



水土保持学报  
*Journal of Soil and Water Conservation*  
ISSN 1009-2242, CN 61-1362/TV

## 《水土保持学报》网络首发论文

题目: 3种浮床植物对关中地区2种污染源涝池水体净化效率研究  
作者: 苏媛, 高照良, 姜永才, 张帅, 张恒, 冯志倩, 周家辉  
收稿日期: 2019-11-15  
网络首发日期: 2020-06-03  
引用格式: 苏媛, 高照良, 姜永才, 张帅, 张恒, 冯志倩, 周家辉. 3种浮床植物对关中地区2种污染源涝池水体净化效率研究[J/OL]. 水土保持学报.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1362.TV.20200602.1547.002.html>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

### 3 种浮床植物对关中地区 2 种污染源涝池水体净化效率研究

苏媛<sup>1,2</sup>, 高照良<sup>1,3</sup>, 姜永才<sup>3</sup>, 张帅<sup>3</sup>, 张恒<sup>3</sup>, 冯志倩<sup>3</sup>, 周家辉<sup>4</sup>

(1.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 基于对植物修复空间特异性的理解, 针对联通关中水系的涝池近年来出现的水体富营养化和黑臭现象,

选取常见浮床植物美人蕉、水菖蒲和西伯利亚鸢尾, 通过室外水培试验, 探究其对涝池污染原水的净化效果, 试验共持续 35 天。结果表明: (1) 试验结束时, 3 种植物在株高、根长生物量均有显著增加, 增长率表现为美人蕉 > 水菖蒲 > 西伯利亚鸢尾。 (2) 美人蕉、水菖蒲和西伯利亚鸢尾对水体中 TN 的平均去除率分别为 56.18%, 52.17%, 60.76%, 均显著高于对照组 ( $p < 0.05$ ); 美人蕉和水菖蒲对水体中 TP 平均去除率分别为 55.42% 和 58.32%, 均显著高于对照组 ( $p < 0.05$ ), 而西伯利亚鸢尾组与对照组无显著差异 ( $p > 0.05$ ), 此外美人蕉和水菖蒲还能起到调节水体 pH 和 DO 的作用。 (3) 3 种植物对水体中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的平均去除率分别为 76.98%, 65.71%, 78.94%, 其中美人蕉组和水菖蒲组  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的主要去除途径为植物吸收和硝化反应, 西伯利亚鸢尾组  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的主要去除途径主要是氨的挥发和硝化反应等, 而对照组  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率高达 60.55% 的主要原因是氨的挥发; 植物组及对照组中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度随时间均呈现增加趋势, 主要与各试验组中水体硝化反应及植物吸收效率的差异性有关。 (4) 3 种植物中, 水菖蒲适用于点源和面源两种污染源涝池水体的净化, 美人蕉只适合用于面源污染涝池水体的净化, 而西伯利亚鸢尾净化能力较差, 生长适应性差, 不适宜作为水生浮床植物推广。研究结果为涝池污染水体修复的浮床植物选择提供参考。

**关键词:** 涝池; 植物修复; 水体净化; 污染源

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0000-00

### Study on the Purification Effects of Three Floating-Bed Plants for Two Pollution Sources in Water Storage Pond Water Bodies of Guanzhong Area

SU Yuan<sup>1,2</sup>, GAO Zhaoliang<sup>1,3</sup>, LOU Yongcai<sup>3</sup>, ZHANG Shuai<sup>3</sup>,

ZHANG Heng<sup>3</sup>, FENG Zhiqian<sup>3</sup>, ZHOU Jiahui<sup>4</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 4.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Based on the understanding of the spatial specificity of phytoremediation, aiming at the phenomena of eutrophication and black odor in water storage pond which is an important component of connecting the water system in Guanzhong area in recent years, three common floating-bed plants (canna, calamus, and Siberian iris) were selected to explore their purification effect for the raw water in the water storage pond by outdoor hydroponics test. The test lasted 35 days. The results showed that: (1) at the end of the experiment, the height and root length biomass of the three plants increased significantly, and the growth rate was as follows: canna > calamus > Siberian iris. (2) The average removal rates of TN in water bodies were 56.18%, 52.17%, and 60.76%, respectively, which were higher than that of the control group ( $p < 0.05$ ). The average removal rates of TP in water bodies of canna and calamus were 55.42% and 58.32%, which were higher than the control group of 15.57% ( $p < 0.05$ ), but the Siberian iris group was not significantly different from the control group ( $p > 0.05$ ). In addition, canna and calamus could also adjust and improve pH and DO in the water. (3) The average removal rates of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in water were 76.98%, 65.71%, and 78.94%,

收稿日期: 2019-11-15

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划项目“沟道径流消能抗冲技术研究”(2016YFC0501706-02)

第一作者: 苏媛(1994—), 女, 陕西渭南人, 主要从事水土保持工程研究。E-mail: sy940909@163.com

通信作者: 高照良(1969—), 男, 河南灵宝人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治研究。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

respectively. The main removal pathways of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the canna and calamus were plant uptake and nitrification. The main removal route of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the Siberian iris group was mainly ammonia volatilization and nitrification, while the removal rate of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the control group was 60.55%, of which main removal reason was ammonia volatilization. The concentration of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  of plant group and control group increased with time, which was mainly related to the difference of water nitrification reaction and plant absorption efficiency in each experimental group. (4) Among the 3 floating-bed plants, calamus was suitable for the purification of the water of the point source pollution and non-point source pollution. The canna was only suitable for the purification of the water of non-point source, while the Siberian iris had poor purification ability and growth adaptation in both, which was not suitable for promotion as an aquatic floating-bed plant. The research results provide a reference for the selection of floating-bed plants for the restoration of polluted water bodies in water storage pond.

**Keywords:** water storage pond; phytoremediation; water purification; pollution source

涝池是北方干旱地区利用农村低洼处聚集雨水的池塘,在暴雨季节将雨水收集起来,在干旱季节也能够为人们的农业生产提供一定量的水资源保障,是拦蓄地面径流,防止土壤冲刷的一项重要水土保持措施<sup>[1-2]</sup>。陕西省为贯彻习总书记“黄河流域生态保护和高质量发展”以及“十八大”以来中央关于加快水利改革与发展的战略部署,把涝池列为陕西省 2016—2030 年水利核心的三大战略工程之一——关中水系生态恢复水土保持建设的重要环节,目前已建设各类涝池 3 000 多座,但由于涝池水位较浅、面积较小、水体流动性差等原因导致其自净能力很低,再加上农村经济发展相对落后,村民环境保护意识不强,污水处理设施缺乏且已有的措施仅局限于外源污染物的截留,忽略了涝池蓄水水体的修复。经调查,关中部分地区养殖场污水、生活污水及地表径流等未经处理或处理不当直接排入涝池,使得很多已有和新建的涝池成为臭水坑,有的甚至成为垃圾填埋场,严重影响了蓄水排涝,修复自然生态,联通区域水系,能惠及民生需求,传承历史人文等功能的发挥。而目前针对于涝池的研究仅停留在其演变特征的分析、生长季地下水动态变化和流域地上生物量与海拔梯度变化规律等<sup>[3-5]</sup>,专家学者还未过多关注涝池水体治理。而涝池作为生态文明建设的一项重要内容,对减少水质污染、提高水量调蓄能力及生态用水至关重要,因此,采取有效措施集中治理被污染的涝池水体是一项迫切任务。近年来,生态浮床技术因其投资少、净水效果好、操作简便等优点,被大量用于净化包括池塘和景观水体在内的重污染或富营养化水体<sup>[6]</sup>;黄廷林等<sup>[7]</sup>研究得出,以聚乙烯发泡板为人工浮床栽培绿萝、美人蕉和龟背竹,在生物填料表面生物膜的综合作用下对西安市景观水体中 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除率分别达到 65.8%~84.4%,89.2%~97%,72.

1%~92.9%和 24%~50%;张亚娟<sup>[8]</sup>分别采用挺水、沉水、浮水 3 类植物对景观水体净化效果进行研究,表明植物种类与景观水体中污染物类型有密切关系,当水体中污染物质为含氮化合物时,挺水植株为最佳的水体净化修复植物。由于受污染的水体具有特异性,对某一水体具有修复功能的植物并不一定适用于另一水体,即植物修复具有空间的特异性<sup>[9]</sup>。因此,本研究选取常见的对污染物去除效果较好的景观水生植物美人蕉、菖蒲、鸢尾作为试验材料构成生态浮床<sup>[10-11]</sup>,研究 3 种植物对 2 种污染源的涝池水体的净化能力,以期为涝池污染水体修复的浮床植物选择提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置

本试验所用生态浮床由植物、浮板和定植篮 3 部分组成(图 1)。将所选浮床植物固定安放在定植篮内,定植篮底部直径为 60 mm,再将定植篮放入有孔的泡沫浮板上,并用土陶粒固定植物根系,利用浮板(25 cm×25 cm)的浮力使其漂浮在水面。各试验组在开口直径 40 cm,底部直径为 30 cm,高 50 cm 的塑料水箱中进行,实际水深 35 cm。

### 1.2 供试材料

供试的美人蕉、水菖蒲、西伯利亚鸢尾均采购于陕西某花卉苗木基地,均为土培苗。于 2019 年 4 月开始,在自来水进行适应性培养,待小苗植株高 40 cm 左右时,选取生长状态良好、形态、尺寸基本一致的植株用于试验。

试验污水取自陕西省杨凌示范区周边分别以面源污染(地表汇流)和点源污染(养殖场废水及生活污水)为主的涝池,其主要水质指标见表 1。由表 1 可知,这 2 种污染源涝池水体均为地表水劣 V 类水。

### 1.3 试验方案

本研究于 2019 年 5 月 16 日至 2019 年 6 月 18

日在中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心试验空地内开展,试验期间桶内水温在 20~27 ℃。共设置 20 个塑料桶,分为面源污染组、点源污染组,每组 10 个塑料桶,设置无植物的对照 1 组,每种植物设置 3 个重复。在每个塑料桶内添加污水至桶高 35 cm 处,污水体积约为 35 L;将植物根冲洗干净并修剪以保持长度基本一致,移植至定植篮内,随浮板一起放入桶内,每桶保持 2 株鲜质量的植物,浮板覆盖面积约为 60%,其中为排除覆盖面积对试验的影响,对对照组放置了与其他组相同的无植物的浮床板。试验期间,定期用超纯水补充桶内蒸发散失水分,确保水位保持稳定。将所有污水桶放置在向阳处,保证光照和温度等条件一致,同时设置遮雨设施。

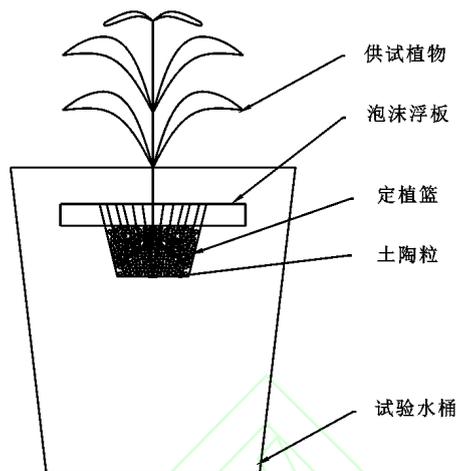


图 1 供试生态浮床装置示意

表 1 2 种污染源涝池水体初始指标值

单位:

污染源	pH	溶解氧/ (mg · L <sup>-1</sup> )	总氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	总磷/ (mg · L <sup>-1</sup> )	氨氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )	硝态氮/ (mg · L <sup>-1</sup> )
面源污染	8.67	9.40	3.20	0.43	0.86	0.47
点源污染	7.72	5.60	18.12	1.48	12.16	1.20

#### 1.4 水样采集与分析

从 2019 年 5 月 16 日开始,每隔 7 天,从桶内水面以下 5 cm 处取水样 100 mL,测定总氮、总磷、硝态氮、氨氮、溶解氧、pH 及温度基本水质指标。样品采集后保存于泡沫冰箱并立即送往实验室进行水质分析。采样时间均控制在早上 9:00—10:00,避免试验误差。

参照中华人民共和国国家标准《地表水环境质量标准》<sup>[12]</sup>中的相关方法,测定各个指标。采用过硫酸钾氧化—双波长紫外分光光度计法测定水样中的总氮含量;采用过硫酸钾氧化—钼蓝比色法测定水样中总磷含量;采用靛酚蓝比色法测定水样中的氨氮;采用双波长紫外分光光度法测定水样中的硝态氮;采用赛多利斯 pb-10pH 计测定水样 pH;采用雷磁 JPB-607A 便携式溶解氧分析仪测定水样中的 DO 含量。

#### 1.5 数据处理

1.5.1 不同浮床植物对污染物去除率计算公式为:

$$E = \frac{(C_{前} - C_{后})}{C_{前}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为不同浮床植物对污染物去除率(%); C 为试验前后污染物浓度差(mg/L)。

1.5.2 不同浮床植物对污染物平均去除能力计算公式为:

$$E_p = \frac{(C_{前} - C_{后}) \times V}{T \times (W_{后} - W_{前})} \quad (2)$$

式中:  $E_p$  为不同浮床植物对污染物去除能力(mg/(g · d)); C 为试验前后污染物浓度差(mg/L); V 为水量体积(单位); W 为 2 次测定植物鲜重差(g); T 为试验周期 35 天。

利用 Microsoft Excel 2010 软件,进行数据处理

和绘图;采用 SPSS 23.0 软件,对数据进行统计分析和差异性显著检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物生长状况

由表 2 可知:(1)在点源污染型涝池水体中,美人蕉、水菖蒲、西伯利亚鸢尾试验前后平均株高相对增长率分别为 22%,31%,3%,最长根长相对增长率分别为 130%,134%,22%;在面源污染型涝池水体中,美人蕉、水菖蒲、西伯利亚鸢尾试验前后平均株高相对增长率分别为 10%,18%,2.4%,最长根长相对增长率分别为 113%,117%,44%;(2)美人蕉、水菖蒲的长势很好,生长速度快,生物量变化较大,西伯利亚鸢尾生长速度较慢,生物量变化小;(3)美人蕉的根系最发达,水菖蒲次之,西伯利亚鸢尾最差;(4)在点源污染型涝池原水中各浮床植物的生长状态均好于面源污染型涝池原水。

### 2.2 水体中 pH、DO 及温度的状况

由于试验在同一条件下进行,各试验组水体温度无较大差异;3 种植物在试验结束后对 2 种污染源涝池水体中 pH、DO 均有不同程度的改善。在 pH 方面,试验 28~35 天时浮床植物所在水体中的 pH 整体呈下降趋势(表 3),这表明 3 种浮床植物对 2 种污染源涝池的水体 pH 有较好的缓冲调节作用;在 DO 方面,受着温度的变化及水体中理化作用的影响,溶解氧在不同处理时间表现出不同的增减趋势;对于点源污染型涝池水体,试验 28~35 天时美人蕉组和水菖蒲组水体 DO 含量均高于西伯利亚鸢尾和对照组 DO 含量,西伯利亚鸢尾和对照组水体 DO 含量无较

大差异;对于面源污染型涝池水体,28~35 天时美人蕉组水体 DO 含量均高于水菖蒲、西伯利亚鸢尾和对

照组 DO 含量,因此美人蕉对水体中 DO 含量增加效果最好。

表2 处理 2 种污染源涝池水质植物试验前后生物量变化

植物类型	污染源类型	平均株高/cm		平均最长根长/cm		平均重量/g	
		移植前	移植后	移植前	移植后	移植前	移植后
美人蕉	A	41	50	15	34	167	282
	B	41	45	15	33	132	186
水菖蒲	A	45	59	12	28	38	59
	B	44	52	12	28	33	49
西伯利亚鸢尾	A	40	41	9	11	65	66
	B	42	43	9	13	78	86

注:A、B 分别代表点源污染原水和面源污染原水。

表3 各试验组 DO、pH 和温度的变化情况

监测项目	时间/d	美人蕉		西伯利亚鸢尾		水菖蒲		对照	
		点源污染型	面源污染型	点源污染型	面源污染型	点源污染型	面源污染型	点源污染型	面源污染型
DO/ (mg · L <sup>-1</sup> )	0~7	6.4~5.8	10.2~9.1	5.5~5.1	4.8~8.6	5.2~5.1	5.0~8.2	5.6~5.1	5.4~8.4
	8~14	5.8~6.2	9.1~9.7	5.1~4.6	6.6~9.1	5.1~4.6	6.2~8.8	5.1~4.6	6.4~9.0
	15~21	6.2~6.4	9.7~9.5	4.6~4.9	9.1~8.5	4.6~5.0	8.8~8.4	4.9~5.2	9.0~8.1
	22~28	6.4~5.8	9.5~9.8	4.9~4.5	8.5~8.0	5.0~5.1	8.4~8.2	5.2~4.7	8.1~8.4
	28~35	5.8~5.2	9.8~9.3	4.5~4.7	8.0~8.5	5.1~5.5	8.2~8.5	4.7~4.9	8.4~8.7
pH	0~7	7.21~7.45	7.81~7.63	7.31~7.53	8.43~8.52	7.57~7.32	8.22~8.18	7.72~7.83	8.63~8.92
	8~14	7.45~7.36	7.63~7.43	7.53~7.44	8.52~8.74	7.32~7.45	8.18~8.26	7.83~7.91	8.92~9.13
	15~21	7.36~7.22	7.43~7.61	7.44~7.60	8.74~8.89	7.45~7.26	8.26~8.15	7.91~8.11	9.13~8.84
	22~28	7.22~7.10	7.61~7.85	7.60~7.82	8.89~8.93	7.26~7.51	8.15~8.17	8.11~7.82	8.84~9.16
	28~35	7.10~7.21	7.85~7.70	7.82~7.76	8.93~8.62	7.51~7.45	8.17~8.14	7.82~8.17	9.16~9.18
温度/℃	0~7	21.3~25.5	21.1~25.2	21.6~25.7	20.8~25.2	21.3~25.3	20.7~24.8	20.5~24.6	21.2~25.3
	8~14	25.5~25.9	25.2~26.3	25.7~26.2	25.2~26.8	25.3~25.8	24.8~25.7	24.6~26.1	25.3~26.6
	15~21	25.9~22.3	26.3~22.0	26.2~21.8	26.8~22.4	25.8~22.2	25.7~22.6	26.1~21.8	26.6~22.1
	22~28	22.3~23.7	22.0~24.8	21.8~24.9	22.4~24.5	22.2~24.0	22.6~24.1	22.8~24.2	22.1~24.4
	28~35	23.7~26.4	24.8~26.1	24.9~26.1	24.5~26.3	24.0~26.2	24.1~26.5	24.2~25.9	24.4~26.7

### 2.3 水体中 TN 的浓度变化

3 种浮床植物对 2 种污染源涝池水体中总氮的去除效率均呈现波动变化状况。对于面源型污染水体,试验开始后前 7 天内,水中总氮含量减少迅速,栽植美人蕉的水中总氮含量减少最快,栽植水菖蒲及西伯利亚鸢尾的水中总氮含量减少速度依次减少;试验开始后 7~35 天,植物组总氮含量变化速率逐渐减小(图 2a),美人蕉、水菖蒲组处理的面源型污染涝池水体在 35 天时总氮含量均显著低于西伯利亚鸢尾和对照组( $P < 0.05$ ),西伯利亚鸢尾组与对照组水体中总氮含量无显著差异( $P > 0.05$ ),此时美人蕉和水菖蒲对水体总氮平均去除能力分别为 0.001,0.004 mg/(g · d)。对于点源型污染水体,试验开始后前 7 天内,种植美人蕉的水中总氮含量减少幅度最大,水菖蒲次之,35 天时两者水体中总氮含量均显著低于对照组( $P < 0.05$ ),而栽植西伯利亚鸢尾的水中总氮含量减少幅度最小(图 2b),与对照组水中总氮含量无显著差异( $P > 0.05$ ),此时美人蕉和水菖蒲对水体总氮平均去除能力分别为 0.002,0.013 mg/(g · d);试验

开始 28 天以后,栽植美人蕉的涝池原水水中总氮含量开始增大,综上表明美人蕉组和水菖蒲组显著提高了系统去除总氮的能力。

美人蕉、西伯利亚鸢尾、水菖蒲和对照组对污染水体中总氮的平均去除率分别为 56.18%,52.17%,60.76%和 45.67%,浮床植物总氮去除率均大于对照组 45.67%;3 种浮床植物对面源污染型、点源污染型涝池水体中总氮的平均去除率分别为 62.81%和 47.45%;3 种浮床植物在试验第 7,14,21,28,35 天对污水中总氮的平均去除率分别为 26.31%,36.89%,44.29%,49.62%,55.13%。

### 2.4 水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化

3 种浮床植物对 2 种污染源涝池水体中氨氮均有显著的去效果。对于面源型污染水体,试验开始后前 7 天内,美人蕉组及水菖蒲组水中氨氮含量分别减少 0.41,0.36 mg/L,西伯利亚鸢尾组和对照组的水中氨氮含量分别减少 0.15,0.13 mg/L;试验开始后 7~35 天,美人蕉组和水菖蒲组氨氮含量变化速率逐渐趋于平稳(图 3a);试验结束后浮床植物处理下

的涝池水体中氨氮含量均显著低于对照组处理( $P < 0.05$ ),这表明浮床植物的存在能显著降低水体中氨氮的含量;35 天时美人蕉、水菖蒲和西伯利亚鸢尾对

水体氨氮平均去除能力分别为 0.000 3,0.002,0.001 mg/(g·d)。对于点源型污染水体,开始后前 7 天内,栽植美人蕉

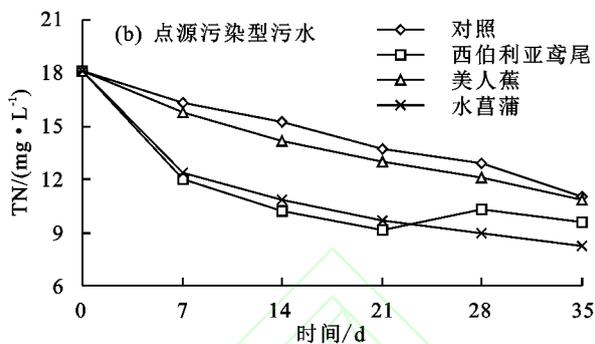
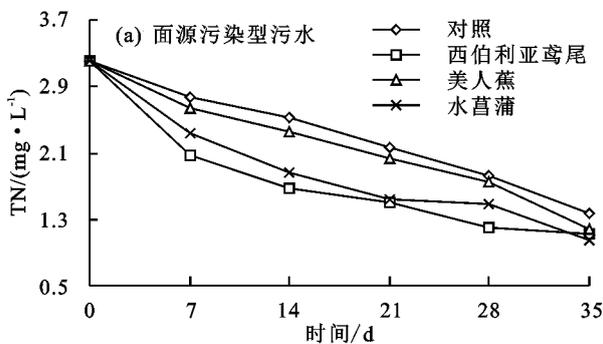


图 2 2 种污染源涝池水体中总氮含量

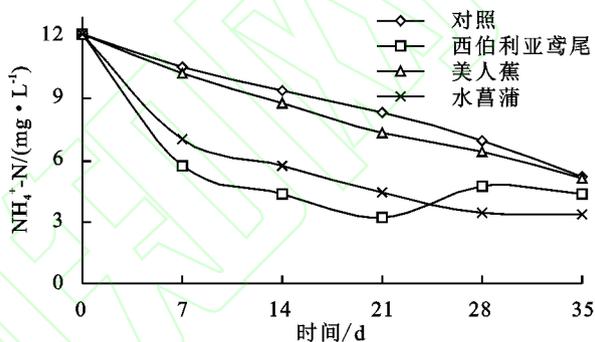
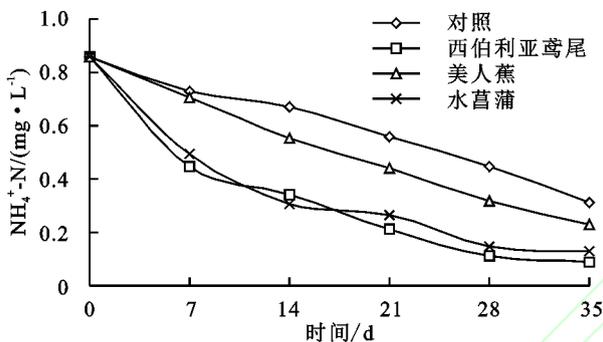


图 3 2 种污染源涝池水体中氨氮含量

的水中氨氮含量减少幅度最大,水菖蒲次之,分别减少 6.42,5.10 mg/L,栽植西伯利亚鸢尾和对照组水中氨氮含量分别减少 1.91,1.59 mg/L;在试验 28~35 天,栽植美人蕉的水中氨氮含量开始增大;试验结束时,栽植美人蕉和水菖蒲的水体中氨氮含量均显著低于对照组( $P < 0.05$ ),栽植西伯利亚鸢尾的水中氨氮含量减少幅度最小(图 3b),与对照组水中氨氮含量无显著差异( $P > 0.05$ ),此时美人蕉和水菖蒲对水体氨氮去除能力分别为 0.002,0.012 mg/(g·d)。

种植物对面源污染型、点源污染型涝池水体中氨氮的平均去除率分别为 82.9%和 65.07%。3 种植物在试验第 7,14,21,28,35 天对污水中氨氮的平均去除率分别为 36.38%,50.85%,61.97%,68.78%,73.88%。

美人蕉、西伯利亚鸢尾、水菖蒲和对照组对污染水体中氨氮的平均去除率分别为 76.98%,65.71%,78.94%和 60.55%,植物组氨氮去除率均大于对照组 60.55%。3

### 2.5 水体中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度变化

由图 4 可知,各试验组硝态氮浓度以不同速率呈增长趋势。对于 2 种污染源的水体来说,试验的 0~35 天,植物组中硝态氮基本呈增长趋势,且试验结束时,美人蕉和水菖蒲组水体中硝态氮含量也远大于对照组和西伯利亚鸢尾组。在试验开始后前 7 天内,种植美人蕉及水菖蒲组水体中硝态氮含量增加幅度远高于对照组和西伯利亚鸢尾组。

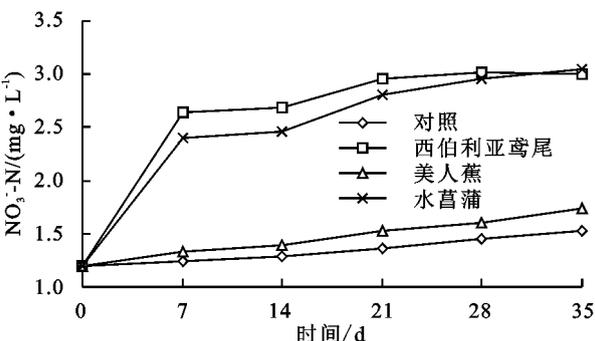
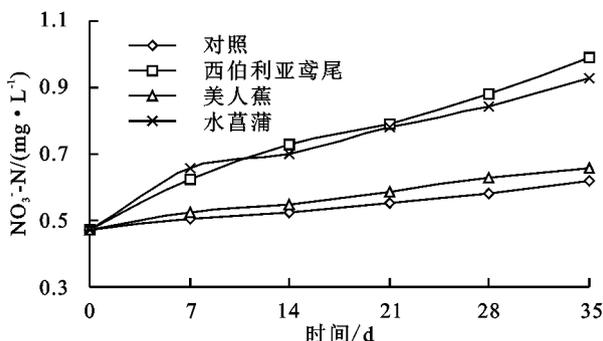


图 4 2 种污染源涝池水体中硝态氮含量

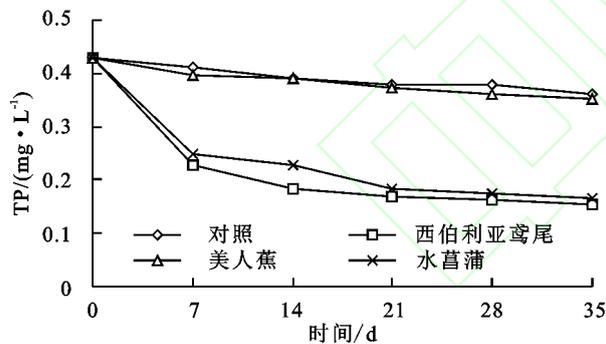
通常来说,水体中硝态氮浓度变化与水体硝化、反硝化反应以及植物吸收有密切关系<sup>[13]</sup>。其中,硝化反应主要是在  $\rho(\text{DO}) \geq 0.5 \text{ mg/L}$  时,由硝化细菌

将水体中氨氮转化为硝态氮和亚硝态氮,然后在无氧及碳源充足的条件下,通过反硝化细菌将硝酸根还原为分子氮,达到除氮的效果<sup>[14]</sup>。而在本试验中,

植物通过光合作用将产生的氧气通过根系传递到水中,使得根系周围呈现好氧环境,再加上试验容器较浅,各个试验组水体复氧能力较强,水体中 $\rho(\text{DO})$ 始终大于硝化反应的最低限值(表 2),因此不利于反硝化反应的进行,即水体中微生物硝化作用生成的硝态氮的速度大于微生物反硝化作用和植物吸收硝态氮去除速度,所以导致了美人蕉组和水菖蒲组水体中大量硝态氮的累积<sup>[15]</sup>;2 种污染源水体中对照组和西伯利亚鸢尾组中硝态氮浓度变化不大,主要原因可能二者水体中硝化细菌数量较生长良好、根系发达的美人蕉组和水菖蒲组少,硝化反应不明显所致,因此其总氮的去除途径可能主要是通过氨氮的挥发。此外,由于环境质量标准中允许水中硝态氮含量较高(国家 I 类水为 10 mg/L 以下),而本研究种硝态氮含量远低于标准限值,因此在讨论净化能力时可不考虑该指标。

## 2.6 水体 TP 浓度的变化

2 种污染源涝池水体中的总磷含量均有不同程度的变化。对于面源污染型水体,试验开始后前 7 天,栽植美人蕉、西伯利亚鸢尾及水菖蒲的污水中总磷质量浓度分别减少 0.20,0.03,0.18 mg/L(图 5a)。相对于西伯利亚鸢尾组,栽植美人蕉和水菖蒲的水体中总磷含量减少更快,在 35 天时,美人蕉组和水菖蒲



组水体中总磷含量均显著低于对照组( $P < 0.05$ ),西伯利亚鸢尾组与对照组水中总磷含量无显著差异( $P > 0.05$ ),此时美人蕉和水菖蒲对水体总磷的去除能力分别为 0.000 3,0.000 6 mg/(g·d)。对于点源污染型水体,开始后前 7 天,栽植美人蕉和水菖蒲植物的水中总磷含量都急剧减小,种植美人蕉、西伯利亚鸢尾和水菖蒲的水中总磷质量浓度分别减小 0.54,0.11,0.60 mg/L,从第 7 天到试验结束,水中总磷质量浓度分别减少 0.65,0.20,0.82 mg/L,栽植美人蕉的水中前期总磷含量减少最快,但后期其含量有所升高;试验结束时,栽植美人蕉和水菖蒲的水体中总磷含量均显著低于对照组( $P < 0.05$ ),栽植西伯利亚鸢尾的水中总磷含量与对照组水中总磷含量无显著差异( $P > 0.05$ ),此时美人蕉和水菖蒲对水体总磷的去除能力分别为 0.000 3,0.001 mg/(g·d)。

美人蕉、西伯利亚鸢尾、水菖蒲和对照组对污染水体中总磷的平均去除率分别为 55.42%,15.56%,58.32%和 15.57%,美人蕉组和水菖蒲组总磷去除率均大于对照组。3 种植物对面源污染型、点源污染型涝池水体中总磷的平均去除率分别为 48.06%和 37.54%。3 种植物在试验第 7,14,21,28,35 天对污水中总磷的平均去除率分别为 30.23%,35.25%,39.90%,42.18%,42.80%。

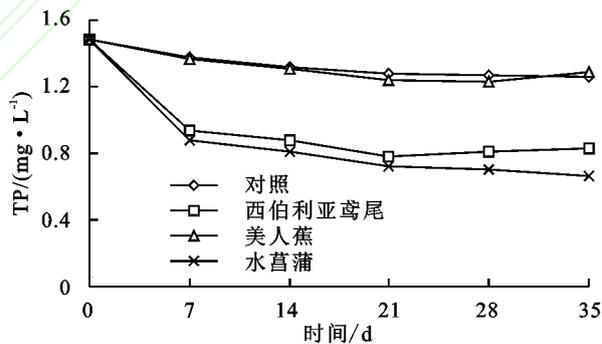


图 5 2 种污染源涝池水体中总磷含量

## 3 讨论

本试验发现,植物处理不同污染源水体的时间与处理效果有密切关系,当处理时间超过植物体自身的净水负荷时,容易导致二次污染,尤其是生物量较大的水生植物,如本试验中采用的美人蕉,其根系发达,生物量变化较大,在处理点源污染水体的第 28~35 天,出现了总磷、总氮及氨氮污染物增加的现象,而在面源污染的水体中未观察到此现象,主要原因是试验期间美人蕉根系出现了部分腐烂,也可能是由于处理污水的浓度超过了美人蕉吸收氮磷的最高负荷。因此水生植物修复污染水体需要在其根系腐烂或枯萎前及时收割,这与以往的研究<sup>[16]</sup>结果相似。植物对污染水体中氮、磷元素的净化包括截留、吸附、沉

降、吸收等多重作用<sup>[17]</sup>。3 种浮床植物处理的前期,2 种污染源水体中总氮和总磷含量减少速度较快,这是由于植物在试验前期处于营养饥饿状态,在水体养分充足的条件下,植物得到快速生长,随着试验时间的延长,水体的养分负荷发生变化,植物生长受到不同程度的影响,使得植物对总氮和总磷含量的去除速率相比前期有所降低。与点源污染水体相比较,面源污染水体下 3 种植物对总氮总磷的去除效果最好,可能是因为污染物浓度较大的水体中,植物对氮磷污染物的去除能力会受到抑制<sup>[18]</sup>。3 种植物对水体种氨氮均具有良好的去除效果,最高达 76.98%。水体中氨氮的去除途径主要有 3 个,主要包括挥发、硝化反应和植物吸收。有研究<sup>[19-20]</sup>表明,氨的挥发和水体 pH 有密切关系,当 pH 为 8.0~9.3 时,氨挥发显著,

pH 为 7.5~8.0 时,挥发不显著,pH<7.5 时,氨挥发可以忽略。由表 2 可以看出,美人蕉组 pH 为 7.10~7.85,不利于氨的挥发,所以该试验组通过氨氮挥发去除的氨氮很少;水菖蒲组 pH 为 7.26~8.26,挥发作用不显著,因此氨的挥发也不是该组植物去除氨氮的主要途径。西伯利亚鸢尾组 pH 为 7.31~8.93,由于其在 2 种污染源类水体中表现出不同的去除效果,因此氨的挥发对该组氨氮浓度降低可能有很大贡献;而对照组水体 7.72~9.18,氨挥发显著,这可能也是对照组氨氮去除率(试验结束时平均去除率为 60.55%)较高的原因。各试验组均基本满足硝化反应的最佳发生条件(pH 为 7.0~8.6, $\rho(\text{DO})>2 \text{ mg/L}$ ),试验结束时,3 种植物组在面源污染涝池水体中的氨氮含量与对照组均存在显著差异( $P<0.05$ ),因此可以推测,植物吸收和硝化作用是氨氮的主要去除途径;而在点源污染涝池水体中,西伯利亚鸢尾组在试验结束时与对照组无显著差异,张鸿等<sup>[21]</sup>研究表明,有植物组水体的硝化细菌、反硝化细菌数量高于无植物组,西伯利亚鸢尾组可能是由于其生长不佳导致水体硝化细菌数量较少,硝化反应不明显所致,所以其水体中氨氮主要以挥发的形式去除。本试验中,水菖蒲组对 2 种污染源水体中污染物的去除能力最强,适应性最好,且其单位质量平均去除能力最好,这与葛滢等<sup>[22]</sup>的研究结果相反,一方面原因是试验方法的差异,本试验为避免蒸发对实验的影响采取的是定期补充蒸馏水,而葛滢等<sup>[22]</sup>采取的是不添加水量,通过称量水重来换算所观测指标的总重计算去除率,避免了人为稀释对植物吸收形为的影响;另一方面,可能是试验条件、试验植物品种等造成。美人蕉组虽表现出对 2 种不同类型水体污染物较强的吸收能力,但由于其生物量较大和根系发达等原因,在处理点源污染水体的后期出现了根系腐烂的现象,释放出更多营养物质,导致水体污染物浓度的上升,造成了二次污染<sup>[23]</sup>,但其在面源污染水体中未出现此现象。因此,在实践中,可考虑将美人蕉用于净化此类水体;西伯利亚鸢尾组对 2 种污染源水体中污染物的去除能力最差,试验结束时,出现了不同程度的干枯黄叶,生长状况相对较差,不建议作为涝池污染水体修复的浮床植物推广。综上所述,在运用植物浮床技术修复涝池污染水体时,应结合其污染源,选择适宜的品种作为浮床植物,才能取得良好的净化效果。

## 4 结论

(1)3 种植物在 2 种污染源水体中能保持较强的生命力,试验结束时,其株高、根长生物量均有显著增加,增长率表现为美人蕉>水菖蒲>西伯利亚鸢尾,同时美人蕉和水菖蒲能够对水体的 pH 和 DO 含量

起到一定程度的改善作用。

(2)3 种植物对水体中氮类污染物表现出较好的净化效果,去除率高达 56.18%,对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率高达 78.94%,其中美人蕉组和水菖蒲组  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的主要去除途径为植物吸收和硝化反应,西伯利亚鸢尾组  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的主要去除途径主要是氨的挥发和硝化反应等,而对照组  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率高达 60.55%的主要原因是氨的挥发;3 种植物浮床组中  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的变化主要与各试验组中水体硝化反应及植物吸收效率的差异性有关。

(3)美人蕉组和水菖蒲组对 2 种污染源水体中 TP 的去除效率分别为 55.42%和 58.32%,去除效率远大于对照组(15.57%),而西伯利亚鸢尾组在试验结束时水体 TP 浓度与对照组无显著差异。

(4)3 种植物中,水菖蒲适用于 2 种污染源类污染水体的净化,美人蕉适合用于面源污染源污染水体的净化,西伯利亚鸢尾净化能力较差,生长适应性差,不适宜作为修复涝池污染水体浮床植物的推广。

### 参考文献:

- [1] 耿乃立.北方干旱区恢复完善农村涝池一举多得[J].中国水利,2017(14):40-42.
- [2] 肖程洲,孙晶,柳宇,等.6种植物对关中涝池水体氨氮的吸收对比分析[J].科学技术创新,2019(9):36-37.
- [3] 李文娟,黄力平,赵传燕,等.黑河上游天涝池流域典型灌木生态参数研究[J].干旱区地理,2018,41(5):1073-1079.
- [4] 杨雲舒,刘文兆,宁婷婷,等.长武塬区涝池演变特征分析[J].水土保持通报,2015,35(5):315-318,322.
- [5] 梁倍,邸利,赵传燕,等.祁连山天涝池流域典型灌丛地上生物量沿海拔梯度变化规律的研究[J].草地学报,2013,21(4):664-669.
- [6] Sun L, Liu Y, Jin H. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna[J].Ecological Engineering,2009,35(1):135-140.
- [7] 黄廷林,宋李桐,钟建红,等.人工浮床净化城市景观水体的试验研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007,39(01):30-33.
- [8] 张亚娟.城市污染景观水体植物净化修复方法研究[J].环境科学与管理,2019,44(10):65-70.
- [9] Susarla S, Medina V F, Mccutcheon S C. PH yto remediation: An ecological solution to organic chemical contamination[J].Ecological Engineering,2002,18(5):647-658.
- [10] 卜发平,罗固源,许晓毅,等.美人蕉和菖蒲生态浮床净化微污染源水的比较[J].中国给水排水,2010,26(3):14-17.
- [11] 张倩妮,陈永华,杨皓然,等.29种水生植物对农村生活污水净化能力研究[J].农业资源与环境学报,2019,36(3):144-154.
- [12] 中华人民共和国国家标准.GB3838-2002 地表水环境

- 质量标准[S].北京:国家环境保护总局发布,2002.
- [13] 罗固源,卜发平,许晓毅,等.生态浮床的去污效果与机理研究[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(6):111-116.
- [14] 虞开森,张书农,郑英铭.厌氧水质模型初探[J].上海:上海环境科学,1990(1):10-14.
- [15] 周晓红,王国祥,冯冰冰,等.3种景观植物对城市河道污染水体的净化效果[J].环境科学研究,2009,22(1):108-113.
- [16] 张景雯,田如男.四种植物对模拟的城市景观污水的净化效果[J].湿地科学,2018,16(1):85-92.
- [17] 卢少勇.黑臭水体治理技术及典型案例[M].北京:化学工业出版社,2019.
- [18] 张志勇,郑建初,刘海琴,等.凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J].中国生态农业学报,2010,18(1):152-158.
- [19] 卢少勇,金相灿,余刚.人工湿地的氮去除机理[J].生态学报,2005,26(8):2670-2677.
- [20] Fennessy M S, Cronk J K, Mitsch W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J].Ecological Engineering,1994,3(4):469-484.
- [21] 张鸿,陈光荣,吴振斌,等.两种人工湿地中氮、磷净化率与细菌分布关系的初步研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),1999,33(4):575-578.
- [22] 葛滢,王晓月,常杰.不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究[J].环境科学学报,1999,19(6):690-692.
- [23] 周林飞,赵言稳,关秀婷.6种水生植物腐烂过程中水质理化指标的变化室内模拟研究[J].湿地科学,2016(6):832-839.