

等氮量有机肥替代化肥对绿洲灌区 糯玉米光合特性及品质的影响

白春生, 范虹, 李波, 程宝钰, 王岩,
殷文, 胡发龙, 樊志龙, 赵财

(省部共建干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃农业大学农学院, 甘肃兰州 730070)

摘要:通过田间定位试验探究等氮量有机肥替代化肥比例对糯玉米光合特性和营养品质的影响,以‘京科糯2000’为试验品种,在施纯氮总量为 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 定额条件下,采用随机区组设计,设全施化肥(F1),有机肥替代25%(F2)、50%(F3)、75%(F4)化肥和全施有机肥(F5)5个处理,测定了糯玉米抽雄期光合特性、鲜穗期籽粒营养品质及鲜穗产量。结果表明:等氮量有机肥替代部分化肥能显著提高糯玉米抽雄期的光合性能,其中F2和F3处理较F1处理的SPAD值提高10.6%~14.3%, T_p 提高11.7%~18.8%, P_n 提高11.2%~17.1%, G_s 提高62.2%~79.2%, C_i 降低22.7%~23.8%。F2处理糯玉米鲜穗产量较F1处理显著提高10.4%。等氮量有机肥替代化肥能显著提高糯玉米鲜穗中可溶性糖含量和粗脂肪含量,F2和F3处理较F1处理可溶性糖含量和粗脂肪含量分别提高22.9%~28.9%和8.5%~11.4%;F2处理较F1处理粗蛋白含量显著提高10.3%;此外,各有机肥替代化肥处理较F1处理的鲜味氨基酸和甜味氨基酸增幅分别为15.7%~19.3%和12.2%~17.4%,其中,F2处理下芳香氨基酸含量较F1显著提高13.0%。综上,等氮量有机肥替代25%和50%的化肥在提高糯玉米鲜穗产量的同时,能显著改善营养品质,实现糯玉米的高产优质,可作为绿洲灌区合理的有机无机肥配施方法。

关键词:糯玉米;有机肥替代化肥;光合特性;品质;绿洲灌区

中图分类号:S513 文献标志码:A

Effects of equal nitrogen organic fertilizer substitution of chemical fertilizer on photosynthetic characteristics and quality of waxy maize in oasis irrigation areas

BAI Chunsheng, FAN Hong, LI Bo, CHENG Baoyu, WANG Yan,
YIN Wen, HU Falong, FAN Zhilong, ZHAO Cai

(State Key Laboratory of Arid Land Crop Science/College of Agronomy,
Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Through field positioning experiments, the impact of the proportion of equal nitrogen amounts of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on the photosynthetic characteristics and nutritional quality of waxy corn was explored as to provide a theoretical basis for the scientific application of organic fertilizer in waxy maize production in oasis irrigation area. In this study, ‘Jingkenuo 2000’ was used as the tested variety. Under the condition of $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of pure nitrogen application, five treatments were set up, including full application of chemical fertilizer (F1), 25% replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer (F2), 50% replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer (F3), 75% replacement of chemical fertilizer by organic fertilizer (F4) and full application of organic fertilizer (F5), respectively. The photosynthetic characteristics of waxy maize at tasseling stage, grain nutritional quality at fresh ear stage and fresh ear yield were investigated. The results showed that: (1) repla-

收稿日期:2024-03-07

修回日期:2024-07-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2301100);甘肃省科技重大专项(22ZD6NA009);甘肃省自然科学基金重点项目(21JR7RA802)

作者简介:白春生(1997-),男,甘肃定西人,硕士研究生,研究方向为旱地与绿洲农作制。E-mail:18793257506@163.com

通信作者:赵财(1978-),男,甘肃武威人,研究员,主要从事多熟种植制度和节水农业研究。E-mail:zhaoc@gsau.edu.cn

cing part of chemical fertilizer with organic fertilizer significantly improved the photosynthetic characteristics of waxy maize at tasseling stage. Compared with F1, the SPAD value of F2 and F3 treatments increased by 10.6% ~ 14.3%, T_r increased by 11.7% ~ 18.8%, P_n increased by 11.2% ~ 17.1%, G_s increased by 62.2% ~ 79.2%, and C_i decreased by 22.7% ~ 23.8%. (2) The fresh ear yield of waxy maize under F2 treatment was significantly higher than that of F1 by 10.4%. (3) Organic fertilizer replacing chemical fertilizer could significantly increase the soluble sugar content and crude fat content in fresh ears of waxy maize. Compared with F1, the soluble sugar content and crude fat content in F2 and F3 treatments increased by 22.9% ~ 28.9% and 8.5% ~ 11.4%, respectively. The crude protein content of F2 treatment was 10.3% higher than that of F1. In addition, compared with F1, the contents of umami amino acids and sweet amino acids in F2 were significantly increased by 15.7% ~ 19.3% and 12.2% ~ 17.4%, respectively. Among them, the content of aromatic amino acids in F2 was significantly increased by 13.0% compared with F1. In short, the replacement of 25% and 50% chemical fertilizers with organic fertilizers can significantly improve the nutritional quality of waxy corn while increasing the fresh ear yield of waxy corn and achieve high yield and high quality of waxy corn, which is a reasonable organic and inorganic fertilizer application method in this area.

Keywords: waxy maize; organic fertilizer substitution chemical fertilizer; photosynthetic characteristic; quality; oasis irrigated area

糯玉米起源于我国,种质资源丰富。由于其鲜食口感甜粘、风味独特且各种营养品质含量丰富,市场价格较高,鲜食糯玉米在我国已逐渐发展成为一项新兴产业^[1-2]。近年来由于玉米品种的不断更新迭代,不同杂交种产量和品质基本没有显著的上升空间,这就意味着未来玉米产量和品质的提升越来越离不开栽培方式的改进^[3-4]。施用氮肥是提升玉米产量和品质的重要措施^[5],但同时产生了过量施用化肥造成成本上升和环境污染严重等一系列问题^[6]。绿洲灌区是我国西北地区重要的玉米产地,因此,如何在保证糯玉米高产优质的同时,减少生产过程中由于肥料施用不当而造成的环境污染等问题,对绿洲灌区糯玉米生产具有重要意义。

研究表明,长期施肥措施不当会造成土壤板结、pH 值下降和养分失衡,同时造成玉米产量和营养品质下降^[7]。近年来,为响应“化肥零增长计划”,加快有机肥在农业生产中的应用,关于不同作物化肥配施有机肥的研究日益增加。有机肥中富含大量有机质和微量元素,与化肥配施可以很好地改善土壤条件。适宜的化肥和有机肥配施比例不仅可以提高作物产量和品质,还能降低环境污染,实现可持续循环农业^[8-9]。玉米植株的光合特性能很好地反映出玉米的生长情况,从而判断玉米产量和品质的变化特征^[10]。大量研究表明,有机肥与化肥长期配合施用可以改善作物光合能力,提高肥料利用效率,显著增加农作物产量并改善品质^[11];较长的有机肥肥效可以在作物生育后期维持较高的叶面积指数,增加叶绿素含量,延长光合时间,利

于鲜穗产量的积累^[12]。方成等^[10]研究表明,30%的餐厨垃圾源蚓粪肥替代氮肥可以显著增加玉米可溶性糖、淀粉和维生素含量;何浩等^[13]研究发现,在秸秆还田条件下化肥减量配施有机肥可以提高土壤肥力,实现玉米增产增收;化肥与有机肥的合理配施不仅能提高土壤水肥利用效率,还能稳定提高作物产量,达到“以肥调水”的效果^[14];孟超然等^[15]研究得出,生物有机肥替代化肥可以显著提高玉米产量及其经济效益。

已有研究多集中在有机肥与化肥配施条件下作物叶片光合特性对产量的影响方面,但对于有机肥配施化肥对河西灌区糯玉米光合特性和营养品质的影响以及最佳配施比例的研究尚不明确。本研究设计了等氮量有机肥替代部分化肥的田间定位试验,将施肥与糯玉米光合特性及营养品质结合分析的同时,兼顾前者与籽粒中不同氨基酸含量的相关关系,探究有机肥与化肥的最佳配施比例对糯玉米营养品质的提升机理,以期为河西绿洲灌区糯玉米的种植提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况和供试材料

本研究于 2022—2023 年在甘肃省武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学绿洲农业科研教学基地(37°30'N、103°5'E)进行。试区位于河西走廊东端,属寒温带干旱气候区,年均降水约 156 mm,年蒸发量约 2 000 mm,日照时数 2 969.2 h,平均气温 7.2℃, >0℃ 积温 3 513℃, >10℃ 积温 2 985℃,无霜期 156

d. 该区光照资源丰富,日照充足,但资源性缺水严重,该地区农业用水主要依靠灌水,昼夜温差大,有利于糯玉米糖分积累,适合糯玉米种植。试验地土壤为灌漠土,含有机质 $14.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $25.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $142.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试材料

试验选用糯玉米‘京科糯 2000’为试验品种;无机肥选用尿素(N 46%)和过磷酸钙(P_2O_5 16%);有机肥选用宁夏正奥化工科技有限公司生产的氨基酸型有机肥(N 5%)。地膜为白色农业塑料薄膜,宽 140 cm、厚度为 0.01 mm。

1.3 试验设计

试验于 2021 年开始,以‘京科糯 2000’为试验

品种,采用随机区组设计,设 5 个施肥制度:全施氮肥(F1)、75%氮肥+25%有机肥(F2)、50%氮肥+50%有机肥(F3)、25%氮肥+75%有机肥(F4)、全施有机肥(F5),施纯氮总量均为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 1)。每个处理设 3 个重复,共 15 个小区,每个小区长 15.8 m,宽 4.6 m,各处理随机排列。灌水量为当地传统灌水量($3\ 240 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$),分别在玉米拔节期、大喇叭口期、吐丝开花期、灌浆期四个时期平均灌溉。施肥处理:磷肥 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 全作基肥,氮肥施用按当地传统施肥习惯,按基肥:大喇叭口期追肥:灌浆期追肥=3:5:2 分施。2022 年糯玉米于 4 月 18 日播种、8 月 20 日收获鲜穗;2023 年糯玉米于 4 月 25 日播种、8 月 25 日收获鲜穗;播种密度 $7.5 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$,行距均为 40 cm。

表 1 不同处理养分投入量

Table 1 Nutrient input of different treatments

处理 Treatment	有机肥比例 Organic fertilizer ratio/%	氮肥比例 Nitrogen fertilizer ratio/%	基肥/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Base fertilizer		追肥/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Top dressing		总氮肥量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Total nitrogen fertilizer rate
			P_2O_5	N	大喇叭口期 Big flare period	灌浆期 Filling period	
F1	0	100	150	90.0	150.0	60	300
F2	25	75	150	67.5	112.5	45	300
F3	50	50	150	45.0	75.0	30	300
F4	75	25	150	22.5	37.5	15	300
F5	100	0	150	0.0	0.0	0	300

1.4 测定项目与方法

1.4.1 鲜穗产量 玉米鲜穗测产,各小区采收 $1.4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 样方鲜果穗称重,从中选取 10 个果穗进行考种,测定鲜果穗重、穗粗、穗长、秃尖长、穗行数、行粒数;将每个果穗完整剥取中间部分籽粒,同处理间混匀, 105°C 烘干后粉碎,用于后期品质的测定。

1.4.2 可溶性糖和蔗糖含量 采用蒽酮比色法测定^[16]。

1.4.3 植株光合指标 分别于 2022 年和 2023 年抽雄期(每年 7 月 20 日左右)采用光合仪(LI-6800, LI-COR 公司,美国)测定玉米不同植株相同叶位处的光合速率、气孔导度,蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度。测定过程中选用红蓝光源,设置叶室中的 PAR 为 $1\ 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,叶室温度控制在 25°C ,每个处理重复测定 3 次^[17]。

1.4.4 叶绿素含量 抽雄期用手持 SPAD 叶绿素仪测定^[18]。

1.4.5 玉米籽粒中粗蛋白质、粗淀粉、粗脂肪、灰分含量 采用 FOSS 公司生产的多功能品质分析仪(NIRSDS2500)测定^[19]。

1.4.6 氨基酸含量 用液质联用系统三重四级杆液质联用仪(Agilent 1290-6460)测定玉米籽粒中的 17 种游离氨基酸含量^[20]。

1.4.7 呈味氨基酸含量计算^[21] 食品风味的产生与食品中的呈味氨基酸有关,根据氨基酸呈味特性不同,将其分为鲜味、甜味、芳香族氨基酸;鲜味氨基酸含量为谷氨酸含量+天冬氨酸含量;甜味氨基酸含量为丙氨酸含量+甘氨酸含量+丝氨酸含量+脯氨酸含量;芳香氨基酸含量为酪氨酸含量+苯丙氨酸含量。

1.4.8 玉米籽粒蛋白质营养品质评价^[22] 对玉米籽粒标准蛋白质中七类必需氨基酸(表 2)依照氨基酸评分标准模式计算各处理下玉米籽粒的蛋白质必需氨基酸评分值(RRA)和氨基酸比值系数(RC):

$$RRA = \frac{\text{测定的氨基酸含量}}{\text{WHO/FAO 标准蛋白参考值}} \times 100\%$$

$$RC = \frac{RRA}{RRA \text{ 均值}}$$

1.5 数据整理及分析

利用 Microsoft Excel 2021 软件整理数据,运用 SPSS 26.0 对数据进行单因素方差分析,使用软件 Origin 2021b 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对糯玉米叶片光合特性的影响

由 2 a 光合参数均值得出,与 F1 处理相比,配施有机肥的处理均提高了糯玉米抽雄期叶片的光合性能(表 3)。其中,F2 和 F3 处理较 F1 效果最为显著($P<0.05$);F2 处理下的 SPAD 值、蒸腾速率、净光合速率和气孔导度较 F1 处理分别提高了 14.3%、18.8%、17.1%和 79.2%,胞间 CO_2 浓度较 F1 处理下降了 22.7%;F3 处理下的 SPAD 值、蒸腾速率、净光合速率和气孔导度较 F1 处理分别提高了 10.6%、11.7%、11.2%和 62.2%,胞间 CO_2 浓度较 F1 处理下降

了 23.8%。由此可知,25%和 50%的有机肥替代化肥对糯玉米叶片光合性能的提升效果最佳。

2.2 不同处理对糯玉米鲜穗产量的影响

有机肥替代部分化肥能显著提高糯玉米鲜穗产量(图 1)。由 2 a 鲜穗产量均值得出,F2 和 F3 处理下的糯玉米鲜穗产量分别达到了 $16\ 017.7\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $15\ 681.8\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,较 F1 处理分别提高 10.4%和 8.1%($P<0.05$)。F4、F5 处理较 F1 处理鲜穗产量有所提升,但无显著差异。说明 25%和 50%有机肥替代化肥处理能够保证糯玉米鲜穗增产,随着有机肥替代比例的增加,肥效发挥更加缓慢,造成后期增产效果不明显。

表 2 WHO/FAO 标准蛋白必需氨基酸模式

Table 2 Essential amino acid patterns of standard protein in WHO/FAO

氨基酸种类 Amino acid species	苏氨酸 Thr	缬氨酸 Val	异亮氨酸 Ile	亮氨酸 Leu	赖氨酸 Lys	蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	苯丙氨酸+酪氨酸 Phe+Tyr
标准蛋白 Standard protein/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	40	50	40	70	55	35	60

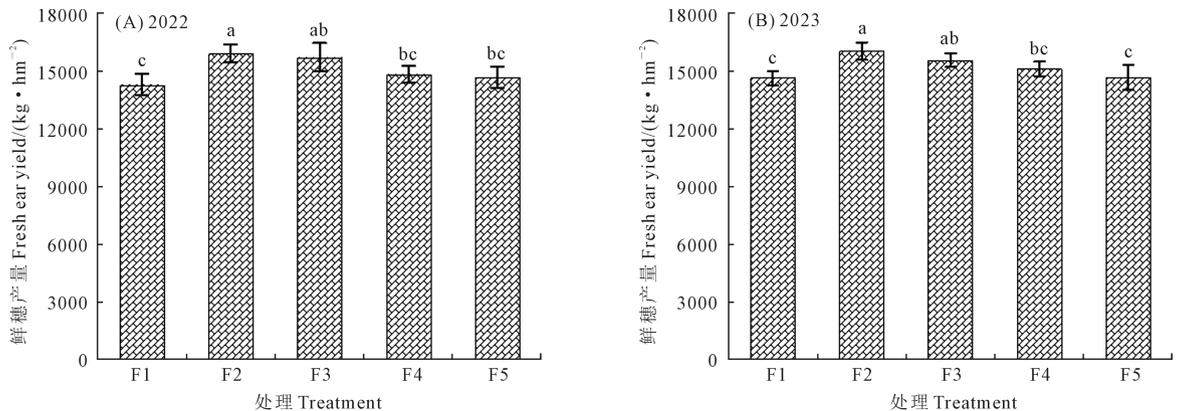
表 3 不同处理下的糯玉米叶片光合指标

Table 3 Photosynthetic indexes of waxy maize leaves under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	SPAD	蒸腾速率 Transpiration rate /($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	净光合速率 Photosynthetic rate /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance /($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration /($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)
2022	F1	44.30c	5.96d	28.91c	0.27c	203.96a
	F2	51.23a	6.79a	35.19a	0.45a	136.78c
	F3	50.60a	6.44b	32.23b	0.39ab	147.38c
	F4	47.30b	6.30bc	33.17b	0.34bc	179.50b
	F5	45.97b	6.15cd	29.65c	0.31bc	191.97ab
2023	F1	42.73d	5.31d	26.04d	0.27c	244.58a
	F2	48.27a	6.60a	29.16a	0.51a	209.98c
	F3	47.33ab	6.15b	28.80ab	0.48a	194.55bc
	F4	45.93bc	6.22b	27.85bc	0.36b	215.95b
	F5	44.67cd	5.55c	27.02cd	0.29c	226.09ab

注:同列不同小写字母表示同一年份各处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments in the same year ($P<0.05$). The same below.



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);误差线表示标准差($n=3$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$), and error bars indicate standard deviation ($n=3$).

图 1 不同处理下糯玉米鲜穗产量

Fig.1 Fresh ear yield of waxy maize under different treatments

2.3 不同处理对糯玉米鲜穗中营养品质含量的影响

不同施肥处理糯玉米鲜穗籽粒中各营养品质含量存在差异(表4)。由2a营养品质含量均值分析出,F2处理下的可溶性糖、粗蛋白、粗脂肪、粗淀粉含量较F1处理分别显著提高了28.9%、10.3%、11.4%、1.8% ($P<0.05$);F3处理下的可溶性糖、粗脂肪和粗蛋白含量同样显著高于F1处理,分别较F1处理提高了22.9%、8.5%和4.8%。配施有机肥处理下的蔗糖含量均显著高于全施化肥处理F1,其含量提高了16.3%~23.9%。由此可见,化肥配施有机肥能有效提高糯玉米鲜穗籽粒的营养品质,其中25%

和50%的有机肥等氮量替代化肥较传统施氮处理更有利于可溶性糖、粗蛋白、粗脂肪和粗淀粉含量的积累。

2.4 不同处理对糯玉米鲜穗中氨基酸含量的影响

2.4.1 不同处理下糯玉米鲜穗中氨基酸含量的差异 研究表明,有机肥替代部分化肥可以显著提高糯玉米鲜穗籽粒中的绝大多数氨基酸含量(表5)。2a氨基酸含量表明(表5),与F1处理相比,F2处理下的丝氨酸、异亮氨酸、酪氨酸和赖氨酸含量分别显著提高31.4%、42.0%、35.4%和42.7% ($P<0.05$);有机肥配施化肥处理下的苏氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、组氨酸、精氨酸、脯氨酸、天冬氨酸和蛋氨酸

表4 不同处理下糯玉米鲜穗中营养物质含量/%

Table 4 Contents of each nutritional quality in waxy maize grains under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar	蔗糖 Sucrose	灰分 Ash	粗淀粉 Crude amyllum	粗蛋白 Crude protein	粗脂肪 Crude fat
2022	F1	9.96d	3.71b	1.23a	64.92b	6.22e	3.85c
	F2	12.94a	4.64a	1.21a	66.14a	6.91a	4.07a
	F3	12.78a	4.57a	1.23a	65.89a	6.80b	4.01ab
	F4	12.41b	4.43a	1.24a	65.66a	6.51d	3.95b
	F5	10.63c	4.32a	1.23a	65.09b	6.69c	3.92bc
2023	F1	9.58c	3.77c	1.24a	66.50b	6.14c	3.44b
	F2	12.25a	4.64a	1.23a	67.67a	6.72a	4.05a
	F3	11.57ab	4.54ab	1.24a	67.46ab	6.11b	3.90a
	F4	11.69ab	4.47ab	1.23a	67.52ab	6.02b	3.92a
	F5	10.73bc	4.36b	1.22a	67.43ab	5.54b	3.65b

表5 不同处理下的糯玉米籽粒中17种氨基酸的含量/(mg·g⁻¹)

Table 5 Contents of 17 amino acids in waxy maize grains under different treatments

氨基酸 Amino acid	2022					2023				
	F1	F2	F3	F4	F5	F1	F2	F3	F4	F5
Ser	0.89c	1.06a	1.03ab	0.97bc	0.91c	0.67b	0.99a	0.99a	0.91a	0.93a
Thr	0.79c	1.06a	0.97ab	0.97ab	0.94b	0.80c	1.00a	0.98a	0.94ab	0.91b
Glu	2.41c	2.89a	2.71b	2.61b	2.49b	2.51c	2.68a	2.63ab	2.59b	2.60b
Gly	0.25b	0.36a	0.33a	0.32a	0.31a	0.29a	0.35a	0.32a	0.29a	0.27a
Ala	2.62b	3.29a	3.20a	3.18a	3.19a	2.50b	3.24a	3.18a	3.17a	3.15a
Val	0.50a	0.53a	0.46a	0.54a	0.48a	0.34a	0.36a	0.34a	0.31a	0.35a
Met	0.31b	0.45a	0.41a	0.40a	0.41a	0.31b	0.45a	0.41a	0.40a	0.41a
Ile	0.22b	0.35a	0.33a	0.35a	0.32a	0.28b	0.36a	0.35a	0.35a	0.33ab
Leu	0.21a	0.20a	0.18a	0.23a	0.20a	0.19a	0.21a	0.21a	0.21a	0.19a
Tyr	0.33c	0.45a	0.41ab	0.39b	0.38bc	0.32b	0.43a	0.41a	0.39a	0.38a
Phe	0.47a	0.47a	0.47a	0.48a	0.46a	0.48a	0.48a	0.44a	0.45a	0.45a
Lys	0.47c	0.62a	0.60ab	0.56ab	0.53bc	0.42b	0.65a	0.63a	0.61a	0.59a
His	0.19d	0.34a	0.31ab	0.28ab	0.27c	0.22b	0.34a	0.31a	0.30a	0.30a
Arg	0.38c	0.73a	0.63b	0.59b	0.54b	0.33d	0.68a	0.67ab	0.62bc	0.60c
Pro	4.16c	4.47a	4.39ab	4.36b	4.32b	4.23c	4.56a	4.47b	4.44b	4.41b
Asp	2.21b	3.02a	2.98a	2.85a	2.87a	2.38b	3.05a	3.04a	3.00a	3.01a
Gln	0.11a	0.10a	0.12a	0.12a	0.11a	0.10a	0.11a	0.12a	0.11a	0.11a
总量 Total content	16.51c	20.22a	19.42a	19.21ab	18.85b	16.38c	19.90a	19.46a	19.06ab	18.96b

注:同一行不同小写字母表示同一年份各处理差异显著($P<0.05$);Ser、Thr、Glu、Gly、Ala、Val、Met、Ile、Leu、Tyr、Phe、Lys、His、Arg、Pro、Asp、Gln分别表示丝氨酸、苏氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、甲硫氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸、精氨酸、脯氨酸、天冬氨酸、谷氨酰胺。下同。

Note: Different lowercase letters in the same line indicate significant differences between treatments in the same year ($P<0.05$). Ser, Thr, Glu, Gly, Ala, Val, Met, Ile, Leu, Tyr, Phe, Lys, His, Arg, Pro, Asp, and Gln represents serine, threonine, glutamic acid, glycine, alanine, valine, methionine, isoleucine, leucine, tyrosine, phenylalanine, lysine, histidine, arginine, proline, aspartic acid, and glutamine, respectively. The same below.

含量均显著高于全施化肥处理,分别提高了 16.4%~29.6%、3.5%~13.2%、7.4%~31.5%、23.8%~27.5%、39.0%~65.9%、60.6%~98.5%、4.1%~7.6%、28.1%~32.2%和 29.0%~45.2%;2 a 施肥处理糯玉米鲜穗中缬氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、谷氨酰胺含量无显著差异;F2、F3、F4、F5 处理下氨基酸总含量较 F1 处理分别显著提高了 21.9%、18.2%、16.4%、15.0%。这一结论表明,施用有机肥处理较传统施氮处理均可以显著提高糯玉米鲜穗籽粒中的绝大多数氨基酸含量,从整体效果来看,25%的有机肥替代化肥处理效果最好。

2.4.2 不同处理对糯玉米鲜穗中呈味氨基酸含量的影响 2 a 试验结果均值表明,配施有机肥处理对糯玉米鲜穗中各呈味氨基酸含量均有显著影响(图 2)。有机肥替代化肥处理较传统施氮鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量分别显著提高了 15.7%~19.3%和 12.2%~17.4% ($P<0.05$);F2 处理下芳香氨基酸含量较 F1 处理显著提高 13.0% ($P<0.05$)。这一结果表明,在所有配施有机肥的处理中,25%的有机肥等氮量替代化肥较传统施氮处理能同时显著提高糯玉米鲜穗籽粒中鲜味氨基酸、甜味氨基酸和芳香氨基酸含量。

2.4.3 不同处理下糯玉米鲜穗中的蛋白质必需氨基酸比值系数 氨基酸比值系数 $RC=1$ 说明氨基

酸含量比例与模式氨基酸一致; $RC>1$ 或 $RC<1$ 都表明该氨基酸偏离模式氨基酸。由表 6 可知,2 a 施肥处理下,糯玉米鲜穗中苏氨酸和苯丙氨酸+酪氨酸含量明显过剩, RC 分别为 1.83~2.07 和 1.13~1.26;蛋氨酸+半胱氨酸(糯玉米鲜穗中存在极少量半胱氨酸,没有计算到其中)和赖氨酸 RC 最接近模式氨基酸,其中 F2 和 F3 处理下的 RC 最接近 1;F2 和 F5 处理下的异亮氨酸 RC 偏离标准模式最小,F1 处理下的缬氨酸较其他配施有机肥处理 RC 偏离标准模式最小;亮氨酸含量相对不足,但各施肥处理下 RC 均值也大于 0.55。

2.5 品质、鲜穗产量及光合特性的相关性分析

由表 7 可以看出,产量与胞间 CO_2 浓度呈极显著负相关($r=-0.84, P<0.01$);粗淀粉含量、粗蛋白含量、粗脂肪含量、可溶性糖含量、蔗糖含量与胞间 CO_2 浓度呈极显著负相关($P<0.01$),与蒸腾速率、气孔导度、净光合速率、SPAD 值呈极显著正相关($P<0.01$);产量与粗淀粉含量呈显著正相关关系($P<0.05$),与粗蛋白含量、粗脂肪含量、可溶性糖含量、蔗糖含量、蒸腾速率、气孔导度、净光合速率、SPAD 值均呈极显著正相关关系($P<0.01$)。表明糯玉米营养品质、鲜穗产量和抽雄期光合特性具有协调提升的关系。

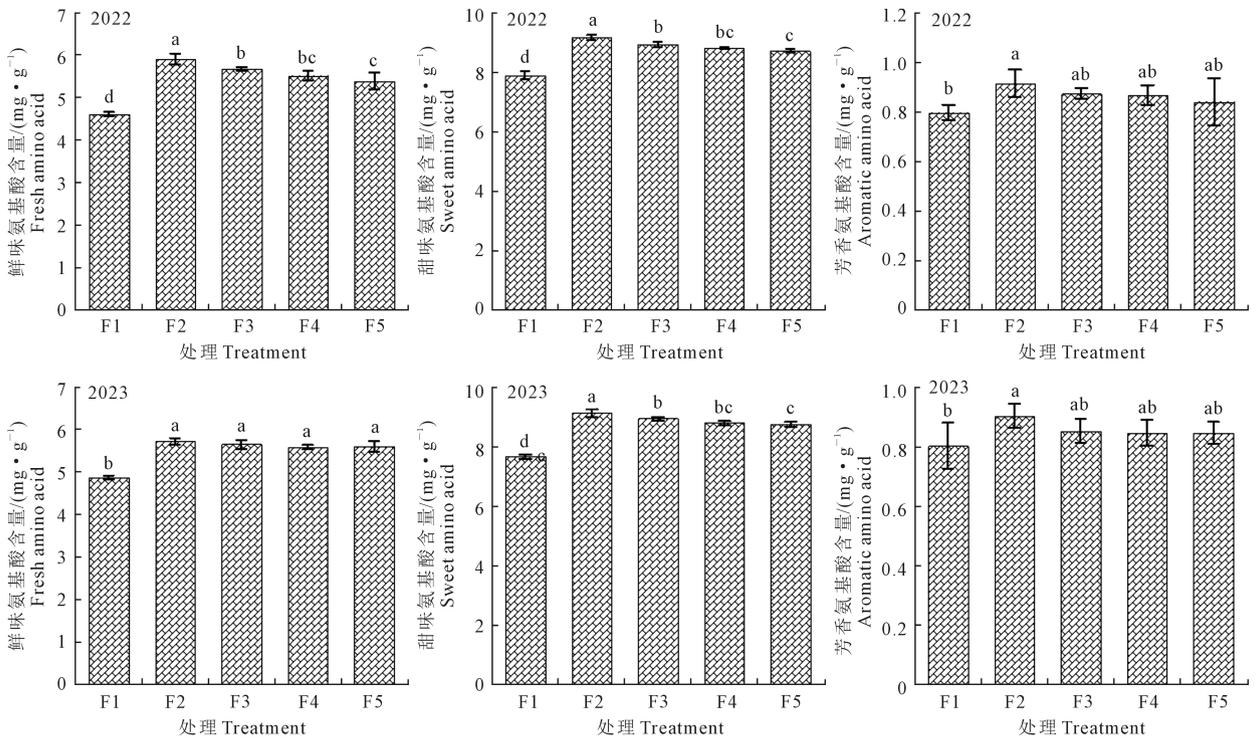


图 2 不同处理下呈味氨基酸的含量

Fig.2 Content of flavor amino acids under different treatment

表6 不同处理下蛋白质必需氨基酸比值系数

Table 6 RC of essential amino acids under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	Thr	Val	Ile	Leu	Lys	Metand Cys	Pheand Tyr
2022	F1	1.83	0.93	0.73	0.63	0.80	0.83	1.24
	F2	1.96	0.79	0.84	0.50	0.83	0.96	1.13
	F3	1.94	0.73	0.82	0.53	0.87	0.94	1.17
	F4	1.93	0.85	0.80	0.55	0.81	0.91	1.15
	F5	1.92	0.79	0.84	0.54	0.79	0.96	1.15
2023	F1	1.92	0.66	0.77	0.66	0.82	0.87	1.28
	F2	2.01	0.58	0.82	0.54	0.90	0.94	1.21
	F3	2.07	0.57	0.79	0.54	0.92	0.90	1.20
	F4	2.07	0.56	0.78	0.57	0.89	0.88	1.26
	F5	1.99	0.63	0.81	0.57	0.85	0.85	1.22

表7 产量与光合特性及各营养品质之间的相关系数矩阵

Table 7 Correlation coefficient matrix between yield, photosynthetic characteristics and nutritional quality

指标 Indicator	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
A	1.00										
B	0.72**	1.00									
C	0.91**	0.75**	1.00								
D	0.89**	0.80**	0.92**	1.00							
E	0.89**	0.56*	0.86**	0.88**	1.00						
F	0.86**	0.83**	0.90**	0.97**	0.84**	1.00					
G	0.88**	0.79**	0.87**	0.96**	0.85**	0.95**	1.00				
H	-0.87**	-0.76**	-0.83**	-0.91**	-0.86**	-0.84**	-0.86**	1.00			
I	0.87**	0.84**	0.90**	0.90**	0.74**	0.88**	0.88**	-0.86**	1.00		
J	0.82**	0.76**	0.85**	0.94**	0.84**	0.93**	0.87**	-0.89**	0.89**	1.00	
K	0.64*	0.74**	0.72**	0.84**	0.77**	0.80**	0.80**	-0.84**	0.70**	0.77**	1.00

注:表中A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K分别表示粗淀粉含量、粗蛋白质含量、粗脂肪含量、可溶性糖含量、蔗糖含量、蒸腾速率、净光合速率、胞间CO₂浓度、气孔导度、相对叶绿素含量、鲜穗产量。**表示极显著相关关系($P<0.01$), *表示显著相关关系($P<0.05$)。

Note: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J and K represents crude starch content, crude protein content, crude fat content, soluble sugar content, sucrose content, transpiration rate, net photosynthetic rate, intercellular CO₂ concentration, stomatal conductance, relative chlorophyll content, and fresh ear yield, respectively. ** indicates an extremely significant correlation ($P<0.01$) and * indicates a significant correlation ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 长期等氮量有机肥替代化肥对糯玉米光合特性的影响

光合效率可以直接影响作物产量,合理的氮肥施用可以优化光合特性,提高作物生长期间的捕光能力,从而提高玉米产量和品质^[23-24]。玉米抽穗期是玉米生长中最关键的时期之一,该时期是玉米生育期间一天中光照时间最长、温度最高、水分蒸发最快的时段,是后期玉米授粉、花粒形成的保证。本研究发现,有机肥配施化肥较全施化肥处理可以提高糯玉米叶片抽雄期的SPAD值、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度,降低胞间CO₂浓度,有效提高叶片光合性能,其中25%的有机肥替代比例最为显著,这与王晓娟等^[25]研究结果相近。其原因是有机肥中含有大量的微量矿质元素,与化肥配施后在一定程度上可以改善水分状况,提高作物的渗透调节和气孔调节能力,进而提高光合速率^[26];养分是限制玉米光合作用的关键因子,适宜的有机肥与氮肥配施提高了土壤肥力,使玉米光合作用显著增

强^[27];作物在水分与养分充足的条件下,气孔打开,促使作物呼吸速率加快,CO₂进入作物细胞,致使胞间CO₂浓度减小,光合速率增大,提高玉米光合能力,但气孔开度过大同时会加快作物蒸腾速率^[28]。同时,本研究发现,2023年较2022年光合作用在各处理间的差异逐渐减小,可能是因为长期有机肥替代化肥改变了土壤养分状况,从而使养分逐渐不再成为影响光合性能的主要因素^[25]。因此,适当的有机肥与化肥配施比例可以提高绿洲灌区糯玉米关键时期的光合效率,为后期糯玉米灌浆和营养品质含量积累提供保障。

3.2 长期等氮量有机肥替代化肥对糯玉米产量的影响

氮素是玉米生长的必需元素,是植物干物质积累和产量形成的基础。研究发现,生物有机肥替代化肥使玉米增产8.5%~11.4%^[15];季佳鹏等^[29]研究得出,20%的有机肥替代比例可以显著实现玉米高产;Zhai等^[30]研究得出,与常规施氮相比,15%和30%的有机肥替代比例能够显著提高夏玉米产量和水分利用效率。本研究发现,25%的有机肥等氮量

替代化肥较传统施氮处理可以使糯玉米鲜穗产量显著提高 10.4%。这与肥料特性有关,传统氮肥只能在短时期为玉米提供养分,而有机肥与氮肥的合理配施在玉米生长后期能够补充养分的同时,还可以改善土壤养分特性,进而提高产量^[12, 31]。在本研究中,随着有机肥替代化肥比例的增加,糯玉米鲜穗产量逐渐降低,表明在一定水平总养分量情况下,有机肥料和化学肥料比例适宜更能发挥肥料的效率,而有机肥过量会导致作物后期因养分供应不足而减产。这是因为化肥的肥效较快,适于在作物生长前期提供适量的无机氮;适宜的有机肥供应则在作物生长中后期持续稳定地释放氮、磷养分,维持作物的生长发育,二者联合作用最终提高作物产量^[32]。

3.3 长期等氮量有机肥替代化肥对糯玉米品质的影响

有机肥与化肥的合理配施是作物提升品质的有效栽培措施^[33]。研究发现,有机肥与化肥配施有利于提高玉米籽粒中的蛋白质、脂肪、可溶性糖以及淀粉含量^[34]。周芸等^[35]研究得出,与单独施用有机肥相比,有机肥配施比例 30% 和 40% 时能显著提高玉米籽粒产量,同时可以提高玉米营养品质含量,且在培肥土壤、兼顾玉米产量和品质方面,有机肥替代 30% 化肥更适宜。在本研究中,除了 2023 年的粗淀粉含量外,2 a 施肥试验条件下,25% 和 50% 的有机肥替代比例相比传统施氮能明显提高糯玉米中的可溶性糖、蔗糖、粗蛋白、粗淀粉和粗脂肪含量,其中,25% 的有机肥替代比例能显著提高糯玉米中大部分氨基酸含量,提升呈味氨基酸的比重,这一结果与吴霞玉等^[20]结论相近。本研究同样发现,25% 和 50% 的有机肥替代化肥比例有利于糯玉米中蛋白质必需氨基酸含量的积累,说明适量比例的有机肥配施化肥有利于糯玉米籽粒中蛋白质的构成,更有利于人体吸收。因为适量有机肥与化肥配施改善了玉米生存的土壤条件,在提高光合性能的同时,促进了植株对营养元素的吸收,有利于糖分和其他营养物质的积累^[36]。有机肥与化肥配施可以增强土壤对氮、磷、钾的吸附能力,为土壤提供丰富的有机质,同时有机肥中也含有丰富的有机质,微生物在参与有机质的分解时会产生大量有机酸和酶等,促进玉米植株对养分的代谢吸收,从而提升籽粒营养品质^[37]。

玉米光合特性、产量和籽粒营养品质对有机肥替代化肥的响应机制仍是今后绿色农业生产中的重点研究方向,因此,需要进一步探究有机肥配施

化肥对农田中微生态环境以及糯玉米植株关键碳、氮代谢酶、差异基因等生理调控机制。

4 结 论

在施氮定额总量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的条件下,有机肥替代部分化肥改善了糯玉米抽雄期的光合特性,为后期鲜穗产量的提高和营养品质的提升奠定了基础;其中有机肥替代 25% ~ 50% 的化肥处理在表现出最佳的光合特性、鲜穗产量和营养品质含量的同时,有效提高了大部分氨基酸和呈味氨基酸含量,以及表现出更稳定的蛋白质氨基酸比值系数,实现了糯玉米的高产优质。

参 考 文 献:

- [1] 许金芳, 宋国安, 刘佳. 鲜食玉米研究现状与发展对策[J]. 玉米科学, 2007, 15(6): 40-42, 46.
XU J F, SONG G A, LIU J. Research situation and development strategy of sweet corn and waxy corn in China[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(6): 40-42, 46.
- [2] 徐丽, 赵久然, 卢柏山, 等. 我国鲜食玉米种业现状及发展趋势[J]. 中国种业, 2020, (10): 14-18.
XU L, ZHAO J R, LU B S, et al. Current situation and development trend of fresh maize seed industry in China[J]. China Seed Industry, 2020, (10): 14-18.
- [3] SUN Z, LI X. Technical efficiency of chemical fertilizer use and its influencing factors in China's rice production[J]. Sustainability, 2021, 13(3): 1155.
- [4] RIZZO G, MONZON J P, TENORIO F A, et al. Climate and agronomy, not genetics, underpin recent maize yield gains in favorable environments[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2022, 119(4): e2113629119.
- [5] XIAO G, ZHAO Z, LIANG L, et al. Improving nitrogen and water use efficiency in a wheat-maize rotation system in the north China plain using optimized farming practices[J]. Agricultural Water Management, 2019, 212: 172-180.
- [6] LIU B, WANG X Z, MA L, et al. Combined applications of organic and synthetic nitrogen fertilizers for improving crop yield and reducing reactive nitrogen losses from China's vegetable systems: a meta-analysis[J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116143.
- [7] 祝英, 王治业, 彭铁楠, 等. 有机肥替代部分化肥对土壤肥力和微生物特征的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1161-1167.
ZHU Y, WANG Z Y, PENG Y N, et al. Changes of soil nutrients and microbial communities under the condition of organic fertilizers replacing part of chemical fertilizers[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(5): 1161-1167.
- [8] LI H, FENG W T, HE X H, et al. Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon(SOC) when SOC reaches a threshold in the northeast China plain[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(4): 937-946.
- [9] 王艳丽, 吴鹏年, 李培富, 等. 有机肥配施氮肥对滴灌春玉米产量及土壤肥力状况的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(8): 1230-1237.
WANG Y L, WU P N, LI P F, et al. Effects of organic manure combined with nitrogen fertilizer on spring maize yield and soil fertility under drip irrigation [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(8):

- 1230-1237.
- [10] 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 W, LI W M, 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.
- [11] DUAN Y H, XU M G, GAO S D, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications[J]. Field Crops Research, 2014, 157: 47-56.
- [12] 张睿, 刘党校. 氮磷与有机肥配施对小麦光合作用及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 543-547. ZHANG R, LIU D J. Effects of N, pandorganic fertilizer on photosynthesis, yield and quality of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(4): 543-547.
- [13] 何浩, 张宇彤, 危常州, 等. 等养分条件下不同有机肥替代率对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(2): 454-461. HE H, ZHANG Y T, WEI C Z, et al. Effects of different organic fertilizer replacement rates on maize growth and soil fertility under equal nutrient conditions [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(2): 454-461.
- [14] 陈玉章, 田慧慧, 李亚伟, 等. 秸秆带状沟覆垄播对旱地马铃薯产量和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(5): 714-727. CHEN Y Z, TIAN H H, LI Y W, et al. Effects of straw strip mulching on furrows and planting in ridges on water use efficiency and tuber yield in dryland potato [J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(5): 714-727.
- [15] 孟超然, 白如霄, 侯建伟, 等. 有机肥替代部分化肥对干旱区滴灌玉米养分吸收及产量影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 750-757. MENG C R, BAI R X, HOU J W, et al. Effects of organic materials partially substituting chemical fertilizer on nutrient uptake and yield of maize under drip irrigation in arid region[J]. Soils, 2020, 52(4): 750-757.
- [16] 杜锦, 向春阳, 丁建文, 等. 外源 SA 和 CaCl₂ 对低温胁迫下糯玉米幼苗生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(6): 64-71. DU J, XIANG C Y, DING J W, et al. Effects of exogenous salicylic acid and calcium chloride on physiology of waxy maize seedlings under low temperature stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(6): 64-71.
- [17] 米娜, 蔡福, 张玉书, 等. 不同生育期持续干旱对玉米的影响及其与减产率的定量关系 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1563-1570. MI N, CAI F, ZHANG Y S, et al. Effects of continuous drought during different growth stages on maize and its quantitative relationship with yield loss [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1563-1570.
- [18] 于维祯, 张晓驰, 胡娟, 等. 弱光涝渍复合胁迫对夏玉米产量及光合特性的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(18): 3834-3846. YU W Z, ZHANG X C, HU J, et al. Combined effects of shade and waterlogging on yield and photosynthetic characteristics of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(18): 3834-3846.
- [19] 尉亚囡, 薄其飞, 唐安, 等. 长期覆膜和施用有机肥对黄土高原春玉米产量和品质的效应[J]. 中国农业科学, 2023, 56(9): 1708-1717. WEI Y N, BO Q F, TANG A, et al. Effects of long-term film mulching and application of organic fertilizer on yield and quality of spring maize on the loess plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(9): 1708-1717.
- [20] 吴霞玉, 李盼, 韦金贵, 等. 减量灌水及有机无机肥配施对西北灌区玉米光合生理、籽粒产量及品质的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(4): 1065-1079. WU X Y, LI P, WEI J G, et al. Effect of reduced irrigation and combined application of organic and chemical fertilizers on photosynthetic physiology, grain yield and quality of maize in northwestern irrigation areas [J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(4): 1065-1079.
- [21] 杨苞梅, 姚丽贤, 国彬, 等. 不同品种荔枝果实游离氨基酸分析 [J]. 食品科学, 2011, 32(16): 249-252. YANG B M, YAO L X, GUO B, et al. Analysis of free amino acids in litchi fruits from different cultivars [J]. Food Science, 2011, 32(16): 249-252.
- [22] 孙娟娟, 阿拉木斯, 赵金梅, 等. 6个紫花苜蓿品种氨基酸组成分析及营养价值评价[J]. 中国农业科学, 2019, 52(13): 2359-2367. SUN J J, A L M S, ZHAO J M, et al. Analysis of amino acid composition and six native alfalfa cultivars [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(13): 2359-2367.
- [23] 吕丽华, 陶洪斌, 夏来坤, 等. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J]. 作物学报, 2008, 34(3): 447-455. LV L H, TAO H B, XIA L K, et al. Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities [J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(3): 447-455.
- [24] 徐国伟, 陆大克, 王贺正, 等. 干湿交替灌溉与施氮量对水稻叶片光合性状的耦合效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5): 1225-1237. XU G W, LU D K, WANG H Z, et al. Coupling effect of wetting and drying alternative irrigation and nitrogen application rate on photosynthetic characteristics of rice leaves [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(5): 1225-1237.
- [25] 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.
- [26] 张岁岐, 山仑. 植物水分利用效率及其研究进展 [J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(4): 1-5. ZHANG S Q, SHAN L. Research progress on water use efficiency of plant [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(4): 1-5.
- [27] 郭喜军, 谢军红, 李玲玲, 等. 氮肥用量及有机无机肥配比对陇中旱农区玉米光合特性及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(5): 806-816. GUO X J, XIE J H, LI L L, et al. Appropriate nitrogen fertilizer rate and organic N ratio for satisfactory photosynthesis and yield of maize in dry farming area of Longzhong, Gansu Province [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2020, 26(5): 806-816.
- [28] KRUSE J, ADAMS M, WINKLER B, et al. Optimization of photosynthesis and stomatal conductance in the date palm *Phoenix dactylifera* during acclimation to heat and drought [J]. New Phytologist, 2019, 223(4): 1973-1988.
- [29] 季佳鹏, 赵欣宇, 吴景贵, 等. 有机肥替代20%化肥提高黑钙土养分有效性及玉米产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 491-499. JI J P, ZHAO X Y, WU J G, et al. Replacing 20% of chemical nitrogen with manures to increase soil nutrient availability and maize yield in a chernozem soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2021,

- 27(3): 491-499.
- [30] ZHAI L C, WANG Z B, ZHAI Y C, et al. Partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer benefits grain yield, water use efficiency, and economic return of summer maize[J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 217: 105287.
- [31] 虞铁俊, 马军伟, 陆若辉, 等. 有机肥对土壤特性及农产品产量和品质影响研究进展[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(35): 64-71.
YU Y J, MA J W, LU R H, et al. Effect of organic fertilizer on soil characteristics, yield and quality of agricultural products; research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(35): 64-71.
- [32] 晁赢, 付钢锋, 阎祥慧, 等. 有机肥对作物品质、土壤肥力及环境影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(29): 103-107.
CHAO Y, FU G F, YAN X H, et al. Effects of organic fertilizer on crop quality, soil fertility and environment; research progress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(29): 103-107.
- [33] 黄志浩, 曹国军, 耿玉辉, 等. 有机肥部分替代氮肥土壤硝态氮动态变化特征及玉米产量效应研究[J]. *玉米科学*, 2019, 27(1): 151-158.
HUANG Z H, CAO G J, GENG Y H, et al. Effects of organic manure partial substitution for chemical N fertilizer on the dynamic change of soil nitrate N and maize yield[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(1): 151-158.
- [34] 焦金龙, 李友强, 吴玲, 等. 化肥减量配施有机肥对青贮玉米产量、营养品质及土壤养分的影响[J]. *华北农学报*, 2022, 37(3): 128-135.
JIAO J L, LI Y Q, WU L, et al. Effects of fertilizer reduction combined with organic fertilizer on yield, nutritional value and soil nutrient of silage maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, 37(3): 128-135.
- [35] 周芸, 李永梅, 范茂攀, 等. 有机肥等氮替代化肥对红壤团聚体及玉米产量和品质的影响[J]. *作物杂志*, 2019, (4): 125-132.
ZHOU Y, LI Y M, FAN M P, et al. Effects of nitrogen in organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer on aggregates of red soil, maize yield and quality[J]. *Crops*, 2019, (4): 125-132.
- [36] SEPEHRI A, MODARRES-SANAVY S. Water and nitrogen stress on maize photosynthesis[J]. *Journal of Biological Sciences*, 2003, 3(6): 578-584.
- [37] 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: 1-12.

(上接第 100 页)

- [23] 张永强, 方辉, 陈传信, 等. 遮阴和种植密度对冬小麦灌浆特性及籽粒品质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(5): 10-19.
ZHANG Y Q, FANG H, CHEN C X, et al. Effects of shading and planting population on grain-filling properties and grain quality of winter wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(5): 10-19.
- [24] 高玉红, 吴兵, 崔红艳, 等. 不同旱地春小麦新品种(系)干物质积累和产量形成的特点[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(5): 1-6.
GAO Y H, WU B, CUI H Y, et al. Characteristics of dry matter accumulation and grain yield forming of different spring wheat varieties or strains in dryland of Gansu Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(5): 1-6.
- [25] 张金汕, 贾永红, 孙鹏, 等. 匀播和施氮量对冬小麦群体、光合及干物质积累的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26(7): 12-24.
ZHANG J S, JIA Y H, SUN P, et al. Effect of uniform pattern and N application rate on colony, photosynthesis and dry matter accumulation of winter wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(7): 12-24.
- [26] ZHANG H, ZHAO Q, WANG Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics, biomass, and yield of wheat under different shading conditions[J]. *Agronomy*, 2021, 11(10): 1989.
- [27] 陈钰蓉, 范震, 赵有欣, 等. 水分与控释尿素耦合对冬小麦干物质积累和氮素转运及产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2023, (12): 173-179.
CHEN Y R, FAN Z, ZHAO Y X, et al. Co-effects of irrigation and polymer coated urea on biomass and nitrogen accumulation, transport and yield of winter wheat[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2023, (12): 173-179.
- [28] LIANG W X, ZHANG Z C, WENX X, et al. Effect of non-structural carbohydrate accumulation in the stem preanthesis on grain filling of wheat inferior grain[J]. *Field Crops Research*, 2017, 211: 66-76.
- [29] MOTZO R, GIUNTA F, PRUNEDDU G. The response of rate and duration of grain filling to long-term selection for yield in Italian durum wheats[J]. *Crop and Pasture Science*, 2010, 61(2): 162.
- [30] 贾峥嵘, 郝佳丽, 郝艳芳, 等. 不同施氮量对冬小麦灌浆特性及产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2022, 50(6): 823-829.
JIA Z R, HAO J L, HAO Y F, et al. Effect of different nitrogen application on grain filling characteristics and yield of winter wheat[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(6): 823-829.
- [31] YAN S C, WU Y, FAN J L, et al. Effects of water and fertilizer management on grain filling characteristics, grain weight and productivity of drip-fertigated winter wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 983-995.
- [32] KANG S Z, ZHANG L, LIANG Y L, et al. Effects of limited irrigation on yield and water use efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 55(3): 203-216.
- [33] 吴少辉, 高海涛, 王书子, 等. 干旱对冬小麦粒重形成的影响及灌浆特性分析[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(2): 49-51, 64.
WU S H, GAO H T, WANG S Z, et al. Analysis on the effect of drought on the grain weight grow and the character of the grain filling of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(2): 49-51, 64.
- [34] 刘志良, 李晓爽, 曹彩云, 等. 春灌一水时间对冬小麦灌浆特性和水分利用效率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(8): 1296-1304.
LIU Z L, LI X S, CAO C Y, et al. Effect of one water time of spring irrigation on grain filling characteristics and water use efficiency of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(8): 1296-1304.
- [35] ZHOU L. Influences of deficit irrigation on soil water content distribution and spring wheat growth in Hetao irrigation district, Inner Mongolia of China[J]. *Water Science & Technology: Water Supply*, 2020, 20(8): 3722-3729.