

宋洪旭,邢荣莲,王会毅,等. 2 种底质参池水体中氮磷营养盐分布特征[J]. 江苏农业科学,2015,43(5):336-340.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.05.110

## 2 种底质参池水体中氮磷营养盐分布特征

宋洪旭<sup>1</sup>,邢荣莲<sup>1</sup>,王会毅<sup>1</sup>,曹学彬<sup>2</sup>

(1. 烟台大学生命科学学院,山东烟台 264005;2. 山东省东方海洋科技股份有限公司/国家海藻与海参工程技术研究中心,山东烟台 264005)

**摘要:**于 2011 年 3—11 月分别对沙质、淤泥质参池的表层和底层水体进行定点采样,测定水体中总氮(TN)、无机氮(DIN)、总磷(TP)、活性磷( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ )的含量,分析 2 种底质参池水体中氮磷营养盐的分布特征及水体中氮磷比(DIN/P)的变化。结果表明:沙底质池塘水体中 TN、TP 含量均低于淤泥底质,沙质底质池塘水体中 TN、TP 含量高于淤泥质底质池塘水体;淤泥质池塘水体中的 TN、TP 含量较低但大体上缓慢增高,9 月或 10 月迅速增高;氮、磷在 2 种底质池塘水体的垂直分布差异不显著;3—11 月的沙质池塘水体以及 7—11 月的淤泥质池塘水体中 DIN/P 均低于 16,氮是限制因素,3—6 月的淤泥质池塘水体中 DIN/P 高于 16,磷是限制因素。

**关键词:**刺参;水华;藻类

**中图分类号:** X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)05-0336-05

刺参池塘生态系统作为人工圈养系统,具有结构单一、生态缓冲能力较弱、抗干扰能力弱、稳定性差等缺点<sup>[1]</sup>。在养殖过程中常人工投入大量的营养物质(饵料、肥料等),由于养殖系统对其利用有限,导致有机质在池塘底部沉积<sup>[2]</sup>。刺参养殖过程中产生的粪便、水生植物尸体等物质也通过吸附、络合、沉降等过程沉积在池塘底部,使得参池沉积物成为氮磷等营养盐的重要蓄积库<sup>[3]</sup>。一定条件下,参池沉积物中的营养盐会通过分子扩散、再悬浮以及生物扰动等过程重新释放到上覆水中,造成“内源污染”<sup>[4]</sup>。研究发现,不同底泥对氮磷营养盐的吸附能力不同,当营养盐释放时,会造成上覆水体不同程度污染<sup>[5-6]</sup>。底泥粒径越小,比表面积越大,吸附污染物的能力越强。底泥中氮磷含量越高,水体受污染风险也

越大<sup>[7]</sup>。与海洋、湖泊等自然水体相比,养殖池塘水体颗粒悬浮物浓度波动较小<sup>[8]</sup>。此外,底泥颗粒组成不同,水体中氮磷含量垂直分布也不同<sup>[9]</sup>。氮磷在养殖水体中的赋存形态、含量比例及变化特征往往会引起浮游植物、藻类生长的变化,进而对养殖环境造成影响<sup>[10-11]</sup>。近年来,对刺参养殖池塘水质的研究多集中在宏观调查、影响因素等方面<sup>[12-14]</sup>。关于不同底质刺参养殖池塘水体中氮磷存在特征研究尚未见报道。本研究定点采集沙质和淤泥质参池表层、深层的水样,对不同底质参池水体中氮磷含量进行测定,分析不同底质参池水体中氮磷存在特征及分布规律,旨在为参池富营养化程度监测、污染风险评估及刺参健康养殖提供参考。

### 1 材料与方法

#### 1.1 参池概况

2011 年 3—11 月(1 月、2 月、12 月为冰冻期)在山东省烟台市刺参养殖池塘进行试验。沙质(粒径 50~1 000  $\mu\text{m}$ )池塘面积约 6.6  $\text{hm}^2$ ,水深 1.5~2.0 m;淤泥质(粒径 2~50  $\mu\text{m}$ )池塘面积约 10  $\text{hm}^2$ ,水深 1.5~2.0 m。池塘养殖

的研究[J]. 化工环保,2001,21(1):1-5.

[4] Manu B, Chaudhari S. Anaerobic decolorisation of simulated textile wastewater containing azodyes [J]. Bioresour Technol, 2002, 8(2):231-255.

[5] Pearce C I, Lloyd J R, Guthrie J T. The removal of colour from textile wastewater using whole bacterial cell: a review [J]. Dyes and Pigments, 2003, 5(8):179-196.

[6] Li X Z, Zhang M. Decolorization and biodegradability of dyeing wastewater treated by a  $\text{TiO}_2$ -sensitized photo-oxidation process [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(9):48-55.

[7] Hao J H, Zhao Q S. The development of membrane technology for wastewater treatment in the textile industry in China [J]. Desalination, 1994, 9(8):353-360.

[8] 赵清华, 全学军, 谭怀琴, 等. 柑橘皮渣生物吸附剂对  $\text{Ni}^{2+}$  的吸附特性[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2009, 23(5):50-54.

收稿日期:2014-06-16

基金项目:国家自然科学基金(编号:31001113)。

作者简介:宋洪旭(1989—),男,山东诸城人,硕士研究生,从事生物化工研究。E-mail:conan-abc@163.com。

通信作者:邢荣莲,博士,副教授,主要从事藻类技术研究。E-mail:xingronglian@163.com。

适的水平进行 5 因素均匀试验,根据试验结果进行回归分析,得到回归模型,决定系数为 0.999 8。根据回归模型得到最优工艺组合:NaOH 质量分数为 20%,改性温度为 70  $^{\circ}\text{C}$ ,改性时间为 35 min,颗粒粒径过 300 目筛,料液比为 0.05 g/mL 在此条件下对品红的去除率为 87.32%。以橘皮制备的新型吸附剂应用前景广阔,本试验为橘皮吸附剂的进一步研究提供了理论基础。

#### 参考文献:

[1] 滕宗焕, 陈建中. 改性粉煤灰的吸附机理及其在废水处理中的应用[J]. 西南给排水, 2007, 29(4):23-27.

[2] 赵亚娟, 刘转年, 赵西成. 粉煤灰吸附剂的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(11):88-90, 94.

[3] 刘明华, 刘卫国, 张宏, 等. 球形纤维吸附剂对  $\text{Cr}^{3+}$  吸附和解吸

3 年,刺参养殖密度为  $2\,250\text{ kg/hm}^2$ 。随机选取沙质、淤泥质参池各 1 口作为研究对象,试验期间固定池塘采样。

## 1.2 样品采集

在每口池塘中间和四周各选取 6 个点,用采水器在距离水面和底泥  $0\sim 40\text{ cm}$  处分别采集  $500\text{ mL}$  表层水、底层水,装入经  $5\%\sim 10\%$  (体积比) 盐酸浸泡  $8\text{ h}$  的 PVC 塑料桶中,加入占水样体积  $2\%$  的三氯甲烷固定,表层水及底层水各取 3 个平行样。采集水样后,置于保温箱中,  $4\text{ h}$  内运回实验室,立即用  $0.45\text{ }\mu\text{m}$  混合纤维素酯膜过滤冷藏待测。

## 1.3 沉积物理化性质

用采样器(专利)采集水下  $10\text{ cm}$  深度的底泥,用自封袋装好,尽快运回实验室放入  $4\text{ }^\circ\text{C}$  冰箱储藏。沉积物主要理化性质见表 1。

表 1 沉积物基本理化性质

样品	总氮含量 (mg/kg)	总磷含量 (mg/kg)	粒径 ( $\mu\text{m}$ )	pH 值
沙质底泥	160~290	20~90	50~1 000	7.65~8.33
淤泥质底泥	230~670	500~720	2~50	7.71~8.35

## 1.4 测定方法

采用过硫酸钾氧化法测定总氮(TN)、总磷(TP)含量;采用铈铬还原比色法测定硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )含量;采用茚三酮分光光度法测定亚硝态氮( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ )含量;采用次溴酸盐氧化法测定铵态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )含量;采用磷钼蓝分光光度法测定活性磷( $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ )含量<sup>[15-16]</sup>。无机氮(DIN)含量为氨态氮( $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ )、硝态氮( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ )、亚硝态氮( $\text{NO}_2^- - \text{N}$ )三者含量之和<sup>[17]</sup>。

## 1.5 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件处理数据,采用 SPSS 13.0 软件进行方差分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 池塘水体中氮、磷的存在特征

2.1.1 总氮、总磷的存在特征 如图 1 所示,沙质池塘水体中 TN 含量为  $0.19\sim 0.29\text{ mg/L}$ ,淤泥质池塘水体中 TN 含量为  $0.14\sim 0.39\text{ mg/L}$ 。3—8 月,沙质池塘水体中 TN 含量大于  $0.2\text{ mg/L}$ ,8—11 月 TN 含量略有降低。淤泥质池塘水体 TN 含量除 9—10 月略有降低外,总体呈上升趋势,11 月含量达到最高且 TN 含量高于同时期的沙质池塘水体。方差分析表明,3—11 月 2 种底质池塘水体 TN 含量差异显著。

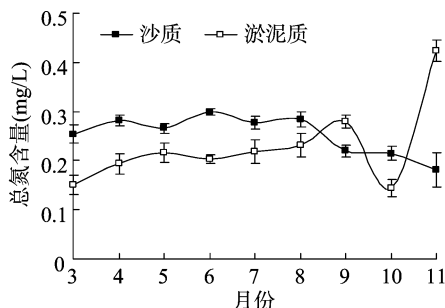


图 1 2 种底质池塘水体中总氮含量变化

由图 2 可知,沙质池塘水体中 TP 含量为  $0.05\sim 0.07\text{ mg/L}$ ,淤泥质池塘水体中 TP 含量为  $0.04\sim 0.08\text{ mg/L}$ 。

3—10 月,沙质池塘水体中 TP 含量均高于同时期淤泥质池塘水体。9—11 月,淤泥质池塘水体中 TP 含量急剧增大。11 月淤泥质池塘水体 TP 含量高于沙质池塘水体。方差分析表明,3—11 月沙质池塘水体与淤泥质池塘水体 TP 含量差异显著。研究发现,底泥粒径越小,比表面积越大,其对营养盐的吸附能力越大。底泥中氮磷含量越高,水体受污染风险越大<sup>[18]</sup>。沙质池塘水体中 TN 含量、TP 含量比淤泥质池塘高,这是因为沙质底泥孔隙度较大,质地疏松,易于流动,悬浮程度好,底泥中的氮磷容易释放到上覆水体中。淤泥质池塘水体中 TN 含量、TP 含量呈增长趋势,11 月达到最大值,这是因为淤泥质的悬浮颗粒物较多,易于沉降在池塘底部,淤泥质底泥颗粒较小、比表面积大,更易吸附含氮、磷营养盐,在一定程度上能阻碍底质中的氮、磷盐向水层扩散迁移<sup>[19]</sup>。淤泥质池塘底泥对氮磷吸附能力较强,但是底质中的氮磷会缓慢地向水体中释放,最终使水体中 TP 含量达到较高水平。沙质池塘水体中的 TP 含量高于淤泥质池塘水体,但淤泥底质中 TP 含量是沙质底质 TP 含量的几十倍,原因在于沙泥颗粒较大( $50\sim 1\,000\text{ }\mu\text{m}$ ),对磷的吸附能力较弱,导致底泥中磷释放能力较强<sup>[7]</sup>。沙质底泥中的磷易于释放到水体中,从而出现沙泥中 TP 含量较低而水体中 TP 较高的现象;淤泥颗粒较小( $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ ),对磷的吸附能力较强,底质中的磷会缓慢释放到水体中,因此虽然淤泥底质 TP 含量较高,水体中 TP 比较低。9—11 月,淤泥质池塘水体 TN、TP 含量迅速增加,可能是通过前期的积累,淤泥质底质中 TN、TP 得以大量释放。此外,进入秋冬季节,池塘中藻类数量减少,水体氮磷消耗减少,导致淤泥池塘水体中 TN、TP 含量急剧增加。由于沙质池塘底泥本身氮磷含量较低且氮磷释放缓慢,内源污染风险较小;淤泥质池塘沉积物存在氮磷暴发的隐患,内源污染风险较大<sup>[20]</sup>。

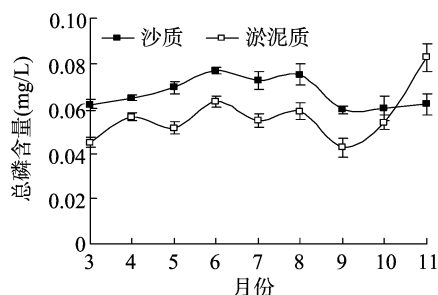


图 2 2 种底质池塘水体中总磷含量变化

2.1.2  $\text{DIN}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  的存在特征 由图 3 可知,沙质池塘水体中 DIN 含量为  $0.041\sim 0.089\text{ mg/L}$ ,淤泥质池塘水体中 DIN 含量为  $0.039\sim 0.105\text{ mg/L}$ ,3—11 月不同底质池塘养殖水体中的 DIN 含量总体呈下降趋势。方差分析表明,沙质池塘与淤泥质池塘养殖水体中 DIN 含量差异显著。淤泥质池塘水体中 DIN 含量多数高于沙质池塘水体,这不同于 2 种底质水体中 TN 含量分布情况,且 2 种底质池塘水体中 DIN 含量高于海湾养殖水体 DIN 含量<sup>[21]</sup>。

由图 4 可知,沙质池塘水体中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  含量为  $0.008\sim 0.022\text{ mg/L}$ ,淤泥质池塘水体中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  含量为  $0.004\sim 0.012\text{ mg/L}$ 。沙质参池水体中的  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  含量明显高于淤泥质参池。沙质水体中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  含量波动较大,且在 5 月、

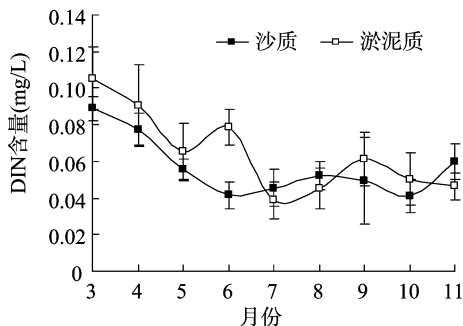


图3 2种底质池塘水体中DIN含量变化

10月各出现1个峰值。3—11月,淤泥质水体 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量整体呈上升趋势,但变幅不大。方差分析表明,3—11月,沙质池塘水体和淤泥质池塘水体中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量差异显著。淤泥质池塘水体中TN含量低于沙质池塘水体,而DIN含量却基本高于沙质池塘水体,原因在于有机质更容易沉积在淤泥质池塘的底部,使得淤泥质底泥中含有较多的有机质,底泥中的有机质在微生物作用下氨化、降解以DIN的形态释放到水体中,使得淤泥质池塘水体中DIN含量高于沙质池塘水体<sup>[22-23]</sup>。3—6月,2种底质参池中DIN含量大体呈下降趋势,7—11月变化不明显,这是由于春夏两季,浮游植物和藻类生长会消耗水体中的DIN,促进底泥中DIN向水体释放,导致水中DIN含量较高,随着水体中藻类生物量减少,水体中DIN含量开始降低或持平<sup>[24]</sup>。赵卫红等研究发现,烟台市海湾养殖水体中DIN含量为0.015 mg/L,这可能是由于刺参养殖池塘是近似封闭的生态环境,水体自然净化能力较弱<sup>[21]</sup>。沙质池塘水体活性磷含量远远高于淤泥质池塘水体,而且活性磷含量的变化幅度比较大,这是因为沙质粒径较大、黏度低,不利于活性磷吸附<sup>[22-24]</sup>。淤泥质底质淤泥颗粒细小,底泥对于 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的吸附能力较强,底泥中的 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 缓慢释放到水体中,导致淤泥质池塘水体中的活性磷含量缓慢增加<sup>[25]</sup>。

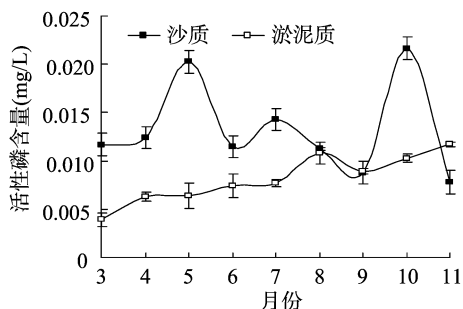


图4 2种底质池塘水体中活性磷含量变化

## 2.2 池塘水体中氮、磷分布情况

由图5可知,沙质池塘表层水体TN含量为0.18~0.28 mg/L,底层水体TN含量为0.20~0.29 mg/L。淤泥质池塘表层水体TN含量为0.14~0.38 mg/L,底层水体为0.14~0.39 mg/L。方差分析表明,2种底质池塘的表层水体与底层水体TN含量差异不显著,说明2种底质养殖池塘水体中TN含量垂直均匀分布。由图6可知,沙质池塘表层水体中TP含量为0.02~0.05 mg/L,底层水体中TP含量为0.02~0.06 mg/L。淤泥质池塘表层水体中TP含量为0.02~0.05 mg/L,底层水体中TP含量为0.02~0.05 mg/L。方差

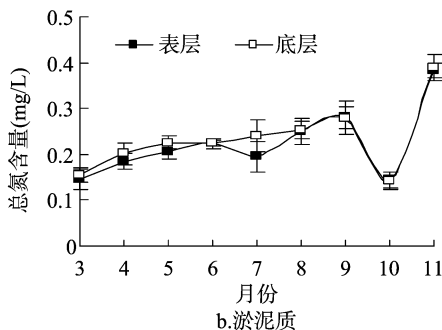
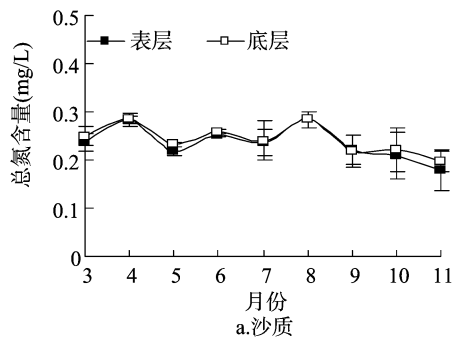


图5 2种底质池塘水体中总氮含量垂直分布情况

分析表明,2种底质池塘表层、底层水体中TP含量差异不显著,说明TP含量在2种底质养殖池塘水体中垂直均匀分布。

由图7可知,沙质池塘表层水体中DIN含量为0.041~0.089 mg/L,底层水体中DIN含量为0.041~0.089 mg/L。淤泥质池塘表层水体中DIN含量为0.043~0.110 mg/L,底层水体中DIN含量为0.033~0.101 mg/L。方差分析表明,2种底质池塘表层水体与底层水体中的DIN含量均无显著差异。由图8可知,沙质池塘表层水体中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量为0.009~0.021 mg/L,底层水体中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量为0.006~0.022 mg/L。淤泥质池塘表层水体中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量为0.004~0.010 mg/L。方差分析表明,2种底质池塘表层和底层水体中 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量均无显著差异。

水体中的无机氮、无机磷含量一般都随着水深增加而增大,有机氮、有机磷分布情况却与之相反<sup>[26]</sup>。水体中氮、磷含量垂直分布不均匀是因为水体垂直方向上水温、盐度、pH值呈梯度变化,水下暗流、潜流以及水体底部存在特殊地形等原因导致营养盐在水体中出现层化现象<sup>[27-28]</sup>。与大型湖泊、近海水域相比,刺参养殖池塘水深较浅,表层水体与底层水体温差极小,池塘水体垂直方向上pH值、盐度没有差异,水体中的颗粒悬浮浓度基本不变<sup>[29]</sup>。所以2种底质的表层水体和底层水体TN、DIN、TP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量均无显著差异,氮磷营养盐含量在养殖水体中垂直均匀分布。刺参池塘水质的实际监测中可直接取表层水体作为样本,简化监测程序。

## 2.3 池塘水体中氮磷比

由图9可知,沙质池塘水体中DIN/P月变化幅度为4.2~16.9,均值为10.8,淤泥质池塘水体中DIN/P月变化幅度为8.8~59.5,均值为21.4,3—6月淤泥质池塘水体DIN/P超过16,7—11月淤泥质池塘水体DIN/P均低于16。沙质参池水体中氮是限制因素,7—11月淤泥质池塘水体中氮是限制因素<sup>[30]</sup>。

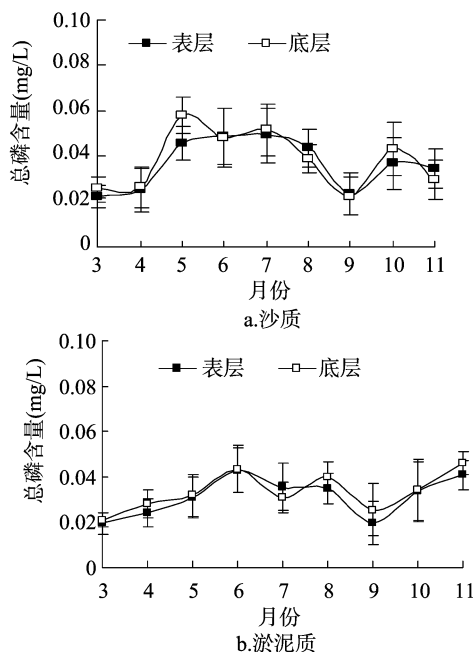


图6 2种底质池塘水体中含量垂直分布情况

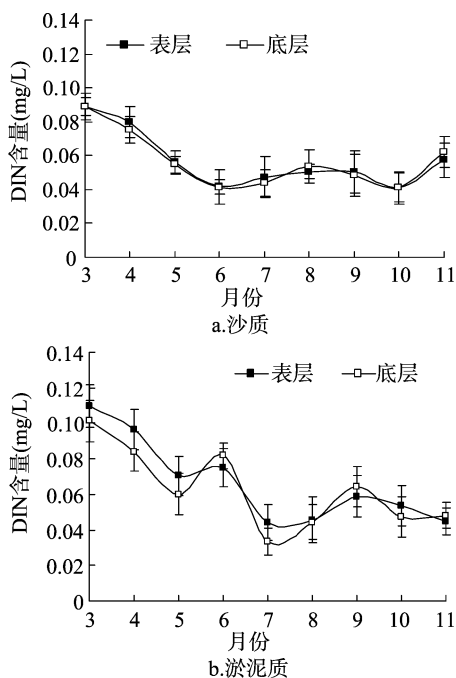


图7 2种底质池塘水体中 DIN 含量垂直分布月变化

浮游植物、藻类生长需要大量氮、磷等营养元素,一般认为,藻类生长需要的氮磷原子比为 16 : 1<sup>[31]</sup>。当水体中的氮、磷含量没有达到其生长所需的最低限度时,浮游植物、藻类生长将受到抑制,水体可能不会富营养化<sup>[31]</sup>。DIN/P 不同的水体中存在与之适应的藻类群落,DIN/P 直接影响藻类生长、细胞组成及其对营养物质的摄取能力<sup>[32-33]</sup>。沙质池塘水体以及 7—11 月的淤泥质池塘水体中,氮是控制生物量的限制因素。研究表明,氮限制情况下,绿藻容易暴发,其中有代表性的绿藻包括四球藻 (*Tetrachlorella alternans*)、美丽胶网藻 (*Dictyosphaerium pulchellum*) 等,这些绿藻对磷需求较多,能够适应较低的 DIN/P 环境<sup>[34-36]</sup>。Xu 等认为,富营养化水体

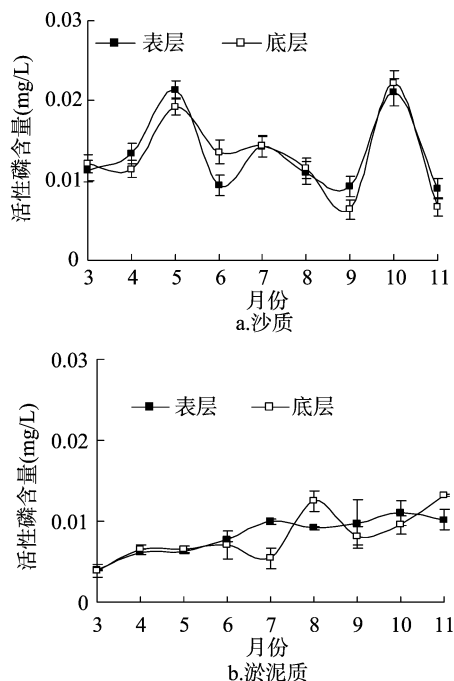


图8 水体中活性磷含量垂直分布月变化

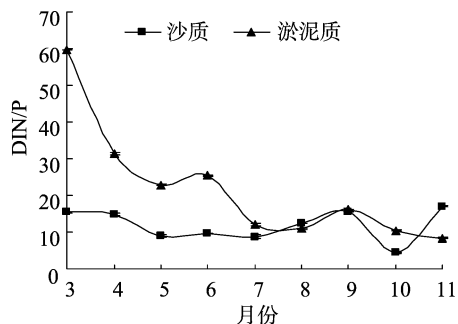


图9 2种底质池塘水体中氮磷比月变化

中,当 DIN/P 较低时,会出现绿藻类生长高峰期;当 DIN/P 较低时,容易发生水华<sup>[35]</sup>。Smith 认为,DIN/P 较低的结果是水体产生水华<sup>[37]</sup>。3—6 月,淤泥质池塘水体中磷是限制因素,研究表明,在磷限制的情况下,蓝藻、硅藻容易暴发,蓝藻门的湖泊鞘丝藻 (*Lyngbya limnetica*) 以及硅藻会在水体中占据优势地位,在 DIN/P 较高的水体中,细胶鞘藻 (*Phormidium tenue*)、铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 等占绝对优势<sup>[34]</sup>,硅藻作为参池中普遍存在的藻群,在适宜的生长环境中会大量繁殖。调查发现,3—6 月,淤泥质池塘中有大量硅藻、蓝藻存在,所以要注意沙质池塘以及淤泥质池塘水体中 DIN/P 变化情况,及时测定水质,避免绿藻、蓝藻、硅藻类暴发,影响水体质量。

### 3 结论

本研究表明,沙质池塘水体中 TN、TP 含量均低于淤泥底质,沙质池塘水体中 TN、TP 含量高于淤泥质底质池塘水体。淤泥质池塘水体中的 TN、TP 含量较低但缓慢增高,9 月迅速增高。淤泥质底质造成池塘水体内部源污染的潜在风险更大,沙质底质对池塘水体内部源污染的影响相对稳定,出现内部源污染

的风险相对较小。氮、磷在 2 种底质池塘水体的垂直分布差异不显著,可为养殖水体水质监测取样工作提供参考。淤泥质池塘水体中 DIN 含量高于沙质池塘水体。3—11 月沙质池塘水体以及 7—11 月淤泥质池塘水体中 DIN/P 均低于 16,氮是限制因素,要关注藻类种群,防止水华发生。3—6 月淤泥质池塘水体中 DIN/P 高于 16,磷是限制因素,要关注蓝藻、硅藻种群,防止水华发生。

#### 参考文献:

- [1] Bonanni P, Caprioli R, Chiara E, et al. Sediment and interstitial water chemistry of the Orbetello lagoon (Grosseto, Italy); nutrient diffusion across the water-sediment interface[J]. *Hydrobiologia*, 1992, 235: 553-568.
- [2] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京:高等教育出版社, 1996.
- [3] 丘耀文, 王肇鼎, 高红莲, 等. 大亚湾养殖水域沉积物-海水界面营养盐扩散通量[J]. *热带海洋*, 1999, 18(3): 83-90.
- [4] 付春平, 钟成华, 邓春光. pH 值与三峡库区底泥氮磷释放关系的试验[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2004, 27(10): 125-127.
- [5] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 1-7.
- [6] Antonio T, Carlos M, Manuel P, et al. Environment implications of intensive marine aquaculture in earthen ponds[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11): 981-988.
- [7] 王会毅, 宋洪旭, 曹学彬, 等. 两种参池底质中氮、磷含量及其分布特征[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(7): 1479-1485.
- [8] 王文强, 温琰茂, 柴士伟. 养殖水体沉积物中氮的形态、分布及环境效应[J]. *水产科学*, 2004, 23(1): 29-33.
- [9] 范成新, 杨龙元, 张路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. *湖泊科学*, 2000, 12(4): 359-366.
- [10] Graudette H E, Lyons W B. Phosphate geochemistry in nearshore carbonates sediments; a suggestion of apatite formation[J]. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists: Special Publication*, 1980, 29: 215-225.
- [11] 刘曼红, 于洪贤, 刘其根, 等. 淡水养殖池塘水质评价指标体系研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(24): 14569-14572.
- [12] 陈东兴. 5 种养殖池塘水质、污染物排放强度及氮、磷收支[D]. 上海:上海海洋大学, 2012.
- [13] 常亚青, 隋锡林, 李俊. 刺参增养殖业现状、存在问题与展望[J]. *水产科学*, 2006, 25(4): 198-201.
- [14] 黄华伟, 王印庚. 海参养殖的现状、存在问题与前景展望[J]. *中国水产*, 2007(10): 50-53.
- [15] 郑瑞芝, 陈然, 王鑫煌, 等. 沉积物总氮总磷同时消解分析方法[J]. *海洋通报*, 2009, 28(4): 97-101.
- [16] 魏复盛. 国家环境保护总局, 水和废水监测分析方法委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [17] 张静, 张瑜斌, 周凯, 等. 深圳湾海域营养盐的时空分布及潜在性富营养化程度评价[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(2): 253-261.
- [18] 罗澈葱, 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.
- [19] 何清溪, 张穗, 方正信, 等. 大亚湾沉积物中氮和磷的地球化学形态分配特征[J]. *热带海洋*, 1992, 11(2): 38-45.
- [20] 韦蔓新, 童万平, 何本茂, 等. 北海湾无机氮的分布及其与环境因子的关系[J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(2): 25-29.
- [21] 赵卫红, 焦念志, 赵增霞. 烟台四十里湾养殖水域营养盐的分布及动态变化[J]. *海洋科学*, 2000, 24(4): 31-34.
- [22] Mowska-Brossard M D. Seasonal variability of benthic ammonium release in the surface sediments of the Gulf of Gdansk (southern Baltic Sea)[J]. *Oceanologia*, 2001, 43(1): 113-136.
- [23] 何琳, 江敏, 戴习林, 等. 混养鱼塘水中磷含量及表层沉积物中磷赋存形态的初步探究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(6): 1236-1243.
- [24] 卢少勇, 金相灿, 郭建宁, 等. 沉积物-水系统中氮磷变化与上覆水对藻类生长的影响[J]. *环境科学*, 2007, 28(10): 2169-2173.
- [25] 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, Omuihuechi-Aluu, Rivers State, Nigeria[J]. *Asia Journal of Agriculture Science*, 2011, 3(2): 63-69.
- [26] 王雨春, 万国江, 尹澄清, 等. 红枫湖、百花湖沉积物全氮、可交换态氮和固定铵的赋存特征[J]. *湖泊科学*, 2002, 14(4): 301-309.
- [27] 齐振雄. 对虾池综合养殖生态系统氮磷收支及沉积物在其中作用的研究[D]. 青岛:青岛海洋大学, 1998.
- [28] 张海生, 王成厚. 浙江近海沉积物中磷的存在形态及其分布特征[J]. *东海海洋*, 1984, 2(4): 56-60.
- [29] 于玲红, 吕超, 李卫平. 冰封期乌梁素海冰层中营养盐垂直分布特征分析[J]. *环境工程*, 2013(增刊1): 170-174.
- [30] Redfield A, Ketchum B, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea water[J]. *The Sea Inter Science*, 1963, 2: 26-27.
- [31] Klausmeier C A, Litchman E, Daufresne T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton[J]. *Nature*, 2004, 429(6988): 171-174.
- [32] John E H, Flynn K J. Growth dynamics and toxicity of *Alexandrium fundyense* (Dinophyceae); the effect of changing N:P supply ratios on internal toxin and nutrient levels[J]. *Eur J Phycol*, 2000, 35: 11-23.
- [33] John P, Christensen, David W, et al. Water column nutrients and sedimentary denitrification in the Gulf of Marine[J]. *Continental Shelf Research*, 1996, 16(4): 489-515.
- [34] 孙凌, 金相灿, 钟远, 等. 不同氮磷比条件下浮游藻类群落变化[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1218-1223.
- [35] Xu Y J, Li D S, Wang W L, et al. Variations of the chemical factors in seawater ponds before and after *Prorocentrum micans* water-bloom[J]. *Trans Oceanol Limnol*, 2000(1): 41-46.
- [36] 崔莉凤, 游亮, 黄振芳, 等. 北京城区水华发生氮磷比变化趋势及原因分析[J]. *环境科学与技术*, 2007, 30(10): 47-49.
- [37] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. *Science*, 1983, 221(4611): 669-671.