

植物辐射诱变育种的研究进展

张丰收^{1,2,3},王青²

(1.射线束技术教育部重点实验室;核科学与技术学院;北京师范大学,北京 100875;

2.射线束技术教育部重点实验室;北京市辐射中心,北京 100875;

3.兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心,兰州 730000)

摘要:简要回顾植物辐射诱变育种的历史,对近几年辐射诱变育种工作(以国内为主)进行总结,分析并指出育种研究过程主要环节中存在的不足以及亟待完善的地方,并对育种工作提出了建议及展望。

关键词:植物育种;辐射诱变;现状分析

中图分类号:S335

文献标志码:A

植物从野生到栽培驯化的历史是人们不断地认识植物、利用植物到最终驯化植物的过程。植物育种的历史从开始的自然演化、自然杂交的方式到后来的人工杂交,人工诱变,直到近年来出现的运用分子生物学的技术进行转基因——分子杂交。人类正是不断地寻找、发明和利用不同的方法培育出了自己所希望的各种各样的新型植物,满足自身的不同的需求,诱变育种是当今植物育种中一个的途径,具体地说它包括:物理诱变和化学诱变。而物理诱变又称辐射诱变。所谓辐射诱变指通过各种辐射源对生物进行辐射诱变,常见辐射诱变源有中子、 γ 射线、X射线、电子束、离子束、紫外线等^[1]。

辐射诱变有着与其他育种方法不同的特点,如:1)广谱,即一次诱变能够获得各个材料同一位置多种不同程度变异,及同一材料不同位置的突变;2)效率高,能够同时对多种植物进行辐射诱变;3)辐照具体素材(目标物)多样化,可以是植物体的种子、器官、组织、细胞等;4)育种周期短,通常 M1 代不选择, M2 代来选择需要的突变, M3 代基本稳定;5)变异的不确定性,即通过辐射发生的诱变无法精准设计和预测等^[2-3]。

1 辐射诱变育种历史

从 1895 年伦琴(Rontgen)发现 X 射线和 1896 年贝克勒尔(Becquerel)发现铀的天然放射性至今已有一百多年的历史^[4-5]。1928 年斯塔特勒(Stadler)首次把 X 射线应用到了玉米和大麦的诱变,开创了物理诱变植物的先河,现在已经接近一百年^[6-7]。植物辐射诱变在我国的建立、起步是在 20 世纪五十年代中期,以中国农业科学院原子能农业利用研究室的建立为标志,全国的农业与核物理相关专业科研院所、高校随后也开展了辐射诱变育种的工作^[1]。经过几代从事诱变育种科研工作者的辛勤努力,我国的诱变育种包括辐射诱变育种工作始终在不断前行,已经取得了可喜的成果^[1-3]。

20 世纪六七十年代,我国的辐射诱变育种由于特殊的历史原因发展缓慢甚至处在停滞的状态,到了 80 年代进入了恢复发展时期^[1]。80 年代中后期以余增亮为代表的中国科学院等离子研究所与安徽省农业科学院水稻研究所合作,对水稻干种子进行离子注入诱变育种的研究,开创了我国也是世界上低能离子注入诱

收稿日期:2020-06-24;修回日期:2020-07-22.

基金项目:国家自然科学基金(11635003;11025524;11161130520);国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB832903);欧盟第七框架计划(269131).

作者简介(通信作者):张丰收(1966—),男,陕西渭南人,北京师范大学教授,博士生导师,国家杰青,主要研究方向为重离子核物理、离子与物质相互作用机理、离子束辐射技术及应用、材料辐射损伤和辐射诱变育种,E-mail:fszhang@bnu.edu.cn.

通信作者:王青,E-mail:wangqing80@126.com.

变育种的新领域^[8-10].经过不断实践,他们发现离子束注入诱变育种这一新型的诱变育种手段具有操作方便,安全无风险、无污染,诱变效率比较高,变异范围比较大等特点^[8].利用这一技术他们与安徽省农业科学院合作,成功地培育出多个水稻新品种,如早熟皖稻 45、优质皖稻 20、高产稳产皖稻 71 和早熟高产皖稻 58 等品种^[11],后又培育出直播水稻——皖稻 143.仅该品种 2007 年在安徽省内外累计推广近 6.67 万 hm^2 ^[12],取得了社会效益和经济效益双丰收.

随后全国多家单位都开始了低能离子诱变育种方面的研究.经过几十年的不断发展和实践,低能离子注入的方法已经得到了许多科研工作者的认可,诱变育种的确取得了明显的效果和可观的经济效益^[13].这期间中国科学院近代物理所(近物所)也加入了离子束诱变育种的行列.他们运用超低能重离子注入诱变农作物小麦,研究证实 X 射线是超低能离子注入诱变育种的一种重要机制^[14].认为低能离子注入植物种子所引发的诱变反应并非离子注入的直接作用,而是其诱发出来的相关次级反应的综合作用的结果^[15].他们还对重离子注入与穿过对植物种子萌发力所起到的各种作用进行观察^[16-17].

20 世纪 90 年代随着高能重离子加速器装置的应用,近物所又开展了重离子对植物(大葱、玉米、小麦、油菜等)不同状态下的种子辐照后其生长发育的生理生化变化等生物学效应的研究^[18-22].同时对植物诱变的机理和机制开展了研究,并开展植物新品种的诱变和培育^[23].其中小麦新品种“陇辐 2 号”培育成功,2003 年通过甘肃省农作物品种审定.这是我国通过重离子束培育出来的第一个小麦新品种^[24].该课题组利用重离子辐照对甜高粱的生理发育的影响、品种改良等开展了深入的研究^[25-26].

北京师范大学低能核物理研究所(北京师范大学核科学与技术学院暨北京市辐射中心前身)是我国核学科建立较早的单位之一.很早开展低能离子注入诱变植物机制及生物效应方面的研究^[27-43].在低能离子注入诱变植物新品种也取得了显著的成果.与江西广昌白莲研究所合作培育子莲新品种——“京广 1 号白莲”,获得了明显的经济效益^[44].2004 年获得国家科技部、商务部、质量监督检验检疫总局和环保总局联合颁发的“国家重点新产品证书”.近几年开展了放射性离子对 DNA 结构的影响^[45-47],花卉、玉米、大豆的辐射诱变研究.目前已有 4 个新培育出来的品种申请了国家新品种权.

最近由中国农业科学院作物科学研究所、浙江大学、江苏里下河地区农科所、浙江省农科院、黑龙江省农科院、山东省农科院原子能所等多家单位合作承担了国家“十三五”重点研发计划“主要农作物诱变育种”,通过联合攻关,已经取得了令人欣喜的成果^[48].

2 辐射诱变育种现状

2.1 材料选择

从国际原子能机构(IAEA)的突变品种数据库(MVD)上知道,到目前为止全世界已经登记注册的辐射诱变的品种有约 3 200 多个,主要包括:谷物、花卉/观赏植物、豆类、水果、干果等(表 1).其中谷物占据总数的半壁江山.从近年国内辐射诱变育种工作的实际情况来看(表 2),主要辐射诱变选材依然是:花卉/观赏植物、谷物、豆类(本文把大豆归为豆类)、油料作物等几大类.

表 1 各种作物类型诱变品种的比例(修自 <http://www.naweb.iaea.org/naifa/pbg/mutation-breeding.html>)

Tab.1 Percentage of Mutant Varieties by crop type(Adapted from <http://www.naweb.iaea.org/naifa/pbg/mutation-breeding.html>)

作物	比例/%	作物	比例/%	作物	比例/%	作物	比例/%
谷物	49.5	水果/坚果	2.4	油料作物	2.1	根茎作物	0.6
花卉/装饰植物	21.9	蔬菜	2.4	其他	2.0	牧草	0.4
豆类	15.0	纤维作物	2.3	饲料	1.2	草药	0.2

植物种类确定的同时,该种类用来作为辐射材料的部位也基本确定.如:草本的植物大部分选择的是种子.从最近几年的工作(表 2)可以看出实验材料主要以种子为主.这与种子自身携带方便、体积小、易保存、繁殖系数高、诱变突变筛选方便等优点有关.但是有许多植物主要靠营养繁殖的,如大部分的球根植物,多年生的木本植物等可以选择球根、枝条等作为辐照材料.选择植物营养体进行辐射诱变需要注意嵌合体的分离.随着生物学技术的进步,实验材料趋于微观,可以选择花粉、愈伤组织、小鳞片等进行诱变.若想进一步扩展

材料的选择范围,完成材料筛选的工作,需要辐照育种工作者具有一定的生物学技能,尤其是要具备分子生物学基本知识。

表 2 近年国内主要的植物辐射诱变工作

Tab.2 The main works of the plant radiation mutation in recent years in China

作物 类群	作物 名称	辐照材料			辐照方法					关注问题					文献
		种子	种球	枝条	空间 搭载	⁶⁰ Co- γ	离子束	电子束、 X 射线	中子	形态 变化	建突变 体库	半致死 剂量	发育 变化	生理生 化变化	
谷物	籼稻	+				+				+	+	+			[49]
	粳米	+					+			+		+			[50]
	水稻	+					+			+		+		+	[51]
	水稻	+				+		+		+		+			[52]
	玉米	+					+		+			+	+		[53]
	玉米	+					+		+			+	+	+	[54]
	燕麦	+					+		+			+	+		[55]
	小麦				+	+		+				+	+		[56]
花卉/ 装饰 植物	锦葵	+				+						+	+	+	[57]
	大花秋葵	+				+						+	+	+	[57]
	元宝槭	+				+			+			+	+		[58]
	月季			+		+			+			+	+		[59]
	海州常山			+		+				+		+			[60]
	小苍兰		+			+			+			+	+		[61]
	鸢尾		+			+			+			+	+		[62]
	西红花		+			+			+			+			[63]
	紫露草			+			+				++	+		+	[64]
	天竺葵			+			+				+		+	+	[65]
	石蒜		+					+		+		+	+		[66]
	韭兰		+					+		+		+	+		[66]
	唐菖蒲		+					+			+	+			[67]
金莲花	+			+		+		+					+	[68]	
豆类	大豆	+				+				+	+	+	+		[69]
	大豆	+				+				+	+	+			[70]
	菜豆	+				+				+	+	+			[71]
	豇豆	+				+				+	+	+			[72]
水果/ 坚果	番木瓜	+					+			+		+			[73]
	猕猴桃	+					+					+	+		[74]
	澳洲坚果	+				+			+		+	+			[75]
蔬菜	辣椒	+				+					+	+		[76]	
油料 作物	花生	+				+				+			+		[77]
	花生	+						+	+				+	+	[78]
	花生	+						+	+				+		[79]
	胡麻	+				+			+		+	+			[80]
其他	烤烟	+				+					+	+			[81]
	毛竹	+				+			+			+			[82]
	百脉根	+					+		+	+	+			+	[83]
牧草	鹅观草	+				+						+			[84]
	羊草	+				+						+	+		[85]
	紫花苜蓿	+				+						+	+		[86]
	海滨雀稗			+		+			+						[87]

2.2 辐射源的选择

从近年来的工作(表2)可以看出,目前国内采用的辐射源,排在首位的依然是 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线是目前辐射诱变育种中最为常见的一种辐照源,通常分为外照射和内照射。外照射是把照射的材料放到照射室内或种植圃地里,内照射是将放射元素放入植物材料体内进行的。辐射也可分为急性照射和慢性照射等。所谓急性照射是短时间从几分钟到几小时内进行的照射;慢性照射是指长时间,几天、几周、几个月或者更长时间所进行的照射^[1]。因辐照室或圃地的空间比较大, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线植物辐射育种的选材范围相对也最全的,从种子、种球(球茎、球根、块根等)、接穗至整个营养体(整个植株),还有各种芽(花芽、枝芽、腋芽等)、花粉、愈伤组织等等,都可以被选择为辐照的材料。相对于其他物理诱变的方法, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照的优点主要有:操作简单、方便快捷、成本低,国内很多地方均可以开展辐照工作^[1-3]。

排序第二的辐照源是离子束。它是当今重要的辐射诱变源之一。相对于 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线的辐射诱变,离子束应用到辐射诱变育种中的历史比较短。研究发现重离子诱变的效率要比以往的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线、X射线及电子束等要高得多^[88]。重离子束作为一种新的辐射源,与X射线、 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线、电子束辐照等辐照技术相比,具有传能线密度(linear Energy Transfer, LET)大、相对生物学效应(Relative biological Effectiveness, RBE)高、损伤后修复效应小、能量沉积的空间分辨性好等生物学优势,因此可以在存活率较高的情况下得到较高的突变率^[13]。离子辐射适用的植物材料也比较广泛,包括:种子、植物的各种芽、叶(鳞叶)、花被片、小苗、愈伤组织、细胞胚、花粉等^[89]。

再次的辐照源是电子束。通过加速器形成高能电子束,通常是用于食品辐照加工^[90]。有人把它引入到了辐射诱变育种,探讨高能电子束对它们的损伤效应和诱变效应^[51]。电子束转靶X射线是最近出现的辐射诱变方法。有人也在尝试用于植物辐射诱变^[66-67]。

在表2里还能看到有人利用中子作为辐照源。中子源主要的有反应堆中子源、加速器和同位素中子源。中子自身是不带电荷,经过与其他物质作用形成电子使物质电离。目前已知中子比X射线和 γ 射线等诱变植物更为有效。因设备成本较高加上其剂量不易把控,在辐射育种应用少,机理研究更少^[90]。

有些研究者还选择运用多种辐照源进行辐射诱变研究,取得了明显的诱变效果。如:文献[68]对野生的金莲花种子进行了快中子、空间辐射(卫星搭载)、高能重离子等多种辐射源的辐射诱变试验。不同的辐射方式对金莲花的作用完全不同。快中子对花色影响显著,卫星搭载对叶形变异作用明显。文献[52]在利用高能电子束对2种基因型水稻品种进行了辐射诱变的研究的同时,与 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线处理进行了比较,探索最适辐射剂量。文献[56]通过航天育种筛选出优良的后代,再通过与优良材料杂交,后采用 ^{60}Co 辐照这样综合手段培育出小麦新品种——豫丰11,2018年通过国家审定。

总之,目前以单一辐照源诱变居多,多种辐照源共同使用少见。 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照和重离子辐照是两个最常用的辐照源。尤其是 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照非常普及便利。这也和我国钴源装置相对较多有关。而高能重离子加速器由于受到机时的限制,还无法与钴源相比。

2.3 关注问题

2.3.1 半致死剂量

辐射诱变所面临最主要的问题是如何确定或者找到最佳的辐照剂量。人们已经很早注意到不同的植物种类、同种植物的不同品种(如:玉米的不同品种)、同种植物的不同的发育阶段、一个植物体不同的器官(根、茎、叶、花、果实)的最佳辐照剂量都是不同的^[1-3]。通常半致死剂量是植物诱变效果最佳的辐照剂量。这个剂量已经在大多数植物诱变中得到了很好的验证^[1-3]。从近年的工作(表2)来看,有近半的工作没有关注这个剂量。可能与实验设计有关,如:剂量的选择梯度过窄,试验材料的样本有限等。

2.3.2 机理研究

文献[83]对模式植物百脉根(*L. Lotus japonicus*)进行辐射诱变,建立起突变体群,确定了半致死剂量,对辐射诱变导致基因组变异和DNA多态性等进行研究。文献[91]通过离子束诱导天竺葵筛选出一个花色及生理指标明显变异的突变体,运用分子生物学的手段对花色的机制进行了分析,预测出众多可能与天竺葵花色形成有关的基因,分析了辐射导致基因变化从而对花色产生影响的路径。文献[92]研究碳离子束对拟南芥的诱变效应,与以前主要研究表型的研究不同,他们更关注染色体畸变,遗传多态性或特定基因的测序分析,揭

示了全基因组的分子概况和突变率.试图为解释碳离子束诱变育种机理提供有价值的线索.文献[93]表明离子束刺激可以增强参与植物激素脱落酸(ABA)生物合成的基因的表达,从而增加水稻中的内源性 ABA 含量.ABA 路径参与了植物对离子束照射的适应.

文献[94]探讨了重离子辐照生物组织后重离子与生物分子相互作用的过程,包括核相互作用下的核碎裂、库仑相互作用下的电子激发及环境相互作用下的生物分子弛豫.进而建立起重离子与生物分子相互作用的微观动力学模型.旨在分析重离子与生物分子相互作用的机制.此工作的意思在于试图从理论上指导离子辐射诱变育种等辐射工作,减少工作的盲目性.

虽然有关辐射诱变机理研究伴随着辐射诱变工作的初始就已经开展,但从目前实际的情况(表2)来看,开展机理机制研究的确不多,诱变的机理不清.或许是已有的技术手段满足不了人们对诱变机理研究的需要,限制了研究者的工作.出现了诱变机理的研究落后于诱变育种应用的现实.

2.3.3 形态发育指标

从表2能够看到形态变化几乎是所有诱变育种工作都关注的问题.外部形态(根、茎、叶、花、果实、种子等)变化、植物体各个部位(叶、花、果实等)颜色的变化等是辐射诱变最直接的效应.是人们所希望看到的最基本变化.而发育变化在这里主要指,发芽率、出苗率、致死率等与生长发育相关的变化,与形态指标变化一样,大部分研究都会选择这些参数来关注.所谓突变体库就是因诱变导致的各种变化的突变个体共同所组成.这与选材的数量关系最大,其次是诱变剂量的梯度设立.尤其是在受到选材数量限制时,就无从建立突变体库.形态变化、发育变化,包括突变体库的建立基本是诱变植物的外部的宏观方面的变化,工作相对简单,容易操作.这也是诱变工作的基础.

2.3.4 生理生化指标

生理生化指标是指植物体代谢过程中的酶、化合物直至形成的脂肪,蛋白等化合物的变化.可以看出有近一半的研究(表2)关注了这些代谢的变化.和观察外部形态变化一样,目前的工作只是记录了变化的结果,如:脂肪、蛋白含量比对照的含量提高多少等.这只能算是工作的一个方面,而少有对其变化的机理进行研究和关注.

2.4 国外辐射诱变研究的进展

国外的植物辐射诱变研究现状与我国的大体一致.已经诱变出了大量的品种,可谓获得新的诱变品种不是问题.目前工作重点之一也是诱变机理的研究,主要关注的问题如:辐射诱变突变体的形态、生理变化相关的基因和蛋白质的确定,突变体内基因或染色体的形态、位置变异及其修复机制的研究等.如:日本研究者所做的相关工作^[95]:设想运用离子束发展高效的诱变技术,使得诱变育种更容易操控.他们抓住了植物诱变育种的三个要素:诱变效率、出发材料和诱变体筛选开展工作,即先摸清植物材料的遗传背景,尤其是确定关键形态特征的基因.在突变体发育早起开展分子生物学方法的筛选,缩短培育时间.从而形成高效的可控的离子束辐照诱变技术.该工作也是辐射诱变机理相关研究的小结,其意义在于提出了辐射诱变应朝着可控、可操作的方向发展.

2.4.1 机理研究

文献[96]研究了快中子对大豆的辐射诱变,注意到大豆基因组的恢复力,快中子导致的结构变化的模式,以及运用快中子作为新的基因缺失或者获得的来源之一.文献[97]报道了碳离子诱变水稻的突变体存在着其早期生长发育及分蘖期受到低温胁迫时影响叶绿体发育的一个重要的基因及蛋白.有助于人们理解植物光合作用中的相关蛋白质功能和作用.文献[98]开展了模式植物拟南芥的重离子束的诱变研究,通过全基因组的分析,发现重离子束不仅仅诱导染色体DNA的各种结构变异,还具有显著的诱导复杂的染色体间重组的能力.并预言重离子束在植物育种和建立突变体库等方面将会证明是独特的诱变源.文献[99]利用全外显子测序(whole-exome sequencing)的方法对重离子诱导下水稻的突变体进行了基因组水平分析.通过对未经过筛选的M2品系进行测序,发现突变总数与依据形态突变的常规突变频率有关.因此,对于诱导突变其突变频率可能是基于测序确定最佳照射条件的良好指标.

这些辐射诱变的研究通过应用包括最新的分子生物学手段寻找突变体形态、生理变化在分子水平的机制及其变化过程和规律,把辐射诱变和现代分子生物学技术很好地结合起来开展工作,缩短了研究周期,提

高了诱变筛选的效率.目前的研究均属于辐射效应的研究,是辐射诱变最基础研究.

2.4.2 机理和应用相结合的研究

文献[100]研究了碳离子诱变水稻产生的突变体,发现其中突变体由于缺失运输镉的蛋白,降低根部吸收镉的能力,减少了秸秆和籽实中镉的含量.由于突变是诱变形成的,而不是转基因,容易被消费者接受,对于全球种植的水稻这是一种可行的选择.此工作的意义在于不仅仅发现了突变体的中有害的微量元素镉的运输机理,同时解决了人类关心的粮食安全问题和对转基因育种的疑虑.这也是辐射诱变育种最初的目标及意义所在.

目前世界各国的研究者都在从不同的角度试图弄清楚辐射究竟导致植物体内发生了怎样的改变?即辐射产生效应的研究.通过彻底摸清辐射诱变产生形态、生理的的外部变化与其对应的各种分子水平的变化机制,在此基础上,去实现辐射诱变的终极目标——让辐射诱变成为一种可以预计、可以设计的育种方法.

3 建议及展望

3.1 完善基础设施和基本策略

通过与国际原子能机构和粮农组织的密切合作,中国在过去60年中已发布了1000多种突变作物品种,而在中国开发的品种占国际原子能机构/粮农组织在全球生产的突变品种数据库中目前列出的突变体的1/4^[101].我国科研工作者在相关离子加速器的组件更新和研制方面也取得了突破^[102].与之形成反差的是国内拥有可以用于育种的 γ 射线源越来越少了^[90],大部分的 γ 射线源主要用于食品加工等其他领域.此外大型加速器用在诱变育种方面的机时也是有限的.因此可以认为当前我国的辐射源与辐射诱变育种相关的政策等软硬件条件需要改善,以满足科研人员对辐射诱变工作的需求.

3.2 深入机理研究和综合运用

辐射诱变机理的探索是一个值得关注的科学问题.目前对各种诱变源的诱变机理的认识正在慢慢地清晰,相关研究也在不断地深入进行中.相信最终人们可以对诱变源的综合运用的诱变效果有所预判,朝着定向辐照,定向诱变的方向发展.鉴于目前参与研究机理的人占辐射诱变的比例很小,还是建议更多有能力的人参与到机理的研究之中.

诱变结果的筛选是诱变工作的重要环节.目前筛选方法多样.宏观的形态学方法,用来比较区分突变体与对照植物的各种形态学差异,是目前最常用的方法(表2).分子生物学的技术(转录组测序、蛋白质组技术等)是最近十几年快速发展起来的实验手段,效率高,精准程度高.它已经在辐射诱变工作中显露头角,也必将在未来辐射诱变育种中起到关键作用.从宏观到微观已经是诱变育种发展必然的趋势.继续深入工作将有助于人们探索辐射诱变的机理,进而从基因和分子层面上揭示辐射引发植物变异的秘密.在这里同时还要提醒大家注意的是宏观的植物形态学和分类学方法不能丢弃,如果一个连基本的植物形态学和分类学知识都没有研究者,所谓韭菜水稻不分,那怎么来取材辐照做分子筛选?

3.3 人才培养

辐射育种的未来离不开人才及人才的培养.辐射育种的现状(表2)也表明若想提高诱变育种的水平,缺乏高水平研究人员是不可以的.而这里需要提醒的是要注重复合型人才的培养,即同时具备物理和生物背景知识人才.只有这样的研究者才有能力去探索辐射诱变植物的机理.相信随着科技进步,植物辐射诱变研究者会在不久的将来揭开植物辐射诱变机理的秘密.

经过几十年的发展,目前我国植物诱变育种应用和机理研究都已经取得了显著的进步,政府和企业辐射诱变的研究和应用上也给予了支持.但是人才队伍建设还存在很多问题,机理研究的高度和范围都有提高和扩大的空间,辐射诱变研究的水平还参差不齐.相信通过几代辐射诱变研究者的不懈努力,我国的植物诱变育种和基础研究一定会迈上新的台阶,必将为我国的农业发展和辐射诱变理论研究做出应有的贡献.

参 考 文 献

[1] 温贤芳.中国核农学[M].郑州:河南科学技术出版社,2001.

WEN X F.China Nuclear Agricultural Sciences[M].Zhengzhou:Henan Scientific and Technological Publishing House,2001.

- [2] 顾光炜,董家伦.农业应用核技术[M].北京:原子能出版社,1992.
- [3] 杜若甫.作物辐射遗传与育种[M].北京:科学出版社,1981.
- [4] RONTGEN W K.A new form of radiation[J].Science,1896,3(72):726-729.
- [5] BECQUEREL H A.On radioactivity a new property of matter[M].Amsterdam:Nobel Lecture,1903:52-70.
- [6] STADLER L J.Mutations in barley induced by X-rays and radium[J].Science,1928,68(1756):186-187.
- [7] STADLER L J.Genetic effects of x-rays in maize[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,1928,14(1):69-75.
- [8] 王学栋,吴跃进,刘贵付,等.离子注入在水稻育种上的应用研究简报[J].安徽农业科学,1988(3):95.
- [9] 余增亮,何建军,邓建国,等.离子注入水稻诱变育种机理初探[J].安徽农业科学,1989(1):12-16.
YU Z L, HE J J, DENG J G, et al.Preliminary studies on the mutagenic mechanism of the ion implantation rice[J].Journal of Anhui Agricultural Sciences, 1989(1):12-16.
- [10] 杨剑波,吴李君,吴家道,等.应用低能离子束介导法获得水稻转基因植株[J].科学通报,1994,39(6):1530-1534.
- [11] 黄群策,李玉峰.离子束生物技术在水稻育种中的应用前景[J].杂交水稻,2002,17(5):5-8.
HUANG Q C, LI Y F.Prospect of ion beam biotechnology in rice breeding[J].Hybrid Rice,2002,17(5):5-8.
- [12] 吴跃进,杨惠成,程太平,等.直播水稻皖稻 143 选育及推广应用[J].安徽农学通报,2008,14(1):133-135.
- [13] 刘瑞媛,金文杰,曲颖,等.重离子束辐射诱变技术在植物育种中的应用[J].广西科学,2020,27(1):20-26.
LIU R Y, JIN W J, QU Y, et al.Application of heavy ion beam irradiation mutagenesis technology in plant breeding[J].Guangxi Sciences, 2020,27(1):20-26.
- [14] 卫增泉,李文建,颜红梅,等.超低能重离子注入作物育种的原初物理机制[J].激光生物学,1996,5(3):888-890.
WEI Z Q, LI W J, XIE H M, et al.Initial physical mechanisms of plant breeding with ultralow energy heavy ion implantation[J].Laser Biology, 1996,5(3):888-890.
- [15] 卫增泉,袁世斌,颜红梅,等.低能离子注入小麦种子胚内的射程分布[J].原子核物理评论,2003,20(3):218-220.
WEI Z Q, YUAN S B, XIE H M, et al.Range distribution of low energy ions implanted into embryo of wheat seed[J].Nuclear Physics Review, 2003,20(3):218-220.
- [16] 颜红梅,卫增泉,李文建,等.重离子注入与贯穿对作物种子萌发力的影响[J].辐射防护通讯,1994,14(4):71-73.
- [17] 颜红梅,王皓瀚,王菊芳,等.重离子束定点诱变育种初探[J].原子核物理评论,2001,18(3):174-176.
XIE H M, WANG H H, WANG J F, et al.Preliminary research into site-chosen mutation with heavy ion beams for crop breeding[J].Nuclear Physics Review, 2001,18(3):174-176.
- [18] 李兴林,卫增泉,王晓娟,等.50MeV/u 碳离子辐照休眠和萌发春麦种子的 M1 代比较[J].核农学报,2001,15(3):129-133.
LI X L, WEI Z Q, WANG X J, et al.Comparison between M1 generation of resting seed and sprout seed of spring wheat irradiated by 50MeV/u¹²C ion beams[J].Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2001,15(3):129-133.
- [19] 刘志芳,邵俊明,唐掌雄,等.不同能量重离子注入农作物的诱变效应[J].核农学报,2006,20(1):1-5.
LIU Z F, SHAO J M, TANG Z X, et al.Effects of heavy ion implantation on crop mutagenesis[J].Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2006,20(1):1-5.
- [20] 钱平平,侯岁稳,吴大利,等.¹²C⁶⁺重离子辐照大葱的生物学效应[J].辐射研究与辐射工艺学报,2007,25(4):211-215.
QIAN P P, HOU S W, WU D L, et al.Biological effects of ¹²C⁶⁺ heavy ions irradiation on *Allium fistulosum* L.[J].Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2007,25(4):211-215.
- [21] 陈学君,李文建,陈婧,等.不同剂量重离子辐照玉米自交系的生物学效应比较[J].原子核物理评论,2008,25(2):176-180.
CHEN X J, LI W J, CHEN J, et al.Study of biological effects of Heavy ion irradiation on maize inbred lines[J].Nuclear Physics Review, 2008,25(2):176-180.
- [22] 侯岁稳,孙兰弟,张颖聪,等.¹²C⁶⁺重离子辐照油菜诱变效应研究[J].核技术,2008,31(6):449-464.
HOU S W, SUN L D, ZHANG Y C, et al.Mutagenic effects of Brassica *napus* by ¹²C⁶⁺ ion beam[J].Nuclear Techniques, 2008,31(6):449-464.
- [23] 卫增泉,颜红梅,梁剑平,等.重离子束在诱变育种和分子改造中的应用[J].原子核物理评论,2003,20(1):38-41.
WEI Z Q, XIE H M, LIANG J P, et al.Application of heavy ion beam in induced mutation breeding and molecular modification[J].Nuclear Physics Review, 2003,20(1):38-41.
- [24] 赵连芝,王勇,甄东升,等.春小麦突变新品种:“陇辐 2 号”[J].核农学报,2005,19(1):80.
- [25] 董喜存,李文建,何金玉,等.碳离子束对甜高粱辐射诱变的当代效应[J].辐射研究与辐射工艺学报,2007,25(6):359-362.
DONG X C, LI W J, HE J Y, et al.Current effect of irradiation with ¹²C⁶⁺ ions beam on mutation of Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2007,25(6):359-362.
- [26] 董喜存,李文建.甜高粱重离子诱变改良研究进展[J].生物物理学报,2009,25(增刊):450-451.
- [27] 陆挺,卫俊智,朱凤绥,等.离子注入引起植物变异的研究[J].北京师范大学(自然科学版),1991,27(4):421-426.
LU T, WEI J Z, ZHU F S, et al.A study on mutations in plants caused by ion implantation[J].Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 1991,27(4):421-426.

- [28] 王彩莲,慎玫,陈秋方.离子注入甜菊的诱变效应研究[J].核农学报,1998,12(6):347-352.
WANG C L, SHEN M, CHEN Q F. Mutagenic effects of ion implantation on Stevia[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 1998, 12(6): 347-352.
- [29] 谢竞伟,周宏余,王平,等.低能重离子注入花生干种子深度-浓度分布的方向效应研究[J].物理学报,2003,52(10):2530-2533.
XIE J Y, ZHOU H Y, WANG P, et al. A study of directional effect of depth-concentration distribution for implanted heavy ions with low energies in dry peanut seeds[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(10): 2530-2533.
- [30] 陆挺,周宏余,丁晓纪,等.低能离子注入植物种子的深度分布及生物效应机理研究[J].物理学报,2005,54(10):4822-4826.
LU T, ZHOU H Y, DING X J, et al. The study of depth distribution for ion with low energy implanted into plant seeds and mechanism of biological effect[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(10): 4822-4826.
- [31] 陈学思,孙绍怡,周晓,等.离子注入对花生的生物学效应[J].花生学报,2009,38(2):20-24.
CHEN X S, SUN S Y, ZHOU X, et al. Biological effect of energy ion implantation on peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. Journal of Peanut Science, 2009, 38(2): 20-24.
- [32] LI K, JIANG S, YU H C, et al. Analysis of charge and mass effects on peroxidase expressions and activities in *Arabidopsis thaliana* after low-energy ion irradiation[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2009, 680: 64-69.
- [33] YU H C, ZHAO J, XU J, et al. Detection of changes in DNA methylation induced by low-energy ion implantation in *Arabidopsis thaliana* [J]. Radiation Research, 2011, 175: 599-609.
- [34] WANG N, XU Z, ZHANG F S, et al. Phenotype observation and variation analysis of F₂ generation of ion implanted chili pepper seeds[J]. Agricultural Science and Technology, 2011, 12(8): 1106-1132.
- [35] 汪宁,许峥,张丰收,等.离子注入线辣椒 F₂ 代表型观察及变异分析[J].中国农业通报,2011,27(2):109-113.
WANG N, XU Z, ZHANG F S, et al. Phenotype observation and variation analysis of chili pepper F₂ derived from the seeds by ion implantation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(2): 109-113.
- [36] 靳芳,李云爽,杨喜霞,等.电子束辐射对玉米及陆地棉花花粉萌发率的影响[J].中国农学通报,2011,27(24):164-168.
JIN F, LI Y S, YANG X X, et al. Effects of electron beam radiation on pollen germination rates of maize and *Gossypium hirsutum* L. [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(24): 164-168.
- [37] 李云爽,靳芳,杨喜霞,等.电子束辐射对金花葵花粉萌发率的影响[J].中国农业科技导报,2011,13(3):97-101.
LI Y S, JIN F, YANG X X, et al. Effect of electron beam irradiation on germination rate of *Abelmoschus manihot*'s pollen [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(3): 97-101.
- [38] 杨喜霞,靳芳,李云爽,等.电子束辐射对黄瓜、丝瓜和花生花粉萌发率和果实的影响[J].北京师范大学(自然科学版),2012,48(1):54-60.
YANG X X, JIN F, LI Y S, et al. effects of electron beam irradiation on pollen germination rate and fruit of cucumber, towel gourd, and peanut [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(1): 54-60.
- [39] ZHANG J H, WANG N Y, ZHANG F S. Analysis of accumulating ability of heavy metals in Lotus (*Nelumbo nucifera*) improved by ion implantation[J]. Plasma Science and Technology, 2012, 14(5): 424-427.
- [40] 张建华,王乃彦,张丰收.离子注入选育莲的矿物元素与重金属元素的吸收分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2012,48(3):254-256.
ZHANG J H, WANG N Y, ZHANG F S. Absorption of heavy metals and mineral elements by lotus; improvement by ion plantation [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48(3): 254-256.
- [41] 杨欢,王阳,何丽娟,等.碳离子注入向日葵种子的生物学效应研究[J].中国农学通报,2013,29(6):175-181.
YANG H, WANG Y, HE L X, et al. Biological effects of sunflower seeds implanted by carbon ion [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(6): 175-181.
- [42] 何丽娟,王阳,杨欢,等.电子束辐照金花葵幼苗的生物学效应及 RAPD 分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2014,50(1):52-57.
HE L X, WANG Y, YANG H, et al. Biological effect and RAPD analysis of electron irradiation on *Abelmoschus manihot* [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2014, 50(1): 52-57.
- [43] 李俊,张西西,董爱香,等.离子注入一串红的生物学效应研究[J].核农学报,2015,29(7):1302-1306.
LI J, ZHANG X X, DONG A X, et al. Study of biological effect of ion implantation on *Salvia splendens* [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(7): 1302-1306.
- [44] 谢克强,邹东旺,张香莲,等.利用离子注入法选育子莲新品系[J].中国蔬菜,2007(增刊):69-71.
XIE K Q, ZOU D W, ZHANG X L, et al. Studies on mutation breeding of seed lotus by ion implantation [J]. China Vegetables, 2007(sup): 69-71.
- [45] SHEN X, DING K K, ZHANG F S. Ion effects of Sr²⁺, Cs⁺ and I-on DNA in aqueous solutions [J]. Chemical Physics Letters, 2013, 574: 100-105.
- [46] ZHANG N, LI M R, ZHANG F S. Interactions of heavy ions with DNA and radiative aspects in physics of liquid matter. In: BULAVIN Leonid A, XU Limei. Springer Proceedings in Physics Volume 223 [M]. Cham: Springer, 2019.
- [47] LI M R, ZHANG N, XU H T, et al. Sequence dependence of the conformational transitions of DNA [J]. Chemical Physics Letters, 2020,

- 748;137344.
- [48] 中国核学会.2016—2017 核技术应用学科发展报告[M].北京:中国科学技术出版社,2018.
Chinese Nuclear Society.2016-2017 Report on advances in application of nuclear technologies[M].Beijing:China Science and Technology Press,2018.
- [49] 谭定宁,杨震,袁定阳. γ 射线诱变籼稻保持系 T98B 突变体的鉴定与农艺性状分析[J].激光生物学报,2019,28(3):274-280.
TAN Y N,YANG Z,YUAN D Y.Screening and agronomic analysis of mutants form indica maintainer rice T98B treated with γ - ray irradiation[J].Acta Laser Biology Sinica,2019,28(3):274-280.
- [50] 李景鹏,余丽霞,杨福.重离子(C)辐照诱变东北粳稻后代变异的初步研究[J].中国稻米,2019,25(1):58-61.
LI J P,YU L X,YANG F.Preliminary investigation of offspring variation of the Japonica rice in northeast China under heavy ion beam radiation[J].China Rice,2019,25(1):58-61.
- [51] 杨瑰丽,陈莹,郭涛,等.碳离子束辐照水稻诱变效应及突变体的筛选[J].华南农业大学学报,2018,39(2):29-33.
YANG G L,CHEN Y,GUO T,et al.Mutagenic effects of carbon ion beam irradiation on rice and screening for induced mutants[J].Journal of South China Agricultural University,2018,39(2):29-33.
- [52] 杨震,张莉,张逸妍,等.高能电子束对水稻的诱变效应[J].激光生物学报,2019,28(6):518-523.
YANG Z,ZHANG L,ZHANG Y Y,et al.Mutagenic effects of high energy electron beam irradiation on rice[J].Acta Laser Biology Sinica,2019,28(6):518-523.
- [53] 姚启伦,何莲,李文博,等.重离子辐射诱变对玉米自交系这样生理特性的影响[J].分子植物育种,2019,17(21):7145-7149.
YAO Q L,HE L,LI W B,et al.Physiological effects of heavy-ion beam irradiation on maize inbred lines[J].Molecular Plant Breeding,2019,17(21):7145-7149.
- [54] 董亚净.不同剂量重离子辐射玉米的抗性研究[D].天津:河北工业大学,2015.
DONG Y J.Research on the resistance of maize irradiated with different doses of heavy ions[D].Tianjin:Hebei University of Technology,2015.
- [55] 李蕊,张大伟,王聪,等.不同剂量 ^{12}C 重离子辐射对干旱胁迫下燕麦形态、产量及抗旱性的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),2015,51(4):553-558.
LI R,ZHANG D W,WANG C,et al.Changes of oats' morphology,yield and drought resistance radiated by different doses of ^{12}C under drought stress[J].Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2015,51(4):553-558.
- [56] 张福彦,杨保安,范家霖,等.航天诱变与 Co^{60} 辐照相结合选育国审小麦新品种豫丰 11[J].种子,2019,38(3):123-126.
ZHANG F Y,YANG B A,FAN J L,et al.Breeding of the state approved new wheat variety Yufeng11 by combining space mutation and Co^{60} irradiation[J].Seed,2019,38(3):123-126.
- [57] 赵艺璇,孙桂芳,杨建伟,等. ^{60}Co - γ 射线对 2 种园林植物种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].西部林业科学,2019,48(1):119-124.
ZHAO Y X,SUN G F,YANG J W,et al.Effects of ^{60}Co - γ irradiation on seed germination and physiological characteristics of two kinds of ornamental plants[J].Journal of West China Forestry Science,2019,48(1):119-124.
- [58] 张林,孙忠奎,张兴,等.辐射处理对元宝槭种子出苗率和苗期形态的影响[J].山东农业科学,2019,51(5):59-62.
ZHAN L,SUN Z K,ZHANG X,et al.Effects of radiation treatment on emergence rate and seedling morphology of *Acer truncatum* [J].Shandong Agricultural Sciences,2019,51(5):59-62.
- [59] 齐文全,江振威,王亚琴,等. ^{60}Co - γ 射线对 9 种庭院月季扦插苗的辐射效应研究[J].核农学报,2020,34(4):0681-0690.
QI W Q,JIANG Z W,WANG Y Q,et al.Radiation effects of ^{60}Co - γ ray on the cutting seedlings of nine garden rose[J].Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2020,34(4):0681-0690.
- [60] 杨秀莲,张莹婷,何岭,等. ^{60}Co - γ 射线对海州常山的辐照效应[J].中南林业科技大学学报,2019,39(3):10-15.
YANG X L,ZHANG Y T,HE L,et al.Mutagenic effects of ^{60}Co - γ ray irradiation on *Clerodendrum trichotomum* [J].Journal of Central South University of Forestry & Technology,2019,39(3):10-15.
- [61] 刘玲,王丹,黎熠睿,等. ^{60}Co - γ 射线对小苍兰的生物学效应[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(1):186-192.
LIU L,WANG D,LI Y R,et al.The biological effects of ^{60}Co - γ rays on *Freesia refracta* [J].Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2019,43(1):186-192.
- [62] 林兵,钟淮钦,黄敏铃,等. ^{60}Co - γ 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(4):0633-0639.
LIN B,ZHONG H Q,HUANG M L,et al.The study of ^{60}Co - γ ray irradiation effects on flower color of *Iris hollandica* [J].Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2019,33(4):0633-0639.
- [63] 陆中华,卢杰,毛碧增,等. ^{60}Co - γ 射线辐照对西红花种球诱变效应的影响[J].浙江农业科学,2019,60(4):650-653.
- [64] HE J Y,LU D,YU L X,et al.Pigment analysis of a color-leaf mutant in Wandering Jew(*Tradescantia fluminensis*) irradiated by carbon ions[J].Nuclear Science and Techniques,2011,22:77-83.
- [65] 余丽霞.离子束诱导天竺葵花色突变体的变异机理研究[D].兰州:中国科学院近代物理研究所,2016.
YU L X.Research on the mechanism of flower pigment mutation induced by carbon ions in Geranium(*Pelargonium* \times *hortorum*) [D].Lanzhou:Institute of Modern Physics,Chinese Academy of Sciences,2016.

- [66] 刘玲,王丹,闵可伶,等.电子束转靶 X 射线对红花石蒜、韭兰的诱变效应[J].西南农业学报,2019,32(3):620-626.
LIU L,WANG D,MIN K L,et al.Mutagenic effects of radiation of electron beam to target X-rays on red spider lily and *Zephyranthes grandiflora*[J].Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2019,32(3):620-626.
- [67] 黎熠睿,王丹,湛晓蝶,等.唐菖蒲响应电子束转靶 X 射线辐照的生物学效应和辐射敏感性评价[J].核农学报,2019,33(6):1049-1058.
LI Y R,WANG D,ZHAN X D,et al.Responds of electron beam to target X-ray irradiation on bio-effect of *Gladiolus gandavensis* and evaluation of radiosensitivity[J].Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2019,33(6):1049-1058.
- [68] 龚佳梦,耿金鹏,曹天光,等.金莲花的诱变生物学效应研究[J].河北工业大学学报,2019,48(2):9-15.
GONG J M,GENG J P,CAO T G,et al.Biological effects of induced mutation in *Trollius*[J].Journal of Hebei University of Technology,2019,48(2):9-15.
- [69] 孙孟园,白云,李振宇,等.⁶⁰Co-γ 射线诱变大豆“桂夏 7 号”突变体筛选[J].四川农业大学学报,2018,36(6):737-744.
SUN M Y,BAI Y,LI Z Y,et al.Screen of ⁶⁰Co-γ ray generated mutants from soybean ‘Guixia7’[J].Journal of Sichuan Agricultural University,2018,36(6):737-744.
- [70] 齐波,汝玄玄,贾召召,等.不同辐射强度对大豆 M₁ 代重要农艺性状的影响[J].中国农学通报,2019,35(12):40-45.
QI B,RU X X,JIA Z Z,et al.Radiation intensities affect important agronomic characters of soybean M₁ generation[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2019,35(12):40-45.
- [71] 陈其福,刘畅,斯琴图雅,等.菜豆 A18-1⁶⁰Co-γ 射线诱变和突变体库的构建[J].中国蔬菜,2019(5):38-44.
CHEN Q F,LIU C,SIQIN T Y,et al.Mutagenesis of snap bean cultivar A18-1 by ⁶⁰Co-γ rays and mutant library construction[J].China vegetables,2019(5):38-44.
- [72] 张忠武,邓钢桥,孙信成,等.⁶⁰Co-γ 射线诱导豇豆 M₂ 代群体变异分析及突变株筛选[J].中国农学通报,2019,35(4):23-32.
ZHANG Z W,DENG G Q,SUN X C,et al.Variation analysis and mutant screening of M₂ population of cowpea induced by ⁶⁰Co-γ ray[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2019,35(4):23-32.
- [73] 张颖聪,游恺哲,罗金棠,等.重离子辐射在番木瓜育种中的应用效果初报[J].中国热带农业,2015,64(3):73-79.
- [74] 杨爱红,刘腾云,周立斌,等.猕猴桃种子高能碳离子束辐射诱变育种适宜剂量的研究[J].江西科学,2019,37(6):839-845.
YANG A H,LIU T Y,ZHOU L B,et al.Search for proper dose of high energy carbon ion beams in kiwifruit radiation breeding[J].Jiangxi Science,2019,37(6):839-845.
- [75] 柳颀,倪书邦,孔广红,等.⁶⁰Co-γ 射线对不同品种澳洲坚果萌动种子的诱变效应[J].西南农业学报,2019,32(5):1149-1154.
LIU J,NI S B,KONG G H,et al.Mutagenic effects of ⁶⁰Co-γ irradiation on germinating seeds of different *Macadamia* cultivars[J].Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2019,32(5):1149-1154.
- [76] 朱丽梅,徐祥文,王淑霞,等.辣椒种子的⁶⁰Co-γ 射线辐射效应与半致死剂量研究[J].辣椒杂志,2019(2):23-27.
ZHU L M,XU X W,WANG S X,et al.The study of ⁶⁰Co-γ effects and semi-lethal dose on pepper seeds[J].Journal of China Capsicum,2019(2):23-27.
- [77] 姜德锋,王维华,乔利仙,等.花生辐照变异新品系的选育[J].核农学报,2017,31(9):1678-1683.
JIANG D F,WANG W H,QIAO L X,et al.Breeding new lines from irradiation mutagenesis in peanut[J].Journal of Nuclear Agricultural Sciences,2017,31(9):1678-1683.
- [78] 李欢倪,仇静静,马俊杰,等.花生半矮化突变体 sdml 的表型分析与赤霉素响应的研究[J].山东农业科学,2017,49(12):1-5.
LI H N,QIU J J,MA J J,et al.Phenotypic analysis of peanut semi-dwarf mutant sdml and its response to gibberellins[J].Shandong Agricultural Sciences,2017,49(12):1-5.
- [79] 王霞,刘录祥,乔利仙,等.快中子辐照结合组织培养培育花生新品种宇花 7 号[J].生物工程学报,2019,35(2):270-280.
WANG X,LIU L X,QIAO L X,et al.Breeding peanut variety Yuhua7 by fast neutron irradiation and tissue culture[J].Chinese Journal of Biotechnology,2019,35(2):270-280.
- [80] 赵东晓,王向誉,孙景诗,等.⁶⁰Co-γ 辐照不同胡麻品种种子萌发及幼苗生长的影响[J].草业科学,2019,36(1):178-189.
ZHAO D X,WANG X Y,SUN J S,et al.Seed germination and seedling growth of different varieties of *Linum usitatissimum* under ⁶⁰Co-γ irradiation[J].Pratacultural Science,2019,36(1):178-189.
- [81] 陈钰栋,陈瑶,杜金格,等.⁶⁰Co-γ 辐射诱变对烤烟品种发芽的影响[J].浙江农业科学,2018,59(12):2241-2242.
- [82] 曹志华,吴中能,王洋,等.毛竹辐射诱变实生优株生长性状的综合评价[J].中南林业科技大学学报,2019,39(2):34-40.
CAO Z H,WU Z N,WANG F,et al.Comprehensive evaluation of growth characteristics of superior *Phyllostachys pubescens* seedlings with radiation-treated mutagenesis[J].Journal of Central South University of Forestry & Technology,2019,39(2):34-40.
- [83] LUO S W,ZHOU L B,LI W J,et al.Mutagenic effects of carbon ion beam irradiations on dry *Lotus Japonicus* seeds[J].Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B,2016(383):123-128.
- [84] 蒋云,张洁,宣朴,等.⁶⁰Co-γ 辐照对鹅观草属植物种子发芽的影响[J].中国农学通报,2019,35(11):24-29.
JIANG Y,ZHANG J,XUAN P,et al.Effects of ⁶⁰Co-γ ray irradiation on *Roegneria* seed germination[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2019,35(11):24-29.
- [85] 韩微波,王建丽,申忠宝,等.⁶⁰Co-γ 射线诱变处理选育羊草新品种菁牧 3 号[J].黑龙江畜牧兽医,2019(1):111-113.

- [86] 刘淑霞,魏国江,孙宇峰,等.⁶⁰Co- γ 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.
- [87] 刘天增,谢新春,张巨明,海滨雀稗⁶⁰Co- γ 辐射诱变突变体筛选[J].草业学报,2017,26(7):62-70.
LIU T Z, XIE X C, ZHANG J M. Mutagenic effect of ⁶⁰Co- γ irradiation on turf characteristics of *Paspalum vaginatum*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(7): 62-70.
- [88] 周利斌,李文建,曲颖,等.重离子束辐照育种研究进展及发展趋势[J].原子核物理评论,2008,25(2):165-170.
ZHOU L B, LI W J, QU Y, et al. Progress and tendency in heavy ion irradiation mutation breeding[J]. Nuclear Physics Review, 2008, 25(2): 165-170.
- [89] 孙兰弟.¹²C⁶⁺重离子辐照鸡冠花和油菜的诱变效应及霸王组织培养的研究[D].兰州:兰州大学,2008.
SUN L D. Studies on mutagenic effects of *Celosia cristata* and *Brassica napus* irradiated by ¹²C⁶⁺ Heavy ions and plant regeneration of *Zygophyllum xanthoxylon*[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [90] 杨震,彭选明,彭伟正.作物诱变育种研究进展[J].激光生物学报,2016,25(4):302-308.
YANG Z, PENG X M, PENG W Z, et al. Progress of study on crop mutation breeding[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2016, 25(4): 302-308.
- [91] YU L X, LI W J, DU Y, et al. Flower color mutants induced by carbon ion beam irradiation of geranium (*Pelargonium x hortorum*, Bailey)[J]. Nuclear Science and Techniques, 2016, 27: 111-118.
- [92] DU Y, LUO S W, LI X, et al. Identification of substitutions and small insertion-deletions induced by Carbon-Ion Beam Irradiation in *Arabidopsis thaliana*[J]. Frontiers in Plant Science, 2017(8):1851.
- [93] CHEN Q F, YA H Y, FENG Y R, et al. Expression of the key genes involved in ABA biosynthesis in rice implanted by ion beam[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2014, 173(1): 239-247.
- [94] 张丰收.离子与生物分子相互作用的微观动力学理论[J].原子核物理评论,2006,23(1):23-34.
ZHANG F S. Interactions of heavy ions with biomolecules; a dynamical microscopic approach[J]. Nuclear Physics Review, 2006, 23(1): 23-34.
- [95] HASE Y, AKITA Y, KITAMURA S, et al. Development of an efficient mutagenesis technique using ion beams: Toward more controlled mutation breeding[J]. Plant Biotechnology, 2012, 29: 193-200.
- [96] BOLON Y, STEC A, MICHNO J M, et al. Genome resilience and prevalence of segmental duplications following fast neutron irradiation of soybean[J]. Genetics, 2014, 198: 967-981.
- [97] MORITA R, NAKAGAWA M, TAKEHISA Y, et al. Heavy-ion beam mutagenesis identified an essential gene for chloroplast development under cold stress conditions during both early growth and tillering stages in rice[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2017, 81(2): 271-282.
- [98] HIRANO T, KAZAMA Y, ISHII K, et al. Comprehensive identification of mutations induced by heavy-ion beam irradiation in *Arabidopsis thaliana*[J]. The Plant Journal, 2015, 82: 93-104.
- [99] ICHIDA H, MORITA R, SHIRAKAWA Y, et al. Targeted exome sequencing of unselected heavy-ion beam-irradiated populations reveals less-biased mutation characteristics in the rice genome[J]. The Plant Journal, 2019, 98(2): 301-304.
- [100] ISHIKAWA S, ISHIMARU Y, IGURA M, et al. Ion-beam irradiation, gene identification, and marker-assisted breeding in the development of low-cadmium rice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(47): 19166-19171.
- [101] GASPARD M. How Nuclear Techniques Help Feed China[EB/OL][2019-04-04]. <https://www.iaea.org/newscenter/news/how-nuclear-techniques-help-feed-china>.
- [102] 孙振武,李玉晓,姜胜男,等.离子静电加速器加速管的研制[J].郑州大学学报(自然科学版),2001,33(2):35-38.
SUN Z W, LI Y X, JIANG S N, et al. Development of acceleration tube of ion electrostatic accelerator[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Sciences), 2001, 33(2): 35-38.

Research progresses in the plant breeding of radiation mutation

Zhang Fengshou^{1,2,3}, Wang Qing²

(1. The Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education; College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. The Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education; Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China; 3. Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator of Lanzhou, Lanzhou 730000, China)

Abstract: An outline history about the plant breeding of radiation mutation was summarized, and the situation of the mutation breeding of recent years (mainly in China) was reviewed either. The shortcoming in the course of mutation breeding was analyzed, as well as some suggestion and prospects were offered here.

Keywords: plant breeding; radiation mutation; situation analysis

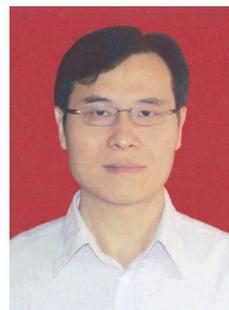


本期专家介绍



张丰收,博士,北京师范大学京师学者特聘教授,博士生导师.曾获中国科学院“引进国外杰出人才(百人计划)”择优支持、国家杰出青年基金,享受政府特殊津贴.现任北京师范大学核科学与技术学院院长,北京市辐射中心主任.兼任中国核学会射线束技术分会理事长、中国辐射防护学会放射生态分会理事长、北京核学会副理事长、中国核物理学会常务理事、中国辐射防护学会教育与科普分会常务理事、中国辐射防护学会电离辐射分会常务理事、中国生物物理学会辐射与环境生物物理专业委员会委员、教育部高等学校教学指导委员会“核工程类专业教学指导委员会”副秘书长、中国科学院核辐射与核能技术重点实验室学术委员会委员、中国科学院中子输运理论与辐射安全重点实验室学术委员会委员、中国科学院重离子辐射生物医学重点实验室学术委员会委员、北京市放射生物学重点实验室学术委员会委员、意大利卡塔尼亚大学国际核与粒子天体物理博士研究生学术委员会委员.目前主要从事重离子核物理、重离子与物质相互作用微观机理、射线束辐射技术及应用、材料辐射损伤和离子辐射育种方面的研究.

汤清虎,河南师范大学教授,博士,硕士生导师.2004年毕业于厦门大学,获得博士学位.2007—2009年在新加坡南洋理工大学化学与生物医学工程学院从事博士后研究.为河南省高校科技创新人才支持计划和河南省高等学校青年骨干教师资助计划获得者.长期从事绿色催化材料合成、催化反应机理、精细化学品绿色制造等方面的研究.主持或作为主要成员参与完成国家自然科学基金、新加坡教育部项目、新加坡科技局项目等课题 10 余项,先后在 *Green Chem*, *Chem Commun*, *J Catal*, *Chem Mater*, *J Mater Chem*, *ChemCatChem*, *Small*, *J Power Sources* 等国际著名期刊发表 SCI 论文 50 余篇,获授权专利 8 件.



邵云,河南师范大学生命科学学院教授,博士,硕士生导师,河南省小麦研究会理事.研究领域为作物栽培生理生态与农业资源高效利用,多年来主要开展了麦田生态系统养分分配规律与碳氮循环、不同轮作种植模式资源高效利用、麦田重金属污染机制及减控技术等研究工作,曾在澳大利亚联邦科学与工业组织(CSIRO)访学开展作物生态系统模型研究.先后主持和参加“十五”、“十一五”、“十二五”国家科技支撑计划项目子课题、“十三五”国家重点研发计划项目子课题及省厅级科研项目近 20 项;在国内外期刊上发表学术论文 50 余篇;主编及参编著作 9 部,编译著作 1 部;获省科技进步三等奖 2 项.曾获“河南省高校优秀党员”、“河南师范大学青年教师课堂教学十佳教师”、“优秀教师”等荣誉称号.