

# 化感作用的研究意义及发展前景<sup>\*</sup>

彭少麟<sup>\*,\*</sup> 邵 华 (中国科学院华南植物研究所, 广州 510650)

**【摘要】** 对化感作用在生态学、林业、农业等领域的理论及实践意义进行综述与探讨,并分析了其今后的发展方向。化感作用有助于更加合理地解释生态系统中植物组成与分布、群落演替、协同进化和生物入侵等现象;在林业生产的森林更新、混交林培育中有时会起到决定性作用;在农业上,单作、轮作、覆盖等各种种植方式均受化感影响,此外,一些化感物质可用作杀虫剂和除草剂,从而减轻对环境的污染水体中同样存在化感作用。培育新的抗虫害、抑草品种,分离、鉴定新的化感物质,深入揭示化感作用的机制,是今后化感作用的研究重点。

**关键词** 化感作用 生态学 林业 农业

**文章编号** 1001-9332(2001)05-0780-07 **中图分类号** Q948 **文献标识码** A

**Research significance and foreground of allelopathy.** PENG Shaolin, SHAO Hua (South China Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650). -Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 12(5): 780 ~ 786.

The research significance and foreground of allelopathy concerning ecology, forestry and agriculture were reviewed and analyzed. Allelopathy helps to elucidate the phenomena such as the composition and distribution of plants, the succession of community, coevolution and invasions of exotic plants in the ecosystem. Sometimes it is crucial to regeneration failure and the establishment of mixed forests. In agriculture, it influences the monoculture, crop rotation, crop cover and so on. Some allelochemicals can be used as pesticides and herbicides which consequently reduce the environment pollution. Allelopathy exists in aquatic plants, too. Future work mainly focus on the cultivation of new allelopathic plants which can avoid pests and suppress weeds, the isolation and identification of new allelochemicals as well as intensive study of the mechanism of allelopathy.

**Key words** Allelopathy, Ecology, Forestry, Agriculture.

## 1 引言

两千多年前人们已经观察到化感现象,但是真正深入研究却仅仅是最近几十年来的事情。1937 年德国科学家 Molish 首次提出了化感作用一词,它涵盖了各种植物之间包括微生物的生化相生及相克作用,之后 Rice 在他的专著中又进行了补充<sup>[70]</sup>。国外在这一领域的研究日趋活跃,1974 年《Journal of Chemical Ecology》创刊,Rice 的专著《Allelopathy》第 1 版和第 2 版相继问世,20 世纪 80 年代在美国先后举行了 3 次国际学术会议并出版了论文集,1994 年《Allelopathy Journal》创刊。Rice 将化感物质分为 14 类<sup>[70]</sup>,主要是一些次生代谢物质,例如酚酸类、类萜等。国内关于化感作用的研究起步较晚,但发展迅速,已取得了一定成果。中国生态学会于 1990 年 12 月成立了化学生态学专业委员会,1991 年 10 月举行了首次学术会议<sup>[39]</sup>。本文在综合国内外资料的基础上,概括了化感作用这一交叉学科在各个领域的理论指导意义和实践意义,分析了其发展前景。

## 2 生态系统中的化感作用效应

### 2.1 群落中的植物组成和分布

以前人们在考虑群落中的植物组成和分布的问题时,往往从植物的生物学特性、生境条件来分析,但是后来人们意识到,以上方法并不能解释所有问题。Muller 等<sup>[55]</sup>指出,在美国南加州沿海岸线分布的一些丛林带,在菊科的加州蒿和唇形科的银

叶鼠尾草等灌丛植物的周围会出现一条 1~2m 宽的裸带,裸带中无任何植物生长。在裸带之外数米范围之内,杂草生长不良,明显地受到抑制。这种现象不能用郁闭度、水分和营养的竞争以及动物因素来解释。由于加州蒿和银叶鼠尾草都是芳香植物,它们的叶中含有丰富的挥发性萜类物质,能被雨露带入土壤中,抑制草本植物种子的发芽和幼苗生长。这是化感作用影响植物分布格局的一个典型例子。Fischer 等<sup>[21,22]</sup>研究了佛罗里达的灌木丛。这些灌木丛中实际上没有什么下层草本植物,由于其中化感物质的作用,阻止了适应于火而生存的草本和沙岗群落的松树的侵入,两者之间形成的裸带大约 1m 宽<sup>[20,50,90,94]</sup>。

Lodhi<sup>[41,44,45]</sup>研究了优势树种的化感作用。由于优势树种产生的植物毒素不断积累,从而影响周围的土壤性质,并且影响其林下植被的生长<sup>[43,81]</sup>。他在研究密苏里州的一处森林时发现,在小无花果树、朴树、红橡树和白橡树下,林下植被生长不良或者出现裸地,而在榆树下生长良好。实验证明其林下土壤中的矿质元素含量和 pH 值都和榆树下的土壤相同。而这 4 种植物的腐叶、叶浸取液以及树下土壤均显著抑制被测草本植物的种子萌发、根伸长和幼苗生长,并且分离出几种化感物质,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重大项目(39899370)、广东省自然科学基金(980952)、中国科学院重大项目(KZ951-B1-110)、中国科学院鹤山试验站开放基金和广东省团队资助项目(003031)。

<sup>\*\*</sup> 通讯联系人。

2000-03-21 收稿,2001-02-26 接受。

主要是酚类,说明林下荒芜的原因是化感作用<sup>[42]</sup>。在台湾,由于沼泽桉(*E. robusta*)的化感作用而使其成为优势种<sup>[13]</sup>。山毛榉附近的月桂树、黄杨、杜鹃、紫杉属和冬青属植物都生长不佳,树下草也被破坏<sup>[71]</sup>。在南加利福尼亚,蔷薇和桉树树下光秃,周围有裸带。一些树种林下缺乏草本植物,例如小无花果、竹子、番石榴等<sup>[66]</sup>。

薊的幼苗总是优先生长在距离老死的植株附近不远的地方。薊总是抑制其他牧草的生长,特别是苜蓿,而能够刺激自身种子萌发和幼苗生长。薊的生活和死亡植株的水浸液都能显著地提高自身种子萌发。所以,薊的化感作用使其抑制其他草类生长,而自身得以迅速蔓延<sup>[89]</sup>。

此外,由于化感物质的存在,抑制了其他植物的生长,许多植物易于形成纯植丛(pure thicket),即使在临近的相似生境中有其它适应生活的种类也难以进入共同生长。在一个广泛的地理区域内,植物群落主要是由相近的种类组成<sup>[77]</sup>。在自然界常常看到蕨类茂盛地生长着,其中并没有其他草本植物的存在,这是因为蕨类的枯死枝叶中含有阿魏酸和咖啡酸等酚类物质,由雨水冲刷流到土壤之中,起到抑制作用。在我国热带亚热带广泛分布的芒萁,常形成中生性的草本植物群落及镶嵌分布的小群落,过去认为主要原因是其根和地下茎十分发达,残落物又不易分解,故其它植物难以侵入,形成纯植丛。叶居新等<sup>[98]</sup>实验表明,芒萁对苜蓿及禾本科草类等具有化感抑制作用,而对马尾松无明显抑制作用,这可以解释芒萁纯植丛的成因,以及在自然状况下可形成马尾松—木—芒萁、马尾松—映山红—芒萁等群落。黑芥含有化感物质,有时会入侵加利福尼亚海岸的草地,并形成纯植丛<sup>[54]</sup>。在加利福尼亚,*B. nigra*纯植丛的形成原因是先前种植过的芥,雨水冲刷茎叶,其中的有毒物质对杂草有抑制作用<sup>[5]</sup>。油蒿(*Artemisia ordosica*)中的化感物质使其周围缺少某些一年生植物<sup>[48]</sup>。曾任森<sup>[103]</sup>等指出,胜红薊、三叶鬼针草、加拿大飞蓬3种菊科植物都有较强的化感作用,因而在华南广泛分布。蟛蜞菊是华南常见杂草,自然状态下也常常形成纯植丛。关于菊科植物的化感作用报告较多,这可以部分解释菊科植物为什么在自然界分布广泛,是被子植物中最大的一个科,这也是菊科植物被大量用做植物来源药物的原因之一。

## 2.2 群落演替

豚草属植物往往担当次生裸地演替中第一阶段的先锋种。Jackson等<sup>[30]</sup>报道了豚草的化感作用,发现它在弃耕地的次生演替中扮演着先锋植物的角色,但是第2年紫菀入侵后,豚草便逐渐消失,研究表明这种演替模式并非土壤等因素造成的,而是由于豚草的自毒性和紫菀对豚草种子萌发和幼苗的抑制作用形成。Nell等<sup>[56]</sup>研究了毛果破布草(*A. psilostachya* DC,豚草的1种)在弃耕地演替和分布格局中的作用,它是第1阶段的优势种,并维持到以后几个阶段的演替过程中,生长在它周围的一种三芒草会受到抑制。Rice<sup>[69]</sup>发现毛果破布草成熟的根、茎、叶对几种固氮菌、硝化细菌和根瘤菌具有抑制作用。由此可见,毛果破布草通过抑制豆科植物的根瘤而影响植株生长,可以认为是豚草在次生演替中成为优势种的一个重要原因<sup>[87]</sup>。

## 2.3 协同演化

在许多植物群落中,生物体相互作用,发生基因改变,从而紧密联系。很多植物能够分解有毒物质使其无毒。所以有化感作用植物的伴生种类往往具有忍受、分解甚至利用化感物质的能力。黑胡桃树下土壤中分离出来的细菌能够将胡桃醌(一种化感物质)降解,并且以此化合物为唯一的碳源<sup>[75]</sup>。群落内生物体的协同演化的本质和范围有待进一步研究。生物体之间的活性物质的吸收和转运机制有待阐明,比如,生物体可能不是真正的吸收者。

## 2.4 生物入侵

外来种(exotic species)入侵往往伴随着强烈的化感作用。茜草科的日本草侵入我国南方的橡胶园并迅速占据优势,严重影响橡胶园的生产。40~50年代传入我国并在东北地区广泛蔓延的菊科杂草——豚草,形成了对自然植被和农业生产的巨大危害<sup>[86]</sup>。在高寒草甸人工草场自然退化现象的研究中发现,垂穗披碱草地的牧草退化速度与主要杂草细叶亚菊入侵程度有明显的相关性,后者对前者的种子萌发及幼苗生长有化感作用<sup>[106]</sup>。在我国广东省珠江三角地区,被称为“植物杀手”的微甘菊具有明显的化感作用,它以惊人的速度入侵,并难以进行人工控制,目前形势已经十分严峻。在入侵美国本土的外来种中,原产巴西大西洋海岸的桃金娘科植物草莓番石榴(strawberry guave)是一种高15英尺的灌木或小乔木,由于其叶子产生的有毒化感物质,已经对夏威夷本地稀有植物和动物构成了严重威胁;原产马来西亚等地的澳大利亚松,叶子中含有的化感物质能够抑制其下部植物的生长,并且改变原有的光、温条件及土壤性质,从而占据优势并取代本地种,破坏了原有的昆虫及野生动物生存环境;原产欧亚大陆的加拿大薊被称为“毒草”,每年引起农业上的直接损失达上千万美元以上;原产我国华中地区的臭椿,一旦存活之后,能形成其它植物难以进入的灌木丛并释放毒素,甚至在有林窗出现的地方都会有臭椿的纯植丛;原产欧亚的 *Alliaria petiolata* 已经占据美国东部和中西部及加拿大东南部阔叶林的下层<sup>[10,58]</sup>。在它茂盛繁衍的地方,可达20000株·m<sup>-2</sup>,使原有林下种类数量锐减,从而取代了原有植物,并且难以消除,其他生物也受到影响<sup>[59,60]</sup>,例如濒临灭绝的西弗吉尼亚白蝴蝶,本来应该在 brassicaceae 上产卵,现在则优先将卵产在蒜芥上<sup>[63]</sup>。在外来木本植物中,广东省新绿化造林的面积有一半以上是桉树、相思树和湿地松纯林,而以上树种已被证实有强烈的化感作用<sup>[46]</sup>。外来种对群落和生态系统的影响是巨大的,已经引起国内外研究者的普遍关注<sup>[62]</sup>。

## 3 化感作用在森林动态与林业经营中的作用

### 3.1 森林更新

化感作用是影响森林天然更新的重要因子,以前人们对于更新失败往往从幼树所处的光照、水分和养分条件考虑较多,而对生化因子的作用估计不足<sup>[104]</sup>。事实上,一些树种更新和重建的失败被认为与化感作用有关。在一处亚高山带的越桔-云杉林中,越桔和云杉中的酚类抑制云杉幼苗的生长,使得云杉

的重建失败<sup>[22]</sup>。化感物质同样会影响一些果树例如苹果、柑橘、桃、葡萄等以及其他一些园艺品种的再植失败<sup>[8,77]</sup>。森林重建与化感有关。在宾西法尼亚西北部有一处地方近 80 年没有树木生长。这是几种草本植物例如紫苑等产生的有毒物质引起的<sup>[66]</sup>。Fisher<sup>[21]</sup>在研究化感作用使树木重建失败的原因时,列举了一些具有化感作用的乔灌木等,如糖枫影响黄桦、朴树影响草本、桉树影响灌木、黑胡桃影响树和草灌木、橡树影响草本等,此外还有刺柏、檫木、黑樱桃、漆树、蕨类等。杉木连栽后,森林凋落物可促进酚类物质的增多,使树木生长受到抑制。有些果树连栽后,也会出现衰退或者幼苗死亡现象。例如,桃树叶浸出液可同时抑制桃树幼苗地上和地下的生长<sup>[23]</sup>。

### 3.2 混交林

混交林与单纯林相比在林分稳定性、抗御病虫害以及发挥森林多种效益等方面表现出明显的优势,在我国有些地区混交林营造面积已达造林总面积的 20% 左右,取得了明显的经济效益<sup>[78]</sup>。但是对于如何营造混交林则存在相当的盲目性,其中化感作用往往被忽略。马尾松与刺桫混交是南方混交林中较为成功的混交组合,在广东和广西等地均有大面积的实验林,效果较好。应用<sup>32</sup>P 可以有效地检测树种混种后的相互关系<sup>[57]</sup>。陈红跃等的研究表明,马尾松与刺桫混交可促进刺桫的吸收能力,因此,在马尾松林下栽种刺桫幼苗,可能在一定程度上得益于马尾松各种分泌物的作用。徐英宝等<sup>[78]</sup>研究了马尾松和木荷之间的化感作用,指出混交林对<sup>32</sup>P 的吸收量比纯林松高。原产北美的北方栎,其生化促进品种为皂荚、花旗松、美国白蜡等,而夏栎等则是其抑制树种。此外,刺槐、锦鸡儿、黄榆等可促进杨树磷的代谢。槭、圆叶扶桑、黄榆、白蜡等是榆树的促进种,杨树等是其抑制种。云杉和落叶松分别能促进对方有机物质的积累<sup>[105]</sup>。因此,如果搭配树种选择不当,会造成混交林营造的失败,典型的例子如德国云杉和花旗松混交的失败。森林植物中有化感作用的树种大概可以归属如下:松属、云杉属、柏科、杨柳科、桦木科、壳斗科、胡桃科、桃金娘科、豆科、椴树科、漆树科、禾本科等,其中一些种类有化感作用。在选择这些树种营造混交林时,应该特别注意考虑化感作用的影响<sup>[104]</sup>。

我国是桉树造林大国,面积已超过 150hm<sup>2</sup>。但是桉树可产生挥发性物质蒎烯、桉树脑及水溶性化感物如酚类、没食子酸、绿原酸等,与某些树种或作物混作时难以共生,一些桉树林下植被稀少。柠檬桉和荔枝间作 3 年之后,荔枝大量死亡。桉树还可以抑制松树、新银合欢、马占相思等生长<sup>[102]</sup>。由于桉树纯林在营造一定时期后会出现退化,人们已经开始重视桉树混交林的研究。由于桉树产生大量的化感物质,选择何种混交树种成为一个值得研究的问题。同样的问题例如木麻黄。木麻黄适宜于滨海沙地种植,是 50 年代引种的我国华南沿海防护林先锋树种,生长 15 年后进入高峰期,20 年后即迅速衰退,第 2 代林木出现严重病害引起大量死亡<sup>[47]</sup>。从其小枝中分离出的 3 种化感物均能显著抑制自身幼苗尤其是根的生长<sup>[14]</sup>。所以木麻黄更适合与其他树种混植。尽管大型乔木的化感作用研究有一定难度,但采用适当的方法仍然可以在较短时间内取得良好的效果,例如用组织培养法研究柳、桦、松等之间的化感作用<sup>[33]</sup>。

## 4 化感作用在农业实践上的应用

化感作用在农业生产中的应用极为广泛,无论是作物的单一种植,还是作物轮作,间作,覆盖,翻埋,重茬种植,都要考虑化感作用的影响<sup>[53]</sup>。此外还牵扯到除草和杀灭害虫的问题。据估计,每年由于化感作用造成的世界农业的损失高达数十亿美元<sup>[38]</sup>。

### 4.1 重茬与自毒作用

紫花苜蓿含有的化感物质使其不但有自毒作用,而且对其他植物也有毒害作用。在种植过紫花苜蓿的土地上生长的第 2 代苜蓿,由于自毒往往生长不良,老植株的残落物产生的可溶性物质还会抑制种子萌发。另外的一些牧草品种也有自毒作用<sup>[24,52]</sup>。Miller<sup>[53]</sup>建议对紫花苜蓿的自毒作用,应该通过选择新的不会产生如此多的化感物质或对化感物具有抗性的栽培品种来解决,而为了降低化感作用的影响,在种植紫花苜蓿之前最好先种玉米,或者是各种谷类和大豆<sup>[51]</sup>。此外,由于大豆自毒作用造成的连茬减产,幅度可达 15%~25%<sup>[29]</sup>。其他有自毒现象的种类还有:水稻、绿豆、高粱、向日葵、茶树等。

### 4.2 作物间作和混作

不同种类的作物间作可以提高产量,例如洋葱同甜菜,马铃薯同菜豆等<sup>[80]</sup>。将野芥与椰菜间作,椰菜的产量可提高 50%<sup>[32]</sup>。有些作物本身对杂草有化感作用,如大麦、小麦、向日葵等,可用来与其他作物间作,控制杂草生长,减少除草剂的用量。在农林混作方面,苹果、杨树、桃树的根系分泌物抑制小麦生长,故不宜在上述树种下间作小麦<sup>[108]</sup>。番茄根分泌物及其植株挥发物对黄瓜生长有很明显的化感抑制作用,所以不宜种在一起<sup>[107]</sup>。芝麻根系分泌的化感物能抑制棉花生长,所以应该避免在棉花田中种植芝麻;但是可以用来防止野毛竹在农田中蔓延,抑制白茅生长<sup>[96]</sup>。在我国,也有农民利用芝麻根系分泌物来清除竹根的实例。杜鹃的化感作用很强,杜鹃花科植物生长的土地如果被用作农田,作物的生长将严重受抑<sup>[71]</sup>。

### 4.3 覆盖和翻埋

种植覆盖作物可以有选择地抑制作物和杂草<sup>[61,67]</sup>。所以,一种大家熟悉的控制杂草的常用方法是利用覆盖作物枯落物的化感作用,这已经在玉米、大豆、蔬菜、水果包括葡萄的生产中得到肯定<sup>[91]</sup>。Bhowmik<sup>[7]</sup>研究了几种一年生草本植物如藜等的枯落物对玉米和大豆的生长及营养吸收的影响,发现除了豚草之外,其他种类都或多或少地降低了玉米和大豆的干物质产量。高粱的枯落物对杂草有很强的抑制作用,在夏季种过高粱的土地上,对比于种植过玉米或大豆的地块,一年生杂草特别是阔叶种类密度大大降低<sup>[15]</sup>。在密西根的一个果园里,人们在成行种植的樱桃树之间种上高粱,其落叶可有效抑制杂草<sup>[66]</sup>。

冬季小麦的覆盖在农业和园艺生产中得到广泛应用。小麦枯落物抑制杂草的作用既有物理作用,更有化感物质的作用。其枯落物中含有有毒的酚类和简单的酸类<sup>[62]</sup>。在研究的 9 种覆盖作物中,小麦更受重视,因为它易于进行化学控制,抑草效果明显,对作物幼苗生长的抑制作用最小<sup>[79]</sup>。尽管其他覆盖作物例如高秆油草、多年生黑麦草等在 8 周内能极其有效地抑制

杂草,但是其缺点是难以进行化学控制,而且作物幼苗生长受到严重抑制。但是小麦秸秆能降低棉花萌发率,抑制幼苗生长,这与其对于大豆的作用相同。可以通过减少秸秆覆盖和翻埋,栽培抗性强的品种得以解决<sup>[26,27]</sup>。黑麦及其枯落物释放化感物,而且会聚集在土壤表层,从而更有效地抑制杂草尤其是一年生阔叶草的发芽和生长<sup>[4]</sup>。根据土壤以及天气情况的不同,黑麦抑制杂草的作用可以持续 30~70d<sup>[49,62,92]</sup>。

豆科覆盖物广泛地用于提高土壤 N 含量<sup>[28]</sup>,苜蓿抑草作用可达 90%<sup>[84]</sup>。苜蓿有化感作用<sup>[70]</sup>,红花苜蓿和多毛野豌豆残株及浸出液抑制一些作物发芽,例如将其植株翻埋到土壤中可以使棉花干重降低 60%~80%。反过来,豆类残株遗留在土壤表面,则可以使玉米增产 20%~75%<sup>[74]</sup>。

#### 4.4 杀虫剂和除草剂

**4.4.1 杀虫剂** 植物在生物或者非生物的逆境下,其次生代谢物会增加,这是重要的防御机制之一<sup>[16]</sup>。例如向日葵在限制 P 的情况下比对照释放出更多的酚类化合物<sup>[34]</sup>。很多次生代谢物具有多种功能,如作为拒食剂、引诱剂、生长调控剂、种子萌发促进剂、协同促进剂以及抗寄生病、杀真菌、杀细菌和作为植物毒素(可分解植物组织)等<sup>[6,9,74,76,93]</sup>。随着合成化学农药对环境的危害日益引起人们的关注,无论是在发展中国家还是发达国家,可持续农业的重要性日趋显著<sup>[72]</sup>。利用化感物质(多为次生代谢物)控制害虫(包括昆虫类和线虫)以及疾病的发生已经有不少报道,某些化感物质具有除草、杀虫效果,除直接使用之外,其结构经过鉴定后,可以人工合成,进行大量生产,或者经过化学修饰之后,进一步提高其效力。除虫菊(*Chrysanthemum cinerariifolium*)是多年生草本植物,我国各地均有栽培。从除虫菊花中提取的除虫菊酯(pyrethrin)是最古老的杀虫剂之一,其成分为萜类化合物,对昆虫有触杀和麻痹作用,至今仍在使用。此外,人们还合成了许多除虫菊酯类似物,如溴氰菊酯等<sup>[37]</sup>。危害植物的线虫能被万寿菊、猪屎豆、菊花、蓖麻、苦楝、木麻黄等有效抑制,石刁柏的线虫寄生率也很低。而以前人们多采用化学杀线剂,缺点是改变了土壤的理化特性,影响了土壤微生物生态环境,扰乱了营养元素的循环。因此,应用抗线虫的品种进行套作或轮作可以防治线虫,保护环境<sup>[9]</sup>。

Guo 对分布在中国的 500 种植物的调查中发现,20 种植物具强烈灭螺效果。El-Sawy 等<sup>[17]</sup>发现豚草抑制河滩钉螺繁衍。於凤安等<sup>[9]</sup>利用植物化感作用灭螺研究表明,益母草、问荆等植物与钉螺的数量呈负相关关系,而经过一个汛期,枫杨、乌桕叶片使钉螺死亡率从草滩对照的 2%升至 43.3%和 44.1%,并指出可通过人工引种,或促进灭螺植物的生长,使其生成为优势群落,发挥灭螺抑螺作用。此外具有灭螺效果的植物兼有灭菌、杀虫和根结线虫的作用,例如可以杀灭蚊子和家蝇。通过沿河滩建立农林复合生同系统,即可抑制钉螺繁衍,又可以保护滩地上生长的林木和间作的农作物,改善环境。

土壤致病菌是引起蔬菜减产的一个严重问题,尽管广泛地使用了栽培抗性品种、嫁接和熏蒸土壤等方法,仍然在很多国家引起较大的损失。Jing Quan Yu 研究了在番茄-中国细香葱间作系统中利用化感作用控制由一种假单胞菌引起的番茄枯萎

病的效果,发现中国细香葱的根系分泌物可抑制该菌的繁殖,显著降低番茄枯萎病的发生<sup>[100]</sup>。Yamagishi 等<sup>[97]</sup>发现在春季种植抗性羽衣甘蓝和芜菁甘蓝,能够抑制芜菁甘蓝的根瘤病,并且大幅度降低土壤中休眠孢子的密度。

**4.4.2 杂草的生物防治** Putnam 和 Duke<sup>[65]</sup>首先探讨了利用具有化感作用的农作物在农田中抑制杂草。起先,他们考虑将化感特性与作物种质结合起来,用以发展抑制杂草的栽培品种。他们从 526 个黄瓜原始材料中筛选出对白芥和黍草有化感作用的品种,其中一个原始材料抑制了 87% 的实验植物的生长。后来又指出其他一些方法,例如利用化感作物的轮作、间作、覆盖等<sup>[40]</sup>。有些研究者还分别对一些含有各种数量和种类化感物质的不同基因型的作物进行了研究,如黄瓜、燕麦、向日葵、大豆、高粱等,以尝试用其作为生物除草剂<sup>[1,18,36,40,65,73]</sup>。紫花苜蓿或高秆油草能够一定程度地抑制某些种类的杂草,显示出其在除草方面的潜力<sup>[53]</sup>。此外,桉树根和大豆根瘤中的根瘤生物毒素(rhizobiotoxine)也有良好的除草效果<sup>[82]</sup>。

利用作物轮作可以在施加少量农药的情况下有效地控制杂草。在小规模的粮食和蔬菜生产中,人们用轮作或者覆盖作物来消灭或者减少某些杂草,这一方法已延续了几个世纪。其中,黑麦、小麦、荞麦、黑芥等效果良好<sup>[91]</sup>。很多作物生长迅速,同杂草竞争资源<sup>[64]</sup>。Overland<sup>[61]</sup>认为这是由作物产生的化感物质和竞争共同作用的结果。

#### 4.5 某些化感物质对农业生产的促进作用

关于化感作用的有害性研究较多,而其有益的一面研究很少<sup>[67]</sup>。以上提到的化感作用很多都表现为抑制作用,其实不尽如此。除了植物之间合理的搭配可以提高产量之外,植物再植时的自毒作用,由于维持了个体的一定生存空间,有效地避免了掠食者的聚集以及致病真菌和细菌的繁衍,促进了个体之间的远缘杂交<sup>[2,3,19]</sup>。谷物麦仙翁产生的麦仙翁精以低浓度施用于麦田可增加小麦产量,抑制杂草生长<sup>[71]</sup>。日本的 Hasegawa Koji 从水芹幼苗的胚根中分泌出一种二糖 Lepidimoide,它广泛存在于植物种子中,可促进植物生长,明显促进植株叶绿素的合成,并且在低光照条件下也具有相同的作用。Lepidimoide 具有与 GA 和 BA 类似的生理作用,是国际上首次确认的促进型互感物质,被称为第 7 类植物激素。日本已投入巨资进行开发研究,一旦解决其工厂化的规模生产,就可以广泛应用于植物工厂的作物栽培和改进农业与园艺技术,特别是该物质可促进植物对弱光的利用,能够大大降低植物工厂的能耗<sup>[11]</sup>。有些化感物质具有促进扦插生根的作用,例如白茅草的根原液促进落叶松插条的生根,其作用优于 IBA+NAA 处理。柳树枝条的浸出液对某些花木扦插成活有促进作用,其发根率高于经 NAA、VB<sub>12</sub><sup>[39]</sup>。

广泛存在于动植物体内的尿囊素对豆科作物表现出显著的促进作用,尤其促进其根的生长,在豆科作物的根瘤分泌物中也发现了大量的尿囊素。尿囊素在低浓度时对大豆和红豆的幼苗生长有促进作用,而高浓度时则抑制生长。尿囊素同时具有促进细胞生长,加速伤口愈合,保持皮肤湿润等功效,已在医药和化妆品领域获得应用<sup>[35]</sup>。

## 5 水生生态系统的化感作用

关于陆生植物的化感作用研究较多,而关于水生植物的报道相对较少<sup>[68]</sup>.在水生生态系统中有些种类成为优势种可能是由其化感作用引起的,例如雅致鼓藻(*Cosmarium vexatum*)的分泌物显著抑制其它多种绿藻的生长,而对自身生长有刺激作用.一些与赤潮和水华有关的海藻和淡水藻分泌的毒素,不仅可以杀死藻类和多种浮游生物,而且会毒害人体.金鱼藻等9种水草含有克制小球藻的生物碱,他们能抵抗食草动物的危害<sup>[83]</sup>.

凤眼莲根系向水域分泌某些化感物质,抑制藻类生长,使水变澄清<sup>[82]</sup>.何池全等<sup>[25]</sup>报道,石菖蒲对多种绿藻和蓝绿藻有显著的抑制效果,可用于治理富营养化水体中的藻类繁生,并且有镇痉的药用价值.此外,水花生、水浮莲、浮萍、紫萍、满江红等也有不同程度的克藻效应<sup>[101]</sup>.

## 6 化感作用的研究与应用前景

化感作用正处于蓬勃发展的时期,尽管已经取得了一定成果,但是在很多方面尚无突破性进展.在今后的研究中,抗病虫害、抑制杂草的化感新品种有待开发,并且推广到实际生产中去,以减少甚至不用化学合成药剂.利用传统的杂交以及现代基因工程等技术,可以将植物的化感基因引入到栽培品种中,获得具有化感特性的新品种. Panchuk 等<sup>[71]</sup>发现一种冰草属植物和小麦的杂交种主要显示了冰草的特性和较高的抑制活性,这无疑是一个良好的开端.如果将来能够成功地开发出小麦、水稻等一些主要作物的抑草、除虫新品种,不但可以维持环境清洁,而且可望进一步提高产量.

分离、鉴定新的化感物质是另一个重要方向.事实上,在人们已经确定的化感物质中,真正具有应用价值的仍然很少,因此,在以后的研究中,鉴定新的化感物质并探索其杀虫、除草乃至促进植物生长的潜力,并在此基础上开发无污染的杀虫剂、除草剂、生长促进剂等,将对现代化的生产产生巨大影响.此外,化感物质的产生、释放及作用机制的研究也是一个薄弱环节,有待进一步探讨.随着我们对化感物质的选择机制、作用的生理方式、生物合成的基因调控了解增多,人们将有可能成功地利用现有的种质资源,提高这些化学物质的产量,调控生活或者枯落物的化感物质释放速度以进行季节性的除草.这一领域的技术虽然复杂,但是却为杂草的综合防治展示了新的前景<sup>[91]</sup>.

全球变化是目前引起世人广泛关注的问题,大气中的  $\text{CO}_2$  浓度已由工业革命前的  $280\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  上升到目前的  $355\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ .  $\text{CO}_2$  浓度升高可促进植物的光合作用,影响生物量,影响种子萌发和幼苗生长,降低生物多样性<sup>[12,31,95]</sup>.  $\text{CO}_2$  浓度升高还会影响化感物质的分泌,例如影响水稻的根系分泌物<sup>[85]</sup>.但是在很多方面还未展开研究,例如在全球变化条件下,植物化感作用的变化、具有化感抗逆特性的优良农作物品种是否会降低或丧失其化感特性、化感生物控制对策调整以及在未来可持续发展农业上的地位等<sup>[88]</sup>.反过来,植物化感作用的变化又

会怎样反作用于全球变化,例如其分泌物数量和性质的改变对大气成分的影响,化感作用的增强或减弱会影响到敏感植物的生长,从而形成对生物多样性的改变以及由此产生的对生态系统乃至整个生物圈的影响等.所以,今后的化感作用研究,应该是置于全球变化的前提下进行的.

## 参考文献

- 1 Alsaadawi IS *et al.* 1986. Allelopathic suppression of weeds and nutrition with selected cultivars of *Sorghum bicolor* (L.) Moench. *J Chem Ecol*, **12**:209 ~ 220
- 2 Augspurger CK & Kelly CK. 1984. Pathogen mortality of tropical tree seedlings: Experimental studies of the effects of dispersal distance, seedling density, and light conditions. *Oecologia*, **61**:211 ~ 217
- 3 Augspurger CK. 1983. Seed dispersal of the tropical tree, *Patyopodium elegans*, and the escape of its seedling from fulgal pathogens. *J Ecol*, **71**:759 ~ 771
- 4 Barnes JP & Putnam AR. 1987. Role of benzoxazinones in allelopathy by rye (*Secale cereale* L.). *J Chem Ecol*, **13**:889 ~ 905
- 5 Bell DT & Muller CH. 1973. Dominance of California annual grassland by *Brassica nigra*. *Am Midl Nat*, **90**:277 ~ 299
- 6 Berenbaum MR. 1985. Brementown revisited: Interactions among allelochemicals in plants. *Rec Adv Phytochem*, **19**:139 ~ 169
- 7 Bhowmik PC & Doll JD. 1982. Allelopathic effects of annual weed residues on growth and nutrient uptake of corn and soybeans. *Agron J*, **76**:383 ~ 388
- 8 Brinker AM. & Creasy LL. 1988. Inhibitors as a probable basis for grape replant problem. *J Am Soc Hortic Sci*, **113**:304 ~ 309
- 9 Cai Q-J (蔡秋锦), Luo W-J (罗婉珍), Chen C-X (陈长雄) *et al.* 1998. Study on extraction and killing effect of plant nematocide. *J of Fujian Colle For* (福建林学院学报), **18**(4):291 ~ 293 (in Chinese)
- 10 Cavers PB *et al.* 1979. The biology of Canadian weeds [ *Alliaria petiolata* (Bieb.) Cavara & Grande ]. *Can J Plant Sci*, **59**:217 ~ 229
- 11 Chen R-M (陈汝民). 1999. Some biological properties of promotive allelopathy substance-Lepidimoid. *J South China Normal Univ* (华南师范大学学报), **1**:110 ~ 119 (in Chinese)
- 12 Chen Z-H (陈章和), Lin F-P (林丰平), Zhang D-M (张德明). 1999. Physio-ecological study on the seed germination and seedling growth in four legume tree species under elevated  $\text{CO}_2$  concentration. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), **23**(2):161 ~ 170 (in Chinese)
- 13 Chou CH & Yaw L K. 1986. Allelopathic research of subtropical vegetation in Taiwan. *J Chem Ecol*, **12**(6):1431 ~ 1447
- 14 Deng L-G (邓兰桂) *et al.* 1996. Isolation and identification of extract from *Casuarina equisetifolia* branchlet and its allelopathy on seedling growth. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **7**(2):145 ~ 149 (in Chinese)
- 15 Einhellig FA. & Rasmussen JA. 1989. Prior cropping with grain sorghum inhibits weeds. *J Chem Ecol*, **19**:369 ~ 375
- 16 Einhellig FA. 1996. Interactions involving allelopathy in cropping systems. *Agron J*, **88**:886 ~ 893
- 17 El-Sawy S *et al.* 1981. Biological combat of Schistosomiasis: *Ambrosia maritima* (damsissa) for snail control. *J Egypt Soc Parasitol*, **11**:99 ~ 117
- 18 Fay PK & Duke WB. 1977. An assessment of allelopathic potential in *Avena* germplasm. *Weed Sci*, **25**:224 ~ 228
- 19 Feeny PK *et al.* 1988. Luteolin 1-O- (6-O-malonyl)- $\alpha$ -D-glucoside and trans-chlorogenic acid: Obiposition stimulants for the black swallowtail butterfly. *Phytochem*, **27**:3439 ~ 3448
- 20 Fischer NH *et al.* 1994. In search of allelopathy in the Florida scrub: the role of terpenoids. *J Chem Ecol*, **20**(6):1355 ~ 1380
- 21 Fisher RF. 1980. Allelopathy: A potential cause of regeneration failure. *J Forest*, **18**:346 ~ 348
- 22 Gallet C. 1994. Allelopathic potential in bilberry-spruce forests: influ-

- ence of phenolic compounds on spruce seedling. *J Chem Ecol*, **20**(5): 1009 ~ 1024
- 23 Gao Z-Q(高子勤), Zhang S-X(张淑香). 1998. Continuous cropping obstacle and rhizospheric microecology I. Root exudates and their ecological effects. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **9**(5): 549 ~ 554 (in Chinese)
  - 24 Guenzi WD *et al.* 1964. Water-soluble phytotoxic substances in alfalfa forage: variation with variety, cutting, year, and stage of growth. *Agron J*, **56**: 499 ~ 500
  - 25 He C-Q(何池全), Ye J-X(叶居新). 1999. Inhibitory effects of *Artocorus tatarimowii* on algae growth. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **19**(5): 754 ~ 758 (in Chinese)
  - 26 Herrin LL *et al.* 1986. Techniques for identifying tolerance of soybeans to phytotoxic substances in wheat straw. *Crop Sci*, **26**: 641 ~ 643
  - 27 Hicks RD *et al.* 1989. Effects of wheat straw on cotton. *Crop Sci*, **29**: 1057 ~ 1061
  - 28 Hoffman ML *et al.* 1993. Weed and corn (*Zea mays* L.) responses to a hairy vetch (*Vicia villosa*) cover crop. *Weed Technol*, **7**: 594 ~ 599
  - 29 Hu J-C(胡江春), Wang S-J(王书锦). 1996. Study on soil sickness by soybean continuous cropping I. Effect of mycotoxin produced by *Penicillium purpurogenum*. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **7**(4): 396 ~ 400 (in Chinese)
  - 30 Jackson JR & Willemsen RW. 1976. Allelopathy in the first stages of secondary succession on the piedmont of New Jersey. *Amer J Bot*, **63**(7): 1015 ~ 1023
  - 31 Jiang G-M(蒋高明). 1995. The impact of global increasing of CO<sub>2</sub> on plants. *Chin Bull Bot* (植物学通报), **12**(4): 1 ~ 7 (in Chinese)
  - 32 Jimenez-Osornil JJ & Giessman SR. 1987. Allelopathic interference in a wild mustard (*Brassica campestris* L.) and broccoli (*Brassica oleracea* L. *var. italica*) intercrop agroecosystem. In: Waller GR ed. *Allelochemicals: Role in agriculture and forestry*. ACS Symp. Ser. 330. Am. Chem. Soc. Washington, DC. 262 ~ 274
  - 33 Jin Y-H(靳月华), Yin Z-F(尹忠馥), Yao Y(姚 媛). 1986. Tissue culture used in chemical ecology (allelopathy). *Chin J Ecol* (生态学杂志), **5**(5): 61 ~ 63 (in Chinese)
  - 34 Koeppe DE *et al.* 1976. The relationship of tissue chlorogenic acid concentrations and leaching of phenolics from sunflowers grown under varying phosphate nutrient conditions. *Can J Bot*, **54**: 593 ~ 599
  - 35 Kong C-H(孔垂华), Li D-J(李德建), Luo S-M(骆世明). 1995. Synthesis of the allantoin and its allelopathic effects on crops. *Ecol Sci* (生态科学), **2**: 88 ~ 91 (in Chinese)
  - 36 Leather GR. 1983. Sunflowers (*Helianthus annuus*) are allelopathic to weeds. *Weed Sci*, **31**: 37 ~ 42
  - 37 Li S-W(李绍文). 1989. Ecological biochemistry IV. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **8**(6): 66 ~ 71 (in Chinese)
  - 38 Li Y-W(李玉文). 1999. The situation and development of chemical ecology. *J Northeast For Univ* (东北林业大学学报), **27**(1): 56 ~ 59 (in Chinese)
  - 39 Li Z-H(李志红). 1999. Methods of allelopathy bioassay and the affecting factors. *Ecol Sci* (生态科学), **18**(1): 35 ~ 38 (in Chinese)
  - 40 Lockerman RH & Putnam AR. 1979. Field evaluation of allelopathic cucumbers as an aid to weed control. *Weed Sci*, **27**: 54 ~ 57
  - 41 Lodhi MAK. 1977. The influence and comparison of individual forest trees on soil properties and possible inhibition of nitrification due to intact vegetation. *Amer J Bot*, **64**: 260 ~ 264
  - 42 Lodhi MAK. 1976. Role of allelopathy as expressed by dominating trees in a lowland forest in controlling the productivity and pattern of herbaceous growth. *Amer J Bot*, **63**(1): 1 ~ 8
  - 43 Lodhi MAK. 1978. Allelopathic effects of decaying litter of dominant trees and their associated soil in a lowland forest community. *Amer J Bot*, **65**(3): 340 ~ 344
  - 44 Lodhi MAK. 1975. Soil-plant phytotoxicity and its possible significance in patterning of herbaceous growth. *Amer J Bot*, **62**: 618 ~ 622
  - 45 Lodhi MAK. 1975. Allelopathic effects of hackberry in a bottomland forest community. *J Chem Ecol*, **2**: 171 ~ 182
  - 46 Luo S-M(骆世明), Lin X-L(林象联), Zeng R-S(曾任森) *et al.* 1995. Allelopathy of typical plants in agroecosystem of south China. *Ecol Sci* (生态科学), **2**: 114 ~ 127 (in Chinese)
  - 47 Luo Y-C(罗云裳), Gao M-C(高茂成). 1989. The relationships between the beefwood growth and the micronutrient in coastal sandy soil. *J South China Agric Univ* (华南农业大学学报), **10**(1): 71 ~ 76 (in Chinese)
  - 48 Ma M-H(马茂华), Yu F-L(于凤兰), Kong L-S(孔令韶). 1999. Allelopathy effects of *Artomisia ordosica*. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **19**(5): 670 ~ 676 (in Chinese)
  - 49 Masiunas JB *et al.* 1995. The impact of rye cover crops on weed populations in a tomato cropping system. *Weed Sci*, **43**: 318 ~ 323
  - 50 Menelaou MA *et al.* 1993. Diterpenes from *Chrysoma paucifloscula*: Effects on Florida sandhill species. *Phytochemistry*, **34**: 97 ~ 105
  - 51 Miller DA. 1983. Allelopathic effects of alfalfa. *J Chem Ecol*, **9**: 1059 ~ 1072
  - 52 Miller DA. 1992. Allelopathy and establishment. Alfalfa talk (Certified alfalfa seed council, Davis, CA), **12**(1): 1
  - 53 Miller DA. 1996. Allelopathy in forage crop systems. *Agron J*, **88**: 854 ~ 859
  - 54 Muller CH. 1969. Allelopathy as a factor in ecological process. *Vegetatio*, **18**: 348 ~ 357
  - 55 Muller CH. 1965. Inhibitory terpenes volatilized from *Salvia* shrubs. *Bull Torrey Bot Club*, **92**: 38
  - 56 Nell RL & Rice EL. 1971. Possible role of *Ambrosia psilostachya* on pattern and succession in old-fields. *The Amer Midland Naturalist*, **86**(2): 344 ~ 358
  - 57 Newman EL & Miller MH. 1977. Allelopathy among some British grassland species. Influence of root exudates on phosphorus uptake. *J Ecol*, **65**: 399 ~ 411
  - 58 Nuzzo V. 1979. Experimental control of garlic mustard [*Alliaria petiolata* (Bieb.) Cavara & Grande. Jin Grande. *Can J Plant Sci*, **59**: 217 ~ 229.
  - 59 Nuzzo V. 1991. Experimental control of garlic mustard [*Alliaria petiolata* (Bieb.) Cavara & Grande. Jin northern Illinois using fire, herbicide, and cutting. *Nat Areas J*, **11**: 158 ~ 167
  - 60 Nuzzo V. 1993. Current and historic distribution of garlic mustard (*Alliaria petiolata*) in Illinois. *Mich Bot*, **32**: 23 ~ 33
  - 61 Overland L. 1966. The role of allelopathic substances in the "smother crop" barley. *Am J Bot*, **53**: 423 ~ 432
  - 62 Peng S-L(彭少麟), Xiang Y-C(向言词). 1999. The invasion of exotic plants and effects of ecosystems. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **19**(4): 560 ~ 569 (in Chinese)
  - 63 Porter A. 1994. Implications of introduced garlic mustard (*Alliaria petiolata*) in the habitat of *Pieris virginiensis* (Pieridae). *J Lepid Soc*, **48**: 171 ~ 172
  - 64 Putnam AR. 1990. Vegetable weed control with minimal herbicide inputs. *Hort Sci*, **25**: 155 ~ 158
  - 65 Putnam AR & Duke WB. 1974. Biological suppression of weeds: Evidence for allelopathy in accessions of cucumber. *Science*, **185**: 370 ~ 372
  - 66 Putnam AR & Tang CS. 1986. The science of allelopathy. New York: John Wiley & Sons. Inc.
  - 67 Putnam AR. 1986. Allelopathy: Can it be managed to benefit horticulture? *HortScience*, **21**: 411 ~ 413
  - 68 Quayyum HA, Mallik AU & Lee PF. 1999. Allelopathic potential of aquatic plants associated with wild rice (*Zizania palustris*) I. Bioassay With Plant and Lake Sediment Samples. *J Chem Ecol*, **25**(1): 209 ~ 228
  - 69 Rice EL. 1965. Inhibition of nitrogen-fixing and nitrifying bacteria by seed plants. Characterization and identification of inhibitors. *Physiologia Plantarum*, **18**: 255 ~ 268
  - 70 Rice EL. 1984. Allelopathy. Second edition. New York: Academic Press.
  - 71 Rice EL. 1988. Pest Control with Nature's Chemicals. New York: A-

- cademic Press.
- 72 Rice EL. 1995. Biological control of weeds and plant diseases: Advances in applied allelopathy. Oklahoma: University of Oklahoma Press.
  - 73 Rose SJ *et al.* 1983. Competition and allelopathy of soybean (*Glycine max* (L.) Merr) cultivars to weeds. *Weed Sci Soc Am Abstr*, Champaign, IL, p. 16
  - 74 Saiki H & Yoneda K. 1981. Possible dual roles of an allelopathic compound, cis-dehydromatricaria ester. *J Chem Ecol*, **8**: 185 ~ 193
  - 75 Schmidt SK. 1988. Degradation of juglone by soil bacteria. *J Chem Ecol*, **14**: 1561 ~ 1571
  - 76 Seigler DS & Price PW. 1976. Secondary compounds in plants: Primary functions. *Am Nat*, **110**: 101 ~ 104
  - 77 Seigler DS. 1996. Chemistry and mechanisms of allelopathic interactions. *Agron J*, **8**: 876 ~ 885
  - 78 Shen GF(沈国防), Zhai M-P(翟明普). 1997. Researches on mixed forest plantations. Beijing: China Forestry Publishing House. (in Chinese)
  - 79 Shilling DG *et al.* 1985. Rye and wheat mulch: the suppression of certain broadleaved weeds and the isolation and identification of phytotoxins. In: Thompson AC ed. The Chemistry of Allelopathy: Biochemical Interactions Among Plants. *Am Chem Soc*, Washington, DC. 243 ~ 271
  - 80 Song J(宋君). 1990. Allelopathy among plants. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **9**(6): 43 ~ 47 (in Chinese)
  - 81 Souto XC *et al.* 1994. Comparative analysis of allelopathic effects produced by four forestry species during decomposition process in their soils in Galicia (NW Spain). *J Chem Ecol*, **20**(11): 3005 ~ 3015
  - 82 Sun W-H(孙文浩), Yu S-W(余叔文). 1992. Allelopathy and its potential application. *Plant Physiol Commu* (植物生理学通讯), **28**(2): 81 ~ 87 (in Chinese)
  - 83 Sun W-H(孙文浩), Yu Z-W(俞子文), Guo K-Q(郭克勤) *et al.* 1991. Bioassay of allelopathic compound of *Eichhornia crassipes* on algae. *Plant Physiol Commu* (植物生理学通讯), **27**(6): 433 ~ 436 (in Chinese)
  - 84 Vravel T *et al.* 1980. Seeded legumes as living mulches in sweet corn. *Proc N Cent Weed Sci Soc*, **29**: 170 ~ 175
  - 85 Wang D-L(王大力), Lin W-H(林伟宏). 1999. Effects of CO<sub>2</sub> elevation on root exudates in rice. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **19**(4): 570 ~ 572 (in Chinese)
  - 86 Wang D-L(王大力), Zhu X-R(祝心如). 1996. Research on allelopathy of *Ambrosia artemisiifolia*. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **16**(1): 11 ~ 19 (in Chinese)
  - 87 Wang D-L(王大力). 1995. Review of allelopathy research of *Ambrosia* genus. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **14**(4): 48 ~ 53 (in Chinese)
  - 88 Wang D-L(王大力). 1999. CO<sub>2</sub> enrichment and allelopathy. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **19**(1): 122 ~ 127 (in Chinese)
  - 89 Wardle DA, *et al.* 1993. Influence of plant age on the allelopathic potential of nodding thistle (*Carduus nutans* L.) against pasture grasses and legumes. *Weed Res*, **33**: 69 ~ 78
  - 90 Weidenhamer JD. 1996. Distinguishing resource competition and chemical interference: overcoming the methodological impasse. *Agron J*, **88**: 866 ~ 875
  - 91 Weston LA. 1996. Utilization of allelopathy for weed management in agroecosystems. *Agron J*, **8**: 860 ~ 866
  - 92 White RH *et al.* 1989. Allelopathic potential of legume debris and aqueous extracts. *Weed Sci*, **37**: 674 ~ 679
  - 93 Whittaker RH & Feeny PP. 1971. Allelochemicals: Chemical interactions between species. *Science*, **171**(3937): 757 ~ 770
  - 94 Williamson GB *et al.* 1989. Chemical inhibition of fire-prone grasses by fire-sensitive shrub, *Conradina canescens*. *J Chem Ecol*, **18**(11): 2095 ~ 2105
  - 95 Wu B-H(吴榜华), Meng Q-F(孟庆繁), Zhao Y-G(赵元根). 1997. Global climate change and biodiversity. *J Jilin For Univ* (吉林林业学报), **13**(3): 142 ~ 146 (in Chinese)
  - 96 Wu H(吴辉), Zheng Sh-Zh(郑师章). 1992. Root exudates and their ecological roles. *Chin J Ecol* (生态学杂志), **11**(6): 42 ~ 47 (in Chinese)
  - 97 Yamashi H *et al.* 1986. Effects of resistant plants as a catch crop on the reduction of resting spores of clubroot (*Plasmodiophora brassicae* Worn) in soil. *J Jpn Soc Hort Sci*, **54**: 460 ~ 466
  - 98 Ye J-X(叶居新), Hong R-C(洪瑞川), Nie Y-R(聂义如). 1987. The effect of the maceration extract of *Dicranopteris dichotoma* on the growth of several plant species. *Acta Phytoecol et Geobot Sin* (植物生态学与地植物学学报), **11**(3): 203 ~ 211 (in Chinese)
  - 99 Yu F-A(於凤安), Peng W-P(彭卫平), Peng Zh-H(彭镇华). 1996. Plant allelopathy effects on *Oncomelania hupensis*. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **7**(4): 407 ~ 410 (in Chinese)
  - 100 Yu J-Q. 1999. Allelopathic suppression of *Pseudomonas solanacearum* infection of tomato (*Lycopersicon esulentum*) in a tomato-chinese chive (*Allium tuberosum*) intercropping system. *J Chem Ecol*, **25**(11): 2409 ~ 2417
  - 101 Yu S-W(余叔文), Tang Z-C(汤章城). 1998. Plant Physiology and Molecular Biology. Beijing: Science Press. (in Chinese)
  - 102 Zeng R-S(曾任森), Li P-W(李蓬为). 1997. Allelopathic effects of *Eucalyptus exserta* and *E. urophylla*. *J South China Agric Univ* (华南农业大学学报), **18**(1): 6 ~ 10 (in Chinese)
  - 103 Zeng R-S(曾任森), Luo S-M(骆世明). 1993. Study on allelopathic potentials of *Cymbopogon citratus*. *J South China Agric Univ* (华南农业大学学报), **14**(4): 8 ~ 14 (in Chinese)
  - 104 Zhai M-P(翟明普), Jia L-M(贾黎明). 1993. Allelopathy of forest plants. *J Beijing For Univ* (北京林业大学学报), **15**(3): 138 ~ 147 (in Chinese)
  - 105 Zhai M-P(翟明普). 1993. The survey of mixed forests and interactions of tree species. *World For Res* (世界林业研究), **1**: 39 ~ 45 (in Chinese)
  - 106 Zhang B-C(张宝琛), Bai X-F(白雪芳), Gu L-H(顾立华) *et al.* 1989. Study on allelopathy and natural degeneration phenomena of artificial grassland on Alpine meadow. *Acta Ecol Sin* (生态学报), **9**(2): 115 ~ 119 (in Chinese)
  - 107 Zhou Z-H(周志红), Luo S-M(骆世明) *et al.* 1997. Allelopathic effects of tomato. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), **8**(4): 445 ~ 449 (in Chinese)
  - 108 Zhu X-R(祝心如), Wang D-L(王大力). 1997. Potential effect of extracts of roots of *Malus pumila* and *Populus canadensis* on wheat growth. *Acta Phytoecol Sin* (植物生态学报), **21**(3): 226 ~ 233 (in Chinese)

**作者简介** 彭少麟,男,1956年生,博士,中国科学院广州分院常务副院长,中国科学院华南植物研究所研究员,中山大学兼职教授,华南理工大学客座教授,博士生导师,中国生态学会常务理事,广东省生态学会理事长,国家自然科学基金重大项目首席科学家,主要从事生态学方面研究,发表学术论文 305 篇。