

马襄鸿, 邓奥严, 武俊男, 等. 牛粪秸秆堆肥与化肥减量配施对春玉米光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(7): 1220-1226.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.07.008

牛粪秸秆堆肥与化肥减量配施对春玉米光合特性及产量的影响

马襄鸿, 邓奥严, 武俊男, 王立春, 姜业成, 崔锡花, 刘春光, 程正海
(吉林省农业科学院/中国农业科技东北创新中心, 吉林 长春 130033)

摘要: 为明确适宜的牛粪秸秆堆肥替代化肥比例, 本研究以富民 985 为供试材料, 设置不施肥 (CK)、100% 全量化肥 (CF)、10% 堆肥替代化肥 (CN)、20% 堆肥替代化肥 (CE)、30% 堆肥替代化肥 (CS) 等 5 个处理, 分析各处理下大喇叭口期、抽雄吐丝期、灌浆期玉米植株叶片光合速率、碳代谢关键酶活性及产量和产量构成的变化。结果表明, 与 CK 相比, 施用牛粪秸秆堆肥替代处理可以显著提升春玉米光合作用能力及碳代谢关键酶活性。在施用堆肥的条件下, 随着堆肥替代比例的增加, 各生育时期玉米叶片的净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r)、气孔导度 (G_s)、胞间二氧化碳浓度 (C_i) 以及碳代谢关键酶 (磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶、核酮糖二磷酸羧化酶) 活性均呈现先增加后减少的趋势, 20% 堆肥替代化肥 (CE) 处理下, 光合作用参数和碳代谢关键酶活性均为最高。施用牛粪秸秆堆肥替代化肥处理可以显著提高春玉米的产量、穗粒数和千粒重, 20% 堆肥替代化肥 (CE) 处理和 10% 堆肥替代化肥 (CN) 处理的籽粒产量分别比 100% 全量化肥 (CF) 处理提高 9.41%、7.03%。本研究为畜禽粪便和作物秸秆资源化利用及耕地的用养结合提供良好的借鉴。

关键词: 堆肥替代化肥; 春玉米; 光合特性; 产量

中图分类号: S513.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)07-1220-07

Effects of partially replacing chemical fertilizers by cow manure and corn straw compost on photosynthetic characteristics and yield of spring maize

MA Xianghong, DENG Aoyan, WU Junnan, WANG Lichun, JIANG Yecheng, CUI Xihua, LIU Chunguang, CHENG Zhenghai

(Jilin Academy of Agricultural Sciences/Northeast Agricultural Research Center of China, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to determine the appropriate proportion of cow manure and corn straw compost for replacing chemical fertilizers, Fumin 985 was used as the test material in this study, and five treatments were set up, including no fertilizer (CK), 100% chemical fertilizers (CF), 10% compost for replacing chemical fertilizers (CN), 20% compost for replacing chemical fertilizers (CE), and 30% compost for replacing chemical fertilizers (CS). The changes of photosynthetic rate, key enzyme activities of carbon metabolism at big trumpet stage, silking stage and filling stage, and yield and yield components of maize under different treatments were analyzed. The results showed that compared with CK, the cow manure and corn straw compost

收稿日期: 2023-07-25

基金项目: 吉林省科技发展规划项目 (20230203179SF)

作者简介: 马襄鸿 (1997-), 吉林辉南人, 硕士, 研究实习员, 主要从事植物养分调控、农业废弃物资源化利用研究。(E-mail) maxianghong1997@163.com

通讯作者: 程正海, (E-mail) 18643316631@163.com; 刘春光, (E-mail) Liu-cg51@163.com

replacing chemical fertilizers (CE), and 30% compost for replacing chemical fertilizers (CS). The changes of photosynthetic rate, key enzyme activities of carbon metabolism at big trumpet stage, silking stage and filling stage, and yield and yield components of maize under different treatments were analyzed. The results showed that compared with CK, the cow manure and corn straw compost

replacement treatment could significantly improve the photosynthesis ability and key enzyme activities of carbon metabolism of spring maize. Under the condition of applying compost, with the increase of the proportion of compost, the net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), stomatal conductance (G_s), intercellular carbon dioxide concentration (C_i) and key enzymes (phosphoenolpyruvate carboxylase, ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase) activities of carbon metabolism of maize leaves in each growth period showed a trend of increasing first and then decreasing. Under CE treatment, the photosynthetic parameters and key enzyme activities of carbon metabolism were the highest. The cow manure and corn straw compost replacement treatment could significantly increase the yield, grain number per spike and 1 000-grain weight of spring maize. The grain yield of spring maize in CE treatment and CN treatment was 9.41% and 7.03% higher than that in CF treatment, respectively. This study can provide a good reference for the resource utilization of livestock and poultry manure and crop straw and the combination of the use and maintenance of cultivated land.

Key words: replacing chemical fertilizers by compost; spring maize; photosynthetic characteristics; yield

春玉米是中国重要的粮食作物,对于保障国家粮食安全具有重要意义^[1]。近年来,随着玉米耕作机械化水平提高及栽培技术的不断完善,春玉米的产量逐年攀升^[2]。施用化肥是提升作物产量的重要措施^[3-4],但长期过量施用化肥不仅导致土壤有机质含量降低、土壤酸化以及土壤微生物群落失衡^[5-6],还会造成作物产量降低、品质变差^[7]。李其胜等^[8]的研究结果表明,有机(类)肥料富含作物生长发育所需的各种营养元素、有机质和活性物质,可以为作物持续供给养分,还能够有效缓解化肥滥用所带来的环境问题。堆肥作为有机(类)肥料的一种,对提升土壤肥力、提高作物产量和改善作物品质有重要作用,因此利用堆肥合理替代化肥,不仅可以降低农业生产成本,同时也是实现中国化肥零增长目标的重要途径^[9]。2019年,全国畜禽粪便污染和农作物秸秆产生量分别为 3.05×10^9 t和 8.7×10^8 t^[10],农作物秸秆与畜禽粪便中含有大量的营养元素和丰富的微量元素^[11],将畜禽粪便与秸秆作为原料进行堆肥制作,并与化学氮肥配施对于农业生产上减肥增效意义重大^[10]。

堆肥的有机质含量较高,并且富含中微量元素、微生物和酶等活性物质。施用堆肥可以提高土壤碳库、氮库^[12]、有机质含量^[13]、速效养分含量、土壤有机碳含量和大团聚体含量^[14]及土壤肥力^[15]。此外,施用堆肥还可以加速共生细菌群落对生物多样性丧失的恢复力^[16],提高作物光合色素含量和矿质元素含量,进而提高产量和果实品质^[17]。纪洪亭等^[18]研究发现用猪粪有机肥替代50%化学氮肥,水稻产量没有显著下降,养分径流流失量亦没有显著增加。曹迟等^[19]的研究结果表明以污泥为原料的堆肥替代20%化

肥后,玉米的产量比常规施肥增加7.16%。由于堆肥原料不同,堆肥养分含量存在差异,因此在使用堆肥替代化肥进行生产应用前首先要确定适宜的替代比例。本研究拟在以牛粪和玉米秸秆为原料制得牛粪秸秆堆肥的基础上,通过设置不同的堆肥与化学肥料替代比例处理,分析不同牛粪秸秆堆肥替代化肥处理对春玉米光合特性及产量的影响,明确适宜的牛粪秸秆堆肥替代化肥比例,旨在促进畜禽粪便和作物秸秆资源化利用,提高作物生产水平,实现耕地的用养结合。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2020年、2021年在吉林省公主岭市朝阳坡镇徐家村进行。试验地年均降雨量450~550 mm,年均积温2 800~3 000 °C,无霜期130~140 d。土壤类型为黑土,0~20 cm土层有机质含量3.18%,全氮含量1.58 g/kg,全磷含量0.51 g/kg,全钾含量22.30 g/kg,pH值6.20。试验地的种植制度为玉米连作。

1.2 试验设计

2019年10-11月,以公主岭鑫诚种植专业合作社提供的牛粪与玉米秸秆为原材料,将玉米秸秆与牛粪按质量比(干重)1:4配制堆肥物料,配制完成后均匀喷洒物料总质量0.1%的枯草芽孢杆菌和长枝木霉复合微生物菌剂(吉林省地富肥业科技有限责任公司产品,1 mL有效活菌数 $\geq 1.0 \times 10^8$ 个),采用纳米膜覆盖进行室外堆肥处理45 d。堆肥处理期间,外界环境平均温度为5.6 °C;堆肥制备期间每7 d使用风机对堆体进行曝气3~5 h。堆肥发酵完成后将堆肥防水保存和取样检测,测得堆肥的含水率为

39.6%, pH 值 8.00, 干基有机质含量、全氮含量、全磷含量、全钾含量分别为 35.50%、1.11%、1.09%、1.03%。

以玉米品种富民 985 为试验材料, 2020 年和 2021 年 5 月 6 日采用人工点播的方式播种, 每 1 hm^2 种植 60 000 株, 10 月 8 日收获。以等量养分替代为依据, 试验设不施肥、全量化肥、10% 堆肥替代化肥、20% 堆肥替代化肥、30% 堆肥替代化肥等 5 个

处理, 各处理肥料的用量如表 1。每个处理 3 个重复, 共 15 个小区。每个小区面积为 72 m^2 。堆肥在春季整地之前一次性均匀撒施, 用旋耕机均匀混入 0~20 cm 土层中。试验所用化肥为 N 含量 46% 的尿素、 P_2O_5 含量 12% 的过磷酸钙和 K_2O 含量 52% 的硫酸钾, 40% 的氮肥和全部磷钾肥与堆肥一起作基肥施用, 60% 的氮肥在玉米拔节期追施。

表 1 各处理肥料用量

Table 1 Fertilizer dosage in each treatment

处理编号	处理名称	N (kg/hm^2)	P_2O_5 (kg/hm^2)	K_2O (kg/hm^2)	堆肥 (kg/hm^2)
CK	不施肥	0	0	0	0
CF	全量化肥	180	90	90	0
CN	10% 堆肥替代化肥	162	73	74	2 685
CE	20% 堆肥替代化肥	144	55	57	5 370
CS	30% 堆肥替代化肥	126	37	40	8 055

1.3 测定项目与方法

1.3.1 玉米叶片光合参数测定 于玉米的大喇叭口期、抽雄吐丝期和灌浆期, 选择晴朗无云的天气, 在各小区选取长势一致的 3 株玉米植株, 采用 Li-6400XT 便携式光合作用测定系统(美国 Li-Cor 公司产品)进行叶片光合参数的测定。大喇叭口期测定倒 3 完全展开叶, 抽雄吐丝期和灌浆期测定玉米的穗位叶。

1.3.2 玉米叶片碳代谢关键酶活性测定 于玉米的大喇叭口期、抽雄吐丝期和灌浆期, 选择晴朗无云的天气, 选取田间生长整齐一致的玉米 5 株, 采集功能叶片(吐丝前选取植株顶部完全展开的叶片, 吐丝后取穗位叶), 用纱布擦拭叶片表面, 去除叶脉, 用液氮速冻, 带回实验室后放入 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 冰箱中保存。参照施教耐等^[20]的方法测定玉米叶片磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEPC)活性, 参照 Thomas 等^[21]的方法测定核酮糖二磷酸羧化酶(RuBPCase)活性。

1.3.3 产量及构成因素测定 玉米完熟期各小区选取 10 m^2 调查总穗数及总穗鲜重, 取 10 穗果穗带回实验室风干后考种, 以 14% 的含水量计算籽粒产量。每处理 3 个重复。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2010 软件进行数据处理与图表绘制, 利用 SPSS 22.0 软件, 使用 Duncan's 方法进行

处理间差异分析。

2 结果与分析

2.1 牛粪秸秆堆肥与化肥减量配施对春玉米光合特性的影响

随着化肥用量逐渐降低, 各生育时期玉米叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)以及胞间二氧化碳浓度(C_i)均呈现先增加后减少的趋势(表 2)。20% 堆肥替代化肥(CE)处理下, 上述参数均为最高; 30% 堆肥替代化肥(CS)处理下, 玉米叶片各生育时期的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度以及胞间二氧化碳浓度与 CK 和 CF 处理总体无显著差异。在 3 个生育时期, 20% 堆肥替代化肥处理(CE)与 10% 堆肥替代化肥处理(CN)的光合参数(P_n 、 T_r 、 G_s 和 C_i)总体显著高于其他处理。在大喇叭口期和灌浆期 CE 处理与 CN 处理条件下净光合速率(P_n)差异显著, 而蒸腾速率、气孔导度以及胞间二氧化碳浓度均无显著差异(表 2)。

2.2 牛粪秸秆堆肥与化肥减量配施对春玉米碳代谢酶活性的影响

不同生育期牛粪秸秆堆肥与化肥减量配施对春玉米叶片碳代谢酶活性的影响如图 1 所示。从图中可以看出, 抽雄吐丝期春玉米 PEPC 活性和 RuBPCase 活性都最高, 大喇叭口期最低。随着堆肥替代比例的增加,

2020、2021 年春玉米 *PEPC* 活性和 *RuBPCase* 活性都呈现先增加后减少的趋势。在大喇叭口期,CE 处理下 2020~2021 年平均 *PEPC* 活性和 *RuBPCase* 活性较 CK 分别提高 20.54%、30.98%;在抽雄吐丝期,CE 处理下

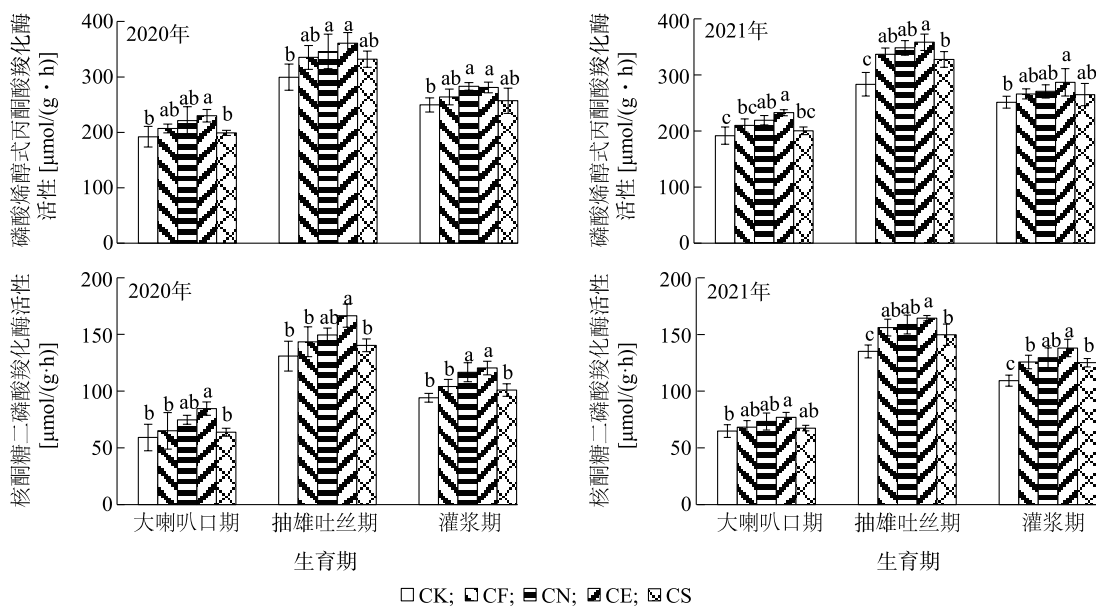
2020~2021 年平均 *PEPC* 活性和 *RuBPCase* 活性较 CK 分别提高 23.48%、24.48%;在灌浆期,CE 处理下的 *PEPC* 活性和 *RuBPCase* 活性较 CK 分别提高 13.39%、27.11%。

表 2 牛粪秸秆堆肥与化肥减量配施对春玉米光合特性的影响

Table 2 Effects of partially replacing chemical fertilizers by cow manure and corn straw compost on the photosynthetic characteristics of spring maize

生育时期	处理	净光合速率 (P_n) [$\mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$]	蒸腾速率 (T_r) (mmol/s)	气孔导度 (G_s) [$\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{s})$]	胞间二氧化碳浓度 (C_i) ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)
大喇叭口期	CK	25.71d	3.20b	0.20b	126.14c
	CF	29.39c	3.76ab	0.22ab	148.12b
	CN	32.11b	4.21a	0.32a	164.98a
	CE	34.32a	4.31a	0.34a	170.23a
	CS	27.66cd	3.40b	0.22ab	137.94bc
抽雄吐丝期	CK	24.74c	3.01b	0.19c	122.26c
	CF	28.64b	3.36b	0.22ab	146.60b
	CN	31.37a	3.91a	0.31ab	163.44a
	CE	32.93a	4.16a	0.35a	168.60a
	CS	27.43b	3.25b	0.22bc	134.45bc
灌浆期	CK	25.05d	3.13c	0.18c	120.46c
	CF	28.01c	3.51bc	0.22bc	145.42b
	CN	30.96b	3.86ab	0.30ab	162.83a
	CE	33.89a	3.97a	0.34a	166.90a
	CS	27.39c	3.23c	0.21bc	136.29b

CK、CF、CN、CE、CS 见表 1。表中数据为 2020 和 2021 年的平均值,同一发育期同列数据后不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。



CK、CF、CN、CE、CS 见表 1。同一发育期柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 牛粪秸秆堆肥与化肥减量配施对玉米叶片碳代谢酶活性的影响

Fig.1 Effects of partially replacing chemical fertilizers by cow manure and corn straw compost on carbon metabolism enzyme activities in maize leaves

2.3 牛粪秸秆堆肥与化肥减量配施对春玉米产量性状的影响

不同施肥处理对春玉米产量及产量构成因素的影响如表 3 所示。与 CK 相比,施肥处理下 2020 年春玉米产量显著增加 31.9%~54.0%,2021 年显著增加 29.1%~47.1%。20%堆肥替代化肥处理(CE)产量最高,其次为 10%堆肥替代化肥处理(CN),30%堆肥替代化肥处理(CS)产量最低。其中,CE 处理与 CN 处理的产量差异不显著,CS 处理 2 年平均产量较 CE 处理降低 13.29%。同样,与 CK 相比,施肥处理下春玉米穗粒数与千粒重都得到一定程度的增加。总体来看,CE 处理与 CN 处理的穗粒数与千粒重差异不显著,与产量变化相一致。CE 处理和 CN 处理的穗粒数与千粒重显著高于 CS 处理和 CK。上述结果表明,适宜比例的堆肥替代化肥能显著增加穗粒数和千粒重,进而提高产量,但替代比例过高不利于产量的形成。此外,不同施肥处理下玉米产量及产量构成因素的方差分析结果表明,施肥能显著影响玉米产量及其产量构成,而年份、年份与施肥交互对产量及其构成的影响不显著(表 4)。

表 3 不同施肥处理玉米产量及构成因素

Table 3 The maize yield and its components under different fertilization treatments

年份	处理	穗粒数 (粒)	千粒重 (g)	产量 (t/hm ²)
2020 年	CK	480.56c	274.27d	7.11d
	CF	535.75b	341.55b	10.02b
	CN	556.48a	349.97a	10.77a
	CE	558.51a	356.54a	10.95a
	CS	528.05b	331.01c	9.38c
2021 年	CK	492.87d	273.61d	7.50d
	CF	535.47bc	341.41bc	10.07bc
	CN	548.64ab	343.60b	10.55ab
	CE	556.44a	356.46a	11.03a
	CS	531.17c	331.44c	9.68c

CK、CF、CN、CE、CS 见表 1。同一年份同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

表 4 不同施肥处理条件下玉米产量及构成因素方差分析

Table 4 Analysis of variance of maize yield and its components under different fertilization treatments

因素	穗粒数	千粒重	产量
年份	NS	NS	NS
施肥处理	**	**	**
年份×施肥处理	NS	NS	NS

** 表示影响极显著($P<0.01$),NS 表示影响不显著。

3 讨论

化肥的施用是保障作物高产稳产的重要措施,部分农户为了追求高产而施用过量的化肥。但长期过量地施用化肥不仅不能保障作物优质高产,还会造成耕地质量下降,不利于农业的绿色可持续发展^[22-23]。Chatzistathis 等^[24]的研究结果表明,堆肥作为一种替代化肥补充养分的方式,可以减少化肥投入,提高土壤肥力和作物光合效率,促进农业的可持续发展。光合作用是作物生长发育的基本生理活动之一,作物生长中后期光合作用的强弱对作物产量的形成有重要影响,因此,对玉米生长中后期光合能力的研究是解析栽培措施对产量影响的重要因子^[25]。Ye 等^[26]研究证实施用有机肥可以显著提高梨枣树叶片的净光合速率和气孔导度。本研究中,在玉米 3 个生育期 20%堆肥替代化肥(CE)处理的光合参数显著高于全量化肥(CF)处理,这说明适量的牛粪秸秆堆肥配施化肥可以显著提高春玉米的光合能力。本试验条件下,当牛粪秸秆堆肥替代比例达到 30%时,3 个生育期玉米叶片光合作用参数与全量化肥(CF)处理无显著差异。

RuBPCase 和 *PEPC* 都是植物光合作用的关键酶^[27]。碳同化过程中 CO_2 首先在叶肉细胞 *PEPC* 作用下生成苹果酸,然后再运输到维管束鞘细胞脱羧释放 CO_2 ,同时在 *RuBPCase* 催化下与核酮糖二磷酸进行反应,从而固定 CO_2 ^[28]。因此,*RuBPCase* 和 *PEPC* 活性的变化能够体现玉米植株碳同化能力的强弱^[29]。本研究中,随着堆肥替代比例的增加,*RuBPCase* 和 *PEPC* 活性均表现为先增强后减弱的趋势。与 CK 相比,牛粪秸秆堆肥替代处理下的 *RuBPCase* 与 *PEPC* 活性均有不同程度的提高。酶活性的提高能增强春玉米的碳同化能力,提高代谢强度和叶片光合能力,为库的扩充提供充足的底物,进而实现增产。2 年试验结果均以 20%堆肥替代化肥(CE)处理的增产效果最佳,且 20%堆肥替代化肥(CE)处理和 10%堆肥替代化肥(CE)处理的差异不显著。

作物高产需要土壤肥力提供保障^[30-32],堆肥与化肥配施,一方面可充分利用不同肥料对作物生长的促进作用,另一方面堆肥的施用能促进土壤氮素转化,调节土壤微生物群落结构,更好地促进耕地的保育与利用。Cheng 等^[33]的研究结果表

明适量的有机肥替代化肥是解决化肥过量施用导致土壤退化的有效途径。长期持续施用有机肥可以显著提高作物产量^[34],促进产量构成因子的增加^[35]。本试验中,等量牛粪秸秆堆肥替代化肥处理能显著影响玉米产量及其构成。与CK相比,等量堆肥替代处理下2020年和2021年春玉米产量分别显著增加31.9%~54.0%和29.1%~47.1%,且玉米的穗粒数与千粒重也显著增加。其原因在于化肥能为玉米生长发育提供充足的速效养分,堆肥能够保障养分的持续供应,从而实现玉米的高产与稳产。

4 结论

施用适量的猪粪秸秆堆肥替代部分化肥可以显著提高春玉米叶片的光合能力及碳代谢酶活性,进而促进春玉米产量、穗粒数和千粒重的提高;施用20%牛粪秸秆堆肥替代化肥时,玉米植株的光合能力、碳代谢酶活性增加最为显著,增产效果亦最佳。

参考文献:

- [1] 王一莹,杜妍,袁静超,等.不同施氮水平对春玉米高产群体产量及氮素利用的影响[J].玉米科学,2023,31(2):106-115.
- [2] 马西青,赵久然,玉柱,等.我国高湿玉米青贮发展潜力分析[J].玉米科学,2023,31(2):54-58.
- [3] ZHANG X, DAVIDSON E A, MAUZERALL D L, et al. Managing nitrogen for sustainable development[J]. Nature, 2015, 528(7580):51-59.
- [4] 柴汕,李青松,高慧珊,等.有机肥等氮量替代化肥对豫南砂姜黑土区夏玉米生长及土壤理化性状的影响[J].河南师范大学学报(自然科学版),2023,51(5):122-130.
- [5] 吕金庆,刘金妮,赵治明,等.马铃薯碎土整地联合作业机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(8):19-29.
- [6] 史伟,张丽霞,高晓静,等.微生态制剂对辣椒促生防病作用及土壤酶活性的影响[J].浙江农业科学,2023,64(7):1749-1752.
- [7] 肖倩,武升,刘莹,等.不同有机养分替代化肥对小麦产量、氮肥利用率及土壤肥力的影响[J].农业环境科学学报,2023,42(10):2291-2300.
- [8] 李其胜,杨凯,蒋伟勤,等.有机(类)肥料对作物产量、土壤养分及土壤微生物多样性的影响[J].江苏农业学报,2023,39(8):1772-1783.
- [9] 潘亚杰,朱晓辉,常会庆,等.秸秆有机肥替代化学氮肥对菠菜生长和氮利用率的影响[J].江苏农业学报,2022,38(3):650-656.
- [10] 中华人民共和国农业农村部科技教育司.农业农村部关于贯彻实施《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》的意见[农科教发(2021)8号][EB/OL].(2021-08-30).http://www.moa.gov.cn/govPublic/KJJYS/202108/t20210830_6375173.htm.
- [11] 魏玉杰,田俊影,蔡崇法.我国东北地区有机肥资源分布特征与养分利用潜力分析[J].农业资源与环境学报,2023,40(4):745-754.
- [12] ABAGANDURA G O, MAHAL N K, BUTAIL N P, et al. Soil labile carbon and nitrogen fractions after eleven years of manure and mineral fertilizer applications[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2023, 69(6):875-890.
- [13] 高纪超,李强,朱平,等.长期化肥有机替代对黑土颜色及腐殖物质的影响[J].水土保持学报,2023,37(4):313-318.
- [14] WANG R, LIU T, LU C Y, et al. Bioorganic fertilizers improve the adaptability and remediation efficiency of *Puccinellia distans* in multiple heavy metals-contaminated saline soil by regulating the soil microbial community[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 448:130982.
- [15] 王世豪,徐新良,黄麟,等.1980s-2010s东北农田土壤养分时空变化特征[J].应用生态学报,2023,34(4):865-875.
- [16] LUO J P, BANERJEE S, MA Q X, et al. Organic fertilization drives shifts in microbiome complexity and keystone taxa increase the resistance of microbial mediated functions to biodiversity loss[J]. Biology and Fertility of Soils, 2023, 59(4):441-458.
- [17] BASSAM A, GAD M, MOHAMED S. Integrated use of organic and bio-fertilizers to improve yield and fruit quality of olives grown in low fertility sandy soil in an arid environment[J]. Phyton-International Journal of Experimental Botany, 2023, 92(6):1813-1829.
- [18] 纪洪亨,周炜,郭智,等.猪粪有机肥替代化学氮肥对水稻农学效应、安全效应及经济效益影响的综合评价[J].江苏农业学报,2021,37(6):1451-1459.
- [19] 曹迟,周晓天,高羽欣,等.污泥堆肥部分替代化肥对铬污染耕地玉米生长的影响[J].农业环境科学学报,2023,42(11):2453-2463.
- [20] 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,1979,5(3):225-235.
- [21] THOMAS H, MORGAN W G, THOMAS A M, et al. Expression of the stay-green character introgressed into *Lolium temulentum* Cereals from a senescence mutant of *Festuca pratensis*[J]. Theoretical and Applied Genetics, 1999, 99(1/2):92-99.
- [22] 巨晓棠,谷保静.我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
- [23] 甘泉峰,黄婷,李媛,等.有机无机肥配施对滨海脱盐土栽培菊芋及其养分吸收的影响[J].土壤,2023,55(2):262-271.
- [24] CHATZISTATHIS T, PAPADAKIS I, PAPAIOANNOU A, et al. Comparative study effects between manure application and a controlled-release fertilizer on the growth, nutrient uptake, photosystem II activity and photosynthetic rate of *Olea europaea* L. (cv. 'Koroneiki')[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 264(5):109176.
- [25] JASON A R, IGNACIO A C, TONY J V. Physiological evaluations

- of recent drought-tolerant maize hybrids at varying stress levels[J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(4): 1129-1141.
- [26] YE S L, LIU T, NIU Y. Effects of organic fertilizer on water use, photosynthetic characteristics, and fruit quality of pear jujube in northern Shaanxi[J]. *Open Chemistry*, 2020, 18(1): 537-545.
- [27] 孙 扬, 吴春胜, 谷 岩. 氮肥对半干旱区膜下滴灌玉米叶片叶绿素荧光特性及产量的影响[J]. *玉米科学*, 2017, 25(1): 133-138, 146.
- [28] 张家桦. 不同滴灌方式对春玉米光合特性、碳氮代谢及水氮效率的影响[D]. 通辽: 内蒙古民族大学, 2022.
- [29] 马襄鸿, 曹国军, 邓奥严, 等. 半干旱区水钾互作对春玉米碳代谢及产量的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2023, 44(3): 62-67.
- [30] 赵 懿, 陈海斌, 杜建军, 等. 不同施肥模式对华南典型红壤菜地肥力与氮肥利用率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(3): 692-698.
- [31] 张晓龙, 杨倩楠, 李祥东, 等. 基于主成分和聚类分析的赤红壤区不同土地利用方式土壤肥力综合评价[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(9): 247-254.
- [32] 周 丽, 王 一, 李冬兵, 等. 不同种植模式对桑园土壤肥力和土壤细菌群落结构的影响[J]. *南方农业学报*, 2022, 53(9): 2425-2434.
- [33] CHENG Y, LUO M, ZHANG T G, et al. Organic substitution improves soil structure and water and nitrogen status to promote sunflower (*Helianthus annuus* L.) growth in an arid saline area[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 283(6): 108320.
- [34] LEONARD R Z, MARC C, SHAMIE Z, et al. Pushing the envelope? Maize production intensification and the role of cattle manure in recovery of degraded soils in smallholder farming areas of Zimbabwe[J]. *Field Crops Research*, 2013, 147: 40-53.
- [35] 何 浩, 危常州, 李俊华, 等. 商品有机肥替代部分化肥对玉米生长、产量及土壤肥力的影响[J]. *新疆农业科学*, 2019, 56(2): 325-332.

(责任编辑: 石春林)