DOI:10.16853/j.cnki.1009-3575.2026.06.002

航天诱变对4种禾本科牧草SP_1代农艺性状的影响

闫 伟[1],王瑞利[1],李振坚[2],张秀娟[1],王 绎[1],李 赛[3,*],李瑞静[1]
(1.内蒙古科学技术研究院,呼和浩特 010020;2.中国林业科学研究院林业研究所/国家林草局林木培育重点实验室,北京 100091;3.天津泰达城市综合开发投资集团有限公司,天津 300453)

摘要:为探究航天空间(微重力、强辐射、高真空)诱变对禾本科牧草种子SP_1代(地面播种种植后的第一代植株)田间农艺性状的影响,本研究选择'1号'羊草(*Leymus chinensis*'No. 1')、'2号'羊草(*Leymus chinensis*'No. 2')、根茎冰草(*Agropyron michnoi*)、'乡土1号'蒙古冰草(*Agropyron mongolicum* Keng.'Xiangtu No. 1')4种禾本科牧草种子于2023年搭乘神舟十六号载人飞船进行空间搭载实验,2024年以地面对照组为参照,开展SP_1代田间相关农艺性状的变化值测定。研究结果表明:'1号'羊草、'2号'羊草、'乡土1号'蒙古冰草诱变组发芽指数显著高于对照($P<0.05$),根茎冰草发芽指数显著降低($P<0.05$),活力指数仅'1号'羊草显著提升;4种牧草的株高、单株鲜重均受一定程度的抑制,但'1号'羊草、'乡土1号'蒙古冰草主根长显著增加($P<0.05$),根茎冰草叶宽略有增加($P<0.05$);'1号'羊草、根茎冰草抽穗期显著延迟($P<0.05$),穗长、小穗数、结实率下降,'乡土1号'蒙古冰草抽穗期略提前,部分穗部指标稳定;羊草和根茎冰草单株鲜重、干重显著降低($P<0.05$),'乡土1号'蒙古冰草生物量无显著变化。

关键词:航天诱变;羊草;冰草;农艺性状
中图分类号:S543 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-3575(2026)06-0008-07

Effects of Space Mutation on Agronomic Traits of SP_1 Generation of Four Gramineous Forages

YAN Wei[1], WANG Ruili[1], LI Zhenjian[2], ZHANG Xiujuan[1], WANG Yi[1], LI Sai[3,*], LI Ruijing[1]
(1. *Inner Mongolia Academy of Science and Technology, Hohhot* 010020, *China*;
2. *Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry and Grassland Administration, Beijing* 100091, *China*; 3. *Tianjin TEDA Urban Comprehensive Development and Investment Group Co., Ltd., Tianjin* 300453, *China*)

Abstract: To investigate the effects of space-induced mutagenesis (microgravity, strong radiation, high vacuum) on the field agronomic traits of the SP_1 generation (the first generation of plants grown after ground sowing) of Poaceae forage grasses, this study used seeds of four species, i. e., *Leymus chinensis* 'No. 1', *Leymus chinensis* 'No. 2', *Agropyron michnoi*, and *Agropyron mongolicum* Keng. 'Xiangtu No. 1'. In 2023, the seeds were carried into space aboard the Shenzhou-16 manned spacecraft for a space exposure experiment. In 2024, the changes in agronomic traits of the SP_1 generation were measured in the field, using the ground control groups as references. The results showed that the germination index of the mutagenized groups of *Leymus chinensis* 'No. 1', *Leymus chinensis* 'No. 2', and *Agropyron mongolicum* Keng. 'Xiangtu No. 1' was significantly higher than that of the control group ($P<0.05$), while the germination index of *Agropyron michnoi* significantly decreased ($P<0.05$). Only *Leymus chinensis* 'No. 1' exhibited a significant increase in the vigor index. The plant height and fresh weight per plant of all four forage grasses were somewhat inhibited. However, the main root length of *Leymus chinensis* 'No. 1' and *Agropyron mongolicum* Keng. 'Xiangtu No. 1' significantly increased ($P<0.05$), and the leaf width of *Agropyron michnoi* slightly increased ($P<0.05$). The heading stage of *Leymus chinensis* 'No. 1' and *Agropyron michnoi* was significantly delayed ($P<0.05$), with reductions in spike length, spikelet number, and seed setting rate. In contrast, the heading stage of *Agropyron mongolicum* Keng. 'Xiangtu No. 1' was slightly advanced, with some spike-related traits remaining stable. The fresh weight and dry weight per plant of the *Leymus chinensis* and *Agropyron michnoi* significantly decreased ($P<0.05$), while the biomass of *Agropyron mongolicum* Keng. 'Xiangtu No. 1' showed no significant change.
Key words: Space mutagenesis; *Leymus chinensis*; *Agropyron Cristatum*; Agronomic traits

禾本科(*Gramineae*)牧草作为全球分布最广泛的牧草类群,构成了天然草地的主体植被。因禾本科牧草优异的适口性和突出的饲用价值,在我国牧草种质资源库中占据核心地位。其不仅表现出极

收稿日期:2025-06-09
基金项目:航天育种内蒙古研究院项目(2021CG0042);内蒙古自治区种业科技创新重大示范工程"揭榜挂帅"项目(2022JBGS0014);内蒙古科学技术研究院产业技术创新项目(2024RCYJ04004);特色牧草新品种选育与盐碱地建植关键技术研究示范项目(2024B02015-1)
作者简介:闫 伟(1990—),男,博士,助理研究员,主要从事草种质资源创新与选育等方面的研究,E-mail:nkyyanwei@163.com;*为通信作者,李 赛(1982—),男,硕士,研究员,主要从事草地生态修复等方面的研究,E-mail:8912622@qq.com

强的耐牧性和抗旱能力，还在生态建设中发挥着水土保持、防风固沙等关键作用。据统计，我国审定登记的牧草新品种中，禾本科品种占比高达 50%，充分体现了该科在牧草育种领域的优势地位[1]。羊草（*Leymus chinensis*）和冰草（*Agropyron cristatum*）作为我国北方地区的重要禾本科牧草，具有显著的生态和经济价值[2-3]。21 世纪初，羊草在我国现代奶业发展中曾发挥过重要的作用[4]，冰草则因其发达的根系和旺盛的生长特性使其成为优良的水土保持植物，在防风固沙、生态修复等领域发挥着重要作用，对维持干旱、半干旱地区生态平衡具有不可替代的生态价值[5]。‘1 号’羊草（*Leymus chinensis* ‘No. 1’）和‘2 号’羊草（*Leymus chinensis* ‘No. 2’）凭借高产、耐盐碱的特性，成为盐碱化草地改良的先锋品种，但其存在结实率低、出苗率低、产草量低的“三低”问题[6]。航天诱变，可针对性改良这些性状，解决种子萌发率低的遗传瓶颈，从而扩大人工种植规模。根茎冰草（*Agropyron michnoi*）与‘乡土 1 号’蒙古冰草（*Agropyron mongolicum* Keng. ‘Xiangtu No. 1’）则以耐旱、抗风沙的优势，在干旱半干旱地区生态修复中发挥重要作用[7-8]。然而，‘1 号’羊草、‘2 号’羊草、根茎冰草、‘乡土 1 号’蒙古冰草虽都具备一定抗逆能力，但现有品种仍存在遗传基础狭窄、适应性不足等问题。通过航天诱变可以显著提高这 4 种牧草基因突变率，从而创制出抗逆性更强的新种质，丰富禾本科牧草种质资源，为进一步提升禾本科牧草应用提供新材料[9]。

航天诱变育种是空间生命科学与作物遗传育种交叉融合的前沿技术手段。航天诱变育种是一种利用太空特殊环境诱导植物基因变异的生物技术。该技术通过太空中的微重力、强辐射、高真空等独特条件，诱导植物遗传物质发生改变，从而获得具有新性状和新基因的种质资源。这种方法能够显著加快优良品种的选育进程，为作物改良提供了高效的技术手段[10]。

目前，航天诱变在水稻等作物的品种改良中已取得显著成效[11]，但牧草航天育种方面尚处于初始阶段，目前主要集中于紫花苜蓿（*Medicago sativa*）的相关研究[12]，对禾本科牧草鲜有报道，尤其是对禾本科牧草 SP_1 代农艺性状的影响规律尚未明晰，限制了该技术在禾本科牧草种质创新中的高效利用。

SP_1 代作为航天搭载处理的直接后代，其农艺性状的变异情况是评估诱变效应、筛选优异材料的重要依据[13]。本研究选取‘1 号’羊草、‘2 号’羊草、根茎冰草、‘乡土 1 号’蒙古冰草 4 种禾本科牧草为试验材料，通过测定分析航天诱变处理后的种子萌发情况、SP_1 代株高、叶片特征等农艺性状的变化，旨在揭示不同牧草品种对航天诱变的敏感性差异，明确航天诱变后的第一代植株农艺性状变异规律，为后续新品种选育奠定基础。

1　材料与方法

1.1　材料

本研究分别挑选内蒙古地区常用的 4 种饱满、无病虫害且发芽率在 90% 以上的禾本科牧草种子作为材料。材料来源详见表 1。

表 1　4 种禾本科牧草种子来源

Table 1　Seed sources of four Poaceae forage species

种名	拉丁名	品种来源
‘1 号’羊草	*Leymus chinensis* ‘No. 1’	内蒙古科学技术研究院提供
‘2 号’羊草	*Leymus chinensis* ‘No. 2’	内蒙古科学技术研究院提供
根茎冰草	*Agropyron michnoi*	内蒙古科学技术研究院提供
‘乡土 1 号’蒙古冰草	*Agropyron mongolicum* Keng. ‘Xiangtu No. 1’	内蒙古科学技术研究院提供

1.2　试验设计

本试验借助神舟十六号载人飞船的太空微重力、高真空、宇宙射线（如高能质子、重离子）及交变磁场等特殊环境，诱导 4 种牧草种子基因组发生突变，2024 年通过地面播种种植诱变一代，并测定其农艺性状变化值，分析不同牧草品种的诱变敏感性差异。

种子处理：将每个品种的种子平均分成两份，一份用于空间搭载（诱变组），另一份作为地面对照（未搭载）。其中，‘1 号’羊草和‘乡土 1 号’蒙古冰草种子重量均为 6.4 g；‘2 号’羊草种子重量均为 6.2 g；根茎冰草种子重量均为 6.3 g。

对照处理:地面对照组种子放置在与搭载环境条件相近的地面模拟环境中(如相同温度、湿度条件下),但不接受空间辐射和微重力处理。

采用随机区组设计,每个品种的诱变组和对照组各设置3次重复,每个重复种植20 m^2。种植地点选择土壤肥力均匀、排灌方便的试验田,在种植前进行土壤翻耕、整地和施肥,保证土壤的基础肥力一致。在5月中旬,按照相同的播种深度和播种量,将诱变组和对照组种子分别播种到对应的试验小区中。在整个生育期内,对试验田进行统一的水肥管理、病虫害防治和杂草清除,确保各组植株生长环境一致。

1.3 试验地概况

航天搭载诱变后的SP_1代种子播种于内蒙古科学技术研究院八拜试验基地,该基地位于呼和浩特市郊区八拜村(40.75°N,111.80°E),海拔1 040 m,属于中温带大陆性季风气候,年日照时数约2 800-3 200 h,光照充足,蒸发量远大于降水量,空气相对湿度较低(年均约45%-55%),作物需依赖灌溉;试验地土壤受地形和气候影响,以栗钙土和草甸土为主,土壤盐碱性受成土母质、灌溉方式及地下水影响,以中性至微碱性土壤为主,pH值通常在7.5~8.5之间,部分地块可能因盐分积累超过8.5(碱性较强),积累盐分以碳酸盐和硫酸盐为主。

1.4 指标测定

①种子萌发

发芽指数:每日同一时间统计发芽种子数(以胚根突破种皮且长度≥种子长度的1/2为标准)。需持续记录至发芽终止(连续2 d发芽数不再增加)。发芽指数=$\sum(G_t/D_t)$,其中:G_t为第t日的发芽数,D_t为对应的发芽天数。

活力指数:随机选取20株幼苗测定苗长,计算活力指数=$I_G \times S$,S为平均苗长(cm),其中I_G为发芽指数。

②苗期性状

幼苗株高(cm):使用直尺测量幼苗基部至顶端的高度,每个样本测量20次,取平均值。

幼苗根长(cm):洗净根系,平铺于培养皿中舒展,用直尺从根颈量至最长根根尖,记录主根长度。

幼苗单株鲜重(g):用清水轻轻冲洗幼苗表面泥土,用吸水纸轻轻吸干根系和茎叶表面水分(避免挤压损伤组织)后,立即将单株幼苗置于电子天平上,读取并记录鲜重数值。

③生长期性状

株高(cm):在分蘖盛期和拔节期,分别测量植株从地面到最高叶尖的高度。

叶片长度(cm):选取植株中部的完整叶片,测量从叶基部到叶尖的长度。

叶片宽度(cm):在叶片中部位置,使用游标卡尺测量叶片的宽度。

根系性状(cm):在生长中期,采用挖掘法或根钻法获取根系样本,测量主根长度。

④生育期性状

播种至抽穗天数(d):记录从播种至50%植株抽出穗的天数,以此来比较诱变组和对照组的生育期差异。

穗长(cm):测量穗轴基部至穗尖的长度。

小穗数(个):统计每个穗上的小穗数量。

结实率(%):在成熟期,随机选取20个穗,统计结实小穗数和总小穗数,计算结实率(结实率=结实小穗数/总小穗数×100%)。

⑤生物量性状

单株鲜重(g):在刈割期或成熟期,将植株齐地面剪下,称取单株的鲜重。

单株干重(g):将鲜样放入烘箱中,在105 ℃下杀青30 min,然后在65 ℃下烘干至恒重,称取干重。

1.5 数据统计与分析

数据整理:运用Excel软件对各性状的观测数据进行整理,计算平均值、标准差和变异系数等统计量。

差异显著性分析:采用SPSS统计软件,对诱变组和对照组的各项农艺性状数据进行独立样本t检验,判断差异是否达到显著水平($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 航天诱变对牧草种子发芽的影响

航天诱变作为一种特殊的诱变手段,对不同禾本科牧草种子萌发的影响呈现出显著差异。由表2可知,‘1号’羊草诱变组(Y1)发芽指数显著高于对照(CK-Y1),活力指数显著高于对照;‘2号’羊草诱变组(Y2)发芽指数显著高于对照(CK-Y2),活力指数与对照无显著差异;根茎冰草诱变组(B1)发芽指数显著低于对照(CK-B1),活力指数与对照无显著差异;‘乡土1号’蒙古冰草诱变组(B2)发芽指数显著高于对照(CK-B2),活力指数与对照无显著差异。综上,航天诱变对‘1号’羊草、‘乡土1号’蒙古冰草

表 2　航天诱变处理对 4 种禾本科牧草种子萌发的影响

Table 2　Effects of space mutation treatment on seed germination of four Poaceae forage species

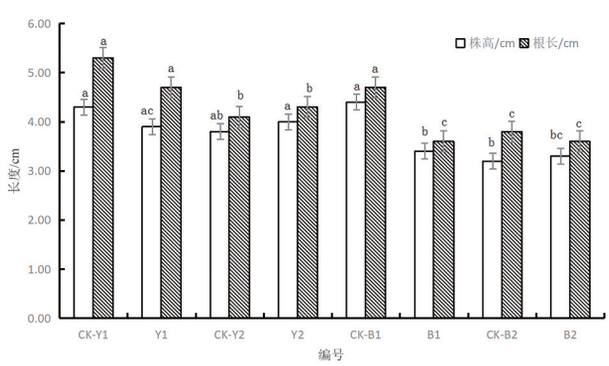
编号	种名	处理	发芽指数	活力指数
CK-Y1	‘1 号’羊草	对照	8. 87±1. 03e	3. 55±0. 34c
Y1		诱变	12. 20±2. 02c	4. 92±0. 88a
CK-Y2	‘2 号’羊草	对照	13. 24±1. 19ab	5. 43±0. 65a
Y2		诱变	14. 92±2. 61a	5. 61±0. 95a
CK-B1	根茎冰草	对照	14. 11±2. 13a	5. 08±0. 71a
B1		诱变	11. 55±2. 38d	4. 62±0. 95ab
CK-B2	‘乡土 1 号’蒙古冰草	对照	11. 67±1. 97d	4. 08±0. 67c
B2		诱变	13. 92±2. 23b	4. 87±0. 71b

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0. 05）。

种子萌发具有促进作用；‘2 号’羊草对航天诱变无显著响应，根茎冰草种子萌发受航天诱变影响则被抑制。‘1 号’羊草和‘乡土 1 号’蒙古冰草表现出显著的萌发和生长优势，具有较高的育种应用潜力。

2. 2　航天诱变对 SP_1 代田间幼苗农艺性状的影响

由图 1 可知，航天诱变对 4 种牧草田间当年播种的幼苗株高、根长均存在一定抑制作用。其中‘1 号’羊草诱变组（Y1）株高显著低于对照，根长显著低于对照；‘2 号’羊草诱变组（Y2）株高与对照无显著差异，根长显著高于对照；根茎冰草诱变组（B1）株高、根长显著低于对照（CK-B1）；‘乡土 1 号’蒙古冰草诱变组（B2）株高、根长与对照（CK-B2）无显著差异。

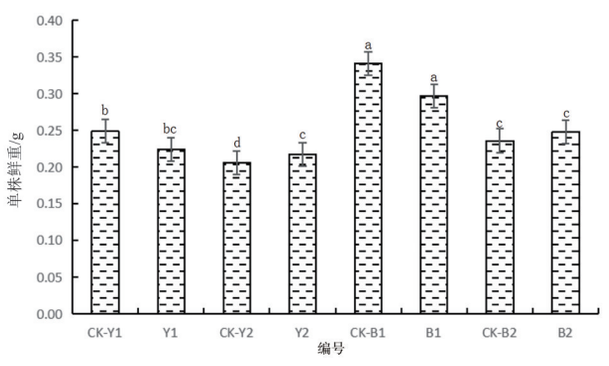


不同小写字母表示差异显著（P<0. 05）

图 1　航天诱变对牧草 SP_1 代田间幼苗株高及根长的影响

Fig. 1　Effects of space mutagenesis on plant height and root length of field-grown SP_1 generation forage seedlings

由图 2 可知，航天诱变对 4 种牧草田间当年播种的幼苗单株鲜重也存在一定抑制作用。其中‘1 号’羊草诱变组（Y1）、‘2 号’羊草诱变组（Y2）及根茎冰草诱变组（B1）单株鲜重均显著低于对照；‘乡土 1 号’蒙古冰草诱变组（B2）单株鲜重与对照（CK-B2）无显著差异。综上，航天诱变对 4 种禾本科牧草幼苗农艺性状影响存在差异，‘1 号’羊草、根茎冰草受航天诱变影响被抑制，‘2 号’羊草、‘乡土 1 号’蒙古冰草对航天诱变无显著响应。研究结果反映不同遗传背景牧草对诱变的适应差异，为后续牧草航天育种筛选材料、优化诱变应用提供依据，需进一步从遗传调控、生理代谢层面探究差异机制。



不同小写字母表示差异显著（P<0. 05）。

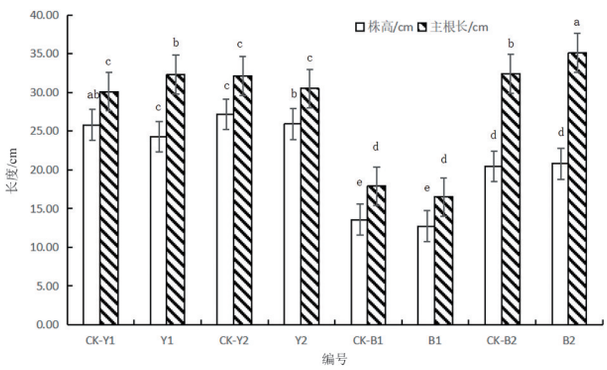
图 2　航天诱变对牧草 SP_1 代田间幼苗单株鲜重的影响

Fig. 2　Effects of space mutagenesis on fresh weight per plant of SP_1 generation forage seedlings under field conditions

2. 3　航天诱变对牧草 SP_1 代田间营养生长期性状的影响

由图 3 可知，航天诱变对不同牧草表型影响具备特异性。其中‘1 号’羊草诱变组（Y1）株高和主根长明显高于对照（CK-Y1）；‘2 号’羊草诱变组（Y2）株高显著低于对照（CK-Y2），主根长无显著

变化；根茎冰草诱变组（B1）株高、主根长显著低于对照（CK-B1）；‘乡土1号’蒙古冰草诱变组（B2）株高于对照（CK-B2）无显著差异，主根长显著高于对照（CK-B2）。

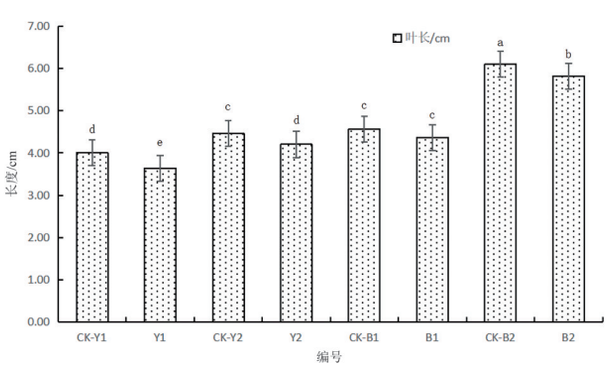


不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图3 航天诱变对牧草SP_1代营养生长期株高和主根长的影响

Fig. 3 Effects of space mutagenesis on plant height and main root length of SP_1 generation forage during vegetative growth stage

由图4可知，航天诱变对羊草和冰草的叶片长度的影响存在差异。其中‘1号’羊草诱变组（Y1）和‘2号’羊草诱变组（Y2）叶长均显著低于对照（CK-Y1/CK-Y2）；根茎冰草诱变组（B1）和‘乡土1号’蒙古冰草（B2）叶长与对照（CK-B1/CK-B2）比较均无显著差异。

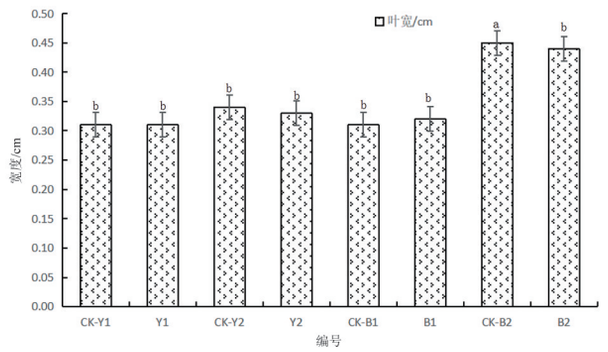


不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图4 航天诱变对牧草SP_1代营养生长期叶长的影响

Fig. 4 Impact of space-induced mutagenesis on leaf length in forage grass SP_1 generation during vegetative growth phase

由图5可知，航天诱变对羊草和冰草叶片宽度影响不显著。其中，‘1号’羊草和‘2号’羊草、‘乡土1号’蒙古冰草诱变组（Y1、Y2、B2）与对照组（CK-Y1、CK-Y2、CK-B2）比较叶宽无显著差异；而根茎冰草诱变组（B1）叶宽显著高于对照；航天诱变对4种禾本科牧草生长性状影响复杂，不同品种在株高、叶长、主根长等指标上有不同响应，体现遗传背景的诱变敏感性差异。这为牧草航天育种中定向改良性状提供依据，后续需结合分子机制，深入解析诱变对生长调控的作用路径。



不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

图5 航天诱变对牧草SP_1代营养生长期叶宽的影响

Fig. 5 Effects of spaceflight mutagenesis on leaf width of SP_1 generation forage grasses during vegetative growth stage

2.4 航天诱变对牧草SP_1代田间生殖生长期的影响

由表3可知，‘1号’羊草诱变组（Y1）抽穗期较对照（CK-Y1）显著延迟，穗长、小穗数、结实率均显著低于对照；‘2号’羊草诱变组（Y2）抽穗期与对照（CK-Y2）无显著差异，穗长、小穗数、结实率略低于对照，差异不显著；根茎冰草诱变组（B1）抽穗期较对照（CK-B1）显著延迟，穗长、小穗数、结实率显著低于对照；‘乡土1号’蒙古冰草诱变组（B2）抽穗期略早于对照（CK-B2），穗长、小穗数、结实率与对照差异不显著。综上，航天诱变对4种牧草生殖生长期性状影响各异，‘1号’羊草、根茎冰草受抑制，‘2号’羊草相对稳定，‘乡土1号’蒙古冰草部分性状获优化。这体现了牧草遗传背景对诱变的生殖响应差异，为航天育种筛选优良种质、解析生殖发育诱变机制提供依据，后续需结合基因表达等探究性状差异的分子基础。

2.5 不同品种牧草SP_1代成株生物量积累变化

由表4可知，航天诱变对多数牧草单株鲜重、干重有抑制作用，‘乡土1号’蒙古冰草受影响小。结果显示，‘1号’羊草诱变组（Y1）单株鲜重显著低于对照（CK-Y1），单株干重显著低于对照；‘2号’羊草诱变组（Y2）单株鲜重显著低于对照（CK-Y2），单株干重显著低于对照；根茎冰草诱变组（B1）单株鲜重

表 3　4 种牧草生殖生长期性状统计

Table 3　Statistics of traits during the reproductive growth period of four forage species

编号	品种名称	处理	播种至抽穗天数/d	穗长/cm	小穗数/个	结实率/%
CK-Y1	‘1 号’羊草	对照	65±3	8. 2±0. 4ab	22±2a	58±4b
Y1		诱变	68±2	7. 5±0. 3b	19±1b	52±3c
CK-Y2	‘2 号’羊草	对照	62±2	8. 5±0. 5a	24±2a	60±3a
Y2		诱变	63±2	8. 1±0. 4a	23±1a	57±2b
CK-B1	根茎冰草	对照	58±2	6. 8±0. 3c	18±1c	45±3d
B1		诱变	61±2	6. 2±0. 2d	15±1d	38±2e
CK-B2	‘乡土 1 号’蒙古冰草	对照	60±2	7. 8±0. 4b	20±1b	55±3c
B2		诱变	59±2	8. 0±0. 3ab	21±1ab	58±3b

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0. 05）。

显著低于对照（CK-B1），单株干重显著低于对照；‘乡土 1 号’蒙古冰草诱变组（B2）单株鲜重与对照（CK-B2）无显著差异，单株干重与对照无显著差异。航天诱变对 4 种禾本科牧草单株鲜重、干重影响各异，‘1 号’羊草、‘2 号’羊草、根茎冰草物质积累受抑制，‘乡土 1 号’蒙古冰草物质积累被促进。这体现不同牧草遗传背景对诱变的响应差异，为航天育种筛选高生物量种质、解析物质积累诱变机制提供依据，后续可结合光合生理、代谢组学深入探究差异原因。

表 4　4 种牧草生物量性状统计

Table 4　Biomass trait statistics of four forage species

编号	品种名称	处理	单株鲜重/g	单株干重/g
CK-Y1	‘1 号’羊草	对照	12. 5±1. 2a	3. 2±0. 3a
Y1		诱变	10. 8±1. 1b	2. 8±0. 2b
CK-Y2	‘2 号’羊草	对照	13. 2±1. 3a	3. 5±0. 4a
Y2		诱变	12. 1±1. 2b	3. 1±0. 3b
CK-B1	根茎冰草	对照	9. 6±0. 9c	2. 5±0. 2c
B1		诱变	8. 2±0. 8d	2. 1±0. 2d
CK-B2	‘乡土 1 号’蒙古冰草	对照	11. 8±1. 1b	3. 0±0. 3b
B2		诱变	12. 3±1. 2ab	3. 3±0. 3ab

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0. 05）。

3　讨论

与常规地面辐射育种相比，航天诱变具有突变频率高、变异幅度大、突变性状稳定及育种周期短等显著优势[14]。在牧草育种领域，航天诱变技术已成功应用于紫花苜蓿的遗传改良[15-16]。航天诱变对植物的影响主要体现在三个层面：在形态学层面，可导致植株高度、叶片形态、分蘖数等表型性状的变异[17]；在生理生化层面，可能改变光合效率、酶活性、抗逆性等特性[18]；在分子水平，则可能引起 DNA 序列改变、染色体结构变异及表观遗传修饰等[19]。这些变异为牧草育种提供了丰富的遗传材料，有助于培育出更具适应性、产量更高、品质更优的新品种。航天诱变作为一种独特的物理诱变手段，与常规理化诱变相同，该方式诱导的非致死性遗传变异通常具有可遗传性，这些变异会在自交世代中逐步趋于纯合。正因如此，航天诱变材料在 SP_1 可能显现出明显的农艺性状变异[20]。植物种子经过空间搭载、回收并种植后，其形态特征会产生变化，不同品种间的变异程度与规律差异显著[21]。同时，航天诱变对种子萌发的影响具有双面性，既能通过打破休眠或诱导有益突变提升发芽率和抗性，也可能因生

理损伤导致萌发抑制。本研究中‘1号’羊草发芽指数和活力指数显著提升,与航天诱变的鸡冠花种子萌发研究中“发芽率提高”的结果一致[21],均体现航天诱变对种子萌发的正向效应可能与激素代谢基因激活相关。根茎冰草发芽指数下降,该研究结果与航天诱变扁蓿豆种子结果类似,直立型扁蓿豆种子被诱变后发芽出苗也受到抑制[22],表明辐射损伤可能普遍影响种子胚的正常发育。

此外,有研究表明航天诱变可使后代在株高上产生广泛的变异[23],本研究显示4种牧草株高均受抑制(降幅3.2%~22.7%),与水稻航天诱变中“苗期株高降低”的结果一致[11],可能与微重力环境下细胞伸长基因表达下调相关。紫花苜蓿诱变后代株高变异幅度较大[15],豆科与禾本科牧草对空间环境的敏感性可能存在科属差异。本研究中‘1号’羊草和‘乡土1号’蒙古冰草根长增加5%~10%,与小麦抗旱品种根部变异规律一致[24]。此外,‘1号’羊草抽穗期延迟3 d,与紫羊茅SP_1代抽穗期延迟现象一致[13],可能与光周期调控基因损伤有关;而‘乡土1号’蒙古冰草抽穗期提前1 d,在紫花苜蓿研究中未见类似报道,可能与野生种特有的早熟适应性机制有关,需进一步研究验证。羊草和根茎冰草生物量显著降低,与高羊茅诱变后“地上生物量减少”的结果一致[25],反映航天诱变对光合系统的潜在损伤;根茎冰草作为以无性繁殖为主的物种,对诱变敏感性最高(发芽指数、株高、生物量均下降),这与“无性繁殖植物基因组修复机制较弱”的理论一致[26]。

4 结论

本研究通过航天诱变处理4种禾本科牧草种子(‘1号’羊草、‘2号’羊草、根茎冰草、‘乡土1号’蒙古冰草),系统分析了SP_1代农艺性状的变异规律。结果表明,航天诱变对不同牧草品种的影响存在显著差异,主要体现在种子萌发、幼苗生长、生殖发育及生物量积累等方面。

在种子萌发阶段,航天诱变显著提高了‘1号’羊草和‘乡土1号’蒙古冰草的发芽指数和活力指数,但抑制了根茎冰草的发芽能力,表明不同品种对空间环境的敏感性不同。幼苗期性状显示,航天诱变对株高和单株鲜重普遍具有抑制作用,但‘1号’羊草和‘乡土1号’蒙古冰草的主根长显著增加,这可能有助于增强其在干旱地区的适应性。

生殖生长期的表现因品种而异:‘1号’羊草和根茎冰草的抽穗期延迟,穗部性状(穗长、小穗数、结实率)显著下降;而‘乡土1号’蒙古冰草抽穗期略提前,穗部性状保持稳定。生物量方面,羊草和根茎冰草的单株鲜重、干重显著降低,但‘乡土1号’蒙古冰草的生物量未受显著影响,显示出较强的诱变耐受性。

综上所述,航天诱变对禾本科牧草的影响具有品种特异性,‘乡土1号’蒙古冰草表现出更高的遗传稳定性和适应性。本研究为牧草航天育种提供了重要依据,后续可结合分子生物学手段深入解析变异机制,筛选优良突变体,为培育高产、抗逆的牧草新品种奠定基础。

参考文献:

[1] 苏志刚,翟亚军,陈盈熹,等. 禾本科牧草抗重金属研究进展[J]. 中国饲料,2025(9):93-100.

[2] 李 达,韩东辰,孙萍萍,等. 羊草良种繁育技术与高产种子田的建立[J]. 农业与技术,2025,45(8):10-13.

[3] 王晓龙,杨 婴,柴 华,等. 干旱胁迫对冰草幼苗生理的影响[J]. 草原与草业,2024,36(2):7-11.

[4] 陶 雅,徐丽君,李 峰,等. 我国羊草产业亟待振兴[J]. 草业学报,2023,32(11):188-198.

[5] 杨东升,于肖夏,卢倩倩,等. 四倍体杂交冰草F_2群体农艺性状聚类、相关及通径分析[J]. 草业科学,2024,41(4):836-844.

[6] 王英哲,徐 博,张 玲,等. 羊草种子胚性组织培养高频再生体系的研究[J]. 草地学报,2023,31(12):3706-3714.

[7] 张 众,云锦凤,石凤翎,等. “白音希勒根茎冰草”新品种选育报告[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2019,40(5):37-42.

[8] 撒春宁,刘金龙,许冬梅,等. 不同播种方式下蒙古冰草和沙生冰草根系构型对干旱胁迫的响应[J]. 中国草地学报,2023,45(9):38-46.

[9] 赵 哲,罗增铜,浦 娜,等. 空间诱变与重离子诱变水稻萌发期耐盐突变体的筛选与鉴定[J]. 华南农业大学学报,2025,46(1):25-33.

[10] 李瑞霞,郭凤霞,陈 垣,等. 当归种子航天诱变二代(SP_2)性状研究[J]. 核农学报,2024,38(10):1906-1912.

[11] 谢 辉,姜爱丽,冷晓婷,等. 航天诱变水稻品种连粳4号栽培技术[J]. 中国种业,2025(5):175-176.

[12] 郭呈宇,房永雨,伊风艳,等. 我国牧草种质资源保护与利用现状[J]. 畜牧与饲料科学,2024,45(6):81-86.

(下转第40页)