

控释氮肥一次性基施提高谷子产量和氮素利用率

关瑞, 张民, 诸葛玉平*, 娄燕宏*, 王会, 潘红, 韩飞, 何伟

(山东农业大学资源与环境学院/土壤与肥料资源有效利用国家工程实验室, 山东泰安 271108)

摘要:【目的】探索控释氮肥一次性基施对谷子生长、产量和养分利用率的影响, 建立高效的谷子一次性施肥技术, 为谷子轻简化栽培提供技术支撑。【方法】2015—2016年连续两年在山东泰安, 以谷子品种‘济谷16’为试验材料进行了大田试验。控释氮肥为硫包膜尿素(SN)和树脂包膜尿素(RN)。试验以不施肥(CK)为对照, 在氮素用量相同的前提下, 设: 常规施肥(NPK); 硫包膜尿素一次性基施(SN1); 2/3硫包膜尿素氮基施+1/3尿素氮追施(SN2); 树脂包膜尿素一次性基施(RN1); 2/3树脂包膜尿素氮基施+1/3尿素氮追施(RN2)。分析调查了谷子的产量、养分吸收及农艺性状。【结果】SN1处理的产量两年均为最高, 分别达到4190.2、4458.3 kg/hm², 与常规施肥处理相比, 产量提高了20.1%~53.5%, 氮肥利用率提高了46.0%~56.3%。在施用同种控释氮肥的条件下, 控释氮肥一次性基施处理的谷子产量和氮肥利用率显著优于控释氮肥基施+追施尿素处理, 其中产量增加了5.8%~7.3%, 氮素积累量增加1.6%~7.9%, 氮肥表观利用率增加了3.7%~19.9%, 氮肥生理利用率增加了5.1%~10.1%, 氮肥农学利用率增加了21.4%~33.4%。谷子成熟期, 不同处理秸秆和籽粒中的全氮、全磷、全钾含量不同, 表现为施用同种控释氮肥的条件下, 一次性基施处理的籽粒和秸秆氮磷钾含量显著大于基施+追施尿素处理。【结论】在谷子种植中, 一次性基施控释氮肥可以在节约施肥成本的同时提高谷子产量和氮肥利用率。

关键词: 谷子; 施肥方式; 控释氮肥; 作物产量; 养分效率

Single basal application of controlled release nitrogen fertilizer improve yield and nitrogen use efficiency of foxtail millet

GUAN Rui, ZHANG Min, ZHUGE Yu-ping*, LOU Yan-hong*, WANG Hui, PAN Hong, HAN Fei, HE Wei
(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: 【Objectives】 In order to provide technical support of the simplified cultivation for foxtail millet, the effect of single basal application of controlled release nitrogen fertilizer on the growth, yield of foxtail millet and fertilizer use efficiency were explored, and highly efficient one-off fertilization technique was also established. 【Methods】 A field experiment was consecutively carried out for two years in Tai'an City, Shandong Province, in 2015 and 2016. The millet cultivar of 'Jigu16' was used as tested materials. The tested two controlled-release fertilizers were sulfur-coated (SN) and resin-coated (RN) urea. The nitrogen release periods of the two controlled released urea were three months and they were mixed with urea in a ratio of 2 : 1. Six treatments were designed for the experiment, no fertilizer (CK), urea basal and topdressing (NPK), SN single basal application (SN1), RN single basal application (RN1), SN basal application and urea topdressing (SN2), and RN basal application and urea topdressing (RN2). The yield, nutrient uptake and agronomic traits of foxtail millet were measured after harvest. 【Results】 The yield in SN1 was the highest among all treatments, which reached

收稿日期: 2018-04-03 接受日期: 2018-05-30

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系杂粮创新团队栽培与土壤肥料岗位专家经费(SDAIT-15-04); 山东省博士后创新项目(201603052); 山东农业大学博士后经费资助。

联系方式: 关瑞 E-mail: guanr1024@163.com

* 通信作者 诸葛玉平 E-mail: zhugeyp@sdau.edu.cn; 娄燕宏 E-mail: yanhonglou@sdau.edu.cn

4190.2 and 4458.3 kg/hm² in 2015 and 2016, respectively. Compared with NPK, the yield and the nitrogen use efficiency of SN1 increased by 20.1%–53.5% and 40.6%–56.3%, respectively. For the same type of controlled-release nitrogen fertilizer, the foxtail millet yield and nitrogen use efficiency of the SN1 and RN1 were significantly higher than those of SN2 and RN2, and the yield increased by 5.8%–7.3%, and the nitrogen accumulation increased by 1.6%–7.9%, the nitrogen apparent use efficiency increased by 3.7%–19.9%, the nitrogen physiological efficiency increased by 5.1%–10.1%, and the nitrogen agronomic efficiency increased by 21.4%–33.4%. At the maturity stage, different treatments showed significant difference in total N, P and K contents in straw and grain. The total N, P and K contents of straw and grain obtained in SN1 and RN1 were significantly higher than those in SN2 and RN2. **【 Conclusions 】** Considering the decreased cost in labor of fertilization, once basal application of all the controlled-release fertilizers is recommended for the high yield and high efficient millet production.

Key words: foxtail; fertilization mode; controlled-release nitrogen fertilizer; yield; nutrient efficiency

谷子是我国最古老的粮食作物之一，被誉为“中华民族的哺育作物”^[1]，我国的种植面积约占世界谷子种植面积的 80%，产量占世界谷子总产量的 90%^[2]。同时，谷子还被认为是应对未来水资源短缺的重要战略储备作物，在实现地区粮食安全和农民增收、农业增效、社会稳定等方面有着十分重要的作用。此外，随着人们饮食结构多样化的需求，以及谷子独特的营养价值和保健功能，市场的需求逐渐扩大，谷子产业的发展面临着新的机遇。

谷子生长过程中需要从土壤中吸收大量的养分，因此，土壤是谷子生存的基础。不同的土壤，不同的施肥方式以及不同的肥料品种都会直接影响谷子的养分吸收量和元素间的比例^[3]，进而影响谷子的农艺性状、养分累积及其产量。研究表明，作物产量提高过程中肥料贡献率超过 40%^[4]，不同施肥量对谷子产量影响显著^[5]。宋淑贤等^[6]指出施用氮肥能够显著改善谷子的产量性状、明显提高籽粒产量，单位面积有效穗数、穗粒重、生物产量、经济产量在一定范围内随施氮量的增加而增加。

谷子生育期一般需施肥 2~3 次，以满足谷子不同生育阶段对养分的需求^[7]，但是，多次施肥导致了肥料过量施用和劳动力投入成本的增加。不可否认，长期以来随着农业生产的发展，肥料的施用量在迅速增加，过多的施用量不仅造成肥料利用率的下降，导致增肥不增产，同时也会引起严重的环境污染，进而威胁农业的可持续发展^[8-9]。因此，提高肥料利用率，减少施肥不当带来的资源浪费和环境污染，是当今亟需解决的难题。优化施肥种类和方式是有效解决上述问题的措施之一，控释肥可以控制肥料养分释放速率，具有安全、长效、高效等特点，其氮素利用率较等量施用的普通肥料可提高

59.6%~65.7%，在减量施用的情况下仍可保持稳产甚至增产^[10]。控释肥一次性基施是提高肥料利用率、节约劳动成本的重要手段^[11]。

目前，关于控释氮肥对农作物产量、养分累积和农艺性状的研究已有很多，王晓琪等^[12]在水稻上的研究指出，与普通尿素相比，施用控释氮肥可增产 4.1%~17.0%，提高氮肥利用率 7.1%~46.7%，每公顷水稻增收 793.9~3582.9 元；杨修一等^[13]在对棉花的研究中发现，施用控释氮肥可以促进棉花的光合作用，促进棉花的干物质积累。但是控释氮肥在谷子上的应用效果鲜有研究，本研究通过两年的田间试验，比较两种包膜缓控释肥料的不同施肥方式对谷子产量、养分累积及其农艺性状的影响，以期获得谷子的最佳施肥方式，为谷子的轻简化栽培提供强有力的技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况及材料

试验地位于山东省泰安市岱岳区山东农业大学马庄试验站，土地平整，灌溉排水条件较好，属暖温带半湿润大陆性季风气候，年平均气温 13℃，年平均降水量为 688.3 mm，日照时数 2536.2 h，平均霜期 172.9 天。耕层土壤 (0—20 cm) 的主要理化性质为 pH 7.2(水土比 2.5 : 1)、土壤有机质含量 11.6 g/kg、土壤全氮 0.75 g/kg、碱解氮 72.3 mg/kg、有效磷 21.3 mg/kg、速效钾 78.6 mg/kg。

供试谷子品种为济谷 16，由山东省农科院作物研究所提供。供试肥料包括硫包膜尿素(控释期三个月，含 N 35%)、树脂包膜尿素(控释期三个月，含 N 43%)、尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅

18%)、磷酸二铵(含 N 18%, 含 P₂O₅ 46%)、硫酸钾(含 K₂O 51%)。

1.2 试验设计

供试氮肥包括普通尿素, 硫包膜和树脂包膜两种缓释氮肥。缓释氮肥施用均以 2/3 缓释氮素配合 1/3 普通尿素氮, 以不施氮肥为对照(CK)。在施氮总量均为 225 kg/hm² 基础上, 设: 常规施肥(NPK, 氮肥全为普通尿素, 2/3 尿素基施、1/3 追施); 硫包膜尿素追肥处理(SN2, 2/3 硫包膜尿素基施, 追施 1/3 普通尿素); 树脂包膜尿素追肥处理(RN2, 2/3 树脂包膜尿素基施, 追施 1/3 普通尿素); 硫包膜尿素一次性基施处理(SN1, 硫包膜尿素一次性基施, 不追肥); 树脂包膜尿素一次性基施处理(RN1, 树脂包膜尿素一次性基施, 不追肥)。所有处理的磷肥和钾肥用量相同, 均作基肥一次性施入, 每个处理 3 次重复, 小区面积 27.5 m²(5.5m × 5m), 随机区组排列。分别于 2015 年 6 月 24 日和 2016 年 6 月 28 日播种, 行距为 40 cm, 用谷子精播机播种, 播种量为 7500 g/hm², 分别于 2015 年 7 月 15 日和 2016 年 7 月 17 日间苗, 8 月 6 日进行追肥, 追肥后统一灌溉, 9 月 29 日收获。

1.3 样品采集及分析

谷子成熟期调查株高、叶长、叶宽、茎粗、穗长、穗粗、单穗质量等农艺性状, 测定叶绿素含量。采用人工摘穗的方式收获, 实测小区产量和秸秆生物量。

采集植株样品, 杀青后, 75℃ 烘干至恒重, 分别将秸秆和谷粒粉碎、过筛, 测定氮磷钾含量。植株全氮含量采用凯氏定氮法测定; 植株全磷含量采用钒钼黄比色法; 植株全钾含量采用火焰光度计法测定^[4]。

1.4 数据处理

氮肥利用效率的计算方法^[15]:

氮肥农学效率 (ANUE, kg/kg) = (施氮区产量 - 对照区产量) / 施氮量;

氮肥生理效率 (PNUE, kg/kg) = (施氮区产量 - 对照区产量) / (施氮区地上部吸氮量 - 对照区地上部吸氮量);

氮肥表观效率 (NRE) = (施氮区地上部吸氮量 - 对照区地上部吸氮量) / 施氮量 × 100%。

用 SPSS16.0 软件进行统计分析, 采用 Microsoft Excel 2010 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对谷子农艺性状的影响

施用控释肥能显著改善谷子农艺性状(表 1), 各施肥处理的农艺性状均显著优于 CK 处理。2015 年施用 SN2、RN2、SN1 和 RN1 控释氮肥处理显著提高了谷子的茎粗、叶长和叶宽, 各控释氮肥处理的茎粗、叶长和叶宽显著大于常规施肥(NPK)的, 提高幅度为 6.6%~11.0%、10.3%~17.1% 和 6.9%~10.3%, 而株高差异未达显著水平。2016 年施用 SN2、RN2、SN1 和 RN1 控释氮肥处理显著提高了谷子的茎粗, 各控释氮肥处理的茎粗显著大于 NPK, 提高幅度为 12.5%~25.0%, 而株高、叶长和叶宽均未达显著水平。不同种类包膜尿素对株高、茎粗、叶长和叶宽的影响差异不显著, SN2、RN2、SN1 和 RN1 控释氮肥处理间的株高和叶宽差异也不显著, 而 RN1 处理的茎粗显著大于 SN2 和 RN2 处理, 分别提高了 13.2% 和 12.0%, SN1 处理的叶长显著大于 SN2 处理, 提高了 7.0%。结果表明, 施用控释氮肥提高了谷子的茎粗和叶长, 其中以一次性基施效果最好。

2.2 不同施肥处理对谷子叶绿素含量的影响

叶绿素含量不仅是衡量植物叶片光合性能的重

表 1 不同施肥处理谷子农艺性状

Table 1 Agronomic traits of millet under different fertilization treatments

年份	处理	株高 (cm)	茎粗 (cm)	叶长 (cm)	叶宽 (cm)
Year	Treatment	Plant height	Stem diameter	Leaf length	Leaf width
2015	CK	95.6 b	0.8 c	35.1 d	2.7 d
	NPK	106.4 a	0.9 b	36.8 c	2.9 c
	SN2	106.7 a	1.0 a	41.7 b	3.2 a
	RN2	105.0 a	1.0 a	40.6 b	3.1 ab
	SN1	106.9 a	1.0 a	43.1 a	3.1 ab
2016	CK	94.1 b	0.6 d	38.9 c	3.0 b
	NPK	105.8 a	0.8 c	41.9 ab	3.3 a
	SN2	98.4 ab	0.9 b	40.5 bc	3.1 ab
	RN2	105.4 a	0.9 b	41.9 ab	3.2 a
	SN1	105.2 a	1.0 a	43.3 a	3.3 a
	RN1	104.3 a	1.0 a	42.1 ab	3.2 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一年不同处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different letters in the column indicate significantly difference among treatments in the same year at the 0.05 level.

要指标,而且对于作物的产量形成十分重要,SPAD值是衡量植物叶片叶绿素含量的重要参数。施肥显著提高了谷子叶片 SPAD 值(图 1),控释氮肥 SN1 的叶片 SPAD 值在 2015 年和 2016 年均最大,与 CK 相比分别提高了 22.9% 和 24.4%。对于树脂包膜尿素处理来说, RN2 和 RN1 处理的叶绿素 SPAD 值差异未达显著水平。2016 年各施肥处理间的叶片 SPAD 值差异也较大,与 NPK 处理相比,控释氮肥 SN1 处理的叶片 SPAD 值显著提高了 17.6%。并且一次性基施硫包膜控释氮肥处理的叶片 SPAD 值显著大于硫包膜控释氮肥后期追肥的处理,提高了 8.8%。表明一次性基施硫包膜控释氮肥可以促进谷子叶片的叶绿素合成和光合作用。

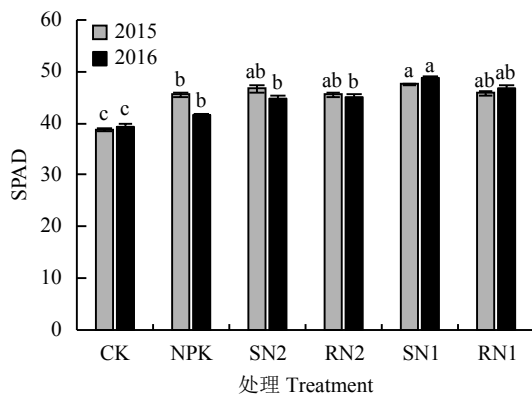


图 1 不同施肥处理的叶绿素含量

Fig. 1 Chlorophyll content in various fertilization treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一年不同处理间在 0.05 水平上差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year at the 0.05 level.]

2.3 不同施肥处理对谷子产量的影响

不同施肥处理间谷子产量及产量构成因素存在不同程度的差异(表 2),各施肥处理的穗粗、单穗重、穗长均显著大于 CK 处理。2015 年的试验数据表明,控释氮肥 SN1 和 RN1 处理的谷子穗粗显著高于 NPK 处理,提高幅度为 10.7%~11.6%,但穗长和单穗重的差异均未达显著水平,2016 年除 CK 外的其它施肥处理间产量构成因素无显著差异。

各控释氮肥处理的谷子产量显著大于 NPK 处理,在 2015 和 2016 年提高幅度分别为 2.8%~9.0% 和 11.9%~20.2%,此外,一次性基施控释氮肥处理的谷子产量均显著大于施用同种控释氮肥的追肥处理,其中硫包膜尿素处理提高了 5.7%~7.3%,树脂包膜尿素处理提高了 2.8%~5.8%。不管是一次性施

表 2 不同施肥处理谷子产量及其构成因素

Table 2 Yield and yield components of foxtail millet under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	穗长 Spike length (cm)	穗粗 Spike width (cm)	单穗重 Weight (g/spike)	产量 Yield (kg/hm ²)
2015	CK	18.5 c	1.8 c	13.9 d	2911.5 d
	NPK	20.4 b	2.2 b	14.0 cd	3844.8 c
	SN2	21.4 ab	2.4 ab	14.9 abc	3965.2 bc
	RN2	21.0 ab	2.4 ab	14.3 bcd	3952.7 bc
	SN1	21.8 a	2.5 a	15.8 a	4190.2 a
	RN1	21.3 ab	2.5 a	15.1 ab	4065.2 ab
2016	CK	20.1 b	1.8 c	20.7 c	2661.3 d
	NPK	21.6 ab	2.3 b	21.2 b	3710.6 c
	SN2	21.8 a	2.4 ab	21.5 ab	4153.7 b
	RN2	21.8 a	2.6 a	21.7 ab	4188.0 b
	SN1	22.4 a	2.5 ab	22.0 ab	4458.3 a
	RN1	22.2 a	2.5 a	21.8 ab	4429.6 a

注 (Note): 同列数值后不同字母表示同一年不同处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different letters in the column indicate significant difference among treatments in the same year at the 0.05 level.

肥还是控释肥的基肥追肥处理(SN2 和 RN2、SN1 和 RN1),两种包膜类型控释肥处理间的谷子产量差异不显著。

2.4 不同施肥处理对谷子秸秆和籽粒氮磷钾含量的影响

植株体内氮磷钾含量是衡量植株生长状况的重要指标,与籽粒产量呈显著正相关^[16]。谷子秸秆和籽粒中的氮含量可表征氮素在植物体内的运移(图 2)。与常规施肥处理相比,一次性控释氮肥处理显著提高了秸秆氮含量,在 2015、2016 年提高幅度分别为 11.7%~13.0%、9.7%~10.6%,但控释肥的追肥处理与常规施肥处理的秸秆氮含量差异并不显著,同时,一次性基施树脂包膜尿素和硫包膜尿素处理间的秸秆氮含量无显著性差异。谷子籽粒氮含量呈现出了同样的规律,只有控释氮肥 RN1 和 SN1 处理显著高于 NPK 处理,两年的提高幅度分别为 9.7%~10.6%、5.8%~7.0%,而其它施肥各处理间差异均不显著。同样,一次性基施树脂包膜和硫包膜尿素处理的籽粒氮含量无显著性差异。

谷子秸秆和籽粒磷含量与氮含量趋势一致(图 3)。除 NPK 外,其它各施肥处理的秸秆和籽粒磷含量较 CK 均显著提高。控释氮肥 SN1 和 RN1 处理的秸秆

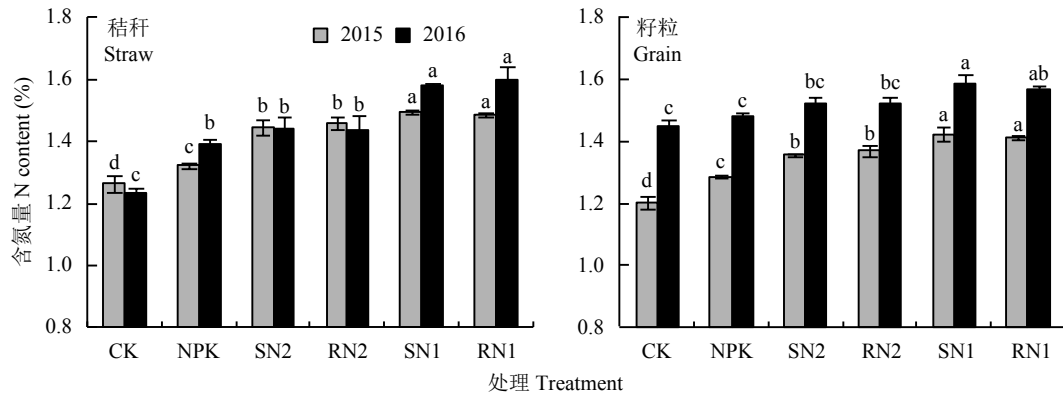


图 2 不同施肥处理的谷子秸秆和籽粒氮含量

Fig. 2 Nitrogen contents in straw and grain of foxtail millet under different fertilization treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一年不同处理间在 0.05 水平上差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year at the 0.05 level.]

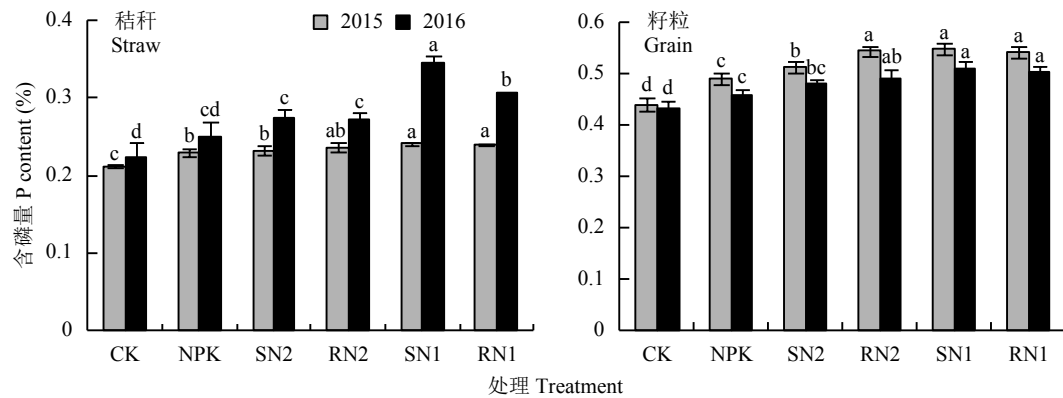


图 3 不同施肥处理下谷子秸秆和籽粒磷含量

Fig. 3 Phosphorus contents in straw and grain of foxtail millet under different fertilization treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一年不同处理间在 0.05 水平上差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year at the 0.05 level.]

和籽粒磷含量均显著大于 NPK 处理, 其中 SN1 处理的秸秆和籽粒磷含量在 2015 年分别提高了 5.1%、12.2%, RN1 提高了 4.8%、10.9%; 在 2016 年, SN1 处理的秸秆和籽粒磷含量分别提高了 38.0%、10.9%, RN1 提高了 22.7%、9.4%。另外, SN2 和 RN2 的秸秆和籽粒磷含量与 NPK 处理差异均不显著。

2015 年和 2016 年各施肥处理的秸秆和籽粒钾含量较 CK 均显著提高 (图 4), 2015 年一次性施用硫包膜控释尿素处理的秸秆和籽粒钾含量显著大于硫包膜尿素追肥处理, 分别提高了 12.2% 和 2.2%。而同种树脂包膜控释尿素处理秸秆和籽粒钾含量差异不显著。2016 年一次性基施控释氮肥处理的秸秆和籽粒钾含量均显著大于追肥处理, 其中硫包膜尿素处理提高了 19.7% 和 20.6%, 树脂包膜尿素处理提高了 10.2% 和 10.3%; 但控释氮肥处理 SN1 和 RN1 的谷子秸秆和籽粒钾含量差异不显著。

2.5 不同施肥方式的谷子氮素利用率

肥料利用率主要取决于作物的吸收能力和土壤、肥料供应养分的能力^[7]。不同施肥处理间的氮肥利用率差异显著 (表 3), 2015 年和 2016 年控释氮肥处理 (SN2、RN2、SN1、RN1) 的谷子地上部氮素积累量均显著高于 NPK 处理, 提高幅度分别为 12.1%~13.9% 和 10.1%~19.3%。而两种不同类型的控释氮肥在一次性施肥时其谷子地上部氮素积累量差异不显著。与 NPK 处理相比, 控释氮肥处理的氮肥农学利用效率两年提高幅度分别为 20.4%~74.1% 和 22.2%~76.8%。与 NPK 相比, 控释氮肥处理的氮肥生理利用效率分别提高了 19.7%~53.2% 和 26.6%~49.0%; 控释氮肥处理的氮肥表现利用效率两年提高幅度分别 25.9%~60.2% 和 37.4%~71.1%。2015 年控释氮肥处理 SN1 的谷子地上部氮素积累量显著大于控释氮肥处理 SN2, 提高了 5.4%。2016 年一次性

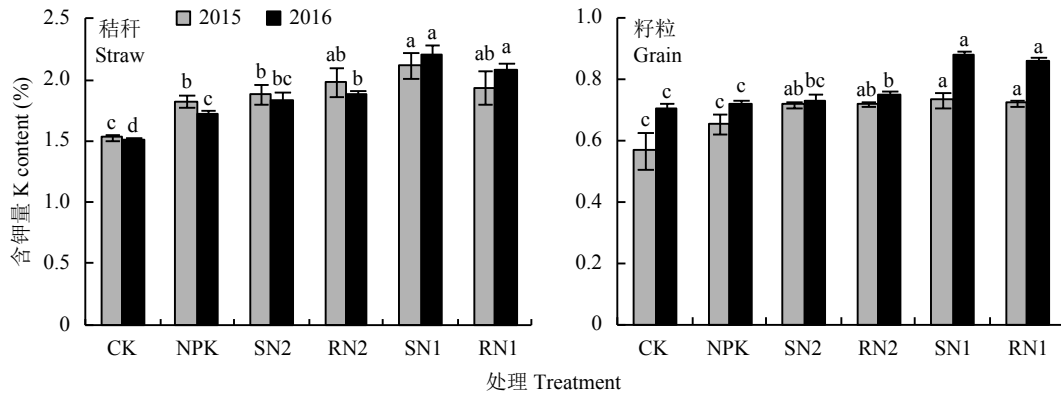


图4 不同施肥处理下谷子秸秆和籽粒钾含量

Fig. 4 Potassium contents in straw and grain of foxtail millet under different fertilization treatments

[注 (Note): 柱上不同字母表示同一年不同处理间在 0.05 水平上差异显著]

Different letters above the bars indicate significant difference among treatments in the same year at the 0.05 level.]

表3 不同施肥处理的谷子地上部植株体内氮累积量及氮肥利用率

Table 3 Nitrogen accumulation and utilization efficiency of foxtail millet under different fertilization treatments

年份 Year	处理 Treatment	NAC (kg/hm ²)	ANUE (kg/kg)	PNUE (kg/kg)	NRE (%)
2015	CK	108.3 d			
	NPK	150.9 c	10.8 e	29.3 c	28.4 c
	SN2	166.2 b	13.0 d	35.1 b	38.6 b
	RN2	169.1 ab	14.4 c	36.3 b	39.4 b
	SN1	175.2 a	18.4 b	43.6 a	44.5 a
	RN1	172.4 ab	18.8 a	44.9 a	45.5 a
2016	CK	109.9 e			
	NPK	150.9 d	9.9 c	26.3 d	27.3 c
	SN2	166.2 c	12.1 b	33.3 c	37.5 b
	RN2	172.5 b	13.5 b	34.4 b	41.7 b
	SN1	179.4 a	17.5 a	37.9 a	46.3 a
	RN1	180.1 a	17.8 a	38.2 a	46.7 a

注 (Note): NAC—氮素累积量 N accumulation; ANUE—氮素农学利用率 Agronomic nitrogen use efficiency; PNUE—氮素生理利用率 Physiological nitrogen use efficiency; NRE—氮素表观利用率 Nitrogen recovery efficiency; 同列数值后不同字母表示同一年不同处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different letters in the column indicate significant difference among treatments in the same year at the 0.05 level.

基施树脂包膜和硫包膜尿素处理的谷子地上部氮素累积量均显著大于控释氮肥的基肥追肥处理, 分别提高了 4.4% 和 7.9%。此外, 一次性基施控释氮肥处理的各项利用率指标均高于控释氮肥的基肥追肥处理。

3 讨论

氮肥的合理运筹是追求作物高产、优质的重要措施, 氮素的供应水平会直接影响谷子的农艺性状、产量^[18]。谷子常规施肥中主要以施用尿素为主, 尿素氮的损失主要有反硝化损失、地表径流损失、硝态氮淋失、氨挥发损失等几种途径。本试验谷子生长季为 6 月下旬到 9 月下旬, 为华北平原地区的炎热多雨期, 在此期间极易发生硝态氮淋失和地表径流, 还会加剧硝酸盐的反硝化作用^[19], 高温还会导致氨挥发速率加快^[20], 造成氮素的损失。而控释氮肥由于氮素释放缓慢, 可以大大减少土壤中的氨挥发和氮素淋溶, 保证谷子生育期的土壤氮含量, 促进作物对氮素的吸收。本试验中, 两种缓释尿素一次性基施 (SN1、RN1) 处理的谷子地上部氮素累积量显著高于其他处理, 第二年试验结果更好 (表 3)。而两种缓释尿素基施配合尿素追施的 (SN2、RN2) 效果在本试验中普遍低于一次性基施处理 (表 2), 这是由于控释尿素在谷子苗期提供的速效氮素不能满足谷子苗期营养需要, 影响谷子苗期生长, 进而影响后期谷子的产量。向春阳等^[21]在玉米的试验也有类似的结果。说明一次性基施控释氮肥和普通尿素, 可以减少施肥次数, 达到节约劳动力成本和提高产量的目的。

氮肥的农学利用率 (ANUE)、生理利用率 (PNUE)、表观利用率 (NRE) 是反映作物对肥料中氮素吸收利用效果的重要指标^[22]。关于控释氮肥对氮肥利用率的影响前人已做了大量研究, 且已证实与普通尿素相比, 控释氮肥可以提高氮肥利用率。本试验中, 与常规施肥相比, 一次性基施控释氮肥处理的氮肥农学利用率、生理利用率、表观利用率分别提高 54.9%~57.4%、12.4%~57.4%、56.3%~57.6%, 这

与 Zheng^[23]、Shoji 等^[24]、Geng 等^[25]在小麦、玉米、棉花等作物上的研究结果一致。控释氮肥与普通尿素配合一次性基施还可以提高作物叶绿素及可溶性蛋白含量, 促进作物的干物质积累^[26]。此外, 在本试验中, 施用控释氮肥的处理谷子的秸秆和籽粒中除氮含量较高外, 磷钾的含量也有显著提高。纪德智等^[27]在其对玉米的研究中也指出, 施用控释氮肥为作物提供了充足的氮素, 促进了作物根系生长, 进而提高了作物对磷钾的吸收, 这与本研究结果一致。

本试验中施用硫包膜尿素的处理产量略高于树脂包膜尿素处理, 但在谷子产量和氮素利用效率方面差异不显著, 表明其效果是相当的。在有选择余地的时候, 可选择价格较低的缓释肥与尿素配合, 达到节省成本的目的。

4 结论

施用控释氮肥可以促进谷子的叶绿素合成及植株氮素累积, 与传统施肥方式相比, 施用控释氮肥处理的氮肥表观利用率提高了 29.2%~57.7%, 产量增加了 2.8%~20.2%, 且控释氮肥一次性基施的效果优于追肥处理, 氮肥表观利用率提高了 12.0%~23.5%, 产量增加了 2.8%~7.5%, 但不同控释氮肥种类在相同施肥方式的情况下没有显著差异。因此, 在谷子生产中推广控释氮肥的一次性基施具有重要的实践意义, 然而在“减肥增效”的背景下, 减量施用控释氮肥能否保持谷子稳产, 还有待更深入地研究。

参 考 文 献:

- [1] 刁现民. 中国谷子产业与产业技术体系[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011.
Diao X M. Chinese millet industry and industrial technology system[M]. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2011.
- [2] 代小东, 常世豪, 杨育峰, 等. 不同氮肥组合和施肥方式对谷子生长和产量的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(11): 13-16.
Dai X D, Chang S H, Yang Y F, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer combination and fertilization mode on growth and yield of foxtail millet[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2014, 43(11): 13-16.
- [3] 王波, 戴璇颖, 丁悦, 等. 不同施肥配比对桑产量和质量的影响[J]. 江苏蚕业, 2001, 3(1): 13-15.
Wang B, Dai X Y, Ding Y, *et al.* Effects of different fertilizer ratio on the yield and quality of mulberry[J]. Jiangsu Sericulture, 2001, 3(1): 13-15.
- [4] 曾宪坤. 中国化肥工业的现状与展望[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 117-125.
Zeng X K. Situation and outlook of fertilizer industry in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1995, 32(2): 117-125.
- [5] 张绪成, 汤瑛芳. 陇中旱地膜谷子施肥量及密度对产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2001, (1): 21-23.
Zhang X C, Tang Y F. Effects of fertilization and density on millet yield of dryland in Gansu Province[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2001, (1): 21-23.
- [6] 宋淑贤, 田伯红, 王建广, 等. 施氮量对不同类型夏谷品种农艺性状及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2014, 18(6): 1-6.
Song S X, Tian B H, Wang J G, *et al.* Effect of nitrogen application rate on agronomic trait and yield of summer millet[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2014, 18(6): 1-6.
- [7] 刘立国, 李洪霞, 魏世峰, 等. 谷子施肥技术[J]. 农村实用科技信息, 2011, (7): 27.
Liu L G, Li H X, Wei S F, *et al.* Fertilizing technology of millet[J]. Rural Practical Science and Technology Information, 2011, (7): 27.
- [8] 高菊生, 李菊梅, 徐明岗, 等. 长期施用化肥对红壤旱地作物和水稻产量影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 286-292.
Gao J S, Li J M, Xu M G, *et al.* The effects of long-term chemical fertilizers on yield of upland crops and paddy rice in red soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(1): 286-292.
- [9] 王斯佳, 韩晓增, 侯雪莹. 长期施肥对黑土氮素矿化与硝化作用特征的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 170-174.
Wang S J, Han X Z, Hou X Y. Impact of long-term fertilization on nitrogen mineralization and nitrification in black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 170-174.
- [10] 张民, 杨越超, 宋付朋, 等. 包膜控释肥料研究与产业化开发[J]. 化肥工业, 2005, 32(2): 7-13.
Zhang M, Yang Y C, Song F P, *et al.* Study and industrialized development of coated controlled release fertilizers[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2005, 32(2): 7-13.
- [11] 郑文魁, 李成亮, 窦兴霞, 等. 不同包膜类型控释氮肥对小麦产量及土壤生化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 162-167.
Zheng W K, Li C L, Dou X X, *et al.* Effects of different types of controlled release urea on wheat yield and biochemical properties of soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 162-167.
- [12] 王晓琪, 朱家辉, 陈宝成, 等. 控释尿素不同比例配施对水稻生长及土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 178-182.
Wang X Q, Zhu J H, Chen B C, *et al.* Effects of different proportion of controlled-release urea on rice growth and soil nutrient[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 178-182.
- [13] 杨修一, 田晓飞, 张娟, 等. 控释氮肥在棉花上的应用研究进展[J]. 棉花学报, 2015, 27(5): 481-488.
Yang X Y, Tian X F, Zhang J, *et al.* Research advances in the application of controlled release nitrogen fertilizer in cotton production[J]. Cotton Science, 2015, 27(5): 481-488.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis(The third edition)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [15] Cassman K G, Peng S, Olk D C, *et al.* Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. Field Crops Research, 1998, 56(1): 7-39.

- [16] 朱从桦, 张嘉莉, 郭翔, 等. 硅磷肥配施提高四川春玉米的氮磷钾吸收和产量[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1603–1611.
Zhu C H, Zhang J L, Guo X, *et al.* Effect of increasing N, P and K uptake and yield of spring maize through combined silicon and phosphate fertilizer application in Sichuan[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(6): 1603–1611.
- [17] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 137–142.
Zheng S X, Liu D L, Nie J, *et al.* Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 137–142.
- [18] 邢静熠. 氮肥对谷子幼穗分化及产量和品质的影响[D]. 太谷: 山西农业大学硕士学位论文, 2016.
Xing J Y. Effects of nitrogen fertilizer on panicle differentiation, yield and quality of foxtail millet[D]. Taigu: MS Thesis of Shanxi Agricultural University, 2016.
- [19] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 61–64.
Wang H, Wang Q J, Shao M A. Characteristics of nitrogen leaching from sloping land on Loess Plateau under rainfall conditions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(5): 61–64.
- [20] 纪玉刚, 孙静文, 周卫, 等. 东北黑土玉米单作体系氨挥发特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(5): 1044–1050.
Ji Y G, Sun J W, Zhou W, *et al.* In situ study of ammonia volatilization from black soil with maize monoculture system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(5): 1044–1050.
- [21] 向春阳, 常强, 马兴林, 等. 玉米不同基因型对氮营养胁迫的反应[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2002, 14(4): 5–7.
Xiang C Y, Chang Q, Ma X L, *et al.* Response to nitrogen stress on maize genotypes[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2002, 14(4): 5–7.
- [22] 于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311–1324.
Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1311–1324.
- [23] Zheng W, Zhang M, Liu Z, *et al.* Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2016, 197: 52–62.
- [24] Shoji S, Delgado J, Mosier A, *et al.* Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2001, 32(7–8): 1051–1070.
- [25] Geng J, Ma Q, Zhang M, *et al.* Synchronized relationships between nitrogen release of controlled release nitrogen fertilizers and nitrogen requirements of cotton[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 9–16.
- [26] 王晓巍, 蒯佳林, 郁继华, 等. 不同缓/控释氮肥对基质栽培甜瓜生理特性与品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3): 847–854.
Wang X W, Kuai J L, Yu J H, *et al.* Effects of controlled/slow-released nitrogen fertilizers on physiological characteristics and quality of melon under substrate cultivation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(3): 847–854.
- [27] 纪德智, 王端, 赵京考, 等. 不同氮肥形式对玉米氮、磷、钾吸收及氮素平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 104–109.
Ji D Z, Wang R, Zhao J K, *et al.* Effects of different nitrogen forms on N, P, K uptake of corn and nitrogen balance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(4): 104–109.