

崔文芳,高聚林,王志刚,等. 生物炭与氮肥减量调控对氮高效玉米田土壤养分的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(5):233-240.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.05.031

# 生物炭与氮肥减量调控对氮高效玉米田土壤养分的影响

崔文芳,高聚林,王志刚,于晓芳,胡树平,苏治军,刘 剑,王富贵

(内蒙古农业大学,内蒙古呼和浩特 010019)

**摘要:**为研究生物炭与氮肥减量对氮高效玉米田土壤养分的作用效果,采用裂区试验设计,以氮肥减量施用为主区,品种为副区,主处理为 C1(CK,纯 N 300 kg/hm<sup>2</sup>)、C2(生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> + 纯 N 300 kg/hm<sup>2</sup>)、C3(生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> + 纯 N 255 kg/hm<sup>2</sup>)、C4(生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> + 纯 N 210 kg/hm<sup>2</sup>)、C5(生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> + 纯 N 165 kg/hm<sup>2</sup>),副处理为氮高效品种郑单 958(ZD)和氮低效品种农华 101(NH)。结果表明,生物炭结合氮肥减量有利于降低土壤 pH 值,提高全量养分及速效养分积累量,各养分含量在土层间存在差异,且氮高效玉米田土壤有机质和速效钾含量显著高于氮低效玉米土壤。其中,C3 处理有机质含量较 CK 显著提高 3.57%,C2、C4、C5 全氮含量提高 4.42%、4.42%、8.85%,C2、C3 全磷含量提高 7.25%、10.14%,C3 全钾含量提高 4.49%,C2、C3、C5 速效氮含量提高 16.08%、7.22%、26.18%,速效磷含量仅 C4 提高 67.32%,速效钾含量 C4、C5 提高 8.57%、11.36%,以上均达到显著水平。生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 与纯 N 210、255 kg/hm<sup>2</sup> 配施土壤质量指数较高,对土壤养分提升效果较显著,是高产氮高效玉米栽培中减氮增效的推荐措施。

**关键词:**玉米;生物炭;氮肥减量;土壤养分;产量;减氮增效;土壤质量指数

**中图分类号:**S513.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)05-0233-08

目前农业生产中因连年种植过量施用化肥,导致土壤养分失衡、面源污染、肥料利用率低等问题,不利于农田土壤的可持续利用。因此,采取化肥减量措施缓解过量施肥造成的土壤质量退化是农业生产中急需解决的问题。生物炭是农业秸秆经过热裂解的产物,富含有机碳,具有良好的孔隙结构且吸附能力强,对氮、磷等土壤养分具有一定持留作用,可有效改善土壤结构及土壤肥效,改善土壤持水保墒及保肥能力<sup>[1]</sup>,有效提高产量。因此,充分发挥生物炭对土壤结构、养分的有效性、作物产量提升的良好作用<sup>[2]</sup>,有利于提高作物肥料利用效率,提升土壤肥力水平,对于持续推进农业高质量发展具有积极意义。

国内外诸多学者对生物炭的应用已有广泛研究。碳素含量高,结构孔隙丰富,比表面积大,是实现还田改土、碳封存、提高作物产量的重要基

础<sup>[3-4]</sup>,能有效提高土壤保水保肥能力。韩翠莲等研究表明,施用生物炭可有效增加土壤有机碳含量,降低土壤水溶性有机炭含量,改变土壤有机质的组成,形成稳定的有机碳,利于土壤有机质的积累和形成<sup>[5-6]</sup>。周志红等认为,生物炭能有效减少氮素淋失,生物炭分别施 50、100 t/hm<sup>2</sup> 可减少氮素淋失分别达 41% 和 78%,从而提高土壤肥力<sup>[7-8]</sup>。

生物炭对土壤养分和作物产量的影响已成为国内外研究的热点。刘遵奇等研究认为,生物炭与化肥配施可显著提高肥料利用效率,实现肥料减量施用<sup>[9]</sup>。朱浩宇等对三峡库区紫色土旱坡地的油菜田和玉米田土壤研究认为,化肥减量配施生物炭有利于改善土壤养分、提高化肥利用率,达到减少氮肥、磷肥施用量和提高作物产量的效果<sup>[10]</sup>。生物炭与化肥配施效果优于单施化肥、常规施肥,其“减量增效”作用,可能因炭、肥互作优化了土壤容重和土壤环境的水、气、热及微生物条件,尤其是改善了土壤总体供肥能力<sup>[11]</sup>。刘敏等研究认为,与常规施肥相比,在生物质炭投入 4.5 t/hm<sup>2</sup> 条件下,减氮 15% (施用纯氮 344.25 kg/hm<sup>2</sup>) 为最佳配施方案<sup>[12]</sup>。目前对于施用生物炭后对土壤质量及作物产量提升适宜的减氮比例缺乏足够的实践验证。内蒙古平原灌区普遍存在耕层浅、犁底层结构紧

收稿日期:2022-04-17

基金项目:国家自然科学基金(编号:32160506);内蒙古自然科学基金(编号:2018MS03011)。

作者简介:崔文芳(1977—),女,内蒙古呼伦贝尔人,博士,教授,主要从事玉米高产氮高效研究。E-mail: cui.wenfang@163.com。

通信作者:高聚林,教授,主要从事玉米生理生态及决策研究。  
E-mail: nmgaojulin@163.com。

实、通透性差等耕层障碍,导致土壤保水保肥能力差、养分有效性低、玉米根系发育受阻和早衰等问题,是影响玉米群体氮效率提升的重大问题。基于沈阳农业大学陈温福院士提出的“以生物炭为核心”的农林废弃物综合利用理论与技术体系,本研究开展在施用生物炭基础上实施氮肥减量调控措施,研究其对玉米田土壤养分的影响,以期今后发展资源高效型农业生产提供理论依据和参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验于 2020 年在内蒙古农业大学敕勒川农业博览园(土默特右旗萨拉齐镇北只图村)进行。试验地前茬是玉米,土质是壤土,土壤有机质含量为 22.18 g/kg,碱解氮含量为 41.56 mg/kg,速效磷含量为 8.34 mg/kg,速效钾含量为 75.68 mg/kg。玉米秸秆生物炭由辽宁金和福农业科技股份有限公司提供,热解温度为 500~600℃,其性质为:全碳含量为 42.5%,全氮含量为 8.9 g/kg,全磷含量为 3.8 g/kg,全钾含量为 32.3 g/kg,速效磷含量为 120 mg/kg,速效钾含量为 289 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验采用裂区试验设计,氮肥是主区,品种是副区。主处理为 C1(CK,纯 N 300 kg/hm<sup>2</sup>)、C2(生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> + 纯 N 300 kg/hm<sup>2</sup>)、C3(生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> + 纯 N 255 kg/hm<sup>2</sup>)、C4(生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> + 纯 N 210 kg/hm<sup>2</sup>)、C5(生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> + 纯 N 165 kg/hm<sup>2</sup>),副处理为氮高效品种郑单 958(ZD)和氮低效品种农华 101(NH)。共 10 个处理,重复 3 次。试验小区长 6 m、宽 4 m,南北行向,株距 20 cm、行距 60 cm,9 行种植,种植密度为 8.25 万株/hm<sup>2</sup>。生物炭作为底肥施入,于播种前施用,先将肥料均匀撒于地表,再翻地,将其翻入耕层 15 cm 左右。氮肥尿素在拔节和大口期以 3:7 比例追肥,磷、钾肥作基肥一次性施入,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 为 210 kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O 为 90 kg/hm<sup>2</sup>,N 肥按 3:7 比例分别于拔节、大口期随水追施。试验中氮肥选择尿素,磷肥选择过磷酸钙,钾肥选择硫酸钾。各品种于 2020 年 4 月 25 日播种;5 月 8 日出苗;6 月 21 日追拔节肥、灌第 1 水;7 月 11 日大喇叭口期追肥、灌第 2 水;7 月 21 日开花期灌第 3 水;8 月 10 日灌第 4 水;灌水总量为 750 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>,9 月 25 日收获。

### 1.3 测试指标及方法

于玉米收获期采集 0~20、20~40 cm 土壤样

品,用于理化性质指标的测定。土壤有机质含量的测定采用重铬酸钾容量法-外加加热法,土壤全氮含量采用全自动凯氏定氮仪测定,全磷含量的测定采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法,全钾含量的测定采用 NaOH 熔融-火焰光度法,速效氮含量的测定采用碱解扩散吸收法,速效磷含量的测定采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提钼锑抗比色法,速效钾含量的测定采用 1 mol/L 醋酸铵浸提、火焰光度计法;pH 值采用水土比 1:5 浸提液 pH 值表示,采用 PHS-3 型 pH 计(上海雷磁科学仪器厂)测定,阳离子交换量(CEC)的测定采用氯化铵-乙酸铵法。

于玉米成熟收获期,每小区选取长势整齐无缺苗的 2 行测定占地面积,实收所有果穗,之后测定实收果穗质量和含水量,并折算为单位面积产量。

### 1.4 土壤质量评价

通过土壤质量指数综合地反映土壤质量的变化情况,采用加权求和模型对生物炭与氮肥减量调控条件下土壤 pH 值、有机质、全量养分、速效养分含量等指标,按公式(1)计算土壤质量指数<sup>[13]</sup>。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times N_i \quad (1)$$

式中: $W_i$  为指标权重; $N_i$  为指标隶属度; $n$  为指标个数。其中,指标权重表示某指标与其他指标之间相关系数的平均值占有所有评价指标相关系数平均值总和的比。隶属度由评价指标所属的隶属度函数确定。隶属度函数一般分为升型和降型,分别用公式(2)和(3)计算。

升型隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \\ \frac{0.9(x-x_1)}{x_2-x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases} \quad (2)$$

降型隶属度函数:

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_2 \\ \frac{0.9(x_2-x)}{x_2-x_1} + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1.0 & x \geq x_1 \end{cases} \quad (3)$$

根据最小数据集中的各指标对土壤质量的正负效应选择函数和确定其隶属度。各指标的最小值和最大值作为函数的转折点  $x_1$  和  $x_2$ 。

### 1.5 数据处理

应用 DPS 7.5 软件对试验数据进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 生物炭结合氮肥减量对土壤性质的影响

表1所示为各处理的土壤性质在氮高效与氮低效品种间的差异性表现,表2所示为生物炭结合氮肥减量后pH值、阳离子交换量、有机质积累量变化。品种间比较(表1)发现,施用生物炭并氮肥减量后土壤pH值变化不显著,品种间的5个处理中C1(CK)pH值显著高于其他处理,C2~C5(7.78、7.89、7.79、7.80)较CK(8.08)分别降低3.71%、

2.35%、3.59%、3.47%。土层间比较发现(表2),氮低效品种NH的0~20cm与20~40cm土层间pH值变化不显著,5个处理中CK(8.12)显著高于其他处理,C2~C5处理(7.64、7.87、7.92、7.84)较CK(8.12)分别降低5.91%、3.08%、2.46%、3.45%;ZD的20~40cm显著高于0~20cm,C2~C5处理(7.89、7.90、7.97、7.81)较CK(8.09)分别降低2.47%、2.35%、1.48%、3.46%。6.5~7.0的土壤pH值更适宜玉米生长,说明生物炭结合氮肥减量有利于降低土壤pH值。

表1 生物炭结合氮肥减量土壤性质的品种间差异性

品种	处理	pH值	阳离子交换量 (cmol/kg)	有机质含量 (g/kg)	全氮含量 (%)	全磷含量 (%)	全钾含量 (%)	速效氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
NH与ZD	C1(CK)	8.08a	6.98b	22.11b	0.113b	0.069b	2.137b	122.18d	10.150b	89.50c
	C2	7.78c	7.00b	22.03b	0.118a	0.074a	2.165b	141.83b	9.317bc	85.17d
	C3	7.89b	7.72a	22.90a	0.112b	0.076a	2.233a	131.00c	8.483c	90.50c
	C4	7.79c	7.58a	21.83b	0.118a	0.064c	2.173b	97.33e	16.983a	97.17b
	C5	7.80c	7.75a	21.63b	0.123a	0.042d	2.092c	154.17a	6.733d	99.67a
品种间差异性	NH	7.86a	7.35a	19.75b	0.118a	0.068a	2.163a	130.67a	12.933a	90.82b
	ZD	7.88a	7.46a	24.45a	0.115a	0.063b	2.157a	127.93a	7.733b	94.02a

表2 生物炭结合氮肥减量对土壤pH值、阳离子交换量和有机质含量的影响

品种	土层 (cm)	处理	pH值			阳离子交换量(cmol/kg)			有机质含量(g/kg)		
			测定值	土层间	处理间	测定值	土层间	处理间	测定值	土层间	处理间
NH	0~20	C1(CK)	8.11a	7.90a	8.12a	6.87de	7.35a	6.82c	18.67c	19.75a	19.97c
		C2	7.71e		7.64d	6.67e		7.32b	22.60a		22.53a
		C3	7.94b		7.87c	7.50bc		7.67b	18.37c		18.37d
		C4	7.70e		7.92b	7.27cd		7.50b	18.40c		17.63e
		C5	7.81d		7.84c	8.47a		8.10a	20.73b		21.53b
	20~40	C1	8.12a	7.86a		6.77de	7.61a		21.27b	20.26a	
		C2	7.57f			7.97ab			22.47a		
		C3	7.79d			7.83bc			18.37c		
		C4	8.14a			7.73bc			16.87d		
		C5	7.88c			7.73bc			22.33a		
ZD	0~20	C1	8.04	7.88b	8.09a	7.10cd	7.46a	7.43bc	25.57b	24.45a	24.07a
		C2	7.84		7.89c	7.33bcd		7.97a	21.47d		20.73d
		C3	7.84		7.90c	7.93ab		7.68ab	27.43a		24.50a
		C4	7.87		7.97b	7.90ab		7.93ab	25.27b		23.47b
		C5	7.80		7.81d	7.03cd		7.00c	22.53c		21.65c
	20~40	C1	8.14	7.98a		7.77bc	7.75a		22.57c	21.31b	
		C2	7.93			8.60a			20.00e		
		C3	7.95			7.43bcd			21.57d		
		C4	8.07			7.97ab			21.67d		
		C5	7.83			6.97d			20.78de		

品种间比较发现(表 1),施用生物炭并氮肥减量后,品种间、0~20 cm 与 20~40 cm 土层间阳离子交换量均未发生显著变化,差异均不显著,NH 的 5 个处理中 C3(7.72 cmol/kg)、C4(7.58 cmol/kg)、C5(7.75 cmol/kg)显著高于 CK(6.98 cmol/kg) 10.60%、8.60%、11.03%。土层间比较发现(表 2),2 个品种的阳离子交换量在土层间差异不显著,NH 的 5 个处理中 C2(7.32 cmol/kg)、C3(7.67 cmol/kg)、C4(7.50 cmol/kg)、C5(8.10 cmol/kg)显著高于 CK(6.82 cmol/kg),分别高 7.33%、12.46%、9.97%、18.77%;ZD 的 C2(7.97 cmol/kg)显著高于 CK(7.43 cmol/kg)7.27%。

施用生物炭并氮肥减量后,有机质积累量在品种间表现差异显著(表 1),氮高效品种 ZD(24.45 g/kg)显著高于氮低效品种 NH(19.75 g/kg),高 23.80%,5 个处理中 C3(22.90 g/kg)有机质含量显著高于 CK(22.11 g/kg),较 CK 提高 3.57%。由表 2 可见,土层间比较发现,NH 的土壤有机质积累量在土层间差异不显著,5 个处理中 C2(22.53 g/kg)、C5(21.53 g/kg)显著高于 CK(19.97 g/kg) 12.82%、7.81%;氮高效品种 ZD 的 0~20 cm 与 20~40 cm 有机质积累量在土层间表现差异显著,0~20 cm(24.45 g/kg)显著高于 20~40 cm(21.31 g/kg)14.73%,同时,C3(24.50 g/kg)处理较 CK(24.07 g/kg)提高 1.78%。

施用生物炭并氮肥减量后,品种间比较发现(表 1),土壤全氮、速效氮含量在品种间未表现显著差异,5 个处理间,C2(0.118%)、C4(0.118%)、C5(0.123%)全氮含量显著高于 CK(0.113%),分别高 4.42%、4.42%、8.85%,速效氮含量 C2(141.83 mg/kg)、C3(131.00 mg/kg)、C5(154.17 mg/kg)显著高于 CK(122.18 mg/kg),分别高 16.08%、7.22%、26.18%。土层间比较发现(表 3),2 个品种的土壤全氮积累量在土层间表现差异显著,NH 的 0~20 cm(0.118%)比 20~40 cm(0.111%)显著高 6.31%,5 个处理中 C2(0.119%)、C4(0.120%)、C5(0.115%)显著高于 CK(0.111%),较 CK 分别提高 7.21%、8.11%、3.60%,ZD 的 0~20 cm(0.115%)显著高于 20~40 cm(0.111%)3.60%,C5(0.124%)处理较 CK(0.109%)显著提高 13.76%;2 个品种土层间速效氮积累量也表现差异显著,NH 的 0~20 cm(130.67 mg/kg)比 20~40 cm(116.80 mg/kg)高

11.88%,5 个处理中 C2(150.50 mg/kg)、C5(152.00 mg/kg)显著高于 CK(116.17 mg/kg),较 CK 分别提高 29.55%、30.84%,ZD 的 20~40 cm(135.40 mg/kg)显著高于 0~20 cm(127.93 mg/kg)5.84%,C2(118.67 mg/kg)、C3(121.83 mg/kg)、C4(162.00 mg/kg)、C5(152.00 mg/kg)处理较 CK(103.83 mg/kg)提高 14.29%、17.33%、56.02%、46.39%。

品种间比较(表 1)发现,施用生物炭并氮肥减量后,土壤全磷、速效磷含量在品种间均发生了显著变化,氮低效品种 NH(0.068%、12.933 mg/kg)显著高于 ZD(0.063%、7.733 mg/kg),分别高 7.94%、67.24%,品种的 5 个处理间,C2(0.074%)、C3(0.076%)全磷含量显著高于 CK(0.069%),分别高 7.25%、10.14%,速效磷含量仅 C4(16.983)显著高于 CK(10.150),高 67.32%。土层间比较发现(表 4),NH 的土层间差异不显著,C2(0.077%)、C3(0.067%)、C4(0.076%)全磷含量显著高于 CK(0.063%)22.22%、6.35%、20.63%,ZD 的 20~40 cm(0.072%)显著高于 0~20 cm(0.063%)显著高 14.29%,5 个处理中仅 C3(0.074%)显著高于 CK(0.070%),较 CK 高 5.71%。2 个品种速效磷积累量在土层间表现差异显著,NH 的 0~20 cm(12.93 mg/kg)比 20~40 cm(6.43 mg/kg)高 101.04%,NH 的 5 个处理中 C4(14.90 mg/kg)显著高于 CK(11.48 mg/kg),较 CK 提高 29.79%,ZD 的 20~40 cm(9.87 mg/kg)显著高于 0~20 cm(7.73 mg/kg)27.68%,C2(8.65 mg/kg)、C3(8.82 mg/kg)、C4(15.98 mg/kg)较 CK(4.57 mg/kg)提高 89.28%、92.99%、249.67%。

品种间比较发现(表 1),施用生物炭并氮肥减量后,土壤全钾含量在品种间未发生显著变化,而速效钾含量在品种间表现差异显著,ZD(94.02 mg/kg)的速效钾含量高于 NH(90.82 mg/kg)3.52%。5 个处理间,C3(2.233%)全钾含量显著高于 CK(2.137 mg/kg),高 4.49%,速效钾含量 C4(97.17 mg/kg)、C5(99.67 mg/kg)显著高于 CK(89.50 mg/kg),分别高 8.57%、11.36%。土层间比较发现(表 5),2 个品种的全钾含量土层间差异均不显著,NH 的 5 个处理中 C2(2.18%)、C3(2.19%)、C4(2.17%)与 CK(2.16%)差异不显著,C5(2.07%)显著低于 CK。组合间比较发现,NH 仅 0~20 cm 的 C3(2.24%)显著高于 CK(2.16%),

表 3 生物炭结合氮肥减量对土壤全氮与速效氮含量的影响

品种	土层 (cm)	处理	全氮含量(%)			速效氮含量(mg/kg)		
			测定值	土层间	处理间	测定值	土层间	处理间
NH	0 ~ 20	C1 (CK)	0.112b	0.118a	0.111cd	134.33c	130.67a	116.17b
		C2	0.125a		0.119ab	149.00b		150.50a
		C3	0.113b		0.109d	124.33d		107.83c
		C4	0.126a		0.120a	88.67f		92.17d
		C5	0.115b		0.115bc	157.00a		152.00a
	20 ~ 40	C1	0.110bc	0.111b		98.00e	116.80b	
		C2	0.113b			152.00ab		
		C3	0.106c			91.33ef		
		C4	0.113b			95.67ef		
		C5	0.115b			147.00b		
ZD	0 ~ 20	C1	0.113bc	0.115a	0.109b	110.00d	127.93b	103.83d
		C2	0.111bcd		0.111b	134.67c		118.67c
		C3	0.111bcd		0.112b	137.67c		121.83c
		C4	0.110cd		0.110b	106.00d		162.00a
		C5	0.130a		0.124a	151.33b		152.00b
	20 ~ 40	C1	0.105d	0.111b		97.67e	135.40a	
		C2	0.110cd			102.67de		
		C3	0.112bcd			106.00d		
		C4	0.110cd			218.00a		
		C5	0.118b			152.67b		

表 4 生物炭结合氮肥减量对土壤全磷与速效磷含量的影响

品种	土层 (cm)	处理	全磷含量(%)			速效磷含量(mg/kg)		
			测定值	土层间	处理间	测定值	土层间	处理间
NH	0 ~ 20	C1 (CK)	0.065cd	0.068a	0.063c	16.23b	12.93a	11.48b
		C2	0.075b		0.077a	12.07c		9.57c
		C3	0.076b		0.067b	8.23ef		6.48d
		C4	0.083a		0.076a	19.40a		14.90a
		C5	0.040f		0.055d	8.73e		5.98d
	20 ~ 40	C1	0.061de	0.067a		6.73f	6.43b	
		C2	0.078ab			7.07f		
		C3	0.058e			4.73g		
		C4	0.069c			10.40d		
		C5	0.069c			3.23h		
ZD	0 ~ 20	C1	0.074bc	0.063b	0.070bc	4.07g	7.73b	4.57de
		C2	0.074bc		0.071b	6.57ef		8.65b
		C3	0.076b		0.074a	8.73cd		8.82b
		C4	0.045g		0.054d	14.57b		15.98a
		C5	0.044f		0.068c	4.73fg		6.48c
	20 ~ 40	C1	0.067e	0.072a		4.07g	9.87a	
		C2	0.069de			10.73c		
		C3	0.071cd			8.90cd		
		C4	0.062f			17.40a		
		C5	0.092a			8.23de		

表 5 生物炭结合氮肥减量对土壤全钾与速效钾含量的影响

品种	土层 (cm)	处理	全钾含量(%)			速效钾含量(mg/kg)		
			测定值	土层间	处理间	测定值	土层间	处理间
NH	0~20	C1(CK)	2.16b	2.163a	2.16a	84.67de	90.82a	83.67cd
		C2	2.18ab		2.18a	86.00d		82.67d
		C3	2.24a		2.19a	88.67c		84.50c
		C4	2.15b		2.17a	102.00a		95.83a
		C5	2.06c		2.07b	92.67b		91.33b
	20~40	C1	2.14b	2.144a		82.67e	84.41b	
		C2	2.17b			79.33f		
		C3	2.14b			80.33f		
		C4	2.19ab			89.67c		
		C5	2.07c			90.00c		
ZD	0~20	C1	2.11d	2.157a	2.16ab	94.33c	94.03a	90.33b
		C2	2.14cd		2.13b	84.33d		82.33d
		C3	2.23a		2.20a	92.33c		86.17c
		C4	2.19abc		2.19a	92.33c		89.67b
		C5	2.12d		2.14b	106.67a		102.00a
	20~40	C1	2.21ab	2.169a		86.33d	86.20b	
		C2	2.12d			80.33e		
		C3	2.16abcd			80.00e		
		C4	2.19abc			87.00d		
		C5	2.16bcd			97.33b		

ZD 的 4 个处理与 CK 差异均不显著,组合中,0~20 cm 的 C3(2.23%)、C4(2.19%)显著高于 CK(2.11%)5.69%、3.79%;2 个品种的土壤速效钾积累在土层间均表现差异显著,NH、ZD 的 0~20 cm(90.82、94.03 mg/kg)比 20~40 cm(84.41、86.20 mg/kg)高 7.59%、9.08%,NH 5 个处理中 C4(95.83 mg/kg)、C5(91.33 mg/kg)显著高于 CK(83.67 mg/kg),较 CK 分别提高 14.53%、9.16%,ZD 的 C5(102.00 mg/kg)较 CK(90.33 mg/kg)提高 12.92%。

2.2 生物炭结合氮肥减量对玉米产量的影响

生物炭结合氮肥减量对不同氮效率玉米产量和土壤质量影响不同(表 6),不同氮效率玉米产量存在一定差异,方差分析表明,氮高效品种的产量显著高于氮低效品种,高 12.22%,且 5 个副处理中,C4 处理产量最高,达到 13 515 kg/hm<sup>2</sup>,但与 C2、C3 差异不显著,3 个处理均显著高于 CK,分别高出 11.37%、6.80%、8.03%,组合的产量表现为 C2ZD、C3ZD、C4ZD 显著高于 C1ZD,分别高 8.31%、10.30%、8.78%,同时也高于相应氮低效品种,说明生物炭结合氮肥减量对氮高效玉米产量具有一定

表 6 生物炭结合氮肥减量对玉米产量和土壤质量指数的影响

品种	处理	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	处理间 差异显著 性	主处理 土壤质量 指数	副处理 土壤质量 指数
C1(CK)	NH	11 475e	12 135b	0.55	0.46
	ZD	12 810cd		0.37	
C2	NH	12 045de	12 960a	0.61	0.53
	ZD	13 875ab		0.44	
C3	NH	12 105de	13 110a	0.41	0.54
	ZD	14 130a		0.67	
C4	NH	13 095bc	13 515a	0.70	0.65
	ZD	13 935ab		0.60	
C5	NH	11 520e	12 210b	0.42	0.38
	ZD	12 900cd		0.35	

促进作用。各处理的土壤质量指数也存在一定差异。5 个处理中,C4 的土壤质量指数最高,为 0.65,其次是 C3、C2,分别为 0.54、0.53,这 3 个处理分别是生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup>与纯 N 210 kg/hm<sup>2</sup>、255 kg/hm<sup>2</sup>、300 kg/hm<sup>2</sup>配施,C1 较低,C1 是仅施用氮肥尿素的处理,表明生物炭与氮肥减量调控措施能够有效提升土壤质量。组合的表现为,C4ZD、

C4NH 的土壤质量指数较高,分别为 0.60、0.70,较 C1ZD、C1NH 高 62.16%、27.27%,说明 C4 处理对于提高土壤质量具有一定效果。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

生物炭可有效增强土壤的养分吸附能力和养分有效性,但生物炭本身养分含量较低,如生物炭与肥料配合施用,则具有一定的养分缓释功能,又可实现化肥减量施用。于玲玲等研究认为,玉米田施用生物炭改善土壤肥力方面,以施用 12 000 kg/hm<sup>2</sup> 处理最优,其有机碳、碱解氮、有效磷、速效钾含量 2 年分别平均提高 31.5%、29.3%、47.8%、59.8%,而施用生物炭 7 000 kg/hm<sup>2</sup> 提高玉米产量和水分利用效率效果最优<sup>[14]</sup>。魏永霞等对连续 4 年施用生物炭的东北黑土区研究表明,4 年连续施用生物炭使土壤容重随生物炭施用量的增加有降低趋势,孔隙度有逐渐增加趋势,适量生物炭可有效降低土壤固相比例,提高气相和液相比例,逐年施加 50 t/hm<sup>2</sup> 生物炭对促进玉米产量稳定性与可持续性效果最明显<sup>[15]</sup>。刘敏等研究认为,生物炭配合减氮调控能够提高土壤有机质、有效磷、速效钾及碱解氮含量,其中减氮 15% 处理土壤养分保蓄能力最佳<sup>[12]</sup>。以上研究表明,生物炭能够改善土壤结构,进而提高土壤肥力和作物产量,但均以常规玉米品种为试验材料,本研究基于氮高效和氮低效玉米品种,以生物炭与减氮为主要调控手段以实现改善土壤肥力的目标。

立足于内蒙古平原灌区所特有的赶超世界玉米最高单产水平的光温生产潜力和优势,针对内蒙古平原灌区土壤质量下降限制春玉米氮素利用效率提高的核心问题,以进一步提高春玉米群体氮效率和提升土壤质量为核心目标,以生物炭与减氮为主要技术途径和调控手段,开展生物炭结合氮肥减量对土壤养分的作用效果进行研究,具有重要的实践应用价值。本研究表明,生物炭结合氮肥减量可有效提高土壤全量养分及速效养分积累量,且氮高效玉米田土壤有机质含量显著高于氮低效玉米品种土壤,高 23.80%、3.52%,各养分含量在土层间也存在一定差异,氮高效品种的有机质含量 0~20 cm 显著高于 20~40 cm 14.73%,氮高效及氮低效玉米田土壤全氮含量 0~20 cm 比 20~40 cm 显著提高 6.31%、3.60%。处理间比较发现,C3 处理

有机质含量较 CK 显著提高 3.57%,C2、C4、C5 全氮含量较 CK 显著提高 4.42%、4.42%、8.85%,本试验是 3 年连续的定位试验结果,战秀梅等关于生物炭对棕壤理化性质影响的 4 年连续定位试验表明,生物炭使土壤有机碳和全氮含量分别增加了 27.6% 和 75.6%<sup>[16]</sup>。史思伟等研究了 10 年的生物炭田间定位试验,认为土壤有机质含量增加 57.7%~123.1%,总氮含量提高 11.3%~21.9%,有效磷含量显著降低了 23.1%~42.0%,速效钾含量上升了 2.0%~23.1%<sup>[17]</sup>。生物炭的持续施用能够提升土壤肥力,尤其对有机质的提升效果更显著。Zhang 等研究也认为,生物炭能显著提高土壤有机质含量,且有利于土壤中有机碳的累积<sup>[18]</sup>。大量研究发现,生物炭对土壤本体有机质具有激发效应,尤其是负向激发效应较多<sup>[19-20]</sup>,将会一定程度抑制土壤本体有机碳的释放,减少了土壤碳输出。以上研究结果均是单纯施用生物炭,而未施行氮肥减量。而生物炭与氮肥减量的研究中,史登林等研究认为,在贵州中等肥力黄壤稻田施行生物炭(5 t/hm<sup>2</sup>)与氮肥减量(20%,即施用 120 kg/hm<sup>2</sup>)配施效果最好<sup>[21]</sup>;袁晶晶研究发现,在河南濮阳地区 10 t/hm<sup>2</sup> 的生物炭配施 300 kg/hm<sup>2</sup> 效果最佳,这可能是土壤肥力、土地利用方式不同所致<sup>[22]</sup>。孟繁昊等研究认为,在沙壤土的玉米田中,生物炭(8 t/hm<sup>2</sup>)与氮肥(150 kg/hm<sup>2</sup>)配施效果最好<sup>[23-24]</sup>。本试验研究结果表明,施用生物炭可有效增加土壤全氮、速效磷、速效钾含量。本研究的 2 年试验结果显示,应用于氮高效玉米品种,生物炭 3 t/hm<sup>2</sup> 与纯 N 300、255 kg/hm<sup>2</sup> 配施效果最显著,施行周期很短,但对土壤质量具有一定提升效果,3 年的试验结果显示,生物炭 3 t/hm<sup>2</sup> 与纯 N 210、255 kg/hm<sup>2</sup> 配施效果最显著<sup>[25]</sup>,这可能与生物炭的施用年限及次数有关,今后将开展连续多年的定点试验,对土壤肥力和土壤质量的调控效果进一步深入研究。

#### 3.2 结论

生物炭结合氮肥减量有利于降低土壤 pH 值,提高全量养分及速效养分积累量,且氮高效玉米田土壤有机质和速效钾含量显著高于氮低效玉米品种土壤,分别高 23.80%、3.52%,各养分含量在土层间也存在一定差异,氮高效品种 ZD 的有机质含量 0~20 cm 显著高于 20~40 cm 14.73%,NH、ZD 的土壤全氮含量 0~20 cm 比 20~40 cm 显著提高 6.31%、3.60%,NH 的速效氮含量 0~20 cm 比

20 ~ 40 cm 提高 11.88% , ZD 的 20 ~ 40 cm 显著高于 0 ~ 20 cm 5.84% 。 5 个处理间比较, C3 处理有机质含量较 CK 显著提高 3.57% , C2、C4、C5 全氮含量较 CK 显著提高 4.42%、4.42%、8.85% , C2、C3、C5 速效氮含量较 CK 显著提高 16.08%、7.22%、26.18% 。 C2、C3 全磷含量较 CK 显著提高 7.25%、10.14% , 速效磷含量仅 C4 较 CK 显著提高 67.32% 。 C3 全钾含量较 CK 显著提高 4.49% , 速效钾含量 C4、C5 较 CK 显著提高 8.57%、11.36% 。

C4 的土壤质量指数最高, 其次是 C3, 分别为 0.65、0.54, 这 3 个处理分别是生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 与纯 N 210、255 kg/hm<sup>2</sup> 配施, C1、C5 较低, C1 是仅施用氮肥尿素处理, C5 是 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 与纯 N 165 kg/hm<sup>2</sup> , 表明生物炭结合氮肥减量调控措施能够有效提升土壤质量, 但生物炭必须与适量氮配施。C4ZD、C3ZD 的土壤质量指数较高, 分别为 0.60、0.67, 其中 C4 对应的氮低效品种土壤质量指数表现也较高, 为 0.70。说明尽管短期内采取生物炭与氮肥减量调控措施, 但对土壤质量提升仍具有一定效果, 而生物炭 3 000 kg/hm<sup>2</sup> 与纯 N 210、255 kg/hm<sup>2</sup> 配施效果最显著, 可显著提升土壤养分供应能力, 提升土壤质量, 促进氮高效玉米的氮吸收, 是高产氮高效玉米栽培中减氮增效的可行性措施。

#### 参考文献:

- [1] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 355–362.
- [2] 王欣, 尹带霞, 张凤, 等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 248–257.
- [3] 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.
- [4] 崔月峰, 孙国才, 郭奥楠, 等. 秸秆和生物炭还田对冷凉稻区土壤物理性质及 pH 值的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(21): 255–260.
- [5] 韩翠莲, 霍铁珍, 朱冬梅. 生物炭对土壤肥力及玉米产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 54–57.
- [6] 陈红霞, 杜章留, 郭伟, 等. 施用生物炭对华北平原农田土壤容重、阳离子交换量和颗粒有机质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2930–2934.
- [7] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用

- [J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 278–284.
- [8] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, et al. Removal of nitrate – nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. Bioresource Technology, 2004, 95(3): 255–257.
- [9] 刘遵奇, 孟军, 陈温福. 玉米秸秆生物炭对尿素分解的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(6): 1142–1148.
- [10] 朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1921–1929.
- [11] 张伟明, 管学超, 黄玉威, 等. 生物炭与化学肥料互作的大豆生物化学效应[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 109–122.
- [12] 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.
- [13] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 682–689.
- [14] 于玲玲, 赵贵元, 崔婧婧, 等. 施用生物炭对玉米田土壤呼吸及水分利用效率的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(3): 209–213.
- [15] 魏永霞, 朱烟豫, 刘慧. 连年施加生物炭对黑土区土壤改良与玉米产量的影响[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 291–301.
- [16] 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): 1633–1641.
- [17] 史思伟, 姜翼来, 杜章留, 等. 生物炭的 10 年土壤培肥效应[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 16–22.
- [18] Zhang Q Z, Du Z L, Lou Y L, et al. A one – year short – term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions[J]. Catena, 2015, 127: 26–31.
- [19] Bamminger C, Marschner B, Jüschke E. An incubation study on the stability and biological effects of pyrogenic and hydrothermal biochar in two soils[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 72–82.
- [20] 刘天, 云菲, 蒋伟峰, 等. 农田施用生物炭的固碳减排效应及其影响因素综述[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(18): 7–13.
- [21] 史登林, 王小利, 刘安凯, 等. 黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 443–449.
- [22] 袁晶晶. 生物炭与氮肥配施对土壤肥力及红枣产量、品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [23] 孟繁昊. 生物炭配施氮肥对土壤理化性质及春玉米产量和氮效率的影响机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- [24] 孟繁昊, 高聚林, 于晓芳, 等. 生物炭配施氮肥改善表层土壤生物化学性状研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1214–1226.
- [25] 崔文芳, 陈静, 鲁富宽, 等. 生物炭与氮肥减量调控对土壤养分和肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(11): 2429–2436.