DOI:10.11721/cqnuj20210211

生物炭添加对潜流湿地污水净化效率的影响*

朱小婕[1]，邵景安[1,2]，赵　培[3]
(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院；2. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室，重庆 401331；
3. 商洛学院 城乡规划与建筑工程学院，陕西 商洛 726000)

摘要:【目的】为了提高农村生活污水的出水水质,探索利用生物炭降低污染负荷的可行性。【方法】以人工潜流湿地为研究对象,利用单因素方差分析法进行生物炭添加前后潜流湿地污水净化效率的对比,探究生物炭对潜流湿地污水系统中总磷、总氮、速效磷及氨氮质量浓度的影响,分析生物炭对潜流湿地氮、磷的吸附去除效率。【结果】1) 随着生物炭添加,总磷、总氮、速效磷及氨氮的平均去除率分别提高 9.54%,8.27%,15.93%及 11.53%,施加生物炭湿地的去除率明显高于未施加生物炭湿地,并随着时间的变化整体呈上升趋势;2) 生物炭添加使污水中总磷、总氮、速效磷、氨氮的去除率与温度、pH 呈统计学意义上的显著性相关;3) 添加生物炭后的潜流湿地污水净化效果显著提高($p<0.05$),生物炭添加对潜流湿地污水净化可以实现较好的处理效果。【结论】研究结果对于乡村分散生活污水处理具有借鉴意义,可为农村生活污水净化提供一定科学依据。

关键词:人工湿地;污水净化;去氮除磷;方差分析法
中图分类号:X524　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-6693(2021)02-0121-09

近些年来,随着中国的城镇化水平的逐步提高与用水量的递增,城镇污水排放问题也越来越突出,特别是乡镇、农村地区由于缺乏完整的污水净化环保系统以及现有污水净化系统净化能力的不足,使得许多未经处理或处理未达标的污水直接排入湖泊、河流或地下,造成水源地水质下降,氮、磷含量过高;而人工潜流湿地去氮除磷的能力很好地缓解了上述地区水质恶化现象。但人工湿地的组成基质易饱和,去氮除磷的能力也会下降,限制了它在污水净化方面的应用。有研究发现基质是影响人工湿地污染物净化能力的主体,生物炭作为一种多功能环保材料,表面具有大量孔洞,孔隙大小不一,为微生物的生长提供巨大的空间,吸附特性良好,因此,近些年来被广泛用于固碳减排、含氨氮废水处理及土壤重金属修复改良等方面的研究与实践[1-3]。根据生物炭吸附固持氮素的性质,本研究设想在湿地中添加一定量生物炭来消纳低污染水中的氮、磷。在利用生物炭去除水体氮磷的研究中,Cayuela 等人[4]的研究表明,在不同的农业土壤中,生物炭添加有利于强化湿地系统脱氮及使 N_2O 的排放量大幅下降。孔令华等人[5]分别以沸石和石灰石为基质建立潮汐流人工湿地处理 SBR 尾水,发现沸石基质人工湿地对氨氮和速效磷的去除效率均高于石灰石基质人工湿地,主要原因在于沸石的多孔性结构及强大的吸附性能。Zhou 等人[6]研究表明以生物炭作为填料的人工湿地的脱氮性能提高。目前,有关生物炭应用于人工湿地处理污水的研究较少,因此,本研究针对室外湿地系统,通过对照添加生物炭前后潜流湿地,探究潜流湿地对污染物的去除性能,为农村生活污水净化提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区桃花谷污水治理示范基地位于陕西省商洛市丹凤县竹林关镇(东经 110°7′～110°49′、北纬 33°21′～33°57′),是典型的人工潜流湿地。桃花谷潜流湿地示范区地处亚热带半湿润与东部季风暖温带过渡性气候区,年平均温度约 13.80 ℃,气温在 1.2～25.6 ℃范围内;降水主要集中在 7－9 月,年均降雨量为 744.1 mm;年内

* **收稿日期**:2020-06-15　**修回日期**:2020-10-10　**网络出版时间**:2021-04-08 8:34
资助项目:国家科技重大专项(No. 2012ZX07104-003);重庆市基础科学与前沿技术研究重点专项项目(No. CSTC2017JCYJB0317)
第一作者简介:朱小婕,女,研究方向为土地利用与土地管理,E-mail:13991731276@163.com;**通信作者**:邵景安,男,研究员,博士,E-mail:shao_ja2003@sohu.com
网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20210407.1652.024.html

降雨量最小月份为1月,月平均降雨量为7.5 mm;年内降雨量最大月份为7月,月平均降雨量为148.1 mm。无霜期为217 d[7]。

1.2 实验设计

实验基地采用垂直潜流湿地结构,整体呈矩形布置,面积分别为120 m^2,实验基地设置两个处理系统,即添加生物炭组与空白组对照。两个处理系统填料层由植物鸢尾、砂砾土层、砂层与碎石层组成,鸢尾下方即表层覆盖层为厚度20 cm、粒径10～15 mm的砂砾土层,中层为厚度20～25 cm、粒径5～8 mm的砂层,底部排水层为厚度20～25 cm、粒径40～80 mm的碎石层,并在湿地底层用天然粘土堆砌,防止渗漏(图1)。根据Zhang等人[8]的研究结果,将生物炭施加量定为240 kg投放于系统表层,生物炭施用量为2 kg·m^{-2},厚度为1～1.5 cm、粒径为3.25 mm。湿地系统连续运行,污水主要自管道蓄积于湿地入水闸井,通过布水管道均匀投配至湿地,水力停留时间为7 d,当污水流经不同的湿地基质填料层时,所降解的污染物浓度存在差异,过滤后的污水由出水口排出(图1)。实验周期为2019年1—5月。

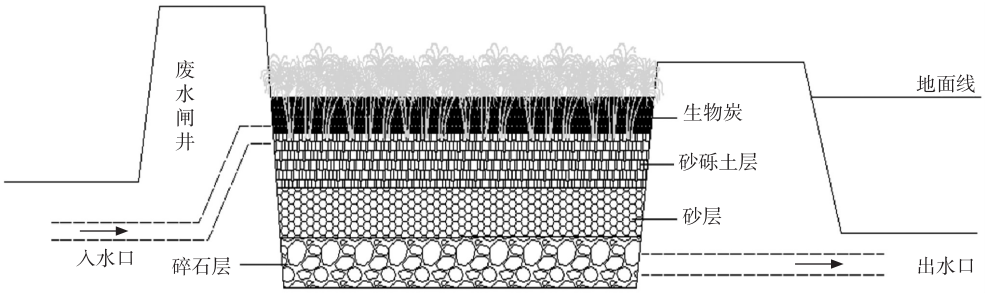


图1　实验基地示意图

Fig.1　Schematic diagram of the experimental base

1.3 实验材料

本研究进水取自商洛市丹凤县竹林关镇桃花谷当地村民的生活污水集水口,污水水质状况见表1,水质参数具有一定的波动性。实验用生物炭成品2018年购于商洛市,生物炭以竹子为原材料,制备条件为500 ℃下高温热解炭化2 h。竹炭的比表面积为332 $m^2 \cdot g^{-1}$,粒径为3.25 mm。处理系统中栽植的植物鸢尾生长季为4—6月。

表1　进水污水水质状况

Tab.1　Quality of influent water　　mg·L^{-1}

统计参数	氨氮质量浓度	总氮质量浓度	速效磷质量浓度	总磷质量浓度
平均值	4.06	18.07	0.35	0.79
标准偏差	0.57	1.78	0.06	0.08

1.4 样品采集与测定

1.4.1 样品采集　本研究的样本数据来源于水样采集地采集的实验水样,生物炭于2019年1月12日添加至研究湿地,施加时间与样本采集间隔16 d。实验水样使用500 mL的聚乙烯瓶分别盛装,种类分为:入水口水样、添加生物炭的出水口水样和未添加生物炭的出水口水样,于2019年1—5月共采集7次水样,采集日期分别为1月28日、2月16日、3月7日、4月3日、4月15日、4月26日、5月7日。按照采集时间将样品的采集次数标注为1,2,3,4,5,6,7,湿地污水进口标注为a,生物炭施加前后的湿地出水口分别标注为－、＋,即未添加生物炭的湿地标注为“出水口－”,添加生物炭的湿地标注为“出水口＋”,共计21个水样样本,每个样本采集3次,以保证后期实验检验的准确性。

1.4.2 测定过程　采集到的水样暂存于4 ℃冰箱中,采用标准方法分析测定相应指标:总氮(TN)含量测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,氨氮(NH_4^+-N)含量测定采用纳氏试剂光度法,总磷(TP)和速效磷(PO_4^{3-})含量测定采用过硫酸钾分解-钼锑抗分光光度法[9]。所有样本均进行上机测试,即利用全自动间断式化学分析仪测取所需的化学指标。

氮、磷去除率的计算公式为:

$$x_{Cr}=\frac{x_{Ci}-x_{Ce}}{x_{Ci}}\times 100\%,$$

式中:x_{Cr}为各污染指标去除率;x_{Ci}为处理前氮或磷养分的质量浓度;x_{Ce}为处理后氮或磷养分的质量浓度[10]。

利用 Microsoft Excel 2010 处理数据并作图,采用 SPSS 软件中的单因素方差分析对所测的数据(生物炭施加前后人工湿地去除率)进行差异性检验,统计结果在 $p<0.05$ 时具有统计学意义。研究数据均在重复实验中取平均值与标准差。

2 结果与讨论

2.1 氮元素的变化分析

2.1.1 氨氮变化分析　图 2 为 2 组人工湿地在运行期间氨氮的质量浓度及去除率情况,在 1－5 月期间,2 组人工湿地出水氨氮质量浓度呈现相似的变化趋势,在停留时间为 7 d 时,随着时间推移出水氨氮质量浓度逐渐降低,出水口＋及出水口－的氨氮去除率平均值分别为 31.54%和 43.07%。由此可见,未添加生物炭的人工湿地对氨氮的去除率相对较低,但添加生物炭后的人工湿地氨氮去除率比未施加生物炭的人工湿地高 11.53%,说明生物炭添加对湿地氨氮的去除作用显著,以生物炭为基质的人工湿地明显优于对照组湿地,与 Mandal 等人[11]的研究结果一致。叶捷等人[12]研究发现在湿地系统去除氨氮的主要途径是基质吸附与硝化作用。一方面,Mohan 等人[13]曾经研究发现生物炭对氨氮的吸附能力较强,所以氨氮的去除率高低可能与生物炭所具有吸附性密切相关。另一方面,Ulyett 等人[14]研究表明生物炭添加可增加土壤的硝化能力。同时,Thies 等人[15]发现生物炭施用会刺激氮细菌活性,改变土壤系统氮循环过程。说明生物炭疏松多孔的性质可能为硝化细菌提供繁殖场所,添加后可改变土壤结构,为氧气扩散进入湿地床体提供条件,并作为湿地中的潜在碳源,有利于硝化作用的发生,使得生物炭湿地氨氮出水质量浓度降低,去除效果明显优于对照湿地。刘舒蕾等人[16]研究发现改性生物炭对氨氮的去除效率为 47.1%,本实验与他们的研究结果一致。

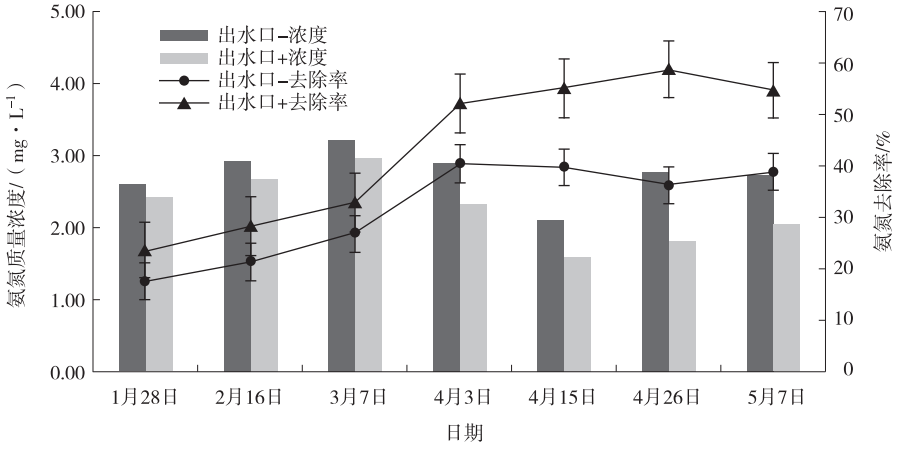


图 2　2 组人工湿地在稳定运行期间出水氨氮质量浓度和去除率

Fig. 2　The effluent concentration and removal efficiency of NH_4^+-N during stable operation of two constructed wetlands

2.1.2 总氮含量及去除率的变化分析　从图 3 可以看出:在整个实验期间,相同进水负荷条件下添加生物炭的湿地系统出水总氮质量浓度(16.09～12.36 mg·L^{-1})低于未添加生物炭的湿地系统(19.68～16.54 mg·L^{-1}),总氮去除率自 1－5 月明显呈上升趋势,施加生物炭后的湿地污水总氮去除率平均值比未施加生物炭的湿地高 8.27%。这一结果与王宁等人[17]研究结果相对一致,说明生物炭添加明显提高了人工湿地对总氮的去除能力。湿地污水中总氮的去除过程与氨氮类似,生物炭有较强的吸附氮能力,加入到基质后可通过吸附和生物固氮减少总氮的淋失[18]。此外,陈旭等人[19]研究表明总氮的去除主要通过反硝化来实现,在土壤中加入生物炭可以增强反硝化速率。原因可能与生物炭提高人工湿地硝化与反硝化脱氮有关。在相同的进水负荷下,提高的总氮去除率一方面是因为在反硝化过程中经常受到碳源不足、氧气过量等因素影响,而高温溶解炭化的生物炭既可作为有机碳源来充当反硝化碳源,通过溶出有机碳补充二级出水碳源,促进反硝化作用;另一方面是生物炭内部可能形成缺氧状态,反硝化性能增强[20]。说明生物炭的添加在一定程度上改变了基质反硝化脱氮的能力,刺激氮

元素的淋失,与空白对照组比较,生物炭对湿地污水中总氮去除效果明显。

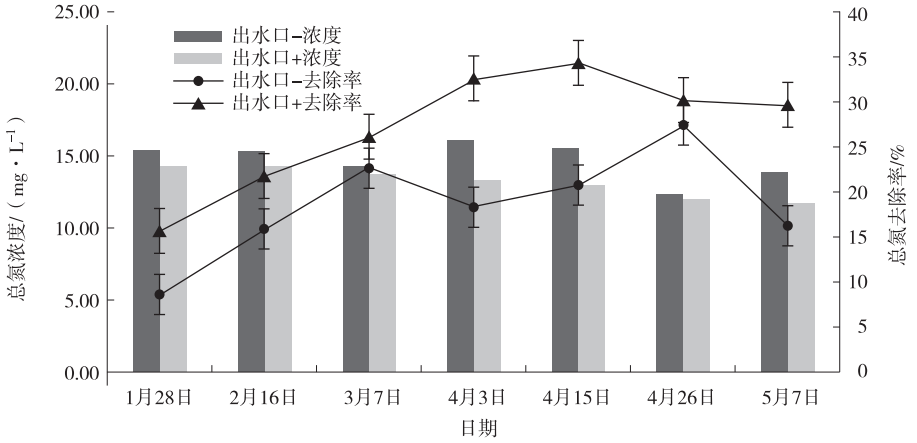


图3 2组人工湿地在稳定运行期间出水总氮质量浓度和去除率

Fig. 3 The effluent concentration and removal efficiency of TN during stable operation of two constructed wetlands

2.2 磷元素的变化分析

2.2.1 速效磷含量的变化分析 从图4可以看出,添加生物炭的湿地系统出水速效磷质量浓度(0.224～0.282 mg·L^{-1})低于未添加生物炭的湿地系统(0.243～0.308 mg·L^{-1}),施加生物炭后的湿地污水速效磷平均去除率比未施加生物炭的湿地高15.93%,从所得数据中得知添加生物炭后的潜流湿地对于污水中元素速效磷的去除效果较为明显。在人工湿地中,磷的去除主要是通过基质吸附、化学沉淀、植物吸收作用来实现[21]。Yao等人[22]研究表明土壤中添加巴西椒木生物炭降低了磷酸盐的淋失。因此,可能是由于生物炭施加改变了土壤的孔隙度,在微小的孔隙中通过吸附及储存流经湿地范围污水中不同种类及成分的元素,降低磷酸盐的淋失,使得自进水口流经湿地范围的污水得到一定程度的净化,出水口的速效磷的去除率呈逐渐递增的趋势,与袁敏[23]等人研究结果一致。自1－5月,出水口＋的速效磷的去除率整体略高于出水口－,湿地系统连续运行期间(1－5月),温度整体呈升高状态,植物鸢尾正值生长期(3－6月)。白晓龙等人[24]研究发现湿地植物鸢尾可通过根部吸收转化污水中所含磷元素。生物炭作为所研究湿地的新添基质层,表面易于附着湿地植物根真菌[25],可间接促进植物鸢尾对磷的吸收利用,说明生物炭添加可改善人工湿地速效磷去除效果,与王若凡等人[26]以生物炭为基质对速效磷的去除结果相似。

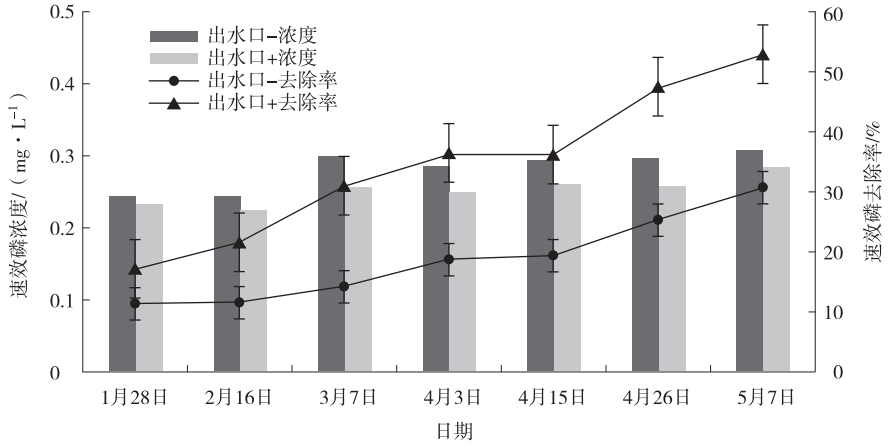


图4 2组人工湿地在稳定运行期间出水速效磷质量浓度和去除率

Fig. 4 The effluent concentration and removal efficiency of PO_4^{3-} during stable operation of two constructed wetlands

2.2.2 总磷含量的变化分析 如图5所示:生物炭添加前后出水口总磷去除率的范围分别为38.24%～55.95%,41.18%～69.05%,从所得数据中得知人工潜流湿地对于污水中的元素总磷的去除效果较为明显,总磷波动较大,可看出人工潜流湿地对于总磷的去除效果较为明显,在1－5月期间,植物鸢尾正值生长期(3－6月),湿地系统3－5月对总磷去除效率明显增强。总磷去除途径与速效磷类似。首先,生物炭可以间接促进植

物对磷的吸收作用，使生物炭与湿地植物鸢尾之间实现良好契合，刺激湿地脱磷效率；其次，出水口＋和出水口－的平均去除率分别为 56.14％和 46.60％，两个出水口的去除率的变化趋势基本吻合，整体上出水口的去除率能够随着温度变化呈上升趋势，保持在 35％～70％之间，总磷去除率较为优越，且出水口＋的去除率较出水口－提高了 9.54％。Xu 等人[27]报道，土壤中加入生物炭可以增强对磷元素的吸附，且吸附量与生物炭中钙含量有关。说明总磷去除率的提高可能与生物炭中所含的钙元素有关，与空白对照组比较，生物炭对湿地污水中总磷去除率具有一定影响。

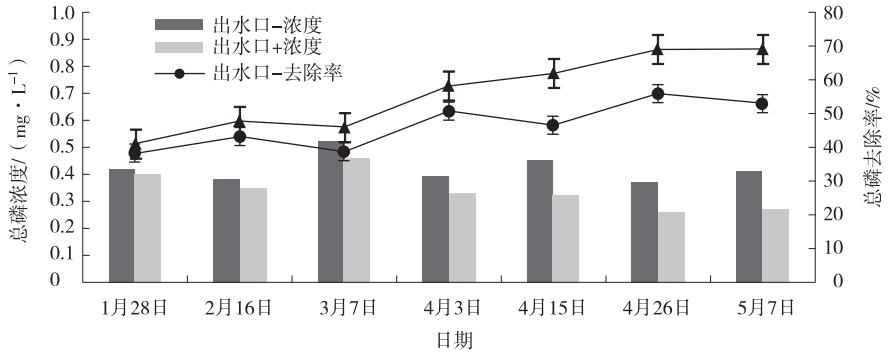


图 5　2 组人工湿地在稳定运行期间出水总磷质量浓度和去除率情况

Fig. 5　The effluent concentration and removal efficiency of TP during stable operation of two constructed wetlands

2.3 各指标去除率与温度、pH 相关性分析

2.3.1 *生物炭施加前各指标相关性分析*　从表 2 可以看出总磷与速效磷的去除率之间存在统计学意义上正相关关系。说明总磷与速效磷去除率之间相关性较强；同时，总磷与速效磷的去除率与温度呈统计学意义上正相关关系。汤显强等人[28]研究表明温度升高有利于增加填料吸附速率及湿地微生物活性，人工湿地夏季总磷去除率大约比冬季高 10％。植物鸢尾生长期为 3－6 月，随着温度变化，湿地植物鸢尾长势良好，根际微生物活性增强，说明温度的变化可能影响污水中磷元素去除。

表 2　生物炭施加前各指标去除率与温度、pH 相关性

Tab. 2　Correlation between removal rate of various indicators and temperature, pH value before application of biochar

	总氮去除率	总磷去除率	氨氮去除率	速效磷去除率	温度
总磷去除率	0.480				
氨氮去除率	0.190	0.492			
速效磷去除率	0.364	0.868 *	0.565		
温度	0.511	0.930**	0.640	0.953**	
pH	0.719	0.739	0.721	0.6611	0.758 *

注：*，**分别表示相关性检验结果在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平（双侧）上具有统计学意义，下同

2.3.2 *生物炭施加后各指标相关性分析*　从表 3 可以看出磷元素去除率与温度呈统计学意义上正相关关系，氮元素去除率与与温度呈统计学意义上正相关关系，总氮与氨氮去除率、总磷与速效磷去除率分别呈统计学意义上极显著正相关，同时，氮磷元素去除率与 pH 呈统计学意义上正相关关系。李雅竹[29]研究发现磷元素受温度影响较大，氮元素受温度影响较小；生物炭吸附氨氮受 pH 的影响很大，吸附磷元素受 pH 影响较小。说明随着温度的升高，分子运动剧烈，被吸附的离子更容易进入到生物炭的孔隙中；同时，李卓瑞等人[30]研究表明生物炭添加于人工湿地后，土壤中的 pH 明显升高，使氮磷的有效性提高。说明生物炭为湿地潜在碳源且呈碱性，添加后使湿地土壤中的酸碱度发生改变，可能刺激氮磷元素的淋失，使生物炭与潜流湿地污水处理效果达到良好契合状态。

综上所述：从表 2 和表 3 的对比可以明显的看出生物炭的施加增强氮磷元素去除率与温度、pH 之间相关性，并明显呈统计学意义上正相关关系。说明温度、pH 对人工湿地污水净化效率具有一定改善作用，与生物炭的良好契合对氮磷浓度含量的去除效率提高具有明显影响。对本研究来说，两组人工湿地进水水质、植物鸢尾、水力负荷及操作温度均相同，生物炭施加可能是间接造成氮磷元素去除率与温度、pH 之间相关性发生变化的主

要原因。

表3 生物炭施加后各指标去除率与温度、pH相关性

Tab.3 Correlation between removal rate of various indicators and temperature, pH value after application of biochar

	总氮去除率	总磷去除率	氨氮去除率	速效磷去除率	温度
总磷去除率	0.793	1			
氨氮去除率	0.907**	0.958			
速效磷去除率	0.751	0.938**	0.894		
温度	0.819*	0.968**	0.972*	0.946**	
pH	0.945*	0.788*	0.849*	0.772*	0.787*

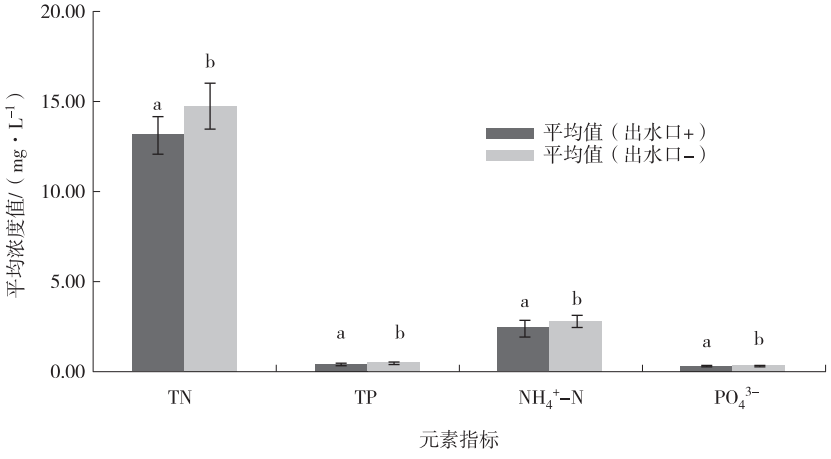
2.4 生物炭施加前后人工湿地各参数差异显著性检验

从表4和图6可以看出:出水口+和出水口−的总氮质量浓度标准差分别为1.28和1.04,变异系数分别为9%和8%;出水口+和出水口−的总磷质量浓度标准差分别为0.05和0.07,变异系数分别为12%,21%;出水口+和出水口−的速效磷质量浓度标准差分别为0.03,0.02,变异系数分别为11%,8%;氨氮的出水口+和出水口−的标准差分别为0.34和0.48,变异系数分别为13%和18%。出水口+的总氮、总磷、速效磷及氨氮质量浓度值的离散程度较出水口−低,其中各元素指标方差分析结果的p值小于0.05,可以认为出水口+与出水口−总氮质量浓度呈统计学意义上极显著性差异。说明在人工潜流湿地中,添加生物炭前后,各元素指标的出水口含量及去除率变化较大,即生物炭对潜流湿地污水中所含的总氮、总磷、速效磷及氨氮的去除效果明显。

表4 添加生物炭前后各参数出水口方差分析统计表

Tab.4 Statistical analysis of variance analysis of water outlet before and after adding biochar mg·L^{-1}

元素类别	湿地类别	平均值	最大值	最小值	标准差	标准误	变异系数	p值(双侧)
总氮	出水口−	14.69	16.09	12.36	1.28	0.48	9%	0.027
	出水口+	13.11	14.28	11.64	1.04	0.40	8%	
总磷	出水口−	0.42	0.52	0.37	0.05	0.02	12%	0.035
	出水口+	0.34	0.46	0.26	0.07	0.03	21%	
氨氮	出水口−	2.75	3.32	2.11	0.34	0.13	12%	0.044
	出水口+	2.35	2.95	1.57	0.48	0.18	20%	
速效磷	出水口−	0.28	0.31	0.24	0.03	0.01	11%	0.030
	出水口+	0.25	0.28	0.22	0.02	0.01	8%	



注:数据以$\bar{x}\pm s$表示,不同上标字母表示数据间差异有统计学意义($p<0.05$)

图6 各参数出水口+和出水口−污染物平均值对比

Fig.6 Comparison of the average value of the water outlet + and the water outlet of each parameter

两种人工湿地中氮磷的质量浓度整体上随着生物炭的添加呈统计学意义上差异（$p<0.05$），与段婧婧等人[31]研究结果一致。同时，卜晓莉等人[32]研究表明稻壳炭施用可以明显减少灰潮土氮磷元素的淋失。定量生物炭的添加改变了湿地污水中氮磷的淋失规律，使人工湿地污水处理良好，说明以生物炭为基质的潜流湿地对污水中所含的氮、磷元素去除效果明显。

3 结论

通过对人工潜流湿地的出水口＋（施加生物炭）和出水口－（未施加生物炭）两组复合型人工湿地进行为期 5 个月的取样与监测，研究这两种人工湿地对污染物的净化效果，来探究生物炭的添加前后对湿地的影响，结论如下：

1）生物炭提高了人工湿地的净化能力。与未施加生物空白组对比，加入生物炭后，人工湿地对总氮、总磷、速效磷及氨氮的去除率分别提高了 9.54%，8.27%，15.93%和 11.53%。

2）生物炭添加后的人工湿地，总氮、总磷、速效磷及氨氮平均去除率与温度、pH 呈统计学意义上正相关关系，说明生物炭基质与湿地系统契合良好。

3）利用单因素方差分析法得知生物炭施加前后的两块人工湿地的污染物浓度及去除率呈统计学意义上差异（$p<0.05$），生物炭的施加对潜流湿地污水净化效率的影响明显，可作为优能基质用于农村低污染水再利用。

参考文献：

[1] FU D，CHEN Z，XIA D，et al. A novel solid digestate-derived biochar-Cu NP composite activating H_2O_2 system for simultaneous adsorption and degradation of tetracycline[J]. Environmental Pollution，2017，221：301-310.

[2] 李江遐，吴林春，张军，等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. 生态环境学报，2015，24(12)：2075-2081.
LI J X，WU L C，ZHANG J，et al. Research progress on biochar remediation of heavy metal pollution in soil[J]. Journal of Ecoenvironment，2015，24(12)：2075-2081.

[3] 张千丰，王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展[J]. 土壤与作物，2012，1(4)：219-226.
ZHANG Q F，WANG G H. Research progress on the physical and chemical properties of biochar and its effect on soil improvement[J]. Soil and Crops，2012，1(4)：219-226.

[4] CAYUELA M L，SANCHEZ-MONEDERO M A，ROIG A，et al. Biochar and denitrification in soils：when，how much and why does biochar reduce N_2O emissions[J]. Scientific Reports，2013，76(3)：1732-1739.

[5] 孔令华，施春红，马方曙，等. 不同填料潮汐流人工湿地处理 SBR 尾水的对比[J]. 环境工程学报，2017，11(1)：379-385.
KONG L H，SHI C H，MA F S，et al. Comparison of tidal flow constructed wetland treatment of SBR tailwater with different fillers[J]. Journal of Environmental Engineering，2017，11(1)：379-385.

[6] ZHOU X，LIANG C L，JIA L X，et al. An innovative biochar-amended substrate vertical flow constructed wetland for low C/N waste water treatment：Impact of influent strengths[J]. Bioresource Technology，2018，247：844-850.

[7] 赵小宁，胡晓黎. 商洛市近 50a 气温和降水的变化分析[J]. 陕西农业科学，2012，58(5)：29-32.
ZHAO X N，HU X L. Analysis of temperature and precipitation changes in Shangluo city in the past 50 years[J]. Shaanxi Agricultural Sciences，2012，58(5)：29-32.

[8] ZHANG A，BIAN R，PAN G，et al Effects of biochar amendment on soil quality，crop yield and greenhouse gas emission in a chinese rice paddy：a field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. Field Crops Research，2012，127(127)：153-160.

[9] 魏复胜. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京：中国环境科学出版社，2002.
WEI F S. Water and wastewater monitoring and analysis methods [M]. 4th Edition. Beijing：China Environmental Science Press，2002.

[10] HU G J，ZHOU M，HOU H B，et al. An ecological floating-bed made from dredged lake sludge for purification of eutrophic water[J]. Ecological Engineering，2010，36(10)：1448-1458.

[11] MANDAL S，THANGARAJAN R，BOLAN N S，et al. Biochar-induced concomitant decrease in ammonia volatilization and increase in nitrogen use efficiency by wheat[J]. Chemosphere，2016(142)：120-127.

[12] 叶捷，彭剑峰，高红杰，等. 潮汐流人工湿地低温下 NH_4^+-N 去除模型的比较和优化[J]. 环境科学学报，2011，31(7)：1456-1463.
YE J，PENG J F，GAO H J，et al. Comparison and optimization of NH_4^+-N removal models in tidal flow constructed wetlands at low temperatures[J]. Journal of Environmental Science，2011，31(7)：1456-1463.

[13] MOHAN D,SARSWAT A,et al. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar,a renewable,low cost and sustainable adsorbent-a critical review[J]. Bioresource Technology,2014,160:191-202.

[14] ULYETT J,SAKRABANI R,KIBBLEWHITE M,et al. Impact of biochar addition on water retention,nitrification and carbon dioxide evolution from two sandy loam soils[J]. European Journal of Soil Science,2014,65(1):96-104.

[15] THIES J E,RILLIG M C. Characteristics of biochar:biological properties[M]//LEHMANN J,JOSEPH S. Biochar for environmental management. London:Science and Technology,2009:85-105.

[16] 刘舒蕾,彭慧君,杨佳怡,等.水生植物生物质炭去除水体中氮磷性能[J].环境科学,2019,40(11):4980-4986.
LIU S L,PENG H J,YANG J Y,et al. Removal of nitrogen and phosphorus from water by biomass carbon of aquatic plants [J]. Environmental Science,2019,40(11):4980-4986.

[17] 王宁,黄磊,罗星,等.生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响[J].环境科学,2018,39(10):4505-4511.
WANG N,HUANG L,LUO X,et al. Effects of biochar addition on nitrogen removal and nitrous oxide release from aerated constructed wetlands[J]. Environmental Science,2018,39(10):4505-4511.

[18] 王涛.颗粒生物炭人工湿地对二级出水氮磷去除研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
WANG T. Research on the removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent by granular biochar constructed wetland[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2018.

[19] 陈旭,张璐.生物炭基质潮汐流人工湿地处理生活污水性能[J].生态环境学报,2019,28(7):1443-1449.
CHEN X,ZHANG L. The performance of biochar-based tidal flow constructed wetland for domestic sewage treatment[J]. Acta Eco-Environmental Sciences,2019,28(7):1443-1449.

[20] KIZITO S,LU T,WU S B,et al. Treatment of anaerobic digested effluent in biochar-packed vertical flow constructed wetland columns:Role of media and tidal operation[J]. Science of the Total Environment,2017(592):197-205.

[21] 张亚琼,崔丽娟,李伟,等.潮汐流人工湿地的除氮效果及影响因素[J].环境科学研究,2015,28(7):1171-1178.
ZHANG Y Q,CUI L J,LI W,et al. Nitrogen removal effect and influencing factors of tidal flow constructed wetland[J]. Environmental Science Research,2015,28(7):1171-1178.

[22] YAO Y,GAO B,ZHANG M,et al. Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate,ammonium,and phosphate in a sandy soil[J]. Chemosphere,2012,89(11):1467-1471.

[23] 袁敏,刘晓冰,唐美珍,等.生物炭固定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.
YUAN M,LIU X B,TANG M Z,et al. Simulation study on the removal of nitrogen in low-temperature sewage by biochar fixation and enhanced constructed wetland[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2018,34(5):463-468.

[24] 白晓龙,杨春和,顾卫兵,等.不同植物人工湿地净化模拟生活污水效果[J].江苏农业科学,2014,42(4):326-328.
BAI X L,YANG C H,GU W B,et al. Purification of simulated domestic wastewater by different plant constructed wetlands [J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2014,42(4):326-328.

[25] HAMMER E C,BALOGH-BRUNSTAD Z,JAKOBSEN I,et al. A mycorrhizal fungus grows on biochar and captures phosphorus from its surfaces[J]. Soil Biology & Biochemistry,2014,77(7):252-260.

[26] 王若凡,汪文飞,王煜钧,等.不同填料对潜流湿地 PO_4^{3-} 去除效果的影响[J].环境工程,2020,38(3):87-91.
WANG R F,WANG W F,WANG Y J,et al. The influence of different fillers on the removal effect of PO_4^{3-} in subsurface flow wetland[J]. Environmental Engineering,2020,38(3):87-91.

[27] XU G,SUN J N,SHAO H B,et al. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity[J]. Ecological Engineering,2014,62(1):54-60.

[28] 汤显强,李金中,李学菊,等.间歇曝气对生物填料人工湿地氮磷去除性能的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(1):318-322.
TANG X Q,LI J Z,LI X J,et al. The effect of intermittent aeration on nitrogen and phosphorus removal performance of bio-filler constructed wetland[J]. Journal of Agricultural Environment Sciences,2008,27(1):318-322.

[29] 李雅竹.氮、磷面源污染生物炭控制技术[D].湘潭:湖南科技大学,2014.
LI Y Z. Biochar control technology for non-point source pollution of nitrogen and phosphorus[D]. Xiangtan:Hunan University of Science and Technology,2014.

[30] 李卓瑞,韦高玲.不同生物炭添加量对土壤中氮磷淋溶损失的影响[J].生态环境学报,2016(2):333-338.
LI Z R,WEI G L. The effect of different biochar additions on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soil[J]. Journal of Ecological Environment,2016(2):333-338.

[31] 段婧婧,薛利红,尹爱经,等.添加生物炭的水芹湿地对农村低污染水的净化研究[J].农业环境科学学报,2017,36(2):353-361.
DUAN J J,XUE L H,YIN A J,et al. Purification of low-pollution water in rural areas with cress wetland added with biochar [J]. Journal of Agricultural Environmental Sciences,2017,36(2):353-361.

[32] 卜晓莉,汪浪浪,马青林,等.稻壳炭施用对太湖滨岸灰潮土氮磷淋失及土壤性质的影响[J].生态环境学报,2019,28(11):2216-2222.
BU X L,WANG L L,MA Q L,et al. Effects of rice husk carbon application on nitrogen and phosphorus leaching and soil properties of gray-tidal soil on the shore of Taihu Lake[J]. Journal of Eco-Environment,2019,28(11):2216-2222.

Effect of Biochar Addition on Sewage Purification Efficiency of Subsurface Flow Wetland

ZHU Xiaojie[1], SHAO Jingan[1,2], ZHAO Pei[3]

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University;
2. Key Laboratory of Surface Process and Environmental Remote Sensing of Chongqing, Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331;3. College of Urban, Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo Shannxi 726000, China)

Abstract: [**Purposes**] Due to the high load of sewage discharged directly from rural areas, it is easy to cause the blockage of constructed wetlands. [**Methods**] Thus, outdoor control experiments were carried out to improve the effluent quality of rural domestic sewage and explore the feasibility of using biochar to reduce the pollution load. Subsurface wetland was taken as the research object. The effect of biochar on the concentration of TP, TN, PO_4^{3-}, NH_4^+-N in subsurface wetland sewage system was investigated through the comparison of the purification efficiency of subsurface wetland sewage before and after the addition of biochar. After that, the adsorption and removal efficiency of biochar on N, P in subsurface wetland was analyzed. [**Findings**] According to the results, it showed that: 1) The average removal rates of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), rapid available phosphorus (PO_4^{3-}) and ammonia nitrogen (NH_4^+-N) increased by 9.54%, 8.27%, 15.93%, 11.53% with the addition of biochar, so the removal rate of wetland added biochar was significantly higher than that of wetland that was not added biochar, and the overall trend was increasing with the change of time; 2) The removal rate of each element (TP, TN, PO_4^{3-}, NH_4^+-N) in water was significantly correlated with temperature and pH value with the addition of biochar; 3) The purification effect of subsurface wetland sewage was significantly improved ($p<0.05$) by adding biochar, which thus could achieve better treatment effect of subsurface wetland sewage purification by adding biochar. [**Conclusions**] The research results had great significance reference for the treatment of decentralized domestic sewage in rural areas, which could also provide some scientific basis for the purification of rural domestic sewage.

Keywords: constructed wetland; sewage purification; nitrogen and phosphorus removal; analysis of variance

(责任编辑 黄 颖)