

补充灌溉下施肥量及基追比对陕北 高粱干物质积累和产量的影响

赵俊城¹, 曹红霞¹, 任利宇², 张 斌², 艾玉玉³, 李志军¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 陕西崇仁水利工程有限公司, 陕西 西安 710000; 3. 榆林市农业技术服务中心, 陕西 榆林 719000)

摘 要: 针对陕北地区高粱生产中灌溉水资源不足和肥料资源利用率低的问题, 于 2023 年在陕西榆林开展施肥量和基追比二因素田间试验, 研究补灌条件下 3 种施肥量 (标准施肥量, Z100; 80% 标准施肥量, Z80; 60% 标准施肥量, Z60) 结合 3 种基追比 (基肥: 拔节肥: 开花肥=8:1:1, F82; 基肥: 拔节肥: 开花肥=6:2:2, F64; 基肥: 拔节肥: 开花肥=4:3:3, F46) 对高粱干物质积累特性及产量的影响。结果表明: 施肥量和基追比对高粱干物质积累、水分利用效率及产量影响显著 ($P<0.05$)。Z80F46 处理具有明显干物质积累优势, 成熟期 Z80F46 处理干物质积累量较 Z80F82 和 Z80F64 处理分别增加 23.47% 和 11.01%。通过 Logistic 方程拟合发现, Z80F46 处理的干物质最大积累速率较 Z80F82 和 Z80F64 处理分别提升了 22.81% 和 7.67%; 最大积累速率达到时间分别延长了 8.08 d 和 3.24 d; 平均积累速率分别提升了 17.46% 和 43.69%。同时, Z80F46 处理促进干物质向籽粒中积累以及花前花后干物质的转运和同化, 同一基追比条件下, Z80F46 处理成熟期籽粒干物质分配比例与 Z100F46 和 Z60F46 处理相比, 分别增加 29.75% 和 57.12%; 同一施肥量下, Z80F46 处理与 Z80F82 和 Z80F64 处理相比, 花前营养器官干物质转运率分别增加 81.82% 和 10.90%, 花后干物质同化量分别增加 101.71% 和 93.34%。此外, Z80 施肥量与 Z100 和 Z60 施肥量下同一基追比处理相比, 籽粒产量分别增加 28.25%~54.35% 和 42.49%~81.50%; 同一施肥量下, Z80F46 处理与 Z80F82 和 Z80F64 处理相比, 水分利用效率分别提高 25.35% 和 9.25%。综上, 推荐适宜陕北地区高粱种植的滴灌施肥方案为标准施肥量条件下减量 20%, 基肥: 拔节肥: 开花肥调整为 4:3:3。

关键词: 高粱; 施肥量; 基追比; 干物质积累; 产量; 补充灌溉

中图分类号: S514; S36 **文献标志码:** A

Effects of fertilizer application rates and basal-to-topdressing ratios on dry matter accumulation and yield of sorghum under supplementary irrigation in northern Shaanxi

ZHAO Juncheng¹, CAO Hongxia¹, REN Liyu², ZHANG Bin², AI Yuyu³, LI Zhijun¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Shaanxi Chongren Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China; 3. Yulin Agricultural Technology Service Center, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: To address the challenges of insufficient irrigation water and low fertilizer utilization in sorghum production in northern Shaanxi, this study analyzed the effects of different fertilizer application rates and basal-to-topdressing ratios on sorghum dry matter accumulation and yield under supplementary irrigation. In 2023, a field experiment with two factors of fertilizer application rates and basal-to-topdressing ratios in Yulin, Shaanxi was conducted. The study adopted three fertilizer application rates (standard fertilizer application rate, Z100; 80% standard fertilizer application rate, Z80; 60% standard fertilizer application rate, Z60) combining with three basal-to-topdressing ratios (base fertilizer: jointing fertilizer: flowering fertilizer=8:1:1, F82; base fertilizer: jointing fertilizer: flowering fertilizer=6:2:2, F64; base fertilizer: jointing fertilizer: flowering fertilizer=4:3:3, F46). The results showed that fertilizer application rates and basal-to-topdressing ratios significantly affected sorghum dry matter accumulation, water use efficiency, and yield ($P<0.05$). The Z80F46 treatment showed a significant advantage in dry matter accumulation, with the mature Z80F46 treatment dry matter accumulation increasing by 23.47% and 11.01% compared to Z80F82 and Z80F64 treatments, respectively. Through Logistic equation fitting, it was found that the maximum dry matter accumulation rate of Z80F46 treatment increased by 22.81% and 7.67% compared to Z80F82 and Z80F64 treatments, respectively; the time to reach the maximum accumulation rate was extended by 8.08 d and 3.24 d, respectively; the average accumulation rate increased by 17.46% and 43.69%, respectively. At the same basal-to-topdressing ratio, the Z80F46 treatment promoted dry matter accumulation in the grain and the transfer and assimilation of dry matter before and after flowering. Under the same basal-to-topdressing ratio, the Z80F46 treatment increased the dry matter transfer rate of reproductive organs by 29.75% and 57.12% compared to Z80F82 and Z80F64 treatments, respectively. Under the same fertilizer application rate, the Z80F46 treatment increased the dry matter transfer rate of reproductive organs by 81.82% and 10.90% compared to Z80F82 and Z80F64 treatments, respectively, and the dry matter assimilation after flowering increased by 101.71% and 93.34%, respectively. In addition, the Z80 fertilizer application rate increased the grain yield by 28.25%~54.35% and 42.49%~81.50% compared to Z100 and Z60 fertilizer application rates, respectively. Under the same fertilizer application rate, the Z80F46 treatment increased the water use efficiency by 25.35% and 9.25% compared to Z80F82 and Z80F64 treatments, respectively. In conclusion, the recommended drip irrigation fertilization scheme for sorghum in northern Shaanxi is to reduce the standard fertilizer application rate by 20%, and adjust the base fertilizer: jointing fertilizer: flowering fertilizer to 4:3:3.

收稿日期: 2024-06-19

修回日期: 2024-09-26

基金项目: 陕西省重点产业链-农业领域项目 (2023-ZDLNY-46)

作者简介: 赵俊城 (1999-), 男, 四川乐山人, 硕士研究生, 研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: zhaojuncheng@nwafu.edu.cn

通信作者: 曹红霞 (1971-), 女, 新疆五家渠人, 教授, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: nschx225@nwafu.edu.cn

F46). The fertilizer application rate and basal-to-topdressing ratio had a significant effect on dry matter accumulation, water use efficiency and yield of sorghum ($P<0.05$). The Z80F46 treatment had a significant advantage in dry matter accumulation. At maturity, the dry matter accumulation of the Z80F46 treatment was 23.47% and 11.01% higher than that of the Z80F82 and Z80F64 treatments, respectively. Logistic equation fitting found that the maximum dry matter accumulation rate of the Z80F46 treatment was 22.81% and 7.67% higher than that of the Z80F82 and Z80F64 treatments, respectively; the time to reach the maximum accumulation rate was extended by 8.08 days and 3.24 days, respectively; and the average accumulation rate was increased by 17.46% and 43.69%, respectively. At the same time, the Z80F46 treatment promoted the accumulation of dry matter in the grains and the transport and assimilation of dry matter before and after flowering. Under the same basal-to-topdressing ratio conditions, the proportion of dry matter allocated to grains at maturity in the Z80F46 treatment was 29.75% and 57.12% higher than that in the Z100F46 and Z60F46 treatments, respectively. Under the same fertilization amount, compared with the Z80F82 and Z80F64 treatments, the Z80F46 treatment demonstrated an 81.82% and 10.90% enhancement in pre-anthesis dry matter transport rate of vegetative organs, along with 101.71% and 93.34% increments in post-anthesis dry matter assimilation, respectively. In addition, compared with the same basal-to-topdressing ratio treatment under Z100 and Z60 fertilization rates, the grain yield under Z80 fertilization rate increased by 28.25% to 54.35% and 42.49% to 81.50%, respectively. Under the same fertilization rate, compared with Z80F82 and Z80F64 treatments, the water use efficiency of Z80F46 treatment increased by 25.35% and 9.25%, respectively. In conclusion, the recommended drip irrigation and fertilization strategy for sorghum cultivation in the northern Shaanxi region involves reducing the standard fertilization rate by 20% and adjusting the ratio of base fertilizer, jointing fertilizer, and flowering fertilizer to 4 : 3 : 3.

Keywords: sorghum; fertilizer application rate; basal-to-topdressing ratio; dry matter accumulation; yield; supplementary irrigation

高粱(*Sorghum bicolor* L. Moench)是全球主要的粮食和饲料作物,为仅次于小麦、水稻、玉米和大麦的第五大禾谷类作物,因其有较强的耐旱性,广泛种植于干旱半干旱地区^[1]。陕北地区具有光照充足、温差较大、无霜期短等气候优势,是高粱的理想种植区域,但该区水资源短缺情况严重,降雨与作物需水存在时间错位^[2]。为解决雨养农业“靠天吃饭”的问题,减轻干旱胁迫对作物生长发育产生的负面效应,陕北地区对高粱作物采取限量补灌策略,即将有限水资源分配至作物需水关键期,最大程度上节约水资源并稳定作物产量^[3]。而限量补灌理论与膜下滴灌技术的结合,则为陕北高粱实现水肥一体化提供了条件。目前,当地高粱种植中仍存在肥料利用率低、重基肥轻追肥等问题,从而导致肥料资源的浪费。在当前有关高粱限量补灌的研究基础上,如何进一步调整施肥量和基追比例,进而提高水肥利用效率、减少水肥投入,是当地杂粮产业发展亟待解决的问题。

合理的施肥量及基追比例对于作物增产、减肥增效起着至关重要的作用^[4]。干物质是作物生长及产量形成的物质基础,其积累、分布及器官间的转运与产量形成密切相关^[5]。提高干物质的积累

以及同化物向籽粒中的转运能力、协调源库关系是提高高粱产量的有效途径。有研究表明适量施氮能有效协调干物质的积累与转运^[6]。Marsalis 等^[7]研究表明,有限灌溉条件下,减少 25% 氮肥投入量仍能使高粱干物质质量保持较高水平。另外,适宜施肥量结合适当施肥时期进行追施,能显著提高土壤养分水平,满足作物关键时期养分需求^[8]。李青凤等^[9]试验结果表明,在高粱拔节期、抽穗期、开花期分别追施总肥量的 20%、50%、30% 可显著提高高粱干物质总量和氮素吸收总量。与此同时,调整基肥与追肥比例可提高花后干物质积累量,促进营养器官干物质向籽粒中转运,实现氮素利用效率和施肥效益的提高^[10]。

目前关于高粱最佳施肥量及追肥时期已有较多报道,但是在限量补灌条件下,施肥量及基追比对高粱干物质积累特性和产量形成的影响尚不清晰,从而无法合理确定其最优施肥策略。为明确陕北地区高粱补灌条件下的最优施肥策略,基于课题组已有成果,通过对当地标准施肥量进行减量调整并设置不同基追比例,研究施肥量及基追比下高粱干物质积累规律和产量构成,以期优化该地区补充灌溉下的施肥制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

于 2023 年在榆林市国家现代农业科技示范区 (109°21'E,37°56'N)进行。该地属干旱半干旱大陆性季风气候,年平均降雨量 371 mm,年蒸发量 1 900 mm,年均气温 8.6℃,无霜期 167 d。该区域光照充沛,地势平坦,供试土壤为黄绵土,肥力水平中等。试验地 0~20 cm 土壤容重为 1.50 g·cm⁻³,田间持水量为 20.79%,pH 值为 8.2,有机质含量为 7.18 g·kg⁻¹,硝态氮含量为 2.44 mg·kg⁻¹,铵态氮含量为 12.17 mg·kg⁻¹,全氮含量为 1.09 g·kg⁻¹,有效磷含量为 14.65 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 78 mg·kg⁻¹。2023 年试验期间总降雨量为 153.00 mm,显著低于多年平均降雨量。全生育期日平均温度及降雨量见图 1。

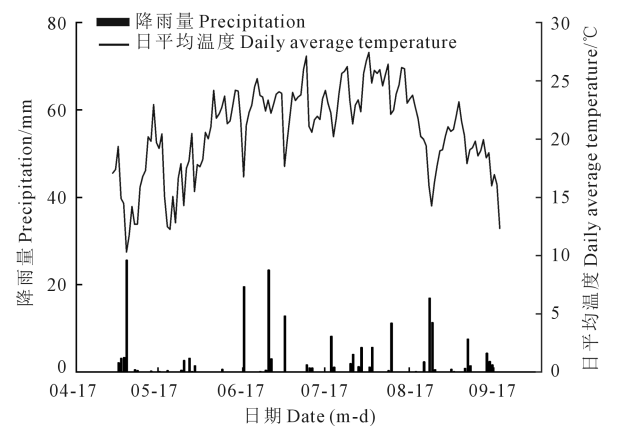


图 1 2023 年试验地高粱全生育期日平均温度与日降雨量
Fig.1 Daily average temperature and daily rainfall of sorghum throughout the entire growth period in the experimental site in 2023

1.2 试验设计

试验采用二因素裂区设计,其中施肥量为主区、基追比为副区。施肥量设置 3 个梯度,分别为标准施肥量的 100% (Z100)、80% (Z80) 和 60% (Z60);标准施肥量为陕北高粱雨养条件下当地常规施肥量(N 150 kg·hm⁻²,P₂O₅ 75 kg·hm⁻²,K₂O 75 kg·hm⁻²)。基追比设置 3 种比例,分别为基肥:拔节肥:开花肥=8:1:1(F82)、基肥:拔节肥:开花肥=6:2:2(F64)和基肥:拔节肥:开花肥=4:3:3(F46)。试验小区面积 40 m²(8 m×5 m),采用 1 膜 1 管 2 行膜下滴灌种植模式,膜间行距 60 cm,膜内行距 40 cm,株距 20 cm 进行布置,每穴留苗 1 株,种植密度为 10 万株·hm⁻²。

各处理所用肥料种类一致且均为水溶性肥,氮肥为尿素(N 占比 46.2%),磷肥为磷酸二铵(P₂O₅和 N 分别占比 46%和 18%),钾肥为硝酸钾(K₂O和 N 分别占比 60%和 13.5%)。供试品种为‘晋杂 22 号’,播种日期为 2023 年 5 月 14 日,收获日期为 2023 年 9 月 14 日。根据本课题组 2022 年陕北高粱补灌试验结果,将拔节期和开花期补灌量定为 15 mm。基肥在播种前进行均匀撒施并旋耕,追肥采用滴灌水肥一体化随水施入,灌溉、除草、除虫等其他管理同当地大田生产。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质积累 在高粱生长阶段的苗期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期 5 个生育期,各小区随机选取长势均匀有代表性的 3 株高粱,将植株各部位按叶、茎鞘、穗(苗期、拔节期、开花期)及叶、茎鞘、穗轴+颖壳、籽粒(灌浆期和成熟期)等分离,分别放入带有标签的档案袋,再置于烘箱内 105℃杀青 30 min,随后 85℃烘干至恒重,测得各部位干物质积累量。

通过 Logistic 方程回归分析拟合高粱干物质积累动态情况,并根据公式计算干物质积累过程的最大干物质积累速率及最大干物质速率出现时间:

$$Y = k / (1 + ae^{-bt}) \tag{1}$$

式中,Y 为干物质积累量(g·株⁻¹);k 为理论最大干物质积累量(g·株⁻¹);t 为高粱生长天数(d);a、b 为相关参数。该方程求一阶导数,可得到干物质积累速率方程:

$$V = kabe^{-bt} / (1 + ae^{-bt})^2 \tag{2}$$

通过公式(1)和(2),推导出干物质积累速率最大值 V_{max},达到积累速率最大值所出现时间 T_{max} 以及平均积累速率 V_{mean},公式如下:

$$V_{max} = (k \times b) / 4 \tag{3}$$

$$T_{max} = (\ln a) / b \tag{4}$$

$$V_{mean} = k / t \tag{5}$$

1.3.2 干物质转运及同化 参照 Gao 等^[11]的方法,计算以下指标:

花前营养器官干物质转运量(DMR)(g·株⁻¹) = 开花期营养器官干物质积累量-成熟期营养器官干物质积累量

花前营养器官干物质转运率(DMRE)(%) = (营养器官干物质转运量/开花期营养器官干物质积累量)×100%

花前干物质对籽粒贡献度(DMRCC)(%) = (花前营养器官干物质转运量/成熟期籽粒干物质积累量)×100%

花后干物质同化量 (DMA) ($\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$) = 成熟期干物质质量 - 开花期干物质质量 (9)

花后干物质对籽粒的贡献度 ($DMAC$) (%) = 1 - 花前干物质对籽粒贡献度 (10)

1.3.3 耗水量及水分利用效率 高粱生育期耗水量采用水量平衡方程计算:

$$ET = P + I + \Delta W + K - R - D$$
 (11)

式中, ET 为高粱全生育期耗水量 (mm); P 为有效降雨量 (mm); I 为灌溉量 (mm); ΔW 为播种前及收获后 0~120 cm 土层储水量差值 (mm); K 为地下水补给量 (mm); R 为地表径流 (mm); D 为深层渗漏量 (mm)。根据试验地具体情况, 式中 K 、 R 、 D 忽略不计。

水分利用效率的计算公式为:

$$WUE = GY / ET$$
 (12)

式中: WUE 为水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); GY 为籽粒产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.4 产量 成熟期每个小区取 5 m^2 调查穗数, 收获后自然风干, 脱粒后称重, 计算产量; 随机选取 1 000 粒测千粒重, 重复 3 次。

1.4 数据分析

通过 Excel 和 SPSS 进行数据处理与分析, 利用 SPSS 中的单因素 ANOVA 检验进行显著性分析; 通过一般线性模型进行多因变量方差分析, 比较单个因素的主效应以及双因素交互效应; 使用 Origin

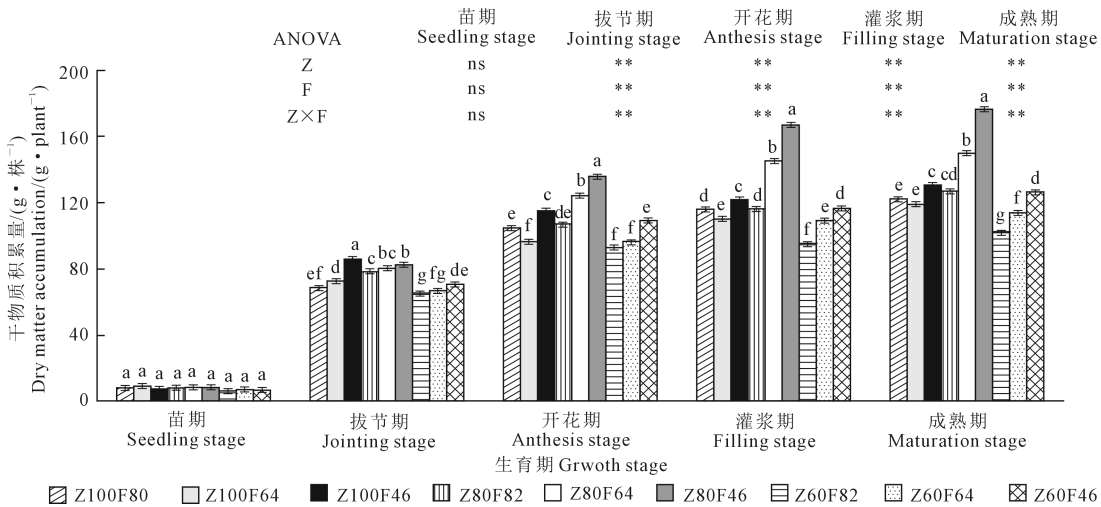
2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 高粱干物质积累动态及拟合分析

2.1.1 干物质积累动态 高粱干物质积累动态如图 2 所示, 施肥量和基追比及其交互作用均极显著影响拔节期后各生育期干物质积累 ($P < 0.01$)。总体来看, 高粱地上部干物质积累量随着生育期的进程呈现逐渐增加的趋势, 各处理趋势基本一致。苗期各处理间干物质积累量差异不显著 ($P > 0.05$)。拔节期后各处理间开始出现差异 ($P < 0.05$), 基本趋势表现为 $Z80 > Z100 > Z60$, 即随着施肥量的降低, 干物质积累量呈现先增加后减少的趋势。成熟期 $Z80$ 施肥量下干物质积累量, 与 $Z100$ 和 $Z60$ 相比, 分别提高 3.69%~34.94% 和 24.12%~39.52%。

$Z100$ 施肥量下, 拔节期干物质积累量表现为 $F46 > F64 > F82$, 拔节期后表现为 $F46 > F82 > F64$; $Z80$ 、 $Z60$ 施肥量下, 拔节期后的干物质积累量均随着追肥比例的增加而增加。 $Z80$ 施肥量下, 拔节期后 $F46$ 处理干物质积累量显著高于 $F82$ 、 $F64$ 处理, 开花期 $Z80F46$ 处理干物质积累量较 $Z80F82$ 和 $Z80F64$ 处理分别增加了 26.96% 和 9.29%; 成熟期分别增加了 23.47% 和 11.01%。以上结果表明, 标准施肥量条件下减量 20% 并提高追肥比例有利于高粱拔节期后地上部干物质积累。



注: 图中不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。ANOVA 方差分析中, Z 表示施肥量, F 表示基追比, ns 表示无显著性差异, * 和 ** 分别表示相关性达到显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 水平。下同。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between different treatments at the same growth stage, with a significance level of $P < 0.05$. In ANOVA analysis of variance, Z represents the fertilizer application rate, F represents the basal-topdressing ratio, ns means non-significant, * and ** indicate significant ($P < 0.05$) and extremely significant ($P < 0.01$) levels of correlation, respectively. The same below.

图 2 高粱各生育期干物质积累量

Fig.2 Dry matter accumulation dynamics in sorghum at different growth stages

2.1.2 基于 Logistic 方程的干物质拟合分析 高粱不同处理下干物质动态积累随生育天数的变化均能使用 Logistic 方程进行回归分析,并且拟合效果较好 ($R^2>0.99$),具体见表 1。可知高粱干物质的最大积累速率、最大积累速率达到时间及平均积累速率均随施肥量的减少呈先增加后减少的趋势。回归方程表明,Z80 施肥量显著提高高粱理论最大干物质积累量,与 Z100、Z60 相比,增长幅度分别为 1.23%~38.43%和 22.51%~42.79%。最大积累速率、最大积累速率达到时间及平均积累速率也呈现相同变化趋势,Z80 施肥量下最大积累速率与 Z100、Z60 施肥量相比,提升幅度分别为 3.23%~36.19%和 7.38%~28.52%;最大积累速率到达时间延长幅度分别为 5.74%~13.55%和 0.83%~7.30%;平均积累速率提升幅度分别为 0.98%~38.32%和 22.62%~43.69%。

Z100、Z60 施肥量下,F46 处理的最大积累速率及平均积累速率显著高于 F82、F64 处理;Z80 施肥量下,各指标均随追肥比例的增加而显著增加。Z80F46 处理的干物质最大积累速率较 Z80F82 和 Z80F64 处理,分别提升了 22.81%和 7.67%;最大积累速率达到时间分别延长了 8.08 d 和 3.24 d;平均积累速率分别提升了 17.46%和 43.69%。上述结果表明,在标准施肥量条件下减量 20%并提高追肥比例能显著提高高粱干物质的理论最大干物质积累量、最大积累速率及平均积累速率,延长干物质积累的天数。

2.2 高粱干物质分配及转运

2.2.1 高粱灌浆期及成熟期干物质分配 灌浆期及成熟期各部位干物质积累量与分配比例见图 3。总体来看,灌浆期及成熟期各部位干物质积累量及分配比例基本表现为茎鞘>籽粒>叶片>穗轴+颖壳。施肥量和基追比及其交互作用对灌浆期和成熟期茎鞘和籽粒部位的干物质积累量影响极显著 ($P<0.01$)。从灌浆期和成熟期籽粒部位干物质积累量来看,Z80 施肥量显著高于 Z100、Z60 施肥量,且随着追肥比例的增加而增加。Z80 施肥量与 Z100、Z60 相比,灌浆期籽粒干物质质量增长幅度分别为 1.35%~127.12%和 112.89%~151.02%;Z80 施肥量下,与 Z80F82 处理相比,成熟期 Z80F64 和 Z80F46 处理的籽粒干物质质量分别增加了 92.40%和 146.31%。

施肥量和基追比及其交互作用对灌浆期和成熟期茎鞘、叶片及籽粒部位的干物质分配比例影响极显著 ($P<0.01$)。成熟期各部位干物质分配比例呈现与干物质积累量相同趋势,同一基追比条件

下,Z80F46 处理籽粒干物质分配比例与 Z100F46 和 Z60F46 处理相比,分别增加 29.75%和 57.12%;同一施肥量条件下,Z80F46 处理籽粒干物质分配比例与 Z80F82 和 Z80F64 处理相比,分别增加 60.93%和 18.36%。从灌浆期至成熟期各部位干物质分配比例对比来看,高粱茎鞘及叶片部位干物质分配比例显著降低,而籽粒分配比例显著增加。成熟期 Z80 施肥量下各处理茎鞘分配比例与灌浆期相比降低了 5.76%~7.45%;叶片分配比例降低了 7.32%~29.02%;而籽粒分配比例增加了 7.13%~27.66%。以上结果表明,在标准施肥量条件下减量 20%并提高追肥比例,可显著提高灌浆期和成熟期高粱籽粒部位干物质积累量及分配比例。

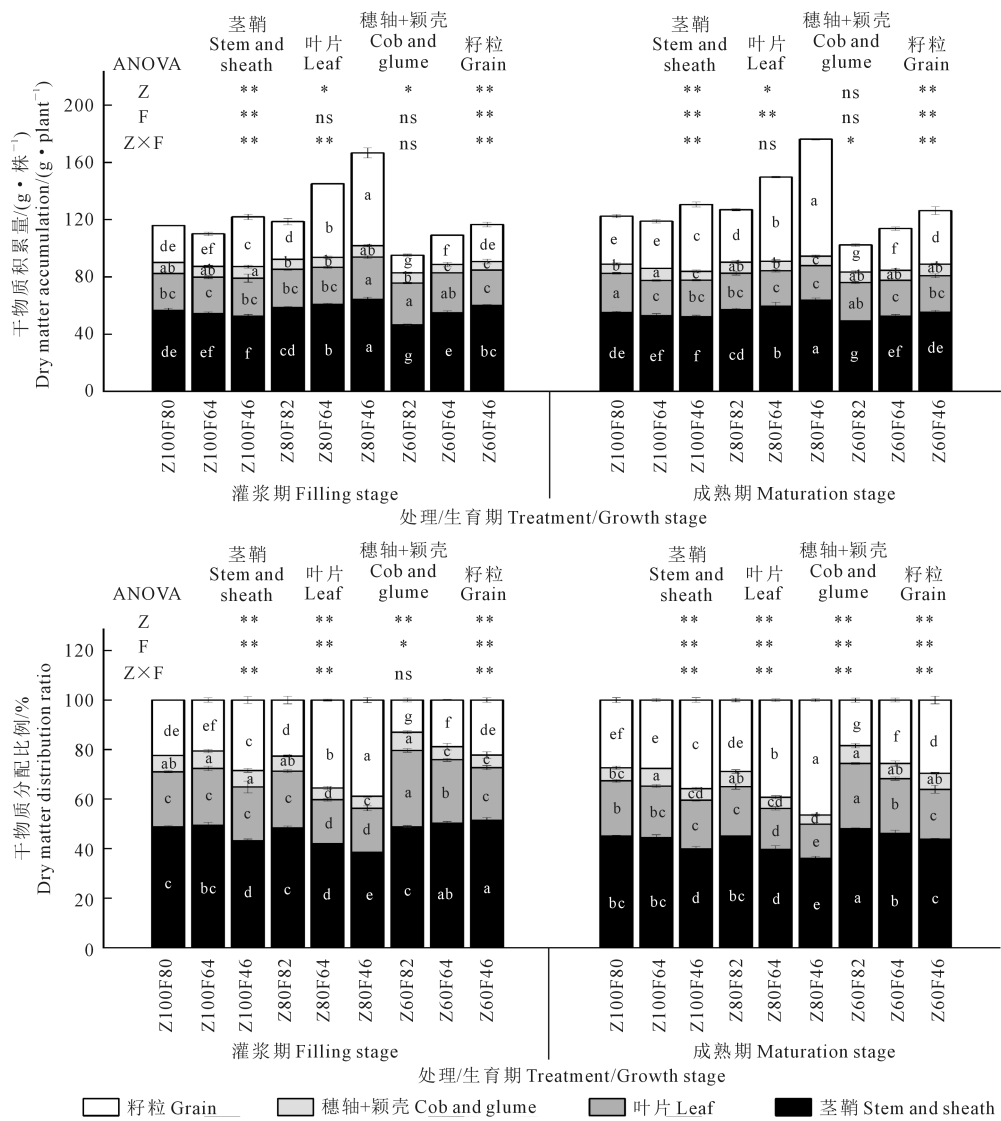
2.2.2 高粱花前干物质转运与花后干物质同化 不同处理对高粱开花前后干物质转运及同化的影响见表 2。施肥量和基追比及两者交互作用对高粱开花前后各指标影响均极显著 ($P<0.01$)。同一基追比下减量施肥,DMR、DMRE 及 DMA 均随施肥量的减少表现为先增加后减少的趋势,以 Z80 施肥量最高。Z80 施肥量与 Z100 和 Z60 相比,DMR 分别增加了 45.85%~287.73%和 44.47%~83.50%;DMA 分别增加了 4.05%~164.83%和 20.37%~138.47%。除 Z100 施肥量外,Z80 和 Z60 处理下的 DMR、DMRE、DMA 均随追肥比例的增加而增加。Z80 施肥量下,Z80F46 处理与 Z80F82 和 Z80F64 处理相比,其 DMRE 和 DMA 分别增加 81.82%和 10.90%,101.71%和 93.34%。

表 1 高粱干物质积累回归方程及特征值
Table 1 Regression equation and characteristic value of sorghum dry matter accumulation

处理 Treatment	回归方程 Regression equation	$V_{\max}$ /(g·d ⁻¹)	$T_{\max}$ /d	V_{mean} /(g·d ⁻¹)	R^2
Z100F82	$y = 119.99 / (1 + 507.58e^{-0.10t})$	3.10	60.30	1.02	0.999
Z100F64	$y = 111.30 / (1 + 142.08e^{-0.10t})$	2.68	58.33	0.97	0.995
Z100F46	$y = 125.86 / (1 + 867.72e^{-0.12t})$	3.74	56.96	1.07	0.998
Z80F82	$y = 121.47 / (1 + 450.31e^{-0.11t})$	3.20	57.98	1.03	0.996
Z80F64	$y = 148.45 / (1 + 431.30e^{-0.10t})$	3.65	61.68	1.26	0.999
Z80F46	$y = 174.23 / (1 + 347.82e^{-0.09t})$	3.94	64.68	1.48	0.999
Z60F82	$y = 99.15 / (1 + 1006.69e^{-0.12t})$	2.98	57.50	0.84	0.998
Z60F64	$y = 111.76 / (1 + 428.39e^{-0.10t})$	2.84	59.76	0.95	0.999
Z60F46	$y = 122.02 / (1 + 961.30e^{-0.11t})$	3.48	60.28	1.03	0.997

注: $V_{\max}$, 干物质最大积累速率; $T_{\max}$, 干物质最大积累速率达到时间; V_{mean} , 干物质平均积累速率。

Note: $V_{\max}$, maximum accumulation rate of dry matter; $T_{\max}$, the time when the maximum accumulation rate of dry matter reaches; V_{mean} , average accumulation rate of dry matter.



注:图中不同小写字母表示高粱各部位在同一生育期处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the figure indicate significant differences ($P<0.05$) between treatments in different parts of the same reproductive period.

图 3 灌浆期及成熟期高粱植株各部位干物质积累量及分配比例

Fig.3 Accumulation and distribution ratio of dry matter in various parts of sorghum during the filling and maturity stages

不同施肥量条件下,DMRCG 的均值表现为 Z60>Z80>Z100;DMAC 的均值表现为 Z100>Z80>Z60,这说明施肥量可以调节开花前后干物质转运、同化及对籽粒的贡献度。相同处理下,DMAC 显著高于 DMRCG。Z80F64 和 Z80F46 处理的 DMAC 与 DMRCG 相比,分别增加了 47.83%和 124.68%,说明籽粒干物质质量的积累更依赖于花后干物质的同化量。上述结果表明,花后干物质同化量对籽粒的贡献度高于花前干物质的转运;标准施肥量条件下减量 20%并提高追肥比例能有效提高高粱花前干物质转运量及转运率,促进花后干物质的同化。

2.3 高粱籽粒产量及水分利用效率

不同处理对高粱籽粒产量及水分利用效率的影响见表 3。由表 3 可知,施肥量和基追比对千粒

重、籽粒产量、总耗水量及水分利用效率均有极显著影响,两者交互效应对籽粒产量和水分利用效率影响极显著。同一基追比条件下减量施肥,各指标均表现为随施肥量的减少呈现先增加后减少的趋势,即 Z80>Z100>Z60。Z80 施肥量与 Z100、Z60 相比,千粒重分别增加了 7.55%~11.09%和 12.27%~16.24%;籽粒产量分别增加了 28.25%~54.35%和 42.49%~81.50%;总耗水量分别增加 0.61%~1.86%和 2.21%~2.90%,水分利用效率分别增加 19.17%~32.94%和 38.39%~46.30%。

同一施肥量下,F46 处理的千粒重、总耗水量显著高于 F82 和 F64 处理,且籽粒产量和水分利用效率随追肥比例增加而显著增加。Z80 施肥量下,与 Z80F46 处理相比,Z80F82 和 Z80F64 处理的千粒重

分别降低了 3.57% 和 2.40%, 总耗水量分别减少了 1.70% 和 0.83%; 与 Z80F82 和 Z80F64 处理相比, Z80F46 处理下的籽粒产量分别增加了 27.42% 和 10.17%, 水分利用效率分别增加了 25.35% 和 9.25%。以上结果表明, 适当减少施肥量并提高拔节期和开花期追肥比例能显著提高高粱千粒重, 促进籽粒产量的形成, 进而获得较高的水分利用效率。

表 2 不同处理下高粱开花前后营养器官干物质转运及同化
Table 2 Dry matter transport and assimilation in nutrient organs of sorghum before and after flowering under different treatments

处理 Treatment	花前 Pre-anthesis			花后 Post-anthesis	
	DMR	DMRE	DMRCG	DMA	DMAC
	/(g · plant ⁻¹)	/%	/%	/(g · plant ⁻¹)	/%
Z100F82	7.06e	7.89e	21.08e	17.63cd	78.92a
Z100F64	5.46e	6.58e	16.64e	22.67b	83.36a
Z100F46	17.29c	18.20b	36.98bc	15.32d	63.02cd
Z80F82	11.53d	12.25cd	31.46cd	20.11bc	68.54bc
Z80F64	21.17b	20.08ab	40.35ab	20.98bc	59.65de
Z80F46	25.22a	22.27a	30.80d	40.56a	69.20b
Z60F82	7.98e	9.49de	42.22ab	9.50e	57.78de
Z60F64	11.54d	12.92c	39.53ab	17.43cd	60.47de
Z60F46	16.80c	17.21b	44.91a	17.01cd	55.09e
F 值 F value					
Z	597.70**	56.81**	74.53**	79.84**	74.53**
F	303.32**	91.45**	10.77**	35.29**	10.77**
Z×F	77.14**	10.70**	19.43**	36.27**	19.43**

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。方差分析中, Z 表示施肥量, F 表示基追比。ns 表示无显著差异; * 和 ** 分别表示显著性差异水平为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments in the same column ($P<0.05$). In the analysis of variance, Z represents the feiltizer application rate, F represents the basal-topdressing ratio. ns means non-significant, * and ** indicate significant levels of $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

表 3 不同处理对高粱籽粒产量及水分利用效率的影响
Table 3 Effects of different treatments on sorghum grain yield and water use efficiency

处理 Treatment	千粒重 1000-kernel weight/g	籽粒产量 Grain yield /(kg · hm ⁻²)	总耗水量 ET /mm	水分利用效率 WUE /(kg · m ⁻³)
Z100F82	25.32de	2086.25e	254.99d	0.82e
Z100F64	25.56d	2156.18e	257.08cd	0.84de
Z100F46	26.16c	2510.79c	262.46a	0.96c
Z80F82	27.16b	2527.19c	259.58bc	0.97c
Z80F64	27.47b	2922.82b	261.87ab	1.12b
Z80F46	28.13a	3220.07a	264.06a	1.22a
Z60F82	24.20f	1774.12g	252.28f	0.70g
Z60F64	24.50f	1953.18f	254.71df	0.76f
Z60F46	25.06e	2259.90d	258.36c	0.87d
F 值 F value				
Z	382.67**	977.29**	57.86**	718.54**
F	34.29**	333.02**	47.00**	41.62**
Z×F	0.09 ns	12.33**	1.36 ns	9.84**

3 讨 论

3.1 施肥量和基追比对干物质动态积累的影响

干物质积累是产量形成的基础^[12]。本研究表明, 同一基追比条件下, 高粱拔节期后干物质积累量随施肥量的降低呈现先增加后减少的趋势。石祖梁等^[13]研究表明, 相同基追比条件下, 小麦开花期和成熟期干物质积累量均随施氮量的增加而增加, 这与本研究结果有一定出入。这可能是因为本试验以补充灌溉为前提, 灌溉量一定条件下, 高施肥量会加重干旱胁迫对作物的影响, 进而影响干物质的积累; 低施肥量会严重影响叶片生长发育, 使光合速率下降, 最终影响光合产物的积累^[14]。合理施肥通过促进植株根系生长来提高养分吸收效率, 延缓作物叶片功能期及光合作用期, 进而提高作物干物质积累能力^[15]。本研究还表明, 拔节期后, Z80 施肥量下干物质积累量随追肥比例的增加而增加。这是因为高粱不同生育阶段对养分吸收的利用特性不同, 拔节期是高粱新陈代谢及营养生长旺盛的时期; 开花期是高粱营养及生殖生长并进的关键时期^[16]。提高该时期的追肥比例, 可满足高粱此阶段对养分的需求, 为高粱生长发育提供充足物质基础; 此外, 合理的水肥配置可以进一步促进水肥耦合效应, 相互补偿水或肥某一个因素缺乏造成的影响^[17]。减量施肥下通过对基追比进行调整可进一步优化有限灌水量下的水肥耦合效应, 通过调节作物根系环境及对土壤中养分的吸收利用, 在一定程度上缓解水分胁迫对植物抗氧化系统的伤害, 维持物质积累的稳定进行^[18]。

Logistic 方程能对干物质动态积累过程进行准确拟合分析。本研究结果表明, 减量施肥 20% 并提高追肥比例, 能显著提升干物质积累的最大积累速率及平均积累速率, 延长干物质积累的天数。尚永盼等^[19]通过对玉米干物质积累过程进行 Logistic 拟合分析发现, 干物质积累量与干物质积累最大速率及平均增长速率呈正相关关系。赵姣等^[20]通过构建 Logistic 方程模型发现, 冬小麦产量形成与干物质最大积累速率呈正相关, 积累速率越大则产量越高。这是因为提高高粱生育中后期的追肥比例, 可以缓解生育期养分不足对高粱生长发育的限制, 延长绿叶面积持续时间, 改善作物光合特性^[19], 进而提升干物质积累最大速率及平均速率, 促进地上部干物质的积累。Du 等^[21]研究同样表明合理施氮可延缓穗叶衰老时间, 使穗叶中的干物质及氮素转运效率保持较高水平, 进而延长干物质积累的天数,

为作物实现高产提供可能。可见,合理施肥并提高追肥比例可持续维持较高的干物质积累速率,延长达到最大干物质积累速率的时间,从而提高干物质积累量和产量。

3.2 施肥量和基追比对干物质分配及转运的影响

干物质的积累和分配是作物器官分化和产量形成的前提,合理施肥可利于穗部干物质积累,促进营养器官和生殖器官分配协调^[22]。本试验结果表明,Z80 施肥量下其籽粒部位干物质积累量及分配比例显著高于 Z100 和 Z60 施肥量。戴明宏等^[23]研究表明,不同施氮条件下,减量施氮可提高春玉米生育后期籽粒部位干物质积累量,这与本试验研究结果一致。这是因为减量施肥能够协调植株水氮代谢,促进光合作用,进而能更好地促进营养器官碳水化合物向籽粒中的转运,协调库源关系^[24]。肥量供应不足会导致营养器官干物质积累量过低,进而限制籽粒物质积累;而过量施肥会使营养生长和生殖生长之间的平衡向过度营养发育转变,从而推迟植物成熟并降低籽粒物质分配比例^[23]。本研究还表明,成熟期 Z80 施肥量下,籽粒干物质积累量及分配比例均随追肥比例的增加而增加,Z80F46 处理最优。这是因为适当提高追肥比例可以促进营养器官的干物质向穗部和籽粒中转运,有效提高籽粒干物质分配比例,更有利于高粱产量的形成。另外,在本试验中,从灌浆期至成熟期,高粱茎鞘及叶片部位的干物质分配比例均大幅降低,而籽粒分配比例显著增加 7.13%~27.66%,这与胡向尚等^[25]研究所取得的趋势基本一致。这是因为在作物生育后期茎鞘及叶片能作为“源”输出干物质,使得干物质的分配中心不断向籽粒转移,进而降低茎鞘及叶片分配比例,提高籽粒分配比例。本研究结果表明,灌浆期和成熟期各处理茎鞘分配比例均大于籽粒分配比例。而赵德明等^[26]研究表明,小麦花后各器官干物质分配比例为籽粒>茎鞘>叶片。这可能是因为试验期间作物受干旱胁迫影响严重,使高粱生殖生长阶段碳水化合物向籽粒部位转运下降,进而影响茎鞘与籽粒的分配比例大小。

花前干物质转运及花后干物质同化共同决定着籽粒干物质质量^[27]。优化施肥量和基追比对干物质积累及转运有显著的调节作用。本试验花前转运量以及花后同化量均随着施肥量的减少呈现先增加后减少的趋势。张磊等^[28]研究表明,当施氮水平低于 $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,玉米干物质转运量、转运率及对籽粒贡献度随着施氮量的增加而增加,当超过这个范围则呈下降趋势,这与本试验结果一致。这

是因为适量施肥有利于源器官干物质向库器官籽粒中转运,但过量施肥会造成营养器官过剩,使同化物转运能力下降,进而影响产量形成^[29]。本试验结果表明,在 Z80 施肥量下,提高追肥比例能显著促进花前干物质转运量、转运率及花后干物质同化量。有研究表明,提高追肥比例可使后期养分充分供应,显著提高花后干物质积累及成熟期营养物质向籽粒中的转运分配,通过提高籽粒干物质质量进而实现高产^[30]。也有研究表明,相同施氮量下,花后干物质积累量及其对籽粒贡献度随追肥比例的增加持续下降^[10]。这可能与土壤基本理化性质、肥力、环境、品种等有关,并且灌水量不同也会对追肥效果产生不同的影响,进而影响开花前后干物质的转运及同化。

3.3 施肥量和基追比对产量及水分利用效率的影响

调整施肥量和基追比对提高作物产量、减少环境问题起着至关重要的作用。已有研究表明,减量施肥可维持作物产量和土壤肥力,通过减少肥料用量来显著提高水肥利用效率^[31]。本试验研究表明,高粱千粒重及产量随着施肥量的降低呈先增加后降低、随追肥比例增加而增加的趋势,与前人研究结果相似。李怀胜等^[32]研究表明,与常规施肥相比,化肥减量可显著提高氮素农学效率,使冬小麦增产幅度达 36.8%。合理调整基追比例,同样可显著改善作物产量及品质。刘昕萌等^[33]研究表明,相同施氮量下适量提高玉米拔节期和开花期追肥比例可提高玉米后期氮素积累量,对提高玉米产量及产量构成要素具有积极意义。这是因为补充灌溉下减量施肥 20% 并提高追肥比例,显著提高了高粱生育中后期的干物质积累量,促进开花前后干物质向籽粒转运及同化,进而为产量的形成提供了充足的物质基础。

合理灌水与施肥不仅能保证产量,还能减少水肥投入,提高水肥利用效率^[34]。本试验中,总耗水量及水分利用效率均随施肥量的减少呈先增加后减少的趋势。吴立峰等^[35]研究表明,相同灌水水平下,棉花的水分利用效率随施肥水平呈抛物线变化趋势。张雅琦等^[36]研究表明,适量施氮可以显著提高杂交谷子水分利用效率,高量施氮增产不显著且水分利用效率较低。这与本试验研究结果一致。由此说明,肥料的增产作用不仅在于施肥量,更重要的是在于实现“肥水互促”。在本试验限量灌溉条件下,适量施肥能够改善水分状况,缓解干旱条件下水分胁迫而造成减产的不利影响,促进高粱对

水分和养分的吸收,进而提高产量及水分利用效率^[37]。本试验结果还表明,耗水量与水分利用效率在同一施肥量下,随追肥比例的增加而增加。究其原因是补充灌溉下减量施肥并提高追肥比例能显著促进高粱的生长发育及产量形成,进而提高作物耗水量和水分利用效率。

4 结 论

陕北地区高粱补充灌溉条件下,减量施肥 20% 并提高拔节期和开花期追肥比例,可显著地提高干物质积累的最大积累速率,延长干物质积累的天数进而提高高粱干物质积累量;同时促进高粱花前干物质转运及花后干物质同化,协调灌浆期和成熟期籽粒干物质积累量及分配比例,最终提高高粱籽粒产量和水分利用效率。

综上所述,在标准施肥量基础上减量 20%,基追比调整为基肥:拔节肥:开花肥为 4:3:3 的补灌施肥模式既能获得较高产量(3 220.07 kg·hm⁻²)及水分利用效率(1.22 kg·m⁻³),又能节约肥料资源,可以推荐作为陕北高粱节水减肥的最佳施肥模式。但由于年际之间降水差异,还需对不同降雨年型下高粱关键生育期最优施肥量及基追比例进一步研究。

参 考 文 献:

[1] 王晓东,李俊志,窦爽,等. 高粱抗旱性研究进展[J]. 山东农业科学, 2024, 56(1): 164-173.
WANG X D, LI J Z, DOU S, et al. Research progress on drought resistance of sorghum[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(1): 164-173.

[2] 丁龙,赵慧敏,曾文静,等. 五种西北旱区植物对于干旱胁迫的生理响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1455-1463.
DING L, ZHAO H M, ZENG W J, et al. Physiological responses of five plants in northwest China arid area under drought stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1455-1463.

[3] 张振,于振文,张永丽,等. 氮肥基追比例对测墒补灌小麦冠层不同层次光能利用及干物质转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 97-105.
ZHANG Z, YU Z W, ZHANG Y L, et al. Effects of basal/topdressing nitrogen ratio on light interception and dry matter transport at different layers of wheat canopy under supplemental irrigation based on soil moisture[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2019, 25(1): 97-105.

[4] 高钰,闫耀廷,赵刚,等. 氮肥运筹对黄土高原春玉米产量形成和氮代谢的调控效应[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (6): 186-195.
GAO Y, YAN Y T, ZHAO G, et al. Regulation effects of nitrogen fertilizer management on grain yield formation and nitrogen transportation of spring maize in the Loess Plateau, China[J]. Soils and Fertilizers

Sciences in China, 2023, (6): 186-195.

[5] WANG C, ZHOU L B, ZHANG G B, et al. Responses of photosynthetic characteristics and dry matter formation in waxy sorghum to row ratio configurations in waxy sorghum-soybean intercropping systems[J]. Field Crops Research, 2021, 263: 108077.

[6] 王旭敏,雒文鹤,刘朋召,等. 节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3183-3197.
WANG X M, LUO W H, LIU P Z, et al. Regulation effects of water saving and nitrogen reduction on dry matter and nitrogen accumulation, transportation and yield of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(15): 3183-3197.

[7] MARSALIS M A, ANGADI S V, CONTRERAS G F E. Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates[J]. Field Crops Research, 2010, 116(1): 52-57.

[8] 寇长林,骆晓声,巨晓棠. 优化施氮对设施番茄土壤硝态氮残留及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 837-848.
KOU C L, LUO X S, JU X T. Effects of optimal nitrogen fertilization on N balance and nitrate-N accumulation in greenhouse tomato fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(5): 837-848.

[9] 李青凤,高杰,彭秋,等. 不同时期追氮量和比例对糯高粱“红缨子”产量、氮积累、转运以及氮肥利用率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023, (9): 105-110.
LI Q F, GAO J, PENG Q, et al. Effects of nitrogen application proportion at different stages on yield and nitrogen use characteristics of waxy sorghum[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023, (9): 105-110.

[10] 赵艳,罗铮,杨丽,等. 氮肥运筹对稻茬小麦氮素转运、干物质积累、产量及品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(8): 1001-1011.
ZHAO Y, LUO Z, YANG L, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on nitrogen translocation, dry matter accumulation, yield and quality of wheat after rice[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(8): 1001-1011.

[11] GAO H X, ZHANG C C, VAN DER WERF W, et al. Intercropping modulates the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen in maize and peanut[J]. Field Crops Research, 2022, 284: 108561.

[12] 严洪冬,王黎明,焦少杰,等. 施氮量对3个极早熟高粱品种干物质积累及籽粒品质的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(9): 101-110.
YAN H D, WANG L M, JIAO S J, et al. Effects of nitrogen application rate on dry matter accumulation and grain quality of three extremely early maturing sorghum varieties[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(9): 101-110.

[13] 石祖梁,顾克军,杨四军. 氮肥运筹对稻茬小麦干物质、氮素转运及氮素平衡的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1128-1133.
SHI Z L, GU K J, YANG S J. Effect of nitrogen application on translocation of dry matter and nitrogen, and nitrogen balance in winter wheat under rice-wheat rotation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012,

32(6): 1128-1133.

[14] 林长松, 吴娜, 李峻成, 等. 施氮量对甜高粱光合特性·糖分积累及产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(17): 7086-7088, 7090.

LIN C S, WU N, LI J C, et al. Effects of nitrogen rate on the photosynthetic characteristics, sugar accumulation and yield of sweet sorghum[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(17): 7086-7088, 7090.

[15] 刘凡, 刘斌祥, 郭宗翔, 等. 滴灌减氮对四川盆地玉米吐丝后叶片衰老和物质积累的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 179-185, 194.

LIU F, LIU B X, GUO Z X, et al. Effects of nitrogen reduction by drip irrigation on leaf senescence and matter accumulation of maize after silking in Sichuanbasin[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 179-185, 194.

[16] 吕广德, 米勇, 陈永军, 等. 氮肥运筹对玉米干物质及氮素积累转运和产量的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(1): 128-137.

LV G D, MI Y, CHEN Y J, et al. Effects of nitrogen application on nitrogen accumulation, dry matter accumulation, transport, and yield of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(1): 128-137.

[17] 张腾, 邢英英, 密菲瑶, 等. 根区深层水氮耦合对玉米生长和生理的影响[J]. 西北农业学报, 2023, 32(11): 1707-1717.

ZHANG T, XING Y Y, MI F Y, et al. Effects of water and nitrogen coupling in deep rootzone on growth and physiology in maize[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2023, 32(11): 1707-1717.

[18] 李慧, 王旭敏, 刘朋召, 等. 耦合效应弥补水氮减量对夏玉米养分吸收和利用的不利影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1283-1296.

LI H, WANG X M, LIU P Z, et al. Interaction offset the adverse impacts of water and nitrogen reduction on nutrient accumulation and utilization of summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(7): 1283-1296.

[19] 尚永盼, 于爱忠, 王玉珑, 等. 绿洲灌区绿肥还田利用方式对玉米干物质积累、分配及产量的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(3): 686-694.

SHANG Y P, YU A Z, WANG Y L, et al. Effects of green manure application methods on dry matter accumulation, distribution, and yield of maize in oasis irrigation area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2024, 50(3): 686-694.

[20] 赵皎, 郑志芳, 方艳茹, 等. 基于动态模拟模型分析冬小麦干物质积累特征对产量的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 300-308.

ZHAO J, ZHENG Z F, FANG Y R, et al. Effect of dry matter accumulation characteristics on yield of winter wheat analyzed by dynamic simulation model[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 300-308.

[21] DU K, ZHAO W Q, LV Z W, et al. Optimal rate of nitrogen fertilizer improves maize grain yield by delaying the senescence of ear leaves and thereby altering their nitrogen remobilization[J]. Field Crops Research, 2024, 310: 109359.

[22] 张丽霞, 杨光辉, 尹钧, 等. 水肥一体化对小麦干物质和氮素积累转运及产量的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 275-282, 319.

ZHANG L X, YANG Y H, YIN J, et al. Effects of drip fertigation on accumulation and translocation of dry matter and nitrogen together with yield in wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 275-282, 319.

[23] 戴明宏, 陶洪斌, 王利纳, 等. 不同氮肥管理对春玉米干物质生产、分配及转运的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(1): 154-157.

DAI M H, TAO H B, WANG L N, et al. Effects of different nitrogen managements on dry matter accumulation, partition and transportation of spring maize (*Zea mays* L.)[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(1): 154-157.

[24] 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.

[25] 胡向尚, 许海涛, 郭海斌, 等. 氮肥对高氮效玉米品种干物质累积分配与籽粒含水量的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(9): 83-88.

HU X S, XU H T, GUO H B, et al. Effects of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation, distribution and grain water content of high nitrogen efficiency maize varieties[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(9): 83-88.

[26] 赵德明, 柴守玺, 黄彩霞, 等. 绿洲生态条件下氮磷肥配施对冬小麦干物质分配及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 88-93.

ZHAO D M, CHAI S X, HUANG C X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer on dry matter distribution and grain yield of winter wheat in the ecological conditions of oasis[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(4): 88-93.

[27] 王鹏飞, 于爱忠, 王玉珑, 等. 绿肥还田结合减量施氮对玉米干物质积累分配及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(7): 1283-1294.

WANG P F, YU A Z, WANG Y L, et al. Effects of returning green manure to field combined with reducing nitrogen application on the dry matter accumulation, distribution and yield of maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(7): 1283-1294.

[28] 张磊, 孔丽丽, 侯云鹏, 等. 施氮水平对玉米开花后干物质积累、转运及土壤无机氮含量的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(4): 155-164.

ZHANG L, KONG L L, HOU Y P, et al. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation, translocation, and inorganic nitrogen content in soil after anthesis of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2020, 28(4): 155-164.

[29] 李传梁, 于振文, 张娟, 等. 测墒补灌条件下施氮量对小麦干物质积累转运和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(8): 1039-1046.

LI C L, YU Z W, ZHANG J, et al. Effect of nitrogen application rates on dry matter accumulation, transportation and yield of wheat under the conditions of soil moisture measurement and supplementary irrigation[J]. Journal of Triticeae Crops, 2023, 43(8): 1039-1046.

[30] TIAN Y, WANG F, SHI X, et al. Late nitrogen fertilization improves cotton yield through optimizing dry matter accumulation and partitioning[J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2023, 68(1): 75-86.

[31] 赵亚南, 宿敏敏, 吕阳, 等. 减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(4): 864-873.

ZHAO Y N, SU M M, LV Y, et al. Wheat yield, nutrient use efficiencies and soil nutrient balance under reduced fertilizer rate[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(4): 864-873.

[32] 李怀胜, 艾海峰, 王贺亚, 等. 减量施肥对滴灌冬小麦生长、产量及养分利用的影响[J]. *新疆农业科学*, 2022, 59(2): 329-336.

LI H S, AI H F, WANG H Y, et al. Effects of fertilizer reduction on growth, yield and fertilizer utilization of winter wheat under drip irrigation[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2022, 59(2): 329-336.

[33] 刘昕萌, 陈庚, 王志国, 等. 不同氮肥基追比对玉米氮素吸收利用、土壤氮素供应及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2020, 35(5): 124-131.

LIU X M, CHEN G, WANG Z G, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on nitrogen uptake and utilization, soil nitrogen supply and yield of maize[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2020, 35(5): 124-131.

[34] 蔡晓, 吴祥运, 王东, 等. 水氮互作对滴灌夏玉米生长及水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(6): 33-42.

CAI X, WU X Y, WANG D, et al. Combined effects of water and nitrogen application on growth and water use of summer maize under drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(6): 33-42.

[35] 吴立峰, 张富仓, 范军亮, 等. 水肥耦合对棉花产量、收益及水分利用效率的效应[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 164-172.

WU L F, ZHANG F C, FAN J L, et al. Effects of water and fertilizer coupling on cotton yield, net benefits and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 164-172.

[36] 张亚琦, 李淑文, 付巍, 等. 施氮对杂交谷子产量与光合特性及水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1119-1126.

ZHANG Y Q, LI S W, FU W, et al. Effects of nitrogen application on yield, photosynthetic characteristics and water use efficiency of hybrid millet[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(5): 1119-1126.

[37] WANG D, LI G Y, MO Y, et al. Evaluation of optimal nitrogen rate for corn production under mulched drip fertigation and economic benefits[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 225-233.

(上接第 181 页)

[28] 张仲鹏, 郝曦煜, 李峰, 等. 黑龙江中南部 4 个燕麦品种在不同刈割时期生产性能及营养品质[J]. *草业科学*, 2024: 1-16(2024-07-04). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.s.20240703.1700.008.html>.

ZHANG Z J, HAO X Y, LI F, et al. Dynamic analysis of yield and nutrient content on different oat varieties[J]. *Pratacultural Science*, 2024: 1-16(2024-07-04). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.s.20240703.1700.008.html>.

[29] 李青松, 方华, 杨坤杰, 等. 京津冀双季青贮玉米品种筛选及生态适应性分析[J]. *河北农业科学*, 2020, 24(6): 36-40.

LI Q S, FANG H, YANG K J, et al. Screening and ecological adaptability analysis of double cropping silage maize varieties in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2020, 24(6): 36-40.

[30] 尹婷. 施肥对不同播期和类型稻田绿肥生长及养分积累的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.

YIN T. Effect of fertilizer application on the growth and nutrient accumulation of green manure with different sowing dates and species in paddy fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.

[31] 周风云, 李伯群, 余国东, 等. 小麦新品种渝麦 13 号丰产性、稳产性及适应性分析[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(3): 894-898.

ZHOU F Y, LI B Q, YU G D, et al. Analysis of high-yield, stability and adaptation of new wheat variety Yumai13[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(3): 894-898.

[32] 岳海旺, 李春杰, 李媛, 等. 河北省春播玉米品种产量稳定性及试点辨别力综合分析[J]. *核农学报*, 2018, 32(7): 1267-1280.

YUE H W, LI C J, LI Y, et al. Comprehensive analysis of yield stability and testing site discrimination of spring sowing maize variety in Hebei Province[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2018, 32(7): 1267-1280.

[33] 崔同霞, 张保军, 姚友旭, 等. 基于 GGE 双标图法的甘肃省西片区域春小麦新品种的丰产性及适应性评价[J]. *甘肃农业大学学报*, 2022, 57(3): 58-65.

CUI T X, ZHANG B J, YAO Y X, et al. Evaluation of fertility and adaptability of new spring wheat varieties in western Gansu Province using GGE biplot[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2022, 57(3): 58-65.

[34] 谢文锦, 李方明, 李宁, 等. 基于 GGE 双标图的北方地区鲜食糯玉米产量和品质性状及试点鉴别力分析[J]. *作物杂志*, 2023, (4): 85-90.

XIE W J, LI F M, LI N, et al. Analysis of yield, quality traits and testing site discrimination of fresh waxy corn in northern China based on GGE biplot[J]. *Crops*, 2023, (4): 85-90.