DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20250214002　　http://www.yykxjz.cn/

赵文广, 王印庚, 李彬, 葛建龙, 廖梅杰, 荣小军, 王锦锦, 邹士方. 水耕对刺参养殖池塘水质及底质理化因子的影响. 渔业科学进展, 2026, 47(1): 126–137

ZHAO W G, WANG Y G, LI B, GE J L, LIAO M J, RONG X J, WANG J J, ZOU S F. Effects of water plowing on water quality and sediment physicochemical factors in sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) culture ponds. Progress in Fishery Sciences, 2026, 47(1): 126–137

水耕对刺参养殖池塘水质及底质理化因子的影响*

赵文广[1,2]　王印庚[2①]　李　彬[2]　葛建龙[2]　廖梅杰[2]
荣小军[2]　王锦锦[2]　邹士方[3]

(1. 上海海洋大学水产与生命学院　上海　201306；2. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室　中国水产科学研究院黄海水产研究所　山东　青岛　266071；3. 山东安源水产股份有限公司　山东　烟台　265617)

摘要　近年来，辽宁、山东地区刺参养殖过程中兴起一种水耕作业方式以调控养殖池塘水质和底质，然而对其水耕工艺和环境改良机理仍不清楚。本研究在辽宁凌海仿刺参(*Apostichopus japonicus*)养殖区开展了为期 48 d 的水耕实验，设置了低频率组(每 8 d 水耕一次)、高频率组(每 4 d 水耕一次)和对照组(不进行水耕)，通过短期的连续性跟踪和长期的定期性监测，分析了养殖池塘池水和底质的化学需氧量(COD)、磷酸盐浓度(PO_4^{3-}-P)、氧化还原电位(ORP)、硫化物含量(S_2^{2-}-S)等理化指标的变化情况。结果显示，水耕后 2 d 时实验组水体浊度最高达到(4.16±0.39) NTU，显著高于对照组(P<0.05)；第 4 天时实验组铵态氮和亚硝态氮(NO_2^--N)浓度分别下降了 88.9%和 75.0%，下降幅度大于对照组。水耕 31 d 时，低频率组和高频率组池塘水体中 PO_4^{3-}-P 和 NO_2^--N 浓度均显著低于对照组，沉积物的有机碳(TOC)含量也显著低于对照组。第 0~47 天，低频率组和高频率组池水中溶解氧(DO)分别升高了 4.2%和 3.8%，低于对照组(37.7%)；COD 分别升高了 21.4%和 21.8%，高于对照组(9.9%)；PO_4^{3-}-P 分别升高了 125.0%和 100.0%，低于对照组(183.3%)；沉积物的 ORP 分别提高了 67.6 mV 和 82.3 mV，显著高于对照组(31.3 mV)；沉积物的 S_2^{2-}-S 分别降低了 6.1%和 7.9%，而对照组增加了 298.4%；沉积物的弧菌(*Vibrio*)占比分别降低了 2.5%和 7.1%，而对照组降低了 1.8%。研究结果表明，定期水耕作业有利于保持水体 PO_4^{3-}-P 处于较低水平，有效抑制了沉积物中 TOC 和 S_2^{2-}-S 含量的增加，显著提升了沉积物的 ORP，同时能有效地降低沉积物中的弧菌比例，进而起到改良和修复养殖池塘环境的作用。相较于低频率组(每 8 d 水耕一次)，高频率组(每 4 d 水耕一次)的环境调控作用更明显。鉴于频繁的水耕作业会导致池水 DO 略有下降、COD 上升和养殖成本增加，具体适宜的水耕频率需根据池水温度、DO 浓度和池底污染老化的程度进行调整。本研究结果为制定水耕工艺及其应用推广提供了数据参考，同时也为深入解释其环境改良机理、构建合理的疾病防控工艺、实现刺参的池塘健康养殖奠定了基础。

关键词　水耕工艺；海参；池塘养殖；水质调控；底质改良；环境因子；沉积物再悬浮

中图分类号　S967.4　**文献标识码**　A　**文章编号**　2095-9869(2026)01-0126-12

---

* 国家重点研发计划(2023YFD2400705)和中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2023TD29)共同资助。赵文广，Email: zwg7221@163.com

① 通信作者：王印庚，研究员，Email: wangyg@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2025-02-14, 收修改稿日期: 2025-04-06

仿刺参(*Apostichopus japonicus*)又名刺参，不仅是一种海产食品，还可以作为滋补品和药物提取物，被认为是一种最具经济价值的海参(Zamora *et al*, 2018; Li *et al*, 2021)。我国是最大的刺参养殖国家，2023 年刺参的养殖面积达 2 890.6 km²,养殖产量达 29.2 万 t (农业农村部渔业渔政管理局等, 2024)。养殖方式包括池塘养殖、工厂化养殖、浅海网箱养殖、吊笼养殖、底播增殖等模式(廖梅杰等, 2021)。池塘养殖具有便于管理、工艺简单、养殖费用低等特点，在我国刺参养殖模式中占据重要地位(王印庚等, 2014)。刺参一般需要 2~3 年或更长时间养成。在池塘养殖过程中，随着养殖期的延长，生物量的不断增大，水体中浮游动植物残骸、残饵和养殖动物的排泄物在池底大量沉积，这不仅会导致水质下降，而且会引起沉积物耗氧并产生大量毒性物质，从而严重影响刺参养殖的收益(Steeby *et al*, 2004; 冯旭文等, 2006; Boyd *et al*, 2010; Kang *et al*, 2016)。此外，刺参养殖池塘一般由于面积大，存在难以换水和清底等不足的情况，容易造成池塘环境恶化而导致刺参病害发生(王印庚等, 2004)。因此，定期改良池塘环境，对于减少病害发生，提高养殖成活率、增产增收具有重要的现实意义。

养殖池塘环境调控主要有添水换水、曝气增氧、环境改良剂氧化、微生态制剂净化、池底清淤等措施。适宜频率的添水换水可以改善刺参养殖池塘环境，能够将老化的池水排出池塘，但这种方法存在水资源浪费量大、处理时间长等缺点(卢超超等, 2014; 蔡徐依等, 2023)。曝气增氧可以有效增加养殖水体中的溶氧，尤其是微孔曝气增氧效率高，可以有效节约电能，但对水体中有机物质的分解有限，且在运行过程中曝气管容易堵塞(范海涛等, 2012; 程香菊等, 2014)。环境改良剂诸如过氧化钙、过硫酸氢钾，可以迅速对环境产生效果，但不合理的使用可能导致底泥板结或留下残留物，而且价格昂贵(Masuda *et al*, 1994; 张静等, 2014)。微生态制剂净化是通过投放益生菌剂以降解有机物、分解有毒有害物质的方法，但一般见效慢，需要长期、连续使用(韩莎等, 2020b; 陈文等, 2022)。池底清淤是一项有效的底质修复措施，一般在清池时方可采用，需要耗费较大财力、物力和时间(杨春懿等, 2022)。近来，辽宁、山东地区兴起了一种原位物理修复方式，养殖者俗称“泚底”，即利用船载水泵系统抽取池塘上层水后，再以高压水流冲击池塘底部，翻耕池底泥土和沉积物，以此维护良好的池水、池底环境，本研究将这种方式称为“水耕”，其设备即称之为水耕机。从养殖实践来看，水耕在池塘环境改良方面具有操作灵活、运行高效、成本低廉等特点，正逐步成为改善养殖池塘水质和底质的一种有效措施。传统养殖实践中，水耕操作频率通常为 7~10 d 一次。然而，经生产实践探索发现，将水耕周期缩短至 3~5 d 可显著改善池塘水体环境并提升刺参的摄食状态。尽管这一优化措施在应用中表现出积极效果，但目前仍缺乏系统的理论支撑，其调控机制尚未明确，且相关操作工艺仍需进一步优化和完善。

因此，本研究以辽宁凌海地区的刺参养殖池塘为研究对象，设置了低频率组(每 8 d 水耕一次)、高频率组(每 4 d 水耕一次)和对照组(不进行水耕)，通过对比不同水耕频率条件下池塘水质、底质理化因子的变化情况，评估水耕工艺对养殖池塘环境的调控作用，以期为这一新型底质改良方法的应用推广提供科学依据，为刺参池塘健康养殖和疾病防控提供有益的支撑和参考。

1　材料与方法

1.1　水耕机结构和使用原理

水耕机是一种用水流翻耕池塘底部的新型环境调控设备(图 1)，该设备主要分为平板船体、进水管、水泵、分流组件和出水管 5 个部分，其中分流组件的高度随池水的深度而变化，水泵主要是柴油水泵机。

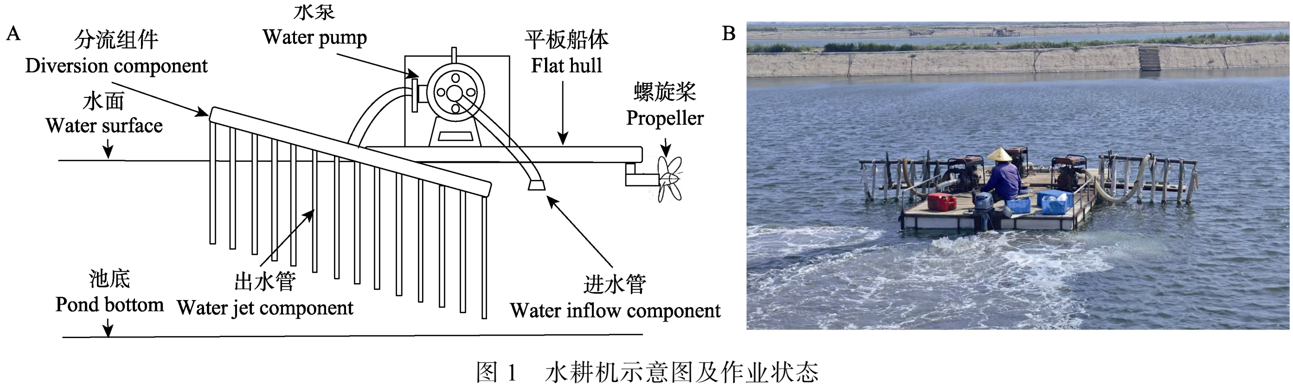

图 1　水耕机示意图及作业状态
Fig.1　Schematic diagram and operation status of water plowing machinery

水耕机在工作时利用水泵抽取池塘上层水后，再以水流冲击池塘底部，实现池水的垂直流动，冲击、翻耕池底泥土和沉积物。

1.2 实验地点与设计

实验地点位于辽宁省锦州市凌海市 5 333 hm^2 海参养殖区(40.88°N，121.38°E)。实验所用 3 个刺参养殖池塘的大小、结构和养殖管理方法相似，各实验池塘长约为 560 m，宽约为 70 m，面积约为 3.92 hm^2，平均水深约为 1.5 m。实验期间，所有池塘未更换水，其他日常养殖管理及投喂保持一致。

参考生产实践采用的水耕频率为 3~10 d，本实验设置 3 个水耕频率，分别为低频率水耕组，每 8 d 水耕一次；高频率水耕组，每 4 d 水耕一次；对照组，不进行水耕作业。各组池塘的作业船上面均放置 3 个水泵，其中分流组件高度(出水口到池底表面的距离)和出水管数量均保持一致。本次使用的水泵发动机由江苏常工动力机械有限公司生产，型号为 CG178F，额定功率 4 kW，额定流量 40 m^3/h。水耕作业均在白天进行，每次工作时长为 4 h，水耕面积覆盖整个池塘。实验自 2023 年 9 月 24 日开始第 1 次水耕作业，至当年 11 月 9 日结束，各池塘按相应频率和操作要求进行。

1.3 样品采集

各组均分别于 2023 年 9 月 23 日(0 d)、10 月 10 日(17 d)、10 月 24 日(31 d)和 11 月 9 日(47 d)采集池塘水体和沉积物样品，分析水耕作业的长期影响。此外，低频组于 10 月 10 日水耕后连续监测水质指标 7 d，并于当天水耕前(S0d)以及水耕后 1、2、3、5 和 7 d 采集池水和底泥样品(编号 S0d~S7d)，同时采集对照组相应样品，分析水耕作业后的短期影响。

每个池塘沿池塘中心和两侧约 100 m 处设 3 个采样点，并用竹竿标记，每个采样点周围分别取样 3 次并混合成一个样本。利用击打式采水器收集池塘底层的海水样品，挖斗式采泥器采集池塘沉积物，取表层 0~5 cm 的沉积物样品装入无菌自封袋，并立即放到装满冰块的保温箱中运至实验室。

1.4 指标检测

采用美国 YSI EXO 水质监测仪现场测定水体温度、浊度(NTU)、溶解氧(DO)和酸碱度(pH)。采用 ORP-BW 测试笔测定养殖池塘沉积物的氧化还原电位(ORP)。采用国标法测定水体中的化学需氧量(COD)、磷酸盐(PO_4^{3-}-P)、铵态氮(NH_4^+-N)、亚硝态氮(NO_2^--N)、硝态氮(NO_3^--N)以及沉积物中的有机碳(TOC)、硫化物(S_2^{2-}-S)的含量。

取底层水和底泥时用灭菌的 1.5% NaCl 溶液稀释至合适倍数后，分别涂布含 2.5% NaCl 的胰蛋白胨大豆肉汤(TSB)琼脂平板培养基和硫代硫酸盐柠檬酸盐胆盐蔗糖(TCBS)琼脂培养基，28 ℃培养 48 h 后进行细菌总数和弧菌(*Vibrio*)总数的计数。

1.5 数据分析

所有数据使用 Excel 2019 及 SPSS 27.0 进行整理分析，以平均值±标准误差(Mean±SEM)表示。采用独立样本 *T* 检验或单因素方差分析的 Duncan 检验进行差异显著性分析，显著性阈值为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 水体中温度、溶解氧、浊度和酸碱度的变化

从图 2A 可知，水耕后 7 d 时间内，同一时间点各组池塘的水温均无显著差异($P>0.05$)。同时发现，在水耕的作用下，2 d 内低频组的 DO 有所下降；虽然低频组和对照组的 DO 起始含量不同，其他时间趋于一致，二者无显著差异(图 2B)。由图 2C 可知，在水耕后第 1 天和第 2 天低频组浊度显著高于对照组($P<0.05$)，其中，水耕后第 1 天，浊度明显上升，最高达到(4.16±0.39) NTU。从第 2 天开始，浊度呈下降趋势，第 3 天以后的浊度与对照组较为接近；对照组浊度保持相对稳定，无显著变化($P>0.05$)。

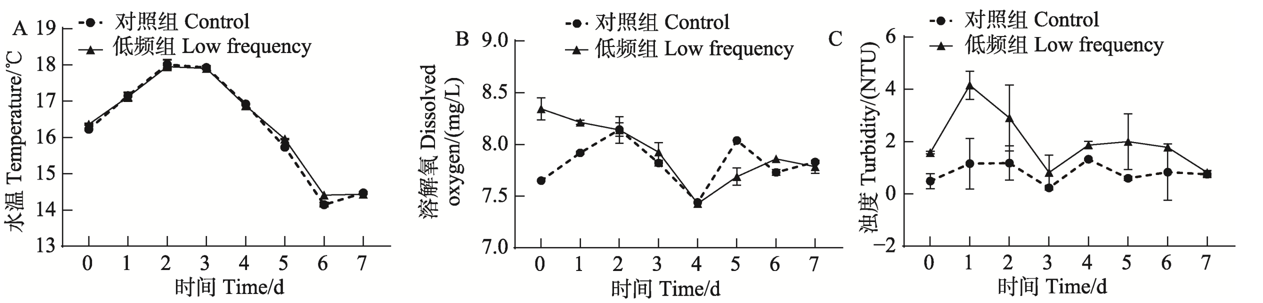

图 2 水耕对水体温度(A)、溶解氧(B)和浊度(C)的短期影响

Fig.2 Short-term effects of water plowing operation on temperature(A), dissolved oxygen (B) and turbidity (C) of pond water

从图 3A 可见，在同一时间各组间水体温度均无显著差异(P>0.05)。实验开始时，各水温约为 20.1 ℃，17 d 时各组水温约为 16.3 ℃，31 d 各组水温约为 14.7 ℃，实验结束时，水温约为 3.1 ℃，整个养殖过程水温下降了 17 ℃，其中 31~47 d 水温下降幅度较大。由图 3B 可见，实验开始之前，对照组的溶解氧显著低于高频组，二者均显著低于低频组。实验结束时，对照组的溶解氧显著高于低频组，二者均显著高于高频组(P<0.05)；整个实验期间，对照组、低频组和高频组的溶解氧分别增加了 37.7%、4.2%和 3.8%。如图 3C 所示，在各采样时间点各组间水体 pH 均无显著差异(P>0.05)，pH 均在 8.0~8.5 之间，保持相对稳定。以上结果表明，长期水耕对水体温度和 pH 无明显影响；长期水耕会抑制水体溶解氧的上升，水耕频率越高，影响越大。

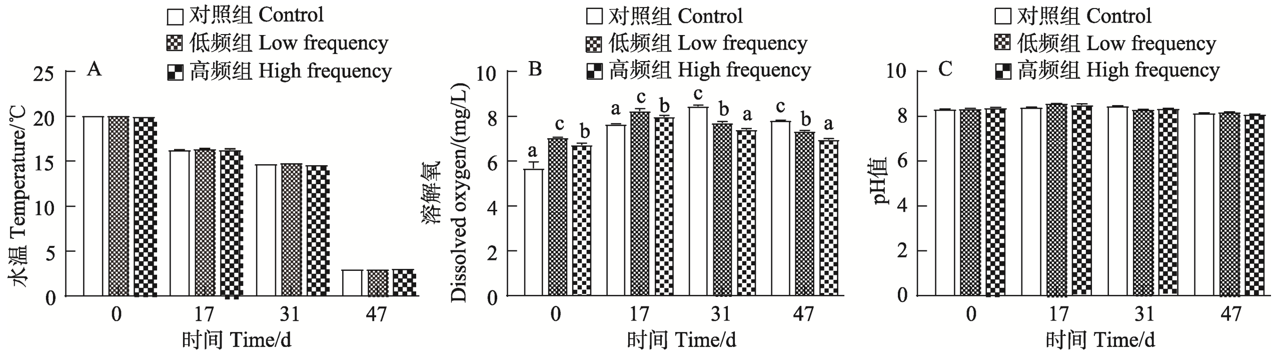

图 3　水耕作业对水体温度(A)、溶解氧(B)和酸碱度(C)的长期性影响

Fig.3　Long-term effects of water plowing operation on temperature (A), DO (B) and pH (C) of the pond water

小写字母表示在相同采样时间不同组之间差异显著(P<0. 05)；未标注表示无显著差异(P>0.05)。下同。

Lowercase letters indicate significant differences between different groups at the same time; no letter indicates no significant difference. The same below.

2.2　水体化学需氧量和磷酸盐的变化

从短期来看，低频组的 COD 在水耕后 7 d 内无显著变化，与对照组之间无显著差异(P>0.05) (图 4A)。从长期来看，实验期间所有组的 COD 均呈小幅上升趋势，0 d 时，高频组的 COD 最低，其次为低频组，均显著低于对照组；至 47 d 时，对照组、低频组和高频组的 COD 水平分别增加了 9.9%、21.4%和 21.8%，低频组的 COD 最低，显著低于对照组(P<0.05)，其次为高频组，与对照组差异不显著(P>0.05) (图 4C)。结果表明，水耕短期内对养殖池塘水体 COD 影响较小，长期水耕有提高 COD 水平的作用。

各组水体 PO_4^{3-}-P 浓度在水耕后 7 d 内的总体变化趋势基本一致(图 4B)，水耕后的第 2 天变化趋势存在一定差异，低频组呈上升趋势，而对照组呈下降趋势，且各时间点对照组大多高于实验组(P>0.05)，而水耕后 3 d 时二者基本处于同一水平。从长期来看，PO_4^{3-}-P 浓度在实验期间的总体变化趋势基本一致，呈现先升高后下降的趋势，且对照组始终高于低频组，均高于高频组(图 4D)。实验开始时对照组、低频组和高频组的 PO_4^{3-}-P 浓度分别为(0.006±0.001)、(0.004±0.002)和(0.003±0.001) mg/L，在 17 d 和 31 d 时对照组显著高于低频组和高频组，至 47 d 时，对照组、低频组和高频组分别增加了 183.3%、125.0%和 100.0%。以上结果表明，水耕后第 3 天水体 PO_4^{3-}-P 浓度最低，长期水耕有抑制 PO_4^{3-}-P 浓度增加的作用。

2.3　水体中铵态氮、亚硝态氮和硝态氮的变化

如图 5A、5B 所示，水耕后 3 d 内，低频组和对照组水体中 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 均呈下降趋势，其中低频组分别降低了 88.9%和 75.0%，对照组分别降低了 75.0%和 43.8%。NO_3^--N 的变化如图 5C，实验组整体上呈下降趋势，而对照组先下降后上升。这些结果说明水耕后 3 d 内可降低水体的 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 含量。

从长期来看(图 5D~5F)，各组 NH_4^+-N 浓度呈先升高后降低的趋势，于 17 d 达最高值，各组间无明显规律。低频组和对照组的 NO_2^--N 浓度呈先升高后降低的趋势，31 d 时达到最高值，且对照组显著高于低频组和高频组(P<0.05)；高频组前后无明显变化。NO_3^--N 变化趋势：对照组先上升后下降，低频组一直呈下降趋势，高频组总体趋于稳定。

2.4　沉积物中氧化还原电位、有机碳和硫化物的变化

从短期来看，水耕后 7 d 内，低频组和对照组沉积物 ORP 无显著性差异(图 6A，P>0.05)。长期来看，实验开始时对照组 ORP 显著高于低频组和高频组，

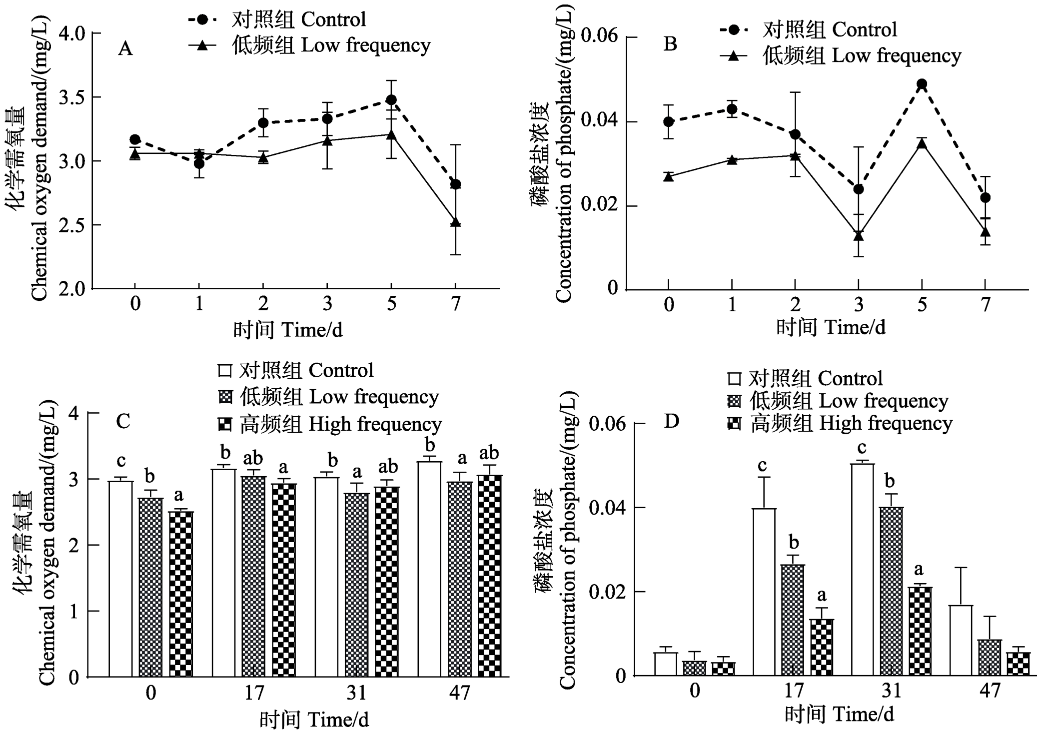

图 4 水耕作业对水体化学需氧量和磷酸盐浓度的短期(A、B)和长期(C、D)影响

Fig.4 Short-term (A, B) and long-term (C, D) effects of water plowing operation on COD and PO_4^{3-}-P concentration of the pond water

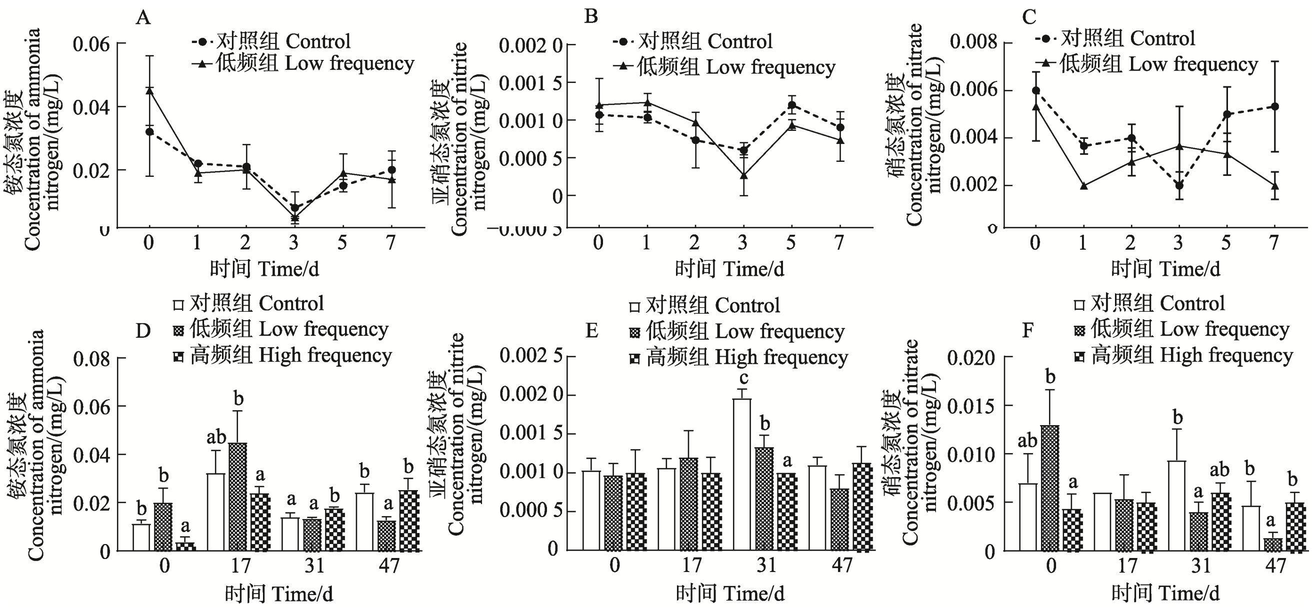

图 5 水耕作业对水体中铵态氮、亚硝态氮和硝态氮浓度的短期(A、B 和 C)和长期(D、E 和 F)影响

Fig.5 Short-term (A, B and C) and long-term (D, E and F) effects of water plowing operation on NH_4^+-N, NO_2^--N and NO_3^--N of the pond water

实验期间各组 ORP 均呈上升趋势，其中对照组、低频组和高频组分别增加了 31.3、67.6 和 82.3 mV (图 6D)；实验结束时，3 个组间无显著差异。结果表明，单次水耕对池底沉积物的氧化还原状态影响较小，而长期水耕可以提高沉积物 ORP，有利于沉积物从高还原态向低还原态转变。

短期来看，水耕后 7 d 内对照组和低频组沉积物中 TOC 含量均呈上升趋势，二者无明显差异(图 6B)。长期来看，对照组呈现上升趋势，低频组先下降后上升，高频组 31 d 内趋于稳定，后期呈上升趋势。在 31 d 时，

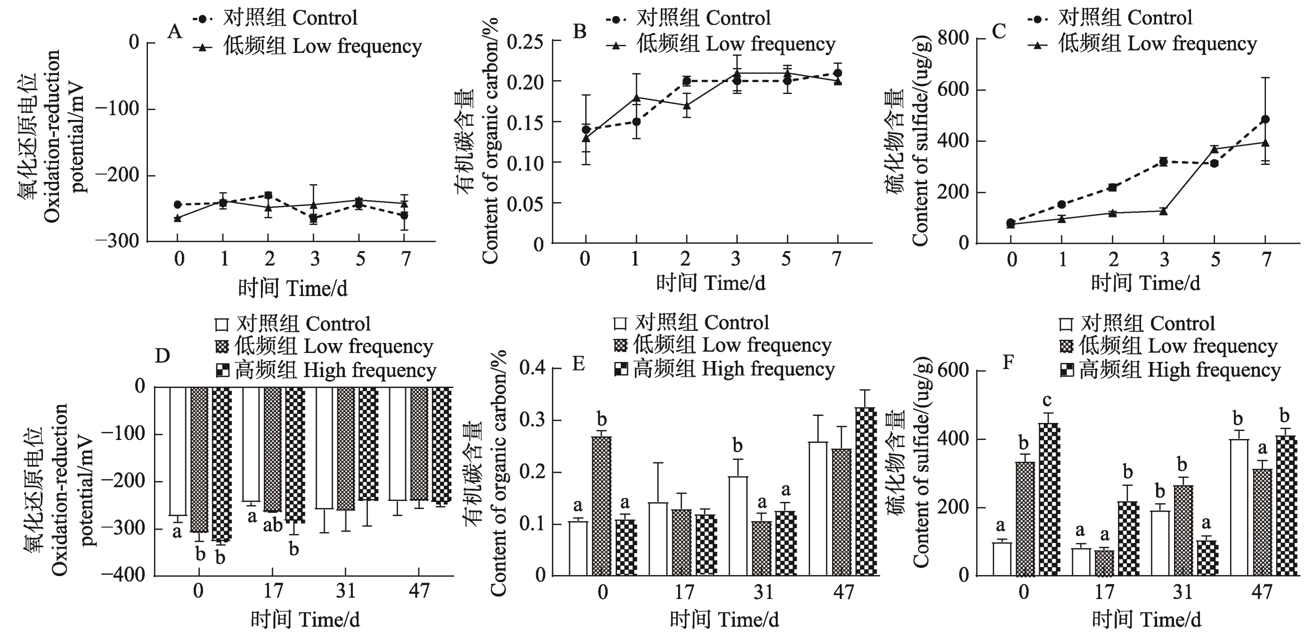

图 6　水耕作业对沉积物中氧化还原电位、有机碳和硫化物含量的短期(A、B 和 C)和长期(D、E 和 F)影响

Fig.6　Short-term (A, B and C) and long-term (D, E and F) effects of water plowing operation on ORP, TOC and S_2^{2-}-S of the pond sediments

对照组显著高于低频组和高频组(图 6E)。以上结果说明，水耕作业可以抑制池塘沉积物中 TOC 含量的增加。

如图 6C 所示，水耕前，对照组和低频组的 S_2^{2-}-S 含量无显著差异，分别为(83.81±6.74) μg/g 和(77.07±3.78) μg/g；在水耕后第 3 天时两组相差最大，S_2^{2-}-S 含量分别为(220.85±18.57) μg/g 和(128.71±17.57) μg/g，对照组显著高于低频组；从第 3~7 天，低频组沉积物中 S_2^{2-}-S 含量明显上升，于第 7 天达最高值，与对照组差异不显著(P>0.05)。长期来看，高频组和低频组 S_2^{2-}-S 含量呈先下降后升高的趋势，对照组呈上升趋势。整个实验期间，对照组 S_2^{2-}-S 含量增加了 298.4%，低频组和高频组分别降低了 6.1%和 7.9% (图 6F)。结果表明，水耕作业 3 d 内可以有效抑制 S_2^{2-}-S 含量的增加，长期水耕作业有利于降低 S_2^{2-}-S 水平。

2.5　水体和沉积物中可培养细菌数量的变化

由表 1 可以看出，各组水样的细菌数量和弧菌总量始终维持在 10^2~10^3 CFU/mL 水平；沉积物的细菌总量和弧菌总量维持在 10^3~10^6 CFU/g 水平。在 31 d 时，对照组的水体中弧菌占比最高，低频组次之，高频组弧菌占比最低；高频组的沉积物中弧菌占比最高，对照组次之，低频组最低。整个实验过程中，对照组、低频组和高频组水体中弧菌占比分别增加了 1.5%、29.1%和 4.9%，沉积物中的弧菌占比分别下降了 1.8%、2.5%和 7.1%。以上结果表明，长期性水耕作业有助于降低沉积物中弧菌比例，频率越高效果越明显。

表 1　水耕作业对水体和沉积物中可培养细菌数量的影响

Tab.1　Effects of water plowing on the number of culturable bacteria of the water and sediment

分组 Group	取样时间 Sample time	水体 Water/(CFU/mL)			沉积物 Sediment/(10^2 CFU/g)		
		细菌总量 Culturable bacteria number	弧菌总量 Culturable *Vibrio* number	弧菌比例 *Vibrio* proportion/%	细菌总量 Culturable bacteria number	弧菌总量 Culturable *Vibrio* number	弧菌比例 *Vibrio* proportion/%
对照组 Control	0 d	600	220	36.7	800	20	2.5
	31 d	110	42	38.2	228	1.5	0.7
低频组 Low frequency	0 d	850	36	4.2	1 060	30	2.8
	31 d	90	30	33.3	460	1.5	0.3
高频组 High frequency	0 d	750	80	10.7	1 350	110	8.1
	31 d	64	10	15.6	440	4.5	1.0

3 讨论

3.1 水耕作业对池塘水体基础指标的影响

水温、pH 和溶解氧作为水产养殖的重要指标，不仅直接影响池塘的其他水质指标，并且关系到刺参的生理功能和生长状态。夏秋高温条件下，表层水温大大高于底层水温，出现温跃层，池塘水体垂直循环受阻，会造成池塘底部缺氧，进而导致池底 NH_4^+-N、S_2^{2-}-S、NO_2^--N 等有毒物质的产生和累积(郑童潇等, 2023)。水耕作业抽取上层水来冲击底层，有利于促进上下层水体的交换，但由于本实验时间为秋季，且池塘较浅，受风力因素影响较大，水耕作业活动没有对池塘水温产生显著影响。海水呈弱碱性并具有一定能力的缓冲性(雷衍之, 2004)。研究显示，短时间的 pH 波动在一定程度上可促进刺参的生长和消化能力，pH 波动持续时间较长时则会抑制刺参的生长和消化(韩莎等, 2020a)。尽管高频率水耕会导致 pH 有所下降，但在实验结束时，各组间无显著性差异，整个实验周期池塘的 pH 处于 8.0~8.5 之间，在刺参生长适宜的 pH 范围内，未对刺参的生理、生长产生不利的影响。

养殖水体透明度表示光线透入池塘池水的深浅程度，其大小由水中浮游生物、有机碎屑、泥沙或其他悬浮物的含量所决定(Bricaud *et al*, 1981; 贾后磊等, 2018)。一般而言，任何种类的浑浊，例如悬浮沉积物、浮游植物大量繁殖，都可能对整个生态系统产生影响(Madsen *et al*, 2001)。本研究中发现，水耕后 2 d 内池塘水体浊度较高，其原因是水耕作业搅动了池底大量泥沙和有机碎屑等物质，这一沉积物再悬浮的过程显著提高了池水浊度。COD 是反映水体中有机及无机可氧化物质污染的常用指标，可以反映水体受到还原性物质污染的程度(杨婉玲等, 2014)。本研究中，低频率水耕和高频率水耕池塘的 DO 分别增加了 4.2%和 3.8%，均低于对照池塘(37.7%)；COD 分别增加了 21.4%和 21.8%，均高于对照池塘(9.9%)。DO 变化趋势与水体的透明度呈正相关，与 COD 变化呈负相关，这与先前研究规律类似(马建薇等, 2013, 迟爽等, 2013)。本实验过程中的该现象，一方面与上述水体浊度的升高对水体产生了遮光效应有关，在一定程度上降低了池塘的光合作用，故而 DO 低于对照池塘；另一方面沉积物再悬浮导致池塘 COD 的上升，同时还原性物质得到氧化而耗氧。研究表明，沉积物再悬浮会增加水体的悬浮颗粒物，这些物质对光具有吸收和散射的作用，增加了水体光学衰减系数，导致水下光强减弱，从而影响植物的光合作用(张运林等, 2006; 谷娇等, 2016)。

3.2 水耕作业对池塘沉积物基础指标的影响

ORP 作为反映沉积物氧化还原特性的综合性指标，受到 DO、TOC 和 S_2^{2-}-S 含量等多种参数的影响(吴金浩等, 2012)。本研究发现，低频率水耕和高频率水耕池塘的 ORP 得到了提高，这可能与水耕带来的沉积物再悬浮和氧化反应有关。与增氧机充氧、投放生石灰的化学反应和梨形环棱螺(*Bellamya purificata*)等底栖动物的生物扰动导致的沉积物氧化还原过程不同(李保民等, 2017; 张明豪等, 2021)，水耕作业是直接用水流冲到底部，将底部聚集的耗氧物质用物理的方式冲散开来，打破了沉积物的表层结构，在池底形成一条深 3~7 cm 的凹陷，促进了沉积物与 DO 的接触，显著提升了沉积物的 ORP，对池底生态具有一定的环境改良效果。

池塘沉积物作为各种化学物质的存储库、植物和动物的栖息地，直接影响水质和养殖产量(董双林等, 2017)。经多年养殖的池塘，底泥不断增厚，积累了大量的代谢产物，其中包括有机物、S_2^{2-}-S 等，直接导致养殖环境恶化(何国民等, 1997)。硫化氢是一种强生物毒性物质，可削弱海参的免疫能力和神经活性，甚至可能导致其死亡(Joyner-Matos *et al*, 2010)。在本实验的前 31 d，实验池塘中沉积物的 S_2^{2-}-S 和 TOC 含量均低于对照池塘。定期的水耕作业将养殖过程中聚集的有机物质冲散，利于水生植物、浮游生物及微生物的分解和利用，同时伴随着不同质量的泥沙颗粒、残余饵料、有机碎屑等物质先后沉降积累，为刺参带来了食物来源，对预防池底老化、提高刺参养殖增产具有重要意义。然而，到实验最后阶段，各个池塘沉积物中的 TOC 和 S_2^{2-}-S 均处于较高水平，可能与实验末期池塘水温的降低有关；实验末期水温降到了 3.1 ℃，此时刺参摄食能力大大下降，池塘中微生物大量减少，微生物分解能力相应降低，故而 TOC 和 S_2^{2-}-S 呈上升趋势。

3.3 水耕作业对池塘营养盐的影响

氮和磷作为水体重要的营养元素，常以无机态和有机态形式存在。无机态的氮和磷可以被水中的藻类和细菌等初级生产者吸收和利用，对维持水域生态具有重要意义(许海等, 2019)。一般来说，沉积物再悬浮会增加水体中有机物的降解和矿化，从而导致氮和磷的升高(刘伟等, 2020)。水中过量的氮积累会造成水体富营养化，使水中一些有害藻类大量繁殖，严重

时还会引发赤潮(屠建波等, 2008)。本研究发现，整个实验期间 NH_4^+-N、NO_2^--N 和 NO_3^--N 总体上保持较低的水平(<0.1 mg/L)，无明显变化规律，说明定期水耕对氮盐影响较小。氮盐含量较低可能与池塘的调节能力较强有关，例如大型藻类和浮游植物对氮盐的吸收利用等，对维持氮循环平衡有着重要作用(王茂双等, 2024)。本研究结果显示，实验组的 PO_4^{3-}-P 含量均显著低于对照组，且水耕频率越高就越明显，这可能与水耕对沉积物的再悬浮和氧化作用有关。有研究表明，再悬浮过程将沉积物中 Fe^{2+}氧化成 Fe^{3+}，形成铁的氢氧化物，该物质对水中的 PO_4^{3-}-P 具有吸附作用，从而导致水体 PO_4^{3-}-P 浓度降低(Kim *et al*, 2011)。此外，沉积物再悬浮的强度与水体 PO_4^{3-}-P 的吸附呈正相关(Zheng *et al*, 2021)，这与水耕频率越高、PO_4^{3-}-P 浓度越低相一致。此外，磷是浮游植物赖以生存的必需营养元素，可以被浮游植物所吸收利用(金杰等, 2013)。水耕可能促进了浮游植物的繁殖，增强了水体 PO_4^{3-}-P 的吸收利用，进而导致水体 PO_4^{3-}-P 浓度的降低。

3.4　水耕作业对沉积物可培养细菌的影响

本研究结果显示，低频组和高频组池塘沉积物的弧菌的相对丰度分别降低了 2.5%和 7.1%，而对照组仅降低了 1.8%，表明长期实施水耕作业能有效降低沉积物中弧菌的比例，且处理频率越高效果越显著。弧菌是水产养殖常见的条件致病菌，已有研究表明，哈维氏弧菌(*Vibrio harveyi*)感染可引发刺参“肠炎病”，显著抑制刺参的摄食和生长(逄慧娟等, 2017)；灿烂弧菌(*Vibrio splendidus*)感染则会导致刺参发生“腐皮综合征”(skin ulcer syndrome)，造成刺参短期内大规模死亡(王印庚等, 2013)。因此，水耕操作引起的弧菌丰度下降对维持刺参健康生长具有积极意义。推测水耕作业降低沉积物中弧菌比例的机制可能与其通过物理扰动增强沉积物氧化程度、促进有机质降解有关。具体而言，水耕产生的机械扰动不仅能够分散沉积物中的有机质，同时可氧化还原层，从而抑制厌氧性弧菌的生长繁殖，最终降低其在可培养细菌群落中的比例。从这个角度讲，水耕是一个有益的过程。养殖池塘作为一个复杂的生态系统，其细菌群落组成及丰度直接影响池塘环境变化、养殖生物生长、疾病发生和产量等(李彬等, 2010; Zhang *et al*, 2014)。

4　总结与展望

本研究结果显示，定期水耕作业有利于保持水体 PO_4^{3-}-P 处于较低水平，有效抑制沉积物中 S_2^{2-}-S 和 TOC 含量的增加，显著提升了沉积物的 ORP，同时能有效地降低沉积物中的弧菌比例，进而起到改良和修复养殖池塘环境的作用。此外，从刺参的养殖生物学角度来看，水耕作业导致的水质指标变化对刺参养殖影响不大，而对池底的清洁作用与刺参生存、生长及健康密切相关。本研究表明，水耕作业对池底有良好的改良修复作用(见表 2)。相较于低频率组(每 8 d 水耕一次)，高频率组(每 4 d 水耕一次)的正向环境调控作用更明显。鉴于频繁的水耕作业会导致池水 DO 略有下降、COD 上升和养殖成本增加，具体适宜的水耕频率需根据池水温度、DO 浓度和池底污染老化

表 2　水耕作业方式对池塘水质和底质指标影响结果对比

Tab.2　Comparison of the effects of water plowing on pond water quality and sediment indices

组别 Group	池塘水体指标 Pond water quality index								池塘底质指标 Pond sediment index			
	浊度 NTU	溶解氧 DO	pH	化学需氧量 COD	磷酸盐 PO_4^{3-}-P	铵态氮 NH_4^+-N	亚硝态氮 NO_2^--N	硝态氮 NO_3^--N	氧化还原电位 ORP	有机碳 TOC	硫化物 S_2^{2-}-S	弧菌比例 *Vibrio* proportion
对照组 Control	水清*	升高明显*	变化不大	略有升高*	升高明显	先升高，后降低	变化不大	变化不大	略有升高	升高趋势	升高趋势	略有降低
低频组 Low frequency	2 d 内较高，第 3 天变清	略有升高	变化不大	升高明显	升高明显，低于对照组	先升高，后降低	变化不大	降低趋势	升高明显*	降低趋势*	先降低，后升高*	略有降低
高频组 High frequency	2 d 内较高，第 3 天变清	略有升高	变化不大	升高明显	升高明显，低于前两组*	先升高，后降低	变化不大	变化不大	升高明显*	稳定*	先降低，后升高*	降低明显*

注：*代表该指标的相对变化有利于养殖生产。

Note: * indicates the relative change of this index is conducive to aquaculture production.

的程度进行调整。鉴于水耕作业对池塘底部生态结构的综合考虑，作者也相继研究了水耕作业对池底生态结构重塑、刺参消化生理及生长、减少病害发生的作用及其机制(另文报道)；未来也将深入研究搭配施用益生菌剂、底质改良剂的增效作用，进一步优化水耕设备集成及水耕工艺，优化刺参养殖池塘的生态维护理论与技术，为绿色水产养殖提供科技支撑。

参 考 文 献

蔡徐依, 田亚雄, 陈潘毅, 等. 固定化菌剂原位净化养殖水体效果及对微生物群落结构的影响. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1606–1615 [CAI X Y, TIAN Y X, CHEN P Y, *et al*. *In-situ* purification of aquaculture water using an immobilized bacterial agent and its influence on the microbial community structure. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(7): 1606–1615]

陈文, 邱磊, 曹树威, 等. 微生态制剂在水产养殖中的应用. 水产养殖, 2022, 43(7): 13–16 [CHEN W, QIU L, CAO S W, *et al*. A brief introduction of probiotics application in aquaculture. Journal of Aquaculture, 2022, 43(7): 13–16]

程香菊, 曾映雪, 谢骏, 等. 微孔曝气流量与曝气管长度对水体增氧性能的影响. 农业工程学报, 2014, 30(22): 209–217 [CHENG X J, ZENG Y X, XIE J, *et al*. Impact of microporous aeration flow and aeration tube length on oxygen transfer performance in water. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(22): 209–217]

迟爽, 曾勇, 赵振军, 等. 刺参养殖池塘的水质变化. 济南大学学报(自然科学版), 2013, 27(3): 239–244 [CHI S, ZENG Y, ZHAO Z J, *et al*. Variation of water quality in culture ponds for *Apostichopus japonicus*. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2013, 27(3): 239–244]

董双林, 田相利, 高勤峰. 水产养殖生态学. 北京: 科学出版社, 2017 [DONG S L, TIAN X L, GAO Q F. Aquaculture ecology. Beijing: Science Press, 2017]

范海涛, 王洪臣, 齐鲁, 等. 污泥浓度对微孔曝气氧传质过程的影响. 环境工程学报, 2012, 6(12): 4305–4309 [FAN H T, WANG H C, QI L, *et al*. Effects of sludge concentration on oxygen mass transfer in fine pore aeration. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(12): 4305–4309]

冯旭文, 于晓果, 陈建芳, 等. 河口季节性缺氧在沉积物中记录的研究进展. 海洋学研究, 2006, 24(1): 50–61 [FENG X W, YU X G, CHEN J F, *et al*. A review on the study progress of sediment records for the seasonal hypoxia in estuaries. Journal of Marine Sciences, 2006, 24(1): 50–61]

谷娇, 宁晓雨, 靳辉, 等. 沉积物再悬浮对浅水湖泊沉水植物光合作用及生长影响的研究进展. 生态科学, 2016, 35(1): 200–208 [GU J, NING X Y, JIN H, *et al*. Research progress in the effect of sediment resuspension on the photosynthesis and growth of submerged macrophytes. Ecological Science, 2016, 35(1): 200–208]

韩莎, 胡炜, 李成林, 等. pH 处理时间对刺参生长、摄食及消化酶活性的影响. 广西科学院学报, 2020a, 36(2): 145–150 [HAN S, HU W, LI C L, *et al*. Effects of pH with different durations on growth, feeding and activity of digestive enzyme of sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2020a, 36(2): 145–150]

韩莎, 曲洪霞, 李成林, 等. 微生态制剂及其使用策略对刺参生长与养殖水质的影响. 中国农学通报, 2020b, 36(2): 144–148 [HAN S, QU H X, LI C L, *et al*. The application strategy of probiotics affects growth and cultural water quality of *Apostichopus japonicus*. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020b, 36(2): 144–148]

何国民, 卢婉娴, 刘豫广, 等. 海湾网箱渔场老化特征分析. 中国水产科学, 1997, 4(S1): 76-80 [HE G M, LU W X, LIU Y G, *et al*. Analysis on aging characteristics of cage fishing ground in bay. Journal of Fishery Sciences of China, 1997, 4(S1): 76–80]

贾后磊, 苏文, 黄华梅, 等. 海岸带和内陆水体透明度动态变化特征及其主导影响因素. 光学学报, 2018, 38(3): 301001 [JIA H L, SU W, HUANG H M, *et al*. Dynamic change characteristics and its dominant influencing factors of secchi disk depth in coastal and inland waters. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 301001]

金杰, 刘素美. 海洋浮游植物对磷的响应研究进展. 地球科学进展, 2013, 28(2): 253–261 [JIN J, LIU S M. Advances in studies of phosphorus utilization by marine phytoplankton. Advances in Earth Science, 2013, 28(2): 253–261]

雷衍之. 养殖水环境化学. 北京: 中国农业出版社, 2004 [LEI Y Z. Aquaculture water environment chemistry. Beijing: China Agriculture Press, 2004]

李保民, 张敏, 蔡清武, 等. 不同修复方式下养殖池塘底质营养物质的迁移特征. 水产科学, 2017, 36(1): 72–77 [LI B M, ZHANG M, CAI Q W, *et al*. Removal characteristics of nitrogen and phosphorus in polluted sediment in aquaculture ponds by different remediations. Fisheries Science, 2017, 36(1): 72–77]

李彬, 荣小军, 姜卓, 等. 秋、冬季节刺参养殖池塘浮游细菌数量变化规律的研究. 渔业科学进展, 2010, 31(3): 44–48 [LI B, RONG X J, JIANG Z, *et al*. Study on spatial and temporal variations of planktobacteria quantity in *Apostichopus japonicus* culture ponds during autumn and winter. Progress in Fishery Sciences, 2010, 31(3): 44–48]

廖梅杰, 王印庚, 李彬, 等. 我国海参养殖产业现状、存在问题及对策探讨(上). 科学养鱼, 2021(2): 24–25 [LIAO M J, WANG Y G, LI B, *et al*. Present status and existing problem for sea cucumber culture industry in China and discussion on its countermeasures (Continued). Scientific Fish Farming, 2021(2): 24–25]

刘伟, 周斌, 王丕波, 等. 沉积物再悬浮氮磷释放的机制与影

响因素. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1311–1318 [LIU W, ZHOU B, WANG P B, *et al*. Mechanism and influencing factors of nitrogen and phosphorus release *via* sediment re-suspension. Science Technology and Engineering, 2020, 20(4): 1311–1318]

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, 36(4): 59–66 [LU C C, SUN Y J, GAO Q F, *et al*. Effects of different water exchange frequencies on the environments of the sediments in sea cucumber culture ponds. Transactions of Oceanology and Limnology, 2014, 36(4): 59–66]

马建薇, 刘俊良, 李燕, 等. 物理因素对白洋淀溶解氧的影响. 中国农村水利水电, 2013(8): 21–24 [MA J W, LIU J L, LI Y, *et al*. Effect of physical factors on dissolved oxygen in Baiyang Lake. China Rural Water and Hydropower, 2013(8): 21–24]

农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2024 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2024 [Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2024. Beijing: China Agriculture Press, 2024]

逄慧娟, 廖梅杰, 李彬, 等. 刺参(*Apostichopus japonicus*)保苗期“肠炎病”及其治疗方法. 渔业科学进展, 2017, 38(3): 188–197 [PANG H J, LIAO M J, LI B, *et al*. Etiology and treatment of enteritis disease in cultured juveniles of *Apostichopus japonicus*. Progress in Fishery Sciences, 2017, 38(3): 188–197]

屠建波, 张秋丰, 胡延忠, 等. 天津近岸海域赤潮监控区富营养化状况评价. 海洋环境科学, 2008, 27(6): 592–594 [TU J B, ZHANG Q F, HU Y Z, *et al*. Assessment on eutrophication status in red-tide monitoring area of Tianjin coastal area. Marine Environmental Science, 2008, 27(6): 592–594]

王茂双, 李瑞环, 刘素美, 等. 桑沟湾营养盐及浮游植物对水产养殖活动的响应. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2024, 54(11): 83–95 [WANG M S, LI R H, LIU S M, *et al*. Responses of nutrients and phytoplankton to aquaculture activities in Sanggou Bay. Periodical of Ocean University of China, 2024, 54(11): 83–95]

王印庚, 荣小军, 廖梅杰, 等. 刺参健康养殖与病害防控技术丛解. 北京: 中国农业出版社, 2014 [WANG Y G, RONG X J, LIAO M J, *et al*. SEA cucumber culture and disease control technology. Beijing: China Agriculture Press, 2014]

王印庚, 荣小军, 张凤萍, 等. 养殖刺参“腐皮综合征”致病菌——灿烂弧菌的原位杂交检测方法的建立与应用. 渔业科学进展, 2013, 34(2): 114–118 [WANG Y G, RONG X J, ZHANG F P, *et al*. Establishment and application of *in situ* hybridization detection of *Vibrio splendidus* causing skin ulcer syndrome in cultured *Apostichopus japonicus*. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(2): 114–118]

王印庚, 荣小军. 我国刺参养殖存在的主要问题与疾病综合防治技术要点. 齐鲁渔业, 2004, 21(10): 29–31, 4 [WANG Y G, RONG X J. Primary problems in the culture of *Apostichopus japonicus* and techniques of disease prevention. Shandong Fisheries, 2004, 21(10): 29–31, 4]

吴金浩, 刘桂英, 王年斌, 等. 辽东湾北部海域表层沉积物氧化还原电位及其主要影响因素. 沉积学报, 2012, 30(2): 333–339 [WU J H, LIU G Y, WANG N B, *et al*. The Eh in surface sediments in the northern of Liaodong Bay and its main influencing factors. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(2): 333–339]

许海, 陈洁, 朱广伟, 等. 水体氮、磷营养盐水平对蓝藻优势形成的影响. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1239–1247 [XU H, CHEN J, ZHU G W, *et al*. Effect of concentrations of phosphorus and nitrogen on the dominance of cyanobacteria. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(5): 1239–1247]

杨春懿, 马广翔, 顾俊杰, 等. 底泥疏浚生态环境效应的后评价研究——以山东省某河段整治为例. 华东师范大学学报(自然科学版), 2022(3): 61–70 [YANG C Y, MA G X, GU J J, *et al*. Study on ecological environmental effects of sediment dredging: A case study on river regulation in Shandong Province. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2022(3): 61–70]

杨婉玲, 赖子尼, 刘乾甫, 等. 不同养殖品种池塘化学耗氧量(COD_{Mn})变化趋势及环境影响因素. 广东农业科学, 2014, 41(8): 161–165 [YANG W L, LAI Z N, LIU Q F, *et al*. Changing trend of chemical oxygen demand (COD_{Mn}) in different breeding pond and its influence factors. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(8): 161–165]

张静, 周雪飞, 钱雅洁. 过氧化钙在环境修复应用中的研究进展. 环境化学, 2014, 33(2): 321–326 [ZHANG J, ZHOU X F, QIAN Y J. Research progress of the application of calcium peroxide in environmental remediation. Environmental Chemistry, 2014, 33(2): 321–326]

张明豪, 张奕昀, 侯诒然, 等. 梨形环棱螺生命活动对池塘沉积物中氮转化的影响. 海洋湖沼通报, 2021, 43(2): 82–90 [ZHANG M H, ZHANG Y Y, HOU Y R, *et al*. Effect of the bioturbation derived from snail *Bellamya purificata* on pond sediments nitrogen forms. Transactions of Oceanology and Limnology, 2021, 43(2): 82–90]

张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性, 生态学报, 2006, 26(12): 3969–3979 [ZHANG Y L, QIN B Q, YANG L Y. Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in Meiliang Bay of Lake Taihu. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 3969–3979]

郑童潇, 廖梅杰, 李彬, 等. 池塘冷能气雾降温设备对高温期刺参养殖池塘环境理化指标及沉积物细菌群落结构的影响. 渔业科学进展, 2023, 44(3): 163–175 [ZHENG T X, LIAO M J, LI B, *et al*. Effects of the cooling equipment based on cooled atomization air on environmental physicochemical indexes and sedimental microbial community structure of sea cucumber culture ponds in summer. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(3): 163–175]

BOYD C E, WOOD C W, CHANEY P L, *et al*. Role of aquaculture pond sediments in sequestration of annual global carbon emissions. Environmental Pollution, 2010, 158(8): 2537–2540

BRICAUD A, MOREL A, PRIEUR L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains. Limnology and Oceanography, 1981, 26(1): 43–53

JOYNER-MATOS J, PREDMORE B L, STEIN J R, *et al*. Hydrogen sulfide induces oxidative damage to RNA and DNA in a sulfide-tolerant marine invertebrate. Physiological and Biochemical Zoology, 2010, 83(2): 356–365

KANG Z J, YU R C, KONG F Z, *et al*. Records of bulk organic matter and plant pigments in sediment of the “red-tide zone” adjacent to the Changjiang River estuary. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(5): 915–927

KIM J, LI W, PHILIPS B L, *et al*. Phosphate adsorption on the iron oxyhydroxides goethite (α-FeOOH), akaganeite (β-FeOOH), and lepidocrocite (γ-FeOOH): A 31P NMR study. Energy & Environmental Science, 2011, 4(10): 4298

LI M, GAO Y, QI Y X, *et al*. Assessment of the nutritional value of cultured sea cucumber *Apostichopus japonicus*. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2021, 30(7): 868–879

MADSEN J D, CHAMBERS P A, JAMES W F, *et al*. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. Hydrobiologia, 2001, 444(1): 71–84

MASUDA K, BOYD C E. Effects of aeration, alum treatment, liming, and organic matter application on phosphorus exchange between soil and water in aquaculture ponds at auburn, Alabama. Journal of the World Aquaculture Society, 1994, 25(3): 405–416

STEEBY J A, HARGREAVES J A, TUCKER C S, *et al*. Modeling industry-wide sediment oxygen demand and estimation of the contribution of sediment to total respiration in commercial channel catfish ponds. Aquacultural Engineering, 2004, 31(3/4): 247–262

ZAMORA L N, YUAN X T, CARTON A G, *et al*. Role of deposit-feeding sea cucumbers in integrated multitrophic aquaculture: Progress, problems, potential and future challenges. Reviews in Aquaculture, 2018, 10(1): 57–74

ZHANG D M, WANG X, XIONG J B, *et al*. Bacterioplankton assemblages as biological indicators of shrimp health status. Ecological Indicators, 2014, 38: 218–224

ZHENG X F, ZHANG K K, YANG T, *et al*. Sediment resuspension drives protist metacommunity structure and assembly in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) aquaculture ponds. Science of the Total Environment, 2021, 764: 142840

(编辑 马僱艳)

Effects of Water Plowing on Water Quality and Sediment Physicochemical Factors in Sea Cucumber (*Apostichopus japonicus*) Culture Ponds

ZHAO Wenguang[1,2], WANG Yingeng[2①], LI Bin[2], GE Jianlong[2], LIAO Meijie[2], RONG Xiaojun[2], WANG Jinjin[2], ZOU Shifang[3]

(1. *College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai* 201306, *China*; 2. *State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, , Qingdao* 266071, *China*; 3. *Shandong Anyuan Aquaculture Co., Ltd., Yantai* 265617, *China*)

Abstract *Apostichopus japonicus* is one of the most important aquaculture species in China and pond culture is the primarily culture method by which this species is cultivated. In the process of pond aquaculture, with the extension of the aquaculture period, organic fertilizer, residual bait, phytoplankton debris and excrement of aquaculture species in the water is deposited in a large amount at the bottom of the pond, which not only leads to the decline of water quality, but also results in the accumulation of a large amount of toxic substances in the sediment, which in turn seriously affects the output of

① Corresponding author: WANG Yingeng, Email: wangyg@ysfri.ac.cn

sea cucumber. In recent years, a water plowing operation mode to control the water quality and pond sediment has emerged for sea cucumber culture in Liaoning and Shandong Province. However, the water plowing technology and environmental improvement mechanism are still unclear. A 48-day water plowing experiment was carried out in the sea cucumber culture area in Liaoning Province. A low-frequency group (water plowing once every 8 days), high-frequency group (water plowing once every 4 days) and control group (no water plowing) were set up. Through short-term continuous tracking and long-term regular monitoring, the changes of physicochemical factors such as chemical oxygen demand (COD), phosphate concentration, redox potential (ORP) and sulfide content in the water and sediment of the culture pond were analyzed. The results showed that the turbidity of water in the experimental groups were (4.16±0.39) NTU, which was significantly higher than that in the control group at two days after water plowing operations. On the fourth day, the concentration of ammonium nitrogen and nitrite nitrogen in the experimental groups decreased by 88.9% and 75.0%, respectively, which was greater than that in the control group. After 31 days of water plowing, the concentrations of phosphate and nitrite nitrogen in the pond water of the low-frequency group and the high-frequency group were significantly lower than those of the control group, and the content of organic carbon in the sediment was also significantly lower than that of the control group ($P<0.05$). After 47 days of water plowing, dissolved oxygen (DO) in the pond water of the low frequency group and high frequency group increased by 4.2% and 3.8%, respectively, but was lower than of the control group (37.7%). Conversely, COD increased by 21.4% and 21.8%, respectively, exceeding that of the control group (9.9%). Phosphate concentrations increased by 125.0% and 100.0%, respectively, yet were still lower than that of the control group (183.3%). ORP of sediments increased by 67.6 mV and 82.3 mV respectively, which were significantly higher than that of the control group (31.3 mV). Sulfide content in sediments decreased by 6.1% and 7.9%, respectively, while that in the control group increased by 298.4%. The proportion of *Vibrio* in sediments decreased by 2.5% and 7.1%, respectively, while that in the control group decreased by 1.8%. The results show that regular water plowing operations are conducive to keeping the inorganic phosphorus in the ponds at a low level, effectively inhibit the increase of organic carbon and sulfide content in sediments, significantly improve the ORP of sediments, and effectively reduce the proportion of *Vibrio* in sediments. Water plowing operations could be employed to improve and remediate the aquaculture pond environment. Compared to the low-frequency group, the high-frequency group exhibited more pronounced environmental regulatory effects. However, given that frequent aquatic tillage may lead to a slight decrease in DO, an increase in COD, and higher aquaculture costs, the optimal tillage frequency should be adjusted based on specific conditions, including pond water temperature, DO concentration, and the degree of sediment pollution and aging. The results of this study provide reference data for the development of water plowing technology and its application and promotion, and also lay the foundation for an in-depth explanation of its environmental improvement mechanism, the construction of disease prevention and control technology, and the realization of healthy culture of sea cucumber *A. japonicus*.

Key words Water plowing operation; Sea cucumber; Pond culture; Water quality control; Sediment improvement; Environmental factors; Sediment resuspension