

# 高温胁迫下9种轻型屋顶绿化植物的生理响应\*

胡杏 钟丽媚 倪建中 王伟 代色平

(广州市林业和园林科学研究院, 广东 广州 510405)

**摘要** 以9种轻型屋顶绿化植物为材料, 通过人工气候室模拟高温, 以25℃为对照, 设置35、40、45、55℃4个胁迫处理, 研究不同温度胁迫下9种植物的形态变化和丙二醛、脯氨酸、可溶性蛋白质和可溶性糖4种生理指标对不同温度的响应, 计算各指标的耐热系数、进行相关性分析及主成分分析, 并基于主成分分析法综合评价其耐热性强弱, 筛选出适宜广州气候的轻型屋顶绿化植物。结果表明: 随着胁迫温度的升高, 丙二醛与可溶性糖整体呈先升后降的趋势、脯氨酸呈上升趋势, 可溶性蛋白主要在55℃有不同程度的下降, 植物间4个指标的变化幅度存在显著差异; 通过综合分析得出9种植物的耐热性强弱依次为: 铺地锦竹草 *Callisia repens*> 大花马齿苋 *Portulaca grandiflora*> 假紫万年青 *Belosynapsis ciliata*> 红趾草 *Callisia repens* ‘Bolivian Jew’> 重瓣大花马齿苋 *Portulaca grandiflora* ‘Double Peony’> 紫米粒 *Portulaca gilliesii*> 凹叶景天 *Sedum emarginatum*> 大苞水竹叶 *Murdannia bracteata*> 薄雪万年草 *Sedum hispanicum*, 筛选出铺地锦竹草、大花马齿苋、假紫万年青、红趾草、重瓣大花马齿苋作为广州轻型屋顶绿化植物。

**关键词** 轻型屋顶绿化; 耐热性; 生理指标; 主成分分析

中图分类号: S731.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 06-0116-08

## Response of Physiology of 9 Extensive Green Roof Plants to High Temperature Stress

HU Xing ZHONG Limei NI Jianzhong WANG Wei DAI Seping

(Guangzhou Institute of Forestry and Landscape Architecture, Guangzhou, Guangdong 510405, China)

**Abstract** This study aimed to select the most heat-tolerant plant from 9 species optimum for the extensive green roof. The contents of malondialdehyde (MDA), proline, soluble protein, soluble sugar in leaves and plant appearance were observed under high temperatures (35℃, 40℃, 45℃ and 55℃, while 25℃ as control) in the phytotron that simulate high-temperature environment. The heat-tolerance coefficients, correlation and principal components of measured indexes were calculated and analyzed before the heat tolerance of tested plants was comprehensively evaluated. The contents of MDA and soluble sugar showed a rise and then reduce with the high temperature rising in general, the contents of proline showed a rise, whereas the contents of soluble protein have decreased in varying degrees of 9 species at 55℃. The rangeabilities between the 4 physiological indexes were significantly different. At the circumstance of 55℃, The heat resistance rank of 9 plants was *Callisia repens* > *Portulaca grandiflora* > *Belosynapsis ciliata* > *C. repens* ‘Bolivian Jew’ > *P. grandiflora* ‘Double Peony’ > *P. gilliesii* > *Sedum emarginatum* > *Murdannia bracteata* > *S. hispanicum*. According to our experiments, the first five taxa were suitable for use as extensive green roof plants in Guangzhou.

**Key words** extensive green roof; heat tolerance; physiological indexes; principal component analysis

\* 基金项目: 广州市科技计划项目“广州园林植物科技资源圃运行费”、广东省重大科技专项(2013A011401004)。

第一作者: 胡杏(1987—), 女, 助理工程师, 主要从事园林植物遗传育种与引种适应性研究, E-mail: 373108011@qq.com。

通信作者: 代色平(1975—), 女, 教授级高级工程师, 主要从事园林植物资源开发利用研究, E-mail: 383856367@qq.com。

随着城市建设飞速发展，建筑用地和绿化用地矛盾突出、“热岛效应”日趋严重，屋顶绿化作为一种新的环境美化新方式逐渐被引入到城市园林绿化建设中<sup>[1-2]</sup>。屋顶绿化不仅能有效扩大城市的绿化面积，还能减少城市高空悬浮物、降低室内温度、增强雨水蓄积能力、减轻城市“热岛效应”<sup>[3]</sup>。受屋顶光照、温度、湿度、土壤基质等环境因素的限制，土壤层厚 5~10 cm 的轻型屋顶绿化有承重风险小、低成本、见效快、养护简便等优势，将是屋顶绿化发展的方向<sup>[4]</sup>。轻型屋顶绿化在植物的选择上主要以耐贫瘠、耐热、抗旱的多年生低矮草本植物为主<sup>[5]</sup>。我国在屋顶绿化植物的应用与研究主要以佛甲草 *Sedum lineare*、垂盆草 *Sedum sarmentosum* 和绿景天 *Sedum* sp. 等景天科植物为主<sup>[6]</sup>，广州地处南亚热带，具有夏季长、温暖多雨、温差较小等气候特征，景天科植物在广州地区容易积水腐烂，景观效果持久性差、管理成本高<sup>[7]</sup>，需要筛选出更多适宜广州轻型屋顶绿化的植物，丰富屋顶绿化景观。

植物耐热性是屋顶绿化植物筛选的重要指标。2022 年 7 月 9 日到 25 日，广东已连续 17 天出现了大范围持续性高温天气，最高气温达 39℃，地表温度超 70℃。因此，筛选耐热性强的植物对于提高植物在屋顶的成活率、提升屋顶绿化景观效果具有重要的意义。国内近几年也开始了多项屋顶绿化植物的耐热性研究。汤聪等<sup>[8]</sup>以广州地区野外引种及已引种驯化成功的鸭跖草科和景天科

8 种屋顶绿化植物为试材，采用电导率法并结合 logistics 方程测定其耐热性。徐玉芬等<sup>[9]</sup>对鸭跖草科植物 logistics 方程测定 4 种鸭跖草科屋顶绿化植物的耐热性。周媛等<sup>[10]</sup>对高温胁迫下 9 种景天属植物形态特征与生理响应进行研究，评价其耐热能力的高低，筛选出耐热性强、适宜无养护屋顶绿化的植物品种。通过引种驯化多种低矮草本地被植物并进行栽培观察，初步筛选出 4 种鸭跖草科植物、3 种马齿苋科植物、2 种景天科植物开展了人工模拟高温胁迫试验，通过观察不同温度胁迫对其生长的影响、研究其生理生化的变化、评价其耐热能力的高低，以期筛选出耐热性强、适合广州轻型屋顶绿化的植物，丰富屋顶绿化植物多样性。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试植物为 9 种低矮地被植物，选取相同长度的健康茎段于 50 cm\*25 cm\*6 cm 的筛盘中扦插，栽培基质为草炭：陶粒=3:1，2 个月后选取生长健壮、无病虫害、覆盖满筛盘的植物作为试验材料。

### 1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 为模拟屋顶绿化环境并排除自然界光照、温湿度不稳定等因素对试验结果的影响，试验在广州市观赏植物种质资源圃人工气候室进行。气候室分别设置 25/20℃（昼/

表 1 9 种轻型屋顶绿化植物  
Table 1 9 plants for extensive green roof useage

| 序号<br>Number | 植物<br>Plant | 科属<br>Family and Genus | 拉丁名<br>Latin                                |
|--------------|-------------|------------------------|---|
| 1            | 铺地锦竹草       | 鸭跖草科锦竹草属               | <i>Callisia repens</i>                      |
| 2            | 红趾草         | 鸭跖草科锦竹草属               | <i>Callisia repens</i> ‘Bolivian Jew’       |
| 3            | 假紫万年青       | 鸭跖草科鸭跖草属               | <i>Belosynapsis ciliata</i>                 |
| 4            | 大苞水竹叶       | 鸭跖草科水竹叶属               | <i>Murdannia bracteata</i>                  |
| 5            | 紫米粒         | 马齿苋科马齿苋属               | <i>Portulaca gilliesii</i>                  |
| 6            | 大花马齿苋       | 马齿苋科马齿苋属               | <i>Portulaca grandiflora</i>                |
| 7            | 重瓣大花马齿苋     | 马齿苋科马齿苋属               | <i>Portulaca grandiflora</i> ‘Double Peony’ |
| 8            | 薄雪万年草       | 景天科景天属                 | <i>Sedum hispanicum</i>                     |
| 9            | 凹叶景天        | 景天科景天属                 | <i>Sedum emarginatum</i>                    |

夜)、35/30℃、40/35℃、45/40℃、55/50℃,其中25/20℃为对照组,湿度设置为75,16h明/8h暗,光照强度模拟夏季晴朗天气光照变化设置,胁迫3d,每种植物每处理3筛。

1.2.2 形态特征变化观察 胁迫3d后,观察植物的形态受害情况。将高温高湿伤害程度划分为以下5级:0级,无热害症状;I级,少于1/4的叶片表现热害症状;II级,1/4至1/2的叶片表现热害症状;III级,1/2至3/4的叶片表现热害症状;IV级,3/4以上的叶片表现热害症状;V级,植株死亡。

1.2.3 生理指标的测定 随机采取中部成熟的叶片作为样品进行各生理指标测试。主要测试指标有丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量,实验方法参照李合生<sup>[11]</sup>的方法,每个处理每个样品重复测定3次,取平均值。

### 1.3 数据处理

1.3.1 基础数据处理与相关性分析 测量的数据利用WPS XLSL表格进行录入并作初步处理,利用IBM SPSS Statistics 21软件进行数据相关性分析。

1.3.2 耐热系数计算 各指标耐热系数=高温胁迫下的指标测定值/对照指标测定值<sup>[12]</sup>。

1.3.3 主成分分析 以55℃高温胁迫后各植物的生理指标相关性与主成分分析,并基于主成分分析用主成分因子进行综合评价<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 高温胁迫下植物形态特征的变化

植物受热害叶片会出现明显的水渍状烫伤斑点,随后变褐,坏死,叶绿素破坏严重,叶色变为褐黄等情况。由表2可知,25、35、40℃处理下,各植物均无热害表现。45℃胁迫处理3d后,铺地锦竹草与大苞水竹叶表现为I级热害,有1/4~1/2叶片有热害症状,其余植物无热害表现。55℃胁迫处理3d后,仅紫米粒无热害症状,耐热性表现最好;其次为大花马齿苋与松叶牡丹,表现为I级热害;薄雪万年草稍差,表现为II级湿热伤害。其中铺地锦竹草的耐热性与观察到的植物外部形态受热害情况表现稍微有不同,原因可能是10月份铺地锦竹草正处于开花季节,植物营养分散,叶片本身稍微偏黄造成的观察误差。

### 2.2 高温胁迫对不同植物丙二醛(MDA)含量的影响

由图1可以看出,9种植物的MDA含量对高温胁迫的响应整体趋势为先升后降,35℃胁迫处理时,大花马齿苋的MDA相较于对照增幅最大,耐热系数为3.06;其余植物的MDA含量变化幅度均不大。40℃胁迫处理时,大花马齿苋和薄雪万年草的MDA含量相较于对照增幅较大,耐热系数分别为2.55、2.19。45℃胁迫处理时,大苞水竹叶与凹叶景天的MDA含量相较于对照急剧下降,耐热系数分别为0.47、0.28;红趾草、大花马齿苋和重瓣大花马齿苋的MDA含量增幅较大,耐热系

表2 不同温度胁迫3天后植物的生长状况  
Tab. 2 The growth status of plants after 3 days high temperature treatment

| 植物<br>Plant | 温度/℃ Temperature |                   |                   |
|-------------|------------------|-------------------|-------------------|
|             | 25,35,40         | 45                | 55                |
| 1           |                  | 1/4至1/2的叶片表现热伤害症状 | 3/4以上的叶片表现热伤害症状   |
| 2           |                  | 无热伤害症状            | 1/2至3/4的叶片表现热伤害症状 |
| 3           |                  | 无热伤害症状            | 1/2至3/4的叶片表现热伤害症状 |
| 4           |                  | 1/4至1/2的叶片表现热伤害症状 |                   |
| 5           | 无热伤害症状           |                   | 无热伤害症状            |
| 6           |                  |                   |                   |
| 7           |                  | 无热伤害症状            | 少于1/4的叶片表现热伤害症状   |
| 8           |                  |                   | 1/4至1/2的叶片表现热伤害症状 |
| 9           |                  |                   | 3/4以上的叶片表现热伤害症状   |

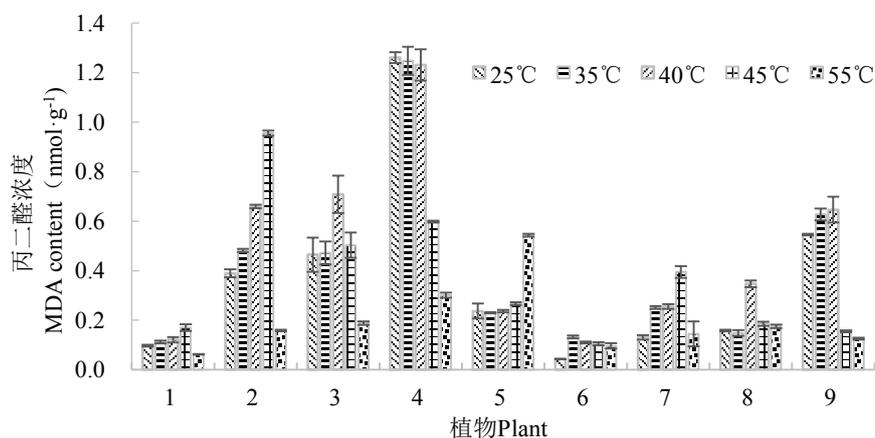


图 1 不同温度胁迫对 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effects of high temperature stress on MDA content

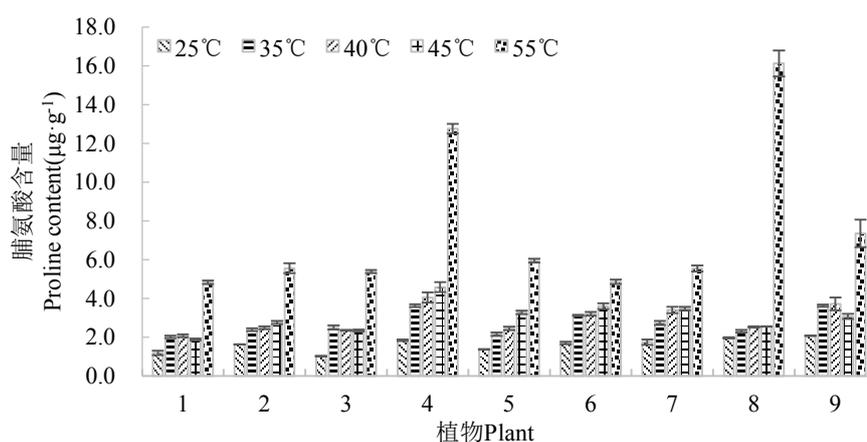


图 2 不同温度胁迫对脯氨酸含量的影响

Fig. 2 Effects of high temperature stress on proline content

数分别为 2.45、2.42、3.02。55 °C 胁迫处理时，紫米粒的 MDA 含量相较于对照增幅最大，耐热系数为 2.29；大苞水竹叶和凹叶景天的 MDA 含量降幅最大，耐热系数分别为 0.24、0.23。

但不同植物在不同温度时的响应程度不同。铺地锦竹草、红趾草、假紫万年青、重瓣大花马齿苋在 55 °C 胁迫处理时，MDA 含量急剧下降；大苞水竹叶、薄雪万年草和凹叶景天在 45 °C 胁迫处理时 MDA 含量就开始急剧下降；紫米粒在 55 °C 胁迫处理时 MDA 含量反而开始大幅增加；仅大花马齿苋的各温度胁迫下的 MDA 值均保持在一个相对温度的水平。

### 2.3 高温胁迫对不同植物脯氨酸 (Pro) 含量的影响

由图 2 可见，9 种植物的 Pro 含量均随胁迫温度的升高成不断增加的趋势。相较于对照，在 35 °C、40 °C、45 °C 胁迫下各植物的 Pro 含量均有

小幅度的增加。55 °C 处理下各植物的 Pro 含量均大幅增加，大花马齿苋的 Pro 含量相较于对照增幅最小，耐热系数为 2.85；假紫万年青和大苞水竹叶的 Pro 含量增幅较大，耐热系数分别为 5.24、6.91；增幅最大的为薄雪万年草，耐热系数为 8.19。

### 2.4 高温胁迫对不同植物可溶性蛋白质含量的影响

由图 3 可见，在 35 °C、40 °C、45 °C 胁迫处理下，9 种植物的可溶性蛋白含量相较于对照变化幅度不大。55 °C 处理时，仅紫米粒的可溶性蛋白含量相较于对照变化幅度最小，其耐热系数为 1.01；其余 8 种植物的可溶性蛋白质含量均急剧下降，耐热系数在 0.43~0.64，其中凹叶景天的可溶性蛋白下降幅度最大，其耐热系数为 0.43。

### 2.5 高温胁迫对不同植物可溶性糖含量的影响

由图 4 可见，9 种植物的可溶性糖含量整体呈

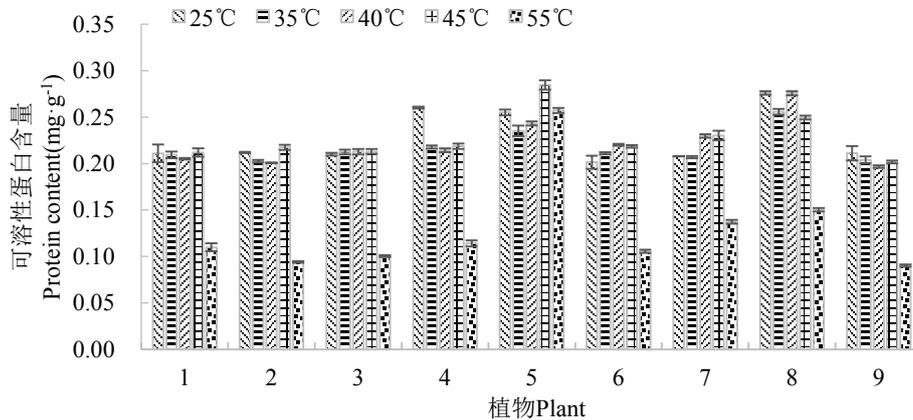


图3 不同温度对可溶性蛋白质含量的影响

Fig. 3 Effects of high temperature stress on soluble protein content

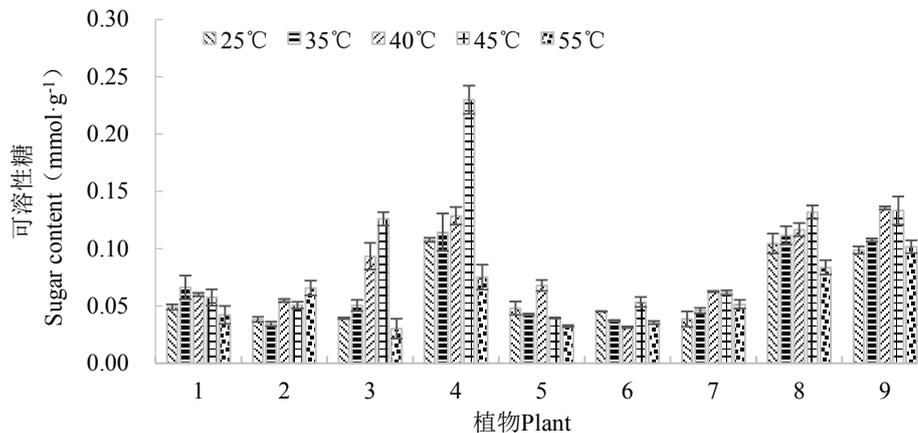


图4 不同温度对可溶性糖含量的影响

Fig. 4 Effects of high temperature stress on soluble sugar content

现先升后降的趋势。35℃胁迫处理时，9种植物的可溶性糖含量相较于对照变化幅度不大，耐热指数在0.82~1.28。40℃胁迫处理时，仅大花马齿苋的可溶性糖含量相较于对照有所下降，耐热指数为0.7；其余8种植物的可溶性糖含量相较于对照均有所上升，耐热指数在1.12~2.37，其中上升最多的为假紫万年青。45℃胁迫处理时，紫米粒的可溶性糖含量开始下降，耐热指数为0.82；其余8种植物的可溶性糖含量相较于对照均上升，耐热系数为1.17~3.20，其中假紫万年青上升幅度最大。55℃胁迫处理时，仅红趾草的可溶性糖含量在持续上升，耐热系数为1.71；可溶性糖含量相较于对照下降幅度最大的为紫米粒，其耐热系数为0.67。

## 2.6 各生理指标的相关性分析

9种植物的4个生理指标的相关性分析结

果见表3~表6。35℃、40℃胁迫处理时，丙二醛与脯氨酸、可溶性糖含量呈极显著正相关关系 ( $P<0.01$ )，可溶性糖与脯氨酸呈显著正相关关系 ( $P<0.05$ ) (表3、表4)。45℃胁迫处理时，可溶性糖与脯氨酸呈显著正相关关系 ( $P<0.05$ ) (表5)。55℃胁迫处理时，丙二醛与可溶性蛋白、可溶性糖与脯氨酸呈极显著正相关关系 ( $P<0.01$ ) (表6)。

由表3~表6可知，4个生理指标间都存在或大或小的相关性，有的存在显著或极显著的相关性，使它们所提供的信息发生重叠<sup>[14-15]</sup>。同时，由于不同植物的耐热机制上存在差异，各指标在耐热性中起的作用不尽相同。所以，直接利用这些单项指标很难对各植物的耐热性做出准确的评价，需综合各指标进行分析。

表 3 35℃高温胁迫下各生理指标的相关系数

Tab. 3 The correlation coefficient matrix of different physiological indexes at 35℃

| 指标<br>Index | 丙二醛<br>Malondialdehyde | 脯氨酸<br>Pro | 可溶性蛋白<br>Soluble protein | 可溶性糖<br>Soluble sugar |
|-------------|------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|
| 丙二醛         | 1                      |            |                          |                       |
| 脯氨酸         | 0.680**                | 1          |                          |                       |
| 可溶性蛋白       | -0.217                 | -0.329     | 1                        |                       |
| 可溶性糖        | 0.496**                | 0.430*     | 0.353                    | 1                     |

注：\*表示  $P < 0.05$  的显著水平，\*\*表示  $P < 0.01$  的显著水平。Note: \*significant at  $P < 0.05$  levels, \*\*significant at  $P < 0.01$  levels.

表 4 40℃高温胁迫下各生理指标的相关系数

Tab. 4 The correlation coefficient matrix of different physiological indexes at 40℃

| 指标<br>Index | 丙二醛<br>Malondialdehyde | 脯氨酸<br>Pro | 可溶性蛋白<br>Soluble protein | 可溶性糖<br>Soluble sugar |
|-------------|------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|
| 丙二醛         | 1                      |            |                          |                       |
| 脯氨酸         | 0.497**                | 1          |                          |                       |
| 可溶性蛋白       | -0.311                 | -0.198     | 1                        |                       |
| 可溶性糖        | 0.648**                | 0.410*     | 0.086                    | 1                     |

注：\*表示  $P < 0.05$  的显著水平，\*\*表示  $P < 0.01$  的显著水平。Note: \*significant at  $P < 0.05$  levels, \*\*significant at  $P < 0.01$  levels.

表 5 45℃高温胁迫下各生理指标的相关系数

Tab. 5 The correlation coefficient matrix of different physiological indexes at 45℃

| 指标<br>Index | 丙二醛<br>Malondialdehyde | 脯氨酸<br>Pro | 可溶性蛋白<br>Soluble protein | 可溶性糖<br>Soluble sugar |
|-------------|------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|
| 丙二醛         | 1                      |            |                          |                       |
| 脯氨酸         | 0.135                  | 1          |                          |                       |
| 可溶性蛋白       | -0.162                 | 0.106      | 1                        |                       |
| 可溶性糖        | 0.118                  | 0.404*     | -0.277                   | 1                     |

注：\*表示  $P < 0.05$  的显著水平。Note: \*significant at  $P < 0.05$  levels.

表 6 55℃高温胁迫下各生理指标的相关系数

Tab. 6 The correlation coefficient matrix of different physiological indexes at 55℃

| 指标<br>Index | 丙二醛<br>Malondialdehyde | 脯氨酸<br>Pro | 可溶性蛋白<br>Soluble protein | 可溶性糖<br>Soluble sugar |
|-------------|------------------------|------------|--------------------------|-----------------------|
| 丙二醛         | 1                      |            |                          |                       |
| 脯氨酸         | 0.133                  | 1          |                          |                       |
| 可溶性蛋白       | 0.829**                | 0.083      | 1                        |                       |
| 可溶性糖        | -0.2                   | 0.580**    | -0.285                   | 1                     |

注：\*\*表示  $P < 0.01$  的显著水平。Note: \*\*significant at  $P < 0.01$  levels.

表 7 55℃高温胁迫下各生理指标的主成分分析

Tab. 7 Principal component analysis of physiological indexes at 55℃

| 主成分<br>Principal component | 各指标的特征向量<br>Eigen-vector of different indexes |            |                          |                       | 特征值<br>Characteristic value | 贡献率 /%<br>Contribution rate | 累计贡献率 /%<br>Cumulative contribution rate |
|----------------------------|---|------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
|                            | 丙二醛<br>MDA                                    | 脯氨酸<br>Pro | 可溶性蛋白<br>Soluble protein | 可溶性糖<br>Soluble sugar |                             |                             |  |
| 1                          | 0.896   | -0.119     | 0.924                    | -0.535                | 1.957                       | 48.937                      | 48.937                                   |
| 2                          | 0.317   | 0.913      | 0.239                    | 0.74                  | 1.538                       | 38.455                      | 87.392                                   |

## 2.7 基于主成分分析的耐热性综合评价

如表7所示,通过对55℃高温胁迫下9种轻型屋顶绿化植物的生理指标进行主成分分析,提取主成分2个,其中第1主成分贡献率为48.937%,累计贡献率87.392%。从各主成分综合指标系数可以看出,第一主成分主要包括丙二醛和可溶性蛋白,荷载分别达到0.896、0.924;第二主成分主要包括脯氨酸和可溶性糖的荷载分别达到0.913、0.74;结果表明,需综合分析这4个生理指标来评价植物的耐热性。

根据9种轻型屋顶绿化植物的4个生理指标的标准值和成分矩阵的因子得分系数特征向量,可得出第一、第二主成分的回归方程分别为:

$$C_1=0.896 X_1 - 0.119 X_2 + 0.924 X_3 - 0.535 X_4$$

$$C_2=0.317 X_1 + 0.913 X_2 + 0.239 X_3 - 0.74 X_4$$

以各主成分相应的贡献率为权重,分别为0.489 370、0.384 55,由于2个主成分总的贡献率为0.873 92,还应对权重单位化<sup>[13]</sup>,获得各植物综合得分的计算式: $Z=(0.489 37 \times C_1 + 0.384 55 \times C_2) / 0.873 92$ 。通过计算,获得9种轻型屋顶绿化植物的综合得分与排名,其耐热性强弱顺序依次为:铺地锦竹草>大花马齿苋>假紫万年青>红趾草>重瓣大花马齿苋>紫米粒>凹叶景天>大苞水竹叶>薄雪万年草(表8)。

表8 9种植物耐热性综合评价结果

Tab. 8 The comprehensive evaluation on heat tolerance upon 9 species

| 序号<br>Ordinal | 植物<br>Plant | 得分<br>Score | 排名<br>Ranking |
|---------------|-------------|-------------|---------------|
| 1             | 铺地锦竹草       | 1.73        | 1             |
| 2             | 红趾草         | 2.02        | 4             |
| 3             | 假紫万年青       | 1.99        | 3             |
| 4             | 大苞水竹叶       | 4.54        | 8             |
| 5             | 紫米粒         | 2.50        | 6             |
| 6             | 大花马齿苋       | 1.76        | 2             |
| 7             | 重瓣大花马齿苋     | 2.04        | 5             |
| 8             | 薄雪万年草       | 5.61        | 9             |
| 9             | 凹叶景天        | 2.60        | 7             |

## 3 讨论与结论

植物耐热性研究是屋顶绿化植物评价及筛选的基础。不同植物耐热机制不同,且受多个因素

影响,多个指标的综合评价能更全面、真实地反应植物耐热能力的强弱。本研究综合分析了9种轻型屋顶绿化植物受高温胁迫后4个生理生化指标的变化,得出4种植物的耐热性由强到弱依次为:铺地锦竹草>大花马齿苋>假紫万年青>红趾草>重瓣大花马齿苋>紫米粒>凹叶景天>大苞水竹叶>薄雪万年草。

通常用MDA用以表示细胞膜脂过氧化程度与植物对逆境反映的强弱<sup>[10]</sup>。试验结果表明,耐热性强的铺地锦竹草与大花马齿苋的MDA累计量明显小于耐热性弱的大苞水竹叶,这与杨华庚、许桂芳等<sup>[16-17]</sup>的研究结论是一致的。而高温会使膜质过氧化作用加剧,形成的MDA能使细胞膜的孔隙变大,通透性增加,导致细胞结构破裂<sup>[18]</sup>。丙二醛的大量积累以及质膜透性的不断增大是细胞损坏的重要标志<sup>[17]</sup>。耐热性差的大苞水竹叶、薄雪万年草与凹叶景天的MDA含量在45℃胁迫处理时开始急剧下降,铺地锦竹草、红趾草、假紫万年青和重瓣大花马齿苋的MDA含量在55℃胁迫处理时开始急剧下降,可能是植物长时间承受高温胁迫导致细胞受损,不能正常合成丙二醛所导致。

植物体内Pro、可溶性蛋白和可溶性糖具有调节渗透、保护细胞膜结构稳定的作用。在正常条件下,植物体内的Pro含量很低,遭受胁迫的植物细胞内会大量积累Pro<sup>[19]</sup>。9种植物在55℃胁迫处理后Pro含量均急剧增加,这一变化的原因可能是高温触发了保护机制发生生理响应,导致Pro含量的大量累积,其中耐热性较差的大苞水竹叶、薄雪万年草、凹叶景天脯氨酸含量最高。而可溶性蛋白在55℃胁迫处理后急剧下降,其余温度下其含量变化幅度均很小,这可能由于Rubisco等表达增强引起可溶性蛋白含量增加,随着高温程度的加剧,Rubisco羧化酶活性下降,净光合速率减少,导致可溶性蛋白含量下降<sup>[20]</sup>。55℃高温胁迫下,假紫万年青和大苞水竹叶的可溶性糖含量急剧下降可能是因为当胁迫到一定程度后,呼吸作用大于光合作用消耗了贮存的糖类,会造成可溶性糖含量下降<sup>[21-22]</sup>。

4个生理指标间均存在或大或小的相关性,与植物的耐热性也密切相关。但不同遗传背景的植物耐热性影响机制不同,主要判定植物耐热性的指标也不一样,在将来的研究中可以测定更多

指标, 进一步进行生理指标的筛选。

极端天气气温超 40 ℃会越来越常见, 夏季裸露屋顶温度超 45 ℃的可能性极大, 屋顶绿化能有效隔绝太阳直接照射屋顶, 进行隔热降温。综合植物在不同高温胁迫下的生长情况, 筛选耐热性较好的铺地锦竹草、大花马齿苋、假紫万年青、红趾草、重瓣大花马齿苋应用于广州屋顶绿化, 可丰富轻型屋顶绿化景观, 保障屋顶绿化植物群落结构稳定, 推动屋顶绿化的发展。

### 参考文献

- [1] KOROL E, SHUSHUNOVA N. Benefits of a modular green roof technology[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 161: 1820-1826.
- [2] AKBARI H, KONOPACKI S. Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada[J]. *Energy*, 2004, 29(2): 191-210.
- [3] 魏艳, 赵慧恩. 我国屋顶绿化建设的发展研究: 以德国、北京为例对比分析[J]. *林业科学*, 2007, 43(4): 95-101.
- [4] 张天宇, 李杨. 轻型屋顶绿化: 我国屋顶绿化发展的新趋势[J]. *华中建筑*, 2010(6): 26-28.
- [5] 张继方, 张俊涛, 刘文, 等. 广州地区地毯式屋顶绿化植物筛选及其评价[J]. *热带农业科学*, 2014, 34(12): 98-104.
- [6] 张乔松, 朱纯, 阮琳, 等. 优良覆盖植物“绿景天”引种试验及天台绿化的应用研究[J]. *广东园林*, 2001(3): 18-24.
- [7] 冼丽铨, 鲍海泳, 陈红跃, 等. 屋顶绿化研究进展[J]. *世界林业研究*, 2013(2): 36-42.
- [8] 汤聪, 郭微, 刘念, 吴少吟. 几种广州地区屋顶绿化植物耐热性的测定[J]. *北方园艺*, 2013(11): 62-65.
- [9] 徐玉芬, 杨静, 邓磊, 等. 应用 Logistic 方程测定 4 种鸭跖草科屋顶绿化植物的耐热性[J]. *仲恺农业工程学院学报*, 2018, 31(4): 52-55; 70.
- [10] 周媛, 郭彩霞, 董艳芳, 等. 9 种景天属轻型屋顶绿化植物的耐热性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(9): 119-127; 136.
- [11] 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: 105-263.
- [12] 张乐华, 周广, 孙宝腾, 等. 高温胁迫对两种常绿杜鹃亚属植物幼苗生理生化特性的影响[J]. *植物科学学报*, 2011, 29(3): 362-369.
- [13] 张鹏. 基于主成分分析的综合评价研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [14] 陈秀晨, 王士梅, 朱启升, 等. 水稻品种耐热性与相关生化指标的关联分析[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(9): 1633-1639.
- [15] JACOB T, RITCHIE S, ASSMANN S M, et al. Abscisic acid signal transduction in guard cells is mediated by phospholipase D activity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, 96(21): 12192-12197.
- [16] 许桂芳, 张朝阳. 高温胁迫对 4 种珍珠菜属植物抗性生理生化指标的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 565-569.
- [17] 杨华庚, 杨重法, 陈慧娟, 等. 蝴蝶兰不同耐热性品种幼苗对高温胁迫的生理反应[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(2): 144-150.
- [18] CHAOUI A, MAZHOUDI S, GHORBAL M H. Cadmium and zinc iinduction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean (*Phaseolus vulgaris* L.)[J]. *Plant Sci*, 1997, 127: 139-147.
- [19] 耶兴元, 何晖, 张燕, 等. 脯氨酸对高温胁迫下猕猴桃苗抗热性相关生理指标的影响[J]. *山东农业科学*, 2010(5): 44-46; 50.
- [20] 张桂莲, 陈立云, 张顺堂, 等. 抽穗开花期高温对水稻剑叶理化特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2007(7): 1345-1352.
- [21] 杨东, 罗群, 曹慕岚, 等. 温度胁迫对菊科杂草生理指标的影响及其适应[J]. *吉首大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(4): 75-79.
- [22] 杨子平, 胡杏, 阮琳, 等. 6 种装配式墙体绿化植物的耐热性研究[J]. *林业与环境科学*, 2018, 34(3): 58-64.