

Mechanisms of Silicon Improving Plant Heavy Metal Tolerance

Jinguang Liu, Ming Li, Hanfei Cheng

Huatian Nanjing Engineering & Technology Corporation, MCC, Nanjing Jiangsu
Email: liujinguang@mcc-ht.com

Received: Mar. 17th, 2019; accepted: Apr. 1st, 2019; published: Apr. 8th, 2019

Abstract

Silicon has been considered to alleviate heavy metal toxicity in plants, and has a good application prospect in the remediation of heavy metal contaminated farmland soil. This review introduces the external and internal mechanisms involved in alleviation of heavy metal toxicity in plants, including by increasing soil pH, promoting co-deposition of heavy metal and Si, inhibiting heavy metal uptake and translocation, modifying heavy metal distribution and stimulation antioxidant enzyme system in plants. The shortcomings and the future research trends in this field are also addressed.

Keywords

Silicon, Heavy Metal, Soil

硅提高植物重金属耐性的作用机理

刘金光, 李明, 程寒飞

中冶华天南京工程技术有限公司, 江苏 南京
Email: liujinguang@mcc-ht.com

收稿日期: 2019年3月17日; 录用日期: 2019年4月1日; 发布日期: 2019年4月8日

摘要

硅(Si)能够缓解重金属对植物的毒害作用, 在农田重金属污染土壤的治理中具有良好的应用前景。本文从植物体外和体内两个角度系统介绍了Si缓解植物重金属毒害的作用机理, 包括提高土壤pH、促进重金属与Si共沉积、抑制重金属的吸收和向地上部的转运、改变重金属在植物体内的分布、刺激植物的抗氧化系统。针对研究现状提出存在的不足, 并对未来研究进行展望。

关键词

硅, 重金属, 土壤

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

《全国土壤污染状况调查公报》(2014 年)表明,我国土壤环境正面临着严重的重金属污染;其中,镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、锌(Zn)和镍(Ni)的土壤调查点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%和 4.8% [1]。土壤重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性的特点,土壤重金属污染会降低作物的产量与品质,并通过食物链进入人体,严重危害身体健康[2]。鉴于重金属污染现状及其危害,有必要采取有效方法治理土壤重金属污染。

研究发现, Si 可以缓解重金属对植株生长的抑制和毒害作用[3] [4] [5],以硅酸盐为主要成分的硅肥作为土壤改良剂/固化剂应用于土壤重金属污染治理中,在降低重金属植物有效性的同时,可以有效提高作物的产量和品质[6] [7]。本文结合国内外的最新研究进展,对 Si 提高植物重金属耐性机理进行了较为系统的介绍,以期 Si 治理土壤重金属污染技术的发展提供参考价值。

2. 土壤中 Si 的存在形态及在植物中分布

硅(Si)在自然界土壤中含量极其丰富(约占 31%),主要以 SiO_2 的形式存在。单硅酸 $[\text{Si}(\text{OH})_4]$ 是植物能够直接吸收利用的主要化学形式,其在土壤溶液中的浓度约为 0.1~0.6 mmol/L [8] [9]。植物体内普遍含有 Si,但是积累水平差异很大。以水稻为代表的水生禾本科植物组织中 Si 含量最高,以燕麦、大麦和小麦为代表的旱地禾本科植物次之,以豆科植物为代表的双子叶植物最低[9] [10]。同一植物的不同部位 Si 的含量也有很大差异。以水稻为例,稻节中含量最高(350 g/kg),其次是稻秆(230 g/kg)和米糠(50 g/kg),而粳米中 Si 的含量最低(0.5 g/kg) [11]。

3. Si 增强植物重金属耐性的机制

1957 年 Williams 和 Vlamis 发现在水培条件下加入少量的 Si 即能缓解 Mn 对大麦幼苗的毒害作用。随后大量的实验表明 Si 能够明显改善 Cd、Zn、Cr、Cu 等重金属对植物的毒害作用[3]。目前, Si 增强植物重金属耐性的机制主要从植物体外和体内两个角度进行揭示。

3.1. 体外机制

在土壤中, Si 主要通过以下 2 种途径降低重金属对植物的毒害作用: 1) 富硅材料多为强碱性物质,施用后可以显著提高土壤的 pH 值[12]; 2) Si 与重金属结合或吸附形成沉积物[13]。李淑仪等[14]通过小白菜(*Brassica chinensis*)盆栽实验,发现 Si 处理显著升高土壤 pH,降低交换态 Cr 所占比例,提高沉淀态和残渣态 Cr 所占比例,而叶片中 Cr 的含量显著降低。魏晓等[13]研究发现单硅酸可以与土壤 Cd 形成不溶性硅酸盐,土壤 Cd 也可以被富硅物质吸附,从而降低 Cd 的迁移。研究还发现, Si 处理玉米后酚类物质的分泌量是未进行 Si 处理植株的十五倍以上。表明 Si 处理可以通过刺激植物根系酚类物质的合成与分泌,酚类物质对金属离子具有很强的螯合能力,从而形成酚类-重金属复合物[3] [15]。

3.2. 体内机制

Si 不仅在外环境中作用, 进入植物体内后也发挥着重要作用。目前, Si 缓解重金属对植物毒害的内部机制主要有以下 3 种模式: 1) 抑制重金属的吸收和向地上部的转运[16] [17] [18]; 2) 改变重金属在植物体内的分布[13] [19] [20] [21] [22]; 3) 刺激植物的抗氧化系统[4] [23] [24] [25]。

3.2.1. 抑制植物对重金属吸收与向地上部的转运

大量水培和盆栽试验表明, 施用 Si 可以显著降低植物重金属的吸收及向地上部的转运。Gu 等[16]研究了 Si 处理对 Zn 胁迫下水稻幼苗 Zn 的吸收和分布的影响, 结果表明 Si 处理幼苗生物量显著高于对照, 而且幼苗根、茎 + 叶鞘和叶片中的 Cd 浓度均随着 Si 添加浓度的升高而逐渐显著降低。Rizwan 等[17]研究发现 Si 处理可以通过增加 Cd 在小麦(*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.)根中的累积和降低向地上部的转运缓解 Cd 对小麦的毒害作用。Guo 等[18]通过施用外源 Si 降低了水稻 Cd 的吸收尤其向地上部的转运, 从而缓解 Cd 的毒害作用。为探明 Si 肥对 Cd 污染稻田降低稻米 Cd 的作用机理, 彭华等[26]研究了水稻不同生育期(基肥、分蘖期和孕穗期)施 Si 对水稻 Cd 吸收积累的影响, 发现 Cd 污染稻田基施 Si 肥能够显著增加水稻产量, 降低了 Cd 由茎秆向叶片和稻壳的转运, 从而降低稻米 Cd 的浓度。因此, 施硅可以通过抑制植物对重金属吸收与向地上部的转运, 缓解重金属的毒害作用。

3.2.2. 改变重金属在植物体内的分布

Iwasaki 等[27]对 Mn 敏感植物豇豆(*Vigna unguiculata* [L.] Walp.)用 1.44 mmol/L Si 和 50 μ mol/L Mn 进行处理, Mn 在散叶中浓度没有降低而 Mn 的毒害症状却完全消除。Rogalla 和 Römheld [19]进一步研究发现 Si 处理黄瓜幼苗叶片共质体中 Mn 所占比例不足 10%, 超过 90%的 Mn 吸附在细胞壁上, 而 Mn 在单 Mn 处理植株叶片共质体和细胞壁中的量约各占 50%。在以秋茄树(*Kandelia obovata* (S., L.) Yong)为研究对象的研究中, Ye 等[20]发现 Si 处理提高了质外体 Cd 所占比例。据课题组前期研究结果, 施用 Si 降低了 Cd 超累积植物龙葵幼苗对 Cd 的吸收和地上部累积, 同时降低了新叶和老叶中 Cd 浓度及功能叶中较高毒性形态 Cd (乙醇提取态、水提取态和 NaCl 溶液提取态)所占比例[28]。

Gu 等[16]研究发现 Si 处理的水稻组织中 Zn 生物活性降低, Zn 和 Si 共同沉积在代谢不活跃的细胞壁部位。Zhang 等[22]进一步从 Cd/Si 联合处理的水稻中提取植物岩, 采用能量弥散 X 线微量分析法分析发现 Si、Cd 同时在植物岩边缘和中心累积。在 Cd 胁迫下, Si 处理的唐菖蒲(*Gladiolus grandiflora* L.)植株中酚类物质和类黄酮类物质含量比未进行 Si 处理植株分别提高了 15%和 24% [29]。因此, 重金属离子与 Si 络合或形成共沉淀吸附在细胞壁或进入液泡, 可以有效降低重金属的生物活性, 从而缓解细胞中叶绿体等超微结构受到的伤害[18]。

3.2.3. 刺激植物机体的抗氧化系统

重金属胁迫可导致植物体内产生和累积大量活性自由基, 自由基可与细胞内包括蛋白质、核酸和脂质等生物大分子反应, 造成氧化伤害[30] [31]。Si 进入植物体内后大部分 Si 沉积下来, 但部分可溶性 Si 可能参与了植物体内相关生理反应过程, 如通过影响抗氧化系统增强植物应对逆境的能力。

Si 对植物抗氧化酶的影响因植物类型、重金属种类和浓度、处理时间而有差异。与单 Cd 处理相比, Si 处理可以显著升高 Cd 敏感基因型和耐性基因型小青菜根的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶活性[32]。Feng 等在 Mn 存在的条件下研究外源性 Si 对黄瓜苗叶绿体内抗氧化酶活性的影响, 结果表明施用 Si 显著提高黄瓜叶绿体内与抗坏血酸-谷胱甘肽循环相关的酶的活性, 包括抗坏血酸过氧化物酶、脱氢抗坏血酸还原酶和谷胱甘肽还原酶。酶活性的提高降低了由 Mn 诱导的叶绿体内 H₂O₂ 累积和脂质过氧化损伤, 从而促进植株生长[33]。在基因水平, Si 进一步升高了 Cu 胁迫下拟南芥叶片中

Cu/Zn-SOD 和金属硫蛋白基因的表达[24]。

此外, Si 还可以通过升高抗氧化物的浓度以抵御重金属诱发的氧化胁迫。Li 等[34]曾提出 Si 增强水稻对高 Mn 胁迫耐性的机制主要是影响了非酶促抗氧化物(谷胱甘肽、非蛋白巯基和抗坏血酸等)。Song 等[32]研究发现,与对照相比,Cd 敏感基因型和耐性基因型小青菜施 Si 后进一步升高了谷胱甘肽的浓度。此外, Si 对提高 Cd 耐性基因型小青菜抗坏血的浓度更有效:施用 Si 使得耐性基因型小青菜抗坏血的浓度分别比 Cd 单独处理升高 1.4 和 1.5 倍,而敏感基因型仅升高 1.1 和 1.2 倍。

4. 研究展望

近年来, Si 缓解植物重金属毒害机制的研究有了较大的进步,但同时还存在诸多不足,应开展更深入的研究与探讨。目前研究多集中于室内单一重金属污染的研究,而对复合重金属污染的研究较少,尤其对土壤重金属污染治理的应用研究较少。农艺调控措施是中轻度重金属污染农田土壤安全利用的重要技术途径,应加大联合相关农艺措施修复土壤重金属污染技术的应用研究。此外,土壤中影响 Si 作用效果的因素尚不清楚,施 Si 对土壤微生物群落影响的研究也鲜有报道。

基金项目

本研究由江苏省自然科学基金资助项目(BK20160155)资助。

参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm, 2014-04-17.
- [2] Liu, J., Qu, W. and Kadiiska, M.B. (2009) Role of Oxidative Stress in Cadmium Toxicity and Carcinogenesis. *Toxicology and Applied Pharmacology*, **238**, 209-214. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2009.01.029>
- [3] Liang, Y., Sun, W., Zhu, Y.G., et al. (2007) Mechanisms of Silicon-Mediated Alleviation of Abiotic Stresses in Higher Plants: A Review. *Environmental Pollution*, **147**, 422-428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>
- [4] Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Anee, T.I., et al. (2017) Exogenous Silicon Attenuates Cadmium-Induced Oxidative Stress in *Brassica napus* L. by Modulating AsA-GSH Pathway and Glyoxalase System. *Frontiers in Plant Science*, **8**, 1061. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01061>
- [5] Gao, M., Zhou, J., Liu, H., et al. (2018) Foliar Spraying with Silicon and Selenium Reduces Cadmium Uptake and Mitigates Cadmium Toxicity in Rice. *Science of the Total Environment*, **631-632**, 1100-1108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.047>
- [6] 武成辉, 李亮, 雷畅, 等. 硅酸盐钝化剂在土壤重金属污染修复中的研究与应用[J]. 土壤, 2017, 49(3): 446-452.
- [7] 李园星露, 孙健. 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(2): 944-952.
- [8] Sauer, D., Saccone, L., Conley, D.J., et al. (2006) Review of Methodologies for Extracting Plant-Available and Amorphous Si from Soils and Aquatic Sediments. *Biogeochemistry*, **80**, 89-108. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-5879-3>
- [9] Epstein, E. (1994) The Anomaly of Silicon in Plant Biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **91**, 11-17. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.1.11>
- [10] 邹邦基. 植物的硅素营养[J]. 土壤通报, 1980, 11(3): 44-45.
- [11] Currie, H.A. and Perry, C.C. (2007) Silica in Plants: Biological, Biochemical and Chemical Studies. *Annals of Botany*, **100**, 1383-1389. <https://doi.org/10.1093/aob/mcm247>
- [12] Zama, E.F., Reid, B.J., Sun, G.X., et al. (2018) Silicon (Si) Biochar for the Mitigation of Arsenic (As) Bioaccumulation in Spinach (*Spinacia oleracea*) and Improvement in the Plant Growth. *Journal of Cleaner Production*, **189**, S0959652618310758. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.056>
- [13] 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.
- [14] 李淑仪, 林翠兰, 许建光, 等. 施硅对污染土壤中铬形态及其生物有效性的影响[J]. 生态环境学报, 2008, 17(1): 227-231.

- [15] Richmond, K.E. and Sussman, M. (2003) Got Silicon? The Non-Essential Beneficial Plant Nutrient. *Current Opinion in Plant Biology*, **6**, 268-272. [https://doi.org/10.1016/S1369-5266\(03\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S1369-5266(03)00041-4)
- [16] Gu, H.H., Zhan, S.S., Wang, S.Z., *et al.* (2012) Silicon-Mediated Amelioration of Zinc Toxicity in Rice (*Oryza sativa* L.) Seedlings. *Plant & Soil*, **350**, 193-204. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0894-8>
- [17] Rizwan, M., Meunier, J.D., Miche, H., *et al.* (2012) Effect of Silicon on Reducing Cadmium Toxicity in Durum Wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) Grown in a Soil with Aged Contamination. *Journal of Hazardous Materials*, **209-210**, 326-334.
- [18] Lei, G., Chen, A., Na, H., *et al.* (2017) Exogenous Silicon Alleviates Cadmium Toxicity in Rice Seedlings in Relation to Cd Distribution and Ultrastructure Changes. *Journal of Soils & Sediments*, **18**, 1691-1700.
- [19] Rogalla, H. and Romheld, V. (2010) Role of Leaf Apoplast in Silicon-Mediated Manganese Tolerance of *Cucumis sativus* L. *Plant Cell & Environment*, **25**, 549-555.
- [20] Ye, J., Yan, C., Liu, J., *et al.* (2012) Effects of Silicon on the Distribution of Cadmium Compartmentation in Root Tips of *Kandelia obovata* (S., L.) Yong. *Environmental Pollution*, **162**, 369-373. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.002>
- [21] Hossain, M.M., Ma, K., Mn, H., *et al.* (2018) Silicon Alleviates Arsenic-Induced Toxicity in Wheat through Vacuolar Sequestration and ROS Scavenging. *International Journal of Phytoremediation*, **20**, 796-804. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1425669>
- [22] Zhang, C., Wang, L., Nie, Q., *et al.* (2008) Long-Term Effects of Exogenous Silicon on Cadmium Translocation and Toxicity in Rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental & Experimental Botany*, **62**, 300-307. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.10.024>
- [23] Song, A., Li, P., Li, Z., *et al.* (2011) The Alleviation of Zinc Toxicity by Silicon Is Related to Zinc Transport and Antioxidative Reactions in Rice. *Plant Soil*, **344**, 319-333. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0749-3>
- [24] Khandekar, S. and Leisner, S. (2011) Soluble Silicon Modulates Expression of *Arabidopsis thaliana* Genes Involved in Copper Stress. *Journal of Plant Physiology*, **168**, 699-705. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.09.009>
- [25] Pereira, A.S., Dorneles, A.O.S., Bernardy, K., *et al.* (2018) Selenium and Silicon Reduce Cadmium Uptake and Mitigate Cadmium Toxicity in *Pfaffia glomerata* (Spreng.) Pedersen Plants by Activation Antioxidant Enzyme System. *Environmental Science & Pollution Research*, **25**, 1-11.
- [26] 彭华, 田发祥, 魏维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1027-1033.
- [27] Iwasaki, K., Maier, P., Fecht, M., *et al.* (2002) Leaf Apoplastic Silicon Enhances Manganese Tolerance of Cowpea (*Vigna unguiculata*). *Journal of Plant Physiology*, **159**, 167-173. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00691>
- [28] Liu, J., Zhang, H., Zhang, Y., *et al.* (2013) Silicon Attenuates Cadmium Toxicity in *Solanum nigrum* L. by Reducing Cadmium Uptake and Oxidative Stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, **68**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.03.018>
- [29] Zaheer, M.M., Yasin, N.A., Ahmad, S.R., *et al.* (2017) Amelioration of Cadmium Stress in Gladiolus (*Gladiolus grandiflora* L.) by Application of Potassium and Silicon. *Journal of Plant Nutrition*, **41**, 1-16.
- [30] Mittler, R. (2002) Oxidative Stress, Antioxidants and Stress Tolerance. *Trends in Plant Science*, **7**, 405-410. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)
- [31] Sharma, S.S. and Dietz, K.J. (2009) The Relationship between Metal Toxicity and Cellular Redox Imbalance. *Trends in Plant Science*, **14**, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2008.10.007>
- [32] Song, A., Li, Z., Zhang, J., *et al.* (2009) Silicon-Enhanced Resistance to Cadmium Toxicity in *Brassica chinensis* L. Is Attributed to Si-Suppressed Cadmium Uptake and Transport and Si-Enhanced Antioxidant Defense Capacity. *Journal of Hazardous Materials*, **172**, 74-83.
- [33] Feng, J.-P., Qing, H., *et al.* (2009) Effects of Exogenous Silicon on Photosynthetic Capacity and Antioxidant Enzyme Activities in Chloroplast of Cucumber Seedlings under Excess Manganese. *Agricultural Sciences in China*, **8**, 40-50. [https://doi.org/10.1016/S1671-2927\(09\)60007-9](https://doi.org/10.1016/S1671-2927(09)60007-9)
- [34] Li, P., Song, A., Li, Z., *et al.* (2011) Silicon Ameliorates Manganese Toxicity by Regulating Manganese Transport and Antioxidant Reactions in Rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Soil*, **354**, 407-419.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2164-5485，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aep@hanspub.org