

不同植物配置下人工湿地微生物群落特征及其影响因素

赖巧晖¹, 张浩², 刘治鹏³

(1.广东农工商职业技术学院, 广州 510075;

2.仲恺农业工程学院, 广州 510075; 3.广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广州 510075)

摘 要:植物是湿地生态系统的重要组成部分,本选择茭白(*Zizania caduciflora*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和芦苇(*Phragmites australis*),连续 5 年研究了不同植物配置下人工湿地微生物群落特征对环境的指示作用,结合微生物群落冗余分析(Redundancy analysis, RDA),研究了不同植物配置下人工湿地土壤环境因子及其对微生物群落分布的影响。结果表明:(1) 土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷和碱解氮呈一致的变化规律,均表现为芦苇>菖蒲>茭白>鸢尾,而不同人工湿地全磷差异不显著($p>0.05$)。(2) 人工湿地对土壤微生物量有较大的影响,土壤微生物量碳、氮、磷呈一致的变化规律,均表现为芦苇>菖蒲>茭白>鸢尾,不同人工湿地微生物量碳和氮差异均显著($p<0.05$),微生物量磷差异不显著($p>0.05$)。(3) 物种丰富度指数(H)、均匀度指数(E)、和碳源利用丰富度指数(S)均表现为芦苇>菖蒲>茭白>鸢尾,而优势度指数(D_s)则表现为鸢尾>茭白>菖蒲>芦苇。其中不同人工湿地碳源利用丰富度指数(S)差异均显著($p<0.05$),不同人工湿地优势度指数(D_s)差异均不显著($p>0.05$)。(4) 相关性分析表明不同人工湿地微生物物种丰富度指数(H)与 SOC, TN 呈显著正相关,芦苇和菖蒲的相关系数高于茭白和鸢尾,说明芦苇和菖蒲人工湿地微生物群落多样性高于茭白和鸢尾;RDA 分析表明,土壤环境因子具有明显的生态梯度, SOC, TN 是影响人工湿地微生物群落多样性的主要环境因子。

关键词:人工湿地; 微生物群落; 土壤养分; 环境指示

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0089-06

Characteristics of Soil Microbial Community and Their Impact Factors in Different Constructed Wetlands with Plant Communities

LAI Qiaohui¹, ZHANG Hao², LIU Zhipeng³

(1.Guangdong College of Agriculture, Industry and Commerce, Guangzhou 510075,

China; 2.Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510075, China;

3.Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510075, China)

Abstract:Hygrophytes are the important parts of a constructed wetland system. Four common wetland plants (*Phragmites australis*, *Acorus calamus*, *Iris tectorum* and *Zizania caduciflora*) in natural wetlands were chosen. The study compared the environmental indicator of soil microbial community in different constructed wetlands of plant communities by redundancy analysis during five years. The results showed that: (1) soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and alkali-hydrolyzed nitrogen showed consistent change rules, which follow the sequence: *Phragmites australis*>*Acorus calamus*>*Zizania caduciflora*>*Iris tectorum*, but there was no significant difference in total phosphorus in different constructed wetlands; (2) constructed wetlands had great impact on soil microbial biomass, and the soil microbial biomass of carbon, nitrogen and phosphorus showed the consistent change rule, which follow the order: *Phragmites australis*>*Acorus calamus*>*Zizania caduciflora*>*Iris tectorum*; the differences of microbial biomass carbon and nitrogen of different constructed wetlands were significant ($p<0.05$), while the difference of of phosphorus microbial biomass was not significant ($p>0.05$); (3) species richness index (H), evenness index (E), and carbon source utilization richness index (S) decreased in the order: *Phragmites australis*>*Acorus calamus*>*Iris tectorum*>*Zizania caduciflora*, and dominance indexes (D_s) decreased in the order: *Phragmites australis*>*Acorus calamus*>*Zizania caduciflora*>*Iris tectorum*; the

收稿日期:2019-01-14

修回日期:2019-02-20

资助项目:广东省教育厅“农林类职业教育绿色技能系统开发与研究”(GDJG2015100)

第一作者:赖巧晖(1983—),女 广东兴宁人,硕士,讲师,研究方向:植被生态学。E-mail:Qiao_huilai@126.com

通信作者:张浩(1981—),男 广东湛江人,副教授,研究方向:环境工程。E-mail:Qiao_huilai@126.com

differences in carbon source utilization richness indexes (S) of different constructed wetlands were significant ($p < 0.05$), while differences in Ds of different constructed wetlands were not significant ($p > 0.05$); (4) correlation analysis indicated that the microbial species richness indexes of different constructed wetlands were significantly positively correlated with SOC and TN; The correlation coefficients of reed wetland and calamus wetland were higher than those of water shoot wetland and iris wetland, indicating that the microbial community diversities of constructed reed and calamus wetlands were higher than those of water shoot and iris wetlands; RDA analysis shows that soil environmental factors have obvious ecological gradients, and SOC and TN are the main environmental factors affecting the microbial community diversities of constructed wetlands.

Keywords: constructed wetland; soil microbial community; soil nutrient; environmental indicator

作为一种污水处理方式,人工湿地又称为芦苇床系统构建湿地,于 20 世纪 70 年代兴起,是一种按一定比例融合了砾石、土壤、炉渣等物质后,并将其放入特定植被的一种处理污水的生态系统^[1]。其作用原理在于,满足四大基本要素(水体、基质、水生植被和微生物)的基础上,通过化学、物理、生物等途径去除特定污染物^[2-3],已经被普遍运用于水环境富营养化和不同水体的水质净化中,取得了较好的经济效益和环境效益^[4]。其主要优点为投资少、运行费用低、能源消耗少、经济美观等。通常情况下,在人工湿地填充沙和砾石等材料较多,但随着基质填料研究的深入,矿石及工业副产品等性能较高的物质也逐渐被纳入基质填料范围中,而针对沸石、白云石等混合基质的研究也在不断进行中^[5-6]。除此之外,还开展了针对湿地植物的研究,发现灯心草、美人蕉、香蒲等植物都具备较强的净化污水的效果,都可以作为理想的湿地植物采用,而这些植物又具备较强的适应性和实用性,不仅生存较易,而且还具有相当程度的美感^[7]。综合以上研究,作为一种高效环保的污水处理技术和生态化处理手段,人工湿地具有广阔的应用前景与空间。国外学界针对人工湿地的研究,大多集中在废水及污水处理方面,而我国学界对该方面研究并不深入^[8-9]。尤其是运用于环境污染等领域,因此研究人工湿地在污水废水净化方面的作用和意义,对于人类的生存和发展具有重要作用。

土壤不仅是人类活动的载体,更是植物生长的载体,土壤微生物和活性直接影响作物的生长,进而对人类活动形成制约,土壤质量的重要标志就是肥力和活性,这也是近年来土壤研究的主要领域之一,其关乎植物生长的全过程,对生态环境起着不可忽视的制约作用^[10],是整个生态系统的重要组成部分,直接决定着生态系统生产力^[11]。此外,土壤微生物的影响因素是多种多样的,其中微生物降解作用是不可忽视的,微生物一方面对地表腐殖质等进行降解使之成为土壤养分,另一方面自身的新陈代谢活动能够提升土

壤活性,大大降低土壤板结等现象,有利于植被恢复和土壤稳定性保持^[12-13];微生物具有很强的环境敏感性,土壤变化能够及时作用到微生物活动中,说明微生物量具有周转快的特点^[14-15]。作为陆地生态最活跃的成分之一,微生物在促进土壤养分循环方面作用显著,同时决定着矿物分解效果,其降解作用关乎整个生态环境的正常循环^[16-17]。大量的研究数据发现,土壤养分与微生物群落的生长发育密切相关,同时微生物群落的分布也影响到土壤中氮、磷等相关营养成分,二者存在相互影响作用。因此,本文选择茭白(*Zizania caduciflora*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、菖蒲(*Acorus calamus*)和芦苇(*Phragmites australis*)4 种人工湿地,研究不同植物配置下人工湿地微生物群落特征对环境的指示作用,其研究成果可为人工湿地的设计与生活污水的治理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 人工湿地设计与流程

试验区选择华南农业大学的人工湿地系统,该系统将底部结构设置为集水区,并在上边放置尼龙网,其作用为防止填料下漏。将每个人工湿地划分为 4 个重复单元,总共 16 个人工湿地单元。湿地底部被划分为 16 个体积为长×宽×深=20 m×5.0 m×1.0 m 的人工湿地结构单元,再用 0.5 m 宽的土埂将每个单元隔开,每个单元所填充的基质大致可分为三层,底层使用粒径为 20—30 mm 的大粒径砾石,设置的厚度为 25 cm;中层使用粒径 15—25 mm 的当地中号炉渣,设置的厚度为 25 cm;上层使用粒径为 10—15 mm 的当地小号炉渣和泥沙,厚度也为 25 cm。在各湿地单元内,分别种植湿地植被鸢尾(*Iris tectorum*)、茭草(*Zizania caduciflora*)、眼子菜(*Potamogeton pectinatus*)和菖蒲(*Acorus calamus*),一般保持 3~7 棵/m²的种植密度。在每个湿地单元中,还要将直径为 10 mm 的 PVC 管呈对角线埋入,以确保循环水从人工湿地中流入 PVC 管,方便采集试验样品。

1.2 样品采集

2013 年 5 月,先将 4 种植被放置于微污染水中,驯化 1 个月后,开始净化试验。将鸢尾、茭草、眼子菜和菖蒲 4 种湿地植被进行株型和生物量趋同的选择后,栽种于用炉渣做基质的人工湿地上,添加自来水至基质饱和,再进行 1 个月的地下水培养,使其保持 2~3 cm 的薄水层,稳定 20 d,中间换水 3~5 次。7 月 20 日,经配水池向人工湿地缓慢注入生活污水,生活污水通过水管匀速流入,会通过布水管缓慢渗入,放水 12 h 后,停止注水,保持水力负荷控制在 $0.81 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。生活污水在人工湿地中停留大概 48~60 h,水经过处理后从底部 PVC 管排出,再经过 1 a 的生长以后,测定各项指标。

当人工湿地稳定 1 a 后,2014 年 5 月 20 日,在每个单元分别采集鸢尾、茭草、眼子菜和菖蒲人工湿地 5 株根区土壤(保留 1 kg 左右),土壤样品数量总计 90 个,将表层的枯落物层去除,将土壤混合均匀后放入实验室进行分析和测定,之后在经过自然风干(20 d)、去除碎片和部分根后、过 80 目筛等流程,测定土壤养分,另一份要在室温 4°C 条件下保存,用以测定微生物群落多样性和微生物量,2014—2018 年,选取 5 a 共计 450 个土壤样品,重复上述试验。

待人工湿地稳定 1 a 后,2014 年 5 月 20 日分别采集茭草、鸢尾、菖蒲和眼子菜人工湿地根区土壤,每个单元采集 5 株根区土壤(保留 1 kg 左右),共计 90 个土壤样品,除去表层的枯落物层,充分混匀后迅速带回实验室内分析测定,自然风干(20 d)去除碎片和部分根后过 80 目筛后测定土壤养分,另一份 4°C 保存测定土壤微生物群落多样性和微生物量,2014—2018 年重复上述试验,5 a 共计 450 个土壤样品。

1.2.1 土壤样品的测定 土壤的微生物量碳、氮、磷等成分测定将借助于氯仿熏蒸— K_2SO_4 提取法,具体参考学者吴金水等^[15]的测量步骤,碳、氮含量的测定分别借助于 TOC2500 碳分析仪、流动注射仪;磷的测量利用比色法;元素分析仪的使用能够测定全氮、全碳含量;速效磷、氮分别使用比色法、 $\text{NaOH}-\text{H}_3\text{BO}_3$ 法;钾的测定利用光度计法^[18]。

1.2.2 土壤微生物群落功能多样性 本研究采用 Shannon, McIntosh, Simpson 指数来衡量微生物群落特征;其对单一碳源的利用通过平均每孔颜色变化率 AWCD 来表示,该值较大的情况下说明微生物能够较大程度地利用碳含量,另一方面也说明微生物的丰度较明显,具体计算公式如下^[15]:

$$\text{AWCD} = \sum (C_i - R_i) / n$$

$$P_i = (C_i - R_i) / \sum (C_i - R_i)$$

其中,培养基孔吸光值用 C_i 表示,对照孔吸光值为 R_i ; P_i 为吸光的比值; n 代表的是基孔数。

$$H = - \sum P_i (\ln P_i)$$

$$\text{Ds} = 1 - \sum P_i$$

1.3 数据分析

Excel 2010.0 和 SPSS 21.0 进行数据统计和方差检验,所有数据为 5 a 的平均值,其中以平均值±标准误差表示 (Mean±SE),单因素方差分析 (One-way ANOVA),所有原始数据进行对数转换;变量的显著性经过的蒙特卡洛 (Monte Carlo) 检验 (499 次),CANOCO 4.5 软件进行排序分析。

2 结果与分析

2.1 不同配置人工湿地土壤养分特征

由表 1 可知,土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷和碱解氮呈一致的变化规律,均表现为芦苇>菖蒲>茭白>鸢尾。其中有机碳变化范围为 9.58~15.23 g/kg,均值为 12.53 g/kg,芦苇和菖蒲差异不显著 ($p>0.05$),二者显著高于鸢尾和茭白 ($p<0.05$);全氮变化范围 1.01~1.45 g/kg,均值为 1.26 g/kg,不同人工湿地差异均显著 ($p<0.05$);全磷变化范围 0.92~0.98 g/kg,均值为 0.97 g/kg,不同人工湿地差异均不显著 ($p>0.05$),全钾变化范围 16.58~23.06 g/kg,均值为 21.25 g/kg,茭白和鸢尾差异不显著 ($p>0.05$);速效磷和碱解氮变化范围分别为 25.17~32.69, 13.11~19.57 mg/kg,其中芦苇和菖蒲显著高于茭白和鸢尾 ($p<0.05$)。

2.2 不同配置人工湿地土壤微生物生物量

由表 2 可知,人工湿地对土壤微生物量有较大的影响,土壤微生物量碳、氮、磷呈一致的变化规律,均表现为芦苇>菖蒲>茭白>鸢尾。其中微生物量碳变化范围为 321.47~423.03 mg/kg,均值为 377.81 mg/kg,不同人工湿地微生物量碳差异均显著 ($p<0.05$);微生物量氮变化范围为 75.36~123.59 mg/kg,均值为 100.67 mg/kg,不同人工湿地微生物量氮差异均显著 ($p<0.05$);微生物量磷变化范围为 13.25~19.03 mg/kg,均值为 15.92 mg/kg,茭白和鸢尾差异不显著 ($p>0.05$),二者显著低于芦苇和菖蒲 ($p<0.05$);SMBC/SMBN 大致表现为鸢尾>菖蒲>茭白>芦苇,鸢尾显著高于其他植物 ($p<0.05$);SMBC/SMBP 大致表现为茭白>菖蒲>芦苇>鸢尾,其中芦苇和鸢尾差异不显著 ($p>0.05$);SMBN/SMBP 大致表现为茭白>芦苇>菖蒲>鸢尾,茭白显著高于其他植物 ($p<0.05$)。

表 1 不同配置人工湿地土壤养分含量

人工湿地	有机碳/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)
芦苇	15.23±3.02a	1.45±0.26a	0.98±0.06a	23.06±3.26a	32.69±3.59a	19.57±2.23a
鸢尾	9.58±2.19c	1.01±0.35d	0.92±0.05a	16.58±2.15c	25.17±3.24b	13.11±2.01b
茭白	11.26±2.44b	1.14±0.27c	0.93±0.07a	17.26±2.47c	26.58±2.01b	14.02±2.59b
菖蒲	14.06±2.01a	1.26±0.15b	0.97±0.09a	21.15±2.98b	30.25±2.78a	17.26±1.58a
平均值	12.53	1.22	0.95	19.51	28.67	15.99
<i>F</i>	203.56	189.74	53.12	157.36	189.24	183.02
<i>p</i>	<0.05	<0.05	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05

注:相同小写字母表示差异不显著($p<0.05$)。

表 2 不同配置人工湿地土壤微生物量

人工湿地	微生物量碳 SMBC/ (mg · kg ⁻¹)	微生物量氮 SMBN/ (mg · kg ⁻¹)	微生物量磷 SMBP/ (mg · kg ⁻¹)	SMBC/ SMBN	SMBC/ SMBP	SMBN/ SMBP
芦苇	423.03±23.65a	123.59±25.41a	19.03±3.02a	3.42±0.23c	22.23±2.16c	6.49±0.69b
鸢尾	321.47±29.58d	75.36±9.25d	14.77±2.54c	4.27±0.52a	21.77±1.59c	5.10±0.53c
茭白	365.47±34.01c	98.24±8.14c	13.25±1.57c	3.72±0.32b	27.58±2.04a	7.41±0.42a
菖蒲	401.26±32.48b	105.47±13.02b	16.63±3.02b	3.80±0.43b	24.13±1.87b	6.34±0.65b
平均值	377.81	100.67	15.92	3.80	23.93	6.34
<i>F</i>	198.36	185.72	82.46	103.57	114.58	129.72
<i>p</i>	<0.05	<0.05	>0.05	<0.05	<0.05	<0.05

2.3 不同配置人工湿地土壤微生物群落多样性

如图 1 所示,物种丰富度指数(H)、均匀度指数(E)、和碳源利用丰富度指数(S)均表现为芦苇>菖蒲>茭白>鸢尾,而优势度指数(D_s)则表现为鸢尾>茭白>菖蒲>芦苇。其中不同人工湿地碳源利用丰富度指

数(S)差异均显著($p<0.05$),不同人工湿地优势度指数(D_s)差异均不显著($p>0.05$);对于物种丰富度指数(H)和均匀度指数(E),芦苇和菖蒲差异不显著($p>0.05$),二者显著高于鸢尾和茭白($p<0.05$)。

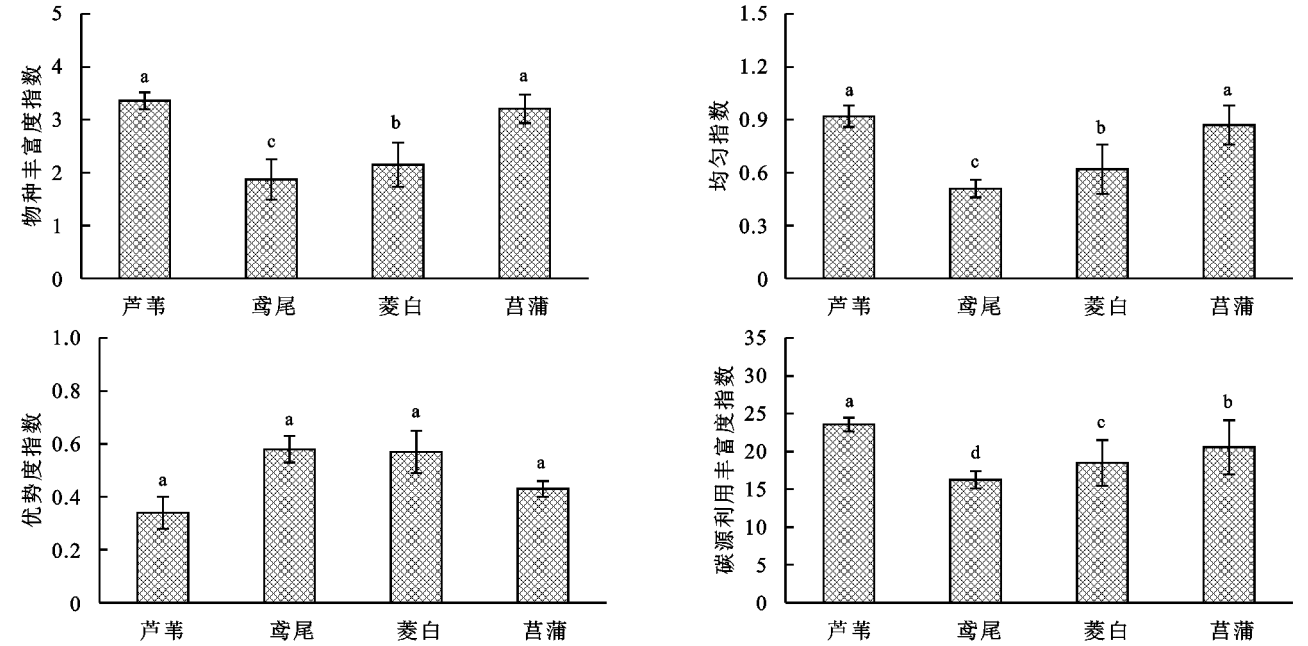


图 1 不同配置人工湿地土壤微生物群落多样性

2.4 不同配置人工湿地土壤养分与微生物多样性的相关性

对不同配置人工湿地土壤养分和微生物多样性

进行相关性分析可知(表 3),对于芦苇湿地,物种丰富度指数(H)与 SOC, TN, TK, AN, SMBC 和 SMBN 呈极显著的正相关($p<0.01$),与 TP 和 AP

呈显著的正相关($p<0.05$);均匀度指数(E)与 SOC,TN 呈极显著的正相关($p<0.01$),与 TK,AN,SMBC 和 SMBN 呈显著的正相关($p<0.05$);碳源利用丰富度指数(S)与SOC,TN,AP,SMBC 呈显著的正相关($p<0.05$)。对于鸢尾湿地,物种丰富度指数(H)与 SOC,TN,TK,AN,SMBC 呈极显著的正相关($p<0.01$),与 SMBN 呈显著的正相关($p<0.05$);均匀度指数(E)与SOC,TN 呈显著的正相关($p<0.05$);碳源利用丰富度指数(S)与 TK,SMBC 和 SMBN 呈显著的正相关($p<0.05$)。对于茭白湿地,物种丰富度指数(H)与 SOC,TN,SMBC 呈极显著的正相关($p<0.01$),与 TK,AN,

SMBN 呈显著的正相关($p<0.05$);均匀度指数(E)与 SOC,TN 呈显著的正相关($p<0.05$);碳源利用丰富度指数(S)与 TN,TK,AN,SMBC 呈显著的正相关($p<0.05$)。

对于菖蒲湿地,物种丰富度指数(H)与 SOC,TN,TK,AN,SMBC 和 SMBN 呈极显著的正相关($p<0.01$),与 TP 和 SMBP 呈显著的正相关($p<0.05$);均匀度指数(E)与 SOC,TN,SMBC 呈极显著的正相关($p<0.01$),与 TK 和 SMBN 呈显著的正相关($p<0.05$);碳源利用丰富度指数(S)与 SOC,TN,AP,AN,SMBC 和 SMBN 呈显著的正相关($p<0.05$)。

表 3 各土壤环境因子之间的相关关系($n=450$)

项目		SOC	TN	TP	TK	AP	AN	SMBC	SMBN	SMBP
芦苇	物种丰富度指数(H)	0.786 **	0.712 **	0.569 *	0.623 **	0.563 *	0.698 **	0.762 **	0.623 **	0.203
	均匀度指数(E)	0.723 **	0.621 **	0.103	0.512 *	0.203	0.523 *	0.536 *	0.516 *	0.165
	优势度指数(D_s)	0.321	0.204	0.058	0.032	0.147	0.214	0.301	0.180	0.098
	碳源利用丰富度指数(S)	0.503 *	0.501 *	0.147	0.245	0.512 *	0.275	0.528 *	0.258	0.147
鸢尾	物种丰富度指数(H)	0.721 **	0.621 **	0.065	0.635 **	0.259	0.659 **	0.623 **	0.587 *	0.206
	均匀度指数(E)	0.536 *	0.503 *	0.087	0.205	0.103	0.256	0.248	0.123	0.352
	优势度指数(D_s)	0.106	0.106	0.156	0.144	0.241	0.108	0.105	0.256	0.159
	碳源利用丰富度指数(S)	0.412	0.203	0.247	0.523 *	0.189	0.456	0.523 *	0.503 *	0.247
茭白	物种丰富度指数(H)	0.706 **	0.742 **	0.256	0.513 *	0.256	0.569 *	0.638 **	0.547 *	0.156
	均匀度指数(E)	0.516 *	0.514 *	0.231	0.156	0.247	0.206	0.421	0.102	0.258
	优势度指数(D_s)	0.302	0.156	0.247	0.245	0.206	0.377	0.205	0.326	0.036
	碳源利用丰富度指数(S)	0.105	0.567 *	0.159	0.509 *	0.305	0.501 *	0.511 *	0.248	0.126
菖蒲	物种丰富度指数(H)	0.756 **	0.756 **	0.536 *	0.698 **	0.247	0.688 **	0.779 **	0.669 **	0.598 *
	均匀度指数(E)	0.623 **	0.627 **	0.205	0.535 *	0.105	0.302	0.658 **	0.531 *	0.214
	优势度指数(D_s)	0.089	0.304	0.136	0.201	0.306	0.214	0.106	0.250	0.025
	碳源利用丰富度指数(S)	0.536 *	0.566 *	0.147	0.247	0.549 *	0.514 *	0.567 *	0.514 *	0.305

注: ** 相关性在 0.01 水平上显著(双尾); * 相关性在 0.05 水平上显著(双尾)。

2.5 不同配置人工湿地土壤微生物群落多样性排序分析

本研究通过 RDA 排序分析来对群落多样性及环境因子之间的关系开展相应分析,这种分析方法可以同时多个环境影响因子开展研究,毕竟影响微生物群落分布的环境因素存在多样性,通过这种分析能够对其与环境因子之间的关系开展多方面研究。本研究过程中的群落样方有限,因此将与前四轴无关的环境因子去除,之后再开展相应的分析研究。从表 4 可知,第一个排序轴的特征值根为 0.616,与环境因子在 0.01 的检验水平下达到显著,相关系数达到 0.946;第二排序轴的特征值根达到 0.126,物种与环境因子显著正相关,且相关系数达到了 0.568,前两个排序轴的累积解释度达到了 92.7%,这说明排序是准确的,分析方法是正确的,则排序效果是满意的。

微生物群落分布受到多方面环境因子的制约,二者之间存在复杂的相互影响关系,具有很强的相关性,本研究过程中通过冗余分析来探究二者之间复杂关系。环境因子是微生物活动的影响载体,不同环境因子的综合作用会对微生物产生明显不同的影响,冗余分析方法正是基于多个影响因子下的关系分析,这种分析方法建立在多因素作用的基础上,将微生物群落分布作为响应变量,而养分、微生物量等作为解释变量,通过该分析方法找寻影响较大的环境因子。通过 RDA 排序分析不难看出,第一、二排序轴的解释度分别达到了 56.3%,32.1%,并在 0.05 的检验水平下达到显著;通过试验分析得知,土壤养分能够显著正相关作用于微生物生长及其新陈代谢活动,微生物活动离不开必要的养分支撑,能够促进其生长发育等活动;从第一排序轴可以发现,有机碳及全氮显

著影响微生物活动,成为影响其群落分布的最主要环境因子之一。

表 4 典范对应排序轴特征值及解释比例

排序轴	1	2	3	4
特征根值	0.616	0.126	0.032	0.000
物种数据累积百分比	45.17	23.15	12.57	5.19
物种与环境排序轴的相关系数	0.946	0.568	0.126	0.015
物种与环境因子关系累积百分比	76.03	92.78	97.49	100.00

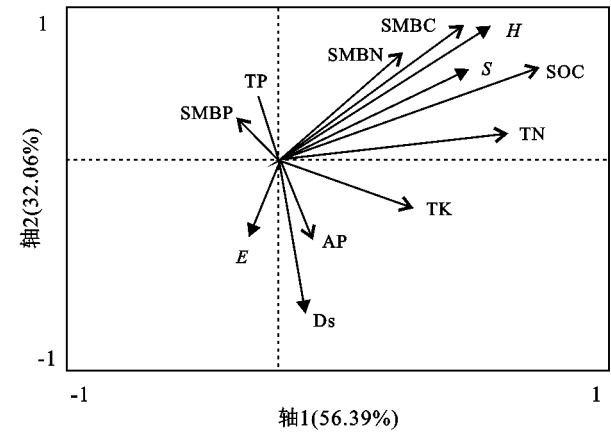


图 2 湿地植被与环境因子的 RDA 二维排序图

3 讨论与结论

在自然情况下,因为生长环境的不同,湿地植物会形成不同生活型的群落。在净化污水过程中,植物群落种间会相互影响和作用,产生积极或消极的影响。不同植物群落类群由于自身种类和生长状态方面存在的差异性,形成不同的土壤微生物群落。而土壤微生物驱动和维持了人工湿地中的能量交换与物质循环,对生态系统的稳定性具有一定的促进作用^[20]。本研究发现,在不同的空间配置前提下,4 种湿地植物群落土壤有机碳、全磷、全钾、全氮、碱解氮和速效磷的变化规律一致,表现为鸢尾<茭白<菖蒲<芦苇。这说明菖蒲和芦苇具有极强的净化水质的作用,因为菖蒲和芦苇的根系比较发达,群落构成比较复杂,能够有效促进微生物的生长发育。而在不同的湿地中,植物自身的生长能力、提供氧气的能力、对污染物的吸收转化能力等都存在较大的差异性。不论是同一物种,还是不同物种,在不同的湿地中,往往表现出不同的净化功能^[21-22]。所以,将湿地植物进行多种选择与搭配,不仅能够使植物之间产生优势互补的效果,还能保持对营养及有机物较好且更稳定的净化效果,从而保证湿地系统发挥稳定的生态功能。综上所述,与鸢尾和茭白群落相比,菖蒲和芦苇群落的生物多样性更高,净化效果更好,生态系统更加稳定,这说明科学合理的植物配置对环境的净化效果与系统生物多样性具有促进和提高作用^[23-24]。

土壤质量不仅能够直接用土壤肥力、活性等指标进行衡量,同时也能根据微生物量来衡量,微生物量碳、氮、磷是重要的肥力指标反映之一^[25],这些成分能够被植被作为养分加以吸收利用,利于土壤肥力改善。从另一个方面来说,微生物量也是土壤质量动态变化的反映指标之一;微生物活性及结构受到多种环境因子的制约,单纯依靠微生物量难以充分反映其活性、功能等特性,但其绝对量也是重要的反映指标之一,且不同微生物成分的比例也是重要的影响因素;本研究中芦苇和菖蒲微生物量含量更高,进而促进物质代谢活动。相关性分析表明不同湿地微生物物种丰富度指数(H)与 SOC, TN 密切相关,通过 RDA 分析得知,该地区微生物群落分布具有一定的多样性,主要的影响因子不仅包括 SOC, TN, 还包括 SMBC 和 SMBN, 这些环境因子能够反映微生物群落分布,也能够对该地区生态动态变化予以反映,但群落分布与影响因子之间的作用机理有待于进一步深入探讨。

参考文献:

[1] 王雨轩,魏巍,李萍萍,等.人工湿地微生物的研究进展[J].生物技术通报,2017,33(10):74-79.

[2] 熊家晴,李珊珊,葛媛,等.处理高污染河水垂直流人工湿地微生物群落特性[J].环境工程学报,2017,11(3):1959-1965.

[3] 易乃康,彭开铭,陆丽君,等.人工湿地植物对脱氮微生物活性的影响机制研究进展[J].水处理技术,2016,42(4):12-16.

[4] 吕纯剑,高红杰,宋永会,等.潮汐流-潜流组合人工湿地微生物群落多样性研究[J].环境科学学报,2018,38(6):2140-2149.

[5] 吴文卫,刘昂,谷照虎,等.采用 PCR-DGGE 技术研究处理农田退水组合人工湿地微生物群落特征[J].应用与环境生物学报,2016,22(6):978-985.

[6] 王林,李冰,朱健.高通量测序技术在人工湿地微生物多样性研究中的研究进展[J].中国农学通报,2016,32(5):10-15.

[7] 陈亮,刘锋,肖润林,等.人工湿地氮去除关键功能微生物生态学研究进展[J].生态学报,2017,37(18):6265-6274.

[8] 李振灵,丁彦礼,白少元,等.潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性[J].环境科学,2017,38(9):3713-3720.

[9] 房昀昊,彭剑峰,宋永会,等.高通量测序法表征潜流人工湿地中不同植物根际细菌群落特征[J].环境科学学报,2018,38(3):911-918.

[10] 王宁宁,赵阳国,孙文丽,等.溶解氧含量对人工湿地去除污染物效果的影响[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2018,48(6):24-30.

- change on soil organic carbon and nitrogen in density fractions and soil $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in semiarid grasslands [J]. *Plant Soil*, 2015, 390(1/2):419-430.
- [10] 马存平,李军保,董强,等.榆林沙区不同固沙林地土壤养分特征[J].*防护林科技*,2017(9):1-3,17.
- [11] 封建民,文琦,郭玲霞.风沙过渡区土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以榆林市为例[J].*水土保持研究*,2018,25(4):304-308.
- [12] 王义,刘美英,陈士超,等.神东矿区土壤肥力与盐分特征研究[J].*干旱区资源与环境*,2014,28(9):63-68.
- [13] 王大勇,刘涛,郭慕萍,等.豆科植物对不同深度土壤水分及养分含量的影响[J].*土壤通报*,2013,44(3):551-555.
- [14] Basche A D, Archontoulis S V, Kaspar T C, et al. Simulating long-term impacts of cover crops and climate change on crop production and environmental outcomes in the Midwestern United States[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2016, 218(2):95-106.
- [15] 尚斌.不同区域土壤有机质分布特征及其与烟叶致香物质关键指标的关系研究[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [16] 张立欣,段玉玺,王伟峰,等.毛乌素沙地不同植被类型的土壤颗粒分形与土壤碳氮变化特征[J].*东北林业大学学报*,2016,44(8):55-60.
- [17] Wang S Z, Zhao Z H, Xia B, et al. A fuzzy-based methodology for an aggregative environmental risk assessment of restored soil[J]. *Pedosphere*, 2014, 24(2):220-231.
- [18] 郭月峰,祁伟,姚云峰,等.不同林龄柠条锦鸡儿林土壤有机质分析[J].*农学学报*,2016,6(7):30-33.
- [19] 路嘉丽,沈光,王琼,等.落叶松、水曲柳、樟子松和农田土壤指标差异及其综合比较[J].*生态学报*,2017,37(10):3543-3552.
- [20] 毛波,董希斌,唐国华.诱导改造对大兴安岭低质山杨林土壤肥力的影响[J].*东北林业大学学报*,2015,43(8):50-53.
- [21] Wang Z, Yao X, Wang W. Variation of soil carbon pools in *Pinus sylvestris* plantations of different ages in north China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3):248-254.
- ~~~~~
- (上接第 94 页)
- [11] 刘佳,易乃康,熊永娇,等.人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响[J].*环境科学*,2016,37(9):3430-3437.
- [12] 唐美珍,李玉洁,张锦,等. *Pseudomonas flava* WD—3 对人工湿地中土著微生物量及酶活性的影响研究[J].*环境科学学报*,2016,36(4):1236-1241.
- [13] 袁敏,刘晓冰,唐美珍.生物炭固定菌强化人工湿地对低温污水中氮素去除的模拟研究[J].*生态与农村环境学报*,2018,34(5):463-468.
- [14] 王林,李冰,余家辉,等.不同湿地模型中根系微生物的多样性[J].*环境科学*,2017,38(8):3312-3318.
- [15] 周旭丹,孙晓刚,赵春莉,等.人工湿地植被根区土壤性质及其净化水质季节效应分析[J].*生态环境学报*,2015,24(6):1043-1049.
- [16] 张盛博,何小娟,吴海露,等.环境因子对人工湿地沉积物中反硝化微生物群落结构的影响[J].*水处理技术*,2017,43(4):11-14.
- [17] 林燕,张焕杰,刘曦,等.固定反硝化菌强化人工湿地处理低污染水研究[J].*农业环境科学学报*,2016,35(11):2154-2162.
- [18] 程宪伟,梁银秀,祝惠,等.人工湿地处理水体中抗生素的研究进展[J].*湿地科学*,2017,15(1):125-131.
- [19] 王苏艳,宋新山,赵志森,等.亚铁对水平潜流人工湿地反硝化作用的影响[J].*环境科学学报*,2016,36(2):557-563.
- [20] 常军军,吴苏青,梁康,等.复合垂直流人工湿地微生物特征对典型污水的响应差异[J].*环境科学研究*,2016,29(8):1200-1206.
- [21] 周桑扬,杨凯,吴晓芙,等.人工湿地植物去除废水中重金属的作用机制研究进展[J].*湿地科学*,2016,14(5):717-724.
- [22] 宋志文,王琳,徐爱玲,等.人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征[J].*环境科学*,2015,36(2):415-420.
- [23] 蒲艾平,刘晓玲,罗鸿兵,等.葡萄糖碳源对复合垂直流人工湿地甲烷排放的驱动影响[J].*应用与环境生物学报*,2017,23(4):719-727.
- [24] 张骁栋,李伟,潘旭,等.表流人工湿地氮素形态组成及去除效率研究[J].*生态环境学报*,2016,25(3):503-509.
- [25] 仇付国,徐艳秋,许俊挺,等.人工湿地系统除磷影响因素研究进展[J].*科技导报*,2017,35(9):23-29.