



减氮和氮硅配施对辣椒产量、营养品质及养分吸收利用的影响

张帆, 崔云浩, 秦志翔, 王芽芽, 张毅, 石玉*

(山西农业大学园艺学院, 山西太谷 030801)

摘要:以辣椒品种‘奥黛丽’为试验材料, 采用基质栽培, 设置正常施氮($N_{1.0}$, 3.91 t/hm²)、60%施氮($N_{0.6}$, 2.35 t/hm²)、40%施氮($N_{0.4}$, 1.56 t/hm²)、不施氮(N_0 , 0 t/hm²) 4个供氮(基施)水平和2个硅肥(根施)水平(0, 1.5 mmol/L), 研究减施氮肥和氮硅肥配合施用对辣椒产量与营养品质及氮肥利用效率的影响效应, 并筛选出最佳施肥处理, 为辣椒的高产提质增效提供理论基础和技术参考。结果表明, (1)与正常供氮水平($N_{1.0}$)相比, 辣椒果实产量在 $N_{0.6}$ 条件下显著提高了19.93%, 在 $N_{0.4}$ 和 N_0 条件下均显著降低; 与单一供氮处理相比, 各配施硅肥处理的辣椒果实产量均显著提高。(2)与 $N_{1.0}$ 处理相比, $N_{0.6}$ 处理更有利于促进辣椒果实中可溶性糖、还原糖、可溶性蛋白、维生素C含量的提高和可滴定酸、 NO_3^- 含量的降低, 而 $N_{0.4}$ 和 N_0 处理则有明显抑制效果; 与单一供氮处理相比, 各配施硅肥处理的辣椒果实品质均不同程度提高。(3)与 $N_{1.0}$ 处理相比, $N_{0.6}$ 处理更有利于辣椒果实大量矿质元素的积累与氮肥农学利用效率的提高, 其中 $N_{0.6}$ 处理较 $N_{1.0}$ 供氮水平下的辣椒氮肥农学利用效率提高了68.97%; 与单一供氮处理相比, 各配施硅肥处理的辣椒果实大量矿质元素含量和氮肥农学利用效率均不同程度提高;(4)通过对辣椒产量及果实品质指标的主成分分析, 结果发现 $N_{0.6} + Si$ 处理下的综合得分最高, 即氮肥减施40%配施1.5 mmol/L的外源硅肥对辣椒产量、品质及氮肥的吸收利用促进效果最佳。

关键词: 氮肥减施; 硅肥; 辣椒; 果实品质; 养分吸收利用

中图分类号: S641.3

文献标志码: A

Effect of Nitrogen Reduction and Nitrogen-silica Application on Yield, Nutritional Quality and Nutrient Uptake and Utilization of Pepper

ZHANG Fan, CUI Yunhao, QIN Zhixiang, WANG Yaya, ZHANG Yi, SHI Yu*

(College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

Abstract: The authors used pepper variety “Audrey” as the test material and fertilized with normal N ($N_{1.0}$, 3.91 t/hm²), 60% N application ($N_{0.6}$, 2.35 t/hm²), 40% N application ($N_{0.4}$, 1.56 t/hm²), no N application (N_0 , 0 t/hm²), and two levels of silicon fertilizer (0 mmol/L, 1.5 mmol/L) to study the effect of silicon on nitrogen uptake and utilization and fruit quality of pepper crop under different levels of nitrogen supply, and to screen out the best fertilization treatment, aiming to provide theoretical basis and technical reference for high yield and quality improvement of pepper. The present experimental study showed that, (1) compared with $N_{1.0}$ nitrogen supply level, fruit yield of pepper under $N_{0.6}$ condition was significantly increased by 19.93%, and fruit yield under both $N_{0.4}$ and N_0 conditions were significantly lower than $N_{1.0}$ nitrogen supply level. Compared with the single N supply treatment, the fruit yield of pepper was significantly higher in all treatments with silicon fertilizer. (2) $N_{0.6}$ was more favorable than $N_{1.0}$ in

收稿日期: 2022-11-10; 修改稿收到日期: 2023-06-30

基金项目: 山西省重点研发计划项目(201903D221065)

作者简介: 张帆(1998—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: 752278872@qq.com

* 通信作者: 石玉, 副教授, 主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: ayu-shi@163.com

promoting the increase of soluble sugar, reducing sugar, soluble protein and vitamin C contents and the decrease of titratable acid and NO_3^- contents in pepper fruits, while $\text{N}_{0.4}$ and N_0 had a significant inhibitory effect. Compared with the single N supply treatment, the fruit quality of pepper in each treatment with silicon fertilizer improved to different degrees. (3) $\text{N}_{0.6}$ was more beneficial to the accumulation of large amount of mineral elements and the improvement of nitrogen fertilizer agronomic use efficiency of pepper fruits compared with $\text{N}_{1.0}$, where $\text{N}_{0.6}$ increased the nitrogen fertilizer agronomic use efficiency of pepper by 68.97% compared with $\text{N}_{1.0}$ nitrogen supply level. Compared with the single N supply treatment, the content of massive mineral elements and the agronomic efficiency of N fertilizer use in pepper fruits of each treatment with silica fertilizer were increased to different degrees. (4) Results of principal component analysis of pepper yield and fruit quality indicators showed that the highest total score was obtained under $\text{N}_{0.6} + \text{Si}$ treatment. In other words, application of 1.5 mmol/L exogenous silicon fertilizer with 40% reduction of N fertilizer had the best effect on nitrogen fertilizer uptake and utilization, fruit mineral element accumulation, fruits quality and yield of pepper.

Key words: nitrogen fertilizer reduction; silicon fertilizer; pepper; fruit quality; nutrient uptake and utilization

氮素是蔬菜作物生长发育必需的大量元素之一^[1],可参与植物体蛋白质、核酸、叶绿素等含氮有机物的合成,进而影响植物的生长发育及果实品质的形成,因此,土壤供应氮素的水平是限制作物产量及果实品质的重要因素,土壤中的氮素主要以硝态氮的形式被植物直接吸收利用,少部分则以铵态氮的形式吸收利用^[2]。毕晓庆等^[3]研究表明,在植物生殖生长期缺失氮素会导致落花落果,叶片早衰,进而影响果实品质和产量。当植物吸收氮素过多时,大量光合产物被用于含氮有机物合成,限制碳水化合物合成与积累,进而影响植物营养生长和生殖生长的平衡^[4]。例如,氮素水平过高导致三叶青贪青生长,茎秆纤细,生殖生长被抑制^[5];过量施氮会导致梨净光合速率下降,阻碍果实糖分合成,硝酸盐在叶片、果实中大量积累,影响碳水化合物的合成与积累,导致坐果率下降,果实品质低下^[6]。此外,过量施氮还会促进樱桃果实内的糖转化为氨基酸,降低果实内糖含量^[7]。

近年来,中国设施蔬菜氮肥施用量高达 850.5 kg/hm²,为氮肥推荐量的 1.9 倍^[1],作物每生长季从土壤中吸收的平均氮肥量为 230 kg/hm²,而氮肥剩余量可达 324 kg/hm²,氮肥利用率平均仅为 18.6%,土壤中未被作物吸收的氮素则以 NH_3 挥发、反硝化作用及淋洗等形式释放到大气或土壤环境中^[8],不仅会导致作物的氮素利用率大幅降低,土壤有机质含量下降,速效养分富集,土壤次生盐渍化严重,还会出现土壤贫瘠、离子毒害等现象,土壤中残留的氮素经过淋溶沉积进入地下水或在反硝化作用下产生 NO 释放到空气中,污染空气,对环境造成严重破坏^[1]。目前,国内外关于辣椒的氮肥施用已有大量研究,近年来,设施辣椒实际生产中氮肥的投入施用量仍在迅速

上升^[1],过量的氮肥施入严重影响了辣椒的氮肥利用效率,普遍导致辣椒果实产量下降,果实中的糖分、蛋白质、维生素等营养物质含量下降,硝酸盐、亚硝酸盐含量增加^[9]。因此,研究减施氮肥对辣椒产量、果实品质及氮素吸收利用的影响机制,可为辣椒的增产提质和氮肥的减量增效提供理论基础。

硅(silicon, Si)是地壳中含量第二高的元素,主要以硅酸盐结晶的形态存在于土壤中,近年来已有研究发现,硅对植物生长发育有益,影响植物体内许多新陈代谢过程^[10]。硅可以沉积在植物叶片表皮形成角质-硅双层,在叶脉间形成矩形硅化细胞,在茎秆表面形成含硅体,增强叶片机械强度与茎秆刚性,进而提高植物抗病虫害能力,促进茎秆增粗防止倒伏^[11]。此外,硅还可促进植物根系生长,提高根系细胞的亲水性和水分传导,从而显著促进了植物根系对土壤矿质元素的吸收利用^[12]。瞿翔等^[13]研究表明,硅可以提高土壤有效磷含量,有效缓解玉米体内的缺素胁迫;袁源远等^[14]研究发现,硅肥能够促进水稻生长发育,改善光合作用与养分吸收利用能力。目前,硅肥在水稻、玉米等农作物的实际生产应用已有大量研究,而在辣椒等双子叶植物生产实践中的应用研究还有待进一步深入。该研究以辣椒(*Capsicum annuum* L.)为试材,通过设置氮肥减施下配施硅肥试验,探讨硅肥对辣椒产量、果实品质及氮素吸收利用的影响,以筛选出最佳的施肥组合,为辣椒增产提质提供理论基础与技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验设计

本试验在山西农业大学园艺试验站及实验大楼

进行。选用辣椒品种‘奥黛丽’为试材,将幼苗装至72孔穴盘中进行苗期管理,待幼苗长至三叶一心时定植于装有不同肥料处理的基质营养钵(30 cm×30 cm×40 cm)内,缓苗1周后,每隔3 d浇灌1次营养液(营养液配方采用日本山崎甜椒营养液配方),每次150 mL,采用滴灌方式每隔1 d浇1次水,并及时进行疏花疏果、整枝打岔及病虫害防治。

根据当地实际每生产1 000 kg辣椒需要4.8 kg氮(N)、0.9 kg磷(P)、5.4 kg钾(K),计算辣椒整个生长期N、P、K需求量,确定N、P、K肥正常用量分别为391,211,231 kg/hm²,根据氮肥减施比例设置正常施氮量(N_{1.0})、60%施氮量(氮肥减施40%,N_{0.6})、40%施氮量(氮肥减施60%,N_{0.4})和不施氮肥(N₀)4个供氮水平。定植时将不同处理氮、磷、钾肥按比例与基质混合作底肥。待进入辣椒花期,于16:00—18:00进行1.5 mmol/L硅酸钠(施硅浓度由预实验筛选得出)根施处理,每周1次,每株500 mL,直至果实成熟,以不施硅为对照。试验共组成8个(4×2)氮肥、硅肥配施处理组合。待辣椒果实成熟且达到采收标准后,采收成熟度均匀一致的果实,于-80℃超低温冰箱保存,用于品质指标测定。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 果实产量

待辣椒果实成熟且达到采收标准后,每隔7 d按单株采收成熟度一致的果实,共采收3批,每批采收5株并进行称重,计算单株产量。每个处理3次重复。

1.2.2 果实营养品质

可溶性糖含量采用蒽酮乙酸乙酯法测定^[15],可滴定酸含量采用酸碱滴定法测定^[15];糖酸比为可溶性糖含量与可滴定酸含量之比;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝G-250法测定^[15];硝酸盐含量采用水杨酸—硫酸比色法测定^[15];维生素C含量采用钼蓝比色法测定^[15]。每个处理3次重复。

1.2.3 果实和基质中矿质元素含量

取成熟的辣椒果实,洗净擦干后置于烘箱内先105℃杀青15 min,后于65℃烘干至恒重,过100目筛并制备干样;同时,将相应处理的栽培基质分装至敞口塑料袋中,待自然风干后过100目筛并制备干样。称取0.2 g烘干样品,用H₂SO₄-H₂O₂消煮法制备消煮液,采用火焰原子吸收分光光度计(AA-6200,日本SHIMADZU)测定果实中K、Ca、Mg元素含量,每个处理3次重复。N元素质量分数采用靛酚蓝比色法^[16]测定,P元素质量分数采用钼锑抗比色法^[16]测定。

1.2.4 辣椒氮肥农学利用效率

依据以上测定结果计算氮肥农学利用效率=(施氮区作物产量-未施氮区作物产量)/氮肥施用量。

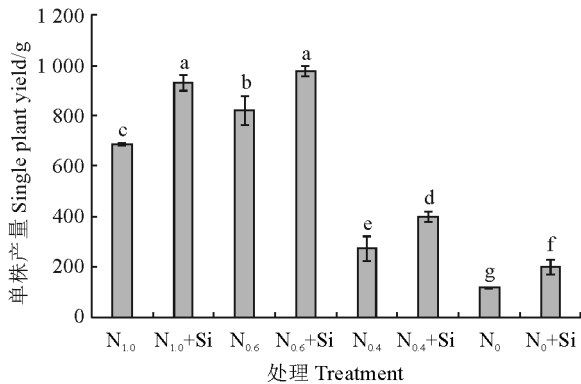
1.3 数据分析

采用SPSS 21.0统计软件进行果实产量、品质及养分吸收指标在处理间的差异显著性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 减氮和施硅对辣椒果实产量的影响

从图1来看,随供氮水平的降低,不施硅和施硅处理辣椒果实产量均呈先升高后降低的变化趋势,且均在N_{0.6}(N_{0.6}+Si)处理下达到最大值,其果实产量比相应的正常供氮处理N_{1.0}(N_{1.0}+Si)显著提高19.93%(5.04%);而N_{0.4}(N_{0.4}+Si)和N₀(N₀+Si)处理的果实产量均显著低于相应正常供氮处理N_{1.0}(N_{1.0}+Si),降幅分别达到60.27%(41.56%)和82.94%(70.78%)。



N_{1.0}为正常供氮;N_{1.0}+Si为正常供氮配施1.5 mmol/L Si;N_{0.6}为60%供氮(氮肥减施40%);N_{0.6}+Si为60%供氮配施1.5 mmol/L Si;N_{0.4}为40%供氮(氮肥减施60%);N_{0.4}+Si为40%供氮配施1.5 mmol/L Si;N₀为不施氮肥;N₀+Si为不施氮肥配施1.5 mmol/L Si。不同小写字母表示各处理间差异显著(P<0.05),使用Duncan新复极差法进行多重比较。下同。

图1 减氮和施硅对单株辣椒果实产量的影响

N_{1.0} was normal N supply; N_{1.0}+Si was normal N supply with 1.5 mmol/L; N_{0.6} was N fertilizer reduced by 40%; N_{0.6}+Si was N fertilizer reduced by 40% with 1.5 mmol/L; N_{0.4} was N fertilizer reduced by 60%; N_{0.4}+Si was N fertilizer reduced by 60% with 1.5 mmol/L; N₀ was no N fertilizer; N₀+Si was no N fertilizer with 1.5 mmol/L. Different lowercase letters indicate significant difference (P<0.05) among treatments, and multiple comparisons were made using Duncan's new complex polarization method. The same as below.

Fig. 1 Effect of nitrogen reduction and silicon application on fruit yield of single pepper plant

与单一供氮处理相比,各配施硅肥处理的辣椒果实产量均显著提高。可见,辣椒果实产量在减施40%氮肥后会发生显著变化,但若进一步减施氮肥则会大幅显著降低;配施硅肥会不同程度提高各施氮水平下辣椒果实产量,但增幅存在差异。

2.2 减氮和施硅对辣椒果实品质的影响

2.2.1 Vc和可溶性蛋白含量

由图2,A、B可知,随供氮水平的降低,不施硅和施硅处理辣椒果实Vc、可溶性蛋白含量均呈先升高后降低的变化趋势,并均在 $N_{0.6}$ ($N_{0.6}+Si$)处理下达到最大值,此时它们的Vc、可溶性蛋白含量均比相应的 $N_{1.0}$ ($N_{1.0}+Si$)处理分别显著提高23.66%

(15.33%)、5.37%(9.01%);而 $N_{0.4}$ ($N_{0.4}+Si$)和 N_0 (N_0+Si)处理的果实Vc、可溶性蛋白含量均大幅度显著低于相应 $N_{1.0}$ ($N_{1.0}+Si$)处理, N_0 (N_0+Si)处理又显著低于相应的 $N_{0.4}$ ($N_{0.4}+Si$)处理。与单一施氮处理相比较,各配施硅肥处理辣椒果实中Vc和可溶性蛋白含量大多进一步显著提高,但提高幅度在各施氮水平间存在差异,增幅分别在16.57%~35.63%和3.61%~9.85%之间。可见,辣椒果实Vc和可溶性蛋白含量在减施40%氮肥后显著提高,但若进一步减施氮肥则会大幅显著降低;配施硅肥会显著提高各施氮水平下辣椒果实Vc和可溶性蛋白含量。

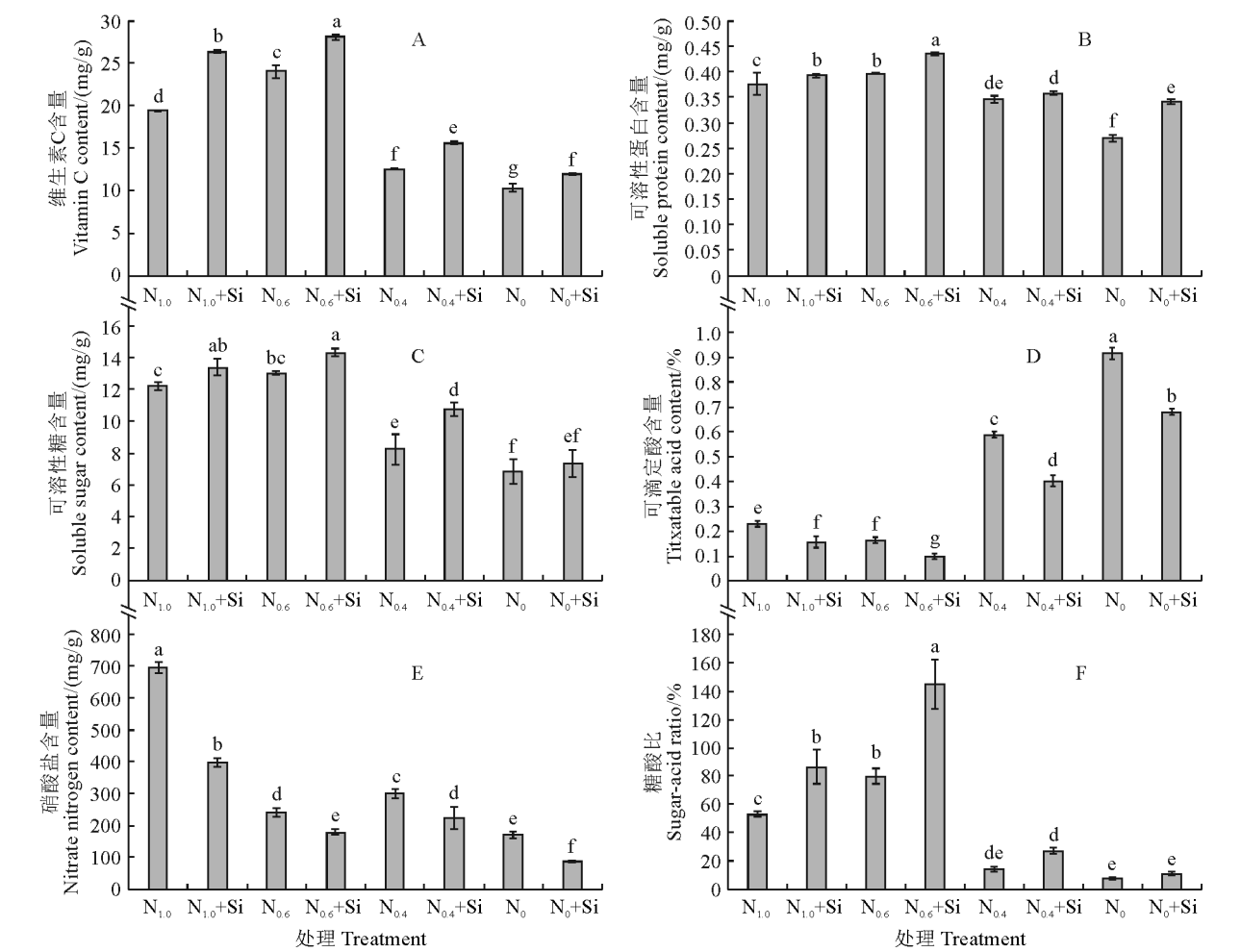


图2 减氮和施硅处理下辣椒果实品质指标的变化

Fig. 2 The quality indicators of pepper fruits under nitrogen reduction and silicon application

2.2.2 可溶性糖和可滴定酸含量

图2,C、D显示,随供氮水平的降低,不施硅和施硅处理辣椒果实的可溶性糖含量均呈先升高后降低的变化趋势,并均在 $N_{0.6}$ ($N_{0.6}+Si$)处理下达到最大值,此时比相应的 $N_{1.0}$ ($N_{1.0}+Si$)处理显著提

高6.91%(7.06%),而 $N_{0.4}$ ($N_{0.4}+Si$)和 N_0 (N_0+Si)处理均显著低于相应正常供氮处理,降幅分别为32.53%(19.86%)和44.05%(45.12%);辣椒果实的可滴定酸含量则均呈先降低再升高的变化趋势,并均在 $N_{0.6}$ ($N_{0.6}+Si$)处理下达到最小值,此时比

相应的 $N_{1.0}$ ($N_{1.0} + Si$) 处理显著降低了 29.03% (36.15%), 而 $N_{0.4}$ ($N_{0.4} + Si$) 和 N_0 ($N_0 + Si$) 处理均显著高于相应正常供氮处理。与单一施氮处理相比较, 各配施硅肥处理辣椒果实的可溶性糖含量大多显著提高, 而其可滴定酸含量均显著降低, 降幅在 25.77%~39.07%。可见, 在减施 40% 氮肥后辣椒果实可溶性糖含量有所提高, 且可滴定酸含量显著降低, 但若进一步减施氮肥, 则可溶性糖含量会大幅显著降低, 且可滴定酸含量大幅显著升高; 配施硅肥会显著提高各施氮水平下辣椒果实可溶性糖含量, 同时显著降低其可滴定酸含量。

2.2.3 硝酸盐含量和糖酸比

图 2,E、F 显示, 在氮肥减施条件下, 不施硅和施硅处理辣椒果实的硝酸盐含量相比于 $N_{1.0}$ ($N_{1.0} + Si$) 处理均显著降低, 降幅在 56.76%~75.30%; 同时, 它们的糖酸比均在 $N_{0.6}$ ($N_{0.6} + Si$) 处理下达到最大值, 比相应的 $N_{1.0}$ ($N_{1.0} + Si$) 处理显著提高了 50.94% (58.18%), 而在 $N_{0.4}$ ($N_{0.4} + Si$) 和 N_0 ($N_0 + Si$) 处理下比 $N_{1.0}$ ($N_{1.0} + Si$) 处理分别显著降低 73.58% (69.15%) 和 85.91% (87.54%)。与单一施氮处理相比, 各配施硅肥处理辣椒果实的硝酸盐含量显著降低 25.56%~49.92%, 而其辣椒果实的糖酸比均有不同程度提高, 并在 $N_{0.6}$ 与 $N_{0.6} + Si$

处理间增幅最大, 显著提高了 81.23%。可见, 氮肥减施后辣椒果实的硝酸盐含量会显著降低, 且辣椒果实的糖酸比在减施 40% 氮肥后显著提高, 进一步减施氮肥则会大幅显著降低; 配施硅肥会显著降低各施氮水平下辣椒果实的硝酸盐含量, 同时会不同程度提高其糖酸比。

2.3 各施肥处理对辣椒果实几种矿质大量元素含量的影响

由表 1 可知, 随供氮水平的降低, 不施硅和施硅处理辣椒果实的矿质大量元素含量均呈先上升后降低的变化趋势, 并均在 $N_{0.6}$ ($N_{0.6} + Si$) 处理下达到最大值, 此时其果实的 Ca、K、N 与 P 元素含量比相应 $N_{1.0}$ ($N_{1.0} + Si$) 处理分别显著提高 18.57% (40.88%)、4.67% (2.55%)、12.66% (6.59%) 和 10.82% (4.88%); 而 $N_{0.4}$ ($N_{0.4} + Si$) 和 N_0 ($N_0 + Si$) 处理的果实大量元素含量均大多比相应 $N_{1.0}$ ($N_{1.0} + Si$) 处理大幅度显著降低。与单一施氮处理相比较, 各配施硅肥处理辣椒果实的矿质大量元素含量均显著提高, 并在 $N_{0.6}$ 与 $N_{0.6} + Si$ 处理间提升幅度最大。可见, 辣椒果实的矿质大量元素含量在减施 40% 氮肥后显著提高, 进一步减施氮肥则会大幅显著降低; 配施硅肥会不同程度提高各施氮水平下辣椒果实的矿质大量元素含量。

表 1 减氮和施硅处理下辣椒果实几种矿质大量元素含量					
Table 1 The contents of several mineral macronutrients in pepper fruits under nitrogen reduction and silicon application					
处理 Treatment	Ca	Mg	K	N	P
$N_{1.0}$	46.53±2.39cde	0.10±0.01d	1.50±0.08bcd	17.46±1.99c	3.88±0.03c
$N_{1.0} + Si$	54.23±12.53bc	0.11±0.00bc	1.57±0.04ab	20.18±1.34ab	4.30±0.03b
$N_{0.6}$	55.17±1.15b	0.10±0.00cd	1.57±0.05ab	19.67±1.44b	4.30±0.03b
$N_{0.6} + Si$	76.40±6.93a	0.12±0.01a	1.61±0.02a	21.51±0.00a	4.51±0.03a
$N_{0.4}$	42.30±1.21e	0.02±0.00h	1.45±0.03cd	16.28±0.01d	3.47±0.00d
$N_{0.4} + Si$	43.23±2.19de	0.07±0.01fg	1.48±0.03cd	17.32±0.86c	3.56±0.08cd
N_0	25.60±6.12g	0.08±0.01ef	1.18±0.09e	13.66±1.66f	0.82±0.00e
$N_0 + Si$	34.33±1.20f	0.08±0.00ef	1.41±0.02d	14.69±1.54e	3.50±0.08cd

注: 同列不同小写字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 ($P<0.05$), 使用 Duncan 新复极差法进行多重比较。下同。
Note: Different lowercase letters within same column indicate significant difference among treatments at 0.05 level ($P<0.05$), and multiple comparisons were made using Duncan's new complex polarization method. The same as below.

2.4 减氮和施硅对辣椒氮肥农学利用效率的影响

图 3 显示, 不施硅(施硅)处理辣椒的氮肥农学利用效率随着施氮量降低均先上升后降低, 并在 $N_{0.6}$ ($N_{0.6} + Si$) 处理下比相应的 $N_{1.0}$ ($N_{1.0} + Si$) 处理显著提高 68.97% (76.01%), 而在 $N_{0.4}$ ($N_{0.4} + Si$) 处理下

不仅显著低于相应 $N_{0.6}$ ($N_{0.6} + Si$) 处理 60.27% (76.01%), 也比正常供氮处理不同程度降低; 与单一施氮处理相比较, 各配施硅肥处理辣椒的氮肥农学利用效率均不同程度提高, 但均未达到显著水平。可见, 辣椒的氮肥农学利用效率在减施 40% 氮肥后显

著提高,而进一步减施氮肥则会大幅降低,且在各施氮水平下配施硅肥也会不同程度提高。

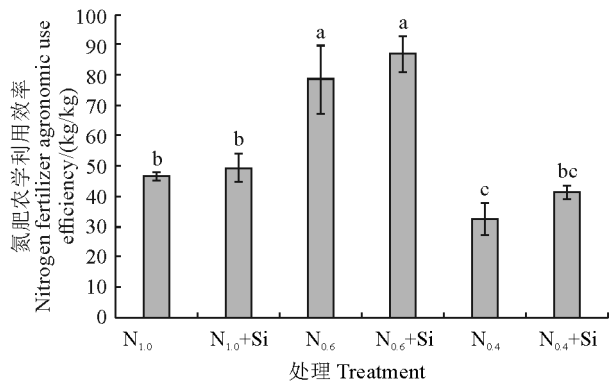


图3 减氮和施硅处理下辣椒氮肥农学利用效率的变化
Fig.3 The agronomic use efficiency of nitrogen fertilizer in pepper under nitrogen reduction and silicon application

2.5 各氮硅配施处理效应的综合评价

为进一步评价不同减氮与氮、硅配施处理对辣椒产量、营养品质及养分吸收利用的影响效应,对主要的11个指标进行相关性分析(表2),除可滴定酸外,其余10个指标间均呈不同程度显著相关,因此可进一步对11个指标进行主成分分析。

由表3可知,前2个主成分的初始特征值大于1,因而提取出了2个主成分,其中第1主成分的方差贡献率为80.70%,第2主成分的方差贡献率为9.11%。根据各主成分的特征值与载荷矩阵(表4)分析,果实的硝酸盐含量和N元素含量对第1主成分的影响最大,果实的可溶性糖、可滴定酸、可溶性蛋白、硝酸盐、P元素、Ca元素与Mg元素含量对第2主成分的影响较大。以特征向量为权重,根据主成分矩阵得出主成分函数(y_1, y_2)表达式(1)和(2):

$$y_1=0.329x_1+0.328x_2+0.326x_3+0.330x_4-0.140x_5-0.333x_6+0.333x_7+0.291x_8+0.316x_9+0.318x_{10}+0.226x_{11}$$
$$y_2=-0.034x_1+0.04x_2+0.119x_3-0.087x_4+0.889x_5+0.096x_6-0.032x_7+0.102x_8+0.028x_9+0.085x_{10}+0.398x_{11}$$

(1)

(2)

根据主成分函数表达式得出11个指标在各处理的综合得分(表5),其中 $N_{0.6}+Si$ 处理的综合得分明显高于其他处理, $N_{1.0}$ 和 $N_{0.6}$ 处理次之, $N_{1.0}+Si$ 处理再次,其余处理均为负值。因此, $N_{0.6}+Si$ 处理对辣椒产量、营养品质及养分吸收利用的促进效果最佳。

表2 辣椒产量、营养品质及养分吸收利用的11项指标的相关性分析											
Table 2 Correlation analysis of 11 indicators of yield, nutritional quality and nutrient uptake and utilization in pepper											
项目 Item	产量 Yield	维生素C Vitamin C	可溶性蛋白 Soluble protein	可溶性糖 Soluble sugar	可滴定酸 Titratable acid	硝酸盐 Nitrate nitrogen	N	P	K	Ca	Mg
产量 Yield	1.000										
维生素C Vitamin C	0.993 **	1.000									
可溶性蛋白 Soluble protein	0.900 **	0.897 **	1.000								
可溶性糖 Soluble sugar	0.981 **	0.968 **	0.906 **	1.000							
可滴定酸 Titratable acid	-0.469	-0.395	-0.267	-0.515	1.000						
硝酸盐 Nitrate nitrogen	-0.950 **	-0.947 **	-0.950 **	-0.963 **	0.476	1.000					
N	0.963 **	0.972 **	0.939 **	0.963 **	-0.427	-0.991 **	1.000				
P	0.766 *	0.749	0.939 **	0.775 *	-0.212	-0.859 **	0.813 **	1.000			
K	0.855 **	0.843 **	0.974 **	0.870 **	-0.318	-0.940 **	0.905 **	0.981 **	1.000		
Ca	0.897 **	0.913 **	0.946 **	0.894 **	-0.290	-0.934 **	0.956 **	0.789 *	0.869 *	1.000	
Mg	0.756 *	0.773 *	0.577	0.728 *	-0.041	-0.572	0.632 *	0.390	0.463	0.587	1.000

注: ** 表示在 0.01 水平上显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关。
Note: ** indicates significant correlation at the 0.01 level, * indicates significant correlation at the 0.05 level.

表 3 主成分总方差解释

Table 3 Explanation of total variance of principal components

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue	方差百分比 Percentage of variance	累积 Accumulation/%	提取载荷平方和 Extraction of the sum of squares of loads	方差百分比 Percentage of variance	累积 Accumulation/%
1	8.877	80.699	80.699	8.877	80.699	80.699
2	1.002	9.106	89.805	1.002	9.106	89.805
3	0.840	7.638	97.443			
4	0.206	1.869	99.312			
5	0.049	0.444	99.757			
6	0.026	0.238	99.995			
7	0.001	0.005	100.000			

表 4 主成分分析的各因子载荷矩阵

Table 4 Loadings matrix of each factor for principal component analysis

主成分 Principal component	果实产量及品质指标 Fruit yield and quality indicator										
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
I	0.977	0.972	0.967	0.978	-0.416	-0.987	0.986	0.864	0.937	0.943	0.672
II	-0.034	0.04	0.119	-0.087	0.889	0.096	-0.032	0.102	0.028	0.085	0.398

注： x_1 . 产量； x_2 . Vc 含量； x_3 . 可溶性蛋白； x_4 . 可溶性糖； x_5 . 可滴定酸； x_6 . 硝酸盐； x_7 . N 元素； x_8 . P 元素； x_9 . K 元素； x_{10} . Ca 元素； x_{11} . Mg 元素。

Note: x_1 . Yield; x_2 . Vitamin C; x_3 . Soluble protein; x_4 . Soluble sugar; x_5 . Titratable acid; x_6 . Nitrate nitrogen; x_7 . N element; x_8 . P element; x_9 . K element; x_{10} . Ca element; x_{11} . Mg element.

表 5 辣椒产量、营养品质及养分吸收利用的
11 项指标的综合得分

Table 5 Combined scores of 11 indicators of yield, nutritional quality and nutrient uptake and utilization of pepper

处理 Treatment	y_1	y_2	y	排序 Order
$N_{1.0}$	0.810	-0.818	0.578	4
$N_{1.0} + Si$	2.688	-0.351	2.135	2
$N_{0.6}$	2.249	0.096	1.821	3
$N_{0.6} + Si$	4.015	0.839	3.312	1
$N_{0.4}$	-1.811	-1.237	-1.572	6
$N_{0.4} + Si$	-0.489	-0.311	-0.423	5
N_0	-4.810	-0.180	-3.893	8
$N_0 + Si$	-2.651	1.964	-1.958	7

3 讨 论

氮素是影响辣椒植株生长和果实品质及产量的重要因素^[17]。在实际生产中,土壤中的氮素往往无法被植株充分利用而在土壤中大量积累,土壤养分平衡被破坏,限制植株根系发育,进而抑制植株干物质积累,影响植株的正常生长发育^[18],导致植株 C/

N 失衡,最终影响果实的形成与发育^[19]。但在一定范围内减施氮肥可显著提高植株氮肥利用效率,促进植株生长发育,提高作物产量^[20-21]。本研究结果表明,氮肥减施 40%($N_{0.6}$)相比于正常供氮水平下($N_{1.0}$)辣椒的氮肥农学效率与果实产量均显著提高,辣椒果实的 N、P、K、Ca 与 Mg 矿质元素积累也均不同程度提高,而随着氮肥的进一步减施辣椒的氮肥农学效率与果实产量均大幅降低,且辣椒果实的 N、P、K、Ca 与 Mg 矿质元素积累均受显著抑制。根据本地生产实际,高山露地辣椒正常氮肥施用量为 300 kg/hm²,徐大兵等^[22]的研究表明,减氮 20%(N 240 kg/hm²)下高山露地辣椒的氮素吸收高于常规氮处理,较本试验中‘奥黛丽’辣椒正常生产施氮量高,最适氮肥减施比例相对较小,这与不同辣椒品种生长期需氮量不同相关,进而其最适减氮比例也不同^[23]。在正常供氮水平下($N_{1.0}$),未被植株吸收利用的 NO₃⁻ 在土壤中堆积,加重了土壤酸化^[1],降低了土壤中 P、K 元素的移动性,从而影响了辣椒根系对土壤养分的吸收利用,导致辣椒的氮素利用率下降^[24]。另外,土壤酸化导致土壤溶液渗透势升高,严重阻碍了植物根系的生长发育,辣椒根系的养分吸收转运能力受抑制^[25]。因此,适量减施氮肥能

够显著促进辣椒对营养元素的吸收,从而提高辣椒的氮肥农学利用效率,进一步促进辣椒果实的养分积累和产量的提升。

近年来,国内外对硅肥在农业上的应用研究越来越广泛,目前,硅被普遍认为是对植物生长发育有益的营养元素^[26]。有研究表明,适量施用硅肥对果实发育和养分积累有积极作用,最终促进增产。本研究表明,与单一供氮相比,氮硅配施后辣椒的氮肥农学利用效率及果实营养元素积累显著提高,果实产量显著增加,且在氮肥减施 40% 下配施硅肥($N_{0.6} + Si$)促进效果最佳。硅元素可有效维持土壤肥力,促进土壤中的元素移动,进而增强作物对营养元素的吸收,有研究发现,硅可以显著促进果实中 K 元素的吸收利用^[27]。Alsaedi 等^[28]的研究表明,施硅处理下黄瓜果实中钾元素含量显著提高,有利于植物维持离子稳态,调节渗透平衡,控制气孔开度,提高植物抗逆性,进而影响果实的养分吸收利用。因此,减施氮肥下配施硅肥与正常供氮相比进一步促进了辣椒根系生长发育,提高了辣椒根系对氮素的吸收利用,进而促进辣椒果实的养分吸收和积累,提高辣椒产量。

可溶性糖是植物光合作用的重要产物,在植物体的生理代谢中起关键作用^[29]。果实中 Vc、硝酸盐含量是影响茄果类蔬菜品质的重要指标^[30]。氮肥施用过量时,土壤中氮素失衡,导致植物的营养生长和生殖生长失衡,阻碍了果实养分的吸收利用,影响果实营养物质的积累^[31]。康利允等^[32]研究表明,氮肥减施 37.5% 显著提高了甜瓜的固酸比、可溶性蛋白含量、维生素 C 含量;刘宇曦等^[25]研究发现,氮肥减施 50% 时,番茄果实的可溶性糖、可滴定酸、维生素 C、可溶性蛋白含量最高。本试验结果表明,氮肥减施 40% ($N_{0.6}$) 时,辣椒果实中 Vc 和可溶性蛋白含量均显著提高,可滴定酸和硝酸盐含量显著降低,若进一步减施氮肥($N_{0.4}$, N_0)辣椒的果实品质相比于正常供氮条件则大幅下降。在 $N_{0.6}$ 施氮水平下,辣椒果实的 N、P、K、Ca 元素含量相比于正

常供氮条件显著提升,说明适量的氮肥减施促进了辣椒果实营养元素的吸收与协同利用,从而促进了辣椒果实综合品质的提升。氮肥施用过量时,氮代谢酶活性显著降低,阻碍了辣椒果实氨基酸代谢进程^[33],适量减施氮肥提高了植株氮代谢相关酶的活性^[34],因此,与正常供氮水平相比,氮肥减施 40% 条件下显著促进了辣椒中 NO_3^- 与氨基酸间的转化,促进了蛋白质的合成,进而降低了果实硝酸盐含量,提高了可溶性蛋白含量。

本研究结果表明,氮硅配施后与相应的单一供氮处理相比辣椒果实的可溶性糖、可溶性蛋白质和维生素 C 含量均进一步显著提高,可滴定酸与硝酸盐含量均进一步显著下降,且在氮肥减施 40% 条件下施硅处理的效果最佳。可溶性蛋白是氮素在果实中的主要存在形式^[35],本研究中氮硅配施相比于单一供氮处理辣椒果实中 N 元素含量提高了 7.54% ~ 15.58%,硅显著促进了果实对 N 素的吸收利用,进而改善了氮代谢^[36],进一步降低果实中 NO_3^- ,促进蛋白质及其他营养物质的积累。因此,氮硅配施显著提高了辣椒果实中可溶性糖、可溶性蛋白质和维生素 C 含量,同时显著降低了可滴定酸与硝酸盐含量,进而提升辣椒果实的综合品质。

综上所述,与正常供氮水平相比,氮肥减施 40% 更有利于促进辣椒果实的生长发育与品质指标积累,提高辣椒果实产量,显著改善了果实品质;辣椒在氮肥减施 40% 条件下的氮肥农学利用效率更高,同时辣椒果实对大量矿质元素的有效吸收效果更佳。在不同供氮水平下配施 1.5 mmol/L 的硅肥,能进一步促进辣椒果实产量与营养品质的提高,同时进一步提高辣椒果实对大量矿质元素的积累,因而施硅有效改善了辣椒在高氮与氮素缺素条件下的生长状态,降低了高氮和缺氮的危害。综合考虑,本研究中氮肥减施 40% 的条件下配施 1.5 mmol/L 的外源硅肥对辣椒产量、营养品质及矿质元素的吸收利用的促进效果最佳。

参考文献:

[1] 黄绍文,唐继伟,李春花,等. 我国蔬菜化肥减施潜力与科学施用对策[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1 480-1 493.
HUANG S W, TANG J W, LI C H, *et al.* Reducing potential of chemical fertilizers and scientific fertilization countermeas-

ure in vegetable production in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1 480-1 493.
[2] XU C M, CHEN L P, CHEN S, *et al.* Rhizosphere aeration improves nitrogen transformation in soil, and nitrogen absorption and accumulation in rice plants[J]. *Rice Science*, 2020, 27(2): 162-174.

[3] 毕晓庆, 山楠, 杜连凤, 等. 氮肥用量对设施滴灌栽培番茄产量品质及土壤硝态氮累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2 246-2 250.

BI X Q, SHAN N, DU L F, *et al.* Effects of nitrogen rates on tomato yield and quality and soil nitrate accumulation under drip irrigation in solar greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(11): 2 246-2 250.

[4] 李菲菲, 黄成能, 谢深喜, 等. 施氮过量对椪柑园土壤和树体矿质养分及果实品质的影响[J]. 南方农业学报, 2018, **49**(4): 748-756.

LI F F, HUANG C N, XIE S X, *et al.* Effects of excessive nitrogen application on orchard soil and tree mineral nutrients and fruit quality of ponkan[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, **49**(4): 748-756.

[5] 付立忠, 赵利梅, 吕惠卿, 等. 氮素水平对三叶青生长和茎叶化学成分含量及抗氧化活性的影响[J]. 中国中药杂志, 2019, **44**(4): 696-702.

FU L Z, ZHAO L M, LÜ H Q, *et al.* Effects of nitrogen level on growth of *Tetrastigma hemsleyanum* and phytochemical content and antioxidant activity in stems and leaves[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019, **44**(4): 696-702.

[6] 丁易飞, 申长卫, 王洁, 等. 不同施氮水平对棚架栽培‘寿新水’梨生长及山梨醇代谢的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, **40**(2): 242-250.

DING Y F, SHEN C W, WANG J, *et al.* Effects of different supply of N levels on tree growth and sorbitol metabolism in leaf and fruit of trellis trained ‘Kotobuki shinsui’ pear[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, **40**(2): 242-250.

[7] 齐勇, 韩秀梅, 宋莎, 等. “落别”樱桃果实不同发育期糖酸组分积累及软化相关成分研究[J]. 食品工业科技, 2021, **42**(21): 344-352.

QI Y, HAN X M, SONG S, *et al.* Study on accumulation of sugar and acid components and softening related components of “Luobie” cherry fruit in the different development stages[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, **42**(21): 344-352.

[8] 丁武汉, 雷豪杰, 徐驰, 等. 我国设施菜地表观氮平衡分析及其空间分布特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, **37**(3): 353-360.

DING W H, LEI H J, XU C, *et al.* Characteristics and spatial distribution of apparent nitrogen balance in the greenhouse vegetable cropping system in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, **37**(3): 353-360.

[9] 任泽玥. 氮肥及生物炭对辣椒产量和品质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2018.

[10] REHMAN M U. Application of silicon, a useful way to mitigate drought stress: An overview[J]. *Current Research in Agriculture and Farming*, 2021, **2**(2): 9-17.

[11] 范永义, 杨国涛, 陈敬, 等. 硅钾肥配施对水稻茎秆理化性状及抗倒伏能力的影响[J]. 西北植物学报, 2017, **37**(4): 751-757.

FAN Y Y, YANG G T, CHEN J, *et al.* The physical, chemical characters and lodging resistance of rice stem with silicon potassium collocation application[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(4): 751-757.

[12] 张环玮, 陈彪, 温心怡, 等. 外源硅对于旱胁迫下烟草幼苗生长、叶片光合及生理指标的影响[J]. 生物技术通报, 2019, **35**(1): 17-26.

ZHANG H W, CHEN B, WEN X Y, *et al.* Effects of exogenous silicon on growth, leaf photosynthesis and physiological indexes of tobacco seedlings under drought stress[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2019, **35**(1): 17-26.

[13] 瞿翔, 郝琦, 李媛媛, 等. 施用硅肥对玉米生理代谢、产量及品质的影响[J]. 热带农业科学, 2021, **41**(8): 5-10.

QU X, HAO Q, LI Y Y, *et al.* Effects of silicon fertilizer on physiological metabolism, yield and quality of maize[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2021, **41**(8): 5-10.

[14] 袁源远, 颜晓, 陈晨, 等. 硫、硅肥配施对铜污染下水稻幼苗生长及其生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, **43**(6): 1 220-1 231.

YUAN Y Y, YAN X, CHEN C, *et al.* Effects of sulfur and silicon fertilizers on growth and physiological characteristics of rice seedlings under copper contamination[J]. *Acta Agricul-turae Universitatis Jiangxiensis*, 2021, **43**(6): 1 220-1 231.

[15] 李小方, 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2016.

[16] 尚浩博. 资源环境常规分析方法[M]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2010: 90-92.

[17] 管西林, 王孝忠, 刘彬, 等. 三类土壤不同酰胺硝比供应下的辣椒产量、品质和氮素损失[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, **23**(3): 730-739.

GUAN X L, WANG X Z, LIU B, *et al.* Yield, fruit quality of pepper and nitrogen loss under different amide/nitrate ratios in three types of soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, **23**(3): 730-739.

[18] 马玉峰, 周忠雄, 李雨桐, 等. 氮素水平及形态对娃娃菜根系特征及生理指标的影响[J]. 中国农业科学, 2022, **55**(2): 378-389.

MA Y F, ZHOU Z X, LI Y T, *et al.* Effects of nitrogen level and form on root morphology of mini Chinese cabbage and its physiological index[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, **55**(2): 378-389.

[19] EI-SAWY S. Effect of nitrogen levels and foliar application of potassium sulfate and micronutrients on growth and yield of maize preceded by wheat or clover[J]. *Annals of Agricultural Science, Moshtohor*, 2019, **57**(3): 669-680.

[20] 秦晶晶, 杜峰, 杨路, 等. 砒砂岩区不同施氮水平下5种潜在适生植物氮素利用比较研究[J]. 西北植物学报, 2021, **41**(5): 828-837.

QIN J J, DU F, YANG L, *et al.* Comparative study on nitrogen utilization of five potentially suitable plants under different nitrogen application levels in pisha sandstone area[J].

- Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(5): 828-837.
- [21] 李春喜, 张令令, 马守臣, 等. 有机培肥和减施氮肥对小麦光合特性和氮素吸收及产量的影响[J]. 西北植物学报, 2017, **37**(5): 943-951.
- LI C X, ZHANG L L, MA S C, *et al.* Effects of organic fertilization combined with reduced nitrogen fertilizer on wheat photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(5): 943-951.
- [22] 徐大兵, 周剑雄, 邱正明, 等. 氮肥替代和减施对高山露地辣椒养分吸收和产量与营养品质的影响[J]. 北方园艺, 2019(21): 1-6.
- XU D B, ZHOU J X, QIU Z M, *et al.* Effects of nitrogen replacement and reduction on nutrient accumulation, yield and quality of pepper on high mountain open field[J]. *Northern Horticulture*, 2019(21): 1-6.
- [23] 吴春燕, 宋廷宇, 韩玉珠, 等. 氮肥对辣椒品质的影响[J]. 北方园艺, 2016(2): 162-165.
- WU C Y, SONG T Y, HAN Y Z, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on quality of pepper[J]. *Northern Horticulture*, 2016(2): 162-165.
- [24] 黄吴进, 邓利梅, 夏建国, 等. 温室滴灌施肥条件下土壤硝态氮的运移及分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2017, **36**(12): 42-48.
- HUANG W J, DENG L M, XIA J G, *et al.* Transport and distribution of nitrate in greenhouse soil under drip fertigation [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, **36**(12): 42-48.
- [25] 刘宇曦, 王娟娟, 武隆楷, 等. 不同追氮量对日光温室樱桃番茄品质、生长和氮素利用效率的影响[J]. 中国蔬菜, 2021(7): 40-47.
- LIU Y X, WANG J J, WU L K, *et al.* Effects of different topdressing nitrogen fertilizer on quality, growth, and nitrogen use efficiency of cherry tomato in solar greenhouse[J]. *China Vegetables*, 2021(7): 40-47.
- [26] ARAÚJO A L G, DE ALMEIDA A M, DE JESUS GUIMARÃES J, *et al.* Potassium silicate, against water stress, in sweet corn plant growth traits[J]. *Journal of Agricultural Science*, 2019, **11**(5): 172.
- [27] 李京蕾. 硅肥对烟草生长及品质性状的影响[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2019.
- [28] ALSAEEDI A, EL-RAMADY H, ALSHAAL T, *et al.* Silica nanoparticles boost growth and productivity of cucumber under water deficit and salinity stresses by balancing nutrients uptake[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, **139**: 1-10.
- [29] OMONDI J O, LAZAROVITCH N, RACHMILEVITCH S, *et al.* Potassium and storage root development: Focusing on photosynthesis, metabolites and soluble carbohydrates in cassava [J]. *Physiologia Plantarum*, 2020, **169**(2): 169-178.
- [30] 巫伟峰, 陈明杰, 陈国跃, 等. 李品种(品系)果实中有机关酸及 V_C 含量的 UPLC 法测定[J]. 植物资源与环境学报, 2021, **30**(1): 78-80.
- WU W F, CHEN M J, CHEN G Y, *et al.* Determination of contents of organic acids and V_C in fruit of *Prunus salicina* cultivars (lines) by UPLC method[J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 2021, **30**(1): 78-80.
- [31] JIANG Z H, LIU Y Z, YANG J P, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on the rhizosphere priming[J]. *Plant and Soil*, 2021, **462**(1/2): 489-503.
- [32] 康利允, 常高正, 高宁宁, 等. 不同氮、钾肥施用量对甜瓜产量和营养品质的影响[J]. 果树学报, 2018, **35**(8): 997-1 005.
- KANG L Y, CHANG G Z, GAO N N, *et al.* Effects of different nitrogen and potassium fertilizing quantities on the yield and nutritional quality of melon (*Cucumis melo* L.) [J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, **35**(8): 997-1 005.
- [33] 张 露, 陈书融, 吴龙龙, 等. 减施氮肥和增氧灌溉对水稻氮代谢关键酶活性及氮素利用的影响[J]. 农业工程学报, 2022, **38**(9): 81-90.
- ZHANG L, CHEN S R, WU L L, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer reduction and oxygen-enhancing irrigation on the key enzyme activities of nitrogen metabolism and nitrogen utilization in rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, **38**(9): 81-90.
- [34] 罗莎莎, 符云鹏, 牛志强, 等. 氮肥基施与追施比例对烤烟光合特性及氮代谢关键酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, **41**(8): 42-48.
- LUO S S, FU Y P, NIU Z Q, *et al.* Effects of ratio between basal nitrogen and top-dressing on photosynthetic characteristics and activities of key enzymes involved in nitrogen metabolism [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2013, **41**(8): 42-48.
- [35] PIÑERO M C, OTÁLORA G, PORRAS M E, *et al.* The form in which nitrogen is supplied affects the polyamines, amino acids, and mineral composition of sweet pepper fruit under an elevated CO_2 concentration [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, **65**(4): 711-717.
- [36] 崔高畅. 基于氮代谢的硅促进旱盐逆境下甘草生长及主要活性成分积累的机制研究[D]. 银川: 宁夏医科大学, 2021.

(编辑:裴阿卫)