

班甜甜,张素勤,马超,等.水涝胁迫对草石蚕生理特性的影响及抗涝性评价[J].华中农业大学学报,2023,42(1):66-74.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.01.009

水涝胁迫对草石蚕生理特性的影响及抗涝性评价

班甜甜^{1,2},张素勤³,马超^{1,2},吴传递³,徐彦军³,李晓慧^{1,2},耿广东³

1.贵州省农业科学院园艺研究所,贵阳 550006; 2.贵州省园艺工程技术研究中心,贵阳 550006;
3.贵州大学农学院,贵阳 550025

摘要 以3个草石蚕(*Stachys sieboldii* Miq.)品种为试材,研究水涝胁迫对草石蚕生理特性的影响,并通过相关性和主成分分析,对草石蚕的抗涝性进行评价,以期对草石蚕抗涝性鉴定提供参考。结果显示,随水涝胁迫时间延长,3种草石蚕叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白含量及超氧化物歧化酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性呈先升高后降低的变化;“鲁引1号”和“赣引1号”的脯氨酸(Pro)含量先升高后降低,“贵裁1号”Pro含量则一直升高;“鲁引1号”和“贵裁1号”的SOD活性先升高后降低,“赣引1号”则一直升高;随胁迫时间的延长,3种草石蚕的MDA含量均一直增加。相关性分析发现草石蚕的叶绿素含量、可溶性糖含量、Pro含量、SOD活性、POD活性、CAT活性和MDA含量间具有密切的相关性,但相关程度不一致。基于主成分分析的抗涝性综合评价,3种草石蚕的抗涝性为赣引1号>鲁引1号>贵裁1号。

关键词 草石蚕;水涝胁迫;生理特性;抗涝性评价

中图分类号 S644.501 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)01-0066-09

水分是影响植物生长的重要环境因子之一,水分过多可降低土壤中O₂溶解度,形成缺氧或无氧的根系环境而危害植物^[1]。近年来全球气候变暖导致异常天气增多,其中洪涝对农业生产构成极大威胁^[2]。洪涝是中国发生几率最高、影响范围最广以及造成损害最大的自然灾害,西南地区受台风影响,夏季经常发生暴雨洪涝灾害,严重影响植物的正常生长,甚至引起植株的死亡,对农业生产造成不利影响。水涝条件下,植物活性氧(reactive oxygen specie, ROS)代谢失衡,造成过氧化氢(H₂O₂)、超氧根阴离子(O₂⁻)等大量积累,过多的ROS导致细胞氧化和膜系统受损^[3],产生膜质过氧化物丙二醛(MDA),与酶发生链式反应,造成膜系统变性,影响植株正常生理代谢,最终导致产量降低。研究表明,玉米苗期淹水3~7 d可使产量降低58.80%~69.80%^[4];绿豆始粒期淹水可使产量降低18.07%~28.87%^[5];大豆V3期淹水可使单株产量降低11.11%^[6]。高水平的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧

化氢酶(CAT)活性在植物抵御淹水胁迫中发挥重要作用^[7],可以有效维持ROS平衡,同时通过渗透调节物质含量的变化调节细胞的渗透势,保证植株的生长^[8-9]。

草石蚕(*Stachys sieboldii* Miq.)是唇形科水苏属多年生草本作物,也是一种以地下茎为食用部分的特色蔬菜,富含水苏糖、脂肪、蛋白质、维生素等,营养价值丰富,有补血、强身、清热解毒、治咳嗽等功效^[10]。草石蚕喜湿润的环境,但在西南地区由于雨水过多,长期水涝导致土壤板结,限制地下茎的生长,严重影响草石蚕的产量,加强草石蚕抗涝品种筛选和涝害生理特性研究,对于深入了解草石蚕抗涝机制及有针对性地提出抗涝技术措施具有重要的理论价值和实践意义。目前,对玉米^[11]、黄瓜^[12]、辣椒^[13]等作物水涝胁迫研究较多,而关于草石蚕的相关研究还鲜见报道。因此,本研究以3个草石蚕品种为试材,研究水涝胁迫对其叶绿素含量、渗透

收稿日期:2022-04-28

基金项目:国家自然科学基金项目(31760596);国家自然科学基金补助项目(黔农科院国基后补助[2021]22号);贵州省蔬菜现代农业产业技术体系(GZCYTX2021-01);贵州省农业科学院专项(黔农科院种质资源(2020)10号);贵州省科技计划项目(黔科合成果[2021]一般063)

班甜甜, E-mail: 1574601087@qq.com

通信作者:耿广东, E-mail: genggd213@163.com

调节物质、保护酶活性以及膜脂过氧化产物的影响,以期解析草石蚕的抗涝机制,建立抗涝性评价方法,为选育抗涝性品种提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试材料为“贵栽1号”(贵州务川主栽品种)、“鲁引1号”(山东滨州主栽品种)和“赣引1号”(江西萍乡主栽品种)。

1.2 试验方法

试验在贵州大学农学院教学实验基地大棚内进行,每个小区2畦,畦面宽100 cm,每畦种植2行,株距40 cm。常规管理,待6—7月份(旺盛生长期,且为雨季时期)时进行水涝处理(在做畦前先将土挖出铺上塑料膜后再填上,进行水涝处理时向小区人工放水,使水淹过土壤表面,保证土壤中的水分一直处于饱和状态),胁迫1、3、5、7 d后,分别测定各品种的相关生理指标,以正常浇水管理的草石蚕为对照,每个小区面积为10 m²,3次重复,随机排列。于08:00—09:00采样,所采样品为从上到下第3和第4片叶。

1.3 测定方法

样品叶采用95%乙醇-丙酮混合液浸泡、提取,测定叶绿素含量^[14];采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量,考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白含量,茚三酮比色法测定脯氨酸(proline, Pro)含量,硫代巴比妥酸法测定MDA含量^[15]。参考文献^[15]测定SOD、POD和CAT活性。

1.4 主成分分析

对3个品种草石蚕的叶绿素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、Pro含量、SOD活性、POD活性、CAT活性、MDA含量等数据进行标准化处理后,采用SPSS 22.0进行主成分分析,依据其特征值和贡献率等,计算草石蚕的抗涝性得分。

1.5 数据处理

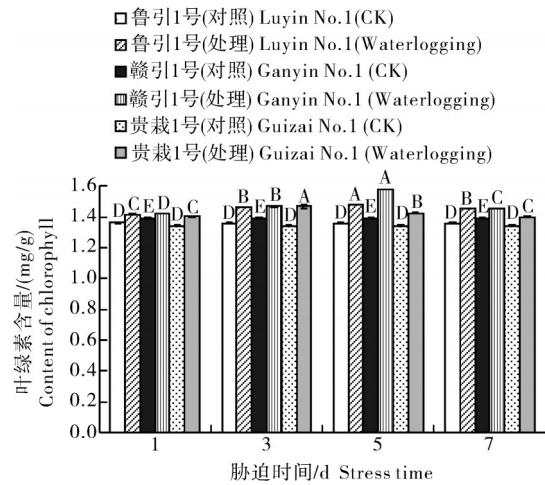
用Excel 2003整理数据并绘制图表,用SPSS 22.0软件进行显著性、相关性分析及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 水涝胁迫对草石蚕叶绿素含量的影响

试验结果(图1)显示,水涝胁迫处理后3种草石蚕叶绿素含量先升高后降低。“贵栽1号”叶绿素含量在水涝胁迫3 d后达到最大值,较对照升高了9.59%,

两者之间具有极显著差异($P<0.01$)。“鲁引1号”和“赣引1号”水涝胁迫5 d后达到最大值,分别较对照升高了8.90%、13.96%,而“贵栽1号”叶绿素含量处理3 d后则有所下降。水涝胁迫7 d后,3种草石蚕的叶绿素含量均有所降低。



不同的大写字母分别表示处理间差异极显著($P<0.01$)。下同。The different capital letters indicate that the difference between treatments is extremely significant ($P<0.01$). The same as below.

图1 水涝胁迫下草石蚕叶绿素含量的变化

Fig.1 The change of chlorophyll content of *Stachys sieboldii* Miq. under waterlogging stress

2.2 水涝胁迫对草石蚕可溶性糖含量的影响

从图2可见,3种草石蚕可溶性糖含量均呈先升高后降低的变化。水涝胁迫1 d,3种草石蚕可溶性糖含量均高于对照,且达到极显著差异水平($P<0.01$)。水涝胁迫3 d,“贵栽1号”可溶性糖含量达到最大值,较对照升高了33.05%;“鲁引1号”和“赣引1号”在胁迫5 d后可溶性糖含量达到最大值,分别高于对照25.98%和28.54%,与胁迫3 d的可溶性糖含

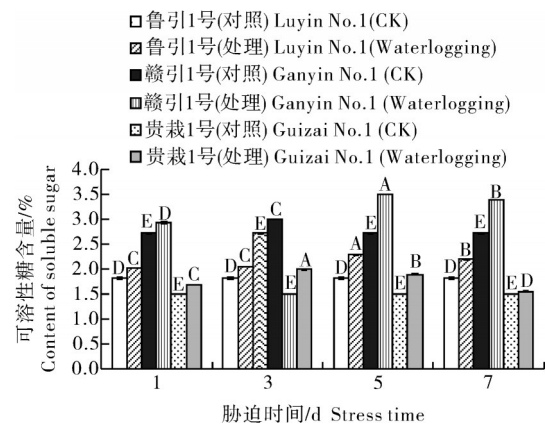


图2 水涝胁迫下草石蚕可溶性糖含量的变化

Fig.2 The change of soluble sugar content of *Stachys sieboldii* Miq. under waterlogging stress

量差异极显著。水涝胁迫7 d后,3种草石蚕可溶性糖含量均比胁迫5 d时有所降低,但仍高于对照,且与对照间差异极显著。胁迫7 d后,“赣引1号”升高幅度最大,“鲁引1号”次之,“贵栽1号”最低。

2.3 水涝胁迫对草石蚕可溶性蛋白含量的影响

从图3可以看出,3种草石蚕可溶性蛋白含量随水涝胁迫时间延长均呈先升高后降低的变化趋势。水涝胁迫3 d后,3种草石蚕可溶性蛋白含量均有所增加,“贵栽1号”可溶性蛋白含量达到最大值,高于对照23.46%,两者之间差异极显著($P<0.01$)。“鲁引1号”和“赣引1号”可溶性蛋白含量在胁迫5 d后达到最大值,分别高于对照22.65%和27.89%。水涝胁迫7 d后,3种草石蚕可溶性蛋白含量下降,但仍高于对照。在胁迫处理末期,“赣引1号”可溶性蛋白含量较对照的升高幅度最大。

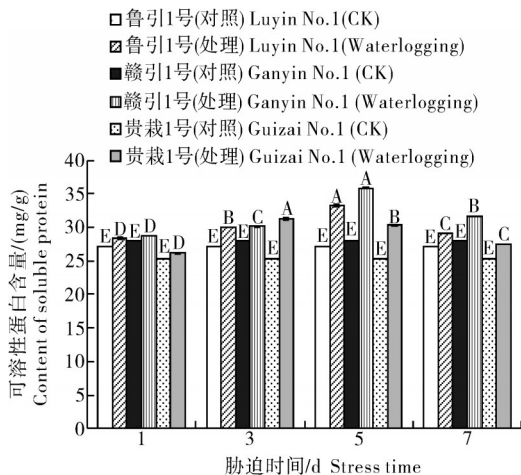


图3 水涝胁迫下草石蚕可溶性蛋白含量的变化

Fig.3 The change of soluble protein content of *Stachys sieboldii* Miq. under waterlogging stress

2.4 水涝胁迫对草石蚕Pro含量的影响

由图4可见,水涝胁迫处理后“鲁引1号”和“赣引1号”Pro含量先升高后降低,而“贵栽1号”则一直升高。水涝处理1 d后,3种草石蚕Pro含量均高于对照,且与对照之间的差异极显著($P<0.01$),“贵栽1号”“鲁引1号”和“赣引1号”Pro含量分别比对照增加30.73%、51.59%和89.06%。水涝胁迫5 d后,“鲁引1号”和“赣引1号”Pro含量均达到最大值,分别与对照和胁迫3 d后的Pro含量均达到极显著差异水平。水涝胁迫7 d后,“贵栽1号”的Pro含量达最大值,比对照升高97.93%,而“鲁引1号”与“赣引1号”Pro含量有所降低,但仍高于对照。水涝胁迫7 d后,“赣引1号”Pro含量升高幅度最大。

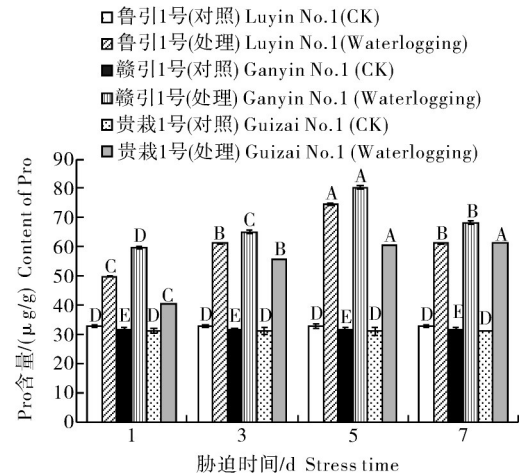


图4 水涝胁迫下草石蚕脯氨酸含量的变化

Fig.4 The change of proline content of *Stachys sieboldii* Miq. under waterlogging stress

2.5 水涝胁迫对草石蚕SOD活性的影响

试验结果(图5)显示,随水涝胁迫时间延长,“贵栽1号”和“鲁引1号”的SOD活性先升高后降低,“赣引1号”则一直升高。水涝胁迫3 d后“贵栽1号”SOD活性达到最大值,高于对照48.49%,并达到极显著差异水平($P<0.01$)。水涝胁迫5 d后,“鲁引1号”SOD活性升高到最大值,较对照升高32.47%。水涝胁迫7 d后,“赣引1号”SOD活性升高到最大值,比对照升高34.71%，“鲁引1号”和“贵栽1号”则低于水涝胁迫5 d的活性,但仍高于对照。水涝胁迫末期,“赣引1号”SOD活性升高幅度最大,“鲁引1号”次之,“贵栽1号”最低。

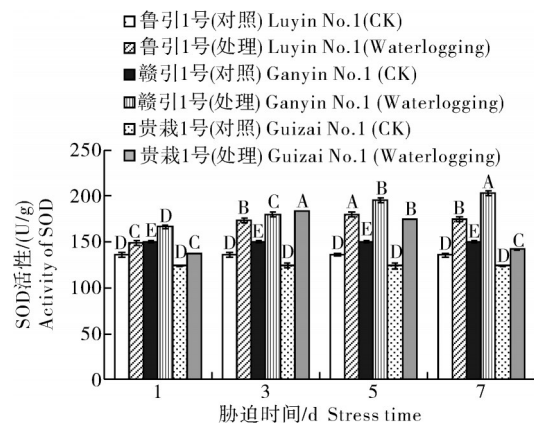


图5 水涝胁迫下草石蚕SOD活性的变化

Fig.5 The change of SOD activity of *Stachys sieboldii* Miq. under waterlogging stress

2.6 水涝胁迫对草石蚕POD活性的影响

由图6可见,3种草石蚕的POD活性随水涝胁迫时间延长先升高后降低。水涝胁迫1 d后,3种草石

蚕的 POD 活性均高于对照,且与对照间差异极显著 ($P<0.01$)。3 种草石蚕的 POD 活性在胁迫 5 d 后达到最大值,“贵裁 1 号”“鲁引 1 号”和“赣引 1 号”分别比对照升高了 66.37%、102.95% 和 104.46%。水涝胁迫 7 d 后,3 种草石蚕的 POD 活性有所降低,但仍高于对照。胁迫末期,“赣引 1 号”的升高幅度最大,“贵裁 1 号”升高幅度最小。

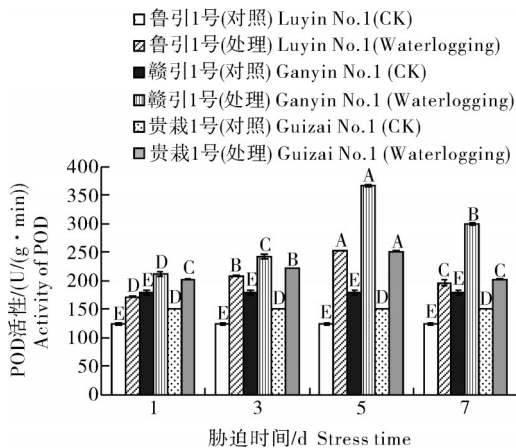


图 6 水涝胁迫下草石蚕 POD 活性的变化

Fig.6 The change of POD activity of *Stachys sieboldii* Miq. under waterlogging stress

2.7 水涝胁迫对草石蚕 CAT 活性的影响

由图 7 可见,3 种草石蚕 CAT 活性随水涝胁迫时间延长先升高后降低。水涝胁迫 1 d,3 种草石蚕 CAT 活性均高于对照,且差异极显著 ($P<0.01$) (图 7)。3 种草石蚕的 CAT 活性在胁迫 5 d 后达到最大值,“贵裁 1 号”“鲁引 1 号”和“赣引 1 号”分别比对照升高了 280.65%、260.29% 和 266.67%。水涝胁迫 7 d 后,3 种草石蚕 CAT 活性有所降低,但仍高于对照。胁迫处理末期,“赣引 1 号”和“鲁引 1 号”升高幅

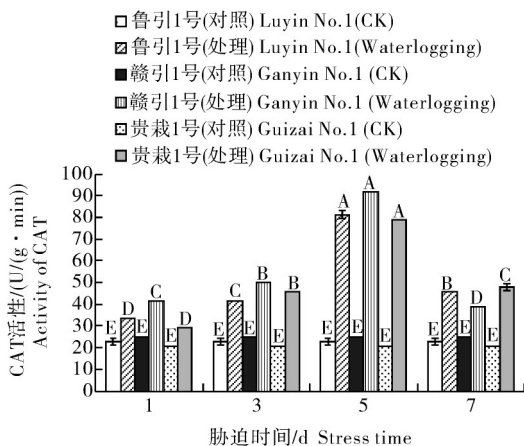


图 7 水涝胁迫下草石蚕 CAT 活性的变化

Fig.7 The change of CAT activity of *Stachys sieboldii* Miq. under waterlogging stress

度大,“贵裁 1 号”CAT 活性升高幅度小。

2.8 水涝胁迫对草石蚕 MDA 含量的影响

3 种草石蚕 MDA 含量随水涝胁迫时间的延长一直增加。水涝胁迫 1 d 后,3 种草石蚕 MDA 含量与对照之间差异极显著 ($P<0.01$)。水涝胁迫 7 d 后,3 种草石蚕 MDA 含量均达到最大值,且分别高于对照 256.86%、282.93% 和 301.20%;胁迫末期,“赣引 1 号”MDA 含量升高幅度最大,“贵裁 1 号”MDA 含量升高幅度最小(图 8)。

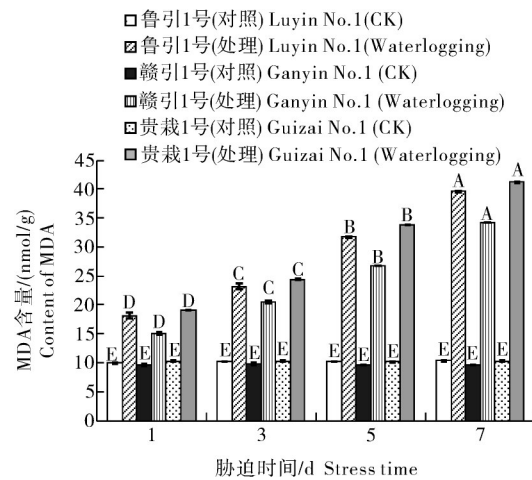


图 8 水涝胁迫下草石蚕 MDA 含量的变化

Fig.8 The change of MDA content of *Stachys sieboldii* Miq. under waterlogging stress on

2.9 草石蚕各生理指标的相关性分析

水涝胁迫处理后草石蚕各生理指标间的相关性分析结果(表 1)显示,可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、Pro 含量、SOD 活性、POD 活性之间的相关系数均 >0 ,绝对值均 >0.8 ,因此,各指标之间均呈极显著正相关。MDA 含量与其他生理指标之间均呈负相关;叶绿素含量与可溶性糖含量、可溶性蛋白含量呈显著正相关,与 SOD 活性、CAT 活性呈极显著正相关;CAT 活性与 Pro 含量、MDA 含量、POD 活性呈一定程度负相关,但相关性均不显著。综上,各项生理指标间存在一定的相关性,但相关程度不一致。因此,可用主成分降维的方法对草石蚕的 8 个生理指标进行主成分分析,综合评价草石蚕的抗涝性。

2.10 3 种草石蚕的抗涝性评价

1) 主成分分析。对水涝胁迫后草石蚕各生理指标进行主成分分析,得到初始特征值、方差贡献率、累计方差贡献率和旋转平方和后的特征值、方差贡献率、累计方差贡献率(表 2)。选取初始特征值大于 1 的前 2 个主成分,第 1 主成分的方差贡献率为 78.510%,第 2 主成分的方差贡献率为 15.490%,累

表1 草石蚕各生理指标间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of *Stachys sieboldii* Miq. physiological indexes

指标 Index	叶绿素 Chlorophyll	可溶性糖 Soluble sugar	可溶性蛋白 Soluble protein	脯氨酸 Pro	MDA	SOD	POD	CAT
叶绿素 Chlorophyll	1							
可溶性糖 Soluble sugar	0.754*	1						
可溶性蛋白 Soluble protein	0.777*	0.999**	1					
脯氨酸 Pro	0.442	0.911**	0.896**	1				
MDA	-0.662	-0.99**	-0.986**	-0.949**	1			
SOD	0.871**	0.978**	0.984**	0.810**	-0.943**	1		
POD	0.433	0.915**	0.901**	0.978**	-0.961**	0.816**	1	
CAT	0.803**	0.262	0.291	-0.123	-0.137	0.454	-0.146	1

注:*表示显著相关,**表示极显著相关。Note:* indicates significant correlation, and ** indicates extremely significant correlation.

计方差贡献率达94%,可代表8个原始性状94%的数据信息。可用这2个主成分代替上述8个生理指标进行抗涝性综合评价。

由表3可知,第1主成分得分系数为正且较大的指标有可溶性糖、可溶性蛋白、Pro、SOD和POD,表明这5项指标对第1主成分的贡献较大;第2主成分得分系数为正且较大的指标有叶绿素、SOD和CAT,这3项指标对第2主成分的贡献较大。

2)抗涝性综合评价。通过对2个主成分的得分系数(表3)和8个生理指标(X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 分别代表叶绿素含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、Pro含量、MDA活性、SOD活性、POD活性、CAT活性)进行处理,建立2个主成分的线性回归方程如下:

$$F_1 = -0.023X_1 + 0.154X_2 + 0.147X_3 + 0.225X_4 - 0.181X_5 + 0.107X_6 + 0.226X_7 - 0.165X_8$$

$$F_2 = 0.386X_1 + 0.044X_2 + 0.062X_3 - 0.168X_4 + 0.028X_5 + 0.154X_6 - 0.175X_7 + 0.533X_8$$

然后以每个主成分所对应的方差贡献率作为权重系数,计算草石蚕的综合得分。从表2可见,2个主成分旋转后的方差贡献率分别为70.482%和23.518%,故3种草石蚕的综合得分公式为: $F_2 = 70.482\% \times F_1 + 23.518\% \times F_2$ 。各主成分得分和综合得分见表4,“鲁引1号”“赣引1号”和“贵裁1号”综合评价的抗涝性得分分别为-0.174、0.815、-0.641,评价得分最高的为“赣引1号”,其抗涝性最好。

表2 各成分特征值和贡献率

Table 2 The characteristic value and contribution rate of each component

成分 Component	初始特征值 Characteristic value			旋转平方和载入值 Rotation sums of squared loadings		
	特征值 Characteristic value	方差贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	特征值 Characteristic value	方差贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	6.280	78.510	78.510	5.639	70.482	70.482
2	1.719	15.490	94.000	2.361	23.518	94.000
3	0.723	2.421	96.421			
4	0.602	1.090	97.511			
5	0.311	0.892	98.403			
6	0.104	0.476	98.879			
7	0.072	0.325	99.204			
8	0.063	0.216	100.000			

表3 主成分得分系数
Table 3 The matrix of principal component scoring coefficient

指标 Indexes	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal components 2
叶绿素 Chlorophyll	-0.023	0.386
可溶性糖 Soluble sugar	0.154	0.044
可溶性蛋白 Soluble protein	0.147	0.062
Pro	0.225	-0.168
MDA	-0.181	0.028
SOD	0.107	0.154
POD	0.226	-0.175
CAT	-0.165	0.533

3 讨论

水分作为植物生长的重要环境因子,可影响植物的形态、生理生化以及地理分布。水涝胁迫严重影响植物生长发育,胁迫时间越长伤害越大^[16]。

3.1 水涝胁迫对草石蚕叶绿素及渗透调节物质的影响

叶片是植物最敏感的器官,逆境胁迫下叶片往往最先表现出症状^[17]。本试验3种草石蚕的叶绿素含量均随胁迫时间的延长先升高后降低,这与宴增等^[18]对黑杨幼苗的研究结论一致。胁迫初期叶绿素含量升高,这可能是草石蚕喜水性的嗜水生理反应,促进了叶绿素的合成,以维持生存所需的光合能力^[19]。随水涝时间的延长,3种草石蚕的叶绿素含量均下降,表明水涝胁迫末期抑制了叶绿素合成,加快了叶绿素的降解^[20],进而影响草石蚕的生长。植物体内的可溶性糖、可溶性蛋白和Pro等渗透调节物质具有保护酶活性和细胞膜结构的功能^[21]。本试验3种草石蚕的渗透调节物质均随胁迫时间的延长先升高后降低,与张志浩等^[22]对花椒的研究结果一致。Pro含量的增加既可提高细胞的渗透调节能力,还可以清除活性氧,增强植株抗氧化能力^[23],这对提高植物的逆境抗性是有益的。水涝胁迫3 d后“鲁引1号”

和“赣引1号”的可溶性糖、可溶性蛋白、Pro含量继续升高,表明这2种草石蚕在水涝胁迫下具有较好的渗透调节能力,“贵裁1号”的可溶性糖、可溶性蛋白在胁迫3 d后,达到最大值,然后下降,因此,“贵裁1号”的渗透调节能力较差。可溶性糖和Pro含量初期上升是因为植株自身的自我保护机制,但这种自我调节作用有一定的限度,当外界的胁迫程度超过自身的调节能力时就会对植株造成伤害,其含量开始下降^[24];可溶性蛋白含量前期升高是由于水涝胁迫刺激了蛋白合成,后期含量降低是因为降解大于合成^[25]。

3.2 水涝胁迫对草石蚕过氧化及抗氧化相关指标的影响

叶片MDA含量为逆境胁迫下植物受害程度的重要指标,淹水胁迫会造成膜脂过氧化反应加剧,导致膜系统受损,从而影响膜透性,间接反映植物组织抗氧化的能力^[26]。本试验中,3种草石蚕MDA含量均随水涝胁迫的延长而上升,这与王桂林等^[27]的研究结果一致,“贵裁1号”和“赣引1号”含量的变化规律与汪宗立等^[28]的研究结果一致,均为前期缓慢上升,后期快速上升。这表明随胁迫时间的延长,叶片细胞质膜透性增大,导致细胞各项功能紊乱,危害植物的生长,这与叶绿素含量和渗透调节物质含量在胁迫末期下降的反应一致。“贵裁1号”和“赣引1号”MDA含量后期快速上升,是因为随胁迫时间的延长细胞内的活性氧大量积累,膜脂过氧化作用加剧,草石蚕对水涝胁迫的适应性逐渐下降。胁迫末期“赣引1号”MDA含量较对照的升高幅度最小,表明其膜脂过氧化程度最低。

植物在遭受逆境胁迫时,可通过改变体内SOD、POD、CAT等酶的活性清除大量的自由基,抵御外界的伤害^[29]。试验表明,“鲁引1号”和“贵裁1号”的SOD活性和3种草石蚕的POD和CAT活性均呈先升高后降低的变化,这与裴姿琛等^[30]、张晓佩等^[31]的研究结果一致,抗氧化酶活性随胁迫时间的延长

表4 草石蚕主成分得分及综合评价

Table 4 Principal component score and comprehensive evaluation value of *S. sieboldii* Miq.

品种 Varieties	主成分得分 Principal component score		综合得分 Comprehensive evaluation value	排名 Ranking
	F_1	F_2		
鲁引1号 Luyin No.1	-0.580	0.998	-0.174	2
赣引1号 Ganyin No.1	1.156	0.003	0.815	1
贵裁1号 Guizai No.1	-0.575	-1.002	-0.641	3

而降低,可能源于持续的涝害导致植株的抗涝机能已无法发挥作用,与文中MDA的含量一直升高的结果相对应。一般来说,耐涝能力强的植物,抗氧化酶的活性会显著升高^[32],根据综合评价结果可知“赣引1号”的抗涝性最强,水涝胁迫1~7 d其SOD活性一直在升高,胁迫末期较对照的升高幅度最大。

3.3 草石蚕抗涝性综合评价

植物的抗涝性是由多种因素交互而构成的一个比较复杂的综合性状,用单一指标评价具有局限性,需将多个指标进行综合分析才能科学反映植物的抗涝性^[33-34]。本研究通过对草石蚕的8个生理指标进行相关性分析发现,各指标间存在复杂的相关性,给草石蚕抗涝性的鉴定带来一定的困难。本研究通过主成分分析将8个指标降维为2个主成分,根据3种草石蚕的得分,明确3种草石蚕的抗涝性为“赣引1号”>“鲁引1号”>“贵裁1号”。

参考文献 References

- [1] PEDERSEN O, PERATA P, VOESENEK L A C J. Flooding and low oxygen responses in plants[J]. *Functional plant biology*, 2017, 44(9): 3-6.
- [2] ALI R, KURIQI A, KISI O. Human-environment natural disasters inter connection in China: a review [J/OL]. *Climate*, 2020, 8(4): 48[2022-04-28]. <https://doi.org/10.3390/cli8040048>.
- [3] 吴麟, 张伟伟, 葛晓敏, 等. 植物对淹水胁迫的响应机制研究进展[J]. *世界林业研究*, 2012, 25(6): 27-33. WU L, ZHANG W W, GE X M, et al. A review of the response mechanisms of plants to waterlogging stress[J]. *World forestry research*, 2012, 25(6): 27-33(in Chinese with English abstract).
- [4] 余卫东, 冯利平, 胡程达, 等. 苗期涝渍对黄淮地区夏玉米生长和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2161-2166. YU W D, FENG L P, HU C D, et al. Effects of waterlogging during seedling stage on the growth and yield of summer maize in Huang-Huai region[J]. *Chinese journal of ecology*, 2015, 34(8): 2161-2166(in Chinese with English abstract).
- [5] 于奇, 冯乃杰, 王诗雅, 等. S3307对始花期和始粒期淹水绿豆光合作用及产量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(7): 1080-1089. YU Q, FENG N J, WANG S Y, et al. Effects of S3307 on the photosynthesis and yield of mungbean at R1 and R5 stages under waterlogging stress [J]. *Acta agronomica sinica*, 2019, 45(7): 1080-1089(in Chinese with English abstract).
- [6] 张洪鹏, 张盼盼, 李冰, 等. 烯效唑对淹水胁迫下大豆叶片光合特性及产量的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2016, 38(5): 611-618. ZHANG H P, ZHANG P P, LI B, et al. Effects of uniconazole on leaf photosynthetic characteristics and yield of soybean under waterlogging stress[J]. *Chinese journal of oil crop science*, 2016, 38(5): 611-618(in Chinese with English abstract).
- [7] 项洪涛, 李琬, 郑殿峰, 等. 幼苗期淹水胁迫及喷施烯效唑对小豆生理和产量的影响[J]. *作物学报*, 2021, 47(3): 494-506. XIANG H T, LI W, ZHENG D F, et al. Effects of uniconazole and waterlogging stress in seedling stage on the physiology and yield in adzuki bean[J]. *Acta agronomica sinica*, 2021, 47(3): 494-506(in Chinese with English abstract).
- [8] 李娟娟, 许晓妍, 朱文旭, 等. 淹水胁迫对丁香叶绿素含量及荧光特性的影响[J]. *经济林研究*, 2012, 30(2): 43-47. LI J J, XU X Y, ZHU W X, et al. Effects of flooding stress on chlorophyll content and fluorescence characteristics in *Syringa L.* [J]. *Non-wood forest research*, 2012, 30(2): 43-47(in Chinese with English abstract).
- [9] 宫长荣, 汪耀富. 淹水胁迫对烤烟生理生化特性的影响[J]. *中国农业科学*, 1995, 28(S1): 126-130. GONG C R, WANG Y F. The effects of waterlogging stress on physiological and biochemical characteristics of flue-cured tobacco [J]. *Scientia agricultural sinica*, 1995, 28(S1): 126-130(in Chinese with English abstract).
- [10] 赵建青. 草石蚕高产栽培及加工技术[J]. *农业技术与装备*, 2009(8): 36-37. ZHAO J Q. High-yield cultivation and processing technology of *Stachys sieboldii* Miq. [J]. *Agricultural technology and equipment*, 2009(8): 36-37(in Chinese with English abstract).
- [11] LIANG K, TANG K Y, FANG T, et al. Waterlogging tolerance in maize: genetic and molecular basis [J]. *Molecular breeding*, 2020, 40(12): 1-13.
- [12] XU X W, JI J, XU Q, et al. The major-effect quantitative trait locus CsARN6.1 encodes an AAA ATPase domain-containing protein that is associated with waterlogging stress tolerance by promoting adventitious root formation [J]. *The plant journal*, 2018, 93(5): 917-930.
- [13] 郭豪, 田浩, 张素勤, 等. 朝天椒苗期对水涝胁迫的生长及生理响应[J]. *北方园艺*, 2022(2): 1-8. GUO H, TIAN H, ZHANG S Q, et al. Growth and physiological responses of *Capsicum frutescens* seedlings to waterlogging stress [J]. *Northern horticulture*, 2022(2): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [14] 张治安, 张美善, 蔚荣海. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. ZHANG Z A, ZHANG M S, WEI R H. *Experimental guidance in plant physiology* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004(in Chinese).
- [15] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. LI H S. *Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment* [M]. Beijing: High Education Press, 2006(in Chinese).
- [16] 王诗雅, 郑殿峰, 项洪涛, 等. 初花期淹水胁迫对大豆叶片AsA-GSH循环的损伤及烯效唑的缓解效应[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(2): 271-285. WANG S Y, ZHENG D F, XIANG H T, et al. Damage of AsA-GSH cycle of soybean leaves under waterlogging stress at initial stage and the mitigation effect of unicon-

- azole [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2021, 54 (2) : 271-285 (in Chinese with English abstract).
- [17] MEENA R S, VIJAYAKUMAR V, YADAV G S, et al. Response and interaction of *Bradyrhizobium japonicum* and arbuscular mycorrhizal fungi in the soybean rhizosphere [J]. *Plant growth regulation*, 2018, 84(2): 207-223.
- [18] 晏增, 张江涛, 赵蓬晖, 等. 持续淹水胁迫对美洲黑杨幼苗生长及生理生化的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(12): 16-23. YAN Z, ZHANG J T, ZHAO P H, et al. Effects of continuous waterlogging stress on growth, physiology and biochemistry of *Populus deltoides* seedlings [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2019, 39(12): 16-23 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李环, 丁昌俊, 苏晓华. 涝渍胁迫对转基因库安托杨生长及生理性状的影响[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(1): 44-52. LI H, DING C J, SU X H. Effects of waterlogging stress on growth and physiological characters in multiple transgenic populus euramericana 'Guariento' [J]. *Forest research*, 2010, 23(1): 44-52 (in Chinese with English abstract).
- [20] 张文豹, 周忠胜, 曾雷, 等. 6种园林树木对持续性淹水胁迫的生理响应及其比较[J]. *南方林业科学*, 2021, 49(1): 6-11, 43. ZHANG W B, ZHOU Z S, ZENG L, et al. Physiological responses and evaluation of six ornamental tree species to continuous flooding stress [J]. *South China forestry science*, 2021, 49(1): 6-11, 43 (in Chinese with English abstract).
- [21] 牛远, 李玲芬, 杨修艳, 等. 氯化胆碱和海藻糖对油菜薹期干旱胁迫的缓解效应研究和耐旱指标筛选[J]. *核农学报*, 2020, 34(4): 860-869. NIU Y, LI L F, YANG X Y, et al. Drought tolerance effects of choline chloride and trehalose on rapeseed (*Brassica napus* L.) at bud stage under drought stress and selection of related indices [J]. *Journal of nuclear agricultural sciences*, 2020, 34(4): 860-869 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张志浩, 刘秀梅, 王倩, 等. 水涝胁迫下5个花椒品种抗氧化能力的比较[J]. *经济林研究*, 2019, 37(4): 179-187. ZHANG Z H, LIU X M, WANG Q, et al. Comparison of antioxidant capacity of five *Zanthoxylum bungeanum* cultivars under waterlogging stress [J]. *Non-wood forest research*, 2019, 37(4): 179-187 (in Chinese with English abstract).
- [23] 胡小京, 刘玉彩, 裴芸, 等. 水分胁迫对野百合幼苗生理特性的影响[J]. *河南农业科学*, 2020, 49(1): 111-117. HU X J, LIU Y C, PEI Y, et al. Effects of soil water stress on physiological characteristics of *Lilium brownii* seedlings [J]. *Journal of Henan agricultural sciences*, 2020, 49(1): 111-117 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王晓娇. 马铃薯萌芽出苗期根系生育对土壤水分的生理和分子响应机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018. WANG X J. Physiological and molecular mechanisms of potato sprouting root responses to soil moisture [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018 (in Chinese with English abstract).
- [25] 党云萍, 李春霞, 刘东雄. 水分胁迫对植物生理生化研究进展 [J]. *陕西农业科学*, 2012, 58(5): 89-93, 122. DANG Y P, LI C X, LIU D X. Advances in studies on physiological and biochemical effects of water stress on plants [J]. *Shannxi journal of agricultural sciences*, 2012, 58(5): 89-93, 122 (in Chinese with English abstract).
- [26] LIU X J, XU N, WU Y N, et al. Photosynthesis, chilling acclimation and the response of antioxidant enzymes to chilling stress in mulberry seedlings [J]. *Journal of forestry research*, 2019, 30(6): 2021-2029.
- [27] 王桂林, 范伟国, 彭福田. 桃树淹水及不同时间喷水杨酸的生理响应 [J]. *果树学报*, 2015, 32(5): 872-878. WANG G L, FAN W G, PENG F T. Physiological responses of the young peach tree to water-logging and spraying SA at different timing [J]. *Journal of fruit science*, 2015, 32(5): 872-878 (in Chinese with English abstract).
- [28] 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. WANG Z L, LIU X Z, LI J K, et al. Relationship between water-logging injury of maize and membrane lipid peroxidation and protective enzyme activity [J]. *Jiangsu journal of agricultural sciences*, 1988, 4(3): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [29] 杨海云, 艾雪莹, Batool Maria, 等. 油菜响应水分胁迫的生理机制及栽培调控措施研究进展 [J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(2): 6-16. YANG H Y, AI X Y, BATOOL M. Progress on physiological mechanisms of response to water stress and measures of cultivation controlling in rapeseed [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(2): 6-16. (in Chinese with English abstract).
- [30] 裴姿琛, 刘泽, 李保会. 不同水分条件下'凤丹'牡丹生长规律及生理差异 [J]. *林业与生态科学*, 2020, 35(1): 79-85. PEI Z S, LIU Z, LI B H. Growth rule and physiological difference of 'Fengdan' peony under different water conditions [J]. *Forestry and ecological sciences*, 2020, 35(1): 79-85 (in Chinese with English abstract).
- [31] 张晓佩, 高承芳, 刘远, 等. 多花黑麦草对水涝胁迫的生理响应 [J]. *福建农业学报*, 2014, 29(9): 898-903. ZHANG X P, GAO C F, LIU Y, et al. Physiologic responses of ryegrass *Lolium multi florum* against waterlogging stress [J]. *Fujian journal of agricultural sciences*, 2014, 29(9): 898-903 (in Chinese with English abstract).
- [32] 方建华, 范传颖, 陈华进, 等. 铁皮石斛不同产地的品质比较 [J]. *浙江农业科学*, 2017, 58(10): 1755-1756. FANG J H, FAN C Y, CHEN H J, et al. Comparison of quality of *Dendrobium officinale* from different habitats [J]. *Journal of Zhejiang agricultural sciences*, 2017, 58(10): 1755-1756.
- [33] 马瑞娟, 张斌斌, 蔡志翔, 等. 不同桃砧木品种对淹水的光合响应及其耐涝性评价 [J]. *园艺学报*, 2013, 40(3): 409-416. MA R J, ZHANG B B, CAI Z X, et al. Evaluation of peach rootstock waterlogging tolerance based on the responses of the photosyn-

- thetic indexes to continuous submergence stress[J]. *Acta horticulturae sinica*, 2013, 40(3): 409-416 (in Chinese with English abstract).
- [34] 朱向涛, 金松恒, 袁建国, 等. 牡丹不同品种耐涝性综合评价[J]. *核农学报*, 2017, 31(3): 607-613. ZHU X T, JIN S H, AI J G, et al. Evaluation of water-logging tolerance of peony variety [J]. *Journal of nuclear agricultural sciences*, 2017, 31(3): 607-613 (in Chinese with English abstract).

Effects of waterlogging stress on physiological characteristics and evaluation of waterlogging resistance of *Stachys sieboldii* Miq.

BAN Tiantian^{1,2}, ZHANG Suqin³, MA Chao^{1,2}, WU Chuandi³,
XU Yanjun³, LI Xiaohui^{1,2}, GENG Guangdong³

1. Horticultural Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China;
2. Guizhou Province Research Center for Horticulture Engineering Technology, Guiyang 550006, China;
3. College of Agronomy, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract Three *Stachys sieboldii* Miq. varieties were used to study the effects of waterlogging stress on the physiological characteristics of *S. sieboldii* Miq.. Correlation analysis and principal component analysis were used to evaluate the waterlogging resistance of *S. sieboldii* Miq. to provide a reference for the identification of waterlogging resistance of *S. sieboldii* Miq.. The results showed that the content of chlorophyll, soluble sugar, soluble protein, and the activity of POD and CAT of the three *S. sieboldii* Miq. varieties increased first and then decreased with the prolongation of waterlogging stress. The content of Pro in Luyin No.1 and Ganyin No.1 first increased and then decreased, while the content of Pro in Guizai No.1 kept increasing. The activity of SOD in Guizai NO.1 and Luyin No.1 increased first and then decreased, while the activity of SOD in Ganyin No.1 kept increasing under the waterlogging stress. The accumulation of MDA in the three *S. sieboldii* Miq. varieties increased all the time with the extension of stress time. The results of correlation analyses showed that the content of chlorophyll, soluble sugar, soluble protein, Pro, and MDA, the activity of SOD, POD, and CAT of *S. sieboldii* Miq. was closely related, but the degree of correlation was inconsistent. The results of comprehensively evaluating waterlogging resistance based on the principal component analysis showed that the waterlogging resistance of the three *S. sieboldii* Miq. varieties was in the decreasing order of Ganyin No.1 > Luyin No.1 > Guizai No.1.

Keywords *Stachys sieboldii* Miq.; waterlogging stress; physiological characteristics; evaluation of waterlogging resistance

(责任编辑: 张志钰)