

不同原料来源生物质炭对蔬菜种植土壤氮磷流失的影响

陈重军¹, 刘凤军^{2*}, 冯宇³, 马能奎¹, 王建芳¹

(1.苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2.苏州市农业科学院, 江苏 苏州 215155; 3.北京市环境保护科学研究院固废污染防治研究所, 北京 100037)

摘要:选择由竹子、水稻秸秆和烟草杆制成的生物质炭,研究不同原料来源生物质炭在不同添加量条件下对蔬菜生长和土壤氮磷流失的影响。结果表明,生物质炭种类和添加量对蔬菜生长和下渗水量产生了影响,且各处理均降低了氮磷流失,但各处理间规律不明显。对总氮和总磷流失,竹炭分别降低 2.6%~19.4%和 9.1%~30.3%,秸秆炭分别降低 5.5%~20.4%和 13.9%~19.0%,烟草杆炭分别降低 4.1%~17.9%和 17.6%~28.7%,生物质炭添加对降低总磷流失效果优于总氮。当竹炭和烟草杆炭添加量为 5%时,对总氮总磷流失降低效果较佳,可作为实际应用参考添加量。

关键词:生物质炭;氮磷流失;蔬菜种植土壤;原料

中图分类号:X712 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2015)12-2336-07 **doi:**10.11654/jaes.2015.12.012

Effects of Applications of Different Biochars on Nitrogen and Phosphorus Losses in Vegetable Soil

CHEN Chong-jun¹, LIU Feng-jun^{2*}, FENG Yu³, MA Neng-kui¹, WANG Jian-fang¹

(1.School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2.Suzhou Academy of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, China; 3.Solid Waste Pollution Control Division, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China)

Abstract: Biochar has potential to adsorb soil nutrients and thus may reduce nutrient losses to the water environment. In this study, nitrogen and phosphorus losses in vegetable soil amended with three different biochars were investigated. These three biochars were made from bamboo, rice straw and tobacco stem. The type and rate of biochar tended to impact vegetable biomass and soil water percolating capacity. However, applying biochars significantly reduced nitrogen and phosphorus losses. Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) losses were reduced by 2.6%~19.4% and 9.1%~30.3% for bamboo charcoal, 5.5%~20.4% and 13.9%~19.0% for rice straw charcoal, and 4.1%~17.9% and 17.6%~28.7% for tobacco stem biochar, respectively. The reduction of TP loss was greater than that of TN loss in all treatments. The least losses of TN and TP were observed in soil amended with bamboo or tobacco stem biochars at a rate of 5%.

Keywords: biochar; nitrogen and phosphorus loss; vegetable soil; biomass raw material

近年来,蔬菜种植逐渐趋向于集约化发展,集约化蔬菜种植培育周期短,施肥量高,喷灌水量大,导致氮磷流失严重,给周边生态环境优化带来了巨大压力^[1]。生物质炭由各种农业废弃物制成,呈碱性,具

有孔隙多、比表面积大、表面电荷密度高等特点,对水、土壤或沉积物中的极性或非极性污染物都有较好的吸附固定作用,特别是对环境中氮磷的吸附尤为突出^[2-3]。研究已经证明生物质炭添加对农田氮磷具有固持作用,可在一定程度上降低农田氮磷流失^[4-5]。然而,目前生物质炭添加对氮磷流失的研究主要集中于水稻田等淹水土壤^[6-7],其对蔬菜种植旱地的氮磷固持能力有何影响还鲜有研究,特别是不同原料来源生物质炭输入对蔬菜种植土壤氮磷流失的影响研究还未见相关报道。本文选择由竹子、秸秆和烟草杆制成的生

收稿日期:2015-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51508366);苏州市科技计划项目(SYN201411);苏州市相城区科技计划项目(201338);苏州市昆山科技计划项目(KN1419)

作者简介:陈重军(1984—),男,浙江义乌人,博士,讲师,主要从事农业面源污染控制与治理研究。E-mail:chongjunchen@163.com

* 通信作者:刘凤军 E-mail:61300829@163.com

物质炭,研究不同原料来源生物质炭在不同添加量条件下对蔬菜生长和氮磷流失的影响,旨在为不同农业废弃物生物质炭化并应用于蔬菜种植土壤氮磷减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用平底育苗盘,尺寸为 60 cm×30 cm,其底部均匀设置微孔,微孔直径 0.5 mm。本文采用育苗基质代替蔬菜栽培土壤,育苗盘微孔能保证下渗水顺畅下漏,但基质无法下漏。育苗盘内装按照比例配制的基质,将其置于塑料支架之上,整个装置置于周转箱中,便于后续接取下渗水。装置见图 1。



图 1 试验装置图

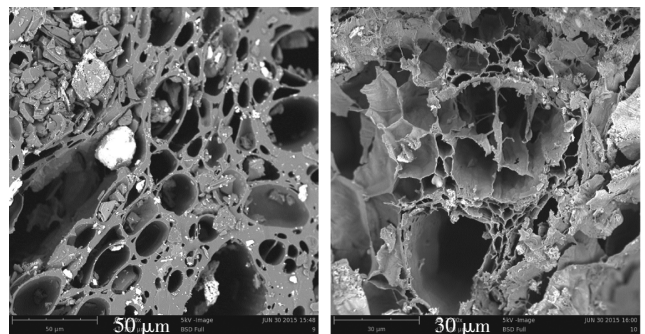
Figure 1 Trays for seedling experiment

1.2 生物质炭来源

试验选择由竹子、水稻秸秆和烟草杆制成的生物质炭,分别称作竹炭、秸秆炭和烟草杆炭。竹炭购于浙江遂昌县神龙谷炭业有限公司,秸秆炭由浙江大学提供,烟草杆炭由贵州省毕节市烟草公司提供,3 种炭的主要理化指标见表 1。比表面积表示生物质炭与氮磷接触的可能性,一定程度上代表了吸附能力,3 种生物质炭比表面积差异较大(竹炭>秸秆炭>烟草杆炭);pH 值均呈碱性,表示生物质炭对改良酸性土壤有积极作用;C、H、N、O 元素的原子比可表征生物质

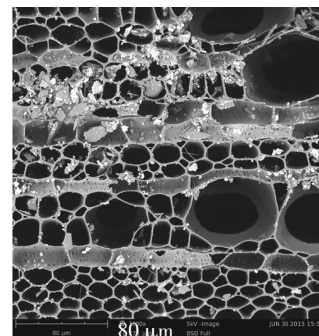
炭的芳香化程度和极性,H/C 和 O/C 越小,芳香化程度越高,(O+N)/C 越大则极性越大^[8]。

生物质炭微观结构扫描电镜图见图 2。不同原料生物质炭的孔隙分布有较大差别:竹炭微孔径分布差异较大,直径分布不一,微孔直径大多在 80 μm 以下;秸秆炭孔隙不规则,微孔分布不均,孔径在 30 μm 以下;烟草杆炭孔隙结构较规则,大小孔分布较均匀,大孔孔径约为 60 μm,小孔约为 20 μm。



(A)竹炭-1500 倍
Bamboo biochar

(B)秸秆炭-2500 倍
Rice straw biochar



(C)烟草杆炭-1000 倍
Tobacco stem biochar

图 2 生物质炭扫描电镜图

Figure 2 SEM images of different biochars

1.3 试验设计

选取竹炭、秸秆炭、烟草杆炭 3 种生物质炭,与培养基质混合均匀。按照培养基质的重量,往育苗盘内按重量添加比例 1%、3%和 5%的生物质炭,控制基质和生物质炭总量为 1000 g。空白对照与生物质炭处理加入等量的复合肥,试验共计 10 个处理,每个处理设置 3 个重复,各处理设置见表 2。每个育苗盘均匀播种小青菜(品种为苏州青)种子 5.0 g,普通复合肥购自湖北澳特化工有限公司,登记号鄂农肥(2009)准字 0081 号,总养分为 45%,其中 N、P₂O₅、K₂O 分别为 14%、16%和 15%,每盆施用 30.0 g 复合肥。

表 1 生物质炭基本理化性质指标

Table 1 Characteristics of biochars tested

主要指标	竹炭	秸秆炭	烟草杆炭
比表面积/g·m ⁻²	330	45	7
pH 值	8.15	9.43	9.27
C 含量/%	68.1	53.7	59.3
H 含量/%	2.8	1.2	2.8
N 含量/%	0.9	1.2	2.7
O 含量/%	28.2	43.9	35.2
H/C	0.04	0.02	0.05
O/C	0.41	0.82	0.59
(N+O)/C	0.43	0.84	0.64

表2 各处理设置情况
Table 2 Experimental design

序号	处理编号	生物质炭种类及添加量	播种量/g	复合肥添加量/g
1	T-1	空白(未添加生物质炭)	5.0	30.0
2	T-2	竹炭 1%	5.0	30.0
3	T-3	竹炭 3%	5.0	30.0
4	T-4	竹炭 5%	5.0	30.0
5	T-5	秸秆炭 1%	5.0	30.0
6	T-6	秸秆炭 3%	5.0	30.0
7	T-7	秸秆炭 5%	5.0	30.0
8	T-8	烟草杆炭 1%	5.0	30.0
9	T-9	烟草杆炭 3%	5.0	30.0
10	T-10	烟草杆炭 5%	5.0	30.0

1.4 试验过程

试验在江苏省苏州市某农业公司温室大棚内进行,周期为2014年4月15日至5月15日,共计31 d。按照蔬菜种植的正常需水规律进行喷水,各处理喷水时间和水量均一致,每次均匀喷施2000 mL,30 min后收集周转箱内的下渗水,现场记录体积,采样后及时送回实验室进行分析。试验周期内共喷水8次,亦采样8次。

1.5 试验方法

(1)水质分析方法:下渗水量采用量筒计量,水样测定TN和TP指标,分别采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法和过硫酸钾消解法^[9]。

(2)蔬菜干重分析:收获每个处理盘内的蔬菜,包括地上和地下部分,将蔬菜鲜样放入干净信封中,打开信封口,放入105℃烘箱中0.5 h,取出后放入干燥器中冷却至室温(约20 min),称重。再烘0.5 h,称重,2次称重之差不超过1 mg即已达恒重,此时蔬菜样品的重量即是蔬菜干重^[10]。

(3)TN和TP的流失量:TN和TP的流失量计算采用以下公式计算。

$$M = \sum_{i=1}^8 \frac{C_i V_i}{1000}$$

式中: C_i 为第*i*次水样TN或TP的浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; V_i 为第*i*次下渗水体积,mL; M 为整个实验过程中TN或TP的累计流失量,mg。

1.6 数据处理

利用SPSS 15.0软件,对各处理的蔬菜产量、下渗水量及氮磷污染物的流失进行单因素方差分析和LSDT检验($\alpha=0.05$), $P>0.05$ 视为无显著性影响, $P<0.05$ 视为具有显著性影响^[11]。

2 结果与分析

2.1 各处理蔬菜产量

从蔬菜干重看,生物质炭的种类和添加量对蔬菜的产量具有一定的影响,但与空白相比影响并不显著($P>0.05$)。从生物质炭种类来看,按照平均值分析,秸秆炭和烟草杆炭处理均增加了蔬菜产量,比空白对照处理(T-1)分别提升9.3%和3.1%,而添加竹炭却降低了蔬菜产量,比空白对照降低5.4%。从添加量分析结果看:3个秸秆炭处理均增加了蔬菜产量,增加幅度为5.5%~12.6%,其中5%添加量(T-7)对蔬菜增量最为明显,增量为3.5 g,增加率达12.6%;烟草杆炭处理仅5%的添加量水平增加了蔬菜产量,增量为6.1 g,增加率达到21.9%,而1%(T-8)和3%添加量(T-9)均降低了蔬菜产量,分别降低4.4%和8.2%;1%竹炭添加量(T-2)对蔬菜产量有所促进,增加0.9%,而3%(T-3)和5%竹炭添加量(T-4)分别使蔬菜产量降低9.1%和8.0%(图3)。

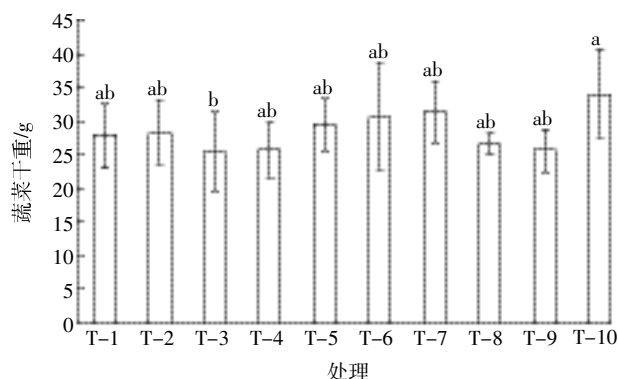


图3 各处理在试验周期内收获的蔬菜干重

Figure 3 Dry weights of vegetable in different treatments

2.2 各处理下渗水量

各处理每次采样下渗水量的均值见图4。各处理与空白处理之间并没有显著差异($P>0.05$),同种生物质炭的各添加量之间的差异也不显著($P>0.05$),但炭的各种类之间规律有所不同,其中1%竹炭添加量(T-2)、3%秸秆炭添加量(T-6)与1%烟草杆添加量(T-8)处理间差异显著($P<0.05$)。从生物质炭种类来看,按照平均值分析,添加竹炭和秸秆炭的处理下渗水量有所降低,平均比空白处理降低2.0%和9.5%。而从添加量分析,除3%竹炭添加量(T-3)外,其余添加量的竹炭处理和所有秸秆炭处理均比空白处理降低了下渗水量。按照添加量不同,5%秸秆炭添加量(T-7)的处理保水性最好,下渗水比空白减少13.9%,

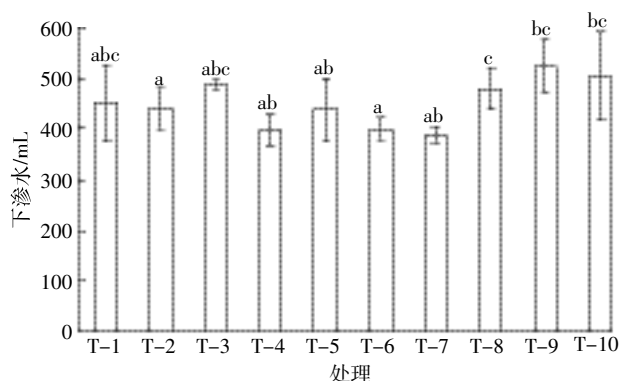


图4 各处理下渗水量均值

Figure 4 Average infiltration amount of different treatments

5%竹炭添加量(T-4)和3%秸秆炭添加量(T-6)的保水性次之,分别减少11.8%和11.6%。然而,添加烟草秆炭的处理保水性较差,下渗水量均高于空白处理,平均增加11.5%,其中3%烟草秆炭的处理(T-9)下渗水量最大,高于空白16.4%。

2.3 各处理总氮和总磷的流失量

根据各处理在试验周期内总氮累积流失量来看,与空白对照相比,仅5%竹炭(T-4)、3%秸秆炭(T-6)和5%烟草秆炭(T-10)处理对总氮流失量存在显著影响($P<0.05$),同时炭的种类和添加量之间的差异并不显著($P>0.05$),见图5A。总体来说生物质炭的添加均降低了总氮流失量,见图6。竹炭添加对总氮减排率为2.6%~19.4%,添加5%竹炭的处理(T-4)最高,为19.4%,添加1%竹炭的处理(T-2)次之,为16.5%,添加3%竹炭的处理(T-3)最小,为2.6%;秸秆炭对总氮减排5.5%~20.4%,添加3%秸秆炭的处理(T-6)最高,为20.4%,添加1%秸秆炭的处理(T-5)次之,为15.0%,添加5%秸秆炭的处理(T-7)最小,为5.5%;而烟草秆炭对总氮减排4.1%~17.9%,添加5%烟草秆炭的处理(T-10)最高,为17.9%,添加1%烟草秆炭的处理(T-8)次之,为5.3%,而添加3%烟草秆炭的处理(T-9)最小,为4.1%。秸秆炭对总氮的流失控制效果最好,平均降低13.6%,而竹炭平均降低率为12.9%,烟草炭平均降低率为9.1%。在所有处理中,3%秸秆炭添加量(T-6)对总氮流失的降幅最大,为199 mg,比空白降低20.4%。

生物质炭的种类和添加量对于总磷流失量存在一定的影响,与空白对照相比,仅5%竹炭(T-4)、1%烟草秆炭(T-8)和5%烟草秆炭(T-10)处理对总磷流失量存在显著影响($P<0.05$);在炭的种类和添加量之间,仅1%竹炭(T-2)和5%竹炭(T-4)处理之间存在

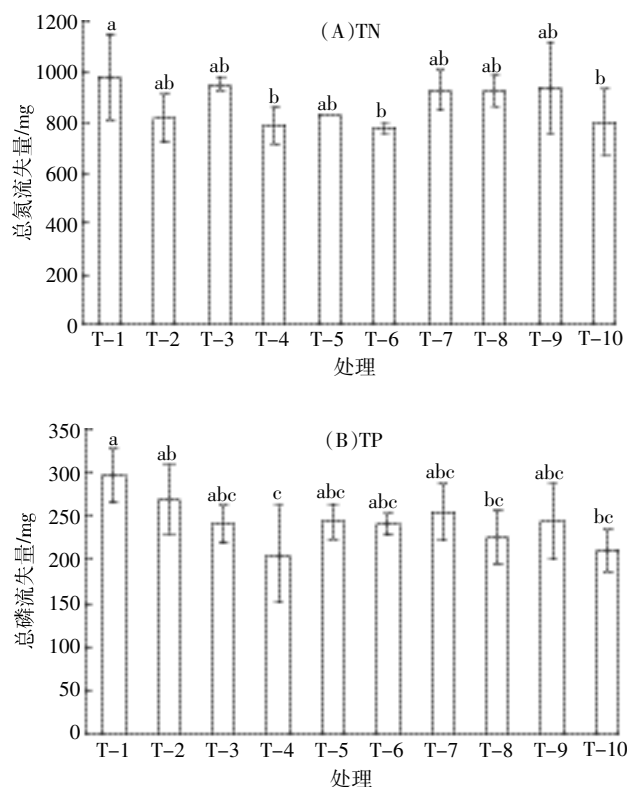


图5 各处理在试验周期内总氮和总磷累积流失量

Figure 5 Cumulative TN and TP losses of different treatments during experiment

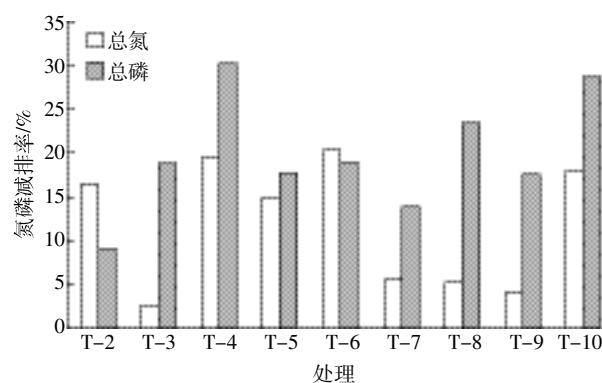


图6 试验周期内生物质炭添加对氮磷流失的减排率

Figure 6 Reduction percentages of TN and TP losses of different treatments during experiment

在显著差异($P<0.05$),见图5B。与空白对照相比,添加生物质炭的处理中,总磷累积流失量均有所降低,见图6。添加5%竹炭的处理(T-4),总磷的流失量仅为206.0 mg,比空白对照降低89.5 mg,流失率降低30.3%,效果最佳。按照不同生物质炭种类和添加量,竹炭添加对总磷减排率为9.1%~30.3%,其中添加5%竹炭的处理(T-4)最高,为30.3%,添加3%竹炭的处

理(T-3)次之,为18.8%,添加1%竹炭的处理(T-2)最小,为9.1%;秸秆炭对总磷减排13.9%~19.0%,添加3%秸秆炭的处理(T-6)最高,为19.0%,添加1%秸秆炭的处理(T-5)次之,为17.7%,添加5%秸秆炭的处理(T-7)最小,为13.9%;烟草杆炭对总磷减排17.6%~28.7%,添加5%烟草杆炭的处理(T-10)最高,为28.7%,添加1%烟草杆炭的处理(T-8)次之,为23.4%,添加3%烟草杆炭的处理(T-9)最小,为17.6%。

在整个研究过程中,生物质炭添加对蔬菜种植有明显的氮磷的减排效果,然而各处理对总氮和总磷的流失率存在较大差别,生物质炭添加对总磷的固持效率高于总氮,总磷流失的降低率为9.1%~30.3%,总氮降低率为2.6%~20.4%。按照添加量的不同,只有T-3和T-2处理的总氮总磷流失增减趋势不一致,随着竹炭从1%(T-2)增加到3%(T-3),总氮减排率降低,但总磷减排率反而增加,其余处理之间总氮和总磷的流失增减趋势均一致。对于竹炭,其较大的比表面积和合适的微孔,为氮磷的吸附提供了良好的条件,特别是T-4处理效果在总氮总磷固持上均最佳,而秸秆炭为T-6>T-5>T-7,烟草杆炭为T-10>T-8>T-9。针对不同生物质炭类型,添加5%竹炭的T-4处理,对总氮总磷减排率分别为19.4%和30.3%,效果最佳,其次为添加5%烟草杆炭的T-10处理,对总氮总磷减排率分别为17.9%和28.7%。

3 讨论

蔬菜干物质质量是决定产量水平的重要因素,也是生物质炭能否在蔬菜种植业大规模应用的重要指标。大部分研究认为添加生物质炭将会对土壤活性有机质增加有一定的促进作用,可以改善土壤性质,提高作物对土壤养分的利用率,从而增加作物的产量^[12-13]。但也有研究认为添加生物质炭对作物生长有抑制作用或没有影响^[14]。本研究发现,不同生物质炭种类对蔬菜产量有不同的影响,按照均值看,添加秸秆炭和烟草杆炭可增加蔬菜产量,而添加竹炭却降低了蔬菜产量。不同的生物质炭制备原料对蔬菜产量有明显差别,推测这是生物质炭本身的特性所造成。由于不同生物质炭的原材料和制备条件有所差异,造成生物质炭本身的元素比不同而引起极性差异、比表面积差异较大、孔隙结构和大小多样化等,从而影响了炭基肥对氮素的固持、释放以及作物对氮磷养分的吸收利用^[15-16]。从增加蔬菜产量的烟草杆炭和秸秆炭来看,5%添加

量对蔬菜产量增加最为明显,推测是较高生物质炭添加量不但为土壤提供了充足的微量元素,而且显著改变了土壤的理化性质,增强了养分的有效性并促进了蔬菜的吸收和生长^[17]。

添加生物质炭对下渗水产生了一定的影响。按照均值来看,添加竹炭和秸秆炭处理的下渗水量有所降低,而添加烟草杆炭处理的保水性较差,下渗水量高于空白处理。研究表明生物质炭的添加在一定程度上提高了土壤的含水能力,这是由于生物质炭表面的多孔性可以将水分保存在其中,减少营养元素的淋溶量,对作物产量产生影响^[18]。本研究中,下渗水量最小的秸秆炭处理对蔬菜的增量最为明显,其保水性高而提高了蔬菜产量。然而,下渗水量较大的烟草杆炭在蔬菜产量上更优于竹炭处理,可能是烟草杆炭孔隙结构较规则,大小孔分布较为均匀,造成水分子的截流率降低,下渗水增加,同时孔洞的规则性和本身较高的pH加大了养分的有效性而便于蔬菜吸收。

生物质炭添加均降低了各处理氮磷养分的流失量,表明生物质炭对氮磷具有较好的固持作用,与前人的研究结果一致^[19]。比如总氮,研究者将添加量为1.5%、2%干土质量的合成木材生物质炭与不添加生物质炭相比,发现总氮淋溶量比对照降低了65%、67%^[20];而以造纸厂废料为生物质炭原料,2%干土质量为添加量,总氮淋溶量比空白对照降低了70%^[21]。研究表明,生物质炭和肥料配施后,显著提高了土壤对营养元素的吸附作用,增强了土壤对营养离子的固持作用,减少了养分流失^[22]。这不仅跟生物质炭多孔性造成强力的吸附作用相关,也与生物质炭表面存在一些金属氧化物,包括氧化钙、氧化镁、三氧化二铁等,可以起催化作用,可以吸附营养元素^[23],且生物质炭通过表面离子交换作用来吸收营养元素如氮素离子,减少氮素的淋溶^[24],并能实现固定氮的再次释放,产生缓释效果^[25]。不仅如此,生物质炭中可能含有多酚或单菇类等抑制硝化作用的物质,能够影响生物质炭表面的硝化作用,从而影响土壤的氮素流失^[26]。生物质炭添加还会对氮磷转化的功能微生物造成影响,生物质炭输入会给土壤带入外源元素,对土壤中固氮菌的丰度活性具有显著促进作用,从而促进土壤生物固氮作用^[27]。但是,生物质炭对土壤功能微生物种群和数量的影响主要取决于生物质炭的理化性质与结构特征和土壤的基本性质^[28-29]。同时,生物质炭不同添加量(1%、3%、5%添加量)对蔬菜种植氮磷流失产生了不同的影响。多数研究表明,随着生物质炭添加量增

加,对土壤中氮磷的固持率也增加。但是刘玮晶等^[9]研究发现,当生物质炭添加量为1%、3%、5%时,3%生物质炭添加量对氮素损失率最高,推测可能氮素通过其他途径损失,例如氨的挥发、生物硝化与反硝化作用等。本文研究结果也有类似之处,在竹炭处理中5%添加量最优,秸秆炭处理中3%添加量最优,而烟草杆炭处理中5%添加量最优,推测同样发生了多种途径的氮磷损失,只是其内在机制还不清楚,需要进一步探讨。

在所有处理中,竹炭添加量为5%时,对总氮总磷流失降低效果最佳。竹炭 $330 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 的巨大比表面积,远大于秸秆炭 ($45 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$) 和烟草杆炭 ($7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$),为氮磷的吸附提供了良好的条件^[8]。同时,竹炭的 H/C、O/C 较小,芳香化程度高,能稳定土壤有机碳库并持留土壤养分,降低氮磷等营养元素的流失^[17]。此外,与秸秆炭和烟草炭相比,竹炭的机械强度较高,不易在土壤中粉碎而迁移,从而减少了吸附养分通过生物质炭颗粒发生的流失。这些条件都为竹炭高氮磷固持率提供了良好的条件。

综上所述,不管是竹炭、秸秆炭和烟草杆炭,均对蔬菜种植过程中土壤氮磷流失的降低有重要作用。单从环境角度考虑,添加5%的竹炭环境效益最好,分别降低总氮和总磷流失量19.4%和30.3%,可作为蔬菜生产中生物质炭的选择种类和参考添加量,对蔬菜行业的清洁生产和农田面源源头减排具有积极意义。但该竹炭添加量一定程度上会降低蔬菜产量,考虑到污染减排和经济效益双重作用,宜选择5%烟草杆炭添加量作为参考,可分别降低总氮和总磷流失量17.9%和28.7%。因此,生物质炭的开发和利用可能成为农业生产中减少化肥流失的有效措施,可实现农业废弃物高效利用、节能减排、提升土壤生产力的双赢效应^[30]。

4 结论

不同原料和添加量的生物质炭均对蔬菜生长和氮磷流失产生了影响,但各处理间规律不明显。各处理均降低了总氮和总磷流失,竹炭分别降低2.6%~19.4%和9.1%~30.3%,秸秆炭降低5.5%~20.4%和13.9%~19.0%,烟草杆炭降低4.1%~17.9%和17.6%~28.7%,总磷流失的降低效果要优于总氮。竹炭添加量为5%时对总氮总磷流失降低效果较佳,氮磷流失率分别降低19.4%和30.3%。研究发现不同生物质炭种类和添加量对蔬菜种植土壤氮磷有不同的固持作用,对氮磷流失控制具有积极意义。

参考文献:

- [1] 闵 炬,陆扣萍,陆玉芳,等.太湖地区大棚菜地土壤养分与地下水水质调查[J].土壤,2012,44(2):213-217.
MIN Ju, LU Kou-ping, LU Yu-fang, et al. Investigation of soil fertility and quality of ground water in greenhouse vegetable fields of Tai Lake region[J]. *Soils*, 2012, 44(2):213-217.
- [2] Lehmann J, da Silva J P, Steiner C, et al. Nutrient availability and leaching in an archaeological anthrosol and a ferralsol of the central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2):343-357.
- [3] 刘玉学,刘 微,吴伟祥,等.土壤生物质炭环境行为与环境效应[J].应用生态学报,2009,20(4):977-982.
LIU Yu-xue, LIU Wei, WU Wei-xiang, et al. Environmental behavior and effect of biomass-derived black carbon in soil: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4):977-982.
- [4] 袁金华,徐仁扣.生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J].生态环境学报,2011,20(4):779-785.
YUAN Jin-hua, XU Ren-kou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2011, 20(4):779-785.
- [5] 刘玮晶,刘 烨,高晓荔,等.外源生物质炭对土壤中铵态氮素滞留效应的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(5):962-968.
LIU Wei-jing, LIU Ye, GAO Xiao-li, et al. Effects of biomass charcoals on retention of ammonium nitrogen in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):962-968.
- [6] 曲晶晶,郑金伟,郑聚锋,等.小麦秸秆生物质炭对水稻产量及晚稻氮素利用率的影响[J].生态与农村环境学报,2012,28(3):288-293.
QU Jing-jing, ZHENG Jin-wei, ZHENG Ju-feng, et al. Effects of wheat-straw-based biochar on yield of rice and nitrogen use efficiency of late rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2012, 28(3):288-293.
- [7] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, 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, 139:469-475.
- [8] 徐义亮.生物炭的制备热动力学特性及其对镉的吸附性能和机理[D].杭州:浙江大学,2013.
XU Yi-liang. Thermodynamic properties of biochar preparation and sorption characteristics and mechanisms of cadmium onto biochars[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [9] 国家环境保护总局.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.
State Environmental Protection Administration. Determination Methods for Examination of Water and Wastewater [M]. 4th Ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
BAO Shi-dan. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [11] 刘大海,李 宁,晁 阳.SPSS 15.0 统计分析从入门到精通[M].北京:清华大学出版社,2008.

- LIU Da-hai, LI Ning, CHAO Yang. SPSS 15 Statistical analysis from entry to the master[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [12] 葛春辉, 唐光木, 徐万里. 生物质炭对沙质土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(6): 1108–1111.
- GE Chun-hui, TANG Guang-mu, XU Wan-li. Influence of application of bio-carbon on characters of soil and crop yield[J]. *Xinjiang Agricultural Science*, 2013, 50(6): 1108–1111.
- [13] 花莉, 张成, 马宏瑞, 等. 秸秆生物质炭土地利用的环境效益研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2489–2492.
- HUA Li, ZHANG Cheng, MA Hong-rui, et al. Environmental benefits of biochar made by agricultural straw when applied to soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(10): 2489–2492.
- [14] 谢祖彬, 刘琦, 许燕萍, 等. 生物炭研究进展及其研究方向[J]. 土壤, 2011, 43(6): 857–861.
- XIE Zu-bin, LIU Qi, XU Yan-ping, et al. Advances and perspectives of biochar research[J]. *Soils*, 2011, 43(6): 857–861.
- [15] Chen B L, Zhou D D, Zhu L Z. Transitional adsorption and partition of nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(14): 5137–5143.
- [16] 陈琳, 乔志刚, 李恋卿, 等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(5): 671–675.
- CHEN Lin, QIAO Zhi-gang, LI Lian-qing, et al. Effects of biochar-based fertilizers on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(5): 671–675.
- [17] 周桂玉, 窦森, 刘世杰. 生物质炭结构性质及其对土壤有效养分和腐殖质组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2075–2080.
- ZHOU Gui-yu, DOU Sen, LIU Shi-jie. The structural characteristics of biochar and its effects on soil available nutrients and humus composition[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2075–2080.
- [18] Major J, Lehmann J, Rondon M, et al. Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(4): 1366–1379.
- [19] Steiner C, Teixeira W G, Lehmann J, et al. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered central amazonian upland soil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 297(1/2): 275–290.
- [20] Brown R A, Kercher A K, Nguyen T H, et al. Production and characterization of synthetic wood chars for use as surrogates for natural sorbents[J]. *Geochemistry*, 2006, 37(3): 321–333.
- [21] Van Z L, Kimber S, Morris S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. *Plant Soil*, 2010, 327(1/2): 235–246.
- [22] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43: 1812–1836.
- [23] Lehmann J. Bio-energy in the black[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5: 381–387.
- [24] Ding Y, Liu Y X, Wu W X, et al. Evaluation of biochar effects on nitrogen retention and leaching in multi-layered soil columns[J]. *Water Air Soil Pollution*, 2010, 213(4): 47–55.
- [25] Taghizadeh-Toosi A, Clough T J, Sherlock R R, et al. Biochar adsorbed ammonia is bioavailable[J]. *Plant and Soil*, 2012, 350(1/2): 57–69.
- [26] Berglund L M, DeLuca T H, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(12): 2067–2073.
- [27] 潘逸凡. 生物质炭对稻田土壤氨氧化微生物的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- PAN Yi-fan. Influence of biochar on ammonia oxidation microbial community in paddy soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [28] Warnock D, Lehmann J, Kuyper T, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil—concepts and mechanisms[J]. *Plant and Soil*, 2007, 300(1/2): 9–20.
- [29] 彭文龙. 生物质炭表面物质对微生物的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- PENG Wen-long. Substance on biochar surface impacts microorganism activities[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [30] 付嘉英, 乔志刚, 郑金伟, 等. 不同炭基肥料对小白菜硝酸盐含量、产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(34): 162–165.
- FU Jia-ying, QIAO Zhi-gang, ZHENG Jin-wei, et al. Effects of different biochar-based fertilizer on nitrate content, yield and quality of cabbage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(34): 162–165.