

静磁场联合外源锌诱导大豆萌发及生物锌富集

刘迪国¹, 裴迅¹, 张瑞^{1,2,3}, 周望庭^{1,3}, 吴慕慈^{1,3}, 杨兴明⁴, 沈方雄⁵, 何静仁^{1,2,3*}

(1. 武汉轻工大学硒科学与工程现代产业学院, 湖北武汉 430023) (2. 湖北省农产品加工与转化重点实验室, 湖北武汉 430023) (3. 国家富硒农产品加工技术研发专业中心, 湖北省绿色富硒农产品精深加工工程技术研究中心, 湖北武汉 430023) (4. 湖北豆旺农业科技有限公司, 湖北钟祥 431900) (5. 质每(湖北)健康科技有限公司, 湖北潜江 433100)

摘要: 该实验探究了静磁场对大豆萌发及生物锌富集的影响。在考察不同静磁场强度(0、15、25、35、45 mT)和处理时间(0.5、1、1.5、2.5、3.5 h)对大豆萌发的发芽率、芽长、鲜重和可溶性蛋白含量变化的基础上, 施加不同质量浓度的外源性硫酸锌(0、40、80、120、160、200 mg/L)处理, 考察不同静磁场环境及静磁场介入时期(前期、中期和后期)对大豆萌发及其蛋白锌含量的影响。试验表明: 静磁场强度为35 mT和处理时间为0.5 h时, 大豆萌发效果最佳, 芽长(23.54 mm)和可溶性蛋白含量(384.28 mg/g)较对照组分别提高15.70%和19.81%, 发芽率和鲜重无显著影响($P>0.05$); 在此静磁场条件与120 mg/L硫酸锌溶液结合静磁场介入后期处理下, 萌发24 h的大豆总锌(106.68 mg/kg)及蛋白锌(27.37 mg/kg)含量较对照组分别提高8.64%和26.68%。综上所述, 适宜静磁场环境及外源性无机锌处理可以促进大豆萌发并诱导大豆中蛋白态生物锌的积累, 为天然富锌食品原料开发提供了新的技术手段。

关键词: 静磁场; 大豆; 萌发; 可溶性蛋白; 生物锌

文章编号: 1673-9078(2025)06-137-145

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0346

Germination and Biological Zinc Enrichment of Soybeans Induced by the Combination of A Static Magnetic Field and Exogenous Zinc

LIU Digu¹, PEI Xun¹, ZHANG Rui^{1,2,3}, ZHOU Wangting^{1,3}, WU Muci^{1,3}, YANG Xingming⁴,
SHEN Fangxiong⁵, HE Jingren^{1,2,3*}

(1. College of Modern Industry for Selenium Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)(2. Key Laboratory of Agricultural Products Processing and Transformation of Hubei Province, Wuhan 430023, China)(3. National Research and Development Center for Se-rich Agricultural Products Processing, Research Center for Deep Processing Engineering Technology of Green Selenium-rich Agricultural Products of Hubei Province, Wuhan 430023, China)(4. Hubei Douwang Agricultural Technology Co. Ltd., Zhongxiang 431900, China)
(5. Zhimei (Hubei) Health Technology Co. Ltd., Qianjiang 433100, China)

引文格式:

刘迪国,裴迅,张瑞,等.静磁场联合外源锌诱导大豆萌发及生物锌富集[J].现代食品科技,2025,41(6):137-145.

LIU Digu, PEI Xun, ZHANG Rui, et al. Germination and biological zinc enrichment of soybeans induced by the combination of a static magnetic field and exogenous zinc [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 137-145.

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2022CFB869); 湖北省教育厅科学技术研究项目(D20221601); 湖北省揭榜制粮食科技项目(2023HBLSKJ008); 潜江大豆精深加工及营养功能食品开发企校联合技术创新中心(whpu-2022-kj-871); 石牌大豆加工及豆制品原料开发与应用新技术企校联合创新中心(whpu-2023-kj-497); 湖北省教育厅科学技术研究项目(D20221601)

作者简介: 刘迪国(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品营养与功效评价, E-mail: dguoliu@163.com

通讯作者: 何静仁(1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与营养及功能性食品配料, E-mail: jingren.he@whpu.edu.cn

Abstract: The effects of a static magnetic field on germination and biological zinc enrichment of soybeans were investigated. The influences of static magnetic field strength (0, 15, 25, 35, and 45 mT) and treatment time (0.5, 1, 1.5, 2.5, and 3.5 h) on the germination rate, seedling length, fresh weight, and soluble protein content of soybeans were initially assessed. Next, after different concentrations of exogenous zinc sulfate (0, 40, 80, 120, 160, and 200 mg/L) were applied during germination, the effects of a static magnetic field strength and time of application (initial, intermediate, and final stages of germination) on the germination and protein zinc content of soybeans were evaluated. The results showed optimal soybean germination under the following conditions: a static magnetic field strength of 35 mT and a treatment time of 0.5 h. The seedling length (23.54 mm) and soluble protein content (384.28 mg/g) were significantly increased by 15.70% and 19.81%, respectively, compared to those of the control group. However, no significant differences were observed in the germination rate and fresh weight between the groups ($P>0.05$). In addition, compared with those of the control group, the total zinc content (106.68 mg/kg) and protein zinc content (27.37 mg/kg) of soybeans germinated for 24 h increased by 8.64% and 26.68%, respectively, after exposure to a static magnetic field (field strength, 35 mT; time, 0.5 h; intervention period, anaphase) combined with exogenous zinc sulfate (120 mg/L). In conclusion, an optimal combination of a static magnetic field and exogenous inorganic zinc can promote the germination of soybeans and induce the accumulation of protein-type biological zinc in soybeans. These findings provide a novel technology for the development of natural zinc-rich food ingredients.

Key words: static magnetic field; soybean; germination; soluble protein; biological zinc

锌是一种重要的微量元素，在人体内发挥着多种生理功能，含量仅次于铁，居第二位。据报道^[1]，锌在人体中的主要功能有：（1）作为各种酶的激活剂；（2）作为锌依赖蛋白的结构调节因子，如锌指蛋白、锌簇蛋白等；（3）参与蛋白质的合成代谢；（4）调节人体的正常生理功能。当锌缺乏时，不仅会阻滞机体的生长发育，还会造成多种疾病的出现，如食欲不振、免疫异常和皮肤粗糙等^[2]。目前，市面上的补锌制剂根据锌的存在形态，可分为无机锌、有机锌、氨基酸锌螯合物及生物活性锌（蛋白锌、富锌酵母）。其中，如硫酸锌、氧化锌等无机锌对人体危害较大，生物利用率较低，而葡萄糖酸锌和乳酸锌等有机锌在这些方面虽有了较大改善，但摄入过多仍会给机体造成负担，存在一定的局限性。蛋白锌是蛋白在生物体内与锌形成的复合物，具有吸收率高，副作用小等优点，已经引起了人们的关注^[1,3]。范轶欧等^[4]通过小鼠口服蛋白锌硒片，证明了锌硒与蛋白结合更有利于促进小鼠生长和提高免疫力。徐贵法^[5]论述了蛋白锌在改善食欲、促进生长发育、提高智力和免疫力等方面均获得了较好的治疗效果。

研究表明，大豆在萌发过程中能够对锌元素进行有效的富集，可使无机锌转化为易被人体吸收的有机锌^[6]。徐娜等^[7]利用 10 $\mu\text{g/mL}$ 外源锌溶液浸泡大豆后，豆芽可食部分和不可食部分的锌含量较

空白对照组分别提升 76.63% 和 40.88%，实现了萌发大豆对锌的有效积累。赵小红等^[8]以大豆为生物强化载体，采用不同浓度锌溶液和硒溶液浸泡大豆，通过大豆发芽制备出富含硒和锌的萌发大豆，其中，锌在大分子物质中的分布主要为多糖和蛋白质。Wei 等^[9]研究发现，采用硫酸锌溶液浸泡糙米，发芽糙米中锌含量与 ZnSO_4 浓度呈线性相关，通过 Caco-2 细胞模型验证了外源锌的引入提高了发芽糙米的锌生物利用度。

磁场（Magnetic Field, MF）作为一种温和绿色的非热物理加工手段，在提高植物发芽率、促进根和芽的生长，增加植物对水和营养的摄取等方面表现出了应用潜力，现今已成为促进种子萌发和生长的有效方法^[10,11]。Bhardwaj 等^[12]将黄瓜种子在 200 mT 静磁场强度下处理 1 h，相比对照组，种子萌发率提高了 18.5%。此外，抗氧化酶也表现出更高的活性，其中，超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、谷胱甘肽还原酶和过氧化物酶活性相比对照组分别提高 8%、83%、77% 和 16%。Podlešna 等^[13]发现磁场处理可以提高蚕豆种子的淀粉酶活性，且在较高强度的磁场不仅有利于种子中赤霉素的生成，而且在 85 mT 强度下处理的种子和植物的地上部分中发现了较高含量的生长素，然而，较低强度的磁场提高了地上部分和根中赤霉素的含量，并且在 30 mT 的强度下更容易刺激根系中生长素的产生。此外，

对灌溉水、雪豆和鹰嘴豆种子进行磁场处理,发现磁处理可以导致两种豆 N、K、Ca、Mg、Na、Zn、Fe 等元素含量较对照组显著增加^[14]。目前磁场处理在发芽方面主要集中在对植物生理变化影响方面的相关研究,对其微量营养元素富集等研究方向的报道较少。因此,本实验以大豆为原料,研究不同静磁场处理条件对大豆萌发以及在萌发过程中大豆蛋白质中锌富集的影响,以期为萌发大豆产品在功能食品开发方向提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验大豆(东生 22 号,产于 2022 年),购自黑龙江拜泉县新三农合作社;硝酸(优级纯)、七水合硫酸锌、苯酚、氢氧化钠、亚硫酸氢钠、酒石酸钾钠、福林酚试剂、甲醇(均为分析纯),购于国药集团化学试剂有限公司;锌标准溶液,购于国家有色金属及电子材料分析测试中心;Bradford 试剂盒,购于上海碧云天生物技术股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

STARTER 3100 型 pH 计,奥豪斯仪器(上海)有限公司;MFH50 静磁场恒温恒湿箱、MFL10 静磁场恒温恒湿光照培养箱,英都斯特(无锡)感应科技有限公司;A3AFG 火焰原子吸收分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;BioTek 酶标仪,美国伯腾仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 磁场处理与大豆萌发

挑选表观良好、籽粒饱满、无病虫害的大豆,用蒸馏水洗净后,将其置于一定量的蒸馏水(1:10, m/V)中浸种 11 h。并在浸种开始时将大豆放入磁场培养箱中,在 0、15、25、35、45 mT 磁场强度下分别处理 0.5、1.0、1.5、2.5、3.5 h。待浸种结束后,进一步采用培养皿滤纸法发芽,即将大豆均匀铺于垫有两层滤纸的培养皿中,随后将培养皿置于 22 °C,相对湿度在 55%~65% 的恒温恒湿箱中培养 42 h,其中每 12 h 喷施一次水,培养结束后样品经冷冻干燥、粉碎、过 80 目筛后备用。

1.3.2 锌富集浓度筛选

准确称取一定量的七水合硫酸锌,用蒸馏水溶解并稀释制备 0、40、80、120、160、200 mg/L 的

梯度质量浓度溶液,分别浸泡大豆,料液比为 1:10 (m/V)。利用 1.3.1 中的培养方式和优化的静磁场条件处理,培养 42 h 后冷冻干燥、粉碎、过 80 目筛后备用。

1.3.3 磁场介入时期的选择

将大豆置于质量浓度为 120 mg/L 的七水合硫酸锌溶液中浸种 11 h,并分别在浸种开始的第 0 h、5 h 15 min 和 10 h 30 min 时进行 30 min 的磁场辅助处理(磁场强度为 35 mT),并将这 3 个时段分别命名为介入前期、介入中期和介入后期。浸种结束后,大豆被继续培养 96 h,其中,萌发前 48 h 大豆采用培养皿滤纸法发芽,温度、相对湿度以及施水频率参照 1.3.1 所述方法进行,随后将培养的萌发大豆转移至育苗盆发芽,温度和相对湿度保持不变。大豆在萌发 96 h 的过程中,每隔 24 h 随机取一定量萌发大豆样品进行冷冻干燥、粉碎,并过 80 目筛后备用。

1.3.4 生长指标的测定

每次收集萌发大豆后立即测定其生长指标,参照方晓敏等^[15]的方法略作修改。(1)发芽率:测定 50 颗大豆的萌发情况,当种子出现肉眼可见的芽且无霉变则视为成功发芽;(2)芽长:随机选取 15 颗大豆,用游标卡尺测量其芽长,取平均值;(3)鲜重:随机选取 25 颗大豆,用电子天平称量其质量。上述试验均测定三次。

1.3.5 可溶性蛋白含量测定

按照 Yang 等^[16]报道的方法略作修改。准确称取 0.05 g 萌发大豆样品,加入 25 mL 蒸馏水,在 25 °C 水浴中震荡提取 1 h,离心后取上清液,采用 Bradford 试剂盒进行试验,操作方法按说明书上进行,在 595 nm 处测定其吸光度,并根据绘制的标准曲线计算样品中可溶性蛋白的含量。

1.3.6 锌含量测定

(1)蛋白态生物锌含量测定前处理按照如下工艺进行:萌发大豆粉→正己烷脱脂,按照料液比 1:15 (m/V) 脱脂两次→利用碱溶酸沉法提取,即:按照料液比 1:30 (m/V) 溶解脱脂萌发大豆粉,利用氢氧化钠溶液(1 mol/L)调节 pH 值至 8.5 并搅拌 3 h,离心后重复提取一次,收集上清液,调节 pH 值至 4.2,离心后收集沉淀→透析→冻干→萌发大豆蛋白质提取物。

(2)萌发大豆及其蛋白质中锌含量测定参照

GB5009.14-2017《食品中锌的测定》中火焰原子吸收光谱法。准确称取一定量样品于微波消解罐中,加入 7 mL 硝酸,按照微波消解仪消解程序进行试验,待消解结束后利用赶酸仪在 180 ℃ 条件下赶酸至 1 mL 左右,用体积分数为 2% 的硝酸溶液定容至 10 mL 待测。同时利用体积分数为 2% 的硝酸溶液配置一定质量浓度的锌标准溶液 (0、0.05、0.1、0.2、0.3、0.4、0.6、0.8、1 mg/L)。仪器参数见表 1。

表 1 仪器工作参数

Table 1 Instrument operating parameter					
元素	波长/nm	灯工作电流/mA	燃烧器高度/mm	空气压力/MPa	乙炔流量/(mL/min)
锌	213.9	6.0	6	0.24	1 100

1.4 统计分析

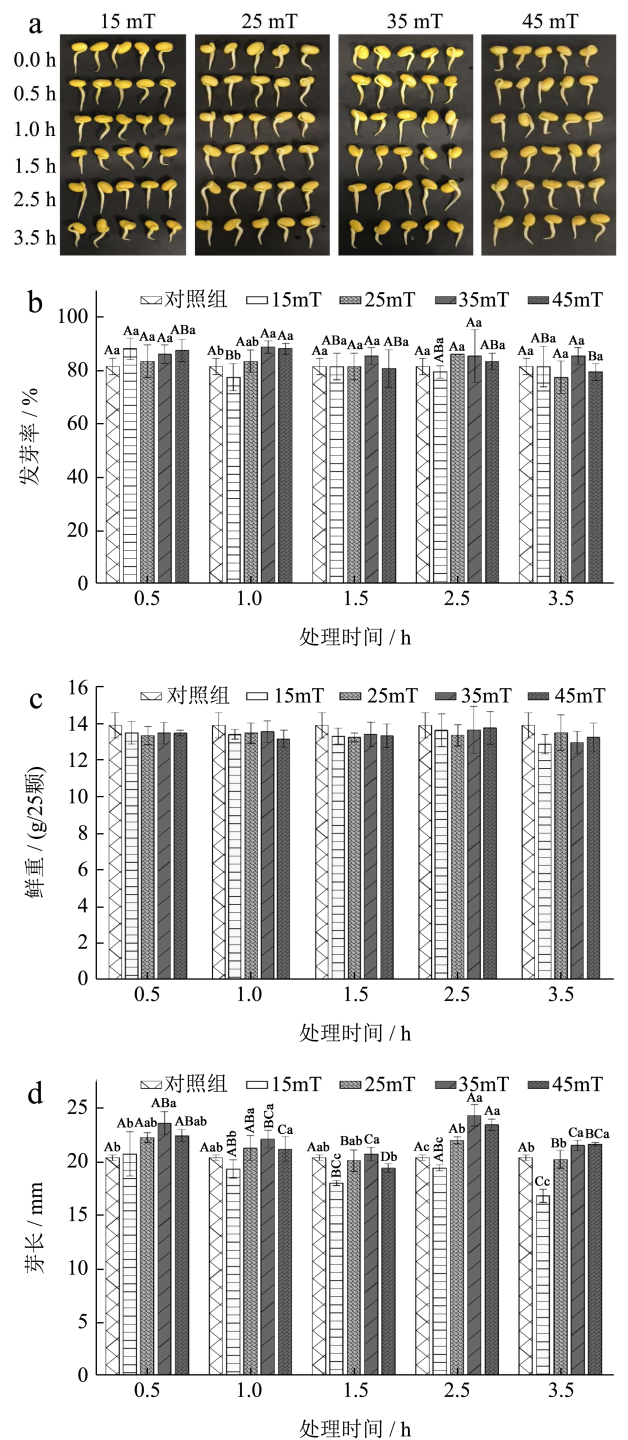
本实验中所有指标的测定均重复 3 次,结果表示为平均值 ± 标准差。采用 Origin 2021 和 SPSS 26.0 软件对各组数据进行分析,采用 Duncan 多重比较及独立样本 *t* 检验分析显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同磁场处理条件对萌发大豆生长指标的影响

由图 1a 可知,静磁场对大豆的萌发状态产生影响,不同磁场强度处理 3.5 h 后均明显抑制了萌发大豆的生长。在磁场强度为 35 mT 和 45 mT 时处理 1.0 h 后,大豆的发芽率分别达到 88.67% 和 88%,相比对照组,其发芽率分别提高了 9.02% 和 8.20% (图 1b),表明磁场处理对大豆的萌发具有促进作用。Michalak 等^[17]使用 30 mT 的交替磁场处理 2.5 min 后大豆发芽率为 89%,相比对照组显著增加 4.71% ($P<0.05$)。图 1c 表明在所选试验条件下磁场处理对萌发大豆鲜重无显著影响 ($P>0.05$)。在 35 mT 和 45 mT 下,随着处理时间的增加,磁场对芽长变化总体呈现先促进后抑制的趋势。其中,35 mT 处理 0.5 h 和 2.5 h 效果最佳,芽长分别为 23.54 mm 和 24.29 mm,较对照组分别提高 15.70% 和 19.38% (图 1d),但二者之间无显著差异 ($P>0.05$)。磁场处理对萌发大豆生长的促进作用可能是在磁场作用下改变了萌发大豆体内生理生化过程,提高了酶的活性及生长素含量,进而促进萌发大豆的萌发和生长^[13]。据研究报道,磁场处理对小麦^[18]、向日葵^[19]、豌豆^[20]等种子的萌发,生长及酶活性的提

高具有积极作用。Luo 等^[10]利用 10 mT 静磁场处理糙米 60 min,发芽糙米 (24~72 h) 芽长和根长分别比对照组长 0.64~3.66 mm 和 1.15~9.25 mm,证明了磁场增强种子萌发的可行性。磁场强度为 15 mT 处理对萌发大豆芽长整体呈现抑制作用,这种抑制程度随着处理时间的延长而增强,表明合适的静磁场强度处理大豆才能有效改善萌发。综上所述,经过 35 mT 和 45 mT 静磁场处理 1.0 h 后,有利于促进大豆的发芽,且 35 mT 处理 0.5 h 和 2.5 h 更有利于萌发大豆的生长。



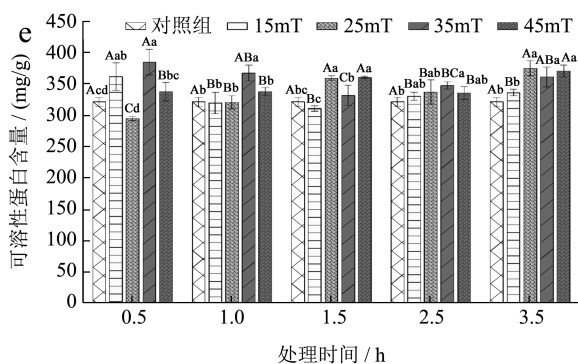


图1 不同磁场处理条件对萌发大豆生长指标及可溶性蛋白含量的影响

Fig.1 Effects of different magnetic field treatment conditions on growth indexes and soluble protein content of germinated soybean

注: a 为磁场处理对萌发大豆形态的影响。b-e 中柱上不同大写字母代表在相同磁场强度不同处理时间下具有显著性差异 ($P < 0.05$); 不同小写字母代表在相同处理时间下不同磁场强度具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.2 不同磁场处理条件对萌发大豆可溶性蛋白含量的影响

大豆在萌发过程中储藏蛋白被蛋白酶水解, 为萌发大豆生长提供营养物质, 导致小分子蛋白质含量提高^[21,22]。本研究分析了不同静磁场处理条件对萌发大豆可溶性蛋白含量的影响, 如图1e所示。在25 mT和45 mT下, 随着磁场处理时间的延长, 萌发大豆可溶性蛋白含量整体呈现上升的趋势; 而在15 mT和35 mT处理时, 可溶性蛋白含量随着处理时间的增加整体处于下降的趋势, 在35 mT处理0.5 h时可溶性蛋白含量最高, 达到384.28 mg/g, 相比对照组提高19.81%, Asghar等^[23]利用50、75和100 mT分别处理大豆3和5 min均能提高发芽大豆可溶性蛋白含量, 三种磁场强度处理3 min作用更为明显。刘圆^[24]利用磁场预处理绿豆, 发现42.5 mT恒定磁场强度处理后萌发绿豆可溶性蛋白含量较对照组提高43.90%。这可能与磁场处理能够提高萌发大豆硝酸还原酶活性, 进而促进氮的代谢有关^[25,26]。综合考虑静磁场处理对萌发大豆生长指标和可溶性蛋白含量的影响及处理成本, 将磁场强度35 mT、处理时间0.5 h作为后续试验条件。

2.3 不同锌浓度处理对萌发大豆生长指标的影响

选取上述最优磁场条件, 探究磁场作用下不同锌质量浓度处理对萌发大豆生长指标的影响。如图2a、2b所示, 在对照组中, 与蒸馏水浸种

(0 mg/mL)相比, 除80 mg/L外, 其它锌浓度处理对萌发大豆的发芽率未造成显著影响 ($P > 0.05$); 相较于对照组, 静磁场处理组具有更稳定的发芽率, 锌浓度梯度的变化对萌发大豆的发芽率未造成显著影响 ($P > 0.05$)。

由图2c可知, 在磁场作用下不同锌浓度处理对萌发大豆鲜重无显著性影响 ($P > 0.05$)。此外, 由图2d可知, 锌溶液质量浓度为120 mg/L, 静磁场处理组萌发大豆生长状态最佳, 静磁场处理组与对照组中蒸馏水浸种相比, 萌发大豆芽长提高11.43%; 在对照组中, 锌溶液质量浓度为120 mg/L处理后萌发大豆芽长为25.00 mm, 相比蒸馏水浸种芽长增加9.65%, 表明磁场与锌溶液对萌发大豆的生长具有一定的协同作用, 低质量浓度锌溶液促进萌发大豆的生长可能是因为锌是多种酶的辅助因子, 参与多项生理过程, 如激素调节 (锌是合成植物生长素前体—色氨酸的必需元素), 进而表现出对萌发大豆生长的促进作用^[27]。当锌溶液质量浓度高于120 mg/L时, 对照组和静磁场处理组萌发大豆芽长长度呈现梯度减小, 其中, 锌溶液质量浓度为200 mg/L时萌发大豆生长被显著抑制 ($P < 0.05$), 与蒸馏水浸种 (0 mg/mL)相比, 静磁场处理组与对照组分别降低13.62%和10.10%, 其原因可能是达到了外源锌施加的临界浓度。综合分析锌溶液质量浓度在120 mg/L时处理大豆最有利于萌发大豆的生长。

2.4 不同锌浓度处理对萌发大豆锌积累的影响

如图2e所示, 锌溶液质量浓度为0~120 mg/L, 对照组与静磁场处理组萌发大豆的锌含量与锌溶液质量浓度呈线性关系, 质量浓度为120 mg/L时, 相比蒸馏水处理, 萌发大豆锌含量分别增加1.83和1.89倍; 当锌溶液质量浓度继续增加时, 对照组萌发大豆锌含量的增加速率高于静磁场处理组, 可能是因为磁场处理导致细胞做出应激反应, 影响了锌元素的吸收和运输^[28]。根据目前的报道, 磁场处理与促进植物生长、矿物质营养摄取和水分运输等生理过程有关^[29,30], 而在本研究中, 图2e表明静磁场在浸种开始时干预并未有效提高萌发大豆的锌含量, 且相关影响机制有待进一步探究。因此, 考虑锌溶液质量浓度变化对生长指标的影响, 后续将采用锌溶液质量浓度120 mg/L进行试验, 继续分析不同磁场介入时期处理后萌发大豆锌含量的变化。

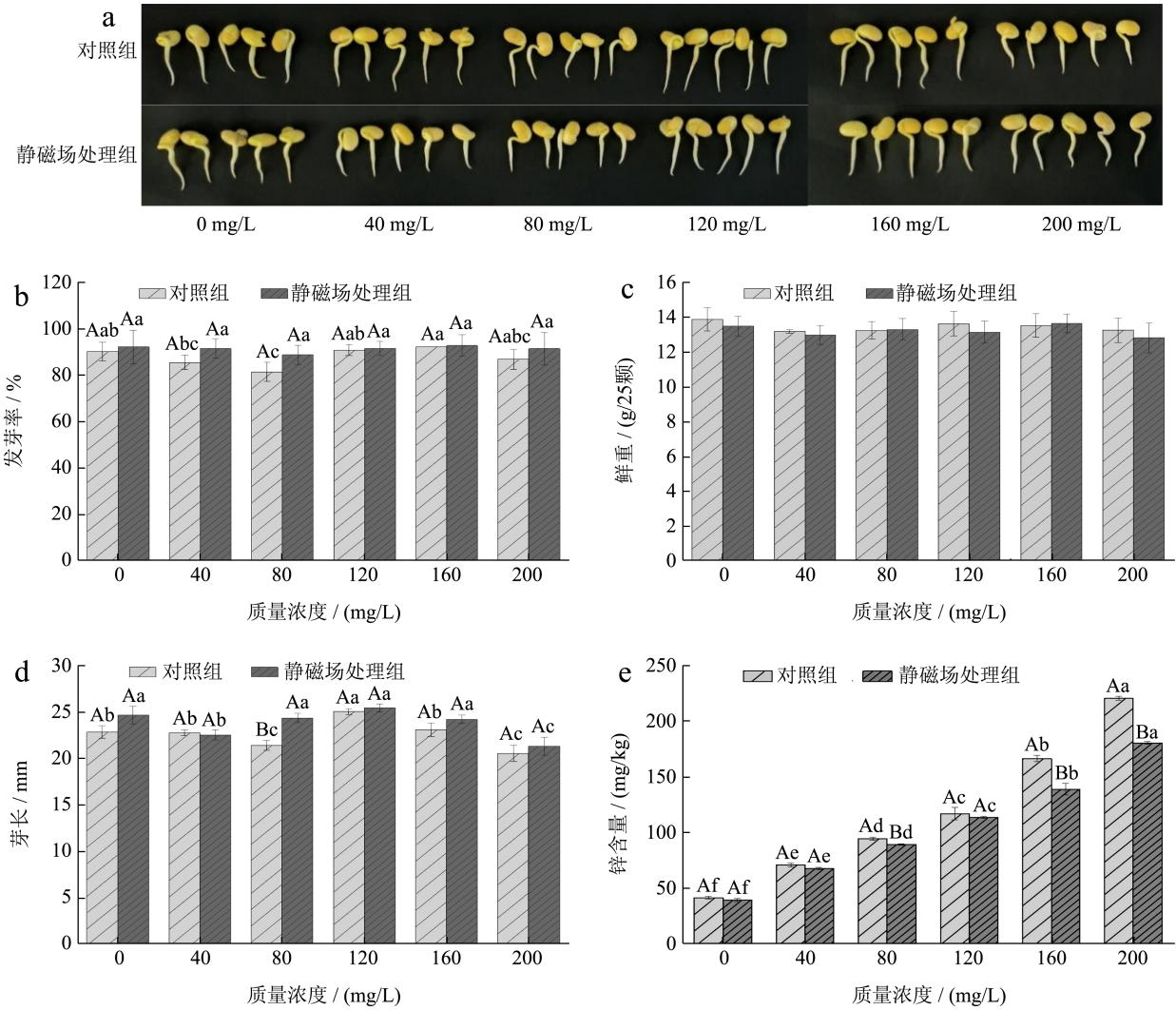


图 2 磁场干预下不同质量浓度锌溶液处理对萌发大豆生长指标及其锌积累的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of zinc solution on growth indexes and zinc accumulation of germinated soybean under magnetic field treatment condition

注：a 为不同质量浓度锌溶液处理对萌发大豆形态表征的影响。b~e 中柱上不同小写字母代表在相同静磁场条件不同锌质量浓度下差异显著 ($P<0.05$)；不同大写字母代表在相同锌质量浓度不同处理组之间具有显著性差异 ($P<0.05$)。

2.5 不同磁场介入时期对萌发大豆生长指标的影响

大豆经优化后的磁场条件及锌溶液处理后生长指标及生长形态图如表 2 及图 3a 所示，萌发大豆在生长 24 h 时，磁场介入中期和后期发芽率最高，较对照组分别增加 11.21% 和 16.82%，48 h 后各组的发芽率均达到 90% 以上，发芽基本完成。萌发大豆鲜重在生长前 48 h 各组无显著差异 ($P>0.05$)；在生长 72 h 和 96 h 时，磁场介入中期的萌发大豆鲜重与介入前期相比分别提高 9.20% 和 11.50%，推

测是因为不同时期静磁场的介入处理导致大豆根系生长状态存在差异，吸水能力不同导致不同处理组之间鲜重出现了明显变化 ($P<0.05$)。萌发大豆在生长 24 h 和 48 h 时，磁场介入中期处理对萌发大豆生长促进作用最强，其芽长较对照组分别提高 23.57% 和 12.27%。而在萌发大豆生长 72 h 和 96 h 时，与对照组相比，磁场介入后期轴长分别提高 22.27% 和 8.07%，根长分别提高 13.76% 和 1.65%。从整体上看，磁场介入中期和后期对萌发大豆长度的影响更为明显。

表 2 不同磁场介入时期对萌发大豆生长指标的影响

Table 2 Effect of different magnetic field intervention periods on growth indexes of germinated soybean						
萌发时间	处理类别	发芽率/%	鲜重/(g/25 颗)	芽长/mm	根长/mm	轴长/mm
24 h	空白组	72.67 ± 4.16 ^b	12.69 ± 0.20	12.67 ± 0.49 ^b		
	对照组	71.33 ± 3.06 ^b	12.18 ± 0.27	11.38 ± 0.58 ^c		
	介入前期	69.33 ± 1.15 ^b	12.23 ± 0.44	11.08 ± 0.07 ^c		
	介入中期	79.33 ± 3.06 ^a	12.65 ± 0.52	14.07 ± 0.73 ^a		
	介入后期	83.33 ± 4.16 ^a	12.69 ± 0.07	13.24 ± 0.11 ^{ab}		
48 h	空白组	90.67 ± 4.62	13.86 ± 0.70	27.53 ± 0.74 ^b		
	对照组	90.67 ± 6.11	14.12 ± 0.42	25.77 ± 0.62 ^c		
	介入前期	96.00 ± 2.00	13.86 ± 0.34	24.42 ± 0.10 ^d		
	介入中期	92.00 ± 2.00	14.29 ± 0.05	28.94 ± 0.56 ^a		
	介入后期	92.00 ± 2.00	13.55 ± 0.27	24.41 ± 0.73 ^d		
72 h	空白组	96.67 ± 1.15	15.55 ± 0.70 ^{ab}		21.18 ± 1.86 ^b	20.18 ± 1.77 ^b
	对照组	98.00	15.85 ± 0.63 ^{ab}		22.64 ± 0.37 ^b	20.65 ± 0.56 ^b
	介入前期	97.33 ± 1.15	14.86 ± 0.70 ^b		22.30 ± 0.92 ^b	21.01 ± 1.43 ^b
	介入中期	98.00 ± 2.00	16.23 ± 0.50 ^a		23.02 ± 0.28 ^b	24.59 ± 0.52 ^a
	介入后期	97.33 ± 3.06	15.89 ± 0.43 ^{ab}		25.76 ± 1.39 ^a	25.25 ± 1.55 ^a
96 h	空白组	97.33 ± 1.15	18.64 ± 0.47 ^b		39.11 ± 1.21 ^{ab}	45.46 ± 2.28 ^{ab}
	对照组	99.33 ± 1.15	19.00 ± 0.19 ^{ab}		39.73 ± 1.93 ^{ab}	43.88 ± 1.47 ^b
	介入前期	97.33 ± 1.15	17.62 ± 0.26 ^c		37.74 ± 1.90 ^b	43.65 ± 0.79 ^b
	介入中期	98.67 ± 1.15	19.65 ± 0.23 ^a		42.04 ± 2.58 ^a	47.49 ± 1.96 ^a
	介入后期	98.00 ± 2.00	18.89 ± 0.94 ^{ab}		40.39 ± 1.18 ^{ab}	47.42 ± 1.81 ^a

注：不同小写字母表示相同生长时间不同处理之间的差异显著（ $P<0.05$ ）；空白组表示不经任何处理、对照组表示大豆仅经外源锌溶液干预。

2.6 不同磁场介入时期对萌发大豆及其蛋白态生物锌积累的影响

图 3b、3c 体现了静磁场和锌溶液协同干预下萌发大豆及其蛋白态生物锌含量随生长天数变化的趋势图。由图 3b 可以看出，萌发大豆锌含量随着生长天数的延长，整体呈现下降趋势；萌发大豆生长 24 h 时锌含量最高，且磁场在浸种不同阶段介入处理对萌发大豆锌含量的提高具有不同的影响，萌发大豆生长 24 h 时磁场介入中期和后期相较于对照组，萌发大豆锌积累有了明显提高（ $P<0.05$ ），介入后期效果最佳（106.68 mg/kg），相比对照组提升 8.64%。Luo 等^[31]使用 30、60、120、150 和 400 mT 的磁场强度处理天蓝遏蓝菜（*Noccaea caerulescens*）种子，相比对照组，30~400 mT 均使得幼苗的芽和根部锌含量显著增加（ $P<0.05$ ），这种影响与磁场强度呈正相关。外加磁场作用可以显

著改变细胞膜的结构，随着浸种时间的延长，静磁场处理后增强了细胞膜的渗透性，进而增加细胞对外界物质摄取能力，导致萌发大豆锌含量提高^[28,32,33]。Liu 等^[34]在研究磁性技术对杨树耐盐性的影响时发现磁场强度为 30 mT 时处理可以导致杨树叶和根的微量元素（Fe、Zn 和 Cu）含量增加，与根部吸收能力更强有关。Ercan 等^[35]利用不同强度磁场处理大麦，幼苗生长两周后根和叶中锌含量与磁场强度呈现正相关，且含量显著高于对照组（ $P<0.005$ ），其中，240~250 mT 处理使得叶中锌含量增幅约为 30 倍。此外还发现微量元素（Fe、B、Cu、Mn 和 Mo）的含量在根中增加，可能与营养素摄取程度和细胞膜损伤有关。磁场处理产生的影响随着生长时间的延长而改变，生长时间超过 24 h 后，对照组萌发大豆富锌效果较好，推测静磁场处理产生的聚锌效果具有时间效应。

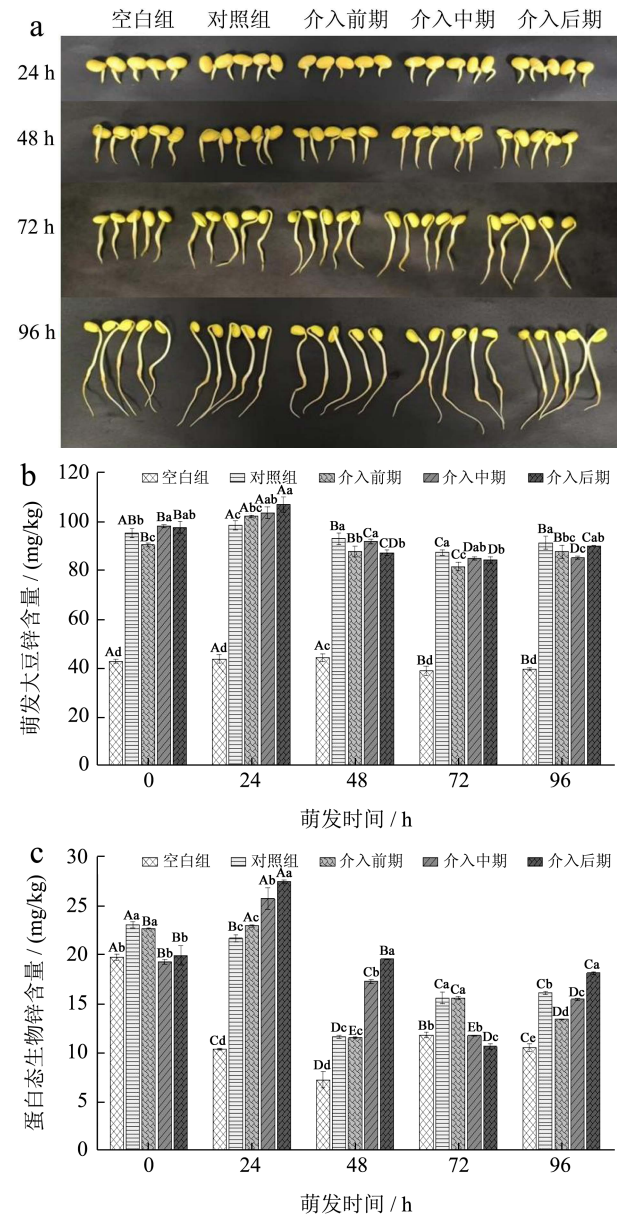


图 3 不同磁场介入时期对萌发大豆及其蛋白态生物锌积累的影响

Fig.3 Effect of different magnetic field intervention periods on the accumulation of biological zinc in germinating soybeans and the proteins from germinating soybeans

注：a 为磁场及锌溶液协同处理下对萌发大豆形态表征的影响。b、c 中柱上不同大写字母代表相同条件处理下不同生长时间之间差异显著 ($P<0.05$)；不同小写字母代表相同生长时间不同条件处理下差异显著 ($P<0.05$)。空白组表示不经任何处理、对照组表示大豆仅经外源锌溶液干预。

如图 3c 所示，空白组萌发 0~24 h 时，蛋白态生物锌含量急剧下降，推测在这一萌发阶段，植物体内出现了明显的生理代谢变化，从而导致蛋白态生物锌含量的改变。从整体上分析，外源锌的引入能在大豆萌发过程中有效增加蛋白态生物锌含

量，在萌发大豆生长 24、48 和 96 h 时，磁场介入后期处理对蛋白态生物锌含量的提高更为明显，与对照组相比，蛋白态生物锌含量分别提高 26.68%、68.17% 和 12.65%，萌发大豆在生长 24 h 时蛋白态生物锌含量最高 (27.37 mg/kg)。在这三个生长阶段中，磁场介入处理对蛋白态生物锌含量产生了不同影响，且影响排序为：介入后期>介入中期>介入前期，这可能是由于静磁场不同介入阶段处理导致了蛋白质结构发生了不同程度的改变，作用机制还需进一步研究。

3 结论

不同静磁场环境影响大豆萌发及生长发育状态和生物锌及可溶性蛋白含量。35 mT 和 45 mT 静磁场处理 0.5~1 h 时，大豆萌发率较高 (86%~88.67%)；但 35 mT 静磁场处理 0.5 h 时，萌发大豆的生长更具优势，芽长和可溶性蛋白含量分别为 23.54 mm 和 384.28 mg/g，相比对照组提高 15.70% 和 19.81%；萌发大豆的鲜重在静磁场处理前后无显著差异 ($P>0.05$)。在静磁场介入后期，质量浓度 120 mg/L 的外源性无机锌处理可以有效促进大豆萌发和生物锌的积累，萌发 24 h 后大豆的总锌、蛋白锌含量分别为 106.68 mg/kg 和 27.37 mg/kg，较对照组分别提高 8.64% 和 26.68%。静磁场技术在生物锌富集及农业食品工业领域的广泛应用将为天然富锌食品及农产品深加工提供新思路及理论技术支持。

参考文献

- [1] DUAN M P, LI T, LIU B, et al. Zinc nutrition and dietary zinc supplements [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(9):1277-1292.
- [2] LIVINGSTONE C. Zinc: physiology, deficiency, and parenteral nutrition [J]. Nutrition in Clinical Practice, 2015, 30(3): 371-382.
- [3] 李天真.食品微量元素锌强化剂的研究[J].粮食与食品工业,2004,1:18-20.
- [4] 范轶欧,周雯,陈敏.蛋白锌硒片对小鼠免疫功能的影响[J].中国卫生检验杂志,2009,19(10):2230-2232.
- [5] 徐贵法.锌制剂的发展及蛋白锌的应用现状[J].现代食品,2021,1:1-6.
- [6] 王朝敏,赵天瑶,薛文通.生物强化富锌食品研究进展[J].食品工业,2022,43(7):218-222.
- [7] 徐娜,邹涛,庞锦伟,等.外源锌浸种对大豆种子萌发、大豆芽生长及锌积累的影响[J].大豆科学,2012,31(6):932-936.
- [8] 赵小红,何慧,贾蕾,等.生物强化硒和锌的豆芽制备、分布及形态研究[J].食品科技,2022,47(1):70-78.

- [9] WEI Y Y, SHOHAG M J I, WANG Y Y, et al. Effect of zinc sulfate fortification in germinated brown rice on seed zinc concentration, bioavailability, and seed germination [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(7): 1871-1879.
- [10] LUO X Y, LI D D, TAO Y, et al. Effect of static magnetic field treatment on the germination of brown rice: changes in α -amylase activity and structural and functional properties in starch [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132392.
- [11] SARRAF M, KATARIA S, TAIMOURYA H, et al. Magnetic field (MF) applications in plants: an overview [J]. Plants, 2020, 9(9): 1139.
- [12] BHARDWAJ J, ANAND A, NAGARAJAN S. Biochemical and biophysical changes associated with magneto priming in germinating cucumber seeds [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 57: 67-73.
- [13] PODLESNA A, BOJARSZCZUK J, PODLESNY J. Effect of pre-sowing magnetic field treatment on some biochemical and physiological processes in Faba bean (*Vicia faba* L. spp. *Minor*) [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38(3): 1153-1160.
- [14] GREWAL H S, MAHESHWARI B L. Magnetic treatment of irrigation water and snow pea and chickpea seeds enhances early growth and nutrient contents of seedlings [J]. Bioelectromagnetics, 2011, 32(1): 58-65.
- [15] 方晓敏,任世达,贾睿,等.低频静磁场对发芽玉米酚类物质富集及降糖活性的影响[J].食品科学,2022,43(19):88-94.
- [16] YANG X Y, LIAO X L, YU L, et al. Combined metabolome and transcriptome analysis reveal the mechanism of selenate influence on the growth and quality of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) [J]. Food Research International, 2022, 156: 111135.
- [17] MICHALAK I, LEWANDOWSKA S, NIEMCZYK K, et al. Germination of soybean seeds exposed to the static/alternating magnetic field and algal extract [J]. Engineering in Life Sciences, 2019, 19(12): 986-999.
- [18] ALMAGHRABI O A, ELBESHEHY E K F. Effect of weak electro magnetic field on grain germination and seedling growth of different wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars [J]. Life Science Journal-Acta Zhengzhou University Overseas Edition, 2012, 9(4): 1615-1622.
- [19] AFZAL I, SALEEM S, SKALICKY M, et al. Magnetic field treatments improves sunflower yield by inducing physiological and biochemical modulations in seeds [J]. Molecules, 2021, 26(7): 2022.
- [20] PODLESNY J, PODLESNA A, GLADYSZEWSKA B, et al. Effect of pre-sowing magnetic field treatment on enzymes and phytohormones in pea (*Pisum sativum* L.) seeds and seedlings [J]. Agronomy, 2021, 11(3): 494.
- [21] BAU H M, VILLAUME C, NICOLAS J-P, et al. Effect of germination on chemical composition, biochemical constituents and antinutritional factors of soya bean (*Glycine max*) seeds [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1997, 73(1): 1-9.
- [22] 吴隆坤,范志军,王冬梅.大豆发芽过程中营养成分变化及生物强化研究进展[J].沈阳师范大学学报(自然科学版), 2019,37(6): 529-533.
- [23] ASGHAR T, JAMIL Y, IQBAL M, et al. Laser light and magnetic field stimulation effect on biochemical, enzymes activities and chlorophyll contents in soybean seeds and seedlings during early growth stages [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B-Biology, 2016, 165: 283-290.
- [24] 刘圆.磁场处理对绿豆种子萌发和生长的影响[D].晋中:山西农业大学,2017.
- [25] 胡弟文.磁场对几种针叶树种种子活力的影响[D].福州:福建农林大学,2013.
- [26] 熊先清,胡广林.外源锌浸种处理对绿豆芽生长和营养品质的影响[J].食品工业科技,2017,38(4):170-174,179.
- [27] GUPTA N, RAM H, KUMAR B. Mechanism of zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation [J]. Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 2016, 15(1): 89-109.
- [28] LI W, MA H L, HE R H, et al. Prospects and application of ultrasound and magnetic fields in the fermentation of rare edible fungi [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 76: 105613.
- [29] HUSSAIN M S, DASTGEER G, AFZAL A M, et al. Eco-friendly magnetic field treatment to enhance wheat yield and seed germination growth [J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2020, 14: 100299.
- [30] 李冉.磁场对镉胁迫下绿豆幼苗生长的影响及其机理研究[D].西安:陕西师范大学,2010.
- [31] LUO J, HE W X, YANG D, et al. Magnetic field enhance decontamination efficiency of *Noccaea caerulea* and reduce leaching of non-hyperaccumulated metals [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 368: 141-148.
- [32] REINA F G, PASCUAL L A, FUNDORA I A. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part II: experimental results [J]. Bioelectromagnetics, 2001, 22(8): 596-602.
- [33] POINAPEN D, TOPPOZINI L, DIES H, et al. Static magnetic fields enhance lipid order in native plant plasma membrane [J]. Soft Matter, 2013, 9(29): 6804-6813.
- [34] LIU X M, ZHU H, MENG S Y, et al. The effects of magnetic treatment of irrigation water on seedling growth, photosynthetic capacity and nutrient contents of *Populus×euramericana* 'Neva' under NaCl stress [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2019, 41(1): 11.
- [35] ERCAN I, TOMBULOGLU H, ALQAHTANI N, et al. Magnetic field effects on the magnetic properties, germination, chlorophyll fluorescence, and nutrient content of barley (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2022, 170: 36-48.