

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 Jing-jing, XUE Li-hong, YIN Ai-jing, et al. Rural low-pollution wastewater purification in *Oenanthe Javanica* wetland with biochar addition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 353–361.

添加生物炭的水芹湿地对农村低污染水的净化研究

段婧婧¹, 薛利红¹, 尹爱经¹, 冯彦房^{1*}, 杨林章^{1,2*}

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.江苏滩涂生物农业协同创新中心, 江苏 盐城 224002)

摘要:为研究生物炭对湿地处理污水的效果,以种植水芹的湿地系统为对象,通过盆栽试验研究了添加1%和5%煅烧温度为500℃和700℃的两种生物炭对低污染水的净化作用及其对水芹生长的影响。结果表明:加入1%煅烧温度为700℃和500℃生物炭的水芹盆中,系统表面水TN浓度均值在4.05~4.18 mg·L⁻¹,低于不加生物炭对照组。煅烧温度为500℃,添加量为1%的生物炭处理组的氨挥发损失总量为96.07 kg·hm⁻²,显著提高;而煅烧温度为700℃,添加量为1%的处理组的氨挥发损失总量(43.02 kg·hm⁻²)与对照相当,其植株地上部分生物量和养分累积量较大,且该种生物炭对土壤养分有一定的固持作用,具有较好的正面效应。通过生物炭和水芹湿地系统的耦合,筛选出了较优的生物炭类型,其在净化污水的同时降低了对环境的负面影响,有效利用了污水中的氮、磷等养分资源,从而为设计农村低污染水的生态修复工程提供了基础数据和技术支撑。

关键词:生物炭;低污染水;水芹;氨挥发;渗漏

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)02-0353-09 doi:10.11654/jaes.2016-0979

Rural low-pollution wastewater purification in *Oenanthe Javanica* wetland with biochar addition

DUAN Jing-jing¹, XUE Li-hong¹, YIN Ai-jing¹, FENG Yan-fang^{1*}, YANG Lin-zhang^{1,2*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Jiangsu Synthetic Innovation Center for Coastal Bio-agriculture, Yancheng 224002, China)

Abstract: The pot cultivation experiment was conducted to study the purification performance for low-pollution wastewater and the impact on the plant growth in *O. javanica* wetland system coupling biochar addition. The treatment groups were designed as 1% or 5% addition amount of biochar calcined at 500 °C or 700 °C (500 °C-1%, 500 °C-5%, 700 °C-1% and 700 °C-5%, respectively), while control groups were set without biochar addition. Each treatment had three replicates. The results showed that the average total nitrogen (TN) concentration of the surface water in treatments of 500 °C-1% and 700 °C-1% were 4.05~4.18 mg·L⁻¹, lower than that of the control; however, the amount of ammonia volatilization loss was 96.07 kg·hm⁻² in 500 °C-1% treatment, which was significantly higher than other treatments. The amount of ammonia volatilization was relatively low in 700 °C-1% treatment (43.02 kg·hm⁻²), and the plant aboveground biomass and nutrient accumulation were higher than other treatments. Biochar with calcination temperature 700 °C and 1% addition amount can also immobilize the soil nutrient to a certain extent. The wetland plant system with appropriate biochar addition seems to be a good measure in the purification of wastewater while reducing negative impacts on the environment and utilizing the nitrogen, phosphorus, and other nutrient efficiently.

Keywords: biochar; low-pollution wastewater; *Oenanthe javanica*; ammonia volatilization; leaching

收稿日期: 2016-07-29

作者简介: 段婧婧(1984—), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 助理研究员, 从事农村低污染水治理与生态修复研究。E-mail: duanjingjing_23@163.com

* 通信作者: 冯彦房 E-mail: yanjieyanfang@163.com; 杨林章 E-mail: lzyang@issas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41501324, 41401345); 江苏省农业科技自主创新课题(CX(15)1004); 农业部行业科研专项(201503106)

Project supported: The Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(41501324, 41401345); The Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund(CX(15)1004); The Special Fund for Agro-Scientific Research in the Public Interest (201503106)

近年来,随着经济的快速发展,我国农业面源污染问题日益严重。生活污水作为农村地区的主要污染源之一,对农村生态环境和村民健康构成了潜在的危险^[1-2]。经过污水处理厂处理或生态工程治理后达标排放的农村生活污水尾水、农田排水以及低污染的河道水属于低污染水,其富含植物生长所需的氮、磷等养分及多种微量元素,可以进行再利用^[3]。

稻田作为一种特殊的人工湿地,具有环境友好、生态健康与可持续利用等优点^[4],可用于接纳农村低污染水^[5]。从6月中上旬泡田到10月中下旬收获,太湖流域一季水稻生长期仅有4个月左右^[6]。如何在非水稻生长季发挥水田处理污水的能力,相关研究较少。水芹是水生宿根草本植物,在我国长江流域分布较广,它可在冬季结冰的条件下存活($\geq -4\text{ }^{\circ}\text{C}$),且具有经济效益,是一种应用潜力较大的经济作物^[7]。本研究以水芹为试验对象,研究了水芹湿地对低污染水中氮、磷的净化效果。

生物炭(Biochar)是在完全或部分缺氧,以及相对较低温度条件下($<700\text{ }^{\circ}\text{C}$),经热解炭化产生的一种含碳量丰富、性质稳定的有机物质^[8]。其表面具有大量的孔洞,孔隙大小不一,有利于土壤微生物的生长。生物炭因容重小,水、气吸收能力强,吸附特性良好,近年来被广泛用于固碳减排、土壤修复改良等方面的研究和实践^[9-13]。秸秆生物炭作为一种土壤改良剂常被施用于农田中以改善作物对氮素的吸收利用率及减少氮损失^[9-10,14]。由于具有较优的吸附性能,生物炭可用于污水处理以及降低水溶液中的氨氮和磷酸盐^[15-16]。根据其吸附固持氮素的性质,本研究设想在土壤中添加一定量生物炭来消纳低污染水中的氮、磷。通过将生物炭用于水芹湿地,可以同时获得多种有益效果:秸秆等农业副产品得到更好的利用,污水得到更深度的净化,改良土壤结构和土壤性质,促进湿地植物的生长等。生物炭和水芹湿地系统耦合,原则上可以增强对低污染水中氮磷的净化效果,然而由于生物炭本身偏碱性,可能会造成系统氨挥发量上升,对此需要予以密切关注。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验如图1所示。供试塑料盆钵上口径26.5 cm、下口径17.0 cm、深32.0 cm、土层高度27.5 cm。供试土壤取自太湖流域宜兴周铁镇,土壤基本理化性质为:pH 5.60、有机质 $13.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮(TN) $1.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $153.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、总磷(TP) $0.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $14.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾 $4.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $92.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验地点位于江苏省农科院试验基地。为防止降水扰动,盆栽上方设有防雨设施。供试污水为经预处理的生活污水,取自江苏省农科院内,其水质基本理化性质为:pH 8.74 ± 0.47 、电导率(EC) $506.9\pm 181.4\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、化学需氧量(COD) $62.3\pm 32.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TN $27.93\pm 12.04\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、氨氮(NH_4^+-N) $24.15\pm 9.97\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、TP $3.31\pm 2.26\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

试验于2015年4月9日开始,选取生长基本一致(株高30 cm左右)的水芹苗进行移栽,每盆定植4株,栽种间距为 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 。试验中生物炭由小麦秸秆在高温下厌氧烧制制备,其主要性质如表1所示。根据生物炭的添加量和煅烧温度不同设置6个处理(表2),每个处理重复3次。

采用淹水灌溉的方式,灌水后保证水芹湿地水位

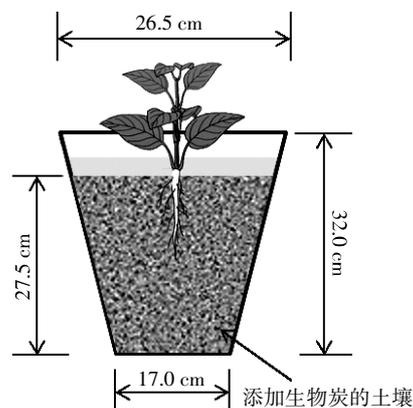


图1 水芹盆栽示意图

Figure 1 Schematic diagram of *O. javanica* pot culture

表1 试验所用生物炭的基本性质

Table 1 The detailed characteristics of biochar used in the experiment

生物炭煅烧温度 Calcination temperature of biochar/ $^{\circ}\text{C}$	基质材料 Substrate material	pH	阳离子交换容量 Cation exchange capacity/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	TN/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TP/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TK/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	灰分 Ash content/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	BET/ $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$
500	小麦秸秆	9.51	27.50	13.30	4.40	20.90	174	51.5
700	小麦秸秆	8.91	17.10	14.15	4.61	21.06	186	378.0

表2 试验处理组

Table 2 Treatment groups in the experiment

处理 Treatments	生物炭添加量 Amount of biochar (%, W/W)	生物炭煅烧温度 Calcination temperature of biochar/°C	是否种水芹 Planted or not	灌溉水源 Irrigation water
500 °C-1%	1	500	是	低污染水
500 °C-5%	5	500	是	低污染水
700 °C-1%	1	700	是	低污染水
700 °C-5%	5	700	是	低污染水
TWW0	0	—	否	低污染水
TWW	0	—	是	低污染水

高度 2~3 cm。试验中各处理组不施肥。灌水量根据作物需水量确定,约 1~3 d 灌 1 次水。每 3 d 取系统表面水,每次取样 30 mL。地下渗漏液共取 3 次,分别在 5 月 6 日、6 月 7 日、6 月 26 日灌水后 24 h 取样。5 月 27 日水芹生长至 40~50 cm,进行第一次刈割;6 月 26 日统一收获。

试验期间添加生物炭处理组、TWW0 与 TWW 对照组累积灌入低污染水量分别为 21.4、19.6、22.1 L。试验期间气温变化如图 2,日平均气温最高值和最低值分别为 31.8 °C 和 17.3 °C,平均值为 24.6 °C。

1.2 分析方法

水样采集后在 4 °C 冰箱中暂存,采用标准方法分析测定相应指标^[7]:pH 值采用 pH 计测定(PS-3C, 上海雷磁),总氮(TN)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,铵态氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂光度法,总磷(TP)采用过硫酸钾分解-钼锑抗分光光度法。化学需氧量(COD)通过 COD 分析仪(DR1010 COD, HACH, 美国)进行测定。氮、磷去除率的计算公式为:

$$\text{去除率}(\%) = (C_i - C_e) / C_i \times 100\%$$

式中: C_i 为处理前氮或磷养分浓度; C_e 为处理后浓度^[8]。

氨挥发采用密闭室间隔通气法-硼酸吸收法收集测定^[9]。每次施肥后 7 d 内连续每天测定,其余每隔 5~7 d 测定一次。每次在 9:00—11:00 和 15:00—17:00 进行,共采集 4 h。

植物生长指标测定株高和 SPAD(Soil and Plant Analyzer Development) 值。水芹株高采用直尺测量;SPAD 值用日本生产的叶绿素计 SPAD-502 进行测定。水芹成熟后,将其地上部与地下部分离、洗净,放到恒温箱中 65 °C 烘干至恒重,磨碎后,称取一定量干样用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮制备成溶液,用于后续测定。N、P 浓度分别采用开氏消煮法和钼锑抗比色法进行测定^[20]。

植物体氮、磷净积累量(PA)的计算公式为:

$$PA = PC \times PB$$

式中:PC 为植物的氮、磷含量,mg·g⁻¹,以干重计;PB 为植物生物量,g·m⁻²,以干重计。

采用三点法,用 30 cm 土钻取全土层土壤,风干后研磨过筛,测定碱解态氮和有效磷含量(20 目)以及全氮和全磷含量(100 目)。采用碱解扩散法和碳酸氢钠法测定土壤碱解态氮和有效磷含量;开氏消煮-半自动凯氏定氮仪测定土壤总氮含量;酸溶-钼锑抗比色法测定全磷含量^[20]。

1.3 统计分析

所有数据均用 3 次重复的平均值。数据处理采用 Excel 2010,统计分析利用 SPSS 13.0 进行。

2 结果与分析

2.1 水质变化

从系统表面水基本性质变化可以看出,添加生物炭处理的表面水 pH 值低于 TWW0 和 TWW 对照组,但没有达到显著性差异($P > 0.05$,表 3)。与 TWW 组相

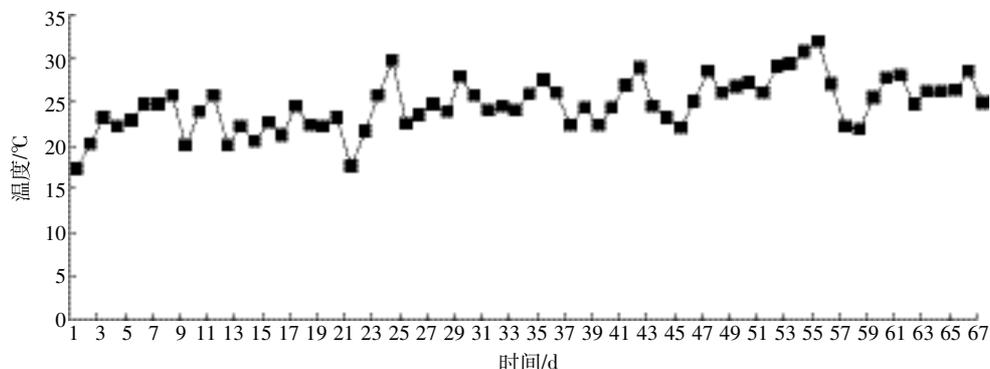


图2 水芹生长期气温变化

Figure 2 Changes of air temperature during the growth of *O. javanica*

表3 系统表面低污染水基本性质
Table 3 Basic properties of the surface water of the system

项目 Items	500 °C-1%	500 °C-5%	700 °C-1%	700 °C-5%	TWW0	TWW
pH	8.08±0.29	8.11±0.27	8.15±0.30	8.07±0.29	8.34±0.40	8.30±0.33
EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	609.7±210.5	643.8±159.0	546.1±125.1	678.7±205.6	620.4±31.4	534.7±57.2
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	60.9±24.3	84.0±42.2	84.5±43.8	73.4±24.2	116.0±41.4	79.0±21.3

比,添加生物炭处理表面水 EC 值有不同程度升高,但未达到显著性差异($P>0.05$)。TWW0 组表面水 COD 值较高,其他处理组基本在同一水平($P>0.05$)。从图 3 可以看出,TWW0 组表面水 TN、 NH_4^+-N 和 TP 浓度均最高。700 °C-1%处理 TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 浓度分布相对较低,不过与其他处理间没有达到显著性差异;500 °C-1%处理 TP 浓度相对较低,同样也没有达到显著性差异。

2.2 氨挥发状况

按水芹收割前后将试验分为两个阶段。对水芹生育期内氨挥发量进行监测发现,除了 700 °C-5%处理,其余处理组第二阶段氨挥发损失量有所上升,可能与该阶段温度有所上升有关;500 °C-1%处理在第

二个试验阶段和总周期内氨挥发损失总量均显著高于其他处理($P<0.05$),其他处理和 TWW0、TWW 组总周期内没有显著差异(图 4)。700 °C-1%处理在添加生物炭处理组中氨挥发总量最小,在水芹整个生育期内其损失总量为 $43.02 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,TWW 组为 $40.44 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

2.3 植物生长与养分累积

添加生物炭处理水芹地上部生物量均显著高于 TWW 对照($P<0.05$),500 °C-1%处理组地上部生物量最高($1192.9 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,图 5)。在养分累积方面,500 °C-1%和 700 °C-1%处理水芹氮累积量最大,显著高于 500 °C-5%处理和 TWW 对照(图 6, $P<0.05$);700 °C-1%处理和 TWW 对照水芹磷累积量最大,500 °C-5%

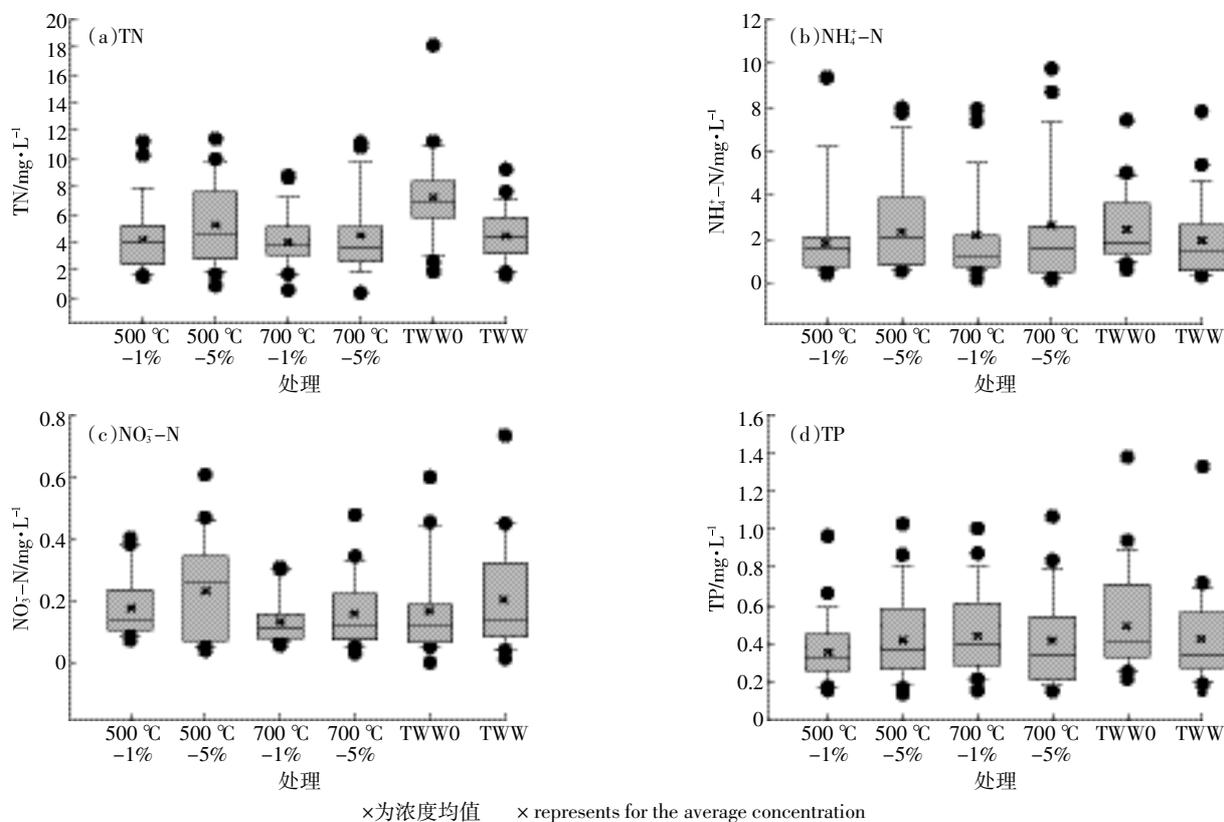
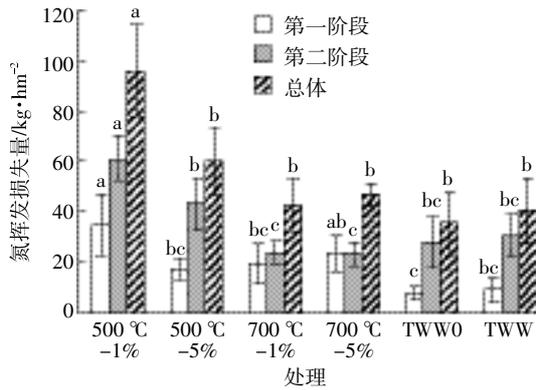


图3 水芹生长期系统表面水 TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 TP 浓度变化

Figure 3 Changes of total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate, and total phosphorus concentration in surface water during the growth of *O. javanica*



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different lowercase letters indicate significant differences ($P < 0.05$) among different treatments. The same below

图4 水芹生长期各处理氨挥发损失量

Figure 4 The amount of ammonia volatilization loss during the growth of *O. javanica*

处理磷累积量最小($P < 0.05$);添加生物炭处理组水芹钾累积量均显著高于 TWW 对照($P < 0.05$),而各生物炭处理之间没有显著差异($P > 0.05$)。

2.4 收获后土壤养分状况

水芹收获后,测定土壤养分含量的变化如表4所示。可以看到,添加生物炭处理土壤碱解氮、有效磷与总氮均显著低于 TWW0 对照($P < 0.05$)。700 °C-5%处理碱解氮显著低于 TWW 组($P < 0.05$),700 °C-5%和500 °C-5%有效磷显著高于 TWW 组($P < 0.05$),700 °C-5%和500 °C-5%处理速效钾显著高于其他处理组和对照组($P < 0.05$)。700 °C-1%处理和 TWW 土壤总磷低于其他组,与700 °C-5%和 TWW0 存在显著性差异($P < 0.05$);700 °C-1%和500 °C-1%处理组全钾显著低于其他各组($P < 0.05$)。

2.5 地下渗漏液变化

从图7可以看出,500 °C-5%处理地下渗漏液中 TN 和 NH_4^+-N 浓度较高,在5月7日和6月27日高于 TWW 对照;其他添加生物炭处理地下渗漏液 TN

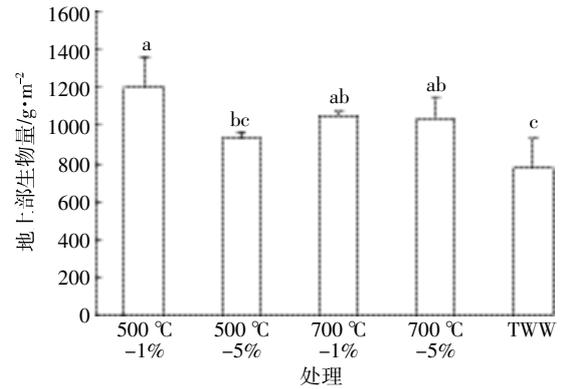


图5 水芹各处理地上部生物量

Figure 5 The biomass of the underground part among different treatment groups

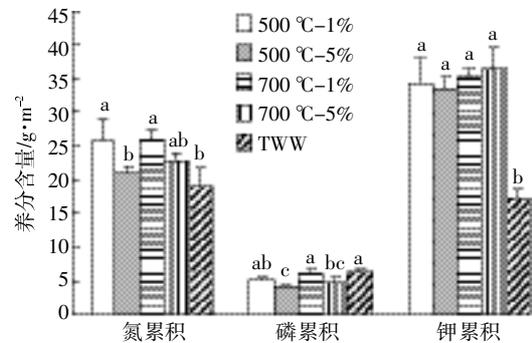


图6 水芹各处理整株氮、磷、钾养分累积量

Figure 6 The nitrogen, phosphorus and potassium accumulation amount of the plants among different treatment groups

和 NH_4^+-N 浓度均低于 TWW 对照。各处理地下渗漏液中 NO_3^--N 浓度较低,各处理之间没有明显区别(图7c)。3次取样除700 °C-5%外,其他添加生物炭处理地下渗漏液 TP 浓度较低(图7d)。从渗漏液中氮、磷的损失量可以看出,添加生物炭处理氮渗漏损失均低于 TWW0 和 TWW 对照组,且各处理渗漏液中氮主要以氨氮为主(图8a);除700 °C-5%磷渗漏损失较高以外,其他添加生物炭处理磷渗漏损失低于 TWW 对照(图8b)。

表4 收获后土壤性质比较

Table 4 Comparison of chemical properties after plant harvest

养分含量 Nutrient content	500 °C-1%	500 °C-5%	700 °C-1%	700 °C-5%	TWW0	TWW
碱解氮 Available nitrogen/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	164.78±3.08b	156.31±5.39bc	164.27±3.88b	145.27±2.48c	200.71±4.24a	167.09±12.95b
有效磷 Available phosphorus/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	12.40±0.37cd	13.05±0.26c	8.52±1.28e	14.45±0.28b	17.33±0.88a	11.36±0.09d
速效钾 Available potassium/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	71.33±1.53c	390.67±3.79a	54.33±0.58cd	374.00±38.12a	253.00±7.07b	37.00±2.00d
总氮 Total nitrogen/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.64±0.14b	1.48±0.09b	1.55±0.11b	1.56±0.03b	1.88±0.13a	1.46±0.08b
总磷 Total phosphorus/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	383.60±4.00ab	384.37±9.63ab	367.42±13.87b	398.25±15.04a	399.02±2.67a	364.33±19.25b
全钾 Total potassium/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.42±0.09c	4.82±0.02ab	4.29±0.32c	4.86±0.13ab	5.01±0.05a	4.70±0.11b

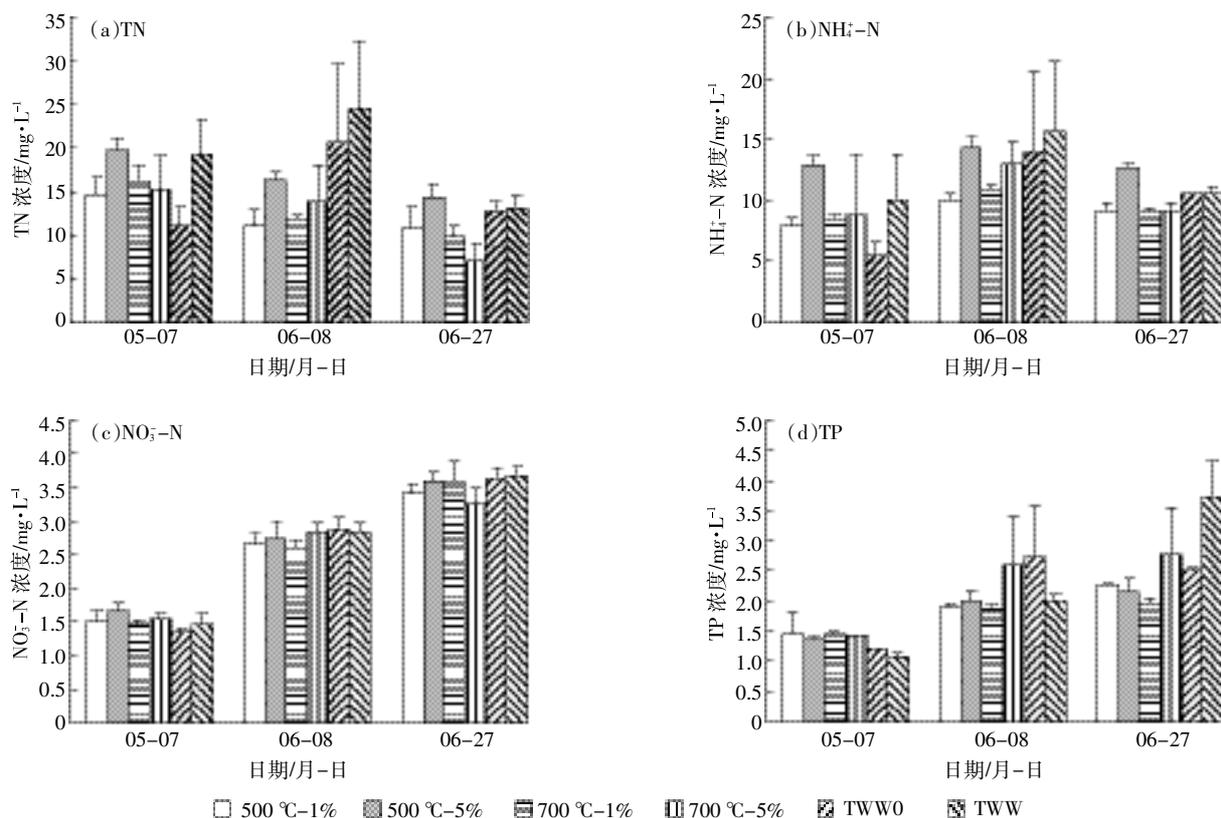


图7 各处理地下渗漏液 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 TP 变化

Figure 7 Changes of TN, NH₄⁺-N, NO₃⁻-N and TP concentration in the underground percolation among different treatment groups

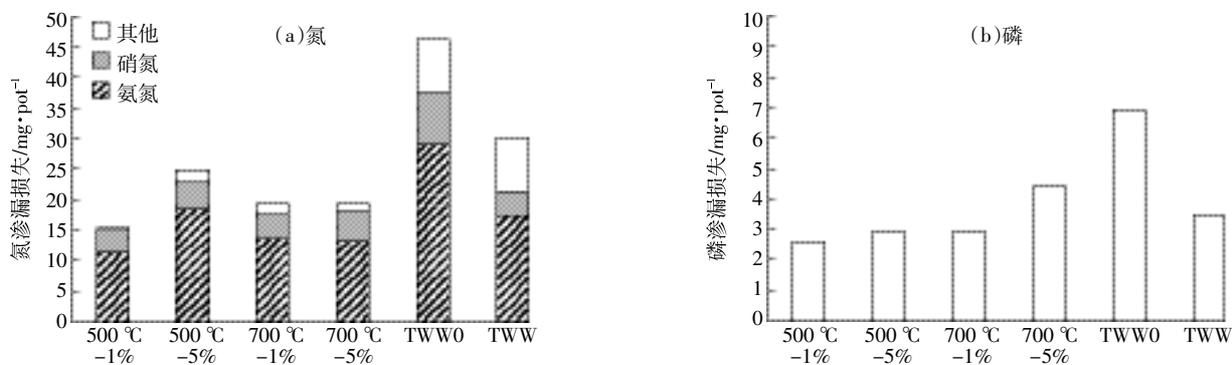


图8 各处理地下渗漏液氮、磷渗漏损失

Figure 8 Percolation losses of the nitrogen and phosphorus in the underground percolation among different treatment groups

3 讨论

3.1 生物炭的吸附性能

生物炭是含碳材料在高温热解下所得到^[8]。由于生物炭多孔的结构和内部大的比表面积,使其与活性炭一样可被用来作为净化污水的吸附剂^[21]。生物炭可以增加土壤阳离子交换量^[22],从而降低氨氮的淋失,并以植物能利用的形式贮存于土壤中^[23]。根据生物炭的制备材料与环境条件的不同,它对养分的吸附效果

也有所不同^[24-25]。总体来说,生物炭吸附阳离子的能力高于阴离子,可用于水溶液中氨氮的去除^[16,25-26]。本试验是将生物炭加入到湿地土壤中而不是表面水中,因此对湿地表面水氮、磷作用有限。不过,添加 1% 煅烧温度 700 °C 的生物炭处理表面水 TN、NH₄⁺-N 有所降低,在一定程度上减低了地表水养分流失的风险。

3.2 添加生物炭对氮磷淋失的影响

一般情况下,施入土壤的氨氮很快转换为硝氮,增加硝氮淋失的风险。在有生物炭的情况下,施入的氨

氮被土壤和生物炭颗粒所固定从而阻断这一过程^[23]。大量研究表明,土壤中添加生物炭可以减小氮素的淋失^[25,27-30]。Yao等^[25]研究发现,在砂土中添加煅烧温度为600℃,以巴西椒木和花生壳为原材料烧制的生物炭能分别减少NO₃⁻淋失总量的34.0%和34.3%,减少NH₄⁺淋失总量的34.7%和14.4%。土柱试验表明,以清水或污水为水源,土壤中添加生物炭均可有效减少TN、TP淋失;随着生物炭用量加大,对TN拦截效果更加明显^[29-30]。本试验中,700℃-1%、700℃-5%和500℃-1%处理组地下渗漏液中TN、NH₄⁺浓度低于对照组,添加生物炭处理TN淋失量均低于对照组,与上述结果一致。

但是,生物炭的添加量并不是越多越好。张广恪等^[29]对生物炭加入土壤拦截外源氮磷效果的研究发现,土壤渗滤液中TP浓度随生物炭用量的增加而增加,拦截率随之降低。这可能是因为生物炭的加入对土壤造成了扰动,增加了土壤孔隙度,使得土壤胶体对磷酸根的固持能力下降。土壤磷素的淋失还与生物炭制备原料相关。Yao等^[25]研究表明,添加600℃煅烧的巴西椒木生物炭降低了磷酸盐淋失,而添加同样温度烧制的花生壳生物炭反而增加了磷酸盐的淋失总量。本试验中随着生物炭用量增加,渗漏液中氮、磷浓度与淋失量并未降低,500℃煅烧温度下随着生物炭的增加,渗滤液中TN、NH₄⁺浓度和TN淋失量有所增加。这可能是因为500℃温度下烧制的生物炭孔隙结构和吸附性能低于700℃生物炭,其表面吸附的氮素在一定条件下释放所致。

3.3 添加生物炭对氨挥发的影响

人工湿地中,氨挥发由水体pH、NH₄⁺浓度、温度、风速、太阳辐射、水生植物等多种因素决定^[31]。水体的pH为9.3时,氨挥发显著;pH为7.5~8.0时,氨挥发不显著^[32]。本试验中所用的污水为经过预处理的生活污水,pH为8.74左右,其氮素以氨氮为主要形态,进入水芹湿地后可能产生的氨挥发不容忽视。

湿地土壤添加生物炭会对氨挥发产生怎样的影响呢?一方面,生物炭的添加可能会导致介质pH值升高从而促进氨挥发;另一方面,生物炭通过吸附作用可有效吸收NH₄⁺-N/NH₃-N,从而减少NH₃挥发损失。Chen等^[33]研究发现,在介质pH为7和8时,添加生物炭增强了对NH₄⁺-N的吸附,从而减少了氨挥发损失。Sun等^[34]研究发现,稻田系统在常规施肥的基础上进行肥水灌溉,添加生物炭处理氨挥发排放量与对照比没有显著差异。本研究也发现,除500℃-1%处

理外,其余添加生物炭处理组氨挥发总量与对照组没有显著差异。研究表明,随着煅烧温度的上升,生物炭中的原子构成发生改变,碳元素含量上升,氢、氧元素含量下降,其芳香性增强,亲水性和极性减弱;高温炭比低温炭孔隙结构更加发达,且随着温度上升,生物炭比表面积增大,从而有利于微生物的附着生长^[13,35-36]。因此,一般情况下高温煅烧下活性炭有较好的吸附能力。我们推测,本研究中700℃煅烧较500℃煅烧的生物炭吸附能力强,而其本身的pH较低,这些都能够解释700℃煅烧的生物炭处理氨挥发量低于500℃生物炭处理。本研究中随着生物炭添加量的增加,氨挥发损失量并没有增加,500℃煅烧生物炭增加后氨挥发损失量还有所减少,可能是因为生物炭对氨氮的吸附作用发挥了主要的影响。

3.4 添加生物炭对土壤和植物的影响

土壤中添加一定量的生物炭可以降低土壤的容重,增加土壤的比表面积以及持水量,改善土壤的理化性质^[27,37-38]。此外,添加生物炭还能提高作物对氮素的利用率,提高作物的产量^[9,39]。张爱平等^[39]研究发现,生物炭和氮肥配合施入土壤后,水稻理论产量增加10.9%~44.9%,且随着生物炭用量的增加,水稻产量增加。本试验也发现,湿地系统中添加生物炭使水芹地上部生物量提高了19.0%~53.2%,水芹产量显著增加。试验中还发现添加生物炭处理水芹对钾累积量较大,与对照组相比提高了94.9%~112.5%。这可能是因为生物炭本身含钾量较高,施加生物炭后钾的可利用性上升很快所致^[40],但其持续作用要通过长期试验来检验。另外,生物炭具有良好的吸附性能,在湿地系统中添加生物炭有利于吸附土壤和水体中重金属污染物质和有机污染物^[8,41]。今后应用水芹湿地来净化污水时需要考虑安全性问题,对水芹的重金属离子和品质等指标进行监测。可以尝试通过生物炭吸附污水中的养分,再将负载生物炭添加到湿地土壤中^[23],以降低可能引起的环境风险。

4 结论

(1)不同煅烧温度,添加量为1%的生物炭处理表面水TN浓度均值在4.05~4.18 mg·L⁻¹,低于不加生物炭对照,说明在湿地土壤中添加适量生物炭可以在一定程度上减低地表水养分流失的风险。

(2)添加生物炭各处理组氨挥发损失总量在43.02~96.07 kg·hm⁻²之间;除了500℃-1%处理以外,其余处理组氨挥发总量与对照组相比没有显著差异。

(3) 煅烧温度 700 °C, 添加量为 1% 处理氨挥发损失总量较小, 植株地上部生物量较大, 为 1 046.9 g·m⁻², 氮磷钾养分累积量分别为 26.0、6.1、35.3 g·m⁻², 处于较高水平, 且对土壤养分有一定的固持作用, 因而是一种较优的土壤调节剂, 可用于农村低污染水再利用。

参考文献:

- [1] 姜海, 杨杉杉, 冯淑怡, 等. 基于广义收益-成本分析的农村面源污染治理策略[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 762-767.
JIANG Hai, YANG Shan-shan, FENG Shu-yi, et al. Control strategies of rural non-point source pollution based on general benefit-cost analysis[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(4): 762-767.
- [2] 孙兴旺, 马友华, 王桂苓, 等. 中国重点流域农村生活污水处理现状及其技术研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(18): 384-388.
SUN Xing-wang, MA You-hua, WANG Gui-ling, et al. Research on current treatment status and technologies of rural domestic wastewater in China major basins[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(18): 384-388.
- [3] 段婧婧, 薛利红, 冯彦芳, 等. 碳氮比对水芹浮床系统去除低污染水氮磷效果的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 384-391.
DUAN Jing-jing, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, et al. Effect of carbon/nitrogen ratio in low pollution wastewater on nitrogen and phosphorus removal in a floating-bed *Oenanthe javanica* system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(3): 384-391.
- [4] Li S, Li H, Liang X, et al. Phosphorus removal of rural wastewater by the paddy-rice-wetland system in Tai Lake Basin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1): 301-308.
- [5] Zhou S, Hosomi M. Nitrogen transformations and balance in a constructed wetland for nutrient-polluted river water treatment using forage rice in Japan[J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32(2): 147-155.
- [6] 颜志俊, 沈爱春, 孙金华, 等. 平原河网区水稻节水减污技术研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 2012.
YAN Zhi-jun, SHEN Ai-chun, SUN Jin-hua, et al. Study on water saving and pollution reduction of paddy soil in plain river network[M]. Nanjing: Hehai University Press, 2012.
- [7] 辛在军, 李秀珍, 闫中正, 等. 冬季不同刈割水芹浮床连续净化过程及效果[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2745-2752.
XIN Zai-jun, LI Xiu-zhen, YAN Zhong-zheng, et al. Purification effects of different stubble height *Oenanthe javanica* (Blume) DC floating bed systems in winter in two successive experimental periods[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2745-2752.
- [8] Lehmann J D, Joseph S. Biochar for environmental management: Science and technology[M]. London: Routledge, 2012.
- [9] Clough T J, Condron L M, Kammann C, et al. A review of biochar and soil nitrogen dynamics[J]. *Agronomy*, 2013, 3(2): 275-293.
- [10] Zhang A, Cui L, Pan G, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 469-475.
- [11] 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 Jiang-xia, WU Lin-chun, ZHANG Jun, et al. Research progresses in remediation of heavy metal contaminated soils by biochar[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12): 2075-2081.
- [12] 王军, 施雨, 李子媛, 等. 生物炭对退化蔬菜地土壤及其修复过程中 N₂O 产排的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 713-723.
WANG Jun, SHI Yu, LI Zi-yuan, et al. Effects of biochar application on N₂O emission in degraded vegetable soil and in remediation process of the soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 713-723.
- [13] 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 Qian-feng, WANG Guang-hua. Research progress of physico-chemical properties of biochar and its effects as soil amendments[J]. *Soil and Crop*, 2012, 1(4): 219-226.
- [14] Wang J, Zhang M, Xiong Z, et al. Effects of biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from two paddy soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(8): 887-896.
- [15] 孙丽丽, 李文英, 李夏, 等. 固废生物炭净化处理猪场废水研究初探[J]. 中国农学通报, 2015, 31(23): 122-126.
SUN Li-li, LI Wen-ying, LI Xia, et al. Purification effect of solid waste biochar on intensive piggery wastewater[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(23): 122-126.
- [16] Hollister C C, Bisogni J J, Lehmann J. Ammonium, nitrate, and phosphate sorption to and solute leaching from biochars prepared from *Corn Stover* (L.) and *Oak wood* (spp.) [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2013, 42(1): 137-144.
- [17] 魏复胜. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
WEI Fu-sheng. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [18] 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.
- [19] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 等. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1884-1888.
SU Cheng-guo, YIN Bin, ZHU Zhao-liang, et al. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 1884-1888.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
LU Ru-kun. Agricultural chemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] Gray N F. Water technology: An introduction for scientists and engineers[M]. London: Arnold, 1999.
- [22] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [23] Foeroid B. Biochar in nutrient recycling: The effect and its use in

- wastewater treatment[J]. *Open Journal of Soil Science*, 2015, 5(2):39-44.
- [24] Mizuta K. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3):255-257.
- [25] 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.
- [26] Carey D E, Mcnamara P J, Zitomer D H. Biosolid derived biochar to immobilize and recycle ammonium from wastewater for agronomy[C]// Proceedings of the Water Environment Federation. WEF; Water Environment Federation, 2013:107-120.
- [27] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3):436-442.
- [28] Sika M P, Hardie A G. Effect of pine wood biochar on ammonium nitrate leaching and availability in a South African sandy soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):113-119.
- [29] 张广格, 邓春生, 张燕荣. 生物炭对土壤拦截外源氮磷等污染物效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(9):1782-1789.
ZHANG Guang-ke, DENG Chun-sheng, ZHANG Yan-rong. Effect of biochar on interception of sewage nitrogen, phosphorus and COD[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1782-1789.
- [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, 25(2):333-338.
LI Zhuo-rui, WEI Gao-ling. Effects of biochar with different additive amounts on the leaching loss of nitrogen and phosphorus in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(2):333-338.
- [31] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理[J]. 生态学报, 2006, 26(8):2670-2677.
LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8):2670-2677.
- [32] Vymazal, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380(1/2/3):48-65.
- [33] Chen C R, Phillips I R, Condron L M, et al. Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand [J]. *Plant and Soil*, 2013, 367(1):301-312.
- [34] Sun H J, Zhang H L, Min J, et al. Controlled-release fertilizer, floating duckweed, and biochar affect ammonia volatilization and nitrous oxide emission from rice paddy fields irrigated with nitrogen-rich wastewater [J]. *Paddy and Water Environment*, 2016, 14(1):105-111.
- [35] 简敏菲, 高凯芳, 余厚平. 不同裂解温度对水稻秸秆制备生物炭及其特性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(5):1757-1765.
JIAN Min-fei, GAO Kai-fang, YU Hou-ping. Effects of different pyrolysis temperatures on the preparation and characteristics of bio-char from rice straw[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5):1757-1765.
- [36] 丁文川, 曾晓岚, 王永芳, 等. 生物炭载体的表面特征和挂膜性能研究[J]. 中国环境科学, 2011, 31(9):1451-1455.
DING Wen-chuan, ZENG Xiao-lan, WANG Yong-fang, et al. Characteristics and performances of biofilm carrier prepared from agro-based biochar[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(9):1451-1455.
- [37] Kolb S E, Fermanich K J, Dornbush M E. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4):1173-1181.
- [38] Karhu K, Mattila T, Bergström I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity: Results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 140(1/2):309-313.
- [39] 张爱平, 刘汝亮, 高霁. 等. 生物炭对灌溉土氮素流失及水稻产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(12):2395-2403.
ZHANG Ai-ping, LIU Ru-liang, GAO Ji, et al. Effects of biochar on nitrogen losses and rice yield in anthropogenic-alluvial soil irrigated with Yellow River water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(12):2395-2403.
- [40] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J]. *Plant and Soil*, 2010, 333(1/2):117-128.
- [41] 王林, 徐应明, 梁学峰, 等. 生物炭和鸡粪对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11):2851-2858.
WANG Lin, XU Ying-ming, LIANG Xue-feng, et al. Effects of biochar and chicken manure on cadmium uptake in pakchoi cultivars with low cadmium accumulation[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(11):2851-2858.