

· 专论 ·

外来入侵植物加拿大一枝黄花的研究进展 与资源化利用策略[△]

魏丹丹, 刘嘉艺, 徐明明, 赵晶晶, 赵明, 郭盛, 段金廛*

南京中医药大学/中药资源产业化与方剂创新药物国家地方联合工程中心/

江苏省中药资源产业化过程协同创新中心, 江苏 南京 210023

[摘要] 加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* Lour 现已入侵至包括中国在内的亚洲大部分国家、欧洲中西部国家, 以及澳大利亚和新西兰等地, 成为一种世界性入侵杂草, 严重影响各区域的生态结构、生态安全和环境。在中药资源化学理论的指导下, 基于中药及天然药物资源的多宜性原则, 在前人较为系统的研究基础上, 针对性地提出采用“化害为利”策略, 引导和促进这一外来入侵物种的转化利用, 将其归化为可造福于我国经济社会和生态健康发展的特色优势资源, 为促进人与自然和谐共生、丰富我国中药及天然药物资源种类做出应有贡献。

[关键词] 加拿大一枝黄花; 一枝黄花; 外来入侵植物; 资源化利用

[中图分类号] R282 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1673-4890(2023)09-1853-13

doi:10.13313/j.issn.1673-4890.20230810001

Research Progress and Resource Utilization Strategy of Invasive Alien Plant of *Solidago canadensis*

WEI Dan-dan, LIU Jia-yi, XU Ming-ming, ZHAO Jing-jing, ZHAO Ming, GUO Sheng, DUAN Jin-ao*

Nanjing University of Chinese Medicine/National and Local Collaborative Engineering Center of Chinese Medicinal

Resources Industrialization and Formulae Innovative Medicine, Jiangsu Collaborative Innovation Center of

Chinese Medicinal Resources Industrialization, Nanjing 210023, China

[Abstract] *Solidago canadensis* Lour, has now invaded most Asian countries (including China), many countries in central and western Europe, as well as Australia and New Zealand, becoming a globally invasive weed. It severely impacts the ecological structure, ecological security, and environmental stress in various regions. Guided by the theory of Chinese medicine resource chemistry and based on the principle of multifunctionality of Chinese medicine and natural resources, this paper built upon the systematic research of previous scholars and proposed a targeted strategy of "turning harm into benefit". This strategy aims to guide and promote the transformation and utilization of this invasive species, ultimately naturalizing it into a valuable and characteristic resource that can contribute to the economic, social, and ecological development of China. This effort seeks to promote harmonious coexistence between humans and nature and enrich the diversity of Chinese medicine and natural medicinal resources, making a significant contribution to these fields.

[Keywords] *Solidago canadensis* Lour; *Solidago*; invasive alien plant; resource utilization

加拿大一枝黄花 *Solidago canadensis* Lour 为菊科 (Compositae) 一枝黄花属 (*Solidago*) 多年生草本植物, 又称黄花草、黄莺、百根草或霸王花, 现已入侵至包括中国在内的亚洲大部分国家、欧洲中西部国家, 以及澳大利亚和新西兰等地, 成为一种

世界性入侵杂草, 严重影响各区域的生态结构、生态安全和环境。本文在中药资源化学理论指导下, 基于中药及天然药物资源的多宜性原则, 在前人较为系统的研究基础上, 针对性地提出采用“化害为利”策略, 引导和促进这一外来入侵物种有效利用、

[△] **[基金项目]** 国家中医药管理局中医药创新团队及人才支持计划项目 (ZYXCXTD-D-202005); 中央本级重大增减支项目 (2060302)

* **[通信作者]** 段金廛, 教授, 研究方向: 中药资源化学与资源循环利用; E-mail: dja@njucm.edu.cn

归化为可造福于我国经济社会和生态健康发展的特色优势资源。

1 加拿大一枝黄花生物学特性

加拿大一枝黄花植株高大,茎干粗壮,根系发达,种子体积小、数量大、易萌发。其主根属直根系,根状茎较发达,具有快速繁殖能力,横向生长在浅土层,外形似根但具有明显分节,节上生不定根,不定根顶端有顶芽,且节上叶腋具潜伏芽的鳞片状叶。茎干木质化直立生长,植株高可达2.0~3.5 m。叶片为互生单叶,叶柄较短且内侧具1个锥形腋芽,其中上部腋芽发育分枝为花序,中部和下部腋芽为休眠芽,叶片背面具有明显出自中部的3条主脉。叶缘具有较稀疏的锯齿,主脉片有微毛,上部叶片叶色为深绿色,触感较为光滑;中部和下部叶片长8~15 cm,宽1.2~3.5 cm,为椭圆或条状披针形,叶基部为楔形,向下延至叶柄处形成翼状。花序呈蝎尾圆锥状,为有限头状花序,直径3~4 mm的小花排列于花轴向上一侧,形成开展的花序。总苞片背部被短柔毛,有缘毛且先端尖,为覆瓦状排列,3~4层黄绿色筒状,最外层卵形苞片较短;内苞片背部具毛,线状披针形。具舌状黄色雄性缘花1层;具4~8朵顶端5齿裂的黄色两性盘花管状小花。基部具有10多根白色丝状冠毛;具1个位于花冠内方的雄蕊,雄蕊花丝顶端有2个条形花粉囊组成的鲜黄色花药;具1室子房下位的位于花中央的雌蕊1个。瘦果淡褐色具纵肋,为先端截形且稍扁的圆柱形,着生微齿,前段具有1~2层白色糙毛状冠毛,千粒质量0.070 03 g。

2 加拿大一枝黄花在我国的种群分布与扩散趋势

20世纪30年代,加拿大一枝黄花作为花卉引入我国,从上海开始扩散传播。由于其生长快、繁殖力强、适应性强,至80年代后期已遍及我国东部及中部部分地区,并呈快速扩张蔓延趋势。该植物种群扩散方式主要为细小质轻且具冠毛的瘦果随风飘扬,常成群生长于农田闲地、水渠草地、道路两旁、丘陵灌丛周边等,可以说无处不在,对入侵地区的自然生态结构和农业生态系统等构成严重危害,造成当地生物多样性减少和农业、畜牧业的巨大经济损失,被公认为一种入侵性很强的恶性杂草,已列入《中国外来入侵物种名单》和《重点管理外来入

侵物种名录》^[1-2]。

基因组单核苷酸多态性系统发育分析表明,加拿大一枝黄花进入我国有3条引种途径和多次引进事件。具体来说,一是从原产地美国直接进入中国,二是从美国经日本进入中国,三是从美国经欧洲进入中国^[3]。总之,多次引进事件、遗传瓶颈和潜在的人为传播是加拿大一枝黄花在中国的传播历史特征^[3]。

加拿大一枝黄花正在中国东部和中部扩散蔓延,入侵一些沿海滩涂草甸、丘陵及山川自然生态和农业经济生产区域,侵害抑制和快速取代本地植物物种群落。其株高、叶片数及生物量受土壤水分变化影响显著,对生长季节的降水量敏感^[4]。我国江苏、安徽、江西、湖南、浙江等省生态区域均为其高适生区,占全国高适生区面积的91.30%^[4]。降水量丰富的中部和南部地区为其潜在适生区,占我国国土面积的22.09%^[4]。随着全球气候变暖,加拿大一枝黄花的叶片面积显著增加,光合作用和获取生存繁殖资源的能力显著增强,入侵能力进一步提升。据调查,目前辽宁省南部、河南省西部和陕西省部分地区逐步由非适生区转化为适生区;中适生区的范围呈现向周边扩散的趋势;部分低适生区转变为中适生区,整体向中部和北部移动,这可能与温度和降水的变化有关^[4]。

3 加拿大一枝黄花入侵机制分析

研究表明,原产于北美温带地区的加拿大一枝黄花通过多倍体化向南扩展到亚热带地区,多倍化提高了加拿大一枝黄花种群的光合系统稳定性,增强了高温耐受性,从而驱动其在原产地(北美)的气候生态位分化,促进了多倍体的分布区向低纬度更高温度气候区扩张,且在全球变暖情况下可能进一步扩张^[5-7]。多次同质园试验和长期田间同质园试验结果表明,多倍化驱动了加拿大一枝黄花对温暖环境的预适应进化,奠定了其入侵中国的基础,入侵后的快速后适应性演化可能是加拿大一枝黄花成功入侵中国的关键^[7]。加拿大一枝黄花可以在有性繁殖过程中具有较高的产量和果实品质,种子发芽率较高,繁殖过程较快,侵袭性增强^[8]。加拿大一枝黄花具有超强的环境适应能力,通过以下方式在环境中快速扩张。

3.1 生长速度快,形成资源抢占优势

加拿大一枝黄花通过增加土壤微生物量和表土

中脲酶、碱性磷酸酶、转化酶、淀粉酶和葡萄糖苷酶活性,具有更快的有机质分解速率,提高了地上生产力和常设生物量中的养分积累,更快地从枯枝落叶中释放养分,提高土壤微生物活性,提高常量营养素循环率,提高的养分循环率可以通过对土壤过程的正反馈进一步增强侵入性^[9]。

3.2 种子数量多,形成有性繁殖优势

加拿大一枝黄花瘦果(种子)质轻、善飞行,通过风传播远距离扩散到大面积区域,每株植株的无数头状花序聚合为圆锥花序,授粉后产生2万多粒种子,在盛行风向上的扩散距离至少为2000 m,可持续传播1个多月,在整个冬季持续传播,能够在距源头500 m处以约2株/m²的植物密度形成新植物,自然条件下种子成苗率为50%~80%^[10]。

3.3 根茎辐射伸展,形成无性繁殖优势

加拿大一枝黄花每个植株的4~15条地下根茎呈辐射状向四周伸展生长,最长可超过1 m,每条根状茎呈分枝状,其顶端均分布芽,于第2年生长为独立的植株。

3.4 化感作用强,形成排他竞争优势

加拿大一枝黄花的化感作用使其易于形成厚单种群,即使邻近相似环境中其他的适应生存物种也难以进入共同生长,进一步提高自身的竞争力,从而促进其入侵成功^[11-13]。脂肪酸类、萜烯类、黄酮类、多酚类等化感物质不仅保护加拿大一枝黄花自身不受侵害,同时抑制其他本地植物的种子萌发、幼苗生长和丛枝菌根定植。种子萌发和幼苗生长通常被认为是植物种群生态扩张的关键过程,从加拿大一枝黄花入侵范围获得的根际土壤中总酚类物质、总黄酮类化合物和总皂苷的浓度高于原生范围^[13]。研究表明,加拿大一枝黄花入侵过程中能够显著影响土壤的理化性质,尤其对土壤铵态氮和硝态氮含量影响显著,间接抑制了本地植物的生长。

3.5 共生机制强,形成土壤微生物互作优势

原位土壤微生物对加拿大一枝黄花的招募潜力胜过本地植物,这种增强的共生机制支配着入侵植物在土壤微生物存在情况下的快速扩张^[14]。研究表明,该种群通过改变本地植物与细菌的互作关系塑造有利于自身的微生物群落,其定植的菌根能够显著降低外界胁迫生境条件对加拿大一枝黄花的危害^[15]。

此外,表型可塑性可能促成加拿大一枝黄花的快速传播。气候变异假说认为,高纬度地区的人口比低纬度地区的人口对温度有更高的可塑性;与降水变化较小的地区相比,降水波动较大地区的人口对水资源可用性具有更高的可塑性。在中国沿纬度(温度变化)和经度(降水变化)梯度变化的加拿大一枝黄花种群采样研究表明,种群间可塑性随温度变化显著的4个性状中,叶片长宽比可塑性与种群的纬度和温度季节性呈显著正相关;此外,根冠比和水分利用效率表明,种群间的可塑性对可用水量有显著影响,这2个性状的可塑性与经度呈显著负相关,与降水季节性呈正相关。观察到的可塑性地理变化表明,加拿大一枝黄花的表型可塑性可能在气候条件不同的地区迅速进化,这可能促成了该入侵物种的传播^[16]。总之,加拿大一枝黄花通过各种生物与非生物因素,使下一代在与相邻本土植物竞争时表现出更强的竞争优势,从而进一步扩张。

4 加拿大一枝黄花植物化学组成与功用分析

研究表明,加拿大一枝黄花植株含有挥发油类、黄酮类、酚酸类、二萜类、三萜及甾体类、苯丙素类等化学成分,具有抗细菌、抗真菌、抗炎、抗抑郁、治疗外伤、增强肾脏功能、消除疲劳、促进循环等较为多样的生物活性和潜在的资源价值^[17]。

4.1 化学组成

4.1.1 挥发油类成分 加拿大一枝黄花花序、叶片和根部中含有一定量的挥发性物质,其中以含氧倍半萜、倍半萜烯、含氧单萜和单萜烯为主。叶中挥发油类成分以香叶烯D(germacrene D, 19.51%)、乙酸龙脑酯(bornyl acetate, 7.14%)、 β -芳姜酮(β -turmerone, 6.89%)的含量较高;花中挥发油类成分以 α -蒎烯(α -pinene, 18.82%)、香叶烯D(8.44%)、乙酸龙脑酯(6.02%)、反式马鞭草烯醇(*trans*-verbenol, 4.37%)、柠檬烯(limonene, 4.14%)和 β -芳姜酮(4.07%)含量较高^[18]。

挥发性物质的组成与含量因产地、采样时间及采样部位不同而有所差异。波兰产加拿大一枝黄花精油以大牻牛儿烯D(23.8%)、 β -毕橙茄烯(20.5%)、大牻牛儿烯B(6.3%)为主。中国杭州地区产该物种花期的主成分为大牻牛儿烯D(34.6%)、柠檬烯(18.5%)、 α -蒎烯(9.1%)、 β -蒎烯(6.6%);植株生长期以大牻牛儿烯D(28.6%)、

α -蒎烯 (15.1%)、柠檬烯 (11.8%)、 β -侧柏烯 (6.6%)、 β -菲兰烯 (6.4%)、乙酰龙脑 (6.0%)、 α -松油醇 (4.8%)、 β -蒎烯 (4.7%)、 β -榄香烯 (3.5%)、 α -古芸烯 (2.6%)、 α -毕橙茄烯 (2.2%) 为主^[19-20]。加拿大一枝黄花叶与中国产野生分布的一枝黄花叶中挥发油的主要成分具有明显差别, 异大香叶烯在加拿大一枝黄花叶挥发油中含量达44.24%, 龙脑乙酸酯是加拿大一枝黄花叶挥发油的特有成分; 中国产野生一枝黄花叶挥发油中的主要成分为榄香烯, 且榄香烯、石竹烯的相对含量明显高于加拿大一枝黄花叶中的挥发油。

4.1.2 黄酮类成分 从加拿大一枝黄花植株中分离得到15个黄酮类物质, 主要为槲皮素及其苷、山柰酚及其糖苷、异鼠李素及其糖苷、槲皮素、3-甲氧基槲皮素、槲皮素-3-*O*- β -D-芸香糖苷、槲皮素-3-*O*- β -D-葡萄糖苷、槲皮素-3-*O*- α -L-鼠李糖苷、山柰酚、山柰酚-3-*O*- β -D-葡萄糖鼠李糖苷、山柰酚-3-*O*- β -D-葡萄糖苷、山柰酚-3-*O*- α -L-鼠李糖苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、异鼠李素、异鼠李素-3-*O*- β -D-葡萄糖鼠李糖苷、鼠李素-3-*O*- β -D-葡萄糖鼠李糖苷、芦丁、芸香苷等^[19-20]。采用氯化铝显色法测定加拿大一枝黄花乙醇提取物中的总黄酮含量, 结果表明, 乙酸乙酯萃取物中的总黄酮质量分数为202.45 mg·g⁻¹^[21]。以干质量计, 加拿大一枝黄花地上部位槲皮素-3-芸香糖苷 (quercetin-3-rutinoside) 质量分数为4.5 mg·g⁻¹^[22]。

4.1.3 酚酸类成分 加拿大一枝黄花地下部位的酚酸类成分含量约为地上部位的1/2, 主要为游离的羟基肉桂酰奎宁酸衍生物, 以新绿原酸 (5-*O*-caffeoylquinic) 和3,5-*O*-二咖啡酰剂奎宁酸 (3,5-*O*-dicaffeoylquinic acid) 为主, 质量分数约为6.0 mg·g⁻¹干质量^[22]。

4.1.4 二萜类成分 二萜类成分为加拿大一枝黄花特征性化学成分, 按其结构特征主要分为半日花烷型及克罗烷型二萜类成分。从加拿大一枝黄花根的乙醇提取物中分离获得8个半日花烷型二萜类成分, 分别是9,13,15,16-bisepoxy-labdane-7-ene-6,15-dione、15,16-epoxy-labdane-7,13-diene-6,15-dione、solidagenone、deoxysolidagenone、13-epi-9,13,15,16-bisepoxy-labdane-7-ene-6,15-dione、15,16-*E*-poxy-labdane-7,13-diene-6,16-dione、15-ethoxy-9,13,15,16-bisepoxy-labdane-7-ene-6-one 和 13-epi-15-ethoxy-9,13,15,16-bisepoxy-labdane-7-ene-6-one^[23]。从其根中

发现7个克罗烷型二萜类成分, 分别为克拉文酸 (kolavenic acid)、克拉文醇 (kolavenol)、6 β -巴豆酰克拉文酸 (6 β -tigloyloxykolavenic acid)、一枝黄花内酯 (solidago lactone)、13*E*-7 α -乙酰氧基克拉文酸 (13*E*-7 α -acetoxylkolavenic acid) 和 13*Z*-7 α -乙酰氧基克拉文酸 (13*Z*-7 α -acetoxylkolavenic acid); 在其花序中除获得6 β -巴豆酰克拉文酸外, 还发现了另一个克罗烷型二萜类成分6 β -当归酰拉文酸 (6 β -angeloyloxykolavenic acid); 从其地上部分乙酸乙酯提取物中分离得到2个克罗烷型二萜类化合物, 分别为 solidagocanin A 和 solidagocanin B; 从其全草中分离获得2个克罗烷型二萜类化合物, 分别是3 β ,4 α -二羟基-6 β -当归酰-13*Z*-烯-15,16-克罗烷内酯 (3 β ,4 α -diol-6 β -angeloxy-cleroda-13*Z*-en-15,16-oli-de) 和 3 β ,4 α -二羟基-6 β -巴豆酰-13*Z*-烯-15,16-克罗烷内酯 (3 β ,4 α -diol-6 β -tigloyoxy-cleroda-13*Z*-en-15,16-olide)^[15]。

4.1.5 三萜类及甾体类成分 从加拿大一枝黄花中分离得到三萜皂苷及甾体皂苷类成分, 分别为 α -香树脂醇乙酸酯 (α -amyrin acetate)、羽扇豆醇 (lupeol) 及其乙酸酯 (lupeol acetate)、熊果酸 (ursolic acid)、豆甾醇 (stigmasterol)、环阿尔廷醇 (cycloartanol) 及其棕榈酸脂 (cycloartanol palmitate)、cycloartenol、cycloartenyl palmitate、3 β -(3*R*-acetoxylhexadecanoyloxy)-lup-20(29)-ene、3 β -(3-ketohexadecanoyloxy)-lup-20(29)-ene、3 β -(3*R*-acetoxylhexadecanoyloxy)-29-nor-lupan-20-one、3 β -(3-hetohexadecanoyloxy)-29-nor-lupan-20-one(4)、 β -胡萝卜苷^[24]。此外, 从其全草乙醇提取物中还鉴定出 α -菠菜甾醇 (α -spinasterol)。

4.1.6 苯丙类成分 从加拿大一枝黄花地上部位的80%乙醇提取物中分离得到4个苯丙素类化合物, 分别是 visanol、8-dehydroxymethylvisanol、9-aldehyd-evibsanol 和 9-*O*-[3-*O*-acetyl- β -D-glucopyranosyl]-4-hydroxy-cinnamic acid。

4.1.7 其他类成分 另据报道, 从加拿大一枝黄花的乙酸乙酯、正丁醇萃取部位鉴定出苯甲酸、对羟基苯甲酸、3,5-二羟基苯甲酸甲酯等有机酸类成分及其衍生物; 从其全草的乙醇提取物中分离鉴定出3-甲酰吲哚 (3-formylindole)^[19-20]。此外, 还从中分离出*D*-甘露醇和2'-羟基-4',6'-*O*- β -D-二吡喃葡萄糖基-苯丁酮 (2'-hydroxy-4',6'-di-*O*- β -D-glucopyranyl phenyl-butanone)。

4.2 功用分析

加拿大一枝黄花进入我国已有70多年的历史,鲜见将其作为药用的报道。然而,在其自然资源较为丰富的国家和地区,其全草均可入药。例如,加拿大传统医学认为,其具有散热去湿、消积解毒的功效,可用于治疗慢性肾炎、膀胱炎、尿结石、糖尿病、风湿病等。研究表明,其挥发油和黄酮类成分具有抗氧化、抗炎、抑菌、杀虫等生物活性;其中半日花烷型二萜类成分solidagenone具有杀寄生虫、抗真菌、抗炎等生物活性。

另据报道,从加拿大一枝黄花的甲基乙基酮提取物中得到的羽扇豆烷型三萜类物质,具有抑制DNA聚合酶 β 裂解酶活性^[24]。对其植株地上部分的乙醚和乙酸乙酯提取部位进行活性测试,发现其具有强烈的抗氧化活性,可以抑制脂质过氧化^[24]。其含有的苯丙素类成分具有明确的调血脂活性,构效关系研究推测其存在C-8位上的羟甲基基团,可能会削弱该类化合物的血脂调节活性。

随着研究方法的不断丰富及多种交叉学科知识的运用,对加拿大一枝黄花化学成分的生物活性及对生态群落结构的影响研究将更加深入,主要集中在抗菌、杀虫、化感作用等方面。

5 基于“化害为利”策略的资源化利用展望

5.1 借鉴其不同分布区域传统医药经验、近缘植物功用和现代生物活性认知,多途径开发医药类健康产品

加拿大一枝黄花在欧洲已有700余年的药用历史,用于治疗尿结石、风湿、慢性肾炎、膀胱炎、糖尿病等疾病,并已列入《欧洲药典》^[22]。在南美洲的传统医药中,加拿大一枝黄花被广泛用作抗炎利尿剂并用于治疗胃肠疾病,在智利民间用于治疗疼痛和炎症。伊朗的巴林基本制药公司已将加拿大一枝黄花的提取物制备为药品^[25]。依据其资源性化学成分的生物活性并借鉴其近缘植物(如智利一枝黄花和中国分布的一枝黄花等)的传统医药功能,采用现代医药产品创制的科学路径和方法,将其开发为医药产品造福人类健康。

5.1.1 止咳平喘功能医药产品开发 采用热碱提取法从加拿大一枝黄花的花中分离获得一种相对分子质量为11.2 kDa的多酚-多糖-蛋白质复合物,成

分分析表明,该复合物由多糖(43%)、蛋白质(27%)、酚类物质(12%)、糖醛酸(10%)和无机物质(8%)组成。多糖部分富含中性糖(81%),单糖分析显示其存在5种主要单糖成分,分别为鼠李糖(23%)、阿拉伯糖(20%)、糖醛酸(19%)、半乳糖(17%)和葡萄糖(14%),并且复合体中存在鼠李糖半乳糖醛酸和阿拉伯半乳糖。对复合物的3种剂量进行镇咳活性试验,发现咳嗽次数以剂量依赖性方式减少,中、高剂量(50、75 mg·kg⁻¹,以体质量计)的效果优于低剂量(25 mg·kg⁻¹,以体质量计)15%、20%;与最强镇咳剂可待因相比,高剂量组的镇咳效果下降了10%;高剂量组显著降低了特定气道阻力值,其效果比沙丁胺醇(经典抗哮喘药物的代表)的保持时间更长^[26]。

此外,加拿大一枝黄花叶所含的柠檬烯具有抗肿瘤、抗菌、祛痰、止咳、平喘等功能,可以直接作为医药原料用于缓解和治疗咳嗽、痰喘等呼吸系统症状。南美一枝黄花*S. arguta* Ait. 根的二氯甲烷提取物在质量浓度为100 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时对结核分枝杆菌*Mycobacterium tuberculosis*的抑制率可达100%^[27]。

5.1.2 杀寄生虫医药产品开发 利什曼病是由利什曼属原动物寄生虫引起的一种被忽视的热带病,先行治疗手段存在效性差、毒性大、费用高昂、治疗周期长及不良反应明显等问题,亟待寻找高效、价格低廉的替代治疗途径。研究表明,加拿大一枝黄花中代表性的半日花烷型二萜类成分solidagenone不仅可以直接抑制原虫前鞭毛体增殖、促使前鞭毛体形态和超微结构变化、改变细胞周期和细胞体积、增加细胞表面磷脂基丝氨酸暴露于细胞表面、诱导质膜完整性损失、增加活性氧水平、诱导线粒体完整性丧失、增加脂滴和自噬小体的数量,还可以降低原虫感染巨噬细胞的百分比和每个巨噬细胞无鞭毛体数量,降低肿瘤坏死因子- α (TNF- α),增加活性白细胞介素-12 (IL-12) p70、活性氧(ROS)和一氧化氮(NO)水平,通过激活IL-12p70/ROS/NO通路诱导亚马逊利什曼原虫的前鞭毛体细胞内无鞭毛体发生凋亡^[28]。此外,其能够减少亚马逊利什曼原虫感染部位的病变大小和寄生虫负荷,增加巨噬细胞浸润和中性粒细胞迁移,在抗氧化、氧化、抗炎反应[减少TNF- α 、 γ -干扰素(IFN- γ),增加IL-6、IL-17的产生],诱导精氨酸酶、诱导型一氧化氮合酶(iNOS)、核转录因子- κB

(NF- κ B)、核因子红细胞2相关因子2 (Nrf2) 和胶原沉积 (Ⅲ型) 方面发挥平衡作用, 有利于伤口愈合并加速损伤部位组织修复^[29]。Solidagenone 对小鼠巨噬细胞、人髓系白血病单核细胞 (THP-1) 和绵羊红细胞具有较低细胞毒性, 计算机预测其具有良好类药性潜力及较高的口服生物利用度, 利用肠道吸收^[28]。

5.1.3 保护肝肾类医药产品开发 研究表明, 扑热息痛可导致模型组小鼠丙氨酸氨基转移酶 (ALT)、天冬氨酸氨基转移酶 (AST)、碱性磷酸酶 (ALP)、尿酸和血尿素氮 (BUN) 水平显著升高 ($P<0.01$), 而加拿大一枝黄花治疗组的水平则显著降低。此外, 接受预防性加拿大一枝黄花治疗组抑制了炎症细胞浸润、充血和空泡变性等高强度病变, 这些病变与扑热息痛模型组相比明显减少 ($P<0.05$), 结果表明, 加拿大一枝黄花提取物对扑热息痛的肝肾毒性具有显著的减轻作用^[25]。

5.1.4 抗抑郁医药产品开发 研究表明, 细菌脂多糖 (LPS) 诱导的抑郁症小鼠皮层中髓过氧化物酶 (MPO) 活性增加, IL-6 和 TNF- α 含量增加; 给予 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 solidagenone 可防止模型组小鼠在旷场实验中的行为学改变, 给予 1、10、 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 solidagenone 均能够减少模型组动物悬尾实验中的不动时间, 同时伴随皮层中 MPO 活性降低、IL-6 和 TNF- α 水平下降, 以及过氧化氢酶活性的增加, 表明 solidagenone 具有类似抗抑郁药的潜力, 这可能与治疗神经炎症过程中的有益作用及在中枢神经系统的抗氧化能力有关^[30]。

5.1.5 抗过敏性气道炎症医药产品开发 采用卵清蛋白刺激巨噬细胞和淋巴细胞造成体外致敏模型, 经 solidagenone 处理后治疗组巨噬细胞培养上清液中亚硝酸盐、TNF- α 和 IL- 1β 的浓度, 以及促炎介质的基因表达均降低, 但不影响巨噬细胞活性; 此外, solidagenone 可显著降低 T 细胞增殖, 以及 IFN- γ 和 IL-2 的分泌。采用卵清蛋白刺激小鼠造成过敏性气道炎症模型, 使用 solidagenone 治疗的小鼠支气管肺泡灌洗液中辅助型 T 细胞 2 (Th2) 细胞因子浓度和炎性细胞计数 (尤其是嗜酸性粒细胞) 减少; 肺组织病理组织学分析显示, solidagenone 给药组细胞浸润减少、黏液高分泌。总之, 在卵清蛋白诱导的气道炎症模型中, solidagenone 在体外和体内都表现出抗炎活性, 表明其作为变态反应性超敏反

应的抗炎剂具有良好的应用前景^[31]。

5.1.6 抗皮肤炎症医药产品开发 分别采用巴豆油、花生四烯酸和苯酚制备小鼠耳肿胀动物模型, 治疗组给予 0.1、0.5、 1.0 mg/耳朵 的 solidagenone 可以显著抑制上述 3 种造模剂导致的小鼠耳肿胀 ($P<0.001$)。Solidagenone 治疗组 MPO、N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶 (NAG) 活性, IL-6 和 NO 含量显著下降 ($P<0.001$); 组织病理学数据表明, 3 种剂量的 solidagenone 给药均降低了肿胀厚度、淋巴细胞浸润和血管扩张等皮肤炎症指标。分子对接结果表明, solidagenone 通过氢键方式结合并抑制环氧合酶-1 (COX-1) 和前列腺素-E(2)-9-还原酶 [prostaglandin-E(2)-9-reductase] 活性。上述结果表明, solidagenone 作为治疗皮肤炎症性疾病的化合物, 具有作为局部抗炎剂的潜力^[32]。同时, 以 solidagenone 为先导化合物合成了一系列具有抑制 Toll 样受体 (TLR) 配体诱导的巨噬细胞炎症反应活性衍生物。结果表明, solidagenone 衍生物可在转录水平上抑制 TLR4 配体脂多糖诱导的 iNOS、COX-2 的蛋白表达和细胞因子的产生 (TNF- α 、IL-6 和 IL-12); 15,17-二溴-solidagenone 还能抑制 TLR2 和 TLR3 配体介导的炎症反应, 其抗炎作用机制可能与抑制 NF- κ B 和 p38 信号转导有关, 进一步对该化合物与 TLR4 进行分子对接和分子动力学研究, 结果表明, 衍生物 15,17-二溴-solidagenone 可用于设计新的抗炎药^[33]。

5.1.7 抗肿瘤医药产品开发 加拿大一枝黄花叶部挥发油的抗肿瘤活性高于花部挥发油, 对 3 种人肿瘤细胞株 MDA-MB 231、A375 和 HCT116 的半数抑制浓度 (IC_{50}) 分别为 29.33、12.63、 $18.03\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 表明加拿大一枝黄花挥发油是细胞毒性化合物的良好来源, 鼓励进一步研究其体内效应和安全性^[18]。智利一枝黄花根的二氯甲烷提取物外显示出良好的抗肿瘤细胞增殖活性, 尤其对胶质瘤细胞系^[34]。Solidagenone 对乳腺癌细胞株 MCF-7、肾癌细胞株 786-0、前列腺癌细胞株 PC-3 显示出潜在体外抗增殖活性。根据成药“五原则” (相对分子质量 <500 , 氢键供体数 <5 , 氢键受体数 <10 , 油水分配系数 <5 , 可旋转的键数量不超过 10 个), solidagenone 符合药物生物利用度的理论理化标准, 从理论研究来看, 观察到的生物学效应可能与分子、核受体间的相互作用有关, 且 solidagenone 可

能是一种酶抑制剂^[34]。肌动蛋白14 (kinesin-14) 高速纺锤体早期激活的类似肌动蛋白1/肌动蛋白家族成员C1 (HSET/KIFC1) 是参与细胞中心体聚集的关键蛋白, 靶向HSET化合物可能以靶向方式潜在抑制肿瘤细胞增殖。研究表明, 来自一枝黄花属的克罗烷型二萜类成分克拉文酸及其类似物能够抑制含有大量中心体的MDA-MB-231人乳腺癌细胞中的中心体聚集。这些天然化合物可用作HSET功能研究的生物探针, 6 β -tigloyloxy克拉文酸可作为开发癌症治疗新药的候选化合物^[35]。

5.1.8 治疗腱鞘炎医药产品开发 在巴西维拉维拉大学进行的一项安慰剂对照双盲临床药理学研究中, 8名志愿者每天2次在手臂皮肤上涂抹含有5%智利一枝黄花乙醇提取液的凝胶膏, 持续21 d。志愿者的一只胳膊被用作安慰剂组, 另一只胳膊被用作实验组。统计数据表明, 与只服用安慰剂的人相比, 实验组的手臂疼痛感显著降低, 证实了外用智利一枝黄花治疗腕、手屈、伸肌腱炎的有效性^[36]。

此外, 加拿大一枝黄花具有降压作用, 可促进回肠、小肠蠕动; 其变种花序中的成分能够影响泌尿系统、增加钙盐排出, 具有利尿作用^[37]。

5.2 依据其不同部位所含化学组成及结构特征, 开发精细化工原料及功能性健康产品

加拿大一枝黄花植物资源地上部位生物产量十分丰富, 含有各种具有生物活性的资源性化学成分类型, 可从中提取资源性物质开发精细化工原料, 用于医药产品、保健型化妆品、日用健康品等。

5.2.1 用于提取环醇类和糖类原料 环醇类和糖类是天然存在于植物材料中的化学物质, 因其有多种药用价值而受到人们广泛关注, 其中最重要的作用是抗糖尿病、抗氧化和抗肿瘤。由于具有独特的理化性质和生物活性, 其在食品工业中被用作甜味剂、防腐剂、质地修饰剂、发酵底物、调味剂和着色剂等。研究表明, 以不同浓度的乙醇-水系统为提取溶剂, 采用浸渍法、索氏萃取法、加压液相萃取法、超声波辅助提取法和超临界流体提取法从加拿大一枝黄花中提取环醇类及糖类成分, 结果获得D-甘露糖 (D-mannose)、D-果糖 (D-fructose)、D-葡萄糖 (D-glucose)、D-甘露醇 (D-mannitol)、D-松二糖 (D-turanose)、蔗糖 (sucrose) 6种糖类成分和D-松醇 (D-pinitol)、D-手性肌醇 (D-chiro-inositol)、鲨肌醇 (scyllo-inositol)、肌醇 (myo-inositol) 4种环

醇类成分。其中, α -呋喃-D-果糖、 β -呋喃-D-果糖、 β -吡喃-D-果糖、 α -吡喃-D-葡萄糖、 β -吡喃-D-葡萄糖和蔗糖是提取物中最主要的化学成分; 与70%乙醇和96%乙醇相比较, 纯水提取效率更高, 加压液相萃取 (50 °C、10 MPa、30 min) 获得的环醇类和糖类效率最高, 总糖类、总环醇类的质量分数分别为 (33.04 \pm 1.15) (2.43 \pm 0.05) mg·g⁻¹ (以干质量计); 每种溶剂和提取技术提取的D-松醇含量差异不大^[38]。

5.2.2 用于开发含挥发油类日化产品 加拿大一枝黄花叶所含的柠檬烯具有抗肿瘤、抗菌、祛痰、止咳、平喘等功能。加拿大一枝黄花资源丰富, 在旺盛的生长季割取地上部分通过简单的水蒸汽蒸馏提取可获得具有抗菌活性的加拿大一枝黄花精油, 其可以作为精细化工原料用于制备高档香薰、香氛, 开发具有抗菌止痒活性的洗手液、沐浴露、护手霜、洗衣液、香皂等天然日化产品, 不仅可以替代人工合成香精, 还可以减少甚至避免化学防腐剂的添加。

5.2.3 用于开发含黄酮类日化产品 研究人员采用1,1-二苯基苦味基苯肼 (DPPH) 自由基消除实验研究加拿大一枝黄花中的黄酮类成分抗氧化和自由基清除活性, 及其构效关系, 结果证明加拿大一枝黄花中的黄酮类成分具有较强的抗氧化和自由基清除活性, 且其活性强弱与分子结构中C-3位羟基的取代与否相关, 取代基越大活性越低^[19,39]。可对加拿大一枝黄花水蒸气蒸馏提取精油后的渣滓进行乙醇加热回流提取, 经过简单的聚酰胺、大孔吸附树脂洗脱富集其中的黄酮类成分, 将其作为抗氧化、抗衰老的日化原料。

5.3 利用其化感作用, 设计和开发植物生长调节功能性产品

加拿大一枝黄花地上部位和地下器官富含酚酸类、黄酮类、萜烯类等化感物质, 对植物生长具有促进或抑制功能, 可用于开发植物生长调节剂。

5.3.1 加拿大一枝黄花中的咖啡酸甲酯和咖啡酸乙酯具有植物生长调节潜力 利用模式植物拟南芥进行研究, 结果表明, 不同浓度的咖啡酸甲酯和咖啡酸乙酯对拟南芥种子萌发和幼苗生长有显著的抑制作用, 尤其对拟南芥表达的根生长、幼苗细胞分裂基因 *cdc2a* 和细胞增殖标记基因 *pcna1* 显示出显著的抑制作用; 显著负面调节主根生长基因 *AtRRE1* 的表达。据此, 推断咖啡酸甲酯和咖啡酸乙酯通过相关

基因的表达调节拟南芥幼苗的生长和发育。

5.3.2 加拿大一枝黄花中的芦丁-铍络合物具有植物生长调节潜力 加拿大一枝黄花叶片中富含等酚类物质,在叶提取物中加入氨水溶液至pH 8.0可形成新的极性酚-铍络合物,其对各种植物的生长具有选择性作用,即在质量浓度为 $20 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,这些物质会刺激大豆幼苗和菊花插条中侧根的形成;当提取物中类黄酮质量浓度为 $25 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,可以抑制萝卜幼苗的根系生长,所获得的含氮极性复合物在极低浓度下展示了调节植物生长过程的能力^[40]。

5.3.3 加拿大一枝黄花提取物对植物生长的抑制作用 加拿大一枝黄花的茎、叶水提取物对小麦的种子萌发和幼苗生长具有强烈的抑制作用,叶提取物对红三叶的萌发和生长有显著的抑制作用。加拿大一枝黄花提取物对结缕草的发芽率、发芽势、活力指数、根长和株高有明显的抑制作用,且随着浓度的增加而增加, $50 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 地上部分的水提物显著提高了结缕草幼苗的丙二醛(MDA)浓度和过氧化物酶(POD)活性; $50 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 根提取物对POD活性没有显著影响,但在质量浓度 $150 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时有显著影响,显著抑制除过氧化氢酶(CAT)活性外的所有指标。研究表明, $20 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 加拿大一枝黄花叶提取物抑制了莴苣地上和地下部分的生长,以及对光和土壤养分的竞争,当存在铅、铜等重金属污染时这种抑制作用尤为明显^[41]。同时,加拿大一枝黄花的凋落物提取物可以显著抑制莴苣和万寿菊的发芽和幼苗生长,其抑制作用随浓度的增加而增加;凋落物和新鲜叶片显著抑制了莴苣的种子发芽率、植株高度和地上生物量的积累。

5.3.4 加拿大一枝黄花提取物对植物生长的促进作用 加拿大一枝黄花的茎和根提取物对萝卜种子的发芽没有显著影响,而根茎提取物对萝卜的种子发芽和幼苗生长有促进作用。质量浓度为 $10 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的一枝黄花叶提取物显著促进了莴苣根系的生长、对光的竞争、土壤养分有效性、叶片光合面积和生长竞争力^[41]。加拿大一枝黄花的提取物在低浓度下对紫花苜蓿幼苗的生长有轻微的促进作用。与分解6个月后相比,未分解的加拿大一枝黄花凋落物对生菜种子发芽指数、幼苗高度、根长、叶大小、叶面积和幼苗生物量(鲜质量)的影响大于凋落物,这表明加拿大一枝黄花的未分解凋落物具有更明显的化感作用,主要原因为凋落物中大部分化感物质会

在分解过程中释放;由于促进植物生长的激素效应,凋落物的分解可能会在低强度胁迫下诱导活性氧的产生;生菜幼苗对加拿大一枝黄花凋落物形成的化感物质的适应性随着时间的推移逐渐增强。

5.4 基于其优良的抑菌杀虫活性,开发生物农药类产品

农业病原微生物和昆虫通过病媒传播的疾病影响人类健康,并通过破坏作物和储存的农产品造成重大经济损失。加拿大一枝黄花富含抑菌杀虫活性物质,可用于开发生物农药类产品。

5.4.1 具有抑制农业病原细菌活性 野外调查表明,加拿大一枝黄花植株无病原菌等感染症状,表明其自身具有强大的抗病原微生物的性能。抗菌活性测试结果表明,加拿大一枝黄花精油对革兰阳性细菌及革兰阴性细菌均有抑制效果,其所含的大香叶烯是其主要的抗菌活性成分,对金黄色葡萄球菌、青枯雷尔氏菌、马铃薯环腐病菌、胡萝卜软腐欧文氏菌、欧氏杆菌属细菌具有一定的抑菌活性,对大肠埃希氏菌和枯草芽孢杆菌具有显著的抑制作用;从同属植物巨大一枝黄花*S. gigantea* Ait根的提取物中分离得到的甾烷二萜类成分对枯草芽孢杆菌、燕麦镰刀菌具有抑制活性^[42]。可深入挖掘其潜力,揭示其抗性机制,将其开发创制为安全有效的生物农药,用于防治番茄青枯病、白菜软腐病、桃根腐病等农业生产过程中的常见病害。

5.4.2 具有抑制农业病原真菌活性 加拿大一枝黄花挥发油对农业病原真菌,如白色念珠菌具有一定的抗真菌活性,对水稻纹枯病和黄瓜立枯病的抑制作用最强,对番茄灰霉病显示出中等抑制作用,对番茄早疫病、菜豆炭疽病和葡萄炭疽病的抑制作用很弱^[42]。通过揭示其产生功效的物质基础和作用机制,可以开发出用于防治水稻纹枯病、黄瓜立枯病、番茄灰霉病等的防治生物药剂。*Solidagenone*具有抗真菌活性,可作为控制采后果实植物致病真菌的替代药物。

5.4.3 具有抑制农业病虫害活性 加拿大一枝黄花挥发油对赤拟谷盗、玉米象、绿豆象3种储粮害虫有明显的熏蒸和触杀活性,并对绿豆象有较强的种群抑制作用^[43]。研究证实其挥发油及黄酮类物质具有显著的杀虫活性,可以抑制3种储粮害虫。可将其制备为生物农药,用于采收后粮食贮藏。

昆虫特有的生长调节剂是理想的生物农药,对

环境和人类是安全的。利用蚊子保幼激素受体转化的酵母双杂交系统作为报告系统,从加拿大一枝黄花近缘植物晚熟一枝黄花 *S. serotina* Aiton. 根中分离得到的克罗烷型二萜类成分 kingidiol 具有保幼激素拮抗活性,对蚊幼虫 24 h 的半数致死剂量 (LD_{50}) 为 $85 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。Kingidiol 通过干扰耐烯虫酯的保幼激素受体与 CYCLE 或 FISC 的复合物影响其作用,而复合物的形成是介导保幼激素作用所必需的。总之,kingidiol 的局部应用导致耐烯虫酯的靶基因表达减少,并导致蚊子卵巢卵泡发育迟缓,可以将其开发成一种新型安全有效的农药^[44]。

5.4.4 具有杀软体动物活性 加拿大一枝黄花地上部分乙醇提取物的石油醚部位表现出强烈的杀软体动物活性,表现为暴露 48 h 后,蜗牛的一系列生化指标,如可溶性糖含量、蛋白质、MDA、乙酰胆碱酯酶 (AChE) 活性、ALT 和 AST 显著降低或升高。组织学评估结果表明,加拿大一枝黄花提取物破坏了蜗牛的肝胰腺组织结构^[45]。

此外,加拿大一枝黄花提取物具有灭螺活性。气相色谱-质谱法 (GC-MS) 鉴定了其中可能有助于杀软体动物功效的 15 种化合物,可将其制备为杀软体动物生物农药^[37]。

5.5 基于其优良的生产习性及营养价值,开发饲用化动物健康产品

加拿大一枝黄花植株生物量丰富,富含蛋白质类、氨基酸类、核苷类、糖类营养物质,可将其作为优质牧草。同时,其富含的挥发油类、黄酮类、酚酸类等抗菌消炎成分可代替抗生素作为饲料添加剂。

5.5.1 可替代草粉作为部分草食性动物的常规饲料 调研发现,近年来浙江省奉化莼湖镇农技站利用加拿大一枝黄花作为饲料喂养湖羊,其增质量效果优于常规喂养。此外,加拿大一枝黄花还可作为青储或干储,以及作为饲料调节剂。在证明加拿大一枝黄花不含有害成分后,自 2008 年起浙江省农业科学院的蒋永清教授与周巷镇的陈世芳将加拿大一枝黄花加工成草粉颗粒饲料饲养长毛兔。饲养结果表明,加拿大一枝黄花的草粉完全可以替代苜蓿草粉。饲养 1 只兔子至少可以节省 20 元。浙江省慈溪市路湾养兔场和浙江省农业科学院畜牧兽医研究所采用加拿大一枝黄花作为獭兔的饲料,结果表明,加拿大一枝黄花对獭兔的生产性能、屠宰性能、

皮肉品质和消化系统发育影响均不显著。

5.5.2 可替代抗生素作为部分动物的饲料添加剂 由于加拿大一枝黄花对多种病原微生物有抑制作用和抗氧化抗炎活性,采用加拿大一枝黄花煎剂和提取物防治动物疾病有一定的疗效。据报道,浙江嘉善地区采用加拿大一枝黄花作为饲料添加剂喂猪,有效地控制了猪的高热病,并在周边地区推广应用。而安徽则用加拿大一枝黄花提取物防治鱼的车轮虫病,取得了很好的效果。用加拿大一枝黄花作为煎剂、洗剂防治动物的各种寄生虫和皮肤病,在防治动物疾病过程中发挥了很好的作用。加拿大一枝黄花根、茎、叶 3 个部位的黄酮粗提取物对治疗鲫鱼的车轮虫病有较好的效果^[46]。

5.6 基于其优良的生物及环境抗性,开发水体治理产品

富营养化和污染不仅严重破坏了水域生态景观和水体生态环境,降低了水体的使用功能,导致鱼类等生物大量中毒与死亡,造成水产养殖业损失。而且,富营养化的水臭味大,颜色深,细菌、亚硝酸盐、硝酸盐等污染物多,人畜食用后会引发多种传染病和寄生虫病,还能诱发食道癌、胃癌等,严重危害人畜健康。富营养化和污染还会影响航运、加速湖泊衰亡等。加拿大一枝黄花提取物可以抑制有害藻类生长,其茎秆制备的炭基菌剂材料可用于污水处理。

5.6.1 抑制有害藻生长,用于水体富营养化治理 有害藻类短时间大量增殖造成水体富营养化,造成水体环境和生态的严重破坏。研究表明,加拿大一枝黄花不同部位的水浸液均对铜绿微囊藻和斜生栅藻生长有抑制作用,对蛋白核小球藻、水华鱼腥藻和羊角月牙藻生长的影响则呈明显特异性,可用于特定有害藻类导致的水体富营养化防治^[47]。

5.6.2 制备生物炭,用于污水处理 加拿大一枝黄花衍生炭能够实现水中 Cr (VI) 的有效去除,不仅在工业废水处理中具有潜在应用价值,也能够实现对入侵植物的有效控制利用^[48]。采用 $2 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 加拿大一枝黄花茎秆制备生物炭固定 2 种分离自某农药废水处理厂好氧池的阴沟肠杆菌 [BD17-BD19 (1:1)], 在吡啶初始质量浓度为 $200 \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、pH 为 7.0、温度为 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 、盐度为 3.0% 的条件下,固定化菌剂在 36 h 内的吡啶去除率最高,可达 91.70%^[49]。通过该技术,实现了农药废水中吡啶类

污染物完全矿化。

5.7 基于其优良的抗逆性和适应能力，开发改良生态环境产品

5.7.1 作为减少水土流失的生物屏障 加拿大一枝黄花在自然环境中具有强大的生命力，生长周期长，抗逆性极强，还具有耐高、低温的特性。选用加拿大一枝黄花作草种，引入荒山秃岭生长繁殖，必将发挥很好的保持水土作用^[50]。

5.7.2 促进盐碱地土壤微生物固氮 土壤生物固氮作用是土壤氮素循环的关键环节，固氮微生物是驱动土壤生物固氮的引擎。研究表明，酸性和碱性土壤中微生物氮固定率在加拿大一枝黄花种植后分别从 $1.09 \text{ mg}\cdot\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 增加到 $2.16 \text{ mg}\cdot\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和从 $0.02 \text{ mg}\cdot\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 到 $2.73 \text{ mg}\cdot\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，表明加拿大一枝黄花的存在可显著刺激盐碱地土壤微生物异养硝化速率、影响矿化-固定转换以提供硝基氮来支持植物和微生物的氮需求^[51]。

5.7.3 作为铅、镉等金属污染的生物蓄积剂和植物修复剂 研究表明，面对土壤中铅、镉胁迫，加拿大一枝黄花的根可上调编码分子伴侣（主要是热休克蛋白）和诱导抗氧化剂的基因，有助于细胞清除活性氧；其叶片增加与次生代谢相关基因的表达（主要由细胞色素P450组成）同时减慢光合作用功能，为生存保存能量。总之，加拿大一枝黄花采用多管齐下方式积极应对重金属胁迫，同时管理活性氧积累和代谢调整以优化能量代谢，在被上述元素严重污染的土壤中用作重金属的生物蓄积剂和植物稳定剂^[52-53]。

5.8 基于其优良丰富的纤维资源，开发材料类产品

加拿大一枝黄花地上部位生物量丰富，其茎秆粗壮，富含韧皮纤维和木纤维，可作为棉、麻等纺织材料的替代品用于制备高档织物；同时，可以作为木材的代用品用于制备板材、工业造纸原料、生物炭原料等。

5.8.1 工业造纸原料 加拿大一枝黄花的茎秆含有丰富的纤维素、半纤维素和木质素，利用该特点可将其用于工业造纸，还可作筷子或者快餐盒等的原料。研究表明，加拿大一枝黄花的综纤维素质量分数达81.86%，高于小黑杨（76.69%）和典型阔叶树木（74%左右）等木材，是较好的制浆原料，应用碱法蒸煮、碱-蒽醌法蒸煮等工艺可实现加拿大一

枝黄花造纸^[54]。

5.8.2 制备复合生物炭原料 制备复合生物炭吸附化感物质，缓解入侵植物负性化感作用。研究表明，通过高温热解可合成加拿大一枝黄花衍生的生物炭及其与羟基磷灰石的复合生物炭，分批吸附和盆栽实验表明两者对山柰酚-3-O-β-D-葡萄糖苷（来自加拿大一枝黄花的化感物质）均具有去除效果，且复合生物炭对山柰酚-3-O-β-D-葡萄糖苷具有更强的亲和力，其吸附容量是单一生物炭的6倍。此外，将2种生物炭添加到土壤中可以有效减轻来自加拿大一枝黄花的化感作用，提高甚至恢复被入侵化感作用抑制的番茄发芽率和/或幼苗生长^[55]。

5.8.3 制备生物基肥料 将加拿大一枝黄花经超临界二氧化碳萃取后的生物质残渣采用生物吸附法进行生物质增值处理，制得新型环保肥料，并在实验室、体内外和田间条件下对肥料的性能和控释性能进行评价，体外试验表明，在生物基载体上施用微量营养素（铜、锰、锌）的生物利用率较高，为60%~80%，硫酸盐微量元素的利用率为100%，表明该模式下微量营养素为缓慢释放模式^[56]。发芽试验表明，常规硫酸盐肥料具有一定的药害作用，而施用新型肥料具有增产和生物强化作用。田间试验表明，与常规微肥（无机盐）相比，生物基肥料可使植株生物量中铜、锰、锌质量分数分别提高2.6%、88.6%和50.6%，从植物和动物营养的角度来看这一点非常重要。田间试验的微量元素吸收计算结果表明，与硫酸盐相比，生物基肥料对肥料微量元素的吸收分别高4.04%（锌）、1.47%（铜）和20.63%（锰）^[56]。

5.9 基于生物资源多宜性原则，不断拓展其多元化利用途径

加拿大一枝黄花植株花序众多、生物质丰富，可作为观赏植物、蜜源植物、肥料等。

5.9.1 作为观赏植物 加拿大一枝黄花是一种很好的鲜切花植物，用作插花的背景材料，既娇艳靓丽，又充满野趣；作为观赏植物，很受消费者欢迎^[57]。此外，由于茎秆粗壮、生长迅速，加拿大一枝黄花可以作为切花菊的优质砧木及园艺造型基质。

5.9.2 作为秋季蜜源植物 一枝黄花属植物通常在夏秋之季开花，是一种秋季食物来源，通常养蜂人认为其对蜜蜂的健康和冬季生存必不可少^[58]。一枝黄花属植物蜂蜜中富含黄酮类成分，含量较高且具

健康价值的资源性化学成分有白杨素(chrysin)、乔松素(pinocembrin)和高良姜素(galangin)等^[59]。

5.9.3 食用菌栽培原料 加拿大一枝黄花植株高大,茎秆粗壮,营养丰富,植株粉碎后是一种培养食用菌的良好基质材料,可大大降低成本,提高经济效益^[54]。

此外,加拿大一枝黄花茎秆除了可作为造纸、筷子或快餐盒的原料,还可作为复合板材的原料;花序富含花青素、胡萝卜素等色素,可作为化工原料供医药和化妆品行业应用;花粉富含营养性成分,以及甾醇类、酰胺类活性成分,可借鉴松花粉、油菜花粉的保健功效开发大健康产品;种子富含油脂类及蛋白质类成分,可作为化工原料及饲料原料。

世界上没有“废物”,只有没被合理利用的资源。中医药宝库就是在不断吸收和包容中华各民族,以及世界优秀传统医术和特色健康物质资源的基础上发展壮大,成为世界共享的人类文明成果。因此,希望通过“化害为利”策略的提出与实践^[60],进一步挖掘外来入侵植物加拿大一枝黄花的多途径利用价值^[61],为促进人与自然是和谐共生、丰富我国中药及天然药物资源种类做出应有贡献。

参考文献

- [1] 张中信,张小平,刘慧君,等.加拿大一枝黄花和一枝黄花化感作用比较研究[J].武汉植物学研究,2010,28(2):191-198.
- [2] 李涛.毛果一枝黄花化学成分和药理活性研究[D].济南:济南大学,2013.
- [3] LIN H, CHEN L, LI J. Multiple introductions and distinct genetic groups of Canada goldenrod (*Solidago canadensis*) in China revealed by genomic single nucleotide polymorphisms[J]. Plants (Basel), 2023, 12(9): 1734.
- [4] 潘铭心,朱思睿,张震.外来入侵植物加拿大一枝黄花在中国的适生区预测[J].西安文理学院学报(自然科学版),2022,25(1):90-96.
- [5] LU H, XUE L, CHENG J, et al. Polyploidization-driven differentiation of freezing tolerance in *Solidago canadensis*[J]. Plant Cell Environ, 2020, 43(6): 1394-1403.
- [6] 田忠赛,冯冬艳,陈世国,等.快速叶绿素荧光(O-J-I-P)揭示了多倍化增强加拿大一枝黄花光合系统稳定性赋予其耐热性机制[C]//南京大学医药生物技术国家重点实验室.首届植物科学前沿学术大会摘要集(二).南京:南京大学医药生物技术国家重点实验室,2022:116.
- [7] 程继亮.多倍化驱动加拿大一枝黄花成功入侵的机制研究[D].南京:南京农业大学,2020.
- [8] WU M, LIU H, LI B, et al. Integrated analysis of mRNA-seq and miRNA-seq reveals the advantage of polyploid *Solidago canadensis* in sexual reproduction[J]. BMC Plant Biol, 2021, 21(1): 462.
- [9] YE X Q, YAN Y N, WU M, et al. High capacity of nutrient accumulation by invasive *Solidago canadensis* in a coastal grassland[J]. Front Plant Sci, 2019, 10: 575.
- [10] ZHANG Z, WEN G, BU D, et al. Long-distance wind dispersal drives population range expansion of *Solidago canadensis*[J]. Plants (Basel), 2022, 11: 2734.
- [11] 杨红珍.加拿大一枝黄花:是“美人”,也是“恶魔”[N].北京科技报,2021-12-06(20).
- [12] 和显含.入侵植物加拿大一枝黄花根系和凋落叶输入对土壤微生物群落的影响及其反馈效应[D].镇江:江苏大学,2022.
- [13] KATO-NOGUCHI H, KATO M. Allelopathy and allelochemicals of *Solidago canadensis* L. and *S. altissima* L. for their naturalization[J]. Plants (Basel), 2022, 11(23): 3235.
- [14] SUN Z K, HE W M. Evidence for enhanced mutualism hypothesis: *Solidago canadensis* plants from regular soils perform better [J]. PLoS ONE, 2010, 5(11): e15418.
- [15] 金樑.外来入侵种加拿大一枝黄花的菌根生态学研究[D].上海:复旦大学,2005.
- [16] LI J, DU L, GUAN W, et al. Latitudinal and longitudinal clines of phenotypic plasticity in the invasive herb *Solidago canadensis* in China [J]. Oecologia, 2016, 182(3): 755-764.
- [17] 王开金,陈列忠,俞晓平,等.一枝黄花属植物的化学成分和生物活性研究进展[J].科技通报,2007,23(1): 75-82.
- [18] NKUIMI W J G, QUASSINTI L, GUDZINSKAS Z, et al. Chemical composition and antiproliferative effect of essential oils of four solidago species (*S. canadensis*, *S. gigantea*, *S. virgaurea* and *S. xiederederi*) [J]. Chem Biodivers, 2020, 17(11): e2000685.
- [19] 马腾,唐文照,刘少超,等.加拿大一枝黄花的化学成分与药理活性研究进展[J].齐鲁药事,2010,29(5): 295-298.
- [20] 吴娜,梅艳,石艳春,等.入侵植物加拿大一枝黄花的化学成分及其生物活性综述[J].江苏农业科学,2016,44(5):5-9.
- [21] 沈校,王振兴,陈丽琼,等.加拿大一枝黄花提取物的抗氧化活性研究[J].广西植物,2018,38(3):299-305.

- [22] WOZNIAK D, SLUSARCZYK S, DOMARADZKI K, et al. Comparison of polyphenol profile and antimutagenic and antioxidant activities in two species used as source of solidaginis herba-goldenrod[J]. Chem Biodivers, 2018, 15(4): e1800023.
- [23] WANGENSTEEN H, PHAN T T, RISE F, et al. New labdane diterpenes from *Solidago canadensis* [J]. Nat Prod Res, 2012, 26(14): 1348-1354.
- [24] CHATURVEDULA V S, ZHOU B N, GAO Z, et al. New lupane triterpenoids from *Solidago canadensis* that inhibit the lyase activity of DNA polymerase beta [J]. Bioorg Med Chem, 2004, 12(23): 6271-6275.
- [25] RAHIMI O, ASADI L N, SALEHI A, et al. Hepatorenal protective effects of hydroalcoholic extract of *Solidago canadensis* L. against paracetamol-induced toxicity in mice[J]. J Toxicol, 2022, 2022: 9091605.
- [26] SUTOVAKA M, CAPEK P, KOCMALOVA M, et al. Characterization and biological activity of *Solidago canadensis* complex [J]. Int J Biol Macromol, 2013, 52: 192-197.
- [27] CANTRELL C L, FISCHER N H, URBATSCH L, et al. Antimycobacterial crude plant extracts from south, central, and north America[J]. Phytomedicine, 1998, 5(2): 137-145.
- [28] BORTOLETI B T S, GONCALVES M D, TOMIOTTOPELLISSIER F, et al. Solidagenone acts on promastigotes of *L. amazonensis* by inducing apoptosis-like processes on intracellular amastigotes by IL-12p70/ROS/NO pathway activation [J]. Phytomedicine, 2021, 85: 153536.
- [29] BORTOLETI B T S, DETONI M B, GONCALVES M D, et al. Solidagenone *in vivo* leishmanicidal activity acting in tissue repair response, and immunomodulatory capacity in *Leishmania amazonensis* [J]. Chem Biol Interact, 2022, 361: 109969.
- [30] LOCATELI G, OLIVEIRA A B, MIORANDO D, et al. Antidepressant-like effects of solidagenone on mice with bacterial lipopolysaccharide (LPS)-induced depression[J]. Behav Brain Res, 2020, 395: 112863.
- [31] VASCONCELOS J F, SANTOS I P, OLIVEIRA T B, et al. The protective effect of solidagenone from *Solidago chilensis* Meyen in a mouse model of airway inflammation [J]. Basic Clin Pharma Tox, 2022, 130(1): 44-55.
- [32] VALVERDE S S, SANTOS B C S, OLIVEIRA T B, et al. Solidagenone from *Solidago chilensis* Meyen inhibits skin inflammation in experimental models[J]. Basic Clin Pharm Tox, 2021, 128(1): 91-102.
- [33] CUADRADO I, AMESTY A, CEDRON J C, et al. Semisynthesis and inhibitory effects of solidagenone derivatives on TLR-mediated inflammatory responses[J]. Molecules, 2018, 23(12): 3197.
- [34] DENISE B G, BARBARA Z, GELVANI L, et al. Antiproliferative potential of solidagenone isolated of *Solidago chilensis* [J]. Revista Brasileira De Farmacognosia, 2018, 28(6): 703-709.
- [35] KURISAWA N, YUKAWA M, KOSHINO H, et al. Kolavenic acid analog restores growth in HSET-overproducing fission yeast cells and multipolar mitosis in MDA-MB-231 human cells [J]. Bioorg Med Chem, 2020, 28(1): 115154.
- [36] DA S A G, MACHADO E R, ALMEIDA L M, et al. A clinical trial with Brazilian arnica (*Solidago chilensis* Meyen) glycolic extract in the treatment of tendonitis of flexor and extensor tendons of wrist and hand [J]. Phytother Res, 2015, 29(6): 864-869.
- [37] 胡超宇. 加拿大一枝黄花的灭螺作用及其化学组分研究[D]. 南昌:江西师范大学,2017.
- [38] RATIU I A, ALSUOD H, LIGOR M, et al. Complex investigation of extraction techniques applied for cyclitols and sugars isolation from different species of *Solidago* genus [J]. Electrophoresis, 2018, 39(15): 1966-1974.
- [39] 王开金,陈列忠,李宁,等. 加拿大一枝黄花黄酮类成分及抗氧化与自由基清除活性的研究[J]. 中国药学杂志,2006,41(7):493-497.
- [40] LIKHANOV A, OLIINYK M, PASHKEVYCH N, et al. The role of flavonoids in invasion strategy of *Solidago canadensis* L [J]. Plants (Basel), 2021, 10(8): 1748.
- [41] WEI M, WANG S, WU B, et al. Heavy metal pollution improves allelopathic effects of Canada goldenrod on lettuce germination [J]. Plant Biol (Stuttg), 2020, 22(5): 832-838.
- [42] 王开金,李宁,陈列忠,等. 加拿大一枝黄花精油的化学成分及其抗菌活性[J]. 植物资源与环境学报,2006, 15(1):34-36.
- [43] 邓业成,李瑞钰,杨林林,等. 加拿大一枝黄花和南美螞蟥菊精油的杀虫活性及化学成分[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2014,32(2):122-129.
- [44] LEE S H, HYUN W, FANG Y, et al. Identification of plant compounds that disrupt the insect juvenile hormone receptor complex [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112(6): 1733-1738.
- [45] SHEN X, WANG Z, LIU L, et al. Molluscicidal

- activity of *Solidago canadensis* L. extracts on the snail *Pomacea canaliculata* Lam[J]. Pestic Biochem Physiol, 2018, 149: 104-112.
- [46] 千霞芳,宋学宏,张红英,等. 加拿大一枝黄花提取物对异育银鲫车轮虫的杀灭活性[J]. 安徽农业大学学报, 2007, 34(4): 515-519.
- [47] 黄莹莹. 加拿大一枝黄花控制富营养化水体有害藻类技术的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [48] 匡开月,刘畅,俞志敏,等. 加拿大一枝黄花衍生炭对Cr(VI)吸附性能研究[J]. 生物学杂志, 2022, 39(4): 55-60, 71.
- [49] NIE Z, YAN B, XU Y, et al. Characterization of pyridine biodegradation by two *Enterobacter* sp. strains immobilized on *Solidago canadensis* L. stem derived biochar[J]. J Hazard Mater, 2021, 414: 125577.
- [50] 王贵春,侯应霞,吴山. 外来入侵植物加拿大一枝黄花的利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(36): 22378-22379.
- [51] WANG W, ZHU Q, DAI S, et al. Effects of *Solidago canadensis* L. on mineralization-immobilization turnover enhance its nitrogen competitiveness and invasiveness[J]. Sci Total Environ, 2023, 882: 163641.
- [52] BIELECKA A, KROLAK E. *Solidago canadensis* as a bioaccumulator and phytoremediator of Pb and Zn [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2019, 26 (36) : 36942-36951.
- [53] XU C, LI Z, WANG J. Temporal and tissue-specific transcriptome analyses reveal mechanistic insights into the *Solidago canadensis* response to cadmium contamination[J]. Chemosphere, 2022, 292: 133501.
- [54] 黄莹,陈欢,李丽珍,等. 加拿大一枝黄花生物资源利用的研究进展[J]. 广州化工, 2014, 42(8): 17-19.
- [55] XU W, HUANG X, YUAN J, et al. The potential for synthesized invasive plant biochar with hydroxyapatite to mitigate allelopathy of *Solidago canadensis* [J]. Ecol Appl, 2023, e2833.
- [56] IZYDORCZYK G, SIENKIEWICZ C U, BASLADYNSKA S, et al. New environmentally friendly bio-based micronutrient fertilizer by biosorption: From laboratory studies to the field[J]. Sci Total Environ, 2020, 710: 136061.
- [57] 陆慧明,阮海根,汤根妹,等. 加拿大一枝黄花利害分析[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2006, 24(4): 403-404.
- [58] ZISKA L H, PETTIS J S, EDWARDS J, et al. Rising atmospheric CO₂ is reducing the protein concentration of a floral pollen source essential for North American bees[J]. Proc Biol Sci, 2016, 283: 20160414.
- [59] KECKES S, GASIC U, VELICKOVIC T C, et al. The determination of phenolic profiles of *Serbian unifloral* honeys using ultra-high-performance liquid chromatography/high resolution accurate mass spectrometry[J]. Food Chem, 2013, 138: 32-40.
- [60] 段金廌. 中药资源化学-理论基础与资源循环利用[M]. 北京:科学出版社, 2015: 41.
- [61] 严辉,郭盛,段金廌,等. 江苏地区外来入侵植物及其资源化利用现状与应对策略[J]. 中药现代中药, 2014, 16(12): 961-970, 984.

(收稿日期: 2023-08-10 编辑: 戴玮)