

控释氮肥减量对糜子干物质积累、 光合特性及产量的影响

王英¹, 刘景辉^{1*}, 武俊英^{2*}, 米俊珍¹, 孙梦媛¹, 张兰英¹, 冯学颖¹

(1. 内蒙古农业大学 农学院/内蒙古杂粮工程技术研究中心, 呼和浩特 010019;

2. 内蒙古农业大学 职业技术学院, 内蒙古 包头 014109)

摘要:【目的】探究黄土高原旱作区糜子高效施肥模式, 明确控释氮肥减量对糜子光合同化能力及产量的影响。

【方法】以当地习惯尿素纯氮施氮量 120 kg/hm² (TN) 为对照, 设置控释氮肥纯氮施氮量 120 kg/hm² (T1)、108 kg/hm² (T2)、96 kg/hm² (T3)、84 kg/hm² (T4)、72 kg/hm² (T5) 和不施氮肥 (T0) 7 个处理, 探究不同氮肥处理后糜子干物质积累分配、旗叶光合特性、SPAD 值、NBI 及产量的变化规律。【结果】①施氮显著提高了糜子各生育期干物质积累量及旗叶光合能力, 与常规尿素相比, 控释氮肥等量施用可提高糜子生育中后期干物质积累量 4.44%~8.77%, 增加成熟期干物质分配到穗中的比例 1.58%~2.75%, 且年际间结果基本一致; ②施用控释氮肥提高糜子旗叶 SPAD 值和 NBI 分别为 2.19%~5.05% 和 2.66%~8.34%, 2 a 平均提高糜子灌浆期净光合速率、气孔导度和蒸腾速率分别为 3.90%、6.40% 和 4.20%, 施用控释氮肥降低胞间 CO₂ 摩尔分数 4.45%。③随着控释氮肥施量降低, 糜子干物质积累及光合性能均下降, 并在减氮 20% 时显著低于 TN 处理。糜子旗叶 SPAD 值和 NBI 与干物质积累量、净光合速率及产量均呈正相关关系, 其中拔节期和灌浆期 NBI 与产量均极显著正相关。④施用等氮量控释氮肥可显著提高糜子产量 4.42%, 增加净收益 121~280 元/hm², 控释氮肥减量 10%~20% 时糜子产量与 TN 处理差异不显著, 控释氮肥减量 30%~40% 时糜子产量显著降低 3.19%~5.23%。【结论】综上所述, 在黄土高原丘陵区糜子生产中施用控释氮肥较尿素表现出更高的增产及减氮潜力。

关键词: 干物质积累分配; 氮平衡指数; 净光合速率; SPAD

中图分类号: S513

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022664

OSID: 

王英, 刘景辉, 武俊英, 等. 控释氮肥减量对糜子干物质积累、光合特性及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 10-18.

WANG Ying, LIU Jinghui, WU Junying, et al. Effects of Reduced Nitrogen Fertilization Via Controlled Release on Dry Matter Accumulation, Photosynthetic Traits and Yield of Proso Millet[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 10-18.

0 引言

【研究意义】糜子是我国北方旱作农业区主要杂粮作物之一, 具有生育期短、耐旱、耐瘠薄等特点, 糜子籽粒营养丰富, 在北方黄土高原丘陵区种植业结构和农民生活中具有不可替代的作用^[1-3]。黄土高原干旱、半干旱区是我国主要旱作雨养农业区, 当地农业集中化程度不高, 为了简化施肥和节约劳动力在糜子种植过程中普遍存在氮肥一次性基施等盲目施肥现象^[4]。氮肥投入量大和施肥不合理导致该地区氮肥利用率较低, 严重威胁当地生态环境, 同时易导致作

物生长后期氮肥供应不足。因此, 如何在黄土高原旱作区实施减肥增效受到了广泛的关注。控释氮肥通过尿素包膜等方式控制肥料的释放时间, 使尿素等传统氮肥的肥效可以缓慢的释放, 较传统氮肥有效养分供应时间长, 肥料利用效率高, 可按作物需求释放养分的特点^[5]。同时控释氮肥在播种时一次施用, 可简化施肥、降低施肥劳动强度, 有效控制种植成本^[6]。缓释氮肥相比传统尿素利用率更高, 因此在获得同等肥效的情况下控释氮肥可较传统氮肥减量施用^[7]。

【研究进展】叶片叶绿素量 (SPAD) 和氮素平衡指数 (NBI) 可以较好地反映作物光合能力、诊断作物氮素营养状况^[8]。施用控释氮肥较普通尿素可提高冬小麦^[9]、棉花^[10]各生育期叶片叶绿素量。在水稻上的研究也证实控释氮肥可使水稻剑叶叶绿素量显著高于常规施氮, 并促进光合产物向籽粒的转运^[11]。施用控释氮肥对烟草叶绿素量和净光合速率也有较大影响, 且在移栽后 11 周时对叶绿素量和净光合速率的提升效果最明显^[12]。控释氮肥可提高作物光合能

收稿日期: 2022-11-23 修回日期: 2023-02-10 网络出版日期: 2023-03-02
基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAD22B04-02); 内蒙古农业大学杂粮产业协同创新中心项目; 内蒙古“草原英才”创新团队资金项目
作者简介: 王英 (1995-), 男, 博士研究生, 主要从事作物栽培学与耕作学方面的研究。E-mail: 1269046052@qq.com
通信作者: 刘景辉 (1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事耕作制度与农业生态系统研究。E-mail: caulih@163.com
武俊英 (1967-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事种子科学与植物营养调控研究工作。E-mail: nmbtwjy@163.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取CC BY-NC-ND协议

力、干物质积累量,进而通过增加籽粒质量来增加产量,控释氮肥比普通尿素更有利于玉米吐丝后植株干物质积累,从而提高成熟期干物质积累量及产量^[13-14]。当施用控释氮肥时棉花有较高的氮素利用效率,更有利于棉花干物质积累,进而使群体干物质积累量分配到生殖器官的比例增加,进而有助于实现高产^[15]。

【切入点】前人对控释氮肥的研究多集中在玉米、小麦等作物上,关于控释氮肥在黄土高原丘陵区糜子生产中是否具有减氮潜力的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究针对当前糜子生产中存在的氮肥种类单一、肥料利用率低等问题,探究控释氮肥减量对糜子干物质积累分配、光合特性及产量的影响,并进一步明确各生育期 *NBI* 与糜子产量的关系。以期建立黄土高原旱作区糜子控释氮肥高效施肥技术,为当地糜子优化减量施氮提供理论依据及技术支持。

表 1 试验地耕层土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of soil in the experimental site

年份	有机质量/(g kg ⁻¹)	全氮量/(g kg ⁻¹)	全磷量/(g kg ⁻¹)	全钾量/(g kg ⁻¹)	碱解氮量/(mg kg ⁻¹)	速效磷量/(mg kg ⁻¹)	速效钾量/(mg kg ⁻¹)	pH 值
2018	3.45	0.51	1.23	22.50	49.80	10.70	139.62	7.75
2019	3.12	0.43	1.12	19.51	42.20	7.20	121.51	7.62

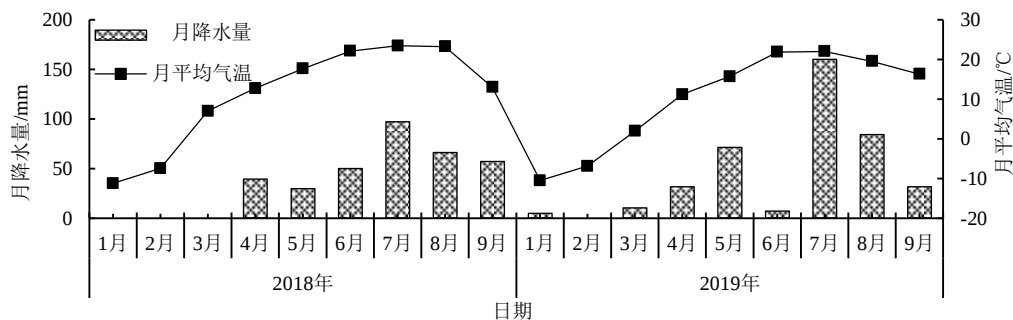


图 1 试验地 2018、2019 年月降水量及月平均气温

Fig.1 Monthly variation of rainfall and temperature in 2018 and 2019

1.2 试验材料

供试糜子品种为当地主栽品种“黑糜子”,由清水河农业局提供。供试肥料:控释氮肥为释放期 90 d 的树脂包衣尿素纯氮量为 44.5%,由宁夏荣和绿色科技有限公司提供纯氮量为 46%的尿素、含 12% P_2O_5 的过磷酸钙、含 51% K_2O 的硫酸钾。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计,在当地施氮量 120 kg/hm² 的基础上设置不同控释氮肥减量处理包括 T0 (不施氮肥)、TN (农民常规施肥,普通尿素 N, 120 kg/hm²)、T1 (等氮量控释氮肥, N 120 kg/hm²)、T2 (控释氮肥减量 10%, N 108 kg/hm²)、T3 (控释氮肥减量 20%, N 96 kg/hm²)、T4 (控释氮肥减量 30%, N 84 kg/hm²)、T5 (控释氮肥减量 40%, N 72 kg/hm²)。各处理均于播种时一次性基施过磷酸钙和硫酸钾,用量为 P_2O_5 80 kg/hm²、 K_2O 25 kg/hm²。试验采用机械条播,行距 25 cm,种植密度 60 万株/hm²,小区面积

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验在内蒙古清水河县五良太乡后脑包村 (39°57'N, 111°39'E) 进行,该地区是典型的长城沿线旱作丘陵地区,丘陵山地占 90%以上,平均海拔 1 374 m。年平均气温 7.1 °C, ≥10 °C 积温 2 370 °C,无霜期 140 d,年日照时间为 2 914 h,年平均大风(指瞬间风速达 17 m/s,即八级以上)日数达 19 d,年总辐射量 570.6 kJ/cm²,干燥度 3.94,年蒸发量 2 577 mm。试验地土壤类型为黄绵土,播前 0~40 cm 耕层土壤理化性质见表 1。该地区属典型的中温带半干旱大陆性季风气候,降水量偏少且春旱尤为严重,2018—2019 年降水量及气温见图 1。

30 m² (6 m×5 m),每个处理 3 次重复,于 2018 年 5 月 28 日播种,9 月 27 日收获;2019 年 5 月 31 日播种,9 月 26 日收获。

1.4 指标测定与方法

于拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期每小区选择 10 株糜子,将植株按叶、茎鞘、穗等不同器官分别处理,置于 105 °C 烘箱内杀青 30 min,然后于 80 °C 烘至恒质量,用电子天平称量各器官干质量,干物质积累量为各器官干物质质量之和;于糜子苗期选择生长均匀的 30 株挂牌,在拔节期、抽穗期和灌浆期使用 SPAD-502 型叶绿素仪测定糜子旗叶中部 SPAD 值,用 Dualex-4 氮平衡指数仪测定糜子氮平衡指数;在糜子灌浆期选择晴天 09:00—11:00 在自然光下采用美国 PP-System 公司生产 CIRAS-3 型便携式光合仪测定旗叶净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 摩尔分数 (C_i) 及蒸腾速率 (Tr);于成熟期取 15 株糜子进行考种,主穗长为主茎穗第 1 分枝基部到穗

头的长度,并测定单株穗质量和千粒质量,计算其平均值,各小区中选择 1 m^2 晾晒风干后脱粒称质量,然后折算成单位面积产量;经济效益是通过对比不同氮肥施用量下投入和产出的差值,从而确定经济效益最大的处理。总投入主要包括化肥和田间管理投入,其中尿素 1.8 元/kg,控释氮肥 3.2 元/kg,硫酸钾 3.5 元/kg,过磷酸钙 0.62 元/kg,人工 100 元/d,除肥料投入外田间管理费用各处理均为 2 100 元/hm²。产出糜子单价为 3.1 元/kg。

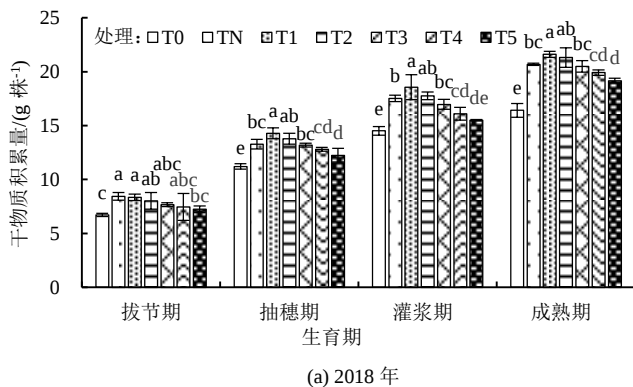
1.5 数据处理

采用 Excel 2021 整理试验数据,用 SAS 9.4 进行 ($P<0.05$) 方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 控释氮肥减量对糜子干物质积累量的影响

图 2 为控释氮肥减量对糜子单株干物质积累的影响,图中不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。由图 2 可知,随着生育期



推进糜子干物质积累量呈上升趋势,施氮肥显著提高了糜子各生育期干物质积累量,2 a 中各生育期施肥处理糜子干物质积累量均高于 T0 处理,增幅为 6.61%~31.59%。拔节期,2 a 中糜子干物质积累量均以 TN 处理最高,但与 T1 处理差异不显著。随控释氮肥减量糜子干物质积累量呈降低趋势,与 TN 处理相比,各减氮处理干物质积累量降幅为 1.07%~17.94%,其中 2 a 中 T5 处理均显著低于 TN 处理。抽穗期、灌浆期、成熟期,糜子干物质积累量均以 T1 处理最高,且在 2018 年 3 个生育期及 2019 年抽穗期显著高于 TN 处理,较 TN 处理增幅达 4.44%~8.77%,这表明施用控释氮肥可以显著提高糜子生育中后期干物质积累量。随着控释氮肥减量,2 a 中抽穗期、灌浆期和成熟期糜子干物质积累量表现为 T1 处理>T2 处理>T3 处理>T4 处理>T5 处理,其中 2 a 中 T2、T3 处理均与 TN 处理差异不显著, T5 处理较 TN 处理显著降低 7.34%~11.49%。

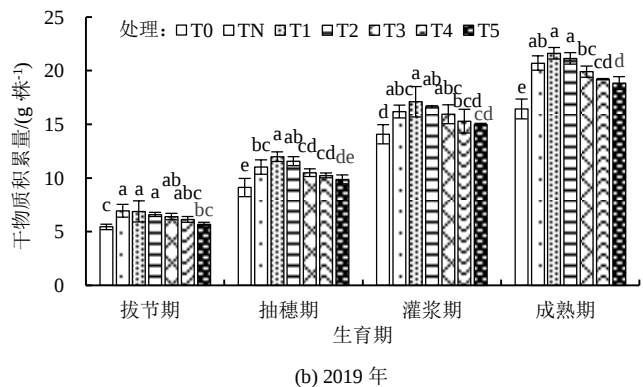


图 2 控释氮肥减量对糜子单株干物质积累量的影响

Fig.2 Effect of controlled-release N fertilizer reduction on dry matter accumulation of proso millets

2.2 控释氮肥减量对糜子成熟期干物质分配的影响

施氮肥显著提高了糜子干物质向穗的转运量,2 a 试验中各施氮处理干物质转运到穗部的比例较 T0 处理增加 14.11%~30.53%,转运比例提高 0.77%~4.26%。施氮肥降低了成熟期分配到糜子叶片和茎鞘中的干物质质量,分配比例分别降低 0.31%~3.66%和 2.01%~6.98%。与施用尿素处理相比,施用控释氮肥在 2018 年和 2019 年分别提高分配到穗中的干物质比例 1.43%和 0.64%,其中 2018 年 TN 处理和 T1 处理间差异达显著水平,相应的施用控释氮肥处理成熟期分配到茎和叶中的干物质减少。随着控释氮肥减量,糜子分配到穗中的干物质质量和分配比例呈降低趋势,其中 T2 处理穗中的干物质分配比例 2 a 平均较 TN 处理提高 0.39%, T3、T4、T5 处理穗中的干物质分配比例 2 a 平均较 TN 处理分别降低 0.52%、1.53%和 2.40%。控释氮肥施量降低糜子干物质分配到茎鞘和叶中的干物质分配比例呈增加趋势。

2.3 控释氮肥减量对糜子灌浆期旗叶光合特性的影响

不同氮肥处理对糜子旗叶光合特性的影响如表 3 所示,施氮可显著提高糜子旗叶灌浆期净光合速率,2018 年各施氮处理糜子净光合速率较 T0 处理提高 8.79%~20.07%,2019 年较 T0 处理提高 11.19%~24.73%。随着控释氮肥施量降低糜子净光合速率呈降低趋势,2 a 间仅 T1 处理和 T2 处理高于 TN 处理,2018 年 T1 处理和 T2 处理分别较 TN 处理增加 2.71%和 0.65%,2019 年 T1 处理和 T2 处理分别较 TN 处理增加 5.08%和 0.82%。T3 处理糜子净光合速率较 TN 处理降低,但差异不显著。T4 处理和 T5 处理糜子净光合速率显著低于 TN 处理,2018 年分别较 TN 处理降低 6.54%和 6.93%,2019 年分别较 TN 处理降低 4.90%和 6.31%。施氮可显著提高糜子旗叶气孔导度,各施氮处理气孔导度 2 a 平均较 T0 处理增加 12.71%~32.99%,除 2019 年 T5 处理外其他各处理均显著高于 T0 处理。糜子气孔导度随控释氮肥施量降低呈降低趋势,2018 年 T1

处理和 T2 处理较 TN 处理分别升高 6.38% 和 2.12%，2019 年较 TN 处理分别升高 6.51% 和 4.95%，2 a 中 T3、T4、T5 处理糜子气孔导度平均较 TN 处理分别降低 5.88%、7.64% 和 9.79%。2 a 中糜子旗叶胞间 CO_2 摩尔分数均以 T0 处理最高，与 T0 处理相比，各施肥处理显著降低 7.98%~14.81%。随着控释氮肥施量降低，糜子旗叶胞间 CO_2 摩尔分数呈增加趋势，2 a 中 T1、T2 处理胞间 CO_2 摩尔分数较 TN 处理平均降低 4.44% 和 0.33%，其中 2019 年 T1 处理显著低于 TN

处理，T3、T4、T5 处理较 TN 处理 2 a 平均提高 2.48%、5.32% 和 8.04%，但仅 T5 处理显著高于 TN 处理。各施肥处理糜子蒸腾速率均显著高于 T0 处理；与 T0 处理相比，各施氮处理蒸腾速率增幅在 8.65%~20.63% 之间。随着控释氮肥减量糜子蒸腾速率呈降低趋势，2 a 中 T1、T2、T3 处理平均较 TN 处理增加 4.19%、3.14% 和 0.33%，T4 处理和 T5 处理较 TN 处理降低 1.37% 和 4.10%，但各控释氮肥处理与 TN 处理差异均不显著。

表 2 控释氮肥减量对糜子成熟期干物质分配的影响

Table 2 Effect of controlled-release N fertilizer reduction on dry matter partitioning in proso millets at maturity

年份	处理	茎鞘		叶		穗	
		分配量/(g 株 ⁻¹)	分配比例/%	分配量/(g 株 ⁻¹)	分配比例/%	分配量/(g 株 ⁻¹)	分配比例/%
2018	T0	4.49 ± 0.06e	27.34 ± 0.38	2.81 ± 0.11b	17.08 ± 0.68	9.13 ± 0.05e	55.58 ± 0.33
	TN	5.53 ± 0.1abc	26.71 ± 0.48	3.29 ± 0.06a	15.91 ± 0.27	11.87 ± 0.04bc	57.38 ± 0.22
	T1	5.69 ± 0.16a	26.34 ± 0.73	3.34 ± 0.04a	15.47 ± 0.19	12.58 ± 0.07a	58.2 ± 0.31
	T2	5.64 ± 0.12ab	26.47 ± 0.59	3.34 ± 0.19a	15.64 ± 0.87	12.34 ± 0.08ab	57.89 ± 0.39
	T3	5.47 ± 0.08bc	26.67 ± 0.37	3.29 ± 0.12a	16.04 ± 0.59	11.75 ± 0.13bc	57.29 ± 0.63
	T4	5.38 ± 0.09cd	27.01 ± 0.47	3.29 ± 0.19a	16.51 ± 0.98	11.25 ± 0.11cd	56.47 ± 0.54
	T5	5.22 ± 0.11d	27.25 ± 0.57	3.21 ± 0.06a	16.74 ± 0.32	10.74 ± 0.05d	56.01 ± 0.28
2019	T0	4.47 ± 0.01d	27.22 ± 0.06	2.85 ± 0.11c	17.32 ± 0.68	9.11 ± 0.06e	55.46 ± 0.35
	TN	5.47 ± 0.15ab	26.44 ± 0.73	3.34 ± 0.16ab	16.11 ± 0.77	11.89 ± 0.11ab	57.45 ± 0.53
	T1	5.69 ± 0.19a	26.33 ± 0.89	3.43 ± 0.15a	15.85 ± 0.67	12.5 ± 0.16a	57.82 ± 0.75
	T2	5.6 ± 0.13a	26.47 ± 0.6	3.41 ± 0.11a	16.14 ± 0.51	12.13 ± 0.14a	57.39 ± 0.67
	T3	5.28 ± 0.13bc	26.54 ± 0.65	3.29 ± 0.03ab	16.52 ± 0.17	11.33 ± 0.02bc	56.94 ± 0.61
	T4	5.14 ± 0.14c	26.75 ± 0.72	3.2 ± 0.05b	16.66 ± 0.24	10.87 ± 0.17cd	56.6 ± 0.88
	T5	5.1 ± 0.13c	27.06 ± 0.69	3.18 ± 0.12b	16.87 ± 0.66	10.57 ± 0.13d	56.07 ± 0.71

注 数值后面不同小写字母表示各处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。

表 3 控释氮肥减量对糜子旗叶光合特性的影响

Table 3 Effect of controlled-release N fertilizer reduction on photosynthetic characteristics of proso millets flag leaf

年份	处理	净光合速率/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 摩尔分数/($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率/($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
2018	T0	22.53 ± 1.11d	0.292 ± 0.004e	146.47 ± 4.70a	5.31 ± 0.08c
	TN	26.33 ± 0.27ab	0.376 ± 0.023abc	122.91 ± 5.54cd	6.18 ± 0.28ab
	T1	27.05 ± 0.51a	0.400 ± 0.015a	119.03 ± 7.97d	6.40 ± 0.24a
	T2	26.51 ± 0.1ab	0.384 ± 0.014ab	122.54 ± 5.55cd	6.33 ± 0.32a
	T3	25.25 ± 1.69bc	0.348 ± 0.018bcd	126.73 ± 5.05bcd	6.16 ± 0.36ab
	T4	24.61 ± 1.03c	0.344 ± 0.035cd	131.63 ± 7.69bc	6.05 ± 0.31ab
	T5	24.51 ± 1.03c	0.335 ± 0.03d	134.46 ± 1.81b	5.82 ± 0.07b
2019	T0	22.9 ± 0.21e	0.325 ± 0.008d	143.31 ± 6.18a	5.86 ± 0.10d
	TN	27.18 ± 0.2bc	0.394 ± 0.029abc	123.89 ± 2.83c	6.52 ± 0.19abc
	T1	28.56 ± 0.11a	0.42 ± 0.011a	116.78 ± 4.97d	6.83 ± 0.09a
	T2	27.40 ± 1.12b	0.413 ± 0.017ab	123.44 ± 3.94cd	6.77 ± 0.22ab
	T3	26.37 ± 0.58cd	0.377 ± 0.021bc	126.20 ± 4.57bc	6.59 ± 0.27abc
	T4	25.85 ± 0.64d	0.367 ± 0.038c	128.28 ± 2.11bc	6.47 ± 0.23bc
	T5	25.46 ± 0.34d	0.359 ± 0.02cd	132.18 ± 0.81b	6.36 ± 0.04c

2.4 控释氮肥减量对糜子旗叶 SPAD 值的影响

由表 4 可知，施氮可显著提高糜子旗叶 SPAD 值；与 T0 处理相比，各施肥处理拔节期、抽穗期和灌浆期 SPAD 值分别提高 4.39%~17.36%、7.87%~20.43% 和 6.63%~21.03%。拔节期，2018、2019 年糜子旗叶 SPAD 值以 TN 处理最高分别达到 32.90 和 30.40，等量控释氮肥处理 SPAD 值稍有降低但差异不显著，随着控释氮肥减量糜子旗叶 SPAD 值呈降低趋势，T1、T2、T3、T4、T5 处理较 TN 处理分别降低 1.62%、4.25%、5.28%、6.59% 和 9.51%。施用控释氮肥可显著提高糜子生育后期旗叶 SPAD 值，2018、2019 年抽穗期 T1 处理 SPAD

值较 TN 处理分别提高 2.19% 和 3.14%，2018、2019 年灌浆期分别较 TN 处理显著提高 5.05% 和 3.81%。随着控释氮肥施量降低糜子旗叶 SPAD 值 2 a 均呈降低趋势。其中 2018、2019 年抽穗期 T3、T4、T5 处理糜子旗叶 SPAD 值均低于 TN 处理，且 2018、2019 年 T5 处理 SPAD 值较 TN 处理显著降低了 5.83% 和 6.64%。灌浆期 T1 处理和 T2 处理处理糜子旗叶 SPAD 值 2 a 平均较 TN 处理增加 4.43% 和 1.17%。T3、T4、T5 处理旗叶 SPAD 值 2 a 平均较 TN 处理降低 0.94%、4.03%、6.05%。其中 T1 处理显著高于 TN 处理，2 a 中 T5 处理 SPAD 值均显著低于 TN 处理。

表 4 控释氮肥减量对糜子旗叶 SPAD 值的影响

Table 4 Effect of controlled-release N fertilizer

reduction on SPAD values of proso millets flag leaves

年份	处理	拔节期	抽穗期	灌浆期
2018	T0	28.03±0.59e	29.26±0.18d	30.86±0.57d
	TN	32.90±0.46a	34.48±0.16ab	35.55±0.46b
	T1	32.37±0.47ab	35.23±1.03a	37.34±0.24a
	T2	31.53±0.32bc	34.20±0.15ab	36.01±0.15b
	T3	31.27±0.86c	33.57±0.09bc	35.16±0.26b
	T4	30.80±0.62cd	33.41±1.12bc	33.47±0.61c
2019	T5	29.84±0.42d	32.47±1.21c	32.90±1.10c
	T0	26.29±0.54e	27.5±0.76e	27.67±0.81d
	TN	30.40±0.37a	31.77±0.80ab	32.05±0.59b
	T1	29.91±0.41ab	32.77±0.43a	33.27±0.22a
	T2	29.08±0.61bc	32.29±0.48a	32.38±0.61ab
	T3	28.70±0.49bc	30.82±0.30bc	31.80±0.48b
	T4	28.33±1.42cd	30.19±0.89cd	31.34±0.88bc
	T5	27.44±0.47de	29.66±0.43d	30.56±0.68c

2.5 控释氮肥减量对糜子旗叶氮平衡指数 (NBI) 的影响

由表 5 可知, 施氮可显著提高糜子 NBI, 2 a 中施氮处理 NBI 较 T0 处理增加 9.45%~44.51%。拔节期, 糜子 NBI 以 TN 处理最高, 但与 T1 处理差异不显著, 各控释氮肥处理 NBI 较 TN 处理降低 2.41%~20.07%。与施用普通尿素处理相比, 施用控释氮肥可显著提高糜子生育后期旗叶 NBI, 抽穗期和灌浆期糜子 NBI 在 2 a 中均以 T1 处理最高, 较 TN 处理增加 2.66%~8.34%。随着控释氮肥施量降低糜子 NBI 呈降低趋势, 2 a 中 T1 处理和 T2 处理均与 TN 处理差异不显著, T5 处理均显著低于 TN 处理。以 2018 年灌浆期为例, T1 处理和 T2 处理糜子旗叶 NBI 较 TN 处理增加 8.34% 和 3.88%, T3、T4、T5 处理较 TN 处理分别降低 4.11%、7.20%、10.86%, 其中 T1、T4、T5 处理与 TN 处理差异显著。

表 5 控释氮肥减量对糜子氮平衡指数的影响

Table 5 Effect of controlled-release nitrogen fertilizer

reduction on the nitrogen balance index of proso millets

年份	处理	拔节期	抽穗期	灌浆期
2018	T0	20.71±2.02d	21.65±1.24c	21.87±0.91f
	TN	28.95±1.40a	28.78±2.55a	29.17±0.42bc
	T1	27.87±0.68ab	29.54±2.31a	31.60±0.17a
	T2	27.16±0.92ab	28.20±1.23a	30.30±1.35ab
	T3	26.19±1.54bc	27.71±2.22ab	27.97±0.51cd
	T4	24.63±0.75c	26.91±0.51ab	27.07±1.29de
2019	T5	23.93±1.44c	25.09±0.78b	26.00±1.64e
	T0	17.06±1.04e	18.65±0.85e	20.60±1.24e
	TN	23.36±1.20a	24.00±0.60ab	27.08±1.2b
	T1	22.80±0.70a	25.11±0.70a	29.05±0.50a
	T2	21.43±0.50b	23.19±0.80bc	28.71±0.58a
	T3	20.48±0.42bc	22.53±0.42cd	25.89±1.00bc
	T4	19.96±0.76cd	22.01±1.25cd	25.00±0.80cd
	T5	18.67±0.65d	21.53±0.59d	24.03±0.5d

2.6 控释氮肥减量对糜子产量及其构成因素的影响

由表 6 可知, 施氮可显著提高糜子籽粒产量, 2 a 中 TN、T1、T2、T3、T4、T5 处理产量平均较 T0 处

理增加 36.88%、42.92%、40.75%、35.39%、32.29%、30.31%。各施氮肥处理糜子产量 2 a 中均以 T1 处理最高, 其中 2018、2019 年 T1 处理产量分别达 4 400.01、4 198.43 kg/hm²; 与普通尿素相比, 施用等量控释氮肥可显著提高糜子产量, 2018、2019 年产量分别增加 4.97% 和 3.88%。随着控释氮肥施量降低糜子产量呈降低趋势, 其中 T1 处理糜子产量 2 a 均显著高于 TN 处理, T2、T3 处理与 TN 处理差异不显著, T4、T5 处理显著低于 TN 处理, 这表明控释氮肥减量 20% 以上时肥效较普通尿素差。穗长是糜子产量构成的重要因素, 2 a 中 T1、T2、T3 处理糜子穗长均与 TN 处理差异不显著, 2018 年 T5 处理显著低于 TN 处理。施氮显著提高了糜子千粒质量, 但施用控释氮肥处理糜子千粒质量与施用普通尿素处理差异不显著。穗数和穗质量是影响糜子产量的主要因素, 随着控释氮肥施量降低糜子穗数呈降低趋势, 其中 2 a 中 T1、T2、T3 处理均与 TN 处理差异不显著, 2018 年 T4 处理和 T5 处理显著低于 TN 处理, 降幅为 0.40%~5.75%。糜子穗质量受氮肥施用量影响显著, 2 a 中 T1、T2 处理糜子穗质量平均较 TN 处理提高 4.44% 和 1.86%, 2 a 中 T3、T4、T5 处理糜子穗质量平均较 TN 处理降低 2.19%、7.64%、9.22%。

2.7 各生育期旗叶 SPAD 值、NBI 与产量的相关性

叶片 SPAD 值和 NBI 可用来反映作物氮素营养及产量水平, 糜子各生育期旗叶 SPAD 值、NBI 与产量等指标的相关性见表 7。糜子 3 个生育期旗叶 SPAD 值和 NBI 与干物质积累、净光合速率和产量均呈正相关关系。干物质积累与灌浆期 SPAD 值、拔节期 NBI 极显著正相关, 与抽穗期和灌浆期 NBI 显著正相关; 净光合速率分别与拔节期和灌浆期 SPAD 值和 NBI 极显著正相关, 与抽穗期 SPAD 值显著正相关; 糜子产量与灌浆期 SPAD 值和 NBI、拔节期 NBI 极显著正相关, 与拔节期 SPAD 值显著正相关。这表明拔节期和灌浆期的 SPAD 值及 NBI 均能在一定程度上反映糜子光合及干物质积累能力强弱, 但与 SPAD 值相比, NBI 与干物质积累相关性更高, 在反映糜子产量上潜力更大。

2.8 控释氮肥减量对糜子经济效益的影响

不同氮肥处理对糜子经济效益的影响见表 8。控释氮肥价格是尿素的 1.78 倍, T1 处理投入最高达 3 522.70 元/hm², T1、T2、T3、T4、T5 处理投入较 TN 处理分别高 10.37%、8.19%、5.91%、3.51%、0.98%。施氮可提高糜子产出, 各施氮处理产出较 T0 处理增幅达 30.28%~42.89%。2 a 中各施氮处理糜子产出均以 T1 处理最高, 且 T1 处理和 T2 处理产出分别较 TN 处理增加 4.96%~3.88% 和 3.54%~2.12%。2 a 中各处理净收益以 T1 处理和 T2 处理最高, 与 TN 处理相比,

2018 年 T1 处理和 T2 处理增收分别达 280.02 元/hm² 随着控释氮肥施量降低, 2 a 中 T3、T4、T5 处理平
和 179.14 元/hm², 2019 年仅 T1 处理经济效益增加 均经济效益较 TN 处理降低 332.45、525.86、641.69
121.15 元/hm², T2 处理经济效益降低 14.95 元/hm²。 元/hm²。

表 6 控释氮肥减量对糜子产量及其构成因素的影响

Table 6 Effect of controlled-release N fertilizer reduction on proso millets yield and its constituent factors

年份	处理	产量/(kg hm ⁻²)	穗长/cm	千粒质量/g	穗数/(×10 ⁴ hm ⁻²)	穗质量/g
2018	T0	3 108.55±12.00e	32.83±3.62c	7.34±0.24b	47.70±0.28e	10.30±0.03d
	TN	4 191.87±106.11b	38.2±1.56ab	7.97±0.78a	54.50±0.55ab	11.61±0.98ab
	T1	4 400.01±114.67a	39.97±1.01a	8.00±0.06a	55.45±0.66a	12.10±0.01a
	T2	4 340.54±53.84a	39.17±0.85ab	7.80±0.10ab	54.74±0.15ab	11.74±0.55ab
	T3	4 156.84±101.51bc	37.5±1.40ab	7.70±0.30ab	53.26±2.37bc	11.32±0.55abc
	T4	4 058.30±45.96cd	36.57±1.80ab	7.67±0.15ab	52.79±0.26cd	10.92±0.09bcd
	T5	4 011.76±19.56d	35.93±2.72bc	7.43±0.20ab	51.36±0.24d	10.57±0.06cd
2019	T0	2 909.39±87.27e	29.13±1.95d	7.15±0.15c	40.75±1.83d	8.68±0.57c
	TN	4 041.54±68.67bc	33.87±0.9ab	7.67±0.13ab	45.62±0.24abc	9.75±0.70ab
	T1	4 198.43±23.03a	34.53±0.95a	7.77±0.15a	46.91±0.80a	10.21±0.61a
	T2	4 127.6±76.32ab	32.50±0.89abc	7.67±0.05ab	46.21±0.66ab	10.01±0.36a
	T3	3 957.00±70.82cd	32.87±2.55abc	7.67±0.23ab	46.36±0.14ab	9.57±0.44abc
	T4	3 899.89±94.3d	31.60±1.49bcd	7.55±0.21ab	45.44±0.43bc	8.84±0.81bc
	T5	3 827.85±87.29d	30.57±0.23cd	7.43±0.15ab	44.33±0.35c	8.83±0.41bc

表 7 旗叶 SPAD 值、氮平衡指数与产量的相关性

Table 7 Correlation of SPAD, nitrogen balance index of flag leaf and yield

指标	生育期	干物质积累	净光合速率	产量
SPAD	拔节期	0.73*	0.92**	0.76*
	抽穗期	0.17	0.52*	0.43
	灌浆期	0.94**	0.97**	0.94**
NBI	拔节期	0.90**	0.96**	0.89**
	抽穗期	0.60*	0.26	0.51
	灌浆期	0.73*	0.93**	0.74**

注 *表示在 $P<0.05$ 水平显著相关, **表示在 $P<0.01$ 水平显著相关。

表 8 控释氮肥减量对糜子经济效益的影响

Table 8 Effect of controlled-release N fertilizer reduction on economic efficiency of proso millets

年份	处理	投入/ (元 hm ⁻²)	产出/ (元 hm ⁻²)	净收益/ (元 hm ⁻²)
2018	T0	2 100.00	9 634.80	7 534.80
	TN	3 157.49	12 994.80	9 837.31
	T1	3 522.70	13 640.04	10 117.34
	T2	3 439.22	13 455.68	10 016.45
	T3	3 355.75	12 988.50	9 632.75
	T4	3 272.27	12 580.74	9 339.47
	T5	3 188.79	12 436.43	9 247.65
2019	T0	2 100.00	9 019.12	6 919.12
	TN	3 157.49	12 528.77	9 371.29
	T1	3 522.70	13 015.14	9 492.44
	T2	3 439.22	12 795.56	9 356.34
	T3	3 355.75	12 266.69	8 910.94
	T4	3 272.27	12 089.67	8 817.40
	T5	3 188.79	11 866.35	8 677.56

3 讨论

氮肥运筹是提高作物肥料利用率, 获得高产的基础, 控释氮肥可与作物需肥规律相匹配, 最终达到增加作物产量的目的^[16]。较高的干物质积累量有利于作物产量形成^[17]。施氮可显著提高作物干物质积累量, 本试验中各施氮处理糜子干物质积累量较 T0 处理提

高 4.84%~31.58%。尹彩侠等^[18]研究表明, 在春玉米连作条件下控释氮肥较农民习惯施肥量减氮 25%仍可提高玉米干物质积累量 7.70%。控释氮肥全量施用和减量 25%可提高玉米成熟期干物质积累 4.78%~10.43%^[19]。本研究表明, 施用控释氮肥处理较施用尿素处理可提高糜子生育中后期干物质积累量 8.77%, 随着控释氮肥施量降低糜子干物质积累量呈下降趋势, 在减氮 10%时糜子干物质积累较施用尿素处理提高 1.37%~4.88%, 减量 20%时干物质积累与 TN 处理差异不显著。这表明控释氮肥能更好匹配糜子全生育期对氮素的需求, 从而满足作物减肥高效生产, 这与前人^[20]研究结果一致。合理施用氮肥有利于糜子源库比例协调, 可以在提高作物干物质积累的同时促进其地上部干物质向穗部的分配比例进而增加产量^[21-22]。与施用普通肥料相比, 施用控释氮肥后玉米成熟期干物质向籽粒中的转运提高 1.94%^[23]。本试验中, 施用控释氮肥可以提高糜子成熟期干物质向穗的转运。适量减少控释氮肥用量不影响植株干物质向籽粒中转移, 并能提高植株氮素的吸收和转运能力^[18]。本试验中, 随着控释氮肥施量降低糜子分配到穗中的干物质质量并未提高, 这可能与作物类型和控释氮肥施用量有关。施用尿素处理氮素在糜子生育前期释放较多, 提高了拔节期糜子干物质积累, 但控释氮肥在作物生育期内均匀释放, 表现为在作物生育中后期维持了较高的干物质积累。总的来说, 控释氮肥在糜子生育后期仍能提供较好的氮素供应, 促进其干物质积累, 为产量提高奠定基础。

氮素是作物生长发育中需求量最大的矿质营养元素, 灌浆中后期适宜的土壤氮素水平有利于作物叶片光合能力和碳代谢水平的提高, 能明显延缓叶片的

衰老速度,显著提高作物灌浆期的净光合速率,增强作物源器官生育后期的同化物输出能力^[24-25]。随着土壤供氮能力的提升小麦叶片叶绿素量呈上升趋势^[26]。相同施氮量下控释氮肥可显著提高玉米叶片叶绿素量及净光合速率,且在控释氮肥减量 25%时净光合速率降低不显著^[27-28]。与施用普通尿素处理相比,控释氮肥一次性基施下减量 50%仍可保持玉米和小麦叶片叶绿素量不变^[29]。本研究发现,施用控释氮肥能提高糜子生育后期旗叶 *SPAD* 值,较 TN 处理增加 2.19%~5.50%,但随着控释氮肥施量降低糜子旗叶 *SPAD* 及净光合速率均呈降低趋势,在减氮 20%时与 TN 处理差异不显著。这表明在黄土高原丘陵区施用控释氮肥及适量减氮并不会影响糜子光合能力,在一定程度上也能降低糜子生育前期生长过盛,后期光合能力受抑制的风险^[25]。本试验中施用控释氮肥及适量减氮对糜子光合性能的提升较前人^[29]研究结果偏小,这可能是因为作物、土壤水热条件及氮肥类型等不同导致的。本研究发现,随着控释氮肥减量糜子气孔导度呈降低趋势,胞间 CO_2 摩尔分数呈升高趋势,这表明适量的控释氮肥对净光合速率的提升一方面通过增加气孔导度,促进旗叶吸收更多的 CO_2 ,另一方面提高细胞对 CO_2 的利用率,增强碳代谢能力^[30]。*NBI* 和 *SPAD* 值与植株含氮量显著相关,可作为实时快速诊断作物氮素营养的指标,且 *NBI* 在不同水分条件下均能较好地反映施氮水平,更适合在黄土高原雨养农业中应用^[31-32]。本试验中,糜子旗叶 *NBI* 表现出随施氮量降低而下降的趋势。Tremblay 等^[33]研究发现,*NBI* 较 *SPAD* 值可以更好得反映水稻产量。在马铃薯上的研究^[34]也表明,叶片 *NBI* 和 *SPAD* 值与施氮量正相关,且块茎膨大期 *NBI* 更能较好地预测产量。这与本研究结果相同,即拔节期和灌浆期糜子旗叶 *NBI* 与产量极显著正相关,表现出更大的预测糜子产量的潜力。

控释氮肥可以提高作物光合特性,促进干物质累积能力进而增加产量,且应用在质地较轻、产量水平中等偏下田块效果更佳^[35-37]。施用控释氮肥较等氮量尿素处理冬小麦 2 a 平均增产 9.2%,与传统施肥处理相比,控释氮肥在降低 23%的施氮量时产量无显著差异^[38]。适量减少控释氮肥用量并未显著改变干物质向籽粒的转运量,较农民习惯施肥减氮 25%时,玉米产量、干物质及氮素累积量并未显著降低,且 2 a 平均增产 4.5%^[18]。本试验中,施用等量控释氮肥处理较施用尿素处理 2 a 增产 4.97%和 3.88%,且控释氮肥减量 20%时其产量未显著降低,这与人^[37,39]研究结果相似。产量增减幅度差异可能与肥料类型、氮肥施用量及土壤肥力、温度、含水率等生态环境不同影响

了树脂包膜控释氮肥养分释放有关^[40]。

4 结 论

1) 拔节期和灌浆期,糜子旗叶 *SPAD* 值及 *NBI* 与干物质积累、净光合速率及产量均呈正相关关系,其中拔节期和灌浆期糜子旗叶 *NBI* 与净光合速率及产量呈极显著正相关,有更好的预测糜子产量的潜力。

2) 施用控释氮肥较尿素可促进糜子旗叶 *SPAD* 值、*NBI* 及净光合速率的提高,增加糜子生育中后期干物质积累量并提高干物质分配到穗部的比例,最终使糜子增产 3.88%~4.97%,经济效益增加 121~280 元/hm²。随着控释氮肥施量降低糜子各生理指标呈降低趋势,减氮 20%以上时糜子光合能力显著下降,干物质积累量及产量均显著低于 TN 处理。综上所述,在黄土高原丘陵区糜子生产中控释氮肥一次性基肥效优于尿素,表现出较大的减肥潜力。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 申瑞玲, 马玉玲, 杜文娟, 等. 糜子的营养生理功能特性及产品开发现状[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(1): 9-12.
SHEN Ruiling, MA Yuling, DU Wenjuan, et al. Nutrition and physiological functional properties and food processing of proso millet[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(1): 9-12.
- [2] KALAM AZAD M O, JEONG D I, ADNAN M, et al. Effect of different processing methods on the accumulation of the phenolic compounds and antioxidant profile of broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) flour[J]. Foods (Basel, Switzerland), 2019, 8(7): 230.
- [3] HABIYAREMYE C, MATANGUIHAN J B, GUEDES J D, et al. Proso millet (*Panicum miliaceum* L.) and its potential for cultivation in the Pacific northwest, U.S.: A review[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 7: 1 961.
- [4] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
JU Xiaotang, GU Baojing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783-795.
- [5] 吴琼. 缓控释肥与水分互作对水稻产量及氮素吸收利用的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
WU Qiong. Interactive effects of slow and controlled release fertilizers and water management on yield, nitrogen absorption and utilization of rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2020.
- [6] 郭金金. 尿素掺混缓释氮肥对夏玉米/冬小麦生长和氮素利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
GUO Jinjin. Effects of slow-release nitrogen fertilizer and urea blending on summer maize/winter wheat growth and nitrogen utilization[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [7] 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 (Basel, Switzerland), 2021, 10(2): 238.
- [8] CEROVIC Z G, MASDOUMIER G, GHOZLEN N B, et al. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids[J]. Physiologia Plantarum, 2012, 146(3): 251-260.
- [9] 刘廷良. 控释氮肥长期定位减施对小麦-玉米周年氮素利用和产量的调控[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
LIU Tingliang. Regulation of long-term location reduction of

- controlled-release nitrogen fertilizer on annual nitrogen utilization and yield of wheat and maize[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [10] 郑曙峰, 徐道青, 陈敏, 等. 一次性减量施用控释肥对棉花群体冠层结构及产量构成的影响[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(11): 2 012-2 019. ZHENG Shufeng, XU Daoqing, CHEN Min, et al. Effects of one-off decreasing controlled-release fertilizer application on cotton canopy structure and yield components[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2020, 57(11): 2 012-2 019.
- [11] 曹兵, 丁紫娟, 侯俊, 等. 控释掺混肥结合增密对水稻氮肥利用效率和氨挥发的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 56-63. CAO Bing, DING Zijuan, HOU Jun, et al. Effects of the blends of controlled-release and conventional nitrogen fertilizers combined with dense planting on nitrogen use efficiency and ammonia volatilization in a paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(13): 56-63.
- [12] 朱亚, 赵永平, 郑仕伟, 等. 缓释肥与叶面肥配施对烟草生长发育和光合特性的影响[J]. 江西农业学报, 2018, 30(6): 67-70. ZHU Ya, ZHAO Yongping, ZHENG Shiwei, et al. Effects of combined application of slow-release fertilizer and foliage fertilizer on growth, development and photosynthetic characteristics of tobacco plants[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(6): 67-70.
- [13] 李磊, 安浩军, 岳茂武, 等. 控失肥与普通复合肥对小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(24): 1-6. LI Lei, AN Haojun, YUE Maowu, et al. Effects of loss control and normal compound fertilizers on growth and development and yield of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(24): 1-6.
- [14] 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): 1 614-1 625. GAO Xuejian, LI Guanghao, LU Weiping, 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): 1 614-1 625.
- [15] 徐景丽, 李亚兵, 胡大鹏, 等. 缓释氮肥对小麦后直播棉产量及氮素吸收利用的影响[J]. 棉花学报, 2020, 32(1): 42-51. XU Jingli, LI Yabing, HU Dapeng, et al. The effects of slow-release nitrogen fertilizers on the nitrogen uptake and utilization efficiency and yield for direct seeded cotton after wheat harvested cropping system[J]. Cotton Science, 2020, 32(1): 42-51.
- [16] 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 Rui, ZHANG Min, ZHUGE Yuping, 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.
- [17] CHEN Z M, WANG Q, MA J W, et al. Impact of controlled-release urea on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a single rice cropping system[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 10 432.
- [18] 尹彩侠, 李前, 孔丽丽, 等. 控释氮肥减施对春玉米产量、氮素吸收及转运的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3 941-3 950. YIN Caixia, LI Qian, KONG Lili, et al. Effect of reduced controlled-release nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and transportation of spring maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3 941-3 950.
- [19] 赵斌, 董树亭, 张吉旺, 等. 控释肥对夏玉米产量和氮素积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1 760-1 768. ZHAO Bin, DONG Shuting, ZHANG Jiawang, et al. Effects of controlled-release fertilizer on yield and nitrogen accumulation and distribution in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10): 1 760-1 768.
- [20] 任寒, 朱国梁, 董浩, 等. 减施配方控释肥调控土壤理化性状与稳定夏玉米产量[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1 440-1 446. REN Han, ZHU Guoliang, DONG Hao, et al. Reducing application of formula controlled-release fertilizers regulates soil nitrogen levels to maintain summer maize yield[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(6): 1 440-1 446.
- [21] 张磊, 何继红, 董孔军, 等. 氮肥对粳性和糯性糜子干物质积累和产量性状及氮肥利用效率的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(12): 2 860-2 868. ZHANG Lei, HE Jihong, DONG Kongjun, et al. Effects of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation, yield traits and nitrogen use efficiency of non-waxy and waxy broomcorn millet[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(12): 2 860-2 868.
- [22] 宫香伟, 韩浩坤, 张大众, 等. 氮肥运筹对糜子生育后期干物质积累与转运及叶片氮素代谢的调控效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(6): 1 045-1 056. GONG Xiangwei, HAN Haokun, ZHANG Dazhong, et al. Effects of nitrogen fertilizer on dry matter accumulation, transportation and nitrogen metabolism in functional leaves of broomcorn millet at late growth stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(6): 1 045-1 056.
- [23] 赵欢, 张萌, 秦松, 等. 缓释肥减量施用对覆膜栽培玉米生物性状、干物质积累与养分分配的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25(1): 139-146. ZHAO Huan, ZHANG Meng, QIN Song, et al. Effects of controlled release fertilizer reduction in plastic mulching on biological characteristics, dry matter accumulation and distribution of nutrient content of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(1): 139-146.
- [24] 刘鹏, 杨刚, 常闻谦, 等. 水氮运筹对糜子生育后期干物质积累、转运及水氮利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4): 139-145. LIU Peng, YANG Gang, CHANG Wenqian, et al. Effects of water and nitrogen management on dry matter accumulation, transportation, and water and nitrogen use efficiency of broomcorn millet in the late growth stage[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(4): 139-145.
- [25] 曲文凯, 徐学欣, 赵金科, 等. 施氮对滴灌冬小麦花后光合生理、灌浆特性及产量品质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5): 327-336. QU Wenkai, XU Xuexin, ZHAO Jinke, et al. Effect of nitrogen application on photosynthetic physiology, grain-filling characteristics and yield and quality after anthesis of winter wheat under drip irrigation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 327-336.
- [26] 马建辉, 张利霞, 姜丽娜, 等. 氮肥和密度对冬小麦光合生理和物质积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(5): 674-680. MA Jianhui, ZHANG Lixia, JIANG Lina, et al. Effect of nitrogen and density on photosynthetic physiology and matter accumulation of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(5): 674-680.
- [27] 范振义. 控释肥对坡耕地小麦-玉米生长及径流氮、磷养分流失的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013. FAN Zhenyi. Effects of controlled release fertilizer on growth of wheat-corn and loss of runoff nitrogen and phosphate in slope filed[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013.
- [28] 郭松, 喻华, 曾祥忠, 等. 包膜控释尿素对玉米花后干物质和氮素积累与分配的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(17): 88-92. GUO Song, YU Hua, ZENG Xiangzhong, et al. Effect of wrapped controlled-release urea on post-flowering dry matter and nitrogen accumulation and distribution in maize[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2019, 47(17): 88-92.
- [29] 于淑芳, 杨力, 张民, 等. 控释肥对小麦玉米生物学性状和土壤硝酸盐积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 128-133. YU Shufang, YANG Li, ZHANG Min, et al. Effect of controlled release fertilizers on the biological properties of wheat and corn and soil nitrate accumulation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(1): 128-133.
- [30] 马泉, 姚远, 郑国利, 等. 硫包膜缓释肥施用模式对稻茬冬小麦冠层结构、光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(4): 465-474. MA Quan, YAO Yuan, ZHENG Guoli, et al. Effect of application patterns of sulfur coated slow-released fertilizer on canopy structure, photosynthetic characteristics and yield of winter wheat after rice[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(4): 465-474.
- [31] 朱娟娟, 梁银丽, TREMBLAY Nicolas. 不同水氮处理对玉米氮素诊

- 断指标的影响(英文)[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1 259-1 265.
- ZHU Juanjuan, LIANG Yinli, TREMBLAY Nicolas. Responses of corn (*zea mays* L.) nitrogen status indicators to nitrogen rates and soil moisture[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1 259-1 265.
- [32] 鱼欢, 杨改河, 王之杰. 不同施氮量及基追比例对玉米冠层生理性状和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 266-273.
- YU Huan, YANG Gaihe, WANG Zhijie. Nitrogen rate and timing considerations on yield and physiological parameters of corn canopy[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 266-273.
- [33] TREMBLAY N, WANG Z J, BÉLEC C. Performance of dualox in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 33(1): 57-70.
- [34] 孙梦媛, 刘景辉, 米俊珍, 等. 控释尿素对旱作马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 7-15.
- SUN Mengyuan, LIU Jinghui, MI Junzhen, et al. The effects of controlled-release of urea on yield and water use efficiency of rain-fed potato[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 7-15.
- [35] 彭碧琳, 李妹娟, 胡香玉, 等. 轻简氮肥管理对华南双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1 424-1 438.
- PENG Bilin, LI Meijuan, HU Xiangyu, et al. Effects of simplified nitrogen managements on grain yield and nitrogen use efficiency of double-cropping rice in South China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(7): 1 424-1 438.
- [36] LI Z L, CHEN Q, GAO F, et al. Controlled-release urea combined with fulvic acid enhanced carbon/nitrogen metabolic processes and maize growth[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(9): 3 644-3 654.
- [37] 谭德水, 林海涛, 朱国梁, 等. 黄淮海东部冬小麦一次性施肥的产量效应[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3 887-3 896.
- TAN Deshui, LIN Haitao, ZHU Guoliang, et al. Effect of one-off fertilization on winter wheat yield in Huang-Huai-Hai East region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3 887-3 896.
- [38] 徐杰, 王锡玖, 薛艳芳, 等. 缓控释氮肥减施对冬小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. 山东农业科学, 2021, 53(9): 68-74.
- XU Jie, WANG Xijiu, XUE Yanfang, et al. Effects of decreasing amounts of controlled-release nitrogen fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of winter wheat[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2021, 53(9): 68-74.
- [39] ZHENG W K, SUI C L, LIU Z G, et al. Long-term effects of controlled-release urea on crop yields and soil fertility under wheat-corn double cropping systems[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(4): 1 703-1 716.
- [40] 咸云宇. 缓释氮肥与尿素配施对迟播小麦产量、品质形成及氮素利用的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2022.
- XIAN Yunyu. Effect of slow release nitrogen fertilizer combined with urea on yield and quality formation and nitrogen utilization of late sowing wheat[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.

Effects of Reduced Nitrogen Fertilization Via Controlled Release on Dry Matter Accumulation, Photosynthetic Traits and Yield of Proso Millet

WANG Ying¹, LIU Jinghui^{1*}, WU Junying^{2*}, MI Junzhen¹, SUN Mengyuan¹, ZHANG Lanying¹, FENG Xueying¹

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University/Inner Mongolia Coarse Grain Engineering Technology Research Center, Hohhot 010019, China; 2. Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou 014109, China)

Abstract: 【Objective】 Proso millet is a common crop cultivated in the Loess Plateau in northwestern China and sustainable production needs to reduce nitrogen fertilization. This paper presents the findings of an experimental study that investigated the impact of reducing nitrogen fertilization through controlled release on photosynthetic traits and yield of the millet. 【Method】 The field experiment was conducted with application of 120 kg/hm² of urea taken as the control (TN). There were seven controlled-release treatments, which applied N fertilizer at 120 kg/hm² (T1), 108 kg/hm² (T2), 96 kg/hm² (T3), 84 kg/hm² (T4), 72 kg/hm² (T5), and zero (T0). During the experiment, we measured the changes in dry matter accumulation, photosynthetic traits of the flag leaves, *SPAD*, *NBI* and yield of the millets in each treatment and the CK. 【Result】 ①Nitrogen fertilization significantly improved the dry matter accumulation and photosynthetic traits of the flag leaves at all growing stages, regardless of treatments. Compared with CK, applying the same amount of N fertilizer but at controlled release increased the dry matter accumulation in the middle and late stages by 4.44%~8.77%, proportion of the dry matter allocated to the ears at maturity stage by 1.58%~2.75%. ②Depending on the application rate, controlled release of N fertilizer led to a 2.19% to 5.05% increase in chlorophyll content and a 2.66% to 8.34% increase in nitrogen balance index of the flag leaves; it also increased the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate at the filling stage by 3.90%, 6.40% and 4.20%, respectively, while reducing the average intercellular CO₂ concentration by 4.45%. ③With the decrease in controlled-release N fertilization, both dry matter accumulation and photosynthetic rate decreased, and the decrease was more significant in T3—T0. *SPAD* and *NBI* of the flag leaves were positively correlated with the dry matter accumulation, net photosynthetic rate and the yield; the correlations between yield and *NBI* at the jointing and filling stages was significantly positive. ④Applying the same amount of N as in TN but with controlled release increased the yield of the millet by 4.42%, equivalent to an increase in net income by 121~280 Yuan/hm². Reducing 10%~20% of N used in the TN with the controlled release did not reduce the yield significantly, but further reduction beyond 20% led to a decrease in yield by 3.19%~5.23%. 【Conclusion】 Applying N fertilizer in controlled release to proso millet in hilly areas in Loess Plateau can improve its yield. It hence has a potential application for other crops in this region and other regions with similar growing environments.

Key words: dry matter accumulation and distribution; nitrogen balance index; net photosynthetic rate; *SPAD*

责任编辑: 白芳芳