

青蒿化感物质的分离与结构鉴定

邓思娟¹, 李春远¹, 陈 实¹, 何雪香², 谷文祥¹, 高志梅¹

(1 华南农业大学 理学院, 广东 广州 510642; 2 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520)

摘要:对青蒿 *Artemisia annua* 地上部分的乙醇提取物进行了系统分离和活性测定。按照溶剂极性不同, 将乙醇提取物分成3个部分, 并分别进行了生物活性测试, 结果表明: 石油醚(A)、石油醚-乙酸乙酯混合液[$V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=1:1$](B)和乙酸乙酯(C)提取部分对萝卜、菜心、白菜和水稻的种子发芽和幼苗生长均具有较强的抑制作用, 并呈现出低促高抑的现象, 抑制活性顺序为 $C>B>A$ 。在活性追踪下, 从C部分分离出6个化合物, 并确定了其中5个化合物的结构, 分别是青蒿酸、青蒿素B、香豆素、棕榈酸、豆甾醇。

关键词:青蒿; 化感作用; 化感物质; 分离; 鉴定

中图分类号: Q948.122.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2008)03-0042-05

Allelochemicals Isolation and Structure Identification of *Artemisia annua*

DENG Si-juan¹, LI Chun-yuan¹, CHEN Shi¹, HE Xue-xiang², GU Wen-xiang¹, GAO Zhi-mei¹

(1 College of Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 Guangdong Forest Research Institute, Guangzhou 510520, China)

Abstract: The allelopathic effects of *Artemisia annua* were investigated. The experimental results indicated that the petroleum extracts (A), petroleum/ethyl acetate [$V:V=1:1$] extracts (B) and ethyl acetate extracts (C) of *Artemisia annua* remarkably inhibited the germination and seedling growth of *Raphanus sativus*, *Brassica parachinensis*, *Brassica perkinensis* and *Oryza sativa*. The inhibitory effects increased with their concentration. The phenomenon that the germination and seedling growth were inhibited at higher concentration while stimulated at lower concentration was also observed. And the order of inhibitions activity is $C>B>A$. Under the guide of bioassay, six compounds were isolated. Five of them were identified as artemisinic acid, artemisinin B, coumarin, palmitic acid and stigmasterol by using IR, ¹HNMR, ¹³CNMR and MS.

Key words: *Artemisia annua*; allelopathy; allelochemicals; isolation; identification

化感作用(allelopathy)由 Molisch 于 1937 年首先提出^[1], 并将其定义为所有类型植物(包括微生物)之间的生化互作, 其中, 这种相互作用既包括自然抑制的作用, 又包括促进的作用。化感现象中, 植物通过分泌化感化合物影响其他植物、微生物或自身的生长和繁殖。近 10 年来, 广泛地筛选化感作用的植物, 分离鉴定活性物质, 通过化感物质对植物的生长发育和代谢的影响, 直接用于杂草防除或模拟活性物质结构, 合成天然除草剂, 已成为杂草防除的

研究热点^[2-5]。

青蒿 *Artemisia annua* 在我国被用作抗疟中药已有 2 000 多年的历史。青蒿素是抗疟有效单体, 工业上常将提取完青蒿素的其他部分弃去, 造成资源浪费。有关青蒿素的理化性质、测定方法、提取分离、药理研究、合成方法等都引起了世界范围内广泛的兴趣, 并取得了不少研究成果, 同时对于青蒿化感作用的研究也作了一些工作, 青蒿的根、茎、叶和生长过青蒿的土壤水提取液对种子发芽和幼苗生长有显著

收稿日期: 2007-12-14

作者简介: 邓思娟(1984—), 女, 硕士研究生; 通讯作者: 谷文祥(1954—), 男, 教授, E-mail: wenxu@scau.edu.cn

基金项目: 广东省科技计划项目(2004B50201018)

的抑制作用,并表现出低促高抑现象^[6-12]。为了促进青蒿中其他生物活性成分的适当应用,本文系统地研究了青蒿地上部分乙醇提取物的植物毒性作用,旨在弄清青蒿化感活性成分的种类与结构,了解青蒿中的次生化合物对植物生长的影响,寻找青蒿中可能作为除草剂的先导化合物,为青蒿的综合应用提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试植物青蒿自种,采样时为盛花期。受体植物萝卜 *Raphanus sativa*、菜心 *Brassica parachinensis* L. cv. Apr. Sep. OilGreen 及白菜 *Brassica perkinensis* Lour. Rupr. cv. Maye 购于广州市种子分公司门市部;水稻 *Oryza sativa* 由华南农业大学农学院提供。

1.2 试验方法

1.2.1 青蒿提取物的制备 取粉碎后的青蒿粉末 5 kg,用 $\varphi=95\%$ 乙醇 10 kg 冷浸萃取 6 d,重复 3 次,合并萃取液,减压回收乙醇,得浸膏 525 g。取浸膏 400 g 拌硅胶 400 g,装入 1 000 mL 玻砂烧结漏斗中,分别用石油醚、石油醚-乙酸乙酯($V_{\text{石油醚}}:V_{\text{乙酸乙酯}}=1:1$)和乙酸乙酯各 2 100 mL(3×700 mL)洗脱,洗脱液合并浓缩,按极性从低到高分 3 部分(简称青蒿乙醇提取物 A、B、C)进行生测。

1.2.2 青蒿乙醇提取物对 4 种受体植物种子萌发、幼苗生长的影响试验 按文献[13]方法测定青蒿乙醇提取物 A、B、C 对 4 种受体植物的化感作用。每个

处理设 3 个重复,对照用清水。试验过程中,适当补充清水,使滤纸保持湿润。2 d 后调查种子的萌发情况,5 d 后测定幼苗的苗高和根长,将相应处理与对照进行比较。

1.2.3 生物活性化合物的分离与鉴定 根据生测结果发现,青蒿乙醇提取物 C 具有较强的生物活性,为此对其进行了分离。称取 50 g 浸膏,用乙酸乙酯溶解,加入 40 g 硅胶粉,减压蒸去溶剂,上柱,梯度洗脱,获得 6 个化合物,通过测定波谱学数据、物理常数,并与文献[14-15]对照,对获得的化合物进行了鉴定。

1.2.4 数据分析方法 种子萌发率、根长和苗高数据均取同一处理的平均值,试验结果用 DPSwin 软件进行邓肯氏分析。

2 结果与分析

2.1 青蒿乙醇提取物 A、B、C 的生物活性

2.1.1 青蒿乙醇提取物 A、B、C 对种子萌发率的影响 青蒿乙醇提取物 A、B、C 对不同受体植物种子萌发均具有不同程度的化感作用(表 1~3)。青蒿乙醇提取物 A 在质量浓度为 0.100、0.010、0.005 $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,对种子萌发均表现出抑制作用,且在 0.100 $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,其抑制作用最大。青蒿乙醇提取物 A 在质量浓度为 0.002 $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,对菜心和白菜种子萌发有轻微的促进作用。青蒿乙醇提取物 B、C 在质量浓度为 0.100 和 0.010 $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时对种子萌发具有明显的抑制作用。在相同质量浓度下,对 4 种受试植物的抑制活性顺序为: C > B > A。

表 1 青蒿乙醇提取物 A 对植物种子萌发率的影响¹⁾

Tab. 1 Effect of A of alcohol extracts of *Artemisia annua* on seed germination rate

$\rho_A/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	萝卜 <i>Raphanus sativa</i>	菜心 <i>Brassica parachinensis</i>	白菜 <i>Brassica perkinensis</i>	水稻 <i>Oryza sativa</i>
0.100	36.67 ± 8.39b	22.22 ± 5.88c	35.56 ± 4.01d	34.44 ± 2.94d
0.010	41.11 ± 7.78b	51.11 ± 11.76b	66.67 ± 1.92c	42.22 ± 7.29cd
0.005	43.33 ± 12.02b	86.67 ± 3.85a	81.11 ± 2.94b	56.67 ± 14.53c
0.002	84.44 ± 5.56a	96.67 ± 1.92a	97.79 ± 6.94a	74.44 ± 2.94b
对照 control	92.22 ± 4.84a	94.44 ± 5.56a	95.25 ± 1.65a	85.56 ± 5.88a

1) 表中数据为 3 个重复的平均数 ± 标准误;同列数据后面字母相同者表示邓肯氏检验($P=0.05$)差异不显著

表 2 青蒿乙醇提取物 B 对植物种子萌发率的影响¹⁾

Tab. 2 Effect of B of alcohol extracts of *Artemisia annua* on seed germination rate

$\rho_B/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	萝卜 <i>Raphanus sativa</i>	菜心 <i>Brassica parachinensis</i>	白菜 <i>Brassica perkinensis</i>	水稻 <i>Oryza sativa</i>
0.100	35.56 ± 6.19b	24.44 ± 2.94d	36.67 ± 1.92c	33.56 ± 4.01d
0.010	40.00 ± 5.09b	57.78 ± 9.88c	65.56 ± 4.44b	41.67 ± 3.85cd
0.005	42.44 ± 4.84b	76.67 ± 1.92b	70.00 ± 1.92b	51.11 ± 2.94c
0.002	83.33 ± 1.92a	87.78 ± 2.94ab	77.98 ± 2.42b	74.44 ± 1.91b
对照 control	95.56 ± 2.94a	97.78 ± 1.11a	98.89 ± 1.11a	87.78 ± 2.94a

1) 表中数据为 3 个重复的平均数 ± 标准误;同列数据后面字母相同者表示邓肯氏检验($P=0.05$)差异不显著

表3 青蒿乙醇提取物C对植物种子萌发率的影响

Tab.3 Effect of C of alcohol extracts of *Artemisia annua* on seed germination rate

/%

$\rho_C/(g \cdot mL^{-1})$	萝卜 <i>Raphanus sativa</i>	菜心 <i>Brassica parachinensis</i>	白菜 <i>Brassica perkinensis</i>	水稻 <i>Oryza sativa</i>
0.100	11.11 ± 6.19b	5.56 ± 2.94d	4.44 ± 1.11d	1.32 ± 1.11b
0.010	18.89 ± 4.01b	8.89 ± 2.94d	15.56 ± 2.22d	3.43 ± 1.93b
0.005	21.11 ± 4.44b	58.89 ± 11.28c	47.78 ± 12.81c	4.14 ± 2.94b
0.002	22.22 ± 1.11b	78.89 ± 4.01b	77.78 ± 2.22b	12.00 ± 1.22b
对照 control	94.44 ± 14.70a	97.78 ± 1.11a	96.67 ± 1.92a	86.67 ± 1.92a

1) 表中数据为3个重复的平均数±标准误;同列数据后面字母相同者表示邓肯氏检验($P=0.05$)差异不显著

2.1.2 青蒿乙醇提取物A、B、C对植物根长、苗高的影响 青蒿乙醇提取物A对不同受体植物根长和苗高具有不同程度的影响(表4)。在质量浓度为0.100、0.010、0.005和0.002 $g \cdot mL^{-1}$ 时,对4种受体植物均有化感作用。其抑制作用在质量浓度0.100 $g \cdot mL^{-1}$ 下表现得最为明显,抑制作用外观表现为幼苗生长不直立、匍匐在滤纸上、扭曲等。而在质量浓度0.002 $g \cdot mL^{-1}$ 时对菜心幼苗生长有促进

作用,具有化感作用的典型特征,即低促高抑现象。

青蒿乙醇提取物B和C对4种受体植物根长和苗高具有不同程度的影响(表5、6),在4个质量浓度下,对各受体植物根长和苗高均具有抑制作用,且抑制作用均达到显著水平。其中,C的质量浓度为0.100和0.010 $g \cdot mL^{-1}$ 时,对菜心和白菜的根长生长完全抑制;对于4种受体植物,均随着乙醇提取物B、C质量浓度的增大,抑制作用增强。

表4 青蒿乙醇提取物A对植物根长/苗高的影响¹⁾Tab.4 Effect of A of alcohol extracts of *Artemisia annua* on root and seedling growth

cm

$\rho_A/(g \cdot mL^{-1})$	萝卜 <i>Raphanus sativa</i>		菜心 <i>Brassica parachinensis</i>		白菜 <i>Brassica perkinensis</i>		水稻 <i>Oryza sativa</i>	
	根长	苗高	根长	苗高	根长	苗高	根长	苗高
	root length	shoot high	root length	shoot high	root length	shoot high	root length	shoot high
0.100	0.11 ± 0.06e	1.12 ± 0.14c	0.00 ± 0.00	0.30 ± 0.08d	0.00 ± 0.00d	0.32 ± 0.05d	1.35 ± 0.09c	0.56 ± 0.15c
0.010	1.47 ± 0.13d	1.18 ± 0.15c	1.05 ± 0.09b	0.54 ± 0.08d	1.19 ± 0.12c	0.55 ± 0.08c	1.59 ± 0.17c	0.83 ± 0.18c
0.005	2.81 ± 0.30c	1.79 ± 0.17b	2.00 ± 0.18a	2.00 ± 0.07c	2.15 ± 0.13b	0.64 ± 0.06c	4.69 ± 0.28b	2.36 ± 0.16b
0.002	3.87 ± 0.38b	2.21 ± 0.26b	2.33 ± 0.25a	3.22 ± 0.15a	2.52 ± 0.11a	1.20 ± 0.08b	5.46 ± 0.26a	2.66 ± 0.25b
对照 control	4.85 ± 0.57a	3.30 ± 0.57a	2.04 ± 0.14a	2.91 ± 0.14b	2.61 ± 0.19a	1.42 ± 0.09a	5.71 ± 0.26a	3.79 ± 0.17a

1) 表中数据为3个重复的平均数±标准误;同列数据后面字母相同者表示邓肯氏检验($P=0.05$)差异不显著表5 青蒿乙醇提取物B对植物根长/苗高的影响¹⁾Tab.5 Effect of B of alcohol extracts of *Artemisia annua* on root and seedling growth

cm

$\rho_B/(g \cdot mL^{-1})$	萝卜 <i>Raphanus sativa</i>		菜心 <i>Brassica parachinensis</i>		白菜 <i>Brassica perkinensis</i>		水稻 <i>Oryza sativa</i>	
	根长	苗高	根长	苗高	根长	苗高	根长	苗高
	root length	shoot high	root length	shoot high	root length	shoot high	root length	shoot high
0.100	0.04 ± 0.12e	0.66 ± 0.04d	0.00 ± 0.00e	0.00 ± 0.00d	0.00 ± 0.00d	0.21 ± 0.01d	0.50 ± 0.05e	0.23 ± 0.09c
0.010	1.29 ± 0.12d	1.15 ± 0.11c	0.54 ± 0.06d	0.42 ± 0.09c	0.69 ± 0.03c	0.43 ± 0.09c	1.54 ± 0.10d	0.54 ± 0.14c
0.005	2.16 ± 0.16c	1.69 ± 0.12b	1.34 ± 0.08c	1.71 ± 0.09b	1.73 ± 0.18b	0.57 ± 0.05c	3.17 ± 0.14c	1.89 ± 0.13b
0.002	3.22 ± 0.24b	1.81 ± 0.12b	1.60 ± 0.14b	2.38 ± 0.20a	2.47 ± 0.14a	1.12 ± 0.14b	4.46 ± 0.26b	2.15 ± 0.14b
对照 control	4.82 ± 0.28a	3.11 ± 0.26a	1.87 ± 0.11a	2.71 ± 0.34a	2.90 ± 0.19a	1.40 ± 0.15a	5.06 ± 0.35a	3.31 ± 0.18a

1) 表中数据为3个重复的平均数±标准误;同列数据后面字母相同者表示邓肯氏检验($P=0.05$)差异不显著

综合表1~6数据表明:同一极性青蒿乙醇提取物对同种植物生长的抑制作用随着浓度增大而增大。不同极性溶剂的青蒿乙醇提取物A、B、C,其抑制活性从强到弱顺序为C>B>A。为此笔者选择C进行了层析分离,获得了6个化合物并鉴定了其中的5个。

2.2 青蒿乙醇提取物C部分的化合物结构鉴定

化合物I: 无色柱晶(乙酸乙酯),熔点(m. p.) 78~80 $^{\circ}C$ 。IR(KBr)/ cm^{-1} : 3 436, 1 643, 1 560, 1 412, 1 105, 1 020, 798, 645。EI-MS(m/z): 132($M^+ - H$), 117(132 - NH), 105(117 - C), 91(105 - CH_2), 65(- NC_4H_3)。结合熔点、红外、质谱综合

表6 青蒿乙醇提取物C对植物根长/苗高的影响¹⁾Tab.6 Effect of C of alcohol extracts of *Artemisia annua* on root and seedling growth

cm

$\rho_c / (g \cdot mL^{-1})$	萝卜 <i>Raphanus sativa</i>		菜心 <i>Brassica parachinensis</i>		白菜 <i>Brassica perkinensis</i>		水稻 <i>Oryza sativa</i>	
	根长	苗高	根长	苗高	根长	苗高	根长	苗高
	root length	shoot high	root length	shoot high	root length	shoot high	root length	shoot high
0.100	0.01 ± 0.01d	0.60 ± 0.14d	0.00 ± 0.00c	0.00 ± 0.00d	0.00 ± 0.00d	0.11 ± 0.04c	0.36 ± 0.07 d	0.00 ± 0.00d
0.010	1.19 ± 0.15c	1.05 ± 0.11c	0.00 ± 0.00c	0.30 ± 0.02d	0.00 ± 0.00d	0.34 ± 0.06c	0.90 ± 0.11d	0.30 ± 0.08d
0.005	1.77 ± 0.11c	1.59 ± 1.56b	0.08 ± 0.02c	0.98 ± 0.10c	0.41 ± 0.06c	0.48 ± 0.07c	2.88 ± 0.20c	1.17 ± 0.15c
0.002	2.54 ± 0.10b	1.76 ± 0.12b	0.76 ± 0.09b	1.66 ± 0.09b	1.97 ± 0.18b	1.08 ± 0.18b	3.70 ± 0.29b	1.97 ± 0.18b
对照 control	4.37 ± 0.27a	3.74 ± 0.30a	1.92 ± 0.13a	2.84 ± 0.15a	2.59 ± 0.17a	1.37 ± 0.11a	5.51 ± 0.32a	3.60 ± 0.22a

1) 表中数据为3个重复的平均数 ± 标准误; 同列数据后面字母相同者表示邓肯氏检验 ($P=0.05$) 差异不显著

分析,与喹啉相似,但文献研究表明,青蒿中未见有含喹啉的报道,故化合物I的结构还有待进一步确定。

化合物II: 白色针晶(乙酸乙酯), m. p. 130 ~ 132 °C. IR (KBr)/ cm^{-1} : 3 016 ~ 2 500 宽峰 (—COOH), 2 950, 1 700, 1 580, 1 200, 1 180. EI-MS (m/z): 233 ($M^+ - H$), 216 ($M^+ - H_2O$), 201 ($M^+ - H_2O, -CH_3$), 188 ($M^+ - COOH, -H$), 162 ($M^+ - COOH, -CH=CH_2$), 136 ($M^+ - COOH, -C_4H_5$), 121 (136 - CH_3), 92 (121 - CH_2CH_3), 79 (92 - CH). 1H NMR (CCl_4) δ : 0.83 (3H), 1.61 (s, 3H), 4.94 (1H), 4.47, 5.58 (2H), 11.56 (1H), 与青蒿酸^[14]的波谱学数据进行比对,二者一致,故确定化合物II为青蒿酸 (artemisinic acid, 图1a)。

化合物III: 白色针晶(石油醚), m. p. 183 ~ 186 °C. IR (KBr)/ cm^{-1} : 3 383 (H_2O 峰), 3 075, 1 755, 980, 950, 930. EI-MS (m/z): 249 ($M^+ + 1$). 1H NMR ($CDCl_3$) δ : 0.98 (d, $J = 4.0$ Hz, 3H), 1.35

(s, 3H), 2.66 (s, 1H), 5.39 (d, $J = 3.0$ Hz, 1H), 6.09 (d, $J = 3.0$ Hz, 1H), 以上数据与青蒿素B的波谱学数据^[15]进行比对,基本一致,故确定化合物III为青蒿素B (artemisinin B, 图1b)。

化合物IV: 浅黄色片状晶体, m. p. 68 ~ 70 °C, IR (KBr)/ cm^{-1} : 1 786, 1 754, 1 671, 1 622, 1 381, 1 110, 995. EI-MS (m/z): 146 (M^+), 118 ($M^+ - CO$), 90 ($M^+ - CH=CH-CHO$). ^{13}C NMR ($CDCl_3$) δ : 159.8, 115.7, 142.8, 127.4, 123.8, 131.1, 115.6, 153.2, 118.2, 与青蒿中有机物香豆素^[17]的碳谱数据进行比对,基本一致,故确定化合物IV为香豆素 (coumarin, 图1c)。

化合物V: 白色片状晶体 ($CHCl_3$), m. p. 56 ~ 58 °C. IR (KBr)/ cm^{-1} : 3 650 ~ 3 250 (brs, COOH), 2 920, 2 870, 1 700, 1 475, 940. EI-MS (m/z): 256 (M^+), 239, 227, 213, 185, 129, 97, 83, 73. 1H NMR ($DMSO - d_6$) δ : 2.36 (t, $J = 7.5$ Hz, 2H), 1.66 (m, 2H), 0.88 (t, $J = 7$ Hz, 3H), 与棕

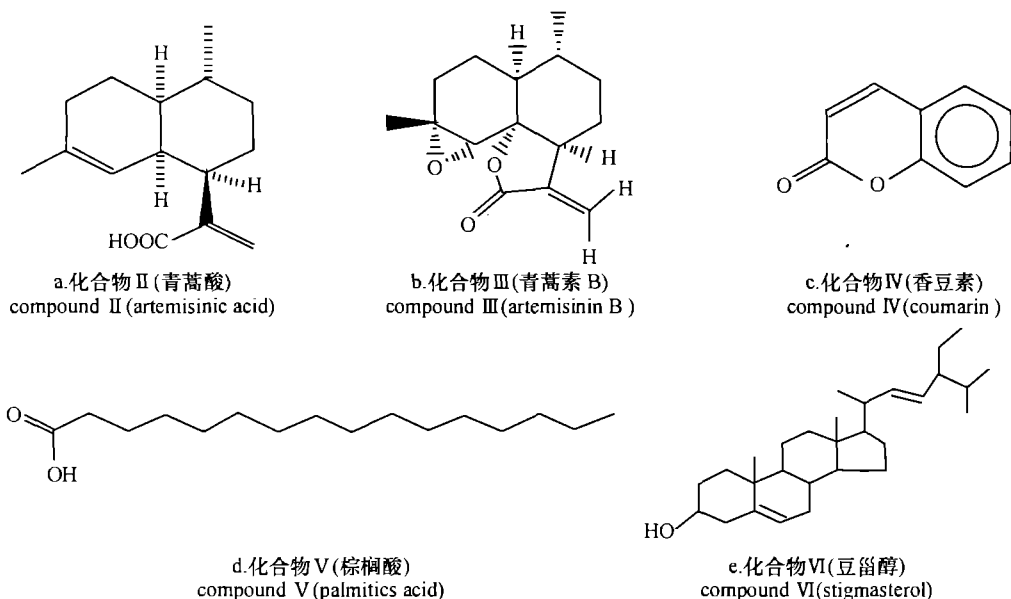


图1 分离化合物的分子结构

Fig.1 Molecule structure of isolated compounds

桐酸的波谱学数据^[14]进行比对,基本一致,故确定化合物 V 为棕榈酸(palmitic acid,图 1d)。

化合物 VI: 白色针晶(二氯甲烷), m. p. 153 ~ 154 °C. IR(KBr)/cm⁻¹: 3 434(—OH), 2 937, 1 375, 2 862, 1 460, 1 056, 965. EI-MS(*m/z*): 412(*M*⁺), 397(*M*⁺ - CH₃), 394(*M*⁺ - H₂O), 379(*M*⁺ - CH₃ - H₂O), 369(*M*⁺ - C₃H₇), 300 [*M*⁺ - CH=CHCH(CH₂CH₃)CH(CH₃)₂], 273(*M*⁺ - C₁₀H₉), 255 [*M*⁺ - CH₂CH₂CH=CHCH(CH₂CH₃)CH(CH₃)₂ - H₂O], 112 [CH₂=CHCH(CH₂CH₃)CH(CH₃)₂]. 显示该化合物为典型的甾醇类化合物,结合其熔点、质谱和红外谱图,确定为豆甾醇(stigmasterol,图 1e)。

3 讨论与结论

前人的研究已经证明青蒿对植物具有化感作用^[9-12]。本文对青蒿地上部分乙醇提取物按极性分成 A、B、C 3 个部分,生测试验表明:他们均对萝卜、菜心、白菜和水稻的种子发芽和幼苗生长具有较强的抑制作用,并呈现出低促高抑的现象,具有化感作用的显著特征。在相同条件下,C 比 B 和 A 的活性要强烈,且都随着溶液浓度增大而抑制作用增强,达到一定浓度时能完全抑制敏感植物菜心、白菜的幼苗生长。A、B、C 对萝卜、菜心、白菜和水稻种子发芽、幼根长度和幼苗高度的抑制作用均表现为 C > B > A。从活性最强的 C 中分离出 6 个化合物,鉴定了其中 5 个化合物的结构,他们分别是青蒿酸(II)、青蒿素 B(III)、香豆素(IV)、棕榈酸(V),豆甾醇(VI)。化合物 I 还有待进一步确定。

植物的化学成分十分复杂,生物活性多样,植物提取物所表现出来的生物活性往往是几个或几类化合物综合作用的结果^[3,4,15,18],同时植物的化感作用和植物毒性作用机理也相当复杂,它不仅取决于化学物质的种类和浓度,而且取决于不同物质的组合,具有明显的协同效应。本研究仅报道了青蒿不同极性提取物的植物毒性作用,从植物毒性作用较强的部分分离获得了一些化合物,他们是否是化感化合物,各单体化合物的化感活性、作用机理以及相互之间交互作用机理、化合物之间的协同作用等还有待进一步的研究,并将另文报道。

参考文献:

- [1] RICE E L. Allelopathy[M]. 2nd ed. London: Academic Press, 1984: 1-2.
- [2] 吕春霞,杨文权,慕小倩. 植物化感作用及其在杂草防治中的应用[J]. 陕西农业科学, 2002(12): 18-20.
- [3] 高宝,柴强. 植物化感作用表现形式及其开发应用研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 172-174.
- [4] HARSH P B, RAMARAO V, SIMON G, et al. Allelopathy and exotic plant invasion: From molecules and genes to species interactions [J]. Science, 2003, 301(5): 1377-1380.
- [5] 刘迎,王金信,李浙江,等. 植物化感作用在农田杂草防治中的应用[J]. 杂草科学, 2005(4): 6-9.
- [6] 张晓艳,王新华. 青蒿的传统应用与青蒿素的现代研究[J]. 中华医药杂志, 2004, 5(1): 23-24.
- [7] 贺小青,方鹏飞. 青蒿素及其衍生物的药理作用[J]. 药理导报, 2006, 25(6): 528-530.
- [8] 叶启翔. 青蒿素类药物抗肿瘤作用研究进展[J]. 实用医学杂志, 2006, 22(5): 600-601.
- [9] DUKE S D, VAUGHN K C, CROOM Z M, et al. Artemisinin, a constituent annual worm wood (*Artemisia annua*), is a selective phytotoxin [J]. Weed Sci, 1992, 35: 499-505.
- [10] LYDEN J, TEASDALE J R, CHEN P K. Allelopathic activity of annual worm wood (*Artemisia annua*) and the role of artemisinin [J]. Weed Sci, 1997, 45(6): 807-811.
- [11] DELABAYS N, MERMILLOD G, DE J J. Allelopathic properties of *Artemisia annua* L.: From the lab to the field [C]//EWRS. Proceedings of the 12th EWRS (European Weed Research Society) Symposium 2002, June 24-27, 2002, Arnhem (Netherlands), Arnhem: EWRS, 2002: 228-229.
- [12] 高志梅,李拥军,谷文祥. 青蒿化感作用的初步研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(1): 122-124.
- [13] 曾任森. 化感作用研究中的生物测定方法综述[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 123-126.
- [14] 屠呦呦,倪慕云,钟裕蓉,等. 中药青蒿的化学成分和青蒿素衍生物的研究(简报)[J]. 中药通报, 1981, 6(2): 31.
- [15] 许杏祥,朱杰,周维善. 青蒿素 B 的立体选择合成[J]. 科学通报, 1982, 27(16): 1022.
- [16] 于德泉,杨峻山. 分析化学手册: 第七分册: 核磁共振波谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 844.
- [17] 谷文祥,段舜山,骆世明. 萜类化合物的生态特性及其对植物的化感作用[J]. 华南农业大学学报, 1998, 19(4): 108-112.

【责任编辑 李晓卉】