

刘敏,纪立东,王锐,等.施用生物质炭条件下减施氮肥对玉米生长和土壤的影响[J].江苏农业科学,2021,49(19):216-222.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.19.039

施用生物质炭条件下减施氮肥对玉米生长和土壤的影响

刘敏¹,纪立东²,王锐¹,司海丽²,柳骁桐¹

(1.宁夏大学农学院,宁夏银川750021;2.宁夏农林科学院农业资源与环境研究所,宁夏银川750002)

摘要:为探讨秸秆生物质炭的氮肥替代效果,在等量生物质炭投入条件下,研究不施肥、常规施肥(不减氮)、减氮15%、减氮30%、减氮45%、减氮100%等6种施肥模式对玉米生长、产量及土壤质量的影响。结果表明,与常规施肥相比,等量生物质炭投入条件下,随着减氮比例的增加,玉米根系构型、叶绿素含量(SPAD值)和净光合速率呈显著降低趋势,减氮15%对玉米根系及植株生长发育、叶片光合作用具有显著促进作用,较常规施肥玉米的总根长、总根表面积、总根体积分别增加了13.5%、17.6%、22.9%;随着减氮比例的增加,玉米产量显著降低,与常规施肥相比,减氮15%通过提高玉米穗粒质量和百粒质量显著提高玉米产量。与常规施肥相比,等量生物质炭投入条件下,减氮15%、30%、45%分别显著提高土壤水稳性大团聚体含量166.87%、143.70%、82.31%;减氮15%处理能显著提高土壤有机质、有效磷、速效钾、碱解氮含量,土壤养分保蓄能力最佳;适宜的碳氮含量比有利于提高土壤微生物和酶活性,减氮15%时与常规施肥相比,磷酸酶和脲酶含量分别显著增加35.9%和6.3%,放线菌数量增加7.3倍,而氮素减量过量,导致碳氮比失衡,土壤微生物数量显著下降;减氮15%处理下氮肥利用效率和氮肥农学效率分别显著提高20.57%和7.93 kg/kg。综合分析,同比常规施肥,在生物质炭投入4.5 t/hm²条件下,减氮15%视为最佳的碳基无机配施方案。

关键词:玉米;氮肥减施;生物质炭;产量;根系构型;光合特性;农艺性状;土壤质量

中图分类号:S143.1;S513.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)19-0216-07

我国作为生物密集型农业国家,有着对化肥依赖程度高,化肥需求量大的特点^[1];但肥料利用率较低,尤其是氮肥通过挥发、淋溶、径流大量损失^[2],造成了土壤质量下降,农作物经济效益降低及环境污染等一系列严重的环境问题。另一方面,我国作为农业大国,也是世界上农业废弃物产出最高的国家,但秸秆等农业废弃物的有效资源化利用率不高^[3],不但浪费资源而且污染环境。如何提高化肥的利用率,充分发挥农业废弃物的价值,对我国农业可持续发展至关重要。

生物炭(biochar)具有理化性质稳定、抗分解能力较强,吸附性能高等特点^[4],被越来越多地用于

农业生产实践。王琪等研究发现,施用生物炭之后黑麦草根际土壤的阳离子交换量、全氮含量、过氧化氢酶活性分别提高了12.40%、7.35%、16.21%^[5]。吕贝贝等研究表明,生物炭与化肥配施改善了土壤理化性质,显著提高了土壤有机碳、全氮、碱解氮含量,促进了玉米对氮素、磷素的吸收^[6]。李伟等研究表明,生物炭配施氮肥显著提高了土壤水稳性大团聚体含量和团聚体稳定性,且小麦-玉米两季作物总产量有所提高^[7]。廖芬等研究发现,生物炭处理可以明显增加甘蔗分蘖期土壤氮(N)含量,与对照相比土壤氮含量增加4.17%~33.33%,同时N损失量从48.85%降至31.26%^[8]。综上所述,生物炭在充分发挥农业废弃物价值的同时,能够明显改良土壤结构、提高化肥利用率。然而,目前关于生物质炭的研究主要集中于相同施肥量条件下增施生物质炭后的作用效果,针对生物质炭替代化学氮肥的研究相对较少,对于施用生物质炭后能否减施氮肥、减氮比例有多少等问题的研究也缺乏足够的实践验证。

本试验通过田间试验,探究定量生物质炭施用条件下,不同减氮处理对玉米生长、产量及土壤物理化学性质的影响,优化生物炭应用于作物稳投增

收稿日期:2021-01-24

基金项目:宁夏回族自治区农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(编号:NGSB-2021-11-07);宁夏回族自治区重点研发计划(编号:2019BCF01001);宁夏农林科学院全产业链创新示范项目(编号:YES-16-0908)。

作者简介:刘敏(1998—),女,宁夏西吉人,硕士研究生,主要从事植物营养与农业资源利用相关研究。E-mail:1152038835@qq.com。

通信作者:王锐,博士,教授,主要从事酿酒葡萄土肥水管理研究。E-mail:amwangrui@126.com。

效及土壤改良培育等施肥措施,旨在为生物炭在农业方面的推广应用提供理论与技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2019年4—10月,在宁夏回族自治区吴忠市同心县李家岗子村试验地进行。该区域为缓坡丘陵区,海拔1 000~2 000 m,属于典型的温带大陆季风性气候;常年干旱少雨,年均降水量210 mm左右,年均蒸发量2 300 mm,年均气温8.8℃,日温差13.8℃,全年积温可达3 200℃,适合玉米的生长,有利于玉米养分的积累。

1.2 试验材料

试验选用宁夏荣华生物质新材料科技有限公司生产的秸秆生物质炭(pH值9.38,有机质含量800 g/kg,全氮含量6 g/kg);氮肥为颗粒尿素[CO(NH₂)₂],N含量≥46%;磷肥为磷酸氢二铵[(NH₄)₂HPO₄],P₂O₅含量≥46%,N含量≥18%;钾肥为氯化钾(KCl),K₂O含量≥45%。供试玉米品种为利禾1号,作物为一年一熟(4月中旬至9月中旬)。供试土壤为灰钙土,质地为壤土,0~20 cm土层土样基本化学性质如下:pH值、有机质含量、碱解氮含量、有效磷含量、速效钾含量分别为8.27、10.32 g/kg、63 mg/kg、16.1 mg/kg、239.83 mg/kg。

1.3 试验设计

以玉米为研究对象,采用单因素随机区组设计,以等量生物质炭投入条件下不同氮肥减施比例为影响因素,设计如下6个处理:(1)CK,不施肥;(2)T1,常规施肥,当地农技推广部门推荐测土配方施肥方案(N:P₂O₅:K₂O含量质量比=27:12:6);(3)T2,减氮15%(N:P₂O₅:K₂O含量质量比=22.95:12:6),磷钾保持一致,施用生物炭4.5 t/hm²; (4)T3,减氮30%(N:P₂O₅:K₂O含量质量比=18.9:12:6),磷钾保持一致,施用生物炭4.5 t/hm²; (5)T4,减氮45%(N:P₂O₅:K₂O含量质量比=14.85:12:6),磷钾保持一致,施用生物炭4.5 t/hm²; (6)T5,减氮100%(N:P₂O₅:K₂O含量质量比=0:12:6),磷钾保持一致,施用生物炭含量4.5 t/hm²。每个处理重复3次,共18个小区,小区面积8.0 m×10.0 m=80.0 m²,宽窄行0.5 m×0.6 m,株距0.15 m。

磷肥钾肥及生物质炭全部基施,氮肥基施70%,剩下30%在玉米拔节期、大喇叭口期分2次

追施。所有处理灌溉及病虫害防治等栽培管理措施一致。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤理化性质测定 玉米收获后,在各处理小区分别以S型多点混合法分别采集土壤深度为0~20 cm的土样,取样并作标记,在实验室自然风干、研磨、过0.15 mm和1.00 mm筛、装袋并标记备用。pH值用(水土质量比5 mL:1 g)PHS-25型精密酸度计测定;全盐含量采用电导率仪测定;有机质含量采用重铬酸钾-硫酸亚铁滴定法测定;碱解氮含量用碱解扩散法测定;有效磷含量用钼锑抗比色法测定;速效钾含量用火焰光度法测定;土壤水稳性团聚体含量采用湿筛法测定^[9]。

1.4.2 作物相关指标测定 (1)根系特性:玉米收获期,各处理选取长势一致、有代表性的植株3株,采用完全采样法采集完整根系样本,冲洗干净后,用WinRHIZO型根系图像分析系统计算根系长度、直径、面积、体积、根尖记数等指标。随后,在105℃杀青30 min,于70℃烘干至恒质量,分析天平称量,测得根干质量。

(2)生理指标:在玉米关键生育期,对不同处理玉米固定位置叶片,采用SPAD-502叶绿素仪器测定叶片叶绿素相对含量(SPAD值);采用LI-6400型便携式光合作用测量系统测定光合特征指标。

(3)产量:于玉米成熟期,对作物产量构成指标进行采样检测。

实际产量(kg/hm²) = 鲜果穗质量 × 出籽率 × (1 - 含水率) ÷ (1 - 14%) ÷ 面积 × 10 000 m²。

1.4.3 土壤微生物区系特征及土壤酶活性测定 玉米收获后,在各处理小区分别以S形多点混合法采集土壤0~20 cm层土样。

(1)土壤三大类群微生物数量。细菌、放线菌、真菌三大类群均采用稀释平板法分离计数,结果以每克干土所含菌落数(CFU/g)表示,细菌含量测定采用牛肉膏蛋白胨培养基;放线菌含量测定采用高氏1号培养基,临用前每300 mL培养基加入灭菌的3%重铬酸钾溶液1 mL,真菌含量测定采用马丁氏孟加拉红培养基,接种后细菌于37℃培养3~5 d,放线菌于28℃培养5~7 d,真菌于28℃培养3~5 d,计数后计算每克干土中的微生物数量。

(2)土壤酶活性。土壤酶活性的测定根据关松荫的方法,土壤蔗糖酶活性、脲酶活性、碱性磷酸酶活性、过氧化氢酶活性分别采用3,5-二硝基水杨

酸比色法、靛酚蓝比色法、磷酸苯二钠比色法、高锰酸钾滴定法测定^[10]。

1.5 计算公式

氮肥利用率 = (施氮区吸氮量 - 不施氮区吸氮量) / 施氮量 × 100% ;

氮肥农学效率 = (施氮区作物产量 - 不施氮区作物产量) / 施氮量 × 100% ;

肥料偏生产力(kg/kg) = 施肥区产量 / 施氮量。

1.6 数据分析

试验数据以 Excel 2010 软件整理,采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析,用最小显著性差异法(LSD)进行显著性检验($\alpha=0.05, n=5$)。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥减施比例对玉米根系构型的影响

如表 1 所示,减氮处理在等量生物炭投入条件下玉米根系的各项指标均随着减氮比例的增加呈

现出逐渐降低的趋势(CK、T1 除外)。根鲜质量在减氮 15% 处理(T2)下比常规施肥处理(T1)显著增加 22.8% ;减氮 30% 处理(T3)与常规施肥无显著性差异,T4、T5 处理均显著低于常规施肥处理。根尖数在减氮 15%、减氮 30% 时与常规施肥没有显著差异。分枝数在减氮 15% 时比常规施肥显著增加了 12.0% ,减氮 30% 处理与常规施肥没有显著差异。玉米的总根长、根表面积、总根体积在减氮 15% 时较常规施肥处理均显著增加,分别增加了 13.5%、17.6% 和 22.9% ;而减氮量为 30% 时与常规施肥均无显著性差异。各减氮处理玉米平均根系直径均与常规施肥无显著性差异。综上所述,与常规施肥相比,等量生物质炭投入条件下,减氮 15% 对玉米根系生长发育具有一定的促进作用;随着减氮比例的增加,玉米根系各项指标表现出明显降低的趋势,说明氮素供应对于玉米根系生长发育具有决定性作用。

表 1 不同处理玉米根系构型比较

处理	根鲜质量(g)	根尖数(个)	分枝数(个)	总根长(cm)	总根表面积(cm ²)	平均根系直径(mm)	总根体积(cm ³)
CK	103.1 ± 2.0e	7 064 ± 140d	9 971 ± 480d	2 023 ± 125e	706 ± 28d	1.17 ± 0.01a	18.75 ± 0.36e
T1	183.0 ± 4.9b	14 334 ± 264a	19 411 ± 237b	3 633 ± 65b	1 229 ± 16b	1.09 ± 0.02bc	33.27 ± 0.89b
T2	224.8 ± 9.4a	14 495 ± 267a	21 741 ± 936a	4 125 ± 44a	1 445 ± 21a	1.12 ± 0.03ab	40.88 ± 1.70a
T3	183.7 ± 2.1b	13 874 ± 357a	18 461 ± 598b	3 460 ± 39b	1 166 ± 21b	1.08 ± 0.03bc	33.41 ± 0.38b
T4	141.2 ± 4.1c	11 833 ± 464b	15 183 ± 258c	3 038 ± 54c	957 ± 14c	1.04 ± 0.02c	25.69 ± 0.75c
T5	126.9 ± 2.1d	10 825 ± 99c	13 936 ± 279c	2 587 ± 54d	750 ± 21d	1.03 ± 0.01bc	23.08 ± 0.37d

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下表同。

2.2 不同氮肥减施比例对玉米光合特性的影响

如表 2 所示,减氮处理在等量生物炭投入条件下,拔节期玉米的净光合速率和叶绿素 SPAD 值随着减氮比例的增加而减小,各处理间蒸腾速率均无显著差异。减氮 15% 时,净光合速率和 SPAD 值较常规施肥分别增加 4.0% 和 4.4% ,减氮 30% 处理与常规施肥的 SPAD 值无显著差异;各减氮处理水分利用效率均低于常规施肥。玉米灌浆期减氮处理叶片净光合速率和 SPAD 值随着减氮比例的增加而减小,蒸腾速率各处理间无显著差异;减氮 15% 时,净光合速率和 SPAD 值较常规施肥分别增加了 8.3% 和 8.8% ;而减氮 30% 处理与常规施肥相比净光合速率和 SPAD 值无显著性差异;T2、T3 处理水分利用效率与常规施肥无显著性差异。说明在等量生物质炭投入条件下,与常规施肥相比,减施 15% 的氮肥能促进玉米的光合作用,进而提高玉米

光合产物累积,而氮素供应水平对于玉米叶片光合作用具有决定性作用。

2.3 不同氮肥减施比例对玉米农艺性状的影响

如表 3 所示,在等量生物质炭投入条件下,玉米的穗质量、穗长、穗粗、穗粒质量均随着减氮比例的升高而降低,秃尖长度随着减氮比例的升高呈波动增加趋势。与常规施肥相比,减氮 15% 时穗质量、穗长和穗粒质量分别显著增加了 12.8%、10.6% 和 13.7% ,穗粗未达到显著差异;当减氮量达到 30% 时,与常规施肥相比,穗质量和穗粒质量分别显著下降了 5.4% 和 5.6% ,穗粗和穗长无显著性差异。T4、T5 处理各项指标(除秃尖长度)均显著低于常规施肥和 T2、T3 处理。

由表 4 可知,减氮处理的玉米产量随着减氮比例的增加而减小。与常规施肥相比,减氮 15% 时玉米产量升高 13.7% ,T3、T4、T5 处理产量均低于常

表 2 不同处理玉米光合特性比较

生育时期	处理	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 [$\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	水分利用效率 (%)	SPAD 值
拔节期	CK	30.36 ± 0.06d	6.40 ± 0.20a	5.88 ± 0.23ab	54.22 ± 0.16d
	T1	37.26 ± 0.41b	6.36 ± 0.25a	6.04 ± 0.16a	58.88 ± 0.27b
	T2	38.75 ± 0.34a	6.43 ± 0.23a	5.48 ± 0.05ab	61.47 ± 0.26a
	T3	35.79 ± 0.50c	6.53 ± 0.11a	5.34 ± 0.11bc	58.62 ± 0.26b
	T4	34.22 ± 0.05c	6.41 ± 0.14a	4.87 ± 0.29cd	56.79 ± 0.25c
灌浆期	T5	33.24 ± 0.54c	6.86 ± 0.32a	4.75 ± 0.14d	54.90 ± 0.15d
	CK	21.73 ± 0.34e	4.78 ± 0.25a	5.26 ± 0.22bc	33.80 ± 0.06e
	T1	30.80 ± 0.43b	5.90 ± 0.33a	5.91 ± 0.25ab	46.68 ± 0.52b
	T2	33.36 ± 0.27a	5.68 ± 0.24a	6.40 ± 0.25a	50.77 ± 0.23a
	T3	30.60 ± 0.56b	4.80 ± 0.25a	5.08 ± 0.43bc	46.73 ± 0.51b
T4	27.84 ± 0.29c	5.64 ± 0.50a	4.46 ± 0.12c	40.53 ± 0.08c	
T5	25.80 ± 0.30d	5.79 ± 0.12a	4.57 ± 0.23c	36.82 ± 0.99d	

表 3 不同处理玉米农艺性状比较

处理	穗质量 (g)	穗长 (cm)	穗粗 (cm)	秃尖长度 (cm)	穗粒质量 (g)
CK	140.76 ± 1.33f	13.64 ± 0.24d	4.63 ± 0.12c	1.70 ± 0.28a	124.89 ± 1.47f
T1	252.20 ± 2.45b	17.93 ± 0.28b	5.23 ± 0.06ab	0.30 ± 0.10d	223.68 ± 2.21b
T2	284.47 ± 1.38a	19.83 ± 0.33a	5.32 ± 0.02a	0.26 ± 0.10d	254.33 ± 1.15a
T3	238.59 ± 2.19c	18.50 ± 0.77b	5.13 ± 0.03b	0.40 ± 0.18cd	211.21 ± 2.91c
T4	210.58 ± 1.96d	16.30 ± 0.33c	4.76 ± 0.04c	0.84 ± 0.13bc	184.28 ± 5.95d
T5	162.38 ± 1.70e	15.43 ± 0.18c	4.67 ± 0.06c	1.33 ± 0.26ab	143.19 ± 1.77e

表 4 不同处理玉米经济效益分析

处理	产量 (kg/hm^2)	单价 (元/kg)	成本 (元/ hm^2)	产值 (元/ hm^2)	经济效益 (元/ hm^2)	产投比
CK	7 489.8	1.9	7 766	14 231	6 465	1.83
T1	13 413.9	1.9	10 779	25 486	14 706	2.36
T2	15 252.2	1.9	18 006	28 979	10 973	1.61
T3	12 666.1	1.9	17 751	24 066	6 315	1.36
T4	11 051.1	1.9	17 487	20 997	3 509	1.2
T5	8 587.3	1.9	17 493	16 796	-697	0.96

注:生产资料投入包括种子(944.5 元/ hm^2)、水费(1 049.5 元/ hm^2)、除草防虫(674.7 元/ hm^2)、犁地(599.7 元/ hm^2)等。产值(元/ hm^2) = 产量(kg/hm^2) × 单价(元/kg);经济效益(元/ hm^2) = 产值(元/ hm^2) - 成本(元/ hm^2);产投比 = 产值/成本。

规施肥。外源生物质炭投入条件下,农业成本投入加大,减氮处理的成本均高于常规施肥水平;随着减氮比例增加,产值逐渐降低,其中 T2 减氮 15% 处理产值高于常规施肥,增加了 13.7%;减氮处理的经济效益与产投比随减氮比例的增加逐渐降低,均低于常规施肥。

2.4 不同氮肥减施比例对土壤质量的影响

2.4.1 不同氮肥减施比例对土壤水稳性团聚体的影响 如表 5 所示,0~20 cm 土层,在等量生物质炭投

入条件下,土壤水稳性大团聚体(>0.250 mm)的数量随着减氮比例的增加而减小且均高于常规施肥,T2、T3、T4 处理较常规施肥分别显著增大 166.87%、143.70%、82.31%。各处理间微团聚体(0.250 mm~0.053 mm)含量差异均不显著,土壤黏粒(<0.053 mm)含量随着减氮比例的增加而增大且均低于常规施肥,与常规施肥相比 T2、T3、T4、T5 处理分别显著降低 52.30%、49.79%、31.16% 和 21.97%。

表 5 不同处理对土壤水稳性团聚体的影响

处理	各级团聚体含量(%)		
	>0.250 mm	0.250~0.053 mm	<0.053 mm
CK	37.3 ± 3.98ab	26.73 ± 3.17a	35.97 ± 7.15bc
T1	20.07 ± 1.17c	27.23 ± 2.21a	52.70 ± 1.04a
T2	53.56 ± 3.64a	21.29 ± 4.87a	25.15 ± 1.23c
T3	48.91 ± 6.73ab	24.63 ± 4.59a	26.46 ± 2.14c
T4	36.59 ± 2.93b	27.13 ± 3.05a	36.28 ± 0.12bc
T5	34.40 ± 6.32bc	24.48 ± 5.34a	41.12 ± 0.98b

2.4.2 不同氮肥减施比例对土壤化学性质的影响

由表 6 可知,0~20 cm 土层不同处理土壤 pH 值和全盐含量(除 T5)无显著差异。各减氮处理的有机质、有效磷、速效钾含量均显著高于常规施肥,但处理间无显著差异。各减氮处理的碱解氮含量随着减氮比例的升高而降低,T2 处理的碱解氮含量与

常规施肥相比显著升高 13.88%,T3、T4、T5 处理碱解氮含量均低于常规施肥处理;说明在等量生物质炭投入条件下,减氮 15% 能够提高土壤有机质、有效磷、速效钾以及碱解氮的含量,土壤养分保蓄能力最佳。

表 6 不同处理对土壤化学性质的影响

处理	pH 值	全盐含量 (g/kg)	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
CK	8.21 ± 0.01b	0.46 ± 0.01b	7.73 ± 0.12c	10.40 ± 1.40e	7.80 ± 0.11c	115 ± 2c
T1	8.34 ± 0.02a	0.61 ± 0.02a	8.48 ± 0.21b	28.10 ± 1.50b	25.80 ± 0.22b	157 ± 3b
T2	8.32 ± 0.02a	0.61 ± 0.03a	9.72 ± 0.16a	32.00 ± 0.70a	27.30 ± 0.08a	169 ± 2a
T3	8.33 ± 0.03a	0.59 ± 0.02a	9.76 ± 0.31a	25.00 ± 1.70b	28.20 ± 0.34a	165 ± 1a
T4	8.32 ± 0.05a	0.58 ± 0.03a	9.60 ± 0.12a	19.60 ± 0.80c	28.00 ± 0.17a	169 ± 1a
T5	8.31 ± 0.04a	0.47 ± 0.02b	9.90 ± 0.13a	14.10 ± 1.90d	28.70 ± 0.06a	163 ± 3a

2.4.3 不同氮肥减施比例对土壤微生物区系特征的影响

如表 7 所示,在等量生物质炭投入条件下,同比常规施肥,减氮处理土壤耕作层微生物总数和细菌数随减氮比例的增加逐渐降低。不同处理以减氮 15% 处理微生物总数和细菌数量最多;土壤真菌数量随减氮量的增加先减小后增大。减氮 15% 相比其他处理显著增加了土壤放线菌数量,表明适宜的碳氮比投入条件下,有利于土壤微生物的生长,而过量的氮素减量,不但导致碳氮比失衡而且无法提供充足的氮源,土壤微生物数量显著下降。

2.4.4 不同氮肥减施比例对土壤酶活性的影响

如表 8 所示,在等量生物质炭投入条件下,0~20 cm 土层中土壤磷酸酶和脲酶含量随着氮肥减施比例的增加而整体降低,减氮量为 15% 时与常规施肥相比,磷酸酶和脲酶含量分别显著增加了 35.9% 和 6.3%;不同减氮处理间的过氧化氢酶含量差异不显著,但均显著高于常规施肥;蔗糖酶含量随着减氮比例的增加而呈显著先增加后降低的趋势,当减氮比例达到 45% 时蔗糖酶出现峰值,同比常规施肥增

表 7 土层不同处理土壤微生物区系特征比较

处理	真菌数 ($\times 10^4$ CFU/g)	细菌数 ($\times 10^6$ CFU/g)	放线菌数 ($\times 10^3$ CFU/g)	总菌数 ($\times 10^6$ CFU/g)
CK	2.70 ± 0.20a	2.05 ± 0.05c	1.2 ± 0.3b	2.08 ± 0.05c
T1	1.90 ± 0.10bc	10.87 ± 0.32a	1.5 ± 0.7b	10.89 ± 0.32a
T2	1.85 ± 0.35bc	11.25 ± 1.25a	12.5 ± 1.5a	11.27 ± 1.25a
T3	1.55 ± 0.15c	6.55 ± 0.25b	0.9 ± 0.2b	6.57 ± 0.25b
T4	2.23 ± 0.30b	5.20 ± 1.90bc	1.2 ± 0.1b	5.22 ± 1.90bc
T5	2.13 ± 0.32b	3.20 ± 0.70c	1.2 ± 0.1b	3.22 ± 0.70c

加了 23.8%。表明适宜的碳氮比投入条件下,可以增加土壤酶活性,而过量的氮素减量,影响了土壤微生物的活性,导致土壤酶活性降低。

2.4.5 不同氮肥减施比例对氮肥利用率及农学效率的影响

如表 9 所示,与常规施肥相比,T2 和 T3 处理的氮肥利用效率显著增加了 63.95% 和 37.40%,T4 处理与常规施肥相比差异不显著,T2、T3 和 T4 处理间差异显著;T2、T3、T4 的氮肥农学效率与常规施肥相比分别显著增加了 7.93、3.63、

表 8 土层不同处理土壤酶活性比较

处理	磷酸酶含量 (g/kg)	过氧化氢酶含量 (mg/g)	蔗糖酶含量 (mg/g)	脲酶含量 (mg/g)
CK	0.97 ± 0.02f	9.28 ± 0.02ab	8.48 ± 0.01e	0.90 ± 0.08d
T1	1.56 ± 0.02d	9.12 ± 0.01b	12.25 ± 0.01c	1.27 ± 0.14b
T2	2.12 ± 0.02a	9.32 ± 0.02a	11.35 ± 0.01d	1.35 ± 0.24a
T3	1.79 ± 0.02b	9.33 ± 0.01a	13.96 ± 0.01b	1.03 ± 0.14c
T4	1.74 ± 0.02c	9.30 ± 0.01a	15.16 ± 0.02a	1.08 ± 0.10c
T5	1.35 ± 0.02e	9.34 ± 0.01a	6.64 ± 0.01f	0.94 ± 0.09d

表 9 不同处理氮肥利用率及农学效率比较

处理	100 kg 经济 产量养分 吸收量 (kg)	地上部分 养分吸收 总量 (kg/hm ²)	氮肥 利用率 (%)	氮肥农学 效率 (kg/kg)	氮肥偏 生产力 (kg/kg)
CK	0.92 ± 0.00e	96.16e	—	—	—
T1	1.05 ± 0.00c	213.78b	29.04c	14.64d	33.14c
T2	1.18 ± 0.00a	260.05a	47.61a	22.57a	44.33b
T3	1.14 ± 0.00b	209.27b	39.90b	18.27b	44.69b
T4	1.04 ± 0.01c	157.91c	27.72c	16.03c	49.65a
T5	0.97 ± 0.01d	114.13d	—	—	—

1.39 kg/kg, 且 T2、T3、T4 处理间差异显著; T2、T3、T4 的氮肥偏生产力与常规施肥相比, 分别显著增加了 11.19、11.55、16.51 kg/kg, 但 T2 和 T3 间差异不显著。综上所述, 不同施肥方式对氮肥利用效率均有提升, 其中减氮 15% 对氮肥利用效率提升最大。

3 讨论

在土壤质量方面, 生物炭作为一种良好的土壤调理剂, 可以改善土壤的理化性质, 提高土壤肥力, 提升作物产量^[11-13]。本试验发现, 施用适量的生物炭且当减氮比例为 15% 时可以实现玉米的减氮增产。已有研究表明, 生物炭可以提高植物根系和土壤微生物活性, 而根系和土壤微生物活性增强与大团聚体的形成有密切的关系, 施用生物炭可以增加土壤的水稳性大团聚体, 改善土壤的水稳性结构^[14]。本试验中在施用等量生物炭的情况下, 不同减氮比例对土壤水稳性团聚体的影响也不同, 减氮 15% 可以为植物的根系提供充足的养分, 促进植物根系生长, 土壤大团聚体显著增加, 对土壤水稳性结构的改善最为明显。前人研究表明, 土壤的微生物与土壤的酶活性存在显著相关关系^[15], 同时也反映了土壤的肥力水平^[16], 在本试验中减氮 15% 处理的磷酸酶和脲酶活性显著高于其他处理, 这与土

壤的养分含量以及土壤的微生物活性具有相同的变化规律, 也与前人的研究结果一致。Chintala 等发现在碱性土壤中生物炭对土壤的 pH 值无显著影响^[17]。Chen 等通过沙培试验证实了生物炭对 NH₃/NH₄⁺ 有较强的吸附作用, 可以减小土壤气态氨氮损失^[18]。Gaskin 等研究表明施加生物炭能够提高土壤中有效磷的含量^[19]。本试验中在减氮 15% 施用生物炭的情况下, 土壤 0~20、20~40 cm 土层的 pH 值、全盐含量与常规施肥无显著性差异, 而有机质、碱解氮、速效钾、速效磷含量均显著高于常规施肥, 这与前人的研究结果^[17-19]一致。当减氮比例升高时, 土壤中虽然有机质、速效钾、速效磷含量不会发生显著变化, 但碱解氮含量随着减氮比例增加而减小。可能是由于氮素养分过少破坏了土壤 C/N 的平衡, C/N 的增高致使土壤中铵态氮或硝态氮被转化成微生物量氮等形式固定下来^[20], 导致植株的氮素利用率下降^[21]。

在作物生长方面, 改善土壤质量, 增加土壤肥力是促进作物生长, 提高作物产量的关键因素。已有研究表明, 施用适量的生物炭对农作物的生长有一定的促进作用^[22-24], 在氮、磷含量各减量 20% 的基础上同时增施腐殖酸 (900 kg/hm²)、生物炭 (2 250 kg/hm²) 能显著提高双季稻的株高、实粒数、结实率、产量^[25]。本试验结果表明, 施用生物炭的情况下化肥减氮 15% 与常规施肥相比, 可以促进玉米和玉米根系的生长发育, 增加玉米的叶绿素含量, 提高玉米的光合速率以及增加玉米的产量, 当减氮比例达到 15% 时, 拔节期玉米净光合速率和叶绿素 SPAD 值分别增加了 4.0% 和 4.4%, 成熟期玉米净光合速率和叶绿素 SPAD 值分别增加了 8.3% 和 8.8%; 根鲜质量在减氮 15% 时, 较常规施肥显著增加了 22.8%, 玉米的总根长、总根表面积及根体积在减氮 15% 时较常规施肥均显著增加, 分别增加了 13.5%、17.6% 和 22.9%, 这与前人研究结果^[22-25]一致。当减氮比例增加时, 虽然生物炭可以减小土壤的氮损失, 但由于氮总量的减少, 影响了玉米的生长和产量。且由于生物炭本身加工成本过高, 增加了种植玉米的成本, 导致施用生物炭的处理在经济效益方面均低于常规施肥。本次试验只分析了 1 年采用炭基减氮施肥模式的效果, 而对于这种施肥模式对土壤和作物的长期影响有待进一步研究, 以秸秆作为原料的生物炭不仅可以实现作物的增产, 而且生物炭可以减少氮的流失, 更有

利于解决由于过量施肥而引发的一系列环境问题。

4 结论

同比常规施肥,等量生物质炭投入条件下,随着减氮比例的增加,玉米根系构型、叶绿素 SPAD 值和净光合速率表现出显著降低的趋势,减氮 15% 对玉米根系及植株生长发育、叶片光合作用具有显著的促进作用,较常规施肥玉米的总根长、总根表面积和总根体积分别增加了 13.5%、17.6%、22.9%;随着减氮比例的增加,玉米产量显著降低;同比常规施肥,减氮 15% 通过提高玉米穗粒质量和百粒质量实现显著提高玉米产量 15%,各减氮处理经济效益均低于常规施肥。

同比常规施肥,在等量生物质炭投入条件下,减氮 15%、30%、45% 都具有显著提高 0~20 cm 土层土壤水稳性大团聚体的作用,增幅分别为 166.87%、143.70%、82.31%;随着减氮比例的增加,土壤水稳性大团聚体和土壤黏粒表现出逐渐降低的趋势,但处理间差异不显著;不同减氮比例能够提高土壤有机质、有效磷、速效钾以及碱解氮含量,其中减氮 15% 处理土壤养分保蓄能力最佳,碱解氮含量提高 13.88%;适宜的碳氮比投入有利于提高土壤微生物数量和酶活性,减氮 15% 时同比常规施肥磷酸酶和脲酶含量分别显著增加了 35.9% 和 6.3%,放线菌数增加了 7.3 倍,而过量的氮素减量,导致碳氮比失衡,土壤微生物数量显著下降;减氮 15% 显著提高了氮肥利用效率 63.95%,氮肥农学效率显著提高 7.93 kg/kg。

综合分析,同比常规施肥,在生物质炭投入 4.5 t/hm² 条件下,减氮 15% 视为最佳的炭基无机配施方案。

参考文献:

- [1] 杨青林,桑利民,孙吉茹,等. 我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J]. 山西农业科学,2011,39(7):690-692.
- [2] 张文新,张成军,赵同科,等. 缓释氮肥减少菜田土壤硝酸盐淋溶研究[J]. 华北农学报,2010,25(5):166-170.
- [3] 陶思源. 关于我国农业废弃物资源化问题的思考[J]. 理论界,2013(5):28-30.
- [4] 季雅岚,索龙,解钰,等. 3种豆科植物生物质炭对海南砖红壤性质 N₂O 排放的影响[J]. 南方农业学报,2017,48(8):1381-1387.
- [5] 王琪,张永波,贾亚敏,等. 有机肥和生物质炭对重金属污染农田土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学,2020,48(1):263-267.
- [6] 吕贝贝,张丽萍,张贵云,等. 生物质炭配施化肥对土壤肥力及玉米生长的影响[J]. 山西农业科学,2020,48(1):81-86.
- [7] 李伟,代镇,张光鑫,等. 生物炭和氮肥配施提高土团聚体稳定性及作物产量[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(5):782-791.
- [8] 廖芬,桂杰,杨柳,等. 施用生物炭对甘蔗土壤化学性质及氮损失的影响[J]. 广西糖业,2019(3):36-42.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2007:14-215.
- [10] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986:25-51.
- [11] 程效义,孟军,黄玉威,等. 生物炭对玉米根系生长和氮素吸收及产量的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2016,47(2):218-223.
- [12] 殷大伟,金梁,郭晓红,等. 生物炭基肥替代化肥对沙壤土养分含量及青贮玉米产量的影响[J]. 东北农业科学,2019(4):19-24.
- [13] 臧清波,马玺,张静峰,等. 生物质炭基肥对玉米和水稻产量性状的影响[J]. 北方农业学报,2019,47(4):61-65.
- [14] 李秋霞. 生物质炭与氮肥配施对旱地红壤团聚体组成及微生物碳氮与作物产量的影响研究[D]. 南京:南京农业大学,2015.
- [15] 李东坡,武志杰,陈利军. 有机农业施肥方式对土壤微生物活性的影响研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(2):99-101.
- [16] 陈恩凤. 土壤酶与土壤肥力研究[M]. 北京:科学出版社,1979:54-61.
- [17] Chintala R, Schumacher T E, McDonald L M, et al. Phosphorus sorption and availability from biochars and soil/biochar mixtures[J]. Clean - Soil, Air, Water, 2013, 41(5):626-634.
- [18] Chen C R, Phillips I R, Condon L M, et al. Impacts of greenwaste biochar on ammonia volatilisation from bauxite processing residue sand[J]. Plant and Soil, 2012, 367(1/2):301-312.
- [19] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, et al. Effect of lowtemperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use[J]. Transactions of the Asabe, 2008, 51(6):2061-2069.
- [20] Wu A L, Wang J S, Dong E W, et al. Effect of application of biochar and straw on fate of fertilizer N in cinnamon soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1):176-185.
- [21] Zhou Z D, Gao T, Zhu Q, et al. Increases in bacterial community network complexity induced by biochar - based fertilizer amendments to karst calcareous soil[J]. Geoderma, 2019, 337:691-700.
- [22] 姜雪,王丽学,戴皖宁,等. 炭基肥与调亏灌溉对大豆生长及水分利用效率的影响[J]. 大豆科学,2020,39(2):1-10.
- [23] 于南卓. 生物炭及炭基肥料对小白菜、油菜及玉米的生长和土壤养分的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2018:20-24.
- [24] 张晟,张徐洁,赵远,等. 不同温度制备的水稻秸秆生物炭对稻田土壤固碳减排及微生物群落结构的影响[J]. 江苏农业学报,2019,35(5):1102-1111.
- [25] 黄家怡,荣湘民,侯坤,等. 氮、磷减量配施生物炭和腐殖酸对双季稻产量和氮、磷流失的影响[J]. 河南农业科学,2020,49(8):31-44.