

电子加速器辐照对枸杞种子的诱变效应

闫婷^{1,2} 常书娟¹ 岳静宇¹ 桑昊² 师鹏飞² 鲁敏¹ 福升¹ 海龙^{1,2}

¹(内蒙古自治区林业科学研究院沙生资源保育与利用国家林业和草原局重点实验室 呼和浩特 010010)

²(内蒙古自治区林业科学研究院内蒙古自治区沙地(沙漠)生态系统与生态工程重点实验室 呼和浩特 010010)

摘要 本研究以枸杞主栽品种宁杞10号种子为实验材料,利用电子加速器产生的X射线0 Gy、80 Gy、100 Gy、150 Gy、200 Gy、220 Gy吸收剂量开展辐照处理,探究不同辐照处理剂量对枸杞种子萌发及幼苗生长特性的影响,初步筛选适宜诱变剂量,为后续M₂代突变体筛选奠定基础。结果表明,在萌发阶段,80 Gy表现为促进萌发效应,100~200 Gy呈“初期抑制-后期恢复”的动态响应模式,220 Gy则持续显著抑制萌发。在幼苗生长阶段,株高抑制效应随剂量升高而增强;地径生长在150~220 Gy剂量范围内受到显著抑制;叶片氮含量及叶绿素含量在各诱变剂量下均显著降低。在80 Gy剂量下叶片宽度、叶面积和叶片圆度显著增加,呈现出正向形态变异潜力。综合种子萌发响应、幼苗生长活力及叶片形态变异等多指标评估,确定80 Gy为宁杞10号的适宜诱变剂量。基于线性回归估算宁杞10号半致死剂量约为858 Gy,揭示了其极强的辐射耐受性。本研究首次建立了宁杞10号电子加速器辐照的剂量-效应关系,明确了其半致死剂量约为858 Gy,适宜诱变剂量为80 Gy,阐明了该品种兼具高耐受性与低剂量有益效应的双重特性,构建了其特有的辐射响应规律。本研究可为枸杞诱变育种及分子遗传改良提供关键技术参数和科学依据。

关键词 电子加速器,枸杞,宁杞10号,种子,生长特性

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0024

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2026-0024

引用该文:

闫婷,常书娟,岳静宇,等.电子加速器辐照对枸杞种子的诱变效应[J].辐射研究与辐射工艺学报,XXXX,XX(XX):XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0024.

YAN Ting, CHANG Shujuan, YUE Jingyu, *et al.* Mutagenic effects of electron beam irradiation on *Lycium barbarum* seeds[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX (XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2026-0024.



基金资助: 内蒙古自治区林业科学研究院科研能力提升“揭榜挂帅”项目(2024NLTS02)、2025年度自治区本级科研院所(自然科学类)基本科研业务费项目(2025JKF02)

第一作者: 闫婷,女,1990年11月出生,2021年于内蒙古大学获得博士学位,副研究员,博士,从事林木遗传育种研究,E-mail: nmgyanting@163.com

通信作者: 海龙,博士,研究员,E-mail: nmhailong@163.com

收稿日期: 初稿 2026-02-25; 修回 2026-04-21

Supported by the Research Capacity Enhancement "Open Competition" Project of Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences (2024NLTS02), and 2025 Annual Basic Research Operating Expenses Project for Natural Science Research Institutes Directly under the Autonomous Region (2025JKF02)

First author: YAN Ting (female) was born in November 1990, and obtained a doctoral degree from Inner Mongolia University in 2021, associate professor, specializing in forest tree genetics and breeding, E-mail: nmgyanting@163.com

Corresponding author: HAI Long, doctoral degree, professor, E-mail: nmhailong@163.com

Received 25 February 2026; accepted 21 April 2026

Mutagenic effects of electron beam irradiation on *Lycium barbarum* seeds

YAN Ting^{1,2} CHANG Shujuan¹ YUE Jingyu¹ SANG Hao² SHI Pengfei²

LU Min¹ FU Sheng¹ HAI Long^{1,2}

¹(Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Sandy Biological Resources Conservation, Cultivation and Utilization, Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China)

²(Inner Mongolia Key Laboratory of Sandy Land (Desert) Ecosystem and Ecological Engineering, Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot 010010, China)

ABSTRACT This study used seeds of *Lycium barbarum* L. 'Ningqi-10', a major cultivated goji variety, as experimental material. Irradiation treatment was conducted using X-rays generated by an electron accelerator at absorbed doses of 0 Gy, 80 Gy, 100 Gy, 150 Gy, 200 Gy, and 220 Gy. The effects of different irradiation treatment doses on seed germination and seedling growth characteristics were investigated, and the optimal mutagenic dose was preliminarily determined, thereby establishing a foundation for subsequent screening of M₂ generation mutants. During germination, the 80 Gy treatment promoted germination; doses of 100–200 Gy induced a dynamic response pattern characterized by “initial inhibition followed by recovery”; and the highest dose (220 Gy) resulted in sustained and significant inhibition. During seedling growth, the inhibitory effect on plant height increased with dose, basal stem diameter was significantly reduced within the 150–220 Gy range, and both leaf nitrogen and chlorophyll contents were significantly decreased across all mutagenic doses. Notably, the 80 Gy treatment led to significant increases in leaf width, leaf area, and leaf roundness, indicating potential for positive morphological variation. Based on a comprehensive evaluation of seed germination, seedling growth vigor, and leaf morphological variation, 80 Gy was identified as the optimal mutagenic dose for this variety. Linear regression analysis estimated the median lethal dose (LD₅₀) to be approximately 858 Gy, revealing the exceptionally high radiation tolerance of ‘Ningqi No. 10’. This study established the first dose–response relationship for X-ray irradiation generated by an electron accelerator in this variety, defining its LD₅₀ as approximately 858 Gy and its optimal mutagenic dose as 80 Gy, thereby elucidating its dual characteristics of high tolerance and beneficial low-dose effects, and constructing a variety-specific radiation response pattern. These findings provide critical technical parameters and a scientific basis for mutation breeding and molecular genetic improvement of *Lycium barbarum*.

KEYWORDS Electron accelerator, *Lycium barbarum*, Ningqi No. 10, Seed, Growth characteristics

CLC TL99

枸杞 (*Lycium barbarum*) 是茄科枸杞属多年生落叶灌木，果实富含枸杞多糖、绿原酸、类黄酮等功效成分，是兼具经济、生态与健康价值的“药食同源”多功能植物。随着健康消费需求升级，枸杞产业亟需现有良种提升抗逆性与果实品质。因此，创新应用新型诱变育种策略，定向选育符合上述要求的优质食用枸杞品种，对于加快良种培育进程、推动产业高质量发展具有重要实践意义。

物理诱变是种质创新的重要手段，主要包括⁶⁰Co-γ射线辐照、航天育种等传统方式。近年来，电子加速器诱变技术的兴起为物理诱变育种开辟了新路径，该技术通过高能电子束轰击重金属靶转换为X射线，并以此对植物组织或种子进

行辐照处理^[1]。相较于传统⁶⁰Co-γ射线，电子加速器诱变具有显著优势，其辐照过程精准可控，可有效诱发遗传变异，且具有突变率高、突变谱广、育种周期短等特点。此外，相较于化学诱变，电子加速器诱变具有操作安全、无残留污染、诱变剂量可控性高、突变谱宽且突变率较高等优势，因此在现代育种中受到日益重视。该技术已用于水稻 (*Oryza sativa* L.)^[2]、玉米 (*Zea mays* L.)、热带果树等作物的种质资源创制中^[1]，并在解决传统育种难题和作物改良方面发挥了巨大潜力。研究表明，在棉花中，基于直线电子加速器的辐射诱变已成功构建了高通量突变体库，获得了纤维颜色变异、植株矮化、产量性状改善等丰富表型变异^[3]。在花卉作物小苍兰中，通过电子束打

靶产生X射线(EBTTX)已建立了系统的半致死剂量测定与突变体筛选体系^[4]。不仅如此,电子加速器技术在更广泛的农业产业链中也展现出重要价值。例如在枸杞产业中,电子束辐照可有效抑制干枸杞生虫并降解农药残留,在4~8 kGy吸收剂量范围内可最大程度保持枸杞原有食用品质^[5]。截至2024年1月,全球已有77个国家在241种植物上登记了3433个突变体品种,其中辐射诱变培育的品种就为2231个^[6],显示出辐射诱变在品种创制中的重要作用。

目前,⁶⁰Co- γ 射线辐照作物种子的研究已相对成熟,而电子加速器技术作为新兴的精准诱变平台,在枸杞育种领域的应用仍属空白。值得注意的是,该技术已在枸杞近缘种及其他植物中验证了可行性^[7],且前期对枸杞的⁶⁰Co- γ 射线辐照研究为其奠定了重要的生物学基础。近年,张宇等^[8]研究显示,丛生竹经10 MeV/20 kW高能电子加速器在20~300 Gy吸收剂量范围内诱变,并结合分子标记处理后,可创制并筛选出炭用竹新种质,进而建立了电子加速器辐射根茎诱变的完整方法体系,该成果可为枸杞电子加速器诱变提供参数借鉴。在近缘种应用方面,同属茄科的一串红电子束辐照研究报告其半致死剂量(Median lethal dose, LD₅₀)约为55 Gy,为枸杞等茄科植物的剂量设计提供了同科参考^[9]。聚焦于枸杞领域,早在1995年汪丽红等^[7]就发现,55 keV电子束辐照枸杞种子可诱发非按期DNA合成,从细胞学层面证实了电子束对枸杞的诱变潜力。近期,杨改儿等^[10]明确了宁杞1号种子的半致死剂量(LD₅₀)为72 Gy,并揭示了低剂量激活抗氧化系统、高剂量加剧氧化损伤的生理响应规律。王嘉栋等^[11]进一步证实,不同枸杞品种对⁶⁰Co- γ 射线的耐受性存在显著差异,半致死剂量变化范围为23.99~49.60 Gy,且在高剂量下可观测到茎扁平、叶片形态变异等诱变表型。上述研究虽然采用的辐射源与本文不同,但为诱变剂量的设计和后续变异筛选提供了关键参数和重要的理论依据。

本研究以栽培品种宁杞10号(*Lycium barbarum* L. "Ningqi-10")种子为材料,借鉴上述木本植物诱变的研究基础和前期⁶⁰Co- γ 射线对枸杞的诱变研究,设置不同吸收剂量梯度开展电子加速器诱变处理,初步研究其对种子萌发及苗木生长特性的诱变效应,不仅具有开创性意义,也为枸杞遗传改良和新品种选育提供了新途径。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究区域位于内蒙古自治区林业科学研究院沙尔沁种苗基地,地理坐标为111°44'E, 40°32'N。该区属中温带大陆性季风气候,海拔1050 m。年平均降水量418 mm,80%以上的降水集中在7~9月,年平均蒸发量1870 mm,年均气温5.6 °C,7月平均气温21.9 °C,1月平均气温-14.0 °C, ≥ 10 °C有效积温2917.0 °C,无霜期135 d,年平均日照时数2942 h。土壤类型为沙壤土。

1.2 供试材料

2022年,于内蒙古自治区呼和浩特市内蒙古林科院树木园(地理坐标40°48'N, 111°42'E)定植宁杞10号苗木。2024年采集宁杞10号种子用于诱变处理。

1.3 试验方法

1.3.1 诱变处理与剂量设计

本研究于2025年4月将宁杞10号干种子寄送至三亚电子加速器诱变育种实验室进行电子加速器诱变处理,辐照采用电子束能量2.0 MeV、束流强度1 μ A~1 mA的电子加速器(平均功率1 kW),剂量率设定为1 Gy/min吸收剂量设计主要参考了枸杞属植物在⁶⁰Co- γ 射线辐照下的辐射敏感范围(半致死剂量LD₅₀为23.99~72 Gy)^[10-11],并兼顾了丛生竹^[8]和同科植物(如一串红)^[9]在诱变研究中的有效剂量范围。基于此,本研究设置0(CK)、80 Gy、100 Gy、150 Gy、200 Gy、220 Gy共6个吸收剂量梯度对宁杞10号种子进行辐照处理,每个处理组供试种子200~300粒。

1.3.2 种子萌发

采用培养皿滤纸法进行种子萌发试验。在直径9 cm的培养皿中放置2层定性滤纸,加入适量蒸馏水,使滤纸完全湿润且皿底无明水,相对湿度保持约为100%。将辐照处理后的宁杞10号种子以0.5% KMnO₄溶液消毒10 min,蒸馏水冲洗3次后,均匀摆放在滤纸上,每皿50粒,设3次重复,加盖后置于光照培养箱中培养。培养温度设定为(25 \pm 1) °C^[12-13],光暗周期12 h/12 h,光照强度1000 Lux。参照国际种子检验规程^[14],以胚根突破种皮且长度达种子长度的一半作为萌发标准,

定时统计萌发数和萌发率。根据枸杞种子萌发特性，以萌发高峰期（第7天）的发芽数计算发芽势。培养期间每2 d补充蒸馏水1次，保持滤纸持续湿润。计算见式（1）、（2）。

$$\text{种子发芽率} = (\text{已发芽的种子总数} / \text{供试种子总数}) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{种子发芽势} = (\text{7天内已发芽的种子总数} / \text{供试种子总数}) \times 100\% \quad (2)$$

1.3.3 苗木种植

上述种子经诱变处理后，于温水下浸泡24 h，2025年4月播种在温室内的营养杯中（以下简称：幼苗）。6月测定幼苗株高后，移栽至沙尔沁种苗基地，移栽后的植株以下简称：野外定植苗，株行距为30 cm×30 cm，同时铺设地布抑制杂草生长，并实施正常田间管理。

1.3.4 苗木生长调查

6月，幼苗移栽前测定其成苗率，并依不同吸收剂量随机选取15株苗木，用卷尺测定株高。成苗率计算见式（3）。

$$\text{成苗率} = \text{每种诱变剂量成活的苗数} / \text{每种诱变剂量处理的总苗数} \times 100\% \quad (3)$$

2025年9月下旬，对各处理组成活植株进行生长指标测定。随机挑选各剂量15株或以上野外定植苗，使用卷尺测定株高及冠幅，使用游标卡尺（精度0.02 mm）测量地径。每株选取树冠中部向阳方向的成熟功能叶，利用PhoneAI便携式植物表型测定仪扫描并分析叶宽、叶长、叶周长、叶面积、叶长宽比、叶尖形态、叶片圆度、叶片紧致度，每项指标重复测定3次。采用托普云农植物营养无损测定仪测定叶绿素相对含量（SPAD值）和氮含量。每株选取树冠中部向阳方向的成熟功能叶3片，每片叶于叶尖、叶中、叶基3个位点测定，取平均值作为该叶片的测定值，每株以3片叶的平均值作为该株的测定值，各处理以各株平均值进行统计分析，结果以平均值±标准误差表示。

1.3.5 LD₅₀的预估值

以12 d种子发芽率为指标，计算各处理相对于对照（0 Gy）的相对发芽率：（处理组发芽率/对照组发芽率×100%）。方法参考黎熠睿等^[15]、牛世

杰等^[16]的方法，以吸收剂量为自变量（ X ），相对发芽率为因变量（ Y ），对剂量-效应关系进行线性拟合，通过最小二乘法获得回归方程： $Y=aX+b$ ，计算当相对发芽率下降至50%时对应的剂量，作为LD₅₀估算值。

1.3.6 数据分析

利用PhoneAI仪器扫描软件计算叶形指数。采用Microsoft Excel 2023软件进行数据整理；使用SPSS 27.0软件的最小显著性差异法（LSD，*代表 $p<0.05$ ，**代表 $p<0.01$ ）进行方差分析。对符合正态分布且呈线性关系的变量，采用Pearson相关系数分析，对非正态分布数据，先行Z-score标准化处理，再采用Spearman等级相关系数评估相关性。所有图表绘制均通过GraphPad Prism软件完成。

1.3.7 基于标准化加权综合得分的整体效应评价

为综合评估不同吸收剂量对宁杞10号多指标影响的整体效应，采用标准化加权综合得分法进行评价。选取反映种子萌发、幼苗生长、生理特性及叶片形态的18项指标（发芽势、发芽率、成苗率、幼苗期株高、成苗期株高、平均地径、东西向冠幅、南北向冠幅、氮含量、叶绿素含量、叶宽、叶长、叶周长、叶面积、长宽比、叶片圆度、叶片紧、叶尖形态）进行综合评价。由于各指标量纲不同，首先对原始数据进行Z-score标准化处理，计算见式（4）。

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (4)$$

式中： X_{ij} 为第 i 个处理第 j 个指标的原始值； \bar{X}_j 和 S_j 分别为第 j 个指标的均值和标准差。

考虑到本研究旨在筛选对整体生长表现最优的吸收剂量，各指标在综合评估中视为同等重要，故采用等权重加权法计算各处理的综合得分，见式（5）。

$$F_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Z_{ij} \quad (5)$$

式中： F_i 为第 i 个处理的综合得分， m 为指标总数（ $m=18$ ）。综合得分越高，表明该吸收剂量下宁杞10号的整体生长表现越优，以综合得分最高者作为适宜诱变剂量的判定依据。数据分析采用SPSS 27.0和Excel 2023完成。

2 结果与分析

2.1 不同吸收剂量处理对枸杞种子萌发、成苗率及幼苗株高的影响

种子萌发是成苗的前提，发芽势反映种子活力及萌发整齐度，进而影响后续幼苗生长发育。从表1可见，除80 Gy处理外，其余吸收剂量处理对宁杞10号种子发芽势及幼苗生长均表现出不同

程度的抑制作用。80 Gy处理对发芽势具有明显促进作用，较0 Gy对照组（70%）显著提高27.61%，该促进效应持续至萌发第9天。同时，80 Gy处理下种子发芽率与对照组几乎无差异，而100~220 Gy处理组则表现为发芽率受抑，且随着剂量升高抑制作用加剧。这表明，电子加速器辐照处理对宁杞10号种子发芽率的影响呈现典型的“低促高抑”特征。

表1 不同吸收剂量对宁杞10号种子萌发、成苗率及幼苗株高的影响
Table 1 Effects of different absorbed doses on seed germination, seedling survival rate, and seedling height of *Lycium barbarum* L. 'Ningqi-10'

吸收剂量 / Gy Absorbed doses	种子发芽率 / % Seed germination rate					株高 / cm Plant height	成苗率 / % Seedling survival rate
	0 d	5 d	7 d	9 d	12 d		
0	0	46.00±6.00 ^b	70.00±4.00 ^b	89.33±9.02 ^{ab}	96.00±3.46 ^{ab}	11.56±0.83 ^a	94.85
80	0	72.00±8.00 ^a	89.33±8.33 ^a	95.33±3.06 ^a	98.00±2.00 ^a	8.37±0.88 ^b	94.34
100	0	32.67±5.03 ^c	68.67±5.03 ^b	84.67±5.03 ^{bc}	94.00±4.00 ^{ab}	6.83±0.68 ^c	92.11
150	0	43.33±9.02 ^{bc}	71.33±8.33 ^b	87.33±9.02 ^b	90.67±9.02 ^b	6.46±0.59 ^c	87.52
200	0	44.00±6.00 ^{bc}	68.67±11.02 ^b	87.33±7.02 ^b	90.00±6.00 ^b	5.16±0.95 ^d	86.76
220	0	42.67±7.02 ^{bc}	68.00±8.00 ^b	79.33±8.33 ^c	85.33±4.16 ^c	3.82±0.57 ^e	80.85

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$)，相同字母表示差异不显著。采用LSD法进行多重比较。下同。
 Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level, while the same letter indicates no significant difference. Multiple comparisons were performed using the LSD method. The same as below.

此外，由表1可知，幼苗株高、成苗率均与吸收剂量呈显著负相关（图1），且随剂量增加抑制效应更为明显。幼苗株高与剂量的相关系数为-0.961 0，成苗率与剂量的相关系数为-0.926 1，决定系数 R^2 分别为0.923 5和0.857 6，表明吸收剂量是影响幼苗株高变异的主要因素。80 Gy处理已对宁杞10号株高产生显著抑制，株高仅为对照组的72.4%。100~200 Gy剂量下抑制作用进一步增强，株高降至对照组的44.6%~59.1%。220 Gy处理抑制作用最为强烈，株高仅为对照组的33.0%（表1）。

基于上述结果，进一步比较了不同吸收剂量条件下宁杞10号种子萌发与幼苗生长性状间的相关性（图1）。经正态性检验，所有观测数值均符合正态分布，故对发芽率、成苗率和株高变量采用Pearson相关系数进行分析。结果表明，在80~220 Gy剂量范围内，辐照显著抑制种子萌发与幼苗生长，抑制效应随剂量升高而增强。其中，成苗率与早期株高均与剂量呈极显著负相关（图1），但整体相关性强度相对较弱，且部分性状间相关性未达显著水平。

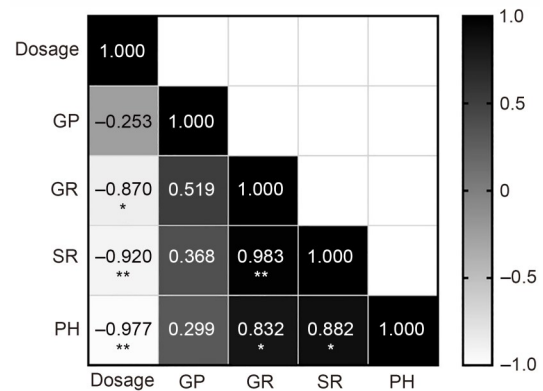


图1 不同吸收剂量处理下枸杞种子萌发与幼苗生长指标的相关性分析(剂量: Dosage; 发芽势: GP; 萌发率: GR; 成苗率: SR; 株高: PH)(注:采用LSD法进行显著性检验,非对角线数值显示Pearson相关系数,星号表示显著性,*代表 $p < 0.05$,**代表 $p < 0.01$)

Fig.1 Correlation analysis among seed germination and seedling growth indicators of *Lycium* under different absorbed doses (Dosage: Dosage; Germination potential: GP; Germination rate: GR; Seedling establishment rate: SR; Plant height: PH) (Note : Significance was tested using the LSD method. Off-diagonal values represent Pearson correlation coefficients. Asterisks indicate significance levels: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$)

综上所述, 采用电子加速器 X 射线对宁杞 10 号种子进行辐照处理, 在 100~220 Gy 吸收剂量范围内, 辐照显著抑制种子萌发, 且抑制率随剂量增加而上升。80 Gy 剂量下种子发芽率与对照无显著差异, 但发芽势较 0 Gy 对照组 (70%) 显著提高 27.61%。同时, 幼苗株高、成苗率与吸收剂量呈显著负相关, 且随剂量增加, 对株高和成苗率的抑制效应愈加明显。

2.2 不同吸收剂量处理对野外定植苗株高生长的影响

为探究辐射诱变效应的持续性及其在后期生长阶段的动态变化, 本研究于 9 月对野外定植苗株高进行调查, 并与 6 月幼苗期株高进行比较。结果显示, 不同剂量处理下野外定植苗株高的变化趋势与幼苗期存在明显差异 (图 2), 表明辐射诱变效应在后期生长阶段发生了阶段性转变。

80 Gy 剂量组植株生长迅速, 9 月相对株高 (处理组株高/对照组株高 \times 100%) 增至 128.72%, 数值上显著高于对照组及其他剂量组 ($p<0.05$), 呈现出“低促”效应。100~200 Gy 处理组株高与对照组无显著差异, 表明其生长已逐步恢复至对照水平。220 Gy 处理组株高虽较幼苗期有所恢复, 但仍显著低于 80 Gy 处理组和对照组 ($p<0.05$), 表现为持续抑制。

综上所述, 不同吸收剂量对宁杞 10 号野外定植苗株高的影响呈现阶段性差异: 80 Gy 处理表现

为后期生长促进, 100~200 Gy 处理表现为生长恢复, 220 Gy 处理表现为持续抑制。

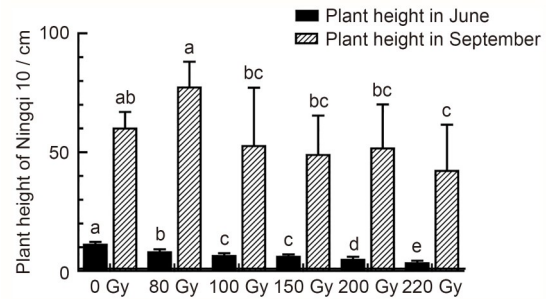


图 2 不同辐照处理后宁杞 10 号幼苗期(6 月)和成苗期(9 月)株高变化效应

Fig.2 Effects of different radiation doses on the plant height of Ningqi 10 seedlings in June and mature plants in September

2.3 不同吸收剂量处理对枸杞野外定植苗生长特征及生理特性的影响

9 月野外定植苗生长速率减缓且生长状态趋于稳定, 故采用单因素方差分析法进一步检验不同吸收剂量对叶片生长指标及生理特性的影响。

从表 2 可见, 80~100 Gy 处理组宁杞 10 号地径生长与 0 Gy 对照组无显著差异, 尽管 100 Gy 剂量下地径出现短暂波动性增大, 但与对照相比仍未达显著水平。而 150~220 Gy 处理对地径生长具有明显抑制作用。

此外, 从表 2 还可以看出, 枸杞野外定植苗的冠幅、叶片氮含量及叶绿素含量均受辐照剂量的影响, 且随剂量增加而逐渐降低。

表 2 不同吸收剂量对植物生长指标及生理特性的影响

Table 2 Effects of different absorbed doses on plant growth indicators and physiological characteristics

吸收剂量 / Gy	样本数	平均株高 / cm	平均地径 / mm	东西向冠幅 / cm	南北向冠幅 / cm	氮含量 / (mg.g ⁻¹)	叶绿素 / (mg.g ⁻¹)
Absorbed dose	Sample size	Plant height	Basal diameter	East-west canopy diameter	North-south canonoae diameter	Nitrogen content	Chlorophyll (SPAD value)
0	15	60.39±6.59 ^b	6.14±0.83 ^{ab}	35.20±7.94 ^{ab}	33.33±9.68 ^{ab}	16.57±0.66 ^a	51.57±1.42 ^a
80	17	77.73±10.36 ^a	5.97±1.26 ^{ab}	26.82±10.17 ^b	20.35±5.60 ^b	15.44±0.87 ^b	48.60±2.57 ^b
100	22	53.09±24.04 ^b	6.96±2.76 ^a	31.09±19.90 ^b	31.09±29.98 ^{ab}	15.05±0.84 ^{bc}	49.08±2.40 ^{ab}
150	22	49.30±16.14 ^{bc}	4.73±1.72 ^c	41.91±21.72 ^a	37.27±17.90 ^a	15.22±0.94 ^{bc}	49.06±3.27 ^b
200	22	52.03±18.06 ^{bc}	5.34±2.16 ^{bc}	41.86±22.90 ^a	37.55±22.92 ^a	15.18±1.47 ^{bc}	48.80±4.85 ^b
220	23	42.56±19.03 ^c	4.52±1.38 ^c	25.00±13.13 ^b	24.70±16.97 ^b	14.48±1.67 ^c	46.83±5.15 ^b

从宁杞10号野外定植苗冠幅变化看，在80~100 Gy处理下，冠幅较0 Gy对照组呈现轻微抑制，表明较低辐照剂量可能对植株横向扩展产生一定抑制作用。在150~200 Gy处理条件下，冠幅较0 Gy对照组呈现轻微恢复趋势。然而，在220 Gy处理时，冠幅降至整个剂量梯度中的最低点，但因其组内标准差较大，例如东西冠幅13.13 cm，南北冠幅16.97 cm，与0 Gy对照组的差异未达到显著水平 ($p>0.05$)。

诱变剂量对宁杞10号的氮含量均产生显著抑制效应(表2)。宁杞10号在80~220 Gy全剂量区间氮含量持续低于0 Gy对照组，且随剂量升高至220 Gy时抑制效应最为显著。

2.4 不同吸收剂量对枸杞野外定植苗叶片形态的影响

对于枸杞植株而言，叶片长度、宽度及叶型指标是营养生长阶段最为直观且易于观测的表型变异。通过比较不同吸收剂量下宁杞10号叶片主

要形态指标的变化规律，以及长宽比、圆度、紧致度和叶尖形态等叶型塑造指标，可在一定程度上反映辐射诱变效应。

从表3可知，不同吸收剂量处理下，宁杞10号叶长总体维持相对稳定，未呈现一致的剂量依赖性变化。叶片宽度仅在80~100 Gy处理下显著增加，其余剂量下与对照基本持平，表明80~100 Gy可能促进叶宽扩展，但在较高剂量(≥ 150 Gy)下效应减弱。综合叶长和叶宽的变化，多数辐照剂量处理下叶片长宽比呈降低趋势，说明辐照处理使叶片趋于短宽，形态更近圆形或饱满形。

在80 Gy剂量处理下，宁杞10号叶片长宽比为 3.86 ± 0.44 ，与0 Gy对照组及100~220 Gy各处理组均存在极显著差异，表明该剂量使叶片更为宽阔。同时，80 Gy剂量下叶片圆度显著提升，叶片形状更趋近圆形(圆度值趋近于1)，而其余剂量处理下圆度多在对照水平附近波动且差异不显著，此趋势与叶片长宽比变化相吻合。

表3 不同吸收剂量对枸杞叶片形状的影响
Table 3 Effects of different absorbed doses on leaf shape of *Lycium*

吸收剂量 Absorbed dose	样品数 Sample size	叶宽/mm Leaf width	叶长/mm Leaf length	叶周长/mm Leaf perimeter	叶面积/mm ² Leaf area/	长宽比 Length-to-width ratio	叶片圆度 Leaf roundness	叶片紧致度 Leaf compactness	叶尖形态 Leaf apex morphology
0	15	13.86±1.31 ^b	65.07±4.92 ^a	145.09±10.29 ^a	567.15±83.16 ^b	4.74±0.52 ^a	0.34±0.03 ^b	0.93±0.01	15.39±3.32
80	17	16.80±3.49 ^a	64.38±12.95 ^a	146.58±29.94 ^a	696.66±292.97 ^a	3.86±0.44 ^b	0.40±0.04 ^a	0.93±0.02	18.21±10.61
100	22	14.51±5.64 ^{ab}	63.60±26.75 ^a	143.68±59.98 ^a	682.27±600.94 ^a	4.46±0.68 ^a	0.37±0.04 ^{ab}	0.95±0.01	21.48±12.98
150	22	13.08±2.27 ^b	61.07±8.01 ^a	138.02±17.99 ^b	517.73±144.96 ^c	4.81±0.88 ^a	0.34±0.06 ^b	0.93±0.04	23.86±9.23
200	22	13.31±1.96 ^b	56.81±4.62 ^b	128.25±10.29 ^c	477.75±91.41 ^d	4.37±0.54 ^a	0.36±0.04 ^b	0.93±0.03	17.29±6.80
220	23	13.25±4.04 ^b	59.27±8.78 ^b	135.22±21.51 ^b	520.29±221.15 ^c	4.71±0.82 ^a	0.34±0.06 ^b	0.92±0.03	15.79±6.74

综上所述，不同吸收剂量对宁杞10号叶片形态具有差异化塑造作用：在80 Gy剂量下叶片显著增宽、叶面积增大、叶片圆度提升、长宽比降低，整体形态更趋短圆；而在150 Gy以上的剂量下，叶片大小相关指标多出现回落。

2.5 不同吸收剂量处理下枸杞野外定植苗生长指标相关性分析

基于前述结果，对株高、地径、冠幅、根蘖数、叶绿素含量、氮含量及叶形态指标进行

Spearman相关分析。结果(图3)表明，吸收剂量与宁杞10号株高、南北冠幅呈负相关，说明220 Gy处理对生长具有抑制效应。然而，在80 Gy剂量下，叶宽增加、长宽比减小、叶片更趋圆润，表现出特异性响应。150~200 Gy处理时冠幅呈现扩展趋势。此外，生长指标(如株高、地径、冠幅)之间存在中度正相关，叶长与叶周长呈极强相关。氮含量与叶绿素含量呈高度正相关，这与氮素是叶绿素合成关键元素的生理机制一致，体现了生理指标间的联动关系。

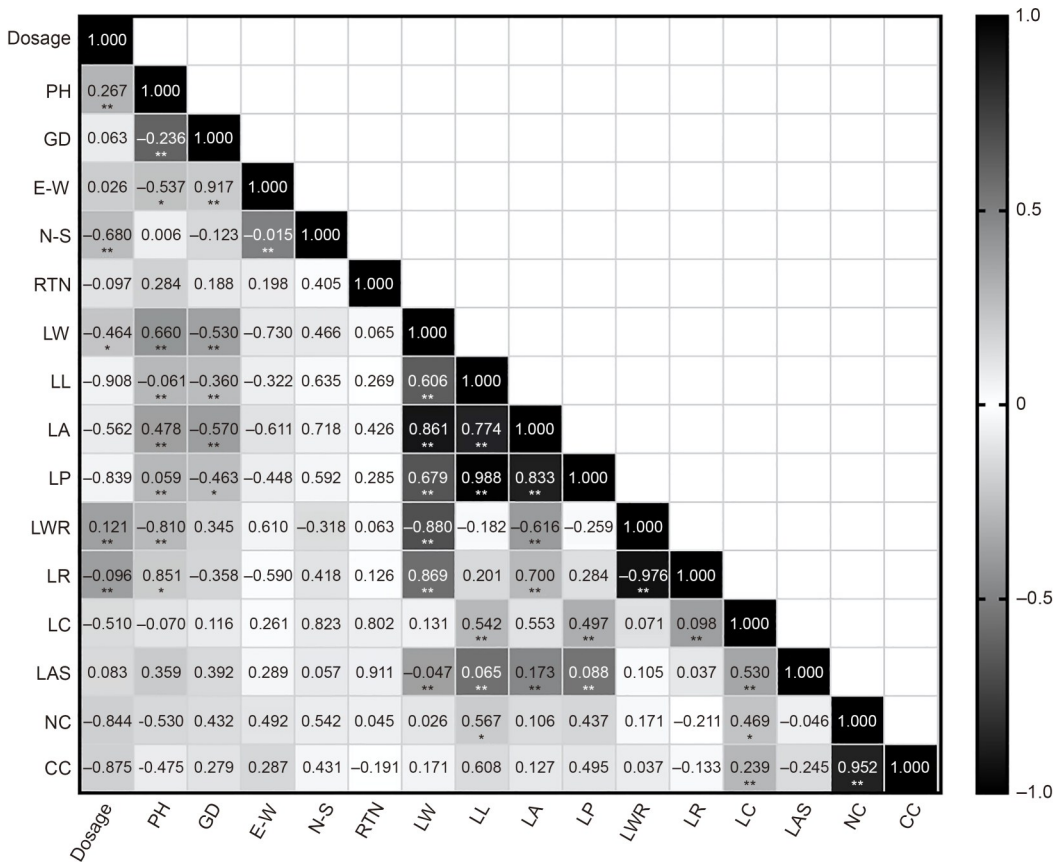


图3 不同吸收剂量处理下枸杞10号野外定植苗生长指标相关性分析(剂量: dosage; 株高: PH; 地径: GD; 东西冠幅: E-W; 南北冠幅: N-S; 根蘖数: RTN; 叶宽: LW; 叶长: LL; 叶面积: LA; 叶周长: LP; 长宽比: LWR; 叶片圆度: LR; 叶片紧致度: LC; 叶尖形态: LAS; 氮含量: NC; 叶绿素含量: CC)(注: 采用LSD法进行显著性检验, 非对角线数值显示 Spearman 相关系数, 星号表示显著性, *代表 $p < 0.05$, **代表 $p < 0.01$)

Fig.3 Correlation analysis of growth indicators in *Lycium* seedlings under different absorbed dose treatments (Dosage: dosage; plant height: PH; ground diameter: GD; east-west crown width: E-W; north-south crown width: N-S; number of root tillers: RTN; leaf width: LW; leaf length: LL; leaf area: LA; leaf perimeter: LP; length-width ratio: LWR; leaf roundness: LR; leaf compactness: LC; leaf apex shape: LAS; nitrogen content: NC; Chlorophyll content: CC) (Note: significance was tested using the LSD method; off-diagonal values represent Spearman correlation coefficients; asterisks indicate significance levels: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

2.6 枸杞10号种子半致死剂量的估算

根据表1数据, 以0 Gy对照组发芽率96.00%为基准, 计算各剂量的相对发芽率。其中, 80 Gy处理组相对发芽率高于100%, 表现出低剂量促进效应。鉴于LD₅₀估算通常关注辐射的抑制效应, 为排除低剂量促进效应的干扰, 本研究采用100~220 Gy剂量范围内的数据进行拟合分析。通过最小二乘法建立线性回归方程, 计算相对发芽率下降至50%时所对应的吸收剂量, 作为LD₅₀的估算值。不同剂量辐照对枸杞10号种子相对发芽率的影响如图4所示。在100~220 Gy剂量范围内, 相对发芽率随剂量增加呈逐渐下降趋势, 但220 Gy剂量下相对发芽率仍达88.89%, 远高于50%。经线性回归分析, 吸收剂量(X)与相对发芽率(Y)的回归方程: $Y = -0.0633X + 104.35$ ($R^2 = 0.8368$)。基于该回归方程外推计算, 当相对发芽率降至

50%时, 对应的吸收剂量约为858 Gy, 此即为枸杞10号种子对电子加速器X射线LD₅₀的估算值。需要指出的是, 本研究中LD₅₀值基于100~220 Gy剂量范围内的线性外推获得, 实际半致死剂量可能更高或存在非线性响应, 后续研究应在更高剂量范围内验证。

上述结果表明, 枸杞10号对电子加速器产生的X射线表现出极强的耐受性, 其外推LD₅₀估算值858 Gy远高于本实验设置的最高剂量(220 Gy)。与已报道的枸杞⁶⁰Co-γ辐照LD₅₀(23.99~49.60 Gy)^[10]相比, 本研究估算值存在显著差异。这一方面反映了利用电子加速器产生的X射线与γ射线两种辐射源生物学效应的不同, 另一方面也证实了不同枸杞品种间辐射耐受性的显著变异。本研究结果为后续枸杞电子加速器诱变育种的剂量选择提供了重要的理论依据。

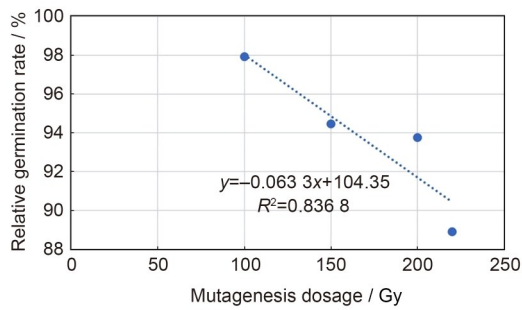


图4 电子加速器X射线辐照下宁杞10号种子的LD₅₀估算(由于80 Gy处理相对发芽率高于对照组,表现出低剂量促进效应,故未纳入LD₅₀拟合)

Fig.4 Estimation of median LD₅₀ for *Lycium barbarum* L. 'Ningqi-10' seeds under electron accelerator X-ray irradiation (the 80 Gy treatment exhibited a low-dose stimulatory effect, as its relative germination rate was higher than that of the control group; therefore, it has been excluded from the median LD₅₀ fitting)

2.7 基于标准化加权综合得分的整体效应评价

本研究采用 Z-score 标准化和等权重加权法,对涵盖种子萌发、幼苗生长、生理特性和叶片形态等 18 项指标构建了辐照剂量处理的综合得分 F_i ,用于全面评估不同辐照剂量对宁杞 10 号整体生长表现的影响。结果显示, 80 Gy 剂量组的综合得分为 0.501, 高于其他组别, 表明该剂量下宁杞 10 号在种子萌发(发芽势和发芽率均高)、幼苗生长(株高和地径优良)、生理特性(氮含量和叶绿素含量稳定)和叶片形态(叶面积和圆度均衡)等多角度表现最优。综合得分次高的是 0 Gy 对照组 0.474。80 Gy 之后, 随着剂量增加综合得分呈递减趋势: 100 Gy 为 0.367, 150 Gy 为 -0.049, 200 Gy

为 -0.369, 220 Gy 为 -0.924。这表明 80 Gy 剂量辐照可能促进综合生长优势, 而 100 Gy 及以上剂量则抑制整体表现, 印证了辐射诱变“低剂量促进、高剂量抑制”的规律, 为适宜诱变剂量的筛选提供了量化依据。因此, 80 Gy 可作为宁杞 10 号的适宜诱变剂量, 以指导后续育种实践, 提高种质资源利用效率。

2.8 电子加速器诱变处理诱导的形态变异

在 M_1 代群体调查中, 除剂量依赖性的生长抑制效应外, 还观察到个别植株出现明显的形态变异。具体而言, 在 100 Gy 处理组中发现两株叶片形态显著区别于野生型的变异株(图 5)。变异株叶片形态明显变窄, 呈现细长柳叶形。其中, 突变体 1 的叶长/叶宽比值仅为对照的 0.818 倍 ($p < 0.01$), 突变体 2 的比值更低 (0.678 倍, $p < 0.01$), 两者均达到极显著差异水平, 而野生型叶片保持正常披针形。植株整体形态观察显示, 除叶片形态差异外, 该变异株的株高、地径、冠幅、叶绿素及氮含量等指标与同期同剂量组 (100 Gy) 未变异植株的均值无显著差异 ($p > 0.05$), 表明变异主要集中于叶片形态。这一发现证实电子加速器 X 射线辐照能够有效诱导枸杞产生形态变异, 且该变异株的叶片细长特征在当年生长季持续保持。鉴于 M_1 代植株尚处于营养生长阶段, 该变异是否具有遗传稳定性, 尚需通过次年新叶萌发后观察其发育稳定性, 并结合 M_2 代种子实生苗及扦插无性系进行进一步验证。

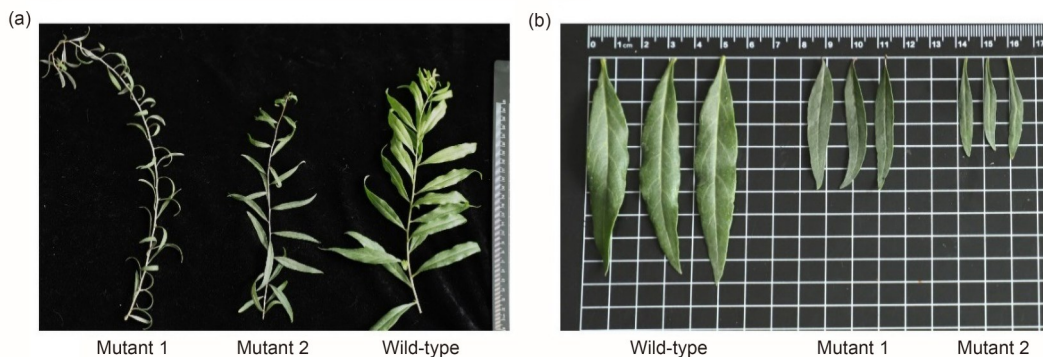


图5 电子加速器诱变处理诱导的宁杞10号细长叶型突变体:(a)100 Gy辐照处理组中筛选获得的细长叶型变异株及野生型对照株整枝形态;(b)变异株与野生型叶片形态对比,左侧为野生型叶片披针形,右侧为变异株叶片细长柳叶形

Fig.5 Slender-leaf type mutant of Ningqi No. 10 induced by electron accelerator mutagenesis: (a) whole-plant morphology of the slender leaf variant and wild-type control plants selected from the 100 Gy irradiation treatment group; (b) comparison of leaf morphology between the variant and wild-type plants, with wild-type leaves on the left showing lanceolate shape and variant leaves on the right exhibiting slender willow-leaf shape

3 讨论

3.1 宁杞10号的辐射敏感性特征及其品种特异性

本研究首次报道了枸杞属植物在电子加速器X射线辐照下的LD₅₀。结果表明,宁杞10号对电子加速器X射线辐照表现出极强的耐受性,在220 Gy剂量下相对发芽率仍达88.89%,其LD₅₀估算值为858 Gy远高于本实验设置的最高剂量。这一结果与杨改儿等^[10]采用⁶⁰Co-γ射线辐照宁杞1号种子获得的LD₅₀(72 Gy)存在显著差异。此种差异一方面印证了王嘉栋等^[11]关于不同枸杞品种辐射敏感性存在显著差异的结论,另一方面也反映出X射线与γ射线的生物学效应的不同。已有研究比较了γ射线、X射线、电子束和质子束对水稻的辐照效应,发现不同辐射源的相对生物学效应存在显著差异,其中X射线的相对生物学效应高于γ射线,相同剂量下损伤更重^[17]。这提示在枸杞诱变育种中,不能简单套用γ射线的剂量数据,而应针对特定辐射源和特定品种开展独立的剂量-效应研究。

同一物种内不同品种间的辐射敏感性差异是普遍存在的生物学现象。例如,黎熠睿等^[15]报道5个唐菖蒲品种的电子束/X射线LD₅₀范围为47.69~87.07 Gy,品种间最大差异达39.38 Gy。红花不同品种对⁶⁰Co-γ辐照的响应也存在显著差异^[16]。本研究发现的宁杞10号高耐受性特征,进一步丰富了枸杞属植物的辐射敏感性数据库,为后续品种针对性剂量设计提供了重要参考。

3.2 LD₅₀与适宜诱变剂量的辩证关系

本研究首次明确了宁杞10号种子电子加速器X射线辐照的LD₅₀估算值约为858 Gy,同时基于种子萌发响应、幼苗生长活力及叶片形态变异等多指标综合评估,筛选出80 Gy为适宜诱变剂量。这两个参数看似悬殊,实则从不同层面揭示了诱变育种的基本规律。

LD₅₀反映的是物种或品种对辐射的耐受极限,是评价辐射敏感性的基础参数。而适宜诱变剂量是育种实践中为使M₂代获得最大数量有益突变体而选择的剂量策略。根据国际原子能机构(IAEA)的育种指南,适宜诱变剂量通常为LD₅₀的50%~70%或更低,以确保在足够大的存活群体中获得

最高的突变频率^[18]。本研究中80 Gy仅占LD₅₀估算值的约9.3%,远低于这一常规比例,这一方面印证了宁杞10号对电子加速器X射线的超强耐受性,另一方面也提示该品种的有益突变可能集中于较低的剂量范围。

高LD₅₀与低适宜剂量并存的现象在辐射育种中并不罕见。例如,Lu等^[19]对4个不同基因型水稻品种进行γ射线辐照处理,发现其LD₅₀范围在316.6~426.7 Gy之间,其中粳稻浙1613的LD₅₀高达426.7 Gy。研究者进一步提出,适宜诱变剂量应选择在LD₅₀附近(±50 Gy)的范围内,以确保最佳的诱变效率。类似的,菲律宾水稻品种NSIC Rc 218的γ射线LD₅₀为424.11 Gy,而最适诱变剂量范围为200~300 Gy,远低于其致死阈值^[20]。印尼水稻Mayas的LD₅₀约为295 Gy,但促进生长的最佳剂量仅为50 Gy^[21]。Elsherbiny等^[22]对埃及水稻品种Giza177的研究表明,100~300 Gy的低剂量γ射线可促进植株生长,而400 Gy以上高剂量则产生显著抑制效应,证实了诱变育种的适宜剂量远低于致死阈值。这些研究虽然针对农作物,但对于木本作物也具有重要参考价值,共同表明了产生有益变异的剂量通常远低于致死剂量,适宜诱变剂量的选择应聚焦于有益变异集中的低剂量区域,而非简单地以LD₅₀为基准。

这一规律的生物学基础在于,LD₅₀反映的是细胞致死效应的累积阈值,而适宜诱变剂量对应的是在保证足够存活群体的前提下,DNA损伤修复机制被适度激活、有益突变发生率相对较高的剂量区间。低剂量辐照可诱导植物启动抗氧化防御系统和DNA损伤修复机制,产生“兴奋效应”(Hormesis),表现为生长促进或特定性状优化。而高剂量辐照则导致不可逆的细胞损伤,即使未致死,其诱变效果也往往表现为非定向的负效应。因此,在育种实践中,适宜诱变剂量通常远低于LD₅₀,而非接近致死阈值。

本研究中,宁杞10号的辐射响应正体现了这一规律。为客观判定适宜诱变剂量,本研究进一步采用标准化加权综合得分法对萌发、生长、生理及叶片形态等18项指标进行综合评价。结果表明,80 Gy处理组的综合得分最高,为0.501,显著高于对照组及其他剂量组。而100~220 Gy处理组随着剂量增加综合得分呈递减趋势,220 Gy处理组综合得分最低,为-0.924。80 Gy处理组在保证较高存活率的同时,显著促进了后期株高生长

(相对株高 128.72%)，并诱导了叶片叶宽、叶面积、叶片圆度显著增加的正向形态变异，呈现出“低剂量有益”的效应。而 100~220 Gy 处理组虽未致死，但生长受到明显抑制且未观察到变异产生，综合得分显著下降，表现出“高剂量抑制”的特征。标准化加权综合得分结果从多元统计角度进一步验证了 80 Gy 作为宁杞 10 号电子加速器适宜诱变剂量的合理性。

上述结果对枸杞诱变育种实践具有直接指导意义。结合宁杞 10 号的剂量响应特性，可形成如下生产应用策略。(1) 剂量配置：以 80 Gy 为主选诱变剂量，同时增设 50 Gy 和 100 Gy 为辅助剂量，以覆盖有益突变可能出现的剂量区间；(2) 处理规模：每剂量处理种子 2 000~3 000 粒，确保 M_1 代存活群体足够大（成苗率约 85%~95%）， M_2 代可获得充足突变体数量；(3) 筛选流程： M_1 代重点淘汰生长严重受抑个体（如 220 Gy 处理组），保留生长正常及表现优势的个体， M_2 代开展目标性状（叶片形态、果实品质、抗逆性等）系统筛选；(4) 加速应用：对于 M_1 代出现的优良变异个体（如本研究发现的细长叶型突变体），可采用扦插无性繁殖方式快速固定变异，缩短育种周期。上述策略已在后续 M_2 代群体构建中初步实施，为宁杞 10 号诱变育种提供了可操作的技术路径。

值得注意的是，在略高于适宜剂量的 100 Gy 处理组中出现了细长叶型突变体，这恰恰印证了诱变育种的随机性本质，射线与 DNA 的相互作用具有偶然性，特定基因的有益突变可能发生在稍高于最适剂量的区域，而并不与群体水平的最优育种剂量完全重合。因此，在后续的研究中，重点聚焦适宜剂量群体的同时，也应对相邻剂量组的特殊变异保持足够敏感，以最大程度发现并保留突变体资源。

3.3 射线对枸杞生长的阶段性效应及其可能机制

本研究发现，不同吸收剂量处理对宁杞 10 号株高生长的影响呈现明显的阶段性特征：幼苗期表现为剂量依赖性抑制，而野外定植后期则出现分化，即 80 Gy 处理组出现显著的后期生长促进（相对株高 128.72%），100~200 Gy 处理组恢复至对照水平，220 Gy 处理组仍持续受抑。这种“低促高抑”的阶段性效应在其他植物的辐射研究中亦有报道。例如，Chang 等^[23] 研究显示，拟南芥经低剂量 γ 射线辐照后，后期出现明显的生长补偿现

象，通过高通量表型平台分析其动态生长规律，发现 100 Gy 处理的植株在播种 21 d 后呈现与野生型几乎相同的生长模式，并观察到兴奋效应。研究者推测这种生长补偿现象可能与辐射诱导的 DNA 修复机制激活及抗氧化系统上调有关。

植物对低剂量辐照的适应性反应机制已在多个物种中得到证实。Gicquel 等^[24] 对拟南芥的研究发现，10 Gy γ 辐照显著上调了与 DNA 修复相关的细胞周期检查点基因，表明植物在低剂量辐照下即可激活 DNA 修复机制。Belykh 等^[25] 进一步证实， γ 辐照可同时诱导 DNA 修复基因的表达上调和抗氧化酶活性的增强，表明低剂量辐照可同时激活植物的 DNA 修复系统和抗氧化防御网络。最新研究中，Hay 等^[26] 发现，X 射线辐照后的矮生菜豆能够表现出显著的恢复能力，光合活性在 3 d 后恢复到胁迫前水平，色素含量也随之恢复，凸显了 DNA 修复效率和抗氧化机制在植物辐射后修复中的关键作用。

基于上述证据，本研究推测 80 Gy 处理组在后期出现的生长促进，可能与该剂量适度激活了枸杞细胞的 DNA 损伤修复系统和抗氧化防御网络有关，即初期损伤诱导修复机制启动，修复后的植株表现出更强的生长势。对于 100~200 Gy 剂量处理，本研究发现植株在 6 个月苗龄时的株高受抑制作用进一步加剧，降至对照组的 44.6%~59.1%。但至 9 月底野外定植期已恢复至对照水平。这一结果提示，该剂量区间造成的辐射损伤可能已超出细胞完全修复的能力范围，但尚未达到不可逆程度，植株通过部分修复机制和生理适应得以恢复正常生长。相比之下，220 Gy 处理组在整个生长周期中持续受抑，表明该剂量可能已诱发不可逆的 DNA 损伤和细胞功能丧失，超出了植株的自我修复阈值。

需要指出的是，上述机制推测尚需进一步的实验验证。后续研究可通过测定不同时期抗氧化酶活性、膜脂过氧化产物及 DNA 损伤修复相关基因表达量等指标，深入解析辐射诱导的“低促高抑”效应的分子机制。

3.4 创新与展望

本研究首次系统建立了宁杞 10 号电子加速器 X 射线辐照的剂量-效应关系，明确了其辐射耐受性特征（ LD_{50} 约 858 Gy）和适宜诱变剂量（80 Gy），为枸杞电子加速器 X 射线诱变育种提供

了关键技术参数。同时,在100 Gy处理组获得的细长叶型突变体,为枸杞叶片形态变异提供了珍贵的种质资源。

此外,突变体库是遗传图谱绘制与基因功能研究的重要材料。后续研究可基于本研究的剂量群体系统开展:(1) M₂代大规模突变体筛选与目标性状遗传分析;(2) 优异突变体的育种应用;(3) 通过转录组、代谢组等多组学手段,深入解析宁杞10号辐射耐受与低剂量有益的分子机制。这些工作将进一步推动枸杞品种的精准选育与遗传资源的深度挖掘,为枸杞种质创新提供理论与材料支撑。

作者贡献声明 闫婷负责诱变实验设计、数据处理分析及论文的撰写;常书娟、海龙参与诱变技术指导;岳静宇负责数据测定和数据分析工作;桑昊、福升负责田间管理,师鹏飞、鲁敏参与部分数据测定。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 翟虎渠,曹兵,顾爽,等.电子加速器诱变育种材料进展初报[J].中国农业科技导报,2024,26(12):210-216. DOI:10.13304/j.nykjdb.2024.0726.
ZHAI Huqu, CAO Bing, GU Shuang, *et al.* Preliminary report on breeding materials induced by electron accelerator[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(12): 210-216. DOI: 10.13304/j.nykjdb.2024.0726.
- 王祥鏢,夏志辉,翟虎渠,等.利用新型电子加速器辐照诱变水稻的研究初报[J].热带生物学报(中英文),2025,16(6):795-799. DOI:10.15886/j.cnki.rdswwb.20250048.
WANG Xiangbiao, XIA Zhihui, ZHAI Huqu, *et al.* Irradiation mutagenesis of rice using a new type of electron accelerator[J]. Journal of Tropical Biology, 2025, 16(6): 795-799. DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20250048.
- Zhao Z H, Liu Z X, Zhou Y P, *et al.* Creation of cotton mutant library based on linear electron accelerator radiation mutation[J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2022, 30: 101228. DOI: 10.1016/j.bbrep.2022.101228.
- Li Y R, Liu L, Wang D, *et al.* Biological effects of electron beam to target turning X-ray (EBTTX) on two freesia (*Freesia hybrida*) cultivars[J]. PeerJ, 2021, 9: e10742. DOI: 10.7717/peerj.10742.
- 朱捷,田坤,姚晓瑜,等.高能电子束辐照降解枸杞中五种农药残留[J].辐射研究与辐射工艺学报,2025,43(3):030402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0122.
ZHU Jie, TIAN Shen, YAO Xiaoyu, *et al.* Degradation of five pesticide residues in Chinese wolfberry using high-energy electron beam irradiation[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(3): 030402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0122.
- 潘金卫,向依,杨航,等.⁶⁰Co-γ射线辐射对紫苏种子的诱变效应[J].贵州农业科学,2025,53(9):20-27. DOI:10.3969/j.issn.1001-3601.2025.09.003.
PAN Jinwei, XIANG Yi, YANG Hang, *et al.* Mutagenic effects of ⁶⁰Co-γ radiation on perilla frutescens seeds[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2025, 53(9): 20-27. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2025.09.003.
- 汪丽虹,王崇英,杨汉民,等.55 keV电子束和Ar⁺离子束及7 MeV V₁₆O⁶⁺离子束辐照枸杞[J].核农学报,1995,9(2):91-94.
WANG Lihong, WANG Chongying, YANG Hanmin, *et al.* Unscheduled DNA synthesis in seeds of Lycium barbarum. Irradiated by 55 keV strong nanosecond pulse electron beam, Ar⁺ ion beam and 7 MeV V₁₆O₆₊ NBEAM [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 1995, 9(2): 91-94.
- 张宇,罗学刚,胡尚连,等.一种丛生竹固定化单细胞定向诱变的技术方法:CN116445467A.[P].2023-07-18.
ZHANG Yu, LUO Xuegang, HU Shanglian, *et al.* A technical method for directional mutagenesis of immobilized single cells in sympodial bamboo: CN116445467A[P]. 2023-07-18.
- 黄海涛,王丹,周丽娟,等.电子束和赤霉素复合处理一串红干种子对M₁代生长发育的影响[J].西北农业学报,2007,16(4):253-256. DOI:10.3969/j.issn.1004-1389.2007.04.060.
HUANG Haitao, WANG Dan, ZHOU Lijuan, *et al.* Effect of combined treatments of electron beam radiation and GA on growth and development of M₁ of scarlet sage dry seeds[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2007, 16(4): 253-256. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1389.2007.04.060.
- 杨改儿,张璇,王嘉栋,等.⁶⁰Co-γ射线辐射宁夏枸杞的生物效应[J/OL].核农学报,2025:1-11.[2026-03-09]. https://link.cnki.net/urlid/11.2265.s.20251014.0922.002.
YANG Gaier, ZHANG Xuan, WANG Jiadong, *et al.* Biological effects of ⁶⁰Co-γ rays irradiation on Lycium barbarum L. [J/OL]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2025: 1-11. [2026-03-09]. https://link.cnki.net/urlid/11.2265.s.20251014.0922.002.
- 王嘉栋,冯凯,杨松波,等.⁶⁰Co-γ射线辐照对4种枸杞穗条的诱变效应[J].辐射研究与辐射工艺学报,2025,

- 43(1): 010404. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0053.
WANG Jiadong, FENG Kai, YANG Songbo, *et al.* Mutagenic effects of ^{60}Co - γ -ray irradiation on the spikes of four Lycium species[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, **43**(1): 010404. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0053.
- 12 安巍, 石志刚. 枸杞无公害栽培技术[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2009.
AN Wei, SHI Zhigang. Pollution-free cultivation techniques of Lycium species [M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 2009.
- 13 王桔红, 陈文, 张勇, 等. 贮藏条件对河西走廊四种旱生灌木种子萌发的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(3): 477-482. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0069.
WANG Juhong, CHEN Wen, ZHANG Yong, *et al.* Effects of storage condition on seed germination of four xeromorphic shrub species from Hexi Corridor[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(3): 477-482. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2011.0069.
- 14 国际种子检验协会(ISTA). 国际种子检验规程[S]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
International Seed Testing Association (ISTA). International rules for seed testing[S]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.
- 15 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. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.06.1049.
LI Yirui, WANG Dan, ZHAN Xiaodie, *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. DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.06.1049.
- 16 牛世杰. 红花和远志种子诱变育种技术的初步研究[D]. 北京: 中国协和医科大学, 2010. DOI:10.7666/d.Y1775697.
NIU Shijie. Preliminary study on mutation breeding technology of safflower and Polygala tenuifolia seeds[D]. Beijing: China Union Medical University, 2010. DOI: 10.7666/d.Y1775697.10.7666/d.Y1775697
- 17 Sharma D, Sao R C, Sahu P K, *et al.* Comparative study of radio-sensitivity and relative biological effectiveness of gamma rays, x-rays, electron beam and proton beam in short grain aromatic rice[J]. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding (the), 2020, **80**(4): 384-394. DOI: 10.31742/ijgpb.80.4.3.
- 18 Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome (Italy) , & International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria) . Manual on mutation breeding[M]. 2nd ed. Vienna: IAEA, 1977.
- 19 Lu Y T, Wang B K, Zhang M C, *et al.* Sensitivity of genotypically diverse rice varieties to radiation and the related changes to antioxidant enzyme activities[J]. International Journal of Radiation Biology, 2024, **100**(3): 453-465. DOI: 10.1080/09553002.2023.2290293.
- 20 Vera cruz J A, Gaa K, Ricablanca J. Field emergence and seedling performance of philippine inbred rice variety NSIC Rc 218 (Mabango 3) exposed to gamma radiation using cobalt-60[C]//Proceedings of the 3rd International Online Conference on Agriculture. Basel: MDPI, 2025.
- 21 Herdiyanti F, Saleh M, Pujowati P, *et al.* Effects of gamma-ray irradiation on agronomic traits and determination of the optimal mutagenic dose (LD_{50}) in the local rice cultivar Mayas (*Oryza sativa*L.)[J]. BIO Web of Conferences, 2025, **206**: 02004. DOI: 10.1051/bioconf/202520602004.
- 22 Elsherbiny H A, Gaballah M M, Hamad H S, *et al.* Inducing potential mutants in rice using different doses of gamma rays for improving agronomic traits[J]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2024, **84**(3): 380-390. DOI: 10.4067/s0718-58392024000300380.
- 23 Chang S, Lee U, Hong M J, *et al.* High-throughput phenotyping (HTP) data reveal dosage effect at growth stages in Arabidopsis thaliana irradiated by gamma rays [J]. Plants, 2020, **9**(5): 557. DOI: 10.3390/plants9050557.
- 24 Gicquel M, Taconnat L, Renou J P, *et al.* Kinetic transcriptomic approach revealed metabolic pathways and genotoxic-related changes implied in the Arabidopsis response to ionising radiations[J]. Plant Science, 2012, **195**: 106-119. DOI: 10.1016/j.plantsci.2012.06.015.
- 25 Belykh E S, Velegzhaninov I O, Garmash E V. Responses of genes of DNA repair, alternative oxidase, and pro-/antioxidant state in Arabidopsis thaliana with altered expression of AOX1a to gamma irradiation[J]. International Journal of Radiation Biology, 2022, **98**(1): 60-68. DOI: 10.1080/09553002.2022.1998712.
- 26 Mele B H, Bianchi A R, Guerretti V, *et al.* Antioxidant defenses and poly(ADP-ribose) polymerase (PARP) activity provide “radioresilience” against ionizing radiation-induced stress in dwarf bean plants[J]. Antioxidants, 2025, **14**(3): 261. DOI: 10.3390/antiox14030261.