

刘长娥, 周 胜, 孙会峰, 等. 复合人工湿地处理低浓度畜禽养殖废水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1416-1424.

LIU Chang-e, ZHOU Sheng, SUN HUI-feng, et al. Purification performance of combined constructed wetlands on livestock wastewater with low concentration of pollutants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1416-1424.

复合人工湿地处理低浓度畜禽养殖废水的净化效果

刘长娥¹, 周 胜^{1,2*}, 孙会峰^{1,2}, 张继宁^{1,2}, 陈桂发^{1,2}

(1.上海市农业科学院, 上海 201403; 2.上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201415)

摘要: 为了解人工湿地对低浓度畜禽养殖废水的去除速度与净化效果, 采用4级复合人工湿地以间歇进水的方式处理低浓度猪场废水, 监测不同时期各级湿地进出水中 TN、TP、NH₄⁺-N、COD_{Cr} 等污染物指标浓度的变化。结果表明, 复合人工湿地进水中 TN、TP、NH₄⁺-N、COD_{Cr} 年平均初始浓度分别为 41.6、8.4、21.4、253.9 mg·L⁻¹, 去除率分别为 94.66%、79.36%、91.04%、32.32%。其中 1 级湿地(芦苇-砾石垂直渗透流)对 TN、TP 和 COD_{Cr} 去除速度较快, 分别为 2.9、0.6、7.5 g·m⁻²·d⁻¹; 2 级湿地(芦苇-沸石垂直渗透流)对 NH₄⁺-N 去除速度较快, 为 1.8 g·m⁻²·d⁻¹; 3 级湿地(芦苇-砾石水平潜流)和 4 级湿地(稻田水平表面流)对污染物的去除速度较低, 对 TN、TP、NH₄⁺-N 的去除速度均小于 0.4 g·m⁻²·d⁻¹, 对 COD_{Cr} 的去除速度小于 2.3 g·m⁻²·d⁻¹。污染物去除率受季节温度变化的影响较小。

关键词: 复合人工湿地; 畜禽养殖废水; 去除速度; 去除率

中图分类号: X713 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)07-1416-09 doi:10.11654/jaes.2017-0112

Purification performance of combined constructed wetlands on livestock wastewater with low concentration of pollutants

LIU Chang-e¹, ZHOU Sheng^{1,2*}, SUN HUI-feng^{1,2}, ZHANG Ji-ning^{1,2}, CHEN Gui-fa^{1,2}

(1. Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Engineering Research Centre of Low-carbon Agriculture (SERCLA), Shanghai 201415, China)

Abstract: In order to evaluate the removal rate and efficiency of livestock wastewater with low concentration of pollutants in constructed wetlands, four-stage combined constructed wetlands were used to purify piggery wastewater with low concentration of pollutants under intermittent influent. The variations of TN, TP, NH₄⁺-N, and COD_{Cr} in different stages of the wetlands were monitored during spring, summer, autumn, and winter. The annual average concentrations of TN, TP, NH₄⁺-N, and COD_{Cr} in the influent were 41.6, 8.4, 21.4, and 253.9 mg·L⁻¹, respectively, and the removal efficiencies of these pollutants were 94.66%, 79.36%, 91.04%, and 32.32%, respectively. In addition, the first stage of the wetlands (reed-gravel vertical seepage flow) had higher rates for removing TN, TP, and COD_{Cr}, which were 2.9, 0.6, and 7.5 g·m⁻²·d⁻¹, respectively. The second stage of the wetlands (reed-zeolite vertical seepage flow) showed a high removal rate for NH₄⁺-N, which was 1.8 g·m⁻²·d⁻¹. However, the removal rates of pollutants in the third stage (reed-gravel horizontal undercurrent) and the fourth stage (rice-soil surface flow) of the wetlands were lower. The removal rates of TN, TP, and NH₄⁺-N were all less than 0.4 g·m⁻²·d⁻¹, whereas that of COD_{Cr} was less than 2.3 g·m⁻²·d⁻¹. Season and temperature had little influence on the removal rates of most of the studied pollutants.

Keywords: combined constructed wetland; livestock wastewater; removal rate; removal efficiency

收稿日期: 2017-01-20

作者简介: 刘长娥(1967—), 女, 副研究员, 主要从事湿地生态与科技情报方面的研究。E-mail: le566@163.com

* 通信作者: 周 胜 E-mail: zhous@263.net

基金项目: 上海市科委基础研究重点项目(12JC1407900); 上海市科技兴农重点攻关项目(沪农科攻字(2016)第 6-3-1 号)

Project supported: Key Basic Research Project of Shanghai Science and Technology Committee(12JC1407900); Shanghai Agriculture Applied Technology Development Program, China(G(2016)No.06-03-01)

随着我国农业产业结构的调整,畜禽养殖业成为我国农村经济的重要组成部分,农村养殖产业的发展,使得一些地方畜禽养殖产生的 N、P 数量剧增,成为各大水域的重要污染源。有分析结果显示,我国农业面源污染的程度已十分严重,进入 21 世纪初,农业面源污染对水体富营养化的影响将进一步加剧,农业和农村发展引起的水污染将成为中国可持续发展的最大挑战之一^[1]。

畜禽养殖产生大量的畜禽粪尿等有机污染物,《畜禽养殖业污染治理工程技术规范》(HJ 497—2009)指出,畜禽养殖废水是指由畜禽养殖场产生的尿液、全部粪便或残余粪便及饲料残渣、冲洗水及工人生活、生产过程中产生的废水的总称。这些废水在储运、利用过程中,因为降雨和其他原因营养物质随径流进入水体而形成污染,不仅造成了河流湖泊和地下水的污染,而且影响环境的清洁,导致生态环境恶化,对人们的身体健康造成极大的威胁。

畜禽养殖废水含有高浓度的有机物、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (氨氮)及悬浮物,COD(化学需氧量)高达 5000~20 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 达 800~1500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP(总磷)为 80~170 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其污染具有长期性和不可逆性。目前的控制方式主要为源头控制法、自然消纳法和工程处理法^[2-5],其中源头控制法和自然消纳法受各种条件的限制,同时也存在潜在风险。有研究^[6]表明,工程处理能够去除大部分的有机物、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和悬浮物等物质,处理后的废水 COD 降至 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, $\text{NH}_4\text{-N}$ 降至 15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,TP 降至 8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,达到《畜禽养殖业污染物排放标准》(GB 18596—2001)的要求,但仍与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 V 类水体要求相差甚远,对地表水和地下水环境仍存在污染风险,必须经过后续处理(即深度处理)。人工湿地是目前应用较为广泛、技术较为成熟的一种处理工艺,具有处理效果好、投资少、运行维护简便等优点。

人工湿地的净化机制主要是依靠基质的吸附交换、基质与表面附着微生物的协作、植物的摄取、微生物的代谢以及植物与根际微生物的共生等,人工湿地技术能够处理的废水种类已达 20 多种,其净化污水的有效性已经得到了许多研究的证实,目前人工湿地用于处理畜禽养殖废水成为热点^[7-12],但用于深度处理还较少,其深度净化效果还有待于进一步提高。

本研究设计 4 级复合人工湿地,对低浓度畜禽养殖废水进行深度处理,通过分析复合湿地对主要污染物的去除效果、年内进出水浓度变化以及不同湿地单元的作用等,了解人工湿地高效处理低浓度畜禽养殖废水的相关技术,为今后深度净化畜禽养殖废水的人工湿地建设提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于上海市农业科学院现代农业园区的庄行生态环境实验区,4 级复合人工湿地分别为 1 级芦苇-砾石垂直渗透流(W1)、2 级芦苇-沸石垂直渗透流(W2)、3 级芦苇-砾石水平潜流(W3)、4 级稻田水平表面流(W4),具体组成见表 1。

在历时 1 个月的河水预试验后,植物(芦苇)生长基本稳定,株高和密度都达到了正常生长状态,各级湿地运行基本正常,进出水呈现出一定的规律,湿地系统内相关的功能群培养趋于成熟,2015 年 5 月开始进行低浓度的畜禽养殖废水处理试验。

1.2 试验用水

为模拟畜禽养殖废水经过工程设施处理的出水水质,试验用水采用养猪废水稀释的方法制备。养猪废水取自庄行养猪场,将 1 车(容量为 3.2~3.4 m^3)猪粪水[TN(总氮)浓度为 700~1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$]注入贮存池(容量为 40 m^3),贮存池加河水至满,稀释约 10 倍。试验期间,人工湿地进水浓度平均为 TN 41.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP

表 1 人工湿地结构组成

Table 1 Structure composition of constructed wetlands

湿地		基质组成与比例	实验前植物		实验后植物		N 含量/%
类型	面积/ m^2		株高/cm	密度/株 $\cdot\text{m}^{-2}$	密度/株(丛) $\cdot\text{m}^{-2}$	生物量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	
1 级(W1)	54	砾石(粒径 2~5 cm,60 cm 深)	芦苇 110.7	芦苇 30	芦苇 183	芦苇 1 540.4	芦苇 1.7
2 级(W2)	36	沸石(粒径 2~5 cm,60 cm 深)	芦苇 134.3	芦苇 69	芦苇 195	芦苇 2 055.3	芦苇 0.96
3 级(W3)	54	砾石(粒径 2~5 cm,60 cm 深)	芦苇 113.3	芦苇 33	芦苇 182	芦苇 1 927.4	芦苇 1.16
4 级(W4)	42	稻田土壤(60 cm 深)	0	0	水稻 30	稻草 1 023.0	稻草 0.45
						籽粒 1 180.0	籽粒 0.97

注:实验前 5 月份 W4 中水稻未移栽。

8.4 mg·L⁻¹、NH₄⁺-N 21.4 mg·L⁻¹、COD_{Cr} 253.9 mg·L⁻¹。

1.3 试验时间

选取代表不同季节的时期进行污水处理试验,分别为5月(春季)、8月(夏季)、11月(秋季)和1月(冬季),每阶段连续运行1个月。每天进水量为6 m³,分3次完成,即2 m³/8 h。

1.4 样品采集与分析

试验期间,每周取样2~3次,水样分别为进水、1级湿地出水、2级湿地出水、3级湿地出水、4级湿地出水。主要分析指标为进出水的TN、TP、NH₄⁺-N、COD_{Cr},测定方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[13],TN采用过硫酸钾消解-紫外分光光度法,TP采用钼锑抗分光光度法,NH₄⁺-N采用离子色谱仪(ICS930)进行分析,COD_{Cr}采用COD-571-1型消解仪进行分析。

去除率(%)=[进水浓度(mg·L⁻¹)-出水浓度(mg·L⁻¹)/进水浓度]×100%

去除速度(g·m⁻²·d⁻¹)=进水污染负荷(g·m⁻²·d⁻¹)-出水污染负荷(g·m⁻²·d⁻¹)^[14]

1.5 数据分析

数据采用不同时期污染物去除率的平均值±标准差来表示。采用SPSS 13.0统计分析软件在95%的置信区间作一维方差分析进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 复合湿地对不同污染物的去除效果

复合人工湿地对TN和NH₄⁺-N的去除效果优于其他指标。由表2可以看出:TN年平均去除率可达到94.66%,全年去除率差异不大;NH₄⁺-N的去除率平均为91.04%,除春季外,其他时期去除率均达到94%以上;TP的平均去除率为79.36%,秋季最高,达94.01%,其次是夏季,冬季去除率最低;COD_{Cr}去除率较差,年平均为32.32%,夏秋季略高,春季最差,去除率仅为15.90%。

同一时期复合湿地对不同污染物的去除效果不同,春季TN的去除效果最好,显著高于NH₄⁺-N、TP和COD_{Cr};夏季各污染物去除率均提高,NH₄⁺-N、TP和COD_{Cr}的去除率提高幅度较大,TN、NH₄⁺-N的去除率显著高于TP和COD_{Cr};秋季各污染物去除率均有所提高,TN、NH₄⁺-N、TP去除率显著高于COD_{Cr};冬季TN、NH₄⁺-N的去除率较高。污染物平均去除率由高至低排序均为:TN>NH₄⁺-N>TP>COD_{Cr}(表2)。

不同时期TN的去除率普遍较高;NH₄⁺-N去除率

表2 复合湿地对不同污染物的去除率

Table 2 Removal efficiencies of different pollutants with combined constructed wetlands

季节	污染物去除率/%			
	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP	COD _{Cr}
春	92.66±1.81a	79.06±5.81b	72.45±13.70c	15.90±2.81d
夏	94.88±0.59a	94.69±0.50a	82.64±4.83b	41.89±4.38c
秋	96.89±0.42a	94.44±1.05a	94.01±0.92a	42.10±4.24b
冬	94.24±0.86a	95.96±1.24a	68.33±7.53b	29.37±23.15c
平均	94.66±0.87a	91.04±4.01a	79.36±5.74b	32.32±6.23c

注:同一行内平均数(n=10)后小写字母不同表示各污染物去除率差异达5%显著水平。

Note: Different lowercase letters (n=10) in a row indicate significant differences at 5% level between removal rate of different pollutants.

夏、秋、冬季较高,春季最低;TP的去除率秋季较高,春、冬季较低;COD_{Cr}的去除率普遍较低,以春季最为明显。

2.2 复合湿地进出水污染物含量及去除率动态变化

试验期间进水污染物浓度的波动,主要受不同时期牲畜尿液、粪便、冲洗水产生量及工人生活、生产过程中废水产生量的影响。从图1看,5—10月进水TN浓度相对较平稳,基本保持在40 mg·L⁻¹左右;11—12月进水TN浓度升高,达到60~90 mg·L⁻¹;12月下旬进水TN浓度急剧下降,恢复至11月前浓度。出水TN浓度全年变化不大,受进水TN浓度的影响较小,比较稳定,基本保持在0.5~3.6 mg·L⁻¹,显著低于进水TN浓度。不同时期,复合湿地对TN的去除效果较稳定,受进水浓度和季节变化的影响小。

进水NH₄⁺-N浓度不同时期波动幅度和频率较TN大,5月较低,为5~15 mg·L⁻¹,10月后较高,普遍在20~40 mg·L⁻¹。进水浓度的频繁变化对出水并未有显著影响,除春季外,其他时期出水NH₄⁺-N浓度较稳定,保持在2 mg·L⁻¹以内,NH₄⁺-N的去除率受进水水质与季节变化的影响较小。

进水TP浓度年内波动较频繁,说明养殖废水中TP浓度受其他因素的影响较大。出水TP浓度受进水的的影响较小,尤其在10—11月期间比较稳定,TP浓度也较低。冬季TP的去除率较低。

进水与出水COD_{Cr}浓度变化趋势基本一致,5—8月浓度较低,比较稳定,之后浓度升高,出现缓慢波动;11月后进水COD_{Cr}浓度急剧升高,并出现大幅度频繁波动。COD_{Cr}的去除率较低,受季节变化影响较小。

由上述分析结果可以看出:TN和NH₄⁺-N去除效

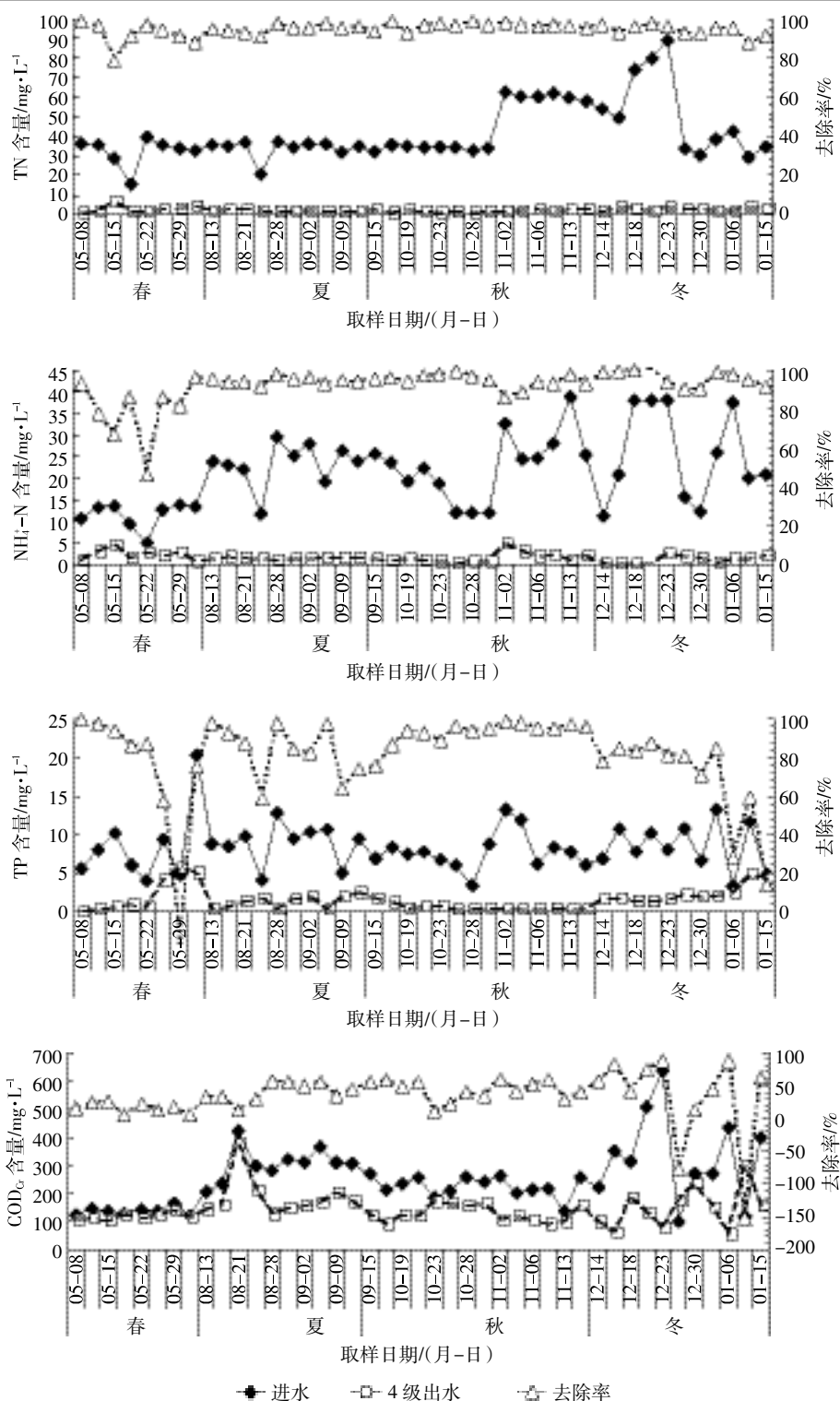


图 1 不同时期湿地进出水污染物浓度及去除率变化

Figure 1 Variations of concentrations of pollutants in influent and effluent and removal efficiencies of constructed wetland during different periods

果最好, 去除率普遍较高; TP 的去除率相对较差; COD_{Cr} 的净化效果最差。4 种污染物的去除率受季节变化的影响均较小。

2.3 污染物去除率与气温的相关性

通过对复合湿地不同时期 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、 COD_{Cr} 去除率与对应日均温的相关分析可以看出, 4 种污染

物去除率受温度的影响较小(图2),与刘长娥等^[15]研究的潜流-表面流复合人工湿地净化河道水的结果有所不同,因净化河道水试验采用的是人工湿地小试装置,填料是沸石,植物为茭草(*Zizania latifolia*)。而本研究采用4种不同类型湿地组合(1级垂直渗透流、2级垂直渗透流、3级水平潜流和4级水平表面流)、3种不同填料(沸石、砾石、土壤)、3种不同布水方式(垂直渗透流、水平潜流、水平表面流)以及2种不同植物(芦苇和水稻),且湿地系统经过了1年的养成,各功能群日趋完善与成熟。这些综合因素的相互作用,可能削弱了温度对湿地去除效果的影响,这种猜测还需要进一步研究证实。

2.4 不同湿地污染物去除速度对比

复合人工湿地是由4级不同湿地组合而成,不同类型湿地对污染物的去除效果与贡献不同。由图3可以看出,TN、TP和 COD_{Cr} 去除速度最高的均是1级湿地,显著高于其他湿地; $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除速度最高的是2级湿地,显著高于其他湿地;3级湿地和4级湿地的污染物去除速度普遍较低。总体而言,4级湿地污染物的去除效果最差,对复合湿地污染物去除的贡献较小。

各级湿地对不同污染物去除速度的稳定性也不

同,TN去除速度稳定性最好的是4级湿地,不同时期TN去除速度差异较小,稳定性较差的是1级湿地。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除速度较稳定的同样也是4级湿地,1级湿地和2级湿地对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除效果的稳定性均较差,不同时期去除速度差异较大。TP去除速度稳定性较好的是3级湿地,其次是1级湿地,而2级湿地和4级湿地TP的去除效果不稳定。 COD_{Cr} 去除速度稳定性较好的是4级湿地。

总体而言,复合湿地系统中,1级湿地对TN、TP和 COD_{Cr} 去除速度快,去除效率高;2级湿地对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除效率高;3级湿地和4级湿地在组合湿地中对4种污染物的去除速度均慢。

1级垂直渗透流湿地TN、TP、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 和 COD_{Cr} 的去除率分别为63.8%、61.4%、27.2%、23.8%;2级垂直渗透流湿地对4种污染物的去除率依次为62.5%、20.3%、72.0%、7.2%;3级水平潜流湿地相应的去除率分别为54.1%、34.5%、41.7%、4.1%;4级水平表面流湿地上述污染物的去除率分别为15.7%、0.8%、33.6%、10.2%。尽管3级湿地的去除速度小,但其TN的去除率能达到50%以上。研究结果显示垂直渗透流湿地污染物去除效果好于水平潜流湿地,水平表面流效果最差,与前人研究结果一致^[8,11-12],主要原因是垂

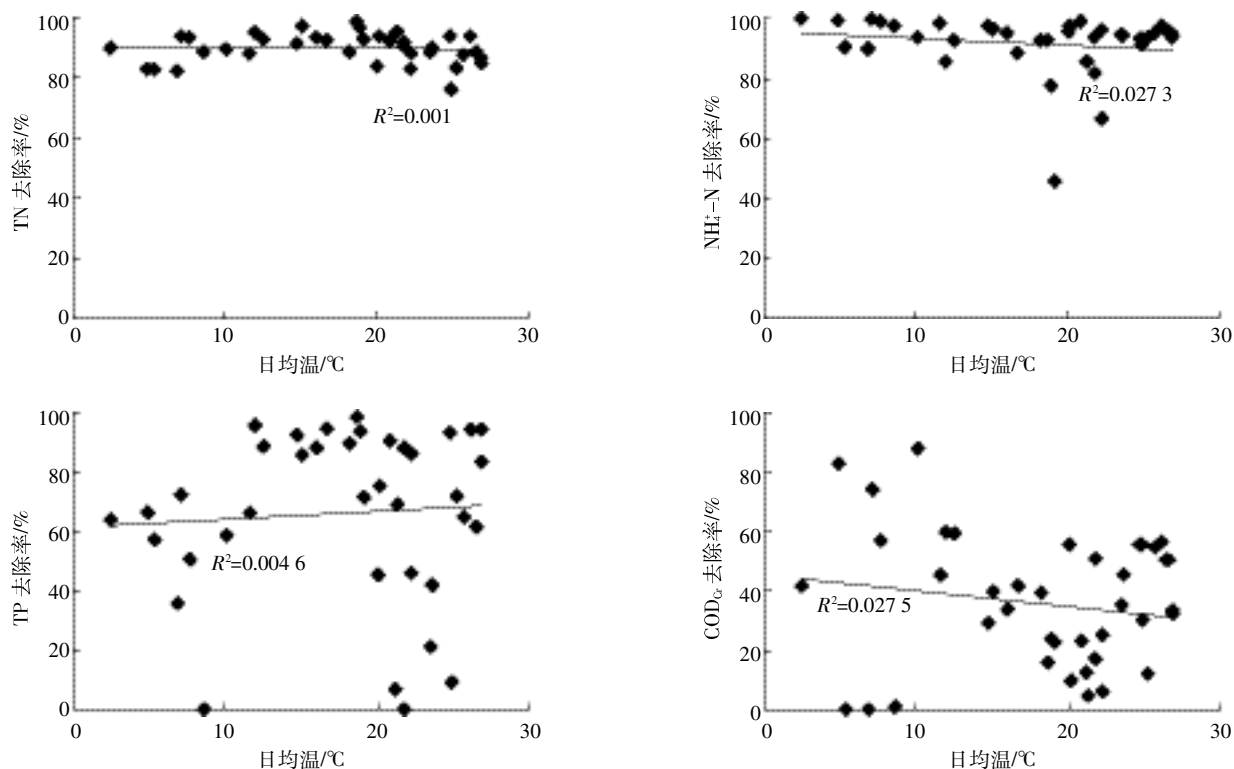
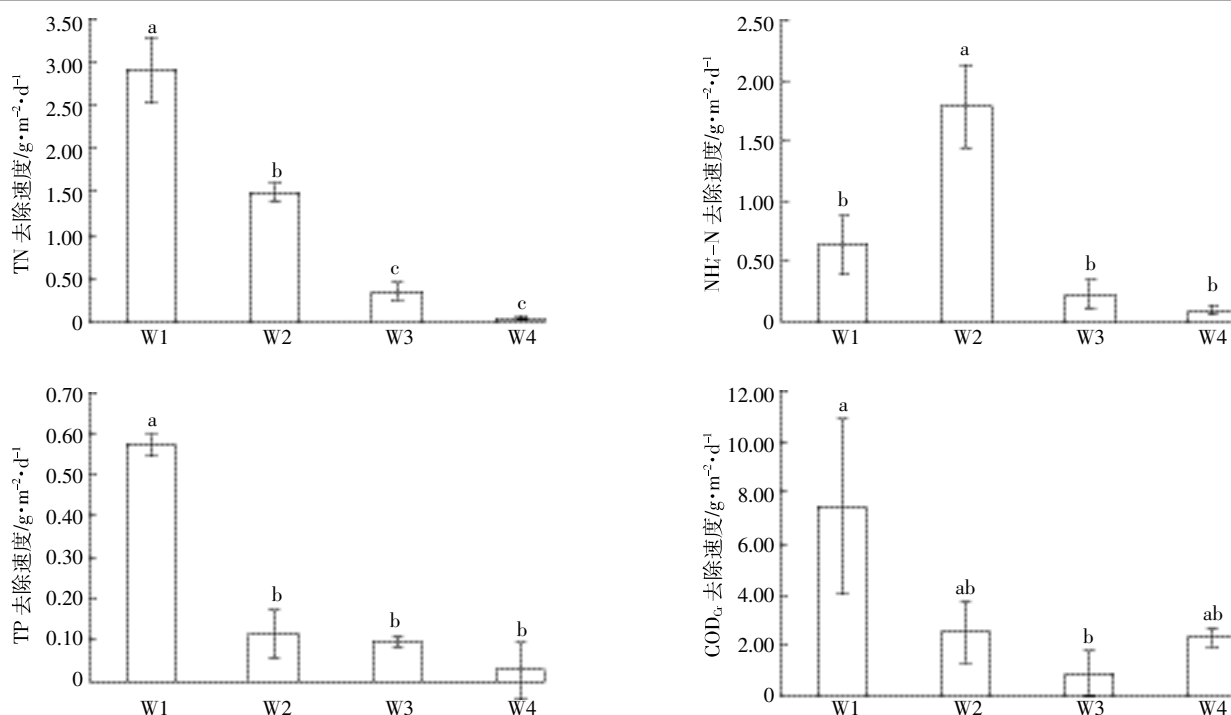


图2 不同污染物去除率与日均温的相关性

Figure 2 Correlation between pollutants removal efficiencies and mean daily temperature



图中不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$) among different treatments

W1:1 级湿地(芦苇-砾石垂直渗透流);W2:2 级湿地(芦苇-沸石垂直渗透流);W3:3 级湿地(芦苇-砾石水平潜流);W4:4 级湿地(稻田水平表面流)

W1:Grade 1 wetlands(reed-gravel vertical seepage flow);Grade 2 wetlands(reed-zeolite vertical seepage flow);Grade 3 wetland(reed-gravel horizontal undercurrent);Grade 4 wetland rice-soil surface flow)

图 3 不同湿地污染物去除速度对比

Figure 3 Contrast of removal rate of pollutants in different wetlands

直渗透流湿地布水方式有利于污水与湿地内部填料充分接触。

3 讨论

3.1 复合人工湿地对氮的去除

植物直接作用对废水中污染物的去除效果说法不一,研究普遍认为通过植物地上部分所吸收的氮仅占人工湿地系统 TN 去除量的 0.3%~14.1%^[16]。而部分国外研究者^[17-18]则认为植物的吸收去氮量占人工湿地去氮量的 50%~90%,其中植物的种类和生长习性、供试污水的污染物浓度、水力停留时间、气候条件、进水负荷、收割频率、湿地基质和湿地结构等都是影响因素^[19-20]。本研究中芦苇-砾石垂直渗透流湿地和芦苇-沸石垂直渗透流湿地 TN 去除率高于潜流和表面流湿地,主要是渗透流的布水方式更有利于湿地基质和植物对污染物的吸收与吸附,其中,沸石对 NH_4^+-N 具有良好的吸收特性。植物通过吸收作用去除的污染物量很少,植物对氮的储存能力与 TN 和 NH_4^+-N 去除率之间的相关性虽然不显著(图 4),但间接作用对污

染物的去除影响较大,植物根系可以连续分泌有机化合物,主要包括一些代谢产物、脱落细胞、渗出物和分解物等,微生物可以利用这些有机化合物,在植物根际间形成丰富的微生物群落^[21],促进硝化与反硝化的进行。而植物对废水处理效果的影响主要在于湿地植物能够显著影响湿地微生物的组成和多样性。

植物对湿地系统污染物去除效果的影响主要体现在两方面:一是可以通过根系直接吸收同化水中的氮,并将其变成体内的有机成分,二是它的根区为微生物的生存和降解污染物质提供了必要的场所和好氧、厌氧条件。

填料主要是作为微生物的载体影响其代谢过程从而影响氮的去除^[22],填料对氮的直接去除作用是对 NH_4^+-N 的物理吸附作用和离子交换作用。有研究发现沸石对 NH_4^+-N 的去除效果较好^[23],可能也是芦苇-沸石垂直渗透流湿地 NH_4^+-N 去除率较高的一个原因。

3.2 复合人工湿地对磷的去除

人工湿地重要的去除磷的途径是填料对磷的吸

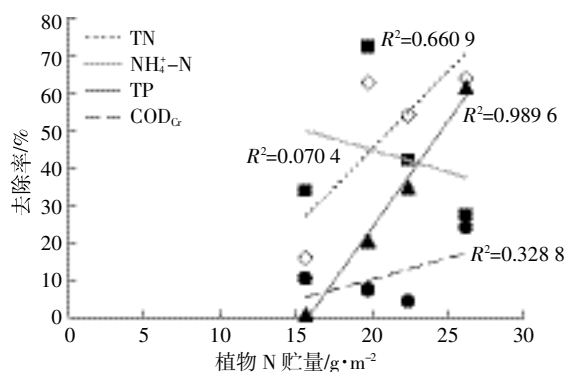


图4 不同污染物去除率与植物氮贮量的相关性

Figure 4 Correlation between different pollutants removal efficiencies and N capacity of plants

附和沉淀作用,其中化学吸附被认为是湿地除磷的主要作用^[24-25]。本研究中,不同填料组成湿地对磷的去除率不同,其中,芦苇-砾石垂直渗透流湿地春、夏、秋、冬磷去除率分别为66.5%、53.1%、62.9%和63.2%;芦苇-沸石垂直渗透流湿地分别为35.0%、35.7%、17.1%和-6.7%;芦苇-砾石水平潜流湿地分别为44.1%、23.6%、34.7%和35.8%;稻田水平表面流湿地分别为-101.5%、37.3%、72.0%和-4.2%。相同水流条件下砾石对磷的去除率高于沸石,相同填料条件下垂直渗透流对磷的去除效果好于水平潜流,说明不同种类填料对磷的吸附能力不同,不同的水流方式对填料的吸附能力有影响。有很多研究评价了各种填料对磷的吸附能力,其中,填料的成分对吸附效果具有较大影响,研究发现钙、铁、铝等元素含量高并且合理搭配后,可提高填料对磷的吸附能力^[26-27]。另外,本研究中稻田土在无植物生长季节,磷的去除率较低,说明填料对磷的去除还受到系统微生物和植物的影响。曹雪莹等^[28]研究发现,人工湿地系统在经过长期运行之后,填料呈现出距植物根系越近磷含量越高的特点,表明植物根系对湿地填料磷的滞留具有明显的影响。陈永华等^[29]将这种植物直接吸收与植物提高微生物和填料去污能力的作用称为植物效应。

3.3 复合人工湿地对 COD_{Cr} 的净化

在人工湿地中,生物降解是有机物的主要去除机理^[30],因此氧气的可供性会在很大程度上影响系统的处理效能。本研究中,人工湿地对 COD_{Cr} 的去除率普遍较低,芦苇-砾石垂直渗透流年内 COD_{Cr} 去除率为10.8%~47.4%,芦苇-沸石垂直渗透流为-5.2%~14.4%,芦苇-砾石水平潜流为-8.2%~12.7%,稻田水平表面流为7.7%~13.5%。4种人工湿地相比,芦苇-

砾石垂直渗透流湿地对 COD_{Cr} 的净化效果相对较好,可能与湿地系统组成特征有利于氧气的融入有关,其填料粒径普遍较大(见表1),填料间的空隙大,同时垂直流能够促进氧气融入;稻田水平表面流湿地中,污染水与空气的接触面大,处理效果稳定。人工湿地主要依赖微生物代谢活动分解去除有机物,填料作为微生物的代谢场所,直接的吸附和其他作用对有机物去除影响较小^[31]。氧气是制约湿地微生物数量和活性的关键性因素,最大程度改善人工湿地填料下部氧气分布,提高好氧微生物数量和活性是提高 COD 去除效率的关键。

由以上分析可以看出,湿地对污染物的去除效果受多方面因素影响,湿地填料的吸附作用可以去除污水中部分污染物,同时为植物的生长贮备了养分。湿地床填料的截留、吸收及与污染物的各种反应等过程也可使污染物得到去除。不同的填料表现出不同的吸附特性和去除效果。湿地结构对废水中污染物的去除效果也有重要影响,不同湿地结构的布水方式不同,从而影响废水中污染物与填料的接触程度,Vymazal等^[12]曾汇总了世界各地表面流湿地(SF)、水平潜流湿地(HSSF)和垂直潜流湿地(VF)的TN、TP去除率,发现不同结构湿地TN、TP去除率存在较大差异。 NH_4^+-N 和TN去除主要是在水平潜流和垂直潜流人工湿地,而且垂直潜流人工湿地对污染物的去除率均高于水平潜流。主要原因是垂直潜流人工湿地溶解氧水平较高,硝化能力强,而且垂直潜流湿地布水方式有利于污水与湿地内部填料充分接触。本研究中也表现出垂直渗透流湿地对污染物的去除效果较水平潜流和表面流湿地好。

4 结论

(1)复合人工湿地年平均去除率为TN 94.66%、TP 79.36%、 NH_4^+-N 91.04%、 COD_{Cr} 32.32%。4种污染物的去除率与日均温的相关性较小,受季节变化的影响不显著。

(2)4级复合人工湿地中,垂直渗透流湿地对污染物去除效果最好,水平潜流湿地次之,水平表面流湿地最差。

(3)4级复合人工湿地中,1级垂直渗透流湿地对污染物总体去除速度最高,之后依次是2级垂直渗透流湿地、3级水平潜流湿地和4级水平表面流湿地。

参考文献:

- [1] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7):1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 Century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7):1008-1017.
- [2] Choudhary M, Bailey L D, Grant C A. Review of the use of swine manure in crop production: Effects on yield and composition and on soil and water quality[J]. *Waste Management & Research*, 1996, 14(6):581-595.
- [3] Edgerton B D, Mcnevin D, Wong C H, et al. Strategies for dealing with piggery effluent in Australia: The sequencing batch reactor as a solution [J]. *Water Science and Technology*, 2000, 41(1):123-126.
- [4] Shahzad A, Ilyas T. Environmental consequences of cattle feedlot manure on saline soils[J]. *The International Journal of Environmental Studies*, 2000, 57(6):95-112.
- [5] Obaja D, Macé S, Costa J, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 87(1):103-111.
- [6] 刘昊,马焕春,杨志敏,等. 微电解-电极-SBBR 组合工艺处理沼液[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5):2297-2301.
LIU Hao, MA Huan-chun, YANG Zhi-min, et al. Micro-electrolysis and electrode-sequencing batch biofilm reactor for treatment of biogas slurry[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(5):2297-2301.
- [7] 张燕,刘雪兰,王月明,等. 中国规模化畜禽养殖污水处理中人工湿地的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(1):87-92.
ZHANG Yan, LIU Xue-lan, WANG Yue-ming, et al. Research progress of constructed wetland treating intensive livestock and poultry wastewater in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(1):87-92.
- [8] 高春芳,刘超翔,王振,等. 人工湿地组合生态工艺对规模化猪场养殖废水的净化效果研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1):154-159.
GAO Chun-fang, LIU Chao-xiang, WANG Zhen, et al. Purification performance of a constructed three-stage wetland system for ecological treatment of piggery wastewater[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(1):154-159.
- [9] 廖新梯,骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 13(1):113-117.
LIAO Xin-di, LUO Shi-ming. Treatment effect of constructed wetlands on organic matter in wastewater from pig farm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1):113-117.
- [10] 杨旭,李文哲,孙勇,等. 人工湿地系统对含沼液畜禽废水净化效果试验研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3):515-517.
YANG Xu, LI Wen-zhe, SUN Yong, et al. Experimental study on purification efficiency of the constructed wetland system for livestock waste water with biogas slurry[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(3):515-517.
- [11] 岳春雷,常杰,葛滢,等. 复合垂直流人工湿地对低浓度养殖废水循环净化功能研究 III[J]. 科技通报, 2004, 20(1):15-17.
YUE Chun-lei, CHANG Jie, GE Ying, et al. Studies on circulating purification of low strength fishery wastewater with compound vertical-flow constructed wetland[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2004, 20(1):15-17.
- [12] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment[J]. *Ecological Engineering*, 2005, 25(5):475-477.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:701-705.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:701-705.
- [14] 张涛,刘长娥,陈桂发,等. 人工湿地处理农村地区污水研究进展[J]. 上海农业学报, 2015, 31(3):141-146.
ZHANG Tao, LIU Chang-e, CHEN Gui-fa, et al. Research progress in rural area wastewater treatment by using constructed wetlands[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2015, 31(3):141-146.
- [15] 刘长娥,宋祥甫,刘福兴,等. 潜流-表面流复合人工湿地河道水质净化效果[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(8):11-18.
LIU Chang-e, SONG Xiang-fu, LIU Fu-xing, et al. Purification effect of integrated subsurface-surface flow constructed wetland on the river water[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, 36(8):11-18.
- [16] 李林锋,年跃刚,蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3):337-342.
LI Lin-feng, NIAN Yue-gang, JIANG Gao-ming. Contribution of macrophytes assimilation in constructed wetlands to nitrogen and phosphorus removal[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(3):337-342.
- [17] Breen P E. A mass balance method for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment[J]. *Water Research*, 1991, 24(6):689-697.
- [18] Rogers K H, Breen A J, Chick A J. Nitrogen removal in experimental wetland treatment systems: Evidence for the role of aquatic plants[J]. *Research Journal of the Water Pollution Control Federation*, 1991, 63(7):934-941.
- [19] 陆松柳,张辰,徐俊伟. 植物根系分泌物分析及对湿地微生物群落的影响研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(4):678-680.
LU Song-liu, ZHANG Chen, XU Jun-wei. Root exudates of wetland plants and the influence on the microbial community in constructed wetlands[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):678-680.
- [20] 奉小忧,宋永会,曾清如,等. 不同植物人工湿地净化效果及基质微生物状况差异分析[J]. 环境科学研究, 2011, 24(9):1035-1041.
FENG Xiao-you, SONG Yong-hui, ZENG Qing-ru, et al. Purification effects and differences in substrate microorganism status in constructed wetlands vegetated with different plants[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(9):1035-1041.
- [21] Zhu D L, Sun C, Zhang H H, et al. Roles of vegetation, flow type and filled depth on livestock wastewater treatment through multi-level min-

- eralized refuse-based constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 39: 7–15.
- [22] Lee S Y, Maniguiz-Rediuas M C, Kim L, et al. Settling basin design in a constructed wetland using TSS removal efficiency and hydraulic retention time[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(9): 1791–1796.
- [23] 冀泽华, 冯冲凌, 吴晓芙, 等. 人工湿地污水处理系统填料及其净化机理研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8): 2234–2243.
- JI Ze-hua, FENG Chong-ling, WU Xiao-fu, et al. Research progress on filler application and purification mechanisms in constructed wetland wastewater treatment system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8): 2234–2243.
- [24] Luo P, Liu F, Liu X L, et al. Phosphorus removal from lagoon-pretreated swine wastewater by pilot-scale surface flow constructed wetlands planted with *Myriophyllum aquaticum*[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 15(1): 490–497.
- [25] Vohla C, Kõiv M, Bavor H J, et al. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands: A review[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(1): 70–89.
- [26] Ding L L, Liang H W, Zhu Y X, et al. Sources of matrix-bound phosphine in advanced wastewater treatment system[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(12): 1274–1276.
- [27] 赵桂瑜, 周 琪. 钢渣吸附除磷机理研究[J]. 水处理技术, 2009, 35(11): 45–47.
- ZHAO Gui-yu, ZHOU Qi. Mechanism of phosphorus adsorption from aqueous solution on steel converter slags[J]. *Technology of Water Treatment*, 2009, 35(11): 45–47.
- [28] 曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 等. 人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 4033–4039.
- CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, et al. Difference of P content in different area substrate of constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(11): 4033–4039.
- [29] 陈永华, 吴晓芙, 何 钢, 等. 人工湿地污水处理系统中的植物效应与基质酶活性[J]. 生态学报, 2009, 29(11): 6051–6058.
- CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HE Gang, et al. Analysis of plant effect and rhizosphere enzyme activity in a constructed vertical flow wetland established for sewage treatment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6051–6058.
- [30] Mitchell C, McNevin D. Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetics[J]. *Water Research*, 2001, 35(5): 1295–1303.
- [31] Ladu J L C, Lu X W, Zheng M L, et al. Application of A²/O bio-reactor & constructed wetlands for removing organic and nutrient concentrations from rural domestic sewage[J]. *International Journal of Environmental Sciences*, 2014, 4(5): 709–718.