

曹志强, 张 刚, 王德建, 等. 利用空心莲子草阻控猪场废水扩散[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(6): 1300-1306.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.06.014

## 利用空心莲子草阻控猪场废水扩散

曹志强<sup>1,2</sup>, 张 刚<sup>1</sup>, 王德建<sup>1</sup>, 郑继成<sup>1,2</sup>, 张世洁<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为减缓猪场废水对水体的污染, 在常熟市某小型养猪场排污塘内进行空心莲子草(水花生)对养殖废水的阻隔作用研究。试验自排污口 40 m 长的空心莲子草截污带内设置 6 个监测点, 监测空心莲子草覆盖与清除后的水体化学需氧量(COD)、氨态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、总氮(TN)、总磷(TP)及浊度, 并分析底泥 TN、TP 含量。结果表明, 水体质量随空心莲子草截污带延长而改善, 生物阻隔为污染物去除的主要机制。污水经 20 m 截污带处理后, 其 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP、浊度较排污口分别下降了 80.1%、93.3%、83.8%、69.4%、63.1%, 且与 30 m 处的阻隔效果相当; 同时, 20 m 处底泥中 TN、TP 含量较排污口 0~2 m 处底泥分别降低 55.0%、68.9%。因此, 20 m 长的空心莲子草截污带能有效控制猪场排污物的扩散, 并将其截留在排污口附近的底泥中。

**关键词:** 猪场废水; 生物阻隔; 空心莲子草; 水质净化; 源头控制

**中图分类号:** X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)06-1300-07

## Pollution control of piggery wastewater by *Alternanthera philoxeroides*

CAO Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Gang<sup>1</sup>, WANG De-jian<sup>1</sup>, ZHENG Ji-cheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Shi-jie<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to slow down the water pollution from piggery sewage, an experiment was set to study bio-interception of *Alternanthera philoxeroides* (APG) to pollutants in a piggery sewage pond of Changshu. Six monitoring points were set up from the outfall in barrier strip which was 40 m long and covered with APG. Before and after removal of APG, water was collected and analyzed for chemical oxygen demands(COD), ammonia nitrogen( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), total nitrogen(TN), total phosphorus(TP) and turbidity. Sediment was also analyzed for TN and TP contents. The results showed that the water quality was greatly improved with the extension of the barrier zone. Bio-interception was the main mechanism of pollutant removal. Compared with water near the outlet, COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN, TP and turbidity had a decline of 80.1%, 93.3%, 83.8%, 69.4% and 63.1% with the treatment from barrier strip which was 20 m long, respectively. And the barrier effect was equal to that of 30 m. However, the contents of TN and TP in the sediment of 20 m away from the outlet decreased 55.0% and 68.9% compared with those in the sediment of 0~2 m away from the outlet. Therefore, barrier strip which is 20 m long and covered with APG can control the emission of pollutants which from piggery wastewater effectively, and intercept them to the sediments near the outlet.

**Key words:** effluent of piggery; bio-interception; *Alternanthera philoxeroides*; water purification; source control

收稿日期: 2018-03-02

基金项目: 国家重点研发计划课题(2017YFD0800105); 中国科学院 STS 计划项目(KFJ-SW-STS-174)

作者简介: 曹志强(1993-), 男, 江苏高淳人, 硕士研究生, 主要研究方向为水生态修复。(E-mail) zqcao@issas.ac.cn

通讯作者: 王德建, (E-mail) djwang@issas.ac.cn

近年来农村养殖业飞速发展, 产生了大量养殖废水, 处理不当易导致周围水体富营养化<sup>[1]</sup>。相关调查结果表明, 中国畜禽养殖业的各项排污在农业源中对化学需氧量(COD)、总磷(TP)和总氮(TN)的贡献已分别达到总量的 95.8%、56.3%和 37.9%<sup>[2]</sup>。目前, 主

要依靠物理、化学及生化途径实现养殖废水脱氮除磷,去臭去色,但由于经济、地形等因素限制,这类规模化处理方式对国内许多中小型养殖场而言难以实现<sup>[3]</sup>。因此,以人工湿地为主的植物修复方法因其经济、便捷、高效等优点倍受青睐<sup>[4-7]</sup>。

空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)是苋科莲子草属的2 栖多年生宿根草本植物,又称水花生、喜旱莲子草等<sup>[8]</sup>,其原产于南美洲,是一种外来植物<sup>[9-11]</sup>。由于有较大的植株体和根系,近年来研究人员将其应用于富营养化水体的植物修复中,也已证明空心莲子草对重金属镍(Ni)、锌(Zn)、铬(Cr)、铅(Pb)等具有富集作用<sup>[12-15]</sup>。目前,这些以空心莲子草为主题的植物修复法多停留于理论及实验室研究阶段,基本未见实际应用<sup>[16-18]</sup>。本研究以江苏省常熟市辛庄镇驰马塘河岸边一养猪场的排污塘为研究对象,监测分析养猪场排污口密集生长的空心莲子草对猪场废水的源头拦截作用,以期为这类小型养殖场排放废水的源头控制提供一种便捷、经济的处理方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验场地

试验所在的养猪场位于江苏省常熟市辛庄镇吕舍村驰马塘河道北侧,养猪场四周为农田、池塘等,其生猪存栏量500只左右,已经营5年以上,猪场废水每日排放,日均粪污排放量5~8 t左右,由长约100 m的沟渠排放至内河池塘。池塘沿岸浅水区自排污口由北至南为密集生长空心莲子草的矩形水域,长约40 m,宽约8 m。区域内空心莲子草密度约为1 m<sup>2</sup> 220~265株,空心莲子草鲜质量为8.2~9.6 kg/m<sup>2</sup>,水下部分深度25~35 cm,12月温度近0℃及更低后开始枯败,枯败后未进行清理工作,至来年2~3月平均温度回升至10℃以上时开始出苗,4月中旬进入快速生长期。试验场地地形如图1所示。试验期间,该地区气温较稳定(15~20℃)。

### 1.2 试验设计

试验以这片空心莲子草密布的区域为研究区,从2017年3月30日开始进行定点采样分析工作,到2017年5月19日最后一次采样结束,处理分为2个阶段,前期(0~20 d)有空心莲子草生长,后期(22~50 d)没有空心莲子草生长,于第20~21 d进行研究区水草的清除工作。在0~20 d,对研究区域内的空心莲子草进行生物量测定,以0.5 m<sup>2</sup>的采样

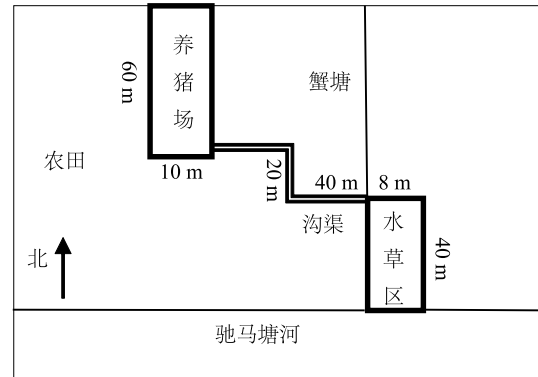


图1 试验场地地形示意图

Fig.1 Schematic of topography for experimental field

方框在区域内按蛇形布点法取样方5块,计数样方内空心莲子草株数,沥水后称鲜质量,同时使用量尺对沉水部分深度进行测量。采集的空心莲子草在称量、计数后放回原处,以保证研究区域内的空心莲子草密度保持一致。

在矩形空心莲子草密布区,沿长边方向,从北向南布置6个监测点,监测点西距岸边3 m,北距排污口分别为2 m、5 m、8 m、14 m、20 m、30 m,分别记为A、B、C、D、E、F。以监测点为圆心,在0.25 m半径范围内采集表层(10 cm)平行水样3瓶,每瓶500 ml,取样及样品保存按照《水和废水监测分析方法》<sup>[17]</sup>进行。水样监测指标包括浊度、pH、氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)等。底泥样采集时,以监测点为中心,在0.25 m半径范围内按梅花五点取样法采集0~15 cm的表层底泥,采集的底泥样品经风干、磨碎,过100目筛后备用,测定其TN、TP含量。空心莲子草覆盖期间分别于第0 d、10 d和20 d采集3次水样,空心莲子草清除期于第23 d(空心莲子草清除时)、30 d、40 d和50 d采集4次水样。于试验开始时(第0 d)、水草清除时(第23 d)和试验结束时(第50 d)各采集1次底泥样品。

### 1.3 监测方法

水体浊度和pH在采样现场测定,浊度采用TB-100型浊度仪测定,pH采用便携式酸度计PHBJ-260测定,每个监测点均测定3次。COD采用文献[19]的方法测定。样品经预处理后采用SEAL Auto Analyzer 3流动分析仪(德国生产)测定NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TN、TP含量。

底泥TN含量采用凯氏定氮法测定,底泥TP含量采用钼锑抗法测定<sup>[20]</sup>。

## 1.4 数据处理及统计分析

试验数据使用 Excel 软件进行计算分析,使用 Origin pro 9 进行绘图分析,使用 SPSS18.0 进行不同处理之间的差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 空心莲子草对猪场废水的净化效果

研究区域水体 pH 差异极小,在空心莲子草去除前后水体 pH 基本没有变化,监测结果显示水体 pH 为  $7.75 \pm 0.13$ ,属中性偏弱碱水质。试验期间,水体温度为  $16 \sim 20^\circ\text{C}$ ,温差较小。在前 20 d,研究区域内有空心莲子草密集分布,猪场废水进入池塘后受到了植物带阻隔。开始试验时,空心莲子草刚返青不久,  $1\text{ m}^2$  水域中空心莲子草平均数量在  $(220 \pm 6)$  株,平均鲜质量为  $(8.20 \pm 0.37)$  kg,水下部分深度为  $(25.0 \pm 3.2)$  cm。在试验的第 20 d,  $1\text{ m}^2$  水域空心莲子草平均数量在  $(265 \pm 8)$  株,平均鲜质量为  $(9.60 \pm 0.54)$  kg,水下部分深度  $(35.0 \pm 4.7)$  cm。可见,4 月份温度升高后,空心莲子草生长十分迅速,生物量大量增加。在第 20~21 d,进行空心莲子草的清除工作,此后研究区内无空心莲子草生长,猪场废水不再受到植物带阻隔。

在清除空心莲子草前后,各监测点的 COD 质量浓度均分别维持在一个较为稳定的范围内(图 2)。在 0~20 d,监测点间距离对水体 COD 质量浓度具有显著影响,其中监测点 A 的 COD 质量浓度最高,监测点 F 浓度最低。在 22~50 d,不同监测点间 COD 质量浓度差异显著,但各监测点 COD 质量浓度差异变小。在空心莲子草覆盖期,水体 COD 质量浓度在监测点 A 至 F 的质量浓度分别为 83.7 mg/L、32.6 mg/L、21.0 mg/L、17.2 mg/L、13.5 mg/L、12.7 mg/L;相较于监测点 A,监测点 B、C、D、E、F 的 COD 质量浓度分别降低 61.1%、74.9%、79.5%、83.9%、84.8%。方差分析结果表明,监测点 B、C、D、E 之间 COD 质量浓度均有显著差异,而监测点 E 和 F 之间差异不显著。这表明空心莲子草覆盖可有效阻隔废水的扩散,监测点 E 处(距排污口 20 m)阻隔作用已经达到较好的效果。空心莲子草清除后,监测点 A、B、C、D、E、F 处的 COD 质量浓度分别为 71.9 mg/L、66.2 mg/L、54.3 mg/L、49.7 mg/L、46.4 mg/L、43.6 mg/L,与空心莲子草覆盖期间相比较,除了监测点 A 浓度下降 14.1%外,其余

各点均呈增加趋势,分别增加 103%、159%、189%、244%、243%。这同样说明空心莲子草能有效阻隔废水的扩散,在空心莲子草覆盖期养殖废水中的有机污染物主要被阻隔在 0~2 m 区域。

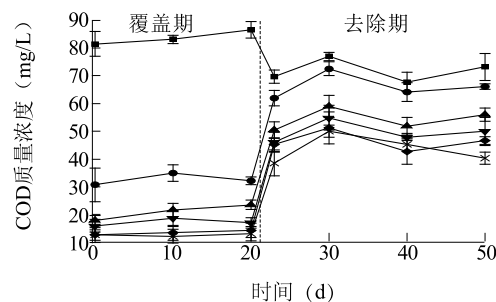


图 2 清除空心莲子草前后各监测点水体 COD 质量浓度动态变化

Fig.2 Dynamic change of chemical oxygen demands (COD) concentration before and after the removal of *Alternanthera philoxeroides* at each monitoring point

在空心莲子草去除前后,不同监测点水体  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度亦分别维持在相对稳定范围(图 3)。空心莲子草覆盖期监测结果表明,监测点 A、B、C、D、E、F 处水体  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度分别为 12.2 mg/L、2.24 mg/L、1.09 mg/L、1.13 mg/L、0.82 mg/L、0.74 mg/L,与监测点 A 相比,监测点 B、C、D、E、F 分别降低 81.6%、91.1%、90.7%、93.3%、93.9%,这表明空心莲子草能有效阻隔  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在水体中的扩散。方差分析结果表明,监测点 A、B 间及其与其他监测点间  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度呈显著差异,而在监测点 C、D、E、F 间,差异不显著。这表明在监测点 C,8 m 长的空心莲子草截污带即可达到较好的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  阻隔效果。随着空心莲子草的清除,监测点 A 的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均质量浓度急剧下降,监测点 B 同样有着明显的降低趋势,而监测点 C 至 F 的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度虽有所上升,但幅度极小。监测点 A 至 F,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度分别为 3.74 mg/L、1.46 mg/L、1.29 mg/L、1.25 mg/L、1.22 mg/L、1.18 mg/L,与空心莲子草覆盖期相比较,监测点 A 和监测点 B 处  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度分别降低了 69.3% 和 34.8%,其余各监测点均呈增加趋势,分别增加 18.3%、10.6%、48.8%、59.5%。这也表明空心莲子草覆盖对废水中  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  扩散具有有效的阻隔作用,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  主要被空心莲子草阻隔在 0~8 m。

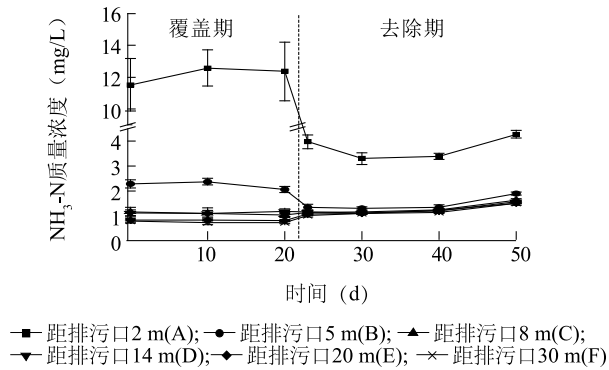


图3 清除空心莲子草前后各监测点水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度动态变化

Fig.3 Dynamic change of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration before and after the removal of *Alternanthera philoxeroides* at each monitoring point

在空心莲子草去除前后,不同监测点水体 TN 含量同样分别维持在相对稳定的范围(图4)。0~20 d 的监测结果表明,监测点 A 至 F 的 TN 质量浓度分别为 15.0 mg/L、3.48 mg/L、3.33 mg/L、3.20 mg/L、2.99 mg/L、2.74 mg/L,监测点距离对水体 TN 质量浓度有显著的影响。与监测点 A 相比,监测点 B、C、D、E、F 处 TN 质量浓度分别降低了 76.8%、77.8%、78.7%、80.1%、81.7%,表明空心莲子草能有效阻隔 TN 在水体中的扩散。方差分析结果表明,相较于监测点 A,监测点 B、C、D 的 TN 质量浓度显著减低,但 B、C、D 之间无显著差异;监测点 E 的 TN 质量浓度较监测点 B 显著下降,但与 C、D 之间无显著差异,而监测点 E、F 之间均没有显著差异,这表明本试验中 20 m 长的空心莲子草截污带即可有效阻隔废水中 TN 的扩散。22~50 d 的监测结果显示,在空心莲子草清除后,水体 TN 质量浓度分别为 5.77 mg/L、5.21 mg/L、4.70 mg/L、4.64 mg/L、4.66 mg/L、4.44 mg/L,各监测点的 TN 质量浓度差异明显减小,但仍以监测点 A 的 TN 质量浓度较高,与其他监测点存在显著差异,此外,监测点 C 至 F 间的 TN 质量浓度差异均不显著。与空心莲子草覆盖期相比较,监测点 A 处 TN 质量浓度降低了 61.5%,其余各点均呈增加趋势,分别增加 49.7%、41.1%、45.0%、55.9%、62.0%。说明空心莲子草覆盖能有效阻隔废水中 TN 的扩散,TN 主要被空心莲子草阻隔在 0~2 m 区域内。

空心莲子草清除前后,不同监测点水体 TP 质量浓度发生剧烈变化,但清除前及去除后两时间段内波动较小(图5)。0~20 d 的监测结果表明,TP

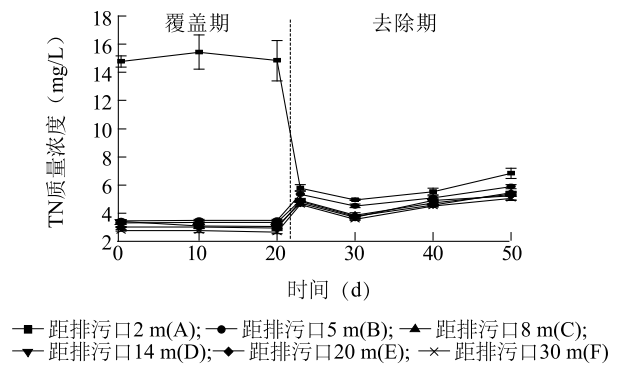


图4 清除空心莲子草前后各监测点水体 TN 质量浓度动态变化

Fig.4 Dynamic change of TN concentration before and after the removal of *Alternanthera philoxeroides* at each monitoring points

质量浓度从监测点 A 到 F 呈现下降趋势,不同监测点之间 TP 质量浓度差异显著。监测点 A 至 F 的 TP 质量浓度分别为 14.90 mg/L、10.30 mg/L、7.05 mg/L、5.66 mg/L、4.57 mg/L、3.84 mg/L,与监测点 A 相比,监测点 B、C、D、E、F 处 TN 质量浓度分别降低了 30.9%、52.7%、62.0%、69.3%、74.2%,表明空心莲子草能有效阻隔废水中 TP 在水体中的扩散。22~50 d 的监测结果显示,各监测点的 TP 质量浓度差异性明显变小,A、B 点 TP 质量浓度稍高,各监测点 TP 质量浓度分别为 8.83 mg/L、8.36 mg/L、8.08 mg/L、7.97 mg/L、7.64 mg/L、7.28 mg/L,与空心莲子草覆盖期相比较,监测点 A 和 B 处 TP 质量浓度分别降低了 40.7%和 18.8%,其余各点均呈增加趋势,分别增加 14.6%、40.8%、67.2%、89.6%。说明空心莲子草覆盖能有效阻隔废水中 TP 的扩散,TP 主要被空心莲子草阻隔在 0~5 m 区域内。

在空心莲子草覆盖时和清除后的 2 个阶段中,各监测点的水体浊度同样分别维持在相对稳定的范围(图6)。0~20 d 的监测结果表明,自监测点 A 至 F,水体浊度呈明显下降趋势,各监测点的水体浊度存在显著差异,其中 A、B 点远高于其他各点。监测点 A 至 F 的平均浊度分别为 89.0、78.9、50.2、38.3、32.8、30.2,与监测点 A 相比,B、C、D、E、F 处水体浊度分别降低了 11.3%、43.5%、57.0%、63.1%、66.1%。这表明空心莲子草对水体中悬浊物起到了阻隔效果。22~50 d 的监测结果显示,各点的水体浊度差异变小,监测点 A 至 F 的水体浊度分别为 73.8、71.5、68.7、67.1、64.4、62.1,仍以 A、B



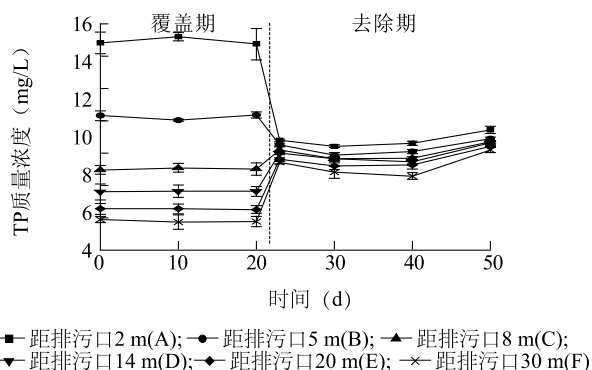


图5 清除空心莲子草前后各监测点水体 TP 质量浓度动态变化  
Fig.5 Dynamic change of total phosphorus concentration before and after the removal of *Alternanthera philoxeroides* at each monitoring point

点浊度稍高, A、B 及 E、F 点间浊度差异显著, 但 C、D 间水体浊度差异不显著。监测点 A、B 的浊度在空心莲子草清除后呈下降趋势, 分别下降了 17.1%、9.4%, 而监测点 C 至 F, 浊度则呈升高趋势, 分别增加了 36.8%、75.5%、96.1%、106.0%。说明空心莲子草对猪场废水扩散有很好的阻隔效应, 水体中悬浊物主要被阻隔在 0~5 m 的水草区域内。

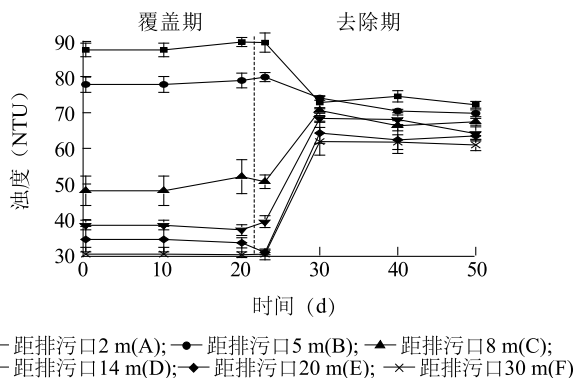


图6 清除空心莲子草前后各监测点水体浊度动态变化  
Fig.6 Dynamic change of turbidity before and after the removal of *Alternanthera philoxeroides* at each monitoring point

## 2.2 空心莲子草对猪场废水中氮、磷的沉积效果

各监测点在 50 d 内 3 次底泥 TN、TP 监测结果 (图 7) 表明, 与水质的剧烈变化不同, 清除空心莲子草前后, 排污塘内同一监测点底泥的 TN、TP 含量几乎没有变化, 不同时间段的监测结果没有显著差异。

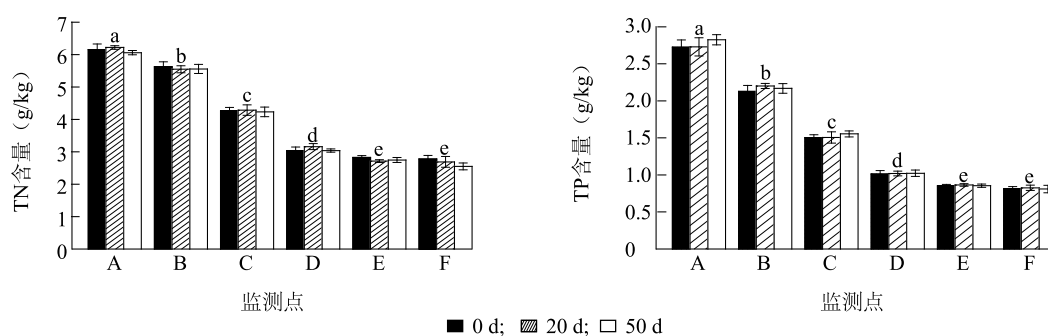
监测点与排污口的距离对底泥 TN、TP 含量具有显著影响, 各监测点底泥 TN、TP 含量与距排污口的距离均呈显著负相关 ( $r_{TN} = -0.89$ ,  $r_{TP} = -0.86$ ), 其

中监测点 A 底泥 TN、TP 含量最高, 这表明空心莲子草覆盖能阻隔废水中 TN、TP 的扩散, 使水体中 TN、TP 沉积到底泥中。本研究中监测点 A、B 底泥 TN、TP 含量是其他监测点的 1.24~3.48 倍, 说明在 0~5 m 区域内, 大量污染物被阻隔沉积下来。方差分析结果表明, 监测点 A、B、C、D 与监测点 E 间底泥 TN、TP 含量差异显著, 而监测点 E 和监测点 F 间差异不显著, 表明空心莲子草的有效截污距离为 20 m (E 监测点), 此处底泥 TN、TP 含量分别为 2.76 g/kg、0.86 g/kg, 较监测点 A, TN、TP 含量分别降低了 55%、68.9%。

## 3 讨论

综上所述, 在清除排污池塘内空心莲子草前后, 池塘水质发生显著变化, 这种变化在距排污口较近的水域表现为水质改善, 而在距排污口较远的水域表现为水质变差。在底泥中, 氮、磷养分物质大量富集于排污口附近, 且不随空心莲子草的清除发生迁移。这都表明密集生长的空心莲子草能够有效阻隔废水污染物的扩散, 使污染物在排污口沉积。猪场废水排出后, 大量污染物被空心莲子草阻隔沉降于排污口附近的底泥中, 使排污口附近底泥中污染物含量远高于远处。在距排污口更近的水域, 底泥中释放的污染物也更多, 并被空心莲子草拦截使其无法有效扩散至远处, 从而造成排污口附近水质恶劣, 而远处的水质状况较好。

由空心莲子草清除前的监测数据可知, 水体污染物大量被阻隔在距污染源 0~5 m 的空心莲子草截污带内, 尤其以 0~2 m 水域中的污染物浓度最高。其中, 空心莲子草对  $NH_4^+-N$  的阻隔作用最强, 在 5 m 后的水体中  $NH_4^+-N$  便降低了 81.6% 以上, 到 30 m 处,  $NH_4^+-N$  去除率已达 93.9%。空心莲子草截污带对浊度的改善能力最弱, 至 30 m 处, 浊度才降低了 66.1%。30 m 处的水体 COD、TN、TP 去除率分别为 84.8%、81.67%、74.2%。吴湘等<sup>[21]</sup> 研究结果表明, 在软隔离小区中空心莲子草种植 100 d 后对水体的氮、磷去除率分别为 34% 与 22%。张伟等<sup>[22]</sup> 在封闭式水泥池内进行的研究结果也表明空心莲子草对 TN 与 TP 的去除率分别为 28.8%、33.3%。这些都远低于本研究中空心莲子草截污带的污染物去除效果。可见在空心莲子草阻隔带内, 大量污染物是被阻隔在距污染源更近的区域, 而空心莲子草的



各监测点见图2注。柱形图上方不同字母表示不同监测点间有显著差异( $P<0.05$ )。

图7 不同监测点底泥氮、磷含量动态变化

Fig.7 Dynamic change of nitrogen and phosphorus at different points

吸收作用并非污染去除的主要机理。本研究结果表明,在截污带5 m后的区域中,以COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 而论,水质已达到地表水环境质量的III类水标准<sup>[23]</sup>;就TN而言,水质虽与地表水环境质量的V类水标准尚有差距,但已远优于城镇污水处理厂污染物浓度标准的一级排放标准;以TP与浊度而论,在截污带20 m后的区域中,水质也已达污染物排放的三级标准<sup>[24]</sup>。需要注意的是,距排污口30 m处的水体TP含量仍高达3.84 mg/L,磷仍是该处水体富营养化的首要因子。

空心莲子草覆盖时,在临近排污口水域(0~5 m)的各项污染物浓度比远处监测点的浓度高出3~16倍,两者水质差异显著。这种差异在水草清除后大大降低,22 d后的监测数据表明,监测点A的各项污染物浓度仅为监测点F的1.28~3.27倍。清除空心莲子草后,就COD与TN 2项指标而言,水质改善水域为距排污口2 m内的区域,而更远的水域则普遍表现为水质反而变差;就 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP与浊度3项指标而言,水质改善区域为距排污口5 m内的区域,在更远的水域表现为水质的恶化。由此可见,临近污染源处,特别是0~2 m范围内,是污染物集中聚集的区域,在该区域空心莲子草截污带的存在对污染物的扩散起到了有效的阻隔作用。刘国峰等<sup>[25]</sup>在太湖竺山水环境修复中也发现,水葫芦工程措施对颗粒物及蓝藻具有滞留效果,使植物区的TN、TP含量更高。徐斌等<sup>[26]</sup>利用WASP水质模型进行伊通河中人工湿地和曝气复氧工程的水质模拟与评估,其研究表明污染源输入端污染物浓度远高于距污染源更远区域,这与本研究中空心莲子草覆盖池塘时各监测点水质变化情况一致。在本研究中,20 m空心莲子草截污带后的水质与30 m截

污带后的水质几乎没有差别,这表明在猪场排污口布置20 m的空心莲子草截污带便能够起到较好的猪场废水源头控制效果。

由底泥的监测数据可见,大量的污染物聚集在排污口附近的区域中(0~5 m),在进行塘内底泥清淤等修复作业时,主要的工程任务可以集中在距排污口0~14 m的范围内。猪场废水作为一种固液混合的高浓度废水,空心莲子草的存在有效阻隔了猪场废水排放时的污染扩散,特别是阻止了固态物质向其他水域的迁移,使其淤积在排污口附近的底泥中。袁旭音等<sup>[27]</sup>对太湖底泥氮、磷含量空间分布情况的研究结果表明,靠近居民生活区、农业区、养殖区周围的底泥氮、磷含量明显高,这与污染物在排污口周围沉积有关。在空心莲子草清除前后,底泥中氮、磷含量并未发生显著变化。这主要是因为该重度富营养化的底泥源自5年以上猪场排污累积,是由空心莲子草截污带持续截留污染物沉积造成的,而空心莲子草清除后,本研究的底泥监测时间较短,30 d的无阻隔排污对已重度富营养化的底泥影响甚微。且在底泥环境中,污染物固定后迁移难度较大,故各监测点底泥中氮、磷含量变化不大。这也与试验池塘内水面波动较小,水力条件稳定,试验周期内温度变化较小等有关<sup>[28]</sup>。本研究区域的底泥氮、磷含量分布趋势与未清除空心莲子草前的水体污染物浓度相对应,因为在空心莲子草覆盖水域时,水域中的污染物迁移受到阻隔,而底泥TN、TP含量更高的区域,其释放的大量污染物同样被限制在附近水域,未能扩散至更远区域的水体中。

本研究通过对猪场排污塘中空心莲子草清除前后的水质及底泥监测,分析这一重度富营养化环境中密集生长的空心莲子草清除前后的水体 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、

TN、TP、COD、浊度与底泥 TN、TP 含量的变化,发现空心莲子草形成的植物带在猪场排污中起到了有效的源头控制作用。研究结论如下:(1)生物阻隔作用是空心莲子草植物带在猪场污水净化过程中的主要机制。空心莲子草在猪场排污池塘中的生长,使得猪场废水中的污染物在排出后被大量阻隔并淤积于排污口附近的底泥中,且在空心莲子草清除后,被拦截固定于底泥中的污染物基本不再扩散。空心莲子草植物带对水体各指标的改善作用由强到弱依次为: $\text{NH}_4^+-\text{N}$  > COD > TN > TP > 浊度。(2)20 m 密集空心莲子草植物阻隔带能够起到理想的生物阻隔效果。本研究中 20 m 处水体 COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN、TP、浊度较排污口处分别下降了 80.1%、93.3%、83.8%、69.4%、63.1%。(3)空心莲子草作为入侵植物,易在富营养化水体中快速生长,给河道生态环境与航运带来诸多不利影响,负评较多。但利用空心莲子草快速繁殖与旺盛生长的习性,辅以控制性管理,将空心莲子草用于高浓度养殖废水的源头控制也不失为一种经济、环保的生物处理技术。此外,凤眼莲、大藻、香菇草等水生植物也易在富营养化水体中迅速繁殖,这类密集生长的植物带常见于水网密集地区的中小型养殖场排污口附近,这些植物带是否具有相似的生物阻隔作用,还有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 王子臣,吴 昊,管永祥,等.养殖场粪污“三分离一净化”综合处理技术集成研究[J].农业资源与环境学报,2013,30(5):63-67.
- [2] 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部.第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2010-02-06) [2018-05-10]. [http://www.stats.gov.cn/tjgh/qt-tjgh/qgqtjgh/t20100211\\_402621\\_161.htm](http://www.stats.gov.cn/tjgh/qt-tjgh/qgqtjgh/t20100211_402621_161.htm).
- [3] 贾 晗,吴若菁,黄 婧,等.生物法处理畜禽养殖污水的研究现状与展望[J].水处理技术,2008(7):7-11.
- [4] 汤贝贝,张振华,卢 信,等.养殖废水中抗生素的植物修复研究进展[J].江苏农业学报,2017,33(1):224-232.
- [5] 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.
- [6] 魏甲彬,杨知建,徐华勤,等.人工湿地处理畜禽养殖废水研究进展[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2013,39(S1):135-139.
- [7] 刘作云,彭忆兰,付美云.3种常见水生植物对养殖废水中化学需氧量的去除效果[J].南方农业学报,2016,47(6):911-915.
- [8] 翁伯琦,林 嵩,王义祥.空心莲子草在我国的适应性及入侵机制[J].生态学报,2006,26(7):2373-2381.
- [9] 张文艳,庞 静.空心莲子草的入侵机制及其防治对策[J].作物研究,2013,27(3):302-306.
- [10] 刘雨芳,彭梅芳,曾强国,等.空心莲子草在稻田生态系统中的生长特性及对水稻生长发育的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(8):1043-1047.
- [11] 褚延梅,杨 健,李景吉,等.三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响[J].生态学报,2014,34(6):1411-1417.
- [12] ALI H, KHAN E, SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications[J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 869-881.
- [13] VAJRABEL S, SARAVANAN P. Accumulation of chromium and its effects on physiological and biochemical parameters of *Alternanthera philoxeroides* seedlings[J]. Journal of Pharmacy Research, 2013, 7(7): 633-639.
- [14] DING B, SHI G, XU Y, et al. Physiological responses of *Alternanthera philoxeroides* (Mart.) Griseb leaves to cadmium stress [J]. Environmental Pollution, 2007, 147(3): 800-803.
- [15] YANG Y, WEI Z, ZHANG X, et al. Biochar from *Alternanthera philoxeroides* could remove Pb (II) efficiently [J]. Bioresource Technology, 2014, 171: 227-232.
- [16] RANE N R, CHANDANSHIVE V V, WATHARKAR A D, et al. Phytoremediation of sulfonated Remazol Red dye and textile effluents by *Alternanthera philoxeroides*: an anatomical, enzymatic and pilot scale study[J]. Water Research, 2015, 83: 271-281.
- [17] 高建明,张世清,陈河龙,等.喜旱莲子草的利用现状及展望[J].热带生物学报,2014,5(4):405-408.
- [18] 龚 龙,韩士群,周 庆.水生植物对螃蟹养殖水体原位修复及其强化净化效果[J].江苏农业学报,2015,31(2):342-349.
- [19] 王心芳,魏复盛,齐文启.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002:422-596.
- [20] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000:146-169.
- [21] 吴 湘,杨肖娥,李廷强,等.漂浮植物对富营养化景观水体的净化效果研究[J].水土保持学报,2007,21(5):128-132.
- [22] 张 伟,韩士群,郭起金.凤眼莲、空心莲子草、鲢鱼对富营养化水体藻类及氮、磷的去除作用[J].江苏农业学报,2012,28(5):1037-1041.
- [23] 国家环境保护总局.地表水环境质量标准:GB3838—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [24] 国家环境保护总局.城镇污水处理厂污染物排放标准:GB 18919—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [25] 刘国锋,包先明,吴婷婷,等.水葫芦生态工程措施对太湖竺山湖环境修复效果的研究[J].农业环境科学学报,2015,34(2):352-360.
- [26] 徐 斌,杨悦锁,王 咏,等.生态修复工程条件下污染河流水质模拟和应用[J].应用生态学报,2017,28(8):2714-2722.
- [27] 袁旭音,陈 骏,陶于祥,等.太湖北部底泥中氮、磷的空间变化和环境影响[J].地球化学,2002(4):321-328.
- [28] 代 政,祁艳丽,唐永杰,等.上覆水环境因子对滨海水库沉积物氮磷释放的影响[J].环境科学研究,2016,29(12):1766-1772.

(责任编辑:张震林)