

2 种植物浮床对含抗生素养殖废水的净化效果

陈金峰^{1,2}, 刘海林^{1,2}, 邹春萍^{1,2}, 刘可星³, 张佩霞^{1,2}, 孙映波^{1,2}

(1. 广东省农业科学院 环境园艺研究所 广东省园林花卉种质创新综合利用重点实验室, 广州 广东 5106402;
2. 农业农村部 华南都市农业重点实验室, 广州 广东 510640; 3. 华南农业大学 资源环境学院, 广州 广东 510642)

摘要: [目的] 探讨湿地植物种类、浮床覆盖面积和处理时间 3 个因素对含抗生素养殖废水净化效果的影响, 为高效利用湿地植物浮床技术去除养殖废水中的传统污染物和抗生素提供依据。[方法] 分别利用巴拉草(*Brachiaria mutica*)和短叶荇苳(*Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius*)构建了植物浮床, 每种植物浮床设置了 20%, 40%, 60% 这 3 个水面覆盖面积, 监测了植物浮床在不同处理时间对养殖废水中的化学需氧量(COD)、氮磷和磺胺嘧啶的净化效果。[结果] 各处理水质各指标随着运行时间持续变好: pH 值变中性; 溶解氧(DO)含量增加; 氧化还原电位(ORP)上升; COD, 氨氮(NH₃-N), 总氮(TN), 总磷(TP)和抗生素磺胺嘧啶(SDZ)浓度持续降低; 不同植物种类对水体 pH 值和 ORP 值, DO 和 COD 的含量无显著影响, 但显著影响水体营养盐的去除; 巴拉草浮床对水体中 NH₃-N, TN 和 TP 的去除效果优于短叶荇苳浮床; 两种植物对 SDZ 的去除效率相当; 总体上, 60% 的覆盖面积更加有利于水体中污染物的去除, 但不利于 DO 扩散。[结论] 60% 覆盖面积的巴拉草浮床, 在运行 47 d 时, 去除养殖废水中 COD(88%), NH₃-N(97%), TN(89%), TP(94%) 和 SDZ(43%) 的效果最好。

关键词: 植物浮床; 养殖废水; 营养盐; 磺胺嘧啶; 去除作用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0137-07

中图分类号: X52, X171.5

文献参数: 陈金峰, 刘海林, 邹春萍, 等. 2 种植物浮床对含抗生素养殖废水的净化效果[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 137-143. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 03. 023; Chen Jinfeng, Liu Hailin, Zou Chunping, et al. Purification effects of two floating plant beds on antibiotics-containing livestock wastewater[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 137-143.

Purification Effects of Two Floating Plant Beds on Antibiotics-containing Livestock Wastewater

Chen Jinfeng^{1,2}, Liu Hailin^{1,2}, Zou Chunping^{1,2}, Liu Kexing³, Zhang Peixia^{1,2}, Sun Yingbo^{1,2}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Ornamental Plant Germplasm Innovation and

Utilization, Environmental Horticulture Research Institute, Guangdong Academy of

Agricultural Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China; 2. Key Laboratory of Urban

Agriculture in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

3. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract: [Objective] The effects of wetland plant species, plant coverage and treatment time on the purification of antibiotic-containing livestock waste water were investigated in order to provide the basis for utilization of wetland plant floating beds technology to efficiently remove pollutants and antibiotics from livestock waste water. [Methods] Plant floating beds were constructed using *Brachiaria mutica* and *Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius*, respectively. Three different plant coverage areas (20%, 40% and 60%) were set for each plant bed. The purification effects of plant floating beds on chemical oxygen demand (COD), nitrogen, phosphorus and sulfadiazine (SDZ) were monitored at different treatment times. [Results] The water quality was improved with the treatment time; pH value became neutral, dissolved oxygen (DO) content and oxidation

收稿日期: 2018-12-06

修回日期: 2019-01-11

资助项目: 广东省科技计划项目“广东省农业科学院环境园艺研究所创新能力建设”(2017A070702008); 广州市科技计划项目“水生观赏植物—微生物燃料电池系统(AOP-SMFC)去除沉积物中磺胺嘧啶的效果与机制”(201707010341)

第一作者: 陈金峰(1985—), 男(汉族), 山东省临沂市人, 博士, 从事水体污染修复与水生生态恢复研究。E-mail: chenjinfeng2000@126.com。

通讯作者: 孙映波(1964—), 男(汉族), 广东省揭阳市人, 硕士, 研究员, 主要从事环境污染防控与治理研究。E-mail: sunyingbo20@163.com。

reduction potential (ORP) increased, and the concentrations of COD, nutrients and SDZ decreased. Plant species had no significant effect on water pH value, DO, ORP and COD, but had significant effect on water nutrient removal. *B. mutica* performed better in the removal of ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) than *C. malaccensis* Lam. var. *brevifolius*, but no significant difference was found in terms of SDZ removal between the two plant species. In general, plant beds with 60% coverage area was more conducive to the removal of pollutants in water, but was not conducive to DO diffusion. [Conclusion] The floating beds constructed by *B. mutica* with 60% plant coverage had the best removal efficiencies. After 47 days of operation, the floating bed simultaneously removed 88% of the COD, 97% $\text{NH}_3\text{-N}$, 89% TN, 94% TP and 43% of the SDZ in the wastewater.

Keywords: floating plant bed; livestock wastewater; nutrients; sulfadiazine; removal

当前, 畜禽养殖业仍然是造成中国水土环境污染的重要源头之一。近年来, 由于抗生素在畜禽养殖业中的大量应用, 导致养殖废水中不但含有大量的 COD、氨氮、总磷等传统污染物, 而且还含有大量的抗生素等新兴污染物。抗生素污染可引起微生物抗药性增强, 进一步诱发抗性基因污染^[1]。畜禽养殖废水若处置不当, 很可能会造成抗生素和抗性基因的迁移和扩散, 导致水土环境受到传统污染物和新兴污染物的双重污染, 进而对生态环境、食品安全和人类健康造成威胁。

目前国内畜禽养殖废水治理常采用的工艺主要有: 自然处理法、厌氧处理法、好氧处理法和厌氧和好氧组合处理法等^[2-4]。自然处理法因成本低廉, 动力消耗少, 可因地制宜等优势被大量中小型养殖场采用, 其中氧化塘或人工湿地是自然处理法主要模式。氧化塘或人工湿地已被证明具备良好的去除水体中 COD 和氮磷营养盐的能力。近年来, 随着人们对水土环境抗生素及抗性基因污染的重视, 氧化塘或人工湿地技术也被应用于去除水体中抗生素^[5]。例如: Dan 等^[6]研究发现, 人工湿地构型、填料影响水体中抗生素(磺胺类和甲氧苄啶)的去除, 垂直潜流湿地去除效率最高, 符山石填料去除效果较好, 但是湿地中的重要元素植物却对去除率没有明显影响; 而 Yan 等^[7]研究了人工湿地对磺胺甲恶唑、罗红霉素和氧氟沙星的去作用, 发现种植风车草的人工湿地去除效果好于无植物对照, 植物的吸收和根际效应可能是植物型人工湿地去除效果更好的原因。

虽然这些传统的氧化塘或人工湿地已被证明有良好的去除传统污染物和抗生素的能力, 但仍有改进空间。植物浮床是一种可在开阔水面安置的一种具有水体净化作用的生态装置, 具有安装简便、成本低廉、美化景观等优点, 可灵活布置在处理养殖废水的氧化塘或者表面流人工湿地的水面上, 增强氧化塘或者人工湿地净化养殖废水的能力, 但是目前缺乏利用植物浮床技术处理含抗生素养殖废水的研究。Xian

等^[8]研究了由不同黑麦草品种构建的植物浮床净化含磺胺类抗生素养殖废水的效果, 发现植物浮床技术能够有效地去除水体中的磺胺类药物, 有些品种的去除率可高达 91.8%~99.5%, 对水体中 COD、总氮和总磷也具有很好的去除效果。尽管如此, 不同植物种类、浮床覆盖面积和处理时间等因素如何影响植物浮床去除水体中抗生素、COD 和氮磷营养盐的效率还需进一步研究。

本研究选取养殖废水中常见的磺胺类药物磺胺嘧啶为供试抗生素, 以对磺胺嘧啶具有较好耐受性的 2 种湿地植物: 巴拉草 (*Brachiaria mutica*) 和短叶荳苳 (*Cyperus malaccensis* Lam. var. *brevifolius*) 为研究对象, 构建不同面积的植物浮床, 研究这 2 种植物在不同浮床覆盖面积下, 在不同处理时间内对养殖废水中磺胺嘧啶、COD、氨氮、总氮和总磷的去除效果, 以期为更加科学合理的应用植物浮床技术治理含抗生素的养殖废水提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

巴拉草 (*B. mutica*, BM) 和短叶荳苳 (*C. malaccensis* Lam. var. *brevifolius*, CM) 均取自广东省农业科学院环境园艺研究所湿地植物苗圃。选取 20 cm 长, 生长健壮的枝条, 插入直径 2.5 cm 的水培篮中, 固定在泡沫板上, 行间距 12 cm×10 cm, 之后将植有植物的泡沫板放入长宽高 (59 cm×44 cm×39 cm) 的高密度聚乙烯 (HDPE) 塑料水箱中。植物首先在自来水中生根, 之后用 1:3000 的花多多 1 号营养液 (氮磷钾含量各 20%) 继续培养 2 个月。净化试验开始之前, 用自来水清洗植物根系, 重新放入自来水中静置 24 h, 之后转入含有 50 L 养殖废水的水箱中。

养殖废水来源于厌氧发酵后的鸡粪 (未使用任何抗生素), 经过稀释和添加抗生素后备用。供试抗生素磺胺嘧啶 (纯度 99%) 购自 Sigma-Aldrich 公司。

制备的养殖废水中含有磺胺嘧啶(SDZ) 10 mg/L, COD 690.75 mg/L, 氨氮(NH₃-N) 89.4 mg/L, 总氮(TN) 89.88 mg/L, 总磷(TP) 1.86 mg/L。

1.2 试验设计

试验研究了 3 种因素对植物浮床去除养殖废水中污染物的影响, 分别为: 植物种类因素、浮床覆盖水面面积因素和处理时间因素。具体设计为: 对每种植物浮床, 通过调节植物种植面积大小, 设置 3 个水面覆盖面积: 20%、40% 和 60%, 每个覆盖面积 6 个重复, 随机区组设计, 同时设置 3 个无植物覆盖重复为对照。试验在位于广东省农业科学院环境园艺研究所内的遮雨棚内进行(23°09'01"N; 113°21'07"E), 分别在试验的 7, 17, 27, 37, 47 d, 取样分析水体中 COD, NH₃-N, TN, TP 和 SDZ 的含量, 测定 pH 值、氧化还原电位(ORP); 溶解氧(DO) 含量从第 17 d 开始测量。所有指标每隔 10 d 测量 1 次。

1.3 测试方法

COD 测定用重铬酸钾氧化—分光光度法, NH₃-N 用盐酸萘乙二胺比色法, TN 用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法, TP 用过硫酸钾消解后用钼酸铵分光光度法测定; SDZ 以 HPLC 法测定, 以 Agilent ZORBAX Eclipse Plus C18 液相色谱柱(250×4.6 mm, 5 μm) 分离目标化合物, 流动相 A 为 0.5% 的甲醇水, B 为纯甲醇, A : B = 8 : 2, 柱温 30 °C, 流速 1 ml/min,

254 nm 比色。pH 值、ORP 和 DO 均采用配备有 pH 值、ORP 和 DO 探头的梅特勒—托利多 SevenGo Duo pro™ pH/离子/溶解氧仪测定。

1.4 数据统计分析

污染物的去除率的计算方法为: 去除率 = (初始浓度 - 取样测定浓度) / 初始浓度 × 100%。以三元方差分析(three way ANOVA) 分析植物、浮床覆盖面积和处理时间对污染去除效果的影响, 以一元方差分析(one way ANOVA) 和最小显著性差异法(LSD) 检验不同处理之间的最终去除效果的差异。所有数据分析用 IBM SPSS Statistics 22 完成, 用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

养殖废水的 pH 值变化与植物种类无关, 但与覆盖面积和处理时间密切相关; DO 的含量受植物种类、覆盖面积和处理时间的影响; ORP 仅与处理时间有关; COD 含量的变化与覆盖面积和处理时间密切相关; NH₃-N, TN 和 TP 的含量均受到植物种类、覆盖面积和处理时间的影响; SDZ 的去除与植物种类关系不大, 而更受覆盖面积和处理时间的影响(表 1)。覆盖面积和处理时间互作极显著影响水体 pH 值, DO, ORP, NH₃-N 和 TP; 植物种类和处理时间极显著影响水体中营养盐的去除(表 1)。

表 1 浮床植物种类、覆盖面积和处理时间对养殖废水中各水质指标影响的 3 因素方差分析

| 指标 | 区组 | 植物 | 面积 | 时间 | 植物×面积 | 植物×时间 | 面积×时间 | 植物×面积×时间 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|----------|
| pH 值 | ns | ns | *** | *** | ns | ns | *** | ns |
| DO | ns | * | *** | *** | * | * | *** | ns |
| ORP | ns | ns | ns | *** | ns | ns | *** | ns |
| COD | ns | ns | *** | *** | * | ns | * | *** |
| NH ₃ -N | * | *** | *** | *** | * | *** | *** | ns |
| TN | ** | *** | *** | *** | * | *** | ns | ns |
| TP | *** | ** | *** | *** | ns | *** | *** | * |
| SDZ | ns | ns | *** | *** | ns | ns | ns | ns |

注: ns 表示无显著性差异; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; DO 为溶解氧; ORP 为氧化还原电位; COD 为化学需氧量; NH₃-N 为氨氮; TN 为总氮; TP 为总磷; SDZ 为磺胺嘧啶。

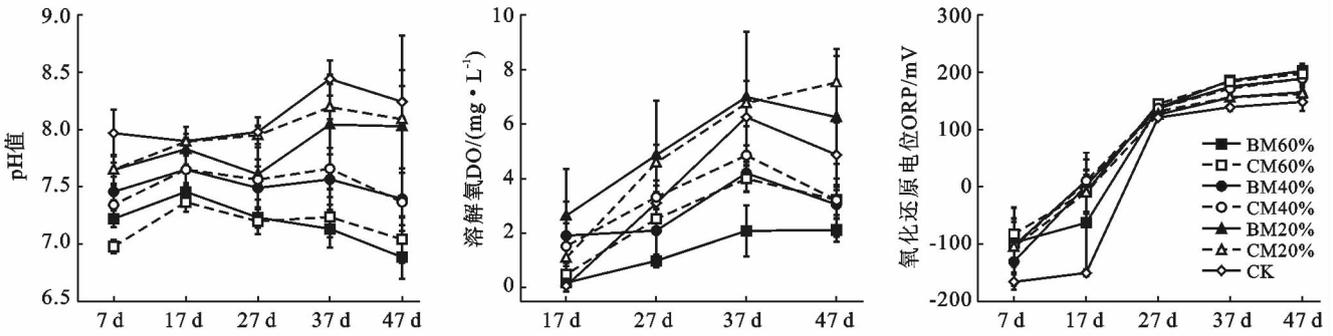
不同处理下养殖废水的 pH 值、DO 和 ORP 变化趋势和最终情况如图 1—2 所示。养殖废水中 COD, NH₃-N 和 TN 的变化趋势和最终去除率如图 3—4 所示。

养殖废水的 pH 值偏碱性, 植物覆盖面积影响水体 pH 值, 整体上表现出植物覆盖面积越大 pH 值越小的趋势, 不同植物之间 pH 值差别不大。

养殖废水的 DO 随处理时间呈现上升趋势。尽管基于全部时间处理的三因素方差分析表明, 2 种植物之间 DO 含量有差异(表 1), 但到第 47d 时, 这种差异已不明显。第 47 d 时, 40% 和 60% 覆盖面积下养殖废水中 DO 的含量显著低于对照和 20% 覆盖面积的浓度。在 17 d 之前, 几乎所有处理的 ORP 值都是负值, 但是随处理时间的延长, ORP 逐渐转为正值。

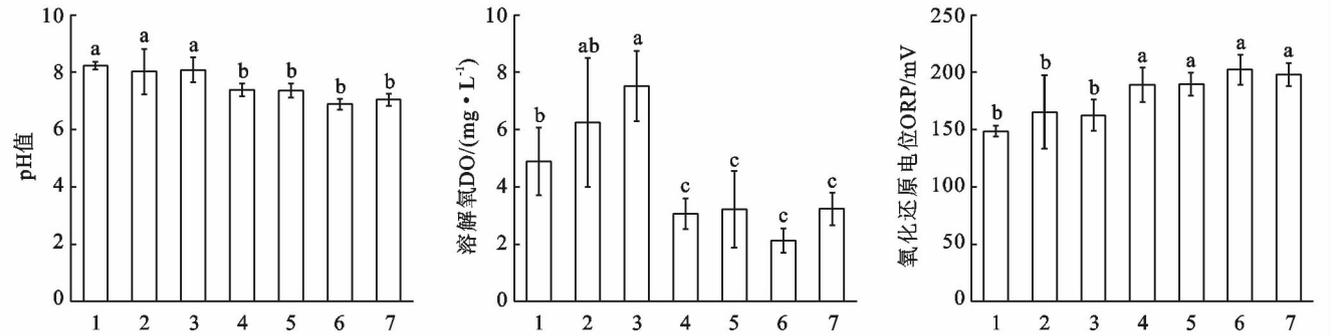
尽管 3 因素方差分析表明,整体上覆盖面积对 ORP 无显著影响(表 1),但 47 d 时,不同覆盖面积开始显

现差异:40%和 60%覆盖面积下 ORP 显著高于对照和 20%覆盖面积处理。植物种类对 ORP 无影响。



注:BM 为巴拉草;CM 为短叶荇菜;60%,40%和 20%为浮床覆盖面积;CK 为无植物覆盖对照;不同字母表示处理间有显著性差异 $p < 0.05$,一元方差分析,LSD 法多重比较。下同。

图 1 养殖废水的 pH 值、DO 和 ORP 在不同处理中的变化趋势



注:1 为 CK;2 为 BM20%;3 为 CM20%;4 为 BM40%;5 为 CM40%;6 为 BM60%;7 为 CM60%。

图 2 处理 47 d 后,养殖废水的 pH 值、DO 和 ORP 值特征

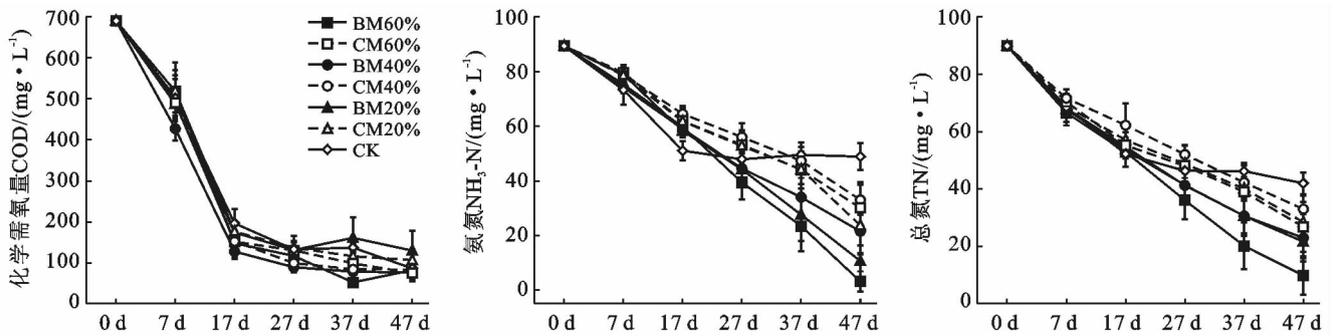


图 3 养殖废水中 COD、氨氮和总氮随时间变化趋势

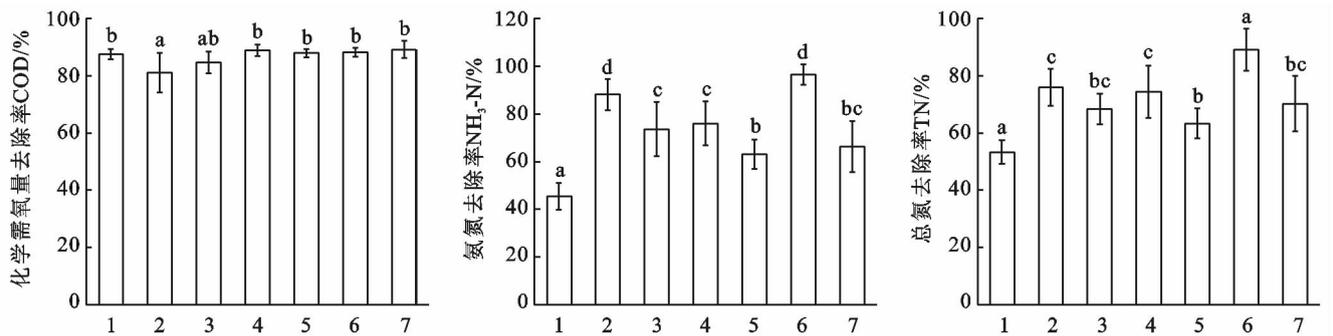


图 4 养殖废水中 COD、氨氮和总氮的最终去除率

养殖废水中 COD 的含量在前 17 d 内直线下降,由最初的接近 700 mg/L 降低到第 17 d 的 100~200 mg/L,之后降解速度放缓。COD 的去除与植物种类无关,而受植物覆盖面积影响。在第 47 d 时,40%和 60%覆盖面积的植物浮床去除率接近 90%,高于 20%的覆盖处理,但与对照无差异。

在处理的前 17 d,所有处理中的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的浓度迅速下降,之后对照处理中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 不再变化,而植物处理组则继续下降。浮床覆盖面积和植物种类均显著影响 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果。47 d 时,20%和 60%覆盖面积的去除效果最优,60%的巴拉草浮床对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率高达 97%,而短叶茛苳的仅有 66%,巴拉草对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果显著好于短叶茛苳。

养殖废水中 TN 的去除规律与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 类似,植物处理组的 TN 含量随处理时间持续下降。不同植物之间的去除效率差异明显。浮床面积越大去除效果越明显。47 d 时,60%的覆盖面积去除效果最优,

此时巴拉草浮床对 TN 的去除率高达 89%,而短叶茛苳的仅有 70%,巴拉草对 TN 的去除效果优于短叶茛苳。

养殖废水中 TP 和 SDZ 的变化趋势和最终去除率如图 5—6 所示。

养殖废水中 TP 的含量在处理的前 7 d 内迅速下降,之后放缓。不同植物的去除效果有差异。浮床覆盖越大,去除效果越好。处理至 47 d 时,巴拉草和短叶茛苳浮床对 TP 的去除效率均达到 90%以上。整体来看,巴拉草的去除效率更高。

养殖废水中 SDZ 的含量在前 27 d 内变化不明显,37 d 时开始下降。至 47 d 时,植物处理组明显比无植物的对照去除效果好。虽然巴拉草浮床去除效果在数值上更优,但并未表现出显著性差异。SDZ 的去除率随浮床的覆盖面积的增大而增加,实验结束时,60%覆盖面积的两种植物浮床均能去除养殖废水中 42%左右的 SDZ。

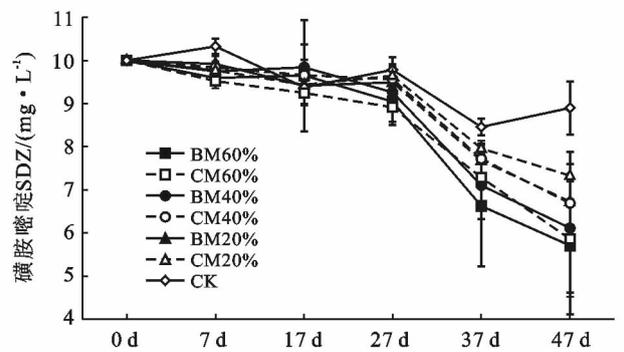
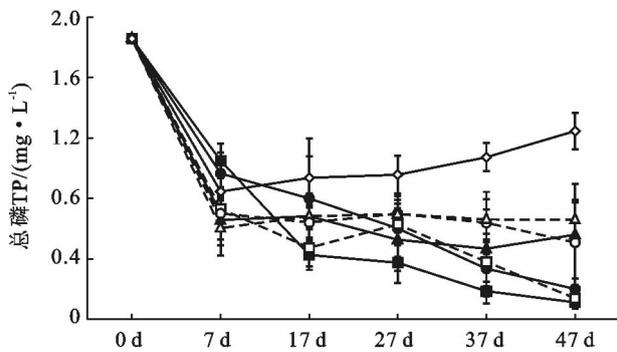


图 5 养殖废水中总磷和磺胺嘧啶变化趋势

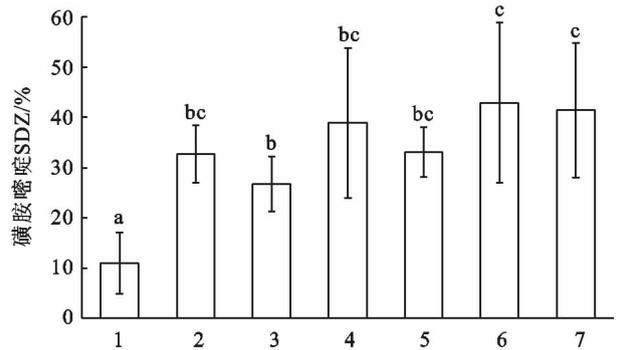
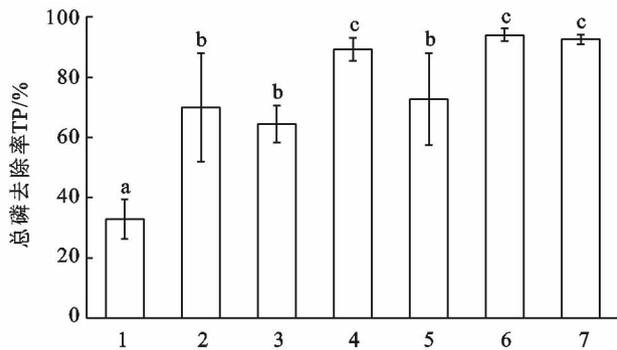


图 6 养殖废水中总磷和磺胺嘧啶的最终去除率

3 讨论

研究发现植物浮床的覆盖面积越大 pH 值越小,这可能与植物吸收铵根离子有关。植物吸收铵根离子是一个离子交换过程,养殖废水中以阳离子形式存

在的铵根离子与植物根毛表皮细胞中分泌出的质子进行交换,实现对铵根的吸收,同时降低了根际 pH 值^[9-11]。植物覆盖面积越大,根系生物量越大,表面积越大,吸收的铵根离子越多,从而使 pH 值越低。

水体中 DO 的含量整体上表现出随覆盖面积增

大而降低的趋势。水体中的 DO 主要来源于两条途径:空气扩散作用和藻类或沉水植物光合放氧。植物覆盖面积越大, O₂ 越不容易扩散进入水体, 藻类光合放氧不足, 从而使得 DO 的含量较低。尽管如此, 覆盖面积大的浮床中(40%和60%)的 ORP 却显著高于20%覆盖面积的浮床。ORP 是表征介质氧化性或还原性的指标, 一般认为 ORP 越正介质氧化性越强, 越负还原性越强。本研究中养殖废水逐渐从还原状态转变为氧化状态, 其中60%和40%的氧化还原电位接近200 mV, 说明60%和40%处理组废水正处于良好的氧化状态。

水体 COD 的降解会影响水体的氧化还原状态, 通过检测水体 ORP 可间接反映水体 COD 的去除情况:在有大量 COD 需要去除时, 水体 ORP 通常较低, 随着 COD 的降解, ORP 逐渐上升^[12]。我们的试验结果符合这一变化特征。尽管60%和40%覆盖处理的 DO 的浓度并不高, 但却具有较高的氧化还原电位, 这可能与40%和60%覆盖面积下 COD 降解更彻底有关。

水体中的 NH₃-N 去除主要有3条途径:硝化反硝化作用、植物吸收和挥发^[13]。在试验前期 NH₃-N 浓度迅速下降, 这可能是由于 NH₃-N 在碱性环境下易挥发造成的。在试验的中后期, 植物在去除 NH₃-N 过程中起主要作用, 特别是巴拉草, 其对 NH₃-N 的去除能力显著高于短叶茳苳, 这可能因为:巴拉草相对于短叶茳苳拥有更快的生长速度和更大的生物量, 能够吸收更多量的 NH₃-N; 巴拉草拥有更大根系表面积, 从而促进了根际微生物硝化反硝化作用。本研究所用养殖废水中的 TN 的成分基本上都是 NH₃-N, NH₃-N 被持续地通过硝化反硝化作用和植物吸收作用去除, 从而使得 TN 的去除规律同 NH₃-N 相似。

TP 在水体中去除主要靠植物根系吸附、吸收, 植物的生物量越大, 生长速度越快, 对总磷的去除效果往往越好。例如李欢等^[14]研究表明混种模式下黑藻、雨久花和黄花鸢尾的生长速度和生物量都比单独种植时高, 对 TP 积累率也显著高于单由挺(沉)水植物组成的群落。在本研究中, 由于巴拉草具有更快的生长速度和更大的生物量, 因此巴拉草的处理效率优于短叶茳苳。

SDZ 在植物根际的去除途径主要有植物吸收、转化和降解^[15-16], 植物根际微生物转化、降解^[17]。在本研究中, 覆盖面积越大, 磺胺嘧啶去除率越高, 这可能是因为覆盖面积越大植物生物量越大, 根系面积越大, 植物吸附、吸收和降解的量就越大; 根系面积大, 微生物的附着面积越大, 由微生物转化降解的也越

多。本研究中, 尽管短叶茳苳和巴拉草在生物量上有较为明显的差异, 但巴拉草的去除率仅在数值上大于短叶茳苳, 这可能跟处理时间不足有关。

在接近50 d 的处理中, 两种植物浮床对水体中 SDZ 的最高去除率均在41%~43%之间, 这跟 Xian 等^[8]利用黑麦草浮床获得的90%以上的去除率有较大差异, 这可能与两个研究受试水体中 SDZ 的初始浓度不一致有关, 本研究中 SDZ 的初始浓度为10 mg/L, 而 Xian 等^[8]初始浓度为100 μg/L。因此, 考虑到养殖废水中实际磺胺类抗生素的含量, 植物浮床技术可作为去除养殖废水中磺胺类抗生素污染的潜在技术。

4 结论

(1) 植物种类对养殖废水 pH 值, DO, ORP 和 COD 的影响不大, 但却是决定营养盐去除的重要因素, 巴拉草植物浮床比短叶茳苳浮床具有更好的 NH₃-N, TN 和 TP 的去除效率, 两种植物并未表现出对 SDZ 去除效果的显著差异。

(2) 植物浮床的覆盖面积显著影响水质。相比小的浮床覆盖面积, 较大的覆盖面积降低了水体 pH 值和 DO 含量, 但能增强水体的氧化性, COD, 营养盐和磺胺嘧啶的去除能力。

(3) 因此, 在利用植物浮床技术进行含磺胺嘧啶养殖废水治理时, 60%覆盖面积的巴拉草浮床是较好的选择。

[参 考 文 献]

- [1] 周启星, 罗义, 王美娥. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(3): 243-251.
- [2] 陈蕊, 高怀友, 傅学起, 等. 畜禽养殖废水处理技术的研究与应用[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(S1): 374-377.
- [3] 邓仕槐, 李远伟, 郑仁宏, 等. 畜禽养殖废水的混合处理工艺[J]. 环境工程, 2006, 24(4): 29-30.
- [4] 杜龔, 周北海, 袁蓉芳, 等. UASB-SBR 工艺处理规模化畜禽养殖废水[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2): 497-504.
- [5] 郑佳伦, 刘超翔, 刘琳, 等. 畜禽养殖业主要废弃物处理工艺消除抗生素研究进展[J]. 环境化学, 2017, 36(1): 37-47.
- [6] A Dan, Yang Yang, Dai Yunv, et al. Removal and factors influencing removal of sulfonamides and trimethoprim from domestic sewage in constructed wetlands [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 146: 363-370.
- [7] Yan Qing, Feng Guozhong, Gao Xu, et al. Removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) and toxico-

- logical response of *Cyperus alternifolius* exposed to PhACs in microcosm constructed wetlands[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016,301:566-575.
- [8] Xian Qiming, Hu Lixia, Chen Hancheng, et al. Removal of nutrients and veterinary antibiotics from swine wastewater by a constructed macrophyte floating bed system [J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(12):2657-2661.
- [9] Nye P. Changes of pH across the rhizosphere induced by roots[J]. Plant and Soil, 1981,61(1/2):7-26.
- [10] Troelstra S R, Van Dijk K, Blacquièrre T. Effects of N source on proton excretion, ionic balance and growth of *Alnus glutinosa* (L.) Gaertner: Comparison of N₂ fixation with single and mixed sources of NO₃ and NH₄ [J]. Plant and Soil, 1985,84(3):361-385.
- [11] 狄廷均,朱毅勇,仇美华,等.水稻根系细胞膜 H⁺-ATPase 对铵硝营养的响应差异[J].中国水稻科学,2007,21(4):360-366.
- [12] 高大文,彭永臻,王淑莹. SBR 法处理豆制品废水过程中 ORP 与 COD 的相关性[J]. 给水排水,2002,28(9):40-43.
- [13] 尹连庆,谷瑞华.人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究[J].环境工程,2008,26(S1):151-155.
- [14] 李欢,吴蔚,罗芳丽,等.4种挺水植物、4种沉水植物及其组合群落去除模拟富营养化水体中总氮和总磷的作用比较[J].湿地科学,2016,14(2):163-172.
- [15] Chen Jinfeng, Xu Huilian, Sun Yingbo, et al. Inter-specific differences in growth response and tolerance to the antibiotic sulfadiazine in ten clonal wetland plants in South China [J]. Science of the Total Environment, 2016,543(PartA):197-205.
- [16] Michelini L, Reichel R, Werner W, et al. Sulfadiazine uptake and effects on *Salix fragilis* L. and *Zea mays* L. plants[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2012,223(8):5243-5257.
- [17] 金彩霞,朱雯斐,郭桦,等.毫米级根际微域磺胺嘧啶的降解动态研究[J].环境科学学报,2014,34(8):2085-2093.

(上接第 136 页)

- [4] Lin Derguey, Huang Borshun, Lin Shinwei. 3-D numerical investigation into the shear strength of the soil-root system of Malcino bamboo and its effect on slope stability[J]. Ecological Engineering, 2010,36(8):992-1006.
- [5] 赵玉娇,胡夏嵩,刘昌义,等.寒旱环境植物根系增强边坡土体抗剪强度试验研究[J].水土保持研究,2016,23(4):212-220.
- [6] 万娟,肖衡林,何俊.多花木兰根系抗拉特性及边坡稳定性分析[J].华中科技大学学报:自然科学版,2014,42(8):109-113.
- [7] 陈航,张慧莉,田堪良,等.紫穗槐根系对黄土边坡加固作用的试验研究[J].人民黄河,2017,39(10):84-88.
- [8] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,等.寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其最优含根量探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
- [9] 栗岳洲,付江涛,胡夏嵩,等.土体粒径对盐生植物根—土复合体抗剪强度影响的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):403-412.
- [10] 陈飞,吴亚星,高阳,等.复合挡土结构在稀土矿山滑坡防治中的应用研究[J].中国稀土学报,2015,33(6):761-768.
- [11] 彭冬水.赣南稀土矿水土流失特点及防治技术[J].亚热带水土保持,2005,17(3):14-15.
- [12] 张兴玲,胡夏嵩.青藏高原东北部黄土区草本植物根系加筋土的抗剪特性[J].水土保持通报,2013,33(4):185-188.
- [13] 郑启萍,徐得潜.草本植物护坡机理及其固土效应试验研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2014,37(2):225-228.
- [14] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区灌木植物根系护坡效应的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1877-1884.
- [15] 张丹,王戈,张文福,等.毛竹圆竹力学性能的研究[J].中南林业科技大学学报,2012,32(7):119-123.
- [16] 郑颖人,赵尚毅.有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004,23(19):3381-3388.