

氮素有机肥替代对高粱产量和土壤性质的影响

王海燕¹ 毕如田² 聂萌恩³ 霍晓兰² 于志勇² 刘平²

(¹山西农业大学社会服务部, 030031, 山西太原; ²山西农业大学资源环境学院, 030031, 山西太原;

³山西农业大学高粱研究所, 030600, 山西晋中)

摘要 以红糯 16 号高粱为供试材料, 于同等养分投入下, 设置不施肥 (CK)、常规施肥 (HF) 以及氮素有机肥替代 25% (NF25)、50% (NF50)、75% (NF75) 和 100% (NF100) 共 6 个处理。结果表明, 与 CK 处理相比, 随着有机肥替代比例增加, 土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾含量均有不同程度的提升; 有机肥替代化肥处理的土壤碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶活性较 CK 处理分别平均显著提高 40.8%、13.6% 和 61.6%。高粱产量与不同牛粪纯氮量可以用一元二次方程较好地拟合, 计算出理论上施用牛粪纯氮量为 92.5 kg/hm² 时高粱产量最高。本试验条件下, 有机肥替代 50% (NF50) 处理不仅有利于改善土壤理化性质和提高土壤酶活性, 还能使高粱处于较高产量水平。综合不同有机肥替代下高粱产量和土壤肥力、土壤酶活性响应可知, 50% 氮素有机肥替代比例为适宜的有机肥施用量。

关键词 高粱; 产量; 土壤性质; 氮素; 有机肥替代比例

“化肥使用量零增长行动”^[1]有力推动了化肥减施增效的发展进程。畜禽粪便与化肥配合施用可以改善土壤理化特性, 提高土壤碳、氮和磷养分含量, 同时增强土壤微生物活性。在保证产量前提下施用有机肥, 对解决过量施用化肥带来的环境污染问题具有重要意义。因此, 有机无机配施已成为当今农业生产研究的热点问题。

良好的抗旱、耐贫瘠特点使高粱成为重要的粮食作物之一, 其粮饲兼用的特点也成为我国传统酿造业 (酿酒、酿醋) 和新型再生能源产业等领域的重要原料^[2]。同其他粮食作物一样, 高粱的稳产和高产是通过施肥实现的。然而, 农户为实现高产目标持续增加化肥施用量, 长期采用这种施肥模式会引发土壤酸化和盐渍化等负面效应^[3]。而施用有机肥可改善土壤养分循环、调节根际微生物区系、提高产量和品质, 探索有机肥替代部分化肥的科学比例, 有利于促进高粱产业良性发展。

目前, 有关有机肥替代化肥的研究主要集中在氮素方面。有机肥替代无机氮肥有助于促进作物的生长发育和光合作用^[4-5]。长期配施有机肥既能够增加土壤有效养分、增强土壤肥力, 还能降低土壤容重^[6]。然而, 有机肥种类及其替代比例、气候条件

和土壤质地等因素均对有机肥替代化肥在作物生长与土壤改良方面的作用效应产生显著影响。在水稻种植中, 有机物料替代的总氮施用量宜控制在低于 250 kg/hm² 的水平, 且替代比例以 30%~60% 为宜^[7]。青稞生产中有有机肥替代 20% 处理综合性得分最高, 可作为推荐施肥模式^[8]。研究^[9-11]表明, 配施有机肥可明显减少化学氮肥施用量, 还可增加土壤肥力。连续使用有机肥替代部分化肥可增加小麦生育后期土壤中速效养分含量, 提高肥料利用率, 能够稳产甚至增产^[12]。生物有机肥替代 10% 化肥, 小麦增产显著^[13]。Xia 等^[14]通过对农业生态系统内畜禽粪便循环利用在作物生产力、活性氮损失以及土壤碳平衡影响方面的研究进行整合分析, 发现相较于单一施用化肥, 采用粪肥等氮源替代部分化肥可使作物产量提高 5.2%。Guo 等^[15]在山东连续 5 年进行田间试验研究发现, 等氮条件下以 25% 牛粪替代化肥对维持小麦和玉米总产量效果最佳, 而单施化肥产量高于其他不同配比处理。20 世纪 90 年代初设立的有机肥替代长期定位试验, 以及其他有机无机肥配施试验, 其作物大多为玉米、小麦和水稻, 关于高粱的研究报道相对匮乏。从目前研究来看, 不同土壤类型和作物上有机肥替代比例应有所

作者简介: 王海燕, 主要从事高粱植物营养研究, E-mail: 283596757@qq.com

刘平为通信作者, 主要从事土壤环境与植物营养研究, E-mail: lp709@163.com

基金项目: 山西农业大学横向科技项目 (2023HX07); 山西省重点研发计划项目“山西耕地质量演变与提升关键技术研究” (202102140601010-3); 山西省基础研究计划项目 (202103021223137); 山西农业大学“科技创新提升工程” (CXGC2023029)

收稿日期: 2024-09-20; 修回日期: 2024-12-05; 网络出版日期: 2025-01-13

不同。基于此，本研究以褐土高粱种植区为试验区域，在当地农户施肥基础上进行不同比例有机肥替代，着重对土壤养分及相关酶活性进行系统研究，以期为褐土区高粱有机肥替代的适宜比例提供理论参考，降低化肥不合理施用带来的负面效应，实现土壤可持续利用。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验于山西农业大学修文基地（37°62' N，112°71' E）进行，该地属于暖温带半湿润大陆性季风气候，年均气温 9.8 °C，年日照时数 2662 h，无霜期 158 d，年均降水量 418~483 mm。土壤类型为褐土，0~20 cm 土壤基本理化性质为 pH 9.01、有机质 11.2 g/kg、全氮 0.82 g/kg、碱解氮 49.6 mg/kg、有效磷 35.3 mg/kg、速效钾 230.6 mg/kg。供试高粱品种为红糯 16 号。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理：不施肥（CK）、100%化

肥（HF）、化肥减量配施 25%有机肥氮（NF25）、化肥减量配施 50%有机肥氮（NF50）、化肥减量配施 75%有机肥氮（NF75）和 100%有机肥氮（NF100）。

采用随机区组设计，重复 3 次，小区面积 48.0 m²，行距 50 cm，株距 20 cm。在高粱播种前先人工均匀撒施有机肥，再将化肥混匀后撒施，两者均作为基肥结合旋耕一次性施入土壤。除 CK 处理外，各处理等量施用氮、磷、钾，所有处理减量配施率均基于氮含量相同，磷和钾不足时添加无机肥料。施用的 N、P₂O₅ 和 K₂O 总量分别为 225、140 和 140 kg/hm²。试验所施用的化肥为尿素（N 46%）、过磷酸钙（P₂O₅ 16%）、硫酸钾（K₂O 50%）。供试有机肥为商品牛粪，其 N、P₂O₅ 和 K₂O 含量分别为 1.67%、0.43%和 0.95%（以风干基计）。各处理养分投入量见表 1。高粱生长期为 2022 年 5 月 5 日-10 月 2 日。

采用五点法采集高粱收获后期表土（0~20 cm）样品。将收集到的土壤样品去除石头和杂草，过

表 1 不同处理有机肥和化肥的施用情况

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer			有机肥 Organic fertilizer			总养分 Total fertilizer		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HF	225	140	140	0	0	0	225	140	140
NF25	169	125	108	56	15	32	225	140	140
NF50	113	111	76	113	29	64	225	140	140
NF75	56	96	44	169	44	96	225	140	140
NF100	0	82	12	225	58	128	225	140	140

2 mm 筛后风干，以备后续测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤养分、土壤容重及 pH 参照《土壤农化分析》^[16]测定土壤养分含量，采用硫酸—重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量；采用浓 H₂SO₄ 消煮凯氏定氮法测定全氮含量；采用碱解扩散法测定碱解氮含量；采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定有效磷含量；采用醋酸铵浸提—火焰光度计法测定速效钾含量；采用环刀法测定土壤容重；采用容重换算法测定土壤孔隙度：土壤孔隙度（%）=（1-土壤容重/土壤密度）×100，土壤密度取值 2.65 g/cm³；采用土壤与水比为 1:2.5 的方法测定土壤 pH。

1.3.2 土壤酶活性 参照《土壤酶及其研究法》^[17]

测定土壤酶活性，采用苯酚一次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性；采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性；采用磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶活性。

1.3.3 产量 于 2022 年 10 月 2 日收获，每个小区单打单收，最后折算成每公顷的产量。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行计算及绘图，采用 SPSS 20.0 进行统计分析（单因素方差分析和 Pearson 相关性分析）。

2 结果与分析

2.1 不同有机肥替代比例对土壤理化特性的影响

表 2 为不同施肥处理下土壤各理化特性变化。

与 CK 处理相比,所有施肥处理均不同程度增加了土壤养分含量。随着有机肥替代比例增加,土壤有机质呈增加趋势,排序为 NF100>NF75>NF50,与 CK 处理相比,NF100、NF75 和 NF50 处理分别显著增加了 16.2%、14.6%和 9.7%;土壤全氮含量 HF 处理比 CK 显著增加 17.1%,其余处理较 CK 处

理均显著增加。土壤碱解氮以 HF 处理最高,比 CK 处理显著增加 25.6%,NF50 处理次之,比 CK 处理显著增加 19.2%;土壤有效磷变化规律与碱解氮较一致,以 HF 和 NF25 处理较高,NF50 处理次之;HF 处理土壤速效钾较 CK 处理显著增加了 22.8%,其余各处理均显著提高。与 CK 处理相比,不同有

表 2 不同施肥处理对土壤理化因子的影响

Table 2 Effects of different fertilization treatments on soil physiochemical properties

处理 Treatment	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total nitrogen (g/kg)	碱解氮 Alkaline hydrolyzed nitrogen (mg/kg)	有效磷 Available phosphorus (mg/kg)	速效钾 Available potassium (mg/kg)	土壤容重 Soil bulk density (g/cm ³)	土壤孔隙度 Soil porosity (%)
CK	10.32±0.39c	0.82±0.05b	47.46±1.01c	31.09±2.01c	222.7±7.01c	1.28±0.02a	51.60±2.13b
HF	10.55±0.51c	0.96±0.04a	59.60±1.21a	41.29±1.78a	273.4±3.75a	1.28±0.03a	51.74±3.02b
NF25	10.75±0.28c	0.95±0.02a	55.38±2.02b	40.30±1.33a	248.2±7.87b	1.27±0.01ab	52.23±1.34ab
NF50	11.32±0.67b	0.95±0.03a	56.58±3.01ab	38.98±1.72ab	241.7±2.56b	1.26±0.03ab	52.59±1.11ab
NF75	11.83±0.47ab	0.94±0.02a	55.12±2.79b	36.75±1.69b	241.1±2.31b	1.23±0.02b	53.53±3.47a
NF100	11.99±0.72a	0.93±0.03a	53.61±1.12b	35.64±2.07b	237.4±1.91b	1.23±0.01b	53.61±2.91a

不同小写字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$),下同。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$), the same below.

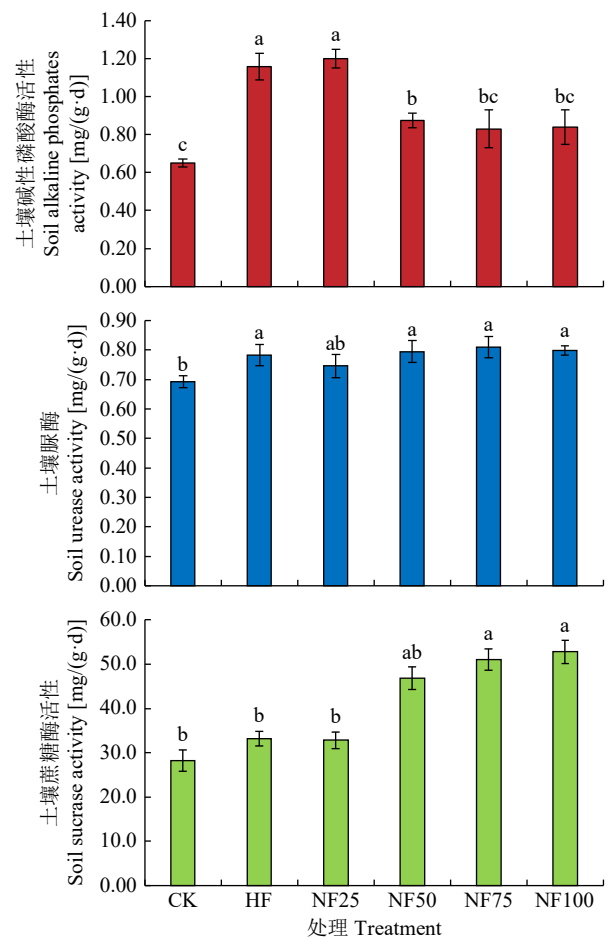
机肥替代处理均降低了土壤容重。随着有机肥替代比例增加,土壤容重降低幅度在 0.8%~4.0%,以 NF75 和 NF100 处理降幅较大,均较 CK 显著降低 4.0%。而土壤孔隙度变化趋势与之相反,随着有机肥替代比例增加,孔隙度平均增幅为 2.2%。

2.2 不同有机肥替代比例对土壤酶活性的影响

由图 1 所示,不同有机肥替代化肥处理对土壤酶活性均有显著影响。土壤碱性磷酸酶活性随有机肥替代比例增加呈先升高后降低趋势,变化范围在 0.65~1.20 mg/(g·d),以 HF 和 NF25 处理较高,比 CK 处理分别显著增加 78.1%和 84.3%;土壤脲酶活性随有机肥替代比例增加呈逐渐上升趋势,变化范围在 0.69~0.81 mg/(g·d),有机肥替代处理 NF50、NF75 和 NF100 比 CK 分别显著增加 15.2%、17.4%和 15.7%,但三者之间差异不显著;土壤蔗糖酶活性变化范围在 28.24~51.49 mg/(g·d),以 NF50、NF75 和 NF100 较高,比 CK 处理分别增加 65.9%、80.9%和 87.0%。

2.3 不同有机肥替代比例对高粱产量变化及其与土壤理化特性和酶活性的关系

由表 3 可知,碱性磷酸酶与碱解氮、有效磷和速效钾均呈极显著正相关,与土壤全氮呈显著正相关;脲酶与全氮呈极显著正相关;与有机质和碱性磷酸酶呈显著正相关;蔗糖酶与有机质、土壤孔隙度和脲酶呈极显著正相关,与土壤容重呈极显著负相关。由此可知,土壤氮、磷、钾养分的有效化过



不同小写字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 1 不同有机肥替代比例对土壤酶活性的影响

Fig.1 Effects of different organic fertilizer replacement ratios on soil enzyme activities

表 3 土壤理化特性与土壤酶活性相关关系
Table 3 Correlation coefficients between soil physiochemical properties and soil enzyme activities

指标 Index	总氮 Total nitrogen	有机质 Organic matter	碱解氮 Available hydrolyzed nitrogen	有效磷 Available phosphorous	速效钾 Available potassium	土壤容重 Soil bulk density	土壤孔隙度 Soil porosity	碱性磷酸酶 Alkaline phosphates	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase
碱性磷酸酶 Alkaline phosphates	0.562*	-0.283	0.754**	0.724**	0.723**	0.193	-0.194	1.000		
脲酶 Urease	0.712**	0.570*	0.466	0.344	0.319	-0.383	0.382	0.551*	1.000	
蔗糖酶 Sucrase	0.384	0.764**	0.273	0.054	-0.088	-0.720**	0.719**	-0.204	0.670**	1.000

“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著和极显著相关。下同。
“*” and “**” indicate significant and extremely significantly correlation at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively. The same below.

程与相关酶活性同步变化，土壤养分循环并不是独立的，而是由微生物活动共同驱动。

由图 2 可知，各有机肥用量处理均能增加高粱产量，NF50 处理增产幅度最高为 21.8%，增产幅

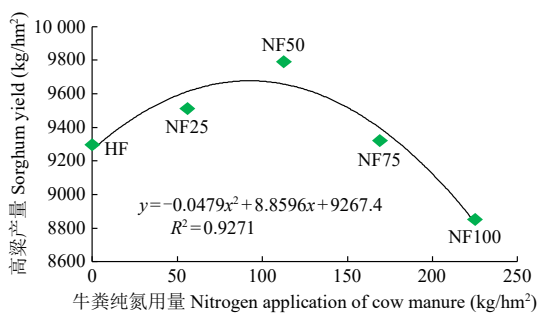


图 2 不同有机肥替代比例下高粱产量
Fig.2 Sorghum yield under different organic fertilizer replacement ratios

度最低的 NF100 处理为 10.2%。不同牛粪纯氮量与高粱产量可以用抛物线方程来进行拟合，其相关性达到显著水平 ($P < 0.05$)，拟合一元二次方程为 $y = -0.0479x^2 + 8.8596x + 9267.4$ ，计算出理论上施用有机肥纯氮为 92.5 kg/hm² 时高粱产量最高。本试验中，50% 有机肥替代化肥量是较为适宜的用量。

由表 4 可知，所有土壤理化特性中土壤全氮、碱解氮和有效磷与产量的相关性较高，三者的相关系数均达极显著水平 ($P < 0.01$)；其次土壤速效钾对产量也有显著影响；3 种土壤酶中碱性磷酸酶和脲酶活性对产量有显著影响，相关系数分别为 0.549 和 0.541。说明土壤养分中全氮、碱解氮和有效磷是影响产量的主导因子，土壤碱性磷酸酶和脲酶活性是重要的生物驱动因子。

表 4 高粱产量与土壤理化特性、土壤酶的相关关系
Table 4 Correlation coefficients between sorghum yield and soil physiochemical properties, soil enzyme activities

指标 Index	总氮 Total nitrogen	有机质 Organic matter	碱解氮 Available hydrolyzed nitrogen	有效磷 Available phosphorous	速效钾 Available potassium	土壤容重 Soil bulk density	土壤孔隙度 Soil porosity	碱性磷酸酶 Alkaline phosphates	脲酶 Urease	蔗糖酶 Sucrase
产量 Yield	0.798**	0.323	0.731**	0.795**	0.529*	-0.195	0.195	0.549*	0.541*	0.385

3 讨论

施用有机肥可以改善土壤理化性质。本试验结果表明，土壤有机质随着有机肥替代比例增加而上升，NF100 处理比 CK 处理显著增加 16.2%；土壤全氮变化规律与土壤有机质一致，但各有机肥替代处理间差异不显著。NF25、NF50、NF75 和 NF100 处理下，与 CK 处理相比，土壤碱解氮分别提高 16.7%、19.2%、16.1% 和 13.0%；有效磷分别提高 29.6%、25.4%、18.2% 和 14.6%；速效钾分别提高 11.6%、8.6%、8.6% 和 6.7%。不同有机肥替代处理不仅提高了土壤养分含量，而且降低了土壤容重，以 NF75 和 NF100 处理降幅较大，土壤孔隙度变化趋势与土壤容重相反。Song 等^[18]研究发现，长期施用有机肥可以提高水稻土肥力水平，马力等^[19]研

究表明，长期施有机肥处理使 0~20 cm 土层含氮量普遍高于施化肥处理。王俊红等^[13]研究表明，减量 10% 以上的化肥配施生物有机肥处理较常规施肥土壤有机质、总氮、速效磷和速效钾含量分别提高 17.4%、12.4%、16.2% 和 19.2%。总之，多项研究^[8,20]发现有机肥部分替代化肥后，可不同程度提高土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量。本研究发现，不同比例有机肥替代氮肥处理较 CK 处理均提高了土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量和土壤孔隙度，降低了土壤容重，主要因为牛粪本身有机质含量较高，增加了土壤有机物料输入，再加之其矿化率也较高，促进了土壤养分元素的循环^[21-22]，而且较高的有机质含量可以改善土壤容重和土壤孔隙度，但在进行有机肥替代时应注意其比例，本研究中 NF100 处理仅在土壤有机质、土

壤容重和土壤孔隙度上表现较好,鲁伟丹^[12]也认为,如果有机肥替代比例过大,短时间内不易分解矿化,可导致有机肥替代化肥处理没有明显效果。

增施有机肥另一个显著作用就是增强土壤酶活性,有利于调节土壤环境^[23]。蔗糖酶主要影响土壤有机碳积累与转化,因而与土壤中氮、磷、有机碳含量密切相关,作为植物和微生物的首要营养来源,直接关系到作物生长。脲酶和碱性磷酸酶是分别参与土壤氮、磷循环的关键酶。本试验中,不同有机肥替代化肥处理对土壤各酶活性均有显著影响。土壤碱性磷酸酶活性随有机肥替代比例增加呈先升高后降低趋势,而土壤脲酶和蔗糖酶活性随有机肥替代比例增加呈逐渐上升趋势。这可能是有机肥用量增加后,提供了大量有机碳,通过改善微生物营养环境,促进其代谢,进而提高土壤酶活性^[24]。蔡惠君等^[25]研究表明,氮肥与牛粪配施与未施牛粪处理相比,土壤蔗糖酶活性随着施氮量增加而升高,郭天财等^[26]研究结果与其相似。其他研究者^[8]认为脲酶受尿素施用量影响较大,替代比例大的处理尿素施用少,进而导致脲酶活性下降,表明脲酶活性高低受有机肥和尿素共同调控,同时也说明土壤酶活性对有机肥替代响应也存在一个最佳比例。关于土壤碱性磷酸酶活性变化,可能因为有机肥不仅为土壤微生物提供生长所需能量,而且向土壤中输入有机磷,增加了土壤磷酸酶的底物量,进一步刺激磷酸酶活性^[27]。另外,本研究中碱性磷酸酶、脲酶和蔗糖酶分别与土壤有机质、全氮、碱解氮等土壤性质存在显著或极显著相关性,而且3种酶之间也存在一定的相关性,说明氮素有机替代处理可以通过影响土壤性质而改善土壤酶活性。总之,有机肥能提供丰富碳源,对土壤微生物起到活化作用,最终提高土壤酶活性^[20]。

丁维婷等^[28]分析了有机肥不同比例替代对黑土土壤的影响,认为有机肥的施用存在最佳比例,这与本研究结果基本一致。吕凤莲等^[29]在壤土2年试验结果表明,小麦产量在75%有机肥替代率时最高;有机肥部分替代化肥后,18%和24%替代比例可保证小麦稳产甚至增产^[12];邢鹏飞等^[30]在华北农田棕壤进行试验,结果发现连续4年猪粪有机肥替代比例为30%的小麦产量均与单施化肥相当。侯红乾等^[31]在湖南红壤双季稻系统25年试验表明,最初化肥处理增产幅度高于70%有机肥替代处理,但随着时间增加后者增产幅度反而增加,30%有机肥

替代下增产变化规律与之相反。间接表明了作物生长季内有机氮替代率必须适宜,否则会出现氮素不足而导致减产^[32]。

本研究中,土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾对产量均有极显著影响,而土壤酶中碱性磷酸酶和脲酶活性对产量有显著影响。适量的有机肥替代一方面可通过直接供给高粱养分改善其营养状况,另一方面通过提升土壤肥力和增加土壤酶活性,进一步促进高粱生长达到增产效果。仅从提高土壤肥力指标的角度来看,NF50处理对土壤肥力提高的贡献居中,再综合产量结果考虑,NF50处理可以保证较高产量水平。因此,在本试验条件下,可将50%牛粪替代化肥量作为适宜推荐量。谢军等^[33]8年定位试验研究也发现,有机肥氮替代50%化肥氮是西南紫色土地区玉米增产稳产、氮肥增效的合理施肥方式。需要关注的是,今后高粱进行氮素有机肥替代时,应考虑控制磷用量,因高粱需磷较少,而有机肥中含有较多磷素,长期施用容易造成磷的盈余。

4 结论

不同比例有机肥替代对土壤理化特性均有一定的改善作用,NF75和NF100处理对土壤养分提升较明显,并对与土壤碳、氮、磷代谢相关度较高的3种酶活性均有不同程度的活化作用。高粱产量与土壤各理化性质相关性分析表明,高粱产量主要受土壤全氮、碱解氮、有效磷、碱性磷酸酶和脲酶影响较大。因此,通过合理施用有机肥,既能培肥土壤又能达到增产目的。不同比例有机肥替代量与高粱产量呈二次抛物线关系,在有机肥纯氮量为92.5 kg/hm²下产量最高。在本试验条件下,生产中可将50%有机肥替代化肥量作为适宜的推荐量。

参考文献

- [1] 农业农村部. 全国农业可持续发展规划. (2015-05-28) [2024-09-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/28/content_2869902.
- [2] 王劲松,董二伟,焦晓燕,等. 不同种植模式对高粱晋糯3号产量和养分吸收的影响. 作物杂志, 2019(5): 166-172.
- [3] 张绪成,于显枫,王红丽,等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控. 中国农业科学, 2016, 49(5): 852-864.
- [4] 马宜林,吴广海,申洪涛,等. 羊粪有机肥与化肥配施对烤烟生长及土壤肥力特性的影响. 核农学报, 2021, 35(10): 2423-2430.
- [5] 李艳丽,何潇,张琳. 不同有机肥配比对中秋酥脆枣光合作用及果实品质的影响. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(1): 45-51.
- [6] Celik I, Gunal H, Budak M, et al. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions. Geoderma, 2010, 160(2): 236-243.

- [7] 任科学, 陆东明, 邹洪琴, 等. 有机替代对长江流域水稻产量和籽粒含氮量的影响. 农业资源与环境学报, 2022, 39(4): 716-725.
- [8] 乔丙颖. 基于青稞生物学性状和土壤质量的有机肥替代可行性. 西宁: 青海大学, 2023.
- [9] 郑学博, 樊剑波, 周静, 等. 沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响. 土壤学报, 2016, 53(3): 675-684.
- [10] 张黛静, 张艳艳, 王艳杰, 等. 耕层调控与有机肥处理下麦田土壤和小麦冠层结构特性及其相互关系. 应用生态学报, 2018, 29(2): 538-546.
- [11] Yang Z C, Zhao N, Huang F, et al. Long-term effects of different organic and inorganic fertilizer treatments on soil organic carbon sequestration and crop yields on the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 2015, 146: 47-52.
- [12] 鲁伟丹. 有机替代对绿洲春小麦减肥增效的研究. 石河子: 石河子大学, 2018.
- [13] 王俊红, 王星琳, 王康, 等. 生物有机肥替代化肥对小麦根际土壤环境的影响. 华北农学报, 2021, 36(4): 155-162.
- [14] Xia L L, Shu K L, Yan X Y, et al. How does recycling of livestock manure in agroecosystems affect crop productivity, reactive nitrogen losses, and soil carbon balance. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(13): 7450-7457.
- [15] Guo L Y, Wu G L, Li Y, et al. Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat-maize rotation system in Eastern China. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 146-153.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析: 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [18] Song W F, Shu A, Liu J L, et al. Effects of long-term fertilization with different substitution ratios of organic fertilizer on paddy soil. *Pedosphere*, 2022, 32(4): 637-648.
- [19] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 898-905.
- [20] 陈凯威, 张仕彬, 徐凯, 等. 不同有机肥替代化肥比对井岗蜜橘品质和土壤养分及酶活性的影响. 中国土壤与肥料, 2023 (12): 98-106.
- [21] 张英, 武淑霞, 雷秋良, 等. 不同类型粪肥还田对土壤酶活性及微生物群落的影响. 土壤, 2022, 54(6): 1175-1184.
- [22] 李其胜, 赵贺, 汪志鹏, 等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作土壤养分利用和酶活性的影响. 土壤通报, 2020, 51(4): 912-919.
- [23] Tao R, Hu B W, Chu G X. Impacts of organic fertilization with a drip irrigation system on bacterial and fungal communities in cotton field. *Agricultural Systems*, 2020, 182: 102820.
- [24] 董二伟, 王成, 丁玉川, 等. 高粱生长及其土壤环境对不同培肥措施的影响. 华北农学报, 2017, 32(2): 217-225.
- [25] 蔡惠君, 杨洋, 盛建东, 等. 氮肥与牛粪配施对土壤养分和玉米产量的影响. 新疆农业大学学报, 2023, 46(1): 58-64.
- [26] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响. 应用生态学报, 2008, 19(1): 110-114.
- [27] 张银杰. 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施蔬菜土壤磷形态转化的影响. 北京: 中国农业科学院, 2022.
- [28] 丁维婷, 房静静, 武雪萍, 等. 有机肥替代化肥不同比例对黑土土壤微生物学性质及春麦产量品质的影响. 中国土壤与肥料, 2021(2): 44-45.
- [29] 吕凤莲, 侯苗苗, 张弘弢, 等. 壤土冬小麦-夏玉米轮作体系有机肥替代化肥比例研究. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (1): 22-32.
- [30] 邢鹏飞, 高圣超, 马鸣超, 等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响. 中国土壤与肥料, 2016(3): 98-104.
- [31] 侯红乾, 刘秀梅, 刘光荣, 等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响. 中国农业科学, 2011, 44(3): 516-523.
- [32] 陶玥玥, 王海候, 金梅娟, 等. 小麦产量与土壤养分对水生植物源有机氮替代率的响应. 土壤学报, 2019, 56(1): 156-164.
- [33] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934-3943.

Response of Sorghum Yield and Soil Properties to Organic Nitrogen Substitution of Chemical Fertilizer

Wang Haiyan¹, Bi Rutian², Nie Meng'en³, Huo Xiaolan², Yu Zhiyong², Liu Ping²

¹Social Service Department, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China;

²College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China;

³Sorghum Research Institute, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030600, Shanxi, China)

Abstract Using 'Hongnuo 16' sorghum as the experimental material and under equivalent nutrient input conditions, six treatments were established: no fertilization (CK), conventional fertilization (HF), and nitrogen organic fertilizer substitution ratios for nitrogen of 25% (NF25), 50% (NF50), 75% (NF75), and 100% (NF100). The results showed that compared with CK treatment, increasing the ratio of organic fertilizer substitution led to varying degrees of improvement in soil organic matter, total nitrogen, alkaline hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, and available potassium contents. The activities of alkaline phosphatase, urease, and sucrase in soils treated with organic manure substitutions were significantly increased by an average of 40.8%, 13.6%, and 61.6%, respectively. Sorghum yield could be well fitted with a quadratic equation, with the highest yield obtained when applying cow manure at a nitrogen rate of 92.5 kg/ha theoretically. In this experiment, the treatment NF50 not only improved soil physicochemical properties and enhanced soil enzyme activity but also maintained sorghum at high productivity. Considering the responses in terms of sorghum yield and soil fertility as well as soil enzyme activity under different levels of organic manure substitution, it was suggested that an organic nitrogen substitution ratio of 50% was suitable for optimal application rates.

Key words Sorghum; Yield; Soil properties; Nitrogen; Ratio of organic manure substitution