

肖安明, 刘盛, 刘奕明, 等. 人工浮岛技术在水体修复中的应用[J]. 净水技术, 2022, 41(10):120-129.

XIAO A M, LIU S, LIU Y M, et al. Application of artificial floating island technology in water body remediation[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(10):120-129.



扫我试试?

人工浮岛技术在水体修复中的应用

肖安明¹, 刘 盛¹, 刘奕明¹, 王润一², 卞梓名¹, 陈战利^{1,*}

(1. 南昌大学资源与环境学院, 江西南昌 330031; 2. 南昌大学工程建设学院, 江西南昌 330031)

摘 要 人工浮岛对于改善水环境有其独特优势。文章从发展历史、组成结构、原理机制、现场试验方面阐述了人工浮岛的应用现状, 提出应关注陆生植物在人工浮岛应用、塑料浮岛载体释放微塑料以及实际运行当中存在的问题, 为提高人工浮岛运行效果提供借鉴, 使其便于在城市黑臭水体治理、农村污水治理等诸多场景中推广应用。

关键词 人工浮岛 浮岛植物 浮岛载体 现场试验 微塑料 光催化材料

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022)10-0120-10

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.10.018

Application of Artificial Floating Island Technology in Water Body Remediation

XIAO Anming¹, LIU Sheng¹, LIU Yiming¹, WANG Runyi², BIAN Ziming¹, CHEN Zhanli^{1,*}

(1. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. School of Infrastructure Engineering Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract Artificial floating islands have unique advantages for water environment improvement. The application status of artificial floating islands is expounded from the aspects of development history, composition structure, principle mechanism, field experiment. It is proposed that attention should be paid to the application of terrestrial plants in artificial floating islands, the release of microplastics from plastic floating island carriers, and the problems in actual operation, so as to provide reference for operation effect improvement of artificial floating islands. So that it can be applied in the treatment of black and odorous water body, treatment of rural sewage and other conditions.

Keywords artificial floating island floating island plant floating island carrier field experiment microplastics photocatalytic material

人工浮岛技术是指应用无土栽培技术, 人工将水生植物或陆生植物栽植到漂浮于水面的浮岛上, 通过根系吸收等作用达到水质净化的目的^[1], 其关键点主要包括浮岛植物遴选、浮岛载体材料选择、浮岛植物处置等。在过去 40 多年的时间, 我国经济高速增长的同时, 水环境污染的问题也越来越严重。人工浮岛技术以成本低、原位修复、处理效率较高、相对被动、不需要额外占用土地、环境友好等优势得

到了人们的重点关注^[2-4]。如 Wang 等^[5]综述了人工浮岛的各组成参数及去除污染物的能力, 孙真等^[3]重点关注了人工浮岛微生物类群与工程成本, Colares 等^[6]则侧重于阐述影响处理效率的因素。而关于连接方式、现场试验等方面的研究较少, 故本文对该方面进行补充, 并对其发展历史、组成结构、净水原理机制等方面进行完善, 以期为人浮岛发展提供借鉴。

1 发展历史

浮岛利用历史悠久, 但早期多用于农业种植, 比如缅甸和墨西哥农民利用浮岛种植黄瓜、玉米等作物^[7-8]。之后随着水环境问题浮现, 人们逐渐意识到人工浮岛的水质修复效果。到 1979 年, 德国正式

[收稿日期] 2021-06-09

[基金项目] 江西省大学生创新创业训练计划(S202010403023)

[作者简介] 肖安明(2000—), 男, 研究方向为废水处理及其资源化利用, E-mail: xiaonaming2022@163.com。

[通信作者] 陈战利(1980—), 男, 博士, 研究方向为废水处理及其资源化利用, E-mail: 15879150235@163.com。

地建立了第一个人工浮岛系统用来修复富营养化湖泊。1993年,日本在 Kasumigaura 湖中建立由不锈钢制成框架的人工浮岛,并在 1995 年第六届国际湖泊会议中进行了介绍,此后人工浮岛技术得到了广泛的关注^[9]。在其他发达国家如美国、意大利、澳大利亚等,人工浮岛也被广泛地用于河流、渔业废水、工业废水等水体净化^[6,10]。我国自 1978 年实行改革开放以来,经济快速增长,对水的需求量不断上升,但水处理基础设施陈旧,治理效果不佳。据 1980 年的统计,90%以上废水未经任何处理直接排入水域,全国地表水水质评价表明,超过 92 100 km 的河长中符合饮用水标准的仅占 1/3 左右,约有 6% 的河水中有毒物质含量超过排放标准或有机污染达到黑臭的严重程度^[11]。同时,在 20 世纪 70 年代,严重的世界能源危机迫使人们要求水处理技术具有节省能源、资源和投资的特点。在这个背景下,我国于 20 世纪 80 年代开始对人工浮岛进行研究^[12]。之后在 Yang 等^[13]、刘淑媛等^[14]一大批环境工作者的努力之下,人工浮岛在我国的研究和应用也取得了很大的突破。1998 年起,江苏无锡的五里湖应用人工浮岛治理其富营养化问题,发现人工浮岛对于氮、磷有极好的去除效果^[15];1999 年浙江杭州的南应加河经过 5 个月左右治理后,异臭味得到有效控制^[15];2002 年—2003 年北京地区的什刹海进行浮岛应用人工浮岛示范,发现水体变得清澈透明,且适宜北京水环境生长的 4 种主要植物依次是旱伞草、高秆美人蕉、矮秆美人蕉和紫叶美人蕉^[16]。除了在我国东南和北部地区外,赵祥华等^[17]分析在云南高原湖泊中应用人工浮岛的情况,发现其去除 COD_{Mn} 有着明显的效果。

在近 3 年的研究当中,研究者们从去除机理出发,通过添加外源电子供体以提高浮岛的反硝化能力^[18-19];Yang 等^[20]将生态浮床耦合微生物燃料电池,促进生物发电和脱氮。但是必须要注意这些试验仅限于小试规模,在实际推广应用可能还需解决维护和成本等问题。在近些年的应用方面,包头南海湿地采用风车草、水葱和千屈菜构建人工浮岛,发现可以有效去除氮、磷等有机物,但在浮岛建立初期,存在一些未能成活的植物以及水体中死亡的浮游植物,水体中 COD_{Cr} 的浓度基本不变^[21];在上海市静安区的彭越浦河道采用了生态浮岛+曝气充氧组合工艺,可以实现初期对 TP 和氨氮的快速去除,

但该工艺并没有指出能耗问题,且对于氨氮等污染物而言,相比于单一的人工浮岛或曝气技术并没有很大的改进^[22];西安一小区 245 m^2 的水域面积上建设太阳能混合充氧-生态浮岛集成修复景观示范工程,结果表明 NO_2^- -N 平均去除率约为 72%,但 NO_3^- -N 平均去除率仅为 24%^[23]。

2 组成结构

人工浮岛主要由漂浮于水面的浮岛载体以及生长在浮岛载体上的浮岛植物构成(图 1),浮岛植物的根系直接与水接触。Yao 等^[24]采用生命周期评价法和综合水质指数对人工浮床的潜在环境不利影响进行研究,表明原材料获取与构建过程占比最大,因此,研究人工浮岛组成结构有着重要的意义。

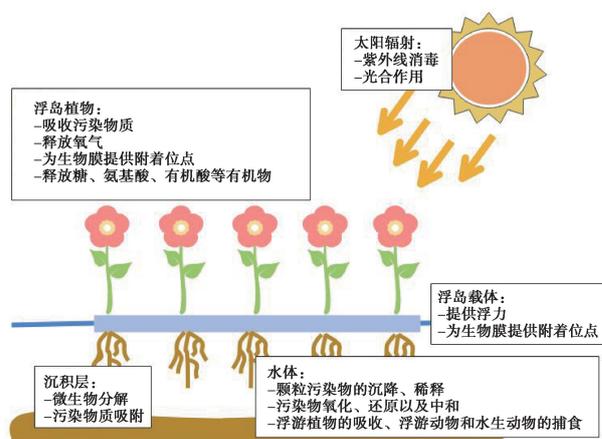


图 1 人工浮岛示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Artificial Floating Islands

2.1 浮岛植物

浮岛植物不但可以通过根、茎、叶直接吸收水中的营养物质,并且其根部可以附着有降解作用的微生物,对浮岛运行有很大影响。很多学者对于浮岛植物的选择提出了自己的看法,研究者^[25]提出浮岛植物选择标准为:(1)本地和非入侵物种;(2)多年生植物;(3)陆生植物种类;(4)湿地植物或能在水培环境中茁壮成长的植物;(5)具有通气组织的植物。Colares 等^[6]认为植物的选择应该考量水体污染情况、根系的生长情况、适应性和当地气候条件。此外 Wang 等^[5]认为浮岛植物还应美化环境,为水生动物和鸟类提供栖息地。这是因为人工浮岛存在着一定的空间层次结构,一般挺水、沼生及陆生植物的茎、叶挺出水面,有着较多的水面植物组织,利于鸟类栖息,其根、茎则位于水面下;漂浮/浮叶植物及

沉水植物则绝大部分植物体位于水面或水面以下,利于水生动物栖息。

表 1 总结了人工浮岛选用植物主要种类。目前,浮岛植物主要选用的是水生植物,其中美人蕉、香蒲、灯心草等挺水植物由于其景观性好和处理效果较好等优点在世界各国人工浮岛中得到了广泛的应用。不同浮岛植物处理不同污染水体时体现出不同的适应性。杨皓然^[26]采用生活污水培育了 30 种常见的挺水植物、浮叶/漂浮植物和沉水植物,发现挺水植物的芦苇、香蒲、美人蕉,以及沉水植物的伊乐藻和浮叶植物中的睡莲生长良好,具有较强的耐污能力。余婷^[27]配制了低(Cd:0.1 mg/L, Cr、Pb、Ni、Zn:1.0 mg/L)、中(Cd:1.0 mg/L, Cr、Pb、Ni、Zn:5.0 mg/L)、高(Cd:5.0 mg/L, Cr、Pb、Ni、Zn:10.0 mg/L)质量浓度重金属溶液,并用其培育了 6 种水生植物(金鱼藻、狐尾藻、美人蕉、黄菖蒲、水芙蓉、凤尾莲)及它们每 3 个的组合,发现不同浓度组生物量的平均增长率为低浓度(24%)>中浓度(19%)>高浓

度(18%),表明它们均可以适应污水环境,且抑制作用随着重金属浓度的增加而增强。Tara 等^[28]研究发现纺织废水对于芦苇的生长有着显著的抑制作用。在选择浮岛植物时要注意胁迫点浓度,当污染水体浓度超过胁迫点浓度时,可能会引起浮岛植物停止生长甚至腐败,造成水体二次污染。现应用的浮岛植物大部分在春季到秋季生长旺盛,而到了低温气候则出现停止生长或腐败现象,例如美人蕉、香蒲、金鱼藻、黑藻^[29]。目前也发现了一批值得工程借鉴的抗寒水生植物如鸢尾、黄菖蒲、梭鱼草、伊乐藻^[30-31],对于陆生植物研究目前鲜有文献报道。Dushenkov 等^[32]用水培法培养芥菜处理含重金属溶液,发现其可吸收超过根部干重 10% 的重金属,此外,试验也证明陆生植物有较好的水体修复能力^[33-34]。这是因为陆生植物相比于水生植物有着更多的生物质、更快的生长速度、更发达的根系^[25],且其根系有着更多的须根^[32],即有更大的比表面积。未来应该进一步研究陆生植物在人工浮岛上的应用。

表 1 人工浮岛选用植物主要种类
Tab. 1 Main Species of Plants Selected for Artificial Floating Islands

分类	名称	参考文献
挺水植物	美人蕉、水葱、鸢尾、芦苇、梭鱼草、菖蒲、香蒲、灯心草、垂花水竹芋	[10, 25, 28, 35-38]
漂浮/浮叶植物	凤眼莲、浮萍、王莲、芡实、苔菜、睡莲、水鳖、两栖蓼、天字萍、水龙、荇菜	[3, 39]
沉水植物	黑藻、狐尾藻、伊乐藻、金鱼藻	[40-41]
沼生植物	香根草、水甜茅、苔草、喜旱莲子草	[2, 38, 42-43]
陆生植物	柳、栀子、黑麦草、芥菜	[32-34]

2.2 浮岛载体

Shahid 等^[44]认为浮岛载体应重点考察其耐用性、功能性、重量、锚固性、环境敏感性、灵活性和成本。此外,Seo 等^[45]认为浮岛材料应该具备疏水性,因为疏水材料可快速黏附微生物,而解吸几乎可忽略。目前浮岛载体按其来源可分为天然材料和人工材料(表 2),人工材料又可分为人工有机材料和人工无机材料。天然材料因其耐久性差、易腐烂的缺点,只适用于面积较小、且方便维护人员时常检修的水域。人工材料从其性能上看则适用的范围更加广阔,如大江大河、规模较大的湖泊等。在实际中,人工有机材料凭借制作简便及低成本等优势在商业得到了广泛的应用,但该类材料存在着废弃后的“白色污染”问题。目前,主要通过加强人工回收或寻

求可降解材料进行替代来解决此类问题,此外,塑料在自然环境下会因老化、磨损等释放微塑料^[46],造成微塑料污染,而使用塑料的人工浮岛也可能存在该问题。Ziajahromi 等^[47]对用聚对苯二甲酸乙二醇酯制成的人工浮岛进行监测,并未发现其自身释放微塑料,但该试验仅运行了两年多,需要进一步对长期运行的人工浮岛进行监测,以确定塑料类浮岛载体是否向环境释放微塑料。人工无机材料相较于人工有机材料在实际应用中并不常见,但其在环境友好和使用废弃方面更具有优势。如果可以简化其制作工艺和降低成本^[8],在未来可能是最佳的人工浮岛载体材料。

此外,光催化技术可以在光照条件下高效地将污染物降解成 CO₂ 和其他无机物,可以有效克

服当前人工浮岛技术面对重污染处理效果不佳的缺点。将光催化材料作为载体材料的人工浮岛对光照充足的地区处理重有机污染污水(如印

染废水、含苯工业废水等)有较大的潜力。目前尚未见将光催化材料引入到人工浮岛,需要进一步试验研究。

表2 人工浮岛载体主要种类

Tab. 2 Main Types of Carriers Used for Artificial Floating Islands

分类	名称	特点	参考文献
天然材料	竹材、木材、椰壳纤维	环境友好、耐久性差	[1, 48-49]
人工材料	有机材料 聚乙烯、聚氯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯纤维 基质、聚苯乙烯	成本低、易加工、耐久性好、不易降解	[47, 50-51]
	无机材料	陶粒、不锈钢	耐久性好、制造工艺复杂

2.3 浮岛连接方式

目前,浮岛的常用连接方式有两种,一种是螺栓式,主要依靠人工浮岛边缘所预留的孔洞,再通过螺栓或螺钉相连。由于浮岛之间依靠点连接,对连接处的应力要求相对较高,但操作较为简便,适用于大块浮岛拼接,目前应用较广泛。另一种是榫卯式,榫卯本是中国木结构传统的连接方式,之后也被应用到人工浮岛的连接,它主要通过浮岛周围做成凹凸的形式,相互拼接咬合便起到连接的作用。这种结构整体性较好,但不利于大块浮岛拼接应用,便于较小块浮岛的拼接,目前常见于泡沫类的人工浮岛。

2.4 浮岛抗风浪结构

风浪可以直接对浮岛结构造成机械损害,同时

也可能使浮岛植物因相互摩擦而损伤,这一危害特别在上海等地区感潮河段中构建人工浮岛时值得特别考虑。研究人员一方面通过设计消浪装置安装于浮岛四周或底部,以此减小风浪对浮岛本体的影响。胡优华等^[54]通过在浮岛周围设置消浪板[图2(a)],可以增加与水面的贴合面积,降低波浪使其直接拍打浮岛侧面。鲁宏^[55]在浮体结构架内下部增设破浪压水板,可实现消浪、破浪、压浪,值得浮岛构造借鉴。另一方面则通过直接改进浮岛结构来进行风浪的抵抗。赵志华等^[56]将两部分的浮岛载体柔性相连[图2(b)],下表面设置为弧形,且下表面设置有断阶结构,使得浮岛可以根据水位起伏进行结构变形,适应水位波浪的变化。另外,还可以采用消浪竹排形式来增强稳定性。

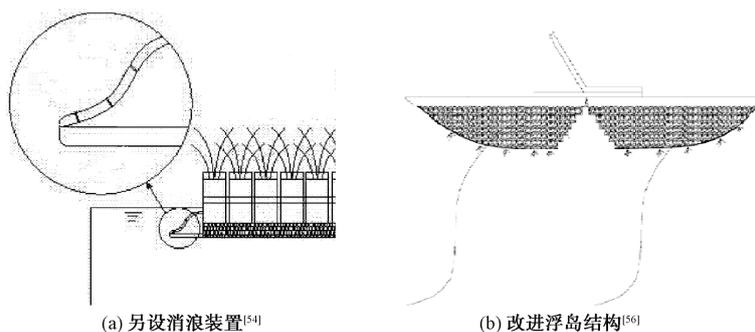


图2 人工浮岛抗风浪结构示例图

Fig. 2 Example Diagram of Anti-Wind and Anti-Wave Structure of Artificial Floating Island

3 修复水体的原理机制

3.1 水体自净作用

水体自净主要包括物理作用(颗粒污染物的沉降、稀释)、化学作用(污染物氧化、还原、中和)以及生物作用(浮游植物的吸收、浮游动物和水生动物

的捕食)。目前文献报道水体自净对于去除水中氮的贡献率为7.1%~85.4%,对去除磷的贡献率为5.4%~44.6%^[5]。各个文献报道的数值相差较大,这是因为水体自净效果受光照条件、水温以及污染物的种类和浓度等因素影响很大。

3.2 植物作用

浮岛植物根据浮岛载体位置一般可分为载体上的茎叶和载体下的根系。浮岛植物茎叶部分一般可进行光合作用,为植物体生长提供能源,并且其可作为从根系吸收污染物质的储存场所,进而通过收割来实现污染物质的最终去除。浮岛植物的根与水直接接触,水中污染物可作为营养物质直接被吸收到植物体内,实现从水中分离。植物根系为微生物的附着提供了表面积,同时可以向水体中释放糖、氨基酸、有机酸等有机物^[57],可为反硝化过程提供电子,还可抑制藻类生长。此外,植物根系分泌的氧气可以形成许多厌氧-缺氧-好氧的微区,这也相当于构成了许多AAO单元,可以增强微生物的硝化反硝化功能^[58]。

3.3 微生物作用

人工浮岛去除污染物主要依靠由细菌、真菌以及有益藻类所组成的生物膜进行代谢^[59]。其工作过程主要是通过同化和转化消耗水中小分子污染物,同时会分泌酶类加速水中大分子污染物的降解和转化^[5]。Zhang等^[38]研究表明,污染物去除效果与细菌群落参数(如TRF数和多样性指数等)之间并没有显著的相关关系,而与微生物群落的代谢能力有关。人工浮岛中丰度最高的类群一般包括拟杆菌门、变形菌门、黄杆菌门。人工浮岛也广泛存在其他种类的微生物,不同种类的微生物对于不同污染物有着不同的去除效果。Zhang等^[60]将氨化细菌加入到蕙兰构建的人工浮岛中,发现其对有机氮去除率可达到80%以上。Tara等^[28]将3种菌种(*Acinetobacter junii* strain NT-15, *Rhodococcus* sp. strain NT-39, *Pseudomonas indoloxydans* strain NT-38)接种到人工浮岛上,发现可以有效处理纺织废水。Rehman等^[61]将烃类降解细菌的联合体(*Bacillus subtilis* strain LORI66, *Klebsiella* sp. strain LCRI87, *Acinetobacter Junii* strain TYRH47, *Acinetobacter* sp. strain LCRH81)接种到芦苇构建的人工浮岛上,发现其去除废水中原油的效率可达97%。未来新菌种的开发将会带动人工浮岛的发展,并且由于微生物作用占比最大,有学者认为这可能将是未来提高人工浮岛处理效率主要的研究方向。

3.4 其他作用

除了上述去除机制外,人工浮岛因采取不同的

联用改进措施有着其他的污染物去除机制。Shen等^[62]将铝基饮用水处理残留物(DWTR)添加到人工浮岛中,结果表明DWTR吸附是磷的主要去除途径。Hu等^[63]将富铁基质添加到人工浮岛中,利用富铁基质中的铁碳微电解反应产生的微弱电流,直接杀伤藻类细胞,同时该反应可释放OH⁻抑制藻类的生长。Colares等^[64]将人工浮岛与微生物燃料电池技术结合,加快厌氧细菌的代谢速率,从而提高COD去除效果。未来也可以联合其他技术,增强人工浮岛净水能力。

值得注意的是,以上的这几种作用并不是孤立存在的。在人工浮岛处理污水中,存在植物-微生物协同作用,微生物可以将植物不能直接吸收的有机物降解为可被植物吸收的盐类物质,同时也会产生一些植物激素,提高浮岛植物抗病能力,而浮岛植物的存在为微生物的富集提供了附着位点以及良好的生存环境,可以大大增加微生物的数量。有学者将香根草幼苗种植在漂浮平台上进行苯酚降解,发现根状菌在香根草幼苗根上的生长繁殖速率为原有的100倍,使苯酚降解率提高了3倍以上^[44]。

4 现场试验

目前,关于人工浮岛的研究主要集中于实验室规模上,虽然这类研究在技术研究初期阶段很有价值,但其结果往往不能转移到实际现场试验^[65]。因此,人工浮岛野外试验的研究成果具有重要的现实指导意义,表3^[39,50,58,66-70]总结了近10年的主要现场试验。

当前人工浮岛现场试验应用于水体修复的种类较多,并且大都取得了较为满意的污染物去除效果。但是这些试验主要侧重于对污染物的去除上,而忽视了整体运行过程当中存在的问题。以下是人工浮岛现场试验存在或值得注意的主要问题及见解。

(1) 人工浮岛受长期温度变化影响较大

研究表明,短期的温度变化不会影响系统的净化效果,但长期的温度变化会使得微生物群落为适应新的环境而导致数目、种类及浮岛植物代谢活动的较大改变^[71-72],影响人工浮岛对污水中营养物质的去除效果。表3所示的污染物去除率为试验期间最高值,通常为浮岛植物生长活跃的温暖时期。Olguín等^[67]发现种植纸莎草、梭鱼草的人工浮岛去除NO₃⁻-N的去除率从5月的76%下降到11月的

表3 人工浮岛现场试验实例
Tab. 3 Examples of Field Experiments on Artificial Floating Islands

水体类型	持续时间	浮岛材料	浮岛植物	增强方式	COD 去除率	TP 去除率
罗非鱼养殖废水	6 个月	PVC 管和渔网	凤眼莲	-	-	28.67% ^a
城市雨水	2 年	PET、海洋级膨胀泡沫	苔草	-	-	52.00%
景观水	178 d		菖蒲、鸢尾花、千屈菜、少脉香菇草	添加沸石、海绵铁	-	84.44%
城市富营养化湖泊	近 2 年	塑料	纸莎草、梭鱼草属	-	44.00%	-
城市黑臭河流	20 d	-	-	微纳气泡、浸没树脂浮床	41.49%;36.37%	35.40%; -18.97%
受农业污染多级池塘	近 3 年	陶瓷	狐尾藻	添加立体弹性填料,并联合固定浮床	-	51.0%
景观水	2 年	聚乙烯	菖蒲、鸢尾花、千屈菜、少脉香菇草	添加沸石、海绵铁	-	66.67% ^a
城市雨水	16 个月	PET、海洋基聚氨酯泡沫	苔草	-	-	-

水体类型	TN 去除率	氨氮去除率	NO ₃ ⁻ -N 去除率	Chl-a 去除率	其他去除率	参考文献
罗非鱼养殖废水	64.14% ^a	-	-	-	-	[39]
城市雨水	17.00%	-	47.00%	-	-	[66]
景观水	80.76%	89.98%	72.96%	62.33% ^a	-	[58]
城市富营养化湖泊	-	35.00%	76.00%	-	粪便大肠菌群: 86.00%	[67]
城市黑臭河流	-	41.28%;4.39%	-	-	-	[68]
受农业污染多级池塘	71.4%	-	-	-	-	[69]
景观水	61.64% ^a	72.22% ^a	-	72.59% ^a	-	[70]
城市雨水	15.07%	-	5.41%	-	Al:12.64% Fe:18.32%	[50]

注:去除率为试验期间的最高值;^a为相比于对照组结果;-为文献中未提及

9%,其他试验的污染物去除率也有不同程度下降。罗固源等^[73]也发现温度对于生态浮床系统有着重要的影响;浮床系统的最佳运行温度为 25~29℃,越远离该温度,运行效果则越差。目前,主要采用曝气、添加填料或生长基质等^[62,74-75]方法增强性能,但效果一般。为此,一方面近些年陆续发现一些微生物如哈尔滨不动细菌等可在低温下去除水中污染物^[76],建议可以引入到人工浮岛中以提高冬季处理效率,另一方面也可选用和培育一些耐寒植物。

(2) 收割策略

收割是将污染物完全从水中分离出来的最后一步,同时也是防止冬季植物枯死后造成二次污染的措施,对于处理效果具有重要的意义。由于不同植

物特性不同,有学者认为对于植物收割并没有通用的模式;此外对于同一种植物,它为适应外部环境(如温度、水中营养物质含量)变化可能会将营养物质转移部位。但地下组织是主要的营养吸收器官,对浮岛植物的整体生长情况影响较大,不利于可持续运行,且一般被浮岛材料所包裹不易收割^[77]。建议进一步研究地上组织养分含量变化,以确定其最佳的收割时间,促进其可持续性。

(3) 收割后的处理、含重金属等污水的浮岛植物处置

Li 等^[78]研究表明,处理炼油厂废水的人工浮岛植物的亚硝酸盐、铅、砷等含量低于动物饲料的阈值。此外,Zhao 等^[79]研究表明浮岛植物地上部分与

根部有毒元素的含量符合中国饲料卫生标准,但它们仅分别持续了 35 d 和 20 d,且为实验室规模。目前尚未有长期的现场试验对浮岛植物体内重金属等对人体有害的物质含量进行研究,需要长期的检测以评估其潜在的风险。

(4) 浮岛覆盖率

浮岛覆盖于水面上可以减少阳光照射到水体中,进而减少水中藻类大量繁殖的可能,但这同时减少了氧气向水中扩散溶解的有效面积,水中光合藻类的减少也降低了水中溶解氧的含量。浮岛覆盖率应该要控制在一个合理的范围。尽管从事浮岛商业开发的浮岛国际公司认为 5%~8% 的覆盖率就足以提高水质^[25],但对于想要在短期内获得较好效果的情况而言,该覆盖率可能比较低。一些学者报道称超过 50% 的覆盖率会降低处理效率,但如果需通过反硝化去除硝酸盐,则可以考虑 100% 的覆盖率^[80]。在现实应用当中,应当从需处理水体污染类型和浮岛种类出发来考虑具体的覆盖率。

5 结语

(1) 面对日趋严重的水污染问题,人工浮岛作为一种新兴的生态修复技术在国内得到了较为广泛的工程应用。在如今绿色生态的背景下,人工浮岛更加有着其独特的优势,具有广阔的应用潜力。

(2) 目前浮岛植物多选用水生植物,对于不同的污染水体及气候变化有着一定的适应性,在应用时应注意其胁迫点浓度及抗寒性能。相比之下,陆生植物研究则较少,但陆生植物有着更多的生物质以及发达的根系,值得进一步研究;浮岛载体材料大多选用人工有机材料,但可能也存在“白色污染”及自身释放微塑料等问题,未来应注意人工无机材料的开发及光催化材料的引入。

(3) 对于人工浮岛的研发应用,应提供详实的现场试验数据。此外应该关注到人工浮岛在寒冷季节处理效率不高、浮岛植物收割策略、收割后的处置和浮岛覆盖率问题。这将极大改进当前运行困境,使其在城市黑臭水体治理、农村污水治理等诸多场景中推广应用,以改善水环境。

参考文献

[1] 唐林森,陈进,黄苗. 人工生物浮岛在富营养化水体治理中的应用[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(1): 21-24.
[2] SCHWAMMBERGER P F, YULE C M, TINDALE N W. Rapid

plant responses following relocation of a constructed floating wetland from a construction site into an urban stormwater retention pond [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134372.
[3] 孙真,陈涵肖,付尚礼,等. 生态浮岛处理微污染水体综述[J]. *环境工程*, 2018, 36(12): 10-15.
[4] SHAHID M J, ARSLAN M, SIDDIQUE M, et al. Potentialities of floating wetlands for the treatment of polluted water of river Ravi, Pakistan [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 133: 167-176. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.04.022.
[5] WANG W, WANG Y, SUN L, et al. Research and application status of ecological floating bed in eutrophic landscape water restoration [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135434. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135434.
[6] COLARES G S, DELL'OSBEL N, WIESEL P G, et al. Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136776. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136776.
[7] BULUT I. Floating islands of Turkey [J]. *Procedia, Social and Behavioral Sciences*, 2011, 19: 526-531. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.05.165.
[8] 代培,吴小刚,张维昊,等. 人工生物浮岛载体的研究进展[J]. *环境科学与管理*, 2006, 31(6): 13-16.
[9] NAKAMURA K, SHIMATANI Y. Water purification and environmental enhancement by the floating wetland [C]. Korea: Proceeding of 6th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference, 1997.
[10] BARCO A, BONA S, BORIN M. Plant species for floating treatment wetlands: A decade of experiments in North Italy [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141666. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141666.
[11] 焦得生,杨景斌,贺伟程,等. 中国水资源评价概述 [M]//水利部水文司. 水资源评价论文集. 北京: 水利电力出版社, 1989: 1-12.
[12] 方媛媛,刘聚涛,戴国飞,等. 生态浮岛技术及其在富营养化水体修复中的应用研究[J]. *环境科学与管理*, 2019, 44(10): 71-75.
[13] YANG H, ZHANG Y, ZHANG J. Artificial floating island technology [C]. Shenzhen: Earth and Environmental Science, 2021.
[14] 刘淑媛,任久长,由文辉. 利用人工基质无土栽培经济植物净化富营养化水体的研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(4): 90-94.
[15] 陈荷生,宋祥甫,邹国燕. 利用生态浮床技术治理污染水体[J]. *中国水利*, 2005(5): 50-53.
[16] 井艳文,胡秀琳,许志兰,等. 利用生物浮床技术进行水体修复研究与示范[J]. *北京水利*, 2003(6): 20-22.
[17] 赵祥华,田军. 人工浮岛技术在云南湖泊治理中的意义及技术研究[J]. *云南环境科学*, 2005, 24(s1): 130-132.
[18] HUANG Z, KONG F, LI Y, et al. Advanced treatment of effluent from municipal wastewater treatment plant by

- strengthened ecological floating bed [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 309: 123358. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123358.
- [19] SUN S, LIU J, ZHANG M, et al. Thiosulfate-driven autotrophic and mixotrophic denitrification processes for secondary effluent treatment; Reducing sulfate production and nitrous oxide emission [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 300: 122651. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122651.
- [20] YANG X, LI T, XIA Y, et al. Microbial fuel cell coupled ecological floating bed for enhancing bioelectricity generation and nitrogen removal[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 46(20): 11433–11444. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.051.
- [21] 刘文焕, 缪晨霄, 王智超, 等. 人工浮岛种植水生植物对包头南海湿地水质净化效果研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(9): 122–128.
- [22] 李滢莹. 静安区彭越浦河道生态浮岛+曝气充氧组合工艺增强河道净化能力研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2019(8): 234–236.
- [23] 刘兴社. 太阳能混合充氧-生态浮岛集成修复景观水体效果研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [24] YAO X, CAO Y, ZHENG G, et al. Use of life cycle assessment and water quality analysis to evaluate the environmental impacts of the bioremediation of polluted water[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 761: 143260. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143260.
- [25] PAVLINERI N, SKOULIKIDIS N T, TSIHRINTZIS V A. Constructed floating wetlands: A review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 1120–1132. DOI: 10.1016/j.cej.2016.09.140.
- [26] 杨皓然. 湖南省常见水生植物的耐污与去污能力比较研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [27] 余婷. 外源重金属胁迫条件下水生植物净化效果研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- [28] TARA N, ARSLAN M, HUSSAIN Z, et al. On-site performance of floating treatment wetland macrocosms augmented with dye-degrading bacteria for the remediation of textile industry wastewater[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 541–548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.258.
- [29] 刘晶晶, 彭娟莹, 吴奇. 生态浮岛技术的研究现状及展望[J]. *湖南农业科学*, 2014(15): 47–49.
- [30] 王亚艳, 李蒙英, 倪鹏平, 等. 湿地型生态岛植物适应性试验[J]. *水资源保护*, 2016, 32(3): 79–83.
- [31] 李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. *中国环境科学*, 1997(1): 55–59.
- [32] DUSHENKOV V, KUMAR P B A N, MOTTO H, et al. Rhizofiltration: The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(5): 1239–1245.
- [33] ZHU L, LI Z, KETOLA T. Biomass accumulations and nutrient uptake of plants cultivated on artificial floating beds in China's rural area[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(10): 1460–1466.
- [34] BARTUCCA M L, MIMMO T, CESCO S, et al. Nitrate removal from polluted water by using a vegetated floating system [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 803–808. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.156.
- [35] WERAGODA S K, JINADASA K B S N, ZHANG D Q, et al. Tropical application of floating treatment wetlands [J]. *Wetlands*, 2012, 32(5): 955–961.
- [36] GARCIA C L M, MAJSZTRIK J C, BRIDGES W C, et al. Comparative nutrient remediation by monoculture and mixed species plantings within floating treatment wetlands [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(14): 8710–8718.
- [37] SALEEM H, REHMAN K, ARSLAN M, et al. Enhanced degradation of phenol in floating treatment wetlands by plant-bacterial synergism [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(7): 692–698.
- [38] ZHANG C, LIU W, PAN X, et al. Comparison of effects of plant and biofilm bacterial community parameters on removal performances of pollutants in floating island systems [J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 58–63. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.09.023.
- [39] SAVIOLO O J A, DO CARMO C F, SILVA C M A, et al. Nitrogen and phosphorus removal from fish farming effluents using artificial floating islands colonized by *Eichhornia crassipes* [J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 17: 100324. DOI: 10.1016/j.aqrep.2020.100324.
- [40] ZHAO D, CHEN C, LU Q, et al. Combined use of cold-season and warm-season macrophytes in floating constructed wetlands to increase nitrogen removal in the early cold season[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120054. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120054.
- [41] 冯优, 陈庆锋, 李金业, 等. 水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(10): 2397–2408.
- [42] ZHAO F, YANG W, ZENG Z, et al. Nutrient removal efficiency and biomass production of different bioenergy plants in hypereutrophic water [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2012, 42: 212–218. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.04.003.
- [43] VAN O A J. Nitrogen removal in constructed wetlands treating nitrified meat processing effluent [J]. *Water Science and Technology*, 1995, 32(3): 137–147.
- [44] SHAHID M J, ARSLAN M, ALI S, et al. Floating wetlands: A sustainable tool for wastewater treatment [J]. *Clean: Soil, Air, Water*, 2018, 46(10): 1800120.
- [45] SEO E, KWON O, CHOI S, et al. Installation of an artificial vegetating island in Oligomesotrophic Lake Paro, Korea [J]. *The Scientific World Journal*, 2013: 1–6. DOI: 10.1155/2013/857670.

- [46] RODRIGUES M O, ABRANTES N, GONÇALVES F J M, et al. Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal) [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 1549 – 1559. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.233.
- [47] ZIAJAHROMI S, DRAPPER D, HORNBUCKLE A, et al. Microplastic pollution in a stormwater floating treatment wetland; Detection of tyre particles in sediment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136356. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136356.
- [48] 马强,高明瑜,谭伟,等. 新型生态浮岛在改善水质中的作用及生物膜载体微生物特征研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(6): 1596–1601.
- [49] GUPTA V, COURTEMANCHE J, GUNN J, et al. Shallow floating treatment wetland capable of sulfate reduction in acid mine drainage impacted waters in a northern climate [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 263: 110351. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110351.
- [50] SCHWAMMBERGER P F, LUCKE T, WALKER C, et al. Nutrient uptake by constructed floating wetland plants during the construction phase of an urban residential development [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 677: 390–403. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.341.
- [51] LI M, WU Y, YU Z, et al. Nitrogen removal from eutrophic water by floating-bed-grown water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) with ion implantation [J]. *Water Research*, 2007, 41(14): 3152–3158.
- [52] SUN S, LIU J, ZHANG M, et al. Simultaneous improving nitrogen removal and decreasing greenhouse gas emission with biofilm carriers addition in ecological floating bed [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 292: 121944. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121944.
- [53] 郑世华,郑仕远,卿立述. 水培陶瓷浮床的研制及应用探索 [J]. *农村经济与科技*, 1999(7): 20–21.
- [54] 胡优华,袁宇美,高静. 一种具有消浪功能的景观生态浮岛: CN201520941744.3 [P]. 2016–05–11.
- [55] 鲁宏. 破浪压水海洋漂浮平台: CN201921888572.2 [P]. 2020–06–16.
- [56] 赵志华,龚伟,李萍,等. 水生植物生态消浪浮床: CN201821798219.0 [P]. 2019–07–26.
- [57] LIU L, WANG S, JI J, et al. Characteristics of microbial eukaryotic community recovery in eutrophic water by using ecological floating beds [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 134551. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134551.
- [58] WANG W, WANG Y, LI Z, et al. Effect of a strengthened ecological floating bed on the purification of urban landscape water supplied with reclaimed water [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622/623: 1630–1639. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.035.
- [59] MASTERS B. The ability of vegetated floating Islands to improve water quality in natural and constructed wetlands; A review [J]. *Water Practice and Technology*, 2012, 7(1). DOI: 10.2166/wpt.2012.022.
- [60] ZHANG W Y, CHEN R, ZHAO T T, et al. Research on strengthening decomposition of organic nitrogen by ammonibacteria in the faber cymbidium plant floating island [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 340: 429 – 435. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.340.429.
- [61] REHMAN K, IMRAN A, AMIN I, et al. Inoculation with bacteria in floating treatment wetlands positively modulates the phytoremediation of oil field wastewater [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 349: 242 – 251. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.02.013.
- [62] SHEN C, ZHAO Y Q, LIU R B, et al. Enhancing wastewater remediation by drinking water treatment residual-augmented floating treatment wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 673: 230 – 236. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.035.
- [63] HU Z, LI D, GUAN D. Water quality retrieval and algae inhibition from eutrophic freshwaters with iron-rich substrate based ecological floating beds treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 135584. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135584.
- [64] COLARES G S, DELL O N, BARBOSA C V, et al. Floating treatment wetlands integrated with microbial fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bioenergy generation [J]. *Science of the total environment*, 2021, 766: 142474. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142474.
- [65] LUCKE T, WALKER C, BEECHAM S. Experimental designs of field-based constructed floating wetland studies; A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 199–208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.018.
- [66] WALKER C, TONDERA K, LUCKE T. Stormwater treatment evaluation of a constructed floating wetland after two years operation in an urban catchment [J]. *Sustainability*, 2017, 9(10): 1687. DOI: 10.3390/su9101687.
- [67] OLGUÍN E J, SÁNCHEZ-GALVÁN G, MELO F J, et al. Long-term assessment at field scale of floating treatment wetlands for improvement of water quality and provision of ecosystem services in a eutrophic urban pond [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 584/585: 561–571. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.01.072.
- [68] SUN Y, WANG S, NIU J. Microbial community evolution of black and stinking rivers during in situ remediation through micro-nano bubble and submerged resin floating bed technology [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 258: 187–194. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.03.008.
- [69] SONG J, LI Q, WANG X C. Superposition effect of floating and fixed beds in series for enhancing nitrogen and phosphorus removal in a multistage pond system [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 695: 133678. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133678.

- [70] WANG W, WANG Y, WEI H, et al. Stability and purification efficiency of composite ecological floating bed with suspended inorganic functional filler in a field study[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 37: 101482. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101482.
- [71] NSENGA K M, BATOOL A, LI X. How to enhance the purification performance of traditional floating treatment wetlands (FTWs) at low temperatures: Strengthening strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766: 142608. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142608.
- [72] 白少元, 张华, 解庆林. 复合流人工浮岛系统植物与基质在污染水体修复中的作用[J]. *净水技术*, 2010, 29(1): 9-15.
- [73] 罗固源, 卜发平, 许晓毅, 等. 温度对生态浮床系统的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(4): 499-503.
- [74] SUN L, LIU Y, JIN H. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(1): 135-140.
- [75] GAO L, ZHOU W, HUANG J, et al. Nitrogen removal by the enhanced floating treatment wetlands from the secondary effluent [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 234: 243-252. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.03.036.
- [76] LI W, ZHANG D, HUANG X, et al. *Acinetobacter harbinensis* sp. nov., isolated from river water [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2014, 64: 1507-1513. DOI: 10.1099/ijs.0.055251-0.
- [77] WANG C, SAMPLE D J, BELL C. Vegetation effects on floating treatment wetland nutrient removal and harvesting strategies in urban stormwater ponds [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 499: 384-393. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.063.
- [78] LI H, HAO H, YANG X, et al. Purification of refinery wastewater by different perennial grasses growing in a floating bed [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35(1): 93-110.
- [79] ZHAO F, ZHANG S, DING Z, et al. Enhanced purification of eutrophic water by microbe-inoculated stereo floating beds [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013, 22(3): 957-964.
- [80] SAMAL K, KAR S, TRIVEDI S. Ecological floating bed (EFB) for decontamination of polluted water bodies: Design, mechanism and performance [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 251: 109550. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109550.

(上接第 119 页)

到径流污染控制目标。部分工业厂区内、居住小区内目前是合流制将由镇区实施雨污分流改造,同时对污水管道未覆盖的区域进行市政道路上的支干管完善工程,以便工业厂区及居住小区雨污分流改造后接入市政污水管道内。

4 结语

水环境整治工程为民生工程,始终坚定不移地推行“控源截污、内源治理”为主、“活水循环、生态修复”为辅的技术路线,设计思路坚持以人民为中心的发展思想,确保黑臭水体治理效果与群众的切身感受相吻合,赢得群众满意。因此,工程技术上应多策并举,顺应“一河一策”“一湖一策”治理理念。

控源截污是黑臭水体治理的重要举措,其中截污纳管应根据河涌综合整治的要求、河涌现状情况、河涌周边建筑分布情况及河涌自身的形态结构和风格、风貌等因素进行考虑,切莫千篇一律,否则不但不能保证控源截污效果,反而会对河涌造成破坏,得不偿失。

村镇地区普遍存在可利用的建设用地有限、征地问题制约项目的推进等问题,因此,排水体制的选择是关键。本研究流域通过充分与镇区对接后,确

定的原则如下:居民区因地制宜,能分尽分;对于易分流区域沿河,设置污水收集管道;对于难分流区域采用截流式合流制解决近期污染物入河问题;对于现阶段污水厂不能实现雨季全流程处理的,通过新建调蓄池控制溢流污染。

参考文献

- [1] 张德祥, 郝玉友, 刘宝富, 等. 巨野县会盟景观带黑臭水体治理案例分析[J]. *净水技术*, 2021, 40(7): 86-91.
- [2] 韦东. 城市封闭性黑臭水体综合治理方案[J]. *净水技术*, 2020, 39(8): 160-166.
- [3] 汤钟, 孙静, 张亮, 等. 深圳前海河流域黑臭水体系统化治理方案探索[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(24): 28-33.
- [4] 李娜. 福州市厦坊溪黑臭水体污染成因分析及治理方案[J]. *中国市政工程*, 2021(1): 36-39, 86.
- [5] 张静, 许晓春. 广东省黑臭水体治理实践中的几点思考[J]. *中国水利*, 2019(5): 6-9.
- [6] 邵运贤, 丁勇, 于善初, 等. 喀斯特地貌地区黑臭水体综合治理案例实践[J]. *给水排水*, 2021, 57(9): 63-68.
- [7] 徐祖信, 徐晋, 金伟, 等. 我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J]. *给水排水*, 2019, 55(3): 1-5, 77.
- [8] 余忻, 黄悦, 张志果, 等. 水环境综合治理市场现状和发展形势分析[J]. *给水排水*, 2020, 56(6): 85-88.
- [9] 王少林. 城市黑臭水体整治中控源截污改善措施的思考[J]. *净水技术*, 2017, 36(11): 1-6.