



李香宇, 张星星, 夏杜菲, 赵磊, 曹增强, 陈向阳, 陈阜, 文新亚. 喷施新型腐植酸对谷子籽粒产量和品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(06): 68-76.
LI Xiangyu, ZHANG Xingxing, XIA Dufei, ZHAO Lei, CAO Zengqiang, CHEN Xiangyang, CHEN Fu, WEN Xinya. Effect of spraying of new-type humic on yield and quality of millet grains[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(06): 68-76.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.06.08

喷施新型腐植酸对谷子籽粒产量和品质的影响

李香宇¹ 张星星² 夏杜菲¹ 赵磊³ 曹增强² 陈向阳¹ 陈阜¹ 文新亚^{1*}

(1. 中国农业大学农学院/农业农村部农作制度重点实验室, 北京 100193;

2. 永定河流域投资有限公司, 北京 100193;

3. 永定河流域(大同市云州区)农业发展有限公司, 山西 大同 037000)

摘要 为探究灌浆初期喷施新型腐植酸对谷子产量和品质的影响, 以清水喷施为对照(NC), 设置腐植酸低(0.75 L/hm², 600×, LC), 中(3.75 L/hm², 120×, MC), 高(7.50 L/hm², 60×, HC)3个浓度梯度, 在谷子灌浆初期喷施于叶面, 测定产量、穗部性状以及籽粒蛋白质、氨基酸、脂肪、碳水化合物、直链淀粉、黄色素、总黄酮、多酚等多个指标, 分析谷子产量及营养品质的变化。结果表明: 1) 灌浆初期叶面喷施新型腐植酸可以通过增加千粒重来增加产量, 各处理的谷子产量增加幅度由高到低为HC>MC>LC>NC, MC和HC处理分别比NC增产18.5%和19.4%, 谷子增产的最适新型腐植酸浓度介于60~120×。2) 灌浆期喷施新型腐植酸可改善谷子籽粒品质, 显著提高蛋白质、氨基酸、黄色素、多酚含量($P<0.05$)。3) 通过主成分分析对不同处理的多个品质指标进行综合分析, 总得分由高到低为MC>LC>HC>NC, 中浓度(3.75 L/hm², 120×, MC)处理对品质提升效果最好。综上, 叶面喷施新型腐植酸可以提升谷子产量, 改善籽粒品质, 中浓度处理综合表现最好。

关键词 生物腐植酸; 谷子; 品质; 产量

中图分类号 S515

文章编号 1007-4333(2024)06-0068-09

文献标志码 A

Effect of spraying of new-type humic on yield and quality of millet grains

LI Xiangyu¹, ZHANG Xingxing², XIA Dufei¹, ZHAO Lei³, CAO Zengqiang²,
CHEN Xiangyang¹, CHEN Fu¹, WEN Xinya^{1*}

(1. College of Agronomy and Biotechnology / Key Laboratory of Farming System of Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Yongding River Basin Investment Co., Ltd., Beijing 100193, China;

3. Yongding River Basin (Yunzhou District, Datong City) Agricultural Development Co., Ltd., Datong 037000, China)

Abstract To investigate the effect of foliar spraying of a new humic acid on yield and quality of millet. Experiments were conducted by taking pure water as the control (NC), and three gradients of low concentration (0.75 L/hm², 600× liquid, LC), medium concentration (3.75 L/hm², 120× liquid, MC), and high concentration (7.50 L/hm², 60× liquid, HC) were set up. They were sprayed on the foliar surface of the grain during the filling period. The effects of spraying new humic acid on millet yield and grain quality during the filling period were analyzed by measuring yield, spike traits, and several indexes such as protein, amino acids, fat, carbohydrates, straight-chain starch, yellow pigment, total flavonoids, polyphenols. Changes

收稿日期: 2023-12-22

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1901103)

第一作者: 李香宇(ORCID: 0009-0000-2513-1013), 硕士研究生, E-mail: s20213010008@cau.edu.cn

通讯作者: 文新亚(ORCID: 0000-0001-5885-7195), 副教授, 主要从事耕作制度与农田土壤微生态研究, E-mail: wxya@cau.edu.cn

in the yield and nutritional quality were determined. The results showed that: 1) The foliar spraying of new humic acid during the irrigation period increased the yield through increasing the weight of thousand grain weight, and the effect of yield increase was $HC > MC > LC > NC$. Compared with spraying with water, the middle and high concentration treatments were able to increase the yield by 18.5% and 19.4%, respectively, and the optimal concentration of the yield increase ranged from 60 to 120 times. 2) Spraying new humic acid during the irrigation period improved the quality of millet, and it increased the contents of protein, amino acid, yellow pigment and polyphenol. 3) The quality indexes of grains under different treatments were comprehensively analyzed by principal component analysis. The ranking of total score in descending order was $MC > LC > HC > NC$, and the medium concentration (3.75 L/hm^2 , $120 \times \text{liquid}$, MC) treatment had the best effect on quality improvement. In conclusion, the foliar spraying of novel humic acids could enhance the yield and improve the quality of millet, and the medium concentration treatment is optimal.

Keywords biological humic; millet; quality; yield

谷子是我国干旱半干旱地区的重要作物,粮饲兼用,在我国北方广泛种植,被称为“杂粮之首”^[1]。谷子耐旱、耐酸、耐碱、抗贫瘠^[2],具有良好的病虫害耐受性,在气候变化背景下有助于保障粮食安全,促进经济发展。小米的品质包括外观品质、食味品质和蛋白质等组分构成的营养品质^[3-4],决定着小米的价格,因此提高小米的品质是市场和消费者的共同需求。随着消费者对食品安全问题的关注,农业生产中的污染问题也越来越受到重视^[5],给粮食生产带来了极大挑战^[6]。在此背景下有机农业逐步发展起来,利用动植物残体、人畜粪尿等制备肥料和生物刺激素^[7]调节作物产量和品质逐步成为有机农业的重要组成部分^[8]。目前在我国北方谷子主要产区化肥过量、不科学使用的现象广泛存在^[9],因此寻找适宜的、可替代的有机肥料对于绿色有机农业生产具有重要意义。

施用肥料是目前提高谷子籽粒品质的主要栽培措施^[10]。卢华雨等^[11]在晋北谷子生产中施用复合肥、堆肥和生物菌肥试验中发现,堆肥可显著提升谷子籽粒中脂肪和氨基酸含量,改善谷子营养品质。冯守疆等^[12]研究表明增施有机肥可使小米蛋白质含量提升2.1%~6.1%,粗淀粉提升1.0%~5.0%。刘鑫等^[13]通过调整施氮时期提高了氮素利用率,进而提高小米食味品质和营养品质。

腐植酸来源于自然产物,富含微量元素、氨基酸等,具有特殊的理化性质和生物学活性^[14],是有机农业中提质增效的良好生物刺激素,可以促进植物生长和养分吸收^[15]。腐植酸不仅能够使农业生产废弃物得到重新利用,并且分布广泛,制取成本相对较低,新型优质生物腐植酸的应用对于农业可

持续发展具有重要的意义。目前腐植酸已经在农业生产中得到应用,已有研究表明,喷施腐植酸可提高水稻的光合作用^[16],并广泛参与其他生理过程,促进植物生长发育^[17-18]。腐植酸可以加强玉米对养分的吸收以及根系的发育^[19],已在葡萄^[20]、水稻^[21]等作物增产和改善品质,改良土壤理化性质^[22],缓解干旱、冷害多种逆境对玉米^[23]、燕麦^[24]等作物的胁迫方面发挥重要作用。但目前腐植酸对于谷子应用效果的研究鲜见报道。本研究采用新型腐植酸肥料,通过大田试验在谷子灌浆期设置不同浓度的叶面喷施处理,测定谷子产量、穗部性状和品质指标变化,旨在探究新型腐植酸对谷子产量和品质的影响效果,以期为谷子有机生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022年在山西省大同市云州区中国农业大学大同有机旱作试验站($39^{\circ}52'19'' \text{ N}$, $113^{\circ}29'32'' \text{ E}$)开展,海拔1 009.5 m。2022年无霜期为125 d,日均气温 7.5°C ,年降水量549 mm。试验田土壤类型为沙壤土,有机质含量为8.60 g/kg, pH为8.40,总氮含量为734 mg/kg,有效磷含量为8.06 mg/kg,速效钾含量为124 mg/kg。

1.2 供试材料

试验选用的供试品种为‘长生11号’,由山西省农业科学院谷子研究所选育,生育期127 d,该品种产量较高,品质优良,适宜试验所在地(山西大同)的气候特征。喷施肥料为新型腐植酸(日本MIT公司),属于生物腐植酸,富含中微量元素、氨基酸(表1)。

表1 新型腐植酸肥料信息

Table 1 New humic acid fertilizers dosage and concentration

成分 Ingredient	含量 Content	单位 Unit
腐植酸 Humic acid	2.0	g/L
氨基酸 Amino acids	7.41	mg/g
总氮 Total N	0.3	g/L
P ₂ O ₅	1.8	g/L
K ₂ O ₅	2.6	g/L
Fe	126	mg/L
Mn	970.7	mg/L
Cu	60.72	mg/L
Mg	4 701	mg/L
Zn	0.699 1	mg/L
Mo	8 154	mg/L

1.3 试验设计

试验采用单因素完全随机试验设计,设置4个喷施水平,分别为喷施清水(NC)做对照、低浓度(0.75 L/hm²,稀释600×,LC)、中浓度(3.75 L/hm²,120×,MC)、高浓度(7.50 L/hm²,60×,HC),具体用量见表2,选择在灌浆初期晴朗无风的早晨喷施。试验于2022年5月19日播种,9月30日收获,其他栽培措施均一致。每个喷施水平设3次重复,共计12个小区,小区面积30 m²(6 m×5 m)。

表2 叶面喷施肥料用量及浓度

Table 2 Foliar spray fertilizer dosage and concentration

处理 Treatment	肥料用量/(L/hm ²) Fertilizer usage	稀释倍数 Dilution factor
NC	0	
LC	0.75	600
MC	3.75	120
HC	7.50	60

注:NC,对照喷施清水;LC,低浓度;MC,中浓度;HC,高浓度。下同。

Note: NC, control sprayed water; LC, low concentration; MC, medium concentration; HC, high concentration.

The same below.

1.4 测定指标

1.4.1 谷子产量及产量构成因素

谷子成熟后,每个小区选取10 m²谷子人工采收,计算有效穗数,使用小型谷子脱粒机脱粒后称量,换算含水率14%的实测产量。此外选取10株长势均匀

的谷子测量穗长、穗粗、穗重、千粒重等构成因素。

1.4.2 谷子籽粒品质

测产后谷子脱壳得到籽粒,使用高速粉碎机处理成小米粉,然后置于冷冻干燥机中干燥48 h。参考陈静^[25]的方法测定蛋白质、16种氨基酸、脂肪和碳水化合物的含量。采用GB/T15683—2008《大米 直链淀粉含量的测定》^[26]中紫外可见分光光度法测定籽粒直链淀粉含量。参考安静等^[27]的方法测定籽粒黄酮含量。参考韦露露^[28]的方法测定多酚含量。参考马珂^[29]方法进行测定籽粒黄色素含量。

1.5 数据处理及分析

使用软件Microsoft Excel 2016进行数据录入、整理和汇总,使用IBM SPSS Statistics 26对数据进行方差分析和主成分分析,使用Origin 2021和R软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 腐植酸对谷子产量及穗部性状的影响

由表3可知,喷施各浓度腐植酸处理均可使谷子产量显著增加,中浓度(3.75 L/hm²,120×,MC)和高浓度(7.50 L/hm²,60×,HC)处理分别比喷施清水(NC)增产18.5%和19.4%。各处理对谷子穗长的影响均不显著($P<0.05$),NC最长,达21.7 cm。穗粗和穗重均呈现出随着腐植酸浓度增加先增加后降低的趋势,MC的穗粗和穗重达到最大,分别为32.85 mm和21.88 g,比NC分别增加17.8%和14.4%。腐植酸处理后谷子的千粒重均显著增加($P<0.05$),MC比NC增加7.7%,达到3.09 g。3个腐植酸处理之间产量、穗长、穗粗和千粒重差异均不显著($P<0.05$)。

2.2 腐植酸对籽粒品质的影响

由图1可知,随着腐植酸浓度的升高,4个浓度水平的籽粒中蛋白质、氨基酸含量都呈先升高后下降趋势,HC、MC和LC均比NC显著增加($P<0.05$),MC的蛋白质、氨基酸含量最高,分别比NC高出7.2%和8.5%,达到11.3和9.0 g/100 g。碳水化合物含量随着腐植酸浓度增加呈先下降后上升的趋势,NC为84.3 g/100 g,仅MC表现为显著下降($P<0.05$),为83.2 g/100 g。各处理与NC的直链淀粉含量无显著差异($P<0.05$),但随浓度的升高呈先上升后下降的趋势,MC的直链淀粉含量最高,为33.35 g/100 g,比NC高出9.7%。各处理

表 3 谷子产量和穗部性状
Table 3 The millet yield and spike traits

处理 Treatment	产量 / (×10 ³ kg/hm ²) Yield	穗长 / cm Panicle length	穗粗 / mm Panicle coarse	穗重 / g Panicle weight	千粒重 / g 1 000 grain weight
NC	43.2±4.1 b	21.72±0.17 a	27.85±0.96 b	19.12±0.18 b	2.86±0.12 b
LC	46.3±0.6 ab	20.02±1.67 a	30.94±0.79 ab	21.22±0.48 a	3.08±0.10 a
MC	51.3±0.8 a	20.99±0.02 a	32.85±0.99 a	21.88±0.31 a	3.09±0.11 a
HC	51.7±1.1 a	20.67±0.86 a	31.38±0.80 ab	21.64±0.46 a	3.09±0.15 a

注：同列数据不同字母表示差异显著($P<0.05$)；相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。
Note: Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

与 NC 的脂肪含量均无显著差异($P<0.05$),均在 5.5~5.7 g/100 g。随腐植酸浓度增大,籽粒黄色素含量逐渐增加,HC 的含量最高,比 NC 增加 14.1% ($P<0.05$),为 29.6 μg/g。MC 和 HC 的多酚含量分别较 NC 增加 10.7% 和 11.3% ($P<0.05$)。籽粒中总黄酮含量随喷施浓度增加呈先升高后下降趋势,MC、HC 分别比 NC 降低 3.8% 和 18.7% ($P<0.05$)。

2.3 腐植酸喷施浓度对谷子籽粒影响综合评价

由图 2 可知,各处理的籽粒营养品质指标之间存在相关性。氨基酸总量同 16 种氨基酸之间均呈正相关,蛋白质含量与谷氨酸、丙氨酸、亮氨酸以及氨基酸总量呈极显著正相关($P<0.01$),与天冬氨酸、精氨酸、脯氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、色氨酸和酪氨酸含量均呈显著正相关($P<0.05$)。黄色素含量与组氨酸、黄酮含量均存在负相关关系但并不显著($P<0.05$)。直链淀粉含量与多酚、黄酮、蛋白质以及 16 种氨基酸含量均呈正相关关系,与精氨酸、苏氨酸、异亮氨酸均存在极显著正相关关系($P<0.01$),同脯氨酸、丙氨酸、和苯丙氨酸均呈显著正相关($P<0.05$)。黄酮含量与直链淀粉、组氨酸含量间两两均呈正相关,与丝氨酸、黄色素、多酚均呈负相关, R^2 分别为-0.52、-0.86 和-0.70。多酚含量除与黄酮呈负相关外,与其余品质性状均呈正相关关系,多酚与丝氨酸呈显著正相关($P<0.05$),与丝氨酸、天冬氨酸、蛋氨酸、甘氨酸、丙氨酸、亮氨酸、谷氨酸、色氨酸、酪氨酸、氨基酸总量、蛋白质、黄色素的 R^2 均 >0.7 。

由表 4 可知,22 个指标共提取出 3 个主成分, >1 的初始特征值有 2 个,方差百分比累计达 97.756%,

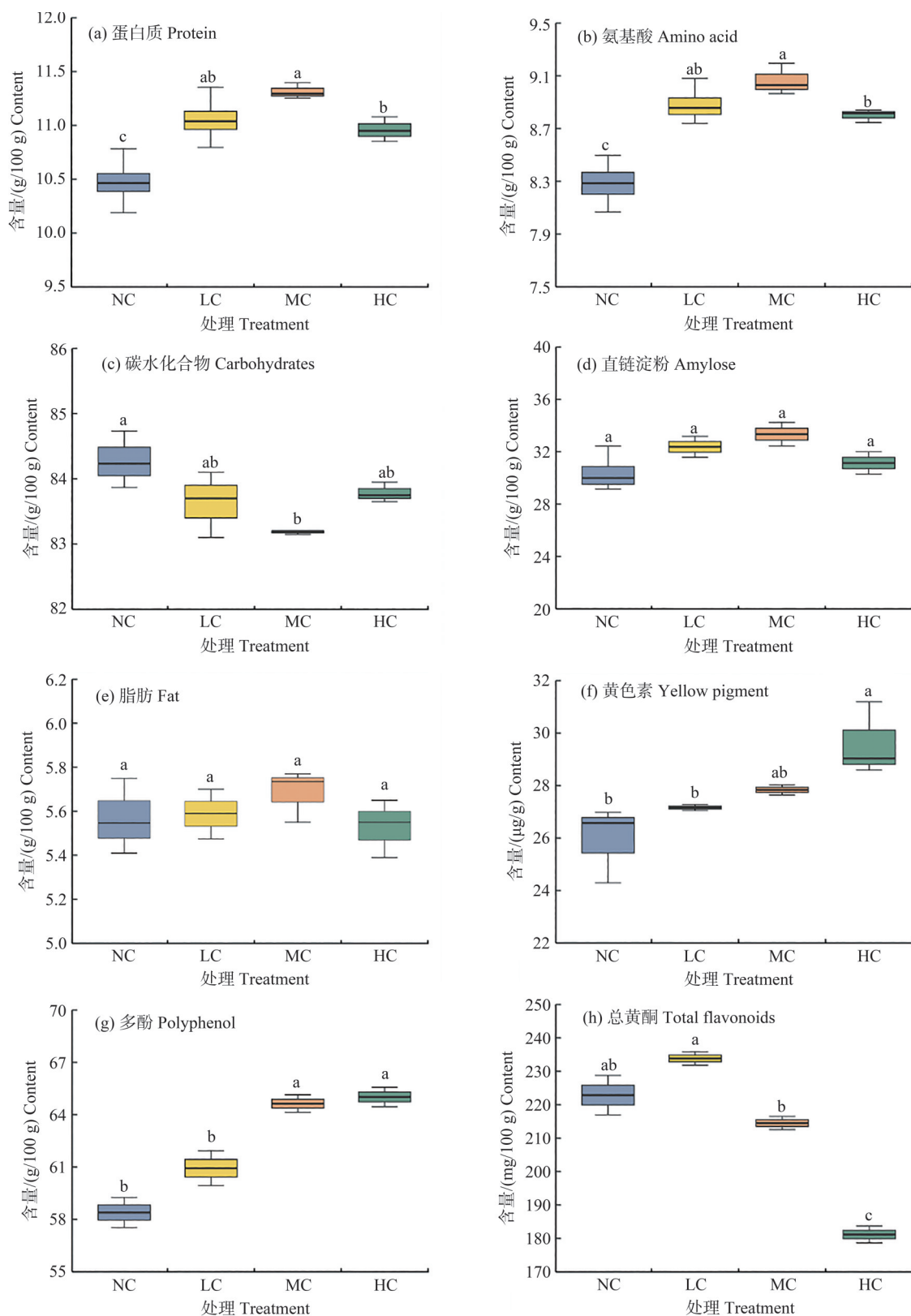
故主成分 1(PC₁)主成分 2(PC₂)能够极为全面评价籽粒品质,其中 PC₁方差百分比达到 83.477%,解析了大部分的品质信息。

由表 5 可知,随着腐植酸喷施浓度增加籽粒的 PC₁、PC₂以及总得分均呈现先升高后降低的趋势,PC₁在 MC 得分最高,且 3 个喷施处理得分均高于 NC。PC₂在 LC 得分最高,之后随着喷施浓度增大得分下降。4 个浓度水平的籽粒品质主成分分析总得分由高到低为 MC>LC>HC>NC,MC 得分排名第 1,即中浓度(3.75 L/hm², 120×)处理对谷子品质提升的效果最好。

3 讨 论

适量施用腐植酸可以实现水稻^[30]、小麦^[31]等作物不同程度增产。本研究中腐植酸高浓度 HC (7.5 L/hm², 60×)喷施处理可使谷子显著增产 19.4%,穗粗、穗重和千粒重均显著增加。白亚青^[32]在谷子灌浆期喷施钼肥对穗长产生显著影响,穗粗和穗重分别升高 8.7% 和 15.6%,与本试验结果一致。本试验中穗粗增加效果更加显著,可能由于本试验中使用的腐植酸含有一定的钼,另外试验肥料中所含的氨基酸可能促进了植物生长。

本研究结果表明灌浆初期喷施新型腐植酸可不同程度改善谷子籽粒品质。新型腐植酸喷施促进了籽粒中蛋白质和总氨基酸积累。已有研究发现,不同小麦品种施用腐植酸均可以显著增加小麦籽粒中蛋白质含量^[33]。张素梅等^[34]在谷子孕穗期喷施腐植酸钾,籽粒粗蛋白增加约 12%。本试验中,喷施腐植酸后的谷子直链淀粉含量虽有先升高后降低的趋势,但是与对照(NC)相比差异不显著



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different small letters mean significant difference at 0.05 level.

图1 不同浓度腐植酸处理的小米品质指标变化

Fig.1 Changes in quality indexes of millet treated with different concentrations of humic acid

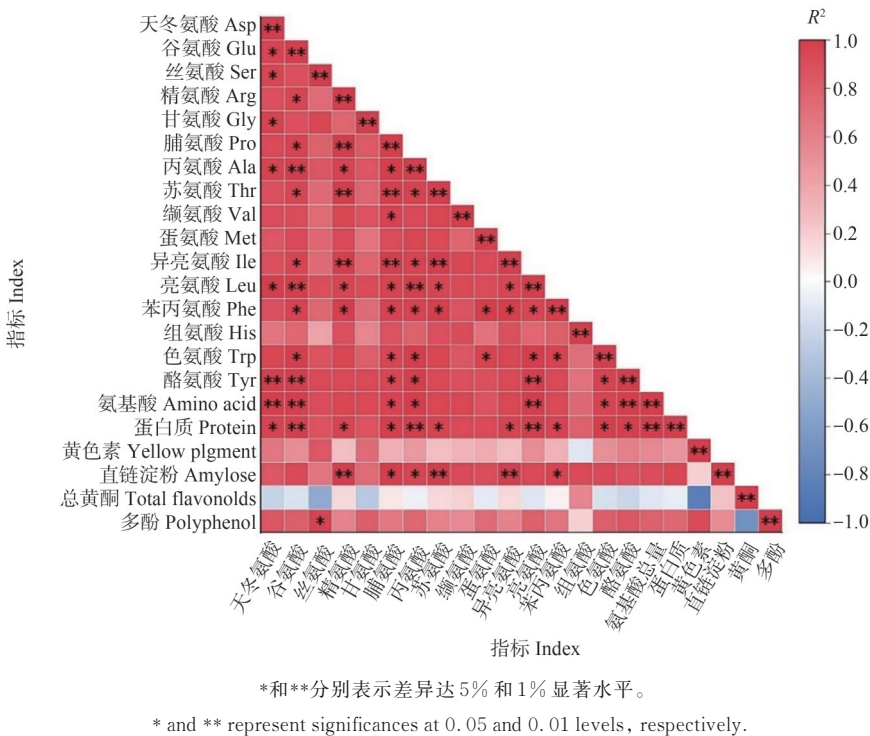


图 2 腐植酸与 22 个品质指标相关分析

Fig. 2 Correlation analysis of humic acid and 22 quality and functional substance indexes

表 4 总方差解释

Table 4 Total variance interpretation

成分 Ingredient	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract the load sum of squares		
	总计 Total	方差百分比 Proportion of variance	累积/% Account	总计 Total	方差百分比 Proportion of variance	累积/% Account
PC ₁	18.365	83.477	83.477	18.365	83.477	83.477
PC ₂	3.141	14.279	97.756	3.141	14.279	97.756
PC ₃	0.494	2.244	100.000			

表 5 籽粒品质主成分分析

Table 5 Analysis of principal component of millet quality

处理 Treatment	PC ₁	PC ₂	总得分 Score	排名 Rank
NC	-5.573 800	0.589 287	-4.984 520	4
LC	1.294 901	0.664 380	1.959 282	2
MC	4.603 027	-0.387 180	4.215 843	1
HC	-0.324 140	-0.866 480	-1.190 620	3

($P<0.05$),与在小麦^[33]上的试验结论一致。过高的直链淀粉含量会增强籽粒硬度,使小米口感降低^[35],本研究中喷施腐植酸后直链淀粉含量与对照相比并无显著差异,说明喷施新型肥料在提升谷子

籽粒产量和品质的同时,不会造成口感降低,但感官品质不是由直链淀粉单一性状控制,仍需要后期研究进一步探索验证。

本研究中喷施新型腐植酸可显著提高谷子籽粒中黄色素和多酚含量($P<0.05$)。刘雨杉^[36]研究发现叶面喷施不同浓度硒肥可提高谷子籽粒中黄色素和多酚含量。对谷子喷施锌肥,籽粒黄色素也有类似效果^[37]。本试验中,高浓度(HC)腐植酸处理后的谷子黄色素与多酚含量均显著增加,与黄珊珊的^[37]研究结果一致,可能是新型腐植酸中丰富的矿质元素发挥的作用。周湘寒等^[38]收集不同品种谷子籽粒,通过测定营养指标发现,酮类化合物

与蛋白质含量呈负相关,与本研究结果一致。

通过对籽粒22个品质相关指标进行主成分分析,对不同处理进行综合评判打分结果表明,喷施新型腐植酸能够提高谷子籽粒品质,但是当浓度过高(7.50 L/hm^2 , $60\times$, HC)时会造成品质下降;喷施新型腐植酸处理后,中浓度(3.75 L/hm^2 , $120\times$, MC)和高浓度(7.5 L/hm^2 , $60\times$, HC)处理的谷子产量均得到显著提升,中浓度(3.75 L/hm^2 , $120\times$, MC)处理可显著改善谷子品质,综合分析最佳的喷施处理为MC处理,这与张素梅^[30]等研究结果一致,其原因可能为喷施适宜浓度腐植酸可以提高谷子光合能力和碳代谢水平,促进干物质积累,但过高浓度会对谷子产生胁迫,破坏光合结构,从而影响谷子的灌浆过程^[30]。

4 结 论

喷施新型腐植酸可显著增加穗粗、穗重和千粒重,从而显著提升谷子的产量。另外喷施新型腐植酸可通过提高谷子籽粒的蛋白质、氨基酸、黄色素、多酚等物质的含量,从而改善籽粒品质。根据多个性状的综合表现,晋北地区谷子生产中, 3.75 L/hm^2 的稀释 $120\times$ 腐植酸喷施谷子可显著提升谷子产量并改善籽粒品质,为最优喷施处理。

参考文献 References

- [1] 刁现民. 育种创新造就谷子种业新发展[J]. 中国种业, 2022(4):4-7
Diao X M. Breeding innovations lead to new developments in cereal seed industry[J]. *China Seed Industry*, 2022(4):4-7 (in Chinese)
- [2] 崔文秀, 宰小玉, 赵美丞, 郑春燕, 宋春旭, 朱峰. 驯化对谷子-根际微生物互作机制影响的进展与展望[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(4):495-504
Cui W X, Zai X Y, Zhao M C, Zheng C Y, Song C X, Zhu F. Impact of domestication on the mechanism of millet and rhizosphere microorganism interactions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(4):495-504 (in Chinese)
- [3] 刘建垒, 常柳, 段晓亮, 王文娟, 孙辉. 谷子的生产概况及其保健功能与机理研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5):389-395
Liu J L, Chang L, Duan X L, Wang W J, Sun H. Foxtail millet: Production status, advances in health benefits and its mechanism [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(5):389-395 (in Chinese)
- [4] 李君霞, 马小倩, 代书桃, 秦娜, 宋迎辉, 朱灿灿, 刘海霞, 金松灿. 谷子品质性状研究进展[J]. 河南农业科学, 2023, 52(9):14-23
Li J X, Ma X Q, Dai S T, Qin N, Song Y H, Zhu C C, Liu H X, Jin S C. Research progress on quality traits of foxtail millet [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2023, 52(9):14-23 (in Chinese)
- [5] 张俊伶, 张江周, 申建波, 田静, 金可默, 张福锁. 土壤健康与农业绿色发展:机遇与对策[J]. 土壤学报, 2020, 57(4):783-796
Zhang J L, Zhang J Z, Shen J B, Tian J, Jin K M, Zhang F S. Soil health and agriculture green development: Opportunities and challenges [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4):783-796 (in Chinese)
- [6] 何可, 宋洪远. 资源环境约束下的中国粮食安全: 内涵、挑战与政策取向[J]. 南京农业大学学报: 社会科学版, 2021, 21(3):45-57
He K, Song H Y. China's food security under the constraints of resources and environment: Connotation, challenges and policy orientation [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University: Social Sciences Edition*, 2021, 21(3):45-57 (in Chinese)
- [7] 武良, 汤洁. 我国生物刺激素产业发展现状及趋势[J]. 中国农技推广, 2016, 32(12):9-12
Wu L, Tang J. Development status and trend of biostimulant industry in China[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2016, 32(12):9-12 (in Chinese)
- [8] 曾完成, 李双. 新业态: 生物刺激素生发灿烂: 浅议腐植酸生物刺激素的居间调节作用[J]. 腐植酸, 2016(3):1-7
Zeng X C, Li S. New formats: Biostimulant industry becoming better and better: Discussion on the intermediary regulation of humic acid [J]. *Humic Acid*, 2016(3):1-7 (in Chinese)
- [9] 文峰, 金晓光, 白乙拉图, 呼瑞梅, 黄前晶, 塔娜, 费宁, 白峰, 李清泉. 有机肥在谷子生产中应用研究[J]. 农业与技术, 2022, 42(10):34-37
Wen F, Jin X G, Bai Y L T, Hu R M, Huang Q J, Tana, Fei N, Bai F, Li Q Q. Application of organic fertilizer in millet production [J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(10):34-37 (in Chinese)
- [10] 王玉文, 李会霞, 田岗, 王高鸿. 我国小米品质研究进展及其改良设想[J]. 中国农学通报, 2001, 17(5):49-51
Wang Y W, Li H X, Tian G, Wang G H. Research progress and improvement of millet quality in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2001, 17(5):49-51 (in Chinese)
- [11] 卢华雨, 张星星, 文新亚, 曹增强, 史明睿, 高岩, 陈阜. 施用不同种类肥料对谷子产量与品质的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(8):1119-1123
Lu H Y, Zhang X X, Wen X Y, Cao Z Q, Shi M R, Gao Y, Chen F. Effects of application of different fertilizers on yield and quality of millet [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2022, 50(8):1119-1123 (in Chinese)
- [12] 冯守疆, 赵连芝, 刘占鑫, 赵欣楠, 杨君林, 张旭临. 氮磷钾与有机肥配施对谷子产量和品质的影响[J]. 甘肃农业科技, 2019, 50(12):28-30
Feng S J, Zhao L Z, Liu Z X, Zhao X N, Yang J L, Zhang X L. Effect of N P K combined with organic fertilizer on yield and quality of millet [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2019, 50(12):28-30 (in Chinese)
- [13] 刘鑫, 李会霞, 田岗, 王玉文, 刘红, 曹晋军, 成错, 王振华, 刘永忠, 李万星. 全生育期水分控制对谷子生长发育及品质的影响[J]. 作物杂志, 2021(5):181-186
Liu X, Li H X, Tian G, Wang Y W, Liu H, Cao J J, Cheng K, Wang Z H, Liu Y Z, Li W X. Effects of water control during the whole growth period on the growth development and quality of millet [J]. *Crops*, 2021(5):181-186 (in Chinese)
- [14] 李仲谨, 李铭杰, 王海峰, 诸晓峰, 苗宗成. 腐植酸类物质应用研究进展[J]. 化学研究, 2009, 20(4):103-107
Li Z J, Li M J, Wang H F, Zhu X F, Miao Z C. Progress in applied research of humic acids substance [J]. *Chemical Research*, 2009, 20(4):103-107 (in Chinese)
- [15] 张瑜, 王若楠, 邱小倩, 杨金水, 李宝珍, 袁红莉. 生物刺激素腐植酸对植物生理代谢的影响[J]. 腐植酸, 2019, 41(3):1-6, 33

- Zhang Y, Wang R N, Qiu X Q, Yang J S, Li B Z, Yuan H L. Effects of biostimulant humic acid on plant physiological metabolism of plant[J]. *Humic Acid*, 2019, 41(3):1-6, 33 (in Chinese)
- [16] 张沁怡, 李文蔚, 阳晶, 罗亚成, 杨捷茹, 王惠群, 肖浪涛. 腐殖酸对水稻剑叶光合特性、必需元素和产量的影响及其相关性研究[J]. 云南农业大学学报: 自然科学版, 2015, 30(2):185-191
- Zhang Q Y, Li W W, Yang J, Luo Y C, Yang J R, Wang H Q, Xiao L T. Effects of humic acid on the photosynthetic characteristics, essential elements and yield of *Oryza sativa* L. and their correlation analysis[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University : Natural Science*, 2015, 30(2):185-191 (in Chinese)
- [17] Trevisan S, Pizzeghello D, Ruperti B, Francioso O, Sassi A, Palme K, Quaggiotti S, Nardi S. Humic substances induce lateral root formation and expression of the early auxin-responsive IAA19 gene and DR5 synthetic element in *Arabidopsis*[J]. *Plant Biology*, 2010, 12(4):604-614
- [18] Mora V, Bacacoa E, Baigorri R, Zamarreño A M, García-Mina J M. NO and IAA key regulators in the shoot growth promoting action of humic acid in *Cucumis sativus* L [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2014, 33(2):430-439
- [19] Canellas L P, Olivares F L, Okorokova-Façanha A L, Façanha A R. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots[J]. *Plant Physiology*, 2002, 130(4):1951-1957
- [20] 朱会调, 高登涛, 白茹, 冯建荣, 魏志峰, 刘丽. 黄腐酸对阳光玫瑰葡萄果实品质及产量的影响[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2021, 39(5): 590-596
- Zhu H T, Gao D T, Bai R, Feng J R, Wei Z F, Liu L. Effects of fulvic acid on berry quality and yield of Shine Muscat grape [J]. *Journal of Shihezi University: Natural Science Edition*, 2021, 39(5): 590-596 (in Chinese)
- [21] 宋攀, 郭新送, 范仲卿, 高涵, 陈卫民, 侯文聪, 丁方军. 叶面喷施黄腐酸钾对水稻产量及品质的影响[J]. 腐植酸, 2022(1):52-55
- Song Z, Guo X S, Fan Z Q, Gao H, Chen W M, Hou W C, Ding F J. Effects of foliar spraying of potassium fulvate on yield and quality of rice [J]. *Humic Acid*, 2022(1):52-55(in Chinese)
- [22] Canellas L P, Dantas D J, Aguiar N O, Peres L E P, Zsögön A, Olivares F L, Dobbss L B, Façanha A R, Nebbioso A, Piccolo A. Probing the hormonal activity of fractionated molecular humic components in tomato auxin mutants[J]. *Annals of Applied Biology*, 2011, 159(2):202-211
- [23] 张小冰, 邢勇, 郭乐, 张彩凤. 腐植酸钾浸种对干旱胁迫下玉米幼苗保护酶活性及MDA含量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(7):69-72
- Zhang X B, Xing Y, Guo L, Zhang C F. Effects of soaking with potassium humate on the activity of protective enzymes and the level of MDA of maize seedlings under drought stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(7):69-72 (in Chinese)
- [24] 刘伟. 腐植酸水溶肥料对燕麦抗旱生理特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014
- Liu W. Effect of humic acid water-soluble fertilizer on Oat drought resistant physiological characteristics [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [25] 陈静. 小米主要营养成分快速检测模型建立及其降压功效研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017
- Chen J. Study on rapid determination of main nutrition compositions and hypotensive effect of foxtail millet [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [26] GB/T15683—2008 大米直链淀粉含量的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- GB/T15683-2008 Rice Determination of straight chain starch content [S]. Beijing: China Standardization Press, 2018 (in Chinese)
- [27] 安静, 渠星宇, 乔金锁. 杂粮中总黄酮的提取及含量测定的实验设计[J]. 化学教育(中英文), 2019, 40(14):41-45
- An J, Qu X Y, Qiao J S. Experiment design of extracting and determining total flavones from cereals[J]. *Chinese Journal of Chemical Education*, 2019, 40(14):41-45 (in Chinese)
- [28] 韦露露. 贵州糯小米品质特性及营养化加工研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019
- Wei L L. Study on Quality Characteristics and Nutritional Processing of Waxy Millet in Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019 (in Chinese)
- [29] 马珂. 不同产地生态因子对晋谷21号小米品质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2022
- Ma K. Effects of the ecological factors in different production areas on the grain quality of Jingu21 [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [30] 陈志青, 冯源, 王锐, 崔培媛, 卢豪, 魏海燕, 张海鹏, 张洪程. 外源钼对水稻产量形成及氮素利用的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(9):2325-2338
- Chen Z Q, Feng Y, Wang R, Cui P Y, Lu H, Wei H Y, Zhang H P, Zhang H C. Effects of exogenous molybdenum on yield formation and nitrogen utilization in rice [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48(9): 2325-2338 (in Chinese)
- [31] Moussa M G, Sun X C, Ismael M A, Elyamine A M, Rana M S, Syaifudin M, Hu C X. Molybdenum-induced effects on grain yield, Macro-micro-nutrient uptake, and allocation in Mo-Inefficient winter wheat[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(4):1516-1531
- [32] 白亚青. 钼浸种与叶面喷施对晋谷21生理生化及产量性状的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2020
- Bai Y Q. Effects of molybdenum seed dipping and foliar spraying on physiological, biochemical and yield traits of Jingu 21 [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [33] 王云赫, 范仲卿, 郭新送, 李学峰, 宋小伟, 杨猛, 丁方军. 腐植酸对不同筋度小麦品种生长特性、产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(10):1240-1246
- Wang Y H, Fan Z Q, Guo X S, Li X F, Song X W, Yang M, Ding F J. Effect of humic acid on growth characteristics, yield and quality of wheat varieties with different gluten [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(10):1240-1246 (in Chinese)
- [34] 张素梅, 张瑞栋, 李靖涛, 雷强, 刘丹, 邢静熠, 吕晓飞, 王宏富. 腐殖酸钾对谷子产量和品质的影响[J]. 山西农业科学, 2014, 42(9):968-970
- Zhang S M, Zhang R D, Li J T, Lei Q, Liu D, Xing J Y, Lv X F, Wang H F. Impact of humic acid potassium on yield and quality in millet [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2014, 42(9):968-970 (in Chinese)
- [35] 蔡一霞, 朱智伟, 王维, 张祖建, 朱庆森. 直链淀粉含量与稻米品质主要性状及米饭质地关系的研究[J]. 扬州大学学报, 2005, 26(4):52-55
- Cai Y X, Zhu Z W, Wang W, Zhang Z J, Zhu Q S. Studies on the relationships of amylose content with the grain quality and the texture of cooked rice [J]. *Journal of Yangzhou University*, 2005, 26(4):52-55 (in Chinese)
- [36] 刘雨杉. 叶面喷施硒肥对谷子氮代谢及籽粒品质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2021
- Liu Y S. Effects of leaf spraying of selenium fertilizer on nitrogen metabolism and grain quality of cereals [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021 (in Chinese)

[37] 黄珊珊. 叶面施锌对谷子品质与产量的影响[D]. 太谷:山西农业大学, 2021

Huang S S. Effects of foliar zinc application on grain quality and yield [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021 (in Chinese)

[38] 周湘寒, 许思楠, 王梦迪, 姚亚亚, 周晨霞, 李慧静. 不同品种小米营养组分与小米粥品质、风味特性的相关性分析[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(5): 58-65

Zhou X H, Xu S N, Wang M D, Yao Y Y, Zhou C X, Li H J. Correlation analysis of nutritional components of different millets/ nutritional compositions with quality and flavor characteristics of millet porridge[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2023, 38(5): 58-65 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 李香宇, 硕士研究生, 2021年9月至今就读于中国农业大学农学院作物栽培学与耕作学专业。参与国家重点研发计划(2021YFD1901103)。



通讯作者简介: 文新亚, 博士, 中国农业大学农学院副教授, 博士生导师, 主要从事气候变化下农田微生态、农田土壤健康以及作物营养强化与品质提升等方面的研究工作。主持和参与国家重点研发计划、主管部门科技项目以及港、澳、台合作研究项目等各类科研项目20余项。发表SCI论文9篇, 获农业农村部“神农中华农业科技奖”。