

Purification Effect and Condition Optimization in Aquaculture Wastewater by *Cordyceps* sp.

Yiyong Li^{1,2*}, Yongcong Yang^{1,2}, Baoye Wang^{1,2}, Chong Lin¹, Xueqin Tao^{1,2}, Jianjun Du^{1,2}

¹ZHONGKAI University of Agriculture and Technology, Guangzhou Guangdong

²Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Agricultural Land Pollution Prevention and Control, Guangzhou Guangdong

Email: *350527256@qq.com

Received: Aug. 1st, 2020; accepted: Aug. 21st, 2020; published: Aug. 28th, 2020

Abstract

This study tried to treat aquaculture wastewater with *Cordyceps* sp. C058. In a sterile environment, to obtain the best conditions, the effects of the initial concentration of wastewater, the addition concentration of carbon source and the inoculation amount on the removal rate of pollution indicators were investigated by using the simulated wastewater. Further, the treatment effects of C058 on the simulated wastewater in an open environment were analyzed. The results showed that the optimal conditions for C058 were the original concentration of wastewater and the glucose added concentration of 550 mg/L, and the inoculation amount was 1%. At this time, the removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP reached 68.17%, 56.41% and 55.90%, respectively. In an open environment, the treatment effect of C058 on simulated wastewater was slightly lower than that of the sterile environment (there was no significant difference between the two), indicating that C058 could play a role of purifying water in the open environment. For three representative fishponds samples, the removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP by C058 were 80.50%, 67.80% and 67.80%, respectively, while the growth rate of C058 mycelium (measured by wet weight) increased by over 22.50%. It could be seen that using *Cordyceps* sp. C058 to purify aquaculture wastewater is feasible, not only to remove pollutants, but also to harvest valuable cordyceps mycelium, which will provide a new way for aquaculture wastewater treatment.

Keywords

Cordyceps Fungi, Aquaculture Wastewater, Nitrogen and Phosphorus, Removal Efficiency

虫草菌净化水产养殖废水条件优化及效果

李义勇^{1,2*}, 杨泳聪^{1,2}, 王宝娥^{1,2}, 林冲¹, 陶雪琴^{1,2}, 杜建军^{1,2}

*通讯作者。

文章引用: 李义勇, 杨泳聪, 王宝娥, 林冲, 陶雪琴, 杜建军. 虫草菌净化水产养殖废水条件优化及效果[J]. 环境保护前沿, 2020, 10(4): 606-615. DOI: 10.12677/aep.2020.104075

¹仲恺农业工程学院, 广东 广州

²广东省农业产地环境污染防治工程技术研究中心, 广东 广州

Email: *350527256@qq.com

收稿日期: 2020年8月1日; 录用日期: 2020年8月21日; 发布日期: 2020年8月28日

摘要

本研究尝试利用大型真菌虫草菌C058处理水产养殖废水。在无菌环境下, 采用模拟废水考察了废水初始浓度、碳源添加浓度及接种量对C058去除污染物的影响, 获得最适作用条件; 进一步在开放环境下, 分析了C058对模拟废水的处理效果; 最后在开放环境下, 探讨了C058对实际废水的处理效果。结果表明, C058的最适作用条件为原浓度废水、葡萄糖添加浓度550 mg/L, 接种量1%, 此时对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的去除率分别达到68.17%、56.41%和55.90%。在开放环境下, C058对模拟废水的处理效果略低于无菌环境条件(两者无显著性差异), 说明C058可以在开放环境中发挥净水作用。对三种代表性鱼塘水样, C058对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的去除率分别达到80.50%、67.80%和67.80%以上, 同时C058菌丝生长量(以湿重计)增加了22.50%以上。可见, 采用虫草菌净化水产养殖废水具有可行性, 不仅去除了污染物, 而且收获了有价值的虫草菌丝体, 为水产养殖废水治理提供了新途径。

关键词

虫草菌, 水产养殖废水, 氮磷, 去除效果

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

据统计, 2018年中国水产养殖总产量为4905.99万t [1] [2] [3]。水产养殖业的迅猛发展为我国带来了巨大收益, 但养殖技术水平较低, 养殖过程缺乏严格管理, 废水随意排放[4]。水产养殖废水中含有大量的氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总氮(TN)、总磷(TP), 主要来源于养殖动物代谢排泄物和饲料溶失, 若排放到湖泊或河流中, 会导致水体富营养化, 影响人们的生活与健康[5]。当前, 水产养殖废水的净化技术主要以微生物技术为主[6], 通过操纵微生物来净化水质, 例如利用天然细菌和微藻的共生关系对水产养殖废水进行净化[7] [8]。这些微生物主要以游离状态存在, 分散于水体中, 不易被回收利用, 且回收成本高。相对于细菌和微藻而言, 大型真菌在处理废水的同时, 能够形成肉眼可见的菌丝球, 更有利于回收利用[9]。但尚未见有大型真菌净化水产养殖废水的报道。

已有研究表明, 大型真菌可以广泛应用于不同类型废水处理, 对很多污染物都有良好的处理效果, 其作用原理包括生物吸附、降解、转化、还原[10]-[17]等。Hanafiah等采用塞尔维亚灵芝净化生活污水, 对COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别达到96%和93.2% [18]; Przystas, W等利用平菇菌对印染废水进行脱色处理, 目标物去除率达到90%以上[19]; Kumar, V等以木霉菌处理电镀废水中的Cr(VI), 对Cr(VI)去除率达到99.4% [20]。可见, 采用大型真菌净化水产养殖废水具有潜在可能性。然而, 截止目前之所以未见大型真菌治理水产养殖废水的报道, 可能原因是大型真菌为异养菌, 其生长需要消耗一定量的碳源, 而该废水中往往碳源不足[21], 限制了该技术的研究应用。

虫草菌是一种典型的大型真菌，其含有丰富的多糖、蛋白质和氨基酸以及微量元素等营养物质[22] [23] [24]，赋予虫草菌以增强免疫力、抑菌、抗炎、抗病毒、提高细胞活性及促进细胞增殖等功能[25] [26]，可开发成水产动物和畜禽的高级饲料添加剂。本课题组在培养虫草菌时发现，其营养需求与模拟水产养殖废水组成十分一致[27] [28]，唯一不能满足的就是碳源。因此，作者大胆设想，如果仅补充一些廉价的碳源，就能利用水产养殖废水培养虫草菌，既能够同化去除水产养殖废水中的氮磷等营养型污染物，又能收获具有显著经济价值的虫草菌丝体，那么该途径是具有理论和经济可行性的。据作者所知，目前国内和国外尚且未见任何有关虫草菌净化水产养殖废水的报道。本研究拟通过无菌环境下的作用条件优化、开放环境试验和实际废水处理等递进式试验，尝试证明采用虫草菌净化水产养殖废水的新途径。

2. 材料与方法

2.1. 供试材料

供试菌种：虫草菌 C058 (图 1a)，来自于广东省微生物研究所药用真菌研究组。

培养基：C8 培养基[27]和水产养殖模拟废水[28]，后者的葡萄糖碳源浓度为 550 mg/L。

供试废水：取广州番禺的三个养殖池塘(北纬 22°56'7"，东经 113°29'52"，见图 1(b)-(d))，所取水样(表 1)置于 4℃冰箱保存，三天内用完。

Table 1. Water quality parameters of the pond water samples

表 1. 池塘水样水质主要参数

水样	$\text{NH}_4^+\text{-N}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH
罗氏沼虾池塘 1	1.37 ± 0.2	1.89 ± 0.3	0.11 ± 0.0	6.5
南美白对虾池塘 2	1.28 ± 0.2	1.77 ± 0.4	0.07 ± 0.01	7
四大家鱼混养池塘 3	1.35 ± 0.3	1.79 ± 0.3	0.06 ± 0.0	7



(a) 虫草菌 C058, (b) 罗氏沼虾池塘 *Macrobrachium rosenbergii* pond, (c) 南美白对虾池塘 *Penaeus vannamei* pond, (d) 四大家鱼池塘 The four major Chinese carps ponds

Figure 1. The strain of *Cordyceps* sp. and the aquaculture ponds

图 1. 虫草菌和养殖池塘

2.2. 试验方法

2.2.1. C058 的培养

从 C058 斜面取菌丝块接种至 C8 培养基中, 在 28℃、150 rpm 培养至生长出大量新生菌丝球后, 在 2000 rpm 条件下离心 10 min 收集菌丝球, 以无菌水清洗 3 次, 作为净水实验的接种物, 备用。

2.2.2. 无菌环境下 C058 处理模拟废水的条件优化

取 3 种不同初始浓度(10 倍浓度、原浓度和 1 倍稀释浓度)的模拟废水 100 mL 置于 250 mL 规格的锥形瓶中, 盖上透气橡胶塞, 在 121℃灭菌 20 min, 待冷却后, 于无菌操作台上接入 1% (质量体积比)的 C058 接种物, 在 28℃、150 rpm 的摇床上培养 3 d 后, 将虫草菌丝滤出, 烘干称量, 根据虫草菌丝增重量间接反映对水产养殖废水中氮磷营养型污染物的同化去除效果; 同时, 测定经处理后废水中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TN, 确定模拟废水的初始浓度对 C058 净化效果的影响。

在最佳初始浓度下, 改变其中的碳源添加浓度(葡萄糖添加量为 0、137.5、275、550、1100、2200 mg/L), 其它同上, 确定碳源添加浓度对污染指标去除率的影响。

在最佳初始浓度和碳源添加浓度下, 改变接种量(0%, 0.25%, 0.50%, 1%, 2%, 4%), 其它同上, 确定接种量对污染指标去除率的影响。综上, 确定无菌环境下 C058 处理模拟废水的最佳作用条件。

2.2.3. 开放环境下 C058 对模拟废水的处理效果

在上述最佳作用条件下, 取消无菌操作, 即在培养基不灭菌、普通实验台接种、摇床上锥形瓶敞口(无橡胶塞)等条件下开放培养, 其它同上, 分析开放环境对 C058 处理模拟废水的影响。

2.2.4. 开放环境下 C058 对实际废水的处理效果

在上述最佳作用条件下, 取表 1 中的三种实际废水 100 mL 至 250 mL 规格的锥形瓶中, 开放培养, 其它同上, 探讨在开放环境下 C058 对实际废水的处理效果。

2.2.5. 分析测定与统计方法

$\text{NH}_4\text{-N}$ 的测定采用纳氏试剂比色法[29], TN 的测定采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法[30], TP 采用钼酸铵分光光度法[31]。C058 增长采用称重法。

每组实验设置 3 个平行样品, 结果取平均值。

3. 结果分析与讨论

3.1. 无菌环境下 C058 处理模拟废水的条件优化

3.1.1. 不同初始浓度模拟废水对 C058 净化效果的影响

氨氮超标的话会危害鱼虾健康, 严重时会导致鱼虾爆发性死亡, 而总氮中的有机氮和硝态氮会向氨氮转化, 因此我们重点关注了氨氮和总氮的去除。由图 2 可知, 在模拟废水初始浓度不同的条件下, C058 对模拟废水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 TN 的去除率均较高, 可达到 54%~84%, 说明虫草菌对不同浓度水产养殖废水都有良好的适应性。同时, 模拟废水初始浓度与 C058 的生长的污染物去除率呈正相关, 说明污染越严重, 虫草菌净水效果越好。由于 10 倍浓度的模拟废水中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 浓度过高, 虫草菌丝块的净化 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 能力有限, 即使去除率达到 80%以上, 但模拟废水中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 仍达到 50 mg/L 以上, 水体中氮含量过高不仅会使鱼虾发生爆发性死亡, 甚至有可能破坏谁与生态平衡。一般来讲, 未处理的实际水产养殖废水的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 浓度接近于原浓度和 1 倍稀释浓度的模拟废水[32]。本研究中, 经过 C058 的净化处理后, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 浓度只剩下 13~16 mg/L, 具有一定的去除效果, 并且虫草菌丝增重量也间接证明了对水产养殖废水中氮磷营养型污染物的同化去除。综合考虑实际情况及试验效果, 确定试验采用原浓度的模拟废水。

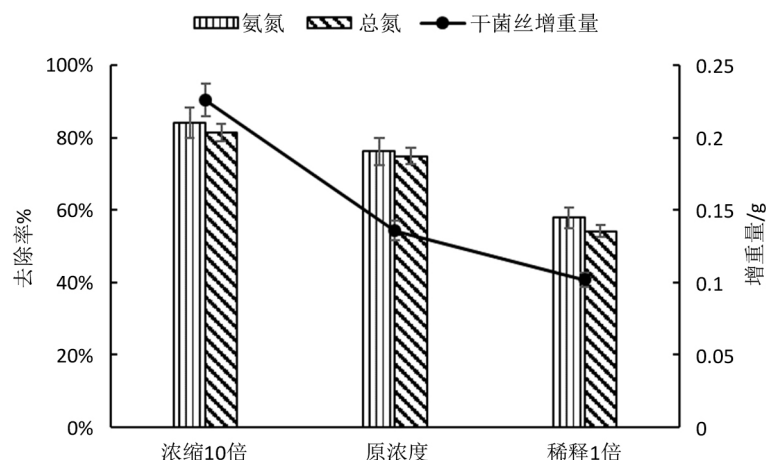


Figure 2. Effects of simulation wastewater initial concentration on C058 growth and the removal ratios of pollution indicators

图 2. 不同初始浓度模拟废水中 C058 的污染物去除效果

3.1.2. 不同碳源添加浓度对 C058 净化效果的影响

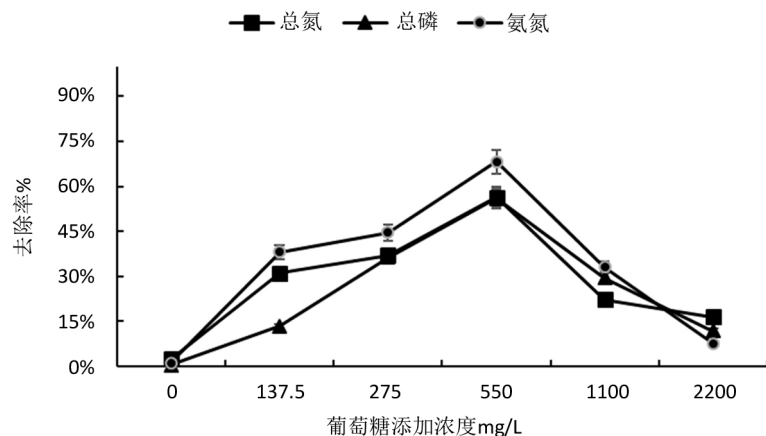


Figure 3. Effect of added glucose concentration on the removal ratios of pollution indicators

图 3. 不同葡萄糖添加浓度下 C058 的污染物去除效果

碳源是微生物组织细胞中重要的物质组成部分，碳源浓度的大小直接影响到微生物的生长及对污染物质去除的效率[33]，尤其是真菌生长更离不开碳源[34] [35] [36]。因此，在原浓度的水产养殖模拟废水条件下，考察碳源对 C058 去除水产养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的影响，结果如图 3 所示。随着葡萄糖添加量的升高，模拟废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率均呈现先缓慢上升后快速下降的变化趋势。在葡萄糖添加量处于 0~275 mg/L 范围时，随着葡萄糖添加量的升高，水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率分别从 38.02%、31.02%和 13.33%提高至 44.62%、36.95%和 36.36%。当葡萄糖添加量为 550 mg/L 时，C058 对水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率达到最大，分别为 68.17%，56.41%，55.90%。但是，当葡萄糖添加量继续升高时， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率却开始快速下降。这可能是因为碳源浓度过高时，水体中的碳氮比过大，使得水体中乙醇等次生代谢产物等物质积累过多[9]，抑制了 C058 对模拟废水中的碳源、氮源及微量元素等营养元素的利用，无法达到净化水产养殖模拟废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 最佳效果，因此，在水模拟废水中葡萄糖最佳添加量为 550 mg/L。

3.1.3. 接种量对污染指标去除率的影响

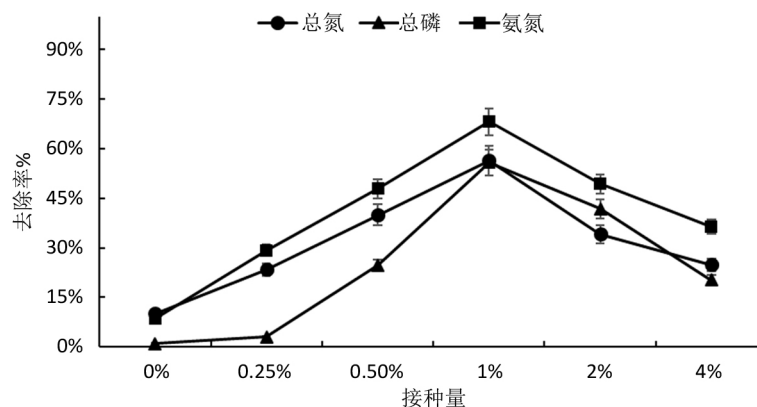


Figure 4. Effect of inoculation amount on the removal ratios of pollution indicators

图 4. 接种量对污染指标去除率的影响

接种量的大小, 直接影响着活菌数的数量和菌体的生物量, 从而影响着污染指标的去除, 但接种量过多, 则会使得活菌数量和菌体生物量饱和, 不仅导致成本增加, 还有可能不利于微生物的生长, 使得污染物质的去除效果变差[37]。因此, 在原浓度的模拟废水条件下, 考察接种量对 C058 去除模拟废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的影响, 结果如图 4 所示。随着接种量的增大, 模拟废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率均呈现先快速上升后缓慢下降的变化趋势。在接种量处于 0.00%~0.50% 范围时, 随着接种量的增大, 水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率分别从 29.30%、23.50% 和 3.09% 提高至 47.87%、40.01% 和 24.72%。当接种量为 1% 时, C058 对水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率达到最大, 分别为 68.17%、56.41%、55.90%。但是, 当接种量继续增大时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率却开始缓慢下降。这可能是由于当接种量过多时, 水体中的营养物质满足不了 C058 的生长需求, 无法达到净化模拟废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 最佳效果。结果表明, 当接种量为 1% 时, C058 净化模拟废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 的效果最好。

综上, C058 的最适作用条件为原浓度废水、葡萄糖添加浓度 550 mg/L, 接种量 1%, 此时对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率分别达到 68.17%、56.41% 和 55.90%, 较之优化前分别提高了 38.87%、32.91% 和 52.81%, 说明对无菌环境下 C058 处理模拟废水的条件优化是有效的。值得指出的是, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率均增加了 35% 左右, 但 TP 的去除率增加了 50% 左右, 这可得出在水产养殖水体中, 相对于氮, C058 对磷的去除效果更好。由于磷资源的不可再生性, 全球越来越重视磷资源的可持续利用[38], 若能通过虫草菌有效地回收磷资源, 不仅节省废水处理成本, 同时保证排水的低含磷量, 解决水体富营养化的问题。

3.2. 开放环境下 C058 对模拟废水的处理效果

细菌污染是废水处理技术整体所面临的一个挑战, 由于在实际应用中, 难以避免细菌污染带来的影响, 若发生细菌污染, 则会形成拮抗作用, 对底物进行竞争从而抑制虫草菌的生长[39]。因此, 在葡萄糖添加量为 550 mg/L, 接种量 1% 的条件下, 考察开放环境下 C058 对模拟废水的处理效果, 结果如图 5 所示。在开放条件下, C058 对模拟废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率分别达到 78.86% 和 71.46%, 并且 C058 的增重量达到 0.1048 g 左右。由于开放条件下培养 C058, 没有经过灭菌处理, 故在培养 C058 的过程中可能因为其他微生物的存在, 与虫草菌形成拮抗关系从而抑制了虫草菌利用模拟废水中营养元素, 使得 3d 后开放环境下模拟废水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 去除率略低于无菌环境下模拟废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 的去除率, C058 的增重量也略低于无菌条件下。但同时说明了开放环境下, 细菌污染对 C058 的生长情况及污染指标的去除影响较低, 这为 C058 应用于实际水产养殖废水提供理论依据。

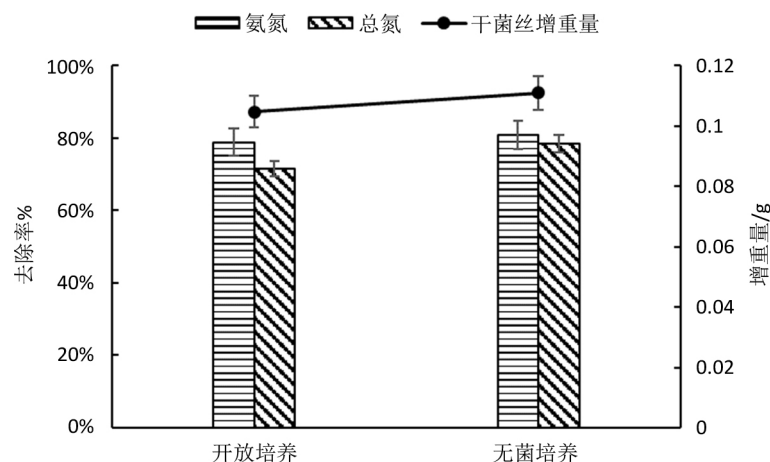


Figure 5. Effects of non-aseptic condition and aseptic condition on C058 growth and the removal ratios of pollution indicators

图 5. 开放条件及无菌条件对 C058 的增重量及污染指标去除率

3.3. 开放环境下 C058 对实际废水的处理效果

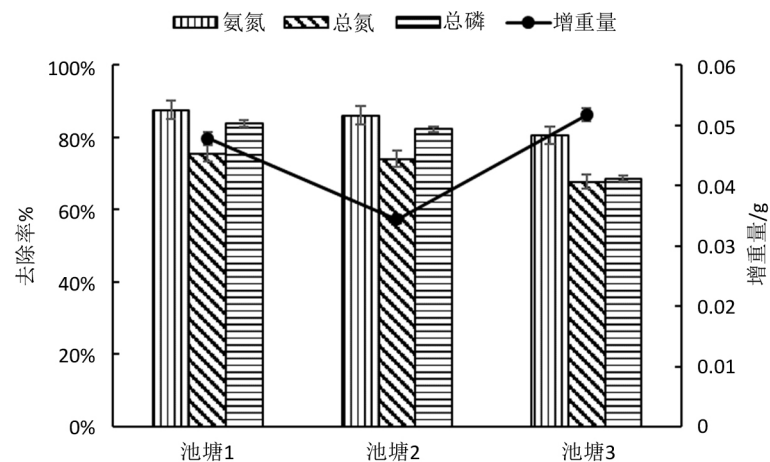


Figure 6. Treatment effect of three water samples from different aquaculture ponds by C058 and its growth

图 6. C058 对三个养殖池塘水样的处理效果及其生长量

由于细菌污染的问题,目前利用真菌去除水产养殖废水的研究主要停留在实验室阶段[40],但通过以上开放试验可知,细菌污染对 C058 去除水产养殖废水污染物的影响较低,所以进一步探讨能否利用实际废水培养虫草菌及虫草菌能否去除实际废水中的氮磷。为此,取了三种具有代表性的池塘水样,分别为罗氏沼虾池塘(池塘 1),南美白对虾池塘(池塘 2)和四大家鱼混养池塘(池塘 3),进一步在葡萄糖添加量为 550 mg/L,接种量 1%的开放环境下,考察 C058 对三个养殖池塘水样的处理效果及其生长量,但虫草菌生长情况的探讨不同于前文,因为考虑到实际应用中可能是直接以收获的湿菌丝块投喂,故特意采用了湿重来表示菌丝块生长,结果如图 6 所示。C058 对三个池塘水样中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率均较高,可达到 67%~88%左右,并且 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TN 和 TP 的浓度最低分别可降至 0.17 mg/L, 0.46 mg/L 和 0.01 mg/L,三个池塘中氮的浓度均可达到地表水环境质量标准中的 II 类水,磷的浓度更是可达到地表水环境质量标准中的 I 类水。对比其他微生物处理水产养殖废水的报道,如 Siriphorn [41]利用固定化螺旋藻处

理南美白对虾养殖废水时, TN 去除效率达到 32.92%, 武心华[42]利用芽孢杆菌处理刺参养殖用水时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效率达到 65.5%, 可见, 虫草菌对水产养殖废水中氮磷的去除效果更理想, 具有研究与应用潜力。另外, 虽然 C058 的生长情况并没有达到预想的效果, 但仍保持了生物量, 说明在实际废水中虫草菌可以正常代谢利用氮磷营养性污染物。

4. 结论

1) 对原浓度的模拟废水, 在葡萄糖添加量为 550 mg/L, 接种量为 1%时, C058 处理效果最佳, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率分别达到 68.17%、56.41%和 55.90%。

2) 在开放环境下, C058 以 1%接种量接种至葡萄糖添加量为 550 mg/L 的模拟废水中培养 3 d 后, C058 增重量达到 0.1048 g 及其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率分别达到 78.86%和 71.46%, 为 C058 应用于实际水产养殖废水提供了理论依据。

3) 利用 C058 处理不同来源的实际水产养殖废水, 都获得了良好效果。通过外加碳源方式, 不同来源的实际水产养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的去除率分别达 80%、67%和 67%以上。

4) 此次试验只对水产养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP 等化学指标进行了跟踪, 但其他生物指标(例如水体自然细菌群落、浮游植物和微型动物等)的影响及其相互作用关系有待进一步深入探究。

基金项目

广州市科技计划项目(201803030039, 201704020187, B318221315); 仲恺农业工程学院优秀博士人才项目(Y002)资助。

参考文献

- [1] 杨岳, 关成立, 张水梅, 等. 水产养殖废水处理技术及研究进展[J]. 当代化工研究, 2017(8): 73-75.
- [2] 吴新民, 郑向荣, 郗艳娟, 等. 水产品质量安全与控制对策[J]. 河北渔业, 2011(5): 56-57.
- [3] 罗马. 2018 年世界渔业和水产养殖状况——实现可持续发展目标[M]. 罗马: 联合国粮食及农业组织, 2018: 2.
- [4] 韩建华. 水产养殖废水污染危害及其处理技术探析[J]. 农业与技术, 2018, 38(12): 103-156.
- [5] 黄翔峰, 王坤, 陈国鑫, 等. 人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 12-20.
- [6] 傅红梅, 曾维农, 付新梅. 水产养殖废水污染危害及其处理技术研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(1): 126-127.
- [7] Bentzon-Tilia, M., Sonnenschein, E.C. and Gram, L. (2016) Monitoring and Managing Microbes in Aquaculture—Towards a Sustainable Industry. *Microbial Biotechnology*, **9**, 576-584. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12392>
- [8] Lananan, F., Abdul Hamid, S.H., Din, W.N.S., et al. (2014) Symbiotic Bioremediation of Aquaculture Wastewater in Reducing Ammonia and Phosphorus Utilizing Effective Microorganism (EM-1) and Microalgae (*Chlorella* sp.). *International Biodeterioration & Biodegradation*, **95**, 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.06.013>
- [9] Sankaran, S., Khanal, S.K., Jasti, N., et al. (2010) Use of Filamentous Fungi for Wastewater Treatment and Production of High Value Fungal Byproducts: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **40**, 400-449. <https://doi.org/10.1080/10643380802278943>
- [10] Godlewska-Żyłkiewicz, B., Sawicka, S. and Karpińska, J. (2019) Removal of Platinum and Palladium from Wastewater by Means of Biosorption on Fungi *Aspergillus* sp. and Yeast *Saccharomyces* sp. *Water*, **11**, 1522. <https://doi.org/10.3390/w11071522>
- [11] Yang, B., Wang, Y., Liu, Z., et al. (2019) Optimum Removal Conditions of Aniline Compounds in Simulated Wastewater by Laccase from White-Rot Fungi. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, **17**, 135-140. <https://doi.org/10.1007/s40201-018-00334-x>
- [12] Negi, R. and Suthar, S. (2018) Degradation of Paper Mill Wastewater Sludge and Cow Dung by Brown-Rot Fungi *Oligoporus Placenta* and Earthworm (*Eisenia fetida*) during Vermicomposting. *Journal of Cleaner Production*, **201**, 842-852. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.068>
- [13] 陆涛, 张其磊, 姚善泾. 丝状真菌在废水处理过程中的生物脱除作用[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(4):

741-753.

- [14] Yang, Q., Yang, M., Pritsch, K., *et al.* (2003) Decolorization of Synthetic Dyes and Production of Manganese-Dependent Peroxidase by New Fungal Isolates. *Biotechnology Letters*, **25**, 709-713. <https://doi.org/10.1023/A:1023454513952>
- [15] Subbaiah, M.V., Vijaya, Y., Reddy, A.S., *et al.* (2011) Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies on the Biosorption of Cu (II) onto *Trametes versicolor* Biomass. *Desalination*, **276**, 310-316. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.067>
- [16] Iskandar, N.L., Zainudin, N.A.I.M. and Tan, S.G. (2011) Tolerance and Biosorption of Copper (Cu) and Lead (Pb) by Filamentous Fungi Isolated from a Freshwater Ecosystem. *Journal of Environmental Sciences*, **23**, 824-830. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60475-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60475-5)
- [17] Raghukumar, C., Chandramohan, D., Michel, F.C., *et al.* (1996) Degradation of Lignin and Decolorization of Paper Mill Bleach Plant Effluent (BPE) by Marine Fungi. *Biotechnology Letters*, **18**, 105-106. <https://doi.org/10.1007/BF00137820>
- [18] Mohd Hanafiah, Z., Wan Mohtar, W.H.M., Abu Hasan, H., *et al.* (2019) Performance of Wild-Serbian *Ganoderma lucidum* Mycelium in Treating Synthetic Sewage Loading Using Batch Bioreactor. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 16109. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52493-y>
- [19] Przystaś, W., Zabłocka-Godlewska, E. and Grabińska-Sota, E. (2019) *Pleurotus ostreatus* as a Species with Potentially High Effectiveness in the Removal of Synthetic Dyes Belonging to Different Classes. *Desalination and Water Treatment*, **161**, 376-386. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24314>
- [20] Kumar, V. and Dwivedi, S.K. (2019) Hexavalent Chromium Stress Response, Reduction Capability and Bioremediation Potential of *Trichoderma* sp. Isolated from Electroplating Wastewater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **185**, Article ID: 109734. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109734>
- [21] 郑侠飞. 微生物制剂和碳源对水产养殖环境的影响及作用机制[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [22] 卢建珍, 王建伟, 刘有志, 等. 蚕蛹虫草及大米虫草培育技术研究[J]. 北方蚕业, 2016, 37(2): 27-30.
- [23] Paterson, R.R.M. (2008) Cordyceps-A Traditional Chinese Medicine and Another Fungal Therapeutic Biofactory. *Phytochemistry*, **69**, 1469-1495. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2008.01.027>
- [24] 樊慧婷, 林洪生. 蛹虫草化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(15): 2549-2552.
- [25] 吴双双. 碳源对两种大型真菌胞外多糖结构及生物活性的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州轻工业学院, 2016.
- [26] He, H.L., *et al.* (2020) Protective Effects of Cordyceps Extract against UVB-Induced Damage and Prediction of Application Prospects in the Topical Administration: An Experimental Validation and Network Pharmacology Study. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, **121**, Article ID: 109600.
- [27] 李义勇, 陈玉婵, 李冬利, 等. 几种虫草菌发酵提取物的抗菌抗肿瘤活性研究[J]. 食品工业科技, 2010, 31(6): 88-90.
- [28] 邹俊良. 生物集成系统净化水产养殖废水的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [29] 环境保护部. HJ535-2009 氨氮的测定——纳氏试剂分光光度法[S]. 2009.
- [30] 环境保护部. HJ636-2012 水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S]. 2012.
- [31] 环境保护部. GB11893-89 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法[S]. 1989.
- [32] 刘庆辉, 余祥勇, 张鹤千, 等. 微藻对水产养殖尾水中氮磷去除效果的研究进展——基于水产养殖尾水资源化利用角度分析[J]. 水产科技情报, 2019, 46(5): 290-295.
- [33] 吕宣惠. 污水生化处理过程中碳源利用与处理综述[J]. 山东化工, 2019, 48(23): 218-220.
- [34] Yang, L.M., Li, H.K. and Wang, Q. (2019) A Novel One-Step Method for Oil-Rich Biomass Production and Harvesting by Co-Cultivating Microalgae with Filamentous Fungi in Molasses Wastewater. *Bioresource Technology*, **275**, 35-43. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.12.036>
- [35] Yang, B., Wang, Y., Liu, Z., *et al.* (2019) Optimum Removal Conditions of Aniline Compounds in Simulated Wastewater by Laccase from White-Rot Fungi. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, **17**, 135-140. <https://doi.org/10.1007/s40201-018-00334-x>
- [36] Zahmatkesh, M., Spanjers, H. and Van Lier, J.B. (2017) A Novel Approach for Application of White Rot Fungi in Wastewater Treatment under Non-Sterile Conditions: Immobilization of Fungi on Sorghum. *Environmental Technology*, **39**, 2030-2040. <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1347718>
- [37] 苗欣宇, 牛红红, 李达, 等. 红酵母固态发酵农林废弃物接种量对菌体生长及营养成分的影响[J]. 农产品加工,

2019(24): 51-54+58.

- [38] Le Corre, K.S., Valsami-Jones, E., Hobbs, P., *et al.* (2009) Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **39**, 433-477. <https://doi.org/10.1080/10643380701640573>
- [39] Zhou, D.D., Li, Y.B., Yang, Y., *et al.* (2015) Granulation, Control of Bacterial Contamination, and Enhanced Lipid Accumulation by Driving Nutrient Starvation in Coupled Wastewater Treatment and *Chlorella regularis* Cultivation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **99**, 1531-1541. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6288-0>
- [40] Espinosa-Ortiz, E.J., Rene, E.R., Pakshirajan, K., *et al.* (2016) Fungal Pelleted Reactors in Wastewater Treatment: Applications and Perspectives. *Chemical Engineering Journal*, **283**, 553-571. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.07.068>
- [41] Sombatjinda, S., Wantawin, C., Techkarnjanaruk, S., *et al.* (2013) Water Quality Control in a Closed Re-Circulating System of Pacific White Shrimp (*Penaeus vannamei*) Postlarvae Co-Cultured with Immobilized Spirulina Mat. *Aquaculture International*, **22**, 1181-1195. <https://doi.org/10.1007/s10499-013-9738-2>
- [42] 武心华. 刺参池塘有机物降解菌固定化及其对水质净化作用研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.