

DOI: 10.5846/stxb201302050242

崔彦萍, 王保栋, 陈求稳. 三峡正常蓄水后长江口叶绿素 a 和溶解氧变化及其成因. 生态学报, 2014, 34(21): 6309-6316.

Cui Y P, Wang B D, Chen Q W. The spatial-temporal dynamics of chlorophyll a and DO in the Yangtze estuary after normal impoundment of the Three Gorges Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(21): 6309-6316.

三峡正常蓄水后长江口叶绿素 a 和 溶解氧变化及其成因

崔彦萍¹, 王保栋², 陈求稳^{1,3,*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061;
3. 三峡大学, 宜昌 443002)

摘要: 根据 2010 年 8 月、10 月和 2011 年 5 月的现场监测数据, 对长江口水域在三峡水库 175m 试验蓄水实施后一个水文年中叶绿素 a 和溶解氧 (DO) 的分布特征及其影响因素进行分析。结果表明, 叶绿素 a 平面分布夏季有两个高值中心, 春季有一个高值中心; 在口门北缘夏季表层叶绿素浓度值最高。垂向上, 夏季叶绿素 a 浓度表层和底层高; 春季和秋季叶绿素 a 浓度中层高。夏季表层和底层 DO 浓度相差较大, 秋季和春季表、底层 DO 浓度分布比较均匀; 整体上秋季和春季的 DO 浓度高于夏季。工程蓄水后 DO 低值区和叶绿素 a 峰值区向口门内位移, 对生态系统结构将产生影响。

关键词: 长江口; 叶绿素 a 变化; 溶解氧变化; 水利工程

The spatial-temporal dynamics of chlorophyll a and DO in the Yangtze estuary after normal impoundment of the Three Gorges Reservoir

CUI Yanping¹, WANG Baodong², CHEN Qiuwen^{1,3,*}

1 Research Centre for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 The First Institute of Oceanography, Qingdao 266061, China

3 China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: Following the rapid development and urbanization in Yangtze River basin, in particular the operation of the Three Gorges Reservoir, the hydrological regime, sediment transport and water quality at the Yangtze outlet have changed dramatically, which significantly affected the estuarine ecosystem. Water quality deterioration, eutrophication and algal bloom become serious problems of the Yangtze estuary. The impoundment of the Three Gorges Reservoir has three stages: the first stage is 135 m in 2003, and the second stage is 156 m in 2006 and the final stage is 175 m in 2010. The impoundment of 175 m in 2010 makes the operation of the reservoir reach to the designed level. It is therefore valuable to investigate the consequent effects on the ecosystem of the downstream, especially the estuary. Based on the survey of hydro-environmental and phytoplankton data in the Yangtze estuary and its adjacent areas in August and November 2010 and May 2011, the paper analyzed the spatial-temporal features of dissolved oxygen (DO) and chlorophyll a (Chla), as well as the affecting mechanism after the impoundment level of the Three Gorges Reservoir reached to the final stage of 175 m. The results showed that in summer, the low DO area is in the turbid belt in surface layer, and the bottom layer exists oxygen depletion zone. In autumn and spring, the vertical profile of DO concentration is rather uniform from surface to bottom. To investigate the effect of stratification in summer, two typical points A3 and A5 are selected. In A3, DO and temperature

基金项目:国家重点基础研究发展(973)计划项目 (2010CB429004)

收稿日期:2013-02-05; 网络出版日期:2014-03-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qchen@rees.ac.cn

decreases monotonically with the depth and Chla increases with depth; in A5 station, DO and Chla first decrease sharply with depth and then gradually increase after 20m depth. The difference of vertical profile between A3 and A5 is because of the stable stratification in A5. For Chla, there are two high value zones in summer and one in spring. In particular, in the north edge of the estuary outlet, the Chla concentration in the surface layer is very high, reaching to eutrophic level. With respect to vertical profile of Chla, the concentration in surface and bottom layers are higher than middle layer (thermocline) in summer, while in spring and autumn the concentration in surface layer is lower. In combining with previous studies, it is found that the low DO zone and the peak Chla contour line are moving toward inshore, which will affect the estuarine ecosystem. From the study, it can be concluded: (1) the maximum concentration of Chla can be in surface, middle or bottom, depending on the vertical stability of the water. The horizontal change of the hotspot is governed by the inflow discharge. (2) in the mixing zone, the peak of Chla concentration is closely correlated with nutrients. (3) near the outlet, the vertical profiles of Chla and DO are opposite, but in offshore area they are consistent. (4) after the impoundment of 175 m, the discharge and sediment as well as nutrients are further reduced, which will intensify the effects on Chla and DO features of the estuary.

Key Words: Yangtze estuary; chlorophyll a; dissolved oxygen; water project

近30多年来,随着长江流域经济的迅猛发展和城市化进程的加快,工农业废水和生活污水不断增加,加之三峡水库和引江济太等工程的实施,进入长江口及其邻近海域的水、沙、盐发生明显变化,长江口已成为我国沿海水质恶化范围最大,富营养化最严重、赤潮多发的水域之一^[1-4]。长江口是淡水与海洋生物栖息地之间的生态交错区,该区域的环境因子变化与河流和海洋均有差异,具有自己的特殊性,而河口区的浮游植物是长江口水生生态系统的重要初级生产者,也是河口生态系统中食物链的重要环节,它们为水体和底栖的动物提供直接的食物来源。因此,开展三峡正常蓄水后长江口及其邻近海域水环境理化因子和浮游植物生态学研究,有利于分析上游水利工程运行对长江口及其邻近海域生态环境的短期效应^[5]。

1 数据来源

本文分析所采用的数据主要来源于国家973课题(2010CB429004)执行的3个航次调查(国家海洋局第一海洋研究所实施),分别为:2010年8月(夏季,丰水期)、2010年10月(秋季,枯水期)、2011年5月(春季,平水期),监测区域如图1。

调查严格遵照国家《海洋调查规范-海水化学要素观测 GB12763.4-91》,每个采样点采集了表层、中层和底层3个样,水温(T)、溶解氧(DO)、pH值等指标采用便携仪器现场测量,其它指标如硅酸盐

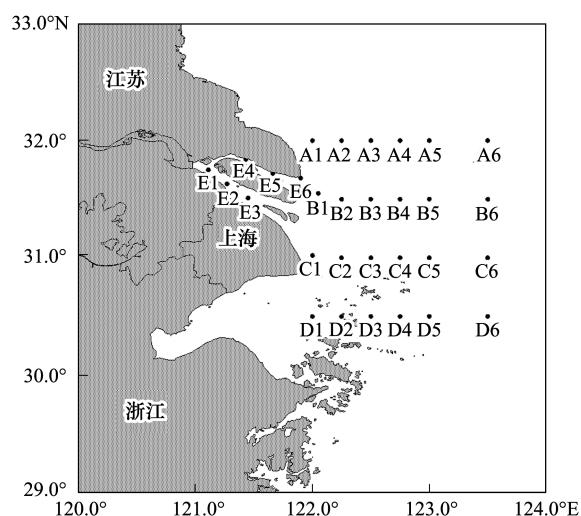


图1 长江口2010—2011年3个季节水环境生态调查区域站点图

Fig.1 The layout of the hydro-environmental monitoring stations in the Yangtze estuary in three seasons during 2010—2011

(S_iO_2)、总悬浮质(TSS)、叶绿素a(Chla)等在实验室根据规范进行测定。

2 研究结果

2.1 溶解氧时空变化

溶解氧与浮游植物的生长繁殖有密切关系,沿海海域中生物活动、海水运动、温度、径流和降雨都对海水中溶解氧的变化分布产生影响^[6]。若水中溶解氧浓度低于2 mg/L,成年鱼会死亡,孵卵生境遭到

破坏,渔业资源将会衰退。从图 2 可以看出:夏季长江口及其邻近海域表、底层 DO 平均值分别为 7.5 mg/L 和 5.2 mg/L,浓度范围分别是 4.0—11.4 mg/L 和 2.0—6.6 mg/L,夏季表层 DO 浓度在口门外最大浑浊带最低,这与长江冲淡水携带的大量悬浮有机

质主沉积区相对应;由于夏季水温高,底层悬浮有机物质的氧化分解消耗了大量的溶解氧,同时夏季水体比较稳定,底层溶解氧难以得到补充,使得长江口门外外底层出现低氧区^[7]。在秋季和春季,DO 浓度垂向分布比较均匀,秋季表、底层 DO 平均浓度分别

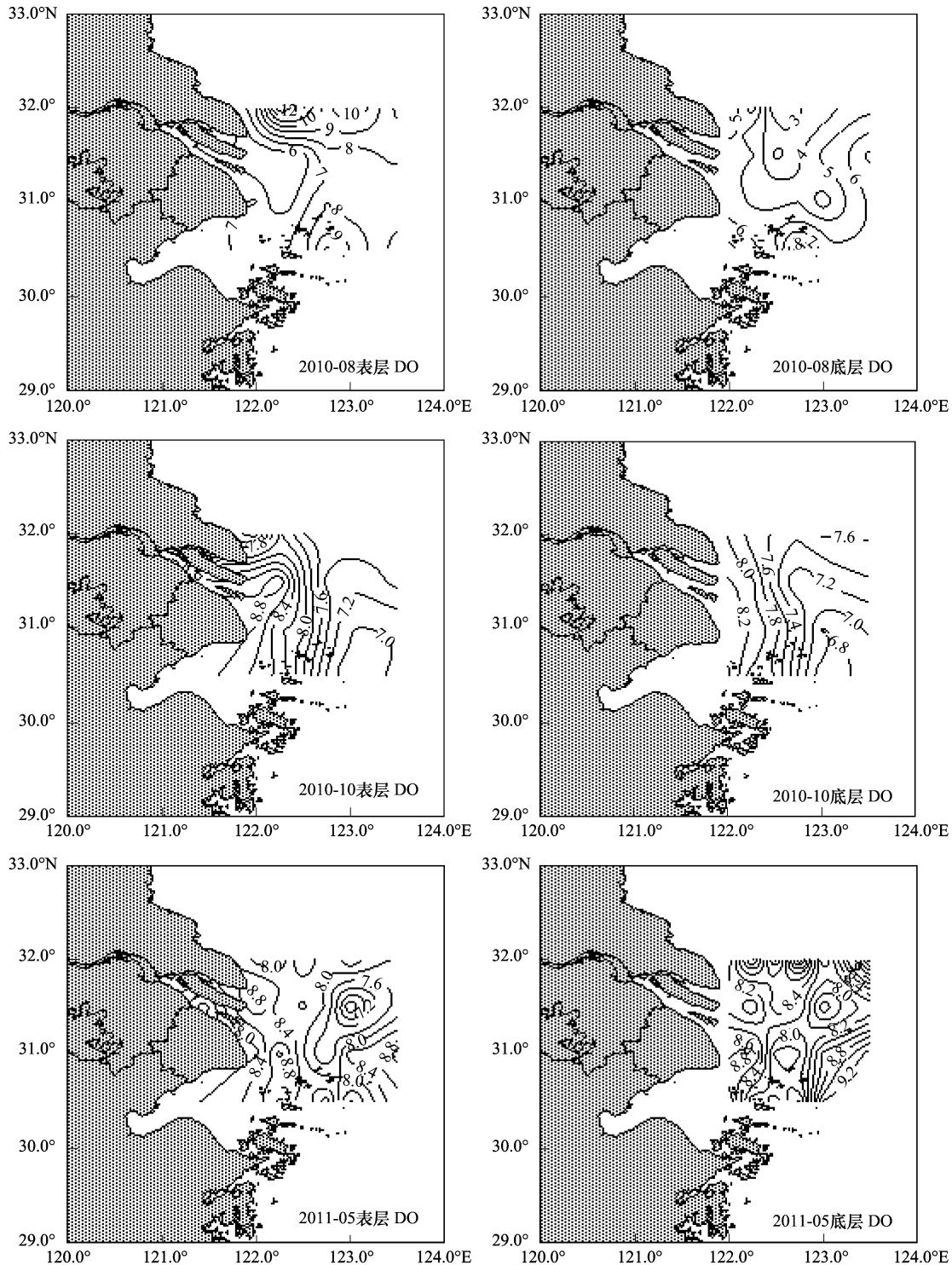


图 2 长江口及邻近海域 2010—2011 年 3 个季节 DO 表层和底层的分布

Fig.2 The concentrations of DO in the surface and bottom water of the Yangtze estuary and its adjacent area in three seasons during 2010—2011

为 7.8 mg/L 和 7.5 mg/L, 浓度范围分别为 6.8—9.0 mg/L 和 6.7—8.5 mg/L; 春季表、底层 DO 平均浓度分别为 8.2 mg/L 和 8.5 mg/L, 浓度范围分别为 6.0—9.3 mg/L 和 7.5—10.0 mg/L。

空间上, DO 浓度从近岸到外海呈现先降低再升

高的趋势, 在口门中心区 DO 浓度最低。

2.2 叶绿素 a 的时空变化

与溶解氧变化密切相关的浮游植物(叶绿素 a 表征)的时空分布特征的分析结果见图 3。

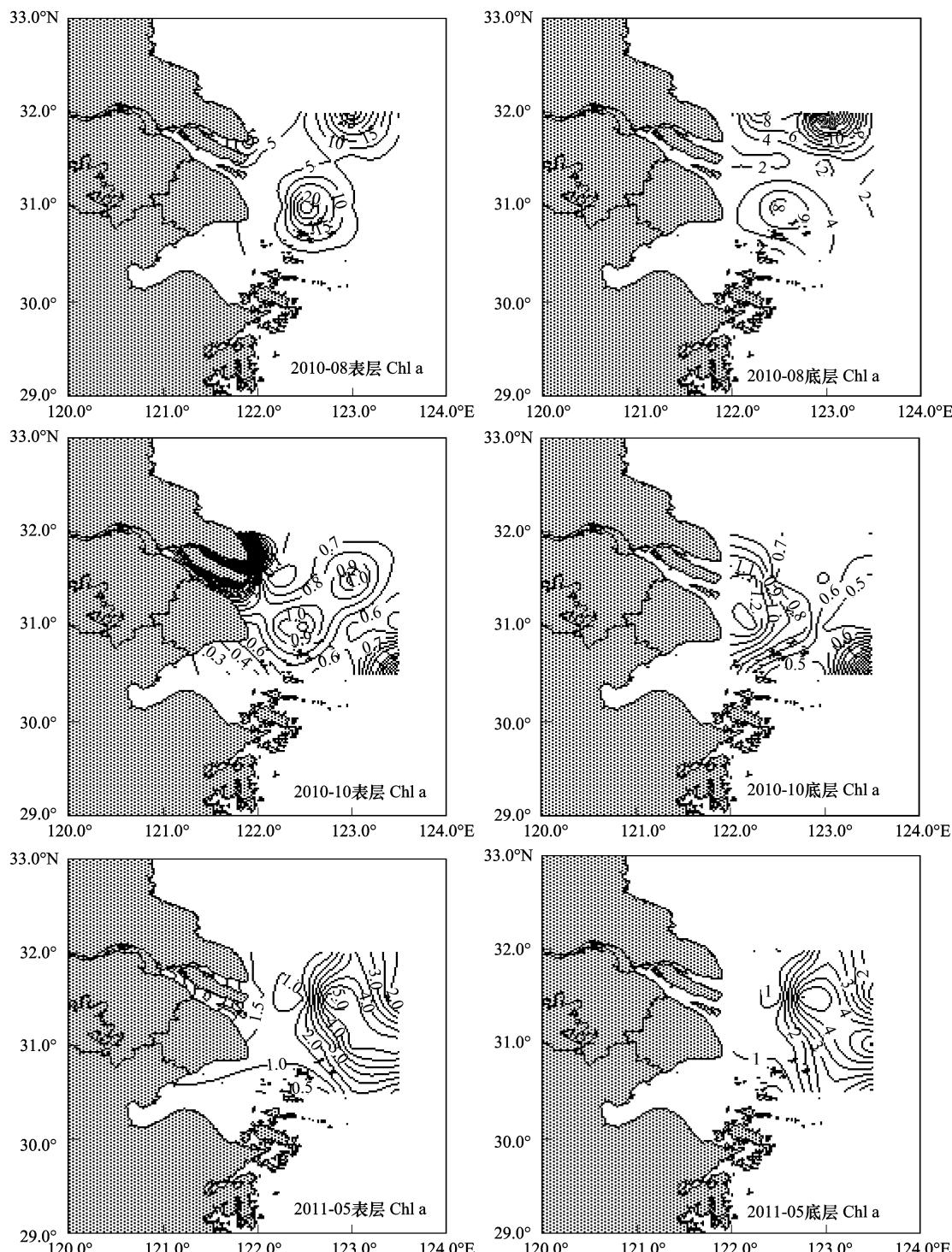


图 3 长江口及邻近海域 2010—2011 年 3 个季节叶绿素 a 表层和底层的分布特征

Fig.3 The concentration of Chla in the surface and bottom water of the Yangtze estuary and its adjacent area in three seasons during 2010—2011

夏季,口门内表层水体叶绿素a浓度范围为0.74—19.33 μg/L,平均值为4.68 μg/L;叶绿素a浓度沿入海方向逐渐升高,口门外表层水体水域叶绿素a浓度为0.34—43.75 μg/L,平均浓度为7.46 μg/L。叶绿素a浓度在口门外东北部稍外海和东南部稍近海水域形成两个高值区,最高值中心浓度分别是43.75 μg/L和36.32 μg/L。中层水体叶绿素a浓度范围为0.37—18.52 μg/L,平均为4.45 μg/L,空间分布特点与表层类似,同样存在两个高值区,只是东南区高值中心内移一些。底层水体叶绿素a浓度范围为1.18—33.78 μg/L,平均为5.90 μg/L,分布特点与表层类似,只是在东北高值区的西侧又有一个高值中心。

秋季,口门内表层水体叶绿素a浓度范围为0.79—5.25 μg/L,平均值为2.23 μg/L,在长江口北支,相对其他站点存在高值密集区域;口门外水体叶绿素a浓度范围为0.39—1.97 μg/L,平均值为0.75 μg/L,北支出口往东有一高值中心,南槽出口外也有一高值中心,东南角也存在一高值中心。在中层除了调查区域东北角有一高值中心,大部分区域叶绿素a浓度分布比较均匀,为0.6—0.8 μg/L,平均值为0.70 μg/L。底层叶绿素a浓度范围为0.41—

2.43 μg/L,平均值为0.77 μg/L,从近岸向外海逐渐降低,在调查区域东北角有一高值中心。

春季,口门内表层水体叶绿素a浓度为1.38—3.33 μg/L,平均值为2.35 μg/L;出了口门叶绿素a浓度先减小,然后增加,再减小;口门外浓度范围为0.12—5.56 μg/L,平均值为1.93 μg/L,在122.6°E、31.6°N中心区域有一高值中心。中层叶绿素a浓度范围为0.35—5.76 μg/L,平均值为2.06 μg/L,高于口门外表层平均值,分布特点类似于表层,在123.5°E、31.0°N区有一高值中心,调查区域东北角有一低值中心。底层叶绿素a浓度范围为0.39—5.64 μg/L,平均值为1.97 μg/L,仍高于表层,但是低于中层,分布特点类似于中层。

虽然用于夏季和春季分析的数据不在同一年份,但是是在一个水文年之内,从图3可以明显看出,本组数据中夏季叶绿素a比春季高出很多,这与以往的结果存在差异,因为长江口一般春末夏初是赤潮高发季节,该差异有待进一步分析。

2.3 叶绿素a的剖面分布

站点C1—C6所在的31.0°N剖面位于长江冲淡水与杭州湾交界处,咸淡水混合比较好,具有代表性。图4给出了C1—C6剖面叶绿素a的浓度分布。

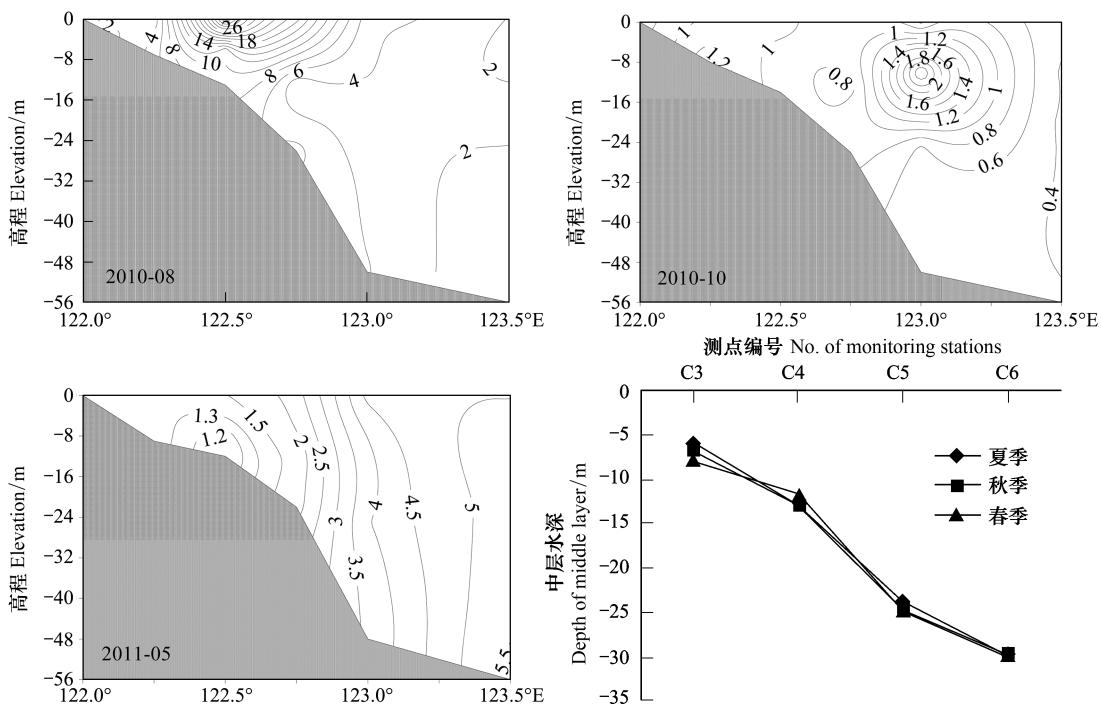


图4 长江口叶绿素a浓度典型剖面分布及测点中层水深

Fig.4 Chla concentration of a typical cross-section and the depth of the middle layer

夏季,叶绿素a浓度离岸方向先增加后减少,在122.5°E表层有一高值中心,中心值达36.32 μg/L,在123.0°E以东区域上下混合比较均匀;秋季,叶绿素a浓度高值区分布在123.0°E、水深8 m处,高值中心浓度向岸方向呈增加趋势;春季,122.5°E以西从表层到底层叶绿素a浓度逐渐减小,但是以东区域,叶绿素a浓度上下层分布均匀;且从西往东浓度是逐渐增加的,最高值分布在123.5°E的底层。总体而言,从夏季到春季,叶绿素a高值区朝离岸方向发展。

2.4 典型站点水环境及生态因子垂直分布

选择温、盐跃层明显的A3、A5两个站位研究夏季溶解氧(DO)、叶绿素a(Chla)、温度(T)以及盐度(Sal)的垂直分布情况(图5)。A3站点叶绿素a在

底层处最高,表层最低,从表层到底层依次增高,而且底层是表层的近一倍,但总体来说浓度较低;对应的DO含量是从表层到底层依次降低,在底层达到低氧范围,最低含量仅为2.00 mg/L,这与叶绿素a分布呈反向关系。这可能是由于来自外海中层的低氧水造成;另外,底层动物呼吸和有机物分解过程也大量耗氧,而温、盐跃层的存在阻碍了上层氧向下层扩散传递,使得下层氧量得不到及时的补充,因此底层的DO远远小于表层。A5站点DO垂向变化趋势与Chla相似,都是表层出现最高值,其中Chla表层达43.75 μg/L,为严重富营养化,中层迅速降低,但也高达18.52 μg/L,底层又迅速增加至33.78 μg/L;DO保持与Chla同步趋势,在中层出现低氧现象,低值仅为1.82 mg/L。

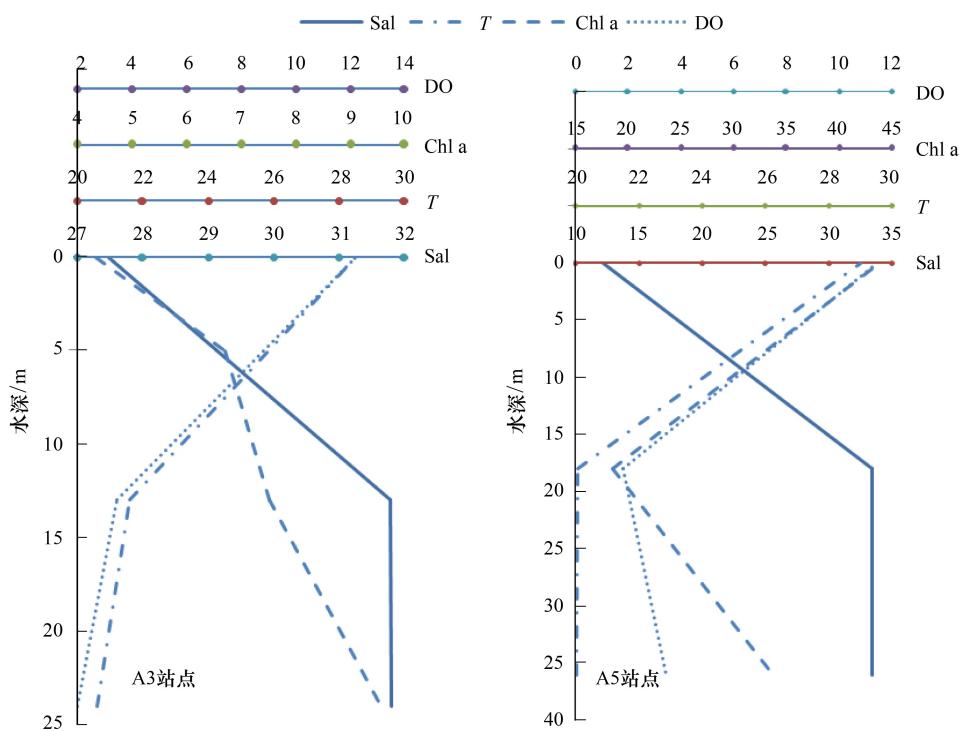


图5 长江口口门附近A3和A5站点夏季T、Sal、DO和Chla垂直分布

Fig.5 Vertical profile of T, Sal, DO and Chla at the monitoring stations A3 and A5 near the estuary outlet

3 长江口海域叶绿素a与环境因子之间的关联性分析

早期的研究认为,海水中营养盐浓度越高,浮游植物生长越快,相应海区的叶绿素就越高^[8],但是此次调查发现叶绿素a与这些营养盐基本没有显著相关性。考虑到叶绿素a和营养盐之间的相关性比较随机,但是叶绿素a表征的生长率和营养盐吸收率

相关性强,本研究采用Monod方程表征营养盐吸收趋势。Monod生长方程认为低浓度情况下,浮游植物的生长随着营养盐浓度的增加而增加,但当浓度超过一定范围时,浮游植物的生长速率将维持在一定程度,不再随外界营养盐浓度的变化而变化^[9]。

对于长江口及邻近海域而言,根据2010—2011年的调查数据,海水中的叶绿素和营养盐之间关系非常复杂(图6),研究海域的营养盐从近岸到外海

呈逐渐降低的趋势,在营养盐浓度较低的外海,浮游植物生长主要受营养盐限制,所以叶绿素浓度较低;靠近近岸,营养盐浓度越高,叶绿素也随之升高,但是叶绿素最高值没有出现在营养盐浓度最高的河口附近的海域,而是出现在营养盐浓度处于中等水平的海域^[10],即最大浑浊带的锋面区域。借用 Steele 方程^[8](式 1)来描述叶绿素和营养盐的关系:

$$\text{Chla} = A_N \frac{\text{Nutrient}}{\text{Nutrient}_{\text{OPT}}} e^{1 - \frac{\text{Nutrient}}{\text{Nutrient}_{\text{OPT}}}} \quad (1)$$

式中: A_N 为浮游植物生长状态参数 (N 分别代表

DIN: dissolved inorganic nitrogen, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$), Nutrient 为营养盐 (DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$) 浓度, $\text{Nutrient}_{\text{OPT}}$ 为浮游植物生长的最适营养盐浓度。当实际海域营养盐浓度小于 $\text{Nutrient}_{\text{OPT}}$ 时,生物量随营养盐浓度的增加而增加,当浓度大于最适浓度时,生物量反而随营养盐浓度的增加而减少。基于此次调查数据,长江口 DIN 浓度在 37 $\mu\text{mol/L}$ 左右,叶绿素浓度达到最高值,而对 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 而言,在浓度约 35 $\mu\text{mol/L}$ 左右,叶绿素 a 浓度达到最高值,而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 则是在浓度约 1.80 $\mu\text{mol/L}$ 时,叶绿素 a 浓度较高。

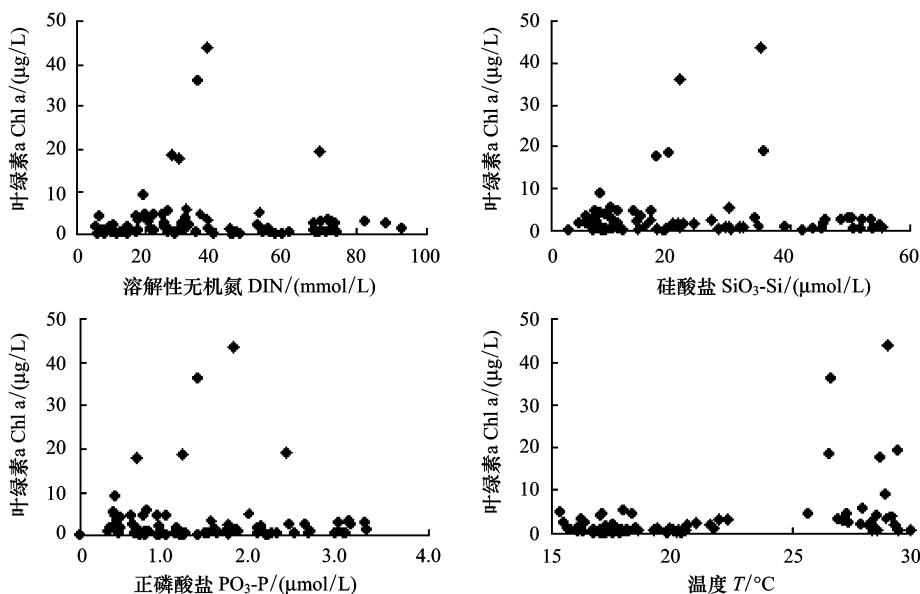


图 6 长江口及邻近海域叶绿素 a 与营养盐和温度的关系

Fig.6 Relation between Chla and nutrients concentration as well as temperature in Yangtze estuary

温度对浮游植物的生长有重要影响,此次调查数据显示,长江口及邻近海域的叶绿素 a 与温度呈现峰值对应的关系(图 6),在 15—23 °C 左右,叶绿素 a 量变化不大,在 29 °C 左右的范围内出现叶绿素 a 的峰值。

海水 TSS 是表征海水光学特征的指标,它主要

反映了水体的浑浊程度以及水体中悬浮物的含量,会直接影响着光线在海水中的衰减程度,进而影响水体中浮游植物的光合作用,因此是影响海洋浮游植物生长的一个重要因素。根据本次调查数据,在 TSS 大于 40 mg/L 左右的水域,叶绿素 a 都处于较低水平(图 7)。

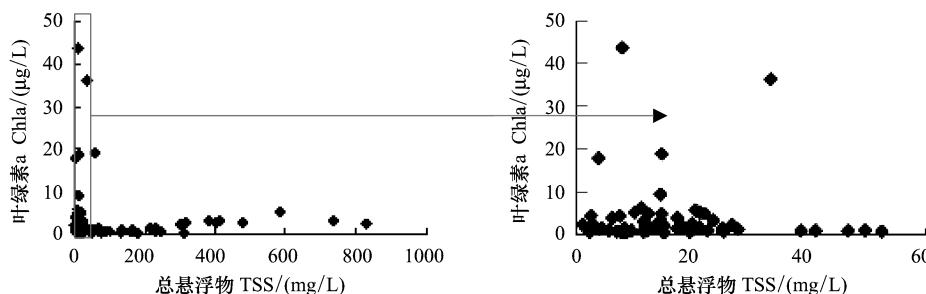


图 7 长江口及邻近海域 Chla 与 TSS 的关系

Fig.7 Relation between Chla and TSS concentration in Yangtze estuary

长江入海径流是冲淡水影响范围的决定因子之一,三峡蓄水后大通站径流和泥沙减少^[11];三期(175 m)蓄水后,水利部长江水利委员会公布的2011年春季监测数据显示水沙通量进一步降低。此同时,低氧区及叶绿素a高值区有向口门内位移的趋势^[12],叶绿素a峰值区从2002年的26 psu区向内位移到2006年的22 psu区,再继续位移至目前的18 psu区;结合作者对本调查周期硅酸盐的分析结果^[13],认为175 m蓄水后,叶绿素a峰值区和低氧区可能进一步内移。

4 结论

通过对三峡水库正常蓄水(175 m方案)后长江口丰、平、枯一个完整水文年内的水环境和浮游植物监测,以影响生态系统最关键的指标DO和Chla为对象,分析了其时空动态,并结合前期的结果,发现:

(1)层化分析结果表明,垂向上Chla在表层、中层、底层都可能出现最大值,这与不同季节水动力垂向稳定性相关;高值区的平面位置随季节也有明显位移,这与长江径流季节性变化相关;

(2)叶绿素a浓度和溶解氧浓度的耦合关系在近岸和远岸存在明显差异,这主要由于长江口最大浑浊带沉积区域导致;在最大浑浊带,叶绿素a峰值和营养盐有很好的对应关系,借用Steele^[8]方程确定了适宜浮游植物生长的DIN、SiO₃-Si和PO₄-P浓度。

(3)三峡175 m正常蓄水后,可能使长江口来水来沙进一步减少,冲淡水的影响范围向口门内位移,将导致叶绿素峰值区和低氧区内移,从而影响长江口生态系统结构。

References:

- [1] Wang J H. HAB alga nearby Changjiang estuary. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(2): 37-41.
- [2] Zhou M J, Yan T, Zou J Z. Preliminary analysis of the characteristics of red tide areas in Changjiang River estuary and its adjacent sea. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7): 1031-1038.
- [3] Chai C, Yu Z M, Song X X, Cao X H. The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang) estuary and the adjacent East China Sea, China. *Hydrobiologia*, 2006, 563(1): 313-328.
- [4] Zhou M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1483-1489.
- [5] Sun J, Tian W. Phytoplankton in Yangtze River estuary and its adjacent waters in spring in 2009: Species composition and size-fractionated chlorophyll a. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 235-242.
- [6] Li D J, Zhang J, Huang D J, Wu Y, Liang J. Oxygen depletion in the Yangtze estuary. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(8): 686-694.
- [7] 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 2002. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(5): 404-412.
- [8] Steele J H. Environmental control of photosynthesis in the sea. *Limnology and Oceanography*, 1962, 7(2): 137-150.
- [9] Capron J, Meyer J. Nitrogen-limited growth of marine phytoplankton II uptake kinetics and their role in nutrient limited growth of phytoplankton. *Deep-Sea Research*, 1972, 19: 619-632.
- [10] Han X R, Wang X L, Sun X, Shi X Y, Zhu C J, Zhang C S, Lu R. Nutrient distribution and its relationship with occurrence of red tide in coastal area of East China Sea. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(7): 1097-1101.
- [11] Bao W J, Cao S, Lin H. Analyses of sediment changes at the Datong Station before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir. *Water Resources Research*, 2010, 31(3): 21-23.
- [12] Wang B D, Wei Q S, Chen J F, Xie L P. Annual cycle of hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary. *Marine Environmental Research*, 2012, 77: 1-5.
- [13] Cui Y P, Chen Q W, Wang B D, Huang G X. Distribution of DSi and changes of Si:N and Si:P ratio in Yangtze estuary before and after impoundment of Three Gorges Reservoir. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(7): 1974-1979

参考文献:

- [1] 王金辉. 长江口邻近水域的赤潮生物. *海洋环境科学*, 2002, 21(2): 37-41.
- [2] 周名江, 颜天, 邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1031-1038.
- [3] 孙军, 田伟. 2009年春季长江口及其邻近水域浮游植物-物种组成与粒级叶绿素a. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 235-242.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 韩秀荣, 王修林, 孙霞, 石晓勇, 祝陈坚, 张传松, 陆茸. 东海近海海域营养盐分布特征及其与赤潮发生关系的初步研究. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1097-1101.
- [7] 包伟静, 曹双, 林红. 三峡水库蓄水前后大通水文站泥沙变化过程分析. *水资源研究*, 2010, 31(3): 21-23.
- [8] 崔彦萍, 陈求稳, 王保栋, 黄国鲜. 三峡水库三期蓄水前后长江口硅酸盐分布及其比值变化. *环境科学学报*, 2013, 33(7): 1974-1979