

# 水生蔬菜对不同程度富营养化涝池水体的净化作用 ——以菠菜和水芹为例

张帅<sup>1</sup>, 高照良<sup>1,2</sup>, 赵 菀<sup>1</sup>, 周富宇<sup>1</sup>, 李永红<sup>1</sup>, 苏 媛<sup>3</sup>, 冯志倩<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.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; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** [目的] 研究水生蔬菜对富营养化涝池水体的净化效果, 为水生蔬菜等经济植物应用于西北农村地区富营养化封闭水体的生态修复提供新的思路 and 理论参考。[方法] 以菠菜 (*Spinacia oleracea*) 和水芹 (*Oenanthe javanica*) 为试验材料, 采用浮床栽培的方式, 探讨水生蔬菜对 3 种不同程度富营养化涝池水体中的氮(N)、磷(P)的净化效果。[结果] ① 2 种蔬菜修复富营养化涝池水体过程中各项 N, P 指标明显下降, 试验结束后模拟涝池水体已基本上达到或优于地表水水质标准的 V 类水标准, 净化后的水体已经达到国家标准。② 菠菜和水芹对水体中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的平均去除率分别为 94.37%, 96.66%, 88.95% 和 97.27%, 94.64%, 83.48%, 显著高于对照 ( $p < 0.05$ ), 对以上营养元素表现出良好的吸收效率, 表明 2 种蔬菜可以高效净化富营养化涝池水体。③ 2 种蔬菜对 TN 的去除率和日均去除速率随水体中 TN 浓度升高而上升, 去除率和日均去除速率均为: 菠菜 < 水芹; 随 TP 浓度升高, 菠菜对 TP 去除率降低, 水芹对 TP 去除率升高, 去除率和日均去除速率为: 菠菜 > 水芹, 说明水芹更适宜含高浓度 N 的富营养化涝池水体, 菠菜更适用于含高浓度 P 的富营养化涝池水体。[结论] 试验条件下, 菠菜和水芹对 3 种程度富营养化水体中 TN, TP 的净化效果良好, 2 种蔬菜的吸收对水体净化起着重要作用。

**关键词:** 涝池; 水生蔬菜; 富营养化水体; 水体净化

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0016-09

中图分类号: X52, X171.1

**文献参数:** 张帅, 高照良, 赵菀, 等. 水生蔬菜对不同程度富营养化涝池水体的净化作用[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 16-24. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.003; Zhang Shuai, Gao Zhaoliang, Zhao Chun, et al. Purification effects of water storage pond with different degrees of eutrophication by aquatic vegetables [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 16-24.

## Purification Effects of Water Storage Pond with Different Degrees of Eutrophication by Aquatic Vegetables

—Taking *Spinacia Oleracea* and *Oenanthe Javanica* as Examples

Zhang Shuai<sup>1</sup>, Gao Zhaoliang<sup>1,2</sup>, Zhao Chun<sup>1</sup>, Zhou Fuyu<sup>1</sup>, Li Yonghong<sup>1</sup>, Su Yuan<sup>3</sup>, Feng Zhiqian<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. 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, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] The purification effects of aquatic vegetables on the eutrophication waterlogging pool were studied, in order to provide new ideas and theoretical reference for the application of aquatic vegetables and other economic plants to the ecological restoration of eutrophication closed water in rural areas of Northwest China. [Methods] Taking *Spinacia oleracea* and *Oenanthe javanica* as experimental materials, the floating bed cultivation method was used to explore the effect of two aquatic vegetables on nitrogen (N) and phosphorus (P) of water in water storage pond with different degrees of eutrophication. [Results] ① The

收稿日期: 2020-11-11

修回日期: 2021-01-03

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

第一作者: 张帅(1994—), 男(汉族), 甘肃省庆阳市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持工程。Email: shuaizhang801@163.com。

通讯作者: 高照良(1969—), 男(汉族), 河南省灵宝市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业水土工程和荒漠化防治方面的研究。Email: gzl@ms.iswc.ac.cn。

related indicators of N and P were significantly decreased with two aquatic vegetables in the process of purifying the eutrophic water. Eventually, the water body of simulated pond had basically reached or exceeded the surface water quality standard of class V water, and the purified water had reached the national standard. ② The average removal rates of *S. oleracea* and *O. javanica* to  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  and  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  in water bodies were 94.37%, 96.66% and 88.95%; 97.27%, 94.64% and 83.48%, respectively, which were significantly higher than the control group ( $p < 0.05$ ), indicating that the two vegetables could efficiently recovery water from eutrophication. ③ The TN removal rate and average daily removal rate of two aquatic vegetables increased with the TN concentration, and showed that *S. oleracea*  $>$  *O. javanica*. With the TP concentration increasing, the TP removal rate of *S. oleracea* decreased, and the TP removal rate of *O. javanica* increased and showed that *S. oleracea*  $<$  *O. javanica*. It indicated that *O. javanica* was suitable for the eutrophic water with high N concentration, while *S. oleracea* was suitable for water with high P concentration. [Conclusion] Overall, *S. oleracea* and *O. javanica* have good absorption effects on TN and TP in three levels of eutrophic water bodies, and could play a vital role in water purification.

**Keywords:** water storage pond; aquatic vegetables; eutrophic water body; water purification

涝池是水资源短缺的西北农村地区为了拦蓄雨水而修筑的一种池塘,具有防治水土流失,修复自然生态,防洪减灾等显著的生态效益和实用价值<sup>[1]</sup>。党的十九大明确提出实施乡村振兴战略,全面开展乡村水环境治理和修复<sup>[2-3]</sup>,陕西省更是将涝池列为“黄河流域生态保护和高质量发展”及“十三五”关中水系生态恢复水土保持建设的重要工程。但近年来由于地表径流、养殖废水直接排放以及化肥大量施用等原因,造成 N、P 等营养元素含量过多,导致涝池水体严重富营养化<sup>[4]</sup>。相关调查显示,关中地区 78.2% 的涝池出现不同程度的水体富营养化现象<sup>[5]</sup>;杨凌示范区 8 个涝池水体均为劣 V 类水质<sup>[6]</sup>。然而目前针对涝池水体的研究多停留在其演变特征的分析、生长季地下水动态变化、富营养化程度等方面<sup>[7]</sup>,对于涝池水体治理的关注较少。水体治理的方法包括物理方法、化学方法和生物方法等。传统的物理法和化学法所需费用高、设施复杂、易带入其他污染物,不适宜乡村现状。利用植物修复技术来净化富营养化水体是目前行之有效的生态治理措施<sup>[8-10]</sup>。Zhao 等学者<sup>[11-13]</sup>的研究表明,香根草、凤眼莲、菖蒲等水生植物对富营养化水体中 TN、TP 的去除率可达 85.3%~96.7% 和 83.1%~96.5%,但水生植物仅考虑到对水体污染物的净化,难以资源化利用,易形成二次污染,还存在冬季净化难等问题。水生蔬菜不仅可以高效去除富营养化水体中污染物<sup>[14-15]</sup>,减少环境污染;还能回收利用富营养化水体中的 N、P 等营养资源<sup>[16]</sup>,产生经济价值,而且可以多茬种植,适宜农村现状,从而受到研究人员的广泛关注<sup>[17-20]</sup>。菠菜(*Spinacia oleracea*)和水芹(*Oenanthe javanica*)均为最有价值的绿色蔬菜之一,具有利尿,镇静,促凝,缓和,润肠和其他有益特性,可以加工成各种产品,如浸剂或治疗性蔬

菜汁等。尽管利用水生蔬菜净化富营养化水体具有减少污染和作物生产的双重优势,但目前缺乏以富营养化涝池水体为研究对象种植水生蔬菜的科学研究数据。因此本试验以菠菜和水芹为试验材料,通过模拟富营养化的涝池水体环境,采用浮床栽培的方式研究菠菜和水芹对富营养化涝池水体的净化效果,以期水生蔬菜等经济植物应用于西北农村地区富营养化封闭水体的生态修复提供新的思路 and 理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

菠菜(*Spinacia oleracea*),品种为亨达利,高抗病耐抽苔,其生命力旺盛,生长快;根系发达,株型整齐;全国各地普遍栽培,是我国北方春季的重要蔬菜之一。选择生长良好,高度 4 cm 左右的幼苗进行试验。水芹(*Oenanthe javanica*),品种为赛雪白芹,叶柄嫩白粗壮,实心;叶片绿色,香味浓,肉质细腻;易栽培,产量高,经济效益好,有较好的适应性、抗病性,是一种深受消费者喜爱的喜凉性绿叶蔬菜。全国各地均有种植,是冬季主要蔬菜之一。选择长势一致,高度 5 cm 左右的幼苗进行试验。

试验用水采用人工配置富营养化涝池水体的方式,水体主要成分由  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$  和  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  提供,其余营养成分根据 10% Hoagland 营养液进行配置<sup>[21]</sup>。水体中氮、磷初试浓度是以陕西省杨凌示范区周边涝池中 N、P 含量的实际测定值为依据来配置的<sup>[5]</sup>。试验水体配置在一大桶中进行,向盛满去离子水的桶中加入营养盐,混匀后分至栽培水箱中。本试验水体共设置高、中、低 3 个浓度梯度(均属于劣 V 类水),试验开始时测定水体中 N、P 浓度,具体浓度详见表 1。

表 1 富营养化涝池水体氮磷初始浓度

处理及编号	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	试验处理	
低浓度	CK <sub>1</sub>	1.511	1.982	6.143	不栽培植物
	T <sub>1</sub>	1.511	1.982	6.143	栽培植物
中浓度	CK <sub>2</sub>	3.925	4.073	12.116	不栽培植物
	T <sub>2</sub>	3.925	4.073	12.116	栽培植物
高浓度	CK <sub>3</sub>	5.496	8.16	24.173	不栽培植物
	T <sub>3</sub>	5.496	8.16	24.173	栽培植物

试验所用生态浮床由植物、泡沫浮板和定植海绵 3 部分组成,以塑料水箱作为栽培容器,生态浮床尺寸为 40 cm×30 cm×30 cm。试验栽培设置和试验生态浮床装置如图 1—2 所示。

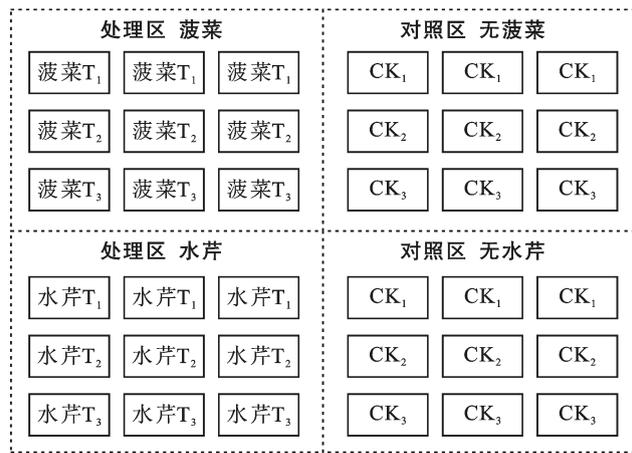


图 1 试验栽培方式示意图

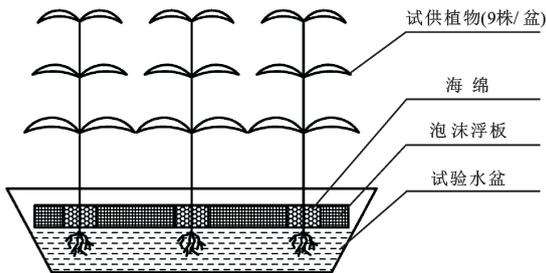


图 2 供试生态浮床装置示意图

## 1.2 试验设计

试验于 2019 年 10—11 月在西北农林科技大学塑料大棚内进行。供试的菠菜和水芹均采购于陕西某蔬菜基地,用清水清洗根系,于 1 mmol/L 的 CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 溶液中饥饿培养 2 d,然后选择生长良好、长势基本一致的幼苗移栽至上述 3 种富营养化水体,每个水箱种植幼苗 9 株,分别以不栽培植物为对照,每个处理重复 3 次。日均温度为 9~20℃ 之间,自然光照。每日定时曝气 2 h,以保证水体溶解氧等条件一致。每 7 d 为 1 个周期,采 1 次水样进行

水体中 N、P 浓度的测定,并用去离子水补充蒸发、植物蒸腾及采样等消耗的水分。

## 1.3 测定方法

1.3.1 水质指标 水样中 TP 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 采用钼锑抗比色法(GB11893-89)测定;TN 采用碱性过硫酸钾氧化紫外分光光度法(HJ636-2012)测定;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用紫外分光光度法(GB11894-89)测定;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏比色法(HJ535-2009)测定;pH 值采用 PHS-3C 型酸度计测定;DO 采用 JPB-607A 型便携式溶解氧分析仪测定。

1.3.2 去除率和每周周日平均去除速率的计算 计算公式为:

$$\text{去除率}(\%) = (C_0 - C_1) / C_0$$

式中: C<sub>0</sub> 为初始水样的浓度(mg/L); C<sub>1</sub> 为试验结束时水样的浓度(mg/L);

$$\text{每周周日平均去除速率}[\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})] = (C_{d1} - C_{d2}) / 7 \text{ d}$$

式中: C<sub>d1</sub> 为某一周期开始时水样的浓度(mg/L); C<sub>d2</sub> 为某一周期结束时水样的浓度(mg/L)。

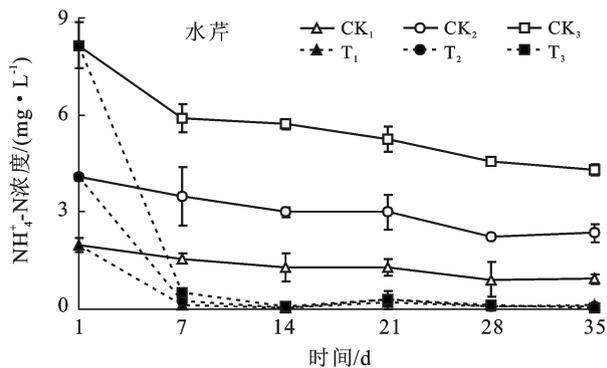
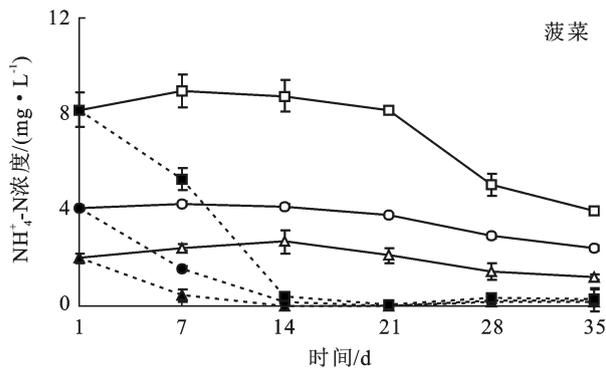
## 1.4 数据分析

本试验应用 Microsoft Excel 和 SPSS 22.0 进行数据统计、分析及绘图,结果以平均值±标准差(Mean±SD)表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 2 种水生蔬菜对富营养化涝池水体中铵态氮的净化效果

植物可直接吸收水体中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,进而合成氨基酸、蛋白质,从而达到净化水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的目的。由图 3 可知,在第 1—14 d 菠菜 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> 处理的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度快速降低至 0.02~0.40 mg/L;14 d 后各处理中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 消耗殆尽,试验结束时浓度略有升高,菠菜对 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> 中的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率分别达到 91.97%, 94.58% 和 96.56%。试验期间菠菜 CK<sub>1</sub>, CK<sub>2</sub>, CK<sub>3</sub> 中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度则呈现波动降低的趋势,试验结束时去除率仅为 40.00%~51.73%,显著低于处理组(p<0.05)。与菠菜不同,在第 1—7 d 水芹 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> 处理中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度迅速减少至较低值(0.14~0.50 mg/L),而后有轻微波动,试验结束时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均去除率达 97.27%。对照组中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度在第 1—7 d 时快速降低,在第 7—35 d 缓慢降低,试验结束时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率分别为 53.17%, 42.35%, 47.21%(图 3)。说明本试验中种植菠菜和水芹的水体对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除效果好于不栽培植物的空白对照,菠菜和水芹的吸收对于富营养化涝池水体的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 净化起到重要作用。

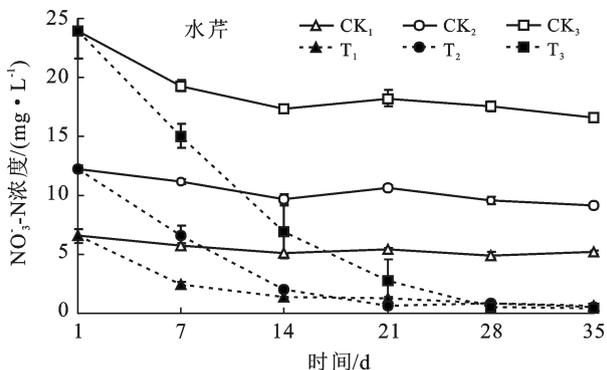
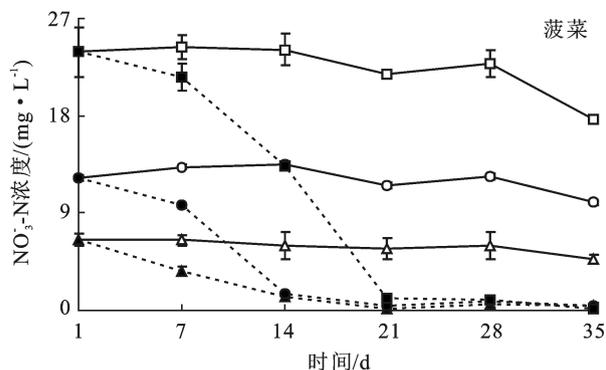
图 3 试验水体中水体  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度变化

## 2.2 2 种水生蔬菜对富营养化涝池水体中硝态氮的净化效果

$\text{NO}_3^-\text{-N}$  不仅是植物最重要的营养物质,更是作为信号分子影响着植物的适应能力、N 素的同化和利用效率。图 4 为试验水体中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度随时间变化的关系图。由图 4 可以看到,第 1—21 d 时菠菜的处理组  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度均快速下降,但在第 28 d 时  $T_1, T_2$  浓度略有上升,  $T_3$  在第 28—35 d 继续降低。试验结束时,菠菜处理组的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  平均去除率为 96.66%,且呈现随试验水体  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度增加,去除

率增高的趋势,去除率是  $\text{CK}_1, \text{CK}_2, \text{CK}_3$  去除率的 3.4~5.2 倍。试验期间水芹  $T_1, T_2, T_3$  的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度以稳定速率下降至较低水平,至结束时  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的去除率分别为 89.93%,96.17%,98.07%,对高浓度的富营养化水体中  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的去除效果最好。

对照组的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度在第 1—14 d 有小幅度降低,后期变化不显著;试验结束时  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的去除率分别为 17.21%,25.04%,31.91%(图 4)。水生蔬菜的存在显著降低了富营养化涝池水体中的  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度。

图 4 不同处理试验水体  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  浓度变化

## 2.3 2 种水生蔬菜对富营养化涝池水体中总氮的净化效果

N 是造成水体富营养化的主要控制因素,利用植物的吸收除 N 是治理水体富营养化的重要手段。图 5 为试验水体中 TN 浓度随时间变化的折线图。由图 5 可以看出,第 1—28 d 时菠菜的 3 个处理 TN 浓度均持续下降,但此后  $T_1, T_2$  处理轻微上升,  $T_3$  处理持续下降;试验结束时 3 个处理 TN 浓度分别降低了 6.82,15.49,32.18 mg/L。菠菜对照组 TN 浓度缓慢降低,变化趋势不明显,试验结束时 TN 平均去除率仅为 17.5%。水芹的  $T_1$  处理在第 1—7 d 时 TN 浓度迅速下降,7 d 后波动下降;  $T_2$  处理在第 1—21 d

迅速下降,第 21 d 后波动下降;  $T_3$  处理则在整个试验期间持续下降(图 5)。水芹的对照组在试验期间对 TN 的去除效果同样不佳,平均去除率仅为对照组平均去除率的 27.6%。说明菠菜和水芹均对富营养化涝池水体中的 TN 有显著的净化效果。

## 2.4 2 种水生蔬菜对富营养化涝池水体中磷酸盐的净化效果

水体中的磷主要以可溶性活性磷的形式被植物吸收,合成植物细胞的组成物质。菠菜和水芹对水体  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除情况如图 6 所示。从图 6 可以看到,1—7 d 时菠菜  $T_1, T_2, T_3$  中  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度快速降低,7—35 d 时去除速度变缓。试验结束时,菠菜对

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除率分别为 82.02%, 92.28%, 92.55%。菠菜对照组  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度在试验期间缓慢降低, 试验结束时去除率仅为 24.06%~44.59%。水芹各处理  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度在试验期持续下降, 其中在第 14—21 d 间 3 个处理都出现快速下降的现象,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度平均降低达 1.68 mg/L, 试验结束时  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除率

分别为 90.27%, 81.76%, 78.40%。CK<sub>1</sub> 降低速率较为平稳, CK<sub>2</sub>, CK<sub>3</sub> 在第 1—21 d 降低速度略快, 而后有轻微波动; 试验结束时  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除率为 46.66%, 45.48%, 39.45% (图 6)。说明菠菜和水芹都可以较好的净化水体中的  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , 其中菠菜对  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的去除效果更好。

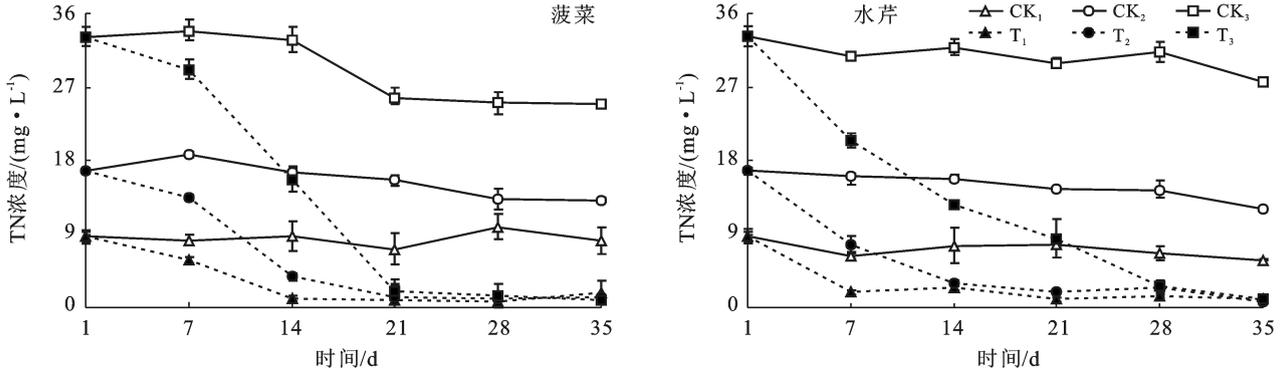


图 5 不同处理试验水体 TN 浓度变化

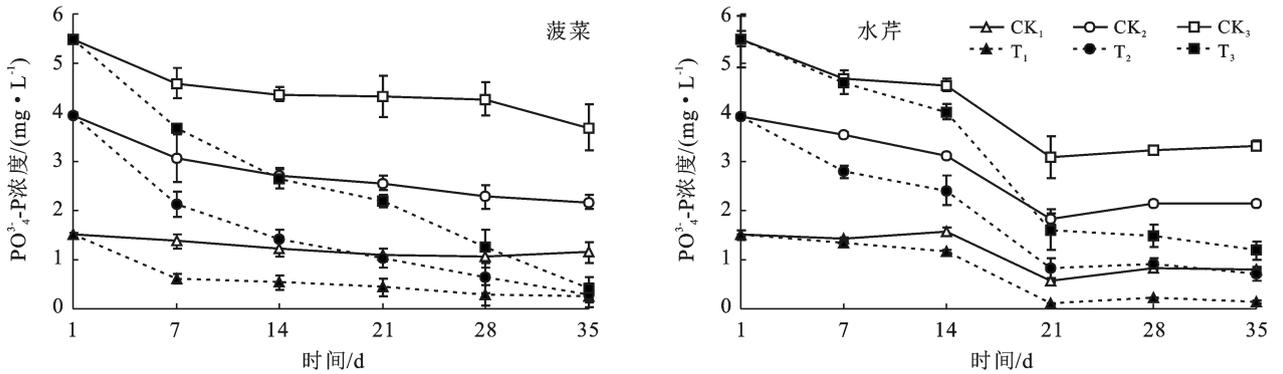


图 6 不同处理试验水体  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度变化

## 2.5 2 种水生蔬菜对富营养化涝池水体中总磷的净化效果

图 7 为试验水体中 TP 浓度随时间变化的关系图。由图 7 可以发现, 在第 1—28 d 时菠菜 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> 处理的 TP 浓度以较大幅度持续下降, 第 28—35 d 下降变慢, 试验结束时 TP 浓度分别为 0.070 mg/L, 0.155 mg/L, 0.394 mg/L; CK<sub>1</sub>, CK<sub>2</sub>, CK<sub>3</sub> 的 TP 浓度则在第 1—35 d 期间呈波动下降趋势, 但下降幅度较小。水芹 T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub> 处理的 TP 浓度在第 1—35 d 持续下降; 对照组 TP 浓度波动降低, 试验结束时对照组的 TP 浓度是处理组的 2.1~2.8 倍 (图 7)。说明栽培菠菜和水芹的处理组能高效净化富营养化涝池水体中的 TP。

## 2.6 2 种水生蔬菜对富营养化涝池水体中总氮、总磷的去除率

从表 2 可以看到, 随 N 浓度升高, 菠菜和水芹

对 TN 的去除率均呈逐渐升高趋势, 去除率分别为 78.61%~97.07% 和 88.37%~96.95%; 在未栽培植物的对照组中, TN 的去除率最高仅为 33.36%, 最低仅有 6.06%, 远低于栽培植物的处理组。随着试验水体 P 浓度由 1.855 mg/L 上升至 6.020 mg/L, 菠菜去除率逐渐下降, 但处理组的去除率均超过 93%; 水芹去除率则呈上升趋势, 由 T<sub>1</sub> 处理的 77.63% 上升至 T<sub>3</sub> 处理的 82.08%, 但其去除率全面劣于菠菜。菠菜和水芹对照组的 TP 去除率同样远低于处理组, 其平均去除率仅为 32.88%。说明菠菜和水芹对富营养化涝池水体中的 N, P 都具有良好的净化效果, 但不同植物的生长情况不同, 对各种营养物质的需求和吸收效率存在很大差异; 根据涝池水体的富营养化水平选择适宜的植物能更加高效的吸收 N, P, 净化水体。

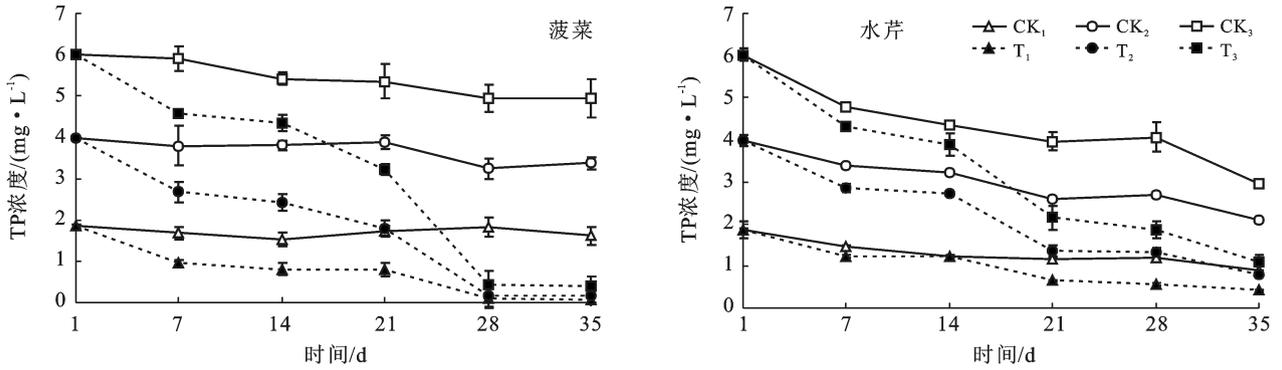


图 7 不同处理试验水体 TP 浓度变化

菠菜净化后的水体指标与地表水水质标准(河流)对比可以发现,3种处理的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度均已优于Ⅱ类水标准;TN浓度均优于Ⅴ类水标准,其中 $T_2$ 处理达到Ⅳ类水标准, $T_3$ 处理已高于Ⅲ类水标准; $T_1$ 处理的TP指标已经降至Ⅱ类水标准, $T_2$ 处理为Ⅲ类水标准, $T_3$ 处理的TP浓度也低于Ⅴ类水标准。水芹净化后的富营养化涝池水体TN浓度均好于国家Ⅳ类水标准,其中 $T_2$ 已经达到Ⅲ类水标准; $T_2$ 、 $T_3$ 处理的 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓度均已好于Ⅱ类水水质要求, $T_1$ 处理达到Ⅲ类水标准;但 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 处理中TP浓度较高,均为劣Ⅴ类水。说明在本试验条件下,菠菜和水芹对富营养化水体的TN净化效果显著;菠菜对TP的净化结果较为理想,水芹对TP的净化效果一般。

表 2 菠菜、水芹对 TN,TP 的去除率 %

处理	菠菜		水芹	
	TN 去除率	TP 去除率	TN 去除率	TP 去除率
CK <sub>1</sub>	6.06	13.02	33.36	52.46
T <sub>1</sub>	78.61	96.20	88.37	77.63
CK <sub>2</sub>	21.49	15.18	27.54	47.90
T <sub>2</sub>	92.56	96.11	95.35	79.74
CK <sub>3</sub>	24.82	18.04	16.67	50.68
T <sub>3</sub>	97.07	93.46	96.95	82.08

### 2.7 2种水生蔬菜对富营养化涝池水体中总氮、总磷的每周期日平均去除速率

图 8 为试验水体中 TN,TP 每周期日平均去除速率图。可以发现,菠菜和水芹的 TN,TP 每周期日平均去除速率均随水体中 N,P 浓度的升高而加快且显著高于对照处理( $p < 0.05$ )。菠菜和水芹的 TN 每周期日平均去除速率变化有明显的区别。菠菜试验开始后逐步升至最高水平,在后两个周期(21—35 d)保持在低速率;水芹则在第一周期就达到最高速率,此后波动下降,在第 5 周期(28—35 d)的去除速率显

著高于菠菜。计算菠菜和水芹在整个试验期间的 TN 日平均去除速率可以发现,水芹总体 TN 日平均去除速率优于菠菜。菠菜和水芹的 TP 每周期日平均去除速率均呈波动变化,菠菜的去除速率极值达  $0.397 \text{ mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$  远高于水芹,计算菠菜和水芹在整个试验期间的 TP 日平均去除速率发现,菠菜在各处理下对 TP 的去除速率均大于水芹。以上表明水芹对 TN 的去除速率好于菠菜,而菠菜对 TP 的去除速率快于水芹。

## 3 讨论

N,P 等营养物质是导致水体富营养化的重要因子,同时又是植物生长发育必需的大量营养元素。它们在水体中的浓度不仅直接关系着水体富营养化程度,也会影响植物的生长和代谢,进而影响植物净化富营养化水体的效果。本试验发现,随富营养化涝池水体 N 浓度升高,菠菜和水芹对 TN 的去除率均呈升高趋势,平均去除率分别达 89.4% 和 93.6%,与段婧婧等<sup>[22]</sup>人的研究相似,高于菱角<sup>[23]</sup>(55.82%~86.55%)、豆瓣菜<sup>[8]</sup>(78.27%)等。而随水体 P 浓度升高,菠菜对 TP 去除率下降,但其去除率均超过 93%,这与 Jin 等<sup>[24]</sup>人对菠菜的研究结果相似,还表明在适宜的 TP 浓度水体中菠菜会呈现较高的 TP 去除率,而  $T_2$ 、 $T_3$  处理的 P 浓度已经超过了菠菜对 P 的耐受性,TP 去除率呈现下降趋势<sup>[25]</sup>。水芹对 TP 去除率虽然上升,但其平均去除率仅为 79.8%,与苋菜(78.53%)相似,高于生菜等水生蔬菜<sup>[26]</sup>。这表明不同蔬菜对 N,P 的吸收机理和需求有差异。2 种蔬菜在不同 N,P 浓度水平下,日均去除速率均为: $T_3 > T_2 > T_1$ ,这与赵鸿哲<sup>[27]</sup>的研究结果相似。同时还发现,水芹 3 个处理的 TN 每周期日平均去除速率在试验初期即达到最大值,显然能更加快速的适应模拟涝池水体的 N 营养环境,虽然最大值低于菠菜,但在 N 消耗至较低水平(1 mg/L)时,去除速率仍能达到

0.2 mg/(L·d)。菠菜的 TP 每周期日平均去除速率无论是最大值还是平均值都高于水芹。这些说明不同蔬菜对不同浓度 N,P 营养环境的适应能力有明显

差异,水芹更能适应广泛的 N 浓度水平,在 N 浓度水平较低时依旧能保持较快的去除速率,而菠菜则在对水体中 P 去除速率上展现出优势。

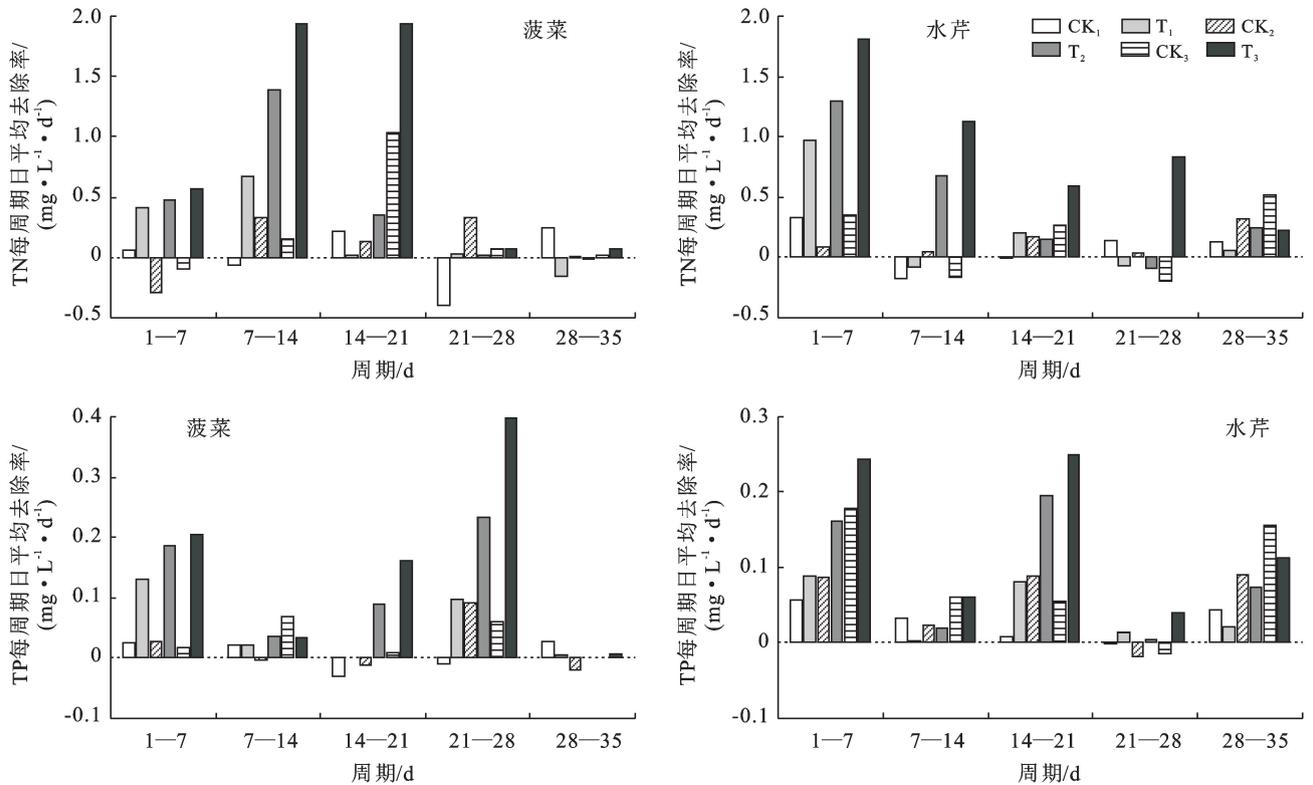


图 8 不同处理试验水体 TN,TP 每周期日平均去除速率

试验的空白对照中尽管无植物系统,但  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  也有一定损失,说明植物吸收不是  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除的唯一途径,可能还包括挥发、硝化作用等。 $\text{NH}_4^+$  与  $\text{NH}_3$  在一定条件下会相互转化,两者存在比例取决于 pH 值,pH 值为 8~9.3 时氨挥发显著<sup>[28-29]</sup>。王盼等<sup>[30]</sup> 试验发现,水体 pH 值较高,氨挥发起到了重要作用;而对水蔬菜的研究发现<sup>[31]</sup>,在净化富营养化养殖水体时 pH 值小于 8,氨挥发不显著。本试验中,在  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  减少最快的第 1—7 d 内,测得  $T_1, T_2, T_3$  水体 pH 值在 7.1~7.6 之间,此时  $\text{NH}_4^+$  占绝大部分比例, $\text{NH}_3$  含量很低,说明在本试验中氨挥发不是  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除的主导因素。硝化作用是在微生物的作用下将  $\text{NH}_4^+$  转化为  $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NO}_3^-$ ,主要受温度、DO,pH 值等因素影响。胡绵好等人对水芹和豆瓣菜的研究发现<sup>[32]</sup>,温度低于 4 °C 或 DO 浓度低于 0.5 mg/L 时硝化作用趋近停止;pH 值在中性或弱碱性条件下硝化速率最高,在 pH 值低于 7 时硝化速率将显著降低。本研究整个试验期  $T_1, T_2, T_3$  水体温度为 10.6~16.7 °C,DO 为 5.3~2.7 mg/L,pH 值为 7.1~7.6,因此存在硝化作用。所以  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除

以植物吸收和硝化作用为主,可能伴有少许氨挥发作用。反硝化作用是在微生物作用下将  $\text{NO}_3^- -\text{N}$  还原为  $\text{NO}, \text{N}_2$  的过程,传统理论认为反硝化作用为严格的厌氧过程,一般 DO 低于 0.5 mg/L 时才会发生反硝化作用;但近年研究发现存在多种好氧反硝化细菌在有合适的碳源、温度(15~35 °C)、pH 值(7~7.5)条件时可以在较高 DO 浓度下进行反硝化作用<sup>[33-34]</sup>。本试验期间水体 pH 值在 7.1~7.6 之间,且有部分根系脱落物做碳源,显然满足上述条件,因此  $\text{NO}_3^- -\text{N}$  的去除仍以蔬菜吸收为主,反硝化可能起到一定作用,这可能也是试验处理组对  $\text{NO}_3^- -\text{N}$  的去除效果明显好于空白对照的原因,与空心菜、薄荷等水生蔬菜的研究结果相似<sup>[17]</sup>。本试验结束时发现,不论是空白对照还是存在植物系统的水体中均有少量沉淀物质,说明水中部分  $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$  形成了磷酸盐沉淀沉积在底部,沉淀和吸附作用在  $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$  的去除中起到了一定作用<sup>[35]</sup>,菠菜和水芹的存在提高了整个系统对  $\text{PO}_4^{3-} -\text{P}$  的去除效果。而在形成磷酸盐沉淀的同时,亦可能存在磷酸盐沉淀的溶解,这可能是导致 TP 去除速率的波动变化的原因。

试验结束时富营养化涝池水体最终  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN, TP 浓度已基本达到或高于地表水水质标准(河流)的 V 类水标准,只有水芹的 TP 浓度仍为劣 V 类水标准。两种蔬菜对 TN 的净化效果好于番茄<sup>[36]</sup>(V 类水标准);但对 TP 的净化效果低于莴笋<sup>[36]</sup>(II 类水标准)。研究结果显示了菠菜和水芹 2 种水生蔬菜在治理富营养化涝池水体上的广泛前景,但距离在广大农村地区的推广应用还有距离,仍需在多个方面开展研究。例如经济植物的选择及不同季节的配置,植物产量及水体营养元素利用效率,营养品质与食品安全性,节水与去污潜力等方面,都需要进一步的工作。

## 4 结论

(1) 菠菜和水芹净化后的富营养化涝池水体最终  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ , TN, TP 浓度基本上已达到或优于地表水水质标准(河流)的 V 类水标准。表明菠菜和水芹可以有效净化富营养化涝池水体,净化后的水体已经达到正常水体指标。

(2) 菠菜对富营养化涝池水体中 TN 的去除率为 78.61%~97.07%,对 TP 的去除率 93.46%~97.07%;水芹对富营养化水体中 TN 的去除率为 88.37%~96.95%,对 TP 的去除率 77.63%~82.08%。说明菠菜和水芹对富营养化涝池水体中 N, P 具有良好的净化效果,且 N, P 浓度越高,净化效果越好。

(3) 菠菜和水芹的对水体中 N, P 的去除率和日均去除速率均显著高于对照,对 N 去除率和日均去除速率为:水芹>菠菜,对 P 去除率和日均去除速率为:菠菜>水芹。表明菠菜和水芹可以快速有效的净化富营养化涝池水体,可用于富营养化涝池水体的生态修复;在本试验条件下水芹对水体中 N 的去除效果更好,菠菜对水体中 P 去除效果更佳。

### [参 考 文 献]

- [1] 肖程洲.不同植物搭配对关中涝池水体污染物的去除效应[D].陕西 西安:西安科技大学,2019.
- [2] 于法稳,郝信波.农村人居环境整治的研究现状及展望[J].生态经济,2019,35(10):166-170.
- [3] 孙慧波,赵霞.中国农村人居环境质量评价及差异化治理策略[J].西安交通大学学报(社会科学版),2019,39(5):105-113.
- [4] García-Nieto P J, García-Gonzalo E, Alonso Fernández J R, et al. Using evolutionary multivariate adaptive regression splines approach to evaluate the eutrophication in the Pozón de la Dolores lake (Northern Spain) [J]. Ecological Engineering, 2016,94:136-151.
- [5] 张锐.生态浮床在改善农村涝池水质方面的作用[J].中国电气工程学报,2019(12):51-61.
- [6] 苏媛,高小宝,张锐,等.关中地区农村典型涝池水体污染物特征及其水质现状调查与分析[J].水土保持通报,2020,40(1):256-261,268.
- [7] 肖程洲,孙晶,柳宁,等.6种植物对关中涝池水体氮磷的吸收对比分析[J].科学技术创新,2019(9):36-37.
- [8] 胡绵好,袁菊红,杨肖娥.水生蔬菜对富营养化水体净化及资源化利用[J].湖泊科学,2010,22(3):416-420.
- [9] 刘韩,王汉席,盛连喜.中国湖泊水体富营养化生态治理技术研究进展[J].湖北农业科学,2020,59(1):5-10.
- [10] 苏媛,高照良,娄永才,等.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].水土保持学报,2020,34(4):347-353,363.
- [11] Zhao Fengliang, Yang Weidong, Zeng Zheng, et al. Nutrient removal efficiency and biomass production of different bioenergy plants in hypereutrophic water [J]. Biomass & Bioenergy, 2012,42(7):212-218.
- [12] Wang Zhi, Zhang Zhiyong, Zhang Yingying, et al. Nitrogen removal from Lake Caohai, a typical ultra-eutrophic lake in China with large scale confined growth of *Eichhornia crassipes* [J]. Chemosphere, 2013,92(2):177-183.
- [13] 邓志强,李旭辉,阎百兴,等.富营养化水体中芦苇和菖蒲浮床氮净化能力比较研究[J].农业环境科学学报,2013,32(11):2258-2263.
- [14] 刘颖,徐文娟.豆瓣菜浮床栽培对富营养化水体净化效果的研究[J].长江蔬菜,2015(22):88-91.
- [15] Magwaza S T, Magwaza L S, Odindo A O, et al. Hydroponic technology as decentralised system for domestic wastewater treatment and vegetable production in urban agriculture: A review [J]. The Science of the Total Environment, 2020,698(1):1-13.
- [16] Chen Z B, Cuervo D P, Müller Jochen A, et al. Hydroponic root mats for wastewater treatment: A review [J]. Environmental Science & Pollution Research International, 2016,23(16):15911-15928.
- [17] 陈华,卫坚强,尹梅,等.水培蔬菜对循环养殖水水质净化效果研究[J].西南农业学报,2018,31(3):619-622.
- [18] 张振华,高岩,郭俊尧,等.富营养化水体治理的实践与思考:以滇池水生植物生态修复实践为例[J].生态与农村环境学报,2014,30(1):129-135.
- [19] Renata D S C C, Bastos R G, Souza C F. Influence of the use of wastewater on nutrient absorption and production of lettuce grown in a hydroponic system [J]. Agricultural Water Management, 2018,203:311-321.
- [20] Krishnasamy K, Nair J, Bauml B. Hydroponic system for the treatment of anaerobic liquid [J]. Water Science & Technology, 2012,65(7):1164-1171.

- [21] 魏东慧,张江汀,魏学智.4种水生植物对富营养化水体氮磷去除效果的研究[J].中国野生植物资源,2012,31(5):12-17.
- [22] 段婧婧,薛利红,冯彦房,等.碳氮比对水芹浮床系统去除低污染水氮磷效果的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(3):384-391.
- [23] 司圆圆,卢王梯,陈兴汉,等.菱角对农村富营养化水体营养盐吸收的初步研究[J].水生态学杂志,2018,39(1):32-36.
- [24] Jin Entao, Cao Leipeng, Xiang Shuyu, et al. Feasibility of using pretreated swine wastewater for production of water spinach (*Ipomoea aquatic* Forsk.) in a hydroponic system [J]. Agricultural Water Management, 2020, 228:105856.
- [25] Yao Lixiao, Li Guoliang, Dang Zhi, et al. Uptake and transport of roxarsone and its metabolites in water spinach as affected by phosphate supply [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2010,29(4):947-951.
- [26] 张村侠,朱世东.浮床栽培绿叶蔬菜对富营养化水体的净化效果[J].安徽农业科学,2007,35(14):4193-4194,4196.
- [27] 赵鸿哲.浮床栽培蔬菜的适应性选择及其对富营养化水体净化效果的研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古大学,2013.
- [28] 方焰星,何池全,梁霞,等.水生植物对污染水体氮磷的净化效果研究[J].水生态学杂志,2010,3(6):36-40.
- [29] 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.
- [30] 王盼,马牧源,刘春光,等.不同氮源对黄花鸢尾净化富营养化水体的影响[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):13-17.
- [31] 杨晓玲,郭金耀.水蕹菜对富营养化养殖水的净化作用研究[J].作物杂志,2012(1):49-52.
- [32] 胡绵好,奥岩松,朱建坤,等. pH 和曝气对水生植物去除富营养化水体中氮磷等物质的影响[J].水土保持学报,2008,22(4):168-173.
- [33] 丁炜,朱亮,徐京,等.好氧反硝化菌及其在生物处理与修复中的应用研究进展[J].应用与环境生物学报,2011,17(6):923-929.
- [34] 梁书诚,赵敏,卢磊,等.好氧反硝化菌脱氮特性研究进展[J].应用生态学报,2010,21(6):1581-1588.
- [35] Gao Jingqing, Xiong Zhiting, Zhang Jingdong, et al. Phosphorus removal from water of eutrophic Lake Donghu by five submerged macrophytes [J]. Desalination, 2009,242(1):193-204.
- [36] 刘晓丹,李军,龚一富,等.5种水培植物对富营养化水体的净化能力[J].环境工程学报,2013,7(7):211-216.

(上接第 15 页)

- [8] 铁永波,唐川,倪化勇.群发性泥石流的危害效应及防范探讨[J].山地学报,2010,28(6):753-757.
- [9] 孔艳,王保云,杨昆,等.云南省泥石流灾害时空分布规律及典型区域孕灾特点分析[J].云南师范大学学报(自然科学版),2018,38(6):55-63.
- [10] 唐川.云南怒江流域泥石流敏感性空间分析[J].地理研究,2005,24(2):178-185.
- [11] 孔艳,王保云,王乃强,等.滇西高山峡谷区泥石流危险性评价:以怒江傈僳族自治州为例[J].云南师范大学学报(自然科学版),2019,39(3):63-70.
- [12] 徐慧娟.怒江流域高山峡谷区泥石流活动规律及成灾驱动力研究[D].云南昆明:云南大学,2016.
- [13] 郑师谊,张绪教,杨艳,等.层次分析法在滇西怒江河谷潞江盆地崩塌与滑坡地质灾害危险性评价中的应用[J].地质通报,2012,31(Z1):356-365.
- [14] 李益敏,杨蕾,魏苏杭.基于小流域单元的怒江州泥石流易发性评价[J].长江流域资源与环境,2019,28(10):2419-2428.
- [15] 吕立群,王兆印,徐梦珍,等.怒江泥石流扇地貌特征与扇体堵江机理研究[J].水利学报,2016,47(10):1245-1252.
- [16] 周东平.云南怒江贡山流域泥石流预警模型研究[D].河北石家庄:石家庄经济学院,2015.
- [17] 苏鹏程,韦方强,谢涛.云南贡山 8·18 特大泥石流成因及其对矿产资源开发的危害[J].资源科学,2012,34(7):1248-1256.
- [18] 张杰,李世凯,甘云兰,等.云南贡山 8·18 特大泥石流灾害调查分析与启示[J].工程地质学报,2015,23(3):373-382.
- [19] 程德方.怒江六库一贡山河段泥石流初探[J].水土保持通报,1985,5(1):55-56.
- [20] Tie Yongbo Xu Ruge, Ba Renji. The formation of run-off-generated debris flow in Southwestern of China: Take Gangou as an example [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(5):1479-1490.
- [21] 铁永波,徐如阁,刘洪,等.西昌市泸山地区典型火后泥石流特征及成因机制研究:以响水沟左岸 3<sup>#</sup>支沟为例[J].中国地质调查,2020,7(3):82-88.