

芽用豆科作物的辐射敏感性研究进展

肖伶俐, 康玉凡

(中国农业大学 农学与生物技术学院, 北京 100193)

摘要:芽菜专用豆科作物优良品种的缺乏已成为制约我国现代芽菜产业快速发展的瓶颈。辐射诱变具有安全简便经济、突变频率高、变异性状稳定早等特点,可缩短育种年限,创造新的基因型,是现代作物育种的重要方法之一;作物辐射敏感性评价研究,是辐射育种的前提和基础,对芽用豆科作物辐射敏感性的研究有助于提高辐射育种的效率。文章从大豆、绿豆、蚕豆、豌豆、小豆、苜蓿、花生等芽用豆科作物辐射敏感性评定指标(当代植株生长发育、农艺性状、生理生化特性、细胞及遗传物质变化等)、品种间辐射敏感性强弱、辐射敏感性的分析方法、品种间辐射敏感性差异机制的研究进展以及运用芽用豆科作物辐射敏感性对辐射处理方法进行改进方面进行了阐述,并对芽用豆科作物辐射敏感性研究前景进行了探讨,以期对芽用豆科作物的辐射育种提供理论与技术支持。

关键词:芽用豆科作物;辐射敏感性;辐照剂量

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2011)-0511-07

Research Progress on the Radiosensitivity of Legume Crops for Sprouting

XIAO Ling-li, KANG Yu-fan

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: The lack of good legume crops for sprouting has become the choke point of the rapid developing of sprout industry in China. Irradiation breeding is an important breeding method. Besides safe, convenient, and economic, radiation mutation could cause high mutation frequency and make the mutative traits stable early. So it can shorten breeding time and create new genotype. Mutation breeding is an effective method in selecting and breeding legume crop varieties for sprouting. Radiosensitivity research is the premise and foundation of irradiation breeding. Radiosensitivity research of legume crops for sprouting could improve its breeding efficiency. This paper stated the research progress of the radiosensitivity indexes, radiosensitivity differences among varieties, the analyse method of radiosensitivity, the mechanism of radiosensitivity among varieties, and the improvement of radiation treatment method. This paper also discussed the research prospect of radiosensitivity of legume crops for sprouting so that can provide the theoretical and technical support of irradiation breeding for legume crops that good for sprouting.

Key words: Legume crops for sprouting; Radiosensitivity; Radiation dose

豆科作物种子是非常好的植物性蛋白来源,发芽后形成的芽菜不仅口感鲜嫩,色泽美观,而且由于种子中贮藏物质分解,氨基酸、核黄素、胡萝卜素、维生素C等营养成分增加,抗营养因子减少,营养价值更胜一筹,具有抗衰老、预防消化道癌症和心血管病变、清除血管壁中胆固醇和脂肪的堆积等多种保健功能^[1],因此,大豆芽、绿豆芽、蚕豆芽、花生芽、苜蓿芽、豌豆苗、小豆苗等豆科作物芽菜日益受到消费者亲睐。随着经济的发展,传统的芽菜生产方式也已逐步被机械化、自动化、工厂化的现代芽菜生产方式所取代,芽菜产业呈现快速发展态势^[2]。然而目前芽菜专

用的芽用豆科作物优良品种却鲜有报道^[2-3],芽用豆科作物品种的缺乏已成为我国现代芽菜产业发展的瓶颈。

近年来,尽管科学技术的发展使得基因工程育种成为作物育种的研究热点,但辐射诱变育种方法因其安全简便经济,且具有突变频率高、变异性状稳定早等特点,可以缩短育种年限,创造新的基因型,仍是作物育种的重要方法之一。辐射敏感性是评定作物对辐射作用的重要指标,亦是选用辐照亲本、确定诱变因素和剂量以及处理方法的依据^[4-5]。对芽用豆科作物辐射敏感性的研究和认识有助于提高其辐射育种的效率。

收稿日期:2011-03-22

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(nyhyzx07-017)。

第一作者简介:肖伶俐(1986-),女,硕士,研究方向为种子科学与工程。E-mail: xiaolingli0512@163.com。

通讯作者:康玉凡(1963-),女,教授,博士,主要从事豆类芽豆种质资源评价、食用豆加工产品、现代芽菜产业发展的理论与技术等方面的教学和研究工作。E-mail: yfkang@cau.edu.cn。

1 芽用豆科作物辐射敏感性评定指标

芽用豆科作物辐射敏感性的衡量需要用特定的指标,目前较多的是以当代植株生长的抑制、细胞学及生理生化方面的变化来衡量。

1.1 当代植株生长抑制及性状指标

辐射对芽用豆科作物的整个生长阶段都有影响,主要表现为生长受抑制、生育期延迟、形态变异、育性及存活率下降,进而产量下降,其受影响程度与辐照的剂量和品种材料的敏感性有关。

1.1.1 植株性状 辐照后,芽用豆科作物的植株在形态上,会出现叶片缺绿、卷缩、扭曲茎、多主茎、嵌合体等各种变异,成株率也会因辐照后的抑制作用明显下降^[6];在育性上,随射线剂量的增加,育性下降,不育率随之增高,且品种间差异显著^[7-9];在农艺性状上,除百粒重和全生育期有所增加外,株高、茎粗、结荚高度、单株荚数、单株粒数和单株产量都有较大幅度的降低^[9]。植株性状中,株高、成株率、育性不仅测定相对简单,而且能较好地反映芽用豆科作物的辐射敏感性。

此外,郭房庆等^[10]发现大豆结瘤状况对辐射处理也十分敏感,辐射在抑制结瘤数量的同时使单瘤重增加,且这2种现象随剂量的增加更为明显。豆科作物能与根瘤菌共生结瘤固氮,将根系结瘤情况作为辐射敏感性的测定指标,其完善的测定方法及对其它芽用豆科作物辐射敏感性的指示作用有待进一步研究。

1.1.2 种子发芽特性与幼苗性状 由于成株性状测定周期长,受田间环境影响大,而种子发芽及幼苗生长观察周期短,条件更易控制,因此很多学者用种子发芽及幼苗性状以快速评定辐射敏感性。

日本山县弘忠等认为种子萌发时胚芽的伸长主要是细胞伸长,因此种子发芽受射线影响不大^[11]。而目前在大豆、豌豆、苜蓿等芽用豆科作物研究中也发现,发芽率与出苗率的半致死剂量远大于成株率的半致死剂量^[7,12-14]。因此在研究芽用豆科作物品种间的辐射敏感性时,不以发芽与出苗率作为评定敏感性的指标。

相对于发芽率和出苗率,辐照对种子活力、出苗时间、幼苗形态及幼苗存活率有更大影响。随着辐照剂量的增加,种子在发芽后根与胚轴的伸长会受到不同程度的抑制,出苗时间延长,子叶出土后不断变厚变大,真叶长出的时间变长,生长缓慢或停止生长,影响苗高和幼苗存活率^[7]。

用以反映辐射生物学效应的种子发芽特性主

要有根长、芽长及以根长或芽长表示生长势的种子活力指数^[15-17]。由于根比芽对辐射更为敏感,用根做指标更为适宜^[15]。而同样以根为指标,苜蓿品种用根长的 HD_{50} (半致矮剂量)和以根长表示生长势的 VID_{50} (使活力下降50%的剂量)为指标,品种间的辐射敏感性顺序不同^[13]。林音等^[15]将以根长表示生长势的 VID_{50} 作为种子植物的适宜诱变剂量,评定辐射敏感性。

用以反映芽用豆科作物的辐射生物学效应的幼苗性状指标主要有:苗高、初生叶面积、初生叶片斑点数、幼苗干物质重等。苗期辐射损伤通常用苗高来评定。但芽用豆科作物幼苗顶端被若干叶片覆盖,相对于单子叶植物,较难以精确测定苗高。*Muszynski*^[18]曾用辐照当代苗高的降低、初生叶片的变小和初生叶面斑点的增加3个方面评定辐射对大豆和红小豆的辐射敏感性,认为初生叶片的变小和初生叶面斑点的增加是判断辐射损伤较好的方法,而叶片斑点法是这3种方法中最好的测定豆类作物辐射损伤的方法。事实上,早在1961年,*Rudolf*就已发现菜豆经辐照后叶片出现斑点,*Blixt*进而提出叶片斑点法并用于测定豌豆的辐射效应,*Muszynski*于1979年将此法用于测定大豆的辐射效应并加以完善,尤其适用于豆科作物的敏感性研究^[17-18]。

辐照也会影响幼苗的干物质重积累,除低剂量会使幼苗干物质重略有增加外,随着辐照剂量的增加,幼苗的干物质重逐渐降低^[11,19]。

1.2 细胞学指标

在研究芽用豆科作物辐射敏感性的细胞学指标中,运用较多的是根尖细胞染色体畸变率、微核细胞率及细胞有丝分裂指数。射线会使作为遗传物质载体的染色体发生各种畸变,影响细胞的正常分裂;微核是在高剂量辐射状态下由染色体演化而来的,*Evans*等于20世纪70年代初提出微核是衡量辐射对染色体损伤的可靠指标^[20]。研究表明,随着辐照剂量的增大,微核细胞率与染色体畸变率升高,有丝分裂指数下降^[21-23]。但已在蚕豆中发现剂量的增加超出一定范围后,染色体畸变率继续增加而微核细胞率开始下降^[24]。同时在蚕豆中发现同一剂量下根尖染色体畸变率与微核细胞率随着剂量率的增加略有升高^[25]。对芽用豆科作物品种间的辐射敏感性研究表明,在相同照射条件下,辐射敏感性愈高的品种,其染色体畸变率和微核细胞率愈高,且染色体畸变与生长抑制呈显著正相关^[23,26-27]。*陈光*等认为⁶⁰Co- γ 射线引起的大豆 M_1

代植株形态上辐射损伤效应的出现,是受细胞染色体畸变的影响,Burnham 等^[27]也指出, M_1 的不育性主要是由于染色体的缺失和易位引起的。

1.3 生理生化指标

随着放射生物学的发展,人们发现辐射毒素和相应酶系的活性等生理生化指标也可反映作物辐射敏感性。

1.3.1 自由基含量 电离辐射使生物大分子和周围的介质分子发生电离和激发而产生自由基,导致生物分子与细胞结构的氧化或过氧化,从而引起生命活动的紊乱或终止^[28]。康玉凡等^[21]研究发现,随着照射剂量的增加,自由基相对含量增加的趋势越快,苜蓿品种的辐射敏感性越强。李贤勇等^[28]发现在 γ 射线作用后大豆长半衰期自由基的产量随着 γ 射线的剂量变化,近似直线上升。

1.3.2 各类酶系的活性 研究表明,辐射对芽用豆科作物 M_1 代幼苗体内的保护酶的活性存在影响。宋道军等^[28-29]发现用 γ 射线辐照对大豆幼苗超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性的影响是随着剂量的增加,先上升后下降,认为低剂量辐照对SOD和CAT有激活和促进合成作用,从而刺激其活性增大,而高剂量对其活性起抑制作用。抗氧化酶系的活性存在一个阈值,SOD、CAT等酶对膜系统的保护作用是有一定限度的^[30],是否可以用其峰值出现的剂量大小来评定辐射敏感性,尚待进一步研究。

过氧化物酶(POD)一方面能有效清除对细胞具有毒害作用的 H_2O_2 ,减少辐射对细胞的损害,另一方面会促使被照射植物组织中的邻苯二酚生成醌型的生物活性化合物,即为植物放射病的主要辐射毒素之一^[31]。同时POD对植物的生长有抑制作用,这与细胞中IAA被氧化,减慢生长速度有关^[32],马鹤林等^[13]认为这也是辐射处理后植株生长受抑制的原因。同一植物体内随辐照剂量的增加过氧化物酶活性升高,过氧化物酶同工酶谱中酶带颜色变深,酶带变宽和出现新酶带^[13-14]。然而对不同敏感性植物体内POD活性的差异不同学者看法不一。前苏联学者МаГоМеДов等曾测定了包括蚕豆、豌豆在内的9种不同辐射敏感性作物POD活化系数,发现植物敏感性越大,活化系数越高^[31]。马鹤林等^[33]研究发现辐射迟钝型苜蓿品种的POD活性大于敏感型,苜蓿芽的过氧化物酶活性随辐射剂量的加大而加强。各种芽用豆科作物品种间辐射敏感性差异与幼苗POD活性的关系有待进一步研究。

关于其它酶类的研究,何丽玫等^[34]发现 $^{60}Co-\gamma$ 射线250~350 Gy处理均对大豆三叶期酯酶同工酶分子结构产生了辐射效应,剂量越大辐射效应愈明显,并与幼苗表型研究的辐射敏感性结果相符,认为酯酶同工酶也可作为研究大豆辐射生物学效应的生化标志之一。但冯志杰等^[35]在小麦上并未观察到辐射引起酯酶同工酶的变化,认为酯酶同工酶不能作为研究辐射敏感性的依据。除大豆外,芽用豆科作物酯酶同工酶与辐射敏感性的关系尚未见报道,有待进一步研究。

1.3.3 膜脂过氧化程度 辐射引起活性氧等有害物质的增加,在调节植物体抗氧化系统的同时,还通过一系列反应促进膜质过氧化。宋道军等^[36]研究表明,大豆幼苗的细胞膜透性(电解渗透率Sr)、脯氨酸(Pro)含量以及丙二醛(MDA)浓度随辐照剂量的增大而增大。而芽用豆科作物不同辐射敏感性品种膜脂过氧化程度的差异尚待进一步研究。

1.3.4 光合生理 研究表明,辐照会对芽用豆科作物 M_1 植株的光合生理产生影响。刘琼英等^[16]通过对大豆、绿豆、红豆、眉豆、花生5种芽用豆科作物种子辐照后的 M_1 幼苗研究认为叶片叶绿素a、b、(a+b)含量的减少及叶绿素a/b比值的增加可作为评价及鉴别种子或幼苗的辐射敏感性可靠的生理生化指标。何莉等^[37]发现 $^{60}Co-\gamma$ 射线辐照蚕豆种子对 M_1 植株的光合生理有明显影响,不同剂量对 M_1 始花期叶片光合速率日变化规律各有不同,而分枝期、现蕾期和开花期叶片叶绿素含量随照射剂量的增加而增大。申慧芳等^[38]发现低剂量辐照处理能够明显提高红小豆苗期叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总量以及净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO_2 浓度,而高剂量则起到相应的抑制作用,认为受影响程度大的品种辐射敏感性大。

1.4 其它生物学效应

关于辐照对芽用豆科作物的其它生物学效应,马飞等^[39]研究发现,绿豆种子经辐照后生物超弱发光强度随着剂量增大而提高,种子的剂量/发光强度响应能动态地反映出种子的辐射敏感性,具有灵敏、快速和能无损检测等优点,因此建议将测试种子辐射诱导生物发光的方法运用于种子辐射敏感性研究。李贤勇等^[28]发现大豆幼苗经辐照后下胚轴细胞DNA和膜脂都出现了异常合成,合成率随 γ 射线剂量增加先上升后下降,其峰值在 $LD_{50/20}$ (幼苗受辐照后培养20 d的半致死剂量)处。宋道军等^[11,40]研究发现大豆种子经辐照后,幼苗DNA及RNA含量随辐照剂量增加而增加;大豆幼苗中IAA

含量除低剂量辐照略有增加外,会随着辐照剂量的增加含量迅速降低。而这些指标在不同芽用豆科作物中以及不同辐射敏感性品种间的差异如何,是否可以作为辐射敏感性的指标尚待进一步研究。

2 芽用豆科作物品种间敏感性强弱

对一些芽用豆科作物的研究表明:杂合基因型品种材料敏感性强,农家品种敏感性低,野生种敏感性最低。余章清^[6]研究发现由 M_1 植株成活率反映的大豆辐射敏感性强弱依次为:杂交非纯系杂种 > 杂交育成之纯系品系 > 杂交育成之纯系品种 > 农家品种。马鹤林等^[33] 研究表明苜蓿辐射敏感性强弱为:育成品种 > 地方品种 > 野生种。Al-Rubeai 通过对 2 个野生和 2 个栽培种菜豆的辐射敏感性研究,不仅观察到不同种间的差异,还发现野生种较栽培种耐辐射,认为同一物种不同类型间的敏感性差异与进化程度有一定关系^[5,26]。对于突变品种与非人工突变品种的敏感性强弱,在芽用豆科作物上研究较少。郭房庆等^[10] 发现大豆 Bragg 2 个用化学诱变法选育成功的超结瘤突变系品种的辐射敏感性显著高于 Bragg。而在小麦上已发现辐射突变品种较耐辐射^[35]。这是由于突变品种诱变育成因素不同抑或作物不同还是突变品种不同基因型敏感性差别较大无法与非突变品种比较辐射敏感性,尚待进一步研究。

对于同一品种,已有的研究表明,植物在不同生育时期或不同生理状态及细胞的不同时期的辐射敏感性存在差异^[5],而研究芽用豆科作物不同生理状态和生育时期的敏感性,对于辐照处理方法的改进有重要意义。邱庆树等^[41] 对花生不同生育时期的研究发现辐射敏感性强弱为:幼苗植株 > 花针期植株 > 催芽种子 > 结果期植株 > 湿种子 > 干种子;对不同发芽时间及不同泡种时间的研究发现, M_1 植株生理损伤基本为萌发后 9 h 辐照处理 > 萌发后 6 h 辐照处理 > 萌发后 12 h 辐照处理,在泡种 0.5~2 h 内随泡种时间的延长 M_1 植株生理损伤加重。此外,同一植物的不同器官、组织和细胞间的辐射敏感性也存在差异^[5,17]。

3 芽用豆科作物辐射敏感性分析方法

当前在芽用豆科作物辐射敏感性的研究方法上,主要分 2 种,一是严格控制植物照射剂量及照射前后条件,对各指标体现的生物辐射损伤的程度进行辐射敏感性和适宜辐射剂量的研究^[19,23,38,],二

是运用数学方法,定量描述射线剂量与辐射损伤之间的关系,据此确定适宜辐射剂量和品种间的辐射敏感性。辐射敏感性的剂量效应模型主要有多靶多击模型、多靶单击模型、Chadwick-Leenhouts 模型等^[5]。在芽用豆科作物中应用较多的是多靶单击模型以及根据射线剂量与生物辐射损伤之间的关系进行回归分析得出的拟合方程,进而得出适宜辐射剂量和敏感性参数或回归系数,并根据适宜辐射剂量或敏感性参数评定品种的辐射敏感性^[12-14,21,33]。对于供试品种量大的同一芽用豆科作物,一些学者将其进行敏感性分类,Ukai 等^[23] 发现供试的 27 个大豆品种辐照后在染色体畸变细胞率与剂量关系图上呈明显双峰分布,据此将 27 个品种的辐射敏感性分为敏感型和迟钝型 2 类,且与依据苗高损伤程度划分的结果相一致。康玉凡等^[12] 综合多项指标运用聚类分析方法将 25 个苜蓿品种分为极敏感型、敏感型、中间型、迟钝型和极迟钝型 5 类。

由于植物不同器官、组织和细胞间及不同生育期的辐射敏感性存在差异,不同指标所反映的芽用豆科作物的适宜辐射剂量及辐射敏感性大小也会有差异。一些学者因而运用多项指标对多品种间的辐射敏感性进行综合评定^[12,16]。这也提示研究者用辐照处理手段改良某一性状时,应以该性状作为敏感性评价的标准,采用相对应的适宜剂量处理,使该性状的变异大,诱变效率高。

4 芽用豆科作物品种间辐射敏感性差异机理

已有研究表明,不同植物辐射敏感性差异的因素有细胞核体积、染色体体积、DNA 含量以及内生代谢物和化学组成等^[5,17,26],但同一植物种的品种间这些因素差别不大,而辐射敏感性存在差异。

射线能引起细胞 DNA 损伤,也增加细胞修复能力。许多学者认为,DNA 损伤修复能力的差异是植物品种间辐射敏感性差异的原因之一。在芽用豆科作物中,已在大豆、蚕豆、豌豆、绿豆、花生中观察到了受 γ 射线照射后根尖细胞的 DNA 修复合成,且修复合成能力有一定限度,随剂量的增加呈先上升后下降的趋势^[28,42-44],袁玉春^[42] 发现辐射敏感性高的大豆品种 DNA 修复合成能力弱,辐射敏感性低的品种 DNA 修复合成能力强。

一些学者认为,品种间辐射敏感性的强弱主要受遗传因素控制。Takaki 及 Ukai 等根据对大豆品种辐射敏感性研究认为,大豆品种辐射敏感性是由基因 *Rg-rg* 控制的,且迟钝型是显性,Blixt 在豌豆上

也得到类似的结果,Rubeai 和 Godward 则认为菜豆品种辐射敏感性属数量性状遗传,是由微效多基因与主效基因共同控制^[5,23]。李国权等^[8]研究表明不同敏感性的大豆辐射损伤修复能力不同,证明由遗传结构所控制的辐射损伤修复能力的大小,是造成品种间辐射敏感性差异的主要原因之一。此外,也有学者认为植物品种间辐射敏感性的大小与遗传背景有关,在进化上属于较古老的类型具有较高的耐辐射性^[5,17]。

5 运用芽用豆科作物辐射敏感性对辐射处理方法的改进

5.1 辐照处理的作物形态及照射方式

照射作物干种子易于控制水分和其它照射条件,操作相对简便,因此对芽用豆科作物大多以照射干种子为主。而由于萌发状态的种子和正在生长的幼苗生理活动处于较活跃状态,特别是作为靶分子的 DNA 处于复制等代谢过程,受射线辐照后易于产生各种辐射损伤,辐射敏感性更强,对其照射能够获得更好的诱变效果^[5],部分学者将芽用豆科作物的萌发种子及幼苗作为辐射对象进行研究^[10, 41, 43-44]。对于作物种子常采用射线急性照射,而作物生育期间则采用慢性照射。我国 20 世纪 80 年代以来研究了包括大豆在内的一些作物生育期间慢照射的方法和诱变效果,有效地提高了诱变效率^[4]。

5.2 辐射诱变剂与其它理化因素复合处理

各种诱变因素的复合处理,能够发挥各自的特异性,相互配合提高诱变效率,获得良好的结果^[4]。研究表明,将射线辐照与咖啡因、EDTA 等抑制遗传物质 DNA 损伤修复的化学制剂复合处理,抑制 DNA 损伤修复,或使其产生错误修复,同时减轻因辐射产生的自由基造成的毒害,可提高作物的突变频率^[11,31]。

由于高剂量射线辐照提高畸变率的同时也加大了辐射损伤,使植株育性和存活率下降,而研究表明激光和微波可减轻 γ 射线造成的辐射损伤,因此不少学者正在探索采用激光与射线复合的方法处理种子,利用射线诱导染色体畸变,同时利用激光促进辐射损伤的恢复^[34]。多种理化诱变因素复合处理芽用豆科作物的研究有待进一步进行。

5.3 辐射技术与杂交育种相结合

作物品种的辐射敏感性强弱与诱发突变频率的高低有着明显的对应关系。由于杂合基因型材料对辐射更为敏感,在芽用豆科作物的辐射育种

中,为提高诱变效果,可以选择优良杂合基因型作辐照亲本。育种实践也已证实,辐照杂合基因型能够提高突变频率,扩大突变谱^[4]。已有的研究表明,射线能使作为遗传物质载体的染色体发生断裂,且细胞内各条染色体对射线的敏感程度不同,发生断裂的部位和程度也不同,从而使染色体间发生不同的交换,产生不同类型可遗传的变异^[20]。因此适宜的辐射剂量和有性杂交结合,使不同品种的断裂的染色体之间发生交换,产生杂种对于芽用豆科作物优良性状的选择是十分有利的。

6 展 望

关于芽用豆科作物品种资源辐射敏感性的研究报道较少,仅见于大豆和苜蓿。围绕各类芽用豆科作物品种辐射敏感性的适宜指标、快速准确的测定方法、品种资源材料的辐射敏感性及其适宜辐射剂量等开展系统性研究具有重要的理论与实践意义。

品种辐射敏感性与辐射诱变效果有着密切联系。由于不同的辐射敏感性指标所指示的辐射敏感性不同,研究不同的敏感性指标确定的适宜辐照剂量与后代各性状诱变效率之间的关系,尤其是与后代芽用性状如芽菜产量、芽体长、芽体粗及营养品质等诱变效率的关系,有助于提高芽菜专用品种的辐射育种效率。辐射敏感性的基础研究可以使育种家在针对某一育种目标时选择相应性状的适宜辐射剂量,提高诱变效率。而作为芽用的豆科作物又有其特殊的育种目标,如大豆种子粒重与芽菜产量负相关,小粒已成为芽用大豆的分类依据和选育目标之一,同时需要改良小粒型易炸荚的性状等^[2-3]。另外,可将提高各类豆科作物种子中功能性成分的含量作为育种目标,如大豆中的异黄酮,花生中的白藜芦醇,蚕豆中的缩合单宁等,培育特用芽用豆品种。

参考文献

- [1] 潘紫霄. 大豆发芽后营养成分的变化[J]. 农产品加工, 2004(9): 22-23. (Pan Z X. The nutrition change of soybean after sprouting[J]. Farm Products Processing, 2004(9): 22-23.)
- [2] 刘红开, 康玉凡. 芽用豆类作物诱变效应研究进展[J]. 大豆科学, 2010, 29(6): 1077-1080. (Liu H K, Kang Y F. Advances on mutagenic effects of legumes for bean sprouts[J]. Soybean Science, 2010, 29(6): 1077-1080.)
- [3] 花登峰, 赵团结, 张黎萍. 小粒专用大豆品种遗传改良研究进展[J]. 杂粮作物, 2005, 25(5): 311-313. (Hua D F, Zhao T J, Zhan L P. Review on genetic improvement of small soybean varieties in special use [J]. Rain Fed Crops, 2005, 25(5): 311-313.)

- [4] 王琳清. 辐射诱变改良作物的综合技术及应用[J]. 科技导报, 1992(11):12,24-26. (Wang L Q. Synthetical technique & application of induction mutation for crop improvement[J]. Science and Technology Review, 1992(11):12,24-26.)
- [5] 冯志杰. 高等植物的辐射敏感性[J]. 中国核科技报告, 1992(S3):1-10. (Feng Z J. The radiosensitivity of higher plants[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1992(S3):1-10.)
- [6] 余章清. γ 射线引变大豆品种几个问题的研究[J]. 豫西农学报, 1987(2):19-24. (Yu Z Q. Studies on soybean varieties induced by γ -ray [J]. Journal of Henan University of Science and Technology, 1987(2):19-24.)
- [7] 赵经荣, 战明奎. 夏大豆辐射诱变类型与频率的研究[J]. 大豆科学, 1986,5(1):1-9. (Zhao J R, Zhang M K. Studies on mutation types and frequency of summer soybean (*Glycine max*) induced by ^{60}Co ray [J]. Soybean Science, 1986,5(1):1-9.)
- [8] 李国权, 李梦, 陈光. 大豆品种间辐射敏感性差异的研究[J]. 吉林农业大学学报, 1986,8(4):56-61. Studies on radiosensitivity difference among soybean varieties[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 1986,8(4):56-61.)
- [9] 陈学珍, 谢皓, 燕平, 等. 大豆种子辐照处理后早期世代农艺性状的综合评价及遗传变异[J]. 分子植物育种, 2004,2(1):61-69. (Chen X Z, Xie H, Yan P, et al. Phenotypes and genetic variation of agronomic traits of soybean irradiated by γ -ray[J]. Molecular Plant Breeding, 2004,2(1):61-69.)
- [10] 郭房庆, 李群, 顾瑞琦. 大豆 Bragg 超结瘤突变系辐射敏感性的改变[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 1997,15(2):100-104. (Guo F Q, Li Q, Gu R Q. The Variation of radiosensitivity of soybean supernodulated mutants [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 1997,15(2):100-104.)
- [11] 宋道军, 徐登益, 万兆良, 等. 修复抑制剂对不同辐射敏感性作物生物学效应的影响[J]. 核农学报, 1997,11(4):215-220. (Song D J, Xu D Y, Wang Z L, et al. The influence of caffeine and EDTA post treatment on biological effect of soybean and rape seedling[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1997,11(4):215-220.)
- [12] 康玉凡, 马鹤林, 陈有军, 等. 我国苜蓿品种的适宜辐射剂量[J]. 内蒙古草业, 1998(1):1-6. (Kang Y F, Ma H L, Chen Y J, et al. Suitable dosages of Chinese *alfalfa* varieties[J]. Journal of Inner Mongolia Prataculture, 1998(1):1-6.)
- [13] 马鹤林, 海棠, 王秀兰, 等. 苜蓿不同品种辐射的生物学效应及适宜辐射剂量的研究[J]. 内蒙古草业, 1993(1):28-33. (Ma H L, Hai T, Wang X L, et al. biological effect by radiation and suitable dosages of different *alfalfa* varieties[J]. Journal of Inner Mongolia Prataculture, 1993(1):28-33.)
- [14] 乔玉梅. 不同箭舌豌豆品种对 ^{60}Co - γ 射线辐射敏感性及其生物学效应的研究[J]. 内蒙古草业, 1997(Z1):55-59. (Qiao Y M. Studies on radiation sensitivity and suitable dosages of different vicia sativa varieties to ^{60}Co - γ ray [J]. Journal of Nei Mongol Prataculture, 1997(Z1):55-59.)
- [15] 林音, 司徒明, 刘宏跃. 以 VID_{50} 作指标快速预测种子繁殖植物的适宜辐照剂量[J]. 核农学通报, 1988,9(1):13-14. (Lin Y, Si S M, Liu H Y. Forecasting suitable dosages of seed propagation plants rapidly by using VID_{50} [J]. Nuclear and Agricultural Bulletin, 1988,9(1):13-14.)
- [16] 刘琼英, 邝炎华, 郑粤美. 食用性植物种子辐射敏感性的研究[J]. 华南农业大学学报, 1994,15(4):85-91. (Liu Q Y, Kuang Y H, Zheng Y M. Studies on the radiosensitivity of edible vegetable seeds[J]. Journal of South China Agricultural University, 1994,15(4):85-91.)
- [17] 丘冠英. 种子辐射敏感性及其影响因素的研究进展[J]. 原子能农业译丛, 1982(2):1-5. (Qiu G Y. Research progress of Seed radiosensitivity and its effect factors[J]. Nuclear and Agricultural Bulletin, 1982(2):1-5.)
- [18] Muszynski S, Hiraiwa S, Tanaka A. Monitoring radiation damage in the seedlings of adzuki bean (*Vigna angularis* (Willd.) Ohwi & Ohashi) after seed irradiation with gamma rays [J]. Japanese Journal of Breeding, 1980,30(3):225-230.
- [19] Kon E, Ahmed O H, Saamin S, et al. Gamma radiosensitivity study on long bean (*Vigna sesquipedalis*) [J]. American Journal of Applied Sciences, 2007,4(12):1090-1093.
- [20] 弥晓菊, 马跃, 郭桂云. ^{60}Co - γ 射线辐射番茄种子对根尖细胞遗传学效应的影响[J]. 黑龙江商学院学报(自然科学版), 1998,14(3):46-51. (Mi X J, Ma Y, Guo G Y. Effects of ^{60}Co - γ ray radiation on tomato's root tip cells with radiating tomato seeds [J]. Journal of Heilongjiang Commercial College (Natural Sciences Edition), 1998,14(3):46-51.)
- [21] 康玉凡, 马鹤林. 苜蓿品种的辐射敏感性及模糊聚类分析[R]. 中国核科技报告, 1994. (Kang Y F, Ma H L. The radiosensitivity of *alfalfa* varieties and the fuzzy concentration analysis [J]. China Nuclear Science, 1994.)
- [22] 谈慕真, 周炯, 顾文祥, 等. 应用微核测定豌豆诱变效应[J]. 上海农业学报, 1991,7(4):33-37. (Tan M Z, Zhou X, Gu W X. Use of micronuclear analysis for determining mutagenic efficiency of gamma ray on pea (*Pisum sativum* L.) [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 1991,7(4):33-37.)
- [23] Ukai Y, Yamashita A. Varietal difference in gamma-rays induced chromosome aberrations in soybean [J]. Japanese Journal of Genetics, 1980,55:225-234.
- [24] 李梅. ^{60}Co - γ 射线对蚕豆干种子的辐射效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 1985(1):17-24. (Li X. The Effect of ^{60}Co Gamma radiation on seed of vicia faba [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition), 1985(1):17-24.)
- [25] 李淑娟. 蚕豆根尖细胞不同剂量率的微核效应研究[J]. 遗传学报, 1986,13(5):357-361. (Li S X. Studies on the effects of micronucleus induced by different dose rates in the root tip cells of vicia faba [J]. Acta Genetica Sinica, 1986,13(5):357-361.)
- [26] 康玉凡, 乔玉梅. 植物辐射敏感性研究概况[J]. 内蒙古草业, 1999(1):1-4. (Kang Y K, Qiao Y M. Research survey of plants radiosensitivity [J]. Journal of Inner Mongolia Prataculture, 1999(1):1-4.)
- [27] 陈光, 刘英华, 史焕芝. 大豆种子辐射损伤效应的研究[J]. 吉林农业科学, 1991(3):83-86. (Chen G, Liu Y H, Shi H Z. Studies on radiation damage effect of soybean seed [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 1991(3):83-86.)
- [28] 李贤勇, 万兆良, 徐登益. 大豆和油菜对 ^{60}Co - γ 射线敏感性差

- 异机理研究[J]. 西南农业大学学报, 1994, 16(4): 365-368. (Li X Y, Wang Z L, Xu D Y. The mechanism for the difference in sensitivity to ^{60}Co - γ rays between *Glycine Max* Merrill and *Brassica Napus* L. [J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1994, 16(4): 365-368.)
- [29] 宋道军, 徐登益, 万兆良, 等. 修复抑制剂对不同敏感性作物超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶活性的影响[J]. 核农学报, 1997, 11(2): 93-96. (Song D J, Xu D Y, Wang Z L, et al. Influence of radiation damage repair inhibitor on superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) in different sensitive crops[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1997, 11(2): 93-96.)
- [30] Zhang J B, Huang W N. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(5): 515-520.
- [31] MaГoMeДo B M A (赵光译). 植物辐射敏感性与某些新陈代谢指标的相关性[J]. 原子能农业译丛, 1982(1): 33-37. (MaГoMeДo B M A (translated by Zhao G). The relationship between radiosensitivity and some metabolism indexes in plants[J]. Nuclear and Agricultural Bulletin, 1982(1): 33-37.)
- [32] 梁艳荣, 胡晓红, 张颖力, 等. 植物过氧化物酶生理功能研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24(2): 110-113. (Liang Y R, Hu X H, Zhang Y L, et al. Progress on physiological function research of plant peroxidase[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2003, 24(2): 110-113.)
- [33] 马鹤林, 海棠, 申庆宏, 等. 89 个豆科牧草种和品种适宜辐射剂量及敏感性分析[J]. 中国草地, 1995(2): 6-11. (Ma H L, Hai T, Sheng Q H, et al. Suitable dosages and radiation sensitivities for 89 forage legumes[J]. Grassland of China, 1995(2): 6-11.)
- [34] 何丽玫, 徐正华, 李晓林. γ 射线与激光处理大豆对酯酶同工酶的效应研究[J]. 激光生物学, 1993, 2(3): 313-316. (He L N, Xu Z H, Li X L. Studies on the influence of γ -ray and laser treatment on esterase isoenzyme in soybean[J]. Laser Biology, 1993, 2(3): 313-316.)
- [35] 冯志杰, 王琳清. 普通小麦品种辐射敏感性及其诱变效应的研究[J]. 中国核科技报告, 1986: 1-19. (Feng Z J, Wang L Q. Studies on varietal radiosensitivity and genetical effect in *Triticum aestivum* L. [J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1986: 1-19.)
- [36] 宋道军, 徐登益, 万兆良, 等. 辐射损伤修复抑制剂对大豆油菜幼苗膜脂过氧化的影响[J]. 中国油料作物学报, 1996, 18(2): 41-44. (Song D J, Xu D Y, Wang Z L, et al. Influence of irradiation damage repair inhibitor on membrane lipid peroxidation in different sensitive crops[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 1996, 18(2): 41-44.)
- [37] 何莉, 华劲松, 徐永蕾. ^{60}Co - γ 射线对蚕豆 M_1 诱变效应的研究[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2007, 21(2): 24-27. (He L, Hua J S, Xu Y L. Study on the mutagenic effects of ^{60}Co - γ ray to faba bean M_1 [J]. Journal of Xichang College (Natural Science Edition), 2007, 21(2): 24-27.)
- [38] 申慧芳, 李国柱. ^{60}Co - γ 射线对红小豆苗期叶绿素含量和光合特性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2008, 28(2): 176-179. (Sheng H F, Li G Z. Effects of ^{60}Co - γ ray on chlorophyll content and photosynthetic characteristics of *adzuki* bean at the seedling stage[J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2008, 28(2): 176-179.)
- [39] 马飞, 冯敏, 高岳, 等. 蔬菜种子的辐射敏感性与超弱发光动力学分析[J]. 核农学报, 2003, 17(5): 383-38. (Ma F, Feng M, Gao Y, et al. Vegetable seed radiosensitivity and kinetic analysis of super-weak bioluminescence[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2003, 17(5): 383-387.)
- [40] 宋道军, 徐登益, 万兆良, 等. 咖啡因和 EDTA 后处理对不同辐射敏感性作物核酸代谢的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 1997, 15(4): 233-237. (Song D J, Xu D Y, Wang Z L, et al. Influence of irradiation and cafe EDTA on the metabolism of nucleic acid of the different radiosensitive crops[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 1997, 15(4): 233-237.)
- [41] 邱庆树, 鲁蓉蓉. 提高花生辐射突变率的研究[J]. 花生科技, 1981(2): 32-34, 1981(3): 28-32, 1983(2): 22-25. (Qiu Q S, Ru R R. Studies on improving radiation mutation rate in peanut[J]. Journal of Peanut Science, 1981(2): 32-34, 1981(3): 28-32, 1983(2): 22-25.)
- [42] 袁玉春. 大豆品种间辐射敏感性差异机制的研究[J]. 核农学报, 1990, 4(2): 71-74. (Yuan Y C. Studies on the mechanism of radiosensitivity among soybean varieties[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1990, 4(2): 71-74.)
- [43] 刘振声, 丘泉发, 陈东立, 等. 利用显微放射自显影技术对 γ 射线诱导的蚕豆根尖细胞非按期 DNA 合成的研究[J]. 植物学报, 1989, 31(8): 611-615. (Liu Z S, Qiu Q F, Chen D L, et al. Autoradiograph study of gamma-ray induced unscheduled DNA synthesis in bean root meristem cells[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1989, 31(8): 611-615.)
- [44] 丘泉发. γ 射线对高等植物细胞 DNA 诱导合成效应的研究[J]. 核农学报, 1989(4): 153-155. (Qiu Q F. Studies on γ ray effect of DNA synthesis inducement of high plants[J]. Nuclear and Agricultural Bulletin, 1989(4): 153-155.)