

串式垂直流湿地去除河水 COD_{Mn} 效果的模拟研究

周峻宇¹, 秦普丰¹, 卢少勇^{2*}, 李济圣², 曲洁婷², 薛巍²

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊环境研究中心, 湖泊工程技术中心, 北京 100012)

摘要:为揭示湿地对污染河水的去除效果,用温室内3级、2级、1级下行流人工湿地模拟系统去除北京清河河水中的化学需氧量(COD)。结果表明,有植物2级柱系统(水力负荷为 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,水力停留时间为 1.72 d)的去除效果最佳,运行期 COD_{Mn} 的平均去除率为 59.71%,平均出水浓度可达地表水Ⅱ类标准。串联级数对 COD_{Mn} 去除的影响较大,1级柱系统对 COD_{Mn} 去除率与多级柱系统间均呈显著差异($P < 0.05$),但多级柱系统间对 COD_{Mn} 去除率无显著差异($P > 0.05$)。植物对 COD_{Mn} 去除有显著影响,无-有植物各级对应系统间 COD_{Mn} 去除率均呈显著差异($P < 0.05$),运行期有植物各级柱系统及多级系统的沿程各柱均具更好的 COD_{Mn} 去除效果。综合考虑去除效果及构成成本,推荐有植物2级串联系统。

关键词:串联;植物;垂直流人工湿地;COD_{Mn};去除效果

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)06-1226-06 doi:10.11654/jaes.2013.06.020

Simulating Study of COD_{Mn} Removal Efficiency in Series Type of Vertical Flow Constructed Wetlands Treating River Water

ZHOU Jun-yu¹, QIN Pu-feng¹, LU Shao-yong^{2*}, LI Ji-sheng², QU Jie-ting², XUE Wei²

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Engineering and Technology Centre of Lake, Research Centre of Lake Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to study the Chemical Oxygen Demand (COD_{Mn}) removal regularity in the wetland, indoor three stages, two stages and one stage downward flow simulated wetlands treating water of Qinghe River in Beijing were discussed. The results showed that the two stages planted system had the highest removal rate under the hydraulic load of $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, and hydraulic retention time of 1.72 d, the average removal rate in operation period was 59.71%, with the average effluent concentration below the value of grade-Ⅱ standard of surface water. The stages of series connection had a superior effect on COD_{Mn} removal, the one stage systems and the multistage systems had significant difference in the COD_{Mn} removal efficiency ($P < 0.05$), but no obvious difference was observed for the multistage systems ($P > 0.05$). The plants had a significant effect on COD_{Mn} removal, the unplanted-planted corresponding systems had significant difference in the COD_{Mn} removal efficiency ($P < 0.05$), the planted systems and the column in flow pathway of multistage systems had a better COD_{Mn} removal efficiency in operation period. Considering the removal efficiency and the actual cost, we recommended the planted two stages series connection system.

Keywords: series connection; plants; vertical flow constructed wetlands; COD_{Mn}; removal efficiency

人工湿地自20世纪70年代起发展,具有效率高、投资低、运转费低、维持费低等优点,被用于河水处理^[1-4]。目前较常采用的湿地形式主要有表面流和潜流,而潜流又分为垂直潜流和水平潜流^[5],其中垂直流

湿地的设计构造使湿地内部布水更均匀、充氧更充分,对有机物等有更好的净化效果^[6]。植物是影响湿地净化能力的关键因素之一,植物本身具去除碳、氮、磷的能力,其庞大根系为微生物提供了良好的栖息场所^[6-7]。

当前关于垂直流湿地对河水的处理已有较多研究^[8-12],但多局限于单一垂直流湿地,对于不同串联及植物影响下垂直流湿地净化河水的效果研究却鲜见报道。本试验通过构建垂直流人工湿地模拟系统,重点研究不同串联及植物影响下垂直流湿地小试处理

收稿日期:2012-10-16

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101, 2009ZX07106-005)

作者简介:周峻宇(1987—),男,硕士研究生,主要从事人工湿地净化污染河水中污染物的研究。E-mail:zjy00001@126.com

* 通信作者:卢少勇 E-mail:lushy2000@163.com

北京市清河河水中 COD_{Mn} 的效果,探讨串联级数及植物对 COD_{Mn} 去除效果的影响,以寻求最优的工艺组合,并供处理类似河水 COD_{Mn} 的湿地借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验装置

考虑到温度和降水等的影响,本装置置于室内,试验工艺流程如图 1 所示。

模拟湿地包括 12 个相同的有机玻璃柱,各柱直径 95 mm、高 900 mm,底层砾石粒径(26.4 ± 7.2)mm、高 150 mm,主体层粒径(4.4 ± 1.5)mm、高 650 mm,两层总体基质平均孔隙率为 42.9%。共设植物 3 级柱、2 级柱、1 级柱垂直流湿地模拟系统,另设一组无植物湿地作为对照组。多级系统各柱间高差 5 cm,通过规格为 3 mm×5 mm(内径 3 mm、外径 5 mm)硅胶管相连且保持各单元柱间流速一致,各柱液面高度均保持在基质上方 2 cm 处,各级系统出水高度与系统末单元柱液面高度保持一致。本装置共设 13 个取样点,于原水桶及各单元柱底部分别取水样 200 mL,每次取完水样通过添加原水至各系统首单元柱以恢复各柱液面原有高度,保障系统的正常运行。

1.2 试验方案

将砾石填充到柱中并用自来水冲洗 3 遍,以清除柱中灰尘及杂质。配置模拟河水(COD_{Mn} 5 mg·L⁻¹、TN 7.1 mg·L⁻¹、TP 0.41 mg·L⁻¹)并采用连续运行方式

使各系统在流量 2.83 L·d⁻¹ 下运行 2 周(3 级柱、2 级柱、1 级柱系统的水力负荷依次为 0.13、0.2、0.4 m³·m⁻²·d⁻¹;水力停留时间依次为 2.58、1.72、0.86 d)以增强系统对低污染水的适应性及促进微生物生长。之后流量不变,连续进清河河水。系统植物在移入装置前先在清水中种植 1 周。供试选用长势一致,高约 58 cm 的芦苇,4 月中旬将其植入表层填料下 10 cm 处,种植密度为每柱 3 株。运行期芦苇的长势较好,每株都有新叶发出,但在 8 月份各有植物系统相继出现部分枯落物。水样的取样频率为 6 d 1 次,于进水桶和各单元柱底部分别取水样 200 mL,每次取完水样通过添加原水至各系统首单元柱以恢复各柱液面原有高度,保障系统的正常运行。

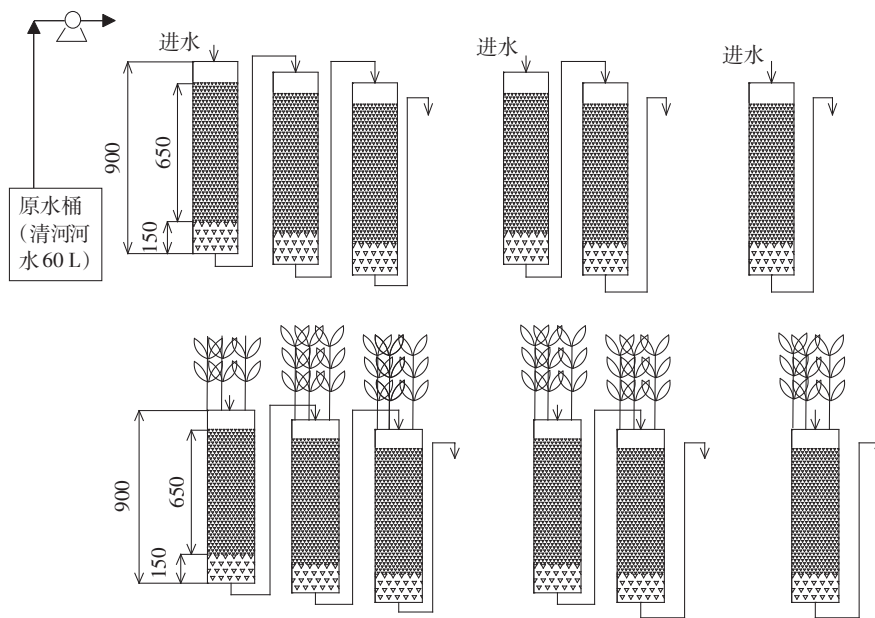
有植物系统在种植植物前与无植物组呈平行关系,芦苇植入系统后将有植物系统与无植物系统进行对比分析以考察植物对各系统去除 COD_{Mn} 的影响。在整个运行期,针对有无植物系统内部考察不同串联级数对 COD_{Mn} 去除的影响。

1.3 监测指标及分析方法

每次采样时,现场测定系统各柱进出水温度、DO 含量、pH 值以及气温。pH 值用便携式 pH 计、DO 用便携式溶解氧仪、水温和气温用温度计测定,COD_{Mn} 用高锰酸钾酸性法测定^[13]。

1.4 数据处理

图形绘制及方差分析通过 Excel 2007 及 SPSS



图中箭头为水流方向,尺寸单位为 mm

图 1 试验工艺流程

Figure 1 Flow chart of the experimental process

16.0 软件实现。其中有无植物系统的各级柱系统间的差异分析用 SPSS 16.0 One-Way ANOVA 及 Paired-Samples T Test 分析模块完成。

2 结果与分析

2.1 温度、pH、DO

运行期平均气温约稳定在 25 ℃, 进水平均水温 24.6 ℃, 各级柱系统平均出水水温为 23.7~24.8 ℃。系统内温度变幅明显低于外界温度变幅, 可见湿地对水流有较好保温效果^[14]。

进水 pH 值为 7.2~9.0, 出水 pH 值: 无植物系统为 7.2~9.6, 有植物系统为 7.0~9.4。

运行期间, 各系统月均 DO 含量呈不同变化趋势, 有植物 3 级柱系统月均 DO 含量均高于无植物 3 级柱系统, 供氧效果较好; 2 级柱和 1 级柱有无植物系统的月均 DO 含量无明显关系(图 2)。无植物 3 级、2 级和 1 级柱系统的平均 DO 含量依次为 1.5、1.5、1.3 mg·L⁻¹; 有植物 3 级、2 级和 1 级柱系统的平均 DO 含量依次为 1.6、1.7、1.5 mg·L⁻¹, 有植物系统的平均 DO 含量均高于无植物对照系统。

2.2 COD_{Mn} 的去除效果

2.2.1 3 级柱系统去除效果

进出水浓度和去除率变化见图 3。系统进水 COD_{Mn} 浓度为 3.49~15.14 mg·L⁻¹, 平均 8.19 mg·L⁻¹。运行期无植物系统出水浓度为 2.23~9.99 mg·L⁻¹, 平均 4.24 mg·L⁻¹, COD_{Mn} 平均去除率为 48.23%。有植物系统出水浓度为 1.68~5.13 mg·L⁻¹, 平均 3.39 mg·L⁻¹, COD_{Mn} 平均去除率为 58.61%。从图 3 可见, 有植物系统 COD_{Mn} 去除率高于无植物系统, 这与运行期系统 DO 月均含量前者均高于后者一致(图 2)。

沿程采样的结果表明, 运行期有(无)植物系统各柱出水平均浓度依次为 4.25、3.47、3.39 mg·L⁻¹ (4.40、4.29、4.24 mg·L⁻¹); COD_{Mn} 平均去除率依次为 48.11%、18.35%、2.31% (46.28%、2.50%、1.17%), 可见第三根柱子去除率不明显。这主要是因为第三根柱子的进水浓度低, 且易降解部分在前面得以去除。

2.2.2 2 级柱系统去除效果

由图 4 可知, 系统进水 COD_{Mn} 浓度为 3.49~15.14 mg·L⁻¹, 平均 8.19 mg·L⁻¹。运行期, 无植物系统出水浓度为 2.24~11.06 mg·L⁻¹, 平均 5.05 mg·L⁻¹, COD_{Mn} 平均

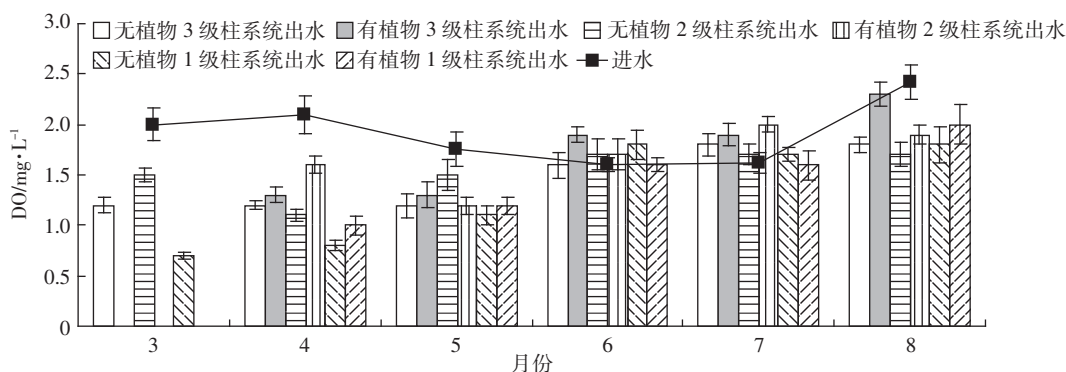


图 2 各系统 DO 含量月均变化

Figure 2 Average monthly variation of DO content in systems

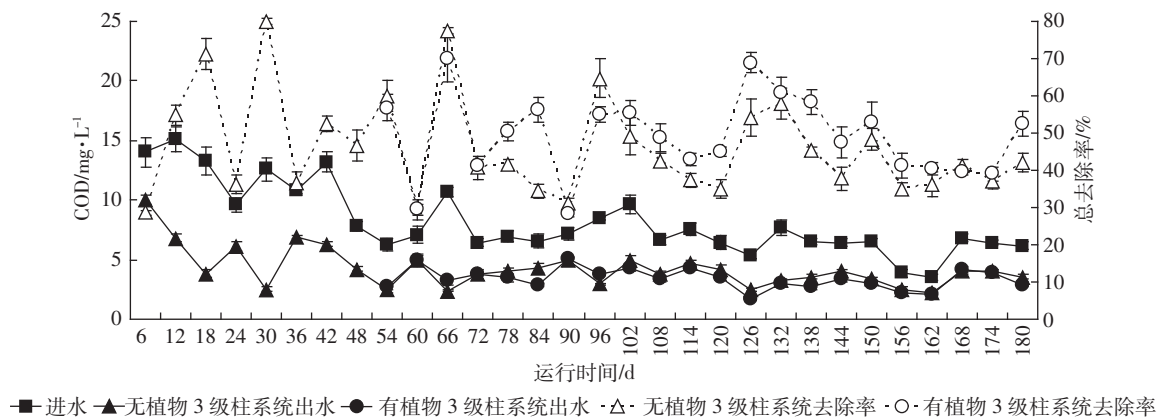
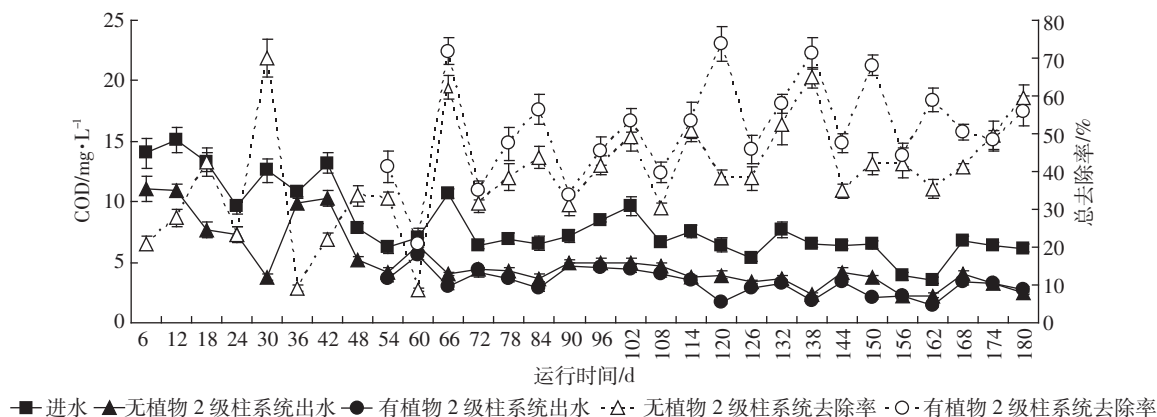


图 3 3 级柱系统进出水 COD_{Mn} 浓度和去除率变化

Figure 3 Variation of COD_{Mn} concentration and COD_{Mn} removal efficiency

图 4 2 级柱系统进出水 COD_{Mn} 浓度和去除率变化Figure 4 Variation of COD_{Mn} concentration and COD_{Mn} removal efficiency

去除率为 38.34%。有植物系统出水浓度为 1.43~5.60 mg·L⁻¹, 平均 3.30 mg·L⁻¹, COD_{Mn} 平均去除率为 59.71%, 平均出水浓度可达地表水 II 类标准。可见系统在中后期的 COD_{Mn} 去除率有植物均高于无植物系统, 这也与 DO 月均含量变化一致(图 2)。

沿程采样的结果表明, 运行期有(无)植物系统各柱出水平均浓度依次为 4.07、3.30 mg·L⁻¹ (5.15、5.05 mg·L⁻¹); COD_{Mn} 平均去除率依次为 50.31%、18.92% (37.12%、1.94%)。第二根柱子去除率较低。主要是因为这根柱子的进水浓度较低, 且易降解部分在前面得以较好地去除。

2.2.3 1 级柱系统去除效果

由图 5 可知, 系统进水 COD_{Mn} 浓度为 3.49~15.14 mg·L⁻¹, 平均 8.19 mg·L⁻¹。运行期, 无植物系统出水浓度为 1.56~13.22 mg·L⁻¹, 平均 5.92 mg·L⁻¹, COD_{Mn} 平均去除率为 27.72%, 有植物系统出水浓度为 2.14~6.48 mg·L⁻¹, 平均 4.08 mg·L⁻¹, COD_{Mn} 平均去除率为 50.18%。从图 5 可见, 有植物系统与无植物系统的 COD_{Mn} 去除

率存在一定波动, 这与 DO 月均含量变化趋势一致(图 2)。

2.3 COD_{Mn} 去除效果差异性分析

2.3.1 无植物系统间 COD_{Mn} 去除效果差异性分析

对无植物各级柱系统间 COD_{Mn} 去除率进行方差分析, 结果(表 1)显示, 1 级柱与 2 级、3 级柱系统间均存在显著差异 ($P < 0.05$), 2 级、3 级柱系统间无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.3.2 有植物系统间 COD_{Mn} 去除效果差异性分析

对有植物各级柱系统间 COD_{Mn} 去除率进行方差分析, 结果(表 2)显示, 1 级柱与 2 级、3 级柱系统间

表 1 无植物系统间 COD_{Mn} 去除率方差分析Table 1 One-Way ANOVA of COD_{Mn} removal efficiency in unplanted systems

项目	<i>n</i>	<i>P</i>	差异性
1、2 级柱系统间去除率	30	0.047	显著
1、3 级柱系统间去除率	30	0.000	极显著
2、3 级柱系统间去除率	30	0.076	不显著

注: *n* 为样本数。下同。

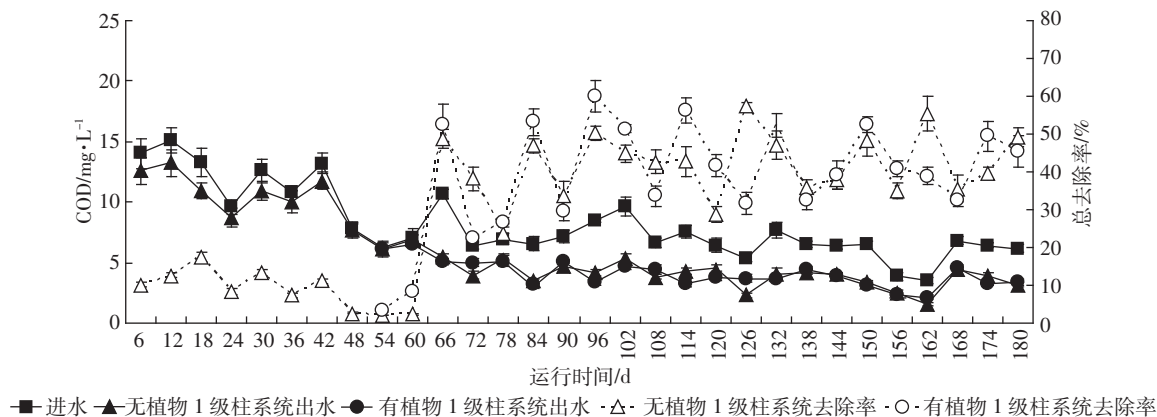
图 5 1 级柱系统进出水 COD_{Mn} 浓度和去除率变化Figure 5 Variation of COD_{Mn} concentration and COD_{Mn} removal efficiency

表2 有植物系统间 COD_{Mn} 去除率方差分析Table 2 One-Way ANOVA of COD_{Mn} removal efficiency in planted systems

项目	<i>n</i>	<i>P</i>	差异性
1、2 级柱系统间去除率	22	0.003	极显著
1、3 级柱系统间去除率	22	0.012	显著
2、3 级柱系统间去除率	22	0.652	不显著

均存在显著差异($P<0.05$),2 级、3 级柱系统间无显著差异($P>0.05$)。

2.3.3 无-有植物系统间 COD_{Mn} 去除效果差异性分析

对各级柱系统在无-有植物下的 COD_{Mn} 去除率进行方差分析,结果(表3)显示,无-有植物各级对应系统间均存在显著差异($P<0.05$)。

表3 无-有植物系统间 COD_{Mn} 去除率方差分析Table 3 Paired-Samples T Test of COD_{Mn} removal efficiency in unplanted-planted systems

项目	<i>n</i>	<i>P</i>	差异性
无-有植物 1、2 级柱系统间去除率	22	0.046	显著
无-有植物 1、3 级柱系统间去除率	22	0.000	极显著
无-有植物 2、3 级柱系统间去除率	22	0.008	极显著

3 讨论

3.1 串联级数对 COD_{Mn} 去除的影响

方差分析结果表明,1 级柱系统对 COD_{Mn} 去除率与多级柱系统间均存在显著差异($P<0.05$)。究其原因,污水中大部分有机物先被生物膜吸附进而被降解,随系统串联级数的减少其水力负荷相应升高,污水在系统内的水力停留时间缩短,部分吸附于生物膜表面的有机物来不及被降解即随水流出,致使 COD_{Mn} 去除率下降^[15]。相对而言,多级柱系统间对 COD_{Mn} 去除率无显著差异($P>0.05$)。

无植物系统:由 2.2 可知,3 级柱系统在运行期对 COD_{Mn} 去除效果最佳,平均去除率为 48.23%,比无植物 2 级柱、1 级柱系统分别高出 9.89%、20.51%,说明水力停留时间的延长可有效提高 COD_{Mn} 的去除效果,这与文献[16]结果一致。有植物系统:由 2.2 可知,2 级柱系统在运行期对 COD_{Mn} 去除效果最佳,平均去除率为 59.71%,比 Sun 等^[17]试验中有植物 2 级柱系统去除率分别高 43.17%和 27.74%,说明进水浓度差异对 COD_{Mn} 去除的影响亦较大。因 8 月进水 COD_{Mn} 负荷偏低,各级有植物柱系统相继出现了部分枯落物,这主要由于植物生长发育不仅需要碳作为自身结构物质

的一部分,且需消耗大量能量^[18],而有机物作为碳源和能量,植物对其高效吸收对自身生长起到了一定促进作用。3 级柱比 2 级柱系统虽具更大净化空间,但经 3 级系统内 1 号及 2 号单元柱的逐级净化,3 号柱更低的进水 COD_{Mn} 负荷基本无法满足植物生长的正常需求,导致植物枯落物增加,从而影响了整个系统对 COD_{Mn} 的去除,这也与 2.2.1 中末单元柱低 COD_{Mn} 降解率相一致。总体上,串联级数对 COD_{Mn} 去除的影响较大,多级柱系统对 COD_{Mn} 去除效果明显优于 1 级柱系统。

3.2 植物对 COD_{Mn} 去除的影响

2.3.3 中方差分析的结果表明,无-有植物各级对应系统间 COD_{Mn} 去除率均呈显著差异($P<0.05$)。由 2.2 可知,运行期有植物各级柱系统及多级系统的沿程各柱均具更好的 COD_{Mn} 去除效果,表明植物对 COD_{Mn} 去除有显著影响,主要因为:一是植物对有机物的吸收,二是植物根系为微生物附着提供了载体^[19]。植物通过根系供养、根系分泌物等改变系统的微生境,促进了有机污染物的氧化分解^[20-21],植物是影响 COD_{Mn} 去除的重要因素^[22]。同时,湿地中的有机物主要通过附着生长在根系表面的微生物转化为微生物体及 CO₂ 和 H₂O,其中好氧微生物对有机物去除至关重要,氧是其关键影响因素^[23]。运行期间,有植物各级柱系统对 COD_{Mn} 去除效果更佳,这与其 DO 月均含量均高于无植物对照系统相一致,故 DO 含量越高,越利于有机物去除^[24]。

综合考虑 COD_{Mn} 去除效果及实际工程应用成本,推荐有植物 2 级串联系统。

4 结论

(1)串联级数对 COD_{Mn} 去除的影响较大。1 级柱系统对 COD_{Mn} 去除率与多级柱系统间均呈显著差异($P<0.05$),但多级柱系统间对 COD_{Mn} 去除率无显著差异($P>0.05$)。

(2)植物对 COD_{Mn} 去除有显著影响。无-有植物各级对应系统间 COD_{Mn} 去除率均呈显著差异($P<0.05$),运行期有植物各级柱系统及多级系统的沿程各柱均具更好的 COD_{Mn} 去除效果。

(3)在不同串联下行流湿地去除河水 COD_{Mn} 的试验中,有植物 2 级柱系统去除效果最佳,运行期平均去除率为 59.71%,平均出水浓度可达地表水 II 类标准。综合考虑去除效果及实际成本,推荐有植物 2 级串联系统。

参考文献:

- [1] Zhou S, Hosomi M. Nitrogen transformations and balance in a constructed wetland for nutrient-polluted river water treatment using forage rice in Japan[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32: 147-155.
- [2] He S B, Yan L, Kong H N, et al. Treatment efficiencies of constructed wetlands for eutrophic landscape river water[J]. *Pedosphere*, 2007, 17: 522-528.
- [3] Dong H, Qiang Z, Li T, et al. Effect of artificial aeration on the performance of vertical flow constructed wetland treating heavily polluted river water[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24: 596-601.
- [4] Huang L, Gao X, Liu M, et al. Correlation among soil microorganisms, soil enzyme activities, and removal rates of pollutants in three constructed wetlands purifying micro polluted river water[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 46: 98-106.
- [5] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2670-2677.
- LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2670-2677.
- [6] 孙文杰, 余宗莲, 关艳艳, 等. 垂直流人工湿地净化污水的研究进展[J]. 安全与环境工程, 2011, 18(1): 25-28.
- SUN Wen-jie, SHE Zong-lian, GUAN Yan-yan, et al. Research progress of sewage purification in vertical flow wetland[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2011, 18(1): 25-28.
- [7] 梁威, 吴振斌, 詹发萃, 等. 人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 16.
- LIANG Wei, WU Zhen-bin, ZHAN Fa-cui, et al. The seasonal variation between rhizosphere microorganisms in constructed wetlands and purification effect[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 16.
- [8] 肖宇芳, 王文忠, 王文, 等. 水平潜流和垂直流湿地处理蓟运河水的效果比较[J]. 中国给水排水, 2010, 26(7): 12-15.
- XIAO Yu-fang, WANG Wen-zhong, WANG Wen, et al. Comparison between horizontal subsurface flow and vertical flow constructed wetlands for treatment of Jiyun River water[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(7): 12-15.
- [9] 陈泽涛, 易皓, 庞志华, 等. 脉冲垂直流人工湿地处理污染河水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5): 77-79.
- CHEN Ze-tao, YI Hao, PANG Zhi-hua, et al. Treatment of polluted river water by pulse-feed vertical flow constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(5): 77-79.
- [10] 刘婧, 邢奕, 金相灿, 等. 复合垂直流湿地去除模拟河水中氮磷的研究[J]. 环境工程技术学报, 2012, 2(1): 29-35.
- LIU Jing, XING Yi, JIN Xiang-can, et al. Study of nitrogen and phosphorus removal from simulated river water by integrated vertical flow wetland[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2012, 2(1): 29-35.
- [11] 赵建, 朱伟, 赵联芳. 人工湿地对城市污染河水的净化效果及机理[J]. 湖泊科学, 2007, 19(1): 32-38.
- ZHAO Jian, ZHU Wei, ZHAO Lian-fang. Efficiency and mechanism of treating the polluted river water with constructed wetland[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(1): 32-38.
- [12] 崔伟, 张勇, 黄民生. 复合垂直流人工湿地脲酶和磷酸酶活性与黑臭河水净化效果[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(13): 8016-8018.
- CUI Wei, ZHANG Yong, HUANG Min-sheng. Activities of urease and phosphatase in integrated vertical flow constructed wetland and purification effect of black and odorous river[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(13): 8016-8018.
- [13] 魏复盛. 水和废水监测分析方法[M]. 第四版增补版. 北京: 科学出版社, 2002.
- WEI FU-sheng. Water and wastewater monitoring method[M]. The fourth edition supplement. Beijing: Science Publishing House, 2002.
- [14] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 农田排灌水的稳定塘-植物床复合系统处理[J]. 中国环境科学, 2004, 24: 605-609.
- LU Shao-yong, ZHANG Peng-yi, YU Gang, et al. Stabilization pond-plant bed composite system treatment of farmland irrigation and drainage water[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24: 605-609.
- [15] 胡小兵, 鲍静, 周俊. 垂直流人工湿地处理生活污水的影响因素分析[J]. 中国给水排水, 2011, 27(11): 69-71.
- HU Xiao-bing, BAO Jing, ZHOU Jun. Analysis of affecting factors in treatment of domestic sewage with vertical flow constructed wetland[J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(11): 69-71.
- [16] 余志敏, 袁晓燕, 刘胜利, 等. 水力条件对复合人工湿地处理城市受污染河水效果的影响[J]. 环境工程学报, 2011, 5(4): 757-762.
- YU Zhi-min, YUAN Xiao-yan, LIU Sheng-li, et al. Effect of hydraulic conditions on treatment of polluted river water by hybrid constructed wetlands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(4): 757-762.
- [17] Sun G, Austin D. Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in lab-scale constructed wetlands: Evidence from a mass balance study[J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 1120-1128.
- [18] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 等. 沼泽湿地生态系统呼吸与温度、氮素及植物生长的相互关系[J]. 环境科学, 2007, 28(1): 1-8.
- ZHANG Li-hua, SONG Chang-chun, WANG De-xuan, et al. Relationship of ecosystem respiration with temperature, nitrogen and plant in freshwater marshes[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(1): 1-8.
- [19] 孙瑞莲, 张建, 王文兴. 8种挺水植物对污染水体的净化效果比较[J]. 山东大学学报: 理学版, 2009, 44: 12-16.
- SUN Rui-lian, ZHANG Jian, WANG Wen-xing. Effect on polluted water purification by eight emergent plants[J]. *Journal of Shandong University: Natural Science*, 2009, 44: 12-16.
- [20] Wand H, Vacca G, Kusch P, et al. Removal of bacteria by filtration in planted and non-planted sand columns[J]. *Water Research*, 2007, 41: 159-167.
- [21] Brix H. Functions of macrophytes in constructed wetlands[J]. *Water Science and Technology*, 1994, 29: 71-78.
- [22] Kaseva M. Performance of a subsurface flow constructed wetland in polishing pretreated wastewater: A tropical case study[J]. *Water Research*, 2004, 38: 681-687.
- [23] 王晟, 徐祖信, 李怀正. 潜流湿地处理不同浓度有机污水的差异分析[J]. 环境科学, 2006, 27(11): 2194-2200.
- WANG Sheng, XU Zu-xin, LI Huai-zheng. Difference between subsurface wetlands for different water treatment[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(11): 2194-2200.
- [24] 高敏, 朱伟, 董婵, 等. 垂直流人工湿地中污染物昼夜及沿程变化规律[J]. 水资源保护, 2010, 26(2): 49-52.
- GAO Min, ZHU Wei, DONG Chan, et al. Diurnal and spatial variations of pollutants in vertical flow constructed wetland[J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(2): 49-52.