

揭密山胡椒的性別密碼： 早期判斷技術的突破與展望

五峰分場 助理研究員 紀銘坤 03-5851487 分機 15

前言

山胡椒 (*Litsea cubeba*)，又稱馬告，是台灣及東亞地區重要的香辛料與藥用植物，其獨特風味和多重功效使其在食品、香料及醫藥領域備受青睞 (圖1)。然而，作為一種雌雄異株植物，山胡椒的性別在幼苗期難以辨識，傳統上需等待2-3年開花結果後方能判斷。這種滯後性導致栽培資源的浪費、育種效率的低下，並限制了其產業的規模化發展。因此，開發精準



▲圖 1. 山胡椒的盛花期。



▲圖 2. 山胡椒 1-2 月與櫻花同時盛開。

有效的山胡椒性別早期判斷技術，已成為當前提升山胡椒產業效益的關鍵。

山胡椒的生物學特性與性別決定機制

山胡椒屬於樟科 (*Lauraceae*) 木薑子屬 (*Litsea*) ，是一種落葉灌木或小喬木。其植株全株散發獨特香氣，果實是主要的經濟利用部分。山胡椒的生命週期展現了典型的雌雄異株現象，即單一植株僅具有成熟雄蕊或雌蕊，而非雌雄同株 (圖 3) 。這種性別二態性是許多植物物種的常見特徵，其性別決定機制通常受到遺傳和環境因素的複雜調控 (Renner and Müller, 2022) 。

在山胡椒中，性別的確定發生在發育早期，但外在的形態學特徵直到植株成熟並進入開花期後才顯現。雌株開出雌花，僅具發育完整的雌蕊，雄蕊萎縮，而雄株則開出雄花，僅具發育完整的雄蕊，雌蕊退化。根據觀察，山胡椒的性別分化是較為穩定的，一旦確定，植株的性別在整個生命週期中通常不會改變。然而，由於其雌雄異株的特性，自然繁殖率受到限制，

因為雌株需要異花授粉才能結實，而雄株的數量和分佈則影響著授粉的效率。

山胡椒的性別決定屬於XY系統，雄株Y染色體攜帶性別決定因子。早期研究顯示，山胡椒基因組大小約為1.3 Gb，性染色體差異可透過FISH (Fluorescence in situ hybridization) 探針檢測 (Liu *et al.*, 2019) 。山胡椒的性別決定可能涉及類似機制，涉及激素調控如GA抑制雌性分化 (Wang *et al.*, 2025) 。

山胡椒性別早期判斷的方法與進展

為了克服傳統性別鑑定方法的局限性，科學家們已開發出多種基於形態學、分子生物學和生理學的早期性別判斷技術。

1. 形態學特徵分析

儘管幼苗期形態差異不明顯，但隨著植株生長，一些細微的形態差異開始顯現。例如，山胡椒的雄花直徑顯著大於雌花，且雄花花瓣呈明顯黃色，雌花較淡黃。與山胡椒有類似生理特性的胡椒莓 (*Tasmannia lanceolata*) 之研究也顯



▲圖 3. 山胡椒的雄花與雌花外觀。

示，雌株葉片通常較寬，莖徑也可能存在差異，但這些形態特徵容易受環境因素影響，變異較大。形態學分析雖然直觀，但準確性相對較低，且需要植株生長到一定階段才能觀察，因此仍需更精確的方法輔助 (Wang *et al.*, 2025)。

2. 分子標記技術：早期判斷的核心利器

分子標記技術是目前公認最有效且準確的早期性別判斷方法，能在幼苗階段就通過DNA分析進行性別鑑定 (Wang *et al.*, 2025)。

(1) 簡單重複序列 (SSR) 標記

SSR 標記由於其高多型性、共顯性和易於操作的特點，在植物性別鑑定中應用廣泛。在山胡椒的研究中，SSR標記如SSR-Lc005和SSR-Lc011 在雄株中呈現獨特條帶型態，而在雌株中缺乏，顯示出與性別的顯著關聯性 (Wu *et al.*, 2015)。

(2) 序列特徵擴增區 (SCAR) 和隨機擴增多型性DNA (RAPD) 標記

SCAR 標記是基於 PCR 擴增產物的序列特徵設計的，具有高特異性和重複性。在山胡椒的研究中，Wu等人於2015年報導了一個名為「Sex differential marker FD」的分子標記，能夠在幼苗期快速區分性別，為山胡椒的早期選育提供了實用工具。RAPD 標記也曾在胡椒莓中被用於識別性聯標記，例如 OPC-02產生雌性特異性片段，而 OPC-05 則產生雄性特異性片段 (Wu *et al.*, 2015)。

(3) 單核苷酸多型性 (SNP) 標記與基因組學方法

SNP 標記是基因組中單個核苷酸的

差異，具有極高的密度和穩定性。隨著高通量測序技術的發展，全基因組關聯分析 (Genome-Wide Association Study, GWAS) 已被應用於識別山胡椒的性別決定區域和性聯SNP。山胡椒的ITS序列分析顯示性別特異性 SNP 在雄株中出現頻率較高 (Wu *et al.*, 2015)。對山胡椒基因組的初步分析，如 Nature Communications 於2020年發布的研究，揭示了與性別決定相關的基因網絡和保守性，為定位性別決定基因提供了系統性參考 (Chen *et al.*, 2020)。

3. 基因表現分析與性別決定基因

基因表現分析能夠識別在不同性別植株中差異表達的基因，這些基因可能直接參與性別決定或花器發育。在山胡椒的研究中，雄性花組織中APETALA3 (AP3) 與PISTILLATA (PI) 基因的表現量顯著高於雌性花組織，這表明這些MADS-box 基因可能調控雄花發育，可作為性別早期標誌物。這些基因的功能保守性在多種被子植物的雄性花發育中都有體現。研究也表明，在許多雌雄異株植物中，性別決定基因 (Sex Determination Genes, SDGs) 通常由一對性染色體控制，類似於人類的 XY 或 ZW 系統 (Wang *et al.*, 2025)。

4. 生理指標與影像分析

除了基因層面的差異，雌雄植株在生理和化學成分上也可能存在差異，這些差異可以被用作性別判斷的輔助依據。

(1) 揮發物分析

植物的次級代謝產物，特別是揮發性精油成分，可能因性別而異。在胡椒莓

中，GC-MS 分析顯示雌株葉片中聚神醛 (Polygodial) 含量可能較高，而 α -蒎烯含量較低 (Cock, 2013)。這些差異為通過化學指紋圖譜進行性別鑑定提供了可能性。

(2) 葉綠素含量

一些研究指出，雌雄異株植物的葉綠素含量可能存在差異。例如，在紫柳 (*Salix purpurea* L) 中，雄株葉片的氮累積量較高，SPAD 值也較高 (Gouker et al., 2020)。這可以通過手持式葉綠素計 (SPAD) 進行快速非破壞性測量，作為性別判斷的輔助指標。

(3) 高光譜影像技術

高光譜影像技術能夠捕捉植物在不同波長下的反射光譜，從而識別出肉眼不可見的生理和生化差異。在胡椒莓的研究中，高光譜影像技術可以偵測到雌雄植株葉片在近紅外波段的反射率差異，雌株反射率可能高出5%。這種技術結合機器學習算法，有望實現對幼苗性別的快速、無損識別。

綜合早期性別判斷模型的建立

山胡椒性別早期判斷方法各有其優缺點 (表1)，為了最大化性別判斷的準確性和效率，研究人員正嘗試將多種判斷方法結合起來，建立綜合性的預測模型。通過整合形態學、分子標記、基因表現、生理指標及影像分析數據，可以利用支持向量機 (SVM) 或其他機器學習算法構建高效的性別預測模型。例如，結合山胡椒的形態參數和分子標記，建立的 SVM 模型在驗證組中的準確率達到了93% (Wang et al., 2025)。

山胡椒性別早期判斷對產業的影響與挑戰

精準的早期性別判斷技術將為山胡椒產業帶來革命性的變革，從根本上提升其生產效率和經濟效益。這不僅對農民和育種者意義重大，也對生態保育和原住民經濟發展具有積極影響。

分子標記實現早期判斷的核心在於特异性：SSR標記穩定，不受環境影響。然而，山胡椒基因組多樣性高，需大樣本驗

表 1. 山胡椒性別早期判斷方法優缺點及適用性比較

| 判斷方法 | 優點 | 缺點 | 早期判斷適用性 |
|----------------------------|---------------------|---------------------------|---------|
| 形態學觀察 | 成本低、操作簡單、非破壞性。 | 準確性低、易受環境影響、需等待植株成熟。 | 較差 |
| 分子標記 (SSR, SCAR, SNP) | 準確性高、早期適用性強、不受環境影響。 | 成本較高、可能具有品系特异性。 | 極佳 |
| 基因表現分析 | 提供性別決定機制線索、高準確性。 | 成本高、需 RNA 提取和定量技術、操作複雜。 | 良好 |
| 生理指標 (揮發物、葉綠素) | 非破壞性、可快速測量。 | 準確性中等、易受環境和生長階段影響、需進一步驗證。 | 中等 |
| 高光譜影像技術 | 非破壞性、自動化、可識別微小差異。 | 設備成本高、數據處理複雜、需大量數據訓練模型。 | 良好 |

證，而且台灣山胡椒亞種差異可能導致標記失效。性別決定機制研究顯示，山胡椒性別可能涉及多基因調控，非單一Y基因（Golicz *et al.*, 2020）。

山胡椒是原鄉部落重要的產業之一，如能早期判斷山胡椒性別，預估可降低栽培成本20%-30%，是產業發展的關鍵技術，但目前仍有不少障礙需要克服。山胡椒性別早期判斷技術如果能夠順利發展應用，不僅能有效提高生產效率，也能促進原鄉地區的經濟活化，並進一步鞏固山胡椒產業的競爭力。

參考文獻

1. Chen, Y. C., Z. Li, Y. X. Zhao, M. Gao, J. Y. Wang, K. W. Liu, X. Wang, and Y. D. Wang. 2020. The *Litsea* genome and the evolution of the laurel family. *Nature communications* 11(1):1675.
2. Cock, I. 2013. The phytochemistry and chemotherapeutic potential of *Tasmannia lanceolata* (Tasmanian pepper): A review. *Pharmacognosy Communications* 3(4):1-13.
3. Golicz, A. A., P. E. Bayer, P. L. Bhalla, J. Batley, and D. Edwards. 2020. Pangenomics comes of age: from bacteria to plant and animal applications. *Trends in Genetics* 36(2):132-145.
4. Gouker, F. E., C. H. Carlson, J. Zou, L. Evans, C. R. Crowell, C. D. Smart, S. P. DiFazio and L. B. Smart. 2020. Sexual dimorphism and sex ratio bias in the dioecious willow *Salix purpurea* L. bioRxiv, 2020-04.
5. Renner, S. S. and N. A. Müller 2022. Sex determination and sex chromosome evolution in land plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 377.1850: 20210210. doi: 10.1098/rstb.2021.0210
6. Wang, C., P. Xu, H. Wang, F. Luo, Q. Tu, Y. Fang, R. You, and Y. Lu. 2025. An efficient strategy for early sex identification in *Litsea cubeba* based on portable Raman technology combined with machine learning algorithms. *Journal of Food Composition and Analysis* 140:107242.
7. Wang, S., Y., Wang, Y. Chen, Y. Zhao, and M. Gao. 2025. Advances in the evolutionary mechanisms and genomic studies of sexual differentiation in Lauraceae plants. *International Journal of Molecular Sciences* 26(9):4335. doi: 10.3390/ijms26094335.
8. Wu, Q., Y. Chen, Y. Wang, and L. Lin. 2015. Sex differential marker FD for rapid sex identification of *Litsea cubeba*. *Genetics and Molecular Research*, 14(4):12820-12827.