

# 潜流人工湿地对微污染河水的净化效果

谢飞<sup>1</sup> 黄磊<sup>2</sup> 高旭<sup>2\*</sup> 马晓霞<sup>3</sup> 刘明<sup>2</sup> 郭劲松<sup>2</sup>

(1. 重庆市河道管理站, 重庆 401147; 2. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;  
3. 重庆中设工程设计股份有限公司, 重庆 400023)

**摘要** 为了探讨潜流人工湿地对微污染河水的净化效果, 在野外条件下构建潜流人工湿地, 分析了湿地中 pH、氧化还原电位(ORP)和 DO 的进出水变化, 考察了湿地中污染物的净化效果, 探讨了温度对湿地净化效果的影响。各湿地进、出水 DO 浓度相差不大; 除美人蕉湿地外, 其余湿地出水 pH 较进水变化较小; 植物湿地出水 ORP 较进水均有所增大。植物湿地对污染物的去除效果均优于空白湿地, 且随着气温的升高,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率逐渐增加, 去除率分别可达 90%、50% 和 20%。TP 去除率却未随温度发生明显变化, 始终波动在 30%~60% 之间。相关性分析结果表明湿地中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TN 的去除率与温度相关, 较低的有机物浓度造成  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率与温度相关性差, 由于湿地对磷的去除主要以颗粒态磷(PP)为主, TP 的去除与温度不相关。

**关键词** 水平潜流人工湿地 微污染河水 温度 去除率

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)01-0065-07

## Purification efficiencies of subsurface horizontal flow constructed wetland treating slightly polluted river water

Xie Fei<sup>1</sup> Huang Lei<sup>2</sup> Gao Xu<sup>2</sup> Ma Xiaoxia<sup>3</sup> Liu Ming<sup>2</sup> Guo Jinsong<sup>2</sup>

(1. Chongqing River Management Station, Chongqing 401147, China; 2. Key laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environments, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;  
3. Chongqing Zhongshe Engineering Design Co. Ltd, Chongqing 400023, China)

**Abstract** Five identical subsurface horizontal flow constructed wetlands (SHFCWs) with different plants were constructed to treat slightly polluted river water under field conditions. The changes of pH, DO and ORP between influent and effluent were monitored, and also the impact of temperature on purification efficiencies was studied. Results showed that there were almost no differences between influent and effluent to DO in all five SHFCWs. Except wetland planted with *Canna indica*, there was a similar situation to pH in the rest of four wetlands. Compared with ORP of influent, ORP of effluent increased in planted wetlands. Removal rates of pollutants in planted wetland were higher than that of blank wetland, and the removal efficiencies of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN and  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  increased with temperature increasing, which could reach to 90%, 50% and 20%, respectively. But removal efficiency of TP had no obvious change, varied from 30% to 60% in planted wetlands. The results of correlation analyses showed that there were significant correlations between temperature and removal of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and TN. The correlation between temperature and removal of  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  was poor for low  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  in influent. Because particulate phosphorus (PP) was the main form in all sorts of phosphorus removal, there was almost no correlation between removal of TP and temperature.

**Key words** subsurface horizontal flow constructed wetland; slightly polluted river water; temperature; removal rate

1973年由德国 Kessel 大学的 Kickuth 教授最先研发的人工湿地技术经过 30 年的发展, 目前正逐渐得到广泛应用<sup>[1]</sup>。该技术具有生态、高效、低投资及运行成本、特别适合分散或非点源污水处理等特点<sup>[2]</sup>。在农村和小社区生活污水处理<sup>[3-4]</sup>、农田排水处理<sup>[5]</sup>、养殖废水处理<sup>[6]</sup>、城市暴雨径流治理<sup>[7]</sup>、湖泊污染防治<sup>[8]</sup>和受污污水处理<sup>[9]</sup>等方面得到广泛

应用。

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAJ25B09); 重庆市环境保护局环环科技计划项目(2011 第 12 号)

收稿日期: 2011-07-08; 修订日期: 2011-08-10

作者简介: 谢飞(1966~), 男, 工学学士, 高级工程师, 主要从事水资源保护、河湖健康生态研究。E-mail: xiefei8020@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: gaouxu@cqu.edu.cn

近年来,人工湿地还不断拓宽应用范围,如用于矿区废水处理<sup>[10]</sup>、二级处理出水的进一步净化<sup>[11]</sup>等。随着对污水处理要求的提高,人工湿地也从最初主要用于处理污水中悬浮物和有机物逐渐向除磷脱氮方向发展<sup>[12]</sup>。国内外很多学者从湿地微生物<sup>[13,14]</sup>、湿地植物<sup>[15]</sup>、湿地填料<sup>[16]</sup>、湿地工艺参数<sup>[17,18]</sup>等方面对潜流湿地的运行特性及处理效果进行了广泛研究。随着人工湿地修复微污染河水以及农村地区人工湿地应用研究的深入,人工湿地逐渐被认为适于农村地区受污河流的净化。为了有效治理小城镇微污染河水,保障小城镇饮用水安全,以西南山地地区小城镇微污染河水作为修复对象,通过构建野外潜流人工湿地,开展了潜流人工湿地在不同季节和不同植物条件下对微污染河水中有有机物和氮磷的去处效果研究,考察温度对实验湿地系统中污染物去除的影响,以期为人工湿地修复小城镇微污染水提供重要的运行参数和技术支持。

## 1 实验部分

### 1.1 实验装置

鹿山河潜流湿地处理系统均采用水平流态,床体一端均匀布水,水体水平流过湿地床。每块湿地池体内面长、宽和高为 3.0 m × 1.0 m × 1.0 m (有效高度 0.9 m, 超高 0.1 m), 湿地底面坡度为 2%, 底部和四周以水泥墙封闭, 并进行防渗处理。每个系统都分为配水区、处理区、出水区。处理区填料由 4 层组成, 底层为 20 cm 厚粗糙碎石 (粒径 40 ~ 60 mm), 中层为 30 cm 厚废砖 (粒径 20 ~ 40 mm), 上层为 30 cm 厚卵石 (粒径 10 mm ~ 30 mm), 表层覆土厚约 10 cm。配水区长 0.15 m, 宽 1.0 m, 并以穿孔花墙分隔配水区和处理区, 以防短流。出水区长 0.15 m, 宽 1.0 m, 并以穿孔花墙分隔出水区和处理区, 湿地构造如图 1。

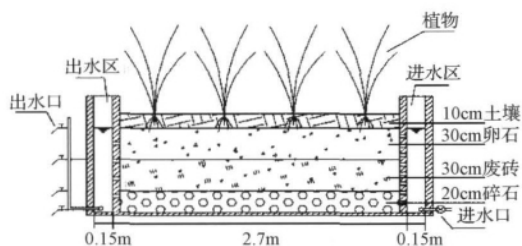


图1 水平潜流湿地构造

Fig. 1 Construction of SHFCW

为了对湿地植物进行比较和筛选,各潜流式人

工湿地栽有不同种水生或湿生植物。植物的选择是结合当地实际情况,以适宜于重庆地区生长的较典型、根系发达、易栽培、根系生物量较大、多年生水生或湿生植物,兼顾景观为原则。另外,考虑修复的对象是微污染的水体,实验尝试采用食用蔬菜作为湿地植物,观察处理效果。栽培情况见表 1。

表1 湿地植物栽种情况表

Table 1 Plants in wetland

编号	植物名称	栽种时间	种植密度(株/m <sup>2</sup> )
WL1	芦竹( <i>Arundo donax</i> )	2008 年 7 月	10 ~ 15
WL2	美人蕉( <i>Canna indica</i> )	2008 年 7 月	10 ~ 15
WL3	菖蒲( <i>Acorus calamus</i> )	2008 年 7 月	10 ~ 15
WL4	空心菜( <i>Ipomoea aquatica</i> )	2008 年 8 月	10 ~ 15
WL5	空白	—	—

### 1.2 实验水质

鹿山河发源于普安水库,最终汇入当地的饮用水源地高峰水库,是高峰水库最大的补给河流,全长近 10 km。该流域涉及鹿山乡和高峰镇两个乡镇,辖 15 个村 20 935 人。据调查该条河流主要污染来源为居民生活废水和农业面源污染。鹿山河水质情况见表 2。暖季,鹿山河  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较低,均达到《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》Ⅲ级标准的要求,TN 及 TP 浓度平均变化幅度较大,且部分超过Ⅲ级甚至Ⅳ级标准的要求。冬季,鹿山河  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  及  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  较暖季低, $\text{NO}_2^--\text{N}$  浓度较暖季明显升高,TN 及 TP 浓度平均变化幅度变小,TN 浓度超过Ⅲ级甚至Ⅳ级标准要求。

### 1.3 实验方法

人工湿地新建于 2008 年 3 月,建成后的湿地装置采用连续方式进水,流量由进水阀控制。

从 2008 年 7 月至 2008 年 9 月经历植物及微生物稳定生长的系列过程,从 2008 年 9 月开始稳定运行,湿地 9 月 ~ 11 月为暖季运行,停留时间为 0.5 ~ 2.0 d; 1 月 ~ 3 月为寒季运行,停留时间为 2.0 ~ 4.0 d。

实验从出水区设置的出水管取样,频率为每周两次,现场测定温度、pH、DO 和 ORP,水样采集后立即测定各污染物指标。TP 采用过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  采用纳氏试剂比色法、 $\text{NO}_2^--\text{N}$  采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  采用紫外分光光度法、TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  采用高锰酸钾指数酸性法测定<sup>[19]</sup>。

表 2 鹿山河水质  
Table 2 Water quality of Lushan River (mg/L)

指 标	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TN	TP	COD <sub>Mn</sub>
暖季进水	0.13~0.61	0.010~0.037	0.43~1.11	0.59~1.87	0.09~0.29	3.80~5.17
寒季进水	0.20~0.47	0.013~0.033	0.32~0.90	1.13~1.58	0.07~0.12	3.60~5.04
Ⅲ级标准	1.0	—	—	1.0	0.2	6

2 实验结果与讨论

2.1 人工湿地中 DO、pH 和 ORP 变化

控制高水位出水 采用连续进水 人工湿地系统 进出水 DO 浓度分布如图 2 所示。

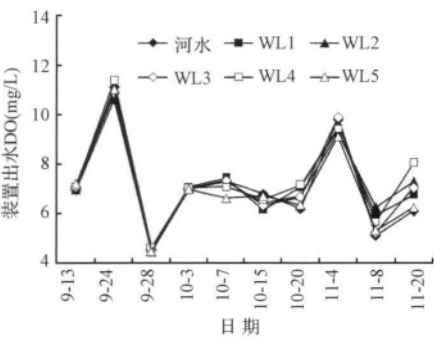


图 2 湿地系统进出水 DO 浓度分布  
Fig. 2 DO of influent in wetlands

湿地进水 DO 浓度分布在 4 ~ 12 mg/L 之间 ,出水 DO 浓度较进水变化不大 ,略有升高。种植美人蕉、芦竹、菖蒲和空心菜的人工湿地较空白出水 DO 浓度略有升高 ,说明植物对湿地有一定的供氧作用 ,植物根系除了泌氧外<sup>[21]</sup> 根系发育导致的湿地填料疏松空隙也能促进湿地表面复氧。由于实验人工湿地处理系统进水中 DO 水平较高 限制了湿地植物根系泌氧和湿地表面复氧 ,因此 ,在本实验中湿地植物的根系对系统的 DO 贡献不大 ,而原水较高的 DO 水平足以满足湿地系统处理污染物所需氧量。

由图 3 可见 ,除 WL2 美人蕉湿地和 WL4 空心菜湿地外 ,其余湿地出水 pH 较河水都有所上升 ,其中 WL5 空白湿地出水 pH 最高。空白湿地由于未栽种任何植物 ,仅装有碎石 / 废砖 / 卵石的组合填料 ,填料的碱性物质在水体中释放<sup>[20]</sup> ,致使水体 pH 升高。因美人蕉和空心菜生长喜酸性环境 ,根部分泌了大量酸性物质 ,使出水 pH 降低<sup>[21]</sup> ;另一方面 ,大量叶片脱落腐烂也进一步加速了植物酸性物质在湿地装置中的释放。综合两方面的作用引起了水体 pH 的降低。

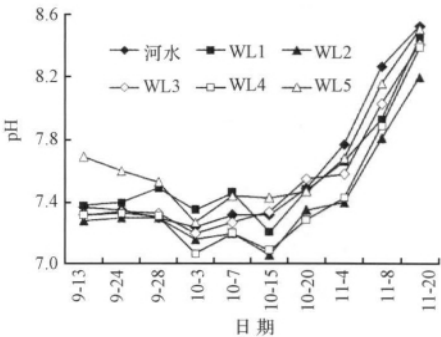


图 3 湿地系统进出水 pH 分布  
Fig. 3 pH of influent in wetlands

由图 4 可知 ,河水 ORP 随时间变化较大 ,最大值出现在 11 月 20 日 ,最小值出现在 9 月 24 日 ,分别为 344 mV 和 285.5 mV。从 2008 年 9 月 13 日 ~ 11 月 20 日 ORP 共出现 3 次峰值 3 次低谷 ,与温度变化并无相关性。由图中还可以发现 ,WL5 空白湿地出水 ORP 比河水平均低 10 ~ 20 mV ,其余湿地出水 ORP 均比河水高。空白湿地没有种植植物 ,缺少根际微生物 ,造成装置中氧化还原反应较弱 ;其余湿地丰富的植物根系为微生物提供了有利的生长环境 ,使装置中的氧化性条件占优势。

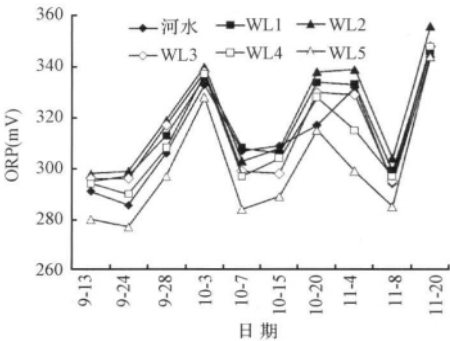


图 4 湿地系统进出水 ORP 分布  
Fig. 4 ORP of influent in wetlands

WL2 美人蕉水平流湿地 ORP 较其余几个湿地大 ,这主要是由于美人蕉发达的根系为其根系微环境充分利用水体中的营养物质提供了条件。WL4 湿地的空心菜虽地上部分繁盛 ,但是由于根系欠发

达,不利于根际微生物附着和生长,致使其 ORP 水平较低。

## 2.2 温度和植物种类对净化效果的影响

图5为2008年11月4日至2009年2月1日日平均气温和水温变化,气温变化范围为5~23℃,2008年11月气温最高,2009年1月气温最低。停留时间控制2d,高水位出水,测定湿地的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除率,如图6所示。由于冬季进行了菖蒲和空心菜的收割,故WL3和WL4仅有暖季数据。

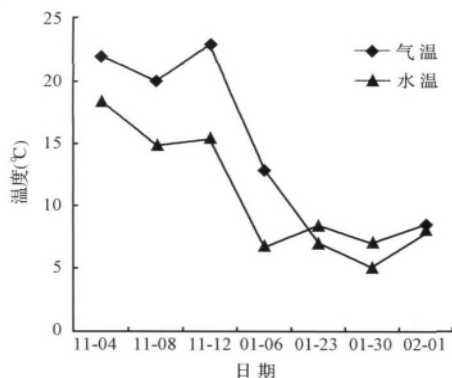


图5 日平均温度变化曲线

Fig. 5 Daily average temperature

图6表明, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除率与温度密切相关。11月4日~12日,随着气温的升高,填料中微生物活性增强,数量增多,对营养物质需求量增加, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN和 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除率逐渐增加,最高去除率均出现在11月8日~12日,分别为90%、50%和20%以上。1月6日~23日外界温度平均低于10℃,此温度条件限制微生物的活性和繁殖,同样也影响植物的生长和对系统的供氧, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和TN的去除率普遍偏低,分别在60%和20%以下。此时, $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 的去除率也有所降低,但降低幅度不大,除WL5空白湿地去除率低于10%以外,其余湿地 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除率分布在10%~20%之间。随着气温的逐渐转暖,湿地对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和TN的去除有所升高,这与杨新萍等<sup>[2]</sup>研究结果类似。

从 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除率关系中可以发现,各湿地对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除率总体较高,在植物湿地中WL2美人蕉湿地 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 去除率最高。植物湿地对 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 处理率仅比空白湿地高5%~10%,说明植物栽种虽对湿地中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除具有一定促进作用,但是影响有限。

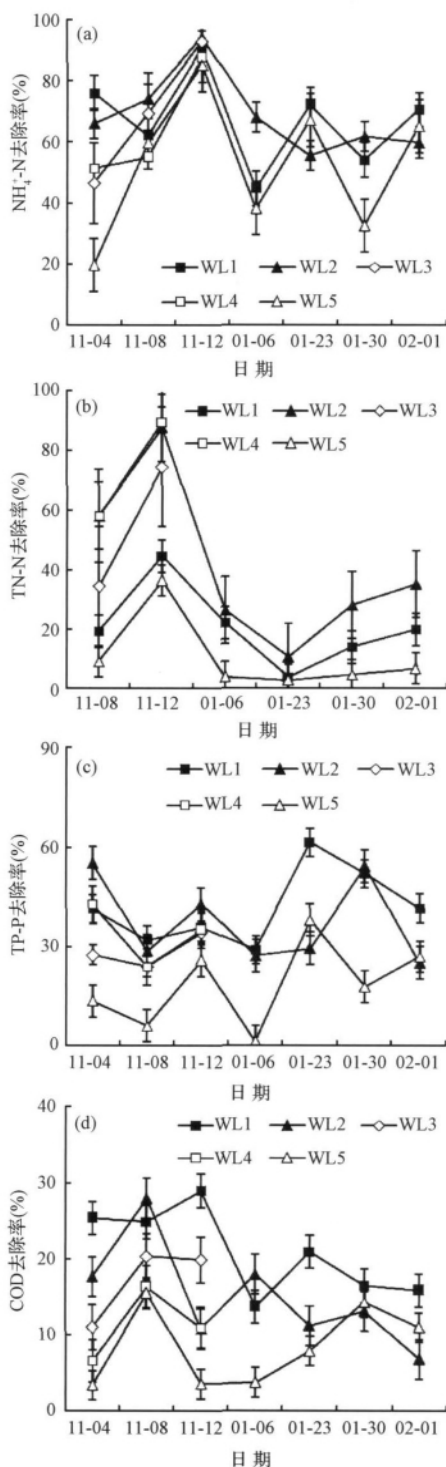


图6 不同类型湿地各污染物去除率

Fig. 6 Pollutant removal rates in different wetlands

分析TN的去除率关系,植物湿地总体上优于空白湿地,说明植物对氮的同化作用较显著,这与人工湿地处理污水的研究结果一致<sup>[12]</sup>。植物湿地中WL2和WL4去除率最高,空心菜虽然根系不发达,但是匍匐生长的大量茎叶是氮素吸收的有力保障,

美人蕉发达的根系和茎叶也同样利于氮素的吸收去除。尽管菖蒲不具有发达的地上部分,但是其旺盛的根系和发达的根茎为硝化/反硝化细菌提供了良好的生长环境<sup>[22]</sup>,促使 WL3 脱氮效果比较明显。具有较高  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率的 WL1 芦竹湿地 TN 去除率却低于其他几种植物湿地。虽然填料的吸附作用使芦竹湿地  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率较高,但是芦竹较其余几种湿地植物生长周期较长,对氮素的吸收贡献较弱。

实验发现,氮素去除效果较好的 WL4 空心菜湿地对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率并不高,这与空心菜根系不发达,不能为好氧微生物提供有利的生长环境,限制了生物降解作用有关。芦竹、美人蕉和菖蒲湿地对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率较高,处理率达到 20% 以上,这 3 种植物均具有发达的根系,说明植物根系是否发达对湿地有机物的去除影响较大。尽管 WL5 空白湿地通过对颗粒性有机物的拦截,对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  去除也有 10% 左右,但仍不及根系发达的植物湿地。

从图 5 和图 6 中可以发现,TP 的去除率与温度变化不一致,随着温度的波动,除 WL5 空白湿地外,其余湿地 TP 去除率均未发生明显变化,始终波动在 30% ~ 60% 之间。空白湿地 TP 去除率却与温度变化一致,这主要是由于空白湿地未种植植物,对磷的去除主要依靠填料的拦截、吸附。虽然填料对磷的吸附与温度存在明显的正相关<sup>[23]</sup>,但植物湿地中植物吸收、枯萎等因素也对 TP 的去除造成了一定影响。关于温度对湿地除磷的影响也一直存在争议<sup>[20]</sup>,由于人工湿地系统构成的复杂性,温度并不是作为单一因素影响某个物化、生化反应而存在的,而是间接地影响其他因素的变化而改变湿地除磷性能。

### 2.3 温度与人工湿地净化效果相关性分析

为了进一步考察温度对污染物去除的影响程度,以美人蕉湿地为例,进行了污染物去除率与温度(本小节提到的温度均为水温,数据同 2.2 中水温一致)的相关性分析,如表 3 所示。

表 3 美人蕉湿地  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TP 去除率与温度的相关性(N = 7)

Table 3 Correlations between  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , TN,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ , TP removal rate and temperature in *Canna indica* wetland(N = 7)

	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	$\text{COD}_{\text{Mn}}$	TP
相关性	0.769*	0.911*	0.477	0.213

\*. 0.05 水平显著相关; \*\*. 0.01 水平显著相关。

从表 3 可以发现,美人蕉湿地中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 去除率与温度的相关性较强,相关系数分别为 0.769 和 0.911。经相关性检验发现, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 去除率与温度较相关,说明温度对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 的去除效果影响较大。TN 与温度的相关系数大于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,说明温度变化对 TN 去除效果的影响大于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 。湿地中脱氮作用主要包括  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  挥发、植物吸收、基质吸附和微生物作用,其中微生物作用占主导<sup>[24]</sup>。一方面,温度变化影响植物对无机氮的吸收<sup>[25]</sup>,影响  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除;另一方面,温度变化影响了湿地中硝化细菌和反硝化细菌的代谢活性,影响其脱氮作用。温度变化对美人蕉湿地 TN 去除效果的影响大于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,某种程度上反映了微生物在净化微污染水中氮素的重要性,这与人工湿地净化污水相似。

由表 3 还可以发现, $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和 TP 的去除率与温度相关性差。与  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  相比,TP 的去除与温度基本不相关。虽然温度升高有利于提升异养微生物活性<sup>[9]</sup>,但微污染水体中较低的有机物浓度,限制了  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  去除效率。

图 7 表示美人蕉湿地 DTP(溶解态磷)和 PP(颗粒性磷)去除负荷变化。可以发现,美人蕉湿地对微污染水体中磷的去除主要以 PP 为主,而填料对 PP 的拦截作用与水力条件密切相关,受温度影响较小,造成 TP 的去除与温度基本不相关。

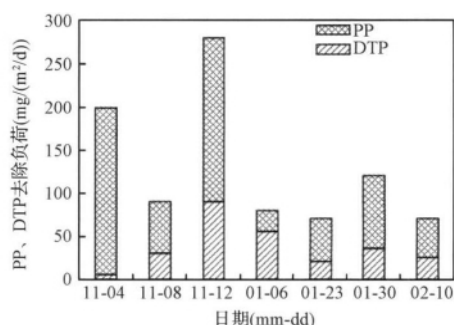


图 7 美人蕉湿地 DTP、PP 去除负荷变化

Fig. 7 Removal loadings of DTP and PP in *Canna indica* wetland

## 3 结 论

(1) 微污染河水的人工湿地处理系统中,较高的进水 DO 限制了湿地植物根系泌氧和湿地表面复氧,而原水较高的 DO 水平足以满足湿地系统处理污染物所需氧量;植物分泌的酸性物质和填料释放

的碱性物质对湿地系统 pH 有正反两方面的影响; 湿地植物有利于提升湿地系统 ORP, 根系是否发达影响 ORP 的提升幅度。

(2) 随着气温的升高,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率逐渐增加, 湿地中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和 TN 的去除率与温度相关性较强, 较低的有机物浓度造成  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率与温度相关性差。TP 去除率未随温度发生明显变化, 与温度不相关。

(3) 在处理微污染水体的湿地系统中, 植物栽种虽对湿地中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除具有一定促进作用, 但是影响有限; 植物对 TN 和  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除有显著作用, 不同种类植物对上述污染物的去除能力存在差别; TP 的去除与植物种类关系不紧密, 湿地对 TP 的去除主要以 PP 为主。

## 参考文献

- [1] Comin F. A. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff. *Water Science Technology*, **1997**, 35(5): 255-261
- [2] 杨新萍, 周立祥, 戴媛媛, 等. 潜流人工湿地处理微污染河道水中有机物和氮的净化效率及沿程变化. *环境科学*, **2008**, 29(8): 2177-2182  
Yang Xinping, Zhou Lixiang, Dai Yuanyuan, et al. Removal efficiency of C and N in micro-polluted river through a subsurface-horizontal flow constructed wetlands. *Environmental Science*, **2008**, 29(8): 2177-2182 (in Chinese)
- [3] 孙亚兵, 冯景伟, 田园春, 等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究. *环境科学学报*, **2006**, 26(3): 404-408  
Sun Yabing, Feng Jingwei, Tian Yuanchun, et al. Treatment of rural domestic sewage with self-aeration subsurface constructed wetland. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2006**, 26(3): 404-408 (in Chinese)
- [4] 闻岳, 周琪, 蒋玲燕, 等. 水平潜流人工湿地对污水中有有机物的降解特性. *中国环境科学*, **2007**, 27(4): 508-512  
Wen Yue, Zhou Qi, Jiang Lingyan, et al. Degradation characteristics of organic substances in polluted surface waters treatment with horizontal subsurface flow constructed wetlands. *China Environmental Science*, **2007**, 27(4): 508-512 (in Chinese)
- [5] 张荣社, 周琪, 张建, 等. 潜流构造湿地去除农田排水中的氮的研究. *环境科学*, **2003**, 24(1): 113-116  
Zhang Rongshe, Zhou Qi, Zhang Jian, et al. Study on nitrogen removal treating agriculture waste water in subsurface constructed wetland. *Environmental Science*, **2003**, 24(1): 113-116 (in Chinese)
- [6] Poach M. E., Hunt P. G., Reddy K. C., et al. Swine wastewater treatment by marsh-pond-marsh constructed wetlands under varying nitrogen load. *Ecological Engineering*, **2004**, 23(3): 165-175
- [7] Scholes L., Shutes R. B. E., Revitt D. M., et al. The treatment of metals in urban runoff by constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, **1998**, 214(1-3): 211-219
- [8] Sakadevan K., Bover H. J. Nutrient removal mechanisms in constructed wetlands and sustainable water management. *Water Science Technology*, **1999**, 40(2): 121-128
- [9] 张建, 邵文生, 何苗, 等. 潜流人工湿地处理污染河水冬季运行及升温强化处理研究. *环境科学*, **2006**, 27(8): 1560-1564  
Zhang Jian, Shao Wensheng, He Miao, et al. Treatment performance and enhancement of subsurface constructed wetland treating polluted river water in winter. *Environmental Science*, **2006**, 27(8): 1560-1564 (in Chinese)
- [10] Hall G., Swash P., Kotilainen S. The importance of biological oxidation of iron in the aerobic cells of the Wheel Jane pilot passive treatment system. *Science of the Total Environment*, **2005**, 338(1-2): 67-72
- [11] 张建, 何苗, 邵文生, 等. 人工湿地处理污染河水的持续性研究. *环境科学*, **2006**, 27(9): 1760-1764  
Zhang Jian, He Miao, Shao Wensheng, et al. Sustainable operation of subsurface constructed wetland treating polluted river water. *Environmental Science*, **2006**, 27(9): 1760-1764 (in Chinese)
- [12] 黄娟, 王世和, 鄢璐, 等. 潜流型人工湿地硝化和反硝化作用强度研究. *环境科学*, **2007**, 28(9): 1965-1969  
Huang Juan, Wang Shihe, Yan Lu, et al. Intensity of nitrification and denitrification in subsurface-flow constructed wetlands. *Environmental Science*, **2007**, 28(9): 1965-1969 (in Chinese)
- [13] 张甲耀, 夏盛林, 邱克明, 等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究. *环境科学学报*, **1999**, 19(3): 323-327  
Zhang JiaYao, Xia Shenglin, Qiu Keming, et al. Nitrogen removal by a subsurface flow constructed wetlands waste water treatment system and nitrogen-transformation bacteria. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **1999**, 19(3): 323-327 (in Chinese)
- [14] 周巧红, 吴振斌, 付贵萍, 等. 人工湿地基质中酶活性和细菌生理群的时空动态特征. *环境科学*, **2005**, 26(2): 108-112  
Zhou Qiaohong, Wu Zhenbin, Fu Guiping, et al. Tempo-

- ral and spatial characteristics of substrate enzyme activities and bacteria physiological groups in constructed wetland. *Environmental Science*, **2005**, 26(2): 108-112 (in Chinese)
- [15] 李宗辉,唐文浩,宋志文. 人工湿地处理污水时水生植物形态和生理特性对污水长期浸泡的响应. *环境科学学报*, **2007**, 27(1): 75-79  
Li Zonghui, Tang Wenhao, Song Zhiwen. Response of the morphological and physiological characteristics of aquatic plants to long-term soaking in the process of constructed wetland wastewater treatment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **2007**, 27(1): 75-79 (in Chinese)
- [16] 崔理华,朱夕珍,骆世明,等. 几种人工湿地基质磷的吸附特性研究. *农业环境科学学报*, **2007**, 26(3): 894-898  
Cui Lihua, Zhu Xizhen, Luo Shiming, et al. The characteristic of phosphorous adsorption on different Substrates used in constructed wetland. *Journal of Agro-Environment Science*, **2007**, 26(3): 894-898 (in Chinese)
- [17] 王晟,徐祖信,李怀正. 潜流湿地处理生活污水时的强化方法. *环境科学*, **2006**, 27(12): 2432-2438  
Wang Sheng, Xu Zuxin, Li Huaizheng. Enhancement strategies in vertical flow constructed wetlands for domestic waste water treatment. *Environmental Science*, **2006**, 27(12): 2432-2438 (in Chinese)
- [18] 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. *Journal of Biotechnology*, **2005**, 115(2): 189-197
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [20] 王世和. 人工湿地污水处理理论与技术. 北京: 科学出版社, **2007**
- [21] Stottmeister U., Wieliner A., Kuschik P., et al. Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, **2003**, 22(1-2): 93-117
- [22] 胡秋香,赵永军,任丽君. 潜流型菖蒲人工湿地不同C/N对污染物的去除效率. *生态学杂志*, **2010**, 29(3): 473-478  
Hu Qiuxiang, Zhao Yongjun, Ren Lijun. Effects of different C/N ratios in subsurface acoruscalamus constructed wetland on pollutant removal efficiency. *Chinese Journal of Ecology*, **2010**, 29(3): 473-478 (in Chinese)
- [23] 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. *环境科学*, **2005**, 26(1): 51-55  
Yuan Donghai, Jing Lijie, Gao Shixiang, et al. Analysis on the removal efficiency of phosphorus in some substrates used in constructed wetland systems. *Environmental Science*, **2005**, 26(1): 51-55 (in Chinese)
- [24] 黄娟,王世和,雒维国,等. 芦苇潜流人工湿地氮转移规律的定量分析. *安全与环境工程*, **2008**, 15(3): 41-44, 48  
Huang Juan, Wang Shihe, Luo Weiguo, et al. Quantitative analysis of nitrogen transferring rule in subsurface flow constructed wetlands with reeds. *Safety and Environmental Engineering*, **2008**, 15(3): 41-44, 48 (in Chinese)
- [25] 李新鹏,童依平. 植物吸收转运无机氮的生理及分子机制. *植物学通报*, **2007**, 24(6): 714-725  
Li Xinpeng, Tong Yiping. Physiological and molecular basis of inorganic nitrogen transport in plants. *Chinese Bulletin of Botany*, **2007**, 24(6): 714-725 (in Chinese)