

# 磁场对结球甘蓝种子萌发的影响及机理研究

崔路路 于海霞 李景富 姜景彬 许向阳\*

(东北农业大学园艺学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

**摘 要:**以结球甘蓝种子为试材, 采用正交试验和均匀试验方法, 研究了磁场强度、作用时间及处理前种子浸泡时间对各发芽指标的影响以及各影响因素的主次顺序, 并对磁场参数中磁场强度和作用时间进行大范围筛选, 更进一步从可溶性蛋白含量、丙二醛含量、抗氧化酶活性等方面探讨磁场处理提高种子活力的作用机理。结果表明: 适宜的磁场处理可以促进种子萌发, 提高种子活力, 以 20 ℃蒸馏水浸泡 8 h 后 1 000 ~ 3 500 GS 磁场处理 1 ~ 6 min 为宜, 但长时间、大强度磁场处理反而抑制种子萌发; 磁场强度为种子萌发的主要影响因子, 作用时间和浸泡时间的主次顺序因发芽指标的不同而不同; 与对照相比, 磁场处理的种子萌发期间可溶性蛋白含量降低或升高的速率、MDA 含量下降的幅度和速率、3 种抗氧化酶活性上升的速率均加快, 从而提高种子活力。

**关键词:** 结球甘蓝; 磁场; 种子; 萌发

种子成熟后其内部会发生一种不可抗拒且导致其活力下降的自然变化, 这种现象的综合效应称为劣变或者老化 (傅家瑞, 1985)。老化致使种子活力越来越低, 从而给农业生产带来不同程度的损失。因此, 通过相应方法或手段提高种子活力的研究日益引起重视, 利用磁场处理提高种子活力的研究也渐渐成为现代农业开发中一个重要领域。多数研究表明, 无论是经济作物还是大田作物, 适宜强度 (粮食作物 1 500 ~ 2 000 GS, 瓜类作物 200 ~ 4 000 GS) 磁场处理可以提高种子发芽势和发芽率, 促进幼苗生长 (高明英和贺少云, 1992; Xi et al., 1994; 弭晓菊 等, 1999; Souza et al., 1999; 刘新成和李秋楨, 2000; 夏丽华 等, 2000; 于海秋 等, 2001; Piacentini et al., 2001), 但其作用机理尚未明确。影响磁场处理效果的因素主要有 2 个: 磁场参数 (磁场类型、大小、作用时间、均匀度等) 和种子特性 (种子类型、种皮厚度、含水量等), 各

因子之间又存在交互作用, 因此综合研究以及对最佳参数的筛选变得非常重要。

本试验采用稳恒磁场设备对结球甘蓝 (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.) 种子进行处理, 测定在磁场作用下种子萌发的各项指标, 对比分析了影响因子中磁场强度、作用时间、种子浸泡时间的主次顺序及最佳处理方式, 并以各发芽指标为依据筛选适宜的磁场处理参数组合, 进一步研究磁场处理对种子萌发期间生理指标的影响, 以期为复苏陈种子提供技术参数和理论依据, 并为探讨磁场处理提高种子活力的作用机理奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试种子为 2010 年 2 月生产的结球甘蓝晚丰的种子, 种子含水量  $\leq 8\%$ , 千粒重 ( $3.03 \pm 0.01$ ) g, 由河北邢台华丰种子有限公司提供。

试验所用磁场发生设备主要包括磁场发生装置 (铁芯线圈)、测量装置 (高斯仪)、电路控制装置, 可控磁场范围 0 ~ 5 000 GS, 由东北农业大学电气与信息学院制作提供。

### 1.2 试验方法

试验于 2013 年 4 月在东北农业大学园艺学院进行。首先采用水漂法选取颗粒饱满、色泽均匀、

崔路路, 男, 硕士研究生, 专业方向: 蔬菜遗传育种, E-mail: neaucui@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): 许向阳, 男, 研究员, 博士生导师, 专业方向: 蔬菜遗传育种与生物技术, E-mail: xxy709@126.com

收稿日期: 2013-11-04; 接受日期: 2014-01-09

基金项目: 现代农业产业技术体系专项 (CARS-25), 哈尔滨市科技创新人才研究专项 (2011RFXXN031)

外表无开裂的种子,然后用 10% 次氯酸钠进行表面消毒 10 min,之后用蒸馏水冲洗数次,室温风干备用。

预备试验结果表明,磁场处理对结球甘蓝干种子影响甚微,甚至种子活力有下降的趋势;而对湿种子则整体效果较好。故以下试验皆先浸泡种子,然后再进行磁场处理。

**1.2.1 正交试验** 按照  $L_9(3^4)$  正交试验设计,取因素 A 磁场强度 ( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  分别为 1 000、2 000、3 000 GS)、因素 B 作用时间 ( $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  分别为 1、2、3 min)、因素 C 处理前种子浸泡时间 ( $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别为 4、8、12 h) 3 因素 3 水平组合处理,其中浸泡条件为 20 ℃ 蒸馏水。根据国家标准 GB5520-85 (粮食、油料检验 种子发芽试验) 进行发芽试验,以不经浸泡和磁场处理的种子为对照,每处理 100 粒种子,3 次重复。

每天统计发芽种子数 (以胚根长度大于种子直径计),第 5 天统计发芽势,第 7 天统计发芽率并测定幼苗胚根长度 (每处理随机选取 20 株);计算发芽指数 (GI) 和活力指数 (VI)。

$$\text{发芽势}(\%) = (G_1/N) \times 100\%$$

$$\text{发芽率}(\%) = (G_2/N) \times 100\%$$

$$\text{发芽指数 GI} = \sum (G_t/Dt)$$

$$\text{活力指数 VI} = \text{GI} \times S$$

式中:  $N$  为种子总数;  $G_1$ 、 $G_2$  分别为第 5、第 7 天的发芽种子数;  $G_t$  为在  $t$  时间内的发芽种子数,  $Dt$  为相应的发芽天数;  $S$  为幼苗胚根长度 (mm)。

**1.2.2 磁场强度和作用时间参数筛选** 按照  $U^*_{10}(10^8)$  均匀试验设计,选择磁场强度和作用时间 2 个因素,每个因素取 10 个水平 (表 1)。对照

表 1  $U^*_{10}(10^8)$  处理方案

编号	磁场强度/GS	作用时间/min
M <sub>1</sub>	500 (1)	7 (7)
M <sub>2</sub>	1 000 (2)	3 (3)
M <sub>3</sub>	1 500 (3)	10 (10)
M <sub>4</sub>	2 000 (4)	6 (6)
M <sub>5</sub>	2 500 (5)	2 (2)
M <sub>6</sub>	3 000 (6)	9 (9)
M <sub>7</sub>	3 500 (7)	5 (5)
M <sub>8</sub>	4 000 (8)	1 (1)
M <sub>9</sub>	4 500 (9)	8 (8)
M <sub>10</sub>	5 000 (10)	4 (4)

注: 括号内的数字表示均匀设计水平号。

除不进行磁场处理外,其余条件均与处理相同。种子发芽试验及发芽指标的测定同 1.2.1。

### 1.2.3 磁场处理对种子萌发期间生理指标的影响

选取种子活力指数最高的磁场处理组合再次进行发芽试验,从第 1 天开始至第 7 天每天测定各生理指标。超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用生物试剂盒 (南京建成生物工程研究所) 进行测定; 过氧化物酶 (CAT) 活性采用紫外吸收法进行测定, 过氧化物酶 (POD) 活性采用愈创木酚法进行测定 (李合生, 2000; 张治安 等, 2004); 丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法进行测定 (郝建军, 2007); 可溶性蛋白含量采用 G-250 考马斯亮蓝法进行测定 (李合生, 2000)。

### 1.3 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2003、SPSS 16.0 及回归分析、方差分析软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 正交试验结果

由表 2 可知,不同磁场处理对结球甘蓝种子各发芽指标的影响程度不同,大多数处理都能不同程度的提高种子发芽指标,其中  $T_3$  处理的发芽势最高,比对照提高了 45.09%;  $T_8$  处理的发芽率和发芽指数最高,分别比对照提高了 40.42% 和 45.65%;  $T_9$  处理的活力指数最大,比对照提高了 46.68%。但个别处理不仅没有提高种子的发芽指标,反而出现降低现象,如  $T_7$  处理的发芽势、发芽指数、活力指数,  $T_4$ 、 $T_5$  处理的活力指数。综合各指标提高幅度,磁场处理最佳效果组合为  $T_9$ ,即磁场强度 3 000 GS、作用时间 3 min、处理前种子浸泡 8 h。

对磁场处理效果进行直观分析 (表 3), 磁场强度、作用时间、浸泡时间 3 个因素对 4 个发芽指标的影响程度不同,主次顺序差异主要为浸泡时间和作用时间,各发芽指标中磁场强度均为主要影响因素。不同发芽指标的最佳组合方案也有所不同,磁场强度除发芽率为  $A_3$  (3 000 GS) 外,其余均为  $A_1$  (1 000 GS) 最佳; 处理时间均为  $B_3$  (3 min) 最佳; 浸泡时间发芽势、发芽率为  $C_1$  (4 h) 最佳,发芽指数、活力指数为  $C_2$  (8 h) 最佳。直观分析所得最佳组合与试验结果不同,经进一步验证,其活力指数为 493.12,高于  $T_9$  处理。

表 2 正交试验结果

编号	组合方案	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数	活力指数
T <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	39.11 ± 3.05 cC	42.48 ± 0.88 bA	29.67 ± 5.53 aA	439.97 ± 12.92 aA
T <sub>2</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	41.16 ± 2.29 cC	44.20 ± 2.47 bA	30.23 ± 3.83 aA	457.71 ± 34.14 aA
T <sub>3</sub>	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	45.24 ± 0.17 aA	46.33 ± 0.68 abA	30.11 ± 1.32 aA	443.07 ± 13.87 aA
T <sub>4</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	40.64 ± 0.87 cC	45.08 ± 2.43 abA	22.72 ± 3.63 abA	311.80 ± 46.06 bB
T <sub>5</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	38.49 ± 1.86 cC	39.00 ± 0.12 cB	22.67 ± 0.52 abA	315.23 ± 6.03 bB
T <sub>6</sub>	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	39.54 ± 3.16 cC	44.02 ± 4.59 bA	24.62 ± 4.03 abA	345.89 ± 17.65 bB
T <sub>7</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	30.34 ± 0.81 dD	45.86 ± 1.21 abA	17.50 ± 2.65 bA	199.25 ± 3.39 cC
T <sub>8</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	41.98 ± 3.39 bB	48.08 ± 5.91 aA	30.47 ± 2.99 aA	365.23 ± 48.70 bB
T <sub>9</sub>	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	38.57 ± 2.38 cC	44.20 ± 4.20 bA	29.37 ± 3.08 aA	487.88 ± 38.69 aA
CK		31.18 ± 0.70 dD	34.24 ± 0.39 dC	20.92 ± 4.15 abA	332.61 ± 9.63 bB

注：表中数据为 3 次重复平均值；同列数据后不同小写字母表示差异显著（α=0.05），不同大写字母表示差异极显著（α=0.01）。

表 3 直观分析结果

指标	因素	直观分析				因素次序	最佳组合
		k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	R		
发芽势	A	31.847	29.556	26.963	4.874	ABC	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>
	B	26.696	30.543	31.117	4.421		
	C	30.210	30.123	28.023	2.187		
发芽率	A	34.337	32.700	36.047	3.347	ACB	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>
	B	34.473	33.760	34.850	1.090		
	C	34.860	34.493	33.730	1.130		
发芽指数	A	30.003	24.437	25.780	5.566	ACB	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
	B	24.397	27.790	28.033	3.636		
	C	28.253	28.540	23.427	5.113		
活力指数	A	446.91	324.31	350.79	122.60	ABC	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>
	B	317.01	379.39	425.61	108.61		
	C	383.69	419.13	319.18	99.95		

为了进一步研究各因素对结球甘蓝种子发芽指标的影响程度，对上述试验结果进行方差分析。从表 4 可以看出，除磁场强度对种子活力指数产生的影响达显著水平外，磁场强度、作用时间、浸泡时间对各发芽指标均未产生显著影响；且各因素对同一指标的影响程度不同，发芽势和活力指数各影响因素的主次顺序与直观分析法所得结果相同。总体来看，磁场强度对各发芽指标的影响最大，作用时间次之（除发芽指数外）。

表 4 方差分析结果

指标	F 值			P 值		
	磁场强度 (A)	作用时间 (B)	浸泡时间 (C)	磁场强度 (A)	作用时间 (B)	浸泡时间 (C)
发芽势	1.974	1.896	0.524	0.185	0.196	0.606
发芽率	0.392	0.224	0.188	0.685	0.803	0.831
发芽指数	1.243	1.207	1.691	0.326	0.336	0.229
活力指数	4.672	3.236	2.856	0.034	0.078	0.100

注：F<sub>0.05</sub>=3.98；F<sub>0.01</sub>=7.21。

2.2 对磁场强度和作用时间参数的筛选

从表 5 可以看出，结球甘蓝种子经过一定时间磁场处理之后，大多数处理的发芽指标都高于对照，但提高幅度有差异。有些处理提高幅度较大，如 M<sub>1</sub> 处理（500 GS×7 min）的发芽势比对照提高了 60.36%；但有些处理反而降低了发芽指标，如 M<sub>9</sub> 处理（4 500 GS×8 min），说明适宜的磁场强度和作用时间参数组合才能提高种子活力。

表 5 均匀设计试验结果

编号	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数	活力指数
M <sub>1</sub>	50.00 ± 1.01	51.43 ± 1.43	59.25 ± 1.80	564.33 ± 14.23
M <sub>2</sub>	46.07 ± 1.07	47.50 ± 1.50	55.94 ± 2.76	531.14 ± 31.33
M <sub>3</sub>	40.49 ± 2.99	44.54 ± 3.30	48.58 ± 0.98	534.38 ± 15.42
M <sub>4</sub>	34.31 ± 8.97	37.87 ± 11.15	40.12 ± 9.71	481.44 ± 20.12
M <sub>5</sub>	41.43 ± 1.42	45.11 ± 0.22	49.55 ± 3.76	490.55 ± 5.11
M <sub>6</sub>	26.49 ± 1.74	29.00 ± 3.00	30.41 ± 1.58	361.88 ± 11.41
M <sub>7</sub>	33.56 ± 1.75	35.33 ± 2.00	33.26 ± 1.61	315.97 ± 15.56
M <sub>8</sub>	35.03 ± 6.62	37.00 ± 6.33	37.47 ± 3.34	378.82 ± 17.82
M <sub>9</sub>	17.51 ± 4.00	21.67 ± 3.50	18.06 ± 2.75	227.21 ± 7.32
M <sub>10</sub>	30.00 ± 0.53	32.00 ± 1.00	20.00 ± 0.58	240.21 ± 8.06
CK	31.18 ± 0.70	34.24 ± 0.39	23.86 ± 4.42	332.61 ± 9.63

注：表中数据为 3 次重复平均值。

以磁场强度、作用时间为自变量，以各发芽指标为因变量，进行回归分析。

发芽势回归方程为：

$$Y=32.850\ 62+0.001\ 29X_1+4.635X_2-0.001\ 18X_1X_2-0.241\ 47X_2^2$$

式中：X<sub>1</sub> 表示磁场强度，X<sub>2</sub> 表示作用时间，下同；回归系数 R<sup>2</sup>=0.918 0\*\*，F 值=11.196。方程最大值 Y=37.629 0，即最大发芽势为 37.63%，此时 X<sub>1</sub>=3 480.54、X<sub>2</sub>=1.093 2，比对照提高了 20.68%。

发芽率回归方程为：



$$Y=35.843\ 56+0.001\ 73X_1+4.040\ 32X_2-0.001\ 1X_1X_2-0.192\ 40X_2^2$$

其中  $R^2=0.913\ 0^*$ ,  $F$  值 =10.488。方程最大值  $Y=41.721\ 98$ , 即最大发芽势为 41.72%, 此时  $X_1=3\ 122.85$ 、 $X_2=1.572\ 7$ , 比对照提高了 21.84%。

发芽指数回归方程为:

$$Y=28.354\ 18+0.008\ 61X_1+6.664\ 58X_2-0.001\ 50X_1X_2-0.334\ 54X_2^2$$

其中  $R^2=0.873\ 5^*$ ,  $F$  值 =6.905。方程最大值  $Y=55.586\ 579$ , 即最大发芽指数为 55.59, 此时  $X_1=1\ 882.7$ 、 $X_2=5.74$ , 比对照提高了 132.98%。

活力指数回归方程为:

$$Y=358.912\ 16+0.066\ 11X_1+40.618\ 08X_2-0.011\ 35X_1X_2-1.327\ 46X_2^2$$

其中  $R^2=0.929\ 3^{**}$ ,  $F$  值 =13.138。方程最大值  $Y=550.462$ , 即最大活力指数为 550.46, 此时  $X_1=2\ 216.21$ 、 $X_2=5.825$ , 比对照提高了 65.49%。

由以上方程可以看出, 发芽势和活力指数的回归系数达到极显著水平; 发芽率、发芽指数的回归系数达到显著水平。这说明在一定磁场强度和作用时间的组合下, 结球甘蓝种子活力提高。综合来看, 结球甘蓝种子在 20℃ 蒸馏水中浸泡 8 h 后经 1 000~3 500 GS 磁场处理 1~6 min, 可以提高种子的各项发芽指标。但是, 随着磁场处理强度增加, 处理时间需相应的减少, 长时间、高强度磁场处理反而会导致种子活力下降。

### 2.3 种子萌发期间生理指标的变化

选取正交试验中种子活力指数最高的组合 (磁场强度 1 000 GS、作用时间 3 min、处理前种子浸泡 8 h), 再次进行发芽试验, 测定结球甘蓝种子萌发期间生理指标的变化, 从生理角度探讨种子活力提高的作用机理。

**2.3.1 可溶性蛋白含量的变化** 蛋白质是种子主要成分之一, 可溶性蛋白含量的高低反映细胞内代谢强度和酶活性。磁场处理与未经磁场处理的种子萌发期间可溶性蛋白含量变化曲线如图 1 所示, 磁场处理与对照可溶性蛋白含量的变化趋势基本一致, 均随着种子萌发天数的增加呈先下降后升高的变化趋势; 但是, 种子萌发 1~5 d 时磁场处理比对照可溶性蛋白含量下降速度快, 5 d 后磁场处理的可溶性蛋白含量比对照提高的速度也快。原因可能是

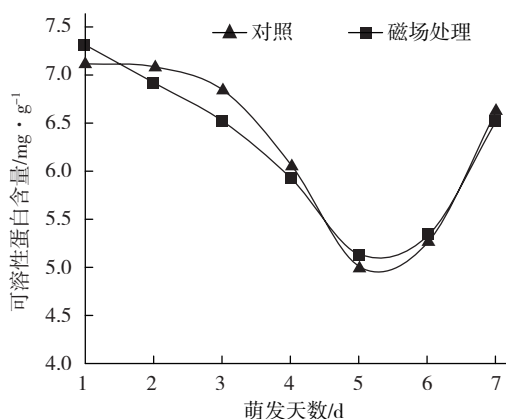


图 1 结球甘蓝种子萌发期间可溶性蛋白含量变化曲线

种子萌发其内部贮藏蛋白分解为氨基酸, 这些氨基酸再合成新的蛋白, 磁场处理加快了种子内部代谢速率和贮藏物质利用, 以及新蛋白合成速率。

**2.3.2 丙二醛 (MDA) 含量的变化** 丙二醛是膜脂过氧化的终产物。由图 2 可知, 种子萌发前期磁场处理和对照的 MDA 含量均呈降低趋势, 且磁场处理的下降幅度和速率均高于对照; 种子萌发 6 d 后磁场处理和对照的 MDA 含量均有所上升。原因可能是种子萌发内部某些保护酶或自身恢复和修复机制启动, 降低了膜脂过氧化程度, 而后期由于营养不足等导致其含量上升, 磁场处理提高了酶活性和修复速度, 从而使其速率加快。

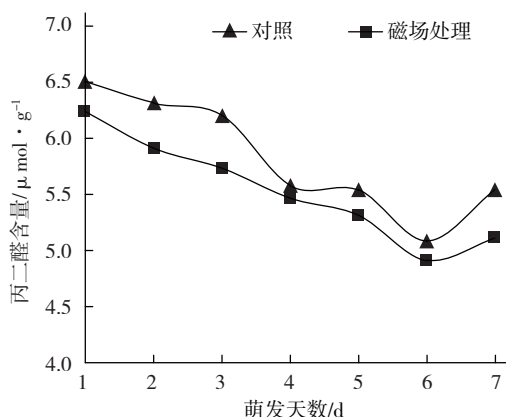


图 2 结球甘蓝种子萌发期间丙二醛含量变化曲线

**2.3.3 抗氧化酶活性的变化** 种子劣变老化过程中, 膜脂过氧化产生大量自由基, 细胞内部修复系统启动, 自由基清除酶类 (SOD、CAT、POD 等) 发挥作用, 这些酶的活性直接影响老化种子自身的膜结构和膜组分, 间接影响种子活力。由图 3、图 4、图 5 可知, 总体来看种子萌发期间磁场处理和对照的 3 种抗氧化酶活性均呈上升趋势, 但磁场

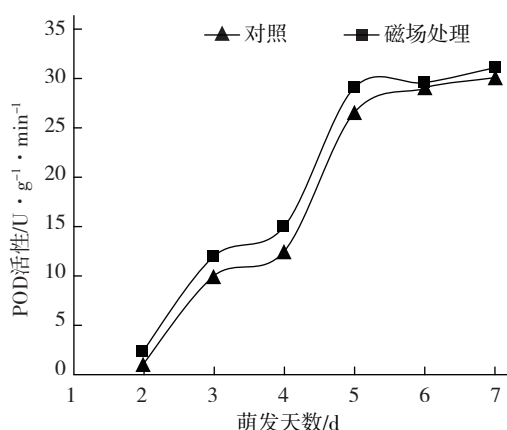


图3 结球甘蓝种子萌发期间 POD 活性变化曲线

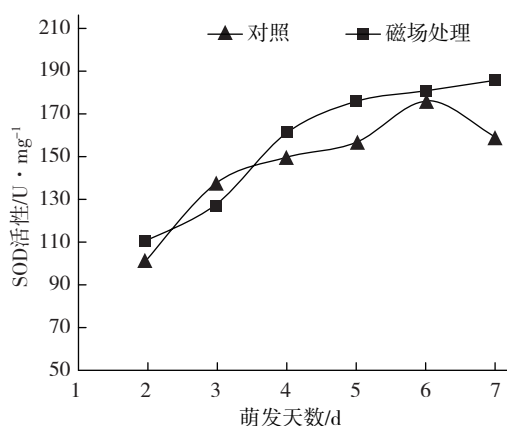


图4 结球甘蓝种子萌发期间 SOD 活性变化曲线

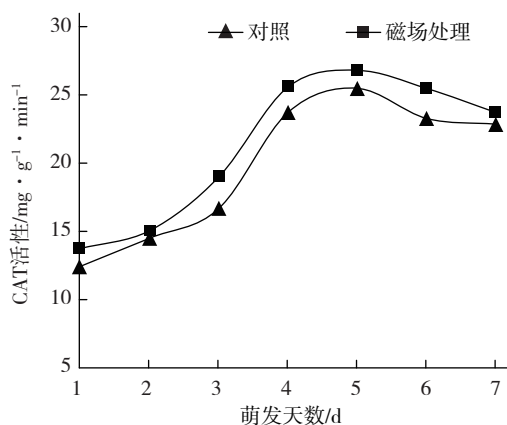


图5 结球甘蓝种子萌发期间 CAT 活性变化曲线

处理的上升速率均高于对照。可能是由于种子萌发体内保护性酶类逐渐被激活, 磁场处理提高了这些酶的活性, 从而提高种子活力。

### 3 结论与讨论

种子, 从宏观方面来讲是农林业生产中最基本的生产资料之一, 从微观方面来讲它是植物个体

发育中的一个阶段 (傅家瑞, 1985), 是一个生命有机体, 随着生长发育到生理成熟, 其活力达到最大, 而后逐渐下降, 直至消失。因此, 保持和提高种子活力是非常有意义的, 而其中一个重要的环节就是播种前处理, 应用也较为广泛。但是由于处理方法、时间、温度、种子特性等因素的不同, 不可能将一种方法单一笼统的应用于所有的种子。本试验结果证实, 播种前利用磁场刺激结球甘蓝种子能在一定程度上提高其活力, 但应用此方法前应进行预试验, 筛选出适宜的参数条件。本试验经大范围参数筛选表明, 结球甘蓝种子用 20 ℃ 蒸馏水浸泡 8 h 后再以 1 000 ~ 3 500 GS 磁场处理 1 ~ 6 min, 可以明显提高种子的各项发芽指标。

由于涉及到许多物质和生物的微观过程、生理生化反应以及磁场效应等方面的一系列问题, 目前磁场处理提高种子活力及萌发效果的作用机理尚无明确结论。研究者们从不同角度对这一问题提出各种假说 (高和平 等, 2004; 包金花和云兴福, 2010)。预备试验中用相同磁场处理干、湿两种状态的结球甘蓝种子, 结果发现磁场处理对干种子的影响甚微, 甚至种子活力有下降的趋势, 而湿种子则整体处理效果较好。水是生物体内生化反应的重要介质, 并且水本身也具有一定分子团结构, 其总是处于一种缔合和解缔成大小分子团的平衡中, 适当磁场处理极可能打破这种平衡, 水分子结构发生变化, 从而容易进入细胞, 成为细胞“兴奋”的基础, 为代谢提供足够的水分 (徐安起 等, 1998; 刘亚丽 等, 2002; 智慧 等, 2005)。同时, 磁场处理又活化水分子进而催化生物大分子, 特别是水解酶和氧化还原酶活性增强, 从而表现出代谢反应加快, 提高植物的抗逆性 (陈怀军, 2008; Ruzic et al., 2009)。还有研究表明, 磁场处理还可提高生物体内某些生化有机物质如有机酸、激素、核酸的含量, 有助于提高植物体抵抗外界不良环境的能力 (卢升高和愈劲炎, 1990; 徐安起 等, 1998)。本试验初步证实, 磁场处理可以提高种子内部的代谢程度和贮藏物质的利用, 同时增强酶活性、提高植株抗逆性; 不过在其他生理生化和超微结构方面, 例如抗氧化酶促其他酶及蛋白酶活性, 生长激素变化, DNA 及 RNA 含量, 蛋白同工酶, 细胞膜、细胞器和染色体的影响等分子水平和转录水平均有

待于进一步研究,从多个层次探讨磁场处理提高种子活力的作用机理。

### 参考文献

- 包金花, 云兴福. 花椰菜种子期磁场处理后体内生理生化变化的研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2010 (1): 126-130.
- 陈怀军. 2008. 磁场处理黄瓜种子对其幼苗抗旱性的影响〔硕士论文〕. 西安: 陕西师范大学.
- 傅家瑞. 1985. 种子生理. 北京: 科学出版社.
- 高和平, 邹礼平, 夏燎原. 2004. 磁场处理水对蔬菜种子发芽影响的初步研究. 种子, 23 (9): 41-43.
- 高明英, 贺少云. 1992. 磁技术在农作物种子上的应用. 物理通报, (12): 33-34.
- 郝建军. 2007. 植物生理学实验技术. 北京: 化学工业出版社.
- 李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- 刘新成, 李秋祯. 2000. 磁场和  $\text{Cu}^{2+}$  对蚕豆幼根生长、细胞分裂和过氧化物酶同工酶谱的影响. 天津师范大学学报: 自然科学版, 19 (1): 57-68.
- 刘亚丽, 岳树松, 刘凌, 周秀荣. 2002. 磁化水对农作物的生理生化效应. 河南师范大学学报: 自然科学版, 30 (3): 52-54.
- 卢升高, 愈劲炎. 1990. 磁场处理农作物种子的生物学效应及其机制研究进展. 种子, (3): 47-49.
- 弭晓菊, 马跃, 郭桂云. 1999. 磁场处理番茄种子对其生理生化影响的研究. 植物研究, 19 (1): 68-74.
- 夏丽华, 依艳丽, 刘孝义. 2000. 磁场处理对几种种子活力的影响. 松辽学刊: 自然科学版, 2 (1): 11-13.
- 徐安起, 丁学厚, 姜滢, 高春新, 孙小镭, 李忠照. 1998. 磁场处理种子对作物生长的影响. 山东大学学报: 自然科学版, 33 (1): 58-60.
- 于海秋, 沈秀瑛, 白宝璋. 2001. 磁场处理玉米种子对玉米籽粒灌浆过程和产量性状的影响. 沈阳农业大学学报, 32 (5): 339-342.
- 张治安, 张美善, 蔚荣海. 2004. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社.
- 智慧, 刁现民, 李顺国, 王永芳, 李伟. 2005. 弱磁场处理对玉米种子活力的影响. 中国农学通报, 21 (7): 130-131.
- Piacentini M P, Fraternali D, Piatti E, Ricci D, Vetrano F, Dachà M, Accorsi A. 2001. Senescence delay and change of antioxidant enzyme levels in *Cucumis sativas* L. etiolated seedlings by ELF magnetic fields. Plant Science, 161 (1): 45-53.
- Ruzic R, Vodink D, Jerman I. 2009. Influence of alumina in biologic effects of ELF magnetic field stimulation. Electro Magneto Biol, 19 (1): 57-68.
- Souza T A, Porras L E, Casate F R. 1999. Effect of magnetic treatment of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seeds on germination and seedling growth. Horticulture, 70 (8): 68-92.
- Xi G, Fu Z D, Ling J. 1994. Change of peroxidase activity in wheat seedling induced magnetic field and its response under dehydration condition. Seedlings Induced by Acta Bot Sin, 36: 113-118.

## Effect of Magnetic Field on *Brassica oleracea* L. var. *capitata* L. Seed Germination and Studies on Its Mechanism

CUI Lu-lu, YU Hai-xia, LI Jing-fu, JIANG Jing-bin, XU Xiang-yang\*

(College of Horticulture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Taking *Brassica oleracea* L. var. *capitata* L. seed as experimental material, the effect of magnetic field intensity, and magnetic acting time and seed soaking time before treatment on seed germination index and primary and secondary relations between all factors were studied by orthogonal test and uniform test method. Then the large scale screening of magnetic field intensity and magnetic acting time were carried out to further investigate the mechanism of using magnetic field treatment to improve seed vigor from the view points of soluble protein content, malondialdehyde content, and antioxidant enzyme activity. The results indicated that suitable magnetic field treatment could promote seed germination and improve seed vigor. Magnetic field intensity was the main factor affecting seed germination. The primary and secondary order of action time and soaking time were varied with different germination indexes. Seed germination was inhibited by too high magnetic field intensity for a long time. Soaking seed in 20 °C distilled water for 8 hours, 1-6 minutes was appropriate treatment by 1 000-3 500 GS magnetic field. After magnetic field treatment, the soluble sugar and protein contents were increased, MDA content decreased, and enzyme activities of antioxidant system were increased, thus the seed germination effect was improved.

**Key words:** *Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.; Magnetic field; Seed; Germination