

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.03.014

大藻对不同质量浓度畜禽废水的净化作用及生物学效应

陈金发^{1,2}, 杨平², 聂琦珊¹, 胡金朝¹, 秦玲¹, 张丹¹, 胡成伦¹

(1. 西昌学院 农业科学学院, 四川 西昌 615000; 2. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 实验以自然湿地中采集的大藻为研究对象, 在室内模拟条件下首次研究了大藻在低质量浓度至高质量浓度畜禽废水条件下的净化作用及植物生理变化。并探讨了湿地植物大藻对废水的净化作用与生物学效应之间的相关性。研究表明: 大藻对畜禽废水的 COD_{Cr}、氨氮、总磷最高去除率分别达到 82.33%、69.21% 和 45.88%。大藻在不同质量浓度畜禽废水胁迫 8 d 后, 大藻抗氧化系统酶活性总体呈下降趋势, 畜禽废水质量浓度越高, 植物损伤情况越明显。大藻叶片中起主要保护作用的酶是 POD, 变化幅度最明显, 对畜禽废水胁迫的敏感性、应激性最强。大藻对畜禽废水的净化作用与大藻的生物学效应相关性较强。

关键词: 大藻; 畜禽废水; 胁迫; 抗氧化系统酶

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2014)03-087-08

Purification and biological effect of *Pistia stratiotes* under different concentrations of livestock wastewater

CHEN Jinfa^{1,2}, YANG Ping², NIE Qishan¹, HU Jinzhao¹,
QIN Ling¹, ZHANG Dan¹, HU Chenglun¹

(1. Department of Agricultural Science, Xichang College, Xichang, Sichuan 615000, China;

2. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The clean and biological effect of *Pistia stratiotes* under different concentrations of livestock wastewater is first studied in indoor simulated conditions, which is collected from nature wetland. The correlation between clean and biological effect is also studied. The results show that the highest removal rates of COD_{Cr}, ammonia nitrogen, total phosphorus reach 82.33%, 69.21% and 45.88% respectively. After 8 days of livestock wastewater stress, the enzyme activity of antioxidant system of *Pistia stratiotes* shows overall downtrend. The main protect enzyme in *Pistia stratiotes* is POD, whose variation range is the most obvious, and its sensitivity and irritability is the strongest. The correlation between removal effect and biological effect is substantially strong.

Key words: *Pistia stratiotes*; livestock wastewater; eutrophication; antioxidant enzyme system

近年随着畜禽养殖业的快速发展, 畜禽养殖业的自身发展与环境保护的矛盾日益突出。未经处理的畜禽废水含有大量的污染物, 污染负荷很高。畜禽污水排入江河湖泊中, 造成水体 N、P 量升高, 导

致水体严重富营养化。污水中有毒、有害成分一旦进入地下水中, 可造成持久性的有机污染, 极难治理、恢复^[1]。国内畜禽养殖业废弃物的配套处理设施少, 处理水平低下。近年来出现了许多废水处理

收稿日期: 2013-10-20

基金项目: 四川省环境保护科技计划项目(2011HB005)

作者简介: 陈金发(1976-), 男, 副教授, 主要从事污染控制与循环经济方面的研究, (E-mail) chenjinfa11@sohu.com。

88

http://qks.cqu.edu.cn

重庆大学学报

第 37 卷

方法,而人工湿地技术是一种最为经济和具有广阔前景的方法。

大藻(*Pistia stratiotes* L.),又名水浮莲等,隶属天南星科(Araceae)大藻属(*Pistia*),多年生漂浮性的水生草本植物,植株根系发达,生长繁殖迅速,可以吸收水体中大量营养物质对富营养化水体和污水处理具有重要作用,是农业环保的头号天敌,被列入中国 100 种最危险入侵物种名单中^[2]。目前大藻已严重侵略中国滇池、草海、万峰湖等重要淡水湖泊,是一种繁殖能力和危害性并不亚于水葫芦的入侵物种也是有用的用于环境监测的生物标志物^[3]。本项目拟在模拟自然条件,以漂浮植物大藻为试验材料,分析和比较不同质量浓度畜禽废水胁迫下,大藻对废水的 COD_{Cr}、NH₃-N、TP 的削减去除能力,及大藻性状、抗氧化酶系统活性等生理特性指标的影响。旨在了解植物在畜禽废水富营养胁迫下的作用机理,同时为水生湿地植物净化畜禽废水提供理论依据,探讨将其用于人工湿地系统的可行性。目前国内外已有研究采用芦苇、黄菖蒲、美人蕉、香蒲和灯芯草等挺水植物,其他漂浮植物凤眼莲和槐属等^[4]作为人工湿地的植物系统,在一定周期后收割起来以回收氮磷,避免二次污染。但是收割后湿地植物随即被淘汰,伴随着一定的成本,而采用入侵植物,通过胁迫既能抑制大藻的生长活力,甚至死亡,又能使其吸收降解畜禽废水中过多的营养物质。将入侵植物的防治与开发相结合,把入侵植物作为一种资源,可实现“化害为利,变害为宝”的目的。

1 材料与方法

1.1 供试水质

模拟实验水样采自凉山州某奶牛场排污废水,用蒸馏水稀释至所需质量浓度。试验过程中室内空气变化为 9~21 °C,水温变化范围 16.5~19 °C。

1.2 供试植物

试验所用大藻采自天然湿地,采集时间为 2012 年 11 月中旬,植物移植前先用自来水反复清洗根部,之后用去离子水进行漂洗。

1.3 器材及方法

可见光分光光度计(722N),电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9070 A)、电阻炉(kxx-A-10 A)、电子天平(ESJ120-4),冷冻式高速离心机等。

水体浊度、色度、PH、COD_{Cr}、氨氮、总磷等水质指标,及植物指标如 SOD、CAT、POD 均采用对应国标法测定。

1.4 试验方法

试验在自然光照条件下进行室内静态试验,先在清水中培养驯化一周,选择生长情况良好,根系发达、健康无损且大小相近的成年水白菜,均匀移植于试验容器中,水量 30 L/盆,生物量 600~700 g/盆,以废水 COD_{Cr} 质量浓度为标准,设 COD_{Cr} 分别为 500、1 000、1 500、2 000 mg/L 4 个处理组。每组设定一个平行,以正常生长下的大藻为对照组(清水培养),每 2 d 测定一次废水及植物指标,每天观察植株性状变化。设定培养每 8 d 为一个试验周期,试验重复次。植物样品经磷酸缓冲液浸润研磨制取酶液测定植物抗氧化酶系统各项指标 SOD、CAT、POD。

2 结果与分析

2.1 对不同营养程度实验水体净化处理效果

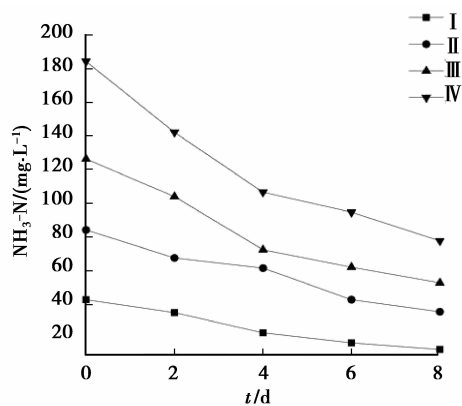
大藻对不同质量浓度畜禽废水中的 COD_{Cr}、NH₃-N、TP 的去除效果见图 1~3。

(a)大藻处理组

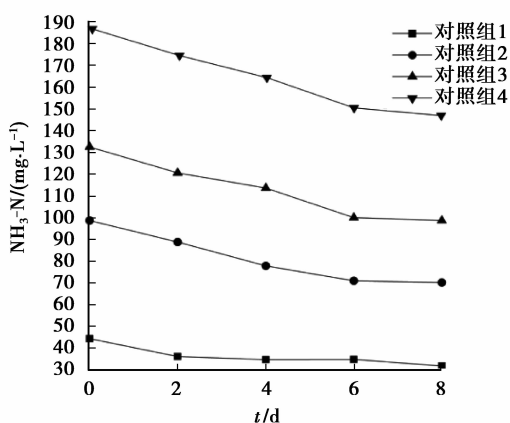
(b)无植物对照组

图 1 大藻处理组与无植物对照组对不同质量浓度畜禽废水中 COD_{Cr} 的去除效果在 4 个处理组中,水体中的 COD_{Cr} 从 498~1 933 mg/L,经 8 d 净化处理,降至 88~1 092 mg/L,大藻对不同质量浓度畜禽废水的 COD_{Cr} 去除率为 43.51%~82.33%。

其中低质量浓度处理组 I 在整个试验周期 COD_{Cr} 从 498 mg/L 降至 88 mg/L, 最终去除率达 82.33%, 去除效果最好; 最高质量浓度组 IV 中 COD_{Cr} 质量浓度从 1 933 mg/L 削减到 1 092 mg/L, 最终去除率为最低的 43.5%。4 种质量浓度中, 大藻在低质量浓度畜禽废水中去除 COD_{Cr} 效果最好且呈现处理时间越长, 去除速率越高的趋势。其余 II、III、IV 组植株在处理 6 d 后均开始萎缩。对照无植物处理组, 通过畜禽废水的水体自净能力, 4 种质量浓度的畜禽废水对 COD_{Cr} 的自净结果分别为 28.20%~34.90%, 处理速率变化小, 效果较稳定受质量浓度的差异影响小。无植物处理组是大藻处理组的去除率的 42.39%、44.84%、38.81%、68.95%。在整个周期中, 不同质量浓度畜禽废水对 COD_{Cr} 的自净处理效果在 30% 上下, 在高质量浓度的畜禽废水中, 由于大藻受畜禽废水的胁迫影响最为严重, 植物对有机物的吸收转移作用减弱, 水样自身的净化效果与大藻的处理效果差异不大。

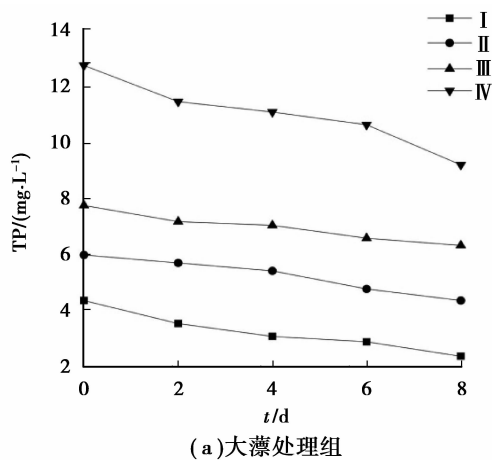


(a)大藻处理组

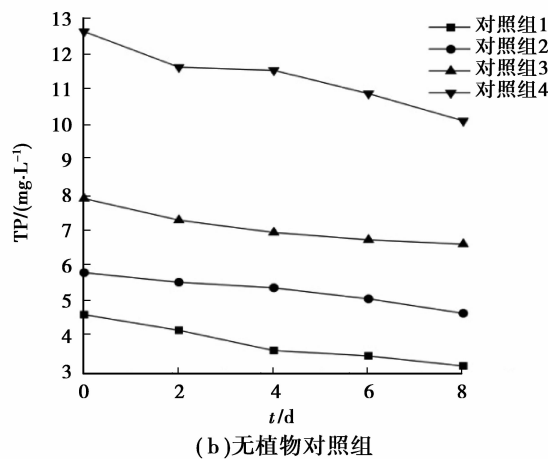


(b)无植物对照组

图2 大藻处理组与无植物对照组对不同质量浓度畜禽废水中 NH₃-N 的去除效果



(a)大藻处理组



(b)无植物对照组

图3 大藻处理组与无植物对照组对不同质量浓度畜禽废水中 TP 的去除效果

大藻对不同质量浓度的畜禽废水中的 NH₃-N 均有较好的去除效果(见图 2), 最终去除率在 57.81%~69.21% 之间。其中低质量浓度处理组 I 的 8 d 后的去除率达到 4 组中最好的 69.21%, 而最高质量浓度处理组 IV 对 NH₃-N 的去除效果最低为 57.81%。大藻对于磷有一定吸收去除效果, 但不显著(见图 3)。由最终去除率看, 4 个处理组的最终去除率分别为 45.88%、27.30%、18.47%、27.87%。期间去除率保持小幅度的升降, 说明大藻在水体中磷素的吸收和净化作用有限, 超过质量浓度限定后大藻对水体中磷素的净化处理效果受畜禽废水质量浓度的影响相对较小。

对照无植物处理组无植物处理组对氨氮和总磷的自净效果分别为 19.44%~28.77%、16.20%~31.05%。其中, 不同质量浓度畜禽废水的自净能力是大藻去除率的 40.46%、49.77%、43.71%、33.60%, 从高质量浓度对畜禽废水的处理效果看, 有无植株对畜禽废水的处理效果影响较大, 这是由于污水中的氮是以有机氮和无机氮两种形式存在

的,分别通过微生物的硝化、反硝化作用去除,植物做营养吸收用以合成自身物质,最后通过植物的收割将其从废水中去除^[5]。在模拟人工湿地系统中,氮的去除作用主要在于植物吸收。而在对总磷的监测结果中发现无植物系统的总磷去除效果是大藻系统的 67.68%、70.33%、87.71%、71.55%,两种系统处理效果的差异较小,对中等质量浓度以上畜禽废水的总磷的去除效果都相对较低,这是由于在模拟人工湿地对磷的去除作用相对较小,在处理畜禽废水的湿地系统中,基质对磷的吸附、沉淀作用比植物对磷的吸收转移作用要有效得多。

大藻对水体 COD_{Cr} 的削减作用最为明显,氮氨次之,总磷较低,且在中低质量浓度畜禽废水中净化效果最为明显,且对植株生理活性损害较小。有无大藻的处理组有明显的效果差异,这是因为对照无植物处理组水样中的微生物分解和沉淀、蒸发为其主要自净作用,而在植物处理组中 4 种有大藻的水体中有机物、氮、磷质量浓度降低的原因,一方面水生植物自身组织可直接吸收水体中氮磷,另一方面水生植物的存在可能加快了水体中氮磷元素本身降解沉淀固结去除挥发等一系列的反应,且起到为根区的好氧微生物输送氧气的作用可能加速了微生物的作用,因此大藻的存在明显提高了废水中污染物的去除率^[6-7]。

2.2 对大藻生理特性和抗氧化酶系统的影响

植物体内的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)等一系列抗氧化酶,能够在逆境胁迫过程中有效清除植物体内过量的活性氧,维持活性氧的代谢平衡和保护膜结构,协调抵御不良环境的胁迫^[8-10]。实验过程中大藻植物体内的 SOD、CAT 及 POD 的变化见图 4~6。

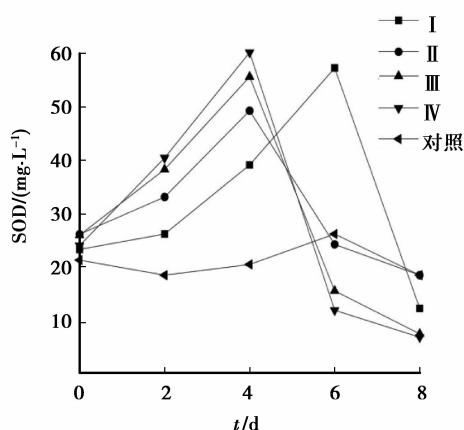


图 4 不同质量浓度胁迫下大藻的 SOD 活性变化

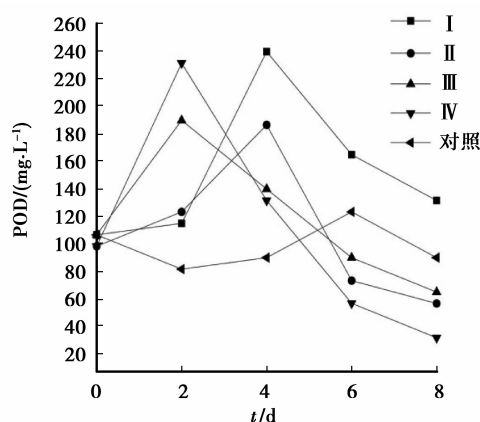


图 5 不同质量浓度畜禽废水胁迫下大藻 POD 的活性变化

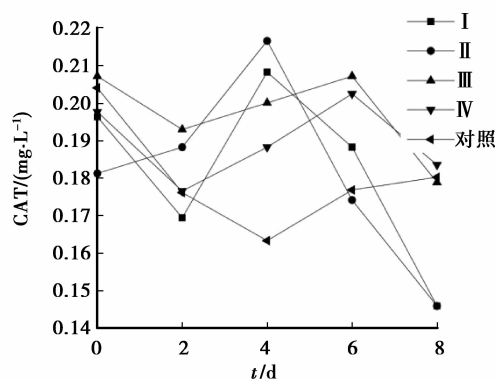


图 6 不同质量浓度畜禽废水胁迫下大藻的 CAT 活性变化

SOD 是清除氧自由基的重要抗氧化酶,其作用是清除超氧自由基 $O_2^{\cdot-}$,产生 H_2O_2 。不同质量浓度畜禽废水胁迫下,图 4 中大藻叶片中的 SOD 含量均呈先升高再降低的趋势,低质量浓度胁迫下,胁迫 6 d 时, SOD 含量增至最大为 $57.4655 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{min})$,为对照的 220.71%,中质量浓度、较高质量浓度、高质量浓度处理组,均在胁迫 4 d 时 SOD 含量增至最大,分别是对照的 243.56%、275.25%、298.03%,4 个处理组胁迫 8 d 时均降至最低,分别是对照的 65.55%、100%、39.08%、35.66%。这符合植物对胁迫反应的典型特征,即当胁迫发生后,植物会采取各种措施提高抗性以适应不良环境,但当胁迫发生超过植物忍受的极限时,其防御措施也就相应减弱乃至死亡。

POD、CAT 同是植物体内清除 H_2O_2 等活性氧的重要酶,植物体内低质量浓度的 H_2O_2 主要靠 POD 在氧化相应基质时被消化。高质量浓度的 H_2O_2 主要靠 CAT 清除,从而使 H_2O_2 控制在较低

水平,并与 SOD 等酶协同作用维持体内活性氧代谢平衡。所有处理组植物的 CAT 在 8 d 后均呈现出下降趋势。在四种质量浓度畜禽废水胁迫一周后,大藻叶片的 CAT 活性变化较不明显,表明大藻叶片中的 CAT 对畜禽废水胁迫敏感程度较低。大藻叶片的 POD 含量均呈先升高后降低再上升的趋势,变幅差异较大(见图 6),表明随着胁迫质量浓度、时间的增加,大藻叶片中的 CAT 活性酶的保护机制没发生作用,POD 酶应激反映剧烈,抗氧化系统平衡失调,低质量浓度 H₂O₂ 部分消除,高质量浓度 H₂O₂ 积累,植物活性氧化加剧,植物样品萎焉。

2.3 植物性状及生长状况

植物生存状况间接反映了植物的耐污力,这也是植物能够达到湿地备选植物标准的重要条件之一^[11]。在中、低质量浓度试验中,实验前期,大藻的生物量有明显增长,水培根系逐渐粗壮。随培养时间增加,处理 6 d 后出现叶片变薄、叶尖组织失水变干,根系变软、断裂、缩短等现象,而较高、高质量浓度畜禽废水处理组约处理 4~5 d 后即出现此现象,在试验一周后低质量浓度实验组生长正常,其余质量浓度实验组大藻叶片均呈现不同程度的老叶变黄、脱水萎焉、部分根系死亡脱落现象。结果见表 1、表 2。

表 1 试验期间各处理组植物生长状况综合评定

天数	处理 I			处理 II			处理 III			处理 IV		
	萎焉程度	茎叶生长状况	倒伏情况	萎焉程度	茎叶生长状况	倒伏情况	萎焉程度	茎叶生长状况	倒伏情况	萎焉程度	茎叶生长状况	倒伏情况
0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	b1	—	a1	b1	c1	a1	b1	c1
4	a1	b1	—	a1	b1	—	a1	b1	c1	a2	b1	c1
6	a1	b1	—	a1	b1	c1	a2	b1	c2	a2	b2	c2
8	a1	b1	—	a2	b2	c2	a2	b2	c2	a2	b2	c2

注:萎焉程度:一无萎焉,a1 轻微萎焉,a2 叶片多萎焉;茎叶生长情况:—植物正常,b1 上部叶片枯萎、干黄,b2 全株均有枯黄;倒伏情况:—无倒伏,c1 轻微倒伏,c2 枝叶部分倒伏。

表 2 不同质量浓度畜禽废水对大藻的生长特性影响

处理	鲜重/g		特定生长率 SGR(%/d)
	初始	结束	
I	718	693.8	-0.43
II	708	574.2	-2.62
III	724	435.5	-6.35
IV	721	357.1	-8.78
对照	705	787.4	1.38

注:特定生长率(SGR)=(lnW_t-lnW₀)/t×100%。式中:W_t为试验第 t 天时大藻重量,g;W₀为初始大藻重量,g。

根据试验期间观测结果,对每株植物的生长状况进行综合评定。根据由于每个指标在植物处理污水中的影响力不同,依次按照赋予影响值 Q 分别为 10,

10,5,5,每个指标又按照状况出现的严重程度分为 3 个等级 R_x:没有出现症状的为最好,即得到全部重要值分数,然后按照字母下标数字 1,2 呈 1/2,1/5 递减。最后所得总重要值即为综合评定结果 S,即 S=Q·R_x^[12]。按照上述方法分析计算,从植物生长力比较,总重要值 S 从大到小依次为:处理 I(115)>处理 II(97.5)>处理 III(80.5)>处理 IV(74.5)。据投放生物量和最终重量测定,计算植株特定生长率、分株速率,得出对照组、各处理组相互之间的初始投放量差异 0.43%~2.70%。而随处理时间增加,植物体萎焉缩水,特定生长率呈降低态,对照组能正常生长,而低质量浓度畜禽废水处理组的大藻影响较小,处理较高质量浓度组和高质量浓度组骤降。

2.4 与其他湿地植物在处理畜禽废水效果的比较

因已报道的研究大都以中低质量浓度的畜禽废水作为处理对象,故只将本研究中的中低质量浓度的畜禽废水的处理效果列表与其他湿地植物相比较(见表 3)。

表 3 利用植物或人工湿地净化畜禽废水的研究成果

植物系统	月份	处理时间	初始质量浓度/(mg·L ⁻¹)			去除率/%			参考文献
			COD _{Cr}	NH ₃ -N	TP	COD _{Cr}	NH ₃ -N	TP	
水薹菜		90 d	200	120	10	54.3	67.9	57.4	[13]
美人蕉浮床		31 d	496	421.5	73.56	60.60	62.36	38.4	[14]
橐吾		9 d	238.4	31.94	15	82.78	87.75	92.73	[15]
菖蒲水葱						96.94	88.53	94.49	
菖蒲+酸模		9 d	1002.31	36.47	0.6190	97.10	88.31	90.98	[16]
菖蒲+鸢尾						97.03	90.35	91.23	
水葫芦		25 d	560		17	87.6		58.2	[17]
			1 080		45.91	74.9		60.6	
水葫芦湿地						64.44	21.78	23.02	[18]
	4		250	94	18	4.00	4.26	16.67	
	5		175	95	18.5	14.29	5.26	24.32	
	6		155	125	23.5	9.68	5.60	31.91	
芦苇、姜花	7	30 d	170	45	25	10.59	35.56	44.00	[19]
	8		140	84	15	17.86	23.81	13.33	
	9		160	106	17	6.25	19.81	5.88	
	10		120	59	12.5	16.67	20.34	4.00	
大藻		8 d	498	42.74	4.368	82.33	69.21	45.88	本研究
			864	84.09	6.008	68.06	57.81	27.30	

由表 3 可知,大藻相对其他单一的湿地植物在较短时间内对低质量浓度畜禽废水中的 COD_{Cr} 去除率较高,氨氮的处理效果也可达到较好的程度。与组合湿地植物相比,畜禽废水的各污染指标去除率略低,特别是在 TP 的去除效果上。

3 结 论

1)大藻对畜禽废水中的有机物、氮有良好的去除效果,对磷的削减作用较弱。对 COD_{Cr} 的削减效果与畜禽废水初始质量浓度大致成负相关,最高达 82.33%;对 NH₃-N、TP 的去除率较稳定,当初始质量浓度 NH₃-N \geq 84.09 mg/L,TP \geq 6.01 mg/L,去除率分别稳定在 60%、30%左右。

2)至试验周期结束,低质量浓度、中等质量浓度、较高质量浓度组均能达到国家标准排放水平,而高质量浓度组中的 NH₃-N 含量也能达标。故大藻可以用于净化有机物、氮磷超标的水体,相较于其他

植物,它具有工艺简单、成本低廉易得、耐受力强、处理周期短并可持续利用等优点,为利用入侵植物处理受污染水体和土壤建立研究基础。

3)比较大藻系统和无植物系统,大藻对高质量浓度磷的富集效果较差,要达到更好的处理效果就要结合适宜的基质,由于大藻为漂浮植物,对基质的筛选主要考虑对污水中营养物质和有毒有害物质的吸附和沉积过滤效果。

4) 畜禽废水对大藻生理特性影响,通过对大藻叶片中 POD、SOD、CAT 的测定,说明大藻叶片中起主要保护作用的酶是 POD,变化幅度最明显,对畜禽废水胁迫的敏感性、应激性最强。不同质量浓度畜禽废水对大藻的生理特性影响相似,但胁迫强度不同,各生理指标在长时间连续胁迫下的变化幅度为高质量浓度畜禽废水 $>$ 较高质量浓度 $>$ 中质量浓度畜禽废水 $>$ 低质量浓度,说明质量浓度越高对芦苇的生理影响越强烈,见表 4。

表 4 不同质量浓度畜禽废水胁迫下大藻叶片中 3 种活性酶的变化幅度

	低质量浓度	中等质量浓度	较高质量浓度	高质量浓度
SOD	-49.25%~39.07%	-79.69%~40.60%	-101.06%~61.72%	-109.22%~83.29%
POD	-67.39%~97.13%	-96.54%~48.08%	-71.65%~100.01%	-110.01%~156.38%
CAT	-24.40%~30.17%	-27.85%~22.31%	-15.58%~10.95%	-10.77%~13.90%

4 讨论

对比已有的研究结果,周雄飞等^[20]对浮萍去除污染水体氮磷能力进行了研究,稀脉浮萍对 TN 去除率达到 81.5%,对 TP 去除率达到 78.2%。宋伟等^[21]的研究表明,水葫芦在 30 d 内对 TN 的去除率达 79%~90%,对 TP 的去除率在 50%左右。多数研究利用较长的水力停留时间,稀释控制进入植物系统的污水初始质量浓度,种植不同植物的湿地系统,配合填料基质的沉降、分解、过滤作用,能达到较好的处理效果。而本研究中大藻悬浮于 4 种质量浓度的畜禽废水中,排除基质处理的干扰,比较无植物组处理,4 种质量浓度的水体均表现出良好的净化效果,经 8 d 的净化大藻对畜禽废水的 COD_{Cr}、氨氮、总磷去除率分别达到 43.51%~82.33%、57.81%~69.21% 和 18.47%~45.88%。表明可以将大藻用于净化有机物、氮磷超标的水体,虽然对水体中磷的削减作用欠佳,但是采用生物塘或人工生态系统方式,进行一定的植物组合,充分利用地形,促使塘中的水生植物通过光合作用吸收氮、磷用于自身的合成和增殖,提高塘中有机物和氮磷的去除功能。相较于其他植物,它具有成本低廉易得、耐受力强、处理周期短并可持续利用等优点。

1)植物的生长受多个环境因素的影响(太阳辐射、降水、温度),有相关研究^[22]表明大藻的生长对季节有较强的依赖性,因此对污水的净化能力也受相应的影响。由于西昌纬度较低、太阳辐射强,冬季室内水温也能达到大藻的正常生长所需,处理效果良好。因此在温度适宜的地区,适用性强。

2)已有相关研究表明大藻不仅能有效处理营养化水体,还能吸收转移环境中的镉、铅等重金属^[23-24]。将大藻作为湿地植物用于畜禽废水的自然处理中,不仅能削减营养物质,还可进一步研究废水中重金属的削减。但由于其强入侵性,而且植物死亡分解后,植物体内吸收物在分解过程中会返还水体,且植物体腐化都将造成二次污染,必须进行封闭式管理,并在固定周期内进行打捞。

3)通过以上纯植物和水的相互作用研究,得出大藻系统对有机物和氮的良好处理效果,要同时取得磷的有效削减,并进一步稳定和提高水质,建立氧化塘、人工湿地,必须筛选出相互结合,有效去除磷的基质。

4)通过实验观察到大藻在表面体征枯萎死亡下,仍具备良好的再生性,利用其旺盛的生命力和再生性,探讨其循环利用机制,找出大藻植株萎焉系

数,在植株真正死亡前恢复其生理活性进行再改造和处理,既能避免二次污染又能循环净化水质,促成良性生态循环系统。

5)大藻是入侵性漂浮植物,水葫芦是入侵性挺水植物,国内外已有水葫芦的相关利用,两种植物的景观性较好,考虑将入侵水生植物有效结合起来,建立封闭式管理的处理高质量浓度有机废水,在处理入侵植物的过程中利用其创造经济价值是一个不错的思路。

参考文献:

- [1] 陈吕军. 中国畜禽养殖业废弃物污染现状及防治对策 [EB/OL]. (2010-06-15) [2013-08-26] http://wenku.baidu.com/link?url=kY-xMG5kcMs1LemWJtZf_YTNi4N3ZgmCbxzuaKe-a9LXBBiN0TSMhPzgRGp_YTNMGz1CFjJPGbey0Wr4PGk2jkk8Kq_r3o7CxbUfijY77m.
- [2] 李猛,马旭洲,王武,等. 大藻对水体氮磷去除效果的初步研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(9): 1137-1142.
LI Meng, MA Xuzhou, WANG Wu. Effects of *Pistia stratiotes* L. on removal rate for nitrogen and phosphorus in polluted water body [J]. Resources and Environment in the Yangtza Basin, 2012, 21(9): 1137-1142.
- [3] Wang C, Wang L Y, Sun Q. Response of phytochelatin and their relationship with cadmium toxicity in floating macrophyte *Pistia stratiotes* L. at environmentally relevant concentrations [J]. Water Environment Research, 2010, 82(2): 147-154.
- [4] Mufarregge M M, Hadad H R, Maine M A. Response of *Pistia stratiotes* to heavy metals (Cr, Ni, and Zn) and phosphorous [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 58(1): 53-61.
- [5] 张志勇,王建国,杨林章,等. 植物吸收对模拟污水净化系统去除氮、磷贡献的研究 [J]. 土壤, 2008, 40(3): 412-419.
ZHANG Zhiyong, WANG Jianguo, YANG Linzhang, et al. Contribution of plant uptake to nitrogen and phosphorus removal of four simulate wastewater treatment systems [J]. Soils, 2008, 40(3): 412-419.
- [6] 黄亮,吴乃成,唐涛,等. 水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(Sup): 1-6.
HUANG Liang, WU Naicheng, TANG tao, et al. Enrichment and removal of nutrients in eutrophic water by aquatic macrophytes [J]. China Environmental Science, 2010, 30(Sup): 1-6.
- [7] 蔡佩英,刘爱琴,侯晓龙. 9 种水生植物对模拟污水中

- 氮、磷的生物净化效果[J]. 福建农林大学学报:自然科学版,2010,39(3):313-318.
- CAI Peiying, LIU Aiqin, HOU Xiaolong. Biological purification effect of nine aquatic plants on N and P from simulation waste water [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University: Natural Science Edition,2010,39(3):313-318.
- [8] Sinha S, Basant A, Malik A. Singh KP multivariate modeling of chromium-induced oxidative stress and biochemical changes in plants of *Pistia stratiotes* L [J]. Ecotoxicology,2009,18(5):555-566.
- [9] Hasan S A, Fariduddin Q, Ali B, et al. Cadmium: toxicity and tolerance in plants [J]. Environ Biol,2009,30:165-174.
- [10] Dazy M, Masfaraud J F, Férard J F. Induction of oxidative stress biomarkers associated with heavy metal stress in *Fontinalis antipyretica* Hedw [J]. Chemosphere,2009,75(3):297-302.
- [11] 刘霄,黄岁樑,唐婷芳子,等. 人工湿地植物生长特性及其对氮磷富集能力研究[J]. 水工程与水资源学报. 2011,22(5):1-5.
- LIU Xiao, HUANG Suiliang, TANG Tingfangzi, et al. Growth characteristic and nitrogen phosphorous accumulation ability of artificial wetland plants [J]. 2011,22(5):1-5.
- [13] 董健,刘超翔,王振,等. 水生植物滤床对猪场养殖废水的深度处理研究[J]. 水处理技术,2012,38(9):54-58.
- DONG Jian, LIU Chaoxiang, WANG Zhen, et al. Tertiary treatment of swine wastewater using aquatic plant filter bed [J]. Technology of Water Treatment, 2012,38(9):54-58.
- [14] 范子红,刘超翔,于鑫,等. 溶氧状况对美人蕉根系特征和畜禽废水处理效果的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2011,33(2):124-128.
- FAN Zihong, LIU Chaoxiang, YU Xin, et al. Effects of oxygenation on canna root characteristics and treatment of swine waster water [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(2):124-128
- [15] 张俊萍,王应军,邓仕槐. 藨吾(*Ligularia sibirica*)对畜禽废水的净化能力[J]. 四川农业大学学报,2011,29(9):397-401.
- ZHANG Junping, WANG Yingjun, DENG Shihuai. Purification effect of *Ligularia sibirica* on livestock wastewater [J]. Journal of Sichuan Agricultural University,2011,29(9):397-401.
- [16] 陈彬,曹伟华. 水葫芦对中高质量浓度畜禽废水的净化效果研究[J]. 江西农业学报,2007,19(2):95-97.
- CHEN Bin, CAO Weihua. Purification effects of water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) on middle-high concentration waste water from livestock [J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2007,19(2):95-97.
- [17] 孙娟,郝智慧,杨国锋,等. 几种水生植物组合对畜禽产品加工废水净化效果的研究[J]. 中国农学通报,2011,27(32):270-274.
- SUN Juan, HAO Zhihui, YANG Guofeng, et al. Purification effects of various combined hydrophytes on the waste water from livestock and poultry products[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011,27(32):270-274.
- [18] 傅智慧. 人工湿地生态工程净化养鸭废水的研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [19] 李远伟. 芦苇、水山姜床人工湿地在畜禽养殖废水处理中的脱氮除磷研究[D]. 雅安:四川农业大学,2007.
- [20] 周雄飞,史巍,柏彦超,等. 浮萍混养体系对污染水体氮磷的去除效果[J]. 江苏农业科学,2011,39(3):541-542.
- [21] 宋伟,韩士群,刘海琴,等. 水葫芦去除污水中氮磷的效果[J]. 安徽农业科学,2008,36(25):11076-11079.
- SONG Wei, HAN Shiqun, LIU Haiqin, et al. Effect of water hyacinth on removing nitrogen and phosphorous in sewage [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008,36(25):11076-11079.
- [22] Lu Q, He Z L, Graetz D A, et al. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic storm-waters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L) [J]. Environmental Science and Pollution Research. 2010, 17: 84-96.
- [23] Li Y, Zhang S S, Jiang W S, Liu D H. Cadmium accumulation, activities of antioxidant enzymes, and malondialdehyde (MDA) content in *Pistia stratiotes* L [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013,20(2):1117-1123.
- [24] Fernando R, Aparecido N, Ismael L, et al. Kinetics of lead bioaccumulation from a hydroponi medium by aquatic macrophytes *Pistia stratiotes* [J]. W Water, Air, and Soil Pollution,2009,203(1/2/3/4):29-37.