

甘志凯,陈 玮,谌 希. 不同形态硅对砷胁迫下小麦光合生理、砷累积及相关基因表达的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):65-72.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.02.009

# 不同形态硅对砷胁迫下小麦光合生理、砷累积及相关基因表达的影响

甘志凯<sup>1</sup>, 陈 玮<sup>2</sup>, 谌 希<sup>1</sup>

(1. 南昌理工学院新能源与环境工程学院,江西南昌 330044; 2. 南昌理工学院医学院,江西南昌 330044)

**摘要:**采用盆栽土培试验,以无砷(As)胁迫处理(CK)为对照,设置 30 mg/kg As 胁迫处理(AS)及砷胁迫下施用纳米硅(NSi)、无机硅(ISi)、有机硅(OSi)与复合处理(NSi + ISi、NSi + OSi、ISi + OSi、NSi + ISi + OSi),探索不同形态硅对 As 胁迫下小麦光合生理、As 亚细胞分布及相关调控基因表达的影响。结果表明,As 胁迫下小麦光合生理受到显著影响,As 含量增加,细胞生理受到显著影响。As 胁迫下不同形态硅及其组合处理均提高了光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素)含量、改善了叶绿素荧光参数( $F_v/F_m$ 、 $\Phi_{PSII}$ 、NPQ、 $q_p$ ),上调了相关重金属调控基因(*TaPCSI*、*TaMT1*、*TaHMA3*)的表达,且增加了细胞壁对 As 的劫持能力,并促进 As 在液泡区室化,整体而言以纳米硅组合处理(NSi + OSi、NSi + ISi + OSi)效果较佳。此外,As 胁迫下,NSi + OSi、NSi + ISi + OSi 处理植株 Si 含量显著增加,生物富集系数(BCF)、转移系数(TF)及 As 含量显著降低,均以 NSi + OSi 优于 NSi + ISi + OSi 处理。综上,30 mg/kg As 胁迫下不同形态硅及其组合处理可保护光合色素降解、提高光合效率、诱导重金属调控基因表达,并通过促进 As 的区室化从而降低 As 累积对小麦的负面影响,以纳米硅与正硅酸乙酯组合施用(NSi + OSi)效果最佳,其 BCF、TF 分别降低 6.53% ~ 76.94%、5.02% ~ 21.45%。

**关键词:**硅;砷胁迫;荧光特性;亚细胞分布;重金属调控基因

**中图分类号:**S512.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)02-0065-08

土壤重金属污染导致的作物减产和人畜基因突变风险已成为发展中国家和发达国家共同关注的环境安全问题<sup>[1]</sup>。砷(As)作为毒性最强的重(类)金属元素之一,由于工业、农业活动造成了较严重的土壤污染。在我国,约 1 000 万  $\text{hm}^2$  的耕地处于中等砷污染,由于动物通过食物链和饮用水摄入砷的风险日益增加,当前严重的砷污染引起了人们的高度关注<sup>[2]</sup>。大量研究表明,As 对绿色植物具有极强的致毒性,可显著抑制植物的光合代谢活性和矿物质养分吸收,使植物生理系统紊乱,严重时可直接导致植物死亡<sup>[3]</sup>。此外,砷胁迫往往伴随着渗透胁迫和养分稳态失衡,导致活性氧(ROS)积累,ROS 过量积累可对膜脂、蛋白质、核糖核酸和光合色素造成重大损伤<sup>[4]</sup>。发育受限、砷胁迫与光合作用密切相关,砷胁迫可造成叶绿素降解、叶绿体超微结构损伤以及光合装置中的蛋白酶失活<sup>[5]</sup>。

因此,As 胁迫下提高抗氧化能力和光合能力对植物的正常生长发育至关重要。

硅(Si)作为地壳中第二丰富的元素,主要以硅酸盐或二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )的形式存在,在地表土壤中,硅常以  $\text{SiO}_2$  的形式存在,而以单硅酸( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ )的形式被植物吸收利用<sup>[6]</sup>。此前的研究表明,外源施用硅可以增强植物碳代谢、促进光合能力,提高水稻、大豆和番茄等作物的品质和产量<sup>[7]</sup>。硅在改善生物和非生物胁迫方面起着至关重要的作用,如施硅可通过提高光合效率、抗倒伏性以降低遮阴对大豆生长带来的不利影响<sup>[8]</sup>。此外,添加硅可以减轻镉(Cd)、铬(Cr)和砷(As)对植物的毒性,并减少它们在不同植物中的积累。Wu 等的研究表明,在营养液中添加硅酸盐可以通过阻止小麦幼苗对 Cd 的吸收和转运以减轻 Cd 对植物的毒性<sup>[9]</sup>。张明辉等的研究表明,Si 可通过诱导 Cd 转运基因(*TM20*、*HMA3*)上调表达,促进根细胞壁和细胞器螯合 Cd 以及减少 Cd 向地上部转移,且与硒组合施用时效果最佳<sup>[10]</sup>。随着纳米技术的快速发展,许多纳米粒子(NPs)被用作肥料,以提高作物产量和减轻重金属污染,然而关于纳米硅(SiNPs)对重金属胁迫缓

收稿日期:2023-06-09

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(编号:GJJ160387)。

作者简介:甘志凯(1984—),男,江西樟树人,讲师,从事植物生物学研究。E-mail:bjyangll@163.com。

解效应的研究较少。

小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是广泛种植的谷类作物之一,其含有可观的能量、矿质营养及膳食纤维,是全世界大多数人口和牲畜的主要食物<sup>[11]</sup>。然而,小麦产区由于长期非正常灌溉和不适当施肥使得小麦生产面临着土壤 As 污染<sup>[9]</sup>。目前,一些栽培措施已应用于提高小麦 As 耐受性和降低 As 吸收量,包括施用如生物炭、阻隔剂、功能菌、有益元素及超富集植物间作等,其中外源施入 Si 等有益元素被认为是最具成本效益、最简便的可持续措施之一<sup>[12]</sup>。然而目前关于外源施入 Si 对环境胁迫的研究主要集中于干旱、高温和 Cd 胁迫,关于 As 胁迫的研究较少<sup>[13]</sup>,且已有研究主要探索硅酸盐 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) 的应用效果,对于有机硅和纳米级硅的研究鲜有涉及。基于此,本研究通过土壤栽培试验探索 As 胁迫下 3 种不同形态硅及其组合对小麦缓解效应及相关缓解机制的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验于 2022 年 1—3 月在南昌理工学院新能源与环境工程学院试验棚中进行。供试小麦品种为扬麦 23。供试土壤取自南昌理工学院实验站,土壤类型为红壤,理化性质: pH 值为 7.25, 表层 (0 ~ 30 cm) 土壤有效砷含量为 0.24 mg/kg, 有机质含量为 19.33 g/kg, 全氮、全磷、全钾含量分别为 10.25%、2.19%、12.76%, 速效氮、速效磷、速效钾含量分别为 63.73、20.58、106.45 mg/kg。

供试硅有无机硅、有机硅、纳米硅,无机硅为四价硅酸钠 ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), 有机硅为农用正硅酸乙酯 [ $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ ], 纳米硅 (SiNPs) 粒径为 19 nm, 其制备工艺参照文献<sup>[9]</sup>; 3 个形态硅均购自上海麦克莱恩生化科技有限公司。试验所用外源 As 为砷酸二氢钠 ( $\text{NaH}_2\text{AsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), 购自默克化学试剂。供试肥料为小麦专用复合肥 (N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量分别为 12%、16%、9%), 其中 As 为痕量, 购自江西天禾农资有限公司。

### 1.2 试验设计

试验采用随机完全区组设计, 根据《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018) 旱地土壤 pH 值为 5.5 ~ 6.5 时 As 污染的标准, 旱地土壤 As 污染风险临界值为 30 mg/kg; 设置以下处理: CK (原土培养)、AS (原土中加入

30 mg/kg 的砷酸二氢钠)。接着基于 AS 处理施入不同形态硅处理: 纳米硅 (NSi)、硅酸钠 (ISi)、正硅酸乙酯 (OSi), 相应的二元处理为 NSi + ISi、NSi + OSi、ISi + OSi, 三元处理为 NSi + ISi + OSi, 试验共设置 9 个处理, 每个处理重复 5 次。上述硅处理采用纯水溶解, 超声 (35 kHz) 15 min 处理制备为相应硅溶液, 各处理总硅浓度皆为 960  $\mu\text{mol/L}$ , 二元、三元处理各形态硅等浓度配比<sup>[14]</sup>。

盆栽装置为圆柱形塑料桶, 盆高 20 cm, 直径 18 cm。每盆装土 10 kg, 将 12 g 小麦专用复合肥与土壤充分混合装盆, 砷胁迫施入砷酸二氢钠, 非砷胁迫处理施入蒸馏水。每盆施入小麦种子 6 粒, 出苗后减至 3 株。硅处理于小麦挑旗期喷施不同形态硅制剂, 每次喷施 10 mL, 1 周 2 次, 连续 4 周, 总量为 80 mL; 非硅处理则以去离子水替代。盆栽周期为 90 d。

### 1.3 测定项目

1.3.1 植株元素含量及根系亚细胞分布测定 培养第 90 天, 将小麦地上部、根系分开 105  $^{\circ}\text{C}$  杀青 30 min, 65  $^{\circ}\text{C}$  烘干至恒质量。将烘干的植株进行粉碎处理过 0.25 mm 网筛封装待测, 称取 500 mg 样品采用  $\text{HNO}_3$  -  $\text{HCl}$  进行酸解萃取, 采用电感耦合等离子体光谱仪 [ICAPQc, 赛默飞世尔科技 (中国) 有限公司], 采用 ICP - MS 法测定样品中的 Si 含量, 采用 ICP - OES 法 (EXPEC 6500, 杭州谱育科技发展有限公司) 测定植株组织中 As 含量。As 的亚细胞分布采用差速离心法分离测定, 分为细胞壁 (Fc)、细胞器 (Fo)、细胞膜 (Fm) 和细胞质 (Fs), 相关步骤参照 Shi 等所述方法<sup>[15]</sup>。

1.3.2 光合色素及叶绿素荧光参数测定 培养第 90 天, 称取约 500 mg 样品采用液氮研磨、丙酮 - 乙醇体积比 (2 : 1) 浸提, 之后基于 UV - 2450 型紫外分光光度计 (Pharma Spec, 日本岛津公司) 采用紫外光度法测定叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量, 具体步骤参照李合生的方法<sup>[16]</sup>。

培养第 89 天, 采用叶绿素荧光仪 (FluorPen FP110, 上海点将科技有限公司) 测定叶片的荧光动力学参数, 叶绿素荧光参数中, PS II 的最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、非光化学荧光淬灭系数 (NPQ)、实际光化学效率 ( $\Phi_{\text{PSII}}$ )、光化学荧光淬灭系数 ( $q_p$ ) 的计算参照高战武等的方法<sup>[17]</sup>。

1.3.3 重金属调控基因及硅吸收基因表达测定 采用 Trizol 总 RNA 提取试剂盒对小麦根系进行总

RNA 提取,使用 ReverTra Ace qPCR RT Kit 从总 RNA 合成第 1 链 cDNA,并采用无菌水将 cDNA 稀释 100 倍作为后续实时荧光定量分析(RT-qPCR)的模板。以小麦 *Actin*(登录号:AB181991.1)为对照基因,相关基因的引物序列见表 1。RT-qPCR 的

扩增体系、扩增程序参照 Cui 等所述<sup>[6]</sup>,使用 Light Cycler® 96 Instrument 荧光定量 PCR 仪进行 PCR 分析,采用断层扫描法( $2^{-\Delta\Delta C_T}$ )计算目标基因的表

达量。

表 1 荧光定量 PCR 分析所用引物信息

基因名称	正向引物序列(5'→3')	反向引物序列(5'→3')
<i>Actin</i>	ATACACGAAGCGACATACAAT	TCCACTGAGAACAACATTACC
<i>TaHMA3</i>	TCTTCATCCGCCCGCTCTC	CCGTGAGGACCTTCACAAT
<i>TaPCSI</i>	GGGTATCATGCCGAGAAAGA	GCCGCAACTCACTGTGTAGA
<i>TaMT1</i>	GATCATCACCAACCGACCAT	CACTTGCATCTCCGTTCTC
<i>TaLsi1</i>	GATCCAGGTCCCGTTCTACTG	GACGAGCGACTGCCAGTG

1.4 数据处理与统计分析

砷的生物富集系数(BCF)与转移系数(TF)按照以下公式进行计算<sup>[15]</sup>:

BCF = 小麦植株总 As 浓度/土壤中 As 浓度;  
TF = 小麦植株地上部 As 浓度/根系中 As 浓度。

采用 Excel 2016 进行数据整理,采用 SPSS 26.0 软件进行单因素及方差分析,图片皆采用 Origin 2018C 软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 不同形态硅对砷胁迫下小麦光合色素含量的影响

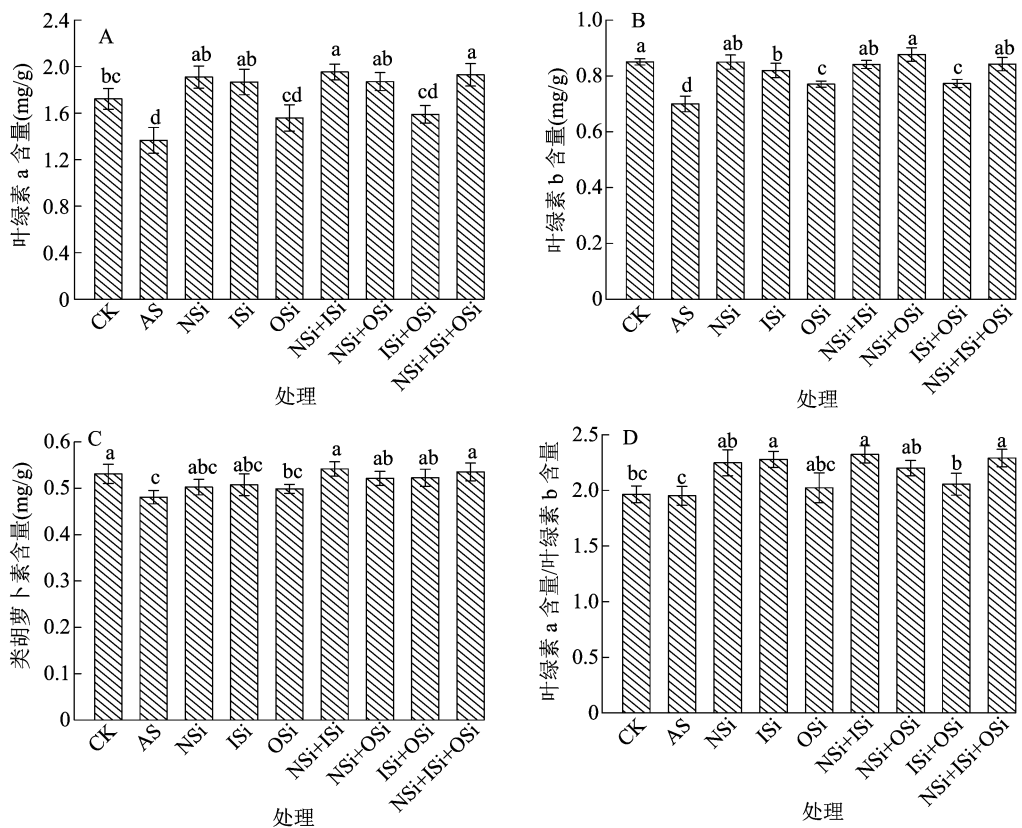
由图 1-A 可知,叶绿素 a 含量中,与 CK 相比,As 胁迫处理(AS)显著降低 20.69%;与 AS 处理相比,As 胁迫下相关硅处理(NSi、ISi、OSi、NSi + ISi、NSi + OSi、ISi + OSi、NSi + ISi + OSi)增加 14.10% ~ 43.07%,除 OSi、ISi + OSi 与 AS 处理无显著差异外,其他硅处理均显著大于 AS 处理。由图 1-B 可知,各处理叶绿素 b 含量表现为 AS < OSi < ISi + OSi < ISi < NSi + ISi < NSi + ISi + OSi < NSi < CK < NSi + OSi 处理,与 AS 处理相比,其他处理显著提高 10.13% ~ 25.31%;与 CK 相比,ISi、OSi、ISi + OSi 分别显著降低 3.62%、9.39%、9.10%,其他硅处理与 CK 均无显著差异。由图 1-C 可知,各处理类胡萝卜素含量差异整体较小,以 AS 处理最低,其显著小于 CK、NSi + ISi、ISi + OSi、NSi + OSi、NSi + ISi + OSi 处理;与 CK 相比,相关硅处理变幅为 -6.12% ~ 4.99%。而在叶绿素 a 含量/叶绿素 b 含量中,仍以 AS 处理最低,与 CK、OSi 无显著差异,其他处理均显著大于 AS 处理。

2.2 不同形态硅对砷胁迫下小麦叶绿素荧光参数的影响

由图 2-A 可知,PS II 最大光化学效率( $F_v/F_m$ )中,以 AS 处理最低,CK 较其显著提高 9.78%;相关硅处理则较其增加 3.43% ~ 12.59%,但仅 ISi + OSi 处理与 CK 存在显著差异。由图 2-B 可知,光化学淬灭系数( $q_p$ )中,以 NSi + OSi 处理最高,CK 次之,二者除与 NSi、NSi + ISi + OSi 处理无显著差异外,均显著大于其他盐胁迫处理。由图 2-C 可知,非化学淬灭系数(NPQ)中,以 AS 处理最高,其他处理较其降低 5.20% ~ 12.06%,其中 ISi + OSi 处理与 AS 处理无显著差异。由图 2-D 可知,实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )中,以 AS 处理最低,其他处理较其显著提高 14.15% ~ 26.73%;就相关硅处理而言,以 NSi + OSi、NSi + ISi + OSi 处理较高,显著大于 ISi、OSi、NSi + ISi 处理。

2.3 不同形态硅对砷胁迫下小麦根系 As 亚细胞分布的影响

由图 3 可知,基于差异离心法可将小麦根系亚细胞的 As 组分分为 4 个部分:细胞壁(Fc)、细胞器(Fo)、细胞膜(Fm)和细胞质(Fs)。不同硅形态及其组合处理不同组分中 As 分布比例差异较大,在根系中 CK 的 As 主要分布于 Fc(52.93%)、Fs(37.95%)中,一小部分分布于 Fo(2.18%)和 Fm(6.94%)中。AS 处理下,与 CK 相比,Fc 中分布的比例较低(44.05%),Fo(4.07%)、Fs(4.07%)中分布的比例增加,而 Fm 中分布比例(6.37%)基本保持不变。就相关硅处理而言,其 Fc 中分布比例为 44.79% ~ 47.37%,Fm 中分布比例为 5.81% ~ 7.38%,Fo 中分布比例为 4.75% ~ 10.53%,Fs 中分



柱上不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 下图同

图1 不同形态硅对 As 胁迫下小麦色素含量的影响

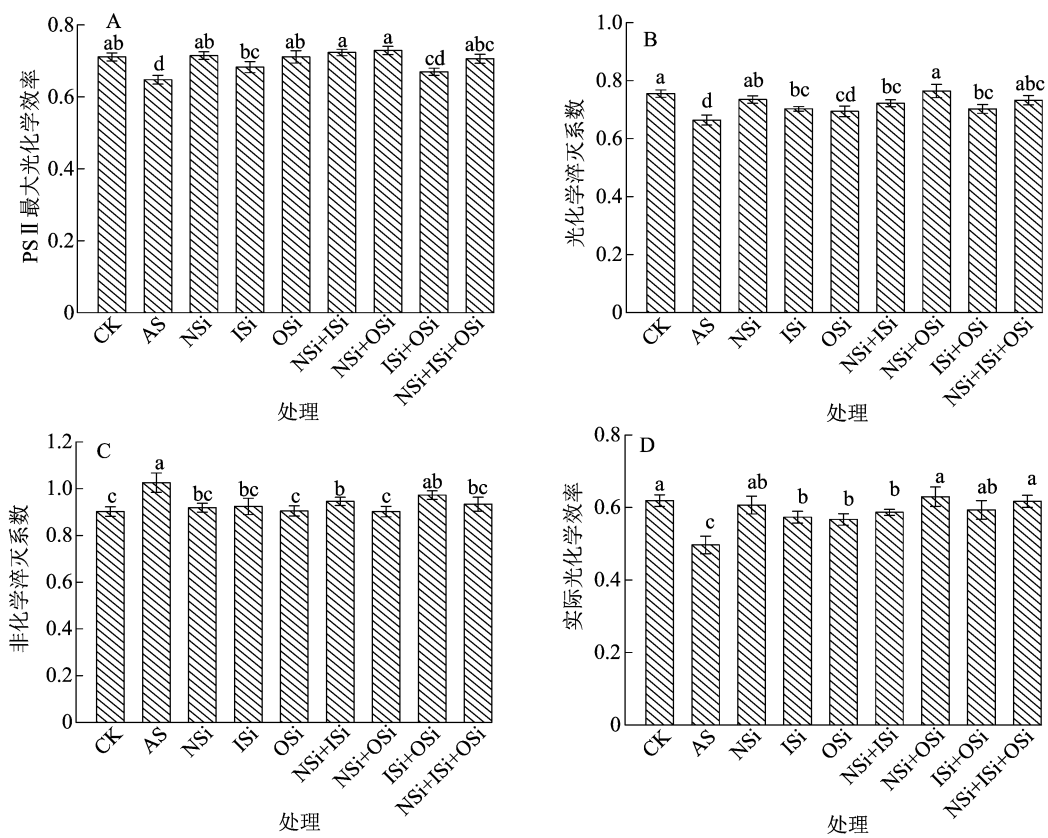


图2 不同形态硅对 As 胁迫下小麦叶绿素荧光参数的影响

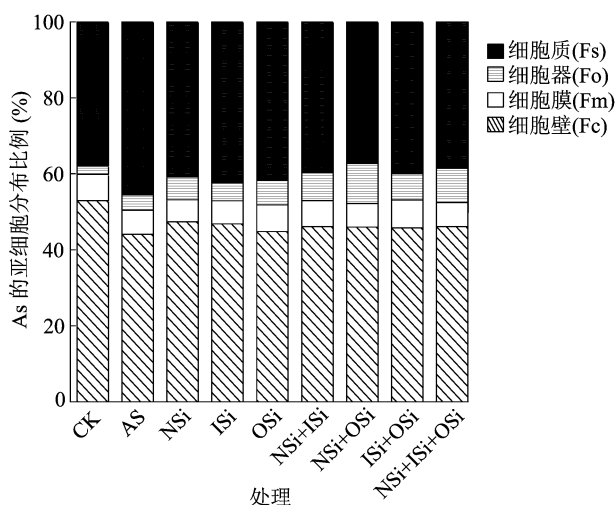


图3 不同形态硅对砷胁迫下小麦根系 As 亚细胞分布的影响

布比例为 37.27% ~ 42.34%，其中 Fo 中分布比例极大值及 Fs 中分布比例极小值均出现在 NSi + OSi 处理。

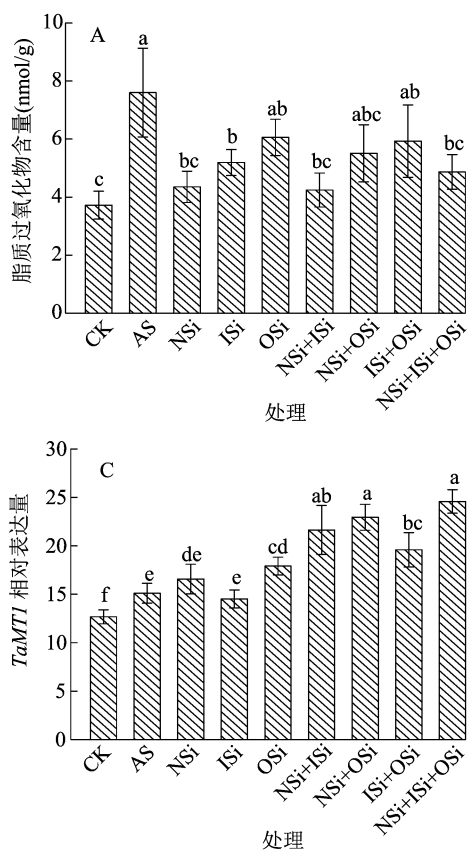
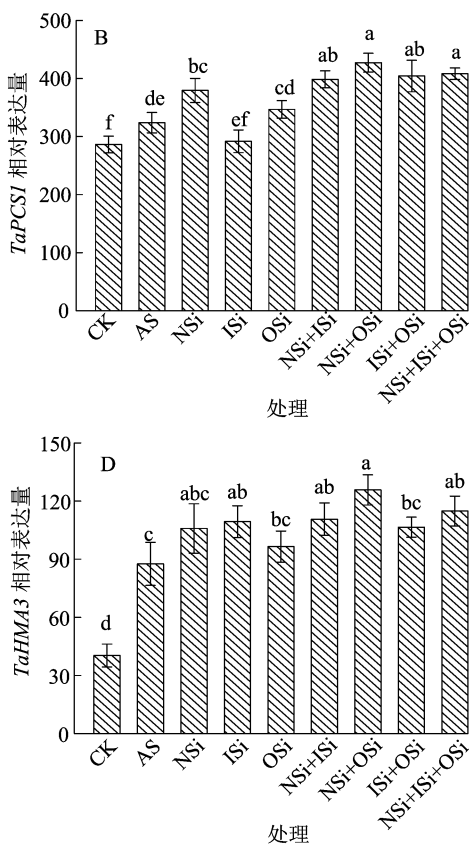


图4 不同形态硅对 As 胁迫下重金属调控基因表达的影响

## 2.4 不同形态硅对砷胁迫下脂质过氧化物含量及重金属调控基因表达的影响

由图 4 - A 可知,在脂质过氧化物 (LPO) 含量中,以 AS 处理含量最高,CK、NSi、ISi、NSi + ISi、NSi + ISi + OSi 处理较其显著降低,其他处理与 AS 处理无显著差异。由图 4 - B 可知,*TaPCS1* 的相对表达量中,各处理转录水平表现为 CK < ISi < AS < OSi < NSi < NSi + ISi < ISi + OSi < NSi + ISi + OSi < NSi + OSi,与 CK 相比,相关砷胁迫处理提高 1.88% ~ 49.18%。由图 4 - C 可知,*TaMT1* 相对表达量中,以 CK 表达水平最低,相关砷胁迫处理较其显著提高 14.47% ~ 93.90%,其中多元组合处理整体大于一元处理,且以 NSi + ISi + OSi 处理表达水平最高。由图 4 - D 可知,*TaHMA3* 相对表达量以 CK 最低,砷胁迫处理较其显著提高 117.44% ~ 212.21%;就相关砷胁迫处理而言,以 NSi + OSi 处理最高,其显著大于 CK、AS、OSi、ISi + OSi 处理。



## 2.5 不同形态硅对砷胁迫下小麦 Si、As 含量及土壤 As 含量的影响

由图 5 - A 可知,在小麦植株 Si 含量中,未施硅

处理(CK、AS)的 Si 含量均较低,二者无显著差异且均显著低于相关施硅处理。就施硅处理而言,各处理 Si 含量表现为 ISi < NSi < OSi < ISi + OSi < NSi +

ISi < NSi + OSi < NSi + ISi + OSi 处理,其中 NSi + ISi + OSi 处理较其他硅处理提高 4.59% ~ 55.84%。各处理的硅转运通道调控基因 (*TaLsi1*) 与植株 Si 含量变化趋势存在一定相似性,但 NSi 处理的 *TaLsi1* 表达水平与 CK、AS 处理无显著差异 (图 5-B)。小麦植株 As 含量中,无砷处理 (CK) 下,其根系及地上部的砷含量均明显低于砷施用处理;相关砷施用处

理中均以 AS 处理的砷含量最高,与 AS 处理相比,相关硅处理的根系、地上部砷含量分别显著降低 31.24% ~ 45.14%、37.52% ~ 55.73% (图 5-C)。土壤 As 含量中,相关砷胁迫处理下,以 AS 处理最高,相关硅处理较其显著降低 9.02% ~ 13.58%,而相关硅处理间差距整体较小 (图 5-D)。

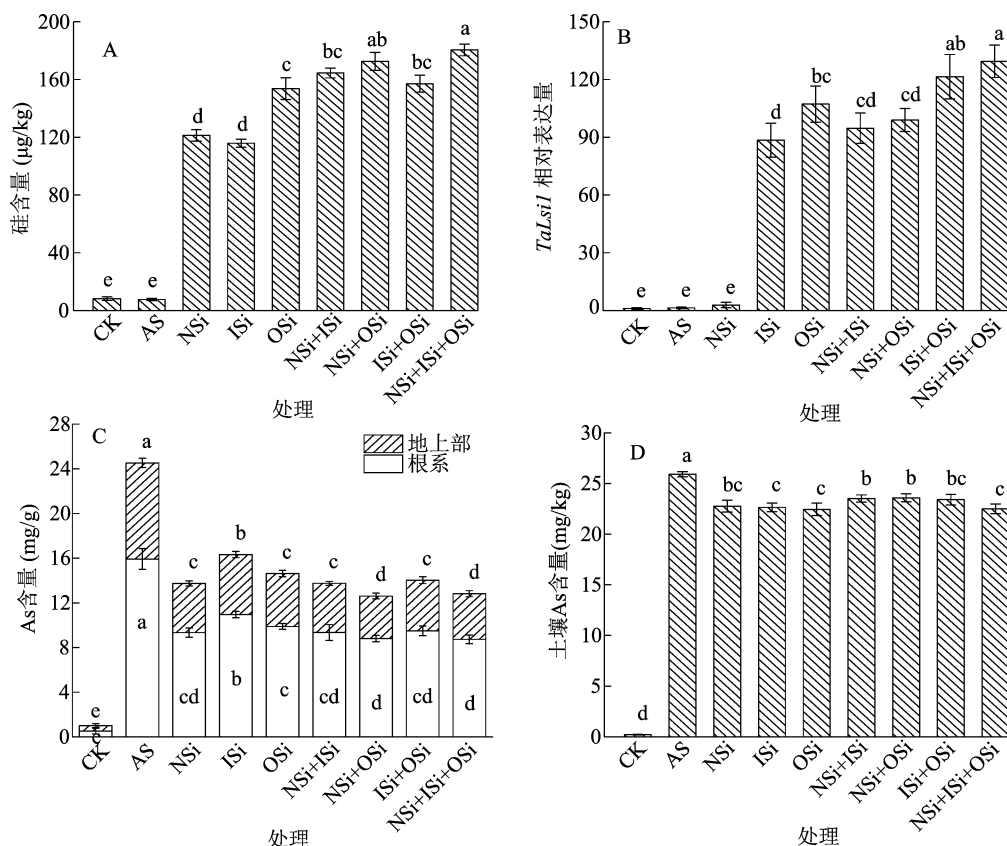


图5 不同形态硅对砷胁迫下小麦 Si、As 含量及其关系的影响

## 2.6 不同形态硅对砷胁迫下小麦 As 生物富集及转运的影响

由图 6-A 可知,砷的生物富集系数 (BCF) 中,以 AS 处理 BCF 最高,为 0.945 9,相关硅处理较 AS 处理显著降低 23.79% ~ 43.48%;就砷胁迫处理而言,以 NSi + OSi 处理的 BCF 最低,其他砷处理较其提高 6.53% ~ 76.94%,其中除 NSi + ISi + OSi 与 NSi + OSi 处理无显著差异外,其他砷处理均显著大于 NSi + OSi 处理。转移系数 (TF) 中,各处理 TF 变化规律与 BCF 基本一致,各处理 TF 表现为 NSi + OSi < NSi + ISi + OSi < NSi + ISi < NSi < ISi + OSi < OSi < ISi < AS 处理,即亦以 AS 处理最高,NSi + ISi + OSi、NSi + OSi 处理较低,其中与 NSi + OSi 处理相比,其他砷处理显著提高 5.02% ~ 21.45%

(图 6-B)。

## 3 结论与讨论

重金属胁迫是影响土壤可持续化及植物发育代谢的典型非生物胁迫之一,光合作用是受非生物胁迫影响的主要生理过程<sup>[18]</sup>。本研究中,与 CK 相比,外源施用 30 mg/kg 砷处理 (AS) 下小麦光合色素 (叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素) 含量、PS II 最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、光化学淬灭系数 ( $q_P$ )、实际光化学效率 ( $\Phi_{PSII}$ ) 均显著降低,非化学淬灭系数 (NPQ) 显著提高。NPQ 是反映光合系统 II (PS II) 吸收的光能无法用于光合电子传递而以热能形式散失的光能比例<sup>[17]</sup>;前人研究表明,硅可通过促进呼吸链中的呼吸与电子传递以加速叶绿素的生物

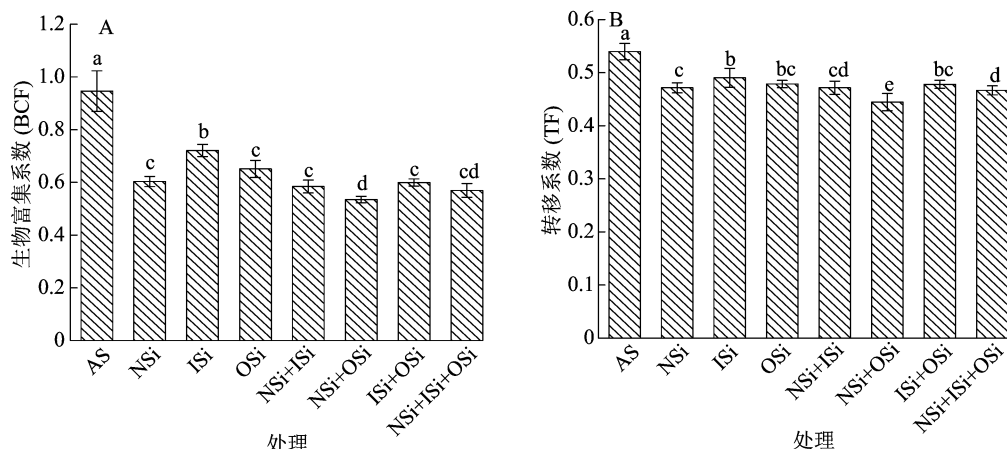


图6 不同形态硅对砷胁迫下小麦 As 生物富集及转运的影响

合成;因此,重金属胁迫下施硅维持植物的光合能力可能与抑制光合色素降解和保护叶绿体超微结构有关<sup>[5,19]</sup>。进一步研究结果显示,叶绿素荧光参数指标极值整体出现在 NSi + OSi、NSi + ISi + OSi 处理,初步表明,As 胁迫下不同形态硅组合纳米硅与有机硅组合施用可有效抑制光合色素的分解及维持光合作用进程。

植物螯合素基因(*PCSI*)、金属硫蛋白合酶基因(*MTI*)以及重金属转运蛋白(*HMA3*)参与调控重金属的络合和转运<sup>[20]</sup>。*PCSI* 在植物体全部器官的重金属螯合中发挥作用,其与脂质过氧化物(LPO)含量密切相关,随着 *PCSI* 表达下调,LPO 则过量积累,从而加重重金属胁迫应激带来的负面影响。*HMA3* 通过将细胞质中的重金属离子转运至液泡,同时介导重金属的长距离运输,在调控重金属螯合物的外排过程中发挥着枢纽作用<sup>[21]</sup>。*HMA3* 有助于将 As-螯合物通过质外体途径转运至液泡实现区室化,其转录水平深刻影响着植物的重金属抗性<sup>[10]</sup>。本研究中,外源施用 30 mg/kg 砷酸二氢钠处理下 *TaPCSI*、*TaMTI* 以及 *TaHMA3* 均发生上调表达;说明 As 积累于液泡溶胶中,且质外体途径活动频繁。而硅处理下 As 含量降低,施硅显著提高了小麦植株的 Si 含量;表明 Si 可以通过介导重金属调控基因的表达、硅吸收及调节抗氧化系统以缓解砷胁迫。此外,OSi 相关处理的 Si 含量较高,这与前人的研究结论<sup>[8,22]</sup>一致:有机硅是最容易被植物吸收累积的主要硅形态。

重(类)金属在植物亚细胞中的分布模式是反映细胞健康状况的重要表征<sup>[23-24]</sup>,细胞壁是阻止重金属进入细胞的首道屏障,其含有大量的果胶、纤维素和半纤维素,这些多糖物质可为细胞提供稳定

而复杂的结构,且细胞壁含有大量的带负电荷的羧基等极性官能团,从而为重金属离子的进入提供多层屏障<sup>[25]</sup>。然而细胞壁的劫持能力有限,当细胞壁吸附饱和后,重金属阳离子进入细胞,从而诱导高尔基体合成硫基官能团形成络合物将重金属运至细胞器(液泡),从而降低重金属对细胞生理的负面影响<sup>[26]</sup>。本研究中,与 CK 相比,砷胁迫处理(AS)细胞壁中 As 比例降低、细胞器和细胞质中的 As 比例增加,且脂质过氧化物含量增加,说明 30 mg/kg 的 As 已严重干扰细胞的生理过程。本研究中,与 AS 处理相比,相关硅处理下的细胞壁、细胞器中 As 比例增加,细胞质中 As 比例降低。这可能是因为 Si 可提高细胞壁木质化以提高重金属固持能力,并有效促进 As-络合物的形成并进入液泡进行区室化的缘故<sup>[27-28]</sup>。此外,本研究进一步表明,以纳米硅组合处理(NSi + OSi、NSi + ISi + OSi)的细胞器中 As 比例较大,细胞质中 As 比例较小,这可能取决于植物体内 Si 含量。

本研究结果表明,SiNPs 处理(NSi)下小麦植株 Si 含量较高,但 SiNPs 处理的硅转运基因(*TaLsi1*)表达水平与未施用硅处理(CK、AS)无明显差异。González - Garcia 等的研究表明,由于纳米材料直径微小能随着水分吸收进入甜椒体内,且其更容易被细胞吸收利用<sup>[29]</sup>;因此 SiNPs 可能随着水分、养分进入小麦体内而不经转运蛋白介导转运。此外,生物富集系数(BCF)、转移系数(TF)中,均以 NSi + OSi 处理最低,其他砷处理较其分别增加 6.53% ~ 76.94%、5.02% ~ 21.45%。综上所述,30 mg/kg As 胁迫下施用不同形态硅及其组合可保护光合色素降解和提高光合效率、调节 As 在亚细胞的分布、调控重金属转运基因的表达使 As 区室化,并通过增

加 Si 吸收和降低 As 累积维持生理稳态以缓解砷胁迫;整体来看以纳米硅与正硅酸乙酯组合施用 (NSi + OSi) 效果最佳。

## 参考文献:

- [1] Zhuang F, Huang J Y, Li H G, et al. Biogeochemical behavior and pollution control of arsenic in mining areas: a review[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1043024.
- [2] 曾思燕, 于昊辰, 马 静, 等. 中国耕地表层土壤重金属污染状况评判及休耕空间权衡[J]. *土壤学报*, 2022, 59(4): 1036–1047.
- [3] Tang Z, Zhao F J. The roles of membrane transporters in arsenic uptake, translocation and detoxification in plants [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2021, 51(21): 2449–2484.
- [4] 和淑娟, 王宏镔, 王海娟, 等. 砷胁迫下 3-吡啶乙酸对不同砷富集能力植物根系形态和生理的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(5): 878–885.
- [5] 龚明贵, 刘凯洋, 魏亚楠, 等. 砷胁迫下接种丛枝菌根真菌对棉花光合特性和叶肉细胞超微结构的影响[J]. *棉花学报*, 2022, 34(3): 256–266.
- [6] Cui J H, Jin Q A, Li F B, et al. Silicon reduces the uptake of cadmium in hydroponically grown rice seedlings: why nanoscale silica is more effective than silicate [J]. *Environmental Science: Nano*, 2022, 9(6): 1961–1973.
- [7] Kovács S, Kutasy E, Csajbók J. The multiple role of silicon nutrition in alleviating environmental stresses in sustainable crop production [J]. *Plants*, 2022, 11(9): 1223.
- [8] 李淑贤, 刘卫国, 高 阳, 等. 硅对人工阴蔽胁迫下大豆幼苗生长及光合特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(19): 3663–3672.
- [9] Wu J W, Mock H P, Giehl R F H, et al. Silicon decreases cadmium concentrations by modulating root endodermal suberin development in wheat plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364: 581–590.
- [10] 张明辉, 时曼丽. 硒、硅对镉胁迫下小麦生长、生理特性及镉分布的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(17): 66–73.
- [11] 白凤麟, 樊雨荷, 李 琳. 硒、硅对盐胁迫下小麦光合生理及养分累积的影响[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(3): 68–75.
- [12] 史高玲, 周东美, 余向阳, 等. 水稻和小麦累积镉和砷的机制与阻控对策[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(5): 1333–1343.
- [13] Zhao F J, Tang Z, Song J J, et al. Toxic metals and metalloids: uptake, transport, detoxification, phytoremediation, and crop improvement for safer food [J]. *Molecular Plant*, 2022, 15(1): 27–44.
- [14] Lou L Q, Shi G L, Wu J H, et al. The influence of phosphorus on arsenic uptake/efflux and As toxicity to wheat roots in comparison with sulfur and silicon [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2015, 34(2): 242–250.
- [15] Shi G L, Liu H A, Zhou D M, et al. Sulfur reduces the root-to-shoot translocation of arsenic and cadmium by regulating their vacuolar sequestration in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1032681.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] 高战武, 范春燕, 鄢上钦, 等. 盐碱胁迫下外源油菜素内酯与 AM 真菌对羊草光合特性及抗氧化酶系统的影响[J]. *山东农业科学*, 2022, 54(5): 44–52.
- [18] 吴敏兰, 李荭荭, 贾洋洋, 等. 砷胁迫对不同烟草品种光合色素和叶绿素荧光特性的影响[J]. *生态毒理学报*, 2015, 10(3): 216–223.
- [19] Li H H, Li Y T, Li X, et al. Low-arsenic accumulating cabbage possesses higher root activities against oxidative stress of arsenic [J]. *Plants*, 2023, 12(8): 1699.
- [20] Monayem H M, Amena K M, Najmul H M, et al. Silicon alleviates arsenic-induced toxicity in wheat through vacuolar sequestration and ROS scavenging[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(8): 796–804.
- [21] Huang H L, Li M, Rizwan M, et al. Synergistic effect of silicon and selenium on the alleviation of cadmium toxicity in rice plants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123393.
- [22] 薛高峰, 张贵龙, 孙淼鑫, 等. 喷施不同形态硅对温室番茄生长发育及品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(16): 272–276.
- [23] 张 立, 王 杰. 不同硒形态对镉胁迫下油菜镉亚细胞分布、化学形态及硒累积的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(17): 259–264.
- [24] 武 坤, 孔 潇, 董 郁, 等. 人工湿地植物对污水中重金属铬、镉、铅富集能力的整合分析[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(6): 1532–1540.
- [25] Riaz M, Kamran M, Rizwan M, et al. Cadmium uptake and translocation; selenium and silicon roles in Cd detoxification for the production of low Cd crops: a critical review [J]. *Chemosphere*, 2021, 273: 129690.
- [26] Hou L, Ji S Z, Zhang Y, et al. The mechanism of silicon on alleviating cadmium toxicity in plants: a review [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1141138.
- [27] Ma J F, Shen R F, Shao J F. Transport of cadmium from soil to grain in cereal crops: a review [J]. *Pedosphere*, 2021, 31(1): 3–10.
- [28] Sheng H C, Chen S L. Plant silicon-cell wall complexes: identification, model of covalent bond formation and biofunction [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 155: 13–19.
- [29] González-García Y, Cárdenas-Álvarez C, Cadenas-Pliego G, et al. Effect of three nanoparticles (Se, Si and Cu) on the bioactive compounds of bell pepper fruits under saline stress [J]. *Plants*, 2021, 10(2): 217.