

# 探索中前行—中药材病害研究概况与思考

高微微\*, 张西梅, 田给林, 焦晓林

(中国医学科学院 北京协和医学院 药用植物研究所, 北京 100193)

**摘要** 中医药是我国医学的特色, 中药资源是中医药事业发展的物质基础, 在国务院颁布的《中药材保护和发展规划》(2015—2020 年) 中, 中药材首次被确立为我国的战略性资源。大量的中药材在田间生产及加工贮藏过程中存在病害问题, 严重影响了中药材的产量和质量。我国药用植物病害研究经历了几十年的历程, 在 2000 年之前, 由于中药行业整体不受重视, 研究的药材及其病害种类均极为有限, 发表的研究论文很少。近 10 年来, 随着中药在国内外的认可度提升和需求量增加, 中药材栽培种类和面积急速扩大, 病害研究的队伍和研究水平均有所增强。在研究方向和内容上主要集中在病原鉴定和防治技术方面, 研究思路延续植物病理学的一般规律, 针对药用植物特色的研究比较薄弱。本文总结了近 20 年以来我国中药材病害的研究概况, 针对存在的问题, 提出在人力不足和经费投入有限的情况下, 要针对中药材病害发生的重点难点问题以及行业的需求, 重点加强病害与中药材质量与安全性相关的基础性研究, 加快先进技术的引入, 提高研究效率和深度, 为中药材病害防治提供理论基础和技术指导。

**关键词** 中药材; 病害; 研究现状; 质量与安全; 策略

**中图分类号:** S 435.67 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.0529-1542.2016.05.003

## Plant diseases of traditional Chinese medicines: 20 years of progress in research on understanding and management

Gao Weiwei, Zhang Ximei, Tian Geilin, Jiao Xiaolin

(Institute of Medicinal Plant Development, Chinese Academy of Medical Sciences and  
Peking Union Medical College, Beijing 100193, China)

**Abstract** Traditional Chinese medicine (TCM) has been used for millennia in China. As the source of TCM, medicinal plant is the basis for Chinese medicine development. In 2015, TCM is firstly regarded as the strategic resource in “Protection and development of Chinese herbal medicine (2015—2020)” by the State Council of China. The occurrence of diseases seriously reduces the quantity and quality of TCM during the production, processing and storage stage. Since TCM has not been given considerable attention, little phytopathological research has been done in our country until 2000. In the recent 10 years, TCM has been more and more accepted worldwide and its demand is increasing. Cultivation area and species of medicinal plants are expanded in China. The research teams and research papers have been increasing rapidly. The previous studies have been focused on pathogen identification and prevention or control technology. The research ideas mainly follow the general rule of plant pathology, while the research on the characteristics of medicinal plants is weak. Here, we summarize the research progress in plant diseases of TCM in recent 20 years. Based on the present situation, we suggest that the major problems of TCM plant disease occurrence and the requirements of industry should be focused, the basic research on plant diseases related to TCM quality and safety be strengthened, advanced technology be accelerated, and research efficiency and depth be improved. All of the efforts would provide theoretical basis and technical guidance for TCM disease management.

**Key words** Chinese traditional medicine; plant disease; research status; quality and safety; management and strategy

收稿日期: 2016-08-10 修订日期: 2016-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(81274071, 83101357); 中医药行业科研专项(201407005)

\* 通信作者 E-mail: wwgao411@sina.com

中医药是我国医学的特色,并且在世界传统医药领域中一直处于领先地位。近年来,随着疾病谱的变化,老龄化社会的到来和健康观念的转变,中医药在国际范围内的认可度越来越高,中药保健品和食品以及日化用品市场也日益繁荣,随之而来的是对中药资源需求量的急剧增长。在中药野生资源破坏严重,濒危物种增加的现状下,野生转为栽培成为满足市场需求的必由之路。目前我国中药材的栽培面积已由本世纪初的 4 万 hm<sup>2</sup> 增加到 12 万 hm<sup>2</sup>,实现人工栽培的中药材种类已达到 200 余种,提供了中药市场 70%左右的供应量<sup>[1]</sup>。中药材种植业的发展,虽然部分缓解了药材需求紧张的问题,但大面积集中生产的方式导致田间病害发生和传播蔓延的加剧,已成为我国各中药材产区的重点和难点问题<sup>[2]</sup>;另一方面,采收加工后的药材由于贮藏条件简陋,霉变现象亦十分普遍,由此导致的真菌毒素污染现象成为影响中药安全的重大隐患<sup>[3]</sup>。药用植物与一般农作物不同,是以其次生代谢产物作为应用基础的植物类群,对其病害的研究除了遵从一般的基本研究规律之外,还应针对其生产及应用方式的特殊性开展研究。本文首先对我国近 20 年来药用植物病害的研究文献进行了调研,从药用植物病害研

究的历史和现状出发,总结病害发生特点,分析现有研究及防治技术存在的问题与不足,最后给出相应的策略和建议,旨在为探讨中药材病害的研究重点,提高研究水平,指导生产实践,实现中药材高产、高效、优质生产的目标提供借鉴与参考。

1 我国中药材病害研究现状

1.1 中药材病害的调查工作

从 20 世纪 90 年代开始,河南、广东、辽宁、安徽、云南、山西、贵州、四川、广西、甘肃、浙江等中药材生产大省陆续开展了野生及栽培药用植物病害的广泛调查工作,对当地发生病害的药材及病原种类有了较为全面的认识,这中间发现了大量病原的新记录种以及新寄主,总体上真菌病害占中药材病害的绝大多数(表 1)。2000 年之后,对病害的调查则更多关注省内的道地药材和大宗栽培药材,如甘肃和宁夏的甘草产区对甘草病害的系统调查<sup>[20-21]</sup>。在病原鉴定的基础上,对某一类病害的危害情况进行了集中调研,如王艳等<sup>[15]</sup>报道了锈病在甘肃省 14 种药材上的发生情况,以及受链格孢属(*Alternaria*)真菌危害的 25 种药材<sup>[16-17]</sup>,这些工作了解病原的寄主范围、发生规律和传播途径奠定了基础。

表 1 部分省份中药材病害调查情况

Table 1 The investigation of TCM diseases in several provinces

| 省份<br>Province | 药材种类<br>TCM species | 病害种类 Disease types |                 |             |                |             | 病原总数<br>Total | 新记录种<br>New record species | 新寄主<br>New host | 引文<br>References |
|----------------|---------------------|--------------------|-----------------|-------------|----------------|-------------|---------------|----------------------------|-----------------|------------------|
|                |                     | 真菌<br>Fungus       | 细菌<br>Bacterium | 病毒<br>Virus | 线虫<br>Nematode | 其他<br>Other |               |                            |                 |                  |
| 河南 Henan       | 87                  | 150                | 4               | 6           | 6              | 3           | 169           | 11                         | 17              | [4]              |
| 广东 Guangdong   | 120                 | 490                | —               | —           | —              | —           | 490           | 86                         | —               | [5]              |
| 辽宁 Liaoning    | 41                  | —                  | —               | —           | —              | —           | 78            | —                          | —               | [6]              |
| 安徽 Anhui       | 62                  | 96                 | 3               | —           | 2              | 7           | 108           | —                          | —               | [7]              |
| 云南 Yunnan      | 42                  | 43                 | —               | —           | —              | —           | 43            | 6                          | 4               | [8-9]            |
| 山西 Shanxi      | 10                  | 13                 | —               | —           | —              | —           | 13            | —                          | 8               | [10]             |
| 贵州 Guizhou     | 53                  | 38                 | 4               | 5           | 1              | 4           | 52            | —                          | —               | [11]             |
| 四川 Sichuan     | 78                  | —                  | —               | —           | —              | —           | 228           | 25                         | —               | [12-13]          |
| 广西 Guangxi     | 7                   | 9                  | —               | 2           | —              | 17          | 28            | —                          | —               | [14]             |
| 甘肃 Gansu       | 74                  | 125                | —               | —           | —              | —           | 125           | 1                          | —               | [15-18]          |
| 浙江 Zhejiang    | 8                   | 9                  | —               | —           | —              | —           | 9             | —                          | 3               | [19]             |

1.2 中药材病害研究回顾

国家科技部于 1998 年制定了“中药现代化科技产业行动计划”,并于 1999 年列入“九五”重中之重项目予以启动实施,中药的发展进入了新的历史阶段。由于中药材种植面积和种类迅速增加,栽培中的病虫害发生日趋严重,成为影响中药材产量和质量的主要因素,作为规范化生产中的难点一病害研

究开始受到重视。科技部“十五”期间(2003 年)首次设立了“中药材病虫害防治技术平台”重点项目,极大地推动了中药材病虫害的研究工作。此后,包括农业院校的专家和学者在内的研究人员逐渐参与到中药材病害的研究中,经过多年的努力取得了明显的进展。我们利用中国知网“中国学术期刊网络出版总库”(CNKI)收录的 1996—2015 年公开发表

的相关文献,采用“药用植物+病害”,“中草药+病害”,“中药材+病害”分别进行主题检索,同时选出人参、西洋参、三七、白术、地黄、黄芪、党参、半夏、当归、丹参、甘草、石斛等 12 种人工栽培面积大且病害严重的大宗药材,采用“药材名称+病害”并列进行主题检索,剔除重复及综述性文章,共得到 448 篇中药材病害相关文献,分别按照发表时间、研究内容进行统计分析。从历年统计结果可以看出,年发表文章数量总体上呈逐年增加趋势,前 10 年的文章总数不超过 88 篇,2005 年之后数量明显增加,2006—2015 年总数增至 360 篇(图 1)。

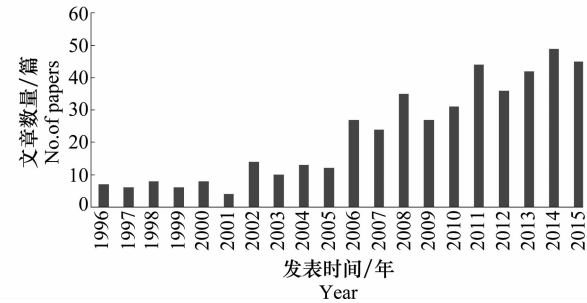


图 1 1996—2015 年有关中药材病害年发表文章数量

Fig. 1 The number of published papers related to TCM diseases in China in 1996—2015

按照病原学、病理生理学、流行病学、土壤生态学、病害对药材品质影响、化学防治、生物防治、农业及综合防治 8 个研究方向划分,对得到的 521 个(同一篇文献包括两方面内容的分别统计)统计数据分别进行统计。其中病原学研究所占比重最高,达 41%,其次为农业及综合防治,占 20%,化学防治和生物防治分别占 15%、12%,其他研究方向均低于 5%,其中,病害对药材品质的影响文章量最少,仅为 1%(图 2)。

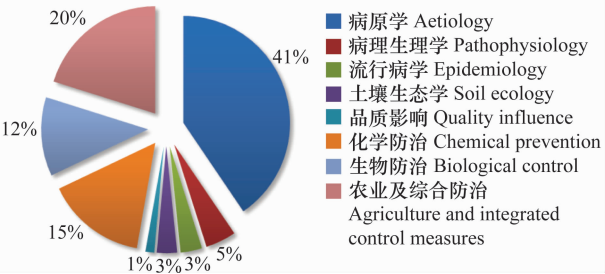


图 2 1996—2015 年中药材病害相关研究中不同研究方向的文献分布

Fig. 2 The distribution proportion of papers on main research fields of TCM diseases in 1996—2015

如果将病原学、病理生理学、流行病学、土壤生态学、病害对品质的影响归属于基础性研究,化学防治、生物防治、农业及综合防治归属于防治技术分别进行统计,发现两方面的文献总体上均呈增加的趋势。以 2005 年为界,之前偏重于防治技术研究,之后基础性研究所占比例明显提高(图 3),研究的深度有所提高。

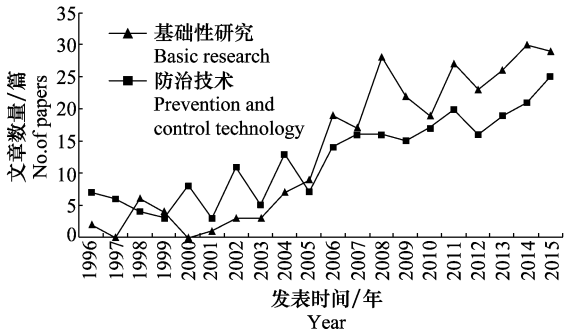


图 3 1996—2015 年发表的中药材病害的基础性研究与防治技术文章数量

Fig. 3 The number of papers on basic research and control technology of TCM diseases in 1996—2015

继续将化学防治、生物防治的论文分为实验室阶段和田间应用阶段,则比值分别为 41:49、58:12,化学防治实验室阶段和田间应用阶段基本持平,而生物防治研究大多处于实验室阶段。

## 2 中药材病害发生特点及基础性研究

### 2.1 野生变为人工栽培,病害发生加重

野生中药材很少发生病害,即使有也不会形成灾害,从野生变为人工栽培后,其生长环境发生变化,在农业生态系统中,种类单一,密度增加,且高水高肥、人为远程调种等管理措施创造了病害发生流行的条件,病害易于在种群内部、田块之间、地区之间蔓延传播,导致栽培药材病害加重。以我国西北主产的甘草为例,商品甘草曾经全部来源于野生资源,甘草锈病在甘肃和宁夏产区的甘草野生种群中均有发现<sup>[20-21]</sup>,但在生物多样性高的自然环境中并不构成对种群的威胁。20 世纪 90 年代中期,由于甘草需求量的增加,野生资源逐渐难以满足市场需求,价格的攀升极大地刺激了甘草种植业的发展<sup>[22]</sup>,种植的甘草不仅锈病发生严重,造成减产,同时又出现了许多新的病害,如育苗期出现猝倒病、立枯病<sup>[21]</sup>,生长期出现灰霉病、白粉病等<sup>[20]</sup>。产在我国长江以南的野生铁皮石斛一般生长在林间树干、

高山岩石上,掠夺性的采挖导致野生资源濒危后,自21世纪初采用大规模试管苗工厂化生产后,浙江、云南等产区设施栽培的铁皮石斛上多种新病害严重发生,成为制约生产的主要障碍<sup>[23-24]</sup>。开展相关的病原鉴定成为这期间病害研究的主要内容。

2.2 道地产区病重,病害因地制宜

一些种植历史悠久的道地药材,如吉林人参、甘肃岷县当归、云南文山三七等,栽培地域集中在道地产区,多年连续种植造成病原积累及适合发病的环境,导致道地产区病害种类多且发生严重,如人参在吉林产区常年发生的病害种类有10余种<sup>[25-26]</sup>,三七在云南的主要病害超过7种<sup>[27-30]</sup>。这些药材病害相关研究有的已超过半个世纪,但一直处于小众范畴。近年来,发展中药材成为很多地方经济增长的重点产业,传统产区纷纷扩大种植,还有些老产区由于病虫害严重、连作障碍或城市化发展,对种子种苗带菌缺乏了解,造成原产区的病害向新产区转移。另一方面,在新的引种地区,由于生态环境、气候土壤条件、栽培方式与原产地有一定差异,新病害时有发

生。例如原产于广东的阳春砂仁,引种到云南西双版纳后,由农田栽培变为半野生栽培,密度增加,种质退化,一种新的病害叶枯病严重发生<sup>[31]</sup>。

对于种植区域比较广泛的中药材,不同地区病害发生相同或因地而异。甘草锈病和白粉病在甘肃和宁夏均有发生,但灰霉病和轮纹病只在甘肃有报道;当归病害在各产区均不相同(表2)。西洋参在我国吉林地区栽培方式为林地伐林栽参,地下根病主要为柱孢属(*Cylindrocarpon*)真菌引起的锈腐病<sup>[39]</sup>;在北京年平均气温高于吉林,栽培方式为农田栽参,地下根病主要为镰刀菌属(*Fusarium*)真菌引起的根腐病<sup>[40]</sup>;而在山东据我们田间调查,前茬为花生的西洋参地下根结线虫发生严重。另外,同一病害在不同产区有病原不同的报道,如几个白术产区的根腐病病原菌,分别为 *Fusarium* 的6个种<sup>[41-45]</sup>,类似情况还有甘草褐斑病<sup>[20-21]</sup>、地黄轮纹病<sup>[13,46]</sup>、地黄病毒病<sup>[13,47]</sup>、半夏病毒病<sup>[48-49]</sup>等(表3)。原因有可能是病原因地而异,存在复合侵染,也可能受鉴定技术的影响。

表 2 不同产区药材病害的多样性

Table 2 Disease diversity of TCM in different production areas

| 药材名称<br>Medicinal plant            | 产区<br>Production area | 病害名称<br>Type of disease | 病原<br>Pathogen                                                                     | 参考文献<br>References |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 甘草<br><i>Glycyrrhiza uralensis</i> | 甘肃 Gansu              | 锈病                      | <i>Uromyces glycyrrhizae</i>                                                       | [20]               |
|                                    |                       | 白粉病                     | <i>Erysiphe</i> sp.                                                                |                    |
|                                    |                       | 黑斑病                     | <i>Alternaria</i> sp.                                                              |                    |
|                                    |                       | 灰霉病                     | <i>Botrytis cinerea</i>                                                            |                    |
|                                    |                       | 轮纹病                     | <i>Ascochyta onobrychidis</i>                                                      |                    |
|                                    | 宁夏 Ningxia            | 锈病                      | <i>Uromyces glycyrrhizae</i>                                                       | [21]               |
|                                    |                       | 白粉病                     | <i>Uncinula</i> sp.                                                                |                    |
|                                    |                       | 立枯病                     | <i>Rhizoctonia solani</i>                                                          |                    |
|                                    |                       | 猝倒病                     | <i>Pythium ultimum</i>                                                             |                    |
|                                    |                       | 根腐病                     | <i>Fusarium solani</i> , <i>F. oxysporum</i>                                       |                    |
| 当归<br><i>Angelica sinensis</i>     | 吉林 Jilin              | 叶斑病                     | <i>Phyllosticta sophoricola</i>                                                    | [32]               |
|                                    | 甘肃 Gansu              | 褐斑病                     | <i>Septoria</i> sp.                                                                | [33]               |
|                                    |                       | 炭疽病                     | <i>Colletotrichum dematium</i>                                                     | [18]               |
|                                    | 云南 Yunnan             | 水烂病                     | <i>Pseudomonas fluorescens</i>                                                     | [34]               |
|                                    |                       | 根腐病                     | <i>Rhizoctonia</i> sp., <i>Meloidogyne incognita</i> , <i>Pseudomonas syringae</i> | [35]               |
|                                    |                       | 软腐病                     | <i>Ditylenchus destructor</i>                                                      | [36]               |
|                                    | 吉林 Jilin              | 叶斑病                     | <i>Erwinia rhapontici</i>                                                          | [37]               |
|                                    |                       |                         |                                                                                    | [38]               |

2.3 土传病害高发,连作障碍严重

以根及根茎入药的药材种类约占全部药材的70%,这类药材一般为多年生,如人参、西洋参、三七、白术、甘草等,种植到收获需要两年以上的生长年限。多年生的特性导致根类药材土传病害发生普遍,严重制约着药材的产量和质量。已报道的病原主

要集中在镰孢属(*Fusarium*)、疫霉属(*Phytophthora*)、丝核菌属(*Rhizoctonia*)、核盘菌属(*Sclerotinia*)、柱孢属(*Cylindrocarpon*)、土赤壳属(*Ilyonectria*)等,这些病原一般为土壤习居或半习居菌,寄主范围广,腐生能力强,一旦定殖下来便很难根除,连续种植条件下的不断增殖积累导致寄主连续感染<sup>[50-51]</sup>。土传病害

是中药材病害防治的重点和难点。

中药材生产上连作障碍现象严重,多数药用植物均不能连作,特别是根类药材问题尤为突出,如五加科植物人参、西洋参、三七等,百合科的贝母、百合,此外地黄、太子参、当归、丹参、半夏等,再次种植间隔期甚至在 10 年以上<sup>[52]</sup>。对于以中药材为主要经济作物的道地产区,连作障碍已成为中药农业可持续发展的

瓶颈,连作障碍的克服对当地经济发展具有战略性意义。近十年来,有关连作障碍的原因及克服技术的研究取得了长足的进展,在 3 种人参属植物<sup>[53]</sup>,以及地黄<sup>[54]</sup>、太子参<sup>[55]</sup>、丹参<sup>[56]</sup>等药材的自毒物质鉴定、自毒的生理生态机制、土壤微生物变化等方面进行了大量研究,对于多种生物及非生物因子在连作障碍中的作用有了基本认识,为指导问题解决提供了理论依据。

表 3 同一病害的病原多样性  
Table 3 Pathogen diversity of the same disease

| 病害种类<br>Type of disease | 产区<br>Production area | 病原<br>Pathogen                                                                                                                         | 参考文献<br>References |
|-------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| 白术根腐病                   | 四川                    | <i>Fusarium lateritium</i> , <i>F. graminearum</i>                                                                                     | [41]               |
|                         | 重庆                    | <i>F. oxysporum</i> , <i>F. solani</i>                                                                                                 | [42]               |
|                         | 贵州                    | <i>F. oxysporum</i>                                                                                                                    | [43]               |
|                         | 浙江                    | <i>F. oxysporum</i> , <i>F. incarnatum</i>                                                                                             | [44]               |
|                         | 河北                    | <i>F. oxysporum</i> , <i>F. solani</i> , <i>F. graminearum</i> , <i>F. incarnatum</i> , <i>F. equiseti</i> , <i>Rhizoctonia solani</i> | [45]               |
| 甘草褐斑病                   | 甘肃                    | <i>Cercospora glycyrrhizae</i>                                                                                                         | [20]               |
|                         | 宁夏                    | <i>Napicladium asteroma</i>                                                                                                            | [21]               |
| 地黄轮纹病                   | 河南                    | <i>Phoma herbarum</i>                                                                                                                  | [46]               |
|                         | 四川                    | <i>Ascochyta molleriana</i>                                                                                                            | [13]               |
| 地黄病毒病                   | 河南                    | <i>Rehmannia mosaic virus</i>                                                                                                          | [47]               |
|                         | 四川                    | <i>Tobacco mosaic virus</i>                                                                                                            | [13]               |
| 半夏病毒病                   | 甘肃                    | <i>Cucumber mosaic virus</i>                                                                                                           | [48]               |
|                         | 河南                    | <i>Soybean mosaic virus</i>                                                                                                            | [49]               |
|                         | 江苏                    | SMV, <i>Dasheen mosaic virus</i>                                                                                                       |                    |

3 中药材病害防治研究现状

3.1 化学防治

化学农药以其简便的使用方法和良好的短期效应优势一直是作物病害防治的主体,同样也是我国中药材病害防治中最常用的方法。在农药的选择上主要参考同期作物上类似病害的防治药剂,通过室内毒力测定和田间药效试验进行确定。中药材土传病害是防治的难点,筛选过的灭生性土壤消毒剂有棉隆<sup>[57-58]</sup>、氯化苦<sup>[59]</sup>等。报道较多的也是生产上常用的灌根或种子/种苗处理剂有多菌灵、恶霉灵<sup>[43,60-61]</sup>、甲基硫菌灵<sup>[62-63]</sup>以及铜离子制剂,如波尔多液、络氨铜·锌<sup>[64]</sup>、羧酸磷铜<sup>[65]</sup>、氢氧化铜<sup>[66]</sup>等。20 世纪 90 年代之后,一些复配制剂开始被应用,主要是甲霜灵+恶霉灵<sup>[67]</sup>、甲霜灵+福美双<sup>[68]</sup>、甲霜灵锰锌<sup>[69]</sup>、恶霜锰锌<sup>[43,61]</sup>等,对中药材土传病害均具有良好的防治效果。

相对地下土传病害,中药材地上部病害种类多,病原更为复杂,包括链格孢属(*Alternaria*)、茎点霉属(*Phoma*)、壳针孢属(*Septoria*)、白粉菌属(*Erysiphe*)、丛梗孢属(*Monilia*)、柄锈菌属(*Puccinia*)等,

防治药剂的种类也更多。20 世纪八九十年代,用药多为铜离子制剂<sup>[70-71]</sup>、代森类<sup>[72-73]</sup>。2000 年之后常用药剂有丙环唑<sup>[71,74-75]</sup>、嘧菌酯<sup>[74]</sup>、苯醚甲环唑<sup>[76-78]</sup>、敌锈钠<sup>[79]</sup>等。此外,代森锰锌与甲呋酰胺<sup>[80]</sup>、唑醚·代森联<sup>[81]</sup>、苯醚甲环唑与丙环唑等的复配制剂<sup>[75]</sup>也被开发应用于地上病害的防治。

化学杀菌剂长期大量使用诱使病原产生抗药性的研究在中药材上仅有个别报道, Lu 等<sup>[82]</sup>测定研究了长白山地区 10 个人参产区的 76 株人参病原菌 *Botrytis cinerea* 对多菌灵、异菌脲、嘧霉胺、嘧菌酯的抗药性,抗性菌株分别占 81.6%、46.1%、31.6% 和 31.6%。抗药性的研究是指导合理用药的基础,亟待弥补这方面的空白。

3.2 生物防治

生物防治是利用有益生物或其代谢产物对作物病害进行有效防治的技术方法。应用较多的主要有各种拮抗菌和抗生素。近 10 年来,针对药用植物病害生防菌的筛选和应用方面取得了一定进展,其中真菌类包括拮抗人参锈腐病菌的哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)<sup>[83-84]</sup>;拮抗三七黑斑病、炭疽病和根腐病病菌的棘孢木霉(*T. asperellum*)<sup>[85]</sup>;对西

洋参黑斑病及锈腐病病原有抑制作用的暗黄青霉 (*Penicillium citreonigrum*)<sup>[86]</sup>。在生防细菌中的芽胞杆菌 (*Bacillus subtilis*) 对人参<sup>[84]</sup>、西洋参<sup>[86]</sup>、太子参<sup>[87]</sup>的多种病原具有良好的抑菌作用。生产上使用的生防菌剂,仅有淡紫拟青霉颗粒剂和厚垣轮枝菌微粒剂在防治当归麻口病方面有报道<sup>[88]</sup>。目前筛选出的绝大多数生防菌都处在实验室研究阶段,针对的病原种类也很少,距离生产上应用还有较长的路要走。

抗生素类农药武夷菌素、多抗霉素、中生菌素在人参属药材上应用较多<sup>[65,89]</sup>。另外,很多含有抗菌成分的药用植物被成功开发为植物源农药,如苦参碱,但植物源农药用于中药材病害的研究很少。由于很多作物与药用植物的病原具有一定的相似性,可以借鉴植物源农药在农作物方面的研究成果加以应用。

### 3.3 农业防治

农业防治是生产中最经济的防治方法。通过改进耕作栽培技术及管理措施,调节病原物、寄主和环境条件之间的关系,创造有利于作物生长而不利于病害发生的环境,以达到控制病害的发生和流行。在中药材病害防治的报道中,绝大部分都把选用抗病品种、调整播期、清除病残体、合理施肥浇水、合理轮作、间作、套种等常规农业措施作为防治病害的主要技术。中药材抗病育种尚处于起步阶段,抗病种质资源的鉴定和品种选育工作十分薄弱<sup>[90-91]</sup>,由于栽培的药材普遍存在种质混杂的现象,系统选育、集团选育等传统的育种手段仍然是目前抗病育种的主要方式<sup>[92]</sup>。对前茬作物的选择及适宜的轮作作物的报道多为经验性推荐,实验性文章较少。赵杨景等<sup>[93]</sup>报道前作为紫苏的土壤种植西洋参的存苗率及生物量比老参地有所提高。白术连作和前作为茄科作物的地块,根腐病发病重,新垦荒地或轮作稻田发病轻<sup>[62]</sup>。

## 4 对未来研究重点的思考

### 4.1 关注次生代谢,重视病害对药材品质安全的影响

次生代谢产物是中药的主要药效成分,同时作为植物的化学防御物质在病害发生过程中会发生变化。中药材作为防病、治病、保健的特殊性产品决定了对其品质有着更高的要求,栽培药材品质下降及外源污染物引起的安全问题是目前面临的突出问题。以往遵循的是农作物的研究方式,重点关注病害发生对产量的影响,忽略品质的变化。很多药材在罹病后仍被继续使用,病害的发生是否造成药效成分改变,从而导致品质下降目前基本上还是盲区。

已有研究发现,发生根腐病的西洋参中的药效成分3种人参皂苷发生不同变化<sup>[94]</sup>,病原 *F. oxysporum* 和 *F. solani* 导致早期人参皂苷 Rb1 升高<sup>[95]</sup>,西洋参根中表现锈根症状的组织与正常组织相比,6种主要皂苷(Rg1、Re、Rb1、Rc、Rb2、Rd)含量下降40%~50%<sup>[96]</sup>。患根腐病三七中新产生9种成分,多为三七皂苷的氧化产物<sup>[97]</sup>。鉴于药用植物及其次生代谢产物种类的多样性,不同病害引起中药材质量变化的问题迫切需要引起重视。

另一方面,中药材在贮藏过程中霉变的现象非常普遍,从而造成真菌毒素污染<sup>[3]</sup>。《中国药典》(2015版)针对19种药材制定了总黄曲霉毒素(AFT)及黄曲霉毒素B<sub>1</sub>(AFB<sub>1</sub>)的限量标准,大量药材品种真菌毒素的污染风险尚不清楚。另外,除黄曲霉毒素外,还存在赭曲霉毒素等其他真菌毒素污染,严重威胁着临床用药的安全。有关真菌毒素污染环节中产毒菌的调查、防控措施及标准制定应是中药材质量与安全方面的重点研究课题。

### 4.2 积累客观数据,指导农药的合理使用

一直以来,化学农药始终作为中药材病害的主要防治措施,但由于基础性研究薄弱,获得认证的农药非常有限,再加上中药材以个体化生产方式为主,不同产区之间、种植基地之间以及种植户之间均缺乏交流,农药的选择和使用非常混乱,个别地方高毒、高残留农药仍有使用,导致农药超标情况时有发生。在对中药安全备受关注以及我国提出到2020年实现农药使用零增长的大背景下,中药材无公害/绿色生产面临着新的挑战。

我们面对的问题是,对于病害发生严重的中药材,完全不使用农药是不现实的,由于在中药材上登记的农药种类少,生产中还无法摆脱非登记农药的使用。因此,迫切需要开展中药材常用农药的作用对象、作用效果、残留时间、降解动态等进行相关基础性研究,为制定安全使用剂量和使用期提供科学依据。中药对绝大多数服用者而言,摄入量和服药的时间均远远低于粮食、蔬菜、水果等食品,人群暴露量尚不够明确,中药材中农药残留对人体的毒性有待数据证实。研究农药对中药药效成分及毒性成分的影响也应受到更多关注,喷施农药杀菌剂后药效成分的变化仅有沈一行等<sup>[98]</sup>的报道,对有毒中药毒性的影响尚未见报道。只有通过大量的研究数据,才能制订出合理的农药使用规范,科学指导用药,同时使公众对中药材中农药残留的危害性有客观认识。

### 4.3 分子技术的应用,助力提升基础研究水平

受研究基础和研究条件的限制,相对农作物而言,中药材病害总体研究水平还比较落后。现今分子生物学技术的快速发展,为植物病理学研究的深入提供了新的技术和视角;次生代谢产物功能基因不断被发现,为研究病原干扰寄主次生代谢的分子机制及对中药材质量的影响提供了重要的分子靶标;生态学理论和方法的介入,为探明中药材连作障碍的机理提供了新的思路。

目前绝大多数中药材病原鉴定均采用的是形态学鉴定方法,对于大量基层及非专业研究者来说,对同属中形态相似的种很难进行准确鉴定。采用 rDNA-ITS 基因序列进行病原分子鉴定相比于各种分子鉴定技术具有快捷简便的优势,已经成为目前最常用的方法,在中药材病害鉴定上多见于硕士论文<sup>[99]</sup>。对 *Fusarium* sp.、*Aspergillus* sp.、*Ilyonectria* sp. 等真菌, ITS 序列有时不足以完成种的鉴定,需要借助 TEF、 $\beta$ -tubulin、histone H3 等其他基因<sup>[100-101]</sup>,综合多基因序列鉴定技术逐渐走入视野。对复合侵染的土传病害的多种病原开展分子系统学研究,从群体遗传学的角度分析不同地区病原遗传结构及致病性的差异,已经成为病原学的重要内容。

选育抗性品种是防治病害最为经济有效而且安全的措施。由于我国栽培药材群体中种质混杂现象普遍,给中药材抗性品种的选育带来很大困难。研究者开始尝试采用诱变育种、基因工程、分子标记等技术加快育种进程,在当归<sup>[102]</sup>、白术<sup>[103]</sup>等药用植物上取得了初步的成效。

半个世纪前,我国就已开始了粮食作物病害的预测预报的研究工作,而中药材的病害流行方面的相关研究尚未起步。全国第四次中药资源普查项目开始以来,已在全国范围内建立了中药资源动态监测站,借助这些已有的站点,通过开展中药材病原种类、寄主范围、发病规律及流行特征研究,建立损失估计模型,奠定病害的监测预警基础,对重大病害发生进行预测预报,可以为制定预防措施减少病害损失提供决策依据。

基因组学及 DNA 测序技术为深入了解土壤微生物在连作障碍中作用提供了强大的工具,q-PCR 技术为定量分析土壤中目标菌的变化提供了有力的支持,使我们能够更全面地了解土壤中复杂的微生物及病原在植物生长及致病过程中的变化,为破解连作障碍的原因并建立克服技术提供了新的研究手段。

## 5 结语

中药材病害研究已有半个多世纪的历史,一直沿用农作物的基本思路,基础理论研究在病原学方面取得较大的进展,防治技术主要集中在农业措施及化学防治的经验积累;由于经费投入和人员有限,在研究范围和深度上远远落后于农作物,整体处于起步上升阶段,如何解决自身的特殊问题,提高研究效率应是目前重点考虑的课题。中药材与农作物和大宗经济作物相比,种类多且种植面积小,栽培方式包括传统的农田栽培、仿野生栽培、设施栽培等多种类型,病害发生情况各有不同,需要解决的问题多而复杂。

对于应用基础性研究,从产品的终极目标出发,保证质量与安全是中药材生产的第一要素;从中药农业可持续的角度来看,连作障碍是目前生产中的瓶颈问题。在这两方面,病害的发生与防治均是其中的关键环节,加强相关的基础性研究,对于建立安全有效的防控措施,提升防控技术水平,以及保障中药农业产业的健康发展至关重要。

现代植物病理学已经进入到基因及蛋白组学的时代,分子生物学技术在病原鉴定、病原与寄主互作、抗病育种、病害监测等方面得到广泛应用,为中药材病害研究提供了新的手段。另外,互联网时代的到来也为研究者之间、研究者与生产者的交流建立了便利快捷的通道,必将有力地促进研究成果的转化和应用。实现中药材优质、安全、高效、环保型生产,植物病理学研究者任重道远。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 程惠珍,高微微,陈君,等. 中药材病虫害防治技术平台体系建立[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2005, 7(6): 109-114.
- [3] 蔡飞,高微微,李红玲,等. 中药上黄曲霉毒素的污染现状与防除技术[J]. 中国中药杂志, 2010, 35(19): 2503-2507.
- [4] 喻璋,任国兰. 河南省药用植物病害初步调查[J]. 云南农业大学学报, 1993, 8(3): 261-262.
- [5] 戚佩坤. 广东省栽培药用植物真菌病害志[M]. 广州: 广东科技出版社, 1994: 1-265.
- [6] 傅俊范,王崇仁,韩桂洁. 辽宁省药用植物病害种类调查及其病原鉴定[J]. 辽宁农业科学, 1995(5): 20-23.
- [7] 林英任,郭英兰,方正舟,等. 安徽省首次记录的本木药用植物病害[J]. 安徽农业大学学报, 1995, 22(1): 36-41.
- [8] 张宏,张中义,刘云龙. 云南药用植物真菌病害研究(I)[J]. 云南农业大学学报, 1998, 13(1): 49-51.



- [9] 张宏,王革,马木兰,等. 云南药用植物真菌病害研究(Ⅲ)[J]. 西南林学院学报,1999,19(4):224-227.
- [10] 张作刚,贺运春,王建明,等. 山西植物真菌病害种类及分布研究—山西药用植物真菌病害(Ⅰ)[J]. 山西农业大学学报,1999,26(2):117-119.
- [11] 黄剑,张智广,黄荣茂,等. 贵州省重点药用植物病害调查研究[J]. 农药,2002,41(10):6-9.
- [12] 陈小红,叶华智,严吉明,等. 四川药用植物病害调查与病原鉴定Ⅰ. 主要栽培药用植物病害[J]. 西南农业学报,2006,19(1):58-62.
- [13] 严吉明,叶华智,秦芸,等. 四川药用植物病害调查与病原鉴定Ⅱ. 四川药用植物病害[J]. 西南农业学报,2008,19(2):359-363.
- [14] 梁萍,钟莉传,黄艳花. 广西7种药用植物病虫害发生情况调查报告[J]. 广西农业科学,2010,41(11):1191-1194.
- [15] 王艳,陈秀蓉,杜牧,等. 甘肃省药用植物锈病调查与病原鉴定[J]. 甘肃农业科技,2009(1):5-8.
- [16] 王艳,陈秀蓉,王引权,等. 甘肃省药用植物上链格孢属(*Alternaria*)病原的种类及分布Ⅰ[J]. 植物保护,2012,38(2):156-159.
- [17] 王艳,陈秀蓉,杨成德. 甘肃省药用植物上链格孢属(*Alternaria*)病原的种类及分布Ⅱ[J]. 植物保护,2013,39(4):116-118.
- [18] 王艳. 甘肃省药用植物球壳孢目真菌病害及其病原研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2013.
- [19] 钱永生,蔡苏,吴剑丙,等. 浙江省“浙八味”道地药材真菌病害调查及病原鉴定[J]. 湖北农业科学,2015,54(19):4740-4745,4748.
- [20] 曹占凤,王艳,陈秀蓉. 甘肃省甘草病害种类调查及病原鉴定[J]. 中国现代中药,2014,16(12):1015-1018.
- [21] 王宽仓,查仙芳,南宁丽. 宁夏甘草主要病害种类调查和防治研究[J]. 宁夏科技,2001(5):48-49.
- [22] 魏胜利,高雪岩,王文全. 开展甘草产业技术研究促进三北地区三农经济发展[J]. 中国中药杂志,2009;34(24):3158-3161.
- [23] 曹星星. 铁皮石斛病原真菌分离与鉴定及印度梨形孢促生作用研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [24] 李戈,李荣英,高微微. 药用石斛规模化种植中的病害问题及防治策略[J]. 中国中药杂志,2013,38(4):485-488.
- [25] 白容霖. 人参9种病害的症状和病原物[J]. 吉林农业大学学报,2002,24(2):78-81.
- [26] 宿艳萍,于锡刚,宋心杰,等. 侵染性人参植物病害[J]. 人参研究,1999,11(4):19.
- [27] 蒋妮,覃柳燕,叶云峰. 三七病害研究进展[J]. 南方农业学报,2011,42(9):1070-1074.
- [28] 杨佩文,崔秀明,董丽英,等. 云南三七主产区根结线虫病病原线虫种类鉴定及分布[J]. 云南农业大学学报(自然科学版),2008,23(4):479-482.
- [29] 冯光泉,王朝梁. 三七种腐病及防治初探[J]. 中药材,2000,23(9):518-519.
- [30] 王勇,刘云芝,陈昱君,等. 三七黑斑病的研究[J]. 人参研究,2005,17(3):42-45.
- [31] 李学兰,李荣英,杨春勇. 西双版纳阳春砂仁叶枯病的调查及影响因素分析[J]. 中国农学通报,2007,23(3):424-427.
- [32] 曹雪梅. 甘草根腐病病原学研究及室内药剂筛选[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [33] 刘晓庆. 甘草、羊蹄上几种病害的病原鉴定及室内药剂筛选[D]. 长春:吉林农业大学,2008.
- [34] 卞静,陈泰祥,陈秀蓉,等. 当归新病害—炭疽病病原鉴定及发病规律研究[J]. 草业学报,2014,23(6):266-273.
- [35] 吕祝邦,李敏权,惠娜娜,等. 甘肃省定西市当归“水烂病”病原鉴定及致病性测定[J]. 植物保护,2013,39(2):45-49.
- [36] 刘华,李正科,杨静,等. 当归根腐病的病原初步研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学版),2011,26(4):458-464.
- [37] 赵振玲,张金渝,张智慧,等. 云南当归软腐病的危害性及病原鉴定[J]. 云南大学学报(自然科学版),2010,32(2):227-232.
- [38] 南楠. 吉林省5种药用植物细菌病害的病原鉴定及对药剂的敏感性研究[D]. 长春:吉林农业大学,2014.
- [39] 严雪瑞,傅俊范. 长白山沿脉参类锈腐病菌比较生物学研究[J]. 植物病理学报,2004,34(1):86-89.
- [40] 毕武. 北京地区西洋参根腐病相关真菌的研究[D]. 北京:中国协和医科大学,2008.
- [41] 刘凡. 白术根腐病病原鉴定、生物学特性和防治研究[D]. 雅安:四川农业大学,2012.
- [42] 杨成前,吴中宝,李品明,等. 白术根腐病菌分离及致病性研究[J]. 西南大学学报(自然科学版),2012,34(1):135-137.
- [43] 张礼维. 贵州白术根腐病病原鉴定及防治研究[D]. 贵阳:贵州大学,2015.
- [44] 檀国印. 白术真菌病害的分离鉴定及其根际促生菌的筛选[D]. 北京:中国林业科学研究院,2013.
- [45] 臧少先,安信伯,石丽军,等. 白术根腐病症状类型及病原鉴定[J]. 河北农业大学学报,2005,28(3):73-76.
- [46] 王飞. 地黄轮纹病病原学及防治研究[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
- [47] 雷彩燕. 地黄花叶病毒(*Rehmannia mosaic virus*, ReMV)基因组结构及生物学特性研究[D]. 郑州:河南农业大学,2006.
- [48] 张华荣. 侵染半夏的黄瓜花叶病毒研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [49] 史雨红. 侵染中国天南星科药用植物马铃薯 Y 病毒属成员的分子生物学研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [50] 沈清清,刘芳,胡彦. 药用植物根腐病原菌研究进展[J]. 北方园艺,2014,38(11):187-190.
- [51] 穆向荣,马逾英,杨枝中,等. 药用植物根腐病防治的研究进展[J]. 中药与临床,2014,5(2):5-8.
- [52] 檀国印,杨志玲,袁志林. 药用植物连作障碍及其防治途径研究进展[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(4):197-204.
- [53] 简在友,王文全,孟丽,等. 人参属药用植物连作障碍研究进展[J]. 中国现代中药,2008,10(6):3-5.
- [54] 张重义,李明杰,陈新建,等. 地黄连作障碍机制的研究进展与消减策略[J]. 中国现代中药,2013,15(1):38-44.
- [55] 陈菊. 黔东南太子参连作障碍原因及防治途径探析[J]. 中国现代中药,2013,15(7):584-586.
- [56] 刘伟,魏莹莹,孙鹏,等. 须根自然腐解对白花丹参生长及其活性成分含量的影响[J]. 中国中药杂志,2015,40(13):2548-2552.



- [57] 刘铁城, 刘惠卿, 王丽华, 等. 西洋参根部腐烂病药剂防治研究[J]. 中药材, 1987, 10(2): 1-5.
- [58] 马承铸, 顾真荣, 李世东, 等. 两种有机硫熏蒸剂处理连作土壤对三七根腐病复合症的防治效果[J]. 上海农业学报, 2006, 22(1): 1-5.
- [59] 高微微, 陈震, 张丽萍, 等. 药剂消毒对西洋参根际微生物及根病的作用研究[J]. 中国中药杂志, 2006, 31(8): 684-686.
- [60] 萧启明, 黄声仪, 鲁文安, 等. 白术根腐病的研究: II. 发生规律及综合防治措施的探讨[J]. 湖南农学院学报, 1992(S1): 214-224.
- [61] 韦鑫, 张礼维, 赵致, 等. 6 种杀菌剂对白术根腐病的田间防效[J]. 中国植保导刊, 2016, 26(4): 64-65.
- [62] 鲁鸿钜, 谷守礼, 杨传英, 等. 应用杀菌剂防治贝母烂种[J]. 中药材, 1987, 10(5): 3-5.
- [63] 杨成前, 郑军, 吴忠宝, 等. 不同农艺措施对白术根腐病的影响及其药剂防治研究[J]. 现代中药研究与实践, 2010, 24(2): 9-11.
- [64] 侯玉兵, 郭颖. 人参立枯病药剂筛选试验[J]. 人参研究, 1992, 4(1): 13-15.
- [65] 赵冬梅, 王铁生. 应用 10 种药剂防治西洋参立枯病试验[J]. 特产研究, 1993 (4): 21-22.
- [66] 蔡君峰, 李合意, 马友德. 两种新农药防治西洋参立枯病的试验初报[J]. 人参研究, 2001, 13(3): 43-44.
- [67] 郭玉财, 石志清, 郭德忱. 恶·甲水剂(育苗青)防治人参苗期立枯病[J]. 植保技术与推广, 1998, 18(3): 42-43.
- [68] 李刚, 侯玉兵, 刘廷惠, 等. 宝福斯防治人参立枯病试验总结[J]. 人参研究, 2004, 16(4): 46-48.
- [69] 孙新荣, 呼丽萍, 刘艳梅, 等. 半夏块茎腐烂病病原鉴定和药效比较[J]. 中国中药杂志, 2010 35(7): 837-841.
- [70] 李荣锋, 吴连举, 钱淑文, 等. 两种新农药防治西洋参黑斑病效果试验[J]. 特产研究, 1996(1): 56-56.
- [71] 蔡君峰, 李合意. 绿乳铜、思科、敌力脱 3 种新农药筛选试验总结[J]. 人参研究, 2000, 12(1): 44-45.
- [72] 王淑琴, 于洪军, 陈仙华. 三七黑斑病的防治研究[J]. 特产科学实验, 1980(4): 9-16.
- [73] 毕爱真, 何允波, 李学平, 等. 代森锰锌防治人参黑斑病[J]. 植物保护, 1990, 16(6): 52.
- [74] 陈少麟, 黄加云, 张艳梅, 任桂兰. 不同药剂防治人参斑病试验总结[J]. 人参研究, 2012, 24(3): 55.
- [75] 王勇, 陈昱君, 杨建忠, 等. 几种杀菌剂对三七黑斑病防效及与三七质量关系研究[J]. 文山学院学报, 2013, 26(6): 4-7.
- [76] 倪萌. 玄参叶斑病的病原学、发生规律及防治技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [77] 龙光泉, 肖定明. 不同药剂对太子参叶斑病的防效初探[J]. 耕作与栽培, 2011(5): 33.
- [78] 张守霞, 黄淑敏, 周琦, 等. 天沐等几种新药剂防治人参病害效果试验总结[J]. 人参研究, 2014, 26(4): 58.
- [79] 谢贤明, 杨成前, 刘燕琴, 等. 川党参锈病防治技术[J]. 现代中药研究与实践, 2012, 26(6): 14-15.
- [80] 刘廷惠, 李刚, 侯玉兵, 等. 人参斑病药剂防治筛选试验研究[J]. 人参研究, 2000, 12(2): 41-42.
- [81] 刘永刚, 李佳佳, 李昭煜, 等. 枸杞炭疽病防治药剂筛选[J]. 植物保护, 2016, 42(1): 230-234.
- [82] Lu Xiaohong, Jiao Xiaolin, Hao Jianjun, et al. Characteriza-
- tion of resistance to multiple fungicides in *Botrytis cinerea* populations from Asian ginseng in northeastern China [J]. European Journal of Plant Pathology, 2016, 144(3): 467-476.
- [83] 傅俊范, 魏晓兵, 周如军, 等. 哈茨木霉菌 Tr41 对人参锈腐病菌的抑制作用[J]. 吉林农业大学学报, 2015, 37(1): 52-56.
- [84] 周如军, 傅俊范, 史会岩, 等. 人参锈腐病拮抗生防菌的筛选与鉴定[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(4): 422-426.
- [85] 叶云峰, 付岗, 胡风云, 等. 三七主要病害生防真菌 F2 的抑菌作用测定及其鉴定[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2112-2115.
- [86] 刘学周, 李绍宾, 赵智灵, 等. 西洋参内生菌株的分离及拮抗性菌株的筛选和鉴定[J]. 中草药, 2014, 45(22): 3332-3336.
- [87] 张国辉, 王龙, 任永权, 等. 贵州省黔东南州太子参立枯病的病害分析及生防初探[J]. 中国农学通报, 2015, 31(11): 205-209.
- [88] 惠娜娜, 马永强, 王立, 等. 淡紫拟青霉、厚垣枝菌生防菌剂对当归“麻口病”的防治效果[J]. 植物保护, 2015, 41 (4): 199-202.
- [89] 王雪, 王春伟, 高洁, 等. 不同杀菌剂对人参黑斑病菌的毒力测定及田间药效[J]. 农药, 2011, 50(11): 841-844.
- [90] 华国栋, 郭兰萍, 黄璐琦, 等. 药用植物品种选育的特殊性及其对策措施[J]. 资源科学, 2008, 30(5): 754-758.
- [91] 杨丽英, 杨斌, 李林玉, 等. 6 种云南道地中药材病害发生及抗病育种研究进展[J]. 中药材, 2010, 33(7): 1186-1188.
- [92] 王春兰. 早熟高产抗病龙胆品系 K-1, K-2 选育及繁育技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [93] 赵杨景, 王玉萍, 杨峻山, 等. 西洋参参与紫苏、薏苡轮作效应的研究[J]. 中国中药杂志, 2005, 30(1): 13-16.
- [94] 高微微, 焦晓林, 毕武, 等. 罹病西洋参根内主要人参皂苷含量的变化[J]. 中国中药杂志, 2008, 33(24): 2905-2907, 2953.
- [95] Jiao Xiaolin, Bi Wu, Li Ming, et al. Dynamic response of ginsenosides in American ginseng to root fungal pathogens [J]. Plant and Soil, 2011, 339(1/2): 317-327.
- [96] Mahfuzur R, Zamir K P. Biochemistry of ginseng root tissues affected by rusty root symptoms [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2005, 43(12): 1103-1114.
- [97] 泰瑞清. 根腐病胁迫下三七体内皂苷的转化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [98] 沈一行, 朱玉香, 宋洪涛, 等. 敌克松对两种曼陀罗生物碱含量的影响[J]. 中药材, 1993, 16(3): 7-9.
- [99] 周阳阳. 2 种药用植物病害相关病原菌的分离鉴定及生物学特性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [100] Geiser D M, Jiménez-Gasco Maria del Mar, Kang Seogchan, et al. A DNA sequence database for identifying *Fusarium* [J]. European Journal of Plant Pathology, 2004, 110(5): 473-479.
- [101] Cabral Ana, Groenewald Johannes Z, Rego Cecília, et al. *Cylindrocarpum* root rot: multi-gene analysis reveals novel species within the *Ilyonectria radicola*, species complex [J]. Mycological Progress, 2012, 11(3): 1-34.
- [102] 颜红梅, 卫增泉, 郝冀方, 等. 重离子束在中药材品种改良上的应用研究[J]. 中国现代中药, 2007, 9(8): 39-40.
- [103] 毛碧增, 孙丽, 刘雪辉. 基因枪转化双价防卫基因获得抗立枯病白术[J]. 中草药, 2008, 39(1): 99.