

5种微量元素浸种对决明种子萌发及幼苗生长的影响

毛仁俊¹, 马楠¹, 梁宗锁^{1,2,3}, 韩蕊莲^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 3. 中国科学院, 水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 采用5种微量元素的不同浓度浸种处理决明种子, 研究不同微量元素及浓度对决明种子萌发及幼苗生长的影响。结果表明: 不同微量元素及浓度浸种处理对决明种子萌发及幼苗生长具有显著影响, 10 mmol/L的锌、0.2 mmol/L的钼、0.15 mmol/L的硼、10 mmol/L、20 mmol/L的铁处理对决明种子萌发及幼苗生长有显著促进作用; 铜的3个处理及20 mmol/L的锌、0.5 mmol/L的钼、0.2 mmol/L的硼处理表现出对种子萌发及幼苗生长的抑制作用。可见, 适宜浓度的铁、锌浸种能够促进决明种子萌发及幼苗生长, 又以10 mmol/L的锌处理效果最佳。

关键词 决明子; 微量元素; 种子发芽; 幼苗生长

中图分类号 S567.21

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2014)06-0161-06

Effects of Seed Soaking with Five Different Trace Elements on the Germination and Seedling Growth of *Cassia obtusifolia*

MAO Renjun¹, MA Nan¹, LIANG Zongsuo^{1,2,3} and HAN Ruilian^{1,2,3}

(1. College of Life Science, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract The study was aimed to evaluate the effect of different trace elements and concentrations on seeds germination and seedlings growth of *Cassia obtusifolia* by soaking with five trace elements in different concentrations. The result showed that different treatments have significant influence on seeds germination and seedlings growth. The treatments of 10 mmol/L Zn, 0.2 mmol/L Mo, 0.15 mmol/L B, 10 mmol/L and 20 mmol/L Fe showed significant promoting effects on seeds germination and seedlings growth. The three treatments of Cu and the treatments of 20 mmol/L Zn, 0.5 mmol/L Mo, 0.2 mmol/L B inhibited the seeds germination and seedlings growth in different levels. In conclusion, soaking with Fe or Zn in suitable concentration could promote the seeds germination and seedlings growth, and the effect of 10 mmol/L Zn is the best.

Key words *Cassia obtusifolia* L.; Trace elements; Germination of seed; Seedling growth

决明子为豆科植物决明(*Cassia obtusifolia* L.)或小决明(*C. tora* L.)的成熟干燥种子, 具有祛风散热, 清肝明目, 润肠通便等功效^[1]。决明子

降压保肝、增强机体免疫功能及抗衰老等作用与决明子含有大量人体必需氨基酸及微量元素有很大关系^[2]。目前, 国内外对决明子的报道主要集

收稿日期: 2013-06-17 修回日期: 2013-10-15

基金项目: 陕西省科技统筹项目(K332021305)。

第一作者: 毛仁俊, 男, 在读硕士, 从事中草药资源及栽培技术研究。E-mail: mrj@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 韩蕊莲, 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事中草药规范化栽培的理论与技术研究。E-mail: hanrl@nwsuaf.edu.cn

中在化学成分鉴定及药理方面的研究^[3-5]。

利用植物生长调节剂、外源激素等处理种子已有较多报道,朱霞等^[6]用多效唑浸种研究决明种子的发芽规律;金正律^[7]研究不同浓度赤霉素、6-苄氨基嘌呤及激动素浸种对决明种子萌发及幼苗生长的影响;袁媛等^[8]研究 PEG 6000 浸种对黄芩种子萌发及幼苗生长的影响。微量元素在植物体内有着不可替代的作用,也是影响药用植物产量和品质的一个重要因素,而微量元素浸种对决明种子萌发及幼苗生长的影响鲜见报道。本试验研究 5 种微量元素及其不同浓度浸种对决明种子萌发及幼苗生长的影响,旨在探索不同微量元素浸种的适宜浓度及其对决明幼苗生长的影响,以期通过微量元素浸种来提高决明种子发芽率、提高幼苗活力,为决明植株的茁壮生长奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试的决明种子为天津天士力现代中药资源有限公司河南邓县决明子 GAP 基地 2012 年秋季收获的种子,经西北农林科技大学梁宗锁教授鉴定为决明(*Cassia obtusifolia* L.)成熟干燥种子。种子含水量(11.2 ± 0.26)%,千粒质量(22.54 ± 0.23)g,净度(97.6 ± 1.24)%。

1.2 试验方法

挑选大小均一、籽粒饱满的种子,清洗除杂,用 $w=1.0\%$ 的次氯酸钠溶液消毒 10 min,用蒸馏水冲洗干净。再用 80℃ 的蒸馏水浸泡种子 30 min(破除种子硬实性),晾干种子表面水分。硫酸铜、硫酸锌、硼酸、钼酸、七水硫酸亚铁 5 种试剂(分析纯),分别配制成: $Cu_1=0.5$ mmol/L、 $Cu_2=1$ mmol/L、 $Cu_3=2$ mmol/L、 $Zn_1=5$ mmol/L、 $Zn_2=10$ mmol/L、 $Zn_3=20$ mmol/L、 $Mo_1=0.1$ mmol/L、 $Mo_2=0.2$ mmol/L、 $Mo_3=0.5$ mmol/L、 $B_1=0.1$ mmol/L、 $B_2=0.15$ mmol/L、 $B_3=0.2$ mmol/L、 $Fe_1=5$ mmol/L、 $Fe_2=10$ mmol/L、 $Fe_3=20$ mmol/L 溶液。在洗净、烘干的培养皿内铺上双层滤纸,每皿放入种子 100 粒,加入 50 mL 配好的溶液浸种,每种处理设 3 个重复,以蒸馏水浸种作为对照。人工智能气候箱中浸种 12 h,温度为 25℃/15℃,光照时间 12 h,光照度 3000 lx。浸种结束后用蒸馏水清洗种子及培养皿,重新摆放于铺有双层滤纸的培养皿中,于人工气候箱中培养,试验过程中保持滤纸湿润,每

天统计发芽数,7 d 后结束。测量幼苗单株鲜质量、根长、胚芽长;计算发芽率、发芽指数、活力指数、可溶性糖质量分数、叶绿素质量分数。

1.3 数据统计与分析

发芽率 = 7 d 内正常发芽的种子粒数 / 供试种子粒数 $\times 100\%$,发芽指数 = $\sum G_t / D_t$ (G_t 为 t 时间内的发芽数, D_t 为相应的发芽天数),活力指数 = 发芽指数 \times 幼苗鲜质量,叶绿素质量分数采用苏正淑等^[9]的修正方法,可溶性糖质量分数按照张志良等^[10]的方法测定。

采用 SPSS17.0 软件进行方差分析,Origin Pro8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 种子发芽的动态过程

图 1 反映不同处理种子发芽的动态过程。从图中可以看出,5 种微量元素的不同浓度浸种对决明种子的萌发影响显著:铜的 3 个处理每天的发芽数均不及对照,且随着浓度增加,发芽数不断降低,表现出对种子发芽的显著抑制作用;锌、钼、硼的发芽趋势相似: Zn_2 、 Mo_2 、 B_2 处理每日的发芽数均高于对照(或与对照相同),而高浓度 Zn_3 、 Mo_3 、 B_3 处理每日的发芽数则不及对照,又以 B_3 处理的抑制作用最为显著;铁的 3 个处理与对照每日的发芽数相当,表现出较好的一致性。不同处理的种子均在试验的前 4 d 发芽数较多,后 3 d 发芽数变化不大。

2.2 5 种微量元素浸种对决明种子萌发及幼苗生长的影响

2.2.1 铜浸种对决明种子的影响 从表 1 中可知,3 个浓度的铜处理均使得决明种子的发芽率及幼苗生长表现出不同程度的降低,各浓度处理均与对照达到了显著差异。 Cu_1 与 Cu_2 两组处理间除了发芽率、活力指数及叶绿素质量分数达到显著差异外,其他指标均未达到显著差异,表明两组处理效果较为接近,而 Cu_3 处理则与前两组处理及对照均达到显著差异,抑制作用最为显著:发芽率(35.0%)仅为对照(86.7%)的 40.4%,活力指数(0.89)仅为对照(4.71)的 18.9%,表明在 0.5~2 mmol/L 的浓度内,铜浓度的升高不利于决明种子的萌发,对幼苗的生长也表现出了阻滞作用。

2.2.2 锌浸种对决明种子的影响 锌的 3 个处理对种子萌发及幼苗生长表现出促进和抑制的双向作用。从表 2 中可知, Zn_1 处理除单株鲜质量、

叶绿素质量分数略低于对照外,其他指标均略高于对照,但各项指标未达到显著差异;Zn2 处理的各项指标均显著优于对照,除可溶性糖质量分数不及 Fe2(82.36 mg/g)以外,其他数据均为最高值:发芽率 94.0%、单株鲜质量 100.6 mg、叶绿素质量分数 9.466 mg/g 分别高出对照 7.3%、4.1 mg、0.84 mg,可溶性糖质量分数增加 15.93 mg,

发芽指数 58.5 为对照的 1.2 倍,是效果最佳的处理;Zn3 处理各项指标均不及对照,各项数据均与对照达到显著差异。这表明高浓度的锌能够抑制决明种子的萌发及幼苗生长,同时暗示 Zn2 处理可能是促进决明种子萌发及幼苗生长的适宜浓度。

2.2.3 钼浸种对决明种子的影响 植物缺钼和钼适宜的范围较小,但适宜和毒害之间的范围很

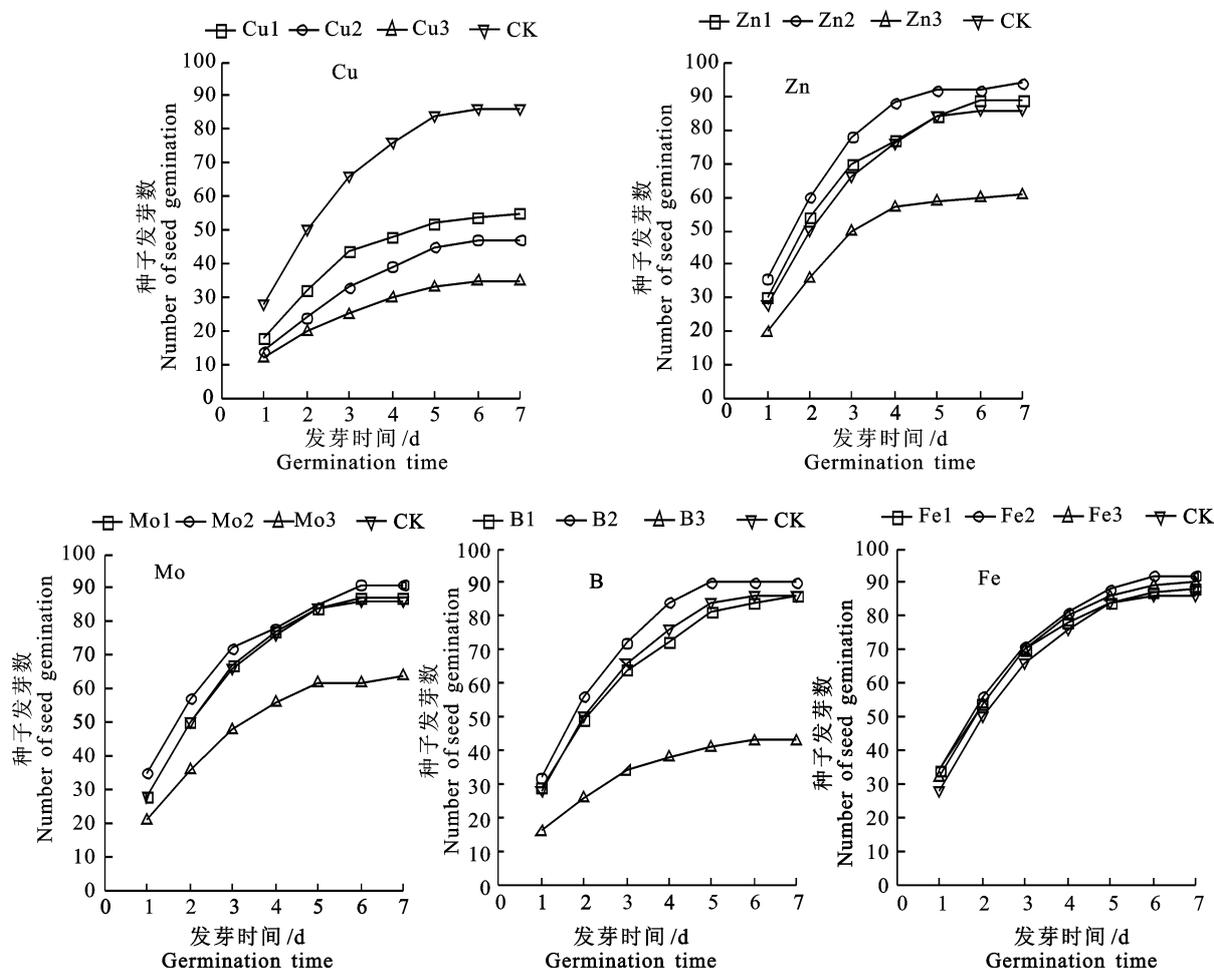


图 1 不同微量元素浸种处理决明种子的动态发芽过程

Fig. 1 Dynamic germination course of *C. obtusifolia* seeds treated by soaking with different trace elements

表 1 不同铜浓度处理下决明种子萌发和幼苗生长情况

Table 1 Seeds germination and seedlings growth of *C. obtusifolia* under different Cu concentrations

处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	单株鲜质量/mg Fresh mass	胚芽长/cm Plumule length	根长/cm Root length	可溶性糖质量分数/ (mg/g) Mass fraction of soluble sugar	叶绿素质量分数/ (mg/g) Mass fraction of chlorophyll
CK	86.7 a	48.8 a	4.71 a	96.5 a	2.62 a	1.52 a	66.05 a	8.626 a
Cu1	55.3 b	30.3 b	1.85 b	61.0 b	2.03 b	0.93 b	33.28 b	4.706 b
Cu2	47.7 c	26.0 b	1.51 c	58.1 b	1.95 b	0.86 b	28.84 b	4.020 c
Cu3	35.0 d	18.4 c	0.89 d	48.9 c	1.41 c	0.71 c	19.15 c	3.046 d

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著,下同。

Note: Different small letters mean significant difference at 0.05 level, the same below.

大^[11]。将 Mo3 浓度加大,以期获得钼的适宜范围。从表 3 中可知,钼的不同浓度处理表现出低浓度促进、高浓度抑制的效果。Mo1 处理的各项指标与对照相近,除活力指数 4.34 与对照 4.71 达到显著差异外,其他数据未达到显著差异;Mo2 的各项指标均优于对照:发芽率提高 4.6%、发芽指数提高 4.4、胚芽长提高 0.29 cm,除叶绿素质量分数外其他数据均与对照达到显著差异,表现出对种子萌发及幼苗生长的促进作用;Mo3 处理使得各项指标出现不同程度下降,与对照相比均达到显著差异,表现出显著的抑制作用。

2.2.4 硼浸种对决明种子的影响 与钼不同,植物缺硼、硼适量、以及硼毒害之间的浓度范围很窄^[12]。因此本次试验在设计硼处理时将其浓度梯度减小,每个梯度浓度仅差 0.05 mmol/L。从表 4 中可知,B1 处理除活力指数外,其他指标均未与对照达到显著差异,表明该浓度对种子萌发及幼苗生长无显著影响;B2 处理除叶绿素质量分数与对照相当外,其他指标均显著高于对照,其中活力指数高出对照 0.63,可溶性糖质量分数高出

对照 8.43 mg/g,显著促进了种子萌发及幼苗生长;B3 处理则抑制种子萌发及幼苗生长:发芽率 43.3%仅为对照 86.7%的 49.9%,活力指数 1.62 仅为对照 4.71 的 34.4%,其他各项指标也表现出不同程度的降低。

2.2.5 铁浸种对决明种子的影响 3 个浓度的铁处理均表现出对种子萌发及幼苗生长的促进作用。从表 5 中可知,Fe1 处理除发芽指数、可溶性糖质量分数外,其他数据与对照无显著差异;Fe2 处理促进作用显著:与对照相比发芽率提高 5.3%、胚芽长增加 0.29 cm、单株鲜质量提高 3.0 mg、叶绿素质量分数达到 9.204 mg/g,其他指标也不同程度优于对照;Fe3 处理表现出促进种子萌发及幼苗生长的作用,但促进作用不及 Fe2 显著。值得注意的是,铁的 3 个处理均使得幼苗叶绿素质量分数、可溶性糖质量分数高于对照,表明适当使用铁元素能够提高幼苗叶绿素的质量分数,对于提高幼苗的光合能力、促进有机物的积累有重要意义。

表 2 不同锌浓度处理下决明种子萌发和幼苗生长情况

Table 2 Seeds germination and seedlings growth of *C. obtusifolia* under different Zn concentrations

处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	单株鲜质量/mg Fresh mass	胚芽长/cm Plumule length	根长/cm Root length	可溶性糖质量分数/ (mg/g) Mass fraction of soluble sugar	叶绿素质量分数/ (mg/g) Mass fraction of chlorophyll
CK	86.7 b	48.8 b	4.71 b	96.5 b	2.62 b	1.52 b	66.05 b	8.626 b
Zn1	89.3 b	49.6 b	4.77 b	96.1 b	2.63 b	1.55 b	67.26 b	8.540 b
Zn2	94.0 a	58.5 a	5.89 a	100.6 a	3.25 a	1.68 a	81.98 a	9.466 a
Zn3	61.0 c	34.2 c	2.46 c	71.9 c	2.35 c	1.22 c	37.41 c	5.530 c

表 3 不同钼浓度处理下决明种子萌发和幼苗生长情况

Table 3 Seeds germination and seedlings growth of *C. obtusifolia* under different Mo concentrations

处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	单株鲜质量/mg Fresh mass	胚芽长/cm Plumule length	根长/cm Root length	可溶性糖质量分数/ (mg/g) Mass fraction of soluble sugar	叶绿素质量分数/ (mg/g) Mass fraction of chlorophyll
CK	86.7 b	48.8 b	4.71 b	96.5 a	2.62 b	1.52 b	66.05 b	8.626 a
Mo1	87.0 b	45.2 b	4.34 c	96.1 a	2.58 b	1.54 b	68.22 b	8.662 a
Mo2	91.3 a	53.2 a	5.23 a	98.3 a	2.91 a	1.65 a	72.16 a	8.712 a
Mo3	64.3 c	36.8 c	2.28 d	61.9 b	2.26 c	1.35 c	38.85 c	6.199 b

表 4 不同硼浓度处理下决明种子萌发和幼苗生长情况

Table 4 Seeds germination and seedlings growth of *C. obtusifolia* under different B concentrations

处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	单株鲜质量/mg Fresh mass	胚芽长/cm Plumule length	根长/cm Root length	可溶性糖质量分数/ (mg/g) Mass fraction of soluble sugar	叶绿素质量分数/ (mg/g) Mass fraction of chlorophyll
CK	86.7 b	48.8 b	4.71 b	96.5 b	2.62 b	1.52 b	66.05 b	8.626 a
B1	86.0 b	46.5 b	4.45 c	95.8 b	2.61 b	1.56 b	65.81 b	8.598 a
B2	90.3 a	54.1 a	5.34 a	98.7 a	2.83 a	1.69 a	74.48 a	8.788 a
B3	43.3 c	24.4 c	1.62 d	66.3 c	1.28 c	1.01 c	22.65 c	4.232 b

表5 不同铁浓度处理下决明种子萌发和幼苗生长情况

Table 5 Seeds germination and seedlings growth of *C. obtusifolia* under different Fe concentrations

处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	单株鲜质量/mg Fresh mass	胚芽长/cm Plumule length	根长/cm Root length	可溶性糖质量分数/ (mg/g) Mass fraction of soluble sugar	叶绿素质量分数/ (mg/g) Mass fraction of chlorophyll
CK	86.7 b	48.8 c	4.71 c	96.5 b	2.62 c	1.52 c	66.05 d	8.626 c
Fe1	88.7 b	51.2 b	4.95 c	96.6 b	2.66 c	1.56 c	69.22 c	8.712 c
Fe2	92.0 a	54.6 a	5.43 a	99.5 a	2.91 a	1.65 a	82.36 a	9.204 a
Fe3	90.3 a	51.8 b	5.08 b	98.6 a	2.78 b	1.60 b	74.46 b	9.028 b

3 结论与讨论

本试验探讨5种微量元素不同浓度浸种对决明种子萌发及幼苗生长的影响,试验结果可以概括为:Zn1、Mo1、B1、Fe1浸种处理对种子萌发及幼苗生长无显著影响,Zn2、Mo2、B2、Fe2、Fe3浸种处理对种子萌发及幼苗生长具有显著促进作用,Cu1、Cu2、Cu3、Zn3、B3、Mo3浸种处理对种子萌发及幼苗生长具有不同程度抑制作用。同时确定本试验中各元素(铜除外)浸种的最适处理为:Zn2、Mo2、B2、Fe2。

本试验的结果表明,不同微量元素、不同浓度对决明种子萌发及幼苗生长有显著影响。试验中对种子萌发及幼苗生长无显著作用的处理,其原因可能是浓度较低,微量元素对种子未能起到作用,因此与对照蒸馏水处理无显著差异。试验中促进种子萌发及幼苗生长的处理,其原因可能是铁、锌及硼等在决明子体内浓度较大^[13],种子对相应元素需求量也较大,加之处理浓度适宜,因此促进了种子的萌发及幼苗生长。而试验中对种子萌发及幼苗生长起阻滞作用的处理,其原因可能有多方面:首先,各种微量元素在植物体内都有不可替代的作用,但彼此之间常有密切联系,如钼和硼在植物体内呈现相互促进的作用,钼、硼同施,显著提高了植物体内原有的各种矿物元素的利用率,促进体内的碳、氢代谢,从而提高作物产量^[14];有些元素间则表现出拮抗作用,如钼与铜、钼与铁、钼与锰之间都是一种拮抗作用^[15]。因此,若单一应用某种元素,可能会由于其浓度过高,或其他元素补给不足而导致对植物生长的抑制,亦或是由于单一元素破坏体内重金属的平衡从而改变氧化还原平衡,造成氧化性损害^[16]。其次,对幼苗生长的阻滞作用可能是由于重金属破坏幼苗体内的营养平衡,导致基础元素的缺失,最终导致中毒^[17-18]。邵兴华等^[19]的研究表明高于

正常水平的铜对根的抑制作用显著,这可能是由于植物吸收过量 Cu^{2+} 后,固定于根部皮层,影响其对养分的吸收。总之,重金属对植物的损伤机制十分复杂,这是由于重金属的毒害作用涉及到诸多生理过程^[20],有很多问题还需要进一步研究。本试验中铜处理均表现出对种子萌发及幼苗生长的抑制作用,笔者认为铜浸种不利于种子萌发,正如生产中一般使用锌、铁拌种,而很少使用铜拌种。第三,不同元素在植物体内发挥不同作用,如铁和铜是植物光合作用的关键元素,在植物长叶期需求量较大,锌是合成各种酶的重要成分,硼能够促进植物营养器官和生殖器官的生长等等。而在种子萌发及幼苗生长阶段主要是消耗种子自身的营养,过多的微量元素可能会造成毒害。

综上所述,本研究中Zn2、Mo2、B2、Fe2、Fe3浸种处理对决明种子萌发及幼苗生长具有促进作用,又以Zn2处理(10 mmol/L)浸种效果最佳,使得种子发芽率提高,幼苗根长增加、根系强健,子叶鲜质量增加、叶绿素质量分数升高,有利于光合作用的进行以及有机物的积累,促进了幼苗的生长发育,为决明植株的健康生长奠定基础。

Reference (参考文献):

- [1] China Pharmacopoeia Commission(国家药典委员会). Chinese Pharmacopoeia(中国药典)[S]. Beijing: Chinese Medical Science and Technology Press, 2010: 135(in Chinese).
- [2] WANG Jie(王杰). Study on chemical components of *Cassia* seed and health function[J]. Journal of Shandong Materia Medica(山东中药杂志), 1989, 3(6): 33(in Chinese).
- [3] HAO Yanjun(郝严军), SANG Yuli(桑育黎), ZHAO Yuqing(赵余庆). Study on the anthraquinones chemical compositions of *Cassia* seed [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs(中草药), 2003, 34(1): 18-19(in Chinese with English abstract).
- [4] LIU Anjun(刘安军), LI Kun(李琨), GAO Xianli(高献礼), et al. Research of effectively purgative components of

- SCI in *Semen cassiae* [J]. Food Science and Technology (食品科技), 2004 (11): 93-96 (in Chinese with English abstract).
- [5] DONG Xiaoqiang (董晓强), YIN Zhanfang (尹占芳). Studies on chemical constituents and pharmacological activities of *Semen cassiae* [J]. China Modern Medicine (中国当代医药), 2013, 20(7): 18-20 (in Chinese with English abstract).
- [6] ZHU Xia (朱霞), HU Yong (胡勇), WANG Xiaoli (王晓丽), et al. Effect of Soaking Seed with Paclobutrazol on *Cassia* Seeds Germination and Seedling Growth [J]. Seed (种子), 2010, 29(3): 98-100 (in Chinese).
- [7] JIN Zhenglü (金正律). Effect of Plant Growth Regulators on Seed Germination and Seedling Growth of *Cassia obtusifolia* [J]. Seed (种子), 2009, 28(12): 78-80 (in Chinese).
- [8] YUAN Yuan (袁媛), LI Na (李娜), SHAO Aijuan (邵爱娟), et al. Effect of PEG 6000 on seed germination and seedling growth of *Scutellaria baicalensis* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs (中草药), 2008, 39(2): 269-272 (in Chinese with English abstract).
- [9] SU Zhengshu (苏正淑), ZHANG Xianzheng (张宪政). Several methods to determine plant chlorophyll content [J]. Plant Physiology Communications (植物生理学通讯), 1989 (5): 87-88 (in Chinese).
- [10] ZHANG Zhiliang (张志良), QU Weiqing (瞿伟菁). Experimental Guidance for Plant Physiology (植物生理学实验指导) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003 (in Chinese).
- [11] Goldbach H E. A critical review on current hypothesis concerning the role of boron in higher plants; suggestions for further research and methodological requirements [J]. J Trace and Microprobe Tech, 1997, 15(1): 81-91.
- [12] Umesh C, Gupta lipseet. Molybdenum in soil, plants and animals [J]. Advances in Agronomy, 1982, 34: 73-109.
- [13] ZHANG Ling (张玲), CAI Hongxin (蔡洪信), XIA Zuoli (夏作理). Analysis and comparison of trace elements in bud of *Semen cassiae* and *Semen cassiae* [J]. Yunnan Journal of Chinese Materia Medica (云南中医中药杂志), 2008, 29(8): 44-46 (in Chinese).
- [14] LIU Peng (刘鹏), YANG Yu'ai (杨玉爱). Effect of molybdenum and boron on nitrogen metabolism of soybean [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science (植物营养与肥料学报), 1999, 5(4): 347-351 (in Chinese with English abstract).
- [15] LIU Peng (刘鹏). Effects of stress of molybdenum on plant and interaction between molybdenum and other elements [J]. Agro-environmental Protection (农业环境保护), 2002, 21(3): 276-278 (in Chinese with English abstract).
- [16] Zhao Huijun, Wu Liangqi, Chai Tuanyao. The effects of copper, manganese and zinc on plant growth and elemental accumulation in the manganese-hyper accumulator *Phytolacca americana* [J]. Journal of Plant Physiology, 2012, 169: 1243-1252.
- [17] Kumar P, Tewari N, Srivastava S, et al. Macronutrient deficiencies and differential antioxidant responses-influence on the activity and expression of superoxide dismutase in maize [J]. Plant Science, 2004, 166: 687-694.
- [18] Bouazizi H, Jouili H, Geitmann A, et al. Copper toxicity in expanding leaves of *Phaseolus vulgaris* L.: antioxidant enzyme response and nutrient element uptake [J]. Ecotox Environ Safe, 2010, 73: 1304-1308.
- [19] SHAO Xinghua (邵兴华), ZHANG Jianzhong (张建忠), LIN Guowei (林国卫), et al. Effect of Cu stress on *Lactuca sativa* L. growth and soil enzymes activities [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (中国农学通报), 2010, 26(4): 157-160 (in Chinese with English abstract).
- [20] MacFarlane G R, Burchett M D. Photosynthetic pigments and peroxidase activity as indicators of heavy metal stress in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.), Vierh [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, 42: 233-240.