

近岸海域水体净化植物的选择与布置

张嘉怡, 田正林*, 宋向上, 潘志林, 倪佳敏

(广东海洋大学 海洋工程学院, 广东 湛江 524088)

摘要:近岸海域污染是海洋环境污染的源头之一,海域水质优劣是海域污染元素含量与水体之间相互作用的结果。因此解决近岸海域的海水净化问题需要控制污染元素的含量,降低超标元素含量,保证近岸海域水体元素组成的平衡。阐述了近岸海域水体污染原因、污染水体处理要求以及处理方法,总结了净化植物的特性与分类,分析了不同种类植物的喜好特性和主要消除水体中的污染元素种类及强度、各种植物对水域环境的净化效应和净化机制。针对污染海域分析了海域净化植物的选择原则、布局原则以及植物水上漂浮方法。为深入开展近岸海域水体污染的生态化处理研究提供参考,具有潜在的工程应用价值。

关键词:近岸海域;水质净化;生态化处理;植物选择

中图分类号:X55

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2022)01-0061-10

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2022.01.006

引用格式:张嘉怡,田正林,宋向上,等.近岸海域水体净化植物的选择与布置研究[J].海岸工程,2022,41(1):61-70. ZHANG J Y, TIAN Z L, SONG X S, et al. Selection and arrangement of the plants for purifying water in the nearshore waters[J]. Coastal Engineering, 2022, 41(1): 61-70.

近年来,人类城市化活动及近岸亲水生活的扩展,不可避免地对近岸水域的水体产生负面影响,威胁近岸海域景观欣赏和海洋环境^[1]。除人类活动的影响以外,近岸海域受到污染的其中一个重要原因是以往修建的部分海洋工程防波堤由于未充分考虑海水的交换作用,致使防波堤防护水域相对封闭,生态系统失去平衡,多年的使用之后,近岸水域水质条件变差。任何一个相对封闭的水域都可视为一个小的生态系统,防波堤初建完成后,其封闭水域是一个调节能力比较强的生态系统,但随着时间的增长,封闭水域内的污染源越来越多,而封闭水域由于生物多样性的缺失,其自然调节能力变差,导致近岸水域水体污染元素等超标。

治理污染水体可采用种植植物的原位处理技术,过去植物净化水体的方法主要用于湖泊、河道等淡水的污水处理中。植物净化水体主要通过营养物和金属的吸收、生物膜的形成、胞外酶的释放、污染物的沉降和结合以及悬浮物絮凝的增强等机制消除污染物。植物在水生环境可持续发展中起着关键作用,它可为许多生物提供食物和庇护所,并影响着河流、河口和沿海地区的生态系统^[2]。Hu 等^[3]开发了一个适用于富营养盐水库和湖泊净化的生态淤泥浮床,在浮床上种植了一种抗污染且生长快速的挺生植物(菖蒲)以吸收养分、净化水体。自然界中的湖泊、河道等由于水深原因净化植物需以小型人工浮岛形式浮于水面,人工浮岛是一种由漂浮垫、漂浮水生植物、以沉积物为根基的新兴湿地植物和相关生态群落(如藻类、生物膜和小型无脊椎动物)组成的浮体构筑物^[4]。人工浮岛根据其规模、复杂程度有多种分类:人工湿地、漂浮处理湿地、浮动植物床系统等^[5-7]。对于湿地系统,其水文、土壤和动植物是物质循环的主要载体,有关湿地系统的研究很多:自然资源的时空分布^[8]、水循环特性^[9-10]、污染物特征识别^[11-12]、物种间的竞争和演替^[13]以及营养层次之间

收稿日期:2021-06-22

资助项目:广东海洋大学科研启动费资助项目——斜坡前潜堤的水沙动力学特性研究(060302072003);广东海洋大学海洋工程学院本科生创新项目——生态型人工浮岛与湿地研究;湛江市科技计划项目——集成在风电基础上的升降式网箱结构稳定性补偿技术研究(2021E05006)

作者简介:张嘉怡(2002—),女,本科生,港口航道及近海工程专业。E-mail: zhazhayigh@163.com

* **通信作者:**田正林(1985—),男,讲师,博士,主要从事波浪与结构物相互作用方面研究。E-mail: 563136067@qq.com

(陈靖 编辑)

的能量流动和物质循环^[14-15]等。

近岸封闭海域也可通过种植净化植物的方法^[16]改善自然环境景观、吸收水体中的超标污染源元素以恢复生态系统,但是近岸海域水体属于咸水,要求净化植物具有高耐盐性能。Hou 等^[17]研究了耐盐性植物(赤碱蓬)对盐沼泽地分布特性的影响,指出:盐沼泽植物密度对浸水情况比较敏感,盐沼泽植物赤碱蓬的密度、成长环境与土壤水涝情况和土壤盐分含量特性等有关。多项研究表明盐碱地的植物受到很多因素的影响、生物因素包括食草植物^[18]、螃蟹吃食^[19];非生物因素包括土壤物理化学特性^[20]、耐污性^[21]、气候影响^[22]盐度、浸没度^[23-24]、沉积物^[25]、盐危害^[26]。由于近岸海域水深较浅、光照强度适宜,耐盐性植物会更好生长,海洋植物(如大型海藻、海草和湿地)在进化过程中也会不断调整自身结构,以便与环境相互作用并生存下来^[27]。

无论是在淡水还是咸水的污水处理中,污水的处理效果都与净化植物的特性关系密切。周晓燕等^[28]通过实验研究了挺水植物芦苇、慈姑和浮叶植物睡莲、荇菜对污水的净化效果:4种水生植物对水体中氮元素去除率分别为:芦苇 77.25%、慈姑 76.16%、荇菜 75.13%和睡莲 71.69%;对磷元素去除率分别为:芦苇 78.97%、慈姑 75.76%、荇菜 75.23%和睡莲 73.09%。Zhu 等^[29]通过原位实验测试了人工湿地的净化效果:植物根、茎、叶的 N、P 含量与分布和植物种类有很大的相关性。刘淑媛等^[30]利用泡沫板栽培水芹、水雍菜去除氮磷,结果表明,水雍菜对 N、P 的去除率 >90%,水芹对 N、P 的去除率达到 75%,经水培蔬菜处理后,水中的氮、磷大幅度降低,水质得以修复。刘士哲等^[31]认为风车草、彩叶草和茉莉净化富营养化污水的能力为:风车草最好,彩叶草次之,茉莉最差。这些研究成果为近岸海域水体污染整治与修复提供了研究思路和框架,可为近岸海域生态系统的管理和修复提供参考。

综上,在水体污染严重的水域中引入各种水生植物可以增加生态系统的生物多样性,通过生态修复技术可净化水体,使自然生态系统得以修复。但在海洋工程领域由于海水固有的特性,有关海洋水体的生态净化研究较少,适合海水生长的植物习性也需进行研究。关于海洋污染水体生态净化处理技术,需要系统研究净化植物的特性,甚至是驯化改良已有物种。因此,对海洋近岸水体交换性差海域的水体污染原因进行系统调查研究,是目前近岸海域水体污染整治的基础性研究之一。本文根据海洋近岸水体交换性差的海域水体污染原因,分析了水域污染特性,进而选择适应海域的净化植物。

1 近岸海域污染

1.1 近岸海域污染原因

由于未充分考虑水体的交换性,有些防波堤破坏了其所处的近岸海域的生态平衡,致使水质变差、水体污染严重。近岸水域水体污染可导致赤潮、水华等发生,污水中所含的 N、P 等元素可使污染水域中的蓝藻(蓝细菌)、绿藻、腰鞭毛虫等生物大量繁殖,进而导致水体变色。大量微生物可能会导致海水耗氧量增加,致使近岸的鱼类、虾蟹等生物因缺氧而大量死亡、尸体腐烂堆积,加剧水体污染。有机物降解产生 NH_3 、 H_2S 等,导致水体发臭。此外 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 与 S^{2-} 形成 FeS 、 MnS ,导致水体呈黑色、浑浊、散发腥臭味,从而形成黑臭水体^[31]。

1.2 近岸海域污染处理要求

近岸水域一旦污染,水体质量明显下降,生态遭到破坏。近岸水域水体污染会影响城市生态文明建设,严重情况下会影响人类身心健康,因此需要对近岸流通性差的水域水体进行有效处理。近岸水域污染水体处理后应该满足以下要求:①水体不黑不臭,并有大量浮游生物出现,水体各项指标满足优良水质要求;②海域具有一定的生态恢复能力,在较长一段时间内都能维持水体的各项指标满足要求;③生物多样性增加,明显出现鱼类等的活动;④氧气在水体中的总含量得以改善,超标水体元素含量显著下降,海域水体变得清澈

透明^[32]。

2 污染水域处理方法

流通性差的海域随着时间的增长会出现污染问题,因此应根据既定水域污染特性找出污染的原因,最终进行有针对性的处理。水体污染通常是水体中的某些物质元素含量过高,造成水体的富营养化,常用的黑臭水体处理方法有物理方法:化学方法、生物治理方法等。本文将从生态和非生态的角度出发,对各种处理方法进行简单描述和分析。

2.1 非生态处理方法

非生态处理方法是指采用物理方法或化学方法消除水体中的污染物质元素,亦即采用非植物自身净化能力的净化水体方法^[34]。非生态净化水体方法投资较大,治理效果欠佳,存在一定的不稳定性。物理方法:如在水体加入吸附剂,利用其强大的吸附性能,去除水中的污染物,改善水质条件。化学方法:如在污染水体中加入 Q_3 ,利用 O_3 同水体中的有机污染物发生化学反应,消除污染物质。 O_3 方法后期运行管理费用较高。

当前我国水环境修复常采用的物理方法有人工爆气、引水冲刷或稀释等。人工爆气方式需要向水中供氧,恢复水底层的溶解氧,对铁元素、 H_2S 或氨氮等物质进行溶解,降低其浓度,实现对水体中磷活化及扩散的有效抑制,增强水体本身的自净能力。而化学方法一般利用化学絮凝处理技术进行污水治理。这一方式能实现对水质的改善和水体污染物质的去除,治理效率较高,效果好。但该方法处理不当易引发对水生物的危害,可能引起二次污染问题。

2.2 生态化处理方法

生态处理方法作为一种新的水体治理与修复技术,利用在水体中种植的植物对污染水体进行原位修复^[33]。生态处理方法具有可操作性强、净水功能良好、运行成本低、景观功能效果好和生态风险小等优点,其应用前景十分广阔。水生植物根系可吸附水中的悬浮污染物质净化水体,也可为微生物成长提供适宜的营养环境^[28]。利用高等水生植物净化黑臭水体是国内外学者研究的热点,目前主要集中于水质净化能力分析^[34-35] 和 水生植物 N、P 吸收能力的研究^[36-37],水生植物的净化作用均有一定的承载限度^[38],因此对不同类型植物的净化特性进行分析很有必要。

2.3 非生态与生态处理方法的比较

非生态污水处理过程中,虽然能在较短时间内完成对水体质量的改善,但投加絮凝剂、物理自由沉淀等方法导致耗药量大,产生的污泥量大。在水体清淤过程中,会因为扰动使更多污染物进入水体,破坏系统内生态平衡。非生态处理方法会引起二次污染,存在一定的治理风险,不是污染水体的长效治理办法^[28]。而生态处理办法对环境影响小,能最大限度降低污染物浓度,提高水体自净能力,恢复水环境生态多样性,并可结合景观设计打造优美的植物景观。但生态处理方法缺点是周期性长,因此可配合其他工程联合使用。生态处理方法与非生态处理方法的对比见表 1。

表 1 非生态与生态水体处理方法的对比

Table 1 Comparison between the non-ecological and the ecological treatment methods

方 法	处理方式	生态影响	净化时间	处理量	二次污染
非生态处理	物理处理方法消除污染物质	处理后对生态平衡产生干扰	短	大	易造成
生态处理	植物吸收污染物质	处理后对环境影响小	长	小	不易造成

由于不同类型植物对富营养化水体的净化机理及净化效果的不同,不同类型植物对不同特性水体的影响也不尽相同。因此,当采用种植植物的生态处理方法时,应先筛选出净化效果最佳的植物,阐明其对不同富营养化水体的净化机理,对净化修复有重要作用。本文以生态化处理方法为主,来探究其植物的选型与应用。

3 净化植物的特性与分类

各种净化植物有不同的耐盐能力、吸污能力、吸收元素能力、环境的适应性等特性,致使其净化能力存在很大差异,所以应对植物的净化原理和净化特性进行分析。

3.1 植物净化原理

植物有吸污净化作用,可高效去除水体中 N、P 和 K 等污染物质,因此被广泛应用于生态修复及环境改善中。植物净化水体的机理:①植物根系吸收水体中含量过高的 N、P 和 K 等元素,通过生化反应加以消化,降低水体中的元素含量;②植物会吸附污染物颗粒,导致颗粒沉降、溶质输运变慢等;③植物可改变水体溶解氧(DO)含量,沉水植物的光合作用能直接提高水中 DO 含量^[39],挺水植物可通过根茎通气组织将叶片产生的氧气输运至根部^[40];④植物生长提供了基质微生物的代谢能量“碳源”^[41],根系环境成为大量微生物及底栖生物的栖息场所,被认为是地球上最富有活性的界面之一^[42];⑤植物的生长吸收水体中的营养盐^[43]。

植物净化水体是通过植物根系对水体中含量过高的 N、P 和 K 等元素进行吸收,使得水体中过量的元素含量降低至满足水体水质要求的指标。植物根系分泌大量的酶,利用酶和微生物降解、吸收水体中有机污染物,从而达到净化水质的目的^[44-45],为多种微生物创造适宜的生境。净化水体是通过浮岛植物根部及根际微生物等的吸收、吸附等作用,消减、还原水体中的 N、P 和有机物质,从而达到净化水质的功能^[46]。

3.2 植物净化特性

污染水域水体中含量过高的 N、P 和 K 等污染元素也是植物生长所需要的营养元素,可通过种植植物的方法净化水体。对于不同类型的植物其净化效果也各不相同^[47-48],如不同类型植物泌氧速率由高至低为:芦苇、香蒲、荇菜、水芹菜和荷花^[49],植物的光合作用和呼吸作用也会使水体中溶解氧 DO 浓度呈昼夜周期性变化。在浮岛上栽植成功且具有较好水质净化效果的植物主要有香根草、菖蒲、美人蕉、风车草、千屈菜等。种植香根草的人工浮岛能够明显降低水体中的 N、P、COD、BOD 等污染物浓度^[50];种植美人蕉的人工植物浮岛对户外城市景观用水净化效果较好,对总氮、总磷和 COD 的去除率分别为 60%、84.33%、24.25%^[51]。不同植物的习性也决定了植物的特定功效,有些水生植物的吸氮耗氮能力很强,如芦苇通过茎秆向根系供氧的能力在根系附近形成脱氮区,包括脱氮所需的好氧和缺氧区域^[52],具有较强的耗氮能力。近岸海域水体盐分含量较高,净化植物需要具有高耐盐性,耐盐性植物能够吸收水中的盐分,并能很快将多余的盐分排出。适合近岸海域高盐分水体的喜盐型植物包括红树林、芦苇、赤碱蓬等,它们在盐渍土壤里可以很好地生长。

3.3 净化植物分类

根据不同植物的生活习性、吸收物质、好氧特性、吸污能力等,可以将植物进行分类,从而针对目标水域水体进行科学有效地净化。由于各水域污染源的不同,导致水体水质各不相同,选择的净化植物类型也会有较大区别。植物净化能力与水体中存在的污染物质特性有关,如狐尾藻对受污染的水体(含底泥)中氨态氮、硝态氮、总氮的去除率能达到 90%,且对环境的影响较小,被称为脱氮“精灵”^[47]。

净化植物需具有较强的抗污吸污能力、抗浸泡能力等,不同类型的植物具有各自不同的能力,因此需按

类型对植物进行分类,以便有针对性地选择近岸水域净化植物。水生植物按生活特性可分为:湿生植物、挺水植物、浮叶植物和沉水植物^[53],4种植物特性的对比见表2。

表2 四类净化植物的对比

Table 2 Comparison of the four kinds of plants applied for the water purification

类 型	生活特性	优 势	劣 势	典型植物
湿生植物	生活在水中或 周期性淹水	抗淹能力强,可生长在潮湿地区	抗旱能力差	大米草
挺水植物	根茎生于水中底泥, 茎叶挺水而出	阳光利用率高, 可减少藻类植物的生长	对扎根基质要求高	芦苇、水葱、灯心草
浮叶植物	根扎于水底基质,叶片浮在水面	水体净化价值高,耐污性能强	抗风浪能力弱	睡莲、凤眼蓝
沉水植物	全部生活在水下	有发达的通气组织,可以吸收更多的污染物质	水中光合作用弱,生长慢	金鱼藻

资料来源:参考文献[49]。

湿生植物是指生活在水中或周期性淹水土壤中的植物,喜欢潮湿环境,抗旱能力差,根具有抗淹性能。根据其生存环境特征,可分为阳性湿生植物(喜强光、潮湿土壤)和阴性湿生植物(喜弱光、潮湿大气),其典型植物为大米草^[53]。挺水植物是指植物的根、根茎生长在水下底泥之中,茎、叶挺出水面的植物,常分布于0~1.5 m的浅水区域,其中有些生长于潮湿的岸边,其典型植物为香蒲、芦苇、水葱、灯心草和水葱^[53]。浮叶植物又称浮水植物,是指根扎入水底基质,叶片浮于水面的植物,生于浅水中,具有很高的水体净化价值,喜肥、耐污,其典型植物为睡莲、凤眼蓝^[53]。沉水植物是指植物体全部位于水面下固着生存的大型水生植物,有利于气体交换的发达通气组织,在水下弱光的条件下也能正常生长和发育,但对水质要求高,水质浑浊会影响其光合作用,其典型植物为金鱼藻、狐尾藻等^[53]。

4 海域净化植物的选择与应用

由于近岸海域特点和水质污染特性不同,应根据各自海域的特点、水质污染来源、各种水生植物的喜好特性等选择需要净化的近岸水域的净化植物品种。污染海域与净化植物需搭配合适才能达到良好的净化水体的效果:芦苇和米草对水中悬浮物、氯化物、有机氮和硫酸盐等具有较好的净化作用;凤眼莲、浮萍、金鱼藻、黑藻等有吸收水中重金属的作用;水葱能净化水中的酚类。选择植物净化近岸海域水体时,首先根据海域水质污染的特性进行分析,然后选择与海域相匹配的净化植物,最后设计植物布局和浮运载体。

4.1 选择净化植物的原则

植物净化污水过程中,净化植物的选择直接关乎海域污染的生态修复成败。净化植物选择应遵循以下原则。

1) 与净化海域有很好的适应性

净化植物应优先考虑本地物种,能较快适应本土环境;当引入外来物种时,应避免外来物种入侵问题。某些净化能力较强、净化效率高的水生植物(如水花生和水葫芦)在引入时,可能会对本地生态系统造成严重的破坏^[54]。当植物选择和管理不当时,引入的物种可能会变成入侵物种,对当地农业、水产养殖和生物多样性造成不良的影响。因此,净化水体的关键是净化植物可以在污染水域很好地成活,且不对当地生态系统造成破坏。

2) 有较强的水体净化能力

水生植物由于生长周期、酶活性等不同,对水体内污染源的吸收净化能力差异较大。在选择植物种类

时,应优先选择水体净化能力强、根系发达、生物消耗量大的植物,吸取消耗掉水体中更多的污染物质。尽可能选择高吸收率的净化植物,能够在短期内(3~6个月)完成海域水体净化。

3)有较强的抗风抗浪能力

近岸污染海域一般与外海相通,会受到外海波浪的冲击作用,也会受到一定的风作用。因此,要求净化植物具有一定的抗风抗浪能力,以保证植物的安全。而植物本身对波浪也有一定的消减作用,如海草^[55-57]、人工湿地^[58]、海藻^[59]等。

4)具有较强的抗腐烂能力

净化植物是通过发达的植物根系对水体进行净化的,植物根系需要长时间地浸没于水中吸收水体中的污染元素,其中腐烂的、长时间浸泡的植物根茎和漂浮物质也会成为污染源。因此净化植物的根系要求耐水浸泡、抗冲刷力强、对水体环境不产生其他负面影响,关键是保证净化植物可以很好地成活。

5)具有一定的针对性

近岸水域污染通常是由水体中的某些元素(如N、P、K等)超标所致。因此,在水质净化前应先调查水体污染的主要原因及污染元素,以便有针对性地选择净化植物。

6)多物种组合搭配

由于污染海域与外海的流通性差,致使海域水体中多种污染元素含量超标,而每一种植物最佳强度吸收的污染元素只有一种或几种。因此,对于含量超标的其他元素的吸收需要另外布置物种净化,以达到满足水质要求的目标。关于植物对水体中污染元素的去除效果及机理已有相关研究成果^[60],不同类型植物的净化效果存在差异,合理的植物配置可提高净化效果。

4.2 布局净化植物的原则

1)考虑植物密度的影响

由于植物的种类及成长环境的不同,植物生长所需的空间也各不相同。株距会影响植物呼吸、授粉等,进而影响植物的生长状况^[61],严重时会导致植物的死亡。因此,引入水生植物时要根据每种植物的习性选择合适的株距,控制植物的密度。

2)考虑植物平面布局的影响

近岸水域植物区对光照具有遮挡作用,会影响其下方生物的活动,进而影响某些水下浮游生物对水体的净化作用。植物带的形状会对水体的循环流动产生影响,尤其是在风浪作用较大时,水体的循环对水体的净化影响较大。此外,植物分布带的形状对风浪具有一定的消减作用,也会影响到植物的浸没深度。因此,确定净化植物后还应考虑植物在水平面上的形状布局。已有学者研究了植物类型及分布对湿地水动力特性的影响^[62-63],目前植物的布局和平面形状逐渐受到关注。

4.3 植物浮运载体设计

适合的浮运载体是近岸海域污染水体植物净化方法得以完成的前提,在水深较大水域,可通过载体使净化植物漂浮于水体表层附近。由于人工浮岛与湿地的适应性强、景观性好、移动性灵活,人工浮岛及湿地是广泛采用的一种技术^[46]。人工浮岛及湿地需固定装置将其固定在目标水域的中心位置,支撑装置和锚链锚固是海上结构固定常用方法,可根据水域条件及工程造价选择固定方法。

5 结 语

净化植物可有效治理近岸海域水体的污染,起到净化水体、创建新生境、美化水域景观等多重作用。本文针对近岸流通性差海域水体污染问题,分析了近岸水域水质污染及净化植物特性以及净化植物的吸污特性和吸污强度,为适应不同海域污染特性的植物选择提供参考。

净化植物对水体中的污染物质具有天然的处理能力,针对海域特点选择与之匹配的净化植物,能有效地消除水体中含有的污染元素含量。植物净化对环境比较友好,优势明显,具有一定的推广应用前景,但净化植物如何安放于水域中尚需研究。随着生态建设和近岸亲水生活的需求,近岸水域污染急需生态化处理,生态浮岛及湿地等生态化处理工艺可与生态环境有机融合^[64],将来势必会得到更多的推广和应用。因此,具有良好涉水性能、耐久性、可模性等优点的新型浮岛载体材料将会是研究热点,可能在海洋环境治理问题中发挥巨大作用。

参考文献 (References):

- [1] 王云龙. 近岸海域海水富营养化的成因与影响[J]. 山东环境, 2000(6): 33-34. WANG Y L. Genesis and influence of seawater eutrophication in coastal waters[J]. Shandong Environment, 2000(6): 33-34.
- [2] LI C W, ZHANG M L. 3D modelling of hydrodynamics and mixing in a vegetation field under waves[J]. Computers & Fluids, 2010, 39(4): 604-614.
- [3] HU G J, ZHOU M, HOU H B, et al. An ecological floating-bed made from dredged lake sludge for purification of eutrophic water[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1448-1458.
- [4] YE H N, YE H P, CHANG Y H. Artificial floating islands for environmental improvement[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 47: 616-622.
- [5] KATO Y, TAKEMON Y, HORI M. Invertebrate assemblages in relation to habitat types on a floating mat in Mizorogaik Pond, Kyoto, Japan[J]. Limnology, 2009, 10(3): 167-76.
- [6] FAULWETTER J L, BURR M D, CUNNINGHAM A B, et al. Floating treatment wetlands for domestic wastewater treatment[J]. Water Science & Technology, 2011, 64(10): 2089-2095.
- [7] SONG H L, LI X N, WANG X J, et al. Enhancing nitrogen removal performance of vegetated floating-bed by adding *Hyriopsis cumingii* Lea and an artificial medium[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2011, 20(9): 2435-2441.
- [8] WHITE, D C, LEWIS, M M. A new approach to monitoring spatial distribution and dynamics of wetlands and associated flows of Australian great artesian basin springs using quick bird satellite imagery[J]. Journal of Hydrology Amsterdam, 2011, 408: 140-152.
- [9] LANE R R, JR, DAY J W, DAY J N. Wetland surface elevation, vertical accretion, and subsidence at three Louisiana estuaries receiving diverted Mississippi river water[J]. Wetlands, 2006, 26: 1130-1142.
- [10] REED D, VAN WESENBEECK B, HERMAN P M J, et al. Tidal flat-wetland systems as flood defenses: understanding biogeomorphic controls[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2018, 213: 269-282.
- [11] BAI J, XIAO R, CUI B, et al. Assessment of heavy metal pollution in wetland soils from the young and old reclaimed regions in the Pearl River Estuary, South China[J]. Environ. Pollut, 2011, 159: 817-824.
- [12] KULKARNI R, DEOBAGKAR D, ZINJARDE S. Metals in mangrove ecosystems and associated biota: a global perspective[J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2018(153): 215-228.
- [13] GALLEGO-TEVAR B, CURADO G, GREWELL B J, et al. Realized niche and spatial pattern of native and exotic halophyte hybrids[J]. Oecologia, 2018, 188: 849-862.
- [14] SUN Z, MOU X, SUN J, et al. Nitrogen biological cycle characteristics of seepweed (*Suaeda salsa*) wetland in intertidal zone of Huanghe (Yellow) River Estuary[J]. Chinese Geographical Science, 2012, 22: 15-28.
- [15] ZAPATA M J, SULLIVAN S M P, GRAY S M. Artificial lighting at night in estuaries implications from individuals to ecosystems[J]. Estuar. Coast., 2019, 42: 309-330.
- [16] AUGUSTIN L N, IRISH J L, LYNETT P. Laboratory and numerical studies of wave damping by emergent and near-emergent wetland vegetation[J]. Coastal Engineering, 2009, 56: 332-340.
- [17] HOU W, ZHANG R, XI Y, et al. The role of waterlogging stress on the distribution of salt marsh plants in the Liao River Estuary wetland[J]. Global Ecology and Conservation, 2020: e01100.
- [18] KUIJPER D, BAKKER J P. Below- and above-ground vertebrate herbivory and abiotic factors alternate in shaping salt-marsh plant communities[J]. Journal of Experimental Marine Biology & Ecology, 2012(432-433): 17-28.
- [19] HOU W, LU W, ZHAO K, et al. Research on the temporal and spatial distribution characteristics of *Helice tientsinensis* in red beach of the Liaohe Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38: 272-277.
- [20] LI S, CUI B, BAI J, et al. Effects of soil abiotic factors on the plant morphology in an intertidal salt marsh, Yellow River Delta, China

- [J]. *Physics and Chemistry of The Earth*, 2018, 103: 75-80.
- [21] DALEO P, ALBERTI J, PASCUAL J, et al. Herbivory affects salt marsh succession dynamics by suppressing the recovery of dominant species[J]. *Oecologia*, 2014, 175(1): 335-343.
- [22] SIMAS T, NUNES J P, FERREIRA J G. Effects of global climate change on coastal salt marshes[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 139(1): 1-15.
- [23] INFANTE-MATA D, MORENO-CASASOLA P, MADERO-VEGA C. *Pachira aquatica*, as indicator of mangrove limit? [J]. *Revista Mexicana De Biodiversidad*, 2014, 85(1): 143-160.
- [24] XUE L, LI X, ZHANG Q, et al. Elevated salinity and inundation will facilitate the spread of invasive *Spartina alterniflora* in the Yangtze River Estuary, China[J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2018(506): 144-154.
- [25] TAI P, DAN S, LIU Y, et al. Degeneration mechanism research of the red beach landscape of the Shuangtaizi Estuary National Nature Reserve in China[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2009, 31: 17-20.
- [26] ZHU H Z, HOU W F, LI Z B, et al. Suaeda heteroptera degradation in the Estuary of Shuangtaizi River[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37: 1191-1194.
- [27] HENRY P Y, MYRHAUG D. Wave-induced drag force on vegetation under shoaling random waves[J]. *Coastal Engineering*, 2013, 78(aug.): 13-20.
- [28] 周晓燕, 贾涛, 杨涓. 几种水生植物去污能力比较研究[J]. *安徽农学通报*, 2017, 23(21): 36-38. ZHOU X Y, JIA Y, YANG J. Study on Purification Ability of Four Different Hydrophytes[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2017, 23(21): 36-38.
- [29] 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.
- [30] 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): 518-522. LIU S Y, REN J C, YOU W H. A study on purification of the Eutrophic water body with economical plants soillessly cultivated on artificial substratum[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1999, 35(4): 518-522.
- [31] 刘士哲, 林东教, 唐淑军, 等. 利用漂浮植物修复系统栽培风车草、彩叶草和茉莉净化富营养化污水的研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1261-1265. LIU S Z, LIN D J, TANG S J, et al. Purification of eutrophic wastewater by *Cyperus alternifolius*, *Coleus blumei* and *Jasminum sambac* planted in a floating phytoremediation system[J]. *Chinese Journal of Appliedecology*, 2004, 15(7): 1261-1265.
- [32] LIANG Z, SIEGERT M, FANG W, et al. Blackening and odorization of urban rivers: a bio-geochemical process[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, 94(3).
- [33] 李天育, 陈钰琦, 张静, 等. 含氮废水的处理方法研究[J]. *广东化工*, 2020, 47(24): 90-91. LI T YU, CHEN Y Q, Zhang J, et al. Research on the treatment of ammonia-nitrogen wastewater[J]. *Guangdong Chemistry*, 2020, 47(24): 90-91.
- [34] WU L Y, WEN C Q, QIN Y Q, et al. Phasing amplicon sequencing on illumina miseq for robust environmental microbial community analysis[J]. *BMC Microbiology*, 2015, 15(1): 125.
- [35] RICHARDSON C J, FLANAGAN N E, HO M, et al. Integrated stream and wetland restoration: a watershed approach to improved water quality on the landscape[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(1): 25-39.
- [36] SHI X Q, NG K K, LI X R, et al. Investigation of intertidal wetland sediment as a novel inoculation source for anaerobic satine wastewater treatment[J]. *Environmental Science and Technology*, 2015, 49(10): 6231-6239.
- [37] KOKKWANG N, SHI X Q, SAYLEONG O, et al. Pyrosequencing reveals microbial community profile in anaerobic bioentrapped membrane reactor for pharmaceutical wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2016(200): 1076-1079.
- [38] 王海珊, 邹平, 戴彝, 等. 优化生物组合技术提高黑臭水体净化效能[J]. *环境工程*, 2021, 39(1): 24-32. WANG H S, ZOU P, DAI B, et al. Optimizing biological combination technology to improve purification efficiency of black-odor water[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 24-32.
- [39] MOORHEAD K K, REDDY K R. Oxygen transport through selected aquatic macrophytes[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1988, 17(1): 138-142.
- [40] PEDERSEN O, COLMER T D, SAND-JENSEN K. Underwater photosynthesis of submerged plants-recent advances and methods[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013, 4: 140.
- [41] CONNELL E L, COLMER T D, WALKER D I. Radial oxygen loss from intact roots of *Halophila ovalis* as a function of distance behind the root tip and shoot illumination[J]. *Aquatic Botany*, 1999, 63(3-4): 219-228.
- [42] PHILIPPOT L, RAAIJMAKERS J M, LEMANCEAU P, et al. Going back to the roots: the microbial ecology of the rhizosphere[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2013, 11(11): 789-799.
- [43] GARCÍA J, ROUSSEAU D, MORATÓ J, et al. Contaminant removal processes in subsurface-flow constructed wetlands: a review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2010, 40(7): 561-661.

- [44] 魏成,刘平. 人工湿地污水净化效率与根际微生物群落多样性的相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2401-2406. WEI C, LIU P. Relationship between wastewater purification and diversity of rhizosphere microorganism in the constructed wetland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(6): 2401-2406.
- [45] 纪和,周建林. 人工浮岛植物的选择与应用[J]. 现代园艺, 2020(14): 92-93. JI H, ZHOU J L. Selection and application of artificial floating island plants[J]. Modern Gardening, 2020(14): 92-93.
- [46] 方媛媛. 人工浮岛修复富营养化水体的试验研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2016. FANG Y Y. Experimental research on artificial floating island remediation technology in eutrophic waters[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016.
- [47] 田雄,葛大兵,袁博,等. 不同植物人工浮岛在净化富营养水体中氮磷的效果研究[J]. 湖南农业科学, 2014(3): 50-52. TIAN X, GE D B, YUAN B, et al. Removal effect of artificial floating island with different plants to nitrogen and phosphorus in eutrophic water[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2014(3): 50-52.
- [48] RAN N, AGAMI M, ORON G. A pilot study of constructed wetlands using duckweed (*Lemna gibba* L.) for treatment of domestic primary effluent in Israel[J]. Water Research, 2004, 38(9): 2241-2248.
- [49] YAN Z, SONG B, LI Z, et al. Effects of submerged plants on the growth of eutrophic algae and nutrient removal in constructed wetlands[J]. Open Access Library Journal, 2016, 3(10): 1-11.
- [50] 钟金鸣. 人工湿地水质净化试验及应用研究[D]. 邯郸:河北工程大学, 2018. ZHONG J M. Study on water purification of artificial wetland[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2018.
- [51] 司友斌,包军杰,曹德菊,等. 香根草对富营养化水体净化效果研究[J]. 应用生态学报, 2003(2): 277-279. SI Y B, BAO J J, CAO D J, et al. Purification of eutrophicated water body by vetiveria zizanioids[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003(2): 277-279.
- [52] 王鹤霏,贾艾晨,张晓东,等. 人工浮岛对城市景观用水水质净化效果的研究[J]. 环境保护科学, 2013(5): 14-17. WANG H F, JIA A C, ZHANG X D, et al. Study on purification effect of artificial floating island on urban landscape water[J]. Environmental Protection Science, 2013(5): 14-17.
- [53] 陶正凯,陶梦妮,王印,等. 人工湿地植物的选择与应用[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(1): 44-48. TAO Z K, TAO M N, WANG Y, et al. Selection and application of constructed wetland plants[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(1): 44-48.
- [54] LIU X Y, LI J. The progress of Chinese aquatic ecological restoration[J]. Journal of Allergy & Therapy, 2012(S1). DOI: 10.4172/scientific reports.583.
- [55] FEAGIN R A, IRISH J L, MOELLER I, et al. Short communication: engineering properties of wetland plants with application to wave attenuation[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(3): 251-255.
- [56] INFANTES E, ORFILA A, SIMARRO G, et al. Effect of a seagrass (*Posidonia oceanica*) meadow on wave propagation[J]. Marine Ecology Progress, 2012, 456: 63-72.
- [57] PAUL M, BOUMA T J, AMOS C L. Wave attenuation by submerged vegetation: combining the effect of organism traits and tidal current[J]. Marine Ecology Progress Series, 2012, 444: 31-41.
- [58] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ J F, SÁNCHEZ-ROJAS V, MEMOS C D. Wave attenuation due to *Posidonia oceanica* meadows[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(4): 503-514.
- [59] LÖVÅS S M. Effect of kelp *Laminaria hyperborea* upon sand dune erosion and water particle velocities[J]. Coastal Engineering, 2001, 44: 37-63.
- [60] THORSLUND J, JARSJ J, JARAMILLO F, et al. Wetlands as large-scale nature-based solutions: status and challenges for research, engineering and management[J]. Ecological Engineering, 2017, 108: 489-497.
- [61] SABOKROUHIYEH N, BOTTACIN-BUSOLIN A, TREGNAGHI M, et al. Variation in contaminant removal efficiency in free-water surface wetlands with heterogeneous vegetation density[J]. Ecological Engineering, 2020, 143: 1-12.
- [62] 李莎莎,田昆,刘云根,等. 不同空间配置的湿地植物群落对生活污水的净化作用研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1951-1955. LI S S, TIAN K, LIU Y G, et al. Compare the purification effects of sewage by the wetland plant community composition and spatial patterns[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1951-1955.
- [63] HEBB A J, MORTSCH L D, DEADMAN P J, et al. Modeling wetland vegetation community response to water-level change at Long Point, Ontario[J]. Journal of Great Lakes Research, 2013, 39(2): 191-200.
- [64] 陈战利,肖安明,刘盛,等. 人工浮岛载体材料选择使用研究[J]. 绿色科技, 2020, 22: 147-149. CHE Z L, XIAO A M, LIU S, et al. Study on the selection and use of artificial floating island carrier materials[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020, 22: 147-149.

Selection and Arrangement of the Plants for Purifying Water in the Nearshore Waters

ZHANG Jia-yi, TIAN Zheng-Lin, SONG Xiang-Shang, PAN Zhi-Lin, NI Jia-Min
(College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: The pollution of nearshore waters is one of the sources of marine environment pollution. The quality of seawater is an inherent result of the interaction between the content of marine pollution elements and the sea water. For solving the problem of seawater purification in the nearshore waters, it is necessary to control the content of each constituent element, reduce the content of the elements exceeding the standard and eventually ensure the development balance of the constituent elements in the nearshore waters. The reason for the water pollution in the nearshore waters, the requirements and methods for the treatment of the polluted water are elaborated systematically. The characteristics and classification of the plants for purifying water are summarized and the preference characteristics of different plants and the types and intensities of the main pollution elements which can be eliminated by the plants from the water are studied, thus determining the purification effect of various plants on the water environment and revealing the mechanism of water-environmental purification by plants. For the polluted sea area, an ecological treatment method is proposed for the environmental renovation and restoration, which is to plant salt-resistant plants for purifying water. In addition, the selection, arrangement and surface-floating way of the plants applied for the water purification are described in detail. This study could lay a foundation for the further research of ecological treatment of water pollution in the nearshore waters and have a potential value for engineering application.

Key words: offshore area; water purification; ecological treatment; plant selection

Received: June 22, 2022