

周玲红, 张浪, 魏甲彬, 等. 冬闲稻田养鸡结合生物炭施用对双季稻田产量及土壤有机碳、活性碳氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1961–1969.

ZHOU Ling-hong, ZHANG Lang, WEI Jia-bin, et al. Effects of winter chicken grazing with biochar application on crop yield, and soil organic carbon, active carbon, and nitrogen content in double-crop paddy soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1961–1969.

冬闲稻田养鸡结合生物炭施用对双季稻田产量及土壤有机碳、活性碳氮的影响

周玲红, 张浪, 魏甲彬, 成小琳, 肖志祥, 徐华勤*, 唐剑武, 唐启源

(湖南农业大学农学院, 长沙 410128)

摘要:本研究利用冬闲田养鸡配施生物炭, 研究其互补效应, 并通过鸡粪田间原位腐解培肥, 减少双季稻生长期化肥用量, 研究其对水稻产量、土壤有机碳和活性碳、氮的影响。试验于2015年对冬闲稻田设4个处理, 分别为冬闲田(F)、冬闲田养鸡(C)、冬闲田添加生物炭(B)、冬闲田养鸡配施生物炭(BC)。2016年4月份于水稻种植前、生育期间和收获后采集土壤样品, 测定水稻产量、土壤有机碳、活性碳和活性氮。试验结果表明: (1) BC处理能显著提高双季稻产量, 早、晚稻实际产量分别达 $6.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $8.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较B、C和F处理增产4.13%~19.25%; (2) 在早稻种植前及早、晚稻收获后土壤有机碳均表现为 $\text{BC} > \text{B} > \text{C} > \text{F}$, 处理间差异显著 ($P < 0.05$); BC处理三次取样时期的有机碳平均值较B、C和F提高4.51%~28.14%; (3) 活性碳、氮含量高低总体趋势表现为 $\text{BC} > \text{B} > \text{C} > \text{F}$, 与B或C处理相比, BC处理对活性碳、氮的提高效果更优; (4) 添加生物炭能降低有机碳、活性碳和土壤微生物量碳的季节变异程度; (5) 相关分析表明早、晚稻产量与土壤有机碳和活性碳、氮均呈极显著相关。冬闲田养鸡配施生物炭处理能够减少20%氮肥用量同时保证水稻产量, 且该冬闲田利用模式能有效提高土壤有机碳和活性碳、氮含量, 是一种高效节肥的培肥模式。

关键词: 冬闲稻田; 鸡; 生物炭; 有机碳; 土壤活性碳、氮; 季节变异

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)09-1961-09 doi:10.11654/jaes.2017-1389

Effects of winter chicken grazing with biochar application on crop yield, and soil organic carbon, active carbon, and nitrogen content in double-crop paddy soil

ZHOU Ling-hong, ZHANG Lang, WEI Jia-bin, CHENG Xiao-lin, XIAO Zhi-xiang, XU Hua-qin*, TANG Jian-wu, TANG Qi-yuan
(College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The objective of the study is to reveal whether the application of biochar and chicken manure can improve soil quality without reducing rice yield and thus reduce the amount of chemical fertilizer used during rice production. A field experiment was conducted to elucidate the effects of biochar application and chicken grazing in winter paddy soil on the seasonal changes in soil organic carbon, active carbon, nitrogen contents, and rice yield after reduced use of chemical fertilizers. Four treatments were set in a winter field in 2015: Fallow (F), winter chicken grazing (C), biochar application (B), and chicken grazing with biochar application (BC). Soil samples were collected before planting, during growth, and after harvest. Rice yield and seasonal change in soil organic carbon, active carbon, and nitrogen content were measured. The results indicated that: (1) The actual yield of early and late rice in BC treatment was $6.99 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $8.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively, and increased by 4.13%~19.25% in comparison with that of the treatments B, C, and F; (2) The organic carbon content before the early rice period and after harvest of early and late rice was in the order: $\text{BC} > \text{B} > \text{C} > \text{F}$ ($P < 0.05$). The organic carbon content in BC treatment was higher than that in the treatments B and C by 4.51%~28.14%; (3) The soil active carbon and nitrogen contents decreased in the order $\text{BC} >$

收稿日期: 2017-10-16 录用日期: 2018-02-08

作者简介: 周玲红(1991—), 女, 湖南郴州人, 硕士研究生, 从事稻田土壤碳氮循环研究。E-mail: 271905246@qq.com

*通信作者: 徐华勤 E-mail: xu7541@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31100382); 国家水稻产业技术体系岗位专家项目(CARS-01-26)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31100382); China Agriculture Research System(CARS-01-26)

B, C>F; (4) The application of biochar could reduce the seasonal variation of organic carbon, activated carbon and soil microbial N. (5) The correlation analysis showed that the yield of early and late rice significantly correlated with soil organic carbon, active carbon, and nitrogen contents. After reducing the amount of chemical fertilizer by 20%, chicken grazing and biochar application improved soil organic carbon, active carbon, and nitrogen contents, as well as rice yield. Chicken grazing combined with biochar application improved available nutrition content in the soil, and thus promoted soil conservation and rice yield in winter field in an eco-friendly manner.

Keywords: fallow paddy field; chicken; biochar; organic carbon; soil active carbon and nitrogen; seasonal variation

生物质炭(Biochar,也可简称为生物炭)一般是指各种生物质如木材、植物组织、动物骨骼或畜禽排泄物及农林废弃物等在完全或部分缺氧和相对较低温度(<700 ℃)的条件下经热裂解或炭化而产生的一类富碳物质^[1]。因其具有高度的稳定性、巨大的比表面积、丰富的孔隙结构和较强的吸附能力^[2],在土壤理化性质改良、吸附固定土壤养分和土壤微生物活性、群落结构等方面受到科研工作者的极大关注^[3-5]。前人研究表明生物炭的孔隙结构及其对水肥的吸附作用可为微生物提供良好的栖息环境^[6],其可利用组分可直接被微生物生长利用^[7],为微生物的生长提供更多的碳源,从而增加土壤微生物量。例如韩玮等^[8]试验表明生物炭处理下土壤微生物量碳、氮、磷的含量明显高于对照,Liang等^[9]研究也得出生物炭的长期效应使土壤微生物量显著提高。但也有研究报道农田施用生物炭对微生物量碳、氮影响并不显著^[10],这可能与土壤类型、生物炭来源等因素有关。不过,生物炭在农业上的应用还存在一定的问题,因生物炭自身所含的矿质养分很少,故单施生物炭不能使土壤变得更为肥沃。农业应用上有将生物炭与牲畜粪便混合发酵等程序制成生物炭基有机肥,但该方法费时费力。

我国南方稻区是我国双季稻主产区,冬闲田约有2000多万公顷^[11],当前冬闲田的利用方式主要是种植绿肥或油菜等冬季作物^[12]。但是这种利用模式经济效益不高,影响农民应用的积极性。通过冬闲稻田养鸡,养鸡产生的鸡粪在田间原位腐解,利用冬闲田作为有机肥发酵和堆放的地点,即可培肥稻田地力,又能减少后期水稻(*Oryza sativa*)种植期间的化肥用量,该模式在南方双季稻种植区得到了一定的应用推广^[13]。在该区域的前期研究发现,冬闲田种植绿肥和田间原位养鸡结合,可显著提高稻田微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮含量^[14]。原因可能是因为鸡粪有机肥和绿肥翻压能为微生物提供大量的碳源和氮源,增加了根系生物量及根系分泌物,促进土壤微生物生长^[15],从而使得土壤微生物量碳、氮含量增加。不

过需要指出的是田间原位养鸡排泄的鸡粪肥直接排放于土壤表面,易被雨水冲刷淋失,且会增加温室气体的排放^[16]。

生物炭有较大的孔隙度和较强吸附性能,可吸附肥料养分、延缓肥料养分的释放^[17]。因此生物炭可以减少随水淋失氮、磷养分的含量,从而使其保持较长时间的供肥作用^[18],且较多研究得出生物炭施用还能减少温室气体的排放^[19],具有较好的固碳减排效果^[20]。所以本研究尝试冬闲田养鸡配施生物炭的互补效应,鸡粪可补充生物炭含量较少的矿质养分,生物炭的吸附作用减少鸡粪肥原位还田养分的流失,并通过鸡粪田间原位腐解培肥,减少双季稻生长期间化肥用量,研究其对双季稻生长期土壤有机碳和活性碳、氮的动态变化,为南方双季稻区稻田土壤肥力的生态培育及农民增收提供科学依据和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料及地点

试验于2015—2016年在湖南农业大学耘园试验基地进行,供试土壤为河流冲积物发育的潮土。供试生物炭为湖南省长沙市生物质能源利用研究中心提供的水稻谷壳生物炭,该生物炭在300~450 ℃下限氧炭化而成,总碳含量为575.30 g·kg⁻¹,全氮、全磷和全钾含量分别为1.90、10.40 g·kg⁻¹和12.90 g·kg⁻¹。供试土壤有机质含量为23.42 g·kg⁻¹,全氮、全磷和全钾含量分别为0.68、0.88 g·kg⁻¹和9.78 g·kg⁻¹,铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾含量分别为29.81、15.13、32.43 mg·kg⁻¹和126.49 mg·kg⁻¹,pH为6.09。

1.2 试验设计与栽培管理

试验于2015年对冬闲稻田设4个处理,每个处理3个重复,共12个小区,每个小区面积为27 m²(3 m×9 m),采用随机区组设计,各小区间起垄覆膜隔开,2016年均种植双季稻。其中冬闲稻田4个处理如下:

(1)冬季休闲,简称冬闲(F):冬闲对照在上一年度晚稻机械收获后将稻草移走,冬季休闲。2016年

早稻施纯氮、 P_2O_5 和 K_2O 分别为 150 、 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 K_2O $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,晚稻分别为 180 、 $105\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;

(2)冬闲稻田添加生物炭(B):于上一年度晚稻收获后将生物炭均匀撒在田块表面并通过翻耕与 $0\sim 15\text{ cm}$ 的土壤混合均匀,生物炭施用量为 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2016年双季稻种植期间化肥N、P、K用量与处理F相同;

(3)冬闲稻田养鸡(C):于2015年12月3日将饲养120 d的本地土鸡放入稻田,用大小为 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的笼子进行圈养,笼内饲喂30只鸡,每8 d挪动一次鸡笼,共挪动5次(首次放入笼子时不算入移动鸡笼,8 d后首次移动,5次移动后各小区每 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 的笼子区域均有2次16 d的停留时间)。鸡饲料为50%玉米+10%米糠+35%苜蓿草粉+5%预混料喂养,至2016年1月28日结束养鸡。在相同的饲料投喂情况下于室内饲养与田间笼养同一批次土鸡1只,用于估算鸡粪排放量,得出约 $7.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 新鲜鸡粪还田,肉鸡和蛋鸡的粪便含水量为52.31%,风干鸡粪总含N、 P_2O_5 和 K_2O 分别为 10.3 、 $9.4\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 和 $8.7\text{ kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ^[21],因此本研究中还田的鸡粪肥约含N、 P_2O_5 和 K_2O 分别为 358.62 、 $327.28\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $302.91\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2016年双季稻每季化肥N和K减少20%,P不变;即早稻纯氮 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O $108\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;晚稻纯氮 $144\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $105\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, K_2O $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本研究磷肥未减量是因为有研究表明一定施肥量的基础上,适当减少氮肥,增加磷肥,对产量有提高作用^[22-23]。

(4)冬闲稻田养鸡配施生物炭结合(BC):生物炭施用同处理F,养鸡同处理B。鸡苗放入田中8 d后移动鸡笼到另一区域,将前一区域的鸡粪与生物炭翻耕混匀,同时将其他处理小区的相应面积也进行翻耕。2016年双季稻种植期间化肥N、P、K用量与处理C相同。

2016年4月开始种植双季稻,早稻供试品种中嘉早17,于2016年3月26日播种,4月27日移栽,移栽密度为 $16.7\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,每穴栽4根基本苗,7月15日收获;晚稻供试品种为湘晚粳12号,播种期为2016年6月23日,7月19日移栽,移栽密度为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,每穴栽2根基本苗,10月27日收获。各小区单灌单排,田间管理措施均一致。肥料施用方法为磷肥做基肥一次性施用,氮肥按基肥:分蘖肥:穗肥=4:2:4施用;钾肥按照基肥:穗肥=7:3施用。

1.3 取样及分析

取土样测定微生物量碳、氮及可溶性有机碳、氮。

取样时间分别为:早稻种植前(2016年4月21日)、早稻苗期(2016年5月6日)、分蘖盛期(5月20日)、孕穗期(6月10日)、灌浆期(6月30日)、成熟期(7月15日);晚稻苗期(7月31日)、晚稻分蘖盛期(8月17日)、晚稻孕穗期(9月7日)、晚稻齐穗期(9月18日)、晚稻灌浆期(10月9日)、晚稻成熟期(10月27日)。其中土壤有机碳采样时间为早稻种植前(2016年4月21日),早、晚稻收获后本研究指早、晚稻成熟期。

试验地耕层厚度为 25 cm ,每个取样时期于各小区按S形采集5个样点,用 20 cm 深的土钻采集耕作层 $0\sim 20\text{ cm}$ 土壤样品,混合均匀后用四分法分成两个部分,一部分过 2 mm 筛后 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存,用于测定土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮;另一部分风干过筛,用于测定土壤有机质。土壤微生物量碳、氮含量根据Brookes等^[24]和Vance等^[25]的方法,采用氯仿熏蒸浸提法测定, K_{EC} 转换系数为 0.38 , K_{EN} 为 0.45 ^[25]。熏蒸开始的同时,另称取等量土样,加入 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ K}_2\text{SO}_4$ 溶液浸提,未熏蒸滤液中的碳和氮含量作为可溶性有机碳、氮。土壤有机碳含量测定采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法^[26]。

早、晚稻收获时每小区连续调查120穴的有效穗数,求出平均数,按平均数法各小区取8蔸水稻植株,风干后进行室内考种。考种项目包括有效穗数、每穗实粒数、空瘪粒数与千粒重等。每个小区实割200穴植株脱粒后测算出实际产量。

1.4 统计分析

经Excel 2007整理数据后,采用SPSS 12.5软件进行不同处理之间方差分析(ANOVA)、多重比较(采用Duncan新复极差法)、季节变异程度(变异系数Coefficient of variation, CV)进行描述,所有数据均进行正态分布和齐性检验。

2 结果与分析

2.1 不同冬闲稻田处理对水稻产量构成因素的影响

由表1可知,早、晚稻的理论产量和实际产量均表现为 $BC>C>B>F$,早稻BC显著高于其他处理,晚稻BC显著高于B和F,各处理均显著高于F($P<0.05$)。与F相比,B、C和BC早稻实际产量增幅分别为12.09%、12.44%和19.25%;晚稻增幅分别为7.14%、8.39%和12.87%;BC与B和C相比,早稻实际产量增幅范围分别为6.39%和6.06%,晚稻增幅分别为5.34%和4.13%。

处理间产量差异主要是有效穗数和每穗粒数不

同所致。早、晚稻B、C和BC三个处理的有效穗数均显著高于F,增幅分别为1.54%~7.67%和7.51%~12.52%;早稻每穗粒数C和BC显著高于B和F($P<0.05$)。

2.2 不同冬闲稻田处理对土壤有机碳的影响

由表2可见,与F处理相比,B、C和BC三个处理均显著提高了土壤有机碳含量($P<0.05$)。其中BC处理土壤有机碳含量显著高于其他处理,在早稻种植前、早稻收获后和晚稻收获后分别比F处理增加了26.81%、31.09%和26.47%。B处理有机碳含量次之,均显著高于C和F处理。从不同取样时期来看,早稻种植前有机碳含量最高,早稻收获后有所降低,晚稻收获后,BC和B差异不显著,但显著高于C和F。说明冬闲稻田养鸡配施生物炭保持和提升土壤有机碳的效果较二者单施更为突出,生物炭施用又优于冬闲稻田养鸡。

2.3 不同冬闲稻田处理对土壤活性碳的影响

2.3.1 土壤微生物量碳

由图1可见,不同冬闲稻田处理条件下土壤微生物量碳(SMBC)变幅很大,为316.34~685.80 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。早稻和晚稻BC处理SMBC含量均显著高于F,最大分别较F提高了48.20%和44.42%;除晚稻成熟期外,C

处理均显著高于冬季休闲($P<0.05$);除晚稻分蘖期、齐穗期和成熟期,BC处理显著高于B,最大提高了28.75%。除早稻苗期和晚稻分蘖期外,BC处理显著高于C处理,最大提高了27.12%,说明养鸡配施生物炭的效果优于二者单独施用。C处理SMBC在早稻种植前显著高于B处理,但在早稻分蘖期和成熟期B显著高于C,其他时期二者无显著差异。

从早、晚稻各取样时期SMBC的平均值来看,BC显著高于其他处理,C和B差异不显著,但显著高于F($P<0.05$)。与F相比,BC、C和B处理早稻各生育时期平均值分别增加了38.46%、19.58%和18.82%,晚稻各生育时期平均值分别增加了31.24%、16.83%和17.80%。各处理SMBC含量在早稻种植前显著高于早稻各生育时期,早稻BC和B在成熟期达最高值,孕穗期次之,C和F则在孕穗期达最高值。晚稻除B在齐穗期外,BC、C和F均在孕穗期达最高值。

2.3.2 可溶性有机碳

由图2可见,不同冬闲稻田处理条件下可溶性有机碳(DOC)变幅为43.63~165.99 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。BC处理的DOC含量均显著高于F,较F提高了19.88%~87.03%。除早稻孕穗期和晚稻齐穗期,C处理均显著高于F,其中最大提高了45.46%。除早稻苗期和孕穗期,B处理均显著高于F,其中最大提高了59.80%。

除早稻成熟期外,BC处理显著高于C处理,不同时期提高幅度为8.22%~29.51%;除早稻孕穗期和成熟期以及晚稻苗期、分蘖期和成熟期外,BC处理显著高于B,不同时期提高幅度为6.18%~48.05%。

早、晚稻各取样时期DOC的平均值同SMBC一致,均表现为BC显著高于其他处理,C和B差异不显著,但显著高于F($P<0.05$),表明养鸡配施生物炭能

表2 不同冬闲稻田处理对土壤有机碳的影响($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 Effects of different winter fallow paddy field treatments on soil organic carbon($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	早稻种植前	早稻收获后	晚稻收获后	平均值
B	14.61±0.13b	13.60±0.16b	14.00±0.33a	14.07±0.19b
C	13.27±0.26c	12.29±0.14c	12.40±0.15b	12.66±0.18c
BC	15.18±0.02a	14.56±0.34a	14.38±0.18a	14.71±0.17a
F	11.97±0.07d	11.10±0.28d	11.37±0.23c	11.48±0.17d

表1 不同处理对水稻产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different treatments on yield components of rice

季别	处理	有效穗数 $\times 10^4\cdot\text{hm}^{-2}$	每穗粒数	结实率/%	千粒重/g	理论产量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$	实际产量/ $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$
早稻	B	326.79±6.59a	105.11±0.43b	73.53±1.50a	27.44±0.27a	6.92±0.10b	6.57±0.08b
	C	308.20±3.93bc	113.82±2.35a	73.70±1.41a	27.13±0.21a	7.01±0.09b	6.59±0.08b
	BC	319.49±4.96ab	116.62±3.41a	74.82±0.99a	27.02±0.06a	7.46±0.07a	6.99±0.15a
	F	303.52±1.85c	102.05±0.97b	73.77±0.56a	27.73±0.33a	6.34±0.07c	5.87±0.04c
晚稻	B	310.88±12.21ab	100.62±4.27a	84.65±1.02a	25.38±0.07a	7.92±0.22b	7.61±0.12b
	C	319.97±7.07a	105.03±0.97a	82.87±2.33a	24.92±0.21ab	8.37±0.04ab	7.70±0.05ab
	BC	325.36±10.37a	108.87±3.69a	83.43±0.45a	24.8±0.26ab	8.77±0.06a	8.02±0.12a
	F	289.17±3.25b	103.44±3.40a	84.00±2.13a	24.73±0.08b	7.39±0.20c	7.11±0.12c

注:同一列中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters in same column indicate significant differences between different treatments at 0.05 level respectively. The same below.

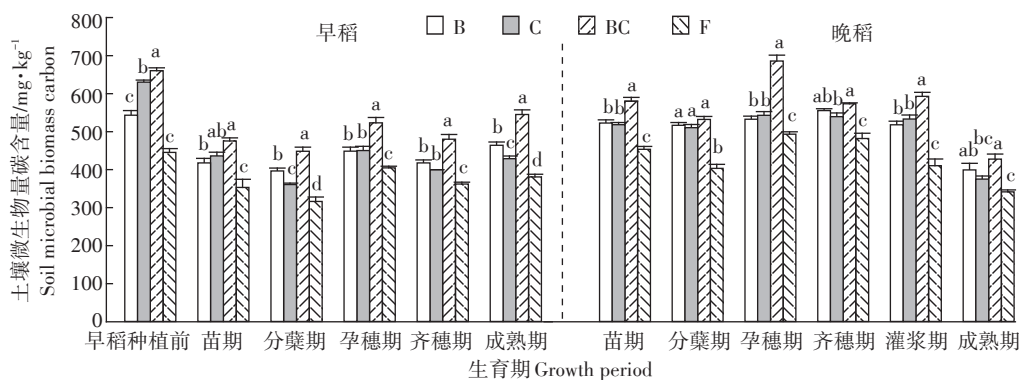


图1 不同冬闲稻田处理对土壤微生物量碳的影响

Figure 1 Effects of different winter fallow paddy field treatments on soil microbial biomass carbon

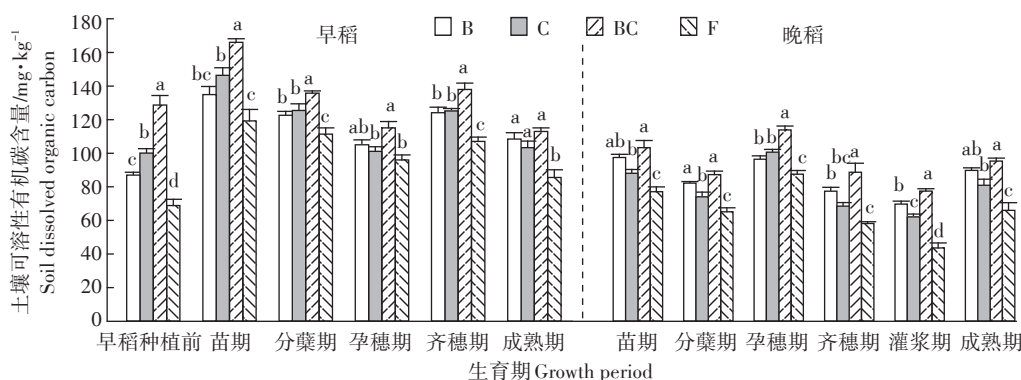


图2 不同冬闲稻田处理对土壤可溶性有机碳的影响

Figure 2 Effects of different winter fallow paddy field treatments on soil dissolved organic carbon

显著提高土壤 DOC 含量。与 F 相比,BC、C 和 B 早稻各生育时期平均值分别增加了 35.44%、19.30% 和 15.77%,晚稻各生育时期平均值分别增加了 42.08%、19.05% 和 28.78%。不同冬闲稻田处理早、晚稻 DOC 分别在苗期和孕穗期达最大值。

2.4 不同冬闲稻田处理对土壤活性氮的影响

2.4.1 土壤微生物量氮

由图3可见,不同处理下土壤微生物量氮(SMBN)

变幅为 16.31~106.29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。除晚稻齐穗期外,BC 处理 SMBN 含量均显著高于 F,较 F 提高了 15.52%~175.78%。早稻种植前和早稻生育期间,C 和 B 处理均显著高于 F,其中在早稻成熟期较 F 分别提高了 127.11% 和 135.38%,晚稻苗期至孕穗期 B 和 C 处理也显著高于 F。除晚稻孕穗期至灌浆期外,BC 处理显著高于 B,其中最大提高了 29.82%;除早稻分蘖期和晚稻齐穗期外,BC 处理显著高于 C 处理,其中最大提高了

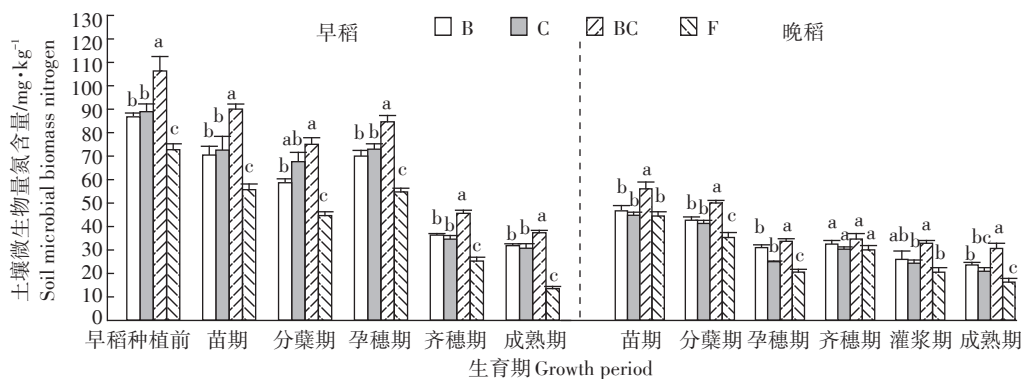


图3 不同冬闲稻田处理对土壤微生物量氮的影响

Figure 3 Effects of different winter fallow paddy field treatments on soil microbial biomass nitrogen

46.44%。

早稻不同取样时期SMBN的平均值来看,BC与C和B差异不显著,BC和C显著高于F,与F相比分别增加64.63%和37.83%,B与F差异不显著;晚稻不同取样时期SMBN的平均值来看BC显著高于C和F,较C和F分别增加了42.29%和27.43% ($P<0.05$)。说明冬闲田养鸡配施生物炭对双季稻田SMBN的提高作用更大。各处理SMBN在早稻种植前最高,早稻苗期和孕穗期较高,齐穗期和成熟期急剧下降;晚稻苗期和分蘖期较高,后期SMBN持续降低。

2.4.2 土壤可溶性有机氮

由图4可见,不同处理条件下可溶性有机氮(DON)含量变幅为52.42~191.84 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除早稻分蘖期和晚稻成熟期外,BC均显著高于F,较F提高了3.57%~105.40%。除早稻苗期和分蘖期以及晚稻灌浆期外,B处理显著高于F,其中最大提高了51.25%。早稻除分蘖期外C处理显著高于F,其中最大提高了40.75%,晚稻仅孕穗期和齐穗期显著高于F。

除早稻分蘖期和晚稻灌浆期外,BC处理显著高于B,其中最大提高了45.50%。早稻种植前BC与C差异不显著,早稻生育期间BC显著高于C,晚稻除灌浆期和成熟期外BC也显著高于C,其中最大提高了45.93% ($P<0.05$)。

从不同取样时期DON的平均值来看,早稻不同

时期的平均值BC显著高于C、B和F,分别高出27.84%、26.77%和50.23%;晚稻不同时期的平均值BC显著高于C和F,较二者分别高出19.43%和29.95%。说明养鸡配施生物炭能显著提高DON含量。早稻C和F处理的DON含量在苗期达最高值,BC和B则在孕穗期达最高;晚稻苗期DON含量最高,分蘖期次之。

2.5 土壤有机碳及活性碳、氮的季节变异程度

变异系数可用来反映样本的变异程度,本试验对不同处理下的有机碳和活性碳、氮的季节变异进行分析,用变异系数来表示其季节变异程度,即其季节波动的剧烈程度。由表3可以看出SMBN的变异程度大于SMBC;施用生物炭及养鸡配施生物炭降低了土壤有机碳季节变异系数,F处理变异系数最高,但差异均不显著;SMBC中C处理变异系数显著高于B和F处理,BC和B、F处理差异不显著;DOC和SMBN均表现为B和BC处理变异系数较小,显著低于C和F处理;DON变异系数BC显著高于B和C处理。

2.6 早、晚稻产量与土壤有机碳及活性碳、氮之间的相关性

相关分析表明,各处理早、晚稻产量与土壤有机碳、SMBC、DOC、SMBN、DON含量均呈极显著正相关关系,其中SMBC与早稻和晚稻的相关系数最大,分别为0.930和0.889(表4)。

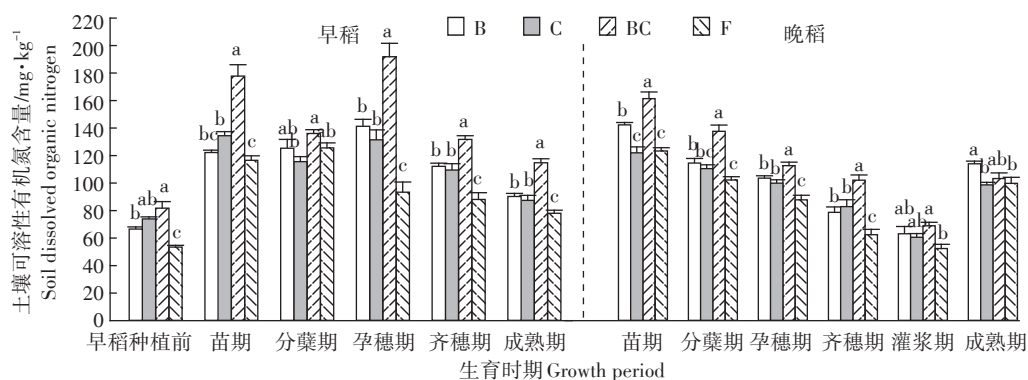


图4 不同冬闲稻田处理对土壤可溶性有机氮的影响

Figure 4 Effects of different winter fallow paddy field treatments on soil dissolved organic nitrogen

表3 不同冬闲稻田处理下土壤有机碳和活性碳、氮的季节变异系数(%)

Table 3 Coefficients of seasonal variation of the soil organic carbon and soil active carbon and nitrogen under different treatments (%)

处理	有机碳	SMBC	DOC	SMBN	DON
B	3.11±0.00a	12.83±0.01b	20.48±0.01b	44.57±0.03b	25.44±0.01bc
C	3.53±0.00a	17.16±0.01a	26.11±0.01a	50.88±0.02a	22.97±0.01c
BC	3.39±0.01a	14.96±0.01ab	22.73±0.01b	46.65±0.02b	29.81±0.01a
F	4.50±0.01a	14.37±0.01b	28.68±0.01a	51.66±0.02a	28.55±0.02ab

表4 产量与土壤有机碳和活性碳、氮间的相关性

Table 4 Correlation between yield and soil organic carbon and soil active carbon and nitrogen

产量	有机碳	SMBC	DOC	SMBN	DON
早稻	0.861**	0.930**	0.902**	0.914**	0.887**
晚稻	0.750**	0.889**	0.819**	0.820**	0.816**

3 讨论

本研究结果中双季稻生育时期土壤有机碳和活性碳、氮含量基本表现为冬闲田养鸡配施生物炭提高效果较二者单施更优,冬闲田对照最低。稻田冬闲期养鸡处理中因为鸡粪自身含有丰富的碳和氮且结构较简单,施入土壤中被微生物迅速分解,产生大量活性碳、氮^[27]。本研究中施用生物炭处理有机碳含量高于养鸡和冬闲,活性碳含量也基本显著高于冬季休闲处理。可能是因为鸡粪施用后会逐渐降解,致使有机碳含量降低;而生物炭包含较多的惰性碳,在土壤的中难降解,直接提高了土壤有机碳含量。另一方面生物炭能吸附土壤中的有机分子,通过表面催化活性促进有机分子的聚合形成土壤有机质^[9];且生物炭对水肥的吸附作用为微生物提供良好的栖息环境和碳源^[28]。把余玲^[29]研究结果也得出小麦/玉米残体与其生物炭单施或配施均显著提高土壤微生物量和可溶性碳含量,原因可能是生物炭具有多孔结构及对可溶性有机质及无机养分(NH_4^+)等吸附性强,使其能保蓄更多的可溶性碳,提高微生物碳源和养分的有效性^[30]。

本研究中冬闲田养鸡配施生物炭提高效果较二者单施更优。这可能与生物炭和鸡粪肥的互补或协同作用有关,因为养鸡配施生物炭较单独养鸡能提供更多的有机碳源,增加微生物对养分的固定;且生物炭能延长肥料的释放期^[31],减少养分的淋失^[32-33],增加氮素的固持,促进了有机氮的矿化^[34],从而提高土壤活性碳、氮含量^[35-36]。

本研究中相对于养鸡和对照处理,施用生物炭以及养鸡配施生物炭处理可以减少有机碳、活性碳及SMBN的季节波动。这表明生物炭施用的重要影响可能是减少土壤有机碳、活性碳和SMBN的季节变化程度,从而增加土壤养分的稳定性。黄剑^[37]也得出施用生物炭可以显著减少土壤微生物量碳、氮的季节波动,原因可能是施用生物炭通过改变土壤孔隙大小,增加土壤溶液滞留时间,从而来减少土壤溶液的淋洗^[38]。本研究中鸡粪施用后会随着降解和淋溶有

机碳含量降低,养鸡配施生物炭处理对养分具有一定的束缚和持留作用^[39],从而有效降低碳的损失。

有研究表明施用生物炭或有机肥能有效提高水稻产量^[40],例如刘晓霞等^[41]研究发现外源添加生物炭显著提高了水稻穗长和产量。戴企平等^[42]研究得出“稻-鸡”种养农作模式与单纯种水稻模式相比,“稻-鸡”种养能明显提高水稻产量。本研究结果与上述结果相似,养鸡配施生物炭以及二者单施均显著提高了双季稻产量,以配施提高最显著。可能是因为养鸡和施用生物炭增加土壤的有机碳含量,提高了土壤C/N比,增加土壤有效氮的可利用性,促进了作物吸收利用,提高作物产量^[43]。养鸡与生物炭结合处理较单独养鸡处理能提供较多的有机碳源,且生物炭能延长肥料的释放期^[31],配施有机碳和活性碳等养分的季节变异较小,减少养分的淋失^[32],从而促进水稻产量的提高。李文军等^[44]研究得出土壤有机碳、氮活性组分与土壤生产力的关系密切,这与本试验结果相似。本研究中水稻产量与土壤有机碳及活性碳、氮呈极显著相关,说明土壤有机碳及活性碳、氮的大小可作为衡量水稻产量高低的依据之一。

4 结论

(1)冬闲稻田养鸡、生物炭单施及二者结合施用均能提高双季稻田有机碳和活性碳、氮含量,冬闲田养鸡与生物炭结合施用提高效果更显著,且养鸡配施生物炭能显著提高双季稻产量;

(2)从时间尺度变化来看,添加生物炭下土壤有机碳、活性碳和SMBN的季节变异程度较养鸡和对照处理更为平缓。

参考文献:

- [1] David L, Pierce F, Baiqun W, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma: An International Journal of Soil Science*, 2010, 158(3/4):46-442.
- [2] 陈温福,张伟明,孟 军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16):3324-3333.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(16):3324-3333.
- [3] Lehmann J. A handful of carbon[J]. *Nature*, 2007, 443:143-144.
- [4] 李 明,李忠佩,刘 明,等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(7):1361-1369.
LI Ming, LI Zhong-pei, LIU Ming, et al. Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil

- [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(7):1361-1369.
- [5] 陈心想, 耿增超, 王 森, 等. 施用生物炭后壤土土壤微生物及酶活性变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4):751-758.
CHEN Xin-xiang, GENG Zeng-chao, WANG Sen, et al. Effects of biochar amendment on microbial biomass and enzyme activities in loess soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4):751-758.
- [6] Luo Y, Durenkamp M, De Nobili M, et al. Microbial biomass growth, following incorporation of biochar produced at 350 °C or 700 °C, in a silty-clay loam soil of high and low pH[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57:513-523.
- [7] Farrell M, Kuhn T K, Macdonald L M, et al. Microbial utilisation of biochar-derived carbon[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 465:288-297.
- [8] 韩 玮, 申双和, 谢祖彬, 等. 生物炭及秸秆对水稻土各密度组分有机碳及微生物的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(18):5838-5846.
HAN Wei, SHEN Shuang-he, XIE Zu-bin, et al. Effects of biochar and straw on both the organic carbon in different density fractions and the microbial biomass in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(18):5838-5846.
- [9] Liang B, Lehmann J, Sohi S P, et al. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, 41(2):206-213.
- [10] Castaldi S, Riondino M, Baronti S, et al. Impact of biochar application to a mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes[J]. *Chemosphere*, 2011, 85(9):1464-1471.
- [11] 谢昭良, 张腾飞, 陈鑫珠, 等. 冬闲田种植2种燕麦的营养价值及土壤肥力研究[J]. 草业学报, 2013, 22(2):47-53.
XIE Zhao-liang, ZHANG Teng-fei, CHEN Xin-zhu, et al. A study on the nutrient value of oat and its influences on soil fertility of winter fallow fields[J]. *Acta Pratacultura Sinica*, 2013, 22(2):47-53.
- [12] 李子双, 廉晓娟, 王 薇, 等. 我国绿肥的研究进展[J]. 草业科学, 2013, 30(7):1135-1140.
LI Zi-shuang, LIAN Xiao-juan, WANG Wei, et al. Research progress of green manure in China[J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(7):1135-1140.
- [13] 唐剑武, 魏甲斌, 徐华勤, 等. 用于农田轮牧养鸡的移动鸡笼: 中国, ZL201520337464.1[P]. 2015-9-23.
TANG Jian-wu, WEI Jia-bin, XU Hua-qin, et al. The moving chicken coop for poultry grazing in farmland: China, ZL201520337464.1[P]. 2015-9-23.
- [14] 周玲红, 魏甲彬, 唐先亮, 等. 冬季种养结合对稻田土壤微生物量及有效碳氮库的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(11):103-114.
ZHOU Ling-hong, WEI Jia-bin, TANG Xian-liang, et al. Effects of winter green manure crops with and without chicken rearing on microbial biomass and effective carbon and nitrogen pools in a double-crop rice paddy soil[J]. *Acta Pratacultura Sinica*, 2016, 25(11):103-114.
- [15] Tang H, Xiao X, Sun J, et al. Soil enzyme activities and soil microbe population as influenced by long-term fertilizer management under an intensive cropping system[J]. *Journal of Pure & Applied Microbiology*, 2014, 8(2):15-23.
- [16] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6):2196-2210.
- [17] 尚 杰, 耿增超, 王月玲, 等. 施用生物炭对(垆)土微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(6):1142-1151.
SHANG Jie, GENG Zeng-chao, WANG Yue-ling, et al. Effect of biochar amendment on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activity in tier soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(6):1142-1151.
- [18] Clough T J, Condron L M. Biochar and the nitrogen cycle: Introduction[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4):1218-1223.
- [19] 蒋 晨, 麻培侠, 胡保国, 等. 生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果[J]. 化农业工程学报, 2013, 29(15):184-191.
JIANG Chen, MA Pei-xia, HU Bao-guo, et al. Effect of biochar returning to paddy field on CH₄ emission reduction[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15):184-191.
- [20] 王欣欣. 生物炭施用对稻田温室气体排放的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013:36-37.
WANG Xin-xin. Studies on the effect of biochar application on paddy greenhouse gas emissions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013:36-37.
- [21] 贾 伟. 我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2014:100-101.
JIA Wei. Studies on the evaluation of nutrient resources derived from manure and optimized utilization in arable land of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014:100-101.
- [22] 杜加银, 茹 美, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3):523-533.
DU Jia-yin, RU Mei, NI Wu-zhong. Effects of fertilization with reducing nitrogen, controlling phosphorus and stabilizing potassium on rice yield and nutrient accumulation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3):523-533.
- [23] 佚 名. 湖南成功研制稻田减氮控磷新技术[J]. 中国农业信息, 2009(12):47.
YI Ming. The successful development of Hunan rice decreased nitrogen and phosphorus control technology[J]. *Chinese Agricultural Information*, 2009(12):47.
- [24] Brookes P C, Landman A, Pudon G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6):837-842.
- [25] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(19):703-707.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:30-33.
BAO Shi-dan. Analysis of soil agriculture[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000:30-33.
- [27] 潘丹丹, 吴祥为, 田光明, 等. 土壤中可溶性氮和 pH 对有机肥和化肥的短期响应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2):170-174.
PAN Dan-dan, WU Xiang-wei, TIAN Guang-ming, et al. Short-term

- response of organic and inorganic fertilizers on dissolved nitrogen and pH in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 170-174.
- [28] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(9): 1812-1836.
- [29] 把余玲. 小麦和玉米植株残体及其生物炭腐解对土壤碳氮含量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 18-19.
- BA Yu-ling. Decomposition of wheat and maize plant residues and straw-biochar and their effects on soil carbon and nitrogen contents [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013: 18-19.
- [30] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1): 311-324.
- [31] Khan M A, Kim K W, Wang M, et al. Nutrient-impregnated charcoal: An environmentally friendly slow-release fertilizer[J]. *Environmentalist*, 2008, 28(3): 231-236.
- [32] Singh B P, Hatton B J, Singh B, et al. The role of biochar in reducing nitrous oxide emissions and nitrogen leaching from soil[C]. Brisbane, Australia, Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science: Soil Solutions for a Changing World, 2010: 257-259.
- [33] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agriculture soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 436-442.
- [34] Anderson C R, Condron L M, Clough T J, et al. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus[J]. *Pedobiologia*, 2011, 54(5): 309-320.
- [35] Dempster D N, Gleeson D B, Solaiman Z M, et al. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil[J]. *Plant and Soil*, 2012, 354(1): 311-324.
- [36] 常蓬勃, 韩 树. 生物炭对壤土土壤微生物及酶活性的影响[J]. 河南农业, 2016(12): 39-40.
- CHANG Peng-bo, HAN Shu. Effects of biochar on loess soil microorganism and enzyme activity[J]. *Henan Agriculture*, 2016(12): 39-40.
- [37] 黄 剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012: 19-21.
- HUANG Jian. The effect of biochar application on soil microbial biomass and soil enzymes[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2012: 19-21.
- [38] Steiner C B, Glaser B, Teixeira W G, et al. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2008, 171(6): 893-899.
- [39] 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.
- [40] 张伟明, 孟 军, 王嘉宇, 等. 生物炭对水稻根系形态与生理特性及产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1445-1451.
- ZHANG Wei-ming, MENG Jun, WANG Jia-yu, et al. Effects of biochar on root morphology, physiological characteristics and yield of rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(8): 1445-1451.
- [41] 刘晓霞, 吴东涛, 朱伟锋, 等. 外源添加生物炭对水稻产量和土壤性质的影响[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(11): 1776-1779.
- LIU Xiao-xia, WU Dong-tao, ZHU Wei-feng, et al. Effects of exogenous biochar on rice yield and soil properties[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(11): 1776-1779.
- [42] 戴企平, 祝水岳, 宋永达. 稻鸡轮作生态牧业的主要效益与操作技术[J]. 浙江畜牧兽医, 2010(4): 26.
- DAI Qi-ping, ZHU Shui-yue, SONG Yong-da. The main benefit and operation technique of rice-chicken rotation ecological animal production[J]. *Zhejiang Animal Husbandry and Veterinary*, 2010(4): 26.
- [43] 武 玉, 徐 刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79.
- WU Yu, XU Gang, LÜ Ying-chun, et al. Effects of biochar amendment on soil physical and chemical properties: Current status and knowledge gaps[J]. *Advance in Earth Science*, 2014, 29(1): 68-79.
- [44] 李文军, 彭保发, 杨奇勇. 长期施肥对洞庭湖双季稻区水稻土有机碳、氮积累及其活性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(3): 488-500.
- LI Wen-jun, PENG Bao-fa, YANG Qi-yong. Effects of long-term fertilization on organic carbon and nitrogen accumulation and activity in a paddy soil in double cropping rice area in Dongting Lake of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(3): 488-500.