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the section B. The strong halocline above the hypoxic zone, as a result of affluent water from the coastwise, Taiwan Warm Current, and the high concentration of organic substance are major factors causing the formation of the hypoxia. The stability of the seawater goes down, the vertical mixing affect the DO through its effect on stratification, in October. ΔDO is primarily affected by the stability and the concentration of ΔNO_3^- , ΔDIP .

Key words: dissolved oxygen; low-oxygen area; Yangtze Estuary; apparent oxygen utilization

水体的溶解氧水平往往是反映生物生长状况和污染状态的重要指标^[1, 2]. 浮游生物的光合作用吸收营养盐, 释放氧气, 使水体中溶解氧水平提高, 而浮游植物死亡时, 有机质降解则会消耗水体中的溶解氧, 并使营养盐水平提高, 造成相应海域底层的缺氧现象. 近海海域中溶解氧含量除受河流径流、降雨、水温和盐度影响外, 还取决于海洋水动力交换. 海水稳定程度越高, 上下水层越稳定, 阻止溶氧的垂直交换越明显.

一般认为海水中实测的溶解氧含量与特定温度、盐度下计算的氧饱和含量之间的任何差异都是由于海洋生物活动或有机物质的氧化造成的. 故表层 AOU(表观耗氧量)含量高低在一定程度上可以反映海区初级生产力的大小, 而底层 AOU 的变化则可反应有机物的分解耗氧情况. 因此 AOU 的变化过

程中将发生一些重要的生物地球化学变化, 氧的消耗可用下面的生化反应式表达^[3]:



即每再生 $16 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸盐和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸盐将消耗 $138 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的氧. 可见水体中 DO 值变化与营养元素含量的变化密切相关, 这一现象引起了学者们的高度重视.

河口作为海洋-陆地相交处的陆地淡水与海洋咸水相交并不断混合的特殊水体环境, 对环境因子变化的反应与河流和海洋均有差异. 近几十年来, 由

收稿日期: 2007-01-29; 修订日期: 2007-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40476036); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB400601)

作者简介: 张莹莹(1976~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为海洋生物地球化学, E-mail: yy.zhang@126.com

于人为排污活动加剧,进入河口地区的营养物质造成某些海区富营养化,极大地促进了这些海域的初级生产.自 1980 年顾宏堪报道长江口外存在低溶解氧区以来^[4],陆续有多人在调查发现了长江口外的低溶解氧区^[5~12].但目前对长江口外海区溶解氧低值区形成的时间、机制及其对生物地球化学循环的动态研究还鲜见报道.本研究拟在现场调查的基础上对此进行探讨.

1 材料与方 法

2006-06、2006-08、2006-10 黄海水产研究所和华东师范大学等单位联合对长江口及毗邻海区(121.930°~125.000°E,27.900°~33.080°N)进行了 3 次大规模的调查.采集每个站点的不同层次的水样,分析项目包括温度、盐度、营养盐、DO 等 20 余项.DO 的最低值($DO = 1.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)出现在 8 月航次中,B 断面是 8 月航次出现低氧的区域,同时它又是典型的长江冲淡水在长江口门向北侧输运的断面,

比较方便做长江北流冲淡水和东海陆架水的端源分析,因此考虑它为本实验的研究对象.本研究主要针对 3 个航次中 B 断面 DO 变化及成因进行分析讨论,B 断面站点分布如图 1.

在所有站位,均使用 Sea-Bird CTD 对海水的深度、盐度、温度等参数进行现场测量,DO 的测定用 9010 溶氧仪现场进行,同时使用 Sea-Bird 上的采水器采集不同深度海水样品进行营养盐分析,采样后立即对水样进行处理.测定营养盐的水样经 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的醋酸纤维膜过滤,然后装入聚乙烯瓶,并按 1% 的体积分数加入饱和 HgCl_2 溶液固定备测,过滤用的醋酸纤维膜、滤器和聚乙烯瓶均预先用 1:5 的稀 HCl 浸 24 h,并用 Milli-Q 水洗去残余 HCl. Chl-a 样品用 GF/F 膜过滤后, -20°C 保存带回实验室分析.营养盐含量用 Continuous Flow Analyzer 测定. Chl-a 分析采用 Zapata 的色素 HPLC 方法,即用 5 mL 甲醇萃取、离心后按 5:1 体积比加 Milli-Q 水后上 HPLC 测定^[13].

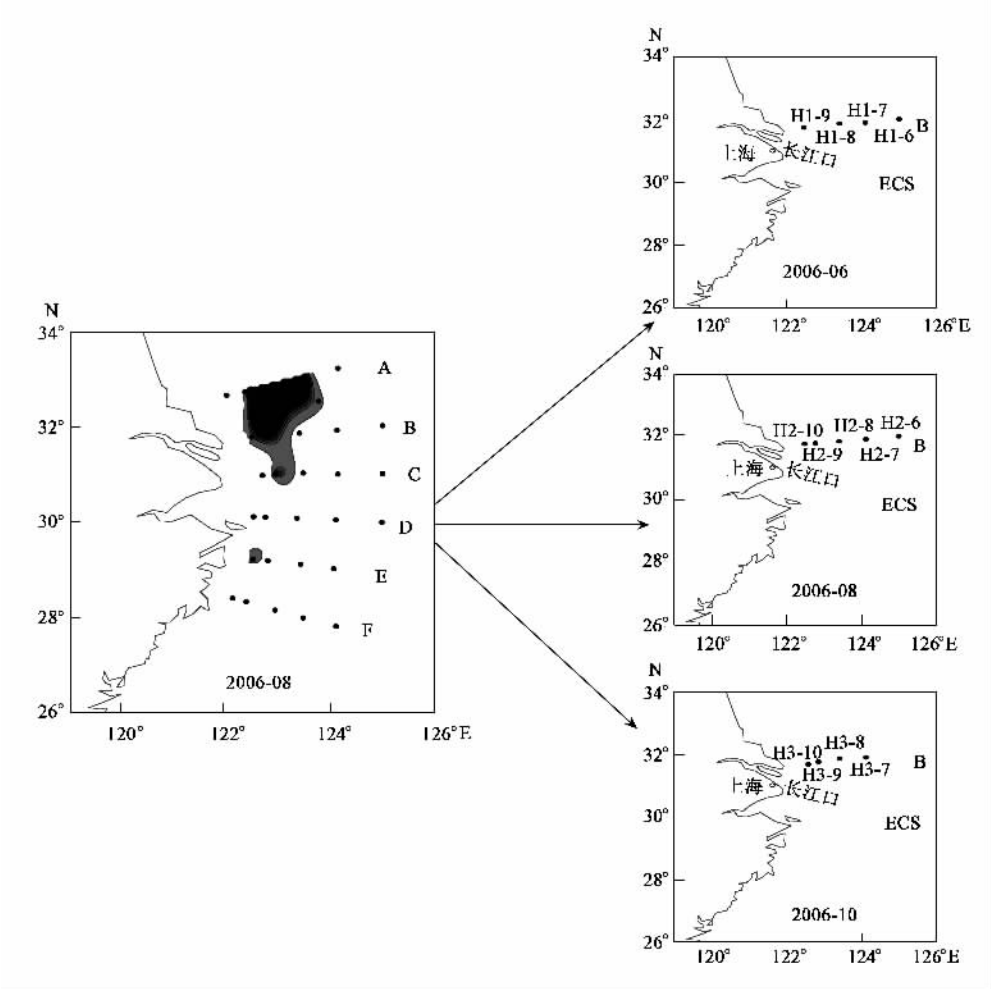


图 1 2006 年 3 个航次 B 断面站位分布

Fig. 1 Sampling stations of B section for the three cruises

海水稳定程度可以用 $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$ 来表示,其中 $\Delta\rho$ 和 ΔZ 分别指密度差值和温跃层的厚度^[14].密度差值可通过海水状态方程计算出,温跃层的厚度可通过CTD现场测量的温盐数据得到.对数据的统计分析采用的是软件SPSS11.0 for Window.

2 结果与讨论

2.1 3个航次B断面上的DO的分布

B断面位于长江口的北部,2006-06,2006-08,2006-10 3个航次的DO值、盐度和温度沿B断面的垂直变化见图2.

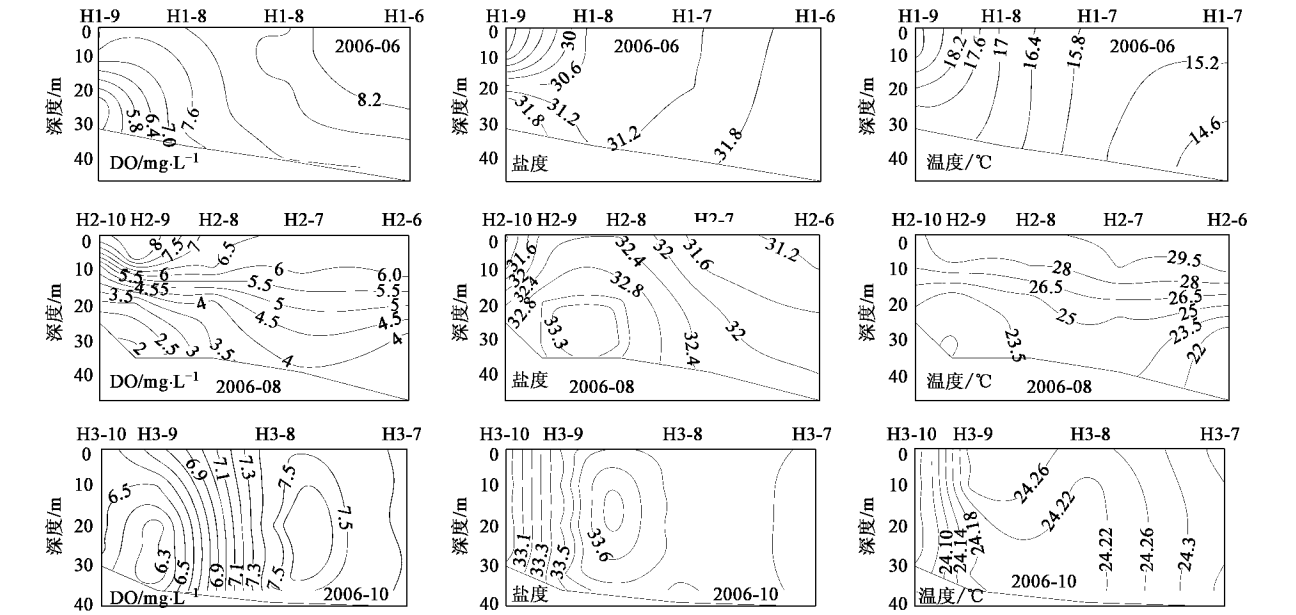


图2 3个航次中B断面上DO、盐度和温度分布等直线

Fig.2 Contours of DO, salinity and temperature in the section B in the three cruises

6月航次中,DO值随着离岸距离的增加而逐渐增加,底层的DO值低于表层.这可能是由于6月份该断面主要受江浙沿岸流和黄海混合水的影响,其中存在于断面海域东北一隅的黄海混合水带来大量DO含量较高的海水,使得在离岸较远的站位,表底DO数值均较大,且其差异较小;盐度也随离岸距离的增加而逐渐增加.H1-9号站盐度分层比较明显,表底变化幅度较大,可达6‰,这种盐度的分布使得该站位底层的DO值相对较低;温度分布的趋势是随离岸距离的增加而降低,最低值出现在H1-6号站的底层.

8月份长江口及其邻近水域底层明显出现低氧状态,低氧区的中心位于东经122°40′北纬32°附近,此处的DO值仅为1.1 mg·L⁻¹.表1是以往研究提供的数据,虽然不同的研究可能采用不同的测定方法,但仍可看出最小的DO值在不断变小,较以往20 a调查的DO数值更小^[4-6,9,12].这可能是近20 a来,长江流域输入长江口的N、P污染物增加了近2倍,富营养化加剧^[15],这也可以说明DO与海区

营养盐含量呈一定的负相关.此时B断面除了受江浙沿岸流和黄海混合水的影响外,还受到台湾暖流的影响^[16],从而使整个断面上DO含量分层非常明显;从盐度的变化来看,低氧分布在32.8‰等盐线到33.6‰的等盐线之间.原因在于台湾暖流的侵入造成大陆架附近的高盐度海水上涌,极大地限制了表层水与下层水的交换,并阻止了氧的垂直交换,从而使底层海水呈现低氧状态;从水温的垂直分布来看,上层水与下层水的温差可达6℃,这可能是因为到达低氧区的台湾暖流使水温升高,生物代谢作用加快,因此夏季水温的垂直分层也可能是形成低氧区的一个主要的物理因素^[12].

10月份时台湾暖流对本区域的影响最强^[16],海水层状结构发生变化,稳定性下降造成上下水层的垂直混合作用加剧,温、密跃层渐趋消失.受其影响,表层水和底层水的一些物理参数和化学参数的数值差异消失.B断面DO、盐度和温度分布的总体趋势均为随离岸距离的增加而逐渐增加.盐度、温度最高值都出现在离岸较远的H3-7号站,而溶氧最低值出

表 1 长江口不同研究结果的低氧值比较

Table 1 Comparison of value of low dissolved oxygen contents in different studies in the Yangtze Estuary

观测时间	低氧值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
1959-08	2.57	[4]
1981-08	2.00	[5]
1982-08	2.85	[6]
1988-08	1.96	[9]
1999-08	1.00	[12]
2006-08	1.10	本研究

现在离岸较近的 H3-9 号站的底层.

2.2 表底层溶解氧浓度差与海水的稳定程度、营养盐浓度差的关系

DO 在表层和底层之间的浓度差 ΔDO 与层化作用的强度有很大的关系.除了 10 月份各站位的表底相差较小外,其余月份航次的各站位相差比较显著,最大的差异达到 $6.28\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

表 2 中列出了 B 断面上各站点在 3 个航次中的 $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$ 数值. $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z} > 0$,表示稳定; $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z} = 0$,表示中性稳定; $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z} < 0$,表示不稳定,水团容易发生混合.6~8 月,风力混合作用较弱,表层水迅速增温,形成稳定的层化结构,B 断面的海水稳定度逐渐增大.较高的稳定度阻止了表层水和底层水中 DO 的垂直交换,底层有机物分解所消耗的氧气得不到补充,形成低氧;而 8~10 月,风力逐渐增强,强烈的风应力搅拌作用和

表 2 B 断面各站位海水的稳定度

Table 2 Stability degree of each station in B section

时间	站位	$\Delta\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\Delta Z/\text{m}$	$\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$
6 月	H1-9	4.37	15	0.29
	H1-8	0.01	10	0.00
	H1-7	0.41	20	0.02
	H1-6	0.32	15	0.02
8 月	H2-10	2.61	15	0.17
	H2-9	2.96	5	0.59
	H2-8	2.23	13	0.17
	H2-7	2.21	10	0.22
	H2-6	3.38	14	0.24
10 月	H3-10	-0.01	—	—
	H3-9	0.05	13	0.00
	H3-8	0.01	10	0.00
	H3-7	0.00	—	—

表层水的冷却下沉使水体混合均匀,海水的稳定程度又逐渐下降接近于零,底层的低氧现象得到了缓解.

相关性分析显示,表底层的 ΔDO 与 $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$ 、 ΔNO_3^-

和 ΔDIP 都达到显著相关的水平.其中 ΔDO 与 $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$ 呈极显著的正相关,即海水的稳定程度越大,表底层的 DO 差越大,显示了层化作用的力量. ΔDO 与 ΔNO_3^- 、 ΔDIP 呈显著负相关关系(表 3).为考查三者对 ΔDO 的影响度,使用多元回归模型进行分析, $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$ 、 ΔNO_3^- 和 ΔDIP 都进入了回归模型,回归方程分别为 $y_{\Delta\text{DO}} = 0.571 + 10.29x_{\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}}$, $y_{\Delta\text{DO}} = 0.556 - 0.409x_{\text{NO}_3^-}$ 和 $y_{\Delta\text{DO}} = -0.767 - 8.770x_{\Delta\text{DIP}}$.由回归分析可知,三者的变化对 ΔDO 的影响率较大,分别是 75.6%、73.9% 和 79.9%,反映了物理过程和生化过程对 DO 的作用.

表 3 ΔDO 与 $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$ 、 ΔNO_3^- 和 ΔDIP 的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficient between $\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$, ΔDO , ΔNO_3^- and ΔDIP

项目	ΔDO	$\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$	ΔNO_3^-	ΔDIP
ΔDO	1.000	0.869*	-0.878*	-0.895*
$\frac{\Delta\rho}{\Delta Z}$	0.869*	1.000	-0.787*	-0.787*
ΔNO_3^-	-0.878*	-0.787*	1.000	0.929*
ΔDIP	-0.895*	-0.787*	0.929*	1.000

1) *: $\alpha < 0.01$, α 表示显著性水平值

2.3 AOU 与相关的地球化学过程

结合盐度、温度数据,应用 Weiss 方程计算溶解氧饱和度(C'_{O_2})和表观耗氧量(AOU)(表 4)^[3].结果表明,调查海区 C'_{O_2} 分布与溶解氧分布有相似的规律,表层水的 C'_{O_2} 高于底层水,这是由于表层水体与大气进行氧交换及浮游植物可以通过光合作用复氧^[12].由于表层水没有光限制,Chl-a 的浓度相对较高(图 3),因此浮游植物的光和作用也比较活跃.3 个航次表层离岸较远站位的 C'_{O_2} 的浓度大于 100%,处于富氧状态,其中 8 月航次的 H2-9 号站最高可达 128.72%.8 月份航次底层达到最低,最低 C'_{O_2} 仅为 27.60%.底层的 AOU 一般均为正值,6 月份 AOU 一般均在 $0.30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上,最高达 $3.20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,8 月份 AOU 的急剧增大,最高达 $5.21\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而 10 月份

AOU 的值又有所降低,在部分站位甚至为负值.这说明在该断面的底层 6 月份可能已出现微弱的有机物耗氧过程,8 月份该过程逐渐增强使底层的含氧量降至最低,形成贫氧环境^[6],而 10 月份该过程又有所减弱,导致 10 月份该断面溶解氧的亏损现象得到一定程度的缓解.

表 4 B 断面调查海域 C₀₂' 及 AOU

Table 4 C₀₂' and AOU in B section

时间	站位	表层		底层	
		C ₀₂ '/%	AOU/mg·L ⁻¹	C ₀₂ '/%	AOU/mg·L ⁻¹
6 月	H1-9	97.15	0.22	58.23	3.20
	H1-8	98.42	0.13	95.31	0.38
	H1-7	96.84	0.26	96.41	0.30
	H1-6	105.69	-0.47	94.17	0.49
	H2-10	116.17	-1.08	34.97	4.59
8 月	H2-9	128.72	-1.84	27.60	5.21
	H2-8	102.71	-0.17	51.22	3.38
	H2-7	97.93	0.13	60.74	2.71
	H2-6	97.63	0.15	48.39	3.79
	H3-10	93.98	0.42	93.62	0.44
10 月	H3-9	98.02	0.14	90.13	0.68
	H3-8	108.45	-0.58	108.66	-0.60
	H3-7	107.15	-0.49	107.07	-0.49

图 3 是 B 断面上各站位 AOU、硝酸盐(NO₃⁻)和无机磷(DIP)的表底分布,由图 3 可得 AOU 与硝酸盐和无机磷均呈一定的正相关性.6 月份,B 断面近岸的站位受江浙沿岸流的影响,硝酸盐的浓度维持在较高的水平,特别是在 H1-9 号站表底层浓度分别达 13.14 和 14.05 μmol·L⁻¹,其余站位的浓度则随离岸的距离逐渐降低.硝酸盐浓度的整体变化不明显,但在 8 月份低氧强盛时期,表底层硝酸盐的浓度差异比较显著,表层最高的浓度仅为 1.59 μmol·L⁻¹,其余站位则在 0.3 μmol·L⁻¹上下浮动.磷酸盐的分布趋势与硝酸盐一致,但其浓度变化表现更为显著,最低仅为 0.08 μmol·L⁻¹,表明 8 月份随着温度的升高,表层 Chl-a 浓度升高,浮游植物的光合作用逐渐增强,表层的硝酸盐、磷酸盐几乎消耗殆尽,同时产生大量的氧,而底层硝酸盐和磷酸盐的浓度则迅速升高,最高的浓度分别达到了 12.81 和 0.82 μmol·L⁻¹,表明营养盐具有极强的再生能力,同时营养盐在低氧区的再生消耗了大量的氧,导致底部氧的亏损.10 月份营养盐的浓度又有所升高,表底浓

度基本一致,这可能是由于 10 月份该断面海水稳定程度较低,上下水层易发生垂直混合,使表层被浮游植物光合作用所消耗的营养盐得到迅速补充(底部营养盐的再生).

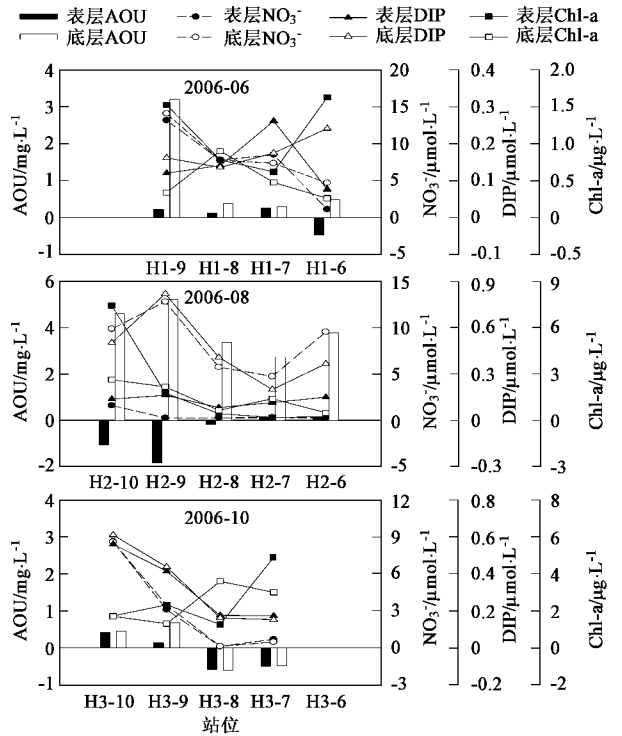


图 3 B 断面 AOU、硝酸盐(NO₃⁻)、无机磷(DIP)和 Chl-a 的表底分布

Fig.3 Distribution of AOU, NO₃⁻, DIP and Chl-a in Section B

3 结论

(1)6~8 月长江口水温升高、颗粒态有机物在底层水域的化学和生物氧化作用导致营养盐在底层再生并消耗大量的底层氧,但此时低氧断面的海水稳定程度逐渐增大,海水的层状结构趋于稳定,阻止表层水和底层水中 DO 的垂直交换,从而底层有机物分解所消耗的氧气补充缓慢,造成底层氧的严重亏损,形成低氧.8~10 月海水稳定度逐渐下降,接近于零,此时易发生涡动混合或对流混合,表底层的 DO 数值趋于一致,低氧逐渐消失.

(2)与历史资料比较,低氧区的氧含量呈现明显下降趋势,这与长江近 20 a 来输入河口营养盐大幅增加有关,反映出长江河口富营养化的加剧.长江河口水域底栖生态系统的生源物质的生物地球化学循环必然受低氧区存在的影响,因此,必须对此给予高度重视和进行进一步的研究.

参考文献:

[1] 王成善,胡修棉,李祥辉.古海洋溶解氧与缺氧和富氧问题研究[J].海洋地质与第四纪地质,1999,3 (19):39 ~ 47.

[2] Neal C, Alan House W, Helen P, *et al.* The water quality of the River Dun and the Kennet and Avon Canal [J]. Journal of Hydrology, 2006, **330**: 155 ~ 170.

[3] Richard F A. Anoxic basins and fjords[A]. In: Riley J P, Skirrow G (eds). Chemical Oceanography[C]. London: Academic Press, 1965. 611 ~ 645.

[4] 顾宏堪.黄海溶解氧垂直分布中的最大值[J].海洋学报, 1980, **2**: 70 ~ 79.

[5] Limeburner R, Beardsley R C, Zhao J. Water Masses and Circulation in the East China Sea [A]. In: Proceedings of International symposium on sedimentation on the continental shelf, with special reference to the East China Sea[C]. Beijing: China Ocean Press, 1983. 285 ~ 294.

[6] 陈吉余,陈祥禄,杨启伦.上海海岸带和海涂资源综合调查报告[M].上海:上海科技出版社,1988. 114 ~ 116.

[7] 张竹琦.黄海和东海北部夏季底层溶解氧最大值和最小值特征分析[J].海洋通报,1990, **9** (4): 22 ~ 26.

[8] Beardsley R C, Limeburner R, Yu H, *et al.* Discharge of the Changjiang (Yangtze River) into the East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 1985, **4** (1/2): 57 ~ 76.

[9] Tian R C, Hu F X, Martin J M. Summer nutrient fronts in the Changjiang (Yangtze River) Estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1993, **37**: 27 ~ 41.

[10] 蒲新明,吴玉霖,张永山.长江口区浮游植物营养限制因子的研究[J]:春季的营养限制情况[J].海洋学报,2001, **23** (3): 57 ~ 66.

[11] 杨庆霄,董娅婕,蒋岳文,等.黄海和东海海域溶解氧的分布特征[J].海洋环境科学,2001, **20** (3): 9 ~ 13.

[12] Li D J, Zhang J, Huang D J, *et al.* Oxygen depletion off the Changjiang (Yangtze River) Estuary [J]. Science in China Series D- Earth Sciences, 2002, **45**: 1137 ~ 1146.

[13] Zapata M, Rodriguez F, Garrido J L. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C8 column and pyridine-containing mobile phases [J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, **95**: 29 ~ 45.

[14] Pond S, Pickard G L. Introductory dynamic oceanography [M]. London: Pergamon Press, 1983. 23.

[15] Zhang J, Yu Z G, Liu S M, *et al.* Nutrient element dynamics of three North China estuaries: Luanhe, Shuangtaizihe and Yalujiang [J]. Estuaries, 1999, **20**: 110 ~ 123.

[16] 张启龙,王凡.舟山渔场及其邻近海域水团的气候学分析[J].海洋与湖沼,2004, **35** (1): 48 ~ 54.