

# 椴属植物 3 种代谢产物的种(品种)、器官和采收时间的差异分析

雷佳妮<sup>1,2</sup>, 王欢利<sup>2</sup>, 黄 犀<sup>2</sup>, 严灵君<sup>2</sup>, 李 尹<sup>1,2</sup>, 汤诗杰<sup>2,①</sup>

[1. 南京中医药大学, 江苏 南京 210023;

2. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物资源保护与利用重点实验室, 江苏 南京 210014]

**摘要:**为进一步合理开发利用椴属(*Tilia* Linn.)植物资源,比较了盛花期不同种(品种)各器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量的差异,并分析了不同采收时间南京椴(*T. miqueliana* Maxim.)各器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量的变化。结果显示:椴属植物种(品种)、器官及其交互作用对 3 种代谢产物含量均有极显著影响( $P<0.01$ )。总多糖、总多酚和总黄酮含量分别为 5.50~26.43、3.65~28.58 和 1.13~16.03  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,对应的变异系数分别为 28.32%~33.07%、49.37%~54.08%和 51.99%~56.37%。绝大多数种(品种)的花中总多糖含量高于叶和苞片,所有种(品种)叶和苞片中总黄酮含量显著( $P<0.05$ )高于花。以花为取样部位,南京椴花中总多糖含量最高,紫椴(*T. amurensis* Rupr.)花中总多酚和总黄酮含量均最高;以叶和苞片为取样部位,‘灰’(‘Grey’)叶和苞片中总多糖、总多酚和总黄酮含量均最高。随着采收时间的推迟,总多糖含量在叶和苞片中呈现相反的变化趋势,总多酚和总黄酮含量在叶和苞片中的变化趋势基本一致。叶中总多糖和总多酚含量均在盛花期后 110 d 达到最高,苞片中总多糖和总多酚含量均在盛花期后 60 d 达到最高,叶和苞片中总黄酮含量在盛花期后 60 d 达到最高。主成分分析和聚类结果显示:总多糖、总多酚和总黄酮含量可作为区分不同器官样品整体差异的关键指标;花部样品偏向多糖积累,而部分叶和苞片样品更偏向多酚与黄酮积累。综合研究结果表明:椴属植物的功能成分开发应采取“分器官、分种(品种)、分时期”的策略。多糖提取优选南京椴花;多酚和黄酮提取优选‘灰’叶和苞片;南京椴资源利用建议盛花期后 60 d 采苞片用于多酚和黄酮提取,采集叶提取多酚可延后至盛花期后 110 d。

**关键词:** 椴属植物; 代谢产物含量; 盛花期; 采收时间

中图分类号: Q949.9; Q946 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2026)03-0054-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2026.03.06

**Analyses of the differences in species (cultivars), organs and harvesting times of three metabolites of *Tilia* plants** LEI Jiani<sup>1,2</sup>, WANG Huanli<sup>2</sup>, HUANG Xi<sup>2</sup>, YAN Lingjun<sup>2</sup>, LI Yin<sup>1,2</sup>, TANG Shijie<sup>2,①</sup> [1. Nanjing University of Chinese Medicine, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for Conservation and Utilization of Plant Resources, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, 35(3): 54-61

**Abstract:** To further rationally develop and utilize *Tilia* Linn. plant resources, differences in total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid contents in each organ of different species (cultivars) during full-bloom stage were compared, and changes in these contents in each organ of *T. miqueliana* Maxim. at different harvesting times were analyzed. The results show that species (cultivars), organs, and their interactions of *Tilia* plants all have extremely significant effects ( $P<0.01$ ) on the

收稿日期: 2025-12-08

基金项目: 江苏省林业发展专项; 南京中山国家植物园科研专项(JSPKLB202502)

作者简介: 雷佳妮(2000—),女,湖北咸宁人,硕士研究生,主要从事植物资源学方面的研究。

①通信作者 E-mail: tangshijie69@aliyun.com

引用格式: 雷佳妮,王欢利,黄 犀,等. 椴属植物 3 种代谢产物的种(品种)、器官和采收时间的差异分析[J]. 植物资源与环境学报, 2026, 35(3): 54-61.

contents of the three metabolites. The total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid contents are 5.50–26.43, 3.65–28.58, and 1.13–16.03  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively, and the corresponding coefficients of variation are 28.32%–33.07%, 49.37%–54.08%, and 51.99%–56.37%, respectively. In most species (cultivars), the total polysaccharide contents are higher in flowers than in leaves and bracts, while in all species (cultivars), the total flavonoid contents are significantly ( $P < 0.05$ ) higher in leaves and bracts than in flowers. Taking flowers as the sampling part, *T. miqueliana* flowers have the highest total polysaccharide content, while *T. amurensis* Rupr. flowers have the highest total polyphenol and total flavonoid contents; taking leaves and bracts as sampling parts, leaves and bracts of ‘Grey’ exhibit the highest contents of total polysaccharides, total polyphenols, and total flavonoids. With the delay of harvesting time, total polysaccharide content shows opposite variation trends in leaves and bracts, while the changes of total polyphenol and total flavonoid contents are basically the same in leaves and bracts. Total polysaccharide and total polyphenol contents in leaves both peak at 110 d after full-bloom stage, while those in bracts both peak at 60 d after full-bloom stage, and total flavonoid contents in leaves and bracts peak at 60 d after full-bloom stage. The principal component analysis and cluster results show that total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid contents can be used as key indexes for distinguishing overall differences among different organ samples; flower samples tend to accumulate polysaccharides, whereas some leaf and bract samples tend to accumulate polyphenols and flavonoids. The comprehensive research result suggests that the development of functional components from *Tilia* plants should adopt a “organ, species (cultivar), and time-specific” strategy. *T. miqueliana* flowers are optimal for polysaccharide extraction; leaves and bracts of ‘Grey’ are optimal for polyphenol and flavonoid extraction; for *T. miqueliana* resource utilization, it is recommended to harvest bracts at 60 d after full-bloom stage for polyphenol and flavonoid extraction, while leaf harvesting for polyphenol extraction can be delayed to 110 d after full-bloom stage.

**Key words:** *Tilia* plants; metabolite content; full-bloom stage; harvesting time

椴属(*Tilia* Linn.)植物为落叶乔木,共23种14亚种,主要分布于北温带,间断分布于欧洲、亚洲和北美洲3个区域,东亚是该属植物多样化程度最高的地区<sup>[1]</sup>。原产于中国的椴属植物有15种,主要分布于黄河流域以南,五岭以北广大亚热带地区,只少数种类分布于北回归线以南,华北及东北<sup>[2]</sup>。中国椴属植物种植历史悠久,最早栽培的有紫椴(*T. amurensis* Rupr.)、南京椴(*T. miqueliana* Maxim.)等。1949年后,随着中国城市园林建设的发展及园林实业的扩展,从欧美等地区引进了一些性状优良的椴属栽培品种,国内的椴属植物种类及规模有了较大发展<sup>[3]</sup>。椴属植物兼具材用、纤维用、蜜源、药用、观赏及园林绿化等多种用途<sup>[4]</sup>。

已有学者从椴属植物不同器官(包括叶、苞片及花等)中提取、分离得到多种天然产物<sup>[5-6]</sup>,并通过相关研究证实部分天然产物具有抗肿瘤、抗菌、抗炎、抗氧化等活性<sup>[7-9]</sup>。多糖、多酚及黄酮类化合物为椴属植物主要的代谢产物,其中,多糖类化合物尤其是果胶类多糖在肠道免疫调节以及抗肿瘤等方面具有一定的活性<sup>[10-12]</sup>,多酚类化合物常表现出抗氧化、抗炎和抗菌等生物学功能<sup>[13-17]</sup>,黄酮类化合物则具有抗

炎、镇痛及抗惊厥等多重药理作用<sup>[18-19]</sup>。尽管上述研究从椴属植物中分离、鉴定出多种代谢产物并考察了其部分药理活性,但针对不同器官、种类及采收时期对多糖、多酚和黄酮等主要功能成分含量和组成影响的系统性研究仍较少。Szűcs等<sup>[16]</sup>从宽叶椴(*T. platyphyllos* Scop.)不同发育阶段苞片中鉴定到多种酚酸类成分,发现其代谢产物模式存在显著差异,采收时间不同对不同代谢产物含量可能有显著影响。原晓等<sup>[20]</sup>以南京椴花为材料,采用UPLC-MS/MS法对不同发育阶段花器官提取物进行成分鉴定,结果显示:盛花期是南京椴花中代谢产物发生显著变化的分界点,且现蕾期和开花期花中代谢产物差异较大。

鉴于此,本研究以华东地区资源丰富、代表性强且应用潜力大的椴属植物11个种(品种)为研究对象,比较不同椴属植物各器官中总多糖、总多酚及总黄酮的含量,分析种(品种)间及器官间主要代谢产物的差异,以为椴属植物采收器官及时期的确定提供参考依据。同时,以华东地区主要的乡土树种南京椴为研究对象,分析其不同采收时间和器官中总多糖、总多酚及总黄酮含量的变化,以为获取椴属植物主要代谢产物(多糖、多酚和黄酮)为目的的采收提

供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

采用同质园法<sup>[21]</sup>,在青岛即墨区抬头园林苗木基地(北纬 36°28'12"、东经 120°17'24")选取 11 个种(品种),包括心叶椴(*T. cordata* Mill.)品种‘柯林斯’(‘Corinthian’)、‘新乐’(‘Shamrock’)、‘绿塔’(‘Greenspire’),宽叶椴品种‘奥勒布劳’(‘Orebro’),欧洲椴(*T. europaea* Linn.)品种‘灰’(‘Grey’),美洲椴(*T. americana* Linn.)品种‘哨兵’(‘Sentry’),银毛椴(*T. tomentosa* Moench)品种‘斯特林’(‘Sterling’),以及紫椴、蒙椴(*T. mongolica* Maxim.)、辽椴(*T. mandshurica* Rupr. et Maxim.)和南京椴;株龄 6~8 a。于 2024 年 5—6 月椴属植物盛花期(‘斯特林’采样时间为 6 月 17 日,南京椴为 5 月 31 日,其余材料为 6 月 6 日),每个种(品种)随机选择 3 株生长健康、长势基本一致的植株,采集树冠中上部阳生枝条中上部的花、叶和苞片,等量混合作为 1 个重复,共设 3 个重复。另采集南京椴盛花期后 20、60、90 和 110 d 的植株叶和苞片,采集方法同上。将采集的样品迅速带回实验室,置于 65 °C 烘箱中烘干至恒质量,粉碎,过 20 目筛,置于-20 °C 冰箱中保存、备用。

### 1.2 方法

参照 GB/T 1234—2020 中的方法测定总多糖含量,参考文献[22]中的方法测定总多酚含量,参照 SN/T 4592—2016 的方法测定总黄酮含量。

### 1.3 数据统计和分析

采用 EXCEL 2010 和 SPSS 25.0 软件对数据进行统计与分析;采用双因素方差分析(two-way ANOVA)进行变异来源分析;采用 Waller-Duncan 检验进行多重比较,两组间差异比较采用独立样本 *t* 检验;采用 Origin 2021 软件进行主成分分析及聚类分析,并作图。

## 2 结果和分析

### 2.1 椴属植物总多糖、总多酚和总黄酮含量的双因素方差分析

椴属植物总多糖、总多酚和总黄酮含量的双因素

方差分析结果见表 1。结果显示:总多糖、总多酚和总黄酮含量在椴属植物不同种(品种)及不同器官间均存在极显著差异( $P < 0.01$ ),其中,种(品种)间总多酚含量的 *F* 值最大(3 145.998),而器官间总多糖含量的 *F* 值最大(7 542.436);种(品种)与器官的交互作用对椴属植物总多糖、总多酚和总黄酮含量有极显著影响,其中,总多酚含量的 *F* 值最大(7 542.437)。

表 1 椴属植物总多糖、总多酚和总黄酮含量的双因素方差分析<sup>1)</sup>  
Table 1 Two-way variance analysis of total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid contents in *Tilia* Linn. plants<sup>1)</sup>

变异来源 Source of variation	<i>df</i>	<i>F</i> 值 <i>F</i> value		
		<i>w</i> <sub>TP1</sub>	<i>w</i> <sub>TP2</sub>	<i>w</i> <sub>TF</sub>
A	10	951.267 **	3 145.998 **	1 071.248 **
B	2	7 542.436 **	52.349 **	6 207.440 **
A×B	20	7 542.437 **	1 376.279 **	412.803 **

<sup>1)</sup> A: 种(品种) Species (cultivar); B: 器官 Organ. *df*: 自由度 Degree of freedom. *w*<sub>TP1</sub>: 总多糖含量 Total polysaccharide content; *w*<sub>TP2</sub>: 总多酚含量 Total polyphenol content; *w*<sub>TF</sub>: 总黄酮含量 Total flavonoid content. \*\*:  $P < 0.01$ .

### 2.2 椴属植物不同种(品种)各器官间总多糖、总多酚和总黄酮含量差异

椴属植物不同种(品种)各器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量及变异系数的比较见表 2。结果显示:椴属植物不同种(品种)和器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量差异较大。总多糖含量在 5.50~26.43 mg·g<sup>-1</sup>之间,总多酚含量在 3.65~28.58 mg·g<sup>-1</sup>之间,总黄酮含量在 1.13~16.03 mg·g<sup>-1</sup>之间。‘灰’叶中总多糖含量显著( $P < 0.05$ )高于花和苞片,‘哨兵’总多糖含量在 3 个器官间无显著差异,其余椴属植物花中总多糖含量显著高于叶和苞片;花中平均总多糖含量(16.61 mg·g<sup>-1</sup>)显著高于叶(9.92 mg·g<sup>-1</sup>)和苞片(9.74 mg·g<sup>-1</sup>)。‘哨兵’、‘斯特林’、紫椴、蒙椴花中总多酚含量显著高于叶和苞片,‘柯林斯’、‘新乐’和‘灰’叶中总多酚含量显著高于花和苞片,‘绿塔’、‘奥勒布劳’、辽椴和南京椴苞片中总多酚含量总体显著高于花和叶;苞片中平均总多酚含量(14.49 mg·g<sup>-1</sup>)显著高于花(12.94 mg·g<sup>-1</sup>)和叶(12.88 mg·g<sup>-1</sup>)。所有种(品种)叶和苞片中总黄酮含量显著高于花,且‘绿塔’、‘奥勒布劳’、‘哨兵’和紫椴苞片中总黄酮含量总体显著高于叶,其余椴属植物叶中总黄酮含量显著高于苞片;叶中平均总黄酮含量(8.46 mg·g<sup>-1</sup>)显著高于苞片(6.80 mg·g<sup>-1</sup>)和花(2.19 mg·g<sup>-1</sup>)。

结果(表2)还显示:南京椴和‘新乐’花中总多糖含量较高(分别为26.43和21.69 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物;‘灰’和‘新乐’叶中总多糖含量较高(分别为17.02和14.36 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物;‘灰’和‘奥勒布劳’苞片中总多糖含量较高(分别为15.53和12.39 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物。紫椴和‘奥勒布劳’花中总多酚含量较高(分别为25.71和19.37 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物;‘灰’叶中总多酚含量最高(28.58 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物;‘灰’和‘奥勒布劳’苞片中总多酚含量较高(分别为26.86和26.62 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物。紫椴花中总黄酮含量最高

(5.43 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物;‘灰’和辽椴叶中总黄酮含量较高(分别为16.03和14.51 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物;‘灰’和辽椴苞片中总黄酮含量较高(分别为13.35和11.51 mg·g<sup>-1</sup>),显著高于其余椴属植物。

从变异系数看,总多糖含量的变异系数在28.32%~33.07%之间,总多酚含量的变异系数在49.37%~54.08%之间,其中,叶中总多糖含量和总多酚含量的变异系数均最大;总黄酮含量的变异系数在51.99%~56.37%之间,其中,苞片中总黄酮含量的变异系数最大。总多酚含量和总黄酮含量的变异系数较高说明这2个指标在种(品种)间差异更大。

表2 椴属植物不同种(品种)各器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量及变异系数的比较( $\bar{x}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison of total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid contents in each organ of different species (cultivars) of *Tilia* Linn. plants and the coefficients of variation ( $\bar{x}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

种(品种) <sup>2)</sup> Species (cultivar) <sup>2)</sup>	总多糖含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Total polysaccharide content			总多酚含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Total polyphenol content			总黄酮含量/(mg·g <sup>-1</sup> ) Total flavonoid content		
	花 Flower	叶 Leaf	苞片 Bract	花 Flower	叶 Leaf	苞片 Bract	花 Flower	叶 Leaf	苞片 Bract
S1	19.35±0.15aC	12.27±0.25bC	9.35±0.27cD	4.64±0.21cH	10.41±0.33aD	6.68±0.31bG	1.13±0.07cF	2.95±0.41aI	1.73±0.18bG
S2	21.69±0.36aB	14.36±0.21bB	11.37±0.26cC	12.19±0.30bE	19.35±0.07aB	9.65±0.35cF	1.74±0.15cE	11.36±0.42aC	5.26±0.27bEF
S3	11.51±0.39aG	8.16±0.18bF	8.27±0.24bE	4.78±0.16bH	3.65±0.08cG	6.78±0.22aG	2.15±0.05cCD	2.78±0.04bI	4.72±0.16aF
S4	17.79±0.21aD	8.63±0.22cE	12.39±0.31bB	19.37±0.23bB	10.72±0.48cD	26.62±0.35aA	1.91±0.09bDE	10.05±0.12aD	10.55±0.43aC
S5	15.21±0.18bE	17.02±0.10aA	15.53±0.31bA	9.31±0.18cG	28.58±0.36aA	26.86±0.09bA	1.16±0.08cF	16.03±0.19aA	13.35±0.34bA
S6	8.45±0.32aH	8.38±0.21aEF	8.44±0.13aE	12.52±0.31aE	9.73±0.19bE	7.28±0.29cG	2.00±0.02cCDE	4.69±0.37bH	5.46±0.13aE
S7	19.49±0.33aC	6.54±0.15bH	5.50±0.34cG	15.74±0.09aD	7.00±0.04cF	9.49±0.21bF	2.91±0.06cB	5.52±0.28aG	4.79±0.10bF
S8	12.54±0.41aF	8.65±0.28bE	9.36±0.41bD	25.71±0.30aA	9.24±0.18cE	17.68±0.31bD	5.43±0.32cA	6.99±0.18bF	9.53±0.24aD
S9	18.11±0.10aD	7.45±0.19bG	6.64±0.32cF	18.24±0.21aC	13.32±0.28bC	10.41±0.31cE	2.21±0.16cC	8.97±0.26aE	5.58±0.36bE
S10	12.14±0.14aF	7.54±0.38cG	10.83±0.11bC	10.46±0.40bF	19.00±0.11aB	19.63±0.46aB	2.25±0.09cC	14.51±0.32aB	11.51±0.38bB
S11	26.43±0.29aA	10.10±0.05bD	9.52±0.18cD	9.39±0.24cG	10.62±0.17bD	18.33±0.35aC	1.17±0.06cF	9.17±0.13aE	2.27±0.20bG
均值 Mean	16.61±0.09a	9.92±0.09b	9.74±0.12b	12.94±0.07b	12.88±0.07b	14.49±0.02a	2.19±0.03c	8.46±0.12a	6.80±0.13b
CV/%	31.46	33.07	28.32	49.37	54.08	52.97	55.20	51.99	56.37

<sup>1)</sup> 同行中不同小写字母表示同一指标在不同器官间差异显著( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant differences ( $P<0.05$ ) between different organs of the same index; 同列中不同大写字母表示同一指标在不同种(品种)间差异显著( $P<0.05$ ) Different uppercases in the same column indicate the significant differences ( $P<0.05$ ) between different species (cultivars) of the same index.

<sup>2)</sup> S1: ‘柯林斯’ ‘Corinthian’; S2: ‘新乐’ ‘Shamrock’; S3: ‘绿塔’ ‘Greenspire’; S4: ‘奥勒布劳’ ‘Orebro’; S5: ‘灰’ ‘Grey’; S6: ‘哨兵’ ‘Sentry’; S7: ‘斯特林’ ‘Sterling’; S8: 紫椴 *Tilia amurensis* Rupr.; S9: 蒙椴 *Tilia mongolica* Maxim.; S10: 辽椴 *Tilia mandshurica* Rupr. et Maxim.; S11: 南京椴 *Tilia miqueliana* Maxim. CV: 变异系数 Coefficient of variation.

### 2.3 不同采收时间南京椴各器官间总多糖、总多酚和总黄酮含量差异

不同采收时间南京椴各器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量的比较见表3。结果显示:盛花期,南京椴花中总多糖含量(26.43 mg·g<sup>-1</sup>)显著( $P<0.05$ )高于叶和苞片;苞片中总多酚含量(18.33 mg·g<sup>-1</sup>)显著高于叶和花;叶中总黄酮含量(9.17 mg·g<sup>-1</sup>)显著高于苞片和花。盛花期后20 d,叶中总多糖(10.14 mg·g<sup>-1</sup>)、总多酚(10.56 mg·g<sup>-1</sup>)和总黄酮(6.89 mg·g<sup>-1</sup>)含量均显著高于苞片;盛花期后60 d,苞片中总多糖(14.29 mg·g<sup>-1</sup>)、总多酚(24.16 mg·g<sup>-1</sup>)

和总黄酮(16.67 mg·g<sup>-1</sup>)含量均显著高于叶;盛花期后90 d,苞片中总多糖含量(12.89 mg·g<sup>-1</sup>)显著高于叶,叶中总多酚(10.35 mg·g<sup>-1</sup>)和总黄酮(7.79 mg·g<sup>-1</sup>)含量显著高于苞片;盛花期后110 d,叶中总多糖(13.44 mg·g<sup>-1</sup>)和总黄酮(8.59 mg·g<sup>-1</sup>)含量显著高于苞片,而苞片中总多酚含量(17.10 mg·g<sup>-1</sup>)显著高于叶。

结果(表3)还显示:随着采收时间的推迟,南京椴3种代谢产物在不同器官中的变化趋势存在差异,总多糖含量在叶和苞片中呈现相反的变化趋势,其中,总多糖含量在叶中呈现“升高—降低—升高”的

趋势;总多酚和总黄酮含量在叶和苞片中总体呈现一致的波动变化趋势。叶中总多糖和总多酚含量均在盛花期后 110 d 达到最高(分别为 13.44 和 15.55  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),显著高于其余采收时间;苞片中总多糖和总多酚含量均在盛花期后 60 d 达到最高(分别为

14.29 和 24.16  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),显著高于其余采收时间。叶和苞片中总黄酮含量均在盛花期后 60 d 达到最高(分别为 9.55 和 16.67  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),总体显著高于其余采收时间。

表 3 不同采收时间南京椴各器官中总多糖、总多酚及总黄酮含量的比较( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Comparison of total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid contents in each organ of *Tilia miqueliana* Maxim. at different harvesting times ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

采收时间 <sup>2)</sup> Harvesting time <sup>2)</sup>	总多糖含量/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Total polysaccharide content			总多酚含量/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Total polyphenol content			总黄酮含量/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Total flavonoid content		
	花 Flower	叶 Leaf	苞片 Bract	花 Flower	叶 Leaf	苞片 Bract	花 Flower	叶 Leaf	苞片 Bract
T1	26.43±0.29a	10.10±0.05bC	9.52±0.18cC	9.39±0.24c	10.62±0.17bC	18.33±0.35aB	1.17±0.06c	9.17±0.13aAB	2.27±0.20bD
T2	—	10.14±0.24aC	8.09±0.11bD	—	10.56±0.30aC	7.49±0.42bD	—	6.89±0.20aD	2.55±0.23bD
T3	—	8.21±0.16bD	14.29±0.16aA	—	13.22±0.18bB	24.16±0.13aA	—	9.55±0.43bA	16.67±0.36aA
T4	—	11.29±0.39bB	12.89±0.05aB	—	10.35±0.30aC	7.52±0.08bD	—	7.79±0.29aC	4.18±0.11bC
T5	—	13.44±0.23aA	8.31±0.38bD	—	15.55±0.39bA	17.10±0.08aC	—	8.59±0.33aB	5.16±0.16bB

<sup>1)</sup> 同行中不同小写字母表示同一指标在不同器官间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different organs of the same index; 同列中不同大写字母表示同一指标在不同采收时间间差异显著( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same column indicate the significant differences ( $P < 0.05$ ) between different harvesting times of the same index. —: 未采样 Not sampled.

<sup>2)</sup> T1, T2, T3, T4, T5: 分别为盛花期及盛花期后 20、60、90 和 110 d Full-bloom stage and 20, 60, 90, and 110 d after full-bloom stage, respectively.

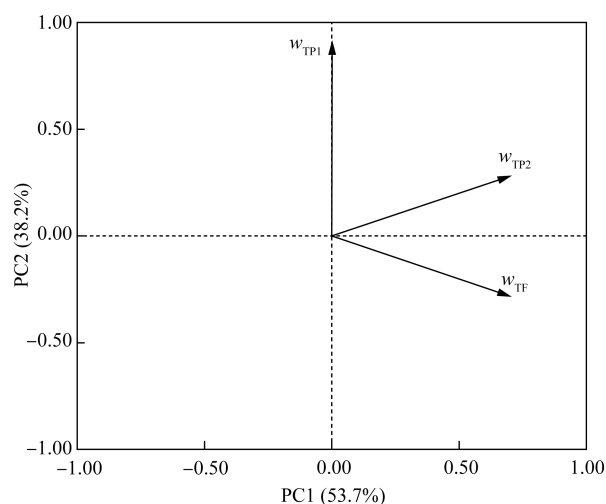
## 2.4 主成分分析

对椴属植物花、叶和苞片中总多糖、总多酚和总黄酮含量进行主成分分析,结果见图 1。结果显示:前 2 个主成分的累计贡献率为 91.9%,说明前 2 个主成分具有代表性。第 1 主成分(PC1)对样品差异的

贡献率为 53.7%,其中,总多酚含量和总黄酮含量具有较高的载荷(均为 0.707),总多酚含量、总黄酮含量与 PC1 轴呈正相关;总多糖含量的载荷接近于 0 (0.002),其与 PC1 轴相关性较弱。第 2 主成分(PC2)对样品差异的贡献率为 38.2%,其中,总多糖含量具有较高的正载荷(0.916),总多酚含量的载荷为 0.282,总多糖含量、总多酚含量与 PC2 轴呈正相关;而总黄酮含量的载荷为 -0.286,总黄酮含量与 PC2 轴呈负相关。因此,总多糖、总多酚和总黄酮含量可作为区分不同器官样品整体差异的关键指标。

## 2.5 聚类分析

基于标准化后的数据绘制层次聚类热图,结果见图 2。结果显示:椴属植物样品层面可大致分为 3 类:第 1 类以多酚或黄酮相对富集为特征,其中,‘灰’苞片和叶呈现总多酚和总黄酮含量均较高的特征;紫椴花、‘奥勒布劳’苞片呈现总多酚含量较高,蒙椴叶和苞片呈现总黄酮含量较高的特征。第 2 类在 3 种成分上整体偏低,主要包含多数种(品种)的叶和苞片,如‘斯特林’、‘哨兵’和‘绿塔’的叶和苞片等。第 3 类呈现总多糖含量较高、总多酚和总黄酮含量较低的特征,主要出现在多数花器官样品中,如辽椴、南京椴和‘柯林斯’的花等。总体而言,花样品偏向多糖积累,而部分叶和苞片样品更偏向多酚和黄酮积累。



$w_{TP1}$ : 总多糖含量 Total polysaccharide content;  $w_{TP2}$ : 总多酚含量 Total polyphenol content;  $w_{TF}$ : 总黄酮含量 Total flavonoid content. 括号中百分数为贡献率 The percentages in parentheses represent the contribution rates.

图 1 椴属植物总多糖、总多酚和总黄酮含量的主成分分析(PCA)  
Fig. 1 Principal component analysis (PCA) of total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid contents in different organs of *Tilia* Linn. plants

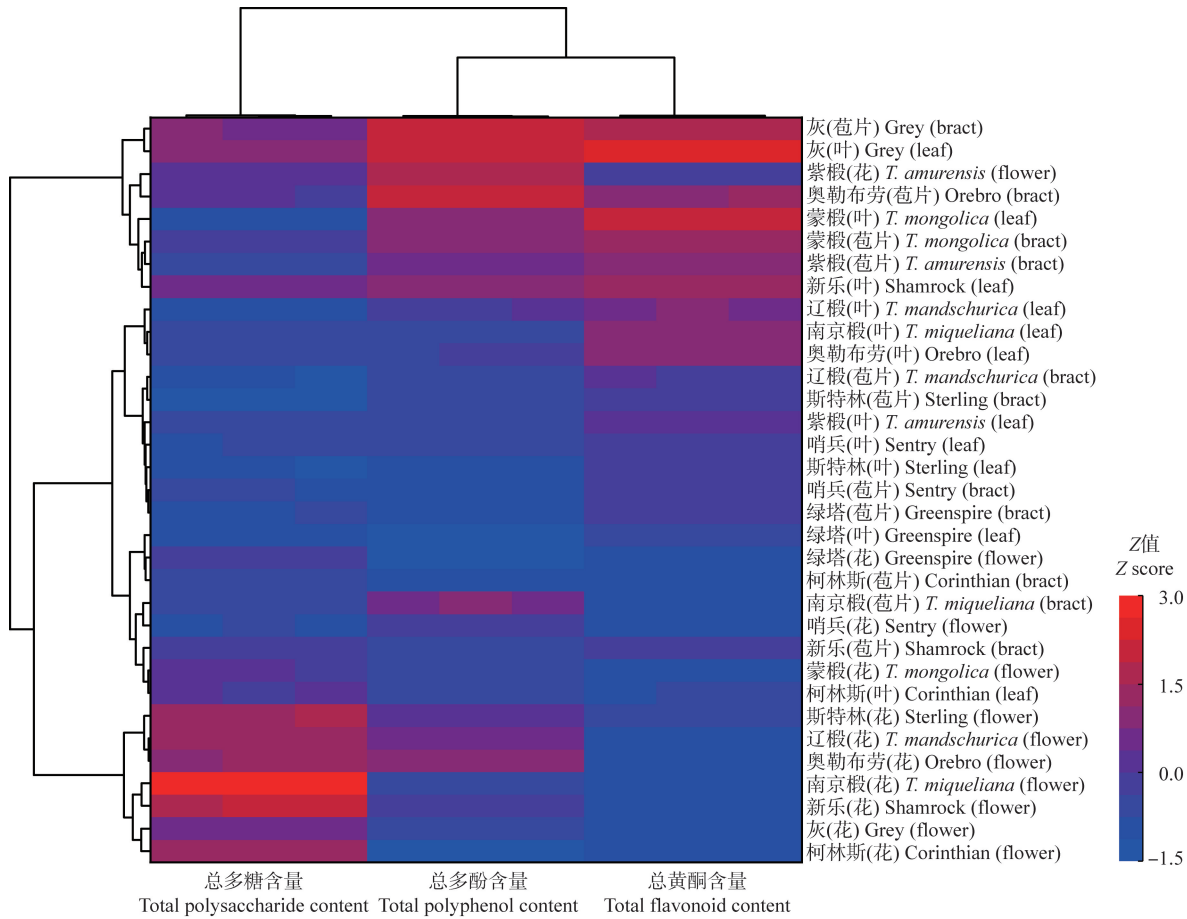


图 2 椴属植物不同种(品种)各器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量的聚类热图  
 Fig. 2 Cluster heatmap of total polysaccharide, total polyphenol, and total flavonoid contents in each organ of different species (cultivars) of *Tilia* Linn. plants

### 3 讨论和结论

#### 3.1 椴属植物不同种(品种)中总多糖、总多酚和总黄酮含量差异

同一物种内,不同品系或基因型的功能代谢产物含量也可能不同,这受到遗传因子的控制。例如:番石榴(*Psidium guajava* Linn.)不同品种果实中黄酮含量和抗氧化活性存在显著差异,差异幅度可超过 1.5 倍,产生这种差异的原因是品种间关键代谢酶基因表达量的差异<sup>[23]</sup>。本研究中,椴属植物不同种(品种)各器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量变化较大,可能是由于不同椴属种(品种)间的遗传差异导致代谢产物合成效率不同,进而表现出代谢产物含量的差异<sup>[15,24]</sup>。

变异系数分析结果显示:椴属植物不同种(品

种)中总多糖含量的变异系数偏小(28.32%~33.07%),表明其作为主要参与基础代谢、结构组成和能源储备的物质,在不同种(品种)间的合成与积累呈现较高的稳定性,具有显著的“保守性”。而总多酚和总黄酮含量的变异系数较高,分别为49.37%~54.08%和51.99%~56.37%。这一明显差异凸显了多酚和黄酮类化合物作为典型的次生代谢产物,其积累水平更易受到遗传背景的影响。因此,相较于总多糖含量,总多酚和总黄酮含量的变异更明显,更具有作为品种选育和功能性资源评价关键指标的潜力。

#### 3.2 椴属植物不同器官中总多糖、总多酚和总黄酮含量差异

本研究结果显示:椴属植物总多糖、总多酚和总黄酮的积累表现出明显的器官特异性。多糖主要富集于椴属植物花中,绝大多数种(品种)花中总多糖含量显著( $P<0.05$ )高于叶和苞片,其中,南京椴花中

总多糖含量最高(26.43 mg · g<sup>-1</sup>),明显高于山茱萸(*Cornus officinalis* Siebold et Zucc.) (9.85 ~ 10.75 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[25]</sup>和红景天(*Rhodiola rosea* Linn.) (2.74 ~ 10.27 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[26]</sup>等传统药用植物,这为南京椴在药用领域的进一步开发、利用提供了重要依据。此外,椴属植物叶中总多糖含量普遍较低,但‘灰’叶中多糖却表现出高积累,总多糖含量为17.02 mg · g<sup>-1</sup>,明显高于枸杞(*Lycium chinense* Mill.)叶(3.91 ~ 15.02 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[27]</sup>和枇杷[*Eriobotrya japonica* (Thunb.) Lindl.]叶(7.06 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[28]</sup>。椴属植物叶片生物量大,具有作为多糖提取替代原料(花)的巨大潜力。

统计发现,在多数椴属植物中,多酚和黄酮主要富集于叶或苞片中。‘灰’叶和苞片是多酚和黄酮的优质来源,其中,总多酚含量分别为28.58和26.86 mg · g<sup>-1</sup>,总体显著高于其余椴属植物,相较于桑属(*Morus* Linn.)植物叶(20.44 ~ 26.35 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[29]</sup>和蒲公英(*Taraxacum mongolicum* Hand.-Mazz.) (23.33 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[30]</sup>等有一定优势。比较而言,叶片是黄酮类化合物的高表达器官,‘灰’和辽椴叶中总黄酮含量较高,分别为16.03和14.51 mg · g<sup>-1</sup>。椴属植物花中总多酚和总黄酮含量普遍偏低,但紫椴花中总多酚含量高达25.71 mg · g<sup>-1</sup>,明显高于油茶(*Camellia oleifera* Abel.)花(6.05 ~ 21.36 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[31]</sup>,可能存在一定的应用潜力。

植物代谢产物的含量不仅取决于自身合成,还与体内运输及在不同器官中的积累密切相关<sup>[32]</sup>。在盛花期,源器官(叶片)中的光合产物大量转运至库器官(如花朵),导致光合产物含量在不同器官间出现“此消彼长”的变化。例如:在菊花[*Chrysanthemum × morifolium* (Ramat.) Hemsl.]初开期,大量营养物质由营养器官转运至花部,同时花器官自身也合成能量物质,使得花瓣中的可溶性糖含量迅速上升,并在盛花期达到最高值<sup>[33]</sup>。统计和聚类热图结果表明:多数椴属植物同一器官中总多糖含量与总多酚和总黄酮含量间存在“此消彼长”的关系。花中表现为“多糖高-多酚/黄酮低”,而叶和苞片中则表现为“多酚/黄酮高-多糖低”。这种多糖与多酚/黄酮的负相关性可能与植物体内的碳源分配策略有关,生殖器官优先积累初级代谢产物(如糖类),符合植物“繁殖优先”的生态策略;而营养器官则更倾向于合成次生代谢产物(如多酚及黄酮)以应对强光、紫外辐射及昆

虫取食压力<sup>[34-35]</sup>。

### 3.3 不同采收时间南京椴中总多糖、总多酚和总黄酮含量变化

对南京椴不同采收时间各器官中3种代谢产物进行动态监测。结果显示:盛花期,南京椴各器官中总黄酮含量总体较低,但在盛花期后60 d,苞片中总黄酮含量达到峰值(16.67 mg · g<sup>-1</sup>)。此时期的苞片中总多酚含量(24.16 mg · g<sup>-1</sup>)明显高于常用药用植物益母草(*Leonurus japonicus* Houtt.) (3.97 ~ 15.40 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[30]</sup>和威灵仙(*Clematis chinensis* Osbeck) (15.56 mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[36]</sup>;叶中黄酮也维持在较高水平,总黄酮含量为9.55 mg · g<sup>-1</sup>。总体上看,随着采收时间的推迟,总多糖含量在叶和苞片中呈现相反的变化趋势,在叶中呈现“升高—降低—升高”的趋势。这种动态变化反映了营养物质阶段性的转运与储存规律<sup>[37]</sup>。此外,发育阶段对次生代谢产物(多酚及黄酮)积累具有显著调控作用。有研究表明:南京椴花在花蕾至凋谢的发育过程中,约有26种黄酮类化合物发生显著波动<sup>[20]</sup>;在宽叶椴苞片中,不同发育阶段多酚和黄酮类化合物的种类和含量差异可达一个数量级<sup>[16]</sup>。这些结果表明:椴属植物通过对次生代谢产物(多酚及黄酮)种类和含量的动态调控,影响各器官在不同发育阶段发挥不同的生态和生理功能。

### 3.4 结论

椴属植物的功能成分开发应采取“分器官、分种(品种)、分时期”的策略。南京椴花可作为多糖提取的材料;‘灰’叶和苞片可作为多酚及黄酮的提取材料。通过对南京椴的动态监测,发现不同采收时间及器官内的代谢产物含量呈现阶段性波动变化,体现了植物在不同发育阶段对资源的优化分配和调控机制。对于南京椴资源利用方面,建议采集盛花期花提取多糖,采集盛花期后60 d的苞片提取多酚及黄酮,采集叶片提取多酚可延后至盛花期后110 d。

#### 参考文献:

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第四十九卷 第一分册[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 51.
- [2] 唐亚, 诸葛仁. 椴树属的地理分布[J]. 植物分类学报, 2023, 34(3): 254-264.
- [3] 诸葛仁, 唐亚. 椴树属形态演化与生物地理学[J]. 西南林学院学报, 1995, 15(4): 1-14.
- [4] 郑万钧. 《中国树木志》编辑委员会. 中国树木志: 第三卷[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997: 2737-2760.
- [5] 史锋厚, 沈永宝, 施季森. 南京椴资源的保护和开发利用[J].

- 林业科技开发, 2012, 26(3): 11-14.
- [6] 胡丹. 南京椴花和叶片中黄酮类化合物的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011: 35-37.
- [7] 马微微. 紫椴花改善睡眠作用有效部位及其化学成分的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013: 14-36.
- [8] 陈洪卫, 余涛, 马亚荣, 等. 椴属药学研究概况[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(36): 12912-12914, 12963.
- [9] 范戎, 单妍, 顾龙龙, 等. 椴树属植物的化学成分和药理活性研究进展[J]. 云南中医药大学学报, 2023, 46(4): 105-112.
- [10] SCHMIDGALL J, SCHNETZ E, HENSEL A. Evidence for bioadhesive effects of polysaccharides and polysaccharide-containing herbs in an *ex vivo* bioadhesion assay on buccal membranes[J]. *Planta Medica*, 2000, 66: 48-53.
- [11] 王婧杰. 紫椴花多糖的提取、分离纯化及抗氧化活性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014: 34-43.
- [12] GEORGIEV Y N, PAULSEN B S, KIYOHARA H, et al. *Tilia tomentosa* pectins exhibit dual mode of action on phagocytes as  $\beta$ -glucuronic acid monomers are abundant in their rhamnogalacturonans I[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 175: 178-191.
- [13] KIVRAK Ş, GÖKTÜRK T, KIVRAK İ. Determination of phenolic composition of *Tilia tomentosa* flowers using UPLC-ESI-MS/MS[J]. *International Journal of Secondary Metabolite*, 2017, 4(3): 249-256.
- [14] BARDAKCI H, BARAK T H, ÖZDEMİR K, et al. Effect of brewing material and various additives on polyphenolic composition and antioxidant bioactivity of commercial *Tilia platyphyllos* Scop. infusions[J]. *Journal of Research in Pharmacy*, 2020, 24(1): 133-141.
- [15] SZÚCS Z, CZIÁKY Z, VOLÁNSZKI L, et al. Production of polyphenolic natural products by bract-derived tissue cultures of three medicinal *Tilia* spp.: a comparative untargeted metabolomics study[J]. *Plants*, 2024, 13: 1288.
- [16] SZÚCS Z, CZIÁKY Z, KISS-SZIKSZAI A, et al. Comparative metabolomics of *Tilia platyphyllos* Scop. bracts during phenological development[J]. *Phytochemistry*, 2019, 167: 112084.
- [17] DALEMSKA Z, MIHAYLOVA D, KRASTANOV A. Comparative investigation on biological activity of *Tilia tomentosa* M. and *Matricaria chamomilla* L. water extracts[J]. *Scientific Works of University of Food Technologies*, 2016, 63(1): 148-154.
- [18] NOGUERÓN-MERINO M C, JIMÉNEZ-FERRER E, ROMÁN-RAMOS R, et al. Interactions of a standardized flavonoid fraction from *Tilia americana* with serotonergic drugs in elevated plus maze[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2015, 164: 319-327.
- [19] MARRASSINI C, ANESINI C, FERRARO G. HPLC Fingerprint of a flower extract of *Tilia × viridis* and correlation with antiproliferative and antioxidant activity [J]. *Phytotherapy Research*, 2011, 25: 1466-1471.
- [20] 原晓, 王欢利, 王奇志, 等. 南京椴花化学成分鉴定及不同发育时期黄酮类化合物差异分析[J]. 西北植物学报, 2024, 44(2): 270-279.
- [21] DE VILLEMEREUIL P, GAGGIOTTI O E, MOUTERDE M, et al. Common garden experiments in the genomic era: new perspectives and opportunities[J]. *Heredity*, 2016, 116: 249-254.
- [22] 李静, 聂继云, 李海飞, 等. Folin-酚法测定水果及其制品中总多酚含量的条件[J]. 果树学报, 2008, 25(1): 126-131.
- [23] 邵雪花, 赖多, 肖维强, 等. 番石榴果实品质评价及黄酮类化合物合成相关基因挖掘[J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(2): 245-253.
- [24] BAO W, SHEN Y, VERDONK J C. Dynamic changes in flavonoids' accumulation pattern in *Tilia miqueliana* flowers at different developmental stages based on widely targeted metabolomic analysis[J]. *Forests*, 2024, 15: 1795.
- [25] 罗晓锋, 董诚明, 史修强, 等. 山茱萸花期多糖含量的动态变化研究[J]. 时珍国医国药, 2012, 23(3): 592-593.
- [26] 李涛, 葛志乐, 何璇. 川西高原产13种红景天属药用植物中多糖含量的测定与比较[J]. 华西药学杂志, 2017, 32(5): 529-530.
- [27] 刘赛, 杨孟可, 李叶林, 等. 不同产地枸杞叶片多糖、总黄酮和总酚含量差异比较分析[J]. 中国中药杂志, 2019, 44(9): 1774-1780.
- [28] 景年华, 史俊友, 刘慧, 等. 枇杷叶多糖超声波辅助提取工艺优化[J]. 山东化工, 2022, 51(14): 34-36, 39.
- [29] 马飞跃, 耿炬, 乔健, 等. 不同品种桑葚叶总酚含量及其抗氧化活性比较[J]. 热带作物学报, 2021, 42(3): 888-896.
- [30] 刘晓海, 茹月蓉, 张雪春, 等. 103种药食两用植物化学成分分析及功能活性评价[J]. 中国食品学报, 2024, 24(8): 385-402.
- [31] 陈佩云, 湛晔, 周安宁, 等. 比较6种油茶花、叶和籽的多酚含量及其抗氧化活性[J]. 现代食品, 2019(24): 149-153.
- [32] 谢伟, 郝志鹏, 郭兰萍, 等. 丛枝菌根影响植物萜类化合物合成与积累研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(9): 49-63.
- [33] 刘萍, 刘旭丹, 丁义峰, 等. 激动素对菊花花瓣衰老生理的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(1): 80-84.
- [34] LE BOT J, BÉNARD C, ROBIN C, et al. The 'trade-off' between synthesis of primary and secondary compounds in young tomato leaves is altered by nitrate nutrition: experimental evidence and model consistency[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(15): 4301-4314.
- [35] 华晓雨, 陶爽, 孙盛楠, 等. 植物次生代谢产物-酚类化合物的研究进展[J]. 生物技术通报, 2017, 33(12): 22-29.
- [36] 吴浩震, 杨俊峰, 刘玉宁, 等. 常用铁线莲属药材总黄酮及主要活性黄酮苷元含量研究[J]. 中医药学报, 2025, 53(4): 38-42.
- [37] MANAFU Z, DU R, MALAJIANG X, et al. Effects of *Alhagi maurorum* Medik polysaccharide derived from different regions on the intestinal immune functions of lambs [J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2024, 15: 1422461.