

硅对西瓜叶片矿质元素积累与生理特性的影响

张清华, 刘震, 赵跃锋, 陈昆* (河南省商丘市农林科学院, 河南商丘 476000)

摘要 为研究西瓜对硅的生理响应特征, 以西瓜品种“8424”为试材, 通过营养液沙培的方式, 研究 5 个硅水平(0、0.3、0.9、1.8 和 3.2 mmol/L)对西瓜幼苗矿质元素积累、光合色素及光合指标的影响。结果表明, 0~1.8 mmol/L 硅浓度可使西瓜幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、类胡萝卜素含量增加, 而在 3.2 mmol/L 时上述指标降低。净光合速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度随硅浓度的增加呈先升高再降低的单峰变化规律, 在 1.8 mmol/L 时达到最大, 较对照分别提高 19.45%、55.29% 和 29.12%, 与对照差异均极显著 ($P < 0.01$), 蒸腾速率呈逐渐降低的趋势。0~0.3 mmol/L 硅浓度促进叶片对 Mg、Ca 元素的吸收积累, 0.9~3.2 mmol/L 硅浓度抑制叶片对 Mg、Ca 元素的吸收积累; 0.3~3.2 mmol/L 硅浓度不利于叶片对 Fe、Mn 元素的吸收积累。

关键词 硅; 西瓜; 矿质元素; 光合色素; 光合指标

中图分类号 S651 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)01-0160-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.01.048



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Silicon on Mineral Element Accumulation and Physiological Characteristics of Watermelon Leaves

ZHANG Qing-hua, LIU Zhen, ZHAO Yue-feng et al (Shangqiu Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Shangqiu, Henan 476000)

Abstract In order to study the physiological response of watermelon to silicon, the effects of five silicon levels (0, 0.3, 0.9, 1.8 and 3.2 mmol/L) on mineral element accumulation, photosynthetic pigments and photosynthetic indexes of watermelon seedlings were studied by sand culture in nutrient solution. The results showed that silicon promoted the increase of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b and carotenoid contents in the leaves of watermelon seedlings in the range of 0-1.8 mmol/L, but decreased at 3.2 mmol/L. The net photosynthetic rate, stomatal conductance and intercellular CO₂ concentration showed a single peak change pattern with the increase of silicon concentration, which increased by 19.45%, 55.29% and 29.12% respectively at 1.8 mmol/L. The difference between two groups was very significant ($P < 0.01$), and the transpiration rate showed a decreasing trend. Silicon concentration of 0-0.3 mmol/L promoted the absorption and accumulation of Mg and Ca in leaves. Silicon concentration of 0.9-3.2 mmol/L inhibited the absorption and accumulation of Mg and Ca in leaves. Silicon concentration of 0.3-3.2 mmol/L was not conducive to the absorption and accumulation of Fe and Mn in leaves.

Key words Silicon; Watermelon; Mineral elements; Photosynthetic pigments; Photosynthetic indicators

硅是植物生长所必需的大量元素, 但硅在不同种类植物间的分布存在较大差异, 如禾本科植物硅含量是双子叶植物的十几倍, 在同一植物体不同部位的分布也不均匀, 如硅在冬瓜上的分布从高到低依次为老叶、成熟叶、主茎、果皮、根。硅作为植物生长的有益元素, 能增加植物对于干旱、重金属毒害等逆境的抵御能力和抗病虫害能力, 提高作物产量, 改善作物品质, 有利于植株的形态建成和生长发育等^[1]。有关硅的研究多集中在单子叶植物上, 而双子叶植物的研究较少, 近年来关于硅在双子叶植物上的研究才逐渐增多, 如硅改善冬瓜的形态结构, 提高根系活力; 硅能缩短茄果实成熟期等^[2]。目前关于硅对双子叶植物西瓜的研究仍不多。为此, 笔者通过沙培试验, 研究硅对西瓜光合色素含量、光合特性及矿质元素吸收规律的影响, 旨在为西瓜生产上合理增施硅肥及无土栽培过程中硅肥用量的确定提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料 供试西瓜品种为“黑将军”。

1.2 试验设计 将长势一致、2 叶 1 心的西瓜幼苗定植于长×宽×高为 60 cm×35 cm×25 cm 的塑料盆中, 每盆定植 6 株西瓜幼苗。塑料盆内事先装满用清水洗净、蒸馏水冲洗 2~3 遍

且消过毒的河沙, 上覆一层蛭石以减少水分蒸腾, 共种植 45 盆。栽植后用 Hoagland 营养液进行浇灌, 每 5 d 更换 1 次营养液。培养 8 d 后排除盆内的营养液, 并分别浇灌含九水偏硅酸钠(Na₂SiO₃·9H₂O)的 Hoagland 营养液, 使营养液中硅浓度分别为 0、0.3、0.9、1.8 和 3.0 mmol/L, 其中硅浓度为 0 时用作对照, 其他浓度的硅用作处理。每个处理和对照均设置 3 次重复, 每盆作 1 次重复。12 d 后, 对西瓜幼苗叶片光合色素含量、光合指标及叶片矿质元素的吸收积累量进行测定。

1.3 测定项目与方法 采用紫外分光光度法测定光合色素含量^[3]。选取植株由上数第 3 片功能叶片, 剪碎叶片并混匀, 称取 0.2 g 放于具塞试管中, 加入 20 mL 80% 丙酮, 放置黑暗处理 24~48 h, 直至叶片变为白色。于 663、646、470 nm 分光光度下比色。

采用 CIRAS-2 便携式光合仪测定西瓜幼苗叶片光合速率、胞间 CO₂ 浓度、气孔导度、蒸腾速率。2019 年 5 月 7 日 09:00—10:00 进行测定, 光强 1 000~1 100 μmol/(m²·s), 气温 23~26 ℃, 叶温 25~28 ℃, CO₂ 浓度 410 μmol/mol, 测定部位为从主蔓第 3 片叶, 每水平随机测定 3 株, 作 3 次重复。

采用火焰原子吸收法测定 Ca、Mg、Fe、Mn 含量^[4]。将烘干的植物干样磨碎后, 过 0.25 mm 筛, 准确称取 0.20 g, 用 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮法消煮至澄清, 用火焰原子吸收法测定矿质元素含量。

1.4 数据分析 利用 DPS 7.02 软件进行统计分析, 利用 Microsoft excel 2007 进行数据处理和作图。

基金项目 河南省“四优四化”西甜瓜科技支撑行动计划示范项目。
作者简介 张清华(1973—), 男, 河南商丘人, 助理研究员, 从事蔬菜育种及栽培研究。* 通信作者, 助理研究员, 硕士, 从事蔬菜育种及生理栽培研究。
收稿日期 2019-09-10

2 结果与分析

2.1 硅对西瓜叶片 Mg、Ca、Fe、Mn 元素积累的影响 由表 1 可知,不同浓度的硅对西瓜幼苗叶片矿质元素积累的影响存在差异。在 0~0.3 mmol/L 时,叶片 Mg、Ca 离子含量随硅浓度的增加而增加,至 0.3 mmol/L 时最大,这说明在一定硅浓度范围内,增加硅肥用量有利于西瓜根系对 Mg、Ca 的吸收;在 0.9~3.2 mmol/L 时,Mg、Ca 含量随硅浓度的增加呈降低趋势,且均低于对照,与对照差异极显著 ($P<0.01$),这表明根系对硅促进 Mg、Ca 离子吸收存在一定的阈值,超过一定阈值反而起抑制作用。在 0~3.2 mmol/L 时,Fe、Mn 元素含量变化规律类似,均随硅浓度的增加而降低。在 0.3 mmol/L 时,Fe 含量与对照差异不显著 ($P>0.05$),其他处理下与对照差异显著 ($P<0.05$);各处理 Mn 含量与对照差异均达显著 ($P<0.05$) 水平,这表明硅浓度高于 0.3 mmol/L 不利于 Fe、Mn 在西瓜叶片中积累。

表 1 硅对西瓜叶片 Mg、Ca、Fe、Mn 元素积累的影响

Table 1 Effect of silicon on accumulation of Mg, Ca, Fe and Mn in watermelon leaves mg/g

Si 浓度 Si concentration mmol/L	Mg	Ca	Fe	Mn
0	50.23 aAB	31.66 bA	0.25 aA	0.18 aA
0.3	52.18 aA	33.77 aA	0.24 aA	0.17 bAB
0.9	47.39 bBC	28.91 cB	0.22 bB	0.16 cB
1.8	44.60 cC	25.16 dC	0.18 cC	0.13 dC
3.2	40.28 dD	21.27 eD	0.13 dD	0.09 eD

注:同列不同小写字母表示不同浓度间差异显著 ($P<0.05$);不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different concentrations ($P<0.05$); different capital letters indicate extremely significant differences between different concentrations ($P<0.01$)

2.2 硅对西瓜幼苗叶片光合色素含量的影响 由表 2 可知,不同浓度的硅对西瓜幼苗叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响不同。在 0~3.2 mmol/L 时,西瓜幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、类胡萝卜素含量变化规律一致,均随硅浓度的增加呈先升后降的单峰变化规律,在硅浓度 1.8 mmol/L 时最大,较对照分别提高 22.58%、25.81%、23.50%、30.30%,与对照差异极显著 ($P<0.01$),表明硅能促进叶片光合色素的生成;硅浓度为 0.3 mmol/L 时,叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b、类胡萝卜素含量略高于对照,但与对照差异不显著,说明硅浓度较低时虽能促进光合色素的生成但促进作用不显著 ($P>0.05$)。当硅浓度达 3.2 mmol/L 时,上述指标均表现出下降趋势,这说明光合色素并不随硅浓度的增加保持上升趋势,而是有一定的限值。

2.3 硅对西瓜光合特性的影响 由图 1 可知,西瓜幼苗叶片净光合速率随营养液中硅浓度的增加表现出先升高后降低的变化趋势,在硅浓度 1.8 mmol/L 时最大,较对照提高 19.45%,与对照差异达极显著水平 ($P<0.01$);硅浓度为 3.2 mmol/L 时,净光合速率呈降低趋势但仍高于对照,但与对照差异不显著 ($P>0.05$)。胞间 CO_2 浓度和气孔导度随硅浓度的增加呈先升高再降低的单峰变化规律。蒸腾速率的

变化规律与上述 3 个指标不同,随硅浓度的增加表现出下降趋势,最小值出现在硅浓度 3.2 mmol/L 时,与对照差异达极显著水平 ($P<0.01$),表明硅有利于减少西瓜叶片水分散失。

表 2 硅对西瓜幼苗叶片光合色素含量的影响

Table 2 Effect of silicon on photosynthetic pigment content in watermelon seedling leaves mg/g

Si 浓度 Si concentration mmol/L	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	叶绿素 a+b Chlorophyll a+b	类胡萝卜素 Carotenoids
0	1.55 cC	0.62 cC	2.17 dC	0.33 cC
0.3	1.62 cBC	0.66 bcBC	2.29 cdC	0.35 cBC
0.9	1.78 abAB	0.72 abAB	2.50 bAB	0.39 bAB
1.8	1.90 aA	0.78 aA	2.68 aA	0.43 aA
3.2	1.67 bcBC	0.69 bBC	2.36 bcBC	0.40 bAB

注:不同小写字母表示不同浓度间差异显著 ($P<0.05$);不同大写字母表示差异极显著 ($P<0.01$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different concentrations ($P<0.05$); different capital letters indicate extremely significant differences between different concentrations ($P<0.01$)

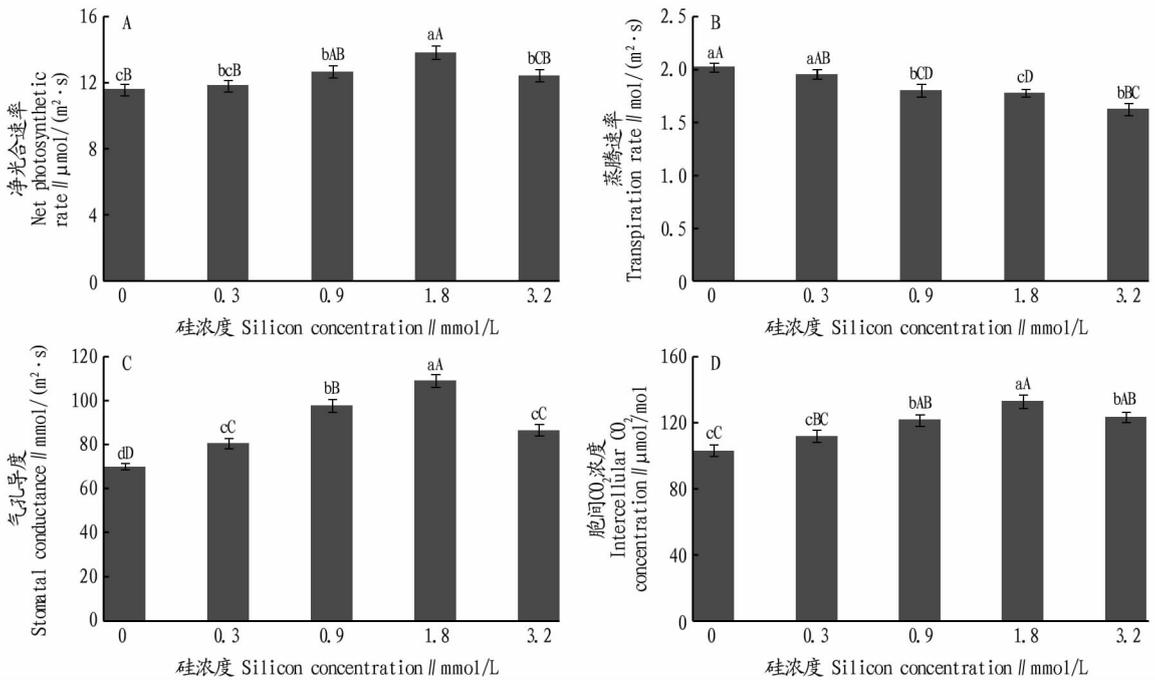
3 讨论

矿质元素是西瓜生长发育、果实品质和产量形成的物质基础,西瓜具有独特的矿质营养特性,矿质元素的过量和缺乏都会对植株生长和后期坐果能力造成影响。镁是光合作用和叶绿体结构形成的基础物质,在改善作物品质和产量方面有重要作用^[5]。钙在维护细胞膜完整性、延缓植株衰老和促进光合产物运转方面有重要作用^[6]。铁是叶绿素合成的重要元素,缺铁能抑制叶绿素的合成并大幅降低单产。锰参与光合反应过程中光合电子传递链的氧化还原过程,对光合作用有调控作用^[7]。而硅能够影响植物对钙、镁、铁、锰等矿质元素的吸收和转运。该试验结果表明,低浓度的硅 (0~0.3 mmol/L) 能促进西瓜叶片对 Mg、Ca 的吸收,而硅浓度达到 0.9 mmol/L 以上时抑制叶片对 Mg、Ca 的吸收积累,这可能是当硅浓度达到一定水平时,硅酸可与钙结合生成不易水解的硅钙化合物,从而抑制植物对 Ca 的吸收^[8],而硅对 Mg 的作用与 Ca 类似。硅能抑制西瓜叶片对 Fe、Mn 元素的吸收,且抑制程度随硅浓度的增加而增大,其中硅抑制西瓜叶片对 Fe、Mn 的吸收机制是硅提高了根系的氧化能力,有一部分 Fe、Mn 在植株根系表面被氧化形成沉淀,减少了根系对这 2 种元素的吸收^[9]。

叶绿素以色素蛋白复合体的形式存在于植物的类囊体内,在光合作用过程中具有捕获并传递光能的重要作用,是植物体内重要的光合色素^[10],但叶绿素的合成除受内在基因调控外,还受包括稀土元素、光照、水分等外部环境条件的影响。卢钢等^[11]研究表明,硅肥可使甜瓜叶片叶绿素含量显著增加,有利于低温条件下甜瓜光合速率的提高。李佐同等^[12]在研究盐胁迫下的玉米幼苗时指出,硅可以促进 NaCl 胁迫下玉米幼苗叶片叶绿素 b 含量的增加,并抑制叶绿素含量的降低。王喜艳等^[13]研究指出,施硅能促进设施黄瓜叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量的提高。该试验结果表明,在 0~1.80 mmol/L 时,西瓜幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 和类胡萝卜素含量呈增加趋势,与前人研究结果一致,

这可能是因为硅能促进植株对 N、P、Mg 等元素的吸收,而这些元素有的直接参与叶绿素的合成^[14],此外硅还能促进叶绿体的增大和基粒的增多^[15];当硅浓度突破一定限值达到

3.2 mmol/L 时,光合色素含量下降,这可能是因为过量的外源硅在植物根系周围形成了盐害环境使细胞受损,抑制了叶绿素的合成^[16]。



注:不同小写字母表示不同浓度间差异显著($P < 0.05$);不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different concentrations ($P < 0.05$); different capital letters indicate extremely significant differences between different concentrations ($P < 0.01$)

图1 硅对西瓜光合参数的影响

Fig. 1 Effect of silicon on photosynthetic parameters of watermelon

光合作是植物生长和产量形成的重要基础。张平艳等^[17]研究认为,1~3 mmol/L 硅浓度可提高黄瓜叶片净光合速率。刘景凯等^[18]在研究硅对大蒜幼苗生理特性的影响时得出,0~1.5 mmol/L 硅浓度能促进大蒜叶片光合速率和气孔导度的增加。而该试验条件下,硅对西瓜叶片净光合速率有促进作用的浓度为0~1.8 mmol/L,再增加硅浓度便会产生抑制作用,这与黄瓜、大蒜光合作用最适硅浓度不同,这应该与不同植物间对硅的适应性存在差异有关。硅浓度不高于1.8 mmol/L 时可促进西瓜叶片光合速率的提高,这可能是因为硅能提高叶绿体中偶联因子 Mg^{2+} -ATPase 和 Ca^{2+} -ATPase 的活性,加快叶绿体的光合磷酸化反应进程^[19],同时,硅在植物体表聚集形成硅化细胞,使其对散射光的透过率提高10倍,促进叶片对光能的吸收利用^[20]。另外,硅可通过减小叶片与茎的夹角来改善冠层受光姿态,提高植物光合速率^[21]。该试验结果表明,施硅降低了叶片蒸腾速率,这可能是因为硅可使表皮细胞沉积形成二氧化硅双层角质层结构,可减少水分的角质层蒸腾^[22]。另外,硅通过在木质部导管壁上沉积,增强了导管的亲水性,降低水到导管内的流速,进而减少蒸腾^[23]。

参考文献

[1] 唐旭,郑毅,汤利. 高等植物硅素营养研究进展[J]. 广西科学,2005,12(4):347-352.
[2] 高荣广,曹逼力. 硅对番茄果实发育及硅吸收特性的影响[J]. 山东农业科学,2016,48(9):88-91.

[3] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
[4] 赵世杰,史国安,董新纯. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,1995.
[5] HUBER S C, MAURY W. Effects of magnesium on intact chloroplasts. I. Evidence for activation of (sodium) potassium/proton exchange across the chloroplast envelope[J]. Plant physiology, 1980,65(2):350-354.
[6] 李天忠,张志宏. 现代果树生物学[M]. 北京:科学出版社,2008:155-186.
[7] STILES W C, REID W S. Orchard nutrition management[M]. New York: Cornell Cooperative Extension, 1991:3-23.
[8] 马同生. 我国水稻土中硅素丰缺原因[J]. 土壤通报,1997,28(4):169-171.
[9] 苏以荣. 硅缓解亚铁对水稻根系毒害的研究[J]. 热带亚热带土壤科学,1993,2(3):171-174.
[10] 丁跃,吴刚,郭长奎. 植物叶绿素降解机制研究进展[J]. 生物技术通报,2016,32(11):1-9.
[11] 卢钢,曹家树. 硅对甜瓜早熟性及光合特性的影响[J]. 园艺学报,2001,28(5):421-424.
[12] 李佐同,高聚林,王玉凤,等. 硅对NaCl胁迫下玉米幼苗生理特性的影响[J]. 玉米科学,2011,19(2):73-76.
[13] 王喜艳,张玉龙,虞娜,等. 硅肥对保护地黄瓜光合特性和产量的影响[J]. 长江蔬菜,2007(2):45-47.
[14] 陈兵兵,石元亮,陈智文. 不同P、K、Si肥对玉米苗期抗寒效果的研究[J]. 中国农学通报,2011,27(3):85-89.
[15] 孙曦. 土壤养分. 植物营养与合理施肥[M]. 北京:农业出版社,1983.
[16] 邓接楼,王艾平,何长水,等. 硅肥对水稻生长发育及产量品质的影响[J]. 山东农业科学,2011(12):58-61.
[17] 张平艳,高荣广,杨凤娟,等. 硅对连作黄瓜幼苗光合特性和抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(6):1733-1738.
[18] 刘景凯,刘世琦,冯磊,等. 硅对青蒜苗生长、光合特性及品质的影响[J]. 植物营养与肥料科学,2014,20(4):989-997.

分蘖期和成熟期干物质中全氮含量均较高,减肥 20%处理水稻干物质全氮含量显著低于常规施肥。成熟期水稻氮吸收积累总量上,也是常规施肥(CK)保持较高氮积累总量,而缺氮及减肥 20%处理氮积累总量均显著下降。这可能是由于常规施肥情况下,较高的施氮量提高了水稻的光合速率和根系活力,促进了水稻干物质的积累和养分的吸收^[16-17]。研究表明,水稻在吸收氮、磷、钾营养元素时具有显著的正向相关性^[18]。因此常规施肥减肥 20%,氮磷钾同时降低,也间接影响了水稻对氮的吸收。化肥减施 20%(或缺氮)配施不同梯度的有机肥,在分蘖期植株氮含量与常规施肥相比略有提高,但在生育后期,减肥 20%缺氮有机肥配施区水稻植株、秸秆氮含量均显著低于常规施肥。说明在水稻生长前期,有机肥中的氮养分尚能满足水稻养分需求,但在水稻生长后期,完全不施氮肥仅靠有机肥中的氮已不能满足水稻的养分需求。

化肥有机肥配施有利于土壤有机质积累和土壤肥力的提高。与常规施肥相比,化肥减少 20%配施有机肥,可以保证水稻产量不下降,当有机肥配施量为 15 000 kg/hm²时,水稻产量为 10 638.20 kg/hm²,与常规施肥无显著差异($P < 0.05$)。与完全不施氮肥(T1、T3)相比,无机有机肥配施(T4~T11)水稻产量及氮吸收量均有所提高,说明氮素在水稻生长中起着重要作用。化肥有机肥配施后水稻氮吸收量较高,一方面通过有机肥直接补充了稻田系统中的土壤养分,另外由于有机肥肥效缓慢可以调节土壤与化肥养分的释放强度和速率,使水稻各生育阶段得到更为均衡的矿质营养,从而提高了水稻产量及养分的积累^[19-20]。

养分吸收是物质生产的基础,而物质生产又是稻谷产量形成的基础^[13]。在常规施肥情况下,氮肥利用率为 32.94%,减少 20%施肥量后,氮肥利用率提高至 35.47%,减肥 20%配施有机肥后氮肥利用率有所提高,这与有机肥中的氮释放后被作物吸收利用有关。氮肥利用率的高低取决于试验缺氮区地上部养分积累量和施肥量,该研究常规施肥氮肥利用率较低,这可能与试验地块基础肥力较高、现有施肥量较大有关。在肥力较高地块,肥料施用越多损失越大,氮肥利用率也越低,因此根据土壤养分情况合理施肥、测土配方施肥、平衡施肥是提高肥料利用率的关键措施^[21]。

该试验结果看,常规施肥条件下水稻产量最高,但氮肥利用率较低。常规缺氮施肥或减肥 20%缺氮的基础上,仅以有机肥配施,对水稻生长和氮养分积累较为不利,各有机肥配施梯度下产量均较低,不具有推广意义。常规施肥减肥

20%的基础上配施不同梯度的有机肥处理中,当有机肥配施量为 15 000 kg/hm²时,水稻产量最高,且氮肥利用率和氮素吸收效率最高,而有机肥配施量为 3 750 kg/hm²,产量及氮肥利用率和氮素吸收效率均略有下降。但综合考虑投入产出,在常规施肥减肥 20%,有机肥配施量为 3 750 kg/hm²时,虽与常规施肥相比产量略有下降,但差异不显著($P < 0.05$),投入有机肥量也较少,推广应用价值较高,因此可作为上海市水稻种植上最优化有机肥配施方案。

参考文献

- [1] 汪红霞,廖文华,孙伊辰,等.长期施用有机肥和磷肥对潮褐土土壤有机质及腐殖质组成的影响[J].中国土壤与肥料,2014(6):39-43.
- [2] 魏宇轩,蔡红光,张秀芝,等.不同种类有机肥施用对黑土团聚体有机碳及腐殖质组成的影响[J].水土保持学报,2018,32(3):258-263.
- [3] 刘立荣.中国古代有机肥制用及其启示[J].西北大学学报(自然科学版),2015,45(4):675-679.
- [4] 金芝辉,王起,柴有忠.氮肥用量和移栽密度对水稻甬优 1540 产量和经济性状的影响[J].安徽农业科学,2019,47(8):39-41.
- [5] 唐利忠,石泉,王晓玉,等.氮肥用量和运筹方式对湘南早稻产量和氮素利用效率的影响[J].中国农学通报,2019,35(11):72-81.
- [6] 陈海飞,冯洋,蔡红梅,等.氮肥与移栽密度互作对低产田水稻群体结构及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1319-1328.
- [7] 刘红江,郭智,郑建初,等.不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J].江苏农业学报,2018,34(4):783-789.
- [8] 杨和川,樊继伟,任立凯,等.种植密度与施氮量对稻麦轮作体系作物产量及地表径流氮素流失的影响[J].江西农业学报,2018,30(7):13-18,23.
- [9] 杨业凤,陆利民.2014年浦东新区主要作物投肥分析[J].上海农业科技,2016(1):101-102,139.
- [10] 邵爱明.2011年奉贤区四团镇主要作物投肥调查[J].安徽农学通报,2012,18(4):112-113.
- [11] 吕家珑,张一平,王旭东,等.长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J].应用生态学报,2001,12(4):569-572.
- [12] 尹岩,梁成华,杜立宇,等.有机肥对稻田土壤磷素潜在环境风险的影响[J].中国土壤与肥料,2013(2):11-16.
- [13] 徐明岗,李冬初,李菊梅,等.化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响[J].中国农业科学,2008,41(10):3133-3139.
- [14] 周卫军,王凯荣,张光远,等.有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2002,35(9):1109-1113.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [16] 邹长明,秦道珠,徐明岗,等.水稻的氮磷钾养分吸收特性及其与产量的关系[J].南京农业大学学报,2002,25(4):6-10.
- [17] 李勇.氮素营养对水稻光合作用与光合氮素利用率的影响机制研究[D].南京:南京农业大学,2011.
- [18] 王伟妮,鲁剑巍,何予卿,等.氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J].中国水稻科学,2011,25(6):645-653.
- [19] 吕真真,吴向东,侯红乾,等.有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):904-913.
- [20] EDMEADES D C. The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: A review[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2003, 66(2):165-180.
- [21] 袁丽敏,吴息正,程雅梅.提高水稻肥料利用率的试验研究[J].安徽农学通报,2013,19(7):108,114.
- [22] 蔡德龙.中国硅营养研究与硅肥应用[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [23] 梁永超,张永春,马同生.植物的硅素营养[J].土壤学进展,1993,21(3):7-14.
- [24] 曹逼力,徐坤,石健,等.硅对番茄生长及光合作用与蒸腾作用的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(2):354-360.

(上接第 162 页)

- [19] 张国芹,徐坤,工兴翠,等.硅对生姜叶片水、二氧化碳交换特性的影响[J].应用生态学报,2008,19(8):1702-1707.
- [20] 何念祖,孟赐福.植物营养原理[M].上海:上海科学技术出版社,1985:315-317.