

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2025. 01. 011

水质净化厂中淡水壳菜控制措施及对脱氮的影响

左世昌, 余 军

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘 要: 针对南方某特大水质净化厂膜生物反应池填料中出现的淡水壳菜滋生问题, 开发了基于管道致紊产生超声空化作用杀灭淡水壳菜的方法, 其原理为利用在空化泡溃灭瞬间形成局部的极端高温和高压, 并伴有强烈的冲击波和微射流对淡水壳菜的细胞造成破坏进而导致其死亡。同时, 采用中试系统地探究了5种杀灭措施对淡水壳菜的处理效果。结果表明, 空化超声方法中在水流速为238 mm/s的运行模式下, 淡水壳菜的致死率可达85%, 半数致死时间(LT50)为5 d。微生物群落结构分析表明, 经过这5种杀灭方式处理后, 填料中的优势菌属均为 *Nitrospira*, 相对丰度为7.91%~36.71%, 对脱氮相关菌属没有造成显著的负面影响。

关键词: 淡水壳菜; 水质净化厂; 脱氮; 超声空化; 微生物群落结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)01-0071-07

Control Measures for *Limnoperna fortunei* in a Water Purification Plant and Its Influence on Nitrogen Removal

ZUO Shi-chang, YU Jun

(Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Wuhan 430014, China)

Abstract: A method based on ultrasonic cavitation resulting from pipeline turbulence was developed to eliminate *Limnoperna fortunei* to solve its breeding in the membrane bioreactor of a large water purification plant in southern China. The principle lies in the utilization of the local extremely high temperature and high pressure formed at the moment of cavitation bubble collapse, accompanied by a strong shock wave and microjet, to damage the cells of *Limnoperna fortunei* and cause its death. Meanwhile, the treatment efficacy of five kinds of extermination measures on *Limnoperna fortunei* was systematically investigated. Under the operation mode of the ultrasonic cavitation method with a water flow rate of 238 mm/s, the mortality rate of *Limnoperna fortunei* could reach as high as 85%, and the half lethal time (LT50) was 5 days. The microbial community structure indicated that the dominant bacteria in the carriers were all *Nitrospira*, with a relative abundance ranging from 7.91% to 36.71% after the application of the five extermination methods, and there was no significant negative influence on the nitrogen removal related bacterial genera.

Key words: *Limnoperna fortunei*; water purification plant; nitrogen removal; ultrasonic cavitation; microbial community structure

淡水壳菜(*Limnoperna fortunei*)是一种原产于东南亚的淡水双壳类动物,属于软体动物门,双壳纲,贻贝科^[1-3]。淡水壳菜广泛分布于中国及东南亚国家的淡水河流和湖泊中,是一种具有蛋白足丝的双

壳纲动物,足丝是一种结构蛋白,常温下其在大部分溶剂中不溶解^[4-6]。一旦有适宜的水质和气候条件,淡水壳菜即迅速生长繁殖。目前国内已经报道有滋生的地区包括长江流域中、下游及长江以南地区,如湖南、湖北、江西、安徽、江苏、广东、广西、浙江、福建等^[7-8]。目前,造成的主要影响大致分为以下3点^[9]:①堵塞小口径原水输送管,如水质检测用的取样管、原水入口和泵站的冷却水输送管等,可影响净水厂的正常运行;②死亡的淡水壳菜腐烂使水中产生异臭,影响水质,还会引起真菌和细菌的大量繁殖,加速管道腐蚀老化;③淡水壳菜的大量繁殖严重影响污水处理构筑物包括填料上的附着生物生长,导致出水水质降低,并且增加了污水处理费用。因此,亟需开发绿色、高效的淡水壳菜杀灭技术,这对保障水处理系统的稳定达标具有重要意义。

近年来,南方某特大水质净化厂生物膜填料反应池中滋生的大量淡水壳菜堵在了填料的空隙中,这可能对脱氮微生物造成负面影响,亟需系统地探究淡水壳菜对脱氮效果影响的机制,以及如何高效杀灭水质净化厂生物膜填料反应池中的淡水壳菜。虽然国内外科研人员对控制淡水壳菜生长进行了诸多研究^[1, 9-13],但目前公开的报道均停留在实验室规模,难以给实际生产过程提供指导。为此,笔者在中试规模下探究了5种淡水壳菜杀灭方式的效果,开发了基于管道致紊产生超声空化作用杀灭淡水壳菜的方法,同时系统地研究淡水壳菜对脱氮微生物的影响,旨在为治理水质净化厂中淡水壳菜提供一种绿色、高效的解决方案。

1 材料与方法

1.1 中试装置

在南方某大型水质净化厂内构筑中试装置(见图1),其具有6格独立廊道,每格尺寸为2 m×0.6 m×1.8 m,池内有效容积约为1.5 m³。根据已经设定的试验方式,分别标注为超声空化组(编号为1)、双氧水组(编号为2)、次氯酸钠组(编号为3)、高锰酸钾组(编号为4)、天南星提取物组(编号为5)、对照组(编号为6,不干涉淡水壳菜的生长和死亡)。在中试装置各池中投入思普润/浦华填料。中试以水质净化厂沉淀池出水即MBBR区进水作为原水,填料填充率、水力停留时间、曝气量与实际工程保

持一致。为了达到流化作用,生物膜填料反应池始终以高曝气量运行,并不会造成厌氧环境。在6格子中各抽取100个填料样品统计淡水壳菜的数量,统计后将填料放回原池,确认淡水壳菜的状态(存活/死亡)。选用实际水质净化厂生物膜填料反应池中填料里面的淡水壳菜作为实际样品,淡水壳菜为成贝,长度为1.5~2.0 cm。同时,由于是选取填料中的淡水壳菜,所以没有淡水壳菜的层叠状态。判断存活/死亡状态采用如下依据:①存活,壳体坚硬、封闭状态;②死亡,壳体变软或破碎、主体暴露在外且柔软。同时检测进出水水质指标,主要包括NH₃-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N等。定期检测所有淡水壳菜在廊道中的生存情况,主要观察成贝的数量、大小及死活状态,统计填料中淡水壳菜的数量,计算相对于总量的占比。

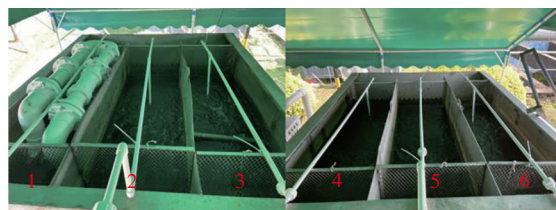


图1 中试装置照片

Fig.1 Photos of pilot device

进行序批式试验时,在第一、二、三周期中,超声空化组的水流速度分别为295、348、238 mm/s,双氧水(含量为3%)组的投加量分别为100、150、200 mL,次氯酸钠(含量为11%)组的投加量分别为100、150、200 mL,高锰酸钾组的投加量分别为2、3、4 mg/L,天南星提取物组的投加量分别为1、1.5、2 mg/L。

1.2 微生物群落分析

为探究淡水壳菜是否会对水质造成影响,以及淡水壳菜杀灭技术是否对脱氮效果造成影响,对填料中的微生物样本进行测序分析。从池中取出填料(有或无淡水壳菜),并用干冰保存,然后送往上海美吉生物医药科技有限公司进行DNA提取和测序。分别用灭菌的离心管盛放样本,以备提取DNA。利用CTAB方法提取样本基因组,再用琼脂糖凝胶电泳检测DNA的浓度和纯度,最后使用无菌水将适量样品稀释至1 ng/μL。用高效高保真酶进行PCR,确保扩增效率和准确性。构建好文库后通过Qubit和Q-PCR进行定量,文库合格以后,使用HiSeq2500 PE250进行上机测序。

1.3 中试运行工况

中试分为两种工况。①序批式(共3个周期,每个周期采用不同的杀灭方式调整参数,以选取最优参数作为连续流工况):将 1.5 m^3 水和20%池容积的填料放入反应池中,另外采用网兜选取含有淡水壳菜的100个填料放入每个池子中。在每个周期的第1天投药,周期内不再投药。②连续流(在最优工况下运行1个周期):模拟真实生产中连续流工况,水力停留时间为24 h,每24 h投加1次相同剂量的药剂。

1.4 超声空化技术

管道采用UPVC承压管(外径为20 cm),将6个管通过卡套连接在一起组成多级管道(总长度为1.2 m),将管径大小匹配的致紊材料(孔板和筛网,当水流通过这些材料时,在下游形成一定的紊动场)固定在长度一定的镀锌铁板支架上,支架材料厚度为3 mm,阻水作用较小,支架的外径为UPVC承压管内径,再将整体结构装入管道中。脉冲泵扬程为15 m、流量为 $25\text{ m}^3/\text{h}$ 。将组装好的2组多级管道分别放入P-1、P-2廊道,其中P-1组放入孔板,P-2组放入筛网,孔板孔径分别为3和6 mm,筛网孔径分别为2和3 mm,两种孔径的材料交错放置,相距10 cm。本项目主要通过改变脉冲泵流速来调节湍流强度,暂时不考虑更换致紊材料来调节湍流强度,如果试验中发现必须替换,再根据具体情况而定。脉冲泵初始流速分别设置为295、348、238 mm/s,从而对下游流场和紊动场进行调节,考察不同下游流场和紊动场情况下对淡水壳菜的杀灭效率。

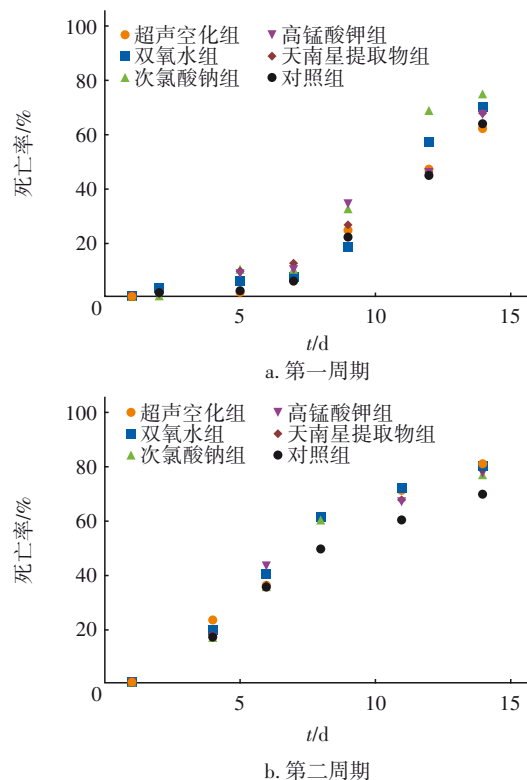
2 结果与分析

2.1 不同杀灭技术对淡水壳菜的处理效果

不同杀灭技术对淡水壳菜的处理效果如图2所示。从图2(a)可以看出,天南星提取物组对淡水壳菜的杀灭效果最先优于其他方式。第9天时,淡水壳菜死亡率最高为34%(高锰酸钾组)。同时发现,从第二个自然周开始,不同杀灭技术对淡水壳菜的处理效果增加明显,这说明淡水壳菜对不同杀灭方式都有一定的耐受能力。在第14天时,淡水壳菜死亡率最高的是次氯酸钠组(75%),半数致死时间(LT50)为11 d。第一周期结束后,对照组淡水壳菜的死亡率也达到了64%,与其相比,其他杀灭方式下淡水壳菜死亡率在第一周期的反应过程中相差

不超过17%(第12天)。说明即使不采用杀灭措施,淡水壳菜也会在序批式工况下自然死亡,且死亡率超过50%。在第二周期内,第6天的杀灭效果比第一周期第9天的好。可见,增加药剂浓度后,淡水壳菜的死亡率迅速提高,说明药剂浓度对杀灭效果有较大影响。在第14天,淡水壳菜死亡率最高的是超声空化组,可以达到80%,LT50为8 d,比第一周期缩短了3 d。

在第三周期内,第13天时,超声空化组对淡水壳菜的杀灭效果最好,死亡率可以达到83%,LT50为5 d,比第一周期缩短了6 d,这说明优化参数可以明显缩短LT50。需要注意的是,超声空化方式对淡水壳菜的杀灭效果与水流速度并没有呈现线性关系,这可能是由于不同的水流速度导致的紊流状态不同,并且与致紊材料的孔结构密切相关。同时结合投药量的经济性和死亡率情况,拟设定不同杀灭技术在连续流工况下的参数如下:超声空化组的水流速度为238 mm/s;双氧水(3%)组的投加量为200 mL;次氯酸钠(11%)组的投加量为150 mL;高锰酸钾组的投加量为4 mg/L;天南星提取物组的投加量为2 mg/L。



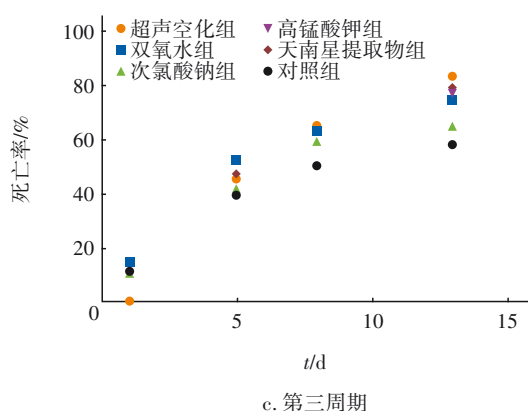


图2 不同杀灭技术对淡水壳菜的处理效果

Fig.2 Efficiency of different extermination techniques on *Limnoperna fortunei*

连续流下不同杀灭技术对淡水壳菜的处理效果如图3所示。

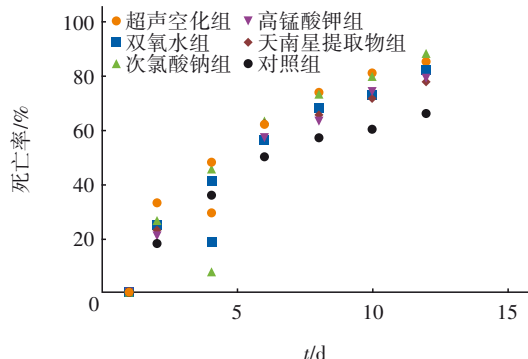


图3 连续流下不同杀灭技术对淡水壳菜的处理效果

Fig.3 Efficiency of different extermination techniques on *Limnoperna fortunei* under continuous flow condition

从图3可以看出,在第2天超声空化组的淡水壳菜死亡率为33%,杀灭效果比较明显。至第12天时,超声空化组的淡水壳菜死亡率可以达到85%,LT50为5 d。试验结束时,次氯酸钠组的淡水壳菜死亡率可以达到89%,LT50为5 d。从两种处理方式来看,LT50都是5 d,可以认为超声空化和次氯酸钠对淡水壳菜的杀灭方式是可行且高效的。从经济角度分析,超声空化技术只需要水泵压水就可以实现有效杀灭,但是在实际生产过程中需要考虑管道的铺设问题,基础建设成本较高,适用于小型水厂或者管网系统。次氯酸钠高效杀灭的投加量为水体积的0.01%,即10 000 m³水需要投加1 t次氯酸钠,约1 000元,适用于中大型水厂淡水壳菜杀灭应急处理。超声空化技术是基于液体介质的一种物理现象,当液体内部局部压力降低时,会在液体内部

部或液固交界面形成空穴,在空化泡溃灭瞬间可以形成局部的极端高温和高压,并伴有强烈的冲击波和微射流。空化对细胞的破坏作用来自于冲击波,能够实现对淡水壳菜的高效杀灭^[13]。

2.2 不同杀灭技术对出水水质的影响

2.2.1 对氨氮的影响

在进水氨氮约为2.5 mg/L的条件下,第一周期中不同杀灭技术对氨氮的影响如图4所示。可以看出,在第一周期中,不同杀灭方式组的出水氨氮浓度都在0左右,说明这些处理方式没有对硝化作用造成显著影响。第二和第三周期也呈现同样的结果,说明不同灭杀技术对去除氨氮均没有负面影响,是否有积极影响暂时还不确定。当然氨氮有可能被化学试剂氧化,从而达到完全去除氨氮的效果。但是,在超声空化组和对照组也出现了相同的现象,所以暂时还不能得出有促进作用的结论。

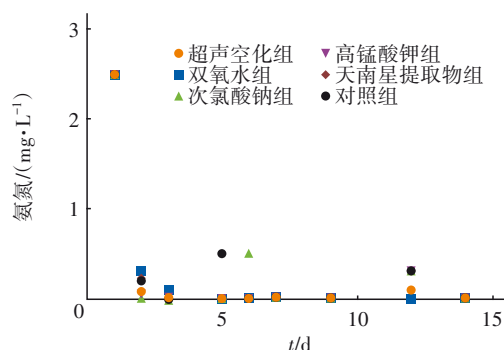


图4 第一周期中不同杀灭技术对氨氮的影响

Fig.4 Effect of different extermination techniques on ammonia nitrogen in the first cycle

与序批式相比,连续流下各种杀灭方式组的氨氮浓度有不同程度的波动,如图5所示。

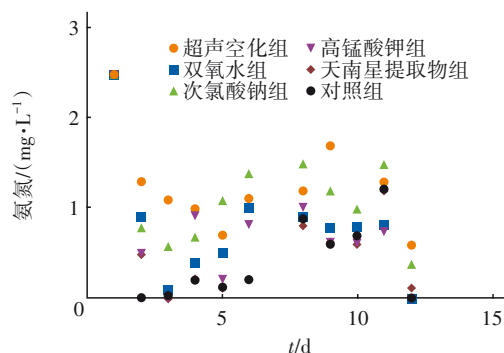


图5 连续流下不同杀灭技术对氨氮的影响

Fig.5 Effect of different extermination techniques on ammonia nitrogen under continuous flow conditions

从图5可以看出,出水氨氮大多在1 mg/L左右,

这可能是由于不断进水引入了新的氨氮,然后氨氮再通过硝化反应去除,在连续流工况下不能使氨氮降为0。序批式试验中,出水氨氮浓度相近,说明在没有外加氨氮的情况下,不同杀灭方式均能够有效地去除氨氮;连续流试验中,不同杀灭方式下出水氨氮均出现波动,且出水浓度均比对照组高一些,这可能是由于不同杀灭方式在连续流工况下对硝化作用产生了微小的影响。

2.2.2 对硝态氮的影响

在进水初始硝态氮浓度约为2.9 mg/L的条件下,第一周期中不同杀灭技术对硝态氮的影响如图6所示。可以看出,超声空化组对硝态氮的影响最为明显,出水硝态氮浓度比进水高1.7~2.2倍,最高时达到了6.5 mg/L。对照组的出水硝态氮浓度比进水提高1.3~1.8倍,最高时达到5.3 mg/L。这说明在曝气好氧条件下,反硝化作用不能有效去除硝态氮,出水硝态氮会比进水的高,与对照组相比,其他杀灭组较高可能是由于这些灭杀技术对反硝化作用的影响较小。总体来看,不同杀灭组与对照组的出水硝态氮没有显著差异。第二周期中,高锰酸钾组的影响最为明显,比进水提高了1.7~2.3倍,最高时达到6.7 mg/L。第三周期中,天南星提取物组的影响最为明显,比进水提高了1.8~1.9倍,最高时达到5.6 mg/L。整体来看,第二周期和第三周期出水硝态氮的变化趋势与第一周期类似。与对照组相比,出水硝态氮没有显著差异。

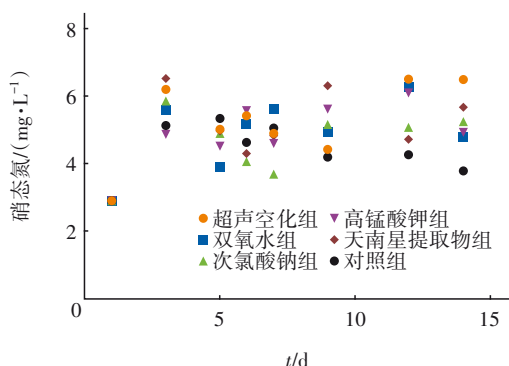


图6 第一周期中不同杀灭技术对硝态氮的影响

Fig.6 Effect of different extermination techniques on nitrate in the first cycle

在连续流下不同杀灭方式组的硝态氮浓度与对照组类似,如图7所示。出水硝态氮浓度大多在5.5~6.0 mg/L之间,比进水浓度高,这可能是由于氨氮经过硝化反应转化为硝态氮,而在好氧环境下,

硝态氮转化成亚硝态氮的速率很低,所以积累后比进水浓度要高。与序批式相比,在连续流下,不同杀灭方式组的硝态氮浓度与对照组相近,说明所采用的杀灭方式基本都不会对硝态氮浓度产生显著影响。

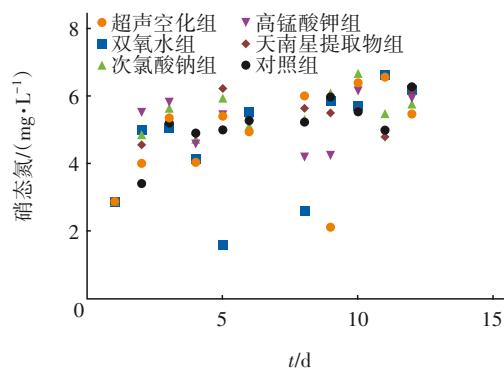


图7 连续流下不同杀灭技术对硝态氮的影响

Fig.7 Effect of different extermination techniques on nitrate under continuous flow condition

2.2.3 对亚硝态氮的影响

序批式与连续流的样品均检测不到亚硝态氮,说明在好氧条件下很难有亚硝态氮积累,因此不讨论该指标。

2.3 不同杀灭技术对脱氮菌群结构的影响

序批式与连续流条件下不同杀灭方式时填料上属水平的群落结构相对丰度如图8所示。从图8(a)可以看出,在序批式下,6组样本中占据优势的属为 *Nitrospira* 和 *Hyphomicrobium* 等。超声空化组和对照组中 *Nitrospira* 的相对丰度相似(12.81%~19.36%),表明超声空化方式对脱氮菌群没有显著的负面影响。从图8(b)可以看出,在连续流下,6组样本中主要的优势菌属为 *Nitrospira*、*Hyphomicrobium* 和 *Sphingopyxis* 等。在连续流下 *Nitrospira* 的相对丰度是序批式的2倍左右,高达23.62%~36.71%(次氯酸钠组除外),这可能是由于连续流状态下促进了氮循环过程,提高了优势菌的富集程度。需要注意的是,次氯酸钠组中 *Nitrospira* 的相对丰度为7.91%,显著低于其他组,而 *Sphingopyxis* 的相对丰度高达8.79%,该菌属是一种有机物降解菌,可见次氯酸钠的连续投加对 *Nitrospira* 是有影响的,但是没有导致脱氮失效, *Nitrospira* 相对丰度也达到了多数净水厂的水平。 *Sphingopyxis* 相对丰度的增加会提高去除有机物的能力。综上所述,在中试规模的连续流工况下,所选用的淡水壳菜杀灭方式不会对

脱氮效果造成影响,只需要考虑杀灭效果、操作性和经济成本。

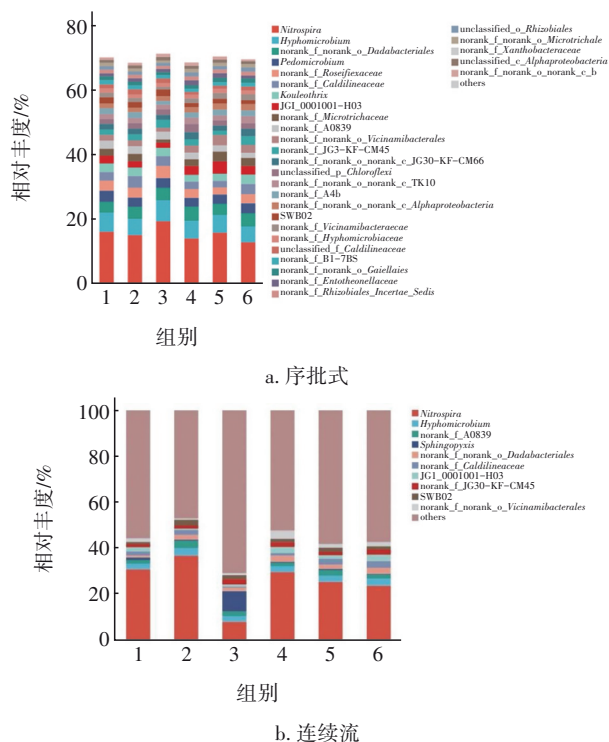


图8 序批式与连续流条件下不同杀灭方式的填料中群落结构在属水平的相对丰度

Fig.8 Relative abundance of community structure at genus level under different extermination techniques in sequencing batch and continuous flow conditions

2.4 超声空化法杀灭淡水壳菜的适用性和可行性

为了明确超声空化法用于杀灭淡水壳菜的应用场景,系统讨论了其在水质净化厂的适用性和可行性。首先,明确不同淡水壳菜杀灭技术的适用场景,这对选择何种技术至关重要。该特大水质净化厂主要是处理河道水,目的是使总氮达标排放。在处理河道水的情况下,超声空化法和化学法都是适用的,仅分析经济成本即可。如果水质净化厂是居民供水用,则倾向于应用超声空化法,或者停产部分处理池并应用间歇式化学法,原因在于投入化学品如次氯酸钠的剂量略高于供水厂日常消毒的量,考虑其安全性,需要结合实际水质进行调整。其次,紧急程度不同对淡水壳菜杀灭技术的选择有很大影响。当紧急程度较高时,比如淡水壳菜占据所有的填料空隙以至于水厂处理效果失效,则应考虑轮换停产处理池,同时投加适量的化学试剂来杀灭淡水壳菜,或者加大超声空化的能量。在脱氮效果

没有受到显著影响时,则可以根据经济成本和水厂设施的排布来选择杀灭技术。在研究过程中发现,所提出的技术都能有效地杀灭淡水壳菜成贝,同时也发现淡水壳菜的生长和繁殖并未对脱氮微生物群落造成明显影响。故认为该水厂总氮未达标并不是上述问题导致的。从超声空化技术本身来看,可以考虑在输水管道中使用,由于致素材料安装方便、可就地取材,超声空化技术的实施性较强且便于操作。如果在水质净化厂中则应重点考虑基建成本问题,若廊道内有现成的管道,则可以考虑使用该技术来杀灭反应池中的淡水壳菜,杀灭效果好且不会对脱氮造成明显影响。通过中试结果来看,淡水壳菜不会从工艺系统中被有效去除,这可能是由于淡水壳菜的虫卵还持续不断地从前端进入净水厂,若要根除淡水壳菜在反应池中的生长和繁殖,需要在前端进水渠处采取杀灭措施。河道进水渠宽度较大,不适合安装管道来启用超声空化法杀灭淡水壳菜。如果前端为管道进水,则可以考虑使用该技术方案,这为杀灭淡水壳菜方式的选择提供了新思路 and 绿色技术。

3 结论

① 根据中试反应池在连续流下的试验结果,对于超声空化法,在水流速度为238 mm/s的条件下淡水壳菜死亡率达85%,LT50为5 d;次氯酸钠(含量为11%)投加量为150 mL时,死亡率为89%,LT50为5 d。同时对硝化细菌 *Nitrospira* 的相对丰度没有显著负面影响,说明这两种方式都可以被用来有效杀灭淡水壳菜。但是,出水硝态氮浓度有所增加,在管网中应用时需予以考虑。

② 从杀灭效率角度来看,超声空化法的效果最好,实际应用时需要考虑水流速度对致素的影响,从而调控对杀灭淡水壳菜效率的影响;次氯酸钠(含量为11%)投加量为150 mL,该数值是水体积的0.01%,即10 000 m³水需要投加1 t次氯酸钠,约1 000元。在管网中使用次氯酸钠药剂需要考虑水流速度过快而使其被快速冲走。

③ 所选取的5种淡水壳菜杀灭技术对降低氨氮浓度的效果不会造成显著的负面影响。与对照组类似,所有组别大多样品的出水硝态氮浓度均在5.5~6.0 mg/L左右,均比进水浓度高,这可能是由于氨氮经过硝化反应后转化为硝态氮,而在好氧条件

下,硝态氮转化成亚硝态氮的速率很低,所以积累后比进水浓度高。微生物群落结构分析表明,在经过5种杀灭措施处理以后,填料中的优势菌属均有*Nitrospira*,其在氮循环过程中具有重要作用,这也和水质指标数据相吻合。

参考文献:

- [1] PEREPELIZIN P V, BOLTOVSKOY D. Hot water treatment (chronic upper lethal temperature) mitigates biofouling by the invasive Asian mussel *Limnoperna fortunei* in industrial installations [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(18): 7868-7873.
- [2] BOLTOVSKOY D, CORREA N. Ecosystem impacts of the invasive bivalve *Limnoperna fortunei* (golden mussel) in South America [J]. Hydrobiologia, 2015, 746:81-95.
- [3] PEREPELIZIN P V, BOLTOVSKOY D. Effects of 254 nm UV irradiation on the mobility and survival of larvae of the fouling invasive mussel *Limnoperna fortunei* [J]. Biofouling, 2014, 30:197-202.
- [4] CATALDO D, BOLTOVSKOY D, HERMOSA J L, et al. Temperature-dependent rates of larval development in *Limnoperna fortunei* (Bivalvia: Mytilidae) [J]. Journal of Molluscan Studies, 2005, 71(1): 41-46.
- [5] BARBOS F G. The scientific literature on *Limnoperna fortunei* (Dunker 1857) from 1982 to 2012[J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2014, 86(3): 1373-1384.
- [6] SYLVESTER F, CATALDO D H, NOTARO C, et al. Fluctuating salinity improves survival of the invasive freshwater golden mussel at high salinity: implications for the introduction of aquatic species through estuarine ports [J]. Biological Invasions, 2013, 15(6):1355-1366.
- [7] 洪洁. 输水管道中淡水壳菜的危害特性及控制措施研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
HONG Jie. Research on Hazard Properties and Control Measures of *Limnoperna fortunei* in Water Pipelines[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [8] BONEL N, SOLARI L C, LORDA J, et al. Differences in density, shell allometry and growth between two populations of *Limnoperna fortunei* (Mytilidae) from the Río de la Plata basin, Argentina [J]. Malacologia, 2013, 56(2):43-58.
- [9] BABA T, CLAUDI R, CORREA N, et al. *Limnoperna fortunei*: The Ecology, Distribution and Control of a Swiftly Spreading Invasive Fouling Mussel [M]. Berlin: Springer, 2015.
- [10] 罗凤明. 深圳市供水系统中淡水壳菜的生物学及其防治技术[D]. 南昌:南昌大学, 2006.
LUO Fengming. Studies on Biology and Control Techniques of *Limnoperna fortunei* (Dunker) in Water Supply System of Shenzhen City [D]. Nanchang: Nanchang University, 2006(in Chinese).
- [11] CALAZANS S H, AMERICO J A, DA COSTA-FERNANDES F, et al. Assessment of toxicity of dissolved and microencapsulated biocides for control of the golden mussel *Limnoperna fortunei* [J]. Marine Environmental Research, 2013, 91: 104-108.
- [12] 王睿. 长距离输水管道中淡水壳菜的氧化杀灭去除技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2011.
WANG Rui. Research on Oxidative Inactivation and Removal Technology of *Limnoperna fortunei* in Long-distance Water Pipelines [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011(in Chinese).
- [13] ZHANG C D, XU M Z, WANG Z Y, et al. Experimental study on the effect of turbulence in pipelines on the mortality of *Limnoperna fortunei* veligers [J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 101-118.

作者简介:左世昌(1993-),男,河南开封人,硕士,工程师,主要研究方向为市政给排水。

E-mail:425717186@qq.com

收稿日期:2023-12-07

修回日期:2024-01-22

(编辑:任莹莹)