

施氮水平对谷子干物质积累分配及氮素利用率的影响

郝子义¹, 李亚伟², 何继红², 董孔军², 任瑞玉², 张磊², 韦恒¹, 刘天鹏², 杨天育^{1,2}

(1. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院作物研究所, 甘肃兰州 730070)

摘要:为探明施氮水平对谷子干物质积累分配和氮素利用的影响,在西北半干旱雨养农业区,以常规种陇谷13号和杂交种张杂谷13号为试验材料,设置4个氮浓度梯度:0(N_{ck})、45($N_{低}$)、90($N_{中}$)、135($N_{高}$) kg/hm^2 ,测定2个品种在不同施氮水平下的产量、干物质积累、分配和氮素利用效率。结果表明,陇谷13号在 $N_{高}$ 处理下,较 N_{ck} 处理花后干物质对籽粒贡献率提高32.5%、穗粒质量提高30.0%、株高提高14.5%、籽粒干物质积累量提高20.5%,产量增加11.1%;张杂谷13号在 $N_{中}$ 处理下较 N_{ck} 处理花后干物质对籽粒贡献率提高21.0%、穗粒质量提高20.7%、籽粒干物质积累量提高21.5%、产量增加11.6%。陇谷13号在 $N_{中}$ 处理下氮肥农学效率最高,为3.75 kg/kg;而张杂谷13号在 $N_{低}$ 处理下氮肥农学效率最高,为9.57 kg/kg。在不同的施氮水平下,陇谷13号氮肥用量为135 kg/hm^2 时产量最高,张杂谷13号氮肥用量为90 kg/hm^2 时产量最高,表明杂交谷子品种更耐低氮环境,是化肥减氮生产中的优势品种类型。

关键词:施氮水平;干物质积累分配;氮素利用效率;谷子产量

中图分类号:S515 文献标识码:A 文章编号:1002-2481(2024)03-0050-10

Effect of Nitrogen Application on Dry Matter Accumulation, Distribution and Nitrogen Utilization in Foxtail Millet

HAO Ziyi¹, LI Yawei², HE Jihong², DONG Kongjun², REN Ruiyu², ZHANG Lei²,
WEI Heng¹, LIU Tianpeng², YANG Tianyu^{1,2}

(1. College of Life Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Crops, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To find out the effect of nitrogen(N) application on dry matter accumulation, distribution and N utilization in foxtail millet, in this study, in the northwest semi-arid rainfed agricultural area, the conventional variety Longgu 13 and the hybrid Zhangzagu 13 were used as materials, four nitrogen concentration gradients(N_{ck} : 0 kg/ha, N_{low} : 45 kg/ha, N_{medium} : 90 kg/ha, N_{high} : 135 kg/ha) were set, The yield, dry matter accumulation, distribution, and nitrogen use efficiency of the two varieties were measured at different levels of nitrogen application. The results showed that the contribution of post-flowering dry matter to the seeds of Longgu 13 under the N_{high} treatment increased by 32.5% than that under N_{ck} , the grain weight per spike increased by 30.0%, the plant height increased by 14.5%, the seed dry matter accumulation increased by 20.5%, and finally the yield increased by 11.1%. The post-flowering dry matter contribution to the seeds of Zhangzagu13 increased by 21.0% than that under N_{ck} , the grain weight per spike increased by 20.7%, the seed dry matter accumulation increased by 21.5%, the final yield increased by 11.6%. Longgu 13 had the highest agronomic efficiency under N_{medium} , it was 3.75 kg/kg, and Zhangzagu 13 had the highest efficiency of 9.57 kg/kg under N_{low} treatment. Under different nitrogen levels, the yield of Longgu 13 was the highest when the nitrogen application rate was 135 kg/ha, and that of Zhangzagu 13 was the highest when the nitrogen application rate was 90 kg/ha, indicating that hybrid foxtail millet varieties were more tolerant to low nitrogen environment and were an advantageous type of variety in the production of chemical fertilizer reduction.

Key words: nitrogen level; dry matter accumulation and distribution; nitrogen use efficiency; foxtail millet yield

土壤是农作物生长的重要影响因子,土壤肥力是土壤肥力的主要影响因子之一,对作物的生长发育具有不可替代的作用^[1]。同时,氮肥利用率的提高

收稿日期:2023-07-16

基金项目:甘肃省农业科学院重点研发计划(2022GAAS41);国家现代农业产业技术体系(CARS-06-14.5-A8);甘肃省农业科学院博士基金项目(2023GAA541)

作者简介:郝子义(2000-),男,河南林州人,在读硕士,研究方向:小杂粮遗传育种与栽培。

通信作者:杨天育(1968-),男,甘肃渭源人,研究员,博士,主要从事小杂粮遗传育种与栽培研究工作。

可有效保证农作物的产量和品质^[2]。近年来,随着对粮食需求的增加,农业生产中过量施用氮肥已成常态,而过量施用氮肥不仅会造成严重的资源浪费,还不利于植株物质转化和养分平衡^[2-5]。因此,如何在优化施肥措施的同时稳产高产显得尤为重要。

谷子是我国北方旱地重要的杂粮作物^[6-7],其具有抗旱、耐瘠薄、抗逆性强等特点^[8]。随着杂粮产业的不断发展,谷子的生产地位也不断提高,而谷子的高产绿色栽培对我国旱地农业的发展具有重要意义^[9-10]。氮肥不仅可以增强光合作用,而且对作物生长发育和产量都有重要影响,适宜的氮肥水平可使谷子增产和品质提高^[11-12]。郭晓红等^[13]研究指出,水稻在盐碱地种植时进行前氮后移,不仅可以促进营养积累,还可以有效提高穗数和穗粒数,进而显著提高产量。在农业生产中,谷子出苗期进行施氮处理可以促进干物质质量的积累,有利于增产增效,同时也可减轻干旱对谷子带来的不利影响^[14-15]。有学者研究发现,在一定范围内,施加氮肥有利于谷子的生长发育,能明显提高谷子的干物质积累量,并且在生长过程中可有效调节谷子的形态发育和生物量的分配,进而使谷子增产^[16-18]。李翔鹏等^[19]研究了不同施氮水平下谷子的干物质积累量、氮肥农学利用率和偏生产力等特征,结果表明,施氮水平为 50 kg/hm² 处理谷子的干物质积累量、氮肥农学利用率和偏生产力最高,施氮水平为 100 kg/hm² 处理谷子的产量和水分利用效率最高。张立媛等^[20]使用盆栽试验和大田试验结合的方法,研究发现,赤峰主栽谷子品种中赤谷 5 号、赤谷 6 号和赤谷 8 号耐低氮能力较强。刘琳琳等^[21]采用盆栽方法对晋谷 21 号进行不同氮肥试验,结果表明,过量施用氮肥制约着谷子营养生长,中氮(5 g/kg)环境下更有利于提高谷子产量。王彦辉等^[22]研究了种植密度和施氮水平对郑谷 3 号产量的影响,结果表明,随种植密度和氮肥的上升谷子产量表现为先增加后减小的趋势。然而,在旱地农业中,长期、过量的化学氮肥投入,在显著提升土壤氮素含量的同时,也会降低谷子的产量及品质^[23]。前人研究中,以谷子杂交种和常规种为试验材料研究谷子干物质积累分配和氮素利用方面的报道较少。

为了明确施氮量对谷子干物质积累及产量的影响,本研究以 2 个谷子品种陇谷 13 号和张杂谷 13 号为试验材料,比较分析了不同氮素水平对谷子品种干物质积累分配、产量和氮素利用效率的影响,旨在为旱地谷子高产及合理施氮提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年在甘肃省农业科学院会宁试验站(105°06'E,35°40'N)进行。试验地海拔 1 800.5 m,年平均气温 7.6℃,年辐射总量 5 842 MJ/m²,年日照时数 2 500 h,≥10℃积温 2 012.7℃,无霜期 140 d,属中温带半干旱气候。一年一熟,无灌溉条件,为典型旱地雨养农业区。

1.2 试验材料

供试谷子品种为常规种陇谷 13 号和杂交种张杂谷 13 号,均由甘肃省农业科学院作物研究所提供。供试所用肥料为尿素、重过磷酸钙和硫酸钾,其 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 46%、18%、50%。

1.3 试验设计

本试验采取双因素裂区设计,供试品种为主因素,施氮水平为副因素,共设 4 个施氮处理,分别是 N_{ck}.0 kg/hm²,N_低.45 kg/hm²,N_中.90 kg/hm²和 N_高.135 kg/hm²,每处理有 3 个重复,共 24 个小区,小区面积 12 m²(3 m×4 m)。种植密度为 4.5×10⁵株/hm²,采用人工条播,播种深度为 5~8 cm,行距 26 cm。本试验所施氮肥为尿素,谷子 5 叶期以追肥方式 1 次施入。重过磷酸钙和硫酸钾在播种前结合整地施入,重过磷酸钙施入量为 70 kg/hm²,硫酸钾的施入量为 90 kg/hm²。谷子苗期人工去除杂草,3 叶期间苗,5 叶期定苗,抽穗期搭防鸟网预防鸟害。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 干物质测定及计算 在谷子苗期、拔节期、开花期、成熟期,各小区选取 15 株长势均匀一致的植株,取样完成后剪掉根系,其中,样品放至烘箱 105℃ 杀青 30 min,80℃ 烘干至恒质量并称量,测定干物质积累量。苗期和拔节期地上部分按整体测定,开花期和成熟期地上部分按器官分类,开花期地上部分分为茎+鞘、叶、穗轴+颖壳共 3 部分,成熟期地上部分分为茎+鞘、叶、穗轴+颖壳、籽粒共 4 部分。

花前营养器官贮藏同化物转运量=开花期干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量 (1)

开花前营养器官贮藏同化物对籽粒贡献率=(开花期干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量)/成熟期籽粒干质量×100% (2)

花后同化物在籽粒中的分配量=成熟期籽粒干质量-花前营养器官贮藏同化物转运量 (3)

花后同化物对籽粒贡献率=花后同化物在籽粒中的分配量/成熟期籽粒干质量×100% (4)

1.4.2 植株全氮及氮肥利用效率 将谷子各时期整理好的样品粉碎,利用凯氏定氮法测定植株全氮含量(g/kg),并计算相关指标。

$$\text{植株氮素吸收量(g)} = \text{植株全氮含量} \times \text{单株干物质积累量} \quad (5)$$

$$\text{氮素利用效率(kg/kg)} = \text{籽粒产量} / \text{植株氮素吸收量} \quad (6)$$

$$\text{氮肥农学效率(kg/kg)} = (\text{施氮区籽粒产量} - \text{不施氮区籽粒产量}) / \text{施氮量} \quad (7)$$

$$\text{氮肥偏生产力(kg/kg)} = \text{施氮处理产量} / \text{施氮量} \quad (8)$$

1.4.3 产量测定 在谷子成熟期,选取 15 株长势均匀一致的植株进行考种,测定穗粒质量、千粒质量和株高;按小区进行收获,脱粒测产后折算为 13% 含水量的籽粒产量。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 和 GraphPad Prism 8.0 进行试验数据统计并作图,利用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差及配对分析,在 5% 水平下用邓肯法检验处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 施氮水平对谷子产量及氮素利用效率的影响

由表 1 可知,施用氮肥均能大幅提高谷子籽粒产量。与 N_{ck} 相比,陇谷 13 号在 $N_{高}$ 处理下,其籽粒产量显著增加了 11.1% ($P < 0.05$),但在 $N_{低}$ 和 $N_{中}$ 处理下的籽粒产量与 N_{ck} 间无显著差异;张杂谷 13 号在 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理分别显著增产 11.6% 和 8.3% ($P < 0.05$), $N_{低}$ 处理的籽粒产量与 N_{ck} 间无显著差异。

表 1 不同氮肥水平下的谷子农艺性状的统计分析

Tab.1 Statistical analysis of agronomic traits in foxtail millet at different nitrogen fertilizer levels

品种 Variety	处理 Treatment	籽粒产量/ (kg/hm ²) Seed yield	穗粒质量/g Grain weight pre spike	千粒质量/g Thousand grain weight	株高/cm Plant height	氮素利用效率/ (kg/kg) Nitrogen use effi- ciency	氮肥农学效率/ (kg/kg) Nitrogen agro- nomic efficiency	氮肥偏生产力/ (kg/kg) Nitrogen partial factor productivity
陇谷 13 号 Longgu 13	N_{ck}	3 909.53b	24.03c	2.89a	145.81c	5.52b		
	$N_{低}$	4 025.53ab	24.05c	2.90a	152.67bc	5.42b	2.57b	89.46a
	$N_{中}$	4 246.88ab	27.31b	2.88a	155.25b	7.33a	3.75a	47.19b
	$N_{高}$	4 344.22a	31.23a	2.93a	166.89a	6.33a	3.22a	32.18c
张杂谷 13 号 Zhangzagu 13	N_{ck}	7 168.36b	21.83c	3.16a	131.06b	18.39a		
	$N_{低}$	7 599.05ab	24.90b	3.19a	132.94ab	14.78b	9.57a	168.87a
	$N_{中}$	7 996.40a	26.35a	3.21a	134.50a	19.15a	9.20a	88.85b
	$N_{高}$	7 764.39a	21.00c	3.18a	125.67c	20.35a	4.42b	57.51c

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference at 0.05 level among treatments. The same as below.

由图 1 可知,陇谷 13 号在低氮水平下籽粒产量低于张杂谷 13 号,差异极显著 ($P < 0.01, t = 15.42$),张杂谷 13 号在低氮环境下籽粒产量依然高

出高氮环境下的陇谷 13 号 65.0%,说明杂交种对环境适应性强,更耐低氮。

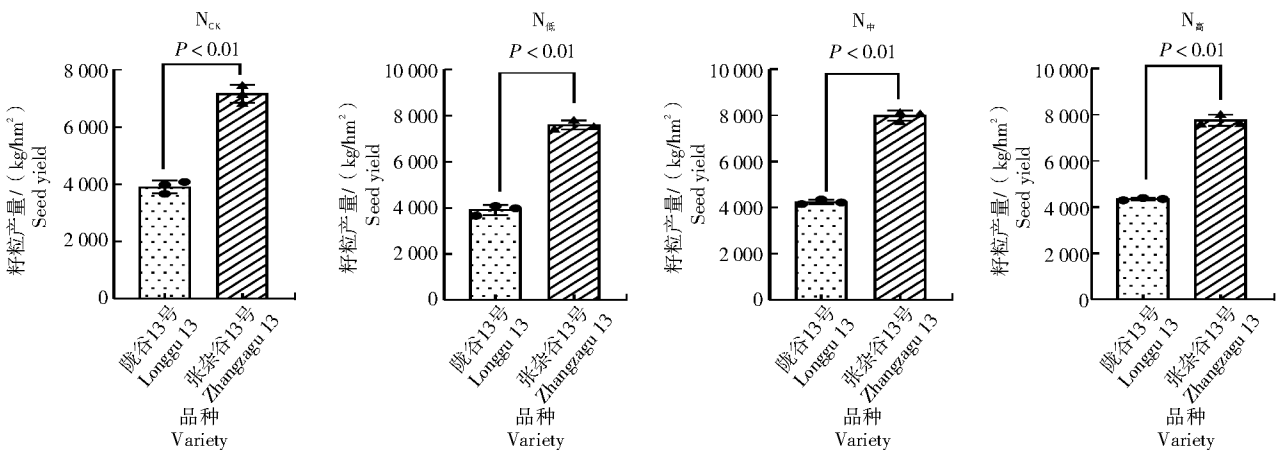


图 1 陇谷 13 号和张杂谷 13 号籽粒产量间配对分析
Fig.1 Paired analysis of grain yield between Longgu 13 and Zhangzagu 13

施肥后穗粒质量的增加是谷子增产的主要原因,千粒质量影响较小^[24]。与 N_{ck} 相比,陇谷13号 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理分别显著增加穗粒质量13.6%和30.0%;张杂谷13号 $N_{低}$ 和 $N_{中}$ 处理的穗粒质量分别增加14.1%和20.7%。同时,施氮水平又显著影响谷子株高,陇谷13号 $N_{高}$ 处理下株高较 N_{ck} 增加14.5%,张杂谷13号 $N_{中}$ 处理下株高较 N_{ck} 增加2.6%。

由图2可知,增施氮肥可提升谷子的氮素利用效率,陇谷13号在 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理下氮素利用效率较 N_{ck} 增加了32.8%和14.7%;张杂谷13号在 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理下氮素利用效率分别较 N_{ck} 提高了4.1%和10.7%。陇谷13号在各氮肥处理下氮素利用效率低于张杂谷13号,且差异极显著($P < 0.01$),表明张杂谷13号的氮素利用效率远高于陇谷13号,品种优势较大。

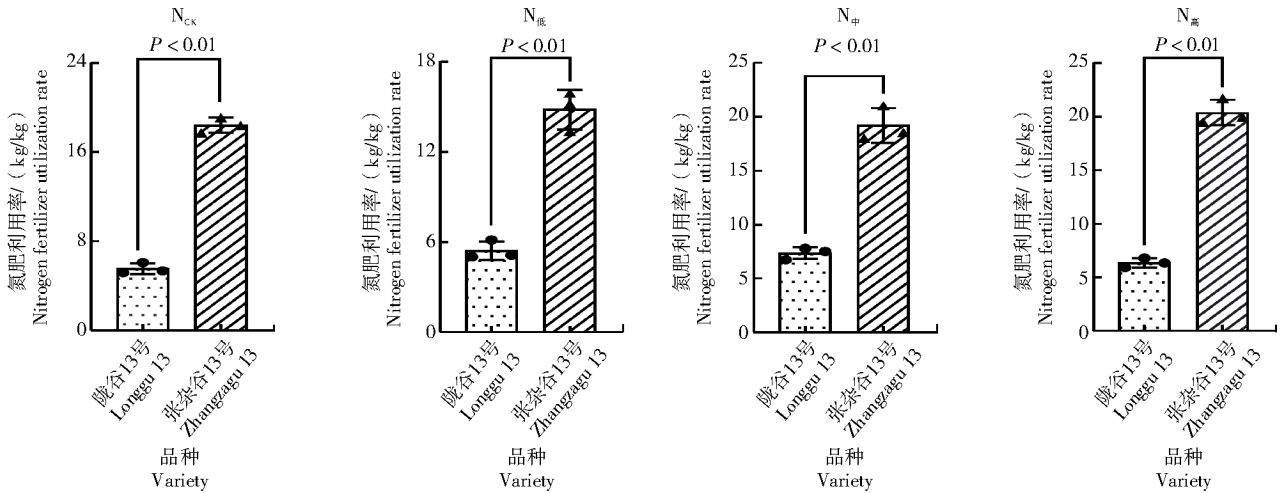


图2 陇谷13号和张杂谷13号氮素利用效率间配对分析
Fig.2 Paired analysis of nitrogen use efficiency between Longgu 13 and Zhangzagu 13

2.2 施氮水平对谷子干物质积累的影响

从表2可以看出,施用氮肥可以提高谷子生长中后期的干物质积累量。在拔节期,与 N_{ck} 相比,陇谷13号 $N_{低}$ 、 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理下干物质积累量分别增加13.6%、50.3%和70.2%;张杂谷13号在 $N_{中}$ 处理下干物质积累量增加了13.7%。在开花期,与 N_{ck}

相比,陇谷13号 $N_{低}$ 、 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理下干物质积累量分别增加了37.7%、57.2%和41.2%;而张杂谷13号 $N_{中}$ 处理下干物质积累量增加了38.2%。在成熟期,与 N_{ck} 相比,陇谷13号各处理间差异均不显著,张杂谷13号 $N_{低}$ 和 $N_{中}$ 处理下干物质积累量分别显著增加了8.3%和9.3%。

表2 不同氮素水平下陇谷13号和张杂谷13号干物质积累量
Tab.2 Analysis of dry matter accumulation of Longgu 13 and Zhangzagu 13 under different nitrogen levels g/株

品种 Variety	处理 Treatment	苗期 Seeding stage	拔节期 Jointing stage	开花期 Flowering stage	成熟期 Mature stage
陇谷13号 Longgu 13	N_{ck}	0.12a	1.91d	7.06c	56.31a
	$N_{低}$	0.09b	2.17c	9.72b	56.54a
	$N_{中}$	0.11a	2.87b	11.10a	59.80a
	$N_{高}$	0.11a	3.25a	9.97b	60.12a
张杂谷13号 Zhangzagu 13	N_{ck}	0.22a	4.16b	10.25b	39.13b
	$N_{低}$	0.20ab	3.91b	10.56bc	42.39a
	$N_{中}$	0.21bc	4.73a	14.17a	42.75a
	$N_{高}$	0.23c	2.78c	9.48c	35.86c

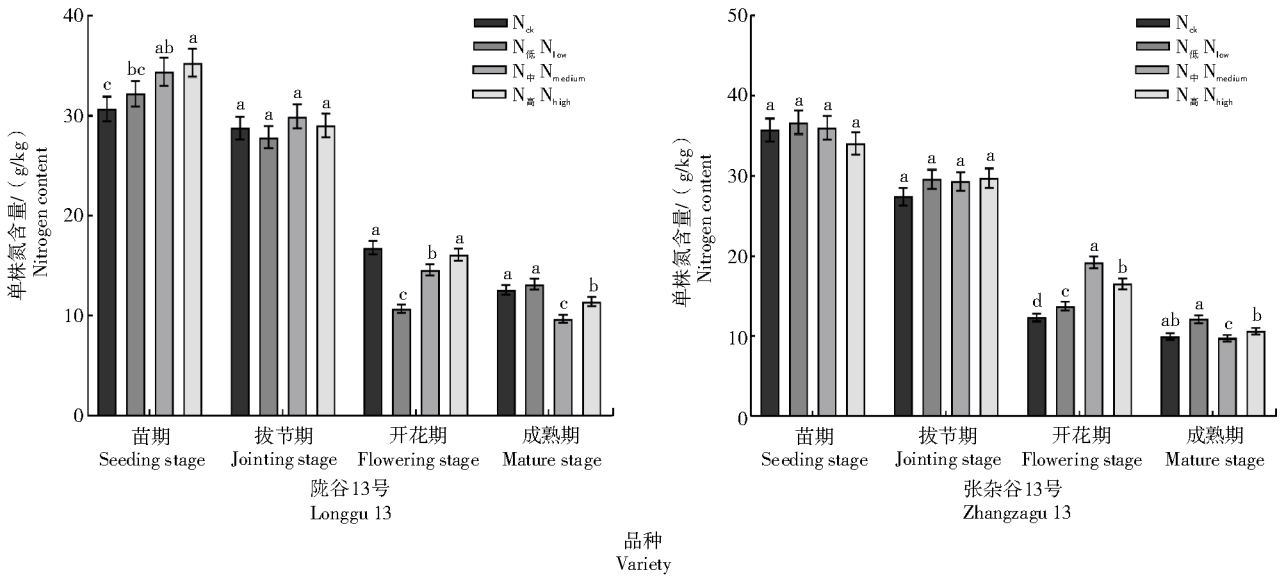
2.3 施氮水平对谷子单株氮含量的影响

从图3可以看出,谷子单株氮含量随着生育进程推进呈现逐渐降低的趋势,在开花期和成熟期处理间差异明显。与 N_{ck} 相比,在开花期陇谷13号

$N_{低}$ 处理和 $N_{中}$ 处理的单株氮含量明显降低, $N_{高}$ 处理下的氮含量与 N_{ck} 差异不明显;而该发育时期的张杂谷13号各处理单株氮含量较 N_{ck} 显著增加($P < 0.05$), $N_{低}$ 、 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理分别增加11.6%、55.8%

和 34.2%。在成熟期,陇谷 13 号 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理单株氮含量低于 N_{ck} , $N_{低}$ 处理略高于 N_{ck} ; 而张杂谷

13 号 $N_{低}$ 和 $N_{高}$ 处理下单株氮含量较 N_{ck} 分别增加 21.8% 和 6.83%, $N_{中}$ 处理略低于 N_{ck} 。



图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。图 4 同
Different lowercase letters indicated significant difference at 0.05 level in the figure. The same as Fig.4

图 3 不同施氮水平下陇谷 13 号和张杂谷 13 号的单株氮含量
Fig.3 Nitrogen content per plant of Longgu 13 and Zhangzagu 13 under different nitrogen levels

2.4 施氮水平对开花期和成熟期各器官干物质积累量的影响

由图 4 可知,施氮可提高作物开花期和成熟期各器官干物质的积累。在开花期,陇谷 13 号各器官干物质积累量较 N_{ck} 显著增加,其中 $N_{中}$ 处理茎+鞘、叶和穗轴+颖壳的干物质积累量增加最高,分别为 57.2%、41.2% 和 37.7%;张杂谷 13 号中, $N_{中}$

处理下茎+鞘、叶和穗轴+颖壳的干物质积累量较对照分别增加 45.4%、38.2% 和 32.4%。在成熟期,陇谷 13 号 $N_{中}$ 和 $N_{高}$ 处理下籽粒干物质积累量较 N_{ck} 增加了 18.6% 和 20.5%, 而 $N_{低}$ 处理较 N_{ck} 无显著差异;张杂谷 13 号 $N_{低}$ 和 $N_{中}$ 处理籽粒干物质积累量较 N_{ck} 分别增加 14.7% 和 21.5%, 而 $N_{高}$ 处理较 N_{ck} 无显著差异。

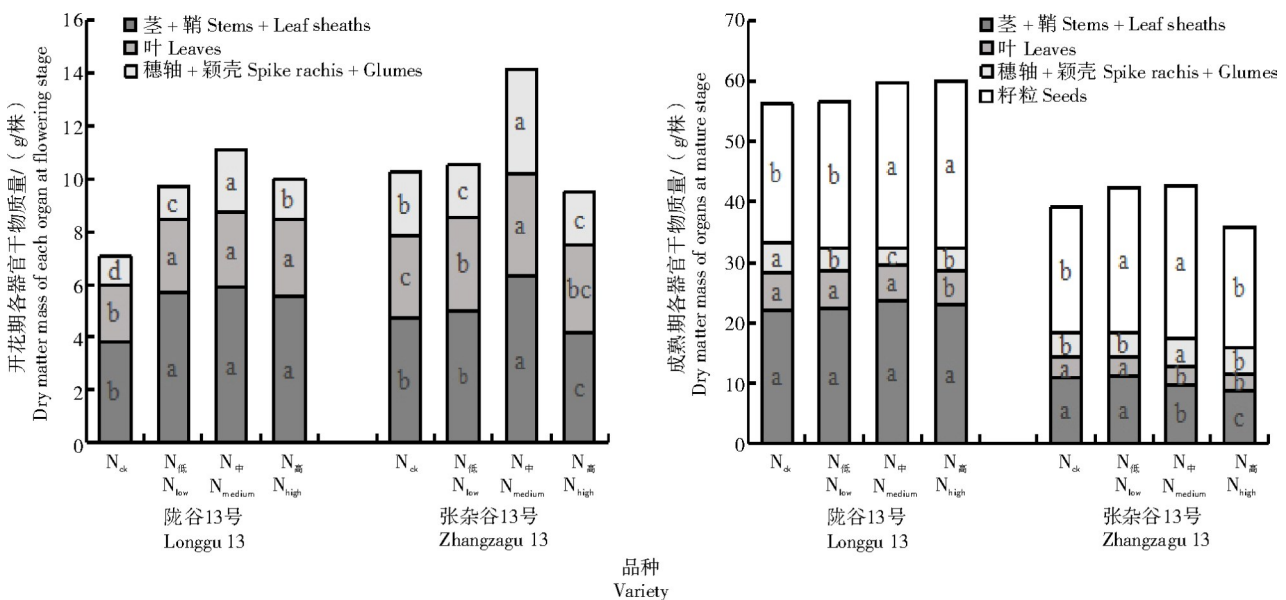


图 4 陇谷 13 号和张杂谷 13 号开花期和成熟期各器官干物质积累量分析
Fig.4 Analysis of dry matter accumulation of different organs at flowering and mature stages in Longgu 13 and Zhangzagu 13

2.5 施氮水平对开花期和成熟期干物质在各器官中分配比例的影响

由表3可知,施氮后均能提高成熟期干物质在籽粒中的分配比例。在开花期干物质分配比例中,陇谷13号和张杂谷13号在N_中处理下穗轴+颖壳的分配比例最高,分别较N_{ck}增加了34.7%和

18.3%。在成熟期干物质分配比例中,籽粒的提升效应明显,与N_{ck}相比,陇谷13号在N_低处理下籽粒的干物质分配比例无显著差异,N_中和N_高处理下分别显著提高了11.7%和12.8%($P < 0.05$);张杂谷13号各处理籽粒干物质分配比例较N_{ck}分别显著提高了5.9%、11.2%和5.3%($P < 0.05$)。

表3 陇谷13号和张杂谷13号开花期和成熟期干物质在各器官中的分配比例
Tab.3 Analysis of proportion of dry matter allocated to each organ at flowering and mature stages in Longgu 13 and Zhangzagu 13

品种 Variety	处理 Treatment	开花期干物质分配比例 Proportion of dry matter allocated at flowering stage			成熟期干物质分配比例 Proportion of dry matter allocated at mature stage			
		茎+鞘 Stems+Leaf sheaths	叶 Leaves	穗轴+颖壳 Spike rachis+Glumes	茎+鞘 Stems+Leaf sheaths	叶 Leaves	穗轴+颖壳 Spike rachis+Glumes	籽粒 Seeds
陇谷13号 Longgu 13	N _{ck}	54.25b	30.03a	15.72b	39.53a	10.66a	8.91a	40.90b
	N _低	58.44a	28.50b	13.07d	39.44a	11.11a	6.92b	42.54b
	N _中	52.88c	25.86c	21.17a	39.63a	10.01a	4.67c	45.67a
	N _高	55.87b	29.39a	14.74c	38.44b	9.20b	6.22b	46.14a
张杂谷13号 Zhangzagu 13	N _{ck}	46.24a	30.24b	23.51b	27.96a	8.33a	10.48b	53.23c
	N _低	47.44a	33.33a	19.22d	26.53a	7.34b	9.74c	56.38b
	N _中	44.39b	27.81c	27.81a	23.00c	6.57c	11.20a	59.20a
	N _高	44.09b	34.70a	21.20c	24.46b	7.84b	11.68a	56.02b

由图5、6可知,陇谷13号在各处理下成熟期茎+鞘的干物质分配比例高于张杂谷13号,差异极显著($P < 0.01$);但成熟期籽粒干物质的分配比例却低于张杂谷13号,且差异极显著($P < 0.01$),

说明陇谷13号营养生长过旺,营养器官干物质向籽粒中转运分配量较低,张杂谷13号在成熟期向籽粒中转运分配量较高,最终影响产量的形成。

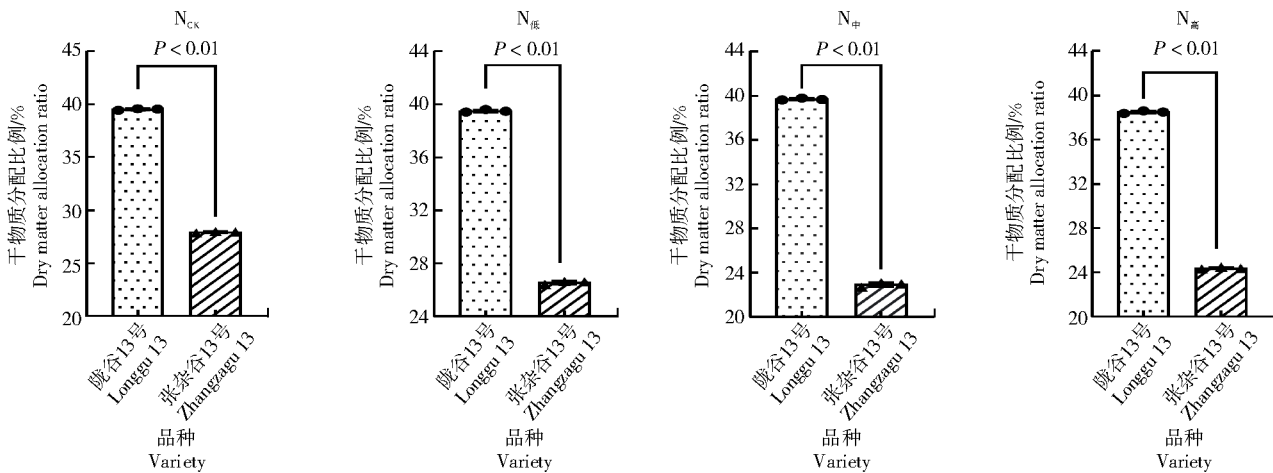


图5 陇谷13号和张杂谷13号成熟期茎+鞘干物质分配比例间配对分析
Fig.5 Paired analysis of the proportion of dry matter allocated between stems+leaf sheaths at mature stage between Longgu 13 and Zhangzagu 13

2.6 施氮水平对开花后营养器官中干物质再分配的影响

由表4可知,施氮显著影响谷子花前和花后干物质积累对籽粒的贡献率($P < 0.05$),并且陇谷13号花前干物质积累对籽粒的贡献大,贡献率在

52.7%~70.8%;而张杂谷13号花后干物质积累对籽粒的贡献大,贡献率在69.5%~90.5%。陇谷13号在N_低、N_中和N_高处理下,花后干物质对籽粒贡献率较N_{ck}分别提高8.0%、12.8%和32.5%;张杂谷13号在N_低、N_中和N_高处理下,花后干物质对籽粒贡献率

较 N_{ck} 提高 6.1%、21.0% 和 10.1%。这些结果表明施氮后明显提高了谷子花后干物质向籽粒中的转

运分配率。

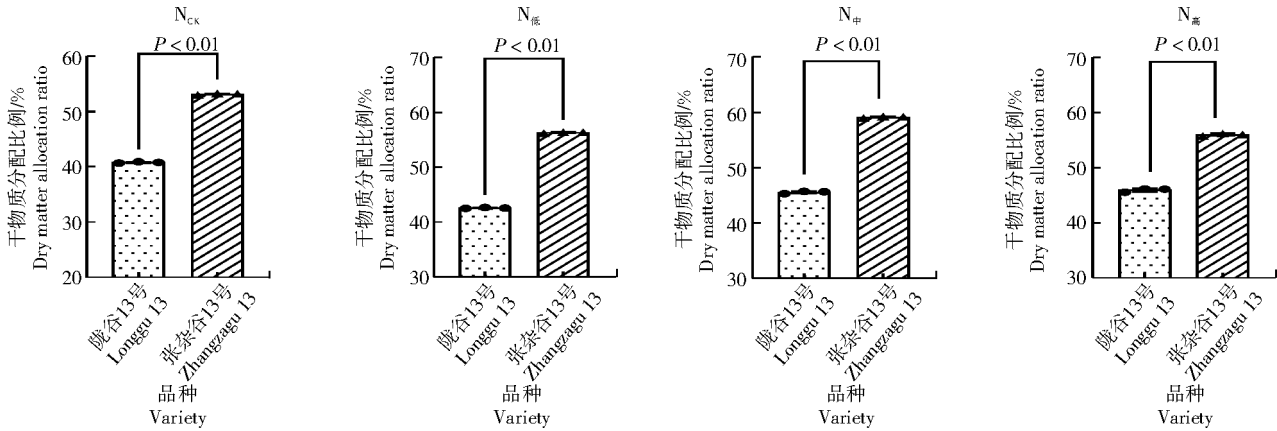


图 6 陇谷 13 号和张杂谷 13 号成熟期籽粒干物质分配比例间配对分析

Fig.6 Paired analysis of the proportion of dry matter allocated to the seeds at mature stage between Longgu 13 and Zhangzagu 13

表 4 不同氮肥水平下陇谷 13 号和张杂谷 13 号花后营养器官干物质的分配量分析
Tab.4 Analysis of distribution of dry matter in vegetative organs after flowering between Longgu 13 and Zhangzagu 13 at different levels of nitrogen fertilizer

品种 Variety	处理 Treatment	花前营养器官贮藏的同化物 Assimilates stored in vegetative organs before flowering		花后干物质 Post-flowering dry matter	
		转运量/(g/株) Transit volume	对籽粒贡献率/% Contribution to the seeds	在籽粒中的分配量/(g/株) Distribution in the seeds	对籽粒贡献率/% Contribution to the seeds
陇谷 13 号 Longgu 13	N_{ck}	16.3a	70.8a	6.7d	32.8d
	$N_{低}$	13.8b	57.6b	10.2c	40.8c
	$N_{中}$	15.0ab	54.7c	12.4b	45.6b
	$N_{高}$	14.6b	52.7d	13.1a	65.3a
张杂谷 13 号 Zhangzagu 13	N_{ck}	6.4a	30.5a	14.5d	69.5d
	$N_{低}$	5.8b	24.4b	18.1b	75.6c
	$N_{中}$	2.4d	9.6d	22.9a	90.5a
	$N_{高}$	4.1c	20.3c	16.0c	79.6b

从图 7、图 8 可以看出,陇谷 13 号在开花前干物质对籽粒贡献率高于张杂谷 13 号,且差异极显著 ($P < 0.01$);但在开花后干物质对籽粒贡献率却低于张杂谷 13 号,且差异极显著 ($P < 0.01$),说明陇

谷 13 号开花前的营养生长干物质积累量高,花后转运分配率低,张杂谷生殖生长干物质转运分配率较高,所以,产量优势明显。

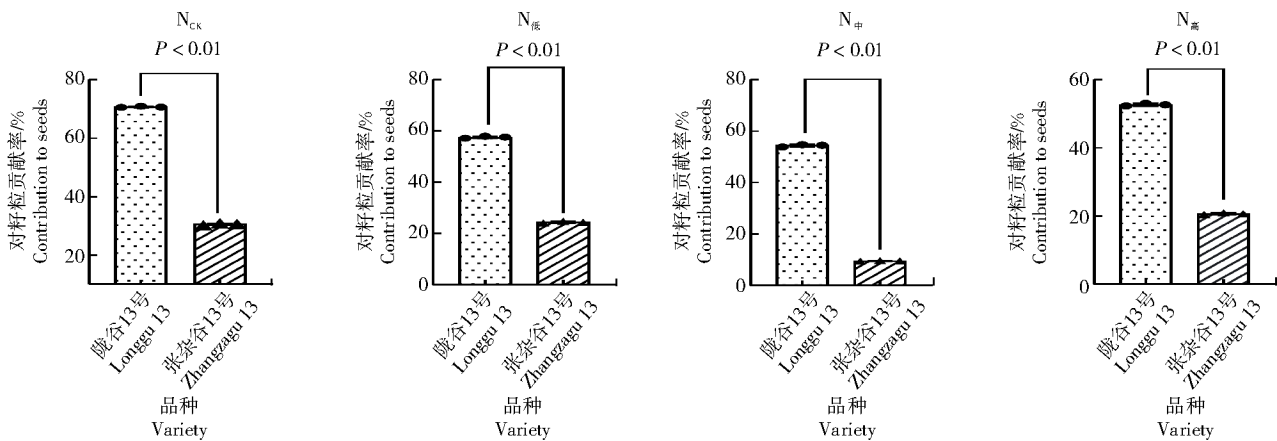


图 7 陇谷 13 号和张杂谷 13 号花前干物质质量对籽粒贡献率间配对分析

Fig.7 Paired analysis of the contribution of pre-flowering dry matter to seeds between Longgu 13 and Zhangzagu 13

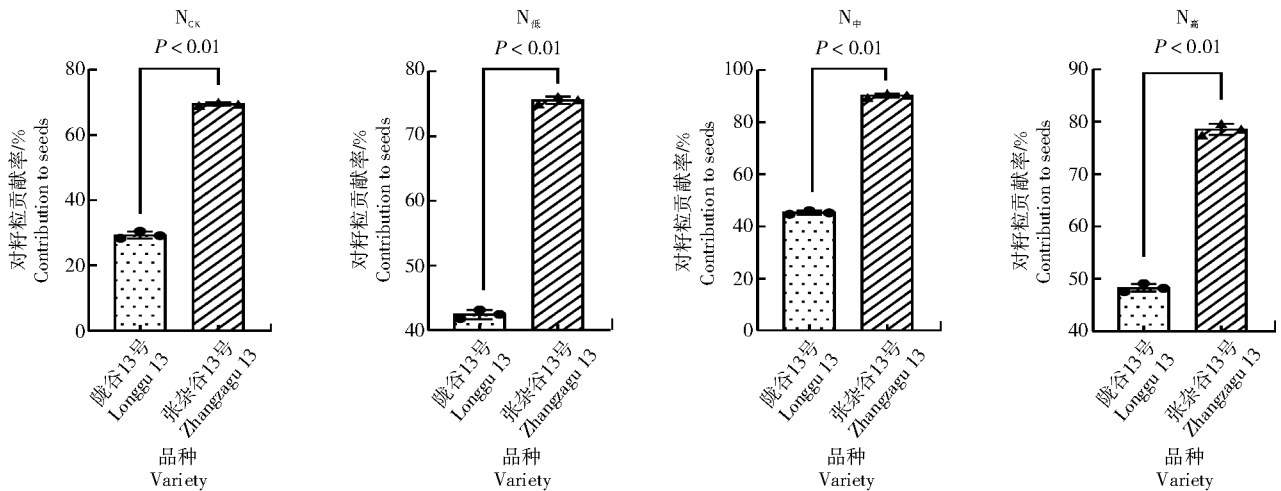


图8 陇谷13号和张杂谷13号花后干物质质量对籽粒贡献率间配对分析
Fig.8 Paired analysis of the contribution of post-flowering dry matter to seeds between Longgu 13 and Zhanzagu 13

3 结论与讨论

3.1 不同氮肥处理对谷子干物质积累转运的影响

在谷子生产中干物质的积累是形成高产的基础^[25]。适量的氮肥对作物的干物质积累、产量和品质都有显著的影响^[17, 26]。刘鑫等^[27]研究表明,提高谷子的干物质积累量可增加谷穗的干物质质量。本研究结果表明,与 N_{ck} 相比,陇谷13号在 $N_{高}$ 处理下,各生育期干物质积累量较对照显著提高,营养器官中积累的干物质向籽粒转运分配的比例较对照明显增加;张杂谷13号在 $N_{中}$ 处理下各生育期干物质积累量较对照显著提高,并且干物质向籽粒转运分配的比例及贡献率的值也明显增加,但在 $N_{高}$ 处理时出现明显的下降,表明适量的施氮水平可明显提高谷子干物质积累量,同时增加干物质转运分配比例,对谷子增产有重要意义,这与前人的研究结论相符^[25]。

3.2 不同氮肥处理对谷子氮肥利用率及产量的影响

氮是作物需求量最大的营养元素,氮肥的施用可有效改善作物品质、提高作物产量^[28-29]。有学者研究表明,在谷子生产中一次性基施控释氮肥可有效提高产量和氮肥利用率^[30]。本试验结果表明,施用氮肥均能提高谷子的氮肥利用效率,而且谷子的氮肥利用效率随着氮肥浓度的增加呈先上升后下降的趋势,陇谷13号施用 90 kg/hm^2 氮肥时的氮素利用率最高,张杂谷13号施用 135 kg/hm^2 氮肥时的氮素利用率最高。

研究表明,当氮肥过量时,植株中的叶绿素含量增高会导致贪青晚熟,致使谷子的产量增加受

阻^[31]。李永虎等^[32]研究表明,谷子产量随施肥量的增加呈现先升后降的趋势。本试验结果表明,陇谷13号随着施肥量的增加谷子产量并没有降低,施肥量为 135 kg/hm^2 时产量最高,在此之后应加大试验的施氮量,以确认最佳的氮肥水平;张杂谷13号产量随施肥量增加呈现先增加后降低的趋势,氮肥用量为 90 kg/hm^2 时,利于促进谷子干物质积累,同时向籽粒中的转运分配量显著提高,增产效果最为明显。

氮肥水平的增加显著提高了陇谷13号在拔节期、开花期和成熟期的干物质积累,氮肥水平为 90 kg/hm^2 时显著提高了张杂谷13号在拔节期、开花期和成熟期的干物质积累,同时提高了营养器官中同化物向生殖器官的转运分配量,氮肥利用率也随之增加。此外,不同基因型谷子品种对氮肥的敏感度不同,陇谷13号最佳氮肥用量为 135 kg/hm^2 ,张杂谷13号最佳氮肥用量为 90 kg/hm^2 ,这将为旱地谷子高产栽培及合理施氮提供理论依据和技术支撑。

参考文献:

- [1] 梁路,张卫杰,徐博涵,等. 有机无机肥配施影响土壤肥力与土壤环境的研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(3): 1-11.
LIANG L, ZAHNG W J, XU B H, et al. Research progress on effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on soil fertility and soil environment[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(3): 1-11.
- [2] GONG X W, DANG K, LIU L, et al. Intercropping combined with nitrogen input promotes proso millet (*Panicum miliaceum* L.) growth and resource use efficiency to increase grain yield on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106434.

- [3] 李凌云, 和爱玲, 杨焕焕, 等. 氮肥减施对黄褐土区小麦——玉米轮作体系产量和氮素吸收利用的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(11): 21-32.
LI L Y, HE A L, YANG H H, et al. Effect of reduction of nitrogen fertilizer rate on yield and nitrogen utilization of wheat-maize rotation system in yellow-cinnamon soil area[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(11): 21-32.
- [4] LADHA J K, PATHAK H, KRUPNIK T J, et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects [J]. Advances in Agronomy, 2005, 87: 85-156.
- [5] HIREL B, ANDRIEU B, VALADIER M H, et al. Physiology of maize II: identification of physiological markers representative of the nitrogen status of maize (*Zea mays*) leaves during grain filling[J]. Physiologia Plantarum, 2005, 124(2): 178-188.
- [6] 禾璐, 杨阳, 王宇坤, 等. 谷子功能基因发掘现状及展望[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 1-10.
HE L, YANG Y, WANG Y K, et al. The current situation and perspective of functional gene discovery in foxtail millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(4): 1-10.
- [7] 王拴锁, 徐晨阳, 陈佳, 等. 谷子高产育种——从主粮株型育种谈起[J]. 山西农业科学, 2023, 51(10): 1121-1126.
WANG S S, XU C Y, CHEN J, et al. High yield foxtail millet breeding: designing from the perspective of plant type optimization of major cereal crops[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(10): 1121-1126.
- [8] 李顺国, 刘斐, 刘猛, 等. 中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 459-470.
LI S G, LIU F, LIU M, et al. Current status and future prospective of foxtail millet production and seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 459-470.
- [9] 贾冠清, 刁现民. 中国谷子种业创新现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2022, 55(4): 653-665.
JIA G Q, DIAO X M. Current status and perspectives of innovation studies related to foxtail millet seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(4): 653-665.
- [10] 刁现民. 禾谷类杂粮作物耐逆和栽培技术研究新进展[J]. 中国农业科学, 2019, 52(22): 3943-3949.
DIAO X M. Progresses in stress tolerance and field cultivation studies of orphan cereals in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22): 3943-3949.
- [11] 王小林, 纪晓玲, 张盼盼, 等. 黄土高原旱地谷子品种地上器官干物质分配与产量形成相关性分析[J]. 作物杂志, 2018(5): 150-155.
WANG X L, JI X L, ZHANG P P, et al. Correlation analysis between aboveground biomass allocation and grain yield in different varieties of foxtail millet in the dry land of Loess Plateau [J]. Crops, 2018(5): 150-155.
- [12] WATTS D B, RUNION G B, BALKCOM K S. Nitrogen fertilizer sources and tillage effects on cotton growth, yield, and fiber quality in a coastal plain soil[J]. Field Crops Research, 2017, 201: 184-191.
- [13] 郭晓红, 姜红芳, 兰宇辰, 等. 氮肥运筹对苏打盐碱地水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(8): 1796-1804.
GUO X H, JIANG H F, LAN Y C, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on rice yield and nitrogen use efficiency in soda saline-alkali land[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(8): 1796-1804.
- [14] 于肖, 牛佳红, 陈二影, 等. 施氮与不同时期水分胁迫对谷子生长及生理生化特性的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(1): 61-67.
YU X, NIU J H, CHEN E Y, et al. Effects of nitrogen application and water stress at different stages on growth and physiological and biochemical characteristics of foxtail millet[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(1): 61-67.
- [15] 牛佳红, 于肖, 陈二影, 等. 施氮与抽穗后干旱胁迫对谷子生长及生理生化特性的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(6): 110-118.
NIU J H, YU X, CHEN E Y, et al. Effects of nitrogen application and drought stress after heading on millet growth and physiological and biochemical characteristics[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(6): 110-118.
- [16] 夏凡, 李翠芳, 王志刚, 等. 施用有机肥对谷子产量、品质及经济效益的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(3): 278-284.
XIA F, LI C F, WANG Z G, et al. Effects of organic fertilizer application on yield, quality and economic benefit of foxtail millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(3): 278-284.
- [17] 秦娜, 朱灿灿, 代书桃, 等. 施氮时期对谷子产量、品质和氮素利用率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(1): 67-78.
QIN N, ZHU C C, DAI S T, et al. Effects of nitrogen fertilizer application stage on the grain yield and quality and nitrogen use efficiency of foxtail millet[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(1): 67-78.
- [18] 王宇坤, 张敏, 孟晓伟, 等. 低氮胁迫对谷子苗期光合指标及生理性能的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(12): 1483-1490.
WANG Y K, ZHANG M, MENG X W, et al. Effects of low nitrogen stress on photosynthesis indexes and physiological performance of foxtail millet at seedling stage[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(12): 1483-1490.
- [19] 李翔鹏, 李方豪, 纪鸿飞, 等. 施氮量对黑龙江谷子产量及耗水规律的影响[J]. 农业与技术, 2022, 42(12): 23-26.
LI X P, LI F H, JI H F, et al. Effect of nitrogen application rate on yield and water consumption of millet in Heilongjiang province[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(12): 23-26.
- [20] 张立媛, 琦明玉, 李志光, 等. 不同谷子品种氮素吸收与利用差异的研究[J]. 东北农业科学, 2021, 46(1): 13-16, 124.
ZHANG L Y, QI M Y, LI Z G, et al. Study on the difference of nitrogen uptake and utilization in different millet varieties[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(1): 13-16, 124.
- [21] 刘琳琳, 王倩怡, 王小林, 等. 氮肥施用量对谷子营养生长期形态发育和生物量分配的影响[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(2): 26-30.
LIU L L, WANG Q Y, WANG X L, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on morphological development and biomass allocation during nutrition growing stage of foxtail millet [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2020, 66(2): 26-30.

- [22] 王彦辉,樊永强,韩燕丽,等. 种植密度和施氮水平对谷子产量和农艺性状的影响[J]. 山西农业科学,2023,51(3):264-270. WANG Y H, FAN Y Q, HAN Y L, et al. Effects of planting density and nitrogen application level on the yield and agronomic traits of millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(3): 264-270.
- [23] 秦娜,马春业,朱灿灿,等. 谷子氮高效基因型筛选及相关特性分析[J]. 河南农业科学,2019,48(5):22-29. QIN N, MA C Y, ZHU C C, et al. Screening of foxtail millet genotype with high nitrogen use efficiency and analysis of related characters[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(5): 22-29.
- [24] 刘鑫,田岗,王玉文,等. 施肥量对谷子干物质质量积累及分配的影响[J]. 山西农业科学,2020,48(9):1461-1463,1519. LIU X, TIAN G, WANG Y W, et al. Effect of fertilizer application on accumulation and distribution of mill dry matter[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(9): 1461-1463, 1519.
- [25] 张丽娜,李阳,郭志利,等. 不同品种谷子生长发育及光合水分特性研究[J]. 山西农业科学,2013,41(9):911-913. ZHANG L N, LI Y, GUO Z L, et al. Growth and photosynthetic water characteristics of foxtail millet varieties[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2013, 41(9): 911-913.
- [26] 闫政东,郭平毅,原向阳,等. 叶面喷施氮肥对张杂谷10号光合特性及产量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2018,38(2):37-41. YAN Z D, GUO P Y, YUAN X Y, et al. Effect of foliar application of nitrogen fertilizer on photosynthetic characteristics and yield of foxtail millet cultivar 'Zhangzagu 10' *Setaria italic* (L.) Beauv[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2018, 38(2): 37-41.
- [27] 刘鑫,王振华,李会霞,等. 谷子杂交种与常规种各器官干物质特征比较[J]. 农学学报,2017,7(1):5-11. LIU X, WANG Z H, LI H X, et al. Characteristics comparison of dry matter in various organs between hybrid and conventional millet[J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(1): 5-11.
- [28] 郝科星,李娜娜,候富恩. 氮·磷·钾肥运筹对谷子品质与产量的影响[J]. 安徽农业科学,2016,44(13):51-55. HAO K X, LI N N, HOU F E. Effect of N, P, K fertilizer management on the quality and yield of millet[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(13): 51-55.
- [29] 袁蕊,郝兴宇,胡桃花,等. 施氮对黄化谷子生理特性及品质的影响[J]. 山西农业科学,2020,48(3):335-338,386. YUAN R, HAO X Y, HU T H, et al. Effects of nitrogen application on physiological characteristics and quality of yellowing millet[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(3): 335-338, 386.
- [30] 关瑞,张民,诸葛玉平,等. 控释氮肥一次性基施提高谷子产量和氮素利用率[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(4):639-646. GUAN R, ZHANG M, ZHUGE Y P, et al. Single basal application of controlled release nitrogen fertilizer improve yield and nitrogen use efficiency of foxtail millet[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(4): 639-646.
- [31] 张娣,柴晓娇,沈轶男,等. 不同氮素水平对谷子农艺性状和氮素利用效率的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(1):66-71. ZHANG S, CHAI X J, SHEN Y N, et al. Influences of different nitrogen levels on agronomic traits and nitrogen utilization efficiency of millet[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(1): 66-71.
- [32] 李永虎,曹梦琳,杜慧玲,等. 施肥位置及施肥量对杂交谷子干物质累积、转运和产量的影响[J]. 中国农业科学,2019,52(22):4177-4190. LI Y H, CAO M L, DU H L, et al. Effect of fertilization location and amount on dry matter accumulation, translocation and yield of hybrid millet[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(22): 4177-4190.