



基于主成分分析与隶属函数法的三角梅 种质资源综合评价

黄仕乾, 刘 珊*, 孙 蓉, 李若谷

(攀枝花学院生物与化学工程学院(农学院), 四川攀枝花 617000)

摘要:【目的】对金沙江干热河谷三角梅种质资源进行综合评价,为干热河谷地区优良三角梅品种筛选及新品种选育提供理论依据。【方法】以18份三角梅种质为研究对象,测定11个品种性状及5种色素含量指标,并进行群众评分及花色分组,通过变异系数(CV)分析、聚类分析、相关分析、主成分分析(PCA)及隶属函数分析等方法对三角梅种质进行综合评价。【结果】18份三角梅种质按花苞颜色可分为紫色组、红色组、橙黄色组、粉色组、白色组,其数量性状的变异系数介于28.05%~39.93%,其中叶片宽变异系数最大(39.93%),苞片宽变异系数最小(28.05%);色素含量的变异系数介于26.52%~46.62%,其中原花青素含量的变异系数最大(46.62%),叶绿素a含量的变异系数最小(26.52%)。相关分析结果显示,原花青素含量与甜菜红素含量和花色均呈极显著负相关($P<0.001$),且相关系数均为-0.87;花色与甜菜红素含量呈极显著正相关($P<0.001$),相关系数为0.88;群众评分与花色、叶片长、原花青素含量和甜菜红素含量均存在显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)相关性,其中与花色的相关性最强。聚类分析结果显示,18份三角梅种质被划分成四大类群,其中第二类群仅含马尼拉小姐,说明马尼拉小姐与其他种质相比更具独特性;11个品种性状和5种色素含量被划分为四大类,其中第一类和第二类主要体现性状特征,第三类和第四类主要体现色素含量特征。PCA分析以特征值大于1为提取标准,共得到第一主成分~第六主成分等6个主成分,累计贡献率为82.85%,6个主成分中因子载荷最高的性状分别为花色、苞片宽、叶片长、叶片宽、叶片颜色和叶绿素a含量。通过计算隶属函数值,发现基利耶坎普贝尔的得分最高。综合PCA分析与隶属函数法计算综合得分,将18份三角梅种质划分为四个等级,其中I级包括马尼拉小姐、巴特夫人、基利耶坎普贝尔。【结论】结合PCA分析和隶属函数法进行综合评价,筛选到马尼拉小姐、巴特夫人、基利耶坎普贝尔等3份综合得分较高的三角梅种质资源,其花苞和叶片面积大、花苞颜色鲜艳,适宜在金沙江干热河谷地区推广种植。

关键词:三角梅种质; 主成分分析; 隶属函数; 综合评价

中图分类号:S685.99

文献标志码:A

文章编号:2095-1191(2026)06-1797-12

Comprehensive evaluation of *Bougainvillea* germplasm resources based on principal component analysis and membership function method

HUANG Shi-qian, LIU Shan*, SUN Rong, LI Ruo-gu

(College of Biological and Chemical Engineering (College of Agriculture), Panzhihua University, Panzhihua,
Sichuan 617000, China)

Abstract:【Objective】This study aimed to comprehensively evaluate *Bougainvillea* germplasm resources in the dry-hot valley of the Jinsha River, providing theoretical reference for superior variety selection and new variety breeding of *Bougainvillea* in the dry-hot valley of the Jinsha River. 【Method】A total of 18 *Bougainvillea* germplasms were taken as research objects to measure 11 cultivar traits and five pigment content indicators. Public scoring and grouping by color

收稿日期:2025-06-15

基金项目:四川省自然科学基金面上项目(2023NSFSC0145)

通信作者:刘珊(1980-), <https://orcid.org/0000-0001-5511-2139>, 教授, 主要从事植物次生代谢研究工作, E-mail: liushan@pzh.edu.cn

第一作者:黄仕乾(2003-), <https://orcid.org/0009-0003-9894-1158>, 研究方向为农艺植物活性成分提取与分析, E-mail: 3530141674@qq.com

category were performed. Comprehensive evaluation of *Bougainvillea* germplasms was conducted based on analysis of coefficient of variation (CV), cluster analysis, correlation analysis, principal component analysis (PCA), and membership function analysis. [Result] The 18 *Bougainvillea* germplasms were divided into purple group, red group, orange-yellow group, pink group, and white group, and the CV of quantitative traits ranged from 28.05%-39.93%, with the largest CV for leaf width at 39.93% and the smallest CV for bract width at 28.05%. The CV of pigment content ranged from 26.52% to 46.62%, with the largest CV for procyanidin content at 46.62% and the smallest CV for chlorophyll a content at 26.52%. Correlation analysis results showed that the procyanidin content had extremely significant negative correlations with betacyanin content and flower color ($P<0.001$), with the coefficient of correlation of -0.87; flower color had an extremely positive correlation with betacyanin content ($P<0.001$), with the coefficient of correlation of 0.88; public scoring had significant ($P<0.05$) or extremely significant ($P<0.01$) correlations with flower color, leaf length, procyanidin content, and betacyanin content, with the most pronounced correlation with flower color. Cluster analysis results showed that the 18 germplasms into four major groups, among which Group II only included *Bougainvillea* cv. Miss Manila, demonstrating that this cultivar showed greater uniqueness compared with other germplasms; the 11 cultivar traits and five pigment content indicators were divided into four major categories: the first and second categories showed trait characteristics, and the third and fourth categories showed pigment content characteristics. Principal component analysis (PCA) showed that, six principal components from the first to the sixth principal component were extracted at the standard of eigenvalue greater than 1, with the cumulative contribution rate of 82.85%, and the traits that exhibited the highest factor loadings across the six principal components (PC1-PC6) were flower color, bract width, leaf length, leaf width, leaf color, and chlorophyll a content. By calculating the membership function values, *Bougainvillea* cv. Killie Campbell had the highest score. According to calculation combined comprehensive PCA with membership function method, the 18 *Bougainvillea* germplasms were divided into four grades, and the Grade I included *Bougainvillea* cv. Miss Manila, *Bougainvillea* cv. Mrs. Butt, and *Bougainvillea* cv. Killie Campbell. [Conclusion] According to comprehensive evaluation of PCA and membership function method, three *Bougainvillea* cultivars (*Bougainvillea* cv. Miss Manila, *Bougainvillea* cv. Mrs. Butt, and *Bougainvillea* cv. Killie Campbell) have high scores. As they have big bracts, big leaves, and bright bracts, they are suitable to be popularized and cultivated in the dry-hot valley of the Jinsha River.

Key words: *Bougainvillea* germplasms; principal component analysis; membership function; comprehensive evaluation

Foundation items: General Project of Sichuan Natural Science Foundation (2023NSFSC0145)

0 引言

【研究意义】三角梅又名叶子花,是紫茉莉科(Nyctaginaceae)三角梅属(*Bougainvillea*)观赏植物的统称(徐凤侠等,2008),原产于南美洲的巴西和秘鲁等地(常圣鑫等,2018),为热带及亚热带地区重要的观赏植物。三角梅苞片色彩绚丽、花期持久、适应性强,在城市园林绿化、垂直绿化工程及生态景观营造中占据重要地位,是花卉产业经济发展的重要支柱。随着城市化进程加快与生态环境建设需求升级,优质观赏植物种质资源的筛选与创新利用成为提升城市生态品质、推动花卉产业可持续发展的关键环节。金沙江干热河谷作为我国典型的气候极端区,其特殊环境对植物观赏性状的改良具有显著影响。该河谷位于我国四川、西藏及云南等地,是我国较为典型的干热地区之一,其生态环境独特,光热资源充足,具有显著的热带性(王以静和方福生,2021)。独特的气候条件使三角梅在色素合成和色彩呈现上形成了独有的适应性机制,使其成为金沙江干热河谷地区广泛种植的观赏植物。三角梅品种丰富多样,其评价方法主要以观赏性状及生长指标的主观权重赋值为主,该方法难以突破指标间的相关性干扰与量纲差异,导致评价结果缺乏客观性与

普适性。因此,开展金沙江干热河谷地区三角梅种质资源分析及综合评价,对优良品种筛选及新品种选育具有重要意义。【前人研究进展】目前,三角梅种质资源评价分析备受关注。王豪等(2023)对20个三角梅品种的观赏性与耐寒性进行评价,筛选出的安格斯可作为宁波地区露地栽培的优良花卉进行推广;陈启斌(2024)对湖北恩施种植的6种园林植物进行观赏性和适应性评价,结果发现三角梅品种安格斯、童安红和小苍兰的观赏价值和适应能力相对较好,适合在园林景观中推广应用;杜学林等(2024)对65份三角梅种质进行表型性状多样性评价,明确苞片类型、有无真花、节间长度、叶片大小、花被管长度等指标是影响其品种分类和评价的主要因子;郝晓函等(2025)对133份三角梅种质的表型性状进行分析,结果发现三角梅表型性状多样性较高,数量性状变异类型丰富。表型性状对植物观赏价值具有影响,目前已有针对报春苣苔属植物(余文迪等,2023)、芍药(应梦云等,2024)、莲花(王思瑶等,2025)、小菊(张煜婷等,2025)等植物表型性状观赏价值的研究报道。观赏植物综合评价方法丰富,早期研究多采用层次分析法(廖美兰等,2015),该方法通过经验构建判断矩阵确定权重,但主观因素对结

果影响较大。灰色关联度分析法则基于数据序列相似性进行评价(陈日红等, 2025), 在一定程度上降低了主观性, 但存在权重确定依赖数据特征的局限性。随着统计学方法的深入应用, 主成分分析(PCA)法凭借其降维处理能力, 通过提取综合变量减少指标相关性干扰, 客观分配权重, 在菊花(梁冠等, 2024)、月季(杨姣等, 2024)、百合(张倩男等, 2024)等观赏植物评价中取得显著成效。隶属函数法通过数学变换将不同量纲指标归一化, 在油茶(刘林秀等, 2025)、谷子(孙影等, 2025)、辣椒(王静静等, 2025)、沙棘(张皓凯等, 2025)、红花(张云等, 2025)等植物评价中展现出良好适用性。此外, 结合植物色素分析(康宇乾等, 2022)与相关分析(田晶华, 2024)有利于对种质资源进行更客观的综合评价。【本研究切入点】目前, 结合主成分分析与隶属函数法对干热河谷地区三角梅进行观赏价值综合评价的研究未见报道。【拟解决的关键问题】以金沙江干热河谷地区常见的18份三角梅种质为研究对象, 测定11个表型性状及5种色素含量, 并进行群众评分, 依据花苞颜色进行分类, 分析影响苞片呈色的因素。对数量性状和色素指标持续进行变异系数(CV)分析、聚类分析及与群众观赏价值结合的相关分析, 结合主成分分析与隶属函数法建立三角梅综合评价体系, 为干热河谷地区三角梅品种选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试18份三角梅种质由攀枝花学院引种栽培, 原始材料采集自金沙江干热河谷地区。于2022年10月进行扦插育苗, 选取生长健壮、长势一致的植株作为试验材料。每品种设3次重复, 每重复选取3株植株。于2024年3—9月定期观察并记录其叶片、茎刺和初开花苞等部位的形态特征, 取样及检测时间为2024年10—12月。为验证观测结果的稳定性与重现性, 于2023年10月开展重复种植试验, 并在2025年3—9月对重复种植的植株进行系统观测和相关参数的补充调查。18份三角梅种质的苞片和叶片形态如图1所示。

1.2 试验方法

1.2.1 花苞颜色分类 采用RHS2015英国皇家园艺协会比色卡(滕彩玲等, 2022)对花苞颜色进行分类。采集同一时期的花苞, 确定其对应的比色卡颜色编号, 依据编号进行分组。

1.2.2 数量性状及色素含量变异系数计算 根据数量性状(苞片长、苞片宽、叶片长和叶片宽)和色素含量(叶绿素a、叶绿素b、原花青素、甜菜红素和甜菜黄素含量)的最大值、最小值、平均值及标准差, 计算变异系数(CV)(任丽华等, 2025), 公式如下:

$$CV(\%) = S/\bar{X} \times 100$$

公式中, $\bar{X}$ 为性状及色素平均值, S 为标准差。

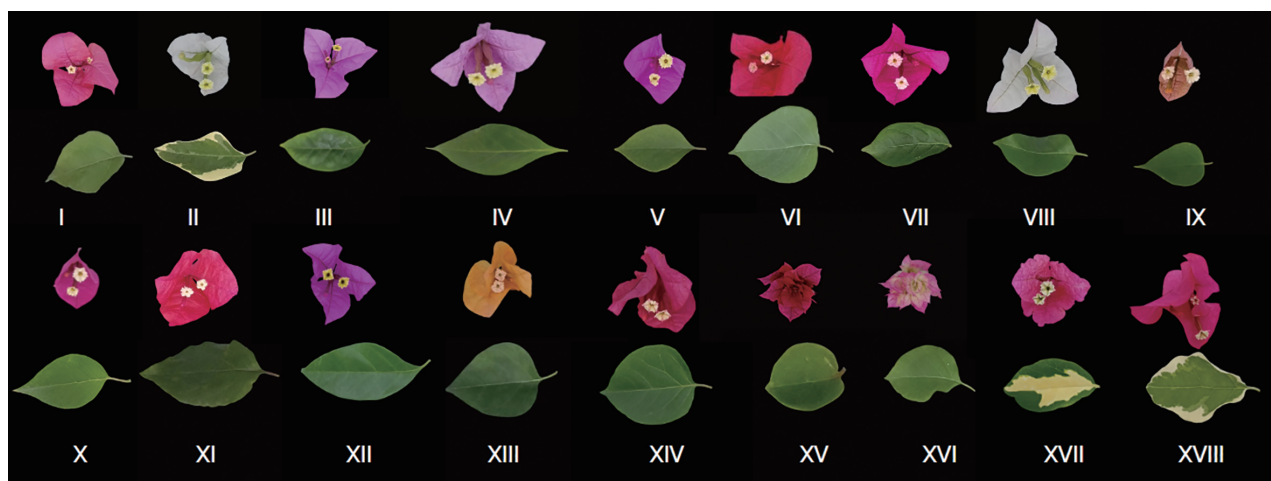


图1 18份三角梅种质的苞片和叶片形态

Fig. 1 Bract and leaf morphology of 18 tested *Bougainvillea* germplasms

I: 基利耶坎普贝尔; II: 斑叶埃娃白; III: 芭比诺宝贝劳伦; IV: 金夫人; V: 安格斯; VI: 金达; VII: 菲菲娜; VIII: 白雪公主; IX: 宝塔橙; X: 宝塔紫; XI: 巴特夫人; XII: 桑德瑞纳; XIII: 加州黄金; XIV: 马尼拉小姐; XV: 重瓣红; XVI: 西施怡锦; XVII: 金心浅紫; XVIII: 金边浅紫。图4同
I: *Bougainvillea* cv. Killie Campbell; II: *Bougainvillea* cv. Mrs. Eva White Variegata; III: *Bougainvillea* cv. Bambino Baby Lauren; IV: *Bougainvillea* cv. Golden Lady; V: *Bougainvillea* cv. Elizabeth Angus; VI: *Bougainvillea* cv. Jinda; VII: *Bougainvillea* cv. Fifina; VIII: *Bougainvillea* cv. Mrs. Eva White; IX: *Bougainvillea* cv. Kasumi; X: *Bougainvillea* cv. Pixie; XI: *Bougainvillea* cv. Mrs. Butt; XII: *Bougainvillea* cv. Sanderiana; XIII: *Bougainvillea* cv. California Gold; XIV: *Bougainvillea* cv. Miss Manila; XV: *Bougainvillea* cv. Mahara; XVI: *Bougainvillea* cv. Cherry Blossom; XVII: *Bougainvillea* cv. Makris; XVIII: *Bougainvillea* cv. Mrs. Eva Mauve Variegata II. The same was applied in Fig. 4

1.2.3 品种性状与色素含量观测及观赏价值评分 对18份三角梅种质的品种性状(叶片颜色、叶片类型、苞片平整度、刺、花色、花易落程度、花期、叶片长、叶片宽、苞片长和苞片宽)与色素含量等指标进行观测。使用叶片扫描仪,设置分辨率为300 dpi,以白色A4纸张为底板,摆放叶片,测量叶片长和叶片宽。叶片长定义为自叶基沿叶脉至叶尖的长度(不包括叶柄),叶片宽定义为垂直于叶片长度方向的最大宽度(Schrader et al., 2021)。采用紫外分光光度法,参考张慧会等(2024)的方法测定叶绿素(叶绿素a和叶绿素b)和甜菜色素(甜菜红素和甜菜黄素)含量;参考李春阳等(2004)的方法测定原花青素含量。随机选取不同性别、年龄、职业的群众,依据自身审美对供试三角梅品种的观赏价值进行打分,获得群众评分。根据观测与打分结果,对三角梅品种性状、色素含量及群众评分等指标进行赋值(表1)。

1.2.4 聚类分析 对表型性状数据进行Z-score标准化以消除量纲差异,以欧氏距离计算种质与性状间的差异距离,采用完全连接法(Complete linkage)构建凝聚型层次聚类树,同时完成行(表型性状指标的赋值)与列(三角梅种质)的双向聚类。采用在线生物信息可视化平台绘制双向层次聚类热图。

1.2.5 PCA分析 参考张亚琦等(2024)的方法并采用SPSS 26.0进行PCA分析,得到主成分矩阵。各主成分得分根据特征值与对应品种性状及色素含量赋值的乘积计算,所有主成分得分相加即为品种的最终得分。

1.2.6 隶属函数分析 将品种性状及色素含量指

标进行主成分降维分析,并参考李晓斐等(2025)的方法进行隶属函数分析,得到品种性状及色素含量的隶属函数值,再求其平均值。隶属函数值计算公式如下:

$$U(x_i)=(x_i-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$$

公式中, $U(x_i)$ 为指标*i*的隶属函数值, x_i 为指标*i*的测定值, $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为指标*i*的最小值和最大值。

1.2.7 综合评价 将隶属函数值乘以100后与主成分得分相加,取平均值作为综合得分(*X*)。利用综合得分求出平均值 $\bar{X}$ 与标准差*S*,以 $X\geq\bar{X}+S$ 者为I级, $\bar{X}+S>X\geq\bar{X}$ 者为II级, $\bar{X}>X\geq\bar{X}-S$ 者为III级, $X\leq\bar{X}-S$ 者为IV级,依次划分等级。

1.3 统计分析

使用Excel 2016整理试验数据;利用Origin 2019绘制条形图;采用网站(<http://www.bioinformatics.com.cn/active/YXBuNisdES9UPkR8>和https://cloud.metware.cn/#/user/register?shared_by=18379)绘制相关分析图和聚类热图。

2 结果与分析

2.1 三角梅种质花苞颜色分类及色素含量对比结果

采用RHS2015英国皇家园艺协会比色卡对花苞颜色进行分类,将18份三角梅种质分为紫色组、红色组、橙黄色组、粉色组、白色组(表2)。三角梅种质色素含量对比结果如图2所示,红色组的甜菜红素和叶绿素含量最高,白色组的原花青素含量最高,橙黄色组的甜菜黄素最高。18份三角梅种质中,菲菲

表1 三角梅种质各项指标赋值情况
Table 1 Valuation of indicators for *Bougainvillea* germplasms

指标 Indicator	赋值 Valuation				
	1	2	3	4	5
叶片颜色 Leaf color	浅绿	绿色	深绿	金边	金心
叶片类型 Leaf type	光叶卵形	疏毛披针型	裂叶密毛型	波缘丝毛型	粘毛心叶型
苞片平整度 Bract flatness	稍扭曲	扭曲	平展	稍外翻	外翻
刺 Thorn	多刺	弯刺	直刺	少刺	无刺
花色 Flower color	白色	橙黄色	粉色	紫色	红色
花易落程度 Flower fragility	极易摇落	较易摇落	中等易落	较难摇落	极难摇落
花期(月份) Flowering period (month)	5—6	6—7	7—8	8—9	9—10
叶片长(cm) Leaf length	2~3	3~4	4~5	5~6	6~7
叶片宽(cm) Leaf width	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6
苞片长(cm) Bract length	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6
苞片宽(cm) Bract width	1~2	2~3	3~4	4~5	5~6
叶绿素a含量(mg/g) Chlorophyll a content	0.12~0.16	0.16~0.20	0.20~0.24	0.24~0.28	0.28~0.32
叶绿素b含量(mg/g) Chlorophyll b content	0.04~0.06	0.06~0.08	0.08~0.10	0.10~0.12	0.12~0.14
原花青素含量(mg/g) Procyanidin content	0.01~0.02	0.02~0.03	0.03~0.04	0.04~0.05	0.05~0.06
甜菜红素含量(mg/g) Betacyanin content	0.10~0.20	0.20~0.30	0.30~0.40	0.40~0.50	0.50~0.60
甜菜黄素含量(mg/g) Betaxanthin content	0.09~0.13	0.13~0.17	0.17~0.21	0.21~0.25	0.25~0.29
群众评分 Public scoring	1~3	3~5	5~7	7~9	9~11

表2 三角梅种质花苞颜色分类
Table 2 Grouping of bract colors of *Bougainvillea* germplasms

种质 Germplasm	比色卡编号 Color chart number	组别 Group	颜色类型 Color type
基利耶坎普贝尔 <i>Bougainvillea</i> cv. Killie Campbell	58B	紫色	深紫红
芭比诺宝贝劳伦 <i>Bougainvillea</i> cv. Bambino Baby Lauren	63B		深紫红
安格斯 <i>Bougainvillea</i> cv. Elizabeth Angus	N74A		亮紫红
菲菲娜 <i>Bougainvillea</i> cv. Fifina	N81		深紫
宝塔紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Pixie	N66B		深紫红
桑德瑞纳 <i>Bougainvillea</i> cv. Sanderiana	NN74C	红色	紫红
金心浅紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Makris	N.58C		浅紫
金边浅紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva Mauve Variegata II	N.57A		浅紫
金达 <i>Bougainvillea</i> cv. Jinda	46C		大红
巴特夫人 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Butt	63A		红紫
马尼拉小姐 <i>Bougainvillea</i> cv. Miss Manila	47C	橙黄色	红色
重瓣红 <i>Bougainvillea</i> cv. Mahara	60		深红
宝塔橙 <i>Bougainvillea</i> cv. Kasumi	169C		橙色
加州黄金 <i>Bougainvillea</i> cv. California Gold	9C		黄色
金夫人 <i>Bougainvillea</i> cv. Golden Lady	65A		浅粉
西施怡锦 <i>Bougainvillea</i> cv. Cherry Blossom	63	粉色	粉色
白雪公主 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva White	N155D		白色
斑叶埃娃白 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva White Variegata	N155B		淡黄白

娜的叶绿素a含量最高;重瓣红的叶绿素b和甜菜红素含量均最高;白雪公主的原花青素含量最高;加州黄金的甜菜黄素含量最高。

2.2 三角梅种质数量性状及色素含量变异系数分析结果

变异系数越大,表明品种间数量性状和色素含量差异越大。如表3所示,18份三角梅种质数量性状的变异系数介于28.05%~39.93%,其中叶片宽变异系数最大(39.93%),苞片宽变异系数最小(28.05%);色素含量的变异系数介于26.52%~46.62%,其中原花青素含量的变异系数最大(46.62%),说明同一环境下不同三角梅种质的原花青素含量差异较大;叶绿素a含量的变异系数最小(26.52%)。苞片长、叶片长及色素含量的平均值与中位数间差值均小于0.1,其数据分布较其他性状更为集中。

2.3 三角梅种质品种性状、色素含量及群众评分相关分析结果

如图3所示,叶片长与叶片宽呈显著正相关($P<0.05$,下同),相关系数为0.56,表明叶片越长则其宽度越大;苞片长与苞片宽呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数为0.61;叶绿素a含量与叶绿素b含量呈极显著正相关($P<0.001$),相关系数为0.84;原花青素含量与甜菜红素含量和花色均呈极显著负相关($P<0.001$),且相关系数均为-0.87;花色与甜菜红素含量呈极显著正相关($P<0.001$),相关系数为0.88。群众评分与花色、叶片长、原花青素含量和甜菜红素含量均存在显著或极显著($P<0.01$)相关性,其中与花色的相关性最强。

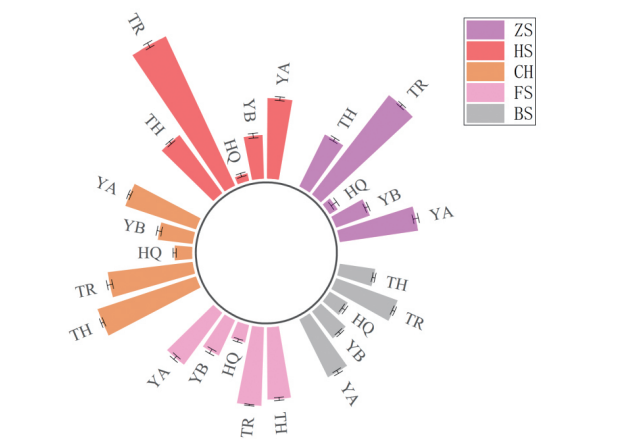


图2 三角梅种质色素含量对比
Fig. 2 Comparison of pigment contents in *Bougainvillea* germplasms
ZS: 紫色组; HS: 红色组; CH: 橙黄色组; FS: 粉色组; BS: 白色组。
YA: 叶绿素a含量; YB: 叶绿素b含量; HQ: 原花青素含量; TR: 甜菜红素含量; TH: 甜菜黄素含量
ZS: Purple group; HS: Red group; CH: Orange-yellow group; FS: Pink group; BS: White group. YA: Chlorophyll a content; YB: Chlorophyll b content; HQ: Procyranidin content; TR: Betacyanin content; TH: Betaxanthin content

2.4 三角梅种质与品种性状和色素含量的聚类分析结果

聚类分析结果(图4)显示,18份三角梅种质被划分成四大类群。第一类群包括巴特夫人、菲菲娜和重瓣红,占种质总数的16.67%,特征为颜色较鲜艳,叶绿素a和叶绿素b含量较高。第二类群仅含马尼拉小姐,占种质总数的5.56%,特征为颜色鲜艳、花苞与叶片较大。第三类群包括安格斯、加州黄金、金夫人、西施怡锦、斑叶埃娃白和白雪公主,占种质总数的33.33%,特征为花色较浅、原花青素含量较

高。第四类群包括桑德瑞纳、芭比诺宝贝劳伦、金达、基利耶坎普贝尔、金边浅紫、金心浅紫、宝塔紫和宝塔橙,占种质总数的44.44%,特征为种质间叶绿素a、叶绿素b和甜菜黄素含量差异较小,花较易落。

对11个品种性状及5种色素含量指标进行聚类分析,将其划分为四大类。其中,第一类和第二类主要体现性状特征,第三类和第四类主要体现色素含量特征。种质间距离越近,其表型特征和色素含量越趋同,亲缘关系越近;表型距离增大,各品种性状

呈现显著分化。马尼拉小姐因花色明艳、苞片大、色素含量丰富、叶片特征优良,故与其他种质相比更具独特性。

2.5 三角梅种质品种性状和色素含量的主成分分析结果

以特征值大于1为提取标准,共得到6个主成分(表4)。第一主成分(PC1)的特征值为4.03,贡献率为25.17%,其中花色的因子载荷最高;第二主成分(PC2)的特征值为3.16,贡献率为19.72%,其中苞片

表3 三角梅种质数量性状和色素含量的变异情况

Table 3 Variation of quantitative traits and pigment contents of *Bougainvillea* germplasms

数量性状/色素含量 Quantitative trait/pigment content	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	中位数 Median	标准差 Standard deviation	变异系数(%) CV
苞片长(cm) Bract length	7.56	2.50	4.75	4.76	1.41	29.76
苞片宽(cm) Bract width	5.19	2.20	3.39	3.09	0.95	28.05
叶片长(cm) Leaf length	5.46	1.73	3.14	3.15	1.08	34.27
叶片宽(cm) Leaf width	4.41	1.16	2.32	2.20	0.92	39.93
叶绿素a含量(mg/g) Chlorophyll a content	0.30	0.13	0.20	0.18	0.05	26.52
叶绿素b含量(mg/g) Chlorophyll b content	0.15	0.04	0.10	0.10	0.03	29.51
原花青素含量(mg/g) Procyanidin content	0.06	0.01	0.03	0.02	0.01	46.62
甜菜红素含量(mg/g) Betacyanin content	0.51	0.17	0.32	0.33	0.10	32.34
甜菜黄素含量(mg/g) Betaxanthin content	0.28	0.09	0.18	0.17	0.05	30.14

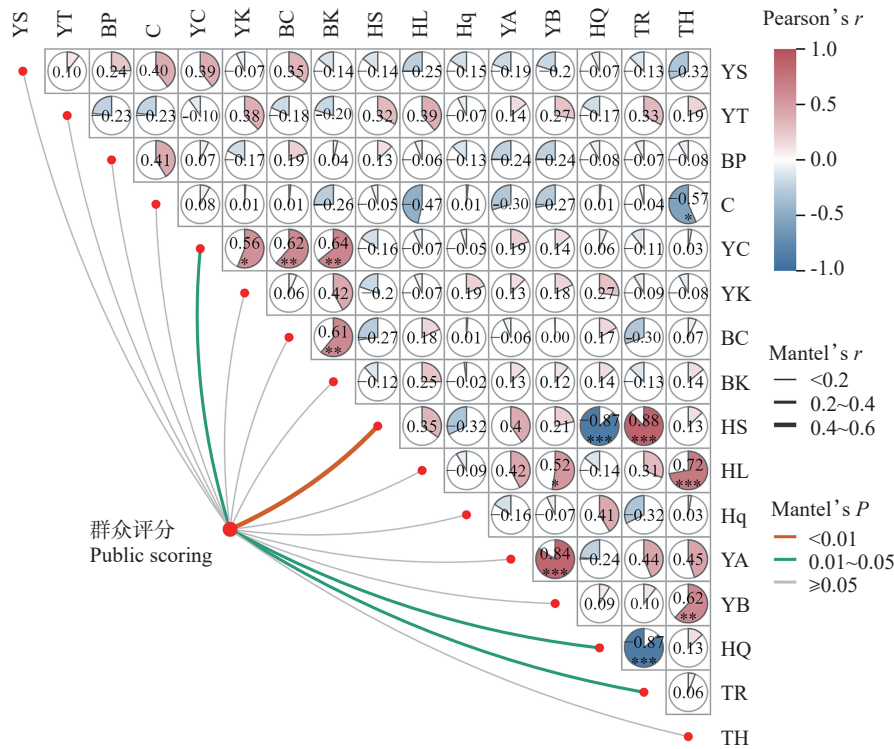


图3 三角梅种质品种性状、色素含量及群众评分相关分析结果

Fig. 3 Correlation analysis results of cultivar traits, pigment contents, and public scoring of *Bougainvillea* germplasms

*表示显著相关($P<0.05$), **表示极显著相关($P<0.01$), ***表示极显著相关($P<0.001$);连线粗细代表相关强度。YS:叶片颜色;YT:叶片类型;BP:苞片平整度;C:刺;YC:叶片长;YK:叶片宽;BC:苞片长;BK:苞片宽;HS:花色;HL:花易落程度;Hq:花期;YA:叶绿素a含量;YB:叶绿素b含量;HQ:原花青素含量;TR:甜菜红素含量;TH:甜菜黄素含量。图4同

* indicated significant correlation ($P<0.05$), ** indicated extremely significant correlation ($P<0.01$), and *** indicated significant correlation ($P<0.001$); line thickness represented correlation intensity. YS: Leaf color; YT: Leaf type; BP: Bract flatness; C: Thorn; YC: Leaf length; YK: Leaf width; BC: Bract length; BK: Bract width; HS: Flower color; HL: Flower fragility; Hq: Flowering period; YA: Chlorophyll a content; YB: Chlorophyll b content; HQ: Procyanidin content; TR: Betacyanin content; TH: Betaxanthin content. The same was applied in Fig. 4

宽的因子载荷最高;第三主成分(PC3)的特征值为2.29,贡献率为14.32%,其中叶片长的因子载荷最高;第四主成分(PC4)的特征值为1.55,贡献率为9.71%,其中叶片宽的因子载荷最高;第五主成分(PC5)的特征值为1.18,贡献率为7.35%,其中叶片颜色的因子载荷最高;第六主成分(PC6)的特征值为1.05,贡献率为6.59%,其中叶绿素a含量的因子载荷最高。经计算,主成分得分排名前3的种质分别为马尼拉小姐(36.41)、巴特夫人(32.19)和桑德瑞纳(28.29),得分最低的为宝塔橙(13.74)(表5)。马

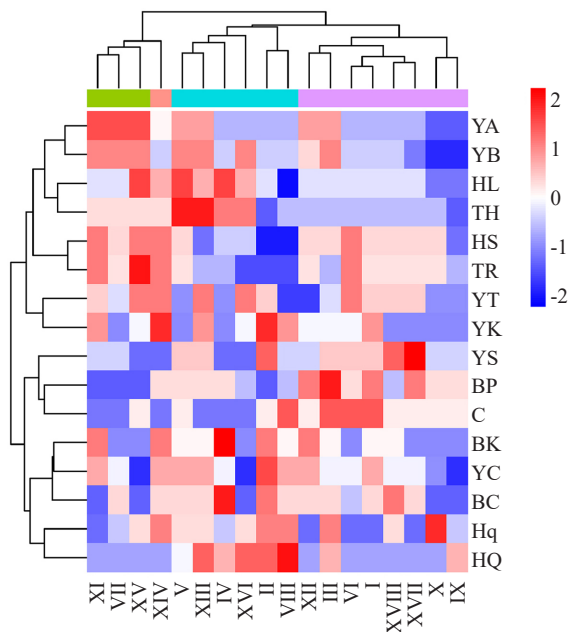


图4 三角梅种质与品种性状和色素含量的聚类分析结果
Fig. 4 Cluster analysis results of cultivar traits and pigment contents of *Bougainvillea* germplasms

表4 三角梅种质品种性状和色素含量的PCA分析结果

Table 4 PCA results of cultivar traits and pigment contents of *Bougainvillea* germplasms

品种性状/色素含量 Cultivar trait/pigment content	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
叶片颜色 Leaf color	-0.36	-0.14	0.55	0.10	0.60	-0.10
叶片特征 Leaf characteristic	0.48	0.00	-0.03	0.55	0.42	-0.50
苞片平整度 Bract flatness	-0.25	-0.22	0.41	-0.45	0.20	0.05
刺 Thorn	-0.50	-0.41	0.33	0.15	0.23	0.38
叶片长 Leaf length	-0.15	0.56	0.72	0.20	-0.06	0.10
叶片宽 Leaf width	-0.05	0.51	0.18	0.74	-0.14	-0.05
苞片长 Bract length	-0.25	0.54	0.56	-0.34	0.07	-0.21
苞片宽 Bract width	-0.01	0.68	0.45	-0.13	-0.47	-0.11
花色 Flower colour	0.75	-0.48	0.32	-0.01	-0.11	-0.01
花易落程度 Flower fragility	0.71	0.35	-0.01	-0.31	0.18	-0.30
花期 Flowering period	-0.29	0.26	-0.42	0.17	-0.07	-0.02
叶绿素a含量 Chlorophyll a content	0.74	0.29	0.12	0.10	0.05	0.53
叶绿素b含量 Chlorophyll b content	0.64	0.50	-0.06	0.06	0.32	0.44
原花青素含量 Procyanidin content	-0.55	0.61	-0.46	0.01	0.21	0.10
甜菜红素含量 Betacyanin content	0.73	-0.48	0.31	0.15	-0.20	-0.03
甜菜黄素含量 Betaxanthin content	0.59	0.50	-0.23	-0.37	0.23	-0.04
特征值 Eigenvalue	4.03	3.16	2.29	1.55	1.18	1.05
贡献率(%) Contribution rate	25.17	19.72	14.32	9.71	7.35	6.59
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	25.17	44.89	59.21	68.91	76.27	82.85

尼拉小姐、巴特夫人和桑德瑞纳花色明艳、叶片和花苞较大、色素含量丰富,综合表现最好;宝塔橙花色不够明艳、叶片和花苞较小,得分最低。

2.6 三角梅种质隶属函数分析结果

利用PCA分析对数量性状和色素含量指标进行降维处理,得到3个特征值大于1的主成分,累计贡献率为74.64%。按照隶属函数公式计算各指标的隶属函数值,将其分别与3个主成分的特征值相乘后计算平均值,结果如表6所示,排名前3的种质分别为基利耶坎普贝尔、巴特夫人和马尼拉小姐,宝塔橙的排名最低。

2.7 三角梅种质综合评价分析结果

综合主成分分析与隶属函数分析将18份三角梅种质划分为四个等级。其中,I级包括马尼拉小姐、巴特夫人、基利耶坎普贝尔,综合得分较高;IV级包括宝塔紫、西施怡锦和宝塔橙,综合得分较低。

3 讨论

金沙江干热河谷年均温度18~24℃、昼夜温差大、日照强,年日照时数大于2500h。一些耐旱性强的三角梅种质花色较其他区域更鲜艳,且花量极大,适合大面积种植。然而,目前关于三角梅在该特殊生境中的生长表现与观赏价值的研究仍属空白。因此,本研究选取金沙江地区常见的18份三角梅种质作为供试材料,开展种质资源综合评价,探析其在金沙江干热河谷地区的观赏适应性与表现差异,为该地区三角梅种质选育与园林应用提供理论依据,也为同类生境植物资源利用提供参考。

相关分析结果显示,叶片长与叶片宽、苞片长与苞片宽分别呈显著和极显著正相关,可见三角梅部分表型性状之间存在相互影响。三角梅苞片中原花青素含量与甜菜红素含量呈极显著负相关(相关系数-0.87)。在植物的苯丙烷代谢途径中,原花青素与花青素拥有同一条以无色花青素为起始底物的关键分支。更重要的是,该分支与甜菜素合成通路共同竞争上游的前体物质,与徐夙侠等(2017)在转录水平上揭示的甜菜素与类黄酮(其重要组成部分为原花青素)生物合成存在此消彼长竞争关系的结论相互印证。群众评分与花色、叶片长、原花青素含量和甜菜红素含量均存在显著或极显著相关性,其中与

花色的相关性最强,与许军等(2018)对海棠观赏性的研究结果一致。通过相关分析了解各性状与色素含量间的相关性,可更客观地对三角梅进行种质资源评价。

干热河谷三角梅种质资源在主成分得分上呈现明显差异,表明该区域种质资源具有丰富的表型多样性。在PCA分析中,提取了6个特征值大于1的主成分,累计方差贡献率为82.85%,能够反映三角梅性状的大部分信息。通过计算主成分得分,排名前3的三角梅种质依次为马尼拉小姐、巴特夫人和桑德瑞纳。其中,第二主成分和第三主成分主要由叶片长、叶片宽、苞片长和苞片宽决定,说明苞片与

表5 18份三角梅种质的主成分得分

Table 5 Principal component scores of 18 *Bougainvillea* germplasms

种质 Germplasm	主成分得分 Principal component score
马尼拉小姐 <i>Bougainvillea</i> cv. Miss Manila	36.41
巴特夫人 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Butt	32.19
桑德瑞纳 <i>Bougainvillea</i> cv. Sanderiana	28.29
重瓣红 <i>Bougainvillea</i> cv. Mahara	28.25
金达 <i>Bougainvillea</i> cv. Jinda	27.62
基利耶坎普贝尔 <i>Bougainvillea</i> cv. Killie Campbell	27.25
金夫人 <i>Bougainvillea</i> cv. Golden Lady	27.03
安格斯 <i>Bougainvillea</i> cv. Elizabeth Angus	26.80
芭比诺宝贝劳伦 <i>Bougainvillea</i> cv. Bambino Baby Lauren	26.62
金边浅紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva Mauve Variegata II	25.88
菲菲娜 <i>Bougainvillea</i> cv. Fifina	24.90
金心浅紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Makris	23.60
加州黄金 <i>Bougainvillea</i> cv. California Gold	23.30
宝塔紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Pixie	21.59
斑叶埃娃白 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva White Variegata	21.49
西施怡锦 <i>Bougainvillea</i> cv. Cherry Blossom	18.90
白雪公主 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva White	16.68
宝塔橙 <i>Bougainvillea</i> cv. Kasumi	13.74

表6 18份三角梅种质的隶属函数分析

Table 6 Membership function analysis of 18 *Bougainvillea* germplasms

种质 Germplasm	隶属函数值 Membership function value			隶属函数得分 Membership function score	排序 Ranking
	$U(x_1)$	$U(x_2)$	$U(x_3)$		
基利耶坎普贝尔 <i>Bougainvillea</i> cv. Killie Campbell	0.35	0.22	0.11	0.23	1
巴特夫人 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Butt	0.20	0.21	0.15	0.19	2
马尼拉小姐 <i>Bougainvillea</i> cv. Miss Manila	0.21	0.19	0.13	0.17	3
斑叶埃娃白 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva White Variegata	0.34	0.09	0.00	0.15	4
安格斯 <i>Bougainvillea</i> cv. Elizabeth Angus	0.18	0.18	0.07	0.14	5
菲菲娜 <i>Bougainvillea</i> cv. Fifina	0.11	0.22	0.08	0.14	6
重瓣红 <i>Bougainvillea</i> cv. Mahara	0.01	0.23	0.16	0.13	7
白雪公主 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva White	0.28	0.11	0.00	0.13	8
桑德瑞纳 <i>Bougainvillea</i> cv. Sanderiana	0.17	0.15	0.06	0.13	9
金达 <i>Bougainvillea</i> cv. Jinda	0.15	0.08	0.14	0.12	10
加州黄金 <i>Bougainvillea</i> cv. California Gold	0.20	0.12	0.03	0.12	11
金夫人 <i>Bougainvillea</i> cv. Golden Lady	0.13	0.18	0.03	0.11	12
金边浅紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva Mauve Variegata II	0.17	0.09	0.08	0.11	13
金心浅紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Makris	0.11	0.04	0.08	0.08	14
西施怡锦 <i>Bougainvillea</i> cv. Cherry Blossom	0.02	0.17	0.01	0.07	15
宝塔紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Pixie	0.08	0.00	0.09	0.06	16
芭比诺宝贝劳伦 <i>Bougainvillea</i> cv. Bambino Baby Lauren	0.12	0.00	0.04	0.05	17
宝塔橙 <i>Bougainvillea</i> cv. Kasumi	0.00	0.03	0.02	0.02	18

表 7 基于 2 种分析方法的三角梅种质综合评价
Table 7 Comprehensive evaluation of *Bougainvillea* germplasms based on two analytic methods

等级 Grade	种质 Germplasm	主成分得分 Principal component score	隶属函数得分 Membership function score	综合得分 Comprehensive score
I	马尼拉小姐 <i>Bougainvillea</i> cv. Miss Manila	36.41	0.17	26.71
	巴特夫人 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Butt	32.19	0.19	25.60
	基利耶坎普贝尔 <i>Bougainvillea</i> cv. Killie Campbell	27.25	0.23	25.13
II	桑德瑞纳 <i>Bougainvillea</i> glabra cv. Sanderiana	28.29	0.13	20.65
	重瓣红 <i>Bougainvillea</i> cv. Mahara	28.25	0.13	20.63
	安格斯 <i>Bougainvillea</i> cv. Elizabeth Angus	26.80	0.14	20.40
	金达 <i>Bougainvillea</i> cv. Jinda	27.62	0.12	19.81
	菲菲娜 <i>Bougainvillea</i> cv. Fifina	24.90	0.14	19.45
	金夫人 <i>Bougainvillea</i> cv. Golden Lady	27.03	0.11	19.02
	金边浅紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva Mauve Variegata II	25.88	0.11	18.44
III	斑叶埃娃白 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva White Variegata	21.49	0.15	18.25
	加州黄金 <i>Bougainvillea</i> cv. California Gold	23.30	0.12	17.65
	芭比诺宝贝劳伦 <i>Bougainvillea</i> cv. Bambino Baby Lauren	26.62	0.05	15.81
	金心浅紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Makris	23.60	0.08	15.80
	白雪公主 <i>Bougainvillea</i> cv. Mrs. Eva White	16.68	0.13	14.84
IV	宝塔紫 <i>Bougainvillea</i> cv. Pixie	21.59	0.06	13.80
	西施怡锦 <i>Bougainvillea</i> cv. Cherry Blossom	18.90	0.07	12.95
	宝塔橙 <i>Bougainvillea</i> cv. Kasumi	13.74	0.02	7.87

叶片是影响三角梅种质表型多样性的主要性状指标,与郁书君等(2025)对三角梅种质表型遗传多样性的综合分析结果一致,表明这两类性状是影响干热河谷三角梅综合评价的核心维度。

PCA 分析与隶属函数法相结合,可将多个品种性状及色素含量指标转化为可量化的综合数据,简化数据结构。通过 PCA 分析将指标降维至少数个主成分,再计算隶属函数值,结果可准确区分观赏型(花色多样性高)或功能型(抗逆型、速生型等)种质,与田间观测一致性较高,且优于传统聚类分析(唐桂梅等,2025)。郭小兰等(2025)对惠州市 5 个品种蓝莓果实品质进行综合评价以及姜秀英等(2025)对辽宁省水稻品种进行品质性状综合评价,均采用 PCA 分析与隶属函数法相结合的方法,其结果与生产实际观测值较为吻合。本研究将 PCA 分析法与隶属函数法相结合,发现马尼拉小姐、巴特夫人和基利耶坎普贝尔综合得分较高,其共性为花苞和叶片面积大且花苞颜色鲜艳,与杨思霞等(2024)研究得出综合价值较高的朱瑾品种所具有的特征性状结果一致,说明该方法得出的结论具有可靠性。

在三角梅种质资源现有的研究中,多数研究聚焦单一性状,如 Feng 等(2025)对抗逆功能基因的研究、Sun 等(2025)对花色苷合成基因的研究,或进行区域性品种比较,如张明达等(2023)对云南地区三角梅低温适应性的评价研究。已有研究对种质进行综合评价的案例较少,且多基于少量指标(如开花量、株高等)进行分析,而三角梅性状变异较大(如苞

片形态极多样),该类方法难以全面反映资源潜力。PCA 分析结合隶属函数法在资源评价中普遍表现出更高的区分度,相较于传统方法,可显著提升三角梅资源评价的客观性、全面性及分类精度,尤其适用于多目标育种(如同时筛选观赏价值高且易栽培的品种)。本研究筛选到综合得分较高的种质与邱胤晖等(2017)筛选到的最优种质有出入,可能是由于评价方法的改进所致。后续对本区域三角梅进行种质资源分析,应扩大样本量,根据三角梅生物学特性优化参数,并利用分子育种技术,同时结合三角梅的抗旱性、耐热性、抗风性等抗逆性状进行研究,为三角梅观赏性研究及种质选育提供更客观的参考依据。

4 结论

结合主成分分析和隶属函数法进行综合评价,筛选到马尼拉小姐、巴特夫人、基利耶坎普贝尔等 3 份综合得分较高的三角梅种质资源,其花苞和叶片面积大、花苞颜色鲜艳,适宜在金沙江干热河谷地区推广种植。

参考文献(References):
常圣鑫,杨光穗,陈金花,黄素荣. 2018. 世界三角梅产业发展历史及趋势[J]. 热带农业科学, 38(1): 71-77. [Chang S X, Yang G S, Chen J H, Huang S R. 2018. Development history and tendency of *Bougainvillea* industry all over the world[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 38(1): 71-77.] doi: 10.12008/j.issn.1009-2196.2018.01.013.
陈启斌. 2024. 6 种园林植物在恩施市的观赏性与适应性调查评价[J]. 绿色科技, 26(7): 18-21. [Chen Q B. 2024.

- Investigation and evaluation of ornamental and adaptability of six garden plants in Enshi City[J]. Journal of Green Science and Technology, 26(7): 18-21. doi: 10.16663/j.cnki.lskj.2024.07.042.
- 陈日红, 甘冰, 陈海凤, 周传猛. 2025. 广西春大豆品种主要农艺性状灰色关联度分析[J]. 农业与技术, 45(9): 38-40. [Chen R H, Gan B, Chen H F, Zhou C M. 2025. Grey correlation analysis of main agronomic traits of spring soybean varieties in Guangxi[J]. Agriculture and Technology, 45(9): 38-40.] doi: 10.19754/j.nyyjs.20250515008.
- 杜学林, 温志, 傅小霞, 张丽华, 林鸿伟, 刘国锋. 2024. 三角梅种质资源表型性状多样性评价[J]. 安徽农业科学, 52(15): 133-139. [Du X L, Wen Z, Fu X X, Zhang L H, Lin H W, Liu G F. 2024. Evaluation of phenotypic character diversity of *Bougainvillea spectabilis* germplasm resources[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 52(15): 133-139.] doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2024.15.029.
- 郭小兰, 郑晓莉, 胡进彬, 王建兵, 王盾, 曹瑜, 林芳花. 2025. 惠州市5个蓝莓品种果实品质综合评价[J]. 安徽农学通报, 31(12): 1-6. [Guo X L, Zheng X L, Hu J B, Wang J B, Wang D, Cao Y, Lin F H. 2025. Comparative evaluation of fruit quality of 5 blueberry varieties in Huizhou City[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 31(12): 1-6.] doi: 10.16377/j.cnki. issn1007-7731.2025.12.001.
- 郝晓函, 关文灵, 李叶芳, 宋杰. 2025. 三角梅主要品种表型性状分析[J]. 热带作物学报, 46(1): 70-82. [Hao X H, Guan W L, Li Y F, Song J. 2025. Phenotypic character analysis of the main cultivars of *Bougainvillea*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 46(1): 70-82.] doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.01.008.
- 姜秀英, 王佳, 李建国, 解文孝, 潘争艳, 韩勇, 吕军. 2025. 基于主成分及聚类分析的辽宁省水稻品种品质性状综合评价[J]. 北方水稻, 55(3): 1-7. [Jiang X Y, Wang J, Li J G, Xie W X, Pan Z Y, Han Y, Lü J. 2025. Comprehensive evaluation of quality traits of rice varieties in Liaoning Province based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Northern Rice, 55(3): 1-7.] doi: 10.16170/j.cnki.1673-6737.2025.03.016.
- 康宇乾, 杨挺, 李雪青, 李雨欣, 张婷婷, 王鹏, 余文刚, 王健, 王健, 周扬. 2022. 不同三角梅品种苞片色彩表型及色素组成分析[J]. 植物科学学报, 40(5): 714-723. [Kang Y Q, Yang T, Li X Q, Li Y X, Zhang T T, Wang P, Yu W G, Wang J, Wang J, Zhou Y. 2022. Flower color determination and bract pigment composition analysis of different *Bougainvillea spectabilis* Willd. varieties[J]. Plant Science Journal, 40(5): 714-723.] doi: 10.11913/PSJ.2095-0837.2022.50714.
- 李春阳, 许时婴, 王璋. 2004. 香草醛—盐酸法测定葡萄籽、梗中原花青素含量的研究[J]. 食品科学, (2): 157-161. [Li C Y, Xu S Y, Wang Z. 2004. Vanillin-HCl assay for the proanthocyanidins content of grape seed and stem[J]. Food Science, (2): 157-161.] doi: 10.3321/j.issn:1002-6630.2004.02.036.
- 李晓斐, 冯军仁, 陈鹏, 甄伟玲, 郭爱, 王玉凤, 赖钟雄, 陈斌. 2025. 甘肃梨种质资源表型性状遗传多样性分析及优质资源筛选[J]. 南方农业学报, 56(2): 520-532. [Li X F, Feng J R, Chen P, Zhen W L, Guo A, Wang Y F, Lai Z X, Chen B. 2025. Genetic diversity analysis of phenotypic traits of pear germplasm resources and fine germplasm resources screening in Gansu[J]. Journal of Southern Agriculture, 56(2): 520-532.] doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2025.02.016.
- 梁冠, 左红娟, 腊贵晓, 刘永康, 曹辉, 路翠红, 赵正伟, 张晓申. 2024. 基于主成分分析和灰色关联度的菊花品种综合评价[J]. 农学学报, 14(12): 40-44. [Liang G, Zuo H J, La G X, Liu Y K, Cao H, Lu C H, Zhao Z W, Zhang X S. 2024. Comprehensive evaluation of *Chrysanthemum morifolium* varieties based on principal component analysis and grey correlation degree[J]. Journal of Agriculture, 14(12): 40-44.]
- 廖美兰, 王华新, 周修任, 龙定建, 黄欣. 2015. 广西二十种金花茶观赏价值综合评价[J]. 北方园艺, (9): 67-70. [Liao M L, Wang H X, Zhou X R, Long D J, Huang X. 2015. Assessment on drought resistance of two wild *Sedum* species and four *Sedum* cultivars[J]. Northern Horticulture, (9): 67-70.] doi: 10.11937/bfy.201509020.
- 刘林秀, 姚小华, 曾海涛, 滕建华, 徐皓, 陈娟娟, 常君. 2025. 油茶开花生物学及授粉方式对果实发育的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 47(1): 93-103. [Liu L X, Yao X H, Zeng H T, Teng J H, Xu H, Chen J J, Chang J. 2025. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 47(1): 93-103.] doi: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.01.008.
- 邱胤晖, 赵金星, 邱志浩, 余文琴. 2017. 三角梅优质品种资源综合评价[J]. 热带作物学报, 38(6): 1035-1041. [Qiu Y H, Zhao J X, Qiu Z H, She W Q. 2017. A comprehensive evaluation of the high-quality *Bougainvillea* variety resources[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 38(6): 1035-1041.] doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2017.06.009.
- 任丽华, 高秋美, 刘洪冲, 米真如, 董秋颖, 蒲高斌, 韩加坤. 2025. 菊花种质资源遗传多样性分析及综合评价[J]. 南方农业学报, 56(2): 462-473. [Ren L H, Gao Q M, Liu H C, Mi Z R, Dong Q Y, Pu G B, Han J K. 2025. Genetic diversity and comprehensive evaluation of chrysanthemum germplasm resources[J]. Journal of Southern Agriculture, 56(2): 462-473.] doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2025.02.011.
- 孙影, 叶录, 王维娟, 赵岩, 郝佳乐, 王小明, 黄文娟, 李倩. 2025. 基于隶属函数分析的谷子品种综合评价[J]. 安徽农业科学, 53(10): 25-29. [Sun Y, Ye L, Wang W J, Zhao Y, Hao J L, Wang X M, Huang W J, Li Q. 2025. Comprehensive evaluation of millet varieties based on membership function analysis[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 53(10): 25-29.] doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2025.10.007.
- 唐桂梅, 李卫东, 周宇霞, 孔佑涵, 肖晓玲, 彭颖姝, 张力, 符红艳, 刘洋, 黄国林. 2025. 基于表型性状分析蕙兰种质资

- 源遗传多样性[J]. 中国农业科学, 58(2): 339-354. [Tang G M, Li W D, Zhou Y X, Kong Y H, Xiao X L, Peng Y S, Zhang L, Fu H Y, Liu Y, Huang G L. 2025. Genetic diversity analysis of *Cymbidium faberi* germplasm resources based on phenotypic traits[J]. Scientia Agricultura Sinica, 58(2): 339-354.] doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2025.02.010.
- 滕彩玲, 杨晓洪, 邓超, 刘艳芳, 韩瑞玺. 2022. 英国皇家园艺学会比色卡颜色特征及其在盆栽香石竹花色测定上的应用[J]. 中国农业大学学报, 27(11): 93-103. [Teng C L, Yang X H, Deng C, Liu Y F, Han R X. 2022. Research on color traits of Royal Horticultural Society Color Chart and its application in flower color testing of potted carnation[J]. Journal of China Agricultural University, 27(11): 93-103.] doi: 10.11841/j.issn.1007-4333.2022.11.08.
- 田晶华. 2024. 3类鲜食玉米主要农艺性状与产量的相关性分析[J]. 安徽农业科学, 52(24): 29-32. [Tian J H. 2024. Correlation analysis between main agronomic traits and yield of three types of fresh corns[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 52(24): 29-32.] doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2024.24.006.
- 王豪, 沈波, 陆云峰, 赵绮, 贾明光, 王建军. 2023. 20种三角梅在宁波的观赏性状及耐寒性研究[J]. 浙江农业科学, 64(10): 2447-2453. [Wang H, Shen B, Lu Y F, Zhao Q, Jia M G, Wang J J. 2023. Study on ornamental traits and cold resistance of 20 species of *Bougainvillea* in Ningbo[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 64(10): 2447-2453.] doi: 10.16178/j.issn.0528-9017.20220974.
- 王静静, 李腾飞, 张禄祺, 段青青, 常培培, 王友平, 张自坤. 2025. 山东地区加工型辣椒品质特征鉴定与综合评价[J]. 中国农学通报, 41(11): 152-158. [Wang J J, Li T F, Zhang L Q, Duan Q Q, Chang P P, Wang Y P, Zhang Z K. 2025. Identification and comprehensive evaluation of quality traits of processed hot pepper in Shandong region[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 41(11): 152-158.] doi: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.11.08.
- 王思瑶, 刘沛英, 傅阳阳, 郑硕理, 舒东蓓. 2025. 基于灰色关联度分析评价子莲花部观赏性状[J]. 农业与技术, 45(2): 17-20. [Wang S Y, Liu P Y, Fu Y Y, Zheng S L, Su D L. 2025. Evaluation of ornamental traits in seed-producing lotus based on grey relation analysis[J]. Agriculture and Technology, 45(2): 17-20.] doi: 10.19754/j.ynyjs.20250130004.
- 王以静, 方福生. 2021. 干热河谷生态环境特点与植被恢复技术探讨[J]. 中国林副特产, (1): 78-79. [Wang Y J, Fang F S. 2021. Discussion on ecological environment characteristics and vegetation restoration technology of dry-hot valley[J]. Forest By-Product and Speciality in China, (1): 78-79.] doi: 10.13268/j.cnki.fbsic.2021.01.031.
- 徐凤侠, 黄青云, 林春松, 黄一锦, 胡欧. 2017. 三色(*Bougainvillea peruviana* 'Thimma')在转录水平的甜菜色素和类黄酮积累比较[J]. 植物研究, 37(2): 249-258. [Xu S X, Huang Q Y, Lin C S, Huang Y J, Hu O. 2017. Comparison between betalain and flavonol accumulation in tricolor *Bougainvillea peruviana* 'Thimma' based on transcriptome[J]. Bulletin of Botanical Research, 37(2): 249-258.] doi: 10.7525/j.issn.1673-5102.2017.02.013.
- 徐凤侠, 王亮生, 舒庆艳, 苏明华, 黄青云, 张文惠, 刘公社. 2008. 三角梅属植物的生物学研究进展[J]. 植物学通报, 25(4): 483-490. [Xu S X, Wang L S, Shu Q Y, Su M H, Huang Q Y, Zhang W H, Liu G S. 2008. Progress of study of the biology of the resource plant *Bougainvillea* [J]. Chinese Bulletin of Botany, 25(4): 483-490.] doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2008.04.015.
- 许军, 何梅, 胡玉安, 武启飞, 林洪, 赵攀. 2018. 观赏海棠研究进展[J]. 江西农业大学学报, 40(3): 553-560. [Xu J, He M, Hu Y A, Wu Q F, Lin H, Zhao P. 2018. Advances in the research on and expectation of ornamental crabapple[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 40(3): 553-560.] doi: 10.13836/j.jjau.2018072.
- 杨姣, 罗中元, 陶金婷, 孟静, 赵雁. 2024. 基于主成分分析和聚类分析的切花月季弯梗特性综合评价[J]. 南方农业学报, 55(9): 2679-2688. [Yang J, Luo Z Y, Tao J T, Meng J, Zhao Y. 2024. Comprehensive evaluation of cut rose bent peduncle characteristics based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Journal of Southern Agriculture, 55(9): 2679-2688.] doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2024.09.013.
- 杨思霞, 黄旭光, 陆炎松, 黄爱玲, 黄宇寒, 霍行, 廖堂贵. 2024. 39份朱槿品种资源表型多样性分析[J]. 热带作物学报, 45(4): 722-733. [Yang S X, Huang X G, Lu Y S, Huang A L, Huang Y H, Huo X, Liao T G. 2024. Phenotypic diversity analysis of 39 *Hibiscus rosa-sinensis* cultivar resources[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 45(4): 722-733.] doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.04.008.
- 应梦云, 施建羽, 叶秋萍, 沈清宇, 余雯. 2024. 基于层次分析法的13个芍药品种观赏价值综合评价[J]. 亚热带植物科学, 53(6): 577-583. [Ying M Y, Shi J Y, Ye Q P, Shen Q Y, Yu W. 2024. Comprehensive evaluation on the ornamental value of 13 *Paeonia lactiflora* varieties based on analytic hierarchy process[J]. Subtropical Plant Science, 53(6): 577-583.] doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2024.06.011.
- 余文迪, 姜贵芸, 刘娟旭, 余义勋. 2023. 40种报春苣苔属植物观赏性状综合评价[J]. 热带作物学报, 44(10): 1986-1993. [Yu W D, Jiang G Y, Liu J X, Yu Y X. 2023. Comprehensive evaluation on the ornamental value of 40 species of *Primulina* [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 44(10): 1986-1993.] doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.10.008.
- 郁书君, 岑若邦, 刘佳美, 景衍之, 李美芬, 冯倚琪, 黄久香. 2025. 三角梅品种的表型遗传多样性综合分析与评价[J]. 广西植物, 45(4): 741-760. [Yu S J, Cen R B, Liu J M, Jing Y Z, Li M F, Feng Y Q, Huang J X. 2025. Comprehensive analysis and evaluation of phenotypic genetic diversity of *Bougainvillea* varieties[J]. Guihaia, 45(4): 741-760.] doi: 10.11931/guihaia.gxzw202404022.

- 张皓凯, 胡芳媛, 李前, 申逸男, 胡志宝, 刘丽娜, 于璐, 王洪江. 2025. 山西岚县沙棘种质表型性状多样性分析与综合评价[J]. 经济林研究, 43(1): 49-59. [Zhang H K, Hu F Y, Li Q, Shen Y N, Hu Z B, Liu L N, Yu L, Wang H J. 2025. Phenotypic traits diversity analysis and comprehensive evaluation of *Hippophae rhamnoides* germplasm from Lan County, Shanxi Province [J]. Non-wood Forest Research, 43(1): 49-59.] doi: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2025.01.006.
- 张慧会, 曾莹, 圣倩倩, 祝遵凌. 2024. 不同品种三角梅开花过程中苞片色彩参数和色素含量的变化特征[J]. 中南林业科技大学学报, 44(2): 157-165. [Zhang H H, Zeng Y, Sheng Q Q, Zhu Z L. 2024. Variation characteristics of color parameters and pigment content in bracts at different flowering stages among various cultivars of *Bougainvillea spectabilis* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 44(2): 157-165.] doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2024.02.017.
- 张明达, 胡雪琼, 张露, 李世峰, 张颢, 李绅崇, 宋杰. 2023. 云南省三角梅种植生态适宜性及低温灾害研究[J]. 灾害学, 38(3): 92-99. [Zhang M D, Hu X Q, Zhang L, Li S F, Zhang H, Li S C, Song J. 2023. Study on ecological suitability and low temperature risk of *Bougainvillea* in Yunnan Province [J]. Journal of Catastrophology, 38(3): 92-99.] doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.015.
- 张倩男, 杨彩玲, 买自珍, 马贵. 2024. 百合种质资源农艺与营养品质性状分析及综合评价[J]. 江苏农业学报, 40(4): 721-733. [Zhang Q N, Yang C L, Mai Z Z, Ma G. 2024. Analysis and comprehensive evaluation of agronomic and nutritional quality traits of lily germplasm resources [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 40(4): 721-733.] doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.04.016.
- 张亚琦, 何云, 李洪立, 洪青梅, 濮文辉, 李琼, 胡文斌, 刘平武. 2024. 33份火龙果种质果实性状主成分分析及综合评价[J]. 热带作物学报, 45(8): 1560-1571. [Zhang Y Q, He Y, Li H L, Hong Q M, Pu W H, Li Q, Hu W B, Liu P W. 2024. Principal component analysis and comprehensive evaluation of fruit traits of 33 pitaya germplasms [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 45(8): 1560-1571.] doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.08.005.
- 张煜婷, 韩雪雪, 何芳霞, 严瑞. 2025. 50种园林小菊观赏性状综合评价[J]. 中国农学通报, 41(4): 56-65. [Zhang Y T, Han X X, He F X, Yan R. 2025. Comprehensive evaluation of ornamental traits of 50 garden chrysanthemums [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 41(4): 56-65.]
- 张云, 侯献飞, 宋贤明, 赵倩, 于月华, 李强, 贾东海, 苗昊翠, 顾元国. 2025. 236份红花种质资源抗旱性鉴定及综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 43(3): 11-21. [Zhang Y, Hou X F, Song X M, Zhao Q, Yu Y H, Li Q, Jia D H, Miao H C, Gu Y G. 2025. Identification and comprehensive assessment of drought resistance in 236 safflower germplasm resources [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 43(3): 11-21.] doi: 10.7606/j.issn.1000-7601.2025.03.02.
- Feng X, Hong Y, Fang Y, Lyu Y, Li H. 2025. Key genes related to the cold resistance of *Bougainvillea glabra* "Elizabeth Angus" [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 72(1): 19. doi: 10.1134/S1021443724608346.
- Schrader J, Shi P J, Royer D L, Peppe D J, Gallagher R V, Li Y R, Wang R, Wright I J. 2021. Leaf size estimation based on leaf length, width and shape [J]. Annals of Botany, 128(4): 395-406. doi: 10.1093/aob/mcab078.
- Sun R, Liu S, Zhang Y. 2025. Genome-wide identification of the pigment formation-regulating CYP450 family gives new insights into color improvement in *Bougainvillea* [J]. Scientia Horticulturae, 341: 113997. doi: 10.1016/j.scienta.2025.113997.

(责任编辑: 陈 燕, 庞 茜)