

沼肥配施化肥对鲜食玉米养分和产量的影响

赵旻爽¹, 高浪涛¹, 孙世琦¹, 张志丹¹, 杨靖民¹, 张昊¹,
张潇¹, 项楠¹, 杨洋¹, 景泉², 汤晓艳³

(1. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118; 2. 吉林省汇泉农业科技有限公司, 长春 130000;
3. 维尔利环保科技集团股份有限公司, 常州 213000)

摘要: 以鲜食玉米为试验对象, 共设6个施肥处理, 分别为沼肥N替代20%化肥N(BM20)、沼肥N替代50%化肥N(BM50)、沼肥N替代80%化肥N(BM80)、沼肥N替代100%化肥N(BM100)、不施肥(CK)、全部施用化肥(BM0)。通过两年田间试验, 研究土壤肥力、鲜食玉米养分(植株、子粒)和产量对不同沼肥配施化肥施用模式的响应。结果表明, 土壤速效养分含量、有机质、全磷含量值均以BM50处理最高。2020年BM20处理子粒全磷和全氮含量累积最多; 2021年BM50处理产量最高(10 276 kg/hm²), 比CK处理增加15.73%。2021年各处理产量相比2020年均不同程度提升。产量线性加平台模型结果表明, 玉米产量在BM20至BM50处理达到最高值。因此, 鲜食玉米沼肥施用模式推荐设置为沼肥N替代50%化肥N(BM50)。

关键词: 鲜食玉米; 沼肥; 养分; 产量

中图分类号: S531.062

文献标识码: A

Effects of Biogas Manure Combined with Chemical Fertilizer on Nutrient Content and Yield of Fresh Corn

ZHAO Min-shuang¹, GAO Lang-tao¹, SUN Shi-qi¹, ZHANG Zhi-dan¹, YANG Jing-min¹, ZHANG Hao¹,
ZHANG Xiao¹, XIANG Nan¹, YANG Yang¹, JING Quan², TANG Xiao-yan³

(1. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118;
2. Jilin Huiquan Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Changchun 130000;
3. WELLE Environmental Group Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: In this paper, fresh corn was used as the test object, and six fertilization treatments were set up, which were biogas manure N replacing 20% chemical fertilizer N(BM20), biogas manure N replacing 50% chemical fertilizer N(BM50), biogas manure N replacing 80% chemical fertilizer N(BM80), biogas manure N replacing 100% chemical fertilizer N(BM100), no fertilizer(CK), and all chemical fertilizer(BM0). Through two years of field experiments, the response of soil fertility, nutrient(plant, grain) and yield of fresh corn to different biogas manure combined with chemical fertilizer application modes was studied and clarified. The results showed that, soil available nutrients, highest organic matter content and total phosphorus content in the mature stage appeared in the BM50 treatment. In 2020, BM20 had the highest accumulation of total phosphorus and total nitrogen content in grains. In 2021, the yield of BM50 was the highest(10 276 kg/ha). BM50 increased by 15.73 % compared with CK. In 2021, the yield of each treatment increased to varying degrees compared with 2020. The results of the yield platform model showed that the yield reached the highest value in the BM20 to BM50 treatments. Therefore, the recommended application mode for fresh corn biogas manure is BM50.

Key words: Fresh corn; Biogas manure; Nutrient; Yield

录用日期: 2024-03-03

基金项目: 长春市农业领域科技型企业专家工作站专项(2024CNZ03)、长春市科技局产业教授项目(2024CKQJ002)

作者简介: 赵旻爽(1996-), 女, 河北张家口人, 主要从事土壤肥力调控研究。E-mail: zms01574@163.com

高浪涛为本文共同第一作者。

张志丹和杨靖民为本文通信作者。E-mail: zhidanzhang79@163.com E-mail: yangjingmin@jlau.edu.cn

沼肥是有机废弃物在厌氧条件下发酵后产生的残留物^[1],其与化肥配施的模式作为潜在的农业管理策略,能够有效改善土壤理化性质,同时提高作物产量和品质^[2]。沼肥中不仅含有丰富的N、P及大量活性营养成分,还含有丰富的氨基酸、水解酶及相关植物激素^[3-4]。在土壤性质方面,沼肥的合理施用可以调节土壤酸碱度提高土壤肥力^[5],并且能够活化土壤微生物^[6],促进微生物的生长繁殖,从而加快土壤中营养物质的氧化分解^[7]。沼肥中丰富的有机质也能够改善土壤结构,增强土壤持水能力和土壤酶活性^[8-9]。在作物农艺性状方面,施用沼肥后,玉米种子萌发更快,茎秆较为粗壮、叶片成色更好,出苗整齐^[10]。成熟期时,玉米穗大粒饱,增产较为明显^[11-13]。穗部农艺性状受到沼肥氮供应量的显著调控^[14-15]。

沼肥的施用可以增加土壤养分,提高作物营养品质,减少作物病害。由于缺乏沼肥应用的相关技术标准和指导,沼肥的不当利用可能会造成一些负面影响,如养分投入过多造成地下水污染、作物减产等^[16-17]。因此,探索农业系统中适宜的沼肥施用方法十分必要。近些年,多位学者对沼肥与化肥的最佳配比模式进行了研究^[18-20]。

鲜食玉米是指在乳熟期采收其青嫩果穗可直接食用的一类特用玉米,主要包括甜玉米、糯玉米和甜加糯玉米3种类型^[21],具有丰富的营养价值和经济价值^[22]。鲜食玉米生长发育对肥力需求较高,施氮量的增加会使玉米产量显著提高^[23]。研究表明,沼肥与化肥配合施用,能够显著提高玉米叶片光合效率,从而提高子粒产量^[24]。施用沼渣比常规施肥处理更能促进玉米增产^[25-26]。赵庆祥等^[27]用沼渣沼肥碳酸氧氨混合沤制后,施用于玉米,产量比对照组提高了17.58%。

本研究以鲜食玉米为研究对象,在前人试验结果的基础上进行完善,共设6个处理组,探究不同沼肥施用模式下土壤肥力、鲜食玉米养分(植株、子粒)和产量的变化,最大限度地发挥作物产量潜力,提高土壤质量,平衡和优化施肥模式。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020–2021年在吉林省长春市绿园区试验基地进行。土壤类型为黑土,土地平坦且土层深厚松软,排灌正常。土壤基础理化性质如表1所示。

表1 试验地土壤基础理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of the basal soil

土壤类型	有机质	碱解氮(mg/kg)	速效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	含水量	容重
Soil type	(g/kg)	Alkali-hydrolyzable	Available	Available	(%)	(g/cm ³)
	Organic matter	nitrogen	phosphorus	potassium	Water content	Bulk density
黑土	24.23	97.62	22.58	149.21	19.16	1.21

1.2 试验设计

试验所用化肥为常用配方复混肥。试验用沼肥由维尔利环保科技集团股份有限公司提供,沼肥中

的氮含量为2.70 g/kg,有机质含量为9.96 g/kg。试验作物为鲜食玉米,品种为京科糯2000,生育期约90 d。

表2 各试验处理的施肥模式
Table 2 Fertilization mode of each experimental treatment

处 理 Treatment		沼 肥	化 肥		
		Biogas manure	Chemical fertilizer		
		N	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	不施肥	0	0	0	0
BM0	全部施用化肥	0	180	100	90
BM20	沼肥N替代20%化肥N	36	144	100	90
BM50	沼肥N替代50%化肥N	90	90	100	90
BM80	沼肥N替代80%化肥N	114	36	100	90
BM100	沼肥N替代100%化肥N	180	0	100	90

田间小区试验设6个施肥处理:以不施肥(CK)和全部施用化肥(BM0)为对照组、沼肥化肥混合组为试验组(BM20、BM50、BM80、BM100)。以土壤需氮量为依据,计算各个处理施肥配比(表2)。试验区面积为1 820 m²,共24个试验小区,每个小区面积为40 m²,采取随机区组设计。

1.3 样品采集与测定

土壤样品的采集与处理:土壤采集深度为0~20 cm,土壤样品挑出植物残体和小碎石后自然风干。用小碾子或擀面杖碾碎并研磨,过20目和100目筛备用。

植物样品的采集与处理:在鲜食玉米的主要生育时期(拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期和乳熟期)进行玉米植株采样。植物样品放入烘箱105℃杀青2 h,粉碎后过60目筛备用。

土壤有机质采用重铬酸钾消煮-硫酸亚铁滴定法测定^[28],土壤pH值测定采用酸碱度测定仪进行测定,土壤碱解氮采用碱解扩散法测定^[29],土壤速效磷采用碳酸氢钠法测定,土壤速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计测定。

鲜食玉米养分含量测定:植株、子粒全磷采用硫

酸-过氧化氢法测定,植株、子粒全氮采用凯氏定氮仪测定。鲜食玉米产量结构测定:适采期每组处理选取两垄长势相似的玉米进行采收,统计株数、穗数。每组处理随机选取20穗进行考种,测量穗长、穗重、穗行数、行粒数和百粒重,计算理论产量。

1.4 数据处理与分析

采用Excel 2019和IBM SPSS Statistics 21软件对试验数据进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对土壤肥力的影响

由表3可知,2020年土壤有机质含量最高的是BM0处理,速效氮、磷养分含量最高的均为BM50处理,速效钾养分含量最高的是BM20处理。2021年土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾在BM50处理下养分含量均最高。2021年较2020年相比各处理土壤pH值平均下降0.16%,其中,BM50处理pH值下降最大。结合两年数据考虑,在BM50处理下有助于土壤养分含量的累积,对于增强土壤肥力来说,BM50为最优处理。

表3 土壤肥力指标
Table 3 Soil fertility index

年 份 Year	处 理 Treatment	pH值 pH value	有机质(g/kg) Organic matter	碱解氮(mg/kg) Alkali-hydrolyzable nitrogen	速效磷(mg/kg) Available phosphorus	速效钾(mg/kg) Available potassium
2020	CK	5.88 c	22.43±1.00 a	101.95±1.24 b	13.23±0.36 b	128.50±0.71 c
	BM0	5.81 d	23.55±2.89 a	102.40±0.00 ab	14.64±0.42 ab	136.50±4.95 b
	BM20	5.98 b	22.07±1.06 a	102.40±1.05 ab	14.15±2.50 ab	147.00±2.83 a
	BM50	6.08 a	21.48±1.07 a	103.88±0.00 a	16.02±0.42 a	142.50±3.54 a
	BM80	5.77 d	22.16±0.81 a	101.22±1.42 b	13.26±1.75 b	120.50±4.95 d
	BM100	5.88 c	22.38±2.27 a	102.40±1.05 ab	13.66±0.14 b	126.50±0.71 c
2021	CK	5.85 a	24.87±0.32 b	95.81±0.92 a	24.35±0.47 d	123.50±0.71 e
	BM0	5.78 c	24.14±0.60 bc	109.05±1.09 a	25.15±1.42 cd	140.00±1.41 c
	BM20	5.83 b	24.66±0.99 bc	113.67±0.30 a	27.41±0.66 b	145.50±0.71 b
	BM50	5.74 d	26.37±0.27 a	121.63±1.63 a	30.82±0.62 a	154.50±0.71 a
	BM80	5.58 f	25.00±0.57 b	108.99±3.94 a	26.31±1.01 bc	134.50±0.71 d
	BM100	5.64 e	23.58±0.86 c	101.07±0.22 a	24.91±0.74 cd	134.00±1.41 d

注:同列数据后不同字母表示处理间在5%水平差异显著。下表同。
Note: Values followed by different letters represent significant differences among treatments($P<0.05$). The same below.

2.2 不同施肥模式对玉米养分含量的影响

2.2.1 沼肥配施化肥对鲜食玉米植株养分含量的影响

图1为鲜食玉米不同生育时期植株全氮含量的变化。两年中BM50、BM80、BM100处理植株全氮含

量由拔节期到乳熟期逐渐降低。CK、BM0、BM20处理沼肥占比较低,植株全氮在抽雄吐丝期出现最低点,可能是由于植株进行生殖生长消耗养分导致。对比两年乳熟期植株全氮含量变化可知,2021年植株全氮含量均高于2020年全氮含量,表明沼肥的施用

能有效促进植物全氮含量的累积。随着沼肥施用量的增加,植物在抽雄吐丝期并没有出现全氮含量降

低的现象,可见沼肥的适量添加能够有效促进植物全氮含量的累积。

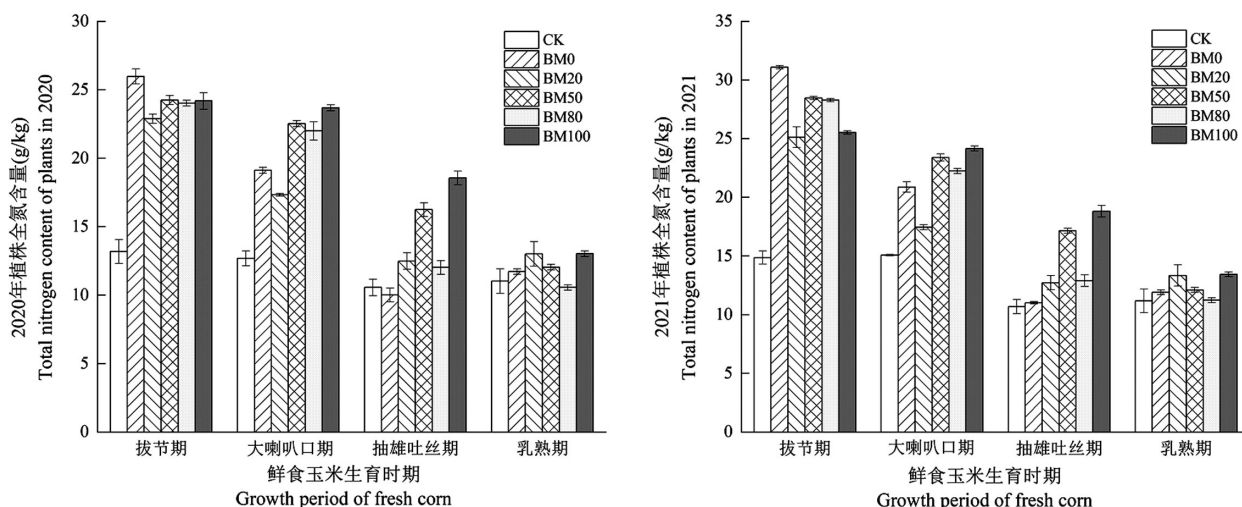


图1 不同施肥模式对植株全氮含量的影响

Fig.1 Effects of different fertilization mode on total nitrogen content in plants

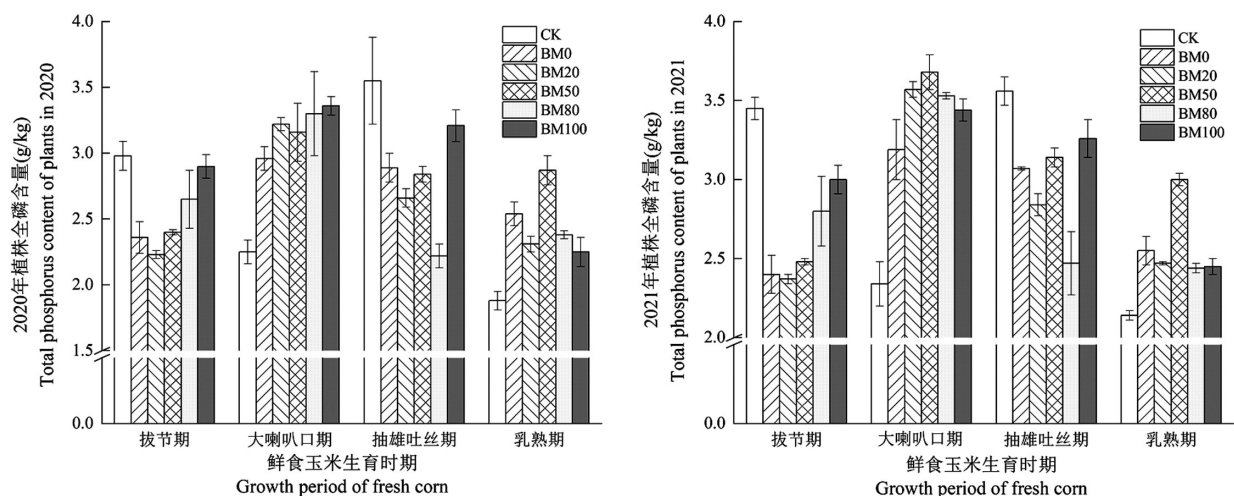


图2 不同施肥模式对植株全磷含量的影响

Fig.2 Effects of different fertilization mode on total phosphorus content in plants

图2为鲜食玉米不同施肥处理各生育时期植株全磷含量的变化。植株全磷含量除CK外其余处理均在大喇叭口期累积后下降,其中BM20处理增幅最大。乳熟期全磷含量最大的处理均为BM50,相比对应CK平均增加近46.50%。相比于2020年,2021年除BM0处理外,各生育时期植株全磷含量均有不同程度提高。随着沼肥施用量的增加,植物全磷含量在BM50处理下达到最大,表明BM50处理更有利于植物全磷含量的累积。

2.2.2 沼肥配施化肥对鲜食玉米子粒养分含量的影响

由表4可知,两年试验中鲜食玉米子粒全氮含量随着沼肥用量的增加,基本呈单峰变化。2020年

BM20处理子粒全氮含量最高。施加沼肥量最多的BM100处理子粒全氮含量低于BM20、BM50和BM80处理,2021年BM0处理子粒全氮含量最高,可见沼肥的过量施用在一定程度上会抑制玉米子粒氮含量的累积。2020年鲜食玉米子粒全磷含量最高的是BM100处理,2021全磷含量最高的是BM0处理,可见单施化肥或者沼肥与化肥配施均有利于玉米子粒全磷含量的累积。

对比两年鲜食玉米子粒养分含量,2021年各施肥处理的全磷含量均高于2020年,随着沼肥施用量的增加,植物全磷含量呈先下降再升高的趋势。BM50处理全磷含量两年对比结果增加最大,增幅达到92.79%。两年植物全氮含量最大值均出现在

表4 不同施肥模式对玉米子粒养分含量的影响

Table 4 Effects of different fertilization mode on nutrient contents of corn grains

g/kg

处 理 Treatment	全 氮 Total nitrogen		全 磷 Total phosphorus	
	2020	2021	2020	2021
CK	14.07±0.63 b	13.12±0.35 c	2.05±0.05 d	3.26±0.06 d
BM0	14.22±0.10 b	15.75±0.24 a	2.21±0.07 c	5.29±0.04 a
BM20	15.51±0.07 a	15.64±0.16 a	2.86±0.03 b	4.10±0.06 b
BM50	15.30±0.29 a	14.65±0.32 b	2.08±0.07 d	4.01±0.05 b
BM80	14.98±0.12 a	13.48±0.14 c	2.23±0.06 c	3.35±0.10 d
BM100	14.96±0.24 a	15.50±0.18 a	3.26±0.00 a	3.61±0.07 c

BM20处理,可知BM20处理有利于植株全磷和全氮含量的累积。

2.3 不同施肥模式对玉米产量的影响

2.3.1 沼肥配施对鲜食玉米产量结构的影响

2020年收获后测定玉米相关产量指标如表5所示。施用沼肥与单施化肥相比,玉米产量均有所下降。出现产量降低的原因在于试验地为首次施用沼肥,沼肥养分释放相对缓慢,短期内没有单施化肥对作物产生的效果强。收获期产量最高的是BM0处理,在各处理中BM50处理玉米产量降低幅度最小。此外穗重、穗粒数、百粒重等产量指标在BM50处理下相对较高,表明沼肥占比接近一半的施肥模式下玉米产量更为理想。

2021年收获后测定玉米相关产量指标,与BM0处理相比,配施沼肥的处理除BM50处理外玉米产量均有所下降。BM50相较BM0处理玉米产量增加53 kg/hm²。与CK处理相比,单施化肥、沼肥化肥配施、沼肥完全代替化肥施用均可以达到增产的效果。BM0处理产量高于沼肥化肥配施,可见部分沼肥代替化肥的处理其增产效果并不能优于全部化肥处理。除BM0处理外,随着沼肥施用量的增加,其产量增幅变化呈现出单峰变化,产量在BM50处理达到最大值,为10 276 kg/hm²,在全部配施沼肥处理中BM50产量最高,表明沼肥在配施过程中,BM50处理的施肥模式下产量相对更为理想。

表5 不同处理玉米产量及其构成

Table 5 Corn yield and composition under different treatments

年 份 Year	处 理 Treatment	穗重(g) Spike weight	穗粒数(粒) Kernels per spike	百粒重(g) 100-grain weight	产量(kg/hm ²) Yield
2020	CK	295.47±20.77 b	502.20±36.72 b	34.00±5.87 a	8 460 f
	BM0	339.00±17.49 a	658.40±42.15 a	36.27±3.26 a	10 105 a
	BM20	317.40±15.84 ab	583.40±80.13 ab	41.49±4.38 a	9 562 c
	BM50	319.60±11.95 ab	615.60±66.19 ab	34.99±5.05 a	9 721 b
	BM80	315.20±14.48 ab	583.40±54.23 ab	33.58±7.21 a	9 423 d
	BM100	313.00±9.08 ab	579.20±38.38 ab	33.01±3.26 a	9 158 e
2021	CK	258.45±31.44 b	688.34±78.62 a	21.30±4.29 d	8 879 f
	BM0	317.32±12.17 a	804.40±135.38 a	28.62±3.97 c	10 223 b
	BM20	313.36±21.46 a	736.40±82.49 a	33.75±3.60 a	10 164 c
	BM50	317.01±27.46 a	775.20±88.96 a	28.73±3.94 c	10 276 a
	BM80	306.67±24.30 ab	711.20±104.02 a	29.90±2.43 c	9 956 d
	BM100	330.41±28.27 a	700.80±80.87 a	32.22±7.89 b	9 823 e

对比两年产量数据,2021年各施肥处理产量同2020年均有所不同程度增加。在2021年中,BM50处理产量超过BM0处理达到最大,为10 276 kg/hm²,

表明BM50处理为增产的最优处理。

2.3.2 沼肥配施下鲜食玉米产量平台

采用线性加平台模型,对不同施肥模式下两年

鲜食玉米产量数据进行拟合(图3),分析沼肥施用模式与鲜食玉米产量之间的线性关系。当 $X < \text{BM}20$, $Y = 1\,494.26X + 8\,669.81$; 当 $X \geq \text{BM}20$, $Y = 10\,121.30X$,

相关系数 $R^2 = 0.962$ 。由此可以看出,随着沼肥占比的增加,鲜食玉米产量先增加后趋于稳定在平台上下,此时平台理论产量为 $10\,121\text{ kg/hm}^2$ 。

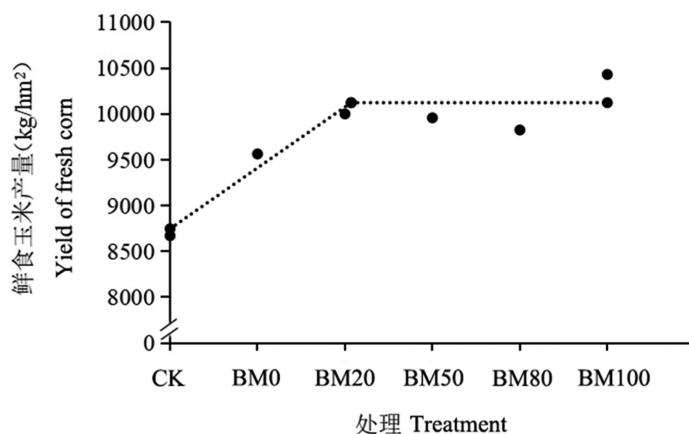


图3 鲜食玉米产量平台

Fig.3 Yield platform for fresh corn

3 结论与讨论

沼肥配施对于土壤肥力改善效果明显。大量研究表明,适当施用沼肥可以增加土壤养分^[30-32]。沼肥配施化肥对有机物质的固定具有积极作用。随着沼肥配比的增加,土壤有机质含量呈先升高后降低的趋势,说明适当的沼肥添加有利于土壤有机质含量增加^[33]。本研究于2021年乳熟期各项土壤速效养分最高值均为BM50处理,其中有机质含量为 26.37 g/kg ,较BM0处理增加 2.23 g/kg 。两年结果相比,BM50处理增幅最大,达到 22.77% 。此外,在所有沼肥处理中,土壤pH值较初始值均有增加,对于土壤酸碱性起到调节作用。

在养分含量方面,沼肥可以提供适宜的根际pH值和生长环境,使沼肥中的营养物质更易被植物吸收利用^[34]。研究表明,施用经 CO_2 饱和和处理后的沼肥能够减少鸡血菜的枯叶数,提高氮素同化性能^[35]。本研究两年全磷含量为BM50处理累积最多,全氮含量为BM20处理累积最多。宋三多^[36]在沼肥施用对稻麦轮作土壤及作物的养分研究中发现,高量沼肥施用下植株全氮含量最多。2020年子粒全氮含量最大值均出现在BM20处理,同比BM0处理,全氮含量增加 0.65 g/kg ,全磷含量增加 1.29 g/kg ,BM20处理子粒全磷和全氮含量累积最多。

沼肥配施能够有效提高鲜食玉米产量。研究结果显示,单施化肥、沼化配施、沼肥全量施用,与CK处理相比均达到增产效果。2021年BM50处理产量最高,比BM0处理增加 0.52% 。2021年产量相比

2020年均不同程度提升,BM50处理产量超过BM0处理,表明沼肥配施时间越长,提升作物产量的效果越明显,初步验证了沼肥具有后效性。产量线性加平台模型结果表明,在BM20至BM50处理之间存在某一施肥浓度梯度使得鲜食玉米产量到达平台,达到该施肥梯度后,即使再增加沼肥施肥量,鲜食玉米产量也不再增加。因此,综合考虑土壤肥力、植株养分含量、产量的前提下,沼肥施用模式推荐设置为BM50处理,即沼肥N替代 50% 化肥N。

参考文献:

- [1] ELENI I, DIEUDONNÉ-GUY O, NIKOLAOS V. Food waste co-digestion with sewage sludge—realising its potential in the UK[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 112: 267–274.
- [2] FERDOUS Z, ULLAH H, DATTA A, et al. Application of biogas slurry in combination with chemical fertilizer enhances grain yield and profitability of maize (*Zea mays* L.)[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2020, 51(19): 2501–2510.
- [3] 胡振民, 万青, 李欢, 等. 喷灌沼液对茶园土壤性质及茶叶产量和品质的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(11): 2757–2763. HU Z M, WAN Q, LI H, et al. Effects of sprinkler irrigation with biogas slurry on tea garden soil and tea yield[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(11): 2757–2763. (in Chinese)
- [4] XIE L F, LIU Q S, HAN W J, et al. Implementation scheme and analysis of monitoring and application technology of biogas manure in Northern Henan Province[J]. Agricultural Science, 2021, 11(2): 11–14.
- [5] 朱增学. 分析沼肥对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 山西农经, 2020(13): 102–104. ZHU Z X. The effects of biogas fertilizer on maize yield and soil fertility were analyzed[J]. Shanxi Agricultural Economy, 2020(13): 102–104. (in Chinese)

- [6] NKO A R. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 473–492.
- [7] 卜祥. 沼肥施用对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. *粮食科技与经济*, 2019, 44(11): 104–105, 123.
BU X. Effects of biogas manure application on maize yield and soil fertility[J]. *Food Science and Technology and Economy*, 2019, 44(11): 104–105, 123. (in Chinese)
- [8] 袁晶晶, 齐学斌, 赵京, 等. 生物炭配施沼液对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 80–86.
YUAN J J, QI X B, ZHAO J, et al. The effect of biochar amendment and slurry application on soil aggregation and organic carbon distribution[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(1): 80–86. (in Chinese)
- [9] 石先罗, 张卫东, 王风, 等. 沼液沼渣农用生态环境风险研究进展[J]. *生态经济(学术版)*, 2014, 30(1): 12–15, 19.
SHI X L, ZHANG W D, WANG F, et al. Study on risk of agricultural ecological environment on biogas slurry and residue[J]. *Ecological Economy*, 2014, 30(1): 12–15, 19. (in Chinese)
- [10] 王东升, 黄忠阳, 吴旭东, 等. 不同施肥对鲜食玉米生长及肥料农学利用率的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 299–304.
WANG D S, HUANG Z Y, WU X D, et al. Effects of different fertilization on fruit maize growth and fertilizer agronomic utilization rate[J]. *Soils*, 2021, 53(2): 299–304. (in Chinese)
- [11] 赵春江, 李瑾, 冯献, 等. “互联网+”现代农业国内外应用现状与发展趋势[J]. *中国工程科学*, 2018, 20(2): 50–56.
ZHAO C J, LI J, FENG X, et al. Application status and trend of “Internet Plus” modern agriculture in China and abroad[J]. *Strategic Study of CAE*, 2018, 20(2): 50–56. (in Chinese)
- [12] 顾晓雯, 朱群, 郑荣华, 等. 有机无机复混肥在鲜食玉米上的应用效果初探[J]. *上海农业科技*, 2022(1): 105–106.
GU X W, ZHU Q, ZHENG R H, et al. Preliminary study on the application effect of organic–inorganic compound fertilizer on fresh corn[J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 2022(1): 105–106. (in Chinese)
- [13] 吴定志, 陆清忠, 刘元晴. 沼肥施用不同用量对玉米产量的影响[J]. *耕作与栽培*, 201(1): 42, 47.
WU D Z, LU Q Z, LIU Y Q. Effects of different application rates of biogas manure on maize yield[J]. *Tillage and Cultivation*, 2012(1): 42, 47. (in Chinese)
- [14] 肖阳. 农业绿色发展背景下我国化肥减量增效研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [15] LIU Z, SUN K, LIU W, et al. Responses of soil carbon, nitrogen, and wheat and maize productivity to 10 years of decreased nitrogen fertilizer under contrasting tillage systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 19: 104–114.
- [16] QUAKERNACK R, PACHOLSKI A, TECHOW A, et al. Ammonia volatilization and yield response of energy crops after fertilization with biogas residues in a coastal marsh of northern Germany[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 160: 66–74.
- [17] CAI M, YU X B, ZHOU W W, et al. Effect of slurry on soil quality[J]. *Tropical Plant Biology*, 2014, 5(1): 52–56.
- [18] 曾繁星. 沼肥与化肥配施对春玉米生育、产量及土壤酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
- [19] 刘再奇. 沼肥施用对玉米产量和土壤肥力的影响[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
- [20] 赵麒麟. 旱旱轮作模式下沼液连续施用对土壤质量和玉米产量及品质的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012.
- [21] 卢柏山, 董会, 赵久然, 等. 不同鲜食玉米品种适采期氨基酸含量分析[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(11): 132–142.
LU B S, DONG H, ZHAO J R, et al. Amino acid content analysis of different fresh corn varieties at suitable harvest time[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(11): 132–142. (in Chinese)
- [22] 荣美琪, 姜龙, 于海燕, 等. 优质甜糯玉米吉科糯18的选育及其高产栽培技术[J]. *粮食问题研究*, 2022(1): 41–43.
RONG M Q, JIANG L, YU H Y, et al. Breeding and high-yielding cultivation techniques of high-quality sweet-waxy maize Jikenuo 18[J]. *Grain Issues Research*, 2022(1): 41–43. (in Chinese)
- [23] LIU Z, SUN K, ZHENG B, et al. Impacts of straw, biogas slurry, manure and mineral manure applications on several biochemical properties and crop yield in a wheat–maize cropping system[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2019, 65(1): 1–8.
- [24] 路运才, 张郑伟, 肖洋, 等. 施用沼渣对玉米产量及相关农艺性状的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(24): 67–70.
LU Y C, ZHANG Z W, XIAO Y, et al. Effect of biogas residue on yield and other agronomic traits in maize[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(24): 67–70. (in Chinese)
- [25] 王家军, 刘杰, 张瑞萍, 等. 沼渣与化肥配合施用对玉米生产的影响[J]. *江苏农业科学*, 2012, 40(5): 48–50.
WANG J J, LIU J, ZHANG R P, et al. Effect of combined application of biogas residue and chemical fertilizer on maize production[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2012, 40(5): 48–50. (in Chinese)
- [26] 祝延立. 沼气废弃物(沼渣、沼液)资源化利用技术研究与示范[D]. 长春: 吉林省农业科学院, 2015.
- [27] 赵庆祥, 李焕明. 沼肥不同施用方法对玉米产量的影响[J]. *耕作与栽培*, 2004(5): 50–58.
ZHAO Q X, LI H M. Effects of different application methods of biogas fertilizer on maize yield[J]. *Tillage and Cultivation*, 2004(5): 50–58. (in Chinese)
- [28] 李晓萍, 梁哲军, 杨志国, 等. 土壤有机质测定方法的改进与探索[J]. *现代农业科技*, 2021, 20(2): 155–157.
LI X P, LIANG Z J, YANG Z G, et al. Improvement and exploration of soil organic matter determination method[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2021, 20(2): 155–157. (in Chinese)
- [29] 侯建伟, 邢存芳, 杨莉琳. 土壤碱解氮测定方法优化改革[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 46(7): 45–49.
HOU J W, XING C F, YANG L L. Optimization reform of soil available nitrogen determination method[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2021, 46(7): 45–49. (in Chinese)
- [30] XU M, XIAN Y, WU J, et al. Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice–rape rotation ecosystem over 3 years[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19: 2534–2542.

(下转第108页)

- [34] CHAER G, FEMANDES M, MYROLD D, et al. Comparative resistance and resilience of soil microbial communities and enzyme activities in adjacent native forest and agricultural soils[J]. *Microbial Ecology*, 2009, 58: 414–424.
- [35] HINSINGER P, HERRMANN L, LESUEUR D, et al. Impact of roots, microorganisms and microfauna on the fate of soil phosphorus in the rhizosphere[J]. *Annual Plant Reviews Volume 48: Phosphorus Metabolism in Plants*, 2015, 48: 375–407.
- [36] 李亚玲, 龙书生, 张宇宏, 等. 玉米对镰刀菌茎腐病抗性的生化反应[J]. *中国农学通报*, 2005(10): 299–302.
- LI Y L, LONG S S, ZHANG Y H, et al. Biochemical reaction of corn resistance to stalk rot caused by *Fusarium graminearum*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005(10): 299–302. (in Chinese)
- [37] ZHANG G, WANG F, QIN J, et al. Efficacy assessment of antifungal metabolites from *Chaetomium globosum* No.05, a new biocontrol agent, against *Setosphaeria turcica*[J]. *Biological Control*, 2013, 64(1): 90–98.
- [38] TIRUMALE S, WANI N. Biological control of phytopathogenic fungi using different extracts of *Chaetomium cupreum*[J]. *Biological Control*, 2018, 11(9): 328.
- [39] 梁建根, 施跃峰, 竺利红, 等. 植物病害生物防治的研究现状[J]. *现代农业科技*, 2008(18): 158–159.
- LIANG J G, SHI Y F, ZHU L H, et al. Research status of biological control of plant diseases[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2008(18): 158–159. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)

(上接第99页)

- [31] WANG L, GUO S, WANG Y, et al. Poultry biogas slurry can partially substitute for mineral fertilizers in hydroponic lettuce production[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 26: 659–671.
- [32] TERHOEVEN-URSELMANS T, SCHELLER E, RAUBUCH M, et al. CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42: 297–302.
- [33] ZHANG H L, LI S X, ZHENG X Q, et al. Effects of biogas slurry combined with chemical fertilizer on soil bacterial and fungal community composition in a paddy field[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 1–13.
- [34] GODDEK S, SCHMAUTZ Z, SCOTT B, et al. The effect of anaerobic and aerobic fish sludge supernatant on hydroponic lettuce[J]. *Agronomy-Basel*, 2016, 6(2): 37–49.
- [35] LIANG F H, XU L, JI L, et al. A new approach for biogas slurry disposal by adopting CO₂-rich biogas slurry as the flower fertilizer of *Spathiphyllum*: Feasibility, cost and environmental pollution potential[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 7: 245–233.
- [36] 宋三多, 刘汉军, 刘轶豪, 等. 沼肥施用对成都平原稻麦轮作土壤及作物养分和重金属含量的影响[J]. *生态科学*, 2018, 37(1): 35–41.
- SONG S D, LIU H J, LIU Y H, et al. Effects of biogas manure application on nutrient and heavy metal content in soil and crop under rice-wheat rotation in Chengdu plain[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(1): 35–41. (in Chinese)

(责任编辑:姜媛媛)