

用植物碳源强化湿地系统脱氮研究

陶加庆, 尤朝阳, 徐浩钦, 张 婷

(南京工业大学 城市建设学院, 江苏 南京 211816)

摘要:为解决湿地系统反硝化脱氮过程中碳源不足的问题,选取芦苇、水稻、小麦和香蒲等秸秆为研究对象,研究在不同环境因素下,碳及氮磷成分释放规律及其强化湿地脱氮效果。

关键词:植物碳源; 湿地系统; 反硝化脱氮

中图分类号: X826; TV133

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2022)04-0066-0007

Study on enhancing nitrogen removal in wetland system with plant carbon source

TAO Jiaqing, YOU Zhaoyang, XU Haoqin, ZHANG Ting

(College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient carbon source in the denitrification process of wetland system, straw such as reed, rice, wheat and cattail were selected as the research objects to study the release law of carbon, nitrogen and phosphorus components under different environmental factors and its enhanced nitrogen removal effect in wetland.

Key words: plant carbon source; wetland system; denitrification

目前,大量低 C/N 污水排入地表水体导致河湖水体富营养化严重,因此氮素的去除已成为地表水修复中亟待解决的问题。人工湿地作为一种营养盐控制手段,主要依靠系统内微生物的硝化和反硝化作用去除水体中的氮素,具有建造运行成本低、维护管理简单、生态环境友好等优势。碳源在反硝化过程中作为电子供体和微生物新陈代谢的能量来源,是人工湿地脱氮的主要限制因素之一。人工湿地在处理此类低 C/N 水体时,由于有机物含量低,碳源不足使得反硝化作用受到严重抑制,生物脱氮效率大大降低。

针对脱氮过程中碳源不足的问题,研究者提出可通过外加碳源,提高进水 C/N,从而有效提高湿地脱氮效果。传统小分子有机物(如甲醇、乙酸、糖类

物质等)作为外加碳源,存在消耗快、存储困难、价格昂贵、投加难控制等问题。而可生物降解多聚物等新型碳源制备工艺复杂、运行成本较高,短期内无法实现大规模应用。天然植物材料体内富含木质纤维素,在微生物酶作用下能够持续分解释放有机物质,且具有来源充足、取材方便、成本低廉、无毒无害等优点,具有一次添加长期释放、后续管理方便的特点。同时,将植物材料作为反硝化外加碳源进行合理利用,一方面能够使其减量化、资源化,另一方面能够降低湿地系统运行成本,提高经济环保效益,已成为目前的研究热点。秸秆、壳类等农业废弃物和景观植物枝、叶、茎秆等凋落物都是可用的植物碳源,均被报道用来强化人工湿地系统脱氮。Zhang 等^[1]在垂直流湿地中使用悬铃木凋落物

收稿日期:2022-01-20

基金项目:江苏省水利科技项目(2020046)

作者简介:陶加庆(1996—),男,硕士研究生,研究方向为人工湿地脱氮。E-mail: 1090143790@qq.com

通信作者:尤朝阳(1970—),男,教授,博士,主要从事污水生物处理、膜法水处理技术等研究工作。E-mail: youzhaoyang@njtech.edu.cn

作为碳源,发现系统对TN的去除率提高了36.04%。Fan等^[2]将菖蒲作为填料基质应用于表面流人工湿地处理低C/N污水,系统对TN的去除率约是添加前的3倍。Si等^[3]在垂直潜流人工湿地中补充小麦秸秆作为碳源,在低温((12.5±4.0)℃)和高温((24.55±2.35)℃)条件下系统对TN的去除率分别提高了37.82%和73.27%。

然而,植物材料中的木质素通过氢键和共价键与糖类聚合物连接,存在于植物细胞壁中,阻碍植物体内纤维素与半纤维素被酶和微生物分解利用,因此需要对植物材料进行预处理,以破坏木质素结构,提高植物材料的可生化性和释碳性能。目前常见的预处理主要包括机械粉碎、酸碱处理、氧化处理、高压蒸煮、辐射处理及多种方法联合处理等方法。李晓崑等^[4]研究发现植物秸秆经碱处理、高压蒸煮和粉碎处理后释碳量相差不大,然而粉碎处理的成本最低。

但是,目前对于植物材料粉碎处理后的释碳性能及对湿地系统中脱氮效果缺乏系统研究。因此,本研究选取芦苇、水稻、小麦和香蒲秸秆等植物材料进行机械粉碎预处理,通过静态释放实验和控制变量法来探究各植物材料释放有机碳、氮磷的规律以及温度、pH等环境因素变化对其释放特性的影响,并从中选出最佳植物碳源应用至湿地系统中以强化人工湿地反硝化脱氮。

1 材料与方法

1.1 植物材料预处理

将芦苇、水稻、小麦和香蒲等植物秸秆冲洗干净,置于70℃烘箱中烘干至恒重,并将烘干后的植物材料用150型磨粉机粉碎成粒径范围为1~2 mm备用。

1.2 植物材料静态释放实验

称取植物材料各2.5 g,使用医用脱脂纱布包裹,置于250 mL的反应瓶中,加入250 mL纯水,调节pH为7.0,用封口膜密封后置于25℃恒温培养箱中。每组设置3个平行。实验周期为15 d,每隔24 h更换反应瓶中250 mL纯水,并在1 d、2 d、3 d、5 d、7 d、9 d、11 d、13 d、15 d更换纯水时取反应瓶中浸出液,测定水样中COD、TN、TP和pH。

1.3 温度、pH影响探究实验

通过控制变量法,分别设温度为10℃、15℃、25℃、30℃、35℃,pH值为5、6、7、8、9,其他实验步骤同1.2所述。每组设置3个平行。实验周期为7 d,在1 d、2 d、3 d、5 d、7 d更换纯水时取反应瓶中浸出液,测定水样中COD、TN和TP。

1.4 人工湿地系统运行

实验构建了2组垂直潜流湿地系统,由下往上分别为细砾石层3 cm、基质层15 cm和蓄水层7 cm,底部设有出水口。其中第1组为空白对照组,基质由芦苇生物炭+河沙(质量比1:9)均匀混合组成,混合物质量为1.8 kg;第2组为添加芦苇碳源的实验组,基质由1.8 kg混合物与30 g芦苇秸秆组成,其中芦苇秸秆与混合物均匀混合布于基质中层。每组处理系统设置2个平行。所有装置均移栽5株同一生长阶段、具有相同鲜重的芦苇植物,植物根系被放置在基质上层的7 cm处。此时,测得湿地装置的填料孔隙容积为(0.50±0.02) L。

通过向自来水中添加C₆H₁₂O₆、NH₄Cl、KNO₃和KH₂PO₄等来模拟低C/N微污染水体,实验配水中各种污染物质量浓度长期测量平均值如表1所示。2组湿地装置在实验室室温条件下采用连续流的方式运行51 d。首先是21 d的微生物驯化启动阶段,将实验配水与经2层纱布过滤后的活性污泥按体积比7:3混合,并向各装置中进入该混合液,水力停留时间为24 h,出水中NO₃⁻-N质量浓度趋于稳定,装置挂膜启动成功。在正式运行阶段,向各装置中进入实验配水,水力停留时间为12 h,连续运行30 d,每天同一时间对2组装置的出水水质进行监测,测定水样中的COD、TN和TP。

1.5 水质测定及分析方法

COD采用6B-200C型COD速测仪按快速消解-分光光度法测定;TN、TP、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N采用UV-5500型紫外分光光度计按文献^[5]中方法测定;pH值采用pH 400型pH计测定。所有数据用Excel 2019进行统计处理,Origin 2019软件进行绘图。

植物材料的有机碳累积释放量按下式(1)计算:

$$\varphi = (c_1v + c_2v + c_3v + 2c_4v + 2c_5v + c_6vt)/m \quad (1)$$

式中: φ 为植物材料有机碳累积释放量(以COD表征),mg/g; c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 分别为1、2、3、5、7 d植物材

表1 实验配水中各污染物质量浓度

单位:mg/L

水质指标	$\rho(\text{COD}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NO}_3^- - \text{N}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP}) / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH
质量浓度	33.87±1.39	16.36±0.29	7.36±0.23	9.00±0.16	0.32±0.02	7.01±0.01

料浸出液中COD质量浓度,mg/L; c_6 为9~15 d植物材料平均每日浸出液中COD质量浓度,mg/L; v 为植物材料每日浸出液体积,L; t 为时间,d; m 为植物材料质量,g。

植物材料的有机碳释放周期按下式(2)计算:

$$t = (m \times \omega \times 10^3) / (c_6 \times v) \quad (2)$$

式中: t 为植物材料有机碳释放周期,d; m 为植物材料质量,g; ω 为植物材料中纤维素、半纤维素含量; c_6 为9~15 d植物材料平均每日浸出液中COD质量浓度,mg/L; v 为植物材料每日浸出液体积,L。

2 结果与讨论

2.1 植物材料的静态释放特性

2.1.1 有机碳的释放规律

图1为植物材料静态释放实验中COD的变化规律,4种植物材料的COD释放量均在第1天达到最高值,从第2天开始迅速下降,5~9 d内下降速率明显减缓,9~15 d期间则进入碳源稳定释放期。静态释放初期,植物表面水溶性物质迅速溶解、内部溶胀脱出的易分解小分子化合物快速降解导致浸出液中COD质量浓度偏高;随着时间推移,植物体中易溶解底物释放完全,浸出液中COD主要来自植物内部纤维素类物质的水解释放,此时COD释放量基本保持稳定。熊家晴等^[6]将芦苇经碱泡、碱热处理后得到的最大碳源释放量为193.60 mg/L、183.81 mg/L,而稳定释放期间相应的碳源平均释放量分别为30.40 mg/(L·d)、35.91 mg/(L·d)。而本研究中采用机械粉碎的方式对芦苇进行预处理,得到COD最大释放量为194.16 mg/L,稳定释放期COD释放量均值为33.11 mg/(L·d)。由此可见,芦苇经粉碎处理后的释碳能力与碱处理组相近,然而可以减少药剂使用费用及对环境的污染。

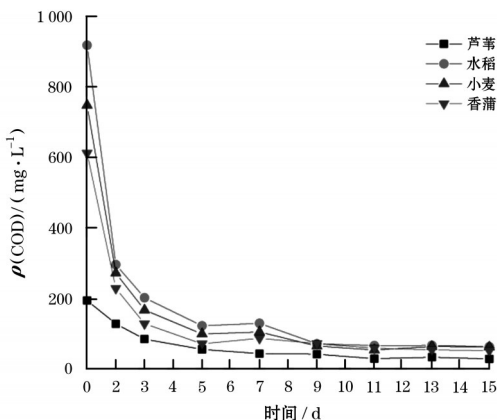


图1 植物材料浸出液中COD质量浓度变化规律

实验结果表明,实验期间植物材料有机碳累积释放量依次是:水稻(245.53 mg/g)>小麦(208.40 mg/g)>香蒲(175.77 mg/g)>芦苇(86.92 mg/g)。不同植物材料的木质素、纤维素和半纤维素组成以及结构差异导致了COD释放量不同。用Van Soest^[7]的方法对植物材料中的纤维素、半纤维素及木质素含量测定,结果见表2。由表2可见,水稻、小麦、香蒲中纤维素和半纤维素含量较高,而木质素含量相对较低,因此有机碳释放量较高;相反,芦苇中木质素含量较高,结构致密,因此有机碳释放速率相对稳定。作为强化人工湿地反硝化脱氮的外加碳源应满足可持续稳定释放碳源的要求,COD释放速率过快导致微生物不能及时完全利用,出水COD质量浓度迅速上升,释放速率过慢、后期供碳不足则不能满足微生物反硝化脱氮的需求。根据计算,芦苇、水稻、小麦和香蒲的有机碳释放周期分别为185 d、97 d、104 d、98 d。可见,芦苇的释碳周期较长、释碳速率稳定,作为人工湿地外加碳源时更易调控。

表2 植物材料中纤维素、半纤维素及木质素占比

单位:mg/g

名称	芦苇	水稻	小麦	香蒲
纤维素	35.64	38.66	35.79	34.41
半纤维素	25.51	26.14	27.65	23.65
木质素	18.58	10.78	15.04	12.53

2.1.2 氮磷的释放规律

采用植物材料作为外加碳源,其内部纤维素类物质能够分解释放有机质,为反硝化菌提供充足的碳源,然而,物料体内的N、P等营养元素也会同步释放至水中加重水体富营养化。

图2为植物材料静态释放实验中TN、TP的变化规律。由图2(a)可知,4种植物材料TN在第1天有最大释放量,随后在3 d内迅速下降后逐渐趋于稳定,进入稳定释放期,此时芦苇、水稻、小麦、香蒲的TN平均释放量分别为0.39 mg/(L·d)、0.65 mg/(L·d)、1.24 mg/(L·d)、0.73 mg/(L·d)。随着水稻、小麦、香蒲在水中快速分解,在实验初期即释放出较多的氮素,同时中后期持续释氮能力也较强,对水环境带来较大营养负荷。相比之下,芦苇的TN释放量较低、对水体水质的影响更小。

由图2(b)可知,4种植物材料均在第1天有最大TP释放量,分别为芦苇1.58 mg/L、水稻11.29 mg/L、小麦9.53 mg/L、香蒲9.02 mg/L,随后TP释放量在5 d

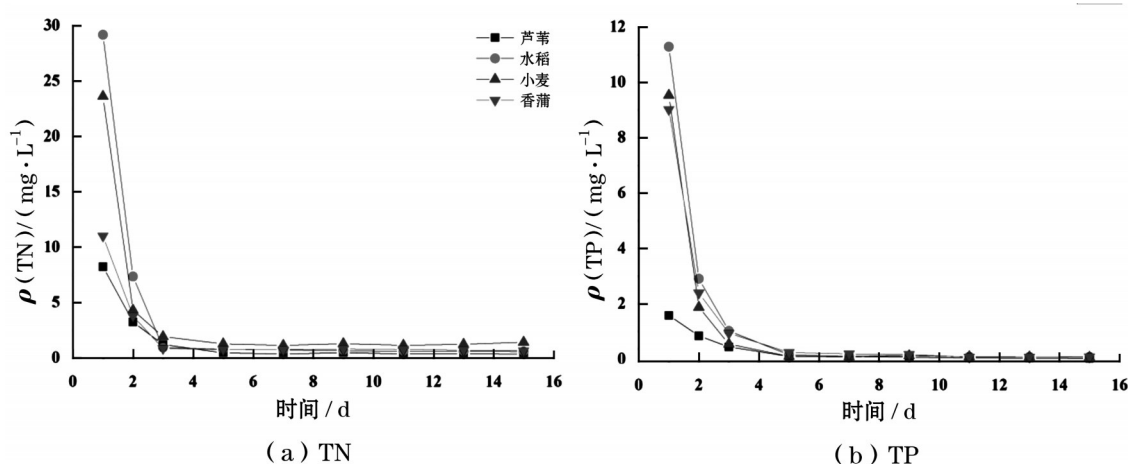


图2 植物材料浸出液中TN和TP变化规律

内迅速下降,11 d时水稻、小麦、香蒲释放的TP降至0.10 mg/L以下,而芦苇释放的TP则降至0.05 mg/L以下。与COD和TN的释放规律不同,4种植物材料在实验中后期的TP释放量均处于较低水平。肖蕾等^[8]将添加和未添加碱处理千屈菜植物碳源的湿地系统进行对比研究发现,2种湿地系统的TP释放规律没有显著性差异。因此,采用植物材料作为人工湿地外加碳源,对水体中TP含量影响较小。但是,为保证湿地系统运行的安全性,仍需确定合适的植物碳源添加量,在最大程度促进反硝化的同时,避免N、P等营养物质过量释放使出水水质不达标。

2.1.3 浸出液C/N、pH变化规律

C/N是污水处理中的重要指标之一,适宜的C/N是保证反硝化脱氮高效进行的关键。图3为植物材料浸出液C/N、pH的变化规律。由图3(a)可知,4种植物材料浸出液C/N整体呈现前期逐渐上升、中期波动下降,后期趋于稳定的变化规律,最大值分别

为芦苇125、水稻216、小麦93和香蒲151。陈帅全等^[9]研究发现玉米秸秆浸出液C/N随时间推移呈下降趋势,最大值为185,而美人蕉秆浸出液C/N则表现为前期下降,后期有一定程度上升,最大值为323。不同种类植物材料释放C、N能力不同导致其浸出液C/N有所区别。C/N主要影响微生物的反硝化过程,较高的C/N能够提供充足的碳源,促进反硝化速率,减少 NO_2^- -N的累积。实验中芦苇浸出液C/N较其它植物材料变化更为平稳,与前者实验结果一致。

水体pH主要影响人工湿地脱氮系统中的微生物活性,硝化细菌在pH值为7.0~8.1时活性最强,反硝化细菌最适宜生长的pH值为7.0~8.5。由图3(b)可知,芦苇、水稻浸出液pH变化比较平稳,pH值均在6.0~7.0范围内变化;而小麦、香蒲浸出液pH值全周期呈波动上升趋势,前9天pH值均低于6.0,最低值达到5.1、5.2,而9 d后pH值则在6.0~6.4之间变化。这主要是因为小麦、香蒲表面附着有大量的可

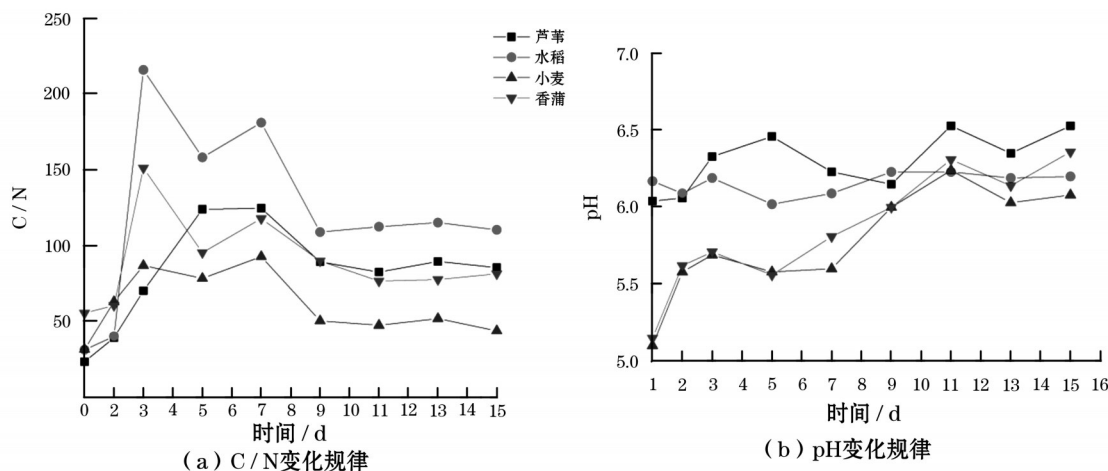


图3 植物材料浸出液C/N和pH变化规律

溶性有机酸类物质,在实验初期迅速溶解进入水体,导致浸出液 pH 值较低。随着时间推移,4种植物材料表面有机酸释放完全,进入稳定释碳阶段,浸出液 pH 值开始逐渐上升。但是,此时植物体内纤维素类物质缓慢分解,同样会释放乙酸、丙酸等有机酸类物质,因而浸出液呈酸性。然而在实际应用中,作为碳源的芦苇水解酸化有机酸释放量较小,不易引起水体 pH 较大变化而影响脱氮效果。

2.2 环境因素对植物材料释放的影响

温度和水体 pH 两种环境因素变化会影响植物材料的分解过程。将实验中 5 次取样测定结果通过衡量计算得出各植物材料在不同温度、pH 条件下的 COD、TN、TP 平均释放量,绘制出图 4 和图 5。

由图 4 可知,水稻、小麦、香蒲的 COD、TN、TP 释放量受温度影响变化规律相似:当温度为 10~15 °C 时,COD、TN、TP 的释放量随温度变化不显著,均处于较低水平;当温度为 15~35 °C 时,COD、TN、TP 的释放量随温度上升显著提高。这与熊剑锋等^[10]研究梧桐树叶随着温度升高 COD 释放速率和增加量均有所提高的结论一致。原因主要在于:低温时物质内部分子活动减缓,有机碳和营养元素释放量较低;随着温度升高,分子运动加剧,与外界水体间的物质传递加速,同时秸秆表面孔隙在一定程度上膨胀,各物质释放量显著增加。

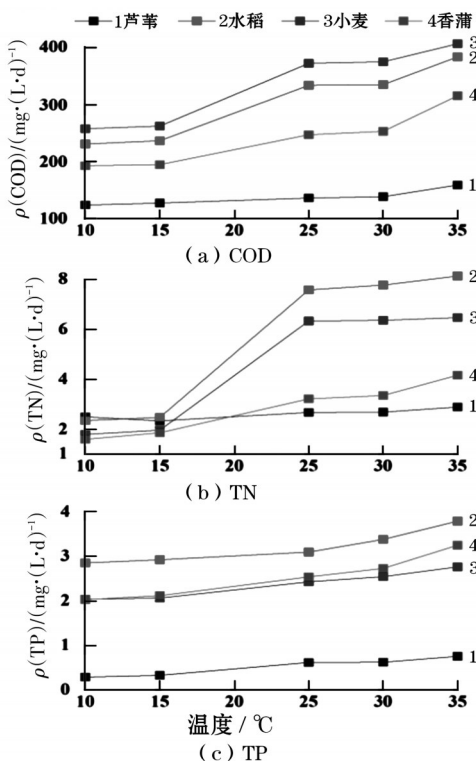


图4 不同温度植物释放 COD、TN、TP 变化

而芦苇的 COD、TN、TP 释放量在温度为 10~35 °C 内呈缓慢上升趋势,并在 35 °C 时达到最大值, COD_{max} 为 125.09 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$, TN_{max} 为 2.89 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$, TP_{max} 为 0.75 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$,远低于其它植物材料。这主要是因为芦苇木质素含量较高,实验中温度提升不足以破坏它的结构,因而 COD、TN、TP 的释放量受温度影响较小。王春喜等^[11]研究表明温度在 20~30 °C 范围植物外加碳源联合反硝化细菌脱氮效果较好。芦苇在此温度区间碳源释放充足稳定,能够较好地满足微生物反硝化脱氮需求。

由图 5 可知,在 pH 为 5~9 范围内,4种植物材料的 COD 释放量随 pH 的升高逐渐降低,在 pH=5 时有最大释放量,分别为芦苇 124.48 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、水稻 345.79 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、小麦 393.05 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、香蒲 247.45 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。这是因为酸性环境有利于促进纤维素分解菌的新陈代谢,加速纤维素酶的分泌,提高植物纤维素类物质的分解和转化,使碳源更快释放,而碱性环境则会减缓有机碳的释放。与 COD 释放规律不同,4种植物材料的 TN、TP 释放量均在 pH=7 时有最大值,芦苇、水稻、小麦、香蒲的 TN_{max} 分别为 2.68 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、7.57 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、6.33 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、3.22 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$, TP_{max} 分别为 0.61 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、3.09 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、2.43 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 、2.54 $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$ 。因此,以芦苇作为人工湿地外加碳源时,不会因水体 pH 变化而导致

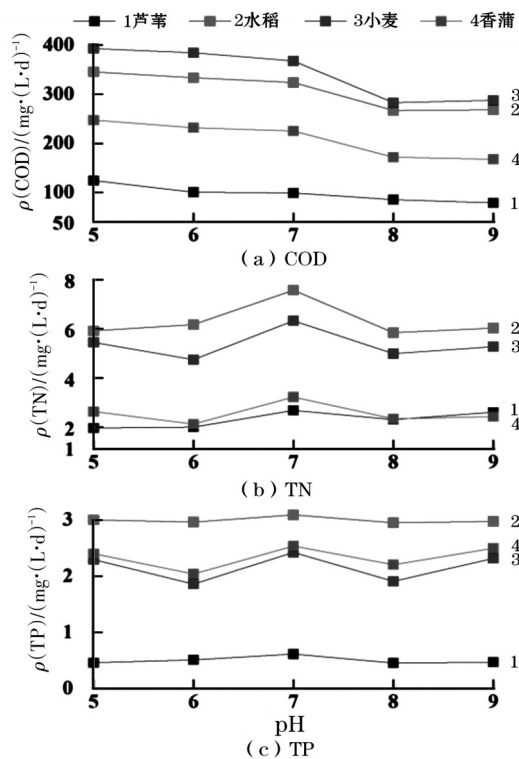


图5 不同 pH 植物释放 COD、TN、TP 变化

释放过量的TN、TP。

2.3 投加芦苇碳源对湿地系统脱氮的影响

2.3.1 对TN去除的影响

图6为人工湿地系统运行期间进出水TN质量浓度变化规律。由图可知,湿地系统进水TN质量浓度为15.49~16.82 mg/L,空白对照组和芦苇实验组湿地出水TN质量浓度分别为11.94~14.07、1.64~3.05 mg/L,对应TN平均去除率分别为20.18%、86.04%。实验进水中TN由 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 组成, NH_4^+-N 主要经湿地内微生物的硝化作用转化为 NO_3^--N ,因而 NO_3^--N 去除效果的好坏直接影响最终污水中TN的去除率。而反硝化反应主要依靠异养微生物在缺氧条件下将 NO_3^--N 和 NO_2^--N 还原为气态氮,这一过程需要充足的碳源参加,所以在进水C/N较低的情况下,空白对照湿地中缺乏有机碳源导致异养反硝化菌的反硝化作用受到抑制,产生了大量 NO_3^--N 累积,因而对TN的去除效果较差。相比之下,通过向人工湿地基质中层添加芦苇秸秆后,伴随着植物碳源分解释放有机物的同时,不仅可以为湿地系统提供足够的能量和电子供体,而且可以加剧湿地中、下层基质中溶解氧的消耗使得系统内部快速形成缺氧/厌氧环境,强化反硝化菌的反硝化作用。此外,芦苇秸秆表面复杂的孔隙结构也可以为反硝化菌提供生长载体和适宜的生存环境,有效提高了人工湿地对低C/N微污染水体中TN的去除率。

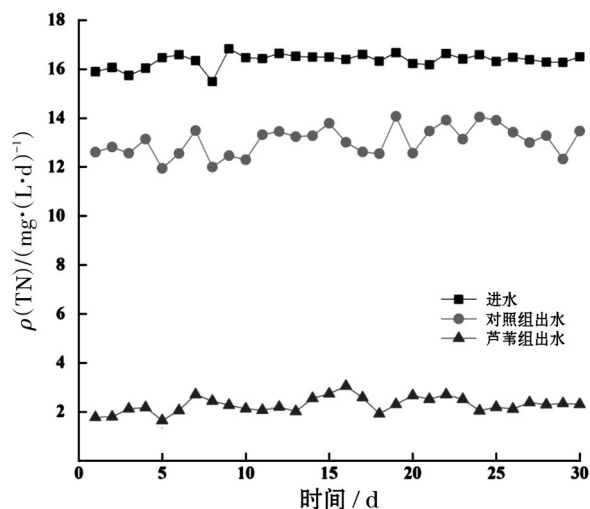


图6 湿地系统运行期间进出水TN质量浓度变化

投加芦苇碳源不仅显著提升了人工湿地的脱氮效果,同样也增强了对TP的去除效果。湿地系统进水TP质量浓度为0.29~0.35 mg/L,空白对照组和芦苇实验组湿地出水TP质量浓度则分别为0.05~

0.09 mg/L、0.02~0.05 mg/L,对应TP平均去除率为77.62%、89.55%。这主要是因为是在缺氧/厌氧环境下,反硝化菌利用 NO_3^--N 作为电子受体,产生与氧同样的摄磷反应,从而促进了湿地对磷的脱除。

2.3.2 对出水COD的影响

图7为人工湿地系统运行期间进出水COD质量浓度变化情况。湿地系统进水COD质量浓度为31.75~36.20 mg/L,空白对照组和芦苇实验组湿地出水COD质量浓度分别为7.35~14.79 mg/L、21.82~29.16 mg/L,2组湿地系统对COD的去除效果均比较稳定,对应COD平均去除率分别为66.44%、21.70%。添加芦苇碳源使得湿地系统内有机负荷上升,COD去除率降低。这是因为随着芦苇体内纤维素和半纤维素水解释放的有机物,未及时被湿地内微生物分解利用就被排出系统。但湿地出水COD仍低于30 mg/L,满足《地表水环境质量标准》中Ⅳ类水水质标准。这表明,芦苇碳源的添加一定程度上增加了湿地出水中有机物的含量,为反硝化菌提供充足的有机碳源,然而由于释放量有限,对水体COD的提高不明显,不会影响出水水质。

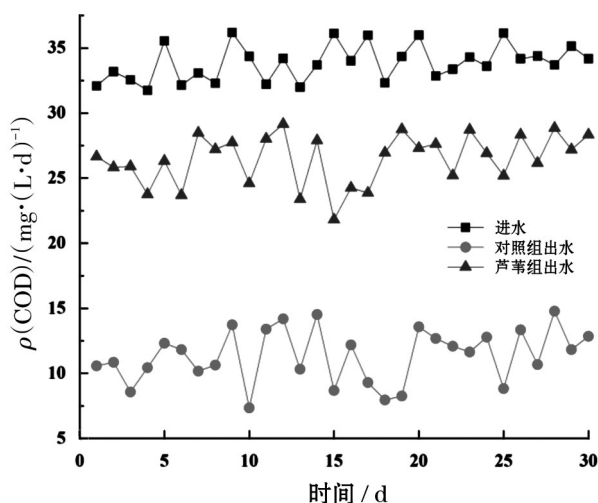


图7 湿地系统运行期间进出水COD质量浓度变化

3 结论

植物材料经粉碎处理后的有机碳15 d累积释放量水稻(245.53 mg/g)>小麦(208.40 mg/g)>香蒲(175.77 mg/g)>芦苇(86.92 mg/g),但芦苇的释碳周期长、释碳速率稳定,且TN、TP释放量较低。当温度为10~35℃时,4种植物材料的COD、TN、TP释放量随温度升高而上升,但芦苇受温度影响程度最小。投加芦苇碳源的湿地系统中,进水中TN质量浓度为15.49~16.82 mg/L,出水中TN质量浓度稳定

在 1.64~3.05 mg/L, 对应 TN 平均去除率达到 86.04%, 与对照组相比提高了 65.86%, 出水 COD 质量浓度控制在 21.82~29.16 mg/L, 满足《地表水环境质量标准》中Ⅳ类水水质标准。

参考文献:

- [1] ZHANG M, ZHAO L, MEI C, et al. Effects of plant material as carbon sources on TN removal efficiency and N_2O flux in vertical-flow-constructed wetlands[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225(11): 1-11.
- [2] FAN C, HE S, WU S, et al. Improved denitrification in surface flow constructed wetland planted with calamus[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021(291): 125944.
- [3] SI Z, SONG X, WANG Y, et al. Intensified heterotrophic denitrification in constructed wetlands using four solid carbon sources: denitrification efficiency and bacterial community structure [J]. *Bioresource Technology*, 2018 (267): 416-425.
- [4] 李晓崑, 贾亚红, 李冰, 等. 人工湿地植物缓释碳源的预

处理方式及释碳性能研究[J]. *水处理技术*, 2013, 39(12): 46-48.

- [5] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [6] 熊家晴, 孙建民, 郑于聪, 等. 植物固体碳源添加对人工湿地脱氮效果的影响[J]. *工业水处理*, 2018, 38(9): 41-44.
- [7] 李朝英, 郑路, 莫世宇. 范氏法与王玉万法植物纤维素测定方法探讨[J]. *浙江农业科学*, 2019, 60(3): 427-429.
- [8] 肖蕾, 贺锋, 梁雪, 等. 不同碳源添加量对垂直流人工湿地污水处理效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(6): 2074-2080.
- [9] 陈帅全, 张驰, 王印, 等. 碱热处理生物质碳源材料比选研究[J]. *森林工程*, 2020, 36(5): 99-105.
- [10] 熊剑锋, 徐华, 阎宁, 等. 梧桐树叶作为反硝化碳源的研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(11): 4057-4061.
- [11] 王春喜, 余关龙, 张登祥, 等. 固体碳源联合反硝化菌脱氮的影响因素研究[J]. *水处理技术*, 2018, 44(10): 62-65.

(上接第 65 页)

3 结 语

河口地区具有特殊的自然条件与生态环境, 精确的水质评价是管理和利用好河口的重要前提, 但目前河口区域河海范围的界定不清晰, 实际评价时标准的选取随意性较大。现行《地表水环境质量标准》及《海水水质标准》存在许多差异: (1) 水体功能类别方面, 2 种标准有大致对应关系, 但严格来说, 存在源头水及水源地保护区欠考虑和污染物的指标分析方法不一致等问题; (2) 评价项目与指标方面, 2 种标准项目设置及指标数量都不相同, 某些指标的范围不一致, 如氮元素及磷元素相关指标, 另海水标准中设有感官指标; (3) 指标标准值分布方面, 对于 2 种标准中常用的几组重要指标, 范围一致及范围不一致指标在功能类别大致对应关系下海水标准总体都要求高于地表水标准, 不考虑纵坐标尺度时, 范围不一致的指标的标准值分布差异大于范围一致的标准值分布差异。

以上差异伴随有环境功能类别交错混乱、监测指标和指标限值无法对接, 标准值分布有差异, 评价指标数量待提升等问题, 导致河口同一区域采用不同标准评价的结果可能截然不同。因此开展现行标准及相关标准的制修订工作, 继续推进符合国

情的入海河口水质基准和标准的研究和制定工作, 结合河口特征有效划分和明确入海河口边界, 将是未来一段时间迫切需要开展的工作。这对加强入海河口及海洋生态环境保护意义重大, 符合我国生态文明建设的发展方向和现实需要。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [2] 国家环境保护总局. 海水水质标准: GB 3097—1997[S].
- [3] 邱训平, 穆宏强, 支俊峰. 长江河口口水环境现状及趋势分析[J]. *人民长江*, 2001(7): 26-28.
- [4] 国峰, 李志恩, 时俊, 等. 长江入海口徐六泾断面 2005—2012 年水环境因子及入海通量变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(2): 227-232.
- [5] 葛跃浩, 陈佳佳. 基于模糊概率综合评价数学模型的长江口水质评价与分析[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(6): 205-206.
- [6] 顾莉, 华祖林, 树锦, 等. 江苏近海水域水环境质量现状评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(5): 498-502.
- [7] 冯娜. 南四湖入湖河口水质变化趋势分析与预测模型研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [8] 郑丙辉, 刘静, 刘录三. 探析入海河口水质评价标准的合理性[J]. *环境保护*, 2016, 44(3): 43-47.