

纳米硅藻土的不同应用方式对水稻生长及其抑制吸收镉的影响

裴福云^{1*}, 蒋爱云²

¹中节能铁汉生态环境股份有限公司, 广东 深圳

²黄河科技学院, 河南 郑州

收稿日期: 2022年4月9日; 录用日期: 2022年5月6日; 发布日期: 2022年5月24日

摘要

目的: 通过盆栽试验探究复混肥中添加不同量纳米硅对水稻生长的影响, 同时研究叶面喷施纳米叶面阻隔剂对水稻阻隔重金属镉的效果。基于此, 考察综合利用纳米硅的两种不同施用方法对水稻生长及阻隔镉吸收的效果。方法: 利用长沙重金属镉污染土壤种植水稻, 在水稻分蘖期、抽穗前期喷施纳米硅叶面阻隔剂。叶面阻隔剂浓度为0.1 g/L、0.5 g/L和0.8 g/L, 考察水稻籽粒中的重金属镉的含量。复混肥中添加质量比为1%的非纳米硅藻土和纳米硅藻土。与不添加硅藻土的普通复混肥对比, 利用普通种植土种植水稻, 考察水稻生长性状。在长沙重金属镉污染的农田实施试验, 综合考察叶面喷施纳米硅藻土和添加纳米硅藻土的复混肥对水稻产量和稻米中镉含量的影响。结果: 结果表明, 添加纳米硅藻土的复混肥能提高水稻植株干重, 在纳米硅藻土添加1%的情况下, 氮磷钾的利用率提供了53.80%, 植株总干重提高50.04%, 根系干重提高185%。喷施两次纳米硅藻土后, 水稻中镉含量显著($P < 0.05$)降低, 与对照相比, 浓度为0.1 g/L、0.5 g/L和0.8 g/L纳米硅藻土喷施后各处理茎叶和籽粒中镉含量分别降低了15.84%、6.93%、3.96%和53.85%、23.80%、38.47%。大田实验的结果表明, 同时施用叶面阻隔剂和含有纳米硅的复合肥与当地施用普通的复合肥相比较, 水稻精米中的镉含量降低了58.8%, 产量增加27%。结论: 从研究结果可以看出, 叶面喷施纳米硅藻土的同时施用含有纳米硅藻土的复混肥能增加水稻产量、阻隔水稻对重金属镉的吸收, 提高稻米品质。

关键词

纳米硅, 复混肥, 叶面喷施, 重金属镉, 水稻, 养分利用

Effects of Different Application Methods of Nano-Diatomite on Rice Growth and Inhibition of Cadmium Uptake

Fuyun Pei^{1*}, Aiyun Jiang²

*第一作者。

¹CECEP Tech and Ecology & Environment Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

²Huanghe Science and Technology College, Zhengzhou Henan

Received: Apr. 9th, 2022; accepted: May 6th, 2022; published: May 24th, 2022

Abstract

Objective: The pot experiment was conducted to investigate the effect of adding different amounts of nano-diatomite on the growth of rice in compound fertilizer and at the same time, the effect of foliar spraying of nano leaf barrier on the removal of heavy metal cadmium was also studied. Based on this, the effects of two different application methods of nano silicon on rice growth and cadmium absorption were investigated. **Methods:** Changsha heavy metal cadmium contaminated soil is used to plant rice, and nano silicon leaf barrier agent was sprayed at tillering stage and heading stage. The concentrations of heavy metal cadmium in rice grain were determined at 0.1 g/L, 0.5 g/L and 0.8 g/L. Compound fertilizer was added with non-nano diatomite and nano diatomite with mass ratio of 1%. Rice was grown with common soil as the comparison of soil with ordinary compound fertilizer without diatomite and then the growth characteristics of rice between the two were investigated. The effects of spraying nano diatomite and adding nano diatomite on the yield of rice and the content of cadmium in rice were investigated in the field of heavy metal cadmium pollution in Changsha. **Results:** The results showed that the dry weight of rice plant could be improved by adding nano diatomite compound fertilizer. Under the condition of adding 1% nano diatomite, the utilization rate of N, P and K was 53.80%, the total dry weight of plant increased by 50.04%, and the dry weight of root increased by 185%. After the spraying of two nanoscale diatomite, the content of cadmium in rice decreased significantly ($P < 0.05$). Compared with the ordinary experiment, the concentration of cadmium in the leaves and grains of 0.1 g/L, 0.5 g/L and 0.8 g/L nano diatomite decreased by 19.85%, 8.09%, 4.89% and 109.07%, 32.85% and 61.71% respectively. The results of the field experiment showed that the content of cadmium in rice was reduced by 58.8% and the yield increased by 27%, compared with the compound fertilizer containing the foliar barrier and the nano silicon. **Conclusion:** From the results, it can be seen that the application of nano silicon in the application of the compound fertilizer with nano silicon can increase the rice yield, block the absorption of heavy metal cadmium and improve the quality of rice.

Keywords

Nano-Diatomite, Compound Fertilizer, Foliar Spraying, Heavy Metal Cadmium, Rice, Nutrient Utilization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着矿产资源的开发利用, 促使不同类型的重金属通过不同的途径进入到环境中, 从而引起农田土壤重金属污染, 引起重金属污染从水土链向食物链延伸的现象[1]。为此需对土壤进行重金属修复。不同污染程度的重金属农田, 分别采取不同的修复措施。镉作为重点监控与污染物排放量控制的 5 种重金属之一[2], 也是超标率最高的重金属污染物。水稻是我国的主要粮食作物, 湖南广东也是水稻的主要产区

之一, 农田土壤重金属镉超标现象普遍[3]。因此, 关于如何在污染的土地上种植重金属含量安全的稻米引起了诸多的探索。

研究表明, 硅不仅对水稻有营养功能, 还能够提高水稻的抗逆性[4] [5] [6]。另外, 纳米材料粒径小, 其结构优势可直接被农作物吸收利用。因此, 如何综合利用纳米硅材料以提供水稻产量的同时阻隔重金属镉的吸收利用, 提升稻米的质量是目前研究的关键点。前期曾经对含有膨润土的复混肥促进水稻生长的影响做了深入研究, 对于硅藻土纳米材料对阻隔水稻吸收重金属方面未见报道。因此, 本研究探索纳米硅藻土叶面喷施及作为添加剂加入复混肥对水稻生长的影响及综合使用对阻隔水稻吸收重金属方面的效果, 以期对重金属污染农田的治理、提高粮食安全提供可行的技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

1) 纳米复混肥对水稻生长的影响该供试土壤本底情况为: 速效磷 0.76 g/kg, 碱解氮 1.94 g/kg、速效钾 2.06 g/kg, 有机质 0.71%、pH 值 4.06。试验作物水稻, 品种“湘早粳 32 号”。复混肥养分比例为 21-11-13。

2) 叶面喷施纳米硅阻隔剂对水稻生长的影响供试土壤为长沙重金属镉污染土壤, 重金属镉 1.25 mg/kg, 有机质 0.38%、速效磷 0.53 g/kg、碱解氮 1.69 g/kg、速效钾 3.43 g/kg。供试作物水稻, 品种“湘早粳 32 号”。试验涉及到的底肥为普通复混肥, 供试叶面喷施剂为纳米硅阻隔剂, 利用物理加工的方式得到纳米硅藻土。试验中施用复混肥养分比例为 15-15-15。

3) 大田实验该实验由湖南长沙水稻所实施。为了综合考察综合使用叶面喷施和土壤阻隔的整体效果在浏阳市永安镇水山村实施, 土壤全镉含量 0.4~0.6 mg/kg, 有效镉含量为 0.25~0.35 mg/kg, 土壤 pH 为 5.8~6.1。水稻品种为杂交晚稻品种 H 优 518。对照用肥料为市场上的复合肥, 养分比例为 20-8-12, 专用肥为添加 3% 纳米硅养分比例为 22-8-10。纳米硅同上。

2.2. 试验方法

1) 含有纳米硅的复混肥对水稻生长的影响试验采用人工盆栽移栽方式, 以不施肥、常规施肥作为对照, 纳米硅藻土的分别设 1%、3%、5%。共设 5 个处理, 每个处理重复 6 次。用土量为 5 kg/盆。试验于 2018 年 4 月 15 日播种, 5 月 15 日移栽, 每盆 2 穴, 每穴 2 株。

2) 叶面喷施纳米硅阻隔剂试验盆栽试验共设 4 个处理, 每个处理重复 3 次, 用土量为 6 kg/盆。叶面喷施剂设三个浓度。试验于 2018 年 4 月 15 日播种, 5 月 15 日移栽, 每盆 2 穴, 每穴 2 株。各处理如表 1 所示。底肥在水稻移栽前一次性施入, 叶面阻隔剂分别于分蘖期、抽穗前期, 试验用盆栽容器大小为: 直径 20~25 cm, 深度 30~35 cm, 无孔。

Table 1. Processing numbers and application rates
表 1. 叶面喷施试验各处理编号及对应的喷施用量

处理编号	材料类别	叶面喷施纳米硅藻土的量
CK	污染土壤 + 常规肥	等量清水
C1	污染土壤 + 常规肥	25 mg 纳米硅藻土, 加水稀释到 720 mL
C2	污染土壤 + 常规肥	50 mg 纳米硅藻土, 加水稀释到 720 mL
C3	污染土壤 + 常规肥	75 mg 纳米硅藻土, 加水稀释到 720 mL

3) 大田实验试验设置两个处理, 每个处理 1 个大区, 每区按梅花五点法取 5 个样品作为承诺规范。每个大区的面积为 236 m², 为防串水串肥, 区之间田埂用膜覆。处理 1: 当地专用肥+盆清水, 处理 2: 含有纳米硅藻土的复混肥(铁汉水稻专用肥)+ 喷施纳米硅藻土。复混肥的施用量 17.6 kg/区, 纳米硅藻土的喷施方法为: 分蘖期每个小区 78 g, 用 39 L 水进行喷施, 抽穗前期每个 26.52 g, 39 L 水溶解喷施。取样包括株高、总穗数、有效穗数等农艺及产量指标, 计算理论产品, 并测定精米中镉含量。

2.3. 测定项目及方法

测定项目主要包括水稻不同阶段鲜重和干重、对应的养分及土壤成分。参照《土壤农化分析》常规方法测定土壤的基本理化性质[7], 重金属有效态采用 DTPA 溶液浸提(GB/T23739-2009), 采用 HNO₃-HF-HClO₄ 消解, ICP-OES 测定重金属全量。

实验数据采用 Excel 整理、SPSS 分析。

3. 结果与讨论

3.1. 材料结构分析

为考察材料的结构形态, 通过扫描电镜观察了硅藻土和纳米硅藻土的微观结构, 从图 1(A)看出, 硅藻土是圆盘状结构, 布满小孔, 属于微米级别, 图 1(B)是加工后的纳米硅藻土, 属于纳米尺度的范畴。分别将普通硅藻土和纳米硅藻土按照 3% 的比例加入到复混肥中, 该复混肥通过高塔造粒工艺造粒得到。观察两种复混肥的表面形态, 从图 1(C)中观察到硅藻土圆盘状结构分散其中, 而添加纳米硅藻土的肥料, 如图 1(D)所示, 则没有圆盘结构。材料的表面结构直接影响其性能。

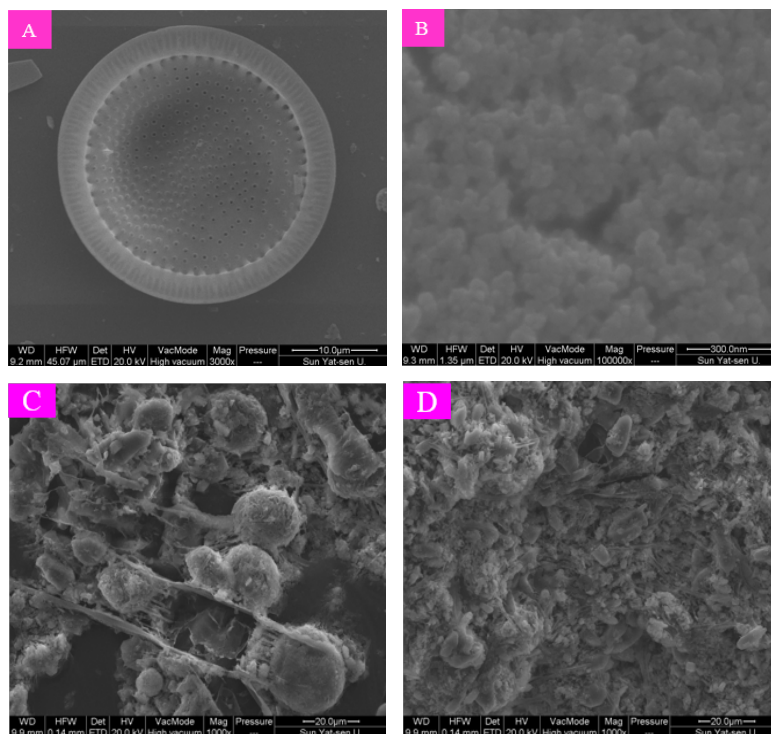


Figure 1. (A) Diatomite; (B) Nano-diatomite; (C) Compound fertilizer with diatomite; (D) Compound fertilizer with nano-diatomite

图 1. 扫描电镜照片。(A) 硅藻土; (B) 纳米硅藻土; (C) 含有硅藻土的复混肥; (D) 含有纳米硅藻土的复混肥

3.2. 添加纳米硅藻土的复混肥对水稻生长的影响

3.2.1. 纳米复混肥对水稻植株植物量的影响

利用纳米复混肥对水稻进行肥效试验, 一次性施入底肥 2 g/盆, 考察抽穗期其地上部分鲜重与干重、分蘖数、有效穗数、根系等指标。总分蘖数、有效分蘖数的结果如表 2 所示。结果表明: 每个处理水稻总分蘖数略有差异, 施用添加硅藻土的复混肥对促进水稻分蘖有明显作用。表明硅肥基肥对穗数有促进作用, 与文献报道一致。

Table 2. Statistics of rice biomass at heading stage

表 2. 出穗期水稻生物量统计

处理	总分蘖数(个/盆)	有效分蘖数(个/盆)
CK0	26	19
CK1	34	20
DT	45	24
NDT	51	28

对比水稻在不同生长阶段的根系干重, 结果如图 2 所示。可以看出, 各处理根系的干重均大于 CK1, 该结果与添加的材料的结构差异性有直接联系。在 DT、NDT 两个处理中, 添加硅藻土和纳米硅藻土的重量比均为 1%, 硅藻土的多孔结构, 为氮磷钾养分吸附缓释提供了可能[8]。养分逐渐释放, 稻株吸收硅藻土的养分也逐渐增加, 养分促进了根系生长。相对于对照 CK1, 收获期 DT、NDT 处理的根系干重分别高 70%和 185%。在添加非纳米硅藻土的两个处理中, 根系干重在不同时期均大于对照[9], 由于 NDT 处理含纳米硅, 纳米材料粒径小、活性高, 更容易被吸收利用[10]。

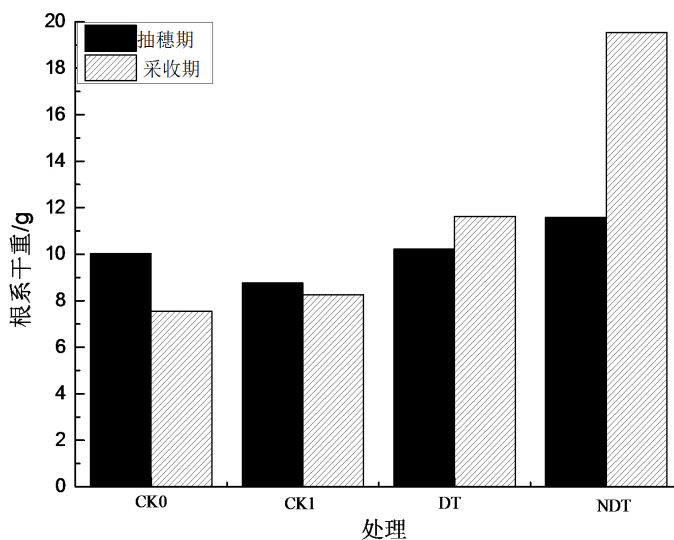


Figure 2. Dry weight of rice root at different stages

图 2. 各处理不同时期水稻根系干重

为更好地分析水稻植株的长势情况, 统计了两个不同生长时期的植株总干重, 结果如图 3。在抽穗期, 添加非纳米硅藻土的 2 个处理水稻植株总干重均高于对照, 而纳米硅藻土处理明显高于对照和 DT;

第二阶段采收期, DT 与 NDT 两处理的总干重均高于对照, 分别提高 33.6%、72%。有文献报道在复混肥中添加硅藻土能提高小麦的产量[11]。结果能够说明含有相同比例的非纳米硅藻土与纳米硅藻土复混肥对水稻生长有利, 纳米材料体现出更好的优势。

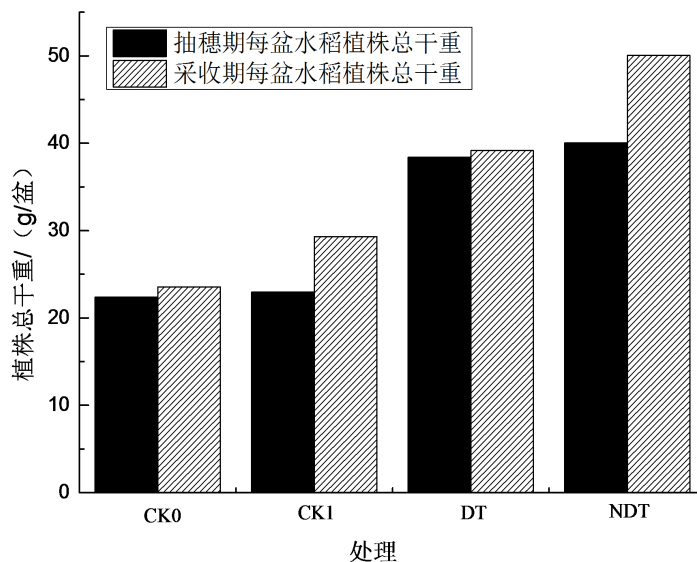


Figure 3. Total dry weight of whole plant at different stages
图 3. 各处理不同时期水稻全植株总干重

3.2.2. 纳米硅复混肥对水稻吸收氮磷钾养分的影响

图 4 结果表明, DT, NDT 两处理在抽穗期吸收的养分总量均高于对照, 与植株总重的趋势相同。在收获期, 添加非纳米硅藻土的复混肥, 随着养分的释放, 植株吸收氮磷钾的量逐渐增加, 其吸收量分别比 CK1 提高 11.97%、53.80%, 说明添加纳米硅藻土的复混肥促进了水稻对养分的吸收[12]。

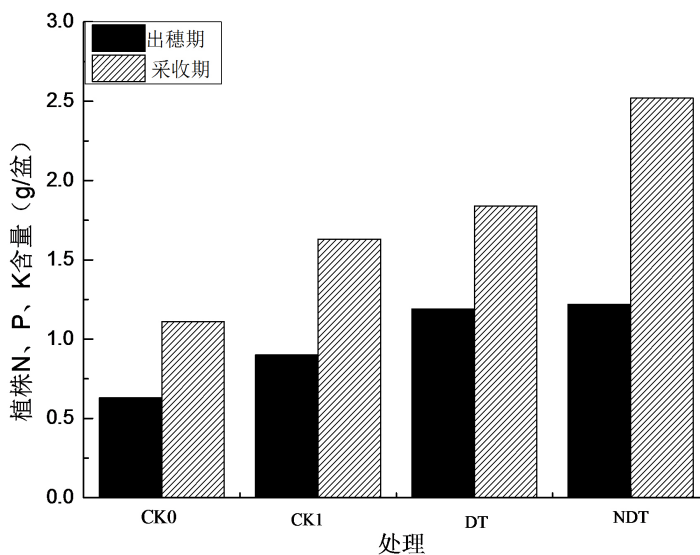


Figure 4. Comparison of total nutrition absorbed by rice plants at different stages
图 4. 不同生长时期水稻植株吸收总养分对比

3.2.3. 土壤养分对比

对收获后的土壤进行了分析, 以期综合对比养分的利用情况, 结果如表 3。对于氮素而言, DT 土壤含氮量高于对照 CK1, 而 NDT 处理则低于对照 CK1, 充分说明硅藻土的多孔结构起到了缓释作用, 而纳米材料则促进氮的吸收利用。水稻全生育期土壤的氮素净供应量, 在不同的处理中也有差异性, 结果表明, DT、NDT 处理均比对照 CK1 高 0.9%~16.4%, 说明添加非纳米硅藻土和纳米硅藻土的复混肥均可提高土壤的供氮能力, 并增加水稻对氮的吸收。本研究结果显示, 土壤钾的净供应量比对照增加了 17.59%~55.31%, 添加纳米硅藻土效果更好, 最高达 55.31%。硅使植株细胞壁增厚, 促进表皮硅质化的同时, 茎叶坚挺则可抑制蒸腾作用, 从而促进光合作用, 与提高水稻的总干重的结果一致。

Table 3. Soil nutrient analysis of NPK after harvest

表 3. 水稻收获后土壤中氮磷钾养分分析结果

处理	N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	含量(mg/Kg)	占比(%)	含量(mg/Kg)	占比(%)	含量(mg/Kg)	占比(%)
种植前	270.47		76.17		206.17	
CK0	112.38		47.74		145.47	
CK1	118.92		57.38		158.96	
DT	124.36	4.50	65.31	-25.84	137.26	-12.52
NDT	110.01	-7.49	49.37	-12.97	120.9	-13.61

综合分析, 结果显示, 添加非纳米硅藻土和纳米硅藻土的复混肥促进水稻根系生长、提高了植株的总重。通过植株及土壤养分总量分析, 硅藻土提高了氮磷钾的利用率。纳米材料更容易被吸收, 故含硅量较高。硅更好地促进了水稻的生长。非纳米硅藻土的多孔结构起到缓释作用; 纳米硅藻土粒径小, 更易被吸收利用, 硅与氮磷钾养分两者相互促进。

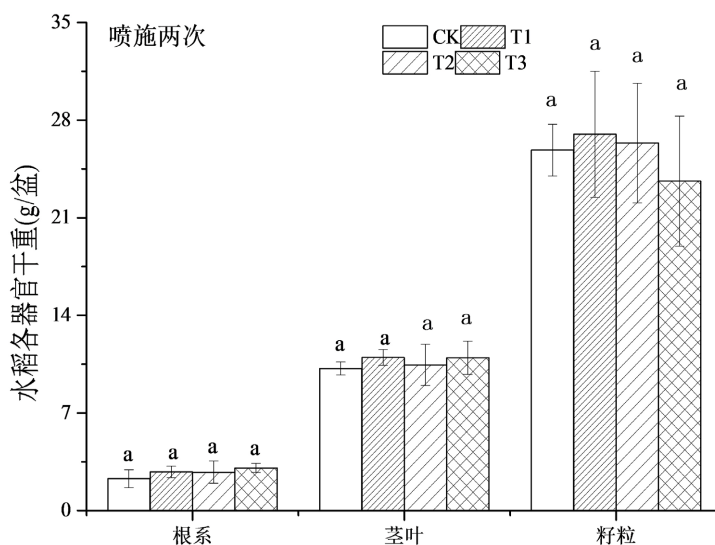


Figure 5. Effect of nano-silicon on rice biomass

图 5. 喷施纳米硅对水稻生物总量的影响

3.3. 叶面喷施纳米硅藻土对水稻阻隔重金属镉的影响

3.3.1. 纳米硅藻土对水稻生物总量的影响

从图 5 可以看出, 喷施两次纳米硅后水稻茎叶和根系干重均有所增加, 与对照相比, 根系分别增加了 21.01%、19.88% 和 33.29%, 茎叶分别增加了 7.74%、2.45% 和 7.55%, T1 与 T2 处理的籽粒干重分别增加了 4.40% 和 1.96%, T3 处理则降低了籽粒干重量。

有研究表明[13], 在种植粳稻的情况下施用 180~240 kg·hm⁻² 硅肥增产效果最好, 低于或高于该施用范围时产量均降低。本研究结果表明, 叶面喷施纳米硅增加了湖南镉污染土壤中湘早籼 32 号水稻的产量, 这与张翠翠等[14]在河南镉、锌复合污染土壤上的研究结果一致周青等[15]的研究结果为分蘖期施硅增产效果最好。硅之所以能够增加作物产量, 原因可能有 1) 促进细胞伸长; 2) 促进根系生长, 提高根系对水分和养分的吸收能力; 3) 促进光合作用, 增加有机物合成。

3.3.2. 纳米硅藻土对镉在水稻中的分布

表 4 为不同处理水稻各器官中镉的含量, 可以看出, 喷施两次纳米硅后, 除了 C3 处理根中镉含量升高以外, 其它两个处理根、茎叶和籽粒中镉含量均显著(P < 0.05)降低, 与对照相比 T1 和 T2 分别降低了 9.25%、15.84%、53.85% 和 7.42%、6.93%、23.80%。T3 处理的茎叶和籽粒中镉含量分别降低了 3.96% 和 38.46%。喷施浓度为 0.1 g/L 和 0.5 g/L 的效果比 0.8 g/L 的效果好。

Table 4. Effect of nano-silicon on contents of cadmium of rice

表 4. 纳米硅藻土对水稻镉含量的影响

处理	喷施两次 Cd 含量/(mg/kg)		
	根	茎叶	籽粒
CK	5.79 ± 0.79a	1.01 ± 0.18a	0.13 ± 0.02a
T1	5.37 ± 0.50a	0.85 ± 0.04a	0.06 ± 0.01b
T2	5.36 ± 0.68a	0.94 ± 0.05a	0.10 ± 0.01b
T3	6.08 ± 0.48a	0.97 ± 0.13a	0.08 ± 0.03b

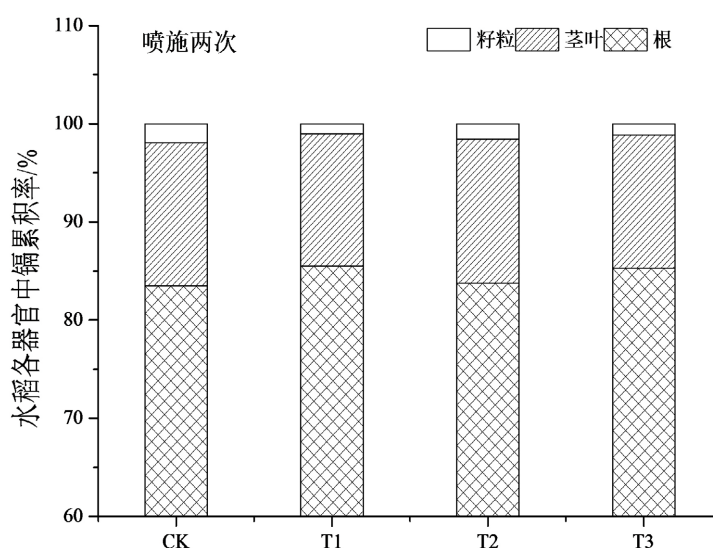


Figure 6. Effect of nano-silicon on cadmium accumulation rate in rice

图 6. 纳米硅藻土对水稻各器官中镉累积率的影响

图 6 是纳米硅藻土对水稻各器官中镉累积率的影响, 从图中可以看出, 水稻中 85%左右的镉累积在根部, 15%左右累积在茎叶中, 籽粒中的镉含量较少。喷施两次纳米硅后, 根中镉累积率有所增加, 而籽粒中镉累积率降低了。

彭华等[16]在湖南镉污染农田中的研究表明, 施硅之所以能够降低稻米中镉的含量是因为降低了镉由茎秆向叶片和稻壳中的转移。本研究结果表明, 喷施两次纳米硅后, 水稻各器官中镉含量均有所下降。

3.3.3. 叶面喷施纳米硅藻土对水稻镉吸收系数和镉元素积累量的影响

水稻镉吸收系数是指水稻某部位中镉元素质量分数与土壤中镉元素质量分数的比值。表 5 为水稻根、茎叶和籽粒中镉的吸收系数, 可以看出, 喷施纳米硅降低了水稻茎叶和籽粒中镉的吸收系数, 与对照相比分别降低了 16.05%、7.41%、4.94%和 54.55%、27.27%、36.36%, T1 和 T2 处理的根中镉的吸收系数分别降低了 7.13%和 7.34%, T3 处理则升高了 4.97%。根据水稻各器官中的镉含量和各器官干重计算出各处理每盆水稻中镉元素积累量, 从结果可以看出, 喷施纳米硅显著($P < 0.05$)降低了籽粒中镉元素的积累量, 与对照相比, 分别降低了 50.00%、23.26%和 43.31%, 茎叶中 T1、T2 处理有所降低, 但是不显著($P > 0.05$), 而根系中镉元素积累量均显著($P < 0.05$)高于对照。

Table 5. Effect of nano-silicon on cadmium absorption coefficient and accumulation

表 5. 纳米硅藻土对水稻镉吸收系数和镉元素积累量的影响

处理	镉吸收系数/%			镉元素积累量/ $\mu\text{g}/\text{盆}$		
	根	茎叶	籽粒	根	茎叶	籽粒
CK	$4.63 \pm 0.80\text{a}$	$0.81 \pm 0.16\text{a}$	$0.11 \pm 0.02\text{a}$	$13.31 \pm 0.31\text{c}$	$10.34 \pm 0.19\text{a}$	$3.44 \pm 0.06\text{a}$
T1	$4.30 \pm 0.49\text{a}$	$0.68 \pm 0.03\text{a}$	$0.05 \pm 0.01\text{b}$	$14.93 \pm 0.32\text{b}$	$9.29 \pm 0.20\text{a}$	$1.72 \pm 0.02\text{c}$
T2	$4.29 \pm 0.66\text{a}$	$0.75 \pm 0.05\text{a}$	$0.08 \pm 0.01\text{b}$	$14.76 \pm 0.29\text{b}$	$9.80 \pm 0.30\text{a}$	$2.64 \pm 0.05\text{b}$
T3	$4.86 \pm 0.51\text{a}$	$0.77 \pm 0.20\text{a}$	$0.07 \pm 0.02\text{b}$	$18.60 \pm 0.38\text{a}$	$10.60 \pm 1.30\text{a}$	$1.95 \pm 0.13\text{c}$

大量研究表明, 施硅能够降低水稻对镉的吸收, 降低稻米中镉的含量[17]。陈喆等[18]的研究结果还表明, 不同施硅方式对重金属镉的阻隔潜力不同, 叶面喷施效果优于基施, 而两者结合施用效果更好。

3.4. 叶面喷施纳米硅藻土和含有纳米硅藻土的复混肥综合作用对水稻生产及阻隔重金属镉的影响

通过一系列盆栽试验结果分析, 证明纳米硅藻土加入复混肥中对水稻生长的促进作用及叶面喷施纳米硅藻土抑制水稻吸收重金属镉的影响。因此, 进一步深入探索了纳米硅藻土在两种情况结合施用对水稻生长及阻隔重金属镉吸收的影响情况。该部分内容主要由湖南水稻所实施。

3.4.1. 不同处理对精米中镉含量的影响

由表 6 可知, 施用铁汉水稻专用肥(即加入纳米硅藻土的复混肥)并喷施纳米硅藻土(处理 2)极显著降低了精米中镉含量($P < 0.01$), 与处理 1 相比降低了 58.5%。表明施用具有较好的降低精米镉含量的作用。

Table 6. Effects of different treatments on Cd content in milled rice
表 6. 不同处理对水稻精米中镉含量的影响(mg/kg)

处理	重复 1	重复 2	重复 3	重复 4	重复 5	平均值
处理 1	0.405	0.611	0.72	0.787	0.618	0.628a
处理 2	0.335	0.289	0.262	0.232	0.179	0.259b

3.4.2. 不同处理对 H 优 518 产量及农艺性状的影响

从表 7 可以看出, 处理 2 除了有效穗数显著低于处理 1 外($P < 0.01$), 其余各项指标与处理 1 无显著差异性($P > 0.05$)。处理 2 的株高降低了 5.4%, 有效穗数降低了 18.5%, 成穗率增加了 29.0%, 结实率提高了 10.0%, 千粒重减少了 2.1%。理论产量增加了 27.9%。

Table 7. Effects of different treatments on rice yield and agronomic characters
表 7. 不同处理对水稻产量及农艺形状的影响

处理	株高 cm	有效穗数 穗/兜	成穗率 %	总粒数 粒/兜	结实率 %	谷草比	理论产量 Kg/m ²
处理 1	98.8a	16.2a	91.1a	1489.4a	75.6a	1.01a	0.0298a
处理 2	93.4a	13.2b	94.1a	1753.2a	83.1a	1.52a	0.0381a

3.5. 硅藻土的不同施用方式的差异性分析

纳米硅藻土添加在复混肥中, 添加用量为 1%, 水稻根系增重 185%, 总植株干重增加 72%, 氮磷钾吸收增加 53.80%; 叶面喷施纳米硅, T1 处理, 籽粒中的镉含量降低 53.85%, 根系增加 73.29%, 产量增加 4.4%; 两者联合施用, 籽粒中的降镉率 58.5%, 产量增加 27.9%。由此可见, 叶面喷施和添加在复混肥中联合施用, 效果最佳。

4. 结论

1) 含有硅藻土和纳米硅藻土的复混肥促进了水稻的生长, 提高了氮磷钾等的利用率, 在添加量为 1% 时, 两者与对照相比较, 氮磷钾的利用率分别提高了 25.56%、17.76%、34.57%, 植株总干重分别提高了 33.6%、72%, 根系干重分别提高了 70% 和 185%, 为促进水稻的生长奠定了物质基础。

2) 叶面喷施纳米硅藻土, 显著降低了茎叶和籽粒中镉的含量, 与对照相比, 分别降低了 15.84%、6.93%、3.96% 和 53.85%、23.80%、38.46%, 显著降低了籽粒中镉的吸收系数和镉元素累积量。

3) 结合叶面喷施纳米硅藻土和含有纳米硅藻土的复混肥方法, 用于湖南长沙镉污染农田水稻的生产, 稻米中重金属镉的含量降低了 58.5%, 理论产量提高了 27.9%。

4) 不同的应用方式显示了不同的效果。在复混肥中添加纳米硅, 有效增产, 叶面喷施有效阻隔重金属, 而两者联合施用, 既提高产量, 也降低籽粒中的镉。为目前镉污染农田的治理提供了一种有效的途径。

参考文献

- [1] 陈卫平, 杨阳, 谢天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
- [2] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[Z], 2014.

- [3] 朱鳳榕, 陈亚刚, 李媛媛, 等. 改性膨润土钝化土壤 Cd 对不同水稻品种安全生产研究[J]. 安徽农业科学, 2015(16): 96-99.
- [4] Lin, H., Fang, C., Li, Y., *et al.* (2017) Cadmium-Stress Mitigation through Gene Expression of Rice and Silicon Addition. *Plant Growth Regulation*, **81**, 91-101. <https://doi.org/10.1007/s10725-016-0191-x>
- [5] Balakhnina, T.I., Bulak, P., Matichenkov, V.V., *et al.* (2015) The Influence of Si-Rich Mineral Zeolite on the Growth Processes and Adaptive Potential of Barley Plants under Cadmium Stress. *Plant Growth Regulation*, **75**, 557-565. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-0021-y>
- [6] Malčovská, S.M., Dučaiiová, Z., Maslaňáková, I., *et al.* (2014) Effect of Silicon on Growth, Photosynthesis, Oxidative Status and Phenolic Compounds of Maize (*Zea mays*, L.) Grown in Cadmium Excess. *Water Air & Soil Pollution*, **225**, 1-11.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [8] 干方群, 杭小帅, 马毅杰, 等. 铁铝柱撑膨润土组成特征及其磷吸附性能研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2230-2235.
- [9] 高玉凤, 焦峰, 沈巧梅. 水稻硅营养与硅肥应用效果研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(16): 156-160.
- [10] 肖强, 孙焱鑫, 王甲辰, 等. 纳米材料在土壤与植株营养领域的应用进展[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 10-15.
- [11] Doaa, M.A.B., Sayed, S.A.A.E.L. and El-Aila, H.I. (2013) Effect of Nitrogen Levels, Diatomite and Potassium Silicate Application on Yield and Chemical Composition of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Plants. *World Applied Sciences Journal*, **25**, 1217-1221.
- [12] 柯玉诗, 黄小红, 张壮塔, 等. 硅肥对水稻氮磷钾营养的影响及增产原因分析[J]. 广东农业科学, 1997(5): 25-27.
- [13] 商全玉, 张文忠, 韩亚东, 等. 硅肥对北方粳稻产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(6): 661-664.
- [14] 张翠翠, 常介田, 高素玲, 等. 硅处理对镉锌胁迫下水稻产量及植株生理特性的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(6): 936-941.
- [15] 周青, 潘国庆, 施作家, 陈风华. 不同时期施用硅肥对水稻群体质量及产量的影响[J]. 耕作与栽培, 2001(3) : 25-27.
- [16] 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.
- [17] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面施硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应[J]. 生态环境学报, 2007, 16(3): 875-878.
- [18] 陈喆, 张淼, 叶长城, 等. 富硅肥料和水管理对稻米镉污染阻控效果研究 [J] . 环境科学学报, 2015, 35(12) : 4003-4011.