doi: 10.3724/CBB-2026-0014

氯化镨对花生北花 12 号种子萌发及生长的影响

付俊瑞[1], 邵明雨[1,2], 赵帅豪[1], 刘晓芹[1,2*]

[1]北京大学现代农业研究院, 潍坊现代农业山东省实验室, 潍坊 261325; [2]山东师范大学生命科学学院, 济南 250358

摘要 稀土元素已被证明对作物生产具有广泛的促生效果, 在农业生产中展现出巨大的应用潜力。然而, 稀土元素对花生种子萌发的影响及作用机制尚未见报道。本研究选取镧、铈、钕和镨 4 种稀土元素以及北花 12 号、四粒红和云南七彩 3 个花生品种, 探究稀土元素对花生种子萌发影响的差异。同时, 基于具有显著促进胚轴伸长作用的镨-北花 12 号组合, 利用转录组测序技术分析稀土元素促进胚轴生长的潜在作用机制。结果表明, 不同稀土元素对种子萌发的影响存在差异, 且不同花生品种对同一稀土元素的敏感性也不同。在 50 μmol·L^{-1} 氯化镨处理组中, 北花 12 号种子胚轴显著伸长, 胚轴内类黄酮物质合成代谢途径及转运蛋白活性途径显著富集, 且类黄酮物质含量显著增加。 qRT-PCR 验证结果显示, 相关差异基因均上调表达。进一步对北花 12 号幼苗叶片喷施氯化镨溶液, 低浓度镨元素可提高叶片内叶绿素含量、可溶性糖含量以及净光合速率。研究结果可为未来稀土肥在花生生产中的合理科学应用提供借鉴。

关键词 北花 12 号, 胚轴伸长, 稀土元素, 转录组测序

付俊瑞, 邵明雨, 赵帅豪, 刘晓芹 (2026). 氯化镨对花生北花 12 号种子萌发及生长的影响. 植物学报

稀土元素(Rare earth element, REEs)是位于元素周期表中原子序数 57 到 71 的镧系元素以及原子序数为 21、39 的元素钪和钇等。自 20 世纪以来, 大量的研究表明稀土元素对作物生产具有广泛的生物促进效应(Liu et al., 2007; Kovarikova et al., 2019)。稀土元素具有提高农作物产量(Chaturvedi et al., 2014; Ribeiro et al., 2021)、提高农产品品质(Rico et al., 2014; Pošćić et al., 2016)、增强抗逆性(Gao et al., 2005; Peng-Bo et al., 2011; Rossi et al., 2017)以及促进营养元素的吸收利用(He et al., 2000; Huang et al., 2003; Zeng et al., 2003)等多方面作用。20 世纪中后期, 花生作为代表性作物之一被用于稀土元素在农业生产中的作用研究。已有研究表明, 施用稀土肥能够促进花生种子萌发、根系生长, 提高根系活力, 增加根瘤数量, 提高固氮量(Ma, 1996; Li et al., 1989; Emmanuel et al., 2010); 增加植株叶面积、提高叶绿素含量和光合作用以及提高了叶片铵态氮和全氮含量(Zhang et al., 2000; Guo et al., 2004); 促进花生对氮磷等营养物质的吸收和利用, 提高荚果的产量和种子的蛋白质含量(Yu et al., 1982; Tu et al., 1986; Nie and Li, 1996; Chen et al., 2014)。Lao 等(2002)进一步通过砂培和田间小区试验, 发现适宜浓度稀土液浸种花生不仅提高了叶绿素含量和光合强度, 而且促进了叶细胞叶绿体的生长发育, 从而有利于光能的吸收和转化, 提高荚果产量。另外, 施加适宜浓度范围的铈营养液可增强花生植株 SOD 和 POD 活性, 进而促进植株生长和开花, 提高开花数和果针数等(Chu et al., 2006; Xu et al., 2021; Emmanuel et al., 2010)。此外, 适宜量的稀土溶液浸种能促进花生种子的发芽率, 干旱条件下幼苗根系发达、植株矮壮、叶片脯氨酸含量以及叶绿素含量和净光合速率提高, 显著促进幼苗的抗旱性(Ni et al., 1999; Nie et al., 2002)。

收稿日期: 2026-01-18; 接受日期: 2026-04-10
基金项目: 山东省重点研发计划(No.2025LZGC051, No.2024LZGC035)
* 通讯作者。E-mail: xiaoqin.liu@pku-iaas.edu.cn

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

种子萌发是植物生长发育的开始，也是农业生产的基础。破土出苗是植物生命周期中至关重要的一步，决定植物能否存活。而胚轴快速伸长和增粗为幼苗顶出土壤提供动力，对植物早期存活和后期生长发育均具有重要作用。花生(*Arachis hypogaea*)是我国重要的经济和油料作物，兼具营养价值、经济价值和产业链发展潜力(李婷婷等, 2026)。促进花生种子萌发对提高花生产量具有重要意义。目前已有报道主要采用稀土肥复合液用于花生生产研究，不同单一稀土元素的作用差异及不同品种对同一稀土元素的敏感性差异及作用机制研究报道较少。因此，本研究中我们首先分别比较了 4 种稀土元素对 3 个花生品种种子萌发的作用差异，并分析了 50 μmol·L^{-1} 氯化镨处理 48 小时后的北花 12 号种子胚轴的转录组水平变化。以此探究不同稀土元素的作用差异及潜在作用机制，为稀土元素在该花生生产中的合理科学施用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试花生品种北花 12 号种子由本实验室联合培育，山东潍坊当地品种四粒红种子购自寿禾种业，云鲜赞七彩花生种子网购于云鲜赞旗舰店由普洱农家人农业有限公司提供。四种氯化盐形式稀土元素氯化镨($PrCl_3$)、氯化铈($CeCl_3$)、氯化镧($LaCl_3$)和氯化钕($NdCl_3$)均购自麦克林品牌。

1.2 稀土元素对种子萌发的影响

首先，种子表面分别采用 1%次氯酸钠消毒 5 分钟，75%无水乙醇消毒抑菌处理 1 分钟后，无菌水洗涤 3–4 次，晾干后放入铺有两层无菌滤纸的一次性培养皿(直径 9 厘米)内，每皿放置 10 粒健康饱满的种子。分别配置浓度 25 μmol·L^{-1}、50 μmol·L^{-1}、100 μmol·L^{-1} 和 200 μmol·L^{-1} 的氯化镧、氯化钕、氯化镨以及氯化铈溶液进行种子催芽处理，每皿加入 5 mL 溶液，以清水为对照，每个处理设置 3 个生物重复共计 30 粒种子。将培养皿放置在 28°C 黑暗条件下培养，期间及时添加溶液，避免培养皿干燥。培养 48 小时后测量统计胚轴长度。

1.3 胚轴组织类黄酮物质含量的检测

采用植物类黄酮含量检测试剂盒(索莱宝，北京)进行胚轴组织类黄酮物质含量检测。每个处理取 10 粒种子的胚轴样品，于 65°C 烘箱烘干至恒重，研磨粉碎后，称量后以料液比 1:30 加入 60%乙醇，放置 60℃水浴锅中进行提取 1.5 小时。每个处理设置 3 个生物重复。在 25°C 下, 12 000 ×*g* 离心 10 分钟，取上清待检测。后续根据商业试剂盒操作说明进行。根据标准管浓度和测定吸光度建立标准曲线，计算样本浓度。最终按照样本质量计算类黄酮含量，类黄酮含量(mg·g^{-1})=样本浓度×v(体积)/w(质量)。

1.4 氯化镨对北花 12 号种子胚轴转录组的影响及差异基因表达 qRT-PCR 验证

根据各处理中胚轴伸长的差异，进一步分别选取上述清水和 50 μmol·L^{-1} 的 $PrCl_3$ 处理 24 小时的胚轴组织样品，每个处理设置三个生物重复。利用 FastPure Universal Plant Total RNA Isolation Kit (Vazyme, China) 提取胚总 RNA。采用 Agilent 2100 bioanalyzer 精确检测 RNA 完整性和总量。样本被送至实验室进行处理，并基于 Illumina NovaSeq 平台上进行测序(诺禾致源，中国)，以获得 150 个碱基对的双端读数。通过去除带接(adapter)的 reads、去除含 N 的 reads、去除低质量 Reads (Qphred≤5 的碱基数占整个 read 长度的 50%以上的 reads)。同时对 clean data 进行 Q20、Q30 和 GC 含量计算以获得高质量 clean data。使用 FastQC (版本 0.11.8)进行了质量控制。使用了 HISAT2 (版本 2.0.5)将过滤后的读段与参考基因组(*A. hypogaea*

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

Tifrunner; GCF_003086295.2)进行比对。利用 Swiss-Prot、GO、KOG、NR 和 KEGG 数据库对单基因进行了功能注释。通过 DESeq2 方法鉴定出差异表达基因(DEGs), 其调整后的 $P<0.05$ 且$|\log_2 \text{foldchange}|\geq 1$。使用 clusterProfiler 进行 GO 丰度分析以及 clusterProfiler 进行 KEGG 通路富集分析。

使用 HiScript III All-in-one RT SuperMix Perfect for qPCR (Vazyme)进行 cDNA 合成, 每个反应中 RNA 模板量为 100 ng。选择花生 *ELF1B* 为内参基因, 通过基因特异性引物(表 1)和 ChamQ Universal SYBR qPCR Master Mix (Vazyme)试剂进行荧光定量 PCR (qRT-PCR)分析。相对表达水平采用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 计算。每个实验包含 3 个独立的生物学重复。

表 1 引物序列

Table1 Primer sequences

Primer name	Gene function	Sequences (5′→3′)
ELF1B	Elongation factor1-beta 2-like	F-AAGCTTCCCTGGCAAAGCTCAA R-TTCCTCAGCTGCCTTCTTATCC
Gene1	1-aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase 1	F-TGGCATCGCCCCAAATCTA R- GCATCCGTGTGCTCCCTCA
Gene2	acyl-CoA-binding domain-containing protein	F-AGCAAGAGTTACGGTGGTGG R-TCTGTGACATTACGGTGGCC
Gene3	gibberellin 20 oxidase 1-like	F-AGAGCAGCCACATTCTCACC R-CCGAAGTCTTCACAGGCCTT
Gene4	FKBP-like peptidyl-prolyl cis-trans isomerase family protein	F-GACGATTTCCCCGTTCTCA R-GGCTCCCCTATCTCTGCTG
Gene5	Expansin A9	F-CGCACACGCCACCTACT R-ATCTGCCCCTGCTCAAA
Gene7	endotransglucosylase/hydrolase protein 22	F-CCTCCAAGCCCTCAAAGGTT R-CTAGGCCGGTTTGAATTGCG
Gene8	XET, lucanendo-1,3-beta-glucosidase-like	F-GAACCCCCAAAGGATTAT R-CCACCTCTTGTTGCCCAG
Gene9	Cytochrome P450 superfamily protein	CGTCGTTACCACTACCC CAAGAACTGCTCCGCTA
Gene10	NAD(P)-binding Rossmann-fold superfamily protein	TTGGTCCTTCTCTCACCCCA CCCGGCAAATATCCTCCACA
Gene11	NAD(P)-binding Rossmann-fold superfamily protein	ATGCGTCATTGGTGG TGTCATTCTCAGGGTCTT
Gene12	dihydroflavonol 4-reductase	GATAAAGCCTACAATAAACG TCGGCAGAAGTCAACA
Gene13	dihydroflavonol 4-reductase	AGCCTTATTACTGCTCTTT TACCTCCCTTCAACTTTT
Gene14	anthocyanidin synthase	AGCGTGACTTGTCCATCT TCTCCAGCCTCCCTTC
Gene15	chalcone synthase	GGGAAAGAGGCAGCAA GCCAAACGAAGCACC

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

1.5 氯化镨对花生植株生长的影响

基于品种北花 12 号种子对氯化镨处理更敏感，进一步观察幼苗生长时期是否也具有一定的影响作用。于生长室(温度 27℃、湿度 50%左右，光照光周期 14 小时光照/10 小时黑暗)条件下采用人工基质土(蛭石:基质土=1:2)种植北花 12 号品种，进一步验证氯化镨对该幼苗生长的影响。待长出第一片真叶时开始进行氯化镨溶液外源喷施处理，溶液浓度分别为 0 μmol·L^{-1}、25 μmol·L^{-1}、50 μmol·L^{-1}、100 μmol·L^{-1} 和 200 μmol·L^{-1}。每隔 5 天喷施一次，共计喷施三次。根据 Shen 等(2018)的研究，分别测定第三次喷施完毕后短期生理效应(24 小时)叶片叶绿素含量和可溶性糖含量的变化以及长期生长效应(7 天)如株高。

叶绿素含量测定方法: 每个处理取 6 株生长一致的植株新鲜倒二叶叶片，去除中脉，称量 0.5 g 叶片置于研钵中剪碎研磨。加入 20 mL 95%乙醇，避光浸提 24–48 小时，直至叶片变白。使用紫外分光光度计分别在波长 665 nm (叶绿素 a)、649 nm (叶绿素 b)和 470 nm (类胡萝卜素)下测定吸光度。每个处理设置 3 个生物学重复。计算叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的浓度(mg·L^{-1})。根据浓度计算各色素含量(mg·g^{-1})。叶绿素 a: Ca=13.95×A665–6.88×A649; 叶绿素 b: Cb=24.96×A649–7.32×A665。叶绿素含量(mg·g^{-1})=C×v/(w×100) (戴悦等, 2023)。同样每个处理取 6 株生长一致的植株新鲜倒二叶叶片，去除中脉，称量 0.2 g 叶片置于研钵中剪碎研磨。按照植物可溶性糖含量测定试剂盒(索莱宝，中国)商业操作说明进行操作测定。每个处理设置三个生物学重复。此外，于上午 9:00–11:00 利用 LI-6800 新一代光合作用全自动测量系统测定叶片净光合速率，每个处理共计测定 10 片新鲜倒二叶叶片。

1.6 数据处理

利用 Graphpad Prism 10.0 软件进行数据单因素方差分析及差异显著性检验(One-way ANOVA, P<0.05 表示差异显著; P<0.01 表示差异极显著)。

2 结果分析

2.1 不同稀土元素对花生种子萌发的影响

采用 0–200 μmol·L^{-1} 梯度浓度稀土溶液分别浸种处理花生种子 48 小时。与清水对照组(0 μmol·L^{-1})比较，对于四粒红花生种子, La^{3+}、Ce^{3+}、Nd^{3+}及 Pr^{3+}未表现出显著的促生长作用(图 1A)。同样，统计分析结果显示，这四种稀土离子对七彩花生种子的萌发也未呈现显著的促进作用(图 1B)。然而，北花 12 号种子的胚轴长度测定结果显示, 25 μmol·L^{-1} Ce^{3+}对种子萌发在 P<0.05 水平上有显著的促进作用(图 1C), 50–200 μmol·L^{-1} 的 Pr^{3+}则对北花 12 号种子萌发具有极显著的促进作用，且随浓度增大，促进效果逐渐减弱(图 1D)。此外，从种子萌发表型(图 2)来看，北花 12 号种子对 $PrCl_3$ 溶液刺激的反应更为敏感。因此，后续选择 Pr-北花 12 号组合进行机制探究。

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

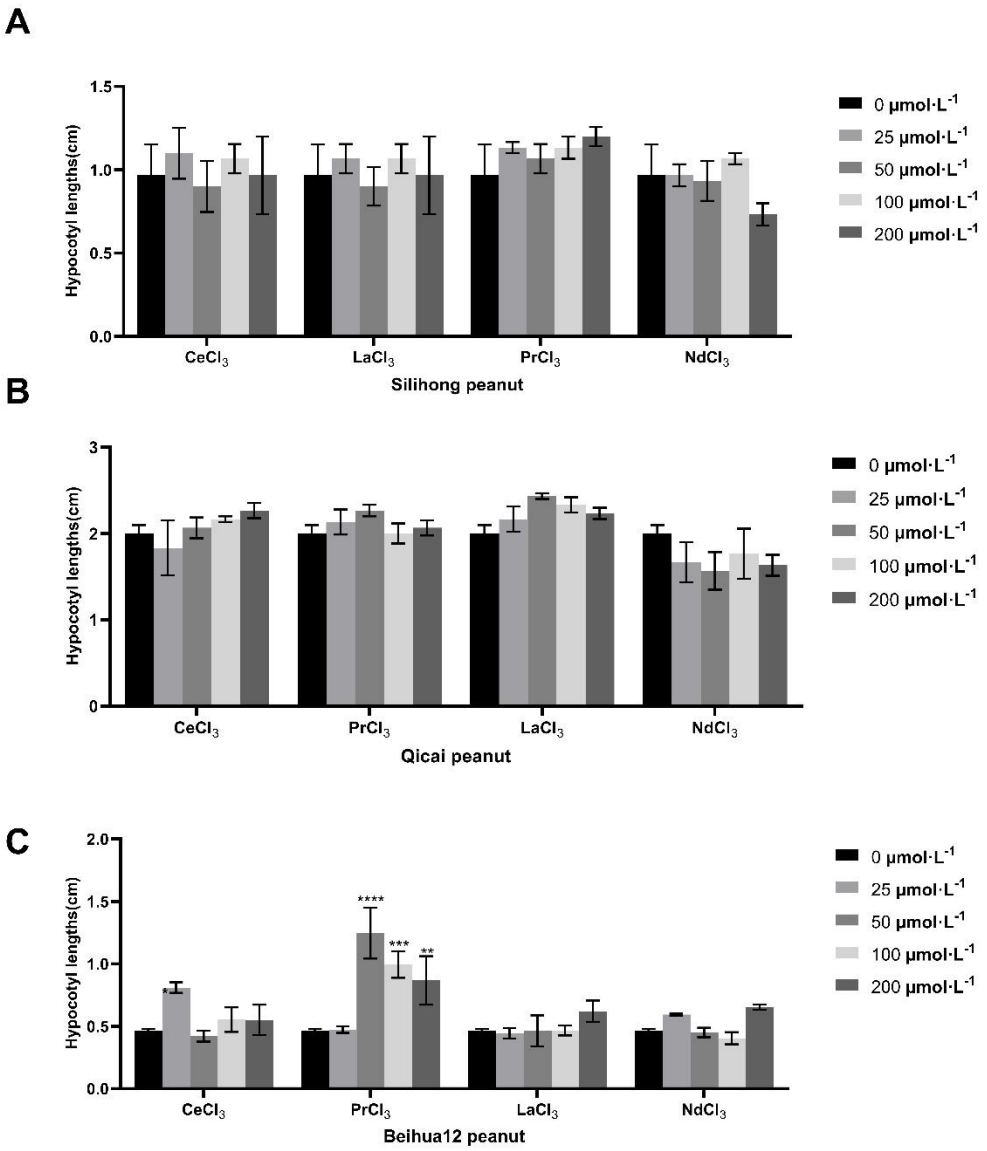


图 1 四种稀土元素分别对花生四粒红**(A)**、七彩**(B)**和北花 12 号**(C)**种子胚轴伸长的影响

结果均以 0 μmol·L^{-1} 处理组为对照，数据为平均值±SE (* P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; **** P<0.0001)。

Figure 1 Influnces of four rare earth elements on the seed hypocotyl elongates of three peanut variety Silihong **(A)**, Qicai **(B)** and Beihua12 **(C)**

All groups were compared with the 0 μmol·L^{-1} treatment, data are means±SE (*P < 0.05; **P<0.01; ***P<0.001; ****P<0.0001).

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

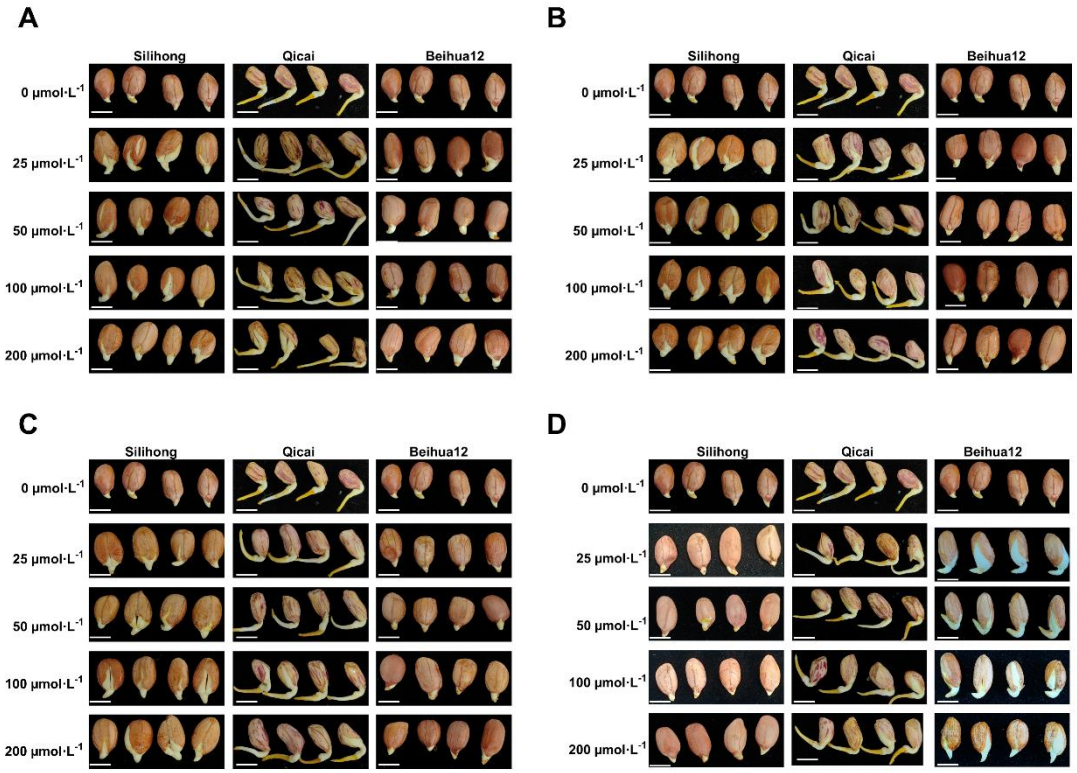


图 2 四种稀土元素处理 48 小时后种子萌发表型

(A) 氯化铈处理; **(B)** 氯化镧处理; **(C)** 氯化钕处理; **(D)** 氯化镨处理(bars=0.5 cm)。

Figure 2 Phenotypes of seeds treated with four rare earth elements at 48 h

(A) $CeCl_3$ treatment; **(B)** $LaCl_3$ treatment; **(C)** $NdCl_3$ treatment; **(D)** $PrCl_3$ treatment (bars=0.5 cm).

2.2 种子萌发过程中胚轴组织转录组水平的变化

为明确稀土元素促进胚轴伸长的机制，选择催芽 48 小时的清水和 50 μmol·L^{-1} $PrCl_3$ 处理的胚轴组织进行转录组测序。如表 2 所示, 0 μmol·L^{-1} 氯化镨处理样品共获得 45834601 个 raw reads, 50 μmol·L^{-1} $PrCl_3$ 处理样品测得46785185个raw_reads；分别mapping到参考基因组的unique_reads概率达78.23%和76.69%, 数据进行质控过滤后分别获得 45577824 个 clean_reads 和 46528615 个。Q20 和 Q30 值均大于 97%，说明测序数据质量完全符合标准，可用于后续分析。基于各样本所有基因的 FPKM 值计算组内及组间样本的相关性系数绘制样本相关性热图(图 3A)，组内样本相关性系数大于组间样本相关性系数，组内样本相关性系数均大于 0.9，说明实验设计合理，样本选择可靠。另外，两组样本 PCA (Principal Component Analysis)主成分分析结果表明，PC1 和 PC2 值分别可解释 99.60%，0.4%的方差(图 3B)，不同处理间样本存在明显分离，各组样本间存在明显聚类，组内样本重复性较好，表明获得的转录组数据质量良好，能够用于后续分析。

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

表 2 RNA 测序基本情况

Table 2 Basic Information on RNA Sequencing

Sample	Raw_reads	Unique_map	Clean_reads	Q20	Q30
Pr-0 μmol·L^{-1}	45834601	17828825 (78.23%)	45577824	99.40%	97.31%
Pr-50 μmol·L^{-1}	46785185	17837786 (76.69%)	46528615	99.40%	97.29%

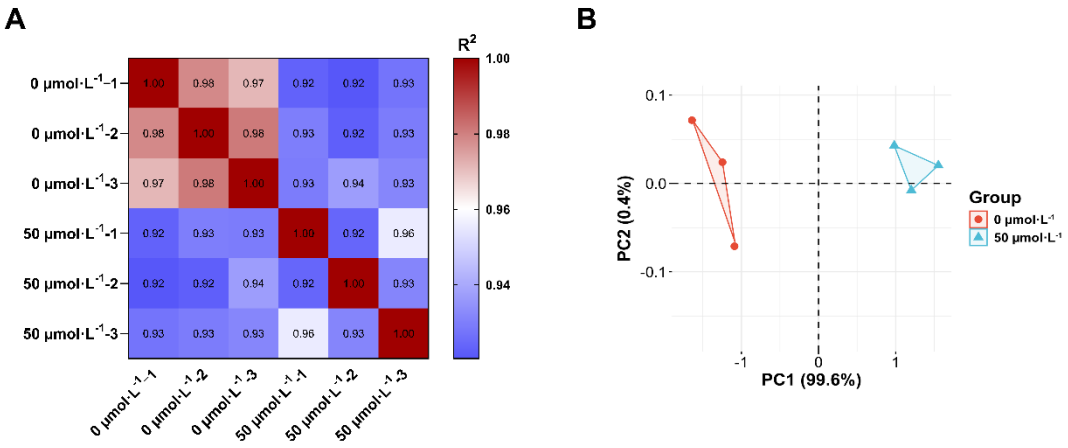


图 3 两组样本相关性热图**(A)**和 PCA 分析**(B)**

Figure 3 Heatmap of correlation between two groups of samples **(A)** and PCA analysis **(B)**

在 padj<0.05、|log2FoldChange|>1 的水平上，清水组和 50 μmol·L^{-1} $PrCl_3$ 比较共产生 454 个差异表达基因，其中上调差异基因 318 个，下调基因 136 个(图 4A)。基于 KEGG 数据库对差异基因参与代谢通路进行注释和分析。KEGG 富集分析结果显示，差异基因显著富集于类黄酮生物合成(Flavonoid biosynthesis, Flavone and flavonol biosynthesis)，盐酸和烟酰胺代谢(Nicotinate and nicotinamide metabolism)和植物昼夜节律(Circadian rhythm-plant)通路(图 4B)。

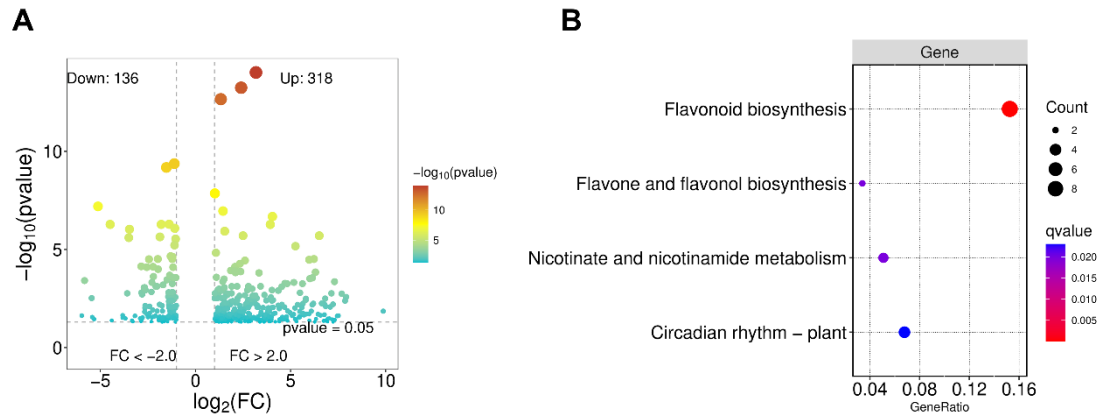


图 4 胚芽组织差异表达基因及 KEGG 富集

(A) 差异基因火山图; **(B)** 差异基因 KEGG 富集。

Figure 4 Differentially expressed genes in the germinal tissue and KEGG enrichment analysis

(A) Volcano plot of differentially expressed genes; **(B)** KEGG enrichment of differentially

expressed genes.

此外，对差异基因进行 GO 功能注释分析。GO 功能富集分析结果表明，在细胞成分中，差异基因主要富集于质膜(external side of plasma membrane)和核膜(nuclear membrane)。在分子功能中，差异基因主要涉及微管蛋白结合活性(alpha-tubulin binding)，脂肪酸跨膜转运蛋白活性(fatty acid transmembrane transporter activity)，水跨膜转运蛋白活性(water transmembrane transporter activity)，水通道活性(water channel activity)以及脂质转运蛋白活性(lipid transmembrane transporter activity)。在生物学过程中，差异基因主要富集于半乳糖胺代谢过程(galacturonate metabolic process)以及类黄酮物质中花青素生物合成过程的调控(regulation of anthocyanin biosynthetic process)、花青素代谢过程的调控(regulation of anthocyanin metabolic process)和含花青素化合物的生物合成过程(anthocyanin-containing compound biosynthetic process) (图 5)。转录组水平的变化结果表明，类黄酮物质可能是响应 $PrCl_3$ 刺激的主要物质，进而促进种子萌发。



图 5 胚芽组织差异表达基因 GO 功能富集

MF: 分子功能; CC: 细胞成分; BP: 生物学过程

Figure 5 GO enrichment analysis of differentially expressed genes in the germinal tissue

MF: Molecular function; CC: Cellular component; BP: Biological process

2.3 胚轴中类黄酮物质含量的变化

基于转录组水平上胚轴组织类黄酮物质合成和代谢途径显著富集的结果，进一步测定了不同浓度 $PrCl_3$ 溶液浸种处理 48 小时后，北花 12 号种子胚轴内类黄酮物质的含量变化。结果表明，与清水组(0 μmol·L^{-1})比较，25 μmol·L^{-1} 和 50 μmol·L^{-1} 处理显著提高胚轴类黄酮物质的含量，其中 50 μmol·L^{-1} 处理组的提升效果极显著(P<0.001) (图 6)。这表明，$PrCl_3$ 可通过促进种子胚轴中类黄酮物质的合成，进而诱导胚轴伸长并促进种

子萌发。

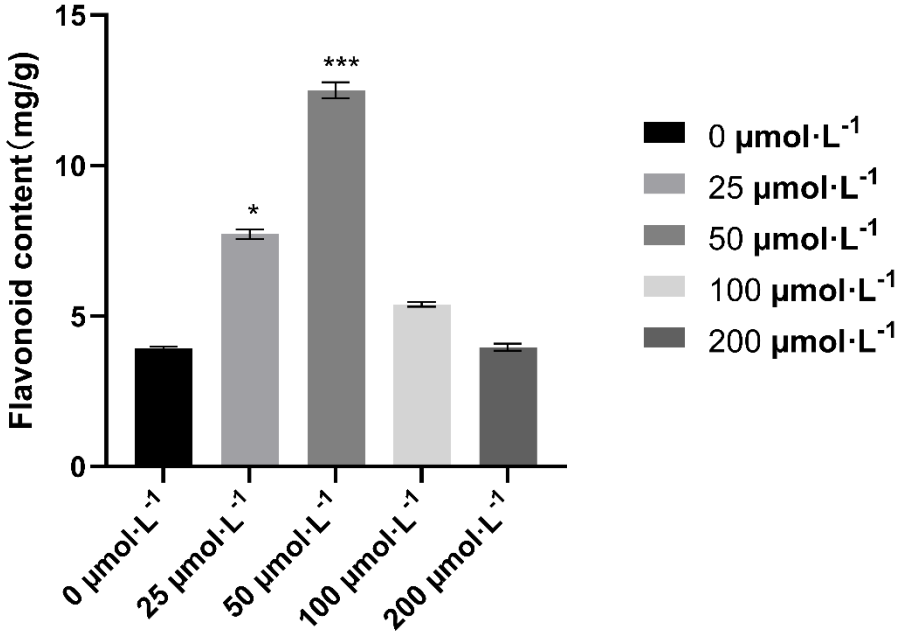


图 6 胚轴中类黄酮物质含量的变化

* *P*<0.05; *** *P*<0.001

Figure 6 Changes in flavonoid content in embryonic axis

* *P* <0.05; *** *P* <0.001

2.4 差异基因的表达验证

扩张蛋白(expansin)是一类存在于植物细胞壁中的非酶类糖蛋白，通过松弛细胞壁结构调控植物生长。木葡聚糖内糖基转移酶(xyloglucan endotransglucosylase，XET)是一种细胞壁松弛酶，是植物细胞壁重构过程中的关键酶。根据已有研究报道，扩张蛋白和木葡聚糖内糖基转移酶与种子萌发密切相关。铁调节蛋白基因1(Gene1)、酰基辅酶 A 结合蛋白(Gene2)、赤霉素氧化酶 20 (Gene3)、FKBP 脯氨酰异构酶(Gene4)和内切-1,3-β-葡聚糖酶(Gene8)均对促进种子萌发和提高种子活力具有重要作用(Zhao et al., 2023)。根据胚轴伸长变化及差异基因表达的变化，选择上述编码基因进行 qRT-PCR 验证。如图 7 结果显示，与对照比较，25 μmol·L^{-1} 和 50 μmol·L^{-1} 的 Pr^{3+}处理显著提高胚轴中基因 *EXPA*9 (Gene5)和 *XET* (Gene7) (图 7B)的表达，且显著高于其它基因的表达量。表明在 $PrCl_3$ 刺激种子胚轴伸长的过程中，这两类基因发挥潜在的关键响应作用。此外，根据类黄酮类物质途径富集结果，选择富集途径中的差异基因(Gene9、Gene10、Gene11、Gene12、Gene13、Gene14 和 Gene15)进行表达量验证(图 7C，D)，经 $PrCl_3$ 处理的胚轴组织中 7 个相关基因的表达量与清水对照组比较均呈上调表达，同样表明了类黄酮类物质参与花生种子萌发的过程。

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

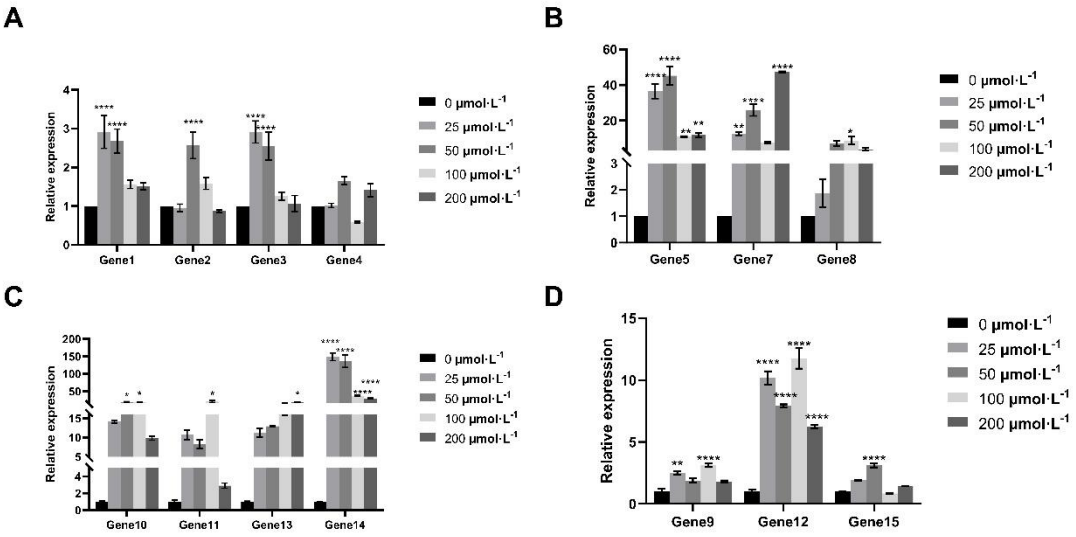


图 7 差异基因的 qRT-PCR 验证

结果均以 0 μmol·L^{-1} 处理组为对照，数据为平均值±SE (* *P*<0.05; ** *P*<0.01; *** *P*<0.001; **** *P*<0.0001)。

Figure 7 qRT-PCR validation of differentially expressed genes

All groups were compared with the 0 μmol·L^{-1} treatment, data are means±SE (* *P*<0.05; ** *P*<0.01; *** *P*<0.001; **** *P*<0.0001).

2.5 外源喷施氯化镨处理对北花 12 号植株生长的影响

第三次喷施 $PrCl_3$ 溶液 24 小时后分别检测了叶片叶绿素含量、可溶性糖含量、净光合速率以及第三次喷施完毕一周后的株高。结果如图 7 所示，50 μmol·L^{-1} 浓度 $PrCl_3$ 喷施显著提高叶片净光合速率(图 8B)、可溶性糖含量(图 8C)及株高(图 8D)，25 μmol·L^{-1} 浓度处理后叶片叶绿素含量(图 8A)和净光合速率(图 8B)显著高于对照组，而且整体均呈现随着 $PrCl_3$ 浓度增大作用效果呈下降趋势，低浓度下植株整体生长较健壮(图 8E)，说明合适的低浓度 $PrCl_3$ 对北花 12 号花生生长具有一定的促进作用。

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

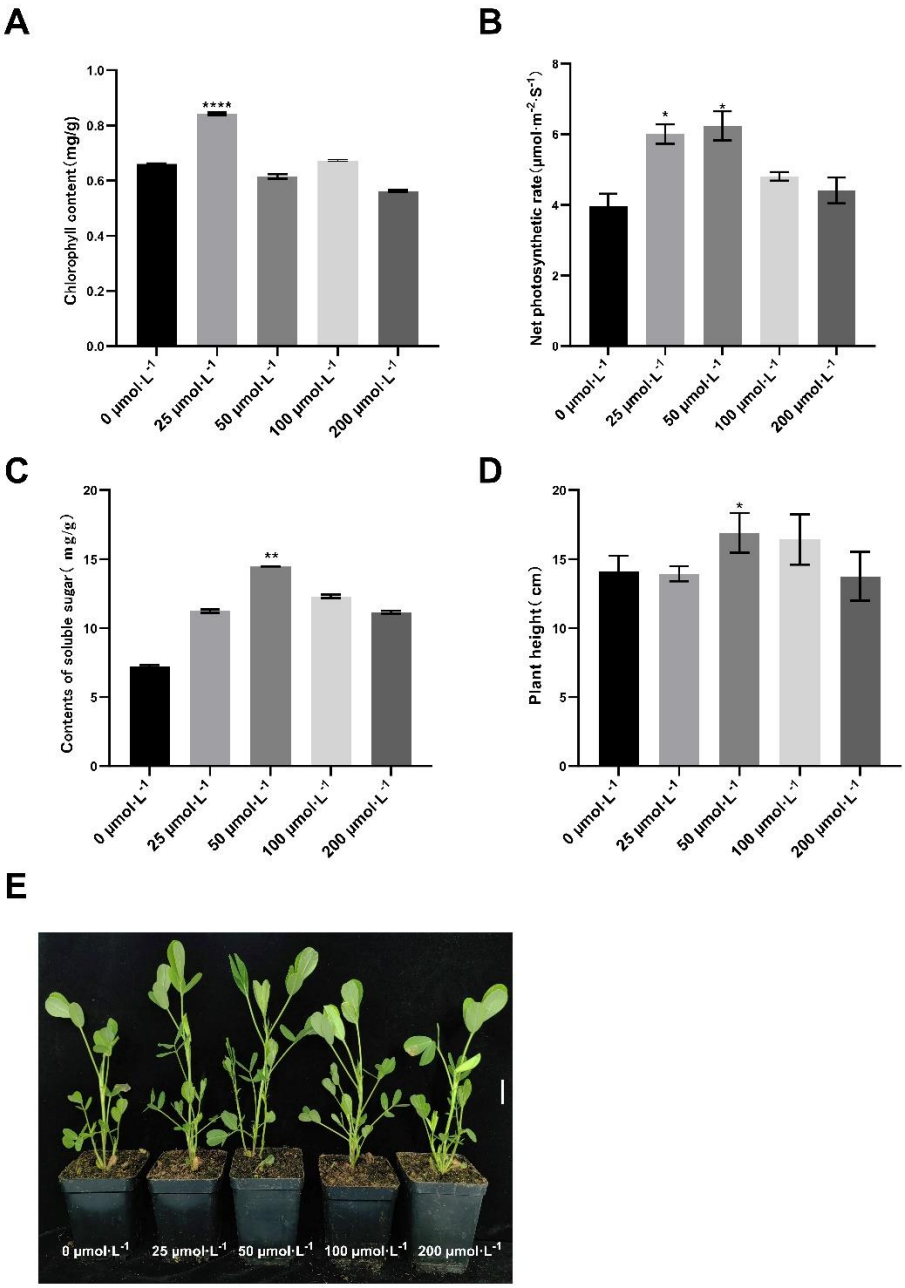


图 8 外源喷施 $PrCl_3$ 对幼苗叶绿素含量**(A)**、净光合速率**(B)**、可溶性糖含量**(C)**、株高**(D)**和植株表型**(E)** (bars=0.5 cm)的影响

结果均以 0 μmol·L^{-1} 处理组为对照，数据为平均值±SE (* P<0.05; ** P<0.01;**** P<0.0001)。

Figure 8 Influnces of exogenous spraying of $PrCl_3$ on Chlorophyll content **(A)**, Net photosynthetic rate **(B)**, Soluble sugar content **(C)**, Plant height **(D)** and Plant growth performance **(E)** (bars=0.5 cm)

All groups were compared with the 0 μmol·L^{-1} treatment, data are means±SE (* P<0.05; ** P<0.01; **** P<0.0001).

3 讨论

自 20 世纪 70 年代以来，稀土营养肥作为植物生长调节剂已被广泛应用于农业生产，可使作物产量提高 5–15% (Huet al., 2004)。由于植物生理和代谢的方式不同，植物对不同元素的敏感性存在差异。Moreira 等

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

(2019)对八种植物(玉米、高粱、水稻、大麦、大豆、向日葵、萝卜和扁豆)进行了铈元素暴露情况的评估。研究表明，基于茎干干物质的差异变化，向日葵、萝卜和小麦对铈相对更敏感。本研究中北花 12 号种子萌发试验结果同样表明了不同稀土元素对促进花生种子萌发的作用效果存在差异。稀土元素对种子发芽、根和茎的生长以及干重变化的影响备受关注。已有研究表明，低浓度的稀土元素能够促进种子发芽和幼苗生长，而高浓度则产生相反的效果(Wang et al., 2014; Sun et al.,2018; Chen et al., 2021)。Sun 等(2018)用高浓度的 La^{3+} (100 mg·kg^{-1})处理丹参种子和幼苗，发现种子发芽指数下降且幼苗生长受到显著抑制。然而，当 La^{3+}浓度为 20 mg·L^{-1} 时，发芽指数和活力指数则明显提高。同样，1–10 mg·L^{-1} 的硝酸铈能够促进大豆种子的发芽和生长，当浓度超过 50 mg·L^{-1} 时，会显著抑制种子发芽和幼苗根系活力(Xu and Chen, 2011)。我们的研究结果与已有研究相一致，低浓度下镨和铈能够显著促进种子的胚芽伸长，高浓度下则呈现下降的趋势。

类黄酮类物质是植物次生代谢产物，广泛存在于植物的各个部位，尤其是在种子中。已有研究报道表明类黄酮物质对种子萌发具有重要作用。蒙古黄芪种子在萌发过程中黄酮类物质的积累与种子的发芽势和发芽率呈正相关(Yang et al., 2018)。糙米的黄酮含量显著影响种子的萌发效率(Tang et al., 2016)。在萌发过程中，大豆种子内的异黄酮等类黄酮物质会显著积累，合成这些物质的关键基因(如 *PAL*、*CHS*)会被激活(Jia et al., 2019)。类黄酮能够参与调节种子内部的信号网络。例如，在番茄中研究发现，槲皮素可以协调活性氧的平衡，并与赤霉素、乙烯等促萌发激素的信号通路相互作用，共同打破种子休眠，启动萌发(Zhang and Xia, 2025)。另外，当种子处于盐碱、干旱等逆境时，类黄酮作为强效的抗氧化剂，能有效清除过量的活性氧，减轻逆境对种子的氧化损伤，保护种子的萌发能力，这表明类黄酮在帮助种子抵抗不良环境、促进萌发方面扮演了关键角色(Wang et al., 2024; Zhao et al., 2024)。基于转录组学测序技术，本研究中胚芽转录组水平变化结果显示，与清水组比较，50 μmol·L^{-1} $PrCl_3$ 处理花生胚轴组织中黄酮类合成途径显著富集，推断低浓度的镨元素可能刺激种子内类黄酮物质的合成，进而促进胚轴伸长。此外，低浓度稀土元素促进了胚轴组织部位细胞扩张蛋白基因和木葡聚糖内糖基转移酶基因的表达，从而促进胚轴快速生长。后续将进一步结合代谢组学和分子生物技术明确关键的类黄酮物质种类及作用机制。另外，糖和脂质是种子萌发过程中重要的能量物质，其转运蛋白活性基因表达的富集有助于为种子萌发提供更多能量(Qian et al., 2023)。水通道蛋白通过调节种子细胞的水分渗透性和吸水速率，在种子萌发过程中发挥关键作用(Chen et al., 2025)。本研究中 GO 富集表明 50 μmol·L^{-1} $PrCl_3$浸种可以显著提高胚轴转运蛋白活性基因的表达，推断 $PrCl_3$还刺激了胚轴内能量物质的代谢，进而促进种子萌发。

叶绿素含量是植物应激的敏感指标。前期研究表明，适量的稀土元素能够促进植物细胞增殖、增加叶绿素含量以及提高光合作用强度(Chen et al., 2014)。因此，低浓度的稀土元素能够增加植物的叶绿素含量和碳酸酐酶活性，从而提高光合作用(Shen et al., 2018)。稀土离子能够取代植物叶绿体基质中的 Ca^{2+}，从而提高 Ca-ATP 酶的活性，增加电子传递链转移的电子数量，增强 ATP 合成，并提高植物的光合速率(Liu et al., 2007)。镧系离子(La^{3+})也可以取代植物叶片中叶绿素的中心 Mg^{2+}，产生相同的效果(Chen et al., 2001)。Hong 等(2005)证实，在植物中，La^{3+} 能够促使 Rubisco 和 Rubisco 激活酶形成一种中间复合物，显著提高二氧化碳的同化效率，并为稀土元素如何提高光合作用效率的分子机制提供了关键见解。相比之下，高稀土浓度则会抑制光合作用并破坏叶绿体超微结构(Shen et al., 2018)，降低叶绿素含量(Wei et al., 2005)，导致基部类囊体变薄，并使类囊体层状结构变得松散(Wen et al., 2011)。本研究中，对北花 12 号幼苗进行外源喷施 $PrCl_3$ 溶液后，低浓度下显著提高了叶片叶绿素含量和可溶性糖含量以及净光合速率，进而有利于促进植株的光合作用。总之，本研究结果表明施用适宜的稀土元素对花生生产具有辅助作用，但应根据品种的特性及稀土元素的作用机理进行科学规范使用。同时，本研究确定的 50 μmol·L^{-1} $PrCl_3$有效浓度，为开发花生专用稀土种

衣剂或叶面肥提供了直接参数。未来可结合土壤吸附动力学与田间小区试验，评估 Pr 元素在典型花生种植土壤(如砂姜黑土)中的生物有效性衰减规律，推动从‘实验室浓度’到‘田间施用量’的转化。

作者贡献声明

付俊瑞：实验设计、操作及数据采集与分析，撰写论文初稿；邵明雨：协助实验操作；赵帅豪：协助分析数据；刘晓芹：实验方案设计规划，参与文章讨论及修订。

利益冲突: 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of Interests: The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

参考文献

Chaturvedi N, Gannavarapu R, Dhal NK (2014). Effect of Lanthanum on the growth and physiological activities of Zea mays, Vigna radiata and Vigna mungo. *International journal of environmental sciences* **4**, 653-9.

Chen AM, Shi QS, Xie XB, Huang XM, Chen YB (2014). Research progress of rare earth elements biological effect on algae. *Chinese Rare Earths* **35**, 103-9.

Chen B, Peng Y, Zhang Q, Chen Z, Li H, Liu J (2025). OsPIP2‐1 positively regulates rice seed germination by modulating OsAmy3C and α‐amylase expression. The Plant Journal **123**, e70314.

Chen JS, Li WJ, Zhang LM, Zhang YY (2014). The Effects of Rare Earth Micronutrients and Soil Conditioner Application on Peanut. *Journal of Peanut Science* **43**, 47-49. (in Chinese)

陈建生，李文金，张利民，任志红，张艳艳 (2014). 花生施用稀土微肥与土壤调理剂效应分析. 花生学报 **43**, 47-49.

Chen WJ, Tao Y, Gu YH, Zhao GW (2001). Effect of lanthanide chloride on photosynthesis and dry matter accumulation in tobacco seedlings. *Biological trace element research* **79**, 169-76.

Chen WY, Shi JS, Li JL (2021). Effect of Interaction Between Regulators and Rare Earth Elements on Seed Germination and Rooting. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths* **39**, 935-941. (in Chinese)

陈蔚燕，师进生，李俊良 (2021). 调节剂与稀土物质互作对种子发芽和生根的影响. 中国稀土学报 **39**, 935-941.

Chu HJ, Mei QH, Mou YQ, Cheng GY, Wu GR (2006). Effects of Extraneous Ce on the Antioxidant Enzymes Activities in *Arachis Hypogacal*. *Chinese Rare Earths* **27**, 71-74. (in Chinese)

储慧君，梅秋红，缪月秋，程光宇，吴国荣 (2006). 铈对花生幼苗抗氧化酶活性影响的研究. 稀土 **27**, 71-74.

Dai Y, Xiao G, Chen H, Tan TL, Zhang ZQ (2023). Study on Extraction Method of Chlorophyll from Rape Pod. *Crop Research* **37**,10-13.

戴悦，肖钢，陈浩，谭太龙，张振乾 (2023).油菜角果叶绿素提取方法研究.作物研究 **37**,10-13.

Emmanuel EC, Ramachandran AM, Ravindran AD, Natesan M, Maruthamuthu S (2010). Effect of some rare earth elements on dry matter partitioning, nodule formation and chlorophyll content in *Arachis hypogaea* L. plants. *Australian Journal of Crop Science* **4**, 670-5.

Gao YS, Chen JS (2005). Effects of La^{3+} on Antioxidant System in Wheat Seedling Leaves under Salt Stress. *Journal of The Chinese Rare Earth Society*, 490-495.

He YW, Loh CS (2000). Cerium and lanthanum promote floral initiation and reproductive growth of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Science* **159**, 117-124.

Hong F, Liu C, Zheng L, Wang X, Wu K, Song W, Lü S, Tao Y, Zhao G (2005). Formation of complexes of Rubisco-Rubisco activase from La^{3+}, Ce^{3+} treatment spinach. *Science in China Series B: Chemistry* **48**, 67-74.

Hu ZY, Richter H, Sparovek G, Schnug E (2004). Physiological and biochemical effects of rare earth elements on plants and their agricultural significance: A review. *Journal of Plant Nutrition* **27**, 183-220.

Huang Z, Chen G, Du J (2003). Influence of lanthanum on the uptake of trace elements in cucumber plant. *Biological trace element research* **95**, 185-192.

Jia Y, Ma Y, Zou P, Cheng G, Zhou J, Cai S (2019). Effects of different oligochitosans on isoflavone metabolites, antioxidant activity, and isoflavone biosynthetic genes in soybean (Glycine max) seeds during germination. *Journal of agricultural and food chemistry* **67**, 4652-4661.

Kovařiková M, Tomášková I, Soudek P (2019). Rare earth elements in plants. *Biologia plantarum* **63**, 20-32.

Lao XR, Wang WX, Li YT, Hao YR (2002). Mechanism of rare earth on the effect of increase yield of peanut. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* **8**, 473-477. (in Chinese)

劳秀荣，王文祥，李燕婷，郝艳如 (2002). 外源稀土元素对花生增产效应的机理研究. 植物营养与肥料学报 **8**, 473-477.

Li TT, Yan ZW, Cui YY, Guo HS, Chen FJ, Zhang QQ, Liu XQ (2026). Establishment and optimization of an efficient peanut genetic transformation system. *Chinese Bulletin of Botany* **61**, 123-135. (in Chinese)

李婷婷，闫志文，崔媛媛，郭昊松，陈方军，张倩倩，刘晓芹 (2026). 一种高效花生遗传转化体系的建立与优化. 植物学报 **61**, 123-135.

Liu XQ, Su MY, Liu C,Si WH, Hong FS (2007). Effects of $CeCl_3$ on energy transfer and oxygen evolution in spinach photosystem II. *Journal of Rare Earths* **25**, 624-630.

Ma YZ (1996). Distribution of Rare Earth Elements in Peanut Seed Soaked with Rare Earth Fertilizer. *Chinese Rare Earths* **17**, 63-65. (in Chinese)

马玉增 (1996). 浸种花生稀土元素分配规律的研究. 稀土 **17**, 63-65.

Moreira CG, de Carvalho TS, de Oliveira C, de Abreu LB, de Castro AC, Ribeiro PG, Bispo FH, Boutin C, Guilherme LR (2019). Ecological risk assessment of cerium for tropical agroecosystems. *Chemosphere* **221**, 124-31.

Nie CR, Li HS, Li M, Du JL (2002). Influence of nitrate rare Earth Elements on the Growth of Peanut Seedlings under Water Stress. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 11-14. (in Chinese)

聂呈荣，黎华寿，李梅，杜建莲 (2002). 干旱条件下硝酸稀土对花生幼苗生长的影响. 土壤肥料, 11-14.

Nie CR, Li ZX (1996). The effects of rare earth elements on peanut photosynthesis and nitrogen metabolism. *Guangdong Agricultural Sciences*, 25-27. (in Chinese)

聂呈荣，黎振兴 (1996). 稀土对花生光合作用和氮素代谢的影响. 广东农业科学, 25-27.

Nie CR, Zhen CD, Nie JJ, Wen YH, Li M (1999). Influence of Rare Earth Solution Soaking on Peanut Seed Germination and Seedling Drought Resistance. *Journal of Peanut Science*, 327-329. (in Chinese)

聂呈荣，甄畅迪，聂建洁，温玉辉，李梅 (1999). 稀土溶液浸种对花生种子萌发和幼苗抗旱性的影响. 花生科技, 327-329.

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

Pošćić, F, Mattiello, A, Fellet, G, Miceli, F. Marchiol, L (2016). Effects of cerium and titanium oxide nanoparticles in soil on the nutrient composition of barley (*Hordeum vulgare L.*) kernels. *International Journal of Environmental Research and Public Health* **13**, 577.

Qian W, Zhu Y, Chen Q, Wang S, Chen L, Liu T, Tang H, Yao H (2023). Comprehensive metabolomic and lipidomic alterations in response to heat stress during seed germination and seedling growth of *Arabidopsis*. *Frontiers in Plant Science* **14**, 1132881-1132881.

Ribeiro PG, Dinali GS, Boldrin PF, de Carvalho TS, de Oliveira C, Ramos SJ, Siqueira JO, Moreira CG, Guilherme LR (2021). Rare Earth Elements (REEs) rich-phosphate fertilizers used in Brazil are more effective in increasing legume crops yield than their rees-poor counterparts. *International Journal of Plant Production* **15**, 1-11.

Rico CM, Lee SC, Rubenecia R, Mukherjee A, Hong J, Peralta-Videa JR, Gardea-Torresdey JL (2014). Cerium oxide nanoparticles impact yield and modify nutritional parameters in wheat (*Triticum aestivum L.*). *Journal of agricultural and food chemistry* **62**, 9669-75.

Rossi L, Zhang W, Ma X (2017). Cerium oxide nanoparticles alter the salt stress tolerance of *Brassica napus L.* by modifying the formation of root apoplastic barriers. *Environmental Pollution* **229**, 132-138.

Shen F, Wang L, Zhou Q, Huang X (2018). Effects of lanthanum on *Microcystis aeruginosa*: Attention to the changes in composition and content of cellular microcystins. *Aquatic Toxicology* **196**, 9-16.

Sun Q, Sun L, Feng S, Guo S (2018). Effect of La^{3+} on seed germination and seedling growth of *Salvia miltiorrhiza*. *Journal of Rare Earths* **36**, 898-902.

Tang CF, Dong C, A XX, Zhang EL, Chen D, Zhang FF, Shen SQ, Dai LY (2016). Flavonoids Content of Rice Landraces with Different Seed Coat Color in Yunnan and Their effects on Seed Germination. *Journal of Plant Genetic Resources* **17**, 883-888. (in Chinese)

汤翠凤, 董超, 阿新祥, 张恩来, 陈丹, 张斐斐, 申时全, 戴陆园 (2016). 云南不同种皮色地方稻种的总黄酮含量及其对种子萌发的影响. 植物遗传资源学报 **17**, 883-888.

Tu SZ, Wang WS, Gu JZ, Wang QY, Zhao FY (1986). Peanut application of "Nong Le Yi Zhi Su" (Rare Earth RE) trial. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 9-11. (in Chinese)

屠世柱, 王武生, 谷建中, 王庆国, 赵风云 (1986). 花生应用"农乐益植素"(稀 RE)试验. 河南农业科学, 9-11.

Wang L, Li J, Zhou Q, Yang G, Ding XL, Li X, Cai CX, Zhang Z, Wei HY, Lu TH, Deng XW (2014). Rare earth elements activate endocytosis in plant cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**, 12936-41.

Wang Y, Jiang W, Li C, Wang Z, Lu C, Cheng J, Wei S, Yang J, Yang Q (2024). Integrated transcriptomic and metabolomic analyses elucidate the mechanism of flavonoid biosynthesis in the regulation of mulberry seed germination under salt stress. *BMC Plant Biology* **24**, 132-156.

Wei ZG, Hong FS, Yin M, Li HX, Hu F, Zhao GW, WoonchungWong J (2005). Subcellular and molecular localization of rare earth elements and structural characterization of yttrium bound chlorophyll a in naturally grown fern *Dicranopteris dichotoma*. *Microchemical Journal* **80**, 1-8.

Wen KJ, Liang CJ, Wang LH, Hu G, Zhou Q (2011). Combined effects of lanthanumion and acid rain on growth, photosynthesis and chloroplast ultrastructure in soybean seedlings. *Chemosphere* **84**, 601-8.

Xu PB, Xue L, Pan L, Liu B, Yang ZY (2011). Effects of rare earth on physiological and biochemical characteristics in *Chukrasia tabularis* seedlings under low-temperature stress. *Journal of Central South University of Forestry &*

Technology **31**, 34-40. (in Chinese)

许鹏波，薛立，潘澜，刘斌，杨振意 (2011). 稀土对低温胁迫麻楝幼苗生理生化特性的影响. 中南林业科技大学学报 **31**, 34-40.

Xu QM, Chen H (2011). Antioxidant responses of rice seedling to Ce^{4+} under hydroponic cultures. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **74**, 1693-1699.

Xu S, Liu JD, Shi HP (2021). Effect of Cerium on Growth and Antioxidant Protective Enzyme System of *Arachis hypogaea* Seedlings. *Subtropical Plant Science* **50**, 333-340. (in Chinese)

许晟，刘佳敦，施和平 (2021). 稀土元素铈对花生幼苗生长与抗氧化保护酶系统的影响. 亚热带植物科学 **50**, 333-340.

Yang N, Wang X, Guo XR, Liu Y, Tang ZH, Wang HZ (2018). Variation in Flavonoids Biosynthesis during Seed Germination and Post-germination Growth in *Astragalus membranaceus*. *Plant research* **38**, 298-305. (in Chinese)

杨楠，王曦，郭晓瑞，刘洋，唐中华，王洪政 (2018). 黄芪种子萌发及萌发后生长过程中黄酮类化合物合成的动态变化. 植物研究 **38** , 298-305.

Yu JX, Ji MH, Yao YK, Zhang JX, Liu HZ, Xiong YL (1982). The effect of rare earth elements on peanut yield and application conditions. *Jiangxi Agricultural Science and Technology* **4**, 14-15. (in Chinese)

余金顺，计明辉，姚跃奎，张金星，刘海中，熊义陵 (1982). 稀土元素对花生的增产效果与施用条件. 江西农业科技 **4**, 14-15.

Zeng FL, Tian HE, Wang ZP, An Y, Gao FY, Zhang LJ, Li FM, Shan L (2003). Effect of rare earth element europium on amaranthin synthesis in *Amarathus caudatus* seedlings. *Biological Trace Element Research* **93**, 271-82.

Zhang LF, Wang CB, Wang HS, Yu ZZ, Gao CG, Che SJ (2000). Studies on Effect and Technique of the Rare - earth Application on the Peanut. *Journal of Peanut Science* **2**, 24-26. (in Chinese)

张礼凤，王才斌，王华松，于照兹，高成功，车书杰 (2000). 稀土在花生上应用效果与使用技术研究简报. 花生科技 **2**, 24-26.

Zhang Y, Xia Y (2025). Quercetin enhances tomato seed germination via phenylpropanoid-dependent regulation of ROS, hormone signaling, and starch hydrolysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 110590.

Zhao F, Jin J, Yang M, Franklin E, Xue J, Xu L, Duan Y (2024). Selenium Differentially Regulates Flavonoid Accumulation and Antioxidant Capacities in Sprouts of Twenty Diverse Mungbean (*Vigna radiata* (L.) Wilczek) Genotypes. *Phyton-International Journal of Experimental Botany* **93**, 611-625.

Zhao J, He YQ, Wang ZF (2023). Current advances on the molecular mechanism of seed vigor. *Journal of South China Agricultural University* **44**, 659-669. (in Chinese)

赵佳，何永奇，王州飞 (2023).种子活力分子调控机理研究进展.华南农业大学学报 **44**,659-669.

The effect of praseodymium chloride on the germination and growth of peanut Beihua12

Fu Junrui[1], Shao Mingyu[1, 2], Zhao Shuihao[1], Liu Xiaoqin[1, 2*]

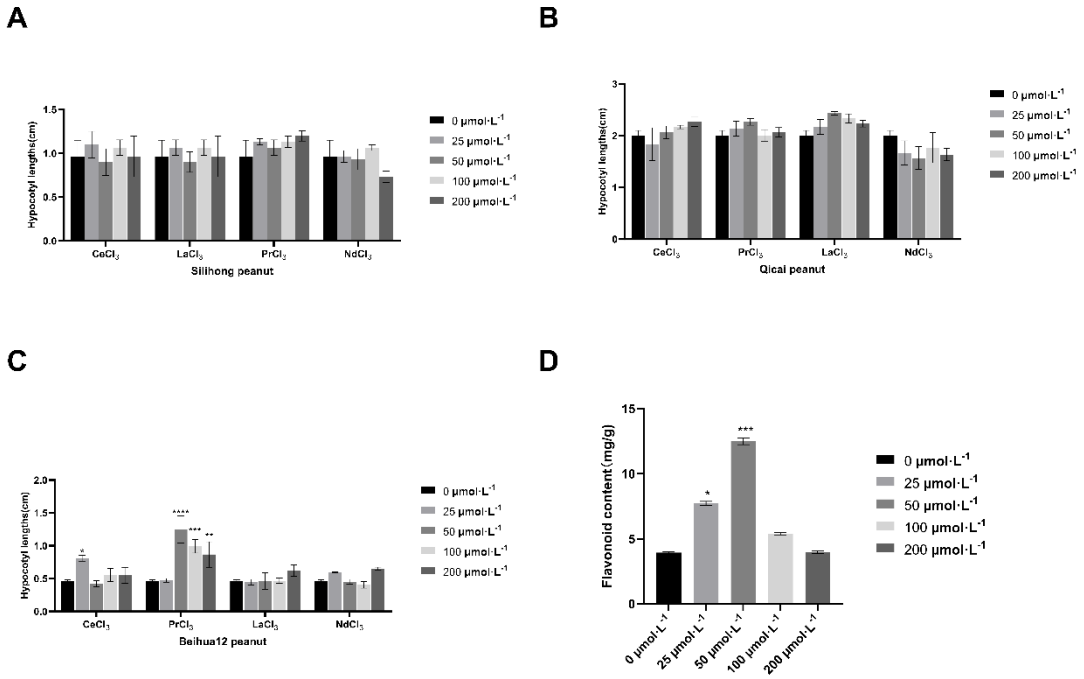
[1]Peking University Institute of Advanced Agricultural Sciences, Shandong Laboratory of Advanced Agricultural Sciences at Weifang, Weifang, Shandong261325, China; [2]College of Life Sciences, Shandong Normal University, Jinan, Shandong250358, China

INTRODUCTION: Rare earth elements (REEs) have been demonstrated to exert broad growth-promoting effects on crop production, showing great potential for application in agriculture. However, the effects of REEs on peanut seed germination and the underlying mechanisms remain unreported.

RATIONALE: In this study, four REEs-lanthanum, cerium, neodymium, and praseodymium were selected, along with three peanut varieties (Beihua 12, Silihong, and Yunnan Qicai), to investigate the differential effects of REEs on peanut seed germination. Furthermore, based on the combination of praseodymium and Beihua 12, which significantly promoted hypocotyl elongation, transcriptome sequencing was employed to analyze the potential mechanisms by which REEs enhance hypocotyl growth.

RESULTS: The results showed that different REEs had distinct effects on seed germination, and the sensitivity of peanut varieties to the same REE also varied. Under treatment with 50 μmol·L^{-1} praseodymium chloride, the hypocotyl of Beihua 12 seeds was significantly elongated, accompanied by significant enrichment of pathways related to flavonoid biosynthesis and transporter activity, as well as a marked increase in flavonoid content. Quantitative real-time PCR (qRT-PCR) confirmed the upregulation of the relevant differentially expressed genes. Furthermore, foliar application of praseodymium chloride solution to Beihua 12 seedlings revealed that low-concentration praseodymium increased leaf chlorophyll content, soluble sugar content, and photosynthetic rate.

CONCLUSION: This study provides a reference for the rational and scientific application of rare earth fertilizers in peanut production in the future.



© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany

Influnces of four rare earth elements on the seed hypocotyl elongates of three peanut variety Silihong (A), Qicai (B) Beihua12 (C), and changes in flavonoid content in embryonic axis (D). All groups were compared with the 0 μmol·L^{-1} treatment, data are means±SE. * P<0.05; ** P<0.01; *** P<0.001; **** P<0.0001.

Keywords Beihua12, hypocotyl elongation, rare earth element, transcriptome sequence

Fu JR, Shao MY, Zhao SH, Liu XQ (2026). The effect of praseodymium chloride on the germination and growth of peanut Beihua12. *Chin Bull Bot*

---

* Authors for correspondence. E-mail: xiaoqin.liu@pku-iaas.edu.cn

通讯作者简介

刘晓芹，研究员，现任北京大学现代农业研究院花生功能基因组学与种质资源创新实验室 PI，同时担任实验室主任以及潍坊市油料作物分子设计育种重点实验室主任。当前，研究工作主要聚焦于花生功能基因组学与种质资源创新。其研究团队综合运用多组学、遗传学、分子生物学以及基因编辑等先进技术手段，全方位开展全基因组水平的基因型精准鉴定工作。借助花生自然群体、遗传群体和突变体群体等丰富的研究材料，深入挖掘目标性状的优异等位基因，系统解析花生重要性状形成的分子遗传机制。

© 植物学报 Chinese Bulletin of Botany