

刘晓宇,刘 杨,冯彦房,等. 水稻秸秆生物炭对渍害胁迫下稻麦轮作土壤的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(5):211-215.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.05.038

水稻秸秆生物炭对渍害胁迫下稻麦轮作土壤的影响

刘晓宇^{1,3}, 刘 杨^{2,3}, 冯彦房³, 陈 寅¹, 石春林²

(1. 江苏农林职业技术学院信息工程学院,江苏句容 212400; 2. 江苏省农业科学院农业信息研究所,江苏南京 210014;
3. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室,江苏南京 210014)

摘要:长江中下游地区稻麦轮作的生产方式往往导致土壤排水不畅和养分流失。且该地区小麦生长季多阴雨,导致小麦渍害胁迫减产。探索合理的方法来缓解小麦渍害胁迫有重要意义。本研究开展盆栽试验,设置不同生物炭施用量和渍水处理,研究水稻秸秆生物炭对稻麦轮作土壤理化性质的影响。结果表明,随着生物炭施用量的增加,土壤容重呈下降趋势,有助于改善稻麦轮作土壤排水不畅的特点。同时,施用生物炭可显著增加土壤 pH 值、有机碳和有效磷的含量($P < 0.05$)。施用生物炭和渍水处理对土壤总氮含量没有显著影响,但生物炭施用量达到 40 t/hm^2 时,渍水处理会导致土壤碱解氮含量显著下降($P < 0.05$),表明生物炭有助于固定土壤氮。总体来看,施用水稻秸秆生物炭可改善稻麦轮作土壤的排水条件,维持土壤养分,有助于抵御渍害胁迫造成的小麦减产。

关键词:水稻秸秆;生物炭;稻麦轮作;渍害胁迫;土壤养分

中图分类号: S156.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)05-0211-05

长江中下游地区是我国主要的粮食产区之一^[1],种植制度以稻麦轮作为主^[2]。该地区稻麦轮作土壤以黏粒含量较高的水稻土为主,一般具备较好的保水能力,有助于水稻在水分充足的环境下生长^[3]。但小麦对过量水分较为敏感^[4],麦季降雨过多,土壤含水量长期维持在较高水平,将导致渍害胁迫,甚至引发赤霉病,造成小麦减产。据报道,不同程度的渍害胁迫可造成小麦减产 20% ~ 50%^[5],直接影响当地粮食安全。

由于人口快速增长和农用地面积减少,为保证粮食产量,我国施用大量化肥以提高农作物单产。

据报道,我国化肥消耗量约占世界总量的 30%^[6],长江中下游地区是我国施肥强度最大的区域之一,以氮肥为例,年施用量可达 $550 \sim 650 \text{ kg/hm}^2$ ^[7]。然而,过量施用氮肥会降低氮利用效率,同时增加环境污染风险^[8]。目前,渍后补施氮肥是应对小麦渍害减产的主要方法之一^[9],但该方法的经济成本和人力成本较高,且会进一步加重该地区养分流失和面源污染的风险。因此,探索更合理的方法来缓解该地区小麦渍害胁迫有重要意义。

生物炭(biochar)是一种常用的土壤改良剂,是生物质在缺氧条件下,经热解产生的一种以碳为主、性质稳定的黑色固体^[10-11]。前人采用荟萃分析和试验分析进行研究的结果表明,施用生物炭可以使小麦增产 11.3% ~ 30.0%^[12-14],且生物炭主要通过影响土壤理化性质来影响作物产量^[15]。前人研究认为,施用生物炭可以改良土壤结构和土壤养分的有效性^[16],且特别适用于酸化、退化和粗质地土壤^[17]。但关于生物炭如何影响质地黏重、养分充足的稻麦轮作土壤理化性质的相关研究相对较少。此外,这种影响在渍害胁迫发生时有何变化,施用

收稿日期:2020-06-23

基金项目:江苏农林职业技术学院科技项目(编号:2019kj014);江苏省农业科技自主创新资金[编号:CX(19)3099];国家自然科学基金(编号:31800358);长江下游平原农业环境重点实验室开放基金(编号:AE2018006)。

作者简介:刘晓宇(1987—),女,江苏扬州人,博士,讲师,主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail:xyliu@jsafc.edu.cn。

通信作者:石春林,博士,研究员,主要从事农业气象研究。E-mail:shicl@jaas.ac.cn。

[24] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.

[25] 倪余文,区自清. 土壤优先水流及污染物优先迁移的研究进展[J]. 土壤与环境,2000,9(1):60-63.

[26] 郝振纯,冯 杰. 水及溶质在大孔隙土壤中运移的实验研究进展[J]. 灌溉排水,2002,21(1):67-71.

[27] 李 勇,袁佳慧,张维维,等. 太湖地区农田土壤大孔隙及胶体释放对有效磷下渗的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(1):7-13.

生物炭能否作为缓解小麦渍害胁迫的方法? 这些问题还有待进一步探索。因此,本研究通过开展小麦盆栽试验,设置不同生物炭施用量和渍水胁迫处理,观测稻麦轮作土壤理化性质的变化,以综合评价水稻秸秆生物炭在渍害胁迫过程中对稻麦轮作制度下土壤的影响,并评估其作为缓解小麦渍害胁迫方法的潜力。

1 材料与方法

1.1 试验设计

2016 年 11 月 15 日在江苏省农业科学院试验场开展小麦盆栽试验,试验土壤取自江苏省南京市典型稻麦轮作土壤(潴育型水稻土)。试验所用的水稻秸秆生物炭购自江苏华丰农业生物工程有限公司,制备温度为 500 ℃。土壤和生物炭的理化性质详见表 1。使用直径为 25 cm、高 20 cm 的塑料桶作为试验用钵,在底部钻取小孔用于排水。盆栽试验考虑生物炭施用量和渍水胁迫 2 个因素,生物炭施用量共设置对照(CK,未施用生物炭)、中施用量

(生物炭施用量为 10 t/hm²)和高施用量(生物炭施用量为 40 t/hm²)3 个处理,每个盆钵均采用风干土 12 kg,与对应的生物炭混合均匀后,装配进入塑料桶。渍水胁迫共设置未渍水(小麦整个生育期始终保持常规水分管理)和渍水(开花期后连续渍水 12 d,其他时期保持常规水分管理)2 个处理。合计 6 个处理,每个处理均设置 3 次重复。小麦供试品种为宁麦 13 号,播种密度为每盆 3 穴,每穴 3 棵苗,在 3 叶期间苗(保留 1 棵苗)。采用当地常规施肥水平对小麦进行管理,麦季施肥量为纯氮 225 kg/hm²,基肥和追肥分配比例为 6:4,60% 的基肥以复合肥形式于播种时施下,40% 的追肥以尿素形式于拔节期施下。小麦开花期为 2017 年 4 月 15 日,此时对小麦盆栽进行渍水处理,关闭盆栽底部的排水口,土壤表层土层保持 1~2 cm,并维持 12 d,12 d 后打开排水口排水,作为渍害胁迫结束。小麦成熟期为 2017 年 5 月 22 日,小麦收获后对土壤进行采样分析。

表 1 稻麦轮作土壤和水稻秸秆生物炭基本性质

类型	pH 值	容重 (g/cm ³)	总碳含量 (%)	土壤有机碳 含量(g/kg)	全氮含量 (mg/kg)	碳氮比	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)
稻麦轮作土壤	8.21	1.27	—	8.70	859.86	10.11	72.71	74.88
水稻秸秆生物炭	9.59	0.48	51	—	377.46	41.19	8.87	92.62

注:“—”表示空缺。

1.2 土壤理化性质分析

2017 年 5 月 24 日进行土壤采样。在盆栽 10 cm 深处,用环刀法测定土壤容重^[18](由于渍水理论上不影响土壤容重,本研究仅采集未渍水处理的土壤容重)。同时均匀采集 0~20 cm 土壤样品。土壤样品经过室内风干、过筛后,进行化学分析,具体测定方法:pH 值采用电位法测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)氧化-滴定法测定;全氮含量采用半微量开氏法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[18]。

1.3 统计方法

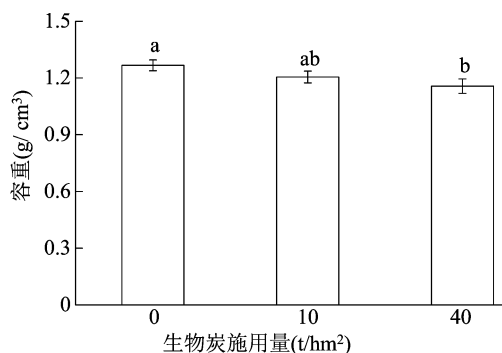
采用方差分析比较盆栽试验中不同处理间土壤理化性质的差异,均值的多重比较采用最小显著差异法检验,*P*<0.05 作为显著性差异的标准,使用 SPSS 19.0 进行统计分析。统计图使用 Origin 9.0 制作。

2 结果与分析

2.1 不同生物炭施用量和渍水处理对稻麦轮作土壤容重和 pH 值的影响

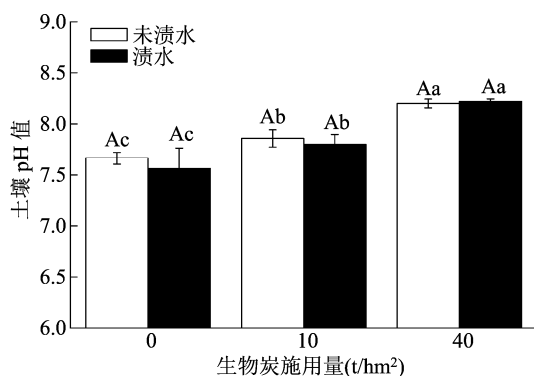
土壤容重数据(图 1)显示,用作对照的稻麦轮作土壤容重为 1.27 g/cm³,而生物炭施用量分别为 10、40 t/hm² 时,土壤容重相比对照分别下降 4.9%、8.7%,且在施用量为 40 t/hm² 时达到显著差异水平(*P*<0.05),表明施用生物炭可以降低土壤容重。随着生物炭施用量的增加,土壤容重还有进一步下降的潜力。

由图 2 可知,相同生物炭施用量处理下,渍水与未渍水处理间 pH 值的差异均未达到显著水平。在相同渍水处理下,由于生物炭 pH 值较高(表 1),生物炭施用量分别为 10、40 t/hm² 时,土壤 pH 值相比对照均显著增加,且随着生物炭施用量的增加,土壤 pH 值还有进一步增加的潜力。



图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图1 盆栽试验中不同生物炭施用量下土壤容重的变化



不同大写字母表示相同生物炭施用量不同渍水处理下存在显著差异; 不同小写字母表示相同渍水处理不同生物炭施用量处理下存在显著差异。下同

图2 盆栽试验中不同生物炭施用量和渍水处理下土壤 pH 值的变化

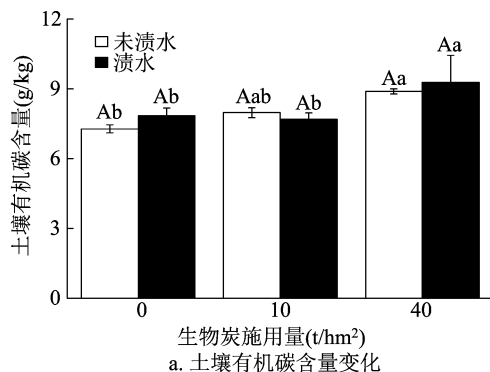
2.2 不同生物炭施用量和渍水处理对稻麦轮作土壤碳、氮含量的影响

由图 3 - a 可知, 相同生物炭施用量处理下, 渍水与未渍水处理的土壤有机碳含量均未达到显著水平。相同渍水处理下, 随着生物炭施用量的增加, 土壤有机碳含量呈现增加趋势, 当生物炭施用量达到 40 t/hm^2 时, 渍水和未渍水条件下的土壤有机碳含量相比对照均显著增加。

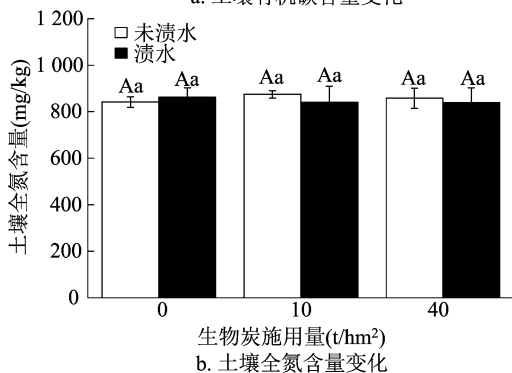
与土壤有机碳含量不同, 施用生物炭和渍水处理对土壤全氮含量没有显著影响 (图 3 - b)。土壤碳氮比的变化与土壤有机碳含量较为一致, 相同生物炭施用量下, 渍水处理下的碳氮比略高于未渍水处理, 但未达到显著水平。相同渍水处理下, 生物炭施用量增加导致土壤碳氮比增加, 且在施用量达到 40 t/hm^2 时与对照相比均达到显著水平 (图 3 - c)。

2.3 不同生物炭施用量和渍水处理对稻麦轮作土壤有效养分的影响

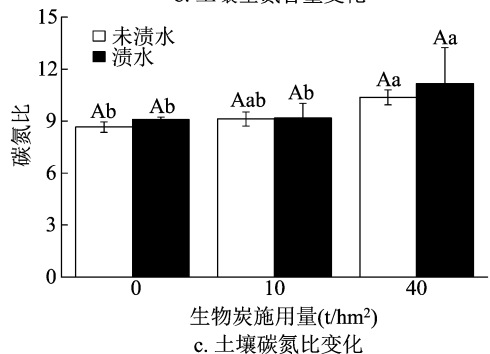
由图 4 可知, 未渍水处理下, 土壤碱解氮含量随生物炭施用量增加而增加, 但差异不显著。而渍水



a. 土壤有机碳含量变化



b. 土壤全氮含量变化



c. 土壤碳氮比变化

图3 盆栽试验中不同生物炭施用量和渍水处理下土壤有机碳含量、碳氮比和全氮含量的变化

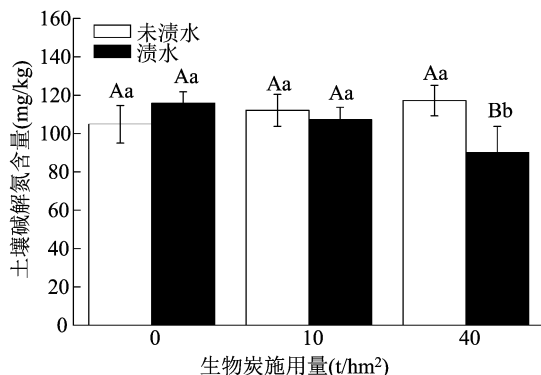


图4 盆栽试验中不同生物炭施用量和渍水处理下土壤碱解氮含量变化

处理下, 土壤碱解氮含量随生物炭施用量的增加而减少, 当生物炭施用量达到 40 t/hm^2 时, 渍水处理下的土壤碱解氮含量显著低于未渍水处理。

由图 5 可知,相同生物炭施用量,渍水处理下的土壤有效磷含量均低于对应未渍水处理,但均未达到显著水平。相同渍水处理下,土壤有效磷含量随生物炭施用量的增加而增加,当施用量达到 40 t/hm^2 时,土壤有效磷含量增加,并与其他 2 个处理的差异达到显著水平。

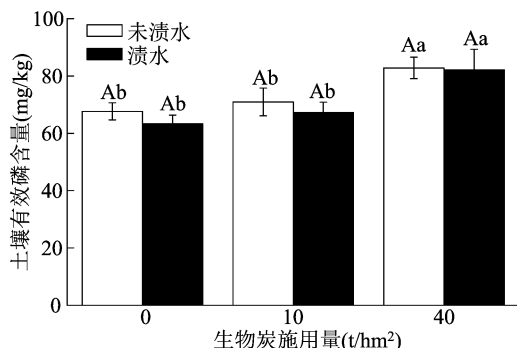


图5 盆栽试验中不同生物炭施用量和渍水处理下土壤有效磷含量的变化

3 讨论

3.1 生物炭对土壤排水的影响

水稻种植需要土壤具备较强的保水能力,因此,水稻种植区的土壤往往透气性和排水性差^[19-20]。受季风气候影响,长江中下游地区在小麦关键生育期(特别是开花期)常出现连续阴雨^[21],土壤表层水分难以排除,将导致小麦渍害胁迫。提高稻麦轮作土壤的排水能力,将有助于缓解渍害胁迫造成的减产。本研究开展的试验结果显示,施用水稻秸秆生物炭可降低土壤容重。生物炭高施用量下,土壤容重相比未施用生物炭的处理显著下降。而土壤容重的下降将有助于提高土壤孔隙度^[22],进而促进土壤水分的排出。刘杨等开展的土柱试验也表明,施用生物炭可促进 10、20 cm 深处土壤体积含水量快速下降^[23]。因此,施用生物炭有助于加速土壤排水,解除土壤的渍水状态。此外,本研究表明,施用生物炭有助于增加土壤有机碳含量,当生物炭施用量达到 40 t/hm^2 时,土壤有机碳含量相比对照显著增加,这与前人的研究结果^[24]一致。土壤有机碳含量的增加有利于土壤团聚体的稳定,可进一步改善土壤结构^[25],且一般认为土壤有机碳含量的增加导致土壤容重下降^[26]。因此,施用生物炭除直接影响土壤容重外,还可通过增加土壤有机碳含量,在中长期对土壤结构持续改良,进一步改善稻麦轮作土壤的排水能力。

3.2 生物炭对土壤养分的影响

生物质制备生物炭过程中,大部分营养元素被保留^[27],因此,生物炭本身也被认为是一种养分^[28-29]。本研究的结果显示,水稻秸秆生物炭施用量达到 40 t/hm^2 时,土壤有机碳含量和有效磷含量显著增加,将有助于小麦生长,以抵御渍害胁迫造成的损失。长江中下游地区存在较严重的过度施肥现象(以氮肥为主)^[30],过量的氮投入不仅会降低作物的氮利用效率,还会通过径流、淋溶和氨挥发等方式影响水和大气环境^[31]。渍害胁迫发生后,土壤氮有更多的机会进入水环境中,因此补施氮肥会增加环境风险,不适宜作为缓解小麦渍害减产的方法。施用生物炭虽然增加了氮投入,但生物炭含氮量较低,且碳氮比较高,不同生物炭施用量下土壤全氮含量未出现显著性差异。前人研究表明,生物炭较高的碳氮比可降低土壤氮的有效性^[32]。本研究中,渍水处理下,生物炭施用量达到 40 t/hm^2 时,土壤碱解氮含量显著下降,表明生物炭影响土壤氮的转化和迁移,可能通过吸附等方式^[33],降低土壤中易分解和流失的氮,从而改善作物的氮利用效率,降低面源污染风险。因此,从土壤养分管理的角度来看,施用水稻秸秆生物炭是一种适用于当地农业环境下应对小麦渍害减产的管理措施。

4 结论

水稻秸秆生物炭作为一种成本较低的土壤改良剂,可以降低稻麦轮作土壤的容重,有助于解除土壤的渍水状态。同时可维持土壤养分并提高作物的氮利用效率,在不增加环境风险的前提下,促进渍后小麦生长恢复。因此,施用生物炭可作为一种用于缓解长江中下游稻麦轮作制度中小麦渍害减产的方法。未来研究中,须要进一步开展不同生物炭种类和施用量对稻麦轮作土壤理化性质的影响研究,筛选最合适的生物炭施用方法,以到达最优的经济-环境效益。

参考文献:

- [1] Chen S, Ge Q Y, Chu G, et al. Seasonal differences in the rice grain yield and nitrogen use efficiency response to seedling establishment methods in the middle and lower reaches of the Yangtze River in China [J]. Field Crops Research, 2017, 205: 157-169.
- [2] Li C Y, Jiang D, Wollenweber B, et al. Waterlogging pretreatment during vegetative growth improves tolerance to waterlogging after anthesis in wheat [J]. Plant Science, 2011, 18(5): 672-678.

- [3] Wu M X, Han X G, Zhong T, et al. Soil organic carbon content affects the stability of biochar in paddy soil [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 59 – 66.
- [4] Rasaei A, Ghobadi M E, Jalali – honarmand S, et al. Impacts of waterlogging on shoot apex development and recovery effects of nitrogen on grain yield of wheat [J]. *European Journal of Experimental Biology*, 2012, 24: 1000 – 1007.
- [5] 刘 杨, 石春林, 宣守丽, 等. 不同生育期渍水寡照对小麦产量构成的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(10): 124 – 127.
- [6] Liu X, Xu S S, Zhang J W, et al. Effect of continuous reduction of nitrogen application to a rice – wheat rotation system in the middle – lower Yangtze River region (2013–2015) [J]. *Field Crops Research*, 2016, 196: 348 – 356.
- [7] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in china – contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 117 – 127.
- [8] Feng Y F, Sun H J, Xue L H, et al. Biochar applied at an appropriate rate can avoid increasing NH_3 volatilization dramatically in rice paddy soil [J]. *Chemosphere*, 2016, 168: 1277 – 1284.
- [9] 范雪梅, 姜 东, 戴廷波, 等. 花后干旱和渍水下氮素供应对小麦旗叶衰老和粒重的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 42(5): 875 – 879.
- [10] Lehmann J. A handful of carbon [J]. *Nature*, 2007, 447(7141): 143 – 144.
- [11] 蒋东来, 王晓玮, 赵铭钦, 等. 生物炭与不同肥料配施对汞胁迫下烤烟生长和生理指标的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 39(4): 106 – 118.
- [12] Albuquerque J A, Salazar P, Barr N V, et al. Enhanced wheat yield by biochar addition under different mineral fertilization levels [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(3): 475 – 484.
- [13] Liu X Y, Zhang A F, Ji C Y, et al. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions; a meta – analysis of literature data [J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1): 583 – 594.
- [14] Vavvari F P, Baronti S, Lugato E, et al. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat [J]. *European Journal of Agronomy*, 2011, 34(4): 231 – 238.
- [15] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 3488 – 3497.
- [16] Zhao X, Wang J W, Wang S Q, et al. Successive straw biochar application as a strategy to sequester carbon and improve fertility: a pot experiment with two rice/wheat rotations in paddy soil [J]. *Plant and Soil*, 2014, 378(1/2): 279 – 294.
- [17] Burrell L D, Zehetner F, Rampazzo N, et al. Long – term effects of biochar on soil physical properties [J]. *Geoderma*, 2016, 282: 96 – 102.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- [19] 姜 东, 陶勤南, 张国平. 渍水对小麦扬 5 号旗叶和根系衰老的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(11): 1519 – 1521.
- [20] Aggarwal P K, Kalra N, Chander S, et al. Infocrop: a dynamic simulation model for the assessment of crop yields, losses due to pests, and environmental impact of agro – ecosystems in tropical environments. I. Model description [J]. *Agricultural Systems*, 2006, 89(1): 1 – 25.
- [21] 石春林, 金之庆. 基于 WCSODS 的小麦渍害模型及其在灾害预警上的应用[J]. *应用气象学报*, 2003, 14(4): 462 – 468.
- [22] 潘金华, 庄舜尧, 曹志洪, 等. 生物炭添加对皖南旱地土壤物理性质及水分特征的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(2): 320 – 326.
- [23] 刘 杨, 刘晓宇, 石春林, 等. 生物炭缓解稻麦轮作区小麦渍害胁迫的作用 [J]. *土壤学报*, 2017, 54(6): 1518 – 1526.
- [24] Mukherjee A, Zimmerman A R. Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory – produced biochars and biochar – soil mixtures [J]. *Geoderma*, 2013, 193 – 194: 122 – 130.
- [25] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – a literature analysis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(1): 1 – 12.
- [26] Keller T, H Kansson I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content [J]. *Geoderma*, 2010, 154(3/4): 398 – 406.
- [27] Laird D, Fleming P, Wang B Q, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 436 – 442.
- [28] Lehmann J, da Silva Jr 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.
- [29] 胡 茜, 赵 远, 张玉虎, 等. 生物炭配施化肥对稻田土壤有效氮素以及水稻产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(15): 108 – 112.
- [30] Tian Z W, Jing Q, Dai T B, et al. Effects of genetic improvements on grain yield and agronomic traits of winter wheat in the Yangtze River basin of China [J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 417 – 425.
- [31] Zhang M, Tian Y H, Zhao M, et al. The assessment of nitrate leaching in a rice – wheat rotation system using an improved agronomic practice aimed to increase rice crop yields [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 241: 100 – 109.
- [32] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos; 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. *Field Crops Research*, 2009, 111(1/2): 81 – 84.
- [33] Chan K Y, Zwieter L V, Meszaros I, et al. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(8): 629 – 634.