

浙江近岸海域表层沉积物中磷的存在形态及其分布特征

安明梅¹, 王益鸣², 郑爱榕^{1*}

(1. 厦门大学 海洋与环境学院, 福建省高校海洋化学及应用技术重点实验室, 福建 厦门 361005;

2. 浙江省舟山海洋生态环境监测站, 浙江 舟山 316000)

摘要: 运用 SEDEX 方法分析了浙江近岸海域表层沉积物中总磷(TP)及磷在各提取相的含量和分布. 研究表明, 表层沉积物中 TP 含量为 432.2~846.1 mg/kg, 平均为 (533.2 ± 90.1) mg/kg; 弱吸附态磷(Ads-P)、铁结合态磷(Fe-P)、自生磷灰石及钙结合态磷(Ca-P)、碎屑态磷(De-P)和有机磷(OP)平均含量分别为 6.2, 93.2, 12.4, 295.0 和 66.5 mg/kg, 分别占 TP 的 1.2%, 17.7%, 2.4%, 56.7%, 和 12.7%. 沉积物的 Ads-P、Ca-P 和 OP 与其粒度和有机碳含量呈显著正相关, De-P 则呈负相关. 各站位沉积物中磷在不同提取相中的含量差异较大, 与沉积物的陆源输入、沉积物粒径及沉积海域的水动力条件等因素有关.

关键词: 磷; 分布特征; 沉积物; 浙江近岸

中图分类号: X 142

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2012)01-0077-07

磷是海洋浮游植物生长的重要营养元素, 也是引发水体富营养化的重要因素. 近年来, 东海、黄海近岸区域由富营养化引起的赤潮灾害爆发频率逐年增加, 导致海洋生物系统退化. 海底沉积物是海水磷的“源”与“汇”, 它既可接受来自水体的磷, 也可以在适当的条件下向上覆水体释放磷, 从而进一步加剧水体的富营养化水平. 因此, 沉积物在生源要素磷的循环过程中起着十分重要的作用. 又因为磷在沉积物-水界面的迁移转化和交换机制受磷形态的影响^[1], 所以研究沉积物中磷的形态有助于理解沉积物中磷的循环过程与再生机制, 为生态环境评价提供根据, 并且有助于评价沉积物中磷的交换和生物可获性, 记录水体营养状态, 了解成岩过程和估计成岩速率等^[2]. 研究沉积物中磷形态的目的之一是定量生物可获得磷, 生物可获得磷包括沉积物中可以释放并参与水体磷再循环的部分. 这部分磷影响水体的营养状态及初级生产力, 与沉积物-水界面磷的交换有密切关系. 因此, 磷的形态分析可以给出潜在的生物可获得磷的上限^[2]. 本文运用 SEDEX 方法^[3]对浙江近岸表层沉积物中的磷进行了总磷(TP)和磷的不同地球化学赋存形态的分级浸提, 研究了磷的弱吸附态(Ads-P)、铁结合态(Fe-P)、自生磷灰石及钙结合态(Ca-P)、碎屑态(De-P)和有机态(OP)的

分布特征, 并探讨了沉积物磷的来源, 可为浙江沿岸水体富营养化的控制与赤潮发生的预防以及海洋环境保护提供基础数据.

1 调查海域、样品采集及处理

1.1 调查海域概况

本调查海域为浙江近岸海域, 位于东海西北部的陆架浅海区, 范围在 $27^{\circ} \sim 32^{\circ} \text{N}$ 和 $120^{\circ} \sim 123^{\circ} \text{E}$ 之间, 自北向南分布着长江口, 杭州湾, 象山湾, 三门湾, 台州湾, 乐清湾和温州湾; 其中杭州湾, 三门湾和乐清湾是半封闭型海湾. 调查海域海底地形总体上呈西北高东南低的态势, 由长江径流冲刷形成的河槽状地形发育, 自口门向外 30~50 m 等深线附近以潮流作用为主, 现代长江水下三角洲发育. 现代长江水下三角洲的表面地形平缓, 延伸坡度约 35° . 沉积厚度 10~40 m. 细沙、粉砂和粉砂质淤泥组成完整的三角洲沉积体系. 由于受海洋外部因素(如气象、径流和地理条件等)以及外海水等因素的影响, 调查海域水文要素的时空变化剧烈, 均一性和保守性较之深海或大洋差, 故水团有不同程度的变性^[4].

1.2 样品采集与处理

调查海域的表层沉积物样品于 2009 年 4 月乘“浙海环监号”科考船采集, 共布设 60 个站位, 站位分布见图 1. 用抓斗式采泥器采集表层样品(0~2 cm). 并测

收稿日期: 2011-03-14

基金项目: 浙江省环保科研计划项目(2008-30)

* 通信作者: arzheng@xmu.edu.cn

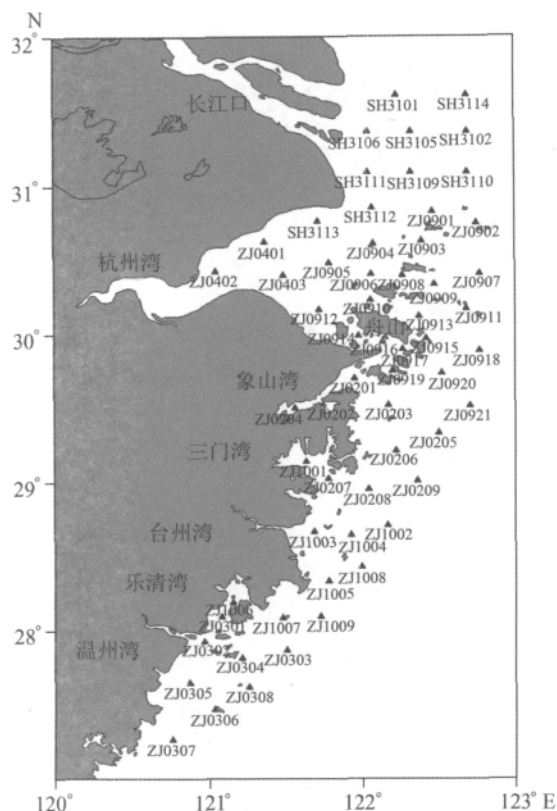


图1 表层沉积物采样站位示意图

Fig. 1 Sampling stations of surface sediments

定氧化还原电位(E_h)。样品现场立即密封冷冻,运回实验室后进行冷冻干燥,过160目筛后备用。

1.3 样品提取与分析

本研究沉积物样品中各种地球化学赋存形态磷的分级提取采用 SEDEX 方法^[3],共分5种形态,分别为 Ads-P, Fe-P, Ca-P, De-P 和 OP, 分级提取流程见图2。沉积物样品 TP 用凯式法消解^[5];浸取液中的磷用磷钼蓝法测定^[5],吸光值用 723S 型分光光度计测定,误差小于±5%。具体方法:浸取液全量转移到 100 mL 的容量瓶中,定容至 100 mL,取 25 mL 定容液体于 25 mL 比色管中,加入 0.5 mL 混合溶液,显色 5 min 后,注入 5 cm 比色皿中,以蒸馏水作参比,于 882 nm 波长处测定其吸光值 A。沉积物有机碳测定用重铬酸钾氧化-还原滴定法^[5]。硫化物测定用碘量法, E_h 用电极法现场测定,粒度分析根据沉积物粒度 GB/T 13909—1992 用 Microtrac 激光粒度仪 S3500 仪器测定,本文采取 ϕ 标准, $\phi = -\log_2 d$,用 1ϕ 、 4ϕ 、 8ϕ 作为砾、砂、粉砂、泥的分级标准^[6],重金属 Fe、Mn、Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 As 的测定按《海洋监测规范》^[7]的方法。

沉积物中无机磷(IP)的计算如下:

$$C_{IP} = C_{Ads-P} + C_{Fe-P} + C_{Ca-P} + C_{De-P},$$

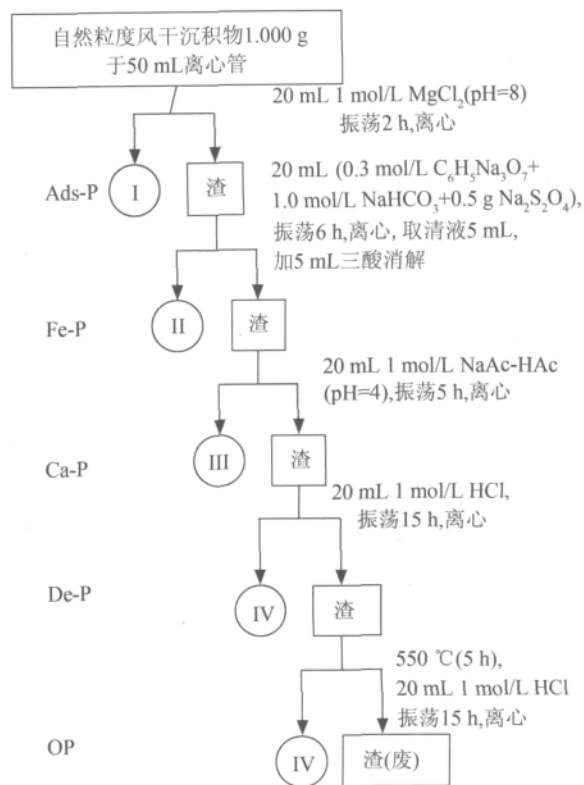


图2 沉积物中磷的分级浸取示意图

Fig. 2 Sequential extraction process of phosphorus in sediment

其中, C_{Ads-P} 、 C_{Fe-P} 、 C_{Ca-P} 和 C_{De-P} 分别为 Ads-P、Fe-P、Ca-P 和 De-P 的浓度。

2 结果与讨论

2.1 TP 的含量、分布及其特征

调查海域表层沉积物中 TP 含量范围为 432.3~846.1 mg/kg,平均为 (533.2 ± 90.1) mg/kg,其中浙江沿岸区域(站位号为 ZJ)TP 含量范围为 434.7~758.7 mg/kg,平均为 (531.1 ± 81.8) mg/kg;而长江口区域(站位号为 SH)TP 含量范围为 432.2~846.1 mg/kg,平均为 (544.7 ± 131.4) mg/kg。这些区域的含量明显高于长江口及近岸海域表层沉积物中的 TP (225.7~488.6 mg/kg,平均为 402.7 mg/kg)^[8],低于长江中下游 7 个浅水湖泊(217.8~3 337.2 mg/kg,平均为 757.0 mg/kg)^[9]和长江口沙洲(437.6~1 103.7 mg/kg,平均为 678.7 mg/kg)^[10]和长江口(699.0 mg/kg)^[11]以及长江口潮滩(539.6~3 379.5 mg/kg)^[12]表层沉积物中的 TP 含量。与我国其他海域相比,调查海域的 TP 含量高于黄、渤海沉积物中 TP 的含量(232.8~616.6 mg/kg,平均为 441.4 mg/kg)^[13]以及珠江口表层沉积物中 TP 含量(340~581 mg/kg,

平均为 455.9 mg/kg [14], 而与东海特定海区表层沉积物中 TP 的含量 ($416.5 \sim 697.4 \text{ mg/kg}$, 平均为 548.9 mg/kg) [15] 相差不大。

TP 的平面分布 (图 3) 总体呈现出近岸低、离岸高的趋势, 存在 5 个浓度由外向内增高的“同心圆”, 由北向南依次分布在长江口外、舟山湾、舟山群岛东面海域、鱼山渔场和台州湾。长江口外出现浓度递增“同心圆”的原因是长江水的流入带来陆源大量的营养, 使得该区域沉积物中磷含量居高; 舟山湾和台州湾的“同心圆”分布也与陆源输入有关。舟山湾沉积物受舟山沿岸陆源输入以及杭州湾水体输入的影响; 台州湾受湾内浙江中部最大港口——海门港的影响, 港口附近人口密集, 人类活动频繁, 陆源排放影响极大。而舟山渔场、舟山群岛东面海域和鱼山渔场的“同心圆”分布则与渔场分布有关。舟山渔场和鱼山渔场处于台湾暖流和浙江沿岸水交汇处, 是盛行上升流的沉积区, 沉积物中的磷来自海洋内部的生物效应, 受沉积物粒度效应控制。总体而言, 浙江近岸海域表层沉积物 TP, 除长江口、舟山湾和台州湾内外, 陆源性输入不强。

2.2 Ads-P 的含量、分布及其特征

沉积物中 Ads-P 是指被吸附在沉积物中、易水解或易溶解的磷, 它可被水、稀电解质溶解、离子交换树脂或同位素 ^{32}P 等置换出来, 主要来源于水生颗粒, 即沉降颗粒的吸附或生物碎屑的再生 [16]。沉积物中 Ads-P 含量是各种磷形态中最少, 但却是磷酸盐交换的主体, 最易被释放而参与循环和被生物所利用。调查海域

表层沉积物中 Ads-P 的含量变化范围为 $2.5 \sim 9.9 \text{ mg/kg}$, 平均为 $(6.2 \pm 1.4) \text{ mg/kg}$, 含量较低, 仅占 TP 的 $0.5\% \sim 2.0\%$, 平均为 1.2% 。其中最高值出现在温州湾外 ZJ0308 站位, 最低值出现在杭州湾北面湾口的 SH3113 站位。调查海域 Ads-P 含量的平面分布 (图 3) 与 TP 的分布相似, 整体呈现近岸低、远岸高的特点, 南面的温州湾最为明显。在杭州湾以南的舟山群岛东面、三门湾、台州湾和温州湾远离岸边的海域外均分布着浓度由外向内递增的高值区, 并且高值区的浓度越往南面越高, 表明该区域可被生物所利用磷含量均很高。在调查海域的杭州湾以北、长江口以南的海域 Ads-P 出现极低值 (2.5 mg/kg , SH3114 站位), 说明调查海域的 Ads-P 主要源于水生颗粒。该含量与长江口潮滩沉积物的 Ads-P 含量范围 ($2.4 \sim 12.2 \text{ mg/kg}$) [16] 较接近, 稍微高于长江口沙洲表层沉积物中的 Ads-P ($0.5 \sim 4.8 \text{ mg/kg}$, 平均为 1.8 mg/kg) [10] 及长江中下游地区湖泊沉积物的 Ads-P 的平均值 (2.4 mg/kg) [17], 但总体相差不是很大。

将表层沉积物 Ads-P 含量与表层沉积物粒度进行相关分析 (表 1) 发现, 两者呈显著正相关 ($r = 0.569, p < 0.01$), 说明 Ads-P 含量与表层沉积物的比表面积有关。即, 粒径小的颗粒表面积大, 表面容易吸附 Ads-P [10, 18]。此外, Ads-P 含量与表层沉积物中有机碳含量成正相关 ($r = 0.629, p < 0.01$), 因为磷的吸附与有机质的累积和降解有关。从表 1 还发现, Ads-P 含量与沉积环境中的重金属 (Fe、Mn、Cu、Pb、

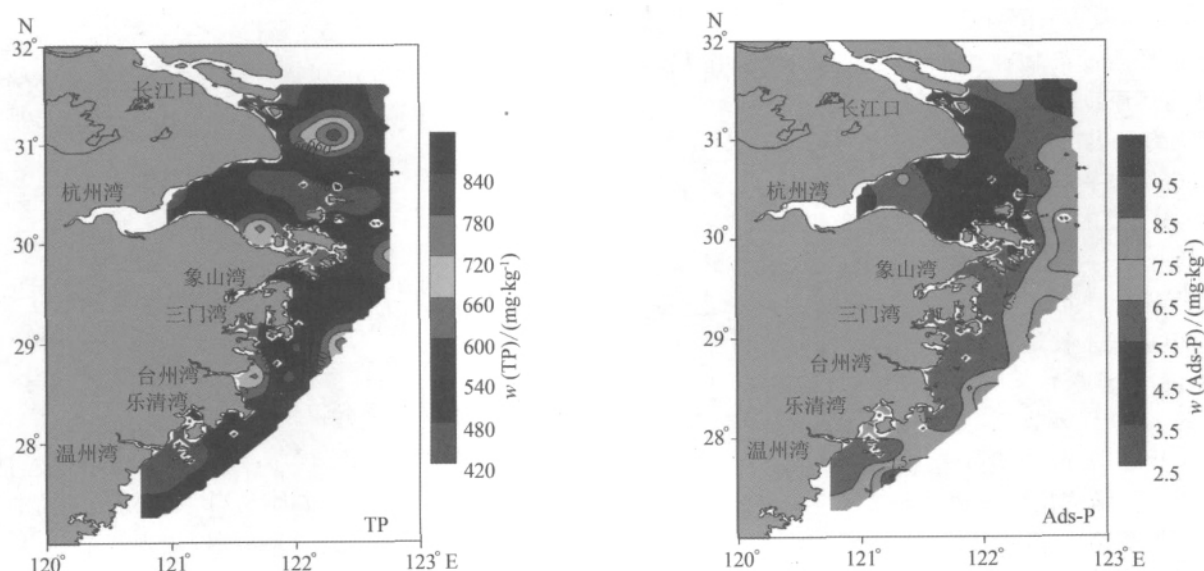


图 3 表层沉积物 TP 及 Ads-P 的平面分布图

Fig. 3 Distribution of total phosphorus and weakly adsorbed phosphorus in surface sediment

表 1 浙江近岸海域表层沉积物中不同形态磷与环境的相关性($n=57$)Tab. 1 The correlativity between environmental parameters and different forms of phosphorus in surface sediment in Zhejiang offshore($n=57$)

要素	Ads-P	Fe-P	Ca-P	De-P	OP
温度	0.287*	-0.11	-0.022	-0.222	0.410**
粒度	0.569**	-0.039	0.333*	-0.590**	0.616**
pH	0.15	-0.18	0.027	-0.172	0.183
溶解氧	-0.351**	0.156	-0.333*	0.269*	-0.2
E_h	-0.156	-0.031	-0.013	0.139	-0.013
有机碳	0.629**	-0.167	0.430**	-0.715**	0.716**
硫化物	-0.228	0.199	-0.066	0.012	-0.028
Fe	0.514**	-0.157	0.324*	-0.651**	0.688**
Mn	0.291*	-0.086	0.058	-0.506**	0.599**
Cu	0.368**	-0.03	0.175	-0.602**	0.614**
Pb	0.427**	-0.028	0.151	-0.600**	0.681**
Zn	0.345**	0.05	0.122	-0.586**	0.554**
Cd	-0.206	0.380**	-0.203	-0.081	-0.058
Cr	0.361**	-0.136	0.458**	-0.398**	0.319*
As	0.412**	-0.067	0.129	-0.512**	0.604**

注: ** 显著相关($p < 0.01$); * 相关($p < 0.05$).

Zn、Cr 和 As)含量有关,这可能是因为这些重金属可以与磷发生络合反应.

2.3 Fe-P 的含量、分布及其特征

在磷的各种形态中,Fe-P 具有重要的环境意义,因为它不仅是 IP 的重要组成,而且可以从其含量和分布推测污染物种类、沉积物地质类型、沉积环境的氧化还原度等重要信息.

调查海域表层沉积物中 Fe-P 含量范围为 45.3~149.2 mg/kg,平均为(93.2±27.6) mg/kg,变化幅度较大. Fe-P 占 IP 的 11.7%~33.0%,平均为 22.7%;占 TP 的 9.2%~29.8%,平均为 17.7%. 此值略高于长江口沙洲表层沉积物中的 Fe-P(20.0~101.2 mg/kg)^[10];但远低于长江中下游浅水湖泊沉积物(327.3~2139.1 mg/kg)^[19]及长江口潮滩沉积物(97.8~620.8 mg/kg)^[20]调查所得的 Fe-P 含量. 一般而言,沉积物污染程度与 Fe-P 含量呈正相关^[21],上述结果表明浙江近岸海域表层沉积物受外来污染程度较低.

表层沉积物中 Fe-P 的平面分布(图 4)呈现北部高南部低、近岸高远岸低的特点,这种平面分布规律表明 Fe-P 含量明显受陆源输入的影响. 在长江口、舟山群岛周边和台州湾出现 Fe-P 含量的极高值和高值区,

与沿岸径流所携带的泥沙、营养盐以及污染物的排放影响有关. 离岸最远处出现的极低值验证了 Fe-P 含量可以作为沉积环境污染程度的指示因子^[21].

2.4 Ca-P 的含量、分布及其特征

沉积物中 Ca-P 主要是指自生钙磷,由水体中浮游生物的骨骼碎屑在沉积物中矿化形成. 调查海域表层沉积物中 Ca-P 含量范围为 5.8~20.4 mg/kg,平均为(12.4±2.7) mg/kg,比长江口沙洲表层沉积物(6.0~42.5 mg/kg,平均为 21.6 mg/kg)^[10]略低. Ca-P 占 IP 的 1.2%~5.7%,平均为 3.1%;占 TP 的 1.2%~4.2%,平均为 2.4%;略低于夏季长江口潮滩沉积物占 TP 的比例(4.99%)^[16],说明海区的生物骨骼碎屑是浙江近岸表层沉积物中 Ca-P 的重要来源.

调查海域表层沉积物中 Ca-P 的平面分布(图 4)呈现远岸高、近岸低的特点,杭州湾、长江口和乐清湾尤为明显. 在舟山群岛北面的 ZJ0904 站周围及浙江南部海域乐清湾外的 ZJ1009 站周围出现两个 Ca-P 极高值区域,印证了海区 Ca-P 具有自生性的特点,说明陆源输入影响较弱. 因为 ZJ0904 站位和 ZJ1009 站位分别是浙江近岸海域著名的舟山渔场和温台渔场的中

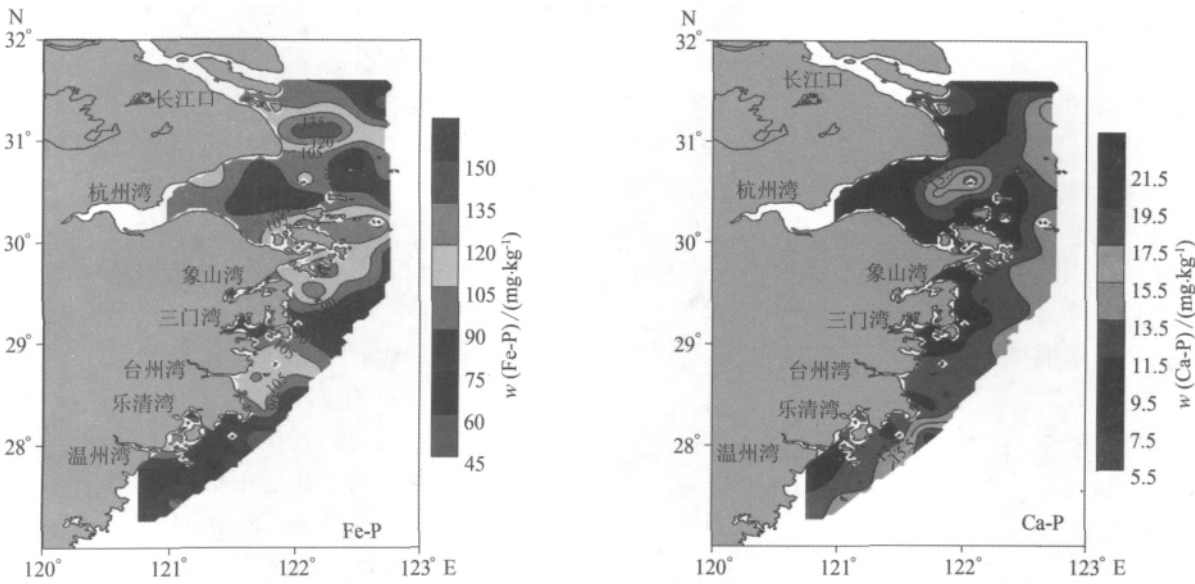


图 4 表层沉积物 Fe-P 及 Ca-P 平面分布图

Fig. 4 Distribution of iron phosphorus and calcium phosphorus in surface sediment

心,说明调查海域表层沉积物中的 Ca-P 主要来源于浮游生物的骨骼碎屑.

调查海域内 Ca-P 的含量与表层沉积物粒度呈显著正相关($r=0.333, p<0.05$)(表 1),表明表层沉积物颗粒越细,所含 Ca-P 含量越高. Ca-P 含量与表层沉积物中有机碳的含量亦成正相关($r=0.430, p<0.01$)(表 1),说明 Ca-P 含量与有机质累积和降解有关^[22].

2.5 De-P 的含量、分布及其特征

De-P 主要来源于岩浆岩或变质岩. 调查海域表层

沉积物中 De-P 含量范围为 222.8~377.1 mg/kg,平均为(295.0±35.0) mg/kg. De-P 占 IP 的 61.2%~82.8%,平均为 72.6%,是 IP 含量的优势组分;占 TP 的 29.4%~81.9%,平均为 56.7%,说明此海域 De-P 具有明显的海相沉积特点. 调查海域表层沉积物中 De-P 的平面分布(图 5)与 Ca-P 相似,呈现明显的远岸高、近岸低的特点. 在舟山群岛北面海域、长江口、三门湾和乐清湾均出现高值区,其中极高值在舟山群岛北面海域,这印证了 De-P 海相沉积的特点,与表层沉积物的粒度和海域水文条件有关.

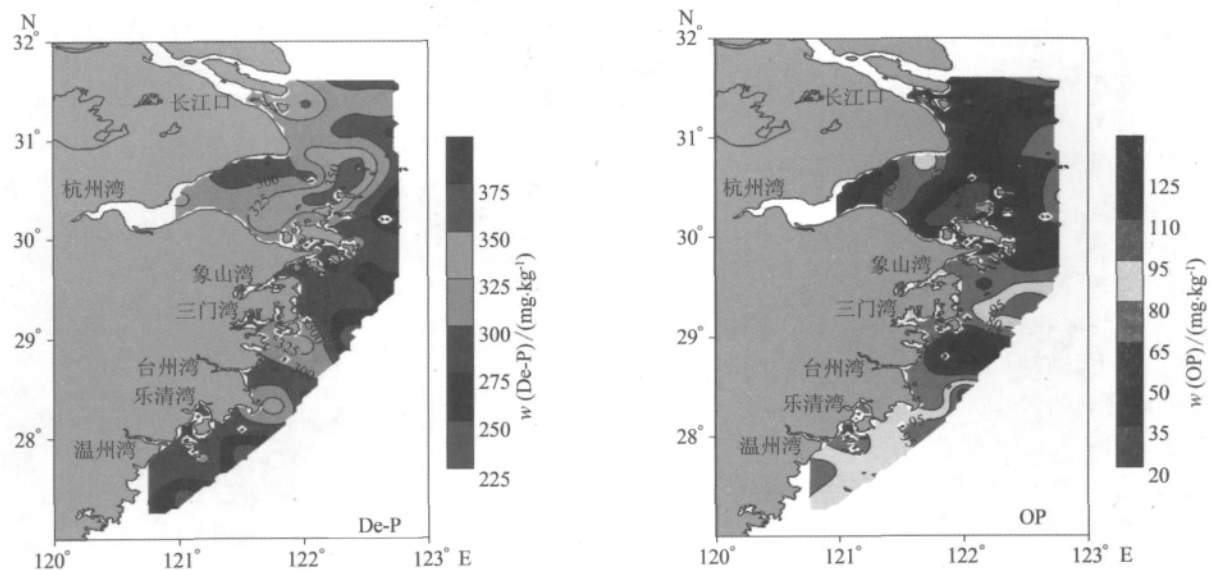


图 5 表层沉积物 De-P 及 OP 平面分布图

Fig. 5 Distribution of detritus phosphorus and organic phosphorus in surface sediment

调查海域表层沉积物 De-P 含量与表层沉积物粒度存在显著负相关($r = -0.590, p < 0.01$) (表 1), 表明表层沉积物颗粒越细, De-P 含量越少, 即 De-P 含量与表层沉积物比表面积无关, 这可能与其主要来源于岩石的风化产物——碎屑磷灰石有关^[10,22]. 因为 De-P 主要来源于岩浆岩或变质岩, 所以岩石风化使得 De-P 的含量增加. 调查海域表层沉积物 De-P 含量与有机碳含量成负相关($r = -0.715, p < 0.01$) (表 1), 说明有机质的累积和降解影响岩石的风化, 进而影响 De-P 的含量.

2.6 OP 的含量、分布及其特征

调查海域表层沉积物中 OP 含量范围为 22.1~123.3 mg/kg, 平均为 (66.5 ± 25.4) mg/kg, OP 占 TP 的 3.8%~22.3%, 平均为 $(12.8 \pm 5.3)\%$, 变化幅度较大. 调查海域表层沉积物中 OP 的平面分布(图 5)呈现出北部低南部高的特点. 在温台渔场的 ZJ0305 站位、象山湾附近的 ZJ0205 站位、杭州湾北岸周围海域出现 OP 含量的极高值, 原因是受陆源输入及生物活动的影响, 可能成为水体潜在的磷源, 影响海区磷含量.

表层沉积物中 OP 含量与表层沉积物粒度存在显著正相关($r = 0.616, p < 0.01$) (表 1), 表明表层沉积物颗粒越细, 即表面积越大, OP 含量越高. 调查海域内 OP 含量与有机碳含量显著正相关($r = 0.716, p < 0.01$) (表 1), 表明表层沉积物 OP 含量与有机质的累积和降解有关.

2.7 各种提取形态磷含量的相对大小及生物可利用性

由浙江近岸海域表层沉积物中 5 种形态磷含量占 TP 的比例可知, 5 种形态磷含量的大小顺序为: De-P > Fe-P > OP > Ca-P > Ads-P. Ads-P 来源较广, 主要源自水生颗粒, 温度、盐度、溶解氧和有机碳浓度是影响其含量的重要因子. Fe-P 含量受陆源输入影响, 并可以作为沉积环境污染程度的指示因子. Ca-P 主要来源于浮游生物的骨骼碎屑, 与有机碳有着相似的成岩机理, 具有明显的海相沉积特点. De-P 主要来源于岩浆岩或变质岩, 也具有明显的海相沉积特点. OP 受陆源输入及生物活动的影响, 可能成为水体潜在的磷源, 影响海区海洋生物及海水养殖的生态环境.

沉积物中生物可利用磷是指以溶解态磷酸盐释放, 并被藻类生长所利用的那部分磷. 生物有效性可通过生物鉴定来评价, 然而, 通过不同形态磷含量的研究可以确定生物可利用磷的上限.

长江口潮滩沉积物中生物可利用磷的研究结

果^[16]表明, 各形态磷中 Ads-P、Fe-P、OP 是潜在的生物有效性磷. 由于 Ads-P 是可以被生物直接利用的, 而其他两种形态是潜在的可利用磷, 所以 Ads-P 是各形态磷中最主要的形态磷. 当上覆水体中磷酸盐含量较高时, 可以将水体中的磷酸盐吸附在颗粒表面, 从而减小富营养化发生的可能性; 反之, 当上覆水体中磷酸盐含量较低时, 可以释放到水体中, 满足浮游植物的生长需要. Fe-P 在还原的沉积环境中能释放磷酸盐, 可供浮游植物吸收利用; 当环境趋于氧化性时, 水体中的磷酸盐可以氧化为 Fe-P. OP 也可以通过矿化作用释放磷酸盐, 被浮游植物利用.

调查海域表层沉积物中 Ads-P、Fe-P 和 OP 含量分别为 2.5~9.9 mg/kg、45.3~149.2 mg/kg 和 22.1~123.3 mg/kg, 三者之和为 76.3~213.9 mg/kg, 占 TP 的 17.7%~43.5%, 平均约占 TP 的 $(31.6 \pm 6.0)\%$, 变化幅度较小. 虽然生物可利用性磷只占 TP 的一小部分, 但对于浮游生物的生长具有重大的影响. 在沉积物-海水界面的微环境的共同作用下, 潜在生物利用磷会被释放、进入水体或通过生物转化在不同程度上促进藻类生长, 影响水体的营养水平和初级生产力.

3 结 论

1) 浙江沿岸表层沉积物中的 TP 含量为 432.3~846.1 mg/kg, 平均为 (533.2 ± 23.9) mg/kg, 无机磷是其主要的存在形式. 无机磷中 De-P 是其主要形态. 5 种形态磷含量的大小顺序为: De-P > Fe-P > OP > Ca-P > Ads-P. 潜在生物利用性磷含量占 TP 含量的 31.6%.

2) 表层沉积物粒度和有机碳含量对不同形态磷的影响各不相同, 表层沉积物粒度与 Ads-P、Ca-P 和 OP 显著正相关, 与 De-P 负相关; 表层沉积物有机碳含量与 Ads-P、Ca-P 和 OP 正相关, 与 De-P 负相关.

参考文献:

- [1] Sundby B, Gobeil C, Silverberg N, et al. The phosphorus cycle in coastal marine sediments[J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37(6): 1129-1145.
- [2] 刘素美, 张经. 沉积物中磷的化学提取分析方法[J]. *海洋科学*, 2001, 25(1): 23-25.
- [3] Ruttenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, 37(7): 1460-1482.

- [4] 张启龙,王凡.舟山渔场及其邻近海域水团的气候学分析[J].海洋与湖沼,2004,35(1):48-54.
- [5] 国家海洋局 908 专项办公室.海洋化学调查技术规程[M].北京:海洋出版社,2006.
- [6] 刘宝珺.沉积岩石学[M].北京:地质出版社,1908:307.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 17378.5—2007 海洋监测规范 第 5 部分:沉积物分析[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [8] 吕晓霞,翟世奎,于增慧.长江口及邻近海域表层沉积物中营养元素的分布特征及其控制因素[J].海洋环境科学,2005,24(3):1-5.
- [9] 金相灿,庞燕,王圣瑞,等.长江中下游浅水湖沉积物磷形态及其分布特征研究[J].农业环境科学学报,2008,27(1):279-285.
- [10] 侯立军,陆健健,刘敏,等.长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性[J].环境科学学报,2006,26(3):488-494.
- [11] 杨光复.三峡工程对长江口区沉积结构及地球化学特征的影响[C]//海洋科学集刊:三峡工程对长江口区生态与环境影响调查研究专辑.北京:科学出版社,1992:69-78.
- [12] 刘绿叶,高效江,陈卓敏,等.长江口潮流沉积物中磷的分布和形态特征[J].复旦学报:自然科学版,2005,44(6):1033-1036.
- [13] 冯强,刘素美,张经.黄、渤海区沉积物中磷的分布[J].海洋环境科学,2001,20(2):24-27.
- [14] 岳维忠,黄小平,孙翠慈.珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J].海洋与湖沼,2007,38(2):111-117.
- [15] 郑丽波,叶瑛周,怀阳王,等.东海特定海区表层沉积物中磷的形态、分布及其环境意义[J].海洋与湖沼,2003,34(3):274-282.
- [16] 刘敏,许世远,侯立军.长江口潮流沉积物-水界面营养盐环境生物地球化学过程[M].北京:科学出版社,2007:6-270.
- [17] 秦伯强,朱广伟.长江中下游地区湖泊水和沉积物中营养盐的赋存、循环及其交换特征[J].中国科学 D 辑,2005,35:1-10.
- [18] 刘敏,侯立军,许世远,等.长江河口潮流表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J].地理学报,2002,57(4):397-406.
- [19] 朱广伟,秦伯强,高光,等.长江中下游湖泊沉积物中的磷的形态及其与水相磷的关系[J].环境科学学报,2004,24(3):381-388.
- [20] 刘敏,欧冬妮,侯立军.河口潮流沉积物磷的季节性累积和生物有效性[J].海洋科学,2007,31(2):20-26.
- [21] 吴峰伟,汪福顺,吴明红,等.滇池、红枫湖沉积物中总磷、分态磷及生物硅形态与分布特征[J].生态学杂志,2009,28(1):88-94.
- [22] 李敏,韦鹤平,王光谦,等.长江口、杭州湾水域沉积物中磷的化学形态分布特征[J].海洋学报,2004,26(2):125-131.

Study of Chemical Forms of Phosphorus and Their Distributions in the Surface Sediment in Zhejiang Offshore

AN Ming-mei¹, WANG Yi-ming², ZHENG Ai-rong^{1*}

(1. Fujian Universities Marine Chemistry and Applied Technology Key Laboratory, College of Oceanography and Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Zhoushan Marine Ecology Environmental Monitoring Station, Zhoushan 316000, China)

Abstract: Total phosphorus and its related forms in the surface sediment in Zhejiang offshore were studied by SEDEX method. The results showed that the content of total phosphorus (TP) in the surface sediment was 432.2-846.1 mg/kg, and average content was (533.2 ± 90.1) mg/kg, and the average content of weakly absorbed phosphorus (Ads-P), iron phosphorus (Fe-P), calcium phosphorus (Ca-P), detritus phosphorus (De-P) and organic phosphorus (OP) were 6.2, 93.2, 12.4, 295.0 and 66.5 mg/kg, respectively, and the percentage composition of TP were 1.2%, 17.7%, 2.4%, 56.7% and 12.7%, respectively. The content of different forms of phosphorus in different sites was mainly influenced by terrigenous inputs, sediment grain size and hydro-dynamics. There are significant positive correlations between sediment grain size, organic carbon and Ads-P, Ca-P, OP; and negative correlations between sediment grain size, organic carbon and De-P.

Key words: phosphorus; distribution; sediments; Zhejiang offshore