

## 硅对西瓜幼苗生长·光合特性及保护酶活性的影响

赵晓美<sup>1</sup>, 李正为<sup>1</sup>, 于文进<sup>2</sup>, 李家文<sup>1</sup>, 周艳霞<sup>3</sup>, 龙明华<sup>2\*</sup> (1. 桂林市农业科学研究中心/广西农业科学院桂林分院, 广西桂林 541006; 2. 广西大学农学院, 广西南宁 530004; 3. 广西农业科学院蔬菜研究所, 广西南宁 530007)

**摘要** [目的] 研究不同浓度硅( $S_i$ )对西瓜幼苗生长、光合特性及保护性酶活性的影响, 为探究外源硅对西瓜幼苗生长及生理特性的影响提供理论依据。[方法] 以“早佳8424”西瓜为试验材料, 采用水培法, 硅酸钾作为硅源, 研究不同硅浓度0 mg/L(CK)、28 mg/L(T1)、56 mg/L(T2)和84 mg/L(T3)4个处理对西瓜幼苗生长指标、光合指标及保护酶活性的影响。[结果] 在0~84 mg/L硅浓度范围内, 蒸腾速率( $T_r$ )随硅浓度的增加而降低, 叶绿素含量(SPAD值)、POD和SOD活性随硅浓度的增加而升高; 56 mg/L硅处理的植株生长速度最快; 植株鲜重分别较T3、T1、CK处理显著增加33.47%、52.42%、65.59%, 干重分别较T3、T1、CK处理显著增加32.43%、48.48%、66.10%; 根系长度分别较T3、T1、CK处理显著增加40.32%、37.99%、43.47%; 净光合速率较T1、CK显著增加32.78%、37.53%, 气孔导度分别较T3、T1、CK显著增加85.71%、191.84%、150.88%, 胞间 $CO_2$ 浓度分别较T3、T1、CK显著增加4.09%、7.89%、8.75%; T1、T2、T3处理的POD、SOD活性分别在第6天、第3天达到最大, 其中在84 mg/L硅浓度处理POD、SOD活性高于其他处理。[结论] 施用外源硅可以提高西瓜幼苗的光合作用和抗氧化酶活性, 促进西瓜幼苗的生长, 其中营养液硅浓度以56 mg/L为好。

**关键词** 西瓜幼苗; 硅; 生长; 光合特性; 酶活性

中图分类号 S651 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)01-0151-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.01.040

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Effect of Silicon on the Growth, Photosynthetic Characters and Protective Enzyme Activity of Watermelon (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. et Nakai) Seedlings

ZHAO Xiao-mei<sup>1</sup>, LI Zheng-wei<sup>1</sup>, YU Wen-jin<sup>2</sup> et al (1. Guilin Agricultural Science Research Center / Guilin Branch, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Guilin, Guangxi 541006; 2. College of Agriculture, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004)

**Abstract** [Objective] The effects of spraying exogenous silicon ( $S_i$ ) on the growth, photosynthetic characteristics and activity of antioxidant enzymes of watermelon seedlings were studied, which provided scientific basis for the effects of exogenous silicon on growth and physiological characters of watermelon seedlings. [Method] The effects of silicon ( $S_i$ ) on the growth, photosynthetic characters and protective enzyme activity of “Zaojia (8424)” watermelon seedlings were studied under the hydroponics (DFT) with the 0 mg/L (CK), 28 mg/L (T1), 56 mg/L (T2) and 84 mg/L (T3) silicon levels. [Result] In 0–84 mg/L of  $S_i$ , transpiration ( $T_r$ ) reduced, SPAD, POD and SOD activity improved with the increase of silicon concentration. The growth rate of plant treated with 56 mg/L silicon concentration were the fastest. Compared with T3, T1 and CK, fresh weight, dry weight and root length of plant were significantly increased by 33.47%, 52.42%, 65.59%, 32.43%, 48.48%, 66.10%; 40.32%, 37.99%, 43.47%. Net photosynthetic rate ( $P_n$ ) was significantly higher than T1 and CK, and increased by 32.78% and 37.53%. Stomatal conductance ( $C_s$ ) and intercellular  $CO_2$  concentration ( $G_c$ ) were also significantly higher T3, T1 and CK, and increased by 85.71%, 191.84%, 150.88%; 4.09%, 7.89%, 8.75%, the activity of POD and SOD in the three treatments reached the maximum on day 6 and day 3 respectively, among which the activity of POD and SOD with the treatment of 84 mg/L, silicon concentration was higher than that with other treatments. [Conclusion] It could be concluded that the application of exogenous silicon may improve the photosynthesis, antioxidant enzyme activities of watermelon seedlings and promote its growth, and the appropriate silicon concentration for optimizing the watermelon seedlings was 56 mg/L.

**Key words** Watermelon seedling; Silicon; Growth; Photosynthetic traits; Enzymatic activity

硅是植物生长的有益元素。将硅肥排在氮、磷、钾肥之后, 称之为“第四大元素肥”<sup>[1]</sup>。硅肥已广泛用于单子叶植物生产中, 如水稻、甘蔗等, 可以促进作物生长、增强抗逆性、增加产量和提高品质<sup>[2]</sup>。硅在双子叶植物生产的应用也逐渐增多。曹逼力等<sup>[3]</sup>研究表明, 低浓度的硅会增加番茄叶片的叶绿素含量, 降低植株的蒸腾作用, 积累更多的干物质。刘缓<sup>[4]</sup>研究表明, 营养液中加入适宜浓度的硅, 能促进黄瓜植株的生长发育, 并可以提高黄瓜的产量和品质, 当营养液中硅浓度过高时, 会抑制黄瓜植株的生长发育, 降低产量与果实品质。苗锦山<sup>[5]</sup>研究发现, 弱光条件下对厚皮甜瓜喷施硅能提高植株的光合作用。张清华等<sup>[6]</sup>研究表明在硅浓度为0~1.8 mmol/L时, 能促进西瓜叶片净光合速率。目前已被证实硅对作物的研究主要集中在禾本科、豆科及黄瓜、甜瓜、番

茄等作物上, 有关硅在西瓜上的应用研究已有报道, 但并不多见。笔者通过水培试验, 于营养液中添加不同浓度的硅元素, 研究外源硅对西瓜幼苗营养生长、光合指标和保护性酶活性的影响, 以期在西瓜生产上硅肥的合理施用及无土栽培营养液中硅的使用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 试验地点及材料。** 试验于2012年8月在广西大学蔬菜试验基地大棚内进行。试验品种为“早佳(8424)”西瓜, 是由新疆葡萄瓜果研究所和新疆农业科学院园艺作物研究所共同培育的早熟西瓜。

**1.1.2 种植槽、种植板与种植杯。** 种植槽长×宽×高为2 m×1 m×25 cm。为防止营养液渗漏, 种植槽内部铺设双层塑料薄膜。泡沫板为种植板, 长×宽×高为1 m×1 m×2 cm, 种植板上开9个种植孔, 直径5 cm。塑料种植杯高7 cm、上口径5 cm、下口径4 cm, 底部和四周均有可让植株根系伸出的孔隙。

### 1.2 方法

**1.2.1 营养液配方。** 采用深液流(DFT)水培法, 营养液各

**基金项目** 国家科技支撑计划资助项目(2007BAD68B04); 广西研究生教育创新资助项目(GXU11T32562)。

**作者简介** 赵晓美(1986—), 女, 河南漯河人, 农艺师, 硕士, 从事蔬菜栽培及技术推广工作。\*通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 从事蔬菜育种、栽培及农产品质量安全研究。

**收稿日期** 2021-05-19

元素的浓度分别为 N 180 mg/L, P 50 mg/L, K 320 mg/L, Ca 160 mg/L, Mg 47 mg/L, Fe 2.8 mg/L, Mn 0.5 mg/L, B 0.5 mg/L, Cu 0.02 mg/L, Mo 0.01 mg/L, Zn 0.05 mg/L<sup>[7]</sup>。

**1.2.2 试验设计。**采用完全随机试验设计,在营养液配方一致的基础上单独添加外源硅,采用硅酸钾( $K_2SiO_3 \cdot nH_2O$ )作为硅源。硅浓度分别为 0(CK)、28 mg/L(T1)、56 mg/L(T2)、84 mg/L(T3)。于 2012 年 8 月 31 日播种育苗,采用 72 孔黑色苗盘,9 月 12 日(幼苗 3 叶 1 心时)定植。每处理 18 株,3 次重复,株行距 20 cm×20 cm,小区面积 2 m<sup>2</sup>。苗期营养液的 EC 值为 1.2~1.5 mS/cm, pH 保持在 6.0~6.5<sup>[8]</sup>。

### 1.3 测定指标与方法

**1.3.1 植株生长指标。**按照赵晓美等<sup>[9]</sup>的测定方法,于定植后 0、4、8 d 测定植株高度,定植第 8 天测定植株的叶片数、根系长度、植株鲜重和干重。植株高度、根系长度用直尺测定。随机取 10 株完整的幼苗,冲洗干净,用滤纸吸干水分,称取植株鲜重,之后将植株装进纸袋中放进烘箱,在 105 °C 下杀青 15 min,之后降至 75 °C 烘干至植株恒定干重,用电子天平称重。

**1.3.2 光合指标。**定植 8 d 后,于晴天 10:00—11:00 测定第 4 片真叶的光合指标。净光合速率( $P_n$ )、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度( $C_i$ )、气孔导度( $G_s$ )、蒸腾速率( $T_r$ )用美国的 Li-Cor6400 便携式光合速率测定仪测定,叶绿素含量(SPAD 值)用日本的 SPAD-502Plus 便携式叶绿素仪测定<sup>[9]</sup>。

**1.3.3 酶活性。**测定定植后 0、3、6、9 d 西瓜幼苗叶片的 SOD、POD 的活性。每个小区随机取 5 株,摘取第 4 片真叶测定酶活性。用氮蓝四唑法测定 SOD 活性,用愈创木酚法测定 POD 活性<sup>[10]</sup>。

**1.4 数据处理**采用 Excel 2007 软件进行数据处理与绘图,采用 DPS 7.05 软件进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

**2.1 不同浓度硅对西瓜苗期生长的影响** 0~84 mg/L 硅浓度范围内,西瓜幼苗植株的生长速率随着硅浓度的增加先升后降,其中 T2 植株生长速率最快,株高最高(图 1)。由表 1 可知,T2 处理西瓜幼苗叶片数为 6.60 片,与其他处理差异不显著;植株鲜重为 9.77g,分别较 T3、T1、CK 处理显著增加

33.47%、52.42%、65.59%;干重为 0.98 g,分别较 T3、T1、CK 处理显著增加 32.43%、48.48%、66.10%;根系长度为 19.87 cm,分别较 T3、T1、CK 处理显著增加 40.32%、37.99%、43.47%。表明在 0~84 mg/L 硅浓度范围内,增加硅浓度能促进西瓜植株的生长,但硅浓度过高西瓜植株生长会受到抑制。

表 1 不同浓度硅对西瓜幼苗生长的影响

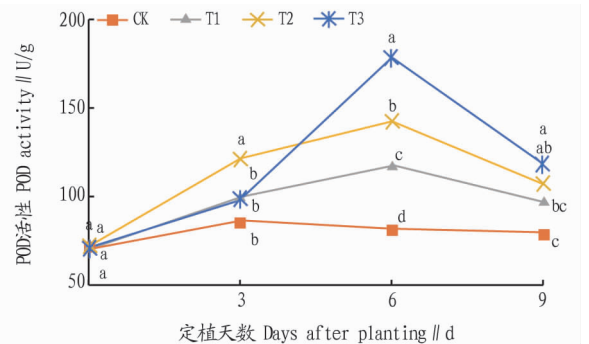
Table 1 Effects of different Si concentration treatments on the growth of watermelon seedling

处理 Treatment	叶片数 Leaf number	植株鲜重 Fresh weight g	植株干重 Dry weight g	根系长度 Root length cm
CK	6.30±0.20 a	5.90±0.01 d	0.59±0.01 d	13.85±0.12 b
T1	6.40±0.24 a	6.41±0.02 c	0.66±0.02 c	14.40±0.10 b
T2	6.60±0.29 a	9.77±0.06 a	0.98±0.01 a	19.87±0.63 a
T3	6.50±0.22 a	7.32±0.12 b	0.74±0.01 b	14.16±0.14 b

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different small letters in the same column meant significant differences between different treatments at 0.05 level

**2.2 不同浓度硅对西瓜苗期叶片保护性酶活性的影响** 不同处理西瓜幼苗叶片中 SOD 和 POD 活性均随时间变化呈先升高后降低的趋势,CK 变化不明显。CK 的 POD 活性在第 3 天达到最大值,其他 3 个处理的 POD 活性在第 6 天达到最大值,之后下降。第 3 天 T2 处理的 POD 活性最高,与其他处理差异显著;第 6 天 T3 处理的 POD 活性最大,与其他处理达显著差异水平;第 9 天 T3 处理的 POD 活性最大,与 CK 和 T1 处理差异显著,与 T2 处理差异不显著(图 2)。



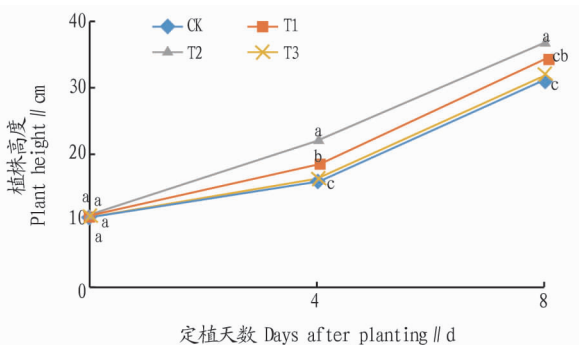
注:不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercases indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

图 2 不同浓度硅对西瓜苗期叶片 POD 活性的影响

Fig. 2 Effects of different Si concentration treatments on POD activity of the leaf of watermelon

CK 的 SOD 活性在第 6 天达到最大值,其他 3 个处理的 SOD 活性在第 3 天达到最大值,其中 T3 处理的 SOD 活性均高于其他处理,在第 3 天与 CK 和 T1 处理差异显著,与 T2 处理差异不显著;T3 处理在第 6 天与 T1 达显著差异水平,与 CK、T2 间差异不显著;第 9 天所有处理间差异不显著(图 3)。表明随着硅浓度增加,西瓜叶片活性氧增多,SOD 和 POD 活性增加。如果活性氧过多,则超出了体内防御能力,会对西瓜幼苗产生严重的胁迫,影响西瓜的正常生长发育。

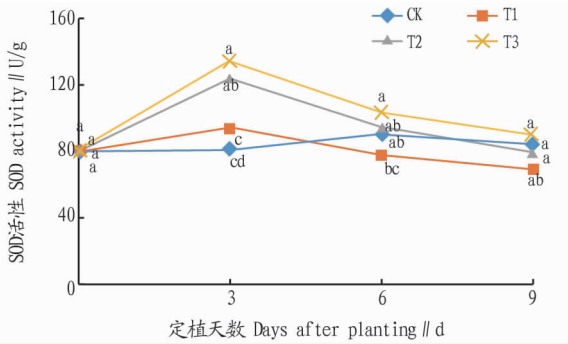


注:不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )

Note: Different lowercases indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

图 1 不同浓度硅对西瓜幼苗主蔓生长速度的影响

Fig. 1 Effects of different Si concentration treatments on the growth rate of main vine length



注:不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercases indicated significant difference between different treatments at 0.05 level

图3 不同浓度硅对西瓜苗期叶片 SOD 活性的影响

Fig.3 Effects of different Si concentration treatments on SOD activity of the leaf of watermelon seedling

### 2.3 不同浓度硅对西瓜幼苗叶片光合特性的影响 从表 2

表 2 不同浓度硅对西瓜幼苗叶片光合特性的影响

Table 2 Effects of different Si concentration treatments on photosynthetic characteristics of the leaf of watermelon seedling

处理 Treatments	净光合速率 $P_n // \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	气孔导度 $G_s // \text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i // \mu\text{mol}/\text{mol}$	蒸腾速率 $T_r // \text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	SPAD
CK	16.20±1.19 b	0.57±0.18 b	274.03±11.62 b	12.48±0.54 a	47.70±1.41 b
T1	16.78±0.31 b	0.49±0.05 b	276.20±3.56 b	12.36±0.47 a	50.90±1.03 b
T2	22.28±1.08 a	1.43±0.36 a	298.00±7.08 a	12.20±0.27 a	51.70±1.57 b
T3	21.50±1.33 a	0.77±0.07 b	286.30±5.65 ab	10.84±0.30 b	56.60±0.56 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )

Note: Different small letters in the same column meant significant difference between different treatments at 0.05 level

## 3 讨论

**3.1 硅对西瓜幼苗生长的影响** 硅在植物生物学中有非常重要的作用,营养液配方中应该添加硅,因为硅很可能是植物必需元素<sup>[11]</sup>。梁颖等<sup>[12]</sup>研究表明外源硅处理使缺磷、低磷条件下番茄幼苗植株干质量均有所上升。郑世英等<sup>[13]</sup>研究表明外源硅处理提高了干旱胁迫下野生大豆的地下部干、鲜重和地上部干、鲜重。在该研究中,0~84 mg/L 硅浓度范围内,西瓜幼苗植株的生长速率随着硅浓度的增加先升后降,56 mg/L 硅处理植株生长速率最快,株高、叶片数、植株鲜重、干重、根系长度都优于其他处理,这与李清芳等<sup>[14]</sup>、刘慧霞等<sup>[15]</sup>的研究结果相似。

**3.2 硅对西瓜幼苗光合作用的影响** 叶绿素含量可直接影响植株叶片的光合能力,添加硅可以增加叶片的叶面积、叶绿素含量,合成更多的有机物,从而提高光合效率<sup>[16]</sup>。马成仓等<sup>[17]</sup>研究表明,硅能够提高玉米幼苗叶片中叶绿素含量,增强光合作用。魏国强等<sup>[18]</sup>研究表明硅能增加黄瓜叶片中叶绿素含量。李清芳等<sup>[19]</sup>研究表明,硅可以增强棉花幼苗的光合强度,减弱蒸腾作用。在该研究中,添加硅能增加叶片中叶绿素含量,提高光合作用,减少蒸腾作用,这与刘景凯等<sup>[20]</sup>、蒋英等<sup>[21]</sup>研究结果一致。这可能是因为植物叶片的硅化细胞对于散射光的透过率为绿色细胞的 10 倍,促进叶片对光能的吸收,从而促进光合作用;硅充足时,叶片直立、植株的受光姿态好,间接增加叶片的光合作用<sup>[22]</sup>。另外硅化物沉淀在细胞壁与角质层之间,能抑制植物的蒸腾<sup>[22]</sup>。

可以看出,在 0~84 mg/L 硅浓度范围内,西瓜幼苗叶片的净光合速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度随着营养液中硅浓度的增加先升高后降低,蒸腾速率随硅浓度的增加而下降。其中, T2 的净光合速率、气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度最大,分别为 22.28  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、1.43  $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  和 298.00  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ;净光合速率与 T3 处理差异不显著,较 T1、CK 增加 32.78%、37.53%;气孔导度分别较 T3、T1、CK 显著增加 85.71%、191.84%、150.88%,胞间  $\text{CO}_2$  浓度分别较 T3、T1、CK 增加 4.09%、7.89%、8.75%。蒸腾速率 T3 最低,分别较 T2、T1、CK 显著减少了 11.15%、12.30%、13.14%,但 T2、T1、CK 之间差异不显著。说明增加外源硅可以提高西瓜叶片的净光合速率,减少西瓜叶片水分蒸发。叶绿素含量 (SPAD) 随着硅浓度的增加而增加, T3 的叶绿素含量最高为 56.60,分别较 T2、T1、CK 显著增加 9.48%、11.20%、18.66%。说明 0~84 mg/L 硅浓度范围内,西瓜叶片的叶绿素含量随着硅浓度的增加逐渐升高,光合作用增强。

**3.3 硅对西瓜幼苗保护性酶活性的影响** SOD、POD 作为保护酶系统的主要组成部分,在清除自由基、维持自由基平衡方面发挥重要作用<sup>[16]</sup>,并能提高植物组织的抗氧化能力。李清芳等<sup>[23]</sup>研究表明施硅可增加干旱胁迫下玉米植株内 SOD、POD 和 CAT 活性,减轻自由基对玉米叶片的伤害作用。该试验结果表明,增施外源硅能促进西瓜幼苗叶片 SOD 和 POD 活性的提高,与曾瑞儿等<sup>[24]</sup>、张环纬等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。该试验仅研究了硅对 SOD 和 POD 活性的影响,未研究其他抗氧化酶类,存在一定的不足之处。

## 4 结论

综上所述,在 0~84 mg/L 硅浓度范围内,56 mg/L 硅浓度处理的西瓜幼苗生长速度、叶片数、植株鲜重、干重、根系长度、净光合速率  $P_n$ 、气孔导度  $G_s$ 、胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$  均优于其他处理,84 mg/L 硅浓度处理的叶绿素含量、POD 和 SOD 活性最高。总之,营养液中添加外源硅,可以促进西瓜幼苗的营养生长,增加叶片叶绿素含量,提高光合作用,减少蒸腾作用,提高叶片的 SOD 和 POD 活性。该试验通过研究硅对西瓜幼苗的影响,为后续硅对西瓜产量、品质的进一步研究及西瓜合理施用硅肥提供理论参考和技术支持。

## 参考文献

- [1] 孟建,崔粟,韩江伟,等. 设施土壤硅素水平和蔬菜施硅效应研究进展[J]. 安徽农学通报,2013,19(17):63-66.
- [2] 夏石头,萧浪涛,彭克勤. 高等植物中硅元素的生理效应及其在农业生产中的应用[J]. 植物生理学通讯,2001,37(4):356-360.



有的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  已被大量消耗,此后所产生的氨挥发很有可能是土壤中有有机氮的矿化而造成。

从环境因素看,该研究中基肥和分蘖肥时期施肥后 3 d 内最高气温平均超过  $30\text{ }^\circ\text{C}$ ,对应的氨挥发速率均高于此后的 4~7 d,因此温度可能是影响稻田氨挥发的重要因子之一。靳红梅等<sup>[6]</sup> 研究指出土壤温度对氨挥发的影响最大,沼液施入土壤后有超过 58% 的氨挥发损失与温度相关,这也可以用于解释夏季氨挥发速率大幅高于冬季的现象。温度影响沼液还田后的氨挥发主要有 2 个方面,一方面高温能够增加沼液的挥发强度,加速铵态氮的流失;另一方面高温可增加土壤微生物活性,促进有机氮的分解而增加铵态氮的挥发量<sup>[17]</sup>。因此,沼液还田时应尽量避免高温天气,既能减少氮素流失,也能降低对大气环境的污染。

该研究所用沼液为畜禽粪污发酵而来,其中含有大量作物生长所需的营养成分<sup>[18-19]</sup>,稻田这一人工湿地为消解沼液提供了巨大潜力。然而,该试验结果显示,在水稻不同施肥期加入沼液将明显增加稻田氨挥发量和由此造成的氮素损失率,这不仅会增加大气  $\text{NH}_3$  浓度,还可能影响水稻生长过程中的氮素供应,因此还需深入认识稻田氨挥发的影响因素,科学配施沼液才能降低沼液还田后可能带来的影响。

#### 4 结论

(1) 与仅施用常规尿素相比,沼液与尿素配施大幅增加土壤氨挥发速率,不同比例沼液与尿素混合施入稻田所产生的氨挥发主要发生在施肥后 7 d 内,且挥发速率在施肥后 3 d 内达到峰值。

(2) 同等氮素施入量的背景下,配施沼液将增加  $\text{NH}_3-\text{N}$  的损失量和损失率,但适当降低沼液配施比例可明显降低氨挥发损失量。

(3) 水稻生长季进行沼液还田要特别关注施肥后 7 d 内天气情况,避免高温增加沼液的挥发。

(上接第 153 页)

[3] 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.

[4] 刘媛. 硅对水培黄瓜生理特性和营养品质的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.

[5] 苗锦山. 硅对设施厚皮甜瓜弱光胁迫的调控效果[J]. 北方园艺,2017(6):52-55.

[6] 张清华,刘震,赵跃锋,等. 硅对西瓜叶片矿质元素积累与生理特性的影响[J]. 安徽农业科学,2020,48(1):160-162,166.

[7] 赵晓美,李正为,杨家源,等. 不同浓度钙元素对西瓜生长发育及产量品质的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(4):1987-1988,2040.

[8] 唐小付,龙明华,马中才,等. 西瓜深液流水培品种适应性比较试验[J]. 长江蔬菜,2008(11):42-44.

[9] 赵晓美,王红梅,杨卫,等. 钙对西瓜幼苗生长、光合特性及保护性酶活性的影响[J]. 北方园艺,2012(14):144-146.

[10] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京:科学出版社,2009:97-100.

[11] EPSTEIN E. The anomaly of silicon in plant biology[J]. Proceedings of the national academy of science USA,1994,91(1):11-17.

[12] 梁颖,石玉,赵鑫,等. 低磷条件下硅对番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2020,46(2):151-160.

[13] 郑世英,郑晓彤,耿建芬,等. 硅对干旱胁迫下野生大豆幼苗生长和生理特性的影响[J]. 大豆科学,2018,37(2):263-267.

#### 参考文献

- [1] 赵玲,刘庆玉,牛卫生,等. 沼气工程发展现状与问题探讨[J]. 农机化研究,2011,33(4):242-245.
- [2] 靳红梅,常志州,叶小梅,等. 江苏省大型沼气工程沼液理化特性分析[J]. 农业工程学报,2011,27(1):291-296.
- [3] 汤云川,张卫峰,张福锁,等. 户用沼气工程发展对农田养分流动的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(8):192-199.
- [4] 沈其林,单胜道,周健驹,等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气,2014,32(3):83-86.
- [5] 尹冬雪,刘伟,周罕宽,等. 沼液农用综合利用研究进展[J]. 安徽农业科学,2018,46(3):15-17.
- [6] 靳红梅,常志州,吴华山,等. 菜地追施猪粪沼液后  $\text{NH}_3$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征及氮损失率[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(5):1155-1165.
- [7] 邓欧平,姜丽娜,陈丁江,等. 大量沼液施灌稻田的氨挥发特征[J]. 水土保持学报,2011,25(6):233-236.
- [8] BOUWMAN A F, BOUMANS L J M, BATJES N H. Estimation of global  $\text{NH}_3$  volatilization loss from synthetic fertilizers and animal manure applied to arable lands and grasslands[J]. Global biogeochemical cycles,2002,16(2):215-224.
- [9] 王朝辉,刘学军,巨晓棠,等. 田间土壤氨挥发的原位测定——通气法[J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(2):205-209.
- [10] 王忠江,蔡康妮,王丽丽,等. 沼肥表施对土壤氮素动态分布及氨挥发的影响[J]. 农业机械学报,2014,45(7):139-143.
- [11] 靳红梅,付广青,常志州,等. 猪、牛粪厌氧发酵中氮素形态转化及其在沼液和沼渣中的分布[J]. 农业工程学报,2012,28(21):208-214.
- [12] MARTINES A M, NOGUEIRA M A, SANTOS C A, et al. Ammonia volatilization in soil treated with tannery sludge[J]. Bioresource technology,2010,101(12):4690-4696.
- [13] 李喜喜,杨娟,王昌全,等. 猪粪施用对成都平原稻季氨挥发特征的影响[J]. 农业环境科学学报,2015,34(11):2236-2244.
- [14] 田玉华,贺发云,尹斌,等. 太湖地区氮磷肥施用对稻田氨挥发的影响[J]. 土壤学报,2007,44(5):893-900.
- [15] 杨士红,彭世彰,徐俊增,等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(11):99-104.
- [16] SOMMER S G, GÉNERMONT S, CELLIER P, et al. Processes controlling ammonia emission from livestock slurry in the field[J]. European journal of agronomy,2003,19(4):465-486.
- [17] MOORHEAD D L, SINSABAUGH R L. A theoretical model of litter decay and microbial interaction[J]. Ecological monographs,2006,76(2):151-174.
- [18] 李玮雯,曲英华,徐奕琳,等. 不同发酵原料沼液的养分含量及变化[J]. 中国沼气,2012,30(3):17-20,24.
- [19] 曹云,常志州,马艳,等. 猪粪沼液防治辣椒疫病机理研究——沼液中铵与腐殖酸的作用[J]. 中国生态农业学报,2013,21(9):1119-1126.
- [14] 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.
- [15] 刘慧霞,李晓蓉,郭正刚. 硅对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长发育的影响[J]. 草业学报,2011,20(1):155-160.
- [16] 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.
- [17] 马成仓,李清芳,束良佐,等. 硅对玉米种子萌发和幼苗生长作用机制初探[J]. 作物学报,2002,28(5):665-669.
- [18] 魏国强,朱祝军,钱琼秋. 硅对黄瓜幼苗生长及活性氧清除系统的影响[J]. 中国蔬菜,2003(5):10-12.
- [19] 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.
- [20] 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]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):989-997.
- [21] 蒋英,姜晓君. 硅对西瓜幼苗光合色素、光合参数及矿质元素吸收的影响[J]. 天津农业科学,2019,25(9):15-18.
- [22] 陆景陵. 植物营养学[M]. 2版. 北京:中国农业大学出版社,2003:111.
- [23] 李清芳,马成仓,尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(3):531-536.
- [24] 曾瑞儿,王鑫悦,侯雪莹,等. 硅对干旱胁迫下花生幼苗生长和生理特性的影响[J]. 花生学报,2018,47(4):13-18.
- [25] 张环纬,陈彪,温心怡,等. 外源硅对干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.