

长江口水域富营养化特性的探索性数据分析

柴超^{1,2,3}, 俞志明^{1*}, 宋秀贤¹, 沈志良¹

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 莱阳农学院青岛市现代农业质量与安全工程重点实验室, 青岛 266109)

摘要: 根据 2004 年 2、5、8、11 月长江口及邻近海域的调查结果, 选择 8 个与富营养化有关的特征参数, 包括营养盐浓度(NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、TN、TP)、化学耗氧量、叶绿素 a 浓度和浮游植物细胞丰度等, 应用探索性数据分析方法对该海域富营养化特性进行研究. 主成分分析表明, 主成分 1 主要反映氮营养盐和有机污染状况; 主成分 2 反映浮游植物生物量; 主成分 3 体现磷营养盐特点. 主成分 1 从口门内到口门外存在降低的趋势, 表明氮营养盐和有机污染主要来源于长江输入. 受人类排污影响, 主成分 1 在吴淞口、石洞口和白龙港排污口附近最高. 冬季口门内各站位的氮营养盐和有机污染最为严重. 春夏季的 3 个主成分均高于秋冬季, 因此春夏季富营养化更为严重. 主成分 1 与盐度之间在秋冬季具有较好的线性关系, 在一定程度上可根据盐度预测长江口海域各站点的主成分 1, 即氮营养盐和有机污染状况. 硝酸盐、总氮、总磷和浮游植物细胞丰度等是控制长江口水域富营养化水平时空变化的主要驱动因素.

关键词: 富营养化; 主成分分析; 回归分析; 长江口

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)01-0053-06

Exploratory Data Analysis to the Study of Eutrophication in the Yangtze River Estuary, China

CHAI Chao^{1,2,3}, YU Zhi-ming¹, SONG Xiu-xian¹, SHEN Zhi-liang¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Modern Agriculture Quality & Safety Engineering Laboratory, Laiyang Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Four cruises were carried out in the Yangtze River Estuary and its adjacent area in February, May, August and November 2004. 8 variables including NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , TN, TP, COD, Chl-a and cell abundance of phytoplankton were analyzed with exploratory data analysis. Three principal components (PCs) are extracted with principal component analysis: N nutrients and COD for PC1, Chl-a and cell abundance for PC2 and P nutrients for PC3. A west-east decreasing gradient in the PC1 indicates N nutrients and organic pollution originate from Yangtze River. Influenced by anthropogenic sewage, PC1 near Wusongkou, Shidongkou and Bailonggang outlets is higher than other stations. N nutrients and organic pollution in stations of inner gate in winter are most serious. PC1, PC2, PC3 in spring and summer are higher so eutrophication level in spring and summer is more serious than other seasons. A good linear relationship between PC1 and salinity exists especially in autumn and winter so N nutrients and organic pollution are predicted to a good extend on the basis of a linear model in which salinity is the independent variable. NO_3^- , TN, TP and phytoplankton cell abundance are dominating factors in assessing the variation of eutrophication in the Yangtze Estuary and its adjacent area.

Key words: eutrophication; principal component analysis; regression analysis; Yangtze River Estuary

富营养化破坏水域的生态平衡, 使原有的生态系统发生结构的改变和功能的退化, 并引起赤潮的暴发^[1~3]. 我国是一个海洋大国, 也是一个富营养化十分严重的国家, 尤其是长江口邻近海域尤为突出. 资料表明, 1997 年溶解无机氮的入海通量比 1968 年增加 7 倍^[4], 2002 年随长江河流排放入海的无机氮为 177.6 万 t, 磷酸盐为 3.15 万 t, 居全国沿海河流之首. 富营养化的加剧导致长江口外海区赤潮发生频率增加、规模扩大、危害程度加重^[5]. 长江口邻近水域已经成为我国有害赤潮的高发区之一, 有记录赤潮事件的约 1/4 发生在这个海域^[6].

探索性数据分析包括主成分分析、回归分析等多元统计分析方法. 主成分分析是利用降维的方法, 在损失很少信息的前提下把多个原始变量转化为几个主成分, 每个主成分都是原始变量的线性组合, 这样在研究复杂问题时就可以只考虑少数几个主成分而不至于损失太多信息, 目前, 探索性分析已经被广

收稿日期: 2005-11-23; 修订日期: 2005-12-30
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50339040); 国家杰出青年科学基金项目(40025614); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-232)
作者简介: 柴超(1974~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为海洋环境化学, E-mail: chaichao@ms.qdio.ac.cn
* 通讯联系人, E-mail: zyu@ms.qdio.ac.cn

泛应用于河流、湖泊及沿海水域的水质评估、富营养化特征、污染物来源等生态环境的研究中^[7~12]。

关于长江口及邻近水域营养盐、浮游植物、叶绿素 a 含量、分布等报道相对较多^[13~18]，但尚没有对该海域富营养化特性的综合分析，本文应用探索性数据分析方法对长江口及其邻近水域富营养化特性进行研究，目的是分析该水域富营养化状况的时空变化特征；分析富营养化水平与物理参数之间的关系；提取控制长江口水域富营养化的关键驱动因素，从而为该水域富营养化的形成机制提供必要的科学基础。

1 材料与方法

于 2004 年 2、5、8、11 月在长江口及邻近海域 121°E~123.5°E, 30.75°N~32°N 海区设置 40 个站位进行现场调查(图 1)，使用颠倒式采水器采集表层水样。调查内容包括温度(t)、盐度(Salinity)、化学耗氧量(COD)、硝酸盐(NO_3^-)、氨氮(NH_4^+)、磷酸盐(PO_4^{3-})、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl-a)等，溶解态营养盐水样经高温灼烧处理过的 Whatman GF/F 滤膜过滤，加氯仿固定，冰冻保存。依照《海洋调查规范》，COD 用碱性高锰酸钾法， NO_3^- 用镉铜还原法， NH_4^+ 用靛酚蓝法， PO_4^{3-} 用磷钼蓝法，Chl-a 用分光光度法测定。TN、TP 均以过硫酸钾氧化比色法测定。各项营养盐测定在荷兰制造的 Skalar San & plus 微量自动分析系统上完成，通过要求标准曲线的相关系数 ≥ 0.999 和利用标准溶液进行中间校准来控制数

据质量。

选择 8 个与富营养化有关的参数，包括 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、TN、TP、COD、Chl-a 和浮游植物细胞丰度，将所有参数进行对数转换，使数据标准化，利用 STATISTICA 统计分析软件进行探索性数据分析。

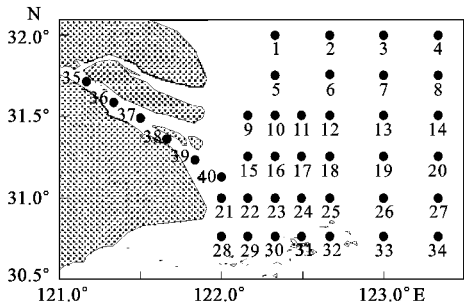


图 1 长江口海域调查站位

Fig. 1 Sampling stations in the Yangtze River Estuary and its adjacent area

2 结果与讨论

2.1 各参数的季节性变化

利用箱形-触须线图分析各参数的季节性变化，中间的横线表示平均值，箱形的上下端分别表示平均值 $\pm$ 标准偏差，上下触须线表示最大、最小值(图 2)。由于调查区域范围大，多数参数的标准偏差较大。 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的季节性差别不十分显著，丰水期 8 月 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的平均浓度分别为 $39.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.82 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ，略高于其它季节，而枯水期 2 月 NH_4^+ 明显高于其它季节，平均浓度高达 10.3

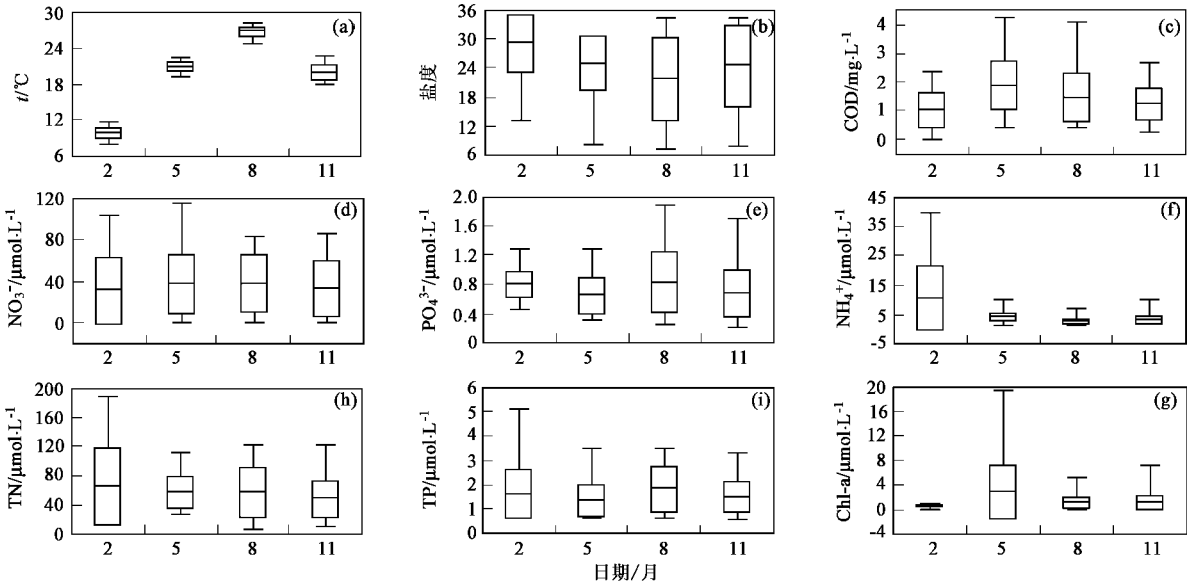


图 2 各参数的季节性变化(盐度平均值不包括 35~40 号站位)

Fig. 2 Seasonal variability of parameters

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.受 NH_4^+ 浓度较高影响,2 月 TN 浓度略高于其它季节;TP 浓度的变化趋势与 PO_4^{3-} 相近,在 8 月略高.COD 和 Chl-a 均在 5 月较高,5 月 Chl-a 平均值高达 $2.8\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,这可能与 2004-05 该海域发生赤潮有关.

2.2 主成分分析

应用主成分分析,按照特征根 ≥ 1 的标准,提取了 3 个主成分,可以解释原始 8 个变量信息的 75%.为使每个主成分的意义更为明确,采用最大方差标准化原始数据旋转方法对因子进行旋转.根据各主成分的解释方差比例及在不同参数上的载荷可以看出(表 1),主成分 1(PC1)描述原始变量信息的 32.59%,在 COD、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、TN 上具有较高的载荷,因此主要反映了氮营养盐和有机污染状况;主成分 2(PC2)描述原变量信息的 20.56%,在 Chl-a 和浮游植物细胞丰度上的载荷较高,主要反映了浮游植物生物量的特征,是生物因子;主成分 3(PC3)在

表 1 因子载荷和解释方差

Table 1 Various factors loadings and explained variance			
参数	PC1	PC2	PC3
COD	0.665 7	0.239 2	0.340 2
NO_3^-	0.802 7	0.126 2	0.414 4
NH_4^+	0.769 7	-0.466 7	-0.157 4
PO_4^{3-}	0.179 7	-0.170 1	0.717 5
TN	0.864 4	0.052 4	0.307 6
TP	0.373 2	0.024 1	0.760 7
Chl-a	0.082 2	0.728 9	-0.480 0
细胞丰度	0.039 4	0.888 9	0.037 6
解释方差比例/%	32.59	20.56	21.65

PO_4^{3-} 和 TP 上载荷较高,主要体现磷营养盐的特点.由于 PC1 主要反映有机污染和氮营养盐水平,因此可以通过分析各站位的 PC1 比较氮营养盐和有机污染状况,PC1 越高,其氮营养盐和有机污染就越严重.根据 2 月和 8 月 PC1 的空间分布(图 3),PC1 从西向东存在降低的趋势,口门内及附近站位的 PC1 较高,靠近外海的各站位较低,说明该水域的氮营养盐和 COD 主要来源于河流输入.特别是在 37 和 39 号站的 PC1 高于其他站位,由于 37 号站位于石洞口排污口和吴淞口附近,39 号站位于白龙港排污口附近,工业和生活污水等点源输入导致氮营养盐和 COD 含量较高,使 PC1 达到最高值,因此人类排污是长江口水域富营养化形成另一个重要来源.

由 4 个季节各站位 PC1-PC2 的分布图可以看出(图 4),2 月口门内及附近各站位的 PC1 较高,而其它季节口门内及附近各站位的 PC1 虽然也高于其它站位,但差别不如 2 月显著,这可能是由于 2 月是枯水期,长江径流量较低,黄浦江和口门内各排污口排出的 COD 和氮营养盐等污染物较难稀释扩散,使得口门内及附近各站位的 PC1 较高,因此冬季口门内的氮营养盐和有机污染最为严重.

从 4 个季节的 PC2 分析,整体上 5 月和 8 月各站位的 PC2 较高.由于 PC2 是生物因子,主要反映 Chl-a 和细胞丰度特征,说明该海域春夏两季的生物活动较为活跃.而 2 月各站位的 PC2 均较低,差别不明显,是由于冬季水温较低,生物活动较弱,整个水域的生物活动没有显著差别.

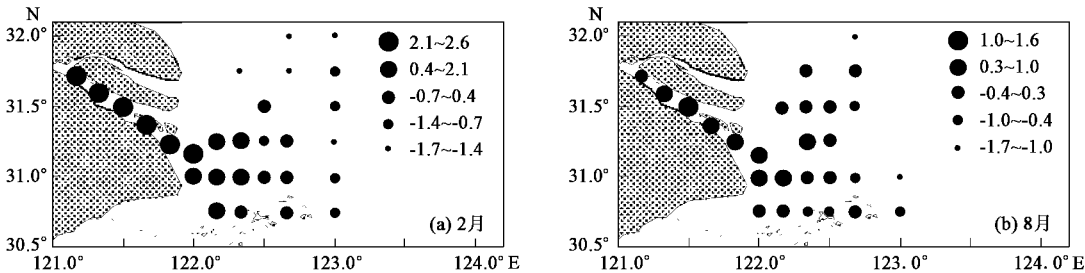


图 3 PC1 的空间分布
Fig.3 Spatial distribution of PC1

比较 4 个季节的 3 个主成分可以看出(图 5),反映氮营养盐和有机污染的 PC1 在春季略高于其它季节;体现 Chl-a 和细胞丰度等浮游植物生物量信息的 PC2 在夏季最高,其次是春季,表现出该海域春夏 2 季的较强生物活动;反映磷营养盐特征的

PC3 在夏季较高,这与图 2 显示的 PO_4^{3-} 和 TP 浓度高于其它季节是一致的.总体上,径流量较大的春夏季,长江口海域有机污染和营养盐的负荷较高,同时浮游植物生物活动较为活跃,因此,春夏季的富营养化状况要更为严重.

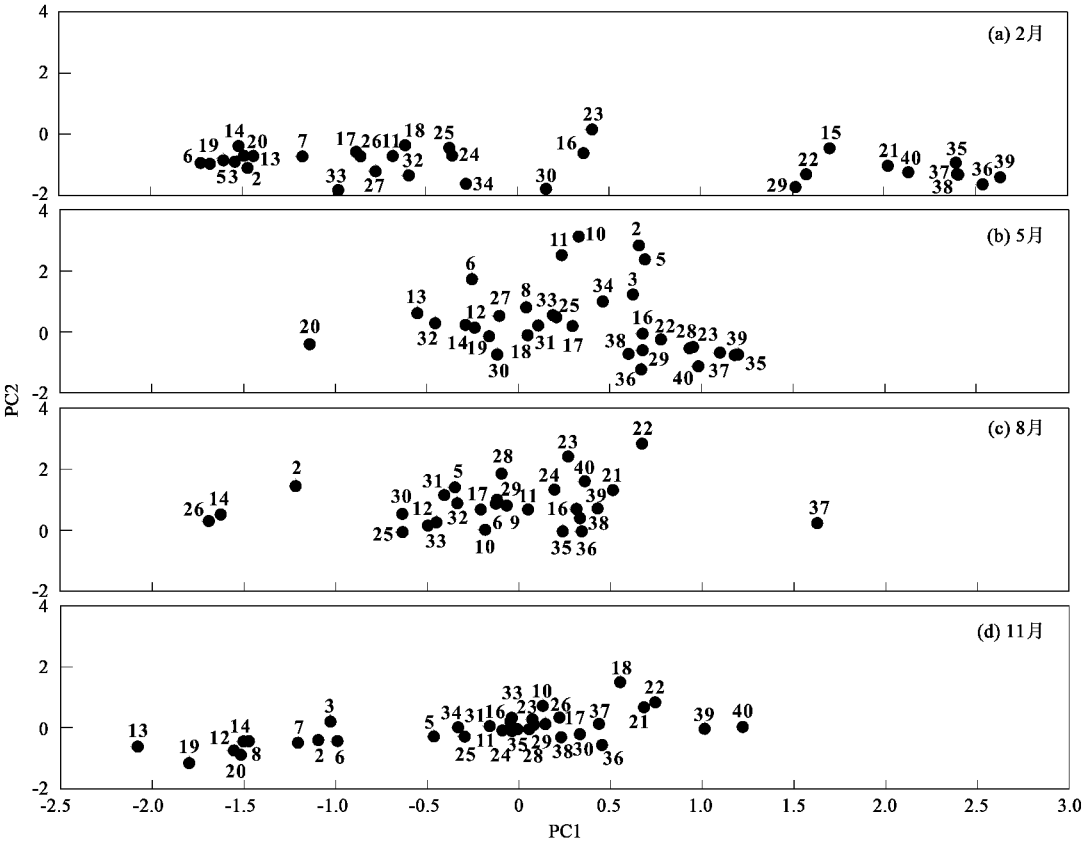


图 4 各季节不同站位的 PC1-PC2 分布

Fig.4 Scores of each monitoring station in PC1-PC2

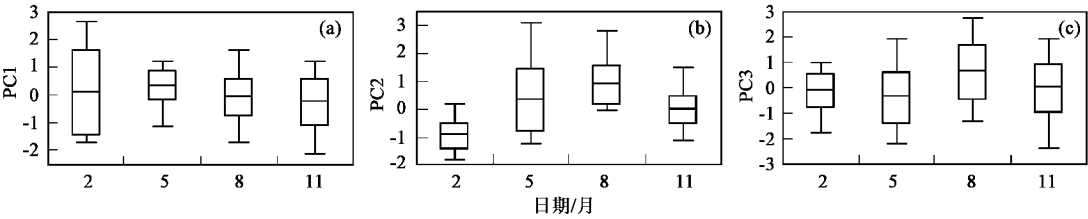


图 5 各主成分的季节性变化

Fig.5 Seasonal variability of PC1, PC2 and PC3

2.3 主成分与物理参数的关系

PC1 与物理参数(盐度)的回归分析表明(表 2), 在 2 月和 11 月, PC1 与盐度呈显著线性负相关关系, 而 5 月和 8 月 2 季 PC1 与盐度的线性关系较差. 图 6 是根据回归模型得出的各站点 PC1 预测值与实际观测值之间的关系, 可以看出, 2 月各站点 PC1 的观测值与预测值吻合较好, 而 8 月的观测值相对分散, 这可能是由于 PC1 反映氮营养盐和有机污染水平, 冬季生物活动较弱, 污染物主要受河流的稀释扩散作用, 因此与盐度具有较好的线性负相关关系; 夏季的生物活动旺盛, 导致氮营养盐和 COD 含量与盐

表 2 各季节 PC1 与盐度的线性回归分析

Table 2 Results of the regression analysis between PC1 and salinity in different seasons

月份	n	R ²	回归方程	p
2	26	0.891 5	PC1 = 5.062 9 - 0.157 1Salinity	< 0.000 1
5	27	0.511 5	PC1 = 1.517 1 - 0.054 0Salinity	< 0.000 1
8	22	0.676 1	PC1 = 0.950 5 - 0.066 9Salinity	< 0.000 1
11	29	0.827 2	PC1 = 1.684 1 - 0.086 0Salinity	< 0.000 1

度的相关性有所减弱. 因此, 在一定程度上可根据盐度来预测秋冬两季长江口海域各站位的 PC1, 即氮营养盐和有机污染状况.

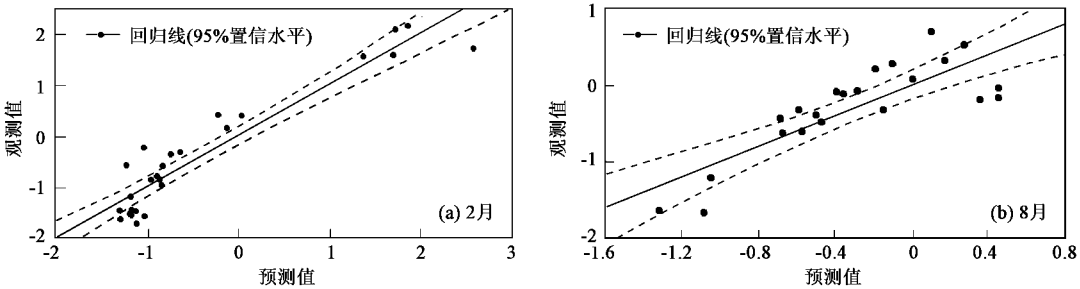


图 6 PC1 与盐度的回归分析结果

Fig. 6 Results of the regression analysis between PC1 and salinity

2.4 长江口水域富营养化的驱动因素

为了从较多参数中提取与富营养化状况有关
的控制因素,分析长江口水域富营养化的驱动因子,本
文依据 Lundberg^[19]的研究方法,分析了各参数与主
成分之间的相关系数(表 3).根据表 3,NO₃⁻ 和 TN
与 PC1 的相关系数均高达 0.8 以上,具有显著的相
关关系($p < 0.01$),因此 NO₃⁻ 和 TN 是驱动 PC1 的关
键因素;与 PC2 最为相关的参数是浮游植物细胞丰
度,其相关系数为 0.883($p < 0.01$),表明细胞丰度是
驱动 PC2 的关键因子;与其它参数相比,TP 与 PC3
的相关系数最高,且 $p < 0.01$,所以 TP 是控制 PC3
的主要因素.因此,NO₃⁻、TN、TP 和浮游植物细胞丰
度是控制长江口水域富营养化状况的关键因素,是
该水域富营养化水平时空变化的主要驱动因子,是
评价其富营养化状况变化最重要的参数.

表 3 参数与主成分之间的斯皮尔曼相关系数(r_s)及对应的 p 值

Table 3 Spearman's correlation coefficient (r_s) and p
between the parameters and PCs

参数	PC1		PC2		PC3	
	r_s	p	r_s	p	r_s	p
COD	0.755	0.000	0.166	0.063	0.388	0.000
NO ₃ ⁻	0.834	0.000	0.056	0.535	0.427	0.000
NH ₄ ⁺	0.636	0.000	-0.447	0.000	-0.108	0.229
PO ₄ ³⁻	0.196	0.028	-0.256	0.004	0.721	0.000
TN	0.841	0.000	0.056	0.536	0.350	0.000
TP	0.457	0.000	0.020	0.823	0.762	0.000
Chl-a	0.087	0.333	0.661	0.000	-0.439	0.000
细胞丰度	0.089	0.322	0.833	0.000	0.032	0.724

3 结论

8 月 NO₃⁻ 和 PO₄³⁻ 的平均浓度分别为 39.5
 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.82 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,略高于其它季节,而 2 月
NH₄⁺ 明显高于其它季节,平均浓度高达 10.3
 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.COD 和 Chl-a 均在 5 月较高.主成分分析
表明,主成分 1 主要反映氮营养盐和有机污染状况;

主成分 2 主要反映浮游植物生物量的特征,是生物
因子;主成分 3 主要体现磷营养盐的特点.主成分 1
从西向东存在降低的趋势,说明长江口水域的富营
养化主要来源于河流输入.受人类排污的影响,主成
分 1 在吴淞口和白龙港排污口附近最高.根据主成
分 1,枯水期 2 月口门内各站位的氮营养盐和有机
污染最为严重,富营养化程度较高.径流量较大的春
夏季,主成分 1、2、3 高于其它季节,长江口海域有
机污染和营养盐的负荷较高,同时浮游植物生物活
动较为活跃,因此,该海域春夏季的富营养化状况更
为严重.主成分 1 与盐度之间在秋冬季具有较好的
线性关系,在一定程度上可根据盐度预测长江口海
域各站点的主成分 1,即氮营养盐和有机污染状况.
NO₃⁻、TN、TP 和浮游植物细胞丰度是控制长江口
水域富营养化水平时空变化的主要驱动因子,是控
制长江口水域富营养化状况的关键因素.

致谢:衷心感谢三峡工程与长江河口生态环境
研究项目组提供浮游植物细胞丰度资料及姚云、周
淑清、李峥等同学在野外和实验室的测定工作.

参考文献:

[1] Telesh I V, Alimov A F, Golubkov S M, *et al.* Response of aquatic communities to anthropogenic stress: a comparative study of Neva Bay and the eastern Gulf of Finland [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **393**: 95 ~ 105.

[2] Capriulo G M, Smith G, Troy R, *et al.* The planktonic food web structure of a temperate zone estuary, and its alteration due to eutrophication [J]. *Hydrobiologia*, 2002, **475-476**(1): 263 ~ 333.

[3] Riegman R, Noordeloos A M, Cadée G. Phaeocystis blooms and eutrophication of the continental coastal zones of the North Sea [J]. *Marine Biology*, 1992, **112**: 479 ~ 484.

[4] 胡敦欣,韩舜鹰. 长江口、珠江口及其邻近海域陆-海相互作用[M]. 北京:海洋出版社,2001. 71 ~ 78.

[5] 朱建荣,王金辉,沈焕庭,等. 2003 年 6 月中下旬长江口海区冲淡水 and 赤潮的观测及分析 [J]. *科学通报*, 2005, **50**(1): 59 ~ 65.

- [6] 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 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1031 ~ 1038.
- [7] Perona E, Bonilla I, Mateo P. Spatial and temporal changes in water quality in a Spanish river [J]. The Science of the Total Environment, 1999, **241**: 75 ~ 90.
- [8] Vega M, Pardo R, Barrado E, *et al.* Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis [J]. Water Research, 1998, **32**(12): 3581 ~ 3592.
- [9] Solidoro C, Pastres R, Cossarini G, *et al.* Seasonal and spatial variability of water quality parameters in the lagoon of Venice [J]. Journal of Marine Systems, 2004, **51**: 7 ~ 18.
- [10] Ceballos B S O, König A, Oliveira J F. Dam reservoir eutrophication: a simplified technique for a fast diagnosis of environmental degradation [J]. Water Research, 1998, **32**(11): 3477 ~ 3483.
- [11] DelValls T A, Forja J M, González-Mazo E, *et al.* Determining contamination sources in marine sediments using multivariate analysis [J]. Trends in Analytical Chemistry, 1998, **17**(4): 181 ~ 192.
- [12] Nguyen H L, Leermakers M, Elskens M, *et al.* Correlations, partitioning and bioaccumulation of heavy metals between different compartments of Lake Balaton [J]. The Science of the Total Environment, 2005, **341**: 211 ~ 226.
- [13] 黄自强, 暨卫东. 长江口水中总磷、有机磷、磷酸盐的变化特征及相互关系 [J]. 海洋学报, 1994, **16**(1): 51 ~ 60.
- [14] 石晓勇, 王修林, 韩秀荣, 等. 长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1086 ~ 1092.
- [15] 王保栋, 战闰, 藏家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径 [J]. 海洋学报, 2002, **24**(1): 53 ~ 58.
- [16] 沈新强, 胡方西. 长江口外水域叶绿素 a 分布的基本特征 [J]. 中国水产科学, 1995, **2**(1): 71 ~ 80.
- [17] 吴玉霖, 傅月娜, 张永山, 等. 长江口海域浮游植物分布及其与径流的关系 [J]. 海洋与湖沼, 2004, **35**(3): 246 ~ 251.
- [18] Edmond J M, Spivack A, Grand A C, *et al.* Chemical dynamics of the Changjiang estuary [J]. Continental Shelf Research, 1985, **4**(1/2): 17 ~ 36.
- [19] Lundberg C, Lönnerth M, Numers von M, *et al.* A multivariate assessment of coastal eutrophication. Examples from the Gulf of Finland, northern Baltic Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **50**(11): 1185 ~ 1196.