

薄叶红厚壳根的化学成分研究 (I)*

陈光英¹, 吴晓鹏², 戴春燕¹, 赵 军¹, 韩长日¹, 宋小平¹, 钟琮芯¹

(1. 海南师范大学化学系//海南省热带药用植物化学重点实验室, 海南海口 571158;

2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南海口 571101)

摘 要: 利用现代色谱分离技术对薄叶红厚壳 *Calophyllum membranaceum* 根的乙醇提取物氯仿部位进行分离纯化, 得到8个化合物, 分别鉴定为: 木栓酮 (Friedelin, I)、海棠果醇 (Canophyllol, II)、木栓醇 (Epi-friedelinol, III)、3, 4-二羟基苯甲酸 (3, 4-dihydroxybenzoic acid, IV)、穗花杉双黄酮 (Amentoflavone, V)、7-羟基香豆素 (7-dihydroxycoumarin, VI)、紫花前胡苷 (Marmesinin, VII)、紫花前胡苷元 (Nodakenetin, VIII)。其中化合物VI、VII、VIII为首次从该植物中分离得到。

关键词: 藤黄科; 薄叶红厚壳; 化学成分

中图分类号: R284.1 文献标识码: A 文章编号: 0529-6579 (2009) 04-0052-05

Chemical Constituents in the Roots of *Calophyllum membranaceum* Gardn.

CHEN Guangying¹, WU Xiaopeng², DAI Chunyan¹, ZHAO Jun¹, HAN Changri¹,
SONG Xiaoping¹, ZHONG Qingxin¹

(1. Key Lab of Tropical Medicinal Plant Chemistry of Hainan Province, Department of Chemistry,
Hainan Normal University, Haikou 571158, China;

2. Institute of Tropical Biosciences and Biotechnology, Chinese Academy of
Tropical Agricultural Sciences, Haikou 571101, China)

Abstract: Eight compounds were isolated from the roots of *Calophyllum membranaceum* Gardn using silica gel column chromatography and sephadex LH-20 chromatography, et al. Their chemical compounds were determined to be Friedelin (I), Canophyllol (II), Epi-friedelinol (III), 3, 4-dihydroxybenzoic acid (IV), Amentoflavone (V), 7-dihydroxycoumarin (VI), Marmesinin (VII), Nodakenetin (VIII) on the basis of comprehensive spectroscopic analysis and chemical method. Compounds VI, VII and VIII were firstly isolated from this plant.

Key words: Guttiferae; *Calophyllum membranaceum* Gardn; chemical constituents

薄叶红厚壳 *Calophyllum membranaceum* Gardn. et Champ. 为藤黄科、红厚壳属常绿乔木植物。红厚壳属植物有很高的药用价值, 可以用作防腐剂、收敛剂、祛痰剂、利尿剂、催泻剂和抗病毒感染药, 种子和根的油常用来治疗伤口和疥疮。自从1992年美国癌症研究中心的 Kashman 等^[1]从马来西亚热带雨林藤黄科红厚壳属植物 *C. lanigerum* 中分离出具有抗艾滋病病毒活性的香豆素化合物 Cal-

anolides 以来, 对红厚壳属植物的化学成分研究引起了人们广泛的兴趣。国内外学者已从该属植物中分离出了香豆素类^[2]、黄酮类^[3]、呋喃^[4]、三萜类^[5]等具有生物活性的化合物。为了更好地开发利用海南药用植物资源, 本课题组在对薄叶红厚壳的化学成分研究的基础上^[6], 进一步对薄叶红厚壳的根进行了系统的化学成分研究,

作者从采自海南陵水县薄叶红厚壳根的乙醇提

* 收稿日期: 2008-09-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (20562004); 教育部科技研究重点资助项目 (207090)

作者简介: 陈光英 (1971年生), 女, 教授; 通讯作者: 韩长日; E-mail: hchr116@hainnu.edu.cn

取物氯仿部位中分离鉴定了8个化合物:木栓酮(I)、海棠果醇(II)、木栓醇(III)、3,4-二羟基苯甲酸(IV)、穗花杉双黄酮(V)、7-羟基香豆素(VI)、紫花前胡苷(VII)和紫花前胡苷元(VIII)。其中化合物VI、VII、VIII为首次从该植物中分离得到。据文献报道,香豆素类化合物具有抗癌等多种药理活性,其中紫花前胡苷和紫花前胡苷元具有抗血小板凝聚作用^[7]。7-羟基香豆素对人的恶性肿瘤细胞具有抑制作用以及对扁豆蚜和淡色库蚊具有较好的杀虫活性^[8-9]。

1 结果与讨论

化合物I 白色针晶,易溶于氯仿, θ_{mp} 262 ~ 263 °C; TLC 检视,喷 φ = 5%的硫酸-乙醇溶液,110 °C显紫红色,逐渐变为蓝黑色;Liebermann-Burchard反应呈阳性,提示可能为萜类化合物。¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃) δ : 0.72, 0.87, 0.96, 1.00, 1.03, 1.05, 1.18 (each 3H, s, Me), 0.88 (3H, d, J = 6.68 Hz), 此为三萜类化合物的特征信号,将以上数据同文献[6]比较,氢谱数据基本一致,故化合物I鉴定为木栓酮(Friedelin)。

化合物II 白色针晶,易溶于氯仿, θ_{mp} 280 ~ 281 °C;¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃) 显示在 δ 0.72 ~ 1.12之间有6个单峰甲基(δ 0.72, 0.86, 0.91, 0.97, 0.99, 1.12)和1个双峰甲基(δ 0.88, d, J = 6.0 Hz),提示该化合物可能是萜类化合物;同时 δ 3.63 (2H, s)提示该化合物还含有羟甲基,将上述数据同文献[6]对照,氢谱数据一致;再将此化合物同本课题组以前从薄叶红厚壳叶中分离到的海棠果醇共TLC检视,三种不同的溶剂系统进行展开,喷5%的硫酸-乙醇溶液,110 °C显色,发现两者 R_f 值及显色情况一致,故化合物II鉴定为海棠果醇(Canophyllol)。

化合物III 白色针晶,易溶于氯仿, θ_{mp} 271 ~ 272 °C; TLC 检视,喷 φ = 5%的硫酸-乙醇溶液,110 °C显紫红色,逐渐变为蓝黑色。¹H-NMR (400 MHz, CDCl₃) 显示在 δ 0.72 ~ 1.17之间有7个单峰甲基(δ 0.86, 0.95, 0.98, 0.98, 1.00, 1.01, 1.17)和1个双峰甲基(δ 0.94, d, J = 7.3 Hz),提示该化合物可能是萜类化合物; δ 3.73 (1H, d, J = 2.4 Hz), 9.48 (1H, s)提示该化合物的次甲基上有1个羟基存在。将上述数据同文献[10]对照,氢谱数据基本一致,故化合物III鉴定为木栓醇(Epi-friedelinol)。

化合物IV 白色结晶,易溶于丙酮, θ_{mp} 199 ~ 200 °C; ESI-MS (negative mode) m/z : 153 [M-H]⁻; ¹H-NMR (400 MHz, CD₃COCD₃) 中只显示1组ABX偶合系统信号 δ 7.47 (1H, d, J = 2.2 Hz), 7.34 (1H, dd, J = 2.2, 8.2 Hz) 和 6.77 (1H, d, J = 8.2 Hz),提示该苯环上3个取代基均含有活泼氢。将上述数据与文献[11]对照,确定化合物IV为3,4-二羟基苯甲酸(3,4-dihydroxybenzoic acid)。

化合物V 黄色针晶(甲醇), θ_{mp} 246 ~ 248 °C,紫外灯365 nm下呈黄色,Zn-浓HCl显色反应呈阳性,提示该化合物为黄酮类化合物。ESI-MS (positive mode) m/z : 539 [M + H]⁺; ¹H-NMR (400 MHz, CD₃COCD₃) 显示出12个芳香质子信号 δ 6.21 (1H, d, J = 1.5 Hz), 6.35 (1H, s), 6.44 (1H, d, J = 1.5 Hz), 6.62 (1H, s), 6.70 (1H, s), 6.77 (2H, dd, J = 2, 6.5 Hz), 7.15 (1H, d, J = 9 Hz), 7.68 (2H, dd, J = 2, 6.5 Hz), 7.96 (1H, dd, J = 2.5, 9 Hz), 8.21 (1H, d, J = 2.5 Hz),提示此化合物可能为双黄酮类化合物;其中6.21 (1H, d, J = 1.5 Hz) 和 6.44 (1H, d, J = 1.5 Hz) 相互偶合,此信号归属于其中一个黄酮单元的6位和8位;7.15 (1H, d, J = 9 Hz), 7.96 (1H, dd, J = 2.5, 9 Hz), 8.21 (1H, d, J = 2.5 Hz) 构成1个ABX偶合系统,6.77 (2H, dd, J = 2, 6.5 Hz) 和 7.68 (2H, dd, J = 2, 6.5 Hz) 则构成1个AA'BB'偶合系统,这2个偶合系统分别归属于两个黄酮单元的B环;13.06 (1H, s) 和 13.19 (1H, s) 给出两个典型的黄酮类化合物的5-OH质子信号。将上述数据同文献[6]对照,氢谱数据一致;再将此化合物同本课题组以前从薄叶红厚壳叶中分离到的穗花杉双黄酮共TLC检视,喷Zn-浓HCl溶液显色,发现两者 R_f 值及显色情况一致,故化合物V鉴定为穗花杉双黄酮(Amentoflavone)。

化合物VI 白色粉末,易溶于DMSO, θ_{mp} 225 ~ 227 °C,365 nm紫外灯下显蓝色荧光,¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆) 显示只有5个芳香质子信号 δ 6.17 (1H, d, J = 9.3 Hz), 7.90 (1H, d, J = 9.3 Hz), 7.49 (1H, d, J = 8.4 Hz), 6.75 (1H, dd, J = 8.4, 2.2 Hz), 6.68 (1H, d, J = 2.2 Hz) 和1个活泼氢的信号10.5 (1H, br. s);其中 δ 6.17 (1H, d, J = 9.3 Hz), 7.90 (1H, d, J = 9.3 Hz) 构成AB偶合系统,这是典型的香豆素类化合物3位和4位氢信号; δ 7.49 (1H, d, J = 8.4 Hz), 6.75 (1H, dd, J = 8.4, 2.2 Hz) 和

6.68 (1H, d, $J = 2.2$ Hz) 则构成 ABX 偶合系统。将上述数据同文献 [12] 对照, 氢谱数据一致; 故推出此化合物为 7-羟基香豆素 (7-hydroxycoumarin)。

化合物 VII 白色粉末, 易溶于 DMSO, θ_{mp} 255 ~ 257 °C, 365 nm 紫外灯下显蓝色荧光, Molish 反应阳性, 提示此化合物可能为糖苷类化合物; $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, DMSO- d_6) 显示出 4 个芳香质子信号, δ 6.22 (1H, d, $J = 9.5$ Hz), 7.95 (1H, d, $J = 9.5$ Hz) 构成 AB 偶合系统, 这是典型的香豆素类化合物 3 位和 4 位氢信号; δ 7.49 (1H, s) 和 6.82 (1H, s) 说明香豆素结构上的 6 位和 7 位均被取代; 4.41 (1H, d, $J = 7.8$ Hz) 为糖端基碳上的质子信号; $^{13}\text{C-NMR}$ (100MHz, DMSO- d_6) 显示 δ 7.3 为端基糖碳的信号; 将以上光谱数据与文献 [13] 比较, 发现两者光谱数据一致, 故推出此化合物为紫花前胡苷 (Marmesinin)。

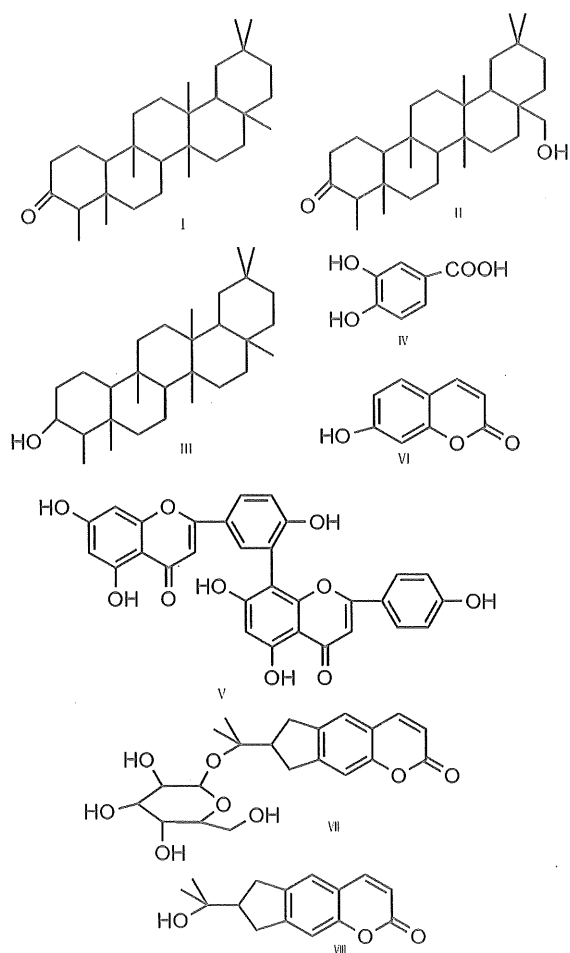


图 1 化合物 I ~ VIII 的结构式

Fig. 1 Chemical structures of compounds I-VIII

化合物 VIII 白色粉末, 易溶于 DMSO, θ_{mp} 189 ~ 191 °C, 365 nm 紫外灯下显蓝色荧光, Molish 反应阴性; $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, DMSO- d_6) 显示出与上述紫花前胡苷元基本相同的数据, 将以上数据与文献 [14] 值对照, 发现两者光谱数据一致; 同时将此化合物与紫花前胡苷的水解产物共 TLC, 发现两者的 R_f 值及显色情况一致, 所以确定化合物 VIII 为紫花前胡苷元 (Nodakenetin)。

2 实验部分

2.1 仪器, 试剂和样品

熔点仪: 浦光数字熔点仪 WRS-1B 型; 上海浦东物理光学仪器厂; 温度未校正; 核磁共振仪: Bruker AV-400 型; 质谱仪: Finnigan LC-MS; 红外光谱仪: Nicolet Nexus670FT-IR 型红外分光光度计; 旋转蒸发仪及中压液相: 瑞士 BüCHI 公司; 紫外: HITACHI U-2800。

高效液相: Waters 2695 Alliance Empower 色谱工作站; Sephadex LH-20 (Pharmacia)。

薄层板 GF254: Merck 公司; 柱层析硅胶: 青岛海洋化工厂。

薄叶红厚壳采自海南陵水县, 经海南师范大学生物系钟琼芯副教授鉴定为薄叶红厚壳根 (*Calophyllum membranaceum* Gardn. et Champ.), 标本存于海南省热带药用植物化学重点实验室。

2.2 提取与分离

干燥的薄叶红厚壳根, 粉碎, 用 $\varphi = 70\%$ 的乙醇回流提取 3 次, 每次 1 h, 减压回收乙醇至无醇味的浸膏。加入适量的水混悬后, 依次用石油醚、氯仿、乙酸乙酯、正丁醇萃取, 得到相应的各个部位, 然后取氯仿部位反复经正相柱色谱、反相柱色谱和 Sephadex LH-20 层析等方法分离纯化, 得到化合物 I ~ VIII。

2.3 物理常数与波谱解析

化合物 I 白色针晶, 易溶于氯仿, θ_{mp} 262 ~ 263 °C; $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, CDCl_3) δ : 0.72, 0.87, 0.96, 1.00, 1.03, 1.05, 1.18 (each 3H, s, Me), 0.88 (3H, d, $J = 6.68$ Hz)。

化合物 II 白色针晶, 易溶于氯仿, θ_{mp} 280 ~ 281 °C; $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, CDCl_3) δ : 0.72 和 0.86 (each 3H, s, H-24, 25), 0.88 (3H, d, $J = 6.0$ Hz, H-23), 0.91, 0.97, 0.99 和 1.12 (each 3H, s, H-27, 26, 29, 30), 3.63 (2H, s, H-28)。

化合物 III 白色针晶, 易溶于氯仿, θ_{mp} 271 ~ 272 °C; $^1\text{H-NMR}$ (400 MHz, CDCl_3) δ : 0.86, 0.94,

0.95, 0.98, 0.98, 1.00, 1.17 (each 3H, s, H-25, 24, 26, 29, 27, 28, 30), 0.94 (3H, d, $J = 7.3$ Hz, H-23), 3.73 (1H, d, $J = 2.4$ Hz, 3α -H), 9.48 (1H, s, 3-OH)。

化合物IV 白色结晶, 易溶于丙酮, θ_{mp} 199 ~ 200 °C; ESI-MS (negative mode) m/z : 153 [M-H]⁻; ¹H-NMR (400 MHz, CD₃COCD₃) δ : 7.47 (1H, d, $J = 2.2$ Hz, 2-H), 7.34 (1H, dd, $J = 2.2, 8.2$ Hz, 6-H), 6.77 (1H, d, $J = 8.2$ Hz, 5-H)。

化合物V 黄色针晶, 易溶于甲醇, θ_{mp} 246 ~ 248 °C; ESI-MS (positive mode) m/z : 539 [M+H]⁺; ¹H-NMR (400 MHz, CD₃COCD₃) δ : 6.21 (1H, d, $J = 2.5$ Hz, H-6), 6.35 (1H, s, H-6''), 6.44 (1H, d, $J = 1.5$ Hz, H-8), 6.62 (1H, s, H-3''), 6.70 (1H, s, H-3), 6.77 (2H, dd, $J = 2, 6.5$ Hz, H-3'', 5''), 7.15 (1H, d, $J = 9$ Hz, H-5'), 7.68 (2H, dd, $J = 2, 6.5$ Hz, H-2'', 6''), 7.96 (1H, dd, $J = 2.5, 9$ Hz, H-6'), 8.21 (1H, d, $J = 2.5$ Hz, H-2'), 13.06 (1H, s, OH-5), 13.19 (1H, s, OH-5')。

化合物VI 白色粉末, 易溶于 DMSO, θ_{mp} 225 ~ 227 °C, 365 nm 紫外灯下显蓝色荧光, ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆) δ : 6.17 (1H, d, $J = 9.3$ Hz, 3-H), 7.90 (1H, d, $J = 9.3$ Hz, 4-H), 7.49 (1H, d, $J = 8.4$ Hz, 5-H), 6.75 (1H, dd, $J = 8.4, 2.2$ Hz, 6-H), 6.68 (1H, d, $J = 2.2$ Hz, 8-H), 10.5 (1H, br. s, 7-OH)。

化合物VII 白色粉末, 易溶于 DMSO, θ_{mp} 255 ~ 257 °C, 365 nm 紫外灯下显蓝色荧光, ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆) δ : 6.22 (1H, d, $J = 9.5$ Hz, H-3), 7.95 (1H, d, $J = 0.5$ Hz, H-4), 7.49 (1H, s, H-5), 6.82 (1H, s, H-8), 4.41 (1H, d, $J = 7.8$ Hz, Glu-1)。

¹³C-NMR (100 MHz, DMSO-d₆) δ : 160.5 (C-2), 112.2 (C-3), 144.7 (C-4), 123.9 (C-5), 125.6 (C-6), 163.1 (C-7), 96.2 (C-8), 155.0 (C-9), 112.2 (C-10), 90.1 (C-2'), 28.8 (C-3'), 76.8 (C-4'), 23.1, 21.8 (gem-CH₃), 97.3 (Glu-1), 73.5 (Glu-2), 76.5 (Glu-3), 70.0 (Glu-4), 76.9 (Glu-5), 60.84 (Glu-6)。

化合物VIII 白色粉末, 易溶于 DMSO, θ_{mp} 189 ~ 191 °C, 365 nm 紫外灯下显蓝色荧光, ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆) δ : 6.22 (1H, d, $J = 9.5$ Hz, 3-H), 7.95 (1H, d, $J = 9.5$ Hz, 4-H), 7.49 (1H, s, 5-H), 6.82 (1H, s, 8-H), 4.70 (1H, t, $J = 6.6$

Hz, 2'-H), 3.27 (2H, d, $J = 9.0$ Hz, 3'-H), 1.13, 1.15 (each 3H, s, 5', 6'-H)。

参考文献:

- [1] KASHIMAN Y, GUSTAFSON K R, FULLER R W, et al. The calanolides, a novel HIV-inhibitory class of coumarin derivatives from the tropical rainforest tree *Calophyllum lanigerum* [J]. J Med Chem, 1992, 35: 2735 - 2743.
- [2] ITOIGAWA M, ITO C, TAN H T W, et al. Cancer chemopreventive agents, 4-phenylcoumarins from *Calophyllum inophyllum* [J]. Cancer Letters, 2001, 169: 15 - 19.
- [3] ITO C, ITOIGAWA M, MIYAMOTO Y. A new biflavonoid from *Calophyllum paniculatum* with antitumor-promoting activity [J]. J Nat Prod, 1999, 62: 1668 - 1671.
- [4] SHEN Y, WANG L T, KHALIL A T. Bioactive pyranoxanthones from the roots of *Calophyllum blancoi* [J]. Chem Pharm Bull, 2005, 53(2): 244 - 247.
- [5] 韩长日, 宋小平, 陈光英. 红厚壳化学成分及药理作用研究进展 [J]. 有机化学, 2003, 23(2): 212 - 219.
HAN C R, SONG X P, CHEN G Y. Advances in the studies on chemical components of *Calophyllum* and related pharmacological activities [J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2003, 23(2): 212 - 219.
- [6] 陈光英, 韩长日, 宋小平, 等. 薄叶红厚壳叶化学成分研究 [J]. 林产化学与工业, 2003, 23(2): 73 - 76.
CHEN G Y, HAN C R, SONG X P, et al. Chemical constituents from leaves of *Calophyllum membranaceum* Gardn [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2003, 23: 73 - 76.
- [7] 孔令义, 裴月湖, 于荣敏, 等. 中药前胡的化学和药理研究概况 [J]. 国外医药·植物药分册, 1991, 6(6): 243 - 254.
KONG L Y, PEI Y H, YU R M, et al. Research progress on chemical components and related pharmacological activities of *Radix peucedani* [J]. World Phytomedicines, 1991, 6(6): 243 - 254.
- [8] MARSHALL M E, KERVIN K, BENEFIELD C, et al. Growth-inhibitory effects of coumarin (1,2-benzopyrone) and 7-hydroxycoumarin on human malignant cell lines *in vitro* [J]. J Cancer Res Clin Oncol, 1994, 120 (Suppl): S3 - S10.
- [9] TANG X R, HOU T P. Separation and identification of botanical insecticide 7-hydroxycoumarin and its biological activity against *Aphis craccivora* and *Culex pipiens pallens* [J]. Natural Product Research, 2008, 22(4): 365 - 370.
- [10] ZHANG A L, QI H Y, YE Q, et al. Chemical study on

- Rostellularia procumbens* [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2006, 12(2): 170-175.
- [11] 杨鸣华, 孔令义. 露珠杜鹃的化学成分[J]. 药学与临床研究, 2007, 15(3): 199-201.
- YANG M H, KONG L Y. Chemical constituents of *Rhododendron irroratum* Franch [J]. Pharmaceutical and Clinical Research, 2007, 15(3): 199-201.
- [12] 王金龙, 李灵娜, 贺礼东, 等. 牵牛全草的化学成分研究[J]. 天然产物研究与开发, 2007, 19(3): 427-429.
- WANG J L, LI L N, HE L D, et al. Studies on the Chemical Constituents of *Pharbitisnil chois* [J]. Nat Prod Res Dev, 2007, 19: 427-429.
- [13] SUN S, LIU J, KONG L Y, et al. 骨缘当归的化学成分研究[J]. 中国药学杂志, 2006, 41(19): 1455-1457.
- SUN S, LIU J, KONG L Y, et al. Studies on chemical constituents of *Angelica cartilagino-marginatavar foliata* [J]. Chin Pharm J, 2006, 41(19): 1455-1457.
- [14] 金京玉, 刘向前, 陆昌洙, 等. 小前胡中香豆素类成分研究[J]. 天然产物研究与开发, 2006, 18: 7-10.
- JIN J Y, LIU X Q, LU C S, et al. Coumarins from *Angelica czernaevia* Kita Forma Dentate Yook [J]. Nat Prod Res Dev, 2006, 18: 7-10.
-
- (上接第46页)
- [4] 张雨浓, 张禹珩, 陈轲, 等. 线性矩阵方程的梯度法神经网络求解及其仿真验证 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2008, 47(3): 26-32.
- ZHANG Yunong, ZHANG Yuheng, CHEN Ke, et al. Gradient-based neural network for solving linear matrix equations and its MATLAB simulative verification [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen, 2008, 47(3): 26-32.
- [5] RUMELHART David, McCLELLAND James. Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition [M]. Cambridge: MIT Press, 1986.
- [6] YANG Xuhua, DAI Huaping, SUN Youxian. SIMO Fourier neural networks research [C]. Proceedings of IEEE Intelligent Transportation Systems, 2003, 2: 1606-1609.
- [7] 谢宏, 程浩忠, 牛东晓, 等. 前向神经网络的神经元分层逐个线性优化快速学习算法 [J]. 电子学报, 2005, 33(1): 111-114.
- XIE Hong, CHENG Haozhong, NIU Dongxiao, et al. A fast learning algorithm for feedforward neural network based on the layer-by-layer and neuron-by-neuron optimizing procedure [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(1): 111-114.
- [8] DUNKL Charles F, YUAN Xu. Orthogonal polynomials of several variables [M]. Cambridge University Press, 2001.
- [9] LIANG Xuebin, TSO Shukit. An improved upper bound on step-size parameters of discrete-time recurrent neural networks for linear inequality and equation system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2002, 49(5): 695-698.
- [10] LIU Puyin. Mamdani fuzzy system: universal approximator to a class of random processes [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10(6): 756-766.
- [11] TOH Karann, YAU Weiyun, JIANG Xudong. A reduced multivariate polynomial model for multimodal biometrics and classifiers fusion [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(2): 224-233.
- [12] 周永权, 赵斌, 焦李成. 基于泛函网络的多维函数逼近理论及学习算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(5): 906-909.
- ZHOU Yongquan, ZHAO Bin, JIAO Licheng. Theory and learning algorithm of multi-dimensional function approximation based on functional networks [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(5): 906-909.
- [13] 邹阿金, 成继勋, 沈建中. 基于Chebyshev神经网络的衍生算法 [J]. 湘潭矿业学院学报, 2001, 16(1): 76-78.
- ZOU Ajin, CHENG Jixun, SHEN Jianzhong. A deriving arithmetic based on Chebyshev neural network [J]. Journal of Xiangtan Mining University, 2001, 16(1): 76-78.
- [14] ZHANG Yunong, ZHONG Tongke, LI Wei, et al. Growing algorithm of Laguerre orthogonal basis neural network with weights directly determined [C] // In Proc. ICIC08. Berlin: Springer Press, 2008: 60-67.