

11个鲜食葡萄品种幼苗抗旱性研究及抗旱指标筛选

刁珊¹, NAMI Kana², 纪薇^{1,2,3*}, 杨明霞^{4*}

(¹山西农业大学园艺学院, 山西太谷 030801; ²日本山形大学, 山形县 990-8560;

³运城城市农业农村局, 山西运城 044000; ⁴山西农业大学果树研究所, 山西太谷 030815)

摘要:【目的】缺水是影响干旱区葡萄种植的主要因素之一,因此有必要筛选抗旱鲜食葡萄品种和葡萄抗旱的相关指标。【方法】以丽红宝、晶红宝、无核翠宝等11个鲜食葡萄品种幼苗为材料,进行自然干旱处理,测定其电导率、叶绿素含量和叶绿素荧光参数,利用相关性分析、主成分分析、聚类分析和灰色关联度分析相结合的方法,综合评价幼苗抗旱性差异并筛选相关指标。【结果】干旱胁迫对植株相对电导率、叶绿素含量和叶绿素荧光参数均有显著影响。相关性分析表明, Rfd与NPQ, F_m 与 F_p 、 F_v 、 F_v/F_m , F_p 与 F_v 、 F_v/F_m , F_v 与 F_v/F_m , 叶绿素a含量与总叶绿素含量呈极显著正相关($p < 0.001$)。主成分分析表明,11个葡萄品种抗旱性排序为:丽红宝>秋红宝>茉莉香>巨茉莉>无核白>晶红宝>火焰无核>晚黑宝>无核翠宝>克瑞森无核>早霞玫瑰。聚类分析将11个葡萄品种分为3个抗旱级别,第1类是高抗旱品种(秋红宝和丽红宝);第2类是中抗旱品种(晶红宝、无核白、巨茉莉和茉莉香);第3类是低抗旱品种(克瑞森无核、晚黑宝、早霞玫瑰、无核翠宝和火焰无核)。灰色关联度分析显示叶绿素a含量、叶绿素b含量、类胡萝卜素含量、总光合色素含量、根系相对电导率和NPQ 6个指标与葡萄幼苗抗旱性密切相关。【结论】秋红宝和丽红宝抗旱性较强,适合在干旱及半干旱地区推广种植。叶片的光合色素含量、根系相对电导率和NPQ可作为评价葡萄抗旱性的可靠指标。

关键词:鲜食葡萄;幼苗;抗旱性差异;指标筛选;综合评价

中图分类号:S663.1

文献标志码:A

文章编号:1009-9980(2023)09-1871-14

Evaluation of drought resistance in seedlings of 11 table grape varieties and screening of drought resistance indicators

DIAO Shan¹, NAMI Kana², JI Wei^{1,2,3*}, YANG Mingxia^{4*}

(¹College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, Shanxi, China; ²Yamagata University, Yamagata-ken 990-8560, Japan; ³Yuncheng Agriculture and Rural Bureau, Yuncheng 044000, Shanxi, China; ⁴Pomology Institute, Shanxi Agricultural University, Taigu 030815, Shanxi, China)

Abstract: 【Objective】Grapes are an important cash crop in the arid areas. Drought seriously affects the growth and yield of grapes and limits the development of the grape industry. Selecting table grape varieties with high drought resistance is the most effective way to cope with drought. This experiment aimed to select table grape varieties with high drought resistance suitable for cultivation in the arid areas as well as drought resistance indicators with high correlation. This study provides a reference for planting grapes in the arid areas. 【Methods】The experiment was conducted in a greenhouse at the Horticulture Station of Shanxi Agricultural University. Eleven table grape varieties tested included five Shanxi varieties (Lihongbao, Jinghongbao, Qihongbao, Wanheibao and Wuhecuibao), three Liaoning varieties (Zaoxiameigui, Jumoli and Molixiang), two Xinjiang varieties (Thompson Seedless and Flame Seedless) and one California variety (Crimson Seedless). 1-year-old cuttings of each variety were collected in November 2021 and buried with earth. The sand-harvested cuttings were transplanted in April 2022, and the experiment was conducted after the seedlings were established in August, 2022. The aver-

收稿日期:2023-03-02

接受日期:2023-05-20

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231A036);山西省科技成果转化引导专项项目(202204021301028);山西省科技重大专项计划(202201140601027-3)

作者简介:刁珊,女,在读硕士研究生,研究方向为园艺植物栽培生理和品质调控。E-mail:ds11212008@163.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail:jwpeiputao@163.com;E-mail:ymx20051@163.com

age air temperature during the experiment was 29.3 °C and the average humidity was 51.9%. Water withholding treatment was used to simulate natural drought, and 20 seedlings of each variety were selected. On the 0, 3, 6, 9 and 12 days after drought stress treatment, biological responses were recorded and chlorophyll fluorescence parameters (maximum fluorescence value (F_m), maximum photochemical efficiency (F_v/F_m), effective quantum yield of PS II (Qy), non-photochemical burst coefficient (NPQ), photochemical burst coefficient (qP) and fluorescence decline rate (Rfd) were measured with a Fluor Pen FP110. The samples were taken back to the laboratory for determination of membrane leakage of the leaves and roots and photosynthetic pigment contents (chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids and total chlorophylls). Significance of differences between varieties at different times of drought were analyzed with the new multiple range method. Correlations between the indicators were tested by correlation analysis. Principal component analysis was used to evaluate the drought resistance of the 11 table varieties, which were classified using cluster analysis based on the principal component scores. The parameters with high correlation with drought resistance were selected using gray correlation analysis. **【Results】** Drought stress had significant effects on the phenotype, membrane leakage in the leaf and root, chlorophyll content, and chlorophyll fluorescence parameters. Drought caused loss of greenness and wrinkling and wilting of grape seedlings. Membrane leakage in the leaves and roots increased significantly under drought. Chlorophyll a content and total chlorophyll content decreased significantly. F_m , F_v/F_m , effective quantum yield, non-photochemical burst coefficient, photochemical burst coefficient and fluorescence decline rate of PSII all decreased. Correlation analysis of various indexes showed that Rfd and NPQ, F_m and F_p , F_v and F_v/F_m , F_p and F_v and F_v/F_m , F_v and F_v/F_m , and chlorophyll a content and total chlorophyll content were highly significantly positively correlated ($p < 0.001$). NPQ and Qy, chlorophyll b content and total chlorophyll content, and chlorophyll a content and carotenoid content were significantly positively correlated ($p < 0.05$). However, root membrane leakage and Rfd, F_m and F_p were significantly negatively correlated ($p < 0.05$). The order of the drought-resistance according to the principal component analysis was in a descending order of Lihongbao > Qihongbao > Molixiang > Jumoli > Thompson Seedless > Jinghongbao > Flame Seedless > Wanheibao > Wuhecuibao > Crimson Seedless > Zaoxiameigui. According to the method of cluster analysis, Qihongbao and Lihongbao were of higher drought resistance; Jinghongbao, Thompson Seedless, Jumoli and Molixiang of moderate drought resistance; and Flame Seedless, Wanheibao, Zaoxiameigui, Wuhecuibao and Crimson Seedless of low drought resistance. Gray correlation analysis showed that drought stress had a significant effect on all the parameters. The grey correlation analysis showed that the correlation between each index and drought was chlorophyll b content, total chlorophyll content, chlorophyll a content, carotenoid content, root relative membrane permeability, NPQ, F_p , F_v/F_m , leaf relative membrane permeability, qP, Rfd, Qy, F_v and F_m . Except for F_v , Qy, F_m and Rfd, the correlation coefficients of all the parameters with drought resistance were higher than 0.8, and the correlations of chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids, total chlorophyll content and root membrane leakage with drought resistance were higher than 0.85. **【Conclusion】** Lihongbao and Qihongbao were identified as of high drought resistance at seedling stage, which could be used as materials for drought resistance breeding and for study of the mechanism and regulation of drought resistance in table grapes. The photosynthetic pigment contents, membrane leakage of the roots and NPQ were highly correlated with drought resistance, which could be used as the simple and intuitive indices of drought resistance in table grapes for identifying drought resistant resources at seedling stage.

Key words: Table grape; Seedlings; Drought resistance differences; Index screening; Comprehensive evaluation

葡萄(*Vitis vinifera* L.)是葡萄科葡萄属的一种落叶藤本植物,栽培面积广、经济效益好、果实营养价值高^[1]。葡萄多种植于干旱和半干旱区地区,因此水分亏缺是限制葡萄优产高产的主要因素之一^[2]。选育抗旱葡萄品种是保障旱地葡萄优产高产的有效途径之一,研究不同葡萄品种的抗旱性,筛选抗旱相关指标,可为葡萄抗旱育种和干旱区葡萄栽培提供理论参考。

全球变暖引起的干旱灾害严重制约农业发展,影响植物生长和发育,故干旱对植物的影响是近年来的研究重点^[3]。研究表明^[3],干旱对植物的影响首先体现在表型特征上,植株失水导致植株生长缓慢,叶片萎蔫下垂,叶片数和叶片面积减少,甚至引发植株死亡。除表型外,细胞膜透性也会因缺水而改变,膜透性的改变又会引起相对电导率的变化^[4]。有研究发现在干旱胁迫下,植株叶片光合色素含量显著减少^[5],而光合色素的下降引起光反应进程变化,从而导致叶绿素荧光参数下降^[6]。植物对干旱的影响体现在多个指标上,前人使用聚类分析、主成分分析或灰色关联度分析等方法把多个单一性状进行联合

分析,开展了柑橘、茶用菊和大麦等作物品种间抗旱性鉴定及关键抗旱指标的筛选工作^[7-9]。

目前对葡萄抗旱性鉴定的研究主要集中在砧木葡萄、野生葡萄上,但应用相关性分析、主成分分析、聚类分析和灰色关联度分析四种方法联合分析鲜食葡萄品种抗旱性及抗旱指标筛选的报道却很少。因此,基于笔者课题组前期葡萄幼苗抗性研究基础^[10],本研究中对11个鲜食葡萄品种幼苗进行干旱处理,并利用相关性分析、主成分分析、聚类分析和灰色关联度分析相结合的方法,分析干旱对11个鲜食葡萄品种幼苗光合色素含量、叶绿素荧光参数和电导率的影响,从而筛选出抗旱性强的鲜食葡萄品种以及与葡萄抗旱关联度高的指标,以期为干旱地区葡萄品种选育及种植提供理论和现实依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试葡萄共计11个品种,其中山西品种5个,辽宁品种3个,新疆品种1个,美国品种2个,具体品种名称、父母本和来源等信息见表1。

表1 供试鲜食葡萄品种名称及来源
Table 1 Name and origin of fresh grape varieties for testing

| 序号 No. | 品种名称 Varieties name | 父母本 Parentage×Maternal | 原产地 Source |
|-----------|------------------------|--------------------------------------|---------------|
| 1 | 晚黑宝 Wanheibao | 瑰宝×秋红宝 Guibao×Qihong | 山西 Shanxi |
| 2 | 早霞玫瑰 Zaoxiameigui | 秋黑×白玫瑰香 Qiuhei×White rose fragrance | 辽宁 Liaoning |
| 3 | 秋红宝 Qihongbao | 瑰宝×粉红太妃 Guibao×Taifi rose | 山西 Shanxi |
| 4 | 巨茉莉 Jumoli | 7601×巨峰 7601×Kyoho | 辽宁 Liaoning |
| 5 | 茉莉香 Molixiang | 玫瑰露×罗也尔玫瑰 Delaware×Royal Rose | 辽宁 Liaoning |
| 6 | 无核翠宝 Wuhecuibao | 瑰宝×无核白鸡心 Guibao×Centennial Seedless | 山西 Shanxi |
| 7 | 火焰无核 Flame Seedless | 多亲本杂交选育 Multi-parent hybrid breeding | 美国 USA |
| 8 | 丽红宝 Lihongbao | 瑰宝×无核白鸡心 Guibao×Centennial Seedless | 山西 Shanxi |
| 9 | 克瑞森无核 Crimson Seedless | 皇帝×C33-199 Emperor×C33-199 | 美国 USA |
| 10 | 无核白 Thompson Seedless | 不详 Unknow | 新疆 Xinjiang |
| 11 | 晶红宝 Jinghongbao | 瑰宝×无核白鸡心 Guibao×Centennial Seedless | 山西 Shanxi |

于2021年12月收集芽饱满的扦插条沙藏,并于2022年4月取出种植于山西农业大学园艺站(112°34'31" N, 37°25'31" E, 海拔791.4 m),扦插苗种植沿用课题组幼苗培育体系^[10]。正常肥水管理至幼苗10~12枚叶片后,选取长势一致、无病虫害的幼苗进行试验。

1.2 试验设计

试验于2022年8月在山西农业大学园艺站进

行。每个品种选取20株长势一致、无病虫害的幼苗,共计220株进行试验。采用断水处理模拟自然干旱,分别在断水0、3、6、9和12 d采样,土壤含水量使用盆栽称重法^[11]计算。于第0天时浇透水,此时土壤含水量最高,植株处于正常状态;第3天时土壤含水量下降至61.29%,此时植株遭受轻度干旱;第6天时土壤含水量为22.12%,植株遭受中度干旱;第9天时土壤含水量下降至7.97%,为重度干旱;第12天时土壤含水

量下降至 1.55%，含水量最低，葡萄幼苗遭受极度干旱胁迫。试验期间外界环境平均温度为 29.3 °C，平均湿度为 51.9%。

1.3 测定指标与方法

叶片保水力参照钟灶发等^[12]的方法测定，于处理第 0 天，选取各品种葡萄幼苗相同部位叶片 2 枚，置于 A4 纸上，使其自然脱水。自叶片脱离植株后开始计时，每 24 h 观察 1 次并拍照记录表型，连续记录 48 h。

电导率参照张星等^[13]的方法测定，取植株相同部位叶片和根 0.1 g，加入 5 mL 蒸馏水浸泡 12 h 后，使用雷磁 DDS-307A 电导率仪测定叶片和根系电导率。

叶绿素含量参照张晓艳等^[14]的方法测定，取植株相同部位功能叶 0.05 g，加入 95% 丙酮、乙醇体积比为 1:2 的混合液 10 mL 浸提 24 h，测定光合色素含量。

叶绿素荧光参数参照倪建中等^[15]的方法测定，将植株第 3~4 节位的健康功能叶暗处理 0.5 h 后，使用 Fluor Pen FP110 手持叶绿素荧光仪（捷克 Fluor-Cam 公司）测定最大荧光 (F_m)、最大可变荧光 (F_v)、PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m)、PS II 的有效量子产率 (Q_y)、闪光脉冲 (F_p)、非光化学淬灭系数 (NPQ)、光化学淬灭系数 (qp) 和荧光下降比值 (Rfd) 等。

1.4 数据处理

使用 SPSS 19.0 进行数据整理分析，对试验数据进行主成分分析、聚类分析、相关性分析和灰色关联度分析，使用 GraphPad Prism 8、RStudio、Excel 2010、ChiPlot 和 Adobe Photoshop 2021 进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下不同品种葡萄扦插苗形态和叶片保水力差异分析

由图 1 可以看出，葡萄幼苗在干旱胁迫下生长缓慢且逐渐萎蔫，随着干旱胁迫天数的增加幼苗萎蔫程度变大。第 0 天幼苗外部形态良好，茎秆挺挺，叶片翠绿。随着干旱时间的延长，各品种植株出现叶片下垂的现象，这表明干旱导致幼苗细胞膨压及水势下降。干旱第 9 天各品种植株外部形态响应差异显著，火焰无核、无核白、克瑞森无核、无核翠宝和早霞玫瑰相较于其余品种萎蔫严重，说明其体内水

平衡失衡严重，表明其应对干旱的能力较弱。当干旱继续加深时，植株死亡，证明此时幼苗体内细胞原生质体失水严重。

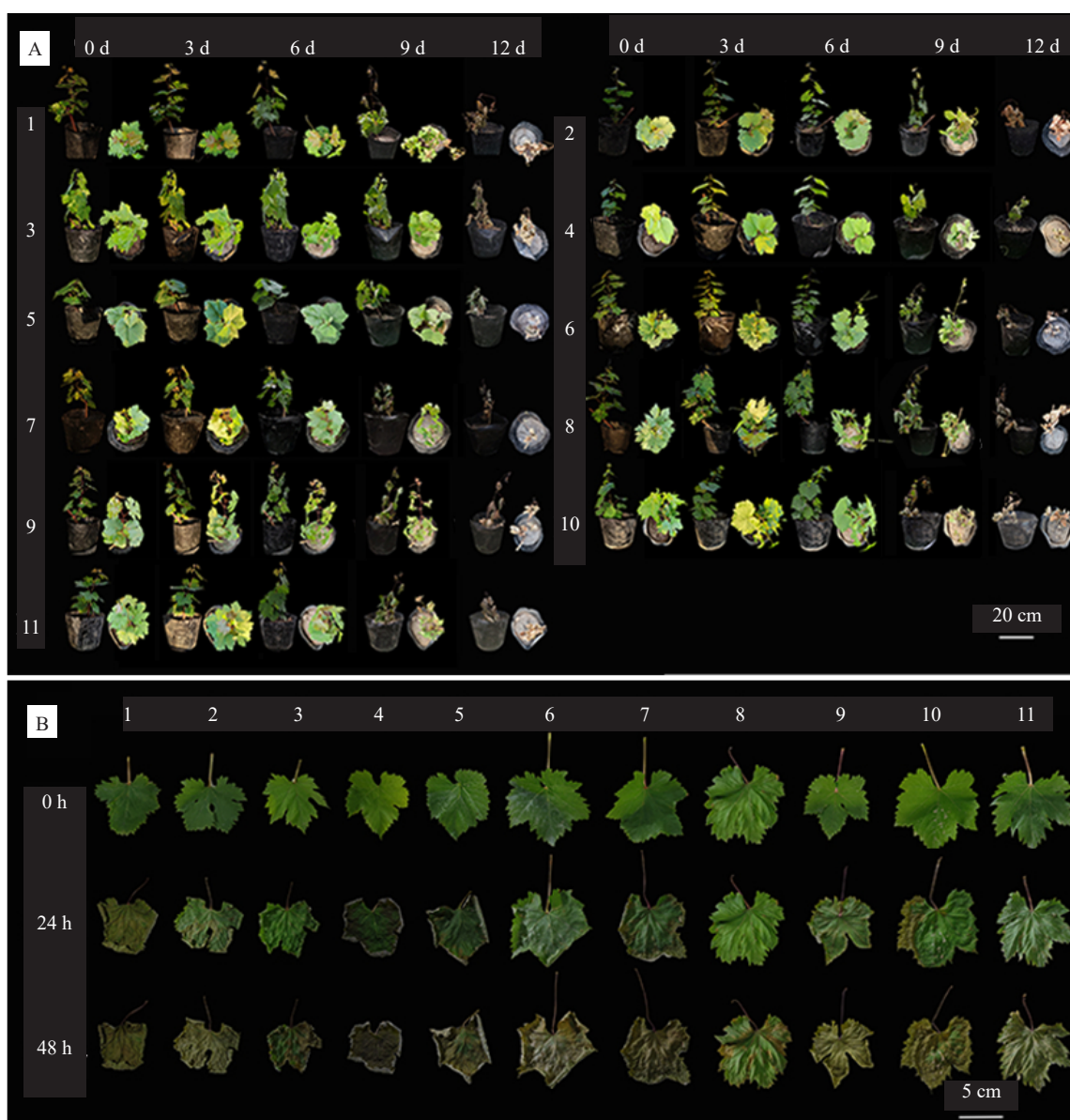
叶片在脱离植株后会因脱水而卷曲、萎蔫和皱缩，其卷曲、萎蔫和皱缩程度能反映不同品种抗旱性差异。在脱离母体 24 h 内，晚黑宝、早霞玫瑰、巨茉莉、火焰无核 4 个品种叶片颜色变化显著；晚黑宝、巨茉莉、茉莉香和火焰无核叶片边缘卷曲程度与其他品种相比较严重。随着离体时间延长，叶片变褐、皱缩和萎蔫情况加重，11 个品种中丽红宝叶片无明显卷曲、皱缩表现；晚黑宝、茉莉香叶片明显卷曲、皱缩；火焰无核、巨茉莉和无核翠宝叶片明显变褐，说明相较于其他品种，丽红宝叶片保水能力最强，最能适应干旱环境。

2.2 干旱胁迫下不同品种葡萄扦插苗相对电导率差异分析

由图 2 可以看出，随着干旱时间的延长，11 个品种葡萄扦插苗叶片和根系的相对电导率变化趋势相同，均随着干旱胁迫的延续呈上升趋势。与第 0 天相比，在 11 个葡萄品种中火焰无核、无核翠、秋红宝和无核白的叶片电导率增幅较大，分别增加 2.78、1.53、1.43 和 1.31 倍；而克瑞森无核和晶红宝的叶片相对电导率上升趋势不显著，说明其叶片细胞膜透性在干旱下变化不显著。巨茉莉、丽红宝、晶红宝和秋红宝 4 个品种的根系相对电导率在干旱下分别显著升高 129.82%、121.39%、100.16% 和 82.30%。综合叶片和根系相对电导率，可以看出在 11 个供试品种中，秋红宝通过调整细胞膜透性来抵抗干旱的能力较强；而克瑞森无核的细胞膜透性受干旱影响较小。

2.3 干旱胁迫下不同品种葡萄扦插苗光合参数差异分析

2.3.1 干旱胁迫下不同品种葡萄扦插苗光合色素含量差异 由图 3 可知，随着干旱胁迫时间的延长，葡萄幼苗中叶绿素 a 和总叶绿素含量呈减少趋势。与第 0 天相比，茉莉香、秋红宝、无核翠宝和无核白的叶绿素 a 含量分别显著下降了 56.6%、51.7%、50.3%、49.2%；茉莉香、无核白和无核翠宝的总叶绿素含量显著减少，分别减少 46.0%、44.8% 和 42.4%。随着干旱胁迫时间的延长，无核白和无核翠宝叶绿素 b 含量降幅较大，为 54.3% 和 20.3%；晶红宝和早霞玫瑰的叶绿素 b 含量增幅较大，上升了 58.6% 和



A. 干旱胁迫下不同品种葡萄扦插苗形态差异;B. 干旱胁迫下不同品种葡萄扦插苗叶片保水力差异。1~11. 晚黑宝、早霞玫瑰、秋红宝、巨茉莉、茉莉香、无核翠宝、火焰无核、丽红宝、克瑞森无核、无核白、晶红宝。下同。

A. Morphological changes of grape cuttings of different varieties under drought stress; B. Differences in leaf water retention of different varieties of grape cuttings under drought stress. 1-11. Wanheibao, Zaoxiameigui, Qihongbao, Jumoli, Molixiang, Wuhecuibao, Flame Seedless, Lihongbao, Crimson Seedless, Thompson Seedless, and Jinghongbao, respectively. The same below.

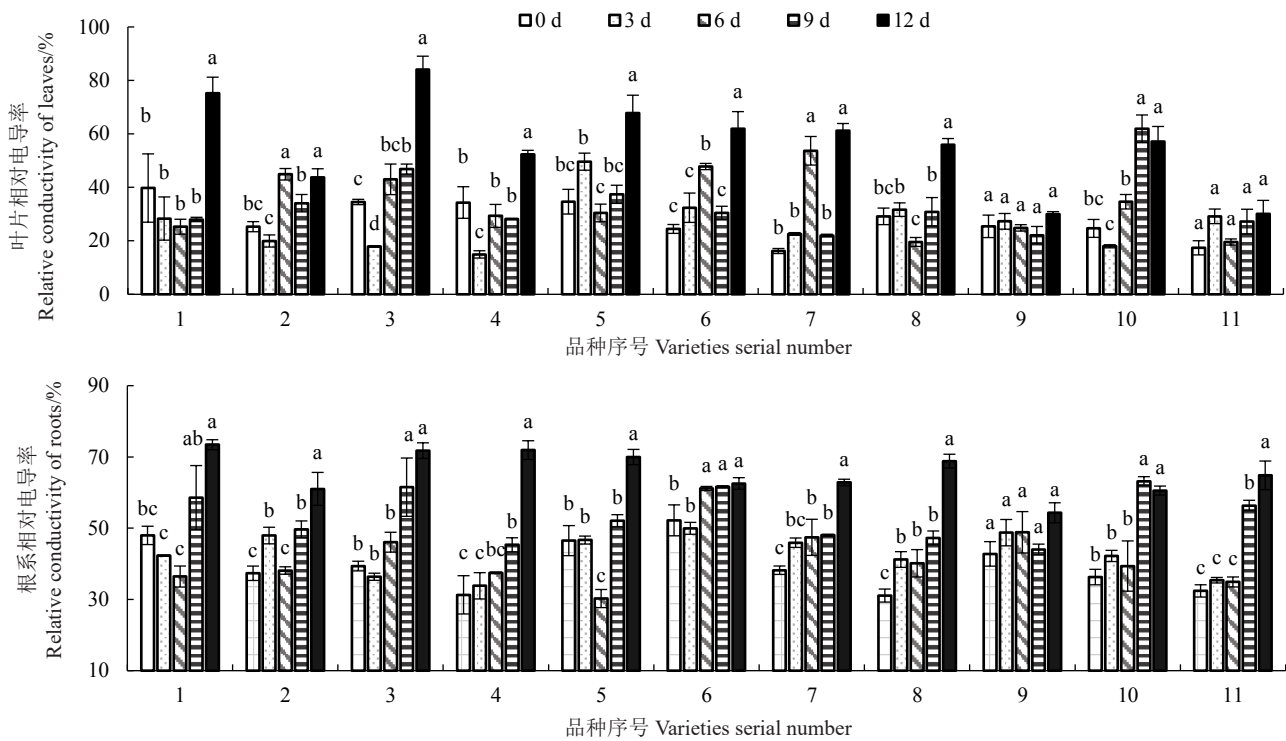
图1 干旱胁迫下不同品种葡萄品种幼苗和叶片表型差异

Fig. 1 Differences in seedling and leaf phenotypes of different grape varieties under drought stress

46.1%。干旱胁迫使晚黑宝的类胡萝卜素含量大幅提高,使茉莉香和无核翠宝的类胡萝卜素含量显著降低47.3%和24.0%。

2.3.2 干旱胁迫下不同品种葡萄扦插苗叶绿素荧光参数差异分析 由图4可知,各品种的 F_m 随着干旱胁迫的延续均呈现降低趋势,其中丽红宝、秋红宝、早霞玫瑰和巨茉莉下降幅度较大,分别下降

了67.4%、66.8%、33.3%和31.4%;晚黑宝、克瑞森无核和无核翠宝下降幅度最小,分别下降了16.5%、18.9%和19.6%。干旱胁迫使各品种的 F_v 显著下降。干旱胁迫下,除茉莉香外,各品种的 F_v/F_m 均降低,丽红宝和秋红宝与第0天相比分别降低了56.0%和52.2%,茉莉香仅比初始状态降低13.2%。干旱胁迫下各品种 F_p 均下降显著,与第0天相比,丽红宝和秋红宝降低了



不同小写字母表示显著差异($p < 0.05$)。下同。

Different small letters means significant difference at $p < 0.05$. The same below.

图2 干旱胁迫对不同品种葡萄扦插苗叶片和根系电导率的影响

Fig. 2 Effect of drought stress on membrane leakage of leaves and roots of grape cuttings of different varieties

68.8%和68.3%，无核翠宝、晚黑宝、火焰无核和克瑞森无核仅下降了23.3%、23.1%、22.0%和20.4%。干旱胁迫下早霞玫瑰Qy上升7.1%，其余品种Qy均呈下降趋势，晶红宝、克瑞森无核和无核白分别降低50.0%、48.0%和41.7%。与正常状态相比，干旱12 d使晶红宝、丽红宝和克瑞森无核的NPQ分别降低了70.8%、63.9%和56.9%；而干旱12 d对无核翠宝的NPQ几乎无影响，仅降低2.4%。除秋红宝、早霞玫瑰、无核翠宝和晚黑宝的qP随着干旱增长了55.7%、40.9%、12.1%和11.2%外，其余品种的qP均降低，其中晶红宝、克瑞森无核、无核白和巨茉莉降低54.8%、46.3%、40.9%和40.3%。晶红宝和丽红宝的Rfd随着干旱时间的延长降低了75.0%和67.4%，无核白、火焰无核、早霞玫瑰和无核翠宝4个品种的Rfd在干旱胁迫下变化不显著。

2.4 干旱胁迫下不同品种葡萄指标间相关性分析

对11个品种葡萄幼苗在干旱胁迫12 d内各指标的变化值进行相关性分析，结果表明：Rfd与NPQ， F_m 与 F_p 、 F_v 、 F_v/F_m ， F_p 与 F_v 、 F_v/F_m ， F_v 与 F_v/F_m ，叶绿素a含量与总叶绿素含量均呈极显著正相关($p < 0.001$)。而NPQ与Qy，叶绿素b含量与总叶绿素含

量，叶绿素a含量与类胡萝卜素含量呈显著正相关($p < 0.05$)。另外，根系电导率与Rfd、 F_m 、 F_p 呈显著负相关($p < 0.05$) (图5)，说明测定指标之间相互联系。

2.5 干旱胁迫下不同品种葡萄幼苗主成分分析

不同品种葡萄幼苗抗旱性能不同，为更好地评价其抗旱性强弱，采用主成分分析法对上述11个品种葡萄幼苗关键指标在干旱胁迫下的变化量绝对值进行综合分析。提取出4个主成分，其累计贡献率为89.48% (表2)，代表性较好，故将14个单一指标转换为4个综合指标。第一主成分中 F_m 、 F_v 和 F_p 载荷量较高，为0.948、0.943和0.929，主要反映干旱胁迫对葡萄幼苗PS II反应中心的影响；第二主成分中总叶绿素含量和叶片相对电导率载荷量较高，分别为0.758和-0.735；第三主成分中载荷量较高的是qP和叶绿素b含量；第四主成分中载荷量较高的是类胡萝卜素含量。

通过主成分模型计算11个鲜食葡萄品种的综合得分，按综合得分由高到低排序为：丽红宝>秋红宝>茉莉香>巨茉莉>无核白>晶红宝>火焰无核>晚黑宝>无核翠宝>克瑞森无核>早霞玫瑰

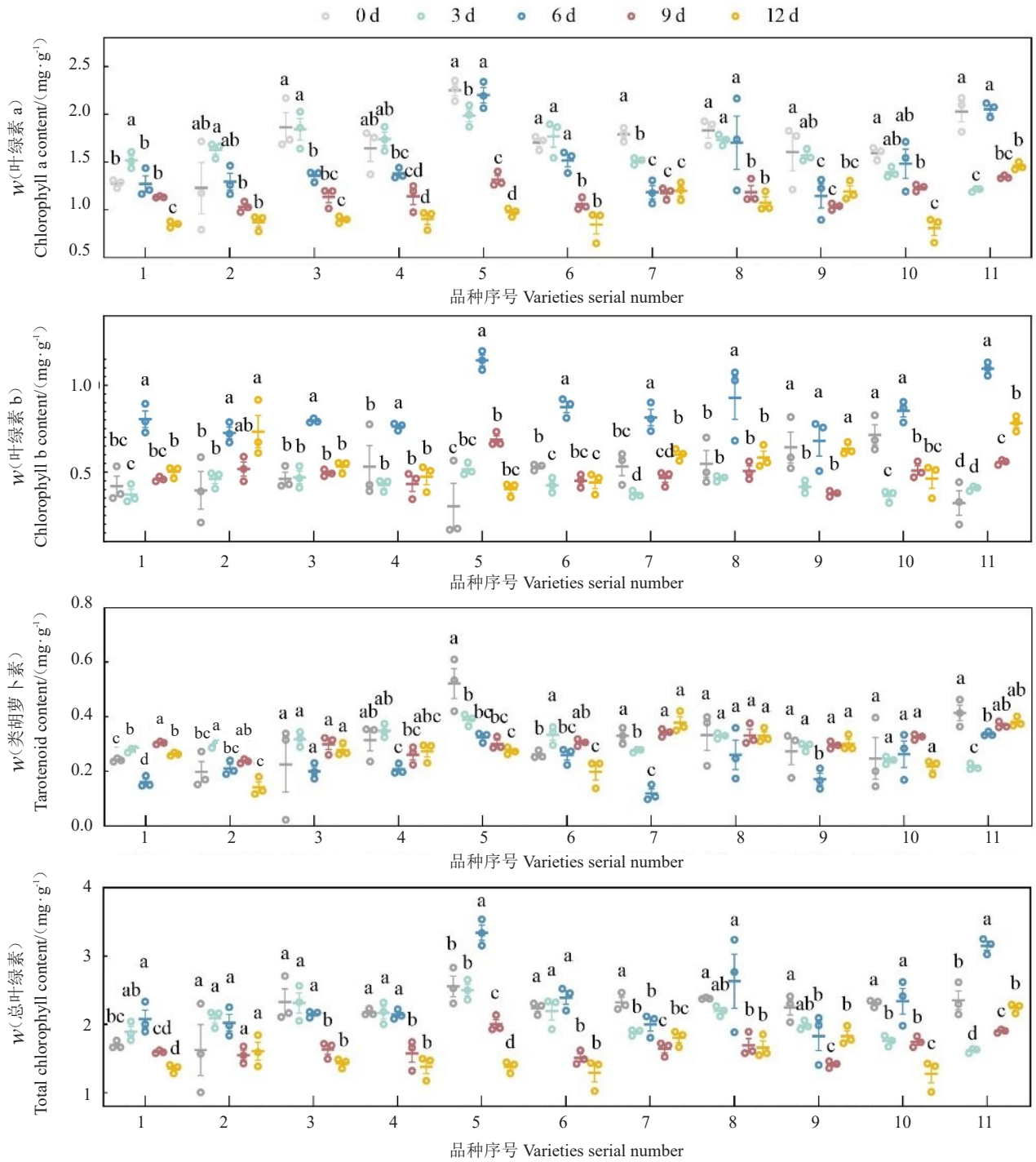


图3 干旱胁迫对不同品种鲜食葡萄扦插苗叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effect of drought stress on chlorophyll contents in fresh grape cuttings of different varieties

(表3),说明在11个供试品种中秋红宝和丽红宝抗旱性较强,而早霞玫瑰和克瑞森无核抗旱性较弱。

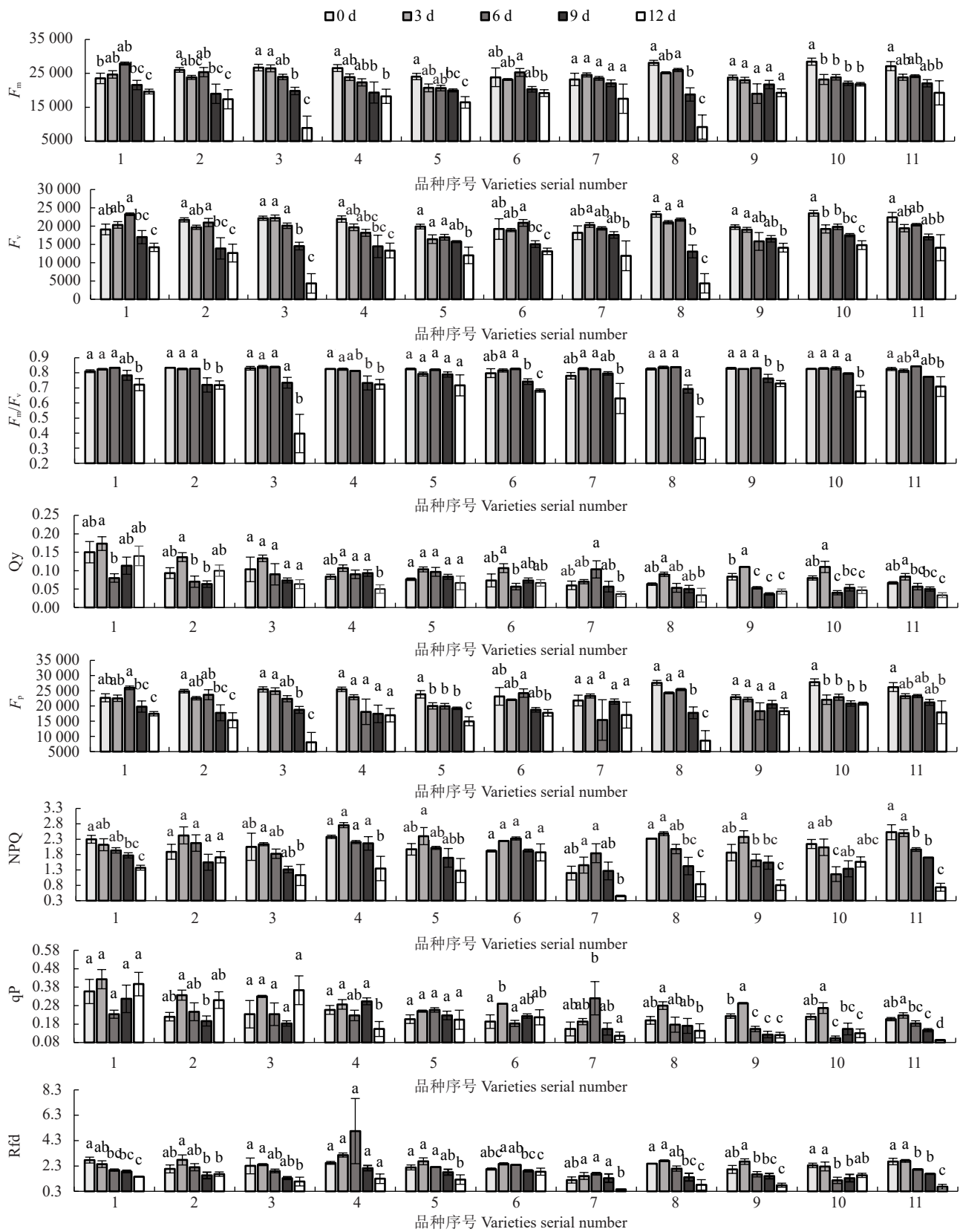
2.6 干旱胁迫下不同鲜食葡萄品种幼苗聚类分析

对各葡萄品种主成分综合得分进行聚类分析,可将11个鲜食葡萄品种分为3类群,第1类是高抗旱品种,包括秋红宝和丽红宝;第2类是中抗旱品种,包括晶红宝、无核白、巨茉莉和茉莉香;第3类是

低抗旱品种,包括克瑞森无核、晚黑宝、早霞玫瑰、无核翠宝和火焰无核(图6)。

2.7 干旱胁迫下不同品种葡萄指标间灰色关联度分析

对11个品种葡萄幼苗在干旱胁迫12 d内测定指标的变化值进行灰色关联度分析,得出各指标与干旱的关联度,结果(图7)表明:除F_v、Qy、F_m和Rfd

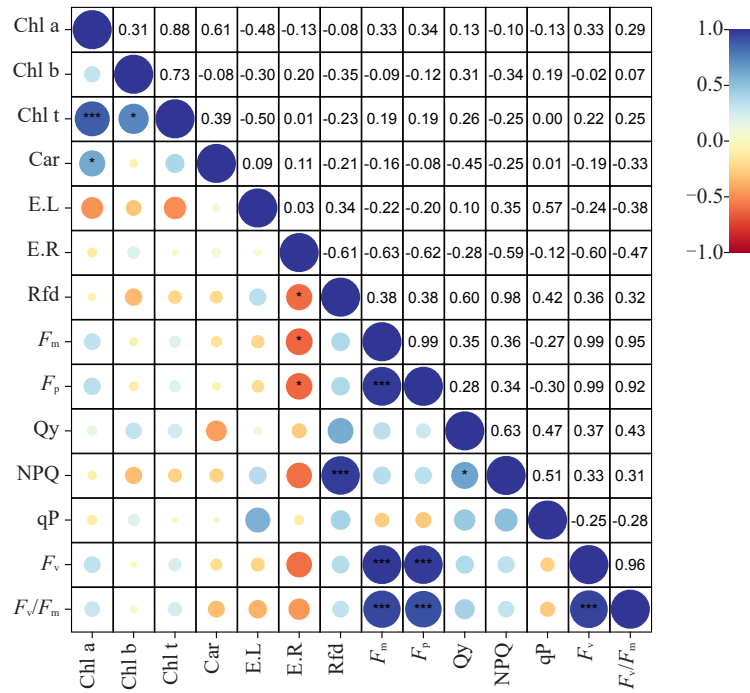


F_m . 最大荧光; F_v . 可变荧光; F_m/F_v . PS II 最大光化学效率; F_p . 闪光脉冲; Q_y . PS II 的有效量子产率; NPQ. 非光化学淬灭系数; qP. 光化学淬灭系数; Rfd. 荧光下降比值。

F_m . Maximum fluorescence; F_v . Variable fluorescence; F_m/F_v . Maximum photochemical efficiency of PS II; F_p . Flash pulse; Q_y . Effective quantum yield of PS II; NPQ. Non-photochemical quenching coefficient; qP. Photochemical quenching coefficient; Rfd. Fluorescence decline ratio.

图 4 干旱胁迫对不同品种葡萄扦插苗叶绿素荧光参数的影响

Fig. 4 Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters of grape cuttings of different varieties



Chl a. 叶绿素 a 含量; Chl b. 叶绿素 b 含量; Chl t. 总叶绿素含量; Car. 类胡萝卜素含量; E.L. 叶片电导率; E.R. 根系电导率。*表示两个指标显著相关($p < 0.05$); ***表示两个指标极显著相关($p < 0.001$)。下同。

Chl a represents chlorophyll a content; Chl b represents chlorophyll b content; Chl t represents total chlorophyll content; Car represents carotenoid content; E.L represents leaf conductivity; E.R represents root conductivity. * indicates that the two indicators are significantly correlated ($p < 0.05$); and *** indicates that the two indicators are extremely significantly correlated ($p < 0.001$). The same below.

图 5 干旱胁迫下 11 个鲜食葡萄品种幼苗关键指标相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of key indicators of 11 table grape varieties under drought stress

表 2 11 个鲜食葡萄品种幼苗关键指标因子载荷矩阵及贡献率

Table 2 Factor loading matrices and contribution rates of key indicators for seedlings of 11 table grape varieties

| 指标名称 Indicator name | 主成分 1 Principal Component 1 | 主成分 2 Principal Component 2 | 主成分 3 Principal Component 3 | 主成分 4 Principal Component 4 |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| F _m | 0.948 | 0.160 | -0.204 | 0.038 |
| F _v | 0.943 | 0.188 | -0.172 | -0.016 |
| F _p | 0.929 | 0.177 | -0.231 | 0.114 |
| F _v /F _m | 0.915 | 0.226 | -0.152 | -0.211 |
| Rfd | 0.608 | -0.671 | 0.212 | 0.177 |
| NPQ | 0.590 | -0.707 | 0.256 | 0.139 |
| Qy | 0.559 | -0.274 | 0.605 | -0.371 |
| 叶绿素 a 含量 Chl a | 0.321 | 0.701 | 0.411 | 0.427 |
| 总叶绿素含量 Chl t | 0.204 | 0.758 | 0.615 | 0.061 |
| 叶绿素 b 含量 Chl b | -0.051 | 0.503 | 0.629 | -0.482 |
| qp | -0.069 | -0.561 | 0.736 | 0.060 |
| 叶片电导率 E.L | -0.193 | -0.735 | 0.138 | 0.260 |
| 类胡萝卜素 Car | -0.244 | 0.366 | 0.189 | 0.866 |
| 根系电导率 E.R | -0.724 | 0.230 | 0.015 | -0.242 |
| 特征值 Eigenvalue | 5.291 | 3.526 | 2.164 | 1.546 |
| 方差贡献率 | 37.794 | 25.184 | 15.454 | 11.045 |
| Contributive percentage/% | | | | |
| 累计贡献率 | 37.794 | 62.977 | 78.431 | 89.476 |
| Total percentage/% | | | | |

表 3 干旱胁迫下 11 个鲜食葡萄品种主成分综合评价排名

Table 3 Comprehensive evaluation rank of principal components of 11 table grape varieties under drought stress

| 品种名称 Varieties name | 主成分得分 Principal component analysis | 排名 Rank |
|---------------------------|---------------------------------------|------------|
| 丽红宝 Lihongbao | 179.234 4 | 1 |
| 秋红宝 Qiuhongbao | 131.144 7 | 2 |
| 茉莉香 Molixiang | 37.787 3 | 3 |
| 巨茉莉 Jumoli | 24.759 9 | 4 |
| 无核白 Thompson Seedless | 1.475 6 | 5 |
| 晶红宝 Jinghongbao | 0.503 0 | 6 |
| 火焰无核 Flame Seedless | -57.092 7 | 7 |
| 晚黑宝 Wanheibao | -62.129 6 | 8 |
| 无核翠宝 Wuhecuiobao | -77.625 2 | 9 |
| 克瑞森无核 Crimson Seedless | -81.344 0 | 10 |
| 早霞玫瑰 Zaoxiameigui | -96.713 7 | 11 |

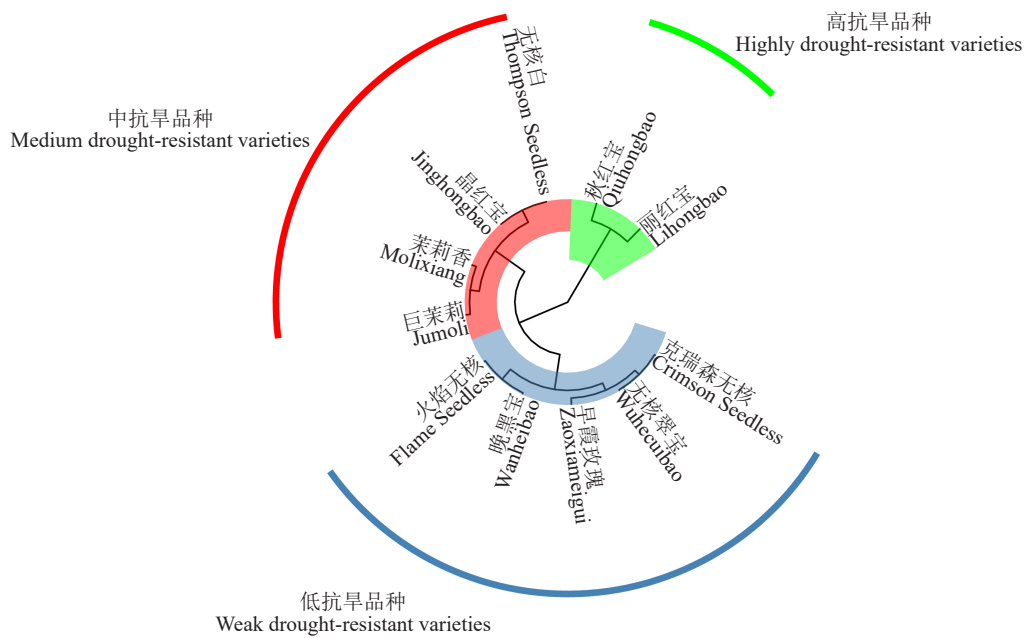
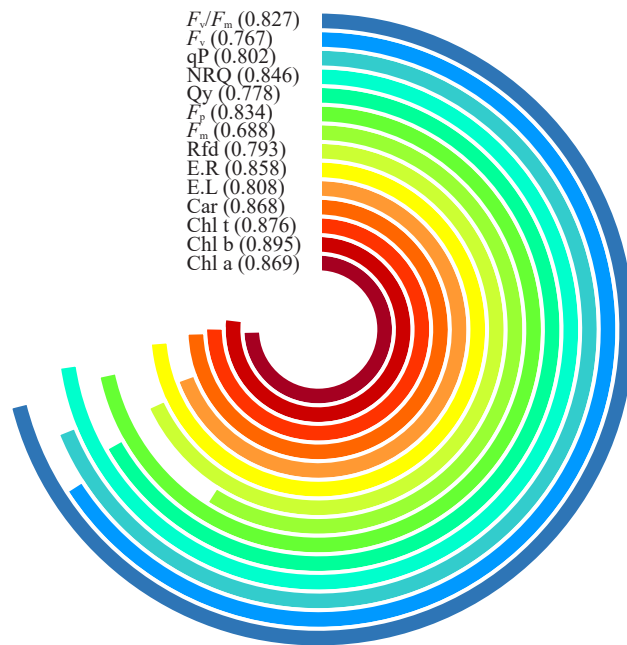


图 6 基于主成分得分的 11 个鲜食葡萄品种抗旱性聚类分析

Fig. 6 Cluster analysis of drought resistance of 11 table grape varieties based on principal component scores

外,其余指标与干旱的关联度都大于 0.8,叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素、总叶绿素含量和根系电导率与干旱的关联度均高于 0.85。各指标根据与干旱关联度排序为:叶绿素 b 含量 > 总叶绿素含量 > 叶绿素 a 含量 > 类胡萝卜素含量 > 根系相对电导

率 > NPQ > F_p > F_v/F_m > 叶片相对电导率 > qP > Rfd > Qy > F_v > F_m , 因此叶绿素 b 含量、总叶绿素含量、叶绿素 a 含量、类胡萝卜素含量、根系相对电导率和 NPQ 可以作为评价葡萄幼苗抗旱性的较直观指标。



括号中数字为关联系数。

The numbers in parentheses are correlation coefficients.

图 7 11 个鲜食葡萄品种幼苗关键指标与抗旱性灰色关联度分析

Fig. 7 Gray correlation analysis of key indicators and drought resistance of seedlings of 11 table grape varieties

3 讨 论

3.1 干旱胁迫对 11 个鲜食葡萄品种幼苗关键指标的影响

已有大量研究表明,干旱对植株的影响首先体现在表型上,本试验中各品种幼苗在干旱胁迫下均出现叶片萎蔫、茎秆弯曲,与前人研究结果一致,分析原因可能是缺水导致植株体内水平衡失衡、细胞水势及膨压下降,从而导致叶片下垂、萎蔫和脱落,叶面积下降,甚至植株死亡^[16]。不同品种的叶片在离体后,均出现变褐、卷曲皱缩等情况,这与钟灶发等^[12]在柑橘叶片上的研究结果一致。在本试验中,丽红宝和秋红宝外部表型变化较小,说明这两个品种叶片保水能力和抗旱能力显著强于其他品种。

细胞膜是维持植物体正常生命活动和细胞内部环境稳定的重要器官,当植物遭受干旱胁迫时,细胞膜会通过改变自身通透性来抵御干旱^[17],而这种变化可以通过相对电导率来体现,因此植株相对电导率可以反映植物抗旱能力强弱。相对电导率作为抗旱性鉴定指标之一,在多种植物上均有研究^[8,18],其值均会随着干旱的延续上升。笔者在本试验中对干旱胁迫下 11 个鲜食葡萄品种幼苗的叶片和根系电导率进行测定,也得出葡萄叶片和根系的电导率均随着干旱胁迫的延续而上升的结果。11 个品种中,秋红宝的叶片和根系电导率变化均显著,丽红宝的根系电导率变化显著,而克瑞森无核的叶片和根系电导率变化不显著。

除了细胞膜透性的改变,干旱对叶绿素含量也有影响。叶绿素作为植株光合作用固定光能的重要物质^[19],包括叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素,本试验结果表明,葡萄叶片的叶绿素 a 和总叶绿素含量在干旱胁迫时降低,这表明随着干旱胁迫时间的延长,植物体内光合代谢过程逐渐被破坏,引发光合色素含量降低,固定光能的能力减弱,最终导致光合作用减弱,这与李润宇等^[20]得出的结论相同。葡萄品种不同,下降趋势也不同,在本试验中茉莉香、无核白、无核翠宝和秋红宝 4 个品种下降显著,说明这 4 个品种叶绿素代谢受干旱影响较大。

叶绿素荧光反映光反应进程,是对逆境较为敏感的关键指标,主要包括 F_m 、 F_v/F_m 、 Q_y 、NPQ 和 qP 等^[21]。干旱会导致 PS II 反应中心关闭时的荧光产量下降^[22],而本研究也得出相同结论,猜测是因为干

旱导致 PS II 的电子传递效率下降^[23]。PS II 最大光化学量子产量也会随着干旱胁迫的延续减少,引发 PS II 反应中心光能转化效率降低^[24],该试验结果也验证该猜想。NPQ 表示 PS II 反应中心吸收的光能以热形式耗散掉的比例^[25],本研究表明,随着干旱胁迫的延续,各品种的 NPQ 均呈下降趋势,与其他学者结论相同^[26],说明植物会降低以热形式耗散掉光能的比例来提高光能利用效率。qP 表示 PS II 在光适应状态下进行光化学反应的能力^[27],有研究表明干旱胁迫使植物的 qP 显著降低^[28],本研究也得出了干旱胁迫会使葡萄叶片 qP 下降的结论,这可能是因为缺水引起叶片内叶绿体结构改变、PS II 反应中心失活^[29],从而导致 PS II 光化学反应能力降低。同时葡萄叶片 PS II 反应中心失活会阻碍叶片利用光能进行光合作用,导致 Rfd 减小,光合能力下降。

3.2 11 个鲜食葡萄品种幼苗抗旱性差异分析及抗旱指标评价

干旱对葡萄的影响体现在多个指标上,而通过单一指标无法准确评判葡萄抗旱性强弱,故需要对多个单一指标进行综合评价^[30],而综合评价多个指标需要科学的评价体系,目前常用方法主要有隶属函数、主成分分析、灰色关联度分析等方法,研究表明采用多指标多方法综合分析可以使结果更加科学客观^[31-32]。

王春雪等^[32]通过相关性分析发现剑麻酶系统中 SOD 和 POD 协同抵抗干旱,将其受到的伤害降至最低。本试验对 11 个品种葡萄幼苗在干旱胁迫 12 d 内的测定指标变化值进行相关性分析,得出 Rfd 和 NPQ, F_m 和 F_p 、 F_v 、 F_v/F_m , F_p 和 F_v 、 F_v/F_m , F_v 和 F_v/F_m , 叶绿素 a 含量和总叶绿素含量协同抵抗干旱;根系电导率与 Rfd、 F_m 、 F_p 呈显著负相关($p < 0.05$),属拮抗作用。相关性分析表明葡萄幼苗通过协调光合色素、相对电导率和叶绿素荧光来增强植株抗旱性。

指标之间相关性并不能鉴定抗旱性强弱,故通过主成分分析综合了电导率和光合参数等关键指标,得出了 11 个鲜食葡萄品种幼苗抗旱性排序:丽红宝 > 秋红宝 > 茉莉香 > 巨茉莉 > 无核白 > 晶红宝 > 火焰无核 > 晚黑宝 > 无核翠宝 > 克瑞森无核 > 早霞玫瑰。王爽等^[5]使用该方法分析了叶绿素相对含量、净光合速率等指标,对 7 个鲜食葡萄品种扦插幼苗的抗旱性能进行了鉴定;由佳辉等^[6]使用该方法分析干旱胁迫下 7 年生葡萄的新梢生长量、光合参

数和叶绿素荧光参数的变化,鉴定了17个砧木葡萄品种的抗旱性强弱。与由佳辉等^[6]的研究不同,该试验以盆栽扦插幼苗为材料,其根系分布与大田成龄葡萄略有区别,因此本试验得出的抗旱性排序还需在大田成龄葡萄上进一步验证。

李洁等^[33]通过聚类分析将50份菜豆品种按抗旱度量值分为5个抗旱级别,结果较理想。故本试验通过聚类分析将11个鲜食葡萄品种分为3个抗旱级别,第1类是高抗旱品种(秋红宝和丽红宝);第2类是中抗旱品种(晶红宝、无核白、巨茉莉和茉莉香);第3类是低抗旱品种(克瑞森无核、晚黑宝、早霞玫瑰、无核翠宝和火焰无核)。

作物对干旱的响应体现在多个指标上,选择合理指标是作物抗旱性研究的关键^[34],国内外学者在筛选与抗旱相关指标上进行了大量研究,发现灰色关联度分析法能很好地达到这一目的,目前该方法已应用于多种作物。例如李小玉等^[35]通过灰色关联度分析证明干旱胁迫下油菜单株产量与产量关联度最为密切。本试验通过灰色关联度分析得出葡萄光合色素含量、根系相对电导率和NPQ可以作为葡萄幼苗抗旱性研究的主要指标。

4 结 论

笔者在本试验中测定了干旱胁迫下不同鲜食葡萄品种扦插幼苗形态、叶片及根系电导率、叶绿素含量及叶绿素荧光参数等16个指标,利用相关性分析、主成分分析、聚类分析和灰色关联度分析相结合的方法,综合评价11个鲜食葡萄品种的抗旱性差异并筛选抗旱相关指标。其中秋红宝和丽红宝为高抗旱品种,适宜在干旱及半干旱地区推广种植;测定指标中光合色素含量、根系相对电导率和NPQ与干旱密切相关,可作为评价葡萄抗旱性的主要指标。

参考文献 References:

- [1] 贺普超. 葡萄学[M]. 北京:中国农业出版社,1999:2-6.
HE Puchao. Viticulture[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999:2-6.
- [2] 郭燕,刘志华,刘钊. PEG模拟干旱胁迫下4种葡萄生理指标的变化及其抗旱性评价[J]. 分子植物育种,2020,18(4):1319-1325.
WU Yan, LIU Zhihua, LIU Zhao. Changes of physiological indexes and drought resistance evaluation of 4 grapes variety under PEG simulated drought stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2020,18(4):1319-1325.
- [3] 沈少炎,吴玉香,郑郁善. 植物干旱胁迫响应机制研究进展:从表型到分子[J]. 生物技术进展,2017,7(3):169-176.
SHEN Shaoyan, WU Yuxiang, ZHENG Yushan. Review on drought response in plants from phenotype to molecular[J]. Current Biotechnology, 2017,7(3):169-176.
- [4] 易家宁,王康才,张琪琦,董雨青,毛晓敏,邓艳婷. 干旱胁迫对紫苏生长及品质的影响[J]. 核农学报,2020,34(6):1320-1326.
YI Jianing, WANG Kangcai, ZHANG Qiqi, DONG Yuqing, MAO Xiaomin, DENG Yanting. Effects of drought stress on growth and quality of *Perilla frutescens*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020,34(6):1320-1326.
- [5] 王爽,侯毅兴,褚佳瑶,卢倩倩,周龙. 干旱胁迫下7个鲜食葡萄品种光合日变化特征的差异分析[J]. 经济林研究,2021,39(4):126-136.
WANG Shuang, HOU Yixing, CHU Jiayao, LU Qianqian, ZHOU Long. A difference analysis of diurnal variation characteristics of photosynthesis of 7 fresh grapes varieties under drought stress[J]. Non-Wood Forest Research, 2021,39(4):126-136.
- [6] 由佳辉,褚佳瑶,冯琳琳,高林,周龙,李树德. 基于光合特性的17个葡萄砧木品种抗旱性比较[J]. 中外葡萄与葡萄酒,2021(6):42-48.
YOU Jiahui, CHU Jiayao, FENG Linjiao, GAO Lin, ZHOU Long, LI Shude. Comparative study on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of 17 grape rootstock varieties[J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2021(6):42-48.
- [7] 罗国涛,刘晓纳,张曼曼,余洪,胡洲,王福生,朱世平,赵晓春. 柑橘砧木根系形态特征与植株耐旱性评价[J]. 果树学报,2020,37(9):1314-1325.
LUO Guotao, LIU Xiaona, ZHANG Manman, YU Hong, HU Zhou, WANG Fusheng, ZHU Shiping, ZHAO Xiaochun. Root morphology of citrus rootstocks and drought tolerance evaluation of their grafted plants[J]. Journal of Fruit Science, 2020,37(9):1314-1325.
- [8] 汤肖玮,苏江硕,管志勇,房伟民,陈发棣,张飞. 茶用菊苗期抗旱性和耐涝性的综合评价[J]. 园艺学报,2021,48(12):2443-2457.
TANG Xiaowei, SU Jiangshuo, GUAN Zhiyong, FANG Weimin, CHEN Fadi, ZHANG Fei. Comprehensive evaluation of tea chrysanthemum's drought and waterlogging tolerance at seedling stage[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021,48(12):2443-2457.
- [9] 徐银萍,潘永东,刘强德,姚元虎,贾延春,任诚,火克仓,陈文庆,赵锋,包奇军,张华瑜. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报,2020,46(3):448-461.
XU Yinping, PAN Yongdong, LIU Qiangde, YAO Yuanhu, JIA Yanchun, REN Cheng, HUO Kecang, CHEN Wenqing, ZHAO Feng, BAO Qijun, ZHANG Huayu. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of barley resources at mature period[J]. Acta Agronomica Sinica, 2020,46(3):448-461.

- [10] 李雪雪. 葡萄砧木种苗抗寒性评价及胚挽救幼苗微嫁接体系优化[D]. 太谷:山西农业大学,2019.
LI Xuexue. Evaluation of cold resistance of grape rootstock seedlings and optimization of micrografting system for embryo-rescued seedlings[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [11] 毛晓佩,孙永玉,戚建华,王顺利,张春华. 干旱胁迫下不同地理种源高山栲幼苗生理生化响应[J]. 林业与生态科学,2022,37(3):258-265.
MAO Xiaopei, SUN Yongyu, QI Jianhua, WANG Shunli, ZHANG Chunhua. Physiological and biochemical response of different provenances *Castanopsis delavayis* seedlings under drought stress[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2022, 37(3): 258-265.
- [12] 钟灶发,张利娟,高思思,彭婷. 干旱胁迫下4种柑橘砧木叶片细胞学特征及抗旱性比较[J]. 园艺学报,2021,48(8):1579-1588.
ZHONG Zaofa, ZHANG Lijuan, GAO Sisi, PENG Ting. Leaf cytological characteristics and resistance comparison of four *Citrus* rootstocks under drought stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(8): 1579-1588.
- [13] 张星,张剑侠. 葡萄砧木杂种的抗旱性评价[J]. 中国果树,2020(5):59-64.
ZHANG Xing, ZHANG Jianxia. Evaluation of drought resistance of grape rootstock hybrids[J]. China Fruits, 2020(5): 59-64.
- [14] 张晓艳,李连国,郭金丽,李晓艳. 欧李叶片光合色素提取方法的比较分析[J]. 北方园艺,2021(9):104-110.
ZHANG Xiaoyan, LI Lianguo, GUO Jinli, LI Xiaoyan. Comparison and analysis of isolation methods of photosynthetic pigment of leaves in *Cerasus humilis*[J]. Northern Horticulture, 2021(9): 104-110.
- [15] 倪建中,罗倩,陈小宇,代色平,王伟. 木棉叶片叶绿素荧光参数和SPAD值对干旱胁迫的响应[J]. 亚热带植物科学,2021,50(4):257-261.
NI Jianzhong, LUO Qian, CHEN Xiaoyu, DAI Seping, WANG Wei. Responses of chlorophyll fluorescence parameters and SPAD value in leaves of *Bombax ceiba* to drought stress[J]. Subtropical Plant Science, 2021, 50(4): 257-261.
- [16] 李剑威,晏舒蕾,黄元城,夏晓雪,储凌峰,李财运,王正加. 薄壳山核桃幼苗对干旱胁迫的生理生化响应[J]. 核农学报,2020,34(10):2326-2334.
LI Jianwei, YAN Shulei, HUANG Yuancheng, XIA Xiaoxue, CHU Lingfeng, LI Caiyun, WANG Zhengjia. Physiological and biochemical responses of pecan seedlings to drought stress[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(10): 2326-2334.
- [17] WANG W N, MIN Z, WU J R, LIU B C, XU X L, FANG Y L, JU Y L. Physiological and transcriptomic analysis of Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.) reveals the alleviating effect of exogenous strigolactones on the response of grapevine to drought stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 167: 400-409.
- [18] 叶旭波,马玲芳,李阳,代晓华. 不同种质资源银柴胡抗旱性研究[J]. 植物生理学报,2020,56(6):1295-1304.
YE Xubo, MA Lingfang, LI Yang, DAI Xiaohua. Study on drought resistance of different germplasm resources of *Stellaria dichotoma*[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(6): 1295-1304.
- [19] MEHER, SHIVAKRISHNA P, ASHOK R K, MANOHAR R D. Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2018, 25(2): 285-289.
- [20] 李润宇,闵卓,房玉林. 独脚金内酯对干旱胁迫‘赤霞珠’葡萄幼苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2019,47(5):67-77.
LI Runyu, MIN Zhuo, FANG Yulin. Effects of strigolactones on growth of ‘Cabernet Sauvignon’ seedlings under drought stress[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019, 47(5): 67-77.
- [21] BAKER N R. Chlorophyll fluorescence: A probe of photosynthesis *in vivo*[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 89-113.
- [22] 李泽,谭晓风,卢锟,张琳,龙洪旭,吕佳斌,林青. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报,2017,37(5):1515-1524.
LI Ze, TAN Xiaofeng, LU Kun, ZHANG Lin, LONG Hongxu, LÜ Jiabin, LIN Qing. Influence of drought stress on the growth, leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5): 1515-1524.
- [23] GUO Y Y, YU H Y, KONG D S, YAN F, ZHANG Y J. Effects of drought stress on growth and chlorophyll fluorescence of *Lycium ruthenicum* Murr. seedlings[J]. Photosynthetica, 2016, 54(4): 524-531.
- [24] 黄桂芬. 模拟酸雨对台湾桉木生理特征的影响及Ca²⁺的调节效应[D]. 福州:福建农林大学,2011:26-27.
HUANG Guifen. Physiological characteristics on effects of simulated acid rain on *Alnus formosana* and regulation of Ca²⁺ [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011: 26-27.
- [25] 戴伟,王刚,胡振阳,谭广文. 五种园林灌木对NaCl胁迫的光合特性响应比较研究[J]. 广东农业科学,2018,45(7):48-55.
DAI Wei, WANG Gang, HU Zhenyang, TAN Guangwen. Comparative study on photosynthetic characteristics responses of 5 garden shrubs under NaCl stress[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(7): 48-55.
- [26] 朱波,徐绮雯,马淑敏,刘帮艳,段美春,王龙昌. 干旱缺钾对油菜内源激素、光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国油料作物学报,2022,44(3):570-580.

- ZHU Bo, XU Qiwen, MA Shumin, LIU Bangyan, DUAN Meichun, WANG Longchang. Effect of potassium deficiency on endogenous hormones, photosynthesis and characteristics of chlorophyll fluorescence in *Brassica napus* under drought stress[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(3): 570-580.
- [27] 魏晓东, 陈国祥, 施大伟, 刘丹, 唐加红, 李霞. 干旱胁迫对银杏叶片光合系统II荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(23): 7492-7500.
- WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, LIU Dan, TANG Jiahong, LI Xia. Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7492-7500.
- [28] TOUNEKTI T, MAHDHI M, AL-TURKI T A, KHEMIRA H. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia[J]. South African Journal of Botany, 2018, 117: 17-25.
- [29] AZHAR A, MAKIHARA D, NAITO H, ASANO K, TAKAGI M, UNOKI S, TOMITA R, ABBAS B, EHARA H. Sago palm (*Metroxylon sagu* Rottb.) response to drought condition in terms of leaf gas exchange and chlorophyll a fluorescence[J]. Plant Production Science, 2021, 24(1): 65-72.
- [30] 李忠旺, 陈玉梁, 罗俊杰, 石有太, 冯克云, 陈子萱. 棉花抗旱品种筛选鉴定及抗旱性综合评价方法[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 240-247.
- LI Zhongwang, CHEN Yuliang, LUO Junjie, SHI Yutai, FENG Keyun, CHEN Zixuan. Screening and evaluation for drought resistance of cotton varieties[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 240-247.
- [31] 刘竞择, 曹柠, 张艳霞, 陈祖民, 史晓敏, 王振平. 葡萄砧木冬季抗抽干能力及抗旱性综合评价[J]. 果树学报, 2020, 37(3): 339-349.
- LIU Jingze, CAO Ning, ZHANG Yanxia, CHEN Zumin, SHI Xiaomin, WANG Zhenping. Comprehensive evaluation on resistance of different grape rootstocks to vine dehydration and drought stress during overwintering[J]. Journal of Fruit Science, 2020, 37(3): 339-349.
- [32] 王春雪, 纪中华, 潘志贤, 岳学文, 李纪潮, 闫帮国, 陈涛. 不同苗龄剑麻(*Agave sisalana*)生理指标的相关性分析及抗旱性评价[J]. 热带作物学报, 2015, 36(7): 1254-1260.
- WANG Chunxue, JI Zhonghua, PAN Zhixian, YUE Xuewen, LI Jichao, YAN Bangguo, CHEN Tao. Correlation analysis on physiological indexes and drought resistance evaluation of different age of *Agave sisalana* seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(7): 1254-1260.
- [33] 李洁, 张小宁, 晋凡生, 韩彦龙, 李海金. 普通菜豆种质资源苗期抗旱性综合评价[J]. 核农学报, 2022, 36(8): 1516-1529.
- LI Jie, ZHANG Xiaoning, JIN Fansheng, HAN Yanlong, LI Haijin. Comprehensive evaluation of drought resistance at seedling stage in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) material[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(8): 1516-1529.
- [34] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 张立异, 徐燕, 高旭, 姜讷, 邵明波. 薏苡种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2872-2887.
- WANG Can, ZHOU Lingbo, ZHANG Guobing, ZHANG Liyi, XU Yan, GAO Xu, JIANG Ne, SHAO Mingbo. Drought resistance identification and drought resistance indices screening of Job's tears (*Coix lacryma-jobi* L.) germplasm resources at seedling stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(15): 2872-2887.
- [35] 李小玉, 田宏先, 王瑞霞. 灰色关联度分析和主成分分析在油菜抗旱育种中的应用[J]. 种子, 2021, 40(9): 92-97.
- LI Xiaoyu, TIAN Hongxian, WANG Ruixia. Application of grey correlation degree analysis and principal component analysis in drought resistance breeding of *Brassica juncea* L.[J]. Seed, 2021, 40(9): 92-97.