

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.012

陆海明, 孙金华, 刘婷, 等. 潜流湿地对微污染水体中氮磷去除效果的中试研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 81-87. (LU Haiming, SUN Jinhua, LIU Ting, et al. Pilot experiment on effects of subsurface artificial wetland on nitrogen and phosphorus removal in slightly-polluted surface water body[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(4): 81-87. (in Chinese))

潜流湿地对微污染水体中氮磷去除效果的中试研究

陆海明¹, 孙金华¹, 刘婷², 刘浩², 宋力³, 朱乾德¹

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 连云港市通榆河北延送水工程管理处, 江苏 连云港 222006; 3. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要:以南京水利科学研究院铁心桥试验基地内象目湖微污染水体为对象,研究总氮大于 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的高水力负荷条件下,鹅卵石、陶粒、砾石、钢渣、蛭石、碎石和砂子等多种基质和再力花、芦苇、美人蕉及菖蒲等水生植物组合条件下的垂直流湿地和水平潜流湿地对氮磷的去除效果。试验结果表明:进水总氮浓度在 $0.793 \sim 2.662 \text{ mg/L}$ 时,种植菖蒲,填料从上到下分别为鹅卵石、碎石、粗砂和细砂的垂直潜流湿地单元(20单元)出水总氮平均浓度最低,为 0.905 mg/L ;总氮、氨氮和硝态氮平均去除率最高,达 80.89% , 43.06% 和 46.32% ;总氮浓度从IV类水体提升至III类。进水TP浓度在 $0.035 \sim 1.003 \text{ mg/L}$ 时,20单元总磷平均去除率最高,为 30.59% ,价格相对便宜的碎石对磷素的去除效果较好。种植菖蒲及填料组合为鹅卵石、碎石、粗砂和细砂的人工湿地处理单元可以应用于饮用水源地原水等微污染水强化处理。

关键词:微污染水;潜流湿地;氮;磷

中图分类号: X52

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2018)04-0081-07

城乡居民生活饮用水通常优先选择人为活动干扰较少、水质优良的山区湖库水源或大江大河等优质水资源。然而,我国南方特别是平原河网区,受地理位置等客观条件限制,部分地区无法通过长距离调水获取优质水资源,只能以当地河道内微污染水作为原水。微污染水不仅需要自来水厂处理工艺和设备上投入大量资金,提高了当地居民生活用水成本,而且给供水安全带来隐患。

为节省原水处理成本,减轻突发水污染事件对城市供水安全的威胁,浙江省嘉兴市、江苏省盐城及连云港等城市相继建设微污染水处理系统,多年运行效果较好。例如2009年建成投入运行、面积为 110 hm^2 的石白漾湿地在进水氨氮浓度为 1.26 mg/L 时,氨氮去除率为 32.5% ;进水总氮浓度为 4.23 mg/L 时,总氮去除率为 15.1% ;进水总磷浓度为 0.42 mg/L 时,总磷去除率达 24.6% ^[1-2];2012年建成运行的 222.87 hm^2 的盐龙湖在全年进水氨氮、总氮和总磷平均浓度分别为 $0.57, 1.75$ 和 0.23 mg/L 时,氨氮、总氮和总磷的年均去除率均达到 $50\% \sim 80\%$ ^[3]。

潜流湿地具有床体密闭外界干扰少、污水处理效率高、占地面积小等特点,广泛应用于生活污水、暴雨径流、工业废污水、农田地表径流等的处理^[4-6]。相对而言潜流湿地在高水力负荷条件下处理微污染水的研究报道较少。利用人工湿地前置处理微污染水体作为水源地原水时,通常面临出水浓度要求高、水力负荷大、水力停留时间短等较高的工艺要求。氮素特别是总氮浓度要在 $1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的高水力负荷条件下达到地表三类水体质量标准 1.0 mg/L 有一定难度,因为较高的水力负荷导致过短的水力停留时间,从而使氮素

收稿日期: 2017-06-06

基金项目: 江苏省水利科技项目(2015072);南京水利科学研究院基本科研业务费专项资金资助项目(Y513011, Y516013, Y517001, Y917014)

作者简介: 陆海明(1978—),男,江苏射阳人,高级工程师,博士,主要从事水环境保护与生态水力学研究。

E-mail: cnlhm@126.com

硝化反硝化作用不能充分进行。

本研究依托水利部在南京水利科学研究所(以下简称南京水科院)铁心桥试验基地建设的人工湿地中试平台,以水体中氮磷为处理对象,开展了高水力负荷条件下水平潜流和垂直流人工湿地处理微污染水中试研究,筛选最佳填料和植物组合,为应用潜流湿地处理水源地氮磷微污染水提供技术依据。

1 材料与方 法

1.1 人工湿地系统

人工湿地中试系统位于南京水科院铁心桥试验基地象目湖北侧。该人工湿地中试系统是铁心桥试验基地雨水资源化利用和废污水处理实验平台的重要组成部分。象目湖承接铁心桥试验基地内地表径流汇水和生活污水。近年来随着基地实验厅建设和工作人员数量增加,象目湖水质逐渐恶化,夏季高温季节出现藻类爆发现象,氮磷是水质主要超标因子。

人工湿地中试平台于2010年建设完成,经过调试稳定运行后,于2013年和2014年开展本次微污染水源处理中试试验。

本次人工湿地中试试验由4个垂直流湿地和3个水平潜流湿地组成,垂直流湿地处理单元长、宽、高分别为5.5,4.5和1.0 m,水平潜流湿地处理单元长、宽、高分别为13.0,2.0和1.0 m(图1和图2)。人工湿地处理单元为并联结构,进水为曝气后象目湖水。湿地处理单元底部坡度为2%。每个人工湿地单元填料分为4层,每层20 cm,人工湿地填料选择常见的基质如石子、鹅卵石、碎石、砂子、蛭石、钢渣、陶粒等,在填料上用土工膜覆盖后回填20 cm厚的农田土壤,用于栽种芦苇、美人蕉、再力花和菖蒲等水生植物。基质填料在回填进入人工湿地处理单元前用网筛筛去除杂质,并用水洗净。垂直流湿地单元编号为17~20,其中17单元填料从上到下依次为鹅卵石、陶粒、石子和碎石,18单元填料从上到下依次为鹅卵石、碎石、钢渣和石子,19单元填料从上到下依次为鹅卵石、蛭石、粗砂和碎石,20单元填料从底到上依次为鹅卵石、碎石、粗砂和细砂。17~20单元水生植物分别为再力花、芦苇、美人蕉和菖蒲。水平潜流湿地单位编号为21~23,其中21单元填料从上到下依次为石灰石、陶粒、碎石和细砂,22单元填料从上到下依次为鹅卵石、陶粒、碎石和细砂,23单元填料从上到下依次为鹅卵石、蛭石、石子和细砂,21~23单元水生植物分别为美人蕉、再力花和菖蒲。石子、碎石、粗砂、细砂、鹅卵石、蛭石、钢渣、陶粒和石灰石等填料粒径分别为1~3 mm,5~10 mm,0.5~1.0 mm,0.25~0.05 mm,5~8 cm,2~4 mm,3~5 cm,5~10 mm和3~5 mm。水生植物群落密布床体。处理单元床体底部以混凝土浇筑,周边砖砌砂浆抹面。湿地处理单元进出水量可根据阀门大小调节。

1.2 人工湿地运行情况

2010年人工湿地基础设施建成后,经过2年的调试和试运行,2013年和2014年开展微污染水处理试验。2013年8—11月和2014年6—8月人工湿地系统进行中试试验,系统进水来源于曝气后的象目湖水,处理后出水重新进入象目湖。试验期间采取每周工作日运行、周末不运行的间歇式。工作期间垂直流人工湿地水力负荷为 $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力停留时间为0.65 d;水平潜流湿地水力负荷为 $1.38 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力

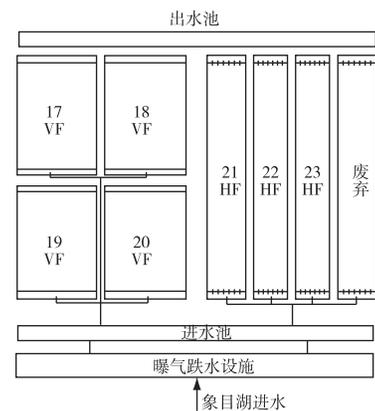


图1 人工湿地平面布置

Fig. 1 Layout plan of constructed wetland

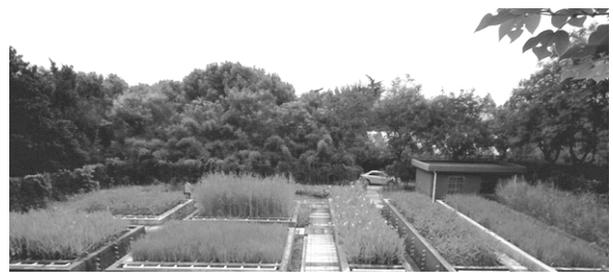


图2 人工湿地试验装置

Fig. 2 Photos of constructed wetland

停留时间为 0.72 d。

1.3 取样和水样检测分析

运行期间,在进水端和出水端分别采集水样,在实验室测定水样 TN, TP 及铵态氮、硝态氮、亚硝态氮等水化学指标。2013 年和 2014 年分别检测 14 次水样,两年共检测 28 次水样。总氮测定采用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,铵态氮测定采用靛酚兰比色法,硝态氮测定采用双波长比色法,亚硝态氮采用重氮偶合分光光度法。

2 结果与讨论

2.1 潜流湿地总氮进出水浓度及去除率比较

本研究进水总氮浓度变化范围为 2.662 ~0.793 mg/L, 试验期间 TN 平均浓度为 1.685 mg/L, 试验结果见表 1。象目湖水经过 4 种垂直潜流湿地单元和 3 种水平潜流湿地单元后, TN 平均浓度存在差异, 其中以 20 单元为最低, 平均浓度低于地表水环境 III 类水体质量标准 (1.0 mg/L), TN 去除率达 46.32%。在水平单元中, 以 23 单元出水平均浓度为最低, 但高于 III 类水体质量标准, 平均浓度为 1.173 mg/L, 平均去除率为 30.39%。

当进水浓度在较低范围时, 随着进水污染物浓度降低, 污水处理难度加大。本研究中人工湿地进水 TN 平均浓度为

1.685 mg/L, 类似于盐龙湖表流湿地进水 TN 浓度 1.52 mg/L^[7]。盐龙湖表流人工湿地 TN 平均去除率为 23.7%, 低于本文 17, 19, 20 和 23 单元平均去除率。盐龙湖表流湿地水力停留时间为 14 h, 平均水力负荷为 0.5 m³/(m²·d), 分别高于和低于本研究湿地单元平均水力停留时间和水力负荷。采用植物床-沟濠系统的嘉兴石臼漾表流湿地运行初期 TN 进水平均浓度为 4.23 mg/L, 出水平均浓度为 3.52 mg/L, 去除率仅为 15.1%^[2], 在稳定运行 4 年期间 TN 去除率与工程运行初期相似^[8]。

汪俊三采用水平潜流植物碎石床工艺处理星云湖水 TN 浓度为 1.104 mg/L 时, 在高水力负荷 (不小于 1.0 m³/(m²·d))、短水力停留时间 (19.89 h) 条件下, 出水 TN 浓度仅为 0.552 mg/L, 去除率为 50%^[9]。本研究的 20 单元在水力负荷和进水污染物浓度均高于星云湖潜流植物碎石床条件下的数值, 取得了相似的处理效果, TN 出水浓度提升 1 个等级。Li 等以五里湖水为处理对象, 比较了在进水 TN 浓度 4.82 mg/L, 高水力负荷条件 (0.64 m³/(m²·d)) 时表面流、水平潜流和垂直潜流湿地的处理效果, 结果表明 3 种类型湿地出水浓度分别为 3.97, 2.29 和 2.37 mg/L, 潜流湿地 TN 去除率高于表面流湿地, 去除率达 50%^[10]。

比较不同季节 TN 去除率可以发现 2014 年春季人工湿地单元去除率较低, 这可能与春季植物刚开始生长, 对氮素的吸收固定尚处于较低水平有关。其他研究者在比较不同季节 TN 去除效果时, 发现 TN 去除效果以夏季和秋季最佳, 这与夏季和秋季温度高、氮素的氨化、硝化和反硝化等生物化学过程相关的微生物活性强, 水生植物在夏季生物量大、植株生长对氮素的吸收固定能力较强有关^[11-12]。

2.2 潜流湿地氨氮和硝态氮去除效果

图 3 为本研究 7 个潜流湿地单元氨氮和硝态氮平均浓度与去除率比较结果。20 单元出水氨氮平均浓度最低, 平均去除率为 80.89%, 除 18 单元外的其他几个单元氨氮去除率均高于 50%。采用碎石床水平潜流人工湿地处理氨氮进水浓度为 0.375 mg/L 的星云湖水时, 氨氮去除率为 54.13%, 氨氮去除率与本研究类似^[9]。盐龙湖表流湿地进水氨氮平均浓度为 0.28 mg/L 时, 平均去除率为 32%, 低于本研究的结果^[7]。

表 1 潜流湿地单元进出水 TN 浓度及平均去除率

Tab. 1 Mean total nitrogen concentrations of influent and effluent and mean removal efficiency for various subsurface constructed wetlands

处理单元	进出水浓度/(mg·L ⁻¹)	平均去除率/%
进水	1.685(2.662~0.793)	
17: 鹅卵石+陶粒+石子+碎石, 再力花	1.260(2.018~0.639)	25.25
18: 鹅卵石+碎石+钢渣+石子, 芦苇	1.422(1.871~0.805)	15.64
19: 鹅卵石+蛭石+粗砂+碎石, 美人蕉	1.111(2.612~0.66)	34.07
20: 鹅卵石+碎石+粗砂+细砂, 菖蒲	0.905(1.663~0.581)	46.32
21: 石灰石+陶粒+碎石+细砂, 美人蕉	1.370(2.115~0.923)	18.96
22: 鹅卵石+陶粒+碎石+细砂, 再力花	1.335(2.117~0.748)	20.77
23: 鹅卵石+蛭石+石子+细砂, 菖蒲	1.173(1.819~0.581)	30.39

硝态氮去除率同样以 20 单元为最高,平均去除率为 43.06%,23 单元硝态氮去除率次之,平均去除率为 37.02%,18 单元硝态氮表观去除率为 17.25%,其他 4 个单元出水硝态氮浓度高于进水浓度,表观硝态氮去除率为负数。象目湖地表水在经过人工湿地单元后,部分湿地单元硝化作用强烈,有机氮被分解转换为硝态氮,氨氮发生硝化作用转为硝态氮,硝态氮未能及时完成反硝化作用导致出水硝态氮浓度升高,此部分氮素仅发生形态变化,并未完全从湿地中去除。

人工湿地去除氮素作用机制包括 pH 值增加导致氨挥发、有机氮矿化作用、硝化作用、反硝化作用、铵离子被基质吸附后固定、植物生长吸收以及厌氧氨氧化作用等^[11-12],其中有机氮矿化和硝化作用主要是改变了氮素的赋存形态,并未将氮素从湿地系统中去除,未收割植物固定的氮素在植株腐烂时仍然回到湿地系统。

20 单元填料和植物组合在水力停留时间小于 1 d、水力负荷大于 $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,进水氨氮和硝态氮浓度处于较低水平的条件下,仍然实现了较高的氨氮和硝态氮去除率,这可能包括如下原因:一是和人工湿地间歇式运行方式有关^[11-13],干湿交替有助于增加床体内填料氧气含量,增强好氧微生物活性,有利于有机氮的矿化分解,鹅卵石、碎石、粗砂和细砂填料搭配方式相比于其他填料搭配更有利于床体复氧;二是与进水氨氮和硝态氮浓度较低、试验期间温度较高、植物生长旺盛有关^[4,13],较高的温度有利于增加植物光合作用,维持植物根系对养分的持续需求,减少植物根系老化脱落对于湿地养分去除效果的干扰。湿地系统中同时存在矿化作用、氨化作用、硝化作用、反硝化作用或者厌氧氨氧化作用,此外植物吸收固定氮素对于氮素的去除同样具有一定作用,但是具体各种作用分别在湿地系统氮素去除中的比例仍需进一步分析研究。

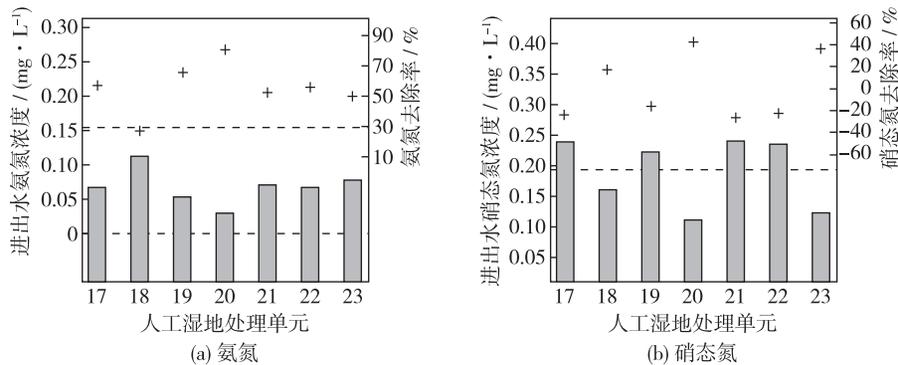


图3 人工湿地处理单元氨氮和硝态氮进出水平均浓度及去除率(图中黑色柱为处理单元出水氨氮和硝态氮浓度,黑色虚线为进水氨氮和硝态氮浓度,“+”为氨氮和硝态氮去除率)

Fig. 3 Mean ammonium-N and nitrate-N concentrations of influent and effluent and mean removal efficiency for various subsurface constructed wetlands (black bars in the figures indicate mean nitrogen concentrations of effluent, dash lines are nitrogen concentrations of influent, “+” signs mean nitrogen removal efficiency)

2.3 潜流湿地总磷进出水浓度及去除率比较

在总磷平均进水浓度为 0.17 mg/L 时,7 种潜流湿地总磷平均去除率均低于 30% (见表 2),其中以 20 单元总磷去除率最高,达 30.59%,出水平均浓度为 0.118 mg/L ;18 和 21 单元总磷平均去除率超过 25%;23 单元最低,仅 1.22%。若不考虑植物对磷素去除效果的影响,水平潜流湿地 21 和 22 单元相比说明,石灰石去除磷素效果高于鹅卵石,4 个垂直潜流湿地磷素去除率比较说明,碎石、钢渣和陶粒具有相对较好的磷素去除效果,蛭石效果较差。人工湿地磷素去除效率超过 25% 的处理单元填料均有价格相对便宜的碎石,这和星云湖富营养化湖水处理试验得到的植物碎石床处理工艺可将进水总磷浓度为 0.077 mg/L 处理至 0.024 mg/L ^[9] 的研究结果相类似。五里湖边人工湿地中试结果表明,湖水总磷平均浓度为 0.152 mg/L 时,采用砾石作为基质的水平潜流和垂直潜流人工湿地出水平均浓度分别为 0.052 mg/L 和 0.056 mg/L ,表流湿地去除效果明显低于潜流湿地^[10]。采用自然土壤作为基质的石臼漾和盐龙湖表流湿地建成运行后,地表

水总磷浓度去除效率不高,盐龙湖表流湿地挺水植物区进水总磷平均浓度为 0.155 mg/L,出水平均浓度为 0.115 mg/L,平均去除率仅为 25.8%^[3,7-8]。

人工湿地磷素去除机制包括土壤或基质吸附、化学沉淀、微生物和植物生长吸收等,其中土壤或基质吸附石主要的磷素去除机制^[11]。许多研究者比较了不同土壤或基质类型对于磷素去除的影响^[14-15],发现页岩、钢渣、干渣、煤渣等具有很好的磷素去除效果,砂子、鹅卵石等去除效果较差;基质表面吸附位点数量、比表面积大小和 pH 值是影响基质磷素吸附能力的主要因素。Yin 等最近研究发现,热改性富含钙的凹凸棒土作为人工湿地基质能够高效去除水体磷素^[16]。人工湿地基质在长期运行后磷素存在吸附饱和现象,吸附饱和和基质丧失磷素去除能力,在 pH 值、氧化还原点位等条件改变时已经被吸附固定或者化学沉淀的磷素可能重新释放进入水体^[11,17]。总体来说,7 个人工湿地单元总磷去除效果偏低,这可能与湿地单元填料主要为鹅卵石、粗砂、细砂等磷素去除能力较弱的材料有关。处理单元填料中有碎石、钢渣、石灰石、陶粒等吸附性能较好材料的处理单元,总磷去除率相对较高。

由于基质填料孔隙被颗粒物、积累的有机物堵塞,导致运行效率下降是影响长期运行的重要原因^[18]。研究表明,人工湿地堵塞虽然不能完全避免,但是通过优选合适孔径的填料,选择有效的前处理单元、控制好进水有机污染和悬浮颗粒物负荷,可以延缓其堵塞过程,有人工湿地在运行 20 年后仍然能保持较好的处理效果^[19]。本研究人工湿地进水为经过沉淀后的微污染水,悬浮颗粒物含量和有机污染负荷较低,20 单元类型主要适用于高水力负荷条件下河流、湖泊微污染水处理,长期运行过程中水体需要维持较低的颗粒物含量和有机污染负荷。

3 结 语

以铁心桥试验基地象目湖微污染水为处理对象,比较了在高水力负荷条件下,4 种垂直流人工湿地和 3 种水平潜流湿地氮磷污染物去除效果。在总氮进水浓度范围为 2.662~0.793 mg/L 和总磷进水浓度范围为 1.003~0.035 mg/L 时,填料从上到下由鹅卵石、碎石、粗砂和细砂组成,种植菖蒲的 20 单元总氮和总磷的平均去除率最高,分别为 46.32% 和 30.59%,该湿地单元氨氮和硝态氮平均去除率分别为 80.89% 和 43.06%,出水总氮浓度平均值低于地表水Ⅲ类水体质量标准,此类型组合湿地可以用于饮用水源地原水等微污染地表水总氮去除。不同人工湿地单元磷素去除效果比较表明,包含碎石的基质除磷效果较好,价格相对便宜的碎石可以在更大范围应用于地表水磷素去除。

参 考 文 献:

- [1] 汪仲琼,张荣斌,陈庆华,等. 人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3804-3811. (WANG Zhongqiong, ZHANG Rongbin, CHEN Qinghua, et al. Water treatment efficiency of constructed wetland plant-bed/ditch systems[J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3804-3811. (in Chinese))
- [2] 尹澄清,苏胜利,张荣斌,等. 以河网作为城市水源的污染问题和湿地净化[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1583-1586. (YIN Chengqing, SU Shengli, ZHANG Rongbin, et al. Use of wetland to purify polluted stream network for a city water source[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(8): 1583-1586. (in Chinese))

表 2 潜流湿地单元进出水 TP 浓度及平均去除率

Tab. 2 Mean total phosphorus concentrations of influent and effluent and mean removal efficiency for various subsurface constructed wetlands

处理单元	进出水浓度/ (mg · L ⁻¹)	平均 去除率/%
进水	0.170(1.003~0.035)	
17: 鹅卵石+陶粒+石子+碎石,再力花	0.134(0.276~0.018)	21.20
18: 鹅卵石+碎石+钢渣+石子,芦苇	0.127(0.315~0.018)	25.29
19: 鹅卵石+蛭石+粗砂+碎石,美人蕉	0.149(0.418~0.044)	12.35
20: 鹅卵石+碎石+粗砂+细砂,菖蒲	0.118(0.246~0.042)	30.59
21: 石灰石+陶粒+碎石+细砂,美人蕉	0.124(0.253~0.018)	27.06
22: 鹅卵石+陶粒+碎石+细砂,再力花	0.152(0.645~0.044)	10.32
23: 鹅卵石+蛭石+石子+细砂,菖蒲	0.168(0.627~0.053)	1.22

- [3] 左倬, 朱雪诞, 胡伟, 等. 盐城蟒蛇河饮用水源原水水质及盐龙湖工程水质净化效果评价[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(5): 61-71. (ZUO Zhuo, ZHU Xuedan, HU Wei, et al. Study on the quality characteristics of the raw water of the drinking water source, Mangshe River, Yancheng and the evaluation of the water quality purification effect of Yanlong Lake project[J]. Environmental Pollution and Control, 2015, 37(5): 61-71. (in Chinese))
- [4] VYMAZAL J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 45(1): 61-69.
- [5] ZHANG T, XU D, HE F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990-2010[J]. Ecological Engineering, 2012, 47: 189-197.
- [6] ZHI W, JI G. Constructed wetlands, 1991-2011: A review of research development, current trends, and future directions[J]. Science of the Total Environment, 2012, 441(441): 19-27.
- [7] 卿杰, 王超, 左倬, 等. 大型表流人工湿地不同季节不同进水负荷下水质净化效果研究[J]. 环境工程, 2015, 33(增刊1): 190-193. (QING Jie, WANG Chao, ZUO Zhuo, et al. Study on the effect of different seasons and different load to the water purification on large surface-flow artificial wetland[J]. Environmental Engineering, 2015, 33(Suppl1): 190-193. (in Chinese))
- [8] 陈庆华, 俞新峰, 王为东. 石臼漾水源生态湿地工程的水质改善效果[J]. 中国给水排水, 2013, 29(1): 43-48. (CHEN Qinghua, YU Xinfeng, WANG Weidong. Water quality improvement of Shijiuayang water source ecological wetland[J]. China Water and Wastewater, 2013, 29(1): 43-48. (in Chinese))
- [9] 汪俊三, 覃环. 高水力负荷人工湿地处理富营养化湖水[J]. 中国给水排水, 2005, 21(1): 1-4. (WANG Junsan, QIN Huan. Constructed wetland at high hydraulic loading for eutrophic lake water treatment[J]. China Water and Wastewater, 2005, 21(1): 1-4. (in Chinese))
- [10] LI L, LI Y, BISWAS D K, et al. Potential of constructed wetlands in treating the eutrophic water: Evidence from Taihu Lake of China[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(6): 1656-1663.
- [11] VYMAZAL J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1-3): 48-65.
- [12] 熊飞, 李文朝, 潘继征, 等. 人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J]. 湿地科学, 2005, 3(3): 228-234. (XIONG Fei, LI Wenchao, PAN Jizheng, et al. Efficiency and functioning of nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands: A review[J]. Wetland Science, 2005, 3(3): 228-234. (in Chinese))
- [13] SAEED T, SUN G. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: Dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112(24): 429-448.
- [14] DRIZO A, FROST C A, GRACE J, et al. Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1999, 33(17): 3595-3602.
- [15] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 51-55. (YUAN Donghai, JING Lijie, GAO Shixiang, et al. Analysis of the removal efficiency of phosphorus in some substrate used in constructed wetland systems[J]. Environmental Science, 2005, 26(1): 51-55. (in Chinese))
- [16] YIN H B, YAN X W, GU X H. Evaluation of thermally-modified calcium-rich attapulgite as a low-cost substrate for rapid phosphorus removal in constructed wetlands[J]. Water Research, 2017, 115: 329-338.
- [17] DRIZO A, COMEAU Y, FORGET C, et al. Phosphorus saturation potential: A parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36(21): 4642-4648.
- [18] AIELLO R, BAGARELLO V, BARBAGALLO S, et al. Evaluation of clogging in full-scale subsurface flow constructed wetlands[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 505-513.
- [19] VYMAZAL J. Does clogging affect long-term removal of organics and suspended solids in gravel-based horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 331: 663-674.

Pilot experiment on effects of subsurface artificial wetland on nitrogen and phosphorus removal in slightly-polluted surface water body

LU Haiming¹, SUN Jinhua¹, LIU Ting², LIU Hao², SONG Li³, ZHU Qiande¹

(1. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *North-Extended Water Supply Project Management Division for Tongyu River of Lianyungang City, Lianyungang 222006, China*; 3. *Institute for Water Resources Research of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China*)

Abstract: The removal efficiency of the horizontal and vertical subsurface constructed wetlands with various combinations of substrates and aquatic plants and nitrogen and phosphorus from the slightly-polluted water body in the Xiangmu lake was investigated as a pilot experiments at the Tiexinqiao Water Experimental Center of Nanjing Hydraulic Research Institute. The analysis and testing results show that when the total nitrogen concentration in inflowing water is 0.793–2.662 mg/L, the average concentration of the total nitrogen in the vertical subsurface constructed wetland unit (unit 20) with cobblestone, gravel, coarse sand, fine sand as the substrates and acoruscalamus as vegetation is the lowest, reaching 0.905; the average removal rate of the total nitrogen is the highest, up to 80.89%, 43.06% and 46.32% respectively during the testing periods, and the total nitrogen concentration in the outflow is reduced and the water quality is improved from the 5th category to the 3rd category. The mean total nitrogen concentration of the effluent from unit 20 is also 0.905 mg/L, which is lower than the 3rd of national water quality standard (GB3838—2002). When the influent phosphorus concentrations was 0.035–1.003 mg/L, the average total phosphorus removal rate of unit 20 was the highest, reaching 30.59%. Cheap gravel could obtain a relatively high phosphorus removal rate. The typical combination of aquatic plant and substrates in unit 20 can be applied to the nitrogen and phosphorus removal from the slightly polluted surface water body.

Key words: slightly polluted water; subsurface constructed wetland; nitrogen; phosphorus