

水生植物修复氮、磷污染水体研究进展*

何 娜^{1,2} 张玉龙² 孙占祥^{1#} 刘鸣达²

(1. 辽宁省农业科学院, 辽宁 沈阳 110161; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要 氮、磷是引起水体富营养化、导致水质恶化的重要因素,因此去除氮、磷一直是污水处理的重要任务。鉴于传统物理、化学方法存在的操作难、成本高、易产生二次污染等问题,人们越来越多地将目光转向利用水生植物去除氮、磷营养物质、净化水质上。介绍了近年来国内外应用水生植物修复氮、磷污染水体的方法、效果及其影响因素,探讨了水生植物净化污染水体的机制。针对目前研究中的不足,提出今后应在不同植物种类开发、植物组合优化以及植物的净化机制等方面加强研究。

关键词 水生植物 植物修复 氮 磷 研究进展

Research advances on phytoremediation of nitrogen and phosphorus polluted water by aquatic macrophytes HE Na^{1,2}, ZHANG Yulong², SUN Zhanxiang¹, LIU Mingda², (1. Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang Liaoning 110161; 2. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang Liaoning 110161)

Abstract: Nitrogen and phosphorus are important factors causing eutrophication of water system and leading to deterioration of water quality, so the removal of nitrogen and phosphorus has always been an important task in wastewater treatment. In view of the problems brought by traditional physical and chemical methods, such as difficult operation, high costs and easy to produce second-pollution, people gradually pay more attention to the phytoremediation technique, which primary use the plants, animals and microbes for nutrient removal and water purification. The latest research achievement both at home and abroad on the polluted water purification by phytoremediation is summarized including the treatment performance and influence factors; the restoration mechanism of phytoremediation is also discussed. The future research directions should be focus on developing different vegetation species, optimization of plant composition and purification mechanism of aquatic plants.

Keywords: aquatic macrophytes; phytoremediation; nitrogen; phosphorus; research advances

随着城市化和工业化进程加快,加上农村农药、化肥的过量施用以及禽畜粪便的随意排放,致使我国水体污染日益严重,水体生态系统遭到不同程度的破坏。其中尤以氮、磷等营养物质和有机污染最为严重。氮、磷作为植物生长的必需营养元素,通常以多种形态存在于污水中,引起水体的富营养化,降低水体水质并影响水体功能。因此,脱氮除磷一直是污水处理的重要任务。虽然自“九五”以来,我国已在水污染防治方面取得了不少成果,但由于未来对资源、能源的消耗仍将持续增长,水资源特别是水污染问题也会长期存在并继续成为制约经济社会可持续发展的重大瓶颈,开展对水污染控制与治理的工作已刻不容缓。

在污染水体修复的各种方法中,水生植物修复是一种投资低、耗能低、无二次污染的新技术。水生植物修复受污染水体,是利用水生植物生长过程对

氮、磷等营养物质的吸收而减少水体中这类污染物,与此同时还可以分解、净化水体中的其他有毒有害物质。因此,植物修复更符合当今环境保护的要求,已经引起国内外学术界的高度重视。自20世纪80年代以来,植物修复技术已经成为环境污染治理方面研究的热点问题,并且开始进入产业化初始阶段。

1 水生植物对水体中氮、磷的去除效果研究

植物修复技术是利用高等水生植物(沉水植物、浮叶植物、漂浮植物和挺水植物)及其根际的微生物共同作用去除水体中污染物的原位生态治理技术,其机制主要是利用植物及根际土著微生物的代谢活动来吸收、积累或降解转化水体中的污染物。

研究表明,水生植物在生长过程中能有效吸收水体中大量的氮、磷等营养物质,将无机的营养

第一作者:何 娜,女,1980年生,博士,主要从事土壤和水污染防治及修复方面的研究。*通讯作者。

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(N0206Z00125-004)

物质变成植物体,在植物成熟或死亡后,通过收割、移走植物,起到净化水质的作用。所以,这一技术能够改善水体环境,促进水体生态系统恢复^[1-3]。例如,有人利用凤眼莲净化污水,7 d后植物组织中氮和磷的含量分别增加了2.9%和6.7%,且发现水体中氮、磷去除数量取决于它们在水体和植物组织中的浓度比值^[4]。

我国利用水生植物净化水质的研究始于20世纪70年代中期。研究的重点为静态条件下单一物种及多种植物配植、动态条件下水生植物对污染物浓度较高的污水的净化作用。ZHU等^[5]利用水生植物系统处理北京动物园的废水,使该废水水质得到明显改善,TN和TP分别减少58%和38%。沈耀良等^[6]对金鱼藻、伊乐藻、苦草3种沉水植物净化污染水体效果进行试验研究,结果表明,几种供试沉水植物具有较好的净化水体效果,可使 NH_4^+-N 和TN分别由1.10~1.30、3.70~4.60 mg/L降低至0.10~0.15、0.71~1.02 mg/L, PO_4^{3-} 和TP分别由0.060~0.080、0.450~0.470 mg/L降低至0.014~0.018、0.030~0.071 mg/L。这些研究结果都表明,水生植物对污染水体具有很好的净化效果,是一种可行的修复技术。

近些年来发展起来的以水生植物为核心的生态浮岛和人工湿地为利用植物修复技术处理污水提供了多种可行的方案。

人工浮岛是1979年由德国HOEGER提出并成功建造,20世纪90年代中期得到日本科学家广泛认同并被应用于湖泊治理^[7]。20世纪80年代,美国根据相同原理开始利用鱼类养殖废水水培生产生菜、西红柿、草莓和黄瓜等蔬菜及风信子等花卉。NATHALIE等^[8]用水培系统飘浮栽培毛曼陀罗净化修复生活污水,取得了较好的效果。我国学者从20世纪80年代起也对植物浮床技术开展了不少研究,并且已经开始实际应用。例如,在太湖的内湖——五里湖上应用植物浮床技术,获得较好的净化水质效果,水体透明度增加、为沉水植物的恢复创造了条件,同时在消除湖面波浪方面也起到了积极作用^[9]。南京在煦园采用以水培水芹、水蕹菜、黄花菜、睡莲及花卉等经济植物为主的生态工程方法净化水体,在种植植物面积占全湖面积5.15%的条件下,治理后1个月,湖中TN、TP分别降低46.3%、48.4%,藻类密度降低了63.2%,透明度提高了1倍^[10]。由于植物浮床技术能够将净化水质、创造生物栖息空间、改善景观以及创造经济效益统一起来

在沿岸难以恢复植物带的河流、湖泊等水域有着广泛的应用前景。在植物选择方面,除水稻外还可种植蔬菜、花卉等多种植物,打破了以往只能采用水生维管束植物的局限,这就为选择利用价值高、易管理、可回收的植物创造了条件,从而拓宽了净化富营养化水体的植物栽培领域。

1953年德国SEIDEL博士首次采用人工湿地的方法进行净化污水的实验,之后SEIDEL与KICKUTH合作开始研究人工湿地处理污水技术,将“人工湿地”这一独具特色的新型污水处理技术正式应用于水污染控制领域^[11]。目前,人工湿地已被成功用于处理各类废水,包括畜禽粪便废水、尾矿废水、工业废水、农用废水、生活污水或城市暴雨径流等^[12]。人工湿地已有许多成功的范例。德国利用水平流和垂直流湿地芦苇床系统处理富营养化水体,结果表明有超过90%的有机污染物和氮、磷等营养物质被去除^[13]。我国云南抚仙湖人工湿地开始运行以来,COD、BOD、SS、TP、TN的去除率分别达到87.8%、68.7%、96.3%、32.4%、36.0%,出水水质由处理前的Ⅳ类水质提高到Ⅲ类^[11]。

2 水生植物去除水体氮、磷效率的影响因素

2.1 植物的种类

植物物种是影响水生植物修复污染水体效果的首要因素。这是因为,不同植物生长速率不同,对各种营养物质的需求和吸收能力也不同,因而净化水体的能力各异^[15]。如主要去除对象是BOD和氮(反硝化)时,所选植物就需具备能为微生物提供附着界面的庞大根系以及较强的传氧能力;而当靠植物的吸收去除某些有机物及氮、磷时,就需要选择具有较好的富集吸收能力并且生长速度快的种类;如果去除的污染物目标较多时就需要寻找能够有效地发挥多种生态功能的种类,或不同生态功能类型的种类搭配使用^[16]。ANSOLA等^[17]比较了芦苇、香蒲、黄菖蒲和水葱4种水生植物对有机质及氮、磷的去除效率,结果表明香蒲对有机质及TN的去除率最高,黄菖蒲对TP的去除率最高。高吉喜等^[18]研究发现,满江红等7种植物的氮去除率为满江红>慈菇>水花生>菹草>金鱼藻>茭白>菱角,如果从去氮、去磷、易成活和适用性4个方面综合考虑,慈菇和茭白最佳,金鱼藻、水花生和满江红次之,菹草和菱角最差。因此,植物种类的确定应遵循优先考虑本地物种、具有较好的适应能力、对氮、磷及有

植物等营养物质具有较强的去除能力、易于管理且

有一定的经济利用价值等原则。

2.2 水体不同的富营养化程度

植物对水中的污染物也有一定的耐受范围;在该范围内,水生植物对氮、磷的净化率随水体中氮、磷等物质的浓度增加而加大^{[19][186]}。KÖRNER 等^[20]研究浮萍对生活污水中氮、磷的去除效果,分析了不同氮、磷初始浓度与其降解速率之间的关系,结果表明氮、磷污染物降解速率常数随着该污染物初始浓度的降低而增加,但氮、磷两者降解速率常数大小不同;当磷初始浓度低至某一水平时,磷成为植物生长的限制因子,植物对磷的去除速率明显加快。SOOKNAH 等^[21]的研究结果表明,在没有稀释的牛奶场厌氧消化废水中(总 COD 为 2 010 mg/L),凤眼兰的生长受到抑制,而石莲花和大藻根本不能生长;将废水稀释一倍后,石莲花和大藻的生长受到抑制,而凤眼兰生长很强健。夏汉平^[22]用水葫芦、百喜草、水花生、香根草 4 种植物对垃圾污水进行处理,结果水葫芦在高浓度和低浓度污水中均被毒害致死,百喜草在高浓度的渗滤液中不能存活、在低浓度污水中受到严重伤害,水花生在高浓度污水中伤害较重、在低浓度污水中形成庞大的生物体,香根草在高、低污染物浓度水体中受到的伤害在 4 种植物中最轻。由此可见,尽管水生植物可以从水体中吸收带走大量的氮、磷富营养物质,但是氮、磷又反作用于水生植物,当氮、磷营养水平超过一定范围时水生植物就会受到胁迫毒害。因此,在实际工作中,既要考虑水生植物对氮、磷的去除效率,也要考虑水生植物对营养胁迫的适应能力,对于先锋物种就要选择去除效果较好而适应能力强水生植物,否则会适得其反。

2.3 氮的不同存在形态

植物对去除水体中氮元素形态有一定的选择性。有机氮总是最先被植物吸收,但是对于无机形态氮的去除,不同的研究得出不同的结论。有研究认为,植物优先吸收 NH_3^--N 和其他还原态氮,仅仅当 NH_3^--N 浓度极低或耗尽时,才会吸收 NO_3^--N ,即水生植物对 NH_3^--N 的去除率较高,且去除速率较快^[23]。但在高光^{[19][185]}进行的伊乐藻、轮叶黑藻净化养鱼污水效果的试验中, NO_3^--N 的净化速率却大于 NH_3^--N 和 TN。

2.4 植物种植方式

多种植物组合比单种植物能更好地净化水质,具有更合理的物种多样性,更容易保持生态系统的

长期稳定性,并且会减少病虫害的发生^[24]。王国祥等^[25]研究也表明,由浮水、浮叶和沉水植物组合的植物群落对污染湖泊中藻类和氮具有显著的去效果,藻类生物量和 TN 浓度分别下降了 58% 和 60%,同时水质也得到较为明显的改善。同年,他们又通过由漂浮、浮叶、沉水植物及其根际微生物组成的人工复合生态系统从群落水平研究了多种水生植物镶嵌组合对富营养化湖水的净化能力,结果表明该人工复合生态系统具有良好的水质净化效果^[26]。BRISSEON 等^[27]依据 35 个公开报道的实验结果,评估了在潜流人工湿地中的大型植物种类对污染物去除的影响。研究覆盖了不同的植物种类、实验方法、气候条件和污水类型。调查研究表明,不同植物种类对一种或多种类型污染物去除率的差异表明植物种类的选择确实是有重大关系的。尽管利用不同植物的生长特性进行适当配合种植有可能提高水体的总体净化效率,但是由于植物搭配种植也可能造成植物间竞争生态位及相互抑制生长,反而使总体净化效果受到影响。FRASER 等^[28]的研究发现,尽管植物的混合种植对去除水中氮、磷有显著效果,但并未发现与单一种植的效果有显著差异。从这些不同的研究结果可以看出,不同的植物物种、实验条件及实验方法会导致相异的实验结果,植物的混合种植是否比单一种植更能有效地净化污水需要进行深入研究和探讨。

2.5 其他因素

除了上述因素外还有一些因素也会影响植物对污染水体的修复效果,如温度、pH、光照、微生物等^{[29][382]}。

水生植物的净化效率受温度影响最大^[30,31]。一般来说,较高的水温下,植物生长旺盛,吸收的营养较多,生产量也较大,因此具有较高的净化效率^[32]。紫背浮萍在低温条件下,细胞的生长、合成以及吸收的能力下降,正常机制被破坏,不能应用于富营养化水体的修复^[33]。凤眼莲的生长和净化效率受温度影响也很大,若水温下降到冰点,则几小时内即死亡;水温在 10℃ 时开始生长,在 21℃ 以上时生长较快,在 27~30℃ 时生长最旺盛,当水温在 35℃ 以上并持续 5~6 h,凤眼莲叶片焦萎发黄^{[34]2}。总之,植物对污染物吸收的最佳温度与其生长所需的最佳温度是一致的^[35]。由于大多数水生植物难以越冬,秋冬季节水体的生态修复是研究难题。

水生植物特别是沉水植物的生长受 pH 影响很大,湖水 pH 偏碱,藻类的生长高峰期耗去大量的

碳源,会导致一些植物种消亡,或者是耐碱性水生植物(苦草和狐尾藻等)成为湖区的优势种,导致水生植物种类单一化^[36]。

光照和光强对植物生长有重要的作用,在没有光照的条件下,水生植物不能进行光合作用,其生长受到抑制,净化效率也会受到影响^[34]。

植物吸收氮、磷往往是与根系微生物联合作用的,微生物对氮的硝化以及有机物的降解有重要作用^[29]。灭菌处理对水生植物去除 TN 特别是 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的影响要大于对 TP 的影响^[19]。

3 水生植物净化污水的机制

植物吸收、微生物代谢以及植物根部的微环境基质的吸附、过滤、沉淀在污水净化过程中起着关键作用,其中包含了物理、化学和生物三重效果的共同作用。

3.1 植物吸收

水生植物在生长过程中,需要吸收大量的矿质元素,而废水中所含的大量氮、磷等营养物质恰好可以满足植物的生长需要,供其生长发育。无机氮($\text{NH}_3\text{-N}$)作为植物生长过程中不可缺少的物质可被植物直接摄取,合成蛋白质与有机氮,最后转化成生物量,再通过植物的收割从废水和湿地系统中除去^[37]。无机磷也是植物必需的营养元素,在植物吸收及同化作用下可转化成植物的 ATP、DNA、RNA 等有机成分,最后通过收割植物而移去^[38]。曹向东等^[39]研究发现,芦苇在生长期对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的摄取量很大,其吸收作用是芦苇湿地净化氮的主要过程。

3.2 微生物降解

在污水处理系统中,微生物对各种污染物的降解起着很重要的作用。在氮的去除过程中,尽管有植物的吸收,但是硝化和反硝化仍然是主要的去除机制^[40],通过细菌的硝化和反硝化作用氮的去除率占总去除率的 45% 以上^[41]。种云霄等^[42]则报道,浮萍氧化塘中存在众多好氧、兼氧和厌氧微生物,氮、磷有机物的降解主要是通过微生物来完成,浮萍正是和这些微生物协同作用一起完成对各种氮、磷污染物的去除。这正说明了水生植物的根际区域可为微生物发挥降解作用提供所需要的微环境,同时,水生植物的根系分泌物可以促进微生物生长,从而间接提高了水生植物的净化效率。可见,水生植物通过和微生物的联合作用对氮、磷污染物可以产生更强的去除效果。

3.3 植物根部微环境基质的物理作用

土壤-植物是一个天然的过滤器,污水进入这个过滤器以后,经过基质层及密集的植物茎叶和根系,可以对污水中的悬浮物进行过滤和截留,并沉积在基质中,尤其对藻类颗粒物具有很好的去除效果^[43]。同时附着在根系的菌体在内源呼吸阶段发生凝集,部分凝集的菌胶团能够将悬浮性的有机物和新陈代谢产物沉降下来^[44]。在五里湖进行的实验发现,28 d 内,每千克鲜质量的伊乐藻上吸附的固体干物质质量达 28.71 g,干物质中 TN、TP 分别为 0.65%、0.31%^[45]。

3.4 植物对藻类的抑制作用

高等水生植物和藻类存在着相互竞争和相生相克。高等水生植物对藻类的克制作用,一方面是因为水生植物与浮游藻类争夺营养和光照而抑制藻类的过量生长;另一方面也是最主要的原因是某些水生植物能产生化感物质(如酚、生物碱等),从而抑制有害藻类的生长^[16]。JEFFERSON 等^[17]将从 4 种藜科植物的叶子中的提取物应用于莴苣的生长试验中,结果表明,当质量浓度在 3.12~6.26 g/L 时莴苣种子的发芽被抑制,种子试验表明植物相生相克物质的存在。清华大学在国际上首次从大型挺水植物芦苇中分离并鉴定出的化感物质 2-甲基乙酰乙酸乙酯(EMA)对藻类的抑制作用具有高效性和选择性,对铜绿微囊藻和蛋白质小球藻有很强的化感抑制作用^[43]。

4 结 语

综上所述,水生植物修复不仅对水中的营养物质具有良好的处理效果,还能实现水体营养平衡,改善水体的自净能力。同时,与其他水环境污染治理的方法相比,植物修复技术还有可以现场进行、无须投放药剂、耗能低、不会形成二次污染等优点。然而,和所有处理技术一样,植物修复技术也有其自身的局限性,还应在以下几个方面进行深入研究:(1)水生植物种类选择。水生植物种类繁多,而已被利用且产生效果的仅几十种,很多植物还有待于进一步研究确定。特别是选择当地抗污力强、净化效果好、经济效益高且便于收割的物种应是一项优先考虑的研究内容;(2)由于受污染水体的特异性,对某一水体具有修复功能的植物并不一定适用于另一水体,即植物修复具有空间的特异性。选出适宜的一种或多种水生植物,通过它们的优化组合,提高治理效果效率,减少处理时间以满足不同环境的修复

需要,这需要进一步深入的研究;(3)虽然水生植物于水体不仅净化了水质而且美化了环境,然而多数植物不耐寒,冬季将死亡、腐烂,再次释放出氮、磷等营养物质,适时的收割植株需要的人力、物理消耗大,如何更好地做到年内和年度间植物的衔接以及如何在低温季节提高植物修复效率,达到最优处理效果仍是今后研究的重点;(4)虽然人们对水生植物修复污染水体的理论和方法有一些研究,但修复理论技术体系尚未形成,包括大型植物的净化机制及环境因子对植物体内养分含量的影响等都有待于进一步研究。

总之,应用水生植物修复污染水体为我国日益恶化的水环境提供了一个行之有效的解决途径,具有良好的研究和应用前景。

参考文献:

- [1] JAYAWEERA M W, KASTURIARACHCHI J C. Removal of nitrogen and phosphorus from industrial wastewaters by phytoremediation using water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms) [J]. Water Science and Technology, 2004, 50 (6): 217-225.
- [2] RECTENWALD L L, DRENNER R W. Nutrient removal from wastewater effluent using an ecological water treatment system [J]. Environmental Science and Technology, 2000, 34 (3): 522-526.
- [3] REDDY K R, DE BUSK W F. Nutrient removal potential of selected aquatic macrophytes [J]. Journal of Environmental Quality, 1985, 14 (4): 459-462.
- [4] BRAMWELL S A, DEVI PRASAD P V. Performance of a small aquatic plant wastewater treatment system under Caribbean conditions [J]. Journal of Environment Management, 1995, 44 (3): 213-220.
- [5] ZHU J, ZHU X Y. Treatment and utilization of wastewater in the Beijing Zoo by an aquatic macrophyte system [J]. Ecological Engineering, 1998, 11 (1/2/3/4): 101-110.
- [6] 沈耀良, 王美敬, 李勇, 等. 沉水植物修复受污水体净化效能的研究 [J]. 苏州科技学院学报: 工程技术版, 2005, 18 (4): 1-4.
- [7] NAKAMURA K, SHIMATANI Y. Water purification and environmental enhancement by the floating wetland [R]. Seoul, Korea: Proceeding of the 6th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference, 1997.
- [8] NATHALIE V, FABIEN M, HUGUETE S, et al. Treatment of domestic wastewater by an hydroponic NFT system [J]. Chemosphere, 2003, 50 (1): 121-129.
- [9] 胡芳, 冯权民. 五里湖富营养化及治理对策研究 [J]. 电网与清洁能源, 2008, 24 (3): 72-76.
- [10] 沈治蕊. 南京煦园太湖富营养化及其防治 [J]. 湖泊科学, 1997, 9 (4): 377-379.
- [11] BRIX H. Use of constructed wetland in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives [J]. Water Science and Technology, 1994, 30 (8): 209-223.
- [12] SUN G, GRGY K R, BIDDLESTONE A J, et al. Treatment of agricultural wastewater in a combined tidal flow-down flow reed bed system [J]. Water Science and Technology, 1999, 40 (3): 139-146.
- [13] LUEDERITZ V, ECKERT E, LANGE WEBER M, et al. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands [J]. Ecological Engineering, 2001, 18 (2): 157-171.
- [14] 谢爱军, 周炜, 年跃刚, 等. 人工湿地技术及其在富营养化湖泊污染控制中的应用 [J]. 净水技术, 2005, 24 (6): 49-52.
- [15] IAMCHATURAPATR J, YI S W, RHEE J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland [J]. Ecological Engineering, 2007, 29 (3): 287-293.
- [16] 刘弋潞, 何宗健. 水生植物净化富营养化水质的机理探讨和研究进展 [J]. 江西化工, 2006 (1): 27-30.
- [17] ANSOLA G, FERNANDEZ C, DE LUIS E. Removal of organic matter and nutrients from urban wastewater by using an experimental emergent aquatic macrophyte system [J]. Ecological Engineering, 1995, 5 (1): 13-19.
- [18] 高吉喜, 叶春, 杜鹃, 等. 水生植物对源污水净化效率研究 [J]. 中国环境科学, 1997, 17 (3): 247-251.
- [19] 高光. 伊乐藻、轮叶黑藻净化养鱼污水效果试验 [J]. 湖泊科学, 1996, 8 (2).
- [20] KÖRNER S, VEMAAT J E. The relative importance of *Lemna Gibba* L, bacteria and algae for the nitrogen and phosphorus removal in duckweed-covered domestic wastewater [J]. Water Research, 1998, 32 (12): 3651-3661.
- [21] SOOKNAH R D, WILKIE A C. Nutrient removal by floating aquatic macrophytes cultured in anaerobically digested flushed dairy manure wastewater [J]. Ecological Engineering, 2004, 22 (1): 27-42.
- [22] 夏汉平. 垃圾污水的植物毒性与植物净化效果之研究 [J]. 植物生态学报, 1999, 23 (4): 289-301.
- [23] 何池全, 赵魁义, 叶居新. 石菖蒲净化富营养化水体的研究 [J]. 南昌大学学报: 理科版, 1999, 23 (5): 73-76.
- [24] STEPHAN A, MEYER A H, SCHMID B. Plant diversity affects cultural soil bacteria in experimental grassland communities [J]. Journal of Ecology, 2000, 88 (6): 988-998.
- [25] 王国祥, 濮培民. 用镶嵌组合植物群落控制湖泊饮用水源区藻类及氮污染 [J]. 植物资源与环境, 1998, 7 (2): 35-41.
- [26] 王国祥, 濮培民, 张圣照, 等. 人工复合生态系统对太湖局部水域水质的净化作用 [J]. 中国环境科学, 1998, 18 (5): 410-414.
- [27] BRISSON J, CHAZARENC F. Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: should we pay more attention to macrophyte selection [J]. Science of the Total Environ-

- ment, 2009, 407(13): 3923-3930.
 - [28] FRASER L H, CARTY S M, STEER D. A test of four plant species to reduce total nitrogen and total phosphorus from soil leachate in subsurface wetland microcosms[J]. Bioresource Technology, 2004, 94(2): 185-192.
 - [29] 黄亚, 傅以钢, 赵建夫. 富营养化水体水生植物修复机理的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊).
 - [30] VYMAZAL J. The use of subsurface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. Ecological Engineering, 2002, 18(5): 633-646.
 - [31] AKRATOS C S, TSIHRINTZIS V A. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 173-191.
 - [32] BINDU T, SYLAS V P, MAHESH M, et al. Pollutant removal from domestic wastewater with Taro (*Colocasia esculenta*) planted in a subsurface flow system[J]. Ecological Engineering, 2008, 33(1): 68-82.
 - [33] SONG G L, HOU W H, WANG Q H, et al. Effect of low temperature on eutrophicated waterbody restoration by *Spirodela polyrrhiza*[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(15): 1865-1869.
 - [34] 严国安, 任南, 李益健. 环境因素对凤眼莲生长及净化作用的影响[J]. 环境科学与技术, 1994(1).
 - [35] PEDERSEN A, KRAEMER G, YARISH C. The effects of temperature and nutrient concentrations on nitrate and phosphate uptake in different species of *Porphyra* from Long Island Sound (USA)[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 312(2): 235-252.
 - [36] 任南, 严国安, 马剑敏, 等. 环境因子对东湖几种沉水植物生理的影响研究[J]. 武汉大学学报: 自然科学版, 1996, 42(2): 213-218.
 - [37] SUN G Z, ZHAO Y Q, ALLEN S. Enhanced removal of organic matter and ammoniacal-nitrogen in a column experiment of tidal flow constructed wetland system[J]. Journal of Biotechnology, 2005, 115(2): 189-197.
 - [38] SEO D C, CHO J S, LEE H J, et al. Phosphorus retention capacity of filter media for estimating the longevity of constructed wetland[J]. Water Research, 2005, 39(11): 2445-2457.
 - [39] 曹向东, 王宝贞, 蓝云兰, 等. 强化塘-人工湿地复合生态塘系统中氮和磷的去除规律[J]. 环境科学研究, 2000, 13(20): 15-19.
 - [40] 屠晓翠, 蔡妙珍, 孙建国. 大型水生植物对污染水体的净化作用和机理[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(12): 2843-2844, 2867.
 - [41] 任玲, 杨军. 海洋中氮营养盐循环及其模型研究[J]. 地球科学进展, 2000, 15(1): 58-64.
 - [42] 种云霄, 胡洪营, 崔理华, 等. 浮萍植物在污水处理中的应用研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(3): 14-18.
 - [43] YOUNGCHUL K, WAN J K. Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the outlet from waste stabilization ponds[J]. Water Research, 2000, 34(13): 3285-3294.
 - [44] 许航, 陈焕仕. 水生植物塘脱氮除磷的效能及机理研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(4): 69-73.
 - [45] 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.
 - [46] MULDERIJ G, MOOIJ W M, SMOLDERS A J, et al. Allelopathic inhibition of phytoplankton by exudates from *Stratiotes aloides*[J]. Aquatic Botany, 2005, 82(4): 284-296.
 - [47] JEFFERSON L V, PENNACCHIO M. Allelopathic effects of foliage extracts from four *Chenopodiaceae* species on seed germination[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(2): 275-285.
 - [48] 胡洪营, 门玉洁, 李锋民. 植物化感作用抑制藻类生长的研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(1): 153-157.
- 编辑: 陈泽军 (修改稿收到日期: 2011-06-22)
- +++++
- (上接第72页)
- 48%, 出水氨氮大幅降低, 可以达标。
- (4) 采用NaOCl氧化降解污水中难降解有机物, 以10 mg/L的NaOCl投加量较适宜, 并经接触氧化池及气浮池处理后达到GB 8978—1996的一级标准。
- (5) 系统稳定运行期的污泥产率仅为0.075 kg(以每千克BOD₅计)。

参考文献:

- [1] 杨卫国. 偶氮二异庚腈在聚氯乙烯工业中的应用[J]. 适用技术市场, 1997(8): 32-34.
- [2] ROTT U, MINKE R. Overview of wastewater treatment and recycling in the textile processing industry[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, 40(1): 137-144.
- [3] 李庄, 曾光明. 偶氮染料生产废水的处理工艺技术研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(3): 29-33.
- [4] 张选军, 张亚雷. 高盐高COD农药废水的处理工程与调试研究[J]. 工业水处理, 2007, 27(6): 22-25.
- [5] CHANG W S, HONG S W, PARK J. Effect of zeolite media for the treatment of textile wastewater in a biological aerated filter[J]. Process Biochemistry, 2002, 37(7): 697-698.
- [6] 张仁江, 张振家. 糖蜜酒精废水两相UASB处理工艺的酸化段特征[J]. 城市环境与城市生态, 2000, 13(2): 60-62.
- [7] 兰中仁, 李正山. 影响高浓度NH₃-N废水吹脱-硝化过程的实验研究[J]. 四川环境, 2004, 23(5): 4-8.
- [8] 高峰, 秦冰. 催化氧化法处理难降解炼油废水的研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2009, 26(2): 12-16.