



不同肥料配比对糜子产量和品质的调控效应

王君杰, 陈 凌, 田 翔, 乔治军

(山西农业大学 农业基因资源研究中心/农业部黄土高原作物基因资源与种质创制重点实验室/杂粮种质

资源发掘与遗传改良山西省重点实验室, 太原 030031)

摘 要 为探明不同施肥方式对糜子营养品质、食味品质和产量的影响,于2019年在山西河曲进行试验,以河曲大红糜子为材料,选用不同配比的有机肥(羊粪)、生物菌肥、尿素和复合肥,研究不同施肥配比对糜子品质和产量的影响。结果表明:不同肥料配比对糜子产量和品质性状显著影响,复合肥和有机肥(F+Y)配施显著提高糜子籽粒产量(GY)、净光合速率(P_n)、钙(Ca)和铁(Fe)含量,显著减低直链淀粉含量(AC);相关性分析发现,籽粒产量(GY)和净光合速率(P_n)呈极显著正相关,相关系数为0.82,镁(Mg)与铁(Fe)呈极显著正相关,值为0.68,直链淀粉含量(AC)与醇溶蛋白含量(Gli)、钙(Ca)达到极显著负相关,值分别为-0.66和-0.50;主成分分析发现,糜子各性状指标分为4个主成分,分别代表糜子食味品质、营养品质、产量指标和蛋白营养品质,综合得分以复合肥和有机肥(F+Y)处理最高,并显著高于其他处理。综上所述,复合肥(187.5 kg·hm⁻²)与有机肥(1.5×10⁴ kg·hm⁻²)配施是糜子获得优质高产的主要施肥方式。

关键词 糜子;产量;营养品质;食味品质;施肥方式

糜子是禾本科C₄作物,具有抗旱、喜温、耐瘠薄、生育期短等特点,在中国农业发展史上具有举足轻重的地位^[1]。作物籽粒品质和产量主要受遗传基因、栽培措施和种植环境共同影响,其中肥料是影响籽粒品质和产量最主要的因素^[2]。近年来,不合理的化肥施用,严重造成生态环境破坏、地下水及土壤污染、肥效减低^[3-4]等一系列环境问题,因此推进种植业绿色发展,实现化肥农药施用量负增长,并深入推进有机肥代替化肥成为糜子优质生产发展方向。有机肥、生物菌肥具有改善土壤理化性质、土壤结构和生物活性、增加土壤有机质含量和生物多样性、增强作物抗逆性等特点^[5-6],但具有肥效慢和养分含量低等缺点;无机肥具有肥效快、养分高等优点,但过量施用会造成土壤板结、环境污染等现象,最终导致农作物产量和品质下降^[7]。有机肥无机肥合理配施,调整农业投入结构,减少化肥农药施用量,实现资源节约、环境友好的农业可持续发展。针对有机肥无机肥配施对作物产量和品质的研究已有大量报道,但主要集中在大宗作物和经济作物上,研究表

明,有机肥替代部分无机肥能显著提高作物产量和品质。氮肥能显著提高农作物微量元素的吸收且主要集中在籽粒铁锌含量的研究^[8-9],小麦籽粒醇溶蛋白和谷蛋白含量随着施氮量的增加而增加^[10],增施有机肥显著增加作物蛋白质含量^[11]和直链淀粉含量^[12-13],有机无机肥配施能显著提高作物产量^[14-17]和品质^[18-22],生物菌肥配施无机肥有利于提高作物产量^[23-24]和品质^[25-26],虽然大量研究揭示了有机肥和无机肥配施对农作物产量和品质有显著提高作用,但不同施肥方式主要局限于有机肥和无机肥^[27],而对有机肥、生物菌肥、尿素和复合肥的配施方式研究较少。糜子作为小宗作物,研究基础比较薄弱,针对肥料方面的研究主要集中在对产量的影响^[28-31],对品质的研究比较少,特别是对糜子营养品质、食味品质和产量指标的综合研究鲜有报道,糜子品质主要分为商品品质、食味品质和营养品质,各个品质指标间相互联系、相互影响,所以如何根据所需的产量品质需求选择合适的施肥方式,是亟需研究的产业问题。本研究在忻州河曲基地进行,以河曲大红糜子为

收稿日期:2022-05-16 修回日期:2022-09-30

基金项目:中央引导专项自由探索类(YDZJSX20231A035);国家现代农业产业技术体系(CARS-06-14.5-A16)。

第一作者:王君杰,男,硕士研究生,从事谷子糜子栽培生理研究。E-mail:xiaoleiawangjie@163.com

通信作者:乔治军,男,研究员,从事谷子糜子生理及农作物资源创新研究。E-mail:nkypzs@126.com

试验材料,设置有机肥、生物菌肥、复合肥和尿素 4 种肥料类型,设置 11 个施肥处理,测定糜子籽粒蛋白质、直链淀粉、谷蛋白、醇溶蛋白、锌、钙、镁、产量和光合速率 9 个指标,利用多元统计分析方法研究不同施肥方式对糜子产量和品质的影响,旨在为糜子优质高产的最优施肥方式提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

2019 年 6—9 月在山西忻州河曲县文笔镇邬家沙梁村(N39°22',E111°13')进行,该地海拔 1 036 m,该区年均气温 8.8℃,无霜期 150 d 左右,前茬作物为玉米,土壤性质为沙壤土,温、光、热资源适宜糜子的生长发育(表 1)。

1.2 试验设计

采取单因素随机区组设计,供试品种为河曲大红糜子,设有机肥羊粪(Y)、复合肥(F)、生物菌

肥(J)和尿素(N)按一定比例配合施用,施肥量按照减量施氮的政策进行设置,共设置 11 个处理(表 2),3 次重复,重复之间设置 1 m 宽的走道,每个重复 2 小区之间设置 0.5 m 的走道,共 33 个小区,小区面积为 15 m²(3 m×5 m),种植密度为 6×10⁵ 株·hm⁻²,行距为 30 cm,株距为 5 cm,6 月上旬播种,9 月下旬收获。播种前肥料统一作为基肥施入土壤,糜子生育期间田间管理均一致。生物菌肥由内蒙古嘉华智慧农业科技有限公司提供,其中有机养分(氮+磷+钾)≥12%,有机质≥45%,专利活性物质≥每克 0.2 亿个。复合肥(N:P:K 为 28:6:6)和尿素(46.4%)由史丹利化肥股份有限公司提供。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 净光合速率 选择在 9:00—11:00 的天气晴朗、无风或风速很小的天气条件下进行,采用便携式光合仪 LI-6400XT 测定糜子开花期植株倒二叶的净光合速率(Net photosynthetic rate,*P_n*)。

表 1 供试田土壤理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of experiment field						
地点 Place	全氮/(g·kg ⁻¹) Total nitrogen	速效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium	有机质/(g·kg ⁻¹) Organic matter	pH	速效氮/(mg·kg ⁻¹) Available nitrogen
河曲 Hequ	0.67	5.49	86.17	8.64	8.72	60.25

表 2 各处理肥料用量

Table 2 Fertilizer rates under different treatments	
不同处理 Different treatment	肥料用量/(kg·hm ⁻²) Fertilizer rate
对照 CK	0
有机肥 Organic fertilizer(Y)	3×10 ⁴
尿素 Urea (N)	150
复合肥 Compound fertilizer(F)	375
生物菌肥 Biological fertilizer(J)	1 500
复合肥+有机肥 Compound+Organic fertilizer (F+Y)	187.5+1.5×10 ⁴
有机肥+生物菌肥 Organic+Biological fertilizer(Y+J)	1.5×10 ⁴ +750
尿素+有机肥 Urea+Organic fertilizer(N+Y)	75+1.5×10 ⁴
复合肥+生物菌肥 Compound+Biological fertilizer(F+J)	187.5+750
尿素+复合肥 Urea+Compound fertilizer(N+F)	75+187.5
尿素+生物菌肥 Urea+Biological fertilizer(N+J)	75+750

1.3.2 籽粒产量 成熟期小区植株全部收获,用剪刀剪下所有糜子穗装入纱网袋,然后脱粒晾干,至籽粒含水量低于 14%以下进行称量保存,换算即为籽粒产量(Grain yield,GY)。

1.3.3 蛋白质含量 糜子籽粒收获后,籽粒含水量晾晒至 14%以下,取 200 g 籽粒进行脱壳粉样,

用全自动凯氏定氮仪测定籽粒蛋白质含量,蛋白质含量(Protein content,PC)=籽粒氮含量×6.25。

1.3.4 微量元素 籽粒中的 Ca、Fe 和 Mg 含量采用原子吸收分光光度计法进行测定,Fe 按照 GB5009.90 进行测定,Ca 按照 GB5009.92 进行

测定, Mg 按照 GB5009. 241 进行测定。

1.3.5 直链淀粉 糜子籽粒中的直链淀粉含量 (Amylose content, AC) 采用双波长分光光度计法, 按照 DB/T2265 标准进行测定。

1.3.6 谷蛋白、醇溶蛋白 醇溶蛋白含量 (Gliadin content, Gli): 称 0.2 g 粉末样品于 10 mL 离心管中, 加入 70% 乙醇 2 mL, 摇匀后离心机 5 000 r · min⁻¹ 离心 10 min, 将上清液倒入消化管中, 重复 3 次, 合并上清液, 残渣留下, H₂SO₄—H₂O₂ 靛酚蓝比色法测氮。

谷蛋白含量 (Gluten content, Glu): 残渣中加入 0.2% NaOH 2 mL, 摇匀后离心机 5 000 r · min⁻¹ 离心 10 min, 将上清液倒入消化管中, 重复 3 次, 合并上清液, H₂SO₄—H₂O₂ 靛酚蓝比色法测氮。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 对试验数据进行整理, 用 DPS 9.50 统计软件对数据进行方差分析, 采用 SPSS 20 统计软件对数据进行相关性分析、主成分分析和聚类分析, 采用 Origin 2021 软件进行作图分析。

2 结果与分析

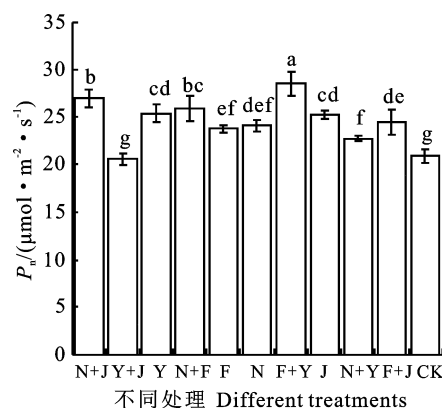
2.1 施肥方式对糜子生长发育的影响

2.1.1 糜子净光合速率 由图 1 可以看出, 糜子 P_n 以 F + Y 处理最大, P_n 值为 28.55 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 较对照 CK 增加 36.54%, 并显著高于其他处理; 以 Y + J 处理最低, 值为 20.57 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Y + J 处理与对照 CK 差异不显著, 可能有机肥与生物菌肥配施两者存在一定的拮抗作用, 影响根系吸收营养物质, 同时二者肥效比较低, 从而导致施肥效果对净光合速率影响不显著。

2.1.2 籽粒产量 GY 与 P_n 变化趋势一致 (图 2), 以 F + Y 处理最大, 值为 5 044.19 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 较对照 CK 增加 32.67%, 并显著高于其他处理; 以 Y + J 处理最低, 值为 3 543.44 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 单施 Y 和 J 对糜子产量的影响差异不显著, 且单施 F 和 N 对糜子产量的影响差异也不显著, 可以认为不同无机肥或者有机肥单施对糜子的增产效应差异不明显。

2.1.3 糜子食味营养品质 由图 3 可以得出, 糜子籽粒 Glu 含量以单施 N 处理最大, 为 3 062.66 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于其他处理 (F + Y 除外), N + J 处理最低, 为 1 948.76 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著低于其他

处理, 次之为 N + Y 处理, 表明无机肥尿素配施生物菌肥或有机肥能显著减低糜子 Glu 含量。Glu 含量的变化趋势与 Mg 呈相反趋势, N 处理显著提高糜子籽粒 Glu 含量, 但显著减低 Mg 含量; N + J 处理显著提高糜子 Mg 含量, 却显著减低 Glu 含量。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

The different lowercase letters indicate a significant difference ($P < 0.05$), the same below

图 1 不同处理的净光合速率

Fig. 1 Effects of different treatments on net photosynthetic rate

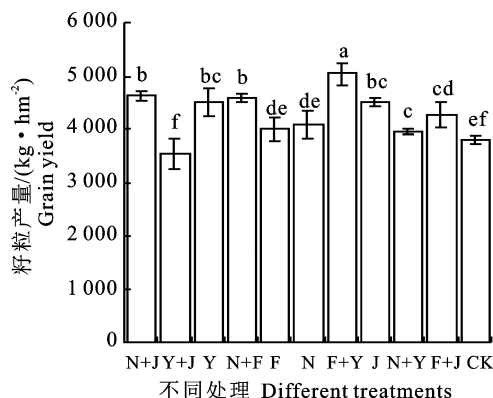


图 2 不同处理的籽粒产量

Fig. 2 Effects of different treatments on grain yield

糜子籽粒 Gli 含量以单施 F 处理最大, 为 1 823.55 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于其他处理, 次之分别为 N + Y 和 F + Y, 表明有机肥无机肥配施能增加籽粒醇溶蛋白含量; 以 N + J 处理最小, 为 896.02 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著低于其他处理, 较最大值减小幅度达 103.51%。

糜子籽粒 AC 以对照 CK 最大, 为 200.52 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于其他处理, 较最小值 157.65 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (F + Y 处理) 增加 27.19%, 表明施肥能显著减低糜子直链淀粉含量, 从而一定程度上改善了糜子食味品质。

糜子籽粒 PC 以 N + Y 处理最大,为 15.56%,显著高于其他处理,较对照 CK 增加

9.19%,对照 CK 最小,为 14.25%,说明施肥能显著提高糜子籽粒蛋白质含量,增加了糜子营养品质。

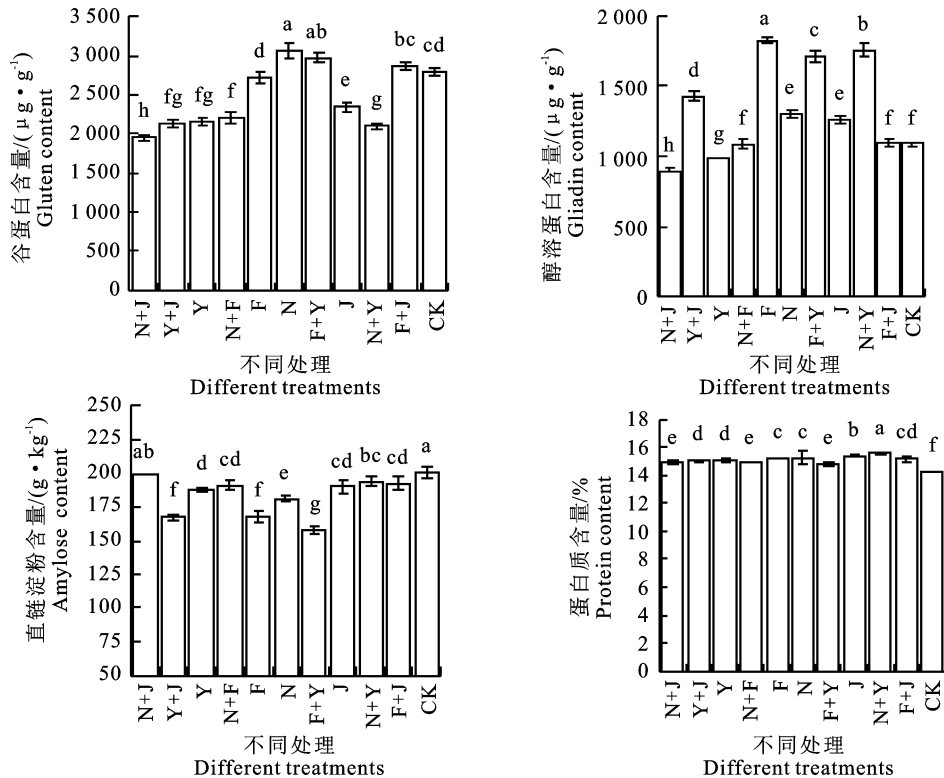


图3 不同处理的品质指标

Fig. 3 Effects of different treatments on quality index

2.1.4 营养品质 由图4可以看出,糜子籽粒Ca和Fe含量都以F+Y处理最大,分别为0.0084%和29.53 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较对照CK分别增加3.70%和5.72%,并显著高于其他处理;N+F处理的Ca含量最低,为0.0075%,说明无机肥N+F配施显著减低糜子籽粒的Ca含量;单施N处理的Fe含量最低,为25.13 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,单施F、N+F处理的Fe含量次之,表明无机肥单施及配施能显著减低糜子籽粒Fe的含量。

糜子籽粒Mg含量以N+J处理最大,为0.1087%,显著高于其他处理,单施N处理最低,为0.0863%,显著低于其他处理,可见生物菌肥通过其有效活菌来改善土壤理化性质,与尿素配施来减缓氮素对Mg离子的抑制作用。

2.2 相关分析

各性状指标之间可能存在一定相关性(图5),Mg与Fe达到极显著正相关,值为0.68,与Glu呈显著负相关,值为-0.40;Ca与Glu和Gli达到极显著正相关,值分别0.56和0.62;AC与Gli和Ca达到极显著负相关,值分别为-0.66和

-0.50;GY和 P_n 达到极显著正相关,值为0.82;PC与Gli达到显著正相关,相关系数为0.36,与Fe呈显著负相关,为-0.36。

2.3 主成分分析

对Ca、Fe、Mg、AC、Glu、Gli、PC、 P_n 、GY 9个指标在11个不同施肥方式处理下进行主成分分析,Kaiser-Meyer-Olkin 取样适切性量数(KMO)值为0.531,且Sig值小于0.05,表明该数据支持主成分分析。

对糜子籽粒Ca、Fe、Glu等9个品质和产量性状进行主成分分析,由表3可以看出,特征值大于1的有4个,可以选用前4个主成分进行数据分析,各特征值的大小代表各个主成分对总遗传方差的贡献,前4个主成分方差贡献率分别为31.238%、21.628%、18.499%和13.970%,并且累计方差贡献率为85.335%,说明9个原始变量85.335%的数据信息被提取出形成新的4个变量,既保留了原始信息又使数据简单化。

由表4可以得出:主成分1负荷较重的指标主要是Gli、AC和Ca,AC和Gli是评价食味品质的

主要指标之一,糜子 AC 含量越高,为粳型糜子,口感越差;Gli 含量增加,食味变差,所以主成分 1 可以标记为食味品质。主成分得分值以 F+Y 处理最高,为 1.860(表 5),说明 F+Y 处理与 Gli、AC 和 Ca 密切相关,F+Y 施肥方式可以促进 Gli 和 Ca 含量的增加,而对 AC 含量有抑制作用。

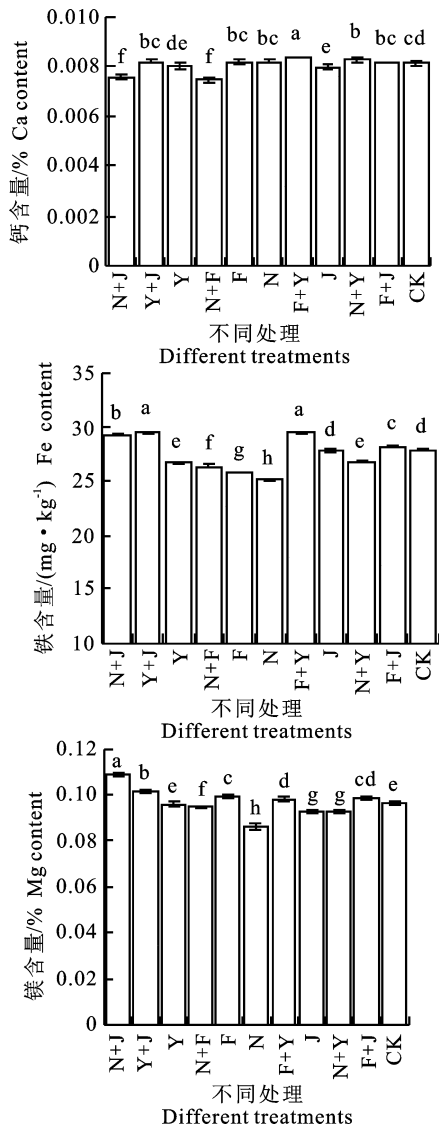
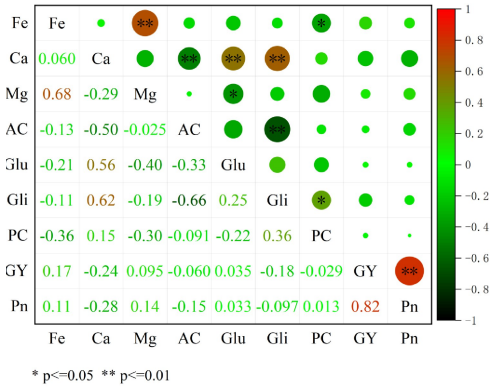


图 4 不同处理的微量元素含量
Fig. 4 Effects of different treatments on microelements

主成分 2 负荷较重的指标主要是 Fe 和 Mg, Fe 和 Mg 是人体所必须的微量元素,是评价糜子营养品质的主要指标之一,所以主成分 2 可以标记为营养品质。主成分得分值(表 5)以 N+J 处理最高,为 1.654,说明 N+J 处理与 Fe 和 Mg 密切相关,N+J 施肥方式可以促进 Fe 和 Mg 含量的增加。



* * 和 * 分别表示 1% 和 5% 水平上极显著差异和显著差异
* and * * indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively

图 5 不同指标间的相关性
Fig. 5 Correlation analysis of different indexes

表 3 各个主成分的特征值
Table 3 Eigenvalues of each principal component

主成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalues		
	特征值 Eigen values	方差贡献率/% Variance contribution	累计方差贡献率/% Cumulative variance contribution
1	2.811	31.238	31.238
2	1.946	21.628	52.866
3	1.665	18.499	71.365
4	1.257	13.970	85.335
5	0.522	5.803	91.138
6	0.274	3.040	94.178
7	0.245	2.722	96.900
8	0.157	1.748	98.648
9	0.122	1.352	100.000

表 4 各个指标在 4 个主成分中的加权系数
Table 4 Weighted coefficients of every index in four principal components

性状 Character	主成分 Principal component			
	1	2	3	4
醇溶蛋白 Gli	0.869	-0.108	-0.105	0.250
直链淀粉含量 AC	-0.856	-0.141	-0.180	0.010
钙 Ca	0.815	-0.139	-0.268	-0.221
镁 Mg	-0.129	0.908	0.069	0.048
铁 Fe	0.093	0.887	0.077	-0.167
净光合速率 P _n	-0.014	0.068	0.955	0.028
籽粒产量 GY	-0.072	0.056	0.937	-0.047
蛋白质含量 PC	0.249	-0.369	0.033	0.816
谷蛋白 Glu	0.469	-0.428	0.088	-0.702

主成分 3 负荷较重的指标主要是 GY 和 P_n , P_n 是影响糜子产量的主要指标之一, P_n 值越大, 植株有机物积累量越多, 从而产量越高, 所以主成分 3 可以标记为产量指标。主成分得分值(表 5)以 F+Y 处理最高, 为 1.788, 说明 F+Y 处理与 GY 和 P_n 密切相关, F+Y 施肥方式可以有效促进糜子 GY 和 P_n 增加。

主成分 4 负荷较重的指标主要是 Glu 和 PC,

Glu 和 PC 含量多少是评价糜子营养品质的主要指标之一, Glu 占了 PC 含量的 80%, 所以主成分 4 可以标记为蛋白营养品质。主成分得分值(表 5)以施肥方式 N+Y 处理最高, 为 1.598, 说明 N+Y 处理与 Glu 和 PC 密切相关, N+Y 施肥方式可以有效促进糜子 PC 含量的增加, 对 Glu 含量有抑制作用。

表 5 不同处理的主成分得分及综合得分

Table 5 Principal component score and comprehensive score under different treatments

处理 Treatments	主成分得分 Principal component score				综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
	1	2	3	4		
尿素+菌肥 N+J	-1.424	1.654	0.807	0.449	0.250 b	4
有机肥+菌肥 Y+J	0.765	1.527	-1.636	0.495	0.315 b	2
有机肥 Y	-0.636	-0.264	0.412	0.305	-0.118 d	7
尿素+复合肥 N+F	-1.311	-0.485	0.796	0.255	-0.304 e	9
复合肥 F	1.185	-0.309	-0.284	0.500	0.313 b	3
尿素 N	0.244	-2.009	-0.065	-0.538	-0.550 f	10
复合肥+有机肥 F+Y	1.860	0.761	1.788	-1.061	1.061 a	1
菌肥 J	-0.246	-0.433	0.464	0.736	0.050 c	6
尿素+有机肥 N+Y	0.441	-0.542	-0.829	1.598	0.065 c	5
复合肥+菌肥 F+J	-0.095	-0.013	-0.004	-0.555	-0.129 d	8
对照 CK	-0.782	0.114	-1.447	-2.183	-0.954 g	11

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

Note: The different lowercase letters indicate a significant difference($P<0.05$).

各个主成分得分按照下列公式进行计算:
 $F_i = \omega_{i1}X_1 + \omega_{i2}X_2 + \dots + \omega_{ij}X_j$ 。

其中 F_i 表示第 i 个主成分, ω_{ij} 表示第 i 成分第 j 个指标对应的成分得分系数, X_j 表示第 j 个指标的标准化数值。

综合得分按照下列公式进行计算: $F = \alpha_1F_1 + \alpha_2F_2 + \dots + \alpha_iF_i$, 其中 α_i 表示第 i 个主成分的权重。其中 $\alpha_i = \lambda_i / (\sum_{i=1}^p \lambda_i)$, λ_i 为第 i 个主成分的贡献率, $\sum_{i=1}^p \lambda_i$ 表示 i 个主成分的累计贡献率。

$$F_1 = 0.112X_1 + 0.316X_2 + 0.029X_3 - 0.381X_4 + 0.132X_5 + 0.368X_6 + 0.112X_7 + 0.0002X_8 + 0.030X_9$$

$$F_2 = 0.467X_1 + 0.005X_2 + 0.470X_3 - 0.138X_4 - 0.227X_5 + 0.038X_6 - 0.137X_7 - 0.041X_8 - 0.027X_9$$

$$F_3 = -0.017X_1 - 0.111X_2 - 0.026X_3 - 0.112X_4 + 0.082X_5 - 0.020X_6 + 0.057X_7 + 0.492X_8 + 0.504X_9$$

$$F_4 = -0.081X_1 - 0.143X_2 + 0.076X_3 -$$

$$0.040X_4 - 0.543X_5 + 0.227X_6 + 0.626X_7 - 0.028X_8 + 0.034X_9$$

$$F = 0.321F_1 + 0.259F_2 + 0.250F_3 + 0.170F_4$$

由表 5 可以看出:综合得分值值以 F+Y 处理最大, 为 1.061, 并显著高于其他处理, 对照 CK 值最小, 为 -0.954, 说明复合肥和有机肥配施能显著影响糜子籽粒食味品质、营养品质和产量, 不同施肥方式对品质和产量指标的影响各不相同, 可以根据所需指标的不同进行合理的施肥。

3 结论与讨论

3.1 不同施肥方式对糜子品质的影响

直链淀粉含量的多少是区分粳性糜子和糯性糜子的主要指标, 其含量多少直接影响糜子的营养品质和食味品质, 直链淀粉含量、蛋白质含量及其组分既影响作物籽粒营养品质又影响食味品质。金正勋等^[32]、王康君等^[33]研究表明稻米中的直链淀粉和蛋白质含量是决定水稻蒸煮食味品质的最主要化学成分, 其含量高稻米的蒸煮食味

品质就变劣,随着施氮量的增加,水稻籽粒蛋白质含量增加,直链淀粉含量减低,胶稠度逐渐变短;而吴长明等^[34]阐明直链淀粉含量的高低不是影响水稻食味品质的关键成分。水稻精米中主要有谷蛋白和醇溶蛋白,其含量决定了水稻的营养品质和食味品质,水稻蛋白质含量与稻米食味品质呈极显著负相关,直链淀粉含量 $>20\%$,蛋白质含量 $>9\%$ 的水稻往往米饭较硬,适口性差^[35]。

本研究结果显示,不同施肥方式显著提高糜子籽粒蛋白质含量,但对直链淀粉含量显著减低,Hao等^[36]研究得出氮肥能显著增加水稻籽粒蛋白质含量,但抑制籽粒直链淀粉的积累,与本试验研究结果基本一致。Kifayatullah等^[12]指出有机肥替代50%的无机肥较单施无机肥能显著提高水稻籽粒蛋白质含量和直链淀粉含量,卞景阳等^[37]研究表明有机肥替代部分无机肥有显著增加稻米直链淀粉含量和减低籽粒蛋白质含量,该结果与本试验结果不一致,本试验得出F+Y处理的蛋白质含量和直链淀粉含量显著低于单施无机肥N和F。徐令旗等^[38]研究发现与无机肥相比,有机肥增加了水稻稻米蛋白质含量,减低了直链淀粉含量,这与本试验结果相反,本试验得出单施有机肥较单施复合肥和氮肥显著提高糜子籽粒直链淀粉含量,减低蛋白质含量。可能本试验以羊粪作为有机肥,而徐令旗等^[38]所使用有机肥为生物炭、海藻生物有机肥、基施旺生物有机肥和凹凸棒有机肥。

Wei等^[39]研究表明不同施肥方式(缓控无机肥)较对照不施肥减低水稻稻米谷蛋白和醇溶蛋白含量,这与本试验结果基本一致,本试验得出N+F无机肥处理较对照CK显著减低糜子籽粒谷蛋白和醇溶蛋白的含量。谷蛋白不影响糜米食味品质,而醇溶蛋白组分增加,糜米食味变差,可以通过增加谷蛋白含量,减低醇溶蛋白含量,在不影响糜米食味品质的前提下提高糜米的营养品质。

通过不同施肥方式对糜子营养食味品质的研究表明:不同类型肥料对比对糜子籽粒PC、AC、Glu和Gli含量各有差异,可根据不同需求来选择科学合理的施肥方式,同时继续进行不同施肥方式对胶稠度、脂肪含量、糊化温度等营养食味品质的研究。

3.2 施肥方式对糜子籽粒微量元素含量的影响

铁、钙、镁、锰、锌等是人体所必需的微量元素,参与了维生素和激素的合成、参与了人体中

50%~70%的酶组分形成,对预防疾病衰老和提升营养健康具有重要作用^[40],增加饮食多样性是提高人体微量元素的主要途径^[41-42]。

本试验结果表明,不同施肥方式对糜子籽粒钙镁铁含量具有显著影响,F+Y显著提高糜子籽粒Ca和Fe的含量,N+J显著提高糜子籽粒Mg的含量;单施无机肥N显著减低糜子籽粒Mg和Fe的含量,无机肥N+F配施显著减低糜子籽粒Ca的含量。Pszczółkowska等^[43]阐明施氮量不改变小麦籽粒钙镁的含量,但显著增加籽粒铁含量,常旭虹等^[44]、姜丽娜等^[45]和赵德勇^[46]也发现增施氮肥有利于小麦籽粒铁的积累,而Klikocka等^[47]研究报道施氮有利于春小麦钙镁的增加,Promuthai等^[48]研究表明施用氮肥对水稻糙米和精米中铁含量没有显著影响,Patel等^[16]指出谷子籽粒微量元素铁不受氮素处理的影响。可见不同作物籽粒钙铁镁含量对肥料的响应具有一定差异,造成不同原因可能受作物本身特性、土壤特性、气候环境的影响。有关有机无机肥配施对提高糜子籽粒微量元素含量还有待进一步系统深入。

3.3 施肥方式对籽粒产量的影响

有机肥替代部分无机肥能显著提高作物产量。张盼盼等^[49-50]研究表明,有机肥($87.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)与磷石膏($60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施能显著提高糜子产量和净光合速率,张磊等^[29]阐明在 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 施氮处理下能显著提高糜子产量,表现为 $90\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} > 135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} > 45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2} > 0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,本试验研究得出F+Y较其他处理能显著提高糜子产量和净光合速率,产量以Y+J和CK较低,且两者差异不显著。Dhanushi等^[51]研究指出生物菌肥和有机肥配施显著提高大豆产量和蛋白质含量,可以作为无机肥的有效替代品,这与本试验结果不一致,可能与大豆自身具有固氮能力,能提高后期生长发育所需的氮素营养所致。

周瑜等^[28]研究指出糜子产量和净光合速率随着施氮量的增加而增加,这与本试验结果基本一致。单施Y和单施J的糜子产量差异不显著,但显著高于单施N和单施F。这与朱元宏等^[52]和Kifayatullah等^[12]的研究结果一致。说明单施有机肥、生物菌肥通过改善土壤理化性质和增加土壤微生物含量来搭建糜子根系吸收营养的理想环境,从而促进糜子产量的增加。有机无机肥配

施比例不同,对产量和品质的影响不同。Liang 等^[53]认为 25% 有机肥+75% 化肥处理下烤烟品质较好,50% 有机肥+50% 化肥处理下烤烟产量高,与本试验结果基本一致。

本研究主要结论为施肥方式显著影响糜子产量和品质性状,以 F+Y 配施显著提高糜子 GY、 P_n 、Ca 和 Fe 含量,显著减低 AC,有助于提高糜子产量,改善品质。

参考文献 Reference:

- [1] 杨武德,石建国,魏亦文. 现代杂粮生产[M]. 北京:中国农业科技出版,2001:50-82.
YANG W D,SHI J G,WEI Y W. Modern Grain Production [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology, 2001:50-82.
- [2] 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,2004,37(5):711-716.
LIU E K,ZHAO B Q,HU CH H,et al. Effects of long-term fertilization systems on yield and quality of maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2004,37(5):711-716.
- [3] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
ZHANG F S,WANG J Q,ZHANG W F,et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*,2008,45(5):915-924.
- [4] LEI B K,XU Y B,TANG Y F,et al. Shifts in carbon stocks through soil profiles following management change in intensive agricultural systems[J]. *Agricultural Sciences*,2015,6:304-314.
- [5] YU Z Q,REN F P. Material properties in advances in organic fertilizer[J]. *Applied Mechanics and Materials*,2015,3823:235-240.
- [6] ZHANG S S,RAZA W,YANG X M,et al. Control of *Fusarium* wilt disease of cucumber plants with the application of a bioorganic fertilizer[J]. *Biology and Fertility of Soils*,2008,44:1073-1080.
- [7] 张维理,武淑霞,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
ZHANG W L,WU SH X,JI H J,et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2004,37(7):1008-1017.
- [8] 李峰,田霄鸿,陈玲,等. 栽培模式、施氮量和播种密度对小麦子粒中锌、铁、锰、铜含量和携出量的影响[J]. 土壤肥料,2006(2):42-46.
LI F,TIAN X H,CHEN L,et al. Effect of planting model, N fertilization and planting density on concentration and uptake of Zn,Fe,Mn and Cu in grains of winter wheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*,2006(2):42-46.
- [9] XUE Y F,YUE S C,ZHANG Y Q,et al. Grain and shoot zinc accumulation in winter wheat affected by nitrogen management[J]. *Plant Soil*,2012,361:153-163.
- [10] 江洪芝,晏本菊,谭飞泉,等. 氮肥施用量及施用时期对小麦品质性状的影响[J]. 麦类作物学报,2009,29(4):658-662.
JIANG H ZH,YAN B J,TAN F Q,et al. Effect of different nitrogen fertilizer amount and application period on wheat quality [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2009,29(4):658-662.
- [11] 关天霞,李彩霞,马国泰,等. 连续施用有机肥对菜田土壤 Cu 和 Zn 积累及辣椒产量品质的影响[J]. 水土保持学报,2020,34(3):219-225.
GUAN T X,LI C X,MA G T,et al. Effects of continuous application of organic fertilizer on Cu and Zn accumulation in soil and the yield and quality of pepper(*Capsicum annuum* L.) [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2020,34(3):219-225.
- [12] KIFAYATULLAH K,TRAN D X,ZUBAIR N,et al. Effects of organic and inorganic fertilizer application on growth,yield, and grain quality of rice[J]. *Agriculture*,2020,544:1-11.
- [13] HOLIK L,HLISNIKOVSĀ L,KUNZOVĀ E. The effect of mineral fertilizers and farmyard manure on winter wheat grain yield and grain quality[J]. *Plant Soil Environment*,2018,65:491-497.
- [14] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等. 有机肥氮代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率[J]. 中国农业科学,2016,49(20):3934-3943.
XIE J,ZHAO Y N,CHEN X J,et al. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2016,49(20):3934-3943.
- [15] 侯红乾,刘秀梅,刘光荣,等. 有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(3):516-523.
HOU H Q,LIU X M,LIU G R,et al. Effect of long-term located organic-inorganic fertilizer application on rice yield and soil fertility in red soil area of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2011,44(3):516-523.
- [16] PATEL H H,SHROFF J C,SHAH SN,et al. Effect of nitrogen management on yield and quality of finger millet, *Eleusine coracana* (L.) Gaertn[J]. *International Journal of Farm Sciences*,2021,11:17-20.
- [17] HAFEZ E,BADAWY S A. Effect of bio fertilizers and inorganic fertilizers on growth, productivity and quality of bread wheat cultivars[J]. *Cercetari Agronomice in Moldova*,2018,51:1-16.
- [18] 李燕青,林治安,温延臣,等. 不同类型有机肥与化肥配施对小麦品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2016,22(6):1513-1522.
LI Y Q,LIN ZH A,WEN Y CH,et al. Effects of combined application of chemical fertilizers with different sources of organic manure on the grain quality of winter

- wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1513-1522.
- [19] 裴雪霞, 党建友, 张定一, 等. 化肥减量配施有机肥对旱地小麦产量、品质和水分利用效率的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 250-258.
- PEI X X, DANG J Y, ZHANG D Y, *et al.* Effects of chemical fertilizer reduction combined with organic fertilizer on the yield, quality, and water use efficiency of dryland wheat[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 250-258.
- [20] 李文, 魏廷虎, 阿保地, 等. 化肥减施配合有机肥对高寒区燕麦营养品质和土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2878-2886.
- LI W, WEI Y H, Abadi, *et al.* Effects of reduction of chemical fertilizer and organic manure supplement on oat nutrient quality and soil nutrient in alpine cold region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(12): 2878-2886.
- [21] PANGARIBUAN D H, HENDARTO K, ELZHIVAGO S R, *et al.* The effect of organic fertilizer and urea fertilizer on growth, yield and quality of sweet corn and soil health[J]. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 2018, 6: 335-344.
- [22] TAKAMITSU K, SHUNYA N, MASAHIKO T. Effect of organic and chemical fertilizer application on growth, yield, and quality of small-sized tomatoes[J]. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 2020, 9: 121-133.
- [23] 王君杰, 李俊, 乔治军. 生物菌肥对谷子长势指标及产量的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(6): 1042-1047.
- WANG J J, LI J, QIAO Z H. Effect of biological bacterial fertilizer on growth index and yield of foxtail millet[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2021, 58(6): 1042-1047.
- [24] 张奇茹, 谢英荷, 李廷亮, 等. 有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4866-4878.
- ZHANG Q R, XIE Y H, LI T L, *et al.* Effects of organic fertilizers replacing chemical fertilizers on yield, nutrient use efficiency, economic and environmental benefits of dryland wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(23): 4866-4878.
- [25] 撤冬荣, 姚拓, 李海云, 等. 微生物肥料与化肥减量配施对多年生黑麦草生长的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(3): 136-143.
- HAN D R, YAO T, LI H Y, *et al.* Effects of combined application of microbial fertilizer and chemical fertilizer on the growth of *Lolium perenne* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3): 136-143.
- [26] 邓妍, 王娟玲, 王创云, 等. 生物菌肥与无机肥配施对藜麦农艺性状、产量性状及品质的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(7): 1383-1390.
- DENG Y, WANG J L, WANG CH Y, *et al.* Effects of combined application of bio-bacterial fertilizer and inorganic fertilizer on agronomic characters, yield, and quality in quinoa[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021, 47(7): 1383-1390.
- [27] 唐继伟, 孙文彦, 田昌玉, 等. 不同氮肥类型和用量对小麦产量和加工品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 728-740.
- TAN J W, SUN W Y, TIAN CH Y, *et al.* Effects of different nitrogen sources and rates on the yield and proceeding quality of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2021, 27(4): 728-740.
- [28] 周瑜, 苏旺, 王舰, 等. 不同覆盖方式和施氮量对糜子光合特性及产量性状的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(6): 873-885.
- ZHOU Y, SU W, WANG J, *et al.* Effects of mulching and nitrogen application on photosynthetic characteristics and yield traits in broomcorn millet[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(6): 873-885.
- [29] 张磊, 何继红, 董孔军, 等. 氮肥对粳性和糯性糜子干物质积累和产量性状及氮肥利用效率的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(12): 2860-2868.
- ZHANG L, HE J H, DONG K J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation, yield traits and nitrogen use efficiency of non-waxy and waxy broomcorn millet[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(12): 2860-2868.
- [30] 王君杰, 曹晓宁, 王海岗, 等. 施氮时期对糜子产量和氮素利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 20-25.
- WANG J J, CAO X N, WANG H G, *et al.* Effects of nitrogen application stage on the yield and nitrogen use efficiency of broomcorn millet[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(12): 20-25.
- [31] 谢呈辉, 马海翌, 许宏伟, 等. 施氮量对宁夏引黄灌区麦后复种糜子生长、产量及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 463-477.
- XIE CH H, MA H ZH, XU H W, *et al.* Effects of nitrogen rate on growth, grain yield, and nitrogen utilization of multiple cropping proso millet after spring-wheat in irrigation area of Ningxia[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(2): 463-477.
- [32] 金正勋, 秋太权, 孙艳丽, 等. 氮肥对稻米垩白及蒸煮食味品质特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 31-35.
- JIN ZH X, QIU T Q, SUN Y L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on chalkness ratio and cooking and eating quality properties of rice grain[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(1): 31-35.
- [33] 王康君, 葛立立, 范苗苗, 等. 稻米蛋白质含量及其影响因素的研究进展[J]. 作物杂志, 2011(6): 1-6.
- WANG K J, GE L L, FAN M M, *et al.* Research progress on protein content and its influencing factors in rice[J]. *Crops*, 2011(6): 1-6.
- [34] 吴长明, 孙传清, 付秀林, 等. 稻米品质性状与产量性状及籼粳分化度的相关关系研究[J]. 作物学报, 2003, 29(6): 822-828.
- WU CH M, SUN CH Q, FU X L, *et al.* Study on the rela-

- tionship between quality, yield characters or indica-japonica differentiation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(6): 822-828.
- [35] 王 忠, 顾盖洁, 陈 刚, 等. 稻米的品质和影响因素[J]. 分子植物育种, 2003, 1(2): 231-241.
WANG ZH, GU W J, CHEN G, *et al.* Rice quality and its affecting factors [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2003, 1(2): 231-241.
- [36] HAO H L, WEI Y Z, YANG X E, *et al.* Effects of different nitrogen fertilizer levels on Fe, Mn, Cu and Zn concentrations in shoot and grain quality in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Rice Science*, 2007, 14: 289-294.
- [37] 卞景阳, 刘琳帅, 孙兴荣, 等. 施肥方式对寒地粳稻产量及品质的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(3): 105-107.
BIAN J Y, LIU L SH, SUN X R, *et al.* Effects of fertilization methods on yield and quality of japonica rice in cold region [J]. *China Rice*, 2019, 25(3): 105-107.
- [38] 徐令旗, 郭晓红, 张佳柠, 等. 不同有机肥对旱直播水稻品质的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(1): 137-146.
XU L Q, GUO X H, ZHANG J N, *et al.* The effect of organic fertilizer on the quality of dry direct-seeding rice [J]. *Agriculae Boreali-Sinica*, 2022, 37(1): 137-146.
- [39] WEI H Y, CHEN Z F, XING Z P, *et al.* Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17: 2222-2234.
- [40] 郑建仙. 功能性食品(第二卷)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999: 355-428.
ZHENG J X. Functional Foods (Vol. II) [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1999: 355-428.
- [41] BLASBLG T L, WISPELWEY B, DECKELBAUM R J. Econutrition and utilization of food-based approaches for nutritional health [J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2011, 32: S4-S13.
- [42] DECKELBAUM R J, PALM C, MUTUO P, *et al.* Econutrition: implementation models from the millennium villages project in africa [J]. *Food and Nutrition Bull*, 2006, 27: 335-342.
- [43] PSZCZÓIKOWSKA A, OKORSKI A, OLSZEWSKI J, *et al.* Effects of pre-preceding leguminous crops on yield and chemical composition of winter wheat grain [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2018, 64: 592-596.
- [44] 常旭虹, 赵广才, 王德梅, 等. 生态环境与施氮量协同对小麦籽粒微量元素含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 885-895.
CHANG X H, ZHAO G C, WANG D M, *et al.* Effects of ecological environment and nitrogen application rate on microelement contents of wheat grain [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4): 885-895.
- [45] 姜丽娜, 郑冬云, 蒿宝珍, 等. 氮肥对小麦不同品种籽粒微量元素含量的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(6): 97-102.
- JIANG L N, ZHENG D Y, SONG B ZH, *et al.* Effect of nitrogen on micronutrient concentration and accumulation in grains of wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(6): 97-102.
- [46] 赵德勇. 氮供应量对小麦农艺性状及锌、铁利用影响的研究初报[J]. 中国土壤与肥料, 2018(5): 52-56.
ZHAO D Y. A preliminary study on effect of nitrogen supply on agronomic traits and accumulation of zinc iron in wheat [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(5): 52-56.
- [47] KLIKOCKA H, MARKS M, BARCZAK B, *et al.* Response of spring wheat to NPK and S fertilization. The content and uptake of macronutrients and the value of ionic ratios [J]. *Open Chemistry*, 2018, 16: 1059-1065.
- [48] PROMUTHAI C, RERKASEM B. The effect of nitrogen on rice grain iron [J]. *International Rice Research Notes*, 2003, 28: 37-38.
- [49] 张盼盼, 郭亚宁, 王小林, 等. 磷石膏和有机肥对盐碱地糜子叶片光合特性的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(6): 1005-1010.
ZHANG P P, GUO Y N, WANG X L, *et al.* Effects of phosphogypsum and organic fertilizer on the photosynthetic characters of the leaves of broomcorn millet in saline-alkali soil [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(6): 1005-1010.
- [50] 张盼盼, 高立城, 李晓敏, 等. 磷石膏和有机肥对盐碱地糜子产量和叶片生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(15): 26-32.
ZHANG P P, GAO L CH, LI X M, *et al.* Phosphogypsum and organic fertilizer; Effects of yield and leaf physiological characteristics of broomcorn millet in saline-alkali soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(15): 26-32.
- [51] DHANUSHI S, NEELAMANIE Y. Growth, yield and seed nutrient quality of soybean (*Glycine max* L.) as affected by organic, biofertilizer and synthetic fertilizer application [J]. *South Asian Journal of Research in Microbiology*, 2019, 5: 1-9.
- [52] 朱元宏, 赵 峥, 张翰林, 等. 不同施肥方式对水稻农艺性状及产量的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2014, 32(1): 43-48.
ZHU Y H, ZHAO ZH, ZHANG H L, *et al.* Study on the growth characters and yield nice under different fertilizer treatments [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2014, 32(1): 43-48.
- [53] LIANG B, HUANG K, FU Y L, *et al.* Effect of combined application of organic fertilizer and chemical fertilizer in different ratios on growth, yield and quality of fluecured tobacco [J]. *Asian Agricultural Research*, 2017, 9: 43-46, 51.

Regulation Effects of Different Fertilization Ratios on Yield and Quality in Broomcorn Millet

WANG Junjie, CHEN Ling, TIAN Xiang and QIAO Zhijun

(Center for Agricultural Genetic Resources Research, Shanxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop

Gene Resources and Germplasm Enhancement on Loess Plateau, Ministry of Agriculture/Shanxi Key

Laboratory of Genetic Resources and Genetic Improvement of Minor Crops, Taiyuan 030031, China)

Abstract This study aims to explore the effects of different fertilization methods on the nutrient quality, edible quality and yield of broomcorn millet. The experiment used Hequ red broomcorn millet as subject material from Hequ, Shanxi Province in 2019. Different fertilizer ratios were used, including organic fertilizer (sheep manure), biological bacterial fertilizer, urea and compound fertilizer. We determined the quality indicators and yield of broomcorn millet under different fertilization ratios. The results showed that different fertilizer ratios significantly influenced the yield and quality characteristics of broomcorn millet, the combined application of compound fertilizer and organic (F+Y) significantly increased the grain yield (GY), net photosynthetic rate (P_n), calcium (Ca) and iron (Fe), and significantly reduced the amylose content (AC). Correlation analysis showed that grain yield (GY) was significantly positively correlation with net photosynthetic rate (P_n) of broomcorn millet, with the value of 0.82, magnesium (Mg) was significantly positively correlation with iron (Fe), with the value of 0.68, amylase content (AC) was significantly negatively correlation with gliadin (Gli) and calcium (Ca), with the value of -0.66 and -0.50 respectively. The results of principal component analysis showed that each character index of broomcorn millet was divided into 4 principal components, which represented the edible quality, nutritient quality, yield index and protein nutritient quality of broomcorn millet respectively. The comprehensive score of compound fertilizer and organic (F+Y) was the highest and significantly higher than other treatments. In conclusion, the combined application of compound fertilizer ($187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and organic fertilizer ($1.5 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) is the main fertilization method for high quality and yield in broomcorn millet.

Key words Broomcorn millet; Yield; Nutrient quality; Edible quality; Fertilization methods

Received 2022-05-16

Returned 2022-09-30

Foundation item Central Guidance Special Project for Free Exploration (No. YDZJSX20231A035); China Modern Agriculture Industry Technology System of Ministry of Finance, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, PRC (No. CARS-06-14.5-A16).

First author WANG Junjie, male, master. Research area: physiology and cultivation of foxtail millet and broomcorn millet. E-mail: xiaolei wangjie@163.com

Corresponding author QIAO Zhijun, male, research fellow. Research area: physiology of foxtail millet and broomcorn millet, innovation of crop resources. E-mail: nky pzs@126.com

(责任编辑: 成敏 Responsible editor: CHENG Min)