

万 蕾,黄亚惠,于 箫. 3 种水培植物对高氮磷水体的耐受性及去除效果[J]. 江苏农业科学,2021,49(21):235-240.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.21.039

### 3 种水培植物对高氮磷水体的耐受性及去除效果

万 蕾<sup>1</sup>,黄亚惠<sup>2</sup>,于 箫<sup>1</sup>

(1. 徐州工程学院环境工程学院,江苏徐州 221018; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院,江苏南京 210095)

**摘要:**以吊兰[*Chlorophytum comosum* (Thunb.) Baker.]、慈姑(*Sagittaria trifolia* var. *sinensis*)、铜钱草[*Hydrocotyle chinensis* (Dunn) Craib] 3 种水培植物为研究对象,分析其在室内水培条件下,在高氮、磷浓度(实测  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度为 41.40 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度为 3.55 mg/L)水体和中高氮、磷浓度(实测  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度为 19.09 mg/L,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度为 1.80 mg/L)水体中的根长、茎长和叶片叶绿素 a 含量的变化情况,以及对氮、磷的去除率。结果表明,铜钱草对高氮、磷浓度的耐受性较好,吊兰次之,慈姑对高氮、磷浓度的耐受性较差。在高浓度氮、磷组,氮的去除率表现为吊兰 > 铜钱草 > 慈姑,而在中高浓度氮、磷组,对氮的去除率表现为铜钱草 > 吊兰 > 慈姑;在高氮、磷浓度组,3 种植物对磷的去除率表现为铜钱草 > 吊兰 > 慈姑,在中高氮、磷浓度组,对磷的去除率表现为铜钱草 > 慈姑 > 吊兰。水生植物在生长状态不佳的情况下,对氮、磷的吸收去除能力肯定较差,而在生长状态较好的情况下,对氮、磷的吸收去除能力不一定强。研究结果为水体富营养化或黑臭水体的治理提供了参考,为水生植被的恢复提供了借鉴。

**关键词:**水培植物;高浓度;氮;磷;耐受;去除率

**中图分类号:** X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)21-0235-06

当前,水体富营养化已经成为全球性的水环境污染问题,目前我国约有 70% 的湖泊受到了不同程度的污染,多数湖泊出现了不同程度的富营养化。不仅仅是湖泊,一些流动性较差的河流也出现了富营养化问题,甚至是黑臭现象。近年来,富营养化水体的治理技术日趋成熟,主要有应急除藻技术,包括絮凝沉淀、机械打捞、投加杀藻剂等<sup>[1-3]</sup>,以及控污截源、生物调控等长期措施<sup>[4-6]</sup>。其中生物调控措施包括水生植被恢复、生物操纵、投加微生物

制剂等。近年来,我国的水生植被恢复存在一个误区,即不管本底条件如何一律栽花种草,希望通过水生植物的净化作用来去除水体中的污染物。因此,前人的研究大多集中在水生植物对污染水体中氮、磷、有机物或是藻类的去除效果上<sup>[7-10]</sup>,示范工程的应用也是几种治理技术的盲目集成,耗费了大量人力、物力和财力,对富营养化水体的治理效果不理想,甚至出现短期或局部由于水生植物的腐烂加重造成的水体污染现象。

恢复水生植物的前提条件是必须创造适合植物生长的水体环境。关于大型水生植物适宜的生存环境特别是营养盐阈值的研究较少。在水生植物对营养元素的耐受性方面,与浮水植物相关的主要是万志刚等通过研究 6 种水生维管束植物在人工培养条件下对不同浓度氮、磷元素培养液的耐受

收稿日期:2021-03-02

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究重大项目(编号:19KJA580002)。

作者简介:万 蕾(1981—),女,山东烟台人,博士,副教授,主要从事水环境污染防治与生态修复方面的研究。Tel:(0516)83290571; E-mail:hjwanl@163.com。

[J]. Biosystems Engineering,2018,168:121-132.

[4]王幼奇,张 兴,赵云鹏,等. 基于 GIS 和地理加权回归的砂田土壤阳离子交换量空间预测[J]. 土壤,2020,52(2):421-426.

[5]陈忠柳,舒英格,周鹏鹏. 喀斯特山区不同生态恢复模式土壤盐基离子的交换及分布特征[J]. 水土保持学报,2020,34(4):304-311,319.

[6]刘 莉,谢德体,李忠意,等. 酸性紫色土的阳离子交换特征及其对酸缓冲容量的影响[J]. 土壤学报,2020,57(4):887-897.

[7]李海鹰,姜小三,潘剑君,等. 土壤阳离子交换量分布规律的研究

——以江苏省溧水县为例[J]. 土壤,2007,39(3):443-447.

[8]白志强,张世熔,钟钦梅,等. 四川盆地西缘土壤阳离子交换量的特征及影响因素[J]. 土壤,2020,52(3):581-587.

[9]付瑞莹. 贵州省铜仁市玉米生长的气象条件分析[J]. 北京农业,2015(6):179-180.

[10]普继琼,廖 萍,吴建芳. 红塔区农产品产地土壤中阳离子交换量与有机质含量和 pH 值的测定及相关性分析[J]. 云南农业科技,2020(4):13-14.

性,发现凤眼莲(水葫芦)对氮、磷元素的耐受性最高,当水体中氮浓度达到 1 514. 26 mg/L 时死亡,当水体中磷浓度达到 200. 4 mg/L 时死亡,对水体中氮耐受性最差的是浮萍、水鳖,对水体中磷浓度耐受性最差的是水鳖<sup>[11]</sup>。在挺水植物方面,黄丹萍等在水培条件下观察 3 个浓度梯度的氮、磷污水对菖蒲胁迫后的根系释氧、通气组织的变化规律发现,高氮、磷浓度(N:120 mg/L,P:12 mg/L)胁迫明显抑制了菖蒲株高、根系长度的生长,从而减少植物根系数量<sup>[12]</sup>。在沉水植物方面,刘少博等研究了狐尾藻在生态湿地系统对高铵态氮的耐受及氮、磷吸收能力,结果表明,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 质量浓度达到 420 mg/L 时,茎高、生物量生长速率分别仅为对照的 27. 4%、17. 9%,植物受到严重胁迫,生长受阻甚至死亡<sup>[13]</sup>;熊剑等研究发现,金鱼藻在硝态氮浓度达到 10 ~ 30 mg/L 时仍可生长,但是会抑制其生长,从而导致生物量降低,随着浓度升高,会导致金鱼藻叶片脱落更加严重<sup>[14]</sup>。关于营养盐对水生植物生长的影响机制研究一直存在分歧<sup>[15]</sup>。总之,营养盐浓度是大型水生植物生长的胁迫因子之一,但不是限制其生长的关键因子,在一定范围的营养盐浓度下,水生植物具有较高的耐受性,其生长过程不会受到显著影响,但要保证水生植物的正常萌发、生长,水体营养盐浓度存在上限阈值,该阈值与水生植物的类型、水生植物的生长阶段有关。

本研究分析了吊兰 [*Chlorophytum comosum* (Thunb.) Baker.]、慈姑 (*Sagittaria trifolia* var. *sinensis*)、铜钱草 [*Hydrocotyle chinensis* (Dunn) Craib] 3 种水培植物在浓度较高的有机物、氮、磷营养水平下的生长状况及对氮、磷的去除效果,以期为水体富营养化或黑臭水体的治理提供参考,并为水生植被的恢复提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用水取自校园景观湖,静置后取上清液,测定其 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P 及 COD<sub>Mn</sub> 浓度,通过投加葡萄糖、硝酸钾和磷酸二氢钾以配制不同浓度的营养液,其实测浓度见表 1。试验装置为长方形塑料水槽,尺寸为 27 cm×20 cm×10. 5 cm,试验用水约为 5 L。选取生长良好的植物,洗净根部后用泡沫板固定,直接放置在水槽上方,每个水槽种植 3 株体积相近的吊兰或慈姑,铜钱草种植量为水槽平面面

表 1 实测人工配制营养液的初始浓度

指标	初始浓度 (mg/L)	
	试验组 1 (高氮、磷组) 的	试验组 2 (中高氮、磷组)
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> - N	41. 40	19. 09
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> - P	3. 55	1. 80
COD <sub>Mn</sub>	19. 03	19. 90

积的 50% 左右,3 种植物的初始净生物量相近。

1.2 分析方法

试验开始后,每 5 d 取 50 mL 水样,测定 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P 的浓度。随机取多片植物叶片,测定叶绿素 a 含量,并且测定植物的株高、根长,取平均值后进行分析。每天补充原水,保证培养液总体积不变。其中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P、COD<sub>Mn</sub> 浓度的测定参照《水和废水监测分析方法(第四版)》,叶绿素 a 含量的测定参照《植物生理学实验指导(第三版)》。本试验从 2019 年 7 月 1 日开始,8 月 9 日结束,共计 40 d,后期由于室内气温过高,停止试验。每组试验设置 2 个平行样,取其平均值进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同水培植物对高氮、磷水体的耐受情况

2.1.1 3 种水培植物根长变化情况 植物的根部是直接接触培养液的部位,由图 1 可以看出,试验组 1(高氮、磷组)的慈姑根长一直在减小,说明该氮、磷浓度不适合慈姑生长,并且在 7 月 20 号以后出现明显烂根现象,因此试验在第 20 天后停止;试验组 2(中高氮、磷组)的慈姑前期根长增长明显,第 20 天后也呈现萎缩、减少的趋势,第 30 天后出现明显烂根的情况,试验周期为 30 d。吊兰在试验组 1(高氮、磷组)经历了 10 d 的适应期后,根长逐渐增长,第 25 天以后呈现萎缩,缓慢变短;而在试验组 2(中高氮、磷组),前期根长呈现波动缓慢增长的趋势,第 30 天以后明显变短,试验组 1 的根长大于试验组 2 的根长。铜钱草的根长变化与慈姑、吊兰不同,前期经历了较长时间的适应期,第 25 天以后,试验组 1(高氮、磷组)和试验组 2(中高氮、磷组)的根长都明显增大,试验组 2(中高氮、磷组)的根长比试验组 1(高氮、磷组)的根长长 25% 以上。

2.1.2 植物茎长变化情况 从图 2 可以看出,慈姑在高氮、磷浓度条件下,茎长一直呈减少趋势,而在中高氮、磷浓度下则呈缓慢增加的趋势。吊兰的茎长变化规律在试验组 1 与根长的变化规律基本一

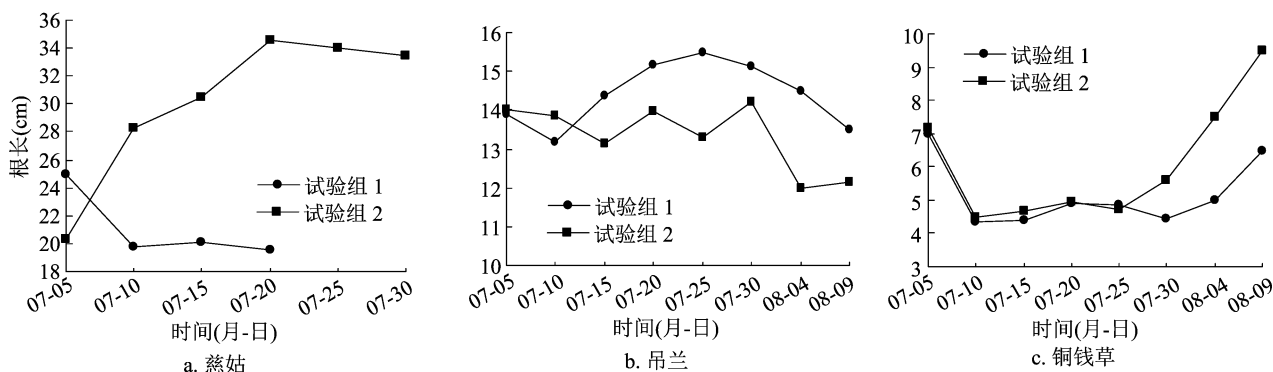


图1 3种水培植物的根长变化

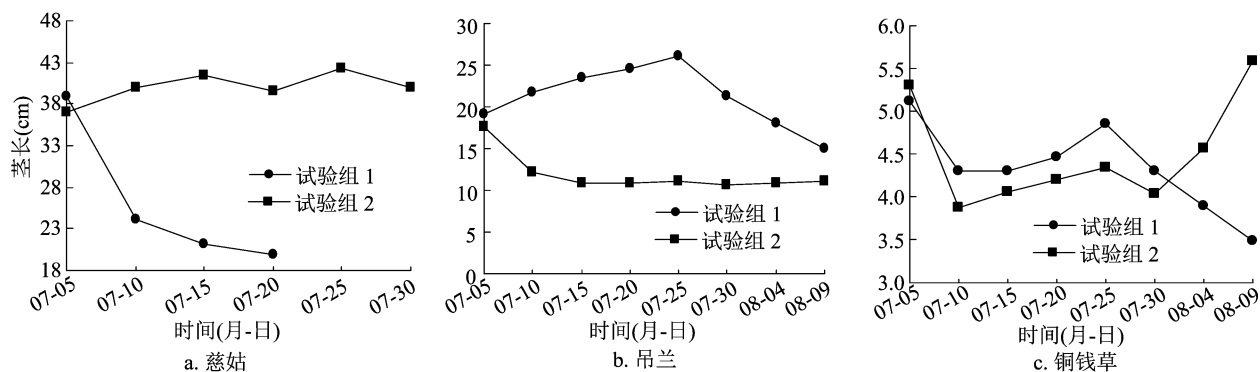


图2 3种水培植物的茎长变化

致,试验第 25 天之前呈增加趋势,第 25 天以后呈明显减少的趋势;而试验组 2 在前期(试验 15 d 之前)有减少的趋势,后期缓慢增长,试验组 1 的茎长大于试验组 2。铜钱草茎长的变化规律与慈姑、吊兰不同,2 个试验组的茎长在试验 10 d 之前都呈下降趋势,可以看作存在 1 个适应期,试验 10 ~ 20 d 都呈增加趋势,而且试验组 1 的茎长比试验组 2 长 10% 左右,但在试验后期(1 个月以后),试验组 2 的茎长明显呈增加的趋势,而试验组 1 的茎长则明显减少。

2.1.3 植物叶片叶绿素 a 含量的变化 从图 3 可以看出,试验前 5 d,3 种水培植物的叶绿素 a 含量都有不同程度的下降,第 10 天以后基本呈增加趋势,并且试验组 2 的植物叶片叶绿素 a 含量均高于

试验组 1。对于慈姑而言,虽然在试验第 15 天时叶绿素 a 含量有升高的趋势,但在试验组 1 在第 20 天时叶绿素 a 含量明显减少,第 25 天时发现明显烂根,没有测量;而试验组 2 的慈姑在试验第 20 天时的叶片叶绿素 a 含量达到最大值,之后开始逐渐减少。对于吊兰而言,试验组 1 的叶绿素 a 含量在试验第 25 天以后出现减少趋势,而试验组 2 的叶绿素 a 含量在第 35 天后明显升高,至试验结束时,达到 3.25 mg/g,试验组 1 低于试验组 2。相比于慈姑、吊兰,试验组 1 铜钱草的叶片叶绿素 a 含量在前期没有明显下降,在试验结束时的叶绿素 a 含量与试验初期相当,并且在试验后期呈现增加的趋势;而试验组 2 的慈姑同样在第 30 天后明显升高。在试验后

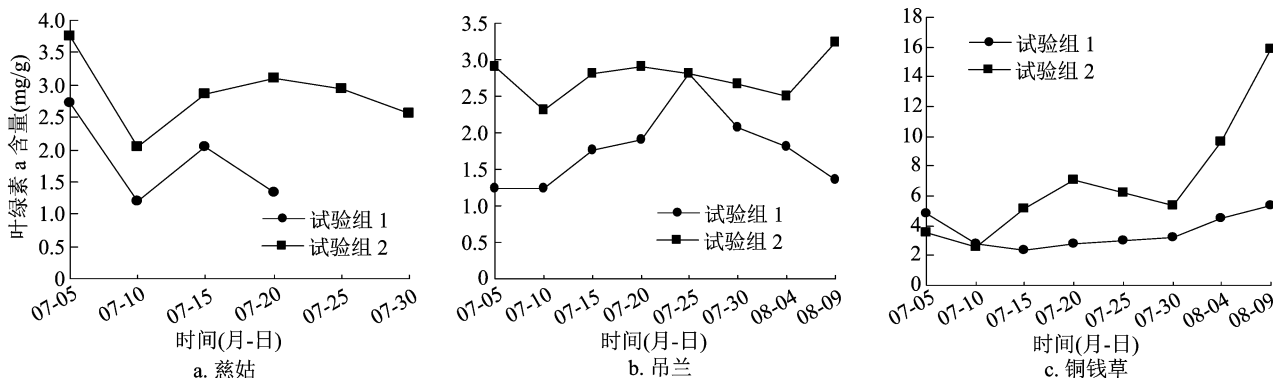


图3 3种水培植物叶片叶绿素a含量的变化

期,不同试验组的铜钱草的生长情况见图 4,可以看出,试验组 2 的铜钱草的生长情况明显好于试验组 1。

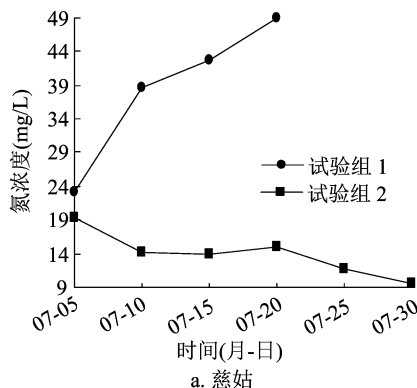


左侧为高氮、磷浓度,右侧为中高氮、磷浓度

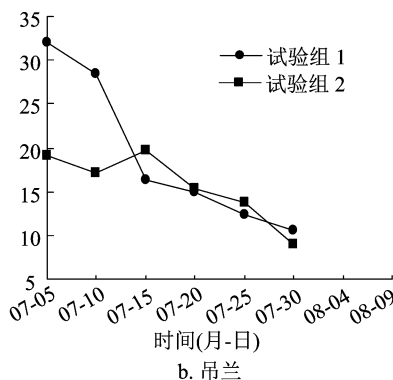
图4 2种质量浓度下铜钱草生长情况的对比

## 2.2 不同水培植物对高氮磷的去除能力

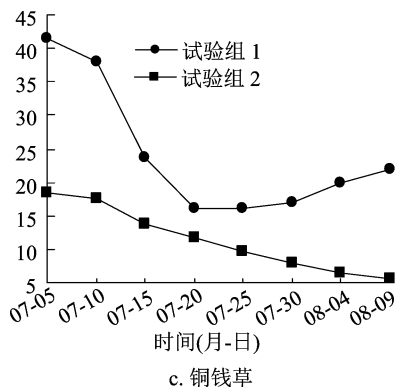
2.2.1 氮浓度的变化情况 从图 5 可以看出,3 种水培植物对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除能力差别较大。试验



a. 慈姑



b. 吊兰



c. 铜钱草

图5  $\text{NO}_3^-$  氮浓度的变化

2.2.2 磷浓度的变化情况 从图 6 可以看出,慈姑培养液中  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度的变化规律与氮相似,不同的是,试验组 2 的磷浓度始终较低。在吊兰试验组 1 中,磷浓度在第 5 天后基本呈增加趋势,试验组 2 的磷浓度在第 15 天以后也有增加的趋势,30 d 后有减少的趋势。在试验组 1 中,铜钱草中磷浓度在第 15 天之前基本不变,第 25 天以后呈下降趋势,而且始终较低,至试验结束时,去除率为 86.70%;在试验组 2 中,磷浓度一直呈现缓慢下降的趋势,至试验结束时,去除率为 99.0%。总体来看,在高氮、磷组,3 种植物对磷的去除率表现为铜钱草 > 吊兰 > 慈姑;在中高氮、磷组,3 种植物对磷的去除率表现为铜钱草 > 慈姑 > 吊兰。

## 3 讨论与结论

### 3.1 植物生长状况与氮、磷净化效果的关系

通常认为,植物的生长状态越好,其对水体中

组 1 的慈姑培养液的氮浓度一直呈增加的趋势,结合植物的生长情况分析可知,40 mg/L 氮浓度已经不利于慈姑生长,而试验组 2 的慈姑培养液中的氮浓度缓慢下降,至试验结束时(30 d),对氮的去除率为 50.55%。试验组 1 的吊兰氮浓度在前期下降较快,第 15 天以后变化趋势变缓,第 30 天以后至试验结束时,氮浓度基本保持不变;试验组 2 的吊兰氮浓度在第 15 天之前呈现波动,而第 15 天以后快速减少,至试验结束时,氮质量浓度的去除率为 64.90%。铜钱草在试验组 1 中的氮浓度在前 20 d 下降较快,第 20 天以后下降趋势明显变缓,甚至在后期有升高的趋势;试验组 2 的氮浓度一直减少,至试验结束时,氮浓度的去除率为 71.33%。在氮、磷高浓度组,吊兰对氮的去除率高于铜钱草,而在中高浓度氮、磷处理组,铜钱草对氮的去除率高于吊兰。

氮磷的吸收能力越强。由表 2 可以看出,无论是试验组 1 还是试验组 2,慈姑的植物生长状况与其对氮、磷去除率的相关系数总体较吊兰、铜钱草高,尤其是在试验组 1 中,慈姑对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率与根长、茎长和叶绿素 a 含量的相关系数( $r$ )均大于 0.7,而吊兰和铜钱草对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除率与根长、茎长和叶绿素 a 含量的相关系数均较小,尤其是铜钱草甚至出现多个弱负相关。由此可以看出,在试验组 1 中,慈姑的生长状况最差,而吊兰、铜钱草在试验组 1 的试验期内没有腐烂,在试验组 2 的条件下生长状态较好,说明水生植物在生长状态不佳的情况下对氮、磷的吸收去除能力较差,而在生长状态较好的情况下,对氮、磷的吸收去除能力不一定强。推测其原因,可能与不同植物对氮磷的耐受程度不同有关,对氮磷耐受能力强的植物,能够在高浓度氮、磷条件(即逆境条件)下清除体内的过氧化氢,维持体内的活性氧代谢平衡,保护膜结构,从而

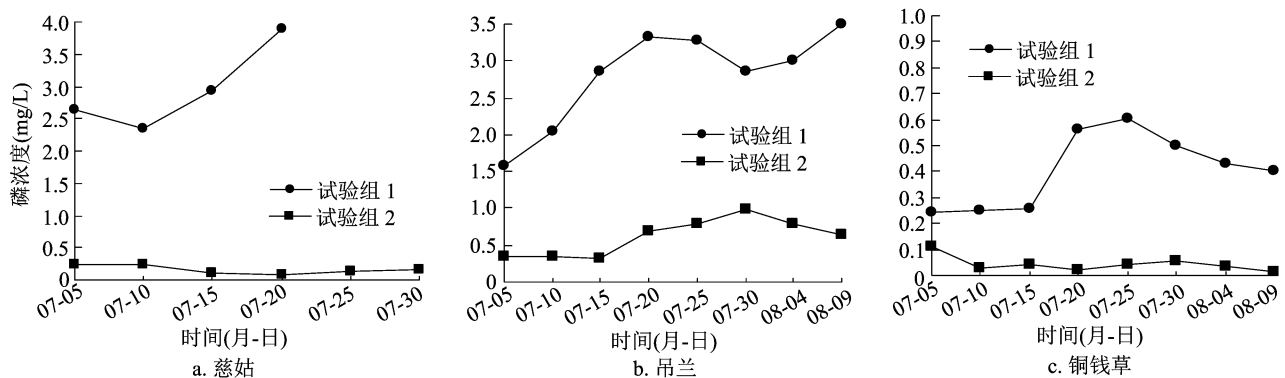


图6  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度的变化

表 2 植物生长状况与氮、磷去除率的相关系数

组别	植物	相关系数( <i>r</i> )			
		营养盐含量	根长	茎长	叶绿素 a 含量
试验组 1	慈姑	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.931 0	0.978 4	0.779 2
		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	0.340 9	0.490 6	0.262 5
	吊兰	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.539 5	0.044 7	0.577 6
		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	0.487 4	-0.024 5	-0.553 4
	铜钱草	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	-0.411 0	-0.333 5	-0.224 7
		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	0.105 8	0.145 3	-0.293 6
试验组 2	慈姑	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.795 4	0.720 8	0.626 8
		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	0.791 6	0.632 5	0.960 6
	吊兰	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	-0.549 4	0.508 4	0.196 7
		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	0.122 1	0.545 3	-0.055 7
	铜钱草	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.466 5	0.196 0	0.798 1
		$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	-0.051 0	-0.282 1	0.515 0

在一定程度上忍耐、减缓或抵抗逆境胁迫,阻止水体中高氮、磷浓度对植物组织的损害<sup>[16-18]</sup>。由此可见,即使在高浓度氮、磷条件下能够正常生长的植物,其对氮、磷的吸收去除能力不一定强。

### 3.2 不同水生植物净化效果的比较

不同水生植物对氮、磷的耐受程度不同,对氮、磷的去除能力也不同。关于慈姑净化富营养化水体方面的研究,不同学者的研究结果差异较大,高丁梅等认为,慈姑对磷的去除效果较其他几种植物突出<sup>[19-22]</sup>。而付晓云等认为,慈姑对污水的净化能力不如水花生、菖蒲等植物<sup>[23-24]</sup>。关于铜钱草的研究,也有研究者认为,铜钱草对总氮的吸收能力较好<sup>[25-26]</sup>,而余红兵等认为,在 5 种水生植物中,水生美人蕉吸收的氮、磷量最高,而铜钱草吸收的氮、磷量最低<sup>[27]</sup>。这与不同研究者的试验条件如气温、容器高度、植物初始状态、进水方式、是否有底泥以及生物量大小、培养液的初始浓度等有关,因此很难

将水生植物对氮、磷的吸收能力进行简单的排序,只能在特定条件下进行比较。慈姑虽然主要分布在我国的华东、华南一带,但是从慈姑的生长周期可以看出,过高的温度不适宜慈姑生长。从本研究结果也可以看出,慈姑的生长状态不好,对氮、磷的净化能力不如吊兰和铜钱草,可能与试验期间气温过高及容器高度过低有关,需要改进试验装置及在春秋季节进行进一步研究。

对于富营养化或黑臭水体的治理,需要因地制宜,在充分调查本底条件及当地物种的前提下,结合当地的气候特征及水体营养盐浓度、底质条件、坡岸条件等筛选适应能力强、对氮磷吸收效果好的水生植物。对于前人的研究成果可以借鉴,但不能一刀切,需要具体问题具体分析。从本研究的分析中可以看出,慈姑的根系较长,在高氮、磷组的生长状态明显较差,可以种植于水深较深的岸边带或用于浮床植物,在一般的富营养化水体中可以正常生长,并且有一定的净化效果。而铜钱草根系较短,只能种植于水深较浅的岸边带,但其耐污能力很强,可种植于生活污水排污口区域附近,特别是老旧城区直立坡岸的城市景观河道的排污口附近水域,可以有效截留进入河道的氮磷污染物。吊兰对氮的去除能力较强<sup>[28]</sup>,可以与慈姑、铜钱草搭配种植,提升景观功能并提高污染水体修复效果。

本研究分析了慈姑、吊兰、铜钱草 3 种水培植物在 2 组浓度较高的氮、磷营养水平下,其根长、茎长及叶片叶绿素 a 含量的变化情况,同时分析了其对氮、磷的去除效果。结果显示:(1)在试验条件下,铜钱草对高氮、磷浓度的耐受性较好,吊兰次之,慈姑对高氮、磷浓度的耐受性较差。慈姑在高氮、磷浓度组 20 d 以后出现明显烂根,中高氮、磷浓度组在 20 d 以后生长状况持续变差,根长和茎长变短,

叶片叶绿素 a 含量下降。吊兰在高氮、磷浓度组经历了适应期后,前期根长、茎长、叶绿素 a 含量升高,25 d 以后生长状态开始变差;高氮、磷浓度组的根长、茎长大于中高氮、磷浓度组,但叶绿素 a 含量低于中高氮、磷浓度组。铜钱草在经历了适应期后,2 个试验组的根长、叶绿素 a 含量呈缓慢增长的趋势,高氮、磷浓度组的茎长在 25 d 以后呈减少趋势,至试验结束时,中高氮、磷浓度组的根长、茎长、叶绿素 a 含量均高于高氮、磷浓度组。(2)在高浓度氮、磷组,3 种植物对氮的去除率表现为吊兰 > 铜钱草 > 慈姑,而在中高浓度氮、磷组,3 种植物对氮的去除率表现为铜钱草 > 吊兰 > 慈姑;在高氮、磷浓度组,3 种植物对磷的去除率表现为铜钱草 > 吊兰 > 慈姑,在中高氮、磷浓度组,3 种植物对磷的去除率表现为铜钱草 > 慈姑 > 吊兰。(3)通过分析 3 种水培植物根长、茎长及叶片叶绿素 a 含量与氮、磷去除率相关关系发现,水生植物在生长状态不佳的情况下,对氮、磷的吸收去除能力较差,而在生长状态较好的情况下,对氮、磷的吸收去除能力不一定强。(4)不同水生植物对氮、磷的吸收去除能力不同,只能在特定条件下进行比较。慈姑可以种植于水深较深的岸边带或浮床载体上,铜钱草可以种植于景观河道的生活污水排污口附近,吊兰可以与慈姑和铜钱草搭配种植,从而提升景观功能,提高污染水体的修复效果。

#### 参考文献:

- [1] 张 彬,任慧君,潘泓宇,等. 天然橄榄石对水体铜绿微囊藻的去除效果[J]. 环境工程学报,2020,14(8):2123-2133.
- [2] 王雪莹,毕相东,董少杰,等. 硫氰酸红霉素原位杀藻的生态学效应[J]. 大连海洋大学学报,2020,35(2):260-265.
- [3] 赵志红,李亚妮,廖婧璇. 洱海蓝藻水华应急控制措施及机械除藻效果初探[J]. 环境科学导刊,2018,37(2):33-35.
- [4] 王洪铸,王海军,李 艳,等. 湖泊富营养化治理:集中控磷,或氮磷皆控? [J]. 水生生物学报,2020,44(5):938-960.
- [5] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. 湖泊科学,2020,32(5):1229-1243.
- [6] 郭雅倩,薛建辉,吴永波,等. 沉水植物对富营养化水体的净化作用及修复技术研究进展[J]. 植物资源与环境学报,2020,29(3):58-68.
- [7] 何 娜,孙占祥,张玉龙,等. 不同水生植物去除水体氮磷的效果[J]. 环境工程学报,2013,7(4):1295-1300.
- [8] 田如男,朱 敏,孙欣欣,等. 不同水生植物组合对水体氮磷去除

- 效果的模拟研究[J]. 北京林业大学学报,2011,33(6):191-195.
- [9] 丁 玲,李羚君,李剑峰,等. 沉水植物净化人工水源湖原水中氮磷和悬浮物的试验研究[J]. 生态环境学报,2018,27(1):122-129.
- [10] 高月香,陈 桐,张毅敏,等. 不同生物联合净化富营养化水体的效果[J]. 环境工程学报,2017,11(6):3555-3563.
- [11] 万志刚,顾福根,孙丙耀,等. 6 种水生维管束植物对氮和磷的耐受性分析[J]. 淡水渔业,2006,36(4):37-40.
- [12] 黄丹萍,贺 锋,肖 蕾,等. 高氮磷胁迫下菖蒲(*Acorus calamus* Linn.)通气组织和根系释氧的响应[J]. 湖泊科学,2012,24(1):83-88.
- [13] 刘少博,冉 彬,曾冠军,等. 高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征[J]. 环境科学,2017,38(9):3731-3737.
- [14] 熊 剑,黄建团,聂 雷,等. 不同营养条件对金鱼藻净化作用及其生理生态的影响[J]. 水生生物学报,2013,37(6):1066-1072.
- [15] Wang B, Li W. Physiological reactions of *Potamogeton malaianus* to different N and P concentrations in the growth medium[J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(10):1616-1621.
- [16] 龙忆年,鲁 滔,王 培,等. 金鱼藻对盐碱胁迫的生理响应研究[J]. 水生生物学报,2020,44(1):213-221.
- [17] 林 海,殷文慧,董颖博,等. 沉水植物对逆境胁迫的响应研究进展[J]. 环境科技,2019,32(1):63-67,73.
- [18] 王佳珍,刘 倩,高娅妮,等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报,2017,37(16):5565-5577.
- [19] 高丁梅,杨 涓,虎春宇,等. 宁夏 4 种水生植物对富营养化水体净化效果的研究[J]. 农业科学研究,2012,33(2):63-65.
- [20] 薛晟岩,张春涛,程 翠,等. 沈阳地区 7 种水生植物对富营养化水体中磷吸收能力的研究[J]. 辽宁林业科技,2010(6):34-35.
- [21] 单 丹,罗安程. 不同水生植物对磷的吸收特性[J]. 浙江农业学报,2008,20(2):135-138.
- [22] 孙 譞,郁东宁,赵 慧,等. 12 种挺水植物对模拟污水的净化作用[J]. 北京农学院学报,2010,25(2):62-66.
- [23] 付晓云,何兴元. 5 种水生植物脱氮除磷能力比较[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):79-82,91.
- [24] 樊开青,王其娟,汪 伟. 5 种挺水植物净化富营养化水体氮磷效果的比较[J]. 江苏农业科学,2011,39(6):598-599.
- [25] 陈友媛,崔 香,董 滨,等. 3 种水培观赏植物净化模拟污水的试验研究[J]. 水土保持学报,2011,25(2):253-257.
- [26] 张凤娥,张 雪,刘 义. 新型植物对河道受污染水体中 TN、TP 去除效果的研究[J]. 中国农村水利水电,2010(6):56-58.
- [27] 余红兵,肖润林,周小梅. 水生美人蕉(*Canna glauca*)与铜钱草(*Hydrocotyle vulgaris*)的光合特性及其对氮磷去除效果研究[J]. 生态环境学报,2020,29(5):1014-1020.
- [28] 郭雪琳,王成端. 无土栽培吊兰深度处理生活污水的研究[J]. 水处理技术,2008,34(6):72-75.