

不同缓控释氮肥对甘薯生长、氮素吸收及利用的影响

许泽康¹, 石 琨^{1,2}, 欧阳宇珺¹, 吴建燕³, 马洪波², 张小贝^{4*}, 汪吉东^{2*}

1. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境所/农业农村部江苏耕地保育科学观测实验站, 江苏南京 210014; 3. 烟台泓源生物肥料有限公司, 山东烟台 264003; 4. 荆门(中国农谷)农业科学研究院, 湖北荆门 448000

摘 要: 甘薯田间施氮通常采用一次性基施氮肥后不再追施氮肥, 因此研发和遴选符合甘薯不同生育期氮素需求的缓控释氮肥对甘薯增产、氮肥减施很重要。本研究以苏薯 16 为试验材料, 采用盆栽试验, 在等量氮、磷、钾投入下, 分析不同缓控释氮肥(草酰胺、硫包衣尿素、脲甲醛、尿素结合硝化抑制剂)对甘薯不同生育期(苗期、封垄期、膨大期和收获期)生长和氮含量、氮利用效率及土壤矿质氮含量的影响。结果表明:(1)与对照相比, 硫包衣尿素和草酰胺控释氮肥分别提高甘薯的块根生物量 96.79%和 103.59%, 且显著高于脲甲醛和尿素结合硝化抑制剂处理($P<0.05$)。在膨大期和收获期, 硫包衣尿素处理的光合速率显著高于对照, 有利于提高块根的生物量。(2)硫包衣尿素和草酰胺在甘薯苗期和封垄期氮素释放量较少, 在甘薯膨大期和收获期释放量较多, 铵态氮和硝态氮之和是脲甲醛和尿素结合硝化抑制剂的 1.24~1.60 倍, 氮肥利用率提高了 1.17~1.80 倍。因此, 硫包衣尿素和草酰胺较为符合甘薯生产上的一次性氮肥投入。本研究结果可为甘薯的养分管理和氮肥减施增效提供科学依据。

关键词: 缓控释氮肥; 甘薯; 光合速率; 矿质氮; 氮肥利用率

中图分类号: S531.06 文献标志码: A

Effects of Different Slow-releasing Nitrogen Fertilizers on Growth, Nitrogen Absorption and Nitrogen Use Efficiency of Sweet Potato

XU Zekang¹, SHI Kun^{1,2}, OUYANG Yujun¹, WU Jianyan³, MA Hongbo², ZHANG Xiaobei^{4*}, WANG Jidong^{2*}

1. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences / Scientific Observing and Experimental Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Jiangsu), Nanjing, Jiangsu 210014, China; 3. Yantai Hongyuan Biological Fertilizer Co., Ltd., Yantai, Shandong 2640003, China; 4. Jingmen Academy of Agriculture Science, Jingmen, Hubei 448000, China

Abstract: Sweet potato is often base fertilized with nitrogen and no further dressing nitrogen fertilizer is needed. It is important to develop and screen slow-releasing nitrogen fertilizers that could meet the nitrogen requirements of sweet potato at different growth stages in order to promote yield and reduce nitrogen rate. A greenhouse pot experiment using variety Sushu 16 was conducted to analyze the effects of different slow-releasing nitrogen fertilizers (urea formaldehyde, sulfur-coated urea, urea formaldehyde resin, urea combined with nitrification inhibitors) on leaf photosynthesis, above-ground and underground biomass and nitrogen content, nitrogen use efficiency, and soil mineral nitrogen (nitrate nitrogen and ammonium nitrogen) content at different growth stages of sweet potato (seedling stage, vine burying stage, bulking stage, and harvest stage). Compared with the control, the sulfur-coated urea and oxamide controlled-release nitrogen fertilizers increased the biomass of sweet potato roots by 96.79% and 103.59%, respectively, significantly higher than that of the urea-formaldehyde and urea combined with nitrification inhibitor treatments ($P<0.05$). In addition, the photosynthesis rate of sweet potato throughout the entire growth period was significantly higher in the sul-

收稿日期 2023-10-12; 接受日期 2024-09-23

基金项目 海南省重点研发计划项目(No. ZDYF2020226); 财政部农业农村部国家现代农业产业技术体系项目(No. CARS-10-GW10, No. CARS-10-GW2)。

作者简介 许泽康(1987—), 男, 硕士, 助理实验师, 研究方向: 作物栽培与营养生理。*通信作者(corresponding author): 汪吉东(WANG Jidong), E-mail: jdwang66@163.com; 张小贝(ZHANG Xiaobei), E-mail: 1169683249@qq.com。

fur-coated urea treatment than that of unfertilized control, which is beneficial to improving the biomass of sweet potato roots. The nitrogen releasing of sulfur-coated urea and oxamide was less in the seedling and closure period and more in the swelling period and harvest period. The sum of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen was 1.24–1.60 times that of urea-formaldehyde and urea combined with nitrification inhibitor, and the nitrogen fertilizer utilization rate increased by 1.17–1.80 times. In conclusion, sulfur-coated urea and urea formaldehyde are more suitable for the one-time application of nitrogen fertilizer in sweet potato production. The study results could provide scientific basis for nutrient management and nitrogen fertilizer reduction and yield enhancement in sweet potato production.

Keywords: slow-releasing nitrogen fertilizer; sweet potato; photosynthetic rate; mineral nitrogen; nitrogen use efficiency

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.03.016

甘薯 (*Ipomoea batatas* L.) 是常见的多用途作物。我国甘薯的种植面积广泛, 涉及 20 多个省份和地区。据联合国粮食及农业组织统计, 2021 年我国甘薯种植总面积约 $2.21 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 甘薯总产量约 $4.78 \times 10^7 \text{ t}$ 。氮是甘薯生长与产量形成的首要元素, 是甘薯块根中许多有机化合物的重要组成部分。甘薯生长过程中氮素供应不足会导致前期植株生长矮小, 后期易早衰而导致产量下降。而氮素供应过多, 往往会造成茎叶徒长, 光合产物向块根的运转不畅, 甘薯产量下降, 品质不佳。氮的吸收主要集中在甘薯生长中前期 (移栽后 60 d 内), 也是甘薯氮营养的关键期^[1], 由于封垄期 (栽插约 60 d) 后由于地上部茎叶覆盖, 后期无法进行追肥, 故而生产上甘薯的氮肥往往是一次性基施。

传统氮肥如尿素施入土壤后会迅速转化为硝态氮和铵态氮, 除部分能直接被甘薯根系吸收, 部分会被土壤中的微生物转化成 N_2 及 N_2O 或经过雨水的淋洗流失掉, 造成大量氮肥浪费和环境污染^[2-4]。已有研究表明, 氮肥的一次性基施往往会导致后期植薯土壤氮的供应不足, 致使甘薯缺氮, 造成减产^[5], 因此, 在一次性施氮背景下, 选择氮释放周期长且能与甘薯生长匹配度高的氮肥尤为重要。

缓控释氮肥能够缓慢释放氮素, 可能与甘薯氮关键效率期的氮需求相匹配, 从而满足作物关键生长期对氮的需求。有关缓控释肥在水稻、小麦、玉米等大宗粮食作物上的研究较多^[6-8]。常见的控释肥有硫包膜尿素、草酰胺、脲甲醛以及聚氨酯包膜类^[9-12], 上述控释氮肥释放周期及在土壤中的释放强度不同。而通过添加硝化抑制剂的尿素, 利用抑制亚硝化单胞菌的活性, 从而减缓铵态氮向硝态氮转化, 进而增加肥效时间。有关氮肥施用对甘薯产量影响的研究, 多侧重于肥料不同用量、不同施用方式方面^[13-14], 而不同类型

控释氮肥在甘薯上的研究较少。本研究主要以不同种类的控释氮肥作为甘薯生长所需氮素, 研究缓控释氮肥对甘薯不同生育期的需氮规律及对甘薯生长的影响, 以期对甘薯的养分管理和减肥增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试土壤为黄棕壤, 采自江苏省农业科学院六合动物基地, 土壤基本理化性质为: pH 7.2, 有机质含量为 27.2 g/kg, 碱解氮含量为 104.6 mg/kg, 有效磷含量为 18.3 mg/kg, 速效钾含量为 135 mg/kg。供试甘薯品种为苏薯 16。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验地点位于江苏省南京市玄武区钟灵街 50 号江苏农业科学院本部试验基地, 采用盆栽试验, 试验设置 5 个处理: (1) N_1 (不施氮处理, 对照); (2) N_2 (草酰胺处理, 含氮量 32.00%, 6.29 g/盆); (3) N_3 (硫包衣尿素处理, 含氮量 42.00%, 4.76 g/盆); (4) N_4 (脲甲醛处理, 含氮量 38.00%, 5.26 g/盆); (5) N_5 (尿素结合硝化抑制剂处理, 含 2% 3,4-二甲吡唑磷酸盐的尿素, 含氮量 46.44%, 4.35 g/盆); 所有处理均施过磷酸钙 16.67 g/盆, 硫酸钾 6 g/盆。每个处理 12 次重复, 随机排列。将土风干后粉碎过 10 目筛, 每盆控根器装 20 kg, 肥料与土充分混合后装盆, 然后植入大小、长势一致的甘薯苗 1 棵。

1.2.2 样品采集与分析 分别于苗期 (施肥后 30 d)、封垄期 (施肥后 60 d)、膨大期 (施肥后 90 d)、收获期 (施肥后 120 d) 取鲜土和植株样, 每个采样时期每个处理随机选取 3 盆。分别称重甘薯块根、茎、叶, 在杀青、烘干磨样后, 测氮养分含量, 采用凯氏定氮法测定植株全氮含量^[15]。土壤鲜样过 2 mm 筛后, 用 2 mol/L KCL 浸提,

采用流动分析仪测定土壤矿质氮^[16]。采用叶绿素测定仪 (CCM-200) 测定甘薯叶片 CCI 值, 采用 LI-6800X 便携式光合仪测定甘薯叶片光合速率。氮肥利用率采用以下公式计算: 氮肥利用率=(施氮处理的吸氮量-无氮处理吸氮量)/施氮量 $\times 100\%$ 。

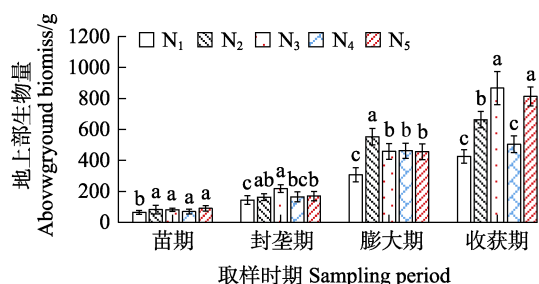
1.3 数据处理

采用 Microsoft Office 2010 软件对数据进行处理, 采用 SPSS 21.00 软件进行数据统计分析。利用单因素方差分析法 (One-way ANOVA) 对 2 组以上数据进行统计分析, 用 Duncan's 法进行处理间多重比较 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同缓控释氮肥对甘薯生物量的影响

2.1.1 对甘薯地上部生物量的影响 由图 1 可知, 甘薯苗期, 各处理的地上部生物量均显著高于 N_1 处理 ($P < 0.05$); 甘薯封垄期, N_3 处理的地上部生物量最高, 显著高于 N_4 、 N_5 处理 ($P < 0.05$), 表明在该时期硫包衣尿素可以促进地上部生长, 尿素结合硝化抑制剂和脲甲醛在该时期作用效果不明显; 甘薯膨大期, 各处理的地上部生物量均显著高于 N_1 处理 ($P < 0.05$), 其中 N_2 处理最高, N_3 、 N_4 、 N_5 处理间差异不显著, 表明在该时期草酰胺、硫包衣尿素、脲甲醛、硝化抑制剂对地上部生长均有显著促进作用, 草酰胺作用最显著; 甘薯收获期, N_2 、 N_3 、 N_5 处理的地上部生物量均显著高于 N_1 、 N_4 处理 ($P < 0.05$), 表明在该时期尿素结合草酰胺、硫包衣尿素、硝化抑制剂有利于甘薯地上部的生长。



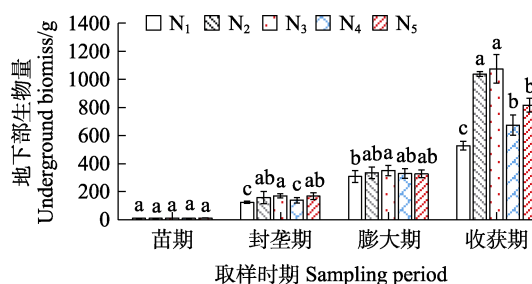
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同缓控释氮肥处理的地上部生物量

Fig. 1 Effect of different slow-releasing nitrogen fertilizer treatments on aboveground biomass

2.1.2 对甘薯地下部生物量的影响 由图 2 可知, 甘薯苗期, $N_1 \sim N_5$ 处理地下部生物量之间差

异不显著; 甘薯封垄期, N_2 、 N_3 、 N_5 处理的地下部生物量显著高于 N_1 、 N_4 处理, 表明这一时期硫包衣尿素和尿素结合硝化抑制剂可以促进甘薯地下部生物量的增加, 脲甲醛处理对地下部生物量的增加作用不明显; 甘薯膨大期, N_3 处理的甘薯地下部生物量最高, 达到 350.42 g/株, 但各控释氮肥处理间差异不显著; 甘薯收获期, N_3 和 N_2 处理的甘薯地下部生物量显著高于 N_5 和 N_4 处理, 表明硫包衣尿素和草酰胺更有利于甘薯产量的增加。



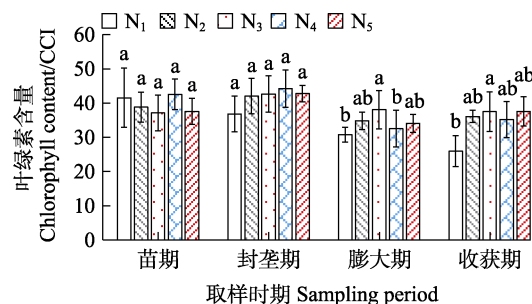
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同缓控释氮肥处理的地下部生物量

Fig. 2 Effect of different-releasing nitrogen fertilizer treatments on underground biomass

2.2 不同缓控释氮肥对甘薯叶绿素和光合速率的影响

由图 3 可知, 甘薯苗期, 各控释氮肥处理间叶绿素含量差异不显著; 甘薯封垄期, N_4 处理的叶绿素含量最高, 达到 44.20 CCI, 但各控释氮肥处理间差异不显著; 甘薯膨大期, N_3 处理叶片叶绿素含量显著高于 N_1 , 表明硫包衣尿素在膨大期能增加叶绿素含量; 甘薯收获期, N_3 处理叶片叶绿素含量显著高于 N_1 处理 ($P < 0.05$), 表明硫包衣尿素处理在收获期仍能维持叶片较高的叶绿素含量。

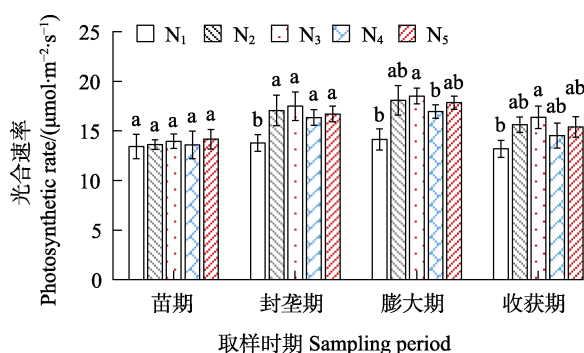


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同缓控释氮肥处理的叶片叶绿素含量

Fig. 3 Effect of different slow-releasing nitrogen fertilizer treatments on leaf chlorophyll content

由图4可知,甘薯苗期, N_5 处理的叶片光合速率最高,各控释氮肥处理间差异不显著;甘薯封垄期, N_3 处理的叶片光合速率最高,显著高于 N_1 处理,表明硫包衣尿素有利于甘薯封垄期的光合作用;甘薯膨大期, N_3 处理的叶片光合速率最高,显著高于 N_4 处理 ($P<0.05$),表明硫包衣尿素有利于甘薯封垄期的光合作用和光合产物的形成,脲甲醛处理的甘薯光合速率较弱;甘薯收获期, N_3 处理的叶片光合速率最高,显著高于 N_1 处理 ($P<0.05$),表明硫包衣尿素有利于甘薯收获期的光合产物的形成。



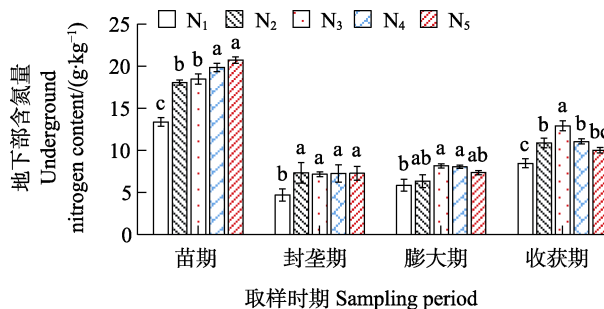
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图4 不同缓控释氮肥处理的叶片光合速率

Fig. 4 Effect of different slow-releasing nitrogen fertilizer treatments on leaf photosynthetic rate

2.3 不同缓控释氮肥对甘薯各器官氮含量的影响

2.3.1 对甘薯地下部氮含量的影响 由图5可知,甘薯苗期,地下部含氮量在整个生长周期最高, N_5 和 N_4 处理的甘薯地下部含氮量显著高于 N_3 和 N_2 处理 ($P<0.05$),表明该期脲甲醛、尿素结合硝化抑制剂的氮素释放量比其他处理高;甘薯封垄期,甘薯地下部含氮量相比苗期降低,各控释氮肥处理均显著高于对照, N_2 处理的地下部含氮量最高,表明草酰胺在该时期释放氮素较多;甘薯膨大期, N_3 和 N_4 处理的甘薯地下部含氮量显著高于 N_1 ($P<0.05$),表明硫包衣尿素和脲甲醛在该时期释放氮素较多;甘薯收获期,甘薯地下部含氮量不降反升, N_3 处理的地下部含氮量最高,显著高于其他控释氮肥处理 ($P<0.05$),表明在该时期硫包衣尿素释放氮素较多,其他控释氮肥的氮素释放量较少。



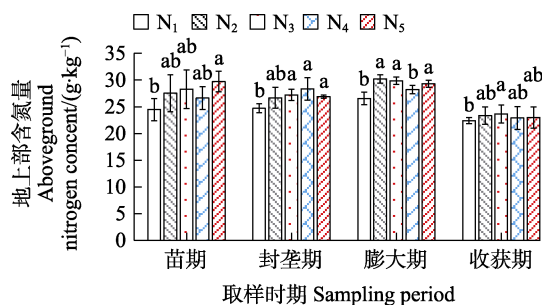
不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图5 不同缓控释氮肥处理的地下部含氮量

Fig. 5 Effect of different slow-releasing nitrogen fertilizer treatments on underground nitrogen content

2.3.2 对甘薯地上部氮含量的影响 由图6可知,甘薯苗期, N_5 处理地上部含氮量显著高于 N_1 处理,表明尿素结合硝化抑制剂可以提高甘薯苗期的地上部氮素的累积;甘薯封垄期, N_3 和 N_4 处理的甘薯地上部含氮量显著高于 N_1 ($P<0.05$),表明该时期硫包衣尿素和脲甲醛对甘薯地上部氮素积累起着促进作用;甘薯膨大期, N_2 、 N_3 、 N_5 处理的甘薯地上部含氮量显著高于 N_4 处理 ($P<0.05$),表明该时期草酰胺、硫包衣尿素、尿素结合硝化抑制剂有利于促进甘薯地上部氮素积累,脲甲醛的促进作用不大;甘薯收获期, N_3 处理的甘薯地上部含氮量最高,显著高于 N_1 处理 ($P<0.05$),表明该时期硫包衣尿素有利于促进甘薯地上部氮素积累。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图6 不同缓控释氮肥处理的地上部含氮量

Fig. 6 Effect of different slow-releasing nitrogen fertilizer treatments on aboveground nitrogen content

2.4 不同缓控释氮肥在土壤中不同时期氮素释放特征

由图7可知,在甘薯整个生长期,土壤硝态氮含量呈下降趋势。甘薯移栽35 d, N_5 处理的硝

态氮释放量最高；甘薯移栽 35~60 d, N_3 处理的确态氮释放量超过了 N_5 处理；甘薯移栽 60 d 后, N_2 处理的确态氮含量最高, 其次为 N_3 处理。由此可见, 草酰胺和硫包衣尿素的控释效果较好。 N_4 处理的确态氮含量一直保持较低的水平, 原因在于脲甲醛溶解性较差, 其肥效太长, 可达 6 个月至 1 a, 不能在甘薯 4 个月生育期里完全释放。

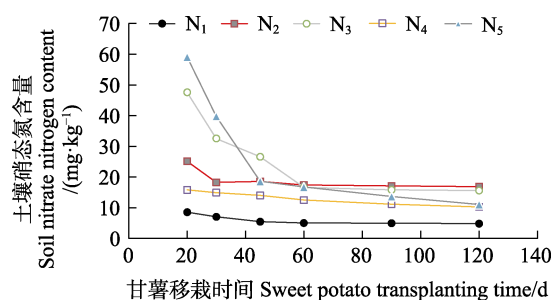


图 7 不同缓控释氮肥处理的土壤中硝态氮含量变化
Fig. 7 Effect of different slow-releasing nitrogen fertilizer treatments on soil NO_3^- -N content

由图 8 可知, 在甘薯的整个生育期, 土壤铵态氮含量呈先升高后降低再升高的趋势。甘薯移栽 20~45 d, N_5 处理的土壤铵态氮释放量最高；甘薯移栽 45~60 d, N_3 和 N_2 处理的铵态氮释放量开始高于 N_5 处理；甘薯移栽 45~120 d, N_2 和 N_3 处理的土壤铵态氮含量最高。表明硫包衣尿素和草酰胺有较好的控释效果, 脲甲醛处理的铵态氮释放量一直较低, 原因在于脲甲醛氮素释放周期太长。

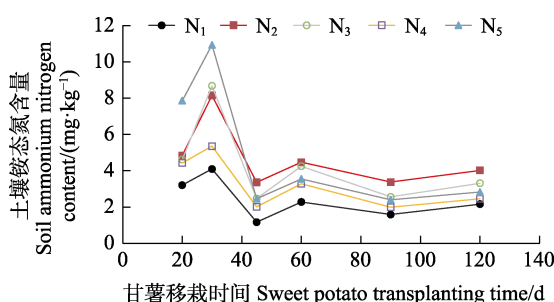


图 8 不同缓控释氮肥处理的土壤中铵态氮含量变化
Fig. 8 Effect of different slow-releasing nitrogen fertilizer treatments on soil NH_4^+ -N content

2.5 不同缓控释氮肥对氮肥利用率和根冠比的影响

由表 1 可知, N_3 和 N_2 的氮肥利用率最高, 分别为 42.33% 和 38.67%, 显著高于 N_4 和 N_5 处理 ($P<0.05$), 表明草酰胺和硫包衣尿素处理有利

于提高氮肥的利用效率。 N_2 的根冠比最大, 显著高于其他控释氮肥处理 ($P<0.05$), N_5 处理的根冠比最小, 表明草酰胺处理能够促进光合产物向地下分配, 尿素结合硝化抑制剂抑制了光合产物向地下分配。

表 1 不同缓控释氮肥处理对甘薯氮肥利用率和根冠比的影响

Tab. 1 Effect of different slow-releasing nitrogen fertilizer treatments on nitrogen use efficiency and root shoot rate of sweet potato

处理 Treatment	氮累积值 Nitrogen accumulation value/(g·株 ⁻¹)	氮肥利用率 Nitrogen fertilizer utilization efficiency/%	根冠比 Root crown ratio
N_1	2.31±0.07 ^{cd}		1.28±0.10 ^b
N_2	2.93±0.05 ^{ab}	38.67±0.32 ^b	1.60±0.04 ^a
N_3	3.14±0.08 ^a	42.33±0.67 ^a	1.22±0.15 ^b
N_4	2.49±0.04 ^c	23.48±0.41 ^d	1.16±0.11 ^b
N_5	2.79±0.10 ^b	33.07±0.56 ^c	1.00±0.08 ^b

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 不同缓控释氮肥对甘薯生长的影响

本研究结果表明, 缓控释氮肥可以提高甘薯块根和单株干物质积累量, 马洪波等^[17]的研究表明, 控释氮肥草酰胺比完全施用尿素可使甘薯增产 28.36%。已有研究表明, 包膜尿素和尿素结合硝化抑制剂氮肥可使甘薯产量分别增产 3.82% 和 10.68%^[18]。但不同控释氮肥施用对作物关键生长期光合作用及作物的增产作用不同^[19]。本研究中, 硫包衣尿素和草酰胺控释氮肥能够有效提高甘薯的块根生物量, 优于尿素结合硝化抑制剂和脲甲醛控释氮肥的块根生物量, 这可能与不同缓控释肥的养分释放特征不一有关。由于尿素结合硝化抑制剂氮素释放主要集中在甘薯生长前期, 后期的氮肥供应不足, 脲甲醛的氮素释放较慢, 不能满足甘薯整个生育期的氮肥供应, 均不利于甘薯产量的增加。

不同缓控释氮肥施用下甘薯叶片的光合性能也与产量呈类似趋势, 缓控释氮肥有利于提高甘薯叶片的光合速率和叶绿素含量, 与张晓冬^[20]的研究结果一致, 其中硫包衣尿素和草酰胺控释氮肥处理的甘薯整个生育期光合速率最高, 且草酰胺的根冠比最大, 显著高于其他控释氮肥处理,

表明草酰胺能够促进甘薯光合产物向地下分配,从而提高甘薯产量。

3.2 不同缓控释氮肥对甘薯氮素吸收及氮肥利用率的影响

甘薯不同生育时期的氮吸收量和强度不同。宁运旺等^[1]在甘薯的氮、磷、钾养分吸收及分配特性的研究中发现,移栽后 60~75 d 是甘薯源-库转换的关键时期,这一时期甘薯吸收的氮素超过整个生育期总氮量的 1/2,即第 3 个月膨大期是甘薯吸收氮的最高峰。李红光^[21]的研究表明,施用包裹性控释氮肥的土壤碱解氮含量在苗期至封垄期和普通氮肥处理相比较少,这是由于控释氮肥在此期间释放了少量氮素,与甘薯在此阶段的需氮量少的规律相吻合,而普通氮肥氮释放较为迅速,肥效往往 40~50 d,不能满足甘薯膨大期对氮的大量吸收需求,往往导致甘薯生长后期脱氮^[22]。而缓控释肥氮释放周期可高达 60 d 以上,高者达到 120 d,因此能满足甘薯膨大期氮的吸收量和强度需求。

4 结论

与尿素结合硝化抑制剂和脲甲醛相比,硫包衣尿素和草酰胺的氮素释放特征为甘薯苗期和封垄期氮素释放量较少,膨大期和收获期释放量较多,避免了因前期氮素供应多导致地上部徒长、以及中后期氮素供应不足的问题,完全符合甘薯的氮肥需求规律,提高了甘薯膨大期和收获期地下部对氮素的吸收,并提高了叶绿素的含量和光合速率,促进了甘薯光合产物向地下部运输,产量提高了 1.27~1.59 倍,氮肥利用率提高了 1.17~1.80 倍。因此,硫包衣尿素和草酰胺为较适合甘薯生长的缓控释氮肥。

参考文献

- [1] 宁运旺, 张永春, 朱绿丹, 蔡枫, 汪吉东, 许仙菊, 胡永红. 甘薯的氮磷钾养分吸收及分配特性[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(1): 71-74.
NING Y W, ZHANG Y C, ZHU L D, CAI F, WANG J D, XU X J, HU Y H. Uptake and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.)[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2011, 27(1): 71-74. (in Chinese)
- [2] MISHRA S N M, MITRA S, RANGAN L, DUTTA S, SINGH P. Exploration of 'hot-spots' of methane and nitrous oxide emission from the agriculture fields of Assam, India[J]. Agriculture & Food Security, 2012, 1: 16.
- [3] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, SHEN J L, HAN W X, ZHANG W F, CHRISTIE P, GOULDING K W T, VITOUSEK P M, ZHANG F S. Significant acidification in major chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [4] JU X T, XING G X, CHEN X P, ZHANG S L, LIU X J, CUI Z L, YIN B, CHRISTIE P, ZHU Z L. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. PNAS, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [5] 曾后清, 朱毅勇, 王火焰, 沈其荣. 生物尿素+硝化抑制剂: 一种控制农田氮素流失的新策略[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 382-388.
ZENG H Q, ZHU Y Y, WANG H Y, SHEN Q R. Bioiological nitrification inhibitor: a new strategy for controlling nitrogen loss from farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 382-388. (in Chinese)
- [6] 李祎成, 熊远福, 文祝友, 熊海蓉, 邢俊英, 王起可. 缓控释肥的研究及其在水稻上的应用进展[J]. 湖南农业科学, 2021(12): 98-101.
LI Y C, XIONG Y F, WEN Z Y, XIONG H R, XING J Y, WANG Q K. Slow-controlled-release fertilizer and its application in rice[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2021(12): 98-101. (in Chinese)
- [7] 张明伟, 马泉, 陈京都, 唐建鹏, 姚义, 成洁旻. 缓控释肥在冬小麦上的应用研究进展及展望[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(2): 15-21.
ZHANG M W, MA Q, CHEN J D, TANG J P, YAO Y, CHENG J M. Research progress and prospect of slow and controlled release fertilizer application in winter wheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(2): 15-21. (in Chinese)
- [8] 赵营, 刘晓彤, 罗健航, 赵天成, 张学军. 缓/控释肥条施对春玉米产量、吸氮量与氮平衡的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(5): 34-39.
ZHAO Y, LIU X T, LUO J H, ZHAO T C, ZHANG X J. Yield, N uptake, and apparent N balance in spring maize as affected by side bar application of slow/controlled release fertilizers[J]. Chinese Soil and Fertilizer, 2020(5): 34-39. (in Chinese)
- [9] ZVOMUYA F, ROSEN C J, RUSSELLE M P, GUPTA S C. Nitrate leaching and nitrogen recovery following application of polyolefin-coated urea to potato[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(2): 480-489.
- [10] GARCÍA C, GARCÍA L, VALLEJO A, CARTAGENA M C, DÍEZ J A. Forecasting by laboratory tests of nitrogen

- leached and absorbed in soil-plant system with urea - based controlled - release fertilizers coated with lignin[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29 (15/16): 2479-2491.
- [11] 沈文忠, 张绪美. 草酰胺缓释肥应用效果研究[J]. *现代农业科技*, 2015(6): 220.
- SHEN W Z, ZHANG X M. Study on the application effect of oxamide slow-release fertilizer[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(6): 220. (in Chinese)
- [12] 张文辉, 丁巍巍, 张勇, 张峻伟, 梅丹丹. 脲甲醛缓释肥料的研究进展[J]. *化工进展*, 2011, 30(增刊 1): 437-441.
- ZHANG W H, DING W W, ZHANG Y, ZHANG J W, MEI D D. Research advances on urea-formaldehyde slow-release fertilizer[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011, 30(Suppl. 1): 437-441. (in Chinese)
- [13] 吴春红, 刘庆, 孔凡美, 李欢, 史衍玺. 氮肥施用量对不同紫甘薯品种产量和氮素效率的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(1): 113-122.
- WU C H, LIU Q, KONG F M, LI H, SHI Y X. Effects of nitrogen application rates on root yield and nitrogen utilization in different purple sweetpotato varieties[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(1): 113-122. (in Chinese)
- [14] 陈晓光, 丁艳峰, 唐忠厚, 魏猛, 史新敏, 张爱君, 李洪民. 氮肥施用量对甘薯产量和品种性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 979-986.
- CHEN X G, DING Y F, TANG Z H, WEI M, SHI X M, ZHANG A J, LI H M. Suitable nitrogen rate for storage root yield and quality of sweet potato[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(4): 979-986. (in Chinese)
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [16] 杨靖民, 张忠庆, 曹国军. 应用间隔流动分析仪测定土壤硝态氮和亚硝态氮含量[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(2): 101-105.
- YANG J M, ZHANG Z Q, CAO G J. Soil nitrate and nitrite content determined by Skalar SAN[J]. *Chinese Soil and Fertilizer*, 2014(2): 101-105. (in Chinese)
- [17] 马洪波, 吴建燕, 李传哲, 张永春. 草酰胺在土壤中氮肥释放特征及对甘薯生长的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(21): 38-42.
- MA H B, WU J Y, LI C Z, ZHANG Y C. Nitrogen release of oxamides in soil and its effect on sweet potato growth[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(21): 38-42. (in Chinese)
- [18] 马洪波, 孙若晨, 吴建燕, 李传哲, 许仙菊, 张永春. 不同类型肥料对甘薯产量和氮效率的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(35): 107-112.
- MA H B, SUN R C, WU J Y, LI C Z, XU X J, ZHANG Y C. Effect of different types of fertilizers on sweet potato yield and nitrogen efficiency[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(35): 107-112. (in Chinese)
- [19] WANG L, ZHANG H, WANG J, WANG J D, ZHANG Y C. Long-term fertilization with high nitrogen rates decreased diversity and stability of diazotroph communities in soils of sweet potato[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022, 170: 104266.
- [20] 张晓冬. 基质(腐殖酸)缓释氮肥及其甘薯生物学与根际土壤环境效应研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- ZHANG X D. Study on matrix-based (humic acid) SRNFs and their sweet potato biological and rhizosphere soil environmental effects[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- [21] 李红光. 包裹型控释肥的养分释放特征及其在主要农作物上的肥效研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2006.
- LI H G. Nutrient releasing characteristic and effects of encapsulated CRF on main crops[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [22] 林清火, 刘海林, 黄艳艳, 罗微, 蒋先军. 种缓控释氮肥的养分释放特征及肥效[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(9): 1718-1723.
- LIN Q H, LIU H L, HUANG Y Y, LUO W, JIANG X J. Release characteristics and fertilizer efficiency of coated controlled-release nitrogen for rice[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2018, 39(9): 1718-1723. (in Chinese)