

丁飞飞, 张克强, 渠清博, 等. 黄鸢尾对牛场养殖废水肥用过程中的耐受性研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 214-220.

DING Fei-fei, ZHANG Ke-qiang, QU Qing-bo, et al. Research on yellow iris tolerance to cattle farm wastewater purification[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 214-220.

黄鸢尾对牛场养殖废水肥用过程中的耐受性研究

丁飞飞^{1,2}, 张克强², 渠清博², 赵 芙², 杨 鹏^{2*}, 沈 晨³

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130012; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 3. 中新天津生态城管委会建设局, 天津 300467)

摘 要:为更有效地利用水生植物黄鸢尾处理牛场养殖废水, 初步探明黄鸢尾净化牛场养殖废水过程中的关键影响因素, 以不同稀释比例牛场废水水培黄鸢尾为研究对象, 通过探究黄鸢尾的生长速率与稀释浓度的关系, 分析黄鸢尾生长速率与各个污染物指标去除率之间相关性, 研究黄鸢尾在牛场废水不同稀释浓度下的耐受性。结果表明: 黄鸢尾作为水质净化系统中常见的植物, 能有效降低牛场废水中的氮磷, 净化水质。当牛场废水浓度高于T3水平(15:1稀释)时, 表现出生长受抑制, 一周之后, 黄鸢尾对COD、NH₄⁺-N、TN和TP的去除率可以达到57.1%、59.49%、82.59%和72.39%, 其中对TN、TP去除效果最为显著。研究表明, 当牛场废水稀释之后, 控制稀释比例在T3水平时, 黄鸢尾生长不会受到抑制, 对牛场粪污废水中的污染物表现出较好的消纳和去除效果。

关键词:黄鸢尾; 牛场废水; 水培; 耐受性

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2019)02-0214-07

doi: 10.13254/j.jare.2018.0224

Research on yellow iris tolerance to cattle farm wastewater purification

DING Fei-fei^{1,2}, ZHANG Ke-qiang², QU Qing-bo², ZHAO Fu², YANG Peng^{2*}, SHEN Chen³

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130012, China; 2. Institute of Agro-environmental Protection, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 3. Construction Bureau Sino-Singapore Tianjin Eco-City, Tianjin 300467, China)

Abstract: To elucidate the effective utilization of aquatic plants to treat dairy farm wastewater, which were suggested to be key factors in the process of yellow iris purification of dairy farm wastewater, yellow irises cultured in dairy farms wastewater at different dilution ratios were used to examine the relationship between the growth rate of yellow iris and dilution concentration gradient. We also analyzed the correlation between the growth rate of yellow iris and the removal rate of pollutant and tolerance of yellow iris at different concentration in dairy farm wastewater. The results showed that yellow iris, as a common plant in water purification systems, could effectively reduce nitrogen and phosphorus in dairy farm wastewater and thereby improved water quality. When the concentration of dairy farm wastewater was higher than T3 level (15:1 dilution), indicating growth inhibition, the removal rates of chemical oxygen demand (COD), NH₄⁺-N, TN, and TP after one week reached 57.1%, 59.49%, 82.59%, and 72.39%, respectively, of which the removal efficiencies of TN and TP showed the significant effects. When dairy farm wastewater was diluted and maintained at a level equivalent to the T3 level, iris growth was not inhibited, and better absorption and removal effect of pollutants in the dairy farm wastewater were observed.

Keywords: yellow iris; dairy wastewater; water planting; tolerance

收稿日期: 2018-09-06 录用日期: 2018-12-17

作者简介: 丁飞飞(1992—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: ding.feifei@foxmail.com

*通信作者: 杨 鹏 E-mail: yp15926@163.com

基金项目: 天津市现代农业产业技术体系项目(ITTPRS2017008/ITTCRS2017006); 天津市科技计划项目(16PTGCCX00030)

Project supported: Tianjin Agriculture Research System (ITTPRS2017008/ITTCRS2017006); The Science and Technology Program of Tianjin, China (16PTGCCX00030)

随着奶牛养殖业的规模化发展,养殖业粪污污染问题日益严重^[1-2],为了保护水体不受污染,保护养殖和人居环境,国内外在奶牛养殖粪污治理和资源化利用方面已经开展了大量的研究工作,各种污水处理工艺应运而生。目前养殖废水处理的方法主要有物理处理法、化学处理法和生物处理法3大类^[3-7]。而生物处理法因其建设投资少、运行维护成本低、无二次污染和生态景观效果好等优势而得到了最为广泛的应用。生物处理法主要包括植物、动物和微生物的单一或组合处理方法。其中多种常见的处理工艺(比如稳定塘、生态沟和人工湿地等)中都会用到植物处理,特别是观赏价值较高的挺水植物已成为污水处理系统中的重要组成部分^[8-12]。水生植物对水体污染的耐受性是植物选择的关键影响因素之一,对水生植物抗水体污染等方面的研究也越来越受到重视。植物净化污水的机理主要是植物自身的吸收作用、物理化学作用以及与微生物协调降解作用,所以在选择植物品种时,可根据耐污性、生长适应能力和根系的发达程度等要求来确定。国内主要运用的挺水植物有鸢尾、香蒲、芦苇、芦竹和黄菖蒲^[13-15],其中鸢尾属植物应用最为广泛,其在医药食品、盆栽观赏、切花生产、园林绿化等领域均占有重要地位,具有良好的经济效益、生态环境效益和社会效益。

迄今为止,关于鸢尾属植物的研究还比较零散,主要集中在核型分析、花粉形态、药用、引种及组培快繁等领域,育种、繁殖生物学、抗旱性、重金属胁迫的生理抗性等方面亦有探讨^[16],但在养殖废水方面应用的研究较少,牛场废水对黄鸢尾生长的主要影响因素体现在营养量、盐胁迫、碱胁迫三个方面,黄鸢尾受到逆境胁迫时,细胞会主动形成一些渗透调节物质,以提高溶质浓度、降低水势,进而从外界吸水,从而保证植物的正常生长。黄鸢尾净化牛场废水主要通过以下途径:依靠自身的生长从废水中吸收大量的氮、磷等营养物质;庞大的根系形成特殊的生物膜结构,对污染物的吸附、过滤和转化起到重要作用;光合作用产生氧气向水中扩散,植物周围形成含氧量高的区域,根区以外贫氧,为微生物提供合适的好氧、厌氧环境,完成硝化、反硝化作用,达到去除污染物的效果^[17]。本研究旨在为黄鸢尾处理牛场养殖废水污染物的研究提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

挺水植物黄鸢尾(黄菖蒲),水冲粪式规模化奶牛

场粪污废水,水质指标见表1。

表1 奶牛场粪污废水水质(mg·L⁻¹)
Table 1 Dairy farms fecal wastewater quality(mg·L⁻¹)

COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP
21 252	2 298.39	1 699.35	332.43

1.2 试验设计

该研究在天津市的农业农村部环境保护科研监测所玻璃温室进行,试验废水取自天津市某规模化奶牛养殖场。以黄鸢尾为试验对象,自来水育苗,长到30~40 cm高进行移栽,将其固定在四孔(一个孔约放1~2株)泡沫板上并置于水培箱(20 L左右)上,水培箱中装有一定量的清水。以清水水培的黄鸢尾作空白对照组CK,另设6组试验组T1~T6,每组设3个平行。在试验组中,每个试验组的水培箱清水与牛场废水比分别为40:1(T1)、20:1(T2)、15:1(T3)、10:1(T4)、8:1(T5)、5:1(T6),牛场废水取自奶牛场粪污收集区,经过7 d的厌氧发酵,混合均匀后,取适量废水测定其COD、NH₄⁺-N、TP和TN的含量,移栽黄鸢尾一周后再次测定水中COD、NH₄⁺-N、TP和TN的含量,分别每隔一周取黄鸢尾的茎叶,去泥后测其生物量,试验周期为一个月。连续观察黄鸢尾生长情况(茎叶及根部生长情况),并分别研究废水中COD、NH₄⁺-N、TP和TN含量与黄鸢尾的生长速率(cm·d⁻¹,测定株高,计算出单位时间株高增幅)、生物量变化率的相互影响关系,以确定黄鸢尾对牛场废水的耐受值。试验期间用蒸馏水每隔2 d补充蒸发水量,以保持培养用水体积不变。去除率计算方法见公式(1):

去除率=
$$\frac{\text{原水浓度}-10\text{ d后水样浓度}}{\text{原水浓度}}\times 100\% \quad (1)$$

1.3 测定项目与方法

COD测定采用微波消解滴定法^[18],NH₄⁺-N测定采用纳氏试剂比色法^[19],TN测定采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法^[20],TP测定采用钼酸铵分光光度法^[21],pH值测定用pH计,盐度测定用电导率仪,MPN多管发酵法测定氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌,特定生长率测定采用测鲜质量法。

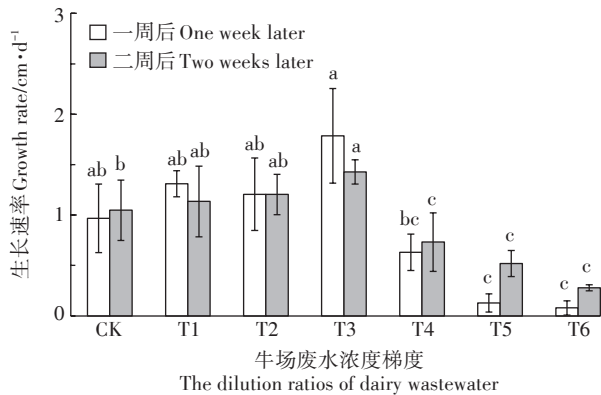
1.4 数据处理

采用Microsoft Excel、Origin软件对数据进行处理和绘图,并用SPSS 20.0统计软件对数据进行统计分析,Duncan法对数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 废水浓度对黄鸢尾生长速率的影响

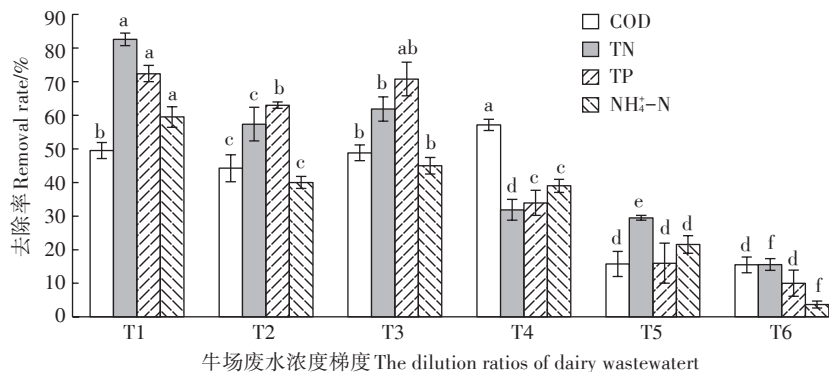
从试验开始到结束,黄鸢尾的生物量持续增加。由图1可以看出,T3处理组黄鸢尾的生长速率高于CK、T1、T2、T4、T5、T6处理组,且T3与T4、T5、T6差异均达到了5%的显著水平。从图中可以明显看出T1、T2浓度与CK相比对黄鸢尾生长速率影响不大,第一周生长速率分别提高了35.19%、24.36%,第二周生长速率分别提高了6.45%、11.65%,T3对黄鸢尾生长速率起到了很大的促进作用,第一周和第二周生长率分别提高了84.31%、28.26%,说明此浓度适合黄鸢尾的生长,T4、T5、T6组黄鸢尾的第一周和第二周生长速度相对于空白对照分别降低了34.88%、86.89%、



同一时间不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
Different lowercase letters at the same time indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图1 不同浓度牛场废水与黄鸢尾生长速率的关系

Figure 1 Relationship between different dilution ratios dairy wastewater and growth rate of iris



同种指标不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)
Different lowercase letters for the same index indicate significant differences among treatments ($P<0.05$)

图2 不同浓度牛场废水与水中污染物去除率的关系

Figure 2 Relationship between different dilution ratios of dairy wastewater and removal rate of pollutants in water

91.85%和23.44%、39.17%、57.12%,当浓度高于T3组时黄鸢尾的生长速率低于CK,黄鸢尾的生长受到了抑制。从图中可以看出牛场废水浓度在低于T3组时黄鸢尾生长速率得到促进,T3处理组COD、TN、TP和NH₄⁺-N浓度分别为1250.7、150.4、36.5、100.2 mg·L⁻¹,当废水水质指标控制在此浓度左右时为黄鸢尾的最佳生长浓度,当水质指标高于此浓度时,黄鸢尾的生长受到抑制。

2.2 废水浓度对黄鸢尾净化能力的影响

牛场废水浓度与黄鸢尾对水中污染物去除率关系如图2所示,此图表示的是用6个不同浓度的牛场废水培养黄鸢尾,各个梯度水中污染物去除率的变化。一周之后,黄鸢尾对COD、NH₄⁺-N、TN和TP的去除率最高达到57.1%、59.49%、82.59%和72.39%。从图中可以明显地看出T1、T2、T3组黄鸢尾对水中的COD、TN、TP和NH₄⁺-N去除率比较高,证明其生长状况比较好,能达到预期的处理效果,其中对TP、TN的去除率比其他两个指标高,黄鸢尾对TP、TN的去除效果更为明显。当废水浓度继续增加去除率明显下降,证明黄鸢尾的生长速率降低,当废水浓度超过T3试验组,黄鸢尾对牛场废水的净化能力被抑制。

2.3 废水浓度与黄鸢尾生长速率相关性分析

当废水浓度较高时,黄鸢尾的生长速率降低,生长被抑制,表2可以表明牛场废水中TN、NH₄⁺-N的浓度与黄鸢尾生长速率存在显著负相关关系($P<0.05$);从表3可以看出黄鸢尾生长速率与TN和NH₄⁺-N的去除率存在显著正相关关系,而与TP的去除率存在极显著正相关关系,黄鸢尾生长速率越高,对COD、TN、NH₄⁺-N和TP的去除率也越高。植物去除污染物的能力与生物生长量有明显的正相关。研究表明,生产量

表2 指标浓度与生长速率的相关性

Table 2 Correlation between concentration of pollution index and growth rate of iris

指标浓度 Index concentration	生长速率 Growth rate	COD	TN	NH ₄ -N	TP
COD	-0.752	1			
TN	-0.776*	0.979**	1		
NH ₄ -N	-0.789*	0.957**	0.991**	1	
TP	-0.679	0.945**	0.958**	0.936**	1

注:“**”和“*”分别表示极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)相关。下同。

Note:“**” and “*” indicate extremely significant($P<0.01$) and significant($P<0.05$) correlation, respectively. The same below.

表3 指标去除率与生长速率的相关性

Table 3 Correlation between removal rate of pollution index and growth rate of iris

指标去除率 Index removal rate	生长速率 Growth rate	COD	TN	NH ₄ -N	TP
COD	0.734	1			
TN	0.867*	0.636	1		
NH ₄ -N	0.842*	0.847*	0.916*	1	
TP	0.967**	0.758	0.948**	0.900*	1

年产率表征的是植物生物量的净增长速率,也是植物生长活跃度和生命旺盛度的一种体现,更活跃的植物生长能够有效改善根区微生物的生境,提高微生物的数量和活度,进而达到更好的污水处理效果。

2.4 不同浓度废水中细菌数量

氨化作用是异养细菌将蛋白质水解为氨基酸,进而脱氨基产生氨的过程。硝化作用是指氨经过微生物的作用氧化成亚硝酸和硝酸的过程。第一阶段由亚硝酸菌氧化氨为亚硝酸;第二阶段由硝酸菌氧化亚硝酸为硝酸。在氮污染情况下,氮循环菌中的氨化菌数量显著高于其他氮循环菌多个数量级。由图3可知,浮游态亚硝化菌和反硝化菌的数量随水体氮污染程度的增加而升高,T3组反硝化细菌数量明显高于其他组,较好地完成反硝化脱氮,从而达到对污染物较高的去除率,T6组氨化细菌、亚硝化细菌数量显著高于其他组,特别是亚硝化细菌远远高于其他处理

组,相关研究表明,微生物数量或生物量随水环境中营养程度的递增而增加,水中含有大量的铵盐、硝酸盐和亚硝酸盐,说明水体已经被氮严重污染,过高浓度的氨氮胁迫会造成植物氮代谢的紊乱,抑制叶绿素的合成,减弱光合作用,影响能量供应,进而影响植物的正常生长。

2.5 不同浓度废水含盐量

由表4可以看出不同梯度牛场废水的含盐量情况,平均最高不超过 $1084\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,已有研究表明盐度对污水中污染物的净化效率有显著影响,随着废水中污染物浓度及盐度的增加,植物对氨氮和正磷酸盐的去除效果明显减弱。石静^[22]研究表明,盐度对黄鸢尾氨氮、磷的去除率有显著影响,低盐度(0.14%)处理组黄鸢尾对氨氮的去除率达到95.4%,磷的去除率达到89.8%,所以低盐度对黄鸢尾生长吸收废水中的氮磷影响不显著。试验牛场废水盐度低于0.14%,所以试验牛场废水盐度对黄鸢尾生长影响不明显。

2.6 养殖优势区典型养殖场粪污选择

对比国内几大奶牛养殖优势区域粪便样品考察结果(表5)^[23],国内代表性奶牛养殖场粪便中氮磷含量比范围为1.80~4.51,张帅等^[24]调研的牛场中粪污废水总氮、总磷含量平均值分别为 $540\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $53.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,质量分数比为10:1。本试验中废水由粪便与清水经过不同比例稀释,经过7日厌氧发酵获得,稀释发酵后总氮总磷比范围为2.74~6.91,最

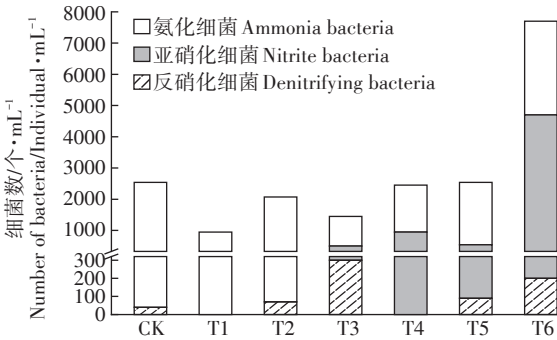


图3 不同牛场废水浓度梯度与细菌数的关系

Figure 3 Relationship between different dilution ratios of dairy wastewater and the number of bacteria

表4 不同浓度牛场废水含盐量($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 4 Salt content of different dilution ratios of dairy wastewater($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

T1	T2	T3	T4	T5	T6
197.5±0.90f	382.3±0.13e	484.4±1.63d	655.2±1.31c	766.1±1.95b	1 084.2±6.85a

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments($P<0.05$).

表5 不同地区养殖场粪便氮磷含量^[23]Table 5 Nitrogen and phosphorus content of farms fecal in different regions^[23]

地区 Districts	粪氮含量 Nitrogen content/ mg·g ⁻¹	粪磷含量 Phosphorus content/ mg·g ⁻¹	氮磷比 Nitrogen to phosphorus ratio
天津1	4.65~5.47	1.60~1.82	2.74~3.01
天津2	4.33~5.12	1.05~1.45	3.30~4.41
天津3	3.86~6.26	1.18~2.05	2.94~3.73
山东1	3.81~4.67	1.00~1.61	2.37~4.51
山东2	2.85~4.48	1.25~1.86	2.24~3.01
内蒙古1	4.09~5.46	1.18~1.63	3.16~3.68
内蒙古2	3.18~4.78	1.19~1.58	2.15~3.69
河北	3.67~4.26	1.05~1.63	2.49~3.50
辽宁	3.28~4.01	1.26~2.06	1.80~2.61
黑龙江	3.37~4.13	1.32~1.82	2.27~2.71

适宜黄鸢尾生长废水浓度 T3 试验组总氮总磷比为 4.12, 在国内代表性养殖场的粪便氮磷含量比范围内, 因此所选样品具有其普遍代表性。

3 讨论

植物净化污水的机理主要是三个方面: ①植物的吸收作用, 植物的生长需要从水体中吸收大量的氮、磷、钾等营养物质合成自身结构的组成物质, 如蛋白质和核酸等, 水体环境的污染物水平、植物个体的生长速度是水生植物吸收水体中氮磷速度的直接影响因素; ②物理化学作用, 水生植物庞大的根系能形成特殊的生物膜结构, 对污染物的吸附、吸收、过滤和转化有相当重要的作用; ③植物与微生物协调降解作用, 微生物对水体中污染物的降解也起着重要作用, 水生植物群落的存在, 为微生物和微型动物提供了附着场所和栖息地, 它们各个部位光合作用产生的氧气向水中扩散, 在植物周围形成含氧量高的区域, 而根区以外的贫氧区则为厌氧微生物提供了生存环境, 从而不断进行着硝化、反硝化反应, 达到降解有机质和其他污染物的效果, 两者缺一不可^[25-26]。黄鸢尾主要从以上三个方面减少水中污染物, 达到净化水质的作用。

研究表明, 黄鸢尾作为湿地处理养殖废水中重要的水生植物, 在湿地系统中, 水力负荷、水力停留时间、水深是影响人工湿地运行的三大要素^[27-28], 所以试验控制黄鸢尾处理废水的体积、水深不变, 观察同一时间段黄鸢尾的生长速率随废水浓度的变化, 开始生长速率随着废水浓度的增加而增大, 到一个峰值后

生长速率会随着废水浓度增加而减小, 最终低于空白组, 说明生长速率受到了抑制, 与马牧源等^[29]研究结果相同。本试验组的转折点出现在 T3~T4 试验组, 从 T4 组开始, 黄鸢尾的生长速率以及对牛场废水污染物的去除率出现了下降趋势, 说明黄鸢尾已经开始表现出不适应废水浓度的趋势, 牛场废水影响黄鸢尾生长主要是营养含量、盐度和 pH 三个方面, 试验牛场废水 pH 在 6.92~7.34, 盐度低于 0.1%, 不会抑制黄鸢尾的生长, 当废水浓度过高, 水中氨氮、磷酸盐浓度高出黄鸢尾适宜范围, 黄鸢尾的生长受到抑制。原因是细胞膜是感受胁迫最敏感的部分。膜系统被认为是植物逆境下受伤害的最初和关键部位。逆境胁迫是造成生物体内活性氧过量积累并导致细胞膜损伤的重要因素^[30]。而黄鸢尾去除污水中各种形态氮是物理、化学及生物共同作用的结果, 主要有挥发、氨化、硝化、反硝化、吸收和沉降等途径。物理作用主要是沉降与挥发, 固体物质通过重力作用沉淀, 对氮的去除作用较小, pH 大于 8.0 时, 氨容易挥发; 化学作用主要是吸附, 氨氮吸附通常迅速且可逆, 但并非植物修复氮去除的长期途径; 生物作用是黄鸢尾自身的吸收以及微生物作用, 微生物通过氨化和硝化反硝化去除氮的效果显著, 无机氮可直接被植物吸收, 摄取的氮量较显著^[31]。

黄鸢尾最佳适应条件为 T3 试验组浓度, 生长速率以及对牛场废水污染物的去除率都达到峰值, 所以 T3 试验组废水浓度为黄鸢尾最佳适宜浓度。T1 处理组表现出很高的去除率, 这种现象与废水浓度有关, 黄鸢尾虽然表现出较高的去除作用, 但是并没有体现很好的生长, 生长速率与空白组相当, 因为 T1 处理组各个指标都很低, 当黄鸢尾处理少量污染物后, 其中一部分是由于黄鸢尾根部吸附了污染物, 从而表现了很高的去除率。

生长在人工湿地相似条件下的试验植物, 其生物量差异显著, 这是植物内在的生长特性, 也表现了物种对这种环境的适应能力。石雷等^[32]研究显示生物量与水体氮磷去除率的相关性良好, 因而可以直接通过生物量来评价它们对氮磷的去除作用。黄鸢尾在 T3 组表现出较好的生长效果, 同时 T3 组废水指标有了明显的下降, 说明黄鸢尾对于养殖废水耐受性的研究有着一定的指导意义。黄鸢尾生长速率在同一稀释倍数废水中, 第一周与第二周也存在着差异, 在废水浓度抑制黄鸢尾生长速率的处理组, 第二周相对于第一周生长率有少许增高, 这可能是因为经过一周的

时间其对高浓度废水有一定的适应性。黄鸢尾的生长速率与废水中污染物的去除率存在显著正相关关系,也可以理解成废水污染物去除率的表现形式是黄鸢尾的生长速率,而生长速率与停留时间长短并不成正比关系,废水污染物去除率与停留时间长短也不成正比关系,这一结论与汪宴廷等^[33]研究结果一致,这可能与植物的生物量积累有关;试验显示第一周黄鸢尾对污染物的去除率高于第二周,这也与植物根系对水中污染物的吸附作用有关系。

植物对富营养化水体的三种控制途径中,微生物的作用贡献最大,马牧源等^[29]指出黄花鸢尾根际处氮循环菌数量最为密集,随着取样点与浮板距离的增加,氮循环菌数量呈下降趋势,说明黄花鸢尾提高了水体中硝化反硝化作用强度,更利于水体中氮的去除。这解释了为什么试验中黄鸢尾对总氮的去除率最高。T6组水体中氮循环菌中氨化细菌、亚硝化细菌明显高于反硝化细菌时,造成氨氮盐、硝酸盐和亚硝酸盐的积累,影响黄鸢尾的生长,与T6组试验测得黄鸢尾生长速率结果相吻合。

4 结论

(1)在牛场养殖废水肥用时,低浓度养殖废水中的氮、磷养分能够为黄鸢尾的生长提供营养,随着养分浓度的增加会促进其生长速率的提升,但过高浓度养殖废水则会抑制植株的生长和生物量积累。

(2)通过两周种植试验对比发现,T3~T4处理是抑制的关键转折点,过高的废水浓度会对黄鸢尾生长形成抑制,但第二周的试验监测发现,植物本身的耐受适应性开始表现,T4、T5和T6三个高浓度处理组的生长速率均有所提升,黄鸢尾通过自身的耐受调节机制,会进一步增加高浓度胁迫下其对污染物的消纳水平。

(3)抑制黄鸢尾生长过程的主要因素是氮浓度,控制氮的浓度可以保证黄鸢尾正常生长。

(4)黄鸢尾对污染物的去除过程中,TN、NH₄⁺-N和TP是主要影响因素,而TP是影响黄鸢尾生长速率的关键限制性因素,对粪污中TP含量的调控可影响到黄鸢尾的生长速率。

参考文献:

[1] 卢世军. 湟中规模养殖业粪污资源化利用现状调查报告[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2018, 48(1):45-47.
LU Shi-jun. Investigation report on the status quo of the utilization of manure pollution in the scale breeding industry in Huangzhong[J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 2018, 48(1):

45-47.
[2] 黎年举, 杨礼. 规模化畜禽养殖场污染治理现状与对策[J]. 当代畜禽养殖业, 2014(12):52.
LI Nian-ju, YANG Li. Present situation and countermeasures of pollution control in large-scale livestock and poultry breeding farm[J]. *Husbandry Animal Modern*, 2014(12):52.
[3] Nasr M, Elreedy A, Abdel-Kader A, et al. Environmental consideration of dairy wastewater treatment using hybrid sequencing batch reactor[J]. *Sustainable Environment Research*, 2014, 24(6):449-456.
[4] Posavac S, Dragičević T L, Hren M Z. The improvement of dairy wastewater treatment efficiency by the addition of bioactivator[J]. *Mljekarstvo*, 2010, 60(3):355-363.
[5] Azadi N A, Fallahzadeh R A, Sadeghi S. Dairy wastewater treatment plant in removal of organic pollution: A case study in Sanandaj, Iran[J]. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 2015, 2(2):73-77.
[6] Li H W, Liu S X, Chen X P, et al. Reconstruction project of dairy wastewater treatment[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2015, 37(6):385-398.
[7] Schneider I D, Topalova Y I. Effect of bioaugmentation on anaerobic wastewater treatment in the dairy industry[J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(9):4389-4397.
[8] 王志国, 蓝梅. 人工湿地系统污水净化机理及其影响因素研究[J]. 人民珠江, 2016, 37(5):90-92.
WANG Zhi-guo, LAN Mei. Study on mechanism and influence factors of wastewater purification in constructed wetland system[J]. *Pearl River*, 2016, 37(5):90-92.
[9] 覃飞妮. 人工湿地在玉林市苏烟水库富营养化水质改善效果研究[J]. 人民珠江, 2014, 35(3):101-104.
QIN Fei-ni. Study on improving effect of eutrophication water quality of constructed wetland in Suyan Reservoir of Yulin City[J]. *Pearl River*, 2014, 35(3):101-104.
[10] 刘冬, 张慧泽, 徐梦佳. 我国人工湿地污水处理系统的现状探析及展望[J]. 环境保护, 2017, 45(4):25-28.
LIU Dong, ZHANG Hui-ze, XU Meng-jia. Analysis and prospect of the status quo of constructed wetland sewage treatment system in China[J]. *Environmental Protection*, 2017, 45(4):25-28.
[11] Rédey Á, Somogyi V, Ányos J, et al. Simulation of the influence of industrial wastewater on a municipal sewage treatment plant: A case study[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2011, 18(2):192-198.
[12] Caroline W M, Benedict M M, Steve O O. Simulation of constructed wetland treatment in wastewater polishing using PREWet model[J]. *Desalination & Water Treatment*, 2012, 41(1/2/3):356-363.
[13] Green M B, Upton J. Constructed reed beds: A cost-effective way to polish wastewater effluents for small communities[J]. *Water Environment Research*, 1994, 66(3):188-192.
[14] Vymazal J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 674(1):133-156.
[15] 凌祯. 浓度和水力负荷对人工湿地脱氮除磷效果的影响研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2012.

- LING Zhen. Study on the effect of concentration and hydraulic load on the removal nitrogen and phosphorus from artificial wetlands[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [16] 付宝春, 薄伟, 康红梅. 干旱胁迫对13种优良鸢尾属植物的生理影响[J]. 山西农业科学, 2013, 41(9): 924-929.
- FU Bao-chun, BO Wei, KANG Hong-mei. Effects of drought stress on physiological parameters of 13 excellent iris[J]. *Shanxi Agricultural Science*, 2013, 41(9): 924-929.
- [17] Ong S A, Uchiyama K, Inadama D, et al. Treatment of azo-dye acid orange 7 containing wastewater using up-flow constructed wetland with and without supplementary aeration[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(23): 9049-9057.
- [18] 袁汉鸿, 胡艳平, 戚惠良. 重铬酸钾法测定水中COD问题的探讨[J]. 净水技术, 2005(4): 67-68.
- YUAN Han-hong, HU Yan-ping, QI Hui-liang. Some problems in determining COD in water with potassium dichromate method[J]. *Water Purification Technology*, 2005(4): 67-68.
- [19] 环境保护部. 水质氨氮的测定纳氏试剂光度法: HJ 535—2009[S]. 北京: 中国环境出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection. Determination of ammonia nitrogen in water by the method of reagent spectrophotometry: HJ 535—2009[S]. Beijing: China Environmental Publishing House, 2009.
- [20] 李艳蕾, 方鑫, 颜滴, 等. 水中总氮的测定方法改进研究[J]. 湖北工程学院学报, 2017, 37(3): 27-30.
- LI Yan-qiang, FANG Xin, YAN Di, et al. Improvement on determination method of total nitrogen in water[J]. *Journal of Hubei Institute of Technology*, 2017, 37(3): 27-30.
- [21] 董荣娟. 钼酸铵分光光度法测定水中总磷方法的改进[J]. 山东工业技术, 2014(24): 87.
- DONG Rong-juan. Ammonium molybdate spectrophotometric method for determination of total phosphorus in water[J]. *Shandong Industrial Technology*, 2014(24): 87.
- [22] 石静. 水体盐度对三种植物生长和氮磷去除能力的影响[D]. 天津: 南开大学, 2010.
- SHI Jing. The effect of salinity on the growth and the nitrogen and phosphorus removal efficiencies of three plants[D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [23] 渠清博. 规模化奶牛场泌乳牛粪便氮磷产生量预测模型研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- QU Qing-bo. Prediction of fecal nitrogen and phosphorus excretion for lactating dairy cows in large-scale dairy farms[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [24] 张帅, 陆鹏, 陈硕, 等. 京郊畜禽粪污氮磷含量特征及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 244-251.
- ZHANG Shuai, LU Peng, CHEN Shuo, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus content and analysis of its influencing factors in feces and wastewater of livestock farms in Beijing suburb[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(8): 244-251.
- [25] 龚娟, 王宇晖, 赵晓祥, 等. 人工湿地处理高氨氮废水中植物的耐受性[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(3): 534-538, 542.
- GONG Juan, WANG Yu-hui, ZHAO Xiao-xiang, et al. The tolerance of plants to high concentration of ammonia in wastewater by constructed wetland[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(3): 534-538, 542.
- [26] 张立辉. 大型水生植物在水污染治理中的应用探讨[J]. 现代农业科技, 2013(12): 194, 198.
- ZHANG Li-hui. The application of large aquatic plants in water pollution control[J]. *Modern Agricultural Environment*, 2013(12): 194, 198.
- [27] 王世和, 王薇, 俞燕. 水力条件对人工湿地处理效果的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003(3): 359-362.
- WANG Shi-he, WANG Wei, YU Yan. Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2003(3): 359-362.
- [28] 申欢, 孙亚军, 胡洪营, 等. 滞留型城市景观河道的污染治理[J]. 中国给水排水, 2006(20): 66-68.
- SHEN Huan, SUN Ya-jun, HU Hong-ying, et al. Pollution control of detention landscape urban river[J]. *China Water & Wastewater*, 2006(20): 66-68.
- [29] 马牧源, 王兰, 孙红文. 黄花鸢尾对富营养化水体净化的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 448-452.
- MA Mu-yuan, WANG Lan, SUN Hong-wen. Purification of eutrophicated water by *Iris pseudoacorus*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 448-452.
- [30] 徐景涛. 典型湿地植物对氮磷、有机污染物的耐受性及其机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- XU Jing-tao. The tolerance and mechanism of typical wetland plants to ammonia and organic pollutant[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [31] 张芳. 不同水生植物对富营养化水体净化效果和机理的比较[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- ZHANG Fang. Comparison of efficiency and mechanisms in eutrophic water treatment using different types of aquatic plants[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2016.
- [32] 石雷, 杨璇. 人工湿地植物量及其对净化效果影响的研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 28-33.
- SHI Lei, YANG Xuan. Study on plant quantity of constructed wetland and its effect on purification effect[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2010, 19(1): 28-33.
- [33] 汪宴廷, 赵晶晶, 颜珊, 等. 三种浮萍对养殖废水中氮、磷的净化效果研究[J]. 四川畜牧兽医, 2014, 41(12): 24-25, 27.
- WANG Yan-ting, ZHAO Jing-jing, YAN Shan, et al. Study the purification effect of three kinds of duckweed on nitrogen and phosphorus of wastewater from breed farm[J]. *Sichuan Animal Husbandry and Veterinarian*, 2014, 41(12): 24-25, 27.