

长江口滨岸排污活动对潮滩营养盐环境地球化学过程的影响

付金沐^{1,2}, 刘敏¹, 侯立军¹, 欧冬妮¹, 刘巧梅¹

(1. 华东师范大学地理系地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. 宿州学院地理环境科学系, 宿州 234000)

摘要: 选择长江口滨岸为典型研究区, 分析探讨了排污活动对长江口滨岸潮滩营养盐环境地球化学过程的影响. 结果表明, 潮滩环境因子对排污活动有明显的环境响应. 排污口滨岸潮滩上覆水、表层沉积物孔隙水和表层沉积物中的 NH_4^+ -N, TIN, TDP, Ads-P, Fe-P 和 CFAP + Ca-P 等都有显著富集效应, 这不仅与排污直接贡献营养盐相关, 而且与排污活动使环境因子发生变化进而影响营养盐的地球化学过程相联系; 而 NO_x^- -N 在长江口滨岸潮滩上覆水、表层沉积物孔隙水和表层沉积物中并未出现累积高峰值, 表明外源输入不是潮滩环境中 NO_x^- -N 主要来源. 分析结果还显示, 排污口潮滩沉积物-水界面间 N、P 分子扩散通量明显大于非排污口, 反映排污活动不仅加剧营养盐 N、P 在潮滩环境中富集, 而且还加剧了潮滩沉积物-水界面间营养盐的扩散过程.

关键词: 营养盐; 地球化学过程; 排污活动; 长江口滨岸潮滩

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)02-0315-07

Impact of Sewage Discharging on Environmental Geochemical Processes of Nutrients in the Yangtze Estuarine and Tidal Flats

FU Jin-mu^{1,2}, LIU Min¹, HOU Li-jun¹, OU Dong-ni¹, LIU Qiao-mei¹

(1. Key Laboratory of Geo-information Science of the Ministry of Education, Department of Geography, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Department of Geographical and Environmental Science, Suzhou College, Suzhou 234000, China)

Abstract: Influences of sewage discharge on environmental geochemical processes of nutrients were investigated in the Yangtze estuarine and tidal flats. The result indicated that the environmental elements obviously responded to sewage discharging. There was obvious enrichment of NH_4^+ -N, TIN, TDP, Ads-P, Fe-P and CFAP + Ca-P in overlying water, surface sediments and its pore waters adjacent to sewage outlets in the Yangtze Estuary. The enrichment of nutrients N and P was considered to be related not only to the inputs of nutrients from sewage outlets, but also to the changes of environmental factors induced by sewage discharge. On the contrary, there was no significant enrichment of NO_x^- -N in the tidal water, pore waters and surface sediments from the Yangtze Estuary, which showed that external inputs of nutrients was not the primary factor controlling the distributions of NO_x^- -N. It was also shown that the diffusive fluxes of nutrients N and P across sediment-water interface was markedly higher at sewage outlets than the control sampling sites in tidal flats, indicating that sewage discharge not only increased the accumulation of nutrients N and P in the tidal flats, but also strengthened the exchange processed of nutrients across tidal sediment-water interface.

Key words: nutrients; environmental geochemical processes; sewage discharging; Yangtze estuarine and tidal flat

滨岸潮滩是海陆作用的重要地带, 是一个多功能的复杂生态系统^[1~3], 具有独特的生态价值和资源潜力. 由于受海陆交互作用影响, 滨岸潮滩各种物理、化学、生物因素变化剧烈, 是一个典型的环境脆弱带和敏感区^[4], 易受各种自然和人为活动的干扰和破坏. 尤其随着人口的不断增长和经济的快速发展, 大量的人为污染物如营养盐、微量重金属、持久性有机污染物等输入到滨岸地区^[5], 给滨岸环境质量造成不同程度的威胁, 对潮滩复杂环境中的初级生产力、生物多样性及生态系统功能产生深刻的负面效应^[6].

长江口是世界超大型的多泥沙混浊河口之一,

是受潮汐、径流双重控制影响的典型河口. 由于长江口滨岸带人口密集、城市化进程迅速, 尤其是近 20a 来, 经济快速增长伴随的巨大开发强度, 严重影响了长江口滨岸潮滩环境系统内部物质的自然循环过程, 对河口潮滩生态系统及近岸水体环境造成了直接和潜在的危害^[7~13], 其中水体富营养化更是亟需解决的环境问题. 但是对水体富营养化现象的研究在很大程度上依赖于对河口滨岸沉积物-水界面间

收稿日期: 2006-03-30; 修订日期: 2006-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(40131020, 49801018); 教育部高等学校骨干教师计划项目; 上海市重点学科建设项目(SHPAD-01)

作者简介: 付金沐(1963~), 男, 副教授, 主要研究方向为区域环境质量演变与环境地球化学过程, E-mail: szsfjm@sina.com

营养盐的生物地球化学过程的了解和认识^[14~16].近年来,国内外学者对河口滨岸沉积环境中氮、磷的累积、迁移释放和循环等地球化学行为的研究较为活跃^[17~21],对长江口滨岸滩涂营养盐在沉积物-水界面附近的各种行为,及其累积和迁移转化过程的研究多有报道^[22~29],但直接排污活动对滩涂营养盐地球化学过程的影响及作用机制的研究并不多见.本实验选择长江口滨岸作为典型研究区,主要研究排污活动对滩涂界面营养盐累积运移的影响和作用机制,这不仅对丰富河口滨岸生物地球化学研究内容具有重要的理论意义,而且对评价直接排污活动对河口滨岸生态系统的环境影响效应、控制污染物排放、协调环境保护与区域经济可持续发展具有重要的应用价值.

1 样品采集及分析方法

1.1 样品采集

选择的典型排污口位于长江口南岸石洞口(SDK)和吴淞口(WSK),对照点为白茆(BM)、白龙港(BLG)、朝阳农场(CY)、东海农场(DH)和芦潮港(LC)(图 1).石洞口(SDK)处总管输污能力为 70 万 t/d,其中工业废水约占 70%,生活污水约占 30%.该排污口污水虽经净化处理,但现场调查中发现仍有大量的污水采用沿岸直接排污入海的方式处置,因而在排污口下游沿岸水域形成了长约数公里的黑水带,对滩涂生态环境影响较大.吴淞口(WSK)

为上海市主要河流黄浦江的出河口,由于黄浦江是上海市最大的纳污河道,市区排放的工业废水和生活污水大部分(400 多万 t/d)都通过吴淞口进入长江口,虽然河水的稀释作用以及河口水动力作用较强,污染物的自然净化能力较强,但排污量较大,对滩涂生态环境也有较大的影响.滩涂上覆水和表层沉积物等样品分别于春季(2002-04)、夏季(2002-07)、秋季(2002-11)和冬季(2003-02)进行了采集.上覆水样品是用聚乙烯塑料瓶(或桶)采集,上覆水用 0.45 μ m 的微孔滤膜过滤,并置于冰柜中冷冻(-20 $^{\circ}$ C)保存;表层沉积物(0~2cm)样品是在退潮期间于上述采样点中滩涂部位采集;沉积物孔隙水是将所采新鲜沉积物样品在 4 000 r/min 转速下离心 15 min 获取,并用 0.45 μ m 滤膜过滤,置于冰柜冷冻(-20 $^{\circ}$ C)保存.

1.2 化学分析与测定

水样中 NH_4^+ -N 和 NO_x^- -N (包括 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N)分别用次溴酸氧化法测定和镉柱还原法测定;总无机氮(TIN)为 NH_4^+ -N 和 NO_x^- -N 之和,水样中 NH_4^+ -N 和 NO_x^- -N 的实验分析误差 < 10%.湿沉积物中可交换态无机氮用 2 mol/L KCl 提取(固液比为 1:10),提取液中氨氮(NH_4^+ -N)和氧化态氮(NO_x^- -N)也分别用上述方法测定.可交换态无机氮的含量是以干沉积物中的含量表达的,并已扣除了孔隙水中 NH_4^+ -N 和 NO_x^- -N 的含量.沉积物中全氮(TN)利用半微量开氏法测定,其含量以干沉积物中的含量表达,沉积物 TN 实验分析误差 < 8%.

根据 Ruttenberg 的方法将磷的形态分为 5 种^[30],即吸附态磷(Ads-P)、铁结合态磷(Fe-P)、自生磷灰石及钙结合态磷(CFAP + Ca-P)、碎屑态磷(FAP)和有机磷(OP),其中前 4 种形态磷的含量总和为无机磷(IP).无机形态磷的分级提取方法及流程如表 1 所示.总磷(TP)用硫酸-高氯酸消煮法测定.有机磷(OP)为总磷和总无机磷之差.以上所有提取液或消煮液加入钼锑抗试剂在 45 $^{\circ}$ C 水浴中显色 20 min 后,用 722-光栅分光光度计在波长 700 nm 下测定,实验误差 < 10%.

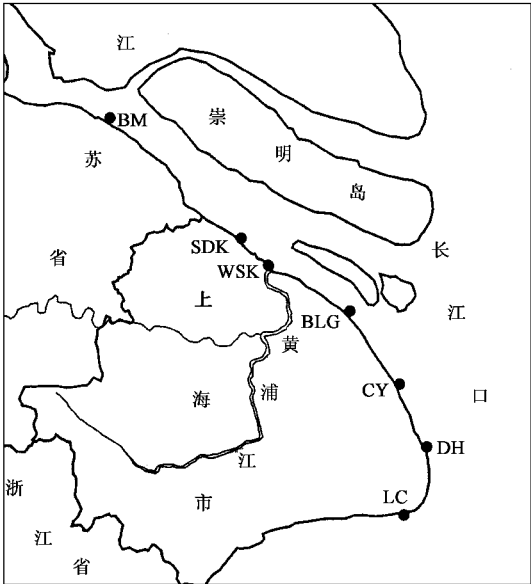
表 1 沉积物无机形态磷的连续提取流程

Table 1 Sequential extraction scheme used for analysis of inorganic phosphorus species in sediments

步骤	提取条件	提取物
1	1 mol/L MgCl_2 , pH = 8, 2h, 25 $^{\circ}$ C	Ads-P
2	1 mol/L 连二亚硫酸钠、柠檬酸三钠、碳酸钠 pH = 7.6, 6h, 25 $^{\circ}$ C	Fe-P
3	1 mol/L 乙酸钠, pH = 4, 5h, 25 $^{\circ}$ C	CFAP + Ca-P
4	1 mol/L HCl, 16h, 25 $^{\circ}$ C	FAP

图 1 研究区域及采样站位分布示意

Fig.1 Map of study area and sampling locations



沉积物有机质(OM)利用高温(550℃)灼烧失重法测定.沉积物中活性铁的测定是将湿沉积物用 1 mol/L 的 HCl 浸取,然后利用邻菲罗啉比色法测定.

上覆水溶解氧用溶氧仪(美国 YSI 550A 型)在野外现场进行测定.沉积物 Eh 是用土壤氧化还原电位计(中国科学院南京土壤所研制)在室内测定.

2 结果与讨论

2.1 潮滩水体及沉积物环境参数对排污活动的环境响应

图 2 显示溶解氧(DO)的时空分布变化明显,季节变化表现为冬季(9.02 mg/L) > 秋季(8.78 mg/L) > 春季(7.43 mg/L) > 夏季(4.57 mg/L),各季节排污口处 DO 的含量明显低于其它采样点.上覆水水温与 DO 存在显著的线性负相关,相关系数 $R = -0.772(p < 0.0001)$,这说明水温是控制上覆

水中溶解氧含量的一个重要因素,但在排污较严重的岸段,DO 的含量不仅受季节变化的制约,还深受排污活动的影响.排污口处 pH 值各季节都较低,说明尽管长江巨大的径流量对河口沿岸的排污具有较大的稀释缓冲作用,但是来自黄浦江和周围城市工业废水和生活污水的点源排放对近岸水体已造成严重影响,并导致水体中营养盐 N、P 的进一步增长,因此,局部地区近岸水体的 pH 状况已不受长江流域特征水体的混合所控制.排污口滨岸潮滩表层沉积物 Eh 值和 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值偏低,Eh 值和 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值的季节变化也不如其他采样点明显(图 3),表明排污口附近受污染物累积的影响,表层沉积物始终处于还原状态;排污口沉积物中有机质(OM)值高于其它采样点,这也与排污口较低 Eh 值和 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值相对应,因为沉积物中 OM 含量愈高,有机质还原得到的低价铁、锰、硫等的量愈大,其沉

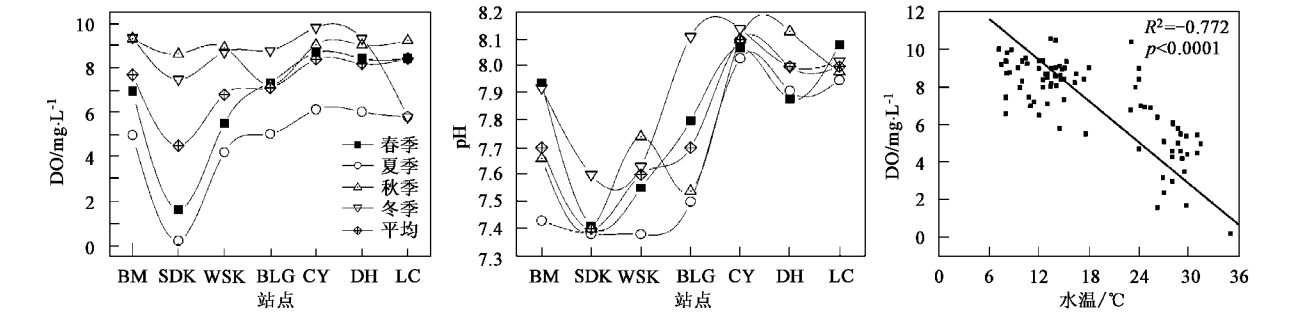


图 2 长江口滨岸上覆水 DO 和 pH 的时空分布及上覆水体温与 DO 之间的相关关系
Fig.2 Spatio-temporal distributions of DO and pH and the correlation between temperature and DO in tidal waters from the Yangtze Estuary

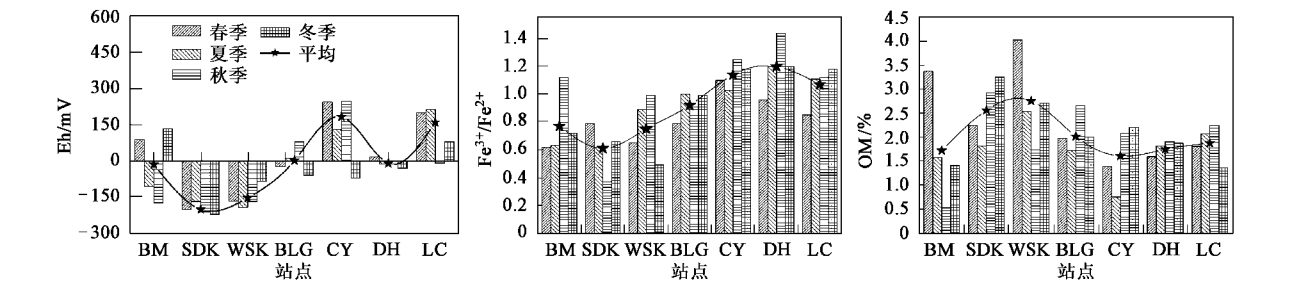


图 3 长江口滨岸潮滩表层沉积物 Eh、 Fe^{3+}/Fe^{2+} 和 OM 的时空分布
Fig.3 Spatio-temporal distributions of Eh, Fe^{3+}/Fe^{2+} and OM in tidal surface sediments from the Yangtze Estuary

积物的氧化还原电位愈低,沉积物的还原性愈强.

2.2 排污活动对潮滩沉积物-水界面营养盐地球化学过程的影响

2.2.1 排污活动对上覆水 N、P 累积的影响

从时空分布来看,上覆水中 NH_4^+ -N 含量在排污口岸段明显出现高峰值,且 NH_4^+ -N 季节变化明显,

一般是春季含量最高,夏季次之,秋冬最低,排污口各季节 NH_4^+ -N 含量均高于其他采样点[图 4(a)]; NO_3^- -N 含量的时空变化比较复杂,各季节在排污口处 NO_3^- -N 含量偏低[图 4(b)];总无机氮(TIN)的含量在排污口处也明显高于非排污口,各季节的高峰值都处于排污口采样点上[图 4(c)].就年均含量而

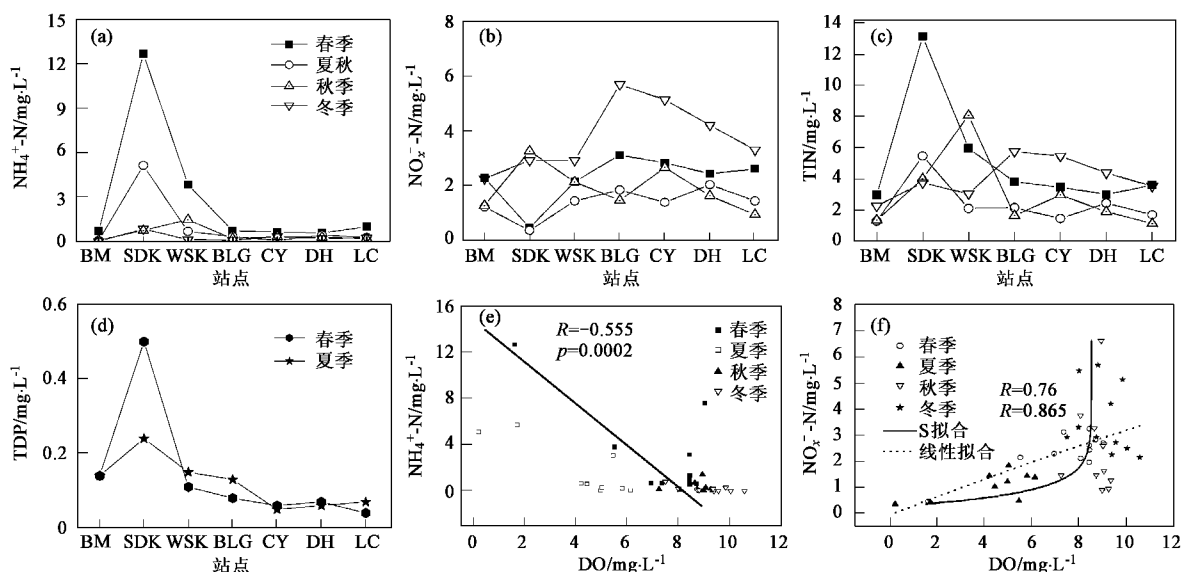


图4 长江口滨岸潮滩上覆水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TIN 和 TDP 的时空分布及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 DO 之间的相关关系

Fig.4 Spatio-temporal distributions of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TIN and TDP in tidal waters and the correlation of DO

with $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ from the Yangtze Estuary

言, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的地区分布差别不太明显, 基本在 1.76 ~ 3.29 mg/L 之间, 但 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 却因采样点的不同发生显著的变化, 排污口采样点含量较高, 而其他采样点含量均不超过 0.49 mg/L. 在排污口处上覆水中 TIN 的赋存形态以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 而其它采样点 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是主要存在形式. 图 4(d) 显示排污口处总可溶磷 (TDP) 含量明显高于非排污口采样点. 相关分析表明, 见图 4(e) 和 (f), 上覆水体中 DO 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈显著负相关, 相关系数 $R = -0.555$ ($p = 0.002$). 对整个研究区域各季节上覆水中的 DO 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 做 S 拟合, 相关性达 $R = 0.76$. 在扣除了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较高的 4 个值后, 对于剩下的对应值, 做线性回归拟合, 相关性达 $R = 0.865$. 这说明排污活动降低上覆水中 DO 含量, 抑制氮的硝化反应, 减少 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化速率, 并降低了 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 生成与累积, 相应增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在上覆水中的富集.

2.2.2 排污活动对表层孔隙水中 N、P 累积的影响

图 5(a) 表明潮滩表层孔隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在排污口岸段出现明显的高峰值, 说明排污使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在表层孔隙水中有显著累积响应; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的时空分布变化比较复杂, 没有统一的变化规律, 排污口处 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的季节变化不如非排污口处明显 [图 5(b)]; 而全年各季节表层孔隙水中 TIN 含量在排污口采样点内普遍较高 [图 5(c)]. 对无机态 N 的年均

含量差异比较, 发现在排污口岸段沉积物孔隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是 TIN 的主要赋存形态, 而非排污口 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 都是 TIN 的主要存在形式, 分别占 TIN 的 49.5% 和 50.5%. 图 5(d) 显示排污口 TDP 含量也高于非排污口采样点. 相关分析表明, 沉积物 Eh 与孔隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量之间存在显著的线性负相关关系 (相关系数 $R = -0.57$, $p = 0.0006$), 而沉积物孔隙水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与沉积物 Eh 之间存在显著的正相关关系 (相关系数 $R = 0.593$, $p = 0.00027$) [图 5(e) 和 (f)]. 沉积物孔隙水和沉积物中 Eh 在排污口处也明显低于非排污口, 表明污染物排放改变潮滩表层沉积物的氧化还原环境, 降低潮滩表层沉积物的 Eh 值, 使污染区附近潮滩表层沉积物还原性增强, 抑制了表层沉积物孔隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的转化.

2.2.3 排污活动对表层沉积物中 N、P 累积的影响

图 6(a) ~ (c) 所示, 表层沉积物中可交换态 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在排污口岸段出现明显的高峰值, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 时空分布变化不明显, 全氮 (TN) 的高峰值普遍出现在排污口的采样点上, 表明排污对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 在表层沉积物中具有显著的累积作用, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的累积作用不明显; 沉积物中总磷 (TP) 在排污口处的含量高于其他采样点, 各季节 TP 高峰值均出现在排污口岸段上 [图 6(d)]. 无机磷 (IP) 占 TP 含量的 70.09% ~ 91.62%, 参见图 6(e) ~ 6(h), 其中 Ads-P、Fe-P 和 CFAP + Ca-P 在排污口采样点含量较高, 各季

节高峰值都处在排污口,而 FAP 在排污口处累积不明显.潮滩表层沉积物中有机磷(OP)含量占 TP 总量的 8.38%~29.91%,图 6(i)表明 OP 时空分布上的变化均较大,排污口处沉积物中 OP 的富集作用不明显.相关分析表明,见图 7(a)和 7(b),TN 值与沉积物中的 OM 值存在正相关关系,而沉积物中的 NH_4^+ -N 含量与 Eh 存在明显的负相关关系,这说明排污增加了潮滩沉积物中 OM 的含量、降低了 Eh 值,这些环境因子的变化都有利于营养盐 N 在潮滩表层沉积物中累积与赋存. Aigars 在研究波罗的海

Riga 湾沉积物中磷的赋存形态时发现,Fe-P 赋存与沉积物氧化还原程度有关,当 Eh 较低时 Fe^{3+} 易被还原为 Fe^{2+} ,因而不利于 Fe-P 在沉积物中累积^[31];然而,本研究结果与之恰恰相反,排污口有较低 Eh 值,却有较高的 Fe-P 含量.图 7(c)显示沉积物 Eh 与 Fe-P 含量存在负相关关系,说明排污活动加剧了沉积物中 Fe-P 的累积和赋存,或 Eh 可能通过其它机制影响 Fe-P 的累积和赋存,但目前因缺乏必要的证据,对此要做更加深入地研究和探讨.

2.2.4 排污活动对 N、P 界面扩散通量的影响

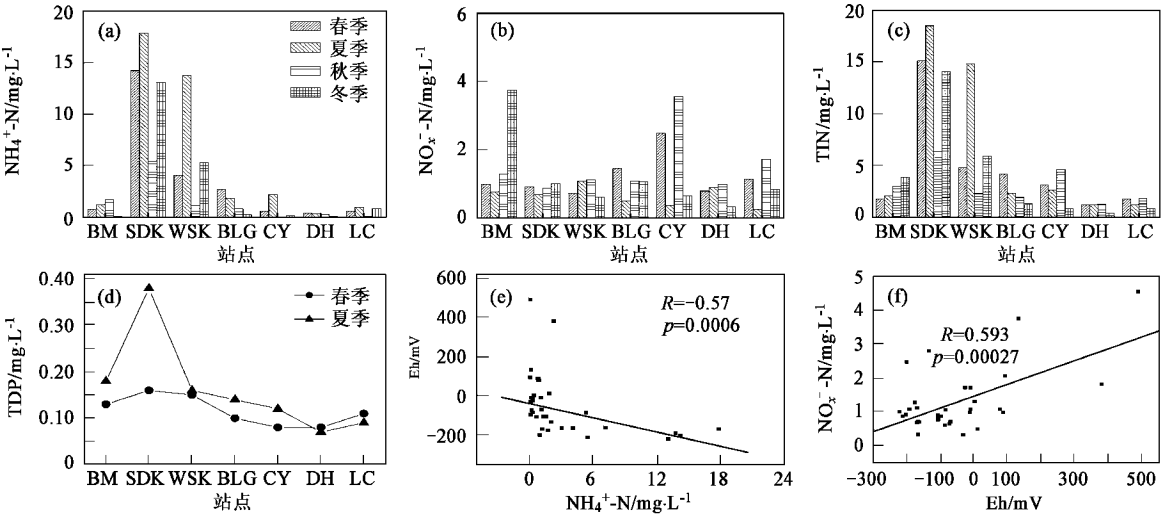


图 5 长江口滨岸潮滩表层沉积物孔隙水中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、TIN 和 TDP 的时空分布以及 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 与沉积物 Eh 之间的相关关系

Fig.5 Spatio-temporal distributions of NH_4^+ -N, NO_3^- -N, TIN and TDP and the correlation of Eh with NH_4^+ -N and NO_3^- -N in tidal surface-sediment pore waters from the Yangtze Estuary

沉积物-水界面间 N、P 交换是沉积物-水环境系统中 N、P 迁移、累积和转化的重要过程.利用修正过的 Fick's 第一定律对潮滩沉积物-水界面间营养盐 N 的扩散通量进行估算,计算公式为^[32]:

$$F = - \phi_0 D_s \frac{\partial c}{\partial Z}$$

式中, $F[\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$ 为扩散通量,若扩散通量为负值则表示营养盐由沉积物向上覆水扩散,若为正值则表示营养盐由上覆水向沉积物扩散; ϕ_0 表示沉积物孔隙度; $D_s (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ 为沉积物的扩散系数; $\partial c/\partial Z$ 为单位距离内营养盐的浓度梯度变化,在沉积物-水界面处 $Z = 0$,并且从沉积物-水界面向下定义为正方向.图 8 绘出了潮滩沉积物-水界面间 N、P 分子扩散通量的年均值.由图 8 可以看出,潮滩沉积物-水界面间 NH_4^+ -N 的扩散以负通量为主,由沉积

物向上覆水扩散,从空间分布来看,排污口处 NH_4^+ -N 扩散通量明显高于其他采样点; NO_3^- -N 的扩散以正通量为主,即 NO_3^- -N 主要从上覆水向沉积物中扩散,在排污口 NO_3^- -N 的扩散通量也高于非排污口; TIN 的扩散通量受 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 共同控制,在排污口处为负值,非排污口处大多为正值,且排污口 TIN 的扩散通量较大;可溶磷(DP)在大部份岸段由上覆水向沉积物扩散,而吴淞口(WSK)处有较高的负通量.由此可以看出,排污活动不仅加剧营养盐在潮滩环境中富集,而且加剧潮滩沉积物-水界面间营养盐 N、P 的扩散过程.

3 结论

(1)长江口滨岸潮滩环境对排污活动有显著的环境响应,排污活动使潮滩上覆水中的 DO 和 pH 值

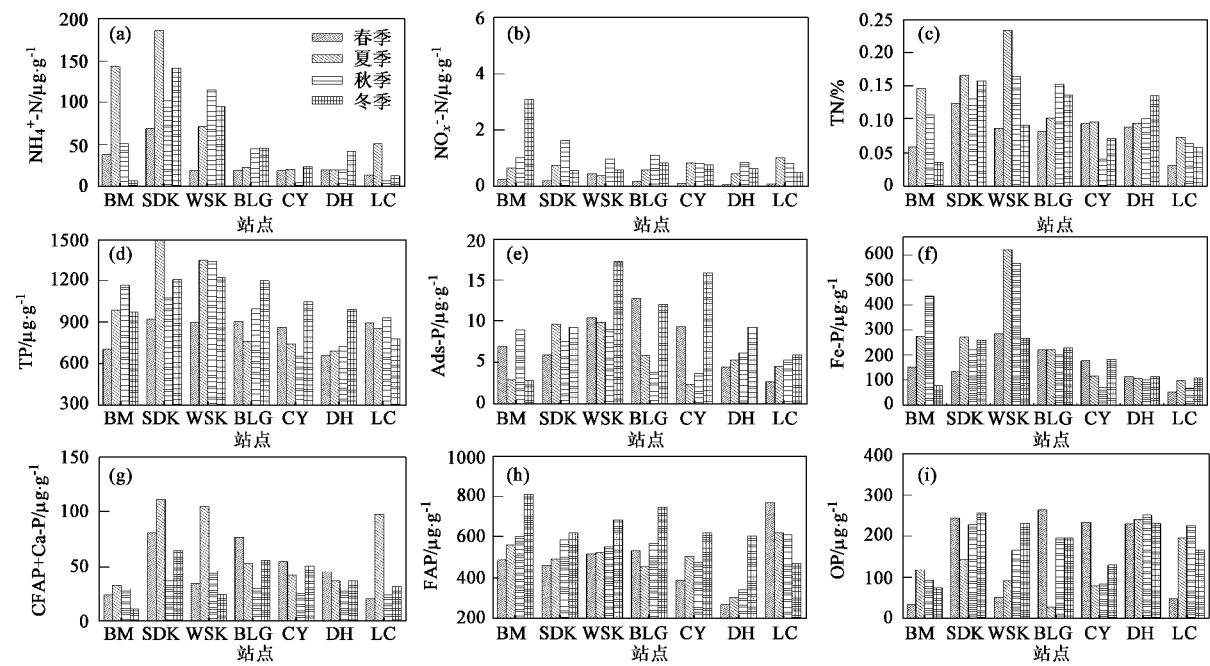


图 6 长江口滨岸潮滩表层沉积物中可交换态 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TIN 和各形态 P 的时空分布变化

Fig. 6 Spatio-temporal distributions of exchangeable $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TIN and P of various forms in tidal surface sediments from the Yangtze Estuary

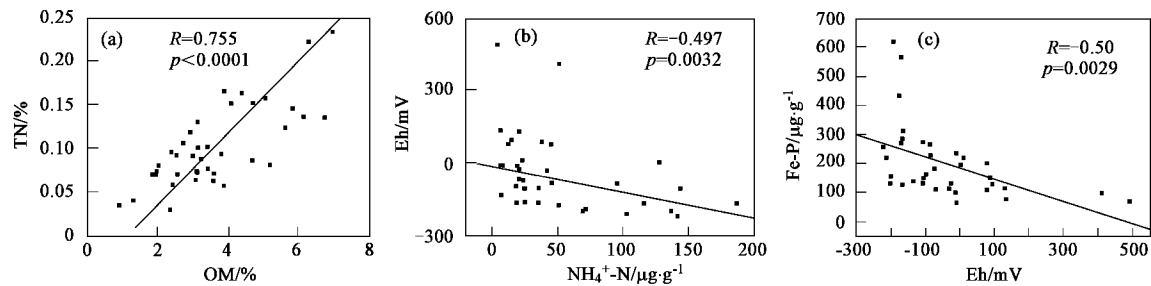


图 7 长江口滨岸潮滩表层沉积物中理化参数之间的相关关系

Fig. 7 Correlation of physio-chemical parameters of tidal surface sediments in the Yangtze Estuary

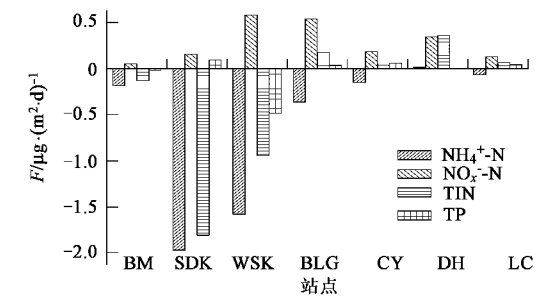


图 8 长江河口滨岸潮滩沉积物-水界面间 N、P 年均扩散通量的沿程分布

Fig. 8 Spatial distributions of N and P annual average diffusive fluxes across the tidal sediment-water interface along the Yangtze Estuary

附近潮滩表层沉积物还原性增强;增加潮滩表层沉积物中的 OM 的含量.这些环境因子的变化间接影响长江口滨岸潮滩营养盐的积累、赋存、迁移和转化.

(2)排污活动对长江口滨岸潮滩上覆水、表层沉积物孔隙水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TIN、TDP 及表层沉积物中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、Ads-P、Fe-P 和 CFAP + Ca-P 等都有显著富集效应.这种作用一方面是排污直接贡献营养盐增加其在潮滩环境中的积累,另一方面是排污活动改变了潮滩环境参数,进而影响营养盐转化和迁移.长江口滨岸潮滩排污口处上覆水、表层沉积物孔隙水和表层沉积物中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 并未出现累积高峰值,表明外源输入不是潮滩环境中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要富集源, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化作用和有机质矿化作用可能是潮滩

降低;改变潮滩表层沉积物的氧化还原环境,降低潮滩表层沉积物的 Eh 值和 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 比值,使污染区

上覆水、表层沉积物孔隙水和表层沉积物中 NO_x^- -N 主要富集来源。

(3) 排污口潮滩沉积物-水界面间 NH_4^+ -N、 NO_x^- -N、TIN 和 DP 的扩散通量都大于非排污口,而且 NH_4^+ -N、TIN 和 DP 在排污口扩散通量多为负值,说明排污活动加剧了潮滩沉积物-水界面间营养盐 N、P 分子扩散过程。

参考文献:

[1] Werner B T. Complexity in natural landform patterns[J]. Science, 1999, **284**: 102 ~ 104.

[2] Whithsides G M, Ismagilov R F. Complexity in chemistry[J]. Science, 1999, **284**: 89 ~ 92.

[3] Goldenfeld N, Kadanoff L P. Simple lessons from complexity[J]. Science, 1999, **284**: 87 ~ 89.

[4] Cerwall H. Biological effects of eutrophication in the Baltic Sea, particularly the coastal zone[J]. Ambio, 1990, **19**: 109 ~ 112.

[5] Sanger D M, Holl A F, Scott G I. Tidal creek and salt marsh sediments in south Carolina coastal estuaries: I. Distribution of trace metals [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1999, **37**: 445 ~ 457.

[6] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco H A, *et al.* Human domination of earth's ecosystem[J]. Science, 1997, **25**: 494 ~ 499.

[7] 刘敏, 许世远, 陈振楼. 上海南汇淤泥质潮滩表层沉积物中多环芳烃[J]. 中国环境科学, 1998, **18**(3): 284 ~ 288.

[8] 陈建芳, 叶新荣, 周怀阳, 等. 长江口-杭州湾有机物污染历史初步研究——BHC 与 DDT 的地层学记录[J]. 中国环境科学, 1999, **19**(3): 206 ~ 210.

[9] 段水旺, 章申, 陈喜保, 等. 长江下游氮、磷含量变化及其输送量的估计[J]. 环境科学, 2000, **21**(1): 53 ~ 56.

[10] 陈振楼, 许世远, 柳林, 等. 上海滨岸潮滩沉积物重金属元素的空间分布与累积[J]. 地理学报, 2000, **55**(6): 641 ~ 651.

[11] 毕春娟, 陈振楼, 许世远, 等. 上海滨岸潮滩根际重金属含量季节变化及形态分布[J]. 海洋与湖沼, 2003, **34**(2): 194 ~ 200.

[12] 顾宏堪, 熊孝先, 刘明星, 等. 长江口附近氮的地球化学 I: 长江口附近海水中的硝酸盐[J]. 山东海洋学院学报, 1981, **1**(4): 37 ~ 46.

[13] 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 I: 秋季的营养限制情况[J]. 海洋学报, 2000, **22**(4): 60 ~ 66.

[14] Klump J V. Biogeochemical cycling in an organic rich coastal marine basin II: Nutrient sediment-water exchange processes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, **45**: 101 ~ 121.

[15] Babu K N, Ouseph P P, Padmalal D. Interstitial water-sediment geochemistry of N, P and Fe and its response to overlying waters of

tropical estuaries: a case from the Southwest coast of India[J]. Environmental Geology, 2000, **39**: 633 ~ 640.

[16] Sundbäck K, Miles A, Hulth S. Importance of benthic nutrient regeneration during initiation of macroalgal blooms in shallow bays [J]. Marine Ecology Progress Series, 2003, **246**: 115 ~ 126.

[17] Bolalek J, Graca B. Ammonium nitrogen at the water Sediment Interface in Puck Bay, Baltic Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1996, **43**: 767 ~ 779.

[18] Rysgaard S, Thastum P, Dalsgaard T, *et al.* Effects of salinity on NH_4^+ adsorption capacity, nitrification, and denitrification in danish estuary sediments[J]. Estuaries, 1999, **22**: 21 ~ 30.

[19] Andrieux-Loyer F, Aminot A. Phosphorus forms related to sediment grain size and geochemical characteristics in French coastal areas [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2001, **52**(5): 617 ~ 629.

[20] Berner R A, Rao J L. Phosphorous in sediments of the Amazon River and estuary: Implication for the global flux of phosphorous to the sea[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, **58**(10): 2333 ~ 2339.

[21] Gerritse R G, Wallbrink P J, Murray A S. Accumulation of phosphorus and heavy metals in the Peel-Harvey Estuary in western Australia: Results of a preliminary study[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, **47**: 679 ~ 693.

[22] 刘敏, 许世远, 侯立军, 等. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的存在形态和分布征[J]. 海洋通报, 2001, **20**(5): 10 ~ 17.

[23] 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 河口滨岸潮滩沉积物-水界面 N、P 的扩散通量[J]. 海洋环境科学, 2001, **20**(3): 19 ~ 23.

[24] 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 长江河口潮滩表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. 地理学报, 2002, **57**(4): 397 ~ 406.

[25] 刘巧梅, 刘敏, 许世远, 等. 上海滨岸潮滩不同粒径沉积物中无机形态磷的分布特征[J]. 海洋环境科学, 2002, **21**(3): 29 ~ 33.

[26] 欧冬妮, 刘敏, 侯立军, 等. 围垦对东海农场沉积物无机氮分布的影响[J]. 海洋环境科学, 2002, **21**(3): 18 ~ 22.

[27] 翁焕新. 滨海沉积物和间隙水中的磷研究[J]. 环境科学学报, 1997, **17**(2): 148 ~ 153.

[28] 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.

[29] 林以安, 唐仁友, 李炎, 等. 长江口生源元素的生物地球化学特征与絮凝沉降的关系[J]. 海洋学报, 1995, **17**(5): 65 ~ 71.

[30] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. Limnology and Oceanography, 1992, **37**: 1460 ~ 1482.

[31] Aigars J. Seasonal variations in phosphorus species in the surface sediments of the Gulf of Riga, Baltic Sea[J]. Chemosphere, 2001, **45**: 827 ~ 834.

[32] Lerman A. Geochemical process: Water and sediment environments [M]. Mew York: John Wiley & Sons Inc, 1979.