

辐射诱变育种技术概述

斯琴图雅¹, 杨建鑫², 汤明威¹, 孙培琳¹, 张丹丹¹, 张子呈¹, 范庆丽¹

(1. 黑龙江省原子能研究院, 哈尔滨 150086; 2. 黑龙江大学, 哈尔滨 150080)

摘要: 辐射诱变技术在种质创新、新品种培育方面具有独特优势。为加强人们对辐射诱变技术体系的了解, 从辐射诱变源、诱变方式、诱变剂量、诱变材料及突变体筛选等方面对辐射诱变技术进行综述。不同诱变源的射线类别、射线穿透能力、电量、质量及辐射环境等条件各有差异, 适宜诱变处理的材料也有所不同, 只有结合相关因素, 采用合适的突变体筛选方法才能达到理想的种质创新目的, 为辐射诱变育种实践提供参考。

关键词: 辐射诱变育种; 辐照方法; 突变体筛选

中图分类号: S335.21 文献标志码: A 文章编号: 1674-8646(2024)16-0016-04

Review of Radiation Breeding Technology

Siqintuya¹, Yang Jianxin², Tang Mingwei¹, Sun Peilin¹, Zhang Dandan¹, Zhang Zicheng¹, Fan Qingli¹

(1. Heilongjiang Institute of Atomic Energy, Harbin 150086, China;
2. Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: Radiation mutagenesis technology has unique advantages in germplasm innovation and new variety breeding. In order to strengthen the understanding of the radiation mutagenesis technology system of breeders, the radiation mutagenesis technology is summarized from radiation mutagenesis source, mutagenesis mode, mutagenesis dose, mutagenesis materials and mutant screening, etc. Different mutagenesis sources have different conditions, such as radiation type, radiation penetrating ability, electric power, quality and radiation environment. The materials suitable for mutagenesis treatment are also different. Only by combining relevant factors and adopting suitable mutant screening method can we achieve ideal germplasm innovation, and provide reference for radiation mutagenesis breeding practice.

Key words: Radiation breeding; Radiation methods; Mutant screening

0 引言

辐射诱变育种是利用 X 射线、 γ 射线、 β 射线、中子及重离子等物理因素诱导生物体产生遗传变异, 从中挑选出优异的突变体, 进而育成新品种的育种方法。辐射诱变育种起源于1895年德国物理学家伦琴^[1]发现的 X 射线。1927年, Muller^[2-3]发现放射线可以导致遗传损伤和突变。1928年, Stadler^[4-6]利用 X 射线对玉米、小麦等作物进行诱变, 证实了射线对作物的诱变作用。我国辐射诱变育种研究起步较晚, 于20世纪80—90年代迎来迅速发展时期, 目前已是国际原子能机构亚太地区(IAEA/RCA)植物诱变育种项目的重要国家^[7]。辐射诱变育种具有变异频率高、变异谱宽、可打破基因连锁、促进基因重组、诱变更稳定、选育周

期更短、可改变植物育性及改善远缘杂交亲和性等优点, 故成为植物新品种改良及种质创新的重要手段。在众多辐射诱变因素中, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 诱变源是应用最广泛、机理研究最深入的一种, 应用已获得了大量农作物新品种^[8]。

目前, 辐射诱变育种技术已形成完整的体系, 包括诱变源的选择、诱变材料及对应诱变剂量的确定、目标突变体的筛选及实际应用等^[9]。辐射诱变技术与离体培养及现代测序技术的有效结合更加丰富了辐射诱变的内涵, 在推进辐射诱变育种发展进程方面获得了更好的效果。本研究对辐射诱变技术涉及的技术问题进行了概述。

1 诱变源、诱变方式及诱变剂量

在辐射诱变育种技术中, 诱变源、诱变方式和诱变剂量是影响辐射诱变效果与诱变处理技术相关的关键性因素, 其选择和控制对于诱发基因突变、产生有益变异及提高诱变效率等具有重要影响。

1.1 诱变源

γ 射线是最常用的一种诱变源, 依据刘晓娜等的

收稿日期: 2024-04-10

基金项目: 黑龙江省科学院院长基金项目(YZ2022YZN02); 黑龙江省自然科学基金(LH2021C078)

作者简介: 斯琴图雅(1980-), 女, 副研究员。研究方向: 辐射诱变育种。

统计, γ 射线在农作物诱变育种上的应用占比达 41.35%^[10], 其波长很短($10^{-8} \sim 10^{-11}$ cm), 具有很强的穿透能力, 因此适用于细胞、种子、枝条、组织培养材料和活体植株等各类材料, 产生 γ 射线的钴源辐照装置十分普遍, 使用便捷。

电子束是由加速器产生的高能电子流, 穿透力远低于 γ 射线, 因此诱变材料的选择应考虑电子的能量、对应的穿透深度^[11]及所需的诱变材料厚度等。在 IAEA 突变品种数据库中, 登记采用电子束辐照诱变的品种较少, 主要有俄罗斯培育的水芹品种 Vest^[12] 和浙江省舟山市农业科学研究所培育的水稻品种红突 31^[13] 等。

中子一般由反应堆、加速器和中子发生器等产生, 不带电荷, 对作物的电离能力强, 诱变率高^[14], 在诱变育种中应用最多的是热中子和快中子。黑龙江省农业科学院培育的大豆品种黑河 12^[15]、小米品种龙谷 27^[16]、泰国培育的水稻品种 Hom Rangsi^[17]、俄罗斯和印度培育的大麦品种 Pavel^[18] 和 RD-2035^[19] 等均由中子辐射诱变培育获得。

重离子的诱变应用主要有低能重离子和高能重离子两部分。低能重离子主要由离子注入设备产生离子束, 能量一般在几十千电子伏到几百千电子伏。高能重离子是由加速器产生的重离子, 能量由几十兆电子伏到几百兆电子伏不等^[20]。重离子较高的诱变效率逐渐获得研究人员的认可, 在作物育种中的占比高达 12.91%^[10]。中国科学院东北地理与生态研究所培育的水稻品种东稻 122、东稻 275、东稻 812 等^[21] 和日本菊花品种 Aladdin 和 Aladdin 2 等^[22] 都用重离子诱变培育获得。

上述射线均属于电离射线, 但彼此间又有所区别, 对作物的诱变作用与其传能线密度(LET)正相关, 传能线密度大, 相对生物效应(RBE)高, 损伤后修复效应小, 能量沉积的空间分辨率好, 可在较高的存活率下获得更高的突变率^[23]。

1.2 诱变方式

1.2.1 内照射与外照射

辐射诱变依据作用方式分为内照射和外照射两种。诱变源由外部照射植物材料称为外照射。外照射是由钴源设施或射线装置产生的光子/粒子从植物体外部辐照材料引起诱变的方式, 如 γ 线、X 线、中子等外照射穿透能力强, 适用于各种体积、大小和密度的植物材料的外照射, 这种方式被广泛采用, 更加安全。内照射是用放射性溶液浸泡或采用注射等措施诱变植物材料引起变异的方式。 α 、 β 射线等穿透力有限的射线其内照射的生物损伤比其外照射时大得多, 为了获得更好的诱变效果可采用内照射方式。广东省农科院

以³²P 处理狮头企花生农家品种获得狮选 64 花生新品种^[24], 并以此为亲本通过杂交育种选育出众多当家品种。埃及科学家对海岛棉“吉扎 45”进行³²P 辐射诱变, 得到了一株整株无腺体的棉花植株“Bahtim110”^[25]。由于放射性核素有衰变期, 内照射时作用于植物体的诱变时间长, 直至衰变完全之前均对周围环境造成辐射危害, 操作危险性大。国家对放射性材料的管控越发严格, 内照射诱变方式的使用越来越少。

1.2.2 急性照射与慢性照射

急性照射是用较高剂量率在较短时间内完成的照射。慢性照射是用低剂量率在很长一段时间内完成的照射, 如几天、几周、几个月甚至更长的时间。剂量率不同, 即使半致死剂量相同, 植株成活率也会有所差异, 高剂量率处理植株成活率低, 低剂量率处理植株成活率高^[26]。王培英等^[27]的大豆辐射诱变研究和徐刚对日本菊花离体培养材料辐射诱变研究认为, 慢性照射的突变率和突变谱高于急性照射的突变率和突变谱^[28]。

1.3 诱变剂量

在辐照诱变技术中, 适宜的诱变剂量及诱变剂量率是关键技术之一。诱变剂量很低时, 对作物具有一定的刺激作用, 但诱变剂量过高, 诱变当代的生理损伤过重, 植株畸形率和成活率降低, 不利于后期有益突变体的筛选。通常以半致死剂量(LD₅₀)作为辐射诱变剂量选择的重要依据^[29], 基于育种目标和工作实际在半致死剂量的基础上调整实际诱变剂量, 例如, 育种目标是改良个别性状, 为减少多发性变异, 可采用较低诱变剂量。为获得更多的突变类型, 可采用较高诱变剂量。

2 诱变材料及诱变材料数量

诱变材料的选择影响诱变率和诱变谱, 而诱变材料的处理数量影响筛选目标突变体的概率。

2.1 诱变材料

2.1.1 种子

在辐射诱变育种中, 种子是最常用的诱变材料, 它处理量大, 运输方便, 耐储存。诱变处理的种子可以是干种、湿种和发芽种, 但因其生理状态和含水量不同, 在辐射敏感性方面存在较大差异。郭安熙^[30]等研究认为, 含水量对种子照射效应的影响主要在于电离水产生的自由基。为有效对比辐射诱变效应, 需要注意种子的含水量和萌动种子的生理状态。辐射处理后的种子具有储藏效应, 因为辐射处理后受损伤的 DNA 分子随时间的延长获得部分修复, 因此辐射后的储存时间影响突变率。但研究者对储藏效应的观点不一, 吕秀珍等^[31]的研究认为, 有些品种有明显的储藏效应,

有些对储藏效应不敏感,这与种子的含油率和水分等有关。

2.1.2 花粉

辐照花粉获得的 M_1 代植株不易形成嵌合体,其 M_2 代突变分离植株中显性突变分离的比率比辐照种子时大。花粉辐照诱变处理的方式特别适合于苦瓜、玉米等异花授粉作物,异花授粉作物 M_2 代一般为杂合体, M_3 代才能够自交产生纯和体。如果辐照花粉后再授粉于雌蕊上,其 M_2 代就可能出现隐性纯和性状的分离,进而加速筛选优良突变材料的速度^[32-33]。

2.1.3 营养器官和整株植株

植物营养器官,如块茎、鳞茎、鳞片、球茎、枝条、不定芽等在本植物和无性繁殖植物辐射诱变育种过程中常被用作诱变材料。以上营养器官应选择组织饱满、生长健壮、芽眼饱满的无性生殖材料进行处理,以提高诱变处理后的存活率。徐晓薇等^[34]用蝴蝶兰大千蜘蛛品种的原种球为诱变材料,经 20 Gy $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线诱变处理获得叶缘带金边的突变株。林兵等^[35]用荷兰鸢尾种球为诱变材料, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线诱变处理后经 6 代筛选获得深蓝紫色、紫罗兰色和白色 3 个不同花色的变异新株系。可以选择整株植株不同生长时期进行诱变处理,其诱变损伤效果的显现是一个时间相对较长的过程。王培英等^[36]用 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线低剂量诱变处理大豆苗期植株,获得与急性照射种子有明显区别的真叶和小叶数量变异类型,并获得蛋白质含量达 50.02% 的高蛋白突变株。

2.1.4 离体培养材料

种子和营养器官为多细胞材料,辐射诱变的后代中往往包含大量的隐性突变体和嵌合体,后期需要多世代的筛选和分离工作才能获得纯合体。诱变处理愈伤组织、单细胞和原生质体等获得的突变体来源于单个细胞,避免了嵌合产生的干扰,便于后期的筛选和鉴定。离体培养的花药和花粉等单倍体材料由于只有一套染色体,辐射诱变产生的突变性状没有显性基因的遮盖,辐射诱变当代即可确认其突变性状,后期通过加倍获得二倍体纯合材料。赵中莹等^[37]用不同剂量的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线对半夏愈伤组织进行辐照,约用 2 年的时间共筛选出 13 株变异植株。Sheikhi 等^[38]用 γ 射线诱变阿魏愈伤组织,经 20 Gy 和 25 Gy 射线照射后的酚类物质含量分别增加了 36.5% 和 38.9%。El-Beltagi 等^[39]用 20 Gy 的 γ 射线辐射促进了迷迭香愈伤组织中总酚和类黄酮类物质的积累。

2.2 诱变材料数量

辐射诱发作物突变的概率是自然突变率的 10 ~ 1000 倍,但总体突变率仍然较低,其中与某一个表型性状对应基因的突变率更低,因此在对稳定材料进行

处理时需要有大量的初始群体供筛选,这导致后期的筛选工作量相对增大。群体量要控制在合理范围内,以自交纯和材料为例,初始设计诱变种子的数量与所用射线的突变率和获得 M_2 代目标突变体的数量相关,与 M_2 代的出苗率、 M_1 代的结实率和 M_1 代的成活率相结合可以获得辐照种子数量^[30]。采用突变率高的射线进行诱变处理,使用的种子量相对少。

3 目标突变体的筛选

以种子诱变作物为例,经辐射诱变处理的种子称为 M_0 代,种植 M_0 代长成的植株为 M_1 代,辐射诱导产生的突变大多属于隐性突变,并以嵌合体的形式出现在 M_1 代植株中。由于辐射诱变当代生理损伤较重,不利于突变体筛选,因此 M_1 代一般不进行突变体选择。在自花授粉作物中,质量性状的突变表型最早在 M_2 代开始显现。异花授粉作物的突变基因在 M_2 代中可能还是杂合的,需要进一步自交纯和,因此一般依据作物生长特点在 M_2 或 M_3 性状分离较大的世代进行突变体筛选。

突变体的筛选技术是辐射诱变育种工作中的关键环节,如何快速、准确、高通量地筛选出目标突变体一直是辐射诱变技术发展需要解决的难题。目前主要采用的突变体筛选方法有表型筛选、生化分析筛选和分子水平筛选及不同筛选方法交叉使用等。

3.1 表型筛选

表型筛选是辐射诱变突变体筛选最常用的方法,主要针对形态变化较大,如抗病性、生长习性、成熟期、株高、颜色、形状等性状,相对于野生型差异显著、易于观察和统计的性状开展的形态学鉴定。表型筛选一般是优良突变体筛选的基础,收获时对表型变化显著的突变体采用单株选择法,以便后代继续观察和鉴定其遗传稳定性、生物学特性和研究分析其突变基因等。宋佳宝等^[40]采用表型筛选的方法构建紫丁香、暴马丁香、红丁香的辐射诱变突变体库 3 个。刘建凤等^[41]采用表型筛选的方法在辐射 M_2 代中筛选出 89 个突变体,突变频率为 3.102%。贾彩凤等^[42]用 γ 射线辐射诱变绿茎金荞麦获得红茎突变株。Yamaguchi H 等用重离子辐射获得侧芽减少并早花的菊花品种 Aladdin 2。周丹蓉等^[43]用 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射诱变结合表型筛选的方法获得了丰产性好、品质优的新李品种福红。

3.2 生物化学筛选

数量性状的变异很难直接观察,这种变异不仅由遗传物质的改变造成,还易受环境因素的影响。因此一般采用生理生化分析方法确定品质和抗性方面的突变,如蛋白质、脂肪含量等品质相关的改变,生物碱、皂苷等代谢产物含量的变化等,与耐冷热、耐盐碱、抗病

虫等抗逆性相关的性状常需要生化分析或抗性鉴定方法加以确定。张亚慧等^[44]通过辐射诱变育种技术获得草莓果实可溶性固形物和 Vc 含量均高于对照的草莓新种质。高露璐等^[45]辐射诱变处理楸树“钟山 5 号”品种的胚性愈伤,结合高盐定向筛选和二级耐盐性评价获得 3 份耐盐的楸树新种质。Ashok A 等^[46]用 γ 射线诱变处理甘蔗胚性愈伤组织,结合耐盐筛选获得 18 份突变体。

3.3 分子标记筛选

在确定表型、品质、抗性变异的基础上结合现代分子生物学技术,进一步从基因水平确定变异及变异基因位点等,进而充分利用有利基因。分子标记是以个体间遗传物质内核苷酸序列变异为基础的遗传标记,主要有限制性片段长度多态性(restriction fragment length polymorphism, 缩写 RFLP)、随机扩增多态性 DNA(random amplified polymorphic DNA,缩写 RAPD)、简单重复序列(Simple sequence repeat, SSR)、单核苷酸多态性(SNP)等,分子标记育种将经验性育种变得可预测,并加速育种速度,让育种目标和结果变得易于掌控。赵新辉等^[47]用 γ 射线辐射诱变杂交水稻恢复系 8612,通过对 M_1 代群体的镉吸收主效基因 *OsNramp5* 进行分子标记筛选,获得该基因的嵌合体 1 株。孙利娜等^[48]用 γ 射线诱变处理 3 个百合品种的鳞片和鳞片薄片切片,对获得的表型变异组培苗进行 PAPD 和 ISSR 分析,获得 98 个多态位点,多态性占比为 77.78%。

4 结束语

辐射诱变技术创制的突变体在植物生理学、遗传学和基因组学研究及新品种培育方面展现出了独特的优势和潜力,通过多年的研究已初步形成辐射诱变育种技术体系,积累了丰富的育种经验和成功案例。但诱变育种仍存在突变频率低、目标突变体筛选困难等诸多难题,需要持续创新和探索,进一步完善辐射诱变技术,优化诱变方法和筛选流程,提高突变效率和突变体早期筛选的准确性。加强跨学科合作,结合基因组学、分子生物学等前沿技术,深入研究诱变机理和突变体的遗传特性,为育种实践提供更加科学、精准的理论支持。

参考文献:

[1] 黄清萍,金鑫,许晓飞,等. X 射线衍射技术在安检领域的研究进展[J]. CT 理论与应用研究,2023,32(06):843-856.

[2] Muller HJ. Artificial transmutation of the gene[J]. Science,1927,66:84-87.

[3] 李娟娟. 三种诱变剂对黄连木诱变效应研究[D]. 保定:河北农业大学,2022.

[4] Stadler LJ. Genetic effects of X-rays in maize[J]. Proc Natl Acad Sci

USA, 1928,14(01):69-75.

[5] Stadler LJ. Mutations in barley induced by X-rays and radium[J]. Science,1928,68:186-187.

[6] 沙国飞. ⁶⁰Co- γ 射线及化学诱变剂对刺梨种子的诱变效应[D]. 贵阳:贵州大学,2023.

[7] 胡春玖. 为世界核技术和和平利用贡献力量——访联合国粮农组织和国际原子能机构联合司司长梁劬[J]. 国防科技工业,2022(03):46-49.

[8] 杜国锋,谢永盾,郭会君,等. 锂离子束辐照小麦诱发 DNA 损伤与特异基因调控网络解析[J]. 植物遗传资源学报,2023,24(05):1485-1497.

[9] Fatma Sarsu, Suprasanna Penna, Rusli Ibrahim, et al. Manual on mutation breeding[M]. Vienna: The Joint FAO/IAEA Centre of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Plant Breeding and Genetics Subprogramme,2018.

[10] 刘晓娜,张丽华,李红军. 农作物辐射诱变育种技术中国专利分析[J]. 核农学报,2023,37(02):298-305.

[11] 赵延军,彭伟,柳玲,等. 10 MeV 电子束辐照医疗保健产品剂量控制应用初探[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2022,40(01):75-82.

[12] IAEA. Mutant variety database[EB/OL]. (2022-03-22)[2024-03-15]. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx?MVID=2235>.

[13] IAEA. Mutant variety database[EB/OL]. (2022-03-22)[2024-03-15]. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx?MVID=614>.

[14] 杨旭. 中子能谱反演算法及紧凑型 D-D 中子发生器中子学特性测量研究[D]. 兰州:兰州大学,2023.

[15] IAEA. Mutant variety database[EB/OL]. (2022-03-22)[2024-03-15]. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx?MVID=1542>.

[16] IAEA. Mutant variety database[EB/OL]. (2022-03-22)[2024-03-15]. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx?MVID=142>.

[17] IAEA. Mutant variety database[EB/OL]. (2022-03-22)[2024-03-15]. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx?MVID=4858>.

[18] IAEA. Mutant variety database[EB/OL]. (2022-03-22)[2024-03-15]. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx?MVID=2339>.

[19] IAEA. Mutant variety database[EB/OL]. (2022-03-22)[2024-03-15]. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx?MVID=1059>.

[20] 吴京京. 基于植物同源重组的重离子辐射靶点序列定位和突变分析实验体系的构建和功能验证[D]. 合肥:中国科学技术大学,2023.

[21] 杨福,李景鹏,余丽霞,等. 关于高能重离子束辐照诱变北方粳稻育种方法的思考[J]. 中国稻米,2023,29(01):72-75,81.

[22] Yamaguchi H. Mutation breeding of ornamental plants using ion beams[J]. Breeding Science,2018,68(01):71-78.

[23] 郝梦. 空间不同 LET 值重离子诱发水稻全基因组甲基化变化及其在不同发育阶段的规律[D]. 大连:大连海事大学,2021.

[24] 黎穗临. 广东花生育种成效与展望[J]. 广东农业科学,2006(04):20-23.

(下转第 24 页)

统计检测结果,见表6。

表6 抗车辙沥青路面工后质量检测结果
Tab.6 Quality test results of rut-resistant asphalt pavement after construction

检测项目	检测点1	检测点2	检测点3	检测点4	检测点5
压实度/%	96.7	96.4	97.3	96.8	97.1
平整度/mm	1.0	1.2	1.1	0.9	0.8
稳定度/次·mm ⁻¹	9811	9836	9856	9839	9841
空隙率/%	3.0	3.3	3.1	3.5	3.3
摩擦系数	61.2	60.5	59.8	58.3	60.8
渗水系数/mL·min ⁻¹	64.5	63.5	68.6	67.5	65.3
1a车辙深度/mm	1.0	0.9	1.1	1.0	1.0

由表6数据可知,抗车辙沥青路面工后压实度、平整度、稳定度、空隙率、摩擦系数及渗水系数等指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)的要求。现场质量检测中,路面的1a车辙深度均小于规范要求的1.2mm,没有脱落、掉渣、裂缝等质量问题。说明该路面具有良好的抗车辙性能,证明抗车辙沥青在路面施工中有着良好的应用效果。

(上接第19页)

[25] Afifi A, Bary A, Kamel SA, et al. Bahtim 110, a new strain of Egyptian cotton free from gossypol [J]. Empire Cotton Growing Review, 1966, 43: 112-120.

[26] 张敦方, 施冰. 福禄考种子辐射后的细胞学观察[J]. 东北林业大学学报, 1989(04): 18-24.

[27] 徐刚. 植物离体诱变育种技术在日本的研究[J]. 中国花卉园艺, 2001(24): 24-26.

[28] 王培英, 许德春, 孟丽芬, 等. γ 射线慢照射大豆苗期植株的效果[J]. 核农学报, 1995(01): 25-29.

[29] 蒋云, 唐力为, 张洁, 等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照藜麦的效应及适宜剂量初步研究[J]. 四川农业大学学报, 2020, 38(04): 384-390, 398.

[30] 郭安熙, 鄂学拴. 极低温下照射种子的生物学效应—I. 对辐射损伤的探讨[J]. 河南科学院学报, 1984(01): 93-98.

[31] 吕秀珍, 刘忠堂, 何煜. $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线照射大豆干种子当代贮藏效应的研究[J]. 核农学报, 1983(04): 15-19.

[32] 鲍印广, 李兴锋, 宗浩, 等. 小偃麦异代换系山农0095辐照花粉后代的细胞学及SSR标记分析[J]. 分子细胞生物学报, 2009, 42(02): 89-94.

[33] 陈小凤, 黄如葵, 梁家作, 等. 苦瓜花粉钴辐照效应及授粉后对其后代表型性状的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(04): 855-861.

[34] 徐晓薇, 林绍生, 姚丽娟, 等. 蝴蝶兰 $\text{Co}^{60}\gamma$ 辐射诱变育种初报[J]. 广西热带农业, 2008(02): 1-2.

[35] 林兵, 钟淮钦, 黄敏玲, 等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐射对荷兰鸢尾花色诱变效应的研究[J]. 核农学报, 2019, 33(04): 633-639.

[36] 王培英, 许德春, 孟丽芬, 等. γ 射线慢照射大豆苗期植株的效果[J]. 核农学报, 1995(01): 25-29.

[37] 赵中莹, 李青苗, 田孟良, 等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对半夏愈伤组织成苗及植株特性的影响[J]. 生物技术通报, 2021, 37(09): 142-151.

[38] Ashouri Sheikhi A, Hassanpour H, Jonoubi P, et al. The effect of

4 结论

通过车辙试验、弯曲破坏试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂强度试验,证实了在沥青混合料中掺入抗车辙剂能够有效改善混合料的高温性能、低温性能及水稳定性,当掺量为0.3%时,抗车辙沥青混合料的低温抗裂性及水稳定性最好,故推荐0.3%为抗车辙剂最佳掺量。在实际项目中按照试验确定的最佳掺量制备抗车辙沥青混合料,将其应用于路面施工,工后现场质量检测证明抗车辙沥青在路面施工中具有良好的推广及应用价值。

参考文献:

[1] 王飞龙. 高速公路抗车辙剂与沥青混合料的应用性能检测[J]. 交通世界, 2023(30): 16-18.

[2] JTGE20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[3] 金燕云. 抗车辙剂对沥青混凝土路用性能影响分析[J]. 江西建材, 2023(11): 26-28, 32.

[4] 赵琳琳. 基于温拌剂的沥青混合料改良机理及路用性能试验[J]. 交通世界, 2024(Z2): 36-38.

gamma irradiation on in vitro total phenolic content and antioxidant activity of ferula gummosa bioss [J]. Journal of Medicinal Plants, 2016(03): 122-131.

[39] El-beltagi HS, Ahmed OK, El-desouky W. Effect of low doses γ -irradiation on oxidative stress and secondary metabolites production of rosemary (rosmarinus officinalis l.) callus culture [J]. Radiation Physics and Chem, 2011, 80(09): 968-976.

[40] 宋佳宝. 三种丁香种子辐射诱变效应及变异株早期鉴定研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2022.

[41] 刘建凤, 张容, 陈士强, 等. 小麦扬辐麦4号辐射诱变突变体筛选和突变体库构建[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(22): 88-94.

[42] 贾彩凤, 李艾莲, 兰金旭, 等. 药用植物金荞麦 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射诱变的(-)-表儿茶素研究[J]. 中国医药导刊, 2009, 11(03): 452-454.

[43] 周丹蓉, 叶新福, 方智振, 等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射诱变李新品种福红的差异性状及果实品质分析[J]. 核农学报, 2023, 37(12): 2317-2326.

[44] 张亚惠, 周历萍, 王淑珍, 等. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐射草莓红颊诱变选育新品系的研究[J]. 核农学报, 2018, 32(08): 1457-1465.

[45] 高露璐, 王鹏, 顾姣姣, 等. 基于胚性愈伤诱变的楸树耐盐种质创制及评价[J/OL]. 分子植物育种, 2021: 1-9. (2021-07-23) https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=LGIPPz-4LgELUHV_K0cv4nKogtDLBqvjDuo3XLTpu4pjaDElm-w-il.

[46] Ashok A Nikama, Rachayya M. Radiation-induced in vitro mutagenesis system for salt tolerance and other agronomic characters in sugarcane (Saccharum officinarum L.) [J]. The Crop Journal, 2015(03): 46-56.

[47] 赵新辉, 唐倩莹, 周群丰, 等. 辐射诱变华恢8612创制稿低积累水稻新种质辐8612-12[J]. 杂交水稻, 2024, 39(01): 44-52.

[48] 孙利娜. $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照百合诱变育种的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2010.