

不同植物配置模式对景观水质保持的影响^{*}

蒋梦冉 刘小冬 许铭宇 韩瑞宏 王佳嵩 陈平

(仲恺农业工程学院 园艺园林学院 / 广东省高校土地复垦植被景观恢复工程技术研究中心, 广东 广州 510225)

摘要 为探讨不同植物配置模式对景观水质的保持效应, 为生态水景植物配置提供科学依据, 选取 24 种水湿生木本植物及 12 种水生草本植物, 根据植物配置原理设计 9 种复层水景植物配置模式处理, 并以无植物配置为对照, 通过设置水箱试验样地, 检测 pH、浊度、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 和 COD_{Cr} 6 项水质指标, 并进行比较分析, 筛选出最佳的植物配置模式。复层植物配置对水质具有不同程度的保持效果。T1 处理 (水石榕 *Elaeocarpus hainanensis*+ 木芙蓉 *Hibiscus mutabilis*- 方枝蒲桃 *Syzygium tephrodes*- 千屈菜 *Lythrum salicaria*- 苦草 *Vallisneria spiralis*- 槐叶苹 *Salvinia natans*) 对 COD_{Cr} 的降解能力最强, T3 处理 (蒲桃 *Syzygium jambos*- 凤箱树 *Cephalanthus occidentalis*- 三白草 *Saururus chinensis*- 苦草) 对降低浊度、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的效果最为显著, T6 (木棉 *Bombax ceiba*+ 喜树 *Camptotheca acuminata*- 水团花 *Adina pilulifera*+ 朱砂根 *Ardisia crenata*- 薄荷 *Mentha haplocalyx*+ 圆叶节节菜 *Rotala rotundifolia*) 对 TN、TP 净化效果最好, 较对照分别下降了 94.1%、96.3%、65.6%、58.2%、83.9%; T8 处理 (香港算盘子 *Glochidion zeylanicum*- 石菖蒲 *Acorus tatarinowii*+ 鸢尾 *Iris tectorum*+ 香菇草 *Hydrocotyle vulgaris*- 苦草) 对上述 6 项水质指标均有良好的降低作用, 达到 II 类水质标准, pH、浊度、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 及 COD_{Cr} 较对照分别下降了 23.1%、67.2%、47.4%、39.8%、78.7%、50.0%。综合景观效果、植物生长状况及各项水质指标, 香港算盘子 - 石菖蒲 + 鸢尾 + 香菇草 - 苦草复层植物配置 (T8) 处理的效果最佳, 在微污染水体净化和水质保持中具有良好的推广应用前景。

关键词 木本植物; 草本植物; 复层水景; 植物配置; 水质保持

中图分类号: S688.9 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2020) 03-0035-09

Effects of Different Plant Configuration Patterns on the Maintenance of Landscape Water Quality

JIANG Mengran LIU Xiaodong XU Mingyu HAN Ruihong
WANG Jiasong CHEN Ping

(Zhongkai University of Agriculture and Engineering / Research Center of Land Reclamation Vegetation Landscape Restoration Engineering Technology in Universities of Guangdong Province, Guangzhou, Guangdong 510225, China)

Abstract To explore different plant configuration mode to keep the effect of landscape water quality, which will provide a scientific basis for ecological water landscape plant configuration, selection of 24 kinds of raw water wet woody plants and 12 kinds of aquatic plant, according to the principle of plant configuration design of 9 kinds of stratified water processing plant configuration mode, and is contrast with no plant configuration,

^{*} 基金项目: 广东省省级科技计划项目 (2016A020207003); 广东省普通高校工程技术研究中心项目 (2016GCZX001); 广东省农业技术需求研究与示范项目 (2017LM4170); 广州市科技计划项目 (201804010303); 现代高质增效农业规划与技术服务项目 (KA1810302); 广州市越秀区科技创新和产业化专项 (2016-GX-004); 校企合作技术开发合作项目 (D11820254)。

第一作者: 蒋梦冉 (1993—), 女, 研究方向为风景园林和植物资源应用, E-mail: 386776436@qq.com。

通信作者: 陈平 (1968—), 男, 教授, 主要从事循环农业及生态环境治理等研究, E-mail: turf2009@qq.com。

by setting the water tank to test samples, test pH, turbidity, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP and COD_{Cr} six measures of water quality, and comparative analysis, select the best plant configuration mode. The arrangement of compound plants can maintain the water quality to different degrees. T1 treatment (*Elaeocarpus hainanensis*+*Hibiscus mutabilis*-*Syzygium tephrodes*-*Lythrum salicaria*-*Vallisneria natans*-*Salvinia natans*) of COD_{Cr} degradation ability, the strongest T3 treatment (*Syzygium jambos*-*Cephalanthus occidentalis*-*Saururus chinensis*-*Vallisneria natans*) to reduce the turbidity, the most significant effect of the concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ T6 (*Bombax ceiba*+*Camptotheca acuminata*-*Adina pilulifera*+*Ardisia crenata*-*Mentha haplocalyx*+*Rotala rotundifolia*) of TN, TP purifying effect is best, has fallen by 94.1%, 96.3% and 65.6% respectively than control, 58.2%, 83.9%; T8 processing (*Glochidion zeylanicum*-*Acorus tatarinowii*+*Iris tectorum* Maxim+*Hydrocotyle vulgaris*-*Vallisneria natans*) of the above 6 quality indexes have good reduction effect, achieve II class water quality standard, pH, turbidity, TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP and COD_{Cr} fell by 23.1%, 67.2% and 47.4% respectively than control, 39.8%, 78.7%, 50.0%. Based on the comprehensive landscape effect, plant growth status and various water quality indicators, the best treatment effect is achieved by T8, which has a good promotion and application prospect in the purification and water quality maintenance of micro-polluted water bodies.

Key words woody plants; multi-layer waterscape; plant configuration; water quality conservation

随着我国生态文明建设的推进,水景营造更加注重生态功能的发挥。植物净水作为一种生态型净水方式受到关注。探讨不同植物配置对水质保持的生态效应,有助于提高水景营造的科学性和功能性。关于水生草本植物已有大量研究,它们对不同物质的去除效果表现出较大差异,如水芹 *Oenanthe javanica* 能将可溶性磷和氨氮完全去除,4 d 内对去除率分别可达 72.98% 和 86.3%^[1];喜旱莲子草 *Alternanthera philoxeroides* 根部对重金属离子有很强的富集能力,能耐受 Cd^{2+} 和 Zn^{2+} 含量分别为 0.2 和 10 mg/L 的污水^[2]。因此将具有不同优势的植物组合,可以达到更好的净水效应。孙映波等^[3]将美人蕉 *Canna indica*、风车草 *Cyperus alternifolius* 等 10 种净水能力较强的植物组成 6 种不同配置,测定静态条件下对 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 BOD_5 、 COD_{Cr} 的去除率,发现处理效果为最优的为美人蕉+再力花 *Thalia dealbata*+香根草 *Vetiveria zizanioides*+菖蒲 *Acorus calamus*+风车草组合。一些木本植物同样具有良好的耐水性和净水作用,并且在景观层次性和持久性上具有较大优势,目前已有少量种类木本植物净水效应得到研究。胡焕斌等^[4]研究发现,芦苇 *Phragmites communis* 和池杉 *Taxodium ascendens* 对氨氮和总氮的净化效率差异不大。靖元孝等^[5]通过对比试验发现水翁对氮、磷具有较强的去除能力,但低于风眼莲。垂柳 *Salix babylonica* 具有较强的反硝化能力,对水中 N、P 的去

除率可达 90% 以上,1 年的除氮量为 10.8 g/m²^[6]。许铭宇^[7]以水翁 *Cleistocalyx operculatus*、秋枫 *Bischofia javanica*、铁冬青 *Ilex rotunda* 等 11 种水生木本植物为研究对象,筛选出净水效果和适应性综合较好的有秋枫、串钱柳、风箱树。广东地区存在大量的湿地木本植物野生品种,隶属 48 科 105 属,高达 156 种^[8],仅有少量而得到开发应用,并且其应用主要限于潜流人工湿地^[9-11],木本植物与草本植物组合的净水研究更是鲜见报道。因此,迫切需加强湿地木本植物的开发利用、优化配置及净水效应研究。本研究以 24 种水湿生木本植物为主体,构建了木本植物与草本植物组合的 9 种复层植物配置模式,测定其对模拟景观水体水质的影响。比较分析不同植物配置模式处理间水质指标的差异性,筛选综合效果最佳的配置模式,为生态水景植物配置提供借鉴与参考。

1 材料与方法

1.1 材料

选择水石榕 *Elaeocarpus hainanensis*、木芙蓉 *Hibiscus mutabilis*、玉蕊 *Barringtonia racemosa* 等 24 种景观效果良好的水湿生木本植物,以及千屈菜 *Lythrum salicaria*、苦草 *Vallisneria natans* 等 12 种具有较高观赏价值和良好净水功能,生长繁殖程度可控的水生草本植物。供试木本植物及其高度和冠幅见表 1,草本植物及其高度见表 2。

表 1 供试木本植物及其高度、冠幅
Table 1 Test woody plants and their heights and crowns

序号 No.	种类 Species	科名 Family	属名 Genus	平均高度 /cm Average height	平均冠幅 /cm Average crown
1	水石榕 <i>Elaeocarpus hainanensis</i>	杜英科 Elaeocarpaceae	杜英属 <i>Elaeocarpus</i>	108	50
2	木芙蓉 <i>Hibiscus mutabilis</i>	锦葵科 Malvaceae	木槿属 <i>Hibiscus</i>	65	12
3	方枝蒲桃 <i>Syzygium tephrodes</i>	桃金娘科 Myrtaceae Juss.	蒲桃属 <i>Syzygium</i>	22	20
4	玉蕊 <i>Barringtonia racemosa</i>	玉蕊科 Lecythidaceae	玉蕊属 <i>Barringtonia</i>	98	149
5	梨果榕 <i>Ficus pyriformis</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	43	15
6	蒲桃 <i>Syzygium jambos</i>	桃金娘科 Myrtaceae	蒲桃属 <i>Syzygium</i>	93	15
7	凤箱树 <i>Cephalanthus occidentalis</i>	茜草科 Rubiaceae	凤箱树属 <i>Cephalanthus</i>	47	14
8	棠梨 <i>Pyrus calleryana</i>	蔷薇科 Rosaceae	梨属 <i>Pyrus</i>	49	12
9	水翁 <i>Cleistocalyx operculatus</i>	桃金娘科 Myrtaceae	水翁属 <i>Cleistocalyx</i>	46	9
10	马甲子 <i>Paliurus ramosissimus</i>	鼠李科 Rhamnaceae	马甲子属 <i>Paliurus</i>	24	19
11	秋枫 <i>Bischofia javanica</i>	大戟科 Euphorbiaceae	秋枫属 <i>Bischofia</i>	68	22
12	金蒲桃 <i>Xanthostemon chrysanthus</i>	桃金娘科 Myrtaceae	蒲桃属 <i>Xanthostemon</i>	98	41
13	铁冬青 <i>Ilex rotunda</i>	冬青科 Aquifoliaceae	冬青属 <i>Ilex</i>	63	/
14	对叶榕 <i>Ficus hispida</i>	桑科 Moraceae	榕属 <i>Ficus</i>	36	36
15	水团花 <i>Adina pilulifera</i>	茜草科 Rubiaceae	水团花属 <i>Adina</i>	41	13
16	岗松 <i>Baeckea frutescens</i>	桃金娘科 Myrtaceae	岗松属 <i>Baeckea</i>	65	/
17	木棉 <i>Bombax malabaricum</i>	木棉科 Bombacaceae	木棉属 <i>Bombax</i>	104	/
18	喜树 <i>Camptotheca acuminata</i>	蓝果树科 Nyssaceae	喜树属 <i>Camptotheca</i>	41	23
19	朱砂根 <i>Ardisia crenata</i>	报春花科 Primulaceae	紫金牛属 <i>Ardisia</i>	33	16
20	串钱柳 <i>Callistemon viminalis</i>	桃金娘科 Myrtaceae	红千层属 <i>Callistemon</i>	71	/
21	神秘果 <i>Synsepalum dulcificum</i>	山榄科 Sapotaceae	神秘果属 <i>Synsepalum</i>	59	39
22	黄槿 <i>Hibiscus tiliaceus</i>	锦葵科 Malvaceae	木槿属 <i>Hibiscus</i>	62	17
23	香港算盘子 <i>Glochidion zeylanicum</i>	大戟科 Euphorbiaceae	算盘子属 <i>Glochidion</i>	89	103
24	落羽杉 <i>Taxodium distichum</i>	杉科 Taxodiaceae	落羽杉属 <i>Taxodium</i>	173	66

表 2 供试草本植物及其高度
Table 2 Testherbs and their heights

序号 No.	种类 Species	科名 Family	属名 Genus	平均高度 /cm Average height
1	千屈菜 <i>Lythrum salicaria</i>	千屈菜科 Lythraceae	千屈菜 <i>Lythrum</i>	13
2	苦草 <i>Vallisneria natans</i>	水鳖科 Hydrocharitaceae	苦草属 <i>Vallisneria</i>	6
3	槐叶苹 <i>Salvinia natans</i>	槐叶苹科 Salviniaceae	槐叶苹属 <i>Salvinia</i>	/
4	三白草 <i>Saururus chinensis</i>	三白草科 Saururaceae	三白草属 <i>Saururus</i>	9
5	黑藻 <i>Hydrilla verticillat</i>	水鳖科 Hydrocharitaceae	黑藻属 <i>Hydrilla</i>	4
6	大藻 <i>Pistia stratiotes</i>	天南星科 Araceae	大藻属 <i>Pistia</i>	/
7	荇菜 <i>Nymphoides peltatum</i>	龙胆科 Gentianaceae	荇菜属 <i>Nymphoides</i>	/
8	圆叶节节菜 <i>Rotala rotundifolia</i>	千屈菜科 Lythraceae	节节菜属 <i>Rotala</i>	10
9	薄荷 <i>Mentha haplocalyx</i>	唇形科 Lamiaceae	薄荷属 <i>Mentha</i>	7
10	石菖蒲 <i>Acorus tatarinowii</i>	天南星科 Araceae	菖蒲属 <i>Acorus</i>	28
11	鸢尾 <i>Iris tectorum</i>	鸢尾科 Iridaceae	鸢尾属 <i>Iris</i>	25
12	香菇草 <i>Hydrocotyle vulgaris</i>	伞形科 Apiaceae	天胡荽属 <i>Hydrocotyle</i>	6

1.2 方法

1.2.1 试验设计 根据美学原理和生长习性将上述植物组成 9 种以木本植物为主体的水景植物配置模式。将这 9 种配置模式作为试验组，同时建立 1 个没有植物的组作为空白对照（CK）。将每种配置、植物种在水箱中，水箱长度 120 cm、宽度 90 cm、高度 34 cm，每个水箱中水和泥的量保持基本一致。水箱中的底泥根据植物特性调整出一定坡度，底泥平均厚度为 20 cm，水深保持在 0~10 cm，每隔 3 d 补充一次水，使之达到原来的刻度线。试验用水为自来水，模拟人工景观水体，试验用土来自广东省清远市，每隔 20 d 测 1 次水质。每个试验组和对照组均设 3 个重复。试验时间为 2017 年 9 月 19 日至 2017 年 11 月 18 日。试验在仲恺农业工程学院试验大棚进行，大棚通风透光。为保证试验条件一致，将对照组周围放置适量植物，使其上层有少量植物枯落物掉落。

各处理具体植物配置如下（“+”表示植物处于同一层次，“-”表示植物处于不同层次）：

T1：水石榕 + 木芙蓉 - 方枝蒲桃 - 千屈菜 - 苦

草 - 槐叶苹（乔木 - 灌木 - 挺水 - 沉水 - 漂浮）；

T2：玉蕊 - 梨果榕 - 三白草 - 黑藻（乔木 - 灌木 - 挺水 - 沉水）；

T3：蒲桃 - 风箱树 - 三白草 - 苦草（乔木 - 灌木 - 挺水 - 沉水）；

T4：棠梨 + 水翁 - 马甲子 - 黑藻 - 大瓢 + 荇菜（乔木 - 灌木 - 沉水 - 漂浮）；

T5：秋枫 + 金蒲桃 + 铁冬青 - 对叶榕 + 水团花 + 岗松 - 圆叶节节菜 + 香菇草（乔木 - 灌木 - 挺水）；

T6：木棉 + 喜树 - 水团花 + 朱砂根 - 薄荷 + 圆叶节节菜（乔木 - 灌木 - 挺水）；

T7：串钱柳 + 神秘果 + 黄槿 - 水团花 - 槐叶苹（乔木 - 灌木 - 漂浮）；

T8：香港算盘子 - 石菖蒲 + 鸢尾 + 香菇草 - 苦草（灌木 - 挺水 - 沉水）；

T9：落羽杉 - 黑藻（乔木 - 沉水）；

CK：自来水 + 底泥。

1.2.2 测定方法 测定的水质指标：总氮（TN）、氨氮（NH₄⁺-N）、总磷（TP）、化学需氧量（COD_{Cr}）、

表 3 试验主要仪器设备
Table 3 Main instruments and equipment in the test

序号 No.	仪器名称 Equipment	型号 Model
1	电子天平 Electronic balance	AE224
2	双光束紫外可见分光光度计 Dual beam UV-Vis spectrophotometer	TU-1901
3	2 孔水浴锅 2-hole water bath	HWS-12
4	pH 计 pH meter	PHS-3C
5	立式自动电热压力蒸汽灭菌锅 Vertical automatic electric pressure steam sterilization pot	LX-B50L
6	水质快速测定仪 Water quality rapid tester	5B-3B(V8)+LH-3BN
9	电冰箱 Refrigerator	BCD-579WE

浊度和 pH 值。TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法，NH₄⁺-N 采用纳氏分光光度法，TP 采用钼酸铵分光光度法，COD_{Cr} 采用重铬酸盐法^[12]，pH 采用笔式 pH 计测量，浊度采用浊度仪测定。试验中使用的主要仪器设备如表 3。

1.2.3 分析方法 使用 Microsoft Excel 计算试验数据及制图，使用 SPSS17.0 进行数据统计分析，采用 Duncan 方法检验差异显著性（ $P<0.05$ ）。

2 结果与分析

2.1 植物生长状况

树木对水的适应性，在形态上一般表现为主干被水淹没部位的茎组织和通气组织增厚、不定根形成及在主根上形成新根，这些是判断树木是否耐水的最直观依据^[13-14]。试验期间，植物在形态上出现了明显的变化，包括叶片的生长、萎蔫和凋零，开花、繁殖新株等。水石榕、木芙蓉、方枝蒲桃、马甲子、香港算盘子、落羽杉、玉蕊、梨果榕、凤箱树、黄槿、秋枫、对叶榕、喜树均长出新叶、皮孔和水生根系，表明这 13 种植物在浅水中生长良好。而串钱柳、水团花、金蒲桃等其他木本植物在试验期间没有长出水生根系，随着时间的推进，陆续出现了萎蔫、死亡的症状。可能由于种植时气温较高、植物抗逆性不足或淹水深度不适宜等原因。

2.2 不同配置模式对水体 pH 值的影响

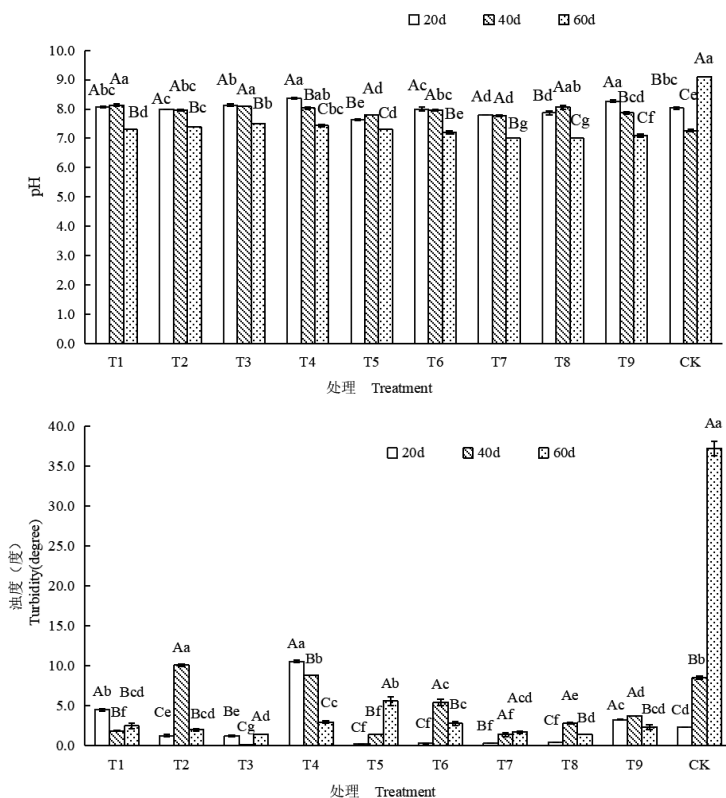
如图 1 所示，第 20 天时，各处理均呈碱性，

pH 值在 8.0 左右，说明土壤向水体释放了碱性物质。第 40 天时，随着水中物质的进一步沉降和土壤的吸附作用，未栽种植物的对照处理（CK）pH 值下降至接近中性；而 9 个试验组的水体 pH 值均高于 CK，较第 20 天时没有明显降低，甚至出现升高。有沉水植物的处理（T1、T2、T3、T4、T8、T9）高于没有沉水植物的处理（T5、T6、T7）。这主要是由于水生植物在白天发生光合作用消耗了水体中的 CO₂，导致 pH 值升高，沉水植物在水中大量繁殖，光合作用更强烈。第 60 天时，CK 的水质恶化，pH 值升高至 9.1，显著高于第 20 天（ $P<0.05$ ）；而栽种植物的 9 个试验组处理的 pH 值有较大幅度的降低（ $P<0.05$ ），其中 T7 和 T8 两个处理的 pH 值均降至 7.0。表明植物对水体 pH 值的调节具有显著作用。试验结束时各处理的水体 pH 值由小到大的顺序为：T7=T8<T9<T6<T1<T5<T2<T4<T3<CK。

2.3 不同配置模式对水体浊度的影响

种植植物后，悬浊物经沉降，水体较为清澈。随着时间的推移，各处理的水体均出现不同程度的浑浊现象。由图 1 可知，CK 的浊度一直呈上升趋势，在第 20 天时，CK 的浊度为 2.33，第 40 天上升至 8.53，而到了第 60 天时 CK 的浊度上升至 37.20，是第 40 天的 4.36 倍，显著高于其他处理（ $P<0.05$ ）。

9 个试验组处理中，第 20 天时各处理的水体浊度出现差异，其中：T4 浊度最高（10.54），T1、



注：不同大写字母表示同一处理在不同时间点之间差异性显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示同一时间点各处理间的差异性显著 ($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters indicate that the same treatment has significant difference between different times ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the same time ($P<0.05$).

图1 不同配置模式对水体 pH 和浊度的影响

Fig.1 The effect of different configuration modes on pH and turbidity of water

T2、T3、T9 的浊度在 1.24~4.50 之间，而其他处理均在 0.5 以下。第 40 天时，T2、T5、T6、T8 的浊度较第 20 天有较大幅度上升，其中：T2 的浊度上升至 10.08，为第 20 天的 8.1 倍；T1、T4 处理的浊度均有所降低，T4 虽有降低但仍然处于较高水平 (8.84)。第 60 天，T1、T3、T5、T7 处理的浊度较第 40 天有一定程度的上升，其他处理浊度较第 40 天有所降低。试验结束时 T5 的浊度最高，为 5.58；T3 和 T8 的浊度最低，均为 1.40，较对照下降了 96.3%。随着植物的生长，会分泌一些浑浊物，但在总体上，植物对水体的浊度具有良好的保持作用。

在试验结束时不同处理的水体浊度由小到大排列为 T3=T8<T7<T2<T9<T1<T6<T4<T5<CK。

2.4 不同配置模式对水体 TN 浓度的影响

由图 2 可知，总体上，各处理 TN 浓度均呈上升趋势。CK 的 TN 值第 20 天为 $0.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，第 40 天上升至 $0.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，第 60 天为 $0.91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，为 III 类水质。

9 个试验组处理中，T4 第 20 天、40 天、60 天的 TN 浓度均显著高于其他处理 ($P<0.05$)，第 60 天时高达 $1.81 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，属于 V 类水质。T2 在第 20 天时 TN 浓度较低，第 40 天时有大幅升高，第 60 天时达到 $1.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，仅次于 T4，为 IV 类水质。第 60 天试验结束时，T6、T7、T8 处理 TN 的浓度均在 0.5 以下，为 II 类水质标准，其中 T6 的 TN 浓度最低为 $0.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。第 60 天天试验结束时，不同处理水的 TN 浓度由小到大排列为：T6<T7<T8<T9<T3<T5<T1<CK<T2<T4。

2.5 不同配置模式对水体 NH_4^+-N 浓度的影响

由图 2 可知，试验期间各处理的 NH_4^+-N 浓度呈现不同的变化趋势，但均没有超出 II 类水质标准 ($0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。CK 的 NH_4^+-N 浓度先下降后升高，3 个时间点之间差异不显著。

9 个试验组处理中，与 CK 相比，T3、T7、T6 对 NH_4^+-N 的去除效果较好，第 60 天的 NH_4^+-N 去除率分别为 65.6%、52.8%、49.8%。第 60 天，T1、T4、T9 的 NH_4^+-N 浓度与 CK 没有明显差

异, 其余处理均有显著降低 ($P<0.05$)。试验结束时, 不同处理 NH_4^+-N 浓度由小到大的顺序为: $\text{T3}<\text{T7}<\text{T6}<\text{T2}<\text{T8}<\text{T5}<\text{T9}<\text{T1}<\text{T4}<\text{CK}$ 。

2.6 不同配置模式对水体 TP 浓度的影响

由图 3 可知, 试验期间对照组 TP 浓度持续上升, 变化幅度最大, 第 40 天和第 60 天的 TP 浓度分别为 0.044 和 $0.127 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 分别是第 20 天的 4.4 倍和 12.7 倍, 差异显著 ($P<0.05$)。说明随时间变化, 底泥持续向水体释放较多的 TP, 但浓度没有超出 III 类水标准。

试验结束时, 9 个试验组处理的 TP 浓度均显著低于 CK ($P<0.05$), 属于 II 类水标准, TP 浓度由低至高为 $\text{T6}<\text{T8}<\text{T1}<\text{T7}<\text{T2}<\text{T4}<\text{T9}<\text{T5}<\text{T3}<\text{CK}$ 。与 CK 相比, $\text{T1}\sim\text{T9}$ 处理 TP 的去除率分别为 83.9%、78.7%、76.8%、74.7%、69.7%、68.7%、66.8%、66.3%、63.2%, 说明植物对 TP 的去除有明显的效果, 其中 T6 效果最佳, 仅为 $0.020 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 属于 I 类水。

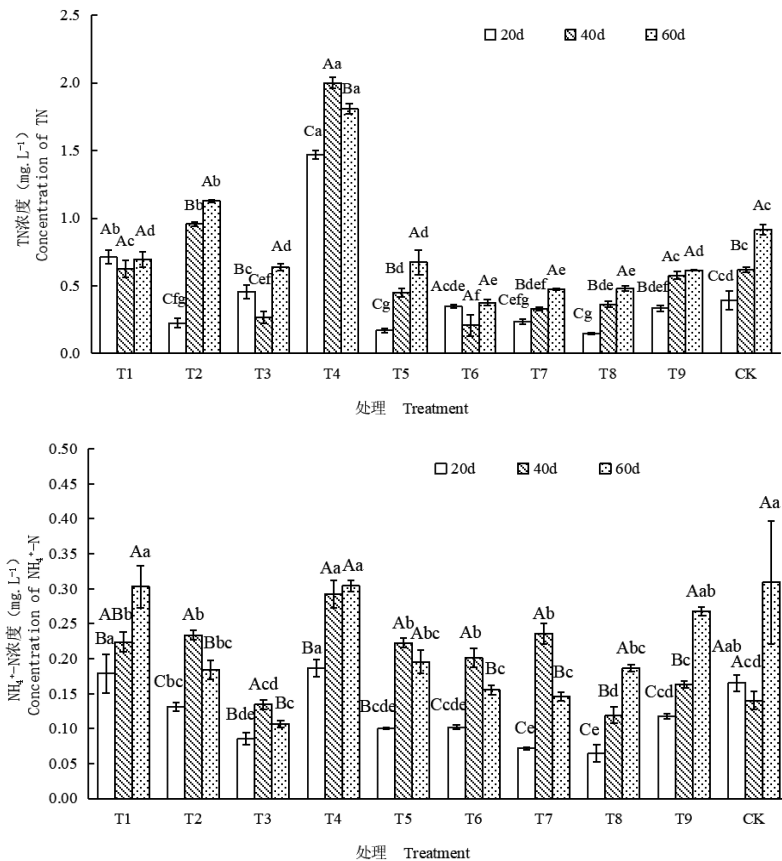
2.7 不同配置模式对水体 COD 浓度的影响

由图 3 可知, CK 的 COD 浓度在第 40 天较第 20 天有小幅度下降, 之后大幅度升高, 在第 60 天达到 $32.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 是第 20 天的 2.13 倍, 显著高于其他处理 ($P<0.05$)。

9 个试验组的 COD 浓度在试验期间呈现不同的变化趋势, 但第 60 天的 COD 浓度均比第 20 天有较大幅度降低, 其中: T1 和 T4 的 COD 浓度降低幅度最大, 分别为 1.88 和 $4.24 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 较第 20 天分别下降了 93.7% 和 84.3%, 达到 I 类水标准。第 60 天达到 II 类水标准的处理有 T8 、 T3 、 T9 、 T2 、 T7 , COD 浓度均在 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。试验结束时, COD 浓度由小到大的顺序为 $\text{T1}<\text{T4}<\text{T8}<\text{T3}<\text{T9}<\text{T2}<\text{T7}<\text{T5}<\text{T6}<\text{CK}$ 。

3 结论与讨论

据本试验对各处理的观察结果表明, 水石榕、木芙蓉、方枝蒲桃、马甲子、香港算盘子、落羽



注: 不同大写字母表示同一处理在不同时间点之间差异性显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一时间点各处理间的差异性显著 ($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters indicate that the same treatment has significant difference between different times ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the same time ($P<0.05$).

图 2 不同配置模式对水体 TN 和 NH_4^+-N 的影响

Fig.2 The effect of different configuration modes on TN and NH_4^+-N concentration of water

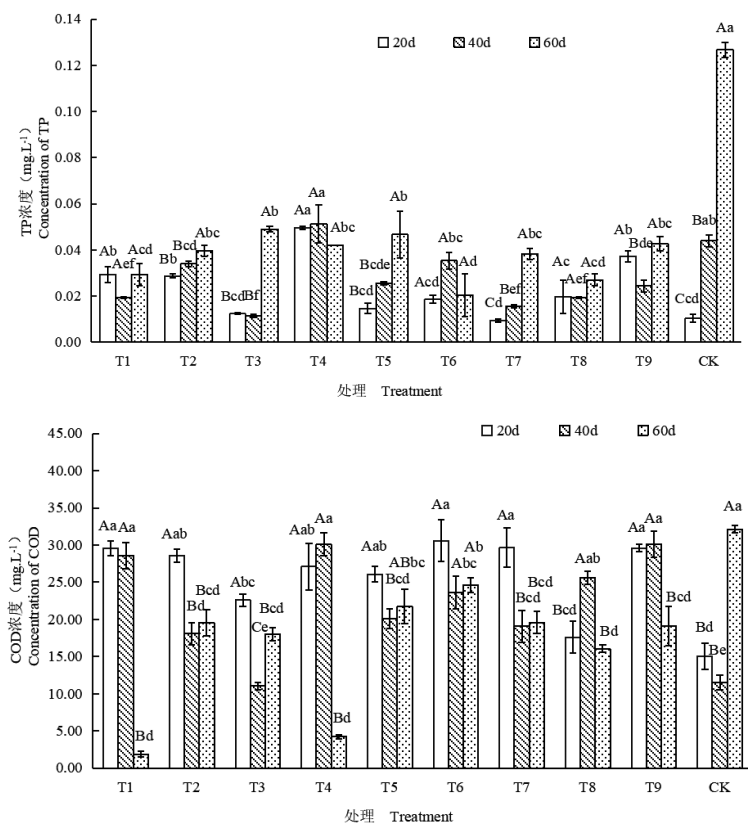
杉、玉蕊、梨果榕、风箱树、黄槿、秋枫、对叶榕、喜树这 13 种植物均能在水中长出新根,具有一定的根系活力,植株整体生长情况良好,均可种植在浅水中。而串钱柳、水团花、金蒲桃等其他木本植物生长不佳或死亡,原因可能是移栽时气温较高影响其存活,植物本身对水的深度不适宜、抗逆性不足等,有待进一步试验探讨,并在实际造景中调整种植水深和种植方式,确保植物存活率。T1、T2、T8、T9 的植物配置模式,其植物整体上对浅水环境具有良好的适应性,均可用于浅水造景。

复层植物配置对水质保持具有较好的生态效应。与对照组相比,复层植物配置(试验组)处理的水体 pH、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、 COD_{Cr} 浓度及浊度在总体上呈现较大幅度的降低。其中 T1 处理对 COD 浓度降低效果最好, T3 处理对浊度和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果最佳, T6 处理对 TN 和 TP 浓度有显著的降低作用。

将生长状况良好的 4 个处理(T1、T2、T8、

T9) 的净水效果进行比较,发现 T8 对测定的 6 项水质指标均有较大程度的降低作用,达到 II 类水质标准,其中 pH、浊度、TN、TP 均优于其他 3 组。而 T1 处理、T2 处理和 T9 处理在试验结束时, TN 含量未能达到 II 类水质标准。并且, T8 处理的植物根系发达,种类丰富,颜色、造型俱佳。从景观效果、生长状况、水质指标 3 个方面综合评价,香港算盘子-石菖蒲+鸢尾+香菇草-苦草组合(T8)为最优的配置模式,可在生态水景建设中广泛应用。

本研究中,试验组的浊度和 TP 浓度受到了大程度的抑制,说明植物起到了关键作用。试验第 20、40 天, 9 个进行植物配置的试验组处理与无种植植物的对照组相比, pH 值没有明显差别,都在 8.0 左右, TP 浓度均处于较低水平;而在第 60 天时,对照组的 pH 值升高至 9.1,此时磷元素大量释放,浓度明显高于 9 个试验组。出现这种现象,主要是底泥对于水体具有双重的作用,既能释放污染物,也能产生强大的吸附作用,其作用方



注:不同大写字母表示同一处理在不同时间点之间差异性显著 ($P<0.05$),不同小写字母表示同一时间点各处理间的差异性显著 ($P<0.05$)。

Note: Different uppercase letters indicate that the same treatment has significant difference between different times ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the same time ($P<0.05$).

图 3 不同配置模式对水体 TP 和 COD 的影响

Fig.3 The effect of different configuration modes on TP and COD concentration of water

向主要受到溶解氧、pH、温度等因素的影响^[15-16]。底泥对于水体总磷的浓度起到主导作用,在各影响因子中,pH值影响最大。pH值较低时,底泥将水中的磷沉降固定,pH值的升高会促进底泥向水体释放磷元素^[17]。因此,对于碱性较强的水体,降低pH值有利于底泥对磷元素的吸附。推断对照处理的TP明显升高的主要原因是pH值升高导致了磷酸根离子较快从沉积物中解析。种植植物可调节水体和土壤的pH值,对底质磷元素的释放有较好的控制作用^[18]。复层植物组合对COD浓度具有显著的降低作用,其中T1处理效果最佳。可能由于其植物类型丰富、生物量增长较快,增强了土壤微生物的活跃性,使有机物加速矿化^[19-21]。T1处理和T4处理中COD浓度在试验初期没有明显降低,后期大幅降低,明显低于其他处理。而T1处理和T4处理中TN和 NH_4^+-H 没有明显降低,甚至表现升高,有别于其他处理。结合这两项指标的表现,推测T1处理和T4处理中总氮和氨氮升高是因为有机物的降解,产生了大量的游离态的氮。

园林水景营造通常仅使用水生草本植物,缺少层次性,到冬季时地上部分枯萎,丧失净水功能,刈割后造成景观缺失和生态位空缺等问题。而水湿生木本植物生命周期长、景观更加持久,可以弥补水生草本植物的不足,提升水景质量,提高生态系统的稳定性^[22]。水湿生木本植物在一定程度上可以替代大型挺水草本植物,作为水际植物景观的主体,与草本植物组合配置,营造复层水景,提高景观层次,保持植物在冬季的净水能力。本试验对复层水景植物造景模式的水质保持效应研究是采用水箱模拟试验的方式进行,存在一定的局限性,今后还需在河岸、湿地等水体中进一步验证其生态效应和造景效果。构建以木本植物为主体的复层水景群落,结合其他生态措施,可以营造生态良好、景观优美、自净力强的低维护水体景观。

参考文献

- [1] 王旭明, 匡晶. 水芹菜对污水净化的研究[J]. 农业环境保护, 1999(1): 35-36, 48-49.
- [2] 陈明利, 张艳丽, 吴晓芙, 等. 人工湿地植物处理含重

- 金属生活废水的实验研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(12): 164-168.
- [3] 孙映波, 梅瑜, 操君喜, 等. 不同水生植物配置对河涌污水的净化效果[J]. 生态环境学报, 2011, 20(Z1): 1123-1126.
- [4] 胡焕斌, 周化民, 王桂珍, 等. 人工湿地处理矿山炸药污水[J]. 环境科学与技术, 1997(3): 17-18, 26.
- [5] 靖元孝, 杨丹菁, 任延丽, 等. 水翁在人工湿地的生长特性及对污染物的去除效果[J]. 环境科学研究, 2005(1): 9-12, 84.
- [6] Gonzalez J, Ansola G, Luis E. Experimental results on constructed wetland pilot system[J]. Water Science & Technology, 2001, 44(11 /12): 387-392.
- [7] 许铭宇. 水生动植物及其组合对富营养化园林水体净化效应研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2017.
- [8] 邓沛飞. 广东湿地木本植物资源调查及应用研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2014.
- [9] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 4种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性与去污效果[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 916-924.
- [10] 吴鹏举, 黄娜, 李翠丹. 固定水力负荷下人工湿地各单元净化污水效果研究[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(5): 77-81.
- [11] 林一煊, 肖石红, 蔡坚, 等. 深圳坝光湿地园水塘修复效果分析[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(4): 1-8.
- [12] 中国国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [13] Kozłowski T T. Responses of woody plants to flooding and salinity[J]. Flooding & Plant Growth, 1984, No. 1(7): 129-163.
- [14] 童伟平, 慕长龙, 黎燕琼, 等. 植物耐水湿性研究综述[J]. 四川林业科技, 2013, 34(1): 23-28.
- [15] 史静, 于秀芳, 夏运生, 等. 影响富营养化湖泊底泥氮、磷释放的因素[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 241-244.
- [16] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 底泥再悬浮状态下生物有效磷形成机制研究[J]. 环境科学, 2008(7): 1824-1830.
- [17] 王行, 张志剑, 李津津, 等. 模拟湿地生境升温条件下湿地底泥—水体磷元素循环特征[J]. 湿地科学, 2011, 9(4): 345-354.
- [18] 袁元, 钟鸿雁. 水生植物对水体pH值影响的原因探究[J]. 江西化工, 2008(2): 62-64.
- [19] 裘湛. 人工湿地植物根际效应对根部微生物影响的研究进展[J]. 净水技术, 2018, 37(7): 26-30.
- [20] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1995(3): 83-86, 96.
- [21] 伍孟雄, 杨敏, 孙雪, 等. 生物质炭生物与非生物氧化特性研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2810-2818.
- [22] 陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 585-591.