

## 我国药用植物化感作用研究进展

张爱华, 郜玉钢, 许永华, 雷锋杰, 张连学\*

吉林农业大学中药材学院, 吉林 长春 130118

**摘要:** 介绍化感作用在药用植物研究中的重要性及意义, 分析了药用植物产生化感作用的原因, 综述药用植物中存在的化感物质种类及其化感作用研究方法, 同时阐述了其化感作用产生的机制, 并对药用植物化感作用研究中存在的主要问题进行了深入剖析, 在此基础上指出药用植物化感作用研究需要加强的方向。

**关键词:** 药用植物; 连作障碍; 化感作用; 栽培; 中药材

**中图分类号:** R282.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0253-2670(2011)10-1885-06

## Advances in studies on allelopathy of medicinal plants in China

ZHANG Ai-hua, GAO Yu-gang, XU Yong-hua, LEI Feng-jie, ZHANG Lian-xue

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

**Abstract:** This review introduced the importance and significance of allelopathy in medicinal plant, analyzed the reasons for allelopathy in medicinal plant, described the types of allelochemicals, reviewed the research methods and clarified the mechanism of allelopathy, and investigated the main problems about allelopathic reearches on medicinal plants. Based on those, the paper points out the problems in the current study on allelopathy of the medicinal plants.

**Key words:** medicinal plants; replant failure; allelopathy; cultivate; traditional Chinese medicinal materials

化感作用是植物争夺土壤中的养分、空间及竞争生态位而形成的对外界环境的一种适应机制<sup>[1]</sup>。植物的化感作用是植物通过向环境释放次生代谢产物即化感物质而实现的。与农作物比起来, 加强药用植物化感作用研究更加具有理论和实践意义。

首先, 随着中药材市场需求的不断扩大, 药用植物栽培种类和规模也在不断增加。在栽培的药用植物中, 根类药材占70%左右, 在生产中绝大多数根类药材会产生连作障碍, 连作障碍已成为制约我国中药材可持续发展的重大问题。药用植物连作障碍与其产生的化感物质密切相关, 药用植物化感作用是其发生连作障碍的重要因素之一<sup>[2]</sup>。

其次, 在我国大力开展引种驯化、人工栽培的过程中, 药用植物之间、药用植物与其他作物间合理的种群格局是至关重要的, 因此有必要深入研究药用植物化感作用在其生态系统进化中的地位和作用, 了解药用植物的化感作用在其生态系统中的利弊。在获得药用植物的同时, 应更加注重其在自然

生态系统中的生态角色, 促进经济发展与生态良好和谐统一。

再次, 从药用植物的利用角度而言, 药材的质量比其产量显得更为重要。当前我国正在研究药材生产的GAP标准, 并将其应用于生产, 使药材达到高效、安全、无污染的标准。为达到这一目的, 采取生物控制将是不可缺少的手段和方法, 而植物化感作用也正是这一研究领域中的重要方面<sup>[3]</sup>。因此, 将药用植物的化感作用与生物防治结合起来进行研究, 药用植物化感物质对农林业害虫、病害、杂草的防除, 即植物源杀虫剂和除草剂的研究、开发和应用, 将成为药用植物化感作用研究领域的重要方面。

本文就近年来药用植物化感研究进行综述梳理, 为今后相关研究提供参考, 促进化感作用在药用植物中的研究, 以及为其开发利用提供借鉴。

### 1 药用植物产生化感作用成因分析

植物有别于动物难以逃避或改变环境, 因此, 适应多变的环境是其维持生存的主要出路。然而,

收稿日期: 2011-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31100239, 31070316); 吉林省科技发展计划资助项目(20110926)

作者简介: 张爱华(1978—), 女, 吉林长春人, 研究方向为中药资源与生物技术。Tel: (0431) 84532952 E-mail: blueice20021230@163.com

\*通讯作者 张连学 E-mail: zlx863@163.com

由于生境的异质性,致使植物不得时常面对各种逆境,同时还要不时应对其他生物的侵扰。在这些胁迫条件下,植物通过物理手段与其他生物竞争有限资源的能力大为下降,化学方法是其增强竞争能力的主要手段<sup>[4]</sup>。其中最重要的途径是植物产生和释放化感物质,在特定的土壤环境下不仅能影响同种或异种植物的种子萌发、植株生长等,而且在微生物的分布、营养元素的活化以及增强植物对金属毒性的抗性等方面具有重要作用。药用植物的化感作用除了环境胁迫外,还有自身独特的原因。

### 1.1 药用植物化感物质与有效成分的“同源性”

药用植物含有特定的生理活性物质,如黄酮、萜醌、生物碱、酚酸类等,而这些化学物质往往是以次生代谢物质的形式分布在药用植物的各个器官。同时,植物中的化感物质也主要来源于植物的次生代谢产物,相对分子质量较小,结构简单。这类小分子物质在药用植物栽培中很容易释放到环境中,使药用植物易于发生化感作用,加剧了药用植物连作障碍的发生。

### 1.2 大多数药用植物为多年生且生长周期长

与生长周期短的农作物不同,药用植物多为多年生,生长周期几年甚至十几年,这使得许多药用植物在同一地块多年生长,随着栽培年限的增加,其不断向环境释放化感物质,并在植物根际区逐渐积聚,使土壤微环境发生改变,尤其是植物残体和植物根系分泌的化感物质一起影响植株代谢,对邻近植物的生长产生巨大影响,与农作物以及其他经济作物相比,药用植物更容易产生化感作用。

### 1.3 药用植物长期栽培及品种选育的结果

药用植物长期栽培及品种选育追求的目标是提高药用植物次生代谢产物的量,其中有些既是药效成分,又是植物的化感物质。药用植物化感物质是在长期进化过程中与环境(生物的和非生物的)相互作用的结果,次生代谢产物在植物提高自身保护和生存竞争能力、协调与环境关系中充当着重要的角色。随着药用植物集约化和规模化种植的扩大,使得同一地块长期种植同种药用植物,品种单一和高密度种植造成生态系统恶化。面对来自种群内外的激烈竞争,药用植物产生和释放化感物质的水平提高,影响同种或异种植物,以此调节种群密度和群落组成,减轻种内或种间的竞争压力。因此,从某种意义上说,提高栽培药材质量的同时也客观加剧了药用植物的化感作用。

## 2 药用植物化感物质

化感物质的研究是药用植物化感作用研究的核心,化感物质是药用植物次生代谢的产物,种类繁多,结构多样,主要是通过莽草酸和异戊二烯代谢途径产生。现已知的化感物质主要包括酚类、醌类、香豆素类、黄酮类、萜类、糖和糖苷类、生物碱和非蛋白氨基酸等<sup>[5]</sup>。

Nicol 等<sup>[6]</sup>采用 Tang & Young 设计的收集系统从西洋参根际土壤中收集根系分泌物,经过 HPLC-ESI-MS 分析确定这些根系分泌物中含有皂苷成分。牡丹根际土壤中存在 5 种以上的酚酸类物质,除了常见的阿魏酸、肉桂酸、香草醛、香豆素外,还有牡丹特异的化感物质丹皮酚<sup>[7]</sup>。木麻黄小枝提取物具有化感作用,其化感物质是结构不同的黄酮类化合物:山柰黄素-3- $\alpha$ -鼠李糖苷、槲皮黄素-3- $\alpha$ -阿拉伯糖苷、木犀草素-3',4'-二甲氧基-7- $\beta$ -鼠李糖苷<sup>[8]</sup>。当归根际土壤水提液对自身种子萌发和幼苗生长具有明显的自毒作用,且自毒效应具有一定的浓度依赖性,推断自毒作用可能是造成当归连作障碍的原因之一。从当归根际土壤水提液中鉴定到 17 个化合物,包括有机酸、酮、醛、酯和烃类等化感物质<sup>[9]</sup>。月桂酸和 2,6-二叔丁基苯酚是地黄抑制芝麻生长的化感物质,这与地黄发生自毒作用的化感物质(阿魏酸、香草酸、香草醛、邻苯二甲酸、丙二酸)不同<sup>[10-11]</sup>。郭兰萍等<sup>[12]</sup>从苍术根际土及根茎中分离到的挥发油成分  $\beta$ -桉叶醇对苍术胚芽的伸长有显著化感作用。

## 3 药用植物化感作用研究

生物技术常用于研究药用植物的化感作用,通过观察受体(土壤生物或其他植物体)对化感物质不同程度的反应,来判断化感物质活性的大小。

### 3.1 对种子种苗的化感作用

伊贝母根系分泌物主成分 1,3,5-三烯丙基-1,3,5-三嗪-2,4,6(1H,3H,5H)三酮、酚酸和二者的混合液对其种子萌发及胚根、胚轴的生长有明显的化感作用,且随着浓度升高而增强,在较低浓度时对胚轴生长有一定促进作用<sup>[13]</sup>。不同组织浸提液对伊贝母种子萌发及幼苗生长有抑制作用,且随浓度升高而抑制作用增强,同浓度组织浸提液的抑制作用大小是叶片浸提液>地上茎浸提液>鳞茎浸提液<sup>[14]</sup>。地黄根际土壤中的对羟基苯甲酸、阿魏酸、香草酸、香草醛量的变化与其块根膨大速率变化动态相似,对羟基苯甲酸表现为先上升后下降,阿魏酸与地黄块根的膨大呈正相关<sup>[15]</sup>。苍术根茎

提取液可显著抑制苍术种子发芽率及其胚根和胚芽的生长,其中茅山苍术根茎提取液对其种子发芽率的抑制作用显著高于英山苍术根茎提取液。由此可见,苍术的化感作用在种内不同品种间存在差异<sup>[12]</sup>。当归根系分泌物可抑制其幼苗的根伸长,但对其苗高和干质量表现出显著的促进作用。当归根际土、非根际土水浸液对其种子萌发、幼苗生长及4种酶活性均有显著的抑制作用;在相同质量浓度条件下,根际土水浸液的综合化感效应较非根际土和对照土强。当归不同发育期化感作用强弱程度为:营养期>幼苗期>繁殖期>成熟期;地上部位自毒效应强于根部<sup>[16-17]</sup>。

唐秀梅等<sup>[18]</sup>研究发现铁、锰的缺乏或过量都会引起商陆根系分泌物量的变化。游佩进等<sup>[19]</sup>报道三七连作土壤对萝卜、莴苣根长有明显抑制作用。黄连根系分泌物、根茎浸提液、植株残体分解产物、根际土浸提液对黄连生长有较强的抑制作用<sup>[20]</sup>。补骨脂种子的化感物质补骨脂素能使番茄种子发芽率下降近70%<sup>[21]</sup>。

### 3.2 对组织培养物的化感作用

牡丹组培苗根系分泌物对二茬组培苗具有一定的自毒作用,添加活性碳可降低其自毒作用,提高根系活力和叶绿素的量<sup>[7]</sup>。邵财等<sup>[22]</sup>利用收集的人参根系分泌物对其根源愈伤组织丙二醛和DNA的化感效应进行研究,发现根源愈伤组织丙二醛水平迅速增加,与对照差异极显著,而后又逐渐降低。DNA量随培养时间的增加而逐渐降低。陈长宝等<sup>[23]</sup>报道人参根际土壤提取物对人参根源愈伤组织的化感效应大于茎源和叶源愈伤组织,提取物对人参愈伤组织生长有明显的抑制作用,并引起愈伤组织褐化,抑制作用在培养初期较明显,后期逐渐减弱,但最终根愈伤组织的质量明显低于对照。Lei等<sup>[24]</sup>报道不同浓度外源人参皂苷均明显抑制人参愈伤组织鲜质量的增加。

### 3.3 对病原菌的化感作用

化感物质对土壤微生物群落具有趋化作用,易造成有害病原菌增加和有益菌减少,导致病虫害频繁发生,引起连作障碍的发生<sup>[25]</sup>。

丹参根系分泌的酸性物质能影响土壤微生物群落,特别是真菌数量<sup>[26]</sup>。李勇等<sup>[27]</sup>研究了不同浓度人参根系分泌物成分苯甲酸、邻苯二甲酸二异丁酯、十六酸和2,2-(4-羟基苯基)丙烷对人参致病菌和绿色木霉菌菌落生长及孢子萌发的化感效应,发现4

种根系分泌物的等量混合物浓度与人参致病菌及绿色木霉菌菌落生长速率呈负相关。不同浓度人参根系分泌物成分对人参致病菌及绿色木霉菌的化感效应存在显著差异。杨靖春等<sup>[28]</sup>研究发现,人参皂苷对人参根际的黑曲霉和青霉的生长有较明显的刺激作用,但对镰刀菌、木霉和黑斑病菌等刺激作用不明显。Nicol等<sup>[6]</sup>报道人参皂苷作为化感因子能够促进西洋参主要土传致病菌——锈腐菌和疫霉菌的生长,而对其拮抗菌——哈茨木霉菌的生长有抑制作用。杨家学等<sup>[29]</sup>研究显示,浓度为0.1~1 mmol/L的丁香酸对西洋参立枯丝核菌菌丝生长具有促进作用,香草酸也有一定的促进作用,但不呈浓度依赖效应,浓度在1 mmol/L以上香草酸对其有显著的抑制作用,阿魏酸也有一定抑制作用;对于西洋参根腐菌,阿魏酸对其生长有明显促进作用,香草酸也有一定促进作用,香草酸表现为低浓度促进,高浓度抑制作用,丁香酸对其生长基本无影响。张爱华等<sup>[30]</sup>报道不同浓度外源人参皂苷对人参土传病害立枯丝核菌、黑斑菌、疫病菌和锈腐菌菌落生长有不同程度的化感作用。

多数药用植物都有专属的有害或病原微生物,化感物质的产生和释放能够影响土壤微生物群落结构,土壤微生态失衡加剧了有害或病原微生物的爆发,化感物质可通过抵消土壤的抑菌作用,诱导病原体的繁殖体萌发,直接或间接地影响植物病原菌,即通过选择性的吸引植物病原微生物在根面和根际定殖和扩繁,造成植物发病,最终导致药用植物减产和品质下降等连作障碍现象发生。

## 4 药用植物化感作用研究机制

目前研究显示,化感物质能抑制细胞分裂、引起膜功能的改变、影响光合作用和生物合成、影响气孔机能和呼吸作用、干扰金属离子的摄取和酶的调节,并能同植物激素产生相互作用等。药用植物化感作用机制的研究主要集中在以下几方面。

### 4.1 对细胞膜的影响

细胞膜通常是化感作用的原初位点,大多数化感物质可以通过影响细胞膜电位、抑制根系质膜和液泡膜的 $H^+$ -ATPase活性和改变膜透性等来影响植物对离子的吸收。人参根际土壤提取液中含有苯酚类、酚酸及其衍生物和苯胺类物质,其中大多数是公认的化感物质<sup>[31]</sup>。人参根系分泌物的化感作用具有破坏人参根源愈伤组织膜的功能,影响细胞分裂,抑制其根源愈伤组织生长<sup>[32-33]</sup>。破坏膜的功

能可能是人参根系分泌物化感作用的一种作用方式。虽然化感物质对细胞膜的作用机制尚未完全清楚,但 Bazivamakenga 等<sup>[34]</sup>认为,化感物质降低了细胞膜中巯基的量,从而破坏了细胞膜的完整性,导致植物根细胞对养分吸收下降,同时细胞内物质大量外渗。

#### 4.2 对抗氧化系统的影响

环境胁迫导致植物体内抗氧化酶活性降低,活性氧自由基过度产生而引起的细胞膜氧化损伤和植物生长受抑制,也是药用植物化感作用机制之一<sup>[35]</sup>。林文雄等<sup>[36]</sup>研究发现,化感物质可抑制受体植物的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性,导致体内活性氧增多,启动膜质过氧化,破坏膜的结构。当归根际土提取物能够抑制当归幼苗体内 SOD、CAT、过氧化物酶(POD)活性,使其清除体内活性氧自由基的功能降低,同时也降低了硝酸还原酶活性,影响当归幼苗对氮的吸收<sup>[16]</sup>。张爱华等<sup>[37]</sup>报道不同浓度外源人参皂苷可升高人参幼苗根中 MDA 水平,影响幼苗体内 SOD、POD、CAT 活性,使 3 种抗氧化酶活性变化规律不一,最终导致人参细胞内无法建立活性氧的产生与清除的平衡系统,细胞自身的自我保护机制不能发挥作用,细胞无法进行正常生理代谢,从而抑制了人参生长。伊贝母根系分泌物对伊贝母幼苗体内的保护酶 SOD 具有抑制作用,但对 POD、CAT 的活性既有抑制作用亦有促进作用。对幼苗体内 MDA 及叶绿素水平有促进作用<sup>[14]</sup>。牡丹组培苗根系分泌物对二茬苗的游离脯氨酸量、SOD 和 POD 酶活性的影响是先升后降的趋势,而向培养基中加入活性炭可以吸附有毒物质,减缓其化感作用的发生<sup>[38]</sup>。黄小芳等<sup>[39]</sup>研究 5 种化感物质对人参根系酶活性的影响。结果显示,苯甲酸在 3 种浓度下均抑制人参幼苗根系 POD 酶活性,邻苯二甲酸二异丁酯和丁二酸二异丁酯仅在低浓度时抑制 POD 酶活性,棕榈酸和 2, 2-二(4-羟基苯基)丙烷 3 种浓度下均促进 POD 酶活性,且与化感物质浓度呈正相关;除丁二酸二异丁酯和棕榈酸外,其余 3 种化感物质均表现为处理浓度与 CAT 酶活性呈正相关,且与对照相比,化感物质对 CAT 酶活性的影响均表现促进作用;苯甲酸和丁二酸二异丁酯在低浓度时抑制苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性,中浓度处理对 PAL 酶活性的促进作用大于高浓度处理;棕榈酸在低浓度时对 PAL 酶活性的促进作用最强,2, 2-二(4-羟基苯基)丙烷在高浓度时对 PAL 酶活性的促进

作用最强,邻苯二甲酸二异丁酯对 PAL 酶活性的促进作用与浓度呈正相关。

#### 4.3 对药用植物激素的影响

植物的生长与生长激素密切相关。现已证明,许多酚酸类化感物质(如萜萘灵、绿原酸、肉桂酸和苯甲酸等)能够对植物生长激素吲哚乙酸(IAA)产生影响<sup>[40]</sup>。陈长宝等<sup>[23]</sup>研究发现,人参化感物质对人参愈伤组织内源 IAA 的量有影响,明显低于对照。地黄连作表现为块根不能膨大,多须根,而 IAA 是引起地黄块根膨大的主要内源激素之一。阿魏酸是 IAA 氧化酶的辅基,阿魏酸同吲哚乙酸氧化酶的活性直接相关,能够提高吲哚乙酸氧化酶的活性,从而氧化 IAA,使 IAA 的量降低,导致地黄块根不能膨大<sup>[15]</sup>。

#### 4.4 其他方面机制研究

经化感物质处理的人参幼苗根尖分生区细胞内出现不同程度的淀粉颗粒空泡化现象,并逐渐解体,核仁核膜解体、消失,细胞丧失正常的功能,不能完成正常的生命活动<sup>[41]</sup>。人参根系分泌物能影响其根源愈伤组织 DNA 的量,随培养时间的增加而逐渐降低,并在培养 1 d 时就与对照差异极显著<sup>[23]</sup>。

研究表明,化感物质作用于植物的效应和机制较为复杂,且一种化感物质常常具有多种生理生化作用。

### 5 存在的主要问题

植物化感作用的研究是国内外植物化学生态学领域的研究热点。大多数学者集中于大田作物和经济作物,而对药用植物的化感作用研究报道较少。尽管已经取得了一定的研究成果,但仍存在一些问题。

#### 5.1 研究方法值得商榷

化感物质必须是经自然途径进入环境的化学物质,因此研究方法上首先要注意的问题是化感物质是否自然进入环境。在自然状态下,除了水以外,不可能有其他溶剂将植物中的化学物质淋溶出来。研究化感物质的活性实验常将化感物质设置不同浓度,但许多化感物质在水中的溶解度很低,有实验采用乳化剂以及用有机溶剂配成同浓度的化感物质溶液的方法,得出许多化感物质在高浓度下对受试植物的实验结果,而在自然状况下,化感物质作用的最高浓度只能是其在水中的饱和溶解度,故影响其他生物的化学物质都是微量的,因此实验结果不能反映自然界的真实情况。在实验室研究化感物质对受试植物种子萌发

的影响, 仅仅是初步的工作, 自然界的化感物质对种子萌发的影响应涉及环境因素(气候条件和土壤的理化性质等), 因此要全面评价药用植物的化感作用, 不仅要考虑植物不同生长阶段自然进入环境的化感物质, 而且要考虑环境因子与化感物质的相互作用, 只有将实验室和实地研究方法有机地结合在一起, 才能得出正确的结论。

## 5.2 机制探讨缺乏深入研究

药用植物化感作用研究机制不够深入。自然界中植物通过不同途径释放多种化感物质, 植物化感作用是众多化感物质共同作用的结果。一方面, 药用植物生成的化感物质不论多少, 都存在着活性有无和高低的差异; 另一方面, 在自然状态下多种来源的化感物质间形成了有序却十分复杂的相互作用。化感物质的作用强度取决于化感物质活性, 而活性强弱受其浓度、分子结构及互作方式的影响。深入细化研究对象, 从生理生化、细胞器乃至分子水平上进行研究, 真正从本质上揭示化感作用的机制。

## 5.3 忽视了土壤、微生物等环境影响

植物化感物质的生成受其生长环境影响, 微生物对植物化感作用有直接或间接的作用, 表现在有的根系分泌物本来无毒性, 但进入环境经微生物作用后变为有毒, 如桃树根分泌的扁桃苷无毒, 经微生物分解产生的苯甲酸对桃树苗有毒性; 与此相反, 生理活性很强的萜萜亭和反式肉桂酸因被细菌分解很快失活。此外, 植物的化感物质也对微生物产生作用, 进而影响到其他植物的生长。在药用植物化感作用研究中, 几乎没有化感物质与土壤及土壤微生物等环境的相互作用的报道。

## 6 药用植物化感作用的研究方向

### 6.1 加强接近自然条件下大组分混合物的研究

自然条件下植物释放的化感物质往往不是单一物质, 不同条件下释放的化感物质的量也有差异, 因为化感物质间存在着协同、拮抗和加合等相互作用, 某些化感物质作为单一的组分无化感活性, 但与其他物质结合在一起会显著增强化感作用, 因此研究化感物质对种子萌发的影响应将化感物质的种类和数量同时考虑。研究中需要尽可能模拟自然条件下大组分混合物对药用植物的影响。

### 6.2 寻求有效解决途径, 加强农艺措施

减缓药用植物连作障碍的影响, 应根据化感作用机制找到互利共生的作物等, 以减轻化感物质对连作药用植物的影响。通过合理利用植物化感作用

产生的物质, 促进土壤中药用植物益生菌群落的形成, 抑制有害微生物的增殖。加强以生态控制为主, 通过研究药用植物和其他作物的化感作用, 建立合理的轮作、间作和套种的耕作制度, 合理安排茬口和设计复合群体是克服化感作用、提高药材质量和产量以及土地的产出率的有效方法。

### 6.3 化感品种的培育

化感作用与植物品种显著相关。通过品种选育, 可以培育出对化感作用有较强抵抗能力的优良品种。如地黄品种“小黑英”比另一品种“金状元”更加具有抵抗由于连作导致的地黄斑枯病的能力<sup>[1]</sup>。化感物质一般是植物的次生代谢产物, 受多基因控制。在药用植物品种选育的过程中, 除了采用传统的选育方法, 还可以结合化感作用机制的研究, 找出控制植物化感作用的某个或某些基因, 然后对该基因序列进行修饰等技术处理, 再转入该植物或其他植物, 对其化感作用表达进行调控。将植物化感作用与基因工程技术相结合, 具有广阔的研究前景。

### 6.4 化感物质对土壤微生态环境的影响

许多化感物质不仅影响临近植物的生长发育, 也会影响土壤的理化性质, 改变其养分状况, 进而间接影响植物自身的生长。许多植物的近缘野生种较栽培种有更好的抗性, 通常连年生长也少有病害发生, 因此, 从药用植物近缘野生种根际土壤分离生防菌来减弱化感作用, 从而达到改善药用植物连作障碍的目的, 具有一定可行性, 也将成为今后的一个重要研究方向。

## 参考文献

- [1] 郭兰萍, 黄璐琦, 蒋有绪, 等. 药用植物栽培种植中的土壤环境恶化及防治策略 [J]. 中国中药杂志, 2006, 31(9): 714-717.
- [2] 周洁, 郭兰萍, 黄璐琦, 等. 植物化感作用及其在中药材栽培中的应用 [J]. 世界科学技术——中医药现代化, 2007, 9(5): 34-38.
- [3] 赵福庚, 何龙飞, 罗庆云. 植物逆境生理生态学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 孔垂华, 徐涛, 胡飞, 等. 环境胁迫下植物的化感作用及其诱导机制 [J]. 生态学报, 2000, 20(5): 849-854.
- [5] 谭仁祥. 植物成分功能 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] Nicol R W, Yousefa L, Traquair J A, et al. Ginsenosides stimulate the growth of soilborne pathogens of American ginseng [J]. *Phytochemistry*, 2003, 64: 257-264.
- [7] 覃逸明, 聂刘旺, 黄雨清, 等. 凤丹 (*Paeonia ostii* T.) 自毒物质的检测及其作用机制 [J]. 生态学报, 2009,

- 29(3): 1153-1161.
- [8] 邓兰桂, 孔垂华, 骆世明. 木麻黄小枝提取物的分离鉴定及其对幼苗的化感作用 [J]. 应用生态学报, 1996, 7(2): 145-149.
- [9] 张新慧, 郎多勇, 张恩和. 当归根际土壤水浸液的自毒作用研究及化感物质的 [J]. 中草药, 2010, 41(12): 2063-2066.
- [10] 王明道, 陈红歌, 刘新育, 等. 地黄对芝麻的化感作用及其化感物质的分离鉴定 [J]. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1191-1198.
- [11] 杜家方, 尹文佳, 张重义, 等. 不同间隔年限地黄土壤的自毒作用和酚酸类物质含量 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 445-450.
- [12] 郭兰萍, 黄璐琦, 蒋有绪, 等. 苍术根茎及根际土水提取物生物活性研究及化感物质的鉴定 [J]. 生态学报, 2006, 26(2): 528-535.
- [13] 王英, 凯撒·苏来曼, 李进, 等. 伊贝母根系分泌物对其幼苗生长的自毒作用 [J]. 作物杂志, 2010(1): 25-28.
- [14] 王英, 凯撒·苏来曼, 李进, 等. 伊贝母植株水浸液自毒作用研究 [J]. 种子, 2009, 28(9): 1-4.
- [15] 何江华, 付香斌, 马东明, 等. 地黄块根膨大过程中土壤化感物质含量及微生物数量变化研究 [J]. 河南科学, 2008, 26(11): 1369-1372.
- [16] 朱慧, 马瑞君, 吴双桃, 等. 当归根际土对其种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(5): 833-838.
- [17] 惠继瑞, 李晶, 赵庆芳, 等. 当归不同发育期自毒作用研究 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(2): 605-607.
- [18] 唐秀梅, 龚春风, 刘鹏, 等. 铁锰营养失衡对商陆根系分泌物的影响 [J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 78-80.
- [19] 游佩进, 张媛, 王文全, 等. 三七连作土壤对几种蔬菜种子及幼苗的化感作用 [J]. 中国现代中药, 2009, 11(5): 12-13.
- [20] 银福军, 瞿显友, 曾纬, 等. 黄连不同部位水浸液自毒作用研究 [J]. 中药材, 2009, 32(3): 329-330.
- [21] Baskin J M, Ludlow C J, Harris T M, et al. Psoralen, an inhibitor in the seeds of *Psoralea subcaulis* (Leguminosae) [J]. *Phytochemistry*, 1967, 6: 1209-1213.
- [22] 邵财, 王英平, 许世泉, 等. 人参根系分泌物对其根源愈伤组织化感研效研究 [J]. 中药材, 2009, 32(12): 1798-1801.
- [23] 陈长宝, 许世泉, 刘继永, 等. 人参化感物质对人参愈伤组织生长的影响 [J]. 同济大学学报: 医学版, 2006, 27(5): 37-38.
- [24] Lei F J, Zhang A H, Xu Y H, et al. Allelopathic effects of ginsenosides on the growth and antioxidant enzymes activity of ginseng callus *in vitro* [J]. *Allelopat J*, 2009, 26(1): 13-22.
- [25] 鞠会艳, 韩丽梅, 王树起, 等. 连作大豆根分泌物对根腐病原菌的化感作用 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 723-727.
- [26] 张辰露, 孙群, 叶青. 连作对丹参生长的障碍效应 [J]. 西北植物学报, 2005, 25(5): 1029-1034.
- [27] 李勇, 刘时轮, 黄小芳, 等. 人参 (*Panax ginseng*) 根系分泌物成分对人参致病菌的化感效应 [J]. 生态学报, 2009, 29(1): 161-168.
- [28] 杨靖春, 张丽华, 辛华, 等. 老参地轮作不同年限的紫穗槐对人参土壤微生物区系的影响研究 [J]. 东北师大学报: 自然科学版, 1985(2): 101-108.
- [29] 杨家学, 高微微. 酚酸类化感物质对两种西洋参病原真菌的作用 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(9): 207-211.
- [30] 张爱华, 雷锋杰, 许永华, 等. 人参皂苷对人参主要土传病害的化感作用 [A]. 中国第四届植物化感作用学术研讨会论文集 [C] 青岛: 中国植物保护协会, 2009.
- [31] 李勇, 黄小芳, 丁万隆, 等. 不同土壤提取物对人参种子生长的化感效应及其化学组成 [J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1173-1178.
- [32] Einhelling F A. *Mechanism of Action Allelochemicals in Allelopathy* [M]. Washington DC: American Chemical Society, 1995.
- [33] Inderjit K H. Plant phenolics in allelopathy [J]. *Bot Rev*, 1996, 62(2): 186-202.
- [34] Bazivamakenga R R, Leorux G D, Simard R R. Effects of benzoic and cinnamic on membrane permeability of soybean roots [J]. *Chem Ecol*, 1995, 21: 1271-1285.
- [35] Weir T L, Park S W, Vivanco J M. Biochemical and physiological mechanisms mediated by allelochemicals [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2004, 7: 472-479.
- [36] 林文雄, 熊君, 周军建, 等. 化感植物根际生物学特性研究现状与展望 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 1-8.
- [37] 张爱华, 雷锋杰, 许永华, 等. 外源人参皂苷对人参种子萌发和幼根抗氧化酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4934-4941.
- [38] 覃逸明, 黄雨清, 聂刘旺, 等. 凤丹种胚组培苗的自毒作用研究 [J]. 核农学报, 2009, 23(1): 75-79.
- [39] 黄小芳, 李勇, 易茜茜, 等. 五种化感物质对人参根系酶活性的影响 [J]. 中草药, 2010, 41(1): 117-121.
- [40] 孔垂华, 胡飞. 植物化感作用及其应用 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [41] 许世泉, 艾军, 王英平, 等. 人参化感物质对人参根尖组织结构的影响研究 [J]. 特产研究, 2008(2): 36-41.