

普通尿素与控释尿素配施对谷子 产量及氮素利用的影响

申朝阳^{1,2},高林广³,周浩露¹,罗新宇¹,黄英惠¹,高小丽¹

(1. 西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100;2. 四川省自贡市乡村振兴发展服务中心,四川 自贡 643000;

3. 佳县农业技术推广中心,陕西 佳县 719200)

摘要:为揭示控释尿素调控旱地谷子生长发育及氮素吸收利用的生理生态机制,以谷子品种‘陕豫谷3号’为试验材料,于2022—2023年在陕北半干旱雨养农业区进行田间试验,设置不施尿素(CK)、100%普通尿素(F1)、100%控释尿素(F2)、50%普通尿素+50%控释尿素(F3)、70%普通尿素+30%控释尿素(F4)、30%普通尿素+70%控释尿素(F5)共6个处理,施肥处理氮素总量均为 $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,研究普通尿素与控释尿素配施对谷子生长发育、干物质积累、产量及氮素吸收利用的影响。结果表明:控释尿素配施比例30%~50%处理的谷子各指标性状表现优于其他处理。与常规施肥F1处理相比,控释尿素配施比例为30%~50%时,谷子灌浆期叶片SPAD值提高0.65%~3.20%,净光合速率 P_n 提高1.07%~4.33%,成熟期总干物质积累量提高14.53%~77.27%,产量提高29.28%~31.81%;氮肥利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率分别提高9.67%~55.47%、9.72%~66.74%和43.04%~295.55%。综上所述,在陕北旱作谷子生产中,氮肥施用总量为 $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,普通尿素配施30%~50%控释尿素有利于谷子的生长发育和产量提高。

关键词:谷子;尿素;配施;干物质积累;产量;氮素利用率

中图分类号:S515;S143.1 **文献标志码:**A

Effects of combined application of common urea and controlled-release urea on foxtail millet yield and nitrogen utilization

SHEN Zhaoyang^{1,2}, GAO Linguang³, ZHOU Haolu¹, LUO Xinyu¹, Huang Yinghui¹, GAO Xiaoli¹

(1. College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Zigong Rural Revitalization and Development Service Center, Zigong, Sichuan 643000, China;

3. Jiaxian Agricultural Technology Extension Center, Jiaxian, Shaanxi 719200, China)

Abstract: To uncover the physiological and ecological mechanisms by which controlled-release urea in regulating grain growth, and nitrogen uptake and utilization in dryland conditions, a field experiment was conducted with a foxtail millet variety of ‘Shanyugu 3’ in the semi-arid, rain-fed agricultural region of northern Shaanxi Province from 2022 to 2023. The study included 6 treatments: no urea (CK), 100% common urea (F1), 100% controlled-release urea (F2), 50% common urea +50% controlled-release urea (F3), 70% common urea +30% controlled-release urea (F4), 30% common urea +70% controlled-release urea (F5). The total nitrogen of fertilizer treatment was $135\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$. The effects of common urea and controlled-release urea combined application on the growth and development of foxtail millet, dry matter accumulation, yield, nitrogen uptake and utilization were studied. The results showed that when the proportion of controlled-release urea was 30%~50%, the performance of foxtail millet indexes was better than other treatments. Compared with the conventional fertilizer F1 treatment, when the ratio of controlled-release urea was 30%~50%, the SPAD value of leaves at grain filling stage was increased by 0.65%~

收稿日期:2024-03-07

修回日期:2024-05-17

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD1000800,2020YFD1000803);国家现代农业产业技术体系(CARS-06-A26);陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-06)

作者简介:申朝阳(2000-),男,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为谷子轻简化高效栽培。E-mail: szy4e6@163.com

通信作者:高小丽(1968-),女,陕西宁强人,研究员,主要从事小杂粮优质抗逆高效栽培生理与技术的研究。E-mail: gao2123@nwsuaf.edu.cn

3.20%, the net photosynthetic rate P_n was increased by 1.07%~4.33%, the total dry matter accumulation at maturity was increased by 14.53%~77.27%, and the yield was increased by 29.28%~31.81%. Nitrogen utilization rate, nitrogen partial productivity and nitrogen agronomic utilization rate were increased by 9.67% to 55.47%, 9.72% to 66.74% and 43.04% to 295.55%, respectively. In conclusion, when the total nitrogen fertilizer application is 135 kg · hm², common urea combined with 30%~50% controlled-release urea is advantageous for the growth and development of foxtail millet in dry farming conditions in northern Shaanxi Province.

Keywords: foxtail millet; urea; combined application; dry matter accumulation; yield; nitrogen use efficiency

旱地农业是中国北方主要的农业形式,发展旱地农业对于保障国家粮食安全意义重大^[1]。杂粮作物是指除稻谷、小麦、玉米之外的其他谷物和豆类作物,作为旱地农业的特色作物,杂粮营养丰富,有利于增加多元化食物供给,其中谷子因其抗旱、耐贫瘠,在旱地农业生产中发挥着重要作用^[2]。受降雨和施肥等诸多因素影响,加之农村劳动力减少,旱区谷子等杂粮作物的施肥方式从基施+追施转变为一次性施足底肥,且存在氮肥过量施用情况,导致氮素利用率低、土壤酸化和水体富营养化等问题频发,不利于该区域农业的绿色可持续发展^[3-5]。因此,提高氮肥利用率,实现谷子经济效益和生态效益的协同发展成为旱区农业研究的重点和难点^[6-7]。

研究发现,应用新型肥料是维持作物生育期内氮素营养需求,促进植株生长发育,同时提高产量的有效措施^[8-9]。缓控释肥、水溶性肥、生物肥和有机肥等新型肥料的研究与应用推动农业生产向更加高产、高效、优质、环保的方向发展,新型肥料相较于常规肥料可实现作物增产 4.6%~17.5%,氮肥利用率提高 16.8%~52.3%^[10]。其中,控释氮肥因能有效控制氮素的释放时间和速率,延长氮素在土壤中供作物吸收的时间,有效解决了普通速效氮肥分解过快、在作物生育后期无法提供足够养分而造成植株脱肥、早衰的问题;同时,控释氮肥大多为一次性基施,可有效降低劳动力成本,提高经济效益,减少环境污染^[11]。因此,与控释氮肥相适应的施肥和栽培管理措施成为新的研究热点^[12-13]。

大田生产中,有机物包膜控释肥的养分释放速率与土壤湿度和温度等因素有关,单施控释肥易出现初始氮素在土壤中释放不足等问题,对作物生育前期的养分利用产生不利影响^[14]。如何通过普通化肥与控释肥的合理配施实现减肥增效,成为生产中亟待解决的关键技术问题。目前普通尿素与控释尿素配施的作用效果已在主粮作物中得到验证,同等施氮量下,与单施普通尿素相比,普通尿素与控释尿素配施后小麦、玉米、水稻产量增加 5.18%~

9.58%,氮肥利用率提高 1.69%~22.03%^[15-17]。也有研究表明,控释氮肥一次性基施可提高谷子产量和氮肥利用率^[18],关于普通尿素配施控释尿素对谷子生长发育、产量和氮肥利用效率影响的系统研究较少。因此,本试验通过研究普通尿素与控释尿素配施对谷子光合性能、地上部干物质积累量、产量及其构成因素、氮素利用效率的影响,揭示两种尿素配施调控旱地谷子生长发育及氮素吸收利用的生理生态机制,以为旱地谷子绿色高效生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022—2023 年在西北农林科技大学榆林小杂粮试验示范站(37°56'26"N,109°21'46"E,海拔 1 120 m)进行,该地区常年平均降水量 400 mm 左右,年平均气温为 11℃。2022 年与 2023 年谷子全生育期日降水量和日平均气温情况如图 1 所示。供试土壤为黄绵土,0~20 cm 土层土壤基础理化性质见表 1。

1.2 试验设计

供试谷子品种为‘陕豫谷 3 号’。设置 6 个处理,即:CK,不施氮肥;F1,100%普通尿素(常规施肥,135 kg · hm⁻²);F2,100%控释尿素(135 kg · hm⁻²);F3,50%普通尿素+50%控释尿素(67.5 kg · hm⁻²+67.5 kg · hm⁻²);F4,70%普通尿素+30%控释尿素(94.5 kg · hm⁻²+40.5 kg · hm⁻²);F5,30%普通尿素+70%控释尿素(40.5 kg · hm⁻²+94.5 kg · hm⁻²)。各施肥处理施氮总量均为 135 kg · hm⁻²,磷肥和钾肥均为 90 kg · hm⁻²,小区面积为 20 m²(4 m × 5 m),每个处理重复 3 次,随机区组设计。供试化肥为普通尿素(N 46%),控释尿素为山西潞安丰喜化工集团生产的包膜控释尿素(N 46%,控释期 90 d),磷肥和钾肥分别为过磷酸钙(P₂O₅ 12%)和硫酸钾(K₂O 50%)。所有肥料混合均匀,作为基肥一次性撒施后深翻,使肥料与土壤混匀后播种。

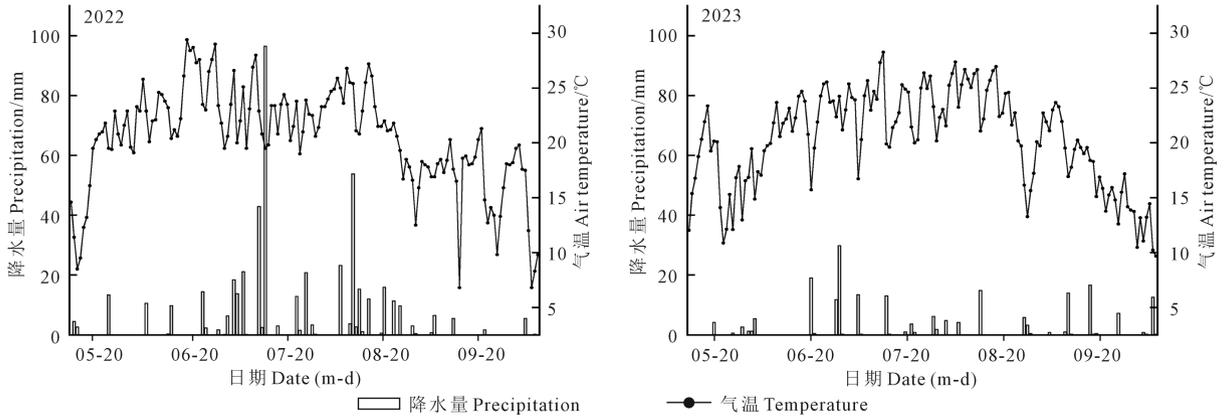


图1 2022—2023年谷子生育期气象条件

Fig.1 Climate condition of growing season of foxtail millet in 2022–2023

表1 试验地0~20 cm 土层理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of 0~20 cm soil layer in the experimental site

年份(Y) Year	pH	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N /(mg·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N /(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)
2022	8.33	0.52	2.63	2.80	6.13	45.40	114.3
2023	8.96	0.31	4.84	2.38	5.48	17.65	102.0

为避免重茬,两年选择不同地块种植,2022年,谷子于5月20日播种,10月3日收获,前茬为玉米;2023年,谷子于5月23日播种,9月28日收获,前茬为马铃薯。行距33.3 cm,穴距20 cm,用小型手推滚筒式播种机进行播种,种植密度约 2.25×10^5 株·hm⁻²。播种后进行1次滴灌以确保出苗,之后不再灌溉,其余田间管理同当地大田生产。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 叶绿素含量(SPAD值) 分别于谷子抽穗期、开花期、灌浆期的晴天9:00—11:00,选择各处理小区有代表性的植株6株,使用叶绿素仪(SPAD-502,日本)测定旗叶的SPAD值。

1.3.2 净光合速率 分别于抽穗期、开花期、灌浆期晴天9:00—11:00,选择各处理小区具有代表性的6个植株用CIRAS-3便携式光合作用测定系统(PP Systems)测定谷子各生育时期旗叶的净光合速率(P_n)。

1.3.3 地上部干物质积累量 分别在谷子拔节期、抽穗期、开花期、灌浆期和成熟期,各小区取具有代表性的植株3株,测定其地上部总干物质积累量。

1.3.4 产量指标 谷子成熟期,各处理小区选择未取样的2行谷子进行收获,脱粒后测定单穗粒重和千粒重,并计算理论产量。

1.3.5 植株全氮含量 在谷子成熟期,各小区分别随机取3株植株,将其分解为茎鞘、叶、籽粒3部分,经烘干、磨粉、过筛,用H₂SO₄-H₂O₂消煮后,AA3连续流动分析仪(SEAL,德国)测定各部分全氮含量,进而按

各部分生物量比例折算得到谷子植株氮素积累量。

1.3.6 氮肥利用效率 各处理氮肥利用效率相关指标计算公式如下:

氮素积累量(kg·hm⁻²)=植株氮含量×干物质积累量

氮肥偏生产力 $NFP(kg·kg^{-1})$ =施氮处理籽粒产量/施氮量

氮肥利用率 $NUE(\%)$ =(施氮处理植株氮素积累量-不施氮处理植株氮素积累量)/施氮量×100

氮肥农学利用效率 $NAE(kg·kg^{-1})$ =(施氮处理籽粒产量-不施氮处理籽粒产量)/施氮量

1.4 数据处理

采用Excel 2019整理数据,使用SPSS 26.0进行单因素ANOVA分析,用LSD进行不同处理数据的显著性检验($P<0.05$),利用Origin 2021绘图。

2 结果与分析

2.1 普通尿素配施控释尿素对谷子光合性能的影响

谷子旗叶SPAD值随着生育进程推进整体呈先升高后降低的趋势,在开花期达到峰值,但不同生育时期施氮处理间存在显著差异(图2)。2a试验结果表明,F3处理灌浆期叶片SPAD值比开花期高1.60%~5.76%。2022年,与常规施肥F1处理相比,F3、F4、F5处理抽穗期叶片SPAD值提高36.72%~39.97%,灌浆期叶片SPAD值仅F3处理提高

0.65%。2023 年,与 F1 处理相比,F2、F3、F4、F5 处理抽穗期叶片 SPAD 值提高 8.96%~16.95%,F5 处理开花期叶片 SPAD 值提高 2.24%,F4 处理灌浆期叶片 SPAD 值提高 3.20%。

谷子旗叶净光合速率除 2022 年 F2、F5 处理及 2023 年 CK 随着生育进程推进呈降低趋势外,其他处理均呈先升高后降低的趋势(图 3)。2022 年,与 F1 处理相比,控释尿素配施处理抽穗期旗叶净光合速率提高 13.51%~45.95%,开花期 F5 处理旗叶净光合速率提高 1.73%,灌浆期 F2、F3、F5 处理叶净光合速率提高 4.56%~21.02%。2023 年,与 F1 处理相比,控释尿素配施处理抽穗期旗叶净光合速率提高 26.70%~61.78%,F2、F4 处理灌浆期旗叶净光合速率提高 0.60%~4.33%。

2.2 普通尿素配施控释尿素对谷子地上部干物质积累量的影响

谷子拔节后单株地上部干物质积累逐渐上升,其增长速率呈“慢-快-慢”的变化趋势,同一时期不同处理间存在一定差异。由图 4 可见,2022 年,F3、

F4 处理抽穗期~成熟期的单株地上部干物质积累量均高于其余各处理,在抽穗期、开花期、灌浆期、成熟期较 F1 处理分别提高 30.78%~55.65%、41.04%~42.25%、8.33%~11.95%和 14.53%~77.27%,在成熟期 F3 处理的干物质积累量显著高于 F1 处理。2023 年,F4、F5 处理的干物质积累量表现较为优异,在开花期、灌浆期、成熟期较 F1 处理分别提高 3.77%~11.16%、31.03%~58.33%和 16.76%~18.70%,其中成熟期 F4 和 F5 处理的单株地上部干物质积累量均显著高于 F1 处理。

2.3 普通尿素配施控释尿素对谷子产量及其构成因素的影响

如表 2 所示,年份和施氮处理对谷子单穗粒重、千粒重和产量均产生显著影响。2022 年,谷子籽粒产量表现为 F3>F2>F4>F5>F1>CK,2023 年谷子籽粒产量表现为 F4>F1>F2>F3>F5>CK。可见施用氮肥均可提高谷子籽粒产量,2022 年各施氮处理较 CK 增产量为 727.73~1 753.06 kg·hm⁻²,增产率达 29.17%~70.26%,其中 F2、F3 处理产量显著高于除

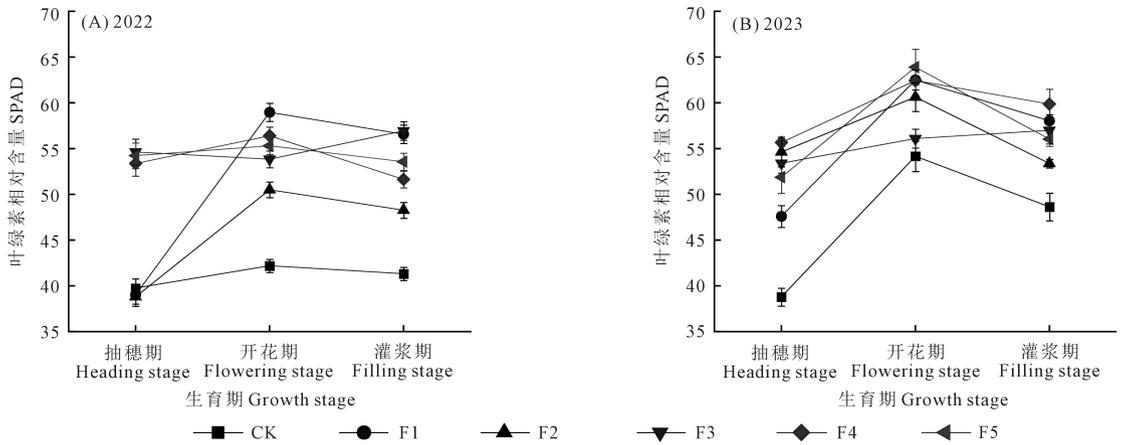


图 2 谷子功能叶 SPAD 值的动态变化

Fig.2 Dynamic change of SPAD value of foxtail millet functional leaves

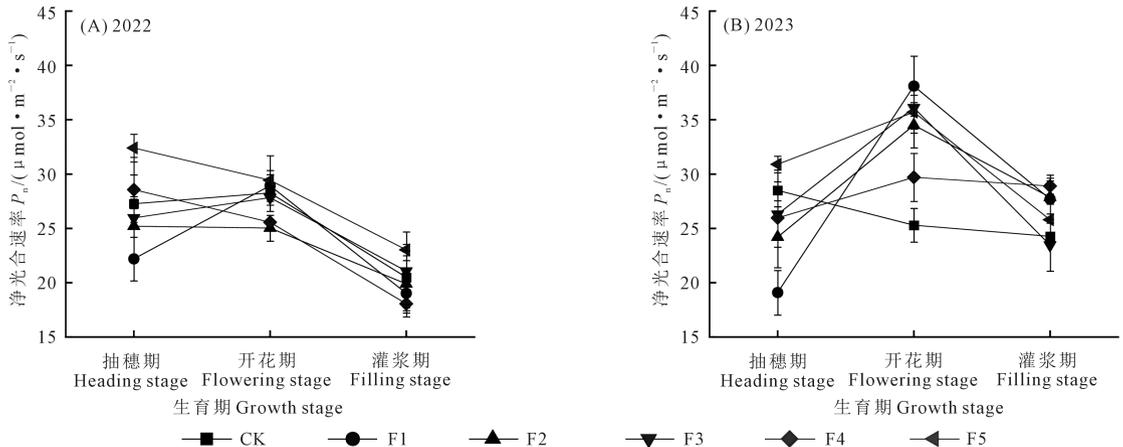
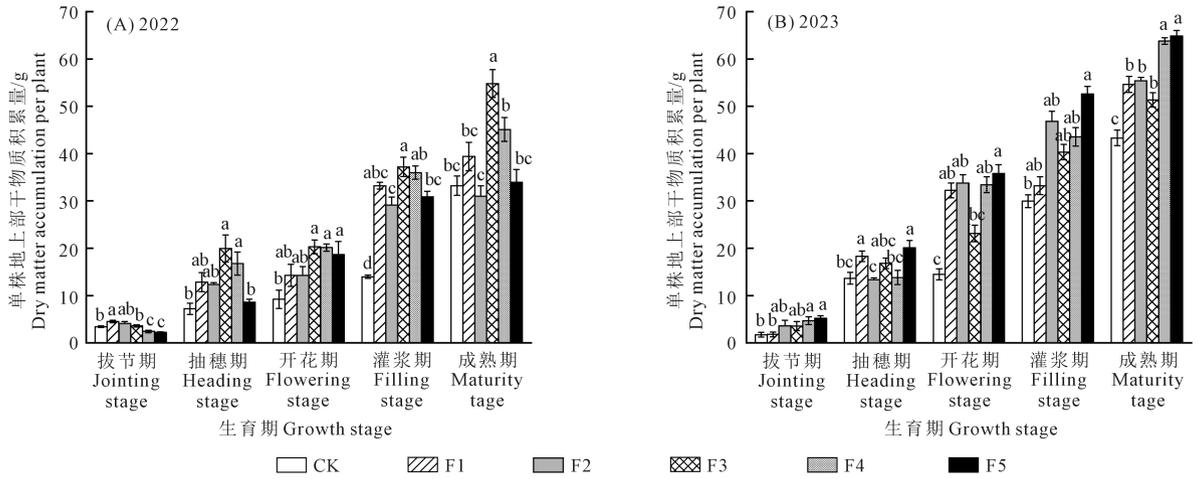


图 3 谷子功能叶净光合速率的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of P_n of foxtail millet functional leaves



注:不同小写字母表示同时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments in the same stage at $P < 0.05$ level.

图 4 谷子不同生育时期单株地上部干物质积累量

Fig.4 Above-ground dry matter accumulation per plant of foxtail millet in different growth stage

表 2 普通尿素与控释尿素配施对谷子产量及产量构成因素的影响

Table 2 Effects of combined application of common urea and controlled-release urea on foxtail millet yield and its components

年份 (Y) Year	处理 (N) Treatment	单穗粒重/g Grain weight per panicle	千粒重/g 1000-grain weight	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	增产率/% Yield increase rate
2022	CK	11.09±1.41c	2.87±0.02b	2495.13±317.29c	0.00
	F1	14.32±1.24bc	2.83±0.02bc	3222.86±278.46bc	29.17
	F2	18.68±1.06a	2.75±0.01d	4202.14±238.60a	68.41
	F3	18.88±1.29a	2.81±0.02c	4248.19±289.76a	70.26
	F4	15.71±0.85ab	2.81±0.02c	3535.67±192.31ab	41.70
	F5	14.41±0.31bc	2.98±0.01a	3242.13±70.65bc	29.94
2023	CK	18.16±1.28b	2.86±0.09b	4086.50±287.11b	0.00
	F1	20.27±0.38b	3.07±0.08a	4559.83±86.25b	11.58
	F2	20.26±0.62b	2.50±0.04c	4559.17±139.29b	11.57
	F3	20.20±0.05b	2.54±0.02c	4545.83±10.22b	11.24
	F4	26.20±1.89a	2.22±0.08d	5895.17±426.07a	44.26
	F5	18.72±0.35b	2.69±0.02bc	4212.67±78.27b	3.09
因素 Factor		F 值 F value			
Y		72.63 **	53.69 **	72.62 **	
N		10.04 **	26.33 **	10.04 **	
Y×N		5.62 **	18.67 **	5.62 **	

注:同列不同小写字母表示同年份不同处理间在 $P < 0.05$ 水平上差异显著;NS、*、** 分别表示显著性水平为 $P > 0.05$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments in the same year at the $P < 0.05$ level. NS, *, ** represent significance levels with $P > 0.05$, $P < 0.05$, $P < 0.01$, respectively. The same as below.

F4 外的其他处理,但两者间无显著差异;2023 年各施氮处理较 CK 增产量为 126.17 ~ 1 808.67 kg·hm⁻²,增产率达 3.09% ~ 44.26%,其中 F4 处理产量显著高于其他处理。与 F1 处理相比,2022 年配施 50%控释尿素的 F3 处理和 2023 年配施 30%控释尿素的 F4 处理谷子产量提升最多,分别较同年 F1 处理提高 31.81%和 29.28%。各施肥处理均增加了谷子单穗粒重,2022 年 F2、F3、F4、F5 处理较 F1 处理提高 0.63% ~ 31.81%,2023 年 F4 处理较 F1 处理显

著提高 29.29%。与 F1 处理相比,各处理整体上具有降低谷子千粒重的趋势,仅 2022 年 CK 和 F5 处理千粒重分别提高 1.41%和 5.12%。

2.4 普通尿素配施控释尿素对谷子氮素利用效率的影响

如表 3 所示,年份对谷子氮素积累量、氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率影响显著;施氮及年份与施氮处理交互作用对谷子氮素积累量、氮肥利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用效率影响均显著。

2022 年谷子氮素积累量表现为 F3>F4>F1>F2>F5>CK, 2023 年谷子氮素积累量表现为 F4>F5>F2>F1>F3>CK。2022 年, F3、F4 处理氮素积累量较 F1 处理分别提高 87.92% 和 12.99%; 2023 年, F2、F4、F5 处理氮素积累量较 F1 处理分别提高 3.26%、29.49% 和 9.93%。各处理间谷子的氮肥利用率存在一定差异, 2022 年, F3、F4 处理氮肥利用率较 F1 处理分别提高 55.47% 和 9.67%; 2023 年, F2、F4、F5 处理氮肥利用率较 F1 处理分别提高 3.91%、35.36% 和

12.92%。2022 年, 与 F1 处理相比, F2、F3、F4 和 F5 处理的氮肥偏生产力分别提高 30.41%、66.74%、9.72% 和 16.88%; 2023 年, F4 处理的氮肥偏生产力较 F1 处理显著提高 29.28%。2022 年, 与 F1 处理相比, F2、F3、F4 和 F5 处理的氮肥农学利用效率分别提高 134.50%、295.55%、43.04% 和 74.77%, F3 处理最高且与 F1 处理间差异显著; 2023 年, F4 处理较 F1 处理氮肥农学利用效率显著提高 281.77%。

表 3 普通尿素与控释尿素配施对谷子氮素利用的影响

Table 3 Effects of combined application of common urea and controlled-release urea on N utilization in foxtail millet

年份 (Y) Year	处理 (N) Treatment	氮素积累量 N accumulation /(kg · hm ⁻²)	氮肥利用率 NUE/%	氮肥偏生产力 NPPFP/(kg · kg ⁻¹)	氮肥农学 利用效率 NAE/(kg · kg ⁻¹)
2022	CK	85.32±4.55c			
	F1	100.53±11.84bc	11.27±5.19bc	23.87±2.06b	5.39±2.06b
	F2	95.52±9.72bc	7.64±2.47bc	31.13±1.77ab	12.64±1.77ab
	F3	188.92±10.28a	66.74±3.19a	39.80±7.51a	21.32±7.51a
	F4	113.59±1.12b	20.94±1.44b	26.19±1.42ab	7.71±1.42ab
2023	F5	86.90±11.46c	1.17±0.05c	27.90±4.12ab	9.42±4.12ab
	CK	139.25±5.22b			
	F1	161.87±20.74b	16.75±3.54b	33.78±0.64b	3.51±0.64b
	F2	167.15±10.01b	20.66±4.84b	33.77±1.03b	3.50±1.03b
	F3	160.23±17.67b	15.54±4.68b	33.67±0.08b	3.40±0.08b
	F4	209.60±7.49a	52.11±9.61a	43.67±3.16a	13.40±3.16a
	F5	177.95±16.20ab	29.67±5.12ab	31.20±0.58b	0.93±0.58b
因素 Factor		F 值 F value			
Y		79.55 **	1.07NS	59.62 **	14.62 **
N		8.32 **	6.33 **	6.88 **	6.88 **
Y×N		7.99 **	8.52 **	7.50 **	7.50 **

3 讨论

在作物生长中后期籽粒形成阶段, 叶片净光合速率是影响产量的主要因素。董庆玲等^[19]研究表明, 普通尿素和控释肥搭配一次性基施可有效提高小麦花后净光合速率, 增加其光合产物的积累。王永军等^[20]研究发现, 玉米开花后 49 d, 施用控释肥可使其果穗叶净光合速率及叶绿素含量明显提升, 且叶片在生长后期仍能保持较高的光合能力, 保障全生育期的光合强度维持在较高水平。本研究发现, 普通尿素配施控释尿素可以改善谷子抽穗期的光合性能, 控释尿素配施占比为 30%~50% 时, 谷子灌浆期叶片仍保持较高的 SPAD 值与净光合速率, 说明普通尿素与控释尿素适宜的配施比可促进光合作用顺利进行, 提高光能利用率, 促进光合产物的积累, 与前人研究结果基本一致。

李君霞等^[21]研究表明, 谷子花后积累的干物质对产量有明显的正向促进作用。Zhao 等^[22]研究发现, 控释尿素和普通尿素配合施用提高了单季晚粳稻的干物质积累量。本研究发现, 控释尿素配施占比为 30%~50% 时, 花后干物质积累量和产量相对较高; 不同处理干物质积累量年间间存在一定差异, 可能是谷子生育期年度间降水量不同 (2022 年降水较多, 2023 年相对干旱), 影响了控释尿素肥效的释放和利用, 进而影响了植株的生长发育。有关谷子田肥料的有效性受降水影响的具体机制还有待进一步探究。

谷子以其丰富的营养价值, 成为推动我国饮食多样性的关键粮食作物之一^[23-24]。有研究发现, 合理施用氮肥是提高谷子产量和品质的重要途径, 拔节期追氮 150 kg · hm⁻² 可满足谷子生育中后期的养分需求, 提高产量, 改善品质^[25]。韩锐锋等^[26]研究

表明,掺混施用比例为 7:3 的树脂包膜尿素(控释期为 90 d)与普通尿素,可有效提高小麦产量。高雪健等^[27]研究发现,在 225 kg·hm⁻²施氮水平下,1:2 的普通尿素与控释肥配施比可使玉米相较于单施普通尿素增产 30%。本研究发现,普通尿素配施控释尿素能较好地满足谷子全生育期的养分需求,可以显著提高谷子的产量与植株氮素积累量,与前人研究结果基本一致。此外,控释肥养分的释放速率受环境温度、降水、土壤质地等因素影响^[28]。本研究表明,与单施普通尿素相比,2022 年控释尿素配施比例为 50%,2023 年控释尿素配施比例为 30% 时增产效果最佳,氮肥利用率最高,可能是在抽穗开花期降水较多的 2022 年,普通尿素的淋溶损失较大,需配施 50%控释尿素才能满足谷子灌浆期对肥料的需求;而降水相对较少的 2023 年,肥料淋溶损失较小,配施 30%的控释尿素即可满足谷子全生育期对肥料的需求,具体生理原因有待进一步研究。

4 结 论

与单施普通尿素相比,普通尿素与控释尿素配施可有效提高谷子产量,其中,控释尿素配施 30%~50%处理较常规施肥的谷子灌浆期叶片 SPAD 值提高 0.65%~3.20%,净光合速率 P_n 提高 1.07%~4.33%,改善了谷子的光合性能;谷子氮肥利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率分别提高 9.67%~55.47%、9.72~66.74%和 43.04%~295.55%,有利于谷子对氮素的高效利用;谷子成熟期总干物质积累量提高 14.53%~77.27%,增产 29.28%~31.81%,有利于谷子总干物质积累量与产量提升。因此,在陕北半干旱雨养农业区谷子生产中,中等肥力地块氮肥施用总量 135 kg·hm⁻²下配施 30%~50%控释尿素为较适宜的施肥方案。

参 考 文 献:

[1] 山仑. 我国旱地农业发展中的几个问题[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 2-4.
SHAN L. Issues in dryland agricultural research in China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 2-4.

[2] 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.

[3] 刘钦普. 国内农田氮磷面源污染风险控制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(1): 1-5.
LIU Q P. Research progress on risk control of nitrogen and phosphorus non-point source pollution in domestic farmland [J]. Jiangsu

Agricultural Sciences, 2018, 46(1): 1-5.

[4] GALLOWAY J N, TOWNSEND A R, ERISMAN J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions[J]. Science, 2008, 320(5878): 889-892.

[5] CHIEN S H, PROCHNOW L I, CANTARELLA H. Chapter 8 recent developments of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environmental impacts [J]. Advances in Agronomy, 2009, 102: 267-322.

[6] 杨旖璇, 屈忠义, 杨威, 等. 氮肥和有机肥配施对盐碱地酿酒高粱生长、氮素利用效率及土壤 N₂O 排放的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(6): 116-127.
YANG Y X, QU Z Y, YANG W, et al. Effects of combined application of nitrogen fertilizer and organic fertilizer on the growth, nitrogen use efficiency of brewing sorghum and soil N₂O emission in saline-alkali land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(6): 116-127.

[7] 史多鹏, 叶子壮, 李杰, 等. 氮肥配施生物炭和脲酶抑制剂对夏玉米-冬小麦产量及氮素利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 51-60.
SHI D P, YE Z Z, LI J, et al. Effects of nitrogen combined with biochar and urease inhibitor on yield and nitrogen utilization of summer maize-winter wheat system [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(4): 51-60.

[8] 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.

[9] 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, ZHU GE 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.

[10] 丁文成, 何萍, 周卫. 我国新型肥料产业发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 201-221.
DING W C, HE P, ZHOU W. Development strategies of the new-type fertilizer industry in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(2): 201-221.

[11] 王云翔, 咸宇字, 赵灿, 等. 缓控释氮肥施用技术在水稻上应用研究进展与展望[J]. 中国稻米, 2023, 29(4): 20-26.
WANG Y X, XIAN Y Y, ZHAO C, et al. Research progress and prospect of slow and controlled release fertilizer application technology in rice[J]. China Rice, 2023, 29(4): 20-26.

[12] SONG C, GUAN Y, WANG D, et al. Palygorskite-coated fertilizers with a timely release of nutrients increase potato productivity in a rain-fed cropland[J]. Field Crops Research, 2014, 166: 10-17.

[13] ZHENG W, ZHANG M, LIU Z, et al. Combining controlled-release fertilizer and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. Field Crops Re-

- search, 2016, 197: 52-62.
- [14] ALIJANI K, BAHRANI M J, KAZEMEINI S A. Short-term responses of soil and wheat yield to tillage, corn residue management and nitrogen fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 78-82.
- [15] 王义凡, 任宁, 董向阳, 等. 控释尿素与普通尿素配施对小麦产量、氮素吸收及经济效益的影响[J]. *作物杂志*, 2023, (5): 117-123.
- WANG Y F, REN N, DONG X Y, et al. Effects of controlled-release and ordinary urea on wheat yield, nitrogen absorption and economic benefit[J]. *Crops*, 2023, (5): 117-123.
- [16] 黄巧义, 吴永沛, 黄旭, 等. 控释尿素与尿素配施对甜玉米产量和氮肥利用率的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2023, 25(2): 163-173.
- HUANG Q Y, WU Y P, HUANG X, et al. Impact of controlled-release urea combined with conventional urea on yield and nitrogen utilization efficiency of spring sweet corn under one-off application[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(2): 163-173.
- [17] 潘晨, 杨宇, 漆栋良. 不同灌溉条件下氮肥配施模式对水稻干物质和产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(2): 73-78, 109.
- PAN C, YANG Y, QI D L. The combined effect of irrigation and nitrogen fertilization on dry matter and yield of rice[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(2): 73-78, 109.
- [18] 关瑞. 夏播谷子氮磷钾配比及控释氮肥一次性基施效应研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- GUAN R. Effects of combined application of nitrogen, phosphate and potassium fertilizer and single basal fertilization of controlled-released nitrogen for summer-sowing millet[D]. Tyan: Shandong Agricultural University, 2018.
- [19] 董庆玲, 姜焕昌, 张慧, 等. 普通和控释尿素配合深施提高冬小麦花期旗叶光合性能与氮素利用效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(7): 1134-1145.
- DONG Q L, LOU H C, ZHANG H, et al. Improving photosynthetic efficiency of flag leaves at anthesis stage and nitrogen utilization of winter wheat by deep placement of common and control-released urea mixture[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2019, 25(7): 1134-1145.
- [20] 王永军, 孙其专, 杨今胜, 等. 不同地力水平下控释尿素对玉米物质生产及光合特性的影响[J]. *作物学报*, 2011, 37(12): 2233-2240.
- WANG Y J, SUN Q Z, YANG J S, et al. Effects of controlled-release urea on yield and photosynthesis characteristics of maize (*Zea mays* L.) under different soil fertility conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2233-2240.
- [21] 李君霞, 朱灿灿, 代书桃, 等. 不同夏谷品种光合特性、干物质积累转运及灌浆特性[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(23): 82-86.
- LI J X, ZHU C C, DAI S T, et al. Photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and transport and grout characteristics of different summer grain varieties[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(23): 82-86.
- [22] ZHAO C, GAO Z J, LIU G M, et al. Combining controlled-release fertilizer and normal urea to improve the yield, nitrogen use efficiency, and grain quality of single season late japonica rice[J]. *Agronomy*, 2023, 13(1): 276.
- [23] 陈卫军, 魏益民, 张国权, 等. 国内外谷子的研究现状[J]. *杂粮作物*, 2000, (3): 27-29.
- CHEN W J, WEI Y M, ZHANG G Q, et al. Research status of millet at home and abroad[J]. *Rain Fed Crops*, 2000, (3): 27-29.
- [24] 张超, 张晖, 李冀新. 小米的营养以及应用研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2007, 22(1): 51-55, 78.
- ZHANG C, ZHANG H, LI J X. Advances of millet research on nutrition and application[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2007, 22(1): 51-55, 78.
- [25] 曾蓉. 氮肥运筹对谷子产量及品质的影响[D]. 晋中: 山西农业大学, 2013.
- ZENG R. Effects of nitrogen application on yield and quality of millet [D]. Puzhong: Shanxi Agricultural University, 2013.
- [26] 韩锐锋, 牛靖锡, 王鑫悦, 等. 控释尿素和普通尿素混合基施对冬小麦氮素吸收利用和产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11): 2042-2058.
- HAN R F, NIU Y X, WANG X Y, et al. Effect of mixed basal application of controlled release urea and common urea on the nitrogen uptake, utilization and yield of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11): 2042-2058.
- [27] 高雪健, 李广浩, 陆卫平, 等. 控释尿素与普通尿素配施对糯玉米产量和氮素吸收利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(9): 1614-1625.
- GAO X J, LI G H, LU W P, et al. Effects of mixing controlled-release and normal urea on yield, nitrogen absorption and utilization in waxy maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(9): 1614-1625.
- [28] LAWRENCIA D, WONG S K, LOW D Y S, et al. Controlled release fertilizers: a review on coating materials and mechanism of release [J]. *Plants*, 2021, 10(2): 238.