

# 输水工程中淡水壳菜生物污损影响及防治对策研究

田勇<sup>1</sup>, 张爱静<sup>1</sup>, 王树磊<sup>1</sup>, 徐梦珍<sup>2</sup>

(1. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038;

2. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**淡水壳菜(*Limnoperna fortune*)是自然河流的滤食性底栖动物, 极易进入输水工程通道, 在输水结构上高密度附着生长, 造成生物污损, 降低输水效率, 威胁工程运行。本文介绍淡水壳菜的生态学特性, 分析生物污损对输水工程的不利影响, 总结目前已采取的防治措施及评估效果, 提出应深入开展生物污损风险评估及系统定量研究, 建立快速灵敏的监测预警体系等管理对策, 为输水工程运行管理提供参考。

**关键词:**输水工程; 淡水壳菜; 生物污损; 防治对策

**中图分类号:**TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2020)01-0110-07

淡水壳菜(*Limnoperna fortune*)学名沼蛤, 隶属于软体动物门双壳纲贻贝科, 体型近似三角形, 壳长一般为20 mm, 最长可达40~60 mm, 营附着或固着生活, 其对环境适应能力极强, 能够在低溶解氧、高水流流速的人工结构中生长(Xu et al, 2015)。在淡水壳菜繁殖期, 幼虫随水流进入输水工程结构及通道中, 高密度附着生长, 影响输水建筑物及设备的正常运行, 造成“生物污损”现象。淡水壳菜生物污损造成水工结构不同程度损坏的报道屡见不鲜, 早在上世纪70年代就报道了武钢冷却水管道被层层贝类附着并堵塞的事故(中国科学院水生生物研究所管道小组, 1979), 目前在淡水壳菜广泛分布的长江中下游及长江以南, 该地区的水利水电工程, 例如广州抽水蓄能电站、安徽琅琊山抽水蓄能电站、东深供水工程、龙茜供水工程、广东东湖水厂等, 均存在严重的生物污损问题(徐梦珍等, 2016; 李名进等, 2007; 董军等, 2005; 罗凤明, 2006; 叶宝民等, 2011)。近年来, 随着全球气候变暖现象的加剧, 淡水壳菜已被发现扩散分布于中国南北分界线靠北一侧, 如黄河流域一带, 甚至已经蔓延到北京地区(Demetrio, 2014), 例如北京十三陵抽水蓄能电站的引水隧洞及

冷却水系统也发现相似的生物污损问题。

近几年国内外学者对淡水壳菜生物污损的危害及其防治措施开展了广泛研究。本文在介绍淡水壳菜生态学特性的基础上, 分析淡水壳菜异常增殖对输水工程的影响, 总结已有的防治技术措施, 提出输水工程防治淡水壳菜污损的管理对策, 为输水工程运行管理提供参考。

## 1 淡水壳菜生态学特性

淡水壳菜生命周期短, 成长快, 繁殖能力强, 成体进入附着状态后一般不再移动, 以鳃滤食水中有机颗粒、藻类及原生动物为食, 其滤食速率与环境温度、溶解氧浓度有关(Xu et al, 2015)。水流流速及水中食物量对其生长也有影响, 丰富的食物和适宜的水流环境能够促进其快速生长和大量繁殖。另外, 淡水壳菜的滤食作用会影响水体与沉积物中有机物的迁移转化, 能从一定程度上改变水质(Demetrio, 2014)。

### 1.1 发育过程

当水温达到16℃时, 淡水壳菜进入繁殖期。我国淡水壳菜生活史历经成熟配子-受精卵-面盘幼虫(包括D-型幼虫、前期壳顶幼虫、后期壳顶幼虫)-蹀行幼虫-稚贝-成贝等阶段。具体发育过程为: 在亲贝体内完成受精, 受精卵在体内发育; 待发育到D-型幼虫阶段时, 幼虫进入水中开始浮游生活, 并逐渐经历浮游的前期壳顶幼虫、过渡期壳顶幼虫、后期壳顶幼虫; 随着浮游幼虫面盘结构和缘膜结构的脱落, 斧足逐渐形成, 进入匍匐的蹀行期; 此后随着足丝腺发育成熟开始分泌足丝, 进入利用足丝附着生

收稿日期: 2018-01-26

基金项目: “十三五”水专项南水北调中线输水水质预警与业务化管理平台(2017ZX07108-001); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主科研项目(2016-KY-04); 南水北调中线干线工程建设管理局科研项目(ZXJ/YW/JF-017)。

作者简介: 田勇, 男, 高级工程师, 主要从事水质保护方面研究。

E-mail: tianyong@nsbd.cn

通信作者: 徐梦珍。E-mail: mzxu@tsinghua.edu.cn

活的稚贝期,稚贝逐渐长大,进入稳定附着后基本不再移动,随着体长的增大逐渐成长为成贝(徐梦珍,2012)(图 1)。从生长速度来看,淡水壳菜第一年生长速度较快,约 8~10.5 mm/a,有的可达 12 mm/a,群体聚集的着生厚度达 2 cm 以上,第二年生长速度变缓(李名进等,2007)。

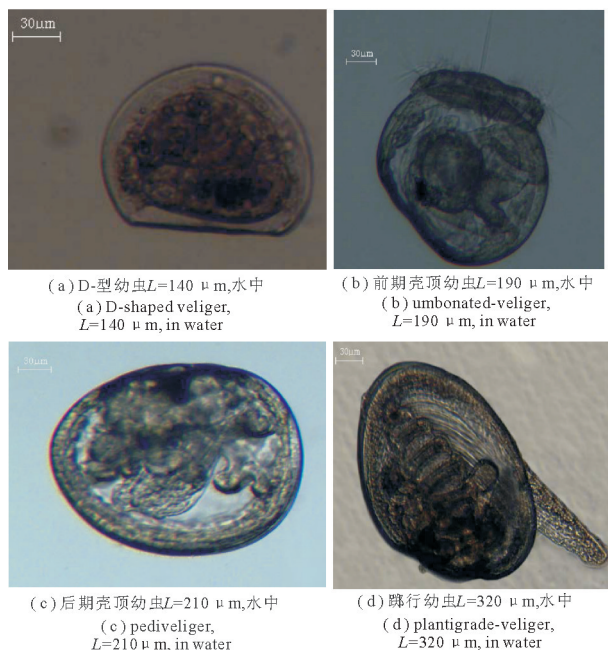


图 1 我国南方地区淡水壳菜幼虫发育阶段

Fig.1 Images showing developmental stages of *L. fortunei* veligers in southern China

## 1.2 附着特性

淡水壳菜幼虫进入蹀行期后逐渐进入附着生活,经历一段不稳定附着后进入稳定附着状态。不稳定附着阶段淡水壳菜幼虫体长约 200~400  $\mu\text{m}$ ,幼虫体长大于 450  $\mu\text{m}$  时进入稳定附着阶段,在正常流速下不会脱落。已经稳定附着的淡水壳菜生长体长大于 3 mm 时开始分泌足丝,淡水壳菜成体依靠足丝末端膨大的吸盘牢固附着在建筑结构壁面上。此外,淡水壳菜对附着材料表现一定的偏好性,在适宜的水流条件下,不稳定附着阶段喜好柔性的土工布材料,稳定附着阶段喜好竹排材料(徐梦珍,2012)。

叶宝民等调查研究输水结构中淡水壳菜的附着特性发现(叶宝民等,2011):(1)淡水壳菜侵入到输水结构后,附着密度随距取水口距离的增加呈指数衰减,局部工程结构变化可引起附着密度的局部波动;(2)输水断面平均流速长期保持在 1.2 m/s 以上或短期输水流速达到 2.0 m/s 时,能够有效抑制淡水壳菜的附着;(3)淡水壳菜附着密度越高,其足丝

对结构壁面的腐蚀作用越强,结构表面的腐蚀坑越深。具有防护涂层的压力管道壁面受淡水壳菜足丝的腐蚀程度相对较轻。

## 2 淡水壳菜生物污损的危害

淡水壳菜在输水管道、暗涵、水电厂冷却管道、水泵、闸门等人工系统中,在水流条件适宜(0.3~0.9 m/s)情况下(Xu et al,2013),异常增殖生长,影响工程的正常运行,引起“生物污损”现象,造成一定危害,目前报道的主要危害总结如下:

(1)淡水壳菜大量生长,附着厚度最大可达 10 cm,引起管道过流面积减小,管道糙率增大,输水效率降低。据有关研究,深圳市东江水源工程连续 2~3 a 不清洗管涵,淡水壳菜大量生长繁殖并缩减有效管径 5%(李名进等,2007),且东深供水工程太园反虹涵洞因淡水壳菜高密度附着,2005 年工程糙率从年初的 0.012 3 逐步增大至年底的 0.0167,增加 35.77%(李代茂,2009)。

(2)淡水壳菜在混凝土结构上附着会引起壁面腐蚀,成贝足丝能够分泌酸液,在足丝的物理侵入和化学腐蚀双重作用下,造成混凝土保护层的脱落,对混凝土结构强度、耐久性产生危害(李名进等,2007; Perez et al,2003)。以广州蓄能水电厂尾水隧洞受淡水壳菜污损后混凝土性能变化研究结果为例,淡水壳菜成贝附着后,混凝土表层吸水率显著增加(侵蚀 1 年,吸水率增加 79%,侵蚀 20 余年,吸水率增加 99%);混凝土材料不同尺寸的孔隙均有增加,尤其是 20 nm 以上有害孔和 200 nm 以上多害孔增加幅度较大;混凝土表观密度也有不同程度的下降,表层元素成分也发生改变,铝元素和铁元素大幅增加,钙元素大幅降低;混凝土的抗压强度,碳化深度增加(Yao,2017)。

(3)淡水壳菜呼吸作用会消耗水中的溶解氧,导致溶解氧降低,其呼吸代谢过程排泄氨氮等化学物质,对水质产生一定影响(Boltovskoy et al,2009),同时,淡水壳菜死亡后腐烂变质会产生的刺激性味道、以及腐败产生的大量霉菌也会对影响供水水质(Darrigran,2002;关芳等,2005)。

(4)供水及冷却水系统中的滤网、冷却器、水泵、闸门等设备上附着生长的淡水壳菜,易造成设备堵塞,金属结构腐蚀,过滤设备坏死,闸、阀门难以启闭等危害,直接影响生产,带来巨大的安全隐患和经济损失(Ricciardi,1998;徐梦珍等,2009),例如巴西 Parana 河及其支流上至少 33 座电站因为淡水壳菜

生物污损,造成闸门结构无法启闭,引发停机事故(Darrigran & Damborenea,2006)。

(5)淡水壳菜迅速增殖对水生生态系统产生多种影响(Boltovskoy et al,2009),一方面改变原水体中的底栖生物群落结构,例如,淡水壳菜的滤食作用可能会改变其他滤食性底栖动物的生物密度,或者通过附着在其他本地软体动物上造成这些物种的窒息死亡等,可能会引起底栖动物地区间的差异性缩小或消失(Lopes et al,2009),另一方面可能对水生食物链产生影响,例如偏好淡水壳菜的某些鱼类(如鲤鱼、青鱼、鲢鱼、卷口鱼等)会改变其原有食性,对原来的食物物种的捕食效率降低,可能会影响原有水生食物链的平衡(L'opez & Casciotta,1998)。总之,淡水壳菜对水利工程的输水通道及结构等的生物污损问题在国内外广泛存在,对人类生产生活造成了严重的经济、社会和环境损失,已成为世界性问题,对输水通道的污损防治十分紧迫。

### 3 淡水壳菜生物污损的防治技术现状

国内外学者将淡水壳菜作为自然水体的入侵物种开展了大量生物学方面的研究,在此基础上提出了相关的防治措施,从实验和工程应用角度开展了大量的防治效果评估,并尝试在实际中应用。表1中对目前已开展的各种防治方法的实用性和经济性进行了比较,总体上看,目前的防治方法仅限于小规模试验研究。

**人工刮除法:**对附着在工程物体表面的淡水壳菜成贝进行高压水冲、人工或机器刮除等强制去除的方法(McEnnulty et al,2001;Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries of Japan,2012)。清除施工需要在停水的情况下进行,会影响工程的正常运行,而且在铲刮过程中还会对结构壁面造成损伤,影响工程的使用寿命。对于大型输水工程中,工程停水检修期不定,该方法的可操作性较低。

**涂料防护法:**在水工建筑物表面涂刷各种防护涂料,提高壁面光滑度,减少淡水壳菜的附着量,或者在涂料中添加化学试剂,例如涂料中释放金属元素抑制贝类生长(罗凤明,2006),但涂料会对输水水质产生影响,且耐久性、经济性差。目前,输水工程的运行管理机构仍倾向于寻求高效且低污染的防附着材料进行防护,姚国友等(2015)等对目前市场上的混凝土表面防护材料进行防护机理及性能测试研究,将防护材料分为渗透结晶型、渗透憎水型和成膜型3类,并提出了防淡水壳菜附着涂料的快速评价

指标体系,可为未来防贝附着涂料的研发提供指导。

**化学灭杀法:**在水体中加入氯、双氧水、石灰、硫酸铜、钾盐、氧化铜、臭氧等杀贝剂(Kim et al,2011;Pereyra et al,2011;Calazans et al,2013),对淡水壳菜进行灭杀,传统的化学试剂灭杀法虽方便,但会影响输水水质,且成本较高,工程应用较困难。近年来部分新药剂逐渐用于淡水壳菜的灭杀研究中,例如聚季铵碱(AFP)是一种有效抑制淡水壳菜而不影响水质的化学试剂(Muschamp & Fong,2001)。此外,部分氨基复合物等抑制剂可以溶解淡水壳菜足丝蛋白,使贝类足丝断裂脱落(Fushoku & Bumon,1999),但目前这些新药剂仍限于试验尺度,缺乏工程实际应用。

**物理灭杀法:**在淡水壳菜幼虫阶段,通过紫外线照射、降温或升温、电磁、超声波处理、降低水中的溶氧量、施加电流电压等方式对幼虫进行灭杀或者破坏其正常的生存环境,抑制其附着繁殖,但大多数方法可操作性及经济性差,难以应用于大流量输水工程(McEnnulty et al,2001)。在已发生淡水壳菜成贝附着的防护中,在热水供应方便的工程中也有采用高温水灭杀附着的淡水壳菜的方法(莫顿,1982),以及利用淡水壳菜在水中溶解氧低于1.0 mg/L情况下会死亡的封闭缺氧法(Darrigran et al,2004),但这些方法只能用于小型输水管线,难以适用于长距离输水管线。

**生态水力学法:**徐梦珍(2012)研究了集吸附、沉降、高频脉动的综合生态水力学防治技术,具体包括:生物引诱附着法,利用淡水壳菜幼虫的附着特性,修建生物附着池,安装利于幼虫附着成长的附着竹排;生物沉降法,利用淡水壳菜幼虫的自身重量,自然沉到底部淤泥层后死亡,该方法虽有效,但沉降池需占用较大空间,制约其应用;高频脉动灭杀法,利用水流通过孔板产生的湍流将淡水壳菜幼虫杀死,此方法对幼虫的灭杀效果很好(Zhang et al,2017),但如果水体中有杂质时,往往会堵塞孔板,影响灭杀装置的正常运行。

总的来看,国内外对于生物污损的防治还没有一个较为成熟的方法,广泛使用的物理刮除、化学制剂灭杀、滤网拦截等方法易引起环境污染、结构壁面损伤等问题。因此,迫切需要寻找既持续有效,经济合理,又对输水供水无不利影响的新方法。近年发展起来的生态水力学防治方法,在试验尺度上防治效果良好,但仍需要在大规模工程应用尺度上开展大量的研究和应用实践。

表 1 国内外淡水壳菜生物污损的防治方法总结及效果评估

Tab.1 Prevention and control measures for *L. fortunei* biofouling and their effectiveness

防治方法	应用范围	效果评估
人工或机械刮除	国内外广泛使用	破坏输水管线壁面,淡水壳菜附着密度迅速恢复,效果不佳
取水口设滤网(Darrigran,2002)	国内外均有使用	滤网容易被堵塞失效,防治效果不佳
沙滤池过滤(姜康后等,1958)	国内试验	过水能力低,难以应用于大流量输水工程,实用性差
加大流速冲刷使附着的淡水壳菜脱落(向元龙,1985)	电厂冷却水管	可能造成输水通道气蚀,风险性大
管壁涂防附着涂料(罗凤明,2006)	国内试验	造成水质污染,且经济性差
化学杀虫剂(Yamada et al,1997)	日本试验	造成水质污染,价格昂贵
化学制剂抑制繁殖活动(Muschamp & Fong,2001)	美国试验	对水质产生影响,或出现其他不可预测危害的风险较高
足丝溶解法(Fushoku & Bumon,1999;Darrigran & Damborenea,2001)	南美、国内试验	淡水壳菜足丝断裂后可重新分泌足丝附着,效果不佳
离水干燥法(Darrigran et al,2004)	南美、国内试验	可用于小型输水管线,难以适用于长距离输水管线
封闭缺氧法(刘丽君等,2006)	深圳、香港试验	可用于小型输水管线,难以适用于长距离输水管线
高温水冲刷(莫顿,1982)	香港试验	仅在在热水供应方便的输水系统可用,推广性差
鱼类捕食等生物操纵法(Paolucci et al,2007)	南美试验	控制力度不足
综合生态水力法(徐梦珍,2012)	国内试验	试验效果良好,工程应用效果有待进一步验证
其他方法(降温或升温、电磁、超声波、降低水中溶氧量等)(McEnnulty et al,2001)	南美、日本、国内试验	可操作性差,且经济性差

#### 4 淡水壳菜生物污损防治管理对策

输水工程特别是跨流域输水工程,为淡水壳菜的输入修建了“高速公路”,加快了淡水壳菜在更大范围的高速扩张(Zhan et al,2015)。虽然国内外已开展大量研究,试图解决淡水壳菜进入输水系统所造成的生物污损及相关生态问题,但目前国内外对于生物污损的防治还没有一个较为成熟、持续有效的方法。因此对于输水工程,特别长距离输水工程,淡水壳菜防治方面面临巨大挑战,仍需开展相关的深入研究及管理对策。

(1)输水工程的水源地特征、运行模式、建筑物结构的不同,造成产生淡水壳菜生物污损的风险也不同。淡水壳菜的扩散模式及其污损影响缺乏系统定量研究,需建立科学可靠的生物污损风险评估体系及方法,评估污损对自然生态系统和输水工程等人工结构的影响。

(2)防治淡水壳菜生物污损的措施体系中,防治淡水壳菜输入及早期监测预警是降低污损风险的最

关键最有效的环节。因此,亟需建立基于淡水壳菜生长发育及附着特性的快速灵敏的监测预警技术体系,实现对淡水壳菜幼虫及成贝附着的快速识别预警。未来将考虑开发基于高通量的实时在线监测技术,在此基础上,通过安装自动采样设备,实时监测原水中的淡水壳菜幼虫,预警入侵风险。前期研究表明,输水结构中的水流流速对淡水壳菜在结构物上的附着具有重要影响,流速为 0.5~1.0 m/s 的运行工况最适宜淡水壳菜附着。因此,可基于水源工程的结构和不同运行工况,建立水动力水环境模型系统,模拟工程全线不同运行工况下的流速分布,结合水质及幼虫实时监测结果,模拟水质及淡水壳菜附着的时空分布,实现智慧水务监测预警。

(3)已有的防治技术方法在相应的应用条件下能够实现一定的防治效果,但是缺乏系统的定量评估。针对大型输水工程,防止附着是目前最具可行性的防治方法。首先,对于污损的输水结构,在工程检修期应注意对受腐蚀的结构壁面进行修护,尽量减少便于初期附着的粗糙面,耐久有效的防护材料

可为淡水壳菜的防治提供一定的支持。目前国内外还没有公认的适合淡水环境要求的防贝涂料,更没有一套完整的可针对现有输水工程应用的涂料防贝技术方案能够被工程运行管理单位认可和应用。因此,进一步研究开发防止附着材料将会产生重要的推广应用价值。未来的防贝材料的开发方向,可以基于市场上现有的成膜型的高分子涂料的改进试验,建立一套以材料的表面自由能和表面微观粗糙度、力学性能、粘结力、施工性、耐久性、经济性等为主要评价指标的评价体系,评价材料的综合性能,进一步指导材料的改性和配方优化。

(4)今后应对现有防治方法进行广泛的工程实践,不断为淡水壳菜防治提供应用依据。以防附着材料的应用为例,在实际工程中的应用受到施工环境及施工工艺的影响,因此,基于实验室开发的防附着材料均需要接受工程应用检验。优选的防附着材料进行现场测试中,需要进一步对涂刷方式、喷涂厚度、施工工艺等参数进行研究,以现场试验的壳菜实际附着密度和涂层的耐久性确定最优的施工工序,进而形成一套完整的可针对实际输水工程应用的涂料防贝技术方案。

(5)最后,在工程运行安全允许的前提下,可适时调整输水流速来抑制淡水壳菜的附着生长,并结合工程实践需求,进一步改进生态水力学防治技术手段,以期成为未来实现淡水壳菜污损防治的有效手段。例如,基于前期研究所揭示的高频脉动灭杀技术原理,未来可开发并测试新的脉动场发生装置,并测试各种装置形式及布设模式下的灭杀效果。此外,国外有研究报道不同频率的机械波对贻贝幼虫具有灭杀效果,但对不同物种测试的效果存在争议,尚无可靠的技术参数供参考。鉴于此情况,未来可进一步试验研究不同频率和波强的机械波对淡水壳菜幼虫的灭杀效果,建立有关波物理参数与幼虫灭杀效率之间的关系模型,基于研究成果开发机械波发生装置、优化技术参数体系,并逐渐用于工程实践。

#### 参考文献

董军,庄美琪,2005.长距离大流量输水管涵贝类防除研究[J].中国农村水利水电,(3):73-77.

关芳,张锡辉,2005.原水输送涵管中贝类代谢特性研究[J].给水排水,31(11):23-26.

李代茂,2009.淡水壳菜对输水建筑物输水能力的影响研究[J].给水排水,35:94-96.

李名进,苏学敏,2007.长距离输水管涵贝类生长成因分析及

防除对策[J].人民珠江,(3):29-34.

刘丽君,尤作亮,罗凤明,等,2006.封闭缺氧法杀灭和去除管道中的淡水壳菜研究[J].中国给水排水,22(3):40-43.

娄康后,刘健,1958.贻贝堵塞管道的防除研究[J].海洋与湖沼,1(3):316-324.

罗凤明,2006.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.

莫顿,1982.香港未经净化的食用水管道中附着沼蛤的生殖周期[J].海洋与湖沼,13(4):12-319.

向元龙,1985.发电厂供水系统中贝类的危害及其防治[J].华北电力技术,4:24-27.

徐梦珍,2012.底栖动物沼蛤对输水通道的入侵及防治试验研究[D].北京:清华大学.

徐梦珍,李威,于丹丹,等,2016.抽水蓄能电站中淡水壳菜生物污损及防治[J].水力发电学报,35(7):75-83.

徐梦珍,王兆印,段学花,2009.输水管线中淡水壳菜(*Limnoperna fortunei*)的防治研究[J].给水排水,35(5):205-208.

姚国友,徐梦珍,安雪晖,等,2015.防淡水壳菜附着涂料的快速评价指标体系[J].清华大学学报(自然科学版),55(9):957-963.

叶宝民,曹小武,徐梦珍,等,2011.沼蛤对长距离输水工程入侵调查研究[J].给水排水,37(7):99-103.

中国科学院水生生物研究所管道小组,1979.淡水壳菜的生物学研究[J].动物利用与防治,2:33-36.

Boltovskoy D, Karatayev A, Burlakova L, et al, 2009. Significant ecosystem-wide effects of the swiftly spreading invasive freshwater bivalve *Limnoperna fortunei* [J]. Hydrobiologia, 636:271-284.

Calazans S H C, Americo J A, da Costa Fernandes F, et al, 2013. Assessment of toxicity of dissolved and microencapsulated biocides for control of the Golden Mussel *Limnoperna fortunei* [J]. Marine environmental research, 91:104-108.

Darrigran G, 2002. Potential impact of filter-feeding invaders on temperate inland fresh water environments [J]. Biological Invasions, 4:145-156.

Darrigran G, Damborenea C, 2001. Concentraciones letales de un biocida para adultos del molusco invasor *Limnoperna fortunei* (Mytilidae) [C]// ACTAS Seminario Internacional sobre Gestión Ambiental e Hidroelectricidad, Complejo Hidroeléctrico de Salto Grande. Spanish, pp: 119-123.

Darrigran G, Damborenea C (eds), 2006. Bio-invasión del mejillón dorado en el continente americano [J]. Argentina, 156-160.

Darrigran G A, Maronas M E, Colautti D C, et al, 2004. Air exposure as a control mechanism for the golden mussel,

- Limnoperna fortunei*, (Bivalvia; Mytilidae) [J]. Journal of Freshwater Ecology, 19, 3: 461 - 464.
- Demetrio Boltovskoy, 2014. *Limnoperna fortunei* The Ecology, Distribution and Control of a Swiftly Spreading Invasive Fouling Mussel[M]. Springer.
- Fushoku B, Bumon I, 1999. Adhesion mechanism of marine sessile animals and anti-fouling counter measure [J]. Nippon Zairyo Gakkai, 213: 44 - 53.
- Kim D, Suok H, Eunjae J, et al, 2011. Prechlorination at water intake for the quality improvement of raw water[J]. J Korean Soc Water Qual, 27: 110 - 114.
- Lopes M N, Vieira J P, Burns M D M, 2009. Biofouling of the golden mussel *Limnoperna fortunei*(Dunker, 1857) over the Anomura crab *Aegla platensis* Schmitt, 1942 [J]. Pan-American Journal of Aquatic Sciences, 4 (2): 222 - 225.
- L'opez A M F, Casciotta J, 1998. First record of the predation of the introduced freshwater bivalve *Limnoperna fortunei* (Mytilidae) by the native fish *Micropogonias* (Sciaenidae) in the Riodela Plata estuary, South America[J]. Iberus, 105 - 108.
- McEnnulty F R, Bax N J, Schaffelke B, et al, 2001. A review of rapid response options for the control of ABW-MAC listed introduced species and related taxa in Australian waters. Centre for Research on Introduced Marine Pests[R]. Csiro Marine Research, Hobart, 101pp.
- Ministry of Agriculture Forestry and Fisheries of Japan, 2012[2014 - 05 - 09]. Practical manual for *Limnoperna fortunei* [EB/OL]. [http://www.maff.go.jp/j/nousin/kankyo/kankyo\\_hozen/k\\_hozen/pdf/kawahibarimanual.pdf](http://www.maff.go.jp/j/nousin/kankyo/kankyo_hozen/k_hozen/pdf/kawahibarimanual.pdf).
- Muschamp J W, Fong P P, 2001. Effects of the Serotonin Receptor Ligand Methiothepin on Reproductive Behavior of the Freshwater Snail *Biomphalaria glabrata*: Reduction of Egg Laying and Induction of Penile Erection[J]. Journal of experimental zoology, 289: 202 - 207.
- Paolucci E M, Cataldo D, Thuesen E, et al, 2007. Impact of the planktonic larvae of the invasive Asian bivalve *Limnoperna fortunei* on the growth of larvae of the "Sábalo", *Prochilodus lineatus*(Pisces) in South America [C]//The 15th International Conference on Aquatic Invasive Species, ICAIS.
- Pereyra P J, Rossini G B, Darrigran GA, 2011. Toxicity of three commercial tannins to the nuisance invasive species *Limnoperna fortunei* (Dunker, 1857); implications for control[J]. Fresenius Environ Bull, 20: 1432 - 1437.
- Perez M, Garcia M, Traversa L, et al, 2003. Concrete deterioration by golden mussels [C]//Conference on Microbial Impact on Building Materials, Lisbon, Portugal: 39 - 47.
- Ricciardi A, 1998. Global range expansion of the asian mussel *Limnoperna fortunei*(Mytilidae): another fouling threat to freshwater systems[J]. Biofouling, 13(2): 97 - 106.
- Xu M, Wang Z, Lin C C, et al, 2013. Experimental study of invasion and biofouling of freshwater mussel *Limnoperna fortunei* [J]. International Journal of Geosciences, 4 (05): 1 - 10.
- Xu M Z, Darrigran G, Wang Z Y, et al, 2015. Experimental study on control of *Limnoperna fortunei* biofouling in water transfer tunnels[J]. Journal of Hydro-environment Research, 9: 248 - 258.
- Xu M Z, Wang Z Y, Zhao N, et al, 2015. Growth, reproduction, and attachment of the golden mussel (*Limnoperna fortunei*) in water diversion projects[J]. Acta Ecologica Sinica, 35: 70 - 75.
- Yamada Y, Kurita K, Kawauchi N, 1997. Countermeasures for *Limnoperna fortunei* in Isojima Intake facilities [C]//Proceedings of the 24th Conference of Construction Technology, Osaka, Japan Water Works Association; pp: 230 - 234.
- Yao G Y, Xu M Z, An X H, 2017. Concrete deterioration caused by freshwater mussel *Limnoperna fortunei* fouling[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 121: 55 - 65.
- Zhan A B, Zhang L, Xia Z Q, et al, 2015. Water diversions facilitate spread of non-native species[J]. Biological Invasions, 17: 3073 - 3080.
- Zhang C D, Xu M Z, Wang Z Y, et al, 2017. Experimental Study on the Effect of Pipeline Turbulence in Pipelines on the Mortality of *Limnoperna fortunei* Veligers[J]. Ecological Engineering, 109: 101 - 118.

(责任编辑 张俊友 郑金秀)

## Impact and Control Measures for *Limnoperna fortunei* (Golden Mussel) Biofouling in Water Diversion Projects

TIAN Yong<sup>1</sup>, ZHANG Ai-jing<sup>1</sup>, WANG Shu-lei<sup>1</sup>, XU Meng-zhen<sup>2</sup>

(1. Administration of South-to-North Water Diversion Middle Route Project,  
Beijing 100038, P.R. China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University,  
Beijing 100084, P.R. China)

**Abstract:** *Limnoperna fortunei* (golden mussel) is a filter-feeding species of macroinvertebrate widely inhabiting the middle and lower reaches of Yangtze River and southern China. The veligers of *L. fortunei* readily invade water transfer tunnels and, after developing, attach to tunnel walls and other structures at high densities. The biofouling that results clogs pipes, lowers water transfer efficiency and leads to corrosion and water pollution. Golden mussel invasions have become a global concern. Research, at home and abroad, has been conducted to solve biofouling and other ecological and social problems caused by golden mussels, but few methods are effective and sustainable. In this paper, we describe the biological characteristics of golden mussel, analyze the negative effects of mussel biofouling on water transfer projects and evaluate prevention and control measures based on an intensive literature review. Particular attention is given to the challenges of biofouling by golden mussels in large inter-basin water diversion projects. Finally, countermeasures for golden mussel biofouling in water transfer projects are suggested. We recommend a combination of prevention and control of veliger invasion of water diversion projects as the most effective strategy. Systematic and quantitative long-term monitoring of mussel biofouling is necessary to provide technical support for project management and risk assessments of veliger invasion. More specifically, rapid and sensitive monitoring should be established at water diversion project inlets to provide an early warning system for golden mussel invasion. Prevention of mussel byssus adhesion is one of the most promising methods for biofouling control in large water diversion projects. This will require the development of effective, bio-compatible coating materials. Coating material effectiveness is negatively related to contact angle and solid-liquid interfacial energy, and positively related to the dispersion force of surface free energy and the solid surface free energy of the coatings. Flow velocity or flow field in the tunnels, within the range of safe operating conditions, could be adjusted to reduce attachment efficiency and/or survival of golden mussels. High frequency turbulent flow has been proven effectivity in killing golden mussel veligers when the Kolmogorov turbulence length is comparable or shorter than veliger body length. The veliger mortality rate is positively correlated with average flow velocity and turbulence action time. Based on our review of the literature, the most effective solution to the veliger biofouling problem combines systematic monitoring for early detection, prevention of byssus adhesion using surface coatings and reduction of veliger survival by adjusting channel flow velocity and turbulence.

**Key words:** inter-basin water diversion; golden mussel invasion; biofouling; biofouling prevention