

刘淑霞,魏国江,孙宇峰,等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对4个紫花苜蓿品种生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(3):146-149.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.03.037

$^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对4个紫花苜蓿品种 生长及生理特性的影响

刘淑霞^{1,2}, 魏国江², 孙宇峰², 王广达¹, 韩如月¹, 郭梦桥², 王晓飞², 肖宇², 关向军², 郭永霞¹
(1. 黑龙江八一农垦大学,黑龙江大庆 163319; 2. 黑龙江省科学院大庆分院,黑龙江大庆 163319)

摘要:研究辐射技术在紫花苜蓿诱变育种上的应用,以 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照紫花苜蓿品种 WL319、斯贝德、巨能耐盐、龙牧 806 的种子,测量不同剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 对4个紫花苜蓿品种 M₁ 代的影响,结果表明,随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的增加,紫花苜蓿的发芽率、出苗率、株高、株干质量、株鲜质量都明显下降;叶绿素含量也呈现减少趋势;不同紫花苜蓿品种叶片中丙二醛(MDA)含量随着辐射剂量的增加呈现上升趋势;不同紫花苜蓿品种叶片中过氧化氢酶(CAT)活性随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的增加呈现先上升后下降的趋势,这为开展紫花苜蓿诱变育种奠定了理论基础。

关键词:紫花苜蓿; $^{60}\text{Co}-\gamma$;诱变育种;生理特性;形态指标

中图分类号: S541⁺10.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)03-0146-04

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)作为一种优良的豆科牧草,具有营养价值高、适口性好等特点,在全国各地被广泛种植^[1]。在紫花苜蓿长期的栽培种植历史进程中,人类不断地通过自然选择、天然杂交和人工杂交等手段丰富其品种类型,但变异性小,育种目标时间长、成本高。随着畜牧业的发展和人们对苜蓿育种目标的不断创新研究,辐射诱变育种尤其是 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 在辐射诱变育种中迫使紫花苜蓿自身的基因和染色体畸变,突变率高,可能创造出自然界没有的新类型概率也高,并逐渐被研究者采纳和利用,这种外界因素的作用有可能引起植物形态结构和生理生化等多方面的变异,可在较短的时间内培育出新品种^[2-5]。近年来,众多学者通过辐射农作物、观赏花卉、果树类、牧草类等筛选出了大量的优良品种,对 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射苜蓿的研究很多^[6-9],但是辐射后苜蓿生理生化发生的变化还未见系统报道,对今后开展辐射育种研究具有重要作用。本试验以 WL319、斯贝德、巨能耐盐、龙牧 806 成熟苜蓿种子为材料,开展不同剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐射处理,对4个紫花苜蓿品种的种子发芽率、幼苗生长、生理指标等开展研究,以期确定适宜紫花苜蓿辐射诱变的剂量范围,旨在为进一步开展紫花苜蓿辐射育种奠定理论基础。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

WL319、斯贝德、巨能耐盐、龙牧 806 苜蓿种子于 2016 年

收稿日期:2017-11-24

基金项目:黑龙江省基本科研业务费专项(编号:ZNBZ2017DQ03);

大庆市指导性科技计划项目(编号:ZD-2016-123)。

作者简介:刘淑霞(1982—),女,河南平顶山人,博士研究生,副研究员,主要从事植物抗逆生理方面的研究。E-mail:258426121@qq.com。

通信作者:郭永霞,博士,教授,主要从事植物生物技术方面的研究。

E-mail:gyxia@163.com。

10月初采自于黑龙江省大庆市星火牧场黑龙江省科学院大庆分院试验基地。

1.2 试验方法

1.2.1 种子辐射 由黑龙江省科学院技术物理研究所进行 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理,辐射剂量分别为 800、1 000、1 200、1 400、1 600 Gy,剂量率为 15 Gy/min,每份处理 500 g 种子;以同批次相同数量未经处理的种子作为对照。

1.2.2 种子处理 将不同剂量 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理后的紫花苜蓿种子用 40℃的蒸馏水浸泡 2 h,置于直径为 18.5 cm 且有 3 层定性滤纸的培养皿中,每个处理各 100 粒紫花苜蓿种子,每个处理重复 3 次,于 25℃恒温培养箱中培养,保持适当湿度。7 d 后统计紫花苜蓿种子的发芽率。

1.2.3 室内栽培种植 将辐射处理后的种子于 2017 年 5 月 10 日进行室内 Lenard 系统种植^[10]。每个塑料杯中种植预先准备的籽粒饱满大小一致的 10 粒苜蓿种子,每个处理种植 30 个塑料杯,全部生育过程都用 Fahraeus 无氮营养液^[11]进行种植。

1.2.4 形态指标及生理指标测定 出苗率:播种后每周统计不同处理的出苗情况,连续 4 周不再有出苗时终止。各处理以不再增加时的出苗率为最终出苗率。出苗率 = 出苗数/播种数 × 100%,出苗以子叶平展为标准。

株高:每个塑料杯随机选取具有代表性的 1 株植株,测定株高(蛭石至植株顶端垂直距离),共计取样 10 株。

干质量和鲜质量测定:在每个塑料杯中选取具有代表性的 2 株苜蓿,共计取样 20 株进行鲜草质量测定和干草质量测定。

叶绿素含量测定采用紫外分光光度法^[12];丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)反应法^[13];过氧化氢酶(CAT)活力测定采用紫外分光光度法^[14]。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 软件处理数据,SPSS 19.0 软件进行方差

分析及 Duncan's 新复极差法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种种子发芽率的影响

从表 1 可以看出,不同紫花苜蓿品种在 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射作用下,随着辐射剂量的增加,不同紫花苜蓿品种种子的发芽率均呈现下降的趋势。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理后,无论是高剂量处理还是低剂量处理不同苜蓿品种种子的发芽率均低于对照。WL319 在 800 Gy 辐射剂量下的发芽率与对照差异不显著,其他剂量下的发芽率与这两者均差异显著,1 000、1 200 Gy 剂

量下差异不显著,1 400、1 600 Gy 剂量下的发芽率与 1 000、1 200 Gy 剂量下的发芽率与这两者均差异显著。斯贝德在 0、800、1 000 Gy 下剂量差异不显著,1 200、1 400、1 600 Gy 剂量 0、800 Gy 剂量下的发芽率与差异显著,1 000、1 200 Gy 剂量间差异不显著。巨能耐盐 0 Gy 与 800 Gy 剂量下的发芽率与对照差异不显著,其他辐射剂量对 0、800 Gy 差异显著。龙牧 806 发芽率 0、800、1 000 Gy 剂量差异不显著,1 000 Gy 与 1 200 Gy 剂量间的发芽率差异不显著,1 200、1 400、1 600 Gy 剂量下的发芽率与 0、800 Gy 剂量下的发芽率差异显著。

表 1 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种种子发芽率的影响

辐射剂量 (Gy)	发芽率(%)			
	WL319	斯贝德	巨能耐盐	龙牧 806
0	100.00 ± 0.00a	97.19 ± 0.14a	100.00 ± 0.00a	98.87 ± 0.19a
800	96.17 ± 1.24a	95.43 ± 1.36a	96.25 ± 1.11a	96.16 ± 2.01a
1 000	87.15 ± 1.95b	89.26 ± 1.64ab	88.33 ± 2.45b	88.45 ± 2.07ab
1 200	80.34 ± 1.35b	76.54 ± 2.46b	75.12 ± 1.96c	80.29 ± 1.88b
1 400	70.32 ± 1.85c	60.11 ± 2.05c	63.13 ± 2.48d	65.34 ± 2.39c
1 600	54.19 ± 1.32d	48.22 ± 1.94d	51.46 ± 1.55e	52.17 ± 2.43d

注:表中数据为 3 次重复的“平均值 ± 标准差”,采用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性分析,同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。表 2、表 3 同。

2.2 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种种子出苗率的影响

种子出苗率是种子活力的直接表现,同时也可反映种子发芽以及正常破土生长的能力。由表 2 可知,不同 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量处理不同紫花苜蓿品种的种子对其出苗率具有不同程

度的影响。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理后,供试的 4 个品种(WL319、斯贝德、巨能耐盐、龙牧 806)的出苗情况均随着辐射剂量的增加而受到抑制,不同苜蓿品种随着辐射剂量的增加出苗率整体上显著下降。

表 2 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种种子出苗率的影响

辐射剂量 (Gy)	出苗率(%)			
	WL319	斯贝德	巨能耐盐	龙牧 806
0	100.00 ± 0.00a	96.22 ± 0.02a	100.00 ± 0.00a	98.14 ± 0.31a
800	94.23 ± 1.354a	94.27 ± 1.05a	94.33 ± 1.27b	97.00 ± 1.25a
1 000	86.46 ± 1.83b	88.05 ± 0.96ab	86.89 ± 1.02bc	89.89 ± 1.37b
1 200	80.31 ± 1.02b	76.44 ± 1.24b	77.45 ± 1.50c	85.43 ± 1.03bc
1 400	59.38 ± 1.75c	51.31 ± 1.07c	54.97 ± 1.43d	54.26 ± 1.86c
1 600	40.20 ± 1.09d	46.16 ± 1.58d	47.82 ± 1.51e	48.29 ± 1.01d

2.3 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种幼苗生长的影响

2.3.1 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理后对不同品种苜蓿幼苗株高的影响

$^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理后不同苜蓿幼苗的株高见表 3。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理对 4 个紫花苜蓿品种的株高生长均有不同程度的影响。800 Gy 辐射处理对 WL319、斯贝德、巨能耐盐、龙牧 806 等 4 个紫花苜蓿品种的幼苗生长具有促进生长的作用,与对照相比增高率分别为 8.19%、6.36%、9.11%、9.79%,但均与对照差异不显著。1 000、1 200、1 400、1 600 Gy 这 4 个辐射剂量对 4 个紫花苜蓿品种的幼苗生长均具有抑制作用;1 000 Gy 剂量下的抑制率分别为 9.35%、8.75%、5.66%、5.85%;1 200 Gy 剂量下的抑制率分别为 25.20%、24.57%、24.46%、22.58%;1 400 Gy 剂量下的抑制率分别为 40.56%、39.21%、35.29%、38.58%;1 600 Gy 剂量下的抑制率分别为 58.50%、73.55%、57.98%、59.29%。

2.3.2 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理后对不同品种苜蓿幼苗株鲜质量和株干质量的影响 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理对 4 个紫花苜蓿品种幼苗植株的鲜质量和干质量均有不同程度的影响,从表 3 可

以看出,800 Gy 辐射处理对 WL319、斯贝德、巨能耐盐、龙牧 806 等 4 个紫花苜蓿品种的幼苗株干质量和株鲜质量均具有促进作用。其余剂量处理之后,随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的增加,对 4 个紫花苜蓿品种的株鲜质量和株干质量抑制作用增加。但 0、800、1 000 Gy 3 个剂量对不同紫花苜蓿品种的株鲜质量和株干质量的影响差异不显著。1 200、1 400、1 600 Gy 辐射剂量处理与 0、800、1 000 Gy 辐射剂量处理对各紫花苜蓿品种的影响均存在显著性差异。

2.4 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种叶绿素含量的影响

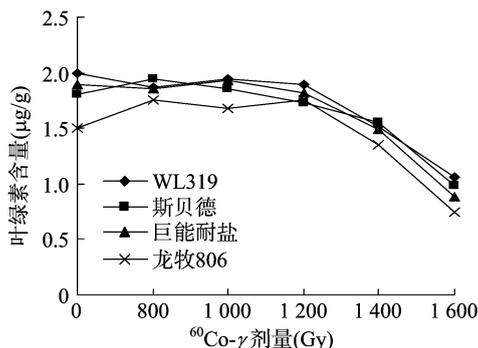
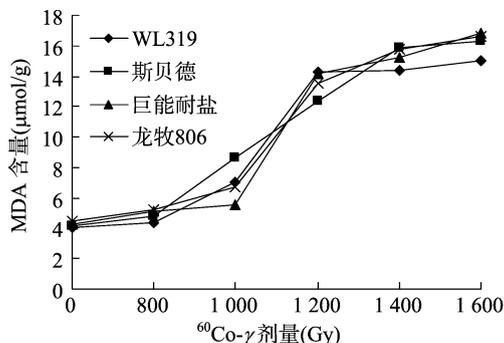
从图 1 可以看出,随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的增大,各个紫花苜蓿品种的叶绿素含量逐渐降低。当 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量超过 1 600 Gy 后,4 个紫花苜蓿品种的叶绿素含量降低明显,降幅均达 45% 以上,其中巨能耐盐的降低幅度达到了 53.16%。

2.5 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种生理特性的影响

2.5.1 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种叶片中 MDA 含量的影响 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对紫花苜蓿膜脂过氧化水平的影响见图 2,4 个紫花苜蓿品种的 MDA 含量随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的

表3 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种幼苗生长形态指标的影响

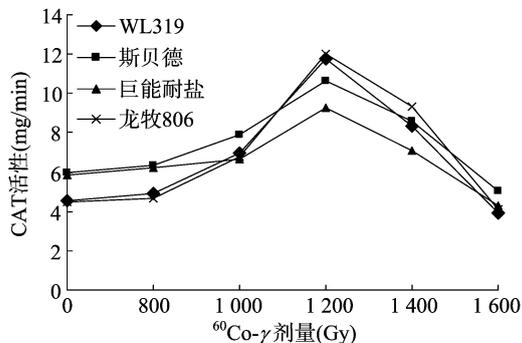
品种	辐射剂量 (Gy)	株高 (cm)	株鲜质量 (g)	株干质量 (g)
WL319	0	22.34 ± 1.06a	2.64 ± 0.35a	0.69 ± 0.09a
	800	24.17 ± 1.11a	2.86 ± 0.07a	0.71 ± 0.13a
	1 000	20.25 ± 1.20a	2.41 ± 0.24a	0.58 ± 0.06a
	1 200	16.71 ± 1.14b	1.96 ± 0.10b	0.51 ± 0.05b
	1 400	13.28 ± 1.05c	1.57 ± 0.23c	0.42 ± 0.06c
	1 600	9.27 ± 1.22d	1.08 ± 0.09d	0.29 ± 0.02d
斯贝德	0	23.44 ± 1.43a	2.73 ± 0.06a	0.71 ± 0.09a
	800	24.93 ± 1.08a	2.93 ± 0.05a	0.75 ± 0.24a
	1 000	21.39 ± 1.06a	2.46 ± 0.42a	0.68 ± 0.07a
	1 200	17.68 ± 1.54b	2.09 ± 0.09b	0.57 ± 0.08b
	1 400	14.25 ± 1.32c	1.67 ± 0.01c	0.42 ± 0.02c
	1 600	6.20 ± 1.09d	1.08 ± 0.06d	0.30 ± 0.04d
巨能耐盐	0	22.61 ± 0.52a	2.78 ± 0.09a	0.75 ± 0.13a
	800	24.67 ± 1.23a	2.82 ± 0.25a	0.79 ± 0.11a
	1 000	21.33 ± 1.62a	2.52 ± 0.57a	0.65 ± 0.10a
	1 200	17.08 ± 1.08b	2.13 ± 0.44b	0.50 ± 0.09b
	1 400	14.63 ± 1.25c	1.71 ± 0.23c	0.43 ± 0.02b
	1 600	9.50 ± 1.07d	1.02 ± 0.17d	0.28 ± 0.07c
龙牧 806	0	22.06 ± 1.16a	2.61 ± 0.39a	0.64 ± 0.06a
	800	24.22 ± 1.24a	2.88 ± 0.18a	0.72 ± 0.05a
	1 000	20.77 ± 1.20a	2.47 ± 0.29a	0.63 ± 0.09a
	1 200	17.08 ± 1.37b	2.03 ± 0.35b	0.48 ± 0.03b
	1 400	13.55 ± 0.21c	1.67 ± 0.37c	0.40 ± 0.06c
	1 600	8.98 ± 1.26d	1.09 ± 0.24d	0.27 ± 0.01d

图1 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种叶绿素含量的影响图2 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种叶片中 MDA 含量的影响

增加而升高,但不同的紫花苜蓿品种 MDA 含量变化存在明显差异。巨能耐盐苜蓿中 MDA 含量增加幅度明显高于其他 3 个紫花苜蓿品种,在 1 600 Gy $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射水平下,巨能耐盐苜蓿品种的 MDA 含量比对照增加了 296.69%,而 WL319、

斯贝德、龙牧 806 的增幅分别为 272.95%、288.76%、267.85%。表明巨能耐盐紫花苜蓿品种的膜脂过氧化水平最高,受害程度最严重,抗性最弱;而龙牧 806 紫花苜蓿品种 MDA 含量的增幅最小,抗性最强。

2.5.2 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种叶片中 CAT 活性的影响 从图 3 可以看出,4 个紫花苜蓿品种的 CAT 活性随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的增加均呈现先升后降的趋势,但不同紫花苜蓿品种随浓度变化的趋势不同。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量为 1 200 Gy 时,WL319、斯贝德、巨能耐盐、龙牧 806 的 CAT 活性均达到峰值,分别比对照增加了 160.84%、78.43%、58.56%、165.63%。之后随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的增加,CAT 活性出现下降趋势。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量为 1 600 Gy 时,巨能耐盐紫花苜蓿品种的 CAT 活性降低了 89.97%,斯贝德 CAT 活性降低 86.89%,WL319 的 CAT 活性降低 64.42%,龙牧 806 紫花苜蓿品种的 CAT 活性降幅最小,为 63.28%。由此可以看出, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理剂量较大时,紫花苜蓿 CAT 活性受到了抑制,清除活性氧能力下降,生长受到抑制。从 CAT 活性的变化来看,高剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理下 4 个紫花苜蓿品种中龙牧 806 紫花苜蓿品种的 CAT 活性降幅最小,受伤程度最小,巨能耐盐品种受伤程度最大。

图3 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种叶片中 CAT 活性的影响

3 结论与讨论

3.1 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种生长量的影响

植物在受到外来刺激后,一般会出现一系列的生物学效应,紫花苜蓿的生长状况是紫花苜蓿经辐射后生物学效应的重要参考指标。苜蓿生长发育可作为辐射等刺激处理后种子活力的指标之一。众多学者研究表明,通过辐射能引起植物的形态指标发生改变,通常低剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理发生突变或者畸形的频率低,不能达到预期的效果,但能改变植物的信号传导。次生代谢产物的合成,植物体内的应急反应系统发生改变使其更好地抵御 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射带来的刺激^[15-17]。本试验中紫花苜蓿在受到 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理后,不同紫花苜蓿品种的发芽率、出苗率、株高、干质量、鲜质量都显著下降,这可能是 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理对紫花苜蓿均有不同程度的损害,抑制苗株高、出苗率、干物质积累等。李瑜等研究发现, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量在 100 Gy 时可抑制桂花的株高、干物质的积累和出苗率^[18],本研究的结论与之一致。Zaka 等的研究表明,大于 6 Gy 的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量就能严重影响豌豆的生长^[19]。由此可以看出,不同植物种类对于 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射的敏感性有很大差异,这可能是植物本身基因组差异有关。

3.2 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种光合色素的影响

本试验中不同紫花苜蓿品种在受到 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理时,随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的增大,不同紫花苜蓿品种叶绿素含量逐渐降低,在此过程中,紫花苜蓿在 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射作用下均抑制叶绿素的产生,这一结果与李瑜等的研究结论^[18]一致。相关学者认为, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射抑制紫花苜蓿中叶绿素的产生,可能是 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射引起了紫花苜蓿自身类囊体的扩张,阻碍了紫花苜蓿叶内同化产物的运转及叶绿素的合成,改变光合作用过程,进而对紫花苜蓿品种起到保护作用。

3.3 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种酶活性的影响

在受到不良外界因素刺激时,植物本身的抗氧化剂和抗氧化酶能有效清除活性氧的毒害,调节植物正常生理生化过程,维持植物自身细胞内氧化还原平衡。本试验中紫花苜蓿叶片中MDA的含量随着 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量的增加而提高。高剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射使紫花苜蓿的膜脂过氧化程度发生变化,MDA的含量增加。低剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射CAT的活性先上升出现自我保护现象,高剂量辐射时,CAT活性下降,CAT活性受到了抑制,清除活性氧能力下降,生长受到抑制。本试验结果与李瑜等研究桂花、Vandenhove等研究拟南芥等得出的结论^[18,20]一致。

3.4 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对不同紫花苜蓿品种敏感性的影响

不同植物种子的品种特性、生理状态不同,在受到外界刺激后作出的应急反应也不尽相同。不同紫花苜蓿品种在受到 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理后,种子自身在生长发育过程中生理状态也会发生变化^[21-22]。一般情况下, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量越大,植物出现变异的概率会加大,出苗率会下降;相反 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射剂量过小,植物材料受到外界的影响和刺激就小,出现变异的概率就会降低,从而不能达到 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射处理预期的目标。因此,在辐射育种中剂量的选择尤为重要。本试验参照前人的研究结果^[23-24],并根据实际情况选择了 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射范围为800~1600 Gy的辐射剂量,本试验结果表明,大于1400 Gy的辐射剂量不同紫花苜蓿品种的出苗率约为50%。在实际应用中,可根据紫花苜蓿种子的成熟度、清洁度、含水量等指标的不同及试验目标对辐射剂量进行相应的调整。

参考文献:

[1] 王伟,王岩,赵天宏,等. 刈割对UV-B辐射增强下紫花苜蓿光合及荧光特性的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(7):1721-1729.

[2] 刘天增,谢新春,张巨明. 海滨雀稗 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射诱变突变体筛选[J]. 草业学报,2017,26(7):62-70.

[3] 刘艳芝,徐祥文,王淑霞,等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线对山药零余子的辐射效应[J]. 山东农业科学,2016,48(4):54-56,60.

[4] 秦献泉,徐宁,朱建华,等. 荔枝枝条辐射生物学效应研究初报[J]. 种子,2016,35(7):5-9.

[5] 李伟,吴超,李正和,等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对香软型水稻品种‘滇屯502’的诱变效应[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2016,31(1):7-15.

[6] 汪航. 三种羊蹄甲SRAP亲缘关系分析及羊蹄甲的辐射诱变

育种初探[D]. 广州:华南农业大学,2016.

[7] 王伟,赵艺欣,郭书嫻,等. UV-B辐射增强对紫花苜蓿光合特性及膜脂过氧化的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):324-327.

[8] Shen X H. Effects of mutagens on antioxidant enzymes activity and cold resistance of alfalfa[J]. Agricultural Science and Technology, 2017,9:2-5.

[9] 王伟,王岩,梁变变,等. 初花期喷镧对UV-B辐射增强下紫花苜蓿光合及荧光特性的影响[J]. 中国农业气象,2017,38(4):230-239.

[10] 杨青川,康俊梅,张铁军,等. 苜蓿种质资源的分布、育种与利用[J]. 科学通报,2016,61(2):261-270.

[11] Trung B C, Yoshida S. Improvement of leonard jar assembly for screening of effective rhizobium[J]. Soil Science and Plant Nutrition,1983,29(1):97-100.

[12] 庞丹波,李生宝,潘占兵,等. 紫花苜蓿引种试验初报[J]. 河南农业科学,2015,44(7):143-147.

[13] 赵萌,魏小红. 吸胀冷害下外源NO对紫花苜蓿种子萌发及抗氧化性的影响[J]. 草业学报,2015,24(4):87-94.

[14] 徐海鹏,李慧萍,金小煜,等. 草地早熟禾愈伤组织对NaCl胁迫的生理响应[J]. 草业科学,2016,33(1):86-92.

[15] El-Sharkawy M S, El-Beshbeshey T R, Mahmoud E K, et al. Response of alfalfa under salt stress to the application of potassium sulfate nanoparticles[J]. American Journal of Plant Sciences,2017,8(8):1751.

[16] 耿兴敏,王良桂,李娜,等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对桂花种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 核农学报,2016,30(2):216-223.

[17] Gu Q, Chen Z P, Cui W, et al. Methane alleviates alfalfa cadmium toxicity via decreasing cadmium accumulation and reestablishing glutathione homeostasis[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2018,147:861-871.

[18] 李瑜,王萍,耿兴敏,等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对桂花幼苗生长及生理指标的影响[J]. 西北农业学报,2017,26(1):61-69.

[19] Zaka R, Chenal C, Missel M T. Effects of low doses of short-term gamma irradiation on growth and development through two generations of *Pisum sativum*[J]. Science of the Total Environment, 2004,320(2):121-129.

[20] Vandenhove H, Vanhoudt N, Cuypers A, et al. Life-cycle chronic gamma exposure of *Arabidopsis thaliana* induces growth effects but no discernable effects on oxidative stress pathways[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2010,48(9):778-786.

[21] El-Sharkawy M, El-Beshbeshey T, Al-Shal R, et al. Effect of plant growth stimulants on alfalfa response to salt stress[J]. Agricultural Sciences,2017,8(4):267.

[22] 蔡智才,毕华兴,许华森,等. 晋西黄土区苹果花生间作系统光合有效辐射及其对花生生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(4):51-58.

[23] 李波,李祥莉,赵宇佳,等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线对无芒雀麦种子的辐照效应[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2017,32(5):756-761.

[24] 徐佳琦,戚嘉敏,朱雯,等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照对洋紫荆种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 林业与环境科学,2016,32(5):58-62.