

垂直流人工湿地对尾水的净化效果及最佳水力负荷*

梁 康^{1,3}, 常军军², 王飞华¹, 刘二元^{1,3}, 梁 威^{1**}

(1: 中国科学院水生生物研究所淡水生态与生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

(2: 云南大学工程技术研究院, 昆明 650091)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 以污水厂尾水为处理对象, 研究垂直流人工湿地在 4 种水力负荷 (125、250、375 和 500 mm/d) 条件下的周年净化效果, 结果表明: 秋季时系统的总氮去除率最高, 冬季则显著降低; 温度为 10℃、溶解氧浓度为 1.1 mg/L 是反硝化强度显著降低的关键拐点; 总磷在冬季较其他季节净化效果高; 125 mm/d 水力负荷下 COD_{Cr} 去除率显著高于其他水力负荷, 冬季 COD_{Cr} 去除率显著降低, 而其他水力负荷及季节下的去除效果没有显著差异; 当湿地以高去除率为目标时, 最佳水力负荷为 125 mm/d; 当湿地以地表水水环境质量 V 类标准为目标时, 最佳水力负荷为 375 mm/d; 当湿地以污染物去除量为目标时, 最佳水力负荷为 500 mm/d. 综合推荐 375 mm/d 为最佳水力负荷.

关键词: 垂直流人工湿地; 尾水; 水力负荷; 季节变化; 净化效果

Purification ability of tail water and optimal hydraulic loading rates in vertical flow constructed wetland

LIANG Kang^{1,3}, CHANG Junjun², WANG Feihua¹, LIU Shuangyuan^{1,3} & LIANG Wei^{1**}

(1: *State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R. China*)

(2: *Research Institute of Engineering and Technology, Yunnan University, Kunming 650091, P.R. China*)

(3: *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China*)

Abstract: Four vertical flow constructed wetlands were employed to evaluate the purification effects within tail water in different seasons under four hydraulic loading rates (125, 250, 375 and 500 mm/d). The results showed that the highest removal efficiency of total nitrogen was achieved in autumn while decreased significantly in winter. The key points of temperature and dissolved oxygen for denitrification were 10℃ and 1.1 mg/L, respectively. The wetland system was more effective for phosphorus removal in winter than in other seasons. Removal efficiency of COD_{Cr} under 125 mm/d was significantly higher than that of other hydraulic loading rates, the lowest treatment performance of COD_{Cr} was achieved in winter, and with no significant variation in other hydraulic loading rates and other seasons. To obtain a full pollutant-removal efficiency of the wetland system, the optimal hydraulic loading rate is at 125 mm/d. To reach the V class of surface water environment quality standard, the optimal hydraulic loading rate is at 375 mm/d. To receive the amount of pollutant removal, the optimal hydraulic loading rate is 500 mm/d. Based on full consideration, the optimal hydraulic loading rate should be at 375 mm/d.

Keywords: Vertical flow constructed wetland; tail water; hydraulic loading rates; seasonal variation; treatment performance

近年来, 污水处理厂尾水已经成为补充地表水的重要途径. 虽然污水处理厂二级生物处理可削减大部分污染物, 但排放的尾水中仍含有大量的氮、磷等污染物, 其对接纳水体水环境及生态系统安全仍构成较大威

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2011ZX07303-001)、水利部科技推广项目 (TG1520) 和江苏省科技厅项目 (BK20130430) 联合资助. 2015-02-27 收稿; 2015-04-30 收修改稿. 梁康 (1988~), 男, 硕士研究生; E-mail: san-maokl@163.com.

** 通信作者; E-mail: wliang@ihb.ac.cn.

胁.因此,亟需开展污水厂尾水的深度处理.

人工湿地因其建造及运行费用低、氮磷去除效率高、耐冲击负荷强等特点而成为尾水深度处理的主要工艺之一^[1-6].水力负荷(hydraulic loading rate, HLR)是湿地设计中的一个重要参数,也是影响湿地污染物处理效果的主要因素之一^[7].Mitsch等^[8]和Kadlec等^[9]研究认为停留时间、水深、水力负荷等因素对湿地系统的处理效果极为重要.一般而言,水力负荷越低、水力停留时间越长,湿地的处理效率往往越高.然而,较低的水力负荷意味着需以较大的湿地面积或是较低的处理量为代价.因此,在进行人工湿地的设计和运行时,需确定最佳水力负荷,在保证出水水质的同时,实现污水处理量最大化.以往的研究多集中在以处理效果来评价湿地的最佳水力条件,且系统运行时间有限,并未考察不同季节下的最佳负荷,对湿地实际运行的指导作用有限.为此,本文拟通过评价湿地处理尾水的周年运行效果,平衡计算进出水污染物总量,探索不同水力负荷下垂直流人工湿地对污水处理厂一级A排放标准尾水处理的佳水力负荷,以期为尾水人工湿地深度处理工程实践提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 实验装置

垂直下行流人工湿地小试系统位于中国科学院水生生物研究所东湖官桥实验基地(30°30.39'N, 114°28'E),由4组相同规模(长×宽×高=1.25 m×1 m×1 m)的下行流人工湿地组成.填料高度75 cm,分为上、下2层,下层为40 cm粒径为10~20 mm的砾石,上层为35 cm粒径为5~10 mm的米石.选择芦苇(*Phragmites australis*)作为湿地植物,种植密度为10株/m².实验系统建于2013年11月,调试运行3个月至系统稳定,于2014年2月底开展研究.

1.2 实验进水水质

实验系统进水以污水处理厂一级A排放标准(2006年)尾水(化学需氧量(COD_{Cr})≤50 mg/L,总氮(TN)≤15 mg/L, NH₄⁺≤5 mg/L,总磷(TP)≤1 mg/L)为处理对象.为避免因进水水质波动造成实验结果不稳定,本实验采用人工配水,配水成分如下:葡萄糖、NaCO₃、KH₂PO₄、CaCl₂、MgSO₄、FeCl₃·6H₂O、NaNO₃、NH₄Cl,进水水质数据详见表1.

1.3 水质分析

为考察季节对不同水力负荷下垂直流人工湿地污染物去除效能的影响,本实验周期设定为1年.4组湿地水力负荷分别设置为125、250、375和500 mm/d.实验期间系统连续运行,通过阀门控制进水,每周采集1次进出水水样,利用YSI556便携式水质监测仪对温度(T)、DO、pH值、氧化还原电位(Eh)进行现场监测,之后将水样带回实验室测定TN、NH₄⁺、NO₃⁻、TP、COD_{Cr}浓度等指标,分别采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光法、纳氏试剂比色法、氨基磺酸-紫外分光光度法、钼酸铵分光光度法和快速消解分光光度法测定^[10].

1.4 数据分析

采用SPSS 18.0软件进行数据的方差及相关性分析.

2 结果与讨论

2.1 湿地对尾水的净化效果

2.1.1 COD_{Cr}的去除 在系统稳定运行后,于2014年2月19日开始进行数据采集.4种条件下湿地对尾水中COD_{Cr}总体保持了较好的去除率,但去除效果均不稳定;进入2015年1月以后,去除率下降明显,为全年最低(图1).125、375 mm/d条件下COD_{Cr}去除率稍好于250及500 mm/d条件下.水力负荷对COD_{Cr}去除效果的影响相对较小,这与Deblina等的结论类似^[7].相关性分析发现,COD_{Cr}去除率仅与

表1 进水水质

Tab.1 Influent water qualities

参数	均值	标准差
pH值	7.47	0.26
溶解氧(DO)/(mg/L)	5.75	2.21
电导率/(μS/cm)	460.51	22.56
TN/(mg/L)	12.18	1.30
NH ₄ ⁺ /(mg/L)	6.52	1.21
NO ₃ ⁻ /(mg/L)	5.46	1.39
TP/(mg/L)	0.71	0.11
COD _{Cr} /(mg/L)	54.50	4.97

NH_4^+ 去除率呈正相关($P < 0.05$), 相关系数为 0.29, 与其他因子无显著相关性($P > 0.05$). 上述结果的原因可能是: (1) 实验进水 COD_{Cr} 浓度较低, 污水中绝大部分可生物降解的有机物已在污水常规处理阶段得到降解; (2) 由于动植物分泌及其残体等的分解, 人工湿地存在一定的背景 COD_{Cr} 浓度^[11]; (3) COD_{Cr} 与 NH_4^+ 的去除均是耗氧过程, 而系统的低溶氧状态对两个过程均存在一定的限制作用.

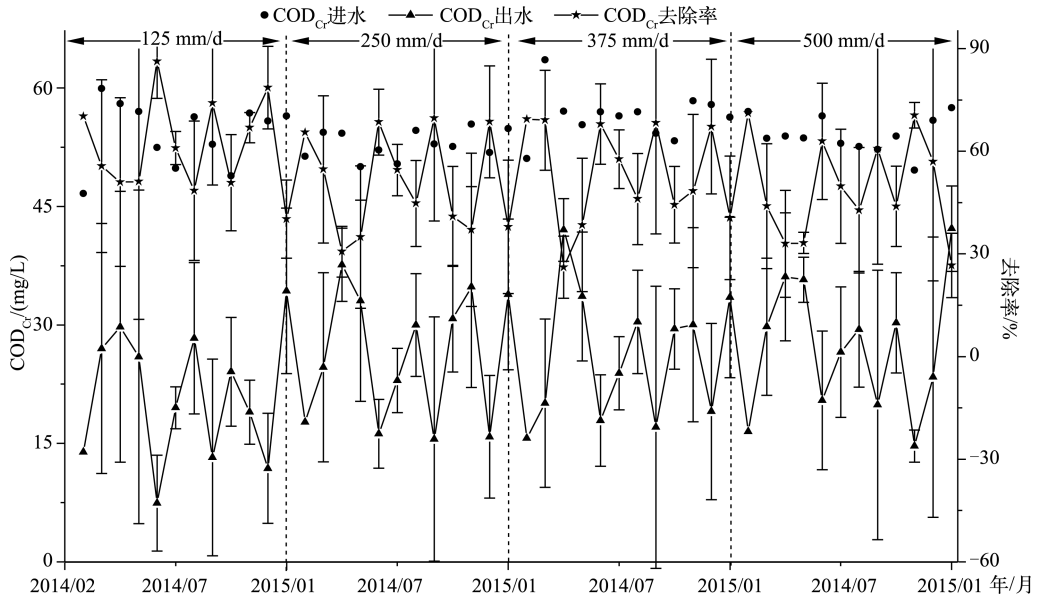


图 1 COD_{Cr} 净化效果的月变化

Fig.1 Monthly changes of COD_{Cr} removal efficiency

2.1.2 氮的去除 由图 2 可知, 湿地系统显著降低了尾水中 TN 的浓度. 随着水力负荷的增大, TN 去除率下

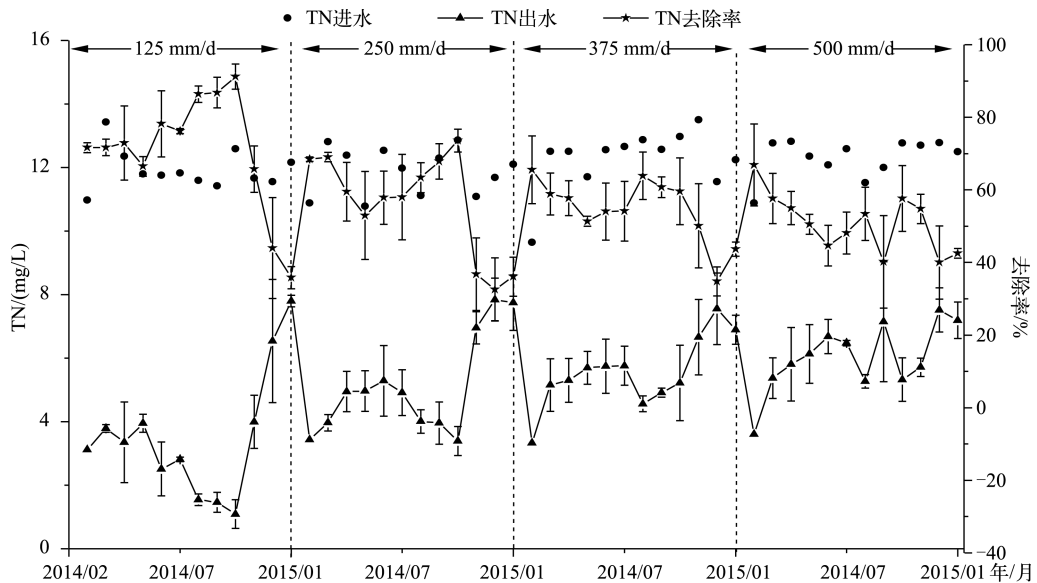


图 2 TN 净化效果的月变化

Fig.2 Monthly changes of TN removal efficiency

降,4种水力负荷下对TN的年均去除率分别为 $71.39\% \pm 17.71\%$ 、 $56.07\% \pm 15.18\%$ 、 $53.98\% \pm 10.22\%$ 和 $49.63\% \pm 9.60\%$ 。从效果的月变化来看,125和250 mm/d水力负荷下TN的去除效果表现出相似的规律:从2月开始逐渐上升,在10月达到最佳,去除率分别达到 $91.24\% \pm 3.46\%$ 和 $73.59\% \pm 3.14\%$;而后于2015年1月和2014年12月分别降至最低值 $35.83\% \pm 3.09\%$ 和 $32.62\% \pm 8.61\%$ 。相关性分析发现,TN去除率与温度、水力负荷分别呈显著正、负相关($P < 0.01$)。由于湿地对氮的去除主要由微生物驱动,冬季微生物活性随着温度的降低而显著下降,故而TN的去除率显著降低。

由图3可看出,湿地对 NO_3^- 保持着较高的去除率。分析发现,在11月以前,4种水力负荷下 NO_3^- 的平均去除率均在90%以上,而11月以后去除率显著下降,其中低负荷下下降幅度更大,此后4种水力负荷下平均去除率分别为 $34.81\% \pm 26.90\%$ 、 $48.03\% \pm 17.24\%$ 、 $63.03\% \pm 22.94\%$ 和 $70.60\% \pm 19.03\%$ (表2)。

相较于 NO_3^- 而言, NH_4^+ 的去除效果不佳且波动相对较大(图4)。125 mm/d水力负荷下 NH_4^+ 去除率更明显,表现出先升后降的趋势,并在10月达到最大值($84.52\% \pm 5.51\%$),而在3、4、5及12月效果较差,均仅有40%左右。其余水力负荷条件下 NH_4^+ 去除效果稳定性均较差。 NH_4^+ 去除效果仅与水力负荷呈显著负相关,而与其他环境因子无显著相关性。其原因可能是由于该垂直流人工湿地系统以间歇方式运行,持续饱和期较长,大气复氧作用受到限制,使得系统内DO浓度较低,尽管这有利于反硝化作用,但将限制硝化作用,导致 NH_4^+ 去除效果较低。

不同季节下垂直流人工湿地的出水温度、溶解氧、氧化还原电位及对污染物的净化效果差异如表2所示。

除125 mm/d下TN在秋季的去除率显著高于春、夏季外,其余水力负荷下在春、夏、秋3季TN的去除效果差异不显著($P > 0.05$),冬季效果则显著降低。4种水力负荷下 NO_3^- 去除率在春、夏、秋3季均保持在较高水平。由于反硝化作用是人工湿地去除 NO_3^- 的主要途径,该实验结果表明,在适宜的温度条件下该垂直流湿地系统具有较优的反硝化效能。硝态氮与有机物浓度被证明是反硝化作用的关键限制性因子^[12-13],而从本实验结果来看,进水中的硝态氮及有机物浓度为反硝化作用创造了较好的条件。除进水本身含有的有机物可作为反硝化作用的碳源外,实验过程中长势良好的湿地植物提供的内源碳及其同化作用可能是主要原因^[14]。尽管如此, NO_3^- 去除率在冬季显著降低,表明 NO_3^- 去除受温度影响较大。

NO_3^- 去除率与出水温度和DO浓度的关系见图5和6。当温度低于 10°C 时,4种水力负荷下 NO_3^- 的去除率急剧下降(图5),可能说明 10°C 是反硝化细菌活性的一个拐点。Misiti等^[15]和Chang等^[16]也得到了类似的结果。除了较低的反硝化活性外,冬季植物枯萎,内源碳供给和同化作用基本停止以及升高的溶解氧浓度都是导致 NO_3^- 去除率下降的可能原因。在较高的水力负荷下,出水DO浓度 $< 1.1 \text{ mg/L}$ 时反硝化作用明显较DO浓度 $> 1.1 \text{ mg/L}$ 时强(图6),表明反硝化的最佳DO浓度可能小于 1.1 mg/L 。系统出水的DO浓度在冬季与春季相对较高,植物低矮及植物的收割可能对相对较高的DO浓度起到一定的作用。夏、秋两季植物生长繁茂,显著降低了大气与湿地表面的空气对流,从而大大降低了大气的复氧作用。已有研究表明,在考虑植物本身的呼吸作用后,相对于大气复氧而言,植物根系泌氧对人工湿地的供养作用相对较弱^[17]。因而冬季的低温、高DO浓度可能是氮去除效果降低的主要原因。

同时,通过对TN、 NO_3^- 、 NH_4^+ 去除率与各在线指标之间进行相关性分析发现,TN去除率与水力负荷呈显著负相关($P < 0.01$),与出水温度、 NH_4^+ 去除率、 NO_3^- 去除率呈显著正相关($P < 0.01$),且与 NH_4^+ 去除率的相关性最高(相关系数为0.774),说明 NH_4^+ 去除率对TN去除效果的影响更为显著。

2.1.3 磷的去除 湿地在4种水力负荷条件下均显著削减了进水磷负荷(图7)。在为期一年的实验期间,湿地系统对不同负荷下的尾水均保持了较好的TP去除率。随水力负荷的增加,TP去除率呈下降趋势,4种水力负荷下的年均去除率分别为 $76.31\% \pm 10.61\%$ 、 $63.69\% \pm 15.31\%$ 、 $54.10\% \pm 17.85\%$ 和 $47.65\% \pm 19.37\%$ 。4种条件下TP去除率均表现出先降后升的整体趋势。10月以后,4种条件下TP的去除率均有不同程度的提升。基质的吸附和沉淀作用是人工湿地除磷的主要途径。湿地运行初期,基质有较充足的吸附和沉淀容量,对磷的去除效能较好^[18-19]。此外,实验后期DO浓度升高,氧化还原电位上升,这也有利于增强基质对磷的沉淀性能^[20]。分析TP去除率与各因子之间关系发现,TP去除率与 NH_4^+ 去除率呈显著正相关($P < 0.01$),与水力负荷、 NO_3^- 去除率以及出水温度呈显著负相关($P < 0.01$)。

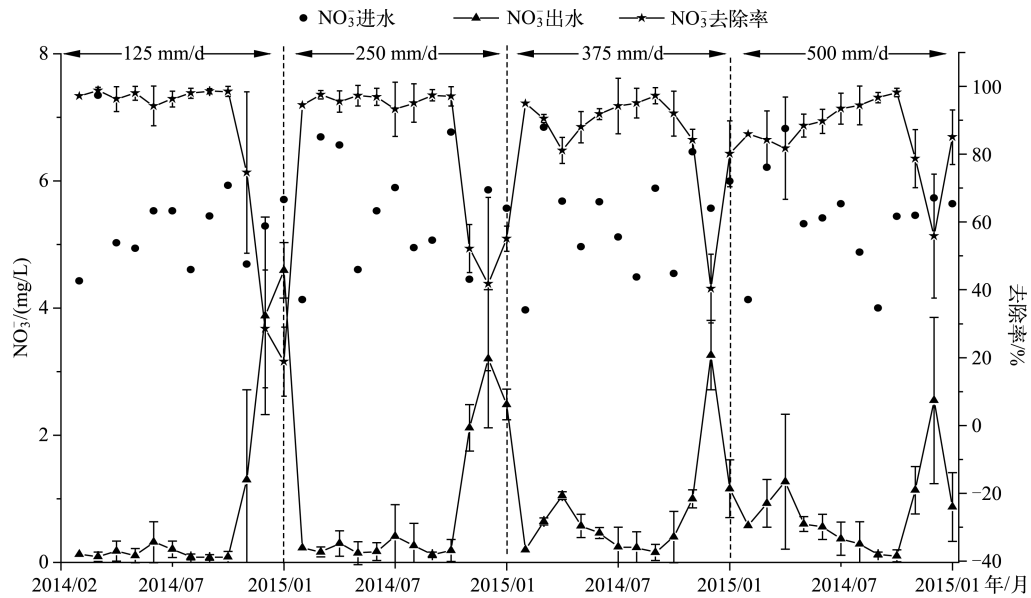


图 3 NO₃⁻净化效果的月变化

Fig.3 Monthly changes of NO₃⁻ removal efficiency

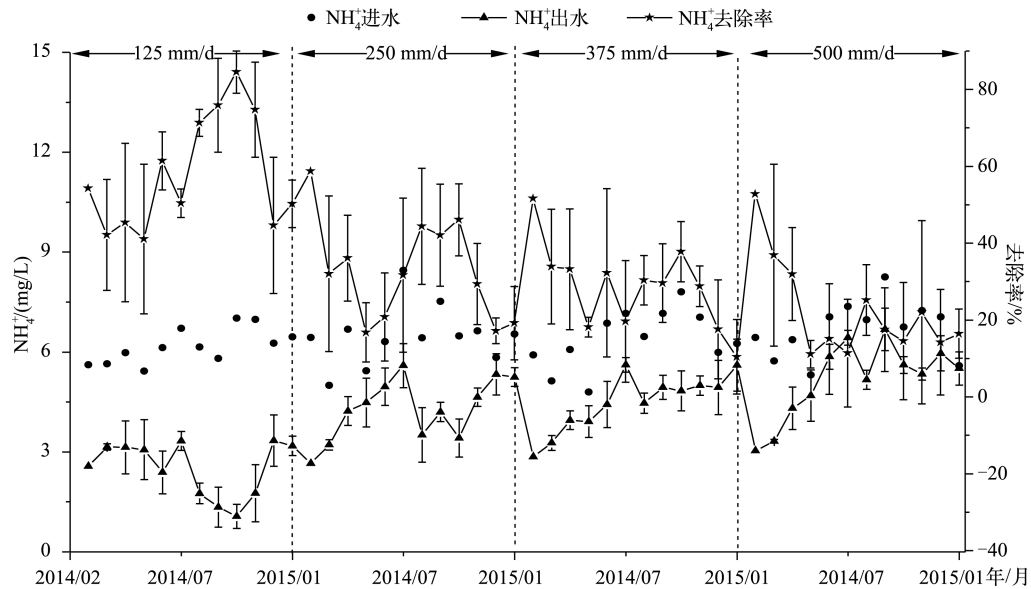


图 4 NH₄⁺净化效果的月变化

Fig.4 Monthly changes of NH₄⁺ removal efficiency

2.2 水力负荷优化

本文尝试从出水水质目标、污染物去除率和污染物去除量等方面分析湿地系统对尾水处理的最佳水力负荷条件。

2.2.1 出水水质目标 由图 1、2、7 可知, 4 种条件下湿地均显著削减了尾水的 N、P 负荷, 其中 125、250 mm/d 条件下出水 TP 浓度均达到地表水 V 类标准, 375 mm/d 条件下除 9 月外也均达到地表水 V 类标准. COD_{Cr} 出

表 2 不同季节垂直流人工湿地的出水温度、溶解氧浓度、氧化还原电位及对污染物的去除效率

Tab.2 Outflow water temperature, DO, oxidation reduction potential and pollutant removal efficiencies of the vertical-flow constructed wetlands in different seasons

季节	<i>HLR</i> /(mm/d)	T/°C	DO/(mg/L)	Eh/mV	TN 去除率	NO ₃ ⁻ 去除率	NH ₄ ⁺ 去除率	TP 去除率	COD _C 去除率
春	125	14.82±4.17	0.70±0.27	-116.75±36.66	71.61%±5.85%	97.74%±2.52%	42.23%±16.41%	72.08%±9.84%	52.62%±21.63%
	250	14.94±4.23	1.30±1.10	-79.55±82.27	64.62%±6.42%	96.63%±2.31%	34.04%±18.20%	59.46%±7.02%	41.72%±21.77%
	375	14.75±4.14	1.07±0.17	-99.99±53.57	58.50%±5.28%	87.12%±6.30%	33.53%±15.14%	46.38%±12.54%	46.31%±26.22%
	500	14.92±4.03	0.80±0.34	-101.59±42.83	56.88%±6.47%	84.49%±10.15%	33.36%±18.90%	46.61%±11.41%	41.55%±18.42%
夏	125	27.46±2.14	0.66±0.24	-122.68±24.40	76.01%±8.16%	95.89%±3.95%	57.27%±10.02%	68.08%±9.04%	67.97%±25.80%
	250	27.19±1.89	0.56±0.20	-135.15±27.80	56.92%±9.83%	94.65%±5.27%	26.49%±14.42%	54.21%±14.60%	56.23%±14.38%
	375	27.05±1.91	0.73±0.28	-103.16±79.14	54.50%±7.23%	91.70%±5.00%	26.50%±16.44%	48.84%±18.34%	57.75%±13.59%
	500	27.11±1.89	0.62±0.27	-118.26±81.70	48.35%±6.37%	89.86%±4.14%	15.18%±12.21%	45.29%±9.45%	49.40%±18.87%
秋	125	23.89±3.89	0.56±0.18	-57.54±58.46	86.62%±6.87%	96.86%±5.15%	78.41%±9.58%	80.35%±9.50%	60.27%±19.93%
	250	23.64±3.94	0.51±0.20	-36.36±79.16	64.73%±12.68%	93.97%±11.97%	42.16%±13.42%	66.28%±18.67%	51.70%±22.88%
	375	23.71±3.71	0.76±0.31	-50.11±67.38	59.13%±9.13%	94.50%±5.20%	31.40%±8.67%	54.75%±20.22%	54.53%±21.53%
	500	23.91±3.82	0.51±0.18	-76.88±59.50	49.88%±11.61%	95.81%±5.54%	15.98%±13.06%	37.85%±25.87%	52.67%±21.89%
冬	125	8.87±2.59	0.59±0.18	21.91±50.90	45.78%±14.43%	34.81%±26.90%	51.77%±15.18%	83.81%±6.64%	63.69%±20.32%
	250	8.56±2.64	0.75±0.18	138.81±62.93	35.98%±7.18%	48.03%±17.24%	21.46%±9.44%	74.55%±8.82%	51.76%±23.88%
	375	9.25±2.57	1.35±0.34	81.17±42.29	42.51%±9.50%	63.03%±22.94%	18.29%±12.40%	65.95%±13.45%	53.37%±22.74%
	500	9.60±2.51	1.37±0.61	23.02±55.81	44.29%±9.16%	70.60%±19.03%	19.75%±8.85%	64.27%±13.57%	50.03%±28.67%

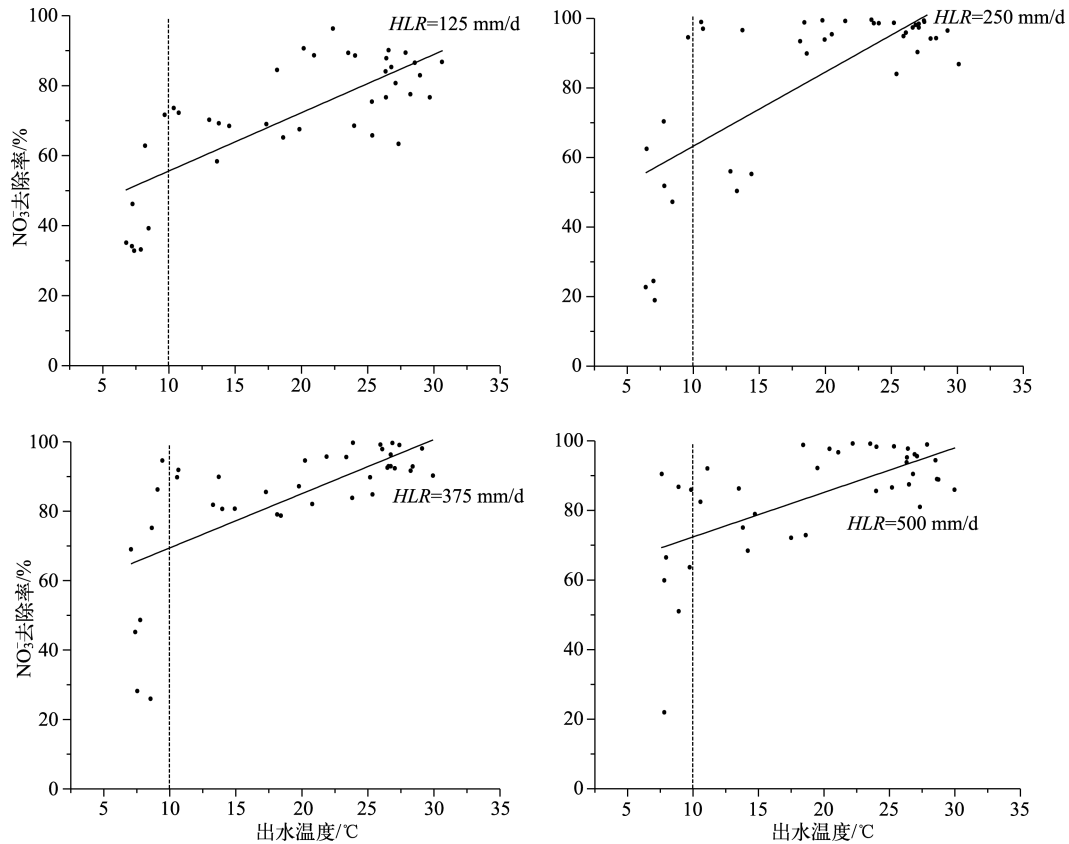


图 5 NO₃⁻去除率与出水温度的相关性分析

Fig.5 Correlation between NO₃⁻ removal efficiency and outflow water temperature

水在 4 种负荷下均达到地表水 V 类标准.因此,若出水水质目标为地表水 V 类,375 mm/d 水力负荷在保证出水 TP 及 COD_{Cr} 达标的同时,能将处理水量最大化.为了使出水 TN 浓度达到排放标准,需合理改善系统的 DO 状况,提高其硝化效能,并辅之以适当的前/后处理措施.

2.2.2 污染物去除率 由图 1、4、5 及表 2 可知,125 mm/d 水力负荷下在全年的污染物去除率均最高,随着水力负荷的提高,污染物在系统内的停留时间缩短,出水浓度升高导致去除效率下降,这与 Trang 等的结论相似^[21].因此,如以污染物去除率为标准,125 mm/d 为最佳水力负荷.

2.2.3 污染物去除量 利用最小二乘法对不同水力负荷的去除率做回归处理^[22],得到去除率(η)与水力负荷(H)的关系(表 3). H 和 η 的乘积建立优化函数:

$$Q = H \cdot \eta \cdot C_{\text{进}} \tag{6}$$

表 3 TN、NO₃⁻、NH₄⁺、TP、COD_{Cr} 去除率与 HLR 的回归方程

Tab.3 Regression equations of TN, NO₃⁻, NH₄⁺, TP and COD_{Cr} removal efficiency with HLR

参数	回归方程	
TN	$\eta = 175.68H^2 - 163.71H + 88.34, R^2 = 0.9555$	(1)
NO ₃ ⁻	$\eta = -7.6739H^2 + 14.354H + 80.842, R^2 = 0.9942$	(2)
NH ₄ ⁺	$\eta = 326.01H^2 - 301.18H + 90.637, R^2 = 0.9593$	(3)
TP	$\eta = 98.575H^2 - 138.05H + 92.026, R^2 = 1$	(4)
COD _{Cr}	$\eta = 0.988H^2 - 0.897H + 0.701, R^2 = 0.7753$	(5)

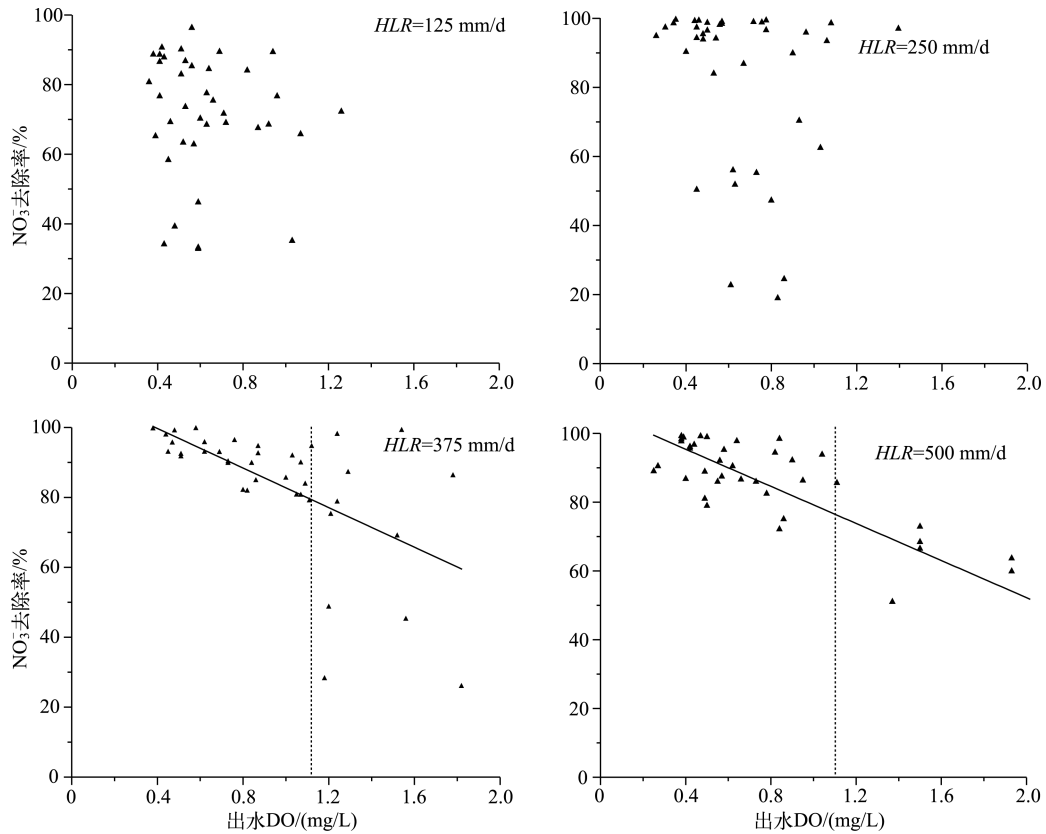


图 6 NO_3^- 去除率与出水 DO 浓度的相关性分析

Fig.6 Correlation between NO_3^- removal efficiency and outflow dissolved oxygen concentration

式中, Q 为湿地每天的污染物去除量, $C_{进}$ 为进水污染物浓度. 将式(1)~(5)代入式(6), 并让 Q 的导数为 0, 即: $Q' = 0$. 其中 $Q'_{\text{TN}} = 0$ 、 $Q'_{\text{NO}_3^-} = 0$ 、 $Q'_{\text{TP}} = 0$ 、 $Q'_{\text{COD}_{Cr}} = 0$ 均无解, 表示本研究条件下 TN、 NO_3^- 、TP、 COD_{Cr} 的去除量均随 HLR 的增加而增加. 因此在 $HLR = 500 \text{ mm/d}$ 时, TN、 NO_3^- 、TP、 COD_{Cr} 达到最大单日去除量. $Q'_{\text{NH}_4^+} = 0$ 时求得 $H_1 = 0.261$ 、 $H_2 = 0.354$, $H_1 = 0.261$ 、 $H_2 = 0.354$ 时分别取得极大值与极小值, 而 $H = 0.5$ 时 $Q_{0.5} = 0.66 \text{ g}/(\text{d} \cdot \text{m}^2) > Q_{0.261} = 0.52 \text{ g}/(\text{d} \cdot \text{m}^2)$, 因此, $HLR = -0.5 \text{ m/d} = 500 \text{ mm/d}$ 时 NH_4^+ 单日去除量也达到最大值. 各指标单位面积单日最大去除量见表 4.

表 4 不同水力负荷下湿地单位面积单日去污量

Tab.4 Pollutant removal amount per square meter and the corresponding HLR of the constructed wetlands

参数	单位面积单日去污量/ $(\text{g}/(\text{d} \cdot \text{m}^2))$			
	125 mm/d	250 mm/d	375 mm/d	500 mm/d
TN	1.08	1.78	2.36	3.07
NO_3^-	0.56	1.15	1.74	2.35
NH_4^+	0.47	0.58	0.58	0.70
TP	0.07	0.11	0.14	0.17
COD_{Cr}	4.12	7.13	10.70	13.48

因此, 当以污染物去除量为目标时, 本实验条件下的最佳水力负荷为 500 mm/d . 此时, 人工湿地对尾水的除污容量得到了最大发挥. 诸多研究表明, 人工湿地对污染物的去除量在一定范围内随其负荷的增大而增

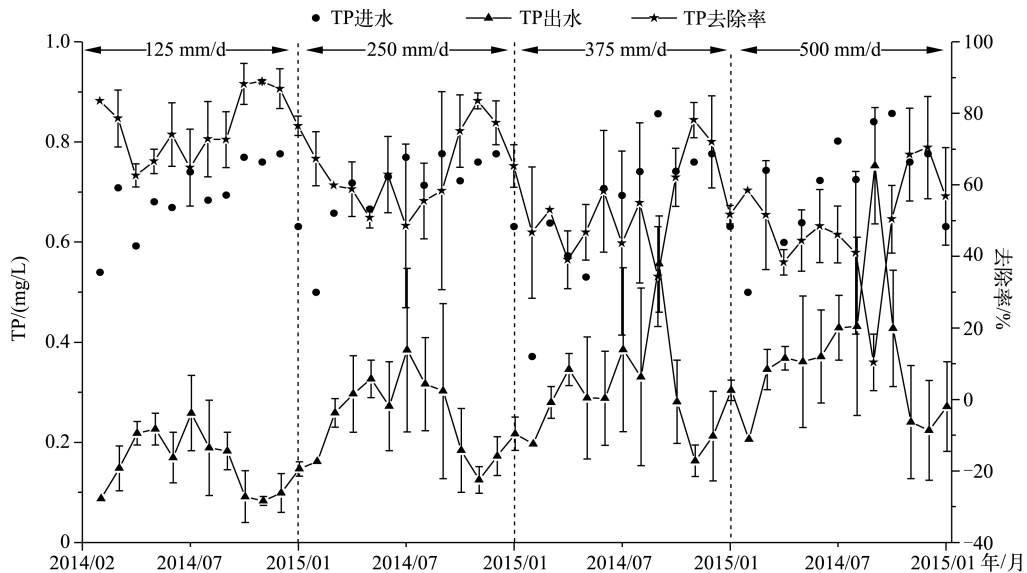


图 7 TP 净化效果的月变化

Fig.7 Monthly changes of TP removal efficiency

加^[23-25].尽管如此,人工湿地系统对污染物存在去除容量,当污染负荷超过最大容量时,去除量将显著降低^[24].因此在以去除量为目标运行人工湿地时,仍需要避免采用超过最大容量的水力负荷值.

4种水力负荷下TN、TP的去除率均有显著差异($P < 0.05$),250、375、500 mm/d水力负荷下 COD_{Cr} 去除率无显著差异($P > 0.05$),其中125 mm/d下的去除率显著高于其他水力负荷下的去除率,而250与375 mm/d下TN、TP去除率差异不显著($P > 0.05$),125与375 mm/d水力负荷下 COD_{Cr} 去除率较250及500 mm/d下的高.综上所述,综合考虑处理水质要求、去除率和污染物去除量,建议的最佳水力负荷为375 mm/d.

3 结论

通过对2014—2015年垂直流人工湿地在不同水力负荷下对尾水深度处理效果进行评价,以为人工湿地深度处理尾水的工程实践提供科学依据.(1)垂直流人工湿地能显著削减尾水中的氮、磷等污染负荷,其中TN在秋季去除效果最佳,去除率分别为 $86.62\% \pm 6.87\%$ 、 $64.73\% \pm 12.68\%$ 、 $59.13\% \pm 9.13\%$ 和 $49.88\% \pm 11.61\%$,冬季效果最差,去除率分别为 $45.78\% \pm 14.43\%$ 、 $35.98\% \pm 7.18\%$ 、 $42.51\% \pm 9.50\%$ 和 $44.29\% \pm 9.16\%$;TP在冬季去除效果最佳,去除率分别为 $83.81\% \pm 6.64\%$ 、 $74.55\% \pm 8.82\%$ 、 $65.95\% \pm 13.45\%$ 和 $64.27\% \pm 13.57\%$.(2)TN、TP去除效果均随水力负荷的上升而降低.除125 mm/d下 COD_{Cr} 去除率显著高于其他水力负荷外,其余水力负荷下 COD_{Cr} 去除率差异不明显.(3)以湿地处理后的主要污染物满足地表水V类标准,同时兼顾污染物去除量的情况下,375 mm/d是最佳水力负荷.

4 参考文献

- [1] 管策,郁达伟,郑祥等.我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用进展.农业环境科学学报,2012,31(12):2309-2320.
- [2] Margaret G. The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia. *Ecological Engineering*, 2005, 25: 501-509.
- [3] Tanveer S, Rumana A, Abdullah AM *et al.* Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh. *Chemosphere*, 2013, 88: 1065-1073.
- [4] Weerakoona GM, Jinadasa KB, Herath GB *et al.* Impact of the hydraulic loading rate on pollutants removal in tropical horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 2013, 61: 154-160.

- [5] Yu D, Piotr RW, Mawuli D *et al.* Impact of hydraulic loading rate and season on water contaminant reductions within integrated constructed wetlands. *Wetlands*, 2011, **31**(3): 499-509.
- [6] 杨立君. 垂直流人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理. 中国给水排水, 2009, **25**(18): 41-43.
- [7] Deblina G, Brij G. Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(8): 1044-1051.
- [8] Mitsch WJ, Gosselink JG. *Wetlands*: 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1993: 135.
- [9] Kadlec RH, Knight RL. *Treatment wetlands*. Boca Rato; Lewis Publisher, CRC Press, 1996: 595-596.
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 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: 210-280.
- [11] Otto RS, Joel AB, Paul BH *et al.* Plant species and temperature effects on the k-C* first-order model for COD removal in batch-loaded SSF wetlands. *Ecological Engineering*, 2006, **26**(2): 100-112.
- [12] Gagnon V, Maltais LG, Brisson J. Treatment of hydroponics wastewater using constructed wetlands in winter conditions. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2010, **212**(1/2/3/4): 483-490.
- [13] Fleur EM, James PS. Nitrate removal processes in a constructed wetland treating drainage from dairy pasture. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(10): 1260-1265.
- [14] Lin YF, Jing SR, Wang TW *et al.* Effects of macrophytes and external carbon sources on nitrate removal from groundwater in constructed wetlands. *Environmental Pollution*, 2002, **118**(3): 413-420.
- [15] Misiti TM, Hajaya MG, Pavlostathis SG. Nitrate reduction in a simulated free-water surface wetland system. *Water Research*, 2011, **45**(17): 5587-5598.
- [16] Chang JJ, Wu SQ, Dai YR *et al.* Nitrogen removal from nitrate-laden wastewater by integrated vertical-flow constructed wetland systems. *Ecological Engineering*, 2013, **58**: 192-201.
- [17] Brix H. Gas-exchange through the soil atmosphere interphase and through dead culms of phragmites-australis in a constructed reed bed receiving domestic sewage. *Water Research*, 1990, **24**: 259-266.
- [18] Sakadevan K, Bavor HJ. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems. *Water Research*, 1998, **32**: 393-399.
- [19] Cheng B, Hu CW, Zhao YJ. Effects of plants development and pollutant loading on performance of vertical subsurface flow constructed wetlands. *International Journal of Environmental Science Technology*, 2011, **8**: 177-186.
- [20] Vymazal J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. *Ecological Engineering*, 2005, **25**: 478-490.
- [21] Trang NTH, Konnerup D, Schierupb HH *et al.* Kinetics of pollutant removal from domestic wastewater in a tropical horizontal subsurface flow constructed wetland system; Effects of hydraulic loading rate. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(4): 527-535.
- [22] 凌 祯, 杨具瑞, 于国荣等. 不同植物与水力负荷对人工湿地脱氮除磷的影响. 中国环境科学, 2011, **31**(11): 1815-1820.
- [23] Suwasa K, Wanida D. Domestic wastewater treatment by a constructed wetland system planted with rice. *Water Science and Technology*, 2011, **64**(12): 2376-2380.
- [24] Jing SH, Lin YF, Wang TW *et al.* Microcosm wetlands for wastewater treatment with different hydraulic loading rates and macrophytes. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(2): 690-696.
- [25] Njenga M, Sylvie MT, Diederik PLR *et al.* Performance evaluation of horizontal subsurface flow-constructed wetlands for the treatment of domestic wastewater in the tropics. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, **139**(3): 358-367.