

引文格式: 苏俊宇, 朱树明, 陈浩文, 等. 不同外源激素对鲜草果种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2024, 39(2): 93–100. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202204009](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202204009)

不同外源激素对鲜草果种子萌发和 幼苗生长的影响*

苏俊宇¹, 朱树明¹, 陈浩文¹, 黄荣梅¹, 胡一凡¹, 杨志清¹, 范源洪^{1,2**}

(1. 云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南省高原特色农业产业研究院, 云南 昆明 650201)

摘要: 【目的】解决草果种子休眠期与育苗周期长、幼苗生长缓慢等问题。【方法】采用不同外源激素处理鲜草果种子, 探究不同外源激素对种子萌发和幼苗生长的影响。【结果】50 mg/L 生长素 (IAA)、200 mg/L 赤霉素 (GA₃)、10 mg/L 2,4-二氯苯氧乙酸 (2,4-D) 处理均能有效降低鲜草果种子发芽启动时间, 提高种子发芽指数, 促进种子萌发; 萌发出的幼苗长势更好, 生物量更高。其中, 50 mg/L IAA 浸种处理后发芽启动时间最短 (55 d), 发芽率 (57%) 与发芽指数 (0.86) 最高, 萌发出的幼苗长势好, 可溶性糖、可溶性淀粉和可溶性蛋白质含量以及过氧化物酶活性均高于其他处理。10 mg/L 2,4-D 和 10 mg/L 6-苄氨基嘌呤 (6-BA) 处理鲜草果种子可改变幼苗生物量分配, 根冠比接近 1 : 2。【结论】本研究揭示了不同外源激素对鲜草果种子萌发和幼苗生长的影响, 为草果良种繁育奠定了一定的基础。

关键词: 草果; 外源激素; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号: S573.901

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2024) 02-0093-08

Effects of Different Exogenous Hormones on Germination of Fresh Seeds and Seedling Growth of *Amomum tsaoko*

SU Junyu¹, ZHU Shuming¹, CHEN Haowen¹, HUANG Rongmei¹,

HU Yifan¹, YANG Zhiqing¹, FAN Yuanhong^{1,2}

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Yunnan Plateau Characteristic Agricultural Industry Research Institute, Kunming 650201, China)

Abstract: [Purpose] To solve the problems of long seedling raising cycle and slow seedling growth in the seed dormancy period of *Amomum tsaoko*. [Methods] Fresh seeds of *A. tsaoko* were treated with different exogenous hormones, and the effects of hormones on seed germination and seedling growth were investigated. [Results] Treatments of 50 mg/L indole 3-acetic acid (IAA), 200 mg/L gibberellin (GA₃) and 10 mg/L 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) could effectively reduce the germination start-up time of *A. tsaoko* seeds, improve the index of seed germination and promote the seed germination. The sprouted seedlings grew better and could accumulate more biomass. Among these treatments, the treatment of soaking the seeds in 50 mg/L IAA had the shortest

收稿日期: 2022-04-06

修回日期: 2024-04-15

网络首发日期: 2024-05-20

*基金项目: 云南省重大科技专项计划 (2019ZG00903); 国家科技资源共享服务平台项目 (NTPGRC2022-015)。

作者简介: 苏俊宇 (1995—), 男, 云南砚山人, 在读硕士研究生, 主要从事植物种质资源及其利用研究。

E-mail: 406698225@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 范源洪 (1964—), 男, 云南昌宁人, 学士, 研究员, 主要从事经济作物遗传育种及其利用研究。E-mail: 2247888136@qq.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240520.0946.003>



germination start-up time (55 days), the highest germination rate (57%) and germination index (0.86). The sprouting seedlings under this way grew well, and the contents of soluble sugar, soluble starch, soluble protein and peroxidase activity were higher than other treatments. The treatment with 10 mg/L 2,4-D and 10 mg/L 6-benzyladenine (6-BA) changed the distribution of seedling biomass, and the root shoot ratio closed to 1 : 2. [Conclusion] This study initially reveals the effects of different exogenous hormones on seed germination and seedling growth of fresh *A. tsaoko*, which provides a certain basis for the breeding of fine varieties of *A. tsaoko*.

Keywords: *Amomum tsaoko*; exogenous hormone; seed germination; seedling growth

草果 (*Amomum tsaoko* Crevost & Lemarie) 为姜科 (Zingiberaceae) 豆蔻属 (*Amomum*) 多年生常绿丛生草本植物^[1], 是重要的药食同源植物^[2], 具有较高的经济价值。草果主要分布于中国云南、广西和贵州的湿热山区, 云南为草果主产区, 种植面积占全国的 95%^[3]; 其中怒江傈僳族自治州的草果种植面积达 $7.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[4], 约占云南省的 1/3。草果已成为云南山区乡村振兴特色产业, 对边疆山区农民增收和区域农村经济发展具有重要意义。在生产上, 草果以种子繁殖和分株繁殖为主, 但分株繁殖的繁殖系数有限, 不能满足草果规模化种植的大量种苗需求; 而种子繁殖便于运输, 能批量繁殖生产种苗, 且实生苗生长旺盛, 适应能力更强, 因此, 种子繁殖技术对草果产业尤为重要。草果种子属休眠性种子, 出苗率低且育苗周期长^[5], 极大地限制了草果良种繁育速度和优良品种的推广应用。如何促进草果种子萌发、缩短育苗周期、提高幼苗质量是草果产业高质量发展的重要前提。已有研究发现: 鲜草果种子活力高, 但发芽率远低于种子活力, 且鲜草果种子经层积处理后能打破种子休眠^[5]。宋美芳等^[6]研究发现: 草果种子内存在发芽抑制物质, 草果种子浸提液能有效抑制白菜种子萌发, 经过层积处理的草果种子浸提液可显著降低白菜种子萌发的抑制率; 雷恩等^[7]研究发现: 草果种皮不是导致种子发芽率低的主要原因, 且使用赤霉素 (gibberellin, GA_3) 能提高草果种子发芽率。以上研究表明: 层积处理和植物激素都能调控草果种子萌发, 打破种子休眠。

植物激素对植物种子休眠、萌发与幼苗生长发育具有调节作用^[8]。其中, 生长素 (indole 3-acetic acid, IAA) 能与其他激素互作, 调控种子萌发与休眠、植物生长发育^[9-10]。棉花种子经外源 IAA 处理后发芽指数显著提高, 内源激素水平更

适合幼苗生长^[11]; 外源 IAA 能降低杉木种子内源 IAA 含量, 使内源 GA 含量显著增加^[12], 表明外源 IAA 可负反馈调节内源 IAA 和 GA 含量, 从而间接调控种子萌发。 GA_3 是打破种子休眠常用的外源激素, 是促进种子萌发的关键因子^[13], 外源 GA_3 处理柴胡种子可降低种子内源 IAA 和脱落酸 (abscisic acid, ABA) 含量, 提高内源 GA_3 含量, 促进种子萌发^[14]。此外, 其他激素也对种子的休眠与萌发有着重要作用。SHUAI 等^[15]使用 IAA、2,4-二氯苯氧乙酸 (2,4-dichlorophenoxyacetic acid, 2,4-D) 和萘乙酸 (1-naphthaleneacetic acid, NAA) 处理大豆种子后, 大豆种皮破裂, 胚根突出延缓。张旺凡^[16]研究发现: 6-苄氨基嘌呤 (6-benzyladenine, 6-BA) 与 GA_3 能有效打破黄精种子休眠, 促进萌发。以上研究说明外源激素对种子休眠萌发与幼苗生长具有显著作用, 尤其对依赖于种子繁殖的植物至关重要。

现有研究多集中于草果种子萌发, 对施加不同植物激素实现打破草果种子休眠、促进草果种子萌发和幼苗生长的报道较少。基于此, 本研究用 50 mg/L IAA、200 mg/L GA_3 、10 mg/L NAA、10 mg/L 2,4-D、10 mg/L 6-BA 处理鲜草果种子, 分析其种子萌发和幼苗生长的变化, 明确不同外源激素对鲜草果种子发芽启动时间、发芽率和幼苗生长的影响, 以期缩短草果育苗周期和提高幼苗质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试新鲜草果采自云南省腾冲市马站乡三联村 ($25^{\circ}16'19''\text{N}$, $98^{\circ}24'54''\text{E}$, 海拔 1796.06 m)。鲜草果去皮、剔除杂质和瘪粒, 留下成熟、饱满的新鲜种子, 混匀后用 0.5% KMnO_4 消毒 30 min, 蒸馏水冲洗 4 次, 再用吸水纸吸干水分, 得到洁

净鲜草果种子。

1.2 方法

1.2.1 试验设计

以蒸馏水浸泡鲜草果种子为对照(CK),以50 mg/L IAA、200 mg/L GA₃、10 mg/L NAA、10 mg/L 2,4-D和10 mg/L 6-BA为浸种溶液,将种子与浸种溶液按体积比1:3~1:4对鲜草果种子进行浸种处理,保证种子被均匀浸泡,每个处理设置3个生物学重复。浸种24 h后,每个重复随机取出100粒种子,用吸水纸吸干水分,待用。将种子播种于消毒的育苗盘中(基质为品氏红袋育苗基质),将育苗盘放置于温室中(白天温度为20~25℃,夜晚温度为15~20℃,湿度为30%~50%),每3 d浇1次水,以保障种子萌发所需水分。所有处理种子萌发期间管理措施一致,观察测量种子发芽启动时间、发芽持续时间、发芽率和发芽指数;待幼苗生长至第4叶时,将其从育苗盘移栽到花盆中。在发芽结束100 d后测量幼苗株高、茎径、根长、叶面积、生物量、可溶性物质含量、抗氧化酶活性。

1.2.2 鲜草果种子萌发指标测定

参照叶清华等^[17]的方法,测定草果种子发芽启动时间和发芽持续时间。当种子胚轴出土时,认定该种子为发芽种子;当连续3 d且每天发芽率不超过重复粒数1%时即认为发芽结束。发芽率(GR, germination rate)和发芽指数(GI, germination index)按以下公式计算^[18]:

$$\text{发芽率} = \frac{n}{N} \times 100\%;$$

$$\text{发芽指数} = \sum \frac{G_t}{D_t}。$$

式中: n 为发芽种子数, N 为供试种子数, G_t 为 t 日内的发芽数, D_t 为相对应的种子发芽时间。

1.2.3 草果幼苗生长指标和生物量测定

草果种子萌发100 d后,每处理选取10株幼苗,用直尺(精确度为0.1 cm)测量株高和主根长,用游标卡尺(精确度为0.01 cm)在茎基部上方1 cm处测量茎径;剪下叶片,用Li-3000C叶面积仪(Li-Cor, USA)测量叶面积。

幼苗生长指标测量完毕后,将其分解为根、茎、叶3部分,10株为1组,于105℃下杀青1 h,再于60℃条件下烘至恒质量并称量,记录幼苗的根生物量、茎生物量、叶生物量和植株总生物

量,按公式计算根生物量比(root mass ratio, RMR)、茎生物量比(stem mass ratio, SMR)、叶生物量比(leaf mass ratio, LMR)、根冠比(root shoot ratio, RSR)和比叶面积(specific leaf area, SLA):根(或茎或叶)生物量分配=根(或茎或叶)生物量/植株总生物量;RSR=根质量/茎叶总质量;SLA=总叶面积/叶质量。

1.2.4 草果幼苗可溶性物质与叶绿素含量测定

参照王学奎^[19]的方法测定草果幼苗可溶性糖、可溶性淀粉、可溶性蛋白质和叶绿素含量。

1.2.5 草果幼苗抗氧化酶活性与根系活力测定

分别使用苏州格锐思生物科技有限公司生产的G0102F、G0106F和G0108F试剂盒测定超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和过氧化物酶(oxidase, POD)的活性;采用TTC还原法^[20]测定根系活力。

1.3 数据统计与分析

采用SPSS 20.0对试验数据进行计算和统计分析;采用单因素方差及Duncan's多重比较方法进行差异显著性检验;采用Origin 9.1作图。所有参数均以“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 不同外源激素处理对鲜草果种子萌发的影响

不同外源激素浸种直接影响种子发芽启动时间(表1)。IAA浸种处理后,种子发芽启动时间最短,播种后第52天开始萌发,较CK处理的发芽启动时间缩短46.67 d;GA₃和2,4-D处理种子的发芽启动时间分别比CK处理缩短39.34和32.34 d;6-BA和NAA处理的种子发芽启动时间最长,但与CK处理无显著差异,表明IAA、GA₃和2,4-D处理鲜草果种子可有效打破种子休眠,促进种子萌发。NAA和IAA处理的发芽持续时间均显著高于CK处理;6-BA和2,4-D处理的发芽持续时间均低于CK处理,但三者间差异不显著;GA₃处理的发芽持续时间较CK处理显著缩短9.34 d,种子出苗整齐度最高。IAA处理的出苗数最多(57株),但各处理组间的出苗数差异不显著。以上结果说明IAA和GA₃处理鲜草果种子能有效打破种子休眠,缩短发芽启动时间,其中用GA₃处理鲜草果种子能提高出苗整齐度。

由图1可知:IAA处理发芽率最高(57.00%),

表 1 不同外源激素处理鲜草果种子的萌发时间

处理 treatments	发芽启动时间/d time of germination initiation	发芽持续时间/d duration of germination	出苗数 number of seedlings emergence
CK	99.33±2.52 a	24.67±0.58 c	51.33±9.87 a
6-BA	102.33±4.51 a	24.33±1.16 c	42.67±3.79 a
NAA	103.33±5.13 a	31.67±0.58 a	49.00±7.55 a
2,4-D	67.67±3.22 b	23.00±1.73 c	44.67±9.29 a
GA ₃	60.67±3.06 c	15.33±0.58 d	46.00±4.58 a
IAA	52.00±3.00 d	27.33±1.16 b	57.00±8.19 a

注: CK. 对照处理, 6-BA. 6-苄氨基嘌呤, NAA. 萘乙酸, 2,4-D. 2,4-二氯苯氧乙酸, GA₃. 赤霉素, IAA. 生长素; 同列不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$); 下同。
Note: CK. control treatment, 6-BA. 6-benzyladenine, NAA. 1-naphthaleneacetic acid, 2,4-D. 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, GA₃. gibberellin, IAA. indole 3-acetic acid; in the same column, different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$); the same as below.

较 CK 处理高 6.67%, 但各处理的鲜种子发芽率差异均不显著。此外, 鲜草果种子经 IAA 和 GA₃ 处理后, 发芽指数显著升高; 2,4-D 处理的发芽指数也高于 CK 处理, 但二者间差异不显著; 6-BA 和 NAA 处理的发芽指数均小于 CK 处理, 且三者间差异不显著。

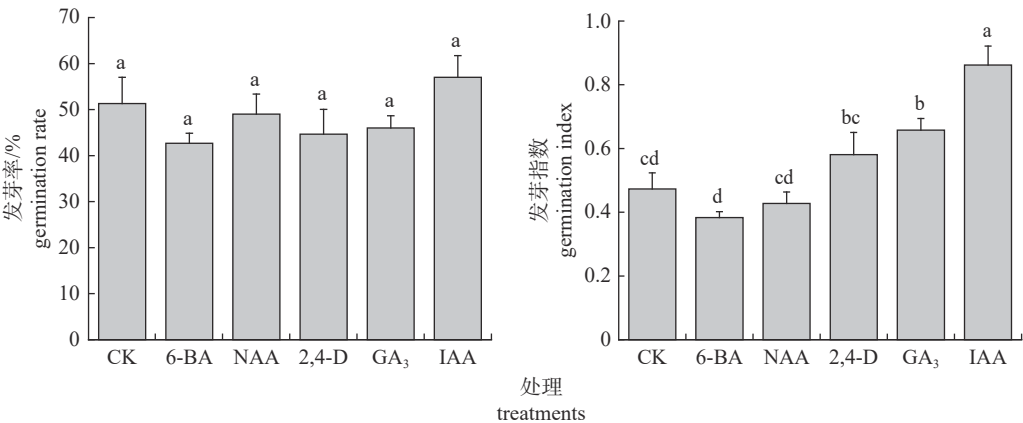
2.2 外源激素处理种子对幼苗生长和生物量分配的影响

不同外源激素处理鲜草果种子后, 幼苗生长情况如图 2a 所示。与 CK 处理相比, IAA 处理种子后, 萌发的幼苗可积累更高的生物量, 为 0.60 g (图 2b), 且幼苗长势更好; 6-BA 和 NAA 处理种子后萌发的幼苗长势及生物量与 CK 处理相差不大。外源激素处理种子导致幼苗根系活力降低 (图 2c), IAA、6-BA 和 GA₃ 处理种子后萌发幼苗的根系活力均低于 CK 处理, 但差异不显著;

2,4-D 和 NAA 处理种子后萌发幼苗的根系活力均显著低于 CK。

由表 2 可知: 外源激素处理鲜草果种子可促进幼苗根系生长, 各处理幼苗根长为 14.23~16.70 cm, 均高于 CK 处理, 但未达到显著水平; IAA 处理种子后萌发幼苗的株高、茎粗和叶面积最大, 且均显著高于 CK 处理; GA₃、2,4-D、NAA 和 6-BA 处理种子后萌发幼苗的株高和茎粗与 CK 处理无显著差异; 2,4-D 和 GA₃ 处理种子后萌发幼苗的叶面积显著大于 CK 处理, 仅 NAA 处理种子后萌发幼苗的叶面积低于 CK, 但差异不显著。

由表 3 可知: 与 CK 处理相比, IAA、GA₃ 和 NAA 处理种子后萌发的幼苗 RMR、SMR 和 LMR 差异均不显著, 表明 IAA、GA₃ 和 NAA 处理种子后萌发幼苗的根、茎、叶生物量分配特征



注: CK. 对照处理, 6-BA. 6-苄氨基嘌呤, NAA. 萘乙酸, 2,4-D. 2,4-二氯苯氧乙酸, GA₃. 赤霉素, IAA. 生长素; 不同小写字母表示不同处理间存在显著差异 ($P<0.05$); 下同。
Note: CK. control treatment, 6-BA. 6-benzyladenine, NAA. 1-naphthaleneacetic acid, 2,4-D. 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, GA₃. gibberellin, IAA. indole 3-acetic acid; different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$); the same as below.

图 1 不同外源激素对鲜草果种子发芽率与发芽指数的影响
Fig. 1 Effects of different exogenous hormones on the germination rate and germination time of fresh seeds of *Amomum tsaoko*

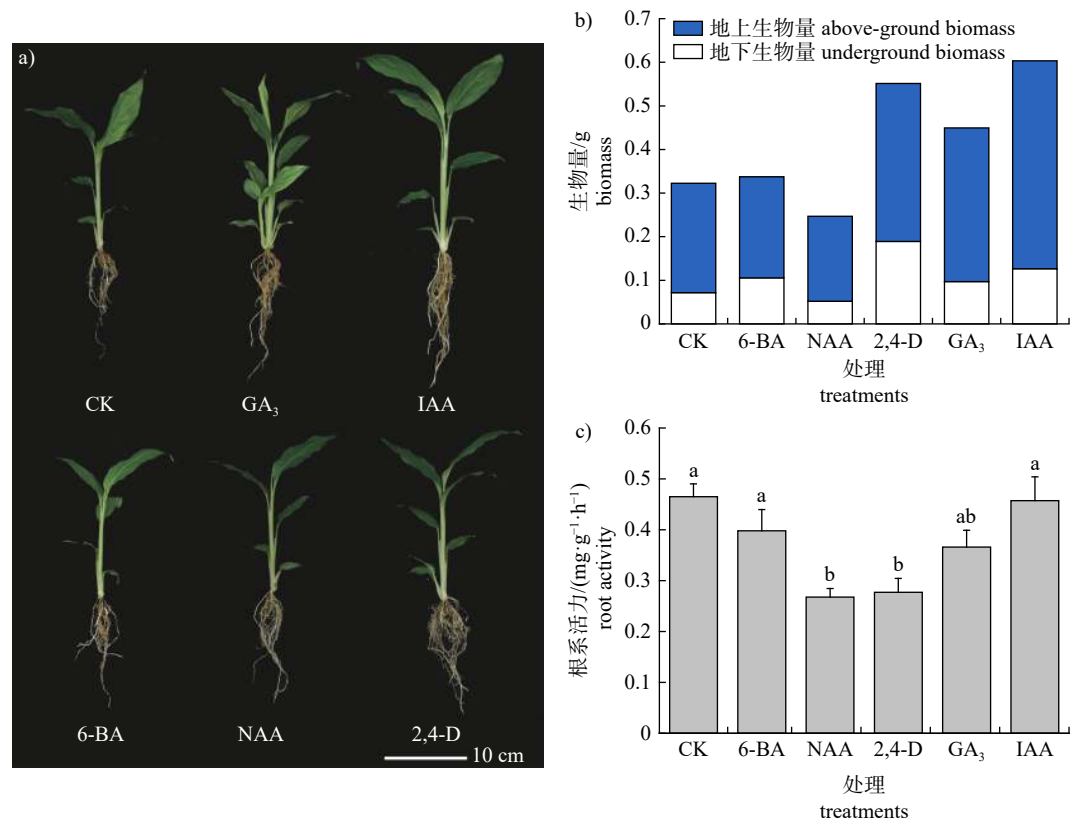


图 2 外源激素处理草果种子对幼苗形态 (a)、生物量分配 (b) 和根系活力 (c) 的影响 (萌发 100 d)
Fig. 2 Effects of exogenous hormones treated *A. tsako* seeds on the morphology (a), biomass allocation (b) and root activity (c) of seedlings (germination for 100 days)

表 2 外源激素处理草果种子对幼苗农艺性状的影响
Tab. 2 Effects of exogenous hormones treated *A. tsako* seeds on the agronomic traits of seedlings

处理 treatments	株高/cm plant height	根长/cm root length	茎粗/cm stem thickness	叶面积/cm ² leaf area
CK	12.43±0.57 b	13.83±0.71 a	0.56±0.00 b	57.39±12.55 b
6-BA	11.83±2.11 b	14.23±0.83 a	0.60±0.02 ab	61.37±11.21 b
NAA	12.00±0.61 b	14.70±1.06 a	0.56±0.08 b	51.49±11.05 b
2,4-D	14.03±0.50 ab	16.70±1.05 a	0.64±0.05 ab	97.83±8.62 a
GA ₃	14.06±2.32 ab	15.83±2.75 a	0.64±0.05 ab	98.47±29.67 a
IAA	15.40±0.10 a	16.03±1.98 a	0.66±0.01 a	114.49±12.65 a

与 CK 相似; 2,4-D 和 6-BA 处理草果种子后萌发幼苗的 SMR 显著降低, 而 RMR 显著增加, 表明 2,4-D 和 6-BA 处理种子后改变了萌发幼苗根、茎生物量的分配, 有效促进了幼苗根系发育。各处理 LMR 和 SLA 差异未达显著水平。说明 IAA 处理种子后不改变萌发幼苗生物量分配特征, 同时有助于萌发幼苗的生长发育。

2.3 外源激素处理种子对幼苗可溶性物质含量的影响

由表 4 可知: IAA、GA₃、2,4-D 和 NAA 处理种子后萌发幼苗的可溶性蛋白质含量与 CK 处

理无显著差异, 仅 6-BA 处理种子后萌发幼苗的可溶性蛋白质含量显著低于 CK 处理, 表明外源激素处理对萌发幼苗的可溶性蛋白质含量影响较小。除 IAA 外, 其他外源激素处理的可溶性糖含量均低于 CK 处理, 但仅 GA₃ 处理与 CK 处理具有显著差异。IAA、6-BA 和 NAA 处理的可溶性淀粉含量显著高于 CK 处理; GA₃ 处理的可溶性淀粉含量高于 CK 处理, 而 2,4-D 处理的可溶性淀粉含量低于 CK, 三者间差异均不显著。可见, IAA 处理种子后能提高萌发幼苗的可溶性物质含量, 为幼苗的生长发育提供物质基础。

表 3 外源激素处理草果种子对萌发幼苗生物量分配的影响

Tab. 3 Effects of exogenous hormones treated *A. tsaoko* seeds on the biomass allocation of seedlings

处理 treatments	根生物量比 root biomass ratio	茎生物量比 stem biomass ratio	叶生物量比 leaf biomass ratio	根冠比 root shoot ratio	比叶面积 specific leaf area
CK	0.222 0±0.029 1 b	0.322 3±0.044 8 a	0.455 7±0.063 2 a	0.286 7±0.048 5 bc	387.850 5±28.382 3 a
6-BA	0.315 1±0.042 1 a	0.259 0±0.023 9 b	0.425 9±0.018 1 a	0.463 9±0.093 3 a	424.376 3±35.599 8 a
NAA	0.213 1±0.032 5 b	0.313 6±0.027 5 a	0.473 3±0.015 2 a	0.272 2±0.051 5 c	438.164 4±26.860 2 a
2,4-D	0.329 3±0.070 7 a	0.239 4±0.019 3 b	0.431 3±0.052 1 a	0.502 2±0.159 8 a	424.944 3±36.975 9 a
GA ₃	0.222 3±0.063 3 b	0.290 7±0.041 5 ab	0.486 9±0.021 8 a	0.291 9±0.109 2 bc	448.951 4±26.926 8 a
IAA	0.207 6±0.041 7 b	0.320 3±0.039 3 a	0.472 0±0.031 4 a	0.264 4±0.066 2 c	409.651 0±52.019 4 a

表 4 外源激素处理草果种子对幼苗可溶性物质含量的影响

Tab. 4 Effects of exogenous hormones treated *A. tsaoko* seeds on the soluble substance content of seedlings

处理 treatment	可溶性蛋白质含量/(mg·g ⁻¹) soluble protein content	可溶性糖含量/% soluble sugar content	可溶性淀粉含量/% soluble starch content
CK	4.92±0.11 a	0.87±0.45 a	0.55±0.11 c
6-BA	3.50±0.70 b	0.81±0.17 ab	1.29±0.40 a
NAA	4.87±0.19 a	0.76±0.14 ab	1.07±0.08 ab
2,4-D	4.99±0.04 a	0.75±0.16 ab	0.46±0.04 c
GA ₃	4.58±0.38 a	0.58±0.83 b	0.76±0.24 bc
IAA	5.24±0.14 a	0.90±0.12 a	1.37±0.12 a

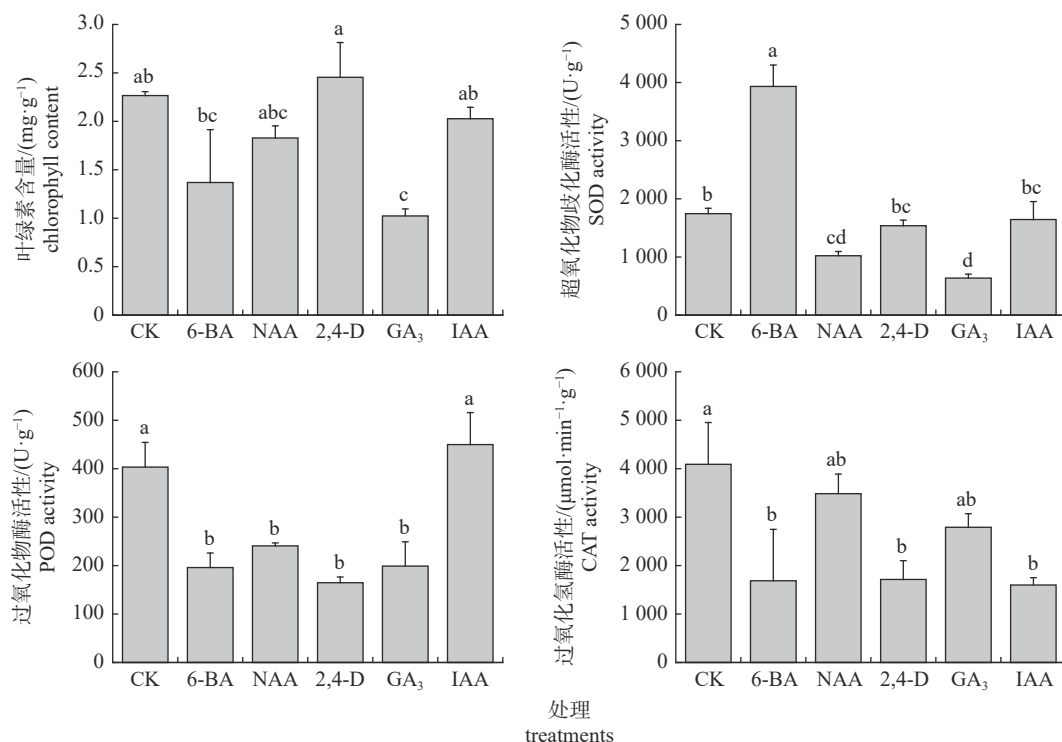
2.4 外源激素处理种子对幼苗叶绿素含量与抗氧化酶活性的影响

由图 3 可知：外源激素处理种子均能不同程度影响幼苗叶绿素含量与抗氧化性。GA₃、6-BA 处理的叶绿素含量显著低于 CK 处理，其他外源激素处理的叶绿素含量与 CK 处理均无显著差异。6-BA 处理的 SOD 活性 (3 932.93 U/g) 显著高于其他处理；IAA 和 2,4-D 处理的 SOD 活性均低于 CK 处理，但差异不显著；NAA 和 GA₃ 处理的 SOD 活性显著低于 CK 处理，其中 GA₃ 处理的 SOD 活性仅为 635.98 U/g，表明 6-BA 处理种子后能有效提高幼苗 SOD 活性水平，而 GA₃ 处理种子后则抑制幼苗 SOD 活性。CK 与 IAA 处理的 POD 活性显著高于其他处理，表明 GA₃、2,4-D、NAA 和 6-BA 处理种子可降低草果幼苗的 POD 活性。所有外源激素处理种子后的 CAT 活性均低于 CK 处理，其中 IAA、2,4-D 和 6-BA 处理与 CK 处理差异达到显著水平，表明外源激素处理种子可降低幼苗 CAT 活性。

3 讨论

外源植物激素处理可以打破种子休眠、促进种子萌发^[21]，种子休眠主要与内源 IAA 水平有关^[22]，内源 IAA 通过增强 ABA 信号通路抑制种子萌发^[23]。而在本研究中，外源 IAA、GA₃ 和 2,4-D 处理能够有效缩短鲜草果种子发芽启动时

间，打破休眠，显著提高种子发芽指数，其中，外源 IAA 处理的鲜草果种子发芽启动时间最短，发芽率与发芽指数最高，表明外源 IAA 处理鲜草果种子可有效打破其休眠状态。LIU 等^[22]研究表明：高浓度外源 IAA 抑制种子萌发，适宜浓度外源 IAA 能增加内源 IAA 和 GA 含量，降低内源 ABA 含量，从而促进种子萌发。SHUAI 等^[15]研究发现：外源 IAA 处理种子后 GA 生物合成通路基因转录下调，ABA 生物合成通路的基因转录上调，导致种子内 GA 含量降低，ABA 含量上升。这些研究表明：IAA 以浓度依赖方式介导 GA 与 ABA 的生物合成来调控种子萌发与休眠。本研究中，2,4-D 和 NAA 都是人工合成的生长素类似物，但外源 2,4-D 可有效打破鲜草果种子休眠，其原因可能在于 2 种生长素类似物对胚根细胞分裂和伸长的影响存在差异。NAA 在低浓度下刺激细胞伸长而高浓度下刺激细胞分裂；2,4-D 在低浓度时就能促进细胞分裂^[24]，在根生长中细胞分裂的作用大于细胞伸长的作用^[25-26]，因此可以促进鲜草果种子萌发，提高发芽指数，缩短发芽启动时间。GA 是解除种子休眠并促进种子萌发的关键激素^[27-28]，使用外源 GA₃ 打破种子休眠，提高种子活力与发芽率是常用的方式^[29-30]。在本研究中，使用外源 GA₃ 处理的草果种子发芽启动时间比外源 IAA 处理长，发芽率与发芽指数也低于外源 IAA 处理，这与 ZHAO 等^[12]使用外源



注/Note: SOD, superoxide dismutase; POD, peroxidase; CAT, catalase.

图3 外源激素处理草果种子对幼苗叶绿素含量和抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effects of exogenous hormones treated *A. tsako* seeds on the chlorophyll content and antioxidant enzyme activities in seedlings

IAA处理的杉木种子发芽率与发芽指数均高于外源GA₃处理的结果一致,推测这可能是鲜草果种子内源ABA含量过高所致,外源GA₃在低浓度ABA条件下能促进种子萌发,但在高浓度ABA条件下对种子萌发的促进作用不明显^[31-32]。

种子萌发的时间和内源激素水平与幼苗的生长发育有关^[33]。本研究中使用外源IAA、GA₃和2,4-D处理种子可获得长势较好的幼苗,并且幼苗积累生物量高,与闫艳华^[34]的研究结果一致。在本研究中,IAA处理种子萌发的幼苗生物量积累与根系活力最高,幼苗所含可溶性蛋白质、可溶性糖和可溶性淀粉含量最高,POD活性最高,这与ZHAO等^[11]研究结果一致,适宜浓度外源IAA处理种子后可增强萌发幼苗关键内源激素的拮抗平衡,糖含量与糖代谢关键酶活性增强。本研究中,与CK处理相比,外源GA₃处理鲜草果种子萌发的幼苗株高、根长、茎粗、叶面积和生物量积累均增加,但低于外源IAA处理种子萌发的幼苗,这可能与幼苗内源激素水平有关,外源GA₃处理种子后可能改变内源乙烯、IAA和ABA水平,从而影响幼苗的生长发育^[35]。

幼苗生物量的有效分配有助于幼苗的健康生长,本研究中10 mg/L 2,4-D和6-BA处理鲜草果种子萌发的幼苗根冠比接近1:2,地下生物量分别占总生物量的32.93%和31.51%,表明这2种处理可使幼苗生物量更多地分配至地下部分,可能对草果幼苗根系生长和抗倒伏能力具有一定的促进作用。本研究表明:IAA、GA₃和2,4-D处理有利于种子萌发,缩短萌发时间,其相关作用机制需要进一步开展后续研究。

4 结论

本研究明确了不同外源激素对鲜草果种子萌发和幼苗生长发育的影响,外源IAA、GA₃和2,4-D可以解除鲜草果种子休眠,缩短发芽启动时间,促进幼苗生长,提高出苗整齐度,缩短草果育苗周期,提高种苗质量和数量。研究结果为草果良种繁育及其产业化应用提供了理论依据。

[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: 第十六卷: 第二分册[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [2] 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, 2020.
- [3] 李纪潮, 张金渝, 蔡明姬, 等. 草果叶斑病类致病菌对新型低毒药剂的敏感性及交互抗性[J]. 南方农业学报, 2022, 53(8): 2153. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1191.2022.08.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1191.2022.08.008).
 - [4] 朱海波, 毕洁颖. 巩固拓展脱贫攻坚成果同乡村振兴有效衔接: 重点方向与政策调试: 针对“三区三州”脱贫地区的探讨[J]. 南京农业大学学报(社会科学版), 2021, 21(6): 80. DOI: [10.19714/j.cnki.1671-7465.2021.0089](https://doi.org/10.19714/j.cnki.1671-7465.2021.0089).
 - [5] 潘春柳, 邓志军, 黄燕芬, 等. 层积处理对草果种子萌发的影响[J]. 种子, 2016, 35(2): 7. DOI: [10.16590/j.cnki.1001-4705.2016.02.007](https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2016.02.007).
 - [6] 宋美芳, 唐德英, 李宜航, 等. 草果种子萌发特性研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(5): 70. DOI: [10.11924/j.issn.1000-6850.casb17100025](https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.casb17100025).
 - [7] 雷恩, 刘艳红, 田学军, 等. 不同化学试剂对草果种子发芽的影响[J]. 种子, 2010, 29(12): 79. DOI: [10.16590/j.cnki.1001-4705.2010.12.058](https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2010.12.058).
 - [8] DAVIES P J. Plant hormones: physiology, biochemistry and molecular biology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2013.
 - [9] WEYERS J D B, PATERSON N W. Plant hormones and the control of physiological processes[J]. New Phytologist, 2001, 152(3): 375. DOI: [10.1046/j.0028-646X.2001.00281.x](https://doi.org/10.1046/j.0028-646X.2001.00281.x).
 - [10] ANFANG M, SHANI E. Transport mechanisms of plant hormones[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2021, 63: 102055. DOI: [10.1016/j.pbi.2021.102055](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102055).
 - [11] ZHAO T L, DENG X L, XIAO Q Z, et al. IAA priming improves the germination and seedling growth in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) via regulating the endogenous phytohormones and enhancing the sucrose metabolism[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 155: 112788. DOI: [10.1016/j.indcrop.2020.112788](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112788).
 - [12] ZHAO G W, ZHONG T L. Influence of exogenous IAA and GA on seed germination, vigor and their endogenous levels in *Cunninghamia lanceolata*[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2013, 28(6): 511. DOI: [10.1080/02827581.2013.783099](https://doi.org/10.1080/02827581.2013.783099).
 - [13] KARSSSEN C M, ZAGORSKI S, KEPCZYNSKI J, et al. Key role for endogenous gibberellins in the control of seed germination[J]. Annals of Botany, 1989, 63(1): 71. DOI: [10.1093/oxfordjournals.aob.a087730](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087730).
 - [14] 袁梦佳, 杨太新, 孙延超. 赤霉素浸种对柴胡种子发芽及内源激素变化的影响[J]. 种子, 2021, 40(9): 81. DOI: [10.16590/j.cnki.1001-4705.2021.09.081](https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2021.09.081).
 - [15] SHUAI H W, MENG Y J, LUO X F, et al. Exogenous auxin represses soybean seed germination through decreasing the gibberellin/abscisic acid (GA/ABA) ratio[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1. DOI: [10.1038/s41598-017-13093-w](https://doi.org/10.1038/s41598-017-13093-w).
 - [16] 张旺凡. 不同植物生长调节剂打破多花黄精种子休眠试验[J]. 中医药学报, 2008, 36(6): 43. DOI: [10.19664/j.cnki.1002-2392.2008.06.017](https://doi.org/10.19664/j.cnki.1002-2392.2008.06.017).
 - [17] 叶清华, 王威, 谢倩, 等. 橄榄种子休眠生理与层积效应[J]. 热带作物学报, 2021, 42(6): 1646. DOI: [10.3969/j.issn.1000-2561.2021.06.020](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2021.06.020).
 - [18] YAN L. Effect of salt stress on seed germination and seedling growth of three salinity plants[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2008, 11(9): 1268. DOI: [10.3923/pjbs.2008.1268.1272](https://doi.org/10.3923/pjbs.2008.1268.1272).
 - [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
 - [20] 叶尚红. 植物生理生化实验教程[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004.
 - [21] KUCERA B, COHN M A, LEUBNER-METZGER G. Plant hormone interactions during seed dormancy release and germination[J]. Seed Science Research, 2005, 15(4): 281. DOI: [10.1079/SSR2005218](https://doi.org/10.1079/SSR2005218).
 - [22] LIU X D, ZHANG H, ZHAO Y, et al. Auxin controls seed dormancy through stimulation of abscisic acid signaling by inducing ARF-mediated ABI3 activation in *Arabidopsis*[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2013, 110(38): 15485. DOI: [10.1073/pnas.1304651110](https://doi.org/10.1073/pnas.1304651110).
 - [23] LIU P P, MONTGOMERY T A, FAHLGREN N, et al. Repression of *AUXIN RESPONSE FACTOR10* by microRNA160 is critical for seed germination and post-germination stages[J]. The Plant Journal, 2007, 52(1): 133. DOI: [10.1111/j.1365-3113X.2007.03218.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2007.03218.x).
 - [24] CAMPANONI P, NICK P. Auxin-dependent cell division and cell elongation. 1-naphthaleneacetic acid and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid activate different pathways[J]. Plant Physiology, 2005, 137(3): 939. DOI: [10.1104/pp.104.053843](https://doi.org/10.1104/pp.104.053843).
 - [25] THIMANN K V. Auxins and the growth of roots[J]. American Journal of Botany, 1936, 23(8): 561. DOI: [10.2307/2436087](https://doi.org/10.2307/2436087).
 - [26] REED H S. Growth and differentiation in plants[J]. The Quarterly Review of Biology, 1927, 2(1): 79. DOI: [10.1086/394267](https://doi.org/10.1086/394267).
 - [27] FINCH-SAVAGE W E, LEUBNER-METZGER G. Seed dormancy and the control of germination[J]. New Phytologist, 2006, 171(3): 501. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2006.01787.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01787.x).
 - [28] FINKELSTEIN R, REEVES W, ARIIZUMI T, et al. Molecular aspects of seed dormancy[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59(1): 387. DOI: [10.1146/annurev.arplant.59.032607.092740](https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092740).
 - [29] ZHAO G W, JIANG X W. Roles of gibberellin and auxin in promoting seed germination and seedling vigor in *Pinus massoniana*[J]. Forest Science, 2014, 60(2): 367. DOI: [10.5849/forsci.12-143](https://doi.org/10.5849/forsci.12-143).
 - [30] 张合瑶, 马福仙, 李莲芳, 等. 微波辐射和浸种对华山松种子生活力和发芽的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(9): 23. DOI: [10.11929/j.swfu.202207023](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202207023).
 - [31] LIU Y G, YE N H, LIU R, et al. H₂O₂ mediates the regulation of ABA catabolism and GA biosynthesis in *Arabidopsis* seed dormancy and germination[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(11): 2979. DOI: [10.1093/jxb/erq125](https://doi.org/10.1093/jxb/erq125).
 - [32] KIM S K, SON T K, PARK S Y, et al. Influences of gibberellin and auxin on endogenous plant hormone and starch mobilization during rice seed germination under salt stress[J]. Journal of Environmental Biology, 2006, 27(2): 181.
 - [33] NÉE G, XIANG Y, SOPPE W J J. The release of dormancy, a wake-up call for seeds to germinate[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2017, 35: 8. DOI: [10.1016/j.pbi.2016.09.002](https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.09.002).
 - [34] 闫艳华. 不同外源激素处理对曼陀罗种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2020(23): 115. DOI: [10.11937/bfy.20200350](https://doi.org/10.11937/bfy.20200350).
 - [35] WANG Y H, IRVING H R. Developing a model of plant hormone interactions[J]. Plant Signaling & Behavior, 2011, 6(4): 494. DOI: [10.4161/psb.6.4.14558](https://doi.org/10.4161/psb.6.4.14558).

责任编辑: 何承刚