

滩涂贝类养殖区底质硫化物的去除及修复

牛俊翔^{1,2}, 蒋 玫¹, 李 磊¹, 袁 骐¹, 吴庆元^{1,2}, 许高鹏^{1,2}, 沈新强^{1*}

(1. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 农业部海洋与河口渔业资源及生态重点开放实验室, 上海 200090; 2. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要:以滩涂现场实验与室内模拟实验相结合的途径, 运用物理修复方法(翻耕、压沙加翻耕)和投放双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)的生物修复方法开展滩涂文蛤(*Meretrix meretrix*)养殖底质中硫化物的去除修复实验。结果表明, 现场和室内物理修复实验中, 翻耕和压沙加翻耕处理去除硫化物效果均达到显著水平($P < 0.05$), 其中压沙加翻耕修复效果优于翻耕, 室内翻耕 30 cm 修复效果优于翻耕 20 cm。室内生物修复实验中, 各沙蚕处理组较对照组均表现出了较好的硫化物修复效果, 且硫化物的去除效果随沙蚕投放密度的适量增加而增强, 其中 $0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 沙蚕组的修复效果达到显著水平($P < 0.05$), 而当增加沙蚕投放密度至 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 硫化物的去除效果反而减弱, 表明最佳沙蚕修复效果有一个适宜的密度投放值。

关键词:滩涂贝类; 底质修复; 硫化物; 物理修复; 双齿围沙蚕

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)07-1467-06 doi:10.11654/jaes.2013.07.026

Study on Restoration of Sulfide in Sediment Environment of Shellfish Mudflat Culture Areas

NIU Jun-xiang^{1,2}, JIANG Mei¹, LI Lei¹, YUAN Qi¹, WU Qing-yuan^{1,2}, XU Gao-peng^{1,2}, SHEN Xin-qiang^{1*}

(1. Key and Open Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries Resources and Ecology of Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The sulfide in mariculture environments could not only influence directly the seawater environmental qualities, but also induce the pollution of sediment environments and result in impairments of the shellfish cultured. In this study, laboratory experiment and field experiment were used to investigate the restoration of sulfide in sediment environment of shellfish mudflat culture areas. And two methods on restoration of sediment environment were involved, one was bioremediation (the densities of *Perinereis aibuhitensis* were $0.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $0.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ respectively), and the other was physical way (only beach ploughing, both covering sand and beach ploughing). The results indicated that two physical ways had achieved significant results in both laboratory experiment and field experiment ($P < 0.05$), and the result of both covering sand and beach ploughing was better than only beach ploughing in both two experiments, and the effect of ploughed 30cm was better than ploughed 20 cm in laboratory experiment. Compared with the control group of bioremediation, all density groups of *Perinereis aibuhitensis* reduced the concentration of sulfide in sediment environment, and the effects of $0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ and $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ were prominent ($P < 0.05$). The effect of *Perinereis aibuhitensis* was enhanced with increasing density, and $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ was the best treatment group (the removal percentage of sulfide was 29.31%), however, when the density of *Perinereis aibuhitensis* increased to $0.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, the removal percentage of sulfide decrease (only 17.36%).

Keywords: mudflat shellfish; Sediment restoration; sulfide; physical restoration; *Perinereis aibuhitensis*

底质是滩涂贝类赖以生存的空间, 是贝类觅食和栖息的重要场所, 滩涂底质环境的优劣会直接关系到

滩涂贝类养殖的成功与否^[1]。贝类是一种滤食性动物, 具有很强的滤水能力, 滩涂贝类的养殖活动增强了环境中的生物沉降活动, 导致水体中有机颗粒加速向底层搬运和积累, 使底质硫酸盐还原反应得以加强, 底质中硫化物的含量增加^[2-4], 并引起生态环境的恶化, 甚至使养殖贝类大量死亡^[5]。

底质硫化物主要是通过硫酸盐的异化还原过程,

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-48)

作者简介: 牛俊翔(1988—), 男, 河南项城人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋渔业生态与环境保护。E-mail: niujx2011@163.com

* 通信作者: 沈新强 E-mail: xinqiang_shen@hotmail.com

或者微生物分解利用生物代谢产物、残饵等有机质中的含硫氨基酸过程而产生的^[6-7],其含量高低是衡量底质环境优劣的一个重要指标。在一定的条件下,底质中的硫化物可通过释放、水体对流等方式进入水体,并与养殖对象血液中的血红蛋白结合产生硫血红蛋白,降低机体中血液的携氧能力^[8]。同时硫化物对养殖对象的鳃组织具有很强的刺激和腐蚀作用,会使其组织产生凝血性坏死,甚至导致养殖生物因呼吸困难而窒息死亡^[6,8-9]。姚国兴等^[10]研究发现硫化物对文蛤具有较强的毒害作用,并可能与文蛤的大批量死亡存在一定的关系。陈坚等^[11]研究发现文蛤幼贝和成贝的成活率随着硫化物浓度的升高而降低。

目前国内外关于滩涂贝类养殖环境中硫化物去除方面的研究报道较少,李晓敏等^[12]利用化学方法对乳山湾老化滩涂进行了修复并取得了一定的效果;马绍赛等^[13]、陈聚法等^[14]和陈惠彬^[15]分别应用物理和生物修复方法提高了老化滩涂贝类养殖的产量,但未探讨修复过程中硫化物的具体变化量和变化特点,也未利用室内模拟实验对滩涂现场实验中硫化物修复效果进行检验。

本研究采用滩涂现场实验与室内模拟实验相结合的方法,运用物理修复方式(翻耕与压沙加翻耕)和投放不同密度双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)的生物方式对滩涂文蛤(*Meretrix meretrix*)养殖环境的底质进行硫化物修复,旨在探明不同修复手段作用下底质硫化物含量的变化过程及去除效果,为进一步研究贝类养殖环境中硫化物的去除机制及大规模的沿海老化滩涂底质环境修复奠定一定的理论和实践基础。

1 材料与方法

1.1 室内模拟物理修复实验

室内模拟物理修复实验在江苏省启东市某养殖池内自行搭建的栅格围隔区域进行。实验沉积物取自现场实验所在的滩涂文蛤养殖区。每个栅格围隔长度和宽度分别为2 m和1.5 m,底部沉积物厚度为60 cm。分别设置翻耕20 cm、30 cm和压沙加翻耕(先压沙3 cm,再翻耕30 cm)3个修复实验组和1个对照组。每天模拟文蛤养殖区潮汐状况,同步调整取自文蛤养殖区的天然海水引入、排出时间。室内模拟实验沉积物取样采用网格法,分别于实验的第0、3、5、10、15、20 d采集各个实验组沉积物样品进行硫化物含量测定。

1.2 室内生物修复实验

室内生物实验在白色聚乙烯塑料箱(75 cm×55 cm×75 cm)中进行。塑料箱体底部铺设取自现场实验所在滩涂养殖区的沉积物,其厚度为20 cm。双齿围沙蚕取自启东当地沙蚕养殖池,其个体规格为:平均体长(20.14±1.45)cm,平均体重(5.55±1.02)g。分别设置4个不同水平的沙蚕密度(0.07、0.14、0.21、0.28 kg·m⁻²)实验组和1个对照组,每组设置2个平行样。同时,每个塑料箱中各放置20个取自自然滩涂养殖区的文蛤,其个体规格为:平均壳长(34.11±1.41)mm,平均壳宽(28.59±1.26)mm,平均壳高(14.17±1.09)mm,平均体重(9.01±1.35)g。每天模拟文蛤养殖区潮汐状况,同步调整取自文蛤养殖区的天然海水引入、排出时间。通过可调节阀门开关控制流速(3.6 L·h⁻¹),同时对塑料箱内进行充氧。每天上、下午各一次监测水体温度、pH、盐度、溶解氧。分别于实验的第0、7、14、21 d采集各个实验组沉积物样品进行硫化物含量测定。

1.3 现场修复实验

于2012年4—8月在江苏省启东市沿海滩涂文蛤养殖区,采用翻耕和压沙加翻耕两种物理修复方法进行现场实验。实验区域总面积约1.42 hm²(图1),其中翻耕区翻耕深度为30 cm,面积为1 hm²;压沙加翻耕区先压沙3 cm,再翻耕30 cm,面积为0.33 hm²;对照区不翻耕、不压沙,保持原貌,面积为0.09 hm²。实验区四周用围网间隔,防止文蛤逃逸。翻耕后投放文蛤苗,放苗密度为50个·m⁻²。在不同修复实验组及对照组区域内各设置3个随机取样点,分别于翻耕后的第0、1、2、3、4月(即4、5、6、7、8月份)采集沉积物样品,进行硫化物的含量测定。

硫化物的测定参照GB17378.5—2007《海洋监测规范》^[16]进行。

1.4 数据计算与分析

实验结果计算及处理采用Excel软件;数据统计分析方法采用SPSS 17.0软件,使用单因素方差分析法(One-Way ANOVA)进行组间差异显著性检验, $P < 0.05$ 表示有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 室内模拟物理修复实验组硫化物含量变化

实验期间,翻耕20 cm、翻耕30 cm和压沙加翻耕3个修复组中底质硫化物含量整体呈现下降趋势(图2),硫化物去除率分别为1.09%、5.11%和7.31%,而

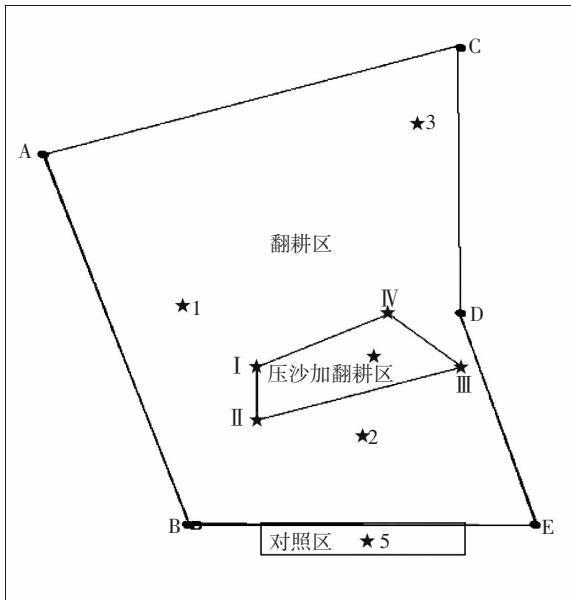


图 1 现场实验示意图

Figure 1 Location of field experiment

对照组硫化物含量有所上升,上升率为 5.29%(图 3)。3 个修复处理组底质硫化物去除效果较对照组均达到显著性水平($P<0.05$),且都呈现先快速下降后小幅平缓波动的变化趋势。图 3 显示,压沙加翻耕组硫化物的去除率最高,其修复效果相对较好,翻耕 30 cm 组的硫化物去除率次之,翻耕 20 cm 组的硫化物去除率最低。

2.2 室内生物修复实验组硫化物含量的变化

生物修复的各实验组第 20 d 硫化物含量较实验开始(第 0 d)均出现逐渐下降的趋势(图 4),其中:密度为 $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的沙蚕组降幅最大,为 $0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;密度为 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的沙蚕组降幅最小,为 $0.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图 5 显示, $0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 沙蚕组硫化

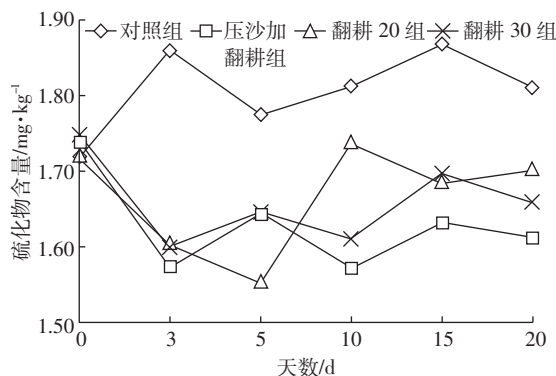
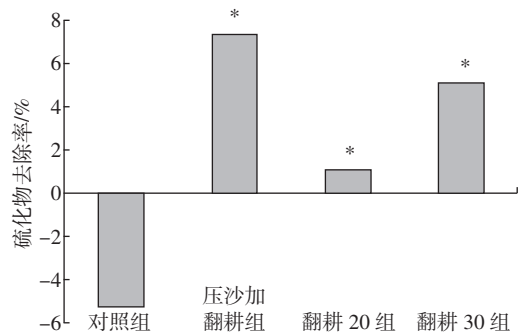


图 2 室内物理实验组沉积物中硫化物含量变化

Figure 2 The variation of sulfide in sediments of laboratory physical experiment



* 表示处理组与对照组之间存在显著性差异 (* means significant difference between the treatment group and the control group)

图 3 室内物理实验组沉积物中硫化物的去除率

Figure 3 The removal percentage of sulfide in sediments of laboratory physical experiment

物去除效果较对照组均达到显著性水平($P<0.05$),且沙蚕对硫化物的去除作用随其投放密度的适量增加而增强,其中 $0.21 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 沙蚕组的去除效果最好,硫化物去除率达 29.31%。此后再增加沙蚕投放密度至 $0.28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,硫化物的去除作用反而减弱,硫化物去除率只有 17.36%,仅高于对照组,说明投放沙蚕密度与硫化物的去除作用不是完全的正相关关系。

2.3 滩涂现场实验组硫化物含量变化

实验期间,翻耕和压沙加翻耕 2 个修复组底质硫化物含量均呈现先急剧下降,后缓慢降低的变化趋势(图 6),硫化物去除率分别为 21.82%和 26.29%,对照组硫化物含量相对变化较小,呈现小幅上升趋势,硫化物增加率为 9.16%(图 7)。翻耕组和压沙加翻耕组硫化物去除效果较对照组均达到显著性水平($P<0.05$),且压沙加翻耕组硫化物的去除效果优于翻耕组。

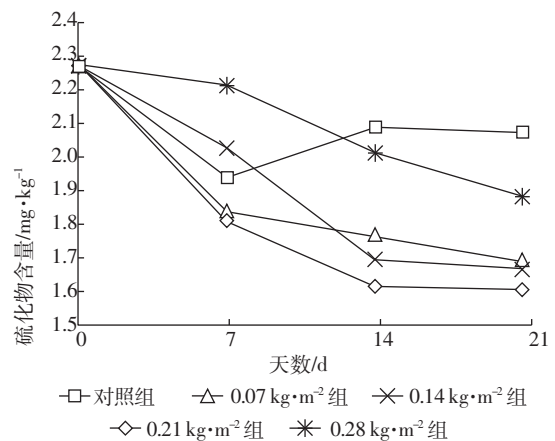


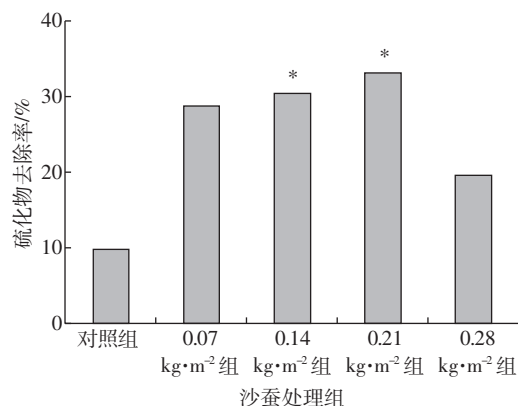
图 4 沙蚕实验组沉积物中硫化物含量变化

Figure 4 The variation of sulfide in sediments of bioremediation experiment

3 讨论

3.1 物理修复方式对底质中硫化物含量的影响

翻耕和压沙是修复老化滩涂最常用且简易有效的两种物理方法,国内已有学者^[13-14]利用翻耕与压沙的修复方法来提高老化滩涂养殖贝类的产量。在本研究中,综合室内模拟实验和现场实验结果可以看出,翻耕处理和压沙加翻耕处理在室内、现场实验均取得了显著的修复效果,且总体上均出现硫化物含量先快速下降,后小幅度波动逐步趋稳的变化趋势。在实验初期,翻耕可使底质深处的污浊物和有机物上升,增加底质与水中溶解氧的接触面积,间接改善了底质缺氧环境,促进有机质和硫化物的部分分解^[17];同时,底质含氧量的增加也抑制了硫酸盐还原菌的活性,从而使底质中硫化物的产生速度及累积量下降^[18]。但随着实验时间的延续,前期翻耕而松散的底质被逐渐压



* 表示处理组与对照组之间存在显著性差异 (* means significant difference between the treatment group and the control group)

图5 沙蚕实验组沉积物中硫化物去除率

Figure 5 The removal percentage of sulfide in sediments of bioremediation experiment

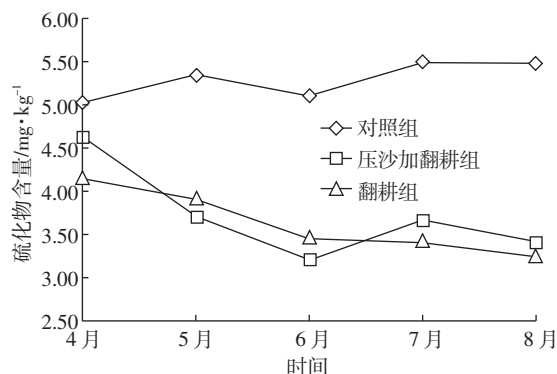
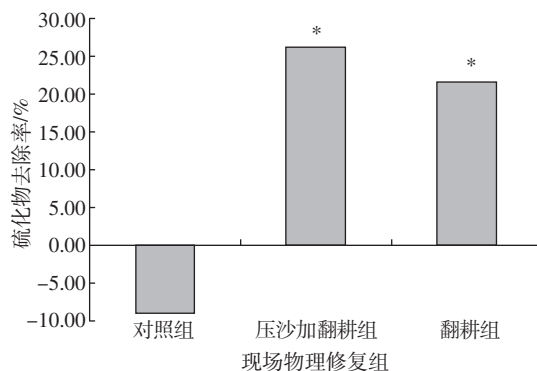


图6 现场实验沉积物中硫化物含量变化

Figure 6 The variation of sulfide in sediments of field experiment



* 表示处理组与对照组之间存在显著性差异 (* means significant difference between the treatment group and the control group)

图7 现场实验沉积物中硫化物去除率

Figure 7 The removal percentage of sulfide in sediments of field experiment

实,导致底质中氧含量相对减少,造成底质硫化物含量有所上升并小幅波动。与单独翻耕修复相比,压沙加翻耕修复方式还综合了压沙修复的优点,压沙并翻耕可使老化的底质与压盖的洁净细沙充分混合均匀,一定程度上稀释了原有底质硫化物的浓度,可在翻耕修复效果的基础上,进一步改善底质硫化物的污染状况,从而使压沙加翻耕组的修复效果在总体上优于翻耕组。此外,室内翻耕实验结果(图2,图3)表明,翻耕20 cm和翻耕30 cm 2个修复组去除底质硫化物的效果显著,且翻耕30 cm组修复效果优于翻耕20 cm组,可见一定范围内增加翻耕深度会增大底质含氧量,阻碍硫化物的形成与积累,增强底质硫化物的去除效果。值得指出的是,压沙加翻耕处理组对硫化物的显著修复效果在现场实验和室内模拟实验中均得到了很好的验证,且其可操作性强,可作为今后大力推广的一种滩涂底质修复方法。

3.2 沙蚕对底质硫化物含量的影响

底质硫化物的产生与底质中有机质的产生和积累是密不可分的^[6,19-20],海水养殖沉积物中硫化物主要来源于 SO_4^{2-} 的还原,而沉积物中 SO_4^{2-} 还原速率相当于活性有机质的分解速率^[18,21]。本次室内模拟实验中底质有机质主要来源于文蛤、沙蚕的排泄物,文蛤会使水环境中生物沉降速率增大,导致底质中有机质的大量积累,而厌氧状态下有机质的增加会导致硫酸盐还原菌数量增多、活性增强,加速底质硫化物的产生和积累,从而使对照组硫化物含量在整个实验期间相对较高。

双齿围沙蚕是典型的沉积食性底栖动物^[22]。相关研究^[23]表明,双齿围沙蚕对养殖底质污染具有一定的

修复效果。在本实验中,各沙蚕处理组底质硫化物含量均持续降低(图4),表现出了良好的硫化物去除效果,其中 $0.14\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.21\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 沙蚕组的硫化物去除效果更佳,均达到了显著性水平。其原因是沙蚕能大量摄食贝类养殖环境中的生物残体和排泄物,减缓底质中有机物的累积速度;同时,沙蚕会积极将呼吸所需的水中溶解氧抽到沉积物中,增加底质中的氧含量,并通过掘穴活动增大水中溶解氧与底质的接触面积,促进有机质的矿化分解^[23]。另外,沙蚕的觅食掘穴活动引起的生物扰动使沉积物被垂直搬运和混合,加速微、小型生物对有机质的分解、代谢和矿化^[23-24],从而达到去除底质硫化物的目的。

此外,不同密度沙蚕组的硫化物修复效果存在差异(图5),表明沙蚕的修复效果与其投放密度密切相关,这也与邓锦松等^[23]的研究结果一致。在本实验中,除 $0.28\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 沙蚕组外,沙蚕修复效果随投放密度的增加而增强,其中以 $0.21\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 沙蚕组修复效果最佳。同时,由于实验中投放的是呼吸代谢作用较强的成体双齿围沙蚕,过高的投放密度会使沙蚕自身耗氧量大于其扰动带给底质的增氧量,引起底质出现局部性和暂时性缺氧,不利于有机质矿化分解;加之高密度沙蚕会产生大量的排泄物,增加底质中有机质含量,进一步减弱底质硫化物的总体修复效果,导致 $0.28\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 沙蚕组底质硫化物含量反而较高。

4 结论

(1)翻耕和压沙是物理修复最常用的手段,本实验中,翻耕处理和压沙加翻耕处理在室内模拟实验和现场实验中均取得了显著的硫化物修复效果,其中压沙加翻耕处理修复效果优于翻耕处理,室内翻耕30 cm效果优于室内翻耕20 cm,说明压沙加翻耕这种物理修复方式,可操作性强,是今后值得推广的一种滩涂底质修复方法。

(2)室内生物实验中,各沙蚕处理组底质硫化物含量相较于对照组均有明显降低,其中 $0.14\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $0.21\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 沙蚕组的修复效果均达到了显著水平。硫化物的去除作用随沙蚕投放密度的适量增加而增强, $0.21\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 沙蚕组的去除效果最好,硫化物去除率达29.31%,增加沙蚕投放密度至 $0.28\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时,硫化物的去除作用反而减弱,硫化物去除率只有17.36%,表明并非投放沙蚕密度越大,其对硫化物的去除作用越强。因此,在利用沙蚕进行底质硫化物修复时,选择一个适宜的密度投放值尤为重要。

致谢:对江苏省启东市金海岸水产研究所朱善央老师的大力支持表示感谢!

参考文献:

- [1] 薛超波, 王国良, 金 珊. 海洋滩涂贝类养殖环境的研究现状[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 116-118.
XUE Chao-bo, WANG Guo-liang, JIN San. Review on the culture environment of the marine intertidal shellfish[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1): 116-118.
- [2] Howard D E, Evans R D. Acid-volatile sulfide (AVS) in a seasonally anoxic mesotrophic lake: Seasonal and spatial changes in sediment AVS [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, 12(6): 1051-1057.
- [3] 王娟娟, 李晓敏, 曲克明, 等. 乳山湾底质中硫化物和氧化-还原电位的分布与变化[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(6): 64-70.
WANG Juan-juan, LI Xiao-min, QU Ke-ming, et al. The distributions and variations of sulfide and redox potential in the sediments of Rushan Bay[J]. *Marine Fisheries Research*, 2006, 27(6): 64-70.
- [4] Hatcher A, Grant J, Schofield B. Effects of suspended mussel culture (*Mytilus* spp.) on sedimentation, benthic respiration and sediment nutrient dynamics in a coastal bay[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 115: 219-235.
- [5] Kostka J E, Thamdrup B, Nohr Glud R, et al. Rates and pathways of carbon oxidation in permanently cold Arctic sediments[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1999, 180: 7-21.
- [6] 彭 斌. 滨海盐场养殖池塘底质硫化物的变化及其与其它因子的关系[J]. 海洋湖沼通报, 2008(3): 155-160.
PENG Bin. The variation of sulfide in culture ponds of Binhai saltern and relationship between sulfide and other factors[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2008(3): 155-160.
- [7] Clark M W, Mcconchie D, Lewis D W, et al. Redox stratification and heavy metal partitioning in Avicennia-dominated mangrove sediments: A geochemical model[J]. *Chemical Geology*, 1998, 149(3): 147-171.
- [8] 李晓敏, 曲克明, 孙 耀, 等. 海水养殖沉积环境硫化物污染及修复[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(6): 88-93.
LI Xiao-min, QU Ke-ming, SUN Yao, et al. The pollution of sulfide and its remediation in sediment environment of marine aquaculture[J]. *Marine Fisheries Research*, 2005, 26(6): 88-93.
- [9] Kierner M C B, Black K D, Lussot D, et al. The effects of chronic and acute exposure to hydrogen sulphide on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) [J]. *Aquaculture*, 1995, 135(4): 311-327.
- [10] 姚国兴, 陈爱华, 孙国铭. 江苏海域滩涂底泥中硫化物含量与文蛤死亡关系的探讨[J]. 水产养殖, 2005, 26(4): 8-10.
YAO Guo-xing, CHEN Ai-hua, SUN Guo-ming. Studies on the relationship between the sulphurett concentration in the substratum and the mortality of the hard clam (*Meretrix meretrix*) in Jiangsu sea area[J]. *Journal of Aquaculture*, 2005, 26(4): 8-10.
- [11] 陈 坚, 胡一箫, 许丰瑞, 等. 氨氮和硫化物对文蛤幼体及成体的急性毒性试验[J]. 现代农业科技, 2010(3): 324-325.
CHEN Jian, HU Yi-xiao, XU Feng-rui, et al. Acute toxicity experiments of ammonia-N and sulfide to the juveniles and adults of *Meretrix meretrix* [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2010(3):

- 324-325.
- [12] 李晓敏. 乳山湾养殖沉积环境中硫化物分布与环境修复研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- LI Xiao-min. Studies on the distributions of sulfide and restoration in cultural sediments of Rushan Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [13] 马绍赛, 辛福言, 张东杰, 等. 乳山湾菲律宾蛤仔养殖滩涂老化修复实验研究[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(2): 59-61.
- MA Shao-sai, XIN Fu-yan, ZHANG Dong-jie, et al. Studies on short-necked clam culture in the recovery areas of Rushan Bay[J]. *Marine Fisheries Research*, 2005, 26(2): 59-61.
- [14] 陈聚法, 张东杰, 宋建中, 等. 乳山湾缢蛏养殖老化滩涂的修复研究[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(5): 57-61.
- CHEN Ju-fa, ZHANG Dong-jie, SONG Jian-zhong, et al. Experimental study on restoration of aged beach for culturing *Sinonovacula constricta* in Rushan Bay[J]. *Marine Fisheries Research*, 2005, 26(5): 57-61.
- [15] 陈惠彬. 渤海典型海岸带滩涂生境、生物资源修复技术研究 with 示范[J]. 海洋信息, 2005(3): 20-23.
- CHEN Hui-bin. Study on restoration of mudflat environment and biological resources in Bohai Coastal[J]. *Marine Information*, 2005(3): 20-23.
- [16] 国家海洋环境检测中心. GB 17378. 5—2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- National Ocean Environment Monitor Center. GB17378. 5—2007 The specification for marine monitoring[S]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [17] 王彦波, 许梓荣, 郭笔龙. 池塘底质恶化的危害与修复[J]. 饲料工业, 2005, 26(4): 47-49.
- WANG Yan-bo, XU Zi-rong, GUO Bi-long. The harm and restoration of polluted sediment in pools[J]. *Feed Industry*, 2005, 26(4): 47-49.
- [18] 祁铭华, 曲克明, 马绍赛, 等. 菲律宾蛤仔养殖对底质 AVS 影响的模拟实验[J]. 水产学报, 2006, 30(1): 81-89.
- QI Ming-hua, QU Ke-ming, MA Shao-sai, et al. A simulation experiment on the effect of *Ruditapes philippinarum* culture on acid volatile sulfide in sediments[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2006, 30(1): 81-89.
- [19] 李娟, 葛长宇, 毛玉泽, 等. 沉积环境对鱼类网箱养殖的响应[J]. 海洋渔业, 2010, 32(4): 461-465.
- LI Juan, GE Chang-zi, MAO Yu-ze, et al. Responses of sediment environment to fish cage culture[J]. *Marine Fisheries*, 2010, 32(4): 461-465.
- [20] 宋金明. 中国近海沉积物-海水界面化学 [M]. 北京: 海洋出版社, 1997: 138-141.
- SONG Jin-ming. Chemistry of sediment-seawater interface of China Seas[M]. Beijing: Ocean Press, 1997: 138-141.
- [21] Allen H E, Fu G, Deng B. Analysis of acid-volatile sulfide (AVS) and simultaneously extracted metals (SEM) for the estimation of potential toxicity in aquatic sediments[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2009, 12(8): 1441-1453.
- [22] 王玲, 陈爱华, 赵啸, 等. 温度和体重对双齿围沙蚕呼吸和排泄的影响[J]. 大连水产学院学报, 2004, 19(3): 176-181.
- WANG Ling, CHEN Ai-hua, ZHAO Xiao, et al. Effect of temperature and body weight on respiration and excretion in *Perinereis aibuhitensis* Grube[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2004, 19(3): 176-181.
- [23] 邓锦松, 马甦, 牛化欣, 等. 投放双齿围沙蚕对虾池底质的修复作用[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006, 36(增刊): 99-104.
- DENG Jin-song, MA Shen, NIU Hua-xin, et al. Effects of introduction of *Perinereis aibuhitensis* Grube on the sediment quality of shrimp ponds[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(Suppl): 99-104.
- [24] 张弛, 王树功, 郑耀辉, 等. 生物扰动对红树林沉积物中 AVS 和重金属迁移转化的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(11): 3037-3045.
- ZHANG Chi, WANG Shu-gong, ZHENG Yao-hui, et al. The effects of roots and crabs' bioturbation on AVS, migration and transformation of heavy metals in mangrove sediments[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11): 3037-3045.