

文章编号: 1674-5566(2013)05-0720-06

## 长江口水域营养盐的限制性研究

刘 浩, 许文珊

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 根据2004年2月和8月调查资料分析了冬夏两个季节硝酸盐( $\text{NO}_3\text{-N}$ )、铵盐( $\text{NH}_4\text{-N}$ )和活性磷酸盐( $\text{PO}_4\text{-P}$ )在长江口水域表层和底层浓度的分布特征。结果表明:新营养盐(硝酸盐)浓度大致呈现近岸高,向外海方向逐渐降低的分布趋势;再生营养盐(铵盐和磷酸盐)夏季的底层浓度值高于表层。一方面藻类在夏季的光合作用强烈,对上层水体的营养盐消耗很大;另一方面,底层水体得到海底沉积物中再生的营养盐的补充,表底层营养盐的此消彼长使得底层营养盐含量明显高于表层。冬季,由于水体混合强烈,表底层营养盐的分布趋于均匀。进一步以氮磷浓度比考察长江口水域营养盐的限制特性发现:近河口区为磷限制,向海方向逐渐过渡成为氮限制。营养盐限制性的变化过程与长江冲淡水和黑潮变异的相对强弱密切相关。

**研究亮点:** 通过分析2004年冬夏两个季节的观测资料,全面揭示长江口水域营养盐的时空分布特征和营养盐限制特性的变化规律,并首次对造成营养盐限制性变化的原因进行了深入探讨。上述认识对于进一步揭示研究海域富营养化的形成机制提供了理论依据。

**关键词:** 营养盐;浮游植物;冲淡水;沉积物;长江口水域

**中图分类号:** X 832

**文献标志码:** A

海洋中的一些元素,特别是N、P、Fe、Si等是浮游植物生长不可缺少的营养物质,也是海洋初级生产力和食物链的物质基础。这些营养物质在海洋环境中的浓度分布和变化不仅与其来源、水平输运、垂直混合以及海水和沉积物界面的动力过程有关,还与海域的浮游植物、浮游动物以及细菌自身和相互之间的生态动力过程密切相关<sup>[1-2]</sup>。近年来,由于人类活动和全球变化的共同影响,氮、磷营养盐的入海通量在不断增加,进而造成近海海域富营养化加剧以及赤潮绿潮等有害藻华频发。了解营养盐的分布变化规律,对于进一步明确营养盐的限制特性,进而为防治海洋生态环境的进一步恶化提供可靠的理论依据。

发生在海水中的生物化学过程一般满足碳氮磷比值为106:16:1,这个比值被称为Redfield数<sup>[3]</sup>,它通常被用来界定海水中营养盐的限制特性。一般认为,当海水中的氮磷摩尔浓度比超过16时,浮游植物的生长就会受到磷元素缺乏的限

制;反之,则是氮限制。长江每年都会携带大量陆源物质入海,对长江口水域的生态环境产生重要影响。该水域一向以生产力高而著称,因此关于这片海区营养盐限制性的研究报道反而相对较少。以往研究认为:在长江口水域对初级生产力起主要限制作用的是光照而非营养盐。这主要由两方面因素造成:一方面,长江口水域由于存在强烈的垂向湍流混合过程<sup>[4]</sup>,使得悬浮在水体中的沉积物不容易沉降,于是形成了高浑浊度的混合带,并抑制浮游植物的光合作用;另一方面,受长江冲淡水的羽流扩展及苏北沿岸流的输送的影响,这一海域终年存在着营养盐的高值区<sup>[5]</sup>。但是最新的研究又发现:在近河口水域浮游植物的生长还是可能受到磷缺乏的限制,而在远离河口的水域浮游植物生长又可能受到氮的限制<sup>[6]</sup>。究竟长江口水域的营养盐限制特性是怎样的?营养盐限制特性有没有时间(季节)上的变化和空间分布(水体水平和垂直方向)上的

收稿日期: 2013-03-25 修回日期: 2013-05-28

基金项目: 上海市教育委员会创新项目(12ZZ165)

作者简介: 刘 浩(1972—),男,博士,副教授,研究方向为近岸海域动力过程。E-mail: haoliu@shou.edu.cn

差别?如果有,造成这些差别的原因又是什么?这些问题都引起我们的研究兴趣。本文的目的就是通过对长江口水域 40 个站点夏冬两个季节观测数据的分析,揭示该水域营养盐的限制特性,在此基础上进一步明确长江口水域营养盐的组成变化可能对浮游生物生长造成的影响。

## 1 数据来源和站点设置

本文采用的数据是在 2004 年 2 月(冬季)和 8 月(夏季)出海调查实测得到。调查海域的范围为  $120.5^{\circ} \sim 123.5^{\circ} \text{E}$ ,  $30.5^{\circ} \sim 32.5^{\circ} \text{N}$ , 共设置 40 个站位进行现场调查。由于在观测过程中,某些站点的仪器出现故障,导致该站点某一季节的数据出现缺失。为了确保不同季节数据的可比性,本文只采用了两个季节都有观测数据的站点进行对比分析(图 1)。调查内容包括海水的温度(T)和盐度(S)等水温要素,同时也包括硝酸盐( $\text{NO}_3\text{-N}$ ),氨氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ )和磷酸盐( $\text{PO}_4\text{-P}$ )等生源要素。水样采集严格依照《海洋调查规范》进行,根据水深不同使用 Niskin 采水器对 0 m(表层), 5 m, 10 m, 20 m 和离海底 2 m(底层)水体的水样进行了采集。对水样进行实验室分析时,营养盐  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{PO}_3\text{-P}$  分别采用镉铜还原法,靛酚蓝法和磷钼蓝法测定。

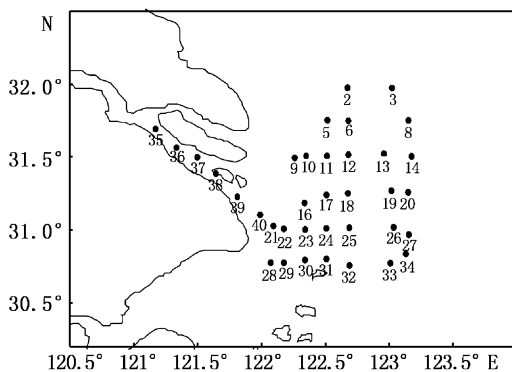


图 1 长江口水域调查站位

Fig. 1 Sampling stations in Yangtze River Estuary

## 2 主要营养盐的时空分布特征

### 2.1 温度盐度场揭示的动力过程

长江口水域温度和盐度的时空分布特征已经另文发表<sup>[7]</sup>,这里就不再赘述。下面仅对温度和盐度场所揭示的水体结构和动力过程进行简单描述。长江口水域的温度(热)层化现象一般

形成于春季,并在夏季最为显著,进入秋季后逐渐减弱,直到冬季垂直方向的温度分布基本是均匀的,显示出较强的垂向热混合过程。长江口水域的盐度分布显著受到长江冲淡水的影响,在长江入海径流最大的夏秋季节盐度层化现象最为显著,在春季枯水期盐度垂向分布趋于均匀,而冬季在东北季风作用下,长江冲淡水的影响主要局限于沿岸一带,长江口外的盐度垂向混合最为充分。通过动力机制分析,可以认为:东亚季风(冬季北风夏季南风)、太阳辐射以及长江冲淡水入海径流的季节变化是导致水体结构季节变化的基本原因。了解上述长江口水域水体结构的季节型特征对于分析主要营养盐的时空分布都是有幫助的。

### 2.2 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度分布

图 2 显示了 2004 年夏季和冬季出海调查期间长江口水域表层和底层水体硝酸盐的水平分布概况。可以看到:无论是冬季还是夏季,表层水体的  $\text{NO}_3\text{-N}$  都呈现出在近河口水域浓度高,并向外海水域逐渐递减的趋势。不同之处在于:在夏季,表层水体  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度梯度递减的趋势相对缓慢;而在冬季,表层水体  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度梯度递减得比较迅速。表层水体  $\text{NO}_3\text{-N}$  的这种分布特征并不令人奇怪,因为硝酸盐通常被称为新营养盐(区别于铵盐这种可在水体再生的营养盐),它的主要来源在于水体外部。具体到长江口水域,  $\text{NO}_3\text{-N}$  基本上都是随长江径流进入到该水域的,因此它的水平分布特征主要取决于长江冲淡水的羽流发展状况。如前所述,在夏季南风影响下,长江冲淡水向海方向的拓展距离比较远,甚至可以跨越东海大陆架到达对马海峡<sup>[8]</sup>。在这一过程中,  $\text{NO}_3\text{-N}$  的浓度梯度递减是比较缓慢的。而在冬季,东亚季风转为北风为主,它限制了长江冲淡水向海方向的拓展,于是长江冲淡水被迫沿顺时针方向转向,最终在科氏力和水平压强梯度力平衡作用下沿着海岸线向南发展,构成了低温低盐的浙闽沿岸流的主体,在特定条件下甚至可以穿越台湾海峡继续向南。

底层水体  $\text{NO}_3\text{-N}$  的浓度分布与表层水体的情形大体相似,只不过在夏季,底层水体  $\text{NO}_3\text{-N}$  向海方向的浓度梯度递减得更加缓慢。这是因为,在夏季长江口水域存在着比较明显的温跃层和盐跃层,而远离河口区的底层水体还可能受到

高温高盐黑潮分支入侵的影响。新的研究显示,黑潮入侵也会向东海输入大量营养盐<sup>[9]</sup>,进而影响到海区的生态系统。冬季由于长江口水域的垂向混合动力过程比较强烈,表底层的  $\text{NO}_3\text{-N}$  的浓度分布趋于均匀。

### 2.3 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度分布

铵盐之所以被称为可再生营养盐,是因为它可以从海底沉积物当中的有机物质通过矿化作用重新生成。因此,它的来源除了像硝酸盐一样随长江径流流入外,还可以通过底层水体与海底沉积物的界面动力过程重新进入到水体。

根据本文的调查结果,同样是无机氮, $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度的季节变化不是很明显,而  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度的季节变化比较显著。造成这种差别的原因是:藻类

生长对无机氮的吸收总是  $\text{NH}_4\text{-N}$  优先于  $\text{NO}_3\text{-N}$ 。一般认为:在硝酸盐和铵盐同时存在的条件下铵盐会被优先吸收, $\text{NH}_4\text{-N}$  的存在对于浮游植物吸收  $\text{NO}_3\text{-N}$  具有抑制作用,而且硝酸盐的吸收速率要小于氨氮。夏季是藻类生长的活跃期,因而对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收量较大,导致海水中的铵盐浓度明显小于冬季的浓度值。

铵盐分布的另一个特征是,夏季底层水体的浓度值要高于表层水体的浓度值,这与磷酸盐的情形比较相似,主要是由沉积物中再生出来的铵盐重新进入水体所致。冬季由于该水域存在比较强的垂向混合过程,表底层铵盐浓度分布也趋于均匀。

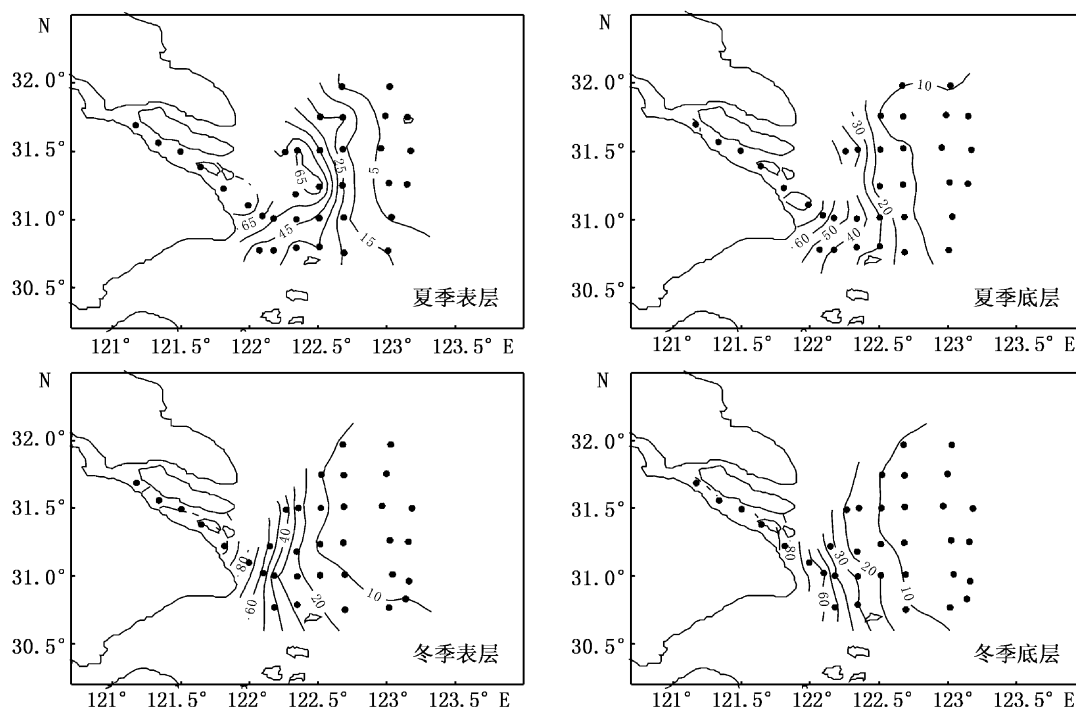


图2 夏冬季节长江口水域  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度在表层和底层的分布特征

Fig. 2 Nitrate distributions in the surface and bottom layers of Yangtze River Estuary in summer and winter, respectively

### 2.4 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度分布

活性磷酸盐也属于可再生营养盐,而且它的再生速度还要快于铵盐<sup>[10]</sup>,这也是磷酸盐浓度一年四季差别不大的重要原因。图3显示了夏冬两季长江口水域表层和底层磷酸盐的水平分布特征。可以看到:在夏季,底层磷酸盐浓度值明显高于表层浓度值,外海浓度值高于中心水域浓

度值。虽然随长江径流进入河口水体的磷酸盐由于长江冲淡水的密度原因主要分布在水体表层,但是高浓度的硝酸盐的存在过度消耗了磷酸盐,导致表层水体磷酸盐浓度下降很快。另一方面,海底沉积物中有机质降解再生后产生的磷酸盐通过水体——沉积物的界面动力过程重新进入到底层水体,由于夏季温盐跃层的存在有效抑

制了上下层水体的物质交换,因此下层水体的磷酸盐浓度显著提升。上下层水体磷酸盐的这种此消彼长的变化过程也就造成底层水体浓度高于表层水体浓度。

另外,最新的研究显示:黑潮变异和台湾暖流向东海输送的 DIN 与长江冲淡水相当,然而输送的  $\text{PO}_4\text{-P}$  却比后者高 8~17 倍,因此高温高盐的台湾暖流携带的  $\text{PO}_4\text{-P}$  也可对河口以外水域

的磷酸盐形成重要的补充,这就是外海值高于中心水域浓度值的原因。

在冬季,受水温下降的影响,无论是藻类的活跃性还是沉积物中有机质降解再生磷酸盐的过程都受到较大的抑制。因此底层水体的磷酸盐浓度较夏季要低,同时,较强的垂向混合过程又使得这一季节表底层水体的浓度分布趋于一致。

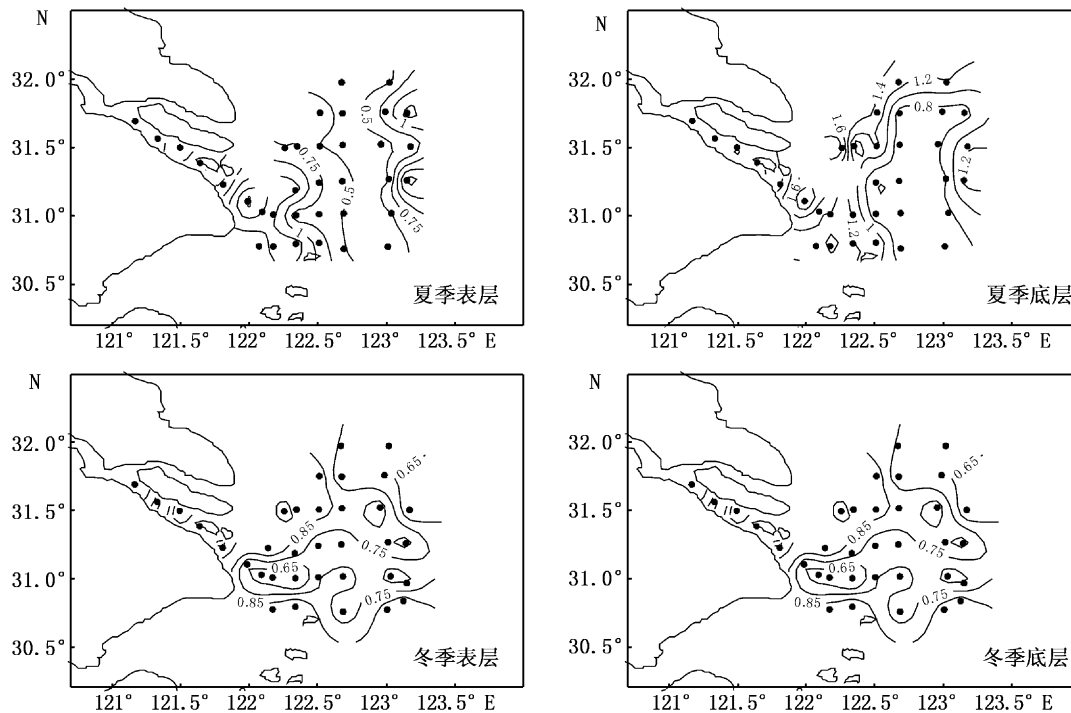


图3 夏冬季节长江口水域  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度在表层和底层的分布特征

Fig. 3 Phosphate distributions in the surface and bottom layers of Yangtze River Estuary in summer and winter, respectively

### 3 长江口水域营养盐的限制性特征

在分析海水中藻类生长特性时,通常以氮磷两种营养盐的浓度比值作为判别营养盐是否对藻类生长产生限制的一个重要依据。当海水中的氮磷摩尔浓度比超过 16 时,浮游植物的生长就会受到磷元素缺乏的限制;反之,则是氮限制。图 4 显示了夏冬两季长江口水域表层和底层水体中氮磷浓度比值的水平分布特征。其中氮的浓度计算考虑了硝酸盐和铵盐两种主要无机氮。可以看到:无论夏季还是冬季,无论表层还是底层,氮磷浓度比都呈现出近岸水域比值高,向海

方向逐渐递减的变化趋势,意味着营养盐的限制特性由近岸的磷限制向外海的氮限制逐渐变化。只不过在不同季节和不同水层这种变化的程度有所不同。这与无机氮和磷酸盐的来源密切相关。如前所述,海水中无机氮的主要成份是硝酸盐,它的主要来源是长江冲淡水,因此在表层水体和近河口水域浓度高;磷酸盐的主要来源是海底沉积物以及台湾暖流和黑潮变异携带到研究海域的磷酸盐,因此在底层水体和外海海域浓度高。可以推断:长江冲淡水和黑潮变异相对强弱的变化都会导致长江口水域营养盐限制性发生改变。

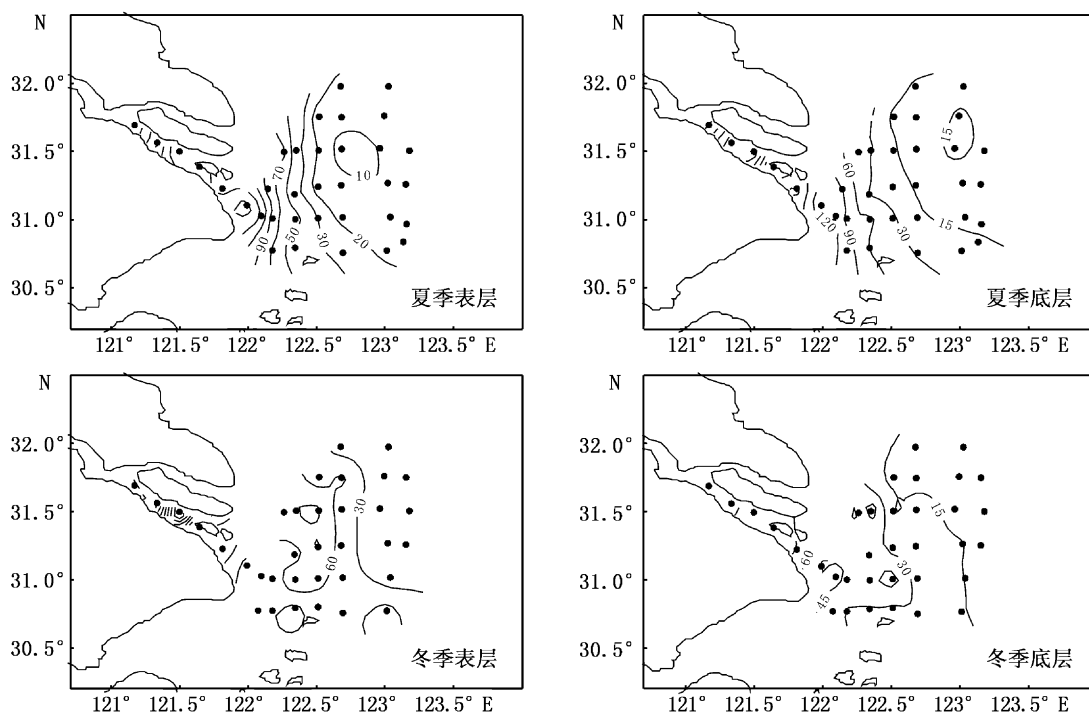


图4 夏冬季节长江口水域氮磷浓度比值在表层和底层的分布特征

Fig. 4 N/P ratio distributions in the surface and bottom layers of Yangtze River Estuary in summer and winter, respectively

#### 4 结论

本文根据2004年两个季节的观测数据分析了长江口水域主要营养盐的时空分布特征。结论如下:在夏季新营养盐(硝酸盐)和再生营养盐(铵盐和磷酸盐)的分布是不同的,由于夏季的生物活动旺盛,上层水体营养盐消耗较大,同时在水体中产生的有机碎屑等颗粒物质也较多,这些物质沉降到海底,通过降解再生并重新进入到水体,使得夏季底层海水中再生营养盐含量较表层明显增高,显示了底层到表层较强的营养盐的浓度梯度;新营养盐主要受长江冲淡水发展的影响,浓度分布由近岸向外海逐渐降低。而冬季无论是新营养盐还是再生营养盐由于生物活性减弱以及海水垂直交换,使营养盐垂直分布较均匀,并且底层浓度较表层略低。

根据研究海域的氮磷浓度比值可以进一步确定:无论夏季还是冬季,无论是表层还是底层,氮磷浓度比都呈现出近岸水域比值高,向海方向逐渐递减的变化趋势,意味着营养盐的限制特性由近岸的磷限制向外海的氮限制逐渐变化。而变化过程又与长江冲淡水和黑潮变异相对强弱

密切相关。

#### 参考文献:

- [1] 黄小平, 黄良民. 河口营养盐动力学过程研究的若干进展[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(4): 86-92.
- [2] LIU H, YIN B S. Numerical investigation of nutrient limitations in the Bohai Sea [J]. Marine Environmental Research, 2010, 70: 308-317.
- [3] REDFIELD A C, KETCHUM B, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of seawater [M]// HILL M N. In the sea. New York, Wiley Interscience, 1963: 26-77.
- [4] LV X G, QIAO F L, XIA C S, et al. Upwelling off Yangtze River estuary in summer [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(11): 1-19.
- [5] CHAI C, YU Z, SONG X, et al. The Status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea, China [J]. Hydrobiologia, 2006, 563: 313-328.
- [6] ZHANG J, LIU S, REN J, et al. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets for the East China Sea Shelf [J]. Progress in Oceanography, 2007, 74(4): 449-478.
- [7] 刘浩, 许文珊. 长江口水域水体结构的季节变化 [J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(2): 260-265.

- [8] CHEN C S, XUE P F, DING P X, et al. Physical mechanisms for the offshore detachment of the Changjiang Diluted Water in the East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(2): 1-17.
- [9] YANG D Z, YIN B S, LIU Z L, et al. Numerical study of the ocean circulation on the East China Sea Shelf and a Kuroshio bottom branch northeast of Taiwan in summer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(5): 1-20.
- [10] RYTHER J H, DUNSTAN W M. Nitrogen, Phosphorous, and Eutrophication in the coastal marine environment[J]. *Science*, 1971, 171: 1008-1013.

## Study on the nutrient limitations in the Yangtze River Estuary

LIU Hao, XU Wen-shan

(*College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*)

**Abstract:** Based on the investigations in February and August, 2004 in the Yangtze River Estuary, the concentration distributions of nitrate ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), ammonium ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) and phosphate ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) in the bottom and surface layers are presented for analysis. It is found that the concentration of the new nutrient (nitrate) shows the high level near the coast and gradually decreases toward the continental shelf in two seasons; whereas the concentration of the regenerated nutrients (ammonium and phosphate) show the high level in the bottom layer comparable to that in the surface layer in summer. Since the phytoplankton is the most active in summer, the nutrients in the upper layer are consumed largely due to the photosynthesis. In the meanwhile, the nutrients regenerated on the sea floor can reenter the bottom layer of the water column and make up the nutrient content. Therefore, the concentrations of regenerated nutrients are higher in the bottom layer than that in the surface layer. In winter, the nutrients are distributed in the similar way in the surface and bottom layers due to the strong vertical mixing in the water column. The further research on the nutrient limitation, according to the Redfield theory, shows that the phosphorus limitation dominates in the river mouth, and such a trend gradually shifts to the nitrogen limitation toward the continental shelf. The variation of the nutrient limitation may be dependent on the relative strength between the Changjiang diluted water and the intrusion branch of the Kuroshio Current.

**Key words:** nutrient; phytoplankton; diluted water; sediment; Yangtze River Estuary