

陈思宇, 彭方丽, 汪 灿, 等. 施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤特性及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(13): 73-80.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.13.010

施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤特性及产量的影响

陈思宇, 彭方丽, 汪 灿, 高 杰, 赵 强, 张国兵, 周棱波, 姜昱雯, 邵明波
(贵州省农业科学院旱粮研究所, 贵州贵阳 550006)

摘要:研究施氮量和糯高粱间作大豆模式下糯高粱根际土壤特性及产量的变化,为糯高粱高产栽培技术提供科学依据。于 2023 年开展田间试验,采用 2 因素完全随机区组设计,种植模式设单作糯高粱(SW)和糯高粱间作大豆(WS)2 个水平,施氮量设不施氮(N0)、正常氮(N1)和高氮(N2)3 个水平,探讨施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤理化性质、酶活性及产量的影响。结果表明,施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤理化性质和酶活性及产量均有显著或极显著影响。种植模式处理间糯高粱根际土壤含水量和容重表现为 SW > WS,土壤孔隙度、全氮含量、碱解氮含量、铵态氮含量、硝态氮含量、硝酸还原酶活性、亚硝酸还原酶活性、谷氨酰胺酶活性、脲酶活性、酸性蛋白酶活性、碱性蛋白酶活性、中性蛋白酶活性、几丁质酶活性及产量均表现为 WS > SW。施氮量处理间糯高粱根际土壤含水量和容重表现为 N0 > N2 > N1,全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量表现为 N2 > N1 > N0,土壤孔隙度、硝酸还原酶活性、亚硝酸还原酶活性、谷氨酰胺酶活性、脲酶活性、酸性蛋白酶活性、碱性蛋白酶活性、中性蛋白酶活性、几丁质酶活性及产量均表现为 N1 > N2 > N0。综上,在本试验条件下,WS - N1 处理即糯高粱间作大豆模式下糯高粱和大豆分别施氮 220、18 kg/hm² 能更好地改善糯高粱根际土壤理化性质和酶活性,为糯高粱的生长发育提供良好的土壤环境,从而促进其产量形成。

关键词:施氮量;糯高粱;间作;根际土壤;产量

中图分类号:S514.04;S514.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)13-0073-07

氮是作物生长发育的必需营养元素,施用氮肥对维持作物产量、保证粮食安全有着重要作用^[1-3]。过量的氮肥投入不仅会降低氮肥利用率,还会造成温室气体排放增加、土壤酸化、土壤生态系统失衡等一系列生态环境问题^[4-7]。因此,优化氮肥施用、提高氮肥利用率并促进作物良好生长发育、维持作物产量和土壤可持续生产力,是亟需解决的重要问题^[8-9]。贵州省是糯高粱的主产区,随着近年来“酱酒热”现象的出现,糯高粱种植面积逐年增加,2023 年达到 15.69 万 hm²,排名全国第三,但大面积常年单一种植糯高粱会导致土壤性质恶化、糯高粱产量和品质降低,从而制约糯高粱的优质高效生

产^[10-11]。禾 || 豆科作物间作可以通过豆科作物的固氮作用减少化学氮肥的施用,促进农作物对不同生态位资源的充分利用,从而提高作物产量^[12-14]。钱玉平等通过设置大豆玉米间作、玉米单作和大豆单作 3 种模式,采用 Biolog - ECO 微孔培养法探讨种植模式对土壤微生物和理化性质的影响及其机制,揭示了大豆玉米增产增效的关键因素是间作模式下土壤微生物结构与土壤理化因子互作^[15]。胡静一等采用膜侧际栽培技术开展不同行比间作试验探讨玉米大豆间作对玉米光合特性、产量及水分利用效率的影响,得到了玉米大豆 2 : 4 带型的间作模式可以改善玉米光合特性、提高水分利用效率并且增加玉米产量^[16]。赵凤艳等利用长期定位微区试验评价不同施氮量下玉米花生间作系统中作物种间互作对不同行玉米生长发育、干物质积累、产量及其构成因素的影响,结果表明适宜施氮量(150 kg/hm²)下间作可显著促进玉米生长发育、干物质积累,提高玉米产量和氮肥利用效率^[5]。刘培等对比了不同施氮水平和玉米大豆不同行比间作模式的玉米、大豆及系统产量的动态变化,发现间

收稿日期:2025-01-02

基金项目:贵州省基础研究计划(自然科学类)项目[编号:黔科合基础-ZK(2023)一般171];国家自然科学基金(编号:32260538);国家现代农业产业技术体系(编号:CARS-06-14.5-B26)。

作者简介:陈思宇(1995—),男,贵州毕节人,硕士,研究实习员,主要从事高粱高效栽培研究工作。E-mail:382126377@qq.com。

通信作者:邵明波,硕士,研究员,主要从事作物高效栽培和育种研究工作。E-mail:563189433@qq.com。

作能稳定地保持间作优势,显著提高土壤 pH 值和土地利用效率,提高玉米大豆的产量,得出减量施氮与间作大豆是华南甜玉米产区资源高效利用、系统产量稳定的可持续绿色生产模式^[17]。综上所述,间作模式下配置适宜施氮量是发挥禾本科间作优势的关键。

关于糯高粱间作大豆,目前已经开展了糯高粱不同间作模式以及带宽和行比配置等方面的相关工作^[18-22]。通过糯高粱不同间作模式对糯高粱干物质和养分积累、根际土壤特性和产量的影响初步筛选出了糯高粱的最佳间作模式为糯高粱间作大豆;在此基础上,进一步探讨了糯高粱间作大豆模式下不同带宽和行比配置对糯高粱根际土壤、光合特性和产量的影响,得到贵州地区糯高粱间作大豆的适宜田间带宽配置为带宽 140 cm,糯高粱窄行行距 40 cm、宽行行距 100 cm,糯高粱与大豆间距 50 cm,适宜的行比配置为 2 行糯高粱间作 1 行大豆。但关于施氮和糯高粱间作大豆模式下糯高粱产量和根际土壤特性变化的规律尚不清楚,相关研究也未见报道。因此,本研究通过探讨不同施氮水平下糯高粱单作及糯高粱大豆间作系统的糯高粱产量、土壤理化性质和酶活性的变化规律,以期探明施氮对糯高粱大豆间作系统中糯高粱根际土壤特性及产量的影响,为贵州地区糯高粱间作大豆施氮技术提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2023 年在贵州省农业科学院旱粮研究所贵阳试验基地进行。供试土壤类型为沙壤土,试验地属于亚热带季风湿润气候,年平均气温为 15.6 °C,全年无霜期 283 d,年降水量 1 043.1 mm。播种前试验地土壤 pH 值为 7.68,各养分含量:有机质含量 33.47 g/kg、全氮含量 1.68 g/kg、全磷含量 0.94 g/kg、全钾含量 9.75 g/kg、碱解氮含量 104.33 mg/kg、有效磷含量 18.61 mg/kg、速效钾含量 209.16 mg/kg。

1.2 试验材料

供试糯高粱品种为红粱丰 1 号,直立散穗型,株型半紧凑,符合酱香型白酒酿造工艺要求,由贵州省农业科学院旱粮研究所提供;供试大豆品系为阴豆 1 号,株型收敛耐阴,适合间套种植,由贵州省农业科学院旱粮研究所提供。供试氮肥为尿素(含 N

46.2%,贵州赤天化桐梓化工有限公司),磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%,贵州黔天化生态肥业有限公司),钾肥为硫酸钾(含 K₂O 52%,国投新疆罗布泊钾盐有限责任公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计 试验采用种植模式和施氮量 2 因素的完全随机区组设计,种植模式设单作糯高粱(SW)和糯高粱间作大豆(WS)2 个水平;施氮量设不施氮(N0)、正常氮(N1)和高氮(N2)3 个水平,其中糯高粱分别以单作 0、200、400 kg/hm² 为基准,大豆分别以单作 0、60、120 kg/hm² 为基准。单作糯高粱行距 70 cm,窝距 25 cm,每窝 2 株,种植 5 行,小区长 5 m,宽 3.5 m,面积 17.5 m²。单作大豆行距 50 cm,窝距 25 cm,每窝 2 株,种植 5 行,小区长 5 m,宽 2.5 m,面积 12.5 m²。糯高粱间作大豆采用 2:1 行比、140 cm 带宽模式,糯高粱窄行 40 cm、宽行 100 cm、窝距 25 cm,每窝 2 株,糯高粱与大豆间距 50 cm,大豆窝距 25 cm,每窝 2 株,小区长 5 m,宽 5.1 m,面积 25.5 m²,包括 3 个带宽。试验共 6 个处理,每个处理 3 次重复,小区间及区组间间隔 80 cm,种植行与区组走向垂直,试验地四周种植 3 行糯高粱作为保护行。糯高粱于 2023 年 4 月 14 日播种,2023 年 8 月 21 日收获,大豆于 2023 年 4 月 14 日播种,2023 年 7 月 28 日收获。于糯高粱和大豆播种时将不同施用量氮肥与磷肥和钾肥混合均匀后一次性施入作为基肥。其中,间作糯高粱的 P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别以单作 100、300 kg/hm² 为基准,间作大豆的 P₂O₅ 和 K₂O 施用量分别以单作 60、40 kg/hm² 为基准,间作施肥量参照单作模式,根据糯高粱和大豆种植密度进行折算,各处理具体施肥量见表 1。其余田间管理,如灌溉、排水、除草、病虫害防治等同常规。

1.3.2 指标测定 于糯高粱成熟期在各小区中间条带选择具有代表性的糯高粱植株 3 株,挖出植株后采集根际土壤,均匀混合过 2 mm 筛网后平均分成 2 份,一份自然风干后室温保存用于土壤理化性质的测定,另一份用液氮速冻后保存于 4 °C 冰箱用于土壤酶活性测定。土壤样品检测公司为贵州百洛尼检测技术有限公司。其中,采用烘干称重法测定土壤含水量,采用环刀法测定土壤容重,并根据土壤容重计算土壤孔隙度,计算公式如下:

土壤孔隙度 = (1 - 土壤容重/SD) × 100%。式中:SD 为土壤密度,2.65 g/cm³。

表 1 试验各处理施肥量

种植模式	施氮量	高粱施肥量 (kg/hm ²)			大豆施肥量 (kg/hm ²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
SW	N0	0	100	300			
	N1	200	100	300			
	N2	400	100	300			
WS	N0	0	110	330	0	18	12
	N1	220	110	330	18	18	12
	N2	440	110	330	36	18	12

注:SW 为单作高粱,WS 为高粱间作大豆;N0 为不施氮,N1 为正常氮,N2 为高氮。

全氮含量采用凯氏定氮法测定,碱解氮含量采用碱解扩散法测定,铵态氮和硝态氮含量采用氯化钾浸提法测定,采用比色法测定硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺酶、脲酶、酸性蛋白酶、碱性蛋白酶、中性蛋白酶和几丁质酶活性;最后分小区人工收获糯高粱,脱粒晒干后实测小区糯高粱产量。

1.4 数据统计与分析

用 Microsoft Excel 2016 软件整理数据和作图。采用 DPS v7.05 软件进行统计分析,用 LSD 法进行差异显著性检测($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤理化性质的影响

2.1.1 物理性质 由表 2 可知,施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤含水量、容重和孔隙度有极显著影响,二者互作对土壤容重和孔隙度有显著影响,而对含水量无显著影响。种植模式处理间土壤含水量和容重表现为 SW > WS,孔隙度表现为 WS >

SW。施氮量处理间土壤含水量和容重表现为 N0 > N2 > N1,孔隙度表现为 N1 > N2 > N0。与 SW 处理相比,WS 处理下土壤含水量和容重分别降低了 12.55% 和 3.78%,孔隙度增加了 1.83%。此外,与 N0 处理相比,N1 处理下土壤含水量和容重分别降低了 25.34% 和 11.37%,孔隙度增加了 5.83%,N2 处理下土壤含水量和容重分别降低了 13.55% 和 5.53%,孔隙度增加了 2.84%。

2.1.2 化学性质 由表 2 可知,施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量均有极显著或显著影响,二者互作对土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量无显著影响。种植模式处理间土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量表现为 WS > SW。施氮量处理间土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量表现为 N2 > N1 > N0。与 SW 处理相比,WS 处理下土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量分别增加 1.86%、3.44%、24.28% 和 17.99%。此外,与 N0 处理相比,N1 处理下土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量分别增加

表 2 施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤理化性质的影响

种植模式	施氮量	含水量 (%)	容重 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	铵态氮含量 (mg/kg)	硝态氮含量 (mg/kg)
SW	N0	31.32 ± 1.87a	0.91 ± 0.02a	65.60 ± 0.64c	1.53 ± 0.03e	95.63 ± 3.13e	1.21 ± 0.06e	11.17 ± 0.48d
	N1	24.04 ± 0.74bc	0.83 ± 0.01b	68.66 ± 0.40b	1.62 ± 0.02c	104.81 ± 0.68cd	2.08 ± 0.10d	13.79 ± 0.27c
	N2	27.68 ± 0.37ab	0.85 ± 0.01b	67.86 ± 0.30b	1.67 ± 0.01ab	108.68 ± 1.18ab	3.23 ± 0.20b	18.40 ± 0.27b
WS	N0	28.29 ± 1.39a	0.89 ± 0.01a	66.56 ± 0.24c	1.58 ± 0.01d	101.43 ± 1.18d	1.77 ± 0.11d	13.53 ± 0.95c
	N1	20.47 ± 1.93c	0.76 ± 0.02c	71.21 ± 0.68a	1.64 ± 0.02bc	106.74 ± 1.37bc	2.60 ± 0.30c	17.27 ± 1.43b
	N2	23.86 ± 2.80c	0.85 ± 0.01b	68.05 ± 0.47b	1.68 ± 0.02a	111.57 ± 1.18a	3.75 ± 0.35a	20.36 ± 0.42a
变异来源								
种植模式(P)	**	***	***	***	*	**	**	***
施氮量(N)	***	***	***	***	***	***	***	***
P × N	ns	*	*	*	ns	ns	ns	ns

注:同一列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著;ns、*、** 和 *** 分别表示 $P > 0.05$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 。下同。

4.83%、7.35%、57.20%和25.68%，N2处理下土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量分别增加7.75%、11.76%、134.36%和56.86%。

2.2 施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤酶活性的影响

施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤酶活性均有极显著影响，二者互作对土壤硝酸还原酶、谷氨酰胺酶、碱性蛋白酶、中性蛋白酶和几丁质酶活性有极显著影响，对亚硝酸还原酶和酸性蛋白酶活性有显著影响，而对脲酶活性无显著影响。种植模式处理间土壤酶活性表现为WS>SW，施氮量处理间土壤酶活性表现为N1>N2>N0。与SW处理相

比，WS处理下土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺酶、脲酶、酸性蛋白酶、碱性蛋白酶、中性蛋白酶和几丁质酶活性分别增加11.78%、32.21%、87.92%、75.48%、27.67%、62.24%、17.30%和125.44%；与N0处理相比，N1处理下土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺酶、脲酶、酸性蛋白酶、碱性蛋白酶、中性蛋白酶和几丁质酶活性分别增加119.05%、14.43%、54.68%、38.47%、113.87%、118.34%、53.73%和25.07%，N2较N0分别增加42.58%、10.08%、41.49%、0.98%、38.82%、124.78%、8.97%和6.13%。

表3 施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤酶活性的影响

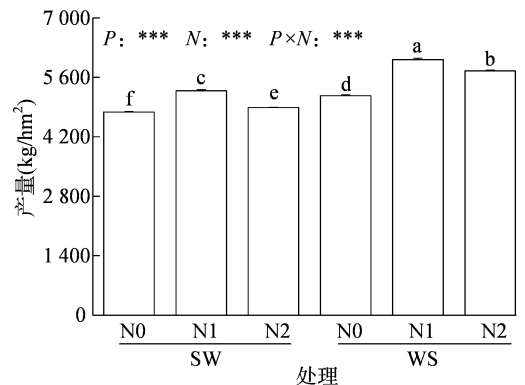
种植模式	施氮量	硝酸还原酶活性(U/mg)	亚硝酸还原酶活性(U/g)	谷氨酰胺酶活性(U/g)	脲酶活性(U/g)	酸性蛋白酶活性(U/g)	碱性蛋白酶活性(U/g)	中性蛋白酶活性(U/g)	几丁质酶活性(U/g)
SW	N0	73.92 ± 3.15d	10.43 ± 0.04d	4.72 ± 0.31e	37.72 ± 2.85d	30.43 ± 1.50d	13.48 ± 0.70c	71.35 ± 2.15c	11.36 ± 1.26d
	N1	110.39 ± 5.08b	13.20 ± 0.07b	10.99 ± 0.86c	59.08 ± 3.64c	60.23 ± 5.54b	19.77 ± 1.45b	94.21 ± 3.12b	27.04 ± 2.42b
	N2	89.02 ± 4.49c	11.24 ± 0.55c	5.48 ± 0.12e	41.59 ± 0.69d	34.26 ± 2.09cd	15.10 ± 0.88c	89.58 ± 2.55b	17.03 ± 0.65c
WS	N0	82.63 ± 1.52cd	13.79 ± 0.31b	8.87 ± 0.34d	66.19 ± 2.85bc	38.85 ± 1.31c	21.87 ± 2.35b	83.69 ± 5.27b	25.61 ± 1.90b
	N1	181.00 ± 6.69a	15.78 ± 0.19a	13.72 ± 0.41a	91.65 ± 4.88a	83.09 ± 2.17a	47.75 ± 0.51a	128.66 ± 3.92a	32.03 ± 2.23a
	N2	117.81 ± 6.91b	15.18 ± 0.30a	12.55 ± 0.09b	66.84 ± 3.39b	53.93 ± 4.31b	49.16 ± 2.07a	91.20 ± 8.63b	27.18 ± 0.84b
变异来源									
P		***	***	***	***	***	***	***	***
N		***	***	***	***	***	***	***	***
P × N		***	*	***	ns	*	***	**	**

2.3 施氮量和间作大豆对糯高粱产量的影响

由图1可知，施氮量和间作大豆对糯高粱产量均有极显著影响，二者互作对糯高粱产量有极显著影响。种植模式处理间糯高粱产量表现为WS>SW，施氮量处理间糯高粱产量表现为N1>N2>N0。与SW处理相比，WS处理下糯高粱产量增加14.73%；与N0处理相比，N1、N2处理下糯高粱产量分别增加13.99%、7.41%。

2.4 糯高粱根际土壤酶活性与土壤理化性质的相关性

由表4可知，糯高粱根际土壤含水量与硝酸还原酶、谷氨酰胺酶、酸性蛋白酶活性呈现显著负相关，与亚硝酸还原酶、脲酶、中性蛋白酶和几丁质酶活性呈现显著负相关；土壤容重与硝酸还原酶、酸性蛋白酶和中性蛋白酶活性均呈极显著负相关，与亚硝酸还原酶、谷氨酰胺酶、脲酶、碱性蛋白酶和几丁质酶活性无显著相关性；土壤孔隙度与硝酸还原酶、酸性蛋白酶和中性蛋白酶活性均呈极显著正相关，



不同小写字母表示各处理在0.05水平上差异显著，***表示P<0.01

图1 施氮量和间作大豆对糯高粱产量的影响

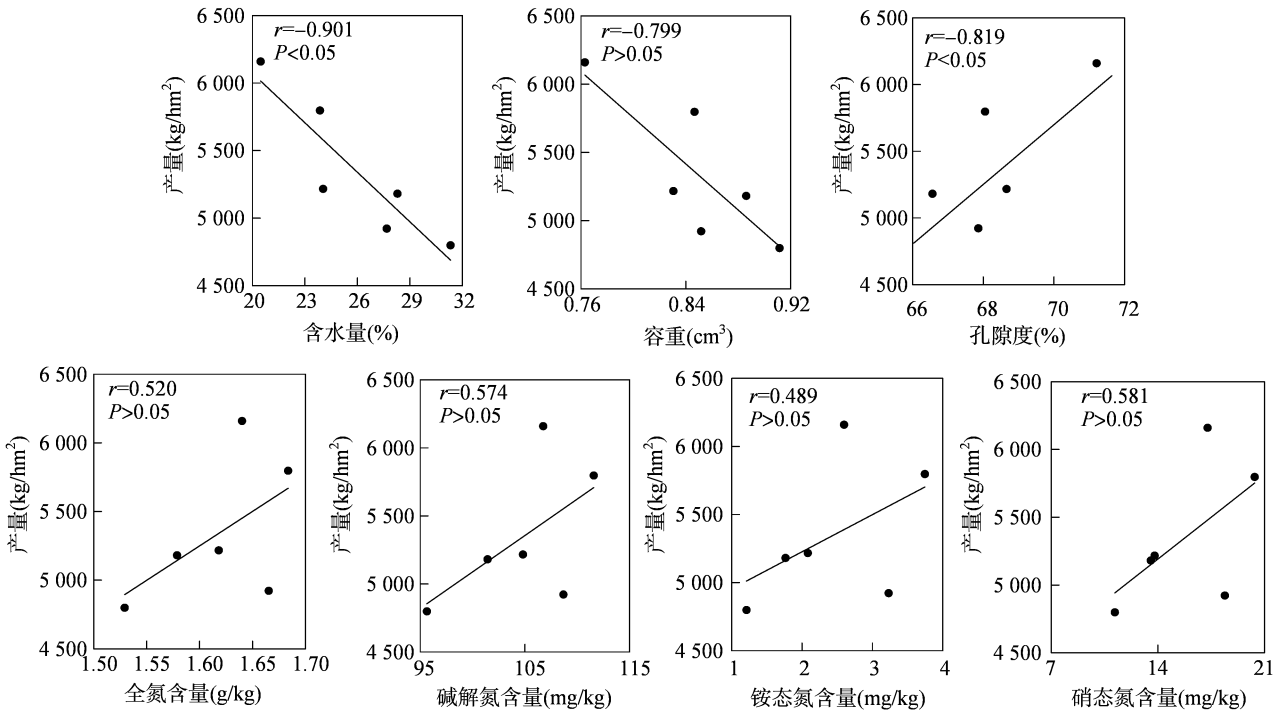
与亚硝酸还原酶、谷氨酰胺酶、脲酶、碱性蛋白酶和几丁质酶活性无显著相关性。

2.5 糯高粱产量与根际土壤特性的相关性

由图2可知，糯高粱产量与糯高粱根际土壤含水量呈显著负相关，与孔隙度呈显著正相关，糯高粱产量与土壤容重及全氮、碱解氮、铵态氮和硝态

表 4 糯高粱根际土壤酶活性与土壤理化性质的相关性

性状	相关系数							
	硝酸还原酶活性	亚硝酸还原酶活性	谷氨酰胺酶活性	脲酶活性	酸性蛋白酶活性	碱性蛋白酶活性	中性蛋白酶活性	几丁质酶活性
含水量	-0.926**	-0.856*	-0.924**	-0.849*	-0.954**	-0.797ns	-0.907*	-0.894*
容重	-0.949**	-0.676ns	-0.746ns	-0.763ns	-0.925**	-0.642ns	-0.976**	-0.742ns
孔隙度	0.952**	0.708ns	0.773ns	0.786ns	0.932**	0.667ns	0.978**	0.772ns



r 为相关系数, P<0.05 为显著相关, P<0.01 为极显著相关, P>0.05 为不显著相关, 图 3 同

图 2 糯高粱产量与根际土壤理化性质的相关性

氮含量均无显著相关性。

由图 3 可知,糯高粱产量与糯高粱根际土壤硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、谷氨酰胺酶、脲酶、碱性蛋白酶活性呈极显著相关,糯高粱产量与酸性蛋白酶、中性蛋白酶和几丁质酶活性呈显著相关。

3 讨论

土壤理化性质可以有效指示农田土壤的肥力状况,合理的氮肥投入可以增加土壤养分含量,改善土壤理化性质^[23-24]。有研究表明,氮肥投入可以提高作物对水分的利用效率,降低土壤含水量和容重,增加土壤孔隙度^[25]。本研究中,施氮降低了土壤含水量和容重,土壤孔隙度则呈现上升趋势,可能是由于氮肥投入促进了糯高粱根系对水分的吸收利用,土壤含水量下降^[26]。但随着氮肥用量增加,糯高粱对土壤水分利用效率下降,土壤含水量和土壤容重略有上升,但并不显著。土壤孔隙度减

小,表明适量的氮肥施入会促进土壤疏松多孔,土壤通气性增强,但过量施氮会导致土壤结构紧实,土壤通气性变差,导致作物水分利用效率降低,这与土壤孔隙度的变化趋势恰好相反,而土壤孔隙度越大,土壤通透性越好,则土壤的贮水能力相对变弱,这与张平良等的研究结果^[27-28]一致。间作可以通过促进作物对土壤养分的吸收从而有效提高土壤综合肥力。研究表明,间作模式下配施适宜用量的氮肥可以显著促进作物生长发育,改善土壤理化性质,提高作物产量^[29-31]。本试验中,在同一施氮水平下,糯高粱间作大豆的土壤全氮、碱解氮、铵态氮和硝态氮含量均高于糯高粱单作,表明禾本科与豆科作物间作可以提高禾本科作物对土壤氮素的竞争能力,而豆科作物在氮素浓度降低时固氮能力增强,有效固定氮素,提高土壤氮素含量^[32-34]。结合糯高粱产量来看,间作系统中糯高粱产量在正常氮水平下达到最大值,表明间作增加糯高粱氮肥利

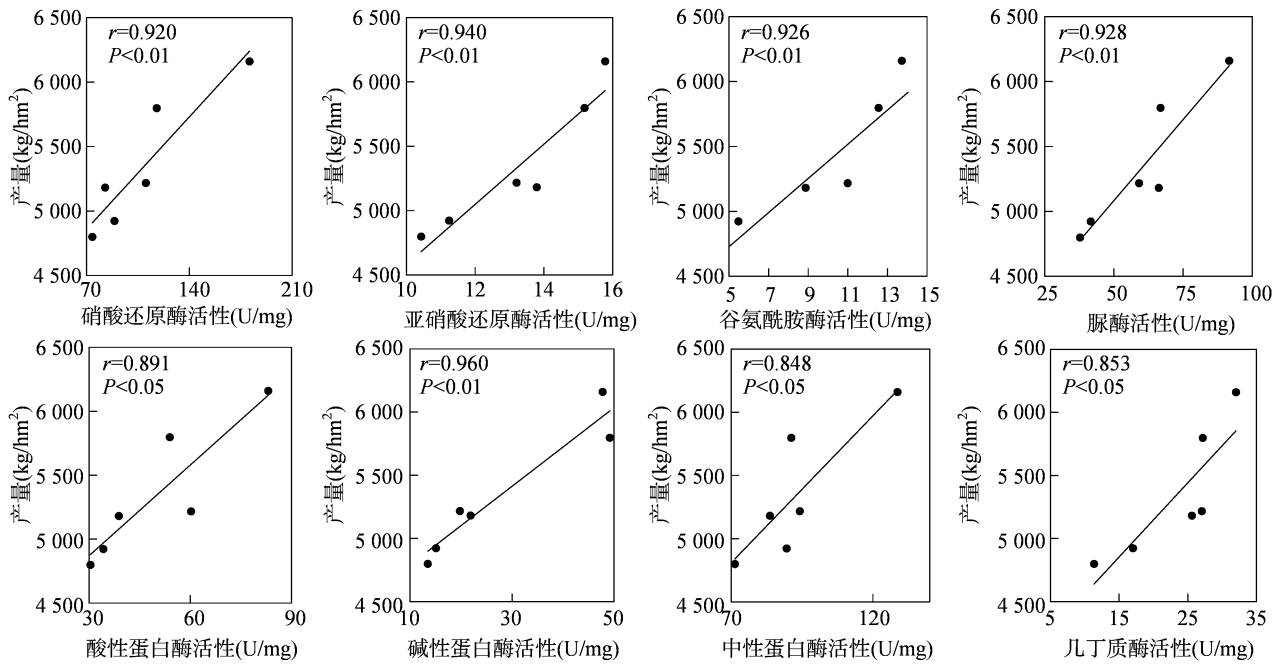


图3 糯高粱产量与根际土壤酶活性的相关性

用效率,而糯高粱产量并未随着施氮量增加而增加,原因可能是间作系统中糯高粱在施氮量达到一定水平后,对氮素的吸收利用效率已经达到最大值,随着施氮量的增加,糯高粱的氮素利用效率、氮肥偏生产力和农学利用效率从而降低,施氮对氮素利用效率产生负面效应^[35]。

土壤酶也是评价土壤肥力、土壤质量和微生物活性的重要指标之一^[36]。施氮和间作都会通过改善土壤理化性质和微生物区系来影响土壤酶活性^[37-39]。本研究中,正常施用氮显著提高了土壤酶活性,随着高水平氮的施入,土壤酶活性降低,表明适宜量的氮肥有利于促进土壤各种酶的产生。土壤硝酸还原酶和亚硝酸还原酶可指示土壤硝态氮还原的关键过程,对植物营养和氮循环起到至关重要的作用^[40],随着氮肥施入呈现先上升后下降的趋势,过多的氮投入会降低硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的活性。谷氨酰胺酶能够调节土壤中的游离氨含量和尿素代谢,谷氨酰胺酶也呈现先上升后下降的趋势,再次表明适宜量的氮素投入对于提高产量具有显著促进作用。脲酶是促进氮素转化的关键酶,其活性可以反映土壤中氮素的转化程度^[41],土壤脲酶活性的变化与土壤总氮、土壤微生物氮等含量紧密相关,当土壤中氮素转化底物含量过多时,产生的氨化物会进行负反馈调节,抑制酶活性^[42],本试验研究结果与之一致。土壤蛋白酶和几丁质

酶活性的变化趋势与其他酶类活性变化规律一致,表明它们与其他酶类对于促进糯高粱对氮素的吸收利用具有很好的协同作用,在参与碳氮循环、提高土壤肥力和促进植物生长方面也起着不可忽视的作用。在本研究中可以看到,与单作相比,间作也显著提高了土壤酶活性,这可能是由于在间作系统中糯高粱与大豆根系的相互作用促使有机物转化速度加快,生物氧化代谢活动加强,改变了糯高粱根际土壤的生境,使2种作物根系土壤中释放酶的数量增加,从而提高土壤酶活性^[43]。

土壤酶活性与土壤理化性质的变化有着密切的关系。本研究中,根际土壤的含水量、容重和孔隙度与硝酸还原酶、酸性蛋白酶和中性蛋白酶活性有着显著相关关系,表明这3类土壤酶对于改善土壤结构、调节土壤疏松性和透气性有重要作用;而疏松的土壤结构能够为糯高粱根系提供一个良好的生长发育空间,有利于糯高粱对土壤氮素和其他养分物质的吸收利用,这对于提高其产量具有重要意义。

4 结论

施氮量和间作大豆对糯高粱根际土壤理化性质和酶活性及产量均有显著或极显著影响。在本试验条件下,WS-N1处理即糯高粱间作大豆模式下糯高粱和大豆分别施氮220、18 kg/hm²能更好地

改善糯高粱根际土壤理化性质和酶活性,为糯高粱的生长发育提供良好的土壤环境,从而促进其产量形成。

参考文献:

- [1] 张磊,孔丽丽,侯云鹏,等. 施氮水平对玉米开花后干物质积累、转运及土壤无机氮含量的影响[J]. 玉米科学,2020,28(4): 155-164.
- [2] 常青,周生,吴中凯. 深松配施氮肥对土壤微生物含量及玉米产量和氮素利用率的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(10):83-90.
- [3] 付锦涛,张香竹,郑煜,等. 化肥减量配施有机肥和灌水量对马铃薯生长、产量及水肥利用效率的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(17):73-79.
- [4] Yan P, Pan J X, Zhang W J, et al. A high plant density reduces the ability of maize to use soil nitrogen [J]. PLoS One, 2017, 12(2):e0172717.
- [5] 赵凤艳,张勇勇,冯晨,等. 不同施氮量下玉米花生间作不同玉米行对土地当量比和产量贡献的研究[J]. 中国土壤与肥料,2023(6):129-137.
- [6] Yin C, Fan F L, Song A L, et al. The response patterns of community traits of N₂O emission - related functional guilds to temperature across different arable soils under inorganic fertilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 108:65-77.
- [7] Yu H L, Ling N, Wang T T, et al. Responses of soil biological traits and bacterial communities to nitrogen fertilization mediate maize yields across three soil types [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 185:61-69.
- [8] 赵士诚,沙之敏,何萍. 不同氮肥管理措施在华北平原冬小麦上的应用效果[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(3):517-524.
- [9] 李升东,王法宏,司纪升,等. 氮肥管理对小麦产量和氮肥利用率的影响[J]. 核农学报,2012,26(2):403-407.
- [10] 邵明波,周棱波,彭方丽,等. 科技支撑贵州酒用高粱产业发展对策[J]. 贵州农业科学,2021,49(4):156-164.
- [11] 彭方丽,周棱波,汪灿,等. 高粱间套作栽培模式研究进展[J]. 贵州农业科学,2020,48(10):20-23.
- [12] 李隆. 间套作强化农田生态系统服务功能的研究进展与应用展望[J]. 中国生态农业学报,2016,24(4):403-415.
- [13] 林文磊,吕美琴,施迎迎,等. 玉豆间作对大豆生长发育、产量、品质及群体经济产值的影响[J]. 大豆科学,2024,43(3):342-351.
- [14] 高砚亮,孙占祥,白伟,等. 玉米||花生间作系统作物产量及根系空间分布特征的影响[J]. 玉米科学,2016,24(6):79-87.
- [15] 钱玉平,宿兵兵,高吉星,等. 玉米大豆间作对喀斯特区土壤理化性质及微生物碳代谢特征的影响[J]. 作物学报,2025,51(1):273-284.
- [16] 胡静一,王佳芯,魏骞,等. 黄土塬区膜际玉米大豆间作对玉米光合特性、产量及水分利用效率的影响[J]. 山西农业科学,2024,52(5):1-8.
- [17] 刘培,邵宇婷,王志国,等. 减氮对华南地区甜玉米//大豆间作系统产量稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2019,27(9):1332-1343.
- [18] Wang C, Zhou L B, Zhang G B, et al. Responses of photosynthetic characteristics and dry matter formation in waxy Sorghum to row ratio configurations in waxy Sorghum - soybean intercropping systems [J]. Field Crops Research, 2021, 263:108077.
- [19] 赵强,章洁琼,汪灿,等. 不同间作模式下糯高粱根际土壤特性及产量变化[J]. 南方农业学报,2022,53(8):2122-2132.
- [20] 陈思宇,汪灿,彭方丽,等. 糯高粱与大豆间作模式下不同带宽配置对糯高粱根际土壤特性及产量的影响[J]. 西南农业学报,2023,36(9):1890-1897.
- [21] 彭方丽,汪灿,周棱波,等. 不同间作模式对糯高粱干物质、养分积累及产量的影响[J]. 南方农业学报,2023,54(1):68-79.
- [22] 彭方丽,汪灿,周棱波,等. 糯高粱间作大豆不同带宽配置对糯高粱光合特性、干物质和养分积累及产量的影响[J]. 南方农业学报,2023,54(7):1966-1976.
- [23] 杨永青,高芳芳,马亚君,等. 山西省旱作农业区不同施肥处理对谷子产量、品质及经济效益的影响[J]. 作物杂志,2020(4):195-201.
- [24] 字洪标,刘敏,阿的鲁骥,等. 三江源区不同建植年限对人工草地土壤微生物功能多样性的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(4):978-987.
- [25] 田龙兵,沈兆壑,赵孝天,等. 种植密度与施氮量互作对不同玉米品种产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学,2024,57(21):4221-4237.
- [26] 王政,刘威,王阁,等. 土壤含水量对滇中植烟土壤氮素矿化及微生物功能多样性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(21):239-248.
- [27] 张平良,郭天文,刘晓伟,等. 密度和施氮量互作对全膜双垄沟播玉米产量、氮素和水分利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(4):579-590.
- [28] 张建军,樊廷录,党翼,等. 覆膜时期与施氮量对旱地玉米土壤耗水特征及产量的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(6):72-78.
- [29] 张斯梅,顾克军,张传辉,等. 麦秸全量还田下减氮施肥对粳稻产量形成和氮素吸收利用的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(2):360-367.
- [30] 韩冬雨,李立军,廉玮歆,等. 阴山南麓复种燕麦箭筈豌豆间作和施氮对土壤特性和饲草产量的影响[J]. 中国土壤与肥料,2024(5):151-161.
- [31] 何衡,丁辉,刘姜,等. 大豆和玉米间作土壤氮素时空变化特征研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2016,39(3):421-426.
- [32] 赵雅姣,刘晓静,吴勇,等. 豆禾牧草间作根际土壤养分、酶活性及微生物群落特征[J]. 中国沙漠,2020,40(3):219-228.
- [33] 董奎军,张亦涛,刘瀚文,等. 玉米大豆间作减量施氮对当季作物农艺性状、经济效益和后茬小麦产量的影响[J]. 中国农业科学,2024,57(22):4495-4506.
- [34] 廖若星. 施肥位置与氮肥用量互作对玉米-大豆带状间作群体产量形成的调控机理[D]. 雅安:四川农业大学,2024.

马晨晨,梁小蕊,张前进,等. 玉米杂交种及其亲本自交系耐高温性综合分析[J]. 江苏农业科学,2025,53(13):80-89.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.13.011

玉米杂交种及其亲本自交系耐高温性综合分析

马晨晨^{1,2}, 梁小蕊^{1,2}, 张前进^{1,2}, 叶飞宇^{1,2}, 庞芸芸¹, 张新^{1,2}, 鲁晓民^{1,2}, 曹丽茹^{1,2}

(1. 河南省农业科学院粮食作物研究所,河南郑州 450002; 2. 神农种业实验室,河南郑州 450002)

摘要:为了筛选出耐高温性较强的玉米杂交种和自交系,以 7 个杂交种及其亲本 14 个玉米自交系为材料,在正常生长和高温胁迫条件下测定玉米株高、穗位高、叶绿素含量、净光合速率(P_n)、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白(SP)含量、脯氨酸(Pro)含量、抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性、玉米产量等 11 个指标,并利用隶属函数值法、主成分分析、灰色关联度等对耐高温性进行综合评价。结果表明,高温胁迫下玉米植株的株高、穗位高均上升,叶绿素含量下降,净光合速率降低,MDA、SP、Pro 大量积累,SOD、POD、CAT 活性大幅度上升,玉米百粒重均显著降低。利用高温系数相关性与主成分分析、关联度分析,得出 POD 活性、净光合速率、MDA 含量、SP 含量、叶绿素含量、株高、SOD 活性、Pro 含量、CAT 活性可作为评价玉米耐高温能力的重要指标;运用综合隶属函数值作为核心评价参数进行聚类筛选,得到郑 3733、郑 8713、郑 V931、郑 K9713 等耐高温自交系以及郑单 819、郑单 988、郑单 6161 等耐高温杂交品种。

关键词:玉米;耐高温性指标;隶属函数;相关性分析;主成分分析

中图分类号:S513.03 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)13-0080-10

玉米是世界上最重要的粮食作物之一,也是我国第一大粮食作物,在全国范围内广泛种植,其种植面积与总产量仅次于美国,在国民经济中占有十分重要的地位。随着时代的进步与农业技术的革新,玉米的种植面积实现了前所未有的扩张;玉米

不仅是饲料作物,还是食品、医药、化工中不可或缺的重要原材料,确保玉米的高产稳产乃至增产具有重要意义^[1-2]。玉米在生长过程中受多种环境因素的影响,其中温度是极其重要的影响因子;合适的温度是玉米实现高产稳产的必要条件之一,而极端温度(过低或过高)会对玉米的生长发育造成不良影响。随着全球温室效应的日益严峻,气候变暖已成为不可逆转的趋势^[3]。极端高温天气频繁出现,导致玉米植株生长发育不良、产量下降或品质降低等问题,对玉米的生长构成了严峻的挑战。前人研究发现,我国夏玉米产区的高温极端阈值温度为 36℃,极端高温每升高 1℃,玉米产量下降 226.62 kg/hm²;在有利的生长条件下,温度每升高 1℃,玉米产量降低 1%^[4-5]。异常高温已成为制约

收稿日期:2024-06-25

基金项目:河南省农业科学院自主创新项目(编号:2023ZC011);河南省科技研发计划联合基金重点项目(编号:232301420023);河南省玉米产业技术体系建设专项(编号:HARS-22-02-G1)。

作者简介:马晨晨(1998—),女,河南周口人,硕士,研究实习员,主要从事玉米遗传育种。E-mail:mchenchen1017@163.com。

通信作者:曹丽茹,博士,副研究员,主要从事玉米抗逆基因挖掘及种质创制和新品种选育,E-mail:caoliru008@126.com;鲁晓民,博士,研究员,主要从事高产优质抗逆宜机收玉米新品种选育,E-mail:luxiaomin2004@163.com。

[35]王丽芳,康娟,马耕,等. 农田施氮对冬小麦产量、根-冠氮素积累及其利用效率的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(11):1403-1408.

[36]覃潇敏,蒋娟娟,韦巧云,等. 轮作与施用生物有机肥对菠萝莲作土壤微生物特性的影响[J]. 中国土壤与肥料,2023(12):50-57.

[37]金江,黄依妮,刘鸿宇,等. 减施氮肥及玉米间作绿肥对混合饲草产量及品质的影响[J]. 中国土壤与肥料,2024(9):61-69.

[38]王霜. 施氮和棉花密度配置对枣棉间作系统土壤温室气体排放的影响[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2024.

[39]崔荣霖. 减量施氮下甘蔗/大豆间作对土壤硝化和反硝化微生物丰度的影响研究[D]. 南宁:广西大学,2024.

[40]胡丹,李培楚,康丽霞,等. 抑制剂包膜尿素对石灰性土壤硝化及相关酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(15):231-238.

[41]杨德任,朱原立,李书玲,等. 酚酸对桉树纯林和混交林土壤养分有效性的影响[J]. 森林与环境学报,2023,43(6):579-587.

[42]张广彩,李菁,梁兆君,等. 不同花生轮作模式对土壤酶活性的影响[J]. 花生学报,2024,53(3):21-27,41.

[43]张斯佳,杨杰,赵帅,等. 华北平原多样化作物与小麦-玉米轮作对土壤质量的影响[J]. 中国农业科学,2025,58(2):238-251.