

桑沟湾沉积物中磷的赋存形态及生物有效性

蒋增杰^{1,2,3}, 方建光^{3*}, 张继红³, 毛玉泽³, 王巍³

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266003; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所农业部渔业资源可持续利用重点开放实验室, 青岛 266071)

摘要:以桑沟湾表层沉积物为研究对象, 利用连续提取法对 8 个采样点沉积物中磷的赋存形态、含量及分布特征进行了研究, 并探讨了磷的生物有效性. 结果表明: ①无机磷(IP)是桑沟湾表层沉积物中磷(TP)的主要形态, 平均占总磷的 73.33%, 有机磷(OP)只占较小的比例. ②无机磷中钙结合磷占的比例相对较大, 平均占总磷的 45.22%, 是沉积物中磷的主要赋存形态, 可交换磷、铁结合磷、碎屑磷占总磷的比例分别为 9.92%、4.74%、13.46%. ③对各形态磷的相关分析结果表明, 总磷的含量及空间分布主要受有机磷的影响与控制($p < 0.05$), 无机磷受自生钙结合磷的影响较大($p < 0.01$). ④磷的生物有效性分析结果表明, 桑沟湾表层沉积物中潜在生物有效性磷的含量为 358.05 ~ 448.39 $\mu\text{g/g}$, 平均占总磷的 86.54%, 具有很强的释磷潜力.

关键词:沉积物; 磷; 赋存形态; 生物有效性; 桑沟湾

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)12-2783-06

Forms and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments from Sungo Bay

JIANG Zeng-jie^{1,2,3}, FANG Jian-guang³, ZHANG Ji-hong³, MAO Yu-ze³, WANG Wei³

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Open Key Laboratory of Fishery Resource Sustainable Utilization, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Forms and bioavailability of phosphorus in the sediments of eight sampling sites from Sungo Bay were analyzed by means of sequential extraction method (SEDEX). Results showed that: ①The main form of total phosphorus (TP) in sediments was inorganic phosphorus (IP), which accounted for 73.33% and organic phosphorus (OP) was only the minor part. ②Among different forms of inorganic phosphorus, calcium-phosphorus (Ca-P) was the dominant forms, accounted for 45.22% of total phosphorus while organic phosphorus, adsorbed-phosphorus (Ads-P), iron-phosphorus (Fe-P) and detritus-phosphorus (Detr-P) was 26.67%, 9.92%, 4.74% and 13.46% respectively. ③The correlation analysis among different phosphorus forms suggested that the concentrations and distribution of total phosphorus were mainly controlled by organic phosphorus ($p < 0.05$), while inorganic phosphorus was affected by calcium-phosphorus ($p < 0.01$). ④Bioavailable phosphorus in sediments ranged from 358.05 $\mu\text{g/g}$ to 448.39 $\mu\text{g/g}$ and occupied 86.54% of the total phosphorus pool.

Key words: sediments; phosphorous; forms; bioavailability; Sungo Bay

沉积物是磷等营养盐的重要蓄积库或释放源^[1,2]. 目前, 国内外学者们对沉积物中磷的累积、迁移释放和循环等地球化学行为方面开展了大量的研究, 结果表明, 水体中的磷进入沉积物后, 并不是简单地堆积, 在形成稳定的磷矿物而被永久埋藏前, 沉积磷要发生非常明显的形态转化和再迁移^[3-5]. 沉积物中总磷含量并不能有效预测其潜在的供磷能力, 研究发现沉积物中能参与界面交换及生物可利用磷的含量取决于磷在沉积物中存在的化学形式(也称地球化学相), 不同形态磷的释放能力差别较大, 它们具有不同的地球化学行为和生物有效性^[6-8]. 在评价沉积物的潜在释磷能力以及释放不同形态的磷对藻类生长的可利用性等方面, 研究磷的不同赋存形态比单一估计总磷含量更有意义^[9,10], 活性含磷组分的再生活化, 会导致沉积物向水体的磷释放, 成为控制水域营养状况及诱发富营

养化的重要因素^[11], 磷的地球化学形态已成为判别沉积物中磷的迁移能力^[12]、生物有效性^[13,14]的重要参数.

桑沟湾位于山东半岛东端(37°01' ~ 37°09' N, 122°24' ~ 122°35' E), 为半封闭海湾, 北、西、南三面为陆地环抱, 湾口朝东, 口宽 11.5 km, 湾内总面积约 133 km², 平均水深 7 ~ 8 m, 是中国北方重要的水产养殖海区. 有关该区域沉积物中氮磷营养盐的含量分布、溶出动力学及沉积物-水界面营养盐的扩散通量已有报道^[15-18], 但这些研究都是对氮磷营养盐总量的测定, 还鲜见有磷的不同化学形态研究的报道. 本

收稿日期: 2007-01-31; 修订日期: 2007-06-18

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2006CB400608); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA100304)

作者简介: 蒋增杰(1978 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋生态学, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: fangjg@ysfri.ac.cn

试验以桑沟湾表层沉积物为研究对象,利用连续提取法(SEDEX)^[19]对桑沟湾表层沉积物中磷的赋存形态及分布特征进行了分析,以期获得桑沟湾沉积环境信息,揭示沉积物中磷的行为特征、沉积物-水界面磷的交换机制及成岩过程等环境地球化学行为。

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

2006-11 在桑沟湾布设了 8 个沉积物采样点(图 1),用抓斗式底泥采样器采集表层(0~5 cm)沉积物,封存于聚乙烯袋中,立即置于装有冰块的泡沫箱中,冷藏带回实验室后冷冻保存。

在实验室中将样品解冻混匀后,在恒温干燥箱中 60℃ 烘干,研磨后过 80 目筛,双层封存于干净的聚乙烯袋中,储藏于干燥器中备用。

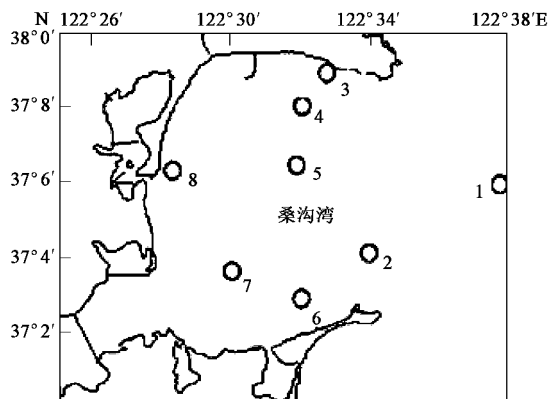


图 1 调查海区及采样点

Fig.1 Area of survey and sampling sites

1.2 分析方法

1.2.1 样品处理及测定

有机磷(OP):分别称取 2 份 1.00 g 沉积物样品,对其中 1 份进行灰化(灰化温度 500℃,灰化时间 2 h),然后利用酸提法(0.5 mol/L H_2SO_4 ,提取时间 16 h)分别对其中的总磷(TP)和无机磷(IP)进行提取和分析,最后由总磷和无机磷的差值获得有机磷(OP)的含量。

无机磷(IP):准确称取 0.20 g 沉积物样品,置于 50 mL 离心管中,按如下步骤提取无机磷。

(1)可交换磷(Ads-P) 往离心管中加 1 mol/L $MgCl_2$ 溶液(pH 为 8.0)25 mL,在振荡器上连续振荡提取 2 h 后,于 4 000 r/min 离心 20 min 分离出上清液,再用 25 mL $MgCl_2$ 溶液重复提取 1 次,再用 25 mL 去离子水代替 $MgCl_2$ 溶液重复以上操作 1 次。合并 3

次离心出的上清液,沉淀物进入下一步实验。

(2)铁结合磷(Fe-P) 在上一步提取所剩下的沉积物样品中,加入 25 mL CDB 溶液(柠檬酸钠-连二亚硫酸钠-碳酸氢钠,pH 为 7.6),振荡 6 h,离心分离上清液,再依次用 25 mL $MgCl_2$ 溶液和 25 mL 去离子水溶液各提取 2 h。合并 3 次离心出的上清液,沉淀物进入下一步实验。

(3)自生钙结合磷(Ca-P) 在上一步提取所剩下的沉积物样品中,加入 1 mol/L 的 NaAC-HAC 缓冲液(pH 为 4.0)25 mL,连续振荡提取 6 h,离心分离上清液,再用 25 mL $MgCl_2$ 溶液代替 NaAC-HAC 缓冲液提取 1 次,提取时间 2 h。然后用 25 mL 去离子水提取 2 h,合并 3 次离心出的上清液,沉淀物进入下一步实验。

(4)碎屑磷(Detr-P) 加入 1 mol/L 的 HCl 溶液 30 mL,连续振荡提取 16 h,离心分离上清液。

用磷钼蓝法测定经分离提取的样液中磷酸盐的浓度,测定仪器为 721E 型可见分光光度计。

1.2.2 数据处理及误差控制

每个沉积物样品做 2 个平行提取,实验数据精确到小数点后 2 位,用均值和标准差表示。统计分析采用 SPSS10.0 软件进行,平行测量误差控制在 10% 以内。等值线的绘制利用 Surfer7.0 软件。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物中磷的赋存形态与含量

桑沟湾表层沉积物中各形态磷的含量如表 1 所示。从表 1 可以看出,桑沟湾表层沉积物中总磷的含量变化范围为 412.99 ~ 508.56 $\mu g/g$,平均含量 $(443.59 \pm 30.02) \mu g/g$;总磷主要由无机磷(IP)组成,平均占总磷的 73.33%,有机磷(OP)只占较小的比例;无机磷中各形态磷的含量差异比较大,以自生钙结合磷所占的比重最大,含量顺序依次为:Ca-P > Detr-P > Ads-P > Fe-P。

2.2 表层沉积物中各形态磷的平面分布

桑沟湾表层沉积物中各形态磷的平面分布见图 2。从图 2 中可以看出,沉积物中的总磷总体变化趋势表现为近岸高于外海,湾内高于湾外,呈现从外海向近岸递增的趋势,并在 7 号站位附近形成一个高值区,主要与该处开展的网箱养殖活动有关;沉积物中的有机磷的变化趋势与总磷的趋势有一定的相似之处,并同样在 7 号站位形成高值区;可交换态磷的分布较为复杂,湾中部区域含量最低,向四周辐射增高,呈现涡旋式的分布特征,在褚岛、西南部湾底、西

表 1 桑沟湾表层沉积物中各形态磷的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

Table 1 Concentrations of different phosphorous forms in surface sediments from Sungo Bay/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$

站位	总磷	有机磷	无机磷	可交换磷	铁结合磷	自生钙结合磷	碎屑磷
1	412.99	131.76	281.22	42.64	20.93	162.72	54.94
2	435.31	103.07	332.24	53.89	18.31	199.87	60.17
3	465.31	144.32	320.99	38.46	15.70	211.90	54.94
4	430.43	103.42	327.00	46.57	18.31	204.57	57.55
5	434.61	115.19	319.42	38.19	28.78	192.28	60.17
6	426.94	99.93	327.00	40.29	26.16	205.62	54.94
7	508.56	167.43	341.13	52.06	23.54	205.36	60.17
8	434.61	86.42	348.19	39.50	15.70	219.75	73.25
平均	443.59 ± 30.02	118.94 ± 26.95	324.65 ± 20.08	43.95 ± 6.21	20.93 ± 4.84	200.26 ± 17.16	59.51 ± 6.05
占总磷的比例/%	100	26.67	73.33	9.92	4.74	45.22	13.46

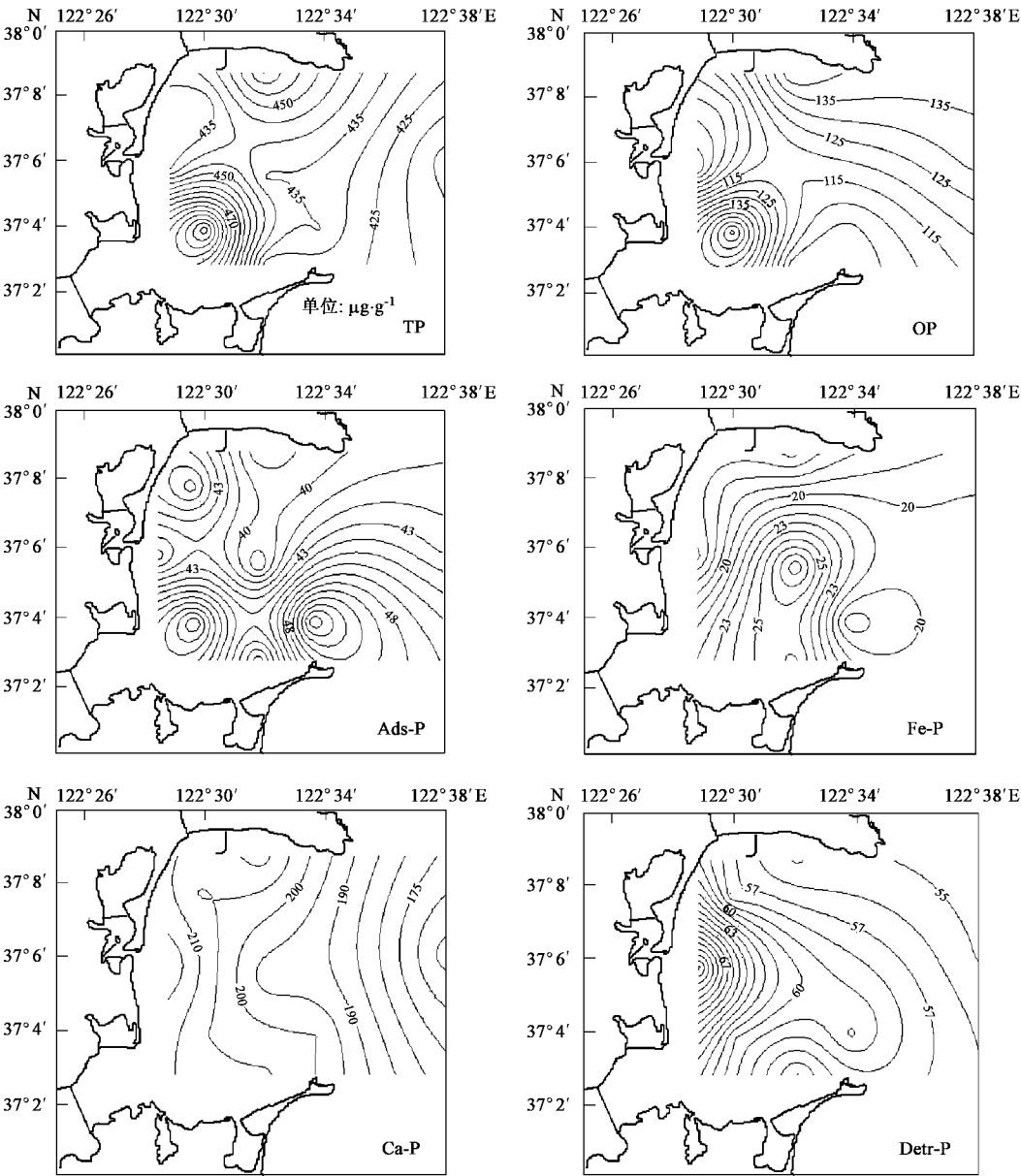


图 2 桑沟湾表层沉积物中不同磷形态的平面分布

Fig.2 Horizontal distributions of different phosphorous forms of surface sediments in Sungo Bay

北部湾底区域分别形成高值区;铁结合磷的分布表现为从近岸以及外海向湾内逐渐增大,在湾中部区域最高;自生钙结合磷和碎屑磷的分布趋势比较规则,都是从外海向湾内递增,并在近西岸区域含量达到最高.

2.3 各形态磷之间的相关关系

各形态磷含量水平之间的相关系数矩阵见表 2.该矩阵表明,总磷和有机磷之间存在着显著的相

关关系($p < 0.05$),说明沉积物中总磷和有机磷在来源上具有较好的一致性,总磷的含量及空间分布主要受有机磷的影响与控制;无机磷与自生钙结合磷的相关性很好,并且显著性水平很高($R = 0.909$),置信度在 99%的置信区间内,说明自生钙结合磷是控制无机磷变化趋势的主要因素;无机磷与碎屑磷的相关系数也较高,但显著性水平不高,可以认为随机性较大.

表 2 表层沉积物中各形态磷的相关系数矩阵¹⁾($n = 8$)

Table 2 Correlation coefficients among different phosphorous forms of sediments in Sungo Bay ($n = 8$)

磷形态	TP	OP	IP	Ads-P	Fe-P	Ca-P	Detr-P
TP	1.000	0.757 *	0.479	0.371	0.002	0.412	0.040
OP		1.000	- 0.211	0.234	0.128	- 0.218	- 0.425
IP			1.000	0.240	- 0.170	0.909 * *	0.630
Ads-P				1.000	- 0.115	- 0.035	- 0.039
Fe-P					1.000	- 0.334	- 0.300
Ca-P						1.000	0.483
Detr-P							1.000

1) * 表示显著相关性水平 $p < 0.05$; * * 表示显著相关性水平 $p < 0.01$

3 讨论

3.1 磷形态分析方法的选择

沉积物中磷的形态分布研究起始于土壤学家在农业研究上对土壤中磷的各种形态及有效性探讨,并总结出了较为成熟的分步提取和分析方法^[19,20].近年来,随着生物地球化学研究的深入,地质学和地球化学家将土壤中磷的分析方法引入沉积物中磷的研究并加以改进.化学连续提取法是目前沉积物中磷形态研究中最成熟、最理想的方法^[21],它的基本原理是采用不同类型的选择性提取剂连续地对沉积物样品进行提取,根据各级提取剂提出磷的量间接反映出沉积物磷的释放潜力.根据提取剂的种类和连续提取方案的不同,化学连续提取法又具体分为很多方法,如 Hietjes 等提出的 4 步连续提取法^[22]、De Groot 等的 3 步法^[23]、Olila 等的 5 步法^[24]、Jensen 等的 5 步法^[25]、Ruttenberg 提出的针对海洋沉积物的 SEDEX 提取法^[19]、李悦等^[20]、朱广伟等^[26]改进的连续提取法及实验研究等.其中 Ruttenberg 的方法首次提出区分原生碎屑磷和自生钙结合磷的磷形态分离,并进行了详细的方法标准化试验,且提取过程易于操作,比较适合研究沉积物中磷的生物地球化学行为,因此,本研究采用该方法对磷形态进行分类.

3.2 不同形态磷的作用及来源

沉积物中的磷以无机磷和有机磷 2 大类形式存

在.根据 SEDEX 法对磷形态的分类,无机磷的存在形式还可以进一步分为可交换磷、铁结合磷、自生钙结合磷和碎屑磷.对于养殖海区来说,表层沉积物中各种形态磷的分布特征不但受地质地球化学背景的控制,而且与沿岸的工业活动、养殖模式、养殖种类等因素密切相关.磷的输入除了来自工农业污水、生活废水等点面源污染外,还来自于养殖区内鱼类、贝类、藻类的死亡残体,代谢废物,残饵等,这些物质含有丰富的有机质,在水交换能力较弱的情况下,被颗粒物质吸附后以有机质的形式进入沉积相,导致沉积物的组成发生改变;另一方面,随着水体环境中沉积物的大量增加,总磷和有机磷的含量也会相对增加.从平面分布来看,总磷及有机磷含量的高值区均出现在网箱养殖区域(7 号站位)附近,显示投饵式养殖活动对沉积物中磷的形态分布的影响比较大,贝类及贝藻混养区受上述因素的影响较网箱区小,因此,表层沉积物中总磷及有机磷含量均相对较低.

可交换磷是活性磷,主要指被沉积物中的氧化物、氢氧化物以及粘土矿物颗粒表面等吸附的磷,主要源于水生颗粒,即沉降颗粒的吸附或生物碎屑的再生.物化条件如温度、pH 值、水动力条件及生物扰动作用等因素,都可导致这种形态的磷向上覆水体的扩散,另外,它的含量还与沉积环境有关,在相对缺氧的环境下,表层沉积物中的磷酸铁还被还原成磷酸亚铁,而释放出磷酸根离子,从而对水体的营养状

况有着一定的影响.本研究中可交换磷的“涡旋式”平面分布特征也体现出受控因素的复杂性,虽然这部分磷的含量较小,平均只占总磷的 9.92%,但在释放时它首先释出,对养殖水体环境的贡献是最直接的.

铁结合磷主要指易与铁的氧化物或氢氧化物结合的磷,在有氧环境下被认为是一种永久性的磷汇,而在厌氧环境中被看作是一种暂时性的磷汇.在磷的各种形态中,它通常被认为是沉积物中易变的部分,因为它会随着氧化还原环境的变化而改变.目前国内对沉积物-水界面氧化还原反应的研究工作不多,对于近岸浅海区 and 大陆架的铁、结合磷的分布情况,研究者多倾向于用污染源和沉积因素来解释,并认为沉积物中铁结合磷含量与该区域的污染程度正相关^[27].桑沟湾表层沉积物中铁结合磷占总磷的比例最低,只有 4.74%,说明该海域的污染还不严重.此外,pH 和盐度过高也会抑制磷的吸附、沉淀和结晶过程,翁焕新等^[28]认为,当盐度为 30~50 时,铁结合磷占总磷的质量分数小于 5%,调查期间,桑沟湾海域海水的 pH 为 7.13 ± 0.06 ,盐度为 31.89 ± 0.84 ,这也是导致该湾表层沉积物中铁结合磷含量较低的原因之一.最近的研究发现,在沉积物-水界面氧化还原反应过程中微生物也介入了这些过程,如在还原条件或缺氧条件下沉积物中细菌能快速积聚和释放磷^[29,30],这使得有关界面磷的交换机制更为复杂,这一机制尚有待于进一步的探讨.

在近岸沉积物中与钙结合的磷有不同类型与来源^[31].Ruttenberg^[19]指出钙结合磷应分为 2 组:一组指碎屑磷灰石,来源于火成岩或变质岩,但与自生钙结合磷不同,它不是活性磷的“汇”,很难再生为生物所利用;另一组指生物骨骼碎屑、碳酸钙结合磷即自生钙结合磷,它主要来源于生物代谢产物、生物碎屑的矿化和早期成岩作用形成的氟磷灰石,但氟磷灰石的形成一般在表层 2cm 以下,可以说表层沉积物中自生钙结合磷主要来源于海洋浮游生物.从自生钙结合磷与其他形态的磷的相关关系(表 2)可以得出,调查区表层沉积物的自生钙结合磷不受沉积物本身的特性和陆源物质排放的影响,只受制于本区域的生物活动,占总磷的 45.22% 也表明桑沟湾沉积物中内源生物成因的磷含量相对较高.

3.3 磷的生物有效性

研究沉积物中磷形态的主要目的是定量生物有效磷,生物有效磷包括沉积物中可释放并参与水体中磷再循环的部分,它与沉积物-水界面磷的交换体

戚相关,通过对不同形态磷含量的分析可以确定沉积物中潜在生物有效性磷的上限^[13].沉积物中可交换磷是最具生物有效性的磷,当上覆水体中磷酸盐含量较低时,通过吸附、解吸过程会很容易释放到上覆水体,进而被浮游生物利用,是沉积物中最容易为生物生长提供营养的磷形态的一种;铁结合态磷具有潜在的生物有效性,在沉积物氧化还原电位下降的情况下, Fe^{3+} 被还原成 Fe^{2+} ,从而释放出其结合的磷,并被生物利用;自生钙结合磷是内源生物成因的钙结合磷,来源于生物代谢产物及生物碎屑的矿化,是活性磷的“汇”,在适当的物理化学条件下能转化成有机磷,而有机磷能够通过微生物矿化变成无机磷进入水体参与生物循环,并逐渐被生物利用.因此,沉积物中的潜在生物有效性磷主要包括可交换磷、铁结合磷、自生钙结合磷和有机磷,而碎屑磷来源于火成岩或变质岩,很难进入水体被生物所利用,是非生物可利用磷,被埋藏在滨岸地区或运移至外海沉积^[32].通过对桑沟湾表层沉积物中磷的赋存形态特征分析,得出桑沟湾表层沉积物中潜在生物有效性磷的含量为 $358.05 \sim 448.39 \mu\text{g/g}$,平均占总磷的 86.54%,占沉积磷库中的绝大部分.在沿岸浅海水域,表层沉积物在水动力、风浪、生物扰动以及人为因素等作用下极易发生再悬浮,这些生物有效性磷通过沉积物-水界面、悬浮物-水界面的物质交换过程会发生再生活化,从而在不同程度上会促进藻类生长,影响水体的富营养化状态和初级生产力.

4 结论

(1)桑沟湾表层沉积物中总磷的含量变化范围为 $412.99 \sim 508.56 \mu\text{g/g}$,总磷主要由无机磷组成,占总磷的 73.33%,有机磷占的比例较小;无机磷中自生钙结合磷所占的比重最大,各形态磷的含量顺序依次为: $\text{Ca-P} > \text{Detr-P} > \text{Ads-P} > \text{Fe-P}$.各形态磷的相关分析结果表明,总磷的含量及空间分布主要受有机磷的影响与控制,无机磷受自生钙结合磷的影响较大.

(2)平面分布上,沉积物中的总磷及有机磷含量的高值区均出现在网箱养殖区域,显示投饵式养殖活动对沉积物中磷的形态分布的影响比较大;可交换态磷的分布较为复杂,呈现涡旋式的分布特征;铁结合磷的分布表现为从近岸以及外海向湾内逐渐增大;自生钙结合磷和碎屑磷的分布趋势比较规则,从外海向湾内递增.

(3)桑沟湾表层沉积物中潜在生物有效性磷的

含量为 358.05 ~ 448.39 $\mu\text{g/g}$, 平均占总磷的 86.54%, 具有很强的释磷潜力.

参考文献:

- [1] 高效江, 陈振楼, 许世远, 等. 长江口滨岸潮滩沉积物中磷的环境地球化学特征[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(6): 711 ~ 715.
- [2] 黄清辉, 王东红, 马梅, 等. 沉积物和土壤中磷的生物有效性评估新方法[J]. 环境科学, 2005, **26**(2): 206 ~ 208.
- [3] 戴纪翠, 宋金明, 李学刚, 等. 胶州湾沉积物中的磷及其环境指示意义[J]. 环境科学, 2006, **27**(10): 1953 ~ 1962.
- [4] Cha H J, Lee C B, Kim B S, *et al.* Early diagenetic redistribution and burial of phosphorus in the sediments of the southwestern East Sea (Japan Sea) [J]. Marine Geology, 2005, **216**: 127 ~ 143.
- [5] Schenau S J, Reichart G J, De Lange G J. Phosphorus burial as a function of paleoproductivity and redox conditions in Abrabian Sea sediments [J]. Geochimica et Co smochimica Acta, 2005, **69**(4): 919 ~ 931.
- [6] Zhou Q, Gibson C E, Zhu Y. Evaluation phosphorus bioavailability in sediment of three contrasting lakes in China and the UK [J]. Chemosphere, 2001, **42**: 221 ~ 225.
- [7] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in lake Erken sediment [J]. Water Research, 2000, **34**: 2037 ~ 2042.
- [8] 郑丽波, 周怀阳, 叶瑛. 东海特定海区柱状沉积物中磷的存在形态及其环境指示意义[J]. 上海环境科学, 2003, **22**(6): 414 ~ 429.
- [9] 黄清辉, 王东红, 王春霞, 等. 沉积物中磷形态与湖泊富营养化的关系[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(6): 583 ~ 586.
- [10] 高丽, 杨浩, 周健民, 等. 滇池沉积物磷的释放以及不同形态磷的贡献[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(4): 731 ~ 734.
- [11] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中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.
- [12] 徐玉慧, 姜霞, 金相灿, 等. 太湖东北部沉积物生物可利用磷的季节性变化[J]. 环境科学, 2006, **27**(5): 869 ~ 873.
- [13] 张路, 范成新, 朱广伟, 等. 长江中下游湖泊沉积物生物可利用磷分布特征[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(1): 36 ~ 42.
- [14] 周小宁, 王圣瑞, 金相灿. 沉水植物黑藻对沉积物有机、无机磷形态及潜在可交换性磷的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2421 ~ 2425.
- [15] 徐林梅, 孙耀, 石晓勇, 等. 桑沟湾养殖海域沉积物中磷的溶出动力学特性[J]. 海洋水产研究, 2006, **27**(4): 66 ~ 70.
- [16] 武晋宣, 孙耀, 张前前, 等. 桑沟湾养殖水域沉积物中营养要素 (TOC、TN 和 TP) 溶出动力学特性[J]. 海洋水产研究, 2005, **26**(2): 62 ~ 67.
- [17] 蔡立胜, 方建光, 董双林. 桑沟湾养殖海区沉积物-海水界面氮、磷营养盐的通量[J]. 海洋水产研究, 2004, **25**(4): 57 ~ 64.
- [18] 张学雷, 朱明远, 汤庭耀, 等. 桑沟湾和胶州湾夏季的沉积物-水界面营养盐通量研究[J]. 海洋环境科学, 2004, **23**(1): 1 ~ 4.
- [19] Rutenberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J]. Limnology & Oceanography, 1992, **37**(7): 1460 ~ 1482.
- [20] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J]. 海洋环境科学, 1998, **17**(1): 15 ~ 20.
- [21] 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): 22 ~ 25.
- [22] Hieltjes A H, Lijklema L. Fractionation of inorganic phosphorus in calcareous sediments [J]. Journal of Environmental Quality, 1980, **8**: 130 ~ 132.
- [23] De Groot C J, Golterman H L. Sequential fractionation of sediment phosphate [J]. Hydrobiologia, 1990, **192**: 143 ~ 148.
- [24] Olila O G, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of sediments in shallow eutrophic lakes of Florida [J]. Archives of Hydrobiology, 1993, **129**: 45 ~ 65.
- [25] Jensen H S, Thamdrup B. Iron-bound phosphorus in marine sediments as measured by bicarbonate-dithionate extraction [J]. Hydrobiologia, 1993, **253**: 47 ~ 59.
- [26] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(3): 349 ~ 352.
- [27] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中磷的分布特征及其环境意义[J]. 热带海洋学报, 2005, **24**(1): 21 ~ 27.
- [28] 翁焕新, 刘云峰. 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.
- [29] 黄清辉, 王磊, 王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(3): 199 ~ 206.
- [30] 孙晓杭, 张昱, 张斌亮, 等. 微生物作用对太湖沉积物磷释放影响的模拟实验研究[J]. 环境化学, 2006, **25**(1): 24 ~ 27.
- [31] 郑丽波, 叶瑛, 周怀阳, 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.
- [32] 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.