

镁氢包衣对大豆萌发和幼苗生长的影响

杨海燕^{1,2*}, 张秋雨^{1,2}, 潘琪芳³, 初少华^{1,3}, 杨夕佳^{1,3}, 韩京龙^{1,5}, 周培^{1,3}, 丁文江^{1,2,4*}

1. 上海市氢科学重点实验室&上海交通大学氢科学中心, 上海 200240

2. 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240

3. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240

4. 上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240

5. 烟台大学环境与材料工程学院, 烟台 264005

摘要 利用种子包衣技术将 MgH_2 包衣于大豆, 并设置 MgO 包衣大豆组作阳性对照和无包衣大豆组作阴性对照, 系统研究了不同处理对大豆发芽势、发芽率、发芽指数, 以及幼苗的地上/地下部鲜重、茎长/粗、总根长、侧根数和叶面积等表型性状的影响。结果表明, 包衣对大豆萌发和幼苗生长的促进作用从小到大为: 无包衣组 $< MgO$ 包衣组 $< MgH_2$ 包衣组。采用 SPSS 进行综合分析, 结果显示, MgH_2-L_3 包衣大豆组综合得分最高, 为最佳包衣配方。 MgH_2 包衣组大豆的最优表现可能归因于镁与氢的协同生物学效应。

关键词 氢化镁; 种子包衣; 氢肥; 大豆萌发

种子萌发是植物生命周期最脆弱的阶段, 显著影响后续幼苗的生长及农产品的产量和质量。研究表明, 氢可通过促进营养物质降解供能、提升抗氧化能力、调控植物内源激素水平, 显著促进各种农作物的种子发芽和幼苗生长, 包括禾谷类、蔬菜、水果和中草药等^[1-8]。种子包衣是为种子发芽和幼苗生长提供保障的一种新型技术^[9], 其利用成膜剂/黏合剂将农药、化肥、微量元素等活性成分均匀

黏合在种子表面, 具有使用方便、省种省药、提高种子田间成苗率、促进幼苗生长等优点。但是, 由于氢气极易挥发, 如何实现种子包衣氢以提高氢的生物利用率, 是研究人员长期关注的重点方向。

氢化镁(magnesium hydride, MgH_2)是一种新型镁基固态储氢材料, 具有储氢密度高(100 g物质中氢质量为7.6)、水解供氢、长效缓释、使用方便等特点^[10-11], 为种子包衣氢提供可靠氢源。研究表明,

收稿日期: 2024-07-01; 修回日期: 2024-07-15

基金资助: 国家自然科学基金面上项目(52371195); 绍兴市重点攻关榜单项目(2023B42001); 上海交通大学氢科学中心双一流项目

作者简介: 杨海燕, 工程师, 研究方向为氢科学、氢生物, 电子信箱: yanghaiyan@sjtu.edu.cn; 丁文江(通信作者), 教授, 中国工程院院士, 研究方向为氢科学、轻合金, 电子信箱: wjding@sjtu.edu.cn

引用格式: 杨海燕, 张秋雨, 潘琪芳, 等. 镁氢包衣对大豆萌发和幼苗生长的影响[J]. 科技导报, 2024, 42(15): 58-68;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.07.00812

MgH₂具有促进种子萌发和作物生长的作用^[12-14]。陈茹猛等^[12]和He等^[13]将MgH₂直接加入水或霍格兰培养液中,发现MgH₂可显著促进水稻/苜蓿种子的萌发、提高抗环境胁迫能力。此外,本课题组在前期研究中发现,将一定量的MgH₂均匀拌于栽培土中,可明显促进生菜种子的萌发,提升生菜的营养物质含量^[14]。

本研究采用固态储氢材料MgH₂,利用包衣技术将MgH₂包衣于大豆,并设置镁肥阳性对照组(MgO包衣大豆组)和阴性对照(无处理大豆组)作对比,研究MgH₂对大豆萌发和幼苗生长的影响。

1 材料与方 法

1.1 材 料

试验大豆(*Glycine max* (L.) Merr.)种子为中黄37。

包衣剂采用的化学试剂为羧甲基纤维素钠(黏度:50~200 mPa·s,阿拉丁)、壳聚糖(黏度:100~200 mPa·s,阿拉丁)、聚乙烯醇(Mw13000~23000,98%水解,阿拉丁)和黄腐酸(95%,上海吉至生化科技有限公司)。

镁基材料分别采用MgO(99%,唐山威豪镁粉有限公司)和MgH₂(98%,上海镁源动力有限公司)。

基质土为泥炭土,德国K牌876配方。蛭石颗粒大小为0.5~1.0 mm。

1.2 试验设计

1.2.1 包衣试验设计

1) 包衣剂溶液配置。采用4种包衣剂,分别为羧甲基纤维素钠(S)、聚乙烯醇(J)、羧甲基纤维素钠+聚乙烯醇(S-J)和壳聚糖+黄腐酸(K-H),其配置方法如下。(1) 羧甲基纤维素钠包衣剂(S):称量1.5 g羧甲基纤维素钠,采用100 mL容量瓶定容,80℃加热搅拌2 h至完全溶解,配置得到15 g/L羧甲基纤维素钠溶液,即羧甲基纤维素钠包衣剂(S)。(2) 聚乙烯醇包衣剂(J):称量4 g聚乙烯醇,采用100 mL容量瓶定容,常温搅拌24 h至完全溶解,配置得到40 g/L聚乙烯醇溶液,即聚乙烯醇包衣剂(J)。(3) 羧甲基纤维素钠+聚乙烯醇包衣剂(S-J):将羧甲基纤维素钠包衣剂(S)和聚乙烯醇包衣剂(J)按照体积比为1:5配置,即得羧甲基纤维素钠+聚乙烯醇包衣剂(S-J)。(4) 壳聚糖+黄腐酸包衣剂(K-H):将3 g黄腐酸加入50 mL水中,在室温下搅拌2 h配置为溶液,再加入1.5 g壳聚糖,继续搅拌24 h,最后采用100 mL容量瓶定容,配置含15 g/L壳聚糖和30 g/L黄腐酸的混合物,即壳聚糖+黄腐酸包衣剂(K-H)。

2) 包衣剂种子。挑取籽粒饱满、个头相当的大豆种子100颗,量取包衣剂2 mL,利用物理混匀法将包衣剂与大豆种子充分混合,自然晾干后,获得包衣处理的大豆种子。羧甲基纤维素钠包衣、聚乙烯醇包衣、羧甲基纤维素钠+聚乙烯醇包衣、壳聚糖+黄腐酸包衣处理的种子分别标记为S组、J组、S-J组、K-H组。

3) MgH₂和MgO包衣种子。分别采用MgH₂和MgO与包衣剂混合均匀,对大豆种子进行包衣,具

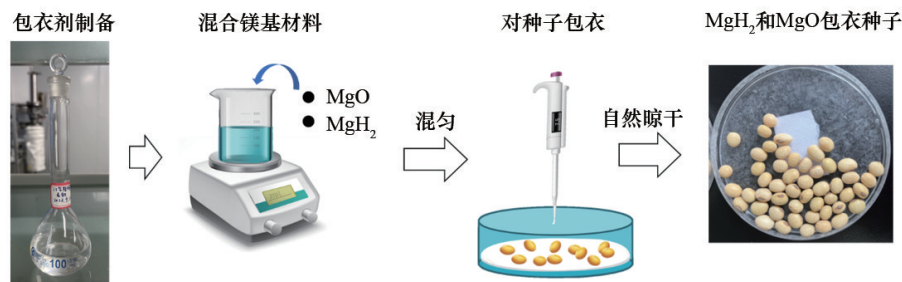


图1 MgH₂和MgO包衣大豆种子过程示意

体包衣过程如图 1 所示。配置优选的包衣剂,在包衣剂中分别加入不同质量的 MgH_2 和 MgO ,配置 3 种浓度梯度: Mg 质量浓度为 3.5、7 和 14 mg/mL 的 MgH_2 和 MgO 包衣剂,分别记为 L_1 、 L_2 和 L_3 。分别量取 2 mL 的 MgH_2 和 MgO 包衣剂,与 100 颗种子充分混合,自然晾干后获得不同浓度的 MgH_2 和 MgO 包衣种子。 MgH_2 组记为 MgH_2-L_1 、 MgH_2-L_2 、 MgH_2-L_3 ; MgO 组记为 $MgO-L_1$ 、 $MgO-L_2$ 和 $MgO-L_3$ 。未包衣种子作为阴性对照组,记为 CK 组。

1.2.2 种子萌发试验

利用盆栽法进行种子萌发试验。将不同包衣处理和未包衣种子播于装有基质土与蛭石(体积比为 6:4)的花盆(高 15 cm,直径 10 cm)中,每盆播种 10 颗种子,平行开展 3 组试验,每盆播种前浇水 2 L。将花盆置于人工气候培养箱(宁波江南仪器厂,FXA-1000F-4)中,培育条件设为:恒温 25℃,12 h 黑暗/12 h 光照,光照强度 60%,空气相对湿度 50%。

1.3 测试方法与数据分析

利用扫描电镜(Scanning electron microscope, ZEISS Sigma 300, Germany)观察 MgH_2 和 MgO 的表面形貌,并利用扫描电镜照片统计 MgH_2 和 MgO 的平均粒径;利用光学显微镜(MECATECH 334, France)观察大豆的包衣形态;大豆播种 4 d 开始取样调查大豆的发芽数;利用电子天平(Sartorius SQP, Germany)称量生长 7 d 的大豆幼苗地上部和地下部鲜重;利用根系和叶面积分析系统(TP-PAS-1, China)分析幼苗的茎部/根系形态和叶面积。

$$\text{发芽率} = \frac{7 \text{ d 发芽种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽势} = \frac{\text{第 4 天正常发芽的种子数}}{\text{处理种子数}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{发芽指数} = \sum(G_i/t_i) \quad (3)$$

式中, G_i 为在时间 t_i 内的发芽种子。

生长 7 d 大豆幼苗的子叶率和真叶率按照公式(4)和(5)进行计算

$$\text{子叶率} = \frac{7 \text{ d 幼苗子叶对数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{真叶率} = \frac{7 \text{ d 幼苗真叶对数}}{\text{供试种子数}} \times 100\% \quad (5)$$

利用 SPSS 27 进行单因素方差分析(ANOVA),当 $P < 0.05$ 时差异达显著性水平。利用 SPSS 27 作主成分分析,对单因素变量作特征提取、相关性分

析和综合得分。

2 结果与分析

2.1 包衣剂对大豆萌发的影响

为了优选出合适的包衣剂,比较了 S 组、J 组、S-J 组和 K-H 组的发芽率,并对 7 d 大豆幼苗的平

表 1 不同包衣剂大豆的发芽率和幼苗表型性状

包衣剂	发芽率/%	子叶率/%	真叶率/%	平均株高/cm
CK 组	65	60	50	13.0
S 组	85	85	75	17.5
J 组	65	60	35	15.3
S-J 组	65	60	50	15.1
K-H 组	30	20	15	11.3

均株高、子叶率和真叶率作对比研究,结果见表 1。

从发芽率来看,S 组的发芽率最高,为 85%,比 CK 组的发芽率为 65% 提高了 20%;J 和 S-J 组的发芽率与 CK 组相同;K-H 组的发芽率下降到 30%。从子叶率来看,CK 组的子叶率为 60%,S 组的子叶率为 85%,比 CK 组提高了 25%;而 J 和 S-J 组幼苗的子叶率与 CK 组持平,K-H 组幼苗的子叶率则下降为 20%。从真叶率来看,CK 组的真叶率为 50%,而 S 组的真叶率为 75%,比 CK 提升 25%;S-J 组的真叶率与 CK 组相同;J 组和 K-H 组的真叶率相比 CK 组反而减低,分别为 35% 和 15%。对平均株高做统计,CK 组幼苗的平均株高为 13 cm,而 S 组幼苗的平均株高达到 17.5 cm,相比 CK 组提高了约 35%;J 和 S-J 组幼苗的平均株高为 15.3 cm 和 15.1 cm,相比 CK 组分别提高约 18% 和 16%;而 K-H 组幼苗的平均株高降低至 11.3 cm。

由以上比较分析可知,S 组的发芽率和表型性状明显优于 CK 组,说明羧甲基纤维素钠包衣可促进大豆萌发;而 J 和 S-J 组与 CK 组的发芽率相当,表型性状提升不明显,说明聚乙烯醇和羧甲基纤维素钠+聚乙烯醇包衣剂对大豆发芽影响不大;K-H 组的发芽率和表型性状均比 CK 组差,说明壳聚糖+黄腐酸包衣剂会抑制大豆萌发。因此,后续 MgH_2 和 MgO 包衣大豆试验优选羧甲基纤维素钠为

包衣剂。

2.2 镁氢材料及其包衣大豆结构分析

利用SEM观察MgH₂和MgO的表面形貌,并对其粒径进行统计分析,结果如图2所示。从图2(a)和(b)

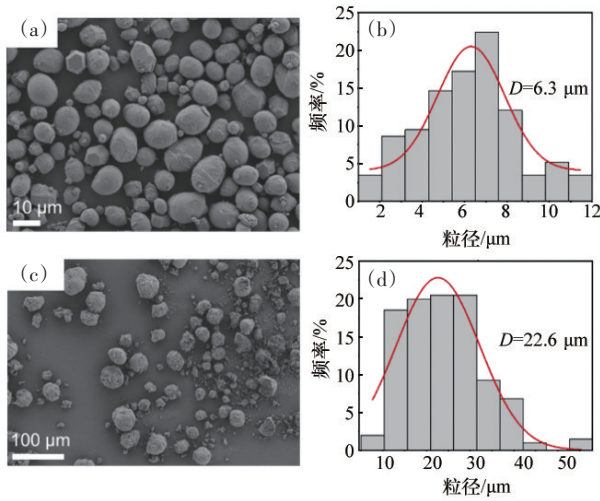


图2 MgH₂的SEM图(a)和粒径分析(b), 以及MgO的SEM图(c)和粒径分析(d)

可以看出,MgH₂为表面光滑的椭球形颗粒,平均粒径为6.3 μm。而MgO为表面疏松的椭球形颗粒,平均粒径为22.6 μm,如图2(c)和(d)所示。MgH₂和MgO均为微米级颗粒,易被包衣于大豆种皮。

进一步采用光学显微镜观察未包衣和不同包衣大豆的表面形貌,结果如图3所示。从图3(a)可以看到,无包衣的大豆表面为纤维网状的种皮结构;而MgO包衣大豆有明显的颗粒附着于种皮上,颗粒数随着MgO浓度的增大而增加(图3(b)~(d));而MgH₂包衣大豆则观察到了明显的气泡(图3(e)~(g)),这是由于在包衣过程中,部分MgH₂颗粒发生水解反应释放氢气所致。光学显微镜观察结果表明,MgO和MgH₂已成功包衣于大豆种皮。

2.3 镁氢包衣对大豆种子萌发和生长的影响

2.3.1 镁氢包衣对大豆发芽的影响

对不同处理大豆的发芽势、发芽率和发芽指数进行统计分析,结果如图4所示。由图4(a)可知,CK组的平均发芽势为70%,而MgH₂组和MgO组的

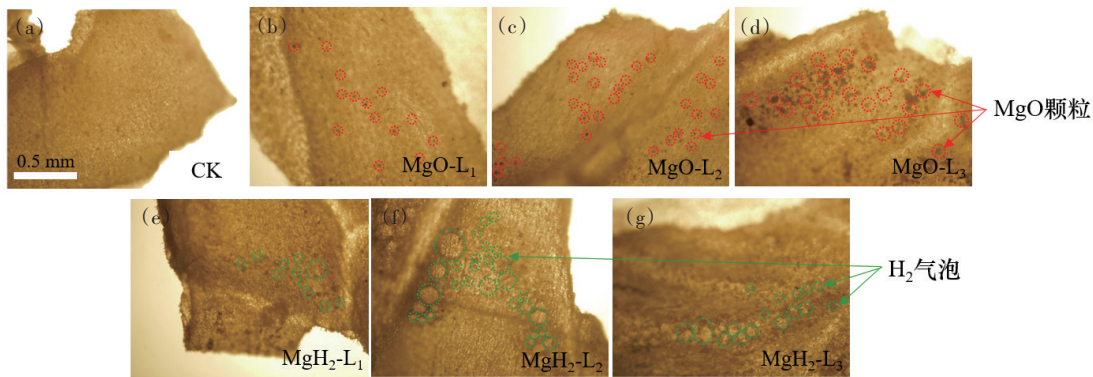
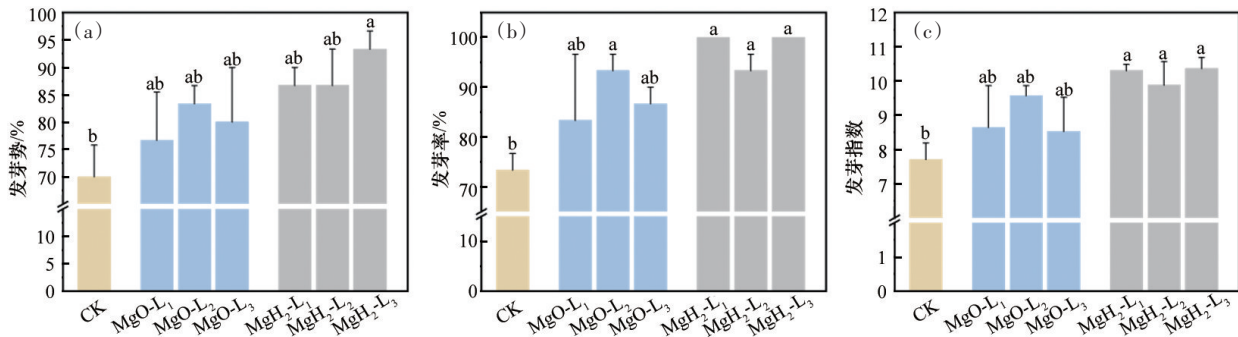


图3 包衣大豆的光学显微镜照片(×10)CK(a)、MgO-L₁(b)、MgO-L₂(c)、MgO-L₃(d)、MgH₂-L₁(e)、MgH₂-L₂(f)、MgH₂-L₃(g)



图中数据为平均值和标准误;图中柱子上的不同小写字母表示相同指标不同包衣材料和质量浓度间差异达5%显著水平

图4 MgH₂和MgO包衣对大豆发芽势(a)、发芽率(b)和发芽指数(c)的影响

发芽势均有提高,其中 MgH_2-L_3 包衣组大豆的发芽势跟 CK 组相比达到显著差异,平均发芽势达 93.3%。发芽率分析结果显示(图 4(b)), MgO 组和 MgH_2 组的发芽率相比 CK 均有提高。同时可以发现, MgO 包衣组中,只有 $MgO-L_2$ 的发芽率较 CK 组的发芽率(73%)具有显著差异,而 MgH_2 组的发芽率较 CK 组均具有显著差异,其中 MgH_2-L_3 和 MgH_2-L_1 组的发芽率达到 100%。发芽指数分析结果显示(图 4(c)), MgO 组、 MgH_2 组的发芽指数较 CK 组均有提升,但 MgO 组与 CK 组相比差异不显著,而 MgH_2 组与 CK 组相比差异显著。综上,种子萌发实验结果表明, MgO 包衣可促进大豆发芽,而 MgH_2 包衣的促发芽效果达到显著水平。

MgO 组和 MgH_2 组的发芽性状较 CK 组均有提升,这是因为 MgO 和 MgH_2 包衣处理可为种子提供镁营养,镁具有一定促进大豆萌发的作用。而 MgH_2 组可显著提升大豆的发芽性状,这是因为 MgH_2 包衣处理处在提供镁营养的同时,还可为种子提供氢营养。氢可促进淀粉、蔗糖、脂类等物质分解来为种子萌发提供物质基础^[3,12],并且氢可调节生长素和赤霉素^[4,7]等内源激素水平来促进种子萌发。 MgH_2 由于镁氢协同作用,促大豆萌发作用较 MgO 包衣更显著。

2.3.2 镁氢包衣对大豆幼苗鲜重的影响

对不同处理组大豆的地上部、地下部鲜重进行统计分析,结果如图 5 所示。

从图 5(a)中可知, MgH_2 组和 MgO 组相较 CK 组,地上部鲜重均增加并达到显著差异水平。 $MgO-L_1$ 、 $MgO-L_2$ 、 $MgO-L_3$ 大豆幼苗的平均地上部鲜重为 1.64、1.69 和 1.83 g,较 CK 组(1.28 g)分别提高了 28.1%、32.0%、43.0%。 MgH_2-L_1 、 MgH_2-L_2 、 MgH_2-L_3 大豆幼苗的平均地上部鲜重为 1.89、1.81 和 1.87 g,较 CK 组分别提高 47.7%、41.4% 和 46.0%。

从图 5(b)中可知, MgO 组和 MgH_2 组相较 CK 组,地下部鲜重均有增加,但 MgO 组中只有 $MgO-L_3$ 的地下部鲜重较 CK 组增加达到显著水平,而 MgH_2 组的地下部鲜重较 CK 组均显著增加。CK 组幼苗的平均地下部鲜重为 0.57 g, $MgO-L_1$ 和 $MgO-L_2$ 的

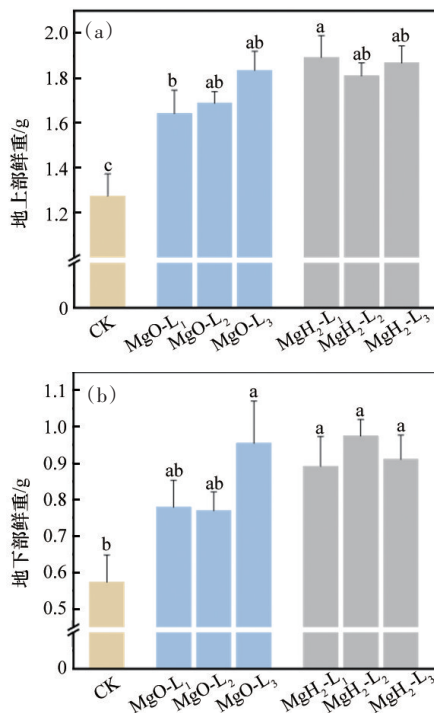


图5 MgH_2 、 MgO 包衣对大豆幼苗的地上部(a)和地下部鲜重(b)的影响

平均地下部鲜重为 0.78 和 0.77 g,较 CK 组提高了 36.8% 和 35.1%;而 $MgO-L_3$ 的地下部鲜重较 CK 组显著提高,达到 66.9%。 MgH_2-L_1 、 MgH_2-L_2 、 MgH_2-L_3 的平均地下部鲜重为 0.89、0.97 和 0.91 g,与 CK 组相比分别提高 56.1%、70.2% 和 59.6%。

地上部和地下部鲜重分析结果表明, MgH_2 和 MgO 包衣大豆都可显著提升地上部鲜重,但对于地下部鲜重, MgO 组仅高浓度 $MgO-L_3$ 增加作用显著,而 MgH_2 包衣大豆 3 个质量浓度梯度均可显著提升地下部鲜重。这些研究结果提示,镁营养是影响地上部鲜重的主要因素,而镁营养和氢营养可能通过镁氢协同生物效应显著影响地下部鲜重。前期研究结果表明,镁营养元素对叶片中光合效率、叶绿素含量及干物质质量均有显著影响^[15-16],而氢对植物有明显的促生长发育作用,尤其对根系的生长具有明显的促进效应^[17-20]。

2.3.3 镁氢包衣对大豆幼苗生长形态的影响

对不同处理大豆幼苗的 7 d 生长形态进行分析。图 6 为 CK 组、 MgO 组和 MgH_2 组大豆幼苗的平视、俯视和全苗图。从图 6 可以看出,不同处理组

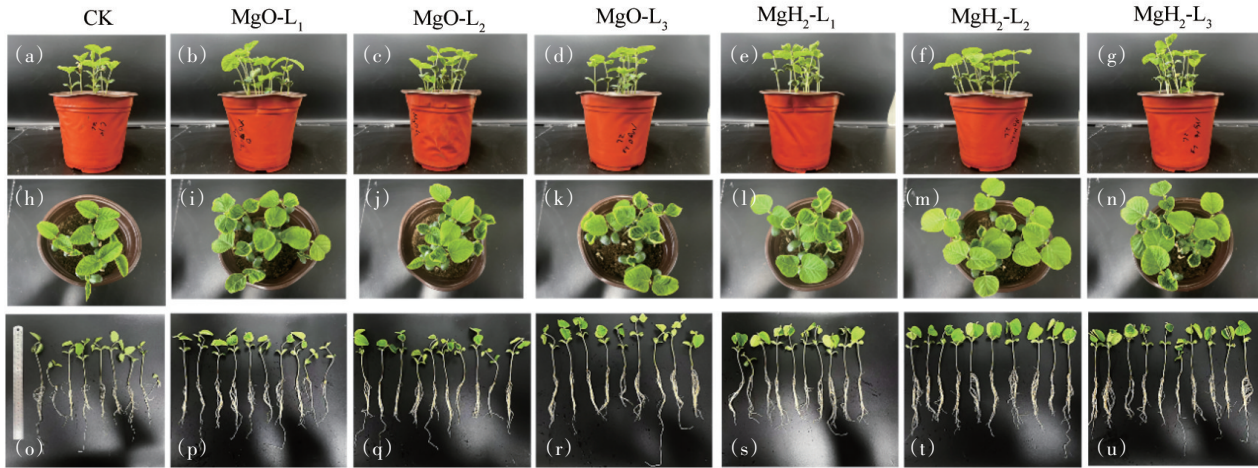


图6 CK组、MgO组和MgH₂组大豆幼苗的全苗、俯视和平视图

的大豆幼苗生长形态不同。

对大豆幼苗茎部生长形态(茎长和茎粗)进行分析,结果如图7所示。茎长分析结果显示(图7(a)),MgO组大豆幼苗的茎长较CK组提高,而MgH₂组大豆幼苗的茎长较CK组显著提高。CK组的幼苗平均茎长为11.4 cm,MgO-L₁、MgO-L₂、MgO-L₃的平均茎长为13.0、12.1和12.6 cm,较CK组分别提高14.0%、6.1%和10.5%;而MgH₂-L₁、

MgH₂-L₂、MgH₂-L₃的平均茎长分别为13.7、14.2和14.5 cm,较CK组分别提高20.2%、24.6%和27.2%。茎粗分析结果显示(图7(b)),MgO组和MgH₂组相较于CK组的茎粗有提升作用。其中,MgH₂-L₁的茎粗较CK组显著提升,MgH₂-L₁的平均茎粗为3.1 mm,较CK组(2.7 mm)提升了14.8%。因此,从茎部形态来看,MgO包衣对茎长和茎粗的有提升作用但差异不显著,而MgH₂包衣主要对提升茎长具有显著效果。因此,MgH₂包衣相比MgO包衣对茎部表型性状提升更明显,表明镁氢协同利于大豆茎部发育。

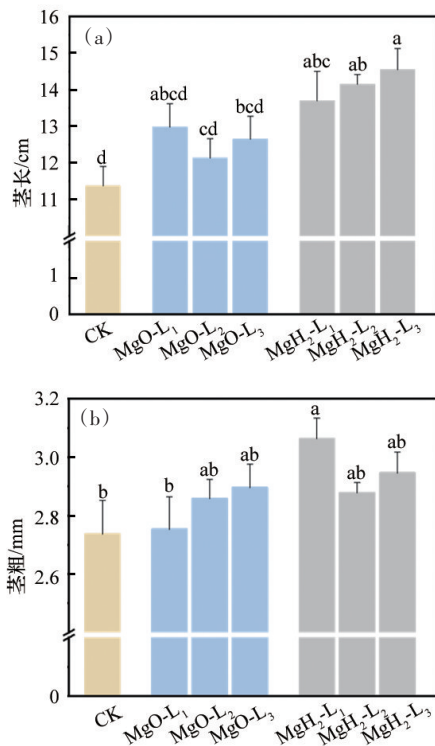


图7 MgH₂、MgO包衣对大豆幼苗茎长(a)与茎粗(b)的影响

对大豆幼苗根部生长形态进行分析,结果如图8所示。由图8(a)可知,MgO组和MgH₂组均能显著增加大豆幼苗的总根长。CK组的平均总根长为210.4 cm,MgO-L₁、MgO-L₂、MgO-L₃的平均总根长为359.9、306.5和397.9 cm,较CK组均显著增长。尤其是,MgO-L₃的平均总根长相较于CK组提升了89.1%。MgH₂-L₁、MgH₂-L₂和MgH₂-L₃的平均总根长为378.3、395.2和389.9 cm,相较于CK组分别提升了79.8%、87.8%和85.3%。由此可知,MgO和MgH₂包衣可显著提升大豆的总根长。由图8(b)可知,MgO组中只有MgO-L₃的侧根数较CK组显著增加,而MgH₂组的侧根数较CK组均显著增加。CK组的平均侧根数为63.7条,MgO-L₁和MgO-L₂的平均侧根数为69.0和71.2条,较CK组增加8.3%和11.8%;而MgO-L₃的平均侧根数达85.1条,较CK组显著提高33.6%。而MgH₂组的平均侧根数显著

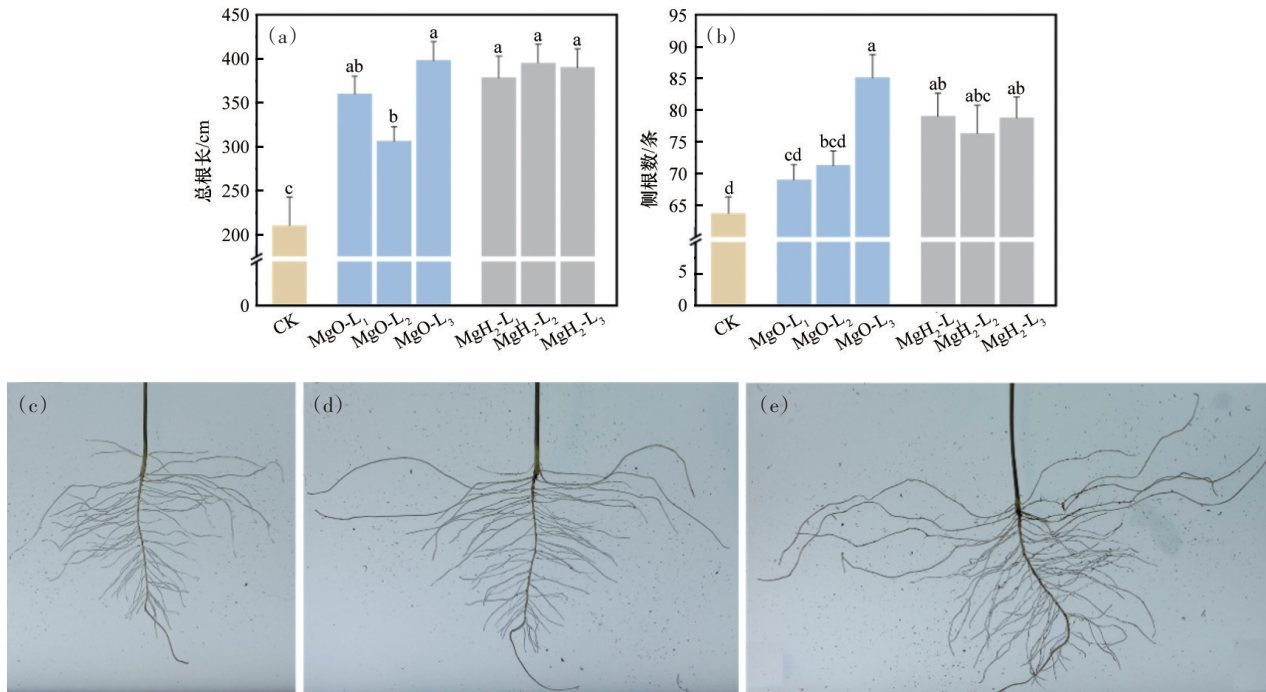


图8 MgH₂、MgO包衣对大豆幼苗总根长(a)、侧根数(b)的影响, 以及CK(c)、MgO-L₂(d)、MgH₂-L₂(e)大豆根系照片

增加, MgH₂-L₁、MgH₂-L₂、MgH₂-L₃的平均侧根数为79.0、76.3和78.3条, 与CK组相比分别增加24.0%、19.8%和22.9%。图8(c)~(e)为不同处理大豆幼苗的根部照片。可以看到, MgH₂组的二级侧根相较CK组和MgO处理组明显发达。二级侧根的增加有利于植物吸收水分和营养物质, 从而促进大豆的生长发育。

MgO组和MgH₂组的根部发育较CK组提升, 这是因为MgO和MgH₂包衣处理可为种子提供镁营养, 具有促进大豆根系发育的作用。研究表明缺镁会显著降低大豆根系的总根长^[21], 而镁处理会显著增强根系的活力和侧根的生长^[22]。MgH₂包衣对大豆的总根长和侧根数均显著提升, 而MgO组对侧根数的提升差异不显著, 这是因为MgH₂包衣处理为大豆幼苗提供镁营养的同时, 还可提供氢营养。氢处理可调控内源H₂、H₂O₂、谷胱甘肽等生长因子促进侧根的发^[4,6,23], 这些因素可能导致MgH₂包衣显著促进一级和二级侧根的生长。因此, MgH₂由于镁氢协同作用, 促大豆根系发育作用较MgO包衣更明显。

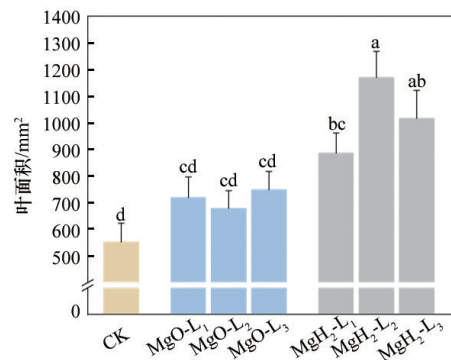


图9 MgH₂、MgO包衣对大豆幼苗叶面积的影响

对大豆幼苗的叶面积进行分析, 结果如图9所示。由图9可知, MgO组的叶面积较CK组增加, 而MgH₂组的叶面积较CK组显著增加。CK组的平均叶面积为553.0 mm², MgO-L₁、MgO-L₂、MgO-L₃的平均叶面积为718.8、678.4和748.7 mm², 较CK组均提升。而MgH₂组的平均叶面积较CK组显著提升, 其中, MgH₂-L₂的平均叶面积为1169.0 mm², 相较于CK组提高了111.4%, 而MgH₂-L₁和MgH₂-L₃的平均叶面积分别提高60.0%和83.7%。因此, MgH₂包衣显著提高了幼苗的叶生长。幼苗的叶生

长分析结果表明氢和镁协同促进了叶的生长发育。镁和氢的协同作用有利于调控叶绿素、气孔导度、光化学电子传递速率等来增强叶片的光合作用和蒸腾作用^[24-25]。

2.4 镁氢包衣大豆的相关性主成分分析

运用SPSS软件对大豆所测得的所有指标进行主成分分析,并计算特征值、特征向量和贡献率,如表2所示。前3个主成分F1—F3的累计方差贡献率达到69.317%,包含了原始变量的大部分信息,也降

低了变量个数。3个主成分的特征值分别为4.318、1.419和1.195。F1的特征向量中较大的分量是发芽势、发芽率和发芽指数,说明F1可能代表了影响种子发芽的因素,其贡献率为43.178%,说明发芽因素对包衣大豆种子的萌发性状贡献较大。F2的特征向量中总根长具有高载荷(0.828),说明F2可能代表影响植物根部发展的因素,其贡献率为14.187%。F3特征向量中叶面积具有高载荷(0.843),这表明F3成分与植物的叶面积相关性较高。

表2 大豆各指标主成分系数和贡献率

主成分	叶面积/ mm ²	地上部 鲜重/g	地下部 鲜重/g	一级侧 根数/条	茎长/ cm	茎粗/ mm	总根长/ cm	发芽 势/%	发芽 率/%	发芽 指数	特征值	贡献 率/%
F1	0.124	0.403	0.380	-0.076	0.032	0.444	0.088	0.875	0.865	0.960	4.318	43.178
F2	-0.110	0.696	-0.042	0.586	0.389	0.273	0.828	0.151	0.191	0.071	1.419	14.187
F3	0.843	-0.155	0.123	0.082	0.669	0.502	0.151	0.130	0.278	0.145	1.195	11.952

对筛选的主成分进行计算,综合得分见表3。由表3可以看出,MgH₂组的综合得分高于MgO组,CK组的综合得分最低。其中,综合得分第1的是MgH₂-L₃,MgH₂-L₁和MgH₂-L₂的综合得分排名分别

是2和3。MgO组中,MgO-L₃、MgO-L₂和Mg-L₁的综合得分排名分别为4、5、6。因此,综合得分排名分析表明,MgO包衣可促进大豆萌发和幼苗生长,MgH₂包衣比MgO包衣促大豆萌发和生长效果更显著,而MgH₂-L₃是包衣大豆的最佳配方。

表3 不同处理下大豆在主成分得分和综合得分

处理组	主成分F1得分	主成分F2得分	主成分F3得分	综合得分	排名
CK组	-1.236	-0.548	-0.263	-0.643	7
MgO-L ₁	-0.364	-0.077	0.091	-0.157	6
MgO-L ₂	-0.265	-0.118	-0.197	-0.154	5
MgO-L ₃	0.111	0.584	-0.149	0.113	4
MgH ₂ -L ₁	0.518	0.174	0.065	0.256	2
MgH ₂ -L ₂	0.479	-0.831	0.164	0.214	3
MgH ₂ -L ₃	0.571	0.036	0.228	0.279	1

3 讨论

MgH₂和MgO包衣大豆促萌发的机理示意图如图10所示。在土壤中,水和微生物的作用下羧甲基纤维素钠包衣剂首先分解/破裂^[26],MgO缓慢水解产生Mg²⁺^[27],反应式为MgO+H₂O→Mg(OH)₂,为植株生长提供镁元素;而MgH₂缓慢水解产生Mg²⁺的同时还产生H₂^[28-29],反应式为MgH₂+2H₂O→Mg(OH)₂+2H₂。镁对植株生长、养分吸收和产量增加都有明显的促

进作用^[15-16,21-22]。适宜的镁营养能增加叶片同化物的合成、促进光合产物的运输与分配,进而促进生长和保障产量^[30]。同时,氢对植物发芽和幼苗生长具有明显的促进作用。研究表明氢可延缓细胞死亡,原位降低O₂⁻、·OH活性氧基团和脂质过氧化,提升细胞活力^[31-32]。同时,氢可调节NO、H₂O₂等信号分子来调控赤霉素、生长素、细胞周期素等生长因子水平,从而促进种子萌发和幼苗生长^[4,7,33]。因此,本研究中MgH₂包衣组的大豆种子的萌发过程

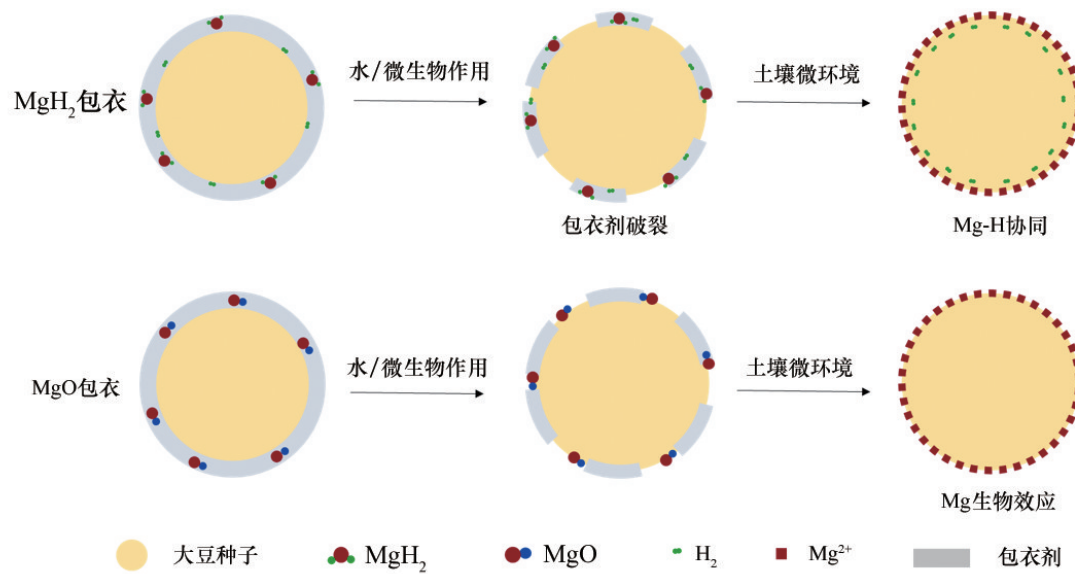


图10 MgH₂和MgO包衣大豆促发芽机理示意

中可缓慢水解提供镁和氢元素(图10(a)),而MgO包衣只能为种子提供镁营养(图10(b)),由于MgH₂包衣组可发挥镁氢协同作用,从而显著促进大豆的萌发及幼苗生长。

4 结论

从发芽率和幼苗表型性状优选出大豆包衣剂,为羧甲基纤维素钠溶液。进一步地,将MgH₂包衣于大豆上,成功获得了固态供氢材料包衣大豆种子,显著促进了大豆的萌发,并促进大豆幼苗生长。

研究表明,MgH₂包衣大豆可显著提升大豆的发芽率,其中,MgH₂-L₃和MgH₂-L₁组包衣大豆的发芽率达到100%。同时,MgH₂包衣大豆显著提升了大豆的地上部和地下部鲜重,并可促进茎部、根系和叶片的生长发育,其侧根数、总根长、叶面积较CK组显著提升。而MgO包衣也可提升大豆的萌发和生长,但仅可显著提升地上部鲜重和总根长。最后,对其进行主成分和综合得分分析,结果显示,MgH₂-L₃包衣大豆组综合得分最高,为最佳包衣配方。由本研究结果可知,MgH₂包衣显著促进大豆萌发与幼苗生长,并且优于常规镁肥MgO,这可能归因于镁氢的协同生物学效应。

参考文献 (References)

- [1] 马南行. 富氢水对油菜生长及生理特性的影响[J]. 现代农业科技, 2023(13): 80-82.
- [2] 李嘉炜, 张白鸽, 陈潇, 等. 富氢水对蔬菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 长江蔬菜, 2022(8): 10-14.
- [3] Zhao Z X, Li C X, Liu H W, et al. The involvement of glucose in hydrogen gas-mediated adventitious rooting in cucumber[J]. *Plants*, 2021, 10(9): 1937.
- [4] Wang Y Q, Lv P X, Kong L S, et al. Nanomaterial-mediated sustainable hydrogen supply induces lateral root formation via nitrate reductase-dependent nitric oxide[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405: 126905.
- [5] 丁芳芳, 程茜菲. 富氢水对当归种子发芽的影响[J]. 陕西农业科学, 2020, 66(4): 63-65.
- [6] Chen M, Cui W T, Zhu K K, et al. Hydrogen-rich water alleviates aluminum-induced inhibition of root elongation in alfalfa via decreasing nitric oxide production[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 267: 40-47.
- [7] Liu F J, Wang Y Q, Zhang G H, et al. Molecular hydrogen positively influences lateral root formation by regulating hydrogen peroxide signaling[J]. *Plant Science*, 2022, 325: 111500.
- [8] Zhao X Q, Chen Q H, Wang Y M, et al. Hydrogen-rich water induces aluminum tolerance in maize seedlings by

- enhancing antioxidant capacities and nutrient homeostasis [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 144: 369–379.
- [9] 王科翰, 邱德志. 种子包衣技术研究概述[J]. *农业科技通讯*, 2021(11): 8–10.
- [10] 张毅华, 陆铎, 赵海懿, 等. 氯化镁调控的绿豆渗透耐性与一氧化氮介导的脯氨酸代谢有关[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(10): 1964–1974.
- [11] Li L N, Liu Y H, Wang S, et al. Magnesium hydride-mediated sustainable hydrogen supply prolongs the vase life of cut carnation flowers via hydrogen sulfide[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 595376.
- [12] 陈茹猛, 陈文奕, 陈惠萍. GA受抑下氢供体对萌发水稻种子淀粉降解的影响[J]. *分子植物育种*, 2022, 20(23): 7868–7875.
- [13] He J J, Cheng P F, Wang J, et al. Magnesium hydride confers copper tolerance in alfalfa via regulating nitric oxide signaling[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 231: 113197.
- [14] 梁木华, 韦一, 陈家琦, 等. 不同形态镁肥对生菜生长发育及品质的影响[J/OL]. *中国土壤与肥料*. [2024-07-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5498.S.20240624.1148.002.html>.
- [15] 王鲲鹏, 任涛, 陆志峰, 等. 不同镁供应浓度对油菜苗期生长和生理特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(15): 3198–3206.
- [16] 申燕, 肖家欣, 杨慧, 等. 镁胁迫对“春见”橘橙生长和矿质元素分布及叶片超微结构的影响[J]. *园艺学报*, 2011, 38(5): 849–858.
- [17] Cheng P F, Wang J, Zhao Z S, et al. Molecular hydrogen increases quantitative and qualitative traits of rice grain in field trials[J]. *Plants*, 2021, 10(11): 2331.
- [18] 宋韵琼, 张峻, 张俊波, 等. 富氢水处理对青菜产量和品质的影响[J]. *现代农业科技*, 2022(8): 49–54.
- [19] 杨瑞怡, 李强, 李湘妮, 等. 富氢水浇灌在网室叶菜栽培中的应用试验[J]. *农业工程技术*, 2019, 39(35): 29.
- [20] 赵懿颖, 徐靖敏, 李芳, 等. 富氢水处理对番茄生长发育和产量的影响[J]. *农业与技术*, 2022, 42(22): 6–9.
- [21] 刘昭阳, 李书悦, 毛婧莹, 等. 镁营养对大豆苗期生长及根系形态构型的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2024, 45(3): 321–328.
- [22] 尤垂淮, 孙青慧, 陈晟, 等. 镁营养对苦瓜生长发育及生理代谢的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(12): 3545–3552.
- [23] Liu F J, Lou W, Wang J J, et al. Glutathione produced by γ -glutamyl cysteine synthetase acts downstream of hydrogen to positively influence lateral root branching [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 167: 68–76.
- [24] Zhang X N, Zhao X Q, Wang Z Q, et al. Protective effects of hydrogen-rich water on the photosynthetic apparatus of maize seedlings (*Zea mays* L.) as a result of an increase in antioxidant enzyme activities under high light stress[J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 77(1): 43–56.
- [25] 刘丰娇, 张晓伟, 李福德, 等. 黄瓜富氢水浸种对低温下幼苗光合碳同化及氮代谢的影响[J]. *园艺学报*, 2020, 47(2): 287–300.
- [26] Olad A, Zebhi H, Salari D, et al. Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil [J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2018, 90: 333–340.
- [27] Zhang W Q, Liu Y, Muneer M A, et al. Characterization of different magnesium fertilizers and their effect on yield and quality of soybean and pomelo[J]. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2693.
- [28] Yuan C Y, Chen W, Yang Z X, et al. The effect of various cations/anions for MgH_2 hydrolysis reaction[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 73: 186–192.
- [29] Xu X L, Yong H, Zhao Y, et al. Investigation of hydrolysis properties of MgH_2 in different anionic/cationic salt solutions[J]. *Materials Characterization*, 2024, 210: 113821.
- [30] 方何婷, 李炎朋, 赵新国, 等. 镁肥添加对红壤饲用大豆产量和品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(2): 13–16.
- [31] Islam M A, Shorna M N A, Islam S, et al. Hydrogen-rich water: A key player in boosting wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling growth and drought resilience[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 22521.
- [32] 田婧芸, 张慧洁, 陕嘉楠, 等. 富氢水处理对铜胁迫下小麦幼苗生长及其细胞结构的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2018, 52(2): 193–198.

- [33] Wu Q, Su N N, Huang X, et al. Hydrogen-rich water promotes elongation of hypocotyls and roots in plants through mediating the level of endogenous gibberellin and auxin[J]. *Functional Plant Biology*, 2020, 47(9): 771-778.

The effects of seed coating by magnesium hydrides on germination and seedling growth of soybeans

YANG Haiyan^{1,2*}, ZHANG Qiuyu^{1,2}, PAN Qifang³, CHU Shaohua^{1,3}, YANG Xijia^{1,3}, HAN Jinglong^{1,5}, ZHOU Pei^{1,3}, DING Wenjiang^{1,2,4*}

1. Shanghai Key Laboratory of Hydrogen Science & Center of Hydrogen Science, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
3. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
4. National Engineering Research Center of Light Alloys Net Forming & State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
5. School of Environmental and Material Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China

Abstract Hydrogen has potential biological effects of promoting seed germination and plant growth. Nevertheless, since hydrogen is highly volatile, it is extremely challenging to coat seeds with hydrogen. Solid-state magnesium-based hydrogen storage material magnesium hydride (MgH_2) could offer reliable hydrogen for seed because of its high hydrogen storage density, rich hydrogen supply by hydrolysis, long-term sustained release, and easy use. This study used a seed coating technology to coat soybeans by MgH_2 and set up the MgO -coated soybean group as a positive control and the un-coated soybean group as a negative control. The effects of different treatments on soybean germination potential, germination rate, germination index and the influence of phenotypic traits, such as aboveground/underground fresh weight, stem length/thickness, total root length, number of lateral roots and leaf area of seedlings, were comprehensively investigated. Results showed that the promotion effects of different coating treatments on soybean germination and seedling growth were in the order: non-coating group < MgO coating group < MgH_2 coating group. Comprehensive analysis was conducted using SPSS, and results suggested that the MgH_2-L_3 coated soybean group exhibited the highest comprehensive score and was thus the best coating recipe. Such optimal germination and growth performance of soybeans by MgH_2 -coatings may be attributed to the synergistic biological effects of both magnesium and hydrogen released by hydrolysis of MgH_2 .

Keywords magnesium hydride; seed coating; hydrogen fertilizer; germination of soybean ●



(责任编辑 赵庆圆)