

复合植物床生态系统对再生水的深度处理研究

宋彦青, 王 芬, 季 民, 陶金成, 袁 野
(天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 采用三级挺水植物床和沉水植物床构建复合植物床生态系统, 考察了该系统对再生水的深度处理效果, 并初步分析了系统中基质、植物和微生物对氮、磷的去除贡献。结果表明: 多级复合植物床生态系统能够有效去除再生水中的氮和磷, 在该系统中, 芦苇和香蒲对营养型污染物的去除效果比扁杆藎草好, 沉水植物床则主要起稳定出水水质的作用。对 TN 的去除主要依靠植物的吸收、转化和微生物的反硝化; 基质对 TP 的去除起主要作用, 平均去除率达到 87.1%。经复合植物床生态系统处理后的再生水不易引起藻类的大量繁殖, 降低了再生水回用于景观用水的富营养化风险。

关键词: 复合植物床生态系统; 再生水; 脱氮除磷

中图分类号: X703 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2010)13-0046-04

Composite Plant Bed Ecosystem for Advanced Treatment of Reclaimed Water

SONG Yan-qing WANG Fen JI Min TAO Jin-cheng YUAN Ye

(School of Environmental Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Three-stage emerged plant bed and submerged plant bed were used to build a composite plant bed ecosystem. The advanced treatment efficiency of reclaimed water was investigated, and the removal contributions of substrates, plants and microorganisms were analyzed primarily. The results show that the composite plant bed ecosystem can effectively remove TN and TP from the effluent of MBR. In this ecosystem, *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* have better removal efficiencies on nutrients than *Scirpus phenicum* is. Submerged plant bed stabilizes the effluent quality. The removal of TN is mainly due to the combined effect of plant absorption, transformation and microbial denitrification. Substrates of the plant beds play a major role in TP removal with the average removal rate of 87.1%. After being treated by the composite plant bed ecosystem, the reclaimed water does not cause rapid algae reproduction, and reduces the risk of eutrophication when being reused as landscape water.

Key words composite plant bed ecosystem; reclaimed water; nitrogen and phosphorus removal

目前许多城市采用再生水补充城市景观水体, 但回用于景观水体的再生水水质距天然地表水的水质仍有较大差距^[1], 使得再生水的污染物本底值较

景观水体高; 加之, 景观水体等浅水湖泊的水体流动性较差, 再生水回用于景观水体存在着富营养化的潜在风险^[2-3]。天津大学校园里的景观水体均以再

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目 (08ZCYSF00100); 国家大学生创新性实验计划项目; 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07314-005)

生水(MBR处理后的学生宿舍盥洗废水和洗浴废水)为唯一补充水源,虽然这些再生水水质达到了相关标准,但实际应用中发现景观水渠中很容易滋生藻类,影响了景观美感。因此,如何进一步去除再生水中的氮、磷,以使再生水回用过程中能维持稳定的水质,避免或延缓再生水水体的富营养化,成为再生水回用于景观水体的关键。

人工湿地是主要通过基质的过滤、吸附、沉淀以及微生物分解和植物吸收等作用去除污水中有机构物、氮、磷等污染物的复杂生态系统^[4,5],其中基质、植物和微生物在人工湿地污水处理系统中起主要作用。人工湿地处理工艺具有净化效率高、工艺设备简单、运转维护管理方便、对负荷变化适应性强、工程基建和运行费用低等特点^[6],应用十分广泛。笔者考虑到再生水回用于景观水体的特点,应用人工湿地工艺原理构建复合植物床生态系统,考察了该系统对再生水的深度脱氮除磷效果,并初步分析了基质、植物和微生物的净化作用,以控制氮、磷等营养物质进入校园景观水体,降低发生富营养化的风险。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

试验采用三级挺水植物床与沉水植物床串联构成复合植物床生态系统,对MBR出水进行深度净化,考察了该系统对再生水的深度处理效果。

各级植物床均使用PVC塑料箱,尺寸均为0.8 m×0.6 m×0.6 m。各级植物床以PVC管相连,相邻两级间的高差为0.2 m,采用穿孔管布水和集水。前三级挺水植物床选用的基质包括砾石、碎石和富含钙、铁等元素的复合泥土。基质自下而上依次是:0.1 m厚的碎石(直径为20~40 mm)、0.15 m厚的砾石(直径为10~20 mm)、0.15 m厚的砾石(直径为5~10 mm)、0.1 m厚的复合泥土。前三级挺水植物床分别种植芦苇、扁杆藨草和香蒲,第四级沉水植物床选用金鱼藻、水芹菜等。多级复合植物床生态系统的工艺流程见图1。

处理对象为校园中水站的MBR出水,自2008年4月23日起检测系统的进、出水和各级植物床出水水质。试验共分为4个阶段:第一阶段(I)采用连续进水,水力负荷为0.347 m³/(m²·d);第二阶段(II)采用连续进水,水力负荷为0.208 m³/(m²·d);第三阶段(III)改用间歇进水,水力负荷为0.104

m³/(m²·d);第四阶段(IV)采用连续进水,水力负荷为0.139 m³/(m²·d)。

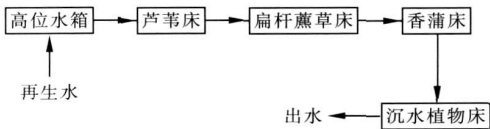


图1 多级复合植物床生态系统的工艺流程

Fig 1 Flow chart of multi-stage plant bed process

1.2 进水水质

MBR出水的浊度低、微生物含量低、视觉感官效果好,但其氮、磷等营养物质的含量较高,将MBR出水直接作为校园景观喷泉和湖泊的补充用水在一定条件下仍会引起水体的富营养化。试验系统稳定运行后的进水TN为4.54~17.984 mg/L,平均为9.724 mg/L;进水TP为0.041~0.898 mg/L,平均为0.315 mg/L。

1.3 分析方法

TN:碱性过硫酸钾氧化—紫外分光光度法,TP:钼酸盐分光光度法,叶绿素a分光光度计。

2 结果与讨论

2.1 对TN、TP的去除效果

植物床生态系统对TN的去除效果见图2。

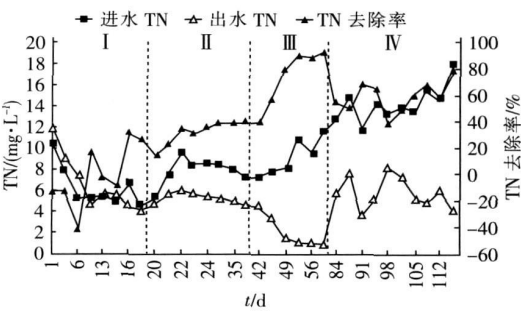


图2 植物床生态系统对TN的去除效果

Fig 2 TN removal efficiency by multi-stage plant bed

由于第二阶段延长了水力停留时间,使TN与微生物充分接触,氨化、硝化和反硝化作用更加充分,在一定程度上有利于对TN的去除。第三阶段采用间歇进水,一方面延长了水力停留时间,另一方面促进了系统的反硝化作用,提高了对NO₃⁻-N的去除效果,对TN的去除率提高。第四阶段连续进水的去除效果不如第三阶段间歇进水的,但与第二阶段相比,虽然进水TN浓度增大,但由于延长了水力停留时间,促进了系统对TN的去除,去除率大于

第二阶段。

复合植物床生态系统 4 个阶段对 TP 的平均去除率分别为 55 0%、72 5%、88 2% 和 96 6%，其中第二、三和四阶段的出水 TP 浓度基本都保持在 0.04 mg/L 以下，系统对 TP 的去除率很高，且去除效果很稳定。

2.2 TN 和 TP 浓度的梯级变化

复合植物床生态系统第四阶段的进水 TN 平均为 14.341 mg/L，经芦苇、扁杆蔗草、香蒲 3 级挺水植物床和沉水植物床处理后，对 TN 的平均去除率累计达到 28.7%、39.6%、54.9% 和 59.6%，出水 TN 平均为 5.714 mg/L。可知，芦苇床和香蒲床对 TN 的去除贡献较大，蔗草床对 TN 的去除贡献较小，沉水植物主要起到稳定出水水质的作用。

第四阶段的进水 TP 平均为 0.751 mg/L，经芦苇、扁杆蔗草、香蒲 3 级挺水植物床和沉水植物床处理后，对 TP 的平均去除率累计达到 65.2%、79.1%、95.9% 和 96.6%，出水 TP 平均为 0.025 mg/L，系统对 TP 的去除效果很稳定。

2.3 对 TN 和 TP 的去除机理分析

为研究基质对再生水中 TN 和 TP 的去除效果，于试验的第 162~183 天构建了 1 个只有基质的反应器，其中基质的组成、来源与厚度等情况均与复合植物床生态系统相同。为研究基质和微生物对再生水中 TN 和 TP 的去除效果，在香蒲床中去掉植物，只保留基质和微生物，与基质单独作用相比较得出微生物对 TN 和 TP 的去除效果；与香蒲床中基质、微生物和植物的总去除效果相比较，得出植物的吸收等作用对 TN 和 TP 的去除效果（见表 1）。以上 3 个系统均采用连续进水，水力负荷均为 0.139 m³ / (m² · d)。

表 1 基质、微生物和植物对 TN、TP 的去除贡献
Tab. 1 Removal rates of TN and TP by substrate, microorganism and plant %

项 目	TN 去除率	TP 去除率
基质	3.5	87.1
微生物	29.5	5.4
植物	28.8	2.7

由表 1 可知，对 TN 的去除主要依靠植物和微生物的共同作用。植物能够吸收利用氮素，还能将光合作用产生的氧气输送到根区，在根区形成氧化态的微环境^[7]，这种有氧和缺氧条件为好氧、厌氧和兼性微生物均提供了适宜的生长环境。植物还能

增强和维持基质的水力传输，改善水力条件^[8]。试验测得，进水中主要是 NO₃⁻ - N（占 TN 的 95% 以上），不含 NO₂⁻ - N、NH₃ - N 和有机氮的含量也很低，故系统对 TN 的去除规律与对 NO₃⁻ - N 的应该一致。由于处理水量即水力负荷的变化对氨氮硝化和 NO₃⁻ - N 反硝化的作用正好相反，为得到较好的 TN 去除效果，应采用较小的水力负荷。为促进系统的反硝化作用，提高对 NO₃⁻ - N 的去除效果，可考虑延长缺氧反应时间或增加系统的缺氧段容积，采用间歇进水来延长水力停留时间或增加水深。

基质对 TP 的去除起主要作用，去除率达到 87.1%。试验用基质中的复合泥土富含钙、铁等元素，能够使磷生成沉淀积累在系统中，碎石、砾石等基质也能对磷元素起到吸附、沉淀的作用。试验条件下，当进水 TP 浓度在一定范围内波动时，出水 TP 浓度总能维持在较低水平。

2.4 原水与植物床出水的藻类生长状况比较

取原水（MBR 出水）和植物床处理出水分别置于两个玻璃缸中，放于室外露天。测定取水当天以及分别静置 3、7 和 14 d 时的叶绿素 a 含量（见图 3）。可知，经复合植物床生态系统处理后，藻类的生长速度大幅减缓。

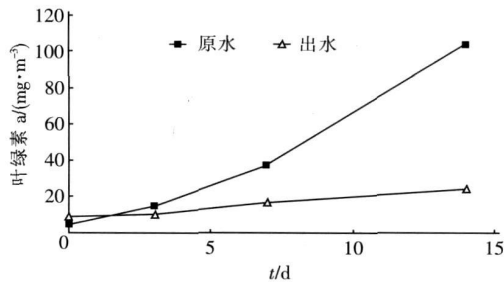


图 3 原水与植物床出水的叶绿素 a 含量

Fig. 3 Chlrophyll a content in influent and effluent

3 结论

① 由挺水植物和沉水植物组成的多级复合植物床生态系统能进一步去除 MBR 出水中的氮、磷营养物质。其中间歇进水阶段是最佳运行阶段，在其进水 TN 和 TP 分别为 (7.197~11.479) 和 (0.107~0.204) mg/L 的情况下，可使出水 TN、TP 分别降到 (0.953~4.435) 和 (0.005~0.034) mg/L。

② 芦苇床和香蒲床对营养型污染物的去除效果显著，沉水植物床则主要起稳定出水水质的作用。

③ 对 TN 的去除主要依靠植物的吸收、转化

作用和微生物的反硝化作用;试验选用的特殊基质对 TP 有非常好的去除效果,基质的吸附、沉淀作用是去除 TP 的主要途径。

④ 经植物床生态系统处理后的再生水不易引起藻类的大量繁殖,降低了再生水回用于景观用水的富营养化风险。

参考文献:

- [1] 周律,邢丽贞,段艳萍,等. 再生水回用于景观水体的水质要求探讨[J]. 给水排水, 2007 33(4): 38-42
- [2] 何安琪,何苗,施汉昌. 城市污水再生回用于景观水体水质安全保障技术[J]. 环境工程, 2006 24(1): 22-23, 32
- [3] 钱靖华,田宁宁. 再生水回用于景观水体存在的问题及防治对策[J]. 给水排水, 2006 32(5): 71-74
- [4] 刘超翔,董春宏,李峰民. 潜流式人工湿地污水处理系

统硝化能力研究[J]. 环境科学, 2003 24(1): 80-83

- [5] Peterson S B Teal J M. The role of plants in ecologically engineered wastewater treatment systems[J]. Ecol Eng 1996 6(1-3): 137-148
- [6] 宋志文,王仁卿,席俊秀,等. 人工湿地对氮、磷的去除效率与动态特征[J]. 生态学杂志, 2005 (6): 15-19
- [7] Fennessy M S Cronk J K Mitsch W J Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. Ecol Eng 1994 3(4): 469-484
- [8] 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

电话: 13752353601

E-mail songweave@163.com

通讯作者:季民

收稿日期:2010-01-15

(上接第 45 页)

3℃左右,因此在进水温度为 12℃左右时丝状菌生长较快,导致了污泥膨胀。大型污水处理厂的进水温度一般都在 15℃以上,无需采用保温措施,但在北方寒冷地区,可将生化反应池建在室内,并采用一定的供暖措施。②pH。对于大型的污水处理厂,可在曝气池前端增设 pH 自动调节装置,通过投加碱、酸来调节曝气池进水的 pH,将 pH 控制在要求的范围内。③DO。控制合理的 DO 浓度,使好氧池的 DO > 2 mg/L。

3.2 防止二沉池底部污泥发生反硝化

主要对策:①维持好氧池中合理的 DO 浓度,使好氧池中氨氮转化成硝态氮的比例合适,好氧池出水的硝态氮浓度不要过高;②增加缺氧池的反硝化能力,通过降低混合液回流中的溶解氧,使缺氧池中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 作为电子受体,或者增加缺氧池体积,以增加反硝化时间;③减少污泥停留时间,使污泥在二沉池中来不及发生反硝化作用。

本试验通过强化缺氧池的反硝化作用、调整污泥回流比、减少污泥在二沉池中的停留时间等措施,使二沉池的浮泥上浮现象得到了有效控制,出水 SS 降低,达到了《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)的一级 B 标准。

4 结论

在试验条件下, A²/O 工艺中二沉池的污泥上浮

主要是由丝状菌过度繁殖导致的污泥膨胀和二沉池底部污泥发生的反硝化作用引起的。其中,丝状菌的过度繁殖是由进水温度太低引起的;在保证一定水温的基础上,控制 pH 在适宜范围内和好氧池的 DO > 2 mg/L 可有效防止丝状菌性污泥膨胀。而二沉池中污泥发生反硝化主要是由进入二沉池的硝态氮浓度过高引起的,试验通过强化缺氧池的反硝化作用、调整污泥回流比、减少污泥在二沉池中的停留时间等措施,抑制了二沉池中污泥的反硝化作用,使二沉池的污泥上浮现象得到有效控制。

参考文献:

- [1] 陈安稳,时翔云,于鲁冀,等. 污泥膨胀的原因及其控制方法[J]. 中国农学通报, 2006 22(12): 296-299
- [2] 王洪臣. 城市污水处理厂运行控制与维护管理[M]. 北京:科学出版社, 1997
- [3] 丁峰,彭永臻,杜红,等. 活性污泥中污泥上浮的产生与控制[J]. 环境工程, 2000 18(6): 25-27
- [4] 李圭白,张杰. 水质工程学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005
- [5] 姜亚敏,买文宁,李宁. AAC 氧化沟工艺中污泥上浮的原因与控制[J]. 工业水处理, 2006 26(4): 78-80

电话: (029) 88405170

E-mail wsp90@vip.sina.com

收稿日期:2010-02-04