

硅钙钾镁肥对减氮后水果黄瓜产量和 氮肥利用率的影响

黄奇伟, 卢惠敏, 吴伊鑫, 梁永超, 彭红云*

(浙江大学环境与资源学院, 教育部污染环境修复与生态健康重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘 要:为减少氮肥施用和环境污染、提高肥料利用率,研究减氮条件下硅钙钾镁肥对水果黄瓜产量和氮肥利用率的影响。以两种水果黄瓜(“碧禧”和“夏之光”)为试验材料,在大棚中设置正常施氮和减施 30% 氮量 2 个氮水平下的 8 个处理,重复 3 次。采收后测定水果黄瓜果实的小区产量、计算氮肥利用率,测定土壤碱解氮和硝酸盐含量。结果表明,与对照组相比,不施硅钙钾镁肥且减施 30% 氮肥量的两种水果黄瓜,其小区产量和硝酸盐含量均显著降低,小区产量最低为 45.47 kg。但在施硅钙钾镁肥且减施 30% 氮肥量的处理组中,两种水果黄瓜的果实产量、氮肥利用率均显著高于对照组,小区产量最高为 61.75 kg,氮肥偏生产力最高为 64.92 kg·kg⁻¹;硝酸盐含量显著下降,最低为 199.57 mg·kg⁻¹。施硅钙钾镁肥后,两种水果黄瓜各项指标的变化规律相似。综上,减少氮肥施用量时,硅钙钾镁肥能够促进水果黄瓜前中期的生长,提高水果黄瓜产量和氮肥利用率,降低硝酸盐含量,同时缓解过量施氮引起的环境问题。

关键词:水果黄瓜;减氮;硅钙钾镁肥;产量;硝酸盐

硅钙钾镁肥料由高温煅烧磷石膏、钾长石制成,是一种常见的酸性土壤调理剂,含有硅、钙、钾、镁、磷等作物所需的大中量元素。与石灰相比,硅钙钾镁肥具有养分充足多元优势,能够提高酸性水稻土 pH 值,增加耕层土壤盐基离子含量,降低土壤交换性铝含量^[1]。硅元素有利于植物生长和作物高产,并能抵抗不同环境下的生物或非生物胁迫^[2]。硅元素可通过增加小麦根系分泌的有机酸来活化根际磷,从而上调根系中磷转运体的表达^[3];显著降低生姜瘟病的发病率,提高生姜产量^[4]。硅钙钾镁对改良土壤、作物增量和抗病性有明显效果。

水果黄瓜外形美观、口感好、营养品质高,是我国新开发的设施栽培蔬菜。水果黄瓜是一种根系敏感作物^[5]。在设施蔬菜生产中,沿袭过去高肥高产的生产经验,种植户为了获得高产和高经济效益而大量施用化肥^[6]。不合理的施肥导致土壤次生盐

渍化,尤其是硝酸盐含量的增加,从而抑制设施蔬菜的生长发育^[7-8]。张维理等^[9]认为温室内蔬菜、花卉等经济作物的化肥施用量要高于水稻等低施肥量作物,这是农田氮排放的主要来源之一,因此有必要减少温室作物的化肥施用量,提高其利用效率。到目前为止,硅钙钾镁肥料应用于减少集约化温室蔬菜种植中肥料用量的报道较少,本研究选择两种不同品种的水果黄瓜为试验材料,通过田间试验研究施硅减氮后对氮肥利用率、水果黄瓜产量和硝酸盐含量的影响,探讨减氮条件下施硅钙钾镁肥对水果的增产增效作用。

1 材料与方 法

1.1 试验区状况

试验地点位于浙江省嘉兴市八福生态农业开发有限公司农场,土壤基本化学性质如表 1 所示,为中等肥力菜园土。

1.2 试验材料

供试水果黄瓜:品种 I “碧禧”,购自嘉兴先丰种业有限公司。品种 II “夏之光”,购自瑞克斯旺出口公司。供试肥料:粉状硅钙钾镁肥,有效硅(SiO₂) 31.0%、钙(CaO) 28.7%、钾(K₂O) 4.8%、镁(MgO) 4.1%,由中材鼎原生态肥业有限

收稿日期:2020-10-14;录用日期:2021-01-08

基金项目:浙江省重点研发计划(2018C02036);浙江省教育厅科研项目(Y201941450)。

作者简介:黄奇伟(1996-),硕士研究生,主要从事资源利用与植物保护的研究。E-mail: 21814137@zju.edu.cn。

通讯作者:彭红云, E-mail: penghongyun@zju.edu.cn

表 1 试验区基础土壤化学性质

pH 值	有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效硅 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
5.91	17.3	134.5	131.7	143.2	1.30	0.64	109.5

公司提供, 平均粒径为 $6.319 \mu\text{m}$, 比表面积 $0.95 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$; 有机肥干羊粪 (含氮量 1.6%); 缓控释复合肥爱果利丰 ($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O}$ 为 16-10-16)。

1.3 试验设计

采用王颀等^[10]施肥方案结合当地施肥习惯, 确定小区常规肥料量与氮肥减施量。施用有机肥干羊粪 (68 kg)、缓控释复合肥爱果利丰 (1.1 kg), 小区总施氮量为有机肥 + 复合肥 (1.26 kg)。有机肥与复合肥同时减少 30% 氮施入量即为减施 30% 氮肥。

对黄瓜品种 I (碧禧) 和黄瓜品种 II (夏之光), 设计如下 4 组施肥方式 (全文以 “+Si” 代表施入硅钙钾镁肥) (表 2): 对照组 (CK), 常规施肥; 减氮组 (-N), 减施 30% 氮肥 (有机肥、复合肥同时减少 30% 施入量); 施硅钙钾镁组 (+Si), 常规施肥 + 硅钙钾镁组 (Si 1.46 kg); 减氮施硅钙钾镁组 (-N+Si), 减施 30% 氮肥 + Si 1.46 kg。具体施肥方式与施肥量见表 2。

表 2 各处理具体施肥方式与施肥量

黄瓜 品种	处理	基肥			
		小区 施氮量 (kg)	施氮量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	小区施硅钙钾 镁量 (kg)	施硅钙 钾镁量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
品种 I: “碧禧”	CK	1.26	650		
	-N	0.88	455		
	+Si	1.26	650	1.46	750
	-N+Si	0.88	455	1.46	750
品种 II: “夏之 光”	CK	1.26	650		
	-N	0.88	455		
	+Si	1.26	650	1.46	750
	-N+Si	0.88	455	1.46	750

每个黄瓜品种各处理重复 3 次, 随机布置小区。每个小区面积为 19.5 m^2 (1 垄, $1.5 \text{ m} \times 13 \text{ m}$), 每垄两行, 小区间横向间隔 0.6 m, 纵向间隔 1 m。2020 年 5 月 15 日育苗, 5 月 31 日在各试验小区分别施入有机肥、复合肥和硅钙钾镁肥, 翻耕与土壤拌匀作为基肥, 6 月 4 日移苗定植, 7 月 14 日盛果

期取土、收获果实, 分别测定硝酸盐含量、土壤碱解氮含量。采用滴灌方式浇水, 在产量测定周期内每 3 日收获一次, 各小区分别称重测产, 测产周期 30 日。

1.4 项目测定、方法及分析

1.4.1 指标测定

盛果期取样, 每个处理取 4 ~ 5 个果型、大小、成熟度一致的果实; 同时, 在小区内按照五点取样法取耕层土壤 (0 ~ 20 cm)。采用紫外分光光度法测定果实中的硝酸盐含量 (GB 5009.33-2016)。土样风干混匀后, 采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量^[11]。

1.4.2 氮肥利用率

氮肥偏生产力 ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) = 施氮区产量 / 施氮量^[12]。

1.4.3 数据分析

用 Origin 2017 进行单因素方差分析、相关性分析和作图, 用最小显著性差异法 (LSD) 比较, 检验在 $P \leq 0.05$ 情况下平均值之间差异的显著性。

2 结果与分析

2.1 硅钙钾镁肥对水果黄瓜生长的影响

由表 3 可知, 与常规施肥的对照组 (CK) 相比较, 两种水果黄瓜的减氮组 (-N) 均显著减产, 品种 I 和品种 II 的减产率分别为 13.87% 和 14.22%; 增施硅钙钾镁肥后, 两种水果黄瓜均显著增产, 施硅钙钾镁组 (+Si) 的品种 I 和品种 II 的小区产量最高, 分别为 61.24 和 61.75 kg, 平均增产率分别为 14.10% 和 16.51%。减氮施硅钙钾镁组 (-N+Si) 的品种 I 和品种 II 小区产量分别为 57.60 和 55.29 kg, 均显著高于其对照组。由两个品种间对比可知, 除品种 I 的减氮施硅钙钾镁组 (-N+Si) 小区产量显著大于品种 II 外, 其余处理组的小区产量无显著差异。

施硅钙钾镁组 (+Si) 的水果黄瓜单果重最大, 品种 I 和品种 II 分别为 128.60 和 125.37 g, 均显著高于相应的减氮施硅钙钾镁组 (-N+Si), 两种

处理的单果重显著高于其对照组（CK）和减氮组（-N）。由两个品种间对比可知，除品种Ⅰ的施硅钙钾镁组（+Si）单果重显著大于品种Ⅱ外，其余处理组的单果重无显著差异。

因此，施硅钙钾镁组、减氮施硅钙钾镁组均能显著提高水果黄瓜的产量和单果重，且效果显著。

表 3 施用硅钙钾镁肥对水果黄瓜产量和单果重的影响

黄瓜品种	处理	小区产量 (kg)	平均增产率 (%)	单果重 (g)
品种Ⅰ： “碧禧”	CK	53.67 ± 1.21cd		116.34 ± 4.88d
	-N	46.23 ± 1.75e	-13.87	105.34 ± 2.94e
	+Si	61.24 ± 1.26a	14.10	128.60 ± 1.74a
	-N+Si	57.60 ± 1.34b	7.32	121.50 ± 1.48c
品种Ⅱ： “夏之光”	CK	53.00 ± 1.98d		117.52 ± 2.24d
	-N	45.47 ± 0.85e	-14.22	102.72 ± 3.64e
	+Si	61.75 ± 0.33a	16.51	125.37 ± 3.52b
	-N+Si	55.29 ± 0.44c	4.32	122.30 ± 0.99c

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。数据值为 3 个重复处理的平均值。平均增产率为各处理相对其对应的空白处理计算得出。下同。

表 4 施用硅钙钾镁肥对水果黄瓜氮肥利用率的影响

黄瓜品种	处理	减氮率 (%)	土壤碱解氮 (mg · kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 (kg · kg ⁻¹)
品种Ⅰ：“碧禧”	CK		165.71 ± 4.76a	42.34 ± 0.98e
	-N	30	155.32 ± 3.41b	52.10 ± 1.10c
	+Si		152.12 ± 4.32b	48.31 ± 1.12d
	-N+Si	30	143.79 ± 3.91c	64.92 ± 1.23a
品种Ⅱ：“夏之光”	CK		166.11 ± 3.34a	41.81 ± 1.03e
	-N	30	153.61 ± 4.89b	51.24 ± 1.09c
	+Si		156.47 ± 2.22b	48.71 ± 1.15d
	-N+Si	30	141.39 ± 4.38c	62.31 ± 2.21b

2.3 施硅钙钾镁肥对水果黄瓜硝酸盐含量影响

由图 1 可知，品种Ⅰ的对照组（CK）硝酸盐含量最高为 360.96 mg · kg⁻¹，其处理组均比对照组（CK）显著降低，减氮组（-N）、施硅钙钾镁组（+Si）和减氮施硅钙钾镁组（-N+Si）的降幅分别为 27.78%、37.68% 和 42.52%。施硅钙钾镁组（+Si）和减氮施硅钙钾镁组（-N+Si）对比，减施氮量显著降低硝酸盐含量。品种Ⅱ硝酸盐变化规律

2.2 施硅钙钾镁肥对水果黄瓜氮肥利用率的影响

氮肥偏生产力是指施肥后的作物产量与施氮肥量的比值，反映作物吸收肥料氮和土壤氮后所产生的边际效应^[12]。由表 4 可知，施硅钙钾镁组（+Si）和减氮施硅钙钾镁组（-N+Si），品种Ⅰ的氮肥偏生产力分别为 48.31 和 64.92 kg · kg⁻¹，品种Ⅱ的氮肥偏生产力分别为 48.71 和 62.31 kg · kg⁻¹，组间无显著差异且均大于对照组（CK）。品种Ⅰ和品种Ⅱ的氮肥偏生产力均表现为减氮施硅钙钾镁组（-N+Si）> 减氮组（-N）> 施硅钙钾镁组（+Si）> 对照组（CK）。

此外，对比两种水果黄瓜的对照组（CK）与施硅钙钾镁组（+Si），施硅钙钾镁肥后土壤碱解氮含量显著变低，提高了土壤氮素利用效率。对比两种水果黄瓜的减氮组（-N）与减氮施硅钙钾镁组（-N+Si）组，同样可得到相同结论。

因此，减氮后施硅钙钾镁肥，可显著提高氮肥偏生产力和土壤氮素利用效率，且在两种黄瓜品种的处理中均有显著效果。

与品种Ⅰ完全一致。

品种Ⅱ和品种Ⅰ对比，品种Ⅱ的对照组（CK）、施硅钙钾镁组（+Si）和减氮施硅钙钾镁组（-N+Si）硝酸盐含量显著小于品种Ⅰ，而两个品种的减氮组（-N）间无显著差异。

因此，减少施氮量和施用硅钙钾镁肥，均能显著降低水果黄瓜果实中的硝酸盐含量，且品种Ⅱ的硝酸盐含量低于品种Ⅰ。

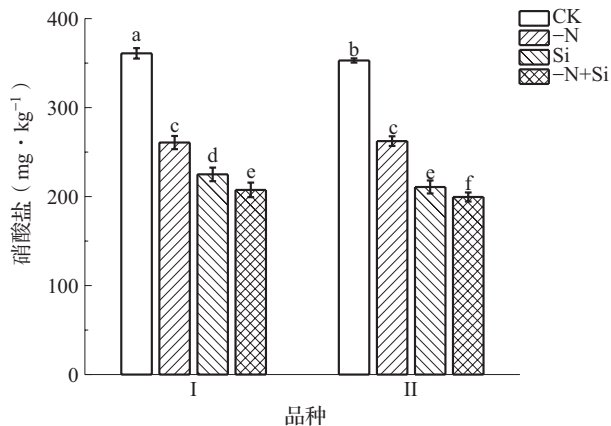


图1 施用硅钙钾镁肥对水果黄瓜硝酸盐含量的影响

3 讨论

试验结果表明,在减少氮肥施用量的条件下,施用硅钙钾镁肥可提高产量和氮肥利用率。提高产量的原因很多,首先是硅导致表皮细胞硅质化,茎秆挺直并减少叶片遮阴,叶片中的硅质化细胞对日光的透散射量较其他类型的细胞将近大10倍,可增强叶片的光合作用,促进水果黄瓜前中期的生长^[13],为增产奠定了良好基础。另外,可能与硅能促进植物根系生长、提高作物对水分的吸收效率、增加植物叶片中酶活性、增加植物根系和叶片ATP酶活性等有关^[14-15];还可能是由于硅能提高土壤中微量元素(如钙、钼、硼等)活性、增加作物对其的吸收,而且硅能提高超氧化物歧化酶、过氧化物酶、硝酸还原酶活性,促进作物生长^[16-17]。同时,硅钙协同效应可以提高水分利用率和光合效率,促进干物质积累亦是可能原因之一^[18]。

根据欧洲食品安全局调查显示,人类通过膳食摄入硝酸盐,其中有50%~70%来自果蔬^[19],过量摄入硝酸盐会导致婴儿患上高铁血红蛋白血症^[20];通过外源性硝酸盐摄入使内源性N-亚硝基化合物合成增加,导致动物癌变、畸变和糖尿病的风险增加^[21]。在本试验中,硅钙钾镁肥显著提高了水果黄瓜的氮肥利用率,且降低了水果黄瓜中的硝酸盐含量。例如施硅钙钾镁并减少氮肥施用量的处理组,其水果黄瓜中的硝酸盐含量较对照组降低了42.52%,这可能是由多方面因素引起:其一可能是硅使植物细胞中叶绿体增大、基粒增多,提高ATP酶活性,促进光合作用的同时,为硝酸盐还原酶和亚硝酸盐还原酶提供充足的能量,用于还原成铵,最后为蛋白质合成提供原料,从而降低了

植株体内硝酸盐含量^[14, 22];其二有可能是施硅提高了植株体内硝酸盐还原酶活性,提高了硝态氮转化率,降低植株中的硝酸盐含量^[23],从而降低了果实中硝酸盐含量;其三可能是施硅可以增加土壤和植物体内的钼含量,降低果蔬中的硝酸盐积累^[17, 24]。

4 结论

在本试验条件下,减少氮肥施用量后施用硅钙钾镁肥,可提高水果黄瓜产量和氮肥利用率,显著降低水果黄瓜的硝酸盐含量。

参考文献:

- [1] 冀建华,李絮花,刘秀梅,等.硅钙钾镁肥对南方稻田土壤酸性和盐基离子动态变化的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):583-592.
- [2] Ma J F, Yamaji N. A cooperative system of silicon transport in plants [J]. Trends Plant Sci, 2015, 20(7): 435-442.
- [3] Kostic L, Nikolic N, Bosnic D, et al. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions [J]. Plant and Soil, 2017, 419(1-2): 447-455.
- [4] 邵长泉,张翠珍,朱恒伟.生姜施用钢渣硅肥防病增产的效果试验初探[J].长江蔬菜,2007(7):55-56.
- [5] 李传哲,马洪波,杨苏,等.滴灌减量施肥对设施黄瓜生长发育、产量及品质的影响[J].江苏农业科学,2019,47(15):170-174.
- [6] 徐坤范,李明玉,艾希珍.氮对日光温室黄瓜呈味物质、硝酸盐含量及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(5):717-721.
- [7] 孙光闻,陈日远,刘厚诚.设施蔬菜连作障碍原因及防治措施[J].农业工程学报,2005,21(S2):184-188.
- [8] 王素平,郭世荣,李璟,等.盐胁迫对黄瓜幼苗根系生长和水分利用的影响[J].应用生态学报,2006,17(10):1883-1888.
- [9] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策Ⅲ.中国农业面源污染控制中存在问题分析[J].中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
- [10] 王硕,吴春涛,李丹丹,等.水肥一体化模式下日光温室黄瓜氮磷钾优化施肥方案的研究[J].园艺学报,2018,45(4):764-774.
- [11] 鲍士旦.土壤农化分析(第3版)[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [12] 叶全宝,张洪程,魏海燕,等.不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J].作物学报,2005,31(11):38-44.
- [13] Epstein E. Silicon [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1999, 50: 641-664.
- [14] Liang Y C. Effects of silicon on enzyme activity and sodium,

- potassium and calcium concentration in barley under salt stress [J]. Plant and Soil, 1999, 209 (2): 217–224.
- [15] Greger M, Landberg T, Vaculik M. Silicon influences soil availability and accumulation of mineral nutrients in various plant species [J]. Plants–Basel, 2018, 7 (2): 41.
- [16] 孙颖, 王旭东, 王莺, 等. 硅磷配施对水稻土中速效养分和水稻产量的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32 (4): 551–556.
- [17] 杨暹, 陈晓燕, 刘志才. 硼钼营养对青花菜花球产量及活性氧代谢的影响 [J]. 园艺学报, 2000, 27 (2): 112–116.
- [18] 翟江, 高原, 张晓伟, 等. 硅钙对日光温室黄瓜光合作用及产量和品质的影响 [J]. 园艺学报, 2019, 46 (4): 701–713.
- [19] Alexander J, Benford D, Cockburn A, et al. Nitrate in vegetables. Opinion of the scientific panel on contaminants in the food chain on a request from the European Commission to perform a scientific risk assessment on nitrate in vegetables [J]. European Food Safety Authority, 2008, 689: 1–79.
- [20] Greer FR, Shannon M, Nutr C, et al. Infant methemoglobinemia: the role of dietary nitrate in food and water [J]. Pediatrics, 2005, 116 (3): 784–786.
- [21] Habermeyer M, Roth A, Guth S, et al. Nitrate and nitrite in the diet: How to assess their benefit and risk for human health [J]. Mol Nutr Food Res, 2015, 59 (1): 106–128.
- [22] 李清芳, 马成仓, 李韩平, 等. 土壤有效硅对大豆生长发育和生理功能的影响 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (1): 73–76.
- [23] 王朝辉, 李生秀, 田霄鸿. 不同氮肥用量对蔬菜硝态氮累积的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4 (1): 22–28.
- [24] 赵静, 白清云, 帕尼古丽, 等. 钼对降低蔬菜硝酸盐积累的效应研究 [J]. 农业环境保护, 2001 (4): 238–239.

Effects of fertilizer of silicon calcium potassium magnesium application under reduced-nitrogen level on yield and nitrogen fertilizer efficiency of fruit cucumber

HUANG Qi-wei, LU Hui-min, WU Yi-xin, LIANG Yong-chao, PENG Hong-yun* (College of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang University, Key laboratory of Environment Remediation and Ecological Health, Ministry of Education, Hangzhou Zhejiang 310058)

Abstract: In order to reduce nitrogen fertilizer application and environmental pollution as well as improve fertilizer efficiency, the effects of fertilizer of silicon calcium potassium magnesium on the yield and nitrogen efficiency of fruit cucumber were studied under the condition of nitrogen reduction. Two kinds of fruit cucumber (“Bixi” and “Sunset”) were used as experimental materials. 8 treatments including two levels of nitrogen fertilizer application (normal nitrogen application and 30% reduction application) were set up in the greenhouse with 3 replicates for each treatment. After harvest, the fruit yield in each plot was measured, nitrogen use efficiency, agronomic nitrogen use efficiency and partial factor productivity for applied nitrogen were calculated. The content of alkali-hydrolysable nitrogen and nitrate in soil was determined. The results showed that, as compared with the control group, application of 30% reduced nitrogen fertilizer group caused the significant decrease in the plot yield and nitrate content of cucumber. The lowest plot yield was 45.47 kg. However, in the treatment group with fertilizer of silicon calcium potassium magnesium application, together with reduced nitrogen fertilizer amount by 30%, the fruit yield, nitrogen use efficiency of two kinds of fruit cucumber were significantly higher than those of the control group. The maximum plot yield was 61.75 kg. The highest partial factor productivity for applied nitrogen was $64.92 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, while the nitrate content were decreased significantly, and the lowest was $199.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. After applying silicon calcium potassium magnesium fertilizer, the change rules of each index for two kinds of cucumber were similar. Above all, under the reduced amount application of nitrogen fertilizer, the application of silicon calcium potassium magnesium fertilizer can promote the growth of fruit cucumber in the early and middle stage, improve the yield and nitrogen use efficiency of fruit cucumber, and reduce the content of nitrate, as well as alleviate the environmental problems caused by excessive nitrogen application.

Key word: fruit cucumber; reduction of nitrogen; fertilizer of silicon calcium potassium magnesium; yield; nitrate