

不同浓度纳米二氧化硅材料对黄土高原苜蓿与高羊茅根系形态的影响

卓玛草¹, 苟恩泽¹, 孔冉¹, 李广^{2,3}

(1. 兰州资源环境职业技术大学地质与珠宝学院, 甘肃 兰州 730021; 2. 甘肃农业大学林学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 河西学院, 甘肃 张掖 734000)

摘要: 基于黄土高原生态屏障区土壤退化治理需求, 研究黄土高原典型草本植物对纳米二氧化硅的响应机制, 为纳米二氧化硅应用于黄土高原土壤修复提供理论依据, 试验以典型草本植物紫花苜蓿和高羊茅为研究对象, 通过梯度浓度纳米二氧化硅添加试验[0(CK)、0.2%、0.8%、2.0%], 系统揭示纳米材料对植物根系形态发育及生物量的调控作用, 采用根系形态解析与熵权综合评价方法, 量化不同处理下根系参数的响应。结果显示, 0.8%纳米二氧化硅浓度处理对两物种均产生显著促生效应, 苜蓿总根长和根体积较不添加纳米二氧化硅处理提升61.5%、26.7%, 高羊茅根系数量、根系体积增幅达113.9%、86.6%; 而2.0%浓度处理引发显著抑制作用, 两物种根系形态指标及生物量均发生不同程度的降低。高羊茅表现出更强的浓度敏感性, 0.8%处理下其根体积增益较紫花苜蓿高60个百分点, 但在2.0%处理时鲜重降幅(27.3%)为紫花苜蓿(13.6%)的2倍, 且根系直径下降28.2%, 而紫花苜蓿仅下降15.9%。机制解析表明苜蓿通过侧根系统冗余化增强抗逆性, 而高羊茅主根延伸易受纳米颗粒物理堵塞影响。熵权模型综合评价显示0.8%浓度处理下两物种综合得分均达理论最大值(1.00), 证实该浓度具有最优根系改良效益。

关键词: 纳米二氧化硅; 黄土高原; 根系形态; 生物量

中图分类号: S154.2

文献标志码: A

文章编号: 2097-2172(2025)08-0734-07

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.08.009

Effects of Different Concentrations of Nano-SiO₂ on Root Morphology of *Medicago sativa* and *Festuca arundinacea* in the Loess Plateau

ZHUOMA Cao¹, GOU Enze¹, KONG Ran¹, LI Guang^{2,3}

(1. College of Geology and Jewelry, Lanzhou Resources and Environment Voc-tech University, Lanzhou Gansu 730021, China;
2. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou Gansu 730070, China;
3. Hexi University, Zhangye Gansu 734000, China)

Abstract: Based on the soil remediation needs in the ecological barrier zone of the Loess Plateau, this study investigated the response mechanism of selected typical herbaceous plants to nano-SiO₂, providing a theoretical basis for the application of nano-SiO₂ in soil restoration in the Loess Plateau. Two typical herbaceous plants—alfalfa (*Medicago sativa*) and tall fescue (*Festuca arundinacea*)—were used as research subjects, a gradient addition experiment with nano-SiO₂ concentrations of 0 (CK), 0.2%, 0.8%, and 2.0% was conducted to systematically reveal the regulatory effects of nanomaterials on root morphological development and biomass. Root morphological analysis and entropy-weighted comprehensive evaluation were employed to quantify responses of root parameters under different treatments. Results showed that the 0.8% concentration significantly enhanced growth in both species. Alfalfa exhibited 61.5% and 26.7% increases in total root length and root volume versus the control, while tall fescue showed 113.9% and 86.6% gains in root number and volume. Conversely, the 2% treatment caused significant inhibition, reducing root morphological indices and biomass across both species. Tall fescue demonstrated greater sensitivity to concentration changes, its root volume gain at 0.8% treatment exceeded alfalfa's by 60 percentage points, but its fresh weight reduction at 2% treatment (27.3%) was twice that of alfalfa (13.6%), and root diameter decreased by 28.2% in tall fescue, versus a milder reduction of 15.9% in alfalfa. Mechanistic

收稿日期: 2025-05-20

基金项目: 甘肃省科技计划自然科学基金项目(25JRRA75); 兰州资源环境职业技术大学校级科研项目(X2024A-06); 甘肃省高校教师创新基金项目(2025A-298)。

作者简介: 卓玛草(1995—), 女(藏族), 甘肃合作人, 助教, 研究方向为区域生态。Email: zhuomacao@lzre.edu.cn。

通信作者: 李广(1971—), 男, 内蒙古化德人, 教授, 博导, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: lig@gsau.edu.cn。

analysis revealed alfalfa's enhanced stress resistance through lateral root redundancy, while tall fescue's primary root elongation was more susceptible to physical blockage by nanoparticles. The entropy-weighted model confirmed that both species achieved theoretical maximum comprehensive scores (1.00) under 0.8% treatment, validating that this concentration offers the optimal root improvement benefit.

Key words: Nano-SiO₂; Loess Plateau; Root morphology; Biomass

黄土高原作为我国关键的生态屏障和重要的农业生产基地,其土壤健康与植被恢复直接关系到区域生态安全与农业可持续发展^[1]。然而,该地区长期受土壤侵蚀、水土流失及生态退化等困扰,导致土壤贫瘠、有机质含量低,严重制约了农业生产与生态恢复进程^[2]。寻找高效、环境友好的土壤改良与植被恢复技术至关重要。近年来,纳米二氧化硅(Nano-SiO₂)凭借其独特的物理化学性质(高比表面积、表面可修饰性),在改善土壤结构、增强植物抗逆性、促进根系发育及养分吸收等方面展现出显著潜力,被视为一种极具前景的新型土壤改良材料^[3-4]。大量研究表明,纳米二氧化硅能在多种作物(芨芨草、番茄、水稻、小麦等)中有效提升种子萌发率、叶绿素含量、根系活力、生物量积累及养分利用效率,其效果往往优于传统硅肥,且其生物效应受到粒径、浓度及表面化学修饰的显著调控^[5-8]。Rangaraj 等^[9]研究表明,稻壳源纳米二氧化硅(20~40 nm)应用于黄土高原区玉米种植,能显著提升土壤有效硅含量(增加 1.5 倍)及固氮菌、解磷菌丰度(50%~80%),进而提高玉米生物量(30%),展现了其在区域土壤改良中的潜力。尽管上述研究在揭示纳米二氧化硅的农业与生态应用潜力方面取得了重要进展,但其在黄土高原这一特殊脆弱生态区的大规模应用仍面临显著挑战。当前纳米二氧化硅研究多限于单一类型或理想条件,缺乏黄土高原地区复杂退化生态系统及关键草本植物物种间响应差异的系统研究。亟待明确剂量阈值效应与作用机制,并阐明其在土壤贫瘠、有机质匮乏条件下与根际微生态的互作机制。鉴于此,本研究以黄土高原生态修复中 2 种典型草本植物——紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和高羊茅(*Festuca arundinacea*)为对象,利用紫花苜蓿具有生物固氮能力和高羊茅须根系发达的特点,代表黄土高原生态修复中兼具重要生态功能和典型根系构型的关键草本植物类群,探究纳米材料对不同功能型植物根系响应的普适

性与特异性。通过设置梯度浓度(0、0.2%、0.8%、2.0%)纳米二氧化硅添加试验,系统揭示纳米材料对 2 种植物根系形态发育(根长、根数、根表面积、体积、直径)及生物量的剂量效应规律,明确其促进与抑制的浓度阈值,探究苜蓿与高羊茅在响应纳米二氧化硅浓度梯度上的种间差异及其潜在的根系构型适应机制,为纳米二氧化硅在黄土高原退化土壤生态修复中的精准、安全应用提供理论依据与科学支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在甘肃省兰州市榆中县境内的兰州资源环境职业技术大学纳米二氧化硅生态改良示范场进行(103° 56' E, 36° 01' N)。试验区地处甘肃省中部,位于黄土高原向青藏高原的过渡地带,地势呈南高北低、中部凹陷的马鞍形地貌,自北向南依次为干旱山区、川塬河谷区及高寒二阴山区^[10]。该区域属典型温带半干旱大陆性季风气候,年均温度 6~7℃,降水量 350~450 mm,主要集中在 7—9 月,无霜期 84~140 d,光照条件好^[11-12]。试验地土壤质地以灰钙土为主,肥力中等。特殊的黄土地貌与脆弱生态系统的耦合作用,导致地表干旱破碎、土地退化及生态系统服务功能空间异质性显著,严重制约区域生态质量与服务效能^[13-14]。

1.2 供试材料

纳米二氧化硅由湖南长沙晶康新材料有限公司生产,为白色类球形颗粒,平均颗粒直径 28 nm,比表面积 300 m²/g,纯度≥99.8%。选用黄土基质,以黄土高原功能性典型草本植物高羊茅(猎狗 5 号)与紫花苜蓿(中苜 1 号)作为供试植被。

1.3 试验方法

试验前对种子进行统一催芽处理,每组选取 40 粒饱满种子置于萌发基质,待幼苗萌发后,筛选出形态均一、子叶饱满的健康植株,移栽至规格 70 cm×40 cm×30 cm 的塑料培养盆(每盆定植 10 株),以消除个体差异影响。设置 0(CK)、

0.2%、0.8%、2.0% 4 个纳米二氧化硅浓度梯度, 所有处理均置于室外均质化环境。于 2024 年 8 月下旬采用标准塑料培养盆进行系统性采样, 遵循最小干扰原则, 确保样点分布的均匀性、科学性和可比性^[15]。每盆选取长势居中的 3 株代表性植株, 3 次重复, 清洗根系后使用 EPSON V700 扫描仪(300 dpi 分辨率)获取 TIFF 格式根系图像及根系数量、总根长、根表面积、根体积、根直径等形态参数^[16]。测定完的根系称得鲜重后在 65 ℃ 下烘干至恒重, 记录干重即为根系生物量。

1.4 加权综合得分模型评价

基于苜蓿和高羊茅在 0(CK)、0.2%、0.8%、2.0% 纳米二氧化硅浓度处理下的根系形态数据, 采用最小-最大标准化处理。将原始数据转化为 0~1 范围消除量纲差异, 并通过熵权法客观分配指标权重, 构建加权综合得分模型, 量化不同浓度的根系增益效应^[17]。按照以下公式进行计算。

假设有 m 个样本和 n 个评价指标, 构建原始数据矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 。

$$p_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

式中, p_{ij} 为第 i 个样本第 j 个指标的标准化值 (0~1); x_{ij} 为第 i 个样本第 j 个指标的原始数据值, $\min(x_j)$ 、 $\max(x_j)$ 分别表示第 j 个指标的最小值、最大值。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}$$

式中, w_j 为第 j 个指标的权重 ($0 \leq w_j \leq 1$, 所有指标权重之和为 1); e_j 为第 j 个指标的熵值(熵越小, 指标的信息含量越多, 对决策的影响越大); n 表示指标的总数。

$$S_i = \sum_{j=1}^n (w_j \times p_{ij})$$

式中, S_i 代表综合得分, 值越大, 根系增益效应越强。

1.5 数据处理与统计

数据整理与预处理使用 Excel 2019 完成。采用 SPSS 25.0 进行物种与浓度双因素方差分析及交互作用检验; 单因素方差分析结合 Tukey HSD 多重比较检验纳米二氧化硅浓度的影响。使用 Origin Pro 2023b 和 GraphPad Prism 9 作图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度纳米二氧化硅对根系数量的影响

如表 1 所示, 纳米二氧化硅浓度对 2 种植物根系生长呈现剂量效应。苜蓿在 0.8% 浓度下根系数量达 79 条, 较 CK 显著增加 68.1% ($P < 0.05$); 当浓度增至 2.0% 时, 根系数量下降至 44 条。高羊茅对纳米二氧化硅浓度响应更为敏感, 0.8% 浓度下根系数量达 77 条, 较 CK 增加 113.9%, 显著高于其余处理 ($P < 0.05$); 而 2.0% 浓度时根系数量 (37 条) 与 CK 无显著性差异 ($P > 0.05$)。研究证实 0.8% 为 2 种植物根系数量发育的最适浓度, 典型呈现纳米颗粒“低浓度促进-高浓度抑制”的双向调控规律。

表 1 不同浓度纳米二氧化硅处理下的苜蓿、高羊茅根系数量 / 条

纳米二氧化硅浓度	苜蓿	高羊茅
0(CK)	47±3.2 b	36±2.8 c
0.2%	50±4.1 b	45±3.6 b
0.8%	79±5.7 a	77±6.1 a
2.0%	44±3.8 b	37±3.0 c

2.2 不同浓度纳米二氧化硅对根系总根长的影响

从图 1 可以看出, 与 CK 相比, 苜蓿在 0.8% 纳米二氧化硅浓度处理下总根长显著增加 61.5% ($P < 0.05$); 当浓度为 0.2% 时, 总根长微降 0.6%, 两者差异不显著; 当浓度为 2.0%, 则显著下降 50.1% ($P < 0.05$)。与 CK 相比高羊茅在 0.8% 纳米二氧化硅浓度处理下表现出更强的绝对增量, 增幅 59.3% ($P < 0.05$), 当浓度为 0.2% 时呈低促趋势, 两者差异不显著。浓度 2.0% 时高羊茅根长降幅 24.3%, 低于苜蓿降幅。尽管 2 种植物在 0.8% 纳米二氧化硅浓度处理下的增幅相近, 但高羊茅凭

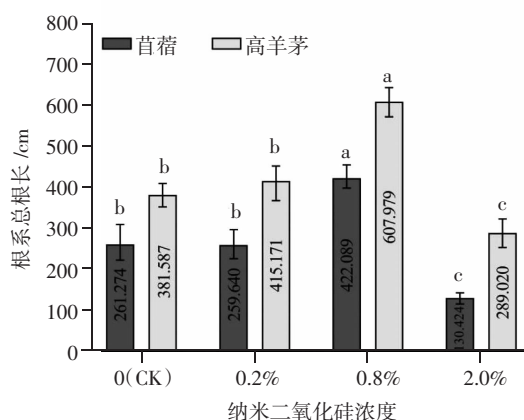


图 1 不同浓度纳米二氧化硅处理下的苜蓿、高羊茅总根长

借更长的根长(381.59 cm)较苜蓿(261.27 cm)展现出更显著的绝对生长优势。

2.3 不同浓度纳米二氧化硅对根表面积、体积的影响

纳米二氧化硅对 2 种植物根系表面积、体积呈浓度依赖性双向调控(图 2、图 3)。苜蓿在浓度 0.8%时根系表面积、根系体积较 CK 分别显著增加 21.0%、26.7%($P<0.05$), 但浓度 2.0%时急剧下降, 降幅分别达 59.9%、67.7%。浓度 0.2%与 CK 无显著性差异($P>0.05$)。高羊茅表现出更强的浓度敏感性, 与 CK 相比较, 浓度 0.2%处理根系表面积显著提升 27.2%, 根系体积显著增大 44.5%($P<0.05$); 浓度 0.8%处理下达最大, 根系表面积、根系体积分别增加 73.0%、86.6%; 当浓度升至 2.0%时, 根系表面积、根系体积分别降低 32.1%、53.1%, 降幅均小于苜蓿, 显示物种间存在耐受性差异。

2.4 不同浓度纳米二氧化硅对苜蓿、高羊茅根系直径的影响

经纳米二氧化硅处理后, 2 种植物根系直径呈现差异化剂量响应(图4)。与 CK 相比较, 浓度

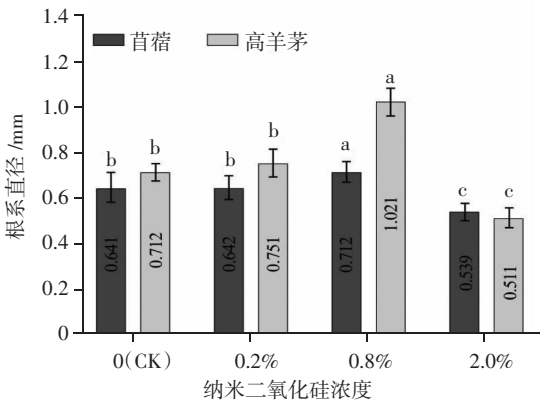


图 4 不同浓度纳米二氧化硅处理下的苜蓿、高羊茅根系直径

0.8%处理下, 高羊茅根系直径增幅达 43.4%, 苜蓿增幅为 11.1%, 促生效应(增幅)的种间差异达3.9倍; 而浓度 2.0%则使高羊茅根系直径减少 28.2%, 抑制强度是苜蓿(降幅 15.9%)的 1.8 倍。可以看出浓度 0.2%处理即引发种间敏感性差异, 高羊茅直径(0.751 mm)增幅 5.5%, 而苜蓿仅微增 0.2%。

2.5 不同浓度纳米二氧化硅对生物量的影响

0.8%纳米二氧化硅浓度处理下, 苜蓿和高羊茅鲜重、干重均达最高, 鲜重分别为 1.580、1.145 g, 较 CK 分别提高 83.3%、79.7%; 干重分别为

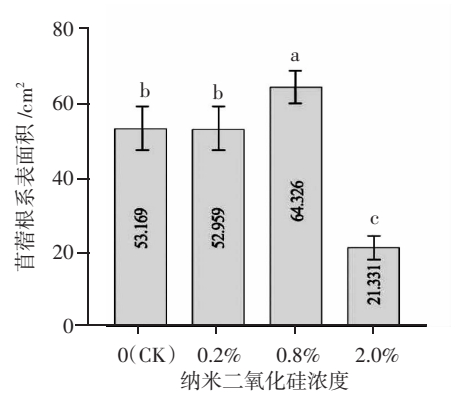


图 2 不同浓度纳米二氧化硅处理下的苜蓿根系表面积和体积

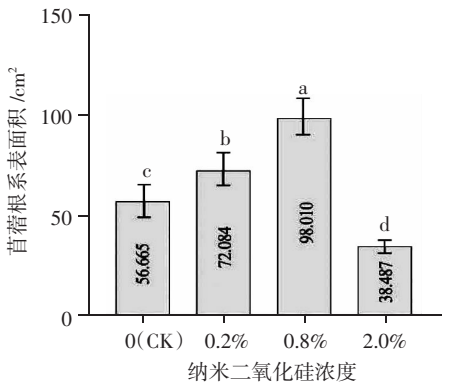
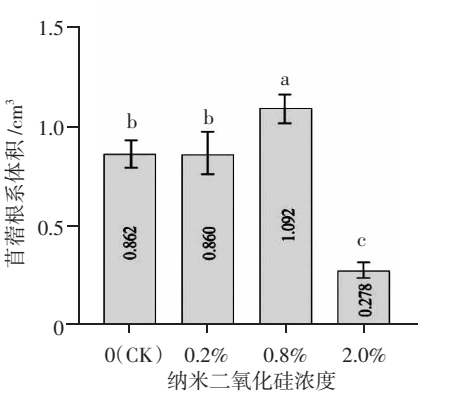
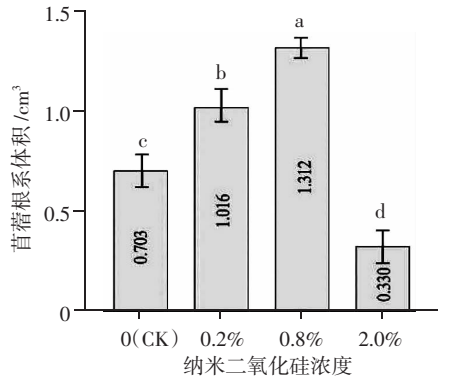


图 3 不同浓度纳米二氧化硅处理下的高羊茅根系表面积和体积



0.616、0.407 g, 较 CK 分别提高 258.1%、247.9% (图 5)。当浓度升至 2.0% 时, 苜蓿鲜重仅下降 13.6%, 而高羊茅降幅达 27.3%, 抑制强度为苜蓿的 2.0 倍, 表明高羊茅对高浓度纳米颗粒的敏感性更强, 其代谢稳定性显著弱于苜蓿。

2.6 物种、浓度及其交互作用对植物根系形态的影响

如表 2 所示, 以物种作为变量对不同浓度纳米二氧化硅处理下的根系形态指标进行双因素方差分析。结果表明, 黄土高原植物根系的数量、

总根长、表面积、体积、直径、生物量等指标在物种与纳米二氧化硅浓度处理之间交互作用不显著。植物物种对根系总根长影响极显著($P<0.01$), 对根系数量、生物量具有显著影响 ($P<0.05$), 而纳米二氧化硅浓度除对根系直径影响不显著外, 均影响极显著 ($P<0.01$)。

2.7 不同浓度纳米二氧化硅处理下根系形态的综合响应评价

通过综合得分模型评价不同浓度纳米二氧化硅处理对苜蓿和高羊茅植物根系形态的影响(表 3、

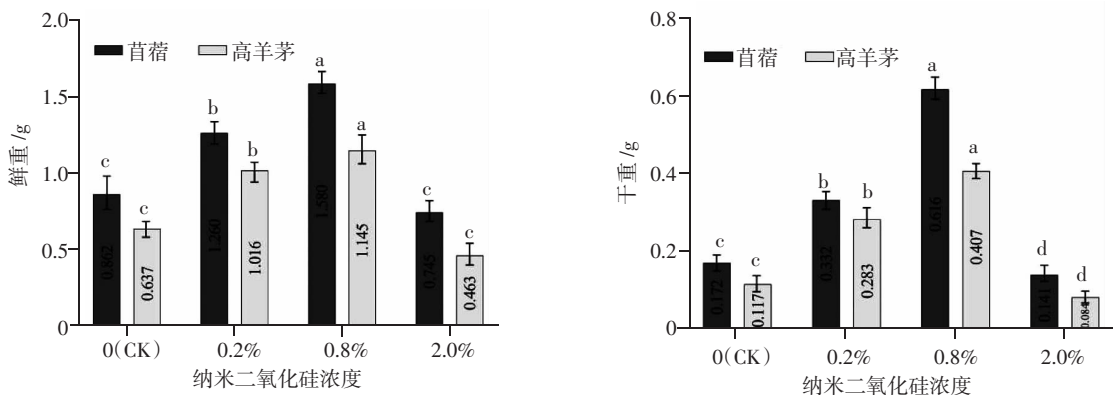


图 5 不同浓度纳米二氧化硅处理下的苜蓿和高羊茅鲜重和干重

表 2 物种、浓度及其交互作用对黄土高原植物根系形态影响的双因素方差分析

因素	根系数量	根系总根长	根系表面积	根系体积	根系直径	生物量
物种	5.638*	9.180**	3.755	0.246	1.755	5.700*
浓度	39.534**	6.083**	6.079**	7.728**	2.597	7.883**
物种×浓度	0.319	0.069	0.498	0.373	0.669	0.147

表 3 苜蓿和高羊茅各指标标准化值及熵权法权重计算结果

指标	纳米二氧化硅浓度	苜蓿标准化值	高羊茅标准化值	苜蓿权重	高羊茅权重	生物学意义
根系数量	0(CK)	0.085 7	0	0.09	0.08	反映根系扩张能力
	0.2%	0.171 4	0.219 5			
	0.8%	1.000 0	1.000 0			
	2.0%	0	0.024 4			
	0(CK)	0	0	0.18	0.25	核心吸收指标
总根长	0.2%	0.442 7	0.419 5			
	0.8%	1.000 0	1.000 0			
	2.0%	0	0			
	0(CK)	0	0	0.21	0.20	根土接触效率
表面积	0.2%	0.735 8	0.752 6			
	0.8%	1.000 0	1.000 0			
	2.0%	0	0			
	0(CK)	0	0	0.13	0.12	空间占位能力
体积	0.2%	0.715 8	0.699 7			
	0.8%	1.000 0	1.000 0			
	2.0%	0	0			
	0(CK)	0	0	0.05	0.04	次要指标(机械支撑)
直径	0.2%	0.595 9	0.470 5			
	0.8%	1.000 0	1.000 0			
	2.0%	0	0			
	0(CK)	0	0	0.34	0.31	综合生长能力(碳汇潜力)
生物量	0.2%	0.600 0	0.829 7			
	0.8%	1.000 0	1.000 0			
	2.0%	0	0			

表 4)。浓度 0.8%处理下, 2 种植物根系综合效益达峰值(得分 1.00), 根系数量、总根长及生物量等指标均呈现最优表现; 低浓度(0.2%)处理下, 高羊茅得分(0.65)高于苜蓿(0.59), 可能归因于其浅根系结构对营养物质的快速吸收特性。高浓度 2.0%处理导致 2 种植物根系指标急剧下降(得分 0), 提示存在明显的毒性抑制阈值。

表 4 苜蓿和高羊茅加权求和综合得分

纳米二氧化硅浓度	苜蓿得分	高羊茅得分	优势物种	排名
0(CK)	0	0	无差异	3
0.2%	0.59	0.65	高羊茅	2
0.8%	1.00	1.00	均最优	1
2.0%	0	0	均抑制	3

3 讨论与结论

本研究首次系统量化了纳米二氧化硅对黄土高原典型豆科(紫花苜蓿)与禾本科(高羊茅)植物根系形态的浓度依赖性调控规律。试验表明, 与不添加纳米二氧化硅处理相比, 浓度 0.8%纳米二氧化硅处理对两物种根系的发育均产生显著促生效应。其核心机制在于纳米颗粒的高比表面积通过静电作用增强土壤团聚体稳定性, 优化孔隙结构, 提升通气性与持水力, 为根系扩展创造理想物理环境^[18]。苜蓿通过侧根冗余化策略(根系数量提升至 79 条)扩大吸收面积, 总根长、鲜重显著增加 61.5%、83.3%。该变化与其豆科植物特性(如根瘤菌共生诱导的激素信号通路)相关, 增强了纳米颗粒物理堵塞的缓冲能力^[19]; 高羊茅则依托主根纵向延伸, 根体积增幅达 86.6%, 根表面积增幅 73.0%, 高于苜蓿(21.0%)。其在 0.8%处理下根体积较苜蓿高 60 个百分点, 但 2.0%浓度时其鲜重降幅(27.3%)为苜蓿(13.6%)的 2.0 倍, 且根系直径较不添加纳米二氧化硅处理下降28.2%, 而苜蓿仅下降15.9%。这一分异源于根系构型进化策略——苜蓿侧根冗余化不仅增加吸收面积, 还可能通过根系分泌物(如有机酸)螯合纳米颗粒, 减轻其毒性; 而高羊茅单一主根延伸模式导致在高浓度下纳米颗粒易在根尖富集, 阻碍细胞分裂素转运, 且其薄壁组织对氧化损伤更敏感^[20-21]。本研究填补了黄土高原多物种响应差异的空白, 明确豆科植物因构型可塑性具备更强纳米耐受性, 为区域退化土壤修复的物种适配性提供了新依据。

熵权模型综合评价证实 0.8%浓度下两物种综合得分均达理论峰值(1.00), 验证其作为黄土高原退化土壤生态修复的优选浓度, 尤其适用于退耕还草地、矿区复绿等需快速建立植被覆盖的场景。该浓度通过“物理改良-微生物激活”级联效应(如促进固氮菌/解磷菌增殖)同步提升根系生物量及养分捕获效率^[22]。然而, 与不添加纳米二氧化硅处理相比, 浓度 2.0%纳米二氧化硅处理引发强烈抑制效应。苜蓿与高羊茅根体积分别骤降 67.7%、53.1%, 鲜重损失达 13.6%、27.3%。高浓度纳米颗粒可能堵塞根际微孔道, 破坏水分运输路径, 外加黄土高原贫瘠土壤中抗氧化物质匮乏, 加剧了高羊茅的膜脂过氧化^[6, 23]。此浓度具有明确生态风险, 可能导致植被盖度下降、水土保持功能衰退, 尤其在干旱区坡面治理中需严控。与现有研究对比, 本研究验证了“低促高抑”的普遍规律, 首次揭示禾本科物种对高浓度纳米二氧化硅的脆弱性, 凸显黄土高原贫瘠土壤中纳米毒性的放大效应。未来需开展田间验证研究, 重点监测不同浓度下纳米颗粒的长期迁移行为及对氮磷循环的干扰, 并构建“纳米二氧化硅-微生物”协同技术体系, 制定兼顾生物量产出与生态安全的环境阈值。

参考文献:

[1] 傅伯杰, 刘彦随, 曹 智, 等. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110-1117.

[2] 李宗善, 杨 磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.

[3] JEELANI P G, MULAY P, VENKAT R. et al. Multifaceted application of silica nanoparticles. A review[J]. Silicon, 2020, 12, 1337-1354.

[4] 孙德权, 陆新华, 胡玉林, 等. 纳米硅材料对植物生长发育影响的研究进展[J]. 热带作物学报, 2019, 40(11): 2300-2311.

[5] 邓欢欢, 莫小丽, 朱星辉, 等. 纳米硅材料对植物生长发育和环境响应的影响研究进展[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(6): 1496-1501.

[6] 杨 岭, 袁林喜, 张学燕. 农用纳米二氧化硅载体对作物生长影响的研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(2): 25-31.

[7] 张万祥, 耿小丽, 武慧娟, 等. 纳米硅肥对燕麦抗倒伏性和种子产量的影响[J]. 中国草食动物科学, 2025,

- 45(4): 1–11.
- [8] YUE L, WANG J, CAO X. et al. Silica nanomaterials promote rice tillering and yield by regulating rhizosphere processes, nitrogen uptake, and hormone pathways[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(46), 16650–16660.
- [9] RANGARAJ S, GOPALU K, RATHINAM Y, et al. Effect of silica nanoparticles on microbial biomass and silica availability in maize rhizosphere[J]. Biotechnology and Applied Biochemistry, 2014, 61, 668–675.
- [10] 石育中, 李文龙, 鲁大铭, 等. 基于乡镇尺度的黄土高原干旱脆弱性时空演变分析——以榆中县为例[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2130–2140.
- [11] 钱 续, 刘晓玲, 白 露, 等. 榆中县南部山区部分水域水质分析评价[J]. 甘肃畜牧兽医, 2022, 52(11): 58–61.
- [12] 孙振荣, 王 平, 谢成俊, 等. 寒旱区玉米间作南瓜高产模式研究[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(1): 41–43.
- [13] 韦 体, 卜 磊, 吴登宇, 等. 甘肃省榆中盆地不同人工植被类型下的土壤养分时空特征[J]. 河南农业科学, 2021, 50(11): 79–86.
- [14] 李梓妍. 生态系统服务供需视角下的生态修复分区及治理[D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
- [15] 李开叶, 曾 超, 杜若尘, 等. 探究蚯蚓辅助苜蓿对不同镉含量污染农田土壤的修复效应[J/OL]. 环境科学, 1–14 (2025–05–15)[2025–05–28]. <http://doi.org/10.13227/j.hjkk.202502202>.
- [16] 李建成, 伍维模, 赵长巍, 等. 氮肥减量配施壳寡糖对棉花根系生长及根际土壤酶活性的影响[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(8): 752–758.
- [17] 马克迪, 董增川, 金大伟, 等. 基于改进的 POME 模糊综合评价模型的江苏省河流生态健康评价[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1): 67–70.
- [18] 姬 晨, 郭树勋, 赵晏俪, 等. 纳米硅对低温胁迫下番茄根系构型及土壤酶活性的影响[J]. 陕西农业科学, 2024, 70(4): 17–22.
- [19] LIU X J, HUANG K, CHU C C. The genetic basis of nitrogen-dependent root system architecture in plants[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2025, 12(1): 3–15.
- [20] 陈娟妮, 朱云松, 宋 锐, 等. 工程纳米材料对高等植物生长影响的研究进展[J]. 植物学报, 2023, 58(5): 813–830.
- [21] 张 悦, 管千慧, 周 政, 等. 纳米颗粒和微生物相互作用过程中生物膜的形成机制与效应[J]. 材料导报, 2025, 39(12): 37–45.
- [22] 张彦峰. 石墨烯量子点在玉米根部的吸收、植物效应及纳米二氧化硅的影响[D]. 太原: 山西大学, 2024.
- [23] 刘 勇, 刘 媛, 赵 俭, 等. 土壤中纳米材料毒性效应的研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 86–93.