



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202002164

中图分类号 X703

文献标识码 A

汪祝方, 赵志森, 程梦雨, 等. 植物群落对湿地净化生活污水的影响[J]. 环境工程学报, 2021, 15(1): 126-135.

WANG Zhufang, ZHAO Zhimiao, CHENG Mengyu, et al. Influence of plant community on the purification of domestic sewage by constructed wetland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(1): 126-135.

植物群落对湿地净化生活污水的影响

汪祝方¹, 赵志森^{1,2}, 程梦雨¹, 程梦奇¹, 张饮江^{1,2,3,*}, 石宗琳²

1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306

2. 河北省湿地生态与保护重点实验室, 衡水 053000

3. 水域环境生态上海高校工程研究中心, 上海 201306

第一作者: 汪祝方(1993—), 女, 硕士研究生。研究方向: 人工湿地水污染处理。E-mail: 18721579313@163.com

*通信作者: 张饮江(1961—), 男, 硕士, 教授。研究方向: 水域环境修复等。E-mail: yjzhang@shou.edu.cn

摘要 为解决植物配置对水质净化影响问题, 研究了不同植物群落对生活污水的净化效果及其响应机理, 并探索了人工湿地植物的最佳组合。结合景观生态学, 运用 7 种湿地植物构建 4 种植物群落的人工湿地 CW-G1、CW-G2、CW-G3、CW-G4, HRT 为 4 d, 水力负荷为 $0.125 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 分析了各人工湿地对污染物的去除率, 通过对植物酶活性变化、渗透调节能力和根际微生物演替情况探究了其净化机理。结果表明: CW-G1 装置内群落对污染物去除效果最佳; CW-G1 装置内植物的 SOD、POD、CAT 酶活性较单种显著提高, MDA 含量显著降低; CW-G1 装置内植物群落根际微生物 Alpha 多样性最高, 门水平上各类菌丰度较为均匀。CW-G1 装置内植物相互协作, 提高抗氧化酶含量, 增强了植物群落抗干扰能力, 增加了根际微生物群落多样性、丰度和均匀度, 植物-微生物协同高效净化污水。以上结果可为湿地植物的配置与运用提供参考。

关键词 湿地; 植物群落; 水质净化; 抗性生理; 根际微生物

2019 年中国生态环境状况公报显示, 全国地表水中 I~III、IV~V、劣 V 类水质断面分别占 71.0%、22.3% 和 6.7%, 水环境污染依然是现阶段我国环境污染治理的重大难题^[1]。人工湿地 (constructed wetlands, CWs) 作为一种新型污水生态处理技术, 具有成本低、绿色持续和稳定有效等优点, 近年来被广泛运用于各类水处理中^[2]。CWs 由物理、化学和生物三重机制协同净化, 其中, 起主导作用的为生物机制^[3], 其由微生物和植物协同完成^[4]。湿地植物作为 CWs 核心成分之一, 对 CWs 高效净化污水起到关键作用。植物特有的景观功能可以营造优美空间, 提升湿地生态美学价值。因此, 合理选用湿地植物对 CWs 净化、景观等功能的发挥至关重要。

传统 CWs 植物的选用多偏向单一种, 造价便宜、施工简单和易于管理, 但湿地植物单一, 植物-微生物稳定性差, 协同作用未充分发挥, 植物景观功能未得到有效利用。国外学者研究了欧洲植物物种丰富度对生态系统的影响, 结果表明, 植物物种丰富度的减少会改变群落组成及功能特性, 降低群落结构复杂性, 导致维持生态系统服务功能的系统稳定性和弹性降低; 而增加植物物种丰富度能大幅度提升景观多样性及生态系统服务功能 (生产、气候调节、侵蚀控制等), 因此, 增加人工湿地的植物多样性对系统稳定性的维持具有重要作用^[5-7]。

收稿日期: 2020-02-28; 录用日期: 2020-05-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (51909157); 河北省湿地生态与保护重点实验室 (筹) 开放基金 (hklk201912)

当人工湿地植物群落布局不同时，植物生物量、根系分布特征、生长期、营养吸收能力、抗逆性等方面均存在显著差异，使用多种植物组合，不同植物互相协同，可以提高综合性污水净化率，保持较为稳定的水质净化效果^[8]。现有研究报道多集中在植物组合对不同浓度污水净化效果及不同植物群落对水体氮磷净化差异上^[9-10]，在景观化湿地植物群落的构建以及植物生理响应对人工湿地水质净化改善的原因等方面尚缺乏深入研究。因此，本文从植物净化效果、株高、花期、季相、生长期等角度，筛选 4 种大型华东地区常用湿地植物，结合景观生态理念，合理配置 2 种中型、1 种小型湿地植物，构建不同湿地植物群落，分析了不同群落污水净化效果，探究了植物群落构建效果，阐述植物生理响应、植物-微生物协同净化机理，得到适宜人工湿地的最佳植物群落配置。预期成果将为提升 CWs 净化与景观美学功能，提高 CWs 系统生物多样性及稳定性，并为 CWs 工程建设、植物筛选与配置提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 人工湿地装置构建

本实验采用人工湿地小试系统，依据《人工湿地污水处理工程技术规范 2005—2010》构建装置：直径 20 cm、高 50 cm 柱状 PVC 材质实验箱底部设置取水口，2 种粒径石英砂为填充介质，大粒径 ($\varphi=6\sim8$ mm) 填于上、下两层，小粒径 ($\varphi=2\sim4$ mm) 填于中层，上、中、下层分别填充 20、20、5 cm，上层石英砂表面种植幼苗期植物，植物种植密度为 36 株·m⁻²。装置启动期间使用模拟污水加入装置进行微生物接种驯化，稳定期为 30 d。

1.2 实验设计与运行

本实验于上海海洋大学室外实验基地进行，开展日期为 2019 年 2—12 月，主要环境参数为：气温为 15~36 ℃，相对湿度为 50%~80%；上层基质孔隙率为 38.69%，中层基质孔隙率为 35.47%。将 4 种大型湿地植物 (株高>1 m) 黄花美人蕉 (*Canna indica* L. var. *flava* Roxb.)、红花美人蕉 (*Canna indica* L.)、千屈菜 (*Lythrum salicaria* L.)、黄菖蒲 (*Iris pseudacorus*)，分别与 2 种中型植物 (株高 0.5~0.8 m) 西伯利亚鸢尾 (*Iris sibirica*)、灯芯草 (*Juncus effusus* L.) 及 1 种小型植物 (株高<0.4 m) 铜钱草 (*Hydrocotyle vulgaris*) 搭配种植^[8]，从而形成 CW-G1、CW-G2、CW-G3、CW-G4 共 4 种植物群落；7 种植物单种对照分别为 CW-CK-C.f、CW-CK-C.i、CW-CK-L.s、CW-CK-L.p、CW-CK-L.s、CW-CK-J.e、CW-CK-H.v；1 个空白对照 (表 1)。根据 HJ2005-2010 人工湿地污水处理工程技术规范模拟

表 1 人工湿地实验装置
Table 1 Constructed wetlands devices

装置	黄花美人蕉	红花美人蕉	千屈菜	黄菖蒲	西伯利亚鸢尾	灯芯草	铜钱草
CW-CK-C.f	√						
CW-CK-C.i		√					
CW-CK-L.s			√				
CW-CK-L.p				√			
CW-CK-L.s					√		
CW-CK-J.e						√	
CW-CK-H.v							√
CW-G1	√				√	√	√
CW-G2		√			√	√	√
CW-G3			√		√	√	√
CW-G4				√	√	√	√
CK							

生活污水,进水条件为:总氮 $30\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (硝氮 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);耗氧有机污染物的浓度(以 COD 计) $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;总磷 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (用 KNO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 、 K_2HPO_4 配置污水)。人工湿地运行方式采用间歇式进水,水力停留时间(HRT)为(4 d),并设置3组平行CWs。

1.3 检测方法

环境指标:气温、相对湿度(空气质量检测仪,CW-AQT100,赛纳威,中国)。水质检测:DO、pH、温度、氧化还原电位(HQd 便携式多参数水质分析仪)、 $\text{NH}_3\text{-N}$ (纳氏试剂光度法)、 $\text{NO}_3\text{-N}$ (紫外分光光度法)、COD(重铬酸钾法)、TP(钼锑抗分光光度法)。植物检测:水解氨基酸采用茚三酮比色法;酶活性、可溶性糖、总蛋白采用南京建成生物工程研究所试剂盒。每株取3片长势较好的植物叶片,去叶脉后剪碎混匀, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温保存待测。

微生物多样性:选取CWs装置内距底部25 cm处的石英砂(装置与平行装置内样品混合)10 g。对16S rRNA 基因 V4~V5 区的引物进行聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)扩增,采用 Illumina MiSeq 平台对群落 DNA 片段进行双端(paired-end)测序,通过 QIIME 软件调用 USEARCH 检查并剔除疑问序列,从而获得样品有效序列,采用可操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU)进行分析。

1.4 数据分析

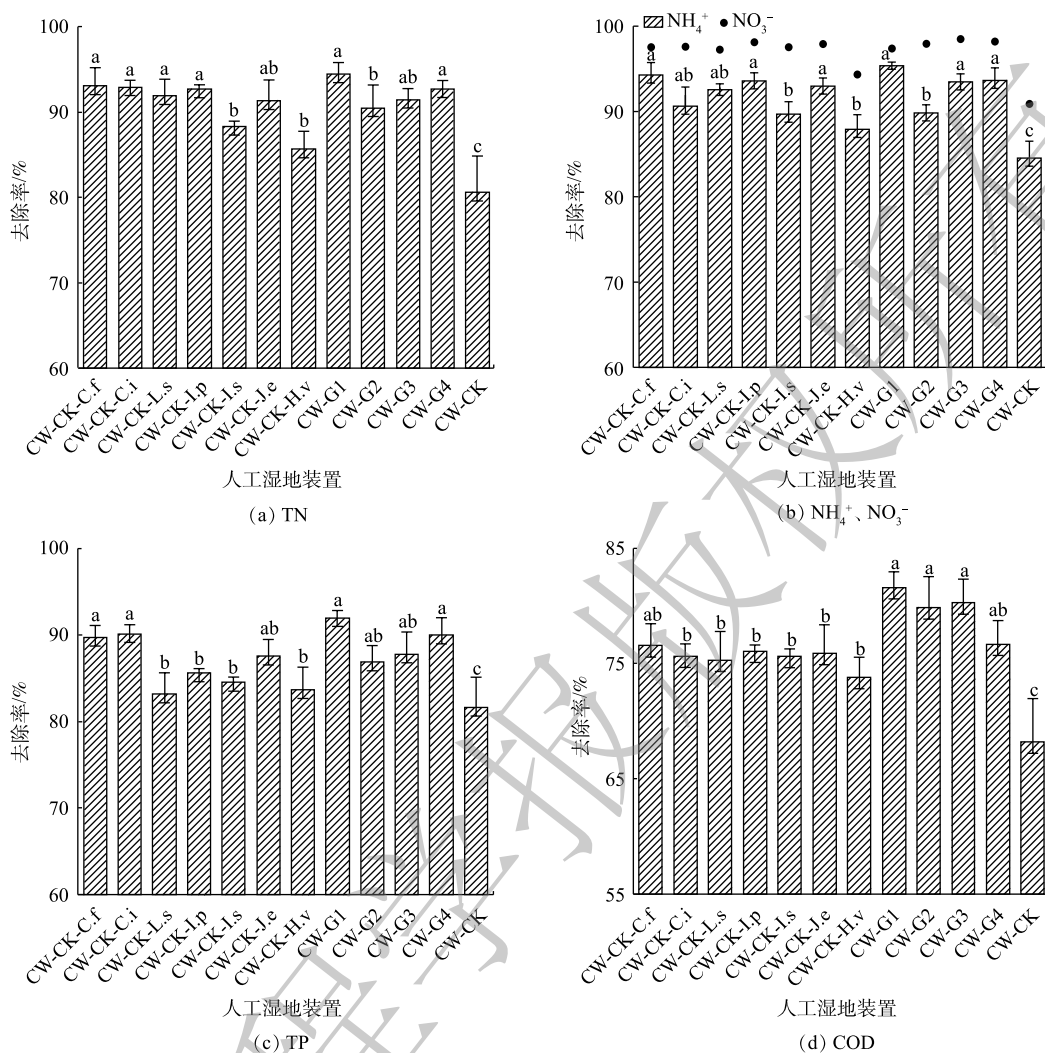
本研究采用 Excel2018 及 SPSS24 进行数据处理与分析,数据为平均值 $\pm$ 标准差,采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与讨论

2.1 植物群落污水净化效果比较

在实验期间,进水水温为 $15.5\sim 24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、pH 为 $7.37\sim 7.62$ 、DO 含量为 $8.11\sim 9.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氧化还原电位为 $152.4\sim 229.4\text{ mV}$,经 4 d(HRT=4 d)后取样。出水水温为 $16.2\sim 28.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、pH 为 $6.01\sim 7.53$ 、DO 含量为 $1.04\sim 3.60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氧化还原电位为 $-158.81\sim 87.2\text{ mV}$,同时,对 TN、TP 和 COD 去除率进行了测定。由图 1 可知,CW-CK 空白对照中对应的 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP、COD 去除率均显著低于 11 个实验装置中对应的 5 种污染物去除率($P<0.01$)。由图 1(a)可知,CW-G1 群落对 TN 的去除率最高;CW-G1、CW-G4 群落对 TN 的去除率较黄花美人蕉、黄菖蒲单种有所提高,但差异不显著($P>0.05$);CW-G2、CW-G3 群落对 TN 的去除率较红花美人蕉和千屈菜单种有所下降,且 CW-G2 群落对 TN 的去除率下降显著($P<0.01$)。由图 1(b)可知,各装置对氨氮的去除效果及装置间差异性与对 TN 的去除效果类似,CW-G1 群落对氨氮的去除率最高,依次为 CW-G4、CW-G3、CW-G2;而各装置对硝氮去除率无显著性差异,且去除率均达到 93% 以上,这说明装置中反硝化过程可有效进行,装置对 TN 的去除主要受氨氮去除效果的影响。由图 1(c)可知,CW-G1 群落对 TP 的去除率最高;CW-G1、CW-G3、CW-G4 群落对 TP 的去除率较黄花美人蕉、千屈菜、黄菖蒲单种有所上升,且 CW-G4 群落上升显著($P<0.01$);CW-G2 群落对 TP 的去除率较红花美人蕉单种下降,下降效果不显著($P>0.05$)。由图 1(d)可知,CW-G1 群落对 COD 的去除率最高;CW-G1、CW-G2、CW-G3、CW-G4 群落对 COD 的去除率较黄花美人蕉、红花美人蕉、千屈菜、黄菖蒲单种上升,且 CW-G2、CW-G3 群落中 COD 的去除率上升效果显著($P<0.05$)。

综上所述,从对 TN、TP、COD 的去除效果来看,植物群落与植物单种处理间存在显著差异($P<0.05$),这表明通过植物搭配可以改变湿地系统水质净化效果。有研究表明,植物配置良好的系统可以有效防治富营养化水体水华的发生^[11-12]及抑制藻类生长^[13]等,人工湿地作为污水处理系统,合理的植物配置可以提高湿地的运行效果,进而提升尾水水质。不同植物对同一污染物净化效果不同,部分能高效吸收氮,部分能更好富集磷,多种植物组合有利于植物间取长补短^[14];不同植物根系特性不同,大型植物红、黄美人蕉、千屈菜、黄菖蒲根系发达,须根丰富;而中小型



注: 字母表示不同处理间去除率的显著性差异, $P < 0.05$ 。

图1 不同人工湿地装置净化效果

Fig. 1 Purification with different CW treatments

植物西伯利亚鸢尾、灯芯草、铜钱草根系浅而须根少, 不同植物组合可以提高根系对基质垂直空间的利用率^[15]; 不同植物根系分泌物不同, 将不同植物组合也可能对根际整体的微生物群落产生影响, 从而影响湿地系统污水净化效率^[16]。

4个植物群落对于TN和TP的去除率依次为CW-G1>CW-G4>CW-G3>CW-G2; 4个植物群落对于COD的去除率依次为CW-G1>CW-G3>CW-G2>CW-G4, 这表明不同植物配置对污染物去除效果也存在差异。郝桂芝等^[17]研究发现, 由6种不同湿地植物组成的3个群落对水体中氮磷净化效果存在显著差异; 李莎莎等^[18]研究发现, 4种不同空间配置的湿地植物群落对生活污水中TN、TP、COD等的去除均存在差异, 本研究的结果也与前人研究的结果相一致。因此, 植物配置时需进行合理的选择, 才能更大程度提高湿地净化效率。

2.2 植物酶活性比较

植物细胞生理代谢会产生活性氧(ROS), 正常情况下, 植物体内有害氧清除系统可保证ROS的动态平衡^[19]; 而逆境胁迫会打破这种平衡, 使ROS大量积累, 并与细胞膜脂反应造成膜伤害^[20]。因此, 在人工湿地污水胁迫下, 植物体内代谢平衡被破坏, 为了满足自身生长、发育及繁

殖等,植物会通过改变自身形态和生理变化以适应污水胁迫^[21]。

氧化物歧化酶 SOD 是植物体内 ROS 清除系统中优先发挥作用的抗氧化酶,是细胞防御活性氧危害的第一道防线。其先将植物体内超氧化物阴离子自由基 $O_2^{\cdot-}$ 歧化为 H_2O_2 , H_2O_2 在过氧化氢酶 CAT 或过氧化物酶 POD 作用下进一步分解成 H_2O 和 O_2 ,从而抑制活性氧对植物造成伤害^[22]。不同 CWs 装置植物体内酶含量变化情况见图 2。由图 2(a)~图 2(d) 可知,相较于植物单种, CW-G1、CW-G2、CW-G4 处理能显著提升群落中 4 种植物体内 SOD 的活性 ($P<0.05$)。由图 2(e)~图 2(h) 可知, CW-G1、CW-G2 处理显著提升了群落中 4 种植物体内 CAT 的活性 ($P<0.05$); CW-G4 装置内植物群落中西伯利亚鸢尾、灯芯草 CAT 活性较单种均显著提升 ($P<0.05$)。由图 2(i)~图 2(l) 可知,4 个群落内植物 POD 活性较植物单种均显著提升 ($P<0.05$)。

丙二醛 MDA 是细胞膜脂过氧化的重要产物,其含量变化可直接反应胁迫下细胞膜系统受伤程度^[23]。由图 2(m)~图 2(p) 可知, CW-G1 群落 4 种植物 MDA 含量均显著低于 4 种植物单种处理

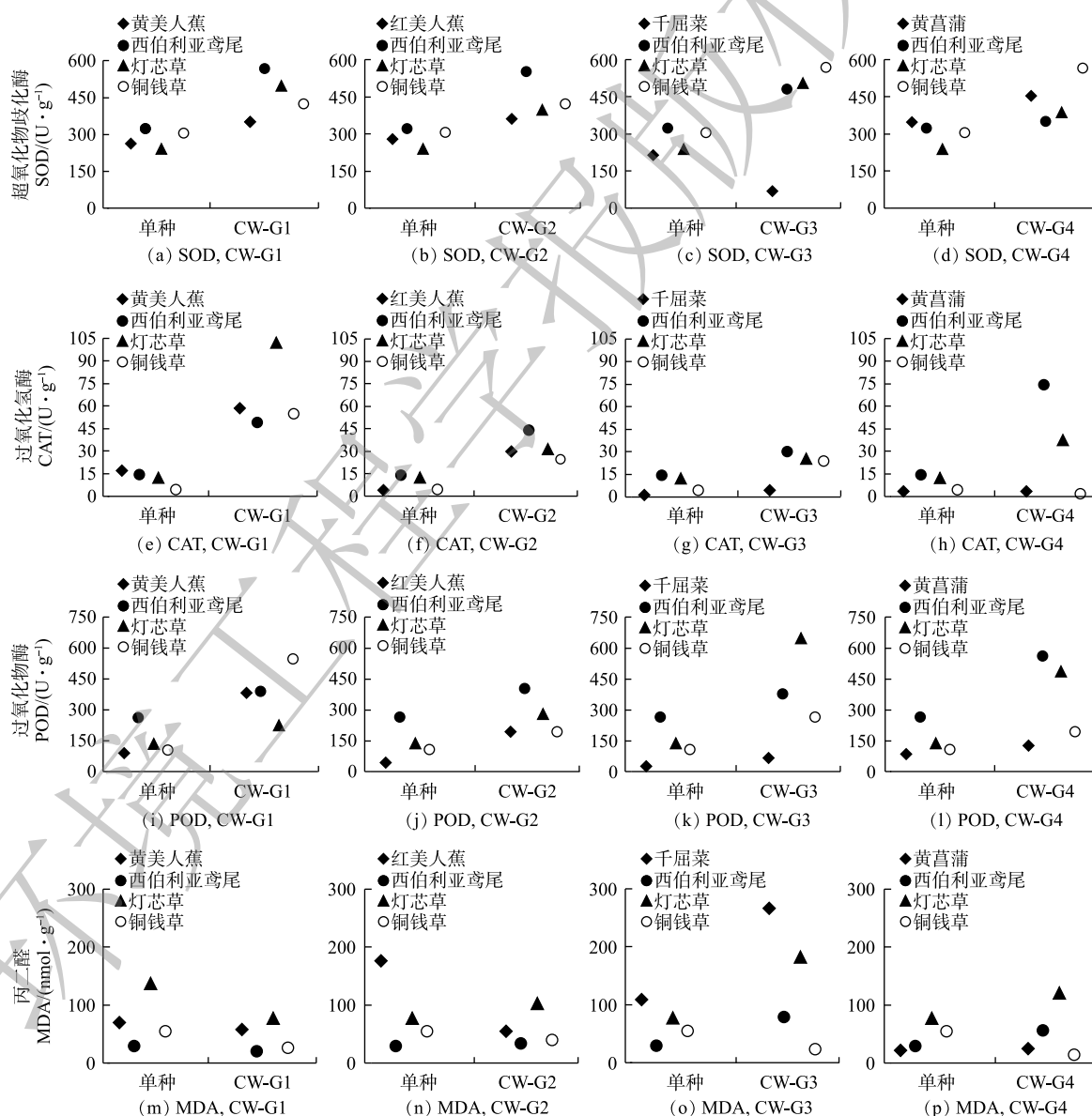


图2 不同CWs装置植物体内酶含量

Fig. 2 Enzyme content in plants in different CWs treatments

($P<0.05$)；CW-G2 群落内红美人蕉、铜钱草 MDA 含量低于二者单种，西伯利亚鸢尾、灯芯草 MDA 含量高于二者单种；CW-G3、CW-G4 群落除铜钱草 MDA 含量低于铜钱草单种，另 3 种植物均高于其单种处理。

SOD、POD、CAT 为植物体内 3 种抗氧化酶，在一定范围内，SOD 和 POD 或 CAT 共同作用能将 O_2 和 H_2O_2 转化为无害的 H_2O 和 O_2 。孙瑞莲等^[24]研究发现，宽叶香蒲和黄花鸢尾通过 SOD 和 CAT 的协同作用抵抗污水胁迫，这也与本研究结果一致。综上所述，CW-G1 群落植物体内 SOD、CAT、POD 含量显著提高 ($P<0.05$)，且 MDA 含量降低，这表明 CW-G1 群落植物间通过相互作用，可以提升 SOD 和 CAT 或 POD 含量，降低植物细胞膜脂过氧化程度，减轻污水胁迫干扰，高效净化污水。

2.3 植物可溶性糖、脯氨酸含量比较

植物可溶性糖、脯氨酸含量变化情况见图 3。植物可溶性糖含量变化如图 3(a)~图 3(d) 所示，实验中 4 种人工湿地植物群落内 4 种植物叶片可溶性糖含量均显著低于 4 种植物单种 ($P<0.05$)，群落中的黄花美人蕉、红花美人蕉、千屈菜、黄菖蒲较单种处理分别降低 39.6%、59.2%、36.8%、59.8%。

植物光合作用最先生成的碳水化合物为葡萄糖，葡萄糖很快转化为淀粉，暂时存储于叶绿体中，之后运送到植物各个部分供生长代谢所用。在本研究中，一方面可能是长期污水胁迫导致叶片受损，使得葡萄糖转化为淀粉的过程受阻，在相同条件下，植物单种处理得到的可溶性糖含量显著高于植物群落，这表明单种处理下植物叶片受损更严重，葡萄糖无法快速转化为淀粉而积累于叶片中，使得可溶性糖含量升高，这与孟昱等^[25]的研究结果一致；另一方面，也可能是长期污水胁迫造成植物体受损，使光合作用产物不能被植物正常利用，导致葡萄糖在叶片中积累。植物单种处理叶片中的可溶性糖含量更高，表明单种处理下植物所受损伤更为严重，植物混种可以有效提高抗干扰能力，这也与贾琼^[26]的研究结果一致。

在正常条件下，植物体内游离脯氨酸含量较低；在逆境条件下，植物体内游离脯氨酸会大量产生并积累，从而调节细胞渗透势以抵抗外界干扰^[27]。由图 3(e)~图 3(h) 可知，实验中 4 种植物群落除 CW-G4 中灯芯草游离脯氨酸含量均显著高于灯芯草单种 ($P<0.05$)，此外，在 3 个植物群落中的 4 种植物游离脯氨酸含量均低于 4 种植物单种处理。植物群落游离脯氨酸含量低于植物单种处

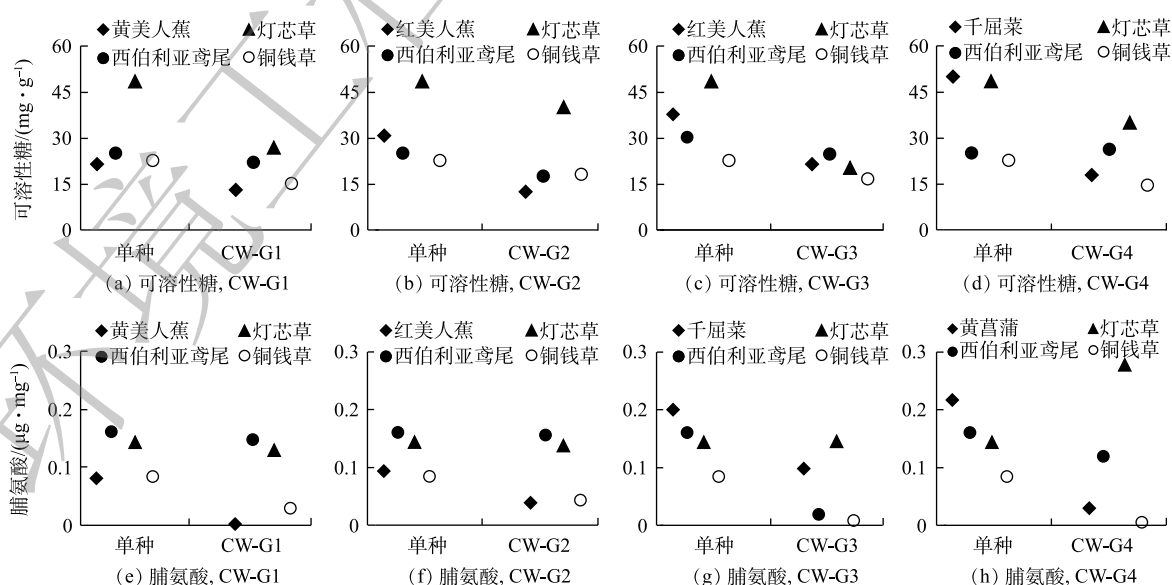


图 3 植物可溶性糖和脯氨酸含量的变化

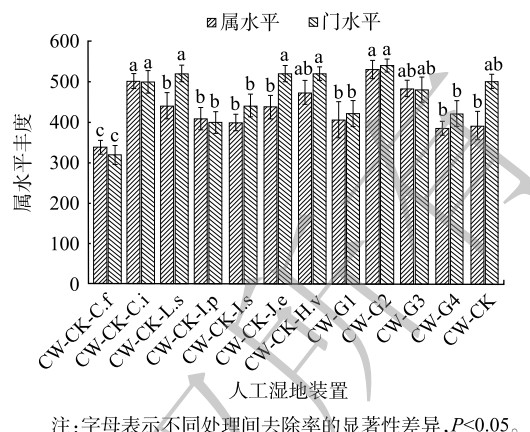
Fig. 3 Changes of soluble sugar and proline contents in plants

理,这表明污水对单种植物有较大的伤害,植物群落可以有效降低外界不利条件对植物的伤害,这也与李玫等^[28]的研究结果一致。

2.4 植物群落根际微生物比较

人工湿地中氮去除以微生物的硝化反硝化作用为主导,不同植物根际分泌物不同,使植物根际富集不同功能微生物。图4为微生物在门、属分类水平下的群落物种丰度。由图4可知,与空白对照相比,种植植物处理提高了门、属水平下微生物群落的物种丰度,CW-G1群落在门、属水平均有最高的物种丰度。图5为各样本微生物组选择有益的分类丰度(MicroPITA)分析图,图中横纵坐标为标准归一化计算后装置中微生物群落属水平下的群落丰度,样本间距离越近,代表样本中微生物群落丰度越相似。MicroPITA分析是一种在分级研究中挑选样本的计算工具,能够更有效的分配资源,降低研究成本,最大化利用样本。Maximum diversity代表按照样本物种组成多样性挑选的样本,即样本alpha多样性最高的样本,可知,CW-G1群落微生物物种组成多样性最高。综上所述,CW-G1群落植物配置方式最利于微生物富集,这也与CW-G1群落水质净化效果最佳的结果相一致。

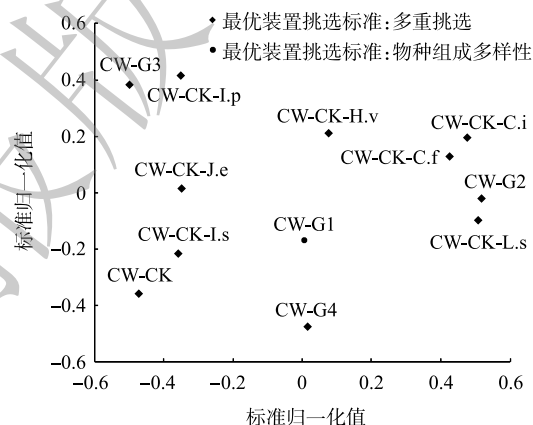
图6为门水平下的微生物群落组成,优势细菌群落在门水平上达到11门以上,其中以变形菌门(*Proteobacteria*)、蓝藻菌门(*Cyanobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、浮霉菌门(*Planctomycetes*)为主,还包括放线菌门(*Actinobacteria*)、酸杆菌门(*Acidobacterio*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)等。变形菌门是根际微生物中丰度最高的菌门,可参与有机物降解、氮转化等;蓝藻菌门能够吸收大量的氨、氮等污染物质;拟杆菌门能够代谢碳水化合物,降解有机物^[29];浮霉菌门中厌氧氨氧化菌能够在缺氧环境下利用亚硝酸盐氧化铵离子生成氮气,是污水处理中重要的细菌^[30]。样本中各微生物群落组成相似,但各菌门均匀度存在差异。Alpha多样性分析得到各样本Smithwilson指数,结果表明,CW-G1群落最高,Smithwilson指数表征群落均匀度,表明CW-G1群落各菌门微生物均匀



注:字母表示不同处理间去除率的显著性差异, $P < 0.05$ 。

图4 不同水平下微生物群落丰度

Fig. 4 Abundance of microbes at different levels



注:图中样点代表本研究所不同装置;标准归一化值采用Bray-curtis距离算法计算得出。该距离算法只考虑不同装置内微生物物种丰度及相似程度,不考虑各物种之间的进化关系或关联信息。

图5 不同装置属水平下微生物群落丰度

MicroPITA 分析

Fig. 5 MicroPITA analysis of microbial community abundance at genus level in different devices

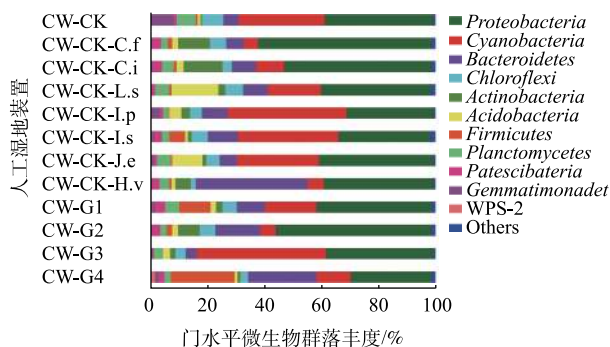


图6 门水平上微生物群落组成及丰度

Fig. 6 Taxonomic composition and abundance of microbes at phylum level

分布, 此种植物配置方式在保证物种丰富度的同时, 也可以保证物种均匀度, 使各菌门细菌共同协作, 高效净化污水。

3 结论

1) 水生植物对人工湿地水质净化具有重要作用, 不同湿地植物净化优势不同, 将不同植物组合可以提高污水综合净化效果, 且通过植物配置可以提升湿地景观。CW-G1 群落表现出最佳的水质净化效果, 表明 CW-G1 组合为 4 种植物群落中的最佳搭配方式。

2) CW-G2、CW-G3、CW-G4 群落在净化不同污染物时净化效果表现为有提升和减弱, 这说明植物间相互作用有促进和抑制作用, 故植物选择时需谨慎考虑。

3) CW-G1 群落 SOD、CAT、POD 含量显著提高 ($P<0.05$), 且 MDA 含量最低, 这表明 SOD 和 CAT 或 POD 是黄美人蕉群落抵抗污水胁迫的一种有效防御策略。

4) CW-G1 群落根围基质适于多种微生物生存, Alpha 多样性最高, 各微生物融合最好, 对人工湿地净水功能的发挥有促进作用。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2018中国生态环境状况公报[EB/OL]. [2020-02-01]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201905/P020190619587632630618>, 2019.
- [2] ZHAO Z M, ZHANG X, WANG Z F, et al. Enhancing the pollutant removal performance and biological mechanisms by adding ferrous ions into aquaculture wastewater in constructed wetland[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 293: 122003.
- [3] 沈莹, 郑于聪, 王晓昌, 等. 不同尺度潜流人工湿地对污染河水的净化机制[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(6): 1667-1675.
- [4] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 255-262.
- [5] TILMAN D, ISBELL F, COWLES J M. Biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 2014, 45: 471-473.
- [6] REA M, NICOLE P, MONIKA K, et al. Vegetation management intensity and landscape diversity alter plant species richness, functional traits and community composition across European vineyards[J]. *Agricultural Systems*, 2020, 177: 102706.
- [7] BALVANERA P, PFISTERER A B, BUCHMANN N, et al. Quantifying the evidence for biodiversity effect on ecosystem functioning and services[J]. *Ecological Letters*, 2006, 9(10): 1146-1156.
- [8] 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*, 2013, 34(4): 916-924.
- [9] GU B, DRESCHER T. Effects of plant community and phosphorus loading rate on constructed wetland performance in Florida, USA[J]. *Wetlands*, 2008, 28(1): 81-91.
- [10] HENNY C, MEUTIA A A. Urban lakes in megacity Jakarta: Risk and management plan for future sustainability[J]. *Procedia Environmental Science*, 2014, 20: 737-746.
- [11] ZHAO H J, WANG Y, YANG L L, et al. Relationship between phytoplankton and environmental factors in landscape water

- supplemented with reclaimed water[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 113-121.
- [12] CHANG N N, ZHANG Q H, WANG Q, et al. Current status and characteristics of urban landscape lakes in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 712: 135669.
- [13] 崔卫华, 卢少勇, 陈亮, 等. 人工湿地中植物的作用与选择原则[J]. 化工之友, 2006(6): 51-52.
- [14] 王圣瑞, 年跃刚, 侯文华, 等. 人工湿地植物的选择[J]. 湖泊科学, 2004, 16(1): 93-98.
- [15] 李海燕, 陈章和. 三种湿地植物的生长及根系溶解性有机碳分泌物研究[J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(6): 536-542.
- [16] 魏成, 刘平, 秦晶. 不同基质和不同植物对人工湿地净化效率的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 211-217.
- [17] 郝桂枝, 张银龙, 祝浩翔. 3种人工植物群落对污水净化模拟试验[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47(11): 81-85.
- [18] 李莎莎, 田昆, 刘云根, 等. 不同空间配置的湿地植物群落对生活污水的净化作用研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(8): 1951-1955.
- [19] XU D, WU Y, LI Y, et al. Influence of UV radiation on chlorophyll, and antioxidant enzymes of wetland plants in different types of constructed wetland[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(17): 10108-10119.
- [20] 薛鑫, 张芊, 吴金霞. 植物体内活性氧的研究及其在植物抗逆方面的应用[J]. 生物技术通报, 2013, 33(10): 6-11.
- [21] 鲁敏, 裴翡翠, 宁静, 等. 4种湿地植物受污水胁迫生理生化特性影响的相关性研究[J]. *山东建筑大学学报*, 2011, 26(5): 416-419.
- [22] YIN X L, ZHANG J, GUO Y Y, et al. Physiological responses of *potamogeton crispus* to different levels of ammonia nitrogen in constructed wetland[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2016, 227: 65.
- [23] HUA D, MA M Z, GE G F, et al. The role of cyanide-resistant respiration in *Solanum tuberosum* L. against high light stress[J]. *Plant Biology*, 2020, 22(3): 425-432.
- [24] 孙瑞莲, 刘健. 3种挺水植物对污水的净化效果及生理响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 138-144.
- [25] 孟昱, 路斌, 张钢. 涝渍胁迫下白桦叶和茎中可溶性糖和淀粉含量相关性研究[J]. 河北林果研究, 2018, 33(1): 50-55.
- [26] 贾琼. 水分胁迫对马铃薯生长与生理特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [27] 梁丽娜, 刘雪, 唐勋, 等. 干旱胁迫对马铃薯叶片生理生化指标的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2018, 37(3): 1343-1348.
- [28] 李玫, 陈志力, 廖宝文. 5种华南沿海湿地植物对人工含盐污水的生理响应[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(27): 13441-13443.
- [29] KIM Y, LOGAN B E. Simultaneous removal of organic matter and salt ions from saline wastewater in bioelectrochemical systems[J]. *Desalination*, 2013, 308: 115-121.
- [30] 陈重军, 朱为静, 黄孝肖, 等. 有机碳源下废水厌氧氨氧化同步脱氮除碳[J]. 生物工程学报, 2014, 30(12): 45-54.
- (本文编辑: 曲娜, 郑晓梅)

Influence of plant community on the purification of domestic sewage by constructed wetland

WANG Zhufang¹, ZHAO Zhimiao^{1,2}, CHENG Mengyu¹, CHENG Mengqi¹, ZHANG Yinjiang^{1,2,3,*}, SHI Zonglin²

1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2. Hebei Key Laboratory of Wetland Ecology and Conservation, Hengshui 053000, China

3. Water Environment & Ecology Engineering Research Center of Shanghai Institution of Higher Education, Shanghai 201306, China

*Corresponding author, E-mail: yjzhang@shou.edu.cn

Abstract To solve the problem of influence of plant configuration on water purification, the purification rate and response mechanisms of different plant communities in domestic sewage treatment were studied to obtain the optimal plant assemblage of constructed wetlands(CWs). Combined with landscape ecology, 7 kinds of aquatic plants were used to construct 4 types of CWs (CW-G1, CW-G2, CW-G3 and CW-G4) with different assemblages, the removal rate of pollutants from domestic sewage by each constructed wetland was analyzed at HRT of 4 d and HLR of $0.125 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. Furthermore, the purification mechanisms were discussed on the basis of enzyme activity change, osmotic regulation of plants and rhizosphere microbial succession. The results showed that the plant community in CW-G1 had the highest pollutant removal rate. SOD, POD and CAT enzyme activities of plants in CW-G1 significantly increased, while MDA content significantly decreased. Alpha diversity of the rhizosphere microbial was the highest in CW-G1, and the bacteria distributed equally at phylum level. The cooperation with each other for plants in CW-G1 led to the increase of antioxidant enzyme activity of plants, the enhancement of the anti-interference ability of plant community, and the increase of the diversity, abundance and evenness of rhizosphere microbial community, plant-microbial cooperated well to decontaminate sewage efficiently. This study provides theoretical and technical support for the allocation and application of wetland plants.

Keywords constructed wetland; plant community; water purification; resistance physiology; rhizosphere microbial