

干旱胁迫对黄山贡菊活性成分和 挥发性代谢物的影响

成明哲¹,巴兆林¹,陈缘¹,李卫文²,张永盛³,潘华斌³,尹冬梅¹

(1 安徽农业大学 林学与园林学院,安徽省林木资源培育重点实验室,安徽合肥城市生态系统定位观测研究站,安徽 合肥 230036;

2 安徽省农业科学院 园艺研究所,农业农村部园艺作物种质创制与利用重点实验室(部省共建),安徽 合肥 230001;

3 歙县歙茶产业发展中心,安徽 歙县 245200)

[摘要] 【目的】探讨干旱胁迫对黄山贡菊活性成分及挥发性代谢物的影响,为黄山贡菊栽培体系及品质调控技术的优化提供科学依据与实践指导。【方法】以‘贡菊1号’为试验材料,共设置4个处理,即空白对照组(CK)、轻度干旱组(D1)、中度干旱组(D2)、重度干旱组(D3),在显蕾期至盛花期进行干旱胁迫处理,于盛花期采收花朵,测定贡菊花朵中绿原酸、木犀草苷、3,5-O-二咖啡酰奎宁酸、木犀草素、总黄酮、总酚、类胡萝卜素含量,并采用顶空固相微萃取(HS-SPME)结合气相色谱-质谱法(GC-MS)对挥发性代谢物进行分析。【结果】干旱胁迫导致贡菊叶片和花朵萎蔫,且花期较CK提前10 d。绿原酸与3,5-O-二咖啡酰奎宁酸含量随干旱胁迫加剧持续上升,并于D3处理达最高值,分别为0.38%和0.85%;木犀草苷与木犀草素含量以D2处理时最高。干旱胁迫显著促进总黄酮积累,并在D3处理达峰值0.44 mg/g;类胡萝卜素含量在D2处理最高,为0.18 mg/g;总酚含量存在波动,但无显著性差异。GC-MS结果显示,贡菊挥发性代谢物中以萜烯、酯、醇、烯、酮、醛等为主,干旱胁迫导致主要香气成分萜烯类占比下降,而醇、烯、酮、醛等挥发性代谢物含量则呈上升趋势。在干旱胁迫下,贡菊挥发性代谢物之间形成了以萜烯与酸协同、芳香族化合物拮抗为主的调控网络,该网络对不同活性成分(如总黄酮、绿原酸)积累呈现差异化的促进或抑制作用。【结论】在干旱胁迫下,菊花抗氧化防御能力与香气品质协同提升,此结果为优化贡菊栽培体系及品质调控技术提供指导。

[关键词] 黄山贡菊;干旱胁迫;活性成分;挥发性代谢物

[中图分类号] S567.2

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2027)03-0061-10

Effects of drought stress on active compounds and volatile metabolites of *Chrysanthemum morifolium* ‘Gongju’

Cheng Mingzhe¹, Ba Zhaolin¹, Chen Yuan¹, Li Weiwen², Zhang Yongsheng³,
Pan Huabin³, Yin Dongmei¹

(1 School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Anhui Provincial Key Laboratory of Forest Resources and Silviculture, Anhui Hefei Urban Ecosystem Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Hefei, Anhui 230036, China; 2 Institute of Horticulture, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Germplasm Innovation and Utilization of Horticultural Crop (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hefei, Anhui 230001, China; 3 Shexian Shecha Industry Development Center, Shexian, Anhui 245200, China)

[收稿日期] 2026-01-13 **[修回日期]** 2026-03-10

[基金项目] 农业农村部园艺作物种质创制与利用重点实验室(部省共建)开放基金项目(AHYY2023001);安徽农业大学高层次人才启动项目(rc372303);2022年度教育部“春晖计划”项目(HZKY2022095);安徽中药材种植联合研究中心项目(yjzx2023006);财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-21);安徽省教育厅自然科学类科研项目(2025AHGXZK60141);安徽农业大学-歙县人民政府合作协议项目(25335020)

[作者简介] 成明哲(1998—),男,山东滨州人,硕士,主要从事林木遗传育种研究。E-mail:mzhcheng@stu.ahau.edu.cn

[通信作者] 尹冬梅(1983—),女,安徽合肥人,教授,博士,博士生导师,主要从事园林植物种质资源创新和遗传育种研究。E-mail:dmyin@ahau.edu.cn

Abstract: 【Objective】 This study aims to investigate the effects of drought stress on active compounds and volatile metabolites of *Chrysanthemum morifolium* ‘Gongju’, providing a scientific basis and practical guidance for optimizing its cultivation system and quality regulation techniques. 【Method】 Using ‘Gongju 1’ as the experimental material, four treatments were established; the control (CK), mild drought stress (D1), moderate drought stress (D2), and severe drought stress (D3). Drought stress was applied from the visible bud stage to the full-bloom stage. Flowers were harvested at full-bloom to determine the contents of chlorogenic acid, luteoloside, 3, 5-*O*-dicaffeoylquinic acid, luteolin, total flavonoids, total phenols, and carotenoids in *Chrysanthemum morifolium* ‘Gongju’. Additionally, volatile metabolites were analyzed by headspace solid-phase microextraction (HS-SPME) coupled with gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). 【Result】 Drought stress induced wilting in leaves and flowers of *Chrysanthemum morifolium* ‘Gongju’ and advanced flowering time by 10 days compared to CK. The contents of chlorogenic acid and 3, 5-*O*-dicaffeoylquinic acid increased progressively as drought stress intensified, reaching peak values of 0.38% and 0.85% respectively at D3, whereas the contents of luteoloside and luteolin peaked at D2. Drought stress significantly promoted total flavonoids accumulation, which peaked at 0.44 mg/g at D3. Carotenoid content reached the maximum value of 0.18 mg/g at D2. Total phenol content fluctuated without significant differences among treatments. GC-MS analysis revealed that volatile metabolites in ‘Gongju’ were predominantly terpenes, esters, alcohols, alkenes, ketones, and aldehydes. Drought stress decreased the proportion of major aromatic terpenes, whereas the contents of volatile metabolites such as alcohols, alkenes, ketones, and aldehydes increased. Under drought stress, the volatile metabolites of ‘Gongju’ formed a regulatory network characterized by synergistic interactions between terpenes and acids, and antagonistic interactions involving aromatic compounds. This network differentially promoted or inhibited the accumulation of various active compounds such as total flavonoids and chlorogenic acid. 【Conclusion】 Under drought stress, the antioxidant defense capacity and aroma quality of *Chrysanthemum morifolium* are synergistically improved, providing guidance for optimizing the cultivation system and quality regulation techniques for ‘Gongju’.

Key words: *Chrysanthemum morifolium* ‘Gongju’; drought stress; active compounds; volatile metabolites

黄山贡菊(*Chrysanthemum morifolium* ‘Gongju’)是菊花的一个栽培品种,数千年来一直被用作传统食品和草药,其与杭白菊、滁菊和亳菊一起被称为“中国四大名菊”^[1]。贡菊作为传统中药材,不仅被证实具有祛风散热、抗氧化、抗癌、降血压等多种药理作用,还因其芳香清爽的口感而广泛应用于茶饮及相关健康产品的开发^[2]。贡菊的品质主要取决于其活性成分的含量与组成,其中药用成分有绿原酸、木犀草苷和 3, 5-*O*-二咖啡酰奎宁酸,这些成分被认为是其药理作用的重要物质^[3];此外,贡菊富含总黄酮、类胡萝卜素及总酚等抗氧化成分^[4]。但随着全球水资源愈发短缺,贡菊种植往往面临大面积干旱的问题^[5]。干旱是一种普遍且持久的非生物胁迫,也是制约植物生长发育的主要限制因素之一^[6-7]。研究表明,干旱胁迫下植物的正常生理代谢受到干扰,通常导致产量下降,但也有可能刺激某些活性成分积累,进而促进品质提升,正所谓“顺境促产量,逆境促品质”。研究表明,在干旱胁迫下,

枸杞还原糖含量高达 75.14 mg/g^[8];金银花绿原酸、3, 5-*O*-二咖啡酰奎宁酸等药用成分积累显著增加^[9];怀菊可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质含量增加,有效成分含量升高^[10]。

挥发性代谢物作为菊花关键特征性次生代谢物,其组成直接决定了菊花的经济价值与品质。菊花产生的挥发性物质主要为烃类、萜类化合物、芳香族化合物、醇类、酮类、醚类、醛类、酯类等,这些物质不仅是其芳香属性的化学基础,更是在食品、化工及医疗等领域具有广泛应用^[11]。萜烯类和芳香族化合物是构成花香的主要成分。研究表明,环境因子能够调控萜烯类物质的合成与释放,例如重度干旱胁迫会导致冬青栎中单萜等萜烯类化合物的相对含量降低,而某些环境信号亦可诱导倍半萜烯等挥发性物质的排放,这些变化揭示了挥发性代谢物在植物适应逆境过程中发挥着重要的生态功能^[12]。因此解析菊花挥发性代谢物的组成特征及其调控机制,对提升贡菊经济价值及品质具有重要

意义。为深入探究干旱胁迫对贡菊品质的影响机制,本研究设置4个干旱梯度,测定贡菊的活性成分含量,采用GC-MS非靶向代谢组学技术对挥发性代谢物进行定性和定量分析,并通过相关性分析,解析不同干旱强度下代谢物变化与活性成分的关联机制,挖掘可能提升贡菊品质的干旱条件,为其栽培体系及品质调控技术的优化提供科学依据与实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究材料与试验设计

本研究以‘贡菊1号’(安徽省农业科学院提供)为试验材料。于2024年8月17日,将长势一致的贡菊苗移栽至高18 cm、口径15 cm的花盆中,每盆装入等量栽培基质统一养护(基质来源:江苏兴农基质科技有限公司)。

根据土壤相对含水量(SRWC)的不同,试验设置4个处理,分别为空白对照组(土壤相对含水量为 $75\% \pm 5\%$,CK)、轻度干旱组(土壤相对含水量为 $60\% \pm 5\%$,D1)、中度干旱组(土壤相对含水量为 $45\% \pm 5\%$,D2)、重度干旱组(土壤相对含水量为 $30\% \pm 5\%$,D3)。在现蕾期(2024年10月28日)至盛花期末(2024年12月20日)对植株进行干旱胁迫处理。每个处理设置3个重复,每个重复包含6盆长势较一致的植株,每盆移栽1株贡菊苗。盆栽采用随机区组排列以消除边际效应。通过称重法控制不同处理的土壤相对含水量,以维持干旱胁迫处理,并于每日18:00补充水分以保持干旱程度。除水分管理外,其他管理与正常盆栽管理相同。于盛花期末前5 d内,从4个处理中选取3株长势一致的植株进行观测,拍照记录叶片与花朵的形态变化,同时采集样品用于各项指标测定。

1.2 贡菊药用成分含量的测定

采用中国药典(2025版)^[3]中的高效液相色谱法(HPLC)测定药用成分,包括绿原酸、木犀草苷、木犀草素及3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸的含量,药典规定了上述成分在药材中的最低含量标准,绿原酸不低于0.20%,木犀草苷不低于0.08%,3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸不低于0.70%。

1.3 贡菊营养成分含量的测定

使用总黄酮(TF)含量检测试剂盒测定TF含量,使用总酚(Tp)含量检测试剂盒测定Tp含量,使用叶绿体色素(叶绿素a、b和类胡萝卜素)含量检测

试剂盒测定类胡萝卜素含量,试剂盒为苏州格锐思有限公司产品,具体方法参照其说明书。

1.4 干旱胁迫下贡菊挥发性代谢物的测定

贡菊挥发性代谢物提取与分析工作由北京诺禾致源公司完成,采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱法进行分析。将液氮研磨后的样品置于顶空瓶中,通过TriplusRSH自动进样器在90℃下孵育5 min,采用DVB/Carbon WR/PDMS萃取纤维吸附20 min,于GC-MS进样口解吸3 min。GC-MS分析在Thermo Scientific Trace 1610-TSQ 9610系统上进行,色谱柱为DB-wax(30 m×0.25 mm×0.25 μm),载气为高纯氦气,流速1.2 mL/min,采用程序升温。质谱条件为电子轰击离子源,电子能量70 eV,扫描范围 m/z 40~400。代谢物通过Deconvolution Plugin进行峰提取,并基于Wiley/NIST 2020质谱库进行鉴定,匹配度阈值设为 $\geq 80\%$ 。

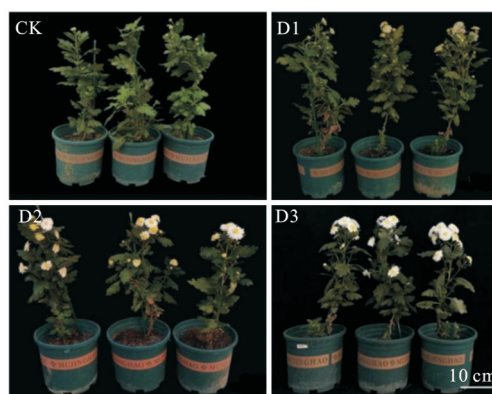
1.5 数据统计与分析

使用Microsoft Excel 2020进行数据处理;采用SPSS Statistics 24.0进行单因素方差分析(ANOVA)及Pearson相关性分析。数据经Levene检验确认方差齐性后,通过ANOVA结合Duncan多重比较法进行组间差异显著性分析($P < 0.05$),用GraphPad Prism 9.5.1绘制图表。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对贡菊生长发育的影响

干旱胁迫对贡菊生长发育的影响见图1。



CK. 土壤相对含水量 $75\% \pm 5\%$;D1. 土壤相对含水量 $60\% \pm 5\%$;D2. 土壤相对含水量 $45\% \pm 5\%$;D3. 土壤相对含水量 $30\% \pm 5\%$ 。下同。

CK. $75\% \pm 5\%$ soil relative water content;D1. $60\% \pm 5\%$ soil relative water content;D2. $45\% \pm 5\%$ soil relative water content;D3. $30\% \pm 5\%$ soil relative water content. The same below.

图1 干旱胁迫对贡菊生长发育的影响

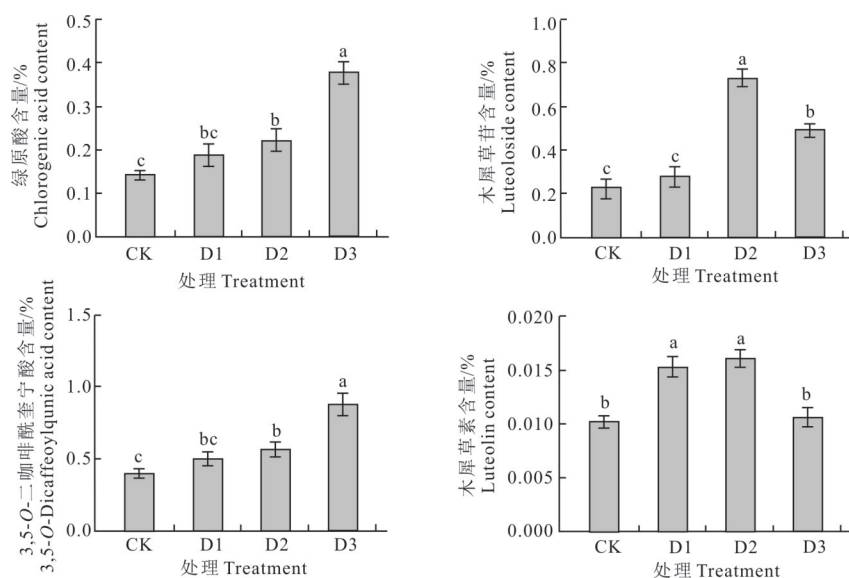
Fig. 1 Effects of drought stress on growth and development of ‘Gongju’

干旱胁迫显著缩短了贡菊的生育周期,开花期较CK提前10 d,在干旱胁迫下,贡菊叶片和花朵均表现出渐进性萎蔫症状(图1)。同时,干旱胁迫程度与开花提前幅度呈正相关,干旱胁迫强度越高,开花启动时间越早。

2.2 干旱胁迫对贡菊活性成分积累的影响

2.2.1 干旱胁迫对贡菊药用成分含量的影响 如图2所示,干旱胁迫对4种关键药用成分的积累具有差异化影响。贡菊的绿原酸含量随干旱强度增加呈持续上升趋势($P<0.05$),其中CK最低,D1、D2处理分别为0.19%和0.23%,而D3处理达峰值0.38%,D3与D2处理差异显著($P<0.05$)。贡菊的木犀草苷含量呈现“升—降”动态,其中CK为0.23%,D1处理升至0.28%,D2处理显著增至

0.74% ($P<0.05$),D3处理回落至0.50%,但仍显著高于CK和D1处理($P<0.05$)。贡菊的3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸含量则呈现持续累积特征,其中CK为0.4%,D1处理升至0.5%,D2处理进一步增至0.55%,D3处理达0.85%,较CK提升125% ($P<0.05$)。贡菊的木犀草素含量变化趋势与木犀草苷一致,其中CK为0.01%,D1处理显著升至0.015% ($P<0.05$),D2处理维持在0.015%,与D1处理无显著差异,D3处理回落至0.012%,与CK无显著差异,但显著低于D1和D2处理($P<0.05$)。综合分析表明,D3处理对绿原酸和3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸积累具有最优促进作用,而D2处理最有利于木犀草苷和木犀草素的高效合成。



图柱上标不同小写字母表示不同处理差异显著($P<0.05$),N为无显著差异。下同。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). N denotes no significant difference. The same below.

N denotes no significant difference. The same below.

图2 干旱胁迫对贡菊药用成分含量的影响

Fig. 2 Effects of drought stress on contents of medicinal components in 'Gongju'

2.2.2 干旱胁迫对贡菊营养成分含量的影响 干旱胁迫对贡菊营养成分含量的影响如图3所示。

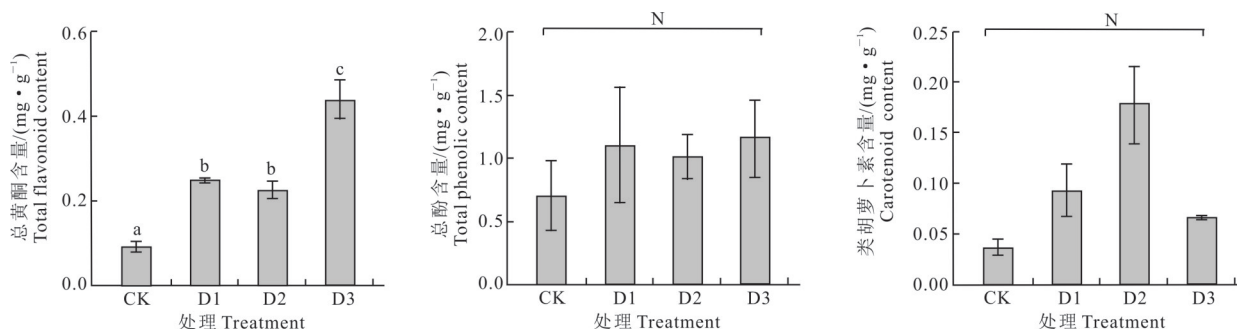


图3 干旱胁迫对贡菊营养成分含量的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on contents of nutritional components in 'Gongju'

由图 3 可以看出,干旱胁迫显著促进贡菊总黄酮含量的积累,其中 CK 的总黄酮含量最低;D1 与 D2 处理相近,分别为 0.25 和 0.23 mg/g,均显著高于 CK($P<0.05$);D3 处理达峰值 0.44 mg/g,显著高于 D1、D2 处理及 CK($P<0.05$)。贡菊的总酚含量则呈现先升后降再升的波动趋势,但总体无显著性差异。贡菊的类胡萝卜素含量呈先升后降的单峰模式,随干旱强度变化无显著性差异。

2.3 干旱胁迫对贡菊挥发性代谢物的影响

2.3.1 挥发性代谢物的类别占比 本研究在贡菊中共鉴定出 208 种挥发性代谢物,分为 11 个化学类别,主要包括萜烯、酯、醇、烯烃、酮、醛等(表 1)。挥

发性代谢物类别占比分析表明,在 CK 中,萜烯是绝对主要的挥发性成分,占比高达 50.74%,其次为酯、烯烃和醇,占比分别为 19.64%,9.87% 和 6.30%。随着干旱胁迫的加剧,各类代谢物类别占比呈现规律性变化,萜烯占比呈现缓慢下降趋势,从 CK 的 50.74% 降至 D3 处理的 47.61%;酮占比则从 5.38% 逐渐上升至 6.48%;酯占比从 19.64% 小幅下降至 18.51%。值得注意的是,其他物质的占比在 D2 和 D3 处理显著升高,分别为 2.68% 和 2.54%,同时,醇、烯烃和酸也表现出不同程度的增加。醛、芳香族化合物、烷烃和呋喃物质在各处理组间相对稳定。

表 1 干旱胁迫对贡菊挥发性代谢物类别占比的影响
Table 1 Effects of drought stress on relative proportions of volatile metabolite groups in ‘Gongju’ %

处理 Treatment	萜烯 Terpenes	酮 Ketones	酯 Esters	其他 Others	醇 Alcohols	醛 Aldehydes	烯烃 Alkenes	芳香族化合物 Aromatic compounds	烷烃 Alkanes	酸 Acids	呋喃 Furans
CK	50.74	5.38	19.64	2.01	6.30	1.73	9.87	0.87	2.17	1.17	0.10
D1	50.86	5.41	18.39	2.10	6.30	1.81	10.57	0.90	2.31	1.24	0.09
D2	48.91	6.15	18.86	2.10	7.22	1.78	10.10	0.93	2.68	1.23	0.09
D3	47.61	6.48	18.51	2.15	7.47	1.64	11.26	1.01	2.53	1.22	0.11

上述结果表明,干旱胁迫造成贡菊挥发性代谢物类别占比的重构,具体表现为主要香气成分萜烯类的占比下降,而部分酮、醇、烯烃及其他物质的占比上升,这种代谢谱变化特征揭示了贡菊挥发性代谢物对干旱胁迫的响应规律。

2.3.2 干旱胁迫下贡菊挥发性代谢物的相关性分析 对所有筛选出的挥发性代谢物进行 VIP 值排序,选取前 15 个 VIP 值最高的挥发性代谢物进行相关性分析,结果见图 4。图 4 结果显示,萜烯(石竹烯、古巴烯)与酸(己酸、庚酸)呈现强正相关($r>0.7$),协同增强抗氧化防御与挥发性信号传导功能;芳香族化合物(苯乙烯-7,8-环氧化物)与多数代谢物呈显著负相关($r<-0.3$),反映了干旱条件下代谢资源向关键防御途径(萜烯/酸合成)的优先分配。此外,萜烯((一)-大根香叶烯 D)与芳香族化合物(苯乙烯-7,8-环氧化物)呈现弱负相关($r=-0.48$),而与古巴烯呈现强正相关($r=0.92$),与石竹烯的相关性较弱($r=-0.06$),表明不同萜烯代谢途径对干旱胁迫的响应并非完全同步。异石竹烯与古巴烯的相关性也相对有限($r=-0.54$)。同时,酸(3-甲基丁酸)与萜烯的正相关性较弱,而与芳香族化合物(苯乙烯-7,8-环氧化物)呈负相关($r=-0.06$),表明其代谢调控可能介于两个协同网络之间。

2.4 干旱胁迫下贡菊挥发性代谢物与活性成分的相关性分析

本研究系统评估了贡菊中主要挥发性代谢物类别与活性成分之间的相关性,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,贡菊的萜烯含量与总黄酮、绿原酸及木犀草苷含量均呈负相关,其中与绿原酸含量的负相关性最强。与之相反,贡菊的酮含量与总黄酮、绿原酸和木犀草苷含量均呈现出较强的正相关关系。贡菊的酯含量与总黄酮、总酚及木犀草苷含量多呈负相关。此外,贡菊的醇含量与总酚、木犀草苷含量存在中度正相关,而醛含量则与木犀草苷含量呈正相关。值得注意的是,贡菊的芳香族化合物与绿原酸含量表现出极强的正相关。上述结果揭示,在贡菊挥发性代谢物中,酮和部分醇与多种活性成分的积累存在显著协同效应,而萜烯和酯则多呈拮抗关系。

3 讨 论

3.1 干旱胁迫对贡菊活性成分的影响

水分是植物生长发育过程中不可或缺的生态因子,对植物生长发育具有重要影响^[6]。在干旱胁迫下,贡菊的叶片和花朵因色素物质遭到破坏,均表现出渐进性萎蔫,正常的生理活动受到影响,导致产量下降^[13]。在干旱胁迫下三角梅通过调整代

谢途径,如促进可溶性糖、可溶性蛋白等营养物质的积累,在多种内源激素的协同调控下促进花芽分

化,使花期提前^[14],这与贡菊在干旱胁迫下花期提前的研究结果一致。

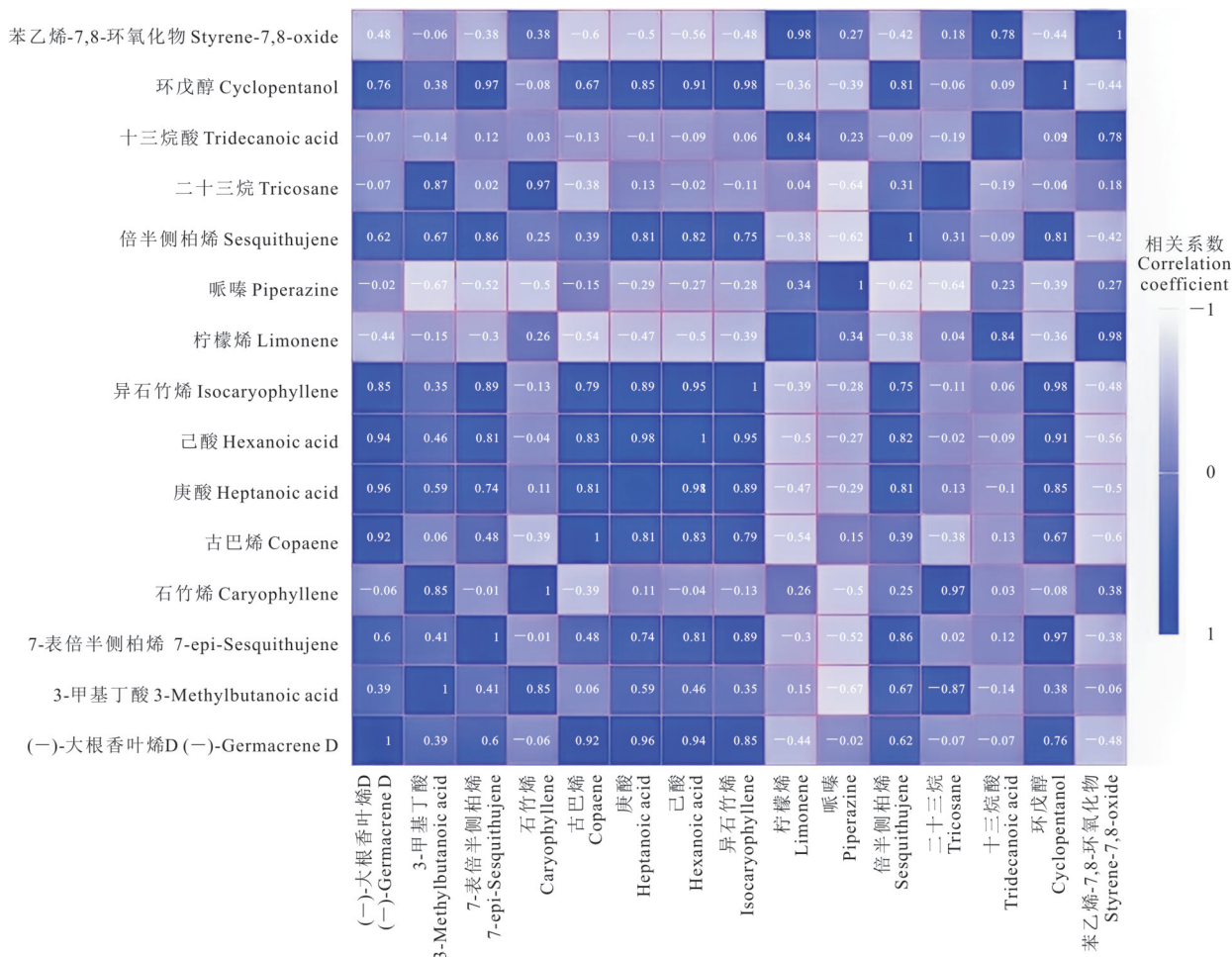


图4 干旱胁迫下贡菊挥发性代谢物的相关性分析

Fig. 4 Correlation heatmap of volatile metabolites in 'Gongju' under drought stress

绿原酸、木犀草苷及3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸可作为评估菊花药用品质的参数^[15]。研究证实,绿原酸、木犀草苷及3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸、总黄酮是具有显著抗氧化活性的天然化合物^[16]。在本研究中,干旱胁迫下贡菊的绿原酸和3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸含量持续上升,而木犀草苷与木犀草素含量呈现阶段性变化。绿原酸含量显著升高,暗示贡菊清除干旱诱导过量活性氧(ROS)的能力加强,从而有效提升了其对干旱胁迫的适应性,白菊在干旱胁迫下也有类似报道^[17]。木犀草苷含量在中度干旱胁迫时达峰值,而重度干旱胁迫时显著降低,体现其抗旱动态响应特征,这与黄芩在干旱胁迫下木犀草苷含量的变化趋势一致^[15]。贡菊的3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸含量同样持续上升,这种模式与茶树^[18]和金银花^[19]在逆境胁迫下的响应一致。

总黄酮、总酚、类胡萝卜素可作为评估菊花营

养品质的重要参数^[20-21]。在本研究中,贡菊的总黄酮含量在D3处理达到最高值,以缓解干旱诱导的氧化损伤,这一现象在紫花苜蓿中也有过相似报道^[22]。类胡萝卜素含量变化表明,适度干旱通过调控光保护机制促进类胡萝卜素的合成,而重度干旱导致代谢失衡,抑制其进一步积累^[23]。相比之下,在本研究中,贡菊的总酚含量仅在轻度干旱和重度干旱胁迫时略高于CK,表明其对于干旱胁迫的敏感性较低,这一结果与卫乐等^[24]在盐碱胁迫下玫瑰多酚的变化趋势一致。

本研究结果表明,中度干旱同步优化类胡萝卜素、木犀草苷和木犀草素含量,三者均具有抗氧化活性,协同增强植物抗逆性,这与金银花在干旱胁迫下采取的对策^[19]一致。在本研究中,贡菊的总黄酮、绿原酸和3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸在重度干旱胁迫下持续积累,暗示绿原酸、3,5-*O*-二咖啡酰奎宁

酸等有机酸类成分通过渗透调节维持细胞稳态,这与蒲公英在干旱胁迫下有机酸类含量的变化结果相似^[25]。中度干旱使贡菊的木犀草苷含量为

0.74%,远超药典标准(0.07%)^[3],表明中度干旱胁迫有助于提升贡菊的品质,为贡菊的科学栽培与水分管理提供了重要的理论支撑。

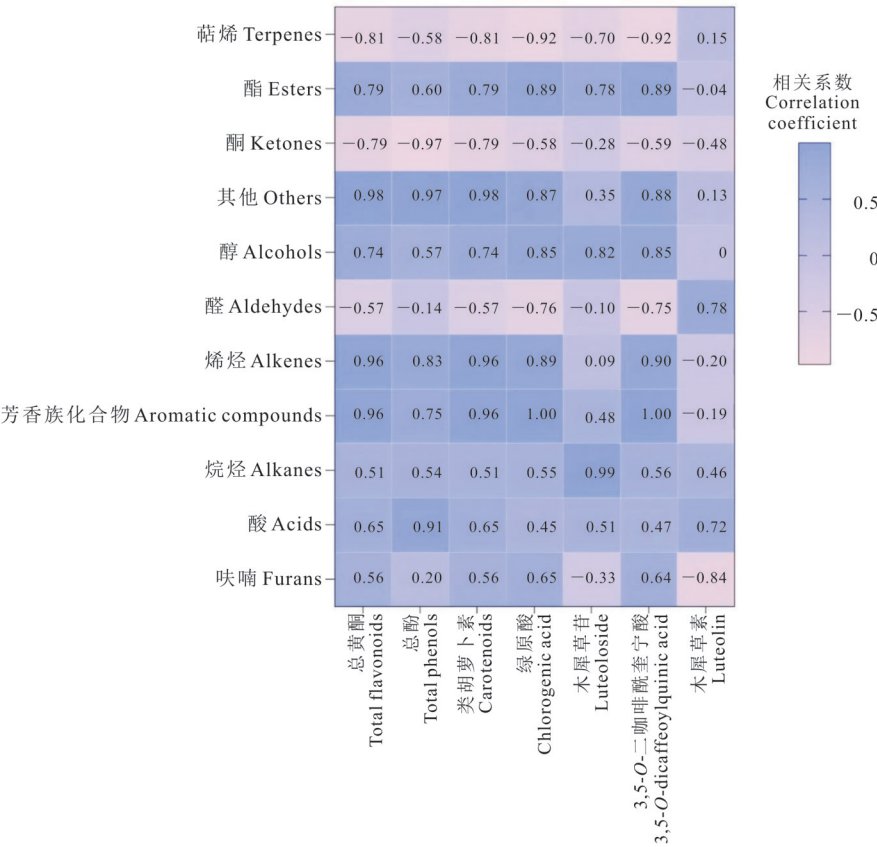


图5 干旱胁迫下贡菊挥发性代谢物与活性成分的相关性分析
Fig. 5 Correlation analysis between volatile metabolites and active compounds in ‘Gongju’ under drought stress

3.2 干旱胁迫对贡菊挥发性代谢物的影响

在不同干旱梯度下,贡菊的挥发性代谢物占比呈现出规律性变化,反映了植物次生代谢物的可塑性^[26]。随着干旱胁迫加剧,代谢谱呈现规律性变化,首要特征是核心香气成分萜烯类占比从CK的50.74%持续下降至D3处理的47.61%,表明其合成途径可能受到抑制^[27]。与此同时,部分应激响应相关物质的占比上升,其中酮类占比从5.38%增加至6.48%,表明干旱胁迫激活了酮类代谢通路的活性^[28];醇类从6.30%增加至7.47%、烯烃类从9.87%增加至11.26%以及酸类从1.17%增加至1.22%,尤其在D2、D3处理更为明显,这表明这些挥发性代谢物可能涉及能量代谢的调整或渗透调节作用^[29-30]。这种变化模式揭示了干旱胁迫下贡菊挥发性代谢物的转变,推测在重度干旱下,植株会将有限的代谢资源从挥发性萜类香气物质的大量合成中分流,转而用于合成或积累某些可能参与膜稳定性维持或作为抗逆信号分子前体的代谢物^[31]。

因此,代谢谱整体呈现出从“香气合成主导型”向“胁迫应激响应型”的特征转变,这种重构规律为解析贡菊次生代谢应对干旱胁迫的适应机制提供了关键科学依据。

3.3 干旱胁迫下贡菊挥发性代谢物与活性成分的相关性

本研究发现,贡菊的萜烯类物质与绿原酸含量呈显著负相关,这可能源于二者在苯丙烷代谢通路中共同前体的竞争,在D3处理中贡菊的绿原酸含量达到峰值,而此时萜烯类代谢物占比呈现下降趋势,这与在干旱胁迫下紫甘蓝苯丙烷代谢通路的变化一致,提示二者可能在抗氧化防御中具有协同效应^[32]。酮类代谢物与木犀草苷含量呈显著正相关,这与蒲公英在干旱胁迫下代谢物变化的趋势^[25]一致,表明酮类代谢物可能通过激活黄酮苷化酶等关键酶,促进木犀草苷的生物合成。相比之下,酯类代谢物与3,5-O-二咖啡酰奎宁酸含量的相关性相对较弱,但在重度干旱下仍保持正相关,说明其在

维持多酚类物质稳定性方面可能发挥调节作用^[33]。

挥发性代谢物与营养成分表现出独特的关联模式。萜烯类代谢物与总黄酮含量呈中等正相关,而与总酚类物质关联较弱,表明萜烯可能作为前体或信号分子协同黄酮合成途径^[34]。酮类代谢物与总黄酮含量表现出较强的正相关性,但与总酚含量呈微弱负相关,这与丹参在水分胁迫下采取的策略^[35-36]一致,提示酮类在黄酮积累中具有促进作用,但可能与酚类代谢存在竞争。酯类代谢物与总黄酮和总酚含量均呈正相关,其作为香气成分可能通过调节次生代谢流间接影响品质^[37]。整体上,相关性网络凸显了萜烯、酮和酯类代谢物与黄酮积累的密切关联,这为香气形成与抗氧化防御的协同机制提供了直接证据^[38]。

挥发性代谢物与活性成分的相关性不仅是代谢网络的体现,更是植物适应逆境的策略,这种机制确保了贡菊在胁迫下维持品质与抗性的平衡^[39]。未来研究需整合转录组、蛋白组等多组学数据,系统解析干旱胁迫对活性成分合成的分子调控机制,深化胁迫响应机制研究。

4 结 论

本研究发现,干旱胁迫导致贡菊叶片萎蔫、花期提前,其总黄酮、绿原酸及 3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸等活性成分随干旱胁迫加剧显著积累;类胡萝卜素、木犀草苷和木犀草素含量在中度干旱时最高。干旱胁迫促使香气成分中萜烯类下调,酮类、醇类上调,相关性分析发现酮类代谢物与绿原酸、木犀草苷含量等呈显著正相关。中度干旱是活性成分均衡积累的最优条件,重度干旱则侧重促进有机酸类物质合成。本研究为通过干旱胁迫来定向提升贡菊品质提供了理论依据,对优化栽培实践具有重要指导意义。

[参考文献]

- [1] Lin L Z, Harnly J M. Identification of the phenolic components of *Chrysanthemum* flower (*Chrysanthemum morifolium* Ramat) [J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 319-326.
- [2] 甘蓓, 管鹏, 罗文婷, 等. 基于氨基酸组成及含量的茶用菊品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(20): 274-281.
Gan B, Guan P, Luo W T, et al. Quality analysis of *Chrysanthemum* tea based on amino acid composition and content [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(20): 274-281.
- [3] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部, 2025 年版[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2025.
- [4] 吴木兰, 张嘉慧, 林启昉, 等. 干燥方式对黄菊花活性成分、抗氧化特性及挥发性风味的影响[J/OL]. 福建农业科技, 2025: 1-7 [2025-11-02]. <https://doi.org/10.13651/j.cnki.fjnykj.2025.09.003>.
- [5] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 905-910.
Liu Y S, Liu Y, Guo L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4): 905-910.
- [6] 宋亚玲, 王红梅, 倪付勇, 等. 金银花中酚酸类成分及其抗炎活性研究[J]. 中草药, 2015, 46(4): 490-495.
Song Y L, Wang H M, Ni F Y, et al. Study on anti-inflammatory activities of phenolic acids from *Lonicerae Japonicae Flos* [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2015, 46(4): 490-495.
- [7] 罗艳. 外源褪黑素缓解园林小菊“绚秋凝红”干旱胁迫的生理效应[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
Luo Y. Physiological effects of exogenous melatonin in alleviating drought stress in garden *Chrysanthemum* “Xuanqiu ninghong” [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [8] 罗长莲, 郑津津, 冯雷, 等. 干旱胁迫对黑果枸杞生长及产量的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2024, 47(3): 186-191.
Luo C L, Zheng J J, Feng L, et al. Effects of drought stress on growth and yield of *Lycium ruthenicum* Murr [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2024, 47(3): 186-191.
- [9] 潘占兵, 杨慧, 左忠, 等. 干旱胁迫对 5 个金银花品种生理生化特征的影响[J]. 生物资源, 2025, 47(1): 81-89.
Pan Z B, Yang H, Zuo Z, et al. Effects of drought stress on physiological and biochemical characteristics of five honeysuckle varieties [J]. Amino Acids and Biotic Resources, 2025, 47(1): 81-89.
- [10] 孟盼盼, 何海燕, 曹钰昕, 等. 5 个栽培类型药菊分枝期抗旱性综合评价[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(2): 90-99.
Meng P P, He H Y, Cao Y X, et al. Comprehensive evaluation of 5 cultivation types of medicinal *Chrysanthemum morifolium* Ramat. at branching stage [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(2): 90-99.
- [11] Guan Y Q, Chen S M, Chen F D, et al. Exploring the relationship between trichome and terpene chemistry in *Chrysanthemum* [J]. Plants, 2022, 11(11): 1410.
- [12] Bertin N, Staudt M. Effect of water stress on monoterpene emissions from young potted holm oak (*Quercus ilex* L.) trees [J]. Oecologia, 1996, 107(4): 456-462.
- [13] 杨富. 药用白菊花花芽分化及花期耐旱性研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.

- Yang Y F. Study on drought tolerance and morphological characteristics of *Chrysanthemum motifolium* Ramat. for medicine [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [14] 吴榕榕. 不同时长控水处理诱导三角梅花芽分化的生理机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- Wu R R. Study of the physiological mechanism of *Bougainvillea* flower bud differentiation induced by different duration of water control treatments [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023.
- [15] 管仁伟, 郭瑞齐, 林慧彬, 等. 基于植物代谢组学技术的干旱及盐胁迫对黄芩中黄酮类成分影响的研究[J]. 中草药, 2022, 53(5): 1504-1511.
- Guan R W, Guo R Q, Lin H B, et al. Effects of drought and salt stress on flavonoids in *Scutellaria baicalensis* based on plant metabolomics[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(5): 1504-1511.
- [16] 范帅帅, 田伟, 王相, 等. UPLC法同时测定野菊花中8种活性成分的含量[J]. 中国药房, 2018, 29(15): 2058-2062.
- Fan S S, Tian W, Wang X, et al. Simultaneous determination of 8 active components in *Dendranthema indicum* by UPLC [J]. China Pharmacy, 2018, 29(15): 2058-2062.
- [17] 杨云富, 郭巧生, 张守栋, 等. 水分胁迫对药用白菊花抗干旱生理及药材内在品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2009, 34(4): 486-487.
- Yang Y F, Guo Q S, Zhang S D, et al. Effects of water stress on drought resistance physiology and internal quality of medicinal *Chrysanthemum morifolium* [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2009, 34(4): 486-487.
- [18] Sun C H, Yang C Y, Tzen J T C. Molecular identification and characterization of hydroxycinnamoyl transferase in tea plants (*Camellia sinensis* L.) [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(12): 3938.
- [19] 乔姝, 范文迪, 卞寅博, 等. 干旱胁迫下金银花绿原酸与木犀草苷积累降低的转录调控机理[J]. 生物工程学报, 2025, 41(10): 3969-3989.
- Qiao M, Fan W D, Bian Y B, et al. Transcriptional regulation mechanism of reduced accumulation of chlorogenic acid and luteoside in *Lonicera japonica* under drought stress [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025, 41(10): 3969-3989.
- [20] Šimunková M, Štekláč M, Malček M. Spectroscopic, computational and molecular docking study of Cu(II) complexes with flavonoids: from cupric ion binding to DNA intercalation [J]. New Journal of Chemistry, 2021, 45(24): 10810-10821.
- [21] Zhao X, Zhao R, Yang X J, et al. Recent advances on bioactive compounds, biosynthesis mechanism, and physiological functions of *Nelumbo nucifera* [J]. Food Chemistry, 2023, 412: 135581.
- [22] 李丹丹, 梁宗锁, 普布卓玛, 等. 干旱胁迫对紫花苜蓿黄酮类化合物含量及其合成途径关键酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(8): 1380-1388.
- Li D D, Liang Z S, Pubzhuoma, et al. Flavonoids contents and flavonoids synthetic key enzyme activities in alfalfa under drought stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(8): 1380-1388.
- [23] 井春喜, 张怀刚, 师生波, 等. 土壤水分胁迫对不同耐旱性春小麦品种叶片色素含量的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(5): 811-814.
- Jing C X, Zhang H G, Shi S B, et al. Effects of soil water stress on pigment contents in leaves of different drought-tolerant spring wheat cultivars [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(5): 811-814.
- [24] 卫乐, 姚爱兵, 孙福华, 等. 盐碱胁迫对“丰花2号”花瓣多酚类物质的影响[J]. 北方园艺, 2021(17): 81-89.
- Wei L, Yao A B, Sun F H, et al. Effects of saline-alkali stress on polyphenols, flavonoids and anthocyanins of ‘Fenghua No. 2’ Rose petals [J]. Northern Horticulture, 2021(17): 81-89.
- [25] 韦明慧, 范雪晴, 杨丽, 等. 蒲公英药效成分的时空积累特征及其对干旱胁迫的响应研究[J]. 中国中药杂志, 2026, 51(7): 1871-1881.
- Wei M H, Fan X Q, Yang L, et al. Spatiotemporal accumulation patterns of pharmacodynamic components in *Taraxacum officinale* and their response to drought stress [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2026, 51(7): 1871-1881.
- [26] 王猛. 发菜响应干旱胁迫的生理与分子机制的多组学分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.
- Wang M. Physiological and molecular mechanisms based on multi-omics analysis of *Nostoc flagelliforme* in response to drought stress [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [27] Pazouki L, Kanagendran A, Li S, et al. Mono- and sesquiterpene release from tomato (*Solanum lycopersicum*) leaves upon mild and severe heat stress and through recovery: from gene expression to emission responses [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 132: 1-15.
- [28] 于浩滢, 徐志超, 闵伟红, 等. 干旱胁迫影响药用植物品质的分子机制研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2018, 20(9): 1650-1658.
- Yu H Y, Xu Z C, Min W H, et al. Molecular mechanism for the quality of medicinal plants affected by drought stress [J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2018, 20(9): 1650-1658.
- [29] 胡书婧, 张汝民. 挥发性有机化合物在植物适应胁迫及生理生态中的作用[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(6): 1378-1387.
- Hu S J, Zhang R M. Roles of volatile organic compounds in plant adaptation to stress and physiological ecology [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(6): 1378-1387.
- [30] Jin J Y, Zhao M Y, Jing T T, et al. (Z)-3-Hexenol integrates drought and cold stress signaling by activating abscisic acid glucosylation in tea plants [J]. Plant Physiology, 2023, 193(2): 1491-1507.
- [31] 朱诗凡, 武金月, 梁夏, 等. 多组学技术在园艺植物抗旱研究中的应用[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(5): 875-887.
- Zhu S F, Wu J Y, Liang X, et al. Multi-omics approaches for drought resistance research in horticultural plants [J]. Journal

- of Zhejiang A&F University, 2025, 42(5):875-887.
- [32] 洪晨,郭丽娜,张莘妍,等. 基于转录组学分析超声胁迫诱导鲜切紫甘蓝酚类物质合成机制[J]. 食品科学, 2025, 46(14): 37-48.
- Hong C, Guo L N, Zhang S Y, et al. Transcriptomics analysis of the mechanism underlying the synthesis of phenolic compounds in fresh-cut red cabbage under ultrasound stress [J]. Food Science, 2025, 46(14): 37-48.
- [33] Zhao Z, Chen G J, Li D Y, et al. Metabolites of esterified derivative 3, 5-dicaffeoylquinic acid dodecyl ester fermented by *Lactobacillus plantarum* in the gut mediate bile acid metabolism and alleviate obesity via FXR/SHP/LRH-1 pathway in high-fat diet induced obese mice [J]. Food Bioscience, 2025, 66:106289.
- [34] 朱晨. 非编码RNA与RNA甲基化介导的乌龙茶萎凋过程中类黄酮与萜类代谢调控机制研究[D]. 福州:福建农林大学, 2022.
- Zhu C. Metabolic regulatory mechanism of flavonoid and terpenoid mediated by non-coding RNA and RNA methylation in oolong tea during withering process [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022.
- [35] 梁宗锁,杨东风,杨宗岐,等. 不同土壤水分对丹参叶片总酚酸类成分积累及相关酶活性的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 573-578.
- Liang Z S, Yang D F, Yang Z Q, et al. Effect of different soil moistures on total phenolic acid composition accumulation and relevant enzymatic activity of *Salvia miltiorrhiza* Lamina [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences), 2013, 41(4): 573-578.
- [36] Ma P D, Pei T L, Lv B B, et al. Functional pleiotropism, diversity, and redundancy of *Salvia miltiorrhiza* Bunge JAZ family proteins in jasmonate-induced tanshinone and phenolic acid biosynthesis [J]. Horticulture Research, 2022, 9: uhac166.
- [37] 赵凤佳,王桂霞,孙健,等. 草莓果实香气形成及调控机制研究进展[J]. 中国蔬菜, 2024(6): 24-30.
- Zhao F J, Wang G X, Sun J, et al. Research progress on aroma formation and regulation mechanism of strawberry fruit [J]. China Vegetables, 2024(6): 24-30.
- [38] Sugimoto K, Zager J J, Aubin B S, et al. Flavonoid deficiency disrupts redox homeostasis and terpenoid biosynthesis in glandular trichomes of tomato [J]. Plant Physiology, 2022, 188(3): 1450-1468.
- [39] Chen X L, Tian Q, Chen Z X, et al. Integrative phenomics, metabolomics, and flavoromics reveal key quality indicators during the formation of flavor and bioactive compounds in *Alpinia hainanensis* (Zingiberaceae) fruit [J]. Food Chemistry, 2025, 486:144602.

(责任编辑:屈李纯)