长江口及其邻近海域磷的分布变化特征

李　峥[1]，沈志良[2]，周淑青[1]，姚　云[2]

（1.上海水产大学 生命科学与技术学院，上海 200090；2.中国科学院 海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室，山东 青岛 266071）

摘要：根据 2004 年 4 个航次的调查资料，研究了长江河口内及其临近海域磷酸盐和总磷的分布变化特征。结果表明，磷酸盐和总磷的浓度分布都是河口附近高，外海低，但其最大值不在河口内，而在口门外。河口内磷酸盐秋、冬季浓度高，春、夏季低；总磷夏、秋季浓度高，春季和冬季低。口门外磷酸盐和总磷浓度分布都是冬、夏季高，春、秋季低。磷酸盐夏季浓度变化大，分层明显，冬季变化小，垂直分布均匀。总磷春季表、底层浓度接近，其余季节表层都低于底层。通过磷酸盐和总磷与盐度、悬浮体的相关关系研究表明，磷酸盐在河口转移过程中，还受到生物活动、水体垂直对流以及缓冲作用等多种因素的影响。总磷在很大程度上受颗粒磷的控制。

关键词：长江口；总磷；磷酸盐；分布特征

中图分类号：P734.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-3096（2007）01-0028-09

长江是中国最大的河流，也是世界第三大河，强大的径流不断向河口邻近海域输送营养盐，促进了该水域饵料生物的大量繁殖与生长，形成了中国著名的长江口和舟山渔场。近几年进入长江口的氮、磷含量不断增加，富营养化程度加重，长江口海域赤潮经常发生，已成为中国沿海赤潮的多发区[1]。

关于长江口及其邻近海域营养盐的分布变化规律，已有不少研究报道。沈志良[2]报道长江每年向长江口海区输送 1.51 万 t 磷酸盐(PO_4-P)；黄自强等[3]对长江口各种形态磷(包括总磷、有机磷和活性磷酸盐)的研究表明，长江冲淡水的磷具有向南、北双向扩展的趋势；黄尚高等[4]研究认为长江口的磷酸盐存在一定的缓冲作用；王保栋等[5]报道长江口以东及其东北部海域高含量的营养盐主要来自长江冲淡水的扩展及苏北沿岸流的输送；傅瑞标等[6]研究了长江口羽状锋面的营养盐特征；石晓勇等[7]报道，长江口临近海域磷酸盐受台湾暖流影响较大。然而，上述现场调查大多只有丰水期和枯水期两季，且仅限于分析长江口附近海域磷酸盐的分布变化，有关总磷以及长江河口内磷的浓度和分布特征的报道很少。作者对磷酸盐和总磷在长江河口内及其邻近海域四个季节的分布特征及其季节变化进行分析讨论，对于研究长江口区磷的分布状况、变化特征及该区域赤潮生消机制的研究提供了基础数据，为探讨长江口海区富营养化有一定的参考意义。

1 调查和分析方法

研究用的资料取自于 2004 年 2，5，8，11 月的 4 次调查，分别代表冬、春、夏、秋 4 个季节。在长江口海域设 7 个断面，40 个站位（图 1），利用颠倒采水器根据水深取各站位表、底层以及 5，10，20，30m 等水层的水样。测定磷酸盐(PO_4-P)的水样用醋酸纤维膜现场过滤，加上 0.3%的氯仿固定，储存于－25 ℃冰箱中速冻；测总磷(TP)的水样直接于冰箱中

收稿日期：2005-10-12；　修回日期：2006-02-28

基金项目：国家自然科学重点基金资助项目(50339040)；中国科学院知识创新工程重要方向资助项目（KZCX3-SW-232）；国务院三峡工程建设委员会资助项目（SX2004-010）

作者简介：李峥（1978-）,女，湖南常德人，硕士，研究方向:水域生态环境，E-mail:z-li@stmail.shfu.edu.cn；沈志良，通讯作者，E-mail:zhlshen@ms.qdio.ac. cn

冷冻保存。回实验室后先将 TP 水样用过硫酸钾消化处理，然后，与 PO_4-P 水样一起用磷钼蓝法测定其浓度，全部水样利用荷兰 SKALAR 微连续流动分析仪进行比色分析。

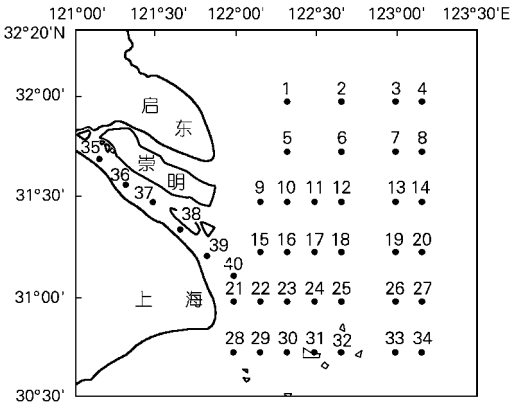

图 1　调查站位

Fig.1　Sampling stations in the Changjiang estuary

2 结果与讨论

2.1 平面分布

PO_4-P 浓度一般河口附近高，外海低，主要受长江冲淡水的影响[8] 。表层 PO_4-P 常被浮游植物吸收而转移，底层由于浮游植物死亡而分解再生，同时沉积物和颗粒悬浮体（TSM）对 PO_4-P 也有缓冲作用，另外高盐高 PO_4-P 外海底层水涌升也能补充水体中的浓度[3]，所以 PO_4-P 和 TP 在长江口呈现出复杂的分布特征。

2.1.1 春季 P 的分布

春季表层 PO_4-P（图 2）在河口内的平均浓度为 0.83 μmol/L,最大值为 1.2 μmol/L。口门外东南方向 PO_4-P 有一高值区，中心浓度为 1.3 μmol/L，向东北方向浓度逐渐减小。表层盐度(*S*)从口门外呈舌状向东增加，最大值小于 31。一般认为盐度为 31 的等盐线为长江冲淡水外缘边界，而盐度为 34 的等盐线为高盐水入侵的主体边界[9]。可见冲淡水在春季势力较强，PO_4-P 主要是受长江冲淡水的影响。与硝酸盐和硅酸盐分布不一样[4,10]，PO_4-P 浓度最高值一般不在河口内而是在口门外，这是由于 PO_4-P 在河口的缓冲作用所致。TP 在河口口门内的平均浓度为 1.6 μmol/L，最大值为 2.7 μmol/L，河口内表层 PO_4-P/TP 为 0.54，可见 TP 主要由 PO_4-P 组成。口门外在调查海区西南角 TP 有一高值区，最高浓度为 3.4 μmol/L，向东北逐渐下降，122° 30′E 以东浓度低于 1.0 μmol/L, 分布基本均匀。TSM 分布与 TP 一致，最大值也在口

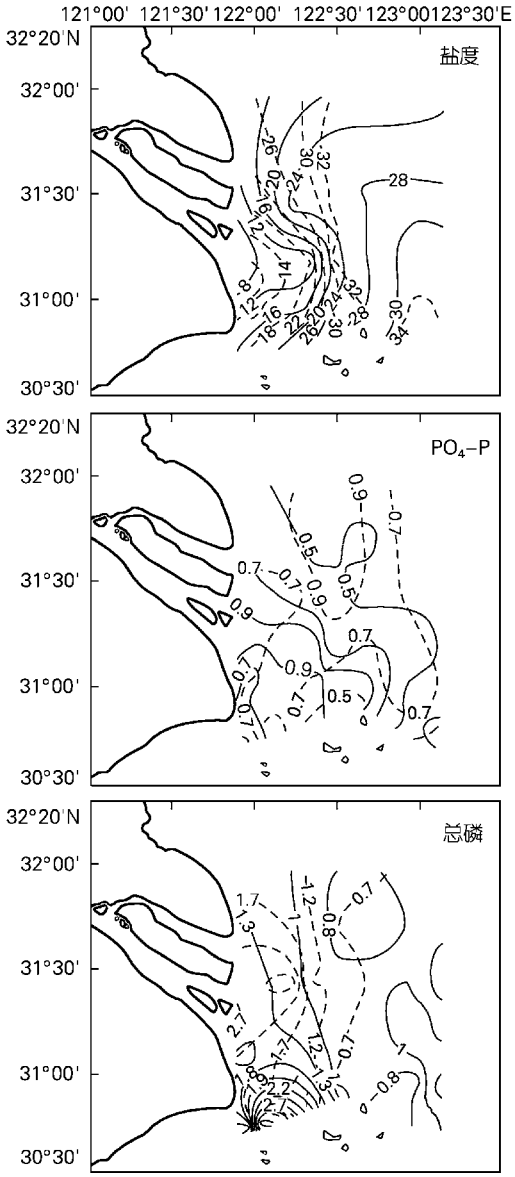

图 2　2004 年 5 月盐度和 P (μmol/L)的分布

Fig.2　Distributions of *S* and P (μmol/L) in the Changjiang estuary in May, 2004

——表层　------底层

——surface　------bottom

门外西南海区，质量浓度接近 300 mg/L，可见此处 TP 中颗粒磷的比例比较大（PO_4-P/TP 仅为 0.29），反映了颗粒物对 P 吸附的影响。而在 122° 30′ E 以东大部分海区 TSM 质量浓度都小于 8 mg/L，此处 TP 主要由 PO_4-P 组成，PO_4-P/TP 为 0.53。

底层 PO_4-P（图 2）在河口内分布比较均匀，平均浓度为 0.66 μmol/L，浓度范围为 0.61～0.75 μmol/L。口门外大部分海区从南到北 PO_4-P 浓度增加，舟山群岛附近低于 0.50 μmol/L，北部海区高于 0.90 μmol/L，其余大部分在 0.70～0.90 μmol/L 之间。调查区东西两侧 PO_4-P 分布均匀，浓度低于 0.70 μmol/L。北部 PO_4-P 浓度高可能与表层浮游植物含量高（Chl a 质量浓度在 10~14 μg/L 之间），死亡后沉降分解再生出 PO_4-P 有关, 这与那里表层 PO_4-P 浓度低相一致。盐度为 34 的等盐线仅在调查海区的东南角，可见外海高盐水的影响很小。河口内底层 TP 平均浓度为 2.2 μmol/L，最高浓度为 3.1 μmol/L，PO_4-P/TP 为 0.34，低于表层的比值，反映了底层 TP 主要由颗粒磷组成，与底层高 TSM 含量有关。口门外 TP 最大值与表层一样在调查海区西南角，浓度高于 4.3 μmol/L，在此处 TSM 高达 628.7 mg/L，PO_4-P/TP 为 0.35。此外，TP 从口门外向东浓度逐渐降低，122° 30′ E 以东分布均匀，PO_4-P/TP 为 0.78，这是由于表层大量的浮游生物死亡沉积分解殆尽，TP 主要以 PO_4-P 的形式存在。

2.1.2 夏季磷的分布

夏季表层 PO_4-P（图 3）在河口内平均浓度为 0.61 μmol/L，浓度范围为 0.21～0.78 μmol/L。 口门外 PO_4-P 最高浓度为 1.9 μmol/L，向东逐渐减小，与盐度分布基本相反，是受长江冲淡水的影响；在 122° 40′E 附近 PO_4-P 有一南北向的低值带，浓度低于 0.50 μmol/L。122° 50′E 以东 PO_4-P 浓度较高且呈增长趋势，是否与台湾暖流有关还有待进一步研究。河口内表层 TP 分布比较均匀，平均浓度为 2.5 μmol/L， 39 号站浓度为 3.5 μmol/L，为调查区的最高浓度, PO_4-P/TP 为 0.28，这是由于夏季降水多（夏季径流量为 40 100 m^3/s，远远高于其它季节），雨水冲刷携带的陆源 TSM 多，因此河口内 TP 主要由颗粒磷组成。口门外 TP 从西向东偏南方向呈舌状下降， TSM 分布与 TP 基本一致，在 TP 浓度较高的 23 号站（浓度为 3.2 μmol/L）其质量浓度高达 502.3 mg/L。122° 30′E 处以东分布均匀，PO_4-P/TP 为 0.55。

底层 PO_4-P（图 3）在河口内平均浓度为 0.95 μmol/L，浓度范围为 0.77～1.1 μmol/L， 高于表层 PO_4-P 的浓度。PO_4-P 最高浓度在口门外近岸处 40 号站，为 2.1 μmol/L，由此向外海逐渐减小。与表层一

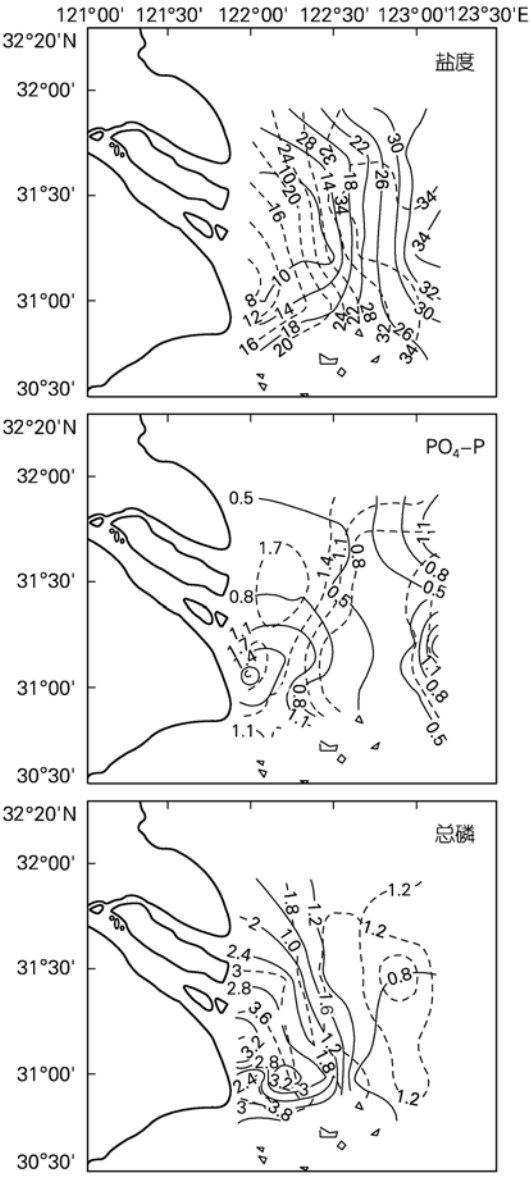

图 3 2004 年 8 月盐度和 P (μmol/L) 的分布

Fig.3 Distributions of *S* and P (μmol/L) in the Changjiang estuary in August, 2004

——表层 ------底层

——surface ------bottom

样，PO_4-P 在 122º40′E 附近处形成低值带（浓度低于 0.80 μmol/L）。河口内底层 TP 平均浓度为 2.9 μmol/L，浓度最大为 3.5 μmol/L，PO_4-P/TP 为 0.33。口门外 TP 浓度从近岸西南高值区（浓度为 4.9 μmol/L）向东偏北方向平行下降，TSM 分布与 TP 相似，西南处 TP 高值区 TSM 大部分质量浓度高于 500 mg/L。122° 30′E 以东大部分浓度低于 1.4 μmol/L，PO_4-P/TP 为 0.65。该区域表层 PO_4-P 所占比例低而底层较高，是由于夏季表层浮游生物生长旺盛，有机磷含量高，而底层由于死亡沉降的浮游生物分解再生导致 TP 中 PO_4-P 比例较高。

2.1.3 秋季磷的分布

秋季表层 PO_4-P（图 4）在河口内平均浓度为 0.85 μmol/L，最高浓度为 1.4 μmol/L。口门外 PO_4-P 最高值在 21 号站，浓度为 1.7 μmol/L，高于河口内最高浓度。河口近岸向东偏南方向 PO_4-P 有一个高值区，从高值区向外海逐渐下降。在 17，18，19 号站处 PO_4-P 有一低值区，低值中心 18 号站浓度仅为 0.21 μmol/L，而此处 Chl a 质量浓度高达 7.3 μg/L，可见是浮游植物的同化作用所致。TP 在河口内平均浓度为 2.4 μmol/L，分布比较均匀，39 号站浓度为 3.3 μmol/L，为调查区的最高浓度，PO_4-P/TP 为 0.37。口门外 TP 从近岸向外海浓度逐渐降低，在 122º20′E，31º00′N 即 23 号站处有最大值 3.1 μmol/L，此处 TSM 也有最大值 306.4 mg/L，TSM 分布与 TP 基本一致。口门外 PO_4-P/TP 为 0.49。

底层 PO_4-P（图 4）在河口内平均浓度为 1.2 μmol/L，最大值（39 号站）为 1.9 μmol/L，也是调查区的最高浓度。 PO_4-P 从口门外呈舌状向东浓度降低，122° 20′E 以东分布比较均匀。TP 在河口内平均浓度为 2.9 μmol/L，浓度范围为 2.6～3.8 μmol/L，PO_4-P/TP 为 0.42。口门外 TP 从近岸向外海逐渐下降，最大值在调查海区西南角为 7.2 μmol/L，远远高于河口内最高浓度。23 号站有一高值中心 TP 浓度为 4.8 μmol/L，而该处 TSM 为调查区最高质量浓度 320.6 mg/L。口门外 PO_4-P/TP 为 0.47，与表层接近。

2.1.4 冬季磷的平面分布

表层 PO_4-P（图 5）在河口内平均浓度为 0.95 μmol/L，高于其他季节，最高值在 37 号站，浓度为 1.3 μmol/L，也是调查区的最高值。口门外 PO_4-P 分布差别不大，浓度范围为 0.45～1.0 μmol/L，大部分浓度在 0.70～0.90 μmol/L 之间。河口近岸 PO_4-P 浓度略高外海稍低，122° 20′E、31° 00′N 即 23 号站出现低值区，此处 PO_4-P 浓度为 0.45 μmol/L（Chl a 质量浓度相对较高为 0.82 μg/L）。近岸处北部海域有一带状高值区从北向南延伸至中部，PO_4-P 大部分浓度

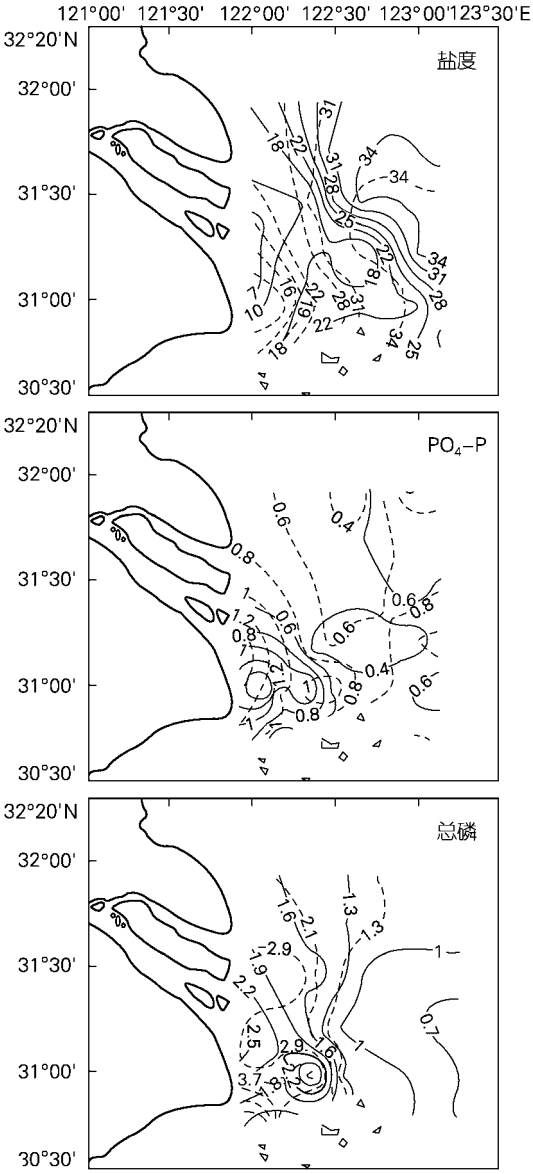

图 4 2004 年 11 月盐度和 P (μmol/L)的分布

Fig.4 Distributions of *S* and P (μmol/L) in the Changjiang estuary in November, 2004

——表层 ------底层

——surface ------bottom

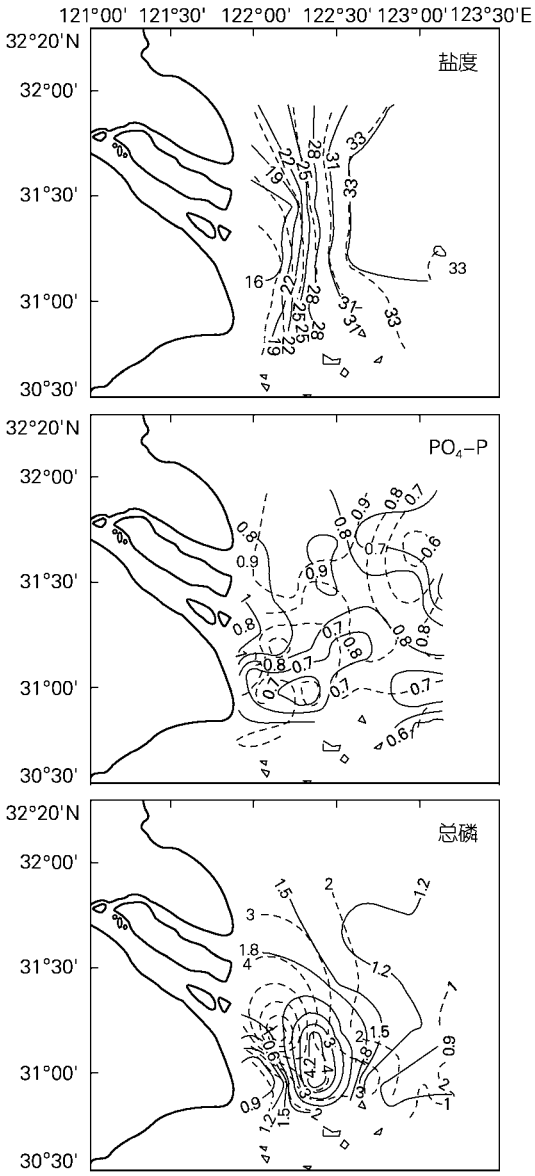

图 5　2004 年 2 月盐度和 P (μmol/L) 的分布

Fig.5　Distributions of *S* and P (μmol/L) in the Changjiang estuary in February, 2004

——表层　------底层

——surface　------bottom

为 0.80～0.90 μmol/L，这可能与浮游植物利用低有关（Chl a 质量浓度低于 0.40 μg/L）。表层 TP 在河口内平均浓度为 1.7 μmol/L，浓度范围为 1.4～1.9 μmol/L，PO_4-P/TP 为 0.58，冬季由于径流量小（9 070 m^3/s，远远低于其它季节），携带的颗粒磷少，浮游植物生长也不旺盛，因此 TP 主要由 PO_4-P 组成。口门外 TP 以 23 号站（5.1 μmol/L）和 16 号站（4.6 μmol/L）为中心有一闭合高值区，从中心向四周浓度逐渐减小，调查区 TSM 最高质量浓度在 23 号站（455.6 mg/L）。口门外 PO_4-P/TP 为 0.61。

底层 PO_4-P 在河口内平均浓度为 0.69 μmol/L，38 号站浓度为 1.2 μmol/L，是整个调查区的最高浓度。口门外浓度差别小（图 5），分布比较均匀,浓度大部分在 0.70～0.90 μmol/L 之间。底层 TP 河口内平均浓度为 1.8 μmol/L（0.94～3.1μmol/L），最高浓度也在 38 号站，PO_4-P/TP 为 0.39。口门外底层 TP 分布与表层相似，但其高值中心更靠近河口（15 号站），最大值为 9.3 μmol/L，高值区 TSM 含量同样也比较高，口门外 PO_4-P/TP 为 0.48。

2.2 垂直分布和断面分布

由于物理、化学、生物等作用的影响，磷的分布呈现复杂的变化，吴玉霖等[11] 提出春、秋季浮游植物密集区在长江口海域南部，都是以 23 号站为密集中心，而且 21~27 号站处于咸淡水混合较好的断面，具有一定的典型性，因此以 21~27 号站所在断面来讨论磷的垂直分布和断面分布。

春季，PO_4-P（图 6）总体分布从近岸到深海区浓度逐渐减小。在 122° 30′ ～122° 40′ E 表层有一高值区，Chl a 质量浓度较低约为 0.40 μg/L，表明生物活动较弱，该区域 PO_4-P 垂直分布随水深而减小，主要反映了长江水的影响。122° 50′E 以东 PO_4-P 浓度随水深而增加，主要是生物活动的影响（Chl a 以 123ºE 表层为高值中心，质量浓度为 3.7 μg/L），表层浮游植物大量吸收磷酸盐，下层则氧化分解，PO_4-P 再生。另外从盐度分布可见， 123° E 处底层有盐度为 34 的外海高盐水入侵，该处 PO_4-P 浓度较高可能与台湾暖流有一定的关系。TP（图 7）总体分布也是河口附近高，外海低，与 TSM 分布一致，122° 30′E 以西浓度大于 1.0 μmol/L，此处 TSM 含量高，PO_4-P 占 TP 的比例为 50%，其余部分主要是颗粒磷。122° 30′ E 以东表层 TP 浓度在 0.80～1.0 mol/L 之间，此处 PO_4-P 浓度低（占 TP 比例约 40%），其余一部分以颗粒有机磷的形式存在于生物体内，表层以下 TP 浓度及分布与 PO_4-P 相近，可见此处表层生物沉降后基本分解殆尽，TP 主要是 PO_4-P（PO_4-P 占 TP 的比例为 77%）。

夏季，PO_4-P（图 6）整体分布从近岸向外海浓

度逐渐减小，随水深而增加。夏季 PO_4-P 浓度分层明显，这是由于表层 PO_4-P 被浮游植物消耗，同时死亡的浮游植物沉降分解，使得 PO_4-P 浓度随水深不断增加，又因夏季温跃层的出现，水体垂直混合较差，底

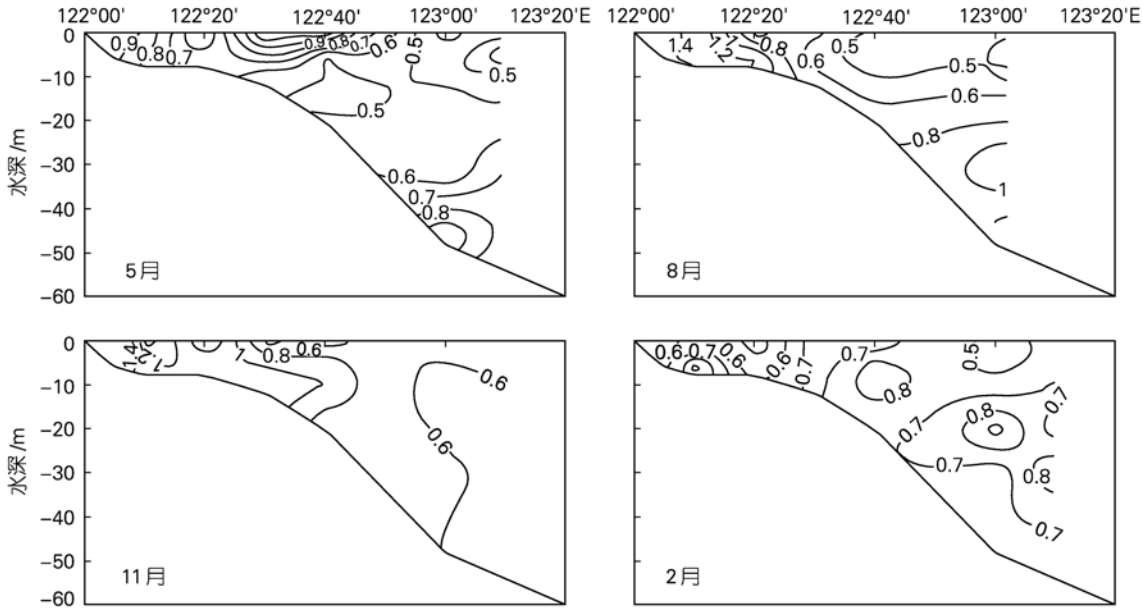

图 6　2004 年 PO_4-P(μmol/L)的断面分布

Fig6. Section distributions of PO_4-P (μmol/L) in 2004

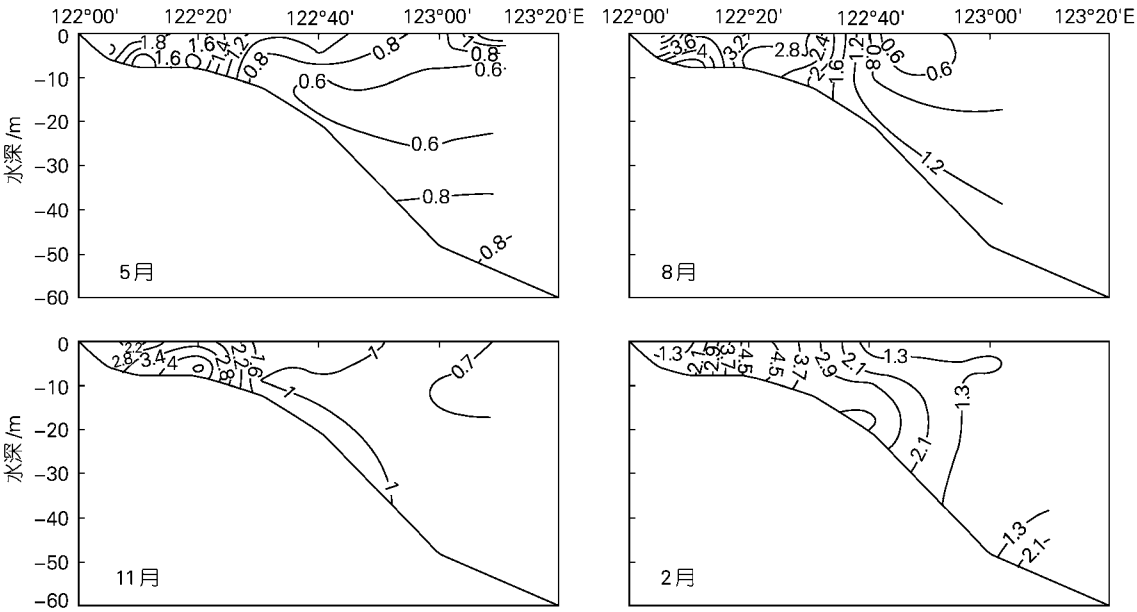

图 7　2004 年 TP(μmol/L)的断面分布

Fig.7　Section distributions of TP (μmol/L) in 2004

层高浓度的 PO_4-P 无法传送到表层。TP（图 7）水平分布从近岸向外海逐渐减小，122° 10′E（22 号站）随水深增加，这与 Chl a 和 TSM 分布一致（底层 Chl a 质量浓度为 6.5 μg/L ，TSM 质量浓度高达 1051 mg/L）；122° 40′E 以东 TP 垂直分布与 PO_4-P 分布一样，浓度随水深而增加，TSM 质量浓度较低（表层小于 1 mg/L），可见此处 TP 主要以 PO_4-P 的形式存在（PO_4-P 占 TP 的比例为 70%）。

秋季，由于受长江冲淡水的影响，PO_4-P（图 6）总体分布从近岸向远海浓度降低。秋季水体混合交换较好，垂直分层不太明显，122° 40′ E 以东 PO_4-P 分布均匀，大部分在 0.60～0.80 μmol/L 之间。TP（图 7）从近岸向外海逐渐降低，近岸由于咸淡水混合出现分层，外海垂直分层不明显。122° 20′E 即 23 号站 TP 随水深增加，最高值出现在底层（4.8 μmol/L），其分布与 TSM 一致，底层 TSM 质量浓度为 556.7 mg/L。122° 40′ E 以东分布均匀，TP 浓度大部分在 0.70～1.0 μmol/L 之间。由此可见，近河口处 TP 主要以颗粒磷的形式存在(PO_4-P 占 TP 的 43%)，而外海主要以 PO_4-P 的形式存在（PO_4-P 占 TP 的 67%）。

冬季，PO_4-P（图 6）整体分布比较均匀，这是由于长江径流量小，冲淡水影响范围也小，同时河口对 PO_4-P 也有一定的缓冲作用。由于水体混合好，垂直分布也比较均匀。整个断面 PO_4-P 浓度大部分在 0.60～0.80 μmol/L 之间。123°E 表层浓度低，可能与生物活动有关（Chl a 质量浓度高达 8.2 μg/L）。TP（图 7）从口门外到 122° 20′E 即 23 号站浓度增加，122° 20′ E 以东向外海浓度逐渐减小，垂直分布均匀。TP 分布与 TSM 一致，TP 浓度最大的 23 号站（表、底层都是 5.1 μmol/L）TSM 质量浓度也有最大值（表层为 455.6 mg/L，底层为 556.7 mg/L），从 23 号站向东向西 TP 浓度逐渐减小。同样，冬季近岸 TP 中颗粒磷占很大的比例（PO_4-P 占 TP 的 40%），而外海 PO_4-P 所占 TP 比例较大（60%）。

2.3 磷的季节变化

表 1 列出了河口内和口门外 4 个季节表、底层海水中 PO_4-P 和 TP 的平均浓度与变化范围。从表 1 可见，河口内 PO_4-P 浓度秋季较高，浓度变化范围也最大，冬季次之，春、夏季丰水期浓度稍低，春季浓度变化范围小。口门外 PO_4-P 的平均浓度夏季和冬季较高，春季和秋季较低。口门外夏季 PO_4-P 浓度高于其他季节，其原因可能与悬浮颗粒的释放出 PO_4-P 有关。夏季河口内 TSM 平均质量浓度高达 255.3 mg/L，在所有季节中含量最高，因此夏季长江带入的 TSM 最多；整个调查区底层 TSM 质量浓度为 259.5 mg/L，也远远高于其他季节，又因夏季水体垂直交换差，底层高浓度的 PO_4-P 无法到达上层水体，所以底层 PO_4-P 的浓度远远高于其他季节。由于夏、秋季大量繁殖的浮游生物死亡分解后，有机磷转换为 PO_4-P，在海水中不断积累，此外沉积物再悬浮释放出部分 PO_4-P，所以冬季 PO_4-P 的浓度也比较高。

秋季和冬季水体垂直交换混合较好，底层 PO_4-P 能不断带到表层水体，PO_4-P 分布比较均匀,表层和底层浓度差别小。春、夏季由于水体交换差，以及生物大量活动导致表层 PO_4-P 浓度低于底层。

表 1　长江口附近海区磷的平均浓度和浓度范围(μmol/L)

Tab.1　Concentrations and ranges of P in the Changjiang estuary(μmol/L)

磷	月份	口门外					口门内
		表层		底层		平均值±S.D	平均值±S.D
		平均值±S.D	范　围	平均值±S.D	范　围		
PO_4-P	2	0.77±0.15	0.45～1.0	0.71±0.15	0.48～1.0	0.74±0.16	0.82±0.33
	5	0.61±0.25	0.32～1.3	0.71±0.23	0.23～1.2	0.64±0.22	0.75±0.17
	8	0.85±0.46	0.26～1.7	1.06±0.42	0.56～2.0	0.84±0.42	0.77±0.25
	11	0.63±0.33	0.21～1.7	0.68±0.27	0.30～1.4	0.60±0.26	1.0±0.41
TP	2	1.57±1.12	0.74～5.1	1.85±1.18	0.69～5.1	1.45±0.97	1.7±0.56
	5	1.25±0.75	0.61～3.5	1.21±1.02	0.34～4.5	1.02±0.74	1.9±0.61
	8	1.55±0.90	0.46～3.5	1.89±1.30	0.72～5.0	1.47±1.01	2.7±0.77
	11	1.26±0.53	0.54～3.1	1.70±1.43	0.68～7.2	1.21±0.81	2.7±0.56

TP 在河口内夏、秋季浓度远高于春、冬季。口门外 TP 的平均浓度冬、夏季高，春、秋季低。夏季径流量大，河口内 TP 浓度高，因此长江带入的 TP 也多，包括颗粒磷。冬季口门内 TP 浓度低于其它季节，而口门外的平均浓度高于夏季以外的其它季节，与 TSM 分布一致，说明长江口海区的 TP 不完全来自于长江径流，还可能与海底沉积物再悬浮有关，特别在冬季，风浪大，沉积物再悬浮严重。一般而言，TP 浓度分布都是底层高于表层，这是由于底层沉积物再悬浮所致，只有春季表层和底层浓度接近，可能是表层浮游植物大量繁殖的原因（春季表层 Chl a 平均质量浓度高达 3.3 μg/L，大大高于其他季节）。

调查海区内 PO_4-P 的浓度和 80 年代相比有所增加[10]，这是受人类活动影响的结果，长江口营养盐含量呈现逐年升高的趋势，而 PO_4-P 由于在长江口存在一定的缓冲作用，其分布变化比较复杂，所以增长趋势不太明显。

2.4 磷与盐度、悬浮体等之间的相关分析

磷的转化是一个复杂的动态变化的过程。由于矿物质风化及有机质的腐解，使颗粒磷转化成 PO_4-P，PO_4-P 因被吸附而沉淀；沉淀再悬浮，使水体中颗粒磷含量增加；沉积在海底的颗粒也被矿化为 PO_4-P；浮游植物生长繁殖期间，PO_4-P 被消耗，无机磷被转化成有机磷，浮游植物死亡后释放出 PO_4-P，有机磷又转化成无机磷[3]。

表 2 列出了各季节表、底层 PO_4-P，TP 与盐度、TSM 之间的相关性，由此可见 PO_4-P 和盐度在春季的表层和秋季的底层负相关性显著，在秋季的表层相关性比较显著，其余季节相关性差或不相关。TP 与盐度冬季不相关，春季的表层相关性也不显著，其余呈显著的负相关。TP 和 PO_4-P 在夏季的底层和秋季表、底层正相关性显著，在春季的表层相关性比较显著，其余不相关。TP 与 TSM 在各个季节的表、底层的正相关性都非常显著。

PO_4-P 与盐度相关性较差，这是因为 PO_4-P 受到 TSM、生物以及水体垂直对流等作用的影响，特别是受河口缓冲作用的影响，无论河口内还是海区，PO_4-P 的浓度大部分都在 0.4～1.2 μmol/L 之间变化。许多学者通过现场和实验室证明了河口悬浮体有从高磷淡水中吸附 PO_4-P 的趋势，而在低磷的咸淡水交汇区将其释放回水中[12,13]，可见 TSM 也影响了 PO_4-P 与 *S* 的相关性。此外，浮游植物在上层吸收 PO_4-P 以及在下层死亡后 PO_4-P 再生，所以 PO_4-P 在河口呈现复杂的特性，与盐度的相关性较差。

表 2　PO_4-P，TP 与盐度、TSM 之间的相关性

Tab.2　The relationships between PO_4-P，TP and *S*，TSM

月份	水层	PO_4-P 与 *S*		TP 与 *S*		PO_4-P 与 TP		TP 与 TSM	
		r	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*
2	表层	-0.33	0.058	-0.08	0.671	-0.10	0.578	0.66	4.3×10^{-5}
	底层	-0.04	0.805	-0.11	0.570	-0.14	0.466	0.69	2.0×10^{-5}
5	表层	-0.43	0.0097	-0.32	0.059	0.35	0.042	0.70	2.4×10^{-6}
	底层	-0.01	0.950	-0.58	2.3×10^{-4}	0.23	0.177	0.74	2.4×10^{-7}
8	表层	-0.10	0.580	-0.74	2.3×10^{-6}	0.25	0.183	0.79	1.5×10^{-7}
	底层	-0.30	0.091	-0.70	1.3×10^{-5}	0.54	0.0017	0.76	4.8×10^{-7}
11	表层	-0.33	0.043	-0.73	2.6×10^{-7}	0.58	0.0002	0.70	1.4×10^{-6}
	底层	-0.77	4.7×10^{-8}	-0.63	3.9×10^{-5}	0.55	0.0005	0.55	9.3×10^{-4}

TP 随盐度增加而减小，这是由于 TP 受长江带来的 TSM 的影响，随着盐度的增加，TSM 含量减少，TP 浓度也降低，因此大部分季节 TP 与盐度的相关性显著。冬季由于水体混合均匀，海底沉积物再悬浮，夏、秋季浮游生物死亡再生积累的磷从底层带入上层水体，严重影响了 TP 与盐度的相关性。

TP 的组成包括 PO_4-P、溶解有机磷和颗粒磷。TP 在某些季节与 PO_4-P 的相关性好，说明在一定程度上 TP 由 PO_4-P 控制。河口近岸附近 TP 主要由颗粒磷和 PO_4-P 组成，而外海表层有部分存在于生物体内的颗粒有机磷，底层则主要以 PO_4-P 的形式存在，因此 TP 的组成变化复杂，这些因素都影响了 TP 和

PO_4-P 的相关性。特别是冬季，由于受颗粒磷的影响，TP 与 PO_4-P 不相关，这和 TP、PO_4-P 与盐度相关性差相吻合。

TP 和 TSM 关系最为密切，这说明在很大程度上 TP 主要受颗粒磷的控制，这些颗粒物质一部分从长江冲淡水带来，一部分是海底沉淀再悬浮，另外还有部分是由浮游植物吸收 PO_4-P 转化而来的颗粒有机磷，因此 TP 与 TSM 的相关性非常显著。

3 结论

PO_4-P 和 TP 浓度的平面分布一般河口附近高，向外海逐渐降低，主要受长江冲淡水影响。但是其最高浓度不是在河口内，大部分在口门外。

PO_4-P 夏季浓度变化大，分层明显，冬季变化小，垂直分布均匀，秋季和冬季表底层浓度接近，春季和夏季表层低于底层。TP 春季表、底层浓度接近，其余各季节表层都低于底层。

PO_4-P 浓度冬季变化幅度小，夏季变化最大；TP 浓度春季变化幅度小，夏季变化大。河口内 PO_4-P 浓度秋季较高，冬季次之，春、夏季丰水期浓度低。TP 河口内夏、秋季浓度远远高于春、冬季；口门外 PO_4-P 和 TP 浓度的分布都是夏季和冬季浓度较高，春季和秋季低。

PO_4-P 与盐度的相关性较差；TP 与盐度的相关性优于 PO_4-P；TP 与 PO_4-P 大部分季节不相关；TP 与 TSM 各季节相关性都非常显著。研究表明，PO_4-P 在河口的转移过程中还受到生物活动、水体垂直对流以及缓冲作用等多种因素的影响。TP 在一定程度上受 PO_4-P 的控制，在很大程度上受颗粒磷的控制。

致谢：盐度、悬浮体、叶绿素 a 数据分别由张启龙、张铭汉和张芳提供，谨致谢意！

参考文献：

[1] 孙霞，王保栋，王修林，等.东海赤潮高发区营养盐时空分布特征及其控制要素[J].海洋科学，2004，**28**（8）：28-32.

[2] 沈志良. 三峡工程对长江口海区营养盐分布变化影响的研究[J]. 海洋与湖沼，1991，**22**（6）:540-546.

[3] 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.

[4] 黄尚高，杨嘉东，暨卫东，等. 长江口水体活性硅、氮、磷含量的时空变化及相互关系[J]. 台湾海峡,1986，**5**(2)：114-123.

[5] 王保栋，战闰，藏家业.长江口及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.

[6] 傅瑞标，沈涣庭.长江河口羽状锋溶解态无机氮磷的生物地球化学特征[J].海洋通报，2002,**21**(4):9-14.

[7] 石晓勇，王修林，韩季荣，等.长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程[J].应用生态学报，2003，**14**（7）：1 086-1 092.

[8] 沈志良， 陆家平，刘兴俊，等.长江口区营养盐的分布特征及三峡工程对其影响[A].中国科学院海洋研究所 .海洋科学集刊[C].第 33 卷，北京：科学出版社，1992.109-129.

[9] 谷国传，胡方西，胡辉. 长江口外高盐水入侵分析[J].东海科学，1994，**12**（3）：1-11.

[10] 沈志良，古堂秀.长江口的水化学环境[A]. 罗秉征，沈焕庭.三峡工程与河口生态环境[C].北京：科学出版社，1994.141-154.

[11] 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.

[12] Pomeroy L R, Smith E E, Grant C M. The exchange of phosphate between estuarine water and sediments[J]. **Limnol Oceanogr**, 1965, **10**(2)167-172.

[13] Butler E I, Tibbitts S. Chemical survey of the Tamar estuary I. Properties of the water[J]. **J Mar Biol Ass UK**, 1972,52:681-699.

（下转第 **42** 页）

（上接第 36 页）

Distributions and variations of phosphorus in the Changjiang estuary and its adjacent sea areas

LI Zheng[1], SHEN Zhi-liang[2] ,ZHOU Shu-qing[1], YAO Yun[2]

(1. College of Life Science, Shanghai Fisheries University，Shanghai 200090, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071,China)

Received:Oct.,12,2005

Key words: Changjiang estuary; phosphate; total phosphorus; distribution characteristics

Abstract: Based on the data obtained from quarterly investigations in the Changjiang mouth and its adjacent sea areas in 2004, the distributions and variations of PO_4-P and TP were discussed. The results showed that both the concentrations of PO_4-P and TP were higher near the Changjiang mouth and lower outside the sea, and the highest concentration was not inside the Changjiang mouth but out of the mouth. The PO_4-P concentrations inside the mouth in autumn and winter were higher than those in spring and summer, and the TP concentrations in summer and autumn were higher than those in spring and winter. The concentrations of PO_4-P and TP outside the mouth were higher in winter and summer than those in spring and autumn. The great changes and obvious stratification in PO_4-P concentrations were found in summer, and a few changes and almost even vertical distributions were found in winter. Except spring, TP concentrations were lower in the surface than in the bottom. The correlations between PO_4-P, TP, S and TSM show that PO_4-P concentration was affected by phytoplankton, vertical convection of seawater and buffer action, etc. in removal process from the river to the estuary. TP concentration was mainly controlled by TSM.

(本文编辑：张培新)