

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2018-0650

赵晓晨, 田雨, 张红香. PEG 引发紫花苜蓿种子的最优处理方案. 草业科学, 2019, 36(10): 2549-2555.

ZHAO X C, TIAN Y, ZHANG H X. Optimum treatment scheme for alfalfa seeds primed with PEG. Pratacultural Science, 2019, 36(10): 2549-2555.

PEG 引发紫花苜蓿种子的最优处理方案

赵晓晨¹, 田 雨¹, 张红香²

(1. 吉林农业大学动物科学技术学院, 吉林 长春 130118; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102)

摘要: 为了筛选出 PEG 引发紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 种子的最优处理方案, 以不同的 PEG 浓度 (5%、10%、15%)、引发时间 (12、24、36 h) 以及引发温度 (10、15、20 °C) 为试验因素, 采用正交设计筛选引发紫花苜蓿种子萌发的最优处理方案, 并根据生理指标的测定来进一步筛选最优组合。结果表明, 正交设计优化 PEG 引发紫花苜蓿种子处理方案中的最优组合是 A₂B₂C₃, 即紫花苜蓿种子在温度为 20 °C 的条件下, 在浓度为 10% 的 PEG-6000 溶液中引发 24 h 后, 其发芽速度可显著提高, 且种子内部的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶的活性增强。

关键词: 正交设计; 紫花苜蓿种子; PEG 引发; 发芽速度; 酶活性

中图分类号: S541⁺.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2019)10-2549-07

Optimum treatment scheme for alfalfa seeds primed with PEG

ZHAO Xiaochen¹, TIAN Yu¹, ZHANG Hongxiang²

(1. Animal Science and Technology College, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin, China;

2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China)

Abstract: In order to determine the best seed priming scheme for alfalfa, the seeds were primed in different concentrations of polyethylene glycol (PEG) (5%, 10%, and 15%) with different durations (12 h, 24 h and 36 h) and temperatures (10, 15, and 20 °C). The orthogonal design was used to determine the best treatment plan, based on the alfalfa seed germination conditions and the physiological index. The results show that the best treatment scheme was A₂B₂C₃, which represents priming with 10% PEG at 20 °C for 24 h. The germination speed of seeds improved significantly, and the activity of superoxide dismutase (SOD), the peroxidase (POD), and catalase (CAT) increased.

Keywords: orthogonal design; alfalfa seeds; PEG priming; germination speed; enzymatic activity

Corresponding author: TIAN Yu E-mail: tianyu@jlau.edu.cn

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 作为优质高产的多年生豆科牧草, 常作为草地补播、建植栽培草地和草田轮作的首选牧草。在国家政策的推动下, 苜蓿产业在畜牧业发展、推进种植业结构调整、“粮改饲”和“种养结合”模式试点中发挥着越来越大的作用。由于苜蓿主要种植区大多处于干旱半干旱地区, 且无灌溉设施, 特别是春播时气温低,

降水量少且不确定性强; 加之苜蓿种子生产存在诸多限制因素^[1], 导致市场上流通的种子存在纯净度差, 发芽率低的现象, 国产牧草种子市场流通的草种合格率不到 60%^[2]。因此, 提高苜蓿种子及幼苗的抗旱性已成为干旱半干旱地区苜蓿栽培利用的一个重要环节。

种子引发 (seed priming) 是在一定的控制条件

收稿日期: 2018-11-30 接受日期: 2019-04-17

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目 (JJKH20180642KJ); 国家重点基础研究发展计划“973 计划”(2015CB150801)

第一作者: 赵晓晨 (1994-), 女, 吉林敦化人, 在读硕士生, 主要从事牧草种子生理生态的研究。E-mail: 15764383543@163.com

通信作者: 田雨 (1983-), 女, 河北昌黎人, 讲师, 博士, 主要从事植物逆境生理生态研究。E-mail: tianyu@jlau.edu.cn

下使种子缓慢的吸收水分膨胀，为种子萌发提前进行生理准备的一种种子播前预处理技术。种子引发能够产生“引发记忆”，不仅能够打破种子的休眠，提高种子发芽速度和整齐度，还能提高种子幼苗的抗逆性^[3-8]。常用的液体引发剂包括水、盐 (NaCl、KNO₃、H₂O₂ 等)、PEG、植物激素 (GA、ABA 等)。已有研究结果证实，种子引发能够促进种子的发芽、幼苗出土以及作物产量。但已有研究主要集中在紫花苜蓿种子引发的最适条件等^[9]，且多集中于引发作用的定性研究，而不同的苜蓿品种的引发条件尚需优化。

种子的活力是一个复杂的属性，活力的高低决定了幼苗在不同生境中出土的均匀度，种子的萌发关系到种苗的建植能否成功，种苗生长可利用的水热资源也受到种子萌发速率的影响。种子的活力受种子的寿命、遗传因素、贮藏条件等因素的影响^[4, 10]。PEG (聚乙二醇) 的主要功能是减缓种子在萌发初期吸收水分的速率，减少种子在吸收水分的过程中膜系统受到的损伤和对受损膜系统的修复^[11]，激活体内超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 等在内的多种保护酶的启动，但在使用 PEG 的分子量、PEG 浓度、浸种时间以及浸种温度上也都存在着多种差异^[12]。

因此，本研究通过正交设计优化 PEG 引发紫花苜蓿种子萌发的最优处理方案，以期为紫花苜蓿种子在退化草地和栽培草地建植中提供可行的种子预处理方案。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

材料选用公农一号紫花苜蓿 (*Medicago sativa* ‘Gongnong No.1’)，种子由吉林省农业科学院畜牧分院草地所提供，试验前于 4℃ 贮藏。

1.2 试验方法

1.2.1 引发方法

以 PEG 为引发剂，设置不同的 PEG 浓度 (5%、10%、15%)、浸泡时间 (12、24、36 h) 及浸泡温度 (10、15、20℃) 为试验因素 (表 1)，将 5 g 种子置入广口瓶中，按表 2 的组合分别加入 PEG 溶液，使种子完全浸没在溶液里，立即摇晃以使种子与 PEG 溶液均匀接触，以保证种子能够引发充分，而后将

广口瓶置于恒温培养箱中进行引发。在引发期间，每隔 2 h 将广口瓶从培养箱中取出，轻轻摇晃，以确保种子能够均匀地吸收水分^[13]。引发结束后，将引发好的种子倒出，用蒸馏水将种子表面的引发剂充分冲洗干净，平铺置滤纸上，室内 (室温 18.7℃，湿度 38%) 回干直至种子的初始含水量 (5.66%)，回干后立即进行发芽试验。

表 1 PEG 6000 引发试验因素及水平
Table 1 Factors and levels of PEG 6000 priming test

水平 Level	因素 Factor		
	PEG 浓度 PEG concentration/%	处理时间 Treatment time/h	处理温度 Treatment temperature/℃
1	5	12	10
2	10	24	15
3	15	36	20

表 2 L₉ (3³) 正交表头设计
Table 2 L₉ (3³) orthogonal header design

处理组合 Treatment	PEG 浓度 PEG concentration (A)	处理时间 Treatment time (B)	处理温度 Treatment temperature (C)
I	1	1	1
II	1	2	2
III	1	3	3
IV	2	1	2
V	2	2	3
VI	2	3	1
VII	3	1	3
VIII	3	2	1
IX	3	3	2

1.2.2 发芽试验

按表 2 对种子进行处理，每个培养皿 50 粒，4 次重复，以未引发处理为对照。置于 10~15℃ (春季播种的土壤温度) 的人工气候箱中进行培养，18 h/6 h (光照/黑暗)。每天计数发芽数，胚根突出种皮 2 mm 视为发芽，第 7 天测量幼苗根长与苗长，每皿随机取 10 株进行测量，并计算平均值。在第 14 天时统计各培养皿中的正常和不正常苗、死种子、新鲜种子及种子的硬实数。

最终发芽率 = 发芽终期全部正常种苗数 / (供试种子数 - 种子的硬实数) × 100%;

发芽速度 (timson index) = $\sum G/t$ 。

式中: G 为每天累计发芽率, t 为试验天数, 在本试验中发芽速度最大值为 100, 该数值越大, 说明种子的发芽速度越快。

$$T_{50} = t_i + \frac{(N+1)/2 - n_i}{n_j - n_i} \times (t_j - t_i)。$$

式中: N 为最后一天的发芽数, t_i 为第 i 天, t_j 为第 j 天, n_i 为第 i 天的发芽数, n_j 为第 j 天的发芽数。

种子活力指数 = (根长 + 苗长) / T_{50} , $1/T_{50}$ 为萌发速率, 即种子发芽率达到最终发芽率的 50% 所需要的时间的倒数。

1.2.3 丙二醛 (MDA) 含量及 SOD、POD、CAT 酶活性的检测

通过正交设计方案测定各发芽指标, 首先筛选出几个优良组合, 然后进一步检测其 MDA(丙二醛) 含量及 SOD、POD、CAT 酶活性, 并最终筛选出 PEG 引发紫花苜蓿种子最优的处理方案。

1.2.4 数据分析

试验数据采用 SPSS Statistics 19.0 软件对所测定的数据进行分析比较, 用平均值和标准误表示试验的测定结果, 对同一处理浓度不同处理时间和温度、同一处理时间不同处理浓度和温度、同一处理温度不同处理浓度和时间以及 4 种酶的活性进行单因素方差分析, 并对各试验数据采用 Duncan 法进行多重比较; 图表制作采用 Excel 2010。

2 结果与分析

2.1 种子发芽指标及方差分析结果

处理组合 I ($A_1B_1C_1$) 的最终发芽率最低 (图 1A), 平均只有 95.12%, 而处理组合 VII ($A_3B_1C_3$) 的平均发芽率最高, 平均可达 98.17%。在达到最终发芽率 50% 所需的时间 T_{50} 中, 处理组合 IV~VIII 显著低于其他 5 种处理组合 ($P < 0.05$) (图 1B)。引发后各处理的种苗长度均高于对照处理, 并且除处理组合 VIII 外其余处理均显著高于对照 ($P < 0.05$) (图 1C)。在种苗的活力指数中, 处理组合 IV~VII 高于其他引发处理, 处理 IV、V 和 VII 显著高于对照组 ($P < 0.05$) (图 1D)。除此之外, 引发还增加了组合 IV~VIII 的发芽速度, 处理组合 IV 显著高于对照 (图 1E)。综上, 引发加快了紫花苜蓿的发芽, 促进了紫花苜蓿种苗的生长, 增加了紫花苜蓿种苗的活力指数。

从方差分析表可知, A 因素即 PEG 浓度对紫

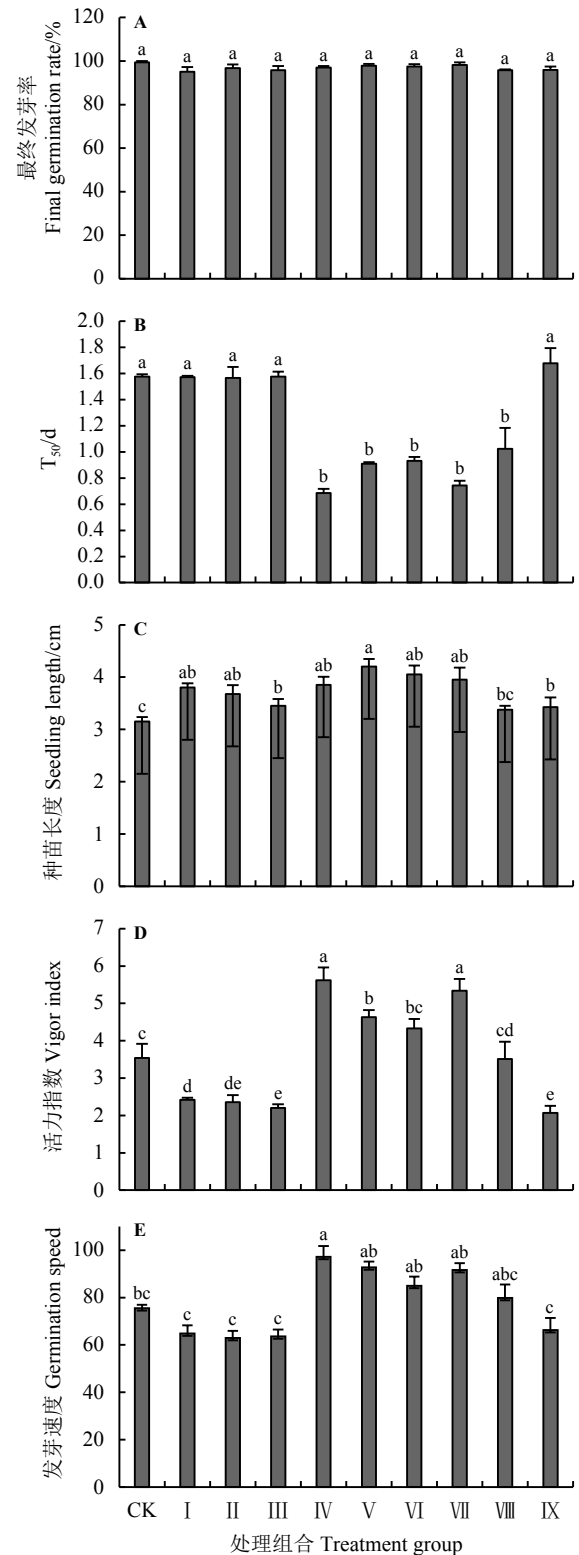


图 1 PEG 引发后紫花苜蓿种子的发芽指标

Figure 1 Germination index of alfalfa seeds after PEG priming

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P > 0.05$)。处理组合的简称同表 2。

Different lowercase letters indicate significant difference between the different treatment at the 0.05 level. The codes of treatments are same as those in Table 2.

花苜蓿种子的发芽速度有显著影响($P < 0.05$)(表 3), 而处理时间和处理温度对紫花苜蓿种子发芽速度则无显著影响($P > 0.05$)。PEG 浓度 A 的极差为 27.806, 处理时间 B 的极差为 12.927, 处理温度 C 的极差为 10.617 (表 4)。综上分析可判断, 3 种试验因素对紫花苜蓿发芽速度的影响程度大小依次为处理浓度、处理时间、处理温度。

表 3 方差分析表
Table 3 RANOVA table

变异来源 Source of variation	离均差平方和 SS	自由度 <i>df</i>	均方 MS	<i>F</i>	<i>P</i>
A	1 164.437	2	582.218	38.54	0.025
B	186.634	2	93.317	6.177	0.139
C	118.573	2	59.286	3.924	0.203
误差 Error	30.214	2	15.107		

在各试验因素水平中, PEG 浓度为 A₂ (10%) 时对紫花苜蓿种子的引发效果最好, 发芽速度达到 91.603; 处理时间 B₁ (12 h) 的效果最好, 发芽速度达到 84.527; 处理温度 C₃ (20 ℃) 的效果最好, 发芽速度达到 82.637 (表 4)。但由于 PEG 浓度对紫花苜蓿的发芽速度影响显著, 而处理时间和处理温度无显著影响, 因此, 在选择处理组合时 10% PEG 浓度作为组合指标优选之一, 与处理时间和处理温度组合后通过生理指标测定来进一步筛选优选组合。

表 4 紫花苜蓿正交试验结果表
Table 4 Results of orthogonal test

序号 Serial number	试验因素 Test factor	水平 Level	均数 Mean	极差 Range	95%置信区间 95% confidence interval	
					下限 Lower limit	上限 Upper limit
1	A	1	63.797	27.806	61.329	66.264
		2	91.603		76.298	106.909
		3	79.22		47.704	110.736
2	B	1	84.527	12.927	41.681	127.373
		2	78.493		41.352	115.634
		3	71.6		42.675	100.525
3	C	1	72.02	10.617	44.131	99.909
		2	79.963		37.459	122.468
		3	82.637		41.68	123.594

2.2 PEG 处理对 MDA、SOD、POD、CAT 酶活性的影响

为进一步比较优良组合, 根据 PEG 浓度对紫花苜蓿种子萌发的影响结果, 确定组合 IV、V、VI 进行 MDA 含量及 SOD、POD 和 CAT 酶活性的测定^[14]。结果表明, 处理 V (A₂B₂C₃) 紫花苜蓿种子 MDA 含量较少 (表 5), SOD 和 POD 酶的活性最高, 且 SOD 与 POD 酶的活性显著高于组合 IV (A₂B₁C₂) 和组合 VI (A₂B₃C₁) ($P < 0.05$), CAT 酶的活性也具有较高的水平。处理 IV 各指标次之, 处理 VI 相对较差。因此, 处理组合 V 为最优组合。

3 讨论与结论

在衡量种子活力时, 通常将种子的发芽指数与幼苗的生长势结合在一起, 种子的活力水平可以用活力指数来反映^[15]。种子活力受种子寿命、遗传因素、贮藏条件等因子影响, 可通过引发技术得到提高^[4, 10]。种子引发作为一种种子播前预处理技术, 常用于改善作物的田间表现^[16], 能提高逆境下的种子活力, 改善发芽和幼苗出土情况^[17-18]。

一般来说, 引发温度 15~25 ℃ 为大多数物种的最适温度。而在本研究所得出的最优引发方案中, 引发温度为 20 ℃ 便与此一致。研究表明, 在种子最适的萌发温度下对种子进行引发后, 引发效果最佳^[19]。引发效果受温度的影响, 随温度的降低而普遍下降, 甚至还可能会影响之后种子的萌

表 5 PEG 处理对紫花苜蓿种子 MDA 含量、SOD、POD 及 CAT 酶的活性的影响
Table 5 Effects of PEG treatment on the content of MDA, the activity of SOD, POD and CAT in alfalfa seeds

序号 Serial number	处理组合 Treatment	SOD/(U·mg ⁻¹)	POD/(U·mg ⁻¹)	CAT/(U·mg ⁻¹)	MDA/(nmol·mg ⁻¹)
对照 Control	对照 Control	535.45 ± 49.96c	284.65 ± 36.71c	34.34 ± 11.85c	445.97 ± 200.13a
IV	A ₂ B ₁ C ₂	1 767.83 ± 609.30b	1 457.11 ± 163.30b	621.07 ± 152.55a	153.46 ± 20.31b
V	A ₂ B ₂ C ₃	2 515.92 ± 531.31a	1 787.10 ± 191.09a	420.83 ± 160.84ab	147.39 ± 25.45b
VI	A ₂ B ₃ C ₁	1 526.98 ± 658.40b	1 426.97 ± 132.32b	177.54 ± 98.40b	126.17 ± 29.18b

同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)。
Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between different treatments at the 0.05 level.

发，而温度过高则会导致种子发生霉变^[20]。如瓜尔豆 (*Cyamopsis tetragonoloba*) 低温处理后发芽率仅为 2%^[21]。用 PEG-1000 引发大豆种子在较高温度 (17 ℃) 的溶液中容易发霉^[12]。

不同种子的最适引发时间也大都不同。例如在关于孜然 (*Cuminum cyminum*) 种子的研究中，用 PEG 引发 48 h 后显著提高了孜然种子的发芽性能^[22]；而在本研究中通过正交设计及 4 种酶活性的检测所筛选出来的最优组合的引发时间为 24 h。引发时间也同样是决定引发成败的关键。在引发沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) 的研究中表明，引发时间过长超过 72 h 出现负效应，过短效果则不显著^[23]。用 PEG 引发白三叶 (*Trifolium repens*) 时，引发时间为最长 72 h 时，显著缩短了 T_{50} ^[24]。

细胞抵御活性氧伤害保护酶系统的主要组成成分是 SOD、POD 和 CAT，对清除自由基和阻止自由基的形成方面具有重要的作用^[15]。在评价种子活力时，通常可以用种子内部对超氧自由基的清除能力来评价。在这一过程中，清除系统与许多酶如 SOD、POD 和 CAT 等保护酶密切相关。大量研究表明，引发能够提高种子的发芽率，加快种子的发芽速度，改善种子的抗逆性，增强 SOD 和 CAT 酶的表达和活性，从而增加作物的产量。种子在贮藏过程中导致种子活力下降和阻碍种子萌发的主要原因之一是膜脂过氧化所产生过量的活性氧。膜脂过氧化作用的主要产物是 MDA，其含量的高低可以反映出膜脂过氧化作用的程度^[25]。在覃柳燕等^[26]关于山豆根 (*Sophora tonkinensis*) 种子的研究中发现，在一定的范围内 SOD、POD 和 CAT 酶的活性越高，对种子组织的保护能力就越强。本研究结果表明，引发加快了种子的发芽速度，激活

了紫花苜蓿体内 SOD、POD 和 CAT 等保护酶的启动，增强了清除活性氧和自由基的能力，减轻了紫花苜蓿膜脂过氧化作用，有效地保护了紫花苜蓿的细胞膜系统，减少了影响种子萌发过程中带来的不利因素，提高了种子的活力。玉米 (*Zea mays*) 种子经过引发后能够快速萌发，具有更高的出苗指数、萌发速度、活力指数和幼苗活力，并且改善了根长、苗长以及幼苗的鲜重和干重^[27]。同时，引发作用能够增加光合色素、叶绿素 a/b，激活 SOD 和 APX 酶活性、增加脯氨酸、甜菜碱含量^[28]。小麦种子经 -0.9 MPa PEG 引发后，植株遇到干旱胁迫时生理指标均显示出优于未引发的植株，如相对增长率、产量、叶绿素 a/b、净光合速度、气孔导度等降低的程度较小，CAT、APX 和 GR 酶活性较高等^[29]。

本研究的最佳引发组合，即在温度为 20 ℃ 的条件下，浓度为 10% 的 PEG-6000 溶液中浸泡 24 h 后能显著提高紫花苜蓿的萌发速率，提高种子活力。

PEG 引发就是通过不同浓度的 PEG 调节溶液的渗透压来达到引发种子的目的，所以引发成败的关键在于选择适宜浓度的 PEG。最适浓度的 PEG 是能最大限度地水合而不让其发生可见的萌发^[12]。研究表明，不同 PEG 的浓度对引发的效果也存在着影响。对孜然种子的研究发现，用 7% PEG 引发的种子的最终发芽率显著高于用 9% PEG 引发的种子和未引发的种子。在 15 ℃ 下用 7% PEG 引发 2 d 的孜然种子增强了种子的耐旱性；在 9% PEG 引发的孜然种子则表现出对发芽率和发芽势的提高^[22]。用 PEG 引发 3 种老化大豆发芽时，20% 和 30% 的 PEG 的引发效果要高于 10% 的 PEG^[30]。

参考文献 References:

- [1] 毛培胜, 侯龙鱼, 王明亚. 中国北方牧草种子生产的限制因素和关键技术. 科学通报, 2016, 61(2): 250-260.
MAO P S, HOU L Y, WANG M Y. Limiting factors and key technologies for forage seed production in northern China. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2): 250-260.
- [2] 刘自学. 草种业现状与发展趋势. 西宁: 第四届中国草业大会论文集, 2016:347-348.
LIU Z X. Grass seed industry status and development trend. Xining: Proceedings of the 4th China Grass Industry Conference, 2016:347-348.
- [3] 王彦荣. 种子引发的研究现状. 草业学报, 2004, 13(4): 7-12.
WANG Y R. Research status of seed priming. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(4): 7-12.
- [4] HEYDECKER W, HIGGINS J, GULLIVER R L. Accelerated germination by osmoticseed treatment. Nature, 1973, 246: 42-44.
- [5] ROWSE H R. Drum priming non-srnotic method of priming seeds. Seed Science and Technology, 1996, 24: 281-294.
- [6] TAYLOR A G, KLEIN D E, WHITLOW T H. Solid matrix priming of seeds. Scientia Horticulturae, 1988, 37: 1-11.
- [7] CARPENTER W J, BOUCHER J F. Priming improves high-temperature germination of pansy seed. HortScience, 1991, 26: 541-544.
- [8] FAROOQ M, BASRA S M A, SALEEM B A, NAFEEES M, CHISHTI S A. Enhanceent of tomato seed germination and seedling vigor by osmopriming. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2005, 42(3/4): 36-41.
- [9] 闵丹丹, 范燕, 郭正刚, 胡小文. 紫花苜蓿种子水引发条件的优化. 草业科学, 2016, 33(4): 669-673.
MIN D D, FAN Y, GUO Z G, HU X W. Optimization of seed hydropriming condition of *Medicago sativa*. Pratacultural Science, 2016, 33(4): 669-673.
- [10] MCDONALD M B. Seed priming. // BLACK M, BEWLEY J D. (eds). Seed Technology and Its Biological Basis. UK: Sheffield Acad, 2000: 287-325.
- [11] 张晓艳, 李宇歌. PEG 渗透处理对老化种子活力的影响. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2005, 5(2): 50-52.
ZHANG X Y, LI Y G. Effect of PEG osmotic treatment on the vitality of aged seeds. Journal of Jilin Normal University (Natural Science), 2005, 5(2): 50-52.
- [12] 季鹏, 于靖, 张军林, 李焕宇, 吕婕. 聚乙二醇 (PEG) 引发种子的机制及最适引发条件的选择. 作物栽培, 2006(6): 18-20.
JI P, YU J, ZHANG J L, LI H Y, LYU J. Mechanism of priming seed with polyethylene glycol (PEG) and selection of optimum priming conditions. Crop Cultivation, 2006(6): 18-20.
- [13] 闵丹丹, 潘佳, 范燕, 王彦荣, 胡小文. 引发对种子萌发和幼苗生长特性的影响. 草业科学, 2016, 33(9): 1728-1738.
MIN D D, PAN J, FAN Y, WANG Y R, HU X W. Effect of priming on seed germination and seedling growth. Pratacultural Science, 2016, 33(9): 1728-1738.
- [14] 朴锦, 具红光. 正交设计优化 PEG 引发关苍术种子萌发的最优处理方案. 中国农学通报, 2015, 31(7): 138-142.
PIAO J, JU H G. The best treatment scheme of orthogonal design for optimizing the effects of seed soaking in PEG on germination percentage of *Atractylodes japonica* Koidz ex Kitam. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(7): 138-142.
- [15] 冯文新, 韩占芳, 王玉国, 李彩霞. 钙浸种对小麦幼苗保护酶活性及膜功能的影响. 麦类作物学报, 1997(3): 31-33.
FENG W X, HAN Z F, WANG Y G, LI C X. Effects of calcium soaking on the activity of protective enzymes and membrane function in wheat seedlings. Triticeae Crops, 1997(3): 31-33.
- [16] BRADFORD K J. Manipulation of seed water relations via osmotic priming to improve germination under stress conditions. Hort Science, 1986, 21: 1005-1112.
- [17] IBRAHIM E A. Seed priming to alleviate salinity stress in germinating seeds. Journal of Plant Physiology, 2016, 192: 38-46.
- [18] YU T, BO G, ZHOU D W. Responses of seed germination, seedling growth, and seed yield traits to seed pretreatment in maize (*Zea mays* L.). The Scientific World Journal, 2014(6): 1-8.

- [19] Hardegree S P. Optimization of seed priming treatments to increase low-temperature germination rate. *Journal of Range Management*, 1996, 49(1): 87-92.
- [20] 赵玥, 辛霞, 王宗礼, 卢新雄. 种子引发机理研究进展及牧草种子引发研究展望. *中国草地学报*, 2012, 34(3): 102-108.
ZHAO Y, XIN X, WANG Z L, LU X X. Research progress and progress and progress and prospects in the mechanism of seed priming. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(3): 102-108.
- [21] 郑光华. 种子生理学. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHENG G H. Seed Physiology. Beijing: Science Press, 2004.
- [22] RAHIMI. Seed priming improves the germination performance of cumin (*Cuminum syminum* L.) under temperature and water stres. *Industrial Crops & Products*, 2013, 42(1): 454-460.
- [23] 韩蕊莲, 候庆春, 邹厚远, 梁宗锁. 用 PEG“引发”沙打旺种子活力及抗逆性的研究. *草业科学*, 1993, 10(6): 60-63.
HAN R L, HOU Q C, ZOU H Y, LIANG Z S. Study of the vitality and resistance on PEG priming seed of *Astragalus adurgen*. *Pratacultural Science*, 1993, 10(6): 60-63.
- [24] GALHAUT L, DE LESPINAY A, WALKER D J, BERNAL M P, CORREAL E, LUTTS S. Seed priming of *Trifolium repens* L. improved germination and early seedling growth on heavy metal-contaminated soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225(4): 1905-3353.
- [25] 张燕, 方力, 吴业池, 冯永新, 姚照兵. PEG 浸种处理提高烟草种子活力的效应. *种子*, 2003(6): 26-29.
ZHANG Y, FANG L, WU Y C, FENG Y X, YAO Z B. Effect of soaking seeds with PEG on improving seed vigor of tobacco. *Seed*, 2003(6): 26-29.
- [26] 覃柳燕, 唐美琼, 梁莹, 李林轩, 缪剑华. 不同温度贮藏后山豆根种子酶活性与发芽率相关性研究. *种子*, 2011, 30(11): 8-10.
QIN L Y, TANG M Q, LIANG Y, LI L X, MIU J H. Study on the relationship between antioxidant enzymes activities and germination rate of *Sophora tonkinensis* Gagnep seed stored at different temperatures. *Seed*, 2011, 30(11): 8-10.
- [27] REHMAN H U, IQBAL H, BASRA S M A, IRFAN A, MUHAMMAD F, ABDUL W, WANG N. Seed priming improves early seedling vigor, growth and productivity of spring maize. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(9): 1745-1754.
- [28] LI X M, Zhang L H. SA and PEG-induced priming for water stress tolerance in rice seedling. // *Information Technology and Agricultural Engineering*. Springer, 2010.
- [29] MOHAMMAD A, ABDUL H, SHAO Y H. Seed osmopriming invokes stress memory against post-germinative drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 145: 12-20.
- [30] 王炜, 史雨刚, 王曙光. PEG 引发对老化大豆种子发芽及活力的影响. *山西农业科学*, 2011, 39(7): 650-654.
WANG W, SHI Y G, WANG S G. Effect of PEG on germination and seed vigor of aging soybean. *Journal of Shanxi Agricultural Science*, 2011, 39(7): 650-654.

(责任编辑 张瑾)