

玉米秸秆炭对玉米物质生产及产量形成特性的影响

程效义, 张伟明, 孟 军, 杨 旭, 赵倩雯, 陈温福

(沈阳农业大学, 沈阳 110866)

摘 要: 采用大田试验方法, 研究玉米秸秆炭对玉米干物质积累、分配及产量形成特性的影响。结果表明, 20 t/hm²生物炭与肥料配施可延长玉米的生长时期和旺盛生长期的干物质积累量, 促进玉米灌浆后期干物质的积累和子粒干重的增加, 与单施化肥相比, 产量提高了 6.06%; 40 t/hm²生物炭与肥料配施在一定程度上抑制玉米干物质积累, 降低行粒数, 产量降低 13.88%。适量的生物炭与肥料配施可促进玉米的干物质积累, 提高产量, 优于单施化肥; 过量的生物炭用量会抑制玉米生长, 导致产量下降。在北方棕壤常规施肥条件下, 适量配施生物炭增产效果明显, 可用于玉米生产。

关键词: 玉米; 生物炭; 干物质积累; 产量

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effect of Biochar on Maize Dry Matter Accumulation and Yield

CHENG Xiao-yi, ZHANG Wei-ming, MENG Jun, YANG Xu, ZHAO Qian-wen, CHEN Wen-fu

(Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The effects of biochar on maize dry matter accumulation, distribution and maize yield were studied by a plot field experiment. The results showed that combination of 20 t/ha biochar with fertilizer could extend the period of vigorous growth and increase the amount of dry matter accumulation of maize, which promoted the dry matter accumulation and increased the dry weight of grain, as well as the yield increased by 6.06% compared with single chemical fertilizer treatment. The combination of 40 t/ha biochar with fertilizer inhibited the dry matter accumulation to some extent, decreased the kernels of the row and the yield by 13.88%. If combined the suitable amount of biochar with fertilizer could promote the dry matter accumulation and increase yield of maize, which better than single chemical fertilizer application. The excess biochar could inhibit the growth of maize, resulting in yield decline. In the condition of conventional fertilization in northern brown earth, the appropriate amount of biochar application could increase yield significantly, which might be used for maize production.

Key words: Maize; Biochar; Dry matter accumulation; Yield

生物炭一般指由生物质如木材、农林废弃物、植物组织或动物骨骼等在缺氧条件下不完全燃烧所形成的稳定的富碳产物^[1]。相关研究表明, 生物炭具

有良好的结构特征与基础理化特性, 使其施入土壤后对土壤容重、含水量、孔隙度、阳离子交换量、养分含量和微生物等产生影响^[2~4], 从而影响作物生长。大量研究表明, 生物炭对作物生长有一定的促进作用。Steiner等^[5]在巴西亚马逊河流域土壤中施用生物炭, 在经历了4个生长季后, 水稻和高粱的产量累积增加75%。Lehmann^[6]分别以68 t/hm²和135 t/hm²的标准施用生物炭, 发现水稻和豇豆的生物量分别提高了17%和43%。在玉米上也得到了类似的结果, 刘世杰^[7]研究发现, 玉米连作黑土施用生物炭后, 玉米株高、茎粗分别比对照增加了4.31~13.13 cm和0.04~0.18 cm, 显著增加苗期玉米的生物量, 可能与

收稿日期: 2015-08-31

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(2013030905)、科技支撑计划专题任务(2012BAD14B01-1)、辽宁省中央财政推广项目“农林废弃物资源化综合利用技术示范推广”

作者简介: 程效义(1985-), 男, 黑龙江依兰人, 博士, 主要从事生物炭应用于土壤改良。Tel: 18624064553

E-mail: cxy_beyond@126.com

陈温福为本文通讯作者。

生物炭增加了作物对养分的吸收或者改善了土壤物理性状有关。也有研究认为,在特定条件下生物炭的施入会对作物生长产生一定抑制效应。张晗芝等^[8]发现,以48 t/hm²的标准向水稻土中施入小麦秸秆生物炭,显著抑制了玉米苗期的株高和干物质积累,且这种抑制作用随着施炭量的增加而加强。Vaccaria等^[9]将木材制备的生物炭以30 t/hm²和60 t/hm²的标准施用于小麦田时,发现分别减产32.1%和23.6%。

由于生物炭的材质、生物炭的用量、应用土壤以及作物类等存在差异,生物炭对作物的影响也不尽一致,很难获得统一的量化范围和标准。因此,因地制宜,适时、适地的开展生物炭相关应用研究显得尤为必要,目前有关生物炭对东北地区玉米生产特性及产量影响的研究较少。本试验以本地区主栽、耐密玉米品种郑单958为试材,研究在东北地区主要农业土壤—棕壤中施用生物炭对玉米干物质积累特征和产量的影响,为生物炭的农业应用提供参考和依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2013年在沈阳农业大学后山棕壤试验基地进行。试验区属温带湿润半湿润季风气候,全生育期130~150 d,生长季降雨量为569 mm,平均气温为20.7℃。土壤类型为东北地区典型棕壤土,其基本理化性质为容重1.31g/cm³,有机质18.82 g/kg,碱解氮84.5 mg/kg,速效磷15.9 mg/kg,速效钾158.7 mg/kg,pH值7.6。

1.2 试验材料

生物炭原材料为玉米秸秆,基本理化性质为pH值9.2,碳67.9%,氮1.07%,硫0.79%,磷0.78%,钾1.68%,粒径1.5~2 mm,由辽宁金和福农业开发有限公司生产提供。供试玉米为郑单958,2013年5月17日播种,5月27日出苗,3叶期间苗,5叶期定苗;9月29日收获,作物生长期按常规进行田间管理。

1.3 试验设计

采用大田试验,随机区组设计。共设4个处理,分别为CK,不施肥不施生物炭,不做任何处理;FB0,常规施肥不施生物炭处理;FB20,在常规施肥基础上增施生物炭20 t/hm²;FB40,在常规肥基础上增施生物炭40 t/hm²。

施用肥料为尿素(46% N)、硫酸钾(50% K₂O)和普钙(12% P₂O₅),施用量分别为纯氮160 kg/hm²、P₂O₅ 75 kg/hm²和K₂O 150 kg/hm²,为当地常规施肥水平。氮、磷、钾肥作为底肥在农田翻耕前混合施入,肥料和生物炭在播前均匀撒施后用旋耕机将生物炭均匀混于20 cm耕层土壤中,次日播种。玉米种植密度为50 850株/hm²,穴距28 cm,垄距60 cm,每小区10垄,垄长10 m,小区面积60 m²,3次重复,共15个小区,总计900 m²。

1.4 测定项目与方法

分别于苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、灌浆中期和成熟期取样。每个小区取样3株,将植株分为茎、叶、鞘、穗几部分,于105℃鼓风干燥箱内进行杀青30 min,在75℃下烘至恒重,冷却至室温后称重。在玉米成熟收获时每小区连续取3行实脱粒测产,另取15株长势一致的玉米植株进行室内考种,调查穗长、行数、行粒数和百粒重。采用谷物水分测量仪PM-8188 New测量子粒水分含量,并折算子粒产量,秸秆部分烘干称重,计算收获指数(收获指数=子粒产量/干物重)。土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾浓度测定参照鲁如坤^[10]的方法测定。

1.5 数据处理与分析

利用Microsoft Excel和SPSS17.0软件处理与分析数据;采用Duncan's差异显著分析方法多重比较各处理;采用Curve expert 1.3软件进行模型模拟玉米的干物质积累动态。

2 结果与分析

2.1 生物炭对干物质积累的影响

表1 不同处理单株干物质积累
Table 1 Dry matter accumulation of maize in different treatments g

处 理	苗 期	拔节期	大喇叭口期	吐丝期	灌浆期	成熟期
Treatment	Seeding stage	Jointing stage	12 full expansion leaves stage	Silking stage	Filling stage	Maturity stage
CK	1.76±0.32 c	21.17±3.62 a	64.69±6.12 c	98.28±5.50 d	145.15±6.94 d	209.16±7.60 c
FB0	2.93±0.20 b	25.76±3.58 a	82.08±2.58 b	185.22±1.44 a	262.34±7.65 a	306.68±7.37 a
FB20	4.03±0.28 a	25.87±3.22 a	93.24±3.05 a	174.72±4.72 b	247.39±9.79 b	303.34±5.37 a
FB40	3.01±0.48 b	23.09±1.95 a	89.76±7.16 ab	155.94±5.18 c	224.63±3.22 c	268.24±8.22 b

注:表中小写字母表示差异达0.05显著水平。下表同。
Note: Different small letters indicated signification at 0.05 probability level respectively. The same below.

由表1可以看出,随着生育期进展,各处理玉米干物质积累逐渐增强,苗期至拔节期积累缓慢,从大喇叭口期至灌浆期迅速增长,进入成熟期后增长又趋于缓慢。

表2 玉米干物质积累的Logistic模型		
Table 2 The Logistic equation of maize dry matter		
处 理 Treatment	方 程 Equation	R^2
CK	$y=215.273\ 8/(1+26.950\ 0e^{-0.050\ 1t})$	0.980\ 0
FB0	$y=295.408\ 6/(1+110.250\ 2e^{-0.087\ 1t})$	0.994\ 9
FB20	$y=292.155\ 6/(1+59.919\ 2e^{-0.074\ 6t})$	0.990\ 3
FB40	$y=259.246\ 9/(1+60.067\ 0e^{-0.075\ 9t})$	0.990\ 9

不同处理对玉米干物质积累的影响,符合logistic生长曲线,曲线可以用指数方程 $y=K/(1+ae^{-bt})$ 拟合^[11],式中 y 为干物质积累量, t 为出苗后天数(d), K , a , b 为

待定参数,待定参数用Curve expert 1.4软件求得。各方程的决定系数 R^2 在0.98~0.994 9,均达到显著水平。从方程中可以看出,系数 K 为干物质积累的上限,与对照相比,FB0、FB20和FB40处理的 K 较大,说明施肥处理的玉米具有较高的干物质积累潜力。FB0处理的 K 值大于FB20和FB40处理,说明常规施肥比生物炭与肥料混施更容易使玉米积累较多的干物质,且随着施炭量的增加,玉米最大干物质积累潜力下降。

2.2 生物炭对玉米干物质积累速率的影响
干物质增加速率方程:
$$d(t)=Kabe^{-bt}/(1+ae^{-bt})^2 \tag{1}$$
其中, $d(t)$ 为干物质增长速率, t 为出苗后天数, K 、 a 、 b 为待定参数。将表2中 K 、 a 、 b 带入得到各处理的干物质积累速率方程(1),作图得到干物质积累速率曲线。

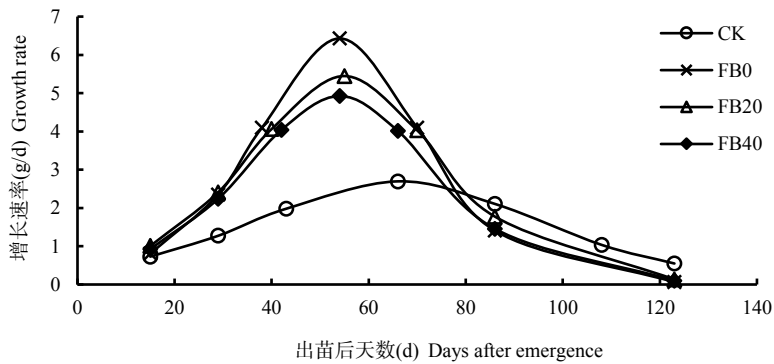


图1 不同处理单株干物质积累速率

Fig.1 Dry matter accumulation rate of per plant in different treatments

干物质增长速率曲线见图1,玉米生长期间不同处理的干物质积累速率有很大差异,各处理最大干物质积累速率和最大干物质积累速率出现的时间均不同。对干物质积累方程求二阶导数,可以进一步求得最大干物质增长速率和最大增长速率出现的时间,所求的二阶导数如下:

$$d^2/dt^2=Kabe^{-bt}(abe^{-bt}-b)/(1+ae^{-bt})^3 \tag{2}$$

当上式等于0时,求得的“ t ”为干物质最大增长速率出现的时间,将其带入方程(1)中,得到干物质最大增长速率。采用同一计算过程可以求出其他处理最大干物质增长速率和出现的时间。

由表3可知,进入拔节期后,各处理的干物质积累速率迅速升高,干物质积累最快的时期在播种后37~92 d(7月4日至8月28日),此时,玉米处于营养生长与生殖生长并进的大喇叭口期和光合产物迅速

积累的灌浆期,是生长最旺盛时期。CK、FB0、FB20和FC40处理的旺盛生长期分别为出苗后39~92、38~70、37~73和37~71 d,与FB0处理相比,FB20处理的旺盛生长期 Δt 延长6 d,旺盛生长期单株干物质积累量略高;FB40处理的旺盛生长期 Δt 延长4 d,旺盛生长期单株干物质积累量降低。CK、FB0、FB20和FB40处理总干物质积累速率最大时刻 t_{max} 分别为出苗后66、54、55和54 d,最大干物质积累速率和平均干物质积累速率表现为FB0>FB20>FB40>CK,可见,施肥促进干物质积累,使干物质积累速率的最大时间提前。在施肥基础上,施用适量生物炭(20 t/hm²)可延长玉米的旺盛生长期,增加旺盛生长期的干物质积累量;过量生物炭(40 t/hm²)降低旺盛生长期的干物质积累量。

表3 玉米干物质积累速率模型特征值
Table 3 The Logistic equation feature of maize dry matter

处理 Treatment	t ₁ (d)	t ₂ (d)	Δt (d)	t _{max} (d)	V _{max} (g/d)	V _{avg} (g/d)	ΔDM (g/株)
CK	39	92	53	66	2.70	1.66	125.03
FB0	39	69	30	54	6.43	2.40	169.47
FB20	37	73	36	55	5.45	2.36	171.12
FB40	37	71	34	54	4.92	2.10	147.42

注:t为玉米出苗后的天数(d);t_{max}为干物质积累速率最大时刻;t₁和t₂分别为干物质增长速率曲线的两个拐点;Δt=t₂-t₁是玉米旺盛生长的时期;ΔDM为旺盛生长期干物质的积累量;V_{max}为最大增长速率;V_{avg}为平均增长速率。
Note: t, the days after emergence (d); t_{max}, the day of the maximum increase rate; V_{max} the maximum increase rate;V_{avg}, the average increase rate; ΔDM, dry matter during Δt; t₁ and t₂ were the spinodal of the rate line of dry mater accumulation Δt=t₂-t₁, ΔDM=y(t₂)-y(t₁).

2.3 生物炭对玉米干物质分配的影响

随着玉米生育时期的推移,玉米各器官的干物质积累量逐渐增加,营养器官所占比例逐渐降低,生殖器官所占比例增大。由图2可知,在苗期、拔节期和大喇叭口期,玉米以茎、叶、鞘生长为主,至吐丝期,玉米茎、叶、鞘的干重分别占总干重的42.93%~45.55%,30.73~34.81%和15.86%~20.54%,穗占1.71%~6.94%。吐丝期后,玉米转向以生殖生长为主的阶段,随着光合产物的积累和营养器官的转运,茎叶鞘等营养器官所占干物重比例下降,生殖器官所占比例逐渐增加,至成熟期,各部分所占总干物重的比例茎秆17.19%~23.72%,叶片10.00%~10.54%,鞘为5.86%~8.31%,穗为57.42%~66.69%。苗期

各处理玉米干物质质量差别较大,表现为FB20>FB0>FB40>CK,差异达到显著水平;拔节期各处理的干物质总量无差异,至大喇叭口期,FB20处理的干物质积累量显著大于FB0处理,且显著大于CK处理,与FB40处理无显著差异;FB0处理的干物重迅速增加,至吐丝期表现为FB0>FB20>FB40>CK,FB0处理显著大于其他3个处理,直至灌浆中期仍保持这一趋势;灌浆后期,FB20处理干物重增加迅速,至成熟期FB0和FB20处理已无显著差异。因此,适量的生物炭(20 t/hm²)与肥料配施明显促进灌浆后期玉米的干物质积累,更有利于玉米光合产物向子粒的积累与转运,对产量形成有利。

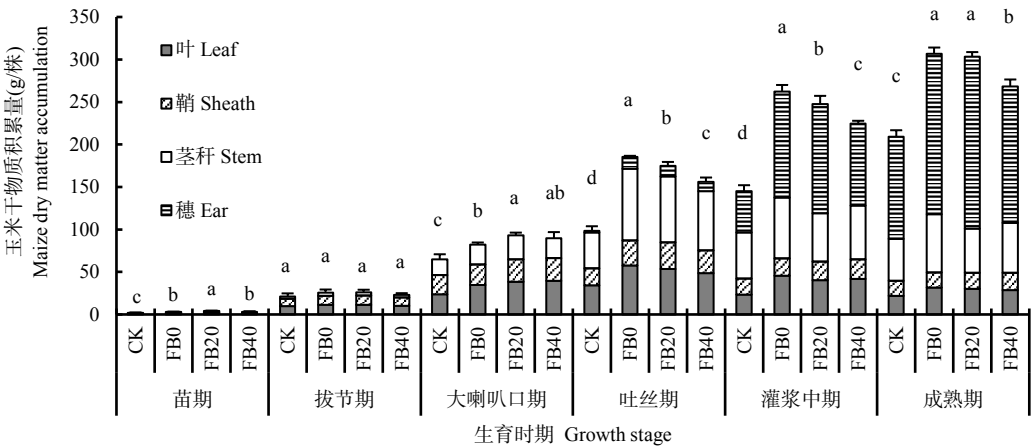


图2 不同处理玉米干物质积累和分配

Fig.2 Accumulation and distribution of maize dry matter under different treatments

比较生物量和收获指数可知(表4),FB0和FB20处理二者生物产量无显著差异,子粒产量FB20显著高于FB0处理,FB20处理的收获指数较高。FB40处理生物产量和子粒产量均显著低于FB0处理,而收

获指数差异不显著。可见,适量的生物炭用量(20 t/hm²)可改变干物质的分配结构,生物量相同的情况下使得更多的干物质分配到子粒中,获得较高的收获指数。

表4 生物炭对玉米生物量和收获指数的影响
Table 4 Influence of biomass yield and harvest index

处 理 Treatment	生物产量(kg/hm ²) Biomass yield	子粒理论产量(kg/hm ²) Grain yield	收获指数 Harvest index
CK	12 455.48±452.3 c	6378.76±123.76 d	0.51±0.01 c
FB0	18 262.99±438.86 a	10 209.61±273.10 b	0.56±0.01 b
FB20	18 064.10 ±319.96 a	11 051.29±299.30 a	0.61±0.01 a
FB40	15 973.49±489.59 b	8 652.46±292.08 c	0.54±0.01 b

2.4 生物炭对产量及产量构成因素的影响

分析产量和产量构成因素可知,与对照相比,施肥可显著提高玉米的行粒数、百粒重和产量。施肥基础上增施生物炭可显著影响玉米的行粒数、百粒重和产量。随着施炭量的增加,玉米的产量呈先增加后降低的趋势。与FB0处理相比,FB20处理的产量显著增加 6.06%,而 FB40 处理的产量显著降低 13.88%。对比产量构成因素可知,与 FB0 处理相比,

FB20处理的穗行数和行粒数呈增加趋势,差异不显著,百粒重显著增加 6.025%;FB40处理的穗行数和百粒重无显著差异,行粒数显著降低 14.85%。因此,在本试验条件下,适量生物炭(20 t/hm²)与肥料配合施用,增加玉米的粒重,促进玉米的产量增加。高量生物炭(40 t/hm²)显著降低玉米的行粒数,导致产量下降。

表5 生物炭对产量与产量构成因素的影响
Table 5 Influence of biochar on maize yield and yield component factors

处 理 Treatment	穗行数(行) Rows per ear	行粒数(粒) Kernels per row	百粒重(g) 100-seed weight	产量(kg/hm ²) Yield
CK	14.27±0.23 a	25.68±1.25 c	28.10±0.72 c	5932.14±92.84 d
NB ₀	14.67±0.61 a	36.28±1.28 a	32.03±0.15 b	10215.69±324.73 b
NB ₂₀	15.07±0.31 a	36.33±0.94 a	33.96±0.59 a	10835.51±202.82 a
NB ₄₀	14.80±0.72 a	30.89±1.08 b	30.47±1.81 b	8797.11±361.84 c

3 结论与讨论

生物炭主要由芳香烃、单质碳或具有石墨结构的碳组成,含有 60%以上的碳元素,还包括 C、H、O、N、S 以及少量微量元素。在生物质热裂解过程中,H、O 元素挥发,C 元素高度聚合,使生物炭具有孔隙度大、比表面积大、富含碳等性质^[12],这也是生物炭可实现还田改土和影响作物生长的重要结构和理化特性基础。国内外有关生物炭对作物生长影响的试验结果不一,大多数研究结果显示,生物炭对作物生长发育和产量等的影响都表现一定积极效应^[13,14]。

本研究结果表明,适量的生物炭与肥料配施可延长玉米旺盛生长期,促进苗期和灌浆后期的干物质积累,提高玉米的粒重和收获指数,增加玉米产量。与单施化肥相比,20 t/hm²的生物炭与肥料配施处理子粒重增加 6.025%,收获指数增加 8.92%,产量增加 6.06%。这可能与生物炭本身含有少量的营养元素有关,生物炭自身含有的磷钾元素是可被作物

利用的速效养分,在一定程度上可以增加养分的供给^[15],促进玉米生长。也可能与生物炭的多孔结构有关,一方面,生物炭多孔、质轻,施入黏重的棕壤中可以降低土壤容重、改善土壤的通气透性能;另一方面,生物炭对氮、磷等养分离子有较强的吸附能力,尤其对铵有很强的吸附作用,不仅降低氮素的挥发^[16],还可作为氮素的“暂存库”,在一定条件下将氮素重新释放于土壤中供作物吸收利用^[17],起到一定的养分吸附和缓释作用,使土壤具有持续的供肥能力,有效防止玉米早衰。

从目前国内外研究结果来看,生物炭对作物生长和产量的影响与生物炭用量有关,唐光木以 20 t/hm²和 40 t/hm²的标准向灰漠土中施用生物黑炭,40 t/hm²生物炭处理显著提高产量,20 t/hm²生物炭处理产量并未提高。Baronti 等^[18]研究发现,当生物炭施用量为 30 t/hm²和 60 t/hm²时,黑麦草的生物量分别较对照增加了 20%和 52%;生物炭施用量达到 100 t/hm²和 200 t/hm²时,其生物量反而较对照降

低8%和30%。本试验中,40 t/hm²生物炭与肥料配施处理的干物质积累与产量受到明显的抑制作用,与单施化肥相比,总干物质积累量和穗部干物质积累量显著减少12.53%和14.94%,产量下降13.88%。可能生物炭本身呈碱性,施入土壤后,能在一定程度上提高土壤pH值,并随着炭量的增加而提高^[19],土壤pH值变化对作物尤其是根系有直接影响,若变幅超过作物所能承受的范围,必然导致玉米的生长受阻,产量下降;也可能与土壤的碳氮比有关,一次性大量施炭后土壤的碳氮比增大,较高的碳氮比会促使微生物与玉米争氮,降低了氮素的有效性^[20,21],从而抑制干物质积累与转运,最终导致减产。另外,造成40 t/hm²生物炭处理减产的原因也可能与当年的极端气候有关,40 t/hm²的标准施入生物炭的处理降低了土壤的容重,增加了土壤的通气条件,不利于保墒^[22],加之春季时严重干旱,使得该处理玉米出苗较晚,延误农时,影响玉米产量。

生物炭对玉米产量的促进作用有一定的适应范围,过量的生物炭施用量对玉米的生长将产生一定的抑制作用。生物炭对作物生长和产量的影响还与土壤质地、生物炭类型、作物种类、施用年限以及是否施肥等有关。高海英^[23]研究表明,壤土中木炭对小麦的增产46%,竹炭产量降低11.08%;在沙土中竹炭的产量提高了224.91%。生物炭对作物产量的影响还随施用时间延长而表现累加效应。Jeffery等^[24]研究表明,在玉米和大豆多年轮作的土壤中施用生物炭(20 t/hm²),第1年的玉米产量并未提高,在第2、3、4年的玉米产量分别比对照提高28%、30%和140%。生物炭对不同区域、环境及用量条件下对玉米的效应及其作用机理及是否具有持续累加效应等还有待进一步研究探索。

参考文献:

- [1] 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, 2011, 13(2): 83-89.
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 13(2): 83-89. (in Chinese)
- [2] Bapat H, Manahan S E, Larsen D W. An activated carbon product prepared from milo(sorghum vulgare) grain for use in hazardous waste gasification by chemical concurrent flow gasification[J]. Chemosphere, 1999, 39: 23-32.
- [3] 孙大荃,孟 军,张伟明,等. 生物炭对棕壤大豆根际微生物的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2011, 45(5): 521-526.
Sun D Q, Meng J, Zhang W M, et al. Effect of biochar on soybean rhizosphere microbes from brown earth soil[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2011, 45(5): 521-526. (in Chinese)
- [4] Lehmann J, Joseph S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology[M]. London, UK: Earthscan Publications, Ltd, 2009.
- [5] 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, 291: 275-290.
- [6] 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: Fertiliser, manure and charcoal amendments[J]. Plant and Soils, 2003, 249: 343-357.
- [7] 刘世杰, 窦 森. 黑碳对玉米生长和土壤养分吸收与淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 79-82.
Liu S J, Dou S. The effects of black carbon on growth of maize and the absorption and leaching of nutrients[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 79-82. (in Chinese)
- [8] 张哈芝, 黄 云, 刘 钢, 等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2713-2717.
Zhang H Z, Huang Y, Liu G, et al. Effects of biochar on corn growth, nutrient uptake and soil chemical properties in seeding stage[J]. Ecology and Environment, 2010, 19(11): 2713-2717. (in Chinese)
- [9] Vaccaria F P, Baronti S, Lugato E. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat[J]. European Journal of Agronomy, 2011, 34: 231-238.
- [10] 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.
- [11] 崔党群. Logistic曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理, 2005, 24(1): 112-116.
Dang J Q. Analysis and making good fitting degree test for logistic curve regression equation[J]. Application of Statistics and Management, 2005, 24(1): 112-116. (in Chinese)
- [12] Gerard C, Zofia K, Stavros K. Relations between environmental black carbon sorption and geochemical sorbent characteristics[J]. Environ Sci. Technol, 2004, 38(13): 3632-3640.
- [13] 马 莉, 侯振安, 吕 宁, 等. 生物炭对小麦生长和氮素平衡的影响[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(4): 589-594.
Ma L, Hou Z A, Lü N, et al. Effects of biochar application on wheat growth and nitrogen balance[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2012, 49(4): 589-594. (in Chinese)
- [14] 唐光木, 葛春辉, 徐万里, 等. 施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1797-1802.
Tang G M, Ge C H, Xu W L, et al. Effect of applying biochar on the quality of grey desert soil and maize cropping in Xinjiang, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1797-1802. (in Chinese)
- [15] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review[J]. Biol Fert Soils, 2002, 35: 219-230.
- [16] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. Bioresource Technol, 2004, 95: 255-257.

(下转第129页)

- Wang Q X, Wang P, Wang W D, et al. Effect of additional N supplied at silking on 1000-Grain weight and grain crude protein content of summer corn[J]. Journal of China Agricultural University, 2002, 7(1): 5964. (in Chinese)
- [16] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 等. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(12): 1456-1461.
- Liu L J, Sang D Z, Liu C L, et al. Effects of real-time and site-specific nitrogen managements on rice yield and nitrogen use efficiency [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(12): 1456-1461. (in Chinese)
- [17] 王绍华, 曹卫星. 水稻叶色分布特色与氮素营养诊断[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12): 1461-1466.
- Wang S H, Cao W X. Positional distribution of leaf color and diagnosis of nitrogen nutrition in rice plant[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12): 146-1466. (in Chinese)
- [18] Bijay Singh, Y S, Jagdish K, et al. Chlorophyll meter and leaf color chart-based nitrogen management for rice and wheat in Northwest India[J]. Agronomy Journal, 2002, 94: 821-829.
- [19] Hussain F, Bronson K F, Yadvinder Singh, et al. Use of chlorophyll meter sufficiency indices for nitrogen management of irrigated rice in Asia[J]. Agron. J., 2000, 92: 875-879.
- [20] 刘宏斌, 张云贵, 李志宏, 等. 光谱技术在冬小麦氮素营养诊断中的应用研究[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11): 1743-1748.
- Liu H B, Zhang Y G, Li Z H, et al. Application of canopy spectral reflectance in monitoring nitrogen status of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(11): 1743-1748. (in Chinese)
- [21] 张俊华, 张佳宝, 李立平. 基于冬小麦植被指数的氮肥调控技术研究[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 550-555.
- Zhang J H, Zhang J B, Li L P. Nitrogen regulation technology based on canopy spectral property of winter wheat[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 550-555. (in Chinese)
- [22] 陈青春, 田永超, 姚 霞, 等. 基于冠层反射光谱的水稻追氮调控效应研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(20): 4149-4157.
- Chen Q C, Tian Y C, Yao X, et al. Effects of nitrogen fertilizer top-dressing based on canopy reflectance spectra in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(20): 4149-4157. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)

(上接第 122 页)

- [17] 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.
- [18] Baronti S, Alberti G, Genesio. Effects on soil fertility and on crops production 2nd International Biochar Conference IBI September 8-10[C]. Newcastle-Gateshead, UK, 2008.
- [19] Yuan J H, Xu R K. The amelioration effects of low temperature biochar generated from nine crop residues on an acidic Ultisol[J]. Soil Use Manag, 2011, 27: 110-115.
- [20] Yanai Y, Toyota K, Okazaki M. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(2): 181-188.
- [21] Johannes L, Jose P, Silva J, 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: 343-357.
- [22] Oguntunde P G, Abiodun B J, Ajayi A E. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. Journal of Plant Nutrient and Soil Science, 2008, 171: 591-596.
- [23] 高海英, 陈心想, 张 雯, 等. 生物炭和生物炭基氮肥的理化特征及其作物肥效评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 69-75.
- Gao H Y, Chen X S, Zhang W, et al. Physicochemical properties and efficiencies of biochar and biochar-based nitrogenous fertilizer [J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2013, 41(4): 69-75. (in Chinese)
- [24] Jeffery S, Verheijen F G A, Velde M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 144(1): 175-187.

(责任编辑:姜媛媛)