

种子含水量与辐射剂量对寒地粳稻出苗率的影响

张 擘¹, 肖明纲¹, 高洪儒¹, 付立新², 胡少新², 吴立成¹, 钱创建³, 郑福余¹, 赵北平¹, 孙中义¹, 刘宝海^{1*}

(1. 黑龙江省农业科学院生物技术研究所/黑龙江省作物与家畜分子育种重点实验室/黑龙江省水稻分子育种工程技术研究中心, 哈尔滨 150028; 2. 黑龙江省农业科学院玉米研究所, 哈尔滨 150086; 3. 黑龙江省农业科学院经济作物研究所, 哈尔滨 150086)

摘要: 辐射诱变是创制水稻种质资源和选育新品种的有效途径, 而种子含水量和辐射剂量是影响辐射耐受性的重要因素。为顺利开展寒地水稻突变体库构建和辐射诱变育种工作, 对不同含水量寒地粳稻种子的适宜辐射剂量进行探索。本研究以黑龙江省不同积温带的4个主栽粳稻品种为试验材料, 采用不同剂量(0、250、280、300、330、350 Gy)⁶⁰Co- γ 射线辐射不同含水量粳稻种子, 处理后统计种子出苗率, 分别进行含水量与品种、含水量与辐射剂量两因素方差分析。结果表明, 在“含水量×品种”模型中, 对出苗率的影响效应依次为: 含水量主效应>品种主效应>含水量与品种的交互效应; 在“含水量×辐射剂量”模型中, 影响效应依次为: 含水量主效应>辐射剂量主效应>含水量与辐射剂量的交互效应, 以上结果说明含水量是影响粳稻种子辐射耐受性的关键因素。在辐射剂量不高于350 Gy条件下, 随着含水量的提高, 种子的辐射耐受性增强, 而随着辐射剂量的提高, 种子的辐射耐受性降低。当含水量高于14%时, 种子的辐射耐受性显著增强。当种子含水量在14%~16%时, 品种的辐射耐受性表现为: 龙粳46>龙粳31>绥粳18>松粳28, 龙粳46种子的辐射耐受性显著高于松粳28, 龙粳31与绥粳18种子的辐射耐受性无显著差异。对于4个粳稻品种而言, 当种子含水量接近14%时, 辐射剂量250、280 Gy是半致死剂量, 种子出苗率接近50%; 当种子含水量在14%~16%时, 辐射剂量350 Gy是半致死剂量, 种子出苗率为50%左右。

关键词: 含水量; 辐射剂量; 寒地粳稻; 出苗率

中图分类号: S511.2²

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2026)01-0001-06

Effects of Seed Moisture Content and Irradiation Doses on Seedling Emergence of Japonica Rice in Cold Region

ZHANG Bo¹, XIAO Minggang¹, GAO Hongru¹, FU Lixin², HU Shaoxin², WU Licheng¹, QIAN Chuangjian³, ZHENG Fuyu¹, ZHAO Beiping¹, SUN Zhongyi¹, LIU Baohai^{1*}

(1. Institute of Biotechnology, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop and Livestock Molecular Breeding of Heilongjiang Province, Heilongjiang Engineering and Technology Research Center of Rice Molecular Breeding, Harbin 150028; 2. Maize Research Institute, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086; 3. Institute of Industrial Crops, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150086, China)

Abstract: Irradiation-induced mutation is an effective way to create rice germplasm resources and breed new varieties. Seed moisture content and irradiation dose are important factors affecting irradiation tolerance. To smoothly carry out the construction of japonica rice mutant libraries and irradiation mutagenesis breeding in cold regions, this study explored the suitable irradiation doses for japonica rice seeds with different moisture contents. Using ⁶⁰Co- γ rays, seeds of four main japonica rice varieties (collected from different accumulated temperature zones in Heilongjiang Province) with different moisture contents were irradiated at six doses (0, 250, 280, 300, 330, 350

收稿日期: 2025-03-18

基金项目: 黑龙江省重点研发计划指导类项目(GZ20210161); 黑龙江省农业科技创新跨越工程农业科技基础创新优秀项目(CX22YQ26); 黑龙江省重点研发计划(创新基地)项目(JD2023SJ29)

作者简介: 张 擘(1983-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事水稻分子育种研究。

通信作者: 刘宝海, E-mail: shslbh@163.com

Gy). After treatment, the seedling emergence rate was recorded, and two-factor analysis of variance(ANOVA) was conducted for the combinations of "moisture content \times variety" and "moisture content \times irradiation dose". The analysis results showed that in the "moisture content \times variety" model, the factors influencing seedling emergence ranked as follows: main effect of moisture content $>$ main effect of variety $>$ interaction effect between moisture content and variety. In the "moisture content \times irradiation dose" model, the influencing factors ranked as: main effect of moisture content $>$ main effect of irradiation dose $>$ interaction effect between moisture content and irradiation dose. These results indicate that moisture content is the key factor affecting the irradiation tolerance of *japonica* rice seeds. When the irradiation dose was not higher than 350 Gy, the irradiation tolerance of seeds increased with the increase of moisture content but decreased with the increase of irradiation dose. When the seed moisture content was higher than 14%, the irradiation tolerance of seeds was significantly enhanced. When the seed moisture content was between 14% and 16%, the irradiation tolerance of the four varieties followed the order: Longgeng 46 $>$ Longgeng 31 $>$ Suigeng 18 $>$ Songgeng 28. Specifically, the irradiation tolerance of Longgeng 46 seeds was significantly higher than that of Songgeng 28, while there was no significant difference in irradiation tolerance between Longgeng 31 and Suigeng 18. For the four varieties, when the seed moisture content was close to 14%, the median lethal irradiation doses were 250 and 280 Gy(with seedling emergence rate close to 50%). When the seed moisture content ranged from 14% to 16%, the median lethal irradiation dose was 350 Gy(with seedling emergence rate around 50%).

Key words: Moisture content; Irradiation dose; *Japonica* rice in cold region; Seedling emergence rate

辐射诱变利用物理因素诱发植物产生遗传突变,在短时间内可以获得有价值的突变体,是创制新种质、获得新品种的有效途径,在我国农作物育种领域取得了重要成果^[1],尤其在水稻育种方面已成为普遍使用的有效方法^[2]。黑龙江省粳稻育种多年采用常规方法进行,致使品种的群体亲缘关系较近、遗传基础狭窄,遗传背景相似^[3],丰富基因资源迫在眉睫。辐射诱变可以拓宽水稻品种遗传基础、发掘有利基因、加速种质创新,是常规育种的重要补充和难以替代的育种途径,也是水稻功能基因组研究的重要手段^[1-2]。

辐射诱变通常选择易于运输和贮藏的种子作为材料,辐射剂量和种子含水量是关乎辐射效果的重要因素^[4-5]。同一作物不同品种、同一品种不同含水量种子辐射耐受性存在一定差异,使用相同的照射量处理后,生物学损伤程度不同。辐射耐受性可根据产生一定的诱变效应所需的辐射剂量来衡量,一般认为,半致死剂量是植物细胞容易发生诱变而又不会致死的临界点,是辐射育种的临界值^[6-7]。在诱变育种中使用半致死剂量或低于半致死剂量的⁶⁰Co- γ 射线辐照易引起突变,且伤害轻,易获得优良的变异性状^[6]。粳稻种子在贮藏过程中含水量因环境的影响而变化,不同贮藏区域的种子辐射结果很不一致。为增强试验的重复性,规模开展粳稻辐射试验,本研究对4个粳稻品种在不同含水量条件下进行不同剂

量⁶⁰Co- γ 辐射处理,探索适宜不同品种粳稻种子的含水量和辐射剂量,以期为粳稻种质资源创新和功能基因组研究提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为黑龙江省第一、第二、第三积温带主栽粳稻品种,第一积温带品种为松粳28,由黑龙江省农业科学院生物技术研究所提供;第二积温带品种为绥粳18,由黑龙江省农业科学院绥化分院提供;第三积温带品种为龙粳31和龙粳46,由黑龙江省农业科学院佳木斯水稻研究所提供。

1.2 试验方法

辐射处理前,先进行种子含水量控制。试验共设6个处理, D_1 (对照,室内相对湿度)、 D_2 、 D_3 、 D_4 、 D_5 、 D_6 处理采用甘油和水的混合液控制相对湿度,甘油含量分别为80%、60%、40%、20%和0。将200 mL不同比例的混合液分别置于6 L的干燥器内,每个品种每个处理1 000粒种子,利用不同比例混合液产生的蒸汽压控制干燥器的相对湿度,调节种子的含水量。9 d后从每个干燥器内每个品种取300粒种子,平均分成6份,置于塑料密封袋中密封,其中3份立即辐射,另外3份保存,干燥器内剩余的种子用于含水量测定等。

2022年4月3日,以⁶⁰Co- γ 射线为辐射源对不

同含水量的种子进行处理,辐照剂量分别为0(CK)、250、280、300、330、350 Gy,剂量率为1.1 Gy/min。

1.3 出苗率测定

选取4个粳稻品种辐射和未辐射处理的种子各150粒(平分为3份),4月17日播种于黑龙江省农业科学院生物技术研究所民主基地水稻苗床中。5月17日(播种后30 d)调查出苗率。

1.4 数据处理

利用SPSS 24.0软件进行方差分析,采用最小显著差异法进行多重比较,利用Rstudio软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对粳稻种子含水量的影响

在不同甘油和水混合液(D₂~D₆)处理下,种子贮存9 d后干燥器内的相对湿度依次为48%、63%、70%、79%和80%,D₁处理室内相对湿度为20%。由表1可知,4个粳稻品种的初始含水量不同,松粳28最低,为7.40%,绥粳18最高,为

11.40%,但随着环境相对湿度(D₁~D₆处理)的升高,各品种含水量均明显提高,说明贮藏湿度是影响种子含水量的关键因素。

2.2 含水量和品种对粳稻种子出苗率的影响

由表2可知,粳稻种子含水量和品种对出苗率影响的主效应和交互效应均达到极显著水平。由偏Eta平方(η^2)可知,不同因素对粳稻种子出苗率的影响效应为:含水量的主效应>品种的主效应>含水量和品种的交互效应,说明辐射后出苗率受种子含水量影响最大。

在全部辐射剂量下,对粳稻种子的出苗率进行统计和多重比较分析(图1),发现随着含水量的提高,种子出苗率呈上升趋势,辐射耐受性增强。松粳28、绥粳18、龙粳31种子在D₁、D₂、D₃处理的出苗率均显著低于D₄、D₅、D₆处理,龙粳46在D₁、D₂处理的出苗率显著低于D₃、D₄、D₅、D₆处理(图1A);当种子含水量低于14%(D₂、D₃处理)时,龙粳46的出苗率显著高于其他3个品种,松粳28与龙粳31的出苗率无显著差异(图1B)。当绥粳18和龙粳46种子的含水量为13.9%(D₃处理)时,种子出苗率显著上升(图1A),辐射耐受性显著增强。当种子含水量为14%~16%(D₄、D₅、D₆处理)时,松粳28、绥粳18、龙粳31的出苗率较D₁、D₂、D₃处理显著上升(图1A),品种的出苗率表现为:龙粳46>龙粳31>绥粳18>松粳28,龙粳46的出苗率显著高于松粳28,龙粳31与绥粳18的出苗率无显著差异(图1B),该结果揭示了4个粳稻品种辐射耐受性的差异:龙粳46>龙粳31>绥粳18>松粳28。

表1 不同处理对粳稻种子含水量的影响 %

Table 1 Effects of different treatments on moisture content of japonica rice seeds

品种 Variety	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆
松粳28	7.40	11.90	13.30	14.20	15.30	15.30
绥粳18	11.40	12.90	13.90	15.30	15.90	16.00
龙粳31	9.90	12.30	13.60	14.90	15.60	15.70
龙粳46	10.30	12.70	13.90	15.10	15.50	15.60

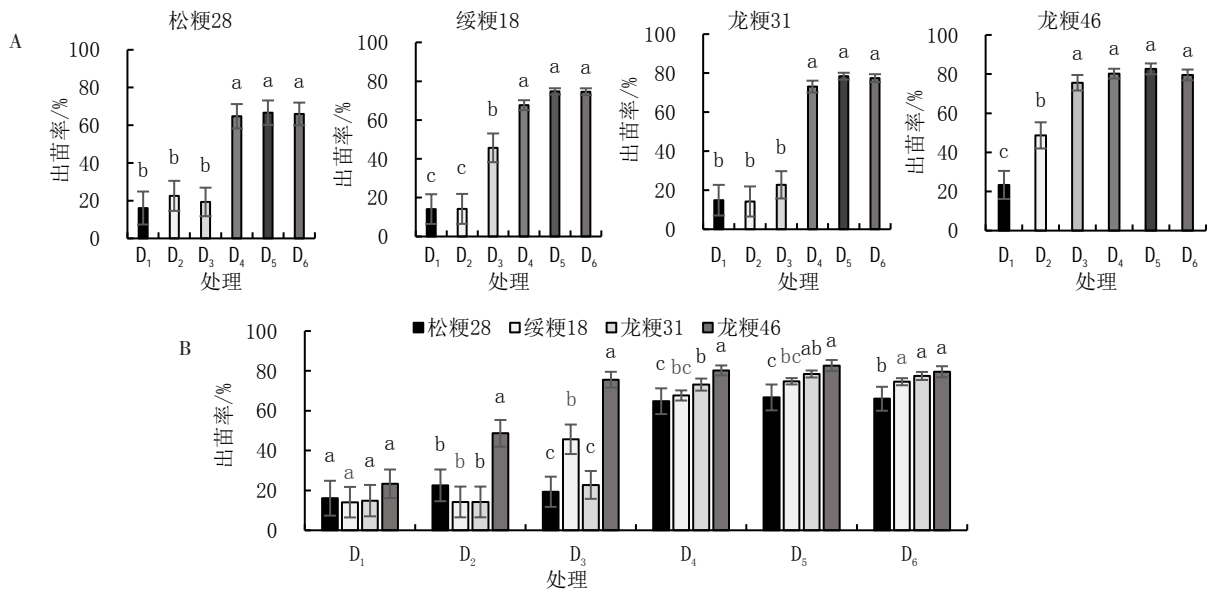
表2 不同含水量、不同品种粳稻种子出苗率的方差分析

Table 2 Analysis of variance on seedling emergence rates for different moisture content and japonica rice varieties

来源 Source	III类平方和 Class III sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F值 F value	P值 P value	η^2
修正模型	310 822.222a	23	13 514.010	21.899**	<0.001	0.552
截距	1111 425.333	1	1111 425.333	1 801.048**	<0.001	0.815
含水量	252 272.556	5	50 454.511	81.761**	<0.001	0.500
品种	31 368.963	3	10 456.321	16.944**	<0.001	0.111
含水量×品种	27 180.704	15	1 812.047	2.936**	<0.001	0.097
误差	251 776.444	408	617.099			
总计	1 674 024.000	432				
修正后总计	562 598.667	431				

注:R²=0.552(调整后R²=0.527)。*表示差异显著(P<0.05),**表示差异极显著(P<0.01),下同。

Note: R²=0.552 (Adjusted R² = 0.527). * indicates a significant difference(P<0.05), ** indicates an extremely significant difference(P<0.01), the same below.



注:小写字母不同表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Differences in lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

图1 不同品种粳稻种子含水量对出苗率的影响

Fig. 1 Effects of seed moisture content on seedling emergence rates in different japonica rice varieties

2.3 含水量和辐射剂量对粳稻种子出苗率的影响

由表3可知,粳稻种子含水量和辐射剂量对出苗率影响的主效应和交互效应均达到极显著差异。由偏Eta平方(η^2)可知,不同因素对粳稻种子出苗率的影响效应为:含水量的主效应>辐射剂量的主效应>含水量和辐射剂量的交互效应,说明辐射后出苗率受种子含水量影响最大。

在全部辐射剂量下,对粳稻种子的出苗率进行统计和多重比较分析(图2),发现随着含水量的提高,粳稻种子的出苗率逐渐升高,D₄处理的出苗率显著高于D₁、D₂、D₃处理,D₄、D₅、D₆处理的出

苗率差异不显著,说明种子含水量超过14%可以显著增强种子的辐射耐受性(图2A);在辐射剂量不高于350 Gy条件下,随着辐射剂量的提高,种子的出苗率下降,种子的辐射耐受性降低(图2B)。当种子含水量低于14%(D₁、D₂、D₃处理)时,辐射剂量250 Gy的出苗率显著高于350 Gy;当种子含水量为14%~16%(D₄、D₅、D₆处理)时,辐射剂量为330 Gy的出苗率显著高于350 Gy的出苗率(图2B)。D₁、D₂处理在各辐射剂量条件下出苗率较低,D₃处理在辐射剂量350 Gy条件下出苗率较低,而在辐射剂量250、280 Gy条件下,种子出苗率接近

表3 不同含水量和辐射剂量条件下粳稻种子出苗率的方差分析

Table 3 Analysis of variance on seedling emergence rates for japonica rice seeds under different moisture content and irradiation dose treatments

来源	III类平方和	自由度	均方	F值	P值	η^2
Source	Class III sum of squares	DF	Mean square	F value	P value	
修正模型	453 832.000a	35	12 966.629	47.209**	<0.001	0.807
截距	1 111 425.333	1	1111 425.333	4 046.501**	<0.001	0.911
含水量	252 272.556	5	50 454.511	183.696**	<0.001	0.699
辐射剂量	141 311.556	5	28 262.311	102.898**	<0.001	0.565
含水量×辐射剂量	60 247.889	25	2 409.916	8.774**	<0.001	0.356
误差	108 766.667	396	274.663			
总计	1 674 024.000	432				
修正后总计	562 598.667	431				

注: $R^2=0.807$ (调整后 $R^2=0.790$)

Note: $R^2=0.807$ (Adjusted $R^2 = 0.790$).

50%, D₄、D₅、D₆处理在辐射剂量 350 Gy 条件下出苗率达到 50% 左右,说明当种子含水量接近 14% 时,辐射剂量 250、280 Gy 可作为半致死剂量,当

种子含水量在 14%~16% 时,辐射剂量 350 Gy 可作为半致死剂量(图 2A,图 2B)。

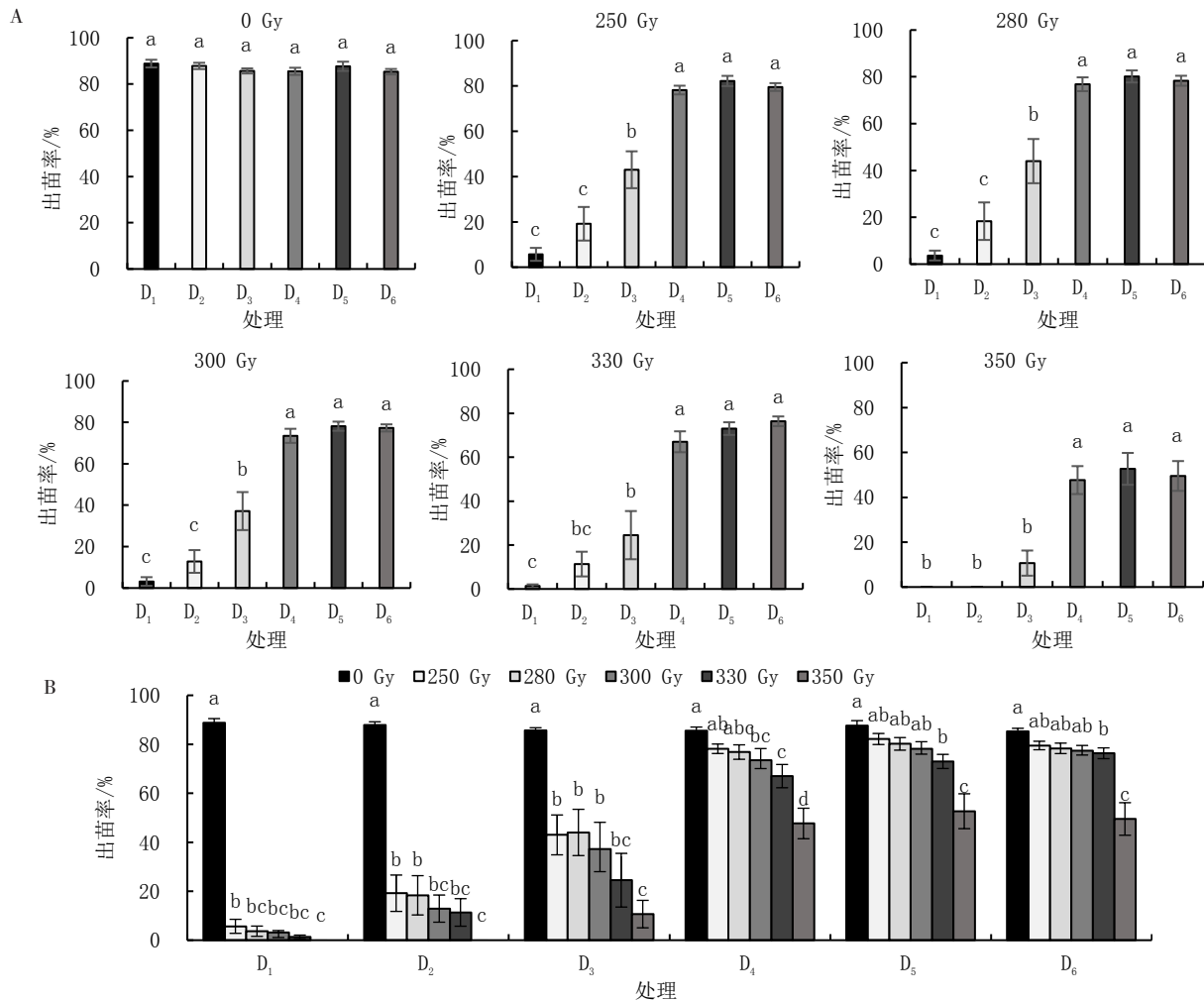


图2 不同辐射剂量条件下种子含水量对出苗率的影响

Fig. 2 Effects of seed moisture content on seedling emergence rates under different irradiation doses

3 讨论

本研究从种子含水量与品种、种子含水量与辐射剂量两方面出发,探讨了影响粳稻种子出苗率的条件,进一步确认含水量是影响寒地粳稻种子辐射耐受性的最重要因素。含水量对种子辐射耐受性的影响显著,然而其具体的作用机制尚未完全明晰^[8]。受到电离辐射照射后,很多生物活性物质受到损伤。其中,大多数DNA分子损伤可以通过修复途径进行修复,然而修复过程中会出现错误,导致染色体畸变和基因突变^[9]。DNA分子损伤是导致生物体死亡的关键因素之一,DNA损伤的很大一部分(70%~80%)是由水在辐射裂解过程中产生的活性氧(ROS)引起,仅有20%~30%是由直接的DNA损伤引起^[10]。有氧细胞中H₂O裂

解裂解后产生的ROS主要为O₂⁻、·OH和H₂O₂^[11],通过脂质过氧化以及蛋白质和核酸的氧化修饰,引发“氧化胁迫”^[12-13]。种子的含水量越高,产生的ROS越多^[8]。面对ROS引起的氧化胁迫,植物会启动多样化的抗氧化系统,减少过量ROS损害组织细胞的正常生理活动。如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的活性以及非酶抗氧化物,如抗坏血酸(AsA)与谷胱甘肽(GSH)活性的变化等^[18,14-16]。用γ射线辐射粳稻种子时,当含水量控制在14%以上时种子的辐射耐受性显著增强,而在较低含水量时种子辐射耐受性显著减弱,可能是含水量在14%以上可以更有效地激活抗氧化防御系统或DNA损伤修复途径。

不同水稻品种由于遗传差异和环境因素影响对辐射的耐受性不同,致死和半致死辐射剂量需

要在具体条件下建立相对的标准。本研究发现当粳稻种子含水量在14%~16%时,种子的辐射耐受性显著增强,辐射耐受性表现为:龙粳46>龙粳31>绥粳18>松粳28,龙粳46种子的辐射耐受性显著高于松粳28,龙粳31与绥粳18种子的辐射耐受性无显著差异。当种子含水量接近14%时,辐射剂量250、280 Gy是半致死剂量,种子出苗率接近50%;当种子含水量在14%~16%时,辐射剂量350 Gy是半致死剂量,种子出苗率为50%左右。适宜的辐射剂量是获得优良变异材料的关键,除了考虑辐射后种子的出苗率,还应考虑种子播种后的田间表现,以及下一代变异单株的情况,进一步明确最佳的辐射剂量。本研究明确了供试材料的适宜辐射条件,为顺利开展寒地粳稻辐射诱变工作提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 刘宝海,刘晴,聂守军,等. 钴⁶⁰- γ 辐射对黑龙江粳稻种子活力及秧苗发育的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(5): 1029-1038.
LIU B H, LIU Q, NIE S J, et al. Effects of ⁶⁰Co- γ ray radiation on seed vigor and seedling development of Japonica rice in Heilongjiang[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(5): 1029-1038. (in Chinese)
- [2] 牛付安,程灿,周继华,等. ⁶⁰Co γ 射线辐照对水稻种子活力和秧苗质量的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2015, 33(6): 12-16.
NIU F A, CHENG C, ZHOU J H, et al. Effects of radiation by ⁶⁰Co γ ray on seed vigor and seedling quality of rice[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science), 2015, 33(6): 12-16. (in Chinese)
- [3] 刘丹,王嘉宇,刘进,等. 黑龙江省部分育成粳稻资源的遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(1): 60-68.
LIU D, WANG J Y, LIU J, et al. Analysis on genetic diversity for part of japonica resources in Heilongjiang Province[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2019, 20(1): 60-68. (in Chinese)
- [4] 赵林姝,刘录祥. 农作物辐射诱变育种研究进展[J]. 激光生物学报, 2017, 26(6): 481-489.
ZHAO L S, LIU L X. Research progresses in irradiation-induced mutation breeding in crops[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2017, 26(6): 481-489. (in Chinese)
- [5] 李春盈,张建周,齐建双,等. 小麦辐射育种过程中辐射剂量的研究[J]. 种子, 2021, 40(12): 102-106.
LI C Y, ZHANG J Z, QI J S, et al. Study on radiation dose in wheat radiation breeding[J]. Seed, 2021, 40(12): 102-106. (in Chinese)
- [6] 黄桂丹. ⁶⁰Co- γ 射线辐射育种研究进展[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(2): 107-111.
HUANG G D. Research progress for ⁶⁰Co- γ ray radiation breeding[J]. Forestry and Environmental Science, 2016, 32(2): 107-111. (in Chinese)
- [7] 耿兴敏,王良桂,李娜,等. ⁶⁰Co- γ 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.
GENG X M, WANG L G, LI N, et al. Study on the seed germination and seedling growth of *Osmanthus fragrans* under ⁶⁰Co- γ irradiation[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2016, 30(2): 216-223. (in Chinese)
- [8] KIANI D, BORZOUEI A, RAMEZANPOUR S, et al. Application of gamma irradiation on morphological, biochemical, and molecular aspects of wheat(*Triticum aestivum* L.) under different seed moisture contents[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 11082.
- [9] WANG J, ZHANG Y, ZHOU L, et al. Ionizing radiation: Effective physical agents for economic crop seed priming and the underlying physiological mechanisms[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(23): 15212.
- [10] GUDKOV S V, CHERNIKOV A V, BRUSKOV V I. Chemical and radiological toxicity of uranium compounds[J]. Russian Journal of General Chemistry, 2016, 86: 1531-1538.
- [11] AZZAM E I, JAY-GERIN J P, PAIN D. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury[J]. Cancer Letters, 2012, 327(1-2): 48-60.
- [12] GUDKOV S V, GRINBERG M A, SUKHOV V, et al. Effect of ionizing radiation on physiological and molecular processes in plants[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2019, 202: 8-24.
- [13] QI W, ZHANG L, FENG W, et al. ROS and ABA signaling are involved in the growth stimulation induced by low-dose gamma irradiation in Arabidopsis seedling[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 175: 1490-1506.
- [14] MACOVEI A, GARG B, RAIKWAR S, et al. Synergistic exposure of rice seeds to different doses of γ -ray and salinity stress resulted in increased antioxidant enzyme activities and gene-specific modulation of TC-NER pathway[J]. BioMed Research International, 2014(1): 676934.
- [15] KIM S H, SONG M, LEE K J, et al. Genome-wide transcriptome profiling of ROS scavenging and signal transduction pathways in rice(*Oryza sativa* L.) in response to different types of ionizing radiation[J]. Molecular Biology Reports, 2012, 39: 11231-11248.
- [16] FOYER C H, NOCTOR G. Ascorbate and glutathione: the heart of the redox hub[J]. Plant Physiology, 2011, 155(1): 2-18.

(责任编辑:范杰英)