

小麦施用生物炭下化肥减施潜力研究

王文军, 王道中, 花可可, 郭志彬 (安徽省农业科学院土壤肥料研究所/养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 安徽合肥 230031)

摘要 利用砂姜黑土区小麦玉米轮作制下开展的连续3年定位试验, 分析了生物炭与化肥配施对小麦产量、产量要素、氮素吸收量、氮素回收率及土壤物理性状的影响, 以期为砂姜黑土区小麦生物炭施用下化肥合理减量施用提供依据。结果表明, 施肥仍是砂姜黑土区小麦高产的关键。在施氮量为 225 kg/hm^2 水平下, 生物炭与化肥配施, 减少10%的氮肥, 小麦可以达到稳产以及略有增产的效果, 氮肥减量达20%时, 小麦产量略有下降, 氮肥减量幅度达30%以上时, 小麦产量显著下降。生物炭与化肥配施下减量施肥可以提高氮素回收率, 随着试验年限增长, 氮素回收率有增加趋势。与单施化肥相比, 施用生物炭土壤容重下降 $0.04 \sim 0.06 \text{ g/cm}^3$, 降幅 $2.92\% \sim 4.38\%$, 土壤田间持水量提高 $2.97 \sim 4.47$ 百分点, 增幅 $11.8\% \sim 17.8\%$, 方差分析结果, 差异均达显著水平。因此, 在淮北砂姜黑土冬小麦种植上, 配施生物炭 30 t/hm^2 , 较常规施肥减少10%的氮肥、20%的磷钾肥, 可以保障小麦增产稳产, 提高氮肥回收率。

关键词 小麦; 生物炭; 化肥减施; 砂姜黑土

中图分类号 X 171 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)20-0185-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.20.048



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on the Potential of Reducing Fertilizer Application under Biochar Application in Wheat

WANG Wen-jun, WANG Dao-zhong, HUA Ke-ke et al (Soil and Fertilizer Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Nutrient Cycling and Resource Environment of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031)

Abstract A 3-year located field experiment under wheat-maize rotation was carried out in Lime Concretion Black Soil Area, and the effects of wheat yield, yield factors, nitrogen uptake, nitrogen recovery, soil physical properties were analyzed under the combined application of biochar and chemical fertilizer, which could provide scientific basis for fertilizer reduction. The results showed that the fertilization was still the key to high yield of wheat in Lime Concretion Black Soil Area. It could get stable wheat yield or a slight increase as the nitrogen application rate reducing by 10%, wheat yield declined slightly as the nitrogen application rate reducing by 10%, and the wheat yield declined significantly as the nitrogen application rate reducing by above 30% under the combined application of biochar and chemical fertilizer. The nitrogen recovery rate improved by reducing fertilizer applied under the condition of biochar application, and the nitrogen recovery rate had an increasing trend as the experiment prolonged. Compared with chemical fertilizer treatment, the soil bulk density decreased by $0.04 \sim 0.06 \text{ g/cm}^3$, a decrease of $2.92\% \sim 4.38\%$, and the field water capacity increased by $2.97 \sim 4.47$ percentage points, an increase of $11.8\% \sim 17.8\%$ under the application of biochar. According to the results of variance analysis, the differences reached significant levels. As a result, the application of biochar at 30 t/hm^2 in winter wheat in Lime Concretion Black Soil Area can reduce the nitrogen fertilizer rate by 10% and the phosphorus and potassium fertilizer by 20% compared with the conventional fertilization, which can ensure the wheat yield increase and stability, and improve the nitrogen fertilizer recovery rate.

Key words Wheat; Biochar; Reducing fertilizer application; Lime Concretion Black Soil

砂姜黑土是发育于河湖相沉积物、低洼潮湿和排水不良环境、经前期的草甸潜育化过程和以脱潜育化为特点的后期旱耕熟化过程, 所形成的一种古老耕作土壤^[1], 全国面积约 400 万 hm^2 , 主要分布于黄淮海平原南部和南阳盆地。区域内地势平坦、光热水资源丰富, 是我国重要的粮食主产区^[2]。砂姜黑土由于质地黏重, 黏土矿物中蒙脱石含量高, 土壤胀缩性强, 水分物理性质十分不良^[3], 严重制约了作物的水肥资源利用效率^[4]。

生物炭是生物质能原料在低氧环境下, 经高温裂解的产物, 由于具有比表面积大、孔隙结构丰富、碳含量高且不易分解等特点, 被广泛应用于土壤改良。研究认为, 生物炭能提高土壤有机碳含量^[5-6]、改善土壤物理结构^[7-8]、增强养分固持能力^[9]、增加土壤微生物多样性^[10]等, 从而提高土壤肥力水平和肥料利用效率, 进而提高作物产量^[11-13]。

砂姜黑土上的研究也证实, 生物炭可以减轻砂姜黑土的胀缩性能^[14], 改善土壤理化性质, 提高作物产量^[15]。但在生物炭施用下, 小麦生产上能否减少化肥用量及适宜化肥减量幅度

尚不清楚。笔者通过连续3年的田间定位试验, 探明生物炭施用下不同氮肥减量比例对冬小麦产量和养分吸收利用的影响, 以期为砂姜黑土区生物炭施用和化肥减量提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验地位于安徽省蒙城县乐土镇葛桥村, 试验区地处淮北平原, 暖温带半湿润季风气候区, 年平均气温 $14.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 无霜期 212 d, 常年降水量 $600 \sim 900 \text{ mm}$ 。供试土壤为砂姜黑土。

1.2 试验材料 供试生物炭为小麦秸秆生物炭(河南商丘三利新能源有限公司, 热裂解炭化温度 $350 \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$), 生物炭性质: pH 10.3, 比表面积为 $8.92 \text{ m}^2/\text{g}$, 有机碳为 510 g/kg , 全氮 5.9 g/kg , 全磷 0.44 g/kg , 全钾 23.0 g/kg 。

供试土壤为砂姜黑土, 其耕层($0 \sim 20 \text{ cm}$)基本化学性质: 有机质 18.9 g/kg , 全氮 0.162 g/kg , 碱解氮 89.4 mg/kg , 有效磷 45.6 mg/kg , 速效钾 132.8 mg/kg , pH 5.90。主要农作物为冬小麦和夏玉米。

1.3 试验设计 试验于2017年开始, 采用田间定位试验, 设7个处理: ①CK(不施肥), ②B(生物炭), ③ $\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$, ④ $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2\text{B}$, ⑤ $\text{N}_3\text{P}_2\text{K}_2\text{B}$, ⑥ $\text{N}_4\text{P}_2\text{K}_2\text{B}$, ⑦ $\text{N}_5\text{P}_2\text{K}_2\text{B}$ 。 N_2 、 N_3 、 N_4 、 N_5 分别为 N_1 的90%、80%、70%和60%, P_2 、 K_2 分别为 P_1 、 K_1 的80%。 $\text{N}_1\text{P}_1\text{K}_1$ 处理肥料用量分别为 $\text{N } 225 \text{ kg/hm}^2$ 、 P_2O_5

基金项目 国家重点研发计划课题(2017YFD0201708); 国家土壤质量太和观测实验站(NAES067SQ25)。

作者简介 王文军(1967—), 女, 安徽歙县人, 副研究员, 硕士, 从事土壤肥力研究。

收稿日期 2021-04-07

75 kg/hm²、K₂O 60 kg/hm²。生物炭用量为 30 t/hm²。小区面积 30 m²,重复 3 次,随机区组排列。氮肥品种为尿素,含氮 46%,磷肥品种为普通过磷酸钙,含 P₂O₅ 12%,钾肥品种为氯化钾,含 K₂O 60%。生物炭于整地前人工撒于地表,均匀旋耕入土 15 cm 左右,翻埋于耕层。N 肥 70%基施,30%拔节期追施,磷钾肥全部基施。

1.4 测定项目与方法 小麦产量:于收获期将各处理小区的小麦全部收获,单独脱粒计产。

土壤样品采集与分析:试验前采集土样,取样深度 0~20 cm,用土钻从每个小区中随机采取 5 个样点,混合后为 1 个混合样,室温下风干后磨细。pH 采用电位法测定,有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,全氮采用开氏蒸馏法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。2020 年小麦收获后,环刀法测定土壤容重和含水量,取样深度 0~15 cm,每小区随机采集 5 个样点。

1.5 数据处理 采用 Excel 作图,不同处理间的数据用 SPSS 进行差异性检验和多重比较。

2 结果与分析

2.1 减肥条件下配施生物炭对小麦产量的影响 从表 1 可以看出,不施肥处理小麦产量最低,与不施肥处理相比,单施生物炭可以提高小麦产量,2018、2019、2020 年及多年平均产量分别提高 8.2%、7.4%、40.5%、13.1%。单施化肥或化肥与配施生物炭均能显著提高小麦产量,表明施肥仍是淮北砂姜黑土区小麦增产的关键。

在增施生物炭时,N₂P₂K₂B 处理不同年度及多年平均产量与 N₁P₁K₁ 处理无显著差异。2018、2019、2020 年及多年平均产量, N₃P₂K₂B、N₄P₂K₂B、N₅P₂K₂B 处理产量均低于 N₁P₁K₁ 处理,2018、2019、2020 年小麦产量 N₃P₂K₂B 与 N₁P₁K₁ 处理间差异不显著,而 N₄P₂K₂B、N₅P₂K₂B 处理产量显著低于 N₁P₁K₁ 处理。以上结果表明,在增施生物炭的条件下氮肥减量 10%,磷钾肥各减量 20%,较全量施肥处理小麦产量不降低,氮磷钾肥各减量 20%,小麦产量低于全量施肥处理,但差异不显著,当氮肥减量幅度在 30%以上时,小麦产量显著下降。

表 1 不同处理对小麦产量的影响

Table 1 Effects of different treatments on wheat yield kg/hm²

处理 Treatment	2018 年	2019 年	2020 年	平均 Average
CK	3 738.89 c	5 044.44 d	1 740.00 d	3 507.78 e
B	4 044.44 c	5 415.56 d	2 444.44 c	3 968.15 d
N ₁ P ₁ K ₁	6 011.11 a	9 088.89 ab	6 135.56 a	7 078.52 a
N ₂ P ₂ K ₂ B	6 050.00 a	9 588.89 a	6 131.11 a	7 256.67 a
N ₃ P ₂ K ₂ B	5 933.33 a	7 700.00 bc	5 678.89 ab	6 437.41 b
N ₄ P ₂ K ₂ B	5 050.00 b	7 611.11 bc	5 364.44 b	6 008.52 c
N ₅ P ₂ K ₂ B	4 900.00 b	7 033.33 c	5 301.11 b	5 744.81 c

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

2.2 减肥条件下配施生物炭对小麦产量各要素的影响 从表 2 可以看出,不同年度间,单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重均以不施肥 CK 处理最低,其次为单施生物炭处理。2018 年,CK、B 与 N₁P₁K₁、N₂P₂K₂B、N₃P₂K₂B 和 N₄P₂K₂B 处理间单位面积有效穗的差异均达显著水平,CK、B 与 N₂P₂K₂B 处理间每穗粒数差异达显著水平,CK、B 与生物炭化肥配施处理间千粒重差异达显著水平;2019 年,CK、B 与 N₁P₁K₁、N₂P₂K₂B 处理间单位面积有效穗的差异均达显著水平,CK、B 与生物炭化肥配施处理间千粒重差异达显著水平,CK、B 与 N₂P₂K₂B、N₃P₂K₂B、N₄P₂K₂B 处理间千粒重差异达显著水平;2020 年,CK、B 与 N₁P₁K₁、N₂P₂K₂B 处理间单位面积有效穗的差异均达显著水平,CK、B 与施肥处理间每穗粒数的差异均达显著水平,CK 与生物炭化肥配施处理间千粒重差异达显著水平。比较单施化肥与化肥生物炭配施处理间小麦产量各要素,可以看出,2018、2019、2020 年,N₁P₁K₁ 处理单位面积有效穗最高,随着氮肥减量幅度提高,单位面积有效穗有逐渐降低的趋势,2018、2019 年 N₁P₁K₁ 与 N₃P₂K₂B 处理间的差异均达显著水平,2020 年,N₁P₁K₁ 与 N₃P₂K₂B、N₄P₂K₂B、N₅P₂K₂B 处理间的差异均达显著水平。千粒重与单位面积有效穗呈相反的变化趋势,随着氮肥用量的降低,千粒重呈增加趋势,2018 年,化肥生物炭配施较单施化肥处理千粒重显著提高。单施化肥与化肥生物炭配施处理间,不同年度每穗粒数差异均不显著。

表 2 不同处理对小麦产量各要素的影响

Table 2 Effects of different treatments on various factors of wheat yield

处理 Treatment	2018 年			2019 年			2020 年		
	穗数 Panicle number ×10 ⁴ /hm ²	穗粒数 Number of grains per panicle	千粒重 1 000-grain weight g	穗数 Panicle number ×10 ⁴ /hm ²	穗粒数 Number of grains per panicle	千粒重 1 000-grain weight g	穗数 Panicle number ×10 ⁴ /hm ²	穗粒数 Number of grains per panicle	千粒重 1 000-grain weight g
CK	402.0 c	25.3 b	42.6 b	445.5 c	30.0 c	45.0 c	298.5 d	13.5 c	40.5 b
B	433.5 bc	26.3 b	42.8 b	451.5 c	30.6 c	45.9 cd	354.0 cd	15.2 c	43.2 ab
N ₁ P ₁ K ₁	544.5 a	35.9 ab	43.0 b	624.0 a	37.4 ab	46.3 bc	571.5 a	37.5 ab	43.5 ab
N ₂ P ₂ K ₂ B	469.5 a	37.1 a	45.3 a	588.0 ab	39.3 a	47.5 a	537.0 ab	38.2 a	45.4 a
N ₃ P ₂ K ₂ B	453.0 a	36.1 ab	44.8 a	490.5 bc	37.7 ab	46.9 ab	412.5 bcd	36.1 ab	44.6 a
N ₄ P ₂ K ₂ B	457.5 a	35.5 b	44.7 a	517.5 abc	38.0 ab	47.1 ab	475.5 abc	36.0 ab	44.8 a
N ₅ P ₂ K ₂ B	436.5 bc	35.1 b	44.9 a	489.0 bc	36.7 b	46.6 bc	400.5 bcd	35.4 b	45.6 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

2.3 减肥条件下配施生物炭对氮素回收率的影响 2018—2020年,CK、B处理吸氮量较低,与施肥处理间差异均达显著水平。配施生物炭施肥处理间, $N_2P_2K_2B$ 处理吸氮量最高,随着氮肥减量幅度的增加,吸氮量呈下降趋势,2018年

$N_1P_1K_1$ 与 $N_3P_2K_2B$ 处理间,2019年 $N_1P_1K_1$ 与 $N_3P_2K_2B$ 、 $N_4P_2K_2B$ 、 $N_5P_2K_2B$ 处理间,2020年 $N_1P_1K_1$ 与 $N_4P_2K_2B$ 、 $N_5P_2K_2B$ 处理间差异均达显著水平(表3)。

表3 减肥条件下配施生物炭对氮素养分吸收和回收率的影响

Table 3 Effects of combined application of biochar with reduced fertilizer on nitrogen uptake and recovery

处理 Treatment	2018年		2019年		2020年	
	吸氮量 Nitrogen uptake kg/hm ²	氮肥回收率 Nitrogen recovery rate//%	吸氮量 Nitrogen uptake kg/hm ²	氮肥回收率 Nitrogen recovery rate//%	吸氮量 Nitrogen uptake kg/hm ²	氮肥回收率 Nitrogen recovery rate//%
CK	105.1 c	—	119.1 c	—	44.0 d	—
B	115.9 c	—	129.2 c	—	70.0 c	—
$N_1P_1K_1$	171.4 a	29.5 b	230.2 a	49.3 a	154.9 a	49.3 c
$N_2P_2K_2B$	171.5 a	32.8 ab	229.0 a	54.3 a	151.5 a	53.1 bc
$N_3P_2K_2B$	166.0 ab	33.9 ab	192.1 b	40.6 a	147.5 a	57.5 ab
$N_4P_2K_2B$	155.9 ab	32.2 ab	198.3 b	50.2 a	127.8 b	53.3 bc
$N_5P_2K_2B$	154.3 b	36.5 a	180.1 b	45.1 a	127.2 b	61.6 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

从表3可以看出,氮素回收率与吸氮量之间无明显相关性,而与施氮量关系密切,随着施氮量降低,氮素回收率呈增加趋势。相关分析结果表明,2018、2020年,施氮量与氮素回收率相关系数分别为-0.796、-0.901,均达显著水平。比较2018—2020年3年氮素回收率可以看出,田间定位试验条件下,氮素回收率与试验年限有关,随着试验年限增加,氮素回收率有逐渐增高的趋势。

2.4 生物炭对土壤容重和田间持水量的影响 合适的土壤容重有利于作物生长发育,而土壤容重大和过低都不利于作物生长。砂姜黑土黏粒含量高,质地黏重,容重高,通气性能差,严重影响作物的生长。从表4可以看出,CK和 $N_1P_1K_1$ 处理土壤容重较高,分别达1.38和1.37 g/cm³,单施生物炭或生物炭与化肥配施,土壤容重均有不同程度降低。与CK处理相比,施用生物炭处理土壤容重下降0.05~0.07 g/cm³,降幅为3.62%~5.07%;与单施化肥处理相比,施用生物炭处理土壤容重下降0.04~0.06 g/cm³,降幅为2.92%~4.38%,方差分析结果表明差异达显著水平。

表4 生物炭对土壤容重和田间持水量的影响(2019年)

Table 4 Effects of biochar on soil bulk density and field water capacity

处理 Treatment	容重 Bulk density g/cm ³	田间持水量 Field capacity//%
CK	1.38 a	25.97 b
B	1.32 b	28.97 a
$N_1P_1K_1$	1.37 a	25.13 b
$N_2P_2K_2B$	1.31 b	28.10 a
$N_3P_2K_2B$	1.32 b	28.40 a
$N_4P_2K_2B$	1.33 b	29.30 a
$N_5P_2K_2B$	1.32 b	29.60 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

土壤供水保水性能较差是砂姜黑土易旱易涝的根本原因,田间持水量的高低反映土壤供水保水性能的优劣,提高

田间持水量可以增强土壤的蓄水、保水和供水性能。从表4可以看出,CK和 $N_1P_1K_1$ 处理土壤田间持水量较低,单施生物炭或生物炭与化肥配施,均能提高土壤田间持水量。与CK处理相比,施用生物炭处理土壤田间持水量提高2.13~3.63个百分点,增幅8.2%~14.0%;与单施化肥处理相比,施用生物炭处理土壤田间持水量提高2.97~4.47个百分点,增幅11.8%~17.8%,方差分析结果表明差异均达显著水平。

3 讨论

长期以来,化肥施用在保障我国粮食安全方面发挥了巨大作用^[16],由于化肥施用上存在的种种问题,特别是化肥的过量施用带来的土壤质量退化及农田面源污染等问题受到了受到越来越多的重视^[17-19],2015年2月,农业部印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,旨在不减产的前提下实现化肥使用量零增长甚至负增长。砂姜黑土质地黏重,水物理性质较差,土壤压实和易受旱涝灾害影响了作物生长发育,农户为了提高产量而加大施肥量,这也是砂姜黑土区作物化肥用量较高的原因之一。该研究结果表明,施用生物炭能降低土壤容重,提高土壤田间持水量,这与其他研究结论相似^[15],这与生物炭具有一定的空隙结构、比表面积大、具有多孔结构有关。研究表明,砂姜黑土上小麦产量与土壤容重呈显著负相关,与土壤田间持水量呈显著正相关^[20]。因此,通过施用生物炭,改善砂姜黑土不良的物理性质,从而消减障碍因子对作物生长的制约,可以促进作物生长,在维持常规施肥产量前提下,减少化肥用量。

生物炭钾含量较高,砂姜黑土有效磷含量较高,因此,磷钾肥用量减少20%对小麦产量不会产生明显影响。而氮肥减量幅度对小麦产量影响较大,该研究结果发现,配施生物炭氮肥减量10%,没有出现减产的现象,可以达到稳产以及略有增产的效果,氮肥减量20%,小麦产量略有下降,且后2年小麦产量降幅高于第1年,当氮肥减量30%及以上时,小麦产量明显下降,与姜佰文等^[21]在玉米上的研究结果略有

不同。该研究结果还发现,氮肥减量幅度与单位面积有效穗成反比,减量幅度越高,单位面积有效穗越低,当氮肥减量达30%和40%时,单位面积有效穗显著下降,表明氮肥减量幅度过高,可能造成小麦前期生长发育氮素养分缺乏,小麦分蘖成穗较少,最终导致小麦产量下降。因此,氮肥减量幅度可能与土壤基础肥力水平、作物类型及产量水平等有关,需要定位试验研究,才能得出适合区域的氮肥减量比例。

氮肥利用率是根据施氮肥与不施氮肥的植物氮素养分吸收量之差占施氮量的比例来求得,其前提是施用氮肥条件下植物从土壤中吸收的氮素量和不施氮肥时基本相同,氮肥回收率是以氮肥被作物吸收或回收的比例对肥料氮的利用情况进行评价,是以不施肥处理为对照^[22]。该研究结果表明,第1年,施肥处理氮肥回收率较低,而第2、3年,施肥处理氮肥回收率明显提高,均达50%左右,最高达60%以上,且氮素回收率有逐年增高的趋势,这与蔡祖聪等^[23]的研究结果相似。其主要原因是,第1年土壤速效氮含量较高,而第2、3年,土壤氮素处于耗竭状态,土壤速效氮含量下降,小麦从土壤中吸收的氮素量减少,因此氮素回收率有增加的趋势。当不施肥处理小麦产量趋于稳定时,氮素回收率会达到某一稳定水平,用此时的氮素回收率来评价施肥的产量和环境效应,可能才有更重要的实际意义。

4 结论

(1) 砂姜黑土区施用生物炭,可以降低土壤容重,提高土壤田间水量,改善土壤物理性状,提高土壤肥力水平。

(2) 在施氮量为225 kg/hm²水平下,生物炭与化肥配施,减少10%的氮肥,小麦可以达到稳产以及略有增产的效果,氮肥减量达20%时,小麦产量略有下降,氮肥减量幅度达30%以上时,小麦产量显著下降。

(3) 砂姜黑土区冬小麦上,氮素回收率与施氮量关系密切,随着施氮量降低,氮素回收率呈增加趋势。生物炭与化肥配施可以提高氮素回收率。

综上所述,在淮北砂姜黑土冬小麦种植上,配施生物炭为30 t/hm²,较常规施肥减少10%的氮肥、20%的磷钾肥,可以保障小麦增产稳产,提高氮肥回收率。

参考文献

[1] 李德成,张甘霖,龚子同.我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J].

土壤,2011,43(4):623-629.

[2] 李卫东,唐登银,王庆云,等.黑粘土的水分物理特性及其改良对策[J].中国农业科学,1997,30(6):30-35.

[3] 张效朴.淮北砂姜黑土的肥力特点与高产高效粮食生产的施肥管理技术研究[J].农业现代化研究,1996,17(4):218-224.

[4] 程思贤,刘卫玲,靳英杰,等.深松深度对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(9):1355-1365.

[5] 张祥,王典,姜存仓,等.生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响[J].中国生态农业学报,2013,21(8):979-984.

[6] OLADELE S O, ADEYEMO A J, AWODUN M A. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils[J]. Geoderma, 2019, 336: 1-11.

[7] AHMED A, KURIAN J, RAGHAVAN V. Biochar influences on agricultural soils, crop production, and the environment: A review[J]. Environmental reviews, 2016, 24(4): 495-502.

[8] 田丹,屈忠义,李波,等.生物炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J].灌溉排水学报,2013,32(3):135-137.

[9] 王静,付伟章,葛晓红,等.玉米生物炭和改性炭对土壤无机氮磷淋失影响的研究[J].农业环境科学学报,2018,37(12):2810-2820.

[10] 侯建伟,邢存芳,卢志宏,等.不同秸秆生物炭对贵州黄壤细菌群落的影响[J].中国农业科学,2018,51(23):4485-4495.

[11] MEENA H M, PRAKASHA H C. Effect of biochar, lime and soil test value based fertilizer application on soil fertility, nutrient uptake and yield of rice-cowpea cropping system in an acid soil of Karnataka[J]. Journal of plant nutrition, 2020, 43(17): 2664-2679.

[12] 肖茜.生物炭对旱作春玉米农田水氮运移、利用及产量形成的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.

[13] 李传哲,章欢,姚文静,等.生物炭配施氮肥对典型黄河故道区土壤理化性质和冬小麦产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(10):3424-3432.

[14] WEI C L, GAO W D, WHALLEY W R, et al. Shrinkage characteristics of lime concretion black soil as affected by biochar amendment[J]. Pedosphere, 2018, 28(5): 713-725.

[15] 赵占辉,张从志,蔡本义,等.不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J].中国生态农业学报,2015,23(10):1228-1235.

[16] 张福锁.科学认识化肥的作用[J].中国农技推广,2017,33(1):16-19.

[17] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.

[18] 王旭波.“围、追、堵、截”:太湖水污染非点源化背景下的治理难点[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2007,9(2):33-36,90.

[19] 张艳娇,赵玲.海都市农业面源污染现状及对策[J].安徽农业科学,2019,47(7):70-72,82.

[20] 王道中,花可可,郭志彬.长期施肥对砂姜黑土作物产量及土壤物理性质的影响[J].中国农业科学,2015,48(23):4781-4789.

[21] 姜佰文,许欣桐,张迪,等.减量施肥条件下生物炭与耕作方式对玉米氮吸收及产量的影响[J].东北农业大学学报,2019,50(10):23-31.

[22] 李虹儒,许景钢,徐明岗,等.我国典型农田长期施肥小麦氮肥回收率的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):336-343.

[23] 蔡祖聪,钦绳武.华北潮土长期试验中的作物产量、氮肥利用率及其环境效应[J].土壤学报,2006,43(6):885-891.

(上接第184页)

[15] DE SOUZA E J, DA CUNHA F F, MAGALHÃES F A, et al. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on agronomic traits of sweet corn[J]. Pesquisa agropecuária tropical, 2015, 45(3): 282-290.

[16] 邓兰生,陈卓森,郭彦彪,等.滴灌施肥次数对甜玉米生长及养分淋洗损失的影响[J].西南农业学报,2015,28(5):2142-2147.

[17] 施龙建,文章荣,张世博,等.开花期干旱胁迫对鲜食糯玉米产量和品质的影响[J].作物学报,2018,44(8):1205-1211.

[18] 张金钰,蒲浩杰,刘鹏飞,等.鲜食甜玉米南方锈病抗性QTL定位分析[J].中国农业大学学报,2020,25(4):82-88.

[19] 姬静华,霍治国,唐力生,等.鲜食玉米形态特征、生理特性及产量对淹

水的响应[J].玉米科学,2016,24(3):85-91.

[20] 邹军,章洁琼,龙英,等.贵州省鲜食玉米丰产稳定性及品质分析评价[J].种子,2020,39(5):131-134,167.

[21] 陆大雷,孙世贤,陈国清,等.国家鲜食糯玉米区域试验品种产量和品质性状分析[J].玉米科学,2016,24(3):62-68,77.

[22] 杨丽,陈天宇,王怀鹏,等.寒地半干旱区鲜食玉米品种适应性和品质性状分析[J].玉米科学,2019,27(3):54-60.

[23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.

[24] 高磊,李余良,李武,等.不同施氮水平对南方甜玉米氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1215-1224.

[25] 颜晓军,叶德练,苏达,等.磷肥用量对甜玉米磷素吸收利用的影响[J].作物学报,2021,47(1):169-176.