

# 夏季长江口水体层化和潮汐作用对颗粒氮、磷运移的影响

葛田田<sup>1</sup>, 王新洋<sup>1,2</sup>, 谭丽菊<sup>1</sup>, 李 铁<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100; 2. 上海交通大学海洋学院, 上海 200030)

**摘要:** 于 2018 年 7 月对长江口及其邻近海域水体中的海洋化学参数进行了 3 个连续站和 5 个大面站的调查, 分析了该海区水体层化和潮汐作用对颗粒氮(PN)和颗粒磷(PP)的影响。结果表明, 该海区 PN 浓度为 0.75~27.42  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 5.39  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ; PP 浓度为 0.07~2.05  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 0.37  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。PN 和 PP 与悬浮颗粒物(TSP)均具有较好的相关性, 表现出明显的同源性。层化现象和潮汐作用对二者的运移和分布有很大影响, 层化不利于底层颗粒物的向上输运, 使得 PN 和 PP 垂直分布出现明显分层现象, 同时长江冲淡水与高盐水交汇形成的锋面, 使大颗粒物在锋面以西快速沉降, 阻碍了颗粒氮磷向外海的水平输送。潮汐是该海区 PP、PN 水平输送的主要动力来源之一, 在潮汐作用下, 长江冲淡水的运移及底层沉积物的再悬浮对水体中颗粒氮磷的周期性变化产生重要的影响, 在上升流区底层及中层 PN 和 PP 浓度受沉积物再悬浮作用周期性增大。相关工作对分析河口海域化学成分分布和水动力作用的相关性具有重要作用。

**关键词:** 长江口; 颗粒氮磷; 层化现象; 潮汐作用

中图分类号: P734 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)08-0001-09

DOI: 10.11759/hyxx20210319003

颗粒物是海洋中物质存在的重要形态, 在海洋各要素的迁移、转化中起到重要的作用, 在营养盐的供给和生物地球化学过程中扮演着重要角色<sup>[1-3]</sup>。颗粒态是海水中营养盐的重要组成部分, 颗粒氮(PN)、颗粒磷(PP)的比例、形态与浓度的变化对近海初级生产力的维持起重要作用<sup>[2]</sup>。此外, PN、PP 具有易沉降、生物成分比重大的特征, 使其成为水体与沉积物相互传递的重要介质<sup>[1-2]</sup>。河流输送是颗粒物从陆地向海洋输送的主要途径。河口区海域水动力条件复杂, 且受陆源输入和外界大洋相互作用的影响, 使得 PP、PN 的产生、迁移转化与循环等过程更加复杂<sup>[4]</sup>。

长江作为我国最大的河流, 其年均径流量达  $9.24 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , 在陆源向东海和西太平洋的输送过程中起着重要作用<sup>[5]</sup>。沿岸经济带的快速发展与城市人口的急速增加, 对长江口邻近海域生态环境造成了重要的影响。近 50 年来, 长江营养盐的输入急剧增加<sup>[6]</sup>, 长江对边缘海总氮(TN)、总磷(TP)的输入通量分别占主要河流总通量的 66% 及 84%<sup>[7]</sup>。同时, 长江口及邻近海域受潮汐、沿岸流和降水等环境因子的调控影响明显, 水文环境复杂, 使得营养盐在该海域的含量和迁移转化受到多种因素的控

制。长江口水域是一个中等强度的潮汐河口, 潮汐在口内为不正规半日潮, 口外为正规半日潮<sup>[8]</sup>, 河口最大浊度的形成机制是水流-潮流相互作用和盐淡水混合作用的结果, 对于长江的物质输送起着非常重要的作用。长江口悬浮颗粒物(TSP)的浓度和年平均输送量达到  $0.5 \sim 1.7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  以及  $5 \times 10^8 \text{ t}$ , 颗粒物吸附/解吸作用是海洋氮磷循环中重要的过程<sup>[9-10]</sup>, 受长江径流输沙量和水文条件的影响, 颗粒氮磷的浓度在长江口海域出现明显的季节和空间分布特征<sup>[1, 4]</sup>。

以往对颗粒氮磷的研究多集中在长江的输入通量、形态转化及季节变化上, 有关长江口潮汐及层化等水动力条件对颗粒氮磷迁移转化机制的研究较少。

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-06-29

基金项目: 国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室开放基金(202112); 自然资源部海洋生态环境科学与工程重点实验室开放基金(MESE-2019-06); 国家重点研发计划(2019YFC1407802)

[Foundation: State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, No. 202112; Open Fund of Key Laboratory of Marine Ecological Environment Science and Engineering, No. MESE-2019-06; Ministry of Natural Resources National Key Research and Development Project of China, No. 2019YFC1407802]

作者简介: 葛田田(1986—), 女, 山东宁阳人, 实验师, 博士在读, 主要从事海洋化学研究, E-mail: getiantian@ouc.edu.cn; 谭丽菊(1972—), 通信作者, 女, E-mail: lijutan@ouc.edu.cn

本文基于 2018 年 7 月在长江口及其邻近海域 3 个连续站和 5 个大面站所测参数,分析潮汐作用以及水体层化等水动力条件对 PP、PN 浓度分布的影响,为分析河口区颗粒态营养盐的分布和迁移转化提供新的思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 站位布设

2018 年 7 月 14 日至 19 日,乘“浙渔科 2”号科考船在长江口邻近海域的 5 个大面站和 3 个连续站进行综合观测,经纬度范围为 122°24.076'E~123°11.786'E, 30°59.345'N~31°00.329'N, 采样站位见图 1。连续站(S1、S2、S3)与大面站中的 L2、L3、L4 虽预设站位相同,但调查日期不同,因此实际经纬度略有差异。

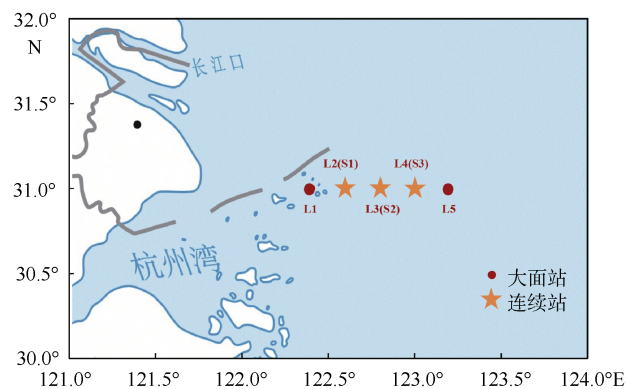


图 1 采样站位图[根据审图号 GS(2020)4627 的地图制作]

Fig. 1 Sampling Stations

注: L1—L5 为大面站, S1—S3 为连续站

### 1.2 样品采集及分析

对连续站,化学要素采样间隔时间为 3 h,物理要素采样时间间隔为 1 h,连续 25 h 观测。现场用 CTD 观测温度、水深及盐度,用 Niskin 采水器采集标准层次水样,各站位水深及采样层次见表 1,各站底层距离海底 2~3 m。

用于测定营养盐的水样经孔径为 0.7 μm 玻璃纤维滤膜(GF/F Whatman)减压过滤,滤膜用于测定颗粒氮磷的浓度,TSP 用已烘干并称重的醋酸纤维滤膜(47 mm, 0.45 μm)过滤,叶绿素 *a*(Chl-*a*)用 0.7 μm Whatman GF/F 进行过滤,所有滤膜于-20 °C 冷冻保存直至实验室分析。PP、PN、溶解态总磷(DTP)和溶解态总氮(DTN)均用碱性过硫酸钾法测定,硝酸盐

表 1 各站位水深及采样层次

Tab. 1 Water depth and sampling level of each station

站位	类型	平均水深/m	采样水深
L1	大面站	10.7	表层、底层
L2	大面站	14	表层、10 m、底层
L3	大面站	26	表层、10 m、20 m、底层
L4	大面站	47	表层、30 m、底层
L5	大面站	55	表层、10 m、30 m、底层
S1	连续站	18.2	表层、10 m、底层
S2	连续站	27.9	表层、10 m、底层
S3	连续站	48.4	表层、15 m、30 m 和底层

(NO<sub>3</sub>-N)用镉-铜还原柱法测定,亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N)用重氮偶氮法测定,铵盐(NH<sub>4</sub>-N)用次溴酸钠氧化法测定,溶解磷酸盐(DIP)用磷钼蓝法测定,溶解硅酸盐(DSi)用硅钼蓝法测定<sup>[11-12]</sup>。

溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)分别采用温克勒法和碱性高锰酸钾法在船上实验室现场测定。TSP、Chl-*a*、总溶解有机碳(DOC)分别用称重法(分析天平, Sartorius CP225D)、荧光法(荧光分光光度计, 日立 F-4600)和高温燃烧法(总有机碳分析仪, Shimadzu TOC-L)测定<sup>[11-12]</sup>。

### 1.3 数据分析方法

本研究对获取的海洋要素间的相关性用 SPSS 软件计算了皮尔逊相关系数,营养盐的断面分布图使用 Surfer 13 软件绘制。

## 2 结果分析

### 2.1 水文特征

调查海域的温度、盐度及密度的范围分别为 19.02~25.36 °C, 24.15~34.38, 1 017.57~1 026.62 kg·m<sup>-3</sup>,其断面分布如图 2 所示。由图可见,3 个参数均呈现出明显的层化现象,约在 10 m 处存在明显的跃层,因此,可将调查海域水体划分为上下两个不同的水体。跃层以上水体受长江冲淡水的影响,呈现出高温低盐的特点,而跃层以下的水体具有低温高盐的特点。表层,在近河口咸淡水混合区,形成明显的锋面。整体而言,相比远海,近岸水体受长江冲淡水的影响具有盐度低、密度小的特点,但从近岸到远海,盐度和温度出现明显的跃层起伏,L2 站位在 5~10 m 的盐度明显高于其他站位,温度明显低于其他站位同等水深水体,有明显的高盐冷水涌升现象。

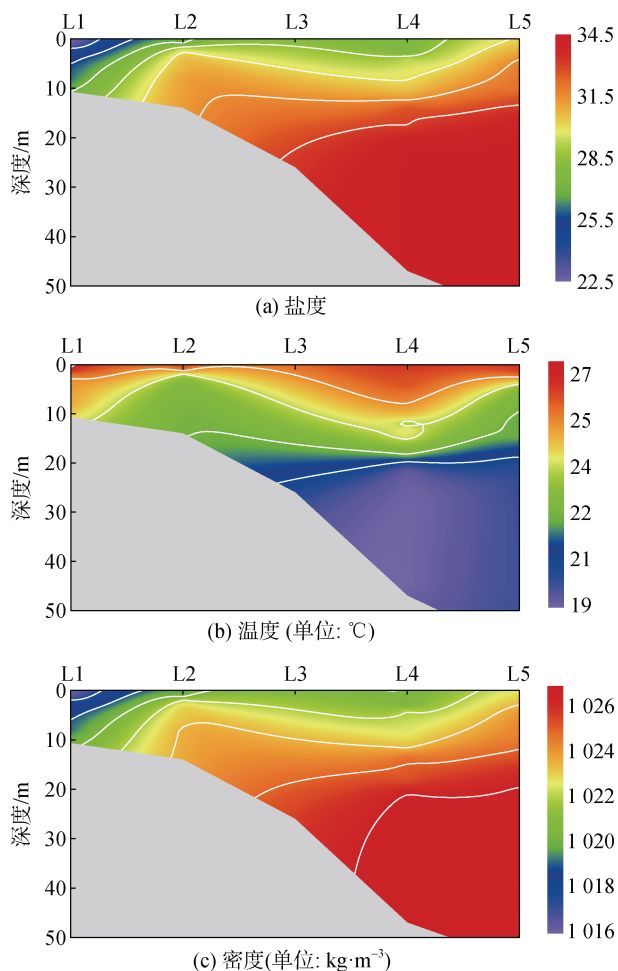


图2 2018年7月调查海域的盐度、温度和密度断面分布图  
Fig. 2 Cross-sectional distribution of salinity, temperature, and density in the surveyed sea area in July 2018

## 2.2 氮磷的形态

调查期间, 长江口海域 PN 浓度变化范围为 0.75~27.42  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均浓度为 5.39  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。DTN 浓度变化范围为 2.04~33.84  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均浓度为 13.97  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  (表 2), PN 占 TN 的比例为 5%~56%, 平均值仅为 16%。PP 浓度范围为 0.07~2.05  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均浓度为 0.37  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , PP 占 TP 的比例为 7%~66%, 平均值为 26%。

## 2.3 TSP、PP 和 PN 的空间分布

TSP 的浓度范围为 1.1~1 015.9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 64.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。PN、PP 和 TSP 具有大致相同的分布特征, 见图 3。由图 3 可见, 三者均表现为在 L3 站位以西底层高, 表层低, L3 站位以东为表层高, 底层低。PN、PP 和 TSP 最高值均位于 L1 站位底层, 浓度分别为 27.42  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2.05  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  和 1 015.9  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。PN/TN、PP/TP 空间分布规律与 PN、PP 的分布规律一致。

表 2 长江口及邻近海域营养盐的浓度范围及平均浓度  
Tab. 2 Concentration range and average concentration of nutrients in the Changjiang estuary and adjacent coastal areas

营养盐	浓度变化范围/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	平均浓度/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$
NO <sub>3</sub> -N	0.46~32.62	13.53
NO <sub>2</sub> -N	0.05~0.80	0.42
NH <sub>4</sub> -N	ND~11.56	1.13
DIN	2.04~33.84	13.97
DON	ND~44.08	13.97
DTN	8.26~63.57	27.96
PN	0.75~27.42	5.39
TN	3.42~90.86	34.35
DIP	0.06~2.66	0.81
DOP	ND~0.62	0.18
DTP	0.21~1.86	0.92
PP	0.07~2.05	0.37

注: ND 为未检出。

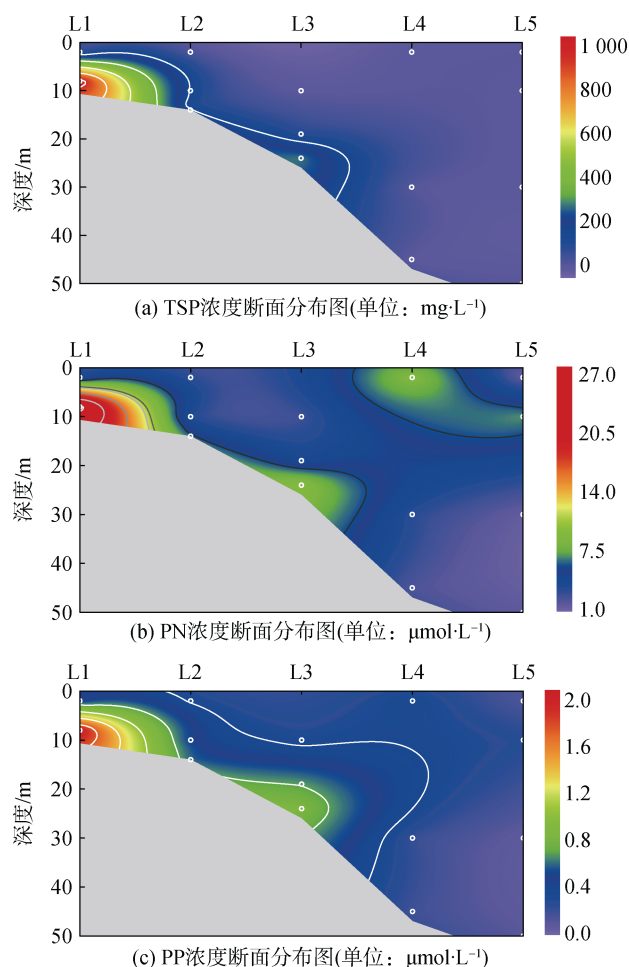


图3 2018年7月调查海域 TSP、PN 和 PP 浓度断面分布图  
Fig. 3 Cross-sectional distribution of TSP, PN, and PP concentration in the surveyed sea area in July 2018

## 2.4 颗粒氮磷的时间变化

对 S1、S2 和 S3 3 个站位进行了 25 h 周日连续观测, 3 个站位 PP 浓度周日变化范围分别为 0.17~1.72  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 0.10~0.72  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 0.07~1.33  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , PN 浓度周日变化范围分别为 3.33~25.57  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 1.60~15.48  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 0.75~12.18  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。3 个站位

PN、PP 浓度随时间的变化趋势如图 4 所示。S1 站的表层 PP、PN 在周日内有 2 次明显的升高和降低的变化趋势, 最高值分别于 10 时和 19 时左右。S2 站 PP、PN 周日变化趋势不明显, 表层和底层浓度大于中间层。S3 站表层在 0 时和下午时段 PN 和 PP 浓度均有高值, 底层浓度较低无明显变化。

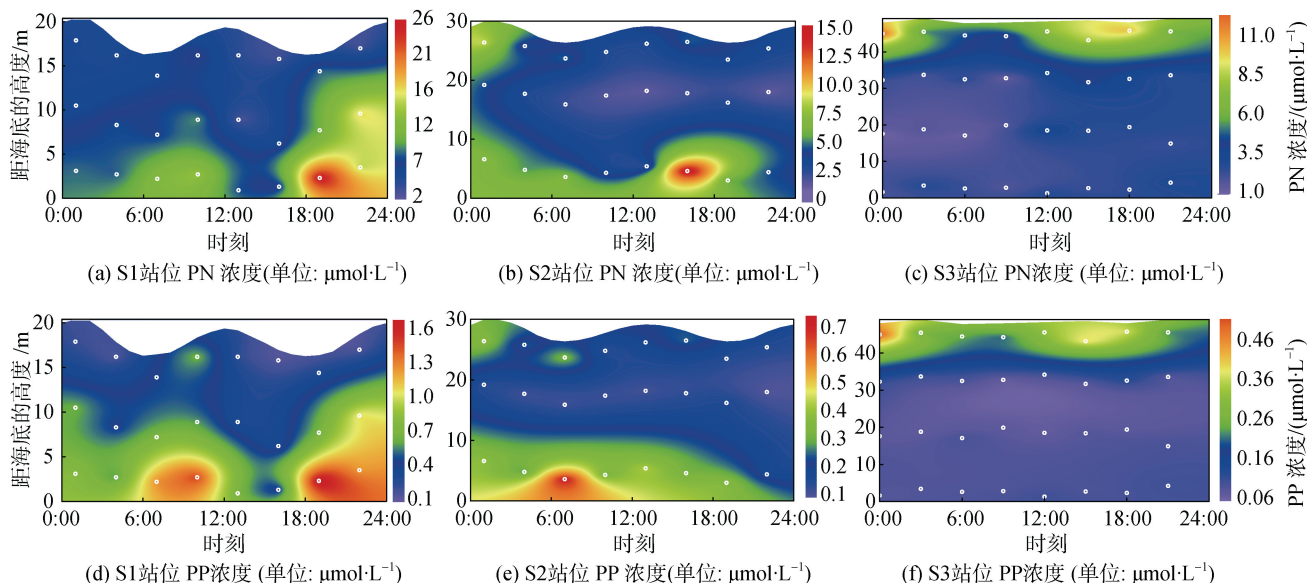


图 4 S1、S2 和 S3 3 个站位 PN、PP 浓度随时间的变化趋势, 纵坐标为距底深度  
Fig. 4 Variation in trend with time of PN and PP concentration at S1, S2, and S3

## 3 讨论

### 3.1 营养盐形态分布特征

水体中的营养盐以不同的形态存在。在近岸河口区, 营养盐的分布及形态特征, 不仅受到生物作用的影响, 还受到大陆径流及跃层变化等水文状况的影响<sup>[4, 13]</sup>。对长江口海域氮磷营养盐的形态进行了分析, 如图 5 所示。由图 5a 可见, 跃层上下 DTN、DIN、DON 浓度均呈现近岸向远海逐渐递减的趋势。夏季, 长江冲淡水强盛, 虽厚度不大(<10 m), 但向东可延伸至 126°E<sup>[12]</sup>, 因此, 上层水体主要受到长江冲淡水的影响, 由于化肥的使用和城市污水的排放, 使得近岸海区 DIN、DON 浓度较高<sup>[14]</sup>, 研究显示, 自 80 年代以来长江输送的 DIN 增加了近 10 倍<sup>[15-17]</sup>。近岸(L3 以西)密跃层以下 DIN、DON 浓度大于远海, 主要受径流和潮流的相互作用以及咸淡水混合的共同影响<sup>[18]</sup>。密跃层以上 PN 浓度由近岸到远海无明显变化趋势, 说明长江径流输送不是该海区 PN 分布的唯一影响因素, 还受到浮游植物的生长等因素共同

作用的影响, 长江口夏季 Chl-*a* 的浓度较高, 平均值为  $2.10\pm 1.59 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 明显大于秋、冬季节平均值为  $0.66\pm 0.19 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.46\pm 0.23 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ <sup>[4]</sup>, 是颗粒氮磷的重要来源。密跃层以下 PN 浓度由近岸到远海逐渐降低, 且在 L3 以东其值逐渐小于表层 PN 浓度, 河口最大混浊带, 其悬浮颗粒物浓度很高, 可能是造成 L3 以西出现 PN 浓度最高值的主要原因, 同时由于锋面的阻碍作用减弱了颗粒物的向外扩散, 使得 L3 以东 PN 浓度较低(见图 3)。

对于该海域磷的不同形态, 相比上层水体, 密跃层以下 PP、DIP、DTP 的浓度较高(见图 5b), 主要由于底层沉积物再悬浮不断释放 PP 及 DIP<sup>[19]</sup>, L1 站 PP 浓度及所占的比例最大, 说明在长江口底层再悬浮的释放是 PP 的重要来源。夏季表层水体浮游植物生长需要利用大量的 DIP<sup>[20]</sup>, 也可使得表层 PP、DIP 浓度较低。在河口悬浮颗粒物浓度较高的水域, 颗粒物由于吸附能力较强而能吸附大量 DIP, 在浮游植物生长旺盛时, 悬浮颗粒物会不断释放无机磷酸盐<sup>[13, 21-22]</sup>, 同时 POP 也会快速分解, 释放的可溶性磷酸盐重新供浮游植物

吸收利用。密跃层上下的 PP、DIP 浓度近岸大于远海 (图 3b), 下层水体主要受近岸陆架悬浮颗粒物的影响,

上层水体主要是受到长江冲淡水影响, 加上上层生物利用的影响, 使得上层 DIP 浓度降低速度大于底层。

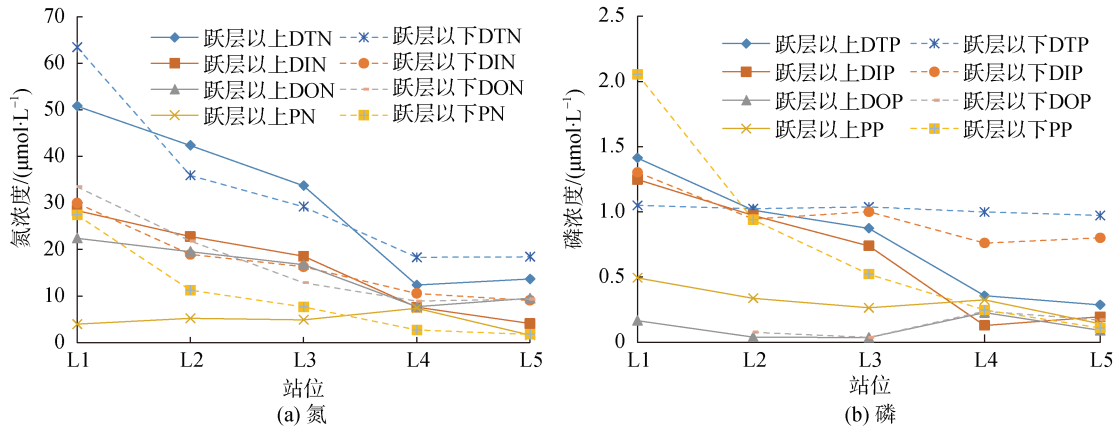


图 5 调查海域不同站位氮磷的存在形态

Fig. 5 Existence form of N and P in different stations in the surveyed sea area

### 3.2 颗粒氮磷的来源及影响因素

为了研究影响长江口颗粒氮磷的因素, 对密度跃层上的水体中 PN、PP 的浓度分别和 TSP、温度、盐度、COD、DSi、DOC、Chl-*a* 以及 DO 做皮尔逊相关性分析, 见表 3 所示。悬浮物呈近岸高, 远岸低的分布特征, 且近岸区域悬浮物浓度变化梯度较大 (图 3a)。长江口外的高悬浮物区域与长江口水动力过

程密切相关, 受长江径流以及潮汐等作用影响, 在长江口悬浮颗粒物含量非常高<sup>[23]</sup>。两层水体 PN 和 PP 均与 TSP 具有强相关性(表 3), 认为颗粒氮、磷的分布特征与运移规律和悬浮颗粒物非常相似。在长江口, 悬浮颗粒物主要来源于长江冲淡水、生物作用以及沉积物再悬浮作用<sup>[4]</sup>, 因此 PN、PP 的分布与这些因素密切相关。

表 3 PP、PN 和其他要素的相关性

Tab.3 Correlation of PN, PP, and other elements

化学要素	密度跃层以上水体				密度跃层以下水体			
	PP		PN		PP		PN	
	皮尔逊相关系数 <i>R</i>	检验概率值	皮尔逊相关系数 <i>R</i>	检验概率值	皮尔逊相关系数 <i>R</i>	检验概率值	皮尔逊相关系数 <i>R</i>	检验概率值
盐度	-0.095	—	0.025	—	-0.862	<0.01	-0.763	<0.01
温度	0.045	—	0.237	—	0.598	<0.01	0.525	<0.01
TSP	0.876	<0.01	0.767	<0.01	0.939	<0.01	0.834	<0.01
COD	0.387	<0.01	0.401	<0.01	0.736	<0.01	0.672	<0.01
DSi	0.363	<0.01	0.127	—	0.776	<0.01	0.723	<0.01
DOC	0.275	<0.05	0.260	—	0.519	<0.01	0.386	<0.01
Chl- <i>a</i>	0.117	—	0.070	—	0.230	—	0.144	—
DO	0.053	—	0.172	—	0.123	—	0.126	—

注: —表示检验概率值大于 0.05。

两层水体中 PN、PP 与温度、盐度的相关性明显不同。密度跃层上的水体, 与温度、盐度的相关性不明显。上层水体具有低盐特点(图 2a), 主要受到长江冲淡水的影响, 与盐度的弱相关性说明长江冲淡

水混合不是影响调查海域 PP 及 PN 浓度的主要因素。密跃层以下水体与温度、盐度具有强相关性( $n=45$ ), 与温度呈现正相关, 与盐度有较强的负相关( $R>0.6$ ,  $n=45$ )。L1 与 L2 水深较浅( $<15$  m, 图 2), 在 L2 长江

水与外海高盐水混合形成锋面<sup>[1]</sup>,在锋面过境处水动力情况相当复杂,受长江水、底层高盐水的侵入以及潮汐的共同影响,沉积物再悬浮作用较大,同时锋面阻碍了再悬浮物质的向外扩散,导致在近岸呈现出高 TSP,低盐的现象。

密跃层以上水体,颗粒氮磷与 DSi、COD 和 DOC 具有弱相关性( $0.2 < R < 0.6$ ),陆地上硅酸盐风化是提供河流溶解硅酸盐的主要过程,长江冲淡水具有较高浓度的 DSi,这说明人类生产生活导致的污水排放通过长江冲淡水对 PN、PP 的分布具有一定的影响<sup>[24-25]</sup>。夏季颗粒氮磷受浮游植物生长的作用较大<sup>[4, 26]</sup>,而各水层颗粒氮磷和 Chl-*a*、DO 并没有明显的相关性,这说明上层水体颗粒氮磷分布可能受生物作用与长江冲淡水的共同影响。密跃层以下,DSi、COD 以及 DOC 具有强相关或者中等强度相关的特点。密跃层以下水体中与 COD、DSi 以及 DOC 的相关性说明底层 PN、PP 浓度受水团混合引起的沉积物的再悬浮作用的影响。

### 3.3 层化对水平和垂向输送的影响

长江口水体结构具有季节性变化特征,夏季调查海域物质分布存在明显的层化<sup>[4]</sup>,不利于高温低盐的表层水和低温高盐的深层水的充分混合。水体结构会对营养盐的运移和分布产生重要的影响。当水体混合均匀时,表层长江冲淡水带来的营养盐与深层沉积物释放的营养盐会相互交换,而明显的水体层化不利于水层中营养盐的垂直交换<sup>[27]</sup>。PP、PN、TSP 断面分布图(图 3)反映了跃层上、下水体具有不同的特征。在 L3 站以西,密跃层以下水体的 PN、PP 浓度大于密跃层以上水体(图 3,图 5),说明海水层化阻碍底层物质向上层的输送。随着离岸距离的不同,密跃层以下水层中的 PP 和 PN 的浓度随着距离的增加呈现明显的指数型下降的趋势,密跃层以上水层中 PP 和 PN 的浓度随着距离的变化较小(图 5),最终到达 L3 以东的站位,表现为密跃层以上水体的 PN、PP 浓度大于密跃层以下水体,这种分布趋势与以往对长江口颗粒氮磷的断面研究相一致<sup>[1]</sup>。这说明层化现象使得跃层上下两部分水体 PN、PP 浓度呈现出不同的变化特征,根据前述讨论,密跃层以上水体主要受到长江冲淡水及生物生长的影响,而密跃层以下水体主要是受到沉积物再悬浮的影响,上层的长江冲淡水向外扩散与底层向里入侵的外海高盐水形成的锋面,使

得大颗粒物质在锋面以西快速沉降,阻碍了颗粒物的水平输送。

### 3.4 潮汐作用对颗粒氮磷的运移

潮汐作用对 3 个站位的颗粒氮磷分布影响存在差异。根据采样(7月15日至7月19日)期间嵊山站平均潮差变化作图(数据来自中国海事服务网 <http://ocean.cnss.com.cn>,潮汐表查询:中国浙江嵊山),见图 6,一天内出现 2 次高潮(0 时、12 时),2 次低潮(6 时、18 时)。各站位水深随时间的变化显示, S2、S3 的潮时与 S1 相比,分别相差约 1.5 h 及 3 h。

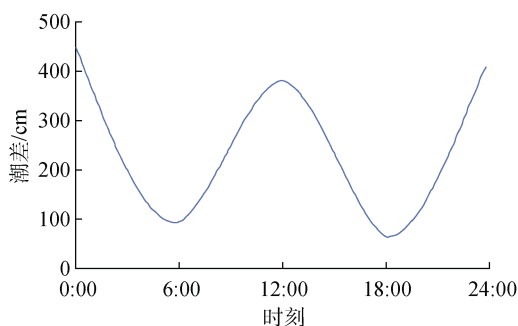


图 6 嵊山站 7 月 15 日—19 日平均潮高变化图  
Fig. 6 Changes in mean tide height on July 15-19 at Shengshan station

S1 站处于河口最大混浊带,底层悬浮颗粒物再悬浮受潮汐作用的影响<sup>[1]</sup>。S1 站底层和中层水体中颗粒氮、颗粒磷浓度明显呈现出一个周日内两次升高和降低的周期性变化规律,两次高值均处于涨潮阶段(10 时,19 时),说明潮汐是导致 S1 周日内变化的主要原因。通过温盐剖面图(图 2)可以看出,该站位有明显的高盐冷水涌升现象,这是由于长江冲淡水与海水混合形成的羽状锋诱导形成。研究显示,夏季在  $31^{\circ}31'N$ 、 $122^{\circ}40'E$  附近存在上升流区,上层水体离岸流,下层水体向岸流动补充,加之地形的影响,便产生上升流,高盐水与陆架水混合涌升,使得沉积物发生再悬浮作用<sup>[18, 28]</sup>。潮汐是该海域上升流发生周期性变化的主要影响因素<sup>[29]</sup>。沈萌等<sup>[29]</sup>对该站位的温盐剖面随时间的变化及潮流流速的分析显示, S1 在 18—22 时及 6—10 时为涨潮阶段。涨潮时上升流加强,底层沉积物扰动加强,并使得颗粒氮磷向外海的输送减少,可能是导致底层出现颗粒氮磷高值的原因,并且由于上升流的影响,中层及近表层也周期性出现高值(图 4)。

S3 站由于离岸较远,该站位与 S1 不同,表层(10

m 以上)PN、PP 浓度明显大于底层, 出现明显的分层, 表层高值区表现为落潮时周期性变深。夏季长江冲淡水的影响可达 126°E, 潮汐作用会影响长江冲淡水的扩展, 会影响长江口表层 TSP 的浓度分布, 落潮时, 长江冲淡水的影响变大, 向远海输送更多的 TSP。因此, 受再悬浮影响较小的 S3 站, 表层 PN、PP 浓度的变化主要受到长江冲淡水周期性扩展的影响。

从 S2 颗粒氮磷的时间变化可见表层和底层水体 PP、PN 浓度高于中层水体, 该站位表层受到长江冲淡水的影响, 而底层受到上升流的影响, 呈现中间水层浓度较低, 且中间水层低值区厚度受到潮汐作用周期性变宽的现象。

## 4 结论

通过以上结果和讨论可见, PN 和 PP 与 TSP 均具有较好的相关性, 同源性明显。受底层沉积物再悬浮作用的影响, 近岸密跃层以下 PP、PN 浓度大于表层, 且表现为从近岸到远海逐渐降低, 密跃层以上 PP、PN 的变化主要受到长江冲淡水及生物作用的影响。夏季的层化作用不利于底层 PP 和 PN 的向上输送, 但有利于大颗粒物质的沉降, 同时由于锋面的作用阻碍了颗粒物的水平向外输送。PP 和 PN 的周期性变化主要受水团混合和陆源输入的控制, 潮汐作用对不同水层水体的颗粒氮磷浓度周期性变化的影响机制不相同, 受上升流影响的站位, 中间水层和底层的周期性变化主要是受底层再悬浮的影响; 而表层水体颗粒氮磷的周期性变化受长江冲淡水的影响较大。

**致谢:** 中国海洋大学海洋与大气学院师生为本文提供了温盐深数据, 中国海洋大学化学化工学院调查团队在海水的取样和测定方面做了大量贡献, 在此一并致谢!

### 参考文献:

- [1] 刘希真, 李宏亮, 陈建芳, 等. 长江口跨越锋面颗粒磷季节分布变化特征及影响因素[J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 88-98.  
LIU Xizhen, LI Hongliang, CHEN Jianfang, et al. The seasonal variation and influence factors of particulate phosphorus across the frontal surface in Changjiang River Estuary[J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(3): 88-98.
- [2] QI X H, LIU M S, ZHANG J, et al. Cycling of phosphorus in the Jiaozhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2011, 30(2): 62-74.
- [3] SUZUKI M S, REZENDE C E, PARANHOS R, et al.

- Spatial distribution (vertical and horizontal) and partitioning of dissolved and particulate nutrients (C, N and P) in the Campos Basin, Southern Brazil[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2015, 166: 4-12.
- [4] LIU S M, QI X H, LI X, et al. Nutrient dynamics from the Changjiang (Yangtze River) estuary to the East China Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2016, 154: 15-27.
- [5] JIANG J H, WANG S M. Primary analysis of water resource, disasters and environment in the Changjiang River catchment[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(5): 512-517.
- [6] LIU J H, YANG S L, ZHU Q, et al. Controls on suspended sediment concentration profiles in the shallow and turbid Yangtze Estuary[J]. Continental Shelf Research, 2014, 90: 96-108.
- [7] TONG Y D, BU X G, CHEN J Y, et al. Estimation of nutrient discharge from the Yangtze River to the East-China Sea and the identification of nutrient sources[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321: 728-736.
- [8] 张锋, 李瑞杰, 孙杰, 等. 长江口及其邻近海域两定点周日海流观测的准调和与分析[J]. 海洋湖沼通报, 2019, 170(5): 59-65.  
ZHANG Feng, LI Ruijie, SUN Jie, et al. Quasi-harmonic analysis on one-day series current data at two anchored stations in the Yangtze River estuary and adjacent area[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2019, 170(5): 59-65.
- [9] FROELICH P N. Kinetic control of dissolved phosphate in natural rivers and estuaries: A primer on the phosphate buffer mechanism[J]. Limnology and Oceanography, 1988, 33: 649-668.
- [10] YAO Q Z, YU Z Z, LI L L, et al. Transformation and source of nutrients in the Changjiang Estuary[J]. Science China (Chemistry), 2014, 5(57): 165-176.
- [11] 全国海洋标准化技术委员会. 海洋监测规范 第 4 部分 海水分析: GB17378.4-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
National Marine Standardization Technical Committee. Marine Monitoring Specification Part 4 Seawater Analysis: GB17378.4-2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [12] 梁洲, 潘扬航, 张锦辉, 等. 2016 年夏季长江口邻近海域海洋参数的数据分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(增刊 1): 69-74.  
LIANG Zhou, PAN Yanghang, ZHANG Jinghui, et al. Data analysis of marine variables in the Yangtze River Estuary adjacent sea area in summer of 2016[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(Sup.1): 69-74.
- [13] 李磊, 沈新强. 春、夏季长江口海域营养盐的时空分布

- 特征及营养结构分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2941-2947.
- LI Lei, SHEN Xinqiang. Distribution features of nutrients and nutrient structure in the Changjiang estuary in spring and summer[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(12): 2941-2947.
- [14] 李亚力, 沈志良, 线薇薇, 等. 长江口营养盐结构特征及其对浮游植物的限制[J]. 海洋科学, 2015, 39(4): 127-136.
- LI Yali, SHEN Zhiliang, XIAN Weiwei, et al. Structure characteristics of nutrients and their restrictive effect on phytoplankton in the Yangtze River Estuary[J]. Marine Sciences, 2015, 39(4): 127-136.
- [15] LIU X C, ARTHUR H W B, LUDOVICUS, P H V B, et al. Exploring spatialtemporal changes of the Yangtze River(Changjiang) nitrogen and phosphorus sources, retention and export to the East China Sea and Yellow sea[J]. Water Research, 2018, 142: 246-255.
- [16] XU H, CHEN Z Y, FINLAYSON B, et al. Assessing dissolved inorganic nitrogen flux in the Yangtze River, China: sources and scenarios. Global and Planetary Change, 2013, 106: 84-89.
- [17] ZHANG S, JI H B. Composition and flux of nutrients transport to the Changjiang Estuary[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 13: 3-12.
- [18] 梁洲, 潘扬航, 祝嗣腾, 等. 长江口邻近海域总悬浮颗粒物的时空分布及其影响因素[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(增刊 1): 50-55.
- LIANG Zhou, PAN Yanghang, ZHU Siteng, et al. Spatiotemporal distribution and influencing factors of total suspended particles in the Yangtze River Estuary adjacent sea area[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(Sup.1): 50-55.
- [19] 矫恒晨, 王盼盼, 简慧敏, 等. 长江口及邻近海域沉积物再悬浮对水体磷酸盐的影响的模拟研究[J]. 海洋学报, 2017, 39(4): 28-38.
- JIAO Hengchen, WANG Panpan, JIAN Huimin, et al. Simulation study of the effects of sediment resuspension on phosphate loading in the Changjiang Estuary and its adjacent area[J]. Haiyang Xuebao, 39(4): 28-38.
- [20] 牟京龙, 张珊珊, 梁翠, 等. 长江口水域营养盐时空分布及其迁移过程[J]. 海洋科学, 2020, 44(1): 19-35.
- MOU Jinglong, ZHANG Shanshan, LIANG Cui, et al. Temporal and spatial distribution and mixing behavior of nutrients in the Changjiang River Estuary[J]. Marine Sciences, 2020, 44(1): 19-35.
- [21] FILIPPELLI G M, DELANEY M L. Phosphorus geochemistry of equatorial Pacific sediments[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(9): 1479-1495.
- [22] SHEN Z L, ZHOU S Q, PEI S F. Transfer and transport of phosphorus and silica in the turbidity maximum zone of the Changjiang estuary[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2008, 78(3): 481-492.
- [23] 曹沛奎, 严肃庄. 长江口悬沙锋及其对物质输移的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 1996(1): 85-94.
- CAO Peikui, YAN Suzhuang. Suspended sediments front and its impacts on the materials transport of the Changjiang Estuary[J]. Journal of East China Normal University(Natural Science), 1996(1): 85-94.
- [24] 邢建伟, 线薇薇, 绳秀珍. 2012年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2520-2527.
- XING Jianwei, XIAN Weiwei, SHENG Xiuzhen. Distribution and source of particulate organic carbon and particulate nitrogen in the Yangtze River estuary in summer 2012[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2520-2527.
- [25] 潘扬航, 梁洲, 王浩男, 等. 长江口邻近海域化学需氧量的分布特征及影响因素分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(增刊 1): 63-68.
- PAN Yanghang, LIANG Zhou, WANG Haonan, et al. The distribution and influence factors of COD in the Yangtze River Estuary adjacent sea area[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(Sup.1): 63-68.
- [26] 周畅浩, 张景平, 黄小平, 等. 大亚湾颗粒态氮磷的时空分布、关键影响因素及潜在生态意义[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(5): 696-702, 711.
- ZHOU Changhao, ZHANG Jingping, HUANG Xiaoping, et al. Distribution, key controlling factors and potential ecological role of particulate nitrogen and phosphorus in Daya bay[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38(5): 696-702, 711.
- [27] WEI Q S, WANG B D, CHEN J F, et al. Recognition on the forming-vanishing process and underlying mechanisms of the hypoxia off the Yangtze River estuary[J]. Science China (Earth Sciences), 2015, 58(4): 628-648.
- [28] LI Y H, LI D Y, FANG J Y, et al. Impact of Typhoon Morakot on suspended matter size distributions on the East China Sea inner shelf[J]. Continental Shelf Research, 2015, 101: 47-58.
- [29] 沈萌, 缪明芳, 王舒瑜, 等. 2018年夏季舟山海域上升流特征及形成机制分析[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2020, 59(增刊 1): 18-23.
- SHEN Meng, MIAO Mingfang, WANG Shuyu, et al. Analysis of upwelling characteristics and formation mechanism in the Zhoushan coastal region in the summer of 2018[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(Sup.1): 18-23.



# Effects of stratification and tides on the transport of particulate nitrogen and phosphorus near the Changjiang River Estuary in summer

GE Tian-tian<sup>1</sup>, WANG Xin-yang<sup>1, 2</sup>, TAN Li-ju<sup>1</sup>, LI Tie<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China)

**Received:** Mar. 19, 2021

**Key words:** Changjiang River Estuary; particulate nitrogen and phosphorus; stratification; tidal

**Abstract:** Based on data recorded in July 2018 in the Changjiang River estuary and adjacent water bodies at three stations and five consecutive bedding face stations, we analyzed the particulate nitrogen (PN) and phosphorus (PP); particularly their distribution features, the migration process, and influencing factors. The results showed that the concentration of PN ranged from 0.75 to 27.42  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , and the average concentration was 5.39  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . The concentration of PP ranged from 0.72 to 2.05  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  with an average concentration of 0.37  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ . PN and PP had good correlations with the suspended particulate matter (TSP), showing apparent homology. Stratification and tides have a great influence on the migration of PN and PP. Stratification was not conducive for the upward transportation of particles at the bottom, making the vertical distribution of PN and PP stratified. At the same time, the dirty water from the Changjiang River entered the highly concentrated saltwater. The formed front causes the large particles to settle rapidly west of the front, hindering the horizontal transport of particulate matter, nitrogen, and phosphorus to the sea. Affected by the tide, the migration of the Changjiang River's fresh water and the resuspension of bottom sediments have an essential impact on the periodic changes of PN and PP in the water. PN and PP in the bottom and middle levels of the upwelling zone are periodically changed by sediment resuspension. This work plays a vital role in analyzing the correlation between the distribution of chemical composition and hydrodynamic effects in the coastal area of the estuary.

(本文编辑: 赵卫红)