

李荣,胡建坤,王霖,等.淡水壳菜对原水水质的影响[J].净水技术,2022,41(2):47-52.

LI R, HU J K, WANG L, et al. Effect of *Limnoperna fortunei* on raw water quality[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(2): 47-52.



扫我试试?

淡水壳菜对原水水质的影响

李荣¹,胡建坤¹,王霖¹,闫慧敏²,汪艳丽³,王伟³

(1.天津水务集团有限公司,天津 300042;2.天津市公用事业设计研究所,天津 300100;3.天津塘沽中法供水有限公司,天津 300450)

摘要 为考察淡水壳菜对原水水质产生的影响,通过室内淡水壳菜的培养,对水质指标及8种嗅味物质的变化进行了研究。结果表明:水中的溶解氧含量随着淡水壳菜培养时间的增加而降低,下降速率为0.018 mg/(L·h);水中的氨氮和总氮含量随着淡水壳菜培养时间的增加而增加,氨氮代谢速率总体为 0.6×10^{-4} mg/(L·h·个),总氮的变化主要受氨氮变化的影响;硝态氮的含量变化较小,而亚硝态氮和总磷基本无变化。另外,水中活体淡水壳菜代谢不产生研究所测定的8种嗅味物质,而有死亡个体的水中会有8种嗅味物质中的3-甲基吲哚和1-辛烯-3-醇这2种物质产生,且死亡个体越多,其在水中的含量越大。三甲胺及硫醚类物质包括二甲基二硫醚和二甲基三硫醚等具有鱼腥臭及腐败恶臭的物质也在含有死亡淡水壳菜的培养水中被发现。

关键词 淡水壳菜 原水水质 溶解氧下降速率 氨氮代谢速率 嗅味

中图分类号: TU991.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)02-0047-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.02.007

Effect of *Limnoperna fortunei* on Raw Water Quality

LI Rong¹, HU Jiankun¹, WANG Lin¹, YAN Huimin², WANG Yanli³, WANG Wei³

(1. Tianjin Water Group Co., Ltd., Tianjin 300042, China;

2. Tianjin Public Utility Design & Research Institute, Tianjin 300100, China;

3. Tianjin Tanggu Sino French Water Supply Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract In order to investigate the effect of *Limnoperna fortunei* on raw water quality, the changes of water quality indices and eight kinds of odorous substances in water were studied by cultivating *Limnoperna fortunei* indoor. Results showed that dissolved oxygen content decreased with the increase of the culture time of *Limnoperna fortunei*, and overall dissolved oxygen decreasing rate was 0.018 mg/(L·h). The content of ammonia nitrogen and total nitrogen increased with the increase of the culture time of *Limnoperna fortunei*, and the overall metabolic rate of ammonia nitrogen was 0.6×10^{-4} mg/(L·h·pcs). Change of total nitrogen was mainly affected by the ammonia nitrogen. The content of nitrate nitrogen changed little, while the content of nitrite nitrogen and total phosphorus basically unchanged. In addition, living *Limnoperna fortunei* didn't produce eight kinds of odorous substances measured in this study, but water within dead individuals produced two substances of 3-methylindole and 1-octene-3-alcohol in the eight kinds of odorous substances, and the more dead individuals, the greater their content in the water. Trimethylamine and sulfuric ether substances including dimethyl disulfide and dimethyl tri thioether with stench and corrupt stink, had also been found in the cultivating water of dead *Limnoperna fortunei*.

Keywords *Limnoperna fortunei* raw water quality decreasing rate of DO ammonia nitrogen metabolic rate taste and odor

[收稿日期] 2020-12-07

[作者简介] 李荣(1984—),女,硕士,主要从事饮用水安全保障技术研究工作,E-mail:bkdlirong@sina.com。

淡水壳菜,学名沼蛤,隶属于软体动物门、双壳纲异柱目贻贝科,壳质较薄,但较坚硬,足丝细软发达,营附着生活,以鳃被动滤食水中有机碎屑、细菌、藻类(绿藻、裸藻)及原生动动物^[1],对环境的适应能力极强,多栖息在流水较缓(流速为0.4~0.9 m/s)的湖泊及河流中,能够在流速较缓的人工输水管道中生长,属于南方地区较常见的典型入侵性底栖动物^[2]。

淡水壳菜通过分泌一种具有极强黏性的结构蛋白足丝彼此黏连并牢固地黏附在外物表面上,一旦入侵原水供水系统,在适宜的条件下在输水管道中大量生长、繁殖、附着,会对附着表面产生污损、腐蚀^[3],增大水流阻力、减小过流面积,造成管道输水能力降低^[4]。淡水壳菜随着水流进入水厂,黏附在泵站管路、各种缝、阀门及净水设施构筑物上,很难一次性清理去除,会造成机泵停转、水厂格栅堵塞等问题,影响输水管道正常运行及水厂正常生产^[5],严重时会引起供水安全事故。另外,淡水壳菜的生长会对水体环境产生一定的影响,其生长会呼吸消耗水中的溶解氧,代谢会排泄氨氮等营养盐^[6],死亡个体腐烂后会产生恶臭,从而影响水体水质。

在天津自来水供水系统使用长江水之前,从未发现淡水壳菜;使用长江水之后,2017年夏天在某水厂出现了淡水壳菜堵塞管道现象,导致脉冲澄清池无法正常运行,2018年底在天津某水库吸水池发现了大量的淡水壳菜,说明淡水壳菜是外来物种,且很大程度上来自长江水^[7]。淡水壳菜的卵夹带在水中,一旦条件适合,立马生长繁殖,入侵水厂,给水厂的稳定运行带来隐患。淡水壳菜导致水中氨氮的增加及臭味物质产生,会引起氯的投加量增加及工艺参数的改变,带来运行不稳定及安全隐患。因此,研究淡水壳菜生长和个体死亡对水质产生的影响,可为水厂工艺稳定控制提供参考和依据。为此,在实验室进行了淡水壳菜的培养试验,考察其对水质产生的具体影响。

1 试验材料和试验方法

1.1 试验材料

试验所用的淡水壳菜取自天津某水库出水口格栅,选取成团生长或个体未受损的健康活体,装入盛有原水的5 L塑料桶中带回实验室。用流动的原水

稀疏地静养在有机玻璃水槽中2 d后,进行淡水壳菜静水培养试验。试验过程中会有淡水壳菜死亡,淡水壳菜死亡判断方法^[8]:双壳已完全弹开显示出明显死亡迹象的,则判断为死亡;对于开小口的,用解剖针等较尖锐的东西刺激开壳处,如果没有反应,将其放回原水中放置24 h后,仍无闭壳反应的,则判断为死亡。

1.2 培养装置

培养装置是一套有机玻璃流水培养容器(图1),容积为7 L,有进出水口,流速可调节。

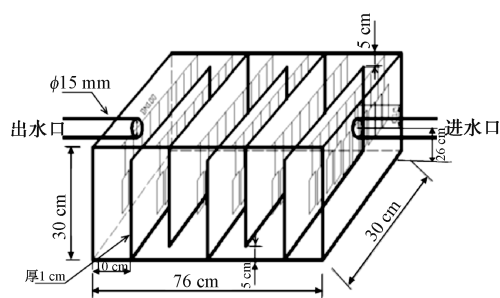


图1 淡水壳菜培养装置

Fig. 1 Culture Apparatus of *Limnoperna fortunei*

1.3 试验方法

挑出壳长为10~15 mm的活体淡水壳菜(成贝期)100个,分别放入到2个盛有5 L原水的试验装置,种群密度为10个/L,静态培养。分别从2个试验装置中交替取样,设定取样时间,按照《水和废水监测分析方法》第四版^[9]中的方法,测定水中溶解氧及水质指标:氨氮、硝态氮、亚硝态氮、总氮、总磷,并测定水中8种臭味物质:土臭素、二甲基异茨醇、1-辛烯-3-醇、3-甲基吡啶、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、2,4,6-三氯苯甲醚、 β -环柠檬醛。使用气相色谱质谱联用仪(Agilent 7890B-5977B)进行测定,采用固相微萃取法,选用Supelco 50/30 μ m DVB/CAR/PDMS固相微萃取针,配合CTC三合一自动进样器进行样品测定^[10]。

1.4 8种臭味物质的测试条件

(1)气相色谱条件

色谱柱:HP-5 MS石英毛细管色谱柱(30 m \times 0.25 mm,膜厚为0.25 μ m);

升温程序:40 $^{\circ}$ C保持4 min,以10 $^{\circ}$ C/min升至250 $^{\circ}$ C并保持5 min;

进样口温度:250 ℃;

载气(流量):He(0.8 mL/min)。

(2)质谱条件

离子源采用230 ℃,四级杆为150 ℃,辅助加热区采用280 ℃,溶剂延迟设置为8 min。

(3)标准曲线和水样测定

标准曲线:用分析天平称取2.50 g NaCl于20 mL CTC专用样品瓶中,分别定量移取上述8种物质的一系列浓度梯度标准溶液于样品瓶中,分别加入20 μL内标使用液(2-仲丁基-3-甲氧基吡嗪),再加入超纯水,使得每个样品瓶中液体的总体积为10 mL,拧紧瓶盖,待测。

水样测定:准确移取10 mL水样于盛有2.50 g NaCl的样品瓶中,加入20 μL内标使用液,拧紧瓶盖。同标准曲线系列样品瓶一同置于自动进样器样品盘中进行分析测试。

2 结果与分析

2.1 淡水壳菜对水中溶解氧的影响

淡水壳菜呼吸会消耗水中的溶解氧,在静水培养条件下,水中的溶解氧随着培养时间的增加而降低(图2),水中溶解氧从开始培养时的8.15 mg/L(25.5 ℃)到培养184 h后降到4.75 mg/L(25.4 ℃),下降速率为0.018 mg/(L·h)。当水中溶解氧质量浓度低于6 mg/L时,淡水壳菜随着培养时间的增加,开始出现开壳死亡。说明淡水壳菜在水中溶解氧浓度充足时呼吸代谢活跃,当水中溶解氧浓度不足时,淡水壳菜呼吸受限,呼吸代谢减弱,会用有限的溶解氧来维持生命,当水中溶解氧不足以满足其生命需求时,淡水壳菜开始死亡。水中淡水壳菜的存在会消耗水中的溶解氧。

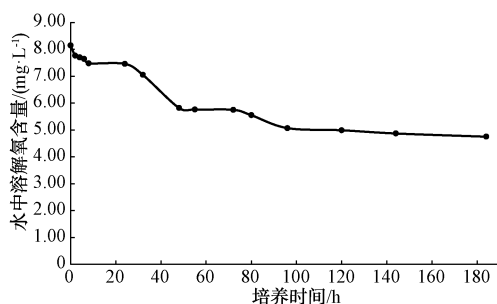


图2 水中溶解氧含量随淡水壳菜培养时间的变化
Fig. 2 Change of DO in Water with *Limnoperna fortunei* Cultivating Time

2.2 淡水壳菜对水质的影响

对比原水水质(表1),发现淡水壳菜生长代谢会排出氨氮等营养盐。

表1 试验原水水质指标 (单位:mg/L)

指标	氨氮	总氮	硝态氮	亚硝态氮	总磷
数值	0.09	0.93	0.08	0.004	0.06

淡水壳菜的培养试验发现,水中的氨氮含量随着培养时间的增加呈线性增加(图3),从0.09 mg/L增加到培养96 h后的0.35 mg/L,水中氨氮含量的变化主要是淡水壳菜代谢引起的,氨氮代谢速率总体为 0.6×10^{-4} mg/(L·h·个)。总氮含量总体呈现随时间增加而增加的变化趋势,总氮的变化主要受氨氮变化的影响。硝态氮的含量出现了较小的波动变化,总体呈现增加的变化趋势,从原水的0.08 mg/L到培养96 h后变成0.11 mg/L,这可能跟水中硝化细菌的存在有关,使得水中的部分氨氮转化为硝态氮。亚硝态氮变化较小,其含量在0.004~0.007 mg/L。总磷基本没有变化,其含量在0.10 mg/L左右。说明淡水壳菜会持续代谢氨氮,使水中氨氮的含量不断增加,从而导致水中总氮含量的增加。

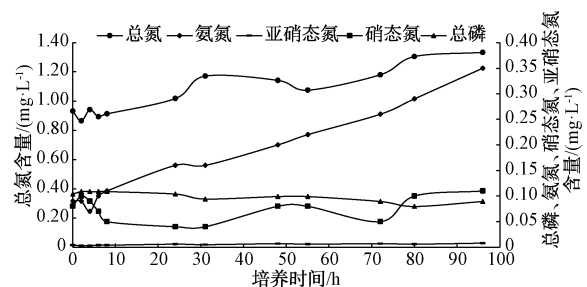


图3 水质指标随淡水壳菜培养时间的变化

Fig. 3 Change of Water Quality Indices with *Limnoperna fortunei* Cultivating Time

2.3 淡水壳菜对水中嗅味的影响

(1)活体壳菜对水中嗅味的影响

淡水壳菜培养水有股腥味,通过对淡水壳菜培养水中8种嗅味物质的测定,发现这8种嗅味物质含量都低于其检出限,说明水中存活的淡水壳菜代谢不产生表2中所列的这8种嗅味物质,但是否会产生其他嗅味物质,还有待于进一步建立检测方法分析研究。

表 2 淡水壳菜培养水中 8 种臭味物质的变化情况 (单位:ng/L)
Tab. 2 Change of Eight Kinds of Odorous Substances in Water of *Limnoperna fortunei* with Cultivating Time (Unit:ng/L)

时间	1-辛烯-3-醇	2-异丙基-3-甲氧基吡嗪	2-异丁基-3-甲氧基吡嗪	2-MIB	β -环柠檬醛	2,4,6-三氯苯甲醚	3-甲基吡啶	土臭素
0 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
2 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	2.2
4 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	2.2
6 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
8 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
24 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
31 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
48 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
55 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
72 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
80 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
96 h	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
DL	6.2	2.5	2.9	2.4	3.9	3.8	8.3	2.2

注:DL 为每种臭味物质的检出限,单位为 ng/L

(2) 死亡壳菜个体对水中臭味的影响

对含有死亡个体的淡水壳菜培养水中的 8 种臭味物质检测(表 3),发现与原水及成活个体的培养水相比,含有死亡个体的淡水壳菜培养水 8 种臭味物质中有 2 种物质含量变化较大,分别是 3-甲基吡啶和 1-辛烯-3-醇。死亡个体越多,其含量越大。说明淡水壳菜个体死亡腐败会产生 3-甲基吡啶和 1-辛烯-3-醇等具有粪臭和干草味的臭味物质,从而对水体感官产生一定的影响。

表 3 含有死亡个体的淡水壳菜培养水中主要臭味物质的变化情况(单位:ng/L)

Tab. 3 Change of Main Odorous Substances in Water of *Limnoperna fortunei* with Cultivating Time(Unit:ng/L)

指标	3-甲基吡啶	1-辛烯-3-醇
原水	<DL	<DL
成活个体	<DL	<DL
5 个死亡/50 个个体	9.2	18.2
25 个死亡/50 个个体	186.0	85.6
DL	8.3	6.2

3 讨论

淡水壳菜是一种滤食性贝类,呼吸和代谢是其生存基础和生长特性,它通过外套膜、唇瓣和鳃瓣表面密生的纤毛运动^[11],通过鳃和外套膜进行气体交换,水中有机碎屑、藻类等中小型颗粒物被纤毛送到口中,经过食道、胃、肠等消化,代谢物通过直肠肛门

排出体外^[6]。虽然从本次试验来看,淡水壳菜的排氮速率为 0.6×10^{-4} mg/(L·h·个),排氮率较低,这跟关芳等^[6]研究的淡水壳菜的排氮率结果相似,只是计量方法不同。当输水管道或者水库中聚集堆叠生长数量众多的淡水壳菜时,它们消耗的氧及代谢排出的氮对水质产生的影响会积少成多,不可忽视。以天津某水库为例,2018 年 7 月—2019 年 7 月,进水口氨氮平均值为 0.12 mg/L,而出水口氨氮平均值为 0.18 mg/L,该水库在 2018 年发现有大量的淡水壳菜存在,这可能是导致氨氮的进出口变化的因素之一。

很多文献报道,含有淡水壳菜的水体中有明显的腥臭味^[3,5,12-15],但是该类腥味物质到底是哪些物质却未见报道。本次试验通过测定淡水壳菜培养水中的 8 种臭味物质,发现水中活体淡水壳菜代谢不产生所测定的 8 种臭味物质,而有个体死亡的水中会产生 3-甲基吡啶和 1-辛烯-3-醇这 2 种臭味物质,且死亡个体越多,其在水中的含量越大。3-甲基吡啶存在于粪便、甜根等中,具有强烈的粪臭味^[16],1-辛烯-3-醇具有干草味,自然界中主要存在薄荷类、鲜蘑菇及河虾等中,淡水壳菜死后,可能是体内的代谢物释放到水中,从而导致水中的 3-甲基吡啶和 1-辛烯-3-醇含量增加。另外,还对含有死亡个体的淡水壳菜培养水进行了臭味物质 GC-MS 定性分析(GC-MS 联用所得质谱信息经计算机

用标准 NIST14 图库检索与标准谱图对照,相关度为 85% 以上的化合物为定性物质),发现还有三甲胺及硫醚类物质包括二甲基二硫醚和二甲基三硫醚等具有鱼腥臭及腐败恶臭的物质存在。这几种物质目前没有建立定量测试方法,还不能定量说明其含量大小,但是淡水壳菜死亡个体的腐败肯定会产生恶臭物质,这点是毋庸置疑的。

一旦水体因淡水壳菜的存在发现臭味物质的出现,可以采用不同的方法加以处理,一般可选取活性炭吸附或者化学氧化法。粉末活性炭可以有效去除水中的臭味物质^[17],一般活性炭的投加量在 10~20 mg/L,并保证 30 min 以上的接触时间,可以有效去除 80% 以上的某些臭味物质^[18]。化学氧化法常用的去除臭味物质的氧化剂有氯、高锰酸钾和臭氧等。研究表明^[19],2 mg/L 的次氯酸钠在 1 h 内几乎能将水中质量浓度为 200 ng/L 的 3-甲基吡啶完全降解,2 mg/L 的高锰酸钾对质量浓度为 200 ng/L 的 1-辛烯-3-醇和 3-甲基吡啶的去除率分别可达 55% 和 88.5%,2 mg/L 的臭氧能有效降解除 1-辛烯-3-醇和 3-甲基吡啶以外的二甲基二硫醚和二甲基三硫醚等硫醚类物质,去除率高达 90% 以上。水体因淡水壳菜产生的臭味物质,需要根据臭味物质的种类和含量而选择不同的处理方式。

为了从源头上解决淡水壳菜对水质的影响,应该在水源地、管道及水厂加强淡水壳菜的防治及去除。在水源地淡水壳菜的主要控制方法是生物法,即在水源地放养捕食淡水壳菜的经济鱼类来控制水中的淡水壳菜,防止其大量繁殖。一般能够捕食淡水壳菜的鱼类有青鱼、鲤鱼、钝吻兔脂鲤、三角鲂、鲇鱼、卷口鱼等^[20]。某水厂通过在水源地投放一定比例(1:1:1:1:1.7)的三角鲂、青鱼、草鱼、鲤鱼、鲢鱼,可有效抑制淡水壳菜的生长,且藻类也大幅下降^[21]。具体水源地、放养鱼类和放养模式需结合当地自然、社会条件而确定。管道内淡水壳菜的防治方法一般包括防附着涂料法及化学药剂灭杀法。防附着涂料可提高管道壁面的光滑度,减少淡水壳菜的附着,但要求涂料必须无毒、不影响饮水健康且经久耐用^[22]。化学药剂法可用于管道淡水壳菜的防治,也可用以水厂淡水壳菜的去除,使用的药剂种类主要为次氯酸钠、高锰酸钾及氯胺等。一般地,水中次氯酸钠质量浓度为 1~2 mg/L,高锰酸钾质量浓度为 0.5~1 mg/L,使用氯胺时,水中总氯质量浓度为

1~2 mg/L,且上述药剂浓度需要维持至少 7 d 才能起到灭杀淡水壳菜的效果,夏季最有效^[13,23-24]。在实际水厂生产中不同药剂都有各自的优缺点,次氯酸钠能与水任意比例互溶,使投加量较为准确,在灭杀淡水壳菜的过程中,还能溶解足丝,降低其附着能力,使其更容易被水冲刷下来;高锰酸钾氧化性强,除藻效果好,但水中浓度过高会使二价锰含量增大,出水色度增加;氯胺的氧化性强,氯化消毒副产物低,但稳定性差,需要现场配制,浓度不能精准控制^[25]。在实际应用中,需要根据具体情况进行相应的选择。

4 结语

本试验研究表明:活体淡水壳菜呼吸会消耗水中的溶解氧,水中溶解氧含量的减少会使水中藻类及其他微生物的活动受抑制,藻相菌相平衡不稳定,最终会影响水质。另外,淡水壳菜生长代谢会产生氨氮等营养物质使水中氨氮含量增加,个体死亡还会产生粪臭、鱼腥臭及腐败恶臭的物质,影响水体感官,淡水壳菜对水质的这些影响会造成水厂氯的投加量增加及工艺参数的改变,带来运行不稳定及安全隐患。因此,建议在有淡水壳菜出现的原水输水管道、水源地及以此为水源的水厂,一定要加强水中氨氮含量实时监测及臭味物质种类识别和含量测定。如果进入水厂的水中氨氮含量变化波动较大,应该根据水厂运行参数实时调整氯的投加量,从而保证管网消毒效果。有淡水壳菜生长的水中如果发现臭味物质存在,应根据臭味物质种类采取相应的处理措施,仅是 3-甲基吡啶一种臭味物质存在,水厂可以适当增加氯的投加量,就可以将其有效去除。如果是多种臭味物质并存,一般粉末活性炭吸附处理效果很好。有臭氧处理措施的水厂,保证臭氧的投加量及接触时间就能有效去除臭味物质。因此,水源地、水厂需要根据臭味物质种类和含量建立各级应急处理预案,从而保障水厂的安全稳定运行。此外,应该建立淡水壳菜三级(水源地-管道-水厂)防治屏障,根据实际情况选择合适的处理方法将淡水壳菜从源头去除,从而消除其影响,保障供水安全。

参考文献

- [1] 张锐坚. 原水管道附着沼蛤对浮游生物和水质的影响及其机理研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
- [2] 曹新垲, 程婷婷, 张雯雯, 等. 沼蛤在南水北调中线渠道沿

- 程迁徙的研究[J]. 城镇供水, 2017(5):62-65.
- [3] 蔡杰龙, 杨永民, 潘志权, 等. 淡水壳菜污损体系及其对输水建筑物侵蚀现状分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(6):111-116, 129.
- [4] 徐梦珍, 王兆印, 段雪花. 输水管道中淡水壳菜的防治研究[J]. 给水排水, 2009, 35(5):205-208.
- [5] 倪杭娟, 张秋勉, 郭应达. 次氯酸钠浸泡脱除原水管壁淡水壳菜试验[J]. 净水技术, 2021, 40(5):131-133.
- [6] 关芳, 张锡辉. 原水输送涵管中贝类代谢特征研究[J]. 给水排水, 2005, 31(11):23-26.
- [7] 李荣, 王洪帅, 白金超, 等. 北塘水库淡水壳菜生境分析[J]. 供水技术, 2020, 14(1):19-22.
- [8] MONTALTO L, DRAGO I. Tolerance to desiccation of an invasive mussel, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Bivalvia, Mytilidae), under experimental conditions [J]. Hydrobiologia, 2003, 498(1-3):161-167. DOI:10.1023/A:1026222414881.
- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [10] 闫慧敏, 韩正双, 白雪娟, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱质谱法测定 8 种嗅味物质[J]. 供水技术, 2018, 12(6):58-61.
- [11] 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.
- [12] 徐梦珍, 王兆印, 王旭昭, 等. 输水通道中沼蛤入侵及水力学防治[J]. 水利学报, 2013, 44(7):856-862, 872.
- [13] 刘冬梅, 王睿, 洪洁, 等. 高锰酸钾对淡水壳菜的杀灭试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(4):46-49.
- [14] 谭纤茹, 刘德福, 张佳磊, 等. 不同富营养状态下沼蛤的存活与行为特性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12):2120-2127.
- [15] 魏小熙, 杨正健, 刘德富, 等. 水利工程污损生物沼蛤在不同环境条件下的行为特性研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(3):73-80.
- [16] 温俊峰. 3-甲基吡啶的合成研究进展[J]. 榆林学院学报, 2011, 21(6):13-17.
- [17] 李大鹏, 徐乐中, 李伟光. 粉末活性炭除臭工艺的影响因素[J]. 净水技术, 2006, 25(2):24-26.
- [18] 刘成, 李俊林, 陈卫, 等. 应对高藻水源水的粉末活性炭吸附预处理研究[J]. 中国给水排水, 2012, 28(1):52-55.
- [19] 刘禧文, 闫慧敏, 韩正双, 等. 水中 8 种典型嗅味物质的氧化去除研究[J]. 供水技术, 2020, 14(4):1-7.
- [20] 张重祉, 罗凤明, 胡向萍. 淡水壳菜的生物防治[J]. 科技经济市场, 2012(12):12-13.
- [21] 韩海燕, 刘春霞, 侯煜堃, 等. 某地表水厂淡水壳菜的综合防治技术研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(3):69-71.
- [22] 华丕龙, 何涛, 何直, 等. 防护材料防止淡水壳菜附着的试验研究[J]. 水电站机电技术, 2015(增1):4-7, 18.
- [23] GUNDERSEN R, JOHANSEN B, GARTLAND P O, et al. The effect of sodium hypochlorite on the electrochemical properties of stainless steels in seawater with and without bacterial films[J]. Corrosion, 1991, 47(10):800-800.
- [24] 魏小熙, 杨正健, 刘德福, 等. 输水系统中污损生物沼蛤得氧化剂灭杀技术研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(5):17-22.
- [25] 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.

(上接第 15 页)

- [41] JAAFARZADEH N, GHANBARI F, AHMADI M. Efficient degradation of 2, 4 - dichlorophenoxyacetic acid by peroxymonosulfate/magnetic copper ferrite nanoparticles/ozone: A novel combination of advanced oxidation processes [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 320: 436-477. DOI: 10.1016/j.cej.2017.03.036.
- [42] 曹影. 过一硫酸盐催化臭氧降解氯霉素效能及机理研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [43] 徐雪璐, 蒋云飞, 王辉, 等. 非均相催化臭氧氧化技术水处理研究进展[C]. 海口:中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷), 2016.
- [44] 王建兵, 侯少沛, 周云瑞, 等. Ru/AC 催化臭氧氧化难生物降解有机物[J]. 环境科学, 2009, 30(9):2565-2569.
- [45] 鲁金凤, 马军, 何如, 等. 负载型 FeOOH 催化臭氧氧化对 THMFP 的控制效果[J]. 中国给水排水, 2008(15):32-35.
- [46] 鲁金凤, 张涛, 刘艳芳, 等. 负载型 FeOOH 催化臭氧氧化对 HAAsFP 的控制效果[J]. 中国给水排水, 2010, 26(19):49-53.
- [47] 杨阳, 杨忠莲, 吴倩, 等. 臭氧投加量对微污染淮河水体中消毒副产物前体物去除效果的影响[J]. 净水技术, 2019, 38(8):53-63.
- [48] AGHAEINEJAD-MEYBODI A, EBADI A, SHAFIEI S, et al. Modeling and optimization of antidepressant drug Fluoxetine removal in aqueous media by ozone/H₂O₂ process: Comparison of central composite design and artificial neural network approaches [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2015, 48: 40-48. DOI: 10.1016/j.jtice.2014.10.022.
- [49] 伍海辉, 高乃云, 万容芳, 等. 高级氧化技术降解卤乙酸效果及动力学研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(12):1974-1978.
- [50] 姜明. 饮用水中消毒副产物亚硝基吡咯烷的控制技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2020.
- [51] 夏海威, 周海东, 赵维诘, 等. 污水中典型药物在臭氧及其组合技术中去除特性的研究[J]. 环境工程, 2015, 33(s1):72-76.
- [52] 丁张凯. 臭氧/过一硫酸盐及臭氧/过氧化氢高级氧化技术降解水中阿特拉津实验研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018.
- [53] 张涛. 饮用水中消毒副产物二氯乙腈的形成过程和控制技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2014.
- [54] ZHANG R H, WANG F F, FANG C, et al. Occurrence of CX₃R-Type disinfection byproducts in drinking water treatment plants using DON-Rich source water [J]. American Chemical Society Environmental Science & Technology Water, 2021, 1(3):553-561.