

猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米碳代谢 关键酶、产量及品质的影响

刘春光^{1,2}, 马襄鸿^{1,2}, 岳玉兰¹, 武俊男^{1,2}, 耿玉辉³, 王立春^{1,2}, 程正海^{1,2}

(1. 吉林省农业科学院, 长春, 130033; 2. 农业部东北植物营养与农业环境重点实验室, 长春, 130033;

3. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春, 130118)

摘要: 在吉林省松原市宁江区大洼镇开展两年的田间试验, 明确猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米碳代谢的调控效应, 确定猪粪秸秆堆肥替代化肥比例。采用裂区试验设计, 主区设置2个猪粪秸秆堆肥施用量, 副区设置堆肥替代化肥比例3个水平, 探讨猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米碳代谢、产量及品质的影响。结果表明, 随着堆肥替代化肥比例增加, 玉米碳代谢水平逐渐增强, 玉米的产量及品质逐步提升, 堆肥 20 000 kg/hm² 替代 20% 化肥 (C2F2) 处理表现最佳, 相较不能堆肥、常规施肥 (F0) 处理条件下春玉米 PEP 羧化酶活性、RUBP 羧化酶活性分别提高了 29.69%、19.03%。产量提高了 18.6%, 淀粉、粗蛋白、脂肪含量分别提高了 6.73%、12.90%、14.24%。综上所述, 施用猪粪秸秆堆肥 20 000 kg/hm² 替代 20% 化肥可以显著提高春玉米碳代谢关键酶活性、产量及品质。

关键词: 春玉米; 堆肥; 碳代谢; 产量; 品质

中图分类号: S513.062

文献标识码: A

Effects of Pig Manure Straw Compost Instead of Chemical Fertilizer on Key Enzymes of Carbon Metabolism, Yield, and Quality of Spring Maize

LIU Chun-guang^{1,2}, MA Xiang-hong^{1,2}, YUE Yu-lan¹, WU Jun-nan^{1,2}, GENG Yu-hui³,

WANG Li-chun^{1,2}, CHENG Zheng-hai^{1,2}

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033; 2. Northeast Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment, Ministry of Agriculture, Changchun 130033; 3. College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: To clarify the regulatory effect of pig manure straw compost replacing chemical fertilizer on carbon metabolism of spring maize, and determine the proportion of pig manure straw compost replacing chemical fertilizer. Conduct field experiments in Songyuan City, Jilin Province. Using a split zone experimental design, two levels of pig manure straw compost application were set in the main area, and three levels of compost substitution for chemical fertilizer were set in the sub area to explore the effects of pig manure straw compost substitution for chemical fertilizer on carbon metabolism, yield, and quality of spring maize. The results showed that as the proportion of compost replacing chemical fertilizers increased, the carbon metabolism level of corn gradually increased, and the yield and quality of corn gradually improved. The C2F2 treatment performed the best, and compared with the F0 treatment, the PEP carboxylase activity and RUBP carboxylase activity of spring corn increased by 29.69% and 19.03%, respectively. The production increased by 18.6%. The content of starch, crude protein, and fat increased by 6.73%, 12.90%, and 14.24%, respectively. In summary, applying 20 000 kg/ha of pig manure straw compost instead of 20% chemical fertilizer can significantly improve the activity of key enzymes in carbon metabolism, yield, and quality of spring maize.

Key words: Spring maize; Composting; Carbon metabolism; Yield; Quality

录用日期: 2023-05-24

基金项目: 吉林省科技发展规划项目(20210404007NC)、黑龙江省自然科学基金项目(SS2022C003)

作者简介: 刘春光(1974-), 助理研究员, 主要从事农业微生物及农业废弃物资源化利用研究。E-mail: Liu_cg51@163.com

马襄鸿为本文共同第一作者。

王立春和程正海为本文通信作者。

近年来,我国规模化种植业和养殖业发展势头强劲,产生了大量的秸秆与畜禽粪便。我国秸秆年均产量约占全球秸秆资源量的20%~30%^[1],每年会产生约38亿t畜禽粪便^[2]。但是目前我国秸秆和粪污依然处在高消耗、高污染、低利用的状况^[3],尤其以畜禽粪便更为突出。因此,以粪污与秸秆作为堆肥原料,将其进行好氧发酵,生产优质的有机类肥料,不仅能解决畜禽粪便和秸秆造成的污染问题,改善人居环境,同时实现了农业废弃物资源化利用,对于推动我国农业绿色发展具有重要意义。

玉米作为我国重要的粮食作物、饲料作物及工业原料,玉米的高产、稳产对于保障国家粮食安全具有重要意义^[4]。近年来,吉林省春玉米产量和种植面积分别达到我国玉米总产量和种植面积的11.68%、10.22%^[5],玉米产量逐年攀升。但肥料过度施用不仅浪费肥料、增加成本又造成土壤微生态环境失衡,使微生物多样性降低^[6],成为限制产量增长的重要因素。有研究证实,施用堆肥产品可以显著促进植物生长^[7],增加土壤肥力、微生物多样性和功能^[8]。施用富含微生物的槟榔堆肥使产量比对照组提高14.89%^[9]。秸秆还田、化肥减量配施有机肥能够有效提高土壤速效养分及有机质含量,提升土壤微生物碳源利用能力^[10],提高土壤有机碳组分含量、碳转化酶活性^[11]。康彩睿^[12]研究表明,在陇中旱农区有机肥化肥配施可以改善玉米碳代谢水平,提高干物质积累量和产量。此前研究多侧重于商品有机肥对作物的影响,对于施用田间堆沤肥替代化肥适宜用量尚不明确。本研究探讨田间猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米碳代谢及产品质量的影响,为实现农业废弃物资源化利用和规模化种植业和养殖业种-养循环提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于吉林省松原市宁江区大洼镇民乐村,该地区属大陆季风气候,光温资源丰富,降雨量较少,年平均气温4.5℃,年平均日照2 900 h,年均降雨量400~500 mm,蒸发量1 500~1 900 mm,无霜期135~140 d。试验地采用玉米连作模式,土壤类型为黑钙土,土壤质地为砂壤,试验地0~20 cm土层土壤全氮、全磷、全钾和有机质含量分别为1.03、0.47、24.03和17.55 g/kg。

1.2 试验材料

将猪粪与粉碎后的玉米秸秆(≤15 cm)按质量比2:1的比例充分混拌,在混拌过程中加入稀释后的微生物菌剂并均匀喷水,制成宽6 m、长度40 m、高2.5 m的堆体,堆体含水率达到50%~55%。建堆完成后使用高分子纳米膜覆盖堆体,每7 d使用风机通风2~3 h,进行好氧发酵,堆置30~35 d即可完成堆肥。待堆肥陈化后防水保存,于春季整地之前进行施用。经检测,堆肥充分腐熟后,其有机质含量达到了45.5%,全氮、全磷、全钾含量分别达到3.11%、1.69%、1.03%,pH值为8.0。

1.3 试验设计

试验于2021、2022年进行,供试玉米品种为富民985,种植密度8.0万株/hm²,株间距19.2 cm。试验采用裂区试验设计,设堆肥施用量和替代化肥比例2个试验因素。主区堆肥施用量设置2个水平,C1(施用堆肥10 000 kg/hm²)、C2(施用堆肥20 000 kg/hm²),副区设置3个替代化肥比例:F0(常规施肥)、F1(堆肥替代10%化肥)和F2(堆肥替代20%化肥),两两交互,各处理3次重复,共18个试验小区,每个小区面积30 m²。田间具体试验设计见表1。

1.4 样品采集及测定

玉米碳代谢关键酶活性的测定:分别于玉米的拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期及完熟期选取

表1 试验处理
Table 1 Experimental treatment kg/hm²

处 理 Treatment	肥料用量 Fertilization amount			
	堆肥用量 Compost application rate	K ₂ O	P ₂ O ₅	N
F0	0	80	80	180
C1F0	10 000	80	80	180
C1F1	10 000	72	72	162
C1F2	10 000	64	64	144
C2F0	20 000	80	80	180
C2F1	20 000	72	72	162
C2F2	20 000	64	64	144

具有代表性植株4株,采集其穗位叶,用纱布擦拭叶片表面后去除中脉、剪碎、混匀,迅速使用液氮速冻。核酮糖-1,5-二磷酸(RuBP)羧化酶活性的测定参照 Thomas H^[13]的方法,磷酸烯醇式丙酮酸(PEP)羧化酶活性的测定参照施教耐^[14]的方法。

玉米产量的测定:参考重量均值法于田间采集10穗鲜穗样本带回,用以考察千粒重、穗粒数等玉米产量及其构成因素。产量计算中,子粒含水量按14%计算。

玉米品质的测定:于玉米完熟期分别选取长势均匀的3株果穗中上部子粒,测定玉米子粒蛋白质、脂肪、淀粉。蛋白质含量采用凯氏法测定,脂肪含量采用油重法测定^[15],淀粉含量采用蒽酮硫酸法测定^[16]。

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据统计及作图,采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米碳代谢关键酶活性的影响

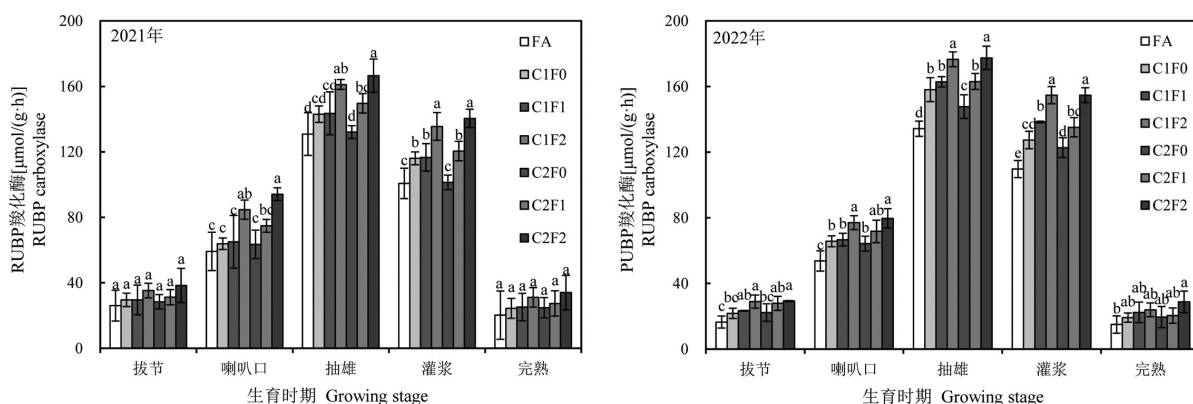


图1 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米RUBP羧化酶的影响

Fig.1 Effect of pig manure straw compost instead of chemical fertilizer on RUBP carboxylase activity in spring maize

2.1.2 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米PEP羧化酶的影响

猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米PEP羧化酶的影响如图2所示。玉米PEP羧化酶随着生育期的推进呈现出先增高后降低的变化趋势,酶活性在玉米拔节期开始逐渐添加,在玉米的抽雄期达到峰值,在玉米完熟期降到最低。施用堆肥替代化肥处理均高于农户常规施肥处理,在两种堆肥施用量条件下,随着堆肥替代化肥比例升高,酶活性逐渐升高,且均表现为施用堆肥替代20%化肥时酶活性最高。在玉米的抽雄期,施用堆肥替代20%化肥处理条件下酶活

2.1.1 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米RUBP羧化酶的影响

猪粪秸秆堆肥替代不同比例化肥对春玉米RUBP羧化酶的影响如图1所示。试验结果表明,玉米RUBP羧化酶活性随着生育期的推进总体呈现出先增高后降低的变化趋势,在玉米的抽雄期达到峰值,在玉米的完熟期,玉米RUBP羧化酶活性降到最低。在玉米生长发育的整个时期,在同一堆肥施用量条件下,随着堆肥替代化肥比例增加,玉米RUBP羧化酶活性随之增加,在抽雄期,施用堆肥替代20%化肥处理较使用堆肥不替代化肥处理之间差异显著。施用堆肥10 000 kg/hm²替代20%化肥处理(C1F2)较施用堆肥10 000 kg/hm²不替代化肥处理(C1F0)提高了12.18%,施用堆肥20 000 kg/hm²替代20%化肥处理(C2F2)较施用堆肥20 000 kg/hm²不替代化肥处理(C2F0)提高了23.10%。在玉米的抽雄期,施用猪粪秸秆堆肥替代20%化肥处理(C2F2)条件下玉米穗位叶RUBP羧化酶活性最高,显著高于农户常规施肥处理(F0),C2F2处理较F0处理提高了29.69%。由此说明,施用堆肥替代化肥可以显著提高玉米RUBP羧化酶活性。

性显著高于施用堆肥不替代化肥处理,C1F2处理较C1F0处理提高了12.64%,C2F2处理较C2F0处理提高了17.93%。当施用堆肥20 000 kg/hm²替代20%化肥时,玉米穗位叶PEP羧化酶活性最高,较农户常规施肥处理条件下的酶活性提高了19.03%。

2.2 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米产量的影响

施用猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米产量的影响如表2所示。施用猪粪秸秆堆肥显著提高了春玉米的千粒质量和穗粒数,其中对千粒质量的提高更为显著,从而显著提高了春玉米的产量。玉米产量及产量构成因素总体表现为随着堆肥替代化肥的比

例增加,玉米的穗粒数、千粒重及产量也随之增加;在同一施肥量处理条件下,堆肥替代20%化肥时,玉米产量最高,显著高于堆肥不替代化肥处理,C1F2处理较C1F0处理产量提高了15.20%,C2F2处理较

C2F0处理产量提高了18.33%,且施用堆肥20 000 kg/hm²替代20%化肥玉米产量最高,较F0处理提高了18.60%。

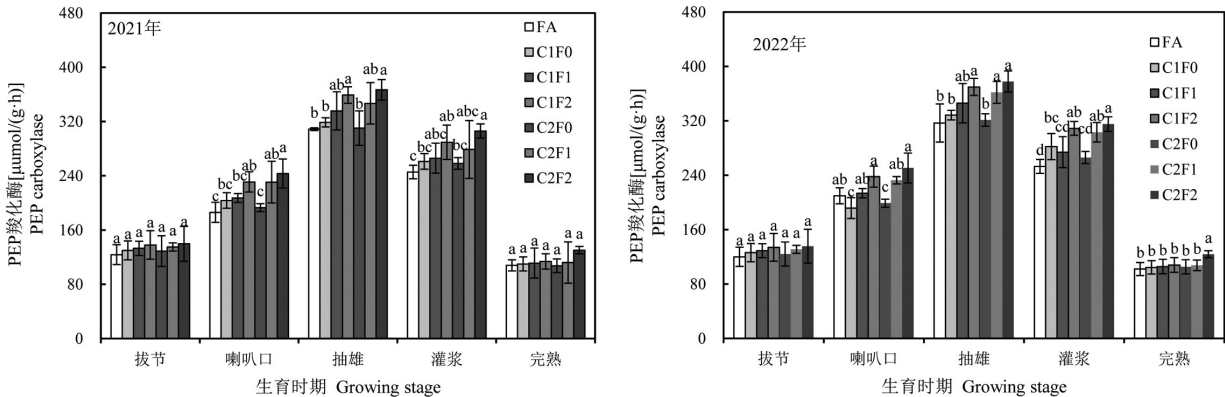


图2 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米 PEP 羧化酶的影响

Fig.2 Effect of pig manure straw compost instead of chemical fertilizer on spring maize PEP carboxylase

表2 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米产量及产量构成因素的影响

Table 2 Effect of pig manure straw compost instead of chemical fertilizer on spring maize yield and yield components

年 份 Year	处 理 Treatment	穗粒数 Kernel number	千粒重(g) 1000-grain weight	产量(kg/hm ²) Yield	增产量(kg/hm ²) Yield increase amount	增产率(%) Yield increase rate
2021 年	F0	510.37 b	263.45 c	10 054.57 b	—	—
	C1F0	511.60 b	271.37 c	10 336.53 b	281.96	2.80
	C1F1	522.67 ab	274.80 c	10 519.41 b	464.84	4.62
	C1F2	530.27 ab	302.70 a	11 890.36 a	1 835.78	18.26
	C2F0	519.08 b	265.00 c	10 065.11 b	10.53	0.10
	C2F1	523.79 ab	287.67 b	11 070.18 ab	1 015.61	10.10
	C2F2	541.16 a	304.28 a	12 051.03 a	1 996.45	19.86
2022 年	F0	520.93 c	263.45 c	10 310.40 c	—	—
	C1F0	520.96 c	269.04 c	10 438.00 c	127.60	1.24
	C1F1	531.17 abc	283.80 b	10 980.30 bc	669.90	6.50
	C1F2	538.88 ab	300.27 a	12 042.66 a	1 732.26	16.80
	C2F0	526.87 bc	267.07 c	10 346.02 c	35.62	0.35
	C2F1	538.72 ab	288.34 b	11 573.03 ab	1 262.63	12.25
	C2F2	543.24 a	304.23 a	12 098.35 a	1 787.95	17.34

注:同列数据后不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平下差异显著(Duncan's法),*代表 $P<0.05$ 。下表同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P<0.05$ level among different treatments(Duncan's method),* significant at $P<0.05$. The same below.

2.3 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米品质的影响

猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米品质的影响如表3所示。施用猪粪秸秆堆肥并减施化肥显著提高了春玉米品质,在两种堆肥施用量条件下,随着堆肥替代化肥比例增加,玉米的淀粉、粗蛋白以及脂肪含量也随之增加,在两种堆肥施用量条件下,施用堆肥替代20%化肥处理春玉米品质较施用堆肥不替代化

肥处理条件下春玉米品质差异显著;其中施用猪粪秸秆堆肥20 000 kg/hm²替代20%化肥(C2F2)处理表现为最优处理,其获得的品质显著高于农户常规施肥,C2F2处理条件下,玉米的淀粉含量、粗蛋白含量以及脂肪含量分别较F0处理提高了6.73%、12.90%、14.24%。

表3 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米品质的影响

Table 3 Effect of pig manure straw compost instead of chemical fertilizer on the quality of spring maize %

年 份 Year	处 理 Treatment	淀 粉 Starch	粗蛋白 Crude protein	脂 肪 Fat
2021年	F0	65.64 c	8.64 c	4.38 c
	C1F0	69.16 abc	8.79 bc	4.46 bc
	C1F1	69.72 abc	9.06 abc	4.69 abc
	C1F2	73.80 ab	9.58 ab	4.87 a
	C2F0	68.23 bc	8.74 c	4.37 bc
	C2F1	73.06 ab	9.21 abc	4.79 ab
	C2F2	74.35 a	9.63 a	4.98 a
2022年	F0	65.82 c	8.40 d	4.29 c
	C1F0	67.31 bc	9.03 bed	4.35 c
	C1F1	69.90 ab	9.03 abc	4.74 abc
	C1F2	72.50 a	9.71 ab	5.04 ab
	C2F0	67.31 bc	8.98 cd	4.44 bc
	C2F1	70.46 ab	9.24 abc	5.01 ab
	C2F2	73.61 a	9.77 a	5.08 a

3 结论与讨论

3.1 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米碳代谢的影响

碳氮代谢是作物体内基础代谢和重要的生理过程^[17],其在作物生育期间的动态变化直接影响光合产物的形成和转化、矿质营养的吸收及蛋白质的合成^[18],对于作物的产量及品质的形成具有重要意义。RuBP羧化酶和PEP羧化酶都是碳代谢的关键酶^[19],其活性与光合作用和产量高度相关。有研究表明,有机肥部分替代化肥可以显著提高光合酶活性和氮代谢酶活性^[20],施用有机肥可以提高作物碳代谢水平,促进作物碳同化代谢过程^[21]。在本研究中,施用猪粪秸秆堆肥替代化肥,显著提高了玉米碳代谢关键酶活性,随着堆肥替代化肥比例增加,玉米碳代谢关键酶活性逐渐增加,当施用堆肥替代20%化肥时,玉米PEP羧化酶和RUBP羧化酶活性达到最高,显著高于农户单施化肥处理。这可能是由于堆肥替代部分化肥条件下,堆肥中养分丰富,肥效长久,在一定程度上为作物提供氮源和碳源,提高了作物的碳代谢水平。

3.2 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米产量的影响

化学肥料为粮食增产增收提供大量养分,但过量使用为农业发展造成负面影响也不可忽视,因此有越来越多的科技工作者投身到农业绿色发展研究当中,使用有机肥替代化肥、有机肥和化肥配合施用都取得了一些进展。施用堆肥可以提高土壤有效

性、提高土壤养分^[22]、增加土壤微生物含量^[23],提高碳源和氮源的有效性^[24],有利于作物吸收利用土壤中的养分,并进行转化和释放,促进作物根系生长及对矿物质元素的吸收,从而显著提高玉米株高和叶面积^[25],提高玉米产量^[3]。在本研究中,施用猪粪秸秆堆肥替代化肥可以显著提高春玉米穗粒数与千粒重,从而显著提高春玉米的产量^[26]。在同一堆肥施用量条件下,随着堆肥替代化肥比例升高,玉米产量也随之升高,施用堆肥20 000 kg/hm²较施用堆肥10 000 kg/hm²替代20%化肥效果较好。当施用堆肥20 000 kg/hm²替代20%化肥时,玉米产量最高达到12 074.69 kg/hm²,较农户常规施肥处理提高了18.6%,平均增产1 892.20 kg/hm²。这是由于施用堆肥替代部分化肥处理与农户常规施用化肥处理相比,养分更为全面,使用化学肥料可以满足作物生长发育重要时期的养分需求,且容易被作物吸收利用,但其养分单一、易损失,而堆肥养分全面但肥效缓慢。因此,堆肥与化学肥料配合施用既可以满足作物生长发育重要时期对于养分的大量需求又可以保障作物养分的均衡,从而促进玉米的高产稳产。

3.3 猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米品质的影响

玉米子粒中的营养成分主要包括淀粉、蛋白质、脂肪等^[28],其主要营养成分含量对于评价玉米营养品质有重要影响。崔新卫等^[29]研究表明,使用有机无机肥配施可以改善作物品质,但在不同作物、不同土壤环境下,作物品质指标的响应不同。本研究结果表明,C2F2试验处理最佳,两年之间C2F2处理差

异不显著,可能是由于试验时间较短,没有表现出差异水平,还应长期定位试验进行研究。当施用猪粪秸秆堆肥 20 000 kg/hm²替代 20%化肥时显著提高了春玉米品质指标,较农户单独施用化肥处理条件下,春玉米的淀粉、粗蛋白、脂肪含量分别提高了 6.73%、12.90%、14.24%。可能是由于猪粪秸秆堆肥与化学肥料配合施用,使玉米子粒灌浆时期获得了充足的大量元素,并且在猪粪秸秆堆肥有丰富、长期的养分供应,以及在堆肥中的生理活性物质促进了春玉米的生长发育以及子粒的形成^[30]。

本研究通过探讨猪粪秸秆堆肥替代化肥对春玉米碳代谢、产量及品质的影响,明确了猪粪秸秆堆肥替代全量化肥比例。研究结果表明,施用猪粪秸秆堆肥替代化肥可以显著提高春玉米碳代谢关键酶活性,能够显著提高春玉米的产量及品质。随着堆肥替代化肥比例增加,玉米碳代谢水平逐渐增强,玉米的产量及品质逐步提升,当施用猪粪秸秆堆肥 20 000 kg/hm²替代 20%全量化肥时效果最佳。

参考文献:

- [1] 李文龙,马孝博,张金波,等. 农作物秸秆综合处理及有效利用[J]. 中国科技信息, 2021(16): 41-42.
LI W L, MA X B, ZHANG J B, et al. Comprehensive treatment and effective utilization of crop straw[J]. China Science and Technology Information, 2021(16): 41-42. (in Chinese)
- [2] 李庆,秦文杰,曹秀芳,等. 基于黑水虻转化的畜禽粪便资源化利用研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 169-175.
LI Q, QIN W J, CAO X F, et al. Research progress in the resource utilization of livestock and poultry feces based on the transformation of black water flies[J]. Journal of Huazhong Agricultural University 2022, 41(6): 169-175. (in Chinese)
- [3] 范铭,李强,张丹,等. 堆肥替代化肥对玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(02): 143-146.
FAN M, LI Q, ZHANG D, et al. The impact of compost replacing chemical fertilizers on maize yield and water use efficiency[J]. Agricultural Research in Arid Regions, 2017, 35(2): 143-146. (in Chinese)
- [4] 陈艺博,杨琴,王晶晶,等. 不同根构型玉米品种间作对根系分布、养分积累和产量的影响[J]. 核农学报, 2023, 37(3): 594-605.
CHEN Y B, YANG Q, WANG J J, et al. Effects of intercropping different root configuration maize varieties on root distribution, nutrient accumulation, and yield[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2023, 37(3): 594-605. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [6] 马阳,郑卫红,张培,等. 不同调控措施对甜瓜土壤性质、细菌多样性和产量的影响[J]. 河北农业大学学报, 2022, 45(1): 48-54.
MA Y, ZHENG W H, ZHANG P, et al. Effects of different regulatory measures on soil properties, bacterial diversity, and yield of muskmelon[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2022, 45(1): 48-54. (in Chinese)
- [7] PEI F Y, CAO X B, SUN Y C, et al. Manganese dioxide eliminates the phytotoxicity of aerobic compost products and converts them into a plant friendly organic fertilizer[J]. Bioresource Technology, 2023: 373.
- [8] HERNÁNDEZ-LARA A, ROS M, CUARTERO J, et al. Effects of solarization combined with compost on soil pathogens and the microbial community in a spinach cropping system[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2023: 346.
- [9] DORNAL V P, GATTEPPA N T, DHANANJAYA B C, et al. Effect of microbial enriched Arecahusk compost on growth and yield attributes of maize in Typic Rhodustalf of Southern Transitional Zone of Karnataka[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2023, 54(5): 594-605.
- [10] 刘亚军,王文静,李敏,等. 无机肥与有机肥配施对甘薯土壤养分变化及微生物碳代谢功能的影响[J]. 河南农业科学, 2022, 51(7): 75-84.
LIU Y J, WANG W J, LI M, et al. Effects of combined application of inorganic and organic fertilizers on soil nutrient changes and microbial carbon metabolism in sweet potato[J]. Henan Agricultural Science, 2022, 51(7): 75-84. (in Chinese)
- [11] 张伟彬. 不同比例化肥与有机肥配施对土壤碳组分及微生物碳代谢的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(15): 188-195.
ZHANG W B. Effects of different proportions of chemical fertilizers and organic fertilizers on soil carbon components and microbial carbon metabolism[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2022, 50(15): 188-195. (in Chinese)
- [12] 康彩睿. 陇中旱农区培肥方式对玉米产量形成及碳代谢特征的影响[D]. 甘肃农业大学, 2020.
- [13] THOMAS H M W G T. Expression of the stay-green character introgressed into *Lolium temulentum* Ceres from a senescence mutant of *Festuca pratensis*[J]. Theoretical and Applied Genetics, 1999, 99: 92-99.
- [14] 施教耐,吴敏贤,查静娟. 植物磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶的研究——I. PEP羧化酶同功酶的分离和变构特性的比较[J]. 植物生理学报, 1979(3): 225-235.
SHI J N, WU M X, ZHA J J. Studies on plant phosphoenolpyruvate carboxylase. Isolation and comparison of isozymes of pep carboxylase and their allosteric properties[J]. Journal of Plant Physiology, 1979(3): 225-235. (in Chinese)
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 284-289.
- [16] 张治安. 植物生理学实验技术[M]. 吉林: 吉林大学出版社, 2008: 107-108.
- [17] 黎书会,童清,唐红燕,等. 以桉树皮为原料的有机基质对植物苗期生长酶活性的影响[J/OL]. 热带作物学报: 1-12[2023-03-23].
LI S H, TONG Q, TANG H Y, et al. The effect of organic substrates made from eucalyptus bark on the activity of growth enzymes in plant seedlings[J/OL]. Journal of Tropical Crops, 2023, 2: 1-12. (in Chinese)
- [18] 牛巧龙,曹高焱,杜锦,等. 施氮量对玉米产量及叶片部分酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(1): 187-192.

- NIU Q L, CAO G Y, DU J, et al. Effect of nitrogen application rate on maize yield and partial enzyme activity in leaves[J]. North China Agricultural Journal, 2017, 32(1): 187–192. (in Chinese)
- [19] 孙 扬,谷 岩,吴春胜.膜下滴灌下玉米叶片光合、荧光特性及碳代谢酶活性研究[J].灌溉排水学报,2016,35(S2):14–16.
- SUN Y, GU Y, WU C S. Study on photosynthetic and fluorescence characteristics and carbon metabolism enzyme activity of maize leaves under drip irrigation under mulch[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(S2): 14–16. (in Chinese)
- [20] 杨 凯,吴 倩,蒲瑶瑶,等.熏蒸条件下有机肥部分替代化肥对西瓜光合和氮代谢酶活性的影响[J].土壤通报,2020,51(4): 905–911.
- YANG K, WU Q, PU Y Y, et al. Effects of partial substitution of organic fertilizers for chemical fertilizers on photosynthetic and nitrogen metabolism enzyme activities in watermelon under fumigation conditions[J]. Soil Bulletin, 2020, 51(4): 905–911. (in Chinese)
- [21] 高静娟,朱晨宇,柯玉琴,等.烤烟-水稻复种条件下有机肥施用时期对烤烟碳氮代谢的影响[J/OL].中国农业科技导报:1–9 [2023-03-24].
- GAO J J, ZHU C Y, KE Y Q, et al. Effects of organic fertilizer application periods on carbon and nitrogen metabolism in flue-cured tobacco under multiple cropping conditions of flue-cured tobacco and rice[J/OL]. China Agricultural Science and Technology Bulletin, 2023, 2: 1–9. (in Chinese)
- [22] 柳夏艳,曹浩轩,缪闯和,等.长期施用堆肥处理下潮土剖面水溶性有机物的三维荧光光谱研究[J].光谱学与光谱分析,2023, 43(3):674–684.
- LIU X Y, CAO H X, MIAO C H, et al. Study on three-dimensional fluorescence spectroscopy of water-soluble organic and soil fertility of summer maize[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(3): 674–684. (in Chinese)
- [23] 徐 东,何建清,张格杰,等.化肥配施园林废弃物堆肥对青稞产质量及土壤肥力的影响[J/OL].作物杂志:1–9[2023-03-23].
- Xu D, He J Q, Zhang G J, et al. The effect of fertilizer combined with garden waste compost on the yield, quality, and soil fertility of highland barley[J/OL]. Crop Journal, 2023, 2: 1–9. (in Chinese)
- [24] 崔 鹏,艾超凡,廖汉鹏,等.超高温堆肥微生物群落强化产热功能特征分析[J].土壤学报,2022,59(06):1660–1669.
- CUI P, AI C F, LIAO H P, et al. Characteristics of enhanced heat production function of microbial community in ultra-high temperature composting[J]. Journal of Soil Science, 2022, 59(6): 1660–1669. (in Chinese)
- [25] 时 君,吕得林,乔子涵,等.油菜秸秆与蓝藻混合堆肥及其产物对玉米生长的影响[J].安徽农业大学学报,2017,44(5):912–917.
- SHI J, LÜ D L, QIAO Z H, et al. The effect of rape straw and cyanobacteria mixed compost and its products on maize growth[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(5): 912–917. (in Chinese)
- [26] 郭校伟,潘军晓,张济世,等.好氧发酵猪粪部分替代化肥提高夏玉米氮素利用率和土壤肥力[J].植物营养与肥料学报,2020, 26(6):1025–1034.
- GUO X W, PAN J X, ZHANG J S, et al. Partially replacing chemical fertilizers with aerobic fermented pig manure to improve nitrogen utilization efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2020, 26(6): 1025–1034. (in Chinese)
- [27] 周迎鑫,王曙文,吕庆雪,等.玉米子粒主要营养成分合成调控研究进展[J/OL].玉米科学:1–11[2023-03-24].
- ZHOU Y X, WANG S W, LÜ Q X, et al. Research progress in the synthesis and regulation of main nutrient components in maize kernel[J/OL]. Journal of Maize Sciences 2023, 2: 1–11. (in Chinese)
- [28] 崔新卫,鲁耀雄,龙世平,等.有机无机肥施用比例及氮肥运筹对茄果产量与品质的影响[J].华北农学报,2014,29(5):213–217.
- CUI X W, LU Y X, LONG S P, et al. The effect of organic and inorganic fertilizer application ratio and nitrogen fertilizer operation on the yield and quality of eggplant fruit[J]. North China Agricultural Journal, 2014, 29(5): 213–217. (in Chinese)
- [29] 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 the growth of fresh corn and fertilizer agronomic utilization efficiency[J]. Soil, 2021, 53(2): 299–304. (in Chinese)

(责任编辑:栾天宇)