

桑沟湾养殖海域柱状沉积物中磷的 赋存形态和生物有效性

张小勇^{1,2} 杨 茜^{1,2} 孙 耀^{2*} 石晓勇¹ 江双林^{1,2}

(¹农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

(²中国海洋大学 海洋污染生态化学实验室, 青岛 266003)

摘 要 以桑沟湾扇贝和海带两个养殖海区的柱状沉积物为研究对象, 采用连续提取法将沉积物中磷的赋存形态分为交换态磷(Ex-P)、铁结合态磷(Fe-P)、自生磷(Au-P)、碎屑磷(De-P)和有机磷(Or-P), 并分析了各形态磷的垂直分布特征; 利用沉积物年代序列测定的结果, 结合桑沟湾水产养殖历史, 探讨了近 200 年来桑沟湾养殖海域沉积物中磷形态的含量变化情况, 并进一步分析了该区域的生物有效磷。结果表明, 柱状沉积物中上层各形态磷的含量高于底层, 表明养殖活动使桑沟湾表层沉积物中的磷含量增大。各形态磷的含量在贝壳沉积区内变化幅度均较大, Or-P 是沉积物中磷的主要形态; 扇贝养殖区沉积物中的总磷(TP)、Or-P 和海带养殖区沉积物中的 TP、Or-P 在沉积时间序列上分布基本一致, 其含量变化与各时期工业生产和海水养殖活动密切相关; 两个区域柱状沉积物中潜在生物有效性磷占总磷的百分比为 61.2% 和 71.0%。沉积物中 Ex-P 的含量对该海域的初级生产力的影响较大。

关键词 桑沟湾 柱状沉积物 磷形态 年代序列 生物有效性

中图分类号 X142 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2013)02-0036-09

Forms and bioavailability of phosphorus in sediment cores of culture zones in Sanggou Bay

ZHANG Xiao-yong^{1,2} YANG Qian^{1,2} SUN Yao^{2*}

SHI Xiao-yong¹ JIANG Shuang-lin^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture,
Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

(² Laboratory of Marine Pollution Ecological Chemistry, Ocean University of China, Qingdao 266003)

ABSTRACT Phosphorus is the most important limiting factor in nutrient cycling, and it is also the key element controlling primary production in aquatic environment. Sediments act as both a sink and a source of phosphorus due to continuous transport of chemical species across the sediment-water interface. Phosphorus is actively involved in both terrestrial and marine biogeochemical cycles. However, not all fractions of phosphorus in sediment are released to the o-

国家重点基础研究发展计划项目(2006CB400007)和中央级公益性科研院所基本科研业务项目(20603022013003)共同资助

* 通讯作者。E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn, Tel: 13573228006

收稿日期: 2012-04-05; 接受日期: 2012-05-29

作者简介: 张小勇(1986-), 女, 硕士研究生, 主要从事环境化学研究。E-mail: xiaoyong19870524@126.com

verlying water. Therefore, the effects of phosphorus fractions in sediments for promoting aquatic environment eutrophication can be more efficiently evaluated based on phosphorus fractions, rather than total phosphorus. In this work, forms and bioavailability of phosphorus in the columnar sediments of two sampling sites in Sanggou Bay were analyzed by means of sequential extraction method (SEDEX). According to this method, there are five types of phosphorous: iron-phosphorous (Fe-P), organic-phosphorous (Or-P), detritus-phosphorous (De-P), exchangeable-phosphorous (Ex-P) and autologous-phosphorous (Au-P); The ages of sediment were also used to explore the content change of phosphorous forms in about two hundred years. The results showed that, for two sites, the contents of total phosphorus and phosphorus forms in the core sediments obviously decreased with depth. The main form of total phosphorus (TP) in sediments was organic phosphorus (Or-P), which accounted for 59.5%, 57.6% of TP in S1 and S2 sites, respectively, and the percentage of Fe-P was less than 1%, which indicated that the environment of Sanggou Bay was less polluted. The contents of various forms in upper layer were all higher than those in bottom sediment and varied greatly in the shell deposition, which suggested that farming activity increased phosphorus sedimentation. In addition, the total phosphorus and contents of phosphorus forms had a tendency to decrease toward the bottom of the core, regardless of the phosphorus species; The distribution of TP and Or-P in time series was almost the same for both two sites; Bioavailable phosphorus in sediments occupied 61.2%, 71.0% of the total phosphorus pool, respectively; The content of Ex-P in sediment imposed a greater impact on the primary productivity in culture zones of Sanggou Bay.

KEY WORDS Sanggou Bay Core sediment Phosphorus forms Chronosequence Bioavailability

磷是海洋生物重要的生源要素之一,对维持海洋生态系统的物质循环和营养供给有重要的作用。但沉积物中总磷(TP)含量并不能有效地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,取决于沉积物中磷的存在形态。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(Zhu *et al.* 2006; Branom *et al.* 2004; 郑丽波等 2003; Zhou *et al.* 2005)。目前,国内关于沉积物中磷形态的研究主要集中在一般海域和湖泊,而对养殖水域的研究则涉及较少(蒋增杰等 2008; 王迪迪等 2008; 韦献革等 2005)。在养殖水域生物体通过自身的代谢作用,产生的残饵、排泄物和粪便等有机物质对养殖环境甚至整个沿海的生态环境产生很大的影响(吴芳等 2005; 舒廷飞等 2002)。研究发现,养殖区沉积物中磷的含量随着沉积物的积累逐渐升高,沉积物溶解态磷的释放将上覆水水体的磷水平提高了18%(江锦花等 2004)。因此,研究养殖海域沉积物中磷的形态特征对了解该海域的生态环境具有深远的意义。但相关研究大多集中表层沉积物,对柱状沉积物中不同形态磷的研究尤其是沉积物的年代测定鲜有报道,本研究选择桑沟湾扇贝和海带两个养殖区为研究对象,采用Ruttenberg(1992)连续提取法(SEDEX),分析了柱状沉积物中磷的赋存形态和含量变化,以期为桑沟湾水产养殖的持续发展提供科学依据。

1 实验方法

1.1 调查区域与方法

桑沟湾位于山东半岛东端(37°01'~37°09'N, 122°24'~122°35'E),东临黄海,是一个半封闭海湾,北、西、南三面为陆地环抱,湾口宽约11.5km,东西宽约7.5km,岸线长60km,湾内总面积约133km²,平均水深7~

8m,是北方重要的水产养殖海区。从20世纪60年代和80年代开始进行海带、扇贝和牡蛎养殖,养殖方式以筏式养殖为主。

本次调查区域为湾北部(S1)和湾南部(S2)两个站位(图1),其位置分别位于扇贝和海带筏式养殖区,沉积类型均以泥质为主。调查时间为2007年8月,使用箱式采样器采集沉积物样品。将沉积物样品以2cm(0~14cm)、3cm(14~35cm)、5cm(35~70cm)和10cm(70cm至柱末端)的厚度进行分层后,冷冻保存。取分层样品在60℃恒温烘干至恒重,用电动研钵仪研磨,过60目筛,待测定,其中在S1站的28~100cm和S2站的20~80cm均含有一定数量的贝壳沉积,下文称为贝壳沉积区。

1.2 磷形态的测定

总磷(TP)的测定方法参照扈传显等(1999),称取烘干磨好的沉积物样品0.05g左右,加入50ml水后再加3ml $K_2S_2O_8$ 溶液,盖好盖子。在压热器中压热30min,冷却,离心,取上层清液。加入1.5ml抗坏血酸溶液混合30s后加入1.5ml混合试剂。混匀,以空白试剂作参比,用5cm比色皿在820nm波长下测定吸光度。沉积物中各形态磷含量测定方法参照Ruttenberg(1992)化学连续提取法(表1)。

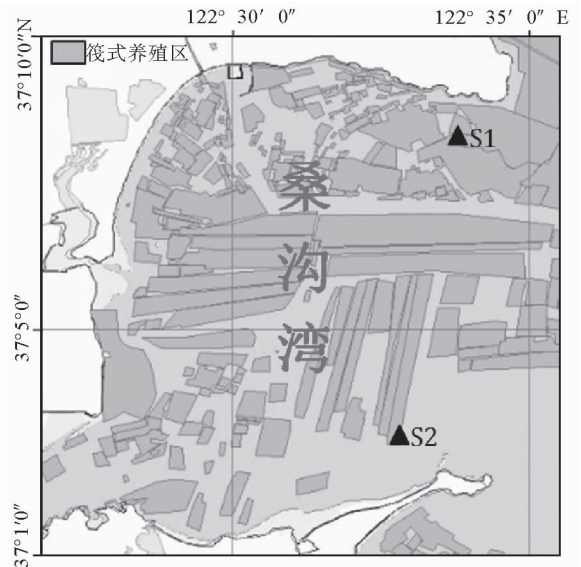


图1 调查站位

Fig.1 Sampling sites

表1 不同形态磷含量的测定方法

Table 1 The method for determination of different phosphorus forms

形态 Forms	符号 Abbreviation	提取方法 Extraction method
交换态磷 Exchangeable phosphorous	Ex-P	0.3g 沉积物加 30ml 1mol/L $MgCl_2$ (pH=8) 振荡提取 2h, 5 000r/min 离心 20min 获取提取液(下同), 同样再提取 1 次, 再用 30ml 去离子水同样提取两次, 合并提取液, 提取液抽滤通过 0.45mm 滤膜, 用分光光度计测量
铁结合态磷 Iron phosphorous	Fe-P	Ex-P 提后残渣加 24ml 0.3mol/L 柠檬酸钠、1mol/L $NaHCO_3$ 及 0.675g $Na_2S_2O_4$ 配成的混合提取剂, 振荡提取 8h, 再用 30ml 去离子水提取 1 次, 合并提取液, 提取液抽滤通过 0.45mm 滤膜, 用分光光度计测量
自生磷 Autologous phosphorous	Au-P	Fe-P 提后残渣加 30ml 1mol/L $NaAc-HAc$ (pH=4) 缓冲液振荡提取 6h, 再用 30ml $MgCl_2$ 提取 1 次, 然后以 30ml 去离子水提取 1 次, 合并提取液, 提取液抽滤通过 0.45 mm 滤膜, 用分光光度计测量
碎屑磷 Detritus phosphorous	De-P	Au-P 提后残渣加 30ml 1mol/L HCl 振荡提取 16h, 再用 30ml 去离子水提取 1 次, 合并提取液, 提取液抽滤通过 0.45mm 滤膜, 用分光光度计测量
有机磷 Organic phosphorous	Or-P	De-P 提后残渣转移到瓷坩埚中, 烘干, 马弗炉中 550 摄氏度灼烧 2h, 冷却后以 30ml 1mol/L HCl 振荡提取 16h, 提取液抽滤通过 0.45mm 滤膜, 用分光光度计测量

1.3 沉积年代序列测定

样品 ^{210}Pb 测年由中国科学院海洋研究所完成。每个柱样分别取12个样品,以取样时间2007年为测年零点,利用沉积速率得到柱状沉积物的年龄。实验室内将所采集的岩心按2cm间距分样,对特殊层位进行岩性

描述,称重,烘干,测其含水量,计算沉积物干密度,研磨备用。 ^{210}Pb 与沉积物的分离、镀片和 α 谱仪的测定参照 Demaster(1985)和 Li(1993)。

$$D_R = \frac{H\lambda}{\ln \frac{I_0}{I_h}}$$

式中, D_R 为沉积速率, H 为深度, λ 为 ^{210}Pb 的衰变常数, I_0 为沉积岩心表层的 ^{210}Pb 放射性活度, I_h 为深度 H 处的 ^{210}Pb 放射性活度。

2 结果与讨论

2.1 年代测定结果

由图 2 可知,其放射性活度随岩心深度的衰变呈“两层分布模式”(李凤业等 1991),反映采样海区沉积环境较稳定。经计算得出 S1、S2 站位的沉积速率分别为 0.726、0.593cm/a,柱状沉积物底部沉积年龄分别约为 186 年和 245 年。

2.2 柱状沉积物中各形态磷的垂直分布特征

S1 站总磷(TP)的平均值为 $485.2\mu\text{g/g}$,表层至 28cm 处的平均值为 $534.9\mu\text{g/g}$,100cm 以下至整个沉积柱底端的平均值为 $276.5\mu\text{g/g}$; S2 站 TP 的平均值为 $336.6\mu\text{g/g}$,表层至 20cm 处的平均值为 $519.6\mu\text{g/g}$,80cm 以下至整个沉积柱末端的平均值为 $120.4\mu\text{g/g}$ 。TP 在 S1 站表层至整个贝壳沉积区内变化幅度较小,100cm 以下含量急剧减小; S2 站表层至整个贝壳沉积区内 TP 含量呈逐渐减小的趋势,80cm 以下含量较稳定。两站位表层沉积物中 TP 的含量均高于底层,这与黄小平等(2010)对大鹏澳养殖区的调查结果一致,说明养殖活动可能使两站位表层沉积物中的 TP 含量增高,另外也可能与近年来大量含磷物质的输入累积于沉积物中和早期成岩改造作用的共同影响有关。S1 站 TP 的平均值显著大于 S2 站,这可能是海带养殖区内的磷酸盐被大量养殖的海带吸收,当上覆水体中的磷酸盐被大量消耗时,沉积物作为营养物质的源,向水体中释放磷保证初级生产者营养盐的需求,从而导致 S2 站沉积物中 TP 的含量减小。

碎屑磷(De-P)主要是来源于流域内风化侵蚀产物中磷灰石矿物晶屑等(Zheng *et al.* 2004),可以反映流域内侵蚀速率的大小及侵蚀程度的强弱。De-P 在 S1 站表层至贝壳沉积区中呈先降低后增加的特点; S2 站的上层 De-P 的含量呈现小幅度的波动,80cm 以下含量变化较稳定。两站位贝壳沉积区内 De-P 均有大幅度的波动,上层平均值均高于下层,这一现象可能是养殖的贝壳中携带的生物残骸使碎屑磷增大,也可能与随着人类活动的频繁,表层沉积物中吸附了大量人为输入的 De-P 有关。S1 上层 De-P 的含量比 S2 站要高得多,原因可能是在贝类养殖海区,滤食性贝类的过滤与生物的沉积作用减少了海域颗粒物质的外移,产生的大量的碎屑沉降到沉积物中(杨卫华等 2004)。

S1 站上层 0~28cm 的沉积柱中 Ex-P 的平均值为 $18.9\mu\text{g/g}$, S2 站上层 0~20cm 平均值为 $25.0\mu\text{g/g}$ 。Ex-P 在 S1 站位先减小,又迅速增大至贝壳沉积区,在 34cm 附近(贝壳沉积区中)出现峰值; S2 站上层 0~20cm 内 Ex-P 的含量变化不大,在 13cm 附近出现该沉积柱的最大值。S1、S2 站 100cm 以下的沉积物中 Ex-P

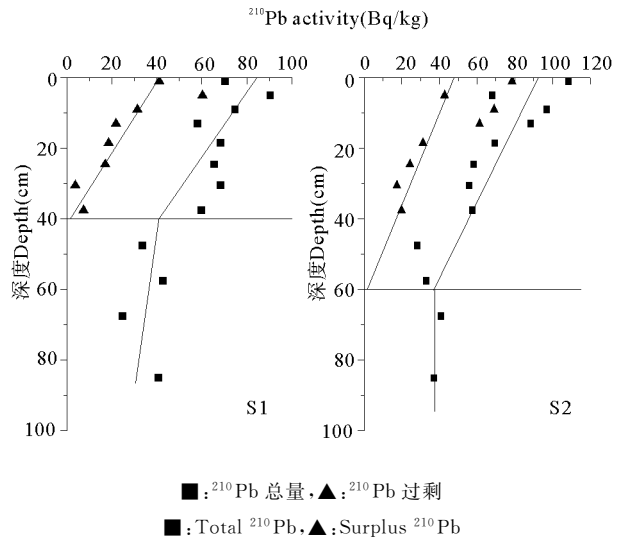


图 2 桑沟湾 S1、S2 站位的 ^{210}Pb 垂直分布
Fig. 2 The vertical distribution of ^{210}Pb in S1 and S2 stations in Sanggou Bay

的含量均呈现递减趋势,表层沉积物中的平均值高于底层,究其原因可能是表层沉积物中有机磷的强烈矿化降解,向孔隙水中提供了较多的溶解磷酸盐,使相对较多的磷酸根被沉积物颗粒吸附,随着沉积深度的加深,有机质降解作用减弱,孔隙水中磷酸盐减少,从而导致被吸附的 Ex-P 含量减少(Krom *et al.* 1980)。此外养殖活动使沉降颗粒和生源碎屑增多,导致其吸附量和再生量也随之增加。S1 站上层 Ex-P 的平均值低于 S2 站上层平均值,这可能与养殖区内海带对沉积物具有细化作用有关(严立文 2008)。有研究表明,大型海藻可以抵御水团流动,能提高颗粒物的沉积速率,因而具备捕获细粒沉积物的能力(Burrell *et al.* 1977)。沉积物中 Ex-P 是活性磷,主要源于水生颗粒,即沉降颗粒的吸附或生物碎屑的再生,其受沉积粒度影响较大,沉积物粒度越细小,吸附的 Ex-P 越多。

铁结合态磷(Fe-P)在沉积物中的含量可以作为判断海洋沉积环境污染状况的指标之一(岳维忠等 2003; 侯立军等 2001)。桑沟湾养殖区的两个站位 Fe-P 的含量在 TP 中的比例均小于 1%,说明其海域环境的污染状况较轻。两站位的深层沉积物中 Fe-P 的含量均低于表层和次表层,这与 Krom 等(1980)的研究结果一致。在较深部位的沉积层,有机质降解消耗溶解氧,使环境变得相对还原,导致铁磷矿物还原溶解,释放出的磷酸盐通过孔隙水向上迁移,在氧化还原电位较高的表层沉积物中形成矿物而沉淀,表层沉积物对磷酸根迁移的“屏蔽效应”,造成铁磷矿物在沉积物表层富集(王雨春等 2004)。Jensen 等(1995)、Schuffert 等(1994)也指出在柱状沉积物中 Fe-P 含量在表层有高位,随深度增加 Fe-P 含量减少的变化趋势普遍存在。从图 3 可看出在 S1 站位贝壳沉积区内 Fe-P 的含量急剧减小,大量研究表明,贝类的生物沉降可加速有机物在底质中的堆积,加剧微生物活动,大量的有机成分在微生物的作用下分解消耗溶解氧,增加底质对氧的需求并产生无氧或缺氧环境(杨卫华等 2004)。杨红生(1998)也认为,筏式养殖对养殖海区的影响主要是厌氧的沉积物的形成,厌氧环境的形成加剧铁磷矿物的还原溶解,从而使沉积物中 Fe-P 的含量减少。

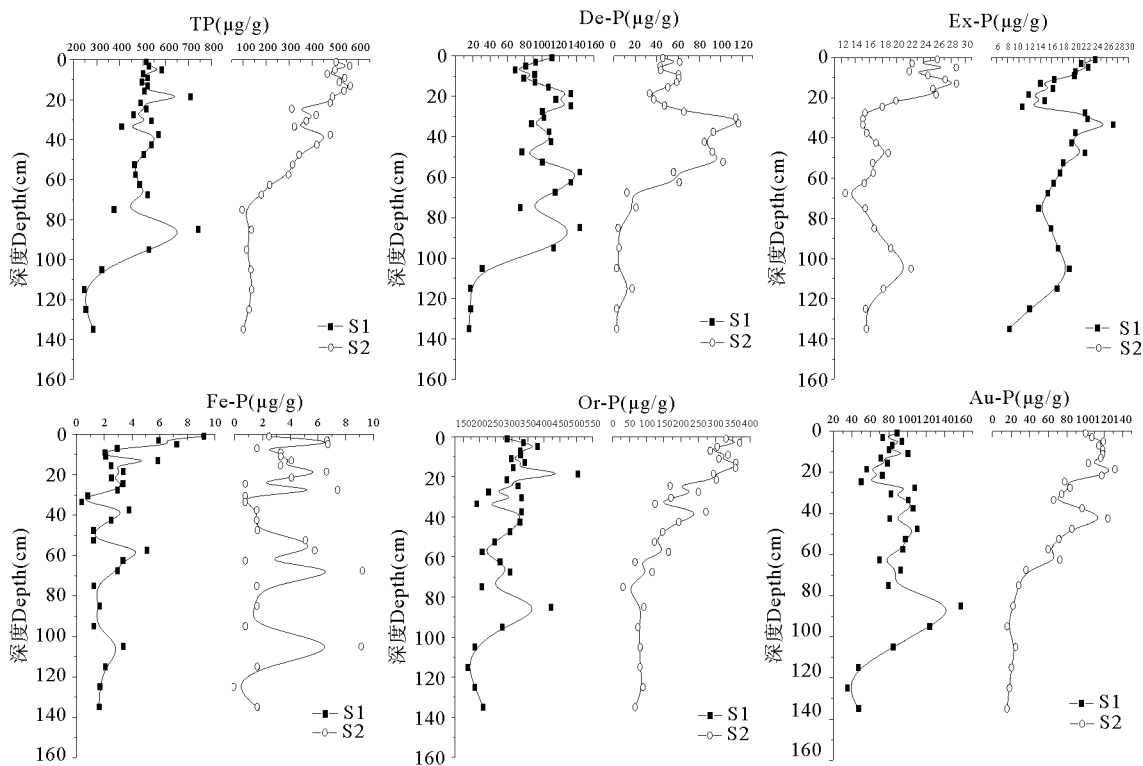


图 3 S1、S2 站位柱状样各磷形态的垂直分布

Fig. 3 The vertical distribution of phosphorus forms in S1 and S2 stations

有机磷(Or-P)在 S1、S2 站中占 TP 的百分含量分别为 59.5 %、57.6 %，是沉积物中主要的磷形态，含量随深度增加均降低。有机磷可分为难降解性和可降解性有机磷(Jensen *et al.* 1995)。难降解性有机磷主要来源陆源于物质的排放，其含量在柱状沉积物中基本保持不变；可降解性有机磷由死亡的海洋浮游生物组成，在早期成岩过程中随有机质的分解而释放，甚至向其他结合态磷转化(Sundby *et al.* 1992)，其含量随深度增加而迅速降低。这与本次调查的两站位中 Or-P 的含量变化一致。Or-P 在两站位的贝壳沉积区内波动均较大，这与桑沟湾的贝类养殖有直接的关系。贝类形成的生物性沉积物可以经降解矿化、再悬浮重新进入水体循环。Andrieux 等(1997)也指出养殖活动使沉积物中有机磷的降解是影响沉积物磷组分的一个重要过程。

自生磷(Au-P)在 S1 和 S2 两站位分布趋势与 TP 相似，表层均高于底层，在贝壳沉积区均呈现一定幅度的波动。湾南部 S2 站上层 Au-P 的含量高于湾北部 S1 站。王雨春等(2004)指出，Au-P 主要是指自生成因和生物成因的自生磷灰石磷，以及与自生碳酸钙共同沉淀的磷(包括生物残骸等，如鱼骨、藻类壳体等)。表层沉积物中 Au-P 主要来源于海洋浮游生物。两站位中表层 Au-P 的含量均高于底层，一方面表明养殖活动使海洋生物骨骼碎屑增多导致沉积物中 Au-P 的含量增加；另一方面也可能与底部沉积生物残骸在微生物作用下被分解有关。Au-P 在 S2 站上层的含量高于 S1 站，可能是因为海带养殖的高生产率导致大量有机物的沉降，这种生物源物质则被认为是海底表层沉积物和悬浮体中有机质的重要来源(Tesi *et al.* 2007)，包括生物碎屑沉积和海带孢子体的释放(Ramaiah *et al.* 2001)。

2.3 柱状沉积物中磷的年际分布特征

各形态磷的含量与沉积年代的对应关系如图 4 所示。从图 4 可以看出，两站位沉积物中 TP 与 Or-P 在整个沉积时间序列上分布基本一致。各形态磷的含量随沉积时间久远变化幅度不同。整体上而言，从 20 世纪 60、70 年代开始，各形态磷的含量呈逐渐增加的趋势，这与桑沟湾开始从事养殖活动有密切的关系。

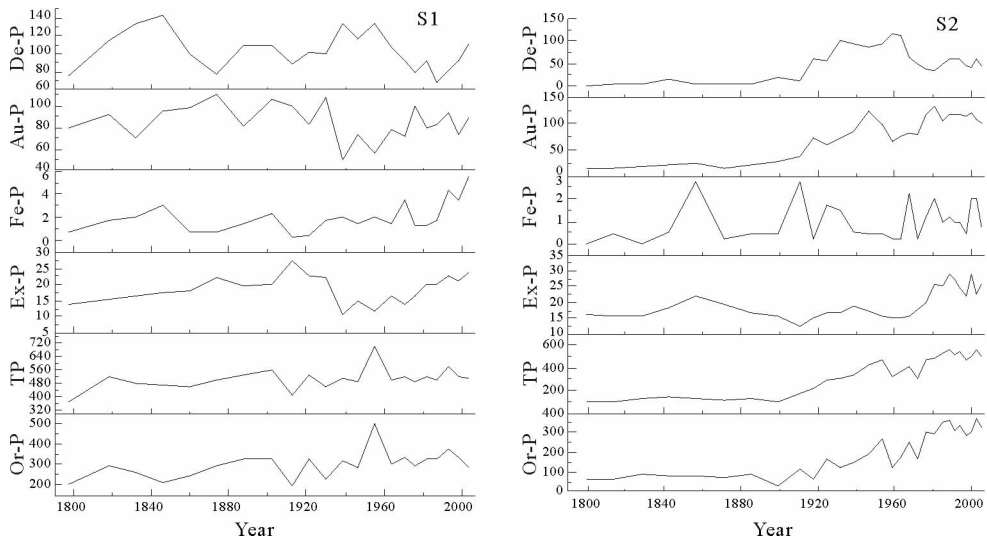


图 4 S1、S2 站位柱状样中各形态磷的年际分布

Fig. 4 The age distribution of phosphorus forms in S1 and S2 stations

从 19 世纪初至 20 世纪初，桑沟湾沉积物中 TP、Or-P 含量比较低且趋于稳定。各形态磷在 S1 站位的含量高于 S2 站位。其中 S1 站位的 De-P、Au-P 和 S2 站位的 Fe-P 在此期间变化幅度较大。此时期正处于中国第一次工业革命之前，桑沟湾受人类活动影响较小。

20 世纪初到 20 世纪 80 年代之间，桑沟湾沉积物中各形态磷含量较高且波动较大。这一时期沉积物中的 De-P 在两站位变化幅度较一致，Ex-P、Fe-P 和 Au-P 的含量自 60 年代开始增幅较大。结合桑沟湾养殖历史(方建光等 1996)，可知该湾的海水养殖业始于 60 年代，当时海带是唯一的养殖品种。70 年代期间，除了养

殖海带以外,贻贝养殖亦有所发展。而此时期又正值中国经济建设的起步期,工业生产和人类活动为海区带来了大量的营养物质,同时也为贝类的大量繁殖生长提供了良好的营养条件,大量贝类残骸的分解造成沉积物中 TP、Or-P、Au-P 和 De-P 含量的大幅度升高。人类活动的频繁、养殖活动的兴起导致大量含磷物质的输入累积于沉积物中,加剧了桑沟湾海域的污染状况,Fe-P 的含量也随之增加。贝类和海带的养殖增加了沉积物中碎屑颗粒物的量,这在一定程度上也提高了沉积物吸附的 Ex-P 的量。

进入 20 世纪 90 年代以来,由于受国内外水产品市场需求量日益增长刺激,桑沟湾海水养殖单位为了追求高产量、高产出,在大量扩展养殖面积的同时亦提高了养殖密度。当养殖规模接近饱和,其对海区的影响受到养殖容量的限制从而逐渐趋于稳定。桑沟湾 TP、Or-P、Au-P 和 Ex-P 含量随时间推移逐渐趋于稳定。

综合养殖区环境条件及各方面因素,和其他海区沉积物的磷主要来自于人类生活废水和工业废水随河流注入海洋,其中含有的磷比较容易颗粒吸附相比,养殖区中磷的输入除了上述因素外,还来自于大量饵料的人工投入,多余的饵料及大量的代谢产物形成沉积物。一方面养殖区水体中沉积物的组成发生改变,导致其吸附能力的改变;另一方面,随着环境中沉积物的大量增加,总磷和各形态磷的含量也会相对增加。分析沉积物中磷的历史变化情况与人类活动、养殖密度和养殖容量等之间的关系,可对桑沟湾养殖现状进行科学评估。

2.4 柱状沉积物中生物有效磷

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(Sonzogni *et al.* 1982)。一般认为 Ex-P 是最具生物有效性的磷,当上覆水体中磷酸盐含量较低时,通过离子交换 Fe-P 会很容易释放到上覆水体,被浮游生物所利用。Fe-P 具有潜在的生物有效性,当沉积环境趋向还原时,Fe-P 容易发生还原释放其结合的磷;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 Ex-P、Fe-P 和 Or-P。而 Au-P、De-P 和难溶态 Or-P 则很难被生物利用(杨逸萍等 1998)。

此次调查中潜在生物有效性磷的含量分别占 61.2% 和 71.0%,均超过总磷的 1/2,即桑沟湾养殖区的大部分磷可以在适宜的条件下通过沉积物-水界面发生活化反应,促进藻类生长,影响水体的初级生产力(侯立军等 2006)。两站位的潜在生物有效性磷均呈现上层值高于下层的现象,表明养殖活动使沉积物中生物有效性磷的含量增大。

表 2 桑沟湾养殖海域各形态磷与 BSi 的线性拟合方程及相关性系数

Table 2 The linear regression equation of BSi and phosphorus forms in culture zones of Sanggou Bay

站位 Station	参数 Parameters($\mu\text{g/g}$)	BSi(mg/g)	
		线性回归方程 Linear regression equation	相关系数 Correlation coefficient
S1	Ex-P	$y=1.155x+11.470$	0.541 3*
	Fe-P	$y=0.633x-2.736$	0.491 9*
	Au-P	$y=0.757x+12.748$	0.317 8
	De-P	$y=-15.918x+159.584$	-0.758 9*
	Or-P	$y=23.408x+415.474$	0.529 1*
S2	Ex-P	$y=4.208x-1.984$	0.491 9*
	Fe-P	$y=0.047x+1.994$	0.070 7
	Au-P	$y=11.892x-2.573$	0.126 5
	De-P	$y=-4.922x+1.784$	-0.104 8
	Or-P	$y=19.229x+105.237$	0.077 5

注: y-各形态磷含量; x-BSi 含量; * 表示 $P<0.01$

Note: y, the content of phosphorus forms; x, the content of BSi; * : significant level, $P<0.01$

BSi 主要来源于硅藻等, 它的积累反映了生产力的长期和空间变化, 硅藻可以作为海洋中主要初级生产者(浮游植物)现存量的良好指标(Zunle *et al.* 1997)。将桑沟湾沉积物中各形态磷与 BSi 含量做线性相关分析, 可间接讨论沉积物中磷形态与浮游植物总量的关系。由表 1 可知, S1、S2 站位的 Ex-P 与 BSi 均呈显著正相关, S1 站的 Fe-P、Or-P 与 BSi 的相关性高于 S2 站, 原因可能是 S1 站位于扇贝养殖区, 贝床沉积物能加速磷的释放, 而且营养盐的释放量要比其他类型的海底沉积物及室内模拟测定的要高得多, 营养盐再生有利于缓解对浮游植物营养的限制, 从而提高初级生产力(杨红生 1998)。

对桑沟湾两站位的沉积物中各形态磷与 BSi 的相关性分析可得出, 沉积物中潜在的生物有效磷 Ex-P、Fe-P 和 Or-P 与 BSi 均存在一定的相关性, 在适宜的条件下可向上覆水中释放磷, 影响水体的初级生产力, 其中 Ex-P 对浮游植物的总量贡献较大。

3 结论

对桑沟湾养殖海区不同形态磷垂直分布研究得出, 养殖活动使表层沉积物中的磷含量增大, 不同的养殖活动对海区沉积物磷形态的影响也不一样, 两个养殖区沉积物中潜在生物有效性磷分别占 61.2% 和 71.0%, 是沉积物中磷的主要存在形式; 沉积物中 Ex-P 与该海域的初级生产力的关系较密切。

参 考 文 献

- 王迪迪, 孙 耀, 石晓勇, 徐林梅, 孟 伟, 姜守轩, 宋健中. 2008. 乳山湾东流区沉积物中不同形态磷的分布特征. 生态学报, 28(5): 2417-2423
- 王雨春, 马 梅, 万国江, 刘丛强, 尹澄清. 2004. 贵州红枫湖沉积物磷赋存形态及沉积历史. 湖泊科学, 16(1): 21-27
- 方建光, 孙慧玲, 匡世煊, 孙 耀, 周诗贝, 宋云利, 崔毅, 赵 俊, 杨琴芳, 李 锋, 张爱君, 王兴章, 汤庭耀. 1996. 桑沟湾海水养殖现状评估及优化措施. 海洋水产研究, 17(2): 95-102
- 韦献革, 温琰茂, 陈璟璇, 王文强. 2005. 哑铃湾网箱养殖海区表层沉积物磷的含量特征. 水产科学, 24(8): 4-7
- 江锦花, 柯世省, 丁理法, 陈国业, 周发富. 2004. 围塘养殖沉积物中磷的存在形态、分布及环境效应. 浙江海洋学院学报, 23(4): 311-314
- 李凤业, 袁 巍. 1991. 南海, 南黄海, 渤海 210Pb 垂直分布模式. 海洋地质与第四纪地质, 11(3): 35-43
- 严立文. 2008. 浅海区海带养殖的沉积环境效应及动力机制. 见: 中国科学院海洋研究所博士研究生学位论文
- 吴 芳, 郭卫东, 郑佩如, 李 超, 李 猛, 吴易达. 2005. 三都澳养殖海域沉积物中 P 的形态分布特征. 海洋环境科学, 24(4): 24-27
- 杨卫华, 高会旺, 刘红英, 高永刚, 傅明珠. 2007. 胶州湾扇贝养殖对海域环境影响的初步研究. 海洋湖沼通报, 20(2): 86-93
- 杨红生. 1998. 滤食性贝类对养殖海区环境影响的研究进展. 海洋科学, 15(2): 42-44
- 杨逸萍, 胡明辉, 陈海龙, 宋瑞星. 1998. 九龙江口生物可利用磷的行为与入海通量. 台湾海峡, 17(3): 269-274
- 郑丽波, 叶 瑛, 周怀阳, 王怀照. 2003. 东海特定海区表层沉积物中磷的形态、分布及其环境意义. 海洋与湖沼, 34(3): 274-282
- 岳维忠, 黄小平. 2003. 近海沉积物中氮磷的生物地球化学研究进展. 台湾海峡, 22(3): 407-414
- 侯立军, 刘 敏, 许世远, 蒋黎敏. 2001. 长江口岸带柱状沉积物中磷的存在形态及其环境意义. 海洋环境科学, 20(2): 7-12
- 侯立军, 陆健健, 刘 敏, 许世远. 2006. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性. 环境科学学报, 26(3): 488-494
- 费尊乐, Trees CC, 李宝华. 1997. 利用叶绿素资料计算初级生产力. 黄渤海海洋, 15(1): 35-47
- 黄小平, 郭 芳, 黄良民. 2010. 大鹏澳养殖区柱状沉积物中氮, 磷的分布特征及污染状况研究. 热带海洋学报, 29(1): 91-97
- 扈传显, 王正方, 吕海燕. 1999. 海水和海洋沉积物中总磷的测定. 海洋环境科学, 18(3): 48-52
- 舒廷飞, 罗 琳, 温琰茂. 2002. 海水养殖对近岸生态环境的影响. 海洋环境科学, 21(2): 74-79
- 韩伟明. 1993. 底泥释磷及其对杭州西湖富营养化的影响. 湖泊科学, 5(1): 71-77
- 蒋增杰, 方建光, 张继红, 毛玉泽, 王 巍. 2007. 桑沟湾沉积物中磷的赋存形态及生物有效性. 环境科学 28(12): 2783-2788
- Andrieux F, Aminot A. 1997. A two-year survey of phosphorus speciation in the sediments of the Bay of Seine (France). Cont Shelf Res 17(10): 1229-1245
- Branom JR, Sarkar D. 2004. Phosphorus bioavailability in sediments of a sludge-disposal lake. Environmental Geosciences 11(1): 42-52
- Burrell DC, Schubel JR. 1977. In: Helfferich C(ed). Seagrass Ecosystems: A scientific perspective. Marcel Dekker, New York, USA, 1: 310-314
- Demaster DJ. 1985. Rates of sediment reworking at the Hebble site based on measurements of ²³⁴Th, ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb. Marine Geology 66: 133-148
- Jensen HS, Mortensen PB, Andersen FO and 2 others. 1995. Phosphorus cycling in a coastal marine sediment, Aarhus Bay, Denmark Limnol Oceanogr 908-917

- Krom MD, Berner RA. 1980. Adsorption of phosphate in anoxic marine sediments. *Limnol Oceanogr* 25(5):797-806
- Li FY. 1993. Modern sedimentation rates and sedimentation feature in the Huanghe River Estuary based on ^{210}Pb technique. *Chin J Oceanol Limnol* 11(4): 333-342
- Ramaiah N, Yoshikawa T, Furuya K. 2001. Temporal variations in transparent exopolymer particles (TEP) associated with a diatom spring bloom in a subarctic ria in Japan. *Marine Ecology Progress Series* 212: 79-88
- Ruttenberg KC. 1992. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnol Oceanogr* 1460-1482
- Schuffert JD, Jahnke RA, Kastner M and 3 others. 1994. Rates of formation of modern phosphorate off western Mexico. *Geochim Cosmochim Acta* 58(22): 5001-5010
- Sonzogni WC, Armstrong SC, DE Logan TJ. 1982. Bioavailability of phosphorus inputs to lakes. *J Environ Qual* 11(4): 555
- Sundby B, Gobeil C, Silverberg N, Mucci A. 1992. The phosphorus cycle in coastal marine sediments. *Limnol Oceanogr* 37(6) 1129-1145
- Tesi T, Miserocchi S, Goni MA and 3 others. 2007. Organic matter origin and distribution in suspended particulate materials and surficial sediments from the western Adriatic Sea (Italy). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 73(3-4): 431-446
- Zheng L, Ye Y, Zhou H. 2004. Phosphorus forms in sediments of the East China Sea and its environmental significance. *Journal of Geographical Sciences* 14: 113-120
- Zhou A, Wang D, Tang H. 2005. Phosphorus fractionation and bio-availability in Taihu Lake (China) sediments. *Journal of Environmental Sciences (China)* 17(3): 384-388
- Zhu G, Qin B, Zhang L. 2006. Phosphorus forms and bioavailability of lake sediments in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Science in China Series D: Earth Sciences* 49: 28-37

《渔业科学进展》编辑部声明

为扩大本刊及作者知识信息交流渠道,加强知识信息推广力度,本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在 CNKI 中国知网及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。

该著作权使用费及相关稿酬,本刊均用于作者文章发表、出版、推广交流(含信息网络)以及赠送样刊之用途,不再另行向作者支付。凡作者向本刊提交文章发表之行为即视为同意我编辑部上述声明。

《渔业科学进展》编辑部

2013年4月20日