

表面流人工湿地对辽河水质长期净化效果

杨 波

(吉林农业科技学院 农学院, 吉林 吉林 132101)

摘 要:选择茭白(*Zizania caduciflora*)、鸢尾(*Iris tectorum*)、美人蕉(*Canna indica*)和芦苇(*Phragmites australis*), 连续 4 年(2015—2018)研究了不同植物配置下人工湿地对辽河水质净化作用。结果表明:2015—2018 年人工湿地不同植被对 BOD₅, COD_{Cr}, TN 和 TP 去除率随着年份的增加而增加;不同年份 BOD₅, COD_{Cr}, TN 和 TP 去除率均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p < 0.05$), 其中芦苇和茭白差异不显著($p > 0.05$), 美人蕉和鸢尾差异不显著($p > 0.05$)。人工湿地地上生物量、地下生物量、N 累积量和 P 累积量随着年份的增加而增加;不同年份芦苇和茭白地上生物量均显著高于美人蕉和鸢尾($p < 0.05$), 其中芦苇和茭白的地上生物量差异不显著($p > 0.05$), 美人蕉和鸢尾的地上生物量差异不显著($p > 0.05$)。人工湿地土壤有机碳、全氮、全钾、速效磷、碱解氮含量呈一致的变化规律, 随着年份的增加而增加;不同年份土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷、碱解氮含量均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p < 0.05$), 其中芦苇和茭白差异不显著($p > 0.05$), 美人蕉和鸢尾差异不显著($p > 0.05$);不同年份湿地土壤全磷含量差异不显著($p > 0.05$)。人工湿地土壤微生物量碳、氮、磷呈一致的变化规律, 随着年份的增加而增加;不同年份湿地土壤微生物量碳、氮、磷含量均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p < 0.05$), 其中芦苇和茭白差异不显著($p > 0.05$), 美人蕉和鸢尾差异不显著($p > 0.05$);不同年份湿地土壤微生物量磷含量差异不显著($p > 0.05$)。地下生物量、N 累积量、P 累积量、土壤全氮、全磷与 TN 和 TP 去除率呈显著正相关($p < 0.05$);土壤速效磷、碱解氮、微生物量碳、微生物量氮与 BOD₅ 和 COD_{Cr} 去除率呈显著正相关($p < 0.05$)。

关键词:人工湿地; 辽河; 净化水质

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0373-07

Long-Term Purification Effect of Surface Flow Constructed Wetland on Water Quality of Liaohe River

YANG Bo

(School of Agronomy, Jilin Agricultural Science and Technology College, Jilin, Jilin 132011, China)

Abstract: Plants are important components of constructed wetland ecosystem. *Zizania caduciflora*, *Iris tectorum*, *Canna indica* and *Phragmites australis* were selected to study the purification effect of constructed wetlands on water quality of Liaohe River under different plant configurations for four consecutive years (2015—2018). The removal rates of BOD₅, COD_{Cr}, TN and TP by different types of vegetation in constructed wetlands from 2015 to 2018 had increased over the years. The removal rates of BOD₅, COD_{Cr}, TN and TP were significantly higher than those of *Canna indica* and *Iris tectorum* ($p < 0.05$) in different years, but there was no significant difference between the removal rates of *Phragmites australis* and *Zizania aquatica* ($p > 0.05$), while there was no significant difference between removal rates of *Canna indica* and *Iris tectorum* ($p > 0.05$). The aboveground biomass, underground biomass, N accumulation and P accumulation of constructed wetland had increased over the years. The aboveground biomass of *Phragmites australis* was significantly higher than that of *Canna indica* and *Iris tectorum* ($p < 0.05$) in different years, and there was no significant difference between the biomass of *Phragmites australis* and *Zizania aquatica* ($p > 0.05$), while there was no significant difference between the biomass of *Canna indica* and *Iris tectorum* ($p > 0.05$). The contents of soil organic carbon, total nitrogen, total potassium, available phosphorus, alkali-hydrolyzed

收稿日期:2020-02-19

修回日期:2020-03-12

资助项目:吉林农业科技学院博士资助项目(20190639);吉林省教育厅科学技术项目(JJKH20200388KJ)

第一作者:杨波(1979—),河北保定人,男,副教授,博士,主要从事生态系统理论与修复研究。E-mail:yangboo7904@126.com

nitrogen of constructed wetland showed consistent change patterns, and had increased over the years. The contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and alkaloid nitrogen were significantly higher than those in *Canna indica* and *Iris tectorum* ($p < 0.05$) in different years, but there was no significant difference between *Phragmites australis* and *Zizania aquatica* ($p > 0.05$), and no significant difference between the contents of *Canna indica* and *Iris tectorum* ($p > 0.05$). There was no significant difference in soil total phosphorus contents in different years ($p > 0.05$). The soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus of the constructed wetlands changed in a consistent manner and had increased over the years. Soil microbial biomass of carbon, nitrogen and phosphorus of constructed wetlands *Phragmites australis* and *Zizania aquatica* were significantly higher than those of the constructed wetlands with *Canna indica* and *Iris tectorum* ($p < 0.05$), and there was no significant difference between soil microbial biomass under the constructed wetland with *Phragmites australis* and *Zizania aquatica* ($p > 0.05$), while there was no significant difference between *Canna indica* and *Iris tectorum* ($p > 0.05$). There was no significant difference in soil microbial biomass phosphorus content in different years ($p > 0.05$). Underground biomass, N accumulation, P accumulation, soil total nitrogen, total phosphorus were significantly positively correlated with TN and TP removal rates ($p < 0.05$). Soil available phosphorus, alkali-hydrolyzed nitrogen, microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen were significantly positively correlated with BOD₅ and COD_{Cr} removal rates ($p < 0.05$).

Keywords: constructed wetlands; Liaohe; purifying water quality

立足于整个全球生态环境,大气、陆地、海洋成为其尤为关键的生态系统构成,此外还包括土壤、森林及山地高原等多种生态子系统^[1-3],整体而言,具有明显的生态特点,其影响要素不仅具有多样性^[4-5],还体现着明显的复杂性。介于陆地和水域之间还分布着特殊的局地生态构成,那就是紧密连接陆地和水域的湿地。作为重要的水域生态构成部分,湿地不仅能够有效地调节局地气候,在涵养水源方面发挥着关键效应,同时能够促进生物多样性分布,具有尤为关键的生态意义^[6-7]。为了有效借鉴利用湿地的生态功能,在污水处理过程中常常借助于人工湿地这一生态方式,这是 20 世纪 70 年代发展起来并逐渐广泛推广的污水处理新途径,该污水处理系统不仅包括水体及湿地植被,还包括基质及微生物,这四部分构成了其基本生态功能,经过一系列的生化处理方式来有效去除水体污染物,对于降低水体营养化及污染物质效果突出,不仅呈现突出的环保效益^[8-9],而且去污效果较为突出,能够针对不同的污染水体开展不同的湿地搭建,从而针对性地开展湿地去污处理,进而取得良好效果。湿地在去污方面不仅借助于湿地的植被的过滤及吸附作用,其中基质对于污染物的沉淀吸附效应也较为突出,此外,微生物的分解效应也较为突出,不同类型的湿地构建对于特定的污染物去除具有一定的针对性,其优势各异,结合其结构的差异,不仅能够分为水平流、垂直流,还包括沟渠型等^[10-11]。由于湿地具有突出的生态效益和经济效益,因此国内外开展了大量的相关研究,且运用日益广泛;作为常用的基

质填充物,煤渣及砾石运用较为广泛,在研究技术不断进步的情况下,矿石副产品甚至于工业副产品逐步运用在基质填充方面,常见的有沸石、白云石等,混合基质能够产生更高效的去污效能;此外,关于湿地植被的选择等方面研究也越来越成熟,经过大量实证研究得知,无论是香蒲,还是美人蕉等,均能够在水体去污过程中发挥尤为突出的效果,且其生长适应性也得到了很好的体现,不仅呈现出较强的美感,同时体现更为重要的经济效益。

在城镇化发展的过程中,越来越多的人口进入城市,在城市承载能力有限的情况下,越来越多的生活垃圾及工业废水随之产生^[12-13],加之污染物处理水平有限,大量的污染物进入大自然,近些年来农村地区的污染现象也较为突出,尤其是部分地区水污染问题相当严重,不仅河流污染现象严重,且地下水的污染问题也较为突出,为污染治理带来了巨大难度。据权威统计数据显示,从废水排放量的角度来看,400 多亿 t 的排放量为污水治理造成了巨大压力^[8],且生活污水呈现明显的上升态势,大量污水以及未处理废水进入河流湖泊,无论是河流还是地下水,均受到了严重的影响,这也正是水资源治理的迫切需求。为了有效利用湿地去污,大量的表面流湿地投入到污水治理过程中,这种类型的湿地具有较低建设及运行成本,但是其需要占用较大的空间^[14-15],加之容易受季节变化制约,其净化效果并不稳定,因此主要运用在农业排水处理方面。为了提升污水处理效率及综合效益,在此基础上的多级串联逐渐投入到湿地构建过程中,

不仅能够有效降低水体富营养化,而且除污效果较佳^[16-17]。对于人工湿地而言,其去污效能的发挥不仅取决于基质及微生物方面,还取决于湿地植被的选择,其整体构造最终影响着其水体净化效果,因此在湿地构建过程中不仅注重基本构造,还要充分考虑整体的去污效果。基于此,本研究基于不同湿地植被错配的角度开展人工湿地去污研究,并将茭白等作为湿地植被研究对象,通过对比分析探究如何优化湿地去污,为污水治理提供有益参考和借鉴。

1 材料与方法

1.1 人工湿地设计与流程

本研究开始于 2014 年 5 月,具体试验地点为吉林省农科院湿地研究区(125.31°E,43.86°N),本研究过程中采用的湿地类型是表面流,将尼龙网覆盖其底部并作为集水区;试验中共构建湿地单元 4 个,要求其长、宽、高分别为 20 m,5 m,1 m,为了尽可能地避免湿地单元间的交互影响,本研究借助于土壤进行分割处理,要求其宽度达到 0.5 m;在基质填充物选择方面,本研究采取的是混合基质,对于底部排水层而言,使用大粒径砾石进行填充,厚度及粒径分别为 25 cm,30 mm;中层基质为中号炉渣,厚度及粒径分别为 25 cm,25 mm;上层基质小号炉渣,其厚度及粒径分别达到 25 cm,15 mm,最后将泥沙铺放其上,从而完成了基质的构建处理。之后进行实地植被的选择及种植,在试验过程中不仅选择了茭白、鸢尾,还将美人蕉、芦苇作为湿地植被研究对象,分别种植于湿地各单元,要求每平米种植密度为 3~7 棵,在其底部集水区用尼龙网覆盖,这样能够最大限度避免基质明显下渗,从而对于集水区运行提供保障;为了使各单元水循环有效地运行,在对角线方向埋入 PVC 管,这样也能够起到便于水样采集的目的。

首先对茭白等湿地植被开展为期一个月的驯化处理,采取的是微污染水的驯化,待完成该驯化处理后方可进行污水去除效应分析。首先选取长势基本一致的湿地植被,分别种植于沙质基质,并加入自来水直至其达到饱和,在培养期借助于地下水进行长达 15 d 的培养处理,且使其上保持薄水层,要求厚度约 2 cm,在这期间进行换水处理的次数不低于三次。接下来对湿地进行污水注入处理,要求注入速度缓慢,水深达到 80 cm,具体时间为 2014 年 7 月,在水管的作用下污水均匀流入,并逐渐下渗,要求注水时间达到 12 h,水力负荷在 $0.75 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 的范围内,经过处理的水最终经 PVC 管排出,通过不同时期取样开展水质分析,具体如下^[13]:

各指标的去除率 = (进水口值 - 出水口值) / 出水口值 $\times 100\%$ 。

1.2 测定方法

水样采集在 2015 年 5 月,对于人工湿地而言,其运行时间恰好满一年,为了增强试验效果的准确性,本研究进行连续四年的实地采样分析。首先对每平方方的湿地植被长势进行统计,尤其是数量及高度等方面,然后收割,并将植株分为地上、地下两部分,待其烘干后称重,进行生物量测定;接下来分别进行地上、地下样品的粉碎处理,并使用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 进行消煮处理,对于其 TN,TP 含量的测量分别采取光度法、钼钼蓝法进行^[12]。

对于水质的测定不仅包括 BOD_5 , COD_{Cr} ,还包括 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN 及 TP,对于前者含量的测定主要借助于稀释接种法、氧化法,对于后者的测定主要借助于光度法进行,相关公式^[11]:

氮、磷积累量(PA) = 植被氮、磷含量(PC) \times 植被生物量(PB)。

地上、地下生物量比(A/U) = 地上部生物量/地下部生物量。

采用 Excel 2010 和 SPSS 21.0 进行差异性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 表面流人工湿地对水质净化能力

由表 1 可知,2015—2018 年人工湿地不同植被对 BOD_5 去除率变化范围在 38.11%~52.82%,随着年份的增加而增加;不同年份 BOD_5 去除率均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p < 0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p > 0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p > 0.05$)。人工湿地不同植被对 COD_{Cr} 去除率变化范围在 42.02%~58.69%,随着年份的增加而增加;不同年份 COD_{Cr} 去除率均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p < 0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p > 0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p > 0.05$)。TN 去除率变化范围在 43.11%~57.91%,随着年份的增加而增加;不同年份 TN 去除率均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p < 0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p > 0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p > 0.05$)。TP 去除率变化范围在 32.13%~46.98%,随着年份的增加而增加;不同年份 TP 去除率均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p < 0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p > 0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p > 0.05$)。

表 1 表面流人工湿地对水质净化能力

年份	类别	BOD ₅ 去除率/%	COD _{Cr} 去除率/%	TN去除率/%	TP去除率/%
2015	茭白	47.67±4.32a	51.12±6.15a	51.14±3.12a	42.56±2.11a
	芦苇	48.98±3.91a	52.87±4.56a	52.44±4.45a	44.17±2.34a
	美人蕉	39.12±2.45b	43.09±3.09b	45.09±5.09b	33.13±3.71b
	鸢尾	38.11±2.87b	42.02±3.42b	43.12±5.21b	32.13±3.45b
2016	茭白	48.12±4.23a	53.56±3.34a	52.35±3.95a	43.61±1.63a
	芦苇	50.53±5.32a	54.36±4.56a	52.23±5.13a	44.89±2.91a
	美人蕉	40.98±4.17b	44.51±5.31b	45.23±4.36b	35.78±3.89b
	鸢尾	39.21±4.56b	43.32±5.30b	43.11±4.31b	34.21±3.72b
2017	茭白	49.34±2.21a	54.59±3.34a	53.43±5.74a	43.12±3.61a
	芦苇	51.78±1.84a	55.65±5.91a	54.91±3.65a	45.93±4.26a
	美人蕉	43.13±2.09b	45.66±4.09b	46.67±4.11b	33.85±5.15b
	鸢尾	42.43±2.96b	44.87±4.44b	45.12±4.78b	32.32±5.06b
2018	茭白	51.41±4.41a	56.61±2.83a	55.48±6.19a	44.91±2.53a
	芦苇	52.82±5.34a	58.69±4.76a	57.91±5.23a	46.98±1.56a
	美人蕉	44.20±4.17b	47.71±5.19b	51.71±4.18b	36.97±2.29b
	鸢尾	43.45±4.20b	46.43±5.25b	50.29±4.39b	35.35±2.19b

注：相同小写字母表示差异不显著($p<0.05$)，下同。

2.2 表面流人工湿地氮、磷积累量

由表 2 可知,2015—2018 年人工湿地地上生物量变化范围在 54.13~103.09 g/m²,随着年份的增加而增加;不同年份地上生物量均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p<0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p>0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p>0.05$)。地下生物量变化范围在 119.13~171.15 g/m²,随着年份的增加而增加;不同年份地下生物量均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p<0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p>0.05$),美人蕉和鸢

尾差异不显著($p>0.05$)。

N 积累量变化范围在 37.12~72.09 g/m²,随着年份的增加而增加;不同年份 N 积累量均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p<0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p>0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p>0.05$)。P 积累量变化范围在 139.09~169.12 g/m²,随着年份的增加而增加;不同年份 P 积累量均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p<0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p>0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p>0.05$)。

表 2 表面流人工湿地氮、磷积累量

		g/m ²			
年份	类别	地上生物量	地下生物量	N 积累量	P 积累量
2015	茭白	81.11±3.14a	132.56±2.17a	55.67±4.09a	151.78±6.76a
	芦苇	82.45±4.56a	134.11±2.67a	58.92±3.16a	152.09±4.82a
	美人蕉	55.02±5.14b	121.24±3.13b	39.56±2.67b	142.12±3.65b
	鸢尾	54.13±5.89b	119.13±3.77b	37.12±2.87b	139.09±3.40b
2016	茭白	88.35±3.17a	145.63±1.65a	59.54±4.13a	152.44±3.32a
	芦苇	89.82±5.12a	156.82±2.24a	61.51±5.34a	159.77±4.97a
	美人蕉	56.17±4.67b	131.78±3.29b	43.09±4.19b	144.18±5.78b
	鸢尾	51.23±4.33b	124.24±3.76b	42.98±4.76b	143.51±5.35b
2017	茭白	89.56±5.56a	166.62±3.46a	64.33±2.98a	157.43±3.14a
	芦苇	92.13±3.10a	167.96±4.23a	67.45±1.81a	163.33±5.98a
	美人蕉	61.87±4.34b	145.15±5.14b	45.13±2.34b	149.15±4.11b
	鸢尾	60.67±4.89b	141.85±5.24b	41.79±2.21b	146.66±4.09b
2018	茭白	99.34±6.79a	168.89±2.67a	69.26±4.35a	163.09±2.83a
	芦苇	103.09±5.13a	171.15±1.13a	72.09±5.67a	169.12±4.67a
	美人蕉	71.15±4.26b	151.08±2.09b	51.14±4.18b	155.33±5.34b
	鸢尾	70.71±4.39b	143.97±2.12b	49.20±4.20b	154.71±5.11b

2.3 表面流人工湿地土壤养分特征

由表 3 可知,2015—2018 年人工湿地土壤有机碳、全氮、全钾、速效磷、碱解氮含量呈一致的变化规律,随着年份的增加而增加;不同年份土壤有机碳、全氮、全

磷、全钾、速效磷、碱解氮含量均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p<0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p>0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p>0.05$);不同年份土壤全磷含量差异不显著($p>0.05$)。

表 3 表面流人工湿地土壤有机碳和养分特征

年份	类别	有机碳(SOC)/ (g·kg ⁻¹)	全氮(TN)/ (g·kg ⁻¹)	全磷(TP)/ (g·kg ⁻¹)	全钾(TK)/ (g·kg ⁻¹)	速效磷(AP)/ (mg·kg ⁻¹)	碱解氮(AN)/ (mg·kg ⁻¹)
2015	茭白	12.11±1.44a	2.01±0.21a	1.01±0.11a	23.61±2.25a	52.62±5.71a	23.66±2.09a
	芦苇	13.45±2.47a	2.21±0.55a	1.11±0.13a	24.19±3.91a	54.23±4.67a	24.12±3.95a
	美人蕉	9.64±2.71b	1.19±0.63b	0.87±0.08a	19.35±4.43b	36.34±4.25b	18.10±4.70b
	鸢尾	9.18±2.23b	1.07±0.67b	0.85±0.06a	16.10±4.33b	34.89±4.56b	16.34±4.43b
2016	茭白	13.19±1.45a	2.15±0.74a	1.09±0.15a	27.98±2.37a	55.43±4.23a	25.98±2.12a
	芦苇	14.52±1.71a	2.29±0.26a	1.15±0.11a	26.11±3.43a	57.51±5.24a	26.15±3.44a
	美人蕉	10.23±2.42b	1.23±0.44b	0.89±0.07a	17.25±2.49b	39.25±4.11b	19.13±2.98b
	鸢尾	9.98±2.56b	1.21±0.81b	0.86±0.05a	16.13±2.98b	37.56±4.18b	17.27±2.67b
2017	茭白	14.24±2.84a	2.24±0.35a	1.11±0.11a	26.45±2.82a	56.44±3.17a	26.45±2.83a
	芦苇	15.62±2.13a	2.32±0.81a	1.21±0.09a	27.15±4.36a	57.12±4.23a	27.12±4.36a
	美人蕉	11.09±1.45b	1.34±0.34b	0.97±0.06a	18.19±3.46b	42.35±6.39b	21.26±3.56b
	鸢尾	10.73±1.56b	1.31±0.61b	0.91±0.07a	16.26±3.75b	39.48±6.10b	19.89±3.75b
2018	茭白	15.54±3.31a	2.35±0.26a	1.13±0.15a	26.67±3.69a	58.98±4.96a	27.67±3.64a
	芦苇	16.82±2.43a	2.61±0.14a	1.24±0.11a	28.78±2.18a	61.14±3.67a	30.71±2.18a
	美人蕉	12.67±1.34b	1.56±0.28b	1.01±0.09a	21.42±2.41b	43.14±5.65b	22.53±2.67b
	鸢尾	11.84±1.98b	1.51±0.31b	0.90±0.08a	19.53±2.55b	41.10±5.11b	21.33±2.55b

2.4 表面流人工湿地土壤微生物生物量

由表 4 可知,2015—2018 年人工湿地土壤微生物量碳、氮、磷呈一致的变化规律,随着年份的增加而增加;不同年份土壤微生物量碳、氮、磷含量均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p<0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p>0.05$),美人蕉和鸢尾差异

不显著($p>0.05$);不同年份土壤微生物量磷含量差异不显著($p>0.05$)。SMBN/SMBP 随着年份的增加而增加不同年份 SMBN/SMBP 均表现芦苇和茭白显著高于美人蕉和鸢尾($p<0.05$),其中芦苇和茭白差异不显著($p>0.05$),美人蕉和鸢尾差异不显著($p>0.05$),SMBC/SMBN 呈相反的变化趋势。

表 4 表面流人工湿地土壤微生物生物量

年份	类别	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
2015	茭白	409.13±32.65a	106.16±13.14a	18.45±3.45a	3.85±0.56b	24.87±3.23a	6.45±0.67a
	芦苇	421.76±23.61a	121.34±25.33a	19.01±3.33a	3.48±0.67b	22.19±3.67b	6.38±0.73a
	美人蕉	378.17±34.01b	88.24±8.23b	15.25±1.90b	4.29±0.24a	24.80±4.12a	5.79±0.54b
	鸢尾	356.47±29.34b	78.11±9.25b	14.56±2.21b	4.56±0.60a	24.48±3.11a	5.36±0.47b
2016	茭白	411.56±32.48a	111.47±13.02a	19.11±3.15a	3.69±0.52b	24.05±2.89a	6.51±0.23a
	芦苇	434.03±23.61a	129.59±25.42a	20.03±3.04a	3.35±0.21b	21.67±3.09b	6.47±0.43a
	美人蕉	385.65±34.01b	91.45±8.14b	15.45±1.53b	4.22±0.19a	24.96±1.67a	5.92±0.55b
	鸢尾	362.47±29.54b	81.32±9.21b	14.77±2.52b	4.46±0.33a	24.54±1.87a	5.51±0.51b
2017	茭白	424.21±32.42a	118.47±13.13a	20.61±3.15a	3.58±0.68a	22.79±2.33b	6.37±0.47a
	芦苇	445.03±23.64a	133.55±25.43a	21.03±3.33a	3.33±0.43a	21.16±2.67b	6.35±0.38a
	美人蕉	388.24±34.01b	98.21±8.14b	16.56±1.28b	3.95±0.50a	23.44±2.89a	5.93±0.41b
	鸢尾	369.47±29.51b	87.37±9.21b	15.70±2.52b	4.23±0.52a	23.53±2.09a	5.56±0.48b
2018	茭白	431.21±32.43a	121.41±13.02a	21.63±3.32a	3.55±0.47a	21.97±1.45b	6.18±0.32a
	芦苇	451.56±23.61a	143.59±25.47a	22.01±3.87a	3.14±0.33a	21.49±3.16b	6.83±0.25a
	美人蕉	393.47±34.23b	105.12±8.17b	17.25±1.32b	3.74±0.27a	22.81±2.99a	6.09±0.49b
	鸢尾	376.34±29.51b	92.31±9.14b	16.34±2.43b	4.08±0.98a	23.03±1.98a	5.65±0.61b

2.5 表面流人工湿地去除率与土壤养分相关性

人工湿地去除率与土壤养分存在一定的关系,由表 5 可知,人工湿地地下生物量、N 累积量、P 累积量、土壤全氮、全磷与 TN 和 TP 去除率呈显著正相关($p<0.05$);土壤速效磷、碱解氮、微生物量碳、微生物量氮与 BOD₅ 和 COD_{Cr} 去除率呈显著正相关($p<0.05$)。

表 5 表面流人工湿地去除率与土壤养分相关性

项目	TN 去除率	TP 去除率	BOD ₅ 去除率	COD _{Cr} 去除率
地上生物量	0.312	0.145	0.098	0.212
地下生物量	0.911**	0.834**	0.045	0.057
N 累积量	0.859**	0.896**	0.113	0.237
P 累积量	0.756**	0.823**	0.278	0.164
有机碳 SOC	0.807**	0.717**	0.789**	0.804**
全氮 TN	0.567*	0.623*	0.215	0.432
全磷 TP	0.677*	0.657*	0.034	0.216
全钾 TK	0.334	0.156	0.034	0.209
速效磷 AP	0.213	0.023	0.796**	0.798**
碱解氮 AN	0.324	0.345	0.823**	0.709**
微生物量碳 SMBC	0.141	0.423	0.841**	0.745**
微生物量氮 SMBN	0.194	0.334	0.796**	0.559*
微生物量磷 SMPB	0.045	0.158	0.321	0.124

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

2.6 表面流人工湿地去除率排序分析

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。从表 6 可知,第一个排序轴的特征值根为 0.623,与环境因子在 0.01 的检验水平下达到显著,相关系数达到 0.951;第二排序轴的特征值根达到 0.116,物种与环境因子显著正相关,前两个排序轴的累积解释度达到了 90.34%。由此可知,土壤养分能够很好解释人工湿地去除率,其中地下生物量、N 累积量、P 累积量、土壤全氮、全磷与 TN 和 TP 去除率呈显著正相关($p<0.05$);土壤速效磷、碱解氮、微生物量碳、微生物量氮与 BOD₅ 和 COD_{Cr} 去除率呈显著正相关($p<0.05$),这与相关性结果相一致。

表 6 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	0.623	0.116	0.056	0.000
物种数据累积百分比	46.13	24.56	11.22	4.14
物种与环境排序轴的相关系数	0.951	0.523	0.145	0.011
物种与环境因子关系累积百分比	78.14	90.34	96.13	100.00

3 讨论与结论

通过连续 4 a 的连续观测分析可知,无论是 BOD₅、COD_{Cr},还是 TN 和 TP,其去除率均受到了时

间的制约,且具有较为接近的发展态势^[18-19],均在时间不断增加的情况下,表现出明显的上升态势,且去除效果较好的是芦苇和茭白,其污染物去除率明显高于其他两种植被,且其差异达到了显著水平;对于芦苇和茭白,去污效果虽然存在一定的差异,但是差异不显著($p>0.05$),对于美人蕉和鸢尾来说亦是如此^[20-21]。对于人工湿地而言,对 P 的去除效应一方面利用湿地植被的吸附效应,另一方面借助于基质的截留及沉淀吸附效果,加之微生物新陈代谢对于该物质的吸收利用,最终形成了较为明显的去除效果。对于本研究湿地而言,其 pH 为中性,以免制约植被及微生物生长,主要的基质为石灰石和高炉渣,其较高含量的 Ca、Fe 在促进微生物活动方面起着重要作用,促进微生物对于水体养分物质的吸收利用;此外,对于湿地基质而言,其具有较强的吸附性,对于污染物去除具有较好效果。通过对人工湿地的分析得知,其 N 元素具有较为复杂的循环,对于 N 的去除,一方面在硝化、反硝化的作用机理下得以实现^[20-21],此外好氧微生物在此过程中也能够通过降解作用发挥较好的去除效应,从而形成对 TN 形成良好的去除效果^[22-23]。

人工湿地的净化能力不仅取决于基质及微生物方面,还取决于植被的选择,其整体构造最终影响着其水体净化效果;对于人工湿地污水处理系统而言,其不仅包括水体及湿地植被,还包括基质及微生物^[22-23],这四部分构成了其基本生态功能,经过一系列的生化处理方式来有效去除水体污染物,对于降低水体营养化及污染物质效果突出,不仅呈现突出的环保效益^[8],而且去污效果较为突出,能够针对不同的污染水体开展不同的湿地搭建,从而针对性地开展湿地去污处理,进而取得良好效果^[24-25]。整体而言,在湿地基质及植被等综合作用下,加之微生物的参与,其最终形成了较良好的去污效果,但是随着时间的推移,对于基质而言,其对污染物的吸附过滤效应会逐渐减弱,最终当其达到饱和状态后则无法继续发挥作用,其重复利用难度较大;但是对于湿地植被而言,其截留过滤效应较为突出,这是其直接的去污效应,加之微生物的作用,能够形成较好的去污效果,主要原因在于植被一方面为微生物提供一定的养分物质,促进其活性,另一方面增加了湿地渗透能力,最终促进湿地的去污使用效果及使用时间,因此,湿地植被选择尤为关键,尤其是其对不同的污染物具有不同的去除效果,在湿地构建过程中需要加以错配,并选择有针对性的基质填充物。对于湿地植被而言,其地上、

地下的 N、P 含量具有较大的差异,其前者明显较高,主要原因在于其该物质在植株不同器官的分配^[17-18]。无论是地上、地下生物量,还是 N 和 P 累积量,其含量变化均受到了时间的制约,且具有较为接近的发展态势,均在时间不断增加的情况下,表现出明显的上升态势;对于地上生物量而言,较高的是芦苇和茭白,且明显高于其他两种植被,于芦苇和茭白来讲,地上生物量虽然存在着一定差异,但是差异并不显著^[23-24],对于美人蕉和鸢尾来说亦是如此。对于 N、P 积累量的去除可以借助于收割的方式进行,且具有良好的净化效果,尤其是芦苇和茭白,其发达的根系对于促进微生物活动起着尤为突出的效应,进而促进湿地对污染物的去除效果,在湿地搭建过程中需要注意不同植被的错配,从而发挥优势互补的作用,以提升净化水质的效果。此外,植被及基质的合理错配也是湿地构建过程中需要进一步探索的方向。

参考文献:

[1] 王守中,张统,张琪,等.新型装配式填料人工湿地系统净化生活污水的效能[J].中国给水排水,2019,35(19):24-27.

[2] 刘馨,井雨,王修贵,等.基于湿地和生态沟处理的稻田排水水质模拟[J].灌溉排水学报,2018,37(2):101-107.

[3] 刘寿涛,何钟响,许蒙,等.植物塘+人工湿地系统对灌溉水净化及稻米镉的阻控效果[J].农业环境科学学报,2019,38(5):14-18.

[4] 吴东丽,董志,郭逍宇,等.典型再生水湿地净化系统芦苇根际细菌多样性变化分析[J].上海环境科学,2019,38(3):101-107.

[5] 童伟军,郑文萍,马琳,等.不同生物促生剂添加量对垂直流人工湿地水质净化效果的影响[J].水生生物学报,2019,43(2):431-438.

[6] 朱伊梦,姜翠玲,朱立琴,等.表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律[J].环境科学,2019,40(6):32-35.

[7] 郝明旭,霍莉莉,吴珊珊.人工湿地植物水体净化效能研究进展[J].环境工程,2017,35(8):5-10.

[8] 丁怡,王玮,宋新山,等.人工湿地在水质净化中的应用及研究进展[J].工业水处理,2017,37(3):6-10.

[9] 赵林丽,邵学新,吴明,等.人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较[J].环境科学,2018,39(9):1-8.

[10] 许永辉,崔正国,曲克明,等.不同耐盐植物人工湿地净化

养殖外排水效果[J].渔业科学进展,2018,39(3):80-88.

[11] 潘傲,张智,孙磊,等.种植不同植物的表面流人工湿地净化效果和微生物群落差异分析[J].环境工程学报,2019,13(8):1918-1929.

[12] 隋跃宇,焦晓光,高崇生,等.土壤有机质含量与土壤微生物量及土壤酶活性关系的研究[J].土壤通报,2009,40(5):1036-1039.

[13] 石心慧,徐淑霞,潘彦硕,等.城市人工湿地对人工湖水体净化效果研究[J].河南农业大学学报,2017,51(6):855-859.

[14] 周新伟,沈明星,金梅娟,等.多级串联表面流人工湿地对河蟹养殖尾水的净化效果研究[J].湿地科学,2017,15(6):774-780.

[15] 蒋凯,邓潇,周航,等.植物塘人工湿地系统对灌溉水 Cd 的生态拦截效果[J].农业现代化研究,2019,40(3):518-526.

[16] 左杰,季军,汪鹏合,等.沙基和浮床培养方式种植水芹对人工湿地冬季水质净化能力的对比[J].湖泊科学,2017,29(6):1342-1349.

[17] 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.

[18] 刘晓静,刘晓晓,汪慧慧,等.氧化深塘和潜流湿地组合技术在农村河道水质净化应用[J].环境工程学报,2019,13(7):1759-1765.

[19] 华昇,陈浩,刘云国,等.不同季节人工湿地处理污水效果[J].安徽农业科学,2019,47(19):21-25.

[20] 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.

[21] 马书占,潘继征,吴晓东,等.旁路多级人工湿地对巢湖流域南淝河水的净化效果[J].湖泊科学,2016,28(2):303-311.

[22] 张惠,汪鹏合,张文娟,等.利用不同物候期水生植物配置提高浮床人工湿地的除氮效果[J].湖泊科学,2017,29(3):575-584.

[23] 张毓媛,曹晨亮,任丽君,等.不同基质组合及水力停留时间下垂直流人工湿地的除污效果[J].生态环境学报,2016,25(2):292-299.

[24] 乔厦,郑学良.表面流人工湿地对城市径流水质的净化研究[J].水土保持研究,2019,26(3):55-59.

[25] 赵欣胜,崔丽娟,李伟,等.吉林省湿地生态系统水质净化功能分析及其价值评价[J].水生态学杂志,2016,37(1):31-37.