

# 硅藻土基硅肥的研究进展

张育新<sup>1</sup>, 丁杰航<sup>1</sup>, 鄢文磊<sup>2</sup>, 饶劲松<sup>1</sup>, 刘冬<sup>3</sup>, 高立洪<sup>4</sup>, 张嵌<sup>5</sup>

1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044;
2. 重庆大学 机械与运载工程学院, 重庆 400030;
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 400799;
4. 重庆市农业科学院, 重庆 401329;
5. 江西农业大学, 江西 南昌 330045

中图分类号: TD985; S143.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)04-0085-09  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.04.010

**摘要** 系统总结了硅藻土基硅肥在提高植物的抗旱、抗病、抗虫、抗倒伏、抗盐、抗冻和抗重金属及增产增质等方面的作用机理、硅藻土基硅肥的生产工艺和硅肥的分类及应用现状, 通过对比了硅藻土基硅肥和其他硅肥的差异, 剖析了硅藻土基硅肥研究应用中存在的问题, 为高品质硅肥的研究提供理论参考。

**关键词** 硅藻土; 硅肥; 土壤; 农作物

## 引言

保证国家粮食稳定供应是民生的根本, 修复耕地、提高耕地质量、实现粮食增产, 肥料是不可忽视的一个重要环节。但我国化肥使用仍然存在结构不合理、利用率低、过量使用等问题。肥料施用量不合理增加的背后原因是较低的化肥利用率, 大量肥料通过淋溶、挥发、径流等途径流失, 造成土壤及水体的污染。土壤中残留的氮、磷、钾等营养物质随径流进入水体中, 不仅影响了水体的水质, 更造成了严重的水体富营养化。

化肥乱用滥施给土壤、水体、大气造成了不良影响, 粮食增产-良田悖论使得传统化肥的施用陷入恶性循环, 为突破化肥困境寻求新的粮食增产点, 功能型硅肥的功效逐渐脱颖而出。植物中硅是必不可少的第四元素, 对植物质量、稳定性和生产率起着重要作用。施用硅肥可以给植物、动物和人体输入有机硅<sup>[1]</sup>。硅是植物细胞壁的重要构成元素, 与水果酸、聚脲酸等植物物质构成稳定性较高的细胞壁。硅与木材形成溶解盘复合体, 聚集在细胞壁上, 提高组织的机械强度和稳

定性, 防止害虫入侵, 加厚表皮细胞壁; 加粗维管束, 抗倒伏能力增强, 能有效提升作物产量, 改善品质<sup>[2-4]</sup>。硅酸能置换土壤中的磷酸根离子, 从而增加有效磷的释放。此外, 施加硅肥能降低土壤对磷的吸附结合能, 从而增加了易解吸磷的含量, 改善功能叶的生态, 促进对氮、磷、钾元素的吸收。硅肥对水稻的抗逆增产、抗倒伏、抗病虫害、减轻 Fe、Mn 毒害效果显著<sup>[5-7]</sup>。硅还能增加叶面积指数, 提高氨基酸产量和转氨酶活性<sup>[8]</sup>, 从而提高开花后干物质生成能力, 提高抗逆性和营养储存强度, 最终提高种群质量。

硅素肥料虽然功能强大, 可以一定程度促进作物增产优品, 但是目前主流硅肥存在一定的问题, 如通过锻造工业废渣制得的硅肥, 可能存在重金属超标的隐患, 施入土壤中, 会损害土壤性能, 对环境造成污染; 市面上的硅复合肥尽管营养组分丰富, 但有效硅的含量较低, 仅大于 20%; 现代合成硅肥有效硅含量高, 但由于操作工艺复杂, 成本较高, 难以普及。

硅藻土是由硅藻遗骸和软泥固结形成的硅质沉积岩。作为肥料载体和物质缓释调节剂, 硅藻土可以增

强肥料的理化性能,抑制肥料中养分的释放,减少土壤养分的外流,提高肥料的利用率。用硅藻土制作硅肥的增产效果较好,肥料成本适宜,硅藻土缓释作用节约肥料且肥力柔和,产出投入比远高于硅酸钠,且其呈弱碱性的肥料特性,并符合农民的施用习惯,能与农民习惯施用的碳酸氢铵等常规酸性肥料拌和而不影响肥效。在硅营养缺乏的条件下,从目前市场产生的经济效益来分析,除去肥料成本后,施用硅藻土能获得最佳的施肥效益。硅藻土基硅肥拥有其他硅肥所不具有的优良特性,故而对硅肥及硅藻土基硅肥的研究具有重要的意义。

硅藻土基硅肥是活化土壤、修复土壤酸度、加速有机物分解、提高农产品品质的高级肥料,并有利于贮存和运输<sup>[9]</sup>,兼具硅藻土与硅肥的统一功效。硅藻土含有丰富的有机质,又具有独特的多孔结构,可为微生物菌剂的生长、繁殖和存活提供良好的微环境条件,是生物菌肥的良好载体。硅藻土孔隙率高、持水性好,不仅对长期保持菌肥内部的水分含量有利,同时还可作为土壤微生物生存提供良好的微环境条件,促进土壤自适应循环能力。硅藻土通透性优秀,能加快气体扩散,增大氧气浓度,还可以吸附培养液中的氮、磷等营养物质用来维持细菌的生长,所以硅藻土基硅肥在供给农作物养分的同时还参与土壤微生物的养护,修复土壤,实现 1+1>2 的功效。

## 1 硅藻土基硅肥与传统硅肥对比分析

### 1.1 传统硅肥与硅藻土基硅肥的定义

传统硅肥可分成三种:一是熔渣硅肥,熔渣硅肥主

要原料来自炼钢铁的副产品熔渣<sup>[10]</sup>。在铁冶炼过程中,铁矿石中的多种污染物不可避免地向钢铁渣中迁移,导致 BFS(主要是 Ni、Cu、Hg、Zn、Cd、Cr、As、Pb、Se、F、Cl)和 SS(主要是 Ni、Cr、Cd、Zn、F、C)中的污染物富集,其中部分污染物(特别是 Cr、Ni、F、Cl)超过了土壤和地下水环境质量的限值,钢铁渣中锰、钡、钒的元素含量高于土壤环境背景值<sup>[11]</sup>。为保证土壤健康、食品安全和环境质量,如果对钢铁渣等工业固体废物不进行任何减少有害污染物的预处理,不能将其直接用于农田土壤修复或固体废物处置,以防止污染物进入食物链,危害人体健康。

第二种是水溶性硅肥。以硅酸钠、硅酸钾等为主,其他辅助成分含量少,水溶性二氧化硅含量为 50%~60%,有效硅含量高,但成本较高<sup>[12]</sup>。

第三种是硅复合肥,是将硅肥添加到 N、P、K 复合肥中经造粒而成,营养元素全面,非常适合测土配方施肥<sup>[13]</sup>。优点是含有营养元素,施用方便,农民易操作,但其有效硅含量较低。

硅藻土基硅肥是一种新型可溶性硅缓释肥,用松香包膜剂包被,经造粒制备而成。硅酸盐以硅藻土为原料制备,有效硅含量高达 70%,同时硅藻土中各类重金属含量低。这种肥料溶于水,能缓慢释放肥效,与土壤的亲水性可以促进土壤团粒结构的形成<sup>[14]</sup>。硅藻土基硅肥用经过改性处理后的具有多孔结构的硅藻土为载体,其可以搭载硅藻等微生物和硅肥有机肥,也可以吸附土壤重金属,具有优良的实用价值。四种硅肥综合对比如表 1 所示。

表 1 四种硅肥综合对比

Table 1 Comprehensive comparison of four silicon fertilizers

种类	组成	优点	缺点	制作方法	主要特点
硅藻土基硅肥	包括硅藻土和有机肥料	亲土性强,能促进土壤团粒结构的形成。含硅量高,不含有害物质		用水溶性有机硅肥作为包膜剂包被肥料,经造粒而成	缓慢释放肥料,增产效果较好,肥料成本适宜,符合农民施用
熔渣硅肥	主要包括黄磷或磷酸生产过程中的废渣	锰的耐受性高,养分齐全	碱性较强,会加速土壤矿化,且一些硅肥重金属含量较高	利用物理方法,高温熔融,机械磨细,其产品质量与机械磨细程度有关	产品有效硅 20% 以上、有效钙 20% 以上、有效镁 5% 以上,还有 P、S、K 和其他有效态的微量元素,养分齐备
水溶性硅肥	以泡花碱为主,主要以包括硅酸钠、硅酸钾等硅酸盐类化合物	水溶性二氧化硅含量 50%~60%,有效硅含量高	成本较高	经过化学方法处理形成的硅肥	
硅复合肥	硅肥和氮磷钾复合肥	含有多种营养元素,施用方便,农民易操作	有效硅含量低	由硅氮磷钾复合肥经造粒而成	与传统化肥相似

## 1.2 硅藻土基硅肥与传统硅肥的对比

刘冬提出一种硅藻土基硅肥的通用制备方法<sup>[15]</sup>,其包括:将硅藻土浸置于碱性溶液中,一般为含钾、钠离子等溶解度较大的强碱性溶液。形成悬浊液后对悬浊液进行充分的加热处理,提取出有效硅成分。然后冷却静置进行过滤,取出上层滤液。向滤液中加入适量生石灰充分反应一段时间后,冷却静置过滤,取滤渣干燥后研磨即为缓释硅钙盐。以畜禽粪便、作物秸秆、餐厨垃圾等有机废物为材料,通过官能团的定向改造和微生物靶向赋能,创制集氮磷流失阻控、土壤重金属钝化、微生物活化于一体的氮磷重金属多向阻控有机肥。然后将硅钙盐、硅藻土、多向阻控有机肥充分均匀进行造粒,并用黏结剂作为支撑层、石蜡作为有机外层的复合包膜,最终形成一种硅藻土基缓释多向阻控复合硅肥。

重庆大学张育新团队研制出得一款硅藻土基硅肥,具体执行细节如下:所述强碱性溶液一般为含钾、钠离子等溶解度较大的能与二氧化硅反应的强碱性溶液,该碱性溶液加入量与改性后的硅藻土的比例有关,能使得硅藻土中有效硅大部分被溶解出来。将硅藻土和碱溶液充分混合得到的悬浊液进行加热(温度90~100℃为宜),以加快反应速度。冷却静置处理后进行过滤,需反复粗滤后再进行精滤得到上层清液。向上层清液中加入生石灰,有效硅将以固态的硅酸盐形式产出,取滤渣清洗后干燥处理,再研磨成细粉状。造粒成分为硅钙盐、硅藻土、有机肥填料,将三者混合均匀备用,用凹凸棒粉作为支撑层,石蜡作为有机外层,通过高速搅拌机将凹凸棒粉分散在熔融的石蜡溶液中,制备复合包膜液进行包膜,该硅肥有效硅含量高达70%以上。

相比之下,目前国内多数小型硅肥厂,生产硅肥的原料主要有4个来源<sup>[16]</sup>:(1)炼铁过程中产生的有效硅含量仅为25%~30%的高炉熔渣;(2)黄磷或磷酸生产中产生的有效硅含量达20%~30%的废渣;(3)粉煤灰,有效硅含量达15%~20%;(4)钾长石。高炉熔渣、黄磷渣和粉煤灰是废弃资源综合利用,生产成本低,但粉煤灰用量大、肥效低,而以钾长石为原料生产的硅肥活性硅含量达35%,但是其养分有部分水溶态,总养分含量较低。小规模硅肥厂都是用球磨机处理原料,造粒后当作硅肥出售。制得的硅肥比土壤中的硅更易被吸收,但由于其溶解度非常低,植物吸收非常缓慢,施用后效果甚微。

相比其他硅源,硅藻土作为一种十分丰富的矿产

资源,由于其具有多孔性、吸附力强、质轻、化学性能稳定、有效硅含量高特点,非常适合与肥料相结合应用于农业生产。广西勤德亚热带作物研究院通过对硅藻土矿产进行一系列科学化精细加工,在生产应用上使其与有机肥、无机肥、复混肥产品相结合,达到了保水保肥、化肥缓控释放以及为作物大量补充硅元素的多重功效<sup>[17]</sup>。硅藻土制成肥料成本适宜,硅藻土缓释作用节约肥料且肥力柔和,并符合农民的施用习惯,产出投入比远高于硅酸钠,且其呈弱碱性的肥料特性,能与农民习惯施用的碳酸氢铵等常规肥料拌和而不影响肥效<sup>[18]</sup>。

## 2 硅藻土基硅肥的作用原理

### 2.1 硅藻土基硅肥提高植物抗病、抗虫、抗旱的原理

施加硅藻土基硅肥能够对植物茎腐病、小麦菌核病、白叶枯病、胡麻叶斑产生抗性。这种阻力抗性是由于细胞质硅浓度增加导致细胞中硅层厚度增加,进而导致叶结构发生变化产生的。其抗病性主要是通过增强硅对细菌细胞入侵的结构应激抵抗力,促进细菌免疫物质的分泌和释放,调节生理代谢,从而减少细菌的伤害。硅藻土基硅肥无定形SiO<sub>2</sub>含量很高,这些硅素积极参与了生物化学防御过程,可以诱导感病植物产生酚醛类、黄酮类等抗毒物质<sup>[19]</sup>。

抗虫害方面,施用硅藻土基硅肥可以增加根部厚度、内源干重,增加内部硅酸盐和纤维素含量,降低半纤维素含量,提高抗弯强度,因此硅在一定程度上增加了植物的抗性,降低了植物害虫的选择性,赋予植物对外界害虫特定的物理抗性,从而降低害虫的入侵程度。而且,富含硅的植物降低了昆虫的消化能力,从而降低害虫生长繁育速度,增加了对害虫的抵抗力<sup>[20]</sup>。此外硅藻土基硅肥中保留部分完整的硅藻土多孔颗粒,毛细作用使得其可以通过孔道吸收水分或肥料进入其空腔内部,这种强烈的吸水性,可对根部害虫进行体液消耗,同时微观上硅藻土具有锐利的微小边缘,能刺破害虫体表,对根系防治害虫具有显著功效。

硅藻土基硅肥对植物的抗旱作用主要是通过提供高质量的有效硅增加根系的数量和长度,增加足够的接触面积,吸收更多水分。同时,由于硅藻土空腔可以贮存一定量的水或肥料,使得植物在抗旱阶段可以有重要补给。硅藻土基硅肥中的硅素能通过减少膜的氧化损伤,提高了植物对水分胁迫的耐受力,从而提高了根的透水系数。硅藻土基硅肥中的硅素处理不会直接

促进根系生长,但会提高植物根系的分枝率,增加水分吸收,增强植物营养素的摄入。研究表明,硅藻土基硅肥中的硅酸盐处理后的植物可以保持较高的气孔导性、蒸腾率、叶片含水量、根和植物整体水力传导性<sup>[21]</sup>。

## 2.2 硅藻土基硅肥减缓重金属毒害的原理

硅藻土基硅肥的应用可以有效减少土壤中特定重金属的毒性作用,对土壤重金属吸附率高达 70%。硅酸根离子螯合会形成重金属硅酸盐化合物,通过影响根的氧化力减少重金属的活动。植物对重金属的吸收受土壤 pH 的影响,而硅藻土基硅肥呈现弱碱性可以调节土壤酸碱度来促进重金属的钝化,硅素可以影响植物内蛋白质的含量,来增强其对重金属的抗性。硅藻土基硅肥中的硅藻土成分运用水滑石 LDH 靶向改性技术,使得硅藻土进一步增大表面孔隙率,可针对性地吸附绝大部分重金属离子。硅藻土基硅肥释放的硅素在植株地上部分的沉淀,从而阻碍重金属向地上部分的迁移或雨水冲刷重金属到地下水的流动。研究表明,施用硅藻土基硅肥可有效降低水稻对土壤中镉、铅的吸收以及减弱对植物的毒性<sup>[22-23]</sup>。许凤丽发现不同形式的硅肥对砷也有不同的影响<sup>[24]</sup>。由于硅和砷对土壤测试物质的相互吸附,施用硅藻土可使土壤中硅的浓度提高到适合植物生长的水平,同时也能减少砷的摄入量。硅藻土基硅肥处理后,随着光照强度的增加,羧化酶活性、可溶性蛋白含量、根干鲜重和成熟黄瓜叶片对重金属的抗性均增加。

## 2.3 硅藻土基硅肥增产的原理

研究表明,硅藻土基硅肥中的硅有助于将碳水化合物运输到果实中。主要原因包括:硅藻土基硅肥中的硅改善了根的活动并防止它们在后期老化;施用硅藻土基硅肥后的植物的机械组织坚挺,迎光面积大光线较好,同时叶绿体的大小增加,基粒的大小增加,进而产量增加。硅藻土基硅肥的缓释效果促进每株烟草植物的叶片数量增加,延迟成熟,使得烟草叶片纯熟晚于茎枝,这不仅保证了烟草叶片营养充分,延缓生长发育期,推迟早期生长,为烟草叶片的生长提供充分的保障,提高养分浓度,从而保证烟叶的品质和产量<sup>[25]</sup>。肖尚华等<sup>[26]</sup>发现,在土壤中施加硅藻土基硅肥后可以提高根系细胞的氧化力,在土壤中增加了根部细胞的氧化作用,降低了重金属元素和还原剂对根系的毒性,而硅藻土基硅肥中负载的活性硅藻能够进行光合作用,为根系供应充分的氧气,强化根系生理作用吸收养

料。邓接楼<sup>[2]</sup>注意到使用硅藻土基硅肥有助于提高膜脂过氧化作用,减少功能叶片的老化,改善植物干物质的组成和积累,增加酸度;同时通过提高酸性蔗糖转化酶、蔗糖磷酸合成酶等相关酶活性,促进了可溶性糖向淀粉的转移。

## 2.4 硅藻土基硅肥减少化肥的原理

由于硅藻土基硅肥中的硅与其他养分相互作用,硅藻土基硅肥的施用可以调节植物对氮、磷的过量吸收,增强了植物对高氮的抵抗能力,缓解因为施用氮肥不当而引发的贪青晚熟和倒伏<sup>[27-29]</sup>。硅藻土肥料具有纳米级、表面积大、微孔多、天然重金属吸附性、游离氨分子吸附强度达 80% 以上等优势。氨分子可在常温下被吸附储存,延长氮肥释放时间。硅藻土中富含有机质,其中以蛋白质为主。氮、磷、钾的含量也比较丰富,此外还含有丰富无机盐成分,可为土壤微生物的生长繁殖提供良好的营养条件,可活化土壤中被固定的营养元素,刺激根系的生长和吸收,可以减少相应营养元素的施肥量。总的来说,硅藻土基硅肥中的硅在所有被分析的植物种类和所有土壤类型中是相似的,影响着植物对养分的吸收。Maria Greger 等<sup>[30]</sup>研究表明,硅提高了土壤中 Ca、P、S、Mn、Zn、Cu、Mo 的有效性,Cl、Fe 的有效性有提高的趋势;硅对钾、镁的有效性影响不大;S、Mg、Ca、B、Fe、Mn 营养元素的吸收量增加,N、Cu、Zn、K、P 营养元素的吸收量减少,Cl、Mo 营养元素的吸收量不受影响。Mg、Ca、S、Mn、Mo 等向地上部运输量增加,Fe、Cu、Zn 营养元素的运输量减少,K、P、N、Cl、B 营养元素的运输量不受影响。结果表明,在土壤中培养植物,硅藻土基硅肥中的硅素能保持土壤溶液中养分的有效性,能够弥补这些营养元素在植物组织浓度的降低。

## 2.5 硅藻土基硅肥节水及土壤改良的原理

硅藻土基硅肥能影响农作物蒸腾作用,以及提高根系导水率,可节约水资源。硅化细胞能增强植物细胞壁的强度。植株大,茎叶直,光照条件、通风条件大大改善<sup>[31]</sup>。Yu Shi<sup>[21]</sup>研究表明,硅藻土基硅肥中的硅加入,解决了番茄生长和光合作用受限的问题,改善了水分胁迫下番茄的水分状况。水分胁迫使番茄根系导水率下降,施硅显著提高了根系导水率。水分胁迫增加了活性氧类的产生并诱导了氧化损伤,而硅则逆转了这些过程。此外,施硅还能提高根系中超氧化物歧化酶和过氧化氢酶的活性,增加抗坏血酸和谷胱甘肽的含量。Coskun devirm<sup>[32]</sup>研究还表明,硅藻土基硅肥

中的硅使细胞膜氧化损伤的减少、根系导水率的增加,而硅通过提高番茄植株的根系导水率和吸水量来提高植株的抗逆性。另外硅藻土基硅肥中的硅藻土具有优良的吸水性,能够有效缓解水分下渗、蒸发。

硅藻土基硅肥进入土壤后,可以直接释放硅酸根离子,充分调动土壤中硫酸盐、磷酸盐、硼酸盐等阴离子的活动,调节土壤阴离子和阳离子的平衡。硅藻土基硅肥携带的钙、镁、铁、铜等阳离子也可使土壤元素更均衡化,硅藻土基硅肥是一种呈碱性的纳米级肥料,能有效改善土壤的酸度(我国南方土壤普遍偏酸性)、促进有机质降解、抑制土壤基质板结<sup>[33]</sup>,使得土壤的毛细管孔隙度总量在所有土壤高度,特别是0~20 cm处增加,毛细管孔隙度和总量位于10~20 cm高度的土壤增加最多,孔隙度增加达到5.47%。硅藻土基硅肥表现出水溶性,可以大幅度改善土壤透过性和土壤特性<sup>[34-35]</sup>。

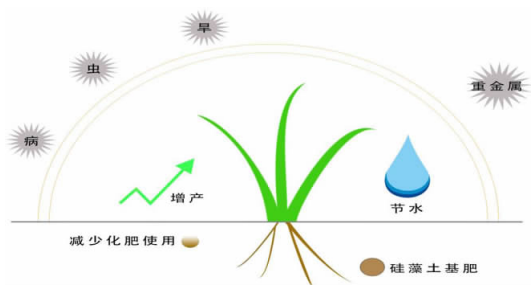


图1 各类胁迫下硅藻土基硅肥增产修复

Fig. 1 Recovery of diatomite - based silicon fertilizer under stress

## 3 硅藻土基硅肥研究与应用分析

### 3.1 硅藻土基硅肥研究分析

研究员刘冬<sup>[15]</sup>提出了一种硅藻土基硅肥制备方法,以硅藻土为硅素来源,制备了一种易于作物吸收的可多样化施用的硅藻土基硅肥,从来源上降低有害杂质含量,同时制备的有效硅易于吸收。张育新团队在此基础上开创了“硅三角一体化”的技术体系,开创性地将“硅藻—硅藻土—硅酸盐”构建闭环:以硅藻土作为硅素来源制备硅酸盐,同时作为优良载体搭载硅酸盐便于造粒,硅藻土在土壤碱化作用下分解为硅酸盐再次被利用;硅藻作为土壤中唯一能够进行光合自养的土壤微生物能够为土壤提供有机质,增加土壤氧气量,修复土壤微生物群落;硅酸盐由硅藻土制备,有害杂质含量低,可直接被作物吸收提升抗逆性以及调节光合作用和蒸腾作用,也是硅藻繁育所必需的营养元

素。硅藻土基硅肥应用功效在于既解决现有硅肥使用弊端又强化了硅肥对植物的功能作用,同时硅三角体系拓展了硅藻土基肥料的研究意义,为进一步深入研究提供了思路。

### 3.2 硅藻土基硅肥在果园、菜园中的应用

硅藻土基硅肥可广泛适用于苹果、梨、桃、葡萄、枣树、香蕉、柑橘、荔枝、龙眼、石榴、杨梅、芒果等多种果树<sup>[36]</sup>。蔡德龙<sup>[37]</sup>证明,硅藻土基硅肥在苹果上的施用可使产量提高10%以上。蔡德龙<sup>[38]</sup>研究表明,施用硅藻土基硅肥后,草莓产量增加约23.9%。与此一致,硅藻土基硅肥可以显著提高对番茄、香蕉、枣和葡萄的产量<sup>[39]</sup>。

硅藻土基硅肥可改善蔬菜品质。闫素芹<sup>[40]</sup>发现,给韭菜施用0.27%浓度的硅藻土基硅肥可溶性蛋白含量增加62.5%,维生素C含量增加19.8%,可溶性糖含量增加69%,韭菜品质得到巨大优化。

菜园、果园施用方法:施硅可分三季点施和沟施,单独施用或与其他肥料混施均可,但硅藻土基硅肥与氮磷肥配合施用比单独施用硅藻土基硅肥的增产效果和经济效益好。常见施用方法有穴施法、环状沟施法、放射状沟施法、条状沟施法、全园施肥法<sup>[41]</sup>。

### 3.3 硅藻土基硅肥在大田农作物中的应用

推广使用硅藻土基硅肥最适合的农作物是水稻。根据农民施氮磷肥的习惯,配合施用硅藻土基硅肥对水稻增产增收有显著影响,不仅能提高株高、有效穗数、每穗粒数等水稻生物学特性,也提高了水稻抗旱、抗病虫害的能力。硅藻土基硅肥的施用可以加快水稻的成熟,硅源富足的水稻,植株坚挺、叶尖直立、叶片迎光性好,光合作用效果佳;根系稳固透水性好吸收养料活性强。硅素不充分的水稻一般具有下垂的叶子、细茎、短根、弱的抗病性和容易倒伏。严重的硅缺乏会导致叶片早衰和自下而上的位错,结实稻粒小,呈褐色。而使用硅藻土基硅肥能够有效解决缺硅导致的铁和锰中毒、根肿胀、根腐烂、水稻早期老化等问题。硅藻土基硅肥与氮磷肥配合施用比单独施用硅藻土基硅肥的增产效果和经济效益好,少量分次施用比一次性底施效果好。此外,硅藻土基硅肥中的硅藻土的介孔特性使得其成为适用于农业应用的不同分子的纳米载体,对促进植物发育、提高植物生产力具有广阔应用前景<sup>[42]</sup>。

### 3.4 施用方法

硅藻土基硅肥是功能肥料,必须与主流营养肥料

配合,实行氮、磷、钾、硅肥科学地配合施用,决不能用硅藻土基硅肥来代替氮、磷、钾肥。硅藻土基硅肥能改良土壤,价格便宜,最好每季连续施用。硅藻土基硅肥不易板结、不易失效、舒缓释放肥效稳定性好,也不会有下渗、挥发等损失,具有肥效期长的特点。硅藻土基硅肥虽具有多种作用,但施用时需注意以下几点:(1)硅藻土基硅肥虽然具有抗病虫害作用,但不能完全代替农药;(2)氮、磷、钾肥不能代替硅藻土基硅肥,必须科学配合施用;(3)普通常规硅肥会造成碳铵中氮的挥发,降低氮的利用率,但是硅藻土基硅肥整体呈现中性或弱碱性,因此硅藻土基硅肥可以与碳铵肥混合施用;(4)因为硅藻土基硅肥粉呈粒状,所以使用时最好将其和适量的湿土或氮、磷、钾肥混施造粒,避免粉尘飞扬,且减少被雨水冲刷而流失营养。

## 4 结论与展望

当前有关硅藻土基硅肥的问题包括:探索硅藻土改性处理方法,进一步改善其介孔性使得能够负载更广泛的改良添加剂;为改善作物产量而进行的研究越来越多,但为改善作物质量而进行的研究却不足。硅肥应用存在南北差异,在长江流域和南部较多,但在北方则分布较少;禾本科等粮食农作物比其他经济作物研究热度更高,不利于推广拓展硅藻土基硅肥潜在研究价值;对硅藻土基硅肥的研究尚处在初级阶段,理论原理有待进一步验证开发以及施用验证。另外,硅与其他营养元素的相互作用、硅参与下植物周期性转化的机制以及改善土壤的机制尚不清楚。目前普遍认为,硅的作用是通过提高细胞壁强度来增强生物抗压能力,但很难确定硅是否在分子防御信号转导途径中也起直接作用,这应该与硅对叶子组织提供额外物理保护的作用无关,但是这样可以提高植物对疾病的抵抗力,大幅减少杀菌剂的使用。硅对植物病害抗性的调节机制不止一个方面,物理屏障保护机制与生化保护过程可能同时存在。硅与植物关键的压力信号转导系统相互作用,最终可能诱发对病原菌的抵制,但该领域的确切机制尚不清楚,是未来研究的热点。

### 参考文献:

- [1] GUNTZER F, KELLER C, MEUNIER J D. Benefits of plant silicon for crops: a review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(1): 201-213.
- [2] 邓接楼,王艾平,何长水,等. 硅肥对水稻生长发育及产量品质的影响[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(12): 58-61.  
DENG J L, WANG A P, HE C S, et al. The effect of silicom fertilizer on growth and development, yield and quality of rice[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(12): 58-61.
- [3] 毛颖盈,王飞军,曹亚波,等. 不同硅肥品种在水稻上的应用效果[J]. *浙江农业科学*, 2016, 57(5): 639-641.  
MAO Y Y, WANG F J, CAO Y B, et al. Application effect of different silicon fertilizer varieties on rice[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(5): 639-641.
- [4] 王晶,李磊,闫鹏科,等. 增施硅肥对枸杞生理代谢、产量及品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(2): 243-250.  
WANG J, LI L, YAN P K, et al. Effect of increasing application of silicon fertilizer on physiological metabolism, yield and quality of wolfberry[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(2): 243-250.
- [5] 龚东芳,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.  
GONG S F, LIU Y, SU X Y, et al. Influence of nano-silicon fertilizer on osmotic stress in *Achnatherum extremiorientale*[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(12): 2924-2930.
- [6] 宁东峰,梁永超. 硅调节植物抗病性的机理:进展与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1281-1288.  
NING D F, LIANG Y C. Silicon-mediated plant disease resistance: advance and perspectives[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(5): 1281-1288.
- [7] 田福平,陈子萱,张自和,等. 硅对植物抗逆性作用的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2007(3): 10-14.  
TIAN F P, CHEN Z X, ZHANG Z H, et al. Study of resistance to stress of plant on silicon[J]. *Soil and Fertilizer Sciences China*, 2007(3): 10-14.
- [8] 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.  
RENG H, FU L D, WANG Y, et al. Effects of silicon fertilizer and basic seedling configuration on growth, yield and quality of rice[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019(1): 108-116.
- [9] WANG L, ASHRAF U, CHANG C, et al. Effects of silicon and phosphatic fertilization on rice yield and soil fertility[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(10): 557-565.
- [10] 蓝际荣. 利用电解锰废渣制作硅锰有机肥的研究[C]. 2017.  
LAN J R. Study on making silicon-manganese organic fertilizer from electrolytic manganese waste residue[C]. 2017.
- [11] WANG X, XIUYING LI, YAN X, et al. Environmental risks for application of iron and steel slags in soils in China: A review[J]. *Pedosphere*, 2021, 31(1): 28-42.
- [12] 肖建忠,毛建伟,星盛煜,等. 利用废料制备液态硅肥的方法及制得的液态硅肥:CN111393190A[P]. 2020.  
XIAO J Z, MAO J W, XING S Y, et al. Method for preparing liquid silicon fertilizer from waste materials and prepared liquid silicon fertilizer: China, CN111393190A[P]. 2020.
- [13] 梁一然. 镁还原渣制备硅钙镁复合肥可行性及提高有效硅含量的研究[D]. 太原:太原理工大学, 2015.  
LIANG Y R. Study on the feasibility of preparing silicon-calcium-magnesium compound fertilizer from magnesium reduction slag and im-



- proving the effective silicon content [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [14] 穆娟微, 王振东, 韩树鑫, 等. 缓释增效硅肥及其制备方法: 中国, CN113045355A [P]. 2021-06-29.
- MU J W, WANG Z D, HAN S X, et al. Slow-release synergistic silicon fertilizer and preparation method thereof: China, CN113045355A [P]. 2021-06-29.
- [15] 刘冬, 袁鹏, 田倩, 等. 一种硅藻土基硅肥及其制备方法: 中国, CN107245011A [P]. 2017-10-13.
- LIU D, YUAN P, TIAN Q, et al. A diatomite based Si fertilizer and its preparation process: China, CN107245011A [P]. 2017-10-13.
- [16] 周春旋, 张济宇, 李宝霞. 硅肥发展现状及展望 [J]. 化学工业与工程技术, 2006, 27(6): 48-53.
- ZHOU C X, ZHANG J Y, LI B X. Current status and developing prospect of silicate fertilizer [J]. JOURNAL OF CHEMICAL INDUSTRY & ENGINEERING, 2006, 27(6): 48-53.
- [17] 余荣生, 谭明卫. 硅藻肥在水稻上的应用技术及效果 [C] // 长沙: 2017 硅肥研究开发暨作物应用新产品、新工艺交流研讨会论文集. 2017: 173-176.
- YU R S, TAN M W. Application technology and effect of diatom fertilizer on rice [C] // Changsha: 2017 Silicon Fertilizer Research and Development and Crop Application New Product and New Technology Exchange Seminar, 2017: 173-176.
- [18] PEI F Y, YANG Y, FANG Q F, et al. Effect of nanodiatomite on growth, quality and yield of amaranth [M]. IUPAC International conference on novel materials and their synthesis. 2014: 59.
- [19] LIANG Y, NIKOLIC M, BÉLANGER R, et al. Silicon in agriculture I | silicon and plant-pathogen interactions [J]. 2015(9): 181-196.
- [20] 孙玉华. 硅肥对水稻生长发育和抗性及其产量的影响 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
- SUN Y H. Effects of silicon fertilizer on growth, development, resistance and yield of rice [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.
- [21] SHI Y, ZHANG Y, HAN W H, et al. Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in solanum lycopersicum L [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 236(7): 196.
- [22] ETESAMI, HASSAN, JEONG, et al. Silicon (Si): Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2018, 147(1): 881-896.
- [23] 裴福云, 任重, 翟晓峰, 等. 纳米硅抑制莴苣吸收重金属镉的研究 [C]. 长沙: 2017 硅肥研究开发暨作物应用新产品、新工艺交流研讨会, 2017: 148-149.
- PEI F Y, REN Z, ZHAI X F, et al. Study on nano-silicon inhibiting lettuce from absorbing heavy metal cadmium [C]. Changsha: 2017 Silicon Fertilizer Research and Development and Crop Application New Product and New Technology Exchange Seminar, 2017: 148-149.
- [24] 许凤丽. 硅肥, 硫肥对污染土壤中水稻吸收 Cd, Cu 的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- XU F L. Effects of silicon fertilizer and sulfur fertilizer on Cd and Cu uptake by rice in polluted soil [D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2019.
- [25] 李京蕾. 硅肥对烟草生长及品质性状的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- LI J L. Effect of silicon fertilizer on growth and quality traits of tobacco [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.
- [26] 肖尚华, 颜见恩, 郭龙平, 等. 硅肥对烟叶生产性状的影响 [J]. 现代农业科技, 2010(20): 58-61.
- XIAO S H, YAN J E, GUO L P, et al. Effect of silicon fertilizer on tobacco production traits [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010(20): 58-61.
- [27] 甘曼琴. 不同有机肥替代对稻麦产量及农田氮磷流失的影响 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
- GAN M Q. Effects of different organic fertilizer substitutions on rice and wheat yield and nitrogen and phosphorus loss in farmland [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.
- [28] 郭彬, 娄运生, 梁永超, 等. 氮肥肥配施对水稻生长、产量及土壤肥力的影响 [J]. 生态学杂志, 2004, 23(6): 4.
- GUO B, LOU Y S, LIANG Y C, et al. Effects of nitrogen and silicon applications on the growth and yield of rice and soil fertility [J]. CHINESE JOURNAL OF ECOLOGY, 2004, 23(6): 4.
- [29] 吴超元, 曾呈奎, 王之珉, 等. 海带间歇施肥试验 [J]. 科学通报, 1959(24): 829-830.
- WU C Y, ZENG C K, WANG Z M, et al. Intermittent fertilization experiment of kelp [J]. Chinese Science Bulletin, 1959(24): 829-830.
- [30] GREGER, MARIA, LANDBERG, et al. Silicon Influences Soil Availability and Accumulation of Mineral Nutrients in Various Plant Species [J]. Plants, 2018, 7(2): 41.
- [31] 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.
- XIA S T, XIAO L T, PENG K Q. Physiological Effects of Silicon in Higher Plants and Its Application in Agricultural Production [J]. Plant Physiology Communications, 2001, 37(4): 356-360.
- [32] COSKUN D, BRITTO D, HUYNH W, et al. The Role of Silicon in Higher Plants under Salinity and Drought Stress [J]. Frontiers in plant science, 2016, 7: 1072.
- [33] 林美芬, 郑毅, 王晓彤, 等. 富碳硅肥对水稻土铁还原菌群落特征的影响 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1778-1789.
- LIN M F, ZHENG Y, WANG X T, et al. Effect of carbon-silicon rich fertilizer on community characteristics of iron-reducing bacteria in paddy soil [J]. Chinese Environmental Science, 2021, 41(4): 1778-1789.
- [34] 许景钢, 钱建民, 李淑琴, 等. 不同硅肥及添加剂对水田可溶性硅的影响 [J]. 作物杂志, 2014(1): 5.
- XU J G, QIAN J M, LI S Q, et al. Effects of different silicon fertilizers and additives on soluble silicon in paddy fields [J]. Crops, 2014(1): 5.
- [35] 彭耀林. 有机肥和无机肥配合施用对水稻生物学特性和土壤肥力的影响 [D]. 南昌: 江西农业大学, 2003.

- PENG Y L. Effects of combined application of organic fertilizer and inorganic fertilizer on biological characteristics of rice and soil fertility [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2003.
- [36] 王永刚,康怀启,王会海,等. 硅肥的研究及其在农业生产上的应用[J]. 中国果菜,2018,38(8):4.
- WANG Y G, KANG H Q, WANG H H, et al. Study on silicon fertilizer and its application in agricultural production [J]. China Fruit and Vegetable, 2018, 38(8): 4.
- [37] 蔡德龙,卢柏廷. 硅肥对苹果生长产量及品质影响的研究[J]. 地域研究与开发,1995,14(2):3.
- CAI D L, LU B T. Effect of silicon fertilizer on growth, yield and quality of apple [J]. Areal Research and Development, 1995, 14(2): 3.
- [38] 蔡德龙. 硅肥在果树上的施用效果(二) [J]. 中国农村科技,2001(2):1.
- CAI D L. Effect of silicon fertilizer on fruit trees ( II ) [J]. China Rural Science & Technology, 2001(1): 1.
- [39] 李志,吴彦,温红霞,等. 温室番茄应用硅肥效果研究[J]. 宁夏农林科技,2015(3):34-42.
- LI Z, WU Y, WEN H X, et al. Study on the effect of applying silicon fertilizer to tomato in greenhouse [J]. Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2015(3): 34-42.
- [40] 闫素芹,陆海英,毕兆东. 硅肥对韭菜产量及品质的影响[J]. 金陵科技学院学报,2013,29(3):60-63.
- YAN S Q, LU H Y, BI Z D. Effect of silicon fertilizer on yield and quality of leek [J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2013, 29(3): 60-63.
- [41] 张万洋,李小坤. 水稻硅营养及硅肥高效施用技术研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2020(4):9.
- ZHANG W Y, LI X K. Research progress on silicon nutrition and high-efficiency application technology of silicon fertilizer in rice [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(4): 9.
- [42] RASTOGI A, TRIPATHI D K, YADAV S, et al. Application of silicon nanoparticles in agriculture [J]. 3Biotech, 2019, 9(3): 90.