

玉米-大豆轮作体系下连续4年增施有机肥 对玉米产量和子粒品质的影响

包文彬^{1,2}, 王春雨^{2,3}, 谢志煌², 李彦生², 张兴义², 刘晓冰^{1,2}

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所/黑土区农业生态重点实验室, 哈尔滨 150081;
3. 黑龙江北大荒农业股份有限公司八五四分公司, 黑龙江 虎林 158403)

摘要: 利用典型黑土区玉米-大豆轮作定位试验, 设5个处理, 即不施肥(NoF)、玉米连作正常施用化肥(LZ)、玉米-大豆轮作正常施用化肥(CF)、玉米-大豆轮作正常施用化肥+15 000 kg/hm²有机肥(CF+15T)和玉米-大豆轮作正常施用化肥+30 000 kg/hm²有机肥(CF+30T), 研究连续4年增施有机肥后对玉米产量及构成要素和子粒中蛋白质、氨基酸、可溶性糖、淀粉、矿质营养元素含量的影响。结果表明, 同CF处理相比, LZ处理玉米产量比CF处理降低15%, 连续4年增施有机肥后玉米产量呈增加趋势, CF+15T处理和CF+30T处理玉米产量比CF处理高8.8%和13%。单施化肥处理下连作与轮作玉米子粒品质指标差异不大, 轮作处理后连续4年增施有机肥处理的玉米子粒中游离氨基酸、可溶性糖和淀粉含量随着施用有机肥的量增加而增加, 对玉米子粒蛋白质含量影响不大。同LZ和CF处理相比, 连续4年增施有机肥显著提高玉米子粒中K、Na、Mg和P含量, Ca、Mn、Fe和Zn含量无显著变化。因此, 黑土区玉米连作减产, 对品质影响不大。玉米-大豆轮作制度下连续4年增施15 000 kg/hm²有机肥提高玉米产量, 是促进子粒淀粉、游离氨基酸、可溶性糖、K、Na、Mg和P积累的有效措施之一。

关键词: 玉米; 玉米-大豆轮作; 增施有机肥; 营养品质

中图分类号: S513.047

文献标识码: A

Effects of Increased Application of Organic Fertilizer on Maize Yield and Grain Quality under Maize-Soybean Rotation System for Four-Year Consecutive

BAO Wen-bin^{1,2}, WANG Chun-yu^{2,3}, XIE Zhi-huang², LI Yan-sheng², ZHANG Xing-yi², LIU Xiao-bing^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030; 2. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081; 3. 854 Farm Heilongjiang Beidahuang Group Co., Ltd., Hulin 158403, China)

Abstract: This study evaluated the effects of cattle manure on maize yield and grain quality in a Mollisol region with five treatments: NoF(no fertilizer), LZ(chemical fertilizer, no manure, continuous cropping), CF(chemical fertilizer, no manure, soybean-maize rotation), CF+15T(CF plus 15 000 kg/ha of manure), and CF+30T(CF plus 30 000 kg/ha of manure). The results showed that LZ reduced maize yield by 15% compared to CF, while CF+15T and CF+30T increased yields by 8.8% and 13%, respectively. In the soybean-maize rotation, manure addition raised the levels of free amino acids, soluble sugar, and starch in maize grains, with no impact on protein content. Four years of manure application significantly increased K, Na, Mg, and P levels but did not affect Ca, Mn, Fe, and Zn in maize grains. Therefore, continuous cropping in Mollisols reduces maize yield but not nutritional quality, while adding 15 000 kg/ha of manure under soybean-maize rotation enhances yield, starch, free amino acids, soluble sugar, and minerals like K, Na, Mg, and P in maize grains.

Key words: Maize; Maize-soybean rotation; Manure addition; Nutritional quality

录用日期: 2022-10-09

基金项目: 国家重点研发计划课题-侵蚀退化农田生态生产功能重建机制和提升关键技术与示范(2021YFD1500803)

作者简介: 包文彬(1997-), 蒙古族, 内蒙古通辽人, 在读硕士, 研究方向为土壤退化与作物生产力。Tel: 13310352673

E-mail: 13310352673@163.com

刘晓冰和李彦生为本文通信作者。E-mail: liuxb@iga.ac.cn E-mail: liyansheng@iga.ac.cn

玉米是重要的谷类作物之一,具有产量高、增产潜力大、适应性强、营养丰富、用途广泛等特点。其子粒富含淀粉、游离氨基酸、蛋白质和可溶性糖等,这些化学品质指标对玉米的加工利用和经济价值有重要影响。东北地区是我国重要的玉米生产基地,玉米播种面积为0.15亿 km^2 ^[1],该区玉米种植面积和产量均超过全国30%^[2]。东北黑土区由于长时间垦殖、化肥长期不合理施用、不合理的种植方式等原因引起黑土区土壤肥力显著下降、黑土耕层变薄、水土流失加剧等现象日益严重,既阻碍作物产量的持续增加,也不利于作物品质的提升^[3~5]。张喜林等长期定位试验表明,由于长期大量施用氮肥,1979–2006年哈尔滨地区黑土pH值由7.1降至5.7^[6]。王慧颖等研究表明,长期施用化肥降低黑土中真菌和细菌的多样性^[7]。长期连作种植方式会导致土壤肥力下降,严重影响作物的产量和品质。王磊等研究证实,长期连作严重抑制玉米幼苗期地上部和地下部生长,且随着连作年限越长,抑制作用越明显^[8]。肖占文等研究表明,玉米产量随着连作年限时间的增加而降低^[9]。因此,如何快速提高黑土有机质含量,促进玉米产量和品质形成是生产者和研究人员面临的现实问题。

轮作是一种用地养地相结合的种植模式,可改善土壤的理化性状,调节土壤肥力,防止病、虫、草害发生。较玉米连作,玉米-大豆轮作可提高黑土层有机质含量,增加玉米和大豆产量^[10]。同时,在有机质含量较低类型土壤或有机质下降较快土壤,化肥配施有机肥是提高作物产量与品质、保证农业可持续发展的一种有效措施^[11,12]。一方面,与化肥相比,绿肥、堆肥和动物粪肥等有机肥既可提供更加全面的养分供应,还可改善由于长期施用化肥导致的土壤理化性质恶化问题。施用牛粪可显著提高土壤中无机氮的含量及土壤氮的矿化速率,促进作物产量增加^[13,14]。潮土连续多年施用牛粪有机肥,土壤中的有机质和速效养分含量显著升高,而单施化肥处理仅表现出速效磷显著升高且降低土壤有机质含量^[15]。另一方面,在化肥基础上增施动物粪肥还会提高土壤中养分的周转速率,提高总体养分的输入量而提高作物产量。美国俄克拉马州一项长达百年的有机肥添加试验表明,在施用化肥处理下,每隔4年增施有机粪肥后土壤中的磷周转关键酶活性提高,增加每季作物生长过程中磷元素的获取能力^[16]。张秀芝等在黑土的长期定位试验表明,有机肥与无机肥配合施用可显著提高土壤有机碳和全氮含量,同时玉米产量与土壤有机碳和全氮呈显著正

相关,表明有机肥无机肥配合施用是提升地力、保障玉米高产稳产的有效途径^[17]。曹寒冰等研究指出,增施有机肥对玉米子粒蛋白质和脂肪积累有促进作用^[18]。增施有机肥提高玉米从土壤中获取氮素的能力,促进植株氮代谢,进而合成较多蛋白质或氨基酸类物质。有机肥替代30%化肥也能显著提高黄棕壤上玉米子粒中可溶性蛋白、可溶性糖和淀粉含量,这种提质效果与有机肥富含钠、钙、镁等营养元素密切相关^[19]。此外,有机肥施用也能改善土壤结构,促进作物根系的建成和提高养分吸收能力^[20,21],进而促进作物对矿质元素的吸收。

关于增施有机肥对黑土区玉米子粒品质的研究少有系统报道。本研究基于玉米-大豆轮作长期定位试验,研究不施肥、玉米连作施用化肥、玉米-大豆轮作施用化肥和玉米-大豆轮作增施有机肥处理4年后的玉米产量、子粒蛋白质、游离氨基酸、可溶性糖、淀粉和主要矿质元素含量的变化,为玉米生产提质增效提供理论指导和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于黑龙江省海伦市前进镇光荣村中国科学院海伦水土保持监测研究站(47°21' N, 126°49' E)。该站属温带大陆性季风气候,雨热同季,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。全年日照总时数2 600~2 800 h,无霜期120~130 d。年均降水量在500~550 mm,2015年降水量为429.8 mm,小于历年平均降水量,在正常波动范围内^[22]。王婧瑄等统计1981–2010年海伦市玉米出苗期–成熟期生育期平均温度为19℃,2015年海伦市玉米出苗期–成熟期生育期平均温度为20℃^[23],具有典型代表性。土壤类型为典型黑土,基础肥力为有机质32 g/kg、pH值6.8、总氮1.6 g/kg、速效氮73 mg/kg、有效磷17 mg/kg、速效钾248 mg/kg,耕层厚度约为30 cm^[24,25]。在该生产区域,种植户主要采取玉米连作或玉米-大豆轮作的种植方式,每年秋收后进行翻耕和起垄作业,很少施用有机肥。

1.2 试验设计

本试验为玉米-大豆轮作施肥长期定位试验,始于2012年,当年种植作物为大豆,2013年种植作物为玉米,以此循环。供试大豆品种为东生1号,生育期114 d左右,需要活动积温2 360℃·d左右;玉米品种为兴垦5号,生育期135 d左右,需要活动积温2 450℃·d左右。

试验采用随机区组设计,设5个处理,每个处理

3次重复,对照组为不施肥(NoF),试验组为玉米连作施用正常量化肥(LZ)、玉米-大豆轮作施用正常量化肥(CF)、玉米-大豆轮作施用正常量化肥+15 000 kg/hm²有机肥(CF+15T)和玉米-大豆轮作施用正常量化肥+30 000 kg/hm²有机肥(CF+30T)。每个小区8垄,垄距70 cm,垄长8 m,面积44.80 m²。大豆双行播种,保苗数27株/m²;玉米单行播种,保苗数5株/m²。人工播种,人工除草和机械中耕。

施肥管理:施肥方式以基施为主,在拔节期进行追肥,施入基肥方式为撒施,追肥方式为穴施。玉米播种前基肥施用磷酸二铵(P₂O₅ 54%, N 18%) 150 kg/hm²、尿素(N 46%)75 kg/hm²、硫酸钾(K₂O 54%) 50 kg/hm²,在抽穗期按尿素225 kg/hm²追肥;大豆播种前施用磷酸二铵150 kg/hm²、尿素50 kg/hm²、硫酸钾50 kg/hm²。有机肥为腐熟牛粪,在每种作物收获后,将腐熟牛粪均匀撒施在小区表面,机耕混施入土壤,大豆和玉米施有机肥量相同。按有机肥干重计算,牛粪含有总碳423 g/kg、总氮7.40 g/kg、总磷12.20 g/kg、总钾10.20 g/kg。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 产量及产量构成要素测定

试验于两个轮作周期后2015年10月15日玉米收获期时取样,从每个小区中间行选取2 m²进行测产,并在测产中随机选取5穗玉米,测定产量构成因素行粒数、穗行数、穗粗、穗长、单穗粒重和百粒重,玉米产量按14%标准含水量折算。

1.3.2 品质测定

蛋白质含量测定使用杜马斯燃烧定氮法,仪器为元素分析仪(Elementar-Vario),总氮含量乘以转

化系数6.25即为蛋白质含量^[26]。游离氨基酸测定采用茚三酮试剂显色法^[27],应用乙酸提取游离氨基酸,水合茚三酮显色,用紫外分光光度计(T6, China)在570 nm波长处比色,测定吸光值。可溶性糖含量采用蒽酮法,应用无水乙醇提取可溶性糖,用蒽酮显色,使用紫外分光光度计选择620 nm波长处比色,测定吸光值。淀粉含量采用蒽酮法,应用高氯酸进行提取淀粉,蒽酮显色,使用紫外分光光度计选择620 nm波长进行比色,测定吸光值。

1.3.3 矿质营养元素测定

玉米子粒中K、Ca、Mg、Na、Mn、Fe和Zn元素含量的测定,将玉米子粒样品用球磨仪(Retsch MM400)粉碎过筛,经过硝酸消解后,使用原子吸收分光光度计(HGA-E50)对样品中的K、Ca、Mg、Na、Mn、Fe和Zn含量进行测定。样品中P含量的测定参照钼锑抗比色法^[28],测定仪器为酶标仪(BMG LABTECH)。

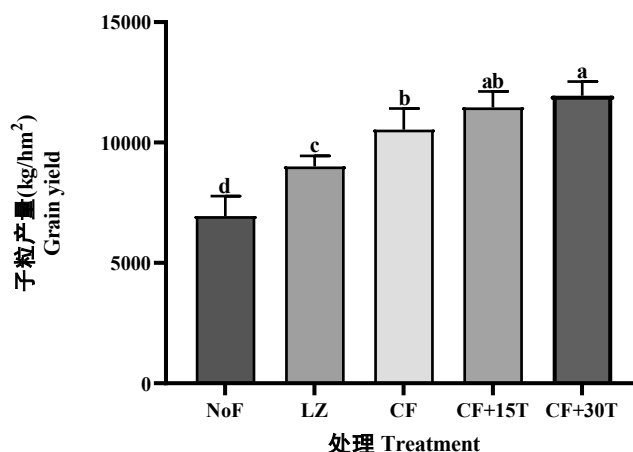
1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2021软件计算各处理产量、营养品质含量和矿质营养元素的平均值与标准误差,采用SPSS 25对各指标的差异性进行One-Way ANOVA检验分析(显著性 $P=0.05$)及皮尔逊相关性分析,采用GraphPad Prism 9软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 连续4年增施有机肥对玉米产量的影响

从图1可以看出,与NoF处理相比,LZ、CF、CF+15T和CF+30T处理均能显著提高玉米产量($P<0.05$)。与CF处理相比,LZ处理玉米产量显著降



注:不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters represent significant difference at $P<0.05$. The same below.

图1 连续4年增施有机肥对玉米产量影响

Fig.1 Effect of 4-year consecutive organic manure addition on maize yield

低15%;与LZ处理相比,CF+15T和CF+30T处理的玉米产量显著增加27%和33%;与CF处理相比,CF+15T和CF+30T处理的玉米产量进一步提高,分别为8.8%和13%,仅CF+30T处理差异达到显著水平($P<0.05$)。

2.2 连续4年增施有机肥对玉米产量构成因素的影响

由表1可知,与NoF处理相比,CF、CF+15T和CF+30T处理显著提高玉米穗长、穗粗、行粒数、单穗

粒重和百粒重。与CF处理相比,LZ处理的穗长、行粒数和百粒重显著降低。与LZ处理相比,CF+15T和CF+30T处理的穗长、穗粗、穗行数、行粒数、单穗粒重和百粒重显著增加。与CF处理相比,CF+15T和CF+30T处理的穗粗和百粒重显著高于CF处理($P<0.05$);CF+15T处理的单穗粒重与CF处理相比,无显著差异,但CF+30T处理的单穗粒重显著高于CF处理($P<0.05$)。

表1 连续4年增施有机肥对玉米产量构成因素的影响

Table 1 Effects of 4-year consecutive organic manure addition on yield components of maize

性状 Trait	NoF	LZ	CF	CF+15T	CF+30T
穗长(cm)	19.70±0.65 b	19.60±0.60 b	22.80±0.32 a	22.70±0.37 a	23.60±0.23 a
穗粗(cm)	4.51±0.06 c	4.62±0.05 bc	4.75±0.06 b	5.00±0.08 a	4.98±0.05 a
穗行数(行)	12.20±0.20 a	12.40±0.27 a	12.20±0.20 a	12.60±0.31 a	12.20±0.20 a
行粒数(粒)	37.30±1.11 b	39.20±1.58 b	43.30±1.55 a	43.80±1.20 a	44.80±0.70 a
单穗粒重(g)	158.00±10.30 d	205.00±10.10 c	239.00±10.94 b	261.00±8.14 ab	272.00±7.26 a
百粒重(g)	20.90±0.42 d	32.54±0.66 c	36.60±0.30 b	38.10±0.10 a	38.90±0.16 a

表2 增施有机肥后产量构成要素与产量相关性分析

Table 2 The relationship between the yield and the yield components under organic matter application

性状 Trait	穗长 Ear length	穗粗 Ear coarse	穗行数 Rows per ear	穗行粒数 Grains per row	单穗粒重 Grain weight per ear	百粒重 100-grain weight	产量 Yield
穗长	1						
穗粗	0.581**	1					
穗行数	-0.032	0.432**	1				
行粒数	0.655**	0.479**	-0.165	1			
单穗粒重	0.765**	0.843**	0.161	0.691**	1		
百粒重	0.650**	0.715**	0.334	0.537*	0.962**	1	
产量	0.765**	0.843**	0.161	0.691**	1.000**	0.962**	1

注: *和**分别代表在0.05水平和0.01水平上差异显著。
Note: *and ** indicate significantly differences at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

2.3 连续4年增施有机肥对玉米子粒蛋白质、游离氨基酸、可溶性糖和淀粉含量的影响

由图2可知,与NoF处理相比,LZ、CF、CF+15T和CF+30T处理显著提高玉米子粒蛋白质含量($P<0.05$)。与CF处理相比,LZ处理的玉米子粒蛋白质含量降低4.6%,无显著差异;与LZ处理相比,CF+15T和CF+30T处理的玉米子粒蛋白质含量显著高于LZ处理,分别提高6.3%和10%;与CF处理相比,CF+15T和CF+30T处理的玉米子粒蛋白质含量提高1.4%和5.3%,无显著差异。

由图3可知,与NoF处理相比,LZ、CF、CF+15T和CF+30T处理显著提高玉米子粒氨基酸含量($P<0.05$)。与CF处理相比,LZ处理的玉米子粒氨基

酸含量无显著差异;与LZ和CF处理相比,CF+15T处理的玉米子粒游离氨基酸含量高15%和10%,无显著差异,而CF+30T处理显著增加,分别为28%和22%($P<0.05$)。

由图4可以看出,与NoF处理相比,LZ处理的玉米子粒可溶性糖含量高19%,无显著差异,CF、CF+15T和CF+30T处理显著提高玉米子粒可溶性糖含量($P<0.05$);与CF处理相比,LZ处理的玉米子粒可溶性糖含量降低11%。CF+15T、CF+30T处理显著高于LZ处理,分别为28%、38%;与CF处理相比,CF+15T、CF+30T处理增加玉米子粒可溶性糖含量13%、22%,CF+30T处理达到差异显著水平($P<0.05$)。

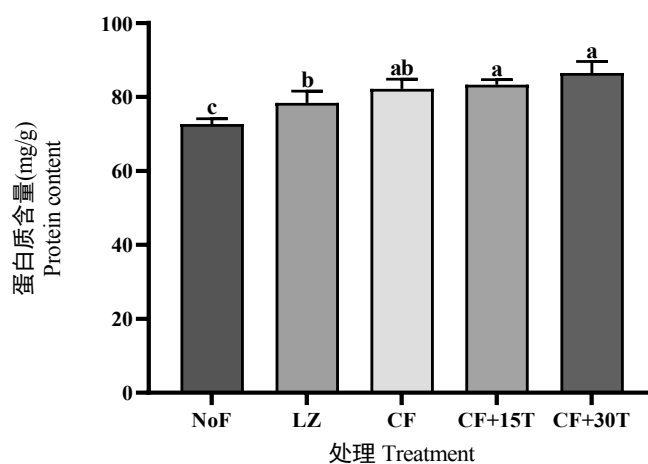


图2 连续4年增施有机肥对玉米子粒蛋白质含量的影响

Fig.2 Effect of 4-year consecutive organic manure addition on protein content of maize grain

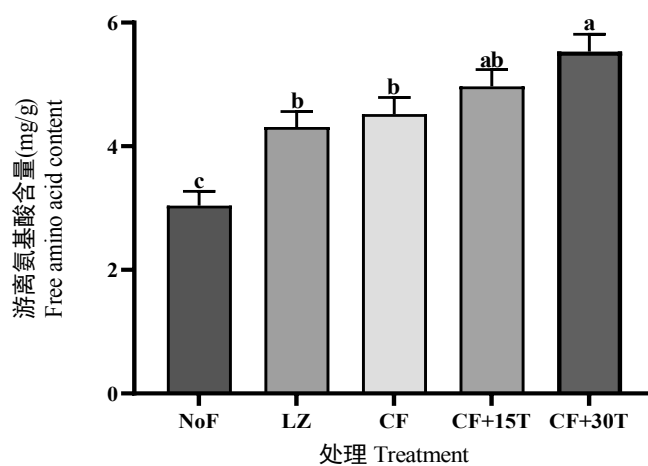


图3 连续4年增施有机肥对玉米子粒游离氨基酸含量的影响

Fig.3 Effect of 4-year consecutive organic manure addition on free amino acid content of maize grain

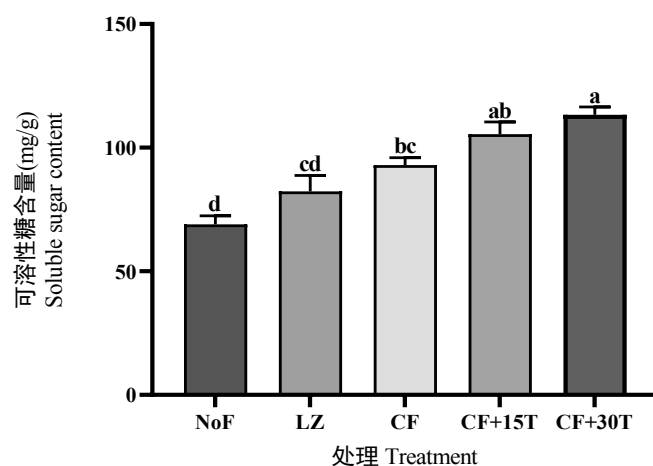


图4 连续4年增施有机肥对玉米子粒可溶性糖含量的影响

Fig.4 Effect of 4-year consecutive organic manure addition on soluble sugar content of maize grain

由图5可知,与NoF处理相比,LZ、CF、CF+15T和CF+30T处理显著提高玉米子粒淀粉含量($P < 0.05$),LZ和CF处理之间无显著差异。与LZ和CF处

理相比,CF+15T处理的玉米子粒中淀粉含量分别提高3.1%和3.3%,无显著差异,CF+30T处理比LZ和CF处理提高6.3%和6.6%,达显著差异($P < 0.05$)。

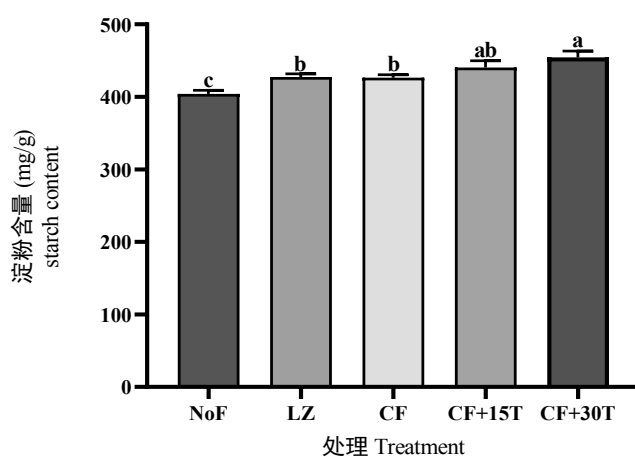


图5 连续4年增施有机肥对玉米子粒淀粉含量的影响

Fig.5 Effect of 4-year consecutive organic manure addition on starch content of maize grain

2.4 连续4年增施有机肥对玉米子粒矿质营养元素的影响

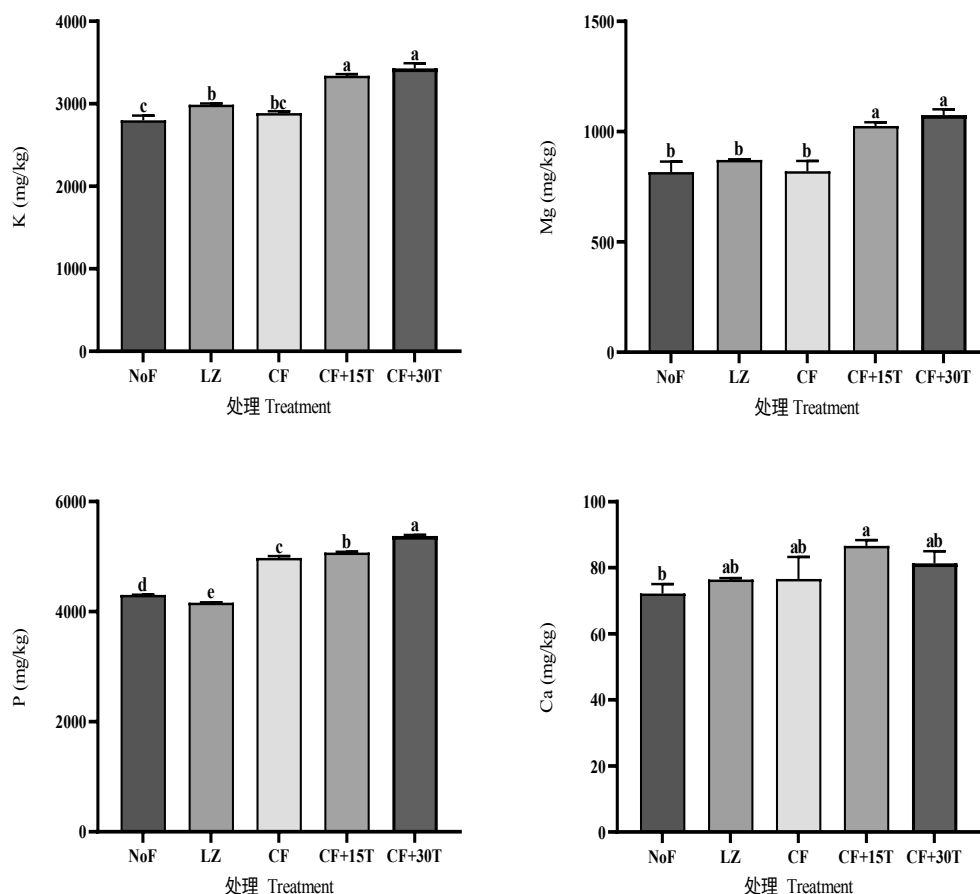


图6 连续4年增施有机肥对玉米子粒中量和大量元素含量的影响

Fig.6 Effects of 4-year consecutive organic manure addition on the contents of medium and macro-mineral elements in maize grain

由图6可以看出,与NoF处理相比,LZ处理玉米子粒P含量显著降低3.2%,K含量显著增加6.7%,Mg和Ca含量无显著差异;CF与NoF处理相比,P含量显著提高15%($P<0.05$),K、Mg和Ca含量均无显著

差异。与CF处理相比,LZ处理玉米子粒P含量显著降低16%,K、Mg和Ca含量无显著差异。CF+15T和CF+30T处理的K、Mg和Ca含量显著高于NoF和LZ处理,仅Ca含量无显著差异。CF+15T和CF+30T处

理与CF处理相比,K、Mg和P含量均显著升高($P < 0.05$);CF+15T和CF+30T处理与CF处理相比,玉米子粒中Ca含量提高13%和6%,无显著差异。

由图7可以看出,与NoF处理相比,LZ处理的玉米子粒Na含量显著增加,Fe和Zn含量显著降低,Mn含量无显著差异。CF与NoF处理相比,Na、Fe、Zn和Mn含量均无显著差异。与CF处理相比,LZ处

理的玉米子粒Na含量显著增加,其他微量元素无显著差异。与LZ处理相比,CF+15T和CF+30T处理的Fe含量高19%和6.3%。与CF处理相比,CF+15T和CF+30T处理的玉米子粒的微量元素Fe、Zn和Mn含量无显著差异,而Na含量分别增加23%和14%($P < 0.05$)。

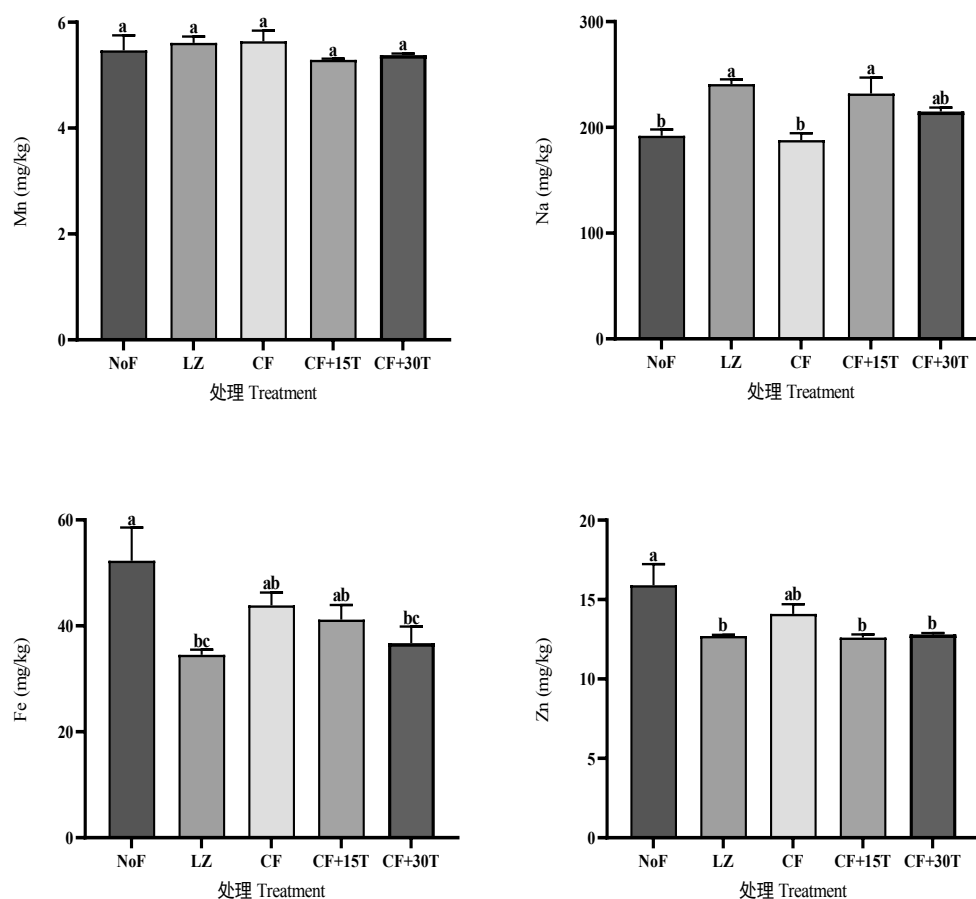


图7 连续4年增施有机肥对玉米子粒微量元素含量的影响

Fig.7 Effects of 4-year consecutive organic manure addition on the contents of trace elements in maize grain

3 结论与讨论

单施化肥条件下,玉米-大豆轮作处理产量显著高于玉米连作处理,连续4年增施有机肥后玉米产量随施用有机肥的量增加而增加,与单施化肥轮作处理相比,连续4年增施有机肥15 000 kg/hm²,玉米产量至少增加8%。单施化肥条件下,连作与轮作处理子粒品质差异不明显,增施有机肥对玉米子粒营养品质可起到提高作用,与单施化肥下轮作处理相比,连续4年增施有机肥玉米子粒中游离氨基酸至少增加10%、可溶性糖增加13%、淀粉含量增加3%,对玉米子粒蛋白质含量影响不大;此外,子粒中K、Na、Mg和P元素含量显著提高,分别增加16%、

23%、25%和2.1%;而子粒中Fe和Zn元素含量分别降低6%和10%左右,差异不显著。在玉米-大豆轮作制度下,黑土区连续4年增施15 000 kg/hm²牛粪有机肥是提高玉米产量及改善其营养品质的有效手段。本研究取样年份降水略低于该地区年平均降水,在此条件下连续4年增施有机肥后玉米产量和品质有明显提升,连续多年增施15 000 kg/hm²有机肥处理在降水较多年份对玉米产量和品质的影响程度,有必要通过进一步研究来验证。

本研究表明,与连作相比,轮作种植制度有利于提高玉米产量和产量构成要素。张鑫研究表明,连作条件下的玉米行数、穗粒数等产量构成要素均低于轮作条件^[29]。有研究认为,连作或轮作不会对玉

米产量造成影响,养分管理对产量造成的影响大于种植制度对玉米产量影响^[30,31]。施用化肥对于玉米产量的形成具有决定性作用,在全世界范围内公认化肥在保障粮食安全中起着不可替代的支撑作用^[32]。本研究表明,连续玉米-大豆轮作处理两个周期后,玉米产量显著高于连作处理,而在轮作施用化肥基础上连续增施有机肥后玉米产量进一步提高,连续4年增施有机肥 15 000 kg/hm²和 30 000 kg/hm²处理下的玉米产量比单施化肥处理显著提高 8.8%和 13%^[33-35]。增施有机肥可使土壤中养分协调供应,使土壤保持较高肥力,进而促进玉米地上部植株生长,使其产量增加^[36,37]。本研究中玉米产量增加与增施有机肥后玉米穗粗和百粒重显著提高密切相关^[38,39]。百粒重受品种遗传因素控制,连续4年增施有机肥可显著提高玉米子粒百粒重,表明采取的单施化肥方法未完全发挥出玉米自身的产量潜能,制约该地区玉米产量形成的主要因素来自于源端受限,而非库端。

施肥是影响作物品质形成的最主要因素,不仅因为肥料中本身含有作物生长所需的氮、磷、钾等大量必须元素,还因为作物在不同肥料处理条件下生长能力不同也会影响主要化合产物的合成和积累速率。本研究中两个轮作周期单施化肥条件下玉米子粒可溶性糖含量有增加趋势,与 CF 处理相比,CF+15T 和 CF+30T 处理玉米子粒可溶性糖含量增加 13%和 22%,均达到差异显著水平。吴光磊研究发现,化肥配施 75 000 kg/hm²半腐熟牛粪条件下,子粒中与可溶性糖代谢关键酶蔗糖磷酸合成酶活性的峰值表现为增施有机肥处理显著高于单施化肥处理,这可能是增施有机肥处理玉米子粒中可溶性糖含量显著提高的主要原因^[40]。本研究中单施化肥条件下,连作处理和轮作处理玉米子粒中淀粉含量差异不明显,连续增施有机肥 30 000 kg/hm²后,玉米子粒中淀粉含量显著提高。本研究发现,单施化肥条件下,连作和轮作处理玉米子粒中游离氨基酸含量变化不明显,而增施有机肥后玉米子粒中的游离氨基酸含量随着有机肥施用量增加而增加,这可能与施用有机肥提高土壤氮循环的速率,从而增加植物对氮的获取能力密切相关^[41-43]。化肥配施 20%猪粪后,春玉米灌浆期叶片的硝酸还原酶活性比单施化肥显著提高 18%,玉米子粒蛋白质也显著增加^[44]。周莉华等指出,施用有机肥可提高土壤的全氮和微量元素,促进土壤养分平衡,有利于提高作物子粒粗蛋白含量,改善玉米子粒品质^[45]。有研究认为,增施有机肥对玉米子粒氨基酸和蛋白质的积累受到不同

土壤类型的影响,在潮土上增施有机肥玉米子粒蛋白质含量比单施化肥显著提高 29%,而黄土上仅增加 8.03%^[46]。当施用化肥配施蚯蚓粪有机肥 15 000 kg/hm²后,土壤中的脲酶活性显著提高,土壤铵态氮和硝态氮含量显著高于单施化肥^[47]。此外,增施有机肥后不同作物均表现出氮素利用率的提高,这也是作物子粒中氨基酸含量增加原因之一^[48]。本研究中增施有机肥与施用化肥相比蛋白质含量无显著差异,可能是玉米增产时对蛋白质的积累产生了稀释效应^[49,50],使其不显著。

有机肥富含大量的活性基团,可通过螯合物的形式保存土壤中的速效养分元素,避免速效养分的快速流失或者分解,从而使作物在较长时间内获益^[51,52]。在单施化肥条件,轮作处理玉米子粒中 K 和 P 浓度显著高于连作处理,连续4年增施有机肥后玉米子粒中 K、Na、Mg 和 P 的浓度进一步显著增加^[53]。以往研究认为,施用有机肥可改善土壤的物理、化学以及生物学性质^[54,55],促进作物根系生长,从而提高对矿质元素的吸收能力,这是施用有机肥后玉米子粒中矿质元素含量增加的主要原因。粪肥所含有的有机酸也会提高土壤中的矿质元素的饱和度,增加矿质元素的可利用性。刘彦伶等研究表明,长期施用有机肥降低土壤磷素吸附位点和吸附结合能,使土壤对磷的吸附能力增强,提高土壤磷素有效性^[56]。同时,本研究发现,与化肥相比玉米子粒中的 Ca 元素在连续4年增施有机肥条件下变化不显著,这可能是因为黑土中钙离子背景值较高,不构成玉米养分的限制因子。玉米子粒中的 Fe、Mn 和 Zn 元素在连续4年增施有机肥条件下变化不显著,这可能是有机肥添加导致土壤中的速效磷和速效钾增加,与微量元素形成竞争状态,从而导致作物吸收微量元素能力降低的结果^[57-59]。根据以上结果,考虑生产成本,增施 15 000 kg/hm²比 30 000 kg/hm²更加经济有效。

参考文献:

- [1] 蔡红光,梁 尧,刘慧涛,等.东北地区玉米秸秆全量深翻还田耕种技术研究[J].玉米科学,2019,27(5):123-129.
CAI H G, LIANG Y, LIU H T, et al. Research on full maize straw re-turning with deep ploughing mode in the Northeast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2019, 27(5): 123-129. (in Chinese)
- [2] 丰智松,曹寒冰,付浩然,等.我国东北地区春玉米科学施肥评价[J].中国土壤与肥料,2022(3):52-60.
FENG Z S, CAO H B, FU H R, et al. Evaluation of scientific fertilization of spring corn in Northeast China[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(3): 52-60. (in Chinese)
- [3] 孙 勇,曲京博,初晓冬,等.不同施肥处理对黑土壤肥力和作物产量的影响[J].江苏农业科学,2018,46(14):45-50.

- SUN Y, QU J B, CHU X D, et al. Effects of different fertilization treatments on soil fertility and crop yield black soils[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(14): 45–50. (in Chinese)
- [4] 王文娟, 张树文, 邓荣鑫. 东北黑土区沟蚀现状及其与景观格局的关系[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 192–198.
- WANG W J, ZHANG S W, DENG R X. Gully status and relationship with landscape pattern in black soil area of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 192–198. (in Chinese)
- [5] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [6] 张喜林, 周宝库, 孙磊, 等. 长期施用化肥和有机肥料对黑土酸度的影响[J]. *土壤通报*, 2008(5): 1221–1223.
- ZHANG X L, ZHOU B K, SUN L, et al. Black soil acidity as affected by applying fertilizer and manure[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008(5): 1221–1223. (in Chinese)
- [7] 王慧颖, 徐明岗, 周宝库, 等. 黑土细菌及真菌群落对长期施肥响应的差异及其驱动因素[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(5): 914–925.
- WANG H Y, XU M G, ZHOU B K, et al. Response and driving factors of bacterial and fungal community to long-term fertilization in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(5): 914–925. (in Chinese)
- [8] 王磊, 王兰英, 朱朝华, 等. 玉米连作对其发芽率和苗期生长的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(2): 53–55.
- WANG L, WANG L Y, ZHU C H, et al. Effect of continuous cropping on seed germination and seedling growth of corn in Hainan[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(2): 53–55. (in Chinese)
- [9] 肖占文, 王多成, 闫吉治, 等. 不同连作年限对玉米制种产量及其农艺经济性状的影响[J]. *作物杂志*, 2010(2): 107–109.
- XIAO Z W, WANG D C, YAN J Z, et al. Effect of continuous cropping on yield and agronomic and economic traits of corn seed production[J]. *Crops*, 2010(2): 107–109. (in Chinese)
- [10] 王娜, 王璐, 宋昌海, 等. 轮作对黑土区作物产量及土壤理化性质的影响[J]. *农业科技通讯*, 2022(9): 71–74.
- WANG N, WANG L, SONG C H, et al. The effect of crop rotation system on the crop yield and soil physical and chemical profiles in Mollisols[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2022(9): 71–74. (in Chinese)
- [11] 张奇, 张振华, 陈雅玲, 等. 施用生物有机肥对土壤特性、作物品质及产量影响的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(15): 71–76.
- ZHANG Q, ZHANG Z H, CHEN Y L, et al. Research progress on effects of application of bio-organic fertilizer on soil characteristics, crop quality and yield[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(15): 71–76. (in Chinese)
- [12] LIU J, SHU A, SONG W, et al. Long-term organic fertilizer substitution increases rice yield by improving soil properties and regulating soil bacteria[J]. *Geoderma*, 2021, 404: 115287.
- [13] LI Y S, XIE Z H, ZHOU M, et al. Soybean yield and quality relative to Mollisols fertility with 7-year consecutive cattle manure application under maize-soybean rotation[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(16): 4740–4754.
- [14] LI Y S, XIE Z H, YU Z H, et al. Impact of surface soil manuring on particulate carbon fractions in relevant to nutrient stoichiometry in a Mollisol profile[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 207: 104859.
- [15] 李彦, 孙翠平, 井永苹, 等. 长期施用有机肥对潮土土壤肥力及硝态氮运移规律的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1386–1394.
- LI Y, SUN C P, JING Y P, et al. Effect of long-term combined application of organic and phosphate fertilizer on retention of organic matter in aquo-brown soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1386–1394. (in Chinese)
- [16] PARHAM J A, DENG S, RAUN W, et al. Long-term cattle manure application in soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(5): 328–37.
- [17] 张秀芝, 高洪军, 彭畅, 等. 长期有机培肥黑土有机碳、全氮及玉米产量稳定性的变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(9): 1473–1481.
- ZHANG X Z, GAO H J, PENG C, et al. Variation trend of soil organic carbon, total nitrogen and the stability of maize yield in black soil under long-term organic fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(9): 1473–1481. (in Chinese)
- [18] 曹寒冰, 谢钧宇, 王楚涵, 等. 不同施肥措施对旱地采煤塌陷区复垦土壤结构及玉米品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 251–257.
- CAO H B, XIE J Y, WANG C H, et al. Effects of different fertilization regimes on reclaimed soil structure and maize quality in dry-land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 251–257. (in Chinese)
- [19] 方成, 代子雯, 李伟明, 等. 化肥减施配施不同有机肥对甜糯玉米产量和品质的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(5): 1347–1355.
- FANG C, DAI Z M, LI M W, et al. Effects of reduced chemical fertilizer with organic fertilizer application on the yield and grain quality of sweet-waxy corn[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1347–1355. (in Chinese)
- [20] 赵占辉, 张丛志, 蔡太义, 等. 不同稳定性有机物料对砂姜黑土理化性质及玉米产量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 1228–1235.
- ZHAO Z H, ZHANG C Z, CAI T Y, et al. Effects of different stable organic matters on physicochemical properties of lime concretion black soil and maize yield[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(10): 1228–1235. (in Chinese)
- [21] 夏思瑶, 王冲, 王新宇. 施用有机肥对生菜产量和品质影响的Meta分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(6): 312–318.
- XIA S Y, WANG C, WANG X Y, et al. Meta analysis of organic fertilizer application on yield and quality of lettuce[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(6): 312–318. (in Chinese)
- [22] 徐宝磊, 高维霖. 海伦市气候因素对大豆及玉米产量的影响分析[J]. *农业与技术*, 2016, 36(10): 215, 197.
- XU B L, GAO W L. Analysis of the influence of climatic factors on soybean and maize yields in Helen city[J]. *Agriculture and Technology*, 2016, 36(10): 215, 197. (in Chinese)
- [23] 王婧瑄. 东北春玉米积温订正模型构建及其在发育期预报的应

- 用[D]. 北京:中国气象科学研究院,2020.
- [24] 陈 帅,陈 强,孙 涛,等.黑土坡耕地秸秆覆盖对表层土壤结构和导气性的影响[J]. 水土保持通报,2016,36(1):17-21.
CHEN S, CHEN Q, SUN T, et al. Effects of straw mulching on top-soil structure and air permeability in black soil sloping farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 17-21. (in Chinese)
- [25] 周 萌. 黑土有机质组分/结构特征对气候变暖及管理措施的响应[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.
- [26] SALDIVAR X, WANG Y J, CHEN P, et al. Changes in chemical composition during soybean seed development[J]. Food Chemistry, 2011, 124(4): 1369-1375.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [29] 张 鑫. 连作对不同年代育成玉米品种光合生理、养分吸收和产量的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2019.
- [30] 张益望,刘文兆,王 俊,等. 轮作及不同施肥措施对春玉米生长、产量及水分利用的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(2):124-128.
ZHANG Y W, LIU Z W, WANG JUN, et al. Effects of long-term rotation and fertilization on the growth, yield and water use of spring maize[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 124-128. (in Chinese)
- [31] 郭金瑞. 东北黑土区不同种植模式对玉米产量和土壤质量及温室气体排放影响研究[D]. 南京:南京农业大学,2015.
- [32] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
ZHU Z L, JIN J Y. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)
- [33] 任 伟,赵 鑫,黄收兵,等. 不同密度下增施有机肥对夏玉米物质生产及产量构成的影响[J]. 中国生态农业学报,2014,22(10):1146-1155.
REN W, ZHAO X, HUANG S B, et al. Effects of application of organic fertilizer under different planting densities on dry matter production and yield formation of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(10): 1146-1155. (in Chinese)
- [34] 李忠芳. 长期施肥下我国典型农田作物产量演变特征和机制[D]. 北京:中国农业科学院,2009.
- [35] 王晓娟,贾志宽,梁连友,等. 不同有机肥量对旱地玉米光合特性和产量的影响[J]. 应用生态学报,2012,23(2):419-425.
WANG X J, JIA Z K, LIANG L Y, et al. Effects of organic fertilizer application rate on leaf photosynthetic characteristics and grain yield of dryland maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(2): 419-425. (in Chinese)
- [36] 刘恩科,赵秉强,胡昌浩,等. 长期不同施肥制度对玉米产量和品质的影响[J]. 中国农业科学,2004(5):711-716.
LIU E K, ZHAO B Q, HU C H, et al. Effects of long-term fertilization systems on yield and quality of maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004(5): 711-716. (in Chinese)
- [37] 侯小畔,安婷婷,周亚男,等. 增施有机肥对夏玉米物质生产及土壤特性的影响[J]. 玉米科学,2018,26(1):127-133.
HOU X P, AN T T, ZHOU Y N, et al. Effect of adding organic fertilizer on summer maize production and soil properties[J]. Journal of Maize Sciences, 2018, 26(1): 127-133. (in Chinese)
- [38] 张 鑫,牛世伟,叶 鑫,等. 不同施肥处理对辽北春玉米土壤理化性质及产量的影响[J]. 西南农业学报,2020,33(9):2013-2017.
ZHANG X, NIU S W, YE X, et al. Effects of different fertilization treatments on soil physicochemical properties and spring maize yield in northern Liaoning province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(9): 2013-2017. (in Chinese)
- [39] 李永平,史向远,周 静,等. 鸡粪深施对土壤呼吸速率及玉米产量的影响[J]. 作物杂志,2013(2):104-108.
LI Y P, SHI X Y, ZHOU J, et al. Effects of deep application of chicken manure on soil respiration rate and maize yield[J]. Crops, 2013(2): 104-108. (in Chinese)
- [40] 吴光磊. 有机无机肥配施对玉米产量和品质的影响及生理基础[D]. 泰安:山东农业大学,2008.
- [41] 郭俊杰,朱 晨,刘文波,等. 不同施肥模式对土壤氮循环功能微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(5):751-759.
GUO J J, ZHU C, LIU W B, et al. Effects of different fertilization managements on functional microorganisms involved in nitrogen cycle[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(5): 751-759. (in Chinese)
- [42] 马 龙,高 伟,栾好安,等. 有机肥/秸秆替代化肥模式对设施菜田土壤氮循环功能基因丰度的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(10):1767-1778.
MA L, GAO W, LUAN H A, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with manure and/or straw on the abundance of functional genes related to soil N-cycling[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(10): 1767-1778. (in Chinese)
- [43] ZHANG J B, ZHU T B, CAI Z C, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(1): 75-85.
- [44] 张玉平,荣湘民,刘 强,等. 猪粪与化肥配施对春玉米碳氮代谢及产量与品质的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(3):319-324.
ZHANG Y P, RONG X M, LIU Q, et al. Effects of combination of organic manure and inorganic fertilizer on yield, quality and metabolism of carbon and nitrogen of spring maize[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2012, 38(3): 319-324. (in Chinese)
- [45] 周莉华. 长期施用生物有机肥对冬小麦和夏玉米生产效应的研究[D]. 北京:中国农业大学,2004.
- [46] 曲 环. 长期施肥对作物品质的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2003.
- [47] 周东兴,李 磊,李 晶,等. 玉米/大豆轮作下不同施肥处理对土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2018,37(6):1856-1864.
ZHOU D X, LI L, LI J, et al. Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass and enzyme activities in maize-soybean rotation system[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37

- (6): 1856–1864. (in Chinese)
- [48] 张广凯, 宋祥云, 刘树堂, 等. 长期定位施肥对小麦-玉米氮素利用及产量品质的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(4): 157–161.
ZHANG G K, SONG X Y, LIU S T, et al. Effect of long-term application on nitrogen utilization and yield quality of wheat and maize [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(4): 157–161. (in Chinese)
- [49] AMADOU A, SONG X, HUANG S, et al. Effects of long-term organic amendment on the fertility of soil, nodulation, yield, and seed quality of soybean in a soybean-wheat rotation system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(3): 1385–1394.
- [50] 姜东, 戴廷波, 荆奇, 等. 有机无机肥长期配合施用对冬小麦子粒品质的影响[J]. 生态学报, 2004(7): 1548–1555.
JIANG D, DAI Y B, JING Q, et al. Effects of long-term application of manure and fertilizers on grain quality and yield of winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004(7): 1548–1555. (in Chinese)
- [51] 刘艳妮. 不同有机肥配施锌肥对小麦生长发育及水肥利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [52] WANG Q, REN X, SUN Y, et al. Improvement of the composition and humification of different animal manures by black soldier fly bioconversion[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123397.
- [53] 王朔林, 王改兰, 杨艳菊, 等. 长期施肥对玉米子粒中植物必需营养元素含量的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(2): 208–212.
WANG S L, WANG G L, YANG Y J, et al. Effects of long-term fertilization on contents of plant essential nutrient in maize grain[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2014, 29(2): 208–212. (in Chinese)
- [54] 许小伟, 樊剑波, 陈晏, 等. 不同有机无机肥配施比例对红壤旱地花生产量、土壤速效养分和生物学性质的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(18): 5182–5190.
XU X W, FAN J B, CHEN Y, et al. Effects of combined application of organic and chemical fertilizers on the yield of peanut, soil available nutrient and biological properties in the upland red soil in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(18): 5182–5190. (in Chinese)
- [55] ZHAO J, NI T, LI J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 99 (18): 1–12.
- [56] 刘彦伶, 李渝, 张萌, 等. 长期不同施肥对黄壤磷素吸附-解吸特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 450–459.
LIU Y L, LI Y, ZHANG M, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus adsorption and desorption characters in yellow soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(3): 450–459. (in Chinese)
- [57] LI B Y, ZHOU D M, CANG L, et al. Soil micronutrient availability to crops as affected by long-term inorganic and organic fertilizer applications[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1–2): 166–173.
- [58] 俄胜哲, 袁继超, 丁志勇, 等. 氮磷钾肥对稻米铁、锌、铜、锰、镁、钙含量和产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2005(5): 434–440.
E S Z, YUAN J C, DING Z Y, et al. Effect of N, P, K fertilizers on Fe, Zn, Cu, Mn, Ca and Mg contents and yields in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005(5): 434–440. (in Chinese)
- [59] WYSZKOWSKI M, BRODOWSKA M S. Content of trace elements in soil fertilized with potassium and nitrogen[J]. *Agriculture*, 2020, 10(9): 398.

(责任编辑: 姜媛媛)