



3 个玉兰材料对水涝胁迫的响应与耐涝性评价

叶 康^{1,2}, 陈伯祥¹, 杜习武^{1,3}, 秦 俊^{1,2}, 曾 丽³, 胡永红^{1,2}

(1 上海辰山植物园, 上海 201602; 2 上海城市树木生态应用工程技术研究中心, 上海 200020; 3 上海交通大学 农业与生物学院, 上海 200240)

摘 要:为评价星花玉兰及其实生选育品种‘菊花’以及其与柳叶玉兰的杂交品种‘皮鲁埃特’的耐涝性强弱, 并为后续星花玉兰耐涝品种选育提供理论依据。通过 14 d 的水涝胁迫, 研究 3 种玉兰叶片生理、内源激素和光合特性等相关的 14 个指标变化。利用主成分分析法, 比较超氧化物歧化酶(SOD)、丙二醛(MDA)、可溶性蛋白、脱落酸(ABA)和 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)这 5 个作为评价耐涝性指标的重要性以及评价耐涝性, 同时利用隶属函数分析法对 5 个指标进行耐涝性评价。结果表明: (1) 3 种玉兰在水涝胁迫后叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、叶绿素含量、初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、PS II 最大光化学量子产量(F_v/F_m)、PS II 有效光化学量子产量(Yield)和可溶性蛋白含量均显著降低, MDA、ABA 含量和 SOD 活性均有不同的增加幅度。‘菊花’和星花玉兰处理组的 C_i 、ACC 显著增加, 而‘皮鲁埃特’的显著降低。 (2) 评价 3 种玉兰耐涝性的生理及内源激素指标重要性依次为 ACC、SOD、ABA、可溶性蛋白和 MDA。 (3) 通过主成分分析法和隶属函数分析法对 3 种玉兰进行综合评价, 耐涝性强弱依次为‘皮鲁埃特’、星花玉兰和‘菊花’。

关键词:星花玉兰; 耐涝性; 主成分分析法; 隶属函数分析法

中图分类号:S685 **文献标志码:**A

Response to Waterlogging Stress and Evaluation of Waterlogging Tolerance of Three *Yulania* Materials

YE Kang^{1,2}, CHEN Boxiang¹, DU Xiwu^{1,3}, QIN Jun^{1,2}, ZENG Li³, HU Yonghong^{1,2}

(1 Shanghai Chenshan Botanical Garden, Shanghai 201602, China; 2 Shanghai Engineering Research Center of Urban Tree Ecology and Applications, Shanghai 200020, China; 3 School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The authors evaluated the waterlogging tolerance of *Yulania stellata* and its seedling breeding cultivar *Y. stellata* ‘Chrysanthemiflora’ and its hybrid cultivar *Y. ‘Piroutte’* with *Y. salicifolia*, to provide theoretical basis for subsequent selection of *Y. stellata* waterlogging tolerant cultivars. Through 14 days of waterlogging stress, the changes of 14 indexes related to leaf physiology, endogenous hormones and photosynthetic characteristics of three *Yulania* materials were studied. Using principal component analysis, the importance of superoxide dismutase (SOD), malondialdehyde (MDA), soluble protein, abscisic acid (ABA) and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) as indicators of waterlogging tolerance was compared and waterlogging tolerance was evaluated. The waterlogging tolerance of the five indicators was evaluated by the membership function analysis method. The results showed that: (1) The contents of P_n , G_s , T_r , chlorophyll, origin fluorescence, maximum fluorescence, PS II maximum photo-

收稿日期: 2023-01-20; 修改稿收到日期: 2023-05-06

基金项目: 上海市绿化和市容管理局科技项目(G212409, G192401); 上海市科委科技创新行动计划项目(19DZ1203500)

作者简介: 叶 康(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事植物区系及观赏植物资源选育研究。E-mail: yekang2007@163.com

chemical quantum yield, PS II effective photochemical quantum yield and soluble protein in the leaves of the three *Yulania* materials were significantly decreased after waterlogging stress, and the contents of MDA, ABA and SOD activity were increased by different degrees. However, the intercellular CO_2 concentration and ACC of *Y. stellata* ‘Chrysanthemiflora’ and *Y. stellata* treatment groups increased significantly, while the C_i and ACC of *Y. ‘Piroutte’* decreased significantly. (2) The importance of physiological and endogenous hormone indicators to evaluate the waterlogging tolerance of three *Yulania* materials was in order: ACC, SOD, ABA, soluble protein, and MDA. (3) According to the comprehensive evaluation of the three cultivars by principal component analysis and membership function analysis, the waterlogging tolerance of the three *Yulania* materials was in the order of *Y. ‘Piroutte’*, *Y. stellata* and *Y. stellata* ‘Chrysanthemiflora’.

Key words: *Yulania stellata*; waterlogging tolerance; principal component analysis; membership function analysis

玉兰属(*Yulania* Spach)植物是中国重要的园林绿化树种,栽培历史悠久^[1-2]。星花玉兰[*Yulania stellata* (Siebold et Zucc.) N. H. Xia]原产日本,为低矮灌木,具有分枝密集、树冠饱满和花量大等特点,开发利用前景可观^[3]。但因星花玉兰及品种在地势低洼、排水不畅的环境下生长受到限制,常出现叶片发黄、干枯脱落甚至植株死亡的情况。长三角地区海拔低、地势平坦、地下水位高,在雨季易发生涝害。因此,选育耐涝性较强的星花玉兰及品种具有重要意义。目前,星花玉兰相关研究多集中在生理学、形态学和遗传学方面^[4-5],逆境抗性相关研究较少。为此,研究星花玉兰及2个品种在水涝胁迫后叶片的光合特性和叶绿素荧光等相关的14个指标变化,建立星花玉兰的耐涝性综合评价方法,评价星花玉兰及2个品种的耐涝性强弱,为星花玉兰的耐涝品种选育提供理论依据。

水分是限制植物生长重要的非生物因子之一,影响植物的生存、生长发育乃至地理分布等^[6]。水分过多对植物的生长产生不利影响^[7],与正常生境相比,水分过多导致的水涝胁迫使植物体内的 O_2 浓度等发生显著的变化,限制了植物有氧呼吸和维持生命活动所需能量产生^[8]。植物的生理过程是复杂的,植物的抗性受多种因素影响,单独用某一指标很难反映植物耐涝的实质,也不利于揭示植物耐涝的本质。目前,关于植物的水涝胁迫研究有不少报道,应用最为广泛的是丙二醛(MDA)、超氧化物歧化酶(SOD)、可溶性蛋白等指标评价耐涝性,在生姜(*Zingiber officinale* Roscoe)^[9]、番茄(*Solanum lycopersicum* L.)^[10]等植物的耐涝性评价中已有大量报道。

主成分分析法在不损失数据原有的信息下,能将原始数据多个彼此相关的指标转换成新的、个数较少且彼此独立的综合指标,避免了重复信息的干扰^[11]。隶属函数分析法是基于模糊数学原理,通过

计算每一个指标相应的隶属函数值,并进行加权得到其综合评价值,可较为全面地对测试指标进行综合评价,有结果可靠和具有可比性的优点^[12]。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料分别是星花玉兰(*Y. stellata*)、星花玉兰‘菊花’(*Y. stellata* ‘Chrysanthemiflora’)及玉兰‘皮鲁埃特’[*Y. ‘(Mag’s)Piroutte’*]的3年生苗(以下分别简称2个品种为‘菊花’和‘皮鲁埃特’)。‘菊花’是星花玉兰实生选育品种;‘皮鲁埃特’是星花玉兰与柳叶玉兰[*Y. salicifolia* (Siebold et Zucc.) D. L. Fu]的杂交品种。所有供试植株生长健康,无病虫害发生。栽培容器为535 mm×360 mm塑料花盆,栽培基质为V(园土):V(草炭):V(介质土)=5:2:3的混合基质。

1.2 试验设计

试验在上海辰山植物园试验地进行,采用双套盆法,于2020年5月27日开始淹水处理,淹水至植株土壤表面以上约3 cm,总时长为14 d;对照组植株正常浇水管理,遵循表层土壤不干不浇水、浇即浇透的原则。3种玉兰的对照组(CK)与水涝处理组(FL)均为20株,共120株。对照组在0 d测定各项试验指标,处理组在水涝胁迫14 d时测定各项试验指标。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 光合特性和叶绿素荧光特性指标测定 叶片气体交换参数测定时间为上午9:00—11:00,各处理组与对照组均测量3株,选取植株中部侧枝第3枚成熟叶片,用Li-6400光合测定仪(Li-COR Inc, USA)测定,采用标准Li-COR叶室,红蓝光源(6400-02 LED光源),设定光照强度为 $1\,400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和空气流速为 $500\ \mu\text{mol}/\text{s}$ 。测定内容包括净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)。

叶绿素荧光特性使用 MINI-PAM 便携式调制叶绿素荧光仪(德国 WALZ 公司)测定,包括最小荧光(F_o)、最大荧光(F_m)、PS II 的最大光化学量子产量(F_v/F_m)和 PS II 有效光化学量子产量(Yield),测定样本选择方式同叶片气体交换参数。

1.3.2 生理指标测定 各处理组与对照组,均随机选择 3 株,取植株中部侧枝第 3 枚成熟叶片,测定叶绿素含量、可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性及丙二醛(MDA)含量。叶绿素含量使用 95% 丙酮-乙醇提取法^[13]测定;可溶性蛋白、SOD、MDA 测定采用上海索桥生物科技有限公司生产的试剂盒。均测 3 个重复。

1.3.3 内源激素含量测定 采用液相色谱串联质谱(LC-MS/MS)分析测定脱落酸(ABA)和 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)。各处理组与对照组随机选取植株枝条中部侧枝的叶片 3 枚,用研磨仪研磨(30 Hz, 1 min)至粉末状,称取 50 mg 研磨后的样本,加入适量内标,用 V(甲醇):V(水):V(甲酸)=15:4:1 混合液 1 mL 提取;提取液浓缩后用 V(甲醇):V(水)=4:1 混合液 100 μ L 复溶,过 0.22 μ m 滤膜,置于进样瓶中,用于 LC-MS/MS 分析。

1.4 数据分析

用 Excel 2010 进行数据整理和图表制作,标准差使用 STDEVP 函数计算。用 SPSS 22 进行方差分析和主成分分析,显著性分析采用 Duncan 法。隶属函数分析法的计算公式为:

指标与耐涝性为正相关时,

$$U_{ij} = (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \tag{1}$$

指标与耐涝性为负相关时,

$$U_{ij} = 1 - (X_{ij} - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \tag{2}$$

式中: X_{ij} 为第 i 个品种第 j 个指标的测定值; X_{imin} 为 j 指标中的最小值; X_{imax} 为 j 指标中的最大值; U_{ij} 为 i 品种 j 指标的隶属值。

通过隶属函数公式计算出各个品种的综合评价价值,综合评价价值越大表明耐涝性越强,综合评价价值计算公式为:

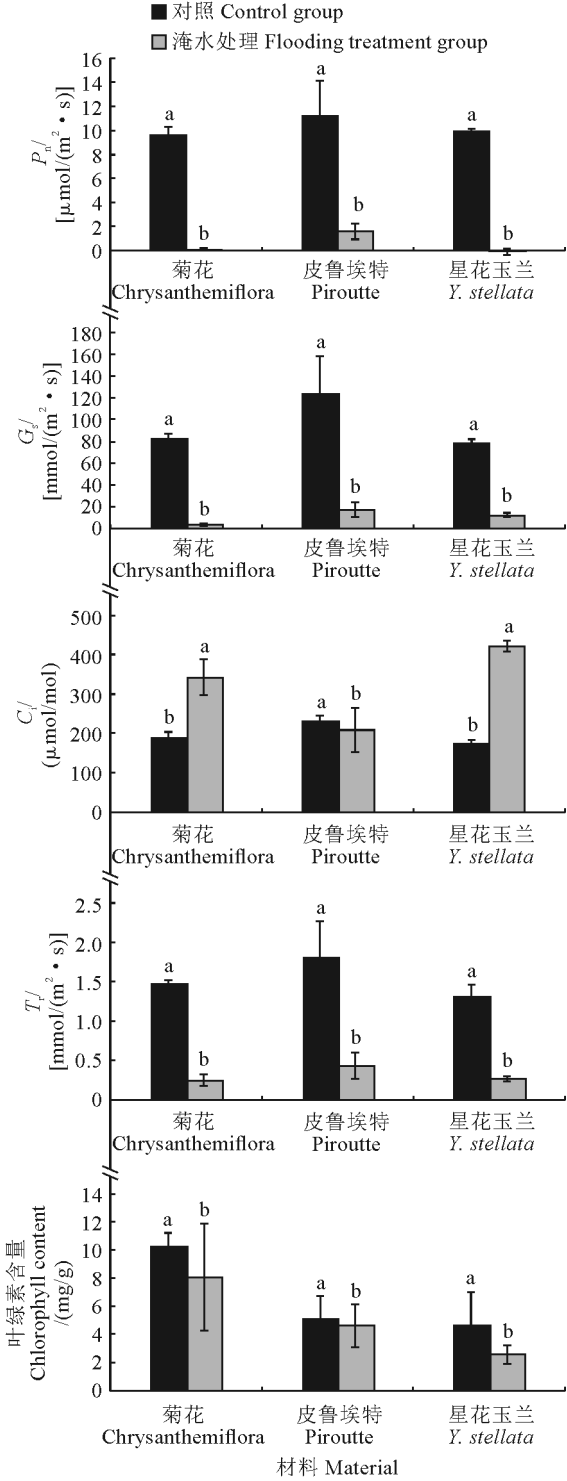
$$D = \sum_{j=1}^n \frac{U_{ij}}{n}, i=1,2,3,\cdots,n \tag{3}$$

2 结果与分析

2.1 水涝胁迫下光合参数的影响

由图 1 可知,水涝处理 14 d 后 3 种玉兰叶片净光合速率(P_n)均较处理前显著下降,大小依次为:‘皮鲁埃特’、‘菊花’和星花玉兰。其中‘皮鲁埃特’在水涝后

的 P_n 最高为 1.59 μ mol/($m^2 \cdot s$),较水涝前降低了 77.4%。而‘菊花’和星花玉兰的 P_n 分别为 0.08~0.09 μ mol/($m^2 \cdot s$),下降幅度为 99.1%和 100.9%。



同一材料的不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。
图 1 水涝胁迫对星花玉兰及其品种光合参数的影响
Different letters of the same material indicate significant difference ($P < 0.05$). The same as below.

Fig. 1 Effects of flooding stress on photosynthetic parameters of *Y. stellata* and its cultivars

在水涝处理 14 d 后叶片气孔导度(G_s)均显著下降,大小依次为:‘皮鲁埃特’、星花玉兰和‘菊花’。其中‘皮鲁埃特’在水涝后的 G_s 为 $17.0\text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;星花玉兰为 $12.7\text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;而‘菊花’仅为 $3.7\text{ mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,下降幅度为 95.5%。

在水涝处理 14 d 后 3 种玉兰叶片胞间 CO_2 浓度(C_i)有不同的变化。其中‘菊花’和星花玉兰的 C_i 均显著增加,增加幅度分别为 80.4%和 141.3%;而‘皮鲁埃特’的 C_i 比处理前降低了 $24.0\text{ }\mu\text{mol}/\text{mol}$,下降幅度为 10.3%。

在水涝处理 14 d 后 3 种玉兰叶片的蒸腾速率(T_r)均大幅降低。其中‘皮鲁埃特’14 d 时为 $0.44\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,降低了 76.0%,是 3 种玉兰中 T_r 最大的且降低幅度最小的。星花玉兰的 T_r 为 $0.26\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,降低了 79.9%。而‘菊花’水涝后的 T_r 最小为 $0.24\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,同时降幅也最大为 83.5%。

在水涝处理 14 d 后 3 种玉兰叶片的叶绿素含

量均降低。其中‘菊花’的叶绿素含量最高为 $8.11\text{ mg}/\text{g}$,较水涝前下降了 20.7%;‘皮鲁埃特’的叶绿素含量为 $4.63\text{ mg}/\text{g}$,下降幅度为 9.5%;而星花玉兰叶绿素含量 $2.57\text{ mg}/\text{g}$,下降幅度最大,为 44.6%。

综上所述,水涝胁迫对光合特性有显著影响,3 种玉兰叶片 P_n 、 G_s 、 T_r 和叶绿素含量均显著降低;‘菊花’和星花玉兰处理组的 C_i 显著增加,‘皮鲁埃特’则降低。‘皮鲁埃特’的 G_s 、 T_r 值也较高,表明‘皮鲁埃特’在水涝胁迫后的受害小于‘菊花’和星花玉兰。

2.2 水涝胁迫对叶绿素荧光特性的影响

由图 2 可以看出,3 种玉兰叶片在水涝 14 d 后的 F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 和 Yield 均小于水涝处理前。其中,‘菊花’在 14 d 的 F_o 、 F_m 、 F_v/F_m 和 Yield 分别下降了 10.7%、14.4%和 4.7%和 30.0%;‘皮鲁埃特’在 14 d 分别下降了 6.9%、16.4%和 9.1%和 19.7%;而星花玉兰 4 个指标下降了 6.0%、10.1%和 7.3%和 15.8%。

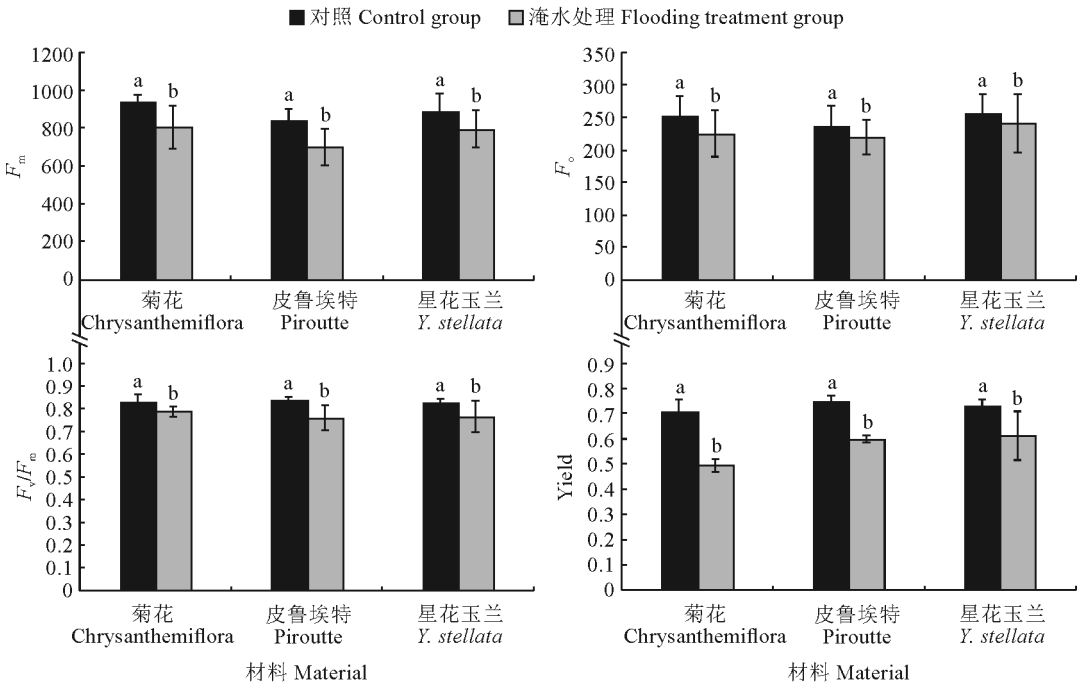


图 2 水涝胁迫对星花玉兰及其品种叶绿素荧光参数的影响
Fig. 2 Effects of flooding stress on Chlorophyll fluorescence of *Y. stellata* and its cultivars

2.3 水涝胁迫对叶片生理指标的影响

由图 3 可知,在水涝处理 14 d 后 3 种玉兰叶片的可溶性蛋白含量均较水涝前降低。其中‘菊花’叶片的可溶性蛋白含量最低,为 $84.5\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$,较水涝前降低了 74.2%;星花玉兰的可溶性蛋白含量最高,为 $184.1\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$;并且降幅最低,降低了 57.9%;而‘皮鲁埃特’的可溶性蛋白含量为 $129.97\text{ }\mu\text{g}/\text{g}$,降幅最大,

降低了 83.0%。在水涝处理 14 d 后 3 种玉兰的叶片 MDA 含量均升高。其中‘菊花’MDA 增加了 $3.8\text{ }\mu\text{mol}/\text{g}$,增幅最低,仅为 5.7%;‘皮鲁埃特’增加了 $15.3\text{ }\mu\text{mol}/\text{g}$,增幅为 21.6%;星花玉兰增加了 $24.7\text{ }\mu\text{mol}/\text{g}$,增幅最高,为 33.3%。在水涝处理 14 d 后 3 种玉兰叶片 SOD 活性均显著升高。‘菊花’的 SOD 活性升高了 $25.6\text{ U}/\text{g}$,增幅最小,为 116.5%;‘皮鲁

埃特’的最高为 35.18 U/g,增幅为 128.4%;而星花玉兰的升高了 34.7 U/g,但增幅最大,为 226.0%。综上所述,3 种玉兰叶片可溶性蛋白含量均较水涝前降低,表明叶片均受到了一定的伤害。而 MDA 含量和 SOD 活性在水涝 14 d 后均有不同的增加幅度,表明植株叶片在受到水涝胁迫伤害的同时也在抑制伤害的加深。

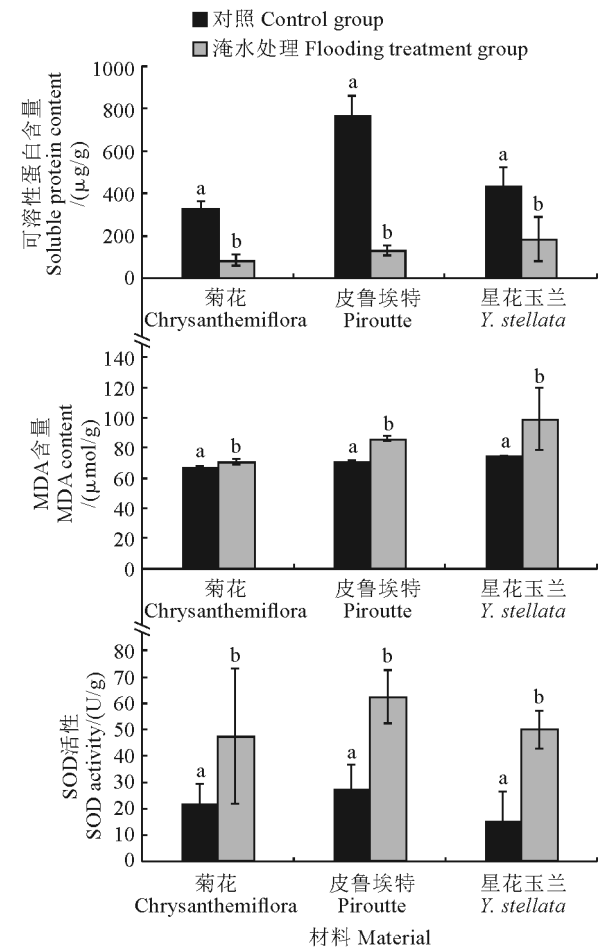


图 3 水涝胁迫对星花玉兰及其品种生理指标的影响
Fig. 3 Effects of flooding stress on physiological indexes of *Y. stellata* and its cultivars

2.4 水涝胁迫对叶片内源激素含量的影响

由图 4 看出,水涝胁迫 14 d 3 种玉兰叶片的 ABA 含量均显著增加。其中‘皮鲁埃特’增加最显著,升高了 1 171.0 ng/g,增幅为 207.0%;‘菊花’升高了 837.7 ng/g,增幅为 179.9%;星花玉兰升高了 735.3 ng/g,增幅为 158.2%。‘菊花’和星花玉兰叶片 ACC 含量均较水涝前升高,增幅分别为 59.4%和 159.1%;‘皮鲁埃特’较水涝前降低了 20.1 ng/g,降幅为 36.5%。

2.5 水涝胁迫下生理指标与内源激素的主成分分析

根据处理组数据进行耐涝性评价,将可溶性蛋白、MDA、SOD、ABA 和 ACC 这 5 个指标进行主成分分析。

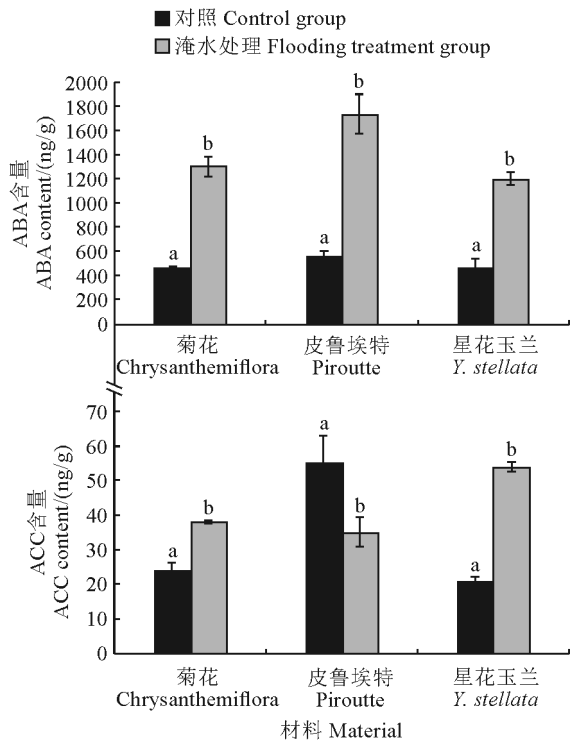


图 4 水涝胁迫对星花玉兰及其品种叶片激素含量的影响
Fig. 4 Effects of flooding stress on leaf hormone contents of *Y. stellata* and its cultivars

表 1 方差分解主成分提取分析

Table 1 Variance decomposition principal component extraction analysis table									
成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract of sum of the loads squares			旋转载荷平方和 Rotating of sum of the loads squares		
	总计 Total	方差百分比 Variance percentage/%	累积 Accumulation/%	总计 Total	方差百分比 Variance percentage/%	累积 accumulation/%	总计 Total	方差百分比 Variance percentage/%	累积 Accumulation/%
1	3.457	69.149	69.149	3.457	69.149	69.149	3.279	65.583	65.583
2	1.256	25.117	94.266	1.256	25.117	94.266	1.434	28.683	94.266
3	0.241	4.818	99.084						
4	0.045	0.902	99.986						
5	0.001	0.014	100.000						

由表 1 可知,前 2 个综合指标的方差贡献率分别为 69.1%和 25.1%,方差贡献率达 94.2%,基本包含所测指标的全部信息。因此可提取第一主成分(Y_1)和第二主成分(Y_2),其余主成分可忽略不计。由表 2 可知,决定第一主成分指标主要包括可溶性蛋白(−0.862)、ABA(0.822)、SOD(0.957)和 ACC(0.970)这 4 个指标。决定第二主成分的主要是 MDA(0.965)。因此,‘菊花’、‘皮鲁埃特’和星花玉兰耐涝性的生理指标及内源激素重要性排序依次为 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)、超氧化物歧化酶(SOD)、脱落酸(ABA)、可溶性蛋白和丙二醛(MDA)。

表 2 各指标的系数及贡献率

Table 2 Coefficients and proportions of each indexes			
指标 Index	第一主成分 Factor 1	第二主成分 Factor 2	
可溶性蛋白 Soluble protein	−0.862	0.350	
MDA	0.068	0.965	
SOD	0.957	0.245	
ABA	0.822	0.542	
ACC	0.970	0.162	
特征值 Eigen	3.457	1.256	
贡献率 Contribution/%	69.149	25.117	
累计贡献率 Cumulative contribution/%	69.149	94.226	

2.6 星花玉兰及 2 个品种的耐涝性综合评价

2.6.1 利用主成分分析法计算综合得分 表 2 中 2 个主成分的表达式分别为：

$$Y_1 = -0.39X_1 + 0.18X_2 + 0.53X_3 + 0.51X_4 + 0.52X_5$$

(4)

表 4 隶属函数分析法综合评价

Table 4 Comprehensive evaluation value of membership function method							
树种 Cultivar	可溶性蛋白 Soluble protein	MDA	SOD	ABA	ACC	平均隶属函数值 Average membership function value	排序 Range
菊花 <i>Y. stellata</i> ‘Chrysanthemiflora’	0.56	0.51	0.50	0.58	0.56	0.54	3
皮鲁埃特 <i>Y. ‘(Mag’s)Piroutte’</i>	0.57	0.56	0.48	0.67	0.63	0.58	1
星花玉兰 <i>Y. stellata</i>	0.48	0.61	0.66	0.60	0.45	0.56	2

3 讨 论

植物在长时间的水涝胁迫后,叶片叶绿素含量降低、发黄萎蔫、碳水化合物大量消耗,光合酶活性和 PSⅡ 反应中心活性降低,净光合速率和光化学量子效率降低等现象^[14]。在胁迫 14 d 后 3 种玉兰叶片的 P_n 、 F_v/F_m 和叶绿素含量等均显著降低,表明

$$Y_2 = 0.52X_1 + 0.81X_2 - 0.03X_3 + 0.25X_4 - 0.11X_5$$

(5)

把每个原始指标的数据标准化后代入到公式(1)和公式(2)中,可得到‘菊花’、‘皮鲁埃特’及星花玉兰对应的前 2 个主成分的值,再分别以 2 个主成分所对应的贡献率为各自的权重,从而得到基于主成分分析法的‘菊花’、‘皮鲁埃特’及星花玉兰耐涝性综合评价模型,即加权值计算公式为：

$$Z = 0.691Y_1 + 0.251Y_2$$

(6)

将 3 种玉兰的 Y_1 、 Y_2 数据分别代入公式(6)中得到综合得分。由表 3 可知,‘皮鲁埃特’综合得分最高,耐涝性最强,星花玉兰次之,‘菊花’得分最低。

表 3 主成分分析法综合得分

Table 3 Comprehensive evaluation scores of principal component analysis				
树种 Cultivar	Y_1	Y_2	综合得分 Comprehensive score	排序 Range
菊花 <i>Y. stellata</i> ‘Chrysanthemiflora’	0.82	−1.37	0.23	3
皮鲁埃特 <i>Y. ‘(Mag’s) Piroutte’</i>	2.43	−0.09	1.66	1
星花玉兰 <i>Y. stellata</i>	1.62	1.02	1.37	2

2.6.2 利用隶数函数分析法计算综合得分 将筛选后的评价指标通过隶属函数公式计算出各个品种的综合评价值;隶属函数值越大,耐涝性越强,隶数函数值越小,耐涝性越弱。由表 4 可知,‘皮鲁埃特’综合评价值最高,耐涝性最强,之后依次为星花玉兰、‘菊花’。

叶绿体受到水涝胁迫的严重破坏,这与张青侠对芍药(*Paeonia lactiflora* Pall.)的研究结果^[15]一致。光合作用是植物生长发育和产量形成的生理基础^[16];而‘皮鲁埃特’胁迫后的 P_n 最大、叶绿素含量降低幅度最小,表明其受到的伤害小于星花玉兰和‘菊花’,这与两种方法综合评价的结果一致。

叶片 MDA 含量为逆境胁迫下植物受害程度的

重要指标,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^[17-18]。SOD 作为内源活性氧清除剂能够在一定程度上清除体内过剩的活性氧,维持活性氧代谢平衡,保护膜结构,使植物具有抵抗逆境胁迫的能力。在胁迫 14 d 后 3 种玉兰叶片的 MDA 含量均上升,表明叶片膜系统均受到水涝的迫害;SOD 含量均上升,表明水涝发生后,植株通过提高叶片 SOD 含量清除活性氧,以保护叶肉细胞膜结构;可溶性蛋白含量均下降,表明叶肉细胞渗透调节能力的下降以及胁迫对叶片已有明显伤害;这与常春丽对丁香(*Syringa oblata* Lindl.)研究结果^[19]一致。而‘皮鲁埃特’在胁迫后的 SOD 含量最高,表明其对抗水涝胁迫的能力强。

在水涝胁迫下植物地上部分 ABA 合成加强,ABA 是一种调节休眠、脱落和植物胁迫反应的生长抑制物质,诱导植株体内与植物抗性有关的酶重新合成表达,抑制生长和促进气孔关闭^[20]。经水涝处理 14 d 后 3 种玉兰叶片的 ABA 含量均显著增加,而 G_s 、 T_r 均显著降低,气孔的关闭,导致叶片 T_r 降低,从而使水分运输速率降低、 CO_2 扩散阻力增加,这与王延双等研究红花玉兰水淹胁迫的结果^[21]一致。而‘皮鲁埃特’在胁迫后的 G_s 、 T_r 均为最高,再次印证其耐涝性最强。

乙烯(ET)的快速积累是植物应对水涝胁迫的重要途径,在缺氧条件下 ET 生物合成的直接前体 ACC 在 ACC 合酶(ACS)的催化下大量生成^[22]。在胁迫 14 d 后‘菊花’和星花玉兰 ACC 含量均较水涝前升高;表明水涝胁迫使‘菊花’及星花玉兰的净光合速率趋近于 0,气孔导度显著下降,让叶片的非光合细胞获取的氧气大大减少,植株缺氧。因此,促进植株合成的 ACC 进一步合成 ET,这与刘光亚等对棉花(*Gossypium hirsutum* L.)研究结果^[23]一

致。而‘皮鲁埃特’的 ACC 含量较水涝前降低了 36.5%,这可能与净光合速率有关,较高的净光合速率依然能为叶片提供一定量的 O_2 ;但其具体机理仍有待后续研究。

耐涝性状为复杂的数量性状,受到多种因素的影响;因此,需要选择多种评价指标综合分析才能科学地反映植物的耐涝性。本研究选择了可溶性蛋白、SOD、MDA、ACC 和 ABA 这 5 个指标,分别通过主成分分析方法和隶属函数分析法进行耐涝性综合评价。通过主成分分析方法提取主成分,得到加权值计算公式对 3 种玉兰进行耐涝性评价;隶属函数分析法计算的综合评价 D 值进行耐涝性评价;两种分析方法相结合的评价结果相同,表明这两种分析方法均可用于星花玉兰和 2 个品种的耐涝性综合评价。通过这两种评价方法建立的星花玉兰及 2 个品种的耐涝性评价方法,可综合反映耐涝性。该两种分析方法相结合的评价方法已在油菜^[24](*Brassica chinensis* L.)和番茄^[25](*Solanum lycopersicum* L.)等植物中应用。‘皮鲁埃特’耐涝性最强,这可能与其杂交亲本之一的柳叶玉兰有一定关系,柳叶玉兰野外常生长于山地溪沟边,具有较强的耐涝性,而‘菊花’则是星花玉兰实生选育品种。因此在星花玉兰的育种过程中,科学地将耐涝性强的种质参与杂交,可以获得耐涝性更强的杂交后代。

经过 14 d 的水涝胁迫,‘菊花’、‘皮鲁埃特’及星花玉兰均有显著的伤害,但 3 种玉兰对水涝胁迫表现出不同的耐涝性。通过主成分分析提取权重,3 种玉兰耐涝性的生理及内源激素指标重要性依次为:1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)、超氧化物歧化酶(SOD)、脱落酸(ABA)、可溶性蛋白和丙二醛(MDA)。分别通过主成分分析法和隶属函数分析法对 3 种玉兰进行耐涝性综合评价,耐涝性强弱均依次为:‘皮鲁埃特’、星花玉兰和‘菊花’。

参考文献:

[1] 田国行,傅大立,赵东武,等. 玉兰属植物资源与新分类系统的研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(5): 404-411.
TIAN G H, FU D L, ZHAO D W, *et al.* Study on the species resources and new classification system of *Yulania* Spach[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(5): 404-411.

[2] 刘秀丽,张启翔. 中国玉兰花文化及其园林应用浅析[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2009, 8(3): 54-58.
LIU X L, ZHANG Q X. Preliminary analysis on the Chinese *Magnolia denudata* flower culture and the application in landscape architecture[J]. *Journal of Beijing Forestry University*

[3] 杜习武,叶康,秦俊. 星花玉兰及其品种的光响应模型筛选[J]. 西部林业科学, 2019, 48(4): 132-136.
DU X W, YE K, QIN J. Selection of photosynthesis light response model of *Yulania stellata* and its varieties[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2019, 48(4): 132-136.

[4] UENO S, SETSUKO S, KAWAHARA T, *et al.* Genetic diversity and differentiation of the endangered Japanese endemic tree *Magnolia stellata* using nuclear and chloroplast microsatellite markers[J]. *Conservation Genetics*, 2005, 6(4): 563-574.

[5] TAMAKI I, NOMURA K, NOMURA R, *et al.* Seedling survival (Social Science Edition), 2009, 8(3): 54-58.

al and growth during the 2 years following seed germination of *Magnolia stellata*, a threatened subcanopy tree, after clearcutting[J]. *Journal of Forest Research*, 2015, **20**(4): 415-419.

[6] 罗巧玉,陈志,马永贵,等. 水分胁迫下发草(*Deschampsia caespitosa*)叶片脯氨酸及其代谢产物变化[J]. *生态学报*, 2022, **42**(9): 3 546-3 556.

LUO Q Y, CHEN Z, MA Y G, *et al.* Analyses of proline accumulation and metabolism in the leaves of *Deschampsia caespitosa* under drought and waterlogging stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(9): 3 546-3 556.

[7] VAN BODEGOM PETER M, SORRELL BRIAN K, ANNE-LIES O, *et al.* Separating the effects of partial submergence and soil oxygen demand on plant physiology[J]. *Ecology*, 2008, **89**(1): 193-204.

[8] COLMER T D, VOESENEK L A C J. Flooding tolerance: Suites of plant traits in variable environments[J]. *Functional Plant Biology*, 2009, **36**(8): 665.

[9] 李港,彭慧敏,蔡小东,等. 5个生姜品种对淹水胁迫的生理响应及耐涝性评价[J]. *南方农业学报*, 2022, **53**(8): 2 196-2 204.

LI G, PENG H M, CAI X D, *et al.* Physiological response of 5 ginger varieties to waterlogging stress and evaluation of their waterlogging tolerance[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2022, **53**(8): 2 196-2 204.

[10] 刘聪聪,兰超杰,李欢,等. 淹水胁迫及恢复对樱桃番茄苗期根系和叶片细胞膜稳定性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, **41**(9): 61-70.

LIU C C, LAN C J, LI H, *et al.* Effects of flooding stress and recovery on root and leaf cell membrane stability at cherry tomato seedlings[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, **41**(9): 61-70.

[11] 张振文,姚庆群. 主成分分析法在芒果贮藏特性分析中的应用[J]. *亚热带植物科学*, 2005, **34**(2): 25-28.

ZHANG Z W, YAO Q Q. Application of the principle component analysis on mango storage characteristic[J]. *Subtropical Plant Science*, 2005, **34**(2): 25-28.

[12] 赵国栋,赵同生,李春敏,等. 11个苹果野生砧木品种低温处理抗性指标的综合评价[J]. *西北林学院学报*, 2018, **33**(6): 145-151.

ZHAO G D, ZHAO T S, LI C M, *et al.* Comprehensive evaluation on cold resistance of eleven wild apple rootstocks[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, **33**(6): 145-151.

[13] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J]. *光谱实验室*, 2002, **19**(4): 478-481.

YANG M W. Study on rapid determination of chlorophyll content of leaves[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2002, **19**(4): 478-481.

[14] 潘澜,薛立. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2012, **31**(10): 2 662-2 672.

PAN L, XUE L. Plant physiological mechanisms in adapting to waterlogging stress: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(10): 2 662-2 672.

[15] 张青侠. 芍药(*Paeonia lactiflora* Pall.)不同品种应答水涝胁迫的机理研究[D]. 山东泰安:山东农业大学, 2020.

[16] 李艳芬,郑君岗,尹美强,等. 低钾胁迫对谷子幼苗叶片光合作用的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, **42**(6): 1 012-1 021.

LI Y F, ZHENG J G, YIN M Q, *et al.* Effect of low potassium stress on leaf photosynthesis of millet seedlings[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(6): 1 012-1 021.

[17] LIU X J, XU N, WU Y, *et al.* Photosynthesis, chilling acclimation and the response of antioxidant enzymes to chilling stress in mulberry seedlings[J]. *Journal of Forestry Research*, 2018, **30**: 2 021-2 029.

[18] TSIKAS D. Assessment of lipid peroxidation by measuring malondialdehyde (MDA) and relatives in biological samples: Analytical and biological challenges[J]. *Analytical Biochemistry*, 2017, **524**: 13-30.

[19] 常春丽,王展,王晶英. 淹水胁迫对丁香幼苗形态及生理特性的影响[J]. *北方园艺*, 2018, **42**(17): 105-110.

CHANG C L, WANG Z, WANG J Y. Effect of waterlogging stress on seedlings morphological end physiological characteristics of *Syringa*[J]. *Northern Horticulture*, 2018, **42**(17): 105-110.

[20] BLATT M R, THIEL G. Hormonal control of ion channel gating[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1993, **44**: 543-567.

[21] 王延双,方文,王欣彤,等. 水淹胁迫对红花玉兰苗木生长和生理生化特性的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2020, **42**(1): 35-45.

WANG Y S, FANG W, WANG X T, *et al.* Effects of waterlogging stress on growth, physiological and piochemistry characteristics of *Magnolia wufengensis*[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2020, **42**(1): 35-45.

[22] HARTMAN S, LIU Z G, VAN VEEN H, *et al.* Ethylene-mediated nitric oxide depletion pre-adapts plants to hypoxia stress[J]. *Nature Communications*, 2019, **10**: 4 020.

[23] 刘光亚,张艳军,孙学振,等. 乙烯对棉花适应淹水胁迫的作用及其机制[J]. *棉花学报*, 2020, **32**(3): 208-218.

LIU G Y, ZHANG Y J, SUN X Z, *et al.* Effects of ethylene on cotton adaption to waterlogging stress and the underlying mechanism[J]. *Cotton Science*, 2020, **32**(3): 208-218.

[24] 庞进平,王永生. 油菜幼苗光合及叶绿素荧光参数对干旱胁迫的响应及其抗旱性分析[J]. *西北植物学报*, 2023, **43**(2): 276-284.

PANG J P, WANG Y S. Photosynthetic and chlorophyll fluorescence responses of rape seedlings to drought stress and its drought resistance evaluation[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, **43**(2): 276-284.

[25] 李洪磊,王晓敏,郑福顺,等. 基于主成分和隶属函数分析的不同果色番茄品种引种初步评价[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2021, **43**(2): 402-411.

LI H L, WANG X M, ZHENG F S, *et al.* Preliminary evaluation of different fruit color tomato varieties introduction based on principal component and membership function analysis methods[J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2021, **43**(2): 402-411.

(编辑:韦青侠)