

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2024.0385

# 栽培密度与氮肥用量互作对叶用甘薯 光合特性及产量、品质的影响

丁芳, 孙喜云, 刘广卿

(商丘市农林科学院 河南商丘 476000)

**摘要:**为明确黄淮地区不同栽培密度和氮肥用量对叶用甘薯生产的影响,以颍菜薯10号为试材,采用裂区试验设计,主区为栽培密度(18、21、24万株·hm<sup>-2</sup>),副区为氮肥用量(800、1200、1600、2000 kg·hm<sup>-2</sup>),研究氮肥用量与种植密度互作对叶用甘薯光合特性、产量及品质的影响。结果表明,氮肥用量对叶用甘薯品质影响显著,种植密度对叶用甘薯茎尖生长、产量、光合作用、氮素吸收效率影响极显著,对茎尖品质无显著影响。茎尖粗度、茎尖数、茎尖总产量、功能叶面积、光合特性、氮素吸收效率受交互效应影响显著。其中,D2N3处理(密度21万株·hm<sup>-2</sup>,氮肥1600 kg·hm<sup>-2</sup>)和D2N4处理(密度21万株·hm<sup>-2</sup>,氮肥2000 kg·hm<sup>-2</sup>)可溶性蛋白含量(w,后同)、茎尖产量较高,分别为83.68 mg·g<sup>-1</sup>、41 127.08 kg·hm<sup>-2</sup>和86.36 mg·g<sup>-1</sup>、41 715.03 kg·hm<sup>-2</sup>,二者间无显著差异;D2N3和D2N4处理的硝酸盐含量分别为25.58、27.22 mg·kg<sup>-1</sup>,二者差异显著。D2N3处理的可溶性糖含量与D1N3、D3N3差异不显著,但显著高于其他处理;D2N3处理的维生素C含量显著高于其他处理,氮素吸收效率与D2N2无显著差异,但显著高于其他处理。综合分析认为,氮肥用量1600 kg·hm<sup>-2</sup>、密度21万株·hm<sup>-2</sup>的种植模式最优,可作为黄淮地区叶用甘薯生产的最优配置在生产中推广。

**关键词:**叶菜型甘薯;栽培密度;氮肥用量;光合特性;品质与产量;氮素吸收效率

中图分类号:S531

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2024)12-133-08

## Effects of different planting densities and fertilizer configurations on photosynthetic characteristics, yield and quality of vegetable sweet potato

DING Fang, SUN Xiyun, LIU Guangqing

(Shangqiu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shangqiu 476000, Henan, China)

**Abstract:** To clarify the effects of different cultivation densities and nitrogen fertilizer application rates on the production of vegetable sweet potato in the Huang Huai region, this experiment used Eshu 10 as the test material and adopted a split zone experimental design. The main zone was the cultivation density (180 000, 210 000, 240 000 plants·hm<sup>-2</sup>), and the sub zone was the nitrogen fertilizer application rate (800, 1200, 1600, 2000 kg·hm<sup>-2</sup>). The study investigated the interaction between nitrogen fertilizer application rate and planting density on the photosynthetic characteristics, yield, and quality of vegetable sweet potato. The results showed that nitrogen fertilizer application had significant impact on the quality of vegetable sweet potato, while planting density had highly significant effect on the growth, yield, photosynthesis, and nitrogen absorption efficiency of leaf sweet potato stem tips, but had no significant effect on stem tip quality. The thickness and number of stem tips, total stem tip yield, functional leaf area, photosynthetic characteristics, and nitrogen absorption efficiency were significantly affected by the interaction effect. Among them, the D2N3 treatment (density 210 000 plants·hm<sup>-2</sup>, nitrogen fertilizer 1600 kg·hm<sup>-2</sup>) and the D2N4 treatment (density 210 000 plants·hm<sup>-2</sup>, nitrogen fertilizer 2000 kg·hm<sup>-2</sup>) had higher soluble protein content and stem tip yield, which were 83.68 mg·g<sup>-1</sup>, 41 127.08 kg·hm<sup>-2</sup> and 86.36 mg·g<sup>-1</sup>, 41 715.03 kg·hm<sup>-2</sup>, respectively, with no significant difference between the two treatments. The nitrate content was 25.58 and 27.22 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, with significant differences. The soluble sugar content, vitamin C content, and nitrogen absorption efficiency of D2N3 treatment were significantly higher than those of other treatments. According to comprehensive analysis, the planting mode with a nitrogen fertilizer application of 1600 kg·hm<sup>-2</sup> and a density of 210 000 plants·hm<sup>-2</sup> can

收稿日期:2024-06-14;修回日期:2024-09-14

基金项目:河南省“四优四化”科技支撑项目(SYSH20230504009);商丘市农林科学院科技攻关项目(2022006.2)

作者简介:丁芳,女,助理研究员,主要从事甘薯栽培研究工作。E-mail:214681636@qq.com

通信作者:刘广卿,女,副研究员,主要从事甘薯组织培养及栽培研究工作。E-mail:lmc2565626@163.com

be promoted as the optimal configuration for vegetable sweet potato production in the Huang Huai region.

**Key words:** Vegetable sweet potato; Cultivation density; Nitrogen fertilizer dosage; Photosynthetic characteristics; Quality and yield; Nitrogen absorption efficiency

叶菜用甘薯是指以甘薯鲜嫩茎尖或叶柄为蔬菜食用的专用型甘薯品种<sup>[1]</sup>,具有产量高、供应期长、营养丰富、污染少等优点,已经成为公认的新型保健型蔬菜。目前,叶菜型甘薯在南方大面积普及,北方栽培规模不如南方,但是随着人们保健意识的增强,叶用甘薯在黄淮地区的栽培面积逐年增加。但受限于传统甘薯栽培模式的影响,低密度和高氮肥投入是菜薯生产中普遍存在的问题<sup>[2-3]</sup>,不适宜的种植密度导致菜薯产量偏低,过量施用氮肥导致土壤板结,菜薯品质下降,氮肥利用率低,这些问题严重阻碍了菜薯产业的健康发展。因此,探索适宜黄淮地区的最佳种植模式对菜薯的推广具有重要的指导和实践意义。

研究表明,种植密度和氮肥管理是叶菜型甘薯产量和品质最直接有效的调控手段。邱永祥等<sup>[4]</sup>通过肥料用量及种类研究了适宜福菜薯 18 高产栽培的最佳氮肥施用量为  $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。张小贝等<sup>[5]</sup>研究表明,当施用  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  氮肥时,徐菜薯 1 号产量最高,硝酸盐含量最低。徐茜等<sup>[6]</sup>研究表明,种植密度与维生素含量呈显著正相关。郑旋<sup>[7]</sup>对菜用甘薯品种密度的研究认为,种植密度为 27 万株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 时台农 71 的产量和品质最佳。孙富年等<sup>[8]</sup>研究表明,一定范围内密植可提高茎尖单产。由此可见,合理的氮素水平和栽培密度能够提高叶用甘薯的产量和品质。

但是上述研究多集中于单一因素对产量和品质的影响,关于种植密度和氮肥用量互作对叶用甘薯生长的研究较少,尤其是针对黄淮地区叶用甘薯生长发育过程中不同供氮水平与密度互作对氮素吸收效率的影响鲜见报道。氮肥与密度互作在一定范围内可以相互促进<sup>[9]</sup>,但当氮肥用量或种植密度过高时,氮肥与密度互作出现负效应<sup>[10-11]</sup>。因此,笔者针对黄淮地区特定生态和土壤肥力,通过不同密度、不同氮肥用量对鄂菜薯 10 号的光合特性、品质、产量及氮素吸收利用效率进行研究,以期为叶菜型甘薯在黄淮地区的优质高产栽培和推广提供参考。

## 1 材料与方

### 1.1 试验材料及试验地概况

供试叶用甘薯为鄂菜薯 10 号。试验于 2023

年 3—8 月在河南省商丘市商丘农林科学院双八试验基地进行。该基地属于暖温带大陆性季风气候,年平均积温( $\geq 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) $4671 \text{ }^\circ\text{C}$ ,试验地土壤为沙质黄潮土,理化性质为 pH 6.2,碱解氮含量( $w$ ,后同) $95.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷含量  $36.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量  $141.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。供试氮肥为尿素(N 含量 $\geq 46.0\%$ ),供试钾肥为硫酸钾( $\text{K}_2\text{O}$  含量 53%),供试磷肥为过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  含量 12%),由史丹利化肥股份有限公司生产,供试有机肥[(N+ $\text{P}_2\text{O}_5$ + $\text{K}_2\text{O}$ )含量 $\geq 15\%$ ,有机质含量 30%]由根力多生物科技有限公司提供。

### 1.2 方法

2023 年 3 月份在基地大棚内进行种苗繁育,4 月中旬剪取 20 cm 左右生长健壮的茎尖苗栽插于试验地内。按照当地栽培习惯,采用小高畦栽培,畦面宽 54 cm,每畦 3 行。

试验采用裂区设计,以栽种密度(D)为主区,设 180 000(D1)、210 000(D2)、240 000(D3)株 $\cdot \text{hm}^{-2}$  3 个水平;对应的行距和株距分别为  $18 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 、 $18 \text{ cm} \times 17 \text{ cm}$ 、 $18 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ ,氮肥施用量(N)为副区,分别为 800(N1)、1200(N2)、1600(N3)、2000(N4) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  4 个水平,共计 12 个处理(详见表 1),每处理 3 次重复,共计 36 个小区。试验地周围设置 3 m 保护行,每隔 15 d 左右采收 1 次,预计采

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design		
处理 Treatment	栽种密度 Planting density/ (Plant $\cdot \text{hm}^{-2}$ )	氮肥施用量 Nitrogen fertilizer application amount/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )
D1N1	180 000	800
D1N2	180 000	1200
D1N3	180 000	1600
D1N4	180 000	2000
D2N1	210 000	800
D2N2	210 000	1200
D2N3	210 000	1600
D2N4	210 000	2000
D3N1	240 000	800
D3N2	240 000	1200
D3N3	240 000	1600
D3N4	240 000	2000

收茎尖5次。将氮肥平均分成5份,移栽前1份氮肥同时配合钾肥( $500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )和磷肥( $900\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )、有机肥( $6000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )共同作为底肥施入,每次采收后于次日追施1份氮肥(灌施),共追肥4次。其他浇水、病虫害管理等同大田。

### 1.3 指标及测定方法

**1.3.1 茎尖数和产量测定** 于6月上旬开始首次采收,采收标准为长12 cm左右的嫩茎,然后每10~15 d采收1次,8月中旬完成最后一次采收,共计采收5次。每次采收时统计各处理茎尖数,并用电子秤称量全部收获茎尖产量,最后汇总,计算总产量。

每次测产前,每小区从长势一致的植株中随机抽取20个茎尖,3次重复共计60个,测定农艺性状。茎尖粗为所取分枝基部的枝粗,用游标卡尺测定;叶柄长、叶长、叶宽均为所取分枝基部叶片叶柄长、叶长、叶宽,用直尺测量;节间长为所取分枝基部的节间长,用直尺测量。

**1.3.2 茎尖品质指标和氮含量测定** 测产完成后,每小区随机抽取茎尖50个,3次重复共计150个,一部分保存在 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱中用于测定粗蛋白、总糖、维生素C、粗纤维和硝酸盐含量,一部分放入低温烘干箱, $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘12 h,用于测定干物质和茎尖全氮含量。采用蒽酮比色法测定可溶性总糖含量<sup>[12]</sup>;采用凯氏蒸馏法测定可溶性蛋白含量<sup>[13]</sup>,采

用2,6-二氯靛酚染料滴定法测定维生素C含量,采用杨剑虹<sup>[14]</sup>的方法测定粗纤维含量;采用赵倩<sup>[15]</sup>的方法测定硝酸盐含量,采用凯氏定氮法测定茎尖全氮含量<sup>[16]</sup>。氮素吸收效率/ $(\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1})$ =氮素吸收量/施氮量。

**1.3.3 叶片光合指标测定** 进入采收期,选择晴天上午09:00—11:00,用便携式光合测定仪测定相关指标,每小区选取5株,3次重复共计15株,取平均值。用叶绿素测定仪SPAD-502测定SPAD值,每株至少测取5个位点,取平均值。进入采收期,每小区选取长势一致的6片功能叶片,用YMJ-A便携式叶面积测定仪测定叶面积,并取平均值。

### 1.4 数据分析

采用Excel 2019进行数据整理和绘图,采用SPSS 22.0对数据进行分析,采用Duncan法进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对叶菜型甘薯茎尖产量和农艺性状的影响

由表2可知,施氮量和种植密度对菜薯农艺性状和产量有一定的互作效应。种植密度对节间长影响显著,对叶长、茎尖粗、叶宽、茎尖数、茎尖总产量均有极显著影响。在N1施氮水平下,茎尖粗、叶

表2 不同处理对叶菜型甘薯生长特性的影响

Table 2 Effects of different treatments on the growth characteristics of leaf vegetable sweet potato

处理 Treatment	茎尖粗 Stem diameter/mm	节间长 Internode length/cm	叶宽 Leaf width/cm	叶长 Leaf length/cm	茎尖数 Number of stem tips	产量 Yield/( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )
D1N1	6.04±0.055 cde	2.49±0.022 bc	8.72±0.096 d	7.92±0.140 b	3.81±0.011 e	34 185.63±300.85 h
D1N2	6.16±0.033 bc	2.51±0.046 abc	8.94±0.110 bc	7.93±0.063 ab	4.01±0.042 d	36 324.91±545.88 fg
D1N3	6.28±0.054 b	2.48±0.040 c	9.12±0.064 ab	7.91±0.051 ab	4.22±0.033 ab	37 577.97±486.17 ef
D1N4	6.04±0.120 cde	2.50±0.015 abc	9.06±0.032 ab	7.92±0.072 ab	4.14±0.025 bc	38 322.46±975.12 de
D2N1	6.52±0.100 a	2.50±0.024 abc	8.84±0.130 cd	7.96±0.150 ab	3.88±0.041 e	35 298.81±1 069.83 gh
D2N2	6.50±0.091 ab	2.48±0.011 c	8.96±0.140 bc	8.02±0.110 ab	4.10±0.020 c	37 822.03±648.72 e
D2N3	6.68±0.060 a	2.54±0.012 a	9.18±0.110 a	8.04±0.072 ab	4.29±0.040 a	41 127.08±692.77 ab
D2N4	6.58±0.180 a	2.51±0.010 abc	9.07±0.100 ab	8.01±0.130 ab	4.19±0.042 b	41 715.03±1 068.70 a
D3N1	5.88±0.052 ef	2.52±0.033 abc	8.22±0.160 e	8.07±0.055 ab	3.51±0.040 g	35 720.87±949.06 g
D3N2	5.92±0.032 def	2.53±0.014 ab	8.19±0.092 e	8.10±0.110 ab	3.61±0.032 f	37 780.62±1 121.86 e
D3N3	6.08±0.074 cd	2.50±0.015 abc	8.24±0.081 e	8.08±0.190 ab	3.63±0.016 f	39 906.32±487.56 bc
D3N4	5.87±0.120 f	2.51±0.022 abc	8.12±0.074 e	8.11±0.060 a	3.58±0.072 fg	39 397.97±292.84 cd
D	**	*	**	**	**	**
N	**	ns	**	ns	**	**
D×N	**	ns	*	ns	**	**

注:同列中不同小写字母表示5%水平上差异显著,\*表示显著相关( $p<0.05$ ),\*\*表示极显著相关( $p<0.01$ ),ns表示无显著相关。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at the 5% level, \* represents significant correlation ( $p<0.05$ ), \*\* represents extremely significant correlation ( $p<0.01$ ), ns represents no significant correlation. The same below.

宽、茎尖数在 D2 处理时最大, D1、D3 处理的茎尖数较 D2 处理分别减少了 1.80% 和 9.54%, 节间长、叶长、茎尖总产量在 D3 处理时最大, 茎尖总产量较 D1、D2 处理分别增加了 4.44% 和 1.20%; 在 N2 施氮水平下, 茎尖粗、叶宽、茎尖数、茎尖总产量在 D2 处理时最大, 节间长、叶长在 D3 处理时达到最大; 在 N3、N4 施氮水平下, 茎尖粗、节间长、叶宽、茎尖数、茎尖总产量在 D2 处理时最大, 叶长在 D3 处理时最大, 其中 N3 施氮条件下, D1、D3 处理的茎尖数分别较 D2 处理减少了 1.63% 和 15.38%, 茎尖总产量分别减少了 8.63% 和 2.97%; 在 N4 施氮条件下, D1、D3 处理的茎尖数分别较 D2 处理减少了 1.19% 和 14.56%, 茎尖总产量分别减少了 8.13% 和 5.55%。氮肥用量对叶菜型甘薯茎尖粗、叶宽、茎尖数和茎尖总产量有极显著影响, 对节间长和叶长无显著影响。在相同密度下, 随施氮量的增加茎尖数呈先升后降的趋势, 在 N3 处理时达到最大值; D1、D3 处理的茎尖粗随施氮量的增加呈先升后降的趋势; D1、D2 密度下增加施氮量叶宽呈先升后降的趋势, D3 密度下增加施氮量叶宽无显著变化; D1、D2 密度下茎尖总产量随施氮量的增加呈逐渐升高的趋势, N4 处理时达到最大值, 但与 N3 处理差异不显著; D3 密度下茎尖总产量随施氮量增加呈先升高后降低的趋势, N3 处理最高, 但施氮量 N3 与 N4 处理差异不显著。交互作用分析表明, 茎尖粗、茎尖数、茎尖总产量存在极显著交互效应, 叶宽存在显著交互效应, 节间长和叶长不存在交互效应。

2.2 不同处理对叶菜型甘薯叶片 SPAD 值、功能叶面积的影响

由表 3 可知, 种植密度对叶菜型甘薯 SPAD 值有显著影响, 对功能叶面积有极显著影响; 氮肥用量对 SPAD 值、功能叶面积均有极显著影响。在 D1、D2 密度水平下, SPAD 值随氮肥用量的增加而提高, 当施氮量达到 1600 kg·hm<sup>-2</sup>(N3) 时, 继续增加氮肥, SPAD 值增幅不显著; 在 D3 密度水平下, SPAD 值随施氮量的增加呈先升后降的趋势, N3 时达到最大值, 表明施用氮肥可以增加叶色值, 达到一定试验量后不再增加。在同一密度水平下, 功能叶面积随氮肥用量的增加呈先升高后下降的趋势, 且均在 N3 处理时达到最大。在高密度条件下 (D3), N3 处理的功能叶面积较 N1、N2、N4 分别增加了 9.36%、4.70%、2.46%; 在中等密度条件下 (D2), N3 处理的功能叶面积较 N1、N2、N4 分别增加了 7.91%、5.46%、8.43%。在氮肥用量相同时, 随

密度的增大 SPAD 值呈先升后降的趋势, 均在 D2 处理时达到最大值。在 N1、N2、N4 处理下的功能叶面积随种植密度增大呈降低趋势, 均在 D1 处理时达到最大。N3 处理下的功能叶面积在 D2 处理时达到最大值。其中, D2N4 处理时 SPAD 值最大, 较 D2N3 处理增加 0.86%, 二者差异不显著; 功能叶面积在 D2N3 处理时最大。交互作用分析表明, 功能叶面积存在氮肥用量和种植密度的显著交互效应, SPAD 值不存在交互效应。

表 3 不同处理对叶菜型甘薯 SPAD 值、功能叶面积的影响

Table 3 Effects of different treatments on SPAD value and functional leaf area of leaf vegetable sweet potato

处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value	功能叶面积 Functional leaf area/cm <sup>2</sup>
D1N1	40.09±0.27 g	316.84±1.31 cd
D1N2	41.60±0.39 ef	320.30±2.92 bc
D1N3	43.51±0.66 abc	330.72±4.39 ab
D1N4	43.74±0.06 ab	312.55±1.63 de
D2N1	41.22±0.58 f	312.16±3.99 de
D2N2	42.36±0.69 de	319.41±6.08 c
D2N3	43.98±0.81 ab	336.86±4.62 a
D2N4	44.36±0.25 a	310.68±3.07 de
D3N1	39.18±0.64 h	289.47±3.07 g
D3N2	40.87±0.62 fg	302.34±2.24 f
D3N3	43.28±0.43 bcd	316.56±3.51 cd
D3N4	42.66±0.35 cd	308.97±2.17 e
D	*	**
N	**	**
D×N	ns	*

2.3 不同处理对叶菜型甘薯叶片光合特性的影响

由表 4 可知, 种植密度、氮肥用量对叶菜型甘薯光合指标影响极显著, 氮肥用量×种植密度对净光合速率、气孔导度影响极显著, 对蒸腾速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度影响显著。在 N1、N4 施氮水平下, 随种植密度的升高净光合速率呈逐渐下降的趋势; 在 N2、N3 施氮水平下, 随种植密度的升高净光合速率呈先升后降的趋势, 在 D2 处理时达到最大值。在 N1、N3 施氮水平下, 随种植密度的升高蒸腾速率呈逐渐下降的趋势; N2 施氮水平下随密度的升高蒸腾速率呈先降后升的趋势, 在 D1 处理时达到最大; 在 N4 施氮水平下, 随种植密度的升高蒸腾速率呈先升后降的趋势。在 N1、N2、N4 施氮水平下, 随种植密度的升高气孔导度呈逐渐下降的趋势; 在 N3 施氮水平下, 随种植密度的升高气孔导度呈先升后降的趋势。在 N1、N4 施氮水平下, 随种植密度的升

表4 不同处理对叶菜型甘薯光合特性的影响

Table 4 Effects of different treatments on the photosynthetic characteristics of leaf vegetable sweet potato

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率 Transpiration rate/ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	气孔导度 Stomatal conductivity/ ( $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
D1N1	24.68±0.42 cd	8.14±0.084 abcd	0.66±0.012 ef	297.66±3.73 d
D1N2	25.03±0.36 bc	8.16±0.120 abc	0.67±0.014 e	314.21±5.31 c
D1N3	25.09±0.33 bc	8.26±0.092 a	0.74±0.020 b	339.16±6.12 a
D1N4	24.89±0.38 bc	8.09±0.120 abcde	0.72±0.017 c	318.22±3.26 bc
D2N1	24.20±0.48 d	8.05±0.110 bcde	0.62±0.011 gh	310.86±4.25 c
D2N2	25.17±0.09 ab	7.98±0.042 de	0.65±0.012 ef	312.37±3.41 c
D2N3	25.61±0.28 a	8.20±0.041 ab	0.79±0.020 a	335.25±5.16 a
D2N4	24.31±0.30 d	8.14±0.120 abcd	0.69±0.015 d	322.14±4.71 b
D3N1	23.38±0.08 e	7.93±0.150 e	0.61±0.022 h	286.27±0.72 e
D3N2	24.62±0.24 cd	8.02±0.044 cde	0.64±0.017 fg	302.55±4.93 d
D3N3	24.07±0.45 d	8.16±0.042 abc	0.64±0.011 fg	311.69±1.63 c
D3N4	22.48±0.21 e	7.98±0.045 de	0.62±0.016 gh	296.39±6.08 d
D	**	**	**	**
N	**	**	**	**
D×N	**	*	**	*

高胞间 CO<sub>2</sub> 浓度呈先升后降的趋势;在 N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub> 施氮水平下,则呈逐渐下降的趋势。在同一密度下,除了 D<sub>2</sub> 处理下蒸腾速率之外的其他指标随氮肥用量的升高,均呈先升高后降低的趋势,表明一定范围内施用氮肥有利于增强叶片光合特性,氮肥用量过高或者过低都不利于叶片进行光合作用。其中,D<sub>2</sub>N<sub>3</sub> 处理的气孔导度显著高于其他处理,净光合速率与 D<sub>2</sub>N<sub>2</sub> 处理无显著差异,但显著高于其

他处理。表明 D<sub>2</sub>N<sub>3</sub> 处理下叶片的光合作用较强,有利于叶菜型甘薯有机物质的积累。交互作用分析表明,叶菜型甘薯的光合特性存在氮肥用量和种植密度的显著交互效应。

#### 2.4 不同处理对叶菜型甘薯茎尖品质的影响

由表 5 可知,种植密度、种植密度×氮肥用量对茎尖各品质影响不显著,氮肥用量对干物质含量影响显著,对可溶性糖、可溶性蛋白、粗纤维、维生素

表5 不同处理对叶菜型甘薯茎尖品质的影响

Table 5 Effects of different treatments on the quality of leaf vegetable sweet potato

处理 Treatment	w(干物质) Dry matter content/%	w(可溶性糖) Soluble sugar content/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	w(粗纤维) Crude fiber content/%	w(维生素 C) Vitamin C content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	w(硝酸盐) Nitrate content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
D1N1	11.62±0.11 bc	12.21±0.06 e	60.92±0.64 e	16.02±0.28 ab	203.31±1.92 de	25.75±0.28 c
D1N2	11.58±0.14 d	12.54±0.11 d	68.28±3.26 d	15.65±0.14 b	198.64±2.83 ef	26.28±0.22 bc
D1N3	11.76±0.18 a	13.26±0.18 a	80.46±1.24 bc	15.13±0.20 b	211.22±3.86 bc	26.36±0.23 b
D1N4	11.74±0.17 a	12.67±0.22 d	84.31±5.75 ab	15.08±0.06 b	196.31±1.61 f	27.32±0.19 a
D2N1	11.64±0.13 bc	12.02±0.24 e	57.09±1.64 f	16.25±0.22 a	203.58±3.43 de	25.58±0.11 cd
D2N2	11.59±0.12 d	12.69±0.24 cd	69.14±4.02 d	15.46±0.25 b	214.37±2.35 b	26.05±0.24 bc
D2N3	11.62±0.09 bc	13.22±0.08 a	83.68±1.54 ab	15.22±0.17 b	226.44±1.65 a	25.78±0.05 c
D2N4	11.64±0.11 bc	12.84±0.13 bc	86.36±2.96 a	15.28±0.14 b	180.22±1.46 gh	27.22±0.19 a
D3N1	11.59±0.15 d	12.24±0.14 e	56.46±2.97 f	16.37±0.32 a	174.37±3.86 h	25.24±0.25 cd
D3N2	11.62±0.09 bc	12.68±0.05 d	66.12±1.36 d	15.26±0.30 b	184.55±1.04 g	25.26±0.16 cd
D3N3	11.74±0.07 a	13.08±0.13 ab	80.38±3.61 bc	15.07±0.04 b	202.62±2.29 de	25.91±0.23 c
D3N4	11.72±0.13 b	12.74±0.12 cd	84.25±4.59 ab	15.14±0.17 b	180.24±7.17 gh	26.59±0.32 b
D	ns	ns	ns	ns	ns	ns
N	*	**	**	**	**	**
D×N	ns	ns	ns	ns	ns	ns

C、硝酸盐含量影响极显著。总体而言,茎尖可溶性糖含量随着施N量的增加呈先上升后下降的趋势,不同密度处理下,均在N3处理时茎尖可溶性糖含量最高,继续增加氮肥用量,可溶性糖含量反而下降。D2、D3处理的维生素C含量及D3处理的干物质含量均随施氮肥量的增加呈先升后降的趋势,在低密度(D1)时,N3处理的维生素C含量分别较N1、N2、N4处理显著增加了3.89%、6.33%、7.60%;在中等密度(D2)下,N3处理的维生素C含量分别较N1、N2、N4处理显著增加了11.23%、5.63%、25.65%;在高密度(D3)下,N3处理的维生素C含量分别较N1、N2、N4处理显著增加了16.20%、9.79%、12.42%。可溶性蛋白含量随氮肥用量的增加呈逐渐上升的趋势,在D2密度水平下,D2N4处理的可溶性蛋白含量最高,较N1、N2、N3处理分别增加了51.27%、24.91%、3.20%,当施氮量达到1600 kg·hm<sup>-2</sup>(N3)时,继续增加氮肥用量,可溶性蛋白含量差异不显著。在同一密度下,硝酸盐含量随氮肥用量的升高而升高(D2N3除外),N3处理与N2处理硝酸盐含量无显著差异,但显著低于N4处理。氮肥和种植密度交互作用表明,茎尖品质不存

在氮肥用量和种植密度的交互效应。其中,D1N3和D2N3处理的可溶性糖含量较高,二者无显著差异;D2N3处理的维生素C含量最高,可溶性蛋白含量以D2N4处理最高,D2N3处理与D2N4处理差异不显著。

### 2.5 不同处理对叶菜型甘薯茎尖氮素吸收效率的影响

由图1可知,在同一种植密度条件下,叶菜型甘薯的氮素吸收效率随着施氮量的增加呈先上升后下降的趋势,均在N3(施氮量1600 kg·hm<sup>-2</sup>)时达到最大。在D1、D2密度下,氮素吸收效率由大到小排序为N3>N2>N1>N4,均在施氮量N4时最低;在D3密度下,施氮量达到N3时氮素吸收效率为0.72 kg·kg<sup>-1</sup>,继续增加施氮量,氮素吸收效率无显著变化。随着种植密度的增加,在同一施氮水平下,氮肥吸收效率呈先升后降的趋势,均在D2处理时达到最高,N1、N2、N3水平下氮肥吸收效率D2最高,与其他种植密度差异显著;在N4水平下,各密度间氮肥吸收效率无显著差异。由表6方差分析结果可知,施氮量、种植密度及施氮量和种植密度互作均对叶菜型甘薯茎尖氮素吸收效率有极显著影响。

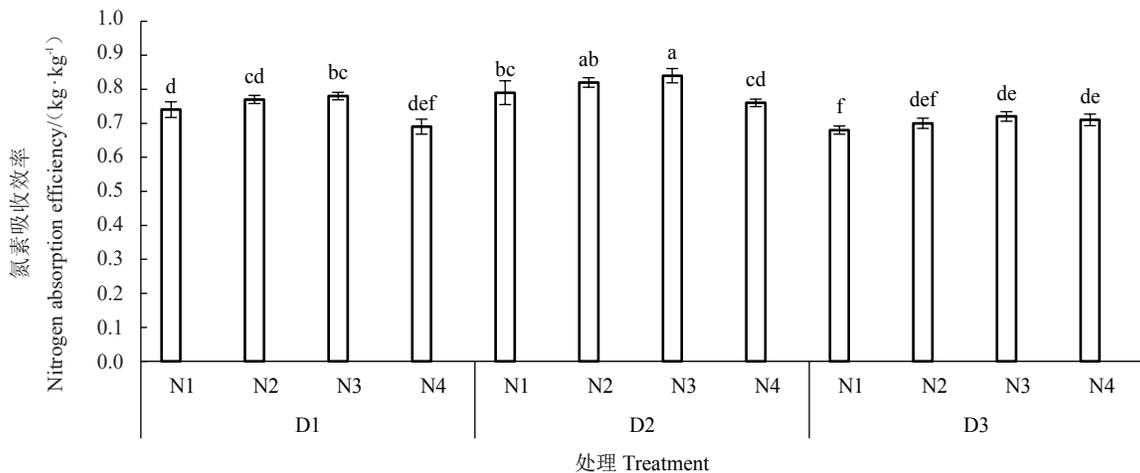


图1 施氮量和种植密度对叶菜型甘薯茎尖氮素吸收效率的影响

Fig. 1 Effects of nitrogen application amount and planting density on nitrogen absorption efficiency of stem tips

表6 施氮量和种植密度对叶菜型甘薯茎尖氮素吸收效率的方差分析

Table 6 Analysis of variance of nitrogen application amount and planting density on nitrogen absorption efficiency of stem tips

指标 Index	D	N	D×N
氮素吸收效率	**	**	**
Nitrogen absorption efficiency	**	**	**

## 3 讨论与结论

### 3.1 施氮量和种植密度对叶菜型甘薯农艺性状和产量的影响

植物农艺性状主要由遗传因素决定,但生长环境也会产生一定影响。种植密度的增加会使群内个体竞争加剧,从而引起作物农艺性状的改变<sup>[17-18]</sup>。在

养分充足的基础上合理密植可有效改善作物冠层结构,减少群落结构重叠,是一种重要的高产栽培措施<sup>[19]</sup>。本研究结果表明,随着施氮水平的升高,各密度下茎尖粗均以 N3 处理下最大;随着种植密度的升高,叶菜型甘薯茎尖粗、叶宽、茎尖数均呈先升后降的趋势,在 D2 处理时达到最大值。D2N4 茎尖总产量最高,但与 D2N3 差异不显著,表明过高的施氮量并不能有效促进菜薯的生长,茎尖产量没有显著提升,这与苏欣<sup>[20]</sup>的研究结果相似,可能是因为氮肥用量过大反而对菜薯生长产生了抑制作用,进而对产量产生影响。适当的氮肥用量和种植密度组合可以促进叶菜型甘薯整体生长发育,D2N3 处理下茎尖粗、叶宽、茎尖数表现最优,这与陈巧丹等<sup>[21]</sup>、刘志刚等<sup>[22]</sup>的研究结果相似。

### 3.2 不同密度和氮肥用量对叶菜型甘薯光合特性的影响

叶绿素是植物进行光合作用的基础,其含量高在一定程度上反映了作物光合作用的能力<sup>[23-24]</sup>。有研究表明,叶用甘薯的产量与光合速率呈正相关<sup>[25]</sup>。不同种植密度、基肥和追肥用量均可对叶用甘薯光合能力产生影响。曾新宇等<sup>[1]</sup>研究表明,种植密度过高、追肥量过低均可降低作物的光合能力。邱永祥等<sup>[26]</sup>研究表明,合理的施氮量能显著提高叶绿素含量。本研究结果表明,叶片 SPAD 值随施氮量的增加而增大,当氮肥达到一定试验量后,SPAD 值增幅不明显,甚至降低。施氮量为  $1600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的菜薯功能叶面积、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度均达到最大,叶片净光合速率在 D1、D2 种植密度下达到最大,而在 D3 密度下以  $1200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时为最大。说明在一定范围内施用氮肥可增强叶片光合能力,但超出此范围,就会起抑制作用,这与越鹏等<sup>[27]</sup>在甜菜上的研究结果一致,可能是因为过量的氮肥会加速叶绿素的分解,导致叶片中叶绿素含量减少,光合效率降低。这也证实了氮素和光合作用之间的密切关系<sup>[28]</sup>。随着栽培密度的增加,菜薯 SPAD 值呈先升后降的趋势,这可能是由于种植密度过大时,植株生长空间不足,影响叶片的展开和光合器官的发育,功能叶面积减小,光合强度降低。

### 3.3 不同密度和氮肥用量对叶菜型甘薯茎尖品质的影响

叶用甘薯作为蔬菜,对茎尖品质要求较高,干物质含量反映其水分状况,维生素 C 含量与可溶性蛋白含量代表营养高低,可溶性糖和粗纤维含量与口感密切相关<sup>[6]</sup>。氮肥是保障作物生产的关键,与

种植密度互作对作物产量和品质造成一定的影响<sup>[29]</sup>。丁芳等<sup>[30]</sup>研究表明,氮肥减施明显降低了菜薯硝酸盐含量。张小贝等<sup>[5]</sup>研究表明,增加施氮量显著提升了菜薯茎尖蛋白含量,可溶性糖含量呈先升后降的趋势。本研究结果表明,种植密度对茎尖品质影响不显著,随氮肥量的增加,可溶性蛋白含量逐渐升高,粗纤维含量在 D1 处理下逐渐下降,在 D2、D3 处理下先下降后上升,表现为  $\text{N1} > \text{N2} > \text{N4} > \text{N3}$ 。可溶性糖和维生素 C 含量均在 N3 处理时达到最高。当氮肥用量超过  $\text{N3} (1600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$  时,可溶性蛋白含量无显著变化,可溶性糖和维生素 C 含量显著降低,硝酸盐快速积累。试验结果与氮肥在菠菜等作物上的研究结论一致<sup>[31]</sup>。可能是因为氮肥用量过大时,大量消耗碳水化合物,从而导致可溶性糖和维生素 C 含量的下降,而维生素 C 含量降低又造成硝酸盐的积累。

### 3.4 施氮量和种植密度对叶菜型甘薯氮素吸收效率的影响

适宜的施氮量能促进作物对氮素的吸收利用,提高作物的氮素吸收效率<sup>[32]</sup>。本研究结果表明,茎尖氮素吸收效率随施氮量的增加而上升,但当施氮量达到一定程度时,氮素吸收利用反而下降,这与毋玲玲等<sup>[29]</sup>的结论一致。曹亚娟等<sup>[33]</sup>研究认为,一定施氮量下增大种植密度,可获得较高的氮素吸收效率,促进氮素积累与产量的同步提升。本研究中,在种植密度  $21 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、施氮量  $1600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时,氮素吸收利用效率最佳,施氮量过大或种植过密都会影响氮素的吸收利用。

综上所述,一定范围内增加氮肥用量和种植密度,能够促进叶用甘薯叶片的生长,增强茎尖分生能力,叶片光合能力和氮素吸收利用效率提高,茎尖产量增加,品质提升。但当施氮量或密度过大时,氮素吸收利用效率显著下降,硝酸盐含量大幅升高,品质降低。从节源增效和安全角度考虑,推荐黄淮地区叶用甘薯种植采用氮肥用量  $1600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、密度  $21 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$  的种植模式。

### 参考文献

- [1] 曾新宇,徐茜,李保证,等.不同密肥及种苗配置对叶菜型甘薯产量、光合特性及品质影响的研究[J].中国土壤与肥料,2023(1):110-125.
- [2] 杨新笋,雷剑,苏文瑾,等.菜用型甘薯鄂菜薯1号的选育及栽培技术[J].湖北农业科学,2010,49(8):1823-1825.
- [3] 谢一芝,郭小丁,贾赵东,等.菜用甘薯品种宁菜薯1号的选育及配套栽培技术[J].江苏农业科学,2013,41(12):107-108.
- [4] 邱永祥,李国良,刘中华,等.不同肥料种类及用量对秋季叶菜

- 用甘薯产量与品质影响的研究[J].江苏师范大学学报(自然科学版),2017,35(3):39-43.
- [5] 张小贝,朱国鹏,陈艳丽,等.追施氮肥水平对菜用甘薯产量、品质及硝酸盐积累的影响[J].热带作物学报,2018,39(1):1-5.
- [6] 徐茜,黎华,杨洪霞,等.重庆地区叶菜用甘薯不同栽植密度下茎尖产量及其食用品质评价[J].南方农业学报,2015,46(4):587-591.
- [7] 郑旋.菜用甘薯品种的筛选及其栽培技术的研究[J].福建农业学报,2004,19(1):41-44.
- [8] 孙富年,黄元射,李明,等.不同蔬菜型甘薯在不同种植密度下茎尖产量和品质[J].江苏农业学报,2008,24(3):312-315.
- [9] 侯云鹏,孔丽丽,尹彩侠,等.覆膜滴灌下氮肥与种植密度互作对东北春玉米产量、群体养分吸收与转运的调控效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(1):54-65.
- [10] 魏廷邦,柴强,王伟民,等.水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J].中国农业科学,2019,52(3):428-444.
- [11] 盛耀辉,王庆祥,齐华,等.种植密度和氮肥水平对春玉米产量及氮素效率的影响[J].作物杂志,2010(6):58-61.
- [12] 魏猛,唐忠厚,陈晓光,等.不同氮素水平对叶菜型甘薯光合作用及生长特性的影响[J].江苏农业学报,2014,30(1):87-91.
- [13] 欧行奇,任秀娟,杨国堂.甘薯茎尖与常见蔬菜的营养成分分析[J].西南农业大学学报(自然科学版),2005,27(5):630-633.
- [14] 杨剑虹.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008.
- [15] 赵倩,石晓勇,陈月红,等.水杨酸浓硫酸比色法测定浒苔中硝酸盐含量[J].海洋学报,2017,39(2):112-119.
- [16] 田培,马飞,姜俊,等.杜马斯燃烧法测定油料粗蛋白含量[J].中国油料作物学报,2012,34(6):650-654.
- [17] 李虎,陈传华,刘广林,等.种植密度和施氮量对桂育9号农艺性状及产量的影响[J].作物杂志,2019(6):99-103.
- [18] 管其锋.不同种植密度对青贮玉米产量和营养价值的影响[J].热带农业工程,2021,45(4):15-18.
- [19] 李欣欣,石祖梁,王久臣,等.施氮量和种植密度对稻茬晚播小麦干物质积累及光合特性的影响[J].华北农学报,2020,35(5):140-148.
- [20] 苏欣.氮肥水平对几种蔬菜产量、品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2006.
- [21] 陈巧丹,邱世鑫,刘学茹,等.氮肥施用量和种植密度对秦皇岛地区菜用甘薯茎尖产量和品质的影响[J].河北科技师范学院学报,2023,37(4):7-14.
- [22] 刘志刚,任红松,王岩萍,等.不同施氮处理对设施甜瓜生长发育、产量和品质的影响[J].中国瓜菜,2019,32(10):36-41.
- [23] 闫平,张书利,于艳敏,等.施肥量对2个超级稻品种叶片SPAD值的影响[J].中国农学通报,2019,35(7):7-14.
- [24] 王海燕,高聚林,王志刚,等.高密度对超高产春玉米花粒期叶片衰老与根系活力的影响[J].玉米科学,2012,20(2):75-81.
- [25] 曾燕楠,程润东,王勇,等.菜用甘薯品种光合速率测定及综合性状调查[J].江苏农业科学,2014,42(11):134-135.
- [26] 邱永祥,谢小珍,蔡南通,等.不同氮素及硝化抑制剂对叶菜用甘薯光合特性、茎叶产量及硝酸盐含量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(12):58-64.
- [27] 越鹏,李彩凤,陈业婷,等.氮素水平对甜菜功能叶片光合特性的影响[J].核农学报,2010,24(5):1080-1085.
- [28] REDDY A, REDDY K R, PADJUNG R, et al. Nitrogen nutrition and photosynthesis in leaves of pima cotton[J]. Journal of Plant Nutrition, 1996, 19(5):755-770.
- [29] 毋玲玲,魏玉杰,宿翠翠,等.不同种植密度与氮肥互作对红花产量及品质的影响[J].草业科学,2024,41(2):404-415.
- [30] 丁芳,孙喜云,刘广卿,等.不同追肥处理对叶菜型甘薯产量、品质及硝酸盐积累的影响[J].中国瓜菜,2024,37(7):156-162.
- [31] 佟容,王国臣,乔建磊,等.减氮施肥对菠菜生长发育及品质的影响[J].北方园艺,2021(14):59-64.
- [32] MENG Q F, YUE S C, HOU P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency simultaneously for maize and wheat in China: A review[J]. Pedosphere, 2016, 26(2):137-147.
- [33] 曹亚娟,韩霜,沙莎,等.施氮量和种植密度对洞庭湖区夏玉米产量及氮素利用的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(2):131-137.