
摘要

加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* L.) 是菊科一枝黄花属多年生草本植物, 原产北美, 1935 年作为庭园花卉从日本引种栽培于我国上海、南京一带, 20 世纪 80 年代扩散蔓延成杂草。加拿大一枝黄花的入侵已引起本地绿化灌木成片死亡, 严重影响农作物产量和质量, 作者试图从植物间的化感作用这一角度去解释和阐明加拿大一枝黄花的成功入侵。文中分析了加拿大一枝黄花水提取液、乙酸乙酯、正丁醇萃取相和剩余水相对测试种小麦 (*Triticum aestivum*)、共生杂草狗尾草 (*Setaria viridis*) 和自身种子萌发和幼苗生长的影响。以种子发芽率、发芽势和发芽指数作为种子萌发参数, 以胚根、胚芽长度和实生苗干湿重的变化作为幼苗生长参数。研究表明: 加拿大一枝黄花叶水提取液对三种植物的种子萌发和幼苗生长有显著的影响, 其中正丁醇萃取物化感作用最强, 剩余水相与对照相比差异不显著; $0.5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 正丁醇萃取物能显著抑制自身花种子萌发, $5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 显著抑制幼苗生长; $1.5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 正丁醇萃取物显著抑制小麦萌发和幼苗生长, $5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 显著抑制狗尾草种子萌发和幼苗生长; 加拿大一枝黄花叶所含化感物质主要在正丁醇萃取相中, 自身种子萌发和幼苗生长对提取物浓度变化最为敏感, 共生杂草幼苗对提取物浓度变化敏感性最弱, 小麦种子萌发对提取物浓度变化敏感性最弱。

关键词: 加拿大一枝黄花, 化感作用, 生物入侵, 提取物, 生物测定

Abstract

Solidago canadensis, a long-lived perennial plant native to North America, was initially introduced as an ornamental plant to Shanghai in 1935. It then escaped into the wild and is now spreading rapidly in China, especially in eastern China. The invasion of *Solidago canadensis* has caused the death of local bush, seriously affecting crop yield and quality. To clarify the success of *S. canadensis* invasion by analysing allelopathy, biological assays were carried out for the effects of the raw aqueous extracts, ethyl acetate extracts, n-butanol extraction extracts and the water remainder, from *S. canadensis* leaves on the germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum*), Setaria (*Setaria viridis*) and *S. canadensis* itself. We tested the four organic fractions to impair germination percentage /rate, vigor, radicle and plumule elongation, and fresh and dry weight kinetics of seedlings. Results are as follows: strong allelopathy did exist in interspecific interactions of *S. Canadensis*. Among those n-butanol extracts showed the strongest allelopathic effect. The phase of water remainder displayed no significant difference compared to the control treatment. The concentration of $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ inhibited the seed germination of *S. canadensis* and the concentration of $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ significantly inhibited itself seedling growth. The concentration of $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ n-butanol extract inhibited the germination and seedling growth of wheat. The concentration of $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ n-butanol extracts inhibited the germination and seedling growth of Setaria. The allelochemicals were contained mainly in the n-butanol extracts. The self-seed germination and seedling growth were the most sensitive to changes in concentration, while the weeds seedling showed the weakest sensitivity, and the wheat germination showed the weakest sensitivity.

Keyword: *Solidago canadensis*, Allelopathy, Biological invasion, Extract, Bioassay

浙江大学研究生学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：廖俊俊 签字日期：2010 年 1 月 27 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 浙江大学 有权保留并向国家有关部门或机构送交本论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：廖俊俊

导师签名：王

签字日期：2010 年 1 月 27 日

签字日期：2010 年 1 月 27 日

致谢

本研究是在导师王强教授的悉心指导下完成，从论文选题到构思直至顺利完成都凝聚了王强老师辛勤劳动。两年来，王强老师在学习和生活上给予我无微不至的关怀，他一丝不苟的治学态度，严谨求实的工作作风，孜孜不倦的求学精神，乐观豁达的做人态度，深深地感染和激励着我。对学生严格而不失开明，学识广博而不失严谨使我终生受益。在此，向王老师致以衷心的感谢和诚挚的敬意！

衷心感谢浙江大学生命科学学院蒋德安老师的悉心指导，虽然与蒋老师分隔异地，平时接触不多，却也让自己为蒋老师的学者气度与智慧魅力感染，不多的交谈也使得自己获益良多。

论文的完成离不开课题组全体成员的精诚团结、密切合作和共同努力，感谢师姐李兆慧、金世锃曾经给予我的帮助和关怀，正是由于她们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难和疑惑，直至本文的顺利完成。

感谢浙江大学生命科学学院植物研究所的全体老师和同学们，感谢浙江大学宁波理工学院的所有老师跟同学们，没有在这两个团体里面所获得东西，我无法如此快速适应新的环境，也无法获得硕士期间微末的成绩。

特别感谢我的家人，正是他们对我的理解、宽容、支持和鼓励，使我不断激励自己、超越自己，不断取得学业上的进步。

在论文即将完成之际，我的心情无法平静，从开始进入课题到论文的顺利完成，有多少可敬的师长、同学、朋友给了我无言的帮助，在这里请接受我诚挚的谢意！

廖俊俊

2009年12月

1 绪论

1.1 化感作用

1.1.1 化感作用提出与定义

早在公元前 370 年,植物间通过向环境释放化学物质相互影响这一现象已为人们所熟知,公元 64 年,希腊和罗马的人们已运用这一知识于农业生产中^[1],然而直到 1937 年德国科学家 H.Molisch 才将这一现象定义为化感作用 (Allelopathy) ^[2],1984 年 E.L.Rice 结合植物化感作用 40 多年的研究成果,将植物化感作用定义为:一种植物(包括微生物)通过其本身产生的、并释放到周围环境中去的化学物质对另一种植物(或微生物)产生直接或间接的相互排斥或促进的效应,它包括抑制作用、促进作用^[3]。

为了加强化感作用研究的交流,国际化感学会于 1994 年创刊了 *Allelopathy Journal*,从 ISI Web of Science 收录的涉及化感作用的文献来源看,有数十种之多,研究对象涉及微生物、低等植物、高等植物,以及化感作用在农业和林业上的应用等。近 20 年来化感作用已逐渐成为一个深受世界各国科学家重视的新的研究领域。

1.1.2 化感作用生态学功能

化感作用是生态系统中植物的自然化学调控现象和植物适应环境的一种生态机制^[4],是植物之间传递信息的一种方式,是生态系统中普遍存在的一种现象,广泛存在于农林生态系统中,它对群落结构、群落演替^[5]、生态系统功能^[6]、生物多样性^[7]和植物产量^[8]等方面均产生影响。

在高等植物的化感作用机理方面,已知的化感作用途径包括:改变膜透性抑制植物养分吸收、抑制细胞分裂伸长和亚显微结构、影响植物光合与呼吸作用、各种酶功能和活性、内源植物激素合成代谢以及蛋白质的合成等产生影响^[9]。

1.1.3 化感物质的释放途径

化感物质存在于植物的各个组织器官中,如叶、茎、根、花、果实和种子。不同植物释放化感物质的器官和浓度不同,对受体植物的影响亦不同。化感物质释放是化感作用的重要环节,植物体内的化感物质的释放方式取决于它的化学成分的性质。自然状况下,化感物质进入环境主要有 4 种途径^[10]。

(1) 挥发:萜类化合物是主要的挥发性化感物质,它们主要存在于樟科等 26 种植物类群中^[11],这些物质挥发到空气中或被植物直接吸收,或随着雾、降水进入土壤根系,对其他植物或母体植物种群产生化感作用。挥发是胜红蓟地上部化感作用的主要途径,挥发

物对禾本科、十字花科、豆科及百合科等常见旱地作物种子萌发和幼苗生长均有显著的抑制作用^[12]。

(2) 淋溶: 活的植物茎、叶以及植物残体分解后产生的化感物质, 经雨水、露水冲洗后从植物体表淋溶至土壤中。例如, 香豆素类化合物以配糖苷形式存在时容易通过淋溶进入环境^[13]。

(3) 根系分泌物: 这是化感物质影响地下种子库以及根系活动的主要形式, 也是当前国内外研究比较多的一个领域。杉木根系分泌物中含有对杉木幼苗起化感作用的物质, 抑制了杉木的生长^[14]。

(4) 植物残体分解后释放: 植物凋落的花、果、枝叶等在分解过程中释放内含物质或转化为次生物质, 从而影响植物生长。天山云杉的凋落物中含有多种化感物质, 影响天山云杉种子萌发和幼苗生长^[15]。

1.1.4 化感作用的研究方法

目前, 化感研究涉及到关于植物的很多学科: 生态学、生物化学、化学(自然产物分离与合成)、植物生理学(包括作用机理研究)、技术农业、林学、基因育种、土壤学和最新的蛋白质组学和基因组学。化感作用有别于植物对养分、水分、光照和空间等有限资源的竞争, 因此, 主要是采用模拟实验并结合田间试验的方法进行研究^[16]。依托现代仪器分析手段和切实可行并相对可靠的方法, 包括物质的提取、分离和生物鉴定, 以及相关的实验设计等, 人们进行着对化感作用的探索。

生物测定是化感作用研究中非常重要的一个环节。确定化感作用大小, 化感物质的提取、分离、鉴定时的生物活性跟踪, 以及化感作用机理研究都必须进行生物测定。几乎所有的化感作用研究报道均涉及生物测定方法。其定义为“用活的有机体测定某种物质与一种标准参照系相比较的相对生物活性”^[17]。在自然条件下, 多种干扰机制同时或连续起作用, 要在野外条件下研究化感作用特别困难, 而实验室的生物测定可以人为控制实验条件而排除其它因素的干扰。因此, 选择适当的生物测定方法是化感作用研究的关键之一。目前比较常用的生物测定方法有发芽实验、幼苗生长发育测定、盆栽实验和大田实验等。

化感作用受体植物的选择应根据研究目的和化感作用植物在野外可能的作用对象来选择^[18]。一般性地研究某植物是否具有化感作用, 则选用对化感物质敏感、生长快而整齐的受体植物。通常采用作物的比较多, 这是由于作物种子发芽比较整齐, 发芽时间较短, 发芽率高, 可达 100%, 实验结果重现性比较好。常选用莴苣、萝卜、油菜、黄瓜、小麦和高粱作受体植物。

化感作用活性测定中最常用的生物测定方法是测定对种子发芽的抑制或促进。它简单，快速，需要较少的化感物质。目前化感作用研究中世界上还没有统一规范的种子发芽方法。通常发芽实验是在培养皿中进行，将经挑选的种子放入已被测试液饱和的基质上，发芽在有光照条件、合适温度的培养箱中进行。种子发芽的标准是胚根突破种皮 1~2mm，发芽的时间根据植物的不同一般为 1~7d，用种子发芽的百分率来表示。作物发芽率高适合测定对种子发芽的抑制作用，但化感物质对种子发芽的促进作用很难检测出来。杂草种子发芽率低，发芽时间长，发芽也不整齐，如不进行种子预处理往往比较难得到理想的实验结果，结果的重现性也差。但杂草种子是用发芽用作研究化感物质的促进作用的很好材料。

很多研究将生长发育测定与种子发芽测定结合起来同时测定。研究者用胚根、下胚轴或胚芽鞘的伸长以及种子发芽率一起来表示化感作用的活性。幼苗生长生物测定的敏感性一般比种子发芽要好。幼苗生长测定的缺点就是需要较多数量的化感物质。而很多纯的化感物质收集分离非常困难。另外，生长测定工作量也比较大。由于胚根长度、下胚轴或胚芽鞘长度的测量需要很大的工作量，所以很多研究缺乏适于统计分析的足够重复。当种子发芽在培养皿中进行时，测量胚根长度比较麻烦，经常产生卷曲和形态上的改变。对幼苗生长的影响也常用干物质重量来表示，Leather 指出，将幼苗培养 7~10d，测定幼苗干物重是表示化感作用全面影响的一个敏感指标^[19]。也有不少研究用幼苗的鲜重作为衡量指标。

1.2 加拿大一枝黄花

1.2.1 生物入侵

外来种是指出现在其过去或现在自然分布范围及扩散潜力以外的物种、亚种或以下分类单元，包括所有可能存活，继而繁殖的部分、配子或繁殖体；在自然分布范围之外，在没有直接或间接引入或人类照顾之下，这些物种不可能存活；也可以泛指非本地原产的各种外域物种^[20]；“外来”的概念不是以国界，而是以生态系统定义。外来入侵种是指外来种在自然或半自然生态系统或生境中建立种群，并对本地的生物多样性、动植物安全产生危害或威胁的物种。外来种在某地区定居、繁衍、扩散，并造成危害的现象称为生物入侵^[21]。

在英国生态学家 Elton 出版的对入侵生态学学科发展产生深远影响的著作“*The Ecology of Invasions by Animals and Plants*”中，第一次系统阐述了由人类活动引发的动物、植物和微生物进入到遥远的新生境，进而威胁入侵地生态系统、经济活动和人类健康的问题^[22]。物种迁移过程古已有之，但在无人干扰条件下而发生大规模生物入侵实例并未见文献报道。人类通过有意识或无意识的活动将物种从一个地区带到另一个地区，而这种活动随着全球经济一体化进程的加速，国家和地区间科技、贸易、人员、物资往来呈现不断上升的

趋势，物种跨洲际的迁移越来越频繁，外来生物发生入侵且造成危害的几率大大提高。

世界各国为了发展农业、林业、渔业，往往会有意识引进一些优良的动植物品种用于生产，这其中不乏成功的案例。据世界粮农组织（FAO）统计数据显示，全球约一半以上耕作的农作物为外来引入物种，如我国古代西汉张骞出使西域将葡萄、胡萝卜、石榴、苜蓿等物种源源不断地沿着举世闻名的丝绸之路传入中原地区，揭开了华夏文明的新篇章。此外，荷兰花卉、新西兰猕猴桃、东北野生大豆、台湾水果等成功案例均说明通过科学利用外来物种的有益性状，跨区域物种交流不仅能丰富地区间生物多样性，还可以带来显著的社会经济效益，是人类文明与进步的一种象征，但人们对有意识引进的外来物种如果缺乏科学管理也会危害一方，如引入我国的福寿螺、水葫芦等^[23]。据国家环保总局南京环境科学研究所的调查显示，在被调查的 283 种外来入侵物种中，49.3 %是无意引进造成的，39.6%是有意引进造成的^[24]。

正如 Elton 指出的那样，入侵生物的危害性主要表现在三个方面：一是对生态系统危害：(1)外来入侵物种通过影响原有生态系统内物种组成结构和数量，改变系统内物质与能量流动方式与层次，对生态系统结构造成直接破坏；(2)外来物种通过竞争作用，直接威胁入侵地物种生存状况，降低入侵地生态系统生物多样性水平^[25]。二是对社会经济生活产生危害：经济代价是农林牧渔业产量与质量的惨重损失与高额的防治费用。美国科学家的研究表明外来物种的入侵对生态环境的危害和经济损失每年高达 1370 亿美元^[26]，我国几种主要外来农林昆虫和环境杂草造成的经济损失每年达 574 亿人民币。三是对人类健康安全的影响：主要表现为当地人群对入侵物种特殊生物学特征的不适应，形成新疾病的病源。如原生地北美的豚草，现已入侵到我国 15 个省区，每年豚草花期都会在花粉过敏症人群中爆发流行性枯草热病。外来入侵物种对环境的破坏及对生态系统的威胁与人类对环境的破坏区别在于：当人类停止对某一环境的污染后，该环境可能会开始并逐渐恢复，而当某一种外来物停止传入一生态系统后，可能造成的生物入侵所导致灭绝的本地特有物种则是不可恢复^[27]。

1.2.2 加拿大一枝黄花生物学性状

加拿大一枝黄花原产于北美，为菊科一枝黄花属多年生草本植物，具有植株高大、生长迅速、繁殖能力强等特点，喜阳光充足的环境，有较强的耐寒耐旱能力，对土壤适应性强。

加拿大一枝黄花高 1.5-3 米；中下部一般没有分枝，直径可达 2 厘米，近木质化，常成紫黑色，有又短又密的硬毛；地下有横走的根状茎；单叶互生，叶片长 12-20 厘米，宽 1-3 厘米，边缘有不明显的锯齿状，叶基楔形，下延至柄，叶柄内侧均具一个锥形腋芽^[28]。中

下部腋芽为休眠芽，上部为活动芽，可发育成分枝和花序。花为金黄色，由无数小型头状花序组成，每株可以形成2—20万粒种子。种子室内发芽率为50%左右，可由风传播，或由动物携带传播。加拿大一枝黄花每株有4-15条根状茎，长度可达1米，每个根状茎又有多个分枝，分枝上有芽，第二年每个芽萌发成一棵独立的植株。加拿大一枝黄花通过根和种子两种方式繁殖，具有超强的繁殖能力^[29]。

在加拿大一枝黄花整个生育期，常见伴生杂草种类较少，主要是狗尾草、马唐、鬼针草、甘野菊等，尤以狗尾草居多。在加拿大一枝黄花发生初期密度较小的地方，能与之伴生的杂草种类比较多，如狗牙根、大巢菜、猪殃殃、水花生等。加拿大一枝黄花根状茎大多形成于秋季，根芽越冬后在早春恢复生长，此时与之伴生的杂草主要有一年蓬、毛茛、山莴苣、波斯婆婆纳、雀麦、马兰等早春杂草。加拿大一枝黄花无性繁殖能力极强，能够在定居点形成纯的种群，它们与上述植物在生态上的联系也仅表现在早春比较短的时间内，随着年生长时间的推移，加拿大一枝黄花种群迅速扩展，结果使这些早春植物很快退出竞争。而秋旱植物又由于加拿大一枝黄花生长形成的郁闭环境而难以进入，使秋夏期间形成比较纯的加拿大一枝黄花种群。加拿大一枝黄花可以通过根的无性繁殖来扩展种群，形成无性系植丛^[30]。

1.2.3 加拿大一枝黄花与生物入侵

1935年作为观赏植物传入我国长江三角洲地区。由于其强大的繁殖能力、竞争能力以及多种途径的传播方式，现逐步蔓延发展成为华东地区重要的恶性外来杂草，并逐步向全国适宜地区辐射蔓延，严重威胁所到之地的生态平衡和农林生产。据不完全统计，目前加拿大一枝黄花在我国主要分布于苏、浙、沪三地；江西、安徽、湖北、湖南、云南等省均有报道^[31]。

根据联合国粮农组织(FAO)国际植物保护公约(IPPC)的有害生物风险分析(PRA)准则，加拿大一枝黄花的危险性综合评价的风险值 $R \approx 2.15$ ，属于高风险的有害生物^[32]。在对加拿大一枝黄花的调查过程中发现，在生长密集有加拿大一枝黄花生长区几乎找不到其他杂草，其危害主要表现在对本地生态平衡的破坏和对本地生物多样性的威胁。一方面是因为其强大的生长优势，与其他杂草争水、争肥、争阳光，体现在：一、繁殖能力强，无性有性结合；二、传播能力强，远近结合；三、生长期长，在其他秋季杂草枯萎或停止生长的时候，加拿大一枝黄花依然茂盛，花黄叶绿，而且地下根茎继续横走，不断蚕食其他杂草的领地，而此时其他杂草已无力与之竞争。这三个特点使得它对所到之处本土物种产生了严重的威胁，成为单一的加拿大一枝黄花生长区。另一方面是由于加拿大一枝黄花的

根部会分泌一些物质，这些物质可以抑制幼苗生长，也抑制包括自身在内的草本植物发芽。加拿大一枝黄花是否有化感作用，作用有多大，有效部位在什么地方，其分泌的次生化合物的有效成分是什么物质，这些问题均有待进一步分析研究。

外来种入侵可分为传入期、定植期、扩散期三个阶段，通过野外实地考察我们认为加拿大一枝黄花已经进入扩散期。

1.3 生物入侵与化感作用

随着“外来生物入侵”这样一种生态学现象不断为公众所关注，外来生物入侵问题也已经成为生态学研究热点，而其中的焦点是“什么原因或者机制导致了外来生物的成功入侵”。针对这个问题，学者们提出了很多种可能的解释，其中比较有影响的有，“理想杂草特征假说”（“Baker” deal weeds characteristics），“多样性阻抗假说”（Biodiversity resistance hypothesis, BRH），“天敌逃避假说”（Enemies release hypothesis, ERH），“进化增强竞争能力假说”（Evolution of increased competitive ability hypothesis, EICA），“生态位机遇假说”（Niche opportunity hypothesis）和“新武器假说”（Novel weapon hypothesis, NWH）。

1.3.1 “理想杂草特征”假说

Baker 在研究植物蔓延特征时最早提出了外来入侵植物应具备某些潜在特征^[33]。他比较了杂草和非杂草的特点，并列出了杂草的特征，而且定义了一种“理想”杂草^[34]。在 Baker 提出植物成功入侵的“理想杂草特征”假说后，多位学者相继对“Baker”特征提出了修正补充。Kolar 和 Lodge 对不同类群植物的入侵性进行了比较，结果显示入侵性强的种类具有一些共同特征：采用 r-选择生活史对策如利用先锋生境、繁殖时间短、生殖能力强，种群增长率高，以及能在 r-选择对策和 k-选择对策之间转换^[35]。此外，Rejmanek 研究还发现草本植物入侵性的强弱与它在原生地的维度有关^[36]。Sutherland 利用两类已建立的数据库信息系统，收集杂草数据信息，分析了分布于北美洲大陆的 19960 种植物的 10 个生活史特征参数，据此划分了杂草与非杂草、本地杂草与外来杂草、入侵性外来杂草与非入侵性外来杂草的特征，进而补充修整了入侵性外来杂草的“Baker”特征^[37]。Sutherland 认为植物要成为外来入侵种必须具备这样一些特征，强无性生殖能力、雌雄同株、花粉自相容、风传粉、耐光性、耐干旱、一年生或两年生、多年生草本、防御机制、毒性。

从外来杂草繁殖和生长特性来看，我国主要外来杂草在很多方面符合“理想杂草特征”。杂草种子适于扩散与传播特征表现为：种子很轻，加拿大一枝黄花和紫茎泽兰种子千粒重只有 0.04 g，薇甘菊种子千粒重 0.1 g；种子产量巨大，如加拿大一枝黄花果实为瘦果，每磅瘦果约有 4,600,000 粒种子，紫茎泽兰单株产种量在 2.5-10 万^[38]；有适于远距离传播的

形态特征: 加拿大一枝黄花、紫茎泽兰和飞机草种子均有冠毛, 在风和流水等外力作用下能进行长距离扩散; 几乎所有外来入侵植物都具有进行单独的有性生殖和无性繁殖的方式, 如飞机草、紫茎泽兰、薇甘菊, 外来植物的有性生殖适于该种的长距离扩散, 而无性繁殖的机制适于植物在局部爆发、有利地排挤掉其他物种, 使外来植物种群在群落中占据优势地位; 此外有些入侵物种还具有较宽的生态幅、耐贫瘠等生物学特性^[39]。

“理想杂草特征”假说解释了一些植物的成功入侵, 但也有学者认为其中漏洞甚多。一种植物变成一种入侵性杂草, 并未发生生活史特征的改变, 只是生境发生了变化。当然, 探讨入侵种的生活史特征, 在理论和应用中都有一定的意义, 它增加了人们对生物入侵过程和机制的认识。

1.3.2 生物多样性阻抗假说

Elton 于 1958 年提出了一个经典的假说来解释物种的成功入侵即生物多样性阻抗假说 (Biodiversity resistance hypothesis, BRH)。Elton 认为群落的生物多样性水平对抵抗外来物种的入侵起着关键性的作用, 物种组成丰富的群落较物种组成单一的群落对入侵生物的抵抗能力要强。多样性阻抗假说能够很好的解释为什么很多外来物种在新的适宜生长环境中繁衍失败, 阐明了外来物种受到本地物种强烈作用而未能在适宜生态位中定居的原因。此外, Elton 还指出岛屿 (尤其是小海岛) 易于被入侵是由于本地物种少, 生物多样性水平低。

多样性阻抗假说提出后得到一些生态学家的支持和认同并对其做了进一步的阐释, 支持者们分别从理论和野外实验证实并发展了这一假说。May 和 MacArthur 从系统营养水平与群落稳定性的关系出发来解释和证明 BRH 假说的正确性^[40]。在假设系统内营养状况水平一定, 植物群落间通过竞争形成了稳定的结构, 生态系统生物多样性水平越高, 植物群落间竞争越强, 外来物种入侵越困难。Post 和 Pimm 提出的“集合模型”显示群落多样性增加增强了群落抵抗入侵的能力^[41]。Law 和 Morton 提出的“竞争模型”显示物种越多的群落越稳定对外来入侵物种具有更大的抵抗能力^[42]。Dukes 以微宇宙试验证明草本植物物种的多样性可以影响它对外来生物入侵的易感性^[43]。

初期对这一假说的支持者主要来自于从事野外实验观察的生态学家, 观察发现物种贫乏的生态系统 (例如群岛) 比物种丰富的系统入侵状况会更严重。Knops 在 3 m × 3 m 样地的种子添加实验中证明外来入侵种与植物的丰富程度呈负相关^[44]。Stohlgren 等发现在物种丰富的热带地区比南北美洲和欧洲温带地区外来入侵物种要少^[45]。Symstad 对美国东北部冰川沉积的沙地草原进行种子添加实验, 结果显示对外来入侵种的抵抗能力随群落种类的丰富度增加而增强^[46]。鲁智军和马克平在中国西南地区调查紫茎泽兰入侵模式与本地植物

多样性在不同时空尺度上的关系时,发现本地植物多样性水平增高会抑制紫茎泽兰入侵过程的群落演替^[47]。

然而,在区域性大尺度空间上的研究结果对 BRH 假说的正确性提出了疑问。Levine 和 D'Antonio 认为 BRH 假说在一些海岛或者在人工可以控制的区域内得到了证实,但他们大规模的野外调查和研究并没有得到生物多样性丰富度与生态系统对入侵的阻抗之间的直接证据^[48]。虽然许多模型和野外实验显示了增加多样性可以降低入侵成功率,但这些模型实验都是在小范围或排除了多种外来因素干扰的基础上建立的,研究结果与大尺度的野外观察数据有偏差。有研究还发现,一些本地物种不但不能阻抗外来入侵,反而会促进外来物种入侵。Palmer 和 Maurer 将其定义为“入侵促进者”,并指出在生物多样性越丰富的地区,这样的“入侵促进者”会越多,也更容易遭到外来物种的入侵^[49]。

1.3.3 天敌逃避假说

Darwin 最早描述了外来物种由于脱离了原有生物圈中天敌的制约,迁移到新生境中迅猛繁衍的现象^[50]。在随后的一百多年里,这个假说一度成为了解释外来入侵的重要理论及研究热点,许多学者对其研究内涵进行了扩充,其核心是外来植物被引入新生境,植物捕食者和其它天敌的选择压力减少,导致它在新生境中数量上迅速增长和空间分布上扩张。内容上包括了天敌是植物种群的重要调解者;天敌对本地物种比对外来物种有更大的选择性抑制作用;外来植物可以利用天敌的调节作用而提高种群密度。Louda 在前人工作的基础上,提出并建立了由植物生活史特性预测特定食草动物限制本地植物繁衍能力的数学模型^[51]。

该假说的研究方向主要有两个方面,一个是利用数学模型大规模的分析某一地区天敌对物种的影响,主要是食草动物天敌对植物的影响;另一个是针对天敌的存在是否对某物种产生影响。

然而很多生态学家对 ERH 的正确性存在怀疑:一方面,在入侵生物学领域,通常认为天敌的缺乏是外来植物迅速传播的一种解释;另一方面,有研究显示在入侵植物的新生境范围内引入原有天敌,入侵状况并没有得到改善。将入侵物种所在原有生物群落天敌引入新生境而对入侵物种进行生物控制的实验均以失败告终^[52]。

1.3.4 增强竞争力进化假说

增强竞争力进化假说(EICA)提出者认为,外来入侵物种最主要的选择性优势来源于环境变化及对其的适应性。成功的入侵种进入到与原生地生物与非生物环境因子完全不同的新生境后,能够迅速而有效地对新环境作出适应与进化反应。EICA 假说包含了两层含义,

一层是关于“生长与防御”资源分配的权衡，在新生境中由于缺乏天敌，外来种放弃了一些原本用于防御天敌的性状，将维持这类性状所需的能量资源分配给用在新生境中体现竞争优势性状的生成，如更大的体型和更强的繁殖能力^[53]；另一层是外来入侵种对环境的适应性进化，主要包括行为、性状以及基因型等的改变^[54]。

Crawley 等在其著作“Colonization, Succession, and Stability”中最早指出一些外来入侵种在入侵地比在原生地生长的更好，可能是由于适应性进化造成的^[55]。Siemann 和 Rogers 的研究为入侵物种在新生境进行基因型改变进而形成适应性进化提供了一些证据，而且提出物种从被引入到成功入侵可能经历了一个复杂的遗传调整期^[56]。Callaway 和 Ridenour 提出化感作用提高了外来物种的竞争力，外来植物可能会向着产生更多化感物质的方向进化，这种竞争性的直接选择替代了“生长与防御”平衡，对 EICA 进行了理论的升华。对 EICA 假说的主要疑问是：入侵生物在新生境中显示出了更大的体型或者更强的繁殖能力，但并没有直接的数据能够证明这些性状的改变能够提高物种间的竞争能力或者它们抵抗天敌能力的增强；此外，大的体型对于特定捕食者来说并不一定是竞争优势。

1.3.5 生态位机遇假说

“生态位机遇假说”是 Shea 和 Chesson 于 2002 年提出的一个较新的理论观点，NOH 支持者试图利用群落生态学理论作为解释生物入侵的框架^[57]。认为资源、天敌和物理环境这三个因素决定了入侵者的增长率，而且这三个因素是随时间和空间而变化的，一个物种对这些因素的时空变化的反应如何，决定了这个物种的入侵能力。“生态位机遇”（niche opportunity）被定义为某一特定生态位提供给一个外来物种在低密度下获得正增长率的潜力。它是由“资源机遇”（resource opportunity）、“天敌逃避机遇”（natural enemy escape opportunity）的组合或者可以描述为资源、天敌和物理环境条件及其时空变化多相耦合的特征。NOH 将天敌逃避假说、资源机遇假说以及入侵地物理环境变化的时空特征耦合起来分析，认为成功的入侵者是能够利用各种机遇的适应者。它在群落中缺乏专性甚至是兼性天敌，资源波动性能被它很好的利用。本地物种对资源利用能力的限制和天敌的控制作用降低了与入侵物种竞争的能力。

1.3.6 新武器假说

NWH 假说的提出者认为，入侵生物代谢过程中产生的一些次生化学物质通过多种途径释放到环境中后，直接作用于或通过改变入侵地生境土壤理化性质和土壤微生物种群结构来间接干扰本地物种的正常生长发育过程，进而从种群水平上体现竞争优势^[58]。Calleway 等在总结了多个学者关于 NWH 假说研究的结果后，提出了“allelopathic advantage against

“resident species” AARS 理论，指出了化感作用是入侵植物成功定居的一个重要因素。

植物等有机体之间依赖释放于环境中的化学物质来发生相互影响是化感作用有别于诸如种间或种内竞争等的重要特征。1986 年，Rice 将已知的具有抑制作用的化感物质归纳划分为 15 大类，其中以小分子酚类、有机酸和内萜类化合物最为常见^[59]。迄今为止，研究所发现的化感物质几乎都是植物的小分子次生代谢物。在研究方法上，植物化感物质提取、分离和鉴定是化感作用研究的基础，且现代仪器分析技术的产生和发展扮演着重要作用。

作为生物进化的产物，无论是植物还是微生物，包括自毒作用在内的化感作用都有其自身存在的价值，并且在不同等级的生态系统水平上形成了完善的适应机制。在高等植物的化感作用机理方面，已知的化感作用途径包括：改变膜透性抑制植物养分吸收、抑制细胞分裂伸长和亚显微结构、影响植物光合与呼吸作用、对各种酶功能和活性、对内源植物激素合成代谢、对蛋白质合成等产生影响。在生态系统水平上化感作用可以对物质循环与能量流动、对食物链类型与系统演替和多样性等产生重要影响。

在分子水平上，基于功能基因或基因组，通过对化感物质的生化合成或诱导，以期达到化感作用的定向利用和控制是化感作用研究的前沿。与此对应，以对化感作用认识为基础，在生态系统水平上通过生物、生态、经营等措施和途径，以期达到对化感作用的定向利用或克服同样也是化感作用研究的前沿。外来植物入侵过程不同阶段分泌的化感物质种类与环境累积量具有时空差异性，而其量的多少对入侵种的发生、发展和与本地物种间竞争与协同进化具有明确的调控作用，即“化感作用与化感物质环境累积量相关”的过程阶段性假说。外来生物引入的新化感物质环境累积量较低，化感作用对自身种群具有驱散作用。累积量较高时，对种群产生自毒作用；新化感物质低环境累积对与之竞争的本地物种具有抑制作用，本地物种经多代选择能够形成（进化）对新物质的耐受性，生态系统内物种间通过特定规则的组合与装配形成协同进化的自适应机制。

1. 4 加拿大一枝黄花的研究现状

加拿大一枝黄花造成的生态问题受到社会高度重视，国内外学者十分重视加拿大一枝黄花生态学研究。马森研究加拿大一枝黄花鲜叶、干叶及干果序水浸出液对土著植物的种子萌发及幼苗生长的化感作用，测定其遗传多样性^[60]；郭水良等研究了加拿大一枝黄花入侵的生理生态学机制^[61]；方芳等研究发现一定浓度的提取液对其他植物生长有明显的抑制作用^[62]；阮海根等对其生物学特点进行了初步研究，加拿大一枝黄花具有较大的表型变异能力^[63]。

现在普遍认为加拿大一枝黄花的入侵与其根系分泌物对周围植物产生的化感作用有

关^[64]，沈荔花等运用化感-竞争分离法评价加拿大一枝黄花在无资源竞争引起的生物干扰影响下的化感作用潜力，研究证实加拿大一枝黄花具有较强的化感作用潜力。同时，加拿大一枝黄花对不良环境的适应能力也较强，原因也在于其具有很强的竞争能力，从而对当地物种系统和生态系统造成极大的危害。外来入侵杂草加拿大一枝黄花不仅化感作用潜力较大，且对资源的竞争能力也较强，即具有较强的生物干扰能力。在资源匮乏条件下，能进一步通过增强自身的化感抑制能力保持其在种间竞争中的优势地位。其试验进一步证明加拿大一枝黄花在入侵过程中其化感作用能力起到相当大的作用，在资源相对有限时，加拿大一枝黄花不但有较强的资源竞争能力，且化感抑制能力明显增强^[65]。

钱振官等用加拿大一枝黄花根茎和叶水浸提液，对小麦、大麦、玉米、水稻、番茄和油菜种作物的种子萌发有明显的抑制作用，对小麦、玉米和水稻3种作物的幼苗生长受到影响，处理间差异显著^[66]；处理日本看麦娘、小藜、旱稗、马唐、狗草尾、鳢肠和凹头苋等7种杂草种子，发现对7种杂草种子的发芽势和发芽率均有明显的抑制作用^[67]。

周凯用加拿大一枝黄花根系及根际土壤水浸提液对白菜和萝卜的化感作用进行研究发现，加拿大一枝黄花根系水浸提液和根际土壤水浸提液对白菜和萝卜种子的萌发具有抑制作用，高浓度的根系水浸提液和根际土壤水浸提液明显抑制白菜和萝卜的根系脱氢酶活性和硝酸还原酶活性。根际土壤水浸提液显著地促进了白菜和萝卜幼苗的伸长，但对根系的伸长生长表现为抑制作用，表现为高浓度水浸提液抑制根系脱氢酶与硝酸还原酶的活性，这可能是植物对水浸提液胁迫而产生的一种反应，地上部分非常态生长以补偿地下部根系所受到的抑制^[68]。

有研究表明，植物精油中柠檬烯、蒎烯、樟脑、长叶薄荷酮、桉树脑、香茅醇等萜类化合物能强烈抑制种子发芽和幼苗生长^[69]，加拿大一枝黄花的具有较高的精油含量，以柠檬烯、蒎烯等萜类成分为主要成分，因此可以推测，植物精油是加拿大一枝黄花中一类重要的化感物质；除精油外，该植物所含的黄酮等酚性成分，可以激发周围植物体内的逆境信使，启动某些产生氧自由基基因的表达，产生氧自由基毒害根系细胞，导致入侵生境中其他植物的死亡^[70]。

1.5 研究目的与意义

外来入侵植物与本土生物之间的作用主要分为促进作用、无影响和抑制作用，目前对外来入侵植物的研究主要集中在如何控制其传播和评价其危害方面。加拿大一枝黄花的入侵已引起本地绿化灌木成片死亡，严重影响农作物产量和质量，虽然引起社会重视，但对该入侵种的相关基础和应用方面的研究工作较为薄弱。本研究试图从植物间的化感作用这

一角度去解释和阐明加拿大一枝黄花的成功入侵，对预测加拿大一枝黄花在我国的扩张趋势和开展对其综合治理有重要意义。此外，本研究还可进一步丰富入侵生态学的内容，对预防其他入侵植物也有参考意义。

2 加拿大一枝黄花叶水提取物对小麦、狗尾草和自身的化感作用

2.1 材料与方法

2.1.1 供试材料

狗尾草(*Setaria viridis*)种子、加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)种子和叶于2008年11月15日采自浙江大学宁波理工学院野外生态观测站(29° 48' 54" N, 121° 34' 27" E, 海拔8m), 小麦(*Triticum aestivum*, 浙丰2号, 购于杭州市种子公司)。

2.1.2 研究方法

2.1.2.1 水提取物制备

将风干的加拿大一枝黄花叶粉碎, 取2.5kg粉末用工业酒精室温下提取48h(料:液=1:5), 提取液经超声波处理, 离心, 过滤, 减压浓缩, 得到暗绿色的乙醇提取物。用4L蒸馏水溶解乙醇提取物, 离心, 过滤, 减压浓缩, 得到暗褐色的水提取物(128.836g); 取100g产物溶于水, 用乙酸乙酯、正丁醇依次萃取, 有机相和剩余水相分别减压浓缩, 得到乙酸乙酯萃取物(16.511g)、正丁醇萃取物(48.136g)和剩余水相浓缩物(35.353g), 四种提取物分别溶于蒸馏水配成 $0.5\text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、 $1.5\text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、 $5\text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、 $10\text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 的处理液。共16种处理液于冰箱中保存备用。

2.1.2.2 提取物对小麦种子萌发影响的测定

小麦种子先用蒸馏水浸泡30min, 再将处理过的种子均匀摆放在铺有两层滤纸的培养盒中, 每个培养盒摆放种子100粒, 分别放入不同浓度的处理液10ml, 对照加入蒸馏水10ml, 包括对照17个处理, 每个处理设3次重复。将培养盒置于光/暗周期16/8h, 光强 $40\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, 温度 $25^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ 的人工气候箱中培养, 种子萌发以胚根突破种皮为标准, 每12h补充等量对应浓度的处理液以保持培养盒内滤纸的湿润, 对照为等量的蒸馏水。第24h开始观察, 每8h统计并记录种子发芽数。

2.1.2.3 提取物对狗尾草种子萌发影响的测定

狗尾草种子用 $0.2\%\text{KNO}_3$ 湿润并在 4°C 下放置7d, 然后用蒸馏水反复清洗干净。将处理过的种子均匀摆放在铺有两层滤纸的培养盒中, 每个培养盒摆放种子100粒, 分别放入不同浓度的处理液10ml, 对照加入蒸馏水10ml, 包括对照共17个处理, 每个处理设3次重复。将培养盒置于光/暗周期16/8h, 光强 $40\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, 温度 $30^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ 的人工气候箱中培养, 种子萌发以胚根突破种皮为标准, 每12h补充等量对应浓度的处理液以保持培养盒内滤纸的湿润, 对照为等量的蒸馏水。第3d后开始观察, 每24h统计并记录种子发芽数。

2.1.2.4 提取物对自身种子萌发影响的测定

加拿大一枝黄花种子用 2.4%次氯酸钠浸泡 15min, 用蒸馏水冲洗干净, 蒸馏水浸泡 60min. 处理过种子均匀摆放在铺有两层滤纸的培养盒中, 每个培养盒摆放种子 0.2g, 分别放入不同浓度的处理液 10ml, 对照加入蒸馏水 10ml, 包括对照 17 理, 每个处理设 3 次重复。将培养盒置于光/暗周期 16/8 h, 光强 $40\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, 温度 $25^\circ\text{C}/20^\circ\text{C}$ 的人工气候箱中培养, 种子萌发以胚根突破种皮为标准, 每 1d 补充等量对应浓度的处理液以保持培养盒内滤纸的湿润, 对照为等量的蒸馏水。第 3d 后开始观察, 每天统计并记录种子发芽数。

2.1.2.5 提取物对小麦幼苗生长影响的测定

培养条件和设备与“提取物对小麦种子的抑制试验”相同。取胚根突破种皮的种子 100 粒均匀摆放在铺有两层滤纸的培养盒, 置入人工气候箱中培养, 并分别加入 10ml 不同浓度的处理液, 对照为蒸馏水, 共 17 个处理, 每个处理设 3 次重复。每 8h 从培养盒中取出 5 棵幼苗测量其胚芽、胚根的长度, 以及实生苗鲜重的变化。共测定 12 次, 历时 4d。

2.1.2.6 提取物对狗尾草幼苗生长影响的测定

培养条件和设备与“提取对狗尾草种子的抑制试验”相同。取胚根突破种皮的种子 100 粒均匀摆放在铺有两层滤纸的培养盒, 置入人工气候箱中培养, 并分别加入 10ml 不同浓度的处理液, 对照为蒸馏水, 共 17 理, 每个处理设 3 次重复。每 12h 从培养盒中取出 5 颗幼苗测其胚芽、胚根的长度, 以及实生苗鲜重的变化。共测定 12 次, 历时 6d。

2.1.2.7 提取物对自身幼苗生长影响的测定

培养条件和设备与“水提取对自身种子的抑制试验”相同。取胚根突破种皮的种子 200 粒均匀摆放在铺有两层滤纸的培养盒, 置入人工气候箱中培养, 并分别加入 10ml 不同浓度的处理液, 对照为蒸馏水, 共 17 理, 每个处理设 3 次重复。每 24h 从培养皿中取出 10 颗幼苗测其胚芽、胚根的长。共测定 12 次, 历时 12d。

2.1.2.8 数据分析

采用发芽率、发芽势和发芽指数 3 个指标鉴定化感物质对种子萌发的影响。

其中小麦和狗尾草种子分别如下式方法计算

发芽率 = (发芽数/100) × 100%;

发芽势 = (发芽初期 7 天的发芽粒数/100) × 100%;

发芽指数 = $\sum (G_t/D_t)$ 其中: G_t 为在 t 天的种子发芽数; D_t 为相对应的种子发芽天数。

加拿大一枝黄花种子发芽率、发芽势和发芽指数如下式计算

发芽率 = 发芽数/重量;

发芽势=发芽初期 7 天的发芽粒数/重量;

发芽指数= $\sum (Gt/Dt)$ 其中: Gt 为在 t 天的种子发芽数; Dt 为相对应的种子发芽天数。

实验数据采用 spss13.0 统计软件, 利用单因素方差分析和 LSD 多重比较分析种子发芽率、发芽势和发芽指数差异。

不同时间区间取样生物测定结果比较时, 计算处理与相应对照的比值(T/C), 以 Williamson 提出的敏感指数 RI 作为衡量指标:

$$RI = \begin{cases} 1-C/T & \text{当 } T > C \text{ 时} \\ T/C - 1 & \text{当 } T < C \text{ 时} \end{cases}$$

其中, C 是对照值, T 是处理值, RI 代表化感效应。当 $RI > 0$ 时表示促进作用, 当 $RI < 0$ 时为抑制作用, RI 的绝对值代表作用强度的大小^[71]。

2.2 结果与分析

2.2.1 提取物对小麦种子萌发和幼苗生长的影响

2.2.1.1 提取物对小麦种子萌发的影响

四种提取物处理液对小麦种子萌发影响的数据结果见表 2-1。从表中可以看出, 加拿大一枝黄花叶提取物对小麦种子发芽率、发芽指数、发芽势的影响规律相似, 随着处理液浓度增加, 对种子萌发抑制作用增强。原液和乙酸乙酯萃取物处理液浓度 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 能显著抑制种子萌发($p < 0.05$); 正丁醇萃取物处理液浓度 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 就能抑制种子萌发($p < 0.05$); 剩余水相浓度 $10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 才能抑制种子萌发($p < 0.05$)。提取物浓度达到 $10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时, 小麦种子萌发率分别为对照的 44.28%、69.89%、39.79%、90.31%; 此时四种处理液的 RI 值依次为 -0.557、-0.301、-0.602、-0.097。

2.2.1.2 提取物对小麦幼苗生长的影响

胚根胚芽的生长状况是幼苗生长的两个重要参数, 不同浓度的四种处理液对小麦幼苗胚根胚芽生长影响的数据结果见图 2-1、图 2-2 及表 2-2。

$0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 的原始水相促进胚芽生长但不显著, 浓度为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时显著抑制胚芽生长 ($p < 0.05$); $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 的乙酸乙酯萃取物、正丁醇萃取物和剩余水相显著抑制胚芽生长 ($p < 0.05$), 并且抑制效应随处理液浓度增大而增强, 此时的 RI 值分别为 -0.457、-0.456、-0.536、-0.430。

浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 的四种处理液都能促进胚根生长但不显著 ($p < 0.05$), 原始水相和正丁醇萃取物处理液浓度 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 显著抑制胚根生长 ($p < 0.05$), 并且抑制效应随处理液浓度增大而增强; 乙酸乙酯萃取物和剩余水相浓度 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 显著抑制胚根生长 ($p < 0.05$), 但

抑制效应不随处理液浓度增大而增强；正丁醇萃取物处理液浓度 10mg·ml⁻¹ 时，胚根在 2d 后腐烂死亡。

不同浓度来自加拿大一枝黄花叶片的 4 种浸提液处理幼苗后，幼苗鲜重变化与胚芽胚根长度变化趋势相同，随着处理液浓度增加，幼苗鲜重越轻，原始水相、乙酸乙酯萃取物和剩余水相浓度 1.5mg·ml⁻¹ 时幼苗鲜重显著降低，正丁醇萃取物 0.5mg·ml⁻¹ 时 ($p<0.05$) 幼苗鲜重显著降低；幼苗干重变化与鲜重变化相似，正丁醇萃取物幼苗干重降低显著。

不同浓度的四种提取液对小麦幼苗生长的影响试验数据结果显示，四种提取液对小麦胚根长度处理表现出“低浓度促进，高浓度抑制”效应；抑制效应随处理液浓度的增大而增强。小麦幼苗生长的各项指标对提取液浓度的敏感性不一，有些指标的敏感性较弱，而有些指标的敏感性则较强。

表 2-1 来自加拿大一枝黄花叶片的 4 种浸提液对小麦种子萌发的影响

提取液	浓度 (mg · ml ⁻¹)	发芽率 (%)	发芽势 (%)	发芽指数
Extracts	Concentrations	Germination percentage	Germination vigor	Germination index
蒸馏 water	0	96.33 ± 2.08a	48.16 ± 1.04a	92.66 ± 2.08a
水提取原液	0.5	92.66 ± 1.15a	46.33 ± 0.57a	85.66 ± 2.51b
Primary water extracts	1.5	91.66 ± 3.05a	45.83 ± 1.52a	83.66 ± 1.15b
	5.0	76 ± 5.00c	38 ± 2.5c	68 ± 6d
	10.0	42.66 ± 5.68d	21.33 ± 2.84d	23.33 ± 2.51e
乙酸乙酯萃取物 Ethyl acetate extracts	0.5	90.67 ± 2.08ab	45.33 ± 1.04ab	87.33 ± 2.51a
	1.5	85.33 ± 4.51bc	42.66 ± 2.25bc	77.33 ± 4.72b
	5.0	78.67 ± 5.51c	39.33 ± 2.75c	68.66 ± 5.13c
	10.0	67.33 ± 5.51d	33.66 ± 2.75d	61.66 ± 3.05d
正丁醇萃取物 n-butanol extracts	0.5	94.33 ± 1.15a	47.16 ± 0.57a	78 ± 6.08b
	1.5	75.33 ± 4.04c	37.66 ± 2.02c	61 ± 4.35c
	5.0	60.33 ± 5.51d	30.16 ± 2.75d	50.66 ± 4.5d
	10.0	38.33 ± 8.39e	19.16 ± 4.19e	20.33 ± 1.52e
剩余水相 Remainder in water	0.5	94.33 ± 2.08ab	47.16 ± 1.04ab	76.33 ± 3.51a
	1.5	92 ± 2.64bc	46 ± 1.32bc	52.33 ± 13.2b
	5.0	90.33 ± 1.15bc	45.16 ± 0.57bd	55.33 ± 2.51b
	10.0	87 ± 2.64d	43.5 ± 1.32c	47.33 ± 9.61c

数据表示平均数 ± 标准差，不同的字母表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。 Data are means ± SD. The different letters denote significant differences at the $\alpha=0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons

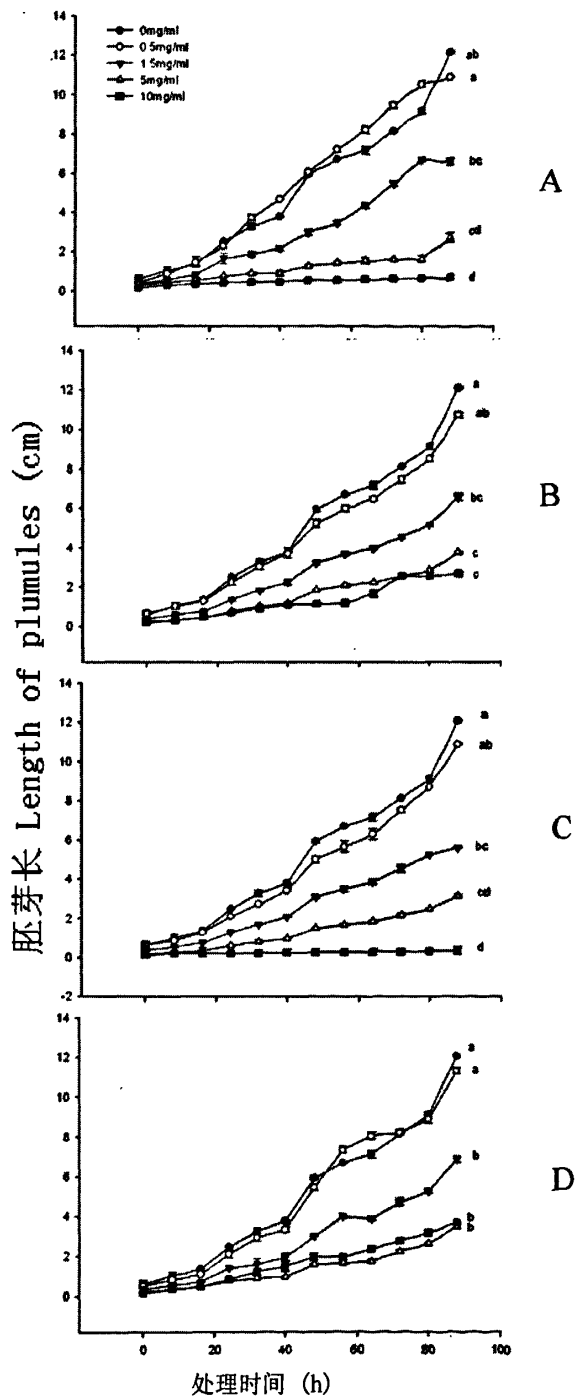


图 2-1 处理液对小麦胚芽长度的影响

Fig. 2-1 Effect of extracts fresh leaves of *S. canadensis* on the plumule length of wheat seedlings

A:原始水相 B:乙酸乙酯萃取物 C:正丁醇萃取物 D:剩余水相

每一个点表示 3 次重复的平均值, 曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

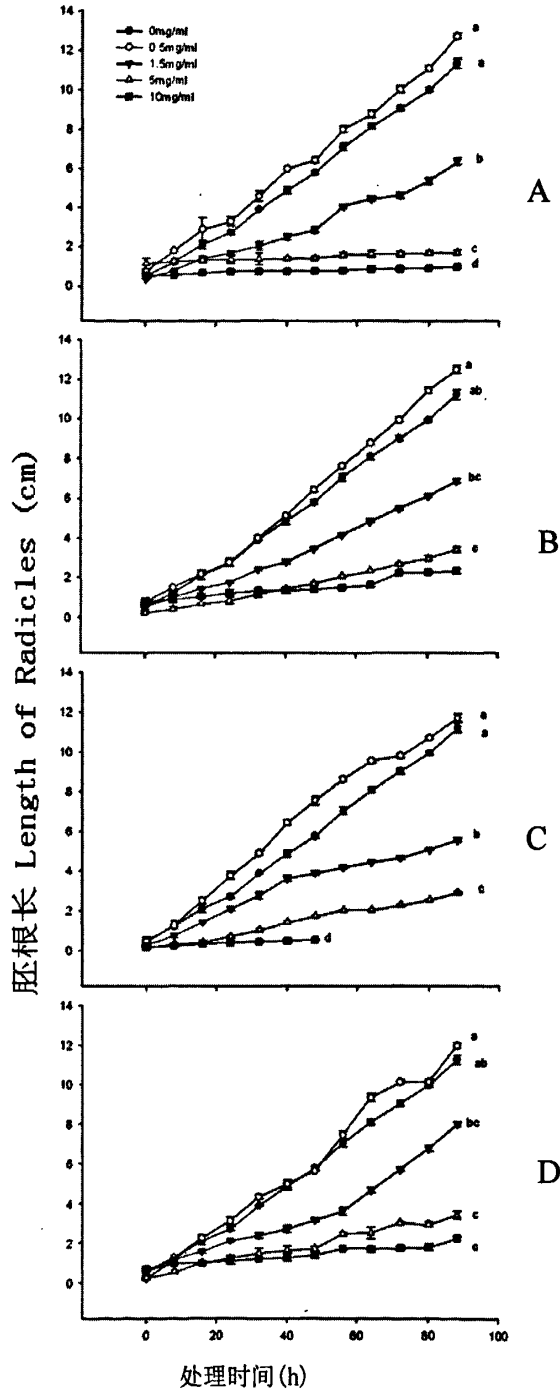


图 2-2 处理液对小麦胚根长度的影响

Fig. 2-2 Effect of extracts fresh leaves of *S. canadensis* on the radicle length of wheat seedlings

A:原始水相 B:乙酸乙酯萃取物 C:正丁醇萃取物 D:剩余水相

每一个点表示 3 次重复的平均值，曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

表 2-2 来自加拿大一枝黄花叶片的 4 种浸提液对小麦鲜重和干重的影响

Table 2-2 Effect of four extracts of fresh leaves of *S. canadensi* on the dry weight and the wet of seedlings

提取液 Extracts	浓度 (mg·ml ⁻¹) Concentrations	胚芽鲜重(g) Wet weight of plulules	胚芽干重(g) Dry weight of plulules	胚根鲜重(g) Wet weight of radices	胚根干重(g) Dry weight of radices
蒸馏水 water	0	0.052±0.005a	0.010±0.001a	0.093±0.006a	0.010±0.000a
水提取原液 Primary water extracts	0.5 1.5 5.0 10.0	0.059±0.005a 0.033±0.003b 0.036±0.004c 0.022±0.007b	0.011±0.000a 0.009±0.000ac 0.007±0.001b 0.008±0.000bc	0.093±0.006a 0.108±0.001b 0.068±0.004c 0.055±0.007d	0.010±0.000a 0.009±0.000a 0.008±0.000b 0.007±0.000b
乙酸乙酯萃取物 Ethyl acetate extracts	0.5 1.5 5.0 10.0	0.050±0.000a 0.035±0.000b 0.034±0.001b 0.019±0.000c	0.009±0.000a 0.006±0.000b 0.006±0.000b 0.006±0.000c	0.095±0.000b 0.087±0.000c 0.073±0.001d 0.063±0.000e	0.010±0.000a 0.007±0.000b 0.006±0.000c 0.006±0.000d
正丁醇萃取物 n-butanol extracts	0.5 1.5 5.0 10.0	0.033±0.000b 0.014±0.000c 0.016±0.000d 0.010±0.000e	0.006±0.000b 0.003±0.000c 0.003±0.000d 0.002±0.000e	0.073±0.001b 0.057±0.001c 0.042±0.001d 0.027±0.000e	0.006±0.000b 0.005±0.000b 0.004±0.000c 0.003±0.000d
剩余水相 Remainder in water	0.5 1.5 5.0 10.0	0.047±0.004a 0.030±0.005b 0.029±0.002b 0.026±0.002b	0.010±0.001a 0.008±0.002b 0.007±0.001b 0.006±0.001c	0.097±0.000a 0.086±0.003b 0.075±0.000c 0.067±0.001c	0.010±0.003a 0.009±0.002b 0.008±0.002b 0.007±0.005c

数据表示平均数 ± 标准差, 不同的字母表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。 Data are means ± SD. The different letters denote significant differences at the $\alpha=0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons

2.2.2 提取物对狗尾草种子萌发和幼苗生长的影响

2.2.2.1 提取物对狗尾草种子萌发的影响

四种提取物处理液对狗尾草种子萌发影响的数据结果见表 2-3。从表中可以看出, 加拿大一枝黄花叶提取物对狗尾草种子发芽率、发芽指数、发芽势的影响规律相似。原液和正丁醇萃取物处理液浓度 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 即能显著抑制种子萌发 ($p<0.05$); 乙酸乙酯萃取物处理液浓度 $10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 能显著抑制种子萌发 ($p<0.05$); 剩余水相不能显著抑制种子萌发 ($p<0.05$)。提取物浓度达到 $10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时, 狗尾草种子萌发率分别为对照的 61.79%、62.5%、42.35%、84.02%, 此时 RI 值分别为 -0.382、-0.375、-0.576、-0.159。

2.2.2.2 提取物对狗尾草幼苗生长的影响

不同浓度的四种处理液对狗尾草幼苗胚根胚芽生长影响的数据结果见图 2-3、图 2-4 及表 2-4。原始水相浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、正丁醇萃取物处理液浓度 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、乙酸乙酯萃取物处理液和剩余水相浓度 $10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时能显著抑制胚芽生长 ($p<0.05$), 原始水相、乙酸乙酯萃取物和剩余水相的浓度效应不显著, 正丁醇萃取物抑制效应随浓度的增高越来越明显。

原始水相和乙酸乙酯萃取物为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 能促进胚根生长但不显著 ($p<0.05$); 原始水相浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、乙酸乙酯萃取物浓度为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、正丁醇萃取物处理液浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时显著抑制胚根生长 ($p<0.05$); 三种处理液对胚根的生长表现出抑制作用, 浓度越高效果越明显; 剩余水相浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 对胚根生长有显著促进作用, 浓度越低促进作用越强, 浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时显著抑制胚根生长 ($p<0.05$).

不同浓度四种提取物处理狗尾草幼苗后, 胚芽胚根鲜重与胚芽胚根长度变化趋势相同, 随处理液浓度增加, 鲜重降低趋势显著。原始水相和乙酸乙酯萃取物浓度 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时幼苗鲜重显著降低, 正丁醇萃取物 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时幼苗鲜重显著降低, 剩余水相处理后幼苗鲜重变化不显著 ($p<0.05$).

表 2-3 来自加拿大一枝黄花叶片的 4 种浸提液对狗尾草种子萌发的影响

Table 2-3 Effect of four extracts of fresh leaves of *S. canadensis* on the *Setaria viridis* seed germination

提取液 Extracts	浓度 ($\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$) Concentrations	发芽率 (%) Germination percentage	发芽势 (%) Germination vigor	发芽指数 Germination index
蒸馏水 water	0	$48\pm 5.53\text{a}$	$42.66\pm 5.02\text{a}$	$23\pm 4.76\text{a}$
水提取原液 Primary water	0.5	$40.33\pm 4.5\text{ab}$	$34\pm 7.21\text{a}$	$21.22\pm 2.251\text{a}$
extracts	1.5	$40\pm 1.73\text{ab}$	$33.33\pm 5.85\text{a}$	$19\pm 1.15\text{a}$
	5.0	$32.66\pm 7.63\text{b}$	$21\pm 3.25\text{b}$	$16.33\pm 2.08\text{b}$
	10.0	$29.66\pm 4.16\text{b}$	$18.33\pm 5.51\text{b}$	$14.83\pm 3.81\text{b}$
乙酸乙酯萃取物 Ethyl acetate	0.5	$46.33\pm 4.61\text{a}$	$39\pm 3.02\text{ab}$	$21.66\pm 2.51\text{a}$
extracts	1.5	$46.66\pm 3.02\text{a}$	$37.33\pm 5.24\text{ab}$	$22.33\pm 2.72\text{a}$
	5.0	$51\pm 6.02\text{a}$	$37.66\pm 2.75\text{ab}$	$24.2\pm 4.82\text{a}$
	10.0	$30\pm 1.66\text{b}$	$24.66\pm 3.32\text{b}$	$18.66\pm 3.01\text{a}$
正丁醇萃取物 n-butanol	0.5	$37.66\pm 1.15\text{ab}$	$32.33\pm 2.31\text{a}$	$19.83\pm 4.76\text{ab}$
extracts	1.5	$37.33\pm 4.74\text{ab}$	$30.67\pm 2.02\text{a}$	$18.33\pm 0.67\text{ab}$
	5.0	$24.33\pm 5.06\text{bc}$	$12.33\pm 2.75\text{b}$	$11.12\pm 3.25\text{bc}$
	10.0	$20.33\pm 5.13\text{c}$	$10\pm 1.19\text{b}$	$9.11\pm 1.34\text{c}$
剩余水相 Remainder in	0.5	$41.33\pm 2.08\text{ab}$	$37.68\pm 2.04\text{ab}$	$21.67\pm 2.75\text{ab}$
water	1.5	$35.67\pm 0.58\text{ab}$	$31\pm 2.64\text{bc}$	$18.38\pm 0.28\text{ab}$
	5.0	$37.67\pm 1.5\text{ab}$	$25\pm 0.57\text{c}$	$17.33\pm 1.25\text{ab}$
	10.0	$40.33\pm 3.38\text{a}$	$23.67\pm 2.04\text{c}$	$15.26\pm 3.37\text{b}$

数据表示平均数 \pm 标准差, 不同的字母表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。Data are means \pm SD. The different letters denote significant differences at the $\alpha=0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons

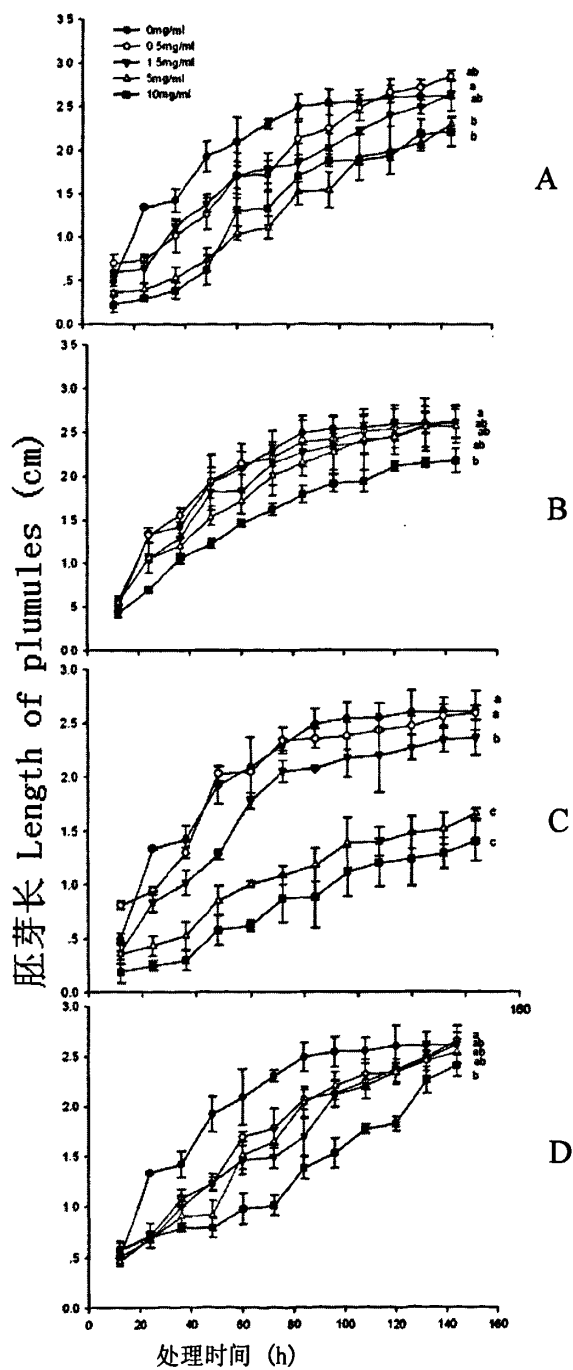


图 2-3 处理液对狗尾草胚芽长度的影响

Fig. 2-3 Effect of extracts fresh leaves of *S. canadensis* on the plumule length of *Setaria viridis* seedlings

A:原始水相 B:乙酸乙酯萃取物 C:正丁醇萃取物 D:剩余水相

每一个点表示 3 次重复的平均值，曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

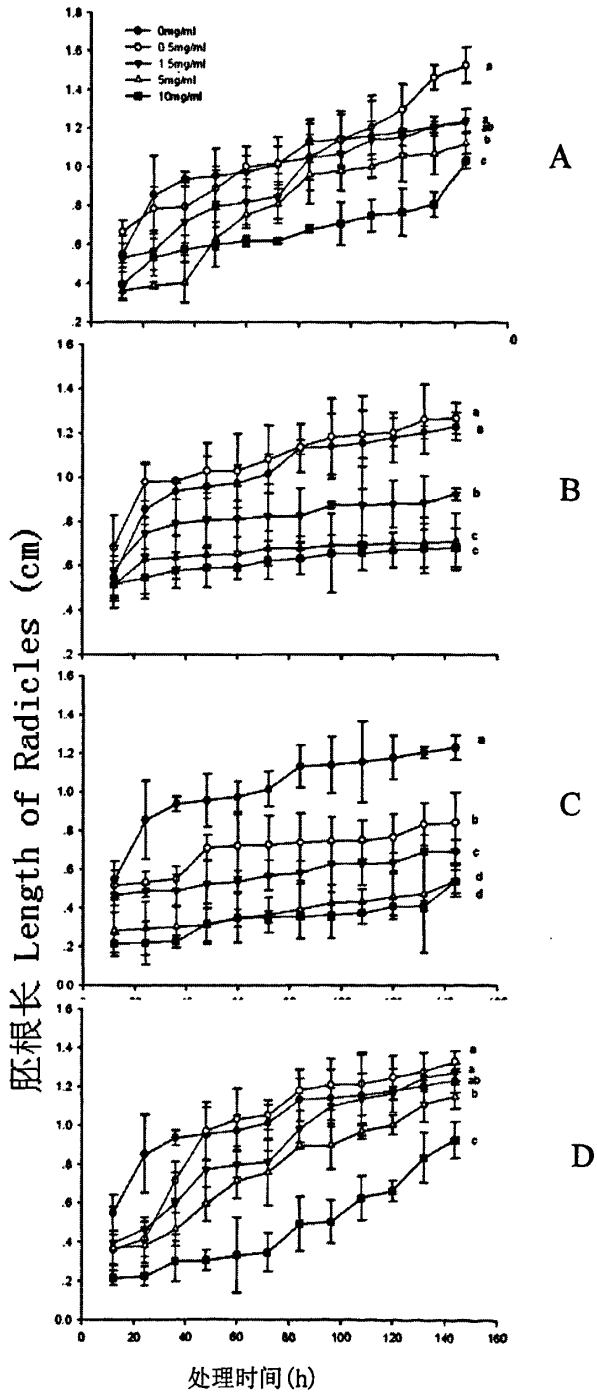


图 2-4 处理液对狗尾草胚根长度的影响

Fig. 2-4 Effect of extracts fresh leaves of *S. canadensis* on the radicle length of *Setaria viridis* seedlings

A:原始水相, B:乙酸乙酯萃取物, C:正丁醇萃取物, D:剩余水相

每一个点表示 3 次重复的平均值, 曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

表 2-4 来自加拿大一枝黄花叶片的 4 种浸提液对狗尾草幼苗鲜重的影响

Table 2-4 Effect of four extracts of fresh leaves of *S. canadensis* on the wet of *S. viridis* seedlings

提取液	浓度 (mg·ml ⁻¹)	胚芽鲜重(g)	胚根鲜重(g)
Extracts	Concentrations	Wet weight of plulules	Wet weight of radices
蒸馏水 water	0	0.012±0.004a	0.009±0.004a
水提取原液	0.5	0.014±0.005a	0.009±0.001a
Primary water	1.5	0.013±0.003a	0.008±0.001b
extracts	5.0	0.006±0.004b	0.006±0.004c
	10.0	0.002±0.004c	0.005±0.002d
乙酸乙酯萃取物	0.5	0.015±0.004a	0.009±0.001b
Ethyl acetate	1.5	0.013±0.001a	0.008±0.004c
extracts	5.0	0.01±0.001b	0.007±0.001d
	10.0	0.009±0.002b	0.006±0.005e
正丁醇萃取物	0.5	0.01±0.001b	0.007±0.001b
n-butanol	1.5	0.008±0.002c	0.005±0.001c
extracts	5.0	0.006±0.002d	0.004±0.001d
	10.0	0.005±0.003e	0.002±0.003e
剩余水相	0.5	0.017±0.004b	0.01±0.003a
Remainder in	1.5	0.015±0.005b	0.009±0.003b
water	5.0	0.013±0.002a	0.008±0.004c
	10.0	0.012±0.002a	0.007±0.001c

数据表示平均数 ± 标准差, 不同的字母表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。 Data are means ± SD. The different letters denote significant differences at the $\alpha=0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons

2.2.3 提取物对加拿大一枝黄花自身种子萌发和幼苗生长的影响

2.2.3.1 提取物对自身种子萌发的影响

四种提取物处理液对加拿大一枝黄花种子萌发影响的数据结果见表 2-5。从表中可以看出, 加拿大一枝黄花叶提取物对自身种子发芽率、发芽指数、发芽势的影响规律相似。原液、剩余水相和乙酸乙酯萃取物处理液浓度 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 即能显著抑制种子萌发($p<0.05$); 正丁醇萃取物处理液浓度 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 能显著抑制种子萌发($p<0.05$), 浓度达到 $10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时, 种子不萌发。随处理液浓度增加, 种子萌发率显著下降。

2.2.3.2 提取物对自身幼苗生长的影响

不同浓度的四种处理液对加拿大一枝黄花幼苗胚根胚芽生长影响的数据结果见图 2-5、图 2-6。与对照相比, 原始水相和剩余水相浓度在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间对加拿大一枝黄花胚芽的生长促进作用, 并且作用都是在生长的前 3 天最为明显, 促进作用随浓度增大而增强, 在浓度为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时促进作用最强, 浓度 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间时促进作用随浓度增大而减弱; 浓度 $10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时能显著促进胚芽生长 ($P<0.05$), RI 值分别为 0.096 和 0.831。乙酸乙酯萃取物浓度在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间对胚芽生长有促进作

用但不显著 ($P < 0.05$), 浓度为 $10\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时, 幼苗生长 6d 后死亡。正丁醇萃取物处理液浓度 $0.5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时对胚芽生长有促进作用但不显著 ($P < 0.05$), 浓度为 $5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时幼苗生长 10d 后死亡, 浓度为 $10\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时幼苗只能生长 4d。

四种提取物都抑制胚根生长, 并且随浓度增大抑制作用增强, 原始水相浓度为 $0.5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、乙酸乙酯萃取物和剩余水相浓度为 $1.5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 、正丁醇萃取物处理液浓度为 $5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时显著抑制胚根生长 ($p < 0.05$)。

表 2-5 来自加拿大一枝黄花叶片的 4 种浸提液对加拿大一枝黄花种子萌发的影响
Table 2-5 Effect of four extracts of fresh leaves of *S. canadensis* on the seed germination

提取物 Extracts	浓度 ($\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$) Concentrations	发芽率(棵/0.1g) Germination rate	发芽势(棵/0.1g) Germination vigor	发芽指数 Germination index
蒸馏水 water	0	$1.4500 \times 10^4 \pm 3.53a$	$0.9665 \times 10^4 \pm 2.02a$	$29.67 \pm 3.76a$
水提取原液 Ethyl acetate extracts	0.5 1.5 5.0 10.0	$1.3083 \times 10^4 \pm 3.5a$ $0.8832 \times 10^4 \pm 2.73b$ $0.5835 \times 10^4 \pm 3.63c$ $0.2415 \times 10^4 \pm 1.16d$	$0.7000 \times 10^4 \pm 5.21b$ $0.5082 \times 10^4 \pm 2.25c$ $0.1717 \times 10^4 \pm 2.36d$ $0.0832 \times 10^4 \pm 1.23e$	$22.22 \pm 2.21a$ $17.25 \pm 1.85b$ $4.33 \pm 2.08c$ $1.83 \pm 3.17d$
乙酸乙酯萃取物 Ethyl acetate extracts	0.5 1.5 5.0 10.0	$1.4082 \times 10^4 \pm 2.36a$ $0.9165 \times 10^4 \pm 5.32b$ $0.6092 \times 10^4 \pm 0.62c$ $0.5082 \times 10^4 \pm 2.83d$	$0.7810 \times 10^4 \pm 3.02a$ $0.6832 \times 10^4 \pm 2.24b$ $0.4415 \times 10^4 \pm 1.57c$ $0.2665 \times 10^4 \pm 2.46d$	$23.66 \pm 4.47a$ $20.33 \pm 1.72a$ $14.2 \pm 2.48b$ $8.66 \pm 3.11c$
正丁醇萃取物 n-butanol extracts	0.5 1.5 5.0 10.0	$1.1915 \times 10^4 \pm 5.23b$ $0.7582 \times 10^4 \pm 4.47c$ $0.3582 \times 10^4 \pm 2.56d$ 0e	$0.5582 \times 10^4 \pm 3.12b$ $0.4417 \times 10^4 \pm 1.22c$ $0.1582 \times 10^4 \pm 5.71d$ 0e	$18.83 \pm 1.67b$ $11.33 \pm 2.67c$ $4.12 \pm 2.53d$ 0e
剩余水相 Remainder in water	0.5 1.5 5.0 10.0	$1.3582 \times 10^4 \pm 1.82a$ $1.1418 \times 10^4 \pm 3.85b$ $0.9167 \times 10^4 \pm 5.11c$ $0.8795 \times 10^4 \pm 4.23d$	$0.8670 \times 10^4 \pm 4.12a$ $0.6897 \times 10^4 \pm 5.89b$ $0.6280 \times 10^4 \pm 2.53c$ $0.6167 \times 10^4 \pm 5.33d$	$23.67 \pm 2.77a$ $19.38 \pm 2.28b$ $15.33 \pm 1.03c$ $12.26 \pm 3.39c$

表中值=平均数 ± 标准差 Values are means ± SD, a、b、c、d 和 e 分别表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性 Denote significant differences at the $\alpha=0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons.

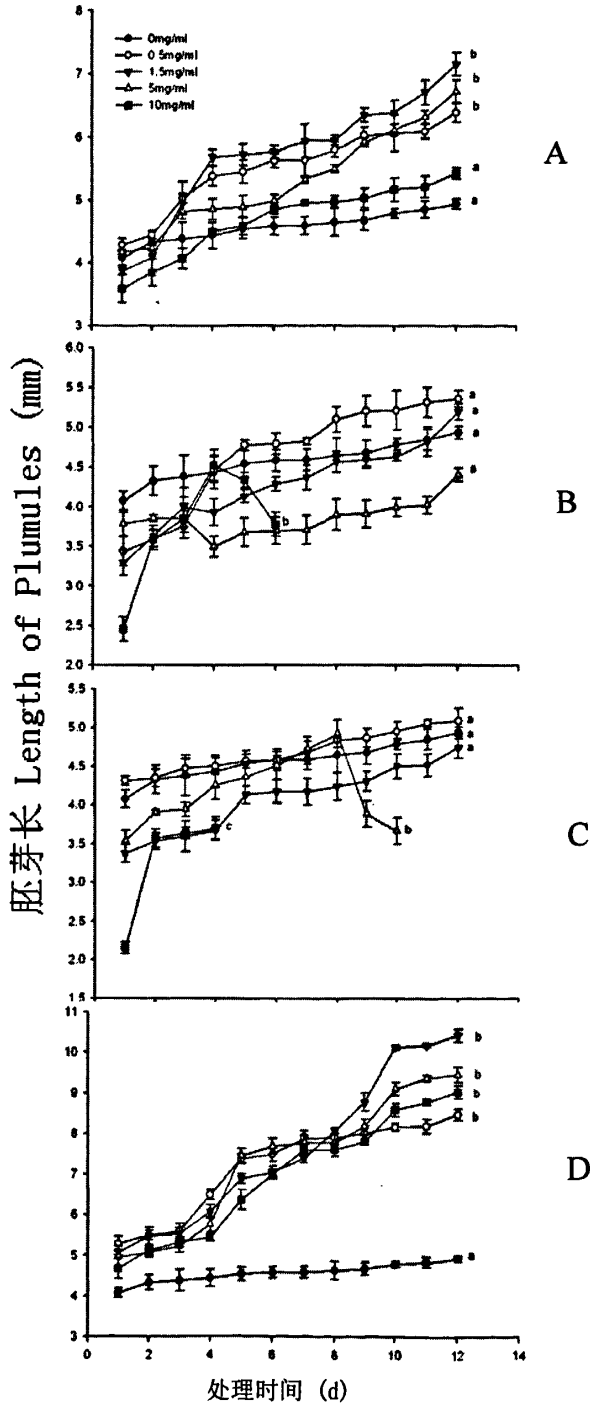


图 2-5 处理液对胚芽长度的影响

Fig. 2-5 Effect of extracts fresh leaves of *S. canadensis* on the plumule length of seedlings

A:原始水相, B:乙酸乙酯萃取物, C:正丁醇萃取物, D:剩余水相

每一个点表示 3 次重复的平均值, 曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

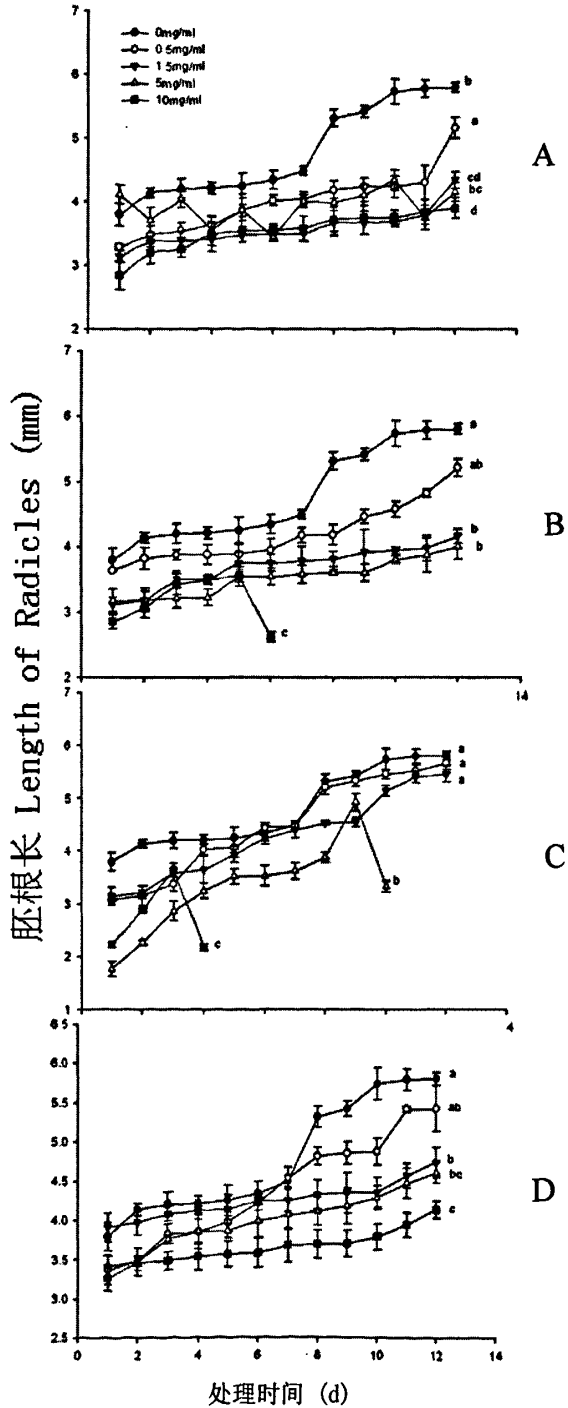


图 2-6 处理液对胚根长度的影响

Fig. 2-6 Effect of extracts fresh leaves of *S. canadensis* on the radicle length of seedlings

A:原始水相, B:乙酸乙酯萃取物, C:正丁醇萃取物, D:剩余水相

每一个点表示 3 次重复的平均值, 曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

2.3 讨论

近年来生物入侵机制是生态学研究的一个重点和热点，也取得了一些进展，目前国内的专家学者倾向于用新武器假说来解释外来物种成功入侵。

本研究证实加拿大一枝黄花叶水提取物中存在化感物质，影响三种植物种子萌发和幼苗生长，存在“浓度效应”，即低浓度促进，高浓度抑制。根据实验室控制试验证明，加拿大一枝黄花中存在的化感物质是导致其在新环境中竞争优势的重要原因，高浓度的加拿大一枝黄花叶水提取液对三种植物种子萌发和幼苗生长抑制作用显著，其中正丁醇萃取物表现最为显著，并且抑制效应与化感物质浓度成正相关，即化感物质浓度增加，抑制作用增强。

化感物质对种子萌发的影响主要体现在抑制发芽和延迟发芽，对发芽速度的影响更显著。加拿大一枝黄花叶水提取液对杂草种子发芽的影响，除了降低发芽率，减少杂草的出苗率外，还表现在对杂草种子发芽势的影响上。由于杂草种子发芽的延迟，有利于加拿大一枝黄花对空间占领时间上的优先，从而更有利于自身的生长，也许这也是它迅速蔓延的原因之一^[67]。高浓度的加拿大一枝黄花叶水提取液使小麦种子腐坏，降低农作物产量，影响农业经济。加拿大一枝黄花有自毒作用，影响自身种子萌发，并且在三种植物中，加拿大一枝黄花对自身种子萌发的影响最大，对狗尾草种子萌发的影响最小，可能因为狗尾草是一种杂草，而杂草是在人为与自然双重选择压力下演化而成的一类高度进化的植物类群，适应能力强，抗逆性强，因而对化感物质的耐受性强，而且狗尾草种子有比较坚硬厚实的种皮，也有一定的保护作用。加拿大一枝黄花种子轻且小，易受外界环境影响，种子主要进行远距离有性繁殖，加拿大一枝黄花无性繁殖能力极强，可以通过根的无性繁殖来扩展种群，形成无性系植丛，因而加拿大一枝黄花对自身种子萌发的影响并不能影响加拿大一枝黄花种群的扩大。加拿大一枝黄花叶水提取液供试植物种子的发芽均有一定的影响，并与浓度的高低有着密切的关系，说明加拿大一枝黄花的迅速蔓延与其向周围环境释放化感物质有关，并随着生长密度的不断提高，释放的化感物质浓度也越来越高，对周围植物的化感作用也随之增强^[67]。

在幼苗生长试验中，三种植物的胚根长度变化对化感物质的反应更敏感，并且高浓度处理液中的三种植物都有根腐烂、萎缩、变褐变黑的现象，出现这些现象的原因可能是由于根最先最直接接触和吸收化感物质，更容易受到化感物质的伤害，随着水分等营养物质向上传输再将部分化感物质传输到茎叶部分，茎叶部分才做出相应的反应。其中处理后的小麦幼苗中出现大量的“畸形苗”，表现为，根不能水平平铺在滤纸上生长，根基的大部分

向上生长而脱离滤纸，并且长有白色绒状物，只有根尖部分与滤纸接触，出现了“站立”生长的现象。王开金在研究中也观察到加拿大一枝黄花提取液对幼苗根系生长抑制作用尤为显著，根长变短，根系色泽随着提取液浓度增加，由白逐渐变褐，用 TTC 法对幼苗根系活力测定结果，证实经提取液处理后，幼苗根系活力明显下降^[72]。周凯在其实验中发现根际土壤水浸提液显著地促进了白菜和萝卜幼苗的伸长，但对根系的伸长生长表现为抑制作用，根系在外观上呈现出褐化、扭曲等畸形现象，表现为高浓度水浸提液抑制根系脱氢酶与硝酸还原酶的活性，这可能是植物对水浸提液胁迫而产生的一种反应，地上部分非常态生长以补偿地下部根系所受到的抑制^[68]。梅玲笑的研究结果也表明根状茎和根系不同浓度浸提液对白三叶幼苗的根长比苗高具有更强的化感抑制作用。加拿大一枝黄花叶水提取液对胚芽的影响主要表现为株高降低和鲜重减轻^[64]。

通过实验发现加拿大一枝黄花叶低浓度水取液对不同受体植物或同一受体植物的不同部位表现出不同的化感作用(促进、抑制或无显著影响)，小麦萌发和幼苗生长受抑制明显，加拿大一枝黄花对自身有较强的自毒作用，狗尾草只有在高浓度时萌发和幼苗生长影响才会较大。

生态条件能显著影响化感物质的释放及其生态学效应，如光照、水分、温度、养分及其他因素，而本试验通过培养皿法，以发芽率、胚芽长、胚根长为影响因子评价了加拿大一枝黄花叶水提取物化感作用强弱。实验在人工气候箱中进行，光、温度、水分条件均保持一致，避免了自然条件下各种因素的干扰，结果较好地反映出了加拿大一枝黄花化感作用的强弱趋势，但是否真实反映加拿大一枝黄花在自然状态下化感作用，还需要在野外自然条件下，进行对不同植物萌发和生长化感作用的研究，并与实验室中的结果进行比较分析，才能更好的理解和反映加拿大一枝黄花的化感作用。

3 加拿大一枝黄花叶与根提取物化感作用比较

3.1 材料与与方法

3.1.1 实验材料

合萌 (*Aeschynomene indica* L.) 种子、加拿大一枝黄花根, 于 2007 年 10 月 20 日, 采自浙江大学宁波理工学院野外生态观测站 (29° 48' 54" N, 121° 34' 27" E, 海拔 8m)。精选大小均一, 健康饱满的种子用于试验。根在自来水下彻底清洗, 然后用蒸馏水冲洗, 风干。

3.1.2 实验方法

3.1.2.1 实验提取液的制备

将风干的加拿大一枝黄花根粉碎, 取 4.0kg 粉末用蒸馏水室温下提取 48h (料: 液=1: 5), 提取液经超声波处理, 离心, 过滤, 减压浓缩, 得到暗褐色的水提物 (507.3g); 取一部分产物溶于水, 用正丁醇萃取, 有机相和水相分别减压浓缩, 得到正丁醇萃取物 (161.3g), 水相浓缩物 (324.2g)。三种提取物分别溶于蒸馏水配成 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 5.0, 10.0 mg·ml⁻¹ 的处理液。共 21 种处理液置于冰箱中保存备用。

3.1.2.2 提取物对小麦种子萌发的影响

方法同 2.1.2.2

3.1.2.3 提取物对合萌种子萌发的影响

合萌种子的预处理过程: 将种子在冷冻室中 (-15 °C ~ 0 °C) 放置 8h, 40 °C 的干燥环境下加热 40min, 用 98% 浓硫酸的浸泡 5min, 然后用蒸馏水反复清洗干净。将处理过的种子均匀摆放在铺有两层滤纸、直径为 15cm 的培养盒中, 每个培养盒摆放种子 100 粒, 分别放入三种提取物不同浓度的处理液 10mL (对照 CK 加入蒸馏水 10mL), 包括对照共 22 个处理, 每个处理设 3 个重复。将培养皿置于光周期 25 °C, 16h; 暗周期 20 °C, 8h, 光强 40nmol/m²s 的人工气候箱中培养, 种子萌发以胚根突破种皮为标准, 每 12h 补充等量对应浓度的处理液以保持培养皿内滤纸的适度 (对照 CK 为等量的蒸馏水)。第 6h 后开始观察、每 6h 统计并记录种子发芽数。

3.1.2.4 提取物对加拿大一枝黄花种子萌发的影响

方法同 2.1.2.4

3.1.2.5 提取物对小麦幼苗生长的影响

方法同 2.1.2.5

3.1.2.6 提取物对合萌幼苗生长的影响

培养条件和设备与“水提取对合萌种子的抑制试验”相同。取胚根突破种皮的种子 100 粒均匀摆放在铺有两层滤纸、直径 15cm 的培养皿，置入人工气候箱中培养，并分别加入 10mL 三种提取物不同浓度的处理液（对照 CK 为蒸馏水），包括对照共 22 个处理，每个处理设 3 个重复。每 12h 从培养皿中取出 5 粒种子测其胚芽、胚根的长度，以及实生苗湿重的变化。共测定 12 次，历时 6d。

3.1.2.7 提取物对加拿大一枝黄花幼苗生长的影响

方法同 2.1.2.7

3.2 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液的化感作用比较

3.2.1 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对小麦的化感作用比较

叶水提取物和根水提取物对小麦种子萌发的影响见表 3-1，从表中可以看出，加拿大一枝黄花根水提取物对小麦种子萌发影响不显著，叶水提取物浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时显著抑制种子萌发 ($p<0.05$)，并且随着浓度增大抑制作用增强。

表 3-1 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对小麦种子萌发的影响

Table3-1 Effect of water extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on wheat seed germination

提取物 Extracts	浓度 ($\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$) Concentrations	发芽率 (%) Germination percentage	发芽势 (%) Germination vigor	发芽指数 Germination index
蒸馏水 water	0	96.33±2.08a	48.16±1.04a	92.66±2.08a
叶水提取物 Water extracts of leaf	0.5	92.66±1.15a	46.33±0.57a	85.66±2.51b
	1.5	91.66±3.05a	45.83±1.52a	83.66±1.15b
	5.0	76±5.00c	38±2.5c	68±6d
	10.0	42.66±5.68d	21.33±2.84d	23.33±2.51e
根水提取物 Water extracts of root	0.5	99.33±1.21a	24.75±0.25b	93.00±0.25a
	1.5	98.67±1.16a	24.50±1.24b	82.33±1.62b
	5.0	96.00±2.56a	24.00±2.56b	78.00±0.69c
	10.0	98.33±1.64a	23.50±1.32b	75.33±3c

表中值=平均数±标准差 Values are means ± SD, a、b、c、d 和 e 分别表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性 Denote significant differences at the $\alpha=0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons.

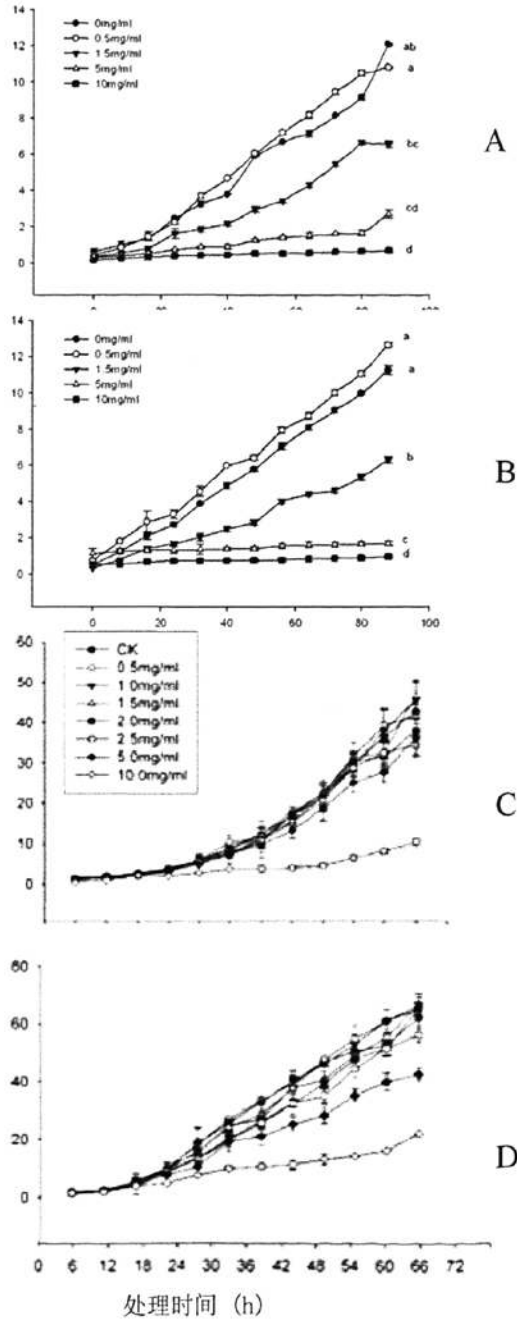


图 3-1 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对小麦幼苗生长的影响

Fig. 3-1 Effect of water extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on the wheat seedlings

A 叶水提取物对小麦胚芽生长的影响 B 叶水提取物对小麦胚根生长的影响

C 根水提取物对小麦胚芽生长的影响 D 根水提取物对小麦胚根生长的影响

每一个点表示 3 次重复的平均值，曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

叶水提取物和根水提取物对小麦幼苗生长的影响见图 3-1。与对照组相比,用不同浓度加拿大一枝黄花根浸液的水提物处理小麦,在浓度 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间时,对小麦的胚芽胚根生长有促进作用,其中 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 的水提物处理对胚芽促进作用最强, $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 的水提物处理对胚根促进作用最强。对小麦胚芽胚根生长有抑制作用的浓度在 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 10.0 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间,并且浓度越高抑制程度越明显, $10.0 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 水提物对其抑制作用最显著。叶水提取物浓度 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 促进胚芽胚根生长但不显著,浓度为 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时显著抑制胚芽胚根生长 ($p < 0.05$),并且抑制效应随浸提液浓度增大而增强。

3.2.2 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对狗尾草和合萌的化感作用比较

叶水提取物对狗尾草种子和根水提取物对合萌种子萌发的影响见表 3-2,从表中可以看出,加拿大一枝黄花根水提取物对合萌种子萌发影响不显著,叶水提取物浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时显著抑制狗尾草种子萌发 ($p < 0.05$),并且随着浓度增大抑制作用增强。

叶水提取物对狗尾草幼苗和根水提取物对合萌幼苗生长的影响见图 3-2,加拿大一枝黄花根水提取物在浓度 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 1 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间时对合萌胚芽生长有促进作用,浓度在 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 1 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间时对合萌胚根生长有促进作用,其中 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时对胚芽胚根作用最明显, $1.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间的浓度对胚芽生长影响表现为抵制作用,浓度越高作用越显著, $10 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时对胚根有较明显的抑制作用。叶水提取浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时能显著抑制胚芽胚根生长,浓度为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 能促进胚根生长但不显著 ($p < 0.05$);叶水提取物对胚芽胚根的生长表现出抑制作用,浓度越高效果越明显。

表 3-2 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对合萌种子萌发的影响
Table 3-2 Effect of water extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on *S. viridis* and *A. indica* seed germination

提取液 Extracts	浓度 ($\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$) Concentrations	发芽率 (%) Germination percentage	发芽势 (%) Germination vigor	发芽指数 Germination index
水 1 Water1	0	48±5.53a	42.66±5.02a	23±4.76a
叶水提取物 Water extracts of leaf	0.5	40.33±4.5ab	34±7.21a	21.22±2.251a
	1.5	40±1.73ab	33.33±5.85a	19±1.15a
	5.0	32.66±7.63b	21±3.25b	16.33±2.08b
	10.0	29.66±4.16b	18.33±5.51b	14.83±3.81b
水 2 Water2	0	82.32±1.24a	54.05±3.11a	27.44±0.41a
根水提取物 Water extracts of root	0.5	85.24±2.18a	54.32±2.5a	28.41±0.73a
	1.5	84.08±8.50a	55.10±11.51a	28.36±3.41a
	5.0	82.88±4.54a	53.55±4.86a	27.63±1.51a
	10.0	87.52±8.71a	53.55±4.86a	27.63±1.51a

表中值=平均数±标准差 Values are means ± SD, a、b、c、d 和 e 分别表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha = 0.05$ 水平上的差异显著性 Denote significant differences at the $\alpha = 0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons.

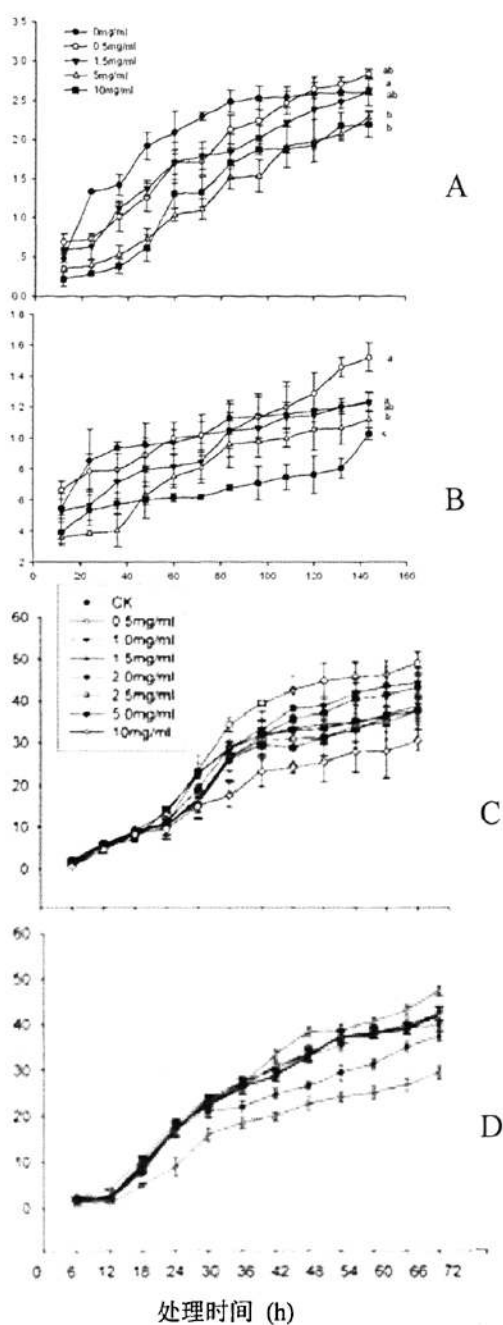


图 3-2 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对狗尾草和合萌幼苗生长的影响

Fig. 3-2 Effect of water extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on *S. viridis* and *A. indica* seedlings

A 叶水提取物对狗尾草胚芽生长的影响 B 叶水提取物对狗尾草胚根生长的影响

C 根水提取物对合萌胚芽生长的影响 D 根水提取物对合萌胚根生长的影响

每一个点表示 3 次重复的平均值，曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

3.2.3 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对自身的化感作用比较

叶水提取物与根水提取物对杂草种子萌发的影响见表 3-3, 从表中可以看出, 随着处理液浓度的升高, 加拿大一枝黄花种子的发芽率、发芽势、发芽指数显著降低, 处理液浓度 1.5 mg·ml⁻¹ 即能显著抑制种子萌发(p<0. 05)。

叶水提取物和根水提取物对自身幼苗生长的影响见图 3-3, 与对照组相比, 根水提取物浓度在 0.5 mg · ml⁻¹ ~ 1.5 mg · ml⁻¹ 之间对加拿大一枝黄花胚芽胚根生长促进作用, 并且作用都是在生长的前 3 天最为明显。在浓度为 5.0 mg · ml⁻¹ ~ 10.0 mg · ml⁻¹ 的提取物对其胚芽胚根生长有比较明显的抑制作用, 且浓度越高作用越明显 (P < 0.05)。叶水提取物浓度在 0.5 mg · ml⁻¹ ~ 1.5 mg · ml⁻¹ 之间对加拿大一枝黄花胚芽的生长促进作用, 促进作用随浓度增大而增强, 在浓度为 1.5 mg · ml⁻¹ 时促进作用最强。浓度 5 mg · ml⁻¹ ~ 10mg · ml⁻¹ 之间时促进作用随浓度增大而减弱; 浓度 10mg · ml⁻¹ 时能显著促进胚芽生长 (P < 0.05), 叶水提取物能抑制胚根生长, 并且随浓度增大抑制作用增强, 浓度为 0.5mg · ml⁻¹ 时显著抑制胚根生长 (p<0.05)。

表 3-3 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对自身种子萌发的影响

Table3-3 Effect of water extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on itself seed germination

提取液 Extracts	浓度 (mg·ml ⁻¹) Concentrations	发芽率(棵/0.1g) Germination rate	发芽势(棵/0.1g) Germination vigor	发芽指数 Germination index
水 Water	0	1.4500×10 ⁴ ±3.53a	0.9665×10 ⁴ ±2.02a	29.67±3.76a
叶水提取物 Water extracts of leaf	0.5	1.3083×10 ⁴ ±3.5a	0.7000×10 ⁴ ±5.21b	22.22±2.21a
	1.5	0.8832×10 ⁴ ±2.73b	0.5082×10 ⁴ ±2.25c	17.25±1.85b
	5.0	0.5835×10 ⁴ ±3.63c	0.1717×10 ⁴ ±2.36d	4.33±2.08c
	10.0	0.2415×10 ⁴ ±1.16d	0.0832×10 ⁴ ±1.23e	1.83±3.17d
根水提取物 Water extracts of root	0.5	1.2840×10 ⁴ ±10.27a	6.9575×10 ⁴ ±7.79b	23.34±2.54a
	1.5	0.8440×10 ⁴ ±6.96b	0.4583×10 ⁴ ±6.25c	11.25±2.33b
	5.0	0.4813×10 ⁴ ±3.34c	0.1758×10 ⁴ ±3.46d	4.81±2.07c
	10.0	0.2283×10 ⁴ ±2.39d	0.0780×10 ⁴ ±2.58e	1.82±0.83d

表中值=平均数±标准差 Values are means ± SD, a、b、c、d 和 e 分别表示与对照进行 LSD 多重比较时 α=0.05 水平上的差异显著性 Denote significant differences at the α=0.05 level in the process of LSD multiple comparisons.

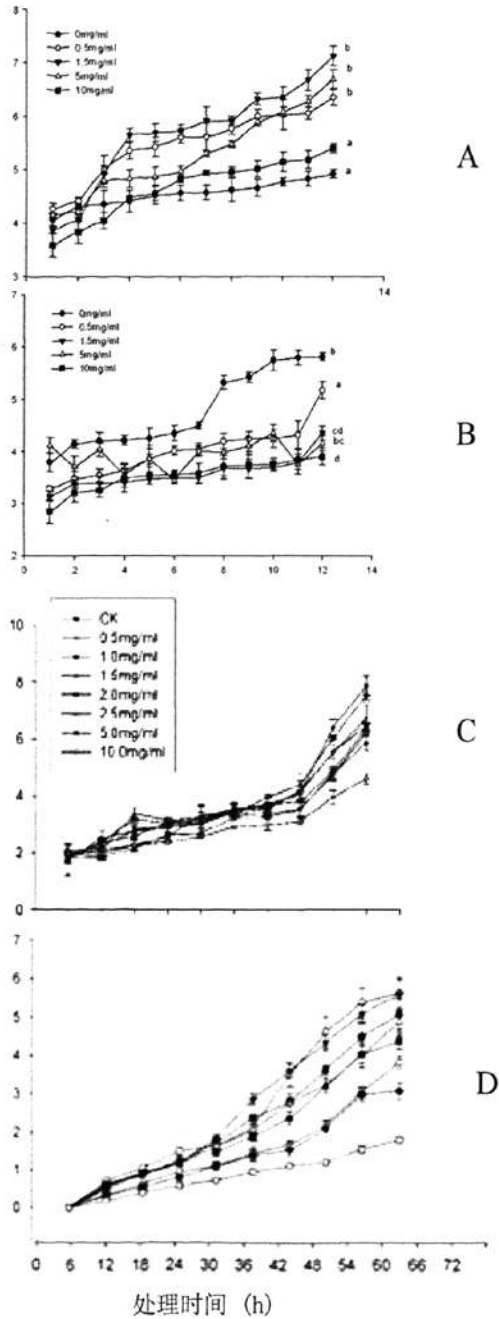


图 3-3 加拿大一枝黄花叶片和根水浸提液对自身幼苗生长的影响

Fig. 3-3 Effect of water extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on itself seedlings

A 叶水提取物对自身胚芽生长的影响 B 叶水提取物对自身胚根生长的影响

C 根水提取物对自身胚芽生长的影响 D 根水提取物对自身胚根生长的影响

每一个点表示 3 次重复的平均值，曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异的显著性。

3.3 正丁醇萃取物的化感作用比较

3.3.1 正丁醇萃取物对小麦的化感作用比较

正丁醇萃取物对小麦种子萌发的影响见表 3-4, 从表中可以看出, 根萃取物对小麦种子萌发影响不显著; 叶萃取物随着浓度增加, 对种子萌发抑制作用增强 处理液浓度 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 就能抑制种子萌发($p < 0.05$).

正丁醇萃取物对小麦幼苗生长的影响见图 3-4, 用 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 的根萃取物处理小麦, 小麦胚芽的生长相比对照组有促进作用。而 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 这个浓度在小麦的生长前期有一定的促进作用, 之后便对胚芽生长产生了抑制作用。浓度在 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1} \sim 10.0 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 之间的提取物均对小麦胚芽的生长有明显的抑制作用且浓度越高效果越显著。各个浓度范围内根萃取物溶液对小麦胚根的生长有非常明显的抑制作用, 并且浓度越高作用越显著 ($P < 0.05$)。 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 叶萃取物显著抑制胚芽胚根生长 ($p < 0.05$), 并且抑制效应随处理液浓度增大而增强。浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 的处理液都能促进胚根生长但不显著 ($p < 0.05$), 正丁醇萃取物处理液浓度 $10 \text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$ 时, 胚根在 7d 后腐烂死亡。

表 3-4 加拿大一枝黄花叶片和根正丁醇萃取物对小麦种子萌发的影响

Table 3-4 Effect of n-butanol extracts fresh leaf or root of *S. canadensis* on wheat seed germination

抽提物 Extracts	浓度 ($\text{mg} \cdot \text{ml}^{-1}$) Concentrations	发芽率 (%) Germination percentage	发芽势 (%) Germination vigor	发芽指数 Germination index
水 Water	0	48±5.53a	42.66±5.02a	23±4.76a
叶正丁醇提取物 n-butanol extracts of leaf	0.5	37.66±1.15ab	32.33±2.31a	19.83±4.76ab
	1.5	37.33±4.74ab	30.67±2.02a	18.33±0.67ab
	5.0	24.33±5.06bc	12.33±2.75b	11.12±3.25bc
	10.0	20.33±5.13c	10±1.19b	9.11±1.34c
根正丁醇提取物 n-butanol extracts of root	0.5	99.00±1.21a	24.00±0.33b	91.00±0.33a
	1.5	98.33±1.67a	24.50±1.33b	82.33±1.67a
	5.0	95.67±0.33a	24.00±0.33b	78.00±2.67b
	10.0	94.67±2.33a	23.50±2.33b	75.33±3.33b

表中值=平均数±标准差 Values are means ± SD, a、b、c、d 和 e 分别表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha = 0.05$ 水平上的差异显著性 Denote significant differences at the $\alpha = 0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons.

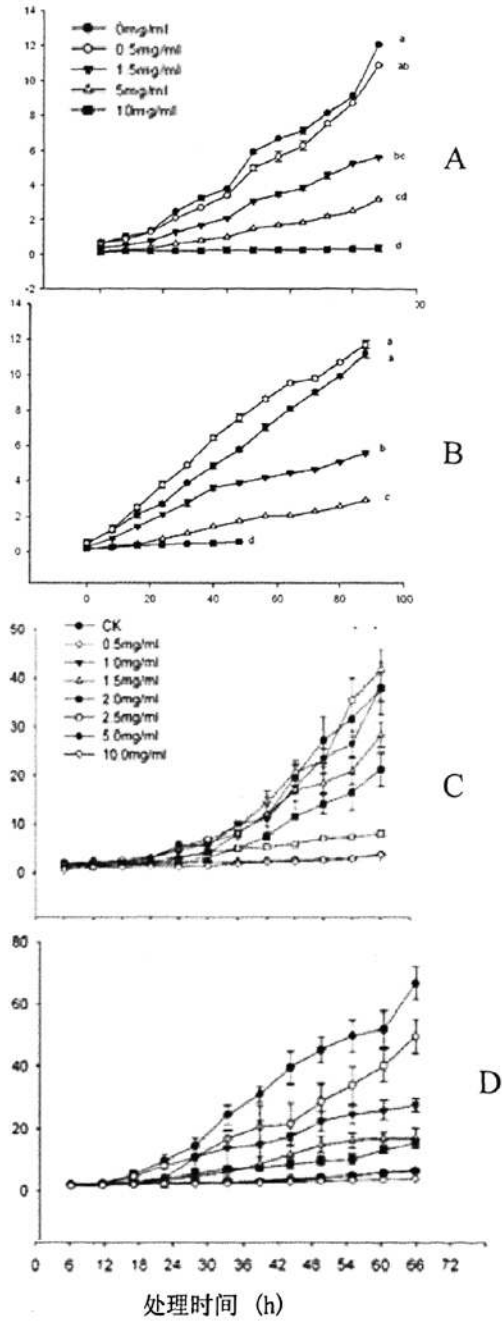


图 3-4 加拿大一枝黄花叶片和根正丁醇萃取物对小麦幼苗生长的影响

Fig. 3-4 Effect of n-butanol extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on wheat seedlings

A 叶萃取物对小麦胚芽生长的影响 B 叶萃取物对小麦胚根生长的影响

C 根萃取物对小麦胚芽生长的影响 D 根萃取物对小麦胚根生长的影响

每一个点表示 3 次重复的平均值，曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

3.3.2 正丁醇萃取物对狗尾草和合萌的化感作用比较

正丁醇萃取物对杂草种子萌发的影响见表 3-5, 从表中可以看出, 根萃取物合萌种子萌发的影响总体来说不明显, 仅有在浓度为 2.5mg/mL 有显著的促进萌发的作用 ($P < 0.05$)。

正丁醇萃取物对杂草幼苗生长的影响见图 3-5。叶萃取物处理液浓度 5 mg·ml⁻¹ 即能显著抑制种子萌发 ($p < 0.05$)。根萃取物浓度为 0.5 mg · ml⁻¹ 时对合萌胚芽胚根的生长产生一定的促进作用, 而浓度在 1.0 mg · ml⁻¹ ~ 10.0 mg · ml⁻¹ 的溶液对胚芽胚根的生长产生抑制作用。叶萃取物处理液浓度 1.5 mg · ml⁻¹ 能显著抑制胚芽生长, 处理液浓度为 0.5 mg · ml⁻¹ 时显著抑制胚根生长 ($p < 0.05$); 抑制效应随浓度的增高越来越明显。

表 3-5 加拿大一枝黄花叶片和根正丁醇萃取物对杂草种子萌发的影响

Table3-5 Effect of n-butanol extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on the weeds seed germination

提取液 Extracts	浓度 (mg·ml ⁻¹) Concentrations	发芽率 (%) Germination percentage	发芽势 (%) Germination vigor	发芽指数 Germination index
水 1 Water1	0	48±5.53a	42.66±5.02a	23±4.76a
叶正丁醇提取物 n-butanol extracts of leaf	0.5	37.66±1.15ab	32.33±2.31a	19.83±4.76ab
	1.5	37.33±4.74ab	30.67±2.02a	18.33±0.67ab
	5.0	24.33±5.06bc	12.33±2.75b	11.12±3.25bc
	10.0	20.33±5.13c	10±1.19b	9.11±1.34c
水 2 Water2	0	82.32±1.24a	54.05±3.11a	27.44±0.41a
根正丁醇提取物 n-butanol with water	0.5	82.71±6.38a	51.28±3.95a	27.57±2.13a
	1.5	82.06±1.54a	50.88±0.95a	27.53±0.51a
	5.0	88.58±6.21a	54.92±3.85a	29.53±2.07a
	10.0	68.53±3.96b	42.49±2.45b	22.84±1.32b

表中值=平均数±标准差 Values are means ± SD, a, b, c, d 和 e 分别表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha = 0.05$ 水平上的差异显著性 Denote significant differences at the $\alpha = 0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons.

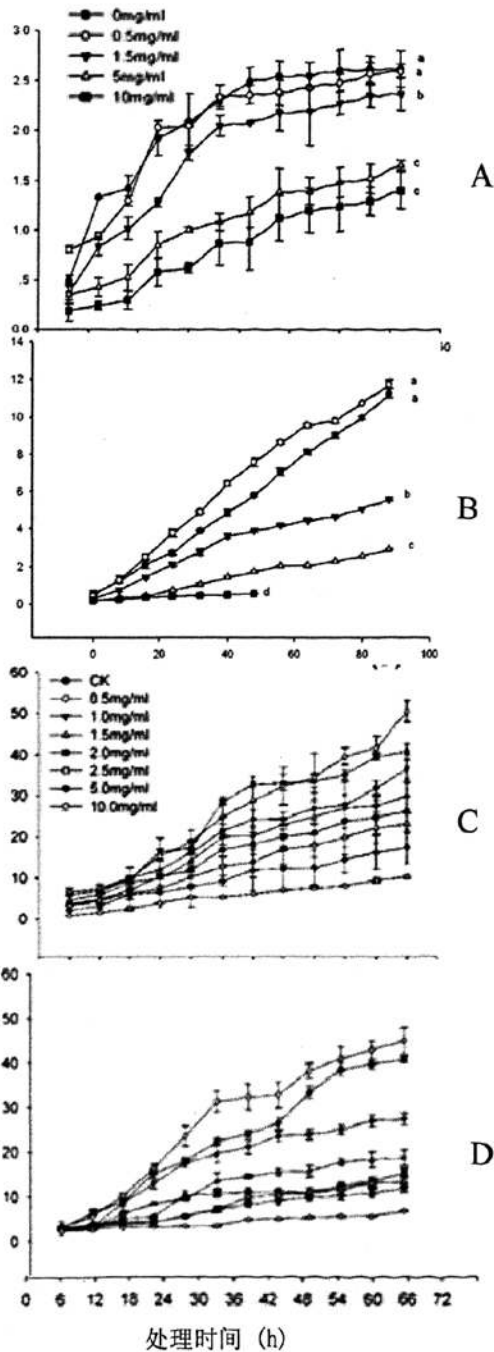


Fig. 3-5 Effect of n-butanol extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on the weed seedlings

A 叶萃取物对狗尾草胚芽生长的影响 B 叶萃取物对狗尾草胚根生长的影响

C 根萃取物对合萌胚芽生长的影响 D 根萃取物对合萌胚根生长的影响

每一个点表示 3 次重复的平均值，曲线上不同字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性。

3.3.3 正丁醇萃取物对自身的化感作用比较

正丁醇萃取物对自身种子萌发的影响见表 3-6, 从表中可以看出, 随着两种萃取物处理液浓度的升高, 加拿大一枝黄花种子的发芽率、发芽势、发芽指数显著降低 ($P < 0.05$)。处理液浓度 $0.5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 能显著抑制种子萌发 ($p < 0.05$), 浓度达到 $10\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时, 种子不萌发。随处理液浓度增加, 种子萌发率显著下降。

正丁醇萃取物对自身幼苗生长的影响见图 3-6, 根萃取物在浓度为 $0.5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 1.5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间对加拿大一枝黄花的胚芽胚根的生长有一定的促进, 且在 $0.5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 这个浓度表现最明显。在 $2.0\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1} \sim 10.0\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 之间的浓度对其胚芽胚根的生长均显著抑制作用, 并且浓度越高越显著 ($P < 0.05$)。叶萃取物处理液浓度 $0.5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时对胚芽生长有促进作用但不显著, 浓度为 $5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时幼苗生长 10d 后死亡, 浓度为 $10\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时幼苗只能生长 4d。处理液浓度为 $5\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ 时显著抑制胚根生长 ($p < 0.05$), 并且随浓度增大抑制作用增强。

表 3-6 加拿大一枝黄花叶片和根正丁醇萃取物对自身种子萌发的影响

Table 3-6 Effect of n-butanol extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on itself seed germination

提取液 Extracts	浓度 ($\text{mg}\cdot\text{ml}^{-1}$) Concentrations	发芽率(棵/0.1g) Germination rate	发芽势(棵/0.1g) Germination vigor	发芽指数 Germination index
水 Water	0	$1.4500 \times 10^4 \pm 3.53a$	$0.9665 \times 10^4 \pm 2.02a$	$29.67 \pm 3.76a$
叶正丁醇提取物 n-butanol extracts of leaf	0.5	$1.1915 \times 10^4 \pm 5.23b$	$0.5582 \times 10^4 \pm 3.12b$	$18.83 \pm 1.67b$
	1.5	$0.7582 \times 10^4 \pm 4.47c$	$0.4417 \times 10^4 \pm 1.22c$	$11.33 \pm 2.67c$
	5.0	$0.3582 \times 10^4 \pm 2.56d$	$0.1582 \times 10^4 \pm 5.71d$	$4.12 \pm 2.53d$
	10.0	0e	0e	0e
	根正丁醇提取物 n-butanol extracts of root	0.5	$1.0568 \times 10^4 \pm 1.82a$	$0.6568 \times 10^4 \pm 4.12a$
1.5	$0.7433 \times 10^4 \pm 3.85b$	$0.4333 \times 10^4 \pm 5.89b$	$11.92 \pm 3.09c$	
5.0	$0.3808 \times 10^4 \pm 5.11c$	$0.1083 \times 10^4 \pm 2.53c$	$3.06 \pm 1.86d$	
10.0	0e	0e	0e	

表中值=平均数±标准差 Values are means ± SD, a、b、c、d 和 e 分别表示与对照进行 LSD 多重比较时 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性 Denote significant differences at the $\alpha=0.05$ level in the process of LSD multiple comparisons.

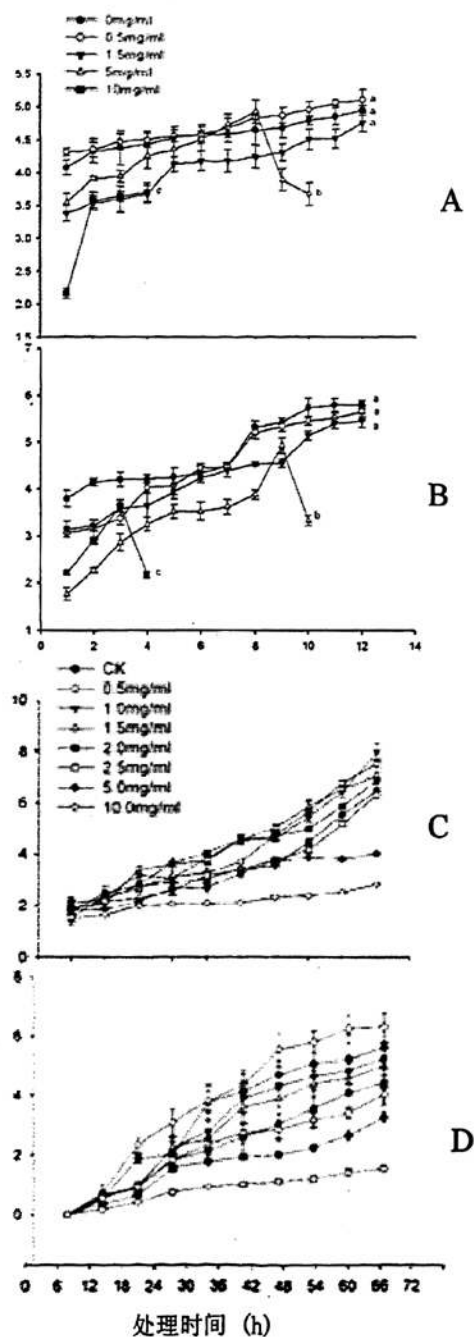


图 3-6 加拿大一枝黄花叶片和根正丁醇萃取物对自身幼苗生长的影响

Fig. 3-6 Effect of n-butanol extracts of fresh leaf or root of *S. canadensis* on itself seedlings

A 叶萃取物对自身胚芽生长的影响 B 叶萃取物对自身胚根生长的影响

C 根萃取物对自身胚芽生长的影响 D 根萃取物对自身胚根生长的影响

每一个点表示 3 次重复实验的平均值, 曲线上不同的字母表示在 $\alpha=0.05$ 水平上的差异显著性

3.4 小结

分析比较加拿大一枝黄花叶与根水提取物表明，加拿大一枝黄花叶与根水提取物均对本地植物存在显著化感作用。化感效应随提取物浓度增加而增强，而且叶水提取物抑制作用明显强于根水提取物。加拿大一枝黄花水提取物对自身抑制作用最强，小麦次之，杂草合萌最弱。根水提取物对小麦、合萌和自身的种子萌发无显著影响；对小麦、合萌和自身幼苗生长的化感作用具有浓度效应。随着提取物处理浓度的升高，对小麦幼苗生长的抑制均有增强的趋势，在较低的浓度时具有促进作用。叶水提取物对小麦、狗尾草和自身的种子萌发有抑制作用；对小麦、狗尾草和自身幼苗生长的化感作用具有浓度效应。在高浓度时小麦和自身幼苗停止生长，甚至死亡。

我们的结果与前人的研究相似，方芳等用加拿大一枝黄花茎部分和地下部分的浸提液处理辣椒、番茄、萝卜、长梗白菜和小麦等五种经济作物种子，发现对作物种子萌发率，在水浸提液浓度相同时，植株茎叶部分的抑制作用要大于地下部分，即加拿大一枝黄花地上部分的化感作用强于地下部分，同时处理作物幼苗时发现，加拿大一枝黄花水浸提液对作物种子苗高和胚根生长有低促进高抑制的现象。相同浓度的水浸提液，茎叶部分的抑制作用要大于地下部分^[62]。与黄洪武的研究结果不完全相同，黄洪武等研究了加拿大一枝黄花地上部分不同浓度水提取液小麦、玉米、大豆和棉花 4 种作物以及光头稗、千金子、荠菜、蔺草、硬草、大狗尾草、看麦娘、升马唐、日本看麦娘、鳢肠、反枝苋和大巢菜 12 种杂草的种子萌发及幼苗生长的化感作用。高浓度提取液均表现强烈的抑制作用，低浓度多表现一定的促进作用，对根长的抑制作用大于芽长，对植株鲜重的抑制作用最大。除大巢菜外，高浓度的加拿大一枝黄花水提取液对杂草的抑制作用明显强于作物^[73]。

梅玲笑等用根和根状茎浸提液处理白三叶种子，同一浓度下，根状茎提取物对种子萌发的抑制作用明显高于根系提取物，根状茎提取物能显著抑制种子萌发，而根系提取物对种子最终发芽率没有影响，仅能延缓种子萌发；加拿大一枝黄花根和根状茎浸提物对白三叶幼根的生长均有显著的抑制作用，抑制强度随着浓度的增加而增强，而且根状茎浸提物的作用明显大于根浸提物的作用。加拿大一枝黄花具有发达的根状茎，其提取物对其他物种所具有的强烈的化感抑制作用意味着根状茎对加拿大一枝黄花入侵竞争的意义^[64]。

加拿大一枝黄花叶、根和根状茎中都含有化感物质，都能影响本地植物的种子萌发和幼苗生长，在加拿大一枝黄花根区土壤中是否存在化感物质，其浓度大小能否影响本地植物种子萌发或幼苗生长。王开金等用根际土壤水提取液处理水稻、长梗白菜、番茄、莴苣和鳢肠种子，发现提取液对水稻、长梗白菜、番茄种子萌发有一定的影响，发芽率差异不

大，但发芽速度变慢；对莴苣和醴肠的抑制作用最为明显，发芽率显著下降，发芽时间严重滞后，说明加拿大一枝黄花根际土壤中含有化感物质，并能影响作物的萌发过程^[72]。周凯等用根际土壤水浸提液处理白菜和萝卜种子，发现较低浓度的根际土壤水浸提液处理对白菜、萝卜种子萌发的发芽指数和萌发率的抑制或促进与对照的差异均不显著，高浓度的处理对白菜和萝卜发芽指数和最终萌发率的抑制均达到显著水平；随着浓度的增加，根际土壤水浸提液对白菜和萝卜幼苗呈逐渐促进伸长生长的趋势，均达到了极显著水平，对根长的影响总体上表现为抑制根系伸长生长的趋势，也达到极显著水平；根际土壤水浸提液对白菜和萝卜根系脱氢酶和硝酸还原酶活性表现出明显的抑制，其中对硝酸还原酶活性的抑制趋势非常明显^[68]。加拿大一枝黄花分泌的化感作用能影响植物体内相关酶活性，进而影响植物生长。

在研究其他植物的化感作用时也发现地上部分的化感效应强于地下部分，如王大力等在研究三裂叶豚草时发现，三裂叶豚草茎叶水浸提液对大豆、玉米和小麦幼苗的抑制作用强于地下部分，但根区土壤浸液对作物种子萌发影响不明显，对幼苗生长影响也不明显。利用 GC、GC/MS 等手段对三裂叶豚草水浸提液进行分析，结果表明三裂叶豚草的茎叶水浸提液成分不仅比根水浸提液的成分复杂，而且含量高，与生物检测的实验结果相吻合，可能正是茎叶水浸提液化感作用明显的原因之一^[74]。

本研究表明，加拿大一枝黄花叶水提取物及其分离组分对本地植物物种胚根比胚芽具有更强的化感效应，低浓度提取液对不同受体植物或同一受体植物的不同部位表现出不尽相同的化感作用，或促进或抑制或无显著影响。从三种植物对低浓度提取物处理响应来看，加拿大一枝黄花自身萌发和幼苗生长受抑制最明显，杂草次之，小麦最弱，植物物种对加拿大一枝黄花化感作用响应的这一差异，可能是加拿大一枝黄花入侵导致入侵地植物群落变化的原因之一。

4 结论与展望

4.1 结论

加拿大一枝黄花存在化感作用，表现为叶提取物对三种供试对象(小麦、狗尾草和加拿大一枝黄花)种子萌发和幼苗生长存在抑制作用；三种供试对象的种子萌发和幼苗生长的各项指标对四种提取液浓度的敏感性不一，有些指标的敏感性较弱，而有些指标的敏感性较强；加拿大一枝黄花叶提取物正丁醇相的化感作用在生物检测中表现出最强的效应，说明化感物质主要存在于正丁醇萃取物中；加拿大一枝黄花叶和根提取物化感作用比较发现，根提取物对三种植物种子萌发无显著影响，对幼苗生长有浓度效应。

4.2 展望

本研究是在人工气候箱中以发芽率、胚芽长、胚根长等为依据，初步明确了加拿大一枝黄花存在化感作用，但针对加拿大一枝黄花化感作用与入侵机制的研究工作仅是初步的，还有许多工作问题有待于进一步深入研究：

(1)本实验研究加拿大一枝黄花叶水提取物对三种植物的化感作用是在人工控制条件下进行，而野外土壤环境比较复杂，化感作用会受到其他因素的影响，因此需要对野外土壤条件下加拿大一枝黄花对不同植物萌发和生长化感作用进行研究，并与实验室中的结果进行比较分析，才能更好的理解加拿大一枝黄花的化感作用。

(2)加拿大一枝黄花叶水提取物正丁醇萃取相中含有化感物质，但是针对化感物质分离、纯化、鉴定还没有进行。

(3)对于选择的供试植物只参阅文献，并且供试植物种类比较少，可能植物选择不恰当，不能准确反映加拿大一枝黄花的化感作用。

参考文献

1. Azim U. Mallik, Allelopathy: Advances, Challenges and Opportunities, Allelopathy in sustainable agriculture and forestry, 2008, 25-38
2. Molisch H, Der Einfluss einer pflanzl. auf die andere allelopathie, Fisher Jena, 1937, 13-20
3. Rice E L, Allelopathy (2nd edition), Academic Press, 1984, 1-501
4. Keane R.M., Crawley M.J., Exotic plant invasions and the enemy release hypothesis, Trends in Ecology and Evolution, 2002, 17(4), 164-170.
5. Susanne Wurst, Sander van Beersum, The impact of soil organism composition and activated carbon on grass-legume competition, Plant Soil, 2009, 314, 1-9
6. Sanon A., Andrianjaka Z.N., Prin Y., et al. Rhizosphere microbiota interferes with plant-plant interactions, Plant Soil, 2009, 321, 259-278
7. Ben Gooden, Kris French, Peter J. Turner, Invasion and management of a woody plant, *Lantana camara* L., alters vegetation diversity within wet sclerophyll forest in southeastern Australia, Forest Ecology and Management, 2009, 257, 960-967
8. Małgorzata Strzałek, Paweł Koperski, The *Stratiotes aloides* L. stand as a habitat in oxbow lake Bużysko, Aquatic Botany, 2009, 90, 1-6
9. 王强, 阮晓, 李兆慧, 潘存德, 植物自毒作用及针叶林自毒研究进展, 2007, 43(6): 134-142
10. 孔垂华, 植物化感作用研究中应注意的问题, 应用生态学报, 1996, 9(3): 332-336
11. 吕卫光, 张春兰, 彭宇, 外源苯丙烯酸抑制连作黄瓜生长的机制初探, 中国蔬菜, 2001, 3, 10-12.
12. 孔垂华, 胡飞, 骆世明, 胜红蓟对作物化感作用研究, 中国农业科学, 1997, 30(5): 95.
13. 刘小香, 谢龙莲, 桉树化感研究进展, 热带农业科学, 2004, 24(2): 54-61
14. 陈龙池, 汪思龙, 杉木根系分泌物化感作用研究, 生态学报, 2003, 23(2): 393-398
15. 李兆慧, 王强, 廖俊俊等, 天山云杉凋落物自毒物质分析与初步鉴定, 分析化学, 2009, 37(6): 882-892
16. 阎飞, 杨振明, 植物化感作用及其作用物的研究方法, 生态学报, 2000, 20(4): 692-696
17. 曾任森, 化感作用研究中的生物测定方法综述, 应用生态学报, 1999, 10(1): 123-126
18. David S. S., Chemistry and mechanisms of Allelopathic interactions, Agronomy Journal,

1996,88: 876-885.

19. Leather G R, Einhellig F, A. Bioassays in the study of allelopathy. In: Putnam A R, Tang C S (eds.), *The Science of Allelopathy*, John Wiley and Sons, New York, 1986, 133-145.
20. 万方浩, 郑小波, 郭建英, 重要农林外来入侵物种的生物学与控制, 北京: 科学出版社, 2005, 5-6
21. 王伯荪, 郝艳茹, 王昌伟, 生物入侵与入侵生态学, 中山大学学报(自然科学版), 2005 44(3): 75-77
22. Elton C S., *The Ecology of Invasion by Animals and Plants*, London: Chapman and Hall, 1958, 143-153
23. 王德辉, 积极引进有益物种防治有害物种入侵, 中国环境学会年会, 上海, 2008, 4, 25-28,
24. 徐海根, 王建民, 强胜, 王长永, 《生物多样性公约》热点研究: 外来物种入侵·生物安全·遗传资源, 科学出版社, 2004, 19
25. Baskin Y., Winners and losers in a changing world: global changes may promote invasion and alter the fate of invasive species, *Bioscience*, 1998, 48(10): 788-792
26. Pimental D, Lach L, Zuniga R, Environmental and economic costs of nonindigenous species in the United states, *Bioscience*, 2000, 50(1): 53-65
27. 丁建清, 解焱, 中国外来种入侵机制与对策, 《保护中国的生物多样性(二)》, 北京, 中国环境科学出版社, 1996, 107-128
28. 《中国植物志》74卷菊科(一), 北京, 科学出版社, 1985, 76
29. 吴海荣, 强胜, 加拿大一枝黄花生物生态学特性及防治, 杂草科学, 2005, 1, 52-56
30. 李振宇, 解焱, 中国外来入侵种, 北京, 中国林业出版社, 2002, 170
31. 董梅, 陆建忠, 张文驹等, 加拿大一枝黄花——一种正在迅速扩张的外来入侵植物, 植物分类学报, 2006, 44(1): 72-85
32. 郭琼霞, 虞赞, 黄可辉等, 外来入侵植物——“加拿大一枝黄花”传入中国的定量风险研究, 武夷科学, 2005, 21, 81-85
33. Baker H G., Weeds-native and introduced, *Journal of the California Horticultural Society*, 1962, 23, 97-104
34. Baker H G., Characteristics and modes of origin of weeds, In: Baker H. G. & Stebbins G. L. (eds), *The genetics of colonizing species*. London, Academic Press, 1965, 23, 147-72
35. Kolar C S, Lodge D M., Predicting invaders-response, *Trends in Ecology and Evolution*,

2001,16(10):546

36. Rejmánek M, Richardson D M., What attributes make some plant species more invasive? *Ecology*, 1996, 77(6):1655-1661
37. Sutherland S., What makes a weed a weed: life history traits of native and exotic plants in the USA, *Oecologia*, 2004, 141(1): 24-39
38. 于兴军, 于丹, 马克平, 不同生境条件下紫茎泽兰化感作用的变化与入侵力关系的研究, *植物生态学报*, 2004, 28(6): 773-780
39. 徐正浩, 王一平, 外来入侵植物成灾的机制及防除对策, *生态学杂志*, 2004, 23(03): 124-127
40. May R M, MacArthur R H., Niche overlap as a function of environment variability, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1972, 69(5):1109-1113
41. Post W M, Pimm S L., Community assembly and food web stability, *Mathematical Bioscience*, 1983, 64(2):169-182
42. Law R, Morton R D., Permanence and the assembly of ecological communities, *Ecology*, 1996, 77(3):762-775
43. Dukes J S., Species composition and diversity affect grassland susceptibility and response to invasion, *Ecological Applications*, 2002, 12(2):602-617
44. Knops J M, Griffin J R., Introduced and native plants of the Hasting reservation, central California: a comparison, *Conservation Biology*, 1995, 7(2), 115-123
45. Stonhlgren T J, Binkley D, Chong G W., Exotic plant species invade hot spots of native plant diversity, *Ecological Monographs*, 1999, 69(1):25-46
46. Symstad A J., A test of the effects of functional group richness and composition on grassland invisibility, *Ecology*, 2000, 81(1):99-109
47. Lu Z J, Ma K P., Scale dependent relationships between native plant diversity and the invasion of croftonweed (*Eupatorium adenophorum*) in southwest China, *Weed Science*, 2005, 53(5):600-604
48. Levne J M, D'Antonio C M., Elton revisited: a review of evidence linking diversity and invisibility, *Oikos*, 1999, 87, 15-26
49. Palmer M W, Maurer T. Does diversity beget diversity? A case study of crops and weeds,

Sciences,1997,8,235-240

50. Darwin,the Origin of Species by Means of Natural Selection,1859
51. Louda S M.,Effect of seed predation on plant regeneration: evidence from Pacific Basin Mediterranean scrub communities.– In:Arroyo M T K,Zedler.PH and Fox.MD (eds),Ecology and biogeography of Mediterranean ecosystems in Chile,California and Australia. Springer-Verlag,1995,311–344
52. Hierro J L,Callaway R M.,Allelopathy and exotic invasion,Plant and Soil,2003,256(1): 29-39
53. Hermes N.,Norfolk Island Ground-Dove,Threatened and Extinct Birds of Australia,RAOU Report 1992, 82. S.T. Garnett (ed.),Royal Australasian,71
54. Callaway R M,Ridenour W M., Novel weapons: invasive success and evolution of increased competitive ability,Frontiers in Ecology and Environment,2004,2 (8):436-443
55. Crawley M J., What makes a community invasible? Blackwell Scientific,London,1987, 429-453
56. Siemann E,Rogers W E.,Genetic differences in growth of an invasive tree species,Ecology Letters,2001,4(6): 514–18
57. Shea,K,ChessonP,Community ecology theory as a framework for biological invasions,Trends in Ecology and Evolution,2002,17(4):170–176
58. Mallick A U,Effects of Vaccinium myrtillus on spruce regeneration:testing the notion of coevolutionary significance of allelopathy,Journal of Chemstrical Ecology,2000,26(9): 2197–2209
59. Rice E L,Allelopathic growth stimulation, New York,In: The science of Allelopathy. Putnam A R,and Tang C H(Eds),1986,John Wiley and Sons, 23-42
60. 马森,加拿大一枝黄花的入侵生物学研究[博士学位论文],上海,复旦大学,2003,39-54
61. 郭水良,方芳,入侵植物加拿大一枝黄花对环境的生理适应性研究,植物生态学报,2003,27(1): 47-52
62. 方芳,郭水良,黄林兵,入侵杂草加拿大一枝黄花的化感作用,生态科学,2004,23(4): 331-335
63. 阮海根,王坚,陆慧明,加拿大一枝黄花生物学特性初步试验,上海交通大学学报(农业科学版),2004,22(2): 192-195
64. 梅玲笑,陈欣,唐建军,外来杂草加拿大一枝黄花对入侵地植物的化感效应,应用生

-
- 态学报, 2005, 16(12): 2379-2382
65. 沈荔花, 郭琼霞, 熊君等, 不同供氮水平下加拿大一枝黄花的化感作用与资源竞争分析, 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 900-904
66. 钱振官, 沈国辉, 柴晓玲等, 加拿大一枝黄花不同水浸液对作物种子发芽和生长的影响, 上海农业学报, 2005, 21(3): 32~35
67. 钱振官, 沈国辉, 柴晓玲等, 加拿大一枝黄花浸出液对杂草种子发芽的影响, 杂草科学, 2005, 2, 18-20
68. 周凯, 郭维明, 加拿大一枝黄花根系和根际土壤水浸液对萝卜和白菜种子萌发及幼苗生长的影响, 西北植物学报, 2005, 25(1): 174-178
69. Bradow JM, Connick WJ., Volatile seed germination inhibitors from plant residues. *Journal of Chemical Ecology*, 1990, 16(3): 645-666.
70. Harsh PB, Ramarao V, Simon G, et al., Allelopathy and exotic plant invasion: from molecules and genes to species interactions. *Science*, 2003, 301(5): 1377-1380.
71. Williamson M, *Biological invasions*, London, Chapman and Hall, 1996
72. 王开金, 陈列忠, 俞晓平, 加拿大一枝黄花化感作用的初步研究, 浙江农业学报, 2006, 18(5): 299~303,
73. 黄洪武, 李俊, 董立尧等, 加拿大一枝黄花对植物化感作用的研究, 南京农业大学学报 2009, 32(1): 48-54
74. 王大力, 祝心如, 三裂叶豚草的化感作用研究, 植物生态学报, 1996, 20(4): 330-337

简历

姓名：廖俊俊

性别：女

民族：汉族

籍贯：安徽省

出生年月：1983.8

政治面貌：中共预备党员

教育经历

2007. 9—至今 浙江大学 生命科学学院 硕士

2001. 9—2005. 7 安徽师范大学 生命科学学院 本科

工作经历

2005. 9—2007. 7 安徽省广德县广德中学 生物教师

攻读学位期间发表的论文和完成的工作

硕士论文研究期间作为课题组成员，参加了导师主持的国家自然科学基金项目“加拿大一枝黄花入侵过程的化学生态机制研究”(NO.30770334)的部分研究工作。

攻读硕士学位期间撰写和发表的论文如下：

李兆慧，王强，廖俊俊等，天山云杉凋落物自毒物质分析与初步鉴定，分析化学，2009，
37(6): 882-892