农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡， 汪文飞， 王煜钧， 孙鹤洲， 刘傲展

引用本文:
王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 等. 生物炭折流湿地对生活污水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2001-2007.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同处理梯度污水对细菌群落和酶活性的影响
吴晓斐, 何源, 黄治平, 张丹丹, 郑宏艳, 丁健
农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2026-2035 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0155

CO_2-N_2气氛下热解工艺对稻秆生物炭吸附Cd^{2+}的影响
周红卫, 陈振焱, 胡超, 张亚平, 顾东清
农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1605-1612 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1406

玉米秸秆生物炭对尿素分解的影响
刘遵奇, 孟军, 陈温福
农业环境科学学报. 2015(6): 1142-1148 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.018

生物炭-化肥配施对稻田土壤氮磷迁移转化的影响
崔虎, 王莉霞, 欧洋, 阎百兴, 韩露, 李迎新, 姜珊
农业环境科学学报. 2019, 38(2): 412-421 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0515

不同生物质炭对酸化茶园土壤N2O和CO2排放的影响
孙赟, 何志龙, 林杉, 张水清, 柳维扬
农业环境科学学报. 2017, 36(12): 2544-2552 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0845

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 等. 生物炭折流湿地对生活污水的净化效果[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2001-2007.
WANG Ruo-fan, WANG Wen-fei, WANG Yu-jun, et al. Purification effect of biochar baffled wetland on domestic sewage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9): 2001-2007.

开放科学OSID

生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

(兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘　要: 为提升西北地区农村生活污水的治理水平,结合西北地区气温特征,以生物炭为主体构建了折流湿地,并分析其对生活污水中污染物的净化效果。结果表明:在水温8~12 ℃条件下,折流湿地的最佳水力停留时间(HRT)为2.5 d,此时,湿地中污水的化学需氧量(COD)、氨氮(NH_4^+-N)、磷酸盐(PO_4^{3-}-P)、悬浮物(SS)的去除率分别为90.51%、72.38%、90.73%、94.57%。此外,各自污染物去除率与其停留时间和沿程均呈显著正相关(P<0.05)。折流湿地经过12个月的运行,对COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、SS的年平均去除率分别为88.16%、83.16%、92.55%、96.30%,且出水水质稳定。生物炭作为折流湿地填料对COD、PO_4^{3-}-P、SS的去除过程均较好地符合一级动力学模型(R^2>0.91),并且对SS具有较快的去除速率。研究表明,生物炭作为折流湿地填料具有良好的应用价值,对解决西北地区农村水污染问题具有重要的意义。

关键词: 折流湿地;生物炭;水力停留时间;一级动力学模型

中图分类号: X799.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2020)09-2001-07　　doi:10.11654/jaes.2020-0258

Purification effect of biochar baffled wetland on domestic sewage

WANG Ruo-fan, WANG Wen-fei, WANG Yu-jun, SUN He-zhou, LIU Ao-zhan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to speed up the treatment of rural domestic sewage in northwest China, this study combined with the characteristics of anuual average temperature, constructed a baffled wetland using biochar as the main body, and its degradation effect on pollutants in domestic sewage was analyzed. The results showed that the optimal hydraulic retention time(HRT) of the baffled wetland was 2.5 d at 8~12 ℃. During this time, the removal rates of chemical demand(COD), ammonia nitrogen(NH_4^+-N), phosphate(PO_4^{3-}-P), and suspended solids(SS) in the wetland were 90.51%, 72.38%, 90.73%, and 94.57%, respectively. In addition, the respective pollutant removal rate was significantly positively correlated with their residence time(P<0.05). After 12 months of wetland operation, the average annual removal efficiency of COD, NH_4^+-N, PO_4^{3-}-P, and SS were 88.16%, 83.16%, 92.55%, and 96.30%, respectively, and the effluent quality was stable. Biochar, a baffled wetland filler, biochemically degraded COD, PO_4^{3-}-P, and SS. Further, the data fitted the first-order kinetic model with R^2 greater than 0.91, and the fastest degradation rate was observed for SS. Therefore, the results show that the use of biochar as a filler in baffled wetlands is of good application value and is of great significance for solving rural water pollution problems in northwestern China.

Keywords: baffle wetland; biochar; hydraulic retention time; first-order kinetic model

我国西北农村地区低温期较长,生活污水水质日变化系数大,人工湿地的填料在其处理污水过程中起主导作用,因此在湿地系统中填料对污染物的截留吸附特性和其内部的水力特性是决定湿地对污染物去除效率的关键因素[1]。现有的研究表明,生物炭具有较大的比表面积和较强的稳定性,可为微生物提供良

收稿日期: 2020-03-10　　**录用日期:** 2020-07-02

作者简介: 王若凡(1983—),女,甘肃兰州人,博士,副教授,主要从事人工湿地污水处理研究。E-mail:wangruofan@mail.lzjtu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51969011);甘肃省自然基金项目(17JR5RA105)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51969011); The Natural Science Foundation of Gansu Province, China(17JR5RA105)

好的生存空间,并具有很强的吸附性。生物炭在土壤重金属的修复和废水处理得到了广泛的应用。如徐德福等[2]研究表明生物炭能够显著增加人工湿地中的植物根系生物量,提高溶解氧含量。王宁等[3]研究表明生物炭投加可强化曝气湿地系统脱氮能力,实现N_2O气体减排。Saeed等[4]研究表明生物炭和粉碎砂浆组合可实现人工湿地对废水的高效处理。但仅用生物炭作湿地填料的研究较少,本研究的宗旨是以生物炭为填料构建折流人工湿地处理生活污水,并结合西北地区年平均气温特征,待其稳定运行后,确定折流湿地的最佳水力停留时间(HRT),考察湿地沿程对去污性能的影响,分析生物炭对各污染物的去除效果和微生物的降解过程;然后对其运行监测12个月,初步评价生物炭应用于折流湿地处理污水的可行性,以为西北地区农村分散式生活污水处理和人工湿地模型建立提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

生物炭购买于当地活性炭厂,该生物炭由农业秸秆经风化、破碎后,放入马弗炉中,以10 ℃·min^{-1}的升温速度,从室温加热到500 ℃炭化3 h,而后冷却至室温装瓶备用,其物理性质[5-6]见表1。

1.2 实验方法

1.2.1 折流湿地装置

采用潜流湿地结构设计构建水平折流湿地,以生物炭为填料构建湿地系统。如图1所示,垂直方向分别是5 cm的承托层(粒径15~25 mm的砾石),30 cm的主填料层(下层20 cm、上层10 cm,分别由粒径6~8 mm和4~5 mm的生物炭填料构成),10 cm的土壤层(过10目筛的均匀黄土),湿地植物为株高0.3~0.7 m的芦苇,每平方米20棵。水平方向是由5个隔室、进水池和出水池组成,每个隔室的长×宽×高=60 cm×20 cm×50 cm,其可处理污水容积为20 L。进水池铺设高15 cm、粒径10~15 mm的砾石,对污水进行预处理。湿地进水为居民区的生活污水(参数见表2),由进水池均匀投配,逐步通过5个隔室,经填料层到达出水池的收集管排出。

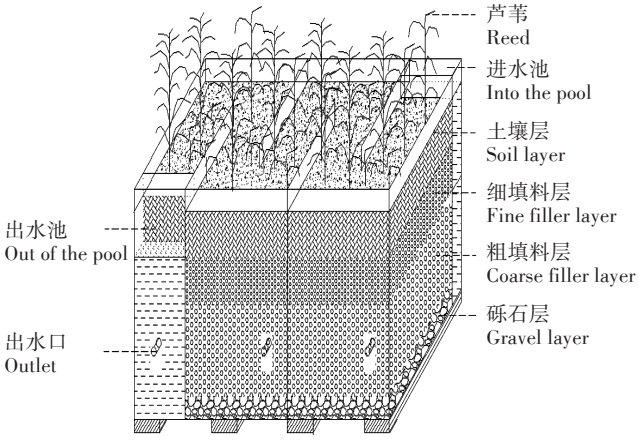

图1 折流湿地结构

Figure 1 Baffled constructed wetland structure

1.2.2 折流湿地对污染物处理效果的研究

(1)HRT对生活污水处理的影响

折流湿地运行稳定后,分别在0.25、0.5、1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5 d追踪测定出水温度、pH、化学需氧量(COD)、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P和悬浮物(SS)的含量,确定湿地的HRT,分析生物炭床对生活污水的降解作用。

(2)沿程对生活污水处理的影响

在最佳HRT下,分别测定湿地沿程在0.6、1.2、1.8、2.4、3.0 m的出水温度、pH、COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P和SS的含量,分析沿程对生物炭床处理生活污水的影响。

(3)折流湿地稳定性监测

在最佳HRT和沿程的条件下,以每2.5 d为一个

表1 生物炭的物理性质

Table 1 Physical properties of biochar

直径 Diameter/mm	比表面积 Specific surface area/($m^2 \cdot g^{-1}$)	孔隙率 Porosity/%	渗透系数 Permeability coefficient/($cm \cdot s^{-1}$)	堆积密度 Bulk density/($g \cdot cm^{-1}$)	碘值 Iodine value/($mg \cdot g^{-1}$)
4~8	18.63	53.21	0.086 2	0.549	≥600

表2 折流湿地进水参数

Table 2 Influent parameters of baffle wetland

pH	电导率 Conductance/($\mu S \cdot cm^{-1}$)	溶解氧 Dissolved oxygen/($mg \cdot L^{-1}$)	COD/($mg \cdot L^{-1}$)	SS/($mg \cdot L^{-1}$)	PO_4^{3-}-P/($mg \cdot L^{-1}$)	NH_4^+-N/($mg \cdot L^{-1}$)
7.2~7.8	310~325	3.4~3.8	244~336	175~254	3.0~5.9	37.5~59.1

处理周期,折流湿地运行12个月,总计年处理污水量为2.920 m^3。不定期地监测湿地进出水温度、pH、COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P和SS的变化,分析其运行参数和稳定性。

1.2.3 指标测定

COD采用重铬酸钾氧化法测定,NH_4^+-N采用纳氏试剂分光光度法测定,PO_4^{3-}-P采用钼酸铵分光光度法测定,SS采用重量法测定,具体操作步骤详见《水和废水监测分析方法》[7]。

研究结果均采用OriginPro 8.0及SPSS软件进行数据显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同HRT对生活污水处理的影响

在水温8~12 ℃条件下,采用间隔配水方式不间断地投加生活污水,并进行微生物挂膜处理,观察湿地出水水质,待湿地去除性能趋于稳定后,进行折流湿地对各污染物的去除实验。由图2可知,折流湿地对各污染物的去除率与HRT的增加呈显著正相关(R^2>0.90,P<0.05)。在2.5 d之前,各污染物的含量明显降低,COD和NH_4^+-N的去除率相比于PO_4^{3-}-P和SS的去除斜率较大,去除率明显上升。其一,是因为SS在湿地前段被沉淀、过滤截留,PO_4^{3-}-P被生物炭吸附去除,Kizito等[8]在对生物炭的研究中也证实生物炭对磷具有一定的吸附作用;其二,是因为生物炭可作为微生物的固定化载体,保护其在不利环境因素下的活动[9],通过提升微生物新陈代谢的稳定性来提高湿地系统对COD和NH_4^+-N的去除率,并且Mohan等[10]研究表明,生物炭对NH_4^+-N具有一定的吸附能力;其三,是因为生物炭具有高碳含量,为异氧生物提供反硝化碳源;其四,可能是因为生物炭内部可以形成缺氧环境导致反硝化作用形成。在2.5 d之后,水中各污染物的去除率趋于平缓,是因为湿地系统中的溶解氧源于进水过程,而随着湿地运行时间的延长,溶解氧被逐渐消耗,湿地内部硝化作用受到了抑制[11],导致湿地对污染物的去除趋于平缓。综合考虑处理效率和经济效益,宜选2.5 d为折流湿地去除污染物的最佳HRT,在此条件下,折流湿地出水中COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、SS的去除率分别为90.51%、72.38%、90.73%、94.57%,这与程龙等[12]以折流式潜流人工湿地对氮磷

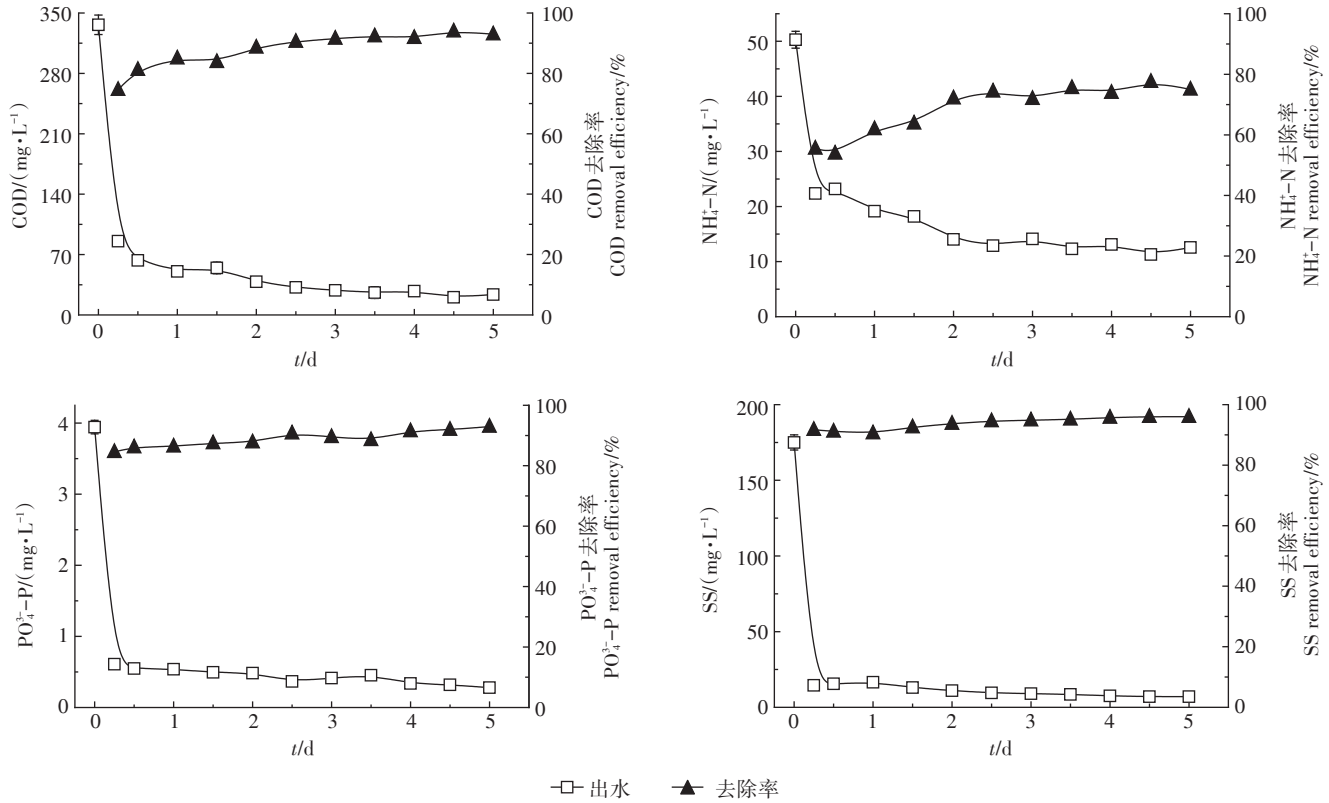

图2 污染物浓度随时间的变化

Figure 2 The change of pollutants concentration over time

的净化效果的HRT相似。

2.2 不同沿程对生活污水处理的影响

在水温8~12 ℃和最佳HRT的条件下，折流湿地出水中各污染物的去除率随沿程的变化如图3所示。湿地沿程的增加与各污染物的去除率呈显著正相关（R^2>0.97，P<0.05）。在1.2 m之前，污染物的去除率迅速上升，这一方面是因为污水刚进入生物炭床时由水体带入溶解氧，供氧水平较高，微生物降解速率较快，使得污染物的去除率提高；另一方面是因为生物炭床对污染物具有截留、沉淀作用。在1.2~3.0 m时，各污染物的去除率呈缓慢上升趋势，NH_4^+-N去除率偏低。这是因为氨化反应快于硝化反应，进水中溶解氧在湿地前段大量被氨化消耗，湿地中后段呈现缺氧（或厌氧）环境，硝化反应被严重抑制，呈现出高NH_4^+-N积累的特征[13]，NH_4^+-N去除率低。因此，折流湿地对污染物的去除前段最为明显；在3.0 m时，湿地对COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、SS的去除率分别为90.00%、67.46%、86.24%、96.30%，这与黄有志等[14]以表流人工湿地对污水去除的研究结论一致。

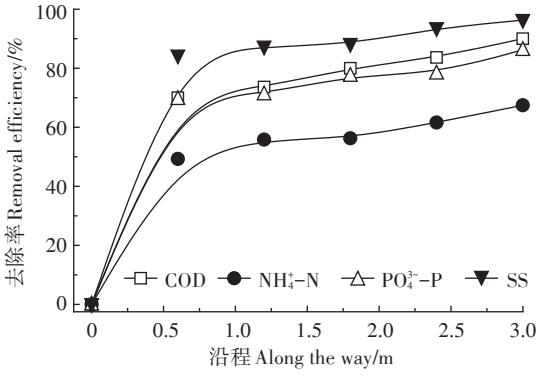

图3 污染物浓度随沿程的去除率

Figure 3 The removal rate of pollutants concentration along the way

2.3 折流湿地稳定性监测

在HRT为2.5 d，沿程为3.0 m的条件下，将折流湿地连续运行12个月，湿地对污染物的去除如图4所

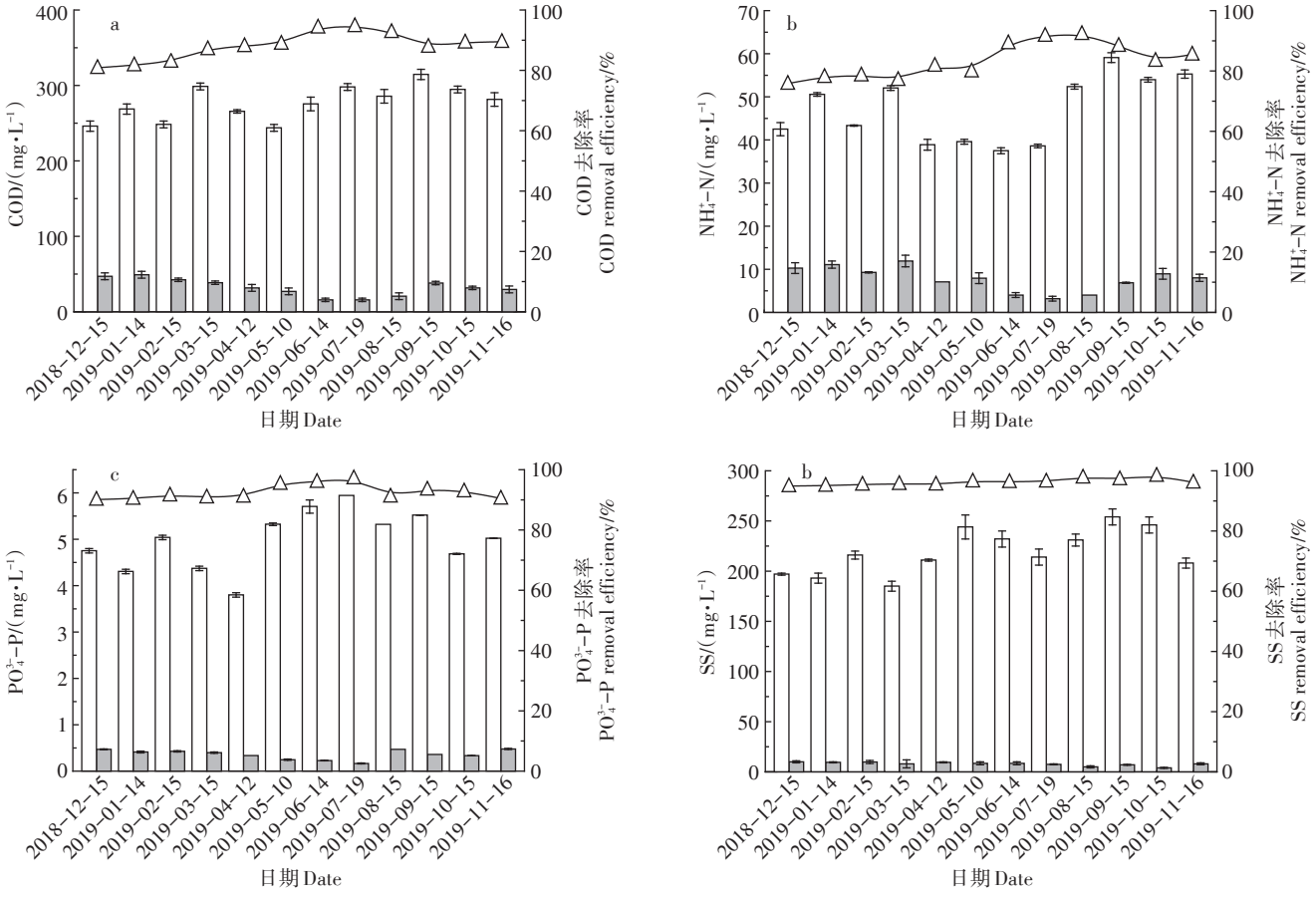

图4 折流湿地对污染物的去除

Figure 4 The removal of pollutants by baffled wetland

示。随着湿地运行时间的增加,各污染物的去除率整体呈上升趋势。运行过程中PO_4^{3-}-P和SS的去除率波动幅度较小,COD和NH_4^+-N的去除率随着月份的增加先上升后下降,在7月达到峰值,分别为94.7%和91.73%。折流湿地对各污染物的去除率夏季>秋季>春季>冬季,夏季相比于冬季湿地对COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、SS的去除率分别提高了0.12、0.21、0.08、0.02倍,这与王学华等[15]研究的人工湿地污染物去除率随季节变化的结论一致。主要原因是:温度等外界条件因素对PO_4^{3-}-P和SS去除的影响较小,其主要是靠生物炭床吸附、过滤、沉淀和离子交换等物理化学作用去除;COD和NH_4^+-N的去除除了物理化学作用外,在湿地系统中还要通过微生物的同化作用去除,而湿地进水中污染物浓度不稳定,使得生物炭床中微生物群落受到冲击,微生物新陈代谢不稳定[16];夏季到冬季过渡时,环境温度逐渐变低,湿地系统中温度也相应降低,导致微生物活性下降;此外,生物炭床上的生物膜经过长时间的运行,膜加厚,内部出现厌氧产酸,导致生物膜脱落,填料堵塞;因此,出现了COD和NH_4^+-N的去除率降低的现象。折流湿地经过12个月的运行,对COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、SS年平均去除率分别为88.16%、83.16%、92.55%、96.30%,出水中COD、PO_4^{3-}-P、SS的含量均能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,出水水质稳定。所以,运用折流湿地处理常规的生活污水能够达到稳定运行,且确保出水达标排放。

2.4 污染物随HRT和沿程变化的动力学模型

人工湿地在对污染物的降解过程中,主要考虑处理负荷与去除效率之间的关系,一级动力学模型经常用于描述潜流人工湿地对污染物的去除规律[17-18]。通过一级动力学模型可以拟合出最适的工艺参数,以用于优化生化处理的条件,预计微生物降解污染物的趋势,其直线方程如公式(1)和公式(2)所示。

$$C_e=C_0\exp(-k_v\cdot a) \quad (1)$$

$$k_v=-1/a\cdot\ln(C_e/C_0) \quad (2)$$

式中:k_v为污染物体积去除速率常数,d^{-1};C_0为进水浓度,$mg\cdot L^{-1}$;C_e为出水浓度,$mg\cdot L^{-1}$;a为污水在折流湿地中的停留时间或沿程,d或m。

随运行时间和沿程的增加,折流湿地系统中污染物浓度呈下降趋势。以$\ln(C_e/C_0)$为纵坐标,以时间t和沿程l为横坐标,绘制一级动力学拟合图,得到拟合数据。由表3可知,一级动力学模型对折流湿地处理COD、PO_4^{3-}-P、SS的拟合过程相比于NH_4^+-N处理的拟合过程要好(R^2>0.91),表明一级动力学模型能够更好地描述折流湿地对COD、PO_4^{3-}-P、SS的生化降解过程,这与HRT和沿程对生活污水处理影响所得结论一致。这也进一步说明了生物炭由于其孔隙率大、比表面积大,更有利于微生物在其表面附着,提高微生物的稳定性;碳源充足,为反硝化提供充足的电子供体[19];渗透系数小,可延长水力停留时间[5],从而极大地提高了生物炭折流湿地对污染物的去除率。

将折流湿地的HRT为第2.5 d和沿程为3.0 m时的COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、SS测定结果代入公式(2),计算出k_v值,结果如表3所示。k_v的大小代表以生物炭为填料的折流湿地对各污染物降解速率的大小[20],由表3可知,在HRT为2.5 d时,速率常数的大小顺序为SS>PO_4^{3-}-P>COD>NH_4^+-N;沿程为3.0 m时,速率常数的大小顺序为SS>COD>PO_4^{3-}-P>NH_4^+-N,以上各污染物的k_v值普遍高于袁敏等[21](k_v:0.218~0.543 d^{-1})和Huang等[22](k_v:0.089~0.139 d^{-1})的研究[21-22],接近于王小晓等[23](k_v:0.354~1.999 d^{-1})的研究,表明生物炭作为折流湿地填料对各污染物中SS的降解速率最大。因此,生物炭折流湿地能够更好地去除污水中的污染物,达到有效净化生活污水的目的。

表3 折流湿地去除污染物的一级动力学方程

Table 3 First-order kinetic equation for pollutants removal from baffle wetland

污染物 Pollutant	影响因素 Influencing factors	一级反应动力学方程 First order reaction kinetic equation	R^2	k_v/d^{-1}
COD	HRT	$\ln(C_e/C_0)=-0.248t-1.483$	0.909	0.792
	沿程	$\ln(C_e/C_0)=-0.446l-0.850$	0.950	0.768
NH_4^+-N	HRT	$\ln(C_e/C_0)=-0.145t-0.821$	0.830	0.545
	沿程	$\ln(C_e/C_0)=-0.172l-0.572$	0.943	0.374
PO_4^{3-}-P	HRT	$\ln(C_e/C_0)=-0.153t-1.835$	0.979	0.866
	沿程	$\ln(C_e/C_0)=-0.316l-0.925$	0.905	0.661
SS	HRT	$\ln(C_e/C_0)=-0.191t-2.348$	0.939	1.165
	沿程	$\ln(C_e/C_0)=-0.595l-1.345$	0.908	1.099

3 结论

（1）在水温8~12 ℃条件下，折流湿地的最佳HRT为2.5 d，在此条件下，湿地对COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、SS的去除率分别为90.51%、72.38%、90.73%、94.57%。HRT和沿程的增加与折流湿地对各污染物的去除率呈显著正相关（$P<0.05$）。

（2）折流湿地经过12个月的运行，对各污染物的去除率为夏季>秋季>春季>冬季，对COD、NH_4^+-N、PO_4^{3-}-P、SS的年平均去除率分别为88.16%、83.16%、92.55%、96.30%，且出水水质稳定。

（3）一级动力学模型表明折流湿地系统对COD、PO_4^{3-}-P、SS具有明显的生化降解作用，R^2在0.91以上，且对SS的降解速率最大。

（4）综合折流湿地对生活污水的去除效果和生化降解的研究结果，选取生物炭作为折流湿地填料，可应用于污水处理一级模块，并且能够达到有效处理西北地区分散式农村生活污水的目的。

参考文献：

[1] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6):1489-1498.
CHENG Shui-ping, WANG Yue-yuan, WU Juan. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. *Lake Sciences*, 2019, 31(6):1489-1498.

[2] 徐德福, 潘潜澄, 李映雪, 等. 生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(7):3187-3193.
XU Deng-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, et al. Effect of biochar on root morphological characteristics of wetland plants and purification capacity of constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(7):3187-3193.

[3] 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):115-121.
WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, et al. Impact of biochar on nitrogen removal and nitrous oxide emission in aerated vertical flow constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(10):115-121.

[4] Saeed T, Yasmin N, Sun G, et al. The use of biochar and crushed mortar in treatment wetlands to enhance the removal of nutrients from sewage[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(1):586-599.

[5] 卢少勇, 万正芬, 李锋民, 等. 29种湿地填料对氨氮的吸附解吸性能比较[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8):1187-1194.
LU Shao-yong, WAN Zheng-fen, LI Feng-min, et al. Ammonia nitrogen adsorption and desorption characteristics of twenty-nine kinds of constructed wetland substrates[J]. *Research of Environmental Science*, 2016, 29(8):1187-1194.

[6] 张修稳, 李锋民, 卢伦, 等. 10种人工湿地填料对磷的吸附特性比较[J]. 水处理技术, 2014, 40(3):49-52, 56.
ZHANG Xiu-wen, LI Feng-min, LU Lun, et al. The adsorption properties of ten CW substrates on phosphorus[J]. *Technology of Water Treatment*, 2014, 40(3):49-52, 56.

[7] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

[8] Kizito S, Lv 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.

[9] 唐美珍, 汪文飞, 李如如, 等. 生物炭对*Pseudomonas flava* WD-3的固定化及其强化人工湿地污水处理研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9):3442-3448.
TANG Mei-zhen, WANG Wen-fei, LI Ru-ru, et al. Immobilized *Pseudomonas flava* WD-3 by biochar for the sewage purification in the artificial wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(9): 3442-3448.

[10] Mohan D, Sarswat A, Ok Y S, 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.

[11] Li J, Hu Z, Li F, et al. Effect of oxygen supply strategy on nitrogen removal of biochar-based vertical subsurface flow constructed wetland: Intermittent aeration and tidal flow[J]. *Chemosphere*, 2019, 223:366-374.

[12] 程龙, 李怀, 阎百兴, 等. 无植物水平折流式潜流人工湿地对氮和磷的净化效果[J]. 湿地科学, 2016, 14(2):219-225.
CHENG Long, LI Huai, YAN Bai-xing, et al. The nitrogen and phosphorus removal efficiency of horizontal baffle subsurface flow constructed wetland without plants[J]. *Wetland Science*, 2016, 14(2): 219-225.

[13] 嵇斌, 康佩颖, 卫婷, 等. 寒冷气候下人工湿地中氮素的去除与强化[J]. 中国给水排水, 2019, 35(16):35-41.
JI Bin, KANG Pei-ying, WEI Ting, et al. Removal and enhancement of nitrogen in constructed wetlands in cold climate: A review[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(16):35-41.

[14] 黄有志, 刘永军, 熊家晴, 等. 北方地区表流人工湿地冬季污水脱氮效果及微生物分布分析[J]. 水处理技术, 2013, 39(1):55-59.
HUANG You-zhi, LIU Yong-jun, XIONG Jia-qing, et al. Analysis on effect of removal nitrogen and microorganism distribution in sewage of surface-flow constructed wetland in northern China in winter[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(1):55-59.

[15] 王学华, 沈耀良, 张娜, 等. 季节变化对人工湿地与生态塘组合工艺脱氮除磷性能影响[J]. 环境工程, 2014, 32(6):20-23.
WANG Xue-hua, SHEN Yao-liang, ZHANG Na, et al. The effects of seasonal change on biological nutrient removal in combined process of constructed wetland and ecological pond[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(6):20-23.

[16] 李紫霞, 唐晓丹, 崔理华. 3种负荷对模拟垂直流人工湿地去除氮、磷效果的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(2):637-642.
LI Zi-xia, TANG Xiao-dan, CUI Li-hua. Effects of three kinds of loads on the removal of TN and TP in a simulated vertical flow constructed wetlands[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(2):637-642.

[17] Saeed T, Sun G. Kinetic modelling of nitrogen and organics removal in vertical and horizontal flow wetlands[J]. *Water Research*, 2011, 45(10):3137-3152.

[18] Zhang S, Yang X L, Li H, et al. Degradation of sulfamethoxazole in bioelectrochemical system with power supplied by constructed wetland-coupled microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244(1):345-352.

[19] 丁怡, 王玮, 王宇晖, 等. 溶解氧和碳源在人工湿地脱氮中的耦合关系分析[J]. 工业水处理, 2015, 35(1):5-9.
DING Yi, WANG Wei, WANG Yu-hui, et al. Analysis on the coupling relationship between dissolved oxygen and carbon source in the nitrogen removal of constructed wetlands[J]. *Industrial Water Treatment*, 2015, 35(1):5-9.

[20] Tang X Y, Yang Y, Mcbride M B. et al. Removal of chlorpyrifos in recirculating vertical flow constructed wetlands with five wetland plant species[J]. *Chemosphere*, 2019, 216:195-202.

[21] 袁敏, 唐美珍, 汪文飞, 等. 生物炭固定黄假单胞菌剂SBR降解污染物动力学[J]. 水处理技术, 2019, 45(4):78-82.
YUAN Min, TANG Mei-zhen, WANG Wen-fei, et al. Dynamics of immobilized *Pseudomonas flava* WD-3 by biochar in SBR for pollutants degradation[J]. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(4):78-82.

[22] Huang J, Jr R B R, Hagedorn C. Nitrogen removal in constructed wetlands employed to treat domestic wastewater[J]. *Water Research*, 2000, 34(9):2582-2588.

[23] 王小晓, 龚珞军, 韩炜, 等. 自然复氧人工湿地处理农村污水动力学研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(2):143-148.
WANG Xiao-xiao, GONG Luo-jun, HAN Wei, et al. Dynamics study on two-stage constructed wetland treatment with natural reaeration to treat rural sewage[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(2):143-148.