

文章编号: 1007-4627(2023)01-0106-07

碳离子束辐照对油葵当代结实特性的影响

陈晓锋^{1,2}, 周利斌^{2,3}, 金文杰², 王转子², 张文辽³, 李文建², 彭云玲¹, 曲颖^{2,3,†}, 慕平^{1,†}

(1. 甘肃农业大学, 兰州 730070;

2. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

3. 白银市科近重离子束生物产业创新研究院, 甘肃 白银 730900)

摘要: 利用兰州重离子研究装置(HIRFL)的碳离子束辐照油葵干种子, 统计出苗率、存活率、花粉活力、柱头可授性和不同授粉条件下的结实率, 研究碳离子束辐照对油葵当代结实特性的影响。结果表明, 出苗率、存活率、花粉活力、结实率随着辐照剂量增加而降低; 与对照相比, 80 Gy辐照后出苗率下降55.68%、存活率下降64.66%; 20~160 Gy辐照显著降低了自交结实率, 40~160 Gy辐照显著降低了混交结实率; 花粉活力由对照组的92.01%降低为160 Gy的47.59%; 随着辐照剂量的增加, 具有较强可授性柱头的百分比逐渐降低, 具有较弱可授性柱头和不具可授性柱头的百分比逐渐增加。研究表明, 碳离子束辐照对油葵当代的损伤作用, 影响了花器官的育性, 降低了结实率; 根据存活率的半致死剂量, 结合混交结实率的半不育剂量, 确定油葵适宜辐照剂量范围55~153 Gy, 为碳离子束辐照油葵育种选择适宜辐照剂量提供了参考。

关键词: 碳离子束辐照; 油用型向日葵; 结实率; 花粉活力; 柱头可授性

中图分类号: S565.5; TL99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2022030

0 引言

重离子束辐照能够诱发基因突变, 使作物在产量、品质和抗性等方面产生广泛的变异, 是种质创新和选育新品种的重要途径之一。重离子束具有较高的传能线密度(Linear Energy Transfer, LET), 在其径迹上沉积较高的能量, 引起高密度电离事件, 造成局部损伤较为严重, 所以具有更高的相对生物学效应(Relative Biological Effectiveness, RBE)^[1], 在诱变育种中表现为诱变效率高、变异性状丰富、变异性状易稳定^[2-3]。国内外研究人员利用重离子束辐照获得了水稻、大豆、小麦、玉米、辣椒、苹果、烟草、牧草、拟南芥、百脉根等植物的优良突变材料^[4-7]; 在花卉育种中得到了花型花色改变、观赏价值提高的花卉新品种, 并进入商业化生产^[8-9]; 我国学者先后育成了皖麦32号、皖麦42号、皖麦43号和S9042、D9055、早粳14、中粳63等一系列小麦和水稻新品种^[10-11]以及陇辐2号春小麦、岷归3号和岷归4号当归、渭党2号和渭党3号党参、陇芪1号黄芪、近甜1号甜高粱、芸选2号红芸豆、花色随温度变化的冬花夏草等植物新品种^[12-13]。

向日葵(*Helianthus annuus* L.)是菊科草本作物, 分为油用型、食用型和观赏型。向日葵具有广泛的生态适应性和较高的经济价值, 近年来成为我国农业结构调整和美丽乡村建设的特色经济作物。葵花籽油富含不饱和脂肪酸、生育酚含量比例均衡, 易被人体吸收, 在国际上被视为优质油脂, 因其营养价值和工业特性成为应用最为广泛的植物油之一^[14]。世界范围向日葵种植面积超过2 000万hm², 我国种植面积稳定在100万hm²左右, 主要分布东北、西北和华北等地区^[15-16]。品种是农业生产的核心, 经过我国育种人的不懈努力, 实现了食葵杂交品种的国产化, 打破了国外的垄断, 然而国内油葵杂交品种市场大部分仍然被进口种子占领^[17]。种质创新是向日葵育种可持续发展的动力, 利用重离子束诱变技术对油葵种质进行创新和改良, 是加快油葵新品种培育的有效途径之一。重离子束辐照向日葵的相关研究较少^[18-20], 结实率是向日葵产量的重要组成因素之一, 当代结实特性是辐照损伤的重要生殖指标, 对于认识损伤与突变关系至关重要, 重离子束辐照对向日葵当代结实特性的影响目前尚未见报道。本研究利用不同剂

收稿日期: 2022-03-11; 修改日期: 2022-04-29

基金项目: 核能开发科研项目(E11Z212GQ1); 国家自然科学基金资助项目(12135016); 中科院院地合作项目(Y706210); 中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(Y201974)

作者简介: 陈晓锋(1996-), 男, 湖北武穴人, 硕士研究生; 从事农艺与种业研究; E-mail: 1203341231@qq.com

†通信作者: 曲颖, E-mail: quying102@impcas.ac.cn; 慕平, E-mail: mup@gsau.edu.cn

量碳离子束辐照油葵种子, 研究其对油葵结实特性的影响, 并确定适宜的辐照剂量, 为重离子束辐照油葵、创新种质提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

实验材料为中国科学院近代物理研究所生物物理室自育的油葵保持系HB, 挑选颗粒饱满、大小一致的种子用于碳离子束辐照试验。

1.2 方法

1.2.1 辐照处理

油葵种子平铺于辐照培养皿中, 利用兰州重离子加速器国家实验室的重离子研究装置(HIRFL)提供的碳离子束进行辐照处理。所用碳离子束 $^{12}\text{C}^{6+}$ 初始能量为80 MeV/u, 辐照剂量分别为20, 40, 60, 80, 100, 120, 160 Gy。剂量率40 Gy/min, 以未辐照种子为对照(0 Gy), 辐照试验重复4次。

1.2.2 出苗率和存活率测定

辐照后的种子2021年4月25日播种于中国科学院近代物理研究所白银重离子辐照育种基地(36°30'3"N, 104°11'15"E), 随后进行常规栽培管理。子叶出土统计出苗率, 现蕾期统计存活率。出苗率=子叶展开植株数/播种粒数 $\times 100\%$; 存活率=存活株数/播种粒数 $\times 100\%$

1.2.3 结实率测定

采用四种不同授粉方式处理。(A)自然授粉: 不套袋、不去雄、无人工干预, 检测混交结实率;(B)自花授粉: 开花前套袋, 不去雄, 无人工干预, 检测自交结实率;(C)辐照植株的花粉给未辐照植株的柱头授粉: 开花前套袋, 开花后取辐照植株的花粉给未辐照的同型不育系进行授粉, 检测辐照花粉 $\times$ 未辐照柱头的异交结实率;(D)未辐照植株的花粉给辐照植株的柱头授粉: 开花前套袋, 对辐照植株进行去雄, 保留柱头; 取未辐照植株的花粉给辐照植株的柱头授粉, 检测辐照柱头 $\times$ 未辐照花粉的异交结实率。套袋采用80目纱网袋, 每个处理10株。成熟期单株收获, 统计结实率。结实率(%)=饱满籽粒数/单盘籽粒数 $\times 100\%$

1.2.4 花粉活力测定

采用改良亚历山大染色法[21]。花药未散粉前采集花药, 保存于卡诺固定液(酒精:氯仿:醋酸=6:3:1, 体积比)中, 固定2 h以上。每个剂量采集10株, 每株10枚花药。将花药放置在干净的载玻片上, 用镊子轻轻分开花药, 使花粉散开, 加入亚历山大染色液, 在酒精灯

上缓慢加热至载玻片上染色液接近干燥, 轻缓盖上盖玻片, 显微镜下4 $\times$ 10倍观察, 育性正常的花粉粒染成紫红色, 不育的花粉粒染成蓝绿色, 每枚花药观察三个视野, 每个视野观察100粒左右花粉。花粉活力=紫红色花粉粒数/观察花粉总粒数 $\times 100\%$ 。

1.2.5 柱头可授性测定

采用联苯胺-过氧化氢法[22], 柱头展开后采集当天所开的Y状柱头, 放置在凹面载玻片上, 加入联苯胺-过氧化氢反应液(1%联苯胺:3%过氧化氢:水=4:11:22, 体积比), 使其完全浸泡。每个剂量采集10株, 每株10个柱头。显微镜下观察柱头的染色情况和气泡变化。根据柱头周围反应液颜色变化程度和气泡大小多少判断柱头可授性强弱。不具可授性: 颜色无变化, 无气泡产生, 记为“-”; 具有较弱可授性: 颜色呈浅蓝色, 伴有少量气泡产生记为“+”; 具有较强可授性: 颜色呈深蓝色, 伴有大量气泡产生“++”。

1.2.6 数据分析

所有数据统计均采用Excel 2016进行基本统计量的计算和简单相关性分析, 显著性分析采用方差分析(ANOVA)在 $P<0.05$ 水平检验显著性差异。Origin2020对数据处理结果进行制图。

2 结果与分析

2.1 碳离子束辐照对油葵出苗率和存活率的影响

如图1所示, 碳离子束辐照后油葵种子出苗率和幼苗存活率变化趋势一致, 随着辐照剂量的增加呈下降趋势。辐照剂量在0~80 Gy之间, 出苗率和存活率急剧下降, 与对照相比, 80 Gy辐照出苗率下降55.68%, 存活率下降64.66%; 辐照剂量80~160 Gy之间出苗率和存活率降低较为平缓, 与80 Gy相比, 160 Gy辐照出苗率下降20%, 存活率降低18.71%。表明碳离子束辐照对油葵的出苗率和存活率抑制作用具有明显的剂量效应。

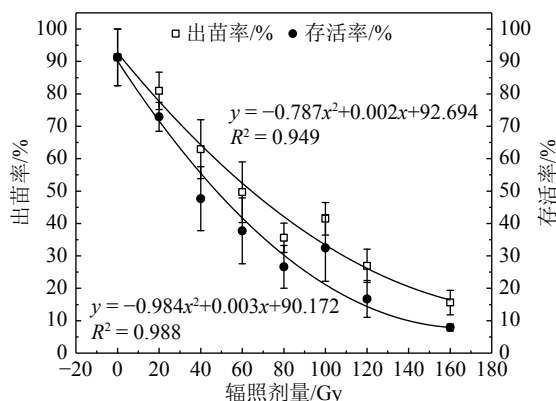


图1 碳离子束辐照对油葵出苗率和存活率的影响

根据回归方程计算得出油葵存活率半致死剂量 (LD_{50}) 为 55 Gy。

2.2 碳离子束辐照对油葵花粉活力的影响

如图 2 所示, 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160 Gy 的碳离子束辐照后花粉活力均值分别为 92.01%, 92.83%, 88.28%, 90.54%, 78.55%, 79.61%, 60.95%, 47.59%, 碳离子束辐照抑制了花粉活力。花粉活力变化范围分别为 82.91%~97.59%, 58.14%~97.69%, 50.63%~97.65%, 43.75%~98.22%, 36.13%~98.69%, 33.96%~96.26%, 26.25%~96.94%, 16.37%~96.39%。对照组的花粉活力分布较为集中, 随着辐照剂量增加, 花粉活力分布逐步下移, 碳离子束对花粉活力的抑制作用逐渐增大。对照组上下四分位数差异较小, 组内变异幅度较小。较低剂量 (20~60 Gy) 下, 花粉活力与对照组差异不显著, 但是低活力的花粉数量逐渐增加; 高剂量 (80~160 Gy) 辐照显著降低了花粉活力 ($P<0.05$), 上下四分位数差异也逐渐增大, 碳离子束辐照增加了花粉活力变异幅度。

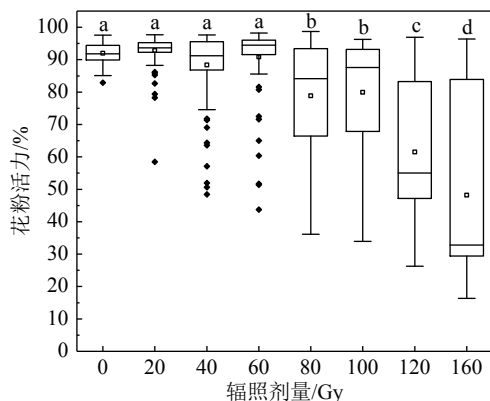


图 2 碳离子束辐照对油葵花粉活力的影响

2.3 碳离子束辐照对油葵柱头可授性的影响

将柱头可授性分为不具有可授性、具有较弱可授性、具有较强可授性三个等级。如图 3 所示, 随着辐照剂量

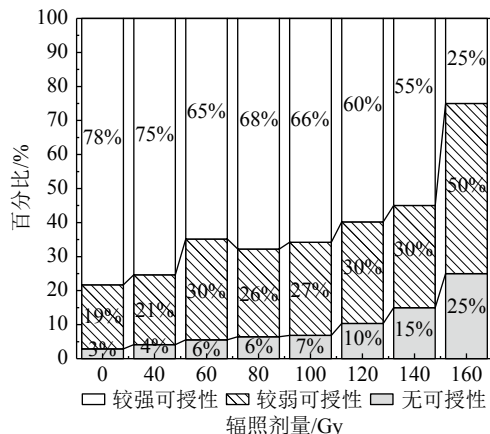


图 3 碳离子束辐照对油葵柱头可授性的影响

增加, 较强可授性柱头的百分比逐渐减低, 从 0 Gy 的 78% 降低为 160 Gy 的 25%; 较弱可授性和无可授性柱头的百分比逐渐增加。较弱可授性的柱头百分比从 0 Gy 的 19% 增加为 160 Gy 的 50%; 不具有可授性柱头的百分比从 0 Gy 的 3%, 增加为 160 Gy 的 25%。表明碳离子束辐照降低了油葵柱头的可授性。

2.4 碳离子束辐照对不同授粉方式油葵结实率的影响

油葵是异花授粉作物, 自交结实率较低, 在生产上主要在自然条件下通过昆虫进行授粉杂交, 而在亲本材料选育过程中则需要通过自花授粉选择纯合的自交系。本文测定了自然授粉条件下的混交结实率和自花传粉条件下的自交结实率。如图 4 所示, 混交结实率显著高于自交结实率 ($P<0.05$)。碳离子束辐照后, 混交结实率和自交结实率变化趋势一致, 即随着辐照剂量的增加, 混交结实率和自交结实率分别与辐照剂量呈线性关系逐渐下降。与对照相比, 40~160 Gy 的碳离子束辐照显著降低了油葵混交结实率 ($P<0.05$), 20~160 Gy 的碳离子束辐照显著降低了油葵自交结实率 ($P<0.05$)。根据回归方程计算得出混交结实率的半不育剂量 (SD_{50}) 为 153 Gy, 自交结实率的半不育剂量 (SD_{50}) 为 84 Gy。

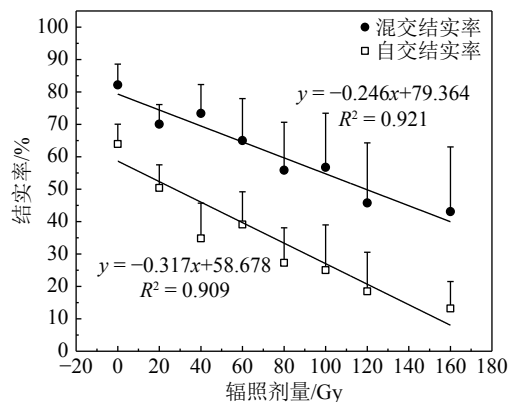


图 4 碳离子束辐照对油葵自交、混交结实率的影响

为了探究雄蕊在碳离子束诱导结实率降低中的作用, 用辐照植株的花粉给未辐照植株的柱头授粉, 测定油葵异交结实率。结果显示 (见图 5), 辐照花粉×未辐照柱头的异交结实率随着碳离子束辐照剂量增加而逐渐下降, 与对照相比, 80~160 Gy 碳离子束辐照显著降低辐照花粉×未辐照柱头的异交结实率 ($P<0.05$)。为了探究雌蕊在碳离子束诱导结实率降低中的作用, 用未辐照植株花粉给辐照植株的柱头进行授粉, 测定油葵异交结实率。结果 (图 5) 显示, 辐照柱头×未辐照花粉的异交结实率随着碳离子束辐照剂量增加而逐渐下降, 与对照相比, 20~160 Gy 碳离子束辐照显著降低辐照柱头×未辐照花粉的异花授粉结实率 ($P<0.05$)。

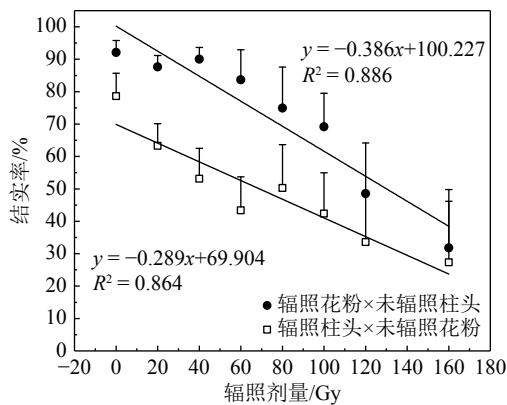


图 5 碳离子束辐照对油葵异花授粉结实率的影响

2.5 花粉活力、柱头可授性与结实率的相关性分析

为验证碳离子束辐照处理下花粉活力、柱头可授性对结实率的影响，进行了相关性分析。如表 1 所列，碳离子束辐照处理下，花粉活力与自交结实率成显著正相关 ($P<0.05$)、与混交结实率、辐照花粉×未辐照柱头异交结实率成极显著正相关 ($P<0.01$)，相关系数在 0.831 1~0.985 5 之间。如表 2 所列，碳离子束辐照处理下，较强可授性柱头的百分比与自交结实率、混交结实率、辐照柱头×未辐照花粉异交结实率呈显著正相关 ($P<0.05$)，相关系数在 0.824 1~0.831 4 之间。如表 3 所列，碳离子束辐照处理下，不具有可授性柱头的百分比与自交结实率、混交结实率、辐照柱头×未辐照花粉异交结实率成显著负相关 ($P<0.05$)，相关系数在 -0.861~-0.812 之间。

表 1 花粉活力与结实率相关性分析

结实率	方程	<i>r</i>	显著性
自交	$y=0.853x-33.19$	0.831 1	*
混交	$y=0.799x-0.454$	0.900 8	**
辐照花粉×未辐照柱头	$y=1.302x-30.47$	0.985 5	**

注：*表示显著性差异 $P<0.05$ ，** $P<0.01$ 。

表 2 较强可授性柱头百分比与结实率相关性分析

结实率	方程	<i>r</i>	显著性
自交	$y=0.840x-17.610$	0.824 1	*
混交	$y=0.728x+17.796$	0.825 7	*
辐照柱头×未辐照花粉	$y=0.823x-1.608$	0.831 4	*

注：*表示显著性差异 $P<0.05$ 。

表 3 不具有可授性柱头百分比与结实率相关性分析

结实率	方程	<i>r</i>	显著性
自交	$y=-1.870x+51.844$	-0.812	*
混交	$y=-1.715x+78.855$	-0.861	*
辐照柱头×未辐照花粉	$y=-1.865x+66.744$	-0.834	*

注：*表示显著性差异 $P<0.05$ 。

3 讨论与结论

近年来，重离子诱变技术以突变谱广、突变率高等诸多优点，被广泛应用于诱变育种工作中。重离子束辐照诱变能引起植株当代明显的表型和生理方面的变化，对不同植物种子萌发和幼苗生长存在剂量效应。前期研究表明，碳离子束对植物生长发育具有双重效应，即低剂量辐照具有促进作用，高剂量辐照具有抑制作用 [23-24]。本文结果显示，碳离子束辐照油葵后，出苗率、存活率呈下降趋势，随着辐照剂量增加而降低，与碳离子束辐照大豆、玉米、苣蓝等植物的结果相似 [25-27]，但并未观测到低剂量辐照的促进作用，这可能与剂量的选择有关，推测 20 Gy 以下的辐照可能对油葵萌发率和存活率具有促进作用。采用低能 N^+ 离子，以注入的方式对向日葵种子进行辐照处理。研究发现，在一定剂量范围内，低能 N^+ 离子注入对向日葵种子发芽率影响较小，随着剂量增大，发芽率逐渐降低 [18]。低能碳离子注入向日葵种子，辐照次数不同、品种不同，低能碳离子辐照对种子萌发率的作用也不同 [20]。结果表明重离子束辐照对植物的影响与植物品种、辐照离子参数、辐照方式、辐照剂量有关。

选择适宜的辐照剂量，是重离子束诱变育种成功的前提。不同植物种类辐照敏感性不近相同，一般采用半数有效剂量作为适宜的辐照剂量 [24-29]。目前半数有效剂量的测定没有统一的指标，可采用的指标包括种子发芽率、植株成活率、生长抑制程度和植株的不育程度等 [29]。存活率是评价和衡量辐照对植物损伤水平的直接指标。根据油葵幼苗存活率与辐照剂量的回归方程计算出油葵存活率的半致死剂量为 55 Gy。适宜的辐照剂量不仅抑制植株生长发育，又能保持有足够数量能结实的植株。结实率是产量性状组成之一，结实率的多少直接关系着 M2 代是否能够获得足够的可供选择的突变群体。碳离子束辐照降低了油葵混交结实率和自交结实率，这与拟南芥 [30]、水稻 [31] 的结果一致。当辐照剂量为 40~160 Gy 时，M1 代植株混交结实率显著低于对照，而较低剂量 20 Gy 辐照下的混交结实率与对照没有显著差异，表明重离子束诱变对油葵混交结实率影响可能存在剂量阈值 [32]。而对于油葵自交结实率的影响并未发现阈值，可能与植物不同性状的辐照敏感性不同有关 [31]，也与剂量的选择有关。育性是作物得到稳定遗传后代的重要前提，结实率是反映育性辐照损伤的重要指标。在育种实践中，因同类植物辐照品种的变化，剂量也需要作适当调整。对适宜辐照剂量的预测，不同学者采用不同的范围 [33-34]。本文根据测量指标的剂量效

应曲线并参考前人的部分结论^[34], 采用半致死剂量(LD₅₀)和混交结实率半不育剂量(SD₅₀)为依据, 确定油菜适宜剂量范围为 55~153 Gy, 为油菜碳离子束辐照育种选择适宜辐照剂量范围提供参考。

雌蕊和雄蕊的正常发育对于植物传粉、受精和种子发育具有重要作用。雌蕊和雄蕊等花器官育性对结实率有着很大的影响, 为了探究雄蕊和雌蕊在碳离子束诱导结实率降低中的作用, 本文检测了异花授粉的结实率。80~160 Gy 碳离子束辐照后的植株花粉给未辐照植株的柱头授粉, 结实率显著低于对照。赵丽梅等^[35]的研究结果表明, 当大豆花粉败育数量超过 60 % 时, 授粉成功率显著降低, 最终大豆结实率锐减, 认为大豆结实率主要由花粉育性控制, 因此推测碳离子束可能降低了花粉的育性, 进而导致结实率降低。20~160 Gy 碳离子束辐照后的植株柱头与未辐照的花粉进行杂交, 结实率显著低于对照。对于日本木瓜的研究认为较低的结实率主要是大量雌蕊的败育所导致的^[36], 可以判断碳离子束辐照降低雌蕊的育性也是导致结实率降低的原因之一。碳离子束显著降低雄蕊和雌蕊育性的剂辐射量不同, 可能是辐照植株形成的花粉因受损严重败育, 因而在柱头萌发前淘汰, 柱头上育性正常的花粉粒比例增加, 而使得较低剂量的对结实率降低作用减少。花粉活力是指花粉具有存活、生长、萌发和发育的能力。碳离子束辐照降低了花粉活力, 并增加了花粉活力变异的幅度, 这与碳离子束辐照对玉米花粉活力的影响相似^[26]。碳离子束辐照处理下, 花粉活力变化与自交结实率、混交结实率、辐照花粉×未辐照柱头异交结实率成显著正相关。Arporn 等^[37]在花期利用硼处理向日葵, 发现花粉活力与结实率成显著正相关。说明碳离子束可能通过降低花粉活力, 进而降低了结实率。柱头是雌蕊接受花粉的部位, 具有可授性的柱头能够黏附花粉, 并为花粉萌发及花粉管生长提供营养物质。碳离子束辐照后, 较高可授性柱头的百分比逐渐降低, 而较低可授性和不具有可授性柱头的百分比逐渐增加, 较强可授性的柱头占比与油菜自交结实率、混交结实率、辐照柱头×未辐照花粉异交结实率呈显著正相关, 不具有可授性柱头占比与油菜自交结实率、混交结实率呈显著负相关。对于羊草产量的研究发现, 雌蕊接受花粉的能力影响羊草的结实率^[38]。这些结果说明碳离子束辐照不仅抑制花粉活力, 也降低了柱头可授性, 从而降低了结实率。

综上所述, 碳离子束辐照油菜干种子造成的损伤, 抑制了植株的生长、发育以及结实。本研究测定不同指标的半致死剂量, 为油菜生产和育种提供参考辐照剂量。尽管重离子束具有较高的诱变效率, 但是在实际育种工

作中筛选优良单株的工作量限制了育种工作的进程。重离子束诱变不仅和辐照剂量有关, 还与辐照粒子种类、LET、辐照方式、辐照材料的状态有关。不同辐照条件下产生变异类型各有差异, 对于辐照参数和辐照条件的优化组合, 为育种目标提供具有针对性的辐照剂量, 是我们下一步亟待加强的工作。

参考文献:

- [1] ZHOU Libin, LI Wenjian, QU Ying, et al. *Nuclear Physics Review*, 2008, 25(2): 165. (in Chinese)
(周利斌, 李文建, 曲颖, 等. *原子核物理评论*, 2008, 25(2): 165.)
- [2] SHIKAZONO N, YOKOTA Y, KITAMURA S. *Genetics*, 2003, 163: 1449.
- [3] TANAKA A, SHIKAZONO N, HASE Y. *Journal of Radiation Research*, 2010, 51: 223.
- [4] QU Ying, LI Wenjian, ZHOU Libin, et al. *Nuclear Physics Review*, 2007, 24(4): 294. (in Chinese)
(曲颖, 李文建, 周利斌, 等. *原子核物理评论*, 2007, 24(4): 294.)
- [5] LUO Shangwei, ZHOU Libin, LI Wenjian, et al. *Nucl Instr and Meth B*, 2016, 383: 123.
- [6] SASAKI N, WATANABE A, ASAKAWA T, et al. *Plant Biotechnology*, 2018, 35(3): 249.
- [7] WANG Xue, XIE Libo, LIU Luxiang, et al. *Pakistan Journal of Botany*, 2020, 52(3): 1.
- [8] KONG Ying, BAI Jinrong, SHANG Hongzhong, et al. *Acta Horticulture Sinica*, 2013, 40(9): 1837. (in Chinese)
(孔滢, 白锦荣, 尚宏忠, 等. *园艺学报*, 2013, 40(9): 1837.)
- [9] SAWADA Y, SATO M, OKAMOTO M, et al. *Metabolomics: Official Journal of the Metabolomic Society*, 2019, 15(9): 118.
- [10] GUO Gao, QIAN Kun. *Anhui Agriculture*, 1998(5): 4. (in Chinese)
(郭高, 钱坤. *安徽农业*, 1998(5): 4.)
- [11] YANG Zanlin, GAN Binjie, YU Zengliang. *Anhui Agricultural Sciences*, 2002, 30(5): 639. (in Chinese)
(杨赞林, 甘斌杰, 余增亮. *安徽农业科学*, 2002, 30(5): 639.)
- [12] GUO Baode, JI Lixia, BAI Qilin, et al. *Shanxi Agricultural Science*, 2019, 47(7): 1175. (in Chinese)
(郭宝德, 冀丽霞, 白琪林, 等. *山西农业科学*, 2019, 47(7): 1175.)
- [13] LIU Ruiyuan, JIN Wenjie, QU Ying, et al. *Guangxi Science*, 2020, 27(1): 20. (in Chinese)
(刘瑞媛, 金文杰, 曲颖, 等. *广西科学*, 2020, 27(1): 20.)
- [14] PAN Na, QU Wenjiao, JUN Ruihong, et al. *China Oils and Fats*, 2014, 39(12): 42. (in Chinese)
(潘娜, 屈文娇, 君睿红, 等. *中国油脂*, 2014, 39(12): 42.)
- [15] FU Manqi, LIU Bin, WANG Jing. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 53(4): 630. (in Chinese)
(傅漫琪, 刘斌, 王婧. *河南农业大学学报*, 2019, 53(4): 630.)
- [16] GUO Shuchun, LI Suping, YU Haifeng, et al. *China Seed Industry*, 2021(7): 10. (in Chinese)
(郭树春, 李素萍, 于海峰, 等. *中国种业*, 2021(7): 10.)
- [17] WEN Jinguang, WANG Lin, HAN Xiaomei, et al. *China Seed Industry*, 2021(11): 17. (in Chinese)
(闻金光, 王林, 韩晓梅, 等. *中国种业*, 2021(11): 17.)
- [18] DONG Guijun, ZHANG Weidong, CHEN Shuangyan, et al. *Acta Biophysics Sinica*, 2004, 20(4): 269. (in Chinese)

- (董贵俊, 张卫东, 陈双燕, 等. *生物物理学报*, 2004, 20(4): 269.)
- [19] HUO Feng, ZHAO Yongxiu, BAI Wei. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2013, 34(1): 72. (in Chinese)
(霍烽, 赵永秀, 白薇. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(1): 72.)
- [20] YANG Huan, WANG Yang, HE Lixian, et al. *China Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(6): 175. (in Chinese)
(杨欢, 王阳, 何丽娴, 等. *中国农学通报*, 2013, 29(6): 175.)
- [21] PETERSON R, SLOVIN J P, CHEN C. *International Journal of Plant Biology*, 2010, 1: 66.
- [22] LUO Changwei, CHEN You, LIU Yun, et al. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2019, 48(7): 48. (in Chinese)
(罗长维, 陈友, 刘云, 等. *河南农业科学*, 2019, 48(7): 48.)
- [23] HOU Suiwen, WU Dali, ZHANG Yingcong, et al. *Journal of Radiation Research and Radiation Technology*, 2008, 26(2): 78. (in Chinese)
(侯岁稳, 吴大利, 张颖聪, 等. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2008, 26(2): 78.)
- [24] LIU Qingfang, YU Lixia, DU Yan, et al. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2013, 31(1): 26. (in Chinese)
(刘青芳, 余丽霞, 杜艳, 等. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2013, 31(1): 26.)
- [25] ZHANG Qiying, YU Lixia, LI Yansheng, et al. *Soybean Science*, 2013, 32(5): 587. (in Chinese)
(张秋英, 余丽霞, 李彦生, 等. *大豆科学*, 2013, 32(5): 587.)
- [26] ZHOU Wenqi, ZHOU Yuqian, LIU Zhongxiang, et al. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(12): 2311. (in Chinese)
(周文期, 周玉乾, 刘忠祥, 等. *核农学报*, 2019, 33(12): 2311.)
- [27] LU Xihong, SHI Guangliang, LI Xuehu, et al. *Nuclear Physics Review*, 2013, 30(4): 477. (in Chinese)
(陆锡宏, 石广亮, 李雪虎, 等. *原子核物理评论*, 2013, 30(4): 477.)
- [28] LUO Chunhua, QU Ying, LI Wenjian, et al. *Journal of Nuclear Agriculture Sciences*, 2015, 29(7): 1316. (in Chinese)
(罗春华, 曲颖, 李文建, 等. *核农学报*, 2015, 29(7): 1316.)
- [29] XIONG Yunhai, WAN Lusheng. *Northern Horticulture*, 2016(20): 81. (in Chinese)
(熊运海, 万路生. *北方园艺*, 2016(20): 81.)
- [30] CHEN Yuze, DU Yan, YU Lixia, et al. *Nuclear Physics Reviews*, 2016, 33(4): 494. (in Chinese)
(陈玉泽, 杜艳, 余丽霞, 等. *原子核物理评论*, 2016, 33(4): 494.)
- [31] YANG Guili, CHEN Ying, GUO Tao, et al. *Journal of South China Agricultural University*, 2018, 39(2): 29. (in Chinese)
(杨瑰丽, 陈莹, 郭涛, 等. *华南农业大学学报*, 2018, 39(2): 29.)
- [32] CHEN Chun, YAN Xiancheng, LUO Wenlong, et al. *Journal of South China Agricultural University*, 2021, 42(1): 49. (in Chinese)
(陈淳, 严贤诚, 罗文龙, 等. *华南农业大学学报*, 2021, 42(1): 49.)
- [33] DENG Renju, FAN Jianxin, CAI Yongqiang, et al. *Acta Laser Biology Sinica*, 2011, 2: 38. (in Chinese)
(邓仁菊, 范建新, 蔡永强, 等. *激光生物学报*, 2011, 2: 38.)
- [34] JIANG Yun, LUO Xiaomei, ZHANG Haiqin, et al. *Progress Report on China Nuclear Science and Technology*, 2011, 2: 38. (in Chinese)
(蒋云, 罗小梅, 张海琴, 等. *中国和科学技术进展报告*, 2011, 2: 38.)
- [35] ZHAO Limei, SUN Huan, HUANG Mei, et al. *Soybean Science*, 2004, 23(4): 249. (in Chinese)
(赵丽梅, 孙寰, 黄梅, 等. *大豆科学*, 2004, 23(4): 249.)
- [36] KAUFMAN E, RUMPUNEN K. *Scientia Horticulturae*, 2002, 94: 241.
- [37] ARPORN K, SODCHOL W, THITIPORN M. *African Journal of Agricultural Research*, 2013, 8(2): 162.
- [38] CHEN S Y, LIU G S, ZHANG W D, et al. *Grass and Forage Science*, 2004, 59(2): 180.

Effects of Carbon Ion Beam Irradiation on the Fruiting Characters of M1 Oil Sunflower

CHEN Xiaofeng^{1,2}, ZHOU Libin^{2,3}, JIN Wenjie², WANG Zhuanzi², ZHANG Wenliao³,

LI Wenjian², PENG Yunling¹, QU Ying^{2,3,†}, MU Ping^{1,†}

(1. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. Kejin Innovation Institute of Heavy Ion Beam Biological Industry, Baiyin 730900, Gansu, China)

Abstract: The dry seeds of oil sunflower were irradiated with the carbon ion beam provided by the Heavy Ion Research Facility(HIRFL) in Lanzhou. To research the effects of carbon ion beam irradiation on the fruiting characters of M1 oil-sunflower, the seedling emergence rate, survival rate, pollen viability, stigma receptivity and seed setting rate under different pollination conditions were measured. The results showed that the seedling emergence rate, survival rate, pollen viability and seed setting rate reduced with the irradiation dose increasing. Compared with control, the emergence rate and survival rate of oil-sunflower decreased by 55.68% and 64.66% after seeds irradiated with a carbon ion dose of 80 Gy. This study also revealed that seeds were irradiated with 20~160 Gy showed very low self-cross seed setting rate, and the mixed-cross seed setting rate were significantly reduced at irradiation of 40~160 Gy. Pollen viability decreased from 92.01% of the CK to 47.59% of the 160 Gy irradiation. With the irradiation dose increasing, the percentage of stigmas with higher receptivity reduced, and the percentage of stigmas with lower receptivity and no receptivity increased. All results indicated that the damage of carbon ion beam irradiation inhibited the fertility of flower organs and reduced the seeding rate. According to the semi-lethal dose of survival rate and the semi-sterile dose of mixed-cross seed setting rate, the recommended irradiation dose range of oil sunflower is 55 to 153 Gy. Our findings may lead to more reference for the selection of suitable irradiation dose for oil sunflower breeding by carbon ion beam irradiation.

Key words: carbon ion beam irradiation; oil sunflower; seed setting rate; pollen viability; stigma receptivity

Received date: 11 Mar. 2022; **Revised date:** 29 Apr. 2022

Foundation item: Nuclear Energy Development Research Program(E11Z212GQ1); National Natural Science Foundation of China(12135016); Academy-local Cooperation Project of Chinese Academy of Sciences(Y706210); Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences(Y201974)

† **Corresponding author:** QU Ying, E-mail: quying102@impcas.ac.cn; MU Ping, E-mail: mup@gsau.edu.cn