

不同营养元素缺乏对谷子幼苗生长及根系形态的影响

张蒙 陈国秋 王凯玺 张文飞 朱康宁 刁玉霖 窦爽 张海金

(辽宁省旱地农林研究所, 122000, 辽宁朝阳)

摘要 为探讨不同营养元素缺乏对谷子幼苗生长的影响, 采用营养液水培法, 设置全素、缺氮、缺磷、缺钾、缺钙、缺镁、缺硫、缺铁和缺微量元素 9 个处理, 对谷子缺素症状及其株高、生物量、叶片表型和根系形态等参数进行了观察与测定。结果表明: 各缺素处理均对谷子幼苗的生长产生一定影响, 主要表现为植株矮小, 叶片窄小失绿, 根系分枝少且易断。不同缺素处理后谷子幼苗株高、生物量、叶绿素相对含量 (SPAD 值)、叶长、叶宽、叶厚、总根长、根总体积以及根表面积显著低于全素处理, 其中对株高和生物量影响最大的营养元素是氮和钙; 对 SPAD 值影响最大的是镁和铁; 对叶片指标影响最大的是氮、铁和钾; 对根系生长影响最大的是钙和铁。因此, 在谷子苗期养分管理中, 应及时补充氮肥, 并注意镁、钙和铁肥的施用。

关键词 谷子; 营养元素; 缺素症状; 幼苗生长; 根系形态

谷子是起源于中国的传统粮食作物, 在我国粮食作物的组成和人们的饮食结构中具有重要地位^[1]。由于谷子具有耐贫瘠的特性, 农户往往对施肥管理有所忽视。然而, 若长期缺乏某种元素, 谷子会在形态结构和生理功能等方面呈现出特定的缺素症状, 进而对谷子的产量和籽粒品质产生影响。因此, 对谷子生长期表现出的营养元素缺乏症状进行正确诊断十分必要。

有关元素缺乏对小麦^[2]、玉米^[3]和大豆^[4]等作物的影响多有报道。不同植物对元素胁迫表现出的敏感性也不同。董伟萍^[4]研究表明, 氮、磷和钾缺少或缺失会使大豆光合作用不同程度降低, 对叶绿素的合成也产生一定影响。张圆圆等^[5]研究表明, 氮、磷、钾、钙和镁缺乏均导致脐橙叶片叶绿素含量降低, 植株生长受到抑制, 生物量减少。中量元素在作物产量和品质方面也起着不可替代的作用, 土壤中中量元素过多或缺乏均会对作物体内细胞代谢产生不良影响, 阻碍作物正常生长发育^[6]。微量元素在植物体内含量较低, 但其生理功能与氮、磷和钾等大量元素同等重要^[7]。土壤中缺乏微量元素直接导致食物中微量元素含量显著下降, 进而带来“隐性饥饿”问题^[8]。凌丽俐等^[9]研究表明, 微量元素的缺乏易导致柑橘叶片黄化、生长势衰退并影响产量和品质。韦绍平^[10]研究表明, 缺乏微量元

素可使龙眼产量减少 24.19%~39.12%, 同时果实的品质也受到极大影响。

目前, 关于谷子田间管理技术的研究比较完善, 但对其营养特性、需求及缺素症状的研究较少。本研究采用营养液水培方法, 在谷子品种朝谷 58 幼苗期进行不同营养元素缺乏处理, 研究不同营养元素缺乏胁迫下, 谷子幼苗表型和农艺性状的变化, 以为谷子营养元素缺乏症的预防及精准施肥提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验于 2023 年 7-10 月在辽宁省旱地农林研究所实验室进行 (41°57' N, 120°45' E)。供试谷子品种为朝谷 58, 由辽宁省旱地农林研究所选育并提供。试验中全素和缺素营养液按张志良等^[11]的方法进行配制, 详见表 1。所用药品均为分析纯, 溶液均为蒸馏水。

1.2 试验设计

挑选饱满一致的谷子种子, 用 0.5% 次氯酸钠溶液消毒 5 min, 接着用无菌水反复冲洗后均匀播于海绵板中。出苗后选择健康、长势一致的谷子幼苗, 用等离子水冲洗干净, 定植于装有营养液的水培盒中。室内光照环境条件正常, 日照时长

作者简介: 张蒙, 主要从事谷子高效栽培理论研究, E-mail: 1299214916@qq.com

张海金为通信作者, 主要从事谷子育种及栽培技术研究, E-mail: ymming123@126.com

基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-06-14.5-B15); 辽宁省建平县杂粮产业乡村振兴科技特派团 (2022JH5/10400137, 2024JH5/10400019); 辽宁省农业科学院院长基金项目 (2024QN1813); 辽宁省谷子种质资源核心种质构建及利用研究 (2025XKJS8559)

收稿日期: 2025-03-31; 修回日期: 2025-05-26; 网络出版日期: 2025-07-30

表 1 营养液配制所用试剂及浓度
Table 1 Reagent and concentration for nutrient solution preparation

试剂 Reagent	浓度 Concentration g/L
Ca(NO ₃) ₂	82.07
KNO ₃	50.56
MgSO ₄ ·7H ₂ O	61.62
KH ₂ PO ₄	27.22
NaH ₂ PO ₄	24.00
NaNO ₃	42.45
MgCl ₂	23.81
Na ₂ SO ₄	35.51
CaCl ₂	55.50
KCl	37.28
Fe-EDTA+Na ₂ -EDTA	7.45
Fe-EDTA+FeSO ₄ ·7H ₂ O	5.57
H ₃ BO ₃	2.86
MnSO ₄	1.02
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22
H ₂ MoO ₄	0.09

为 10.5 h/d，每日称重补水，全周期保持空气相对湿度 50%左右^[12]。

试验采用单因素随机区组设计，共设置 9 个处理：全素（CK）、缺氮（T1）、缺磷（T2）、缺钾（T3）、缺钙（T4）、缺镁（T5）、缺硫（T6）、缺铁（T7）和缺硼、锰、铜、锌、钼（T8）。每个

处理下培养谷子幼苗 15 株，3 次重复，培养 60 d 后拍照并进行生理指标测定。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株表型观察 试验期间每天观察谷子幼苗的表型，并记录植株出现缺素症状的部位及表现特征。在处理 60 d 时统一进行拍照。

1.3.2 农艺性状 试验结束时，每个处理选取 10 株长势一致的谷子测定株高；收获不同缺素处理的整株，称取鲜重后 105 °C 杀青 30 min，75 °C 烘干至恒重后称取干重；采用 SPAD-502 便携式叶绿素测定仪（柯尼卡美能达，日本）读取叶片叶绿素相对含量（SPAD 值）；分别在幼苗缺素处理 15、30、45 和 60 d 时测量叶长、叶宽和厚度（倒 2 叶）。根系形态：收获后使用根系扫描仪与表型分析系统（GX-Y-A）获取图像并统计总根长、根平均直径、总体积、根表面积。

1.4 数据处理

采用 SPSS 对数据进行方差分析，采用 Microsoft Excel 2016 整理数据。

2 结果与分析

2.1 不同缺素处理下谷子植株的缺素症状表现

从图 1 可以看出，不同营养元素缺乏条件下朝

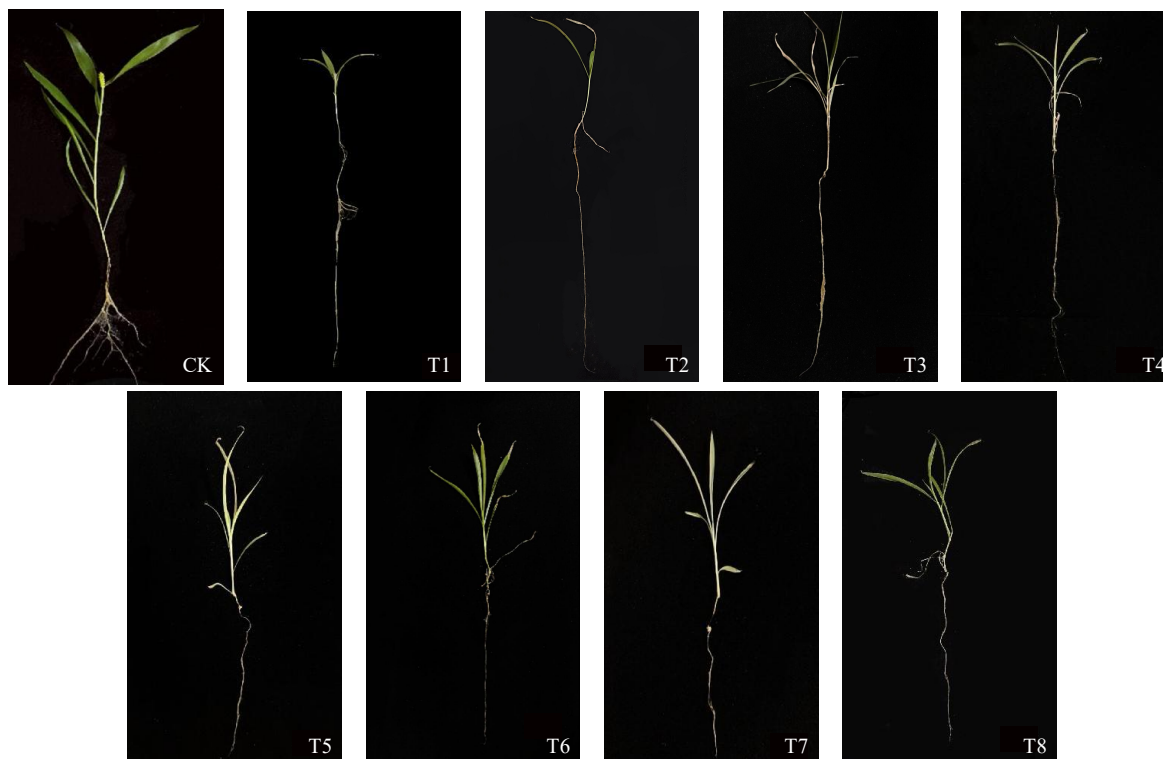


图 1 不同缺素处理对谷子生长的影响

Fig.1 Effects of different nutrient deficiency treatments on the growth of foxtail millet

谷 58 缺素症状表现明显且反应程度均不同。CK 处理的植株健康，正常抽穗，叶片鲜绿，根系发育良

好。不同缺素培养处理的植株总体表现为植株矮小，叶片窄小失绿，根系分枝少且易断（表 2）。

表 2 不同缺素处理 60 d 时谷子的缺素症状

Table 2 Nutrient deficiency symptoms of foxtail millet under different nutrient deficient treatments at 60 days

处理 Treatment	缺素症状 Nutrient deficiency symptom
T1	叶片小且颜色呈暗绿色，叶尖与叶缘呈黄黑色，老叶易脱落、茎细长、植株矮小，根系较长，次生根量少，生长缓慢至后期停止生长。
T2	叶片稀疏，正面卷曲形成筒状，叶片几乎完全脱落，易发病（叶片出现明显的谷瘟病），根系局部呈铁锈红色。
T3	叶片黄化，叶尖端和叶缘焦枯似灼烧状，后期全叶干枯，整体叶片萎蔫下垂，植株整体呈直立的矮丛状。
T4	叶片薄而柔软，正面出现褐色斑块，叶尖焦枯坏死，根部严重腐烂。
T5	叶片失绿，叶尖干枯呈尖钩状，培养后期全叶变金黄色，茎节较短。
T6	叶片呈黄绿色，老叶干枯，新叶叶尖焦枯。
T7	叶片薄且失绿，后期黄化，直至全叶变白，茎段微黄。
T8	叶片狭长，展开困难，新老叶呈暗绿且失去光泽。

2.2 不同缺素处理对谷子幼苗株高与生物量的影响

不同缺素处理会不同程度影响谷子幼苗的生长（图 2）。各缺素处理的株高均显著低于 CK 处理（32.4 cm），其中 T1 处理的幼苗植株最矮，均值为 8.3 cm，显著低于 T2（16.4 cm）、T6（15.2 cm）和 T8 处理（15.3 cm）。各处理的株高由高到低排序为：CK>T2>T8>T6>T5>T3>T7>T4>T1。

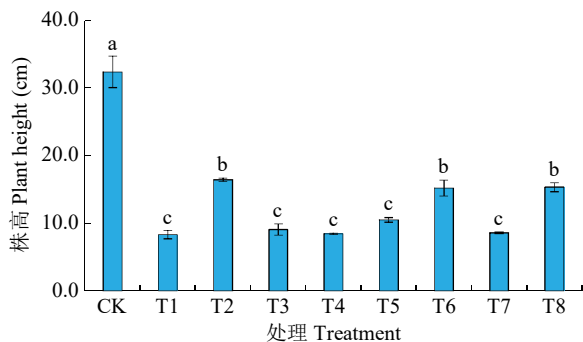


图 2 缺素处理对谷子幼苗株高的影响
Fig.2 Effects of nutrient deficiency treatments on plant height of foxtail millet seedlings

图 2 缺素处理对谷子幼苗株高的影响

Fig.2 Effects of nutrient deficiency treatments on plant height of foxtail millet seedlings

从图 3 可以看出，9 个处理的全株鲜重变幅为 0.058~1.201 g，干重变幅为 0.013~0.213 g，缺素处理的谷子幼苗鲜重与干重均显著低于 CK 处理。除 CK 处理外，T1 处理的全株鲜重最低，与 CK 和 T8 处理存在显著差异。缺素处理显著降低了谷子幼苗的株高，造成全株鲜（干）重降低，其中以 T1 处理影响最为明显。

2.3 不同缺素处理对谷子幼苗叶片表型的影响

2.3.1 对谷子幼苗 SPAD 值的影响 图 4 表明，与

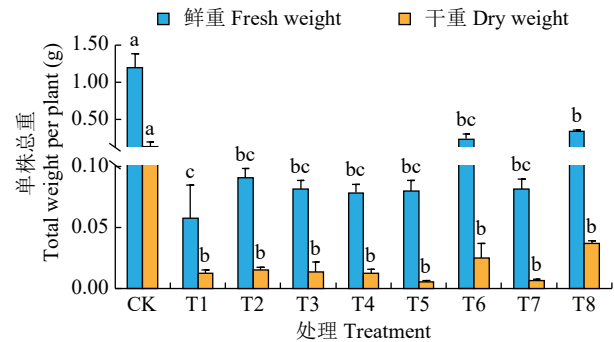


图 3 缺素处理对谷子幼苗干重和鲜重的影响
Fig.3 Effects of nutrient deficiency treatments on the dry weight and fresh weight of foxtail millet seedlings

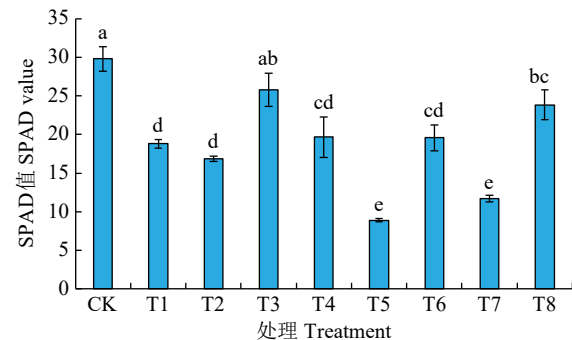


图 4 缺素处理对谷子幼苗 SPAD 值的影响

Fig.4 Effects of nutrient deficiency treatments on SPAD value of foxtail millet seedlings

CK 处理相比，T3 处理 SPAD 值略有降低，差异不显著。其他处理的 SPAD 值均显著低于 CK 处理，尤其是 T5 和 T7 处理，对 SPAD 值的影响最大，分别较 CK 处理降低 70.1%和 60.8%。

2.3.2 对谷子幼苗叶片生长的影响 由图 5 可见，不同缺素处理在 15、25、40 和 60 d 时测得的谷子幼苗叶长、叶宽和叶厚均小于 CK 处理，此外，各指标变化规律基本一致，均随生育进程呈上升趋势

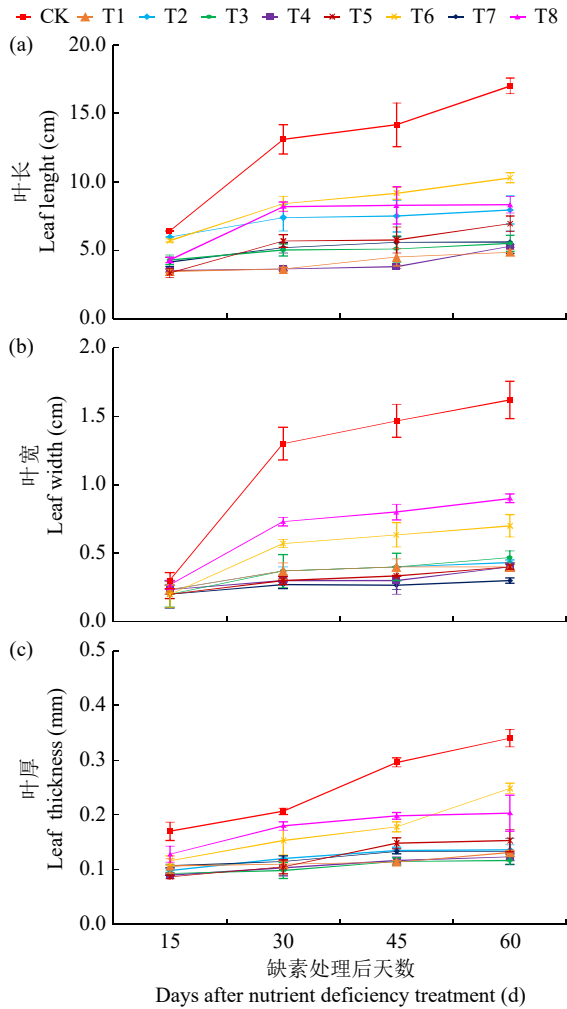


图5 缺素处理对谷子幼苗叶片生长的影响
Fig.5 Effects of nutrient deficiency treatments on leaf growth of foxtail millet seedlings

势，在 60 d 时均达最大值，培养后期 CK 处理生长匀速，而各缺素处理生长较缓慢。缺素处理 60 d 时，相较于 CK 处理，T1~T8 处理的叶长减少幅度为 39.4%~71.5%，其中以 T1 处理最低，均值为 4.9 cm（图 5a）；缺素处理 15 d 时，各处理的叶宽无明显差异，随着处理时间的增加各处理差异明显，缺素处理 60 d 时，相较于 CK 处理，T1~T8 处理叶宽减少幅度为 44.4%~81.5%，其中以 T7 处理最低，均值为 0.3 cm（图 5b）；缺素处理 60 d 时，T1~T8 处理叶厚减少幅度为 27.0%~65.7%，其中以 T3 处理最低，均值为 0.1 mm（图 5c）。叶面积变小也可能是导致谷子干重降低的原因之一。

2.4 不同缺素处理对谷子幼苗根系形态的影响

如表 3 所示，各缺素处理对谷子幼苗总根长、根总体积和根表面积均有明显抑制作用。从总根长来看，CK 处理的总根长显著高于其他处理，其次是 T1 和 T2 处理，T4 处理对总根长的影响较明显；从根总体积看，不同缺素处理均不同程度降低了根总体积，T1~T8 处理与 CK 处理有显著差异，降幅为 50.8%~92.4%。从根表面积来看，缺素处理的根表面积均显著低于 CK 处理，其中以 T7 处理最低，降幅为 45.5%~91.9%。从根平均直径来看，T6 处理均值最大，较 CK 处理增加了 15.8%，与 T1 和 T2 处理存在显著差异，与其余处理差异不显著。

表 3 缺素处理对谷子幼苗根系形态的影响

Table 3 Effects of nutrient deficiency treatments on root morphology of foxtail millet seedlings

处理 Treatment	总根长 Total root length (cm)	根平均直径 Average root diameter (mm)	根总体积 Total root volume (cm ³)	根表面积 Root surface area (cm ²)
CK	640.83±87.62a	0.38±0.01ab	1.18±0.13a	85.01±2.73a
T1	431.72±47.11b	0.33±0.02b	0.58±0.15b	46.31±6.87b
T2	217.87±29.42c	0.32±0.02b	0.30±0.04c	21.94±2.09c
T3	104.25±10.05d	0.42±0.02ab	0.21±0.01c	14.24±1.15cde
T4	72.48±6.80d	0.37±0.01ab	0.18±0.01c	13.26±0.06cde
T5	109.68±6.12d	0.42±0.05ab	0.17±0.02c	10.28±0.91de
T6	91.79±10.09d	0.44±0.04a	0.25±0.03c	13.92±1.83cde
T7	74.16±11.20d	0.38±0.05ab	0.09±0.01c	6.88±1.52e
T8	137.36±19.73cd	0.38±0.01ab	0.25±0.04c	16.73±1.97cd

不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

3 讨论

研究表明，氮、磷、钾、钙、镁、硫及铁

等微量元素的缺失对朝谷 58 幼苗的生长指标均会产生不同程度的影响，营养元素缺乏导致谷子幼苗出现植株矮小、叶片失绿、叶尖焦枯及根系分

枝少的现象,这与前人^[13]研究结果一致。王樱琳等^[14]研究显示,大部分植物对氮、磷和钾胁迫最为敏感,其次对铁、钙和镁胁迫表现出不同的敏感性。本研究发现,朝谷58幼苗在氮缺失的培养液中,植株的生长受到了明显的抑制,表现出典型的植株矮小、叶片颜色暗淡的缺素症状。由于叶片生长受阻、叶长变短的原因,其干重和鲜重显著小于其他缺素处理,这与菠萝^[15]和薏苡^[16]幼苗的缺素症状表现相似。熊露露等^[16]研究表明,磷素缺乏会使植株底部老叶叶尖首先出现焦枯现象,导致后期叶片萎缩或脱落。本研究缺磷处理也出现相同现象,与其他作物表现不同的是,缺磷处理的谷子幼苗叶片上出现了明显的谷瘟病。缺钾会阻碍幼苗生长,缺钾处理的黄豆幼苗表现为叶薄、植株瘦小且易发生疾病^[17]。本研究发现缺钾处理的叶片厚度低于其他缺素处理。

植物叶片颜色是各种色素的具体表现,微量元素缺乏会导致SPAD值显著降低。镁是叶绿素重要的组成成分,本研究中元素的缺乏对叶片中SPAD值的影响较为明显,尤其是缺镁和缺铁处理,在培养后期时叶片呈黄色,根据测得的SPAD值,也得到了证实,试验中缺镁和缺铁处理下SPAD值下降的幅度最大,这与前人^[18-19]的研究结果一致。

根系是植物吸收养分的主要器官。唐永良等^[20]研究发现,缺钙使根尖变褐,坏死,并分泌出一种胶状物粘附在根上。本研究结果表明,缺素处理均显著降低了幼苗根系总根长、根总体积与根表面积,但各缺素处理间差异不显著,其中钙是抑制根系伸长的主要影响因子。硫在植物体内移动性虽然较低,但大气中的SO₂和H₂S等可能为幼苗提供了部分营养来源^[21],本试验中缺硫处理对谷子伤害程度较其他处理轻,此外,硫元素的缺乏增加了幼苗的根平均直径,其内在机制还需进一步研究。

大田种植作物常常发生缺素症状。营养缺乏症是作物体内营养失调的外部表现,本试验通过营养液水培方式对谷子幼苗进行观察,确定了谷子大、中、微量营养元素的缺素症状,未来还可尝试其他的培养方法,进一步为谷子的营养诊断和优质高效栽培提供理论依据。

4 结论

不同元素缺乏均对谷子幼苗农艺性状产生不同程度的抑制作用,其中氮元素是主要限制因子,其次是镁、钙和铁元素。谷子苗期管理中,应及时补充氮肥,并配合施用中、微量元素,才能保证幼苗正常生长。

参考文献

- [1] 陈二影,秦岭,程炳文,等. 夏谷氮磷钾肥的效应研究. 山东农业科学, 2015, 47(1): 61-65.
- [2] 张凡,袁澍,雷韬,等. 大量元素缺乏对小麦光合、呼吸作用和生理特性的影响. 四川大学学报(自然科学版), 2009, 46(2): 462-468.
- [3] 王妍. 微量元素缺乏时小麦、玉米叶绿素快相荧光动力学特征比较. 曲阜: 曲阜师范大学, 2013.
- [4] 董伟萍. 不同基因型大豆品种生理及产量性状对氮、磷及钾缺失的响应. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [5] 张圆圆,马金龙,管冠,等. 脐橙幼苗新老叶片养分含量对大、中量元素短期缺乏的差异化响应. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(2): 353-362.
- [6] 王妍,郭磊,李建兵,等. 我国主要粮食产区土壤有效态钙硫的变化特征及其对作物产量的影响. 中国土壤与肥料, 2024(3): 209-217.
- [7] 刘桂东,姜存仓,石磊,等. 我国微量元素肥料研究及应用的历程与展望. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(9): 1794-1811.
- [8] 孙亮,徐益,蔡沁,等. 中微量元素对水稻产量和品质的影响研究进展. 中国农业科技导报, 2024, 26(8): 9-19.
- [9] 凌丽俐,周薇,彭良志,等. 缺镁对‘纽荷尔’脐橙不同叶龄叶片叶绿素及荧光特性的影响. 果树学报, 2013, 30(2): 235-240.
- [10] 韦绍平. 微量元素对龙眼产量与品质的影响. 吉林农业, 2015(8): 91.
- [11] 张志良,瞿伟菁,李小芳. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [12] 秦岭,陈国秋,陈二影,等. 不同生态环境对谷子营养品质和淀粉特性的影响. 中国农业大学学报, 2024, 29(5): 28-39.
- [13] 闫志蕊,乌恩,包庆格乐,等. 不同营养元素缺乏对黄豆幼苗特征的影响. 现代园艺, 2022, 45(14): 10-12.
- [14] 王樱琳,韦小丽,段如雁,等. 闽楠幼苗对大量元素缺乏的响应. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 61-65.
- [15] 李开雄,唐敏,梁国平,等. 营养元素缺乏对‘台农16号’菠萝组培幼苗生长的影响. 热带农业科技, 2024, 47(3): 11-15.
- [16] 熊露露,王健健,姬拉拉,等. 氮磷缺乏对薏苡生长及其生理特性的影响. 北方园艺, 2021(1): 116-121.
- [17] 闫志蕊. 重要营养元素缺乏对黄豆苜蓿番茄幼苗的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [18] 韩配配,秦璐,李银水,等. 不同营养元素缺乏对甘蓝型油菜苗期生长和根系形态的影响. 中国油料作物学报, 2016, 38(1): 88-97.
- [19] 康家敏,陈实,王立,等. 微量元素缺乏对党参幼苗表现特征和生长的影响及部分生理特性测定. 种子, 2022, 41(5): 36-41.
- [20] 唐永良,罗质超,曹淑卿,等. 营养元素缺乏对根系生长发育的影响. 植物生理学通讯, 1981(6): 44-46, 37.
- [21] 李崇辉,朱强,郭再华,等. 养分缺乏对紫云英苗期生长及氮磷钾吸收的影响. 中国土壤与肥料, 2022(6): 91-95.

Effects of Different Nutrient Deficiencies on Growth and Root Morphology of Foxtail Millet Seedlings

Zhang Meng, Chen Guoqiu, Wang Kaixi, Zhang Wenfei,
Zhu Kangning, Diao Yulin, Dou Shuang, Zhang Haijin

(Liaoning Dryland Agriculture and Forestry Research Institute, Chaoyang 122000, Liaoning, China)

Abstract To investigate the effects of different nutrient deficiencies on the growth of foxtail millet seedlings, a hydroponic experiment was conducted with nine treatments, including a complete nutrient solution, and deficiency of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sulfur, iron, and micronutrients. Deficiency symptoms, plant height, biomass, leaf phenotype, and root morphology were observed and measured. The results showed that all nutrient deficiency treatments adversely affected seedling growth, primarily resulting in reduced plant height, chlorotic and smaller leaves, and poorly developed root systems with fewer branches and increased fragility. Compared with the complete nutrient treatment, different deficiency treatments significantly reduced plant height, biomass, relative chlorophyll content (SPAD value), leaf length, leaf width and leaf thickness, total root length, total root volume, and root surface area. Nitrogen and calcium deficiencies had the greatest effects on plant height and biomass, magnesium and iron deficiencies most strongly affected SPAD value, nitrogen, iron, and potassium deficiencies had the greatest impact on leaf morphology, and calcium and iron deficiencies most severely affected root growth. These findings suggest that nitrogen fertilization should be prioritized during the foxtail millet seedling stage, along with adequate supplementation of magnesium, calcium, and iron.

Key words Foxtail millet; Nutrient elements; Symptoms of nutrient deficiency; Seedling growth; Root morphology