

网络出版时间:2015-03-12 14:17

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2015.04.007

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150312.1417.007.html

硅肥浓度对温室黄瓜光合和荧光特性的影响

刘 缓,李建明,郑 刚,杜清洁,潘铜华,常毅博

(西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】初步探究硅肥对温室水培黄瓜植株光合特性和叶绿素荧光参数的影响,筛选适宜温室水培黄瓜的硅肥施用水平。【方法】用硅浓度分别为 0(对照),0.5,1.0,1.5 和 2.0 mmol/L 的营养液水培黄瓜(津优 35 号),于苗期和结果期进行叶绿素含量、光合速率及叶绿素荧光参数等相关指标的测定。【结果】随着硅浓度的增加,黄瓜植株叶片的净光合速率(P_n)、水分利用效率(WUE)、叶绿素荧光参数中最大光化学效率(F_v/F_m)、光合电子传递速率(ETR)、光化学猝灭系数(qP)及叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素总量均呈现先升高后降低的趋势,且与对照差异显著,各指标峰值大多出现在硅浓度为 0.5~1.0 mmol/L 时;非光化学猝灭系数(qN)随硅浓度增加呈现先降低后升高的趋势;蒸腾速率(Tr)和气孔限制值(L_s) 随硅浓度的升高无显著变化。黄瓜叶片叶绿素含量随硅浓度的变化表现为苗期较结果盛期显著。【结论】硅浓度为 0.5~1.0 mmol/L 的营养液对黄瓜植株光合和荧光特性影响最为显著,也最有利于植株光能利用率的提高;过量施用反而会导致黄瓜植株光合效率、 ETR 、 qP 降低和 qN 升高;苗期及时施用硅肥很重要。

[关键词] 黄瓜;硅肥;温室水培;光合特性;叶绿素荧光特性

[中图分类号] S626.5;S642.201

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)04-0073-06

Effects of silicon nutrition on photosynthesis and fluorescence of cucumber

LIU Huan, LI Jian-ming, ZHENG Gang, DU Qing-jie,
PAN Tong-hua, CHANG Yi-bo

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 This paper investigated the effects of silicon concentration in cultural solution on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of greenhouse cucumber plants to determine suitable silicon rational application level. 【Method】 Five nutrient solutions with concentrations of 0(CK), 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 mmol/L were used to culture cucumber plants (Jinyou 35). Chlorophyll contents, photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters were measured at seedling stage and fruiting stage. 【Result】 As the increase of silicon concentration, contents of Chl a, Chl b and total Chl, net photosynthetic rate (P_n), water using rate photosynthetic (WUE), electron transport rate (ETR), and photochemical quenching (qP) all increased firstly and then decreased slightly with significantly differences between treatments. Peaks were obtained when the concentration was in 0.5—1.0 mmol/L. But transpiration rate (Tr) and L_s had no significant changes. Non-photochemical quenching (qN) decreased firstly and then increased. Chlorophyll contents at seedling stage were higher than at fruiting stage. 【Conclusion】 Sili-

[收稿日期] 2013-11-11

[基金项目] 国家“863”高新技术研究与发展计划项目(2011AA100504);国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD29B01)

[作者简介] 刘 缓(1989—),女,河南商丘人,硕士,主要从事设施园艺植物生理生态研究。E-mail:liuhuanlh1989@163.com

[通信作者] 李建明(1966—),男,陕西洛川人,教授,博士生导师,主要从事设施园艺植物生理生态和设施园艺工程研究。

E-mail:lijianming66@163.com

con fertilizer with concentration of 0.5—1.0 mmol/L had the most significant effects on photosynthesis and fluorescence of cucumber plants and benefited light efficiency the most. However, excessive application would lead to reduction of *ETR* and *qP* and increase of *qN*. It was recommended to apply silicon fertilizer timely at seedling stage.

Key words: cucumber; silicon nutrition; greenhouse hydroponic; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence parameters

硅是植物体组成的重要营养元素^[1],被国际土壤界列为继氮、磷、钾之后的第 4 大元素。地壳中硅含量丰富,仅次于氧元素,但土壤中能被植物吸收利用的有效硅素养分供给不能满足植物体的生长需要,而且我国耕地有一半都是缺硅的^[2]。国际上许多报道已证明了对多种作物人为施硅的必要性^[3-4],国内也早有关于硅肥对水稻生长影响的研究。现今硅肥效应研究对象已实现了由水稻等禾本科作物向常见蔬菜经济作物的拓展,研究方向也已从优化植株形态、提高抗逆性、增产、改善品质等表观测量,向硅素对植物体离子吸收传导、光合特性、荧光特性等内在特征方向转变,并在烟草、花生、草莓、甘蔗等多种植物上取得了可喜的研究成果。黄瓜种植范围广、需求量大,但易发生病虫害,因此硅肥可以作为提高抗性、增加产量、改善品质的良好肥料选择。但硅肥在黄瓜上的研究目前仍多集中在产量、植株形态差异方面。李伟等^[5]从荧光动力学层面初步研究了弱光对黄瓜生长发育的影响,但运用荧光动力学技术研究硅肥对黄瓜光合生理的影响尚属空白。本试验通过水培法,测定不同浓度硅素对黄瓜生长及光合荧光参数的影响,探讨硅素处理对黄瓜光合机构运转状况及过剩光能耗散机制变化的作用,以期为硅肥在黄瓜生产栽培中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验于 2013-04-06 在西北农林科技大学科研温室进行,供试材料为黄瓜品种“津优 35 号”。采用穴盘基质育苗,待长到 4 叶 1 心时,选取生长一致的健壮幼苗移栽至水培槽(60 cm×40 cm×25 cm)。采用液培法,以 Hoagland 配方配制营养液。硅(分析纯 $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)处理浓度分别为 0(CK),0.5,1.0,1.5 和 2.0 mmol/L,除陪伴离子钠浓度不同外,其他离子及所有处理都相同。每个处理 6 槽,每槽 4 株。培养初期,营养液每 7 d 换 1 次,旺盛生长期每 5 d 换 1 次,用通氧泵保持通氧,并每隔 3~5

d 用电导仪测定营养液的 EC 和 pH 值,确保 EC 值保持在 1.8~2.4 S/m,pH 值保持在 6.0~6.5。待黄瓜植株抽蔓时,在温室横梁上拉一道铁丝,结上尼龙绳,供植株攀缘,绑蔓 2~3 次。期间做好防虫治病工作。

1.2 测定项目及其方法

1.2.1 叶绿素 采用分光光度法测定^[6],于黄瓜苗期和盛果期各测定 1 次。

1.2.2 光合特性 在光合有效辐射(*PAR*)为 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的条件下,采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 XT 便携式光合仪,测定黄瓜植株正数第 6 叶(主要功能叶)的净光合速率(*Pn*)、蒸腾速率(*Tr*)、胞间 CO_2 浓度(*Ci*)及大气 CO_2 浓度(*Ca*)。每处理测 6 株,取平均值,苗期和盛果期各测定 1 次。另按照吴克宁等^[7]的方法计算气孔限制值(*LS*): $LS = 1 - Ci/Ca$;叶片水分利用效率(*WUE*)则由公式 $WUE = Pn/Tr$ ^[8]算出。

1.2.3 叶绿素荧光参数 采用 LI-6400 XT 便携式光合仪(美国生产)测定。于结果盛期选取见光一致的黄瓜植株正数第 6 片叶。光下荧光在早上 10:30 开始测量,暗下荧光在保证植株叶片暗适应 2 h 后,于晚间 21:30 开始测量。每处理选取 6 株,测算光化学猝灭系数(*qP*)、非光化学猝灭系数(*qN*)、最大光化学效率(*Fv/Fm*)和光合电子传递速率(*ETR*)。各荧光参数参照 Genty^[9]和文献[10]的方法计算:

$$qP = (Fm' - F) / (Fm' - Fo'),$$

$$qN = 1 - (Fm' - Fo') / (Fm - Fo),$$

$$Fv/Fm = (Fm - Fo) / Fo,$$

$$ETR = Yield \times PAR \times 0.5 \times 0.84.$$

式中: Fm' 为光适应条件下最大荧光,指光适应状态下全部 PS II 中心都关闭时的荧光强度; F 是任意时间实际荧光产量; Fo' 为光适应条件下最小荧光,指光适应状态下全部 PS II 中心都开放时的荧光强度; Fm 为最大荧光产量(maximal fluorescence),是 PS II 反应中心处于完全关闭时的荧光产量; Fo 为初始荧光(minimal fluorescence),是 PS II 反应中心处于完全开放时的荧光产量;*Yield* 代表全部光合量子

产量;PAR 指入射到样叶上的光合有效辐射强度。

1.3 数据分析

采用 SPSS 18.0 统计软件对数据进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度硅对黄瓜叶片叶绿素含量的影响

由表 1 可见,黄瓜苗期叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量随着营养液中硅浓度的增加逐渐升高,当硅浓度为 1.0 或 1.5 mmol/L 时达到最大

值,而后降低;与对照(CK)相比,各处理叶绿素总量增加了 21.8%~36.4%,叶绿素 a 含量增加了 19.5%~35.6%,叶绿素 b 含量增加了 23.9%~43.5%;方差分析结果表明,各处理间叶绿素含量与 CK 相比差异显著。结果盛期叶绿素总量比 CK 增加了 1.7%~18.4%,叶绿素 a 含量提高了 6.4%~15.3%,叶绿素 b 含量增加了 3.1%~22.5%。苗期和结果盛期叶绿素 b 较对照的增长率均比叶绿素 a 的增长率高。

表 1 不同浓度硅对黄瓜叶片叶绿素含量的影响(鲜质量)

Table 1 Chlorophyll contents in cucumber leaves with different silicon concentrations (FW) mg/g						
硅浓度/ (mmol·L ⁻¹) Si level	叶绿素 a Chl a		叶绿素 b Chl b		总叶绿素含量 Chl(a+b)	
	苗期 Seedling	结果盛期 Fruiting	苗期 Seedling	结果盛期 Fruiting	苗期 Seedling	结果盛期 Fruiting
0(CK)	6.08±0.27 c	9.23±0.19 bc	2.08±0.18 b	3.78±0.12 bc	8.15±0.45 c	13.00±0.29 b
0.5	7.40±0.05 b	9.82±0.05 ab	2.57±0.06 ab	3.79±0.38 b	9.97±0.07 b	13.52±0.32 b
1.0	8.24±0.30 a	10.11±0.31 a	2.84±0.29 a	4.39±0.10 ab	11.08±0.42 a	14.50±0.40 a
1.5	8.14±0.27 a	10.64±0.12 a	2.98±0.08 a	4.62±0.07 a	11.12±0.35 a	15.26±0.16 a
2.0	7.26±0.01 b	8.48±0.43 c	2.67±0.02 a	3.58±0.21 c	9.93±0.04 b	12.07±0.64 b

注:同列数据后标不同小写字母表示差异达显著(P<0.05)水平。表 2 同。
Note: Different letters in each column indicate significant difference at P<0.05 level. The same for Table 2.

在黄瓜苗期,随硅浓度升高,各处理间叶绿素 a 含量变化显著,叶绿素 b 含量变化不显著;结果盛期,叶绿素 a 和叶绿素 b 在各处理间的变化均显著。虽然各处理光合色素含量较对照均有相应增加,但在不同生长期,硅对植株叶片光合色素形成的促进程度不同。在盛果期,2.0 mmol/L 硅浓度处理组黄瓜叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿含量都与对照差异不显著,甚至低于对照。

2.2 不同浓度硅对黄瓜叶片光合特性的影响

从表 2 可以看出,随着硅浓度的增加,黄瓜叶片 Pn 和 WUE 均呈先增大后减小的趋势。在黄瓜苗

期,与对照相比,除 2.0 mmol/L 硅处理外,其余处理 Pn 和 WUE 分别提高 0.6%~13.1%和1.1%~20.8%;Tr 随硅浓度的增加先降低后升高,各处理间差异不显著;Ls 随硅浓度的升高略有降低,各处理间差异也不显著。在结果盛期,与对照相比,各处理 Pn(除 2.0 mmol/L 硅处理外)和 WUE(除 1.5 和 2.0 mmol/L 硅处理外)分别提高7.3%~22.9%和 10.2%~52.7%;Tr 随硅浓度的增加先降低后升高,各处理间差异不显著;Ls 随硅浓度的增加略有升高,各处理间差异不显著。

表 2 不同浓度硅对黄瓜叶片光合特性的影响

Table 2 Photosynthetic characteristics of cucumber with different silicon concentrations								
硅浓度/ (mmol·L ⁻¹) Si level	Pn/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		Tr/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)		WUE/(mmol·mol ⁻¹)		Ls/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	
	苗期 Seedling	结果盛期 Fruiting	苗期 Seedling	结果盛期 Fruiting	苗期 Seedling	结果盛期 Fruiting	苗期 Seedling	结果盛期 Fruiting
0(CK)	18.00±0.11 b	17.62±1.38 a	7.34±0.05 a	10.23±1.03 a	2.45±0.03 b	1.73±0.06 b	0.88±0.01 a	0.22±0.02 a
0.5	20.36±0.61 a	20.66±1.51 a	6.89±0.17 a	9.00±1.05 a	2.96±0.13 a	2.33±0.11 a	0.81±0.01 a	0.25±0.01 a
1.0	19.55±0.60 a	18.79±0.77 ab	7.19±0.34 a	9.97±0.33 a	2.75±0.19a b	1.88±0.02 b	0.84±0.02 a	0.27±0.01 a
1.5	18.11±0.12 b	18.04±1.60 ab	7.38±0.42 a	10.80±1.15 a	2.48±0.13 b	1.68±0.08 b	0.77±0.03 a	0.26±0.03 a
2.0	15.07±0.05 c	14.59±1.58 b	7.76±0.63 a	10.79±1.10 a	1.98±0.15 c	1.35±0.02 c	0.82±0.06 a	0.26±0.01 a

2.3 不同浓度硅对黄瓜叶片叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光是激发态电子快速返回到基态过程中产生的光。与表观性的气体交换指标相比,叶绿素荧光参数更能够反映光合系统的内在性特点,因

此叶绿素荧光特性常作为了解光合作用的探针^[11]。Fv/Fm 是没有任何环境胁迫并经过充分暗适应的叶片所具有的最大(潜在)光化学效率,它能揭示植物体对其生境光强密度长期适应的机制。光合电子传递速率(ETR)最能反映光合速率,它与植物体内

的 P_n 有很强的线性关系,是很好的表征植物光合能力变化的量。光化学淬灭系数(qP)指的是 PSⅡ 天线色素吸收的光能可以用于光合电子传递的份额,从一定程度上反映反应中心的开放程度。非光化学淬灭系数(qN)反映的则是 PSⅡ 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热能形式耗散掉的光能部分,反映植物光合机构自身的光保护机制。

由图 1、图 2、图 3 可见, ETR 、 qP 和 F_v/F_m 随硅浓度升高的变化趋势大体一致。在硅浓度为 0~

2.0 mmol/L 时,随着硅浓度的增加 ETR 先升高后降低,与上述 P_n 的变化趋势一致; qP 也呈现相同的变化趋势,且二者峰值均出现在 1.0 mmol/L 硅浓度时; F_v/F_m 随硅浓度的增加先升高后降低,在硅浓度为 0.5 mmol/L 达到最大值后开始略微下降。图 4 显示,与前 3 个参数变化趋势相反, qN 随硅浓度升高表现出先下降后上升的现象,趋势变化的转折点在 0.5 mmol/L 硅浓度处。

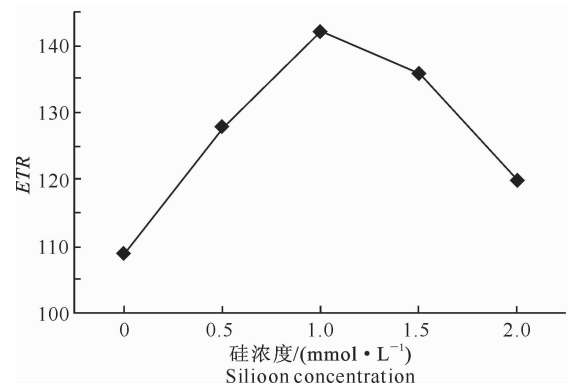


图 1 硅对黄瓜叶片光合电子传递速率(ETR)的影响
Fig. 1 Effects of silicon on ETR of cucumber

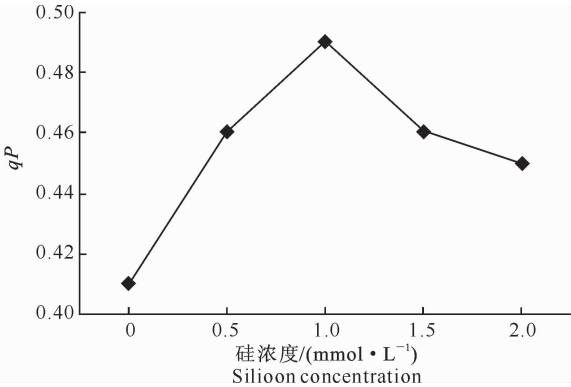


图 2 硅对黄瓜叶片光化学淬灭系数(qP)的影响
Fig. 2 Effects of silicon on qP of cucumber

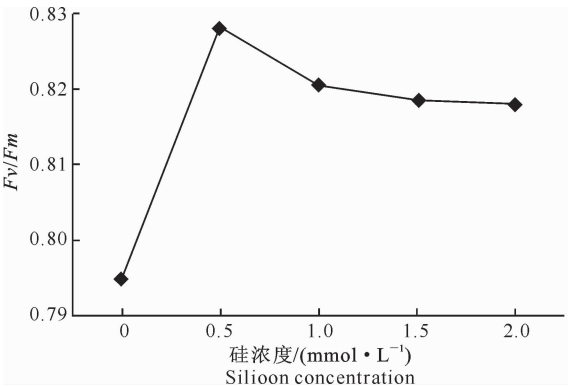


图 3 硅对黄瓜叶片最大光化学效率(F_v/F_m)的影响
Fig. 3 Effects of silicon on F_v/F_m of cucumber

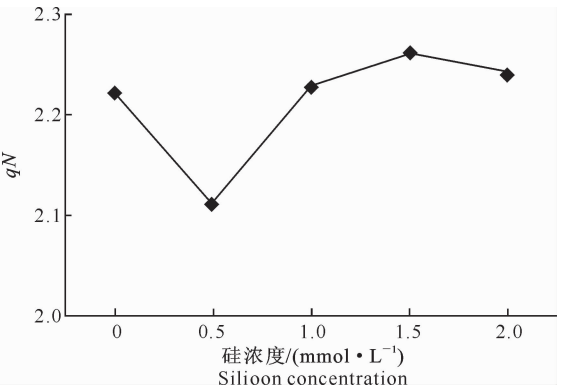


图 4 硅对黄瓜叶片非光化学淬灭系数(qN)的影响
Fig. 4 Effects of silicon on qN of cucumber

3 讨论

3.1 不同浓度硅对黄瓜叶片叶绿素含量的影响

叶绿素分子在光合系统中承担重要的功能。叶绿素含量将影响叶绿素分子对光能的吸收、传递以及在 PSⅡ、PSⅠ 之间的分配和转换合成三磷酸腺苷(ATP)与还原型辅酶二(NADPH)的量^[12],从而影响光合作用。本试验研究结果与王喜艳等^[13]向保护地土壤施硅对黄瓜影响的研究结果相吻合,符合硅能提高植株叶片叶绿素含量的一般效应,这是因为硅能促进 N、P、Ca²⁺、Mg²⁺ 的吸收,从而促进光合

色素的形成。本研究中,黄瓜苗期植株叶绿素含量随硅浓度的变化比结果盛期明显,叶绿素含量也远远高于王喜艳等^[13]的研究结果,这是采样时期不同导致的。因为随着植株的生长,其形态、生理功能及对硅的吸收特性都在变化,所以硅对黄瓜的影响程度也就不同。

3.2 不同浓度硅对黄瓜叶片光合特性的影响

本试验中硅对黄瓜光合特性的影响与硅在甘蔗^[14]、棉花^[15]上的研究结果一致,即在适宜浓度范围内能够提高植株光合能力,促进光合作用。这是由于硅化细胞不仅使植株茎叶直挺,减少遮阴,而且

还能参与代谢活动,有效调节作物气孔开闭及水分蒸腾作用,因此本研究中适宜浓度硅处理组的黄瓜植株 Pn 和 WUE 均明显提高,但 Ls 和 Tr 均与对照无显著差异,说明 Pn 显著提高并不全是由气孔限制因素引起的,也可能是硅素影响了叶绿体活性等光合反应中心活性造成的。硅对植株叶片光合效率影响的差异显著性在苗期和结果盛期不同,同样可以理解为由于生长期不同,硅对植株的影响程度不同所致。过高的硅浓度(1.5~2.0 mmol/L)表现出不利于黄瓜生长发育的效应,可能是由于硅浓度过高已经形成了盐害环境,破坏了植株根部细胞对水分和其他营养物质的吸收^[16],从而抑制和减弱了植株的光合作用。

3.3 不同浓度硅对黄瓜叶片荧光特性的影响

光化学淬灭系数(qP)的大小反映了光系统Ⅱ稳定原初电子受体质体醌(QA)的还原状态,它是由于QA的重新氧化所引起的。 qP 愈大,说明QA重新氧化的量愈大^[17]。在本试验中, qP 的数值随硅浓度的增加先逐渐变大再略微变小,这恰证明了适量硅促进了从光系统Ⅱ氧化侧向光系统Ⅱ反应中心的电子流动;当硅浓度超过1.5 mmol/L时,过高浓度的硅溶液本身就形成了一种盐胁迫,高盐环境破坏了根系细胞,影响了对其他离子的吸收,进而影响了电子传递系统的通道,致使 qP 值变小, ETR 水平也降低。非光化学淬灭系数 qN 的变化反映了PSⅡ反应中心对过量光能的热耗散能力及光合机构的损伤程度^[18]。 qN 值在0.5~1.0 mmol/L硅浓度时比对照有所降低,而相应的植株的光合能力却升高了,这是因为适量的硅可以降低强光对黄瓜叶片光合机构的损伤程度,保障光合机构正常工作,使得黄瓜叶片光合电子顺畅传递,所以此硅浓度范围内黄瓜叶片的 ETR 水平很高,这种保护机制有利于植株光合作用的进行,显著提高了黄瓜叶片的潜在光化学效率, Fv/Fm 在此硅浓度范围内增大也恰好证明了这一点。逆境条件会在一定程度上阻碍黄瓜光合系统对光能的吸收利用^[19],高盐胁迫刺激黄瓜植株启动更强的非光化学淬灭机制以耗散过剩的光能来适应现有光强而使植株免受伤害,这可能就是在硅浓度过高(1.5~2.0 mmol/L)时,其他参数都降低而 qN 却呈上升趋势的原因。

本试验证实了促进黄瓜叶片叶绿素的合成是硅能提高黄瓜植株光合速率的一个重要途径,也证实了硅素能够影响黄瓜植株的光合特性和荧光特性,而关于硅素如何参与叶绿素的合成及硅对光合反应

和叶绿素荧光特性的影响机制,尚不能作出充分解释。本试验仅对黄瓜植株在苗期和结果盛期2个生长时期的相关指标做了简单的对比分析,还不能详细反映硅肥在黄瓜各个生长发育过程中的阶段效应。不同浓度硅对黄瓜光合和荧光特性影响的相关机制及硅肥在黄瓜生长发育中的阶段效应,有待进一步试验探究。

4 结 论

一定硅浓度的营养液能促进黄瓜叶片叶绿素的形成,增强植株PSⅡ反应中心的活性,提高光合速率及黄瓜叶片潜在光化学能转换能力。硅浓度在0.5~1.0 mmol/L的营养液最有利于黄瓜植株对光能利用率的提高,过量施硅反而会导致黄瓜的 Pn 、 ETR 、 qP 降低和 qN 升高。研究结果还显示,黄瓜叶片叶绿素含量随硅浓度的变化表现为苗期比结果盛期显著,因此苗期及时施用硅肥很重要。

[参考文献]

- [1] Khoshgoftarmanesh A H, Mohaghegh P, Sharifnabi B, et al. Silicon nutrition and phytophthoradrechsleri infection effects on growth and mineral nutrients concentration, uptake, and relative translocation in hydroponic-grown [J]. Journal of Plant Nutrition, 2012(35):1168-1179.
- [2] 张福锁. 土壤与植物营养研究新动态 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001:12-23.
Zhang F S. Plants and soil research trends [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2001:12-23. (in Chinese)
- [3] Gonzalo M J, Lucena J J. Effect of silicon addition on soybean (*Glycine max*) and cucumber (*Cucumis sativus*) plants grown under iron deficiency [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013(6):455-461.
- [4] Britez R M, Watanabe T, Jansen S. The relationship between aluminium and silicon accumulation in leaves of *Faramea merginata* (Rubiaceae) [J]. New Phytologist, 2002 (156): 1026-1033.
- [5] 李 伟, 黄金丽. 黄瓜幼苗光合及荧光特性对弱光的响应 [J]. 园艺学报, 2008, 35(1):119-122.
Li W, Huang J L. Effects of sulfur nutrition on photosynthesis and Chlorophyll fluorescence of cucumber leaves [J]. Gardening Journal, 2008, 35(1):119-122. (in Chinese)
- [6] Schnettger B, Critchley C, Santore U J, et al. Relationship between photo inhibition of photosynthesis, D1 protein turnover and chloroplast structure: Effects of protein synthesis [J]. Plant Cell Environ, 1994, 17:55-64.
- [7] 吴克宁, 赵彦锋, 吕巧灵, 等. 潮湿土区灌浆水和施磷对冬小麦光合作用和产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4):428-434.
Wu K N, Zhao Y F, Lü Q L, et al. Effect of irrigation during

- grain filling stage and applying phosphate on the photosynthetic efficiency and yield of winter wheat in the flavouquie soil area [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(4): 428-434. (in Chinese)
- [8] 杨广东, 朱祝军, 计玉妹, 等. 不同光强和缺镁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 115-118.
- Yang G D, Zhu Z J, Ji Y M, et al. Effect of light intensity and magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence and active oxygen in cucumber leaves [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(1): 115-118. (in Chinese)
- [9] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论 [J]. *植物学报*, 1999, 16(4): 444-448.
- Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance [J]. *Botany Gazette*, 1999, 16(4): 444-448. (in Chinese)
- [10] 王建华, 任士福. 遮荫对连翘光合特性和叶绿素荧光参数的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(7): 1811-1817.
- Wang J H, Ren S F. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Forsythia suspensa* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7): 1811-1817. (in Chinese)
- [11] Hattori T, Sonobe K, Inanaga S, et al. Effects of silicon on photosynthesis of young cucumber seedlings under osmotic stress [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2008, 31(6): 1046-1058.
- [12] Maksimovic J D, Mojovic M. Silicon ameliorates manganese toxicity in cucumber by decreasing hydroxyl radical accumulation in the leaf apoplast [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(7): 2411-2420.
- [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.
- Wang X Y, Zhang Y L, Yu N, et al. Effects of silicon fertilizer on cucumber photosynthesis and yield in protected field [J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2007(2): 45-47. (in Chinese)
- [14] 黄海荣, Bokhtiarism, 徐林, 等. 硅肥对甘蔗光合特性和产量的影响 [J]. *广西农业科学*, 2009, 40(12): 1564-1569.
- Huang H R, Bokhtiarism, Xu L, et al. Effect of silicon fertilization on yield and photosynthetic attributes in *Saccharum officinarum* L. hybrid [J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2009, 40(12): 1564-1569. (in English)
- [15] 李清芳, 马成仓. 土壤有效硅对棉花幼苗营养代谢的影响 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(6): 726-730.
- Li Q F, Ma C C. Effect of available silicon in soil on nutritive metabolism of cotton seedling [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(6): 726-730. (in Chinese)
- [16] 王喜艳, 张玉龙. 盐胁迫下硅对黄瓜保护酶活性和膜质过氧化物的影响 [J]. *西北农业学报*, 2009, 18(1): 221-224, 233.
- Wang X Y, Zhang Y L. Influence of silicon on activities of protective enzymes and MDA content in cucumber under salt stress soil [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(1): 221-224, 233. (in Chinese)
- [17] 刘劲松, 石辉. 镉胁迫对黄瓜幼苗光合和叶绿素荧光特性的影响 [J]. *水土保持研究*, 2011, 18(5): 187-190, 196.
- Liu J S, Shi H. Effects of Cd^{2+} stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of cucumber seedlings [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(5): 187-190, 196. (in Chinese)
- [18] 樊荣, 周清, 赵冬梅. 植物声频控制技术对黄瓜叶绿素荧光特性的影响 [J]. *西北农业学报*, 2010, 19(1): 194-197.
- Fan R, Zhou Q, Zhao D M. Effect on changes of chlorophyll fluorescence in cucumber by application of sound frequency control technology [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(1): 194-197. (in Chinese)
- [19] 魏国强, 朱祝军. NaCl 胁迫对不同品种黄瓜幼苗叶绿素荧光特性和活性氧代谢的影响 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37(11): 1754-1759.
- Wei G Q, Zhu Z J. The effects of NaCl stress on plant growth, chlorophyll fluorescence characteristics and active oxygen metabolism in seedlings of two cucumber cultivars [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11): 1754-1759. (in Chinese)