



# 五种湿地植物组合对城市污水净化效果的模拟研究

李 婷<sup>1</sup>, 杨 恒<sup>1</sup>, 潘远智<sup>1</sup>, 周宇燊<sup>1</sup>, 刘 洋<sup>2</sup>, 郭 丽<sup>1</sup>

(1. 四川农业大学 风景园林学院, 四川 成都 611130; 2. 四川农业大学 林学院, 四川 成都 611130)

**摘要:**为研究各植物生长状况及其对水体污染物的去除效果,筛选出净化效果优良的植物组合。选取旱伞草、马蹄莲、黄菖蒲、再力花、千屈菜、睡莲 6 种优势湿地植物构建 5 种组合,在室内静水条件下对比研究各植物组合生长状况及净化能力。结果表明:(1)各组合植物在污水中生长良好,生物量增长率均在 45% 以上。(2)五种植物组合对总氮(TN)、铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、总磷(TP)的净化效果均较好,对 pH 改善作用明显。但植物组合的净化效果存在差异,其中,再力花+旱伞草+黄菖蒲+睡莲(T+C+I+N)、再力花+旱伞草+千屈菜(T+C+L)对 TP 的净化效果最好,最终去除率达 99.21%、97.63%,而再力花+旱伞草+黄菖蒲(T+C+I)对 TN 的净化效果较好,最终去除率达 99.01%;各组合对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除表现差异不显著。(3)处理时间对植物组合的净化效果存在显著影响,30~36 d 时污水的净化效果最佳。综合评价表明,再力花+旱伞草+千屈菜(T+C+L)、旱伞草+再力花+黄菖蒲(T+C+I)的综合净化能力最强,且适应力强、景观效果佳,可作为最优植物组合应用于污水净化。

**关键词:**植物组合;城市污水;氮磷;净化效果

城市水体能调节城市气候,美化城市环境,是城市生态系统重要的组成部分<sup>[1]</sup>。但近年来,由于未达标的污废水大量排放入城市河流以及大气干湿沉降<sup>[2]</sup>和雨水地表径流污染<sup>[3]</sup>的影响,我国许多城市水体出现富营养化现象,氮磷含量严重超标<sup>[4]</sup>,产生“水华”或“湖靛”现象,严重影响城市景观和环境质量。以成都市为例,2017 年地表水环境综合评价显示:IV~V 类水质断面占比 24.35%,劣 V 类水质为 7.5%;其中景观水体黄龙溪为劣 V 类水质,其总磷超标指数为 0.73,氨氮为 0.38,水体污染严重。治理污水主要是降低水体中的氮磷等污染物含量,抑制藻类滋生<sup>[5]</sup>。目前,污水净化修复技术主要有人工湿地、生态浮岛(床)及生物稳定塘等<sup>[6-7]</sup>,其中以湿地植物为核心的人工湿地因效率高、成本低且兼具景观效应而被广泛应用<sup>[8-9]</sup>。但湿地植物种类繁多,植物净化效果受其生态习性、吸收特性及对营养物质积累分配模式<sup>[10]</sup>的影响,同时单种与组配的选择对净化效果也有重要影响。因此,选取适当的植物种

类并进行合理搭配对提高污水治理效果具有重要意义。本试验参考前人研究<sup>[6]</sup>,选取了 6 种不同生态型的湿地植物,根据其生态习性和观赏效果,构建了 5 种组合,在室内静水条件下对比研究各植物组合生长状况及对水体污染物的去除效果,以期筛选出净化效果优良的植物组合,为城市污水净化和人工湿地建设提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 试验植物的选择与组合搭配** 本研究根据湿地植物选择的原则:适地适种、抗逆性强、耐污能力强、根系发达,具观赏和经济价值<sup>[6]</sup>,选取了四川地区常见 6 种本土湿地植物,包括挺水植物:再力花(*Thalia dealbata*)、旱伞草(*Cyperus alternifolius*)、黄菖蒲(*Iris pseudacorus*);湿生植物:马蹄莲(*Zantedeschia aethiopica*)、千屈菜(*Lythrum salicaria*);浮叶植物:睡莲(*Nymphaea tetragona*)。湿地植物在成都市温江区花卉市场购置,按照各植物的生态习性和园林景观效果(包括植物花色、花期、叶型、层次)进行 5 种组合配置,依次为:再力花+旱伞草(T+C)、再力花+旱伞草+千屈菜(T+C+L)、再力花+旱伞草+黄菖蒲+睡莲(T+C+I+N)、再力花+旱伞草+马蹄莲+睡莲(T+C+Z+N)、再力花+旱伞草+黄菖蒲(T+C+I)。

收稿日期:2018-09-25

基金项目:四川省科技计划资助项目(2016HH0047);国家级大学生创新性训练计划资助项目(1510626096)。

第一作者简介:李婷(1997-),女,在读学士,从事园林植物应用研究。E-mail:18428399517@163.com。

通讯作者:郭丽(1981-),女,博士,讲师,从事风景园林研究。E-mail:gardengl@126.com。

1.1.2 试验水质 试验用水为城市污水,取自成都市温江区杨柳河,各项理化指标测定如下:总氮(TN)42.16 mg·L<sup>-1</sup>,总磷(TP)6.33 mg·L<sup>-1</sup>,铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)6.49 mg·L<sup>-1</sup>,pH9.21。参考国家地表水环境质量标准(GB 3838—2002)可知,此水样为劣V类水质。

## 1.2 方法

1.2.1 试验设计 于2017年7月6日至8月25日,在四川农业大学温室内开展试验。试验设5种植物组合及无水生植物对照组共6个处理,每个处理设置3次重复。试验所用培养容器为长×宽×深=75 cm×35 cm×35 cm的蓝色塑料箱,容积90 L;所用基质为粗砂和小石头。用0.2%高锰酸钾对箱及基质浸泡消毒12 h,之后用去离子水漂洗干净并暴晒干;在桶底先铺15 cm的粗砂,再填充一层小石头。将6种湿地植物适应性培养30 d后,选取长势良好、大小高度基本一致的植物,测定株高根长后,用去离子水洗净根系,按各组合植物配置栽植于培养箱内,每箱加入供试污水30 L,保持每箱初始生物量为45.21~46.78 g·L<sup>-1</sup>,植株覆盖面积<50%。试验期间每2 d用去离子水补充蒸发和蒸腾的水分,保证水位稳定;每6 d取水样250 mL测定TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的浓度和pH,取样时间为8:00-9:00,取样前多次搅动混匀水样。在试验结束时收获植物,测量每个处理下植物的生物量鲜重及平均株高根长。

1.2.2 测定项目及方法 根据国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》<sup>[11]</sup>(GB 3838—2002)测定水质参数。TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N采用纳氏试剂光度法测定,pH采用PHS-3C玻璃电极pH计测定。TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率(R)的计算公式如下: $R(\%) = (C_0 - C_i) / C_0 \times 100$ 。式中: $C_i$ 为第*i*次TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的浓度; $C_0$ 为TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的初始浓度。

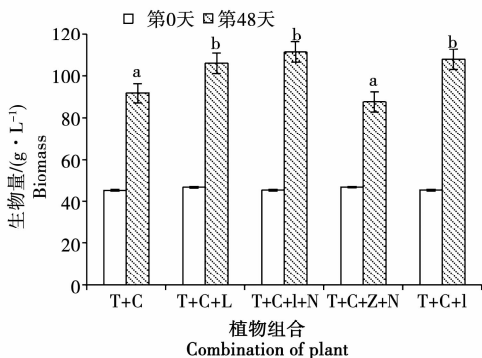
1.2.3 数据分析 采用Excel 2010软件处理试验数据,采用SPSS 19.0统计分析软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、重复测量方差分析(MANOVA of repeated measuring)和Duncan法多重比较。采用模糊数学隶属函数值法评价5种组合综合净化能力,以TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N三个浓度指标进行综合评价,由于这3个指标都

与植物组合的净化能力呈负相关,因此隶属函数计算方法如下: $X(i) = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, $X(i)$ 表示某一指标的测定值; $X_{\min}$ 表示对应指标的最小值; $X_{\max}$ 表示对应指标的最大值。求出5种组合各指标的隶属函数值后相加并求平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 湿地植物及组合的生长情况

由图1可知,试验期间各植物组合在污水中生长良好。前期(0~36 d),各组合植物长势旺盛,植株萌发新叶、产生分蘖,株高、根长明显增加;再力花、伞草和千屈菜开花;36~48 d,植物长势放缓、花凋落,再力花、睡莲部分叶片枯黄脱落甚至腐烂在水中。48 d后,再力花株高由初始80.6 cm增长到198.7 cm,增高最多;伞草平均根长由20.1 cm增长至45.6 cm,挺水植物根系均发达且长出大量须根;各组合植株的生物量明显增加,增长率均在45%以上。其中,T+C+L、T+C+I+N、T+C+I三个组合增长最多,生物量增量分别为59.12、65.66、62.32 g·L<sup>-1</sup>,显著高于T+C、T+C+Z+N两个组合( $P < 0.05$ ),说明这3个组合植物对污染物的吸收及耐受能力优于其它组合。



不同小写字母表示组间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

Different capital and lowercase letters indicate significant difference between combinations at 0.05 level, the same below.

图1 五种湿地植物组合生物量变化

Fig. 1 Biomass changes of five wetland plant combinations

### 2.2 湿地植物组合对水体中TN的去除效果

由图2和表1可知,试验期间各组合的TN浓度均明显下降,处理时间对TN的净化效果有显著影响( $P < 0.05$ )。在试验初期(0~6 d),TN

浓度快速下降,各植物组合平均去除率为61.21%,T+C组合的净化率达到73.06%,与对照(41.72%)差异显著;在第12天各组合TN浓度出现回升,平均去除率降至52.69%。试验中期(12~30 d),TN浓度呈直线下降,但去除速率减缓;试验后期(30~48 d),各植物组合TN浓度上下波动;在试验第30天,各植物组合的平均去除率达94.38%,已去除大部分氮素;试验结束,TN浓度由初始的42.16 mg·L<sup>-1</sup>降至0.42~

1.77 mg·L<sup>-1</sup>,与对照差异显著(17.74 mg·L<sup>-1</sup>)。处理组合对TN的净化效果影响显著( $P < 0.05$ ),各组合平均去除率差异显著(表1),排序为:T+C+I>T+C+L>T+C+I+N>T+C>T+C+Z+N>CK,其中T+C+I净化效果最佳,平均去除率为77.67%,并且TN去除率最大值99.01%出现在其处理48 d时,显著高于同时期的空白对照组(57.93%)。

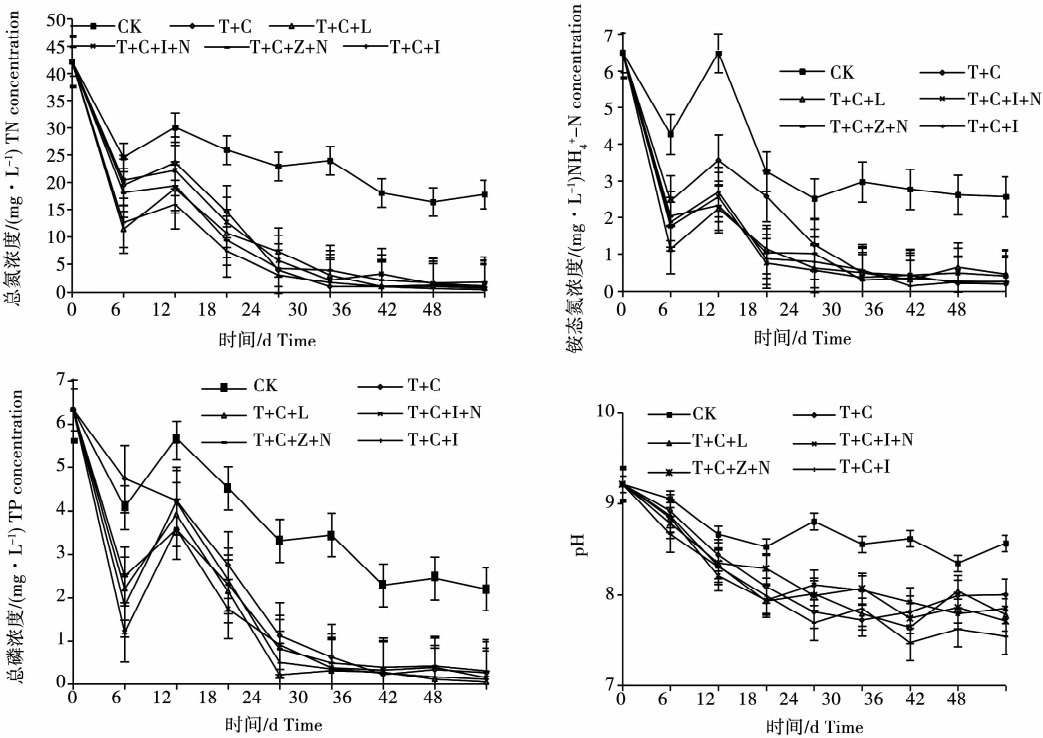


图2 污水中各污染物浓度的动态变化  
Fig.2 Dynamic changes of pollutant concentrations in sewage

表1 湿地植物组合对TN的去除率

处理 Treatments	去除率/% Removal rate								平均去除率/% Average removal rate
	6 d	12 d	18 d	24 d	30 d	36 d	42 d	48 d	
CK	41.72a±0.54	28.72a±0.61	38.58a±0.96	45.70a±1.05	43.23a±0.71	57.26a±0.31	61.21a±0.50	57.93a±1.00	41.60a±2.09
T+C	73.06e±0.61	55.46d±0.81	74.81d±0.93	82.86b±0.30	92.75c±0.46	97.59d±0.06	97.53cd±0.22	98.33cd±0.06	71.59c±3.79
T+C+L	53.86b±0.68	44.09b±1.13	65.46b±0.78	90.64e±0.48	97.65e±0.11	97.60d±0.33	97.05bc±0.12	97.98cd±0.11	74.71e±3.50
T+C+I+N	57.14c±0.85	54.14d±0.53	77.85e±0.45	89.95d±0.25	90.71b±0.30	94.86c±0.53	96.05b±0.41	95.81b±0.33	72.94d±3.53
T+C+Z+N	51.75b±0.64	47.45c±0.71	70.02c±0.52	86.67c±0.52	94.87d±0.42	92.25b±0.28	96.38b±0.48	97.39c±0.28	70.75b±3.64
T+C+I	70.22d±0.80	62.29e±0.64	82.64f±0.53	92.73e±0.23	95.91d±0.11	97.71d±0.32	98.53d±0.09	99.01d±0.04	77.67f±3.56

2.3 湿地植物组合对水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效果

由图 2b 和表 2 可知,各组合水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度明显下降,处理时间对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的净化效果有显著影响( $P<0.05$ )。试验初期(0~6 d)水体中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除较快,去除率较均高于 60%;12 d 时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度不同程度回升,其中对照组浓度回升至 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 初始浓度 6.49 mg·L<sup>-1</sup>;随后(12~30 d),NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度继续下降,但下降速率放缓;试验后期(30~48 d),NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度小范

围波动;试验第 30、36、42 和 48 天时,各植物组对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均去除率分别为 92.93%、94.71%、94.12% 和 94.99%;试验结束时,各植物组合 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度由 6.49 mg·L<sup>-1</sup> 下降至低于 0.45 mg·L<sup>-1</sup>,与对照组(2.56 mg·L<sup>-1</sup>)差异显著。处理组合对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的净化效果也有显著影响( $P<0.01$ ),但各组合平均去除率差异不显著( $P>0.05$ ),其中伞草+再力花+黄菖蒲(T+C+L)平均去除率最高(76.79%);显著高于对照组(41.97%)。

表 2 湿地植物组合对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除率  
Table 2 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal rate of wetland plant combination

处理 Treatments	去除率/% Removal rate								平均去除率/% Average removal rate
	6 d	12 d	18 d	24 d	30 d	36 d	42 d	48 d	
CK	34.31a±2.41	0.04a±3.06	60.40b±1.93	61.33a±0.36	54.36a±4.59	57.39a±1.62	59.79a±2.09	60.55a±1.84	41.97a±2.80
T+C	62.32b±2.36	45.27b±2.10	50.00a±1.76	80.72b±0.83	92.16b±0.60	93.26b±0.27	96.57c±0.23	96.88d±0.13	69.73b±3.57
T+C+L	82.54d±1.22	65.60d±1.54	82.54c±1.18	90.38e±0.83	92.20b±1.21	95.03b±0.03	90.02b±0.5	92.80b±0.33	76.79c±3.35
T+C+I+N	72.97c±2.34	60.64cd±1.72	88.38e±0.33	91.23e±0.33	94.10b±0.15	93.21b±0.13	92.33bc±3.32	93.56bc±0.15	76.27c±3.43
T+C+Z+N	68.69c±1.58	64.24cd±0.67	84.10cd±0.43	84.42c±0.15	95.16b±0.11	94.42b±0.32	95.66c±0.15	95.94cd±0.10	75.85c±3.42
T+C+I	71.26c±1.38	58.62c±1.11	86.66de±0.44	87.83d±0.15	91.06b±0.24	97.65c±0.15	96.03c±0.18	95.76cd±0.11	76.10c±3.48

2.4 湿地植物组合对水体中 TP 的去除效果

由图 2c 和表 3 可知,试验期间各组合的 TP 浓度均明显下降,处理时间对 TP 的净化效果有显著影响( $P<0.05$ )。试验初期(0~6 d),TP 浓度快速下降,T+C+I+N 组合去除率高达 81.07%,但 T+C 组合的净化率仅为 25.24%,各组合间差异显著( $P<0.05$ );在第 12 天,除 T+C 以外各组合 TP 浓度均有回升,中期(12~30 d)各组合浓度呈直线下降、后期(30~48 d)浓度上下波动。试验进行 36 d 后,各植物组合平均净化率达 95.40%;试验结束,各植物组合组 TP 浓度

由 6.34 mg·L<sup>-1</sup>下降至 0.05~0.30 mg·L<sup>-1</sup>,明显低于对照组(2.20 mg·L<sup>-1</sup>)。处理组合对 TP 的净化效果也有显著影响( $P<0.05$ ),各组合平均去除率差异显著(表 3),排序为:T+C+I+N>T+C+L>T+C+I>T+C+Z+N>T+C>CK;其中 T+C+I+N 和 T+C+L 两组净化效果最佳,平均去除率分别为 73.71% 和 72.71%,与对照(39.85%)差异显著( $P<0.05$ );TP 浓度最小值出现在 T+C+L 处理 48 d 时,浓度仅为 0.05 mg·L<sup>-1</sup>,去除率达 99.21%,与对照组(65.30%)差异显著。

表 3 湿地植物组合对 TP 去除率  
Table 3 TP removal rate of wetland plant combination

处理 Treatments	去除率/% Removal rate								平均去除率/% Average removal rate
	6 d	12 d	18 d	24 d	30 d	36 d	42 d	48 d	
CK	35.65b±1.23	10.57a±1.28	28.71a±0.81	47.63a±0.79	45.58a±0.74	63.88a±0.42	61.36a±0.33	65.30a±1.56	39.85a±2.60
T+C	25.24a±1.37	33.28b±0.18	56.47b±0.33	82.33b±0.57	90.22b±0.33	96.53d±0.09	94.79c±0.24	95.90bc±0.48	63.86b±4.05
T+C+L	65.14d±0.33	38.17c±0.48	66.09e±0.18	96.69e±0.24	95.11d±0.18	95.74cd±0.40	98.26e±0.18	99.21d±0.18	72.71de±3.84
T+C+I+N	81.07f±0.42	43.38d±0.33	72.56f±0.51	85.65c±0.16	94.16d±0.24	94.95c±0.16	94.01bc±0.24	97.63cd±0.24	73.71e±3.60
T+C+Z+N	60.57c±0.33	43.38d±0.33	63.56d±0.24	87.22c±0.27	92.27c±0.33	93.85b±0.31	93.38b±0.33	95.27b±0.42	68.78c±3.55
T+C+I	71.29e±0.24	33.75b±0.27	61.83c±0.24	92.13d±0.77	95.11d±0.27	95.90d±0.09	97.32d±0.18	98.26d±0.18	71.73d±3.86

2.5 湿地植物组合对水体 pH 的影响

由图 2d 可知,试验中各植物组合污水 pH 在 0~24 d 迅速下降,之后 24~48 d 随时间变化上下波动,且始终低于同期对照组。污水初始 pH 为 9.21,水体呈碱性,随着湿地植物生长,各植物组合水体 pH 均下降;试验结束时,植物组水体 pH 保持在 7.54~8.00,低于无植物的空白对照组(8.50),说明植物对污水 pH 有明显改善作用。

2.6 净化效果综合评价

采用模糊数学的隶属函数值法综合评价各植物组合的净化能力。从以上分析可知,污染物的去除集中在前 36 d,所以采用 36 d 时各指标浓度值进行计算,结果如下(表 4),5 种湿地植物组合对污水净化能力排序为:T+C+I>T+C+L>T+C>T+C+I+N>T+C+Z+N。其中,T+C+I、T+C+L 是净化能力最强的一类,其对氮磷最终净化率均高于 98%;T+C、T+C+I+N 是净化能力较强的一类,生物量增量较大;T+C+Z+N 组合净化能力适中,生物量增量最低。

表 4 五种植物组合综合评分排序

Table 4 Comprehensive score ranking  
offive plant combinations

处理 Treatments	隶属函数值 Membership function value			总分 Total score	排序 Sorting
	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -H	TP		
CK	0	0	0	0	6
T+C	0.9975	0.8908	0.9998	0.9627	3
T+C+L	0.9974	0.9349	0.9740	0.9688	2
T+C+I+N	0.9298	0.8898	0.9512	0.9236	4
T+C+Z+N	0.8652	0.9197	0.9193	0.9014	5
T+C+I	1.0003	1.0000	0.9831	0.9945	1

3 结论与讨论

本试验中,5 种植物组合生物量显著增加。其中,浮叶和挺水植物搭配的再力花+旱伞草+黄菖蒲+睡莲(T+C+I+N)组合生物量最大,因为浮叶-挺水植物搭配既能在水面横向生长增加浮叶,又向水面以上空间立体生长,相比其它组合能更多地利用空间增加生物量。这与彭婉婷等<sup>[12]</sup>的研究结论相一致。但将该组合中的挺水植物黄菖蒲替换为马蹄莲后(T+C+Z+N),生物量反而变为最小,这可能是由于各植物吸收特性不同,马蹄莲与其它种存在竞争或者互斥作用<sup>[13]</sup>,导致其长势较差、生物量较小。通过分析

各污染物的去除率与各组合生物量增量的相关性,发现植物生物量增量与 TN、TP 去除率相关性显著,分别为 0.615( $P<0.05$ )、0.652( $P<0.05$ ),这与金树权等<sup>[14]</sup>的研究结果类似,说明生物量增量是影响植物净化能力的重要因素,可作为评价水生植物净化能力的重要指标<sup>[15]</sup>,相关研究应加强对植物生长状况的监测。

研究表明,处理时间与处理效果关系密切,时间过短净化效果不理想,时间过长会造成二次污染<sup>[16]</sup>。本试验中,5 种植物组合对污染物的去除趋势大致相同:前期(0~12 d)植物生长快,植物根系及基质大量拦截、吸附污染物,在短期内即有较好的净化效果;但在 12 d 时污染物浓度出现明显回升,一方面可能是根系富集的污染物被微生物大量分解释放到水中引起浓度回升<sup>[12]</sup>,另一方面也可能是基质吸附饱和释放出部分污染物所致。后期(12~36 d)随着处理时间的延长,污染物进一步去除,但由于植物生长减缓、微生物降解作用缓慢,去除速度也放缓。各植物组合对 TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP 的去除均在 30~36 d 已有较好效果,此后(36~48 d)污染物浓度上下波动,其中对照组氮磷浓度升高可能是因为微生物死亡,其尸体中同化的营养物质被降解回水体<sup>[17]</sup>;试验组可能是由于睡莲、再力花的叶片腐烂释放氮磷到水体中引起的。因而实践中应加强管理,及时清理败落物<sup>[18]</sup>、控制收割时间,避免影响水质。本试验周期内可在 30~36 d 收割植物,既将大部分污染物从系统中移除,又避免造成二次污染;同时保持了再力花、黄菖蒲等多年生植物的再生能力<sup>[19]</sup>。

本试验中,各植物组合对 TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的去除效果较好,去除率显著高于对照组,对 pH 改善作用明显,与前人的研究结果基本一致<sup>[20]</sup>,说明了植物在净化污染物方面的重要作用。研究表明,不同的植物组合对污染物的净化效果存在差异<sup>[21]</sup>。本试验中,再力花+旱伞草+千屈菜(T+C+L)和再力花+旱伞草+黄菖蒲(T+C+I)对各污染物的去除效果均优于其它组合,一方面是由于两组合植物生物量大、生长更为迅速,吸收同化氮磷元素的效率高;另一方面也与植物的吸收同化能力、植物根系的发达程度及根系微生物的活动密切相关<sup>[22-23]</sup>,再力花、旱伞草、千屈菜和黄菖蒲均具有发达的根系,能形成连续的有氧厌氧区域,为细菌的硝化及反硝化作用<sup>[24-25]</sup>、聚磷菌的聚合作用<sup>[26]</sup>等提供场所,有利

于氮磷元素的去除;同时,其组合构成的根系微环境中,可能分泌氨基酸、酶等根系分泌物促进微生物生长繁殖<sup>[27]</sup>,提高对污染物的分解能力,但还需进一步试验证实;此外,处理时期正值再力花和千屈菜花期,其地上部分开花吸收了较多的磷元素<sup>[28]</sup>,因而提高了对磷素的去除率。两组合植物均为多年生,分布范围广、适应力强,组合叶型花色丰富、搭配层次高低错落,具有较好的净化能力和景观效果,可作为处理的城市污水的优势组合。但实际应用时,还应考虑水体污染状况、气候条件及收割时间,力求最大限度地发挥湿地植物的净化作用。

本试验中,各植物组合在污水中生长良好,生物量显著增加,其增量可作为一个重要指标来筛选用于净化水体的水生植物;5种植物组合均对氮磷净化效果明显且降低了污水的 pH,使水质 pH 接近中性;处理时间对净化效果影响显著,植物对污水的净化效果在处理 30~36 d 达到最佳;综合评价表明,再力花+旱伞草+千屈菜(T+C+L)、伞草+再力花+黄菖蒲(T+C+I)两组合根系发达、生物量大、净化能力强且具有景观效果,可作为城市污水净化的优势组合。

#### 参考文献:

- [1] 徐竟成,顾馨,李光明,等.城市景观水体水量效应与水质保育的协同途径[J].中国园林,2015,31(5):67-70.
- [2] Xie Y, Xiong Z, Xing G, et al. Source of nitrogen in wet deposition to a rice agroecosystem at Tai lake region[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(21):5182-5192.
- [3] 张千千,李向全,王效科,等.城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J].生态环境学报,2014,23(2):352-358.
- [4] Verma R, Suthar S. Performance assessment of horizontal and vertical surface flow constructed wetland system in wastewater treatment using multivariate principal component analysis [J]. Ecological Engineering, 2018, 116: 121-126.
- [5] 窦艳艳,陈焱,李春龙.不同水生植物组合对富营养化水体净化的模拟研究[J].环境科学与技术,2015,38(8):223-227,272.
- [6] 张斐斐,黄林海,吴海洋,等.人工湿地植物的选择与利用及存在的问题[J].江西科学,2016(1):32-40.
- [7] 黄勇,董运常,罗伟聪,等.景观水体生态修复治理技术的研究与分析[J].环境工程,2016,34(7):52-55,164.
- [8] 张洋意,任良锁,陈光,等.湿地植物刈割研究进展[J].湿地科学,2017,15(2):293-297.
- [9] Samson O O, Gaddale U, Pushparaj N. Phytoremediation of phosphorus and nitrogen with *Canna x generalis* reeds in domestic wastewater through NMAMIT constructed wetland[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4:349-356.
- [10] 蒋跃平,葛滢,岳春雷,等.轻度富营养化水人工湿地处理

系统中植物的特性[J].浙江大学学报(理学版),2005,32(3):309-313,319.

- [11] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.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.
- [12] 彭婉婷,邹琳,段维波,等.多种湿地植物组合对污水中氮和磷的去除效果[J].环境科学学报,2012,32(3):612-617.
- [13] 杜红霞,王丽,湛景武,等.不同湿地植物及其组配对富营养化水体的净化效果[J].环境污染与防治,2017,39(6):616-619.
- [14] 金树权,周金波,朱晓丽,等.10种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J].农业环境科学学报,2010,29(8):1571-1575.
- [15] 苗金,原海燕,黄苏珍.10种水生观赏植物对不同富营养化水体的净化效果研究[J].水土保持学报,2015,29(2):60-64,75.
- [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] Polomki R F, Taylor M D, Bielenberg D G, et al. Nitrogen and phosphorus remediation by three floating aquatic macrophytes in green house based laboratory- scale subsurface constructed wetlands[J]. Water, Air & Pollution, 2009, 197(1-4):223-232.
- [18] 胡世琴.人工湿地不同植被净化污水效果及其氮磷累积研究[J].水土保持研究,2017,24(1):200-206.
- [19] 陈丽丽,李秋华,高廷进,等.模拟生态浮床种植6种水生植物改善水质效果研究[J].水生态学杂志,2012,33(4):78-83.
- [20] 周玥,韩玉国,张梦,等.4种不同生活型湿地植物对富营养化水体的净化效果[J].应用生态学报,2016,27(10):3353-3360.
- [21] 张泽西,刘佳凯,张振明,等.种植不同植物及其组合的人工浮岛对水中氮、磷的去除效果比较[J].湿地科学,2018,16(2):273-278.
- [22] Li J, Yang X, Wang Z, et al. Comparison of four aquatic plant treatment systems for nutrient removal from eutrophied water. [J]. Bioresource Technology, 2015, 179:1-7.
- [23] 刘文杰,许兴原,何欢,等.4种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J].环境工程学报,2016,10(11):6313-6319.
- [24] Wang M, Zhang D Q, Dong J W, et al. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate—A review[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 57(7):293-311.
- [25] Wu H, Zhang J, Wei R, et al. Nitrogen transformations and balance in constructed wetlands for slightly polluted river water treatment using different macrophytes[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2013, 20(1):443-451.
- [26] 李红芳,刘锋,肖润林,等.水生植物对生态沟渠底泥磷吸附特性的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(1):157-163.
- [27] 程丽芬,张欣,樊兰英,等.人工湿地水生植物根系研究进展[J].山西林业科技,2017,46(2):40-45.
- [28] 柳骅,杨霞.千屈菜在富营养化水体中生长及磷去除效果试验初报[J].浙江林业科技,2005(1):43-46,53.



# 邢台地区柿子发育过程中不同部位维生素 C 含量测定

朱秀敏, 杜军霞

(邢台学院, 河北 邢台 054001)

**摘要:** 为了解邢台地区柿子营养成分含量, 进一步促进柿资源的应用。采用 2,4-二硝基苯肼法对邢台地区柿子的不同发育时期、不同部位的维生素 C 含量进行测定。结果表明: 邢台地区柿子在发育过程中维生素 C 含量逐渐升高, 至过熟期时含量达到最高。维生素 C 主要存在于果实的果皮( $37.03 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ )、果肉( $35.73 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ )中, 显著高于《中国食物成分表》中的数据( $30 \text{ mg} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ), 而其种子和柿蒂部分维生素 C 含量极低。

**关键词:** 邢台; 柿子; 维生素 C

柿子是柿科(Ebenaceae)柿属(*Diospyros*)植物的果实。柿子营养价值很高, 含有丰富的糖类、蛋白质、胡萝卜素、维生素 C、瓜氨酸、微量元素等多种活性物质, 其中维生素 C 含量较显著, 为一般水果的几倍到几十倍<sup>[1]</sup>。柿子具有清肺生津, 清热止血, 涩肠健脾的功效<sup>[2]</sup>。柿子的水提取物

具有解酒的功效<sup>[3]</sup>。为此可大力开发研究利用柿子提取维生素 C, 以扩大维生素 C 的来源, 同时也可以更好地利用柿资源。目前, 维生素 C 测定方法主要有 HPLC 法、2,6-二氯酚酚滴定法、紫外分光光度法、高效液相色谱法、碘量法等<sup>[4-5]</sup>。本文采用了 2,4-二硝基苯肼法对邢台地区不同成熟程度柿子的不同部位中维生素 C 含量进行了测定比较研究<sup>[6-7]</sup>, 进一步为邢台地区柿资源的应用提供了新的指向。

收稿日期: 2018-06-21

第一作者简介: 朱秀敏(1966-), 女, 硕士, 教授, 从事营养及营养富集相关研究。E-mail: zxm31919@126.com。

## Simulate Study on the Purification Effect of Urban Sewage by Five Combinations of Wetland Plants

LI Ting<sup>1</sup>, YANG Heng<sup>1</sup>, PAN Yuan-zhi<sup>1</sup>, ZHOU Yu-jue<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>2</sup>, GUO Li<sup>1</sup>

(1. College of Landscape Architecture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** In order to study the growth status of each plant and its removal effect on water pollutants, the plant combinations with good purification effect were screened out. Six kinds of dominant wetland plants, including *Cyperus alternifolius* (C), *Zantedeschia aethiopica* (Z), *Iris pseudacorus* (I), *Thalia dealbata* (T), *Lythrum salicaria* (L), and *Nymphaea tetragona* (N), were selected to construct five combinations, and then the growth status and purification capacity of five plant combinations were comparatively studied under the indoor hydrostatic conditions. The results showed that: (1) every plant combination grew well in the sewage, the growth rate was above 45%. (2) All of five plant combinations had good purification effects on total nitrogen(TN), ammonium nitrogen( $\text{NH}_4^+$ -N) and total phosphorus(TP), and had obvious effect on pH improvement. The degree of purification was different among different combinations, among them, the combinations of T+C+I+N and T+C+L had the best purification effect on TP, which final removal rate were 99.21% and 97.63%. T+C+I had the best purification effect on TN which final removal rate was 99.01%; there was no significant difference in  $\text{NH}_4^+$ -N removal performance among different combinations. (3) The processing time had significant influences on the purification ability of plant combinations, and the span time 30-36 d had the best purification effects. Comprehensive evaluation showed that the combinations of T+C+L and T+C+I had the strongest comprehensive purification ability, strong adaptability and good landscape effect, which could be used as the optimal plant combination for sewage purification.

**Keywords:** plant combination; urban sewage; nitrogen and phosphorus; purification effect