

淮山药零余子 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐射的诱变效应

胡泊¹, 宾丽慧², 容敏坚², 黄学华¹, 胡永杏², 古彪^{2*}

1. 广西农业科学院园艺研究所, 广西南宁 530007; 2. 广西农业科学院玉林分院, 广西玉林 537000

摘要: 为探讨 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐射对淮山药主要性状的诱变效应, 开创淮山药育种的新路径, 以南方生态型淮山药品种桂淮5号零余子为材料, 开展 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线辐射诱变研究, 并根据育种目标对辐射第一代 (M_1) 的变异性状进行选择。结果表明: (1) 一定剂量范围内 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线对淮山药零余子发芽、成苗有极显著的抑制损伤作用, 辐射剂量与发芽率一元线性回归方程为 $y=-0.8776x+103.37$, 据此其半致死剂量、临界剂量分别为 60.8 Gy 和 72.2 Gy; (2) 40 Gy 辐射处理对淮山药零余子 M_1 代群体萌芽及生长发育没有抑制作用, 相反表现出一定的促进作用。(3) 辐照处理诱导零余子 M_1 代群体块茎增长增粗、增加单薯重量。(4) 辐照处理诱导零余子 M_1 代个别单株块茎丛生分枝, 薯形由长柱形变异为不规则的块状, 单薯重量大幅度提高; 100 Gy 处理尤为明显, 出现机率达到该处理收获株数的 90%。(5) 辐射处理诱导零余子 M_1 代出现具有双胞薯明显变异的单株, 60 Gy 处理的出现机率最高, 占该处理收获株数的 8%。试验从 M_1 代筛选获得了 18 个双胞薯、11 个大型薯和 1 个开雌花等表现差异明显的单株。结果表明, 淮山药辐射诱变育种具有良好的应用前景, 并为淮山药新品种、品系选育提供了基础材料。

关键词: 淮山药; 零余子; $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐射; 诱变效应; M_1 代单株选择

中图分类号: S632.1 文献标识码: A

Mutagenic Effect of $^{60}\text{Co-}\gamma$ Ray Radiation on Chinese Yam Bulbil

HU Po¹, BIN Lihui², RONG Minjian², HUANG Xuehua¹, HU Yongxing², GU Biao^{2*}

1. Institute of Horticulture, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China; 2. Yulin Branch, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Yulin, Guangxi 537000, China

Abstract: The southern ecological type of Chinese yam variety Guihuai5 was used to investigate the mutagenic effect of $^{60}\text{Co-}\gamma$ radiation. In a certain dose range, $^{60}\text{Co-}\gamma$ radiation had highly significant inhibitory effect on the germination and seedling growth of Chinese yam bulbils. The linear regression equation between the radiation dose and germination rate was $y=-0.8776x+103.37$. According to this, the half-lethal-dose and 40%-lethal-dose was 60.8 Gy and 72.2 Gy respectively. 40 Gy radiation treatment had no inhibitory effect on the germination, growth and development of the M_1 generation population of the bulbils. On the contrary, it showed a promoting effect in some extent. Radiation treatment induced increased tuber length, diameter and weight in the off spring plants of M_1 generation. The radiation treatment induced fascicular branching in some individual tubers in the M_1 generation, which resulted in the tuber change from long-column-shaped shape to irregular-block-shaped shape, and the weight of single tuber increased greatly. This occurred particularly in 90% of the plants harvested in the 100 Gy treatment. $^{60}\text{Co-}\gamma$ treatment induced mutations with twin tubers in the M_1 generation of the treated bulbils. The occurrence probability of the twin mutation was the highest in the 60 Gy treatment, accounting for 8% of the plants harvested. From the M_1 generation, 18 mutants with twin tubers, 11 mutants with large tubers and 1 mutant with female flowers were obtained. The results of this experiment indicate a bright prospect for radiation induction breeding of Chinese yam, and would provide basic materials for the further breeding of new Chinese yam varieties and lines.

Keywords: Chines yam; bulbil; $^{60}\text{Co-}\gamma$ radiation; mutagenic effect; M_1 mutant selection

收稿日期 2022-05-10; 修回日期 2022-08-22

基金项目 国家现代农业产业技术体系广西薯类创新团队项目 (No. nycytxgxcxtd-11-05)。

作者简介 胡泊 (1985—), 男, 学士, 助理研究员, 研究方向: 淮山育种。*通信作者 (Corresponding author): 古彪 (GU Biao), E-mail: gxylgb8293@163.com。

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.05.014

淮山药, 属薯蓣科 (Dioscoreaceae) 薯蓣属 (*Dioscorea* L.) 一年生或多年生缠绕性藤本块茎类植物, 在我国已有 2500 年以上的栽培历史。淮山药品种资源丰富, 20 世纪 60—70 年代植物资源调查发现, 我国有薯蓣科植物 1 属 6 组 49 种^[1-2]。通常, 南方习惯称之为淮山, 北方则称之为山药。有学者从植物生态学角度提出, 我国淮山药品种大体上分为北方型品种和南方型品种两大生态类型^[3], 并指出它们之间主要在植物学性状、适应性、品质、产量、抗逆性等方面均存在较大差异。淮山药块茎主要含淀粉, 不同淮山药种类的块茎大小差异很大, 小的与马铃薯一般, 大的长度可超过 2.5 m, 重达 7.5 kg^[4]。形状各异, 有球状、圆柱状、椭圆、扁平等, 有单胞的, 也有多胞的; 块茎有不分枝的, 也有分枝的。目前生产上的淮山药品种多为块茎长条形、单胞、不分枝品种, 其他类型的应用较少。淮山药是集医药、养生、保健、食用、饲用于一体的高效率经济作物^[5], 甚至可以代粮, 发展潜力巨大, 产业前景广阔。

辐射诱变育种是利用物理诱变因素如 γ 射线等, 诱发植物性状产生遗传变异, 获得有利用价值的突变体, 从而选育出新品种或新种质资源的育种方法^[6]。1969 年, 联合国粮农组织 (FAO) 与国际原子能机构 (IABA) 联合出版发行了《突变育种手册 (Manual on Mutation Breeding)》, 这被认为是植物辐射诱变育种从初期基础研究到实际应用转折的标志^[7]。与常规育种相比, 辐射诱变育种有提高基因突变率、打破性状连锁和促进基因重组、克服植物自交不亲和性、促进远缘杂交结实等潜在优势, 是一种较为简单、能够稳定变异且具有高繁殖效率等优势的优势的育种手段^[8], 较传统育种高效、快速, 较转基因育种更为经济, 是产生新品种的主要手段之一。进入 20 世纪 70 年代, 辐射诱变育种已经成为一种有效的育种手段并得到了迅速发展, 在水稻、小麦、玉米、豆类、果树等品种选育中取得了大量成果。相对而言, 马铃薯、甘薯、淮山药等薯类作物辐射育种研究较少。尤其是淮山药育种, 在有限的育种实践中方法手段比较单一, 目前主要以种质收集、自然变异单株系统选育和引种为主^[9-10]。利用辐射人工创造淮山药变异的育种方法, 迄今仅见刘艳芝

等^[11]对北方型淮山药品种进行诱变处理的报道。

本试验以南方生态型淮山药品种桂淮 5 号零余子为材料, 开展 ^{60}Co - γ 辐射诱变效应研究, 在有效剂量范围内, 分别采用 40、60、80、100 Gy 剂量梯度对试验材料进行辐射处理, 通过田间试验对经辐射处理的零余子 M_1 代发芽率、植株生长发育、结薯形态特征等研究分析, 并围绕育种目标对变异单株进行选择, 以便探讨淮山药零余子 ^{60}Co - γ 辐射诱变性状变异的效应, 测试明确桂淮 5 号零余子辐射的半致死剂量、临界剂量, 获取具有性状表现差异的辐射 M_1 代单株, 探讨淮山药辐射育种的可行性, 并为后继的品种、品系选育提供基础材料。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为南方生态型本地淮山药品种桂淮 5 号零余子, 来自广西桂平市淮山药种植户, 2020 年 11 月采收。所用零余子经人工检选, 大小均匀、饱满, 表面色泽较一致、无伤损、无病虫害, 平均粒重为 8.3 g。

1.2 方法

1.2.1 辐射剂量范围的测试 刘艳芝等^[11]关于淮山药零余子有效辐射剂量, 以及史玮^[12]关于马铃薯、张建斌等^[13]关于香蕉 ^{60}Co - γ 辐射诱变的相关研究资料, 所采用的辐射剂量相互之间悬殊较大。为了测试找到适合桂淮 5 号淮山药零余子的有效剂量范围, 减少盲目性, 提高工作效率, 本研究在正式试验前做了一个较大剂量梯级、较宽剂量范围的预备试验。预备试验具体做法: 采用辐射剂量分别为 30、60、90、120、150、180 Gy, 剂量率为 1.0 Gy/min, 对试验材料零余子进行 ^{60}Co - γ 射线辐射处理, 以未经辐射的为对照, 共 7 个处理。每个处理零余子 100 颗, 不设重复。辐照处理后当天, 将各处理的零余子单层排放到垫有多层湿纸巾的托盘上, 表面覆盖单层湿纸巾, 置于温度 28 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 80% 的培养箱进行催芽。每天观察记录一次萌芽 (露白) 情况, 连续 5 d 不再增加萌芽视为萌芽终止, 统计各处理发芽数、发芽率, 结果如表 1。

预备试验结果只做定性判断不做差异显著性分析。结果表明, 辐射剂量 ≥ 120 Gy 的各处理催

表 1 不同辐射剂量处理淮山药零余子的发芽率

Tab. 1 Germination rates of Chinese yam bulbils in treatment with different radiation doses

处理 Treatment	发芽数 Germinated number	发芽率 Germination rate/%
CK	66	66
30 Gy	74	74
60 Gy	56	56
90 Gy	16	16
120 Gy	0	0
150 Gy	0	0
180 Gy	0	0

芽期内均没有萌芽, 可视达到或超过致死剂量; 而辐射剂量 30 Gy 时, 发芽率不降反升, 高于对照 8 个百分点, 其原因可能与适当剂量辐射对零余子萌发的生理生化过程具有正面效应有关, 需要进一步研究, 但至少说明该剂量及低于该剂量没有对受试零余子产生明显胁迫损伤和诱变效应。因此, 可以判断 ≤ 30 Gy、 ≥ 120 Gy 对诱变而言无实际意义, 在正式试验时可以将其排除。

1.2.2 零余子辐射处理 根据预备试验测试结果, 本试验采用 40~100 Gy 作为适用剂量范围, 设置了 4 个辐射剂量梯度处理, 以未经辐射的为对照, 共 5 个处理。 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线辐照处理于 2021 年 4 月 21 日由广西南翔环保有限公司辐照中心 (广西深圳辐照公司) 施行, 辐射剂量分别为 40、60、80、100 Gy, 剂量率为 1.0 Gy/min。每个处理零余子数为 300 颗。

1.2.3 辐射处理零余子的田间种植 经辐射处理后的零余子, 于 2021 年 4 月 22 日播种于广西农业科学院蔬菜研究所试验基地设施种植大棚。大棚四面通透, 棚顶透光不透雨; 棚长 30 m, 宽 10 m; 地块土壤条件良好, 土层深度约 25 cm, 装备水肥一体化滴灌设施。深耕耙碎后起垄, 垄高约 30 cm, 垄间距 1.6 m。每处理设 3 个重复, 每个重复种植零余子 100 颗。株、行距为 20 cm \times 20 cm, 双行种植。

1.2.4 田间调查 从种植后第 5 天起, 每隔 5 d 观察一次发芽出苗情况, 以发芽露出地面 1~3 cm 肉眼明显可见为准, 记录各处理的出苗数, 并对已计数的苗作标记。连续 5 d 不再出现苗数增加, 视为出苗终止, 统计各处理出苗总数、发芽势、发芽率、相对发芽率。发芽势 = 最高峰时的发芽数/播种数 $\times 100\%$; 发芽率 = 发芽数/播种数 $\times 100\%$; 相对发芽率 = 处理发芽率/对照发芽率 $\times 100\%$ 。收

获时, 计数株数、结薯数; 观测薯形、单株胞数、块茎分枝; 测量薯长、圆径, 平均单薯重, 测定各处理总产薯重量; 将入选单株单独标记收藏, 以便 M_2 代种成株行观察目标性状的遗传性和进行株系选育; 单株选择余下的其他材料, 以处理为单位混合收藏, M_2 代以处理为单位种成混合小区继续观察选择。

1.3 数据处理

应用 SPSS 25.0 和 Excel 软件对数据进行方差及回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同辐射剂量处理对淮山药零余子发芽率的影响

田间调查结果显示: 对照的淮山药零余子发芽率为 86.0%; Gy40 处理的发芽率为 92.7%, 比对照高, 相对发芽率为 107.8%; 此外, 60~100 Gy 各处理的发芽率均比对照低, 且在此剂量范围内, 辐射剂量越高, 发芽率越低。60 Gy 处理的发芽率为 59.7%, 相对发芽率为 69.4%; 80 Gy 处理的发芽率为 28.7%, 相对发芽率为 33.4%; 100 Gy 处理的发芽率为 4%, 相对发芽率为 4.7%。差异性统计分析显示, 除 40 Gy 处理的发芽率高于对照且达显著水平外, 60~100 Gy 各处理与对照之间及其相互间的发芽率, 均随剂量的提高而下降, 且达到极显著水平 (表 2)。在一定剂量范围内, $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线对淮山药品种桂淮 5 号零余子发芽

表 2 不同辐射剂量处理淮山药零余子的发芽率及相对发芽率

Tab. 2 Germination rate and relative germination ratio of the treated bulbils in treatments with different radiation doses

处理 Treatment	零余子播种 总数 Total bulbil number	发芽数 Germination number	发芽率 Germination rate/%	相对发芽率 Relative germination ratio/%
CK	300	258	86.0 ^{bA}	100.0 ^{bA}
40 Gy	300	278	92.7 ^{aA}	107.8 ^{aA}
60 Gy	300	179	59.7 ^{cB}	69.4 ^{cB}
80 Gy	300	86	28.7 ^{dC}	33.4 ^{dC}
100 Gy	300	12	4.0 ^{eD}	4.7 ^{eD}

注: 同行数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: Within the same row, different lowercase letters represent significant difference ($P < 0.05$), and different capital letters represent extremely significant difference ($P < 0.01$).

具有明显的抑制、损害作用，剂量越高抑制、损害作用越大，零余子发芽率越低。

但是，40 Gy 处理的发芽率与本试验另外 3 个剂量处理的结果完全不同，比对照处理不降反升，且差异显著，说明适当较低剂量的 ⁶⁰Co-γ 照射可能对淮山药零余子的萌发有促进作用，有待进一步研究。

2.2 半致死剂量和临界剂量的确定

使用 Excel 软件，以辐射剂量 0 (CK)、40、60、80、100 Gy 及其对应发芽率为基础，拟合一元线性回归方程 $y=bx+a$ ，并利用“回归-线性”参数求算决定系数 (R^2)，以检验方程的拟合优度。其中， y 为零余子发芽率， x 为辐射剂量； $y=50\%$ 时的 x 值即为半致死剂量 (LD_{50})； $y=40\%$ 时的 x 值为临界剂量 (LD_{40})。据此，一元线性回归方程为 $y=-0.8776x+103.37$ ；决定系数达到 0.8008，差异极显著。当 $y=50$ 时，可得出 $x=60.8$ ；当 $y=40$ 时，可得出 $x=72.2$ 。即在本研究条件下，淮山药品种桂淮 5 号零余子诱变的适宜辐照剂量范围为 60.8~72.2 Gy，辐射的半致死剂量为 60.8 Gy、临界剂量为 72.2 Gy (图 1)。

2.3 各辐射剂量处理对淮山药零余子发芽势的影响

经辐射处理的淮山药零余子发芽明显滞后，

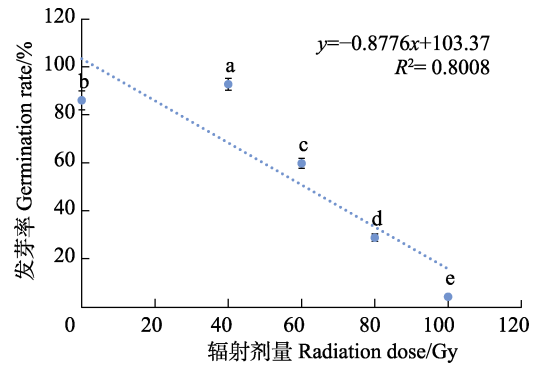


图 1 辐射剂量与淮山药零余子发芽率一元线性回归关系

Fig. 1 Linear regression relationship between radiation dose and germination rate of Chinese yam bulbils

而且这种趋势随着辐射剂量的增加而递增，其中 60 Gy 和 80 Gy 处理比对照出苗初始期推迟滞后 10 d，100 Gy 的滞后 15 d。从发芽势也可看出，随着剂量的递增，发芽势急剧下降 (表 3)。

由表 3 可以看出，尽管 40 Gy 辐射处理在 15 d 时发芽数比 10 d 时增加 103 个，达到高峰值，即发芽势为 42.7%，低于 CK 的 64%，但其后 5 d 发芽数仍达到 102 个，形成一个非常接近第一个高峰期的次高峰期，发芽率增至 76.7%。因此，40 Gy 辐射处理对淮山药零余子发芽势的胁迫、损伤效应，不同于另外 3 个剂量的处理，未表现为负效应。

表 3 不同辐射剂量处理淮山药零余子的发芽进程

Tab. 3 Germination process of Chinese yam bulbils in treatments with different radiation doses

处理 Treatment	第 5 天 Day 5		第 10 天 Day 10		第 15 天 Day 15		第 20 天 Day 20	
	出芽数 Germ. No.	出芽率 Germ. rate/%	出芽数 Germ. No.	出芽率 Germ. rate/%	出芽数 Germ. No.	出芽率 Germ. rate/%	出芽数 Germ. No.	出芽率 Germ. rate/%
CK	9	3.0	82	27.3	192	64.0	216	72.0
40 Gy	2	0.7	25	8.3	128	42.7	230	76.7
60 Gy	0	0	0	0	19	6.3	123	41.0
80 Gy	0	0	0	0	5	1.7	19	6.3
100 Gy	0	0	0	0	0	0	3	1.0
处理 Treatment	第 25 天 Day 25		第 30 天 Day 30		第 35 天 Day 35		第 40 天 Day 40	
	出芽数 Germ. No.	出芽率 Germ. rate/%	出芽数 Germ. No.	出芽率 Germ. rate/%	出芽数 Germ. No.	出芽率 Germ. rate/%	出芽数 Germ. No.	出芽率 Germ. rate/%
CK	256	85.1	256	85.1	258	86.0	258	86.0
40 Gy	267	89.0	278	92.7	278	92.7	278	92.7
60 Gy	159	53.0	176	58.7	179	59.7	179	59.7
80 Gy	61	20.3	84	28.0	86	28.7	86	28.7
100 Gy	7	2.3	11	3.7	12	4.0	12	4.0

2.4 不同辐射剂量处理对淮山药零余子既有芽生长发育成熟的影响

为了更直观地分清辐照处理对萌芽阶段及其后续苗期生长发育成熟阶段的影响,本研究引入了既有芽成活率的概念,即某处理收获时的实得株数/该处理的既有芽数 $\times 100\%$ =既有芽成活率。由表 4 可以看出,40、60、80、100 Gy 处理的既有芽成活率分别为 89.6%、77.1%、82%和 75%,均明显低于对照,说明 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐射对淮山药零余子的损伤不仅作用于萌芽阶段,抑制萌发,形成弱苗,而且对整个生长期造成了延续影响,植株长势相对较差,对整个苗期生长均有明显负向效应。田间观察也发现黄化叶、白化叶现象以及畸形、嵌合体、丛生植株等。因此,与发芽率一样,各辐射处理的实收总株数、块茎数均比对照发生较大幅度减少,且随着剂量的加大,减少的幅度明显增大。但比较而言,辐照对既有芽成活率的不利效应要比其对发芽率的不利效应要小得多。比如,100 Gy 处理的发芽率仅为 4.7%,而其既有芽的成活率为 75%。因此,辐照主要是抑制了零余子发芽,对既有芽的生长也有影响,但要小得多(表 4)。

表 4 不同辐射剂量处理的淮山药零余子既有芽成活率
Tab. 4 Survival rate of existing buds of Chinese yam bul-bils in treatment with different radiation doses

处理 Treatment	既有芽数 Existing buds	收获株数 Harvested plants	既有芽成活率 Survival rate/%
CK	258	253	98.1
40 Gy	278	249	89.6
60 Gy	179	138	77.1
80 Gy	86	71	82.0
100 Gy	12	9	75.0

2.5 不同剂量处理对淮山药 M_1 代结薯特性及块茎性状的影响

2.5.1 对块茎形状及重量的影响 与对照相比,不同辐射剂量处理的块茎长度、直径、重量均有所增加,并随着辐照剂量的增加表现先升后降再升的趋势。40、80、100 Gy 剂量处理的块茎长度、直径、重量均较 CK 的增加,且均达到显著以上水平;60 Gy 处理比 CK 的增加幅度较小,但除薯长外,薯茎、薯重也达到显著水平(表 5)。40 Gy 处理的薯长、薯径、薯重均比对照有较大幅度增加,分别增加了 38.9%、31.3%、73.8%;而 60 Gy 处理比 CK 的增加幅度小,是各辐射剂量对薯长、

薯径、薯重影响效应最小的处理。60 Gy 处理的这种效应似乎中断了随着辐射剂量的提高薯长、薯径、薯重相应比 CK 增加的趋势。以单薯重为例,40 Gy 处理的单薯重为 0.73 kg,比对照增加了 73.8%;60 Gy 处理的块茎重为 0.59 kg,比对照增加了 40.5%,尽管比对照仍明显增重,但没有持续 40 Gy 处理的增幅;80 Gy 的块茎重为 0.67 kg,比对照增加了 59.5%,持续了 60 Gy 处理增长趋势,比 60 Gy 处理的大,但仍然比 40 Gy 处理的小。说明至少在数理统计上,40 Gy 辐照处理表现出的性状表征具有特殊性,与其他 3 个处理表现不尽相同,是否在效应因果关系上有差别需要进一步研究加以厘清甄别。另外,100 Gy 处理的块茎重为 1.8 kg,比对照增加了 328.6%(图 2)。该变异的原因和机理值得更深入的研究,是否遗传需要进一步开展多世代观察。

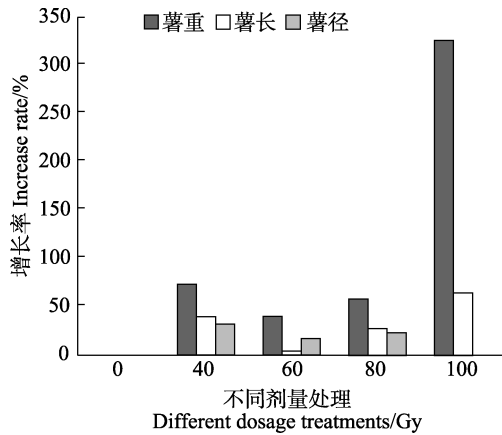
表 5 不同辐射剂量处理的淮山药块茎性状表现
Tab. 5 Tuberisation feature and tuber size of Chinese yam in treatments with different radiation doses

处理 Treatment	总薯数 Total tubers	薯长 Length/cm	薯径 Diameter/cm	薯重 Weight/kg
CK	253	28.40 \pm 5.01 ^{dC}	3.64 \pm 0.68 ^{bB}	0.42 \pm 0.05 ^{eB}
40 Gy	251	39.45 \pm 5.18 ^{bAB}	4.78 \pm 0.88 ^{aA}	0.73 \pm 0.24 ^{bB}
60 Gy	149	29.47 \pm 7.07 ^{cdC}	4.24 \pm 0.81 ^{abA}	0.59 \pm 0.16 ^{bcB}
80 Gy	73	36.25 \pm 8.42 ^{bcBC}	4.49 \pm 0.83 ^{aA}	0.67 \pm 0.22 ^{bB}
100 Gy	10	46.63 \pm 10.70 ^{aA}		1.80 \pm 0.42 ^{aA}

注:表中数据为均值 \pm 标准差;同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示处理间差异极显著($P<0.01$)。由于 100 Gy 处理为多分枝不规则的块茎,因而没有测量薯径。

Note: The data are mean \pm standard deviation; within the same column, different lowercase letters represent significant difference ($P<0.05$), and different capital letters represent highly significant difference ($P<0.01$). As the tubers were irregular and rich-branchy in the 100 Gy treatment, the diameter was not measured.

2.5.2 对发生双胞薯及次生芦头现象的效应 双胞率表示由一个淮山药零余子长成的单株有 2 个或多个成薯的株数占该处理总株数的百分数。本试验的对照桂淮 5 号为单胞品种,试验结果也均为一株结一个块茎,但经辐射的 4 个处理均不同程度地出现了双胞结薯现象。同时,在一个单株中除正常结薯的芦头外,还出现了 2 个甚至多个没有结成块茎的芦头,本文称之为次生芦头,以对应区别于正常结薯的芦头。次生芦头的出现同样随着剂量的增加而增加,但辐射剂量越高次生芦头成薯的概率越低。40 Gy 处理无次生芦头出



由于 100 Gy 处理为多分枝不规则的块茎，因而没有测量薯径。
As the tubers were irregular and rich-branched in the 100 Gy treatment, the diameter was not measured.

图 2 不同剂量处理淮山药的薯长、薯径和薯重

Fig. 2 Tuber length, diameter and weight in Chinese yam treated with radiation doses

现，有 2 个分别出现结 2 个块茎的单株，即双胞胎，占该处理收获株数的 0.8%；60 Gy 处理 16 株出现次生芦头，其中 11 株为双胞胎（含 1 个 3 胞株），占该处理收获株数的 8%，是双胞胎率最高的处理；80 Gy 处理有 13 株长有次生芦头，其中 4 个双胞胎，占 5.6%；100 Gy 处理全部 9 个单株均为长有次生芦头的单株，其中 1 个为双胞胎，

占比为 11.1%（表 6）。

2.5.3 对块茎分枝特性的影响 淮山药品种桂淮 5 号的块茎为长圆柱形，无分枝。块茎双（多）分枝率是指由一个芦头长成的块茎出现 2 个（多个）分枝的块茎数占该处理总块茎数的百分数。在 60~100 Gy 之间，随着辐射剂量增加，分枝的趋势愈明显。40 Gy 处理仅出现 2 个分枝的块茎 1 个；60 Gy 处理出现 3 个分枝的块茎 2 个，4 个、6 个分枝的块茎各 1 个；80 Gy 处理出现 3 个分枝的块茎 3 个，4 个分枝的块茎 1 个；100 Gy 处理的单株块茎则全部发生了分枝，其中 2 个分枝的 3 个，3 个以上分枝的 7 个，最多的 1 个块茎分枝数达到 10 个（表 6、表 7）。

3 讨论

3.1 淮山药品种桂淮 5 号零余子 ⁶⁰Co-γ 辐射诱变的半致死剂量和临界剂量

本研究经相关性分析得到零余子的发芽率与 ⁶⁰Co-γ 辐射剂量之间的相关回归方程为： $y = -0.8776x + 103.37$ ；决定系数为 0.8008，达极显著差异。这说明在一定剂量范围内，淮山药品种桂淮 5 号零余子的发芽率、发芽势与辐射剂量之间

表 6 不同辐射剂量处理淮山药的双胞胎、次生芦头以及块茎的双分枝和多分枝情况

Tab. 6 Twin tuber (TT), secondary rootstock (SR), double-branched tuber (DBT) and multiple-branched tubers (MBT) in Chinese yam plants treated with different radiation doses

处理 Treatment	双胞胎数 No. of TT	双胞胎率 Rate of TT/%	次生芦头株数 No. of SR	次生芦头株率 Rate of SR/%	双分枝薯数 No. of DBT	双分枝薯率 Rate of DBT/%	多分枝薯数 No. of MBT	多分枝薯率 Rate of MBT/%
CK	0	0	0	0	0	0	0	
40 Gy	2	0.8	0	0	1	0.4	0	
60 Gy	11	8.0	5	3.6	0	0	4	2.8
80 Gy	4	5.6	9	12.7	0	0	4	5.5
100 Gy	1	11.1	8	88.9	1	10.0	9	90.0

表 7 不同辐射剂量处理淮山药的次生芦头、双胞胎数分布

Tab. 7 Distribution secondary rootstocks and twin-tuber plants in Chinese yam plants treated with different radiation doses

处理 Treatment	次生芦头株数 Plants with secondary rootstock	次生芦头分布情况 Secondary rootstock distribution	双胞胎数 Twin-tuber plants	多分枝块茎数 Tubers with multiple branches	多分枝块茎情况 Multiple-branched tuber distribution
CK	0		0	0	
40 Gy	2	2*2	2	1	3*1
60 Gy	16	2*12, 3*4	11	4	3*2, 4*1, 6*1
80 Gy	13	2*12, 3*1	4	4	3*3, 4*1
100 Gy	8	2*5, 3*1, 4*2	1	9	3*2, 4*1, 5*2, 6*1, 8*1, 9*1, 10*1

注：“*”前的数字表示次生芦头数或分枝数，“*”后的数字表示株数或块茎数。

Note: The data before “*” show the number of the secondary rootstocks or multiple-branched tubers, and those after “*” show the number of the plants or tubers.

呈高度负相关,随着 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐射剂量的增加,淮山药零余子的发芽会被抑制和延迟。

桂淮 5 号零余子 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐射的半致死剂量为 60.8 Gy, 临界剂量为 72.2 Gy。因此,对淮山药品种桂淮 5 号零余子进行诱变处理的适宜辐照剂量范围为 60.8~72.2 Gy。不同植物、不同品种、相同品种的不同器官、相同器官的不同部位、不同生长期,由于结构和生理生化特性等的差异,对 $^{60}\text{Co-}\gamma$ 辐射的敏感性和耐受程度不同,需要通过试验才能确定合适的处理剂量。

本研究得到的淮山药桂淮 5 号零余子的辐射半致死剂量与刘艳芝等^[11]报道的结果差别较大。在该研究中,嘉祥细毛长山药零余子 $\text{LD}_{50}=18\,964.8\text{ Rad}$, 济宁米山药零余子 $\text{LD}_{50}=23\,588.0\text{ Rad}$, 牛腿山药零余子 $\text{LD}_{50}=23\,369.2\text{ Rad}$, 铁棍山药零余子 $\text{LD}_{50}=20\,153.8\text{ Rad}$ (Gy 与 Rad 的换算关系是 $1\text{ Gy}=100\text{ Rad}$)^[8]。据此,这些淮山药品种的 LD_{50} 为 189.6~235.9 Gy,远大于桂淮 5 号的 60.8 Gy。这可能与所采用的辐射剂量率、淮山药品种及其生态类型等不同有关。

3.2 40 Gy 辐射处理对淮山药零余子 M_1 群体萌芽及生长发育可能具有促进作用

在有效辐射剂量的下限附近,即本试验中的 40 Gy 处理,与对照相比,其淮山药零余子相对发芽率显著上升,而且对 M_1 代块茎的长、径、重的增加效应也表现出较明显的生长促进效应,薯长、粗、重均有较大幅度增加,表明此辐射强度对淮山药零余子萌芽及生长发育有促进作用。这种正面效应具有实际应用价值,零余子可以作为繁殖材料,提高繁殖系数,在淮山药品种提纯复壮乃至大田生产中提供更高效的技术路径,值得进一步研究。

3.3 辐照处理诱导零余子 M_1 代双胞胎薯、次生芦头、块茎丛生分枝的变异

本研究中,在有效辐射剂量范围内,辐射使淮山药 M_1 代产生不同程度的双胞胎薯、次生芦头和块茎分枝现象。这些均应同属于植物学意义上的茎芽分生。尤其是在 60 Gy 处理中获得了 8.0% 的双胞胎薯率,这是一个特别值得关注的诱变效应。双胞胎薯符合小型薯早熟密植丰产轻简化栽培的育种目标要求,能有效解决当前淮山药主推品种块茎过长、种收劳动力成本过高的难题。而且,覃维治等^[14]研究表明,结薯数是影响淮山药产量的因素之一,对产量提高有一定的作用,

在淮山药育种中,应选择结薯数适中的品种。

另外,在可耐受辐射剂量的上限附近,即本研究中的 100 Gy 处理,零余子发芽率仅为 4%,可被视为致死极限辐射剂量,却诱发了该处理全部块茎出现多个分枝甚至分枝丛生现象,薯形由长柱形变异为不规则块状,且其平均单薯重达到了 1.80 kg。丛生芽变异在其他作物的诱变育种中也较常见,多被视为不良性状,没有选择意义。但对以块茎为经济产量的淮山药等作物来说,地下块茎分枝、丛生,长成块状块茎,在某种程度上,比如对提高产量而言,一旦这种变异是可遗传的,就可能成为具有应用价值的优良性状。张明玉等^[15]就曾提出,淮山药生产应该走“应用块状品种,起垄轻简栽培”的发展方向。

3.4 从零余子辐射处理的 M_1 代可以选择获得具有明显变异的单株

本研究从零余子辐射处理的 M_1 代共筛选获得了 18 个双胞胎薯、11 个大型薯和 1 个开雌花等表现差异明显的单株,这些变异单株形成的生理基础、诱变机理值得深入研究,其遗传性有待在 M_2 代等后继世代继续研究观察。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第 16 卷[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 54-121.
Flora of China Editorial Board of Chinese Academy of Science. Flora of China (Vol. 16)[M]. Beijing: Science Press, 1985: 54-121. (in Chinese)
- [2] 蔡金辉, 严渐子, 黄晓辉, 叶淑静, 蒋伦伟, 顾之中. 山药品种资源的分类研究[J]. 江西农业大学学报, 1999(1): 55-57.
CAI J H, YAN J Z, HUANG X H, YE S J, JIANG L W, GU Z Z. Study on variety resources classification of Chinese yam[J]. Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1999(1): 55-57. (in Chinese)
- [3] 韦本辉. 我国淮山药产业发展现状及对策[J]. 现代农业科技, 2012(3): 352-354.
WEI B H. Development status and countermeasures of *Dioscorea opposita* Thunb industry in China[J]. Modern Agriculture Science and Technology, 2012(3): 352-354. (in Chinese)
- [4] TOYOHARA H, IRIE K, DING W, IWATA H, FUJIMAKI H, KIKUCHI F, UKAI Y. Evaluation of tuber shape of yam (*Dioscorea alata* L.) cultivars by image analysis and elliptic Fourier descriptors[J]. SABRA Journal of Breeding and Ge-

- netics, 2000, 32: 31-37.
- [5] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
Chinese Pharmacopoeia Committee. Pharmacopoeia of the People's Republic of China (vol.1)[M]. Beijing: Chinese Press of Medicine Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [6] 徐冠仁. 辐射育种的进展[J]. 中国农业科学, 1961(12): 7-12.
XU G R. Progress in radiation mutagenic breeding[J]. Agricultural Sciences in China, 1961(12): 7-12. (in Chinese)
- [7] 夏英武. 作物诱变育种[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
XIA Y W. Crops mutation breeding[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 李鹏, 李新华, 张锋, 邱登林. 植物辐射诱变的分子机理研究进展[J]. 核农学报, 2008(5): 626-629.
LI P, LI X H, ZHANG F, QIU D L. Research progress in molecular mechanism of irradiation-induced plant mutation breeding[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2008(5): 626-629. (in Chinese)
- [9] 韦本辉, 甘秀芹, 刘斌, 申章佑, 胡泊, 陆柳英, 李艳英, 吴延勇, 宁秀呈, 何彰杰. 淮山药新品种‘桂淮7号’的选育及栽培要点[J]. 南方农业学报, 2012, 43(6): 764-766.
WEI B H, GAN X Q, LIU B, SHEN Z Y, HU P, LU L Y, LI Y Y, WU Y Y, NING X C, HE Z J. Breeding and cultivation techniques for a new yam variety ‘Guihuai7’[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(6): 764-766. (in Chinese)
- [10] 李艳英, 甘秀芹, 韦本辉, 刘斌, 申章佑, 胡泊, 劳承英, 宁秀呈. 5个淮山品系比较试验[J]. 广东农业科学, 2015, 42(11): 55-58.
LI Y Y, GAN X Q, WEI B H, LIU B, SHEN Z Y, HU P, LAO C Y, NING X C. Comparative analysis of different strains of yam (*Dioscorea opposita* Thunb)[J]. Guangdong Agricultural Science, 2015, 42(11): 55-58. (in Chinese)
- [11] 刘艳芝, 徐祥文, 王淑霞, 马井玉. ^{60}Co - γ 射线对山药零余子的辐射效应[J]. 山东农业科学, 2016, 48(4): 54-56, 60.
LIU Y Z, XU X W, WANG S X, MA J Y. Radiation effect of ^{60}Co - γ ray on bulbil of *Dioscorea opposita*[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(4): 54-56, 60. (in Chinese)
- [12] 史玮. ^{60}Co - γ 射线辐照创造马铃薯突变株系的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
SHI W. Study on potato mutation line induced by ^{60}Co - γ rays[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [13] 张建斌, 张建平, 王安邦, 徐碧玉, 金志强, 刘菊华. 香蕉不定芽 ^{60}Co 辐射诱变研究[J]. 热带农业科学, 2018, 38(2): 42-45, 51.
ZHANG J B, ZHANG J P, WANG A B, XU B Y, JIN Z Q, LIU J H. Radiation-induced mutation of banana adventitious shoots by using ^{60}Co [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2018, 38(2): 42-45, 51. (in Chinese)
- [14] 覃维治, 韦本辉, 甘秀芹, 韦民政, 唐秀桦. 淮山药种质资源主要农艺性状遗传多样性分析[J]. 南方农业学报, 2014, 45(10): 1726-1733.
QIN W Z, WEI B H, GAN X Q, WEI M Z, TANG X H. Genetic diversity analysis of main agronomic traits in yam-germplasm resources[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(10): 1726-1733. (in Chinese)
- [15] 张玉明, 张培通, 殷剑美. 江苏省山药生产现状及育种方向[J]. 种子世界, 2016(7): 2-3.
ZHANG Y M, ZHANG P T, YIN J M. Production situation and breeding directions for Chinese yam in Jiangsu province[J]. Seed Development, 2016(7): 2-3. (in Chinese)