

基于产量和水氮利用效率的玉米/大豆 间作系统炭氮配施方案优选

于滨杭¹, 姬建梅¹, 白伟桦², 王丽学^{1*}

(1.沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866; 2.辽宁省河库管理服务中心, 沈阳 110003)

摘 要:【目的】实现间作系统低耗高效增产, 获得适宜的炭氮配施方案。【方法】以间作玉米、大豆为试材进行田间小区试验, 设置 3 个施炭水平: C_0 (0 t/hm²)、 C_1 (15 t/hm²)、 C_2 (30 t/hm²) 和 3 个施氮水平: N_1 (135 kg/hm²)、 N_2 (180 kg/hm²)、 N_3 (225 kg/hm²), 并设置对照 (CK, 不施炭和氮), 研究不同炭氮水平对玉米/大豆间作系统产量和水氮利用效率的影响, 选用博弈论赋权的 TOPSIS 法进行综合评定, 确定基于产量和水氮利用效率的最优配施方案。【结果】炭、氮及其交互作用对玉米和大豆的产量及水氮利用效率均有影响。其中 C_1N_2 处理的玉米产量和水分利用效率最高, C_1N_1 处理的大豆产量、氮肥利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学效率最高。通过解析炭氮调控模型得出, 施炭和施氮协同影响综合评定值, 随着施炭量和施氮量的增加, 综合评定值先增加后降低, 适宜生物炭减施氮肥对玉米/大豆间作系统产量及水氮利用效率具有正向耦合作用。【结论】推荐水肥相对充足的东北地区采用施炭量 17.1~24.0 t/hm²、施氮量 154.8~173.7 kg/hm² 的配施方案。研究可为玉米/大豆间作系统“减氮增效”提供科学依据。

关键词: 玉米/大豆间作; 生物炭; 减量施氮; 产量; 水氮利用效率

中图分类号: S513; S565.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022389

OSID:



于滨杭, 姬建梅, 白伟桦, 等. 基于产量和水氮利用效率的玉米/大豆间作系统炭氮配施方案优选[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 25-33.

YU Binhang, JI Jianmei, BAI Weihua, et al. Optimizing Biochar Application and Fertilization for Maize-soybean Intercropping System Based on Their Yields and Water-nitrogen Use Efficiency[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 25-33.

0 引言

【研究意义】玉米和大豆皆是我国主要的粮油兼用型作物, 在我国国民经济与生活中占有重要地位^[1]。在耕地资源有限的情况下, 玉米/大豆间作是实现粮油安全, 农业可持续发展的有效途径^[2]。【研究进展】作物水肥空间及土壤环境会因玉米/大豆间作产生很大不同^[3], 在玉米/大豆间作体系的中后期, 由于种间竞争等因素, 出现养分供不应求^[4], 甚至作物减产^[5]。在农业生产中, 为追求高产盲目大量施用氮肥, 会显著抑制豆科作物生物固氮^[6], 显著降低间作优势。也会威胁土壤质量和可持续性^[7]。例如, 土壤中铵态氮和硝态氮易损失 (挥发、硝化/反硝化和淋溶), 导致土壤中过量的氮将通过不同的途径进入到环境中^[8-9], 不仅造成氮的大量流失、氮素利用效率下降, 还对环境造成如土壤酸化、湖泊水体富营养化和温室气体排放增加等负面影响^[10-11]。因此, 需要新

的技术手段以实现氮肥的“减量增效”。

生物炭是一种富含碳的固态难溶有机物^[12], 在缺氧或无氧条件下 200~1 200 °C 热解形成^[13]。其具有富含多孔结构、比表面积大和吸附能力强等特点^[14], 对配施的肥料具有缓释作用以实现减量增效, 已成为近些年的研究热点。已有文献^[15-18]表明, 生物炭配施氮肥可以改善土壤团聚体结构、提高土壤肥力、促进植株氮素吸收, 进而促进产量及水氮利用效率的提高。但不同的炭氮配施方案对作物生长、产量及水氮利用效率等指标影响不同, 且不同指标对同一炭氮水平的响应亦有差异。各指标衡量标准不同, 又相互影响, 仅凭单一指标无法确定最佳配施方案。生物炭与氮肥配施的研究也大多集中在单作体系, 间作复合种植的研究还相对滞后。因此, 需要综合考虑多作物及多指标对不同炭氮条件的响应, 科学应用多目标的综合评价方法, 取得合理的炭氮配施方案。TOPSIS 法根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序, 是近年来广泛用于方案选择的综合评价方法^[19]。其基本原理是通过检测评价对象与最优解、最劣解的距离来进行排序, 若评价对象最靠近最优解同时又最远离最劣解, 则为最好, 反之最差^[20]。TOPSIS 法中“正

收稿日期: 2022-07-14 修回日期: 2023-03-16 网络出版日期: 2023-05-08

基金项目: 辽宁省自然基金项目 (2019-ZD-0705)

作者简介: 于滨杭 (1997-), 男。硕士研究生, 主要从事北方寒区绿色高效用水方面的研究。E-mail: 627462097@qq.com

通信作者: 王丽学 (1964-), 女。教授, 博士生导师, 主要从事农田水利及水资源开发利用方面的研究。E-mail: 1987500010@syou.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

理想解”和“负理想解”是 TOPSIS 法的 2 个基本概念。理想解是一设想的最优的解（方案），其各个属性值均达到各备选方案中的最好值，负理想解则相反。方案排序的规则是把各备选方案与正理想解和负理想解做比较，若其中有一个方案最接近理想解，而同时又远离负理想解，则该方案是备选方案中的最优方案。【切入点】不同炭氮配施方案对玉米/大豆间作系统产量及水氮利用的影响研究尚不明确，全面考虑产量和水氮利用效率等各项指标，对炭氮配施方案的综合评价缺乏系统研究。【拟解决的关键问题】本研究旨在阐明以下问题：①不同炭氮配施方案对玉米/大豆间作系统产量及水氮利用效率的影响；②基于产量及水氮利用效率的炭氮配施方案寻优。研究可为玉米/大豆间作系统炭氮管理决策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2021 年 5—9 月在沈阳农业大学水利学院综合试验基地进行，该站点位于 $41^{\circ}84'N$, $123^{\circ}57'E$ ，海拔 44.7 m。试验区为典型旱作雨养农业区，作物一年一熟，试验期间降水量为 596.2 mm，占全年降水量的 74.9%，且主要集中在 6—9 月。试验期间气温和降水量如图 1 所示。试验区土质为潮棕壤，土质分布均匀，土壤理化性质如表 1 所示。

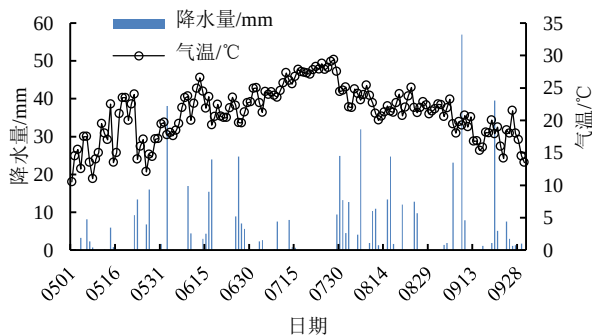


图 1 2021 年试验期间内气温及降水量

Fig.1 Temperature and rainfall during the period of test in 2021

表 1 试验前土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil

全氮量/ (g kg ⁻¹)	全磷量/ (g kg ⁻¹)	全钾量/ (g kg ⁻¹)	有机 质量/ (g kg ⁻¹)	0~90 cm 土壤体积 质量/ (g cm ⁻³)	田间 持水率/ (cm ³ cm ⁻³)	凋萎系数/ (cm ³ cm ⁻³)
0.67	0.47	23.19	33.93	1.42	0.38	0.18

1.2 试验材料

玉米品种选用郑单 958（平均生育期 130 d），大豆品种选用辽豆 32（平均生育期 122 d），供试生物炭由玉米秸秆 450 °C 高温无氧裂解而成，购自辽宁金和福农业开发有限公司，其基本理化性质如表 2。

表 2 生物炭基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of biochar

全氮量/(g kg ⁻¹)	全磷量/(g kg ⁻¹)	全钾量/(g kg ⁻¹)	有机碳量/(g kg ⁻¹)	pH
10.2	8.1	15.7	515.0	8.5

1.3 试验设计

试验设生物炭施用量和氮肥施用量 2 个因素。生物炭施用量设不施炭（C₀, 0 t/hm²）、低炭（C₁, 15 t/hm²）、高炭（C₂, 30 t/hm²）3 个水平；氮肥施用量，根据当地种植习惯，大豆不施肥，玉米设常规施氮量（N₃, 225 kg/hm²）、常规施氮量减量 20%（N₂, 180 kg/hm²）、常规施氮减量 40%（N₁, 135 kg/hm²）3 个水平，采用 L₉（3²）正交试验，并设对照（CK，不施炭和氮），共 10 个处理（表 3），3 次重复，30 个小区，每个小区 18 m²（6 m×3 m）。

表 3 生物炭与氮肥配施方案设计

Table 3 Application details of biochar and fertilizer

处理	编码组合	生物炭施用量/(t hm ⁻²)	氮肥施用量/(kg hm ⁻²)
C ₀ N ₁	(-1,-1)	0	135
C ₀ N ₂	(-1,0)	0	180
C ₀ N ₃	(-1,1)	0	225
C ₁ N ₁	(0,-1)	15	135
C ₁ N ₂	(0,0)	15	180
C ₁ N ₃	(0,1)	15	225
C ₂ N ₁	(1,-1)	30	135
C ₂ N ₂	(1,0)	30	180
C ₂ N ₃	(1,1)	30	225

采用玉米大豆带状复合种植，玉米与大豆行比为 2:2，玉米宽行距为 1.8 m，玉米窄行距为 40 cm，玉米与大豆间距 70 cm，大豆与大豆之间的窄行距为 40 cm，玉米株距 15 cm，每穴留一株，大豆株距 20 cm，采用 1、2、1 方式留苗。供试生物炭在试验开始前均匀铺于土壤并反复搅拌，与 0~30 cm 土壤均匀混合。氮肥施用量见表 3，磷钾肥随底肥施用，施用量为 P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²。在试验期间，降水量可以满足作物生长需求，不进行灌溉，降水作为唯一的补充水源。玉米和大豆于 5 月 6 日同时播种，于 9 月 25 日同时收获。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 产量

作物成熟后，对各小区全部玉米脱粒、大豆去荚处理，按小区实收计产，并以 14% 含水率折合成公顷产量。

1.4.2 耗水量及水分利用效率

采用 TDR（时域反射仪）测定 0~90 cm 的土壤体积含水率，每 10 cm 一层，每个小区埋设 3 根 Trime 管（分别在玉米带，豆带和带中），每根管的每个层位重复测量 3 次，每隔 7 d 观测 1 次，降水前后加测。另外，用烘干法校准 TDR 的土壤含水率数据。

采用土壤含水率计算耗水量的方法^[21]，耗水量计算式为：

$$ET=W_T+P-\Delta W-R-D+K, \quad (1)$$

式中： ET 为作物耗水量 (mm)； W_T 为灌溉量 (mm)； P 为生育阶段有效降水量 (mm)； ΔW 为时段初与时段末土壤计划湿润层内的储水量之差 (mm)； R 为地表径流量 (mm)； D 为深层渗漏量 (mm)； K 为地下水补给量 (mm)。本试验在雨养条件下进行， $W_T=0$ ，试验小区平坦且有垄隔开，故无地表径流损失， $R=0$ ，90~100 cm 土壤含水率变化不大，故无深层渗漏， $D=0$ ，地下水平均埋深为 4.5 m，故无地下水补给量， $K=0$ 。

其中，土壤储水量计算式为：

$$\Delta W=\frac{\theta_m \rho_b h}{\rho_w}, \quad (2)$$

式中： θ_m 为 0~90 cm 土壤体积含水率 (%)； h 为土层厚度 (cm)； ρ_b 为 0~60 cm 土层的平均土壤体积质量 (g/cm^3)； ρ_w 为水的密度 (g/cm^3)； h 为土层厚度 (cm)。

水分利用效率计算式为：

$$WUE=\frac{Y}{ET}, \quad (3)$$

式中： WUE 为水分利用效率 ($\text{kg}/(\text{hm}^2 \text{ mm})$)； Y 为作物产量 (kg/hm^2)。

1.4.3 植株氮素

于玉米成熟期选取每个处理的 5 株玉米，将茎叶和籽粒分别烘干磨粉过筛后用于测定植株全氮，经浓 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 将样品消煮至无色透明，再定容过滤，采用凯氏定氮仪测定全氮量并计算植株吸氮量。

1.5 相关参数计算

秸秆吸氮量 (kg/hm^2) = 秸秆产量 × 秸秆含氮量，(4)

籽粒吸氮量 (kg/hm^2) = 籽粒产量 × 籽粒含氮量，(5)

地上部吸氮量 (kg/hm^2) = 籽粒产量 × 籽粒含氮量 + 秸秆产量 × 秸秆含氮量，(6)

氮肥农学效率 (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮量，(7)

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 施氮区籽粒产量 / 施氮量，(8)

氮肥利用效率 (%) = (施氮区地上部吸氮量 - 不施氮区地上部吸氮量) / 施氮量 × 100%。(9)

1.6 数据分析

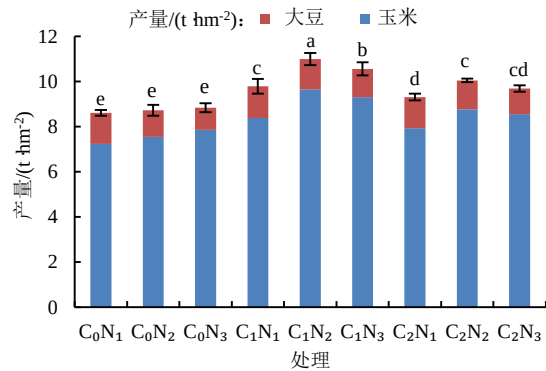
本研究选用 Microsoft Excel 2010 软件整理数据，OriginPro 2018b 软件绘图，SPSS 25.0 软件统计分析，Matlab 2021b 解析模型。

2 结果与分析

2.1 生物炭配施氮肥对玉米/大豆间作系统产量的影响

就玉米产量而言，其受施炭、施氮以及交互作用

的影响显著 (图 2)，影响大小依次为施炭、施氮、炭氮交互作用。 C_1 和 N_2 、 N_3 的组合显著高于其他处理，其中 C_1N_2 的产量最高，较 C_0N_3 增产 22.8%，与 C_1N_3 产量差异不大，但可减少施氮量 45 kg/hm^2 。就大豆产量而言，其受施氮影响最大，同一施炭水平下，随着施氮量的减少，大豆产量呈现上升趋势。同一施氮水平下， C_1 处理的大豆产量较 C_0 处理提升 2.92%~27.55%， C_2 处理的大豆产量较 C_0 处理提升 0.73%~14.70%。总体来看，施炭后大豆生长仍受抑制，但产量较不施炭显著提高。系统产量受生物炭影响较大，施炭可使其增产 7.26%~26.41%。施炭同时改变了系统产量随施氮量的变化规律：不施炭时，间作系统产量随氮肥减量配施比例的增加而降低；施炭后，间作系统产量随生物炭与氮肥减量配施比例的增加呈先增加后降低的趋势。由此可见，生物炭配施氮肥对玉米/大豆间作系统增产效果显著。



注 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

图 2 生物炭和氮不同水平组合下玉米/大豆间作系统产量

Fig.2 Yield of maize/soybean intercropping system under combinations of different levels biochar and nitrogen

2.2 生物炭配施氮肥对玉米/大豆间作系统水分利用效率的影响

施炭和施氮对土壤储水消耗量影响显著，炭和氮的交互作用影响不显著 (表 4)。与 N_1 相比， N_2 和 N_3 处理使土壤储水消耗量提高 3.75%~12.44%；与 C_0 处理相比， C_1 处理和 C_2 处理使土壤储水消耗量降低 2.50%~9.36%。随着施氮量增加，耗水量增加；随着施炭量增加，耗水量先减少后增加。 C_1 处理和 C_2 处理中，除 C_1N_1 处理外，土壤储水消耗量的总体差异不显著，即高炭处理并不能进一步降低土壤储水消耗量。 C_1 处理和 C_2 处理的 WUE 显著高于 C_0 处理，且 C_1 处理高于 C_2 处理。其中， C_1N_2 处理的土壤储水消耗量虽和其他施炭处理差异不大，但由于其产量较高，所以 WUE 显著高于其他处理。总之，生物炭配施氮肥会提高玉米/大豆间作系统的 WUE ，但高炭处理会导致 WUE 增幅减小。

表 4 生物炭和氮不同水平组合下玉米/大豆
间作系统耗水特性及水分利用率Table 4 Water consumption characteristics and
water use efficiency of maize/soybean intercropping
system under different levels of biochar and nitrogen

处理	耗水来源/mm		总耗水量/mm	WUE/ (kg hm ⁻² mm ⁻¹)
	降水量/mm	土壤储水 消耗量/mm		
C ₀ N ₁	596.2	68.17±5.49ab	664.37±5.49ab	12.98±0.27e
C ₀ N ₂	596.2	74.22±2.63a	670.42±2.63a	13.00±0.40e
C ₀ N ₃	596.2	76.53±3.41a	672.73±3.41a	13.13±0.32e
C ₁ N ₁	596.2	61.79±2.22b	657.99±2.22b	14.88±0.54c
C ₁ N ₂	596.2	68.17±2.92ab	664.37±2.92ab	16.57±0.38a
C ₁ N ₃	596.2	69.48±4.00ab	665.68±4.00ab	15.86±0.40b
C ₂ N ₁	596.2	66.48±4.09ab	662.68±4.09ab	14.05±0.30d
C ₂ N ₂	596.2	68.97±4.26ab	665.17±4.26ab	15.12±0.17c
C ₂ N ₃	596.2	71.26±6.41ab	667.46±6.41ab	14.52±0.88cd
C		3.69*	3.69*	144.71**
N		4.37*	4.37*	16.64**
C N		0.16	0.16	4.70**

注 数值代表 3 次重复的均值±标准偏差。*表示<0.05 水平影响显著，
**表示<0.01 水平极显著。下同。

表 5 生物炭和氮不同水平组合下玉米/大豆间作系统玉米氮素吸收与利用效率

Table 5 Nitrogen uptake and utilization efficiency of Maize in maize/soybean intercropping system
under combinations of different levels biochar and nitrogen

处理	吸氮量/(kg hm ⁻²)			氮肥利用效率/%	氮肥农学效率/(kg kg ⁻¹)	氮肥偏生产力/(kg kg ⁻¹)
	秸秆吸氮量	籽粒吸氮量	总吸氮量			
C ₀ N ₁	55.87±3.06d	54.97±1.50d	110.83±2.56e	33.25±0.57cd	25.18±0.88cd	53.64±0.88c
C ₀ N ₂	53.98±3.73d	56.52±0.88d	110.50±3.51e	26.23±1.95e	20.58±1.51ef	41.93±1.51e
C ₀ N ₃	60.91±4.05bcd	67.01±3.94bc	127.92±2.94d	28.73±1.31de	17.85±0.58f	34.92±0.58g
C ₁ N ₁	67.76±2.20ab	71.57±3.28b	139.33±5.47bc	50.68±3.23a	33.60±2.46a	62.07±2.46a
C ₁ N ₂	62.54±1.94bc	83.07±2.27a	145.60±4.11ab	45.74±2.28a	32.30±1.75ab	53.65±1.75c
C ₁ N ₃	71.38±1.07a	80.60±2.27a	151.98±5.39a	39.42±2.40b	24.29±1.20d	41.37±1.20e
C ₂ N ₁	59.63±3.85d	55.66±3.93d	115.30±5.58e	38.53±4.14bc	30.26±1.05b	58.72±1.05b
C ₂ N ₂	73.35±2.50a	61.30±3.43cd	134.65±4.20cd	39.65±2.34b	27.39±0.64c	48.74±0.64d
C ₂ N ₃	74.97±3.88a	64.21±4.16c	139.18±6.78bc	33.73±3.56cd	20.96±1.00e	38.04±1.00f
C	27.45**	78.53**	80.16**	81.80**	97.32**	97.32**
N	10.64**	17.20**	29.94**	15.29**	95.30**	494.33**
C N	5.44**	2.73*	3.77*	4.13**	3.11*	3.11*

2.4 不同炭氮用量对玉米大豆间作系统产量及水肥 利用效率的综合评价

2.4.1 综合评价值确立

由于得出的玉米产量、大豆产量，及水氮利用效率的最佳炭氮配施量各不相同，因此需要进行综合评价。

通过 AHP 层次分析法^[22]得到玉米产量权重最高，为 0.32；大豆产量次之，为 0.21；WUE 与 NUE 权重相等，为 0.14；氮肥农学效率为 0.11，氮肥偏生产力仅为 0.09。

通过熵权法^[23]得到 WUE 权重最高，可达 0.26；玉米产量次之，为 0.16；大豆产量、NUE、氮肥农学效率和偏生产力权重依次为 0.100、0.158、0.155、0.169。

由于 AHP 法和熵权法得到的权重并不相同，本研究依据博弈论原理对上述结果进行组合赋权^[24]，得到综合权重。其中，玉米产量权重最高，为 0.28；其次是大豆产量，为 0.18；WUE 和 NUE 权重分别为 0.14 和 0.12；氮肥农学效率和偏生产力权重低至 0.12 和 0.11。

2.3 生物炭配施氮肥对玉米/大豆间作系统玉米氮素 利用效率（NUE）的影响

施炭和施氮均极显著影响秸秆和籽粒吸氮量，但施炭的影响高于施氮（表 5）。随施氮量的增加，玉米秸秆吸氮量和籽粒吸氮量总体呈上升趋势。随施炭量的增加，吸氮量先增加后减少，其中 C₂ 处理的秸秆吸氮量均高于籽粒吸氮量，说明高炭处理增加了秸秆吸氮量。施炭对 NUE 的影响大于施氮，对氮肥农学效率的影响和施氮相近，对偏生产力的影响小于施氮。同一施氮水平下，NUE 随施炭量的增加呈先增加后降低的趋势，在 C₁ 水平下最高。与 C₁N₃ 处理相比，C₁N₁ 处理和 C₁N₂ 处理 NUE 分别提高 28.56% 和 16.03%。表明在适宜施炭量基础上减施氮肥有利于 NUE 的提高。氮肥偏生产力和氮肥农学效率受炭氮配施变化影响的趋势相近，同一施炭水平下，随着施氮量的升高，氮肥农学效率和偏生产力均呈下降趋势。

通过近似理想法^[25]，从作物高产、节水、减氮的角度出发，通过 TOPSIS 法对不同炭氮配施方案进行综合评价（表 6）。C₁N₂ 处理综合评价得分最高，C₀N₃ 处理最低。C₁ 处理的产量及水氮利用效率优于 C₂ 处理和 C₀ 处理。因此，施用适量生物炭可以提高玉米大豆间作系统产量及水氮利用效率。

表 6 基于 TOPSIS 法确定的不同炭氮组合对
玉米/大豆间作系统综合得分指数的排序Table 6 Ranking of watermelon comprehensive
maize/soybean intercropping system indexes under different
biochar and nitrogen treatments determined by TOPSIS method

处理	正理想解距离 (D+)	负理想解距离 (D-)	综合得分指数	排序
C ₀ N ₁	0.45	0.25	0.36	7
C ₀ N ₂	0.50	0.11	0.18	8
C ₀ N ₃	0.52	0.08	0.13	9
C ₁ N ₁	0.21	0.45	0.69	2
C ₁ N ₂	0.08	0.52	0.84	1
C ₁ N ₃	0.23	0.39	0.63	3
C ₂ N ₁	0.32	0.33	0.51	5
C ₂ N ₂	0.23	0.35	0.60	4
C ₂ N ₃	0.37	0.24	0.45	6

2.4.2 回归模型建立

为探究施生物炭量、施氮肥量与综合评价得分直接的关系，建立回归方程如式（10）所示：

$$Y = -0.37x_1^2 + 0.14x_1 - 0.1x_2^2 - 0.07x_2 + 0.03x_1x_2 + 0.79, \quad (10)$$

式中：Y 表示综合评价得分； x_1 、 x_2 分别表示生物炭和氮肥的编码值。其 $R^2=0.945$ ； $F=39.05 > F_{0.01}$ ； $P < 0.01$ ，炭氮耦合对综合评价得分影响显著。

式（10）中 x_1 、 x_2 项系数大小反应施炭量与施氮量对间作系统综合评价得分指数的影响大小。其正负表明，在试验设计范围内，施炭量与施氮量对间作系统综合评价得分的促进或抑制作用。因此，施炭的促进作用大于施氮，施炭对综合评价得分有促进作用，而施氮有一定抑制作用，但式中交互项系数为正，表明炭和氮具有正向耦合作用，可促进综合评价得分指数的提高。

2.4.3 炭氮施用量对间作系统综合得分的调控效应分析

为探究炭氮单因子对玉米/大豆间作系统综合评价的影响，对上述模型进行降维处理^[26]，得到施炭量与施氮量的单因素效应函数表达如式（11）、式（12）所示：

$$Y_1 = -0.37x_1^2 + 0.14x_1 + 0.79, \quad (11)$$

$$Y_2 = -0.10x_2^2 - 0.07x_2 + 0.79, \quad (12)$$

式中： Y_1 、 Y_2 分别为施炭量、施氮量对玉米/大豆间作系统综合评价得分指数影响的单因素效应函数。

随着施炭量和施氮量的增加，玉米/大豆间作系统综合评价得分指数先升高后降低（图 3），说明炭、氮二因素符合报酬递减规律。当生物炭编码值 x_1 为 0.19，氮肥编码值 x_2 为 -0.35 时，综合评价得分最高；用量超过这一阈值，综合评价得分降低。

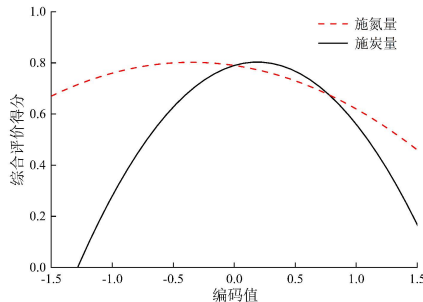


图 3 炭氮用量对玉米/大豆间作系统综合评价得分的单因素效应

Fig.3 Single factor effect of biochar and nitrogen application rate on comprehensive evaluation index of maize/soybean intercropping system

2.4.4 炭氮施用量对间作系统综合得分的边际效应分析

通过对式（11）、式（12）求导，得到施炭量和施氮量调控综合评价得分的边际效应函数如式（13）、

式（14）所示：

$$Y_1' = -0.74x_1 + 0.14, \quad (13)$$

$$Y_2' = -0.20x_2 - 0.07, \quad (14)$$

式中： Y_1' 、 Y_2' 分别为施炭量、施氮量对玉米/大豆间作系统综合评价得分影响的边际效应函数。

由图 4 可知，玉米/大豆间作系统综合评价得分随炭氮的增加而降低。当生物炭编码值为 -1~0.19 时，氮肥编码值为 -1~-0.35 时，对指标有促进作用；超过该范围，则有抑制作用。

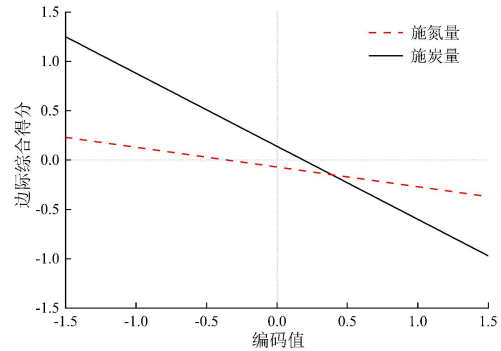


图 4 炭氮用量对玉米/大豆间作系统综合评价得分的边际效应

Fig.4 Marginal effect of biochar and nitrogen dosage on comprehensive evaluation index of maize/soybean intercropping system

2.5 基于产量及水氮利用效率的炭氮配施方案模拟寻优

玉米大豆间作系统综合评价得分指数为开口向下的抛物面（图 5），受炭氮协同作用影响显著，施用适宜生物炭可在减少氮肥投入的同时提高间作系统综合评定值。Matlab 模拟寻优结果表明，生物炭编码值为 0.19，氮肥编码值为 -0.35 时，即生物炭施用量为 20.7 t/hm²，氮肥施用量为 164.25 kg/hm² 时，玉米/大豆间作系统综合评价得分指数最高，为 0.84。用超过综合得分指数最大值的 95% 确定最佳配施范围，即当施炭量在 17.1~24 t/hm²、施氮量在 154.8~173.7 kg/hm² 时，玉米/大豆间作系统产量及水氮利用效率的综合评价最优。

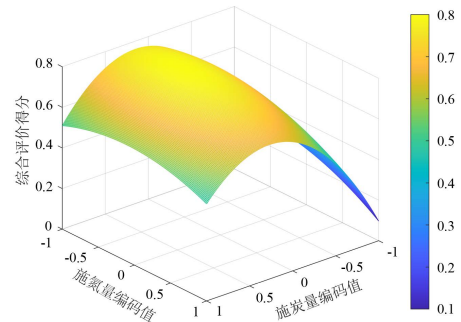


图 5 炭氮用量对玉米/大豆间作系统综合评价指数的耦合效应

Fig.5 Coupling effect of biochar and nitrogen dosage on comprehensive evaluation index of maize/soybean intercropping system

3 讨论

3.1 生物炭配施氮肥对玉米大豆间作系统产量的影响

本研究发现,与仅施用氮肥相比,生物炭配施氮肥后对间作系统的产量有不同程度的提高。主要原因为,当外源养分吸附在生物炭上,生物炭可以作为一种缓释肥料来提供养分,促使氮肥缓释^[27],提高土壤固碳、固氮能力。生物炭与氮肥配施存在协同或互补的关系:肥料消除了生物炭养分含量低的缺陷,生物炭的吸附性发挥作用又赋予肥料养分缓释性能^[28]。但过高的生物炭会提高土壤 C/N,抑制土壤微生物分解和氮的矿化速率^[29],导致高施炭量的产量提升弱于低施炭量。间作体系中,大豆往往因玉米遮阴的影响而生长受抑制^[30]。氮肥供应不足时,玉米生长受抑制,遮阴效果减弱,大豆产量明显提高。适宜减量施氮时,玉米因种间优势吸收利用更多的土壤氮,促进大豆的结瘤固氮能力^[31]。因此,在玉米减氮供应时,玉米与大豆均获得足够的氮供其生长^[32]。本研究中,生物炭与氮肥两因素交互作用显著,说明在氮肥有限的情况下,通过在土壤中添加生物炭也可以提高作物产量,与曹磊齐等^[33]和江立等^[34]的研究结果一致。因此,可以通过减氮并施用适宜生物炭的途径提高玉米/大豆间作系统的产量。

3.2 生物炭配施氮肥对玉米/大豆间作系统水分利用效率的影响

将生物炭添加到土壤中时,一方面,生物炭颗粒较小,填充入土壤中较大尺寸的孔隙,改变了土壤水通量^[35];另一方面,与单施氮肥相比,生物炭与氮肥配施能够减少因施肥而提高的土壤水分消耗。因此,土壤能供给作物更多水分,提高了作物 WUE。然而,过度使用生物炭可能会导致 WUE 减弱,Castellin 等^[36]研究发现,当生物炭施用量从 15 t/hm² 增加到 30 t/hm² 时,土壤表观持水率下降了 23.5%,耗水量上升,导致 WUE 降低,与本研究结果一致。李明阳等^[37]研究发现,施用 12 t/hm² 生物炭的盆栽大豆 WUE 反而低于施用 6 t/hm² 生物炭。李中阳等^[38]研究发现,随着生物炭施用量的增加,冬小麦的 WUE 先增大后减小。其中,施用 40 t/hm² 冬小麦 WUE 最高。一方面,生物炭施用量高会造成土壤高孔隙率和过多疏水化合物的输入,这可能会导致土壤水分的损失^[39]。另一方面,过量施用生物炭会使土壤颜色变暗,提高土壤的表面温度,从而降低水的黏度和表面张力^[40],同时增强辐射吸收产生的加热效应,会加快土壤水分蒸发^[41]。因此,合理的炭氮配施方案才能有效提高间作系统 WUE。

3.3 生物炭配施氮肥对玉米/大豆间作系统氮素吸收及利用的影响

生物炭含有大量营养物质和可交换的阳离子,可以促进农作物生长^[42]。此外,由于生物炭具有丰富的微孔结构和较大的比表面积,因此生物炭表面迅速吸收了氮和其他基本营养物质^[43]。本研究发现,生物炭-氮肥互作增加了作物对氮的吸收,与 Muhammed 等^[44]的研究结果一致。这表明,在作物生长过程中,生物炭配施氮肥可以起到有效缓释氮素的作用,同时提供充足的氮素。C₂ 处理下,玉米的 NUE、农学利用率和氮素偏生产力低于 C₁ 处理,且秸秆吸氮量高于籽粒吸氮量,这可能与高炭处理下“源库不协调”影响了氮素养分向籽粒转运相关^[17],导致过多养分存留在茎鞘和叶片等营养器官中,造成养分“奢侈吸收”^[45]。施用氮肥可以通过增加土壤胶体吸附和土壤阳离子交换能力来减少铵态氮的损失^[46],因此,适当的氮肥管理会促进玉米氮素积累。但是,当施氮量过大时,养分释放速度快,释放的养分与作物吸收规律不匹配,可能会极大地消耗土壤肥力^[47]。过度施肥不仅显著降低玉米氮肥利用率^[48],甚至无法增加产量。前人研究结果也表明,适当地施氮肥是提高肥料利用效率的有效途径^[49],氮肥利用率随着施氮量的提高先增加后减少^[50]。

4 结论

1) 适量生物炭配施氮肥可增强氮肥肥效,不仅可以提高玉米/大豆间作系统产量,还可以减少土壤储水消耗量,促进作物地上部氮素积累,从而提高间作系统水氮利用效率。

2) 生物炭施用量为 15 t/hm²,氮肥施用量为 180 kg/hm² (C₁N₂ 处理) 的综合评价得分指数最高,表明减氮并施用适宜生物炭有利于综合提升玉米/大豆间作系统产量及水氮利用效率。

3) 玉米/大豆间作系统生物炭与氮肥最优配施范围为施炭量 17.1~24 t/hm²、施氮量 154.8~173.7 kg/hm²,此范围有利于当地实现玉米/大豆间作系统高产、节肥、增效。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 李瑞,文涛,唐艳萍,等.遮阴对大豆幼苗光合和荧光特性的影响[J].草业学报,2014,23(6):198-206.
LI Rui, WEN Tao, TANG Yanping, et al. Effect of shading on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of soybean[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(6): 198-206.
- [2] 蔡倩,孙占祥,郑家明,等.辽西半干旱区玉米大豆间作模式对作物干物质积累分配、产量及土地生产力的影响[J].中国农业科学,2021,

- 54(5): 909-920.
- CAI Qian, SUN Zhanxiang, ZHENG Jiaming, et al. Dry matter accumulation, allocation, yield and productivity of maize-soybean intercropping systems in the semi-arid region of Western Liaoning Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(5): 909-920.
- [3] 田艺心, 曹鹏鹏, 高凤菊, 等. 减氮施肥对间作玉米-大豆生长性状及经济效益的影响[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(11): 109-113.
- TIAN Yixin, CAO Pengpeng, GAO Fengju, et al. Effects of nitrogen reduction on growth traits and economic benefits of intercropped maize and soybean[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(11): 109-113.
- [4] ZUO Y M, ZHANG Z J, LIU C H, et al. Achieving food security and high production of bioenergy crops through intercropping with efficient resource use in China[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2015, 2(2): 134.
- [5] FAN Y F, CHEN J X, CHENG Y J, et al. Effect of shading and light recovery on the growth, leaf structure, and photosynthetic performance of soybean in a maize-soybean relay-strip intercropping system[J]. *PLoS One*, 2018, 13(5): e0198159.
- [6] 沈其荣, 褚贵新, 曹金留, 等. 从氮素营养的角度分析旱作水稻与花生间作系统的产量优势[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1 177-1 182.
- SHEN Qirong, CHU Guixin, CAO Jinliu, et al. Yield advantage of groundnut intercropped with rice cultivated in aerobic soil from the viewpoint of plant nitrogen nutrition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1 177-1 182.
- [7] USMAN M, MADU V U, ALKALI G. The combined use of organic and inorganic fertilizers for improving maize crop productivity in Nigeria[J]. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2015, 10: 1-7.
- [8] GUO L W, NING T Y, NIE L P, et al. Interaction of deep placed controlled-release urea and water retention agent on nitrogen and water use and maize yield[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 75: 118-129.
- [9] PAN S G, WEN X C, WANG Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. *Field Crops Research*, 2017, 203: 139-149.
- [10] WANG N, WOLF J, ZHANG F S. Towards sustainable intensification of apple production in China—Yield gaps and nutrient use efficiency in apple farming systems[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(4): 716-725.
- [11] PRATIWI E P A, HILLARY A K, FUKUDA T, et al. The effects of rice husk char on ammonium, nitrate and phosphate retention and leaching in loamy soil[J]. *Geoderma*, 2016, 277: 61-68.
- [12] WEBER K, QUICKER P. Properties of biochar[J]. *Fuel*, 2018, 217: 240-261.
- [13] FARHANGI-ABRIZ S, TORABIAN S, QIN R J, et al. Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145 869.
- [14] 房彬, 李心清, 赵斌, 等. 生物炭对旱作农田土壤理化性质及作物产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(8): 1 292-1 297.
- FANG Bin, LI Xinqing, ZHAO Bin, et al. Influence of biochar on soil physical and chemical properties and crop yields in rainfed field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(8): 1 292-1 297.
- [15] 袁晶晶, 同延安, 卢绍辉, 等. 生物炭与氮肥配施改善土壤团聚体结构提高红枣产量[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 159-165.
- YUAN Jingjing, TONG Yan'an, LU Shaohui, et al. Biochar and nitrogen amendments improving soil aggregate structure and jujube yields[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(3): 159-165.
- [16] 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): 3 424-3 432.
- LI Chuanzhe, ZHANG Huan, YAO Wenjing, et al. Effects of biochar application combined with nitrogen fertilizer on soil physicochemical properties and winter wheat yield in the typical ancient region of Yellow River, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3 424-3 432.
- [17] 何大卫, 赵艳泽, 高继平, 等. 生物炭和氮肥配施对梗稻产量形成、氮肥当季效应及其后效的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(12): 2 114-2 124.
- HE Dawei, ZHAO Yanze, GAO Jiping, et al. Effects of biochar application combined with nitrogen fertilizer on yield formation of japonica rice and the immediate and residual effects of nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(12): 2 114-2 124.
- [18] FALOYE O T, ALATISE M O, AJAYI A E, et al. Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 165-178.
- [19] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 基于评价模型的宁夏沙土春玉米最佳灌水施氮量研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 258-265.
- YAN Fulai, ZHANG Fucang, FAN Xingke, et al. Optimal irrigation and nitrogen application amounts for spring maize based on evaluation model in sandy soil area in Ningxia[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(9): 258-265.
- [20] 秦聪, 郭华. 基于熵权-TOPSIS 法的汾河水质评价[J]. *水资源开发与管理*, 2020, 18(9): 34-39.
- QIN Cong, GUO Hua. Evaluation of Fenhe River water quality based on EW-TOPSIS method[J]. *Water Resources Development and Management*, 2020, 18(9): 34-39.
- [21] 付诗宁, 魏新光, 郑思宇, 等. 滴灌水肥一体化对温室葡萄生理特性及水肥利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(23): 61-72.
- FU Shining, WEI Xinguang, ZHENG Siyu, et al. Effects of integrated management of water and fertilizer on the physiological characteristics and water-fertilizer use efficiency of grapes in greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(23): 61-72.
- [22] ALBAYRAK E, ERENSAL Y C. Using analytic hierarchy process (AHP) to improve human performance: An application of multiple criteria decision making problem[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2004, 15(4): 491-503.
- [23] 张智, 杨志, 黎景来, 等. 基于灰色关联与 TOPSIS 耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 302-311, 330.
- ZHANG Zhi, YANG Zhi, LI Jinglai, et al. Water and fertilizer irrigation decision of melon based on grey relation analysis and TOPSIS coupling model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 302-311, 330.
- [24] 李建明, 于雪梅, 王雪威, 等. 基于产量品质和水肥利用效率西瓜滴灌水肥制度优化[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 75-83.
- LI Jianming, YU Xuemei, WANG Xuwei, et al. Optimization of fertigation scheduling for drip-irrigated watermelon based on its yield, quality and fertilizer and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 75-83.
- [25] WANG F, KANG S Z, DU T S, et al. Determination of comprehensive quality index for tomato and its response to different irrigation treatments[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1 228-1 238.
- [26] 张中典, 张大龙, 李建明, 等. 黄瓜气孔导度、水力导度的环境响应及其调控蒸腾效应[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 139-147.
- ZHANG Zhongdian, ZHANG Dalong, LI Jianming, et al.

- Environmental response of stomatal and hydraulic conductances and their effects on regulating transpiration of cucumber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 139-147.
- [27] PURAKAYASTHA T J, BERA T, BHADURI D, et al. A review on biochar modulated soil condition improvements and nutrient dynamics concerning crop yields: Pathways to climate change mitigation and global food security[J]. Chemosphere, 2019, 227: 345-365.
- [28] 何绪生, 耿增超, 余雕, 等. 生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 1-7.
- HE Xusheng, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 1-7.
- [29] 葛顺峰, 周乐, 李红娜, 等. 土壤 C/N 对苹果植株生长及氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7): 795-800.
- GE Shunfeng, ZHOU Le, LI Hongna, et al. Effect of soil C/N ratio on nitrogen utilization and growth of apple[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7): 795-800.
- [30] WU Y S, GONG W Z, YANG F, et al. Responses to shade and subsequent recovery of soya bean in maize-soya bean relay strip intercropping[J]. Plant Production Science, 2016, 19(2): 206-214.
- [31] LI B, LI Y Y, WU H M, et al. Root exudates drive interspecific facilitation by enhancing nodulation and N₂ fixation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(23): 6 496-6 501.
- [32] XU Z, LI C J, ZHANG C C, et al. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2020, 246: 107 661.
- [33] 曹磊齐, 翟亚明, 朱成立, 等. 不同水氮条件下生物炭对夏玉米水氮耦合效应的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 72-79.
- CAO Leiqi, ZHAI Yaming, ZHU Chengli, et al. The efficacy of biochar in improving crop yield is impacted by irrigation and nitrogen fertilization[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 72-79.
- [34] 江立. 生物炭与氮肥配比对土壤微生物特性和红枣产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 81-86.
- JIANG Li. The combination of biochar addition and nitrogen fertilizer application affects soil microbial community and functions and jujube yield[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 81-86.
- [35] FALOYE O T, ALATISE M O, AJAYI A E, et al. Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2019, 217: 165-178.
- [36] CASTELLINI M, GIGLIO L, NIEDDA M, et al. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 1-13.
- [37] 李明阳, 王丽学, 姜展博, 等. 调亏灌溉和生物炭对大豆生长、产量及水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(6): 1 966-1 973.
- LI Mingyang, WANG Lixue, JIANG Zhanbo, et al. Effects of regulated deficit irrigation and biochar application on growth, yield and water use efficiency of soybean[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(6): 1 966-1 973.
- [38] 李中阳, 齐学斌, 胡超, 等. 不同用量生物炭对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S2): 149-151.
- LI Zhongyang, QI Xuebin, HU Chao, et al. Influences of biochars on growth and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S2): 149-151.
- [39] JEFFERY S, MEINDERS M B J, STOOF C R, et al. Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil[J]. Geoderma, 2015, 251/252: 47-54.
- [40] WU W A, HAN J Y, GU Y N, et al. Impact of biochar amendment on soil hydrological properties and crop water use efficiency: A global meta-analysis and structural equation model[J]. GCB Bioenergy, 2022, 14(6): 657-668.
- [41] YANG B B, XU K, ZHANG Z. Mitigating evaporation and desiccation cracks in soil with the sustainable material biochar[J]. Soil Science Society of America Journal, 2020, 84(2): 461-471.
- [42] 勾芒芒, 屈忠义. 生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 283-288.
- GOU Mangmang, QU Zhongyi. Coupling effect of biochar and fertilizer on soil water content and tomato yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 283-288.
- [43] YAO Q, LIU J J, YU Z H, et al. Three years of biochar amendment alters soil physiochemical properties and fungal community composition in a black soil of Northeast China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 110: 56-67.
- [44] IBRAHIM M M, TONG C X, HU K, et al. Biochar-fertilizer interaction modifies N-sorption, enzyme activities and microbial functional abundance regulating nitrogen retention in rhizosphere soil[J]. Science of the Total Environment, 2020, 739: 140 065.
- [45] 王耀锋, 刘玉学, 吕豪豪, 等. 水洗生物炭配施化肥对水稻产量及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1 049-1 055.
- WANG Yaofeng, LIU Yuxue, LYU Hao hao, et al. Effect of washing biochar and chemical fertilizers on rice yield and nutrient uptake[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(4): 1 049-1 055.
- [46] DUAN R, LONG X E, TANG Y F, et al. Effects of different fertilizer application methods on the community of nitrifiers and denitrifiers in a paddy soil[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(1): 24-38.
- [47] XIA H, RIAZ M, ZHANG M Y, et al. Biochar-N fertilizer interaction increases N utilization efficiency by modifying soil C/N component under N fertilizer deep placement modes[J]. Chemosphere, 2022, 286: 131 594.
- [48] 韦剑锋, 韦冬萍, 陈超君, 等. 不同氮水平对甘蔗氮素利用及土壤氮素残留的影响[J]. 土壤通报, 2013, 44(1): 168-172.
- WEI Jianfeng, WEI Dongping, CHE Chaojun, et al. Effects of nitrogen fertilizer levels on nitrogen utilization and residue in sugarcane-planted soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(1): 168-172.
- [49] MAZID MIAH M A, GAIHRE Y K, HUNTER G, et al. Fertilizer deep placement increases rice production: Evidence from farmers' fields in Southern Bangladesh[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(2): 805-812.
- [50] 王世斌, 高佩玲, 相龙康, 等. 生物炭、河沙对盐碱土水盐、氮素及玉米产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 17-23.
- WANG Shibin, GAO Peiling, XIANG Longkang, et al. Amending saline-alkali soils with biochar or fluvial sand to improve bioavailable nitrogen and yield of summer maize[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 17-23.

Optimizing Biochar Application and Fertilization for Maize-soybean Intercropping System Based on Their Yields and Water-nitrogen Use Efficiency

YU Binhang¹, JI Jianmei¹, BAI Weihua², WANG Lixue^{1*}

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Liaoning Province Heku Management Service Center, Shenyang 110003, China)

Abstract: 【Objective】 Intercropping is a sustainable cultivation practice for improving crop productivity and enhancing resource use efficiency. In this paper, we investigate the combined impact of nitrogen fertilization and biochar amendment on yields and water use efficiency of maize-soybean intercropping system. 【Method】 The experiment was conducted in plots. It consisted of three biochar treatments: 0 t/hm² (C₀), 15 t/hm² (C₁), and 30 t/hm² (C₂), and three nitrogen fertilizations: 135 kg/hm² (N₁), 180 kg/hm² (N₂), and 225 kg/hm² (N₃). No fertilization and biochar amendment were taken as the control (CK). Yield and water and nitrogen utilization efficiency were measured in each treatment. The TOPSIS method combined with the game theory was used to determine the optimal biochar and nitrogen applications for maximizing crop yields and water and nitrogen utilization efficiency of the intercropping system. 【Result】 Biochar and nitrogen applications significantly influenced yields and water and nitrogen utilization efficiency of the two crops. Biochar amendment had greater impact on corn yield and water and nitrogen utilization efficiency, while nitrogen application impacted the yield of soybean more. The C₁+N₂ treatment gave the highest maize yield and water utilization efficiency, while C₁+N₁ led to the highest soybean yield, nitrogen utilization efficiency, and nitrogen partial productivity. Results obtained from the carbon-nitrogen regulation model indicated that the comprehensive evaluation value of the synergistic effect of the carbon and nitrogen applications initially increased and then decreased with the increase in biochar and nitrogen applications. We also found that rationally reducing nitrogen application coupled with a biochar amendment had a positive effect on yields and water and nitrogen utilization efficiency of the intercropping system. 【Conclusion】 For the regions in northwestern China we studied, which have relatively sufficient water and fertilizers, amending the soil by 17.1~24 kg/hm² of biochar combined with 154.8~173.7 kg/hm² of nitrogen fertilization is optimal for yields and water and nitrogen utilization of corn-soybean intercropping system.

Key words: maize/soybean intercropping; biochar; reducing nitrogen application; yield; water-nitrogen use efficiency

责任编辑：赵宇龙

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动，每年评选优秀论文 10 篇，每篇奖励 800 元，并颁发获奖证书，届时将在期刊网站首页展示，同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部