

## • 综 述 •

## 珍稀濒危药用植物川贝母人工繁育关键技术研究进展与可持续发展战略

高 旦<sup>1,2,3</sup>, 吴宇涵<sup>1,4</sup>, 陈晓芳<sup>3</sup>, 卢 峰<sup>1</sup>, 杨泽敏<sup>1</sup>, 张浩博<sup>1,4</sup>, 史亚龙<sup>1,2,5</sup>, 张海涛<sup>1,4</sup>, 王家禄<sup>1,2</sup>, 王永刚<sup>6</sup>, 庾 强<sup>7</sup>, 李西文<sup>1,2\*</sup>

1. 中国中医科学院中药研究所, 道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室, 北京 100700

2. 北京协和医学院/中国医学科学院药用植物研究所, 北京 100193

3. 毕节医学高等专科学校, 贵州 毕节 551700

4. 吉林农业大学中药材学院, 吉林 长春 130118

5. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070

6. 兰州理工大学生命科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050

7. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083

**摘要:** 川贝母 *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* 是我国珍稀濒危药用植物的代表性物种, 受野生资源过度采挖及生境破碎化与退化的影响, 其野生种群已濒临枯竭, 目前被列为国家二级保护野生植物。人工繁育已成为缓解川贝母野生资源危机、保障临床用药需求的核心途径, 但受限于对高海拔特有生境的高度依赖、生态适应性较窄、种源混杂与种质退化、育苗周期长、病虫害频发及幼苗死亡率高等瓶颈问题, 川贝母的品种选育及规模化种植仍面临严峻挑战。系统综述了川贝母种质资源创新与良种繁育、栽培生境适配性优化、病虫害绿色防控及采收加工标准化等关键环节现状, 梳理了近年来上述领域的研究进展与技术突破。基于此, 提出以种质资源创新与良种繁育为核心, 构建川贝母“资源保护-种质创新-品种选育-品质调控-智能加工”全链条技术体系的发展战略, 为推进川贝母资源可持续利用、促进产业高质量发展提供理论依据与技术支撑。

**关键词:** 川贝母; 珍稀濒危药用植物; 人工繁育; 种质资源管理; 栽培技术优化; 病虫害综合防控; 采收加工

中图分类号: R282 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)03-1109-14

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.03.027

## Advances in key artificial breeding technologies and sustainable development strategies for the rare and endangered medicinal plant *Fritillariae Cirrhosae Bulbus*

GAO Dan<sup>1,2,3</sup>, WU Yuhuan<sup>1,4</sup>, CHEN Xiaofang<sup>3</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, YANG Zemin<sup>1</sup>, ZHANG Haobo<sup>1,4</sup>, SHI Yalong<sup>1,2,5</sup>, ZHANG Haitao<sup>1,4</sup>, WANG Jialu<sup>1,2</sup>, WANG Yonggang<sup>6</sup>, YU Qiang<sup>7</sup>, LI Xiwen<sup>1,2</sup>

1. Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China

2. Institute of Medicinal Plant Development, the Chinese Academy of Medical Sciences & Peking Union Medical College, Beijing 100193, China

3. Bijie Medical College, Bijie 551700, China

4. College of Chinese Medicinal Materials, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China

5. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

6. School of Life Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

7. College of Grassland Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

收稿日期: 2025-08-01

基金项目: 中国中医科学院科技创新工程项目(CI2024E003, CI2024C003YN); 北京市自然科学基金资助项目(7254508); 国家重点研发计划项目(2025YFC3509201); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(ZXKT22061, ZZ18-YQ-036, GL2025009, ZXKT25043)

作者简介: 高 旦, 助理研究员, 从事中药材质量评价及全程质量追溯。E-mail: dgao@icmm.ac.cn

\*通信作者: 李西文, 男, 研究员, 博士生导师, 从事品质中药材栽培及育种研究。E-mail: xwli@implad.ac.cn

**Abstract:** Chuanbeimu (*Fritillariae Cirrhosae Bulbus*) is a representative species of rare and endangered medicinal plants in China. Due to overharvesting of wild resources and habitat fragmentation and degradation, its wild populations are nearing depletion and are currently listed as a national second-level protected plant. Artificial propagation has become the core method to alleviate the crisis of wild *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* resources and ensure the supply of medicinal materials for clinical use. However, challenges remain, including its high dependence on specific high-altitude habitats, narrow ecological adaptability, mixed seed sources and genetic degradation, long seedling cycles, frequent pest and disease outbreaks, and high seedling mortality rates. These issues still pose significant challenges to variety selection and large-scale cultivation of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus*. This paper systematically reviews the current status of key areas such as genetic resource innovation and high-quality seed breeding, cultivation habitat adaptation optimization, pest and disease green control, and standardized harvesting and processing. It also outlines the recent research progress and technological breakthroughs in these fields. Based on this, the paper proposes a development strategy focused on genetic resource innovation and high-quality seed breeding, and the establishment of a comprehensive technical system for *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* covering resource protection, genetic innovation, variety selection, quality control, and intelligent processing. This strategy aims to provide a theoretical foundation and technical support for the sustainable use of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* resources and promote high-quality industry development.

**Key words:** *Fritillariae Cirrhosae Bulbus*; rare and endangered medicinal plant; artificial propagation; germplasm resource management; cultivation technique optimization; integrated pest and disease control; harvesting and processing

川贝母作为我国传统名贵中药材,素有“止咳圣药”之美誉<sup>[1]</sup>,《中国药典》2025年版明确规定其基原为川贝母 *Fritillaria cirrhosa* D. Don (别名卷叶贝母)、暗紫贝母 *F. unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia、甘肃贝母 *F. przewalskii* Maxim.、梭砂贝母 *F. delavayi* Franch.、太白贝母 *F. taipaiensis* P. Y. Li 或瓦布贝母 *F. unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia var. *wabuensis* (S. Y. Tang et S. C. Yue) Z. D. Liu, S. Wang et S. C. Chen 的干燥鳞茎。是临床治疗肺热咳嗽、肺虚久咳的药材。现代研究表明,川贝母富含贝母素甲、贝母素乙等甾体生物碱,及腺苷、鸟苷等核苷类成分,这些活性物质不仅具备显著的镇咳祛痰、抗菌抗炎功效,在免疫调节和抗肿瘤等领域也展现出巨大潜力<sup>[2-3]</sup>(图1)。近年来,随着对其药用价值研究的深入,川贝母在临床医疗、保健品及功能性食品开发中应用愈发广泛,市场需求呈持续增长趋势。然而,严苛的生长条件与漫长的生长周期,使川贝母野生资源面临严峻的挑战。据报道,川贝母药材的6种基原物种其野生资源主要分布于四川、青海和甘肃等地海拔3 000~4 500 m的灌丛或草甸,年平均温度维持在5~8 °C,无霜期不足120 d<sup>[4]</sup>。从种子萌发到可采收鳞茎历经5~7年时间,资源的自然更新难以满足市场日益增长的需求。近30年来,四川阿坝、甘肃甘南、青海等主产区均出现了较为严重的过度采挖现象。2020年全国中药材资源普查数据显示,野生种群密度较1980年下降78.6%,2021年,川贝母被列入《国家重点保护野生植物名录》(二级),野生资源已濒临灭绝。此外,全球气候变化导致高海拔地区生态环境逐年脆弱,进一步压缩了川

贝母的适生空间,加强其野生资源保护迫在眉睫。

面对野生资源近乎枯竭的困境,发展高质量的人工繁育产业已成为目前保障川贝母可持续市场供应的唯一有效途径和战略选择。虽然近年来在人工种植技术取得了一定进展,如20世纪50~60年代即实现了人工引种成功<sup>[5]</sup>,随后陈士林等<sup>[6]</sup>率先开展川贝母野生抚育,为人工栽培环境选择与野生资源可持续发展奠定了基础。近年来,丁丹丹等<sup>[7]</sup>提出的“二段式”栽培模式(即温室大棚集约化育苗与野外移栽结合)显著提高了种苗成活率,突破了传统播种保苗率低的瓶颈,成为川贝母规模化种植的重要技术路径之一。这些进展为人工繁育提供了实践经验和技术支撑。但产业发展仍面临诸多挑战,严重制约其可持续发展能力。(1)种质资源基础研究薄弱:野生驯化进程中因种源混杂、遗传多样性降低及种质退化等现象突出,导致栽培药材有效成分(甾体生物碱)含量不稳定,有些药材种类和部分产地难以达到《中国药典》标准;(2)精准栽培技术体系不完善:对川贝母生理生态特性,尤其在关键生育期的养分(N、P、K及微量元素需求动态)、水分(需水临界期与精准灌溉阈值)、光照需求规律掌握不清,缺乏标准化、可推广的生态种植模式;(3)育苗周期长成本高:1~2年生幼苗种植关键技术不成熟,导致保苗率低(30%左右)、实生苗生长缓慢;整体育苗环节周期长、成本高、效率低;(4)连作障碍问题严重:直播苗种植4~6年,长期连作导致川贝母根际土壤微生物群落结构失衡(有益微生物锐减,病原微生物富集)、土传病害(如镰刀菌根腐病)高发、土壤理化性质劣变,造成产量锐减和品质下降<sup>[8]</sup>;(5)采收

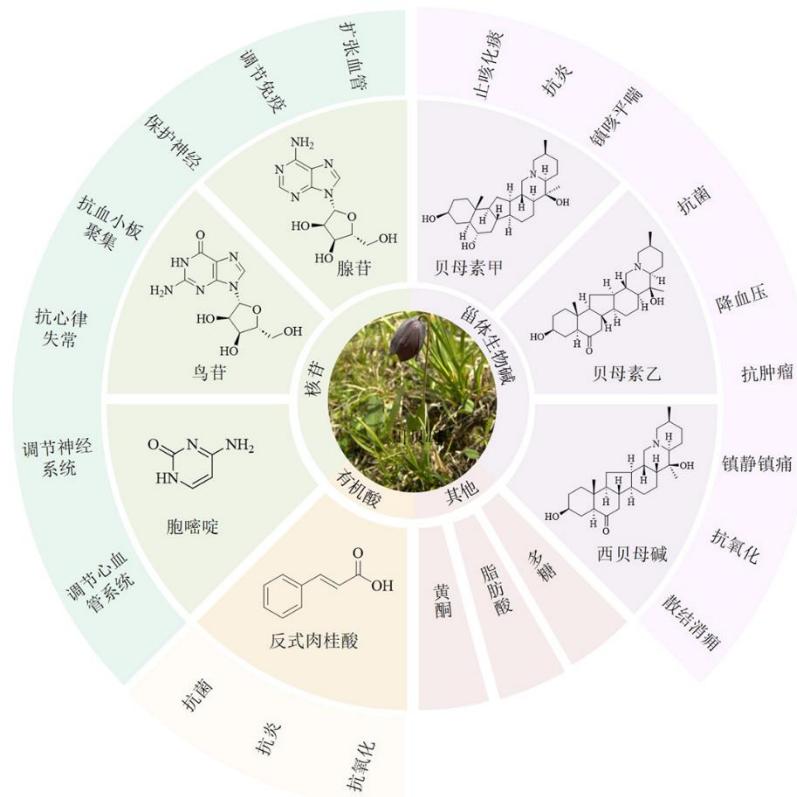


图1 川贝母鳞茎中的主要活性成分及其药理作用

Fig. 1 Main active ingredients of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* and their pharmacological effects

加工与质量评价体系不完善: 采收时机缺乏科学调控, 传统的自然晾晒受天气影响大, 烘干温度与时间控制随意性强, 易导致甾体生物碱等活性成分流失或转化, 影响药材品质均一性; 质量评价仍以单一成分(如贝母素甲、贝母素乙)含量测定为主, 难以全面反映药材整体药效, 且缺乏与临床疗效关联的生物活性评价指标。破解上述瓶颈难题, 构建资源节约、环境友好、产出高效、品质可控的川贝母生态种植体系, 是实现川贝母资源保护与可持续利用动态平衡的关键突破点。本文旨在系统梳理近年来川贝母人工繁育在种质资源创新评价、人工精细栽培、采收加工及质量追溯与评价体系等关键环节取得的核心技术进展; 并从种业振兴、绿色生产、数字化赋能、产业融合等多维度, 提出整合“生态保护优先、技术创新驱动、产业效益提升”的可持续发展综合解决路径, 推动川贝母等濒危药用植物的资源保障模式从“资源消耗型”向“科技创新型”的战略转型, 助推川贝母产业的高质量发展。

## 1 川贝母种质资源研究

### 1.1 资源特性与分布

川贝母(卷叶贝母)作为中药材川贝母基原植

物中分布最广的物种<sup>[9]</sup>。其野生资源常与北温带分布的杜鹃花属 *Rhododendron* L.、金露梅属 *Dasiphora* Raf.、绣线菊属 *Spiraea* L.、鲜卑花属 *Sibiraea* Maxim.等物种群落伴生。其典型生长生境为海拔3 000~4 500 m的灌丛草甸带, 土壤类型主要为腐殖质层较厚的高山/亚高山灌丛草甸土, 土层通常呈酸性<sup>[6]</sup>。然而, 21世纪以来, 受持续增长的市场需求驱动下的过度采挖、全球气候变暖及城镇化扩张导致的生境破碎化退化等多重因素影响, 川贝母野生资源量呈急剧下降趋势<sup>[10]</sup>, 其种质资源遗传多样性保护面临严峻挑战, 并日益受到学术界关注<sup>[11-13]</sup>。

### 1.2 种质资源遗传多样性特征

川贝母广阔的地理分布范围和异花授粉特性为其积累了丰富的遗传变异基础。近20年来, 川贝母种质资源的收集保存和栽培繁育工作已取得一定进展<sup>[14]</sup>。然而, 现有收集的种质主要来源于西藏、四川、云南等核心分布区, 采集模式多为农户采收蒴果后经中间商转售至种植基地。虽然这种广泛收集策略在提升栽培群体遗传多样性、增强环境适应性及抗逆能力方面具有积极作用, 但同时也引发种

源混杂、谱系溯源不清等问题。

在表型多样性研究方面,杨泽敏等<sup>[14]</sup>基于青海绿康种植基地的7年生川贝母群体,通过对460份不同种质的关键数量性状和质量性状进行系统测定分析表明,川贝母种群内表型变异丰富,其中腺苷、鸟苷、胸苷等核苷类成分含量变异幅度最大,变异系数高达85%~105%;其次是果重、花朵数和鳞茎鲜质量等农艺性状,变异系数在25%~30%,揭示了川贝母显著的种内表型多样性。在分子水平,吴小波<sup>[9]</sup>对采自四川、云南、西藏的14个野生川贝母居群及其16个近缘物种居群开展了扩增片段长度多态性(amplified fragment length polymorphism, AFLP)标记分析。算术平均法无权聚类和群体结构分析软件聚类方法均显示,14个川贝母居群在遗传上可明显分为3类,从分子层面印证了川贝母野生种群丰富的遗传多样性。随着新型分子标记技术如简单序列重复(simple sequence repeat, SSR)、单核苷酸多态性(single nucleotide polymorphism, SNP)在贝母属的研发与应用<sup>[15]</sup>,及高通量表型组学的推进,未来研究有望通过整合基因组、表型组、代谢组等多维数据,深度解析川贝母的遗传多样性结构,为构建核心种质库、保护遗传资源及指导精准育种奠定科学基础。

### 1.3 种质资源保护与挑战

尽管川贝母已被列为国家二级保护野生植物,但其野生资源仍受无序采挖、气候恶化、生境破碎化等人为和环境因素的胁迫。在通过人工栽培替代野生品实现“以利用促保护”、缓解药用资源供需矛盾的同时,需加强种质资源基础研究。据国家重要野生植物种质资源库(<https://seed.iflora.cn/>)显示,川贝母种质资源主要为中国科学院昆明植物研究所、西藏自治区高原生物研究所及成都中医药大学等单位负责保存,涵盖云南、四川及西藏部分地区的种质资源,保存形式以种子和离体培养物为主,但尚未建立覆盖横断山区、喜马拉雅东部、四川西部等核心分布区的系统性种质资源库。

未来应持续鼓励川贝母种质资源基础研究,探索核心种质资源评价体系;构建种质收集保存体系和保护措施,建立全国性种质资源保护网络与共享平台;完善种质资源登记管理制度,鼓励个人、社会组织及企业登记所保存的种质资源;推动优良种质产业化应用,开展优异种质产业化开发示范,以利用促保护,多方位协同保障川贝母种质资源遗传多样性。

### 1.4 新品种选育

川贝母漫长的生育周期(>5年)、严格的异花授粉特性、较短的人工驯化历史及不当的跨地域引种和不规范留种操作,导致当前栽培群体存在严重的种源混杂现象。种植基地内多个贝母近缘种混生的情况相当普遍,显著增加了田间管理的难度,并导致药材产量和有效成分含量波动大、品质不均一。因此,系统开展良种选育与推广工作迫在眉睫。

针对这一需求,四川、云南、青海等地的川贝母生产单位及科研机构已初步选育出“子康1号”“川贝1号”“绿之源1号”“绿之源2号”等品系及优良单株。初步评价显示,上述材料在鳞茎产量、抗逆性(耐寒、抗病等)及次生代谢物(如贝母素甲、总生物碱、核苷)含量等方面均优于地方对照群体。如Yang等<sup>[16]</sup>选育的“子康1号”,其总生物碱质量分数达0.110%,显著高于《中国药典》2020年版规定的0.050%,较传统对照种质提高57.14%。此外,Wang等<sup>[17]</sup>研究发现“子康1号”存在754个上调基因与980个下调基因,其中37个显著差异表达基因(differentially expressed genes, DEGs)通过编码6种关键酶(C4H、F3'H、ANS、DFR、DFT及BA1)调控花青素生物合成,上述DEGs是调控“子康1号”紫色表型形成的关键基因。目前,受限于川贝母生长周期极长、异花授粉导致后代分离显著、扩繁效率低下及组培快繁技术尚未成熟等关键瓶颈,上述优良种质的规模化制种与扩繁效率较低,尚未实现产业化广泛应用。

目前在育种方法层面,川贝母当前良种选育仍以集团选育为主,而近年甾体生物碱合成途径的系统解析为高生物碱含量品种培育提供了关键突破口,也为阐明生物活性成分合成途径奠定了核心基础。多项研究表明<sup>[18-21]</sup>,川贝母关键活性成分如贝母素甲和贝母素乙的生物合成依赖于植物甾醇( $\beta$ -谷甾醇等)的修饰过程,涉及细胞色素P450氧化酶(cytochrome P450, CYP450)、糖基转移酶(UDP-glycosyltransferases, UGT)及乙酰转移酶等催化反应。Liao等<sup>[22]</sup>通过川贝母鳞茎转录组与代谢组关联分析,鉴定出CYP90G4、CYP724B2等多个参与C-26位羟基化和环化反应的关键酶基因。Wang等<sup>[19]</sup>研究发现UGT73家族成员Fuwi3GT通过W201残基(关键位点)精准识别异甾体骨架,催化西贝母碱3-O-葡萄糖基化,点突变实验显示W201L突变

体酶活性丧失 80%，揭示其底物选择分子基础。这些发现为基于合成关键酶基因表达的分子标记开发和代谢调控育种奠定了关键理论基础。虽然多种分子标记技术如随机扩增多态性 DNA<sup>[23]</sup>、转录组来源的简单重复序列<sup>[16]</sup>、SNP、AFLP 和 DNA 条形码<sup>[24]</sup>等，在贝母属植物中得以应用，并在物种鉴定、系统分类和遗传多样性评估方面展现出良好前景，但其在川贝母分子标记辅助育种中的实际应用仍面临巨大挑战。核心限制因素在于川贝母超大基因组（其单倍体基因组大小约 30 Gb）带来的高昂全基因组测序和基因分型成本<sup>[25]</sup>。因此，现有开发的标记多基于叶绿体基因组或有限转录本数据，导致标记密度、基因组覆盖度及分辨率均不足，难以支撑高效的分子育种实践，目前主要停留在理论探索阶段。值得期待的是，随着测序技术成本持续下降和大基因组组装能力的显著提升，如近年成功破译的泸定百合 *Lilium sargentiae* E. H. Wilson (35.66 Gb)<sup>[26]</sup> 和兰州百合 *L. davidii* var. *unicolor* (Hoog) Cotton (36.68 Gb)<sup>[27]</sup> 等超大基因组解析的突破，为川贝母超大基因组破译提供了技术借鉴。同时，关键酶基因的功能解析助力新型酵母工程细胞构建——通过异源表达 *CYP450*、*UGT* 等基因，可在酵母中重构甾体生物碱合成途径，为呼吸道传染疾病的药物研发提供高效活性成分生产体系。未来整合高通量表型组、基因组、转录组及代谢组数据，有望构建分子设计育种体系，推动育种从“经验型”迈向“精准型”，实现药材产量与品质的协同提升，为川贝母药用价值开发与可持续利用提供核心支撑（图 2）。

### 1.5 种业发展现状与问题分析

中药材种业是指专门针对中药材的种质资源保护与利用、品种选育、种子种苗生产、加工、销售、质量控制和行业管理的全产业链体系。其中中药材种子产业与育种体系建设，作为国家战略性、基础性核心产业，是中药材产业链的源头，对保障中药材稳定供给、质量安全及现代中医药产业发展具有核心作用。与粮食作物数千年的驯化和育种历史相比，中药材种子生产和育种体系的发展历史较短，仅约 40 年，受品种特性、生态适应性及监管特殊性影响，中药材种业整体仍处于初级阶段，育种体系建设、良种推广及标准化种子生产体系亟需完善，而政策支持在推动行业规范发展中起到关键作用。2019—2025 年，国家层面持续出台政策推动中

药材种业发展。这些政策为中药材种业的高质量发展提供了系统性保障。

与川芎、姜黄、百合、山药等自宋代即有栽培历史的药用植物相比<sup>[28]</sup>，川贝母的人工栽培与驯化起步较晚。20 世纪 50 年代首次报道采用种子进行人工繁育以应对野生资源短缺问题，标志着川贝母种子产业的起步，同时为育种体系的建立奠定了基础<sup>[5]</sup>。在市场需求扩大与野生资源枯竭的双重驱动下，其人工栽培已初具规模。陈士林等<sup>[6]</sup>提出野生抚育理念，团队围绕川贝母生活史、繁育特性、产地适宜性及群落生态开展系统性研究<sup>[29-31]</sup>，基于全球药用植物地理信息系统优选出适宜规模化种植的生态区域，为提升人工种植的品质和效率提供了重要科技支撑。

近年来，肖婷等<sup>[4]</sup>对于川贝母药材 4 个基原植物（卷叶贝母、暗紫贝母、瓦布贝母、太白贝母）的栽培模式和栽培区域进行了系统的综述。目前川贝母的栽培区域主要集中在青海、四川、云南、西藏等地，种植生产企业主要包括青海绿康、西藏曼郎和丽江可宝，总种植规模达到了已达数千亩级别。川贝母在种苗繁育方面主要以种子繁殖为主，5 年生成株可以产生 1~6 个蒴果，每个蒴果内有种子 150 粒左右，种子饱满率约为 50%，繁育系数较高。也有采用球茎以离体方式进行扩繁的报道，但目前尚处于实验室阶段，主要用于种质的保存和实验研究<sup>[13,32]</sup>，随着炼苗移栽关键技术的突破，川贝母组培苗或将进一步促进其的标准化和规模化生产。然而，目前受限于较为严苛的栽培条件，高昂生产成本以及较长的繁育周期，目前川贝母的种苗生产模式主要以企业经营为主。经后熟处理的川贝母种子于清明前后按 6 000 粒/m<sup>2</sup> 的密度播种于遮阴棚中，2 年后采挖得到的种鳞茎可作为种苗向中药材生产企业或有经验的种植户出售，从而形成“企业提供种苗-合作企业生产”或“企业提供种苗-种植户生产”的生产模式。

种子生产是川贝母种业发展的基础，除前述的种源混杂、良种推广体系不完善、异花授粉和庞大的基因组导致分子育种难度大以外，川贝母种子繁育仍面临着诸多挑战，其中种子繁殖技术的瓶颈尤为突出。由于川贝母自然生长周期长达 5 年以上，长期连作引发的土壤微生物失衡问题严重，表现为病原菌（如 *Parastagonospora*、*Pseudogymnoascus*、*Luteimonas*）积累和促生菌（如 *Sphingomonas*、

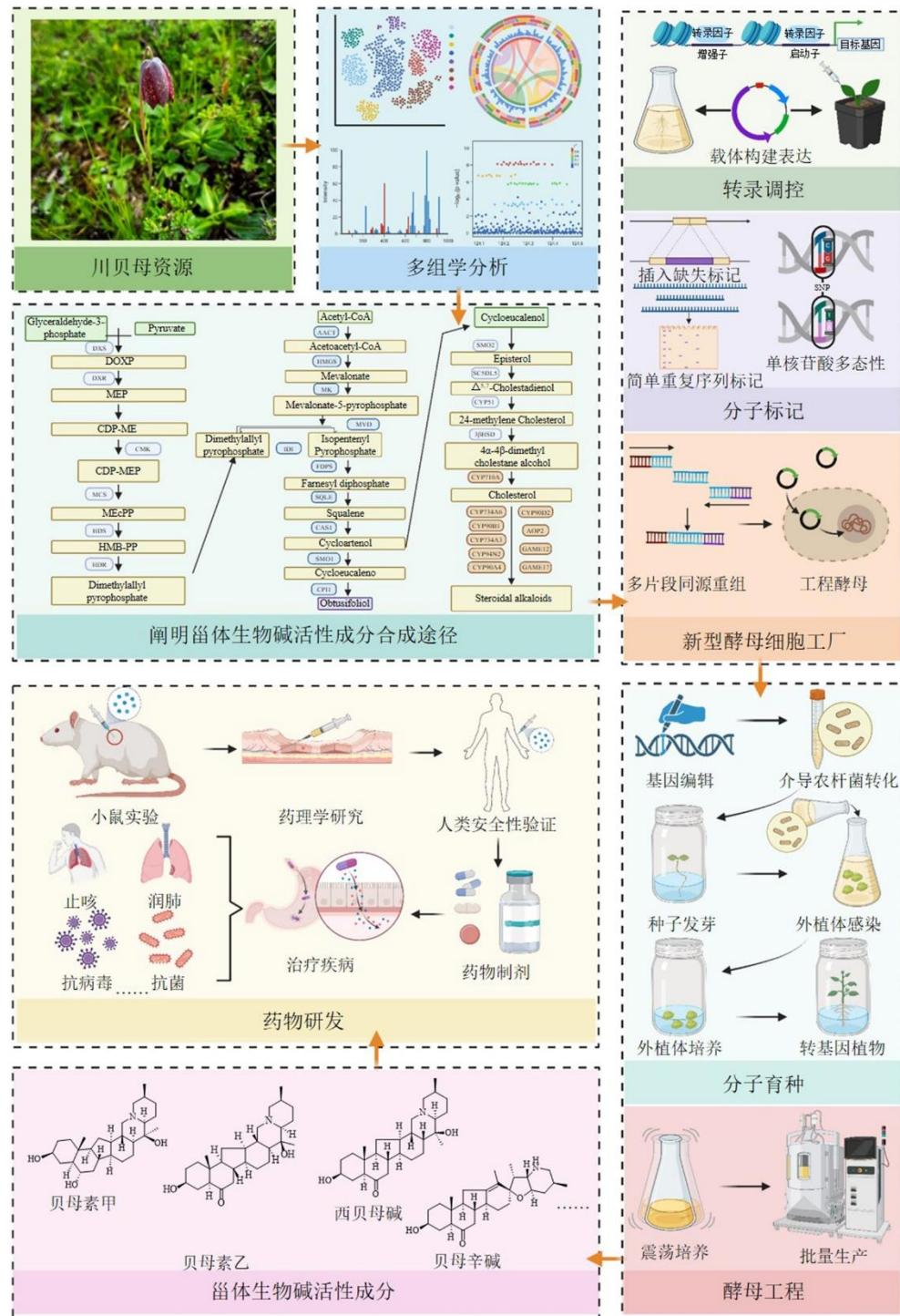


图2 川贝母资源的开发和利用策略

Fig. 2 Development and utilization strategies for *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* resources

*Lysobacter*、*Cladosporium*) 减少, 直接影响植株生长<sup>[8]</sup>。此外, 种植过程中平均每年 20%~30%的缺苗问题也一定程度上制约川贝母种苗的规模化生产。未来的种业发展应注重种质创新、标准化生产体系建设与产业化推广。其中育种技术创新应重点关注表型辅助选择育种、组培快繁技术和基因组选

择育种。产业化方面可推行繁种育苗与药材生产分离的模式, 推广川贝母药材生产管理规范化标准化种植技术。

## 2 川贝母精细化栽培体系研究现状

关于川贝母的人工栽培, 早在 20 世纪 50~60 年代川贝母已经开始并且试种已经初步成功<sup>[5,33]</sup>,

之后陈士林等<sup>[6]</sup>在青藏高原地区率先开展了川贝母野生抚育工作,为川贝母人工栽培环境的选择以及野生川贝母资源的可持续发展奠定了重要基础。之后,丁丹丹等<sup>[7]</sup>提出“二段式”栽培模式,该模式通过在高原温室大棚中进行集约化育苗,培育出2~3年生的川贝母鳞茎,随后移栽至大田或野外环境进行后续种植和抚育。该技术显著提升了种苗的存活率,克服了传统播种保苗率极低的难题,对推广川贝母人工繁育及保护野生资源具有重要的示范和应用价值。此模式成为当前川贝母规模化种植与可持续发展的关键技术创新。

## 2.1 精准营养调控关键技术

受限于繁育周期漫长,人工栽培历史较短及发育规律不清等问题,目前川贝母的栽培管理仍处于探索阶段,在栽培过程中面临着产量不稳定、药用品质参差不齐等瓶颈。施肥作为调控植物生长与次生代谢的关键农艺措施,其科学施用直接影响川贝母的养分吸收效率、抗逆性及有效成分积累。当前,针对川贝母的肥料研究已从单一元素效应逐步深入到“土壤-微生物-植物”互作机制,但多年生栽培模式下的精准施肥体系尚未完善,过量施肥导致土壤有害元素积累严重威胁川贝母品质<sup>[34]</sup>,因此亟需通过整合多维度研究成果以指导生产实践。如王新月等<sup>[35]</sup>通过三因子四水平试验证实,氮磷钾配施对川贝母产量及总生物碱含量呈“先升后降”规律,缺素处理可导致产量降低21.66%~47.29%,并确定5年生植株的最优施肥区间( $N 15.27\sim 21.72 \text{ g/m}^2$ 、 $P_2O_5 11.85\sim 16.08 \text{ g/m}^2$ 、 $K_2O 13.82\sim 18.65 \text{ g/m}^2$ )。进一步通过川贝母初花期氮磷钾不同剂量追肥试验,发现各肥料对光合特性、农艺性状(单果质量、鳞茎鲜质量等)及总生物碱含量呈显著剂量依赖性效应,且最佳追肥量为氮肥 $20 \text{ g/m}^2$ 、磷肥 $250 \text{ g/m}^2$ 、钾肥 $75 \text{ g/m}^2$ ,为其规范化栽培中精准施肥技术提供了科学依据<sup>[36]</sup>。马靖<sup>[37]</sup>通过“3414”田间试验确定了川贝母低氮磷钾施肥模式(“树儿子”期与“灯笼花”期差异化施肥方案)。Jiang等<sup>[38]</sup>研究发现适量氮肥可通过重构根际微生物群落(增加假单胞菌等有益菌、减少炭疽菌等病原菌)提升川贝母鳞茎产量及贝母素甲、西贝母碱含量。

有机肥与微生物肥料在川贝母绿色栽培中展现出显著效益。施用有机肥能够增加土壤有机质含量,从而有效改善土壤团粒结构并维持土壤pH稳定,对缓解长期过量施用化肥造成的土壤板结与盐

碱化有良好的效果<sup>[39]</sup>。Wu等<sup>[40]</sup>研究指出合理施用有机肥可以招募参与养分循环的植物促生菌,从而促进川贝母产量提高了119.45%。此外,Zhou等<sup>[41]</sup>研究发现,接种丛枝菌根真菌、解钾菌和解磷菌的微生物肥料可显著提高太白贝母菌根定植强度,同时提升鳞茎生物碱和核苷酸类成分含量。Ren等<sup>[42]</sup>通过盆栽试验证实,接种曲霉属解磷真菌单一及复合菌株可显著提升太白贝母鳞茎生物量。有机肥微生物肥料在提高川贝母产量和药用成分方面具有巨大潜力,然而,目前有机肥替代化肥的协同增效模式与生态经济效益平衡机制尚不清楚、微生物肥料作用机制及菌株筛选标准化仍不足。

## 2.2 精准光环境调控关键技术

川贝母属于典型的阴生药用植物,对生长环境中的光照条件极为敏感,开展精准光调控是保障幼龄植株存活和生长发育的重要手段<sup>[43-44]</sup>。早期(1~3年生)植株因叶片接近地面,容易受强光照射和泥土飞溅影响,导致叶片损伤和存苗率降低。因此,在幼苗生长期采用较高遮荫度(50%~70%)有助于减轻强光对叶片的伤害,同时降低地表温度,促进幼苗健康发育。随着植株年龄增长,遮荫强度应逐渐降低至约30%,以满足成株对光合作用的需求并防止鳞茎黄化。遮荫管理通常结合搭建荫棚、套种和覆盖等方法,根据不同生长期灵活调整,确保光照条件既不过强也不过弱,实现对川贝母生长环境的动态调控。马靖等<sup>[45]</sup>研究表明,遮阴会降低川贝母“树儿子”期和“灯笼花”期植株净光合速率,导致“树儿子”期叶片宽度减小、“灯笼花”期开花率及挂果率显著降低,大田栽培时期均不宜遮阴,不遮阴处理更经济环保。李西文等<sup>[29]</sup>研究表明,遮阴可显著提升川贝母幼龄植株净同化率,而“树儿子”期植株在全光照下光化学效率无显著差异。Yang等<sup>[43]</sup>通过转录组学与生理分析发现,不同光质管理的调光薄膜可通过调控光合作用相关基因提升川贝母光合能力,显著增加鸟苷、尿嘧啶等成分含量及叶片厚度,并减少黄酮类抗氧化物质合成需求,为其光质调控栽培及高海拔适应机制解析提供分子依据(图3)。Lu等<sup>[44]</sup>通过土壤代谢组学与微生物组学分析发现,蓝色遮阴农膜显著提升川贝母根际细菌 $\alpha$ 多样性及微生物网络稳定性,并促进植物促生菌(如 $Desulfomicrobium$ 、 $Zoogloea$ )和线虫拮抗真菌(如 $Stachyliidium$ )的富集,同时促进川贝母根际防御代谢物(槲皮素、小檗碱等)和生长相

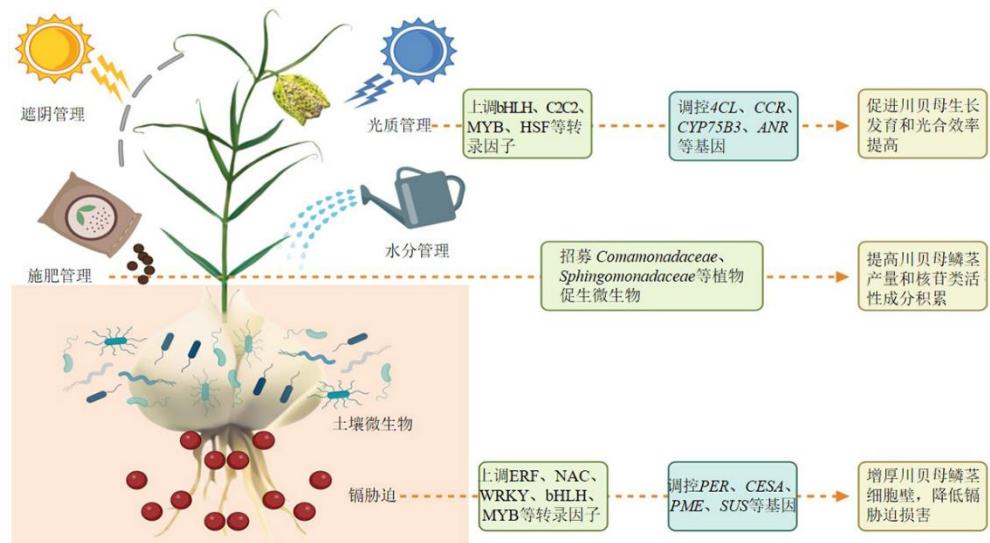


图3 川贝母田间管理及分子调控机制

Fig. 3 Field management and molecular regulatory mechanisms of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus*

关物质（3-吲哚乙腈等）积累，为濒危药材资源可持续利用提供了“以光调菌、以菌促药”的新型技术路径。

### 3 川贝母病虫害综合防控体系

#### 3.1 主要病害类型及病原学特征

川贝母在生长过程中易遭受多种病虫害的侵袭，主要包括根腐病、立枯病、灰霉病、蚜虫、地老虎等。根腐病是川贝母常见的病害之一，主要危害根部，导致根部腐烂，植株枯萎死亡（表1）。Wang等<sup>[54]</sup>通过分子鉴定、致病性检测、形态学评估和显微镜检查，确定镰刀菌为引起太白贝母鳞茎腐烂的病原菌。镰刀菌作为一种土传致病真菌，已在全球范围内传播，会在宿主植物上引发多种症状，包括枯萎、根腐和鳞茎腐烂，导致具有重大经济影响的病害<sup>[55]</sup>。立枯病主要危害川贝母的幼苗，导致幼苗枯萎死亡。

表1 川贝母主要病虫害及其主要症状

Table 1 Major diseases and pests of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* and their primary symptoms

病虫害名称	主要症状	文献
根腐病	根部腐烂，植株枯萎死亡	46
立枯病	幼苗枯萎死亡	47
灰霉病	叶片枯萎、果实腐烂	48
叶斑病	叶片出现斑点，严重时叶片枯萎	49
锈病	叶片、茎秆出现锈色孢子堆	50
蚜虫	吸食植株汁液，造成叶片卷曲、生长不良	51
地老虎	咬食幼苗茎部，造成缺苗断垄	52
蛴螬	咬食根部，造成植株生长不良、倒伏	53

郭鶯怡等<sup>[56]</sup>研究表明，立枯病的病原菌为立枯丝核菌，其生长最适温度为25~30℃，最适pH为8。灰霉病主要危害川贝母的叶片和果实，导致叶片枯萎、果实腐烂。何俊洁<sup>[57]</sup>指出灰霉病的发生与空气湿度密切相关，高湿度环境下发病更为严重。

#### 3.2 传统病虫害防控措施

川贝母病虫害防控通常采取“农业防治和生物防治”相结合的综合策略，以实现病虫害的有效控制与可持续生产目标。

农业防治是川贝母病虫害综合防控的基础。在种植过程中，合理轮作可以改善土壤环境，减少病虫害的发生。姜超等<sup>[58]</sup>指出轮作可以打破病虫害的生存环境，减少病原菌和害虫的数量。孙晓红等<sup>[59]</sup>研究表明，改善土壤微生物群落结构可以有效防治病害。在川贝母种植中，可以与非百合科作物进行轮作，如豆科作物、禾本科作物等，这些作物不仅能改善土壤结构，还能为川贝母提供健康的生长环境。周雨佳<sup>[60]</sup>研究表明豆科绿肥与作物间作可以提高土壤肥力，减少病虫害的发生。此外，加强栽培过程管理，通过除草、松土、施肥、灌溉等措施，可以创造适宜生长环境，这不仅有利于川贝母生长，还能提高其抗病虫害能力。Wu等<sup>[40]</sup>研究指出，合理施用有机肥能够有效抑制病原真菌 *Heydenia* 和 *Solicoccozyma* 的生长，其相对丰度分别显著降低了63.1%和19.4%，从而有效降低川贝母病害发生率。因此，农业防治在川贝母病虫害综合防控中具有不可替代的作用，通过合理轮作、科学施肥及裁

培过程的精细化管理,可实现土壤环境改良、病虫害防控与药材产量品质提升的协同效应。然而,当前关于川贝母与特定作物或药用植物(如紫苏、当归等)轮作的最优周期、土壤微生物群落互作机制及病害抑制效果的研究仍较匮乏,亟需结合微生物组学、代谢组学等多组学技术,解析不同轮作模式下根际微生态的动态变化规律,为构建靶向性的轮作防控体系提供科学依据。

化学防治因其见效快、效果显著的特点,在川贝母种植过程中被广泛应用,成为目前最主要的防治手段之一。针对地上部分的病虫害,喷药是常见的防治方式。常用的药剂包括代森铵、噁霉灵、百菌清、嘧菌酯、嘧菌环胺、咯菌腈、吡唑醚菌酯和氟唑菌酰胺等。这些药剂各有其独特的防治机制和适用范围,能够针对不同的病虫害类型提供有效的解决方案。如代森铵是一种广谱保护性杀菌剂,主要用于预防真菌性病害,通过抑制病原菌孢子萌发和菌丝生长来发挥作用<sup>[61]</sup>;噁霉灵则对多种土传病害有较好的防治效果,常用于防治根腐病等<sup>[62]</sup>;百菌清是一种保护性杀菌剂,能够形成保护膜,防止病原菌侵入植物组织<sup>[63]</sup>;嘧菌酯和嘧菌环胺主要用于防治灰霉病、霜霉病、炭疽病、锈病和叶斑病等<sup>[64]</sup>;咯菌腈对多种真菌病害有良好的防治效果,尤其适用于种子处理<sup>[65]</sup>;吡唑醚菌酯是一种新型广谱杀菌剂,对多种作物病害有防治作用<sup>[66]</sup>;氟唑菌酰胺则对一些难防治的病害如菌核病表现出较好的防治效果<sup>[67]</sup>。肖荣凤等<sup>[68]</sup>研究发现,使用6.6%嘧菌酯-1.1%咯菌腈-3.3%精甲霜灵悬浮种衣剂及25%吡唑醚菌酯乳油在防治药用植物根腐病方面表现出显著的成效。黄萍等<sup>[69]</sup>研究表明氟唑菌酰胺等药剂对菌核病具有较好的防治效果。

繁殖材料也是病原传播的关键途径和主要媒介之一。在川贝母的种植过程中,种子或种苗往往携带病原菌,这些病原菌可能在播种后迅速引发病害,导致植株生长受阻,甚至大面积感染。因此,播种前对繁殖材料进行严格的消毒处理至关重要。常用的消毒方法包括浸种和拌种。浸种是将繁殖材料浸泡在特定浓度的消毒剂溶液中,通过药剂渗透作用杀死附着在种子表面或内部的病原菌<sup>[70]</sup>;拌种则是将消毒剂与繁殖材料均匀混合,使药剂附着在种子表面,形成保护层,从而有效抑制病原菌的生长和传播。这些消毒措施不仅能显著降低病害的发生率,还能为川贝母的健康生长提供有力保障,是川贝母

病害综合防控体系中不可或缺的重要环节。

对土壤进行熏蒸消毒可有效防治地下病害,常用药剂包括威百亩、棉隆和异硫氰酸烯丙酯等。课题组前期研究表明,施用威百亩熏蒸可以使川贝母鳞茎生物量提高43.5%。在川贝母种植过程中,可以选择合适的化学农药进行防治,但要注意合理使用,避免农药残留和环境污染<sup>[71]</sup>。然而,当前针对川贝母的土壤熏蒸剂研究较为薄弱,相关的药剂筛选、使用剂量、施用方式及对川贝母生长和品质影响等方面的系统性研究仍有待加强。

### 3.3 新型病虫害防控策略

生物防治是川贝母病虫害综合防控的新型手段。作为一种绿色、环保的防控策略,生物防治充分利用丰富的生物资源,不仅能够有效降低病虫害的发生率,还能在保护生态环境方面发挥积极作用,实现川贝母生产的可持续发展。孙启花等<sup>[72]</sup>发现微生物菌剂在减少根腐病发生、促进植株生长、提高产量方面具有显著优势。Ku等<sup>[73]</sup>研究发现施用枯草芽孢杆菌C3,可以降低太白贝母球茎腐病的发生率18.44%。Wang等<sup>[74]</sup>研究发现从太白贝母球茎组织中分离出的内生细菌SJ22被鉴定为地衣芽孢杆菌,在体外对镰刀菌属表现出显著的拮抗作用,平板抑制率可达84.35%~89.96%,盆栽试验中对由镰刀菌属引起的鳞茎腐病的控制率达到73.38%,从而显著降低太白贝母球茎腐病的发生率。樊黎<sup>[75]</sup>研究发现由Bacillus和Pantoea gavini制成的微生物菌肥对尖孢镰刀菌Fusarium oxysporum、链格孢菌Alternaria alternata、炭疽菌Colletotrichum gloeosporioides和拟盘多毛孢菌Neopestalotiopsis clavigpora的抑菌效率分别为68.9%、73.9%、35.4%、30.3%。此外,利用天敌昆虫如瓢虫、草蛉等对蚜虫等害虫进行防治,也可以有效减少害虫的数量。

未来,川贝母病虫害防控将进一步向智能化方向发展。一方面,应加强对地下病害发生机制与防控途径的研究;另一方面,可引入人工智能技术,借助机器学习算法对气象和土壤生态数据进行深度分析,建立精准的地下病害预测模型,实现早期智能预警。通过计算机视觉技术开发自动化病害识别系统,可快速准确判别病害种类及危害程度,为精准防控提供数据支撑。同时,结合人工智能优化生物防治与化学防治的配比与施用时机,可构建智能化综合防控决策体系,从而显著提升防控的效率与精准度,为川贝母产业的可持续发展提供坚实的技术保障。

## 4 川贝母的采收加工与质量评价

中药材质量受品种、产地、栽培、采收、加工及贮藏等多环节系统性影响<sup>[76]</sup>。其中,适时采收是保障药材产量与质量的关键环节。药用植物在生长周期内,其代谢活动随季节更迭而动态变化,致使活性成分含量与生物产量持续波动<sup>[77]</sup>。产地初加工作为药材品质形成的重要阶段,不仅有助于提升中药材的可追溯性,更能从源头保障药材质量与安全性<sup>[77]</sup>。科学的储藏标准可有效防止药材变质、维持有效成分稳定并延长保质期<sup>[78]</sup>。现代质量控制体系通过整合分子鉴定、成分定量分析及全程追溯技术,构建起从种质资源到终端产品的质量标准化闭环管理体系<sup>[79-80]</sup>。

### 4.1 品质形成机制

川贝母中“松贝”以其独特的“怀中抱月”品相及优良品质,成为“优质”“优形”研究的典型样本。这种川贝母鳞茎外层两瓣鳞片大小悬殊,大瓣紧抱小瓣,未抱合部分呈新月形,宛如母亲怀抱婴儿,不仅具有极高的辨识度,其有效成分贝母素甲、贝母素乙的含量也显著高于其他品种。袁媛等<sup>[81]</sup>指出,道地药材“优质”“优形”的形成是遗传因素、环境因素及其交互作用的结果。以人参为例,人工驯化过程中通过有性繁殖较好地保留了野生群体的遗传多样性,使得栽培人参仍具有较高的遗传变异水平<sup>[82]</sup>;而环境因素同样对药材形态塑造影响显著,不同生长年限与种植模式下的川贝母,其形态特征亦存在明显差异。研究表明,生长于不同区域的川贝母鳞茎生物碱含量有明显差异<sup>[83]</sup>;不同遮荫程度和土壤肥力条件下,川贝母的叶片形态、株高及鳞茎大小也呈现出规律性变化<sup>[40,45]</sup>。

鉴于川贝母在临床应用中的重要地位及其资源稀缺性,深入解析其“优质”“优形”的分子作用机制已成为当前研究的迫切需求。通过基因组学、转录组学等现代生物技术,系统研究川贝母活性成分合成关键基因的表达调控网络,解析环境信号响应机制,不仅有助于揭示“优质”“优形”的分子本质,还能为川贝母良种选育、规范化种植提供理论依据,对保障中药资源可持续利用和临床用药安全具有重要意义。

### 4.2 采收期对川贝母品质的影响及商品规格分化规律

川贝母的采收期缺乏统一且量化的衡量标准,不同采收时间所产出的药材会呈现出差异显著的

商品规格,而商品规格直接与药材品质紧密关联。《中国药典》2025年版依据川贝母不同基原植物干燥鳞茎的性状差异,将其划分为“松贝”“青贝”“炉贝”及栽培品等多个商品规格,且不再限定各规格对应的植物来源<sup>[4]</sup>。

目前多认为“松贝”指产自四川阿坝松潘地区的暗紫贝母,其鳞茎典型形态特征为“怀中抱月”,即大瓣紧抱小瓣,未抱合部分呈新月形;“青贝”主要对应青海、四川、云南交界地区的卷叶贝母,其显著特征为“观音合掌”,即外层鳞叶大小相近、相对抱合,顶部开裂,可见心芽和小鳞叶;“炉贝”通常指西藏昌都地区年限较长的梭砂贝母,药材品质亦较优<sup>[6,30,84-85]</sup>。当前市场中,“松贝”被普遍认为品质最佳,主要来源于生长2~3年的暗紫贝母,2024年其市场价格已升至约5 000元/kg (<https://yaocai.zyctd.com/>);“青贝”品质次之,多由生长4年以上的卷叶贝母加工而成,价格约为4 000元/kg (<https://yaocai.zyctd.com/>)。由此可见,栽培川贝母的采收期与生长年限是决定药材外观性状的核心要素。刘辉等<sup>[86]</sup>研究表明卷叶贝母在植株枯萎期采挖,其鳞茎生物量与总生物碱含量均达峰值。王业等<sup>[87]</sup>通过对不同规格卷叶贝母鳞茎的生理指标与生物碱含量,发现直径较大的鳞茎更适宜作为种源进行繁育,较小鳞茎则适合作为商品药材。综合考量药材产量、内在质量及生产实际,建议以生产“青贝”为目标,采收4~5年生的卷叶贝母作为商品。

### 4.3 产地初加工及其智能优化

产地初加工是保障药材质量、便于贮藏运输的关键环节<sup>[88]</sup>。目前,川贝母产地加工仍以传统方法为主,主要包括日晒法、烘干法、蛤粉裹制法等<sup>[76,89]</sup>。日晒法是将采挖后的川贝母洗净泥土,白天置于室外摊晒,夜晚移至室内,如此反复直至达到干燥要求,但该方法耗时长,所得药材表面皱缩,折干率较低。蛤粉裹制法是使川贝母表面均匀裹附蛤粉,经日晒夜收反复干燥,然而此方法会导致药材中生物碱含量显著下降。烘干法是当前种植企业应用最广泛的初加工方式,相较于其他方法,在保留生物碱和核苷类成分方面更具优势,既能提高干燥效率,成本也低于真空干燥、冷冻干燥。由于栽培川贝母鳞茎直径与纵横比均一性较差,干燥过程中易出现外部干燥而内部未干的现象,贮藏时若管理不当,极易产生“黄粒”“黄子”等品质缺陷。李瑞琦等<sup>[78]</sup>通过系统研究不同烘干温度和时间对不同规格川贝母水分含

量的影响,确定小、中、大规格的川贝母在40℃条件下分别烘烤68、72、85 h,可使水分稳定保持在(8.0±0.2)%,且药材色泽最佳,此为当前川贝母的最优干燥条件。为满足大批量、规模化产地初加工需求,微波-热泵联合干燥、智能梯度控温系统、紫外烘晒等新型干燥技术在提升干燥效率、降低生产成本方面展现出巨大潜力,但上述先进技术在川贝母产地初加工领域的应用研究仍处于空白状态,亟待开展系统性探索。此外,对不同初加工方法与川贝母药效成分(如甾体生物碱的转化规律、核苷类成分的稳定性)的关联性研究深度不足,尚未明确加工过程中关键成分的动态变化机制;针对不同基原、不同生长年限的川贝母,缺乏差异化的初加工工艺参

数体系,难以实现精准化加工;对新型干燥技术与川贝母鳞茎生理特性的适配性研究缺失,未能建立技术应用的可行性评价标准,这些都制约着产地初加工技术的升级与品质提升。

## 5 结语与展望

川贝母作为我国珍稀药用植物资源,兼具显著的药用经济价值与生态服务功能,其可持续发展已成为多学科交叉研究的重要命题(图4)。近年来,通过植物学、生态学、农艺学等多学科协同攻关,川贝母在种质创新、栽培技术优化、生态种植模式构建等方面取得阶段性成果。然而,产业发展仍面临诸多技术瓶颈:在种质资源研究层面,其遗传背景解析深度不足,基于表型组-基因组关联分析的核心种质精

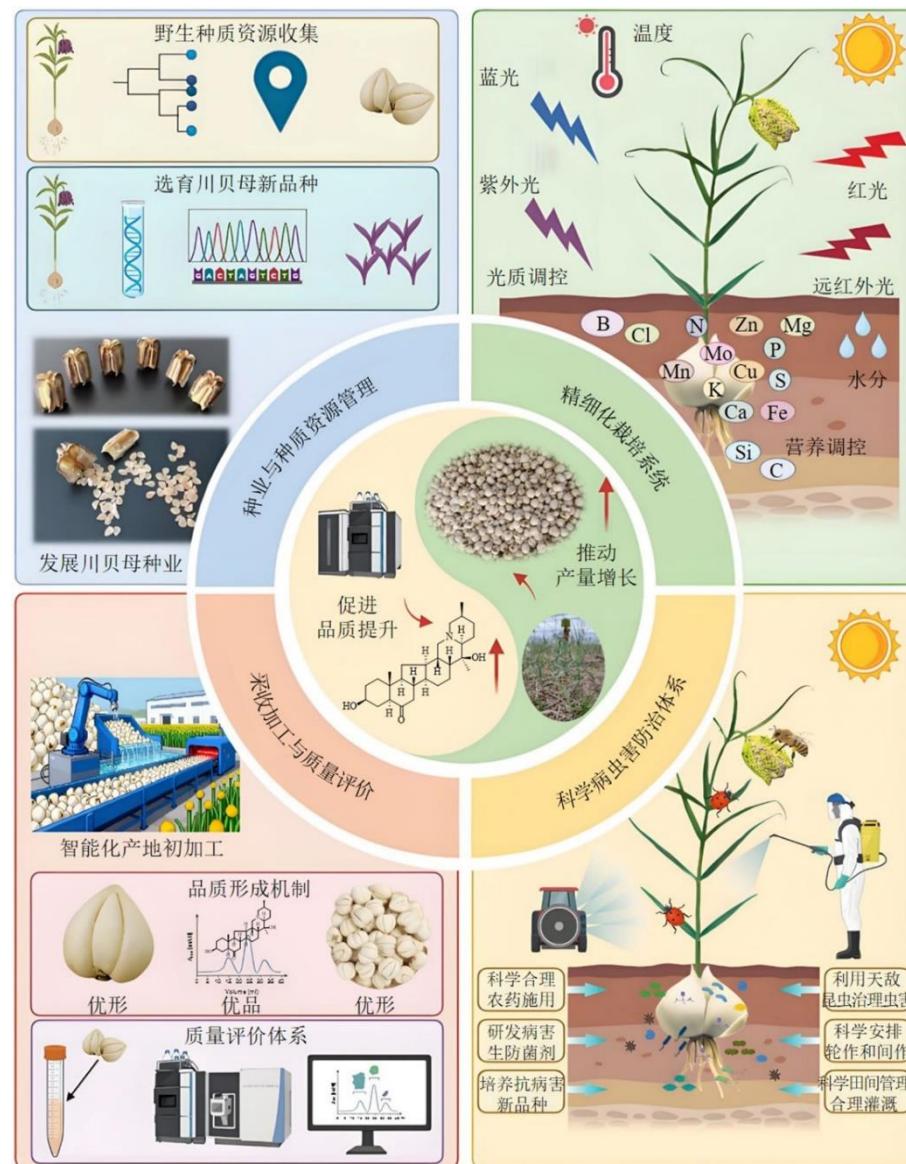


图4 川贝母人工繁育与可持续发展战略

Fig. 4 Artificial propagation and sustainable development strategies of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus*

准评价体系尚未完善；栽培技术领域，智能化监测与调控技术应用滞后，养分水分动态需求模型及精准供给策略仍待构建；生态种植模式推广进程中，群落结构优化与生态功能提升的协同机制研究匮乏；全产业链发展环节，标准化生产体系与质量追溯机制尚不完善，产业融合的协同创新效能亟待提升。

为突破川贝母优质高效生产的技术瓶颈、推动产业高质量发展，未来亟需从以下方向开展系统性研究：（1）深化种质资源创新，依托第三代高通量测序技术，开展川贝母超大基因组精细图谱绘制与功能基因挖掘，结合种质资源表型精准鉴定与分子标记辅助选择技术，构建高效的种质创新与良种选育体系；（2）针对川贝母阴生植物的生物学特性，系统开展生长发育进程中光照、水分、养分的动态需求规律研究，解析“环境因子-生理响应-代谢产物”的互作机制，并基于人工智能与物联网技术，研发多环境参数智能监测与精准调控系统，为植物工厂化高效栽培及栽培周期缩短提供技术支撑；（3）基于群落生态学理论，探索多物种共生的仿野生栽培模式，解析生物多样性与生态系统稳定性的调控机制，创新川贝母生态种植模式；（4）构建涵盖种质标准、栽培规范、加工流程、质量检测的全产业链标准化体系，结合区块链技术建立全程质量追溯平台，培育区域特色品牌，强化产业核心竞争力。通过科技创新驱动与产业模式革新双轮驱动，实现川贝母资源保护、产业发展与生态平衡的协同共进，为珍稀濒危药用植物资源可持续利用及中医药产业高质量发展提供理论依据与实践范例。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 谢梦迪, 田亮玉, 桂新景, 等. 近红外光谱技术结合化学计量学应用于川贝母真伪与规格的快速辨识研究 [J]. 中草药, 2022, 53(8): 2490-2498.
- [2] 代琪, 马珑珂, 叶俏波, 等. 不同基源川贝母化学成分和药理作用研究进展 [J]. 亚太传统医药, 2024, 20(6): 239-243.
- [3] 崔治家, 马艳珠, 张小荣, 等. 川贝母化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的预测分析 [J]. 中草药, 2021, 52(9): 2768-2784.
- [4] 肖婷, 杨明豪, 王秋玲, 等. 濒危药材川贝母野生变家种进展 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(16): 4483-448.
- [5] 白凤. 川贝母试种成功的经验 [J]. 中药通报, 1957(4): 164-165.
- [6] 陈士林, 贾敏如, 王瑀, 等. 川贝母野生抚育之群落生态研究 [J]. 中国中药杂志, 2003, 28(5): 398-402.
- [7] 丁丹丹, 余强, 王晓蓉, 等. 川贝母无公害仿生态栽培体系 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2019, 21(4): 775-783.
- [8] Gao D, Gao X S, Wang Y, et al. Effects of long-term continuous cultivation on the structure and function of soil bacterial and fungal communities of *Fritillaria cirrhosa* on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 21291.
- [9] 吴小波. 川贝母及其近缘种野生居群群体遗传学及药材品质评价研究 [D]. 大理: 大理大学, 2020.
- [10] Cunningham A B, Brinckmann J A, Pei S J, et al. High altitude species, high profits: Can the trade in wild harvested *Fritillaria cirrhosa* (Liliaceae) be sustained? [J]. *J Ethnopharmacol*, 2018, 223: 142-151.
- [11] Wu X B, Duan L Z, Chen Q, et al. Genetic diversity, population structure, and evolutionary relationships within a taxonomically complex group revealed by AFLP markers: A case study on *Fritillaria cirrhosa* D. Don and closely related species [J]. *Glob Ecol Conserv*, 2020, 24: e01323.
- [12] Jiang R P, Zou M, Qin Y, et al. Modeling of the potential geographical distribution of three *Fritillaria* species under climate change [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 12: 749838.
- [13] Zhang Z, Xing C Y, Su H Y, et al. In vitro plant regeneration and bioactive metabolite production of endangered medicinal plant *Fritillaria cirrhosa* [J]. *Curr Plant Biol*, 2024, 39: 100363.
- [14] 杨泽敏, 王业, 吴宇涵, 等. 川贝母种质资源的表型多样性及综合评价 [J]. 中草药, 2025, 56(2): 635-646.
- [15] 张婕, 李西文. 川贝母转录组中 SSR 位点信息分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(18): 30-35.
- [16] Yang Z M, Gao D, Wang Y, et al. Physiological and multi-omics insights into ultraviolet B-induced stress adaptation in *Fritillaria cirrhosa* native to the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *J Adv Res*, 2025: S2090-1232(25)00844-6.
- [17] Wang Y, Yang Z M, Gao D, et al. Integrated microbiology and target metabolomics analysis reveal the interaction of plant-microbe-soil interactions leading to the phenotypic plasticity of *Fritillaria cirrhosa* [J]. *Ind Crop Prod*, 2024, 219: 118999.
- [18] Peng M Y, Liu Z Q, Chen X Y, et al. LED blue light enhances the accumulation and synthesis of steroidal alkaloids in *Fritillaria unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia *in vitro* [J]. *Ind Crops Prod*, 2024, 216: 118836.
- [19] Wang J J, Wang Z K, Wang H, et al. UDP-glucosyltransferases from UGT73 family catalyze 3-O-glucosylation of isosteroidal and steroidal alkaloids in *Fritillaria unibracteata* var. *wabuensis* [J]. *Plant J*, 2025, 121(5): e70042.
- [20] Zhang Y F, Ma L, Su P, et al. Cytochrome P450s in plant terpenoid biosynthesis: Discovery, characterization and metabolic engineering [J]. *Crit Rev Biotechnol*, 2023, 43(1): 1-21.
- [21] Lu Q X, Li R, Liao J Q, et al. Integrative analysis of the

- steroidal alkaloids distribution and biosynthesis of *Bulbs Fritillariae Cirrhosae* through metabolome and transcriptome analyses [J]. *BMC Genomics*, 2022, 23(1): 511.
- [22] Liao H, Quan H G, Huang B H, et al. Integrated transcriptomic and metabolomic analysis reveals the molecular basis of tissue-specific accumulation of bioactive steroid alkaloids in *Fritillaria unibracteata* [J]. *Phytochemistry*, 2023, 214: 113831.
- [23] Xin G Z, Lam Y C, Maiwulanjiang M, et al. Authentication of *Bulbus Fritillariae Cirrhosae* by RAPD-derived DNA markers [J]. *Molecules*, 2014, 19(3): 3450-3459.
- [24] Chen Q, Hu H S, Zhang D Q. DNA barcoding and phylogenomic analysis of the genus *Fritillaria* in China based on complete chloroplast genomes [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 764255.
- [25] 赵敏, 杨秋雄, 王硕, 等. 流式细胞术测定川贝母四种基源植物基因组大小 [J]. *分子植物育种*, 2023, 21(16): 5265-5272.
- [26] Liang Y W, Gao Q, Li F, et al. The giant genome of lily provides insights into the hybridization of cultivated lilies [J]. *Nat Commun*, 2025, 16(1): 45.
- [27] Xu S J, Chen R Z, Zhang X Q, et al. The evolutionary tale of lilies: Giant genomes derived from transposon insertions and polyploidization [J]. *Innovation*, 2024, 5(6): 100726.
- [28] 郭巧生, 王长林. 我国药用植物栽培历史概况与展望 [J]. *中国中药杂志*, 2015, 40(17): 3391-3394.
- [29] 李西文, 陈士林. 遮荫下高原濒危药用植物川贝母 (*Fritillaria cirrhosa*) 光合作用和叶绿素荧光特征 [J]. *生态学报*, 2008, 28(7): 3438-3446.
- [30] Li X W, Dai Y, Chen S L. Growth and physiological characteristics of *Fritillaria cirrhosa* in response to high irradiance and shade in age-related growth phases [J]. *Environ Exp Bot*, 2009, 67(1): 77-83.
- [31] Li X W, Chen S L. Diurnal changes in gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of *Fritillaria cirrhosa* and *F. delavayi* under field conditions [J]. *Photosynthetica*, 2009, 47(2): 191-198.
- [32] 马步进. 卷叶贝母离体培养及人工种子技术研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2021.
- [33] 中医研究院中药研究所生药研究室. 谈谈认药 [J]. *植物学杂志*, 1976(3): 17-18.
- [34] Yang Z M, Wang J L, Wang W J, et al. Physiological, cytological and multi-omics analysis revealed the molecular response of *Fritillaria cirrhosa* to Cd toxicity in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *J Hazard Mater*, 2024, 472: 134611.
- [35] 王新月, 高旦, 杨泽敏, 等. 氮磷钾配施对川贝母产量和品质及养分吸收的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2024(5): 54-62.
- [36] 王新月, 王业, 邬洁, 等. 花期追肥对川贝母产量和品质的影响 [J]. *世界中医药*, 2022, 17(13): 1789-1796.
- [37] 马靖. 栽培川贝母品质调控技术的初步研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2015.
- [38] Jiang W J, Wang X Y, Meng L X, et al. Integrated microbiology and metabolomics analysis reveal patterns and mechanisms for improving the yield and alkaloid content of *Fritillaria cirrhosa* by nitrogen fertilization [J]. *Ind Crops Prod*, 2024, 218: 119000.
- [39] 解丽萍. 土壤腐殖质对作物生长及土壤环境的影响 [J]. *中国果业信息*, 2024, 41(4): 89-91.
- [40] Wu Y H, Yang Z M, Gao D, et al. Integrative microbiomics and co-occurrence network analyses decipher the mechanisms underlying organic fertilizer-driven yield and nucleoside content enhancement in *Fritillaria unibracteata* [J]. *Technol Hortic*, 2025, 5(1): e018.
- [41] Zhou N, Mu M J, Yang M, et al. The effect of microbial fertilizer on the growth, rhizospheric environment and medicinal quality of *Fritillaria taipaiensis* [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(11): 500.
- [42] Ren X Y, Yuan L, Yao H, et al. Effects of phosphorus-solubilizing fungi on bulb quality and the *Fritillaria taipaiensis* rhizosphere soil environment [J]. *PeerJ*, 2025, 13: e19283.
- [43] Yang Z M, Wang Y, Wang J L, et al. Transcriptomics combined with physiology reveals the effect of different light qualities on the development of *Fritillaria cirrhosa* in the Qinghai Tibet Plateau [J]. *Environ Exp Bot*, 2024, 224: 105814.
- [44] Lu Y, Gao D, Gao X S, et al. Light quality modulates yields and secondary metabolite accumulation in *Fritillaria cirrhosa*: Insights from rhizosphere metabolomics and microbiomics [J]. *Ind Crops Prod*, 2025, 229: 120967.
- [45] 马靖, 伍燕华, 付绍兵, 等. 遮阴对栽培川贝母生长和产量的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(18): 5755-5757.
- [46] 李晓静, 刘嘉乐, 张剑, 等. 西洋参根腐病及其防治研究进展 [J]. *中国中药杂志*, 2025, 50(9): 2317-2323.
- [47] 刘子瑶. 林下参内生细菌分离鉴定及对人参立枯病菌、猝倒病菌抑菌效果评价 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [48] 关致远, 马永强, 咸文荣. 青海高原地区番茄灰霉病病原菌的分离鉴定及药剂筛选 [J]. *青海大学学报*, 2025, 43(2): 27-33.
- [49] 李梦, 梁巧兰, 魏列新, 等. 86.2%氧化亚铜可湿性粉剂与化学农药混配对百合叶斑病的防治效果评价 [J]. *中国生物防治学报*, 2024, 40(5): 1149-1159.
- [50] 孙淼, 吴玉德, 梁天祺, 等. 药用植物锈病的研究现状与展望 [J]. *农业与技术*, 2024, 44(22): 17-21.
- [51] 周俐宏, 张惠华, 吴天宇, 等. 不同百合品种抗蚜虫性鉴定 [J]. *北方园艺*, 2018(11): 85-88.
- [52] 毕春辉, 李雪. 兰州百合地下害虫发生特点及其防治技术 [J]. *农业科技与信息*, 2020(1): 54-57.
- [53] 孟秀鹏, 梁巧兰, 魏列新, 等. 百合地下害虫主要种类调查及生物(源)农药筛选 [J]. *植物保护*, 2022,

- 48(4): 324-335.
- [54] Wang S J, Chen K K, Guo J Q, et al. Identification of pathogen causing bulb rot in *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li and establishment of detection methods [J]. *Plants*, 2024, 13(16): 2236.
- [55] 郭志青, 张霞, 刁立功, 等. 镰刀菌及其伏马毒素的危害和防控 [J]. 山东农业科学, 2022, 54(1): 157-164.
- [56] 郭懿怡, 周思瑶, 王铁霖, 等. 北乌头立枯病病原生物学及有效药剂抑菌活性评价 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(7): 1727-1734.
- [57] 何俊洁. 植物病害防治中的生物防治技术研究 [J]. 种子科技, 2025, 43(7): 146-148.
- [58] 姜超, 刘春燕, 王向向, 等. 大豆常见病害防治与典型土传病害生物防治的研究进展 [J]. 贵州农业科学, 2025, 53(3): 74-84.
- [59] 孙晓红, 徐增鑫, 鲍双双, 等. 基于土壤微生物群落结构的参地土壤改良研究进展 [J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2024, 25(4): 442-447.
- [60] 周雨佳. 豆科绿肥接种根瘤菌在与茶树间作、草莓轮作中对作物生长及田间减肥减药效果的研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [61] 海岩. 新型杀菌剂——代森铵 45%水剂 [J]. 农业知识, 2016(28): 22.
- [62] 雷腾宇, 马福嵘, 闫晓静, 等. 花生根腐病病原菌尖镰孢菌对噁霉灵的抗性风险评估 [J]. 植物保护学报, 2024, 51(4): 852-862.
- [63] 蔡雨芯, 童兰艳, 肖昭竞, 等. 蔬菜水果中百菌清镰丝高敏荧光检测卡的制备和应用 [J]. 现代食品科技, 2025, 41(1): 310-319.
- [64] 刘润强, 王清峻, 曹前辉, 等. 噬菌环胺和氟噬菌酯复配对不同病原菌抑制的增效作用 [J]. 贵州农业科学, 2016, 44(6): 67-70.
- [65] 李新新, 陈秀, 赵莉, 等. 呤酰菌胺和咯菌腈复配防治叶用莴苣菌核病增效配方筛选及田间防效 [J]. 农药, 2025, 64(3): 219-223.
- [66] 张梦雅, 刘佳, 董志平, 等. 谷锈菌夏孢子萌发条件研究与药剂防效评价 [J/OL]. 植物病理学报, (2025-06-03) [2025-08-24]. <https://doi.org/10.13926/j.cnki.apps.000975>.
- [67] 李阿根, 朱颖, 程静雯, 等. 菊科蔬菜菌核病病原鉴定及其对氟唑菌酰羟胺的敏感性 [J]. 中国蔬菜, 2025(2): 123-130.
- [68] 肖荣凤, 陈燕萍, 陈梅春, 等. 太子参根腐病病原菌的鉴定及防治药剂筛选 [J]. 植物保护学报, 2020, 47(6): 1333-1342.
- [69] 黄萍, 程茵, 田蕲娟, 等. 几种油菜菌核病防治药剂大田示范效果评价 [J]. 湖北植保, 2025(2): 54-56.
- [70] 刘赛, 徐常青, 仰铁锤, 等. 一种川贝母鳞茎包衣剂及其应用: 中国, CN118716349A [P]. 2024-10-01.
- [71] Gao D, Wu Y H, Lu Y, et al. Fumigation-driven restructuring of soil microbial ecosystems enhances endangered *Fritillaria cirrhosa* productivity and secondary metabolite biosynthesis: Insights from metabolomics and microbiome profiling [J]. *Ind Crops Prod*, 2025, 236: 121938.
- [72] 孙启花, 宫景屏, 王炜, 等. 大姜根腐病防治中微生物菌剂的研发与应用效果分析 [J]. 农业开发与装备, 2024(12): 172-173.
- [73] Ku Y L, Yang N, Pu P, et al. Biocontrol mechanism of *Bacillus subtilis* C3 against bulb rot disease in *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li [J]. *Front Microbiol*, 2021, 12: 756329.
- [74] Wang S J, Chen K K, Wei M, et al. Biological control and mechanism characterization of endophytic *Bacillus velezensis* SJ22 against bulb rot of *Fritillaria taipaiensis* P. Y. Li [J]. *Biol Contr*, 2025, 206: 105792.
- [75] 樊黎. 微生物菌肥对草莓的促生效果及对根腐病防治效果研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [76] 李震宇, 崔伊凡, 秦雪梅. 中药材质量评价的挑战与代谢组学应用于中药材质量评价的研究进展 [J]. 中草药, 2018, 49(10): 2221-2229.
- [77] 李巧. 栽培卷叶贝母生药学特性及采收加工研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2022.
- [78] 李瑞琦, 马玉翠, 吴翠, 等. 川贝母包装与贮藏标准操作规程 [J]. 中南药学, 2019, 17(12): 2145-2148.
- [79] 李瑞琦, 吴翠, 徐靓, 等. 基于传统性状客观化分析的川贝母质量评价 [J]. 中国药学杂志, 2020, 55(1): 14-18.
- [80] 陈德勇, 张泽洲, 李瑞琨, 等. 贝母质量安全现状及分析方法研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(23): 9242-9250.
- [81] 袁媛, 黄璐琦. 道地药材分子生药学研究进展和发展趋势 [J]. 科学通报, 2020, 65(12): 1093-1102.
- [82] 焦红红. PgMADS41 与 PgMADS44 调控人参根系形态建成的分子机制研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [83] 张梦蕊, 付绍兵, 谢慧敏, 等. 不同产地川贝母中异甾体生物碱含量的比较 [J]. 华西药学杂志, 2022, 37(1): 67-74.
- [84] 谢俊杰, 谭鹏, 郝露, 等. 基于广义中药学探讨川贝母产业发展现状、策略与方法 [J]. 中草药, 2022, 53(7): 2150-2163.
- [85] 林丹琳, 贡保草, 张英, 等. 川贝母商品规格的本草考证 [J]. 中国现代中药, 2025, 27(4): 601-610.
- [86] 刘辉, 黄林芳, 陈士林, 等. 川贝母采收期的初步研究 [J]. 中药材, 2009, 32(3): 331-332.
- [87] 王业, 冯雪, 高旦, 等. 川贝母不同规格鳞茎的生理指标和生物碱含量比较分析 [J]. 世界中医药, 2022, 17(13): 1833-1839.
- [88] 王淑慧, 梁鸿, 张庆英, 等. 川贝母资源与生产技术研究进展 [J]. 中国现代中药, 2025, 27(4): 593-600.
- [89] 宋怡, 罗舒, 高应娟, 等. 四川道地药材初加工研究现状 [J]. 四川农业科技, 2022(2): 22-25.

[责任编辑 赵慧亮]