

淡水入侵生物沼蛤的污损机制与防污措施研究进展

朱佳兰^{1,2}, 李世国^{1,2*}, 张颖^{1,2}, 战爱斌^{1,2*}

¹中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; ²中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 沼蛤是一种典型的淡水入侵贝类, 能够利用其分泌的足丝牢固黏附在多种水下基质表面, 引起严重的生物污损问题。沼蛤污损不但影响水生生态系统健康, 也给水利工程、交通运输、水产养殖等行业带来经济损失, 已成为全球水生生态系统安全和国民经济重要行业的潜在威胁, 相关防污工作亟待开展。欲从根本上解决沼蛤污损问题, 一方面需要加强对其基础生物学特性和污损机制的深入解析, 另一方面也需要在此基础上研发更加经济、高效、环境友好的防污措施。本文综述了近年来国内外关于沼蛤污损生物学特性、污损机制和防污措施方面的研究进展, 尤其是对沼蛤生物污损发生的主要机制如足探测识别、足丝黏附和环境影响等方面进行了总结, 也从物理、化学、生物和防污材料等角度阐述了现有的沼蛤污损控制措施并对未来发展方向进行了展望, 以期更加深入地理解沼蛤生物污损现象, 为揭示其作用机制、制定科学有效的防污措施、维护水生生态系统安全提供数据支撑, 综述内容对于水下仿生材料研发也具有重要的参考价值。

关键词: 金贻贝; 沼蛤; 生物污损; 抗污损; 足丝黏附; 生物入侵



开放科学标识码
(OSID 码)

Research progress on the fouling mechanisms and anti-fouling strategies of the freshwater invasive golden mussel *Limnoperna fortunei*

ZHU Jialan^{1,2}, LI Shiguo^{1,2*}, ZHANG Ying^{1,2}, ZHAN Aibin^{1,2*}

¹Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

²College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The golden mussel *Limnoperna fortunei* Dunker 1857, a representative freshwater invasive bivalve, can use its byssus to firmly adhere to various underwater substrate surfaces, causing a serious biofouling problem. Biofouling by golden mussels not only affects the health of aquatic ecosystems, but also brings about economic losses to water conservancy projects, transportation, and aquaculture, making it a potential threat to aquatic ecosystem safety and national economically important industries. Therefore, strategies to control the biofouling (named anti-fouling) of this species are urgently needed. To fundamentally solve the fouling problem caused by this species, it is necessary to strengthen an in-depth understanding of its biological characteristics and fouling mechanisms, as well as develop more economical, efficient, and environmentally friendly anti-fouling strategies. Therefore, this review summarizes advances in knowledge of fouling mechanisms and anti-fouling strategies for the golden mussel *L. fortunei* developed in recent years. The main biological characteristics and fouling mechanisms, including foot detection, byssus adhesion, and their environmental influences, are reviewed here. Research progress on anti-fouling strategies against *L. fortunei* is also summarized, including physical, chemical, biological, and material methods. This review provides support for an in-depth understanding of the fouling phenomenon and mechanisms of golden mussels and provides a theoretical reference for formulating effective anti-fouling strategies and maintaining aquatic ecosystem safety. The content of this review also has important reference value for the research and development of underwater biomimetic materials in the future.

Key words: golden mussel; *Limnoperna fortunei*; biofouling; anti-fouling; byssus adhesion; biological invasion

生物污损 (biofouling) 是水生生物大量黏附在生态系统或工程系统中的基质表面而引起生态影响和表面损伤的现象 (Gule *et al.*, 2016)。污损生物种类繁多, 在海洋和淡水生态系统中均有分布,

收稿日期 (Received): 2022-11-11 接受日期 (Accepted): 2023-02-06

基金项目: 北京市自然科学基金面上项目 (5222026); 中国科学院青年创新促进会项目 (2018054)

作者简介: 朱佳兰, 女, 硕士研究生。研究方向: 水生生物污损。E-mail: jlzhu2021_st@cees.ac.cn

* 通信作者 (Author for correspondence), 李世国, E-mail: sgli@cees.ac.cn; 战爱斌, E-mail: azhan@cees.ac.cn

严重威胁水生生态系统安全和社会经济发展。据统计,全球每年因生物污损问题而造成经济损失高达 1500 亿美元(Nurioglu *et al.*, 2015)。海洋生物污损问题在国内外均受到广泛关注,以藤壶 *Balanus albicostatus* Pilsbry、海鞘 *Ascidacea* 和贻贝 *Mytilus edulis* L. 为代表的大型海洋污损生物的黏附机制、抗污防腐和仿生材料研制等方面都已经开展了深入的研究并取得了长足的发展和进步(刘艳等, 2013; 宋积文等, 2015; Chen *et al.*, 2021; Cho *et al.*, 2018)。与之相比,人们对淡水生态系统中的生物污损问题关注有限,沼蛤 *Limnoperna fortunei* Dunker、斑马贻贝 *Dreissena polymorpha* (Pallas)、斑驴贻贝 *Dreissena rostriformis bugensis* Andrusov 等代表性淡水污损生物的治理工作至今仍面临诸多问题和挑战。

沼蛤又称淡水壳菜、湖沼股蛤,隶属软体动物门双壳纲贻贝目贻贝科沼蛤属,是淡水生态系统中的代表性污损贝类。沼蛤原产于亚热带地区,东南亚以及我国珠江流域都有分布,对于水环境变化具有极强的适应性,是一种重大入侵物种,目前已经成功入侵到全球众多水域(Xu, 2015)。在国内,沼蛤于 20 世纪 60 年代随船舶运输首先传入香港,然后又逐渐向北到达长江流域,近些年来借助南水北调等大型水利工程已经成功入侵到华北水域并形成种群(Morton, 2015; Wang *et al.*, 2022)。国际上,沼蛤分别于 1992 年和 2000 年左右随贸易货船在琵琶湖和日本东部地区两次成功入侵日本水域(Ito, 2015);对美洲地区的入侵则始于 1990 年左右,经船舶压舱水进入到阿根廷拉普拉塔河口水域(Oliveira *et al.*, 2015),目前已扩散到南美洲地区的大多数淡水河流和湖泊(Barbosa *et al.*, 2016)。

入侵成功的沼蛤能够利用其分泌的足丝结构(byssus)牢固黏附在多种水下物体表面,聚集形成贻贝床,引起严重的生物污损问题。沼蛤形成的贻贝床最高污损密度可达 $70 \text{ 万个} \cdot \text{m}^{-2}$,如此高的污损密度往往对当地水生生态系统健康造成严重影响,主要体现在以下几方面:聚集的沼蛤大量滤食水体中的浮游动植物,与本地水生生物争夺生存空间,改变大型无脊椎动物特别是与其生活习性相似的贝类的群落结构,导致本地水生生物多样性降低(Boltovskoy *et al.*, 2015a; Frau *et al.*, 2016; Molina *et al.*, 2015; Penchaszadeh *et al.*, 2000; Sylvester &

Sardiña, 2015);沼蛤的大量滤食显著降低水体中颗粒有机物浓度,增加氨氮、硝酸盐和磷酸盐等污染物浓度,带来富营养化风险(Boltovskoy *et al.*, 2015a; Pazos *et al.*, 2020);聚集的沼蛤一旦大量死亡,还会产生 3-甲基吡啶和 1-辛烯-3-醇等有毒有害物质,导致水质恶化(李荣等, 2022)。除上述生态系统健康外,沼蛤污损也影响当地经济和社会发展,包括引起水下设施表面腐蚀,降低船舶航行能力、管道输水能力和工业设施使用年限(Boltovskoy *et al.*, 2015b);堵塞管道和设备,导致机器停转、工厂停工(Boltovskoy *et al.*, 2015b);争夺营养,造成周围养殖物种大量死亡,降低养殖行业产量(Silva *et al.*, 2016)。在水力发电行业,仅巴西一个国家每年因为沼蛤生物污损问题造成的经济损失就高达 1.2 亿美元(Rebelo *et al.*, 2018)。中国也是遭受沼蛤生物污损影响较为严重的国家之一,虽然目前我国北方地区分布的沼蛤尚未泛滥成灾,但在珠江流域该问题已经十分严重,每年大约需要花费 124 亿美元来清除附着在输水管道上的沼蛤(田勇等, 2020; Li *et al.*, 2021)。由此可见,沼蛤生物污损问题已经成为全球水生态系统健康和重要行业发展的潜在威胁,开展沼蛤生物污损治理即抗污损(anti-fouling)工作必要且紧迫,对维护水生生态系统安全和可持续发展意义重大。

深入了解沼蛤生物学特性和污损发生机制是开展污损治理工作的前提。研究表明,沼蛤生物污损依赖于足丝在水下基质材料表面的黏附行为,多种特异性蛋白组分参与了足丝黏附行为的发生(Li *et al.*, 2021)。目前,已从沼蛤足丝中分离和鉴定了多种蛋白组分,主要包括足蛋白(Fps)、胶原蛋白(preCols)和基质蛋白(PTMP 和 TMP)3 大类。它们在足丝整体结构稳定、足丝固化以及基质材料界面黏附过程中发挥重要作用(Li *et al.*, 2018; Ohkawa & Nomura, 2015)。这些蛋白由足组织中的足丝腺合成并分泌,固化形成的足丝主要有足丝盘、近端足丝线和远端足丝线。足丝线赋予足丝强大的抗拉伸性能,而足丝盘则增加了足丝与水下表面的接触面积,这些结构特征使沼蛤足丝的黏附变得更加牢固且有韧性。结合沼蛤的生物学特性和黏附特征,近些年来人们制定了多种抗污损措施,这些措施按照原理可以分为物理法(如人工清除、过滤、温度控制、封闭缺氧、脱水干燥和水动力学控制

等)、化学法(氧化试剂、杀虫剂和微囊化饵料等)、生物法(天敌投放和基因工程等)和防污材料法(涂料和涂层等)等几个类型,为降低沼蛤生物污损风险、减轻行业损失做出了贡献。

虽然人们在沼蛤污损方面已经进行了多方面的探索,但缺乏对它们的系统梳理和全面总结,不利于防污措施的创新和发展。基于此,本文综述了国内外近年来关于沼蛤生物学特性、污损机制和防污措施方面的研究进展,以期更加深入地了解沼蛤生物污损现象,为揭示其污损机制、制定科学有效的防污措施、维护水生生态系统安全提供数据支撑。由于水生生物的污损机制也是高性能水凝胶等生物材料制备的理论基础,所以综述内容对于水下仿生材料研发也具有重要的参考价值。

1 沼蛤污损的生物学基础

沼蛤污损的发生有着广泛的生物学基础,最突出的特点包括其强大的发育和繁殖能力、足丝分泌能力和环境适应能力,这些都有助于实现沼蛤种群密度快速上升、黏附能力迅速提高以及在各种不利环境条件下的生长。沼蛤寿命通常为2~3 a,最长可达5 a(宋美华等,2020)。繁殖执行R选择策略,繁殖能力极强(于丹丹等,2016)。根据形态差异,可将其生活史划分为幼虫期、幼贝期与成贝期3个主要发育阶段。沼蛤发育周期较短,幼贝生长到5 mm时便分化出雄性和雌性,生长到6 mm时即可达到性成熟(Darrigran,2002)。在25℃下,从受精卵开始发育至幼虫期结束仅需13 d左右,其间依次经历配子发生期、担轮幼虫期、面盘幼虫期和蹀行幼虫期等几个重要形态时期。沼蛤进行体外受精,受精后6~7 h到达担轮幼虫阶段。20 h后出现面盘幼虫,并开始进入浮游生活阶段。发育6 d后产生蹀行幼虫,并相继长出胚壳I和胚壳II,游泳行为不再活跃,倾向于下沉至底部活动。从第13天开始,沼蛤足便开始发育,进入幼贝时期(Cataldo,2015)。沼蛤从受精卵开始到发育至性成熟,经历的时间显著低于其他淡水和海洋贝类。这些繁殖和发育特征说明,沼蛤在适宜环境条件下可实现快速发育和生长,并在短时间达到一定密度和生物量,为沼蛤生物污损的发生奠定了基础。

进入蹀行幼虫期后,沼蛤逐渐发育出肌肉发达、运动能力强且能够分泌足丝蛋白的足。足可以伸出贝壳探测水下表面性质,若表面适宜便开始分

泌蛋白、合成足丝从而产生黏附行为,若表面不适宜则会继续探测寻找新的基质(Morton,2015)。沼蛤生物污损的发生与其足丝结构的黏附行为密不可分。足是分泌足丝蛋白、合成足丝的重要器官,主要由上皮组织、结缔组织和肌肉组织组成。沼蛤的足呈扁平状且肌肉发达,有利于沼蛤与水下基质表面接触(Iwasaki,2015)。足表面被纤毛覆盖,近端纤毛直径0.2 μm、远端部分直径0.1 μm并以圆形尖端结束,这种形态特征有利于沼蛤在运动过程中以范德华力为基础在基质表面发生临时吸附。足的腹侧部分有一条腹沟,约占足部长度的60%。腹沟内侧分布多种腺体,包括附属腺、胶原腺和酚腺等,分别负责分泌足蛋白、胶原蛋白和基质蛋白等三大类组装成足丝的功能蛋白(Andrade *et al.*, 2015)。这些蛋白沿着腹沟被释放到水体中,随即固化形成足丝。大量纤毛结构分布在腹沟内表面,有助于足丝蛋白的释放和运输。足丝黏附趋于稳定后,沼蛤不再移动,由幼虫期进入幼贝期直至成贝期。成贝期的沼蛤体长2~3 cm,足丝分泌能力很强,每个个体可以分泌多达40~50根的足丝。这些足丝具有优异的黏附力学性能,辅助沼蛤在水下基质表面大量聚集,为沼蛤生物污损的发生提供了必要条件。

此外,黏附在基质表面的沼蛤能承受剧烈的水环境条件(如温度、盐度、pH值、干旱、缺氧等)变化和其他外部力量的威胁(如捕食、水流冲刷等),保证自身在多变的淡水环境中仍能正常繁衍生息(Karatayev *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2020; Morton, 2015; Sylvester & Sardiña, 2015)。对水体环境变化的极强适应性,也成为沼蛤污损发生的生物学基础,给生物污损治理带来极大困难。

2 沼蛤污损的作用机制

足丝在水下基质材料表面的黏附是沼蛤污损的主要机制,而对基质材料的探测则是沼蛤污损发生的首要过程。沼蛤足探测并识别水下基质表面的机制目前并不十分清楚,但已有报道显示,海洋贻贝的足在接触基质以后前端会首先形成一个小窝结构,利用该结构中的空气负压暂时吸附在基质表面。这一小窝结构为足丝形成创建了一个具有极端条件的绝缘反应场所,具有低pH、低离子强度和高还原平衡等性质,使足丝蛋白能够发生流体-流体相分离以及表面吸附和扩散,形成微结构并

最终固化形成足丝 (Waite, 2017)。笔者观察到, 沼蛤足丝黏附过程中足的作用方式与海洋贻贝一致, 在足丝黏附之前沼蛤也会利用足来探测水下表面的性质以确定它是否进行黏附, 但具体作用机制还需要进一步研究确认。

足探测成功后, 沼蛤开始分泌足丝蛋白并形成足丝。足丝长度为 1.0~1.5 cm, 由光滑的外表皮和内部纤维状成分构成, 可以分成近端足丝线、远端足丝线和黏附盘 3 部分。近端足丝线直径 15~20 μm , 纤维状成分排列紧凑、结构致密, 具有较强的弹性和韧性; 远端足丝线直径为 25~30 μm , 纤维状成分较为松散, 内部丝状纤维之间有着明显的边界, 具有较强的刚性和抗拉伸性能。致密的近端足丝线可以让足组织在有限区域内分泌和合成大量足丝, 而松散的远端足丝线则有利于内部纤维成分的展开而形成面积更大的黏附盘 (Li *et al.*, 2018)。黏附盘位于足丝的末端, 表面积较大, 表皮光滑, 但与基质材料表面接触的一侧则较为粗糙, 底部孔洞结构较多, 可以调节蛋白质凝聚过程, 有利于足丝与基质表面的紧密结合。这些足丝是由不同的足丝蛋白固化形成的, 包括足蛋白、胶原蛋白和基质蛋白等。目前, 关于沼蛤足丝蛋白的研究较少, 与其他淡水污损贝类不同, 沼蛤足丝蛋白组成和性质更接近海洋贻贝 (Uliano-Silvam *et al.*, 2018)。沼蛤的足丝蛋白具有高含量的多巴 (3,4-二羟基苯丙氨酸, Dopa)、丰富的金属离子和典型的黏附蛋白重复序列及保守结构域 (Li *et al.*, 2018)。Ohkawa *et al.* (1999) 通过凝胶过滤、反相高效液相色谱等方法首次从沼蛤足丝中鉴定出富含 Dopa 的足蛋白 Lffp-1。Lffp-1 的分子质量为 96 ku, 其中 Lys、Tyr、Thr 和 Dopa 等占据了蛋白质氨基酸组成的 56% 以上。Ohkawa *et al.* (2015) 构建了一个沼蛤足组织的 cDNA 文库, 从 192 个随机选择的克隆中筛选出足蛋白 Lffp-2。在此基础上, Li *et al.* (2018) 结合转录组测序、质谱分析、蛋白质组测序等分析方法从沼蛤足丝中鉴定出 16 种与黏附行为密切相关的蛋白组分, 包括沼蛤足蛋白 (如 Lffp-1、Lffp-2 和 Lfbp-3 等)、相关酶类、细胞骨架蛋白和其他功能蛋白, 进一步分析初步揭示了这些蛋白在足丝黏附过程中的重要作用。目前, 相比于其他足丝蛋白, 足蛋白 Lffp-2 研究较为深入。Lffp-2 在沼蛤足丝中的丰度最高, 序列长度为 176 个氨基酸, 富含能够与金属

离子互作的表皮生长因子 (EGF) 结构域, 与金属离子介导的足丝黏附蛋白之间的交联机制有关。这些蛋白赋予足丝很强的黏附力和内聚力, 决定了沼蛤可以牢固黏附在各种基材表面而不发生断裂, 产生生物污损。

沼蛤足丝蛋白的黏附力和内聚力依赖于 Dopa。Dopa 是酪氨酸羟基化的产物, 在贝类足丝蛋白交联、足丝蛋白界面黏附机制中起重要作用。针对海洋贻贝足丝的研究显示, Dopa 可通过其结构中的邻苯二酚 (又称儿茶酚) 增强足丝与基质表面的界面黏附作用。邻苯二酚结构非常简单, 仅由带有 2 个相邻羟基的苯环组成。但邻苯二酚具有形成各种化学相互作用的能力, 包括氢键、 π - π / π -阳离子相互作用、金属-邻苯二酚配位键、氧化交联和静电相互作用等 (Forooshani & Lee, 2017)。邻苯二酚能够通过羟基取代水分子建立双齿氢键, 从而使足丝蛋白直接黏附在亲水基材表面上 (Mian *et al.*, 2011)。邻苯二酚的苯环能够通过 π - π 电子相互作用与其他芳环发生相互作用, 这一反应不但可以提高含邻苯二酚聚合物的内聚性能, 还能使足丝蛋白稳定黏附在富含芳香族化合物的材料表面上, 例如聚苯乙烯、石墨烯、碳纳米管或苯酚等 (Forooshani & Lee, 2017; Saiz-Poseu *et al.*, 2019)。芳香环还可以与阳离子形成 π -阳离子相互作用, 增强邻苯二酚对带电表面的吸附, 并有助于提高其与阳离子官能团的内聚性能 (Das *et al.*, 2015)。邻苯二酚可以螯合多种金属离子形成可逆络合物 (Lee *et al.*, 2006), 还能与金属氧化物表面形成强的可逆的界面键 (Wei *et al.*, 2016)。这一系列反应使得分布在足丝外表皮的 Dopa 能够辅助足丝蛋白之间相互交联而形成坚硬结构, 对于足丝具有保护作用, 同时也使分布在黏附盘底部的 Dopa 可以通过多种化学作用完成对不同材料基质的界面黏附。在沼蛤足丝中, Dopa 主要分布于外表皮和黏附盘底部 (Li *et al.*, 2018), 上述一系列作用在沼蛤足丝中是存在的, 是沼蛤足丝结构稳定和界面黏附发生的主要机制, 也是沼蛤能够黏附到水下基质如岩石、金属材料等表面的主要驱动力。

由于足丝蛋白在沼蛤污损机制中起关键作用, 一些可以改变蛋白黏附状态的因素能够影响沼蛤的污损能力, 如金属离子、化学氧化试剂以及基质材料表面性质等。分析表明, 沼蛤足组织和足丝中

都富含金属离子, Ca^{2+} ($35.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、 Mg^{2+} ($26.37 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、 Zn^{2+} ($23.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、 Al^{3+} ($3.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)和 Fe^{3+} ($1.65 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)等含量较高(Li *et al.*, 2018)。金属离子与沼蛤足丝蛋白之间产生相互作用,主要体现在以下几方面:首先,金属离子通过与特定氨基酸残基结合,增强 Lffp-2 与其他足蛋白之间的相互作用,提升黏附盘的内聚力(Hwang *et al.*, 2010);再次,金属离子可以通过与邻二苯酚的螯合作用对足丝蛋白的自组装和多巴氧化交联产生影响(Lee *et al.*, 2006);此外,金属离子还影响足丝的机械性能,足丝线的强度往往随金属离子浓度的变化而变化(Li *et al.*, 2017)。因此,环境中金属离子种类和浓度的变化可以降低沼蛤的污损能力。此外,Dopa 容易被氧化形成多巴醌,化学氧化剂如 NaClO 、磁性纳米颗粒如 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-NPs}$ 等能影响水体氧化还原状态的环境因子已经被证实可以通过改变足丝蛋白中 Dopa 的氧化还原状态、足丝蛋白表达、足丝蛋白与金属离子结合能力等过程而降低沼蛤的污损能力(Li *et al.*, 2019, 2021)。

3 沼蛤污损的控制措施

3.1 物理法

手动/机械清洁。该方法主要使用特定机械设备(如高压水枪)对表面进行清洗或刮擦,清除黏附在基质表面的污损生物。这种方法对沼蛤的清除力度大,是目前沼蛤污损治理的常用方法。该方法的弊端在于,清理过的基质表面会被新生的沼蛤取代,同时会腐蚀或损坏表面结构,从而降低某些水下设施的使用年限。如果需要到基质表面进行彻底清洁,还需承担系统关闭所造成的损失(Boltovskoy *et al.*, 2015c)。

过滤。对于相对较小的水体,可以使用介质过滤器(例如砂滤器)或机械自清洁过滤器等进行清除(Claudi & Oliveira, 2015a)。这些过滤器能够清除尺寸大的沼蛤($200 \mu\text{m}$ 以上),但对治理沼蛤幼虫效率不高。例如,琅琊山抽水蓄能电站的冷却水管系统进水端虽然安装了孔径为 300 和 $50 \mu\text{m}$ 的2种过滤器,但是运行一段时间后发现管道内仍有少许沼蛤附着(徐梦珍等, 2016)。

温度控制法。温度是常规的环境因子之一,过高或过低的温度都对水生生物的生长和存活具有十分严重的影响(鲁耀鹏等, 2017)。沼蛤适宜存活的温度为 $0 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$, 较高高温条件下的个体活性强

于低温,高温条件下的死亡率较高(魏小熙等, 2016a; Karatayev *et al.*, 2015)。利用该特性可采取如下2种热处理措施治理沼蛤:(1)恒定速率升温法。测试表明,在每5、15或30 min 升温 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的速率下,当温度达到 $43.6 \sim 50.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,沼蛤历经 $1.8 \sim 15.3 \text{ h}$ 后全部死亡。(2)高温水浴法。迫使沼蛤长期暴露于恒定高温条件下直到全部死亡。测试表明,水浴温度为 $34 \sim 36 \text{ }^\circ\text{C}$ 的环境下,沼蛤的死亡时长为 $25.0 \sim 644.3 \text{ h}$;水浴温度为 $38 \sim 44 \text{ }^\circ\text{C}$, 沼蛤的死亡时长为 $0.7 \sim 17.5 \text{ h}$;当水浴温度大于 $55 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,沼蛤瞬间死亡(魏小熙等, 2016b; Perepelizin & Boltovskoy, 2015a)。目前,高温水浴法是控制沼蛤生物污损较为有效、环保和经济的方法之一,但高温处理易引起基质表面损伤、加速设施老化。

封闭缺氧法。氧气是沼蛤生存必不可少的条件,在溶解氧小于 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,沼蛤的死亡时长为 $10 \sim 29 \text{ d}$ 。当环境温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,体长小于 7 mm 的沼蛤耐受性低于个体大于 20 mm 的沼蛤(Perepelizin & Boltovskoy, 2015b)。缺氧控制法是一种经济且环保的沼蛤污损控制方法,但是治理过程需要设施停止运行,所需时间较长。

脱水干燥法。沼蛤暴露在干燥的空气中时可存活 $3 \sim 10 \text{ d}$ (魏小熙等, 2016a)。利用该特性研发出的脱水干燥法是一种经济且对环境友好的方式,但需要设施停止工作且处于脱水状态,因此操作过程受到多种因素限制。

水动力学控制法。该方法主要包括流速控制和湍流控制,适用于清除管道中的沼蛤(Xu, 2013)。沼蛤在管线上稳定污损的流速范围为 $0.3 \sim 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 当流速为 $0.4 \sim 0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时污损密度最大,水流速度超过 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的管线中基本没有沼蛤污损发生(徐梦珍等, 2012; 叶宝民等, 2011; Zhao *et al.*, 2019)。湍流主要用于控制沼蛤幼虫,高频脉动湍流场可使幼虫破碎受损,其作用效果与作用时间呈正相关(张晨笛等, 2016)。

3.2 化学法

氧化剂。一定浓度的氧化剂可以通过迫使沼蛤贝壳紧闭来阻断其与外界进行物质循环和能量交换,从而达到灭杀沼蛤的目的。常用的化学氧化剂主要包括次氯酸钠、氯胺 T、高锰酸钾、过氧化氢和二氧化氯等。魏小熙等(2016c)设置了 50 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 2个实验条件来测评沼蛤在各类氧化剂作

用下的死亡特性和足丝溶解特征。次氯酸钠能够较好地灭杀沼蛤,在低浓度次氯酸钠对沼蛤的灭杀研究中,次氯酸钠的最佳浓度为 $1\sim 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在封闭静态浸泡状态下,沼蛤历时 3 d 死亡率可达到 90% 以上;在动态水流模拟状态下,死亡时间较静态处理晚 1 d 左右。香港供水系统中,一般首先使用 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的高浓度次氯酸钠来处理高密度的沼蛤,低浓度 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 控制沼蛤密度的增加,每隔 2~3 个月重复一次可以有效保持管道畅通,还可以防止沼蛤幼虫在系统中的沉降(倪杭娟等,2021;魏小熙等,2016c; McEnulty *et al.*,2001)。

pH 调节剂。该方法将水体的 pH 值调节到沼蛤的耐受范围之外,从而杀死沼蛤。Montresor *et al.* (2013) 测试出 NaOH 浓度在 $40\sim 800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 范围为 11.24~13.04 时,沼蛤的半数致死浓度 LC_{50} 在 48 h 时为 $344.95\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,72 h 时为 $113.14\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,96 h 时为 $88.51\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。2000 年,地处巴西的 Salto de Cashias 水力发电厂的沼蛤污损密度高达 $15\text{ 万个}\cdot\text{m}^{-2}$,厂方采取措施将水体的 pH 值保持在 9.0 左右,12 个月后实现了对 99% 污损沼蛤的有效控制(Claudi & Oliveira,2015b)。

硫酸铜。铜会对水生生物尤其是软体动物产生亚致死效应,包括生长速度下降、生殖障碍、酶活性抑制、蛋白质和 DNA 合成减少或改变、细胞骨架改变以及 ATP 合成和 Ca^{2+} 稳态的破坏等(Clayton *et al.*,2000)。Soares *et al.* (2009) 评估了硫酸铜对沼蛤的毒性,测出铜浓度的平均、最小和最大 LC_{50} 和 LC_{95} 值分别为 2.16、1.70、2.65 和 4.86、3.97、6.47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表现出一定的沼蛤污损治理潜力。

饵料法。利用沼蛤滤食性开发的微囊化饵料是氯化钾和季铵的混合物,包衣由淀粉黏结剂、油和蜡的混合物制成。Calazans *et al.* (2003) 测试了微囊化饵料的作用效果,处理 48 h 后,微囊化饵料的 LC_{50} 为 $270.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,传统氯化钾溶液的 LC_{50} 为 $1439\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,微囊化氯化钾的 LC_{50} 为 $8336.7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,微囊化饵料的毒性是溶解性氯化钾的 5.3 倍,是微囊化氯化钾的 9.4 倍。微囊化饵料将化学试剂包裹在营养涂层中,减少其在环境中的残留,同时最大限度降低沼蛤关闭贝壳的防御性反应。

其他化学试剂。MXD-100、BULAB 6002、二癸基二甲基氯化铵(H-130)和氯硝柳胺也是被测试使用过的沼蛤杀灭试剂。MXD-100 是由香港 Max-

clean 公司研发的一种防污抗菌剂。Montresor *et al.* (2013) 通过一系列实验证实, MXD-100 浓度在 $0.05\sim 500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, LC_{50} 在 48 h 时为 $45.49\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,72 h 时为 $13.69\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,96 h 时为 $11.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在巴西, MXD-100 在应用时通常持续 90 d、每天 3 次、每次 10 min、 $1\sim 7\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可以消除新黏附的沼蛤个体,是一种针对沼蛤污损的有效治理方法(Claudi & Oliveira,2015b)。BULAB 6002 是一种液态阳离子聚季铵化合物,常用于控制湖泊中的藻类,也是一种有效的沼蛤杀灭试剂(Claudi & Oliveira,2015b)。Darrigran *et al.* (2001) 测试了聚季铵化合物对平均大小 $262.5\text{ }\mu\text{m}$ 的沼蛤幼虫的处理效果,实验将幼虫分别放置在 1、2、4、8 和 $16\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的季铵聚合物中 24 h,结果显示可用于沼蛤幼虫的杀灭,但是使用的浓度无法在 24 h 内获得 100% 死亡率所需的剂量。H-130 是一种非氧化性试剂,含有季烷基铵溶液,常用作工业直流淡水冷却水系统中的杀螺剂(Claudi & Oliveira,2015b)。Cataldo *et al.* (2003) 分别在 15、20 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下测试了浓度为 2.5、5、10、20 和 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 H-130 对沼蛤的杀灭效果,表现出较好的应用潜力。氯硝柳胺是一种被世界卫生组织批准使用的软体动物灭杀剂。该试剂不能持久存在于水环境中,在天然水体和沉积物系统中可通过水解、光解和微生物降解去除(Dawson,2003)。Cataldo *et al.* (2003) 测试了 0.25、0.5、1、2、4、6 和 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯硝柳胺对沼蛤的杀灭效果,发现处理 48 h 后 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯硝柳胺会导致超过 80% 的沼蛤群体死亡, $1\sim 2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时死亡率为 60%~70%,而 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氯硝柳胺仅能杀死不到 20% 的沼蛤。Sanson *et al.* (2020) 进一步研究发现,该试剂能够引起沼蛤基因表达的显著变化,是氯硝柳胺杀灭沼蛤的主要分子机制。

3.3 生物法

天敌捕食法。在生态允许范围内,捕食性鱼类可以限制沼蛤种群密度,通过该方法可以控制沼蛤污损程度(徐梦珍等,2016)。González *et al.* (2020) 研究表明,鱼类对沼蛤的丰度具有自上而下的影响,将具有强壮牙齿或坚固齿列的捕食性鱼类、能够直接摄取沼蛤无需粉碎捕食性鱼类、在摄食时经常食用沼蛤的草食性鱼类、使用鳃耙过滤浮游生物鱼类组合在一起,可以持续抑制沼蛤生长。在我国黄河某地表水厂的沼蛤防治过程中,人

们先在水沉砂池投放青鱼、鲤鱼、鲢鱼各 20000 尾,然后连续 3 a 按 1:1:1:1.7 的比例补充投放青鱼、草鱼、鲤鱼和鲢鱼,沉砂池内的沼蛤逐年减少(宋美华等,2020)。

基因驱动法。目前沼蛤的基因组已经测序完成,科学家们参考已有的案例将 CRISPR-Cas9 系统引入到沼蛤生育相关编码基因的敲除工作中,试图在自然种群中诱导沼蛤不育,阻止沼蛤繁衍生息(Rebelo *et al.*, 2018)。这种基因改造模式理论上可达到限制沼蛤种群增长的目的,但此类方法目前无法在实验室条件下获得大规模胚胎,且在环境中容易引发转基因风险(Hammond *et al.*, 2016; Rebelo *et al.*, 2018; Uliano-Silva *et al.*, 2018),其应用效果和前景还有待科学评估。

3.4 防污材料法

沼蛤的黏附往往对材料有一定的偏好性,因此基质材料也是影响沼蛤污损能力的主要因素(徐梦珍等,2012)。防污材料法主要通过材料表面释放有毒物质来灭杀沼蛤,或通过抑制足丝合成和黏附来达到防污目的。防污涂料或涂层一般由高分子树脂、防污剂、助剂、填料和溶剂等组成,其中防污剂起到杀死沼蛤或抑制足丝黏附的作用。在实际应用中,对于新的设施在系统允许的情况下可以直接使用防污材料替代,而对于陈旧设施的改造则可以在设施表面涂覆防污涂层,以起到防污的作用。

在常用涂料涂层中,硅胶和环氧树脂涂层表现出良好的沼蛤防污性能(华丕龙等,2015;徐梦珍等,2016;杨永民等,2021;姚国友等,2016;郑航桅和潘志权,2021;Faria *et al.*, 2006; Matsui *et al.*, 2001, 2002; Ohkawa *et al.*, 2001)。硅胶是一种表面自由能和氢键成分都较低的非极性表面,环氧树脂则是一种典型三维网状交联结构的热固性聚合物,这 2 种材料的显微硬度小、接触角大、耐久性强,经测试涂,有这 2 种涂层的材料表面基本没有沼蛤黏附,防污效果较好(姚国友等,2016;杨永民等,2021)。在防污材料中,铜基材料对沼蛤生物污损有很强的驱避作用,氧化亚铜(Cu_2O)是使用最广泛的氧化物金属材料之一(Matsui *et al.*, 2019)。Bergmann *et al.* (2010)评估了氧化亚铜和铜作为涂料和基材对沼蛤的毒性作用,结果表明,与同期浸没的陶瓷基板相比,10%常规氧化铜涂层可以减少 85.85% 沼蛤污损,未涂层的铜基材可以减少

58.59% 沼蛤污损。Matsui *et al.* (2019)对砂浆、聚氨酯树脂涂层砂浆、木材、石灰石、铜、铝和不锈钢等基材进行了为期 4 a 的浸泡实验,结果表明,除铜以外,其他材料上的沼蛤数量没有显著差异,缺乏防污效果,显示出铜及铜类化合物基材料在沼蛤杀灭和污损防控方面的优越性。但 Cu_2O 在淡水环境中的溶解度很低,也不可生物降解,容易产生持续的污染,因此不能应用于饮用水系统(Bergmann *et al.*, 2010; Pereira *et al.*, 2010)。

4 结论与展望

本文综述了近些年来沼蛤污损的生物特性、污损机制和防污措施方面的研究进展,特别是针对繁殖和发育能力、足丝分泌能力和环境适应能力等沼蛤污损的生物学基础,足探测过程、足丝黏附、环境影响等污损机制,以及物理法、化学法、生物法和防污材料法等多种防污措施进行了全面总结。

沼蛤生物污损依赖于足丝在水下基质材料表面的黏附行为。现有证据表明,沼蛤首先通过足探测并识别水下基质性质,吸附并分泌足丝蛋白,最终固化形成足丝。足丝蛋白富含 Dopa, Dopa 与基质材料之间的界面黏附以及 Dopa 介导的足丝蛋白之间的相互作用是决定沼蛤生物污损能力的关键。化学氧化剂、纳米颗粒等一些影响水体氧化还原状态的因子可以削弱 Dopa 与基质材料之间的界面黏附性能和足丝蛋白之间的相互作用,从而降低沼蛤生物污损的程度。然而,由于贝类足丝黏附蛋白的作用具有显著的物种特异性,目前关于沼蛤生物污损机制的了解特别是对于足丝蛋白组成、Dopa 功能以及它们在水下黏附过程中作用方式的了解还十分有限,各种防污材料和试剂对沼蛤足丝黏附的影响及其作用机制也尚未被完全阐明,在一定程度上限制了污损防控理论的发展与实践。因此,后续研究应在全面解析沼蛤足丝蛋白黏附机制的基础上,进一步阐明各种防污方法与沼蛤足丝黏附之间的关系,为后续从足丝黏附角度探索生物污损治理措施提供理论参考。

现有沼蛤的防污措施可以分为物理法、化学法、生物法和防污材料法等几大类。物理法是目前治理沼蛤污损最常用的方法,其优点在于能够有效清除沼蛤,但是该措施需要工厂、设施、设备等停工停产,实施期间需要投入大量的人力和时间进行处理,对设施表面损伤也较大,恢复供水后沼蛤污损

问题重新出现,所以只能作为短期沼蛤污损控制的方案。化学法是目前杀灭沼蛤较为有效的方法,但所使用的化学试剂往往较为昂贵,也会对水体造成二次污染,限制了一些化学试剂在不同领域的广泛使用。生物法虽然是一种环境友好的沼蛤污损治理措施,但该方法作用周期长、技术要求高,只能在一定程度上抑制沼蛤种群数量而不能彻底杀灭,在实际应用过程中使用率较低。防污材料法大多数都是通过材料自身或涂层涂料中有毒物质的释放来发挥作用,虽然可以达到广谱防污的目的,但是也具有二次污染、防污性能时效性差、价格昂贵等问题,在某些领域被限制使用。微囊化饵料方法似乎弥补了上述大部分方法的不足,具有环境友好等特点,在沼蛤污损治理过程中具有广阔的应用前景。就目前进展来看,新研发的一些有效的沼蛤防污措施大多处于实验室测试阶段。未来关于沼蛤防污的研究方向应主要集中在新型防污材料和试剂的开发与利用上,进一步设计绿色环保、经济有效、不释放有毒有害物质的新型环保材料和制剂,将基于实验室研发并测试的防污方法更好地应用到生产实际中。

参考文献

- 华丕龙,何涛,何直,姚国友,2015. 防护材料防止淡水壳菜附着的试验研究. *水电站机电技术*, 38(12): 4-7.
- 李荣,胡建坤,王霖,闫慧敏,汪艳丽,王伟,2022. 淡水壳菜对原水水质的影响. *净水技术*, 41(2): 47-52.
- 刘艳,吴惠仙,薛俊增,2013. 海洋外来物种入侵生态学研究. *生物安全学报*, 22(1): 8-16.
- 鲁耀鹏,王冬梅,张秀霞,李军涛,郑佩华,冼健安,2017. 淡水螯虾生理生态学与环境毒理学研究进展. *生物安全学报*, 26(4): 266-272.
- 倪杭娟,张秋勉,郭应达,2021. 次氯酸钠浸泡法脱除原水管壁淡水壳菜试验. *净水技术*, 40(5): 131-134.
- 宋积文,董艳红,李海涛,赵研,2015. 中国近海入侵贝类及其影响. *生物安全学报*, 24(3): 177-183.
- 宋美华,张保祥,刘健,卜庆伟,张凌晓,林琳,唐漪,2020. 调水工程中淡水壳菜防治方法研究. *中国农村水利水电* (7): 95-99.
- 田勇,张爱静,王树磊,徐梦珍,2020. 输水工程中淡水壳菜生物污损影响及防治对策研究. *水生态学杂志*, 41(1): 110-116.
- 魏小熙,刘德富,杨正健,张佳磊,2016a. 水利工程污损生物沼蛤的物理去除技术研究. *长江科学院院报*, 33(10): 24.
- 魏小熙,杨正健,刘德富,马骏,谭纤茹,2016b. 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. *水力发电学报*, 35(3): 73-80.
- 魏小熙,杨正健,刘德富,谭纤茹,2016c. 输水系统中污损生物沼蛤的氧化剂灭杀技术研究. *中国农村水利水电* (5): 17-22.
- 徐梦珍,曹小武,王兆印,王旭昭,2012. 输水工程中沼蛤的附着特性. *清华大学学报(自然科学版)*, 52(2): 170-176.
- 徐梦珍,李威,于丹丹,强杰,胡志平,姚国友,2016. 抽水蓄能电站中淡水壳菜生物污损及防治. *水力发电学报*, 35(7): 75-83.
- 杨永民,潘志权,陈小丹,蔡杰龙,朱思军,赵可昕,2021. 防护淡水壳菜涂料性能分析及工程实践. *新型建筑材料*, 48(11): 77-81.
- 姚国友,徐梦珍,安雪晖,周建为,华丕龙,2016. 防附涂料的防附着与抗侵蚀性能试验. *水力发电学报*, 35(5): 31-39.
- 叶宝民,曹小武,徐梦珍,王兆印,林正傑,2011. 沼蛤对长距离输水工程入侵调查研究. *给水排水*, 37(7): 99-103.
- 于丹丹,唐洪武,徐梦珍,李威,王兆印,闵从军,2016. 抽水蓄能电站中淡水壳菜幼虫密度日波动机制. *水力发电学报*, 35(6): 74-79.
- 张晨笛,徐梦珍,王兆印,刘玮,于丹丹,王大强,2016. 沼蛤幼虫管道湍流灭杀试验研究 II: 灭杀效果. *水利学报*, 47(12): 1510-1518.
- 郑航桅,潘志权,2021. 淡水壳菜防治涂料对输水管涵糙率的影响及效益评价. *中国给水排水*, 37(24): 87-92.
- ANDRADE G R, DE ARAÚJO J L F, NAKAMURA FILHO A, GUAÑABENS A C P, DE CARVALHO M D, CARDOSO A V, 2015. Functional surface of the golden mussel's foot: morphology, structures and the role of cilia on underwater adhesion. *Materials Science and Engineering: C*, 54: 32-42.
- BARBOSA N P U, SILVA F A, DE OLIVEIRA M D, DOS SANTOS NETO M A, DE CARVALHO M D, CARDOSO A V, 2016. *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mollusca, Bivalvia, Mytilidae): first record in the São Francisco river basin, Brazil. *Check List*, 12: 1846.
- BERGMANN C P, MANSUR M C D, BERGONC P E A, PEREIRA D, SANTOS C P, BASEGIO T, VICENZ J, SANTOS S C A, 2010. Selection of materials and coatings for the incrustation control of the golden mussel in the hydroelectric power station of Ibitinga (SP, Brazil). *Material (Rio de Janeiro)*, 15(1): 21-30.
- BOLTOVSKOY D, CORREA N, SYLVESTER F, CATALDO D, 2015a. Nutrient recycling, phytoplankton grazing, and

- associated impacts of *Limnoperna fortunei* // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing; 153–176.
- BOLTOVSKOY D, XU M, NAKANO D, 2015b. Impacts of *Limnoperna fortunei* on man-made structures and control strategies: general overview // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing; 375–393.
- CALAZANS S H C, AMERICO J A, DA COSTA FERNANDES F, ALDRIDGE D C, DE FREITAS REBELO M, 2003. Assessment of toxicity of dissolved and microencapsulated biocides for control of the golden mussel *Limnoperna fortunei*. *Marine Environmental Research*, 91: 104–108.
- CATALDO D, BOLTOVSKOY D, POSE M, 2003. Toxicity of chlorine and three nonoxidizing molluscicides to the pest mussel *Limnoperna fortunei*. *Journal of American Water Works Association*, 95(1): 66–78.
- CATALDO D H, 2015. Larval development of *Limnoperna fortunei* // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing; 43–53.
- CHEN L, DUAN Y, CUI M, HUANG R, SU R, QI W, HE Z, 2021. Biomimetic surface coatings for marine antifouling: natural antifoulants, synthetic polymers and surface microtopography. *Science of the Total Environment*, 766: 144469.
- CHO J H, LEE J S, SHIN J, JEON E J, AN S, CHOI Y S, CHO S W, 2018. Ascidian-inspired fast-forming hydrogel system for versatile biomedical applications: pyrogallol chemistry for dual modes of crosslinking mechanism. *Advanced Functional Materials*, 28(6): 1705244.
- CLAUDI R, OLIVEIRA M D, 2015a. Alternative strategies for control of golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in industrial facilities // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing; 463–476.
- CLAUDI R, OLIVEIRA M D, 2015b. Chemical strategies for the control of the golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in industrial facilities // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing; 417–441.
- CLAYTON M E, STEINMANN R, FENT K, 2000. Different expression patterns of heat shock proteins hsp60 and hsp70 in zebra mussels (*Dreissena polymorpha*) exposed to copper and tributyltin. *Aquatic Toxicology*, 47(3/4): 213–226.
- DARRIGRAN G, 2002. Potential impact of filter-feeding invaders on temperate inland freshwater environments. *Biological Invasions*, 4: 145–156.
- DAS S, RODRIGUEZ N R M, WEI W, WAITE J H, ISRAELACHVILI J N, 2015. Peptide length and dopa determine iron-mediated cohesion of mussel foot proteins. *Advanced Functional Materials*, 25(36): 5840–5847.
- DAWSON V K, 2003. Environmental fate and effects of the lampricide bayluscide: a review. *Journal of Great Lakes Research*, 29: 475–492.
- FARIA E A D, BRANCO J R T, CAMPOS M D C S, OLIVEIRA M D, ROLLA M E, 2006. Study on antifouling properties of materials. *Journal of Mining School*, 59(2): 233–238.
- FRAU D, MOLINA F R, MAYORA G, 2016. Feeding selectivity of the invasive mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) on a natural phytoplankton assemblage: what really matters? *Limnology*, 17(1): 47–57.
- GONZÁLEZ-BERGONZONI I, SILVA I, TEIXEIRA DE MELLO F, D'ANATRO A, BOCCARDI L, STEBNIKI S, BRUGNOLI E, TESITORE G, VIDAL N, NAYA D E, 2020. Evaluating the role of predatory fish controlling the invasion of the Asian golden mussel *Limnoperna fortunei* in a subtropical river. *Journal of Applied Ecology*, 57(4): 717–728.
- GULE N P, BEGUM N M, KLUMPERMAN B, 2016. Advances in biofouling mitigation: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(6): 535–555.
- HAMMOND A, GALIZI R, KYROU K, SIMONI A, SINISCALCHI C, KATSANOS D, GRIBBLE M, BAKER D, MAROIS E, RUSSELL S, BURT A, WINDBICHLER N, CRISANTI A, NOLAN T, 2016. A CRISPR-Cas9 gene drive system targeting female reproduction in the malaria mosquito vector *Anopheles gambiae*. *Nature Biotechnology*, 34(1): 78–83.
- HWANG D S, ZENG H, MASIC A, HARRINGTON M J, ISRAELACHVILI J N, WAITE J H, 2010. Protein- and metal-dependent interactions of a prominent protein in mussel adhesive plaques. *Journal of Biological Chemistry*, 285: 25850–25858.
- IWASAKI K, 2015. Behavior and taxis of young and adult *Limnoperna fortunei* // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing; 249–260.
- ITO K, 2015. Colonization and spread of *Limnoperna fortunei* in

- Japan//BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel. Berlin: Springer International Publishing: 321–332.
- KARATAYEV A Y, BOLTOVSKOY D, BURLAKOVA L E, PADILLA D K, 2015. Parallels and contrasts between *Limnoperna fortunei* and species of *Dreissena*//BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel. Berlin: Springer International Publishing: 261–297.
- FOROOSHANI P K, LEE B P, 2017. Recent approaches in designing bioadhesive materials inspired by mussel adhesive protein. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 55(1): 9–33.
- LEE H, SCHERER N F, MESSERSMITH P B, 2006. Single-molecule mechanics of mussel adhesion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103: 12999–13003.
- LI S, LIU C, ZHAN A, XIE L, ZHANG R, 2017. Influencing mechanism of ocean acidification on byssus performance in the pearl oyster *Pinctada fucata*. *Environmental Science & Technology*, 51(13): 7696–7706.
- LI S, XIA Z, CHEN Y, GAO Y, ZHAN A, 2018. Byssus structure and protein composition in the highly invasive fouling mussel *Limnoperna fortunei*. *Frontiers in Physiology*, 9: 418.
- LI S, HEN Y, GAO Y, XIA Z, ZHAN A, 2019. Chemical oxidants affect byssus adhesion in the highly invasive fouling mussel *Limnoperna fortunei*. *Science of the Total Environment*, 646: 1367–1375.
- LI S, LI X, CHENG J, ZHAN A, 2021. Effectiveness and mechanisms of recoverable magnetic nanoparticles on mitigating golden mussel biofouling. *Environmental Science & Technology*, 55(4): 2500–2510.
- LIU W, XU M, ZHANG J, ZHANG T, 2020. Survival and attachment of biofouling freshwater mussel (*Limnoperna fortunei*) to environmental conditions: potential implications in its invasion, infection and biofouling control. *Limnology*, 21(2): 245–255.
- MATSUI Y, NAGAYA K, YUASA A, NARUTO H, YAMAMOTO H, OHKAWA K, MAGARA Y, 2001. Attachment strength of *Limnoperna fortunei* on substrates, and their surface properties. *Biofouling*, 17(1): 29–39.
- MATSUI Y, NAGAYA K, FUNAHASHI G, GOTO Y, YUASA A, YAMAMOTO H, OHKAWA K, MAGARA Y, 2002. Effectiveness of antifouling coatings and water flow in controlling attachment of the nuisance mussel *Limnoperna fortunei*. *Biofouling*, 18(2): 137–148.
- MATSUI K, FUMOTO T, KAWAKAMI H, 2019. Testing the repellent effects of construction materials on the attachment of the invasive golden mussel, *Limnoperna fortunei*, in a Japanese urban tidal river. *Limnology*, 20(1): 131–136.
- MCENNULTY F R, BAX N J, SCHAFFELKE B, CAMPBELL M L, 2001. A review of rapid response options for the control of ABWMAC listed introduced marine pest species and related taxa in Australian waters. *CSIRO Marine Research*. 23: 1–99.
- MIAN S A, GAO X, NAGASE S, JANG J, 2011. Adsorption of catechol on a wet silica surface: density functional theory study. *Theoretical Chemistry Accounts*, 130(2): 333–339.
- MOLINA F R, JOSÉOSÉ DE PAGGI S B, CÉSAR PAGGI J, 2015. Impacts of *Limnoperna fortunei* on zooplankton//BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel. Berlin: Springer International Publishing: 177–190.
- MONTRESOR L C, MIRANDA-FILHO K C, PAGLIA A, LUZ D M, ARAÚJO J M, SILVA M J D S, GERHARD L, MARTINEZ C B, VIDIGAL T H, 2013. Short-term toxicity of ammonia, sodium hydroxide and a commercial biocide to golden mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 92: 150–154.
- MORTON B, 2015. The biology and anatomy of *Limnoperna fortunei*, a significant freshwater bioinvader: blueprints for success//BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel. Berlin: Springer International Publishing: 3–41.
- OHKAWA K, NISHIDA A, HONMA R, MATSUI Y, NAGAYA K, YUASA A, YAMAMOTO H, 1999. Studies on fouling by the freshwater mussel *Limnoperna fortunei* and the antifouling effects of low energy surfaces. *Biofouling*, 13(4): 337–350.
- OHKAWA K, ICHIMIYA K, NISHIDA A, YAMAMOTO H, 2001. Synthesis and surface chemical properties of adhesive protein of the Asian freshwater mussel, *Limnoperna fortunei*. *Macromolecular Bioscience*, 1(9): 376–386.
- OHKAWA K, NOMURA T, 2015. Control of *Limnoperna fortunei* fouling: antifouling materials and coatings//BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel. Berlin: Springer International Publishing: 395–415.
- OLIVEIRA M D, CAMPOS M, PAOLUCCI E M, MANSUR M C, HAMILTON S K, 2015. Colonization and spread of *Limnoperna fortunei* in South America//BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei*: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel. Berlin: Springer In-

- ternational Publishing: 333–355.
- PAZOS R S, SPACCESI F, GÓMEZ N, 2020. First record of microplastics in the mussel *Limnoperna fortunei*. *Regional Studies in Marine Science*, 38: 101360.
- PENCHASZADEH P E, DARRIGRAN G, ANGULO C, AVERBUJ A, BROGGER M, DOGLIOTTI A, PIREZ N, 2000. Predation of the invasive freshwater mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857) (Mytilidae) by the fish *Leporinus obtusidens* Valenciennes, 1846 (Anostomidae) in the Rio de la Plata, Argentina. *Journal of Shellfish Research*, 19(1): 229–232.
- PEREPELIZIN P V, BOLTOVSKOY D, 2015a. Control of *Limnoperna fortunei* fouling by thermal treatments // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing: 443–449.
- PEREPELIZIN P V, BOLTOVSKOY D, 2015b. Control of *Limnoperna fortunei* fouling by oxygen deprivation // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing: 451–454.
- PEREIRA D, BERGMANN C P, MANSUR M C D, BERGONCI P E A, DOS SANTOS C P, BASEGIO T, VICENZI J, 2010. Evaluation of materials and coatings for controlling golden mussel *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857). *Biomas*, 23(2): 87–100.
- REBELO M F, AFONSO L F, AMERICO J A, DA SILVA L, NETO J L, DONDERO F, ZHANG Q, 2018. A sustainable synthetic biology approach for the control of the invasive golden mussel (*Limnoperna fortunei*). *PeerJ*, 6: e27164v3.
- SAIZ-POSEU J, MANCEBO-ARACIL J, NADOR F, BUSQUÉ F, RUIZ-MOLINA D, 2019. The chemistry behind catechol-based adhesion. *Angewandte Chemie International Edition*, 58(3): 696–714.
- SANSON A L, COSENZA-CONTRERAS M, DEMARCO R, NEVES L X, MATTEI B, SILVA G G, MAGALHÃES P H V, ANDRADE M H G, CASTRO-BORGES W, 2020. The golden mussel proteome and its response to niclosamide: uncovering rational targets for control or elimination. *Journal of Proteomics*, 17: 103651.
- SILVA F A, BARBOSA N P U, PAULA R S, CARVALHO V A, CORRÊA A, CARDOSO A V, DE CARVALHO M D, 2016. Brazilian gold bars: a dangerous intruder has been detected. *Science Today*, 57: 38–42.
- SOARES M F, PEREIRA D, SANTOS C P, MANSUR M C, PIRES M, BREINTENBACH J O, GRESPAN C, 2009. Toxicity of copper sulfate to golden mussel, *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857), in raw water. *Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology*, 4(1/2/3): 37–48.
- SYLVESTER F, SARDIÑA P, 2015. Relationships of *Limnoperna fortunei* with benthic animals // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing: 191–210.
- ULIANO-SILVA M, DONDERO F, DAN OTTO T, COSTA I, LIMA N C B, AMERICO J A, MAZZONI C J, PROSDOCIMI F, REBELO M D F, 2018. A hybrid-hierarchical genome assembly strategy to sequence the invasive golden mussel, *Limnoperna fortunei*. *Gigascience*, 7(2): 128.
- WAITE J H, 2017. Mussel adhesion-essential footwork. *Journal of Experimental Biology*, 220(4): 517–530.
- WANG H, XIA Z, LI S, MACLSAAC H J, ZHAN A, 2022. What's coming eventually comes: a follow-up on an invader's spread by the world's largest water diversion in China. *Biological Invasions*, 115: 1–5.
- WEI W, PETRONE L, TAN Y, CAI H, ISRAELACHVILI J N, MISEREZ A, WAITE J H, 2016. An underwater surface-drying peptide inspired by a mussel adhesive protein. *Advanced Functional Materials*, 26(20): 3496–3507.
- XU M, 2015. Distribution and spread of *Limnoperna fortunei* in China // BOLTOVSKOY D. *Limnoperna fortunei: the ecology, distribution and control of a swiftly spreading invasive fouling mussel*. Berlin: Springer International Publishing: 313–320.
- ZHAO N, XU M, BLANCKAERT K, QIAO C, ZHOU H, NIU X, 2019. Study of factors influencing the invasion of golden mussels (*Limnoperna fortunei*) in water transfer projects. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 22(4): 385–395.