

本 科 生 成 绩 单

Undergraduate Transcript

姓名：张恺欣 性别：男
学院：风景园林艺术学院 专业：园林

学号：2023011952 入学时间：2023年09月01日
班级：园林2301 学制：四年



课程号		课程名		性质 学分 成绩 绩点 附注				课程号		课程名		性质 学分 成绩 绩点 附注				
2023-2024学年 秋								2205243ey140		园林树木学实习 现代城市生态与环境学		必修 1.0 90 4.0 任选 1.0 61 --				
1080110	汽车原理与技术	任选	1.0	81	--	已获学分: 6.5 GPA: 3.89										
1085003	工程训练 (丙)	必修	1.0	89	3.7	2025-2026学年 秋										
1091005	大学信息技术 (甲)	必修	2.5	77	2.7	3053229		园林植物保护学		必修		2.0	72	2.3		
1122101	植物学	必修	3.0	81	3.0	3181007		毛泽东思想和中国特色社会主义理论体系概论		必修		2.5	92	4.0		
1122102	植物学实验	必修	1.0	85	3.7	3203121		草坪学		选修		1.5	94	4.0		
1151206	高等数学乙I	必修	5.5	69	2.0	3204139		园林建筑设计		选修		3.0	87	3.7		
1180012	思想道德与法治	必修	2.5	75	2.7	3204201		计算机图像处理		选修		3.0	91	4.0		
1191017	大学英语A1	必修	3.0	81	3.0	3204202		园林绿地规划设计		选修		3.0	82	3.3		
1200201	园林植物与人类	任选	1.0	95	--	3204203		园林生态学		必修		2.0	89	3.7		
1203201	素描	必修	3.0	83	3.3	3204205		园林植物栽培与养护		选修		2.5	66	1.7		
1241001	体育 I	必修	1.0	93	4.0	3204235		鲜切花生产技术		选修		2.0	83	3.3		
1301002	军事理论	必修	2.0	89	3.7	3205201		园林植物栽培养护实习		必修		1.0	98	4.0		
1305103	军事技能训练	必修	2.0	93	4.0	已获学分: 22.5 GPA: 3.37										
1306001	大学生心理健康与发展	必修	1.0	82	3.3	2025-2026学年 春										
ZH080	世界经济地理之一带一路	选修	1.0	84	--	3055444		园林植物保护实习		必修		1.0	90	4.0		
已获学分: 30.5 GPA: 3.0								3181008		习近平新时代中国特色社会主义思想概论		必修		3.0	89	3.7
2023-2024学年 春								3204129		园林工程		选修		3.0	84	3.3
1091007	大学程序设计 (Python)	必修	2.5	77	2.7	3204133		屋顶花园与垂直绿化		选修		1.5	97	4.0		
1151008	概率论与数理统计 I	必修	4.0	65	1.7	3204204		园林植物遗传育种学		选修		3.0	90	4.0		
1181003	中国近现代史纲要	必修	2.5	73	2.3	3204206		干花制作艺术		选修		1.5	85	3.7		
1191018	大学英语A2	必修	3.0	75	2.7	3204212		园林植物景观设计		选修		3.0	90	4.0		
1203202	色彩基础	必修	2.5	83	3.3	3204236		盆景艺术		选修		1.5	90	4.0		
1241002	体育II	必修	1.0	88	3.7	3204237		插花艺术		选修		1.5	98	4.0		
1271262	有机化学A	必修	4.0	65	1.7	3205202		园林南方实习		必修		2.0	94	4.0		
1305202-1	劳动教育理论	任选	1.0	86	3.7	ZH037		食品标准与法规		选修		1.0	82	--		
1306005	生涯规划与职业发展	必修	1.0	86	3.7	已获学分: 22.0 GPA: 3.84										
ZH066	城市与文化遗产	选修	1.0	79	--	-----										
已获学分: 22.5 GPA: 2.49								以下空白								
2023-2024学年 夏																
1125106	生物学实习	必修	1.0	A-	3.7											
1205255	园林认知实践	必修	2.0	92	4.0											
1205340	园林美术实习	必修	1.0	92	4.0											
ey194	光影中国	任选	1.0	93	--											
已获学分: 5.0 GPA: 3.93																
2024-2025学年 秋																
1072281	测量学	必修	2.0	72	2.3											
1080111	能源利用与人类文明	任选	1.0	74	--											
2063706	土壤与植物营养	必修	2.5	70	2.0											
2122201	基础生物化学	必修	3.0	77	2.7											
2122202	基础生物化学实验	必修	1.0	85	3.7											
2181003	马克思主义基本原理	必修	2.5	69	2.0											
2191029	国才英语	选修	1.5	74	2.3											
2203009	园林史	必修	2.0	92	4.0											
2203304	设计初步	必修	3.0	87	3.7											
2241001	体育III	必修	1.0	85	3.7											
2271263	有机化学实验	必修	1.5	80	3.0											
已获学分: 21.0 GPA: 2.86																
2024-2025学年 春																
2122103	植物生理学	必修	3.0	75	2.7											
2122104	植物生理学实验	必修	1.0	90	4.0											
2191052	求职英语	任选	1.5	66	1.7											
2203120	园林艺术	必修	2.5	77	2.7											
2203207	园林树木学	选修	3.0	82	3.3											
2204201	花卉学	选修	3.0	79	3.0											
2204202	园林苗圃学	选修	2.5	71	2.3											
2205241	花卉学实习	必修	1.0	86	3.7											
2205242	园林苗圃学实习	必修	1.0	89	3.7											
2241002	体育IV	必修	1.0	80	3.0											
ZH202	铸牢中华民族共同体意识-马克思主义民族理论与政策	选修	1.0	80	--											
已获学分: 20.5 GPA: 2.89																
2024-2025学年 夏																
1185008	思想政治理论课实践	必修	2.0	85	3.7											
2203010	AUTOCAD	必修	2.5	92	4.0											
已获总学分		150.5		校内修读学分		150.5		校外认定学分		0.0						
方案要求学分		171.5		GPA		3.13										
备注																

编号: CSCD-C-20260908-01

检索报告

根据委托人张恺欣委托,通过网络检索,张恺欣发表的1篇论文被《中国科学引文数据库》(Chinese Science Citation Database,简称CSCD)数据库收录。数据库具体检索结果如下:

标题: 陕西羽叶报春四倍体诱导、鉴定与性状分析

Induction,Identification,and Trait Analysis of Tetraploid *Primula filchnerae*

作者: 张恺欣;余心泽;高恺阳;程晨;韩雪莹;史倩倩

来源: 植物研究,2026,46(3):399-410【核心库】

地址: 西北农林科技大学风景园林艺术学院, 杨凌, 712100

学科: 园艺

基金: 国家自然科学基金面上项目 ; 大学生创新创业训练计划项目

文献类型: 研究性论文

语种: 中文

文献收藏号: CSCD:8275409

DOI: 10.7525/j.issn.1673-5102.2026.03.002

查证检索:

西北农林科技大学图书馆

2026年9月8日

荣誉证书

张恺欣、余心泽、高恺阳

你（们）的作品《溪山幽洞》在
2026 年第三届陕西省大学生花艺大赛
中荣获盆景艺术类

二 等 奖

特发此证，以资鼓励。

指导老师：史倩倩

陕西省风景园林学会

2026 年 5 月 10 日



荣誉证书

张恺欣、高恺阳、余心泽

你（们）的作品《炽野·晴光》
在 2026 年第三届陕西省大学生花艺大
赛中荣获插花艺术类

优秀奖

特发此证，以资鼓励。

指导老师：史倩倩

陕西省风景园林学会

2026 年 5 月 10 日

6100000930999



西北农林科技大学
NORTHWEST A&F UNIVERSITY

获奖证书

张恺欣、杨淇嘉、胡书豪、曹永祺 同学：

你们的作品《不同牡丹品种和芍药品种花茶品质评估》在西北农林科技大学第三届“教稼杯”大学生创新创业竞赛（创新赛道）中荣获二等奖。

特发此证，以资鼓励。

指导老师：史倩倩





西北农林科技大学
NORTHWEST A&F UNIVERSITY



大学生创新训练计划项目

结题证书

张恺欣同学主持，曹永祺、胡书豪、杨淇嘉、石昕露同学参与的国家级项目“根际微生物对紫斑牡丹种子萌发的影响”（No. 202510712267）顺利结题，评审结果为良好，指导教师为史倩倩，特此证明。

西北农林科技大学
创新创业教育工作领导小组办公室

（代章）

2026年5月28日

教务处

陕西羽叶报春四倍体诱导、鉴定与性状分析

张恺欣 余心泽 高恺阳 程 晨 韩雪莹 史倩倩*

(西北农林科技大学风景园林艺术学院, 杨凌 712100)

摘 要 为探索陕西羽叶报春(*Primula filchnerae*)多倍体诱导技术,本研究分别采用种子浸泡法和生长点棉球滴加法进行秋水仙素处理,比较不同浓度与处理时间对发芽率、死亡率及四倍体诱导率的影响,并通过流式细胞术与根尖染色体计数进行倍性检测与验证。结果表明:秋水仙素处理总体抑制种子萌发并提高幼苗死亡率,但在适宜浓度下可显著提高四倍体诱导率。种子处理组中,0.02 g·L⁻¹、24 h处理组的种子发芽率最高,为(77.67±3.51)%;0.05 g·L⁻¹、24 h处理组的幼苗死亡率最低,为(2.16±0.93)%,且四倍体诱导率最高,为(30.12±4.02)%。生长点处理组中,0.05 g·L⁻¹处理效果最佳,四倍体诱导率为(40.00±10.00)%。流式细胞术检测结果表明,四倍体材料的G₀/G₁主峰较二倍体明显偏移;染色体计数进一步验证,二倍体染色体数为2n=2x=24,四倍体染色体数为2n=4x=48。形态学和细胞学比较分析表明,四倍体植株的叶片及花朵相关指标显著优于二倍体,生长势更强,观赏价值更高。此外,四倍体植株的气孔尺寸增大、气孔密度降低,符合多倍体植株的典型细胞学特征。综上所述,本研究建立了高效的陕西羽叶报春秋水仙素诱导与倍性鉴定技术体系,为该物种多倍体育种及种质创新提供了技术支撑。

关键词 陕西羽叶报春;秋水仙素;四倍体;流式细胞术;染色体计数;形态学性状

中图分类号:S682 **文献标志码**:A **doi**:10.7525/j.issn.1673-5102.2026.03.002

Induction, Identification, and Trait Analysis of Tetraploid *Primula filchnerae*

ZHANG Kaixin YU Xinze GAO Kaiyang CHENG Chen HAN Xueying SHI Qianqian*

(College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A&F University, Yangling 712100)

Abstract To establish an efficient polyploid induction protocol for *Primula filchnerae*, seeds and shoot apices were treated with colchicine using the seed immersion method and the cotton ball dropping method. The effects of different colchicine concentrations and treatment durations on germination rate, mortality rate and tetraploid induction rate were compared. Flow cytometry and root-tip chromosome counting were used for ploidy detection and verification. The results showed that colchicine treatment generally suppressed seed germination and increased seedling mortality rate, but it significantly increased the tetraploid induction rate at the optimal concentration. For seed treatment, the highest germination rate (77.67±3.51)% occurred under 0.02 g·L⁻¹ colchicine treatment for 24 h, while the lowest mortality rate (2.16±0.93)% and the highest tetraploid induction rate (30.12±4.02)% occurred under 0.05 g·L⁻¹ colchicine treatment for 24 h. For the shoot apex treatment, 0.05 g·L⁻¹ colchicine treatment had the highest tetraploid induction rate of (40.00±10.00)%. Flow cytometry analysis revealed that the G₀/G₁ peak of tetraploid plants was significantly shifted from that of diploids, and chromosome counting confirmed that the diploid chromosome number was 2n=2x=24 and the tetraploid chromosome number was 2n=4x=48. Morphological and cytological comparative analysis indicated that the leaf and flower-related traits such as growth potential and ornamental value of tetraploid plants were significantly superior to that of diploid plants. In addition, tetraploids had an increased stomatal size and a decreased stomatal density compared to diploids, which is consistent with typical cytological features of polyploids. In summary,

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32371953);大学生创新创业训练计划项目(XN2025024023)。

第一作者简介:张恺欣(2004—),男,本科,主要从事栽培技术研究。

* 通信作者:E-mail:shiqianqian2005@163.com。

收稿日期:2026年1月23日。

this study established an efficient colchicine-induced polyploidization and ploidy identification protocol for *P. filchnerae*, and provides technical support for polyploid breeding and germplasm innovation in the species.

Key words *Primula filchnerae*; colchicine; tetraploid; flow cytometry; chromosome counting; morphological traits

多倍体育种是当前园艺植物改良与种质创新的关键技术之一。全基因组加倍可在细胞、组织及器官水平引发一系列连锁反应,从而影响植物生长发育,改变其功能性状及环境适应性,为优良新材料的培育与利用提供重要支撑^[1]。在园艺植物中,人工诱导多倍体常用于拓宽遗传变异基础并改良观赏性状(如花器官增大、叶色加深等)。此外,多倍体材料在抗逆性、次生代谢等功能性状方面往往表现出与二倍体不同的特征^[1-2]。然而,多倍体效应具有显著的物种特异性,且受诱导参数、外植体类型及鉴定流程等因素影响,多倍体诱导率与材料稳定性常存在较大差异。因此,建立针对目标物种的可重复诱导与鉴定体系,是多倍体育种投入实际应用的基础与前提^[2]。

秋水仙素作为经典的有丝分裂抑制剂,是园艺植物人工诱导多倍体最常用的化学诱导剂之一。其通过抑制微管聚合、阻断纺锤体形成,使复制后的染色体无法正常分离,从而实现染色体加倍^[3]。已有研究^[4-6]表明,在观赏植物及经济作物中,利用秋水仙素处理愈伤组织、分生组织或处理种子、幼苗等,可成功获得稳定的四倍体材料,并观察到典型的形态学与细胞学变化。例如,Ha等^[7]在大麻(*Cannabis sativa*)多倍体诱导试验中发现,0.5 mmol·L⁻¹秋水仙素处理24 h为最佳条件;Mo等^[8]研究表明,云锦杜鹃(*Rhododendron fortunei*)经0.1%秋水仙素浸泡24 h可获得最优诱导效果;Luo等^[9]指出,橡胶草(*Taraxacum koksaghyz*)在0.1%秋水仙素处理48 h时,多倍体诱导效率可达56.6%。上述研究表明,只有在适宜的外植体生理状态下,系统优化药剂浓度与处理时间,才能获得稳定的多倍体诱导与筛选效果^[10-11]。

陕西羽叶报春(*Primula filchnerae*)为中国特有的报春花科(Primulaceae)报春花属(*Primula*)多年生草本植物。其全株密被多细胞柔毛;花冠初开时呈紫色,后渐变为粉红色,裂片基部具橘黄至紫红色彩斑;果期花萼增大呈灯笼状,观赏价值突出^[12-13]。然而,该物种野外种群数量稀少,被《中国物种红色名录》和《世界自然保护联盟红色名录》列为濒危物种,亟需通过种质创新与繁殖技术促

进资源保护与开发利用^[14-17]。报春花属植物的多倍体诱导主要采用化学方法^[18-21]。已有研究表明,不同报春花材料对秋水仙素的最适浓度与处理时间存在显著差异:田埂报春(*P. forbesii*)在0.08%秋水仙素处理48 h时诱导率最高(56%)^[18];而滇北球花报春(*P. denticulata* subsp. *sinodenticulata*)需0.60%秋水仙素处理72 h,诱导率方达54%^[19]。总体而言,报春花多倍体诱导技术仍存在诱导效率不稳定、不同起始材料适配性不足及鉴定流程欠规范等问题,难以满足种质创新与产业应用需求^[22]。目前,针对陕西羽叶报春,尚缺乏以不同起始材料(如种子与生长点)进行诱导参数优化及可重复鉴定体系的系统研究,亦缺少对诱变四倍体表型特征的量化表征分析。

基于上述研究现状,本研究旨在比较秋水仙素处理对陕西羽叶报春种子与生长点两类起始材料的诱导效应,筛选关键诱导参数并建立稳定的倍性鉴定流程。此外,通过测定并比较诱变四倍体与二倍体对照的形态指标及气孔特征,明确多倍体化引发的表型变异。研究结果将为陕西羽叶报春四倍体种质创制及园艺开发应用提供可重复的技术路线与材料基础。

1 材料与方法

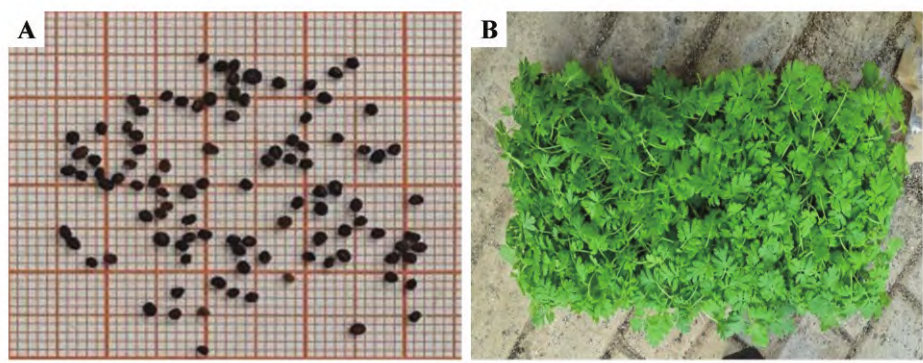
1.1 供试材料

本研究设置种子处理组与生长点处理组多倍体诱导试验。种子处理组供试材料为2024年4月于果实成熟期采收的陕西羽叶报春种子(图1A)。种子近球形、略扁,直径0.6~2.2 mm,褐色至深褐色,表面粗糙,千粒质量约为0.118 g。生长点处理组供试材料为购自北京花木有限公司的陕西羽叶报春幼苗(图1B),单株具4~6片叶。

1.2 陕西羽叶报春多倍体诱导

1.2.1 种子处理组诱导试验

选取饱满种子,于清水中浸泡24 h。吸干表面水分后,进行秋水仙素浸泡。试验采用二因素全因子设计(表1),设置3组秋水仙素质量浓度(0.02、0.05、0.10 g·L⁻¹)与3组浸泡时间(12、24、48 h)。以清水浸泡为对照(CK),每组处理300粒种子。



A. 浸泡处理所用种子;B. 生长点处理所用植株。
A. Seeds for soaking treatment; B. Seedlings for apical meristem treatment.

图1 多倍体诱导试验所用材料
Fig.1 Materials used in polyploidy induction experiment

将V(沙壤土):V(珍珠岩):V(腐殖土)=1:1:1混匀,填入72孔穴盘中,压实、整平。浸泡后的种子用蒸馏水冲洗3~5次,播种于穴盘中,覆盖塑料薄膜。待子叶展开后揭除薄膜,统计植株发芽率。培养30 d后统计植株死亡率。发芽后120 d内,每周记录地上部分生长情况。

表1 种子处理组处理 Table 1 Treatments of the seed induction group		
秋水仙素质量浓度 Colchicine mass concentration/(g·L ⁻¹)	浸泡时间 Soaking time/h	种子数量 Number of seeds
CK	12	300
	24	300
	48	300
0.02	12	300
	24	300
	48	300
0.05	12	300
	24	300
	48	300
0.10	12	300
	24	300
	48	300

1.2.2 生长点处理组诱导试验

将少量医用脱脂棉置于幼苗茎尖生长点处,分别滴加清水(CK)、秋水仙素溶液(0.02、0.05、0.10 g·L⁻¹),使棉球充分湿润。处理期间每12 h各滴加1次,连续处理48 h。试验共设置4个处理组(表2),每处理组30株幼苗。处理后120 d内,每周记录地上部分生长情况。

表2 生长点处理组处理 Table 2 Treatments of the apical meristem induction group		
秋水仙素质量浓度 Colchicine mass concentration/(g·L ⁻¹)	处理时间 Treatment time/h	幼苗数量 Number of seedlings
CK	48	30
0.02	48	30
0.05	48	30
0.10	48	30

1.3 多倍体鉴定

以二倍体植株为对照,采用流式细胞术检测秋水仙素处理后所有存活植株的倍性,依据G₀/G₁主峰位置判定DNA含量^[23]。从各处理组存活的植株采集幼嫩叶片,去除中脉后剪取40~50 mg组织,蒸馏水洗净并吸干表面水分后,置于塑料培养皿中备用。向样品中加入1 mL新鲜配制的细胞核提取液,于冰上使用双面刀片迅速切碎组织。使用1 mL移液器吸取样品,经孔径48 μm的尼龙筛网过滤至2 mL离心管中。加入28 μL PI染液,避光孵育30 min,上机检测。通过分析DNA含量峰值位移,筛选出DNA含量加倍植株,进一步进行染色体计数鉴定。

对经流式细胞术筛选的疑似多倍体植株进一步采用染色体计数法进行倍性验证。首先,于晴日上午09:00—10:00剪取长约2 mm根尖,置于0.10 g·L⁻¹秋水仙素溶液中,4℃避光处理2.5 h,以抑制纺锤体形成,促进染色体凝缩。处理结束后,

蒸馏水冲洗根尖 3~5 次,去除残留药液。随后,使用新配制的卡诺氏固定液($V(\text{无水乙醇}):V(\text{冰醋酸})=3:1$)于 4℃固定 24 h。固定后,用蒸馏水冲洗 3 次,转入 $0.075\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 低渗液中处理 8 min,使染色体分散。低渗处理后,将根尖置于 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸中,60℃水浴解离 10 min。解离结束后,用蒸馏水冲洗 4~5 次,每次更换清水,持续 10 min,以去除残留解离液。将根尖置于载玻片上,用手术刀和解剖针轻轻分散组织,使细胞均匀散开。滴加卡宝品红染液,染色 10 min,压片^[24-25]。显微镜下观察染色体数目,与二倍体对比较,确定倍性水平,统计各组变异植株数量及四倍体诱导率。

1.4 形态学观察

以相同栽培条件下的二倍体植株为对照,对四倍体植株进行形态学观测。测定指标包括株高、叶片数量、叶面积、花葶高、花葶数量、花朵直径及地径等,系统比较二倍体与四倍体植株的形态差异^[26]。

1.5 气孔性状观测

选取充分展开的成熟叶片,用镊子撕取下表皮,平铺于洁净载玻片上,滴加蒸馏水,覆盖盖玻片,制备临时装片。于显微镜下随机选取 3 个视野,测量保卫细胞长度与宽度,统计气孔数目,计算气孔密度。

1.6 数据处理

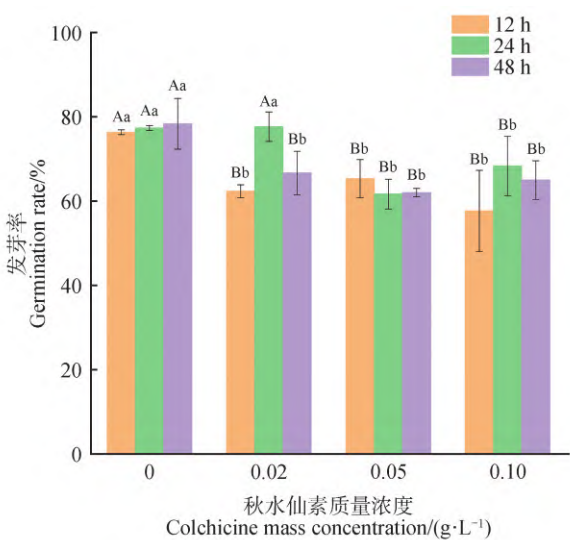
试验数据以均值±标准差(mean±SD)表示,所有处理设置 3 次重复($n=3$)。使用 Microsoft Excel 2019 整理数据,使用 IBM SPSS Statistics 27.0 进行统计分析,使用 Origin 2024 作图。使用 Adobe Photoshop 2020 与 ImageJ 1.54 处理图片,使用 BD Accuri C6 Plus 配套分析软件处理流式细胞仪数据。

2 结果与分析

2.1 秋水仙素处理对种子发芽率和幼苗死亡率的影响

2.1.1 发芽率

统计分析结果如图 2 所示,对照组发芽率显著高于其他处理组,说明秋水仙素处理对陕西羽叶报春种子萌发具有抑制作用。同时,综合浸泡时间和浸泡质量浓度分析表明,在 $0.02\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 秋水仙素浸泡 24 h 时种子发芽率最高,为 $(77.67\pm 3.51)\%$,显著高于其他处理组($P<0.05$);其他处理组之间未发现显著性差异($P>0.05$)。



不同小写字母表示在相同质量浓度不同浸泡时间之间在 $P<0.05$ 水平上差异显著,不同大写字母表示在相同浸泡时间不同质量浓度处理之间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Different lowercase letters indicated significant differences at the $P<0.05$ level when comparing different soaking time treatments at the same mass concentration. Different uppercase letters indicated significant differences at the $P<0.05$ level when comparing different colchicine mass concentrations at the same soaking time.

图2 秋水仙素处理对陕西羽叶报春种子发芽率的影响
Fig.2 Effect of colchicine treatment on the germination rate of *Primula filchnerae* seeds

对秋水仙素质量浓度与浸泡时间进行双因素方差分析,结果如表 3 所示。秋水仙素质量浓度与浸泡时间对种子发芽率的影响均达到显著水平($P<0.001$);二者交互作用也达显著水平($P<0.001$),表明 2 个因素共同调控种子发芽率。相较于浸泡时间,秋水仙素质量浓度对种子发芽率的影响更为显著。这表明:在秋水仙素诱导中,秋水仙素质量浓度对种子发芽的影响大于浸泡时间。

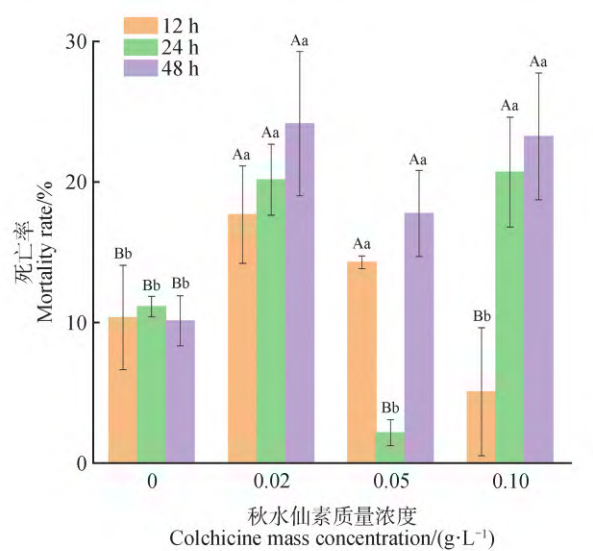
表 3 秋水仙素质量浓度及浸泡时间对陕西羽叶报春种子萌发率的双因素分析

Table 3 Two-factor analysis of colchicine mass concentration and soaking time on seed germination rate of *Primula filchnerae*

变异来源 Source of variation	自由度 d_f	发芽率 Germination rate	
		F	P
浸泡时间 Soaking time	2	127.370	<0.001
秋水仙素质量浓度 Colchicine mass concentration	3	204.765	<0.001
浸泡时间×秋水仙素质量浓度 Soaking time×Colchicine mass concentration	6	80.870	<0.001

2.1.2 死亡率

由图3可知,对照组及0.10、0.02 g·L⁻¹秋水仙素处理组幼苗死亡率均随浸泡时间延长而升高。0.05 g·L⁻¹秋水仙素48 h处理组幼苗死亡率较12 h处理组也有所升高。这表明:延长秋水仙素浸泡时间导致幼苗死亡率升高。相同浸泡时间下,各秋水仙素处理组幼苗死亡率都显著高于对照组($P<0.05$),进一步证实秋水仙素处理对陕西羽叶报春幼苗的毒害效应。当浸泡时间为24 h,0.05 g·L⁻¹秋水仙素处理组幼苗死亡率((2.16±0.93)%)显著低于其他处理组($P<0.05$)。



不同小写字母表示在相同质量浓度不同浸泡时间处理之间在 $P<0.05$ 水平上差异显著;不同大写字母表示在相同浸泡时间不同质量浓度处理之间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Different lowercase letters indicated significant differences at the $P<0.05$ level when comparing different soaking time treatments at the same mass concentration. Different uppercase letters indicated significant differences at the $P<0.05$ level when comparing different mass concentrations at the same soaking time.

图3 秋水仙素处理对陕西羽叶报春幼苗死亡率的影响
Fig.3 Effect of colchicine treatment on the mortality rate of *Primula filchnerae* seedlings

对秋水仙素质量浓度与浸泡时间进行双因素方差分析,结果如表4所示。秋水仙素质量浓度与浸泡时间对幼苗死亡率的影响均达到显著水平($P<0.001$),且二者交互作用也达显著水平($P<0.001$),表明2个因素共同调控幼苗死亡率。表4中 F 表明,二者对幼苗死亡率的影响程度相近。

表4 秋水仙素质量浓度及浸泡时间对陕西羽叶报春幼苗死亡率的双因素分析

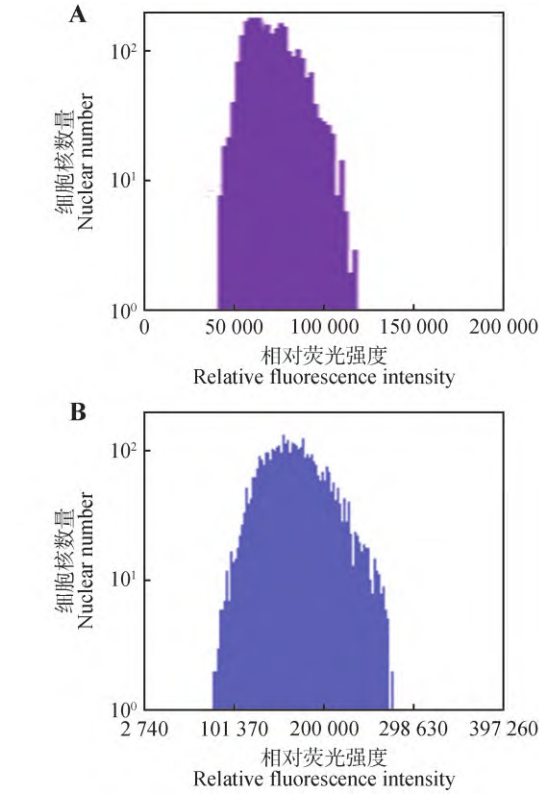
Table 4 Two-factor analysis of the effects of different colchicine mass concentrations and soaking time treatments on seedling mortality rate in *Primula filchnerae*

变异来源 Source of variation	自由度 d_f	死亡率 Mortality rate	
		F	P
浸泡时间 Soaking time	2	18.856	<0.001
秋水仙素质量浓度 Colchicine mass concentration	3	20.100	<0.001
浸泡时间×秋水仙素质量浓度 Soaking time×Colchicine mass concentration	6	13.303	<0.001

2.2 四倍体鉴定结果

2.2.1 流式细胞术倍性鉴定结果

采用流式细胞术对秋水仙素处理后存活植株进行倍性鉴定。相对荧光强度直方图(图4)显示,疑似四倍体样品(图4B)相对荧光强度的主峰位置约为二倍体对照(图4A)的2.0倍,表明其核DNA相对含量加倍,符合四倍体特征。



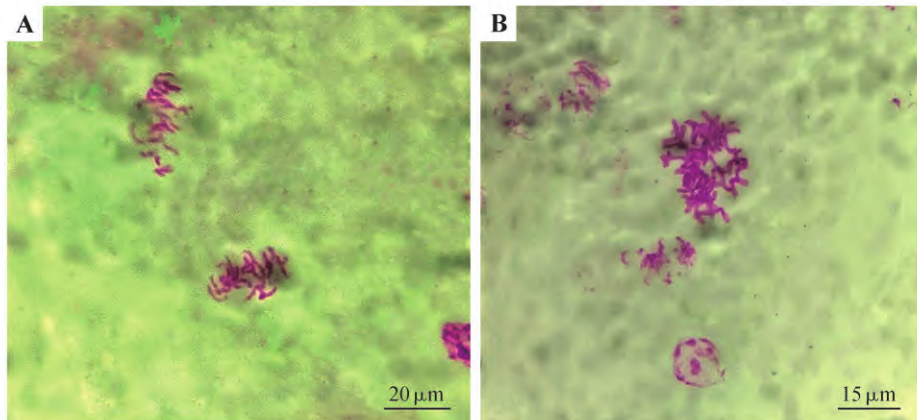
A. 二倍体; B. 疑似四倍体。
A. Diploid; B. Suspected tetraploid.

图4 二倍体和疑似四倍体的流式细胞术分析直方图
Fig.4 Flow cytometry analysis histograms of diploid and suspected tetraploid

2.2.2 染色体数量鉴定结果

为进一步确证流式细胞术筛选的疑似四倍体植株,采用根尖压片法进行染色体计数。观察结果如图5所示,二倍体植株根尖细胞染色体数

为24条($2n=2x=24$,图5A),而疑似四倍体植株染色体数为48条($2n=4x=48$,图5B),证实其为四倍体。



A. 二倍体; B. 四倍体。

A. Diploid; B. Tetraploid.

图5 根尖染色体

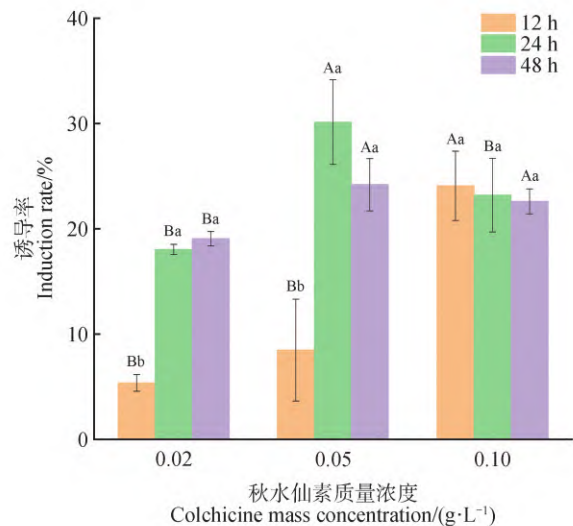
Fig.5 Root tip chromosomes

2.3 四倍体诱导率

2.3.1 种子处理组

由图6可知,不同秋水仙素质量浓度下,四倍体诱导率随浸泡时间的变化趋势存在差异。0.02 g·L⁻¹秋水仙素处理下,四倍体诱导率随浸泡时间延长总体呈上升趋势;0.10 g·L⁻¹秋水仙素处理下呈下降趋势;0.05 g·L⁻¹秋水仙素处理下呈先上升后下降趋势,其中24 h处理组四倍体诱导率达(30.12±4.02)%,显著高于其他组($P<0.05$)。相同浸泡时间下,四倍体诱导率同样存在差异。浸泡12 h时,诱导率随秋水仙素质量浓度升高呈上升趋势;浸泡24 h与48 h时,呈先上升后下降趋势,在0.05 g·L⁻¹秋水仙素处理下达到峰值。综合浸泡时间和秋水仙素质量浓度分析表明,本试验范围内0.05 g·L⁻¹秋水仙素处理24 h诱导效果最佳。

对秋水仙素浸泡时间与质量浓度进行双因素方差分析,结果如表5所示。秋水仙素质量浓度与浸泡时间对诱导率的影响均达到显著水平($P<0.001$),且交互作用显著($P<0.001$)。表5中 F 显示,相较于质量浓度,浸泡时间对诱导率的影响更为显著,表明控制浸泡时间对多倍体诱导效果的影响大于质量浓度的影响。



不同小写字母表示在相同质量浓度不同浸泡时间处理之间在 $P<0.05$ 水平上差异显著,不同大写字母表示在相同浸泡时间不同质量浓度处理之间在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

Different lowercase letters indicated significant differences at the $P<0.05$ level when comparing different soaking time treatments at the same colchicine mass concentration. Different uppercase letters indicated significant differences at the $P<0.05$ level when comparing different colchicine mass concentrations at the same soaking time.

图6 秋水仙素处理对陕西羽叶报春四倍体诱导率的影响
Fig.6 Effect of colchicine treatment on the tetraploid induction rate of *Primula filchnerae*

表5 秋水仙素质量浓度及浸泡时间对陕西羽叶报春诱导率的双因素分析

Table 5 Two-factor analysis of the effects of different colchicine mass concentrations and soaking time treatments on the induction rate of *Primula filchnerae*

变异来源 Source of variation	自由度 d_f	诱导率 Induction rate	
		F	P
浸泡时间 Soaking time	2	63.194	<0.001
秋水仙素质量浓度 Colchicine mass concentration	3	43.045	<0.001
浸泡时间×秋水仙素质量浓度 Soaking time×Colchicine mass concentration	6	15.166	<0.001

2.3.2 生长点处理组

如表6所示,0.05 g·L⁻¹秋水仙素处理的四倍体诱导率较高,可达到(40.00±10.00)%,显著高于0.10 g·L⁻¹秋水仙素处理($P<0.05$);与0.02 g·L⁻¹秋水仙素处理相比差异未达到显著水平($P>0.05$),但诱导率数值仍略高。如表7所示,不同质量浓度

秋水仙素处理对植株死亡率的影响未达到显著水平($P>0.05$),表明在本试验条件下,生长点滴加处理对幼苗存活影响较小。相比之下,秋水仙素处理质量浓度对四倍体诱导率的影响达到显著水平($P<0.05$),说明秋水仙素可有效诱导生长点材料发生倍性变异。

表6 秋水仙素处理下幼苗死亡率和四倍体诱导率
Table 6 Mortality and tetraploid induction rate under colchicine treatments

秋水仙素质量浓度 Colchicine mass concentration/(g·L ⁻¹)	死亡率 Mortality rate/%	诱导率 Induction rate/%
CK	0 ^a	0 ^c
0.02	6.67±5.77 ^a	33.33±5.77 ^{ab}
0.05	3.33±5.77 ^a	40.00±10.00 ^a
0.10	0 ^a	26.67±5.77 ^b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between treatments($P<0.05$).

表7 秋水仙素处理下幼苗死亡率和四倍体诱导率的单因素分析
Table 7 Single-factor analysis of mortality and induction rate under colchicine treatment

变异来源 Source of variation	死亡率 Mortality rate			诱导率 Induction rate		
	d_f	F	P	d_f	F	P
秋水仙素质量浓度 Colchicine mass concentration	3	1.833	0.219	3	22.133	<0.001

2.4 陕西羽叶报春二倍体与四倍体形态及细胞学差异

2.4.1 形态变化

种子处理组和生长点处理组经120 d培养后,

所有存活植株经过流式细胞术判定倍性,观察发现四倍体与二倍体的形态存在差异(图7)。对植株叶面积、叶片数量、花葶高、花葶数量、花朵数量、花朵直径及地径进行测定,结果如表8所示。

表8 陕西羽叶报春二倍体与四倍体的形态指标差异
Table 8 Morphological index differences between diploids and tetraploids of *Primula filchnerae*

处理方案 Treatment scheme	植株类型 Type	叶面积 Leaf area/cm ²	叶片数量 Number of leaves	花葶高 Flower stalk height/cm	花葶数量 Number of flower stalks	花朵直径 Diameter of the flower/cm	花朵数量 Number of flowers	地径 Ground diameter/mm
种子处理 Seed treatment	二倍体	1.03±0.22	2.53±0.52	3.21±0.52	1.33±0.62	1.14±0.13	1.94±0.57	1.13±0.10
	四倍体	2.05±0.08**	5.07±0.70**	11.14±1.18**	2.60±0.63**	1.73±0.14**	4.25±0.93**	1.12±0.07
生长点处理 Apical meristem treatment	二倍体	2.08±0.47	13.17±2.42	23.00±4.03	4.60±0.95	2.17±0.11	27.33±2.14	2.50±0.37
	四倍体	3.62±0.71**	16.76±3.10**	29.90±3.49**	5.17±1.29**	2.53±0.30**	27.78±2.26	3.16±0.49**

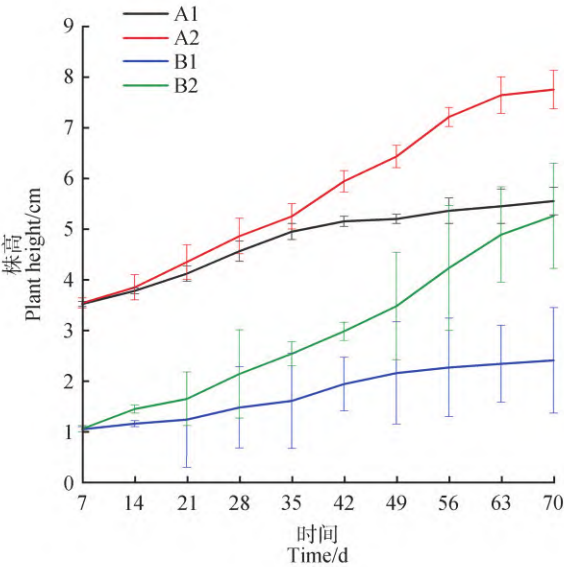
注:**表示相同处理方案不同植株类型间形态指标差异显著($P<0.001$)。
Note: ** indicated a significant difference in morphological index between diploids and tetraploids of *Primula filchnerae* in the same treatment scheme at $P<0.001$.



A1. 四倍体种子处理组; A2. 二倍体种子处理组; B1. 四倍体生长点处理组; B2. 二倍体生长点处理组。
A1. Tetraploid seed treatment group ; A2. Diploid seed treatment group; B1. Tetraploid apical meristem treatment group; B2. Diploid apical meristem treatment group.

图7 陕西羽叶报春二倍体与四倍体植株对比
Fig.7 Plant comparison diagram of diploids and tetraploids of *Primula filchnerae*

种子处理组,四倍体植株除地径外,其余指标均显著高于二倍体($P<0.001$)。开花前,株高动态变化如图8所示,四倍体植株生长速率较快,处理70 d时株高高于二倍体,表明其生长势更强。



A. 生长点处理组; B. 种子处理组; A1、B1. 二倍体植株; A2、B2. 四倍体植株。
A. Apical meristem treatment group; B. Seed treatment group; A1, B1. Diploids; A2, B2. Tetraploids.

图8 秋水仙素处理下陕西羽叶报春株高变化比较
Fig.8 Comparison of plant height changes in *Primula filchnerae* under colchicine treatment

2.4.2 细胞变化

对四倍体和二倍体植株进行气孔观察(图9),并统计分析气孔特征(表9)。结果表明,四倍体植株保卫细胞长、宽均显著高于二倍体植株($P<0.001$);气孔密度显著低于二倍体。

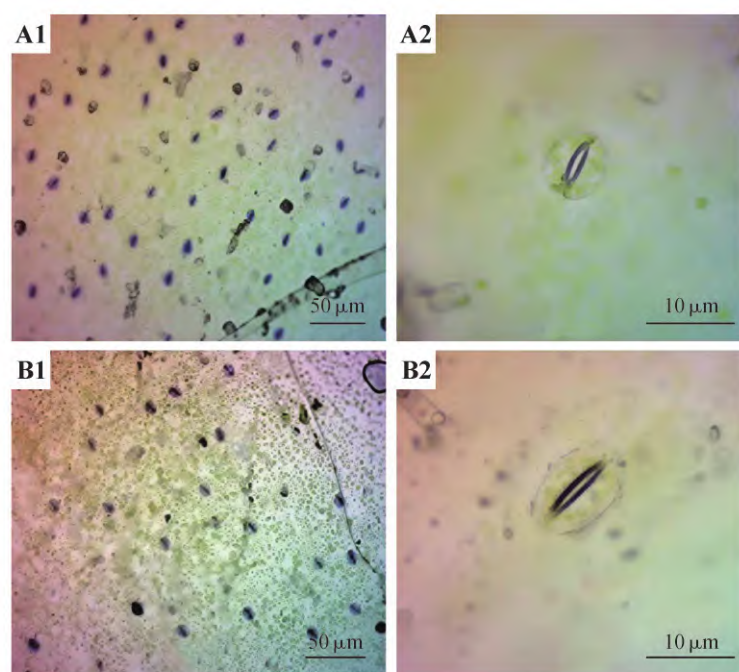
表9 陕西羽叶报春二倍体和四倍体植株气孔特征差异
Table 9 Differences in stomatal characteristics between diploid and tetraploid plants

植株类型 Plant type	气孔长度 Stomata length/ μm	气孔宽度 Stomata width/ μm	气孔密度 Stomata density/ (个 $\cdot\text{mm}^{-2}$)
二倍体植株 Diploid	7.5 ± 0.2^b	6.8 ± 0.2^b	58.9 ± 7.8^a
四倍体植株 Tetraploid	12.2 ± 0.5^a	7.6 ± 0.2^a	33.3 ± 5.0^b

注: 同列不同小写字母表示不同植株类型间差异显著($P<0.001$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences between diploid and tetraploid plants($P<0.001$).

3 讨论

本研究以种子和幼苗生长点为起始材料,系统优化了秋水仙素诱导陕西羽叶报春多倍体的参数条件。结果表明,不同材料类型的诱导效应存在显著差异。种子浸泡处理中,秋水仙素质量浓度、处理时间及其交互作用对种子发芽率、植株死



A1、A2. 二倍体植株气孔密度和单个气孔; B1、B2. 四倍体植株气孔密度和单个气孔。

A1, A2. Density and individual stomata of diploid plants; B1, B2. Density and individual stomata of tetraploid plants.

图9 陕西羽叶报春二倍体和四倍体植株气孔对比

Fig.9 Comparison of stomata of diploid and tetraploid plants of *Primula filchnerae*

亡率及四倍体诱导率均有显著影响($P < 0.05$),但幼苗生长点棉球滴加处理在试验质量浓度范围内对成苗存活的影响相对较小。这表明种子和分生组织对秋水仙素的敏感性及耐受阈值存在差异,需针对不同起始材料优化诱导方案^[27]。综合各项指标,本研究确定种子诱导最优条件为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 秋水仙素处理24 h,可在保持极低死亡率(约2%)的同时获得约30%的四倍体诱导率;幼苗生长点以 $0.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 秋水仙素处理48 h可获得更高的四倍体诱导率(约40%),且对植株生长影响较小。该结果与其他物种的研究结果一致,例如,欧芹(*Petroselinum crispum*)比较试验^[28]表明,茎尖分生组织诱导成功率显著高于种子处理;以紫毛兜兰(*Paphiopedilum villosum*)芽尖等分生组织为外植体,可在严格控制损伤程度、保证成活率的前提下,诱导获得四倍体植株^[29]。为确保不同处理条件下变异植株倍性判定的准确性,同时兼顾大规模样本筛选效率,本研究采用流式细胞术快速筛查全部存活植株,并结合根尖染色体计数确证倍性^[23,30]。基于双重鉴定策略,本研究进一步证实了流式细胞术与染色体计数在多倍体鉴定中的可靠性,并构建了完善的多倍体鉴定流程。该高效诱

导与鉴定体系为报春花属植物多倍体育种奠定了技术基础。

多倍体植株与二倍体植株相比通常表现出巨大化表型特征(Gigas效应)^[31]。本研究中,陕西羽叶报春四倍体表现出典型的巨大化变异。其营养生长指标如叶片数量、单叶面积及基部茎粗均较二倍体显著增加($P < 0.001$),生殖生长方面,单株花序数量、花朵数量及花径也显著高于二倍体($P < 0.001$)。这些形态性状的提升表明,染色体加倍有效增强了植株物质积累能力与结构发育潜力,使四倍体个体具有更优的生长势与观赏价值。类似的多倍体巨大化效应在其他园艺植物中已有广泛报道,例如四倍体兜兰较二倍体表现出叶片、气孔等组织细胞尺寸增大和器官膨大^[29]。这类巨大化现象往往与细胞体积增大、细胞周期调控改变和组织水平细胞增殖有关。已有研究^[32]表明,倍性变化通过影响细胞扩张与细胞增殖过程,改变细胞、组织与器官的结构比例关系,使多倍体植株表现出更强的细胞储存能力,但可能降低结构稳定性。从调控层面来看,倍性加倍可通过基因剂量效应引发转录组快速响应,并伴随表观遗传的重新编程(如DNA甲基化修饰变化),导致多倍体表

型差异^[33-34]。基于上述分子机制证据,可推测本研究获得四倍体材料的形态优势是多层级调控的综合结果。另一方面,多倍体常伴随代谢物谱变化。部分研究观察到四倍体次生代谢成分及抗氧化能力提升,例如,金银花(*Lonicera japonica*)四倍体叶片酚类物质含量及抗氧化酶活性均高于二倍体^[35]。由此推测,陕西羽叶报春四倍体材料可能具有更优的生理适应性,例如抗逆性提高或次生代谢产物富集,有待进一步功能性试验验证。

气孔特征变化是多倍体细胞学效应的重要表现之一。本研究发现,四倍体植株气孔保卫细胞长度和宽度显著大于二倍体,而单位面积气孔数量显著降低。许多其他植物的多倍体中均观察到气孔增大、密度降低的现象,如甘牛至(*Origanum majorana*)^[36]、桑树(*Morus* spp.)^[37]、纹瓣兰(*Cymbidium aloifolium*)^[38]。该现象常被用作鉴别二倍体与四倍体的早期判定依据^[39]。气孔特征与功能性状密切相关^[40]。较大的气孔孔径有利于在适宜光照和水分条件下提升叶片CO₂扩散与同化速率,而较低的气孔密度可减少蒸腾水分损失。这种双向调节有助于提高水分利用效率及抗旱能力,并对光合效率产生正向作用^[41-42]。因此,后续可测定陕西羽叶报春四倍体气体交换参数、叶片水势及脱落酸含量等指标,进一步验证气孔表型变化对光合作用及蒸腾现象的优化效应。

4 结论

本研究建立了陕西羽叶报春秋水仙素诱导的可重复技术体系,构建了全部存活植株流式细胞术快速筛查结合根尖染色体计数确证的倍性鉴定流程。比较两类起始材料结果表明,幼苗生长点处理四倍体诱导效率更高,可达到(40.00±10.00)%,且对植株损伤较小,技术可控性更强。种子浸泡处理在平衡幼苗成活率与四倍体诱导率的条件下,同样可获得稳定四倍体材料。倍性鉴定结果显示,陕西羽叶报春二倍体染色体数为2n=2x=24,诱导四倍体染色体数为2n=4x=48。四倍体在形态与细胞学指标上表现出显著且符合多倍体规律的差异,可作为早期鉴定与育种筛选的依据。综上,秋水仙素可有效诱导陕西羽叶报春四倍体,该诱导体系与所获材料为多倍体育种与种质创新提供了技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 李霖峰,刘宝.植物多倍化与多倍体基因组进化研究进展[J].中国科学:生命科学,2019,49(4):327-337.
- LI L F, LIU B. Recent advances of plant polyploidy and polyploid genome evolution [J]. Science in China: Series C, 2019, 49(4): 327-337.
- [2] 裴芸,虞夏清,赵晓坤,等.多倍化与植物新表型关联性的研究进展[J].园艺学报,2023,50(9):1854-1866.
- PEI Y, YU X Q, ZHAO X K, et al. Progress in the study of the association of polyploidy with new plant phenotypes [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2023, 50(9): 1854-1866.
- [3] SINGH B, YUN S, GIL Y, et al. The role of colchicine in plant breeding [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(14): 6743.
- [4] TOUCHELL D H, PALMER I E, RANNEY T G. In vitro ploidy manipulation for crop improvement [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 722.
- [5] BHATTARAI K, KAREEM A, DENG Z N. In vivo induction and characterization of polyploids in gerbera daisy [J]. Scientia Horticulturae, 2021, 282: 110054.
- [6] REN J, LU X, DUAN Y Y, et al. In vivo tetraploid induction of mono-embryonic citrus genotypes by colchicine treatment [J]. Scientia Horticulturae, 2024, 338: 113701.
- [7] HA T H, KIM D G, KIM J, et al. Induction of polyploidy and its effect on cannabinoid content in *Cannabis sativa* L. [J]. Industrial Crops and Products, 2026, 239: 122423.
- [8] MO L, CHEN J H, LOU X Z, et al. Colchicine-induced polyploidy in *Rhododendron fortunei* Lindl [J]. Plants, 2020, 9(4): 424.
- [9] LUO Z N, IAFFALDANO B J, CORNISH K. Colchicine-induced polyploidy has the potential to improve rubber yield in *Taraxacum kok-saghyz* [J]. Industrial Crops and Products, 2018, 112: 75-81.
- [10] 季必霞,陈达伟,张晨晨,等.大花蕙兰多倍体的高效诱导[J].植物研究,2011,31(5):558-562.
- JI B X, CHEN D W, ZHANG C C, et al. High efficient polyploid induction of *Cymbidium hybridum* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2011, 31(5): 558-562.
- [11] PRASATH D, NAIR R R, BABU P A. Effect of colchicine induced tetraploids of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) on cytology, rhizome morphology, and essential oil content [J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2022, 31: 100422.
- [12] 刘金,夏齐平,王建,等.自花授粉在安徽羽叶报春花选育中应用的初步研究[J].植物研究,2018,38(2): 232-237.
- LIU J, XIA Q P, WANG J, et al. A preliminary study on the application of self pollination in *Primula merrilliana*

- flower color selection[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(2): 232-237.
- [13] 吴宪, 廖建雄, 甘啟良, 等. 环境因子对陕西羽叶报春种子萌发及成苗的影响[J]. 植物科学学报, 2011, 29(2): 212-217.
- WU X, LIAO J X, GAN Q L, *et al.* Influence of environmental factors on seed germination and seedling formation of *Primula filchnerae* [J]. Plant Science Journal, 2011, 29(2): 212-217.
- [14] 中国科学院动物研究所. 中国生物多样性红色名录 [EB/OL]. (2023-05-19) [2025-12-20]. <http://protection.especies.cn/redlist/list>.
- Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences. Redlist of China's Biodiversity [EB/OL]. (2023-05-19) [2025-12-20]. <http://protection.especies.cn/redlist/list>.
- [15] IUCN 2025. The IUCN Red List of Threatened Species [EB/OL]. [2025-12-20]. <https://www.iucnredlist.org/en>.
- [16] 中华人民共和国生态环境部. 濒危特有植物: 陕西羽叶报春保护与可持续利用 [R/OL]. (2023-06-12) [2025-12-20]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/zrstbh/swdyxbh/202306/t20230612_1033462.shtml.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Endemic endangered plant: conservation and sustainable use of *Primula filchnerae* [R/OL]. (2023-06-12) [2025-12-20]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/zrstbh/swdyxbh/202306/t20230612_1033462.shtml.
- [17] JIANG X, LIU W J, ZHU Y Z, *et al.* Impacts of climate changes on geographic distribution of *Primula filchnerae*, an endangered herb in China [J]. Plants, 2023, 12(20): 3561.
- [18] 张晓曼, 孙晓光, 杨建民. 田埂报春多倍体诱导及其形态学研究 [J]. 植物遗传资源学报, 2010, 11(6): 789-792.
- ZHANG X M, SUN X G, YANG J M. Polyploid induction and morphology of *Primula forbesii* [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2010, 11(6): 789-792.
- [19] 张超, 李枝林, 李佳, 等. 滇北球花报春多倍体诱导及核型分析 [J]. 西北植物学报, 2011, 31(2): 236-241.
- ZHANG C, LI Z L, LI J, *et al.* Polyploid induction and karyomorphological studies of *Primula denticulata* ssp. *sinodenticulata* [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(2): 236-241.
- [20] 余道平, 李策宏. 迎阳报春四倍体诱导及鉴定 [J]. 核农学报, 2014, 28(6): 961-966.
- YU D P, LI C H. The tetraploid induction and identification of *Primula oreodoxa* Franch [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(6): 961-966.
- [21] NIAZIAN M, NALOUSHI A M. Artificial polyploidy induction for improvement of ornamental and medicinal plants [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2020, 142(3): 447-469.
- [22] 周慧文, 冯斗, 严华兵. 秋水仙素离体诱导多倍体研究进展 [J]. 核农学报, 2015, 29(7): 1307-1315.
- ZHOU H W, FENG D, YAN H B. The progress of polyploids induced *in vitro* via colchicine [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(7): 1307-1315.
- [23] DOLEŽEL J, GREILHUBER J, SUDA J. Estimation of nuclear DNA content in plants using flow cytometry [J]. Nature Protocols, 2007, 2(9): 2233-2244.
- [24] 林晓璇, 陈林静, 容晨毓, 等. 铺地黍染色体制片优化及核型分析 [J]. 草业科学, 2021, 38(1): 89-98.
- LIN X X, CHEN L J, RONG C Y, *et al.* Optimization of chromosome preparation and karyotype analysis of *Panicum repens* [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(1): 89-98.
- [25] MARAVILLA A J, ROSATO M, ROSSELLÓ J A. Preparation of mitotic chromosomes with the squash technique [M] // HEITKAM T, GARCIA S. Plant cytogenetics and cytogenomics: methods and protocols. New York: Springer, 2023: 141-149.
- [26] CHEN C H, CHEN P, WU Z X, *et al.* Colchicine-induced chromosome doubling in *Cinnamomum camphora* and its effect on morphological and terpenoid storage structures [J]. Industrial Crops and Products, 2025, 233: 121338.
- [27] ENG W H, HO W S. Polyploidization using colchicine in horticultural plants: a review [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 246: 604-617.
- [28] NASIRVAND S, ZAKARIA R A, ZARE N, *et al.* Polyploidy induction in parsley (*Petroselinum crispum* L.) by colchicine treatment [J]. Cytologia, 2018, 83(4): 393-396.
- [29] HUY N P, TAM D T T, LUAN V Q, *et al.* *In vitro* polyploid induction of *Paphiopedilum villosum* using colchicine [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 252: 283-290.
- [30] 施春晖, 徐兰兰, 王晓庆, 等. 流式细胞仪鉴定猕猴桃倍性技术研究 [J]. 植物研究, 2014, 34(6): 845-849.
- SHI C H, XU L L, WANG X Q, *et al.* Identification of kiwifruit ploidy using flow cytometry [J]. Bulletin of Botanical Research, 2014, 34(6): 845-849.
- [31] BECKER F W, OBERLANDER K C, TRÁVNÍČEK P, *et al.* Inconsistent expression of the gigas effect in polyploid *Oxalis* [J]. American Journal of Botany, 2022, 109(10): 1607-1621.

- [32] PACEY E K, MAHERALI H, HUSBAND B C. Polyploidy increases storage but decreases structural stability in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Current Biology*, 2022, 32(18): 4057-4063.
- [33] SONG M J, POTTER B I, DOYLE J J, *et al.* Gene balance predicts transcriptional responses immediately following ploidy change in *Arabidopsis thaliana* [J]. *The Plant Cell*, 2020, 32(5): 1434-1448.
- [34] SUN W Q, LI M D, WANG J B. Characteristics of duplicated gene expression and DNA methylation regulation in different tissues of allopolyploid *Brassica napus* [J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 518.
- [35] KONG D X, LI Y Q, BAI M, *et al.* A comparative study of the dynamic accumulation of polyphenol components and the changes in their antioxidant activities in diploid and tetraploid *Lonicera japonica* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2017, 112: 87-96.
- [36] KUNENE E N, FANG J Y. Oryzalin-induced autopolyploidy in sweet marjoram (*Origanum majorana* L.) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2026, 357: 114638.
- [37] KRUTHIKA H S, RUKMANGADA M S, NAIK V G. Genome size, chromosome number variation and its correlation with stomatal characters for assessment of ploidy levels in a core subset of mulberry (*Morus* spp.) germplasm [J]. *Gene*, 2023, 881: 147637.
- [38] TARATIMA W, ROHMAH K N, PLAIKHUNTOD K, *et al.* Optimal protocol for *in vitro* polyploid induction of *Cymbidium aloifolium* (L.) Sw [J]. *BMC Plant Biology*, 2023, 23(1): 295.
- [39] YAO P Q, CHEN J H, MA P F, *et al.* Stomata variation in the process of polyploidization in Chinese chive (*Allium tuberosum*) [J]. *BMC Plant Biology*, 2023, 23(1): 595.
- [40] WANG J X, RENNINGER H J, MA Q, *et al.* Measuring stomatal and guard cell metrics for plant physiology and growth using StoManager1 [J]. *Plant Physiology*, 2024, 195(1): 378-394.
- [41] ŠMARDÁ P, KLEM K, KNÁPEK O, *et al.* Growth, physiology, and stomatal parameters of plant polyploids grown under ice age, present-day, and future CO₂ concentrations [J]. *New Phytologist*, 2023, 239(1): 399-414.
- [42] BERTOLINO L T, CAINE R S, GRAY J E. Impact of stomatal density and morphology on water-use efficiency in a changing world [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 225.

不同牡丹品种和芍药品种花茶品质评估

张滢滢, 张恺欣, 王浩任, 赵莉媛, 韩雪莹, 程 晨, 李芮成, 张延龙, 史倩倩*

(西北农林科技大学风景园林艺术学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为评价牡丹和芍药品种资源的花茶开发潜力, 丰富花茶产品类型, 本研究选用15个牡丹品种和17个芍药品种的花蕾、花朵、花瓣部位分别制作花茶, 通过干花茶颜色值分析、茶汤感官评审以及营养成分、抗氧化能力测定, 并结合主成分分析(principal component analysis, PCA)综合评估其花茶品质。结果表明, 不同牡丹和芍药品种的花茶品质差异显著($P < 0.05$), 总体上, 牡丹与芍药花茶均富含VC、还原糖、可溶性蛋白及多酚、黄酮、花青苷等功能性成分, 具有较强的抗氧化活性和较高的营养价值。通过相关性分析和PCA发现, 总酚、总黄酮与抗氧化活性之间存在相关关系, 部分指标之间呈显著相关($P < 0.05$), 不同活性成分在抗氧化能力形成中具有重要作用。从含量上看, 牡丹总酚含量范围为10~70 mg/g, 芍药为20~200 mg/g, 总黄酮含量两者分别分布在30~230 mg/g与50~300 mg/g之间。不同花样本特征存在明显分化, 铁离子还原抗氧化能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS)阳离子自由基清除能力和1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力在花瓣、花蕾和花朵中各有优势。综合评分显示, 牡丹的‘海黄’‘琉璃贯珠’‘鸦片紫’在花瓣茶中表现最佳, ‘海黄’‘鸦片紫’‘墨池金辉’更适宜用于牡丹花朵茶的加工, 而‘大红宝珠’‘海黄’‘琉璃贯珠’则更适合作为牡丹花蕾茶原料。芍药中, ‘红艳飞霜’‘艳紫向阳’‘红凤展翅’为花瓣茶的优选品种, ‘艳紫向阳’‘苍龙’‘大红袍’为花朵茶的适宜品种, ‘大红袍’‘红光奇锦’‘玛莎’在花蕾茶品质中表现突出。本研究结果可为牡丹与芍药花茶品种的筛选及其资源的开发利用提供科学依据和参考。

关键词: 牡丹; 芍药; 花茶品质; 品种筛选

Quality Evaluation of Tree Peony and Herbaceous Peony Flower Teas Made from Different Cultivars

ZHANG Yingying, ZHANG Kaixin, WANG Haoren, ZHAO Liyuan, HAN Xueying, CHENG Chen,

LI Ruicheng, ZHANG Yanlong, SHI Qianqian*

(College of Landscape Architecture and Art, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To evaluate the potential of tree peony (*Paeonia suffruticosa*) and herbaceous peony (*Paeonia lactiflora*) germplasm resources for flower tea development and to enrich the variety of flower tea products, 15 tree peony cultivars and 17 herbaceous peony cultivars were selected, and their buds, flowers, and petals were separately processed into flower tea. The color parameters of tea, together with the sensory evaluation, nutritional composition and antioxidant capacity of tea infusion, were analyzed. Principal component analysis (PCA) was used to comprehensively assess flower tea quality based on 12 quality-related variables. The results showed that the overall quality of peony and herbaceous peony flower teas differed significantly among cultivars ($P < 0.05$). In general, both types of flower teas were rich in vitamin C, reducing sugars, soluble proteins, polyphenols, flavonoids, and anthocyanins, exhibiting strong antioxidant capacity and high nutritional value. Correlation analysis and PCA revealed that total phenolic and total flavonoid contents were correlated with antioxidant activities. Significant correlations were observed among several measured parameters ($P < 0.05$), indicating that different bioactive compounds greatly contribute to the antioxidant capacity of flower teas. In tree and herbaceous peony flower teas, total phenolic contents ranged from 10 to 70 mg/g and from 20 to 200 mg/g, and total flavonoid contents ranged from 30 to 230 mg/g and from 50 to 300 mg/g, respectively. Clear differentiation was observed among flower parts. Petal,

收稿日期: 2025-08-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32371953)

第一作者简介: 张滢滢(2002—)(ORCID: 0009-0005-8678-0734), 女, 硕士研究生, 研究方向为园林植物应用。

E-mail: 2537435217@qq.com

*通信作者简介: 史倩倩(1987—)(ORCID: 0000-0002-3247-6527), 女, 副教授, 博士, 研究方向为园林植物育种、园林植物重要观赏性状分子机理。E-mail: shiqianqian2005@163.com

flower bud, and whole flower teas showed the strongest antioxidant activities in ferric reducing antioxidant power (FRAP), 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) radical cation, and 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assays, respectively. Comprehensive quality scores indicated that the tree peony cultivars 'Haihuang', 'Liuliguanzhu', and 'Yapianzi' were optimal for processing into petal tea, 'Haihuang', 'Yapianzi', 'Mochijinhui' were more suitable for processing into whole-flower tea, while 'Dahongbaozhu', 'Haihuang', and 'Liuliguanzhu' were more suitable for processing into bud tea. Among the herbaceous peony cultivars, 'Hongyanfeishuang', 'Yanzixiangyang', and 'Hongfengzhanchi' were the best cultivars for petal tea, 'Yanzixiangyang', 'Canglong', and 'Dahongpao' were optimal for flower tea, while 'Dahongpao', 'Hongguangqijin', and 'Masha' exhibited the best bud tea quality. These findings provide a scientific basis and reference for the cultivar selection and resource utilization of tree peony and herbaceous peony flower teas.

Keywords: *Paeonia suffruticosa*; *Paeonia lactiflora*; flower tea quality; cultivar selection

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20250831-222

中图分类号: TS272

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2026) 06-0226-16

引文格式:

张滢滢, 张恺欣, 王浩任, 等. 不同牡丹品种和芍药品种花茶品质评估[J]. 食品科学, 2026, 47(6): 226-241. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20250831-222. <http://www.spkx.net.cn>

ZHANG Yingying, ZHANG Kaixin, WANG Haoren, et al. Quality evaluation of tree peony and herbaceous peony flower teas made from different cultivars[J]. Food Science, 2026, 47(6): 226-241. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20250831-222. <http://www.spkx.net.cn>

牡丹 (*Paeonia suffruticosa*) 和芍药 (*Paeonia lactiflora*) 同属于芍药科芍药属, 是中国的传统名花, 种质资源丰富, 兼具观赏和药用价值。因其含有氨基酸、矿物质及花色苷等活性成分, 被广泛应用于各个行业^[1]。现代药理学研究表明, 牡丹和芍药的根部和花朵均含有较高含量的芍药苷和单萜类化合物。其中, 根部含量更为丰富, 富集了鞣质、芍药酚等物质, 入药能够发挥降血脂、抗菌消炎、降血压功效, 对人体健康有益^[2-3]。随着茶饮多样化趋势的发展, 花茶因其药用价值和观赏价值日益受到市场青睐。在众多花茶品种中, 传统的玫瑰花茶、茉莉花茶与菊花茶占据主流^[4], 牡丹与芍药花茶的开发正成为新兴方向, 其花具有抗氧化、清热解毒、美容养颜等功效, 是开发高附加值花茶产品的优秀材料。目前市场上对牡丹花茶的开发多集中在‘丹凤’牡丹, 有牡丹全花茶、花瓣茶、花蕊茶等多种产品。牡丹和芍药花型多种多样, 其中菊花型、蔷薇型以及荷花型品种外形优越, 花瓣适宜制茶。Li Shanshan等^[5]采用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术分析了30个不同牡丹品种的挥发性香气成分, 归纳出5类花香型。其中玫瑰香型的牡丹品种更适宜用于花茶加工。不同品种的芍药花茶在香气、理化性质上存在差异, 但都有较高的2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS) 阳离子自由基清除能力, 整体清除率达到82.20%~87.40%^[6]。目前, 关于牡丹和芍药在花茶领域的研究仍相对有限, 尚缺乏系统的品质评价与成分分析。因此, 本研究选取不

同品种牡丹和芍药的花蕾和盛开期的花朵, 结合理化分析与功能活性评价, 对其外观特征、色度参数、抗氧化活性、理化特性和营养物质等进行测定, 筛选适宜花茶加工的品种, 以期对牡丹、芍药花茶的品质评价与产业化开发提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

2024年3—5月在西北农林科技大学牡丹资源圃选取不同品种的牡丹和芍药长势健壮的6年生植株, 采集透色期花蕾和盛开期花朵(图1)。本研究所选用的牡丹与芍药花样品目前尚未被纳入新食品原料目录, 仅用于实验室条件下的理化性质与感官品质分析, 以期为其潜在的食用开发与安全性评估提供科学依据。

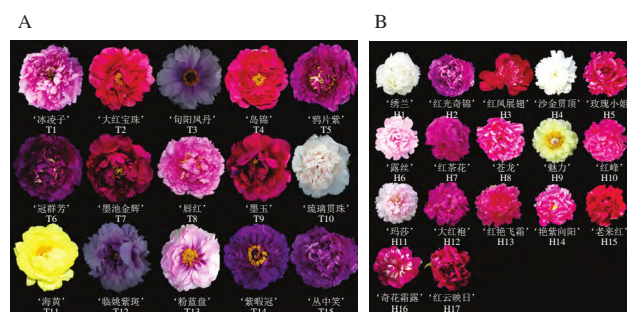


图1 不同牡丹品种(A)和芍药品种(B)盛开期花朵

Fig. 1 Tree peony (A) and herbaceous peony (B) flowers from different cultivars at full bloom

Folin-Ciocalteu试剂、考马斯亮蓝G250、牛血清白蛋白、没食子酸标准品、芦丁标准品等 上海麦克林生化科技有限公司; 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、ABTS、Trolox 广州永诺生物科技有限公司; 甲醇、乙醇、乙腈 天津科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

CR-410色差仪 日本柯尼卡美能达公司; 2030型高效液相色谱仪 日本岛津公司; ReadMax 1900Plus型光吸收型全波长酶标仪 上海闪谱生物科技有限公司; 4-5KRL离心机 西格玛奥德里奇上海贸易有限公司; DK-98-II水浴锅 天津市泰斯特仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品前处理

所有样品均采用前期实验优化确定的统一工艺进行加工。不同品种的牡丹与芍药花瓣采用微波高火处理60 s进行杀青, 随后在80 °C条件下进行热风干燥^[7]。牡丹花蕾杀青采用微波低火处理40 s, 芍药花蕾杀青采用微波中高火处理40 s; 牡丹盛开花朵杀青采用微波高火处理40 s, 芍药盛开花朵杀青则采用微波低火处理30 s。花蕾及花朵杀青处理完成后, 均在60 °C条件下进行热风干燥^[8]。各处理样品以整花或同一朵花完整部位为一个实验单位, 每个处理设置3个独立生物学重复, 干燥至质量恒定后用于后续测定。

1.3.2 颜色变化分析及感官评价

按照CIE表色系统, 使用色差仪测量加工前后不同品种牡丹和芍药花蕾、花朵和花瓣的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 选取同一品种发育长势一致的花朵, 避开边缘和基部, 在具有代表性的区域取3个不同测量点, 最终取3点测量数值的平均值, 每个品种重复独立取样, 进行3次生物学重复。参考GB/T 23776—2018《茶叶感官评审方法》对样品进行感官评审, 结合花茶特性使用“干花茶形态”作为评价因子。由5名受训评审员通过视觉、嗅觉、味觉和触觉等感官手段, 从干花茶形态、外形、汤色、香气和滋味等方面进行系统评分^[9]。

1.3.3 营养成分测定

VC含量测定采用钼酸铵法; 可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝染色法; 还原糖含量采用3,5-二硝基水杨酸法^[10-11]。将样品研磨成粉后过筛, 取100 mg置于10 mL离心管中, 水浴加热, 待冷却至室温后离心取上清液, 在上清液中加入反应液, 分别在760、595、540 nm波长处测定吸光度, 每个样品进行3次重复测定。

总酚、总黄酮及总花青素含量的测定分别参照Folin-Ciocalteu法^[12]、 $\text{NaNO}_2\text{-AlCl}_3$ 法^[13]以及pH值差变法^[14]进行。样品经研磨后取100 mg进行超声提取, 离心后取上清液进行测定。

1.3.4 抗氧化能力测定

抗氧化能力通过铁离子还原抗氧化能力 (ferric reducing antioxidant power, FRAP)、ABTS、DPPH法测定^[15-16], 提取液与相应工作液避光反应, 分别于593、732、519 nm波长处测定吸光度, 以上均设空白对照并重复3次取样测定。

1.3.5 主要功能活性成分测定

采用高效液相色谱-质谱技术对样品中的功能活性成分进行定量分析。取各部位样品0.4 g, 用甲醇浸提24 h (每6 h振荡一次), 随后进行30 min超声波辅助提取, 在10 000 r/min条件下离心10 min, 收集上清液过滤后用于分析。采用标准品半定量法计算各色素及类黄酮的相对含量。通过测定各组分的特征离子峰面积, 并结合相应标准品建立的标准曲线, 计算样品中功能活性成分的含量^[17]。

1.4 数据分析

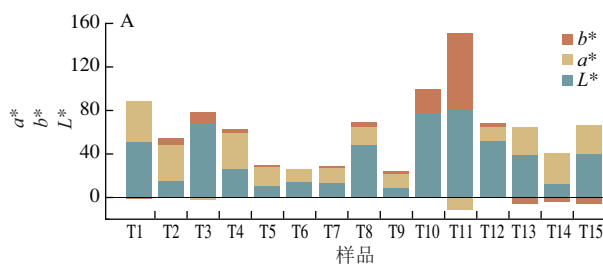
采用SPSS 22.0软件进行数据分析, 采用方差分析以确定各组间总体差异, 随后使用沃勒-邓肯 k 比值 t 检验进行组间比较。相关性分析采用Pearson法。采用Origin 2016软件绘图。采用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 法构建花茶品质评价模型。

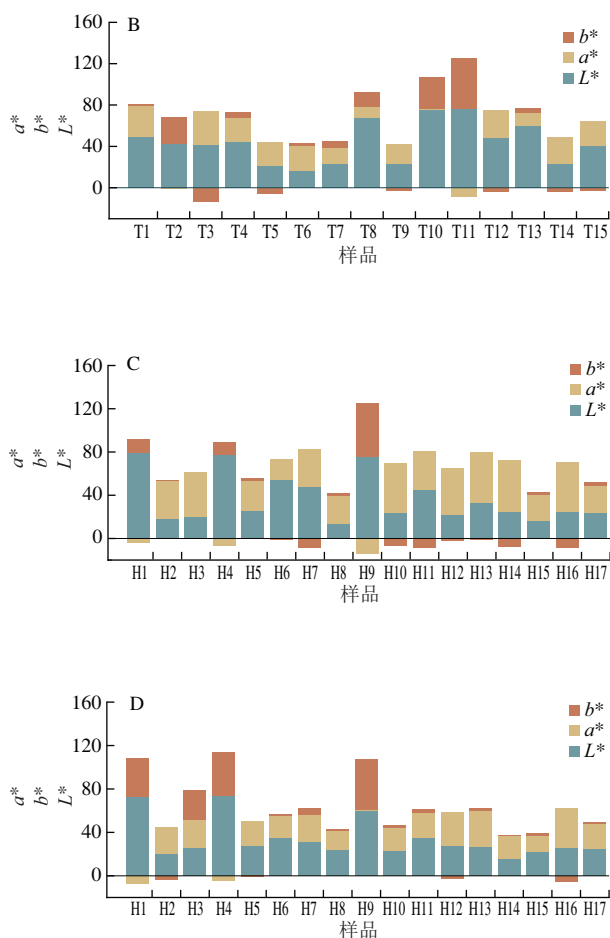
2 结果与分析

2.1 颜色变化分析和感官评价结果

2.1.1 花茶颜色变化分析

由图2A、B可知, 牡丹花茶各品种之间颜色差异明显, 整体 L^* 值较高, 表明牡丹花色整体偏亮, 花蕾颜色较深, 其中T10、T11的 L^* 值最高。T1、T2的 a^* 值较高, 呈现较深的粉红或紫红色。 b^* 值在多数样本中为正, 说明样品普遍偏黄调, 但部分品种 (如T5、T6、T7) 花朵花瓣 b^* 值较低, 花蕾中 b^* 值略低于花朵花瓣部位, 颜色偏冷调。总体而言, b^* 值整体较低, a^* 、 L^* 值是导致牡丹品种间花色产生差异的主要因素。相比之下芍药颜色更深 (图2C、D), 整体 L^* 值略低于牡丹, H1、H4、H9在所有部位中 L^* 与 b^* 值均较高, 而H8、H15则相对较低, 色调偏深偏绿。芍药花朵的颜色分布范围更广。但从干花茶形态可以看出, 相较鲜样而言, 牡丹和芍药的干花茶亮度整体便低 (图1、3), 与加工工艺紧密相关。

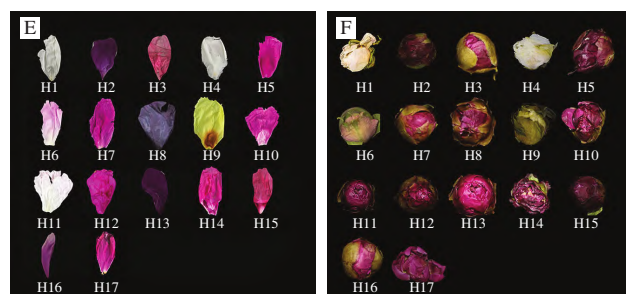
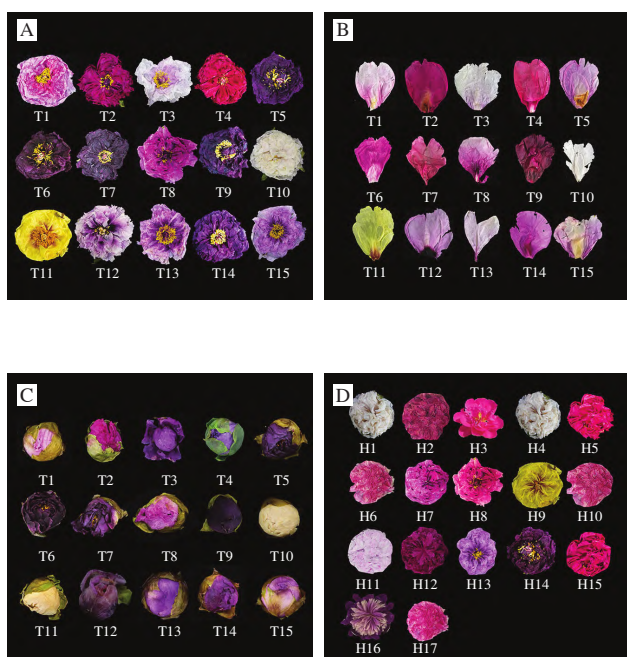




A.牡丹花朵、花瓣; B.牡丹花蕾; C.芍药花朵、花瓣; D.芍药花蕾。

图2 牡丹、芍药花朵、花瓣和花蕾的颜色值

Fig. 2 Color values of flowers, petals, and buds of tree peony and herbaceous peony



A~C.分别为牡丹花朵、花瓣、花蕾; D~F.

分别为芍药花朵、花瓣、花蕾。图4、14同。

图3 牡丹、芍药花蕾、花朵和花瓣干花茶

Fig. 3 Dried flower teas prepared from buds, flowers, and petals of tree peony and herbaceous peony

2.1.2 感官评价分析

由图4可知,不同样本茶汤汤色在明度和色调上有所差异。感官评价结果同样显示,不同牡丹和芍药品种及不同样本类型在外观、汤色、香气、滋味及干花茶形态等指标上表现不一。

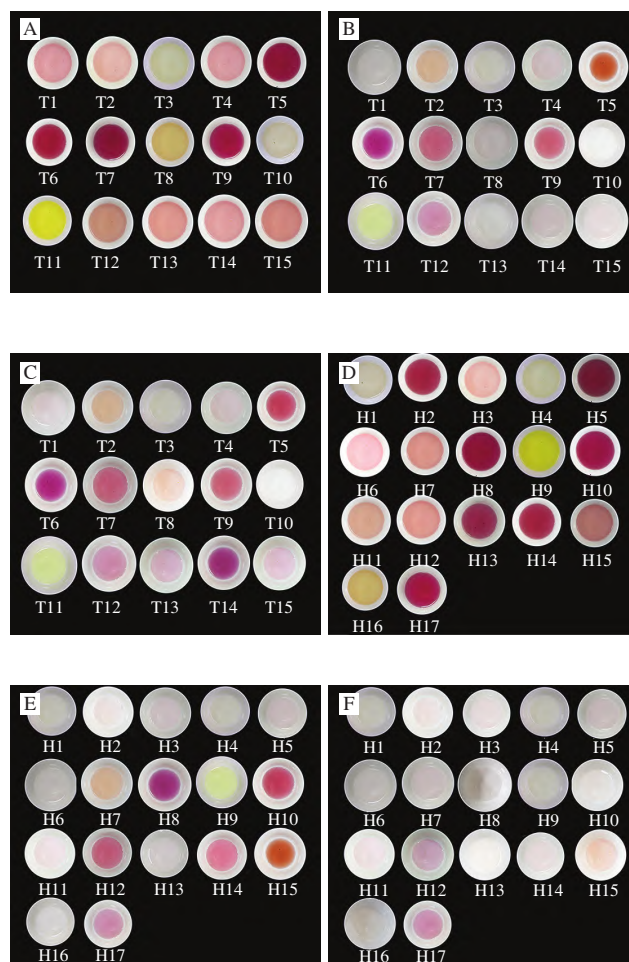


图4 牡丹、芍药花蕾、花朵和花瓣茶汤色

Fig. 4 Tea infusion color of tree peony and herbaceous peony buds, flowers, and petals

表1 牡丹花茶感官评分

Table 1 Sensory evaluation scores of tree peony flower teas

品种	外形评分			汤色评分			香气评分			滋味评分			干花茶评分			总分		
	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣
T1	90.50	97.50	88.75	82.75	92.00	84.50	82.50	88.50	85.50	82.50	88.50	83.00	89.75	94.50	90.00	85.25	91.70	85.91
T2	91.25	84.50	88.25	90.25	85.25	85.75	83.75	80.50	85.75	82.75	83.00	82.75	86.75	86.25	90.00	86.28	83.30	85.90
T3	89.75	90.25	87.25	90.00	82.25	86.00	90.25	88.75	84.50	86.75	87.25	80.00	90.25	87.00	88.00	89.05	87.85	84.34
T4	80.00	90.00	92.00	91.75	88.50	87.50	86.50	84.00	81.00	88.50	86.75	80.25	91.75	85.75	90.00	86.53	86.95	85.08
T5	91.75	84.75	82.00	90.50	92.50	88.00	84.00	84.00	86.50	90.25	82.00	84.75	86.25	83.25	81.75	88.69	84.36	84.53
T6	85.50	87.00	78.25	91.75	86.00	91.75	86.50	84.75	85.75	86.50	83.75	84.75	84.75	86.00	77.75	86.60	85.26	83.38
T7	86.00	93.50	84.75	94.25	92.50	92.25	89.25	83.50	86.00	84.00	82.50	87.00	89.75	90.50	84.75	87.41	87.30	86.49
T8	90.25	87.50	88.75	89.75	83.75	83.00	87.50	84.50	85.00	86.25	84.50	80.25	90.25	89.50	90.50	88.31	85.68	84.86
T9	93.75	85.00	82.75	93.75	92.75	88.75	90.25	82.75	82.25	80.50	83.00	83.25	91.75	84.25	87.00	88.70	84.54	83.80
T10	86.25	81.75	79.00	90.50	83.25	82.75	90.00	86.00	87.75	83.25	86.25	86.50	88.00	87.00	81.75	86.89	84.84	84.09
T11	95.00	91.50	89.25	94.00	92.25	93.75	86.50	85.75	84.00	89.75	88.50	82.75	89.50	93.50	91.75	90.65	89.44	86.69
T12	87.75	88.75	88.75	90.50	83.17	89.75	88.75	83.75	87.50	84.75	81.50	87.75	88.50	86.50	88.25	87.45	84.54	88.19
T13	86.25	94.00	88.00	89.75	96.00	81.25	86.25	89.00	84.25	85.00	92.00	82.50	86.75	94.00	85.75	86.28	92.35	84.51
T14	89.75	90.00	87.50	88.50	84.75	88.50	90.75	81.00	84.25	83.25	81.50	82.00	90.00	88.00	89.75	87.95	84.48	85.36
T15	86.00	87.50	85.80	89.00	88.75	87.00	90.00	85.50	85.40	86.00	84.50	79.50	89.75	88.00	86.00	87.68	86.28	83.95

表2 芍药花茶感官评分

Table 2 Sensory evaluation scores of herbaceous peony flower teas

品种	外形评分			汤色评分			香气评分			滋味评分			干花茶评分			总分		
	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣	花蕾	花朵	花瓣
H1	83.50	83.25	78.75	80.50	90.00	80.25	85.75	80.50	76.50	82.00	86.00	80.25	85.75	90.45	89.75	83.54	84.78	79.89
H2	87.00	84.50	86.75	94.00	89.75	84.75	89.00	80.00	77.75	87.00	87.75	80.75	98.00	89.50	89.00	89.30	85.38	82.73
H3	84.75	82.50	80.50	90.25	85.75	87.75	84.50	83.25	80.50	83.50	83.00	80.75	85.50	88.75	74.00	84.94	83.79	80.65
H4	85.50	89.75	82.25	82.50	86.25	79.75	80.00	81.75	81.00	84.75	84.50	79.00	90.50	86.75	82.50	84.10	85.53	80.74
H5	89.00	84.50	86.75	90.00	87.75	85.50	83.33	85.25	82.75	83.50	85.00	83.50	91.00	90.50	83.50	86.23	85.76	84.33
H6	80.25	90.75	88.75	83.50	86.25	79.25	79.75	83.75	82.50	82.50	86.50	84.50	92.50	91.50	84.60	82.35	87.35	84.55
H7	79.25	80.25	80.00	79.50	84.25	81.25	82.50	80.00	83.00	78.50	86.50	82.25	90.50	88.50	82.50	80.99	83.29	81.80
H8	88.25	87.50	89.25	81.00	89.50	88.25	79.67	81.50	84.50	83.00	87.25	86.75	90.25	88.25	84.25	84.00	86.20	86.71
H9	85.75	88.00	88.50	85.75	90.75	87.75	85.75	82.00	84.75	86.50	86.50	88.75	94.50	89.75	86.75	86.85	86.50	87.39
H10	85.00	89.25	87.25	82.50	89.00	88.00	78.33	83.50	86.00	80.75	88.75	85.50	87.75	84.75	84.50	82.08	87.19	86.21
H11	80.00	80.50	80.75	85.50	88.75	86.75	80.00	80.75	80.50	82.75	86.50	82.00	89.50	82.50	80.00	82.33	83.39	81.59
H12	87.75	83.50	84.50	92.25	86.25	86.75	83.75	88.45	83.50	81.50	89.00	84.50	86.75	89.00	81.75	85.23	87.21	84.20
H13	89.75	90.25	81.25	84.25	91.25	85.75	79.60	81.50	85.00	83.75	86.00	82.25	92.00	86.50	81.50	85.09	86.51	82.96
H14	87.75	89.75	80.75	93.25	92.00	86.00	81.50	87.25	82.75	82.25	87.50	84.75	86.75	88.75	80.00	84.99	88.58	82.90
H15	83.50	88.75	82.00	88.00	90.00	86.00	81.33	80.50	83.00	80.50	85.75	81.00	87.50	90.50	86.00	82.91	86.09	82.75
H16	85.75	88.00	87.00	78.67	86.25	82.50	80.33	86.25	82.00	80.75	86.25	82.25	87.00	88.75	82.75	82.31	86.94	83.45
H17	84.50	86.75	82.75	80.50	80.50	84.75	86.75	86.25	83.25	79.75	81.25	83.00	86.00	86.00	82.00	83.39	84.28	83.08

如表1所示，牡丹花蕾茶T11形态得到了95分的高评价，T7花蕾茶则在汤色上以94.25分优于其他品种，T14的香气较突出，而T4、T9在干花茶形态上评分较高。综合来看，T11在外观、香气与滋味方面有综合优势，市场潜力较大。牡丹花朵茶T1在外形上的得分（97.5分）远高于其他品种，T13各方面均得到了高分的评价，适宜制作成花朵茶。T4花瓣茶在外形上有突出的优势，T6、T7花瓣茶在汤色上评价较高，而T11在干花茶形态上有突出优势。但从香气和滋味方面来看，无明显优秀品种。综合多项指标，T12为牡丹花瓣茶相对优选品种。

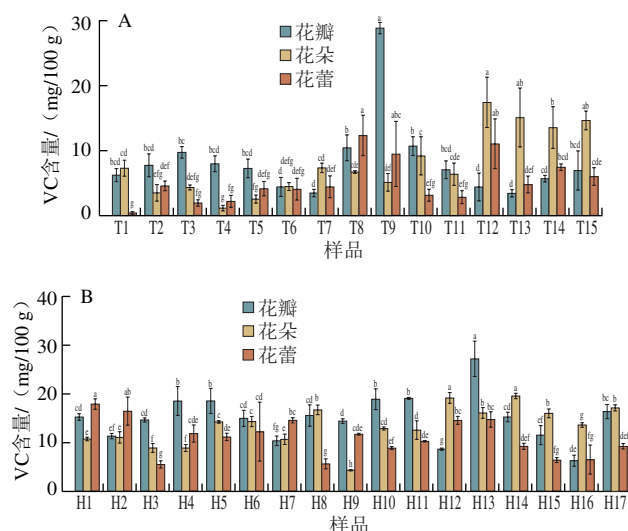
如表2所示，在芍药花蕾茶中，H2、H3、H5、H12、H14在汤色评价中得分均高于90分，H4、H5、H6、H7、H8、H9在干花形态方面表现良好，综合来看H2作为花蕾茶，得分领先于其他品种。H13和H6花朵茶在外形评分中优势突出，H13的汤色得分较高（92分），H1、H5、H6、H15则具有良好的外形条件。综合各感官体验来看，H14花朵茶在视觉和味觉上均具优势。H9在花瓣茶中综合得分相对较高，具有一定代表性。

2.2 营养成分分析

2.2.1 VC含量分析

由图5A可知，不同牡丹品种间的VC含量存在显著差异（ $P<0.05$ ），其中花瓣部位的VC含量普遍较高，其次是花朵部位。T9花瓣部位VC含量远高于其他品种，达到相对较高的水平；T3、T8、T10等品种的花瓣也表现出较高的VC含量。H12、H13、H14、H15花朵部位的VC含量较高，普遍在12~20 mg/100 g之间，显著高于其他品种（ $P<0.05$ ）。相比之下，花蕾部位的VC含量整体较低，多分布在0~5 mg/100 g区间内。芍药样品中也观察到品种和部位差异（图5B）。芍药品种整体VC含量高于牡丹，其中花朵和花瓣部位含量较高，普遍分布在10~20 mg/100 g范围内。H13品种的花朵和花瓣中VC含量均较为突出，花瓣的VC含量高达约26 mg/100 g，显著高于其他品种（ $P<0.05$ ），花瓣VC含量普遍高于花朵和花蕾。H8、H12、H14等品种的花朵中也检测到相对较高的VC水平。然而，部分品种（如H9）花朵中VC含量则较低，H3、H15、H16花蕾中的VC含量同样处于较低水

平。多数组别之间存在显著差异 ($P<0.05$)，表明品种间及部位间VC积累差异显著。



不同字母表示组间存在显著差异 ($P<0.05$)，下同。

图5 牡丹(A)、芍药(B)花茶VC含量

Fig. 5 VC contents of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.2.2 还原糖含量分析

如图6所示，牡丹和芍药的还原糖含量表现出相似的部位差异趋势，不同品种间的还原糖含量存在显著差异，且不同花部位间差异明显。两者还原糖含量在各部位的高低顺序为花瓣、花朵、花蕾。牡丹各品种花瓣的还原糖含量范围为约150~350 mg/g，花朵部位的还原糖含量整体略低于花瓣，主要分布于150~280 mg/g之间，显著高于花蕾部位的80~130 mg/g ($P<0.05$)。其中T1、T12、T14花瓣及T5、T14花朵的还原糖含量最高，显著高于其他品种 ($P<0.05$)，均达到或超过300 mg/g。部分品种（如T15、T6、T7）的花瓣还原糖含量相对较低，在100~150 mg/g之间，T4花朵还原糖水平与之接近。芍药花瓣的还原糖含量范围为200~370 mg/g，其中H2、H6、H8、H9、H17花瓣还原糖含量较高，高达350 mg/g，显著高于其他品种 ($P<0.05$)。花朵部位的还原糖含量集中在180~260 mg/g之间，而花蕾部位仅约为80~150 mg/g。部分品种（如H2、H6、H17）花蕾的还原糖含量显著偏低 ($P<0.05$)。整体来看，芍药还原糖含量略高于牡丹，且不同品种间差异幅度较小。

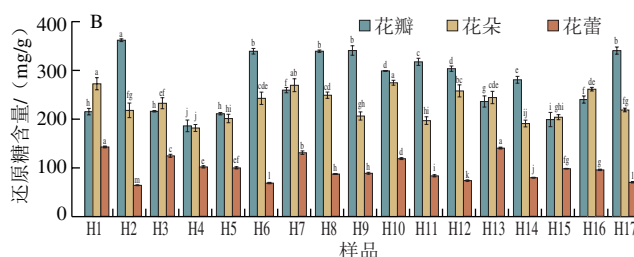
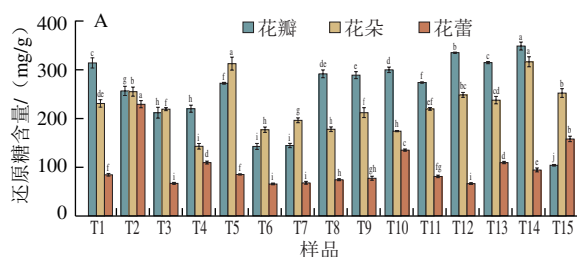


图6 牡丹(A)、芍药(B)花茶还原糖含量

Fig. 6 Reducing sugar contents of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.2.3 可溶性蛋白含量分析

如图7A所示，不同牡丹品种和部位间的可溶性蛋白含量存在显著差异 ($P<0.05$)。总体而言，花瓣和花朵部位的可溶性蛋白含量明显高于花蕾。各品种花瓣可溶性蛋白含量范围为20~55 mg/g，其中T2、T7、T14等品种的花瓣和花朵可溶性蛋白含量显著高于其他品种 ($P<0.05$)，达到50~55 mg/g。花蕾部位可溶性蛋白含量普遍较低，多分布在10~25 mg/g范围内，但在T2、T5、T7等品种上表现较优，均在30 mg/g以上。综合来看，T2、T7属于高蛋白含量品种。不同品种芍药样品的可溶性蛋白含量存在显著差异 ($P<0.05$)（图7B）。花瓣、花朵和花蕾的含量差异相对较小，分布在60~90 mg/g之间。H2、H7、H10、H13等品种花瓣及花朵的可溶性蛋白含量较高 (>80 mg/g)，显著高于其他品种 ($P<0.05$)。部分样品如H15花瓣、H16花蕾的含量相对较低。与牡丹相比，芍药各部位间的蛋白含量差距较小，表明其蛋白代谢相对稳定，且整体水平较高。

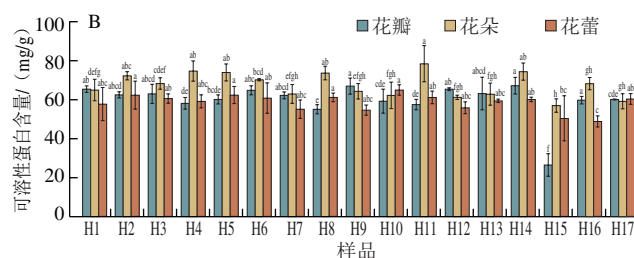
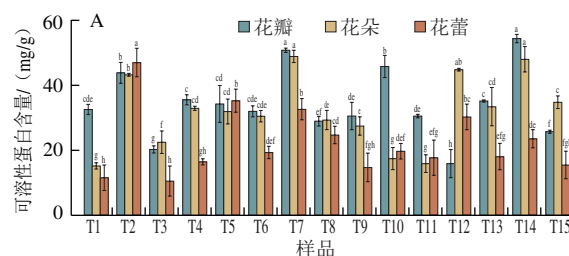


图7 牡丹(A)、芍药(B)花茶可溶性蛋白含量

Fig. 7 Soluble protein contents of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.2.4 总酚含量分析

由图8A可知,牡丹各品种及部位之间的总酚含量存在显著差异($P<0.05$)。牡丹总酚含量范围在10~70 mg/g,花蕾和花朵部位的总酚含量较高,花蕾的总酚含量多数介于10~50 mg/g之间,其中T6、T13、T15品种总酚含量最高。T6、T9、T14等品种的花瓣和花朵部位也富含酚类物质。T11花朵的总酚含量高达70 mg/g,显著高于其他品种($P<0.05$),T3花瓣的总酚含量则显著低于其他品种($P<0.05$)。芍药花茶的总酚含量在不同品种和样本间亦呈现明显差异,且总体含量高于牡丹,介于20~200 mg/g(图8B)。芍药花朵的总酚含量普遍高于花瓣和花蕾。其中H15花朵的总酚含量高达200 mg/g,显著高于其他品种($P<0.05$);其次是H5的花蕾部位,其总酚含量超过150 mg/g。花瓣部位的酚类含量则相对稳定,多数品种分布在50~100 mg/g之间。

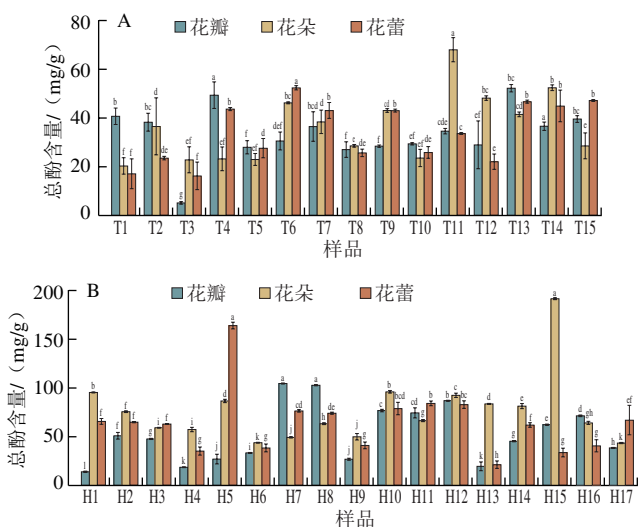


图8 牡丹(A)、芍药(B)花茶总酚含量

Fig. 8 Total phenolic contents of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.2.5 总黄酮含量分析

整体来看,牡丹和芍药的总黄酮含量分别为30~230 mg/g和50~300 mg/g。牡丹花朵部位的总黄酮含量水平较高,显著高于花瓣和花蕾部位,且在不同品种之间呈现显著差异($P<0.05$)(图9A)。其中T2花朵的总黄酮含量最高,约为230 mg/g,显著高于其他品种($P<0.05$),T5、T7等品种花朵的黄酮含量也处于较高水平。T2、T7花蕾部位同样富含总黄酮,高达约200 mg/g。花瓣部位整体最低,多数品种总黄酮含量分布于50~120 mg/g,仅少数品种(如T6、T12)略高。表明牡丹花朵是黄酮类化合物的主要富集部位。由图9B可知,芍药样品的总黄酮含量差异显著($P<0.05$),整体水平高于牡丹。其中花蕾部位黄酮含量最高,其次为花

朵,花瓣最低。H11、H12花蕾的黄酮含量最高,H2、H9是花朵部位总黄酮含量最高的品种,均在200 mg/g以上,明显高于其他品种。相比之下,芍药花瓣部位的总黄酮含量相对较低,多数在80~150 mg/g范围内。

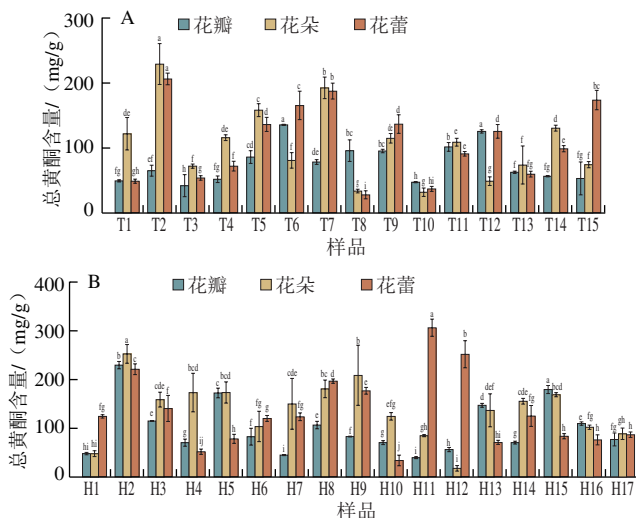
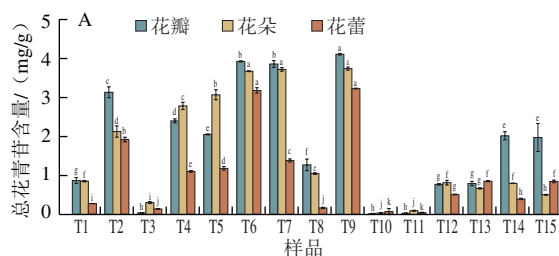


图9 牡丹(A)、芍药(B)花茶总黄酮含量

Fig. 9 Total flavonoid contents of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.2.6 总花青苷含量分析

由图10A可知,不同牡丹品种及部位间的总花青苷含量存在显著差异($P<0.05$)。花瓣部位的总花青苷含量最高,其次为花朵,花蕾的含量相对较低,说明花青苷主要集中在花瓣组织中。其中,T9花瓣的花青苷含量最高(约4.2 mg/g),显著高于其他品种($P<0.05$),T6、T7花瓣及花朵的花青苷含量也较高,约为3.5~4.0 mg/g,而T3、T10、T11的花青苷含量则明显低于其他品种。T6、T9是所有品种中花蕾部位总花青苷含量最高的品种。由图10B可知,芍药各品种的花青苷含量亦存在显著差异($P<0.05$),且整体水平略高于牡丹。芍药总花青苷表现出类似于牡丹的趋势,花瓣中的花青苷含量明显高于花朵和花蕾部位。其中H8、H17花瓣的花青苷含量最高,这两个品种的花朵同样表现出最高的总花青苷含量。花蕾部位的总花青苷含量最低,其中H15、H17含量最高,约为2.5 mg/g。而H1、H9、H11各部位的花青苷含量均较低,与品种的花色相关。表明花青苷主要在花瓣中富集,并在花色形成过程中起作用。



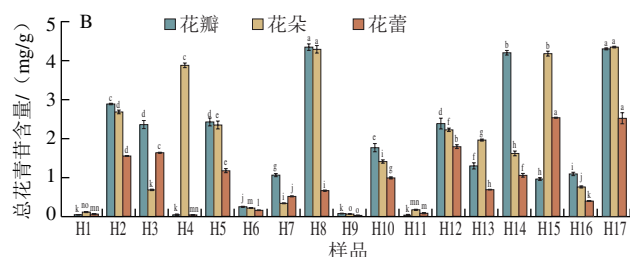


图10 牡丹(A)、芍药(B)花茶总花青苷含量

Fig. 10 Total anthocyanin contents of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.3 抗氧化能力分析

2.3.1 FRAP分析

由图11A可知,不同牡丹品种及花部位间FRAP存在显著差异($P<0.05$)。总体上,花瓣和花朵部位的FRAP明显高于花蕾。各品种花瓣的FRAP分布在200~850 $\mu\text{mol/g}$ 之间,其中T1和T11品种的花瓣表现出极高的FRAP,分别达到约800 $\mu\text{mol/g}$ 左右,显著高于其他品种($P<0.05$)。T2、T5、T7、T10、T14等品种花瓣也表现出较高的FRAP。花朵部位的FRAP主要分布于200~600 $\mu\text{mol/g}$ 之间,其中T13花朵达到约800 $\mu\text{mol/g}$ 。相比之下,花蕾部位的FRAP普遍较弱,主要分布在50~300 $\mu\text{mol/g}$ 范围内。芍药样品的FRAP总体高于牡丹,不同品种和部位间差异同样显著($P<0.05$)。

(图11B)。花瓣部位的FRAP介于300~1 150 $\mu\text{mol/g}$ 之间,花朵的FRAP整体略高于花瓣部位,主要分布在250~1 200 $\mu\text{mol/g}$ 范围内,其中H14的花瓣和花朵部位FRAP均超过1 300 $\mu\text{mol/g}$,达到最高水平。花蕾部位的FRAP最低,多在100~400 $\mu\text{mol/g}$ 之间, H8、H10、H13花蕾的FRAP显著偏低($P<0.05$)。综合分析表明,牡丹和芍药均表现出较高的FRAP,其中花瓣、花朵较高,花蕾最低。

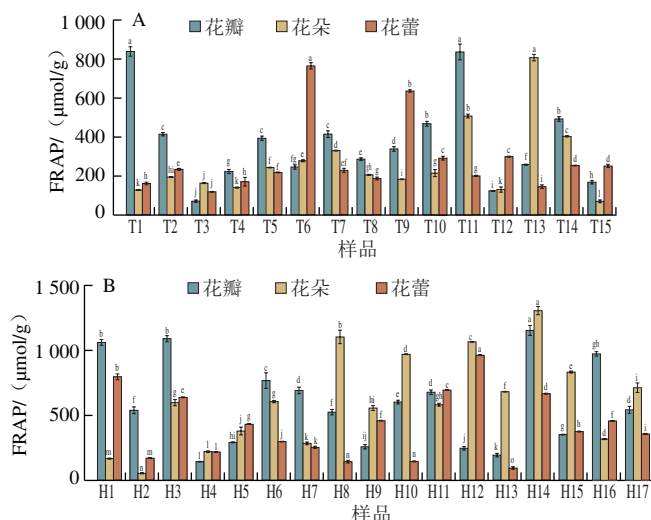


图11 牡丹(A)、芍药(B)花茶的FRAP

Fig. 11 FRAP of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.3.2 ABTS阳离子自由基清除能力分析

不同牡丹品种及部位的ABTS阳离子自由基清除能力差异显著($P<0.05$)。整体来看,花蕾部位的ABTS阳离子自由基清除能力最强,表现出较好的抗氧化能力(图12A)。各品种花蕾的ABTS阳离子自由基清除能力范围为300~1 000 $\mu\text{mol/g}$,其中T9、T10花蕾的ABTS阳离子自由基清除能力最高,均超过900 $\mu\text{mol/g}$,显著高于其他品种($P<0.05$)。花瓣和花朵的ABTS阳离子自由基清除能力相对较低,大多数品种分布在400~700 $\mu\text{mol/g}$ 之间。T7、T12是花朵部位ABTS阳离子自由基清除能力最高的品种,花瓣部位则是T2、T10水平较高。总体上,牡丹花蕾的ABTS阳离子自由基清除能力最强,表明其在花发育早期即具备较高的抗氧化潜力。由图12B可知,芍药各品种部位的ABTS阳离子自由基清除能力在500~1 500 $\mu\text{mol/g}$ 之间,其ABTS阳离子自由基清除能力整体高于牡丹,且不同品种和花部位间的差异显著($P<0.05$)。其中花瓣部位ABTS阳离子自由基清除能力整体表现最高,是芍药主要的抗氧化活性物质积累区域。H3、H8、H12品种花瓣的ABTS阳离子自由基清除能力高达1 300 $\mu\text{mol/g}$ 。花朵和花蕾部位的ABTS阳离子自由基清除能力略低于花瓣,但整体水平均较高。

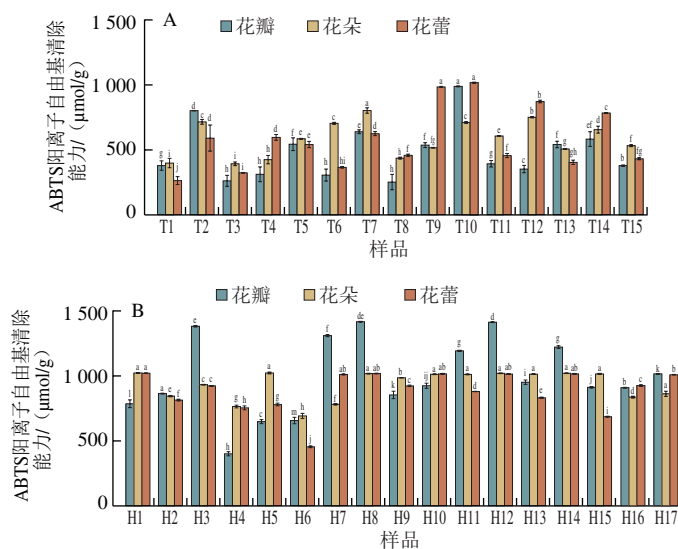


图12 牡丹(A)、芍药(B)花茶ABTS阳离子自由基清除能力

Fig. 12 ABTS radical cation scavenging capacity of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.3.3 DPPH自由基清除能力分析

由图13A可知,不同牡丹品种及部位间的DPPH自由基清除能力差异显著($P<0.05$)。其DPPH自由基清除能力由强到弱依次为花朵、花蕾、花瓣。T5、T7品种花朵表现出最高的DPPH自由基清除能力。花蕾部位的DPPH自由基清除能力介于100~400 $\mu\text{mol/g}$ 之间,其中T2、T12的DPPH自由基清除能力最高。花瓣部位的

DPPH自由基清除能力相对较弱,部分品种(如T3、T6等)显著低于其他品种,其DPPH自由基清除能力仅约30 μmol/g。相比之下,芍药的DPPH自由基清除能力整体较强,各品种间同样表现出显著的差异性($P<0.05$) (图13B)。与牡丹不同的是,芍药花瓣部位的DPPH自由基清除能力最大,范围在500~1 250 μmol/g之间,花朵和花蕾略低于花瓣。H3、H5、H7、H8、H12、H14品种花瓣的DPPH自由基清除能力超过1 300 μmol/g,显著高于其他品种($P<0.05$)。花朵部位的DPPH自由基清除能力分布较为平均,主要在800~1 100 μmol/g之间,花蕾的DPPH自由基清除能力最低。综合来看,H12的DPPH自由基清除能力最强。

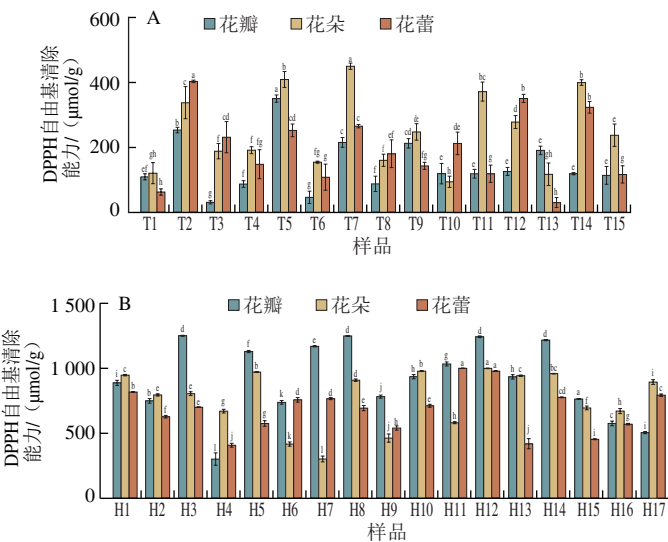


图13 牡丹(A)、芍药(B)花茶DPPH自由基清除能力

Fig. 13 DPPH radical scavenging capacity of tree peony (A) and herbaceous peony (B) flower teas

2.4 主要功能活性成分分析

2.4.1 牡丹主要功能活性成分分析

利用高效液相色谱仪对15种牡丹花茶的花蕾茶、花朵茶、花瓣茶的活性成分进行分离测定,包括矢车菊素糖苷类物质、黄酮醇、黄烷醇、黄烷酮、酚酸(表3~5)。矢车菊素糖苷类物质在各个部位中均有分布,其含量高低与颜色深浅呈正相关。T9花蕾茶、T5花朵茶和T6花瓣茶等品种中矢车菊素-3,5-葡萄糖苷含量较高,最高达37.453 mg/g。黄酮醇类中芦丁普遍存在且含量较高,T9花蕾和花瓣茶中最高达41.778 mg/g。花旗松素含量普遍较低,仅部分样品检测出。表儿茶素和原花青素B₂为主要黄烷醇,其含量普遍高于黄酮醇。T5、T4、T7等品种中相关成分含量较高,儿茶素、原花青素B₁含量极低,仅个别样本检出。表没食子酸儿茶素为主要酚酸成分之一,而在酚酸类物质中,没食子酸在所有牡丹样品中均可检出,但含量较低。

2.4.2 芍药主要功能活性成分分析

不同芍药品种花茶中活性成分与牡丹相似,但含量不同(表6~8)。H14、H15、H17等品种中矢车菊素-3,5-葡萄糖苷含量较高,最高为37.379 mg/g。H1品种相关成分含量普遍较低。黄酮醇类中以花旗松素为主,但仅在少数品种中测得,在H10等品种中含量较高,最高达6.366 mg/g;芦丁广泛存在但含量较低。儿茶素、表儿茶素、表没食子酸儿茶素和原花青素B₂等黄烷醇类含量显著高于黄酮醇,其中表没食子酸儿茶素含量最高。H5、H3等品种中儿茶素含量较高,最高可达117.481 mg/g。相比之下,原花青素B₁含量较低,仅在少数样品中检出。柚皮素和圣草酚等黄烷酮类物质在芍药花茶中含量同样较低。

表3 牡丹花蕾茶主要功能活性成分含量

Table 3 Contents of major functional active compounds in tree peony bud teas

mg/g

品种	没食子酸	矢车菊素-3,5-葡萄糖苷	矢车菊素-阿拉伯糖苷	原花青素B ₁	矢车菊素-半乳糖苷	表没食子酸儿茶素	矢车菊素-芸香糖苷	儿茶素	原花青素B ₂	表儿茶素	花旗松素	苯甲酸	圣草酚	柚皮素	芦丁
T1	0.195±0.023 ^d	0.308±0.007 ^f	0.117±0.001 ^f	0.245±0.004 ^f	0.135±0.062 ^e	7.050±5.806 ¹	1.179±0.762 ²	ND	2.298±1.992 ²	2.501±0.424 ^{4b}	0.447±0.035 ⁵	1.251±0.126 ⁶ⁱ	0.411±0.006 ⁶	0.637±0.020 ^{6hi}	1.456±0.430
T2	0.241±0.042 ^{ghd}	3.435±0.112 ^{2f}	0.496±0.002 ^{2e}	0.763±0.104 ^{10d}	0.391±0.018 ⁷	31.724±0.925 ⁸	3.415±0.204 ^{8b}	ND	5.504±0.342 ⁹	2.464±0.198 ^{8b}	ND	1.494±0.042 ^{2b}	0.616±0.601 ^{1b}	0.142±0.042 ²	0.752±0.488
T3	0.218±0.001 ^{hdi}	1.941±0.941 ^{1b}	0.566±0.002 ^{1d}	ND	ND	23.179±0.272 ¹¹	2.654±0.028 ^{1d}	15.012±0.639 ⁹	3.454±0.040 ¹⁰	2.956±0.197 ¹⁰	ND	1.772±0.025 ¹⁰	0.722±0.750 ¹⁰	0.344±0.255 ¹⁰	0.428±0.033
T4	0.209±0.024 ^{1d}	1.929±0.013 ^{1b}	0.356±0.039 ^{1e}	0.288±0.024 ¹	0.203±0.008 ⁸	10.782±0.247 ¹	1.392±0.030 ⁷	ND	2.633±0.440 ¹⁰	2.579±0.416 ¹⁰	1.557±0.032 ⁹	3.259±0.520 ⁹	0.698±0.261 ^{1b}	2.679±0.774 ⁹	0.034±0.005
T5	0.233±0.058 ^{ghd}	4.556±3.510 ^{10e}	2.930±0.345 ^{1b}	ND	ND	0.000±0.000	3.808±0.434 ¹	15.449±2.395 ¹⁰	1.298±0.379 ¹⁰	3.781±0.656 ¹	ND	1.881±0.224 ¹⁰	0.435±0.035 ^{1b}	ND	3.923±0.747
T6	0.262±0.002 ^{1d}	19.510±0.299 ¹	3.414±0.010 ¹	0.958±0.037 ¹	0.487±0.025 ¹	18.220±0.210 ¹⁰	2.174±0.018 ¹	12.442±0.329 ⁹	1.772±0.041 ¹⁰	3.672±0.148 ^{1d}	ND	3.270±0.177 ⁹	1.728±1.087 ⁹	0.285±0.015 ¹⁰	ND
T7	0.208±0.004 ^{1d}	2.252±0.008 ¹⁰	ND	1.381±0.196 ¹	0.747±0.030 ⁷	39.560±0.271 ¹	3.335±1.037 ¹⁰	3.253±0.004 ¹	2.463±0.119 ¹⁰	6.666±0.352 ¹	1.544±0.036 ¹	2.487±0.050 ¹⁰	0.509±0.010 ^{1b}	2.329±0.697 ¹⁰	0.262±0.005
T8	0.245±0.026 ^{ghd}	6.348±0.266 ¹⁰	0.353±0.014 ^{1e}	0.896±0.001 ¹⁰	ND	20.411±0.214 ¹⁰	2.300±0.190 ^{1d}	ND	3.660±0.181 ¹⁰	2.175±0.021 ^{1b}	ND	1.162±0.033 ¹⁰	0.359±0.007 ¹⁰	0.759±0.007 ¹⁰	ND
T9	0.258±0.051 ¹⁰	20.630±0.320 ¹	ND	0.464±0.034 ^{1d}	0.266±0.017 ^{1d}	ND	ND	ND	1.443±1.247 ¹⁰	3.078±0.067 ¹⁰	ND	2.455±0.034 ¹⁰	0.438±0.024 ^{1b}	0.269±0.165 ¹⁰	4.295±0.195
T10	0.263±0.004 ^{1d}	0.896±0.049 ^{1b}	ND	0.723±0.055 ¹⁰	0.400±0.021 ¹	24.424±2.587 ¹	2.943±0.297 ¹⁰	ND	4.342±0.327 ¹⁰	3.938±0.622 ¹	ND	2.187±0.202 ¹⁰	0.368±0.054 ^{1b}	0.782±0.039 ¹⁰	0.364±0.051
T11	0.227±0.000 ¹⁰	0.397±0.002 ¹	0.360±0.029 ^{1e}	ND	ND	21.317±0.290 ¹⁰	2.422±0.013 ^{1d}	11.258±0.724 ¹	1.028±0.006 ¹⁰	2.828±0.195 ¹⁰	ND	2.171±0.384 ¹⁰	0.376±0.019 ^{1b}	10.633±0.026 ¹	3.836±0.275
T12	0.208±0.025 ^{1d}	2.205±0.315 ¹⁰	1.101±0.819 ¹	0.679±0.049	0.390±0.012 ¹	31.655±1.412 ¹	3.543±0.062 ¹⁰	ND	3.364±0.045 ¹⁰	4.757±0.256 ¹	ND	2.752±0.165 ¹⁰	0.490±0.009 ^{1b}	0.932±0.781 ¹	1.757±0.475
T13	0.284±0.013 ¹	5.197±0.051 ^{1d}	0.577±0.019 ¹	0.605±0.439 ¹	0.402±0.118 ¹	18.686±0.543 ¹⁰	2.241±0.043 ¹	ND	4.130±0.060 ¹⁰	3.550±0.766 ¹⁰	ND	1.170±0.049 ¹⁰	0.880±0.024 ^{1b}	0.851±0.053 ¹⁰	0.432±0.058
T14	0.260±0.006 ^{1d}	3.528±0.112 ¹⁰	0.390±0.000 ^{1e}	ND	ND	31.596±1.326 ¹	3.553±0.161 ¹⁰	17.112±0.961 ¹	0.742±0.472 ¹	3.753±0.438 ¹	ND	1.732±0.156 ¹⁰	0.344±0.016 ^{1b}	0.000±0.000	2.700±0.111
T15	0.287±0.031 ¹	7.228±0.029 ¹	0.513±0.007 ¹	0.953±0.010 ^{1b}	0.496±0.004 ¹	16.140±0.090 ¹⁰	ND	ND	2.694±0.175 ¹⁰	3.734±0.249 ¹	ND	0.891±0.049 ¹⁰	0.608±0.012 ^{1b}	1.905±0.052 ¹	0.321±0.010

注: ND:未检出,下同。

表 4 牡丹花朵茶主要功能活性成分含量

Table 4 Contents of major functional active compounds in tree peony flower teas

品种	没食子酸	矢车菊素-3,5-葡萄糖苷		原花青素B ₁	矢车菊素-半乳糖苷		表没食子酸儿茶素	矢车菊素-芸香糖苷		儿茶素	原花青素B ₂	表儿茶素	花旗松素	苯甲酸	圣草酚	柚皮素	芦丁
		mg/g	mg/g		mg/g	mg/g		mg/g	mg/g								
T1	0.231±0.011 ^{bc}	3.879±2.642 ^{cd}	0.894±0.464 ^{de}	0.617±0.012	0.385±0.042 ^b	25.035±16.349 ^d	3.224±1.602 ^{abc}	61.582±10.086 ^e	1.098±0.621 ^{de}	5.179±2.100 ^{ab}	ND	2.845±0.905 ^{de}	0.419±0.056 ^e	4.827±2.218 ^b	7.020±1.436 ^{bc}		
T2	0.204±0.003 ^{abc}	3.142±0.340 ^{cd}	0.489±0.040 ^{de}	0.567±0.067	0.342±0.026 ^b	25.463±3.046 ^b	3.057±0.466 ^{abc}	12.264±1.205 ^b	ND	2.521±0.220 ^{bc}	ND	ND	ND	1.537±0.400 ^c	ND		
T3	0.223±0.001 ^{bcd}	2.142±0.079 ^{cd}	0.592±0.005 ^{de}	ND	ND	10.001±0.104 ^b	ND	ND	9.834±0.929 ^d	1.941±0.187 ^e	5.554±0.375 ^e	2.547±0.093 ^{bc}	ND	0.171±0.025 ^e	0.319±0.029 ^d		
T4	0.255±0.042 ^{ab}	5.724±2.680 ^{bcd}	0.949±0.484 ^{de}	0.675±0.016	0.347±0.024 ^b	87.313±52.639 ^d	10.443±4.710 ^e	57.830±36.642 ^e	18.880±8.658 ^e	4.548±1.713 ^{abc}	3.341±0.038 ^d	2.069±0.269 ^e	0.844±0.221 ^{abc}	0.669±0.266 ^e	3.246±1.626 ^{bc}		
T5	0.255±0.018 ^{ab}	18.995±17.763 ^a	9.043±1.142 ^b	ND	ND	ND	9.435±8.047 ^e	12.500±0.729 ^b	5.529±3.531 ^{abcd}	6.371±3.773 ^a	ND	3.648±1.366 ^e	1.143±0.538 ^e	0.652±0.833 ^e	15.579±0.708 ^a		
T6	0.208±0.042 ^{abc}	15.584±11.698 ^{ab}	ND	0.649±0.172	0.370±0.075 ^b	ND	ND	13.607±2.958 ^b	3.531±0.709 ^{abcd}	4.614±0.726 ^{bc}	4.596±0.262 ^b	1.930±0.070 ^e	1.107±0.284 ^{ab}	1.142±0.634 ^e	7.569±4.619 ^b		
T7	0.249±0.043 ^b	15.226±0.054 ^{ab}	9.272±0.093 ^b	ND	ND	ND	ND	ND	6.187±0.051 ^{bcd}	3.557±0.100 ^{cc}	ND	2.568±0.292 ^{bc}	0.835±0.022 ^{abc}	ND	4.922±0.283 ^d		
T8	ND	2.564±0.311 ^{cd}	0.881±0.049 ^{de}	0.588±0.046	0.325±0.018 ^b	13.262±0.994 ^b	1.565±0.029 ^{bc}	ND	4.513±1.435 ^{abcd}	2.464±0.416 ^{bc}	ND	2.756±0.194 ^{abc}	ND	1.845±0.318 ^e	1.176±0.138 ^{de}		
T9	0.210±0.003 ^{abc}	15.256±0.506 ^{ab}	11.678±0.556 ^d	ND	ND	ND	ND	8.909±0.736 ^b	0.992±0.106 ^e	2.846±0.102 ^{bc}	ND	ND	0.387±0.126 ^d	0.446±0.268 ^c	ND		
T10	ND	0.344±0.000 ^d	ND	ND	ND	26.309±0.083 ^b	2.691±0.454 ^{abc}	ND	7.035±0.028 ^{bc}	2.420±0.193 ^{cc}	ND	2.696±0.248 ^{abc}	0.742±0.017 ^{abcd}	0.934±0.023 ^e	0.042±0.004 ^d		
T11	0.221±0.013 ^{bcd}	0.503±0.202 ^d	0.301±0.121 ^e	ND	ND	12.881±5.426 ^b	0.984±0.042 ^{bc}	ND	0.793±0.346 ^e	2.731±2.080 ^{cc}	0.737±0.188 ^e	0.812±0.889 ^d	0.400±0.111 ^d	13.451±3.201 ^a	1.032±0.503 ^d		
T12	0.193±0.009 ^{abc}	4.210±0.268 ^{cd}	3.557±0.372 ^c	0.613±0.032	0.333±0.008 ^b	10.987±0.305 ^b	1.465±0.080 ^{bc}	5.273±0.244 ^b	ND	3.630±0.174 ^{cc}	ND	ND	ND	3.927±0.743 ^b	ND		
T13	0.180±0.000 ^f	3.863±0.189 ^{cd}	0.479±0.017 ^e	0.518±0.143	0.312±0.072 ^b	11.290±1.427 ^b	1.525±0.155 ^{bc}	21.406±1.767 ^d	7.456±0.963 ^{bc}	2.472±0.082 ^{cc}	4.061±0.004 ^e	2.155±0.085 ^{de}	0.734±0.056 ^{cd}	ND	0.313±0.009 ^d		
T14	0.287±0.003 ^a	11.371±0.300 ^{abc}	2.547±0.335 ^d	ND	ND	20.115±0.430 ^b	8.717±8.768 ^{ab}	ND	2.412±0.113 ^{cd}	2.881±1.295 ^{bc}	ND	3.131±0.116 ^{bc}	1.194±0.081 ^d	0.581±0.150 ^f	4.191±0.140 ^d		
T15	0.189±0.012 ^{de}	4.022±0.258 ^{cd}	1.160±0.296 ^c	1.450±1.428	1.009±0.585 ^e	4.175±0.104 ^b	0.742±0.024 ^c	6.991±0.243 ^b	ND	3.330±0.056 ^{cc}	2.591±0.027 ^e	ND	ND	4.880±0.022 ^b	ND		

表 5 牡丹花瓣茶主要功能活性成分含量

Table 5 Contents of major functional active compounds in tree peony petal teas

品种	没食子酸	矢车菊素-3,5-葡萄糖苷		原花青素B ₁	矢车菊素-半乳糖苷		表没食子酸儿茶素	矢车菊素-芸香糖苷		儿茶素	原花青素B ₂	表儿茶素	花旗松素	苯甲酸	圣草酚	柚皮素	芦丁
		mg/g	mg/g		mg/g	mg/g		mg/g	mg/g								
T1	0.264±0.000 ^f	5.657±0.059 ^f	ND	1.064±0.091 ^a	0.528±0.012 ^a	3.953±0.038 ^f	0.712±0.004 ^f	ND	0.655±0.018 ^{bc}	3.028±0.515 ^{def}	1.647±0.397 ^{ab}	1.621±0.085 ^{bc}	ND	1.907±0.053 ^e	0.622±0.009 ^d		
T2	0.224±0.001 ^a	1.775±0.000 ^f	0.476±0.003 ^d	1.062±0.038 ^e	0.553±0.020 ^a	29.830±0.605 ^b	3.327±0.022 ^e	ND	12.007±0.232 ^a	3.873±0.299 ^{cd}	1.771±0.020 ^f	ND	ND	1.800±0.094 ^d	ND		
T3	0.445±0.434 ^a	1.205±0.094 ^f	ND	ND	ND	2.208±0.288 ^b	0.535±0.031 ^f	4.410±0.433 ^e	2.274±1.817 ^{de}	0.981±0.220 ^b	ND	1.570±0.047 ^e	ND	0.197±0.001 ^e	1.915±1.134 ^{cd}		
T4	0.211±0.005 ^a	1.354±0.092 ^f	0.376±0.033 ^d	0.500±0.053 ^e	0.298±0.029 ^b	35.004±3.454 ^a	4.105±0.726 ^e	11.127±1.502 ^d	0.025±0.002 ^e	3.466±0.458 ^{abc}	1.895±0.343 ^a	ND	ND	3.047±0.173 ^b	ND		
T5	0.287±0.061 ^a	12.156±2.971 ^a	11.421±2.575 ^a	ND	ND	ND	ND	2.959±0.734 ^e	3.092±0.680 ^f	5.748±0.892 ^d	ND	ND	0.931±0.021 ^f	ND	ND		
T6	0.233±0.003 ^a	37.453±1.095 ^a	ND	0.500±0.053 ^b	0.348±0.031 ^{ab}	ND	3.861±0.117 ^{ab}	ND	2.760±0.076 ^{cd}	2.995±0.025 ^{def}	ND	2.013±0.503 ^{ab}	ND	ND	2.349±0.097 ^{cd}		
T7	0.308±0.005 ^a	20.587±0.222 ^c	3.634±0.028 ^{bc}	ND	ND	17.168±0.178 ^e	2.044±0.015 ^d	ND	4.807±0.090 ^b	4.542±2.000 ^{bc}	ND	2.230±0.040 ^b	ND	ND	5.032±0.033 ^b		
T8	0.263±0.001 ^a	6.221±0.025 ^f	0.506±0.001 ^d	0.500±0.053 ^d	0.235±0.002 ^b	4.781±0.229 ^f	3.648±0.023 ^{bc}	42.437±0.435 ^a	1.596±0.001 ^{de}	3.573±0.449 ^{ab}	ND	1.087±0.093 ^d	ND	ND	ND		
T9	0.378±0.036 ^a	28.148±4.062 ^a	4.551±3.503 ^b	ND	ND	ND	ND	ND	0.694±0.097 ^{bc}	5.253±0.343 ^{ab}	ND	1.497±0.292 ^{cd}	ND	ND	41.778±4.023 ^a		
T10	0.214±0.004 ^a	1.168±0.014 ^f	ND	ND	ND	4.214±0.262 ^f	1.692±0.468 ^e	ND	0.895±0.003 ^{ab}	4.584±0.376 ^{bc}	ND	1.598±0.362 ^{bc}	ND	ND	3.173±0.013 ^{bc}		
T11	0.216±0.001 ^a	0.358±0.049 ^f	ND	ND	ND	15.175±0.128 ^d	1.652±0.011 ^{de}	ND	0.846±0.037 ^{bc}	2.796±0.122 ^{def}	ND	2.081±0.535 ^e	0.337±0.009 ^b	9.577±0.089 ^a	2.752±2.162 ^{cd}		
T12	0.368±0.009 ^a	16.486±0.264 ^d	2.165±0.000 ^{cd}	ND	ND	6.364±0.237 ^f	0.333±0.017 ^e	ND	1.632±0.018 ^{cd}	2.628±0.020 ^{ef}	ND	1.578±0.100 ^{bc}	ND	ND	2.607±0.078 ^{cd}		
T13	0.169±0.000 ^f	0.450±0.202 ^f	0.166±0.049 ^d	ND	0.253±0.325 ^b	0.356±0.005 ^f	1.348±0.066 ^f	ND	0.158±0.019 ^{bc}	1.298±0.228 ^{ab}	ND	0.489±0.001 ^e	ND	ND	0.565±0.075 ^d		
T14	0.339±0.010 ^a	10.258±0.568 ^{ab}	ND	ND	0.000±0.000	10.973±0.089 ^f	1.348±0.066 ^f	15.914±0.951 ^e	1.594±0.078 ^{de}	3.531±0.285 ^{de}	ND	2.397±0.223 ^a	ND	ND	4.094±0.244 ^{cd}		
T15	0.224±0.003 ^a	10.539±0.326 ^c	0.176±0.010 ^d	0.500±0.053 ^e	0.127±0.004 ^b	0.648±0.004 ^f	ND	22.035±5.173 ^b	0.063±0.001 ^e	2.263±1.308 ^{ab}	1.160±0.024 ^d	0.376±0.341 ^e	0.347±0.038 ^b	1.685±0.248 ^d	ND		

表 6 芍药花蕾茶主要功能活性成分含量

Table 6 Contents of major functional active compounds in herbaceous peony bud teas

mg/g															
品种	没食子酸	矢车菊素-3,5-葡萄糖苷	矢车菊素-阿拉伯糖苷	原花青素B ₁	矢车菊素-半乳糖苷	表没食子酸儿茶素	矢车菊素-芸香糖苷	儿茶素	原花青素B ₂	表儿茶素	花旗松素	圣草酚	柚皮素	芦丁	
H1	0.247±0.002 ^{bc}	0.574±0.004 ^a	0.441±0.016 ^{bc}	1.825±0.017 ^{bc}	0.891±0.007 ^{bcd}	ND	4.853±0.039 ^b	34.006±0.549 ^e	20.632±0.441 ^a	5.733±0.041 ^c	ND	ND	ND	0.554±0.002 ^{bc}	
H2	0.204±0.065 ^c	8.169±0.204 ^{bc}	0.557±0.023 ^{cd}	1.751±0.090 ^{bcd}	0.836±0.013 ^{bc}	22.595±0.663 ^f	2.555±0.095 ^f	ND	2.482±0.169 ^{ab}	2.121±0.030 ^d	ND	ND	0.125±0.030 ^f	0.656±0.035 ^{de}	
H3	0.165±0.004 ^c	0.534±0.018 ^b	ND	0.967±0.016 ^c	0.863±0.002 ^{abc}	19.781±0.653 ^b	3.109±0.090 ^f	ND	1.992±0.031 ^{abc}	1.288±0.066 ^d	2.054±0.024 ^b	ND	0.103±0.006 ^f	ND	
H4	0.245±0.001 ^{bc}	1.062±0.033 ⁱ	ND	0.626±0.015 ^e	0.346±0.003 ^b	21.948±0.037 ^f	2.511±0.005 ^f	ND	0.764±0.001 ^j	0.787±0.055 ^d	ND	0.852±0.013 ^a	3.441±0.088 ^b	0.787±0.051 ^{de}	
H5	0.369±0.193 ^a	7.380±0.083 ^d	0.472±0.015 ^{de}	1.429±0.034 ^{abcd}	0.730±0.047 ^{ef}	27.727±0.699 ^f	3.092±0.067 ^f	ND	2.260±0.046 ^{ab}	6.771±0.038 ^c	ND	0.533±0.006 ^e	1.811±0.661 ^{cd}	ND	
H6	0.233±0.001 ^{bc}	1.198±0.019 ^j	0.362±0.002 ^{def}	1.224±0.002 ^{abcd}	0.619±0.000 ^{de}	ND	3.519±0.046 ^f	28.911±0.684 ^f	2.427±0.029 ^{ab}	5.513±0.058 ^c	ND	0.378±0.001 ^f	1.760±0.025 ^{cd}	1.370±0.044 ^e	
H7	ND	3.435±0.028 ^f	0.436±0.014 ^{de}	2.089±0.005 ^b	1.015±0.010 ^b	32.183±0.640 ^f	3.500±0.104 ^f	81.514±0.800 ^f	3.359±0.068 ^{de}	9.324±0.021 ^b	ND	ND	1.489±0.325 ^{def}	0.890±0.158 ^d	
H8	0.248±0.024 ^{bc}	0.701±0.009 ^{ab}	ND	ND	ND	25.593±0.331 ^f	2.881±0.035 ^{ab}	0.000±0.000	2.770±0.071 ^{ab}	2.594±1.250 ^d	ND	ND	1.152±0.118 ^{de}	ND	
H9	0.203±0.053 ^c	5.098±0.168 ^c	1.232±0.678 ^b	1.820±0.135 ^{bcd}	0.878±0.055 ^{bcd}	37.163±2.056 ^f	4.116±0.197 ^f	10.832±0.600 ^f	6.426±3.588 ^d	11.005±0.957 ^b	4.815±0.771 ^a	ND	4.510±0.147 ^a	ND	
H10	0.187±0.002 ^c	1.016±0.058 ^j	0.356±0.012 ^{def}	1.199±0.054 ^{cd}	0.627±0.025 ^{fg}	ND	3.603±0.245 ^f	34.491±0.669 ^e	5.493±0.333 ^c	5.713±0.060 ^f	ND	0.406±0.007 ^e	1.457±1.321 ^{def}	1.661±0.160 ^{bc}	
H11	0.233±0.025 ^{bc}	8.382±0.105 ^{bc}	0.759±0.008 ^e	4.574±1.687 ^a	1.724±0.069 ^a	34.974±1.276 ^f	3.800±0.128 ^f	86.827±2.774 ^a	21.551±0.049 ^a	13.429±0.463 ^a	ND	0.824±0.033 ^b	3.189±0.097 ^b	1.489±0.044 ^e	
H12	0.325±0.002 ^a	4.838±0.191 ^f	0.967±0.027 ^a	1.852±0.083 ^{bc}	0.907±0.034 ^{bc}	60.222±0.234 ^a	6.333±0.027 ^a	ND	10.390±0.119 ^f	4.568±3.668 ^f	2.619±1.636 ^b	ND	2.403±0.253 ^c	0.493±0.002 ^e	
H13	0.193±0.003 ^c	8.007±0.846 ^c	0.533±0.072 ^{cd}	2.030±0.285 ^a	0.977±0.126 ^{bc}	31.157±0.206 ^a	3.940±0.670 ^{ab}	60.809±0.830 ^a	4.439±1.436 ^f	4.968±3.444 ^f	4.922±0.726 ^a	0.540±0.006 ^e	3.290±0.136 ^c	2.996±0.669 ^a	
H14	0.169±0.005 ^c	ND	0.126±0.010 ^f	ND	0.252±0.322 ^b	ND	0.338±0.022 ^c	ND	0.155±0.002 ^j	1.284±0.019 ^d	ND	ND	ND	ND	
H15	0.238±0.003 ^{bc}	2.387±0.062 ^b	0.443±0.009 ^{de}	1.130±0.042 ^{def}	0.568±0.011 ^g	ND	4.032±0.010 ^{cd}	28.272±0.185 ^f	12.052±0.047 ^b	5.263±0.176 ^c	ND	0.507±0.009 ^d	ND	1.838±0.008 ^b	
H16	0.223±0.001 ^c	15.426±0.011 ^a	0.203±0.000 ^f	0.631±0.133 ⁱ	0.346±0.056 ^c	23.143±0.141 ^f	2.638±0.011 ^{bc}	3.695±0.023 ^b	1.563±0.046 ^{hi}	6.407±0.293 ^c	ND	ND	2.054±0.028 ^{cd}	ND	

表 7 芍药花朵茶主要功能活性成分含量
Table 7 Contents of major functional active compounds in herbaceous peony flower teas

mg/g														
品种	没食子酸	矢车菊素- 3,5-葡萄糖苷	矢车菊素- 阿拉伯糖苷	原花青素B ₁	矢车菊素- 半乳糖苷	表没食子酸 儿茶素	矢车菊素- 芸香糖苷	儿茶素	原花青素B ₂	表儿茶素	花旗松素	圣草酚	柚皮素	芦丁
H1	0.190±0.018 ^d	0.533±0.002 ^c	0.119±0.007 ^b	3.255±0.034 ^a	1.533±0.015 ^a	17.714±0.662 ^{cd}	2.086±0.069 ^{abcd}	98.267±0.143 ^b	16.776±0.567 ^a	8.363±5.684 ^{hbc}	6.149±0.070 ^{ab}	0.693±0.002 ^{def}	0.142±0.002 ^b	1.447±0.204 ^{ac}
H2	0.184±0.011 ^{de}	10.969±8.406 ^{cd}	0.194±0.006 ^c	1.166±0.128 ^c	0.593±0.058 ^b	11.925±1.957 ^{bc}	1.619±0.223 ^{efg}	2.758±0.891 ^b	1.999±0.161 ^{efgh}	13.465±1.224 ^a	ND	0.848±0.035 ^d	2.483±0.129 ^f	0.354±0.507 ^g
H3	0.168±0.002 ^{de}	6.355±0.280 ^{de}	0.732±0.063 ^b	1.453±0.331 ^{de}	0.824±0.115 ^c	26.085±2.823 ^b	2.765±0.449 ^b	ND	3.792±0.448 ^b	13.299±1.763 ^a	ND	1.132±0.065 ^{ab}	4.358±0.366 ^{cd}	3.692±0.387 ^a
H4	0.218±0.002 ^c	0.246±0.017 ^c	0.355±0.013 ^{de}	ND	0.042±0.019 ^c	9.234±0.179 ^{ab}	1.217±0.049 ^{ab}	ND	1.241±0.477 ^c	5.852±0.281 ^{efgh}	4.044±0.025 ^{de}	6.603±0.395 ^d	5.631±0.847 ^b	1.443±0.093 ^{def}
H5	0.249±0.004 ^d	16.410±0.272 ^{bc}	0.601±0.015 ^c	2.337±0.201 ^b	1.057±0.046 ^b	23.486±0.287 ^{hbc}	2.522±0.266 ^{bcd}	117.481±2.912 ^a	1.575±0.520 ^{ab}	10.927±0.818 ^{ab}	ND	0.774±0.022 ^d	3.538±0.149 ^f	1.230±0.222 ^{cd}
H6	0.222±0.002 ^c	1.366±0.190 ^c	ND	2.154±0.032 ^c	1.040±0.017 ^{bc}	21.263±1.685 ^{hbc}	2.404±0.213 ^{bcd}	ND	3.823±0.659 ^a	9.336±0.337 ^{bcd}	5.634±0.486 ^{bc}	0.801±0.037 ^d	ND	2.027±0.287 ^{cd}
H7	0.193±0.004 ^d	2.270±0.131 ^c	0.294±0.008 ^{ab}	0.536±0.023 ^d	0.311±0.008 ^b	9.431±1.517 ^{ab}	ND	ND	2.571±0.145 ^{bc}	5.007±0.225 ^{efgh}	3.495±0.365 ^c	0.731±0.080 ^{ab}	4.202±0.086 ^d	1.469±0.233 ^{bc}
H8	0.274±0.008 ^b	30.525±2.285 ^a	0.280±0.014 ^b	0.701±0.214 ^d	0.379±0.100 ^b	5.339±0.716 ^f	0.880±0.073 ^{bc}	81.688±9.759 ^d	1.776±0.169 ^{ghi}	1.640±0.010 ^j	ND	0.859±0.018 ^{cd}	1.831±0.399 ^g	0.844±0.029 ^{gh}
H9	0.193±0.002 ^d	1.023±0.142 ^c	0.329±0.023 ^{ab}	ND	ND	34.288±4.432 ^a	3.777±0.460 ^a	ND	3.560±0.422 ^c	5.113±0.350 ^{efgh}	5.234±0.269 ^{bc}	0.869±0.068 ^{cd}	1.794±0.823 ^g	ND
H10	0.292±0.015 ^d	10.830±0.900 ^{cd}	1.099±0.149 ^a	3.329±0.118 ^a	1.505±0.012 ^a	19.293±13.422 ^{bc}	2.033±1.249 ^{def}	ND	13.129±1.293 ^{bc}	4.654±0.210 ^{ghi}	6.366±0.132 ^a	0.529±0.012 ^{bc}	4.788±0.545 ^c	2.645±0.501 ^b
H11	0.214±0.031 ^c	1.602±0.436 ^c	ND	1.611±0.530 ^d	0.805±0.248 ^c	18.262±4.526 ^c	2.158±0.443 ^{cde}	ND	2.101±0.358 ^{efgh}	2.016±0.579 ^{ij}	5.835±1.790 ^{ab}	1.065±0.042 ^b	0.709±0.252 ^b	2.665±0.952 ^b
H12	0.248±0.020 ^{cd}	7.183±0.089 ^{de}	0.540±0.006 ^{cd}	2.200±0.095 ^c	1.053±0.047 ^{bc}	11.695±0.403 ^{bc}	1.539±0.053 ^g	0.333±0.020 ^b	5.005±0.023 ^d	3.442±0.181 ^{hij}	ND	0.588±0.234 ^{efg}	1.859±0.040 ^f	0.953±0.030 ^{efg}
H13	0.300±0.001 ^a	10.318±0.204 ^{cd}	ND	1.940±0.031 ^c	0.933±0.005 ^{cd}	24.895±0.247 ^{bc}	2.795±0.024 ^b	90.489±1.943 ^c	12.591±0.192 ^c	3.344±0.165 ^{ghi}	6.063±0.102 ^{ab}	ND	5.636±0.091 ^b	0.482±0.020 ^f
H14	0.295±0.008 ^a	10.826±0.920 ^{cd}	0.524±0.043 ^c	ND	ND	24.154±1.626 ^{bc}	2.672±0.145 ^{bc}	66.011±0.934 ^c	2.231±0.965 ^{efgh}	5.883±4.166 ^{efgh}	4.711±0.284 ^{cd}	1.038±0.034 ^{bc}	0.141±0.032 ^b	3.616±0.460 ^f
H15	0.264±0.003 ^{bc}	34.112±1.076 ^a	0.289±0.003 ^{ab}	ND	ND	18.328±0.602 ^c	2.166±0.053 ^{cde}	47.218±1.136 ^c	2.621±1.031 ^f	7.752±0.284 ^{def}	ND	0.466±0.018 ^b	1.619±0.410 ^f	1.876±0.054 ^d
H16	0.226±0.004 ^d	6.412±0.147 ^{de}	0.389±0.005 ^d	1.313±0.088 ^{de}	0.664±0.035 ^{fg}	8.570±6.502 ^{ghij}	1.988±0.124 ^{def}	34.592±0.742 ^c	13.477±0.176 ^b	7.103±0.738 ^{efgh}	6.675±0.497 ^a	0.700±0.055 ^{def}	8.361±0.298 ^a	2.626±0.567 ^{bc}
H17	0.244±0.002 ^d	22.331±16.679 ^b	ND	1.510±0.009 ^d	0.747±0.005 ^{cd}	2.838±0.084 ^d	0.598±0.008 ^b	79.546±0.402 ^d	4.151±0.018 ^c	10.441±0.024 ^{bc}	ND	0.483±0.029 ^a	2.043±0.030 ^{fg}	ND

表 8 芍药花瓣茶主要功能活性成分含量
Table 8 Contents of major functional active compounds in herbaceous peony petal teas

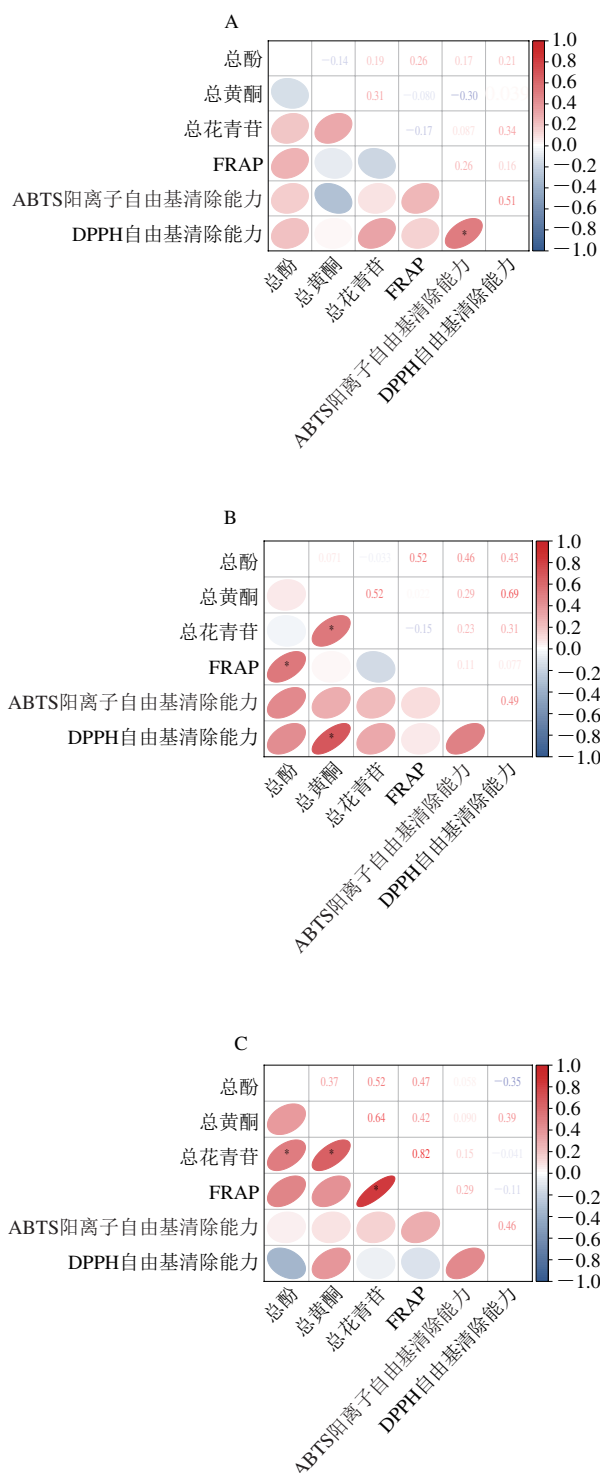
														mg/g
品种	没食子酸	矢车菊素-3,5-葡萄糖苷	矢车菊素-阿拉伯糖苷	原花青素B ₁	矢车菊素-半乳糖苷	表没食子酸儿茶素	矢车菊素-芸香糖苷	儿茶素	原花青素B ₂	表儿茶素	花旗松素	圣草酚	柚皮素	芦丁
H1	0.182±0.000 ^b	0.254±0.010 ^b	0.502±0.001 ^b	0.345±0.145 ^{de}	0.239±0.058 ^b	2.324±0.059 ^d	0.532±0.016 ^d	ND	12.142±0.396 ^a	3.325±0.225 ^g	1.990±0.014 ^c	0.425±0.017 ^{cd}	2.162±0.174 ^{de}	ND
H2	0.225±0.014 ^{abhi}	1.375±0.010 ^b	0.437±0.022 ^{ab}	0.684±0.071 ^{efg}	0.362±0.010 ^f	6.326±0.010 ^{cd}	0.448±0.030 ^f	ND	5.475±0.100 ^{bc}	4.311±0.093 ^{ghi}	ND	0.790±0.004 ^a	0.692±0.007 ^{efg}	ND
H3	0.236±0.002 ^{fab}	17.494±0.473 ^c	0.625±0.006 ^c	1.722±0.057 ^{hcd}	0.853±0.025 ^{de}	18.542±1.009 ^{bc}	1.787±1.187 ^{cd}	100.927±2.018 ^a	4.824±0.191 ^{bcd}	18.282±0.851 ^a	ND	0.739±0.376 ^{bc}	4.637±0.104 ^{de}	4.063±0.167 ^a
H4	0.198±0.016 ^{ab}	0.215±0.009 ^b	0.292±0.020 ^b	0.067±0.008 ^f	0.098±0.003 ⁱ	1.737±0.109 ^f	1.122±1.162 ^{defg}	ND	5.435±5.059 ^{bc}	1.806±0.446 ^c	0.885±0.236 ^d	0.389±0.066 ^d	0.928±0.136 ^{efg}	ND
H5	0.311±0.002 ^b	16.169±0.524 ^c	0.777±0.132 ^c	ND	ND	23.813±0.627 ^b	2.736±0.030 ^f	ND	4.667±0.022 ^{bcd}	6.220±3.528 ^{efg}	ND	ND	3.091±0.080 ^{cd}	1.222±0.045 ^c
H6	0.247±0.037 ^{fab}	1.578±0.046 ^{bc}	ND	3.648±1.747 ^c	1.249±0.013 ^a	15.765±0.011 ^{bcd}	1.882±0.020 ^{hbc}	0.448±0.048 ^c	3.101±0.013 ^{cd}	10.626±0.199 ^{cd}	4.120±0.701 ^b	0.948±0.033 ^b	ND	1.166±0.020 ^f
H7	0.255±0.002 ^{efg}	12.144±0.152 ^d	0.217±0.008 ^b	0.777±0.016 ^{efg}	0.425±0.012 ^{fg}	8.768±0.237 ^{def}	0.308±0.062 ^f	0.513±0.102 ^c	4.416±0.165 ^{hbcde}	6.620±0.520 ^{ef}	ND	ND	1.439±0.030 ^{efg}	ND
H8	0.303±0.001 ^{bc}	17.112±0.112 ^c	8.925±0.082 ^a	ND	ND	ND	ND	ND	2.388±0.036 ^{cd}	5.252±0.243 ^{ghi}	ND	0.897±0.022 ^b	0.465±0.112 ^{fg}	ND
H9	0.218±0.029 ^{ghi}	0.877±0.010 ^b	0.287±0.004 ^b	ND	ND	15.543±0.853 ^{hcd}	1.910±0.032 ^{bcd}	ND	1.023±0.200 ^f	5.573±0.256 ^{efg}	1.780±0.023 ^c	ND	17.272±0.281 ^a	ND
H10	0.273±0.063 ^{abc}	29.917±2.061 ^b	0.278±0.013 ^{cd}	0.677±0.010 ^{efg}	0.352±0.032 ^{ab}	3.835±0.607 ^{cd}	0.689±0.068 ^{bc}	6.042±0.375 ^c	3.993±2.025 ^{cd}	10.425±0.013 ^d	ND	ND	2.158±0.006 ^{de}	1.213±0.160 ^f
H11	0.214±0.010 ^{gh}	0.790±0.152 ^b	0.369±0.035 ^{cd}	1.419±0.368 ^{cd}	0.768±0.182 ^c	12.366±0.277 ^{de}	1.563±0.022 ^{def}	ND	2.524±0.517 ^{cd}	10.223±0.037 ^d	ND	1.438±0.599 ^a	4.902±4.182 ^b	2.348±0.178 ^d
H12	ND	10.423±0.135 ^c	0.623±0.005 ^{cd}	2.350±0.040 ^b	1.124±0.018 ^b	ND	2.065±0.040 ^{cd}	37.855±2.526 ^c	10.330±0.180 ^f	12.551±0.370 ^{bc}	ND	0.748±0.028 ^{bc}	2.099±0.074 ^{de}	3.563±0.111 ^b
H13	0.261±0.006 ^{def}	6.123±0.154 ^{de}	0.642±0.050 ^{cd}	0.314±0.417 ^{fg}	0.972±0.023 ^c	8.114±0.080 ^{def}	1.160±0.013 ^{cdefg}	ND	2.506±1.126 ^{cd}	8.143±0.035 ^c	1.206±0.159 ^d	ND	1.095±0.061 ^{efg}	ND
H14	0.255±0.001 ^{efg}	37.379±1.908 ^a	0.389±0.019 ^b	0.926±0.027 ^{def}	0.480±0.016 ^d	7.938±0.822 ^{def}	1.080±0.094 ^{abefg}	6.054±2.294 ^c	1.758±1.327 ^f	12.681±0.017 ^b	ND	ND	1.845±0.263 ^{def}	3.548±0.467 ^b
H15	0.309±0.009 ^b	17.520±3.089 ^b	0.866±0.028 ^b	1.794±0.401 ^{bc}	0.926±0.184 ^{cd}	49.223±20.880 ^a	6.168±1.332 ^c	80.844±18.436 ^b	6.376±0.328 ^b	3.660±0.395 ^{ghi}	ND	ND	1.691±1.030 ^{def}	ND
H16	0.287±0.004 ^{bcd}	7.525±0.661 ^f	0.566±0.020 ^{cd}	1.921±0.096 ^{bc}	0.941±0.042 ^{cd}	15.741±1.374 ^{bcd}	1.538±0.723 ^{abef}	0.277±0.012 ^c	12.020±0.122 ^c	5.458±2.892 ^{gh}	5.832±0.497 ^a	0.888±0.025 ^b	0.047±0.015 ^f	2.899±0.277 ^c
H17	0.344±0.002 ^a	4.845±1.411 ^f	0.308±0.001 ^b	ND	ND	6.416±0.304 ^{cd}	0.977±0.001 ^{fg}	24.416±10.765 ^d	4.780±0.017 ^{bcd}	6.043±2.909 ^{gh}	ND	ND	1.653±0.019 ^{efg}	1.027±0.009 ^f

2.5 抗氧化活性的相关性分析

对总酚、总黄酮、总花青素含量与3种抗氧化活性指标（FRAP、ABTS阳离子自由基清除能力、DPPH自由基清除能力）之间的相关性进行分析。在牡丹中，花瓣各指标间相关性较弱，仅DPPH自由基清除能力与ABTS阳离子自由基清除能力呈显著相关（ $P<0.05$ ）（图14A）。花朵中总黄酮、总花青素与各抗氧化指标存在显著正相关关系（ $P<0.05$ ），总酚与3种抗氧化活性指标均呈正相关（图14B），说明酚类及黄酮类化合

物是牡丹花瓣具有抗氧化能力的重要贡献物质。花蕾的相关性表现也较为突出，其中FRAP与总酚、总黄酮呈正相关，与总花青素显著正相关（ $P<0.05$ ），但三者与ABTS阳离子自由基清除能力相关性较弱（图14C）。芍药总酚含量与3种抗氧化活性指标基本呈正相关，其中花瓣和花朵的相关性更强（图14D~F）。值得注意的是，在芍药花瓣中，总酚与ABTS阳离子自由基清除能力呈显著正相关（ $P<0.05$ ），但与FRAP的相关性极弱，说明酚类化合物在芍药抗氧化作用中具有重要贡献，在不同抗

氧化评价体系中的表现存在差异。花瓣和花朵中的总黄酮则与3种抗氧化指标呈负相关,在花蕾中正相关较强;总花青苷则相反,在花蕾中与3种抗氧化指标的相关性不明显,在花瓣和花朵中则较强,与花瓣中DPPH自由基清除能力呈显著正相关($P<0.05$)。综上,总酚与总黄酮与抗氧化活性指标相关性较强,与牡丹和芍药抗氧化能力联系紧密。



*.显著相关($P<0.05$)。

图14 牡丹花瓣(A)、花朵(B)、花蕾(C)和芍药花瓣(D)、花朵(E)、花蕾(F)花茶抗氧化活性指标相关性分析

Fig. 14 Correlation analysis of antioxidant activity and total phenolic, flavonoid and anthocyanin contents in tree peony petal (A), flower (B), and bud (C) teas, as well as herbaceous peony petal (D), flower (E), and bud (F) teas

2.6 基于PCA的花茶综合评价

采用PCA法对牡丹和芍药各项指标进行综合分析,结果如表9所示。对指标降维标准化后保留5个主成分,其特征值均大于0.9,累计方差贡献率分别达到76.702%和78.619%,能够较好地反映牡丹样品主要指标的综合

变异特征。由表10可知，牡丹PC1与FRAP、 L^* 值呈较强正相关，载荷量分别达到0.931和0.739，与DPPH自由基清除能力（-0.870）、总花青苷（-0.478）呈负相关，表明PC1主要反映样品整体的抗氧化能力及亮度色彩特征。牡丹PC2与总黄酮和总花青苷呈正相关，载荷量分别为0.832与0.593；与 a^* 值同样呈正相关，其载荷量相对较低；但与 L^* 值呈负相关。因此，PC2主要反映总黄酮、花青苷与花色的信息。牡丹PC3在可溶性蛋白（0.711）和还原糖（0.883）上载荷值较高，主要体现了牡丹营养成分积累水平，蛋白与糖含量较高的样品在PC3中表现优异。PC4主要与 a^* 值和 b^* 值呈正相关，载荷量分别为0.733和0.888，PC5中总酚和ABTS阳离子自由基清除能力的载荷量较高，均达到0.8以上，因此PC5主要反映酚类对牡丹抗氧化能力的贡献。芍药PC1主要反映了芍药颜色值，与 L^* 值、 b^* 值呈高度负相关，载荷量分别为-0.826和-0.916，同时与 a^* 值呈正相关（0.899）。PC2与总酚和抗氧化活性指标呈高度正相关，反映芍药样品中酚类物质与抗氧化能力的作用关系。PC3在VC和还原糖上载荷值较高，分别为0.812和0.466，同时PC3与总酚呈负相关，载荷量为-0.546，因此该成分与营养物质积累紧密相关。PC4仅与总黄酮呈显著正相关，载荷量为0.91；PC5仅反映可溶性蛋白，其载荷量高达0.969。

表 9 牡丹和芍药主成分特征值及贡献率

Table 9 Eigenvalues and variance contribution rates of principal components for tree peony and herbaceous peony flower teas						
主成分	牡丹			芍药		
	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
PC1	3.244	27.033	27.033	3.972	33.099	33.099
PC2	2.171	18.095	45.128	2.215	18.454	51.553
PC3	1.528	12.737	57.865	1.311	10.927	62.481
PC4	1.268	10.567	68.432	1.104	8.450	70.931
PC5	0.992	8.271	76.702	0.923	7.688	78.619

表 10 主成分载荷矩阵

Table 10 Principal component loading matrix										
指标	牡丹					芍药				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
VC	-0.128	-0.468	0.528	0.283	0.096	0.122	0.196	0.812	-0.017	0.015
还原糖	0.090	0.000	0.883	-0.113	0.050	0.069	0.436	0.466	-0.324	0.313
可溶性蛋白	-0.180	0.259	0.711	0.334	0.094	0.001	0.059	0.020	0.043	0.969
总酚	-0.052	0.119	-0.067	0.171	0.804	0.251	0.470	-0.546	0.074	0.047
总黄酮	-0.016	0.832	-0.024	0.196	0.047	-0.009	-0.054	-0.101	0.910	0.033
总花青苷	-0.478	0.593	0.205	0.001	0.226	0.333	0.494	0.165	0.393	0.051
FRAP	0.931	0.028	-0.013	0.014	0.200	0.105	0.586	0.192	0.028	0.114
ABTS阳离子自由基清除能力	0.122	-0.013	0.229	-0.042	0.816	0.134	0.841	-0.256	-0.145	-0.052
DPPH自由基清除能力	-0.870	0.005	-0.044	-0.065	0.017	0.182	0.815	0.167	0.007	0.003
L^*	0.739	-0.558	-0.192	-0.120	-0.140	-0.826	-0.235	0.110	-0.303	0.230
a^*	0.024	0.465	0.190	0.733	-0.113	0.899	0.258	0.078	-0.036	0.047
b^*	0.042	-0.032	0.016	0.888	0.192	-0.916	-0.070	-0.053	0.110	-0.115

由图15可知，牡丹和芍药的各品种花瓣、花朵和花蕾样本在主成分空间中均呈一定的分离趋势。牡丹花瓣部位较多分布于第1象限，与VC、总黄酮、FRAP、DPPH自由基清除能力、ABTS阳离子自由基清除能力等多个指标载荷方向一致，花蕾则分布范围相反，呈负相关，部分与总花青苷及 a^* 值方向一致（图15A）。各部位组内离散程度较大，表明不同品种的差异明显。芍药不同花部位在主成分空间中呈现出较为清晰的分离趋势。其中花瓣样本主要分布于PC1正向区域，与FRAP、ABTS阳离子自由基清除能力、DPPH自由基清除能力、可溶性蛋白、VC及还原糖等指标载荷方向一致（图15B），表明花瓣中抗氧化能力与营养成分水平较高。花朵样本同样分布在PC1正向区域，同时与总酚正载荷方向一致，多项指标较为均衡。花蕾样本的分布相对离散，主要分布于第3象限，部分样本沿总黄酮载荷方向偏移。各部位组内差异同样较为明显，不同品种间差异显著（ $P<0.05$ ）。

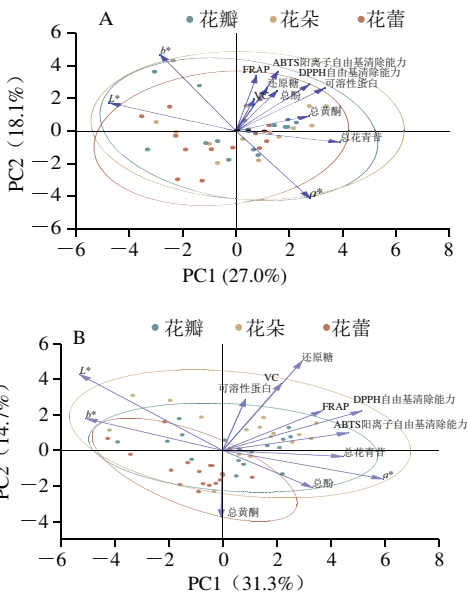


图 15 不同品种牡丹（A）、芍药（B）PC1、PC2得分图
Fig. 15 PC1 versus PC2 score plots of bud, flower and petal teas of tree peony (A) and herbaceous peony (B)

牡丹和芍药分别以各自PC1、PC2、PC3、PC4、PC5对应的方差贡献率作为权重，结合主成分得分构建品质评价模型。牡丹评价模型 $F=0.270 \times PC1 + 0.181 \times PC2 + 0.127 \times PC3 + 0.106 \times PC4 + 0.083 \times PC5$ 。芍药评价模型 $F=0.331 \times PC1 + 0.185 \times PC2 + 0.109 \times PC3 + 0.085 \times PC4 + 0.077 \times PC5$ 。将牡丹和芍药各指标代入评价公式进行计算，结果如表11、12所示。牡丹花瓣茶T11、T10、T5综合评价排名位于前三，总分分别为0.998、0.351、0.148，花朵茶综合品质最高的是T11、T7、T5，花蕾茶综合品质最高的是T2、T11、T10。芍药花瓣茶中H14、

H13、H3综合品质最高，H14、H8、H12的花朵茶品质最优，花蕾茶中综合表现最优的则是H12、H2、H11。

表 11 牡丹花茶综合评价

Table 11 Comprehensive evaluation of tree peony flower teas

品种	花瓣茶		花朵茶		花蕾茶	
	总分	综合排序	总分	综合排序	总分	综合排序
T1	-0.207	13	-0.404	15	-0.628	14
T2	-0.025	6	0.364	4	0.904	1
T3	-0.185	12	0.124	6	-0.692	15
T4	-0.348	14	-0.188	11	-0.324	12
T5	0.148	3	0.403	3	-0.133	6
T6	-0.047	8	-0.020	9	-0.048	5
T7	0.130	4	0.563	2	0.161	4
T8	-0.079	10	-0.248	13	-0.259	11
T9	-0.055	9	0.096	7	-0.143	7
T10	0.351	2	-0.051	10	0.184	3
T11	0.998	1	1.059	1	0.387	2
T12	0.037	5	0.005	8	-0.168	9
T13	-0.100	11	-0.209	12	-0.339	13
T14	-0.027	7	0.204	5	-0.235	10
T15	-0.504	15	-0.289	14	-0.165	8

表 12 芍药花茶综合评价

Table 12 Comprehensive evaluation of herbaceous peony flower teas

品种	花瓣茶		花朵茶		花蕾茶	
	总分	综合排序	总分	综合排序	总分	综合排序
H1	-0.451	15	-0.603	16	-0.640	15
H2	0.394	6	0.346	6	0.135	2
H3	0.422	3	0.190	10	-0.268	13
H4	-0.639	16	-0.309	15	-0.960	17
H5	0.297	8	0.291	8	-0.108	6
H6	-0.045	13	-0.122	14	-0.190	9
H7	0.066	12	-0.055	13	-0.145	8
H8	0.407	4	0.603	2	-0.210	11
H9	-0.796	17	-0.967	17	-0.810	16
H10	0.395	5	0.376	4	-0.209	10
H11	0.138	11	0.087	12	0.008	3
H12	0.252	10	0.407	3	0.246	1
H13	0.441	2	0.349	5	-0.120	7
H14	0.659	1	0.638	1	-0.056	4
H15	-0.201	14	0.333	7	-0.279	14
H16	0.271	9	0.152	11	-0.219	12
H17	0.361	7	0.211	9	-0.073	5

3 讨论

牡丹和芍药种质资源丰富，品种类型多样。自古便有食用的传统，如牡丹饼、花粥、花酒等。现代研究表明，其花瓣和花蕊富含钙、铁、锌等微量元素以及多酚类、黄酮类等抗氧化活性物质，具有润肺清热、延缓衰老、降胆固醇等多种保健作用^[18]。随着功能性饮品的需求增加，牡丹和芍药在花茶领域展现出较高的应用潜力和开发价值。因此，对不同品种牡丹与芍药花茶原料进行综合评价，可为品种遴选与产品开发提供依据，并推动牡丹与芍药由观赏向食用和药用方向转型。

花茶评价基于感官、理化指标和功能成分等方面，如有机酸、氨基酸、糖类及多酚类、黄酮类化合物、抗氧化能力等。研究显示，茉莉花茶等级越高，茶多酚、咖啡碱和抗氧化能力越优^[19]。而不同玫瑰花茶中黄酮类等活性成分的含量及其抗氧化活性存在差异，且二者显著相关，说明功能性成分和生物活性指标可作为花茶品质评价的重要依据^[20]。相较常见的花茶，牡丹与芍药在花型、香气和保健价值方面更优势，具有较大开发空间。对20种花茶的综合评估显示，牡丹花茶的抗氧化活性位居前5，其黄酮类化合物和总多酚的含量与抗氧化能力高度相关^[21]。此外，牡丹花中含有果胶，具备调节肠道健康、降低胆固醇的效用^[22]。芍药花中的芍药苷、氧化芍药苷和芍药内酯苷等活性成分，可有效缓解细胞氧化应激，抑制黑色素合成并促进美白^[23]。

花茶感官品质主要受外观形态、香气、汤色和风味的影 响。类黄酮是影响牡丹和芍药呈色的关键色素之一。短时间的微波干燥可使酶失活，从而有效保留较好的感官品质和更多功能性成分^[24]。但加热可能诱导类黄酮物质出现氧化和褐变，影响干花茶的色泽。同时表没食子酸与黄酮醇的络合也可能加剧这一过程^[25]。本研究发现，干花茶形态颜色值整体亮度偏低，牡丹和芍药中均普遍存在矢车菊素糖苷类物质，如矢车菊素-3,5-葡萄糖苷，其具有不稳定性^[26]，加热易发生热降解及非酶褐变^[27]，与颜色测定结果相印证。感官评价显示，完整、色泽鲜艳的样本综合得分更高，评价者普遍偏好色泽明艳、花型饱满的样品。

不同品种及花朵部位在功能成分和感官特征上差异显著^[28-29]。本实验中牡丹和芍药各品种间理化性质存在差异，与遗传背景复杂性相关^[6]。PCA结果显示，不同品种的样本点在二维空间中广泛分布，形成了不同程度的离散趋势（图15），表明其品质性状具有丰富的多样性。单因素方差比较结果显示，在关键指标如总酚含量、总黄酮含量及FRAP等方面，品种间的差异均达到了显著水平（ $P<0.05$ ）。例如，牡丹品种T7、T13等总酚含量显著高于品种T10、T3（图8）。推测不同品种之间具有丰富的形态多样性，同时也伴随着不同的化学成分，品种间的遗传差异推动了多种次生代谢产物的合成^[30]。干花茶含有丰富的功能成分和抗氧化活性成分，推测加工工艺（如干燥处理）促进样品中生物活性化合物积累^[31]，推动多酚类化合物和黄酮类化合物在高温下由结合态转化为游离态，这一趋势与Choi等^[32]在香菇热处理研究中类似。同时该过程可能让植物的细胞壁发生热变性，结构松散，从而影响其可提取性，使黄酮类化合物和多酚物质更易释放^[33]。此外，在干燥过程中水分的大量蒸发会导致功能成分浓缩，从而提升其抗氧化能力。本研究中的

FRAP、ABTS阳离子自由基清除能力和DPPH自由基清除能力与黄酮类物质、总酚含量显著相关,进一步证实了这一机制。儿茶素、矢车菊素糖苷、表没食子酸等物质之间的协同作用也显著提升了样品的抗氧化性能^[34-35]。

同一牡丹和芍药品种的不同部位在功能性成分含量方面存在显著差异,进而影响花茶的品质表现和口感特征。Li Sen等^[36]在对萱草的研究中发现,黄酮类化合物主要富集于花瓣区域,且其含量显著高于花萼对应区域。本研究中整花的总黄酮含量高于花瓣和花蕾,这一现象可能源于整花样本中不仅包含花瓣,还包括花药、花丝、花萼等其他部位。花瓣部位的还原糖含量高于花朵和花蕾,这可能与花瓣在发育过程中承担富集色素和糖类物质的功能有关,花瓣含有的营养物质与牡丹、芍药花朵呈色关系密切^[37]。高含量的酚类、黄酮类物质是茶水的重要活性成分,是支撑牡丹、芍药作为花茶等健康食用产品的基础,其不仅影响茶的口感、鲜度和风味,与茶水提取物协同作用具有降血糖的功效^[38]。牡丹花蕾的总酚含量较高(图8),其ABTS阳离子自由基清除能力也高于花朵和花瓣部位(图12),这可能与花蕾阶段是植物最活跃的阶段之一有关,此时生理活性较高,为了生长或抵御胁迫环境,花蕾会合成较多的抗氧化活性成分。胡喜兰等^[39]对不同时期芍药花成分进行测定,发现花蕾的多酚含量最高,表现较强的抗氧化能力。这一结论在望春玉兰花蕾^[40]的研究中也得到印证,从望春玉兰花蕾提取的26种生物活性化合物中,黄酮类和多酚类物质含量最高,展现出显著的抗氧化能力。花朵的活性成分以及抗氧化能力稍逊色于花瓣和花蕾,但盛开期的花朵香气浓郁、色泽绚丽,可用于与茶叶的窈制工艺,提升茶品观赏性和风味层次^[41]。研究表明,花茶中的黄酮类、没食子酰化儿茶素等物质与涩味密切相关,而咖啡因与非酰化儿茶素则增强苦味^[42]。本研究中,富含表没食子酸儿茶素、儿茶素、表儿茶素的样本表现出明显涩感,在滋味评价中得分偏低。

综上,牡丹与芍药在花茶中的应用潜力显著,不同品种与花部位在功能成分与感官品质上存在显著差异。未来在开发中,可根据不同品种和部位的功能成分及感官特征进行筛选,优先选择色泽明亮、花型饱满、香气浓郁且黄酮类、多酚类物质丰富的品种。在花部位选择上,花蕾代谢活性强,往往富含多酚类、黄酮类、VC等功能性成分,可作为高活性功能茶原材料,盛开花朵因其香气与观赏性优异,更适用于提升花茶的感官品质。花瓣中富含花青素、芳香物质等多种次生代谢产物,适合作为兼具观赏性与功能性的花茶原料。后续研究应进一步扩大样本来源,深化成分解析,研究贮藏稳定性与功能验证,推动牡丹与芍药从观赏型花卉向功能性健康饮品的产业化转型。

4 结 论

本研究通过对15个牡丹品种和17个芍药品种的花蕾茶、花朵茶、花瓣茶各项营养物质、抗氧化能力及主要功能活性成分进行测定,发现不同牡丹和芍药品种间的花茶品质存在差异较大,营养成分及抗氧化成分丰富,价值突出。此外,3种花部位特征各不相同,可依据不同需求进行选择制作花茶。具体而言,‘海黄’‘琉璃贯珠’‘鸦片紫’更适宜作为牡丹花瓣茶的品种,‘海黄’‘鸦片紫’‘墨池金辉’更适宜作为牡丹花朵茶的品种,‘大红宝珠’‘海黄’‘琉璃贯珠’更适宜作为牡丹花蕾茶的品种。芍药花瓣茶的适宜品种则为‘红艳飞霜’‘艳紫向阳’‘红凤展翅’,花朵茶适宜品种有‘艳紫向阳’‘苍龙’‘大红袍’,花蕾茶适宜品种则为‘大红袍’‘红光奇锦’‘玛莎’。

参考文献:

- [1] HONG D Y. Peonies of the world: taxonomy and phyto geography[M]. Kew: Royal Botanic Gardens Kew, 2010.
- [2] SUT S, ZENGIN G, DALL'ACQUA S, et al. *Paeonia arietina* and *Paeonia kesrounensis* bioactive constituents: NMR, LC-DAD-MS fingerprinting and *in vitro* assays[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2019, 165: 1-11. DOI:10.1016/j.jpba.2018.11.040.
- [3] YANG Y, LI S S, TEIXEIRA DA SILVA J A, et al. Characterization of phytochemicals in the roots of wild herbaceous peonies from China and screening for medicinal resources[J]. Phytochemistry, 2020, 174: 112331. DOI:10.1016/j.phytochem.2020.112331.
- [4] CHEN J Y, LUO W W, LI W X, et al. Effect of scenting process on the taste profile of jasmine green tea and the potent bitterness-enhancing compound in jasmine flowers[J]. Food Research International, 2025, 204: 115927. DOI:10.1016/j.foodres.2025.115927.
- [5] LI S S, CHEN L G, XU Y J, et al. Identification of floral fragrances in tree peony cultivars by gas chromatography-mass spectrometry[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 142: 158-165. DOI:10.1016/j.scienta.2012.05.015.
- [6] WANG X X, SUN K R, LIAO X P, et al. Physicochemical, antibacterial and aromatic qualities of herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall) tea with different varieties[J]. RSC Advances, 2024, 14(20): 14303-14310. DOI:10.1039/D3RA08144C.
- [7] 揭晓. 牡丹花茶的制作工艺与营养成分分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [8] 孟鑫, 王浩任, 陈足岳, 等. 不同杀青工艺对‘凤丹’牡丹花朵茶及花蕾茶主要成分的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(11): 10-21. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2025.11.002.
- [9] 揭晓, 成仿云. 牡丹花茶制作工艺研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(12): 239-242. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.12.043.
- [10] 张伟, 王洪伦, 周昌范, 等. 考马斯亮蓝G-250染色法测定柠条锦鸡儿种子中可溶性蛋白含量[J]. 氨基酸和生物资源, 2011, 33(3): 74-76. DOI:10.14188/j.ajsh.2011.03.015.
- [11] 江建丽. 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定五味子还原糖含量的适宜条件[J]. 海峡药学, 2014, 26(1): 57-60.
- [12] 王汝华, 李鹏飞, 余倩倩, 等. 冬红海棠果实不同部位多酚含量及抗氧化能力的比较[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 31-38. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2021.03.007.

- [13] 魏新翠, 李厚华, 蔡雪雁, 等. 15 种红果肉海棠多酚及抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2015, 36(20): 133-136; 144. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.20.019.
- [14] 韦婷, 杨艳宇, 李芡艳, 等. pH示差法测定苹果皮花色苷含量[J]. 食品与发酵科技, 2022, 58(2): 130-136. DOI:10.3969/j.issn.1674-506X.2022.02-020.
- [15] 羌宇, 张耀宗, 余勃, 等. ABTS法和DPPH法测定类胡萝卜素清除自由基能力的适用性[J]. 南昌大学学报(理科版), 2019, 43(6): 543-549. DOI:10.13764/j.cnki.ncdl.2019.06.007.
- [16] AMAMCHARLA K J, METZGER E L. Modification of the ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay to determine the susceptibility of raw milk to oxidation[J]. International Dairy Journal, 2014, 34(2): 177-179. DOI:10.1016/j.idairyj.2013.09.004.
- [17] 施丽娟, 陈宁, 王丹, 等. 超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱法定量分析云南大叶种茶酚类成分[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 271-280. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210616-176.
- [18] 孙静, 姜宇, 陶俊. 牡丹与芍药的食用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 10-14. DOI:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.11.003.
- [19] 黄彪, 鲁菲菲, 李巍, 等. 不同等级福州茉莉花茶活性成分及体外抗氧化活性比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 193-199. DOI:10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240628001.
- [20] 张莲莉, 戴伟锋, 覃豪, 等. 三种玫瑰花茶中黄酮类成分的分析及其抗氧化活性研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(5): 84-90. DOI:10.16112/j.cnki.53-1223/n.2019.05.013.
- [21] 李楠, 杨欣, 孙元琳, 等. 20 种花茶黄酮、总酚及抗氧化活性分析[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(18): 34-39. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.18.006.
- [22] 陈玲, 宁二娟, 王学方. 响应面法优化牡丹花果胶提取工艺及其抗氧化活性[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(2): 10-16. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2025.2.002.
- [23] WANG Y X, WANG Z T, CHEN S Y, et al. Anti-melanogenesis activity and chemical profiling of herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.) flowers: a natural skin whitening agents containing *Paeonia* monoterpene glycosides[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 225: 120363. DOI:10.1016/j.indcrop.2024.120363.
- [24] SHI L Z, KIM E, YANG L Y, et al. Effect of a combined microwave-assisted drying and air drying on improving active nutraceutical compounds, flavor quality, and antioxidant properties of *Camellia sinensis* L. (cv. Longjing 43) flowers[J]. Food Quality and Safety, 2021, 5: fyaa040. DOI:10.1093/fqsafe/fyaa040.
- [25] DAI Q Y, HE Y Y, HO C T, et al. Effect of interaction of epigallocatechin gallate and flavonols on color alteration of simulative green tea infusion after thermal treatment[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(9): 2919-2928. DOI:10.1007/s13197-017-2730-5.
- [26] WANG D Q, CUI H P, ZONG K L, et al. The effects of the interaction between cyanidin-3-*O*-glucoside (C3G) and walnut protein isolate (WPI) on the thermal and oxidative stability of C3G[J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(9): 6711-6719. DOI:10.1002/fsn3.4309.
- [27] IDIR S, ACHAT S, CRUZ L, et al. Anthocyanin-rich extracts: susceptibility to color loss by hydration and thermal degradation, influence of metal ions and endogenous copigments[J]. Food Chemistry, 2025, 481: 144004. DOI:10.1016/j.foodchem.2025.144004.
- [28] HAN A R, NAM B, KIM B R, et al. Phytochemical composition and antioxidant activities of two different color *Chrysanthemum* flower teas[J]. Molecules, 2019, 24(2): 329. DOI:10.3390/molecules24020329.
- [29] LIU H B, FAN J J, MA J Z, et al. The effects of processing treatments on the quality and functional constituents of crabapple flower tea[J]. Horticulturae, 2025, 11(3): 255. DOI:10.3390/horticulturae11030255.
- [30] ZHANG Z Y, REN A Y, LIU Y C, et al. Comprehensive chemical profiling and comparison of different medicinal cultivars of *Paeonia lactiflora* Pall[J]. Microchemical Journal, 2025, 213: 113674. DOI:10.1016/j.microc.2025.113674.
- [31] ZHAO Y Q, ZHANG W Y, YANG H X, et al. Effects of drying methods on phytochemicals and antioxidant activity of broccoli by-products[J]. Food Research International, 2025, 208: 116284. DOI:10.1016/j.foodres.2025.116284.
- [32] CHOI Y, LEE S M, CHUN J, et al. Influence of heat treatment on the antioxidant activities and polyphenolic compounds of shiitake (*Lentinus edodes*) mushroom[J]. Food Chemistry, 2006, 99(2): 381-387. DOI:10.1016/j.foodchem.2005.08.004.
- [33] PELEG H, NAIM M, ROUSSEFF R L, et al. Distribution of bound and free phenolic acids in oranges (*Citrus sinensis*) and grapefruits (*Citrus paradisi*)[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1991, 57(3): 417-426. DOI:10.1002/jsfa.2740570312.
- [34] GAMAGE D, DHARMADASA R M, ABEYSINGHE D C, et al. Effect of drying methods and type of packaging materials on phytochemical content and total antioxidant capacity of five medicinal plants with cosmetic potential over three months storage at ambient temperature[J]. World Journal of Agricultural Research, 2021, 9(2): 73-79. DOI:10.12691/wjar-9-2-5.
- [35] NGUYEN T H D, VU D C, NGUYET N T M, et al. Evaluation of phenolics and bioactivities of *Camellia quephongensis* leaf extracts as affected by various extraction solvents[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2023, 14: 100914. DOI:10.1016/j.jafr.2023.100914.
- [36] LI S, CUI H L, WANG J Y, et al. Qualitative and quantitative analysis on flavonoid distribution in different floral parts of 42 *Hemerocallis* accessions[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 670506. DOI:10.3389/fpls.2021.670506.
- [37] 孙燕, 高德民. 牡丹花色性状的的研究进展[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(1): 17-22. DOI:10.3969/j.issn.2097-2172.2023.01.004.
- [38] LV M W, YANG Y, CHOISY P, et al. Flavonoid components and anti-photoaging activity of flower extracts from six *Paeonia* cultivars[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 200: 116707. DOI:10.1016/j.indcrop.2023.116707.
- [39] 胡喜兰, 尹福军, 程青芳, 等. 不同花期芍药花中活性成分的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(9): 511-514. DOI:10.3321/j.issn:1002-6630.2008.09.121.
- [40] LI S S, JIAO G G, OU P H, et al. Phytochemical characterization, antioxidant activity, and anti-melanoma mechanism of flower buds of *Magnolia biondii* Pamp[J]. Plants, 2025, 14(11): 1725. DOI:10.3390/plants14111725.
- [41] WANG S Y, ZHAO F, WU W X, et al. Comparison of volatiles in different jasmine tea grade samples using electronic nose and automatic thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry followed by multivariate statistical analysis[J]. Molecules, 2020, 25(2): 380. DOI:10.3390/molecules25020380.
- [42] ZHANG L, CAO Q Q, GRANATO D, et al. Association between chemistry and taste of tea: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 101: 139-149. DOI:10.1016/j.tifs.2020.05.015.