

# 两种参池底质中氮、磷含量及其分布特征

王会毅<sup>1</sup>, 宋洪旭<sup>2</sup>, 曹学彬<sup>3</sup>, 刘佳亮<sup>3</sup>, 姜云宁<sup>3</sup>, 曲善村<sup>3</sup>, 邢荣莲<sup>2\*</sup>

(1.烟台大学海洋学院, 山东 烟台 264005; 2.烟台大学生命科学学院, 山东 烟台 264005; 3.山东东方海洋科技股份有限公司省级海参工程技术研究中心, 山东 烟台 264005)

**摘要:**为明确沙质、淤泥质参池底质中氮、磷变动规律,于2011年3月至11月分别对此2种参池进水口、中间区和排水口的底质的上层(0~2 cm)、下层(3~5 cm)进行了定点采样,分析了不同底质中总氮、总磷的时空分布特征。结果表明:(1)沙质中总氮含量为 $(0.16\pm 0.05)\sim(0.29\pm 0.03)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,变化范围较小。淤泥质中总氮含量为 $(0.13\pm 0.06)\sim(0.67\pm 0.09)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,变化范围大,总体呈增长趋势。方差分析结果表明,3—6月沙质和淤泥质中总氮含量没有显著差异( $P>0.05$ ),7—11月沙质和淤泥质中总氮含量有显著差异( $P<0.01$ )。沙质中总磷含量为 $(0.02\pm 0.02)\sim(0.09\pm 0.07)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,淤泥质中总磷含量较高,为 $(0.50\pm 0.02)\sim(0.72\pm 0.04)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,两种底质中总磷含量都呈先降后升趋势,在8月份达到最低点。(2)总体上看,上层底质中总氮、总磷含量略高于下层,无显著性差异( $P>0.05$ )。(3)沙质、淤泥质中进水口总氮、总磷含量最低。总氮含量在排水口和中间区相差不大。调查前期和后期,中间区总磷含量均高于排水口,后期两区域磷含量差别较大。综合评价认为,沙质参池底质中氮磷含量低、变化小,可能更有助于海参的可持续健康养殖,淤泥质中氮磷含量较高,且随着养殖月份增加明显升高,作为水体中营养盐的主要来源,存在内源污染风险。

**关键词:**海参池塘;底质;氮;磷;内源污染

中图分类号:X55 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)07-1479-07 doi:10.11654/jaes.2013.07.028

## Contents and Distribution Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediments from Two Type Ponds for Sea Cucumber Breeding

WANG Hui-yi<sup>1</sup>, SONG Hong-xu<sup>2</sup>, CAO Xue-bin<sup>3</sup>, LIU Jia-liang<sup>3</sup>, JIANG Yun-ning<sup>3</sup>, QU Shan-cun<sup>3</sup>, XING Rong-lian<sup>2\*</sup>

(1.College of Ocean, Yantai University, Yantai 264005, China; 2.College of Life Sciences, Yantai University, Yantai 264005, China; 3. Provincial Engineering Research Center for Sea Cucumber, Shandong Oriental Ocean Sci-Tech Co., LTD, Yantai 264005, China)

**Abstract:** With the strong development of sea cucumber pond breeding, the aquaculture water pollution becomes a serious problem. Sediments play vital role on pond environment pollution. To understand the rhythms of nitrogen(N) and phosphorus(P) in the sandy and the silty sediments ponds for sea cucumber breeding, the sandy and silty sediments samples in the upper(0~2 cm) and lower(3~5cm) layers near the inlet, middle area and the outlet of sea cucumber breeding pond were collected from March to November in 2011, respectively. The spatial and temporal distribution characteristics of total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) in sandy and silty sediments were investigated. The results showed that TN contents ranged from  $(0.16\pm 0.05)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  to  $(0.29\pm 0.03)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  in sandy sediments, that in silty sediments ranged from  $(0.13\pm 0.06)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  to  $(0.67\pm 0.09)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . TN contents in silty sediment were in an upward trend in overall. The one-way ANOVA showed that there was no significant difference in the TN contents between the sandy and the silty sediments from March to June( $P>0.05$ ), but a significant difference occurred from July to November( $P<0.01$ ). TP contents ranged from  $(0.02\pm 0.02)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  to  $(0.09\pm 0.07)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  in sandy sediment, that in silty sediment ranged from  $(0.50\pm 0.02)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  to  $(0.72\pm 0.04)\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . In the two sediments, the TP contents decreased first and then increased during the investigating period, reached the lowest in August. TN and TP contents in upper sediment were slightly higher than that in lower sediment, while the difference between the two layers was not significant( $P>0.05$ ). The TN and TP contents were both the lowest in the two sediments near the inlet area. There was no big difference on TN contents in sediments near the middle and the outlet areas. TP contents in the middle area were both higher than that in the outlet area during the early and late investigat-

收稿日期:2012-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(31001113,41273130);省优秀中青年科学家奖励基金(BS2010HZ022);山东省自然科学基金(2009ZRB019CE)

作者简介:王会毅(1987—),女,河南濮阳人,硕士研究生,专业方向为水生生物学。E-mail:wanghuiyi666@126.com

\*通信作者:邢荣莲 E-mail:xingronglian@163.com

ing period. Moreover, the difference turned out to be bigger in the late investigating period. Comprehensively, the sandy sediment might be more beneficial for healthy and sustainable development of the sea cucumber breeding. The silty sediment could have internal pollution risks because of higher N and P accumulation contents.

**Keywords:** sea cucumber pond; sediment; nitrogen; phosphorus; internal pollution

沉积物作为氮磷等生源要素的重要蓄积库,不仅承担着净化水体的作用,在一定条件下,其中高含量的营养盐还会通过分子扩散、再悬浮以及生物扰动等过程重新释放到上覆水中,引发“二次”污染<sup>[1-2]</sup>。同时,沉积物的特性也影响氮磷含量在沉积物和上覆水体中的分配<sup>[3]</sup>。

近年来,随着水产养殖业的高速发展,养殖水域环境不断恶化,养殖动物病害频发。针对这一现状,国内外学者在养殖水域水质调控、营养收支平衡及氮磷赋存形态方面做了很多研究<sup>[4-6]</sup>,池塘养殖是海参养殖的主要方式,养殖过程中多以人工投饵为主,残饵粪便以及生物残骸沉积在池塘底部,有机物大量富集,使参池底质大面积恶化,进而导致养殖水域污染<sup>[7]</sup>。以底质修复为中心的养殖生境修复已经成为亟待解决的水产养殖业的关键技术之一,了解不同类型底质在氮磷污染中的作用是底质修复的前提,但是目前对养殖池塘底质中营养盐变化规律的基础研究工作却很少。因此,本研究对不同参池底质中总氮、总磷含量和分布规律进行调查,以期了解参池底质的污染程度,掌握不同底质中氮、磷含量变化特征,丰富底质在养殖生态系统中的作用、为海参健康养殖的有效人工调控提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 参池概况

于2011年3月至11月(1月、2月、12月为冰冻期),在山东烟台某养殖区进行。沙质(粒径50~1000  $\mu\text{m}$ )池塘,面积约6.6  $\text{hm}^2$ ,水深1.5~2 m。淤泥质(粒径2~50  $\mu\text{m}$ )池塘,面积约为10  $\text{hm}^2$ ,水深1.5~2 m。本次调查随机选取两口沙质、两口淤泥质参池作为研究对象,实验期间固定池塘采样。

### 1.2 样品采集

由于在采样时发现0~5 cm底质在3 cm处有明显分层,于是将底质分为上层(0~2 cm)和下层(3~5 cm)。每个池塘设6个采样点,各池塘样点分布如图1所示。采用GPS定位系统,每月用自行研制的采泥器(正在申请专利)于每个池塘中定点采集上层及下层底质,每个点上、下层各取两个平行样,将样品分装密

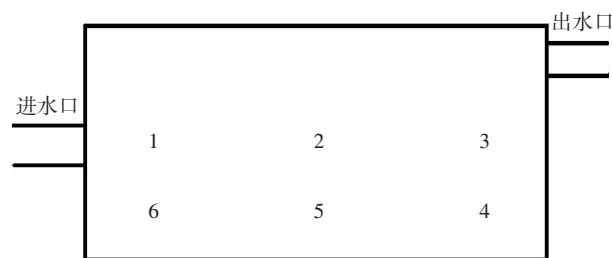


图1 研究池塘采样点分布

Figure 1 Distribution of the sampling sites in the study pond

封,带回实验室。

### 1.3 样品测定

将样品在阴凉处风干,研磨,过1 mm土壤筛,置于聚乙烯袋中于阴凉干燥处保存,待测总氮、总磷含量。采用沉积物中同时消解的方法<sup>[8]</sup>消解后,结合国标<sup>[9-10]</sup>中水质总氮、总磷测定的方法进行测定。

### 1.4 数据处理与分析

数据分析及绘图采用SPSS17及Excel 2007,分析方法为单因素方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 底质中氮含量及其变化

由图2可知,沙质中总氮含量为 $(0.16 \pm 0.05) \sim (0.29 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,变化范围较小。淤泥质中总氮含量为 $(0.13 \pm 0.06) \sim (0.67 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,6月份最低,11月份最高,平均较沙质中更高,总体呈增长趋势。根据

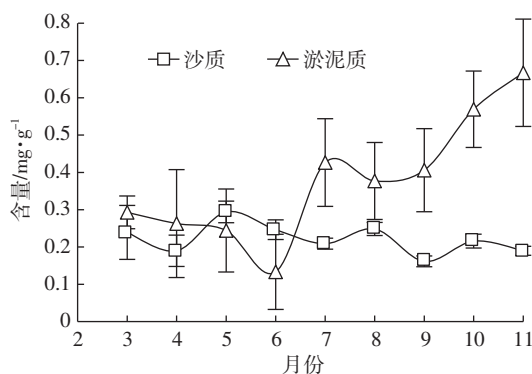


图2 底质中总氮含量变化

Figure 2 Variation of TN contents in sediments

“第二次全国海洋污染基线调查技术规程”中沉积物总氮( $\leq 0.55 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )、总磷( $\leq 0.60 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )标准<sup>[1]</sup>可知,调查期间沙底质较清洁,随着养殖过程的进行,淤泥底质受氮污染的风险增大。方差分析结果表明,3—6月沙质和淤泥质中总氮含量没有显著差异( $P>0.05$ ),7—11月沙质和淤泥质中总氮含量有显著差异( $P<0.01$ )。这说明3—6月沙质和淤泥质中总氮含量并没有明显差别,随着养殖过程的进行,淤泥质细小颗粒更有利于氮的缓慢吸附和释放,造成氮元素的过度积累,对水体的潜在污染性也更大。

## 2.2 底质中氮含量垂直分布特征

由图3可知,沙质中,上层总氮含量为 $(0.17\pm 0.04)\sim(0.30\pm 0.04) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,下层为 $(0.14\pm 0.04)\sim(0.29\pm 0.03) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。除6、7、10月份下层总氮含量较高外,其他月份上层总氮含量均高于下层。方差分析表明,沙质的上层、下层总氮含量没有显著性差异( $P>0.05$ )。淤泥质的上层和

下层总氮含量分别为 $(0.12\pm 0.07)\sim(0.66\pm 0.11) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $(0.15\pm 0.06)\sim(0.68\pm 0.08) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。除6、9、11月份上层和下层中总氮含量大致相等外,其他月份上层中总氮含量高于下层,上层、下层总氮含量同样没有显著性差异( $P>0.05$ )。沙质和淤泥质的上层和下层总氮含量变化趋势相似。

## 2.3 底质中氮含量水平分布特征

由图4可知,沙质中,进水口总氮含量为 $(0.15\pm 0.06)\sim(0.30\pm 0.04) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,中间区为 $(0.14\pm 0.04)\sim(0.31\pm 0.03) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,排水口为 $(0.18\pm 0.05)\sim(0.28\pm 0.06) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。总体上分析,总氮含量在进水口较低,排水口较高,在中间区变化较大,含量在进水口和排水口之间。淤泥质中,进水口总氮含量为 $(0.15\pm 0.06)\sim(0.60\pm 0.09) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,中间区为 $(0.13\pm 0.05)\sim(0.70\pm 0.07) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,排水区总氮含量为 $(0.13\pm 0.08)\sim(0.71\pm 0.08) \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。3—5月,中间区总氮含量较高,进水口和排水口总氮含量几乎相等,随着养殖过程的进行,三个区域的总氮含量趋于一致;8—11月,排水口总氮含量升至最

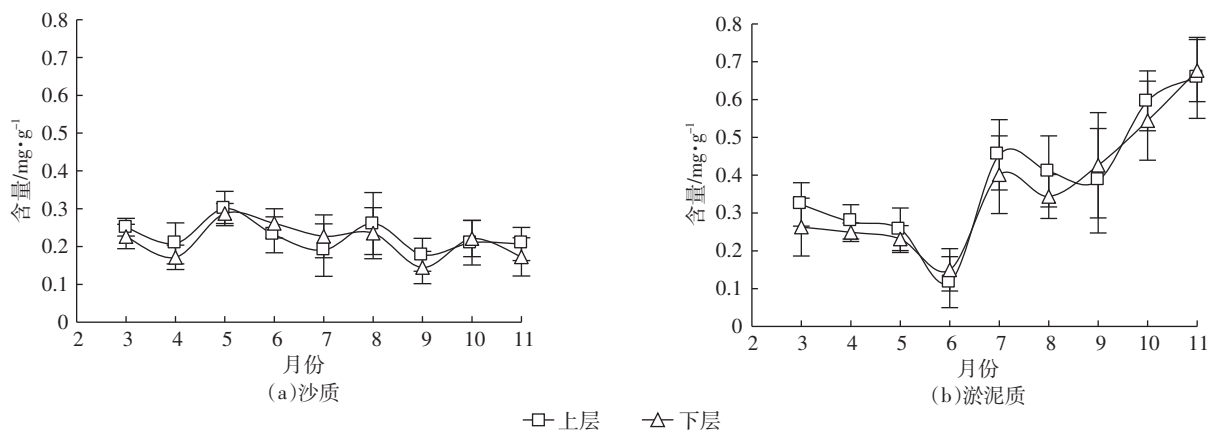


图3 沙质、淤泥质中总氮含量垂直分布

Figure 3 Vertical distribution of TN contents in sandy and silty sediments

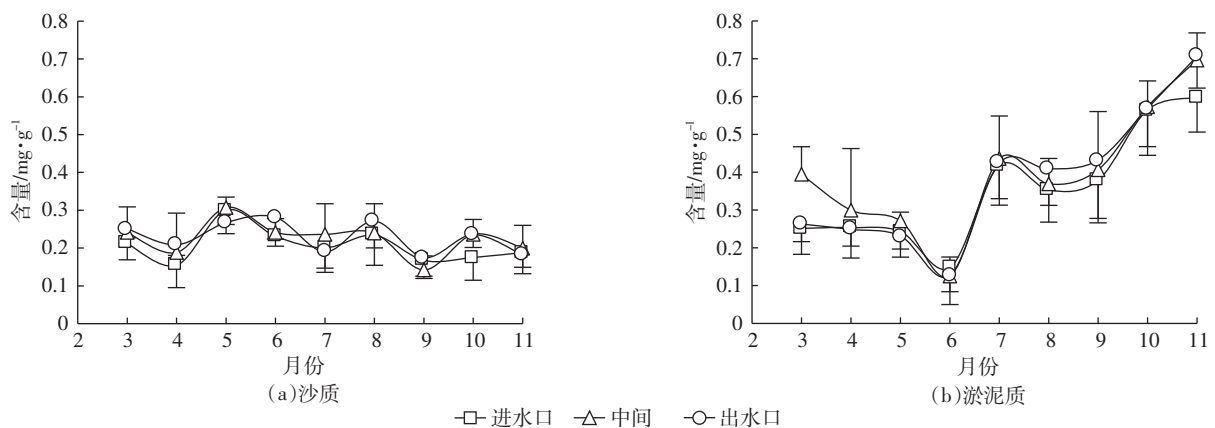


图4 沙质、淤泥质中总氮含量水平分布

Figure 4 Horizontal distribution of TN contents in sandy and silty sediments

高。

## 2.4 底质中磷含量及其变化

由图5可知,沙质中总磷含量为 $(0.02 \pm 0.02) \sim (0.09 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,呈先降后升趋势。淤泥质中总磷含量较高,为 $(0.50 \pm 0.02) \sim (0.72 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,与沙质中含量有一个数量级之差,也呈先降后升趋势,但是变化较沙质更小。李小伟等<sup>[12]</sup>研究发现广州市郊养殖池塘上层沉积物中总磷含量为 $1.643 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;何琳等<sup>[6]</sup>研究发现混养鱼塘中上层沉积物总磷含量为 $(0.68 \pm 0.09) \sim (0.70 \pm 0.07) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。本研究对象是参池,养殖年限较鱼塘短,总体污染程度较轻。与“第二次全国海洋污染基线调查技术规程”中沉积物总磷( $\leq 0.60 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )标准比较,淤泥质总磷含量较高,存在污染风险,应加强对淤泥质池塘的环境监测。

## 2.5 底质中磷含量垂直分布特征

由图6可知,沙质上层中总磷含量为 $(0.03 \pm 0.01) \sim (0.09 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,下层中总磷含量为 $(0.02 \pm 0.01) \sim (0.08 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。淤泥质上层中总磷含量为 $(0.60 \pm 0.12) \sim (0.74 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,下层中总磷含量为 $(0.43 \pm$

$0.09) \sim (0.69 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。除了淤泥质上层总磷含量在6月份略低于下层外,两种底质中,上层总磷含量均高于下层,表现出“上层富集现象”<sup>[13]</sup>,方差分析结果表明都没有显著性差异( $P > 0.05$ )。这可能是由于受到养殖活动的影响,大量含磷有机物富集在沉积物上层,但是由于取样深度差异不大,总磷含量并没有显著性差异。

## 2.6 底质中磷含量水平分布

不同底质池塘不同区域总磷含量分布如图7所示。沙质中进水口总磷含量为 $(0.02 \pm 0.01) \sim (0.08 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,中间区总磷含量为 $(0.03 \pm 0.02) \sim (0.09 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,排水口总磷含量为 $(0.02 \pm 0.01) \sim (0.09 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,淤泥质中进水口总磷含量为 $(0.43 \pm 0.11) \sim (0.69 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,中间区总磷含量为 $(0.52 \pm 0.14) \sim (0.75 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,排水口总磷含量为 $(0.58 \pm 0.12) \sim (0.73 \pm 0.11) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。两种底质中,进水口总磷含量总体处于较低水平。沙质中,3—8月中间区、排水口总磷含量无明显差别,9—11月中间区总磷含量明显高于排水口;淤泥质中,6—9月排水口总磷含量较高,其他月份中间区总磷含量较高。

## 3 讨论

研究发现,淤泥质和沙质中氮磷含量月变化有明显的区别。这是由于不同性状的底泥对氮、磷的吸附和释放能力不同,这种差异性是由不同底质具有不同的氮、磷饱和度和组分构成而造成的。研究表明,不同的基质底质对水体污染程度产生不同的影响,粒径越小,比表面积越大,吸附污染物的能力越大,氮、磷的含量越高,因而其污染风险的程度也越大<sup>[14]</sup>。沙质孔隙度较大,质地疏松,易于流动,悬浮程度好,易与上覆水进行循环,调查发现沙质池水体中氮、磷含量变

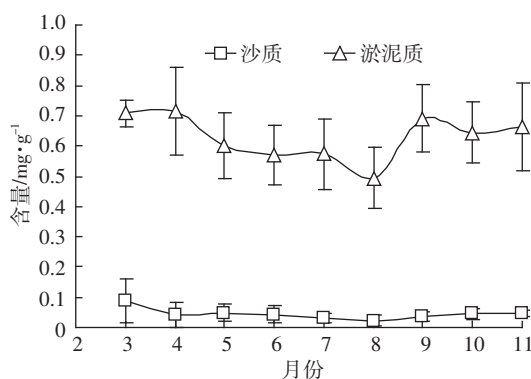
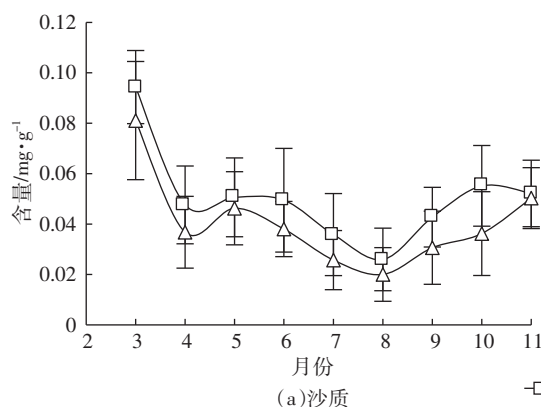
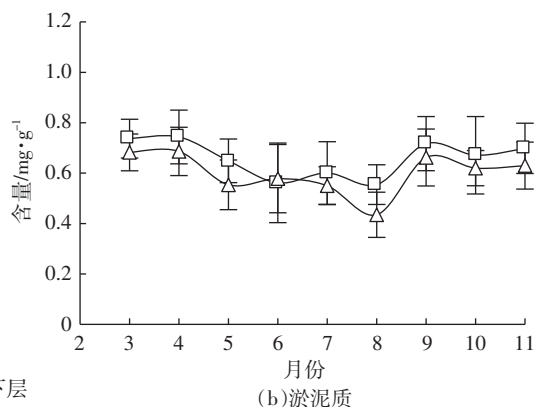


图5 底质中总磷含量变化

Figure 5 Variation of TP contents in sediment



(a)沙质



(b)淤泥质

图6 沙质、淤泥质中总磷含量垂直分布

Figure 6 Vertical distribution of TP contents in sandy and silty sediments

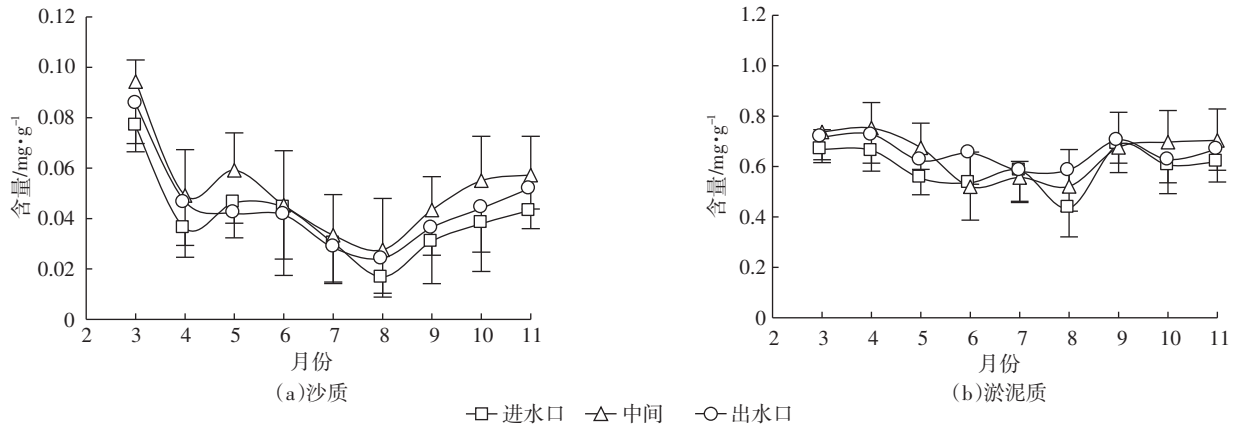


图7 沙质、淤泥质中总磷含量水平分布

Figure 7 Horizontal distribution of TP contents in sandy and silty sediments

化较小。淤泥质的悬浮颗粒物较多,易于沉降在池塘底部<sup>[5]</sup>。淤泥颗粒较小、比表面积大,因而更易吸附含氮、磷化合物,同时阻碍底质中的氮、磷盐向水层扩散、迁移,导致淤泥底质中总氮、总磷含量高于沙质,随着不断的吸附,含量逐渐升高,调查后期含量最高。淤泥中氮磷也会同时会释放到水体中,对水体中总氮、总磷的测定发现,调查初期沙质池水体中氮、磷含量较高,后期淤泥质参池水体中氮、磷含量明显升高,但沙质池水体的变化较小(待发表)。这说明随养殖时间增加,淤泥质受内源污染的风险较大。

淤泥质中总氮含量先降后升,总体呈增长趋势,这一方面是由于6月份海参进入休眠期,投喂的饵料相应减少,且温度的升高有利于氮的释放,同时微生物活性增强,也促进底质中有机氮向无机氮转化,进而释放进入上覆水体,最终使底质中总氮含量降低。另一方面,水温升高时,溶氧降低,使环境处于还原状态,促进底质中氨氮的释放。此外,藻类的大量繁殖消耗溶解氧,致使水质恶化,死亡的藻类沉降到池底将释放大量有机质,使底质中总氮含量逐渐升高。沙质中总氮含量相对较低,变化范围较小。淤泥质中总磷含量几乎是沙质中的16倍,这不仅说明淤泥质对磷的吸附能力要远远高于沙质,也说明底质类型对磷含量的影响可能大于对氮的影响。两种底质中总磷含量变化都是先降后升,在8月份达到最低点,说明季节改变对参池生境有很大的影响。夏季,盐度的上升为底质中的微生物还原提供了硫酸盐,使磷大量释放<sup>[6]</sup>。范成新等<sup>[17]</sup>研究发现底质中磷释放量随着水温上升而上升,与本文的研究结果一致。与此同时,夏季藻类大量繁殖,消耗了水体中的可溶性磷,也促使底质中的磷向上覆水体释放。由于海参的最适生长

水温为10~16℃,一年中的3—5月、9—11月是海参的生长盛期。当温度超过25℃时,海参进入夏眠状态,11月水温低于4℃时海参进入冬眠,此时投饵量减少,残饵粪便都相应减少<sup>[18]</sup>。由此推测,未采样调查的冬眠期,参池底质中的氮磷含量应该低于秋季。

何芳等<sup>[19]</sup>对水库沉积物氮磷释放特征研究时发现,在好氧条件下磷释放无明显差别,在厌氧条件下磷释放量由大到小为中层(14~16 cm)、表层(0~2 cm)和底层(28~32 cm),硝化作用存在显著差异由强至弱为表层、中层、深层。而本文研究发现除夏季个别月份外,上层底质中总氮、总磷含量大于下层,差异不显著。这一方面可能是由于随着沉积深度的加深,含水量逐渐降低,下层疏松度较上层差,总氮富集相对较稳定,而上层底质接近水体,下层与水体中的氮都会向上层富集,最终导致上层底质中总氮含量高于下层。另一方面水库与池塘环境的差别造成不同深度底质中细菌种类和数量不同,不同深度硝化作用的强度不同,差异不显著可能是由取样深度差别不大造成的。

在研究底质中氮、磷含量水平分布时发现,进水口氮、磷含量较低,排水口和中间区氮、磷含量较高。这可能是由于当水流扰动池塘底质时,使泥沙颗粒悬浮起来,促进间隙水中氮、磷的扩散,并进而增加释放量,且释放量与扰动速度成正比<sup>[20-21]</sup>。进水口水流速度较大,因此总氮含量较低,中间区是网箱养殖区,海参养殖密度大,投饵量大,相应食物残渣和排泄物较容易在此处沉积,氮磷含量较高。沙质中3个区域的总氮含量分布没有明显规律,淤泥质中,3—5月中间区总氮含量处于较高水平,随着养殖过程的进行,3个区域总氮含量趋于一致,这可能与饵料的投放和池塘排换水有关。调查的前期和后期,中间区总磷含量均

高于排水口,后期两区域磷含量差别较大。这说明随着养殖过程的进行,池塘受磷污染的风险增大。6—8月3个区域的氮磷含量差别不大,没有明显规律,这可能是由于此时处于海参生长的休眠期。与淤泥质池塘相比,沙质池塘水平分布变化较大,这与淤泥质颗粒细小,吸附能力较强有关。

## 4 结论

(1)沙质中总氮含量为 $(0.16\pm0.05)\sim(0.29\pm0.03)$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,淤泥质中总氮含量为 $(0.13\pm0.06)\sim(0.67\pm0.09)$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。沙质中总磷含量为 $(0.02\pm0.02)\sim(0.09\pm0.07)$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,淤泥质中总磷含量为 $(0.50\pm0.02)\sim(0.72\pm0.04)$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,比沙质中含量高一个数量级。底质类型对磷含量的影响可能大于对氮的影响。沙质受氮污染的风险较小,淤泥质总氮含量在10月份和11月份超标,此时应加强池塘环境监测。沙质中总磷含量处于较低水平,淤泥质中总磷含量较高,受内源污染的风险较大。

(2)在时间上,沙质中总氮含量变化范围小;淤泥质中总氮含量在6月份最低,11月份最高,总体呈增长趋势。两种底质中总磷含量都呈先降后升趋势,在8月份达到最低点。淤泥质的缓冲能力更强,但是随着养殖过程的进行,受内源污染的风险更大。

(3)在垂直方向上,上层、下层总氮含量相差不大,在不同月份上下波动。上层总磷含量略高于下层,差异不显著。

(4)在水平方向上,进水口氮磷含量最低。排水口和中间区总氮含量上下波动,相差不大,底质受氮污染的风险较小。调查的前期和后期,中间区总磷含量均高于排水口,后期两区域磷含量差别较大,说明底质受磷污染的风险可能大于氮污染,且随着养殖过程的进行,底质受磷污染的风险增大。

(5)综合评价,沙质参池底质中氮磷含量低、变化小,可能更有助于海参的可持续健康养殖,淤泥质中氮磷含量较高,且随着养殖月份增加明显升高,作为水体中营养盐的主要来源,存在较大的内源污染风险。

## 参考文献:

- [1] 刘峰,高云芳,王立欣,等.水域沉积物氮磷赋存形态和分布研究进展[J].水生生态学杂志,2011,32(4):137-144.
- [2] LIU Feng, GAO Yun-fang, WANG Li-xin, et al. Review on nitrogen and phosphorus forms and distribution in sediments[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(4):137-144.
- [3] 刘峰.仿刺参池塘氮磷收支和沉积物特征性氮磷垂直分布的实验研究[D].青岛:中国海洋大学,2009:1-81.
- [4] LIU Feng. Experimental studies on nitrogen and phosphorus budgets and the vertical distribution of nitrogen and phosphorus forms in the sediments of sea cucumber ponds[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009:1-81.
- [5] Fu Chang-ying, Fang Tao, Deng Nan-sheng, et al. Temporal and spatial distribution of phosphorus in the Xiangxi river [J]. *Acta Hydrobiology Science*, 2006, 30(6):647-651.
- [6] Ekubo A A, Abowei J F N. Review of some water quality management principles in the culture fisheries[J]. *Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology*, 2011, 3(12):1342-1357.
- [7] 蒋增杰,方建光,毛玉泽,等.宁波南沙港养殖水域沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量[J].农业环境科学学报,2010,29(12):2413-2419.
- [8] JIANG Zeng-jie, FANG Jian-guang, MAO Yu-ze, et al. Diffusion fluxes of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus across sediment: Water interface in Nansha aquaculture area, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12):2413-2419.
- [9] 何琳,江敏,戴习林,等.混养鱼塘水中磷含量及上层沉积物中磷赋存形态的初步研究[J].农业环境科学学报,2012,31(6):1236-1243.
- [10] HE Lin, JIANG Min, DAI Xi-lin, et al. Examination of phosphorus contents and its forms in the surficial sediments of polyculture fish ponds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6):1236-1243.
- [11] Zhou Huai-dong, Jiang Cui-ling, Zhu Li-qin, et al. Impact of pond and fence aquaculture on reservoir environment[J]. *Water Science and Engineering*, 2011, 4(1):92-100.
- [12] 郑瑞芝,陈然,王鑫璜.沉积物总氮总磷同时消解分析方法[J].海洋通报,2009,28(4):98-101.
- [13] ZHENG Rui-zhi, CHEN Ran, WANG Xin-huang. Study on simultaneous digestion and respective analysis method of TN and TP in sediment samples[J]. *Marine Science Bulletin*, 2009, 28(4):98-101.
- [14] 国家环境保护总局. GB/T 11894—1989 水质总氮的测定:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].北京:中国标准出版社,1989.
- [15] Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China. GB/T 11894—1989 Water quality determination of total nitrogen: Alkaline potassium persulfate digestion UV spectrophotometric method [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1989.
- [16] 国家环境保护总局. GB/T 11893—1989 水质总磷的测定:钼酸铵分光光度法[S].北京:中国标准出版社,1989.
- [17] Ministry of Environmental Protection of People's Republic of China. GB/T 11894—1989 Water quality determination of total phosphorus: Ammonium molybdate spectrophotometric method [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1989.
- [18] 第二次全国海洋污染基线调查领导小组办公室.第二次全国海洋污染基线调查技术规程[M].北京:海洋出版社,1997.
- [19] The Second National Baseline Survey of Marine Pollution Leading Office. The second Marine pollution baseline survey technology procedures[M]. Beijing: Ocean Press, 1997.
- [20] 李小伟,乔永民,杨宇峰.广州市郊养殖池塘上层沉积物中氮磷的初步研究[J].水利渔业,2008,28(1):74-77.
- [21] LI Xiao-wei, QIAO Yong-min, YANG Yu-feng. Preliminary study on

- nitrogen and phosphorus in the upper sediment of culture ponds in Guangzhou's suburbs[J]. *Reservoir Fisheries*, 2008, 28(1):74-77.
- [13] 孟春红, 赵冰. 东湖沉积物中氮磷形态分布的研究[J]. 环境科学, 2008, 29(7):1831-1837.
- MENG Chun-hong, ZHAO Bing. Vertical distribution of species of nitrogen and phosphorus in the sediment of Donghu lake[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7):1831-1837.
- [14] 罗淑葱, 秦伯强, 朱广伟. 太湖底泥蓄积量和可悬浮量的计算[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(6):491-496.
- LUO Lian-cong, QIN Bo-qiang, ZHU Guang-wei. Calculation of total and resuspendable sediment volume in lake Taihu[J]. *Oceanologia Etlimnologia Sinica*, 2004, 35(6):491-496.
- [15] Uzukwu P U, George O S, Jamabo N A. The problem of water seepage in aquaculture: A preliminary study of the soils of arac fish farm, O-muihuechi-aluu, rivers state, Nigeria[J]. *Asia Journal of Agriculture Science*, 2011, 3(2):63-69.
- [16] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Ecology: Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323(5917):1014-1015.
- [17] 范成新, 张路, 杨龙元. 湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(4):370-378.
- FAN Cheng-xin, ZHANG Lu, YANG Long-yuan. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake[J]. *Oceanologia Etlimnologia Sinica*, 2002, 33(4):370-378.
- [18] 任贻超, 王芳, 董双林, 等. 荣成靖海湾海参养殖池塘初级生产力季节变化特征[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(3):24-28.
- REN Yi-chao, WANG Fang, DONG Shuang-lin, et al. Seasonal characteristics of primary production of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) culture ponds in Jinghai bay, Rongcheng[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(3):24-28.
- [19] 何芳, 李富生, 王立国. 浅水型水库活性区沉积物氮磷释放特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2):783-788.
- HE Fang, LI Fu-sheng, WANG Li-guo. Release characteristics of nitrogen and phosphorus by sediment of activated zone in shallow reservoirs[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2012, 43(2):783-788.
- [20] 苏丽丹, 林卫青, 杨漪帆, 等. 淀山湖底泥氮、磷释放通量的研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(5):32-39.
- SU Li-dan, LIN Wei-qing, YANG Yi-fan, et al. Fluxes of nitrogen and phosphorus releasing from sediment in Dianshan Lake[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, 33(5):32-39.
- [21] 李一平, 逢勇, 吕俊. 水动力条件下底泥中氮磷释放通量[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4):318-324.
- LI Yi-ping, PANG Yong, LÜ Jun. On the relation between the release rate of TN, TP from sediment and water velocity[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4):318-324.