

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.06.004

王英, 刘景辉, 武俊英, 等. 控释氮肥减量对糜子产量、氮素利用及土壤氮含量的影响. 土壤, 2023, 55(6): 1187–1197.

# 控释氮肥减量对糜子产量、氮素利用及土壤氮含量的影响<sup>①</sup>

王英<sup>1</sup>, 刘景辉<sup>1\*</sup>, 武俊英<sup>2\*</sup>, 米俊珍<sup>1</sup>, 孙梦媛<sup>1</sup>, 张兰英<sup>1</sup>, 冯学颖<sup>1</sup>

(1 内蒙古农业大学农学院/内蒙古杂粮工程技术研究中心/内蒙古农业大学杂粮产业协同创新中心/全国农业科研杰出人才及其创新团队, 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:** 针对黄土高原旱作区糜子生产中氮肥种类单一、“一炮轰”等施肥方式造成氮肥利用率低的问题, 本文以当地常规施氮(尿素 N 120 kg/hm<sup>2</sup>)为对照, 设置不同控释氮肥减量处理探究糜子产量、成熟期氮素积累分配及氮素利用效率对控释氮肥的响应, 分析土壤各形态氮素含量的变化规律, 以期为建立旱地糜子控释氮肥一次性基施轻简栽培技术提供支撑。结果表明: 施用控释氮肥通过增加单位面积穗数和穗重显著提高了糜子产量, 两年分别增产 3.88% 和 4.97%, 控释氮肥减量 20% 以下时糜子产量与尿素差异不显著。施用控释氮肥可提高糜子成熟期氮素积累量 1.97%~3.21%, 增加糜子氮素向籽粒中的分配比例 0.55%~1.18%, 控释氮肥减量 20% 以上时糜子氮素积累量显著低于尿素全量基施处理。施用控释氮肥提高了糜子氮肥表观利用率、氮肥偏生产力、氮肥农学利用率及氮素生理利用率, 其中氮肥偏生产力显著提高 3.88%~4.14%。与施用尿素相比, 等量控释氮肥可显著提高糜子抽穗期和成熟期土壤硝态氮和铵态氮含量 5.41%~11.80% 和 4.04%~14.77%。随着控释氮肥减量, 糜子田各形态氮素均呈降低趋势, 减氮 20% 以上时土壤硝态氮和铵态氮含量均显著低于对照。相关性分析结果表明, 糜子氮素积累量与产量呈极显著正相关, 氮素利用效率指标与土壤硝态氮含量相关性最强。综上, 施用控释氮肥可显著提高糜子生育中后期土壤供氮能力, 促进糜子对氮素的吸收利用进而增加产量并提高经济效益, 且在适量减氮 20% 时并未显著降低糜子产量, 因此控释氮肥在糜子生产中有较大的应用前景及减氮潜力。

**关键词:** 氮素积累及分配; 硝态氮; 微生物生物量氮; 氮肥农学利用效率

中图分类号: S516 文献标志码: A

## Effects of Controlled-release N Fertilizer Reduction on Prosomillet Yield, Nitrogen Utilization and Soil N Content

WANG Ying<sup>1</sup>, LIU Jinghui<sup>1\*</sup>, WU Junying<sup>2\*</sup>, MI Junzhen<sup>1</sup>, SUN Mengyuan<sup>1</sup>, ZHANG Lanying<sup>1</sup>, FENG Xueying<sup>1</sup>

(1 College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University/Inner Mongolia Mixed Cereals Engineering Technology Research Center/Inner Mongolia Agricultural University Mixed Cereals Industry Collaborative Innovation Center/National Outstanding Agricultural Research Talents and Innovation Teams, Hohhot 010019, China; 2 Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou, Inner Mongolia 014109, China)

**Abstract:** In this study, aiming at the problems of low nitrogen utilization rate caused by single nitrogen fertilizer type and "one-blast" fertilization in prosomillet production in the dry farming area of the Loess Plateau, local conventional nitrogen urea N 120 kg/hm<sup>2</sup> (TU) was taken as the control, different treatments of controlled release nitrogen fertilizer (CRNF) reduction were designed, the changes of soil nitrogen contents and prosomillet yield, nitrogen accumulation and distribution at maturity stage and nitrogen use efficiency were analyzed in order to provide support for the establishment of simple cultivation technology of prosomillet. The results show that CRNF significantly increases prosomillet yield by increasing the number and weight of spikes per unit area by 3.88% and 4.97% in two years, respectively. Prosomillet yield under CRNF reduction of less than 20% is not significantly different with that of TU. CRNF increases nitrogen accumulation by 1.97% to 3.21% in prosomillets at the maturity stage, and increases the distribution of prosomillet nitrogen to the seeds by 0.55%–1.18%, and prosomillet nitrogen accumulation under CRNF reduction of 20% or more is significantly lower than that of TU. CRNF improves the apparent N fertilizer utilization,

①基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD22B04-02)和内蒙古“草原英才”创新团队资金项目资助。

\* 通讯作者(caulih@163.com; nmbtwjy@163.com)

作者简介: 王英(1995—), 男, 山西偏关人, 博士研究生, 主要从事间作高产栽培研究。E-mail: 1269046052@qq.com

N fertilizer bias productivity, N fertilizer agronomic utilization, and N physiological utilization of prosomillets, in which N fertilizer bias productivity is significantly increased by 3.88%–4.14%. Compared with TU, equal amount of CRNF significantly increases soil nitrate and ammonium N contents by 5.41%–11.80% and 4.04%–14.77% at tassel and maturity stages of prosomillets, respectively. With the decrease of CRNF, all forms of soil nitrogen show a decreasing trend in prosomillet fields, and soil nitrate and ammonium N contents under N reduction of more than 20% are significantly lower than those of TU. Correlation analysis shows that nitrogen accumulation and yield of prosomillets have a positive significant correlation ( $P < 0.01$ ), and nitrogen use efficiency index has the highest correlation with soil nitrate nitrogen content. In conclusion, CRNF can significantly improve soil nitrogen supply capacity in the middle and late growth stages of prosomillets, promote the uptake and utilization of nitrogen by prosomillets and thus increase its yield and economic efficiency while does not significantly reduce its yield at a moderate nitrogen reduction of 20%, so CRNF has a great potential for nitrogen reduction in prosomillets production.

**Key words:** Nitrogen accumulation and allocation; Nitrate N; Microbial N; N fertilizer agronomic use efficiency

糜子是我国北方旱作区重要的栽培作物,具有耐旱、生育期短、耐贫瘠等特性<sup>[1]</sup>。黄土高原丘陵区土壤肥力差、降水时空分布不均,糜子在该地区有着独特的生产优势,随着我国种植业结构调整和乡村振兴战略实施,糜子更表现出巨大的市场潜力<sup>[2]</sup>。近年来随着化肥施用,糜子的生产效率越来越高,氮肥的施用对糜子产量的贡献率逐步上升<sup>[3]</sup>。然而,生产中糜子施氮常以尿素形式施于土壤表面,这在造成肥料浪费的同时还会引起土壤养分失调、水体和大气污染等诸多环境问题,因此探究合理的氮肥施用方式对糜子产业可持续发展意义重大<sup>[4]</sup>。控释氮肥采用尿素包膜等方法做到肥效控制释放,能够减少氮素的流失并提高氮肥利用效率,同时其可仅在播前一次施入,能在减少劳动力投入的同时提高作物产量,是一种极具应用前景的新型肥料<sup>[5]</sup>。

控释氮肥具有养分释放速率缓慢、肥效长等特性,其养分释放量和供应时间能够满足作物不同生长期的需求,在提高土壤供肥能力的同时减少养分淋溶风险以发挥最大的肥效<sup>[6]</sup>。张敬昇<sup>[7]</sup>研究表明,尿素中掺混控释氮肥施入土壤后可在小麦的整个生育期内保持较高的土壤铵态氮含量和脲酶活性,增强土壤的硝化能力以保持氮素供给。尿素配施控释氮肥也可以提高土壤 0~100 cm 土层的硝态氮累积,且随控释氮肥用量的增加土壤硝态氮含量呈上升趋势,当控释氮肥比例大于 50% 时土壤中铵态氮含量也高于习惯施肥处理<sup>[8]</sup>。施用控释尿素较传统氮肥可以提高玉米成熟期氮素积累量 9.4%~15.5%、农学利用效率

70.8%~147.7%,降低氮素损失 27.4%~45.4%,且树脂包膜尿素对提高玉米产量、氮素吸收利用以及降低氮素损失量的效果最好<sup>[9]</sup>。同时控释氮肥能更好解决作物生长前期肥料利用率低、流失量大的问题,对农业面源污染的防控意义重大<sup>[10]</sup>。

前人关于控释氮肥的研究多集中在玉米<sup>[11]</sup>、水稻<sup>[12]</sup>等作物上,关于旱作区糜子生产是否适用控释氮肥鲜见报道。本试验针对黄土高原丘陵区糜子氮肥类型单一、肥料利用率低的问题,探究控释氮肥减量对黄土高原丘陵区糜子产量、氮素吸收分配及土壤氮素供应的影响,旨在探讨该地区糜子生产中使用控释氮肥的可行性并明确其减肥潜力,以期为黄土高原丘陵区糜子合理施肥提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

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,  $\geq 10$  °C 积温 2 370 °C,无霜期 140 d,年日照时数为 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/cm<sup>2</sup>,干燥度 3.94,年蒸发量 2 577 mm。试验地土壤类型为黄绵土,试验地 0~40 cm 土壤养分情况见表 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 1—9 月降水及月平均气温情况见图 1。

表 1 试验地 0~40 cm 土壤养分情况  
Table 1 soil nutrients at 0–40 cm depth in test field

年份	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	pH
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

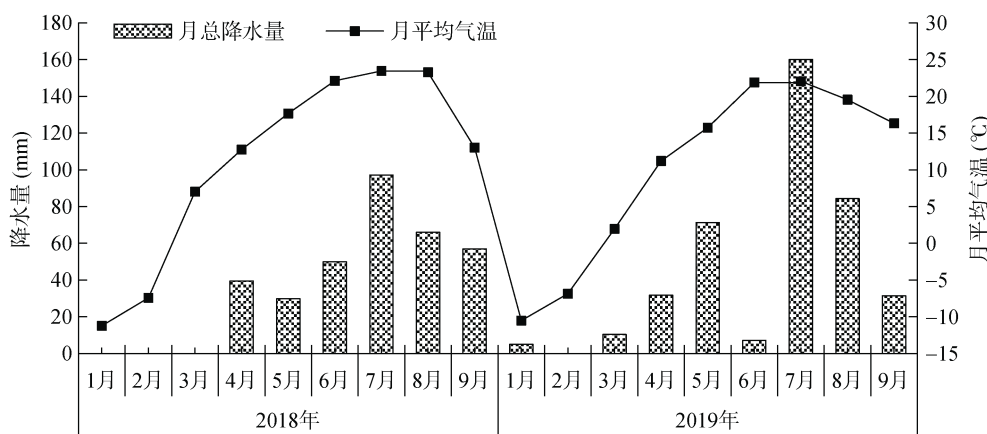


图 1 试验地 2018—2019 年月降水量及气温  
Fig.1 Monthly rainfall and temperature in 2018—2019

## 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，含 N 44.5%)、尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含  $P_2O_5$  12%)、硫酸钾(含  $K_2O$  51%)。

## 1.3 试验设计

试验采用随机区组设计，在当地常规施氮量的基础上设置不同控释氮肥减量处理，包括：T0(不施氮肥)、TU(常规施肥，普通尿素 N 120  $kg/hm^2$ )、T1(等氮量控释氮肥，N 120  $kg/hm^2$ )、T2(控释氮肥减量 10%，N 108  $kg/hm^2$ )、T3(控释氮肥减量 20%，N 96  $kg/hm^2$ )、T4(控释氮肥减量 30%，N 84  $kg/hm^2$ )、T5(控释氮肥减量 40%，N 72  $kg/hm^2$ )，此外各处理均于播种时施用过磷酸钙和硫酸钾，用量为  $P_2O_5$  80  $kg/hm^2$ 、 $K_2O$  25  $kg/hm^2$ ，各处理肥料均作基肥撒施于土表后进行 20 cm 翻耕。试验在 2018 年和 2019 年分别于 5 月 28 日和 5 月 31 日播种，于 9 月 27 日和 9 月 26 日收获。采用机械条播，行距 25 cm。小区面积 30  $m^2$ ，重复 3 次。

## 1.4 采样与指标测定

**1.4.1 土壤氮素含量测定** 于糜子苗期、抽穗期和成熟期在每小区内选取 3 点，先除去样点土壤表层杂草等杂物，然后用土钻钻取 0~20、20~40 cm 土层土壤样品带回实验室。部分样品保存于 4  $^{\circ}C$  冰箱用于土壤铵态氮、硝态氮、微生物生物量氮含量测定，其余样品风干后过筛密封保存用于土壤全氮含量的测定。采用 AA3 流动分析仪测定硝态氮和铵态氮含量，采用氯仿熏蒸提取法测定土壤微生物生物量氮含量；采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量。

**1.4.2 植株氮素吸收分配及利用** 在收获期每小区选择 30 株糜子，将植株按叶、茎鞘、穗器官分别

处理，置于 105  $^{\circ}C$  烘箱内杀青 30 min，然后于 80  $^{\circ}C$  烘至恒重后测定各器官干物质积累量。将各器官粉碎后用  $H_2SO_4-H_2O_2$ -靛酚蓝比色法测定氮含量，器官干物质积累量与氮含量的乘积即为器官氮素积累量。根据取样株数和基本苗数计算每公顷植株的总干物质后计算氮素养分积累量。

某器官氮素积累量分配率(%)=不同器官的氮素积累量/植株总氮素积累量 $\times$ 100

氮肥农学效率( $kg/kg$ )=(施氮区糜子产量-无氮区糜子产量)/施氮量

氮肥表观利用率(%)=(施氮肥区植株吸氮量-无氮区植株吸氮量)/施氮量 $\times$ 100

氮肥偏生产力( $kg/kg$ )=施氮区糜子产量 / 施氮量  
氮肥生理利用率( $kg/kg$ )=(施氮区作物产量-无氮区作物产量)/(施氮区植株吸氮量-无氮区植株吸氮量)

**1.4.3 产量和产量构成因素** 于糜子成熟期取 30 株进行考种，测定主茎穗第一分枝基部到穗头的长度，即为穗长，测定每株穗重和千粒重计算其平均值。在每个处理各重复中选择 1  $m^2$  晾晒风干后脱粒称重，然后折算成公顷产量。

**1.4.4 经济效益** 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，除肥料投入外各处理田间管理费用均为 2 100 元/ $hm^2$ 。产出为糜子籽粒，单价为 3.1 元/ $kg$ 。

## 1.5 数据处理

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

## 2 结果与分析

### 2.1 控释氮肥减量对糜子产量及其构成因素的影响

施氮肥可显著提高糜子籽粒产量, TU、T1、T2、T3、T4 和 T5 处理较 T0 两年平均增产 36.88%、42.92%、40.75%、35.39%、32.29% 和 30.31% (表 2)。各施肥处理糜子产量两年均以 T1 最高, 分别达 4 400.01 kg/hm<sup>2</sup> 和 4 198.43 kg/hm<sup>2</sup>, 与普通尿素相比, 施用等量控释氮肥可显著提高糜子产量, 两年分别增加 4.97% 和 3.88%。随着控释氮肥减量, 糜子产量呈降低趋势, 其中 T1 处理糜子产量两年均显著高于 TU, T3 处理与 TU 差异不显著, T4 和 T5 处理显著低于 TU, 这

说明控释氮肥减量 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, T1、T2 和 T3 处理糜子穗长两年均与 TU 差异不显著, 2019 年 T5 处理显著低于 TU。施氮肥可显著提高糜子千粒重, 但控释氮肥及减氮处理与施尿素间差异不显著。公顷穗数和穗重是影响糜子产量的主要因素, 随着控释氮肥减量, 糜子公顷穗数呈降低趋势, 其中 T1、T2 和 T3 处理两年均与 TU 差异不显著; T4 和 T5 处理两年均低于 TU, 降幅为 0.40% ~ 5.75%。糜子穗重受氮肥施用量影响显著, 与普通尿素相比, T1 和 T2 处理糜子穗重两年平均较 TU 提高 4.44% 和 1.86%, T3、T4 和 T5 处理两年平均较 TU 降低 2.19%、7.64% 和 9.22%。

表 2 控释氮肥减量对糜子产量及其构成因素的影响

Table 2 Effects of controlled-release nitrogen fertilizer reduction on yield and constituent factors of prosomillet

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

注: 表中同列小写字母不同表示同一年份不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 下表同。

### 2.2 控释氮肥减量对糜子成熟期氮素积累及分配的影响

两年结果表明(表 3), 各施氮处理糜子氮素积累量以 T1 处理最高, 但与 TU 差异不显著; 且随控释氮肥减量, 氮素积累量呈降低趋势, 其中 T1、T2 和 T3 处理与 TU 差异不显著, T4 和 T5 处理两年均低于 TU, 降幅介于 2.85% ~ 7.41%。成熟期氮素在糜子器官中的分配比例是影响氮素利用的关键, 研究表明, 成熟期氮素在各器官的分配比例表现为穗部 > 茎鞘 > 叶片, 平均占比分别为 65.43%、18.37% 和 16.19%。施氮肥显著提高了糜子氮素向穗中的转运量, 两年各处理较 T0 增加 23.57% ~ 57.53%, 转运比例提高 0.67% ~ 3.96%。施氮同时降低了成熟期分

配到糜子叶片和茎鞘中的氮素积累量, 分配比例分别降低 2.10% ~ 10.12% 和 0.40% ~ 4.36%。与施用尿素相比, 施用控释氮肥可提高成熟期氮素向穗中的分配, 在 2018 年和 2019 年分配比例分别提高 1.18% 和 0.55%, 相应的施用控释氮肥处理成熟期分配到茎和叶中的氮素含量减少, 但两年差异均未达显著水平。随着控释氮肥减量, 糜子分配到穗中的氮素的量和比例均呈降低趋势, 其中 T2 处理分配比例两年平均较 TU 提高 0.28%, T3、T4 和 T5 处理较 TU 降低 0.56%、1.30% 和 1.97%。与 T1 相比 T3、T4、T5 处理氮素在穗部的分配量两年均显著降低。随控释氮肥减量, 糜子氮素积累量分配到茎和叶中的比例呈增加趋势, 但处理间差异不显著。

表 3 控释氮肥减量对糜子成熟期氮素分配的影响  
Table 3 Effect of controlled-release nitrogen fertilizer reduction on nitrogen partitioning in millets at maturity stage

年份	处理	茎鞘		叶		穗		总氮积累量 (mg/plant)
		积累(mg/plant)	分配(%)	积累(mg/plant)	分配(%)	积累(mg/plant)	分配(%)	
2018	T0	10.24 ± 0.14 c	18.83 ± 0.26 a	9.23 ± 0.37 b	16.99 ± 0.68 a	34.89 ± 0.2 e	64.18 ± 0.38 e	54.36 ± 2.1 d
	TU	12.92 ± 0.23 ab	18.31 ± 0.33 ab	11.10 ± 0.19 a	15.74 ± 0.27 bcd	46.51 ± 0.18 b	65.94 ± 0.25 b	70.53 ± 1.84 ab
	T1	12.95 ± 0.36 a	18.01 ± 0.5 b	10.98 ± 0.13 a	15.27 ± 0.19 d	47.99 ± 1.00 a	66.72 ± 0.35 a	71.92 ± 0.93 a
	T2	12.94 ± 0.29 ab	18.25 ± 0.4 ab	10.94 ± 0.61 a	15.43 ± 0.86 cd	47.02 ± 0.32 ab	66.32 ± 0.45 ab	70.89 ± 3.01 ab
	T3	12.86 ± 0.13 ab	18.37 ± 0.18 ab	11.14 ± 0.41 a	15.92 ± 0.59 abcd	46.01 ± 1.4 b	65.71 ± 0.42 bc	70.01 ± 1.19 ab
	T4	12.72 ± 0.22 ab	18.56 ± 0.32 ab	11.22 ± 0.66 a	16.38 ± 0.97 abc	44.58 ± 0.42 c	65.06 ± 0.62 cd	68.52 ± 0.92 bc
	T5	12.51 ± 0.26 b	18.76 ± 0.39 a	11.10 ± 0.22 a	16.63 ± 0.32 ab	43.12 ± 0.21 d	64.62 ± 0.32 de	66.72 ± 0.81 c
2019	T0	7.55 ± 0.02 d	18.75 ± 0.04 a	6.94 ± 0.27 b	17.22 ± 0.67 a	25.8 ± 0.16 f	64.03 ± 0.40 c	40.29 ± 2.44 e
	TU	10.75 ± 0.3 ab	18.11 ± 0.50 a	9.46 ± 0.22 a	15.93 ± 0.76 bc	39.17 ± 0.36 bc	65.96 ± 0.61 a	59.37 ± 1.92 ab
	T1	11.04 ± 0.37 a	18.02 ± 0.61 a	9.60 ± 0.41 a	15.66 ± 0.67 c	40.64 ± 0.53 a	66.32 ± 0.86 a	61.28 ± 0.43 a
	T2	10.84 ± 0.25 ab	18.13 ± 0.41 a	9.55 ± 0.30 a	15.96 ± 0.51 bc	39.41 ± 0.46 b	65.90 ± 0.77 ab	59.8 ± 0.22 ab
	T3	10.59 ± 0.26 abc	18.20 ± 0.44 a	9.51 ± 0.10 a	16.35 ± 0.16 abc	38.08 ± 1.19 c	65.45 ± 0.70 ab	58.19 ± 1.50 bc
	T4	10.38 ± 0.28 bc	18.36 ± 0.49 a	9.33 ± 0.13 a	16.50 ± 0.23 abc	36.82 ± 1.14 d	65.13 ± 1.01 abc	56.53 ± 0.19 cd
	T5	10.20 ± 0.26 c	18.56 ± 0.48 a	9.21 ± 0.36 a	16.75 ± 0.65 ab	35.56 ± 0.04 e	64.70 ± 0.08 bc	54.97 ± 1.73 d

### 2.3 控释氮肥减量对糜子氮肥利用率的影响

氮肥表观利用率以 TU 最低且表现为随控释氮肥减量而增加的趋势(表 4), T1、T2、T3、T4 和 T5 两年平均较 TU 增加 9.29%、13.59%、18.66%、23.31% 和 27.88%, 除 2018 年 T1 处理外, 其他处理均显著高于 TU。糜子氮肥偏生产力表现为 T5>T4>T3>T2>T1>TU 的趋势, 且处理间差异均达显著水平。其中 T1、T2、T3、T4 和 T5 处理两年平均较 TU 分别增加 4.01%、13.81%、24.28%、38.26% 和 57.36%,

T2、T3、T4 和 T5 处理两年平均较 T1 增加 9.42%、19.49%、32.93% 和 51.30%。随着控释氮肥减量, 糜子农学利用率呈增加趋势, 以 T5 处理达到最大, 两年分别为 12.54 kg/kg 和 12.29 kg/kg。T1、T2、T3、T4 和 T5 在 2018 年较 TU 分别增加 13.98%、22.69%、24.77%、28.19% 和 36.02%, 在 2019 年较 TU 分别增加 13.85%、19.55%、20.08%、24.98% 和 30.30%。两年各处理糜子氮肥生理利用率均以 T2 处理最高, 控释氮肥处理较 TU 处理平均高 0.48%~13.06%。

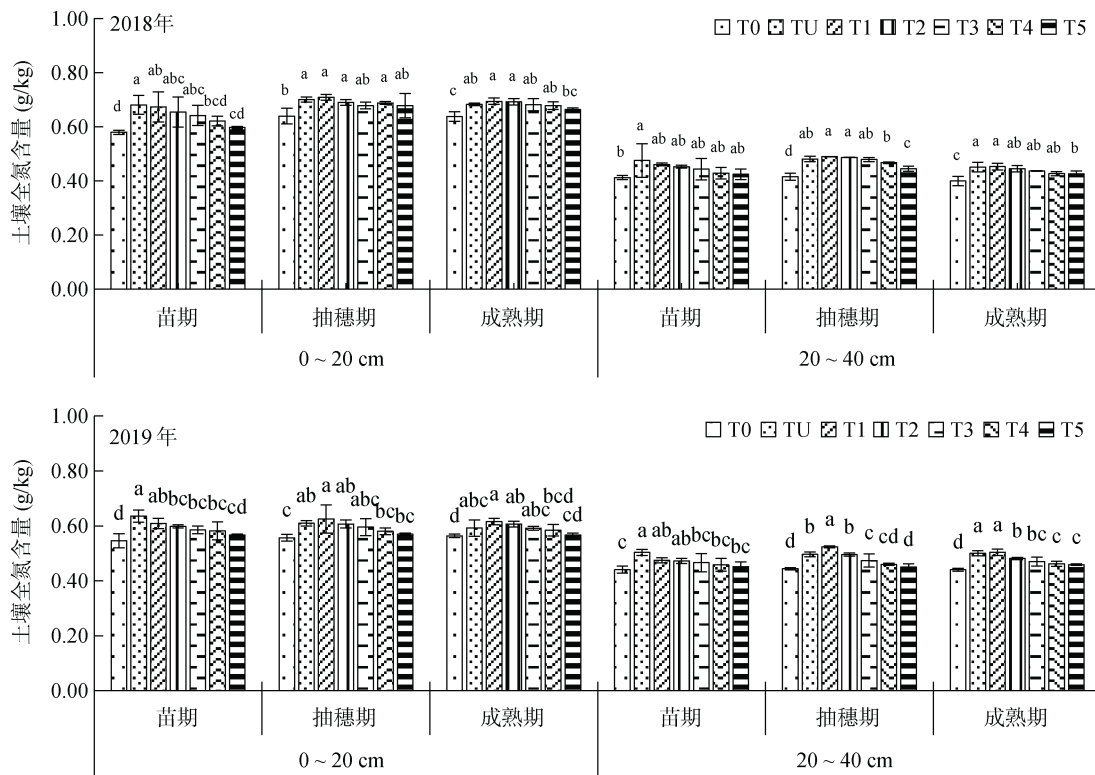
表 4 控释氮肥减量对糜子氮素利用的影响  
Table 4 Effect of controlled-release nitrogen fertilizer reduction on nitrogen utilization of prosomillet

年份	处理	氮肥表观利用率(%)	氮肥偏生产力(kg/kg)	氮肥农学利用率(kg/kg)	氮肥生理利用率(kg/kg)
2018	T0	—	—	—	—
	TU	32.33 ± 1.77 d	35.21 ± 0.91 f	9.22 ± 0.83 c	25.76 ± 2.88 a
	T1	35.11 ± 2.38 cd	36.67 ± 0.96 e	10.51 ± 1.13 bc	28.88 ± 2.91 a
	T2	36.73 ± 2.04 bc	40.19 ± 0.50 d	11.31 ± 0.55 ab	29.12 ± 2.36 a
	T3	39.12 ± 2.64 abc	43.99 ± 1.03 c	11.51 ± 1.08 ab	26.84 ± 3.21 a
	T4	40.43 ± 3.41 ab	48.83 ± 0.56 b	11.82 ± 0.41 ab	25.89 ± 1.49 a
	T5	41.19 ± 0.96 a	55.72 ± 0.27 a	12.54 ± 0.23 a	27.89 ± 1.75 a
2019	T0	—	—	—	—
	TU	38.17 ± 1.18 d	33.68 ± 0.57 f	9.43 ± 0.16 d	24.5 ± 2.68 a
	T1	41.97 ± 1.94 c	34.99 ± 0.19 e	10.74 ± 0.71 c	25.66 ± 1.15 a
	T2	43.35 ± 1.21 bc	38.22 ± 0.71 d	11.28 ± 0.11 bc	26.23 ± 2.87 a
	T3	44.40 ± 1.31 bc	41.64 ± 0.19 c	11.33 ± 0.83 abc	24.73 ± 0.65 a
	T4	46.40 ± 1.01 ab	46.43 ± 1.12 b	11.79 ± 0.09 ab	25.78 ± 3.98 a
	T5	48.93 ± 3.98 a	52.70 ± 0.51 a	12.29 ± 0.80 a	26.18 ± 2.15 a

## 2.4 控释氮肥减量对土壤全氮含量的影响

全氮是土壤中全部氮素形态之和,包含了有机态氮和无机态氮。本试验结果(图 2)表明,从苗期到成熟期土壤全氮含量呈下降趋势,两年各处理 0~20 cm 土层土壤全氮含量均高于 20~40 cm 土层,表现为随土层加深土壤全氮含量降低的趋势。施氮肥可提高土壤全氮含量,与 T0 相比,各施氮处理土壤全氮含量在 0~20 cm 土层提高 0.60%~17.49%,在 20~40 cm 土层提高 1.47%~17.96%。在苗期,土壤全氮以 TU 最高且表现出 TU>T1>T2>T3>T4>T5>T0 的趋势,其中 2018 年 T1、T2 和 T3 处理与 TU 差异不显

著,2019 年 T1 处理与 TU 差异不显著。在抽穗期和成熟期,土壤全氮含量在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层均表现为 T1>TU 的趋势,但两处理间差异不显著,这表明施用控释氮肥较尿素并不能显著改变糜子生育后期土壤全氮含量。随着控释氮肥减量,糜子抽穗期和成熟土壤全氮含量均呈下降趋势,但在 0~20 cm 土层 T2、T3、T4 和 T5 处理土壤全氮含量两年均与 TU 差异不显著;在 20~40 cm 土层仅 T5 处理两年均显著低于 TU,降幅为 2.81%~9.23%。这表明施用控释氮肥及适量减氮对土壤全氮含量影响较小。



(图中小写字母不同表示同一土层同一生育期不同处理间差异达  $P<0.05$  显著水平,下同)

图 2 控释氮肥减量对土壤全氮含量的影响

Fig. 2 Effect of controlled-release nitrogen fertilizer reduction on soil total nitrogen content

## 2.5 控释氮肥减量对土壤微生物生物量氮含量的影响

两年结果(图 3)表明,土壤微生物生物量氮含量随土层加深呈降低趋势,其中 0~20 cm 土层微生物生物量氮含量平均为 15.31 mg/kg, 20~40 cm 土层平均为 9.87 mg/kg,降幅达 5.44 mg/kg。随着生育期的推进,土壤微生物生物量氮呈先升高后下降的趋势,两年均在抽穗期达到最大值。各时期土壤微生物生物量氮均以 T0 最低,施氮肥显著提高了苗期、抽穗期和灌浆期土壤微生物生物量氮含量,较 T0 增幅为 1.34%~33.87%。在苗期各施肥处理土壤微生物生

物量氮含量以 TU 处理最高,但均与 T1 和 T2 处理差异不显著。随着控释氮肥减量土壤微生物生物量氮含量呈降低趋势,其中 0~20 cm 土层 T3 处理在 2019 年与 TU 和 T1 处理差异不显著, T4 和 T5 处理两年均显著低于 TU,较 TU 降幅在 9.85%~15.70%。施用控释氮肥较尿素可显著提高抽穗期和成熟期 0~20 cm 土层土壤微生物生物量氮含量,两时期增幅分别为 7.17%~7.63% 和 6.10%~6.98%。随着控释氮肥减量,糜子生育中后期土壤微生物生物量氮含量呈降低趋势。以成熟期为例,两土层土壤微生物生物量氮均表现为 T1>T2>TU,其中 T1 处理在 0~20 cm 土



层均显著高于 TU 处理; T1 和 T2 处理较 TU 在 0~20 cm 两年平均增加 6.55% 和 1.70%, 20~40 cm 土层平均增加 4.72% 和 2.53%。T3、T4 和 T5 处理两年

均显著低于 TU, 0~20 cm 土层两年平均降幅为 7.42%~12.62%, 20~40 cm 平均降幅为 6.76%~13.57%。

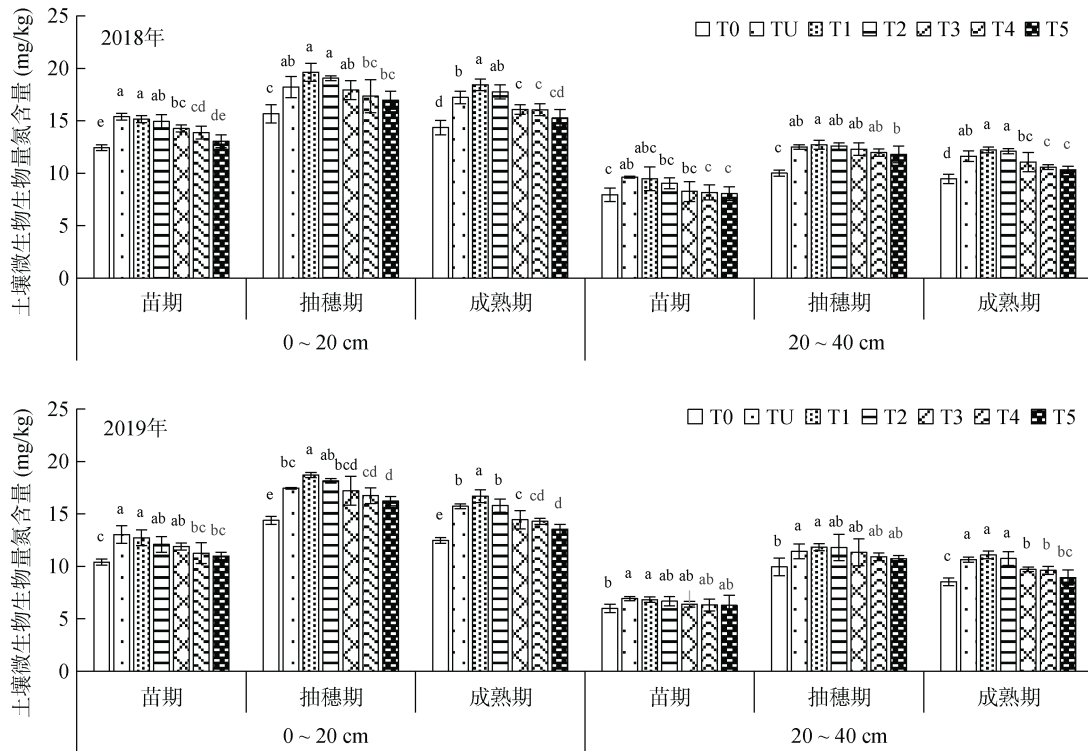


图 3 控释氮肥减量对土壤微生物生物量氮含量的影响

Fig. 3 Effect of controlled-release nitrogen fertilizer reduction on soil microbial biomass nitrogen

## 2.6 控释氮肥减量对土壤硝态氮含量的影响

由图 4 可知,随着生育时期推进土壤硝态氮含量呈先升高后下降的趋势,两年均以抽穗期达到最大,成熟期含量最低;各处理土壤硝态氮含量随着土层的加深均呈下降趋势。施氮可显著提高土壤硝态氮含量,各施肥处理土壤硝态氮含量在苗期、抽穗期和成熟期较 T0 增幅分别为 10.30%~69.53%、15.33%~66.65% 和 11.29%~53.98%。苗期土壤硝态氮含量两年均以 TU 处理最高, T1 处理均低于 TU, 但仅 2019 年 0~20 cm 土层差异显著, T3、T4 和 T5 处理两年土壤硝态氮在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层均显著低于 TU。抽穗期和成熟期是影响糜子产量形成的关键时期,两年中这两个时期 T1 处理土壤硝态氮含量均显著高于 TU, 增幅为 5.41%~10.88%, 这表明施用控释氮肥较尿素可显著提高糜子生育后期土壤速效氮含量。随着控释氮肥减量糜子生育后期土壤硝态氮含量呈降低趋势,以成熟期为例各土层土壤硝态氮含量均表现出 T1>T2>TU>T3>T4>T5>T0 的趋势。两年 T1 处理土壤硝态氮含量显著高于 TU, 增幅为 7.13%~10.88%; T2 处理土壤硝态氮含量两土层较 TU 增加

2.89%~6.53%; T3、T4 和 T5 处理土壤硝态氮含量在两土层较 TU 均呈降低趋势, 降幅为 2.34%~22.83%。

## 2.7 控释氮肥减量对土壤铵态氮含量的影响

铵态氮是糜子直接吸收的氮素形态之一,其含量直接影响糜子的生长发育。研究结果(图 5)表明,随着生育时期的推进,土壤铵态氮含量呈先升高后下降的趋势,峰值出现在抽穗期。在 0~40 cm 土层施肥对表层土壤铵态氮影响更大,以抽穗期为例,各施肥处理 0~20 cm 土层铵态氮含量较 T0 增加 20.06%~53.23%, 20~40 cm 土层增加 14.77%~35.01%。施氮肥是提高土壤速效氮含量的有效手段,本研究中施氮显著提高苗期、抽穗期和成熟期土壤铵态氮含量 5.70%~51.02%、14.76%~56.44% 和 2.96%~44.63%。在苗期,两土层铵态氮含量均以 TU 处理最高并随着控释氮肥减量呈降低趋势,各控释氮肥处理 0~20 cm 土层土壤铵态氮含量较 TU 降幅为 3.14%~27.31%, 20~40 cm 土层降幅为 3.60%~22.51%, 其中 T1 处理土壤铵态氮含量在 2019 年显著低于 TU, 2018 年与 TU 处理差异不显著。施用控释氮肥可显著

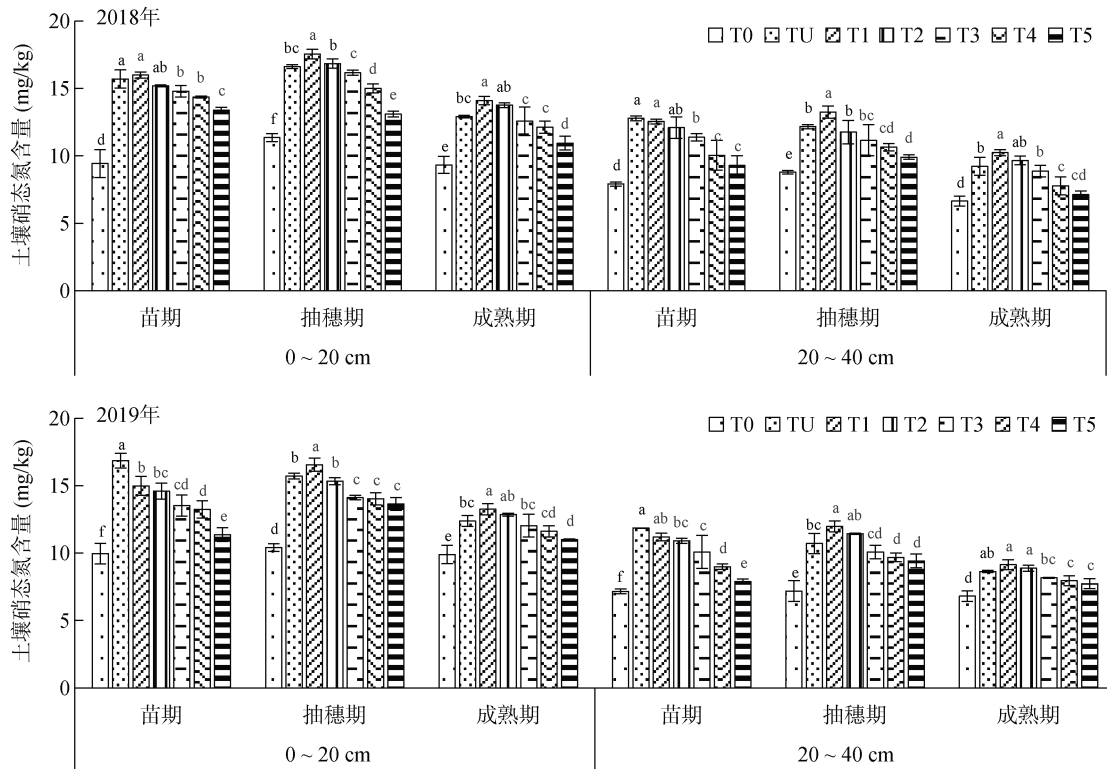


图 4 控释氮肥减量对土壤硝态氮含量的影响

Fig.4 Effect of controlled-release nitrogen fertilizer reduction on soil nitrate-nitrogen content

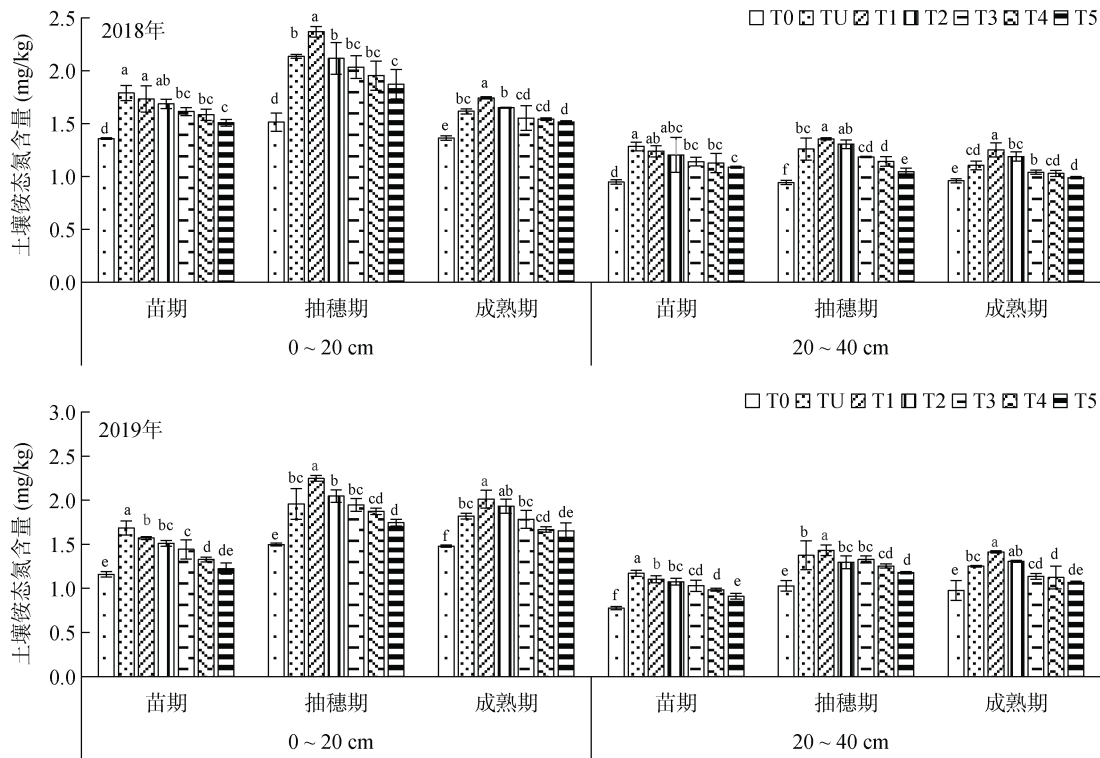


图 5 控释氮肥减量对土壤铵态氮含量的影响

Fig.5 Effect of controlled-release nitrogen fertilizer reduction on soil ammonium nitrogen content

提高糜子生育后期土壤铵态氮含量,抽穗期和成熟期各土层铵态氮含量均以 T1 处理最高且显著高于 TU。

以抽穗期为例, T1 处理在 0~20 cm 土层较 TU 增加 12.84%, 20~40 cm 土层增加 5.78%; 随着控释氮肥



减量，糜子生育后期土壤铵态氮含量呈降低趋势。以成熟期为例，两年中各施肥处理土壤铵态氮均以 T1 处理最高且显著高于 TU，增幅在 7.82%~13.29%；T2、T3 和 T4 处理铵态氮含量与 TU 差异均不显著，其中 T2 处理较 TU 升高 2.09%~7.59%，T3 和 T4 较 TU 降低 2.03%~9.18% 和 4.56%~10.26%；T5 处理土壤铵态氮含量最低且显著低于 TU，较 TU 降低 7.65%~12.65%。

**2.8 土壤氮素形态与糜子氮素利用效率及产量的相关性**

相关性分析(表 5)表明，糜子氮素积累量与产量

呈极显著正相关，这表明提高糜子氮素的吸收利用有利于产量提高。糜子氮素积累量和产量与土壤全氮、微生物生物量氮、硝态氮、铵态氮含量和氮肥生理利用率呈极显著正相关，与氮肥表观利用率呈极显著负相关。糜子氮肥表观利用率与土壤全氮、微生物生物量氮、硝态氮和铵态氮含量呈极显著负相关，氮肥偏生产力与土壤硝态氮呈显著负相关，氮肥农学利用率与土壤硝态氮含量呈极显著负相关，糜子氮肥生理利用率与土壤全氮、微生物生物量氮、硝态氮和铵态氮含量呈极显著正相关。这表明土壤氮素指标中土壤硝态氮含量对于糜子氮效率的影响最大。

表 5 氮素利用效率、产量与土壤不同氮素形态的相关性  
Table 5 Correlations between nitrogen use efficiency, yield and soil nitrogen form

	全氮	微生物生物量氮	硝态氮	铵态氮	氮肥表观利用率	氮肥偏生产力	氮肥农学利用率	氮肥生理利用率	氮素积累量	产量
全氮	1									
微生物生物量氮	0.84**	1								
硝态氮	0.82**	0.73**	1							
铵态氮	0.86**	0.91**	0.84**	1						
氮肥表观利用率	-0.76**	-0.67**	-0.79**	-0.75**	1					
氮肥偏生产力	-0.03	-0.06	-0.23*	-0.14	0.55**	1				
氮肥农学利用率	-0.14	-0.15	-0.32**	-0.21	0.69**	0.88**	1			
氮肥生理利用率	0.61**	0.57**	0.52**	0.59**	-0.36**	0.18	0.27*	1		
氮素积累量	0.93**	0.81**	0.85**	0.87**	-0.84**	-0.15	-0.21	0.65**	1	
产量	0.66**	0.61**	0.74**	0.71**	-0.80**	-0.59**	-0.44**	0.62**	0.80**	1

注：\*、\*\*分别表示相关性达  $P<0.05$  和  $P<0.01$  显著水平。

**2.9 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 6。各处理投入以 T1 处理最高达 3 522.70 元/hm<sup>2</sup>，T1、T2、T3、T4 和 T5 处理投入较 TU 分别高 10.37%、8.19%、5.91%、3.51% 和 0.98%。施氮肥可提高糜子产出，施肥处理两年较 T0 增幅达 30.28%~42.89%。各施肥处理糜子产出两年均以 T1 处理最高，且 T1 和 T2 处理产出分别较 TU 增加 4.96%~3.88% 和 3.54%~2.12%。净收益作为总产出和总投入之间的差值，在各处理之间的差异明显。两年各处理净收益以 T1、T2 处理最高，与 TU 相比 2018 年 T1、T2 增收分别达 280.03 元/hm<sup>2</sup> 和 179.14 元/hm<sup>2</sup>，2019 年仅 T1 处理经济效益增加 121.15 元/hm<sup>2</sup>，T2 处理经济效益降低 14.95 元/hm<sup>2</sup>。随着氮肥的减量，T3、T4 和 T5 处理两年平均经济效益降低 332.45、525.86 和 641.69 元/hm<sup>2</sup>。通过对产投比分析可知，不施氮处理产投比最高，T1 处理产投比较 TU 有所降低。

表 6 控释氮肥减量对糜子经济效益的影响  
Table 6 Change in prosomillet economic benefits under controlled-release nitrogen fertilizer reduction

年份	处理	投入(元/hm <sup>2</sup> )	产出(元/hm <sup>2</sup> )	净收益(元/hm <sup>2</sup> )	产投比
2018	T0	2 100.00	9 634.80	7 534.80	4.59
	TU	3 157.49	12 994.80	9 837.31	4.12
	T1	3 522.70	13 640.04	10 117.34	3.87
	T2	3 439.22	13 455.68	10 016.45	3.91
	T3	3 355.75	12 988.50	9 632.75	3.87
	T4	3 272.27	12 580.74	9 339.47	3.84
2019	T0	2 100.00	9 019.12	6 919.12	4.29
	TU	3 157.49	12 528.77	9 371.29	3.97
	T1	3 522.70	13 015.14	9 492.44	3.69
	T2	3 439.22	12 795.56	9 356.34	3.72
	T3	3 355.75	12 266.69	8 910.94	3.66
	T4	3 272.27	12 089.67	8 817.40	3.69
	T5	3 188.79	11 866.35	8 677.56	3.72

### 3 讨论

土壤氮素形态与含量直接反映其对作物的营养供应能力,是衡量外源氮投入是否适宜的评价依据之一,控释氮肥通过理化手段改变了氮肥的释放特性,对土壤中各种形态氮素的含量也产生了显著影响。前人研究表明,控释氮肥一次性基施可以满足棉花全生育期对氮素的需求,较尿素处理显著提高了棉花收获期 0~20 cm 土壤硝态氮含量达 38.5%<sup>[13]</sup>。金荣等<sup>[14]</sup>认为在尿素中加入控释氮肥可以提高 0~40 cm 土壤的全氮及速效氮含量,促进玉米生育后期氮素积累量。张英鹏<sup>[15]</sup>研究表明,控释氮肥处理表层土壤速效氮含量比传统施肥处理提高 33.06%,铵态氮含量也略高于传统施肥。本试验结果表明,控释氮肥全量基施较尿素处理并未显著降低糜子苗期土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量,且提高了糜子生长中后期土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量,其中硝态氮和铵态氮含量在抽穗期和成熟期两土层均显著高于尿素处理,增幅达 5.11%~14.77%。这表明控释氮肥可以延缓肥料的释放周期,协调土壤在作物整个生育期内的供氮能力从而提高糜子单产。土壤微生物量氮是土壤氮的关键储备库之一,具有调节氮周转的重要作用。有研究表明,施用控释氮肥可以显著提高油菜生长后期土壤微生物量氮含量<sup>[16]</sup>。施用控释氮肥处理的土壤微生物量氮含量也大于普通化肥处理<sup>[17]</sup>。本试验中施氮肥显著提高了糜子生育期内土壤微生物量氮含量,且在糜子生育后期控释氮肥处理土壤微生物量氮含量显著高于尿素处理。这说明施用控释氮肥可以提高土壤微生物量氮库容,对于减少肥料流失及提高氮肥利用效率有积极意义。作物生育期内各形态氮素在土壤中的垂直分布是影响氮肥利用率的重要性因素。与尿素相比,控释氮肥可显著增加表层土壤硝态氮含量,达到与分期施氮一致的效果<sup>[18]</sup>。在小麦<sup>[19]</sup>、玉米<sup>[20]</sup>上的研究结果也表明,控释氮肥减少了硝态氮下渗,可在表层土中保持较高的硝态氮含量,在深层土壤中硝态氮含量则显著低于常规施肥处理,有效控制了氮素向下淋溶。本试验中控释氮肥处理 0~40 cm 土层土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量均表现出随土层加深而下降的趋势,但控释氮肥全量处理在成熟期 0~20 cm 和 20~40 cm 土层硝态氮和铵态氮含量均高于尿素处理,与前人研究结果不同。这可能是当地降雨量较少对控释氮肥的释放产生影响,导致养分在作物生育前期释放少,后期释放偏多导致的,这也表明不同地域、土壤类型、气温和

降水等因素会影响控释氮肥肥效释放。

氮肥合理运筹的最终目的是减少施肥量、降低劳动力投入、减少环境压力和保证作物产量,前人对控释氮肥减量下土壤氮素含量变化的研究结果并不一致。在玉米上的研究表明,控释氮肥减量 20% 并一次性基施在不同土层中无机氮含量相比常规施肥均减少,显著降低了环境风险<sup>[21]</sup>。鲁艳红<sup>[22]</sup>则认为,减量 15% 的树脂包膜尿素能保持较高的土壤氮素水平,减氮 30% 及以上的树脂包膜尿素不利于土壤氮素肥力的保持。氮肥减量 10% 配施树脂包膜尿素可降低作物收获后 0~20 cm 土层土壤硝态氮含量,在减氮 30%~40% 时降低硝态氮累积的效果更加明显<sup>[23]</sup>。本试验中,随着控释氮肥减量,土壤全氮、微生物量氮、硝态氮和铵态氮含量均呈下降趋势。但在减氮 20% 时土壤硝态氮和铵态氮含量与普通尿素基施差异不显著,基本保持了和尿素施用相等的供氮能力。减氮 20% 以上则会导致土壤无机态氮含量较尿素处理显著降低。这一结果可能与当地土壤保肥能力差,尿素处理后期氮素流失严重有关,同时当地土壤有机质含量低,糜子生育期内降水不均也影响了控释氮肥肥效释放。因此在当地控释氮肥减量 20% 以上增大了糜子生长后期氮素供应不足的风险。

施用控释氮肥能显著提高小麦对氮素的吸收利用,随施氮量增大植株氮素积累量增加,氮生理效率、氮肥效率与氮肥利用率下降<sup>[24]</sup>。控释氮肥处理较常规施氮可显著提高水稻氮肥利用率达 2.70%~34.10%<sup>[25]</sup>。也有研究表明,控释氮肥的氮肥利用率较等氮量的尿素可提高 37.6%,在减氮 10% 施用条件下也可保证较高的氮肥利用效率<sup>[26]</sup>。本试验中施用控释氮肥促进了糜子对氮素的吸收利用,增加糜子氮素积累量达 3.2%。施用控释氮肥也可以提高糜子氮肥表观利用率、氮肥偏生产力和氮肥农学利用率,且随控释氮肥减量各指标均呈上升趋势。生殖生长阶段充足的氮素供给可提高作物的同化能力,促进成熟期氮素向穗部转运,利于获得高产并提高氮素利用效率<sup>[27]</sup>。本研究中施用控释氮肥较尿素处理提高了糜子氮素转运到穗部的比例,利于其产量提高。前人研究表明,施用控释氮肥可以增加玉米<sup>[28]</sup>籽粒产量,树脂膜控释尿素显著提高小麦籽粒产量 10.4%~16.5%<sup>[29]</sup>。朱红英<sup>[30]</sup>研究表明,控释肥料的施用比普通肥料明显提高玉米产量达 1.98%~19.02%,且以控释肥料减氮 30% 时产量最高。本试验中施用控释氮肥显著提高了糜子产量,较普通尿素高 3.88%~4.47%,随着控释氮肥减量糜子产量呈降低趋势,但

在减氮 20% 时与施用尿素差异不显著。本试验中控释氮肥的增产效应较前人偏低, 这可能与肥料类型、种植方式、土壤水热条件有关, 但总的来说控释氮肥在当地糜子生产中肥效优于尿素且具有较大的减肥增效潜力。

## 4 结论

施用控释氮肥可提高糜子生长中后期土壤各形态氮素含量, 同时提高糜子成熟期氮素积累量并增加氮素向穗部的转运比例, 保证了糜子较高的氮肥表观利用率、氮肥偏生产力及氮肥农学利用率; 通过提高糜子单位面积穗数及穗重进而增产 3.88% ~ 4.97%, 增加收益 121.15 ~ 280.03 元/hm<sup>2</sup>。随着控释氮肥减量, 土壤各形态氮含量及糜子产量均呈降低趋势, 控释氮肥减量 20% 以上时土壤速效氮含量及糜子产量显著低于 TU。因此, 控释氮肥在黄土高原丘陵区糜子生产中肥效优于尿素, 表现出更大的减肥潜力。

## 参考文献:

- [1] Liu C J, Yuan Y H, Liu J J, et al. Comparative transcriptome and physiological analysis unravel proso millet (*Panicum miliaceum* L.) source leaf adaptation to nitrogen deficiency with high nitrogen use efficiency[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 199: 104891.
- [2] 党科, 吕思明, 宫香伟, 等. 种植密度对糜子不同生育时期饲料品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(7): 989-999.
- [3] 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): 1045-1056.
- [4] 李成亮, 黄波, 孙强生, 等. 控释肥用量对棉花生长特性和土壤肥力的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 295-305.
- [5] Vejan P, Khadiran T, Abdullah R, et al. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture[J]. *Journal of Controlled Release*, 2021, 339: 321-334.
- [6] 刘仲阳, 吴小宾, 郑福丽, 等. 我国主要粮食作物一次性施肥的长期效应研究进展[J]. *土壤*, 2022, 54(4): 667-675.
- [7] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 不同控氮比掺混肥对土壤无机氮与脲酶及冬小麦产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(4): 159-164.
- [8] 张玉凤, 沈玉文, 王江涛, 等. 缓控释掺混尿素对章丘大葱—小麦产量、效益及土壤氮素的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(2): 231-238.
- [9] 侯云鹏, 李前, 孔丽丽, 等. 不同缓/控释氮肥对春玉米氮素吸收利用、土壤无机氮变化及氮平衡的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3928-3940.
- [10] 张伟纳, 刘宇娟, 董成, 等. 氮肥运筹对潮土冬小麦/夏玉米产量及氮肥利用率的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 165-175.
- [11] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 控释氮肥全量基施对旱地玉米产量形成和水肥利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 170-177.
- [12] 黄思怡, 周旋, 田昌, 等. 控释尿素减施对双季稻光合特性和经济效益的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 736-742.
- [13] 于小晶, 田晓飞, 张民, 等. 控释氮肥和控释钾肥对棉花产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(3): 313-321.
- [14] 金容, 李兰, 郭萍, 等. 控释氮肥比例对土壤氮含量和玉米氮素吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 214-221.
- [15] 张英鹏, 李洪杰, 刘兆辉, 等. 农田减氮调控施肥对华北潮土区小麦-玉米轮作体系氮素损失的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1179-1187.
- [16] 廖佳元, 宋海星, 赵东生, 等. 油菜不同生长期稻田土壤无机氮形态及氮肥利用率对控释氮肥施用的响应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 158-164.
- [17] 王坤. 控释肥对小麦—玉米产量及养分吸收的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.
- [18] 孙云保, 张民, 郑文魁, 等. 控释氮肥对小麦—玉米轮作产量和土壤养分状况的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 115-121.
- [19] 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.
- [20] 胡斌, 李絮花, 闫童, 等. 控释氮肥对土体中无机氮淋溶分布及夏玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(4): 110-114.
- [21] 孙晓. 不同缓/控释氮肥在黄土台塬区春玉米的减量简约化施用效果[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [22] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 155-161, 174.
- [23] 胡娟, 吴景贵, 孙继梅, 等. 氮肥减量与缓控肥配施对土壤供氮特征及玉米产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 116-120, 194.
- [24] Yang Y C, Zhang M, Zheng L, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2011, 103(2): 479-485.
- [25] 李鹏飞. 控释尿素对双季稻产量、氮素损失及氮肥利用率的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.
- [26] 李亚朋. 不同新型缓控释肥减氮施用对玉米增产增效作用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [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.
- [28] 吕东波, 吴景贵, 李建明, 等. 不同缓控尿素对春玉米产量、品质及土壤有机氮的动态影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 165-170, 249.
- [29] 马富亮, 宋付朋, 高杨, 等. 硫膜和树脂膜控释尿素对小麦产量、品质及氮素利用率的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 67-72.
- [30] 朱红英, 董树亭, 胡昌浩, 等. 不同控释肥用量对玉米生产效应的影响[J]. *玉米科学*, 2007, 15(2): 114-116.