

尾水人工湿地中水生植物的应用研究进展

陈 静

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 人工湿地因环境效益显著、经济效益好、应用范围广等特点,近年来在污水处理中得到广泛应用。植物作为生态系统的生产者,是湿地系统最为核心的要素。基于国内外人工湿地植物的研究和应用情况,阐述了植物在尾水人工湿地中的应用情况、影响植物净化能力的因素,以及湿地植物应用中存在的问题等,并对尾水人工湿地植物的研究和应用做出了展望。在参考大量文献基础上对湿地植物选择的原则方法、影响因素及主要问题进行了系统性的总结,为实际工程应用提供依据和参考。

关键词: 人工湿地;净化能力;适应性;植物配置;生物量

中图分类号: X703

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)01-0115-04

0 引 言

自20世纪70年代德国Kickuth提出“根区理论”后,人工湿地研究与应用得到了迅速发展^[1]。在污水处理领域,人工湿地工艺首先在欧美得到广泛推广。我国对人工湿地研究起步相对较晚,自20世纪80年代后半期引入人工湿地理念并开始相关研究工作。1990年7月在深圳建成的白泥坑人工湿地被认为是人工湿地在我国的首次大规模应用。随后多地相继建立建设了人工湿地用于污水处理的系统示范工程^[2]。人工湿地在污水处理中的作用得到充分认可,并且各地在实际应用中积累了大量经验,使得人工湿地的设计和运维越来越成熟。目前,我国至少有200座正常运行的大规模人工湿地。与常规二级处理相比,人工湿地处理污水厂尾水在满足水质目标的同时,具有环境效益显著、处理范围广、投资和运营成本低等多重优势。处理污水的范围广泛,不仅适用于处理城镇生活污水,还可适用于处理农业废水、畜牧养殖废水、食品和矿山等的废水。人工湿地投资仅为常规二级污水处理厂的1/10~1/2,日常运维费用仅为常规二级污水处理厂的1/5~1/3,但出水水质可达到或超过二级污水处理水平^[3]。

人工湿地的净化功能是植物、基质和微生物共同作用的结果。其中,植物作为生态系统的生产者,是湿地系统最为核心的要素。植物的净化作用首先体现在通过植物的根、茎、叶等部位直接吸收污水中

的氮、磷等营养物质,其次体现在对重金属等有毒有害物质的吸附和富集,还表现为通过植物光合作用和根部泌氧为湿地提供有利的溶氧环境。同时,植物为湿地生产系统的分解者——微生物提供生长场所。研究^[4]表明,不同种类湿地植物在生长速度、对污染物的吸收转化能力、泌氧能力等方面均存在差异,不仅影响植物自身对污染物质的吸收转化,还影响基质中微生物的种类和数量,从而使得搭配不同种类植物的湿地系统净化能力表现出明显的差异。筛选适宜的人工湿地植物,不仅可以提高对污染物的处理效率,而且有利于构建高效稳定的湿地生态系统。一直以来,国内外对人工湿地植物净化能力的研究主要集中在特定的一种或几种植物对污染物的去除效率^[5-16]上,对多种植物组合协同的净化能力的研究相对较少。

利用多种水生植物组建复合生态系统在治理污水时具有独特优势^[5],多种植物有机组合并发挥植物之间的正向作用进行水体修复是湿地研究和应用的一个发展方向。该系统可以克服单一水生植物净化能力受季节制约的短板,利用不同植物生长在时空上的差异,从而实现优势互补^[6]。本文在参考大量文献基础上归纳了影响植物净化能力的内在因素和环境因素,总结了应用中存在的问题和湿地植物筛选的原则,并对植物的研究与应用进行了展望,可以为实际工程应用提供依据和参考。

水生植物按照生活类型可以分为挺水植物、沉水植物、漂浮植物和浮叶植物。挺水植物和沉水植物因独特的生理特性,在对氮磷吸收、重金属等物质的吸附与富集等方面优势明显,因此在人工湿地设计中得

收稿日期: 2021-04-02

作者简介: 陈静(1985—),女,硕士,工程师,从事排水设计工作。

到广泛应用。挺水植物有着发达的根、茎、叶,不仅可以大量吸收、转化污染物,而且在近岸区形成一道天然的生态屏障,在拦截污染物入河、削减面源污染方面效果显著。沉水植物的整个植株都在水中,根部、叶部蓄积高含量的重金属,在对重金属污染水体中表现出较强的吸附和富集能力^[7]。

1 湿地植物对氮、磷的去除

大量试验表明^[8],种植植物的系统对氮、磷的去除率明显高于无植物系统。植物对氮、磷的去除作用主要包括两个方面。一方面,植物通过吸收氮、磷,将其转变为植物自身的组成物质,通过直接被收割或被草食动物食用进一步同化。另一方面,通过在植物根区形成利于微生物生存和降解营养物质的条件实现对氮、磷元素的分解释放。

研究表明^[8],植物体内的氮、磷积累量与生物量呈显著的相关性。在以氮、磷为主的轻度富营养化(植物生长的阈值以下)水体中,生物量、根系发达程度、吸收能力可以作为筛选的依据。蒋跃平等^[2]对21种常见挺水植物的氮、磷吸收能力进行了试验。研究表明,所选的植物中,黄菖蒲、美人蕉、菖蒲和芦竹等对氮、磷的积累能力超过平均水平,属于高积累功能群;香蒲、鸢尾等对氮、磷的积累量只有样本均值的一半,属于低积累功能群。张洪刚^[9]对常见的芦苇、香蒲、水葱、茭白、慈姑和菖蒲6种植物对氮、磷的吸收量进行定量研究,发现芦苇和菖蒲对氮、磷的吸收能力明显高于其他植物,在氮、磷为主的污水处理中属于优势品种。

2 湿地植物对重金属物质的去除

区别于植物对氮、磷的主动吸收,植物对重金属的吸收表现为被动吸附,并且呈现明显的定向选择性。这种定向选择性不仅表现在不同植物对某种重金属物质富集能力的差异性上,还表现在同一植物对不同种类重金属的富集能力有明显的差异上。就不同生活型的水生植物对重金属富集能力来说,沉水植物对重金属的富集能力最强,其次为漂浮植物和浮叶植物,最后为挺水植物。就不同种类植物来说,根系发达的水生植物大于根系不发达的水生植物^[7]。就植物自身不同部位的吸附能力而言,根区是最主要的吸附部位,茎叶区的吸附能力较低。一种植物对重金属去除能力的影响因素主要包括生物量、接触时间、初始浓度等。与对氮、磷的吸收相似,水生

植物对重金属的吸附富集量与生物量亦呈现正相关性。植物蓄积重金属量与接触时间密切相关,蓄积量随着接触时间的增加逐渐增大,但并非随时间一直增加,后期植株衰败坏死的部分会向水体重新释放重金属,使得水体中重金属浓度反而呈现升高趋势。因而应当在重金属去除率最大时定时捞取,避免重金属元素的反向释放。在高进水浓度(致死阈值以下)的条件下,水生植物对重金属的吸收能力强于低浓度的情况。

在对植物定向吸附重金属的试验研究中,吴振斌等^[10]对比自己和前人的研究结果,得出伊乐藻对汞和镉的抗性较强,可以用于汞和镉为主的重金属污染水体的生态修复。朱家宾等^[11]选取了梭鱼草、再力花、水蓼3种南方地区常见的根系发达且易于富集微生物的植物种类,研究其对铬、砷、铅、铜等重金属的去除效果。结果表明,水蓼和再力花对4种重金属的富集作用较优。黄永杰等^[12]对生态修复常用的8种水生植物重金属富集能力进行了研究。结果表明,浮萍、香蒲、水鳖、中华慈姑、芦苇和空心莲子草对含铜、铅和锌等重金属复合污染水有较好的净化效果,凤眼莲对钴和锌等重金属吸收能力突出,香蒲是吸收富集铅、锌和镉较适宜的种类。

3 湿地植物对DO的贡献

大气表面复氧、植物泌氧和进水溶氧是湿地中溶解氧的主要来源^[13]。植物光合作用产生氧气,由根茎传递至根部,并由根部泌氧作用释放至湿地床内,是湿地溶氧的重要来源之一^[3]。不同种类植物的光合作用强度、根茎氧传输能力及根部泌氧能力有所不同,鄢璐等^[14]比较了5种常见的湿地植物的供养能力和稳定性,供氧能力顺序依次为芦苇>美人蕉>茶花>富贵竹>空心菜。芦苇是最为常见的湿地植物种类之一,其独特的根茎构造使其供氧能力优于其他植物。湿地植物的生长状况及光合作用强度对于湿地溶氧分布影响显著,故选择生长旺盛、根系发达和光合作用较强的湿地植物,有助于改善湿地的溶氧条件。

湿地系统中,供氧来源主要有大气表面复氧、植物根系泌氧和进水溶氧。研究^[3]表明,植物泌氧作用对人工湿地中的氧环境作用有限,植物根系泌氧和大气复氧所产生的的氧气并不能满足实际污染负荷下湿地系统处理污水所需要的氧气量,一般可通过控制运行条件、改变水力流态、强化供氧等强化复氧

技术来改善湿地水体溶氧水平^[15]。

4 影响湿地植物净化功能的环境因素

影响湿地植物净化功能的环境因素主要有进水、气候和土壤条件等^[17-22]。

众所周知,尾水人工湿地是一个持续接收污水的环境,应用于污水处理的湿地植物需对持续进水条件有较好的适应性。在生长周期中需要周期性或间断性干燥环境的植物很难适应人工湿地的环境,在持续进水的处理环境中存活率较低。Zapater M.等^[16]试验研究表明,莎草、灯心草和香菇草对持续进水条件适应性良好,可以较好地处理生活污水。

进水浓度是影响植物净化效果的外因之一。在植物生长阈值以下浓度范围内,植物对污染物的去除效率会随着进水污染物浓度的增大而有所提升,但过高浓度的污水反而抑制植物的正常生长甚至导致植株死亡^[17]。针对处理工业废水中常遇到高盐度污水的情形,邱金泉等^[18]对人工湿地处理高盐度污水的适用性进行了研究。结果表明,盐分对植物有胁迫作用,植物长时间处在高盐度水环境中生长受阻甚至死亡。在利用人工湿地方法处理高含盐污水时,应该选择对高盐环境适应性较好的植物,如大芦苇、盐角草、红树、大米草、蔗草等挺水植物,以及叶藻、川蔓藻、虾海藻等沉水植物。

温度、光照等气候要素对植物生长有直接影响,与之形成响应的是湿地植物对污染物的去除呈现显著的季节性差异。研究^[19]表明,在植物光合作用强、生长旺盛的夏季,植物湿地系统对污染物的去除率为全年最高。这跟当季植物的强光合作用和生长能力密切相关。冬季对污染物的处理效果为全年最低,甚至出现人工湿地出水中的无机磷浓度高于进水的情形^[20]。在北方寒冷地区采用人工湿地技术处理尾水时,在植物配置上尽量选用耐寒且保温性能好的种类,常用于水处理的耐寒植物主要有伊乐藻(沉水型)、海三棱藨草(挺水型)、茶花(挺水型)、香蒲(挺水型)、千屈菜(挺水型)等。除此之外,通过优化湿地运行条件、保证持续性进流条件^[21],以及采取有效的保温措施,可以显著提升人工湿地植物在冬季的存活率和处理效率。研究^[21-22]表明,与冰封法、温室大棚法相比,薄膜保温法出水水质好、操作简单、成本低,适合在北方地区推广应用。

在四季分明地区应用人工湿地处理污水时,为了增强对温度变化明显的湿地环境的适应性,李文

朝^[23]将耐寒型沉水植物伊乐藻与喜温植物凤眼莲等组合形成常绿型水生植被,实现了不同种类植物在生长期和净化功能上的季节性交替互补,保证了植物系统净化功能在季节上的连续性。

5 湿地植物应用中存在的若干问题

植物生长的周期性特点使得人工湿地系统在春夏季节的处理效果较好,秋冬季节的处理效果下降。如何优化湿地植物选择、改善湿地进水条件及其他经济可行的措施改善人工湿地在冬季的处理效果,是很多地区湿地运行中存在的一大难题。

衰败是人工湿地植物面临的又一问题。研究^[24-25]表明,除了直接的损伤外,湿地运行环境中其他因素,如水质水位的变化、不利于植物生长的基质条件及富营养状态,都能引起水生植物的衰败。

收割法作为可持续性去除污水中污染物的方法,在实际中大规模应用并不很成功,主要是受到经费、收割频率和收获物处置等因素的影响。结合植物的生长和处理效率变化曲线,确定合理的收割频率不仅关系到人工湿地对污染物的处理效果,也关系到湿地的运维成本等。如果收获物处理不当,就会造成二次污染,甚至引发更大的环境问题。

湿地植物间的相互作用也是一个不容忽视的问题。植物间相互作用不仅包含不同种类植物对光、水和营养物质等生存资源的竞争,而且植物之间通过释放化学物质来影响周围植物的生长,包括促进和抑制作用^[26]。Szczepanska^[27]研究发现,宽叶香蒲、水葱、木贼、苔草等植物腐烂产生的化感物质对芦苇的生长和繁殖具有抑制作用。芦苇腐烂产生的乙酸、硫化物等在芦苇组织中的富集,抑制芦苇本身的生长发育,造成大面积的芦苇衰退^[28]。

6 人工湿地选择植物的原则

植物配置应立足人工湿地的进出水水质目标、进水水质特点、水体溶氧含量等,结合当地的气候和土壤条件,兼顾生态、景观等多种因素综合确定。一般考虑以下原则:

(1)净化能力和耐污能力强。应选择对目标污染物有较好的净化能力,并且对高浓度污水环境有较好耐受力的植物。

(2)生态性。尽量选择攻击性小,不会破坏湿地生态平衡的本地品种。需引入外来品种时,应充分考虑物种对本地生态环境是否会造成入侵风险。

(3)适应性。基于本地区的气候特征、降雨量、土壤条件等因素,考虑抗冻、耐淹、抗盐碱等方面的特殊需求,选择适应性好的类型。

(4)美观性。在满足功能需求的前提下,丰富植物种类,选择美学价值高的植物,提升湿地的景观效果。

7 湿地植物应用展望

(1)在试验和实践中继续挖掘和筛选根系发达、耐污力强、净化效果好、对环境适应性高且稳定、观赏价值高的人工湿地植物,重视植物间的合理搭配,以形成健康稳定的群落结构。已经有学者^[29-30]利用植物组织培养技术来挑选植物,降低了挑选成本,也不受季节限制,提供了新的寻找方式。利用转基因技术,增强植物修复能力,也是未来研究的热门。

(2)开展植物与湿地系统中其他要素影响关系的应用研究,如研究湿地水位、流速等水动力条件对植物生长和净化能力的影响,继而通过优化湿运行工况,创造更为有利的植物生长环境。开展湿地植物与基质、湿地植物与微生物的相互作用等的研究和应用。

(3)应用组合协同理念组建复合型生态系统进行水体修复是湿地研究和应用的一个发展方向。采用多种水生植物和植被组建复合型生态系统在治理污水时具有独特优势,可克服单一植物净化能力受季节制约的短板,亦可发挥不同植物在时间和空间上的差异。

应用过程中应充分考虑植物之间的相互作用,利用植物相生相克的原理,筛选出对杂草具有抑制作用、能自身快速生长的湿地植物类型。同时,用于组建生态系统的优势种类避免选用存在强抑制效应的植物组合。

参考文献:

- [1] 李林锋,等.人工湿地植物研究进展[J],环境污染与防治,2006,28(8):616-619.
- [2] 蒋跃平,葛滢,岳春雷,等.人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献[J].生态学报,2004,24(8):1718-1723.
- [3] 王世和.人工湿地污水处理理论与技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [4] Rosgers K H, et al. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems:evidence for the role of aquatic plants [J].Res. Journal of WPCF, 1991, 63(7):934-941.
- [5] 白峰青,郑丙辉,田自强.水生植物在水污染控制中的生态效应[J],环境科学与技术,2004,27(4):99-100.
- [6] Haycock N E, Burt T. Floodplain as nitrate buffer zones [J]. NERC-News, 1992, 21: 28-29.
- [7] 王谦,成水平.大型水生植物修复重金属污染水体研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(5):96-102.
- [8] 夏汉平.人工湿地处理污水的机理与效率[J].生态学杂志,2002,21(4):51-59.
- [9] 张洪刚.人工湿地及湿地植物对生活污水净化效果的研究[D].北京:首都师范大学,2006.
- [10] 吴振斌,马剑敏,赵强,等.Hg²⁺、Cd²⁺及其复合胁迫对伊乐藻的毒害[J].中国环境科学,2005(25):262-266.
- [11] 朱家宾,李冰,侯谄然,等.人工湿地不同植物根系及基质重金属富集特征及其与环境因子相关性[J].上海海洋大学学报,2018,27(4):531-542.
- [12] 黄永杰,刘登义,王友宝,等.八种水生植物对重金属富集能力的比较研究[J].生态学杂志,2006,25(5):541-545.
- [13] 惠斌,顾银海,张金戈.人工湿地强化复氧技术研究现状及设计构想[J].绿色科技,2014,1:153-156.
- [14] 鄢璐,王世和,刘洋,等.人工湿地氧状态影响因素研究[J].水处理技术,2007,33(1):31-34.
- [15] Silvan N, Vasander H, Laine J. Vegetation is the main factor in nutrient retention in a constructed wetland buffer [J]. Plant and Soil, 2004, 258(1): 179-187.
- [16] Zapater M, Gross A, Soares M. Capacity of an on-site recirculating vertical flow constructed wetland to withstand disturbances and highly variable influent quality[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(10):1572-1577.
- [17] 成水平,况琪军,夏宜.香蒲、灯心草人工湿地的研究: I. 净化污水的效果[J].湖泊科学,1997,9(4):351-358.
- [18] 邱金泉,王静,张雨山.人工湿地处理高盐度污水的适用性及研究进展[J].工业水处理,2009,29(11):1-3.
- [19] 梁威,吴振斌.人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J].环境科学动态,2000,3:32-37.
- [20] 成水平,吴振斌,况琪军.人工湿地植物研究[J].湖泊科学,2002,14(2):179-184.
- [21] 王勇,张宝莉,汤灿,等.寒冷地区多级垂直流人工湿地系统设计及氮磷去除效率[J].农业工程学报,2016,32(23):218-225.
- [22] 谭月臣,姜冰冰,洪剑明,等.北方地区潜流人工湿地冬季保温措施的研究[J].环境科学学报,2012,32(7):1653-1661.
- [23] 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,1997,17(1):53-57.
- [24] Gersberg R M, Elkins B V, Lyon S R, et al. Role of aquatic plants in wastewater treatment by artificial wetlands [J]. Wat Res, 1986, 20(3):363-368.
- [25] Ostendorp W. "Dieback" of reeds in Europe: A critical review of literature[J]. Aquatic Bot, 1989, 35:5-26.
- [26] 王圣瑞,年跃刚,侯文华,等.人工湿地植物的选择[J].湖泊科学,2004,16(1):91-96.
- [27] Szczepanska W. Allelopathy among the aquatic plants [J]. Pol Arch Hydrobiol, 1971, 18(1):17-30.
- [28] Armstrong J, Armstrong W, Wu Z, et al. A role for phytotoxins in the Phragmites die back syndrome? [J]. Folia Geobot Phytotax, 1996, 31:127-142.
- [29] Capers R S. Macrophytes colonization in a fresh water tidal wetland (Lyme, CT, USA) [J]. Aquatic Botany, 2003, 77: 325-338.
- [30] Zhou C F, An S Q, Jiang J H, et al. An in vitro propagation protocol of two submerged macrophytes for lake revegetation in east China [J]. Aquatic Botany, 2006, 85: 44-52.