

郭晨宁,李晶晶,杨 灏,等. 涝渍胁迫对地黄生理生化特性及活性成分的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(11):118-126.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.11.017

# 涝渍胁迫对地黄生理生化特性及活性成分的影响

郭晨宁,李晶晶,杨 灏,张 宝,陈随清,杨晶凡,练从龙

(河南中医药大学药学院/河南省中药资源与中药化学重点实验室/豫药全产业链研发河南省协同创新中心,河南郑州 450046)

**摘要:**地黄栽培有“三怕”,即怕旱、怕涝和怕病虫害,每年因雨水季节造成地黄受涝减产现象屡见不鲜,尤以膨大期最为明显。开展膨大期地黄受水淹胁迫的生长指标、生理生化指标和代谢变化研究,解析地黄响应水淹胁迫的调控机制,可为地黄的抗逆品种选育以及地黄水淹灾后生产指导提供重要理论依据。选用野生地黄及栽培地黄品种沁怀作为供试品,根据淹水程度分为对照(CK)、渍处理和涝处理,在处理 1 d 和 3 d 进行表型观察,测定各项生理生化指标,并使用 HPLC 测定地黄中代谢活性成分的变化。结果表明,野生地黄叶片在涝、渍处理 3 d 时存在不同程度的干枯、变黄和腐烂,栽培地黄涝处理 1 d 后叶片开始卷曲、腐烂,处理 3 d 后腐烂程度大于渍处理。栽培地黄的根系活力随胁迫程度和胁迫时间的增加而不断降低;渍处理野生地黄根系的根系活力始终显著高于 CK( $P < 0.05$ ),而涝处理则显著低于 CK。随着胁迫时间和胁迫程度的增加,栽培和野生地黄根、叶的超氧化物歧化酶(SOD)活性均呈升高趋势。野生地黄根、叶的过氧化氢酶(CAT)活性在涝处理下均显著高于渍处理,涝、渍处理栽培地黄根的 CAT 活性在处理 3 d 时较处理 1 d 时大幅下降。涝、渍处理栽培地黄根过氧化物酶(POD)活性均显著高于 CK,叶的 POD 活性则始终显著低于 CK;渍处理野生地黄根、叶的 POD 活性始终显著高于 CK。随着胁迫时间和胁迫程度的增加,栽培和野生地黄根、叶的可溶性糖含量呈升高趋势。除了栽培地黄叶处理 3 d 时的涝处理,涝、渍处理栽培和野生地黄根、叶的脯氨酸含量始终显著高于 CK。涝、渍处理栽培和野生地黄叶的叶绿素含量始终显著低于 CK。涝、渍处理栽培地黄根中地黄苷 D 和梓醇含量显著低于 CK,野生地黄根则显著高于 CK(涝处理 3 d 时除外)。综上,涝、渍胁迫可改变地黄生理生化特征,影响其活性成分含量和代谢成分含量变化,野生地黄相比栽培地黄对涝、渍胁迫具有更高的抗性。

**关键词:**膨大期;地黄;涝渍胁迫;生理生化;代谢成分

**中图分类号:**S567.23<sup>+</sup>4.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)11-0118-09

地黄药材为玄参科植物地黄(*Rehmannia glutinosa* Libosch.)的新鲜或干燥块根,生地黄味甘、性寒,具有养阴生津、清热凉血的功效,用于热病伤阴、舌绛烦渴、温毒发斑、吐血、衄血、咽喉肿痛<sup>[1]</sup>,是著名的“四大怀药”之一,治疗疾病已经有数千年的应用历史。研究表明,地黄具有抗炎、提高免疫、保护肾脏、降血糖、抗炎和抗骨质疏松等药理作用,在临床上应用广泛<sup>[2]</sup>。早在 1 000 多年前,地黄就开始从野生种变为栽培种,在北魏时期的《齐民要术》就记载了“种地黄法”<sup>[3]</sup>。虽然,地黄野生种和栽培种在分类上被归为同一种植物,且它们的形态特征极为相似,但在地下块根的大小上却存在显著

差异。具体来说,栽培种的块根明显膨大,相比之下,野生种的块根则显得细小,膨大程度并不显著,适应环境广,抗性强。王露等研究发现,栽培地黄在碳水化合物、内源激素等含量方面与野生地黄存在较大的差异<sup>[4-5]</sup>。涝渍胁迫是影响植物生长发育的一种灾害现象,主要是由于长期受地下水浸渍或者地表长期滞水而造成的<sup>[6]</sup>。涝渍胁迫分为涝胁迫和渍胁迫,涝胁迫是植物被积水淹没部分或全部淹没所造成的危害,而渍胁迫是土壤含水量完全处于饱和状态下对植物造成的危害。涝渍胁迫影响全球大约 10% 的耕地面积,是农业生产的最重要限制因子之一<sup>[7]</sup>。涝渍对陆生植物有很大影响,根系由于无法得到充足的氧气供应而缺氧,缺氧状况下,植物的呼吸作用受到限制,导致能量和营养物质的供应不足,还可能产生一些有毒代谢物,从而影响植物的生长和发育。地黄喜温耐旱怕涝,适宜生长在土质疏松、光照充足、气候温和的环境中。当突如其来的洪水或连续的降雨导致地黄种植区

收稿日期:2024-06-17

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:232102310468)。

作者简介:郭晨宁(1999—),女,河南郑州人,硕士研究生,主要从事药用植物分子生物学研究。E-mail:gchening6850@163.com。

通信作者:练从龙,博士,讲师,主要从事药用植物生理生态与分子机制研究。E-mail:lian1988@hactcm.edu.cn。

域遭受严重涝灾时,这一珍贵的中药材的产量将受到极大的影响。地黄每年都会因涝害造成或多或少的损失,其中 2021 年河南“720”特大暴雨灾害,造成地黄的产量损失最为显著,产量初步估计减少 30%~40%,如此严重的损失造成地黄市场供不应求,价格不断上涨。因此,该事件发生之后引起了人们对地黄生产过程中遭受涝害胁迫问题的强烈重视。

因此,本研究以膨大期野生地黄和栽培地黄品种沁怀为供试材料,采用可控的土盆栽培模拟涝渍胁迫,探究地黄涝渍胁迫下的表型变化、生理特性及代谢变化关系,为地黄的抗逆品种选育以及地黄水淹灾后生产指导提供关键的理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

栽培地黄种质选用沁怀为试验材料,野生地黄种质采挖自野外生长的地黄,表现为块根不膨大;试验所用土壤为沙壤土,取自试验田中未种植过地黄的土壤。地黄盆栽种植选用大小相似的种质进行繁殖,试验用花盆尺寸为内径 20 cm,高 19.3 cm,栽培时土壤与盆口齐平,进行常规的栽培管理至块根膨大中期,选用长势一致的地黄进行试验处理。

### 1.2 试验方法

试验于 2023 年 10 月 19 日在河南中医药大学药用植物园进行。涝渍胁迫依据地黄在栽培过程中遇到的“渍”和“涝”问题,设置 3 个梯度,分别为对照、渍处理和涝处理。对照组:土壤含水量控制在田间持水量的 60% 左右;渍处理:土壤含水量完全处于饱和状态,并随时补充水分;涝处理:将花盆放在水箱中,根部土壤全部浸入水中,水位超过花盆口 1~2 cm,每天查看水箱内的水位情况,及时补充水分到设定的水位线。试验用水均为自来水,其他常规管理皆一致。处理后每隔 1 d 进行表型观察、指标测量和取样。不同供试材料的相同指标均在 08:30—10:30 采样,取地黄中间成熟叶片和块根用于相关指标测定,每个处理 3 次重复。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 生长形态指标的观察、测定 生长形态指标主要包括地黄植株的生长形态描述、块根活力。在处理 1 d(24 h)和 3 d(72 h)观察 3 组地黄的形态,包括其叶片卷曲或萎蔫程度,并拍照记录。块根的活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法<sup>[8]</sup>。

1.3.2 酶活生理指标的测定 处理后 1 d 和 3 d 取地黄中间成熟叶片和块根,每个处理 3 次重复。叶片游离脯氨酸(Pro)含量的测定采用茚三酮法<sup>[9]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法<sup>[9]</sup>;过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)的活性采用试剂盒(南京建成生物工程研究所)测定。

1.3.3 渗透调节物质指标测定 可溶性糖的含量采用蒽酮比色法测定,具体试验方法参考《植物生理生化实验原理和技术》<sup>[9]</sup>。

1.3.4 光合色素指标测定 光合色素包括总叶绿素、类胡萝卜素、叶绿素 a 和叶绿素 b,它们的含量采用 80% 丙酮浸提,利用紫外分光光度计比色法测定。总叶绿素含量 = 叶绿素 a 含量 + 叶绿素 b 含量。

### 1.4 地黄代谢组检测与分析

1.4.1 高效液相色谱法(HPLC)色谱条件 代谢组学的检测采用高效液相色谱仪(Waters),色谱柱为 Agilent5 TC-C18,内径为 4.6 mm,柱长 250 mm;样品放置于冻干机(Scientz-100F)中真空冷冻干燥;利用研磨仪(MM40, Retsch)研磨至粉末状;地黄苷 D 高效液相色谱法参数设定:波长为 203 nm,流动相乙腈:水体积比为 10:90;流速 1.0 mL/min;柱温:30 ℃。梓醇高效液相色谱法参数设定:波长为 210 nm,流动相乙腈:水体积比为 5:95;流速 1.0 mL/min;柱温:30 ℃。

1.4.2 地黄样品溶液与标准品溶液的制备 地黄样品制备:精确称定,置于具塞锥形瓶中,加入 25% 甲醇,称重,超声(功率 400 W,频率 50 kHz)处理 1 h,放冷,再称重,用 25% 甲醇补足减失的重量,摇匀,高速离心 10 min,取上清液滤过,取续滤液,即得。标准品溶液制备:取地黄苷 D 标准品适量,精确称定,加 25% 甲醇制成每 1 mL 含 1 mg 的溶液,即得。取梓醇标准品适量,精确称定,加流动相制成含量为 1 mg/mL 的溶液,即得。

1.4.3 样品活性成分含量测定与计算 取样品滤液,根据“1.4.1”节色谱条件分别重复进样 3 次,计算结合标准曲线,得到地黄苷 D 和梓醇的活性成分含量。

1.4.4 线性关系的考察 取地黄苷 D 标准品溶液,精确吸取适量溶液于容量瓶中,经 25% 甲醇稀释,配制成浓度分别为 31.33、62.67、125.30、188.00、251.00、313.30、470.00 mg/L 的标准液;精

确称取梓醇标准品,依次制成 35、350、700、1 400、2 100、2 800、3 500 mg/L 的标准液,浓度由低到高进行测定。以峰面积为纵坐标,质量浓度为横坐标进行线性回归。

1.4.5 重复性考察 平行制备 6 份样品溶液,计算各活性成分峰面积的相对标准偏差(RSD)值。

1.4.6 精密度试验 取供试品溶液,连续进样 6 次。计算各活性成分峰面积 RSD 值。

1.4.7 稳定性试验 取样品溶液,在制备后 0、2、4、6、8、10、12、24 h 分别进行测定。计算地黄苷 D 和梓醇峰面积的 RSD 值。

1.4.8 加样回收率试验 取 6 份已知含量的相同样品,每份 0.1 g,再精确加入适量地黄苷 D、梓醇标

准品,按照“1.4.1”节色谱条件测定并计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 生长形态指标的观察、测定

2.1.1 涝渍胁迫对地黄植株形态的影响 由图 1 可知,野生地黄经过涝渍处理后 1 d 叶片无明显变化,涝处理叶片相较于 CK 和渍处理叶片褪绿变黄;处理 3 d 后,渍处理叶片有少许变黄、腐烂,涝处理叶片明显变黄,且有少量枯叶腐烂掉落。栽培地黄经过涝渍处理 1 d 后,渍处理相较于 CK 变化不大,涝处理与 CK 相比,叶子卷曲、腐烂;处理 3 d 后,有多片叶片卷曲腐烂。



图1 地黄涝渍胁迫后植株形态的变化

2.1.2 涝渍胁迫对地黄根系活力的影响 根系是植物吸收运输水分和养分的器官,是体现植物生长活跃度的重要指标<sup>[10]</sup>。由图 2 可知,栽培地黄的根系活力随着涝渍胁迫时间的延长而下降,涝处理的降幅明显高于渍处理;处理 1 d 时,栽培地黄渍处理和涝处理的根系活力相较于 CK 分别显著下降 22.02% 和 27.27% ( $P < 0.05$ );处理 3 d 时,渍处理和涝处理根系活力分别较处理 1 d 时下降 26.79% 和 39.06%,相较于 CK 显著下降 44.55% 和 56.96%。处理 1 d 时,野生地黄渍处理和涝处理相较于 CK 根系活力分别上升 22.32% 和下降 40.59%;渍处理和涝处理 3 d 时的根系活力较处理 1 d 时分别上升 72.50% 和下降 18.14%,较于 CK 分别显著上升 149.41% 和显著下降 29.68%。说明涝渍胁迫会严重影响栽培地黄根系的生长发育,而适当的渍处理则会使野生地黄根系活力增加;栽培

地黄的根系相对于野生地黄的根系来说抗涝渍能力较弱。

### 2.2 涝渍胁迫对地黄酶活生理指标的影响

2.2.1 超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化 SOD 是广泛存在于植物、动物和微生物体内的一种清除超氧阴离子自由基的酶,是清除 ROS 的第一道防线,催化超氧化物的歧化反应<sup>[11]</sup>。SOD 的活性与植物抗逆性存在密切的联系,并且它的调节受到外源激素的影响<sup>[12]</sup>。从图 3 可以看出,随着胁迫时间的延长,野生地黄与栽培地黄 SOD 活性呈现逐渐上升的变化趋势,涝处理的 SOD 活性显著高于渍处理。其中,处理 3 d 时,涝处理栽培地黄根的 SOD 活性相较于 CK 显著上升 146.92%,涨幅最高。

2.2.2 过氧化氢酶(CAT)活性测定 CAT 是清除植物代谢过程中产生的过氧化氢,从而保护植物细胞的一种酶<sup>[13]</sup>。由图 4 可知,栽培地黄叶随着胁迫

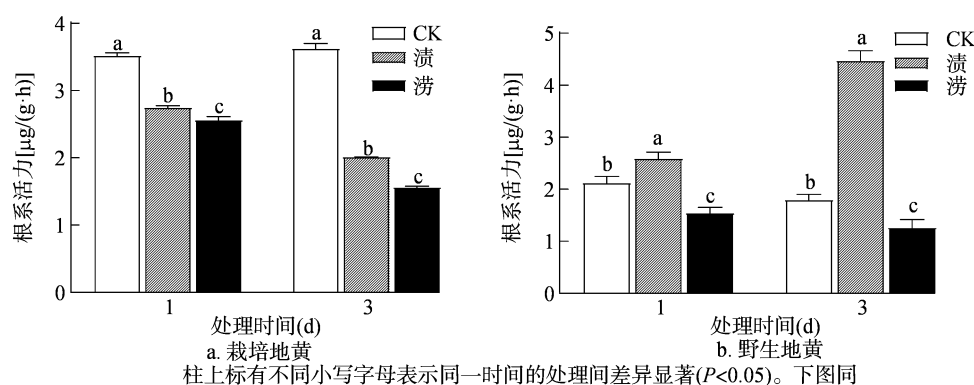


图2 涝渍胁迫对地黄根系活力的影响

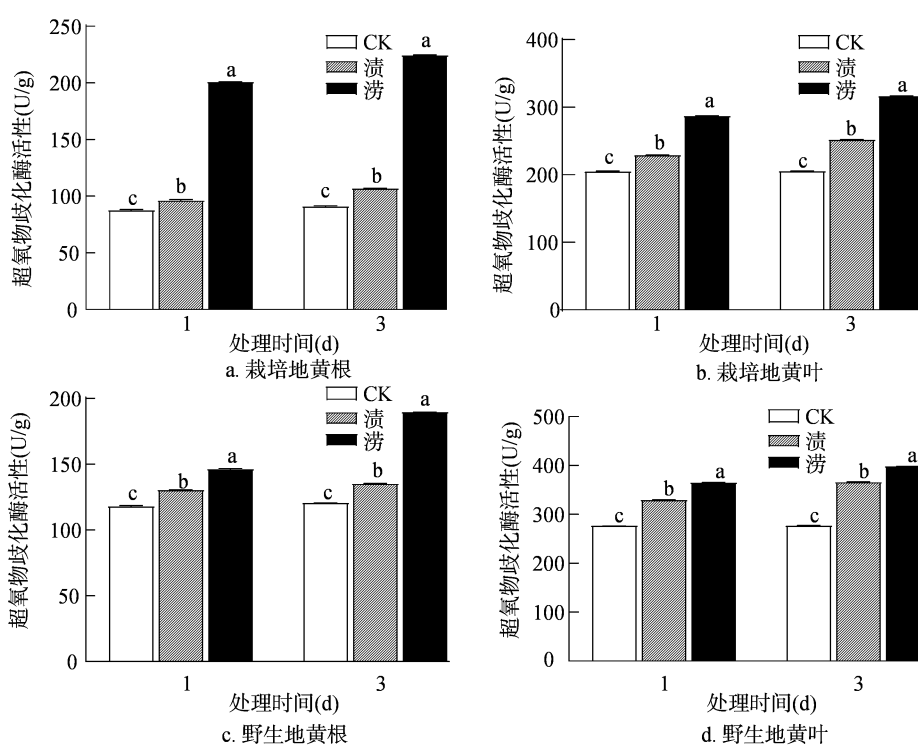


图3 涝、渍胁迫对地黄 SOD 活性的影响

程度的加深, CAT 活性均呈下降趋势。野生地黄根中随着胁迫时间的延长和程度的加深, CAT 活性呈现逐渐上升的趋势。野生地黄叶渍处理和涝处理 1 d 的 CAT 活性较 CK 呈现显著下降趋势; 涝处理 3 d 的 CAT 活性较 CK 显著上升, 增幅为 93.88%, 而渍处理则显著下降。

2.2.3 过氧化物酶(POD)活性测定 POD 是维持细胞结构完整性的氧化还原酶, 广泛存在于植物体内, 主要作用为增强细胞的抗衰老能力以及对抗逆境胁迫<sup>[14]</sup>。由图 5 可知, 栽培地黄根渍处理和涝处理的 POD 活性均显著高于 CK, 渍处理 1 d 的涨幅最大, 较 CK 显著增加 82.29%。栽培地黄叶随着涝渍处理时间的延长, POD 活性有所增加。处理 1 d

时, 野生地黄根涝处理的 POD 活性最高, 而处理 3 d 时则是渍处理最高, 较 CK 显著增加 106.62%。野生地黄叶经涝渍胁迫后, 渍处理 POD 活性呈现显著上升趋势, 处理 1、3 d 分别较 CK 增加 22.34%、27.54%。

### 2.3 涝渍胁迫对地黄渗透调节物质的影响

2.3.1 可溶性糖含量测定 可溶性糖是植物体内可利用碳水化合物之一, 可溶性糖的含量在一定程度上反映植物的碳代谢水平<sup>[15]</sup>。由图 6 可知, 栽培地黄根和野生地黄的根、叶随着涝、渍胁迫时间的延长和胁迫程度的加深, 可溶性糖含量均呈现上升趋势。处理 1 d 时, 栽培地黄根渍、涝处理的可溶性糖含量较 CK 分别显著上升 6.48%、19.61%; 渍处理和涝处理 3 d 时相较于 1 d 分别上升 0.30%、

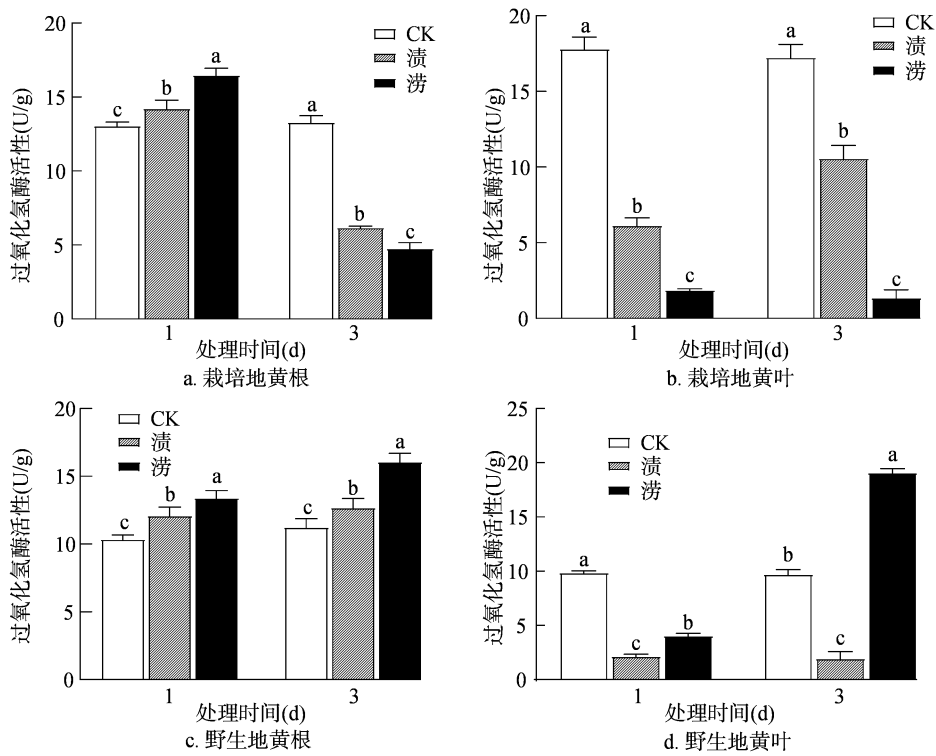


图4 涝、渍胁迫对地黄 CAT 活性的影响

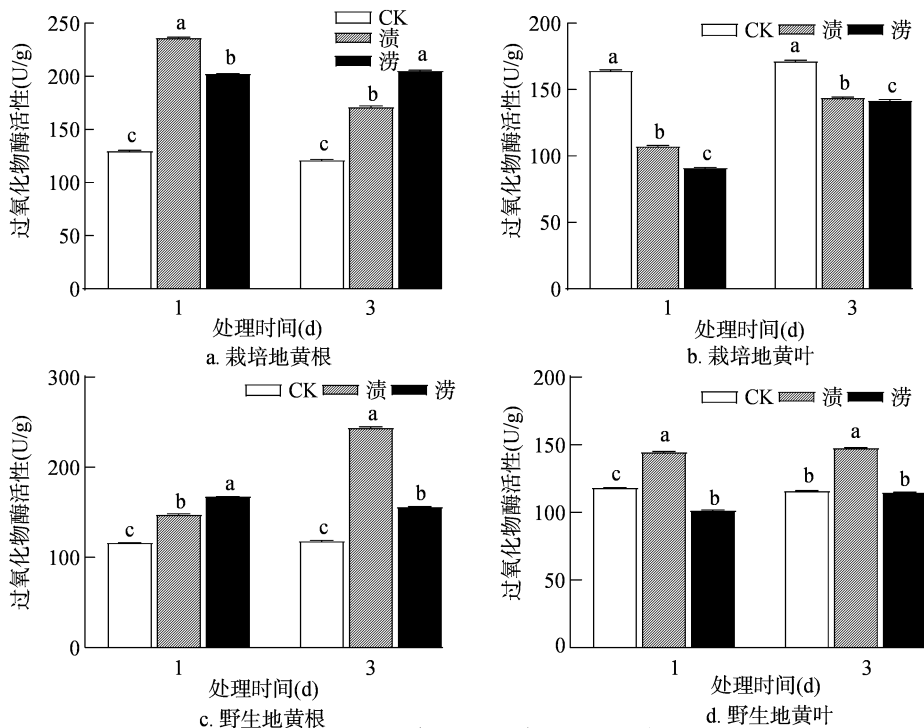


图5 涝渍胁迫对地黄 POD 活性的影响

4.96% ;栽培地黄叶涝处理 1 d 时相较于 CK 显著增加 27.85% ,处理 3 d 相较于处理 1 d 增加 2.62% ;渍处理 1、3 d 与 CK 均无显著差异。野生地黄根渍处理和涝处理 1 d 的可溶性糖含量相较于 CK 分别

显著增加 15.04% 和 19.32% ,处理 3 d 的可溶性糖含量相较于 1 d 分别增加 1.04% 和 3.15% 。野生地黄叶渍处理和涝处理 1 d 相较于 CK 分别显著增加 7.46% 和 41.18% ,处理 3 d 相较于处理 1 d 可溶

性糖含量分别升高 14.60% 和 2.74%。总体来看,根的可溶性糖含量大于叶。综上可知,当胁迫发生

时,地黄能通过积累可溶性糖的含量来抵抗涝、渍胁迫<sup>[15]</sup>。

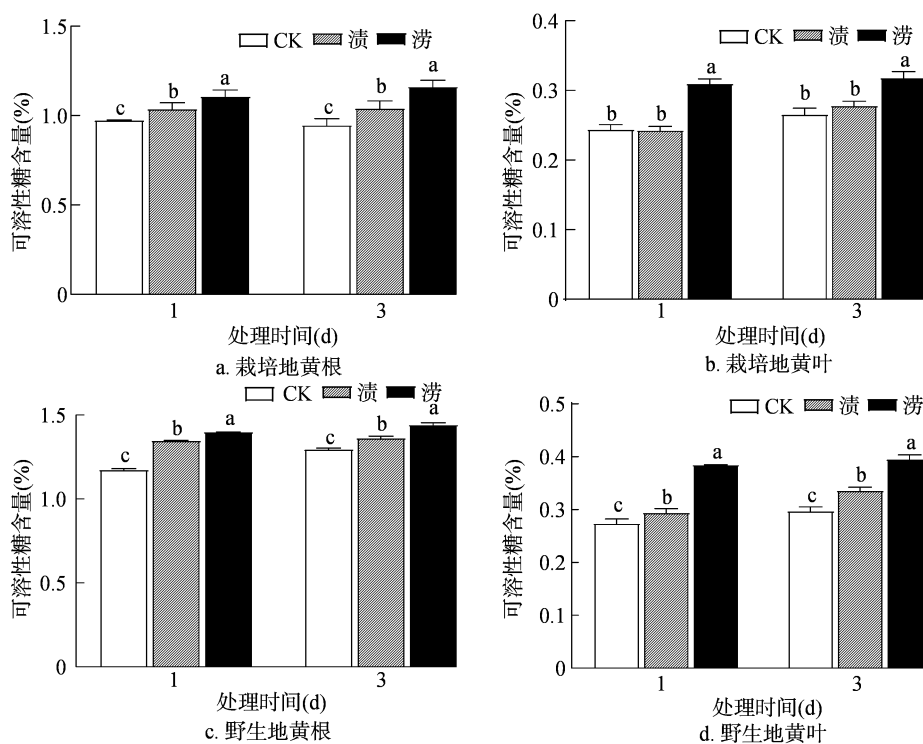


图6 涝、渍胁迫对地黄可溶性糖含量的影响

2.3.2 脯氨酸(Pro)含量测定 Pro 是环境胁迫条件下细胞内的保护物质,其含量与多数植物的胁迫耐受能力呈正相关关系<sup>[16]</sup>。由图 7 可知,栽培地黄根经涝、渍处理 1 d 后 Pro 含量较 CK 显著增加,处理 3 d 时渍处理的 Pro 含量最高,较 CK 显著增加 117.37%。栽培地黄叶经涝、渍处理 1 d 后 Pro 含量显著上升,其中涝处理含量最高,较 CK 增加 156.26%,涝处理 3 d 的 Pro 含量较处理 1 d 下降 72.59%。野生地黄根和野生地黄叶随着涝、渍胁迫时间的延长和程度的加深,Pro 含量呈现逐渐上升的趋势。

#### 2.4 涝、渍胁迫对地黄光合色素指标的影响

叶绿素是植物进行光合作用的必要组成,叶绿素的缺乏将会导致植物光合能力下降,不利于植物生长发育。由图 8 可知,随着胁迫时间的延长,栽培地黄叶的叶绿素含量在渍胁迫、涝胁迫处理下均逐渐降低;而野生地黄叶的叶绿素含量却逐渐升高。涝处理下,野生地黄叶的叶绿素含量明显高于栽培地黄叶。与 CK 相比,涝、渍处理的地黄叶叶绿素含量均显著降低,说明在涝渍逆境胁迫下,叶绿素遭到了大量破坏,其含量显著下降。

#### 2.5 涝、渍胁迫对地黄代谢活性成分含量的影响

##### 2.5.1 线性考察 地黄活性成分标准曲线如表 1

所示,地黄苷 D 与梓醇回归方程均满足  $r^2 > 0.999$ ,表明在线性范围内地黄苷 D、梓醇含量与标准液浓度呈现良好的线性关系。

2.5.2 重复性考察 平行制备 6 份样品溶液,地黄苷 D、梓醇 RSD 值分别为 2.15%、1.14%,表明本方法重复性好。

2.5.3 稳定性试验 取样品溶液,在制备后 0、2、4、6、8、10、12、24 h 分别进行测定。计算出地黄苷 D 和梓醇峰面积的 RSD 值分别为 1.21%、1.58%。表明样品在 24 h 内基本稳定。

2.5.4 精密度试验 取供试品溶液,连续进样 6 次。计算得到地黄苷 D、梓醇峰面积 RSD 值分别为 2.25%、1.72%,表明仪器精密度良好。

2.5.5 加样回收率试验 地黄中活性成分加样回收率见表 2,地黄苷 D 和梓醇平均回收率分别为 100.45% 和 100.15%,RSD 值分别为 0.21% 和 0.36%,表明该方法准确可靠。

2.5.6 地黄样品活性成分含量 由图 9 可知,渍处理和涝处理后,经 HPLC 测定发现,地黄中代谢活性成分地黄苷 D 与梓醇含量的变化趋势总体类似。栽培地黄根中,涝渍胁迫后的地黄苷 D 和梓醇含量与 CK 相比均显著降低。野生地黄根与栽培地黄根

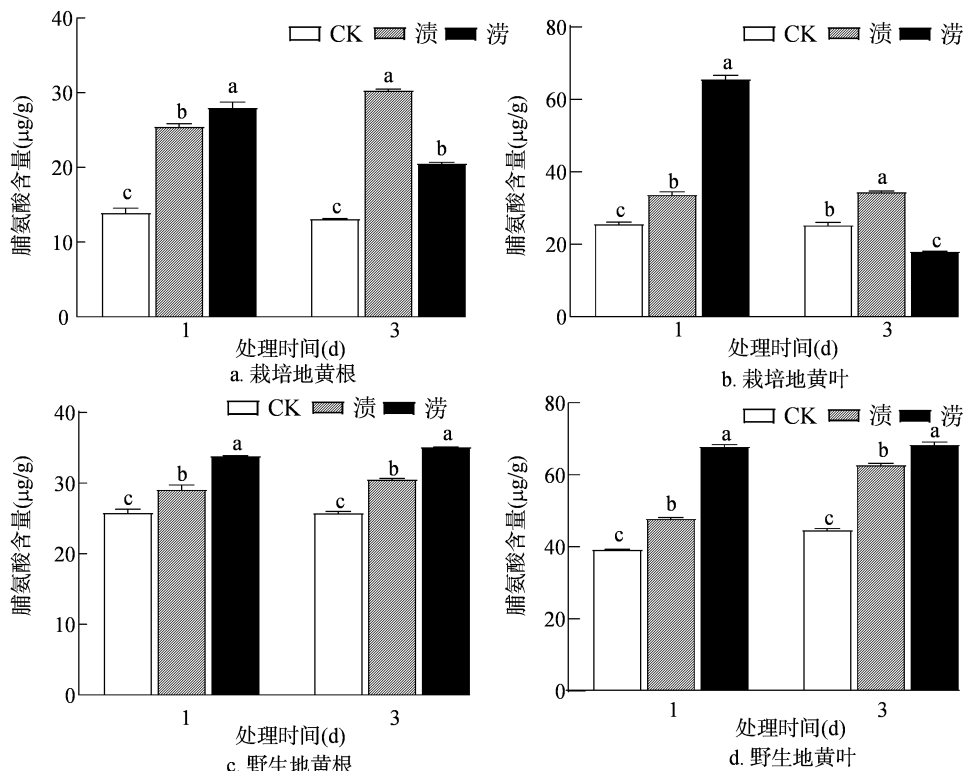


图7 涝、渍胁迫对地黄 Pro 含量的影响

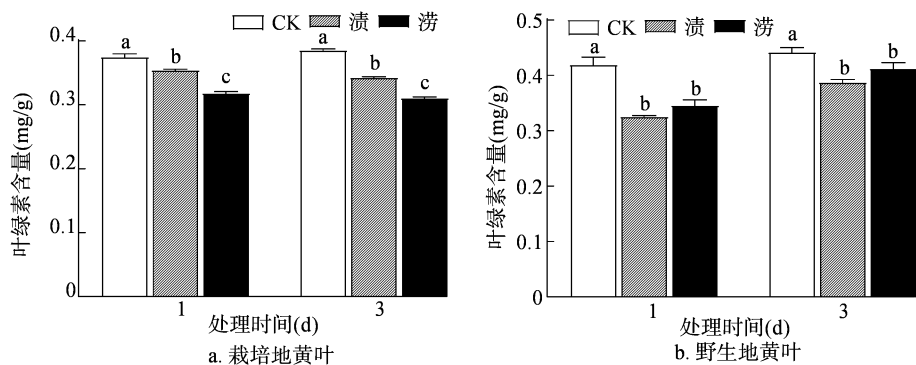


图8 涝、渍胁迫对地黄叶绿素含量的影响

表 1 地黄活性成分回归方程

待测组分	回归方程	$r^2$	线性范围 (mg/L)
地黄苷 D	$y = 4 \times 10^6 x - 8160.6$	0.999 1	31.33 ~ 470.00
梓醇	$y = 3 \times 10^6 x + 83081$	0.999 2	35 ~ 3500

趋势相反,在胁迫后呈现含量显著上升的趋势(涝处理 3 d 除外)。栽培地黄叶中,地黄苷 D 和梓醇的含量与 CK 相比呈现显著上升趋势,但处理 3 d 与处理 1 d 相比含量下降。野生地黄叶中地黄苷 D 含量与 CK 相比均呈显著上升趋势,但渍处理 3 d 的含量与处理 1 d 相比上升,涝处理含量则下降;梓醇含量涝、渍处理相较于 CK 呈现上升趋势,涝处理 1、3 d

显著高于相应渍处理。

### 3 讨论

涝渍胁迫是影响植物生长发育及农业生产的重要逆境胁迫方式之一,涝渍下植物体内活性氧清除酶系统活性下降,膜脂过氧化产物增多,氧化压力升高,植物衰老加快是植物遭受涝害的表现之一<sup>[17-19]</sup>。植物遭受涝渍逆境胁迫后为了适应生长,其自身表现形态、生理生化指标及代谢成分都会有相应的变化<sup>[20]</sup>。涝、渍胁迫下,野生地黄与栽培地黄根、叶的 SOD 活性较 CK 显著增加,涝处理相对于渍处理也显著增加。栽培地黄根和野生地黄根的 POD 活性涝、渍处理显著高于 CK,随着胁迫时间的

表 2 地黄活性成分加样回收率

成分	样品含量 (mg/g)	加入量 (mg/g)	测得量 (mg/g)	回收率 (%)	平均回收率 (%)	RSD (%)
地黄苷 D	2.043 2	2.0432	4.10	100.38	100.45	0.21
	2.043 5	2.043 2	4.10	100.35		
	2.043 1	2.043 2	4.09	100.16		
	2.043 3	2.043 2	4.13	101.06		
	2.043 2	2.043 2	4.11	100.67		
	2.043 3	2.043 2	4.09	100.05		
梓醇	1.776 9	1.776 5	3.55	100.13	100.15	0.36
	1.776 5	1.776 5	3.55	100.08		
	1.776 6	1.776 5	3.57	100.48		
	1.776 9	1.776 5	3.56	100.24		
	1.776 8	1.776 5	3.54	99.84		
	1.776 9	1.776 5	3.55	100.11		

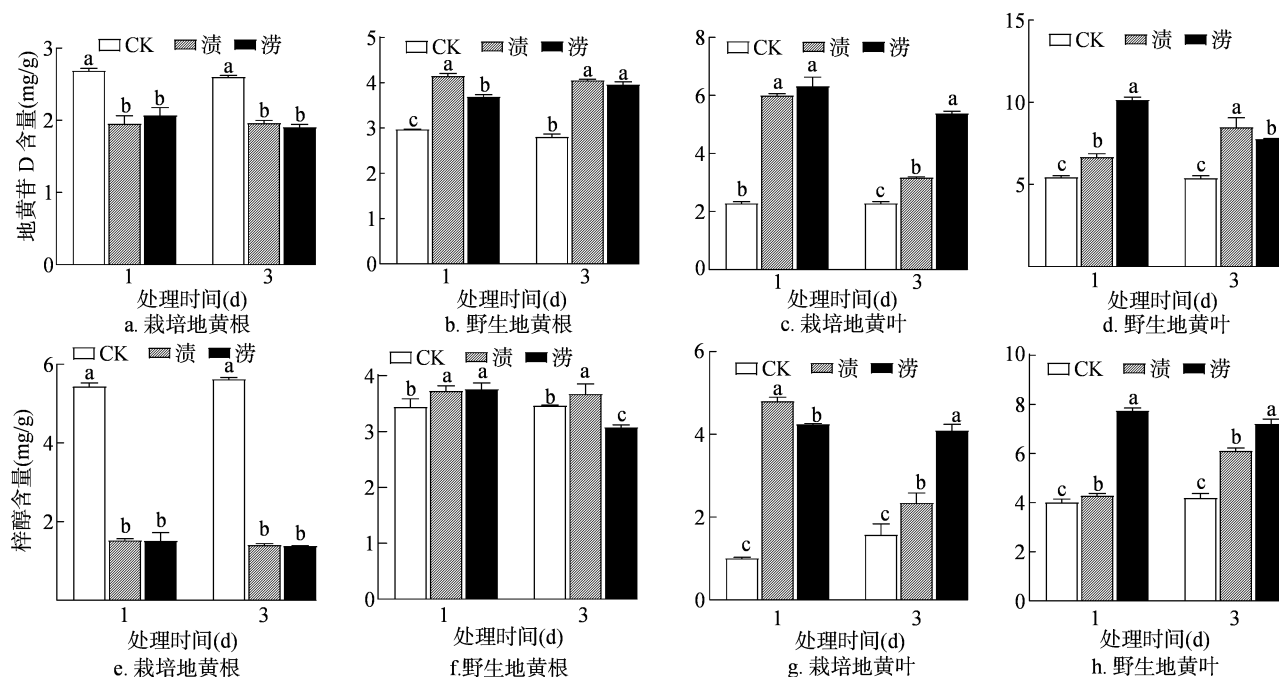


图9 涝、渍胁迫对地黄中代谢活性成分含量的影响

延长,栽培地黄根渍处理 POD 活性有所下降;栽培地黄叶涝、渍处理的 POD 活性小于 CK;野生地黄叶渍处理 1、3 d 的 POD 活性均显著高于相应涝处理。野生地黄根、叶涝处理的 CAT 活性显著高于渍处理,栽培地黄根在处理 1 d 时随着胁迫程度的加深, CAT 活性呈现逐渐上升的趋势,而在处理 3 d 时呈现不断下降的趋势,栽培地黄叶随胁迫程度加深, CAT 活性不断下降。这与方文对红花玉兰的研究结果<sup>[21]</sup>一致。综上所述,植物在受到胁迫后,会启动自身保护机制。在这个过程中,植物体内的

POD、SOD、CAT 等酶会配合作用,共同清除因胁迫而产生的活性氧,以减少膜系统的损伤,进而增强植物的抗涝性。并且这种抗氧化酶的活性随着地黄抗涝渍能力的大小而改变,由这些抗氧化酶活性变化得出,野生地黄抗涝渍能力明显大于栽培地黄。

渗透调节是植物在面对逆境胁迫时采取的一种关键自我防护机制。可溶性糖和脯氨酸作为植物细胞内的重要渗透调节物质,在细胞内大量积累能维持细胞较高的渗透压,有助于稳定质膜结构,增强细胞的耐脱水能力,从而提高植物对逆境胁迫

的耐受性<sup>[22-23]</sup>。栽培地黄根、叶以及野生地黄根、叶随着涝胁迫、渍胁迫时间的延长,可溶性糖含量均呈现上升的趋势,这与周鑫等关于桢楠幼树的研究结果<sup>[24]</sup>一致。栽培地黄根和叶涝处理 3 d 时脯氨酸含量都有所降低。以上结果表明,栽培地黄抗涝能力弱于野生地黄。

叶绿素是植物进行光合作用不可或缺的组成部分,若植物体内叶绿素含量不足,将会严重削弱其光合能力,从而对植物的生长发育产生不利影响。野生地黄和栽培地黄叶绿素含量随着胁迫程度的加深和时间的延长不断降低,刘晓慧等研究发现,涝、渍胁迫也会导致丝瓜幼苗叶绿素含量显著下降<sup>[15]</sup>。

地黄苷 D 和梓醇是地黄中重要的活性成分,经 HPLC 测定发现,经涝渍处理后,栽培地黄根中地黄苷 D 和梓醇含量显著低于 CK,而野生地黄根中含量显著高于 CK(涝处理 3 d 除外),渍胁迫含量最高。涝、渍处理栽培地黄叶和野生地黄叶的地黄苷 D 含量、梓醇含量均显著高于 CK。野生地黄的活性成分含量高于栽培地黄。以上含量变化表明,栽培地黄涝渍胁迫后活性成分含量减少,可能是本研究的胁迫已经超出了地黄的适宜逆境;而对野生地黄来说,涝渍胁迫能提高其活性成分含量,表明适当的逆境胁迫可以提高地黄中药活性成分的含量。

#### 4 结论

本研究初步探索地黄在涝、渍胁迫下的生理响应机制,其中,SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、脯氨酸含量等指标结果显示,野生地黄抗涝渍能力明显大于栽培地黄;经 HPLC 测定,栽培地黄在涝渍胁迫下地黄苷 D 与梓醇含量整体呈下降趋势而野生地黄呈上升趋势,且野生地黄含量高于栽培地黄。总体上,野生地黄相比栽培地黄对涝渍胁迫具有更高的抗性,但为了更深入地揭示地黄响应涝渍胁迫的根本原因,还需从分子层面进行深入研究,为地黄筛选抗涝渍的分子育种策略奠定科学基础。

#### 参考文献:

[1] 国家药典委员会. 中国药典[M]. 北京: 中医药科技出版社, 2020.  
 [2] 陈金鹏, 张克霞, 刘毅, 等. 地黄化学成分和药理作用的研究进展[J]. 中草药, 2021, 52(6): 1772 - 1784.  
 [3] (北魏) 贾思勰原著, 缪启愉校释. 齐民要术校释[M]. 北京: 农

业出版社, 1982.  
 [4] 王露, 刘燕, 孙虹, 等. 地黄野生种与栽培品种碳水化合物含量变化的比较研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(31): 147 - 153.  
 [5] 李先恩, 孙鹏, 祁建军, 等. 地黄栽培种与野生种内源激素含量的差异[J]. 作物学报, 2013, 39(7): 1276 - 1283.  
 [6] 苏慧. 受淹胁迫对作物生长的影响及其排水调控研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.  
 [7] Setter T L, Waters I. Review of prospects for germplasm improvement for waterlogging tolerance in wheat, barley and oats[J]. Plant and Soil, 2003, 253(1): 1 - 34.  
 [8] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.  
 [9] 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, 2000.  
 [10] 宋雨蒙, 李素艳, 孙向阳. 复合增氧剂对建兰水培苗生长及生理特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 115 - 123.  
 [11] 魏婧, 徐畅, 李可欣, 等. 超氧化物歧化酶的研究进展与植物抗逆性[J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2571 - 2584.  
 [12] 侯小进, 张梦, 刘克帅, 等. 低温处理对桃种子贮藏物质及抗氧化酶活性的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2024, 52(1): 9 - 15.  
 [13] 张俊杰, 蔡长春, 曹景林, 等. 紫外分光光度法测定烟苗过氧化氢酶活性[J]. 亚热带资源与环境学报, 2023, 18(4): 27 - 33.  
 [14] 黄梦真, 柴亚倩, 关思慧, 等. 两个石榴品种对低温的生理生化响应[J]. 果树学报, 2024, 41(6): 1150 - 1159.  
 [15] 刘晓慧, 伍海兵, 张圣美, 等. 淹水胁迫对丝瓜幼苗生长及呼吸酶活性的影响[J]. 江西农业学报, 2020, 32(3): 48 - 54.  
 [16] 罗爱华, 李文甲. 干旱胁迫对番茄扦插苗叶片丙二醛、脯氨酸含量及保护酶活性的影响[J]. 园艺与种苗, 2018, 38(2): 17 - 20, 49.  
 [17] 汪宗立, 刘晓忠, 李建坤, 等. 玉米的涝渍伤害与膜脂过氧化作用和保护酶活性的关系[J]. 江苏农业学报, 1988, 4(3): 1 - 8.  
 [18] 李建坤, 汪宗立, 王志霞. 活性氧清除剂对受渍玉米叶片保护酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 1991, 7(3): 23 - 28.  
 [19] Chen L Z, Wang W Q, Lin P. Photosynthetic and physiological responses of *Kandelia candel* L. Druce seedlings to duration of tidal immersion in artificial seawater[J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 54(3): 256 - 266.  
 [20] 张晓燕. 涝渍胁迫对白蜡、枫杨和黄连木生长与生理的影响[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 96 - 100.  
 [21] 方文. 水涝胁迫对红花玉兰幼苗生长和生理特性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.  
 [22] 杨华庚, 黎彬, 李娜, 等. 胡椒扦插苗对涝渍胁迫的生理响应[J]. 生物技术进展, 2023, 13(4): 565 - 574.  
 [23] 李小玲, 华智锐. 温度与水分胁迫下黄芩的渗透调节能力与交叉关系研究[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(21): 162 - 168.  
 [24] 周鑫, 喻秀艳, 张昭昇, 等. 涝渍胁迫对桢楠幼树不同功能根系生理生化特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 95 - 103.