

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20201217002

http://www.yykxjz.cn/

李乐洲, 王祖峰, 张东升, 雷兆霖, 张津源, 杨耿介, 王玉龙, 周玮. 不同管理方式对参池颗粒物沉降作用及沉积物的影响. 渔业科学进展, 2021, 42(4): 29–38

LI L Z, WANG Z F, ZHANG D S, LEI Z L, ZHANG J Y, YANG G J, WANG Y L, ZHOU W. Influence of different management methods on the sedimentation of particulate matter and sediment in sea cucumber ponds. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(4): 29–38

## 不同管理方式对参池颗粒物 沉降作用及沉积物的影响\*

李乐洲<sup>1</sup> 王祖峰<sup>2</sup> 张东升<sup>1</sup> 雷兆霖<sup>1</sup> 张津源<sup>1</sup>  
杨耿介<sup>1</sup> 王玉龙<sup>1</sup> 周玮<sup>1①</sup>

(1. 大连海洋大学水产与生命学院 辽宁 大连 116023; 2. 全国水产技术推广总站 中国水产学会 北京 100125)

**摘要** 为探究不同管理方式对刺参养殖池塘(简称参池)沉降颗粒物及相关底泥、水体指标的影响,分别测定9口参池(分为养水机、自然纳潮、微孔曝气3组参池,每组3个重复)颗粒物在四季的平均沉降量和水平空间分布情况,底泥有机质含量和弧菌(*Vibrio*)总数,水体营养盐含量、浮游植物生物量和净初级生产力。结果显示,自然纳潮和微孔曝气池塘颗粒物平均沉降量的季节、水平分布均无显著差异( $P>0.05$ );养水机池塘颗粒物平均沉降量在夏季为 $(30.33\pm 2.46)$  g/(m<sup>2</sup>·d),极显著高于另外2组参池( $P<0.01$ ),在冬季为 $(7.49\pm 1.17)$  g/(m<sup>2</sup>·d),显著低于另外2组参池( $P<0.05$ );在水平分布上,养水机池塘沉降颗粒物的分布较另外2组参池更均匀;在相同季节,养水机池塘底泥有机质含量和弧菌总数均处于3组参池的最低水平,微孔曝气池塘总体次之,自然纳潮池塘总体最高;3组参池的水体营养盐含量接近,而养水机池塘浮游植物生物量、净初级生产力均处于3组参池中最高水平,微孔曝气池塘总体次之,自然纳潮池塘总体最低。本研究表明,传统海参养殖在自然纳潮换水管理基础上,辅助适宜设备能够影响颗粒物质的沉降规律,加快参池底泥–水体之间营养物质交换,改善水底养殖环境。

**关键词** 仿刺参; 颗粒沉降量; 水平分布; 养水机

**中图分类号** S967.4 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)04-0029-10

水体沉降颗粒物在不投饵刺参(*Apostichopus japonicus*)养殖池塘中具有重要的生态功能,其来源于参池水体,经水流的运输降至池底,既是刺参的重要天然饵料,又是构成沉积物的物质来源(Boyd, 2004; 赵文等, 2009)。沉降颗粒过少,刺参摄食需求受限,

会影响养殖效果,但沉降颗粒在池底堆积,会造成池塘“老水”、致病菌增多等有害现象发生,严重时甚至造成刺参死亡(郑忠明, 2009; 皮坤等, 2015; Callender *et al*, 1982)。参池不同于海洋和大型湖泊,通常深度较浅且封闭,底泥易在风浪、换水和潮汐等

\* 辽宁省科学计划(2018104009)、辽宁省“兴辽英才”项目(XLYC1808029)和大连市第二批领军人才项目共同资助 [This work was supported by Scientific Scheme of Liaoning Province (2018104009), “Xing Liao Ying Cai” Project of Liaoning Province (XLYC1808029), and Second Batch of Leading Talents in Dalian City]. 李乐洲, E-mail: m18004267192@163.com

① 通讯作者: 周玮, 教授, E-mail: zhouwei@dlo.edu.cn

收稿日期: 2020-12-17, 收修改稿日期: 2021-01-08

扰动作用下形成再悬浮,后经矿化、降解等作用释放到水体,适量的有机转化在促进水中生物生长的同时,降低了底质环境压力,但过量的转化会引起水体富营养化(Yahel *et al*, 2008; 舒廷飞等, 2002; 乔延龙等, 2019)。因此,沉降颗粒物的科学调控对于刺参养殖起着至关重要的作用。

海参池塘养殖中,传统的纳潮换水作业是水质管理的主要方式。纳潮换水的频率和换水量一方面能够实现水质更新,另一方面能够减少沉降颗粒在池底的积累(卢超超等, 2014),但换水作业影响有限,无法将多余的沉降颗粒物排出。因此,在换水的基础上,寻求一种合理的方法处理多余的沉降颗粒物,对于养殖系统营养要素的循环具有积极意义。近年来,在纳潮换水的基础上,辅助微孔曝气增氧的参池管理方式得到了广泛推广(陈国海, 2018; 顾海涛等, 2017),该技术在提高水体溶氧的同时,会促进底泥中好氧微生物繁殖,增强沉积物酶活性,使有机化合物转化为浮游生物所利用的营养物质(徐皓等, 2017; 顾海涛等, 2017)。许宽等(2012)和凌芬等(2013)曾就河道底泥进行实验,发现曝气组底泥中有机氮的去除率较对照组高 5%,曝气组底泥中有机质较对照组低 35.1%,说明微孔曝气能加速底泥有害物质分解,并依靠物质流动的方式影响水域环境。

养水机是本团队研发的一款新型参池水质管理设备,相关研究证明(孙广伟等, 2020; 林青等, 2019; 王祖峰, 2016),该设备具有打破参池温、盐跃层(年最大温、盐差分别为 0.7℃、6.65)、提高溶氧含量(年平均溶氧为 8.39 mg/L)、提高养殖产量 30%等优势。但从颗粒物质沉降的角度,深入探讨养水机运行对参池环境的影响还未涉及。因此,本研究选择自然纳潮管理方式下的参池作为空白对照,并对配备微孔曝气增氧机和养水机设备的参池颗粒物质沉降量、沉降颗粒物的分布以及与沉降颗粒物相关的底泥和水体指标进行采集测定,旨在通过比较、分析不同参池管理方式的差异,探究参池管理新思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验参池

参池选自大连市青堆子海域(39.78°N, 123.32°E)的宝发海珍品有限公司,养殖品种为仿刺参。将相邻且管理情况一致(不投饵、不投药、苗种密度规格一致)的 9 口参池分为 3 组,即养水机组、自然纳潮组和微孔曝气组,每组设 3 个重复。各参池均为矩形池塘(600 m×85 m×1.2~2 m),南深北浅,泥沙池底,进、

排水口分别位于池塘最南端和最北端。每月大潮后进行换水,冬季结冰后无换水,夏季除养水机池塘外均出现跃层现象。实验期间,各参池水温变化范围为 -2.1℃~27.5℃,盐度为 29.9~36.3, pH 值为 7.3~8.6,溶氧为 4.2~13.9 mg/L。

### 1.2 实验设备

养水机(专利号: ZL200610077526.5)由进水口吸入表层池水,经进水管和动力与净化装置,由专用喷头从底层水平喷出,其中动力与净化装置由机箱和生物滤料构成(图 1)。运行前,按使用说明接种商品 EM 菌;专用喷头动力为 750 W,出水量为 12 m<sup>3</sup>/h;微孔曝气设备属于面增氧设备,运行时产生上浮气泡,具体工作机理参考陈国海(2018)。养水机与微孔曝气设备均放置于各组参池池底的进水口处,养水机每日 21:00—次日 09:00 工作,冬季(12~2 月)工作 1 h;微孔曝气设备仅在参池缺氧时工作,冬季管道冻结无法工作。

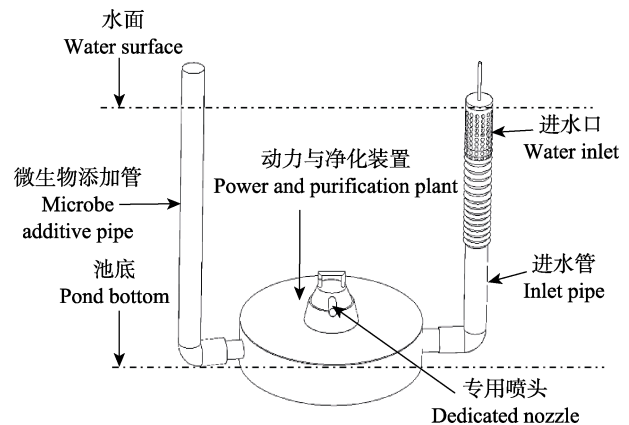


图 1 养水机模拟图

Fig.1 Simulation diagram of water quality regulator

### 1.3 样品采集

2015 年 10 月—2016 年 9 月,每月换水后 1 d,在各池中轴线的进水口、池塘中部、排水口底部分别放置沉降颗粒收集装置(图 2),收集沉降颗粒样品,每点放置 3 个作为重复,6 d 后收回。收集装置由 PVC 圆柱管制成,高为 35 cm,直径为 11 cm,上端用尼龙网遮盖,防止大型水生动物进入,下端嵌套重物,防止漂浮(Takesue *et al*, 2009; Storlazzi *et al*, 2009; Whyte *et al*, 1990)。同时,用直径为 5 cm 的柱形采泥器采集各参池进水口、中部、排水口的表层(0~10 cm)泥样,用采水器采集各参池进水口、中部、排水口的表层、中层、底层 1 L 混合水体水样(泥样和水样每份均采集 3 个作为重复)。

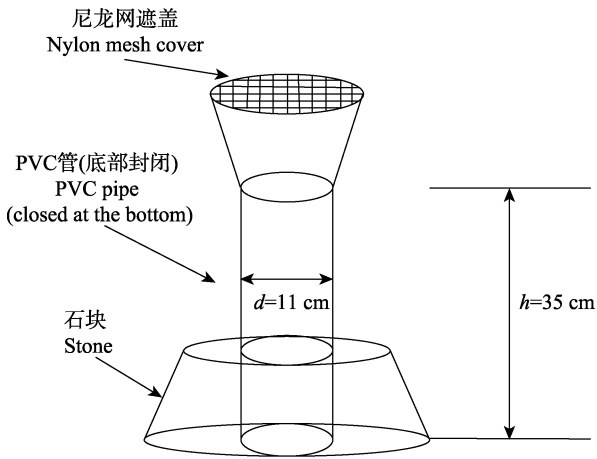


图 2 沉降颗粒物收集装置  
Fig.2 Settled particles collection device

1.4 样品测定

分别同步测定 3 组参池的进水口、中部、排水口颗粒物质的沉降量, 以及底泥和水体中的相关指标, 泥样指标包含有机质含量、弧菌(*Vibrio*)数量, 水样指标包含“三氮一磷”[氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N)、硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N)和活性磷酸盐(PO<sub>4</sub>-P)]含量, 浮游植物生物量以及群落净初级生产力[数据均以平均值±标准差(Mean±SD)表示]。

**1.4.1 颗粒物沉降量** 回收的颗粒物静置 2 h 后, 利用虹吸法去除上清液, 将沉降颗粒物倒入培养皿, 转至烘箱, 在 60℃下烘干至恒重后研磨, 用电子天平称重之后, 装入密封袋在干燥器中保存。

各参池不同位置及平均沉降量按公式(1)、(2)计算:

$$Q_A = DW_A / (t \times A) \quad (1)$$

$$Q = (Q_A + Q_B + Q_C) / 3 \quad (2)$$

式中, 进水口、中部、排水口各位置的干质量和颗粒物沉降量分别记为 DW<sub>A</sub>、DW<sub>B</sub>、DW<sub>C</sub> 和 Q<sub>A</sub>、Q<sub>B</sub>、Q<sub>C</sub>, 池塘颗粒物月平均沉降量为 Q, t 为收集时间, A 为装置横截面积。

**1.4.2 有机质含量和弧菌数量** 采集的表层底泥去除杂质, 转至60℃烘箱, 烘干后, 过100目筛并保存。有机质含量使用灼烧法测定(GB 17378.5-2007), 弧菌数量采用培养基法测定(TCBS培养基)。

**1.4.3 营养盐浓度、浮游生物量及初级生产力** 采集的混合水样, 经 0.45 μm 无菌滤膜过滤, 过滤后的水样中, NH<sub>4</sub>-N 使用次溴酸钠氧化法测定, NO<sub>2</sub>-N 使用锌铬还原法测定, NO<sub>3</sub>-N 使用萘乙二胺分光光度法测定, PO<sub>4</sub>-P 使用磷钼蓝分光光度法测定(GB/T 12763.4-2007); 采集的 1 瓶水样送至北京百迈客公司镜检以测定浮游生物量及种类组成; 净初级生产力采

用黑白瓶法测定。

1.5 数据处理与分析

使用EXCEL2010对1.4中各指标月数据按季节(春: 3—5月、夏: 6—8月、秋: 9—11月、冬: 12—2月)整理, 使用SPSS 25.0对整理后的数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和双变量相关性分析, 以 P<0.05 和 P<0.01 分别作为显著差异水平和极显著差异水平。

2 结果

2.1 参池颗粒物平均沉降量的季节特征

分别按照四季变化测定 3 组参池的颗粒物平均沉降量(以下简称沉降量)(图 3)。从图 3 可以看出, 各参池沉降量在周年内均呈春、冬季低, 夏、秋季高的变化特征, 养水机池塘、自然纳潮池塘和微孔曝气池塘沉降量四季变化范围分别为 7.49~30.33、10.39~5.38、10.31~24.94 g/(m<sup>2</sup>·d)。统计分析表明, 在相同季节, 不同组别的参池沉降量具有不同差异水平。春、秋两季各组参池沉降量差异均不显著(P>0.05); 夏季养水机池塘沉降量显著高于另外 2 种参池(P<0.01), 且另外 2 种参池之间差异不显著(P>0.05); 冬季养水机池塘沉降量显著低于另外 2 种参池(P<0.05), 且另外 2 种参池之间差异不显著(P>0.05)。

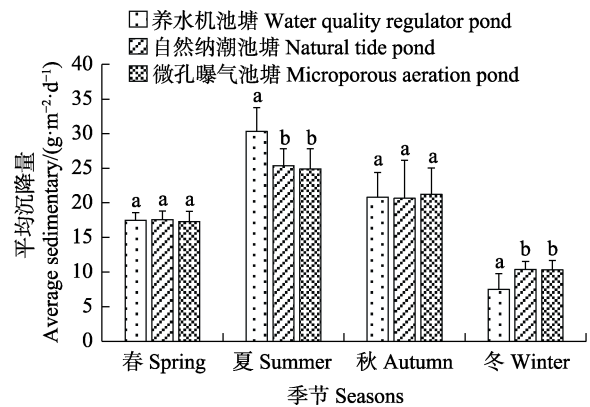


图 3 参池颗粒物平均沉降量的季节特征  
Fig.3 Seasonal characteristics of average sedimentary in sea cucumber ponds

不同字母表示差异显著。下同  
Different letters indicated significant different.  
The same as below

2.2 参池颗粒物平均沉降量的水平分布特征

分别按照四季变化测定3组参池进水口、中部、排水口的颗粒物平均沉降量, 如图4所示。结果显

示,除夏季外,养水机池塘沉降量在水平方向上呈进水口≈中部≈排水口分布特征;除冬季外,自然纳潮与微孔曝气池塘颗粒物沉降量在水平方向上均呈进水口>中部≈排水口的分布特征。养水机池塘、自然纳潮池塘、微孔曝气池塘进水口沉降量变化范围分别为7.36~38.79、10.66~47.04、8.19~48.69 g/(m<sup>2</sup>·d),中部沉降量变化范围分别为8.98~36.21、10.30~17.56、11.81~18.13 g/(m<sup>2</sup>·d),排水口沉降量变化范围分别为6.13~15.99、9.67~11.54、9.14~10.94 g/(m<sup>2</sup>·d)。在相同季节,养水机池塘进水口沉降量均低于另外

2组参池,中部、排水口均高于另外2组参池。统计分析表明,各参池沉降量在不同水平位置上具有不同差异水平。除夏季外,在相同季节,养水机池塘各处沉降量差异不显著( $P>0.05$ );夏季养水机池塘排水口沉降量显著低于进水口和中部( $P<0.05$ );在春、夏、秋三季,自然纳潮和微孔曝气池塘进水口沉降量均显著高于中部和排水口( $P<0.05$ );在相同季节,自然纳潮和微孔曝气池塘中部和排水口的沉降量差异均不显著( $P>0.05$ );在冬季,3组参池各处沉降量差异均不显著( $P>0.05$ )。

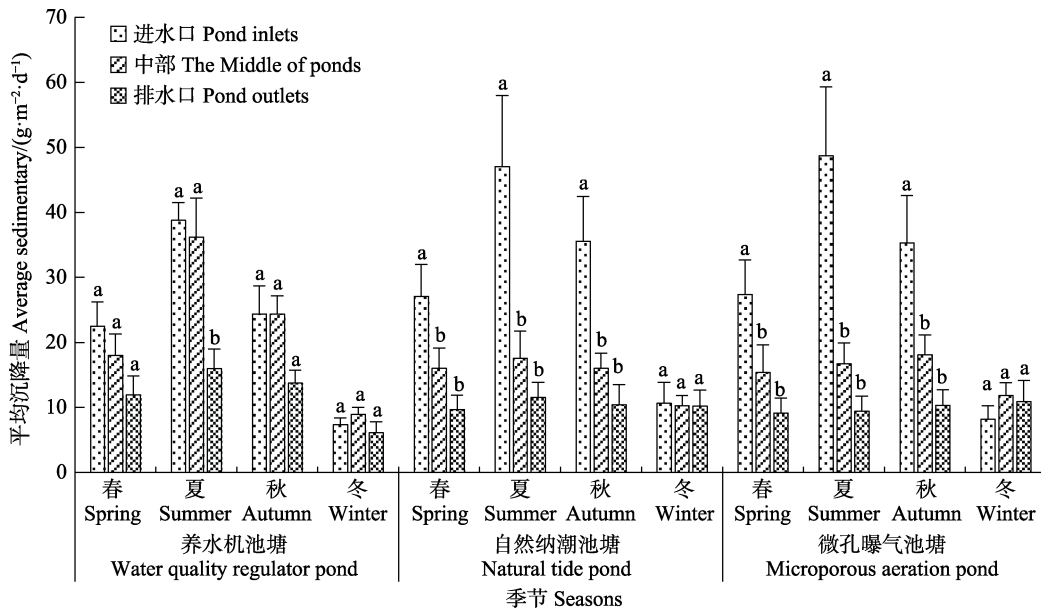


图4 参池颗粒物平均沉降量的水平分布特征

Fig.4 Horizontal distribution characteristics of average sedimentary in sea cucumber ponds

2.3 参池底泥中沉降量相关指标的季节变化

分别按照四季变化测定各组参池底泥中有机质含量和弧菌数量(表1、表2)。从表1和表2可以看出,在相同季节,养水机池塘有机质含量、弧菌数量总体上均为最低,微孔曝气池塘次之,自然纳潮池塘最高,但秋季养水机和自然纳潮池塘弧菌数量接近,微孔曝气池塘最高。统计分析表明,在相同

季节,养水机池塘有机质含量均显著低于自然纳潮池塘( $P<0.05$ ),而与微孔曝气池塘差异不显著( $P>0.05$ );自然纳潮池塘有机质含量在夏季显著高于微孔曝气池塘( $P<0.05$ ),在其余季节与微孔曝气池塘差异不显著( $P>0.05$ );自然纳潮池塘弧菌数量在春、夏季显著高于另外2组参池( $P<0.05$ ),而另外2组参池差异不显著( $P>0.05$ );秋、冬季3组参池弧菌数量差异不显著( $P>0.05$ )。

表1 参池底泥有机质含量的季节变化

Tab.1 Seasonal variation of organic matter content in sea cucumber pond sediment/%

季节 Seasons	有机质含量 Organic matter content		
	养水机池塘 Water quality regulator pond	自然纳潮池塘 Natural tide pond	微孔曝气池塘 Microporous aeration pond
春 Spring	0.81±0.08	1.19±0.15	1.02±0.17
夏 Summer	0.96±0.07	1.33±0.12	1.12±0.14
秋 Autumn	0.77±0.30	1.09±0.59	0.99±0.24
冬 Winter	0.81±0.05	1.19±0.02	0.97±0.05

表2 参池底泥弧菌数量的季节变化

Tab.2 Seasonal variation of the *Vibrio* bacteria number in sea cucumber pond sediment/(CFU·mL<sup>-1</sup>)

季节 Seasons	弧菌总数 Total <i>Vibrio</i> bacteria number		
	养水机池塘 Water quality regulator pond	自然纳潮池塘 Natural tide pond	微孔曝气池塘 Microporous aeration pond
春 Spring	1253.33±1225.47	3103.67±1965.69	1339.56±1329.68
夏 Summer	683.33±645.78	1648.67±1202.48	845.00±923.53
秋 Autumn	993.50±157.06	989.07±698.24	1152.67±449.59
冬 Winter	301.67±475.01	391.50±229.75	324.67±324.87

#### 2.4 参池水体中沉降量相关指标的季节变化

分别按照四季变化测定各参池水体中 NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P、浮游植物生物量和净初级生产力(表3、表4)。“三氮一磷”含量(表3)结果显示,在相同季节,养水机池塘水体 NH<sub>4</sub>-N 浓度均为最低,NO<sub>3</sub>-N 浓度在春、夏、冬三季为最低,而秋季浓度介于另外2组参池之间,NO<sub>2</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P 浓度与另外2组参池近似。浮游植物生物量和净初级生产力(表4)结果显示,在相同季节,养水机池塘浮游植物生物量和净初级生产力均为最高,微孔曝气池塘次之,自然池塘最低。统计分析表明,在相同季节,各参池水体氮、磷营养盐浓度均无显著差异( $P>0.05$ );养水机池塘夏季浮游植物生物量显著高于另外2组参池( $P<0.05$ ),其余季节与另外2组参池差异不显著( $P>0.05$ );在相同季节,自然纳潮与微孔曝气池塘浮游植物生物量无显著差异( $P>0.05$ );养水机池塘春、夏、秋季净初级生产力显著高于自然纳潮池塘( $P<0.05$ ),而

与微孔曝气池塘差异不显著( $P>0.05$ );自然纳潮池塘春季净初级生产力显著低于微孔曝气池塘( $P<0.05$ ),而夏、秋季与微孔曝气池塘差异不显著( $P>0.05$ );冬季3组参池净初级生产力均为差异不显著( $P>0.05$ )。

#### 2.5 参池颗粒物质平均沉降量与各指标的相关分析

各组参池中颗粒物质平均沉降量与各指标的相关性见表5。各参池颗粒物质平均沉降量均与 NO<sub>3</sub>-N 呈负相关,与其他指标均呈正相关。养水机池塘颗粒物质平均沉降量与 NO<sub>2</sub>-N 呈显著正相关( $P<0.05$ ),与浮游生物量、净初级生产力呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 NO<sub>3</sub>-N 呈极显著负相关( $P<0.01$ )。自然纳潮池塘颗粒物质平均沉降量与 NO<sub>2</sub>-N、浮游植物生物量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 NO<sub>3</sub>-N 呈显著负相关( $P<0.05$ )。微孔曝气池塘颗粒物质平均沉降量与 NO<sub>2</sub>-N 呈显著正相关( $P<0.05$ ),与浮游植物生物量、净初级生产力呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 NO<sub>3</sub>-N 呈极显著负相关( $P<0.01$ )。

表3 参池水体营养盐含量的季节变化

Tab.3 Seasonal variation of nutrient content in sea cucumber pond water/(mg·L<sup>-1</sup>)

指标 Indexes	季节 Seasons	养水机池塘 Water quality regulator pond	自然纳潮池塘 Natural tide pond	微孔曝气池塘 Microporous aeration pond
氨氮 NH <sub>4</sub> -N	春 Spring	0.32±0.06	0.38±0.05	0.34±0.04
	夏 Summer	0.19±0.08	0.23±0.07	0.23±0.09
	秋 Autumn	0.12±0.08	0.18±0.09	0.14±0.07
	冬 Winter	0.16±0.05	0.19±0.05	0.20±0.06
亚硝酸盐 NO <sub>2</sub> -N	春 Spring	0	0.01±0	0
	夏 Summer	0.01±0.01	0.02±0.01	0.01±0.01
	秋 Autumn	0.01±0	0.01±0	0.01±0
	冬 Winter	0	0	0
硝酸盐 NO <sub>3</sub> -P	春 Spring	0.34±0.08	0.37±0.09	0.35±0.09
	夏 Summer	0.29±0.11	0.35±0.10	0.30±0.14
	秋 Autumn	0.29±0.03	0.34±0.03	0.28±0.02
	冬 Winter	0.42±0.08	0.50±0.15	0.51±0.20
活性磷酸盐 PO <sub>4</sub> -P	春 Spring	0.03±0.01	0.02±0.01	0.02±0.01
	夏 Summer	0.03±0.01	0.02±0.01	0.03±0.01
	秋 Autumn	0.02±0	0.02±0	0.02±0
	冬 Winter	0.02±0	0.02±0	0.02±0

表4 参池水体浮游植物生物量和净初级生产力的季节变化

Tab.4 Seasonal variation of phytoplankton biomass, and net primary productivity in sea cucumber pond water

指标 Indexes	季节 Seasons	养水机池塘 Water quality regulator pond	自然纳潮池塘 Natural tide pond	微孔曝气池塘 Microporous aeration pond
浮游植物生物量 Phytoplankton biomass/ (mg·L <sup>-1</sup> )	春 Spring	9.96±2.12	7.65±1.73	8.12±2.02
	夏 Summer	31.50±9.34	26.78±9.22	27.68±8.66
	秋 Autumn	24.73±2.57	20.32±4.70	22.08±4.36
	冬 Winter	8.70±4.27	4.60±2.63	4.79±4.05
净初级生产力 Net primary productivity/ [gO <sub>2</sub> (m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )]	春 Spring	2.33±0.56	1.70±0.65	2.24±0.76
	夏 Summer	6.84±2.05	5.11±1.70	5.74±1.85
	秋 Autumn	3.56±1.45	2.20±0.84	2.86±1.40
	冬 Winter	0.87±0.43	0.57±0.32	0.60±0.16

表5 参池平均沉降量与各指标的相关性

Tab.5 The correlation between the average sedimentary and other indicators in sea cucumber ponds

项目 Items	养水机池塘 Water quality regulator pond	自然池塘 Natural pond	微孔曝气池塘 Microporous aeration pond
有机质含量 Organic matter content	0.681	0.401	0.778
弧菌总数 Total <i>Vibrio</i> bacteria number	0.353	0.338	0.544
氨氮 NH <sub>4</sub> -N	0.004	0.045	-0.085
亚硝酸盐 NO <sub>2</sub> -N	0.805*	0.973**	0.857*
硝酸盐 NO <sub>3</sub> -N	-0.912**	-0.896*	-0.931**
活性磷酸盐 PO <sub>4</sub> -P	0.593	0.029	0.692
浮游植物生物量 Phytoplankton biomass	0.899**	0.929**	0.938**
净初级生产力 Net primary productivity	0.973**	0.923**	0.939**

注: \*表示在 0.05 水平显著相关, \*\*表示在 0.01 水平极显著相关

Note: \* indicates correlation at the 0.05 level, and \*\* indicates correlation at the 0.01 level

### 3 讨论

本研究各组颗粒物平均沉降量均呈春、冬季低, 夏、秋季高的变化特征, 变化范围为 7.49~25.38 g/(m<sup>2</sup>·d), 与任贻超(2012)、赵文等(2009)的研究结果吻合。在自然情况下, 参池中颗粒物沉降量呈“沿程衰减”的水平分布趋势, 与史鹏程等(2020)、朱晓磊等(2016)的研究结果吻合。根据各组参池的换水条件一致, 纳潮带入各池内的外源性颗粒物数量近似相同的实验条件, 分析 3 种管理方式下池塘颗粒物平均沉降量的季节及水平分布差异, 发现其差异主要由各组参池的内源性颗粒物数量差异引起。

#### 3.1 参池中颗粒物沉降量的季节变化

比较不同组别之间的沉降量, 养水机池塘夏季极显著高于另外 2 组参池( $P<0.01$ ), 冬季显著低于另外 2 组参池( $P<0.05$ ), 自然纳潮池塘与微孔曝气池塘颗粒物平均沉降量差异不显著( $P>0.05$ )。因此, 认为养水机池塘夏季差异主要源于底泥-水体之间物质交

换能力的不同, 而冬季差异主要源于颗粒物自身性质的不同。

夏季养水机池塘显著高于另外 2 组参池原因主要有 3 个方面。首先, 在底泥再悬浮方面, 皮坤等(2015)和于海波等(2013)观测发现, 草鱼、对虾等游动会引起池塘底泥再悬浮, 因此, 推测养水机以 750 W 动力持续作用于池塘底部, 其射出的水流扰动引起底泥的再悬浮是不可避免的。其次, 在浮游植物生物量方面, 养水机池塘夏季浮游植物生物量[(31.50±9.34) mg/L]为全年最高水平(表 4), 显著高于另外 2 组参池( $P<0.05$ ), 浮游植物作为内源性颗粒物的重要组成部分, 凋亡后沉至池底也会造成沉降量升高。另外, 在水体分层方面, 余真真等(2011)和张岩松等(2004)指出, 水分层现象源于水体垂直交换能量的缺失, 会抑制悬浮物质的沉降作用。养水机将上层低密度水抽至底层喷出形成强制对流的设计, 在王祖峰(2016)等研究已验证其打破跃层的效果, 因此, 夏季池塘跃层出现期间, 养水机运行可以提高沉降量。

冬季养水机池塘显著低于另外2组参池的原因:从影响夏季沉降量的3个方面看,首先养水机冬季运行时间从12 h/d减少到1 h/d(设备维护运行),对水体扰动显著降低,各参池底泥再悬浮能力近似相同;其次冬季参池中,浮游植物少、且3组参池无差异;另外冬季表、底层水体的垂直对流强烈(张玉荣等,2016)不具备水体分层条件。因此,上述3个方面内容不具备造成冬季沉降量差异的条件。但已有研究(虞兰兰等,2011;鲍献文等,2011;柴蓓蓓,2012)普遍认为,冬季颗粒物自身性质会显著影响其在池塘中的沉降过程。上述研究发现,冬季封冰后,沉积物中泥沙等无机颗粒显著减少,而以微生物残体的有机颗粒沉降为主。其特征是粒径较小、沉降速度慢、易受水流等扰动的影响,甚至形成反向输送。因此,认为冬季养水机1 h/d运行的水体扰动制约了浮游植物的沉降作用,可能是造成养水机池塘冬季沉降量降低的主要原因。

### 3.2 参池中颗粒物沉降的水平分布

比较不同组别之间的沉降颗粒物水平分布,自然纳潮和微孔曝气池塘沉降量总体均呈现“沿程衰减”的水平分布趋势,进水口沉降量与中部和排水口差异显著( $P<0.05$ ),尤其表现在春、夏、秋三季(冬季因无换水,本文不做讨论);而养水机池塘沉降量分布均匀,各处沉降量差异不显著( $P>0.05$ ),其成因与池塘换水和池塘内物质交换有关。

自然纳潮和微孔曝气池塘总体呈“沿程衰减”的水平分布特征的原因:任朝亮等(2014)研究发现,水体沉降颗粒物的分布情况与水体中悬浮物的分布直接相关,其中,悬浮物主要包括泥沙颗粒、浮游植物、有机碎屑等。各组参池在纳潮时,较大的泥沙颗粒受重力作用,在进水口先行沉降,较小的浮游植物、有机碎屑等虽然沉降较慢,但在静水条件下,悬浮物浓度将以进水口为中心,向周围区域辐射衰减分布,缓慢垂直沉降。在实验条件下,自然纳潮和微孔曝气池塘结束换水后,较好的静水条件为沉降颗粒物在进水口的辐射衰减分布和垂直沉降提供了优势条件。

养水机池塘总体上呈分布均匀特征的原因:首先,在外源性悬浮物扩散分布方面,本研究中的养水机以750 W的动力每天运行12 h,从进水口向出水口方向进行强制水体对流,打破了池塘结束换水后的静水条件,对较小的浮游植物、有机碎屑,甚至部分较大的泥沙颗粒形成了向出水口方向的输送,沉降颗粒物在水平混合作用下完成了垂直沉降过程。据前文所述,部分沉降颗粒物甚至出现再悬浮,移动后再沉降

的现象。其次,在内源性浮游植物繁殖方面,林青等(2019)调查发现,养水机扰动促进了不同位置底泥分解,释放出来的营养物质促进了浮游植物均匀生长。结合上文中养水机池塘夏季浮游植物生物量最高 $[(31.50\pm 9.34) \text{ mg/L}]$ 的结论,反映了养水机池塘中内源性浮游植物对沉降量的贡献。

至于养水机池塘夏季排水口处颗粒物沉降量与进水口、中部2处存在显著差异( $P<0.05$ ),可能是由夏季换水量大、所含泥沙较多,而养水机的功率有限,产生的水体扰动无法影响大颗粒泥沙的先行沉降规律所致。

### 3.3 参池中颗粒沉降物的分解与营养循环

比较3种管理方式下沉积物相关指标发现,养水机池塘夏季沉降量虽最高,但夏季有机质含量 $[(0.96\pm 0.07)\%]$ 和弧菌数量 $[(683.33\pm 645.78) \text{ CFU/mL}]$ 均为最低,说明养水机管理方式既能促进颗粒物沉降,增加海参天然饵料,又能避免有机质的过量积累,防止弧菌引发的恶劣环境。究其原因如下:首先,养水机扰动作用促进有机质转化释放。根据Gale等(1994)的观点,再悬浮是底泥有机质向水体迁移释放的主要方式,养水机对底层水体的扰动为再悬浮创造了条件。根据党子乔(2017)对池塘沉积物-水界面的氮磷通量研究,养水机池塘全年均为正释放通量,且高于另外2组参池,而自然纳潮和微孔曝气池塘 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在7、8月甚至出现了负通量,说明养水机有助于底泥营养物质的有效释放。其次,生物包抑制弧菌繁殖,养水机的生物包中接种的异养菌随着工作水流释放到池底环境中,形成优势菌群,参与有机质降解(娄斯艺,2018),抑制弧菌繁殖。张敏(2017)研究也发现,养水机池塘异养菌年均数量 $(84736 \text{ CFU/mL})$ 显著高于自然纳潮池塘 $(64602 \text{ CFU/mL})$ 和微孔曝气池塘 $(70311 \text{ CFU/mL})$ 异养菌年均数量。另外,高溶氧环境保障了有机质氧化反应的进行。王祖峰(2016)观测显示,养水机将表层高溶氧水体强制与底层水体交换,可有效解决底层水体缺氧问题,避免了弧菌的厌氧发酵。本研究在实验现场发现底泥不发黑、不臭的现象,也说明养水机池塘具有良好的底质环境。

在上述讨论的基础上,分析3组参池水体营养盐含量无显著差异( $P>0.05$ )(表4),发现养水机池塘尽管颗粒物沉降量最多,底泥有机质中有效释放的营养物质也未在营养盐层面形成积累,而是通过各季节较高的浮游植物生物量和净初级生产力水平的形式得到了表现。这与杨东方等(2007)和熊倩等(2015)的相关研究结论一致。氮、磷营养盐是浮游植物生长的必

需物质,目前研究普遍认为(施沁璇等,2021;曲克明等,2000)浮游植物生长最适 N/P 为 16 : 1 (Redfield 比),越接近该比例,越有利于浮游植物的生长。养水机、自然纳潮和微孔曝气池塘的 N/P 周年均值分别为 21.5、32.25 和 26.33,养水机池塘 N/P 最接近 Redfield 比,是浮游植物生长优势的关键因素,与本研究中,养水机池塘中观测到的浮游植物生物量优势和在现场观察到大型水生植物和藻类被抑制的现象是一致的。

综上所述,夏季养水机池塘颗粒物质沉降量极显著高于另外 2 组参池,其水平分布较另外 2 组参池更均匀。同时期底泥有机质含量、弧菌总数,水体中营养盐含量,浮游植物生物量、净初级生产力等指标,表现出具有促进底泥-水体之间营养物质循环、改善池塘水质、提高生产力水平的优势。与实践上淤泥少、无杂草、少病害的现象一致。而微孔曝气组尽管与自然纳潮组没有表现出显著差异,但在降低有机质积累、抑制弧菌、促进浮游植物生长、提高生产力等方面也表现出一定的优势,作者认为实验中微孔曝气设备仅针对解决夏季缺氧的问题,其运行方式和运行时间可能制约了参池水和底质的改良效果。因此推测,在海参养殖池塘管理上,辅助适宜的设备管理将成为产业技术研究新的领域;另外,从水体动力学角度开展池塘养殖系统相关研究,可能给传统上偏重理化因子与生态系统相关性的研究带来新的理论突破。

## 参 考 文 献

- BAO X W, LI Z, WANG Y Z, *et al.* Sediment distribution features in the north Yellow Sea during summer and winter. *Journal of Sediment Research*, 2010(2): 48–56 [鲍献文, 李真, 王勇智, 等. 冬、夏季北黄海悬浮物分布特征. 泥沙研究, 2010(2): 48–56]
- BOYD C E, LIN W H. Bottom soils, sediment, and pond aquaculture. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2004 [克劳德 E·博伊德(著), 林文辉(译). 池塘养殖底质. 广州: 广东科技出版社, 2004]
- CALLENDER E, HAMMOND D E. Nutrient exchange across the sediment-water interface in the Potomac River estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1982, 15(4): 395–413
- CHAI B B. Pollutants flux on the sediments multi-phase interface in drinking water reservoir and pollution controlling technology. Doctoral Dissertation of Xi'an University of Architecture and Technology, 2012 [柴蓓蓓. 水源水库沉积物多相界面污染物迁移转化与污染控制研究. 西安建筑科技大学博士研究生学位论文, 2012]
- CHEN G H. Microporous aeration and oxygenation technology in pond culture. *Animals Breeding and Feed*, 2018(11): 43–44 [陈国海. 池塘养殖中微孔曝气增氧技术. 养殖与饲料, 2018(11): 43–44]
- DANG Z Q. The effect of three water quality control methods on the annual changes of N and P fluxes at the sediment-water interface of sea cucumber ponds. Master's Thesis of Dalian Ocean University, 2017 [党子乔. 三种水质调控方式对海参池塘沉积物-水界面 N、P 通量的周年变化影响. 大连海洋大学硕士研究生学位论文, 2017]
- GALE P M, REDDY K R. Carbon flux between sediment and water column of a shallow, subtropical, hypereutrophic lake. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5): 965–972
- GU H T, LIU X G, HE Y P, *et al.* Performance and application effects of microporous aerators. *Fishery Modernization*, 2017, 44(3): 25–28 [顾海涛, 刘兴国, 何雅萍, 等. 微孔曝气式增氧机的性能及应用效果. 渔业现代化, 2017, 44(3): 25–28]
- LIN Q, ZHANG D S, WEI Y N, *et al.* Effects of three water quality regulation methods on phytoplankton population structure in a sea cucumber culture pond. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(4): 566–572 [林青, 张东升, 魏亚南, 等. 3 种水质调控方式对刺参池塘浮游植物种群结构的影响. 大连海洋大学学报, 2019, 34(4): 566–572]
- LING F, LIU B, WANG G X, *et al.* The role of aeration in reducing internal  $\text{NH}_4^+$ -N release from polluted urban river channel. *Journal of Lake Science*, 2013, 25(1): 23–30 [凌芬, 刘波, 王国祥, 等. 曝气充氧对城市污染河道内源铵态氮释放的控制. 湖泊科学, 2013, 25(1): 23–30]
- LOU S Y. A preliminary study on the number and flora composition of heterotrophic bacteria in sea cucumber ponds under three water quality control methods. Master's Thesis of Dalian Ocean University, 2018 [娄斯艺. 三种水质调控方式下海参池塘异养菌数量及区系组成的初步研究. 大连海洋大学硕士研究生学位论文, 2018]
- LU C C, SUN Y J, GAO Q F, *et al.* Effects of different water exchange frequencies on the environments of the sediments in the sea cucumber culture pond. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2014(4): 59–66 [卢超超, 孙永军, 高勤峰, 等. 不同换水频率对刺参养殖池塘底泥环境的影响. 海洋湖沼通报, 2014(4): 59–66]
- PI K, ZHANG M, LI G C, *et al.* Characteristics of nutrient in sedimentary particles in different aquaculture models ponds. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, 24(1): 143–148 [皮坤, 张敏, 李庚辰, 等. 不同养殖模式池塘沉降颗粒营养物质组成特征. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1): 143–148]
- QIAO Y L, YIN X Y, XIAO G X, *et al.* Acute toxicity effects of suspended solids stress on *Fenneropenaeus chinensis* larvae. *Progress in Fisheries Science*, 2019, 40(3): 50–56 [乔延龙, 殷小亚, 肖广侠, 等. 悬浮物胁迫中国对虾幼体的急性毒性研究. 渔业科学进展, 2019, 40(3): 50–56]
- QU K M, CHEN B J, YUAN Y X, *et al.* A preliminary study on influence of N and P on population constituent of planktonic diatoms in seawater. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 445–448 [曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究. 应用生



- 态学报, 2000, 11(3): 445–448]
- REN C L, SONG J X, WANG Z, *et al.* Spatial distribution of organic matter and the correlational study of pollutions of Weihe River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(3): 123–128 [任朝亮, 宋进喜, 王珍, 等. 渭河底泥有机质的空间分布及与其他污染物相关性. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(3): 123–128]
- REN Y C. Studies on the bio-deposition and related ecological effects in different polyculture mode of *Apostichopus japonicus* (Selenka) pond. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2012 [任贻超. 刺参(*Apostichopus japonicus* Selenka)养殖池塘不同混养模式生物沉积作用及其生态效应. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2012]
- SHI P C, ZHU G W, YANG W B, *et al.* Spatial-temporal distribution of suspended solids and its sedimentation flux and nutrients effects in Xin'anjiang Reservoir, China. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2137–2148 [史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 等. 新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应. *环境科学*, 2020, 41(5): 2137–2148]
- SHI Q X, HAO G J, YE T, *et al.* Research on eutrophication and its driving factors in reservoirs of the Quzhou area. *Progress in Fishery Sciences*, 2021, 42(1): 18–28 [施沁璇, 郝贵杰, 叶霆, 等. 衢州地区渔业水域水库水体富营养化水平及驱动因子研究. *渔业科学进展*, 2021, 42(1): 18–28]
- SHU T F, WEN Y M, TANG Y T. Cycle and budget balance of nitrogen in the cultivated water. *Fisheries Science*, 2002(2): 30–34 [舒廷飞, 温琰茂, 汤叶涛. 养殖水环境中氮的循环与平衡. *水产科学*, 2002(2): 30–34]
- STORLAZZI C D, FIELD M E, BOTHNER M H, *et al.* Sedimentation processes in a coral reef embayment: Hanalei Bay, Kauai. *Marine Geology*, 2009, 264(3/4): 140–151
- SUN G W, ZHOU W, DANG Z Q, *et al.* Annual change of primary productivity in *Apostichopus japonicus* ponds by three water quality regulations. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(4): 632–641 [孙广伟, 周玮, 党子乔, 等. 3种水质调控方式下刺参池塘初级生产力的周年变化. *水产学报*, 2020, 44(4): 632–641]
- TAKESUE R K, BOTHNER M H, REYNOLDS R L. Sources of land-derived runoff to a coral reef-fringed embayment identified using geochemical tracers in nearshore sediment traps. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, 85(3): 459–471
- WANG Z F. A comparative study of three water quality controlling technologies effected in *Apostichopus japonicus* pond-aquaculture. Master's Thesis of Dalian Ocean University, 2016 [王祖峰. 仿刺参养殖池塘三种水质控制技术效果的比较. 大连海洋大学硕士研究生学位论文, 2016]
- WHYTE J N C, BOURNE N, HODGSON C A. Nutritional condition of rock scallop, *Crassadoma gigantea* (Gray), larvae fed mixed algal diets. *Aquaculture*, 1990, 86(1): 25–40
- XIONG Q, HUANG L C, YE S W, *et al.* The seasonal variations and spatial distribution of the primary productivities of phytoplankton in the Three Gorges Reservoir. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(5): 853–860 [熊倩, 黄立成, 叶少文, 等. 三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化与空间分布. *水生生物学报*, 2015, 39(5): 853–860]
- XU H, TIAN C F, LIU X G, *et al.* Comparative study on aeration mechanism and equipment performance of aquaculture ponds. *Fishery Modernization*, 2017, 44(4): 1–8 [徐皓, 田昌凤, 刘兴国, 等. 养殖池塘增氧机制与装备性能比较研究. *渔业现代化*, 2017, 44(4): 1–8]
- XU K, LIU B, WANG G X, *et al.* The effect on the variation process of internal nitrogen under aerating to the sediment condition of urban polluted river. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(12): 2935–2942 [许宽, 刘波, 王国祥, 等. 底泥曝气对城市污染河道内源氮变化过程的影响. *环境科学学报*, 2012, 32(12): 2935–2942]
- YAHIEL G, YAHIEL R, KATZ T, *et al.* Fish activity: A major mechanism for sediment resuspension and organic matter remineralization in coastal marine sediments. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 372: 195–209
- YANG D F, CHEN S T, HU J, *et al.* Magnitude order of the effect of light, water temperature and nutrients on phytoplankton growth. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(3): 201–207 [杨东方, 陈生涛, 胡均, 等. 光照、水温 and 营养盐对浮游植物生长重要影响大小的顺序. *海洋环境科学*, 2007, 26(3): 201–207]
- YU H B, GAO Q F, SUN Y J, *et al.* Dynamic change and circulation of nutrients in polyculture system of sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) and shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*). *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(9): 25–32 [于海波, 高勤峰, 孙永军, 等. 刺参-对虾复合养殖系统主要营养盐动态变化及循环过程的研究. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(9): 25–32]
- YU L L, JIANG W S. Seasonal variations in the distribution of suspended fine particulate in the Yellow Sea and the East China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(4): 474–481 [虞兰兰, 江文胜. 黄、东海悬浮细颗粒物浓度和粒径分布变化研究. *海洋与湖沼*, 2011, 42(4): 474–481]
- YU Z Z, WANG L L, DAI H C, *et al.* Study on the effect of water temperature stratification on vertical transport of suspended solids. *Journal of Sichuan University (Engineering Science)*, 2011, 43(1): 64–69 [余真真, 王玲玲, 戴会超, 等. 水温分层对水体中悬浮颗粒物垂向输运影响的研究. *四川大学学报(工程科学版)*, 2011, 43(1): 64–69]
- ZHANG M. The effect of three water quality control methods on the number of microorganisms and enzyme activities in the sea cucumber pond environment. Master's Thesis of Dalian Ocean University, 2017 [张敏. 三种水质调控方式对海参池塘环境中微生物数量及底泥酶活性的影响研究. 大连海洋大学硕士研究生学位论文, 2017]
- ZHANG Y R, DING Y P, LI T J, *et al.* Annual variations of chlorophyll *a* and primary productivity in the East China Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(1): 261–268 [张玉荣, 丁跃平, 李铁军, 等. 东海区叶绿素 *a* 和初级生产力季节变化特征. *海洋与湖沼*, 2016, 47(1):

- 261–268]
- ZHANG Y S, ZHANG F J, GUO X W, *et al.* Vertical flux of the settling particulate matter in the water column of the Yellow Sea in summer. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(3): 230–238 [张岩松, 章飞军, 郭学武, 等. 黄海夏季水域沉降颗粒物垂直通量的研究. *海洋与湖沼*, 2004, 35(3): 230–238]
- ZHAO W, ZHANG Y W, WEI J, *et al.* The structure of suspended particles and sedimentation in cultured ponds of sea cucumber, *Apostichopus japonicus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5749–5757 [赵文, 张义伟, 魏杰, 等. 刺参养殖池塘颗粒悬浮物结构及其沉积作用. *生态学报*, 2009, 29(11): 5749–5757]
- ZHENG Z M. Study on nutrient fluxes across sediment-water interface in sea cucumber culture ponds. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2009 [郑志明. 刺参养殖池塘沉积物—水界面营养盐通量的研究. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2009]
- ZHU X L, ZHANG H, LEI P, *et al.* Historical distribution characteristics of major elements in Guanting Reservoir sediments. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 442–449 [朱晓磊, 张洪, 雷沛, 等. 官厅水库沉积物中大量元素的历史分布特征. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 442–449]

(编辑 马瑾艳)

## Influence of Different Management Methods on the Sedimentation of Particulate Matter and Sediment in Sea Cucumber Ponds

LI Lezhou<sup>1</sup>, WANG Zufeng<sup>2</sup>, ZHANG Dongsheng<sup>1</sup>, LEI Zhaolin<sup>1</sup>, ZHANG Jinyuan<sup>1</sup>,  
YANG Gengjie<sup>1</sup>, WANG Yulong<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>1①</sup>

(1. College of Fisheries and Life Sciences, Dalian Ocean University, Dalian, Liaoning 116023, China;  
2. National Fisheries Technology Promotion Station, Chinese Fisheries Society, Beijing 100125, China)

**Abstract** The aim of this study was to explore the effects of different management methods on the sedimentation of particulate matter, related sediments, and water quality indicators in sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) ponds. Nine sea cucumber culture ponds (divided into three groups: water quality regulator, natural tide, and microporous aeration) were used. The average sedimentary and horizontal distribution characteristics of particulate matter were measured in spring, summer, autumn and winter as well as the organic matter content of the mud, total number of *Vibrio*, nutrient concentrations in the water, phytoplankton biomass, and net primary productivity were analyzed. The results showed no significant difference in the seasonal and horizontal distribution of the average sediment concentrations between natural tide ponds and microporous aeration ponds. The average sediment concentrations in the water quality regulator ponds was  $(30.33 \pm 2.46)$  g/(m<sup>2</sup>·d) in summer, which was significantly higher than in the other two types of ponds, while in winter it was  $(7.49 \pm 1.17)$  g/(m<sup>2</sup>·d) and was significantly lower than in the other two types of ponds ( $P < 0.05$ ). The horizontal distribution characteristics of the average sediment concentrations in the water quality regulator ponds were more than those of the other two groups of ponds. During the same season, the organic matter content, and the total number of *Vibrio* in the water quality regulator pond sediment were at the lowest level among the three groups, with the microporous aeration ponds being the second lowest, and the natural tide ponds being the highest. The results of this study show that traditional sea cucumber farming is based on the management of natural tides and auxiliary suitable equipment can affect the sedimentation rate of particulate matter, accelerate the exchange of nutrients between the bottom sediment and the water of the sea cucumber ponds, and improve the water and bottom sediment environment.

**Key words** *Apostichopus japonicus*; Sedimentary; Horizontal distribution; Water quality regulator

① Corresponding author: ZHOU Wei, E-mail: zhouwei@dlou.edu.cn