

## 逆境条件下硅肥调控效应研究进展

刘春成<sup>1, 2, 3, 4</sup>, 李中阳<sup>1, 3, 4</sup>, 胡超<sup>1, 3, 4</sup>, 曾智<sup>5</sup>, 吴海卿<sup>1, 3, 4</sup>,  
崔丙健<sup>1, 3, 4</sup>, 樊向阳<sup>1, 3, 4</sup>, 刘源<sup>1, 3, 4</sup>, 马欢欢<sup>1, 2</sup>, 马天<sup>1, 2</sup>,  
崔二苹<sup>1, 3, 4</sup>, 樊涛<sup>1, 3, 4</sup>, 高峰<sup>1, 3, 4\*</sup>

- (1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081; 3. 中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453000; 4. 中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453002; 5. 江西省水利规划设计院, 江西 南昌 330000)

**摘要:** 硅(Si)元素被认为是N、P、K之后的第四大元素。硅肥有利于促进作物的生长和土壤环境的改善。为了给硅肥利用的研究提供一定参考,通过文献综述的方法,总结了逆境条件下硅肥对低温胁迫的调控作用、对植株病害的防效、对水分胁迫的调控作用以及对重金属胁迫的缓解效应。综合现有研究结果,认为增施硅肥具有提高植株的耐盐胁迫、耐重金属胁迫、抗低温、抗病害等能力。此外,不同硅肥的调控效果不同,而且配施其他肥料或者农艺措施等效果更佳。最后,对今后硅肥利用研究方面提出一些建议:(1)加强硅肥的相关机理研究,如硅是如何改善土壤微环境的,纳米硅材料在植物体内的运输、积累及其对植物抗逆性能的作用机理研究;(2)开展硅肥与非常规水资源安全利用的耦合研究,如何利用硅肥的特性来解决微咸水灌溉和再生水灌溉及其二者耦合灌溉的问题;(3)加强硅肥的提质效应研究。

**关键词:** 硅肥; 盐胁迫; 重金属胁迫; 土壤; 水分胁迫; 产量; 品质

硅(Si)可以存在于空气、水体和土壤中<sup>[1-3]</sup>。Si是岩石圈中第二丰富元素<sup>[1]</sup>,其含量仅次于氧(O)元素。土壤中Si的质量分数为0.5%~48%,平均为28%。Si在土壤中有3种存在形式,即固相、液相、可吸附相,其中固相硅由结晶、微晶和无定形组成,无定形硅主要与生物活性有关,产生二氧化硅或硅藻土等<sup>[3]</sup>。一半以上的植物都是硅藻土的生产者,硅藻土在植株和农业生产中的作用得到很多学者的广泛认可<sup>[4-5]</sup>。硅有益于植物的生长发育,研究证实,硅肥在很多方面都有利于植株的生长发育、提高植物的生物量及产量,如硅肥可以加强光合作用<sup>[6]</sup>,促进有益微生物的生长和共生<sup>[7]</sup>,减少昆虫或病原菌的危害<sup>[8]</sup>,提高P、Ca、K等养分利用率<sup>[9-10]</sup>,提高植株对盐胁迫和水分胁迫的

耐受性,促进碳的固定<sup>[11-14]</sup>,缓解Cd、As、Pb等重金属的毒害作用<sup>[6, 15-16]</sup>等。随着科技的快速发展和新型肥料的不断研发,硅肥愈加受到学者们的关注,关于植物对硅的吸收机理、硅对植物生长发育和土壤微环境的影响以及硅的一些抗逆性特征的研究愈加深入。本文综述了逆境条件下硅肥对植物生长的影响和作用机理等,以期对硅肥的研究利用提供一定参考。

### 1 逆境条件下硅肥的调控效应与机制

逆境条件下,硅肥主要有抗寒性、抗病害性、抗盐碱性、抗旱性和抗重金属性等主要功效(表1)。对其作用机理虽然有一定的认识,但尚不完全清楚,有待进一步研究与完善。

#### 1.1 硅肥对低温胁迫的调控作用

植株抗寒性可以由丙二醛(MDA)含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量等指标表征,MDA是在植株遇冷时,细胞膜脂产生的过氧化物质。脯氨酸可调节细胞渗透压平衡,当植物受到低温冷害时,脯氨酸大量积累并作出调控,保持植物体内稳定的渗透压和较高的水分,提高了植物的抗低温能力。一

收稿日期: 2020-04-09; 录用日期: 2020-06-06

基金项目: 中央级科研院所基本科研业务费专项(FIRI202001-02); 国家重点研发计划(2017YFC0403503-2, 2017YFC0403302-1)。

作者简介: 刘春成(1986-),男,安徽界首人,助理研究员,博士研究生,研究方向为非常规农业水资源安全利用。E-mail: liuchuncheng986@sohu.com。

通讯作者: 高峰, E-mail: gfyx@sina.com。

一般来说,叶片可溶性糖含量越高,植株抗寒能力越强,低温胁迫下,为适应环境叶片可溶性糖含量会升高,促使脱落酸积累,间接诱导蛋白质的合成,从而提高植物的抗寒性。

表1 逆境条件下硅肥功效与作用机理

| 硅肥功效  | 作用机理                                                                                     |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 抗寒性   | 参与代谢,改变生理生化指标                                                                            |
| 抗病害性  | 物理屏障;参与代谢活动                                                                              |
| 抗盐碱性  | 削弱植物蒸腾旁路途径,减少Na <sup>+</sup> 随蒸腾流的吸收及向地上部运输;<br>Si沉积于根部表皮减少了Na <sup>+</sup> 质外运输途径的非选择吸收 |
| 抗旱性   | 硅化作用,降低水分损失<br>参与植物代谢活动诸如渗透调节等,间接影响其抗旱性;影响植物叶片气孔的关闭以及细胞液浓度,调节植物体内矿质元素的平衡                 |
| 抗重金属性 | 改善土壤理化性质;改变土壤重金属的形态                                                                      |

Si通过在植物体内参与新陈代谢活动等方式调节植物生理生化指标,进而提高植株的抗寒性。戴青云等<sup>[17]</sup>研究表明,经过低温胁迫后,与不施硅肥相比,施硅肥条件下,紫花苜蓿根茎部的可溶性糖、游离脯氨酸含量有所提高,而MDA含量有所降低,进而提高了紫花苜蓿的抗寒性。陈海燕<sup>[18]</sup>研究表明,低温胁迫时,增施硅制剂对水稻抗低温生理指标和保护酶活性具有一定的积极作用。其中,不耐冷品种抗低温效果以Si-60(3-缩水甘油醚氧基丙基三甲氧基硅烷)为宜,耐冷品种抗低温效果以Si-60-G(含有环氧基团的纳米硅)为宜。喷施不同硅肥,对作物的抗旱性能影响有所不同,李鑫<sup>[19]</sup>研究表明,低温处理3、5、7 d时,总体上, Si-60-G对MDA含量的降低效果和过氧化氢酶(CAT)活性的提升效果最佳,分别显著降低了15.81%、36.22%、60.77% ( $P < 0.05$ )和分别提高了3.26%、2.30%、2.35%; Si-E-G(以稻壳灰为原料制成的制剂)对脯氨酸含量的提升效果最佳,分别显著增加了28.82%、28.13%、30.49% ( $P < 0.05$ ); Si-La(硅与镧的复合制剂)对可溶性糖含量和过氧化物酶(POD)的提升效果综合而言相对最佳,分别增加了0.54% ( $P > 0.05$ )、26.65% ( $P < 0.05$ )、24.05% ( $P < 0.05$ )和分别提升了17.01%、16.36%、22.26%。兰倩<sup>[20]</sup>利用人工气候室开展低温胁迫处理下土壤养分和水稻养分吸收对5种不同硅制剂(氨基丙基三乙氧基硅烷、3-缩水甘油醚氧基丙基三

甲氧基硅烷、稻壳提取硅、氨基纳米硅、环氧基纳米硅)的响应研究,结果表明低温胁迫条件下5种不同硅制剂均能提高土壤速效养分含量,有效缓解低温对水稻养分吸收的抑制作用,增加植株养分(全氮、全钾、全磷)含量,进而提高产量及其构成(有效穗数、穗粒数、结实率和千粒质量等),但不同硅制剂的效应不同,就产量及其构成因素而言, Si-60、Si-60-G效果最佳。Qian等<sup>[21]</sup>研究表明,低温胁迫下施硅显著提高了竹叶的光合作用速率,并且随着硅肥用量的增加,超氧化物歧化酶(SOD)、POD和CAT的活性增加,而MDA含量和细胞膜通透性均随硅的降低而降低,表现出较强的抗寒性,但施硅量超过一定量(8.0 g/kg)时会出现竹子生物量下降的现象,建议竹子施硅量宜为2.0 ~ 8.0 g/kg。

## 1.2 硅肥对植株病害的缓解作用

(1) Si提高植株抗病害性能的作用机理。一部分硅在植株细胞中聚集形成物理屏障,这种物理屏障不仅抵御了真菌对植株的侵入,也减轻了真菌对细胞壁的酶降解作用,且Si本身对细菌也具有一定的毒性<sup>[22]</sup>;此外, Si可能参与了植株和病原物相互作用体系的代谢过程,经过一系列生理生化反应和信号转导,激活寄主防卫基因,诱导植株系统抗病性的表达,从而抑制植株病害的发生。增施硅肥具有提高植株抗病能力、降低植株发病率的功能效果,在不同植株中均有大量研究证实了此功效。张国良等<sup>[23]</sup>研究表明,增施硅肥明显降低植株的纹枯病病级和病情指数,说明Si在叶表聚集具有物理屏障效果,提高了水稻对纹枯病的抗性。杨艳芳等<sup>[24]</sup>研究表明,硅肥能够显著降低感病小麦品种植株白粉病病情指数11.20% ~ 41.01%,提高其对白粉病的抗病能力,硅肥浓度以1.7 mmol/L为最佳,其相对免疫效果达38.79%。王肇庆等<sup>[25]</sup>研究表明,外施SiO<sub>2</sub>溶液可以显著减轻草地早熟禾白粉病的病情指数和病害程度( $P \leq 0.05$ ),且随着施硅量(0 ~ 275 mg/m<sup>2</sup>)的增加,病情的减轻愈显著。硅肥在作物体内会产生较硬的硅化细胞使植物不易被咬烂食用,也会产生一种害虫厌烦的气味使害虫远离作物,进而提高作物抗病虫害能力,尤其是稻瘟病。万跃明等<sup>[26]</sup>研究表明,在糯稻种植中,增施硅肥后穗颈稻瘟病株率和病情指数较不施硅肥分别下降了80.65%和84.23%,纹枯病病株率和病情指数也分别降低

了 51.93% 和 73.44%。根据鄢建宾等<sup>[27]</sup>研究, 在水稻孕穗期喷施叶面 25% 速效硅 (499.5 mL/hm<sup>2</sup>) 和酿造醋 (1500 mL/hm<sup>2</sup>) 时, 水稻稻瘟病发病率可以降低 61.5%。不同硅肥施用量对植株病害的缓解功效亦有所不同。张舒等<sup>[28]</sup>研究表明, 随着硅肥用量 (60 ~ 300 kg/hm<sup>2</sup>) 的增加, 水稻纹枯病病株率和病情指数均呈下降趋势, 分别显著降低 6.5% ~ 11.8% 和 20.53% ~ 43.3%, 病丛率也呈下降趋势, 下降 4.36% ~ 40.26%, 基于防治成本角度考虑, 施硅量以 120 ~ 240 kg/hm<sup>2</sup> 为宜。任海等<sup>[29]</sup>开展了不同施硅量对水稻病害 (纹枯病和稻瘟病) 的影响研究, 结果发现在基本苗一定 (84 万株/hm<sup>2</sup>) 时, 不施硅肥处理的植株发病率和发病指数分别为 9.4% 和 20.8%, 而基施硅肥 900、1350、1800 kg/hm<sup>2</sup> 和喷施 450 (苗期)、900 (拔节期、抽穗期)、1350 (苗期、拔节期、抽穗期) mL/hm<sup>2</sup> 后植株发病率分别降低了 5.1%、7.9%、1.6%、7.1%、3.1%、6.9%, 发病指数分别降低了 17.6%、19.7%、15.0%、18.5%、16.9%、18.9%, 这说明适度增施硅肥可以增强水稻抗病能力, 抑制纹枯病和稻瘟病的侵染, 从而降低水稻病害损失。方至萍<sup>[30]</sup>研究表明, 稻田适量增施硅肥 (23.40 kg/hm<sup>2</sup>) 降低了早稻的纹枯病病丛率、晚稻单位叶片胡麻叶斑病斑数, 降幅达 17.94%、67.99%, 显著提高了水稻抗真菌病害的能力。

(2) 科学的硅肥施用在增产的同时也可以有效地降低稻瘟病的发生, 是水稻种植中一种有效的减药增效措施, 尤其是配合其他措施效果更佳。张佑宏等<sup>[31]</sup>研究表明, 施硅肥在增产 4.59% ~ 7.78% 的基础上, 对稻叶瘟和稻穗瘟具有防效作用, 病情指数分别为 6.09 ~ 10.64 和 5.52 ~ 8.94, 防效为 50.96% ~ 71.93% 和 39.21% ~ 62.31%。若是混合施用硅肥、锌肥 (硅 225 kg/hm<sup>2</sup>+ 锌 15 kg/hm<sup>2</sup>), 则能更好地抑制稻叶瘟和稻穗瘟的发生, 病情指数降低至 3.26 和 3.58, 防效高达 84.98% 和 75.65%。杨克泽等<sup>[32]</sup>认为, 喷施硅肥对玉米茎基腐病有一定的防效, 防效为 34.0% ~ 47.6%, 喷施浓度宜为 2000 mg/L, 而且配施 18% 吡啶醚菌酯的防效更好, 防效为 64.0%。

(3) 不同硅肥对植株病害的防效不同。在南非地区, Keeping 等<sup>[33]</sup>通过盆栽试验研究了 4 种硅源 [美国硅酸钙、当地 (南非) 硅酸钙、矿渣和粉煤灰] 对甘蔗品种 (2 个抗性和 2 个易感性) 蔗螟

抗性的影响, 结果表明, 用当地硅酸钙处理过的植物中硅含量增幅最大 (特别是茎中), 且高硅处理可以显著降低螟的危害, 易感品种的伤害降低了 34%, 抗性品种的伤害降低了 26%, 易感品种比抗性品种更受益于硅处理。郭玉蓉等<sup>[34]</sup>研究表明, 硅酸钠、正硅酸和纳米氧化硅 3 种硅化物中, 硅酸钠处理对甜瓜白粉病的防效最高, 为 70.8%, 正硅酸处理次之, 为 56.2%, 纳米氧化硅处理最低, 为 36.1%。魏国强等<sup>[35]</sup>研究表明, 在黄瓜诱导接种白粉菌时, 以接种后第 4 和 7 d 的调查结果为例, 加硅处理的诱抗效果较不加硅处理分别提高了 53.07% 和 47.16%, 显著降低了黄瓜的病情指数, 极大削弱了白粉病的危害。随着硅肥利用的推广, 对硅肥的改良也逐渐出现, 其对植株病害的抑制作用具有更好的效果。Wang 等<sup>[36]</sup>发现, 与硅灰石和钙渣硅肥相比, 基于稻草生物炭的硅源改良剂可显著提高多年生黑麦草组织中的硅水平, 将灰叶斑点症状的发生延迟 1 ~ 2 d, 对灰叶斑发生率的抑制作用增强 42% ~ 58%。

(4) 尽管很多研究都证明了硅肥对病虫害具有一定的防效。但是也有学者持怀疑态度。Horgan 等<sup>[37]</sup>探讨了硅土改良剂和氮素对危害水稻幼苗的苹果螺的影响, 结果表明, 当氮和硅一起施用, 与单独施氮处理相比, 硅的添加导致 YTH183 品种水稻的幼苗生长量减少, 但是 IR64 品种幼苗未观察到相同的效果, 表明硅的效应具有品种特异性反应。此外, 不论什么品种, 在播种后 21 d 移植到苹果螺感染的盆中, 经硅处理的幼苗的生物量要比没有硅处理的低; 然而在感染苹果螺的小区试验中, 发现硅处理下苹果螺对 IR50 品种水稻幼苗的伤害没有明显变化, 在很大程度上不足以减少苹果螺对水稻幼苗的损害。

### 1.3 硅肥对盐胁迫的调控作用

当土壤或水域中盐分浓度显著高于植物适宜生长浓度时, 会破坏植物质膜的选择透过性, 胞内溶质外渗, 盐离子大量进入细胞, 使植物遭受盐害。在盐胁迫条件下, 植物明显缺水, 叶绿素含量和光合作用相关酶活性降低, 气孔关闭, 叶绿体类囊膜受损, 光合速率降低, 进而减缓地上部生长且抑制根系生长, 使叶片脱落, 生物量下降。硅肥对盐胁迫的调控作用机制主要包括两个方面, 一方面 Si 在植物体内积累会降低蒸腾作用, 削弱植物蒸腾旁路途径, 减少 Na<sup>+</sup> 随蒸腾流的吸收及向地上部

运输; Yeo 等<sup>[38]</sup> 研究证实了硅酸盐通过部分阻止蒸腾旁途径减少  $\text{Na}^+$  的运输。另一方面, Si 沉积于根部表皮减少了  $\text{Na}^+$  的质外运输途径的非选择吸收; Gong 等<sup>[39]</sup> 研究表明, NaCl 胁迫下, 硅在外皮层和内胚层中的沉积减少了水稻幼苗对钠的吸收, 这是通过减少整个根部的质外性转运来实现的。

硅肥能够改善植物的光合作用, 提高植物的耐盐性。Xie 等<sup>[40]</sup> 研究表明, 在盐碱土种植玉米时, 一定剂量的硅肥能够提高玉米的光合速率、气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度, 同时显著降低玉米的蒸腾速率, 这意味着在不同生长阶段施用适量硅肥可显著提高盐碱胁迫下玉米的光合效率, 最佳施硅量 ( $\text{SiO}_2$ ) 为  $150 \text{ kg/hm}^2$ 。贺月<sup>[41]</sup> 研究表明, 硅肥具有缓解盐胁迫对桃苗伤害的作用, 显著提高桃苗 SPAD 值  $15.9\% \sim 32.6\%$ 、净光合速率  $31.8\% \sim 45.5\%$ , 显著降低叶片相对电导率  $23.4\% \sim 27.7\%$ , 缓解了叶片细胞膜受伤害程度, 显著降低了叶片和根系中的  $\text{Na}^+$  含量, 减轻了离子毒害作用, 亦可以提高叶片的气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率、水分利用效率和桃苗干鲜重。Kumar 等<sup>[42]</sup> 研究发现 PGPR 制剂 (聚蓖麻酸甘油酯) 和硅肥的组合应用可以提高盐渍土壤中野豌豆的生长、产量和生物化学性能。顾跃等<sup>[43]</sup> 研究表明, 盐胁迫 ( $0 \sim 11.25 \text{ g/L}$ ) 条件下, 施硅肥可以降低狗牙根草坪草叶中脯氨酸、电解质渗出率和根中  $\text{Na}^+$  含量, 同时增加叶片叶绿素含量、相对含水率及根干质量、根中  $\text{K}^+$  含量, 进而提高狗牙根草坪草对盐胁迫的适应能力。

不同类型的硅肥, 其效果有一定的差异, 纳米硅肥对盐胁迫的效果更加理想。Kalteh 等<sup>[44]</sup> 通过不同硅肥类型 (不施硅、普通硅肥和纳米硅肥) 和盐胁迫水平 ( $1、3$  和  $6 \text{ dS/m}$ ) 的三阶重复析因试验发现, 盐分胁迫下, 生长发育指数显著下降, 而随着硅肥的施加, 叶片干重、鲜重和脯氨酸含量显著增加, 提高了植物的耐受性, 尤其纳米硅肥效果更佳; 同时, 纳米硅肥还能显著提高叶绿素含量, 而普通硅肥虽然也能一定程度上提高叶绿素 b 含量, 但是会降低叶绿素 a 含量。

#### 1.4 硅肥对水分胁迫的调控作用

田间水分胁迫是作物生产中普遍存在的问题, 尤其是在干旱和半干旱地区, 人们普遍认为 Si 可以减轻植物的水分胁迫。Si 减轻植物水分胁迫的机理, 一方面在于硅化作用, Si 在植物体内沉积形成

角质-双硅层以降低水分损失; 另一方面在于 Si 参与植物代谢活动诸如渗透调节等, 从而间接减轻水分胁迫的不利影响; 此外, Si 在植物体内积累会影响植物叶片气孔的关闭以及细胞液浓度, 调节植物体内矿质元素的平衡。朱瑾<sup>[45]</sup> 研究表明, 干旱胁迫条件下, 施硅肥在一定程度上可以抑制干旱引发的膜脂过氧化损害, 减缓叶片水分的散失, 提高叶绿素含量, 提高苗期抗旱能力, 其中叶面喷施有机硅肥最佳, 叶施无机硅肥次之, 土施无机硅肥效果相对最差, 但对土壤水分和土壤电解质的影响不明显; 同时施用有机硅肥在早熟禾叶片形态变化及逆境后补偿生长效应方面卓有成效, 无机硅更有利于根系构型的优化。龚束芳等<sup>[46]</sup> 研究表明, 干旱胁迫下增施纳米硅肥显著促进了远东芨芨草幼苗的生长发育, 株高、根长、鲜质量和相对含水率均有显著提高, 生理指标如可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸含量和酶活性也有显著提高, 此外, 增施硅肥还降低了 MDA 含量, 提高幼苗的抗逆境胁迫能力。吴森等<sup>[47]</sup> 研究表明, 干旱胁迫下适宜浓度的硅使紫花苜蓿种子发芽情况有所改善, POD、SOD 和 CAT 活性增加, 而 MDA 含量降低, 进而提高其抗旱性。Eneji 等<sup>[48]</sup> 评估了某些硅源 ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{CaSiO}_3$  和硅胶) 在适当和亏缺灌溉下对 4 种草的生长和养分吸收的影响, 结果表明对于所有物种, 亏缺灌溉下施硅处理的生物产量响应均明显好于充分灌溉的, 亏缺灌溉下的较高响应表明植物对 Si 的依赖更大, 可以承受干旱胁迫, 此外 Si 的吸收与氮 (N) 和磷 (P) 的吸收之间都有很强的联系, 但是在缺水情况下钾 (K) 的吸收与硅吸收之间的联系比在充分灌溉下更为紧密。

在玉米苗期生理生化性状对硅肥的响应方面, 林少雯等<sup>[49]</sup> 研究表明在一定水分胁迫下随着硅肥用量 ( $0、0.133、0.266 \text{ g/kg}$  单硅酸) 的增加, 株高、叶面积、茎粗、根系长度、根系活力、叶绿素含量均有所增加, 而 MDA 以及脯氨酸含量有不同程度的降低, 减缓了膜脂过氧化, 缓解了玉米植株缺水的症状, 增强了玉米植株的抗旱性。

#### 1.5 硅肥对重金属胁迫的缓解效应与机制

(1) 硅肥在重金属污染土壤修复中具有明显的效果。硅肥可以改善土壤理化性质, 改变土壤重金属的形态。Si ( $\text{OH}$ )<sub>4</sub> 对  $\text{Cd}^{2+}$  具有配位能力,  $\text{SiO}_2$  对  $\text{Cd}^{2+}$  具有吸附能力<sup>[50]</sup>。硅肥属于碱性肥料, 增施硅肥可以提高土壤 pH, 进而降低 Cd 的活

性。王昊等<sup>[51]</sup>研究表明,硅酸盐处理使水稻根际土壤 pH 提高了 0.15 ~ 0.31 个单位,土壤 Cd 的存在形态由可交换态向碳酸盐结合态和有机结合态转变。李园星露等<sup>[52]</sup>研究表明,增施硅肥较对照相比土壤 pH 提高了 0.22 ~ 0.39 个单位,土壤中有有效态、酸可提取态和毒性淋溶(TCLP)提取态 Cd 含量下降了 19.71% ~ 28.87%、15.53% ~ 26.16%、21.82% ~ 37.02%。Neumann 等<sup>[53]</sup>研究表明, Si 在双子叶植物叶片表皮的细胞壁产生硅酸锌沉淀,改变了重金属 Zn 的存在形态。Savant 等<sup>[54]</sup>和顾明华等<sup>[55]</sup>研究表明, Si 与 Al 通过化合或络合反应形成 Si-Al 络合物或硅酸铝复合物,进而固定重金属 Al,降低 Al 的危害。郭俊霞等<sup>[56]</sup>研究表明,喷施硅肥可以有效降低土壤有效 Cd 的比重。

硅肥影响重金属污染土壤中重金属在植物体内的转移和累积。郭俊霞等<sup>[56]</sup>研究表明,喷施硅肥可以有效降低药材根茎和茎叶中的含 Cd 量。梅鑫<sup>[57]</sup>研究表明,在土壤 Pb、Cd 胁迫条件下,增施硅肥显著降低了大蒜各器官 Pb、Cd 含量。Wang 等<sup>[58]</sup>研究表明 Cd 胁迫下,叶面喷施纳米硅降低了 Cd 从水稻根到芽的积累和转运。陈蕊<sup>[59]</sup>研究表明, Cd 胁迫条件下,施硅(0.5 ~ 2 mmol/L)显著抑制了 Cd 由根系向地上部分的转运,有效缓解了 Cd 胁迫的抑制作用。Zhang 等<sup>[60]</sup>研究表明,固态或液态硅肥可使水稻地上部分的 Cd 积累降低 26% ~ 52%。Cd 污染稻田中,添加硅肥可以显著降低水稻根和稻米中 Cd 的吸收系数( $P < 0.05$ )<sup>[61]</sup>。彭鸥等<sup>[62]</sup>研究发现,在 Cd 胁迫下,硅肥(0 ~ 40 mg/L)可以有效降低水稻根系、茎鞘、叶片以及糙米、稻壳和低伤流液中的含镉量,施硅量越高,降低镉效果越好;就转运系数而言,施硅能阻止 Cd 从根系向茎鞘、茎鞘向糙米中转移,且总体上施硅量越大效果越好,而低浓度(10  $\mu\text{g/L}$ ) Cd 胁迫下施硅可以降低从茎鞘向叶片和稻壳转移的 Cd 量,但是高浓度(>10  $\mu\text{g/L}$ ) Cd 胁迫下尚无明确规律。魏晓等<sup>[63]</sup>在中、高度 Cd 胁迫试验中表明,不同程度 Cd 胁迫对土壤-水稻系统中 Cd 的吸收和转运的影响是不同的。中度 Cd 胁迫时共质体中可溶性 Cd 占主导,施用富硅物质可以降低土壤 Cd 的移动性和水稻根及幼苗中 Cd 的积累,而高度 Cd 胁迫时施硅可以降低根和芽中 Cd 的积累,使 Cd 大量积累在根及其共质体中,并降低根及其共质体中 Cd 的转换和积累。付洁<sup>[64]</sup>通过水稻盆栽试验研究表

明,轻、中、高度 As 胁迫条件下,糙米和精米中无机 As 含量均符合食品污染物砷的限量标准(GB 2762-2017,无机 As 含量  $\leq 0.2 \text{ mg/kg}$ ),米糠中的无机 As 含量在轻度 As 胁迫条件下除施硅 100 mg/kg 没有降低至标准限值外,其他施硅量均降至标准限值内,在中度 As 胁迫条件下施硅量超过 100 mg/kg 则会显著增加米糠中无机 As 含量( $P < 0.05$ ),且超过食品安全限值,重度 As 胁迫条件下除施硅 25 mg/kg 外其他均超过了食品安全限量标准。此外, Yu 等<sup>[65]</sup>通过为期 45 d 的盆栽试验发现,不同 As 剂量水平下,硅肥的施用不仅促进了水芹的生长,而且显著降低了植物对 As 的吸收。但是,也有学者认为硅肥对 As 的毒害作用没有效果,甚至会加强 As 的毒害作用。比如, Lee 等<sup>[66]</sup>研究结果表明, As 污染稻田,在施用 Si 后,由于 As 和 Si 在土壤固体上的竞争性吸附,土壤溶液中 As 和 Si 的浓度均会增加,水稻幼苗积累了更多的 As, As 的毒害作用会有所增强,其生长受到施硅的抑制。

硅肥可以刺激植物体的生理代谢活动,减缓重金属的毒害作用。在植物体生理过程中,施硅可以改善细胞超微结构,增强抗氧化系统酶活性,提高清除自由基能力等,进而减缓重金属的毒害<sup>[67]</sup>。施硅增加了叶片的厚度,加粗了维管束,提高了线粒体数量,增大了叶绿体,提高了叶片腺嘌呤核苷三磷酸含量<sup>[68]</sup>;施硅可提高叶片对光的吸收效率,延缓叶片衰老时间,提高光合效率<sup>[69]</sup>,而光合作用与水稻糙米 Cr 含量显著负相关<sup>[70]</sup>。梅鑫<sup>[57]</sup>研究表明,土壤 Pb、Cd 胁迫条件下,增施硅肥提高了大蒜的叶片色素含量、光合速率和叶绿素光化学活性,增强了 SOD、POD、CAT 的活性,降低了 MDA 含量。胡瑞芝等<sup>[71]</sup>研究表明, Si 通过与 MDA 发生络合反应降低 MDA 含量,提高 SOD 活性,减轻重金属毒害作用。Wang 等<sup>[58]</sup>研究发现, Cd 胁迫下叶面喷施纳米硅降低了水稻幼苗的 MDA 含量,但具有较高的谷胱甘肽含量和不同的抗氧化酶活性,表明它们对镉的耐受性较高。陈蕊<sup>[59]</sup>研究表明, Cd 胁迫条件下,施硅显著提高了水稻幼苗 POD 活性和可溶性蛋白含量,显著降低了 MDA 含量,有效缓解了 Cd 胁迫的抑制作用。

(2) 在作物不同生育期施适量的硅肥,对重金属胁迫的缓解作用也不同,其是一种降低重金属污染土壤中作物可食部位重金属含量的有效措施。Rehman 等<sup>[72]</sup>研究发现 Cd 胁迫条件下,与其他施

用硅的组合相比,在水稻3个生长期(移栽、分蘖、抽穗期)分阶段施用硅是改善植物生长和降低Cd含量的最佳方法,可以将谷物中的Cd浓度降低到阈值水平(0.2 mg/kg)以下,并在试验条件下降低Cd健康风险指数。张世杰等<sup>[73]</sup>研究表明,冬小麦不同生育期配施硅肥对籽粒和秸秆中的Cd、Pb、As含量阻控效果不同,通过聚类分析可知拔节期施硅2次最佳,为冬小麦籽粒、秸秆中Cd、Pb、As低含量类群。李嘉琳等<sup>[74]</sup>研究表明,在水稻分蘖期-拔节期喷施叶面硅肥没有明显的促生效果,虽然显著降低了根系Cd向地上部位迁移的能力,但对Cd从茎叶到籽粒中的转运无显著影响,籽粒中Cd的累积没有明显的降低。

(3) 硅肥对重金属胁迫具有一定的缓解作用,可以降低土壤和植株各组织中的重金属含量,配施其他措施的效果则更加明显。先前的研究<sup>[58, 75]</sup>表明,硅肥可以减少水稻籽粒中As和Cd的积累。Pan等<sup>[76]</sup>研究了铁改性生物质炭和硅溶胶组合或单独施用对水稻籽粒中As和Cd积累的影响,结果表明,在为期2年的田间试验中,相比单施硅溶胶处理,铁改性生物炭加硅溶胶处理的谷物产量更高,糙米中As和Cd的含量更低,可见,同时使用铁改性生物炭和硅溶胶可以进一步减少稻米中As和Cd的积累。根据湖南省株洲市南洲镇五家桥村试验结果<sup>[77]</sup>可知,Cd胁迫条件下,硅肥可以降低稻田土壤有效态Cd含量,早、晚稻田分别降低17.09%、18.26%,而硅肥结合水分管理的降幅还可以进一步提高,分别为17.95%、30.43%;Cd胁迫条件下,硅肥可以降低水稻根系、茎鞘、叶片、稻壳和糙米Cd含量,其中糙米Cd含量最高降幅为49.23%,而硅肥结合水分管理效果更佳,糙米Cd含量降幅为60.34%~78.46%。李园星露等<sup>[52]</sup>在重金属As、Cd复合污染稻田土中开展了硅肥耦合水分管理的试验研究,结果表明,硅肥耦合淹水能够有效阻止稻米As、Cd复合污染,且以速溶硅肥+矿化硅肥与淹水耦合的效果最佳,较对照湿润灌溉相比,糙米中的Cd、As含量分别降低了65.05%、47.62%。邓晓霞等<sup>[78]</sup>通过Cd污染稻田中硅肥配施土壤调控剂的试验表明,硅肥可以降低土壤酸可提取态Cd、根系和糙米Cd含量,提高产量和茎叶Cd含量(在国家食品污染物限量标准GB 2762-2012以内),而配施土壤调理剂时土壤酸可提取态Cd、糙米Cd含量的降幅和产量的增幅更

大,且以叶面硅肥配施2/3纳米活性炭+1/3硅钾钙镁肥最佳。

(4) 不同类型的硅肥,对重金属胁迫的缓解作用亦有所不同。Wang等<sup>[79]</sup>田间试验表明,不同硅肥中,高施硅钾肥(9000 kg/hm<sup>2</sup>)显著降低了稻米中的As含量,最高可达20.1%;除偏硅酸钠之外,试验条件下所有硅肥均具有降低水稻籽粒中Cd含量的能力,其中硅钙肥料在缓解水稻籽粒中Cd浓度方面最有效。王昊等<sup>[51]</sup>基于盆栽试验,研究了3种硅酸盐的复配组合[海泡石(SP)、海泡石+硅钙复合矿物(SPC)和海泡石+硅钙复合矿物+水溶硅肥(SCY)]对稻田Cd的迁移影响,结果表明,3种硅酸盐的不同组合均可使土壤Cd由可交换态向碳酸盐结合态和有机结合态转变,以及降低籽粒的Cd含量,但是SP对土壤中Cd的钝化效果和籽粒中Cd的降幅不明显,而SPC或SCY的钝化效果和降幅显著。Huang等<sup>[80]</sup>通过2种有机硅肥(OSiF1、OSiF2)与无机硅肥的对比试验发现,有机硅肥OSiF1、OSiF2和无机硅肥的灰色关联度分别为0.72、0.77和0.61,表明有机硅肥对小麥中Cd和Pb的解毒效果可能优于无机硅肥,但是增施有机硅肥OSiF1、OSiF2和无机硅肥均可以促进小麦根和芽对Si的吸收,从而降低芽、麸皮和面粉中Cd和Pb的积累,特别是面粉Cd含量分别降低17%、10%和31%,Pb含量分别降低74%、53%和48%,进而降低了Cd和Pb的健康风险指数。

随着硅肥的不断研发,提出了一种新的硅肥——纳米硅肥。Liu等<sup>[75]</sup>研究表明,纳米硅溶胶的叶面施用显著提高了谷物产量,同时降低了糙米中的As含量,在芽的细胞壁上诱导了更多的As结合,降低了根中的电解质渗漏量和MDA含量,并增加了含As的水稻幼苗根部抗氧化酶(SOD、POD、CAT、抗坏血酸过氧化物酶)的活性,进而减轻水稻中As的毒性和积累。钢渣已被广泛用作改良剂和硅肥,以减轻土壤中重金属的迁移率和生物利用度。钢渣的施用一定程度上可以降低土壤酸度,提高植物对Si的利用率,促进植株生长,并抑制Cd在土壤-植物系统中向籽粒的运输。Ning等<sup>[81]</sup>研究表明,施用矿渣可以提高土壤pH和植株有效硅含量,并降低金属的生物利用度,且粉状矿渣比粒状矿渣更有效。施用粉状矿渣时,土壤中酸可提取态Cd含量显著降低,水稻组织中Cd、Cu和Zn

含量分别降低 82.6% ~ 92.9%、88.4% ~ 95.6% 和 67.4% ~ 81.4%；另外，1% 粉状炉渣会显著促进水稻的生长，而 3% 粉状炉渣会限制水稻的生长。同时，Ning 等<sup>[82]</sup>研究发现，当有效硅 (SiO<sub>2</sub>) 施量不低于 1600 mg/kg 时，在土壤中未发现 Cd 和 Pb 的大量积累；相反，可交换态 Cd 显著下降，且水稻籽粒中的 Cd 含量也显著降低。Ji 等<sup>[83]</sup>研究了不同类型的富硅土壤改良剂（矿渣、地面矿渣和硅藻土）和肥料（活性矿渣、地面活性矿渣和商业化硅肥）对长期 Cd 污染稻田水稻分蘖期重金属的耐受性，结果表明富硅物质将水稻生物量提高了 15.5%，使叶片总 Cd 量降低了 8.5% ~ 21.9%，且以商业硅肥效果最明显。

## 2 结论与展望

基于现有研究结果，增施硅肥具有提高植株的耐盐胁迫、耐寒胁迫、耐重金属胁迫、抗低温、抗病害等能力。此外，不同硅肥的调控效果不同，而且配施其他肥料或者农艺措施等效果更佳。虽然，硅肥的利用研究在很多方面已经取得了大量成果，但是仍有以下一些问题需要深入研究。

(1) 硅肥的一些相关机理研究。目前已有的硅肥研究中，更多的是偏向于实际应用，缺乏机理研究。例如，硅元素与其他矿质元素的互相作用机理和硅在植物体内的循环与转化机理，以及硅提高植株抗逆性能的机理等，尚不完全清楚。

(2) 硅肥与非常规水资源安全利用的耦合研究。硅肥可以提高植株的耐盐性和缓解重金属的毒害作用，而非常规水资源（微咸水、再生水、养殖废水、雨水等）中，微咸水灌溉会引发土壤次生盐渍化的风险，再生水中的重金属存在植株富集的危害，如何利用硅肥的特性来解决微咸水灌溉和再生水灌溉及其二者耦合灌溉的问题，对于非常规水资源的安全利用具有重要的参考价值。

(3) 对纳米硅材料在植物体内的运输、积累及其对植物抗逆性能的作用机理研究。纳米技术是一个有前途的跨学科研究领域，为医学、制药、电子和农业等多个领域开辟了道路。硅纳米技术有可能改变农业和植物生物技术等各个领域中使用的现有技术。硅纳米粒子介导的生物分子靶向将有助于开发新的抵抗各种生物和非生物胁迫的硅肥。这些纳米硅肥可以在不损害自然的前提下，为各种化肥提供绿色环保的替代品。

(4) 硅肥对产品品质提升、改善的研究。当前，随着经济和生活水平的不断提高，人们对农作物的品质和安全愈加重视。在提高植株抗逆性能保障稳产或不显著减产的基础上，如何提升果实品质愈来愈受到青睐。目前，总体上硅肥研究多侧重于提高逆境下的稳产增产，改善产品品质的研究相对较少。因此，弄清楚硅肥对农作物品质的提升、改善机理，筛选出不同作物适宜的低成本硅肥具有重要的现实意义。

## 参考文献：

- [1] Basile-Doelsch I. Si stable isotopes in the Earth's surface: A review [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2005, 88: 252-256.
- [2] Meunier J D, Guntzer F, Kirman S, et al. Terrestrial plant-Si and environmental changes [J]. *Mineralogical Magazine*, 2008, 72 (1): 263-267.
- [3] Tubana B S, Babu T, Datnoff L E. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: History and future perspectives [J]. *Soil Science*, 2016, 181 (9/10): 1-19.
- [4] Olga W, Sanaz S, Jordan M C C, et al. Potential of silicon amendment for improved wheat production [J]. *Plants*, 2018, 7 (2): e7020026.
- [5] Agostinho F B, Tubana B S, Martins M S, et al. Effect of different silicon sources on yield and silicon uptake of rice grown under varying phosphorus rates [J]. *Plants*, 2017, 6 (3): e6030035.
- [6] Ashfaq F, Inam A, Inam A, et al. Response of silicon on metal accumulation, photosynthetic inhibition and oxidative stress in chromium-induced mustard (*Brassica juncea* L.) [J]. *South African Journal of Botany*, 2017, 111: 153-160.
- [7] Maria I M, Miriam B, Bikash B, et al. Silicon and nitrate differentially modulate the symbiotic performances of healthy and virus-infected *Bradyrhizobium*-nodulated cowpea (*Vigna unguiculata*), yardlong bean (*V. unguiculata* subsp. *sesquipedalis*) and mung bean (*V. radiata*) [J]. *Plants*, 2017, 6 (4): e6030040.
- [8] James V, Michael W, Rebecca P, et al. Integrating soil silicon amendment into management programs for insect pests of drill-seeded rice [J]. *Plants*, 2017, 6 (3): e6030033.
- [9] Struyf E, Conley D J. Silica: an essential nutrient in wetland biogeochemistry [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7: 88-94.
- [10] Jesus L R, Batista B L, Lobato A K D. Silicon reduces aluminum accumulation and mitigates toxic effects in cowpea plants [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2017, 39 (6): e138.
- [11] Parr J F, Sullivan L A. Phytolith occluded carbon and silica variability in wheat cultivars [J]. *Plant & Soil*, 2011, 342 (1-2): 165-171.

- [12] Li Z M, Song Z L, Li B L. The production and accumulation of phytolith-occluded carbon in Baiyangdian reed wetland of China [J]. *Applied Geochemistry*, 2013, 37: 117-124.
- [13] Song Z L, Wang H L, Strong P J, et al. Phytolith carbon sequestration in China's croplands [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 53: 10-15.
- [14] Song Z L, Mcgrouter K, Wang H L. Occurrence, turnover and carbon sequestration potential of phytoliths in terrestrial ecosystems [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 158: 19-30.
- [15] Song A, Li P, Li Z J, et al. The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice [J]. *Plant and Soil*, 2011, 344: 319-333.
- [16] Rizwan M, Meunier J D, Davidian J C, et al. Silicon alleviates Cd stress of wheat seedlings (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio) grown in hydroponics [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, 23: 1414-1427.
- [17] 戴青云, 刘代欢, 王德新, 等. 硅对水稻生长的影响及其缓解镉毒害机理研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(5): 86-92.
- [18] 陈海燕. 外源硅对低温胁迫下苗期水稻生理生化特性的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [19] 李鑫. 低温胁迫下硅对水稻叶片生理特性及土壤硅素形态的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- [20] 兰倩. 低温胁迫下硅对土壤养分有效性和水稻养分吸收的影响 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [21] Qian Z Z, Zhuang S Y, Li Q, et al. Soil silicon amendment increases phyllostachys praecox cold tolerance in a pot experiment [J]. *Forests*, 2019, 10 (5): f10050405.
- [22] Yoshii H. Studies on the nature of rice blast resistance [J]. *The Phytopathological Society of Japan*, 1941, 11: 81-88.
- [23] 张国良, 戴其根, 张洪程. 施硅增强水稻对纹枯病的抗性 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, 32 (5): 600-606.
- [24] 杨艳芳, 梁永超, 娄运生, 等. 硅对小麦过氧化物酶、超氧化物歧化酶和木质素的影响及与抗白粉病的关系 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36 (7): 813-817.
- [25] 王肇庆, 尹淑霞. 外施硅肥与灌溉方式对草地早熟禾白粉病病情的影响 [J]. *中国农学通报*, 2014, 30 (10): 316-320.
- [26] 万跃明, 王美玲, 严宠红, 等. 糯稻抗病能力、产量及经济效益对硅肥的响应特征 [J]. *广东农业科学*, 2019, 46(8): 65-70.
- [27] 鄢建宾, 余忠建, 鄢庆新. 不同单体微量元素肥料在水稻上的应用效果 [J]. *现代化农业*, 2007 (8): 16-17.
- [28] 张舒, 胡时友, 郑在武, 等. 不同硅肥施用量对水稻纹枯病发生及产量的影响 [J]. *江西农业学报*, 2019, 31 (10): 99-101.
- [29] 任海, 付立东, 王宇, 等. 硅肥与基本苗配置对水稻生长发育、产量及品质的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019 (1): 108-116.
- [30] 方至萍. 硅对长江中下游双季稻区化肥农药协同增效减施技术的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [31] 张佑宏, 张国斌, 王治虎, 等. 施用硅肥锌肥作基肥对稻瘟病发生的影响 [J]. *中国农学通报*, 2018, 34 (8): 90-94.
- [32] 杨克泽, 马金慧, 吴之涛, 等. 硅肥与18%吡唑醚菌酯SC混喷对玉米茎基腐病及产量的影响 [J]. *农药*, 2019, 58 (7): 527-531.
- [33] Keeping M G, Meyer J H. Silicon-mediated resistance of sugarcane to *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae): effects of silicon source and cultivar [J]. *Journal of Applied Entomology*, 2006, 130 (8): 410-420.
- [34] 郭玉蓉, 陈德蓉, 毕阳, 等. 硅化物处理对甜瓜白粉病的抑制效果 [J]. *果树学报*, 2005, 22 (1): 35-39.
- [35] 魏国强, 朱祝军, 钱琼秋, 等. 硅对黄瓜白粉病抗性的影响及其生理机制 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10 (2): 202-205.
- [36] Wang M, Wang J J, Tafti N D, et al. Effect of alkali-enhanced biochar on silicon uptake and suppression of gray leaf spot development in perennial ryegrass [J]. *Crop Protection*, 2019, 119: 9-16.
- [37] Horgan F G, Palenzuela A N, Stuart A M, et al. Effects of silicon soil amendments and nitrogen fertilizer on apple snail (*Ampullariidae*) damage to rice seedlings [J]. *Crop Protection*, 2017, 91: 123-131.
- [38] Yeo A R, Flowers S A, Rao G, et al. Silicon reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in saline conditions and this is accounted for by a reduction in the transpirational bypass flow [J]. *Plant, Cell & Environment*, 1999, 22: 559-565.
- [39] Gong H J, Randall D P, Flowers T J. Silicon deposition in the root reduces sodium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by reducing bypass flow [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2006, 29: 1970-1979.
- [40] Xie Z M, Song R, Shao H B, et al. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils [J]. *the Scientific World Journal*, 2015, 2015: 245072.
- [41] 贺月. 硅对桃苗盐胁迫的缓解作用及桃园施硅效果评价 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [42] Kumar V, Kumar P, Khan A. Optimization of PGPR and silicon fertilization using response surface methodology for enhanced growth, yield and biochemical parameters of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under saline stress [J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 23: e101463.
- [43] 顾跃, 赵云, 姬承东. 硅肥对盐胁迫下狗牙根生理生化特征的影响 [J]. *中国草地学报*, 2019, 41 (3): 30-37.
- [44] Kalteh M, Zarrin T A, Shahram A, et al. Effect of silica nanoparticles on Basil (*Ocimum basilicum*) under salinity stress [J]. *Journal of Chemical Health Risks*, 2014, 4 (3): 49-55.
- [45] 朱瑾. 有机硅提高草地早熟禾苗期耐水分胁迫的效应研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [46] 龚束芳, 刘阳, 速馨逸, 等. 纳米硅肥对远东芨芨草幼苗模拟抗旱的影响 [J]. *草业科学*, 2018, 35 (12): 2924-2930.

- [47] 吴森, 刘信宝, 丁立人, 等. PEG 模拟干旱胁迫下硅对紫花苜蓿萌发及生理特性的影响 [J]. 草地学报, 2017, 25(6): 1258–1264.
- [48] Eneji A E, Inanaga S, Muranaka S, et al. Growth and nutrient use in four grasses under drought stress as mediated by silicon fertilizers [J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(2): 355–365.
- [49] 林少雯, 刘树堂, 隋凯强, 等. 水分胁迫下硅素对玉米苗期生理生化性状的影响 [J]. 华北农学报, 2018, 33(1): 160–167.
- [50] 郑杰伟. 硅与 Cd ( II ) 和细胞壁组分相互作用的模拟研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [51] 王昊, 张悦, 王欣, 等. 硅酸盐调控抑制水稻对富硒水稻土中 Cd 吸收 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 225–233.
- [52] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As–Cd 生物有效性及稻米累积阻控 [J]. 环境科学, 2018, 39(2): 944–952.
- [53] Neumann D, Nieden U Z, Schwieger W, et al. Heavy metal tolerance of *Minuartia verna* [J]. Journal of Plant Physiology, 1997, 151(1): 101–108.
- [54] Savant N K, Korndrfer G H, Datnoff L E, et al. Silicon nutrition and sugarcane production: A review [J]. Journal of Plant Nutrition, 1999, 22(12): 1853–1903.
- [55] 顾明华, 黎晓峰. 硅对减轻水稻的铝胁迫效应及其机理研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 360–366.
- [56] 郭俊霞, 吴萍, 李青苗, 等. 生石灰和硅肥处理对川芎生长发育的影响及其栽培土壤、植株的降镉效应 [J]. 贵州农业科学, 2019, 47(5): 20–23.
- [57] 梅鑫. 硅对大蒜铅镉胁迫的缓解效应 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [58] Wang S, Wang F, Gao S. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(4): 2837–2845.
- [59] 陈蕊. 硅离子对水稻镉吸收转运特性的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [60] Zhang P B, Zhao D D, Liu Y Q, et al. Cadmium phytoextraction from contaminated paddy soil as influenced by EDTA and Si fertilizer [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(23): 23638–23644.
- [61] 李祥, 张昊, 陈楠, 等. 不同土壤改良剂对镉污染稻田安全生产的影响 [J]. 安徽农业科学, 2020, 48(5): 71–74.
- [62] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 施硅对镉胁迫下水稻镉吸收和转运的调控效应 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1049–1056.
- [63] 魏晓, 张鹏博, 赵丹丹, 等. 水稻土施硅对土壤–水稻系统中镉的降低效果 [J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1600–1606.
- [64] 付洁. 施硅量对水稻吸收、转运和累积种的影响研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- [65] Yu T H, Peng Y Y, Lin C X, et al. Application of iron and silicon fertilizers reduces arsenic accumulation by two *Ipomoea aquatica* varieties [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(11): 2613–2619.
- [66] Lee C H, Huang H H, Syu C H, et al. Increase of As release and phytotoxicity to rice seedlings in As-contaminated paddy soils by Si fertilizer application [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 276: 253–261.
- [67] Li L F, Ai S Y, Li Y C, et al. Exogenous silicon mediates alleviation of cadmium stress by promoting photosynthetic activity and activities of antioxidative enzymes in rice [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2018, 37(2): 602–611.
- [68] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants [J]. Trends in Plant Science, 2006, 11(8): 392–397.
- [69] 王显, 张国良, 霍中洋, 等. 氮硅配施对水稻叶片光合作用和氮代谢酶活性的影响 [J]. 扬州大学学报 (农业与生命科学版), 2010, 31(3): 44–49.
- [70] Gao M, Zhou J, Liu H L, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. Science of the Total Environment, 2018, 631–632: 1100–1108.
- [71] 胡瑞芝, 方水娇, 陈桂秋. 硅对杂交水稻生理指标及产量的影响 [J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2001, 27(5): 335–338.
- [72] Rehman M Z U, Rizwan M, Rauf A, et al. Split application of silicon in cadmium (Cd) spiked alkaline soil plays a vital role in decreasing Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) grains [J]. Chemosphere, 2019, 226: 454–462.
- [73] 张世杰, 孙洪欣, 薛培英, 等. 叶面施硅时期对冬小麦镉铅砷累积的阻控效应研究 [J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(3): 1–6, 36.
- [74] 李嘉琳, 梁金明, 陈波华, 等. 叶面肥与不同类型钝化材料组合施用对水稻累积镉效应研究 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10): 2338–2345.
- [75] Liu C P, Wei L, Zhang S R, et al. Effects of nanoscale silica sol foliar application on arsenic uptake, distribution and oxidative damage defense in rice (*Oryza sativa* L.) under arsenic stress [J]. RSC Advances, 2014, 4(100): 57227–57234.
- [76] Pan D D, Liu C P, Yu H Y, et al. A paddy field study of arsenic and cadmium pollution control by using iron-modified biochar and silica sol together [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(24): 24979–24987.
- [77] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 调理剂及农艺措施对污染稻田中水稻吸收镉的影响 [J]. 中国农业科学, 2020, 53(3): 574–584.
- [78] 邓晓霞, 黎其万, 李茂萱, 等. 土壤调理剂与硅肥配施对镉污染土壤的改良效果及水稻吸收镉的影响 [J]. 西南农业学报, 2018, 31(6): 1221–1226.
- [79] Wang H Y, Wen S L, Chen P, et al. Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in

- contaminated fields [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (4): 3781–3788.
- [ 80 ] Huang H L, Riawan M, Li M, et al. Comparative efficacy of organic and inorganic silicon fertilizers on antioxidant response, Cd/Pb accumulation and health risk assessment in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Environmental Pollution, 2019, 255 (Part1): 113146.
- [ 81 ] Ning D F, Liang Y C, Song A L, et al. In situ stabilization of heavy metals in multiple-metal contaminated paddy soil using different steel slag-based silicon fertilizer [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23 (23): 23638–23647.
- [ 82 ] Ning D F, Liang Y C, Liu Z D, et al. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil [J]. Plos One, 2016, 11 (12): e0168163.
- [ 83 ] Ji X H, Liu S H, Juan H, et al. Effect of silicon fertilizers on cadmium in rice (*Oryza sativa*) tissue at tillering stage [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2017, 24 (11): 1–9.

#### Advances in the regulation effects of silicon fertilizer under adversity stress

LIU Chun-cheng<sup>1, 2, 3, 4</sup>, LI Zhong-yang<sup>1, 3, 4</sup>, HU Chao<sup>1, 3, 4</sup>, ZENG Zhi<sup>5</sup>, WU Hai-qing<sup>1, 3, 4</sup>, CUI Bing-jian<sup>1, 3, 4</sup>, FAN Xiang-yang<sup>1, 3, 4</sup>, LIU Yuan<sup>1, 3, 4</sup>, MA Huan-huan<sup>1, 2</sup>, MA Tian<sup>1, 2</sup>, CUI Er-ping<sup>1, 3, 4</sup>, FAN Tao<sup>1, 3, 4</sup>, GAO Feng<sup>1, 3, 4\*</sup> (1. Institute of Farmland and Irrigation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang Henan 453002; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3. Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City of Henan Province of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang Henan 453000; 4. Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang Henan 453002; 5. Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Nanchang Jiangxi 330000)

**Abstract:** Silicon (Si) is considered to be the fourth largest element after N, P, and K. Silicon fertilizer is beneficial to promote the growth of crops and improve soil environment. In order to provide a certain reference for the research on the utilization of Si fertilizer, through the method of literature review, under the conditions of adverse environment, the regulation effects on low temperature stress and water stress, the control effect on plant diseases, and the mitigation effect on heavy metal stress of Si fertilizer are elaborated. Based on the existing research results, increasing the application of Si fertilizer can improve plants' ability of resistance to salt stress, heavy metal stress, low temperature stress and disease. Further more, different types of Si fertilizer have different regulation effects, and the better effects could be gained by coupling other fertilizers or agronomic measures. Finally, some suggestions about Si fertilizer utilization are put forward in the future research: (1) strengthen the research on the related mechanism of Si fertilizer, such as how silicon improves the soil microenvironment, or the mechanism of the transportation and accumulation of the nano Si material in plants and its effect on plants; (2) carry out the coupling research on the safe utilization of Si fertilizer and unconventional water resources, for example, how to use the characteristics of Si fertilizer to solve the problems of brackish water irrigation and reclaimed water irrigation as well as their coupling irrigation; (3) strengthen Si fertilizer research on the improvement effect of product quality.

**Key words:** silicon fertilizer; salt stress; heavy metal stress; soil; water stress; yield; quality