

生物炭基肥基施对大白菜产量、品质、养分吸收及土壤性质影响研究

姜丽娜^{1, 2}, 索琳娜², 梁丽娜², 李超³, 张宁宁³, 孙向阳^{1*}, 李艳梅^{2*}

(1. 北京林业大学林学院, 森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市农林科学院植物营养与资源环境研究所, 北京 100097; 3. 北京市大兴区农产品产销与蔬菜产业服务站, 北京 102615)

摘要: 生物炭基肥料在培肥土壤和农作物增产提质方面具有潜在应用价值。以露地大白菜为供试作物, 通过大田小区试验, 设置不施氮肥 (CK)、尿素 (U)、尿素+生物炭 (BU)、尿素+生物炭+碱木质素 (JMZS-BU) 和尿素+生物炭+海藻酸 (HZS-BU) 5 个处理, 考察不同掺混型生物炭基氮肥基施对大白菜产量、品质、养分吸收及土壤化学性质的影响。结果表明: 施氮肥增加了大白菜产量和氮钾吸收, 增加了大白菜硝酸盐含量; 与普通尿素处理相比, 3 个炭基尿素处理大白菜产量增加 12.2% ~ 27.9%, 产量由大到小顺序为 HZS-BU>JMZS-BU>BU; 大白菜硝酸盐含量减少 12.5% ~ 24.9%, 维生素 C 含量增加 7.6% ~ 30.9%, 碱木质素掺混型炭基尿素处理降低大白菜硝酸盐含量和增加大白菜维生素 C 含量的幅度更大。与普通尿素相比, 炭基尿素处理增加了大白菜对氮、磷、钾养分的吸收; 2 种掺混型炭基尿素尤其海藻酸掺混型炭基尿素处理的增幅更大。与普通尿素对比, 炭基尿素处理增加了土壤 EC 值、pH、有机质、全氮、矿质氮、速效钾和有效磷的含量, 增加了土壤养分持留时间, 碱木质素掺混型炭基尿素的增幅更大, 这有助于降低后茬种植对无机养分投入的需求。相关分析表明, 炭基尿素处理提升大白菜产量与其增加土壤有机质、有效磷和 EC 含量密切相关, 土壤有机质和有效磷提升的影响效应更大。综合考虑大白菜产量、品质及土壤培肥效应, 推荐碱木质素炭基尿素为露地大白菜生产的优选基肥。

关键词: 生物炭; 碱木质素; 海藻酸; 大白菜; 土壤性质

大白菜属于十字形花科芸薹属的叶用菜, 主产于我国东北沿海和华北部分地区, 含大量膳食纤维和有益次生代谢物, 适应性较广, 生长周期较短, 产量较高, 在我国蔬菜周期营养供给体系中占重要地位^[1]。近年来, 随着国民生活水平提高, 人民对蔬菜产量和品质的需求更高, 对无公害绿色蔬菜的市场需求日益提升^[2]。肥料是无公害蔬菜产量与品质稳定供给的重要物质基础, 关乎农业产业发展和农村生态环境保护。然而, 在高产出、高收益的驱使下, 过度施肥导致的蔬菜产量品质降低和肥料损失问题

日益突出^[3]。因此, 研究新型化肥增效技术对保障农作物安全生产和促进农业绿色可持续发展极为重要。

生物炭一般指在缺氧和相对温度小于 700℃ 条件下, 木料、农作物废弃物、植物组织、畜禽粪便或动物残骸等生物质被热解后的产物^[4]。生物炭具有官能团丰富、孔隙多和比表面积大的特点, 是优质的土壤改良剂^[5], 但生物炭单独施用在不同土壤质地的农学效应不同, 部分可能导致当季或几季作物无增产甚至减产^[6]。

炭基尿素是采用化学或物理方法将生物炭作为基质, 掺加氮、磷、钾等营养元素的一种或几种混合制成的肥料^[7]。生物炭基肥是一种新型缓控释肥料, 也是农田废弃物炭化还田的新途径。生物炭基肥在农作物增产提质及土壤改良方面表现出良好的调控效果, 但有关生物炭基肥增效产品及技术农业开发应用的研究数据还较少^[8]。

陈琳等^[9]研究发现, 与配方施肥相比, 生物

收稿日期: 2022-07-20; 录用日期: 2022-10-05

基金项目: 北京市产业经济与政策创新团队 (BAIC 11-2023); 北京市农林科学院创新能力专项 (KJCX20220406); 北京市农林科学院青年基金 (QNJJ202134)。

作者简介: 姜丽娜 (1999-), 硕士研究生, 主要从事土壤与资源研究。E-mail: 1832082936@qq.com。

通讯作者: 李艳梅, E-mail: 472912615@qq.com; 孙向阳, E-mail: sunxy@bjfu.edu.cn。

炭基肥显著提升杂交水稻产量和氮素利用率。张云舒等^[10]研究表明,生物炭基肥可改良土壤理化性质,增加土壤全氮、有机质、全磷及有效磷含量。宋彬等^[11]研究表明,掺混法制备的炭基氮肥显著延长作物氮素供应期,增加土壤碱解氮和有效磷含量,大幅提升作物对氮、磷养分的利用能力。杨劲峰等^[12]研究发现,炭基缓释氮肥显著增加花生产量、土壤有机质及氮、磷、钾含量。高海英等^[13]研究发现,炭基尿素表现出改良土壤、改善作物生长和增产的作用。炭基尿素在农作物增产提质、肥料减施增效、土壤改良培肥等方面的农学正效应得到广泛认可^[14]。

如何进一步优化生物炭基肥的缓释性并拓展其土壤改良和肥效功能是当前肥料行业密切关注的一项课题。

木质素较好的养分缓释性能、吸附性及可降解性使其成为一种优良的肥料缓释载体^[15]。研究表明,添加木质素可增强炭基尿素的力学和缓释性能,有效抑制土壤脲酶活性^[16],陈介南等^[15]、张作新等^[17]研究木质素缓释氮肥在砂壤质潮土露天栽培小麦生产上的应用,试验结果显示,这种木质素增强型炭基尿素增加了土壤有机质含量及土壤通透性,在小麦整个生育期实现了营养元素长效供应,小麦每公顷增产 11.8%。但总体而言,将碱木质素作为辅料制作生物炭基肥产品的土壤改良及作物调控的研究报道较少。

海藻酸是海藻经过特殊生理生化工艺提取得到的活性生物调节物质^[18],张广雨等^[19]选取烟草考察了生物炭和海藻肥混合施用的调控作用,检测到烟草根际土壤 pH 升高,土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量增加的现象,烟草青枯病发病率及病情指数显著下降,烤烟产量增加,品质提升。但海藻酸作为辅料强化生物炭基肥调控效应的研究仅有零星报道,缺少系统全面的数据支撑。

基于以上所述,本文以露地大白菜为研究对象,考察碱木质素和海藻酸作为辅料制备生物炭基肥对大白菜产量、品质和氮、磷、钾吸收及土壤理化性质的影响,旨在为生物炭基肥农业高效应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验作物:大白菜(91-12 白菜)。

供试材料:尿素(N 46%,由北京市农林科学院植物营养与资源研究所提供)、普通过磷酸钙(P_2O_5 12%)、硫酸钾(K_2O 52%)、碱木质素(褐色粉末,碱性,易溶于水,购于润友化学有限公司)、海藻酸(白至浅黄色纤维状粉末,中性,溶于水后呈胶体液,购于杭州绿祥农资有限公司)、小麦秸秆生物炭(购于辽宁金和福农业科技股份有限公司)。

供试土壤:属性为轻壤质褐土,土壤有机质 13.1 g/kg、有效磷 48.3 mg/kg、速效钾 128 mg/kg,土壤 pH 值 7.85,参照北京土壤养分分等定级评价,供试土壤已测养分结果可定级为土壤肥力中等。试验结束采收大白菜样品的同时,采集耕层 0 ~ 20 cm 的土壤样品(每个小区随机选取 3 点,取样点位保持一致,组成混合样)供后续分析用。小麦秸秆生物炭性质见表 1。

表 1 小麦秸秆生物炭性质

项目	密度 (g/cm ³)	pH	含碳量 (g/kg)	含氮量 (g/kg)	含磷量 (g/kg)	含钾量 (g/kg)	比表 面积 (m ² /g)
小麦秸秆 生物炭	0.285	9.66	596	11.5	8.11	29.3	15.56

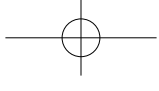
1.2 生物炭基肥料的制备

本试验共制作 3 种肥料,炭基尿素由生物炭和尿素两部分组成,尿素与生物炭质量比为 1 : 2;碱木质素掺混型炭基尿素是在炭基尿素的基础上添加 10% 碱木质素作为辅料;海藻酸掺混型炭基尿素是在炭基尿素的基础上添加 10% 海藻酸作为辅料;将 3 种肥料按照配方称取固定量,放入搅拌机搅拌均匀后储存备用。

1.3 试验设计

本试验采用大田小区试验,于北京市大兴区农业技术推广站蔬菜基地进行,设置 5 个处理(表 2),每个处理重复 3 次,共 15 个小区,每小区面积为 15 m² (1 m × 15 m),随机区组排列,所有处理的磷、钾肥和缓释氮肥均采用一次性基施处理,磷、钾肥用量分别为 P_2O_5 100 kg/hm²、 K_2O 157 kg/hm²,氮肥用量为 N 230 kg/hm²。

试验过程中将土壤含水量控制在田间最大持水量的 60% 左右,根据实际情况适当灌溉。各处理除氮肥施用不同外,磷、钾肥及其他田间管理保持一致。试验结束后,每个处理的成熟大白菜样品均



选取 60 个重复样本,用于后续测定相关指标;同时,采集各处理耕层 0 ~ 20 cm 的土壤样品(每个小区随机选取 3 点,取样点位保持一致,组成混合样)供后续分析用。

表 2 试验处理

处理	施肥	说明
CK	对照(不施氮肥)	—
U	尿素	尿素 230 kg/hm ²
BU	炭基尿素	尿素 230 kg/hm ² + 生物炭 460 kg/hm ²
JMZS-BU	碱木质素掺混型炭基尿素	尿素 230 kg/hm ² + 生物炭 460 kg/hm ² + 碱木质素 69 kg/hm ²
HZS-BU	海藻酸掺混型炭基尿素	尿素 230 kg/hm ² + 生物炭 460 kg/hm ² + 海藻酸 69 kg/hm ²

注:所有施肥处理的磷、钾肥一致,分别为 P₂O₅ 100 kg/hm²、K₂O 157 kg/hm²。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 大白菜品质及养分

在试验小区内采集处于成熟期的新鲜大白菜作为试验样品,每个处理随机采收 10 颗新鲜大白菜,单株产量以去根后称重为准,采用 4 分法取样,粉碎混匀,进行相关品质指标测定。参照《土壤农业化学常规分析方法》^[20],采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定大白菜维生素 C (V_c) 含量;采用紫外分光光度法测定大白菜硝酸盐含量;采用凯氏定氮法测定大白菜全氮含量;采用火焰光度法测定大白菜全钾含量;采用钼钒黄吸光光度法测定大白菜全磷含量;植株地上部全氮、全磷、全钾吸收量(kg/hm²)=地上部干重(kg/hm²)×地上部养分含量(%)。

1.4.2 土壤理化性质

测定方法参照《土壤农化分析》^[21]。采用土水比 1:2.5 的电极法测定土壤 pH 值;采用土水比 1:5 的电极法测定土壤电导率(EC);采用重铬酸钾-外加热法测定土壤有机质含量;采用凯氏定氮仪测定土壤全氮含量;采用靛酚蓝比色法测定土壤 NH₄⁺-N 含量;采用 KCl 萃取法测定土壤 NO₃⁻-N 含量;采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷含量;采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定土壤速效钾含量。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 进行试验数据整理,采用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析和 Pearson 相关分析,显著

性水平设为 0.05,多重比较采用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 炭基尿素基施对大白菜产量的影响

由表 3 可以看出,与 CK 相比,施氮肥处理增加了大白菜的产量,增产幅度为 6.4% ~ 36.1%,不同处理大白菜产量表现为 HZS-BU>JMZS-BU>BU>U>CK。与 U 相比,BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理分别使大白菜产量提升 12.2%、13.5%、27.9%,其中 HZS-BU 处理的增幅最大;表明生物炭基尿素基施有助于增加露地大白菜的产量,选择海藻酸作为辅料的炭基尿素增产效果优于选用碱木质素作为辅料的处理。

表 3 炭基尿素基施对大白菜产量的影响

处理	大白菜产量 (kg/hm ²)	对比 CK 增幅 (%)	对比 U 增幅 (%)
CK	85346 ± 2112d	—	—
U	90789 ± 2247c	6.4	—
BU	101858 ± 2521b	19.3	12.2
JMZS-BU	103028 ± 2550b	20.7	13.5
HZS-BU	116161 ± 2875a	36.1	27.9

注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

2.2 炭基尿素基施对大白菜品质的影响

由表 4 可以看出,与 CK 相比,施氮肥处理增加了大白菜的 V_c 含量,增加幅度为 5.70% ~ 38.4%。不同处理大白菜 V_c 含量表现为 JMZS-BU>HZS-BU>BU>U>CK。与 U 相比,BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理分别使大白菜 V_c 含量提升 7.6%、30.9%、13.7%,其中 JMZS-BU 处理的增幅最大,表明与传统尿素基施相比,炭基尿素基施增加了大白菜 V_c 含量,以碱木质素作为辅料炭基尿素基施处理的增幅最大。

与 CK 相比,U 处理增加了大白菜的硝酸盐含量,3 个炭基尿素处理减少了大白菜的硝酸盐含量,降幅为 3.73% ~ 17.40%。不同处理大白菜硝酸盐含量表现为 JMZS-BU<HZS-BU<BU<CK<U。与 U 相比,BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理分别使大白菜硝酸盐含量降低 12.5%、24.9%、20.0%,其中 JMZS-BU 处理的减幅最大,表明生物炭基尿素基施能够降低露地大白菜硝酸盐含量,选择碱木质素作为辅料时的降幅更明显。

综合考虑露地大白菜 V_c 和硝酸盐含量,碱木质素作为辅料炭基尿素处理的大白菜品质最佳。

表 4 炭基尿素基施大白菜维生素 C 和硝酸盐含量

处理	(mg/kg)	
	维生素 C	硝酸盐
CK	263 ± 0.82e	241 ± 9.02b
U	278 ± 5.89d	265 ± 2.21a
BU	299 ± 0.82c	232 ± 8.97b
JMZS-BU	364 ± 11.20a	199 ± 12.30c
HZS-BU	316 ± 7.76b	212 ± 5.33c

2.3 炭基尿素基施对大白菜氮、磷、钾含量及吸收量的影响

由表 5 可以看出,与 CK 相比,施氮肥处理增加了大白菜的全氮含量和氮吸收量,增加幅度分别为 16.7% ~ 21.0%、24.2% ~ 56.9%。不同处理大白菜全氮含量表现为 JMZS-BU>HZS-BU>BU>U>CK,不同处理大白菜氮吸收量表现为 HZS-BU>JMZS-BU>BU>U>CK。与 U 相比,BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理分别使大白菜全氮含量提升 1.36%、3.74%、2.72%,氮吸收量提升 12.6%、13.2%、26.3%,其中 JMZS-BU 处理的大白菜全氮含量增幅最大,HZS-BU 处理的大白菜氮吸收量增幅最大,表明生物炭基尿素基施能够提升露地大白菜的全氮含量和氮吸收量,选择碱木质素作为辅料时大白菜的全氮含量增幅更为明显,选择海藻酸作为辅料时大白菜的氮

吸收量增幅更为明显。

与 CK 相比,施氮肥处理增加了大白菜的全磷含量和磷吸收量,增加幅度分别为 9.68% ~ 12.90% 和 4.23% ~ 48.70%。不同处理大白菜全磷含量和磷吸收量均表现为 HZS-BU>JMZS-BU>BU>U>CK。与 U 相比,BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理分别使大白菜磷吸收量提升 19.7%、24.9%、42.6%,其中 HZS-BU 处理的大白菜全磷含量和磷吸收量增幅最大,表明生物炭基尿素基施能够提升露地大白菜的全磷含量和磷吸收量,选择海藻酸作为辅料时的增幅更为明显。

与 CK 相比,施氮肥处理增加了大白菜的全钾含量和钾吸收量,增产幅度分别为 5.05% ~ 13.10% 和 1.10% ~ 21.70%。不同处理大白菜全钾含量和钾吸收量均表现为 HZS-BU>JMZS-BU>BU>U>CK。与 U 相比,BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理分别使大白菜全钾含量提升 4.09%、4.81%、7.69%,钾吸收量提升 1.09%、14.50%、20.40%,其中 HZS-BU 处理的大白菜全钾含量和钾吸收量增幅最大,表明生物炭基尿素基施能够提升露地大白菜的全钾含量和钾吸收量,选择海藻酸作为辅料时的增幅更为明显。

综合考虑露地大白菜全氮磷钾含量和氮磷钾吸收量,海藻酸作为辅料炭基尿素处理的大白菜养分最佳。

表 5 炭基尿素基施大白菜全氮、磷、钾含量和吸收量

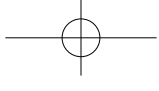
处理	全氮 (%)	全磷 (%)	全钾 (%)	氮吸收量 (kg/hm ²)	磷吸收量 (kg/hm ²)	钾吸收量 (kg/hm ²)
CK	2.52 ± 0.12c	0.31 ± 0.01b	3.96 ± 0.04c	153 ± 7.28d	18.9 ± 0.36c	272 ± 2.44c
U	2.94 ± 0.15b	0.31 ± 0.02b	4.16 ± 0.03b	190 ± 9.54c	19.7 ± 0.94c	275 ± 17.60c
BU	2.98 ± 0.06b	0.34 ± 0.07a	4.33 ± 0.16ab	214 ± 15.00b	23.6 ± 4.99b	278 ± 9.74c
JMZS-BU	3.05 ± 0.21a	0.34 ± 0.01a	4.36 ± 0.05a	215 ± 4.65b	24.6 ± 0.65b	315 ± 3.75b
HZS-BU	3.02 ± 0.04a	0.35 ± 0.01a	4.48 ± 0.04a	240 ± 3.27a	28.1 ± 0.54a	331 ± 2.71a

2.4 炭基尿素基施对土壤性质及养分的影响

由表 6 可以看出,与 CK 相比,施氮肥处理增加了耕层土壤的 EC 值,增加幅度为 86.5% ~ 257.0%。不同处理土壤的 EC 值表现为 JMZS-BU>HZS-BU>BU>U>CK。与 U 相比,BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理分别使大白菜耕层土壤 EC 值含量提升 48.1%、91.5%、52.8%,其中 JMZS-BU 处理的增幅最大。与试验土壤初始 pH 值相比,各处理组土壤 pH 值变化幅度表现为 BU<U<CK<HZS-BU<JMZS-BU,其中 BU 处理的土壤 pH 值变幅最小,HZS-BU 处理的土壤 pH 值最小,JMZS-BU 处理的土壤 pH 值最大且变幅

最大。与 U 相比,BU 和 JMZS-BU 处理分别使大白菜耕层土壤 pH 值增加 0.06 和 0.28 个单位,HZS-BU 处理土壤 pH 值降低 0.11 个单位,这可能是由碱木质素和海藻酸自身性质不同所致,表明生物炭基尿素基施对露地大白菜耕层土壤 pH 值的影响与其类型有关,以海藻酸作为辅料的炭基尿素会适度降低碱性土壤 pH 值。

与 CK 相比,施氮肥处理增加了耕层土壤有机质和全氮含量,其中土壤有机质含量增加幅度为 1.82% ~ 7.58%。不同处理组的土壤有机质含量和全氮含量均表现为 JMZS-BU>HZS-BU>BU>U>CK。



与 U 相比, BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理分别使大白菜耕层土壤有机质含量提升 2.38%、5.65%、5.06%, 其中 JMZS-BU 处理的土壤有机质含量和全

氮含量增幅最大, 表明生物炭基尿素基施增加了露地大白菜耕层土壤有机质和全氮含量, 碱木质素作为辅料炭基尿素的增幅大于海藻酸。

表 6 炭基尿素基施处理土壤性质及养分

处理	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH	有机质 (%)	全氮 (%)	矿质氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
CK	126 $\pm$ 0.91d	8.00 $\pm$ 0.06a	3.30 $\pm$ 0.19c	0.10 $\pm$ 0.01c	50.8 $\pm$ 6.97c	61.0 $\pm$ 0.44b	219 $\pm$ 10.80d
U	235 $\pm$ 5.36c	7.80 $\pm$ 0.06b	3.36 $\pm$ 0.21bc	0.12 $\pm$ 0.01b	101.0 $\pm$ 5.79b	61.1 $\pm$ 0.88b	368 $\pm$ 11.40c
BU	348 $\pm$ 23.50b	7.86 $\pm$ 0.04b	3.44 $\pm$ 0.02b	0.13 $\pm$ 0.02b	102.0 $\pm$ 12.00b	61.6 $\pm$ 0.46b	374 $\pm$ 0.53c
JMZS-BU	450 $\pm$ 9.34a	8.08 $\pm$ 0.02a	3.55 $\pm$ 0.02a	0.18 $\pm$ 0.02a	126.0 $\pm$ 12.50a	63.5 $\pm$ 0.53a	480 $\pm$ 26.50a
HZS-BU	359 $\pm$ 3.78b	7.69 $\pm$ 0.04c	3.53 $\pm$ 0.11a	0.14 $\pm$ 0.03b	108.0 $\pm$ 3.58b	63.1 $\pm$ 0.79a	409 $\pm$ 9.66b

与 CK 相比, 施氮肥增加了露地大白菜收获时耕层土壤矿质氮、有效磷和速效钾含量, 增幅分别为 98.8% ~ 148.0%、0.16% ~ 4.10% 和 68.0% ~ 119.0%。不同处理土壤矿质氮、有效磷和速效钾含量均表现为 JMZS-BU>HZS-BU>BU>U>CK, 其中 JMZS-BU 处理的增幅最大, 说明施氮肥在促进露地大白菜增产的同时, 还增加了耕层土壤的后茬养分供应。与 U 相比, BU、JMZS-BU、HZS-BU 处理均增加了露地大白菜收获时耕层土壤矿质氮、有效磷和速效钾含量, BU 处理的增幅分别为 1.00%、0.82%、1.63%; JMZS-BU 处理的增幅分别为 24.80%、3.93%、30.40%; HZS-BU 处理的增幅分别为 6.93%、3.27%、11.10%, 表明相对于普通尿素处理, 炭基尿素处理增加了耕层土壤的后茬氮、磷、钾养分供应, 碱木质素和海藻酸作为辅料炭基尿素的增幅大于普通炭基尿素, 碱木质素辅料型的增加更为明显。

综合考虑露地大白菜收获时耕层土壤 EC、有机质、全氮、矿质氮、有效磷和速效钾含量, 碱木质素作为辅料炭基尿素处理的大白菜收获时耕层土壤养分最佳。

2.5 炭基尿素基施处理下大白菜产量与土壤理化性质相关分析

相关分析结果 (表 7) 表明, 露地大白菜产量与土壤 EC 值、有机质含量和有效磷含量呈极显著相关关系, 相关系数分别达 0.777、0.889 和 0.803, 与土壤速效钾和矿质氮含量显著相关, 相关系数分别为 0.702 和 0.685, 表明炭基尿素基施处理增加露地大白菜产量与其提升大白菜耕层土壤有机质和矿质养分含量密切相关, 尤其与土壤有机质和有效磷

的相关性更强。土壤 EC、有机质、矿质氮和有效磷等指标, 两两之间存在显著相关关系。

表 7 炭基尿素基施处理条件下大白菜产量与土壤理化性质的相关分析

指标	产量	pH	电导率	有机质	矿质氮	有效磷
pH	-0.471					
电导率	0.777**	0.026				
有机质	0.889**	-0.080	0.956**			
矿质氮	0.685*	-0.130	0.928**	0.860**		
有效磷	0.803**	0.068	0.862**	0.955**	0.737*	
速效钾	0.702*	-0.058	0.950**	0.900**	0.992**	0.808**

注: ** 和 * 分别表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平显著相关。

3 讨论

3.1 炭基尿素对大白菜产量、品质、养分吸收及土壤性质的影响

作物产量与品质形成是作物生产极重要的一环, 也是农业生产的最后一环^[22]。氮肥增效技术在农作物增产提质、肥料减施增效等方面的作用被广泛认可^[23]。本研究表明, 炭基尿素能实现露地大白菜增产提质, 并增加大白菜收获期耕层土壤后茬养分供应; 原因可能与生物炭对土壤耕层养分的缓释作用有关^[24], 生物炭对矿质养分, 尤其氮素的吸持, 可延缓氮素在土壤中的释放, 增加土壤耕层养分长效供应 (表 6), 改善植物矿质营养状况 (表 5), 从而提升产量 (表 3) 和品质 (表 4), 实现节本增效^[25]。李艳梅等^[22, 26]研究表明, 与普通尿素相比, 炭基尿素明显增加耕层土壤硝态氮持留, 减少氮素深层迁移。李正

东等^[27]、张雯^[28]研究表明,炭基尿素在培育小麦、花生、水稻等作物时,增加收获期土壤有机质含量,促进作物矿质养分吸收,提升了作物品质,使小麦产量提升20%~35%。李艳梅等^[22]、乔志刚^[29]研究表明,炭基尿素栽培小白菜、芹菜、青椒等蔬菜可显著增加蔬菜产量、可溶糖含量及维生素C含量。康日峰等^[30]研究表明,炭基尿素栽培小麦显著提高了土壤有机质、碱解氮和有效磷含量,小麦全氮和全磷含量分别提升了19%和15%。姚春雪^[31]研究表明,炭基尿素基施显著提高青椒产量及维生素C含量,并显著降低青椒硝酸盐含量,青椒品质显著提升。以上研究均证实炭基氮肥在肥料养分缓释、土壤养分吸持及农作物增产提质方面的作用,本研究再次证实这一结论。

3.2 碱木质素掺混型炭基尿素对大白菜产量、品质、养分吸收及土壤性质的影响

研究表明,碱木质素炭基尿素处理增加大白菜产量及养分吸收,提升大白菜品质,并增加收获期大白菜根际土壤EC、pH、有机质和矿质养分含量。前人考察过碱木质素在炭基尿素中的应用研究^[16],但尚未考察碱木质素和炭基尿素的作物效应,本研究碱木质素和炭基尿素混合施用减少了大白菜硝酸盐累积,增加了大白菜产量(表3)及维生素C含量(表4),原因可能是木质素具有络合作用、交换和吸附离子等优良性能,从而通过抑制土壤颗粒对磷酸基团的吸附^[32-33],增加土壤有效磷含量(表6),促进大白菜磷吸收(表5)及增产(表3)。相关分析表明,大白菜产量和土壤有效磷含量呈极显著相关(表7)。陈倩等^[34]研究表明,栽培玉米时,施用木质素抑制了土壤脲酶活性,减少土壤养分流失,提高肥料利用率,玉米氮和磷吸收率分别较对照平均提升28.8%和17.4%,产量增加20%以上,品质亦大幅提升,证实木质素在玉米农学效应方面的正调控作用。前人研究指出木质素和生物炭可调节土壤碳氮比,增加土壤有机质含量,减少土壤矿质养分流失,原因是二者均由一个巨大骨架聚合而成,且含大量碳元素,具有较好的吸附性,可吸附水分和养分^[35],并通过静电引力和范德华力对养分进行吸附和交换作用,具有良好的肥料缓释性^[36-37]。在炭基尿素中添加粘接剂可大幅提升肥料缓释性能和农用效果^[22],木质素优化生物炭基肥缓释性能的效果较好^[16],向炭基

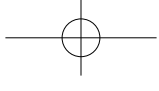
尿素中添加10%(质量比)碱木质素的生物炭基肥配方的肥料缓释效果已被证实^[38]。本研究向尿素与生物炭质量比1:2混料中加入10%的碱木质素制备的生物炭基肥,表现出增加土壤EC值、有机质、矿质氮、有效磷和速效钾含量(表6),促进大白菜氮、磷、钾吸收(表5),增加大白菜产量(表3)及维生素C含量(表4)的作用,说明碱木质素掺混型炭基肥料有利于土壤有机质积累、矿质养分吸持、农作物养分吸收增加及增产提质。

3.3 海藻酸掺混型炭基尿素对大白菜产量、品质、养分吸收及土壤性质的影响

研究表明,海藻酸炭基尿素使大白菜增产并促进大白菜氮、磷、钾吸收,提升大白菜品质,增加收获期土壤EC值和养分含量,降低土壤pH。前人针对烟草的研究表明,海藻酸炭基尿素通过提升土壤有效养分含量,促进植株生长发育,增加烟草产量,并大幅提升烟草品质^[19]。黄继川等^[39]、王伟涛等^[40]研究表明,海藻酸与尿素复合肥料的施用可活化土壤氮素和磷素养分,促进水稻对氮、磷养分的吸收利用,提升水稻产量和品质,可实现尿素减量20%。李松伟等^[41]、方明等^[42]研究表明,生物炭和海藻肥混施可有效改良土壤理化性质,提升土壤养分含量,原因是生物炭和海藻肥自身含有有机质,具有吸附和催化作用,能促使有机小分子聚集,影响土壤微生物及酶活性,从而使其具备优良土壤改良剂的潜质。本研究向炭基尿素中掺混海藻酸,表现出增加收获期大白菜耕层土壤有机质、速效养分含量(表6),增加大白菜产量(表3),促进大白菜氮、磷、钾吸收(表5)及改善大白菜品质(表4)的作用,与前人研究结论基本一致,证实了炭基尿素和海藻酸配施应用的可行性。

3.4 炭基尿素基施处理下大白菜产量与土壤理化性质相关分析

相关分析表明,炭基尿素基施增加露地大白菜产量与其提升大白菜耕层土壤有机质、矿质养分含量和EC值密切相关,尤其与土壤有机质和有效磷的相关性更强(表7)。炭基肥料主要是生物炭与尿素掺混制备,生物炭施入土壤,一方面增加了养分固持减少养分损失,提升土壤有机质和矿质养分含量(表6),另一方面生物炭本身带入的有机质和氮、磷、钾养分可作为肥料提升土壤肥力,促进大白菜氮、磷、钾吸收(表5)及增产(表3)。



钱力^[43]研究表明,生物炭处理增加作物产量与其提升土壤有机质、有效磷、速效钾含量有关。李晓^[44]研究表明,炭基尿素基施增加玉米产量与其增强耕层土壤养分持留与供应,尤其增加土壤有机质和有效磷指标有关。钟晓晓等^[45]研究表明,添加生物炭增加了土壤 EC 值、有机质含量,提高了土壤肥力。袁晶晶等^[46]研究表明,生物炭调节土壤碳氮比,提高土壤有机质含量,减少铁氧化物对磷的吸附,增加土壤有效磷含量。武玉等^[47]研究表明,生物炭本身含大量的磷且有效性较高,施入土壤可显著增加土壤有效磷含量。本试验也表明,基施生物炭基肥增加土壤有机质和有效磷含量是其提升大白菜产量的重要原因(表 6,表 7)。

3.5 两种掺混型炭基尿素农学效应对比分析及差异浅析

碱木质素掺混型炭基尿素和海藻酸掺混型炭基尿素处理均表现出使大白菜增产提质的作用,但二者的农学效应存在一定差异。在提升大白菜产量方面,海藻酸掺混型炭基尿素表现更佳,支撑这种差异的背后机制可能是海藻酸类物质本身就是促进农作物增产的天然有益调节物质,更利于提升大白菜氮、磷、钾养分吸收(表 5)及产量(表 3);在改善大白菜品质方面,碱木质素掺混型炭基尿素更佳,支撑这种差异的背后机制可能是碱木质素具有更好的粘结性,碱木质素掺混型炭基尿素的缓释性优于海藻酸掺混型炭基尿素,更利于优化土壤氮素供应(表 6),促进大白菜氮素利用,提升大白菜 Vc 含量(表 4),并降低大白菜硝酸盐累积(表 4),改善大白菜品质。本研究分析了植物氮、磷、钾营养吸收和土壤 pH 值、EC 值、有机质、氮、磷、钾养分等指标,除了本研究能够给出的大白菜农学效益差异的解释,可能还存在其他机制,未来需进一步增加分析视角和指标来全面阐释。

4 结论

(1) 与普通尿素相比,3 个炭基尿素处理使大白菜产量增加 12.2% ~ 27.9%, Vc 含量增加 7.55% ~ 30.90%,硝酸盐含量减少 12.5% ~ 24.9%,海藻酸掺混型炭基尿素增产更佳,碱木质素掺混型炭基尿素提升总体品质作用更佳。

(2) 与普通尿素相比,炭基尿素处理增加大白菜对氮、磷、钾养分的吸收,两种掺混型炭基尿素

处理增幅更大,氮、磷和钾养分吸收量增幅分别为 12.6% ~ 26.3%、19.7% ~ 42.6% 和 1.09% ~ 20.40%,海藻酸掺混型炭基尿素增加大白菜养分吸收幅度更大。

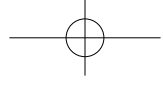
(3) 与普通尿素对比,炭基尿素处理增加土壤 EC 值、pH 值、有机质、全氮、矿质氮、速效钾和有效磷含量,增加土壤养分持留,碱木质素掺混型炭基尿素的增幅更大,有助于降低后茬种植对无机养分投入的需求。

(4) 炭基尿素处理增加大白菜产量与其提升土壤有机质、有效磷和 EC 含量密切相关,土壤有机质和有效磷提升的影响效应更大。

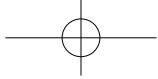
综合考虑大白菜产量、品质及土壤培肥效应,推荐碱木质素炭基尿素为优选基肥,其次是海藻酸炭基尿素。

参考文献:

- [1] 贾圣青,杨振超,任苗,等. 化肥减施对大白菜生长、产量和品质的影响[J]. 陕西农业科学, 2021, 67(11): 35-39.
- [2] 黄丙玲,司庆臣,张宗祥. 不同施肥处理对大白菜产量及品质的影响[J]. 中国农技推广, 2021, 37(8): 59-61.
- [3] 金晶晶,阚建鸾,李巧玲,等. 氮磷钾肥对大白菜产量及养分吸收的影响[J]. 现代农业科技, 2016(23): 68, 71.
- [4] 廖上强,陈延华,李艳梅,等. 生物炭基尿素对芹菜产量、品质及土壤硝态氮含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(5): 443-448.
- [5] 陈慧,时正伦,吴永波,等. 不同生物炭配施基肥处理对桑树幼苗叶片品质的影响及综合评价[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(3): 71-77.
- [6] 赵满兴,贺治慧,徐世峰,等. 生物质炭对延安烤烟生长及经济性状的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(5): 1192-1196.
- [7] NY/T 3041-2016, 生物炭基肥料[S].
- [8] 战秀梅,彭靖,王月,等. 生物炭及炭基肥改良棕壤理化性状及提高花生产量的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 9.
- [9] 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.
- [10] 张云舒,唐光木,蒲胜海,等. 减氮配施炭基肥对棉田土壤养分、氮素利用率及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2020, 29(9): 1372-1377.
- [11] 宋彬,孙茹茹,梁宏旭,等. 添加木质素和生物炭对土壤氮、磷养分及水分损失的影响[J]. 水土保持学报, 2019,



- 33 (6): 227-232, 241.
- [12] 杨劲峰, 江彤, 韩晓日, 等. 连续施用炭基肥对花生土壤性质和产量的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2015 (3): 68-73.
- [13] 高海英, 何绪生, 陈心想, 等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31 (10): 1948-1955.
- [14] 周子渝, 田福, 顾瑗璐, 等. 不同配比生物炭基肥对苦苣生长及品质的影响 [J]. 现代园艺, 2021, 44 (3): 36-38.
- [15] 陈介南, 闫豪, 张林, 等. 木质素缓释肥料的制备及应用评价 [J]. 江西农业大学学报, 2017, 39 (4): 810-817.
- [16] 王秋静. 木质素在生物质炭尿素肥料中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [17] 张作新, 张树明, 张永利, 等. 木质素肥料在小麦上的增产效果初探 [J]. 农业开发与装备, 2020 (4): 125, 151.
- [18] 李金鑫, 李絮花, 刘敏, 等. 海藻酸增效复混肥料在冬小麦上的施用效果 [J]. 中国土壤与肥料, 2020 (1): 153-159.
- [19] 张广雨, 褚德朋, 刘元德, 等. 生物炭及海藻肥对烟草生长、土壤性状及青枯病发生的影响 [J]. 中国烟草科学, 2019, 40 (5): 15-22.
- [20] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学常规分析方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 李艳梅, 张兴昌, 廖上强, 等. 生物炭基肥增效技术与制备工艺研究进展分析 [J]. 农业机械学报, 2017, 48 (10): 1-14.
- [23] 黄勤理, 徐茂华. 生物炭基有机肥的优势及其在广西烤烟上的应用探析 [J]. 现代农业科技, 2020 (14): 41-42.
- [24] 周溶慧, 朱成立, 黄明逸, 等. 不同粒径及用量生物炭对盐渍土和番茄的影响 [J]. 中国农村水利水电, 2022 (6): 175-180.
- [25] 白怀瑾, 岳振平, 王俊茹. 生物质炭基肥盐碱地番茄上应用初报 [J]. 农业科技通讯, 2022 (1): 114-115.
- [26] 李艳梅, 杨俊刚, 孙焱鑫, 等. 炭基氮肥与灌水对温室番茄产量、品质及土壤硝态氮残留的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2015, 34 (10): 1965-1972.
- [27] 李正东, 陶金沙, 李恋卿, 等. 生物质炭复合肥对小麦产量及温室气体排放的影响 [J]. 土壤通报, 2015, 46 (1): 177-183.
- [28] 张雯. 新型生物炭基氮肥的研制及田间应用研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [29] 乔志刚. 不同生物质炭基肥对不同作物生长、产量及氮肥利用率的影响研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [30] 康日峰, 张乃明, 史静, 等. 生物炭基肥料对小麦生长、养分吸收及土壤肥力的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2014 (6): 33-38.
- [31] 姚春雪. 改性生物质炭基肥料的特性及在生产上的应用 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [32] 刘宁, 何红波, 解宏图, 等. 土壤中木质素的研究进展 [J]. 土壤通报, 2011, 42 (4): 991-996.
- [33] 秦丽元, 王秋静, 蒋恩臣, 等. 改性木质素粘结生物质炭包膜尿素肥料性能试验 [J]. 农业机械学报, 2016, 47 (5): 171-176, 182.
- [34] 陈倩, 穆环珍, 黄衍初, 等. 施用木质素对春玉米生长发育及产量的影响研究 [J]. 中国生态农业学报, 2004 (4): 98-100.
- [35] 路瑶, 魏贤勇, 宗志敏, 等. 木质素的结构研究与应用 [J]. 化学进展, 2013, 25 (5): 838-858.
- [36] 张杰, 汪洪, 李书田, 等. 施用木质素对土壤中尿素转化及释放的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2010 (5): 16-20, 85.
- [37] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 等. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展 [J]. 生态学报, 2016, 36 (19): 5998-6011.
- [38] 张伟. 水稻秸秆炭基缓释肥的制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [39] 黄继川, 彭智平, 涂玉婷, 等. 施用海藻酸复合肥料的双季稻产量和氮磷肥料效应 [J]. 热带作物学报, 2020, 41 (5): 859-867.
- [40] 王伟涛, 孟庆敏, 高丽超, 等. 海藻酸与控释尿素配施对小麦玉米产量及土壤养分的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (5): 280-288.
- [41] 李松伟, 王发展, 陈彪, 等. 生物炭配施海藻肥对连作植烟土壤理化特性及烤烟生长的影响 [J]. 河南农业大学学报, 2021, 55 (5): 852-861.
- [42] 方明, 任天志, 赖欣, 等. 施用生物炭对红壤和潮土种植小白菜氮素利用的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2019 (6): 123-133.
- [43] 钱力. 生物质炭基肥料的试验与改性探索 [D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- [44] 李晓. 施用生物质炭及炭基肥对温室气体排放、玉米生长及土壤性质的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [45] 钟晓晓, 王涛, 原文丽, 等. 生物炭的制备、改性及其环境效应研究进展 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40 (5): 44-50.
- [46] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (2): 468-475.
- [47] 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.



Effects of biochar based fertilizer application on yield, quality, nutrient absorption and soil properties of Chinese cabbage

JIANG Li-na^{1, 2}, SUO Lin-na², LIANG Li-na², LI Chao³, ZHANG Ning-ning³, SUN Xiang-yang^{1*}, LI Yan-mei^{2*}

(1. Key Laboratory of Forest Cultivation and Protection, Ministry of Education, School of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097; 3. Daxing District Agricultural Products Production and Marketing and Vegetable Industry Service Station, Beijing 102615)

Abstract: Biochar-based fertilizers have potential application value in fertilizing soil and improving crop yield and quality. The effects of different blended biochar-based nitrogen (N) fertilizers on the yield, quality and nutrient absorption and its root zone soil chemical properties of open-field cabbage were investigated by the field plot experiment through setting five treatments of no N fertilizer (CK), urea (U), urea+biochar (BU), urea+biochar+alkali lignin (JMZS-BU) and urea+biochar+alginate (HZS-BU). The results showed that the application of N fertilizer increased the yield, nitrogen and potassium uptake and nitrate content of the cabbage. Compared to the common urea treatment, the yield of Chinese cabbage in the three carbon-based urea treatments increased by 12.2% ~ 27.9%, and the order of yield from high to low was HZS-BU>JMZS-BU>BU; Nitrate content in Chinese cabbage was decreased by 12.5% ~ 24.9% and vitamin C (Vc) content was increased by 7.6% ~ 30.9%. In addition, JMZS-BU treatment decreased nitrate content and increased Vc content in Chinese cabbage more significantly. All three carbon-based urea treatments increased the nitrogen, phosphorus and potassium uptake by Chinese cabbage compared to the U treatment, and the two types of blended carbon-based urea treatments, especially HZS-BU, showed a larger increment. Moreover, the carbon-based urea treatments increased soil EC, pH, organic matter, total nitrogen, mineral nitrogen, available potassium and available phosphorus, and increased the soil nutrient retention, which was more significantly in JMZS-BU. This helps to reduce the need for inorganic nutrient inputs for subsequent crops. The correlation analysis showed that, the increased cabbage yield was closely related to soil organic matter, available phosphorus and EC content. Therefore, alkaline lignin carbon-based urea (JMZS-BU) was recommended as the preferred fertilizer for open field cabbage production.

Key words: biochar; alkali lignin; alginate; Chinese cabbage; soil properties