

梭鱼草(*Pontederia cordata*)拦截沟渠中氮、磷的效果研究

余红兵^{1,2}, 杨知建², 肖润林³, 张树楠³, 刘 锋³, 向佐湘², 单武雄²

(1. 湖南城市学院建筑与城市规划院, 湖南 益阳 413000; 2. 湖南农业大学农学院, 湖南 长沙 410128;
3. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125)

摘要:通过沟渠中种植观赏植物梭鱼草, 研究了不同时间沟渠中梭鱼草段与无植物段拦截净化氮磷的效果以及梭鱼草自身氮磷含量、生物量季节变化。结果表明: 梭鱼草段与无植物段都会净化沟渠水中的氮磷含量, 全氮、全磷含量的降低(3.37%–3.33%)一般要高于硝态氮、铵态氮的变化(–3.66%–7.14%), 梭鱼草段拦截氮磷的能力(6.82%–33.33%)明显高于无植物段的自然净化(–3.66%–6.67%); 降雨后, 沟渠水中全氮、硝态氮含量呈先增加后降低的变化趋势, 铵态氮含量变化则不稳定, 全磷含量在雨后第 2d 含量达到最高, 然后趋于平稳; 梭鱼草氮磷含量以及生物量季节动态变化在 10 月份达到最高值, 可确定此时为其最佳收割期, 其氮磷含量分别为 28.38g/kg、4.10g/kg, 生物量为 0.19kg/m²。梭鱼草收割全年可从沟渠带走氮、磷分别为 5.36g/m²、0.78g/m²。本研究结果对开发观赏植物在沟渠修复中的应用提供理论依据。

关键词:梭鱼草; 沟渠; 拦截; 氮磷; 收割时期

中图分类号: X173

文献标识码: B

文章编号: 1000-0275(2012)04-0508-05

Research of Ditch Interception Effect of Nitrogen and Phosphorus of *Pontederia Cordata*

YU Hong-bing^{1,2}, YANG Zhi-jian², XIAO Run-lin³, ZHANG Shu-nan³, LIU feng³,
XIANG Zuo-xiang², SHAN Wu-xiong²

(1. College of Architecture and Urban Planning, Hunan City University, Yiyang, Hunan 431000, China; 2. College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3. Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China)

Abstract: Through planting the ornamental plant *Pontederia cordata* in the ditch, the effect of interception and purification water of *Pontederia cordata* ditch (eco-ditch) and without plant ditch (natural ditch) was studied at different times, and studied seasonal change of the contents of aboveground nitrogen, phosphorus and biomass of *Pontederia cordata*. The results showed that eco-ditch and natural ditch could purify nitrogen and phosphorus contents of water, and reduction range(3.37%–33.33%) of total nitrogen and total phosphorus was higher than reduction range(–3.66%–7.14%) of nitrate and ammonium nitrogen, the interception capacity of eco-ditch (6.82%–33.33%) was obviously higher than natural purification of natural ditch (–3.66%–16.67%). After raining the content of total nitrogen and nitrate nitrogen in ditch water had the tendency of increasing firstly and then declining, while the content of ammonium nitrogen was unstable, the content of total phosphorus reached highest values after raining the 2nd, then tended to steadily. Seasonal dynamics of the contents of aboveground nitrogen, phosphorus and biomass of *Pontederia cordata* reached highest values in October, so, it was the best time to harvest. The content of the aboveground nitrogen, phosphorus was 28.38 g/kg and 4.10g/kg and biomass was 0.19kg/m². The harvest of *Pontederia cordata* would remove 5.36g/m² of nitrogen and 0.78g/m² of phosphorus every year, the objective is to provide the theory basis for restoration application of the development ornamental plant in ditch.

Key words: *Pontederia cordata*; ditch; interception; nitrogen and phosphorus; harvest time

国内外学者对水生植物在水体净化、生态修复等方面已经进行了很多研究^[1–6], 并且已经应用到生态修复、水污染治理以及农业非点源污染控制等多个方面, 但研究重点侧重在芦苇、茭白品种上以及湖泊的治理上^[7–9]。水生植物作为生态沟渠的重要组成部分, 通过沟渠拦截径流和泥沙, 植物滞留和吸收氮、磷, 实现生态拦截氮、磷的功能^[9–11]。

目前, 关于农田排水沟渠中的水生观赏植物对氮、磷截留效应方面的研究不多, 而水生观赏植物在水体景观工程中

因其景观价值高、水体净化能力强而引起关注。梭鱼草又称: 北美梭鱼草, 雨久花科梭鱼草属多年生挺水或湿生观赏类植物, 花期 5–10 月, 利用其植株生长速度快而大量吸收污水中营养物质和庞大密实的根系产生的机械滤清效果特点, 来拦截流经沟渠流向河道中的农业面源污染物。目前对于梭鱼草后期收割带走氮、磷的量及其收割期的探讨也未见报道, 因此, 本研究采用在农田排水沟渠中种植观赏植物梭鱼草的方法, 通过梭鱼草生物量的季节动态变化规律及其对氮、磷

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“农业生态系统氮磷循环与调控”(编号: KZCX2-YW-T07); 外国专家局项目“农业生态系统氮磷循环与调控”(编号: 20100491005–8); 湖南省科技厅项目(编号: 2009SK3024)。

作者简介: 余红兵(1976–), 女, 博士生, 讲师, 主要从事园林植物及沟渠湿地植物净化研究; 通讯作者: 肖润林(1963–), 男, 研究员, 主要从事农林复合生态系统管理研究。

收稿日期: 2012–02–28, **修回日期:** 2012–05–16

的积累量进行研究分析,为梭鱼草最佳收割期的探讨提供合理数据,也为生态沟渠的系统管理与有效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验在湖南省长沙县金井镇脱甲村飞跃农田之间一条南北向的沟渠中进行,该沟渠为2008年度由国家农业部综合开发,是典型城郊农业区环境质量修复与功能提升技术研究与示范基地。试验前对该自然排水沟渠按工艺要求进行了结构工程改造以及植物种植,沟渠常年保持一定水位,暴雨时容易发生沟渠水位壅集(茭白等植物易被淹淘汰),因梭鱼草根系发达、抗倒伏并且具有一定观赏价值,且该沟渠旁边是一条乡村公路,可在梭鱼草生长季节形成良好的生态景观廊道,于2010年选择其隔段种植,并已正常运行1年,以便进行沟渠植物氮磷吸收以及茶园覆盖还田养分循环利用技术研究。当地属于中亚热带南缘季风气候,年平均气温16.5℃~20.5℃,1月平均气温11.9℃,极端最低气温-5.2℃,7月平均气温27.9℃,极端最高气温39.1℃,≥10℃的有效积温6539℃,年平均降雨量1389mm,降雨多集中在4~6月,占全年降雨的76%。

1.2 试验设计

试验主要设置梭鱼草沟渠段和无植物沟渠段两种处理,自上而下分别选择无侧面外来水的梭鱼草沟渠段250m,无植物沟渠段250m,每个处理都是由水泥砌成的堰,中间留有一出水口形成3个监测断面,在试验期间均有水从出水口平缓流出。断面1设置在梭鱼草沟渠段的上端;断面2设置在梭鱼草沟渠段的下端,或无植物沟渠段的上端;断面3设置在不植物沟渠段的下端。沟渠水源主要来自上游水塘的生活污水和农田排水,4~6月湖南属多雨季节,降雨以及农田灌溉会有大量排水流向沟渠,因此选择这段时间研究梭鱼草沟渠段和无植物沟渠段水体氮磷含量的变化规律,从而评估生态拦截效应。

1.3 评价指标

定量分析梭鱼草段与无植物沟渠段对氮、磷拦截的影响,作为拦截效果的评价指标。计算公式如下:

$$R_1 = \frac{(C_{\text{断面1}} - C_{\text{断面2}})}{C_{\text{断面1}}} \times 100 \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{(C_{\text{断面2}} - C_{\text{断面3}})}{C_{\text{断面2}}} \times 100 \quad (2)$$

式中: R_1 —梭鱼草段拦截水样氮或磷的能力(R_1),%; $C_{\text{断面1}}$ —梭鱼草沟渠段的上端水样氮、磷浓度,mg/L; $C_{\text{断面2}}$ —梭鱼草沟渠段的下端水样氮、磷浓度,mg/L; R_2 —无植物段拦截水样氮或磷的能力(R_2),%; $C_{\text{断面2}}$ —无植物沟渠段的上端水样氮、磷浓度,mg/L; $C_{\text{断面3}}$ —无植物沟渠段的下端水样氮、磷浓度,mg/L。

1.4 样品采集与分析方法

在2011年4~6月每月上旬分别在1,2,3三个监测断面出水口处采集水样1次,并于2011年6月17日雨过后,在17日(下雨当天),18日,19日,20日,21日,22日分别在三个

监测断面取水样6次,每次取样500ml,不同端面氮磷含量及雨后几天氮磷含量结果均取平均值。 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 用流动分析仪测定;TN用碱性过硫酸钾消化,然后用流动分析仪测定;TP用过硫酸钾消解钼锑抗分光光度法测定^[13]。从4月开始,每隔1月采用样方(1m×1m)植物段的梭鱼草,并于10月采集地下部分,采用收获法采集地上部分样品,采用挖掘法采集地下部分,取样时将样方内茎叶齐地收割并将根状茎与须根全部挖出,带回实验室洗净并自然风干测其鲜重。所有采样样品于105℃杀青2h,80℃烘干至恒重,获取干物重,计算生物量。并烘干、粉碎等预处理,分析梭鱼草地上及地下部分吸收的氮、磷含量。各植物样品先用 $\text{H}_2\text{SO}_4-\text{H}_2\text{O}_2$ 消化后,用流动分析仪测全氮,用钼锑抗比色法测全磷^[13]。运用Microsoft Excel 2003进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 沟渠不同断面拦截氮磷含量效果分析

通过对试验沟渠中从上向下的3个断面中水中氮磷含量的变化趋势图(图1、图2)分析,可以看出,不同断面中水中氮磷含量存在一定的差异。各断面水体中全氮、硝态氮浓度均有不同程度的下降,铵态氮浓度先下降后稍增加,各断面水体全磷的浓度下降情况则与全氮浓度下降情况相同。从沟渠上游梭鱼草段到下游无植物段,即在断面1到断面3处,沟渠水中全氮、全磷含量是逐渐下降的。其中,全氮从3.05mg/L减少为2.24mg/L和2.15mg/L,全磷从0.10mg/L减少为0.11mg/L和0.10mg/L,硝态氮含量也逐渐下降,从0.42mg/L减少为0.39mg/L和0.38mg/L,而铵态氮含量从0.88mg/L减少为0.82mg/L然后增加到0.86mg/L。上述结果说明无论是梭鱼草生态拦截段,还是无植物拦截的沟渠段,都会一定程度上降低沟渠水中的氮磷含量,但梭鱼草段拦截氮磷的能力明显高于无植物段的沟渠自然净化,且全氮和全磷的拦截程度明显高于铵态氮和硝态氮的拦截。



图1 沟渠不同处理断面水中氮素含量变化

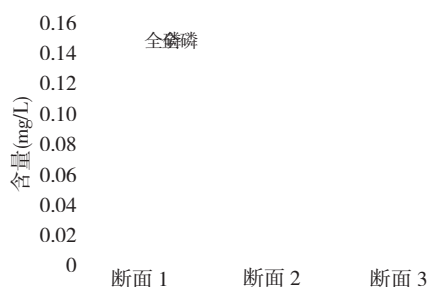


图2 沟渠不同处理断面水中磷含量变化

同时,从图 1、图 2、表 1 可以看出,梭鱼草的生态拦截在沟渠的水体净化中发挥重要作用。断面 1 和断面 2 之间为梭鱼草沟渠段,水中全氮全磷在梭鱼草沟渠段有明显降低,其中,梭鱼草拦截全氮、全磷的能力分别为 27.05%、33.33%,拦截铵态氮、硝态氮的能力分别为 6.82%、7.14%,说明梭鱼草可以吸收、滞留和净化泥沙携带的颗粒态或不溶态的氮磷。断面 2 和断面 3 之间为无植物沟渠段,因沟渠水流的自然净化,水中氮磷在无植物沟渠段虽有一定降低,但其净化能力明显减弱,而铵态氮甚至增加。且其自然净化全氮、全磷的效果相对明显,分别为 3.37%、16.67%,而净化铵态氮、硝态氮的能力分别为 -3.66%、2.56%。

表 1 沟渠梭鱼草段与无植物段拦截氮磷的能力

处理	全氮 (%)	全磷 (%)	铵态氮 (%)	硝态氮 (%)
梭鱼草段	27.05	33.33	6.82	7.14
无植物段	3.37	16.67	-3.66	2.56

就梭鱼草段和无植物段不同处理对水中不同形态养分的净化效果看,梭鱼草段拦截氮磷的能力(6.82%~33.33%之间)明显高于无植物段的自然净化(-3.66%~16.67%之间)。生态沟渠中的植物在截留和净化过程中起到重要作用的原因:一方面,植物根系巨大表面会附着大量微生物,根际会创造有利于各种微生物生长的微环境;另一方面,植物可通过茎叶向下输送氧气,在根系附近形成好氧微区,促进有机质、氮、磷等的转化;此外,植物对营养物质的吸收也是净化的主要途径^[4]。

2.2 沟渠水中雨后氮磷含量时间变化分析

通过对沟渠水中雨后氮含量时间变化(图 3)分析:可以看出,从下雨当天(17 日)开始水中全氮含量呈现先增加后降低的变化趋势,在雨后第 2d(19 日)含量达到最高,为 2.53mg/L。硝态氮含量的变化趋势与全氮含量变化趋势一致,同时在雨后第 2d(19 日)含量达到最高,为 0.46mg/L,且其变化相对比较平稳。说明降雨会有大量农田排水流向沟渠,雨后前 2d 由于受底泥释放、泥沙沉积等因素影响,导致全氮、硝态氮含量不稳定,但从雨后第 3d(20 日)开始,沟渠水中的全氮、硝态氮含量呈现降低且趋于平稳的状态。而水中铵态氮含量变化则不稳定,下雨当天较高,为 0.92mg/L,雨后第 1d 较低 0.74mg/L,雨后第 2d(19 日)含量又增高,在 17 日,19 日,21 日为波峰,18 日,20 日,22 日为波谷。可能是因为梭鱼草沟渠内部呈现好氧和厌氧交替的环境条件,结合底泥和植物的作用以及农田排水流向沟渠,导致铵态氮含量很不稳定的主要原因。

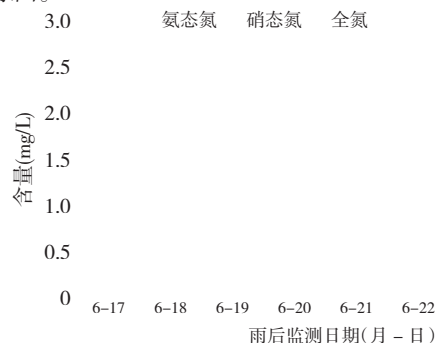


图 3 氮素含量雨后变化情况

通过对沟渠水中雨后全磷含量时间变化(图 4)分析可知:下雨当天(6 月 17)沟渠水中全磷含量为 0.11mg/L,然后降低再呈现逐渐增加趋势,在雨后第 2d(19 日)含量达到最高,为 0.13mg/L,然后趋于平稳,雨后 3d 均为 0.10mg/L。说明水中全磷含量雨后前 2d 由于受底泥释放、泥沙沉积等因素影响,使全磷含量变化不稳定,再者,由于水生植物可以直接从水层和底泥中吸收磷,并同化为自身所需要的物质,水生植物对磷的吸收,打破水体中磷平衡,使得水体中磷含量变得不稳定。

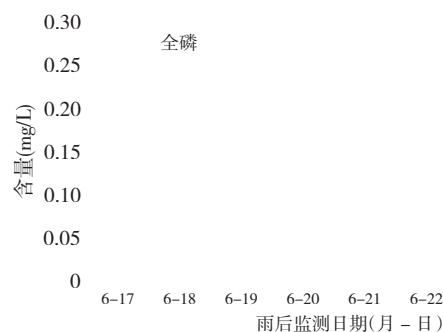


图 4 磷含量雨后变化情况

2.3 沟渠梭鱼草氮磷含量及生物量季节变化

图 5 表明,梭鱼草氮、磷含量都随季节变化而变化,在整个生长季节均表现先增加后降低的趋势。在雨季(4~6 月),梭鱼草地上部分含氮量迅速增加,在 10 月份达到最高,为 28.38 g/kg,进入冬季后逐渐降低,12 月份降到 21.40g/kg。梭鱼草地上部分含磷量变化相对平稳,也在 10 月份达到最高,为 4.10 g/kg,12 月份为 2.60 g/kg。图 6 显示,梭鱼草生物量的季节动态变化呈逐渐增加后降低的趋势,随着梭鱼草生育期的生长,生物量也逐渐增加,在其营养生长后期,生物量达到最高值,然后因植株枯萎,生物量又开始降低。生物量最大值出现在 10 月,为 0.19kg/m²。图 6 也表明,植物氮、磷吸收量也

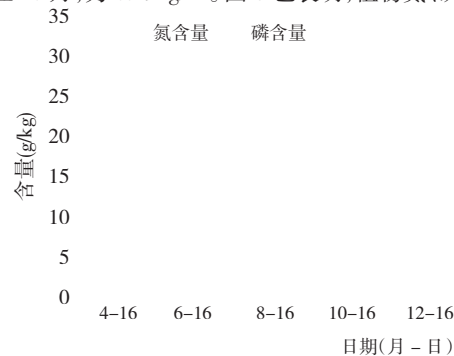


图 5 梭鱼草地上部分氮、磷含量变化

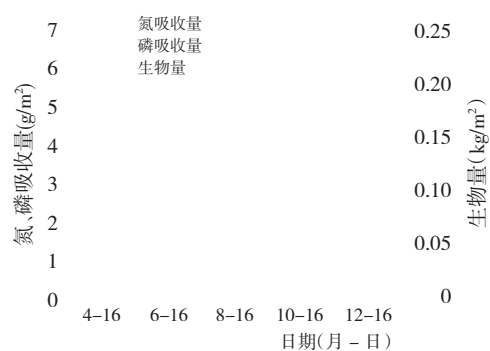


图 6 梭鱼草地上部分氮、磷吸收量和生物量变化

随季节变化而变化,季节变化趋势与生物量的变化一致,这表明植物氮、磷吸收量主要来自其生物量。

由于梭鱼草属于根茎型挺水植物,也可以通过根部从沟渠底泥中吸取氮、磷营养元素,从而降低底泥中氮、磷的含量。表2结果表明,梭鱼草根部分10月份氮、磷含量分别为18.34 g/kg、2.65 g/kg,生物量为0.41 kg/m²,梭鱼草全年可通过根部从沟渠底泥中吸取氮、磷分别为7.59g/m²、1.10g/m²,从本研究中的氮磷吸收量看,将梭鱼草应用于沟渠作为拦截氮磷植物,地上与地下部分均可取得较好效果。因此,沟渠中种植挺水植物梭鱼草将成为修复沟渠水体的重要途径。沟渠梭鱼草段氮磷去除的重要作用机理主要是因为植物生长及其根系—土壤微生物系统的截留、微生物降解、氧化还原等作用。

表2 梭鱼草地上与地下部分(10月)氮磷吸收量和生物量

植物部位	氮含量(g/kg)	氮吸收量(g/m ²)	磷含量(g/kg)	磷吸收量(g/m ²)	生物量(kg/m ²)
地上部分	28.38	5.36	4.10	0.78	0.19
地下部分	18.34	7.59	2.65	1.10	0.41

2.4 梭鱼草最佳收割期的确定及收割覆盖

从图5、图6可以看出,梭鱼草在整个生长发育期生物量以及氮、磷含量和吸收量呈明显的动态变化,表2表明,梭鱼草在10月份地上部分氮、磷含量达到最高值,分别为28.38g/kg、4.10g/kg,生物量为0.19kg/m²,梭鱼草收割全年可从沟渠带走氮、磷分别为5.36g/m²、0.78g/m²,由此说明梭鱼草在10月份收割能充分发挥其在沟渠中拦截氮、磷的能力,为观赏水生植物在沟渠进行推广应用提供依据。

在确定最佳的收割期对梭鱼草进行地上收割时,不仅要考虑其充分拦截氮磷等营养物的能力,同时还应考虑到梭鱼草的观赏价值。梭鱼草作为观赏植物,其花期为5~10月,且植株具有很强的观赏特性等优点,因此,在梭鱼草的生长晚期10月底,及时收割,即避免了对水体产生二次污染,从而兼顾了梭鱼草的景观价值和净化水体功能的充分发挥。同时,在长沙县金井镇的百里茶廊,开展沟渠植物氮磷吸收—茶园覆盖还田养分循环利用技术研究,即将收割的梭鱼草覆盖到丘陵茶园,使其吸收的氮磷循环利用,并定期进行茶园土壤、茶园杂草等生态环境调查研究,这也进一步发挥了梭鱼草的经济效益和生态效益,此研究有待进一步深入。

3 讨论

农田排水沟渠对氮、磷均有一定程度的截留效应,而水生植物的存在可增强该截留效应。在本研究中,梭鱼草生态拦截氮磷的能力明显高于无植物段的自然净化。徐红灯等^[15]研究结果也表明种植有水生植物的生态沟渠对氮、磷的截留效果明显好于自然沟渠,生态沟渠氮、磷的截留效率均在30%以上,而自然沟渠的截留效率为20%~30%。其主要原因是由于梭鱼草发达的根系,有助于硝化细菌的生长,使沟渠底泥中的硝化作用增强,有利于氮的吸收和转化;另外,水生植物可以直接从水层和底泥中吸收氮、磷,并同化为自身所需要的物质,水生植物对磷的去除是通过植物吸收、微生物转化积累及物理化学等几方面共同作用完成的^[16],使作为水体中磷的源和汇的沉积物—水界面发挥汇的作用,打破了界面的

平衡,因此有利于磷的吸附和沉积^[17]。无植物的沟渠段,由于缺少根区的氧化环境,其对氮、磷的拦截能力也就低于有梭鱼草的沟渠段。杨林章等^[18]研究认为植物不仅可以通过吸收同化去除水体中的一部分氮磷,还能产生有利于水体氮磷去除的环境,如根系的泌氧能创造有利于硝化—反硝化反应进行的厌氧—好氧环境,沟底植物发达的根系能降低流速而有利于水流中颗粒物质的沉淀。一年来生态沟渠系统植物组合所累积的氮磷量高于底泥中所累积的氮磷量,还形成了良好的生态景观。姜翠玲等的研究也表明,我国长江中下游地区沟渠去除非点源污染物的主要机制就是植物对营养物质的吸收,芦苇和茭白对N的吸收能力较高,湿地植物定期收割是净化非点源污染物的关键措施。湿地植物的吸收是净化非点源污染物的一个重要因素,每年秋季芦苇地上部分收割以后,可带走818kg/hm²的N和103.6 kg/hm²的P,茭草通过收割可带走131 kg/hm²的N和28.9 kg/hm²的P,解决了植物的二次污染问题^[9]。

降雨后氮在沟渠系统中的转化主要通过沉积作用、脱氮作用、植物吸收和渗滤作用等^[19-21]。沟渠可以在降雨后截留大部分颗粒态氮,脱氮也是氮从水体最终去除的一个主要过程。本研究结果显示沟渠系统在降雨后,沟渠水中全氮、硝态氮含量呈先增加后降低的变化趋势,铵态氮含量变化则不稳定,其主要原因可能是降雨径流在短时间内的汇入和沟渠系统的不稳定性使氮的各项转化受到影响,但随时间增加,这种影响逐渐减少,表明沟渠系统同时又具有一定的抗冲击修复作用,在一定时间内可逐渐恢复稳定,使氮的各种转化作用得以发挥^[22]。本研究全磷含量在雨后第2d含量达到最高,然后趋于平稳,这与降雨后较大的径流使磷的转化作用受影响,出现浓度增加并在雨后第2d达到最高,但是由于底泥对磷的吸附和水中颗粒物的增加,再加上沟渠系统的抗冲击修复性,使磷的转化作用迅速恢复,总磷浓度趋于平稳。

4 结论

(1) 由于沟渠自身净化和梭鱼草的拦截净化作用,均对沟渠中的氨态氮、硝态氮、总氮和总磷都有着不同程度的降解能力;且梭鱼草段拦截氮磷的能力(6.82%~33.33%之间)明显高于无植物段的自然净化(-3.66%~16.67%之间);梭鱼草段与无植物段都会净化沟渠水中的氮磷含量,全氮、全磷含量的降低(3.37%~33.33%之间)一般要高于硝态氮、铵态氮的变化幅度(-3.66%~7.14%之间)。

(2) 在降雨结束以后,沟渠水中全氮、硝态氮含量呈先增加后降低的变化趋势,前两天不稳定,但从雨后第3d开始,其含量呈现降低且趋于平稳的状态,铵态氮含量变化则不稳定,下雨当天沟渠水中全磷含量为0.10mg/L,然后降低再呈现逐渐增加趋势,在雨后第2d(19日)含量达到最高,为0.13mg/L,然后趋于平稳。

(3) 梭鱼草地上部分氮磷含量以及生物量季节动态变化在10月中旬达到最高值,由此确定此时为梭鱼草最佳收割期,其氮磷含量分别为28.38g/kg、4.10g/kg,生物量为0.19kg/m²,梭鱼草收割全年可从沟渠带走氮、磷分别为5.36g/m²、0.78g/m²,这既避免了对水体产生二次污染,又兼顾

了梭鱼草的景观价值和净化水体功能的充分发挥。

(4) 同时,开展沟渠植物氮磷吸收——茶园覆盖还田养分循环利用技术研究,将收割的梭鱼草覆盖到丘陵茶园,使其吸收的氮磷循环利用,定期进行茶园土壤、茶园杂草等生态环境调查研究,这也进一步发挥了梭鱼草的经济效益和生态效益。此研究有待进一步深入。

参考文献:

- [1] 汤显强, 黄岁樑. 人工湿地去污机理及国内外应用现状[J]. 水处理技术, 2007, 33 (2): 9-13.
- [2] 袁东海, 任全进, 高士祥, 等. 几种湿地植物净化生活污水 COD、总氮效果比较[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2337-2341.
- [3] 方云英, 杨肖娥, 常会庆, 等. 利用水生植物原位修复污染水体[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 407-412.
- [4] 胡秋香, 赵永军, 任丽君, 等. 潜流型菖蒲人工湿地不同 C/N 对污染物的去除效率[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 473-478.
- [5] Lacoul P, Freedman B. Relationships between aquatic plants and environmental factors along a steep Himalayan altitudinal gradient[J]. Aquatic Botany, 2006, 84 (1): 3-16.
- [6] Calheiros C S, Duque A F, Moura A, et al. Changes in the bacterial community structure in two-stage constructed wetlands with different plants for industrial wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13): 3228-3235.
- [7] 历恩华. 大型水生植物在浅水湖泊生态系统营养循环中的作用[D]. 武汉:中国科学院武汉植物园, 2006.
- [8] 雷泽湘. 太湖大型水生植被及其环境效应研究[D]. 广东:暨南大学, 2006.
- [9] 姜翠玲, 范晓秋, 章亦兵. 非点源污染物在沟渠湿地中的累积和植物吸收净化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1351-1354.
- [10] Abe K, Ozaki Y. Removal of N and P from eutrophic pond water by using plant bed filter ditches planted with crops and flowers[J]. Plant and Soil Sciences, 2002, 92(11): 956-957.
- [11] Gill S L, Spurlock F C, Goh K S, et al. Vegetated ditches as a management practice in irrigated alfalfa[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 144(1-3): 261-267.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999.
- [14] 胡宏祥, 朱小红, 黄界颖, 等. 关于沟渠生态拦截氮磷的研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(2): 141-145.
- [15] 徐红灯, 席北斗, 王京刚, 等. 水生植物对农田排水沟渠中氮、磷的截留效应[J]. 环境科学研究, 2007, 20(2): 84-88.
- [16] Moustafa M Z. Analysis of phosphorus retention in free-water surface treatment wetlands[J]. Hydrobiology, 1999, 392(1): 41-53.
- [17] 江永春, 吴群河. 磷的沉积物——水界面反应[J]. 环境技术, 2003 (增刊): 16-19.
- [18] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1371-1372.
- [19] 徐红灯, 席北斗, 翟丽华. 沟渠沉积物对农田排水中氨氮的截留效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5): 1924-1928.
- [20] 姜翠玲. 沟渠湿地对农业非点源污染物的截留和去除效应[D]. 南京:河海大学, 2003.
- [21] Senzia M A, Mashauri D A, Mayo A W. Suitability of constructed wetlands and waste stabilization ponds in wastewater treatment: nitrogen transformation and removal[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003(28): 1117-1124.
- [22] 徐红灯, 王京刚, 席北斗, 等. 降雨径流时农田沟渠水体中氮、磷迁移转化规律研究[J]. 环境污染与防治, 2007, 29(1): 20-21.