

doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.013

引用格式: 胡尔艾, 郑凯鑫, 纪佳慧, 等. 三种藨草在低剂量 ^{60}Co - γ 辐射诱变下的生理响应与评价[J]. 草地学报, 2026, 34(1): 132–141

HU Er-ai, ZHENG Kai-xin, JI Jia-hui, et al. Physiological Response and Evaluation of Three *Phalaris arundinacea* Resources to Low-Dose ^{60}Co - γ Radiation-Induced Mutagenesis[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1): 132–141

三种藨草在低剂量 ^{60}Co - γ 辐射诱变下的生理响应与评价

胡尔艾^{1,2}, 郑凯鑫^{1,2}, 纪佳慧², 辛冰², 刘凌云², 滕珂², 范希峰²,
岳跃森², 丁国昌^{1*}

(1. 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福建福州 350002; 2. 北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所, 农业农村部华北都市农业重点实验室, 北京 100097)

摘要: 为探究低剂量 ^{60}Co - γ 辐射对藨草资源1、藨草资源2和藨草资源3的生物学效应并区分3种藨草对低剂量辐射的耐受性。采用10 Gy的 ^{60}Co - γ 射线辐射其带芽点根状茎(亲代), 研究了该处理对3种藨草子一代(M_1 代)种子萌发及幼苗生理生化特性的影响。结果表明: 辐射显著抑制了3种藨草 M_1 代种子的发芽率、发芽势及发芽指数; 生理生化指标显示, 藨草资源3的叶绿素含量和可溶性糖含量较对照显著升高, 而过氧化物酶活性降低; 藨草资源2表现为叶绿素含量、丙二醛含量及过氧化物酶活性下降, 可溶性蛋白含量和超氧化物歧化酶活性升高; 藨草资源1的可溶性蛋白含量显著降低。相关性分析表明, 发芽指标之间、光合色素之间均呈显著正相关, 主成分分析结果与相关性分析结果类似。最后通过隶属函数法分析表明, 3种藨草的低剂量辐射耐受能力强弱为藨草资源3>藨草资源1>藨草资源2。

关键词: 藨草; 辐射诱变; 种子发芽; 幼苗生理

中图分类号: S515

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)01-0132-10

Physiological Response and Evaluation of Three *Phalaris arundinacea* Resources to Low-Dose ^{60}Co - γ Radiation-Induced Mutagenesis

HU Er-ai^{1,2}, ZHENG Kai-xin^{1,2}, JI Jia-hui², XIN Bing², LIU Ling-yun², TENG Ke²,
FAN Xi-feng², YUE Yue-sen², DING Guo-chang^{1*}

(1. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian Province 350002, China;

2. Institute of Grassland, Flowers and Ecology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences Key Laboratory of Urban Agriculture (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China)

Abstract: To investigate the biological effects of low-dose ^{60}Co - γ radiation on three *Phalaris arundinacea* resources and differentiate their radiation tolerance, their rhizomes with bud point (parental generation) were irradiated with 10 Gy of ^{60}Co - γ rays. The effects on seed germination and seedling physiological-biochemical characteristics of the first filial generation (M_1) were examined. The results demonstrated that radiation significantly suppressed germination rate, germination potential, and germination index of all three resources. Physiological analysis revealed chlorophyll and soluble sugar content in *Phalaris arundinacea* 3 significantly increased ($P<0.05$), but peroxidase (POD) activity decreased. For *Phalaris arundinacea* 2, chlorophyll, malondialdehyde (MDA) content, and POD activity reduced, and soluble protein and superoxide dismutase (SOD) activity elevated. For *Phalaris arundinacea* 1, soluble sugar and soluble protein content markedly decreased. Correla-

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-10-20

基金项目: 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJ CX20251208, KJ CX20230119); 云南省科技计划项目(202403AP140045)资助

作者简介: 胡尔艾(2001-), 女, 汉族, 贵州安顺人, 硕士研究生, 主要从事观赏草研究, E-mail: huerai2i@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: fjdgc@fafu.edu.cn

tion analysis showed significant positive relationships between germination parameters and photosynthetic pigments. Principal component analysis yielded consistent findings with correlation results. The low-dose radiation tolerance hierarchy established by subordinate function analysis was *Phalaris arundinacea* 3>*Phalaris arundinacea* 1>*Phalaris arundinacea* 2.

Key words: *Phalaris arundinacea*; Radiation mutagenesis; Seed germination; Seedling physiology

诱变育种是一种人工创造新品种的方法,主要包括化学诱变和物理诱变(辐射诱变)。与化学诱变相比,辐射诱变更常见,能够使诱变对象获得更复杂和多样的突变性状,并提高突变效率^[1]。辐射诱变由不同辐射诱变剂诱导,包括电离辐射和非电离辐射,其中电离辐射主要是指 x 射线和 γ 射线^[2-3],作为一种高能电离辐射,γ 射线通过诱导 DNA 损伤、自由基生成及细胞代谢改变等方式,影响种子的生理生化过程,从而调控其萌发特性与幼苗发育^[4]。适度的辐射剂量能够激活植物的修复机制并引发有益突变,为作物遗传改良提供新的途径^[5];而过量辐射则可能导致细胞凋亡、生长抑制甚至死亡^[6]。藨草(*Phalaris arundinacea*),又称草芦或圆草芦,是一种禾本科的多年生草本植物。藨草喜湿,常生长在河漫滩、湖边、低洼地、沼泽地等湿度较高地区,与芦苇混生^[7]。藨草高大、生长周期短且生物量产量高,营养价值高,可作牧草、能源草,还可用于生态治理,在畜牧生产、湿地生态系统恢复与建设以及农业环境污染治理等领域展现出广阔的应用前景与巨大发展潜力^[8]。同时,藨草具备抗寒、抗涝、抗旱和抗病虫的能力,能够在多种恶劣环境中良好生长^[9]。目前,关于藨草的基础研究已相当丰富,主要集中在其生物特性、抗逆性、饲草利用和污染治理等方面。然而,针对藨草种质资源的遗传改良研究相对较少,且多采用传统选育方法^[10-11],关于辐射诱变对藨草生长活力及幼苗生理影响的研究也较为稀缺。已有研究表明,辐射对多种植物的发芽率、幼苗形态及生理指标有显著影响^[12-14],并且不同物种甚至品种对辐射的敏感性存在显著差异,如紫花苜蓿(*Medicago sativa*)品种间对辐射的响应差异明显^[15],桂花(*Osmanthus fra-*

grans)的不同品种‘潢川金桂’‘籽银桂’也表现出不同的辐射敏感性^[16]。因此,探究同种植物不同品种对固定 γ 辐射剂量的响应差异,对于解析不同品种抗低辐射机制具有重要意义。

目前,关于藨草及其人工选育品种间对低剂量 10 Gy ⁶⁰Co-γ 辐射的响应及不同藨草品系对辐射的耐受性差异研究鲜有报道。本研究以北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所自主选育的 3 个藨草品系(藨草资源 1, 2, 3)的 M₁ 代种子为试验材料,旨在探究辐射对 3 个不同品系藨草的发芽指标影响,通过对叶绿素(Chlorophyll, Chl)、丙二醛(Malondialdehyde, MDA)、渗透调节物质含量和抗氧化酶活性的测定,结合相关性分析和主成分分析对各对照、处理与指标间的关系进行分析,最后通过隶属函数法综合评价 3 个品系的藨草辐射耐受性。研究结果可为藨草辐射诱变育种的体系优化提供理论依据,同时为解析禾本科植物辐射响应机制提供一定的理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为来自北京市农林科学院小汤山国家精准农业研究示范基地的 3 个藨草品系(藨草资源 1、藨草资源 2、藨草资源 3)的 M₁ 代种子,该种子由亲本根状茎经 10 Gy ⁶⁰Co-γ 辐射处理获得。3 个藨草品系生长特性及田间表型图分别见表 1,图 1。前期试验结果显示经 20 Gy ⁶⁰Co-γ 以上辐射剂量处理的藨草在发芽及生长过程中多数死亡,遂选择经 10 Gy ⁶⁰Co-γ 辐射剂量处理的藨草 M₁ 代种子作为试验材料。将种子去稃并收集储存于牛皮纸袋中备用。

表 1 3 种藨草的生长特性

Table 1 Growth characteristics of three *Phalaris* species

品系名称 Variety name	生长特性 Growth characteristics
藨草资源 1 <i>Phalaris arundinacea</i> 1	高大直立,株型开展,分蘖多,叶色深绿,于 3 月初—3 月中旬返青,抽穗早,花序直立,较大,根状茎发达
藨草资源 2 <i>Phalaris arundinacea</i> 2	植株较低矮,株型较开展,分蘖多,叶色浅绿,于 3 月中旬—3 月下旬返青,抽穗晚,花序直立,较小,根状茎发达
藨草资源 3 <i>Phalaris arundinacea</i> 3	高大直立,株型紧凑,分蘖多,叶色深绿,于 3 月中旬—3 月下旬返青,抽穗晚,花序直立,较大,根状茎发达

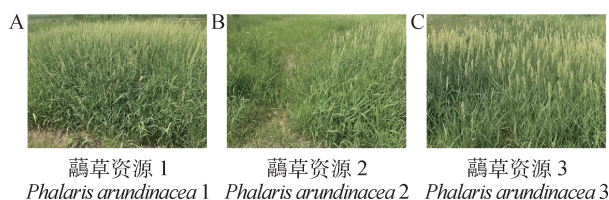


图1 3种藨草的田间表型生长图

Fig. 1 Field phenotypic growth charts of three *Phalaris* species

1.2 试验方法

1.2.1 试验地点和时间 试验于2025年1—4月在北京市农林科学院草业花卉与景观生态研究所内实验室和温室中进行。

1.2.2 试验步骤 试验挑选成熟饱满均匀一致的种子,置于50 mL离心管中,用蒸馏水冲洗以去除种子表面杂质,后用84消毒液消毒10 min,之后使用蒸馏水清洗5次及以上,最后用50 mg·L⁻¹的6-BA浸泡24 h后接种于垫有两层提前浸湿滤纸的发芽盒中。每发芽盒中放置30粒种子,每处理重复4次,以各品系未经辐射的种子作为对照。置于人工气候室中(16 h光照/8 h黑暗,恒温25℃)培养,期间每日观察种子萌发情况,及时补充水分,保持滤纸为湿润状态。

1.2.3 发芽指标测定 试验期间记录种子发芽数,统计种子萌发情况,以种子子叶外露长度超过种子大小的一半以上视为发芽^[17]。第3天统计发芽势,第10天统计发芽率^[18]。第10天随机取20个幼苗测量其根长和苗长。

$$\text{发芽势} = \frac{\text{第3天发芽种子数量}}{\text{试验种子总数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽率} = \frac{\text{第10天发芽种子数量}}{\text{试验种子总数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽指数}(G_i) = \sum(G_i/t), G_i \text{为在第} t \text{日的发芽个数}, t \text{为相应天数}^{[19]}$$

1.2.4 幼苗指标测定 直至最后一粒种子发芽3天内不再有种子发芽后,将幼苗移至穴盘内炼苗后测定幼苗生理指标。炼苗30天后选取植株幼嫩叶片的从上至下第2~4片叶子,用蒸馏水清洗,滤纸吸干水分,放入-20℃低温冰箱储存备用进行生理指标测定,各项指标重复测定3次。其中叶绿素含量测定参考李合生^[20]的方法,丙二醛、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶

(Peroxidase, POD)、可溶性糖(Soluble sugar, SS)、可溶性蛋白(Soluble protein, SP)参考高俊山^[21]的方法。

1.3 数据分析

采用隶属函数法^[22]对3种藨草的各项指标进行综合评价,计算公式为

$$U(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$U(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中: X_i 为指标的测定值/对照值, $X_{\min}$, $X_{\max}$ 分别为 X_i 中最小值和最大值。若指标与耐辐射能力呈正相关,用公式(1),反之用公式(2)。

使用Excel 2019, SPSS Statistics 27和Origin 2024软件进行数据整理、分析和作图。

2 结果与分析

2.1 辐射对3种藨草种子萌发的影响

经10 Gy辐射处理后,3种藨草资源的发芽势(Germination energy, GE)发芽率(Germination rate, GR)和发芽指数(Germination index, GI)均呈现下降趋势。具体表现为(表2),在发芽试验开始3天后,仅藨草资源3对照组和试验组的发芽势、发芽率和发芽指数存在显著差异($P < 0.05$),分别为25%和13%,43%和25%,4.75和2.46。在3个试验品系中,藨草资源1对照组的发芽势、发芽率和发芽指数均最高,分别为32%,53%,5.10。其他各品系以及各处理的发芽指标见表2。

辐射在一定程度上影响不同品系藨草的苗长。藨草资源1辐射处理后植株苗长主要集中在30~40 mm之间,而处理前(对照组)苗长则主要集中在40~50 mm之间,根长无明显差异,均位于10~20 mm之间(图2A)。藨草资源2对照组与处理组间苗长与根长无显著差异,苗长处理前后范围在25~50 mm间;根长处理前后范围集中于10~20 mm间(图2B)。藨草资源3对照组苗长长度集中在20~50 mm之间,处理组苗长集中30~50 mm之间,存在极低值,为12 mm,根长范围无明显差异,均集中在10~20 mm间(图2C)。

表 2 10 Gy 处理下 3 种藨草的发芽势、发芽率和发芽指数

Table 2 The germination energy, germination rate, and germination index of three *Phalaris* species under 10 Gy irradiation

试验处理对象 The experimental treatments	发芽指标 Germination indices		
	发芽势 Germination energy/%	发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index
藨草资源 1 <i>Phalaris arundinacea</i> 1	32±0.04 ^a	53±0.04 ^a	5.10±0.45 ^a
藨草资源 1-10 Gy <i>Phalaris arundinacea</i> 1-10 Gy	25±0.04 ^{ab}	44±0.03 ^a	3.80±0.34 ^{abc}
藨草资源 2 <i>Phalaris arundinacea</i> 2	29±0.01 ^{ab}	43±0.01 ^a	3.96±0.14 ^{ab}
藨草资源 2-10 Gy <i>Phalaris arundinacea</i> 2-10 Gy	21±0.03 ^{bc}	39±0.05 ^{ab}	3.52±0.40 ^{bc}
藨草资源 3 <i>Phalaris arundinacea</i> 3	25±0.04 ^{ab}	43±0.09 ^a	4.75±0.88 ^{ab}
藨草资源 3-10 Gy <i>Phalaris arundinacea</i> 3-10 Gy	13±0.01 ^c	25±0.02 ^b	2.46±0.22 ^c

注:数据后不同小写字母表示存在显著差异($P<0.05$)
Note: Values with different lowercase letters differ significantly ($P<0.05$)

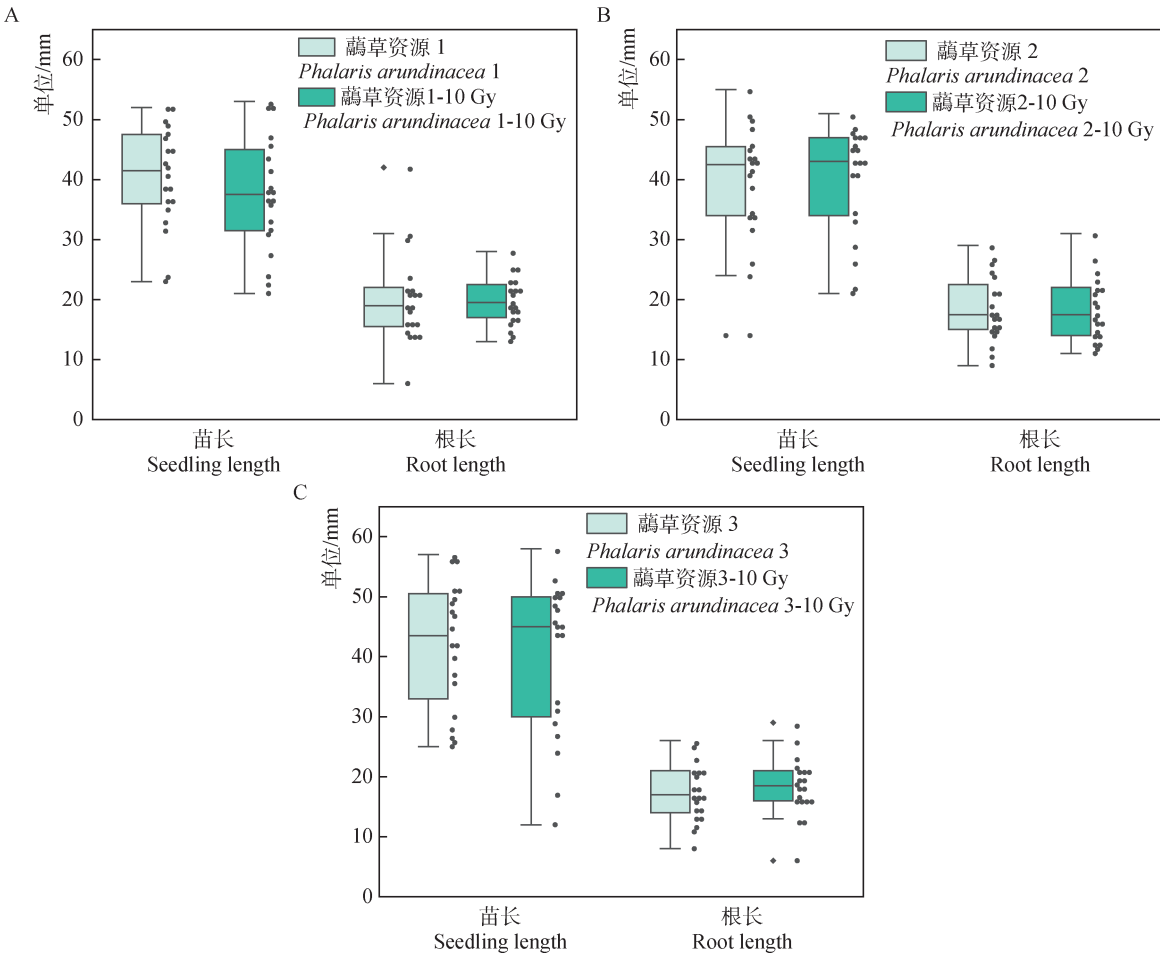


图 2 10 Gy 处理下 3 种藨草的苗长和根长范围

Fig. 2 Range of seedling length and root length in three *Phalaris* species under 10 Gy irradiation

注:10 Gy 处理下藨草资源 1(A)、藨草资源 2(B)和藨草资源 3(C)的苗长和根长范围

Note: Seedling length and root length of *Phalaris arundinacea* 1 (A), *Phalaris arundinacea* 2 (B), and *Phalaris arundinacea* 3 (C) under 10 Gy irradiation

2.2 辐射对 3 种藨草叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

3 种藨草中仅藨草资源 2、藨草资源 3 处理前后叶绿素含量存在显著差异($P<0.05$) (图 3A)。藨草资源 2 处理后叶绿素含量下降,由 0.99 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 降

至 0.84 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;藨草资源 3 处理后叶绿素含量显著上升,处理前后叶绿素含量分别为 1.05 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 1.54 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;藨草资源 1 处理前后叶绿素含量无显著变化。

3 种藨草类胡萝卜素 (Carotenoid, Car) 含量处

理前后均有显著变化($P<0.05$)(图 3B)。藨草资源 1 和藨草资源 3 辐射处理后类胡萝卜素含量升高, 分别由 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $0.08 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 0.10

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 相反, 藨草资源 2 类胡萝卜素含量辐射处理后显著下降, 由 $0.11 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

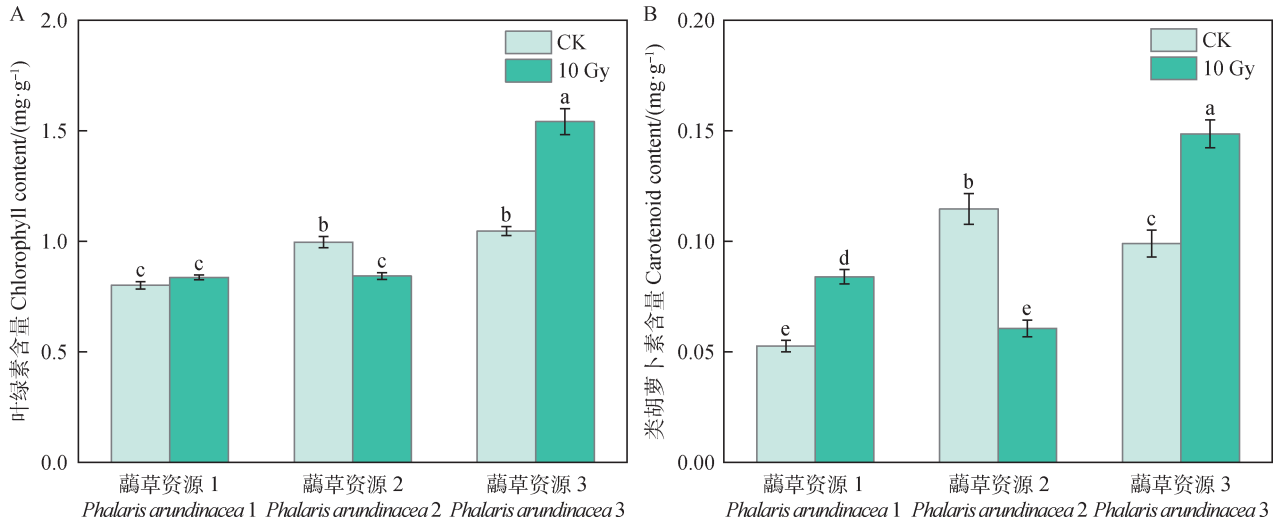


图 3 10 Gy 辐射处理对 3 种藨草叶绿素(A)含量和类胡萝卜素(B)含量的影响

Fig. 3 Effects of 10 Gy irradiation on Chlorophyll (A) and Carotenoid (B) contents in three *Phalaris* species

注:不同小写字母表示存在显著差异($P<0.05$)。下同

Note: Different lowercase letters in same row means significant differences ($P<0.05$). The same as below

2.3 辐射对 3 种藨草渗透调节物质含量的影响

3 种藨草中仅藨草资源 2 的丙二醛含量处理前后有显著差异,辐射处理后丙二醛含量显著下降($P<0.05$),由 $32.15 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $22.27 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$;藨草资源 1 和藨草资源 3 处理前后无显著差异(图 4A)。

藨草资源 1 在 10 Gy 辐射处理后可溶性蛋白含量显著下降($P<0.05$),而藨草资源 2 的可溶性蛋白含量在处理前后显著上升($P<0.05$),分别为 $4.57 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $2.93 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, $3.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 上升至 $4.03 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,藨草资源 3 辐射处理前后无明显差异(图 4B)。藨草资源 3 在处理后可溶性糖含量显著上升($P<0.05$),由 $70.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $96.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,藨草资源 1 与藨草资源 2 处理前后无显著区别(图 4C)。

2.4 辐射对 3 种藨草抗氧化酶活性的影响

藨草资源 2 在辐射处理后过氧化物酶活性降低($P<0.05$),超氧化物酶活性升高($P<0.05$),分别由 $324.99 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $275.35 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 5A), $1541.08 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $2370.34 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 5B);藨草资源 3 辐射处理后过氧化物酶活性降低($P<0.05$),由 $411.63 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ 至 $286.02 \text{ U}\cdot\text{g}^{-1}$ (图 5A),超氧化物歧化酶活性无显著差异;藨草资源 1 处理前后二者均无显著差异。

2.5 相关性分析

相关性分析热图(图 6A)表明,GR、GI 和 GE 间呈强正相关($P\leq 0.01$),反映发芽指标的高度协同性;Chl 与 Car 呈极显著正相关($P\leq 0.01$),显示光合色素是同步变化的;SS 与 GR 呈负相关($P\leq 0.05$),与 GI 和 GE 有负相关性(不显著),与 Chl 和 Car 呈显著正相关($P\leq 0.01$),与 MDA 呈负相关($P\leq 0.05$);POD 与 SOD 显示有正相关性(不显著),可能表示抗氧化酶在防御系统中的微弱协同作用。

2.6 主成分分析

主成分分析(Principal component analysis, PCA)显示,PC1(40.0%)和 PC2(15.3%)解释了 55.3% 的总变异(图 6B)。PC1 上 Chl、Car、SS 和 SP 呈负向载荷,其余指标呈正向载荷;PC2 上 SOD 和 MDA 呈负向载荷,其余皆呈正向载荷。PC1 的主要载荷是 GR、GE、Chl 和 Car,反映发芽指标与光合色素差异特征。GR、GE 之间和 Chl、Car 之间载荷夹角小,表明它们高度正相关。PC2 的主要载荷是 SS、POD、MDA 和 GI,反映胁迫响应与抗氧化差异特征。其中,SS 与 MDA 和 GI 之间载荷夹角呈钝角,表明 SS 与二者均呈负相关性,其余指标间相关性弱或不相关。

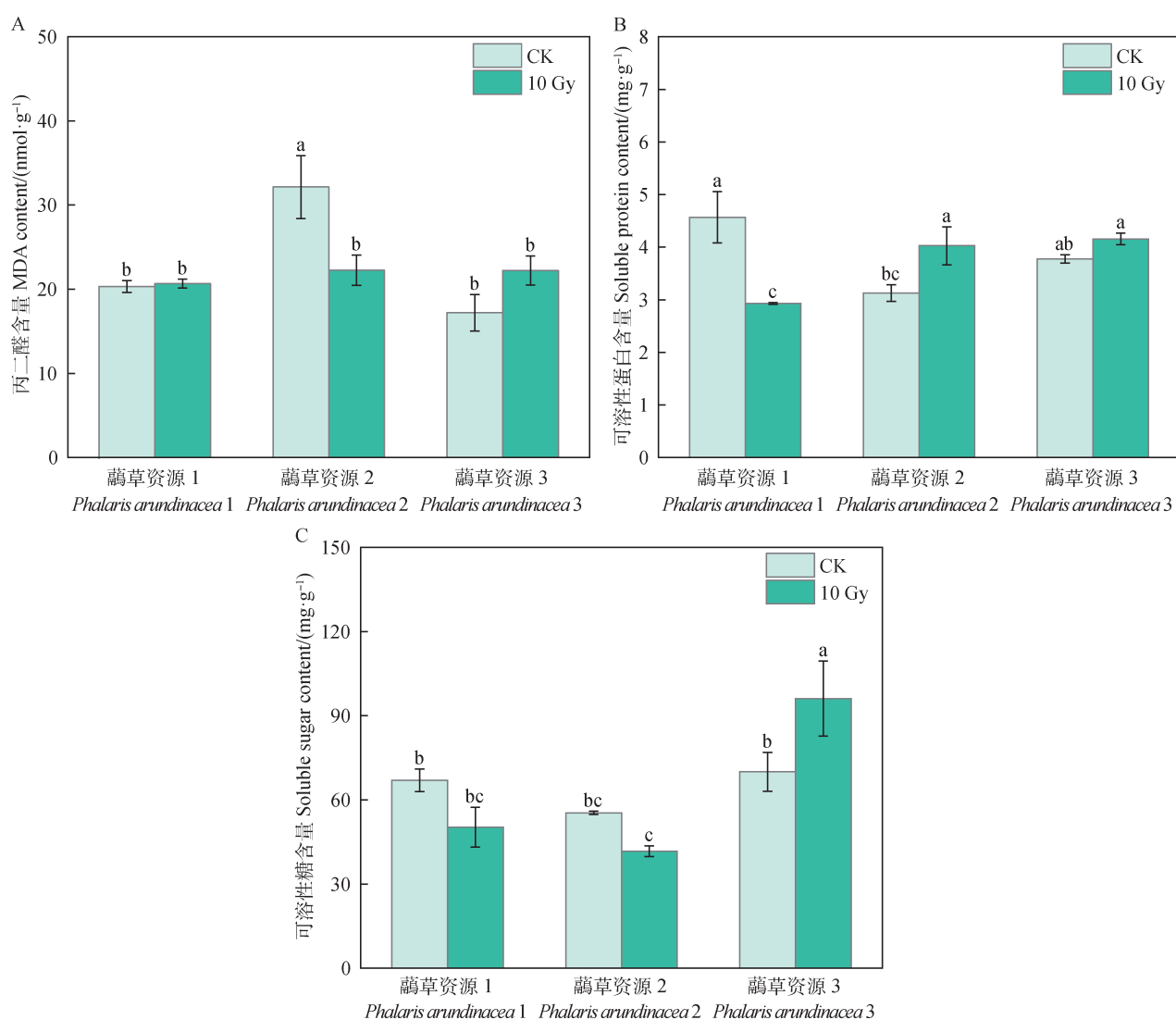


图 4 10 Gy 辐射处理对 3 种藨草丙二醛(A)含量、可溶性蛋白(B)含量和可溶性糖(C)含量的影响

Fig. 4 Effects of 10 Gy irradiation on Malondialdehyde content (A), Soluble protein content (B), and Soluble sugar content (C) in three *Phalaris* species

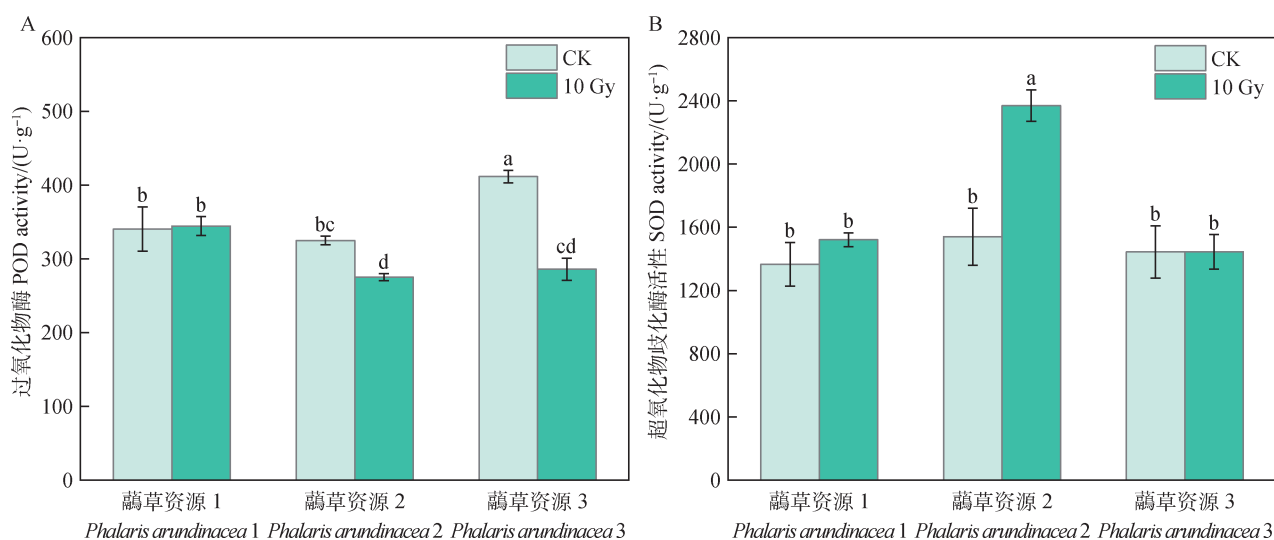


图 5 10 Gy 辐射处理对 3 种藨草过氧化物酶活性(A)和超氧化物酶活性(B)的影响

Fig. 5 Effects of 10 Gy irradiation on Peroxidase (A) and Superoxide dismutase (B) activities in three *Phalaris* species

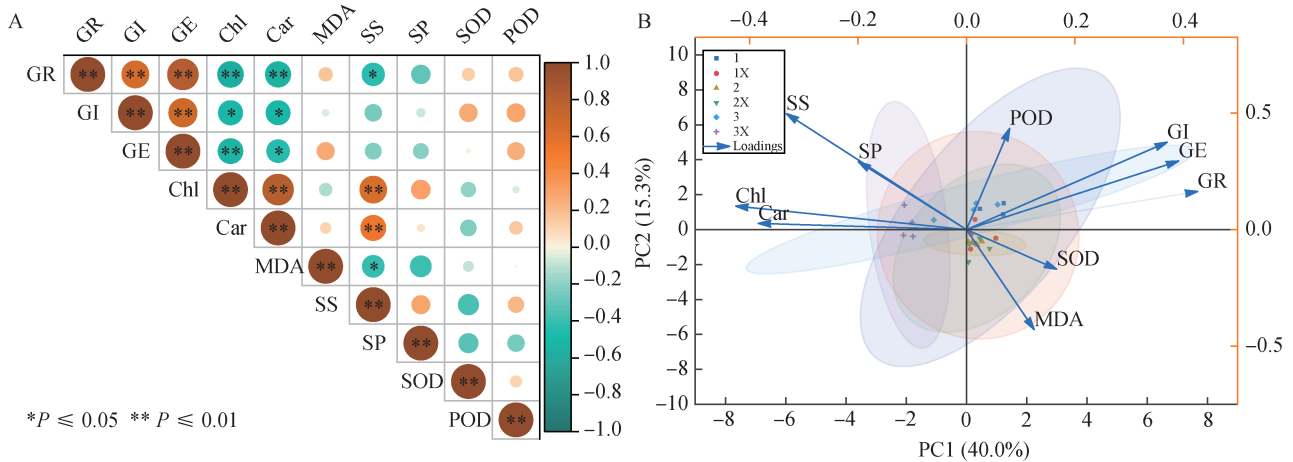


图 6 10 个指标的相关性分析热图(A)和主成分分析(B)组合图

Fig. 6 Combined visualization of correlation heatmap (A) and PCA (B) for ten physiological indices

注:GR-发芽率,GI-发芽指数,GE-发芽势,Chl-叶绿素,Car-类胡萝卜素,MDA-丙二醛,SS-可溶性糖,SP-可溶性蛋白,SOD-超氧化物歧化酶,POD-过氧化物酶。1-藜草资源1,1X-藜草资源1-10 Gy,2-藜草资源2,2X-藜草资源2-10 Gy,3-藜草资源3,3X-藜草资源3-10 Gy
Note: GR-Germination rate, GI-Germination index, GE-Germination energy, Chl-Chlorophyll, Car-Carotenoid, MDA-Malondialdehyde, SS-Soluble sugar, SP-Soluble protein, SOD-Superoxide dismutase, POD-Peroxidase. 1-*Phalaris arundinacea* 1, 1X-*Phalaris arundinacea* 1-10 Gy, 2-*Phalaris arundinacea* 2, 2X-*Phalaris arundinacea* 2-10 Gy, 3-*Phalaris arundinacea* 3, 3X-*Phalaris arundinacea* 3-10 Gy

2.7 抗辐射能力综合评价

采用隶属函数法^[22],结合10 Gy辐射处理下的测定数据,对3种藜草的辐射耐受性进行综合评价。表3显示,藜草资源1、藜草资源2、藜草资源3的隶

属函数平均值分别为0.40,0.36,0.51。根据隶属函数值越大,耐辐射能力越强的特点,可知3种藜草的耐辐射能力强弱表现为藜草资源3>藜草资源1>藜草资源2。

表 3 10Gy 处理下 3 种藜草幼苗隶属函数值

Table 3 Membership function values of seedling stress tolerance for three *Phalaris* species under 10 Gy irradiation

指标 Index	藜草资源 1 <i>Phalaris arundinacea</i> 1	藜草资源 2 <i>Phalaris arundinacea</i> 2	藜草资源 3 <i>Phalaris arundinacea</i> 3
发芽率 Germination rate	0.69	0.52	0.00
发芽指数 Germination index	0.51	0.40	0.00
发芽势 Germination energy	0.64	0.41	0.00
叶绿素 Chlorophyll	0.08	0.01	1.00
类胡萝卜素 Carotenoid	0.27	0.01	1.00
丙二醛 Malondialdehyde	0.67	0.51	0.80
可溶性糖 Soluble sugar	0.33	0.00	1.00
可溶性蛋白 Soluble protein	0.00	0.55	1.00
超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase	0.58	1.00	0.21
过氧化物酶 Peroxidase	0.24	0.00	0.07
平均值 Average	0.40	0.36	0.51
耐辐射能力排序 Radiation resistance ranking	2	3	1

3 讨论

本研究结果表明,10 Gy剂量的⁶⁰Co-γ辐射对3种藜草材料的M₁代种子萌发均产生抑制效应。其中,10 Gy剂量处理对藜草资源3种子的发芽率、发芽势、发芽指数均表现出显著抑制作用;而藜草资源1和藜草资源2所受影响相对较轻。尽管萌发过程受到抑制,但3种材料的幼苗根长与苗长在辐射处理后

均未出现显著变化,说明该剂量辐射对萌发阶段的抑制作用大于对早期幼苗形态建成的影响。这一现象与李逵等人^[23]在黄牡丹(*Paeonia lutea*)中以及Zaka等人^[24]在豌豆(*Pisum sativum*)中的研究结果相似,他们均发现较低剂量辐射(≥10 Gy)可显著抑制种子发芽。然而,也有其他研究^[25-26]发现某些植物在低剂量辐射下表现出萌发促进效应,这可能是由于不同物种间对⁶⁰Co-γ辐射的敏感性存在差异。

植物的生理生化指标是衡量内外环境变化对植物代谢和生长发育的重要因素,这些指标的变化能一定程度上反应胁迫对植物的伤害。光合色素,尤其是叶绿素与类胡萝卜素在一定程度上能直接反应植物光合作用情况^[27]。本研究结果显示,10 Gy辐射处理后,藨草资源3叶绿素含量显著升高($P < 0.05$),此时可能是藨草资源3通过增加叶绿素含量以抵御辐射带来的伤害从而提升其光合作用能力,这与于虹漫等人^[28]使用低剂量⁶⁰Co-γ辐射仙客后叶绿素含量升高结果一致。而藨草资源2叶绿素含量显著降低($P < 0.05$),则可能是由于藨草资源2叶绿体结构受到损伤导致叶绿素合成受阻,这与吴建慧等^[29]和Fan等^[30]的研究结果一致。

在胁迫条件下,植物体内活性氧的积累会诱发膜脂过氧化,使得丙二醛含量升高,丙二醛与蛋白质和核酸发生反应导致它们功能丧失,造成膜通透性增强^[31]。因此,丙二醛作为膜脂过氧化的特征性产物,是评价植物细胞膜损伤程度及抗逆性强弱的核心指标^[32]。本试验研究结果表明,藨草资源2在10 Gy辐射处理后丙二醛含量显著降低($P < 0.05$)。推测该剂量辐射可能通过减轻藨草资源2膜脂过氧化程度,从而降低细胞膜损伤以增强其对辐射胁迫的耐受性。这与王冠^[33]在榛子(*Corylus avellana*)中报道的低剂量辐射减轻膜损伤结论一致。然而,不同物种对辐射的响应存在差异,如菊苣(*Cichorium intybus*)^[34]中丙二醛随辐射剂量呈先升后降的变化趋势,反映出不同植物膜系统对辐射胁迫的响应机制具有多样性。除丙二醛外,渗透调节物质也是植物应对胁迫的重要生理指标^[35]。本研究中,藨草资源3在辐射后可溶性糖含量显著上升($P < 0.05$),而藨草资源1可溶性蛋白含量与可溶性糖含量较对照均降低。这说明,藨草资源3可能通过积累渗透调节物质,协同膜脂过氧化的抑制效应,增强对辐射胁迫的适应能力,该结果与小麦^[36]及多花野牡丹^[37]中辐射对渗透物质的影响趋势既存在一致性也表现差异性。

植物体内的酶促抗氧化酶系统中,POD和SOD共同维持植物体内的活性氧平衡,保护植物免受潜在的氧化损伤。SOD通过拆解超氧阴离子为 H_2O_2 ,POD则将 H_2O_2 转换为 H_2O 来消除或减轻ROS造成的细胞损伤^[38]。本研究结果表明,藨草资源2和藨草资源3的POD活性均较对照降低,但藨草资源2的SOD活性升高。推测藨草资源2的

SOD活性的升高一定程度上弥补了POD活性降低的不足,从而维持植物体内ROS的动态平衡。这与滕娟等^[39]和焦雪辉等^[40]在三七和青冈栎中发现低剂量辐射(10 Gy)可诱导SOD活性升高结果一致。

4 结论

10 Gy辐射剂量对3种藨草M₁代种子发芽有抑制作用;在幼苗生长方面,根长与苗长处理组与对照差异不显著;藨草资源3的叶绿素含量和可溶性糖含量升高,抗氧化酶活性中过氧化物酶活性降低;藨草资源1和藨草资源2的相关生理指标有提升也有降低,具有复杂性、随机性和不确定性,各指标在3个品系间有明显差异和无规律性;相关性分析和主成分分析结果表明,发芽指标之间和光合色素之间均呈显著性正相关,其他各指标间部分存在相关性;隶属函数法分析结果显示3种藨草耐低剂量辐射能力强弱为:藨草资源3>藨草资源1>藨草资源2。

参考文献

- [1] MA L Q, KONG F Q, SUN K, et al. From classical radiation to modern radiation: past, present, and future of radiation mutation breeding [J]. *Frontiers in Public Health*, 2021, 9: 768071
- [2] DE LA LUZ RIVIELLO-FLORES M, CADENA-IÑIGUEZ J, DEL MAR RUIZ-POSADAS L, et al. Use of gamma radiation for the genetic improvement of underutilized plant varieties [J]. *Plants*, 2022, 11(9): 1161
- [3] LUDOVICI G M, OLIVEIRA DE SOUZA S, CHIERICI A, et al. Adaptation to ionizing radiation of higher plants: From environmental radioactivity to chernobyl disaster [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, 222: 106375
- [4] JAN S, PARWEEN T, SIDDIQI T O, et al. Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products [J]. *Environmental Reviews*, 2012, 20(1): 17-39
- [5] WI S G, CHUNG B Y, KIM J S, et al. Effects of gamma irradiation on morphological changes and biological responses in plants [J]. *Micron*, 2007, 38(6): 553-564
- [6] MARCU D, DAMIAN G, COSMA C, et al. Gamma radiation effects on seed germination, growth and pigment content, and ESR study of induced free radicals in maize (*Zea mays*) [J]. *Journal of Biological Physics*, 2013, 39(4): 625-634
- [7] 张永亮, 骆秀梅. 藨草的研究进展 [J]. *草地学报*, 2008(6): 659-666
- [8] ZHANG Y L, LUO X M. Research progress of reed canarygrass [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008(6): 659-666
- [8] 李宏玉. 藨草的生物生态学特性及其利用 [J]. *云南农业科*

- 枝, 2015(3):27-30
LI H Y. The bioecological characteristics of reed canarygrass and their utilization[J]. Yunnan Agricultural Science and Technology, 2015(3):27-30
- [9] 李欣瑞, 张建波, 周磊昊, 等. 藨草属草种质资源研究进展[J]. 草学, 2019(1):9-22, 32
LI X R, ZHANG J B, ZHOU L H, et al. Research progress on *Phalaris* Linn. germplasm resources[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2019(1):9-22, 32
- [10] 季晓菲, 周靖文, 闫利军, 等. ‘川西’藨草品种比较试验报告[J]. 草学, 2024(4):12-17, 37
JI X F, ZHOU J W, YAN L J, et al. Report on comparative test of *Phalaris arundinacea* ‘Chuan Xi’[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2024(4):12-17, 37
- [11] 梁欢欢, 胡宇, 薛莉超, 等. ‘中兰藨草’品种比较试验[J]. 中国草食动物科学, 2023, 43(5):70-75
LIANG H H, HU Y, XUE L C, et al. Varieties comparison experiments of *Phalaris Canariensis* ‘Zhonglan’[J]. China Herbivore Science, 2023, 43(5):70-75
- [12] 袁帅, 董志晓, 赵煜晗, 等. ^{60}Co - γ 辐射对扁穗雀麦种子萌发及其幼苗生长的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(7):1319-1328
YUAN S, DONG Z X, ZHAO Y H, et al. Effects of ^{60}Co - γ radiation on the seed germination and seedling growth of *Bromus catharticus* [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(7):1319-1328
- [13] 常媚瑕, 吴媛, 苏世贤, 等. ^{60}Co - γ 辐射对朝天椒种子诱变效应的影响[J]. 分子植物育种, 2021, 19(17):5755-5767
CHANG M X, WU Y, SU S X, et al. Effects of ^{60}Co - γ radiation on seeds mutation of *Capsicum frutescens* [J]. Molecular Plant Breeding, 2021, 19(17):5755-5767
- [14] 陈玉霞, 钼晓艳, 邱建辉, 等. ^{60}Co - γ 辐射对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(1):146-150
CHEN Y X, CHU X Y, QIU J H, et al. Effects of ^{60}Co - γ irradiation on cucumber seed germination and seedling growth[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(1):146-150
- [15] 刘淑霞, 魏国江, 孙宇峰, 等. ^{60}Co - 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
LIU S X, WEI G J, SUN Y F, et al. Impact of ^{60}Co - γ radiation on growth and physiological traits in four cultivars of *Medicago sativa* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(3):146-149
- [16] 李瑜, 王萍, 耿兴敏, 等. ^{60}Co - γ 辐射对桂花幼苗生长及生理指标的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(1):61-69
LI Y, WANG P, GENG X M, et al. Effect of ^{60}Co - γ rays irradiation on seedling growth and physiological indexes of *Osmanthus fragrans* [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2017, 26(1):61-69
- [17] 王文恩, 包满珠, 张俊卫. ^{60}Co - γ 射线对日本结缕草干种子的辐射效应研究[J]. 草业科学, 2009, 26(5):155-160
WANG W E, BAO M Z, ZHANG J W. The effect of ^{60}Co - γ irradiation on dry seeds of *Zoysia japonica* [J]. Pratacultural Science, 2009, 26(5):155-160
- [18] 张美茜, 王晓琴, 关海滨, 等. 亚精胺对混合盐碱胁迫下桔梗种子萌发特性的影响[J]. 种子, 2022, 41(8):49-54
ZHANG M X, WANG X Q, GUAN H B, et al. Effects of spermidine on seed germination of *Platycodon grandiflorum* under mixed saline-alkali stress[J]. Seed, 2022, 41(8):49-54
- [19] 黄洁琼, 翟佳兴, 王颖, 等. 褪黑素对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(8):2575-2583
HUANG J Q, ZHAI J X, WANG Y, et al. Effect of melatonin on seed germination and physiological characteristics of alfalfa seedlings under drought stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(8):2575-2583
- [20] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社, 2001:134-182
LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001:134-182
- [21] 高俊山. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2018:93-132
GAO J S. Plant physiology laboratory guide [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2018:93-132
- [22] 谢季坚. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2018:28-30
XIE J J. Fuzzy mathematics and its applications [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2018:28-30
- [23] 李奎, 郑宝强, 王雁, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照对黄牡丹种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2010, 25(6):840-843
LI K, ZHENG B Q, WANG Y, et al. Effects of ^{60}Co - γ ray irradiation on seed germination and seedling growth of *Paeonia lutea* [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2010, 25(6):840-843
- [24] ZAKA R, CHENAL C, MISSET M T. Effects of low doses of short-term gamma irradiation on growth and development through two generations of *Pisum sativum* [J]. Science of The Total Environment, 2004, 320(2-3):121-129
- [25] 李春牛, 李先民, 黄展文, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照对茉莉花种子萌发和幼苗生长及生理的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(1):119-127
LI C N, LI X M, HUANG Z W, et al. Effect of ^{60}Co - γ irradiation on seed germination and seedling growth and physiology in Jasmine (*Jasminum sambac* (L.) Ait.) [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(1):119-127
- [26] 李凤童, 包建忠, 孙叶, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照德国鸢尾杂交种子的生物效应[J]. 核农学报, 2017, 31(8):1469-1474
LI F T, BAO J Z, SUN Y, et al. Biological effects of ^{60}Co - γ ray irradiation on the hybrid seeds of *Iris germanica* [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(8):1469-1474
- [27] 姚宇恒, 南丽丽, 陈洁, 等. 红豆草幼苗叶片光合和叶绿素荧光对干旱胁迫的响应[J]. 草业科学, 2024, 41(5):1161-1174
YAO Y H, NAN L L, CHEN J, et al. Effects of drought stress

- on the leaf photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of sainfoin seedlings [J]. Pratacultural Science, 2024, 41 (5):1161-1174
- [28] 于虹漫,陈宗瑜,强继业. ^{60}Co - γ 射线辐照对仙客来生长及叶片光合特性的影响[J]. 北方园艺,2003(5):45-46
- YU H M, CHEN Z Y, QIANG J Y. Effects of ^{60}Co - γ ray irradiation on growth and leaf photosynthetic characteristics of *Cyclamen* [J]. Northern Horticulture, 2003(5):45-46
- [29] 吴建慧,牛喆,兰凤,等. ^{60}Co - γ 射线辐射对2种露地菊叶片生理生化特性的影响[J]. 核农学报,2019,33(6):1059-1064
- WU J H, NIU Z, LAN F, et al. Effect of ^{60}Co - γ ray on physiological and biochemical characteristics of two kinds of *Chrysanthemum grandi florum* leaves [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(6):1059-1064
- [30] FAN J, SHI M, HUANG J Z, et al. Regulation of photosynthetic performance and antioxidant capacity by ^{60}Co γ -irradiation in *Zizania latifolia* plants [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2014, 129:33-42
- [31] MORALES M, MUNNÉ-BOSCH S. Malondialdehyde: facts and artifacts [J]. Plant Physiol, 2019, 180(3):1246-1250
- [32] WANG Y, WANG J, SARWAR R, et al. Research progress on the physiological response and molecular mechanism of cold response in plants [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1334913
- [33] 王冠. ^{60}Co - γ 射线辐照对榛子鲜果的保鲜效果研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023:33-37
- WANG G. Study on the effect of ^{60}Co - γ irradiation on the fresh fruit preservation of hazelnut [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023:33-37
- [34] 张玉,白史且,李达旭,等. ^{60}Co - γ 辐射对菊苣种子发芽及幼苗生理的影响[J]. 草地学报,2013,21(1):147-151
- ZHANG Y, BAI S Q, LI D X, et al. Effects of ^{60}Co - γ -rays irradiation on chicory seed germination and seedling physiology [J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(1):147-151
- [35] 赵艺璇,孙桂芳,刘秋萍,等. ^{60}Co - γ 辐射对红秋葵和黄秋葵形态及生理特性的影响[J]. 河南农业大学学报,2018,52(5):710-715
- ZHAO Y X, SUN G F, LIU Q P, et al. Effects of ^{60}Co - γ irradiation on morphological and physiological characteristics of *Hibiscus coccineus* and *Hibiscus esculentus* [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(5):710-715
- [36] 邵磊,张从宇,王敏. ^{60}Co - γ 射线辐射对小麦种子萌发、幼苗生长及生理的影响[J]. 种子,2008(11):8-10,14
- SHAO L, ZHANG C Y, WANG M. Effect of ^{60}Co - γ ray wheat seed germination, seedling growth and physiology [J]. Seed, 2008(11):8-10,14
- [37] 林仙淋. ^{60}Co - γ 辐射对多花野牡丹幼苗生长发育的影响[D]. 福州:福建农林大学,2016:28-30
- LIN X L. The effect of ^{60}Co - γ ray on the growth and development of the *Melastoma affine* seedlings [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016:28-30
- [38] HASANUZZAMAN M, BHUYAN M H M B, PARVIN K, et al. Regulation of ROS metabolism in plants under environmental stress: a review of recent experimental evidence [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(22):8695
- [39] 滕娟,熊俊芬,何忠俊,等. ^{60}Co - γ 辐射对三七幼苗生理特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2015,30(3):445-449
- TENG J, XIONG J F, HE Z J, et al. Effect of ^{60}Co - γ irradiation on physiological properties of *Panax notoginseng* seedlings [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2015, 30(3):445-449
- [40] 焦雪辉,史喜兵,乔雨轩,等. ^{60}Co - γ 射线对青冈栎、细叶青冈种子的辐照效应[J]. 江苏农业科学,2024,52(12):150-159
- JIAO X H, SHI X B, QIAO Y X, et al. Effects of ^{60}Co - γ irradiation on seeds of *Cyclobalanopsis glauca* and *Cyclobalanopsis gracilis* [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(12):150-159

(责任编辑 付 宸)