

武欣怡,陈顺钰,朱晨璐,等. 酸胁迫对马尾松种子萌发不同时期体内渗透调节物质和酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(19):156-163.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.19.024

# 酸胁迫对马尾松种子萌发不同时期体内渗透调节物质和酶活性的影响

武欣怡<sup>1</sup>, 陈顺钰<sup>1</sup>, 朱晨璐<sup>1</sup>, 黄偲祺<sup>1</sup>, 李启艳<sup>1</sup>, 侯晓龙<sup>1,2,3</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福建福州 350002; 2. 南方红壤区水土保持国家林业和草原局重点实验室, 福建福州 350002;  
3. 海峡两岸红壤区水土保持协同创新中心, 福建福州 350002)

**摘要:**为揭示马尾松能在土壤酸化的稀土矿废弃地生长和更新的适应机理,以马尾松种子为试验材料,设计不同 pH 值(5.5、4.5、3.5)酸胁迫试验,测定酸胁迫下马尾松种子萌发、胚根胚芽生长、体内渗透调节物质和酶活性等指标,并采用隶属函数法进行综合评价。结果表明,马尾松种子各萌发指标均随 pH 值降低呈减小趋势,但 pH 值 3.5 和 pH 值 4.5 对发芽率、发芽势和发芽指数无显著影响,pH 值 5.5 对发芽率和发芽指数有显著促进作用,pH 值 3.5 对活力指数有显著抑制作用;不同酸胁迫处理均显著抑制马尾松胚根伸长,但 pH 值 5.5 及 pH 值 4.5 对胚芽和胚根鲜质量有促进作用;随 pH 值降低,露白期马尾松种子可溶性蛋白含量呈降低趋势,且显著小于对照,但发芽期则与对照无显著差异;露白期和发芽期马尾松种子的脯氨酸和可溶性糖呈增加趋势,且 pH 值 3.5 时露白期和 pH 值 4.5 时发芽期脯氨酸含量显著大于对照;露白期马尾松种子体内 POD 活性随 pH 值降低先升后降,而 MDA 含量则相反;露白期和发芽期 CAT 和 SOD 活性均随酸胁迫程度增强逐渐增加;隶属函数值随 pH 值降低先增后减,仅 pH 值 3.5 时小于对照。综上,马尾松种子对酸胁迫有较强耐性,脯氨酸、可溶性糖及 CAT 和 SOD 活性在马尾松种子适应酸胁迫上起到了重要作用。

**关键词:**马尾松;酸胁迫;萌发生长;抑制指数;隶属函数值

**中图分类号:**Q945.78;X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)19-0156-07

土壤酸化是世界各国普遍关注的重要土地退化问题之一<sup>[1]</sup>,我国南方红壤土因土壤本身性质及强淋溶作用的影响,碱性盐基离子不断淋失,土壤不断酸化<sup>[2]</sup>。各类资源的开采,特别是一些金属矿的开采,进一步加剧了土壤酸化问题,其中,福建省长汀县离子型稀土矿开采和冶炼过程中投入过量过酸的浸取剂和沉淀剂,造成土壤酸化严重,一般植物无法正常生长<sup>[3]</sup>。因此,长汀矿区废弃地的生态修复成为当地急需解决的问题。

在前期开展长汀县稀土矿废弃地植被恢复的研究过程中发现,马尾松可正常生长,在废弃地植被恢复中发挥了重要作用,而且在恢复过程中出现天然更新的马尾松幼苗( $0 < \text{基径} \leq 5 \text{ mm}$ )<sup>[4]</sup>,说明

马尾松种子对稀土矿废弃地的酸性土壤有一定耐受性,且可在酸胁迫逆境下完成繁殖更新,这对酸性土壤中植被恢复效果的维持具有十分重要的意义<sup>[5]</sup>。研究发现,枫香(*Liquidambar formosana*)种子对酸化土壤有较强耐性,pH 值 5.5 和 pH 值 4.5 处理有利于种子的萌发和幼苗的生长<sup>[6]</sup>;pH 值范围在 6.0~7.5 最适合半夏(*Pinellia ternata*)种子萌发、生长,不同的 pH 值(3.0、4.5、6.0、7.5、9.0)处理对半夏最终的萌发率无显著影响<sup>[7]</sup>。植物渗透调节物质和抗氧化酶活性在其适应逆境胁迫方面发挥了重要作用,夏枯草(*Prunella vulgaris*)幼苗对酸性环境有较强耐受性,根系 APX 抗氧化酶以及叶片中渗透调节物质含量的提高可减少酸胁迫的伤害<sup>[8]</sup>;宽叶雀稗种子萌发初期的 POD 活性和萌发中期的 CAT、SOD 活性增加减小了酸胁迫对细胞的伤害,在其适应酸胁迫中发挥了重要作用<sup>[9]</sup>;类芦(*Neyraudia reynaudiana*)种子体内 POD 和 CAT 活性在弱酸条件下(pH 值 5.6、5.0、4.5)增强,SOD 活性在 pH 值 3.5 条件下有所增加,有利于类芦适应酸胁迫环境<sup>[10]</sup>;酸胁迫条件下,柑橘砧木体内脯氨酸含量增加,维持了其细胞质酸度,有效增强柑橘砧

收稿日期:2021-11-11

基金项目:福建省自然科学基金(编号:2019J0007);国家自然科学基金(编号:31901298);福建农林大学科技创新专项基金(编号: CXZX2020143C、71202103D)。

作者简介:武欣怡(1997—),女,山西晋中人,硕士研究生,主要从事土壤污染研究。E-mail:wxybaw97@163.com。

通信作者:侯晓龙,博士硕士生,副教授,主要从事生态修复研究。  
E-mail:xl.hou@fafu.edu.cn。

木对酸胁迫的耐性<sup>[1]</sup>。但目前关于马尾松种子萌发过程对酸胁迫的适应机制尚不清楚。

鉴于此,本研究以马尾松种子作为试验材料,设计不同的 pH 值(5.5、4.5、3.5)对马尾松种子进行酸胁迫试验,测定马尾松种子萌发、生长、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性等指标,分析马尾松种子萌发对酸胁迫的适应机理,从而为土壤酸化离子型稀土矿废弃地的植被恢复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用马尾松种子采购自江西省九江市庐山南麓,4℃冰箱储存备用。挑选成熟饱满且大小均匀的种子在浓度为 0.3% 的  $\text{KMnO}_4$  溶液中消毒 30 min,去离子水反复冲洗干净,并浸种 24 h,将表面的杂质、劣质种子除去,剩下的优质种子用于试验。

### 1.2 试验设计

根据长汀县离子型稀土矿废弃地土壤实际的酸化水平,即土壤 pH 值基本处于 4.05~5.83 范围内<sup>[8]</sup>,设计不同水平的酸胁迫模拟实际土壤的酸污染程度,不同的 pH 值溶液采用  $\text{CH}_3\text{COOH}$  调节配制,分别为对照(以去离子水为对照组)和 pH 值 5.5、4.5、3.5,用 CK、pH5.5、pH4.5、pH3.5 表示。

2020 年于福建农林大学田家炳实验楼进行种子萌发和生理特性测定试验,人工气候箱设置温度为 25℃,空气相对湿度 70%,日光照 14 h,光照度 10 000 lx,黑暗 10 h。在每个玻璃培养皿中铺设直径 9 cm 的滤纸并高温灭菌,然后加入酸胁迫液并放入 50 粒大小均匀的马尾松种子。每个处理设置 6 个重复,其中 3 个重复用来测定马尾松种子萌发的形态学和生物量指标,3 个重复用来测定萌发过程的渗透调节物质含量,每天做好种子萌发情况记录。以马尾松种子形态变化为依据,将种子发芽分为露白期(胚根开始突破种皮的种子)、发芽期(胚根长度为 1~2 cm 的种子)以及未萌发(连续 3 天不发芽即萌发期结束,为未萌动的种子)3 个阶段<sup>[11-12]</sup>。3 个阶段种子各取 0.2 g 用于抗氧化酶活性及丙二醛(MDA)含量的测定,0.1 g 用于脯氨酸、可溶性蛋白及可溶性糖含量的测定。

### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 种子萌发指标 在萌发结束后计算发芽相关指标,计算公式<sup>[13]</sup>如下:发芽率=(萌发种子数/供试验种子总数)×100%;发芽势=(发芽高峰期

发芽种子数/供试验种子总数)×100%;发芽指数( $GI$ )= $\sum G_t/D_t$ ;活力指数( $VI$ )= $GI \times g$ 。式中: $G_t$ 代表在第  $t$  天的萌发数; $D_t$ 代表相应的萌发天数, $g$ 代表胚芽长+胚根长。

1.3.2 种子萌发生长指标 马尾松种子萌发结束后,从每个玻璃培养皿中选取 10 株长势基本一致的马尾松,参照张爱敏等的方法<sup>[14]</sup>测量出其胚根、胚芽长,快速用电子天平称量马尾松的胚根与胚芽鲜质量,然后将其放入烘箱中 105℃杀青 30 min,以 80℃烘干至恒质量,称其干质量。

1.3.3 渗透调节物质含量 丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法<sup>[15]</sup>;脯氨酸含量的测定采用茚三酮比色法<sup>[16]</sup>;可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝法,可溶性糖含量的测定采用蒽酮比色法<sup>[17]</sup>。

1.3.4 抗氧化酶活性 抗氧化酶活性的测定参照梁俊的方法<sup>[18]</sup>。其中,过氧化氢酶(CAT)活性采用过氧化氢紫外分光光度法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光化还原法测定。

### 1.4 数据处理

试验数据经过收集整理后,采用 SPSS 21.0 软件对各指标利用单因子方差分析(One-way ANOVA)和多重比较法进行统计分析,并对数据进行差异显著性分析( $\alpha=0.05$ ,Tukey-HSD 法)。采用 Origin 2017 软件作图。

采用模糊数学隶属函数法<sup>[11]</sup>对马尾松种子萌发及幼苗生长各个指标进行综合评价,其计算公式如下:

当指标与抗逆性呈正相关时: $A_i' = (A_i - A_{\min}) / (A_{\max} - A_{\min})$ ;

当指标与抗逆性呈负相关时: $A_i' = 1 - (A_i - A_{\min}) / (A_{\max} - A_{\min})$ ;

$M = \sum A_i'$ 。

式中: $A_i'$ 代表马尾松种子萌发和生长  $i$  指标的隶属函数值; $A_i$ 代表马尾松种子萌发及生长  $i$  指标的测定值; $A_{\max}$ 代表马尾松种子萌发及生长  $i$  指标的最大值; $A_{\min}$ 代表马尾松种子萌发及生长  $i$  指标的最小值; $M$ 代表各个测定指标的综合隶属函数值。

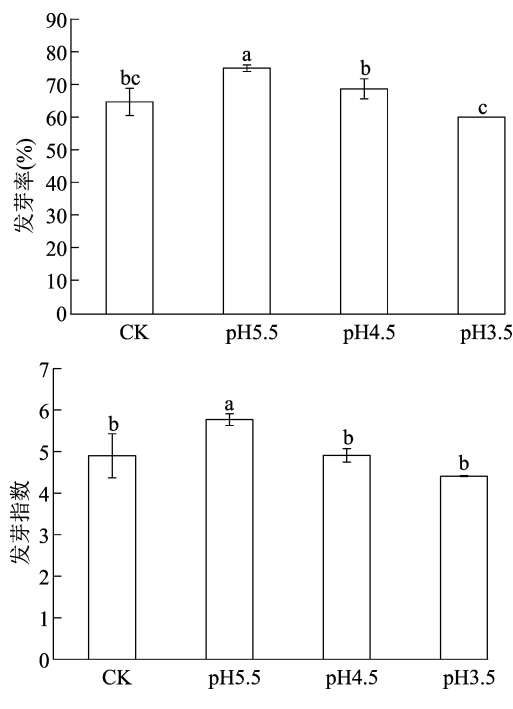
隶属函数值越大,说明酸胁迫对马尾松种子萌发及幼苗生长促进作用越强;数值越小,说明酸胁迫对马尾松种子萌发和幼苗生长抑制作用越强。且本试验测定的马尾松种子萌发及幼苗生长指标

只有 MDA 和脯氨酸与耐酸性呈负相关,其他指标与耐酸性均呈正相关。

## 2 结果与分析

### 2.1 酸胁迫对马尾松种子萌发及生长的影响

2.1.1 酸胁迫对马尾松种子萌发的影响 如图 1 所示,马尾松种子各萌发指标均随 pH 值降低呈逐



不同小写字母代表不同 pH 值处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。图 2、图 3 同

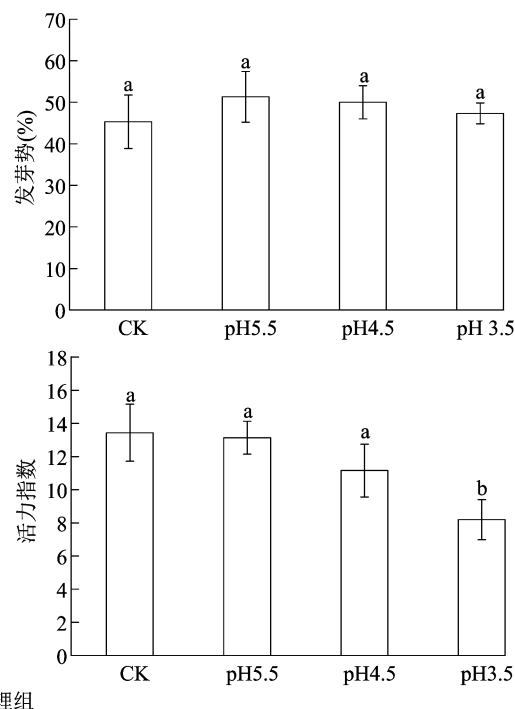
图1 不同程度酸胁迫处理对马尾松种子萌发的影响

### 2.1.2 酸胁迫对马尾松种子胚根、胚芽生长的影响

如图 2-a 所示,马尾松胚芽质量在不同程度酸胁迫下均大于对照,但胚芽干质量相较于对照增加不显著 ( $P > 0.05$ ),说明酸胁迫对胚芽干质量的影响不明显。胚芽鲜质量随 pH 值的降低先增后减,pH 值 4.5 时达到最大值;而胚芽干质量随 pH 值的降低而增加,在 pH 值 3.5 时达到最大值。

如图 2-b 所示,胚根鲜质量随 pH 值降低逐渐减小,但 pH 值 5.5 和 pH 值 4.5 时胚根鲜质量显著大于对照 ( $P < 0.05$ ),pH 值 3.5 时胚根鲜质量小于对照;不同程度酸胁迫影响下胚根干质量均小于对照,呈先增后减的变化,其中在 pH 值 5.5 和 pH 值 3.5 时胚根干质量显著小于对照 ( $P < 0.05$ ),在 pH 值 3.5 时显著达到最小值 ( $P < 0.05$ )。由此可见,pH 值 5.5 和 pH 值 4.5 显著促进了胚芽鲜质量的增加,pH 值 3.5 则对胚芽鲜质量起抑制作用;不同程

度酸胁迫对胚芽干质量均有不同程度抑制。如图 3 所示,随 pH 值降低,马尾松种子胚芽长呈减小趋势,但仅在 pH 值 3.5 时与对照相比显著减短 20.8% ( $P < 0.05$ );胚根长随 pH 值降低呈先增后减的变化,3 组不同酸胁迫处理间胚根长无明显变化,但均显著小于对照。由此可见,pH 值 3.5 时对胚芽的生长具有显著抑制作用,不同水平酸胁迫对根系的生长均有显著抑制作用。



度酸胁迫对胚芽干质量均有不同程度抑制。

如图 3 所示,随 pH 值降低,马尾松种子胚芽长呈减小趋势,但仅在 pH 值 3.5 时与对照相比显著减短 20.8% ( $P < 0.05$ );胚根长随 pH 值降低呈先增后减的变化,3 组不同酸胁迫处理间胚根长无明显变化,但均显著小于对照。由此可见,pH 值 3.5 时对胚芽的生长具有显著抑制作用,不同水平酸胁迫对根系的生长均有显著抑制作用。

### 2.2 酸胁迫对马尾松种子萌发渗透调节物质含量的影响

MDA 是用来反映脂质过氧化程度强弱的重要指标,其含量越高,说明组织的保护能力越弱<sup>[19]</sup>;而脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖等可保护蛋白质,对维持细胞膨压以及促进植物体内 ROS 清除有重要作用,可提高植物在逆境胁迫下的耐性<sup>[20]</sup>。如图 4 所示,马尾松种子露白期 MDA 和可溶性糖含量在

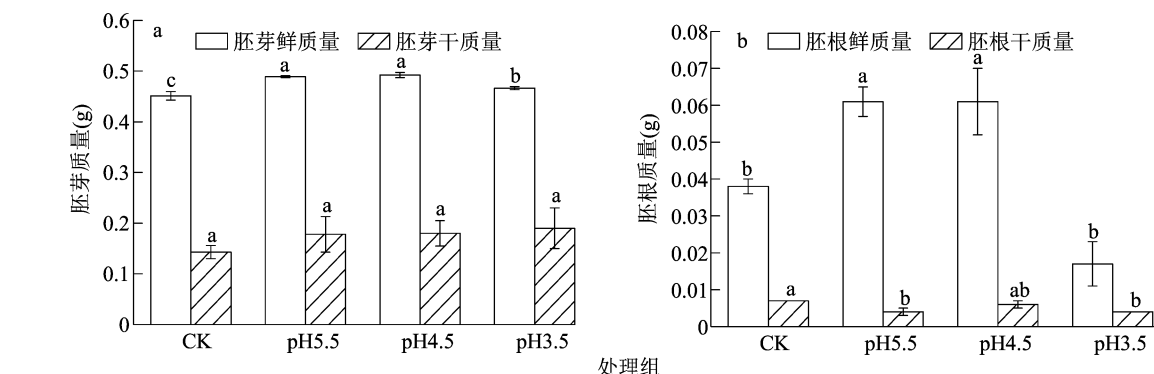


图2 不同程度酸胁迫处理对马尾松胚芽、胚根质量的影响

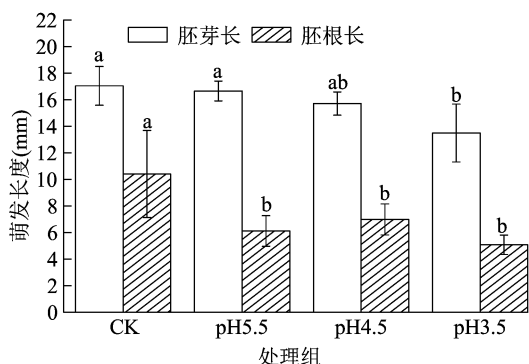
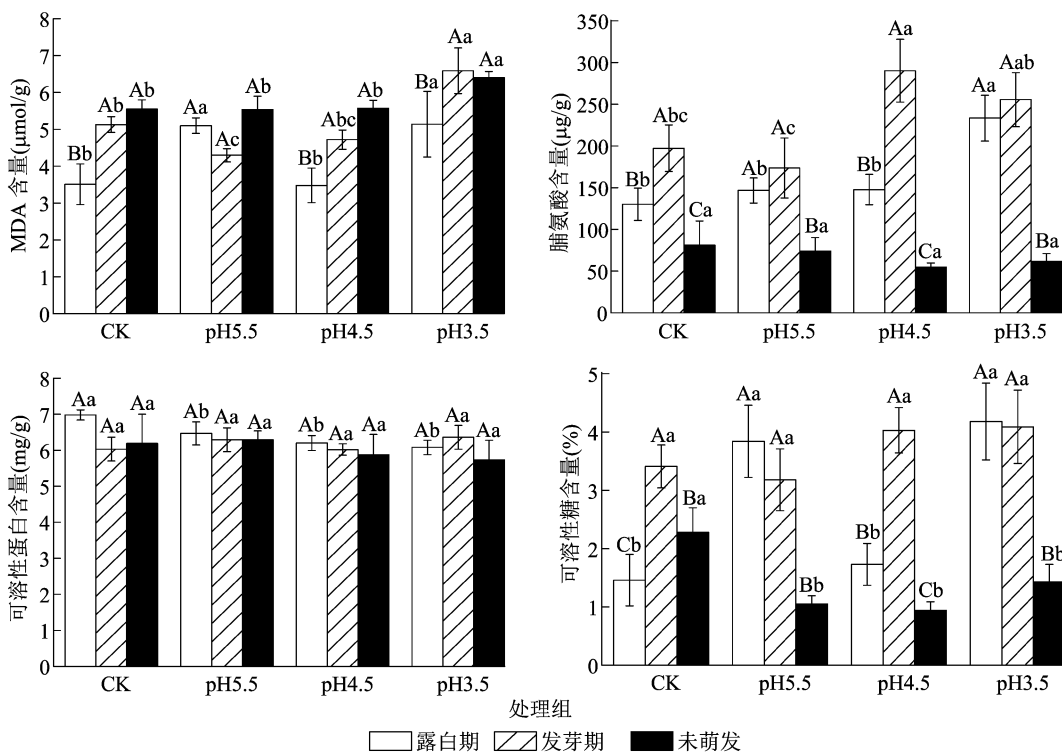


图3 不同程度酸胁迫处理对马尾松种子胚根、胚芽长度的影响

pH 值降低时呈先减后增的变化,其中 pH 值 5.5 和 pH 值 3.5 时与对照相比显著增加;脯氨酸含量随

pH 值降低呈递增趋势,pH 值 3.5 时脯氨酸含量增量显著,达 79.2%,另外 2 组酸胁迫下脯氨酸含量与对照相比无明显变化;可溶性蛋白含量随 pH 值降低呈递减趋势,且不同酸胁迫下均显著低于对照。说明露白期马尾松种子体内各渗透调节物质对 pH 值 3.5 最敏感,其中 MDA 对种子萌发起显著抑制作用,可溶性糖和脯氨酸对种子萌发起显著促进作用。发芽期 MDA 和可溶性糖含量均随 pH 值降低呈逐渐增加的趋势,其中 MDA 含量在 pH 值 5.5 时显著达到最小值 ( $P < 0.05$ ),pH 值 3.5 时显著达到最大值 ( $P < 0.05$ ),而可溶性糖含量在 3 组酸胁迫间差异不明显;脯氨酸含量随 pH 值降低先



露白期 发芽期 未萌发

不同小写字母代表同一萌发时期不同 pH 值处理差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母代表同一 pH 值不同萌发期处理差异显著 ( $P < 0.05$ )。图 5 同

图4 不同程度酸胁迫下马尾松种子萌发渗透调节物质含量

增后减, pH 值 4.5 时与对照组相比显著提高 47.1% ( $P < 0.05$ ); 酸胁迫下马尾松种子体内可溶性蛋白含量无明显变化。说明发芽期 pH 值 5.5 和 pH 值 3.5 下的 MDA 及 pH 值 4.5 下的脯氨酸对酸胁迫处理更敏感。对于未萌发种子来说, 脯氨酸和可溶性糖含量均随 pH 值降低呈先减后增趋势, 其中脯氨酸含量在不同酸胁迫下与对照相比无明显变化, 可溶性糖含量在不同酸胁迫下与对照相比均显著减少; 可溶性蛋白含量随 pH 值降低呈递减趋势, 但对酸胁迫响应并不显著 ( $P > 0.05$ ); MDA 含量随 pH 值降低而增加, 在 pH 值 3.5 下显著达最大值 ( $P < 0.05$ )。说明酸胁迫下可溶性糖含量显著减少和 pH 值 3.5 下 MDA 含量显著增加对种子萌发起显著抑制作用。

### 2.3 酸胁迫对马尾松种子萌发酶活性的影响

如图 5 所示, 露白期马尾松种子 CAT 和 SOD 活性随 pH 值减小逐渐增强, 其中 CAT 活性在 pH 值 3.5 时显著大于对照 ( $P < 0.05$ ), SOD 活性在 pH 值 4.5 和 pH 值 3.5 时显著大于对照 ( $P < 0.05$ ); POD 活性随 pH 值减小先升后降, 在 pH 值 4.5 时显著达到最大 ( $P < 0.05$ )。发芽期马尾松种子 CAT 和 POD 活性均随酸胁迫程度增加呈先降后升的变化, 不同的是, CAT 活性在 pH 值 3.5 时显著大于对照 ( $P < 0.05$ ); POD 活性在不同程度酸胁迫下均小于对照, 在 pH 值 4.5 和 pH 值 3.5 时达到显著水平 ( $P < 0.05$ ); SOD 活性随 pH 值减小逐渐增强, 在 pH 值 4.5 和 pH 值 3.5 时显著大于对照 ( $P < 0.05$ ), pH 值 5.5 时显著小于对照 ( $P < 0.05$ )。随 pH 值减小, 未萌发的马尾松种子 CAT 活性逐渐降低, 但均显著大于对照 ( $P < 0.05$ ); POD 活性先升后降, 相较于对照, 只有 pH 值 5.5 下显著抑制其活性 ( $P < 0.05$ ); SOD 活性与对照相比均无显著差异。由此可见, 不同程度酸胁迫对马尾松种子 CAT 活性均有促进作用, 对 POD 活性总体呈现抑制作用, 而 pH 值 3.5 和 pH 值 4.5 显著促进了露白期和发芽期 SOD 活性, pH 值 5.5 处理显著抑制了露白期和发芽期 SOD 活性。

### 2.4 种子萌发各指标的隶属函数分析

如表 4 所示, 马尾松种子萌发各指标的综合隶属函数值总体表现为 pH4.5 > pH5.5 > CK > pH 3.5, 其中, pH 值 4.5 是对照的 1.20 倍, pH 值 5.5 是对照的 1.07 倍。在 pH 值 4.5 时, 胚芽鲜质量、胚根鲜质量、MDA 含量和 POD 活性对综合隶属

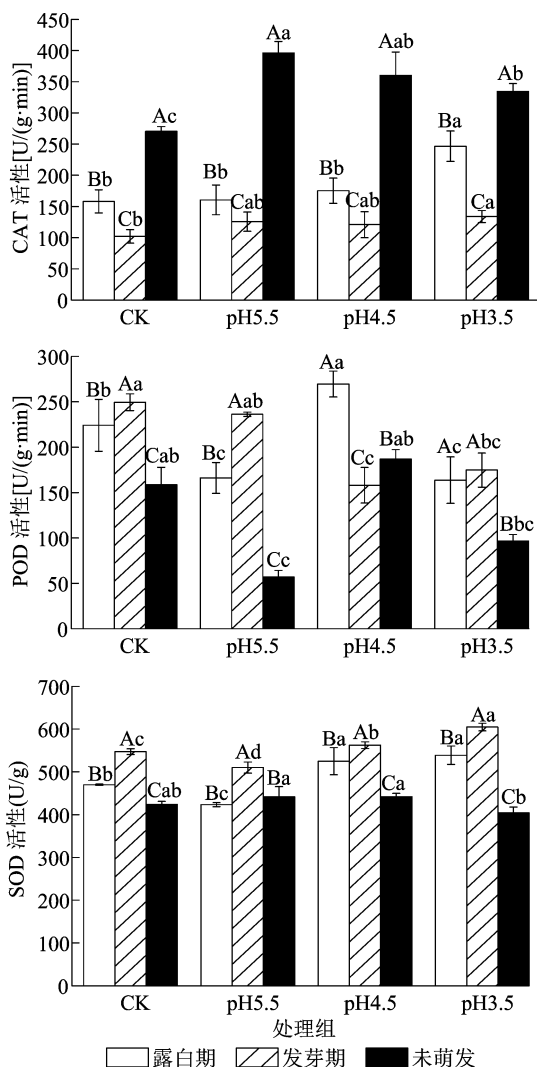


图5 不同程度酸胁迫下马尾松种子萌发抗氧化酶活性

函数值的贡献最大; 在 pH 值 5.5 时, 发芽率、发芽势、发芽指数、胚根鲜质量对综合隶属函数值的贡献最大。说明 pH 值 4.5 和 pH 值 5.5 处理有利于马尾松种子萌发和生长, 而 pH 值 3.5 时对马尾松种子萌发和生长起抑制作用。

## 3 讨论与结论

马尾松种子能在长汀离子型稀土矿废弃地萌发生长, 说明其对酸胁迫环境有一定耐性<sup>[21]</sup>, 对其在酸胁迫环境下的萌发生长情况和适应机制进行研究发现, pH 值 5.5 对马尾松种子萌发具有促进作用; pH 值 3.5、4.5、5.5 均对马尾松种子活力指数起抑制作用, pH 值 3.5 的马尾松种子活力受抑制程度最明显。欧阳玲研究发现, 白三叶种子的胚根长、发芽指数、发芽率等指标均随 pH 值减小呈现出先增加后减小的变化, 且弱酸环境 (pH 值 6.0) 最有利

表 4 不同程度酸胁迫下马尾松种子各萌发生长指标的隶属函数值

处理	隶属函数值									
	发芽率	发芽势	发芽指数	活力指数	胚芽鲜质量	胚芽干质量	胚根鲜质量	胚根干质量	胚芽长	胚根长
CK	0.31	0	0.36	1	0	0	0.48	1	1	1
pH5.5	1	1	1	0.94	0.76	0.74	1	0	0.89	0.20
pH4.5	0.58	0.78	0.36	0.57	1	0.79	1	0.67	0.63	0.38
pH3.5	0	0.33	0	0	0.12	1	0	0	0	0

处理	隶属函数值							各指标综合隶属函数值	排序
	MDA 含量	脯氨酸	可溶性蛋白	可溶性糖	CAT 活性	POD 活性	SOD 活性		
CK	0.98	1	1	0	0	0.57	0.40	9.10	3
pH5.5	0.03	0.84	0.44	0.88	0.03	0.02	0	9.77	2
pH4.5	1	0.83	0.13	0.10	0.19	1	0.88	10.89	1
pH3.5	0	0	0	1	1	0	1	4.45	4

白三叶种子萌发<sup>[22]</sup>,本研究结果与之类似。本研究还发现,随 pH 值降低,马尾松胚根和胚芽出现越来越短小现象,且酸胁迫对胚根的影响大于胚芽。周娟等研究发现,土壤酸化对植物根系的毒害比芽严重,导致其无法正常生长<sup>[23]</sup>,本研究结果亦与之一致。这可能是过多的  $H^+$  直接作用于植物根系,破坏了根系细胞壁结构稳定性,造成细胞死亡导致。

MDA 通常作为生物标志物来评价非生物胁迫下质膜和胞内细胞器的氧化损伤程度<sup>[24]</sup>。本研究发现,马尾松种子 MDA 含量在 pH 值 3.5 时显著增加,体内产生大量活性氧(ROS)。罗良旭等发现,强酸环境(pH 值 $\leq 3.5$ )紫萼玉簪的细胞质膜过氧化反应加剧,MDA 含量增加,认为可能是 ROS 产生速率超出了细胞的清除能力<sup>[25]</sup>,本研究结果与其基本一致。植物中脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖可保护蛋白质,对维持细胞膨压以及促进植物体内 ROS 清除有重要作用,可提高植物在逆境胁迫下的耐性<sup>[20]</sup>。本研究发现,露白期马尾松种子体内脯氨酸随 pH 值降低不断积累,尤其在 pH 值 3.5 时脯氨酸含量显著增加。研究表明,脯氨酸在维持细胞质酸度、调节线粒体功能、触发特定基因的表达、提高马尾松种子对逆境的耐性上发挥了重要作用<sup>[26-27]</sup>,pH 值 3.5 时脯氨酸含量提高有利于马尾松种子正常萌发生长。王一鸣等发现,景天三七在轻度土壤酸胁迫(pH 值 5.6)时可通过增加脯氨酸维持细胞渗透压平衡,以保护种子免受自由基影响<sup>[28]</sup>。本研究发现,马尾松种子在发芽期的脯氨酸积累量随 pH 值降低呈先增后减的变化,在 pH 值 4.5 时显著高

于对照组,维持了细胞渗透压平衡,这与人研究结果<sup>[28]</sup>一致。本研究还发现,露白期马尾松种子的可溶性蛋白含量在酸胁迫下显著低于对照组,与马尾松胚芽和胚根在酸胁迫下的生长规律正相关,说明可溶性蛋白含量减小影响了胚芽和胚根的生长。王莉莉发现 pH 值 5.5 和 pH 值 4.5 处理下牡丹可溶性蛋白含量持续减小<sup>[29]</sup>,本研究结果与其一致。这可能是由于酸胁迫抑制正常蛋白合成并加快其分解,或是酸胁迫下正常蛋白的分解速度远大于合成速度,马尾松种子体内代谢活动减慢,从而马尾松种子萌发生长受到抑制。本研究结果显示,可溶性糖含量在马尾松种子露白期呈先降后升的变化,pH 值 3.5 处理可溶性糖含量显著增加。侯培军等发现,蓝杉幼树在强酸(pH 值 4.0)条件下可溶性糖含量显著增加,为幼树在强酸下的生命活动提供能量来源,维持了蓝杉正常生长<sup>[17]</sup>,本研究结果与之一致。这可能是马尾松种子为了抵御强酸胁迫,从而产生大量可溶性糖。本研究发现,酸胁迫条件下马尾松种子露白期和发芽期脯氨酸、可溶性蛋白及可溶性糖含量均高于未萌发的种子,说明马尾松种子能通过保护蛋白质、细胞膜等结构的完整性以及清除 ROS 来进行自我调节,适应酸胁迫,正常萌发生长。抗氧化酶活性是植物种子组织抵抗自由基和逆境胁迫的必要基础,只有自由基的产生和消除达到平衡,才能防止植物种子被自由基毒害<sup>[30]</sup>。其中,CAT 是植物细胞的抗氧化防御酶,在植物受环境胁迫时通过清除体内  $H_2O_2$  来保护植物<sup>[31]</sup>;POD 通过催化由  $H_2O_2$  参与的氧化反应,使  $H_2O_2$  还原成

水,从而达到保护细胞的作用<sup>[32]</sup>;SOD 可催化超氧化物歧化反应,使活性氧对植物种子细胞的毒害减轻<sup>[33]</sup>。本研究发现,露白期马尾松种子通过提高 POD 活性来分解  $H_2O_2$ ,从而达到清除活性氧,减小 MDA 含量的目的;发芽期 POD 活性总体呈降低趋势,但 CAT 和 SOD 活性均有不同程度的升高,保证了自由基的产生和消除达到平衡,减轻酸胁迫对马尾松种子的毒害,有助于马尾松种子在不同程度酸胁迫下萌发生长;而未萌发马尾松种子体内抗氧化酶活性均有不同程度降低,MDA 含量不断升高,抑制了马尾松种子的萌发。这一结果与王光涛等对冬小麦叶片在酸胁迫下 SOD、CAT 活性不断降低的研究结果<sup>[34]</sup>不同,可能是由于本研究选用的植物种类不同,且对植物的研究阶段和部位不同,导致植物体内抗氧化酶活性变化情况不同,对酸胁迫的耐受度不同。

综上,马尾松种子萌发对酸胁迫具有较强耐性,pH 值 4.5 和 pH 值 5.5 对马尾松种子萌发和生长有促进作用,而 pH 值 3.5 时有抑制作用;酸胁迫对马尾松种子萌发过程中胚根生长抑制性大于胚芽;脯氨酸和可溶性糖对酸胁迫下马尾松种子萌发生长生理过程的调节上发挥了重要作用;POD 在种子萌发露白期,CAT 和 SOD 在发芽期清除体内  $H_2O_2$  减轻酸胁迫对其危害上发挥了重要作用。

#### 参考文献:

- [1] Zhu S P, Nong J F, Luo G T, et al. Varied tolerance and different responses of five *Citrus* rootstocks to acid stress by principle component analysis and orthogonal analysis [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 278: 109853.
- [2] Joris H A W, Caires E F, Bini A R, et al. Effects of soil acidity and water stress on corn and soybean performance under a no-till system [J]. *Plant and Soil*, 2013, 365 (1/2): 409–424.
- [3] 史晓燕, 陈宏文. 废弃池堆浸离子型稀土矿污染途径及其修复研究[J]. *中国稀土学报*, 2019, 37 (4): 409–417.
- [4] 王友生. 稀土开采对红壤生态系统的影响及其废弃地植被恢复机理研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
- [5] 刘玉民. 酸铝环境马尾松根系分泌物特性及其缓解铝毒的根际效应[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [6] 陈顺钰, 韩航, 薛凌云, 等. Pb、Cd 和酸胁迫对枫香种子萌发、幼苗生长及体内抗氧化酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37 (4): 647–655.
- [7] 蒋小刚, 吴海棠, 张雅娟, 等. 不同 pH 对半夏生长及生理特性的影响[J]. *中药材*, 2021, 44 (1): 23–27.
- [8] 张利霞, 常青山, 薛 娴, 等. 酸胁迫对夏枯草叶绿素荧光特性和根系抗氧化酶活性的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29 (8): 134–142.
- [9] 陈顺钰, 赵雅曼, 李宗勋, 等. Pb、Cd 和酸胁迫对宽叶雀稗种子萌发、幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. *草地学报*, 2018, 26 (5): 1173–1180.
- [10] 陈雪娇, 韩航, 侯晓龙, 等. 水土保持植物类芦对土壤酸胁迫的形态生理响应[J]. *草业学报*, 2017, 26 (4): 143–149.
- [11] 陈顺钰. 长汀稀土矿废弃地植被恢复优势树种种子萌发对镉和酸胁迫的响应[D]. 福州: 福建农林大学, 2019.
- [12] 张雷, 郑霞, 刘亚, 等. 海水胁迫对高羊茅种子萌发的影响[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41 (1): 335–337.
- [13] 蒋雪君, 刁倩楠, 曹燕燕, 等. 低温处理对甜瓜种子萌发及胚根生长的影响[J]. *上海蔬菜*, 2020 (6): 62–64.
- [14] 张爱敏, 周国顺, 付丽军, 等. 低温胁迫下油菜素内酯对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *中国瓜菜*, 2019, 32 (12): 31–36.
- [15] 王建刚. 不同时期 8 种挪威槭丙二醛 (MDA) 含量的变化[J]. *现代园艺*, 2020, 43 (15): 33.
- [16] 张哲, 陈青, 梁晓, 等. 朱砂叶螨为害前后抗、感木薯品种叶组织营养物质含量差异分析[J]. *热带作物学报*, 2020, 41 (9): 1865–1869.
- [17] 侯培军, 刘怡菲, 孟凡金, 等. 酸胁迫对科罗拉多蓝杉幼树光合作用和抗性生理特征的影响[J]. *西南林业大学学报 (自然科学)*, 2021, 41 (2): 172–176.
- [18] 梁俊. 东南景天镉解毒相关代谢过程及关键基因克隆[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [19] 许彩丽, 周易桢森, 谢乔颖, 等. 干旱胁迫对箭叶淫羊藿生理生化影响[J]. *湖南林业科技*, 2020, 47 (5): 20–24, 41.
- [20] 常云霞, 李姿琳, 李芙蓉. IAA 对  $Cd^{2+}$  胁迫下拟南芥渗透调节物质及抗氧化特性的影响[J]. *周口师范学院学报*, 2018, 35 (5): 79–82, 133.
- [21] 吴语嫣. 长汀花岗岩侵蚀劣地马尾松种群动态分析[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [22] 欧阳玲. 酸铝胁迫和土壤改良剂对白三叶生长的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- [23] 周娟, 袁珍贵, 郭莉莉, 等. 土壤酸化对作物生长发育的影响及改良措施[J]. *作物研究*, 2013, 27 (1): 96–102.
- [24] Sikder R K, Wang X R, Zhang H H, et al. Nitrogen enhances salt tolerance by modulating the antioxidant defense system and osmoregulation substance content in *Gossypium hirsutum* [J]. *Plants*, 2020, 9 (4): 450.
- [25] 罗良旭, 高素萍, 王成聪, 等. 紫萼玉簪种子和幼苗对酸雨与镉复合污染的生理生态响应[J]. *浙江大学学报 (农业与生命科学版)*, 2017, 43 (2): 192–202.
- [26] Hui R, Zhao R M, Song G, et al. Effects of enhanced ultraviolet-B radiation, water deficit, and their combination on UV-absorbing compounds and osmotic adjustment substances in two different moss species [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25 (15): 14953–14963.
- [27] Szabados L, Savaouré A. Proline: a multifunctional amino acid [J]. *Trends in Plant Science*, 2010, 15 (2): 89–97.
- [28] 王一鸣, 龙胜举, 陈延, 等. 土壤酸化对景天三七生长、抗氧化酶活性及光合特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2018, 27 (8): 1202–1208.

杨梦思,罗莎莎,王如月,等.水肥耦合效应对核桃属 2 种幼苗抗寒性的影响[J].江苏农业科学,2022,50(19):163-175.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.19.025

# 水肥耦合效应对核桃属 2 种幼苗抗寒性的影响

杨梦思<sup>1,3</sup>, 罗莎莎<sup>1</sup>, 王如月<sup>1</sup>, 叶春秀<sup>1</sup>, 虎海防<sup>2</sup>

(1. 新疆农业大学林学与风景园林学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆林业科学院, 新疆乌鲁木齐 830063;  
3. 新疆佳木果树学国家长期科研基地, 新疆阿克苏 843000)

**摘要:**以核桃属 2 种幼苗为试材,采用田间水肥试验,通过设置 3 个施肥梯度和 3 个灌水梯度处理,分析核桃幼苗的抗寒性。结果表明:(1) 9 个水肥处理中,LT<sub>50</sub>由低到高顺序有所差别,但最低均为 2-1 处理,初步判断在 2-1 处理下核桃幼苗抗寒能力最强;2 种核桃幼苗枝条的 LT<sub>50</sub>中,东部黑核桃 < 扎 343,初步判断黑核桃抗寒能力要强于普通核桃。(2)通过 LT<sub>50</sub>与各指标相关性分析,得到指标与抗寒性的关系为:可溶性糖含量、脯氨酸含量、SOD 活性、POD 活性、木质素含量、纤维素含量与抗寒性呈正相关;丙二醛含量、相对电导率、半致死温度与抗寒性呈负相关。(3)通过比较主成分分析法与隶属函数法发现,两者所得结论基本一致,2 种核桃幼苗 9 种处理下排序均为 2-1 为第一,抗寒能力为东部黑核桃 > 扎 343,即黑核桃 > 普通核桃。(4)利用聚类分析法将不同处理下 2 种核桃幼苗根据抗寒能力强弱分为 3 组,第 1 组为 2-1、1-1,抗寒能力最强;第 2 组为 1-2、1-3、2-3、3-1、2-2,抗寒能力中等;第 3 组为 3-3、3-2,抗寒能力最弱。综上所述,在不同水肥处理下,中水高肥(灌水 15 d/次,施肥 15 kg/667 m<sup>2</sup>)为最强抗寒能力水肥组合;核桃属 2 种幼苗的抗寒能力表现为黑核桃 > 普通核桃。

**关键词:**核桃属;幼苗;水肥耦合;抗寒性

**中图分类号:**S664.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)19-0163-13

核桃属植物适应性强,用途多,果实含油率高,为重要的木本油料、干果树种和用材树种<sup>[1]</sup>。核桃(*Juglans regia* L.)为核桃属核桃种<sup>[2]</sup>,是世界上最重要的坚果树种之一,具有极高的经济价值<sup>[3]</sup>。核桃栽培历史悠久,种植规模巨大,是我国重要的经济林树种<sup>[4]</sup>。其产地大多分布于干旱半干旱地区,春夏季节干旱少雨,且降水不均匀<sup>[5]</sup>,水分成为影

响核桃苗木生长发育的关键因子。因此在干旱半干旱地区研究灌水对核桃生长发育的影响,对促进水分的高效利用有着重要意义<sup>[6]</sup>。目前核桃的施肥情况仍是凭经验施肥,盲目施肥、随意施肥的现象比较普遍,制约了核桃产业的健康发展<sup>[3]</sup>。黑核桃(*Juglans nigra* L.)为核桃属黑核桃组 *Rhycocaryon*,原产于北美洲,具有生长快、抗风沙、耐低温、耐干旱、耐盐碱等特性,是经济价值较高的林果兼用树种<sup>[7]</sup>。由于黑核桃耐干旱、根系发达、生长快,且与核桃有较强的亲和力,近年来被广泛用作薄皮核桃的优良砧木,以提高核桃的产量和品质<sup>[8]</sup>。在我国多处已引种栽培黑核桃,产生了显著的经济、生态及社会效益。新疆从 1991 年起引种栽培黑核桃,但在实际生产中,施肥和灌水依然存在

收稿日期:2022-03-04

基金项目:2022 年新疆维吾尔自治区林业发展补助资金项目(编号: XJLYKJ-2022-10)。

作者简介:杨梦思(1998—),女,山东单县人,硕士研究生,研究方向为林木遗传与良种选育。E-mail:519285199@qq.com。

通信作者:虎海防,硕士,研究员,研究方向为果树种质资源与栽培生理。E-mail:43784936@qq.com。

[29]王莉莉.土壤 pH 值对牡丹生长及生理特性影响的研究[D].长春:吉林农业大学,2015.

[30]赖华燕,王友凤,吴凯,等.外源激素对福建青冈种子易萌性和抗氧化酶活性的影响[J].生态学杂志,2017,36(2):382-388.

[31]Chen L C, Wu R, Feng J, et al. Transnitrosylation mediated by the non-canonical catalase ROG1 regulates nitric oxide signaling in plants[J]. Developmental Cell, 2020, 53(4): 444-457. e5.

[32]Andrade C A, de Souza K R D, de Oliveira Santos M, et al.

Hydrogen peroxide promotes the tolerance of soybeans to waterlogging[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 232: 40-45.

[33]Alscher R G, Erturk N, Heath L S. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(372): 1331-1341.

[34]王光涛,冯素伟,丁位华,等.根际 pH 值对冬小麦叶片抗氧化酶活性和内源激素含量的影响[J].江苏农业科学, 2021, 49(10): 71-75.