

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.002

植物碳源强化浮床净化效果及对根系微生物群落影响

韩雪宜^{1,2}, 王怡¹, 王文怀^{1,2}, 朱政^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学
西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 为解决传统生态浮床对再生水补给景观水体中氮去除效果不佳的问题,在传统生态浮床(T-EFB)基础上引入植物碳源,构建植物碳源强化生态浮床(PCS-EFB),并通过中试考察了两者对再生水补给景观水体水质的净化效果,以及植物碳源对根系微生物菌群的影响。结果表明,PCS-EFB可大幅降低水体中污染物浓度,试验全程对浊度、TN、NO₃⁻-N、藻密度和叶绿素a(Chl-a)的平均去除率分别可达46.52%、62.24%、92.84%、57.51%和63.86%。同时,植物碳源的缓释性与良好的可生化性使其在促进反硝化的同时不会引起水体COD的大幅增加。此外,植物碳源的添加还可提高浮床系统微生物多样性,同时增加 *Proteobacteria*、*Chloroflexi*、*Firmicutes* 等功能菌的相对丰度,促进水中污染物的去除和降解。因此,植物碳源强化生态浮床可用于以硝酸盐氮为主的景观水体净化,以保障水质和控制富营养化。

关键词: 生态浮床; 植物碳源; 景观水体; 硝酸盐; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0009-06

Purification Efficiency and Effect on Plant Roots Microbial Community of Enhanced Floating Bed with Plant Carbon Source

HAN Xue-yi^{1,2}, WANG Yi¹, WANG Wen-huai^{1,2}, ZHU Zheng^{1,2}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology <MOE>, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: To solve the problem that traditional ecological floating bed (T-EFB) is not effective in removing nitrogen from the landscape water supplied with reclaimed water, the plant carbon source (PCS) was introduced to an ecological floating bed to construct PCS-EFB. The purification effects on the landscape water supplied with reclaimed water and plant roots microbial community of T-EFB and PCS-EFB were compared. Results showed that PCS-EFB could greatly enhance the removal of pollutants in water. The average removal rates of turbidity, TN, NO₃⁻-N, algae density and Chl-a concentration in PCS-EFB reached 46.52%, 62.24%, 92.84%, 57.51% and 63.86%, respectively. Meanwhile, the sustained release and good biodegradability of PCS could promote the denitrification process without increasing COD in water largely. Moreover, the addition of PCS could improve the microbial diversity,

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(52170172); 陕西省重点产业创新链(群)项目(2021ZDLSF05-04); 西安市科技局社会发展科技创新示范项目(20SFSF0011)

通信作者: 王怡 E-mail: wangyi1003@sina.com

increase the relative abundance of functional bacteria such as *Proteobacteria*, *Chloroflexi* and *Firmicutes*, and then promote the removal and degradation of pollutants in water. Thus, the PCS-EFB is suitable for the purification of the landscape water supplied with reclaimed water, and it is a promising technology for removing nitrate in water, which helps to ensure water quality and control eutrophication.

Key words: ecological floating bed; plant carbon source; landscape water; nitrate; microbial community

随着水资源危机的加剧,再生水逐渐成为城市景观水体潜在的补给水源^[1],且其补给水体中 NO_3^- -N为TN的主要成分,C/N相对较低。研究表明,当水体缺乏碳源且 NH_4^+ -N浓度较低时,藻类以 NO_3^- -N作为氮源^[2],加之城市景观水体流速较缓、自净能力较弱,极易发生富营养化。因此,在磷浓度得到有效控制的前提下,降低水体中的 NO_3^- -N浓度是现阶段控制再生水补给景观水体富营养化的关键。

生态浮床由于操作简单、成本低、观赏价值高等优点被广泛应用于景观水体水质保障^[3],但碳源不足限制了其对再生水补给景观水体中氮的去除。因此,添加碳源是提高生态浮床氮去除率的一种可行途径。其中,植物生物质由于易获得、成本低等优点逐渐受到关注。然而,目前已有研究多是将植物碳源应用于人工湿地,而用于生态浮床的研究较少。此外,有关植物碳源强化浮床对长水力停留时间的再生水补给景观水体氮去除研究未见报道。

基于此,以再生水补给景观水体为研究对象,通过中试探究添加植物碳源对浮床净化效果及植物根系微生物群落的影响,以期进一步降低再生水补给景观水体中 NO_3^- -N浓度,为保障再生水补给景观水体水质和控制富营养化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

中试在西安市某再生水生产公司进行,采用3个400 L聚乙烯圆台形塑料桶(915 mm×785 mm×715 mm),分别设为控制(CK)、传统浮床(T-EFB)和植物碳源强化浮床(PCS-EFB)反应器。为模拟景观水体实际状况,先向各反应器中分别加入12 L(厚度为3 cm)常年补给再生水的某景观水体表层沉积物,后缓慢加入310 L该公司生产的再生水,同时对反应器外壁进行遮光处理。

T-EFB选用聚乙烯塑料板为载体;选用菖蒲、千屈菜和铜钱草为浮床植物,每种植物初始生长状

况良好且接近(菖蒲、千屈菜、铜钱草的平均湿质量分别约为130、180、150 g/株),种植密度均为18株/ m^2 。此外,在T-EFB下方10 cm处通过尼龙网袋悬挂250 g植物碳源构建PCS-EFB,其中植物碳源来自收割后且经预处理的菖蒲茎叶(剪成8 cm,置于85℃烘箱中20 min,对应含水率为58%, BOD_5/COD 为0.65)。两浮床覆盖率均为30%,试验过程中分别在第42天和第98天补充再生水,试验初次添加和后续补给再生水的水质及水量见表1,其中再生水 BOD_5/COD 为0.12~0.18。试验历时140 d,以补水时间划分为三个阶段,分别为阶段Ⅰ(0~42 d)、阶段Ⅱ(42~98 d)和阶段Ⅲ(98~140 d)。

表1 试验初次添加和后续补给再生水的水质及水量

Tab.1 Water quality and quantity of reclaimed water added for the first time and subsequently replenished

补水时间/ d	水量/ L	水质/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)						
		TP	COD	TN	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	NO_2^- -N	PO_4^{3-} -P
0	318	0.10	14.66	5.69	5.32	0.28	0.00	0.09
42	60	0.11	14.97	6.22	6.13	0.30	0.03	0.09
98	60	0.16	14.97	7.11	7.06	0.03	0.00	0.15

1.2 样品采集与测定

试验期间每7 d于早上9:00收集各系统水面下25 cm处水样。水质测定中,水温、DO使用哈希HQ-30D便携式水质分析仪现场测定,其余指标均立即带回实验室分析。pH采用pH计测定,浊度、TN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和 NO_2^- -N均采用紫外-可见分光光度计测定, BOD_5 采用稀释接种法测定,COD采用重铬酸钾消解法测定,Chl-a采用丙酮萃取法测定,藻密度采用Nikon 50i显微镜镜检计数。试验结束后分别采集T-EFB与PCS-EFB系统中的植物根系,置于纯水中恒温振荡4 h,取上清液通过0.22 μm 滤膜采集微生物样品后进行群落分析。微生物

菌种鉴定由上海晶能生物技术有限公司完成。

2 结果与讨论

2.1 水体水质历时变化

2.1.1 理化参数历时变化

各系统水体理化参数的历时变化如图1所示。试验中水温变化范围为13.7~28.9℃,符合夏季高、秋季低的特点。其中,0~98 d水温整体较高,平均值为25.6℃;98~140 d水温随季节变化逐渐降低,平均值为19.4℃。图1(b)表明,DO浓度与水温呈负相关,试验全程CK、T-EFB与PCS-EFB中DO浓度均值分别为3.92、3.56和4.13 mg/L。试验前期,PCS-EFB中碳源释放较快,使其DO浓度较CK和T-EFB略有下降;后期各反应器中DO浓度均持续升高。一方面,随着植物生长由适应期进入旺盛期,其代谢加快,光合作用产生氧气随着植物根系传递到水中;另一方面,水温降低导致水体耗氧速率下降。同时,PCS-EFB中植物碳源进入缓慢释放期耗氧速率降低。因此,各系统中DO浓度均上升。

由图1(c)可知,各系统pH变化规律相似,试验全程CK、T-EFB和PCS-EFB的pH平均值分别为7.86、7.43和7.56,无显著差异($p>0.05$)。而T-EFB和PCS-EFB中植物根系分泌有机酸使其pH略低于CK^[4]。由图1(d)可知,CK、T-EFB和PCS-EFB中浊度平均值分别为10.34、7.78和5.53 NTU,与CK相比,T-EFB和PCS-EFB对浊度的平均去除率分别为28.92%和46.52%,这可能是由于PCS-EFB中悬挂装有植物碳源的尼龙网增强了对水中悬浮态有机物的截留与过滤,从而造成浊度大幅下降。因此,PCS-EFB可大幅降低水体浊度,有效控制pH,且不会引起DO明显下降。

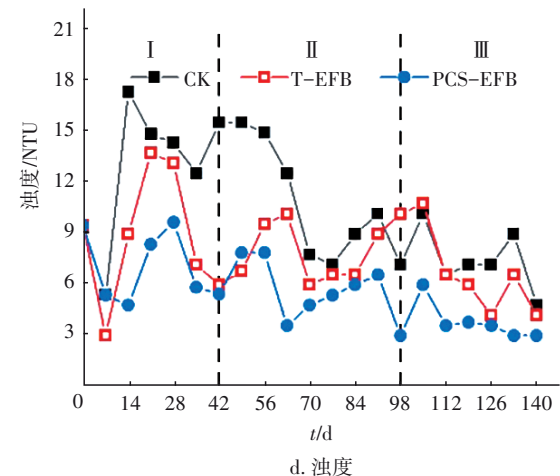
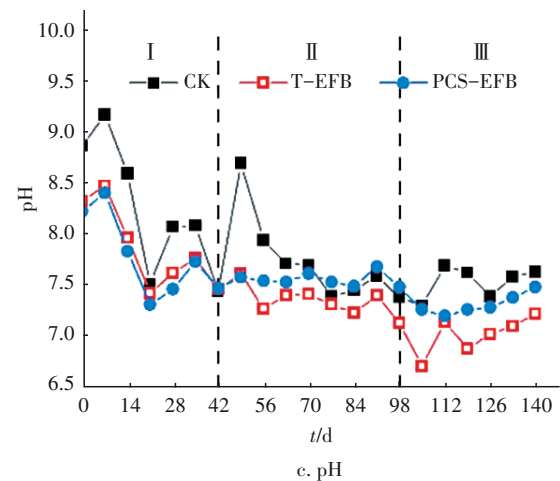
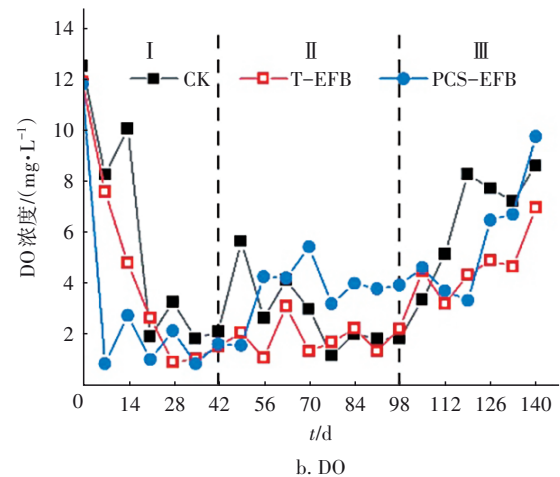
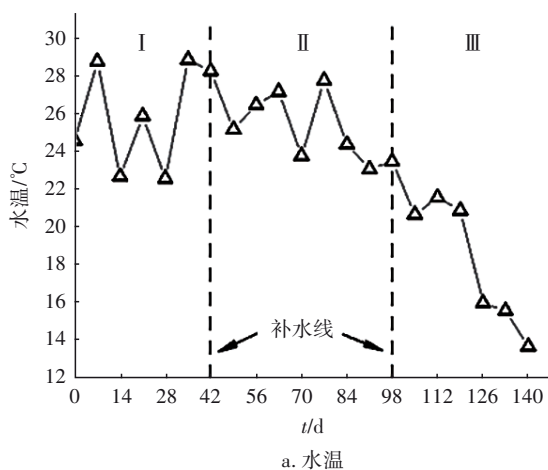


图1 各系统水体理化参数历时变化

Fig.1 Change of physi-chemical indexes in different water system with time

2.1.2 氮浓度历时变化

与初始值相比,各系统的 NO_3^- -N浓度均呈下降趋势,但PCS-EFB的下降幅度最大,尤其在第II和第III阶段(见图2)。与初始值相比,CK、T-EFB和

PCS-EFB对 NO_3^- -N的平均去除率分别为70.27%、72.38%和92.84%。这是由于沉积物中微生物的反硝化作用,而PCS-EFB中植物碳源的添加进一步促进了反硝化菌对 NO_3^- -N的去除,使得该系统中的 NO_3^- -N浓度除补水点外稳定低于0.15 mg/L。

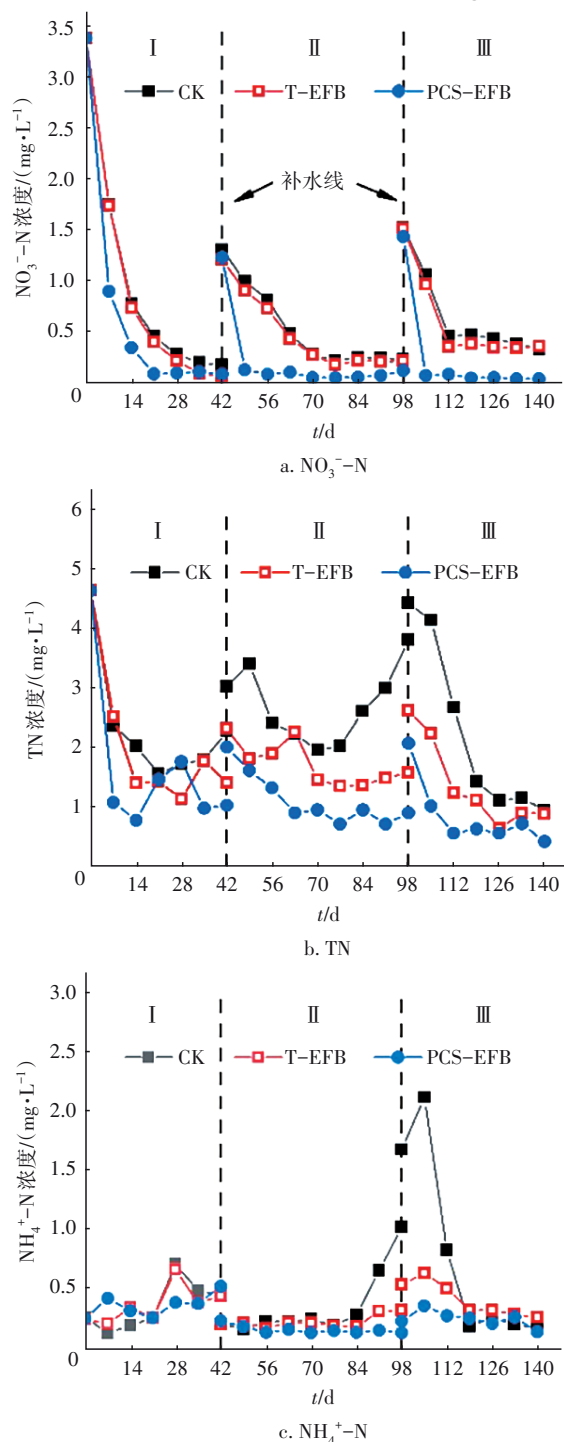


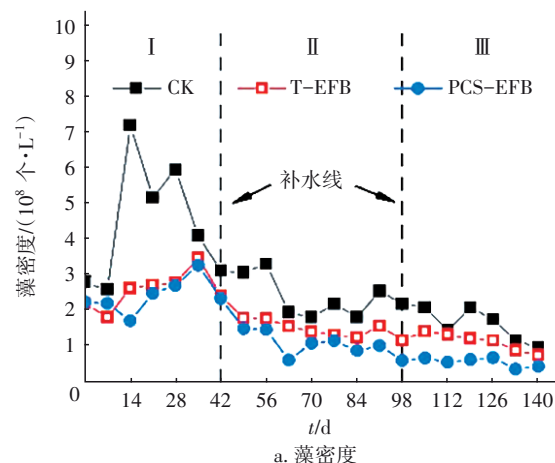
图2 各系统水体氮浓度的历时变化

Fig.2 Change of nitrogen concentration in different water system with time

图2(b)显示,TN浓度的变化趋势与 NO_3^- -N相似。与初始值相比,CK、T-EFB和PCS-EFB对TN的平均去除率分别为38.70%、47.28%和62.24%。除补水点外,PCS-EFB中TN浓度稳定保持在1.5 mg/L以下,满足《地表水环境质量标准》的IV类标准限值(1.5 mg/L),而CK和T-EFB中TN浓度均超过地表水V类标准限值(2.0 mg/L),尤其是CK在第二次补水后TN浓度达4.50 mg/L以上。由图2(c)可知,PCS-EFB中 NH_4^+ -N浓度基本保持全程最低。在第84~105天,CK中 NH_4^+ -N浓度上升至2.25 mg/L,这一方面是由于试验前期其藻密度较大,此时衰亡解体释放了 NH_4^+ -N;另一方面,由于无浮床时水体扰动易引起底泥释放。此外,各系统中 NO_2^- -N浓度均保持在较低水平(<0.2 mg/L),尤其是T-EFB与PCS-EFB中 NO_2^- -N全程稳定低于0.08 mg/L。因此,T-EFB和PCS-EFB均可降低再生水补给景观水体中TN及 NH_4^+ -N浓度,而PCS-EFB进一步促进了 NO_3^- -N的去除,使其氮浓度全程处于较低水平。

2.1.3 藻密度和Chl-a浓度历时变化

各系统藻密度和Chl-a浓度的变化规律相似,均表现为CK全程较高,T-EFB相对较低,PCS-EFB稳定最低(见图3)。与CK相比,T-EFB和PCS-EFB对藻密度的去除率分别为37.74%和57.51%,对Chl-a的平均去除率分别为42.44%和63.86%,PCS-EFB对藻密度和Chl-a的去除率显著高于CK和T-EFB($p < 0.05$)。浮床的光屏蔽效应及植物对水体中营养物的吸收使得T-EFB和PCS-EFB中藻密度及Chl-a浓度较CK显著下降,外碳源引入进一步强化了PCS-EFB对水体中TN和 NO_3^- -N的高效去除,从而使得PCS-EFB中藻密度和Chl-a浓度全程最低,富营养化控制效果最好。



a. 藻密度

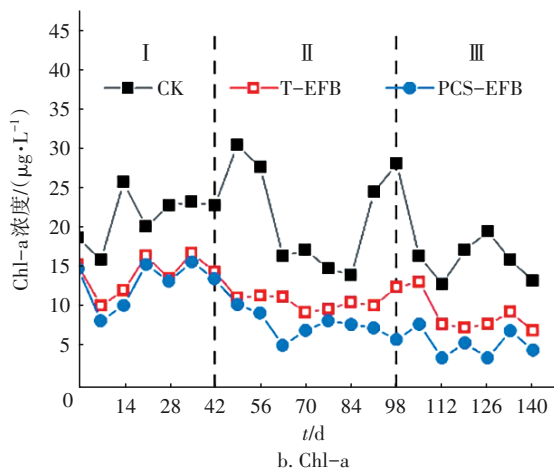


图3 各系统藻密度和Chl-a浓度的历时变化

Fig.3 Change of algae density and Chl-a concentration in different water system with time

2.1.4 COD浓度历时变化

图4为各系统COD浓度历时变化,不同系统中COD浓度均呈先升高后降低的趋势。0~42 d处于夏季,水温较高(22.6~28.9℃),沉积物中微生物呼吸速率增大,加剧水体氧气消耗和内源污染物释放,从而导致各系统水中DO浓度快速下降以及上覆水COD浓度增加。此时,植物碳源处于快速释放期,PCS-EFB中COD浓度稍高于CK和T-EFB,但差异并不显著($p>0.05$)。随后,PCS-EFB中碳源进入缓慢释放期,加之微生物对有机碳的消耗,使得COD浓度持续下降,并低于CK和T-EFB。

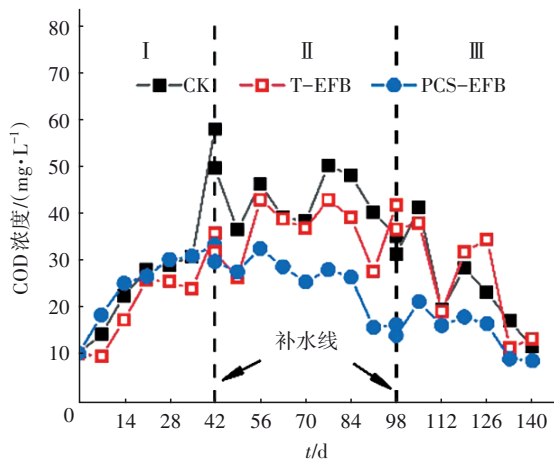


图4 各系统COD浓度的历时变化

Fig.4 Change of COD concentration in different water system with time

再生水 BOD_5/COD 在 0.12~0.18 之间,可生化性较差,而植物碳源浸提液的 BOD_5/COD 为 0.65,可

生化性良好。试验期间,CK、T-EFB 与 PCS-EFB 中 COD 浓度均值分别为 32.83、29.03、22.45 mg/L。结合图 2(a)可知,植物碳源的加入促进了 PCS-EFB 中反硝化的进行,这也是 PCS-EFB 后期 COD 浓度持续下降的原因。因此,PCS-EFB 中外加碳源较好的可生化性不仅未引起水体 COD 浓度的大幅增加,还通过促进反硝化实现了对水中有机的进一步去除,从而将 COD 浓度全程控制在 V 类标准限值以内(40 mg/L)。

2.2 微生物群落结构分析

2.2.1 微生物多样性指数

T-EFB 与 PCS-EFB 中植物根系微生物 Alpha 多样性指数分析结果见表 2。可见,PCS-EFB 中植物根系微生物的 OTU 数以及 Chao、Shannon 和 Simpson 指数均远高于 T-EFB,其原因在于植物碳源不仅为反硝化细菌提供电子供体,而且还可作为其能源和附着载体,促进适宜菌群的衍生和增殖^[5]。本研究通过尼龙网在 T-EFB 下方悬挂植物碳源构建 PCS-EFB,不仅促进了多种微生物的附着和协同生长,而且尼龙网内外侧易形成厌氧-缺氧-好氧微环境,提高微生物的多样性。

表2 T-EFB与PCS-EFB中植物根系微生物的Alpha多样性指数

Tab.2 Alpha diversity index of plant rhizosphere microbes in T-EFB and PCS-EFB systems

项 目	OTU	Chao	Shannon	Simpson
T-EFB	1 971	2 102	7.365	0.981
PCS-EFB	4 472	4 482	9.787	0.992

2.2.2 微生物门水平相对丰度

图 5 为 T-EFB 和 PCS-EFB 系统植物根系微生物在门水平的相对丰度。*Proteobacteria* 为 T-EFB 和 PCS-EFB 中优势菌种,相对丰度分别为 69.7% 和 72.7%。研究表明 *Proteobacteria* 广泛存在于多种水体,可以参与反硝化过程^[6],植物碳源的添加提高了其在 PCS-EFB 中的相对丰度。此外,*Chloroflexi* 和 *Firmicutes* 在 PCS-EFB 系统中的相对丰度分别为 6.8% 和 6.2%,在 T-EFB 系统中的相对丰度分别为 0.44% 和 0.08%。据报道,*Chloroflexi* 具有多种代谢能力,且可参与氮循环过程^[7],而 *Firmicutes* 作为脱氮过程中的重要微生物,能够同时参与反硝化并降解纤维素^[8],PCS-EFB 系统中这两者相对丰度的提高,表明 PCS-EFB 在脱氮和降碳方面比 T-EFB 更为

优越,这与水中氮和COD浓度的变化趋势吻合。因此,PCS-EFB增大了 *Proteobacteria*、*Chloroflexi* 和 *Firmicutes* 等功能菌的相对丰度,从而促进了有机物降解和氮的转化,有利于再生水补给景观水体水质的进一步提升。

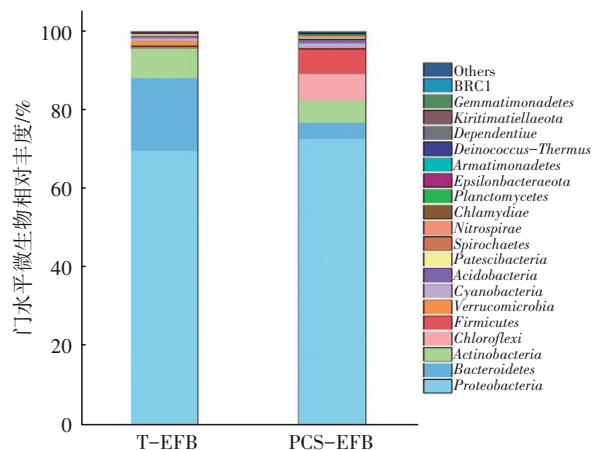


图5 T-EFB与PCS-EFB系统中植物根系微生物群落相对丰度

Fig.5 Relative abundance of plant rhizosphere microbial communities in T-EFB and PCS-EFB systems

3 结论

① 植物碳源的添加提高了PCS-EFB对水体中污染物的去除效果,其对浊度、TN和 NO_3^- -N的平均去除率分别可达46.52%、62.24%和92.84%,且其缓释性能以及良好的可生化性避免了COD浓度的大幅增加,保障了再生水补给景观水体水质的安全和稳定。

② 与CK相比,PCS-EFB通过光屏蔽、浮床植物吸收及植物碳源强化脱氮,对水体中藻密度和Chl-a的去除率分别达57.51%和63.86%,可有效控制景观水体富营养化。

③ PCS-EFB提高了 *Proteobacteria*、*Chloroflexi* 和 *Firmicutes* 等功能菌的相对丰度,从而促进了有机物降解和氮的转化,有利于再生水补给景观水体水质的进一步提升。

参考文献:

[1] WANG W H, WANG Y, LI Z, *et al.* Effect of a strengthened ecological floating bed on the purification of urban landscape water supplied with reclaimed water

[J]. Science of the Total Environment, 2017, 622: 1630-1639.

[2] KUMAR A, BERA S. Revisiting nitrogen utilization in algae: a review on the process of regulation and assimilation [J]. Bioresource Technology Reports, 2020, 12:100584.

[3] 王文怀,王怡,韦存智,等.水绵强化浮床净化再生水补给的景观水体效果[J].中国给水排水,2018,34(21):59-63.

WANG Wenhui, WANG Yi, WEI Cunzhi, *et al.* Effect of enhanced *Spirogyra* floating bed on purification of landscape water supplied with reclaimed water [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(21): 59-63 (in Chinese).

[4] MIKE W, NATHALIE F, RACHEL G, *et al.* Evaluation of algal bloom mitigation and nutrient removal in floating constructed wetlands with different macrophyte species [J]. Ecological Engineering, 2017, 108:581-588.

[5] WANG H, CHEN N, FENG C, *et al.* Insights into heterotrophic denitrification diversity in wastewater treatment systems: progress and future prospects based on different carbon sources [J]. Science of the Total Environment, 2021, 780:146521.

[6] CHEN D, WANG H Y, YANG K, *et al.* Performance and microbial communities in a combined bioelectrochemical and sulfur autotrophic denitrification system at low temperature [J]. Chemosphere, 2018, 193:337-342.

[7] LI X, LI Y Y, LV D Q, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal performance and bacterial communities in a multi-stage surface flow constructed wetland treating rural domestic sewage [J]. Science of the Total Environment, 2020, 709:136235.

[8] YAN Q, JIE M, YU Y H, *et al.* Microbial community response during the treatment of pharmaceutically active compounds (PhACs) in constructed wetland mesocosms [J]. Chemosphere, 2017, 186:823-831.

作者简介:韩雪宜(1996-),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事景观水体修复技术研究。

E-mail:1174607769@qq.com

收稿日期:2022-03-14

修回日期:2022-04-29

(编辑:李德强)