

灰色系统理论在中药色谱指纹图谱模式识别中的应用研究

魏航¹, 林励^{2*}, 张元¹, 王莲婧², 陈沁群¹

(1. 广州中医药大学医学信息工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广州中医药大学中药学院, 广东 广州 510006)

摘要: 建立了基于灰色系统理论的中药色谱指纹图谱模式识别模型。运用基于范数与信息熵赋权法的灰色关联分析, 求出各待比较图谱特征变量数据序列与理想图谱特征变量数据序列之间的灰色关联度, 并依据模糊匹配中的“最大匹配度”原则进行判断, 从而达到品种识别和质量评价的目的。该模型在 56 批次不同品种化橘红药材样品的高效液相色谱分析中取得较满意的结果: 熵权与范数的灰色关联分析均能准确识别出毛橘红与光橘红两个品种, 克服了传统相似度或灰色关联在化橘红色谱指纹图谱分析中的误判问题; 对药材中化学成分的种类与含量十分接近的毛橘红不同栽培品种的认识率超过 92.85%。此外, 该模型计算量较少, 整个模式识别过程通过计算机编程实现, 操作简单。实验结果显示, 灰色系统理论在中药色谱指纹图谱模式识别中有良好的适应性。

关键词: 灰色系统理论; 中药; 色谱指纹图谱; 模糊匹配; 模式识别

中图分类号: O658 文献标识码: A 文章编号: 1000-8713(2013)02-0127-06

Research on the application of grey system theory in the pattern recognition for chromatographic fingerprints of traditional Chinese medicine

WEI Hang¹, LIN Li^{2*}, ZHANG Yuan¹, WANG Lianjing², CHEN Qinjun¹

(1. School of Medical Information Engineering, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China; 2. School of Chinese Materia Medica, Guangzhou University of Chinese Medicine, Guangzhou 510006, China)

Abstract: A model based on grey system theory was proposed for pattern recognition in chromatographic fingerprints (CF) of traditional Chinese medicine (TCM). The grey relational grade among the data series of each testing CF and the ideal CF was obtained by entropy and norm respectively, then the principle of “maximal matching degree” was introduced to make judgments, so as to achieve the purpose of variety identification and quality evaluation. A satisfactory result in the high performance liquid chromatographic (HPLC) analysis of 56 batches of different varieties of *Exocarpium Citrus Grandis* was achieved with this model. The errors in the chromatographic fingerprint analysis caused by traditional similarity method or grey correlation method were overcome, as the samples of *Citrus grandis* ‘Tomentosa’ and *Citrus grandis* (L.) Osbeck were correctly distinguished in the experiment. Furthermore in the study on the variety identification of *Citrus grandis* ‘Tomentosa’, the recognition rates were up to 92.85%, although the types and the contents of the chemical compositions of the samples were very close. At the same time, the model had the merits of low computation complexity and easy operation by computer programming. The research indicated that the grey system theory has good applicability to pattern recognition in the chromatographic fingerprints of TCM.

Key words: grey system theory; traditional Chinese medicine (TCM); chromatographic fingerprint (CF); fuzzy matching; pattern recognition

作为一种基于中药化学成分信息的、综合的、可量化的鉴别手段, 中药指纹图谱已成为评价、控制中

* 通讯联系人. Tel: (020) 39358270, E-mail: lwyl@gzhtcm.edu.cn.
基金项目: 国家科技部“十二五”科技支撑计划项目(2011BAI01B02).
收稿日期: 2012-09-17

药质量的有效技术^[1]。然而中药是一个多成分非线性的复杂体系,其指纹图谱含有大量信息,形成一个巨大的多维信息库,且同时存在一些噪声干扰而真伪难辨,具有模糊性和灰色性,即信息的不完全性与非确知性^[2]。灰色系统理论主要研究系统模型不明确、行为信息不完全、运行机制不清楚的系统的建模、预测、决策和控制等问题^[3]。用灰色理论来处理非确定性量,能求出各待比较图谱与参照图谱的灰色关联度,进而应用模糊匹配中“最大匹配度”原则的模式识别方法。整个分析过程利用 Java 编程,实现了计算机技术与模式识别算法在中药色谱指纹图谱分析中的应用,这不但可以大大提高识别效率,减小人为误差,而且操作简便,有良好的适应性。为了进一步验证灰色系统理论对中药色谱指纹图谱的识别效果,我们选择广东道地药材化橘红进行了研究。

化橘红是芸香科植物化州柚 *Citrus grandis* ‘*Tomentosa*’ 或柚 *Citrus grandis* (L.) Osbeck 的未成熟或近成熟干燥的外果皮,有散寒、利气、消痰的功效^[4]。前者习称“毛橘红”,后者习称“光橘红”。毛橘红主产于广东化州,为特产道地药材,其药效明显

优于光橘红^[5]。由于光橘红与毛橘红为种与栽培变种的关系,主要成分为柚皮苷等黄酮类^[5],两者的黄酮类指纹图谱如直接采用传统相似度算法,相似度多在 0.95 左右,难以识别。

1 基于灰色系统理论的模式识别方法

1.1 灰色关联分析的基本原理^[3,6]

灰色关联分析是通过比较数据序列曲线的几何形状的接近程度来判断其联系的紧密程度。一般来说,几何形状越接近,变化趋势也就越接近,关联度就愈大;反之就愈小。灰色关联分析方法在中药色谱指纹图谱模式识别中应用的基本原理:计算参照图谱特征变量数据序列(即理想图谱序列)和各测试图谱特征变量数据序列(即待比较图谱序列)的灰色关联度,进行优势分析,得出识别评价结果。

设 $X_l = \{x_l(1), x_l(2), \dots, x_l(m)\}$ ($l=1, 2, \dots, n$) 为理想图谱序列, $X_j = \{x_j(1), x_j(2), \dots, x_j(m)\}$ ($j=1, 2, \dots, k$) 为待比较图谱序列(其中 m 为特征变量数, n 为理想图谱数, k 为待比较图谱数),则 X_j 对于 X_l 在第 i 个特征变量($i=1, 2, \dots, m$) 的灰色关联系数 $\zeta_{lj}(i)$ 为:

$$\zeta_{lj}(i) = \frac{\min_i \min_j |x_l(i) - x_j(i)| + \rho \max_i \max_j |x_l(i) - x_j(i)|}{|x_l(i) - x_j(i)| + \rho \max_i \max_j |x_l(i) - x_j(i)|} \quad (1)$$

其中 ρ ($0 < \rho < 1$) 称为分辨系数,其值越大分辨能力越强,但对整个顺序趋势无影响。一般取 $\rho = 0.5$ 即可满足分辨率要求。

待比较图谱序列 X_j 对于理想图谱序列 X_l 的关联度 γ_{lj} 为:

$$\gamma_{lj} = \sum_{i=1}^m w_{lj}(i) \zeta_{lj}(i) \quad (2)$$

其中 $w_{lj}(i)$ 为 X_j 对于 X_l 在第 i 个特征变量的权重因子。

γ_{lj} 越大,表示待比较图谱序列 X_j 与理想图谱序列 X_l 越接近。当计算出所有 γ_{lj} ($l=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k$) 就可以很容易地判断所有待比较图谱序列与哪个理想图谱序列最接近。

$$\varepsilon_{lj}(i) = \sqrt{\sum_{j=1}^k (\zeta_{lj}(i) - \zeta_l^-(i))^2} / \left(\sqrt{\sum_{j=1}^k (\zeta_{lj}(i) - \zeta_l^+(i))^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^k (\zeta_{lj}(i) - \zeta_l^-(i))^2} \right) \quad (4)$$

式(4)中 ζ_l^+ 与 ζ_l^- 分别表示距理想序列 X_l 最近的序列与最远的序列:

$$\zeta_l^+ = \{ \max_j \zeta_j(i) \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq k \} \quad (5)$$

$$\zeta_l^- = \{ \min_j \zeta_j(i) \mid 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq k \}$$

用信息熵测度 X_j 对于 X_l 第 i 个特征变量的权

1.2 特征权重的确定

基本的灰色关联度分析法采用等权重的形式求取关联度,这可能会淹没关联因素的个性信息,进而可能导致对整体接近性的排序关系的误判,这与灰色系统补充信息转化性质的目标相背离^[7]。针对此缺陷,本文分别运用范数^[8]与信息熵法^[9]确定各特征变量的权重。

用范数测度待比较图谱序列 X_j 对于理想图谱序列 X_l 第 i 个特征变量的权重因子为:

$$w_{lj}(i) = \varepsilon_{lj}(i) / \sum_{i=1}^m \varepsilon_{lj}(i) \quad (3)$$

其中 $\varepsilon_{lj}(i)$ 为 X_j 对于 X_l 在第 i 个特征变量的范数灰色关联系数,其定义为:

重因子为:

$$w_{ij}(i) = (1 - J_{ij}(i)) / (m - \sum_{i=1}^m J_{ij}(i)) \quad (6)$$

其中 $J_{ij}(i)$ 为 X_j 对于 X_l 在第 i 个特征变量的均衡度,其定义为:

$$J_{ij}(i) = - \sum_{j=1}^k f_{ij}(i) \ln f_{ij}(i) / \ln k \quad (7)$$

式(7)中 $f_{ij}(i) = \zeta_{ij}(i) / \sum_{j=1}^k \zeta_{ij}(i)$, 规定当 $f_{ij}(i) = 0$ 时, $\sum_{j=1}^k f_{ij}(i) \ln f_{ij}(i) = 0$ 。

1.3 模糊匹配的基本原理

中药色谱指纹图谱实际上是中药整体性的化学表征,具有“整体性”和“模糊性”^[2]。为了更好地同时反映中药色谱指纹图谱的这两种特征,把模糊匹配中“匹配度”的思想引入到中药色谱指纹图谱的模式识别中。在中药指纹图谱模式识别中,由于待比较图谱 X_j 的特征条件与理想标准图谱 X_l 的特征条件不一定完全相同,因此在进行匹配时必须首先考虑 X_j 的特征条件与 X_l 的特征条件近似匹配的问题,即它们的匹配程度是否大于某个预先设定的阈值,其次考虑“最大匹配度”原则。目前常用的计算匹配度的方法主要有贴进度、语义距离、关联度以及相似度等^[10]。本研究将基于范数与信息熵赋权法的灰色关联度作为匹配度的度量方法应用于指纹图谱模式识别中。

在标准图谱 $X_l (l = 1, 2, \dots, n)$ 较完备的情况下,根据灰色关联度的原理,我们可定义加权灰色关联度矩阵为 R 。

$$R = (\gamma_{lj})_{n \times k} \quad (8)$$

其中 n 为理想图谱数, k 为待比较图谱数, γ_{lj} 为第 j 个待比较图谱序列与第 l 个理想图谱序列的加权灰色关联度。

在 R 的第 j 列中,如果 $\gamma_{l_0 j} = \max_{1 \leq l \leq n} (\gamma_{lj})$, 则将待比较图谱 X_j 归入第 l_0 类。也就是说, X_j 对哪个理想图谱序列的灰色关联度最大,就将它归入哪个理想图谱序列所属的类别中。这实际上就是最大匹配度原则。

2 实验部分

2.1 样品来源

50批毛橘红药材样品(S1~S50)均采自化州市绿色生命有限公司化橘红GAP基地,其品种分别为大茶岭、黄绒果、假西洋、金钱肚、凤尾以及陆福^[11];

6批光橘红样品:其中S51~S53采于GAP基地,S54~S56为市售。经广州中医药大学林励研究员鉴定,均为毛橘红与光橘红正品。

2.2 仪器、对照品与试剂

Waters 2965 高效液相色谱(HPLC)系统(Waters Corporation, Milford, MA, USA):四元泵,在线真空脱气系统,自动进样器,柱温箱,二极管阵列检测器,Empower3 工作站。

柚皮苷对照品(批号110722~201009)由中国药品生物制品检定所提供,芹菜素对照品(批号520-36-5)由北京恒元启天化工技术研究院提供,纯度均为99%。野漆树苷、柚皮素对照品均为自制,采用峰面积归一化法计算,纯度分别为99.32%、98.68%。

甲醇(色谱纯,德国默克公司),冰乙酸(优级纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);其余所用试剂均为分析纯。

2.3 色谱条件

Waters Symmetry C₁₈ 色谱柱(250 mm × 4.6 mm, 5 μm)。流动相为A(甲醇)-B(2%(v/v)醋酸水溶液),采用梯度洗脱:0~8 min, 0~10% A; 8~12 min, 10% A~12% A; 12~15 min, 12% A~13% A; 15~25 min, 13% A~25% A; 25~60 min, 25% A~55% A; 60~65 min, 55% A~62% A; 65~68 min, 62% A~70% A。流速1.0 mL/min,检测波长330 nm;柱温箱(35 ± 5) °C;进样量10 μL。

2.4 溶液的制备

2.4.1 对照品溶液的制备

取柚皮苷、野漆树苷、柚皮素、芹菜素对照品适量,精密称定,用甲醇配制成柚皮苷20 g/L、野漆树苷0.3 g/L、柚皮素1.5 g/L、芹菜素0.04 g/L的混合对照品储备液。

2.4.2 供试品溶液的制备

按照文献^[11]方法,精密称定干燥至恒重的样品粉末(过4号筛)0.2 g,每个样品平行做3份,置具塞锥形瓶中,加石油醚20 mL,超声波(500 W, 40 kHz)提取30 min,弃去石油醚液,待样品中残存的石油醚全部挥去后,加甲醇20 mL,密闭,精密称定;再用超声波提取30 min,取出,放凉,用甲醇补足减失的重量,摇匀,滤过,并用甲醇洗涤滤器和滤渣数次,滤液全部转移到100 mL容量瓶中,用甲醇定容至刻度,取适量用0.45 μm滤膜过滤,即得供试品溶液。

3 结果与讨论

3.1 方法学考察结果

3.1.1 精密度

取同一份供试品溶液 10 μL , 连续进样 5 次, 考察保留时间及峰面积的一致性, 结果显示各主要色谱峰(按峰面积归一化法计含量大于 5% 的色谱峰, 下同)的保留时间和峰面积的 RSD 均小于 4%。

3.1.2 重复性

取同一批次化橘红药材粉末, 按 2.4.2 节方法制备, 平行制备 5 份, 考察保留时间和峰面积的一致性, 结果显示各主要色谱峰的保留时间和峰面积的 RSD 均小于 4%。

3.1.3 稳定性

取同一份供试品溶液 10 μL , 分别在 1、8、16、24 和 48 h 连续测定 5 次, 考察保留时间和峰面积的一致性, 结果显示各主要色谱峰的保留时间和峰面积的 RSD 均小于 4%。

3.2 HPLC 方法的建立

按 2.3 节的色谱条件测定 56 批次化橘红药材样本的色谱指纹图谱, 见图 1。

通过观察图 1 中各批化橘红样本的图谱发现, 主要成分聚集在 5 ~ 60 min 内, 因此选定此时间段为化橘红色谱指纹区。

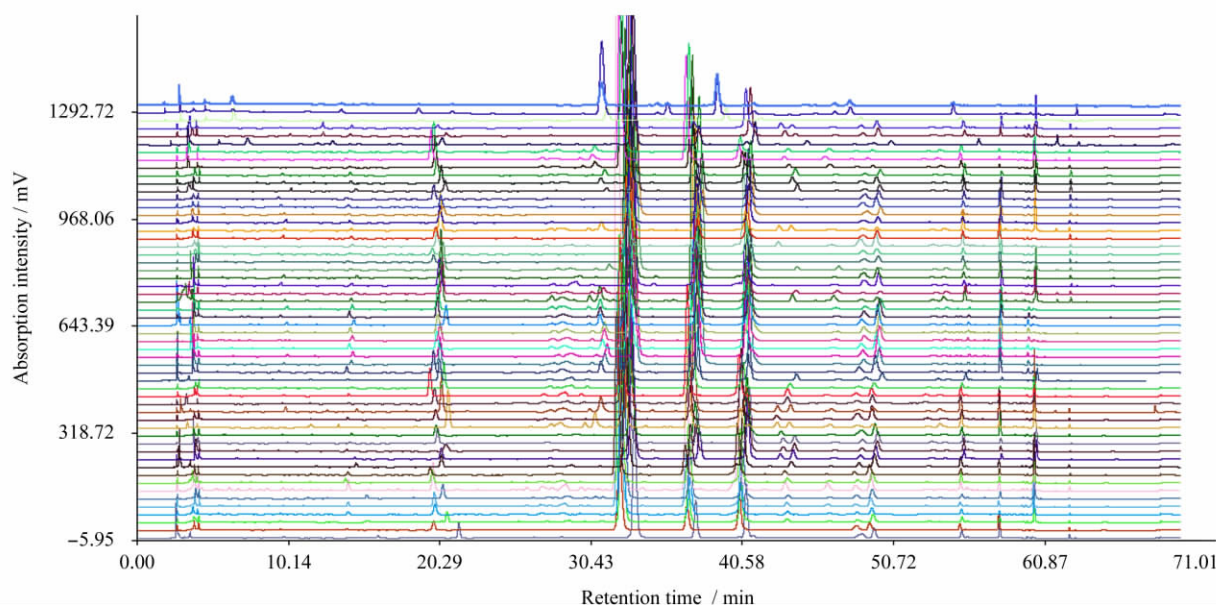


图 1 56 批化橘红药材的 HPLC 指纹图谱

Fig. 1 HPLC fingerprints of 56 batches of Exocarpium Citrus Grandis

3.3 化橘红的 HPLC 特征提取

基于所选定的区域采用模糊匹配方法自主识别所有色谱峰^[12]: 以柚皮苷、野漆树苷、柚皮素和芹菜素为参照峰校正各色谱峰的相对保留时间, 以峰面积归一化法量度各色谱峰的特征。从而获得化橘红 HPLC 的数量化特征作为灰色关联分析数据。

3.4 基于灰色系统理论的化橘红品种识别模型的建立与识别结果

采用交叉验证法进行识别验证, 将每个样本依次作为待测样本, 其余样本按照品种分组以均值法建立理想图谱的学习模型, 用于识别每个样本的归属。根据灰色系统理论, 分辨系数取值 0.5, 按照公式(1) 求出各待比较图谱对于理想图谱在每个特征峰变量的灰色关联系数, 再按 1.2 节的方法以该灰色关联系数的结果分别运用信息熵与范数法确定权重, 进而运用公式(2) 求出各待比较图谱与理想图

谱的灰色关联度。考虑到本研究中的理想图谱 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 较完备, 即化橘红的理想图谱库的品种较齐全的情况, 因此, 最后以该灰色关联度为依据应用“最大匹配度”原则进行模式识别, 从而判断出各样本所属的栽培品种。部分结果如表 1、表 2 所示。

为了验证本算法的有效性, 与采用均值灰色关联法^[3]的计算结果进行了比较, 结果如表 3 所示。

实验结果显示, 基于灰色系统理论的化橘红品种识别模型取得了满意的结果: 熵权与范数的灰色关联分析对光橘红样品的拒真率与认假率均为零, 即能准确识别出毛橘红与光橘红, 而且对毛橘红不同栽培品种有较好的识别率: 分别为 96.42% 与 92.85%; 而均值灰色关联分析的识别率仅有 76.78%, 其中有 2 批光橘红样本分别被误判为毛橘红中的大茶岭与陆福。这主要是因为化橘红是非典

型药材,不同品种的化橘红的第一大成分均为柚皮苷,其含量远远高于其他成分,因此即使其他成分变化很大,其对识别结果的影响相对于柚皮苷的影响

效果很微小。而通过信息熵与范数赋权的灰色关联度的意义和计算结果,能够方便、有效地分析出各特征成分的影响程度。

表1 部分不同品种化橘红色谱指纹图谱与各品种的参照图谱之间的熵权灰色关联度及判定结果

Table 1 Entropy grey relational grades among some samples and the reference chromatographic fingerprints (CF) of different varieties of Exocarpium Citrus Grandis and recognition results

Sample	Reference CF							Recognition result	Actual variety
	DCL	JXY	FW	JQD	HRG	LF	GJH		
S1	0.967	0.841	0.839	0.793	0.851	0.863	0.816	DCL	DCL
S3	0.880	0.902	0.859	0.850	0.860	0.852	0.825	JXY	JXY
S12	0.857	0.851	0.890	0.814	0.867	0.859	0.788	FW	FW
S21	0.833	0.808	0.807	0.901	0.815	0.8204	0.802	JQD	JQD
S34	0.846	0.834	0.852	0.811	0.906	0.863	0.819	HRG	HRG
S45	0.909	0.849	0.849	0.831	0.868	0.905	0.811	DCL	LF
S52	0.824	0.831	0.802	0.794	0.826	0.838	0.945	GJH	GJH

DCL: Da Chaling; JXY: Jia Xiyang; FW: Feng Wei; JQD: Jin Qiandu; HRG: Huang Rongguo; LF: Lu Fu; GJH: Guang Juhong.

表2 部分不同品种化橘红色谱指纹图谱与各品种的参照图谱之间的范数灰色关联度及判定结果

Table 2 Norm grey relational grades among some samples and the reference CF of different varieties of Exocarpium Citrus Grandis and recognition results

Sample	Reference CF							Recognition result	Actual variety
	DCL	JXY	FW	JQD	HRG	LF	GJH		
S2	0.960	0.873	0.860	0.853	0.867	0.882	0.827	DCL	DCL
S5	0.899	0.904	0.858	0.844	0.866	0.869	0.782	JXY	JXY
S13	0.851	0.827	0.860	0.799	0.839	0.825	0.828	FW	FW
S25	0.831	0.818	0.819	0.886	0.832	0.830	0.818	JQD	JQD
S35	0.894	0.855	0.860	0.852	0.898	0.874	0.859	HRG	HRG
S46	0.915	0.852	0.851	0.852	0.870	0.900	0.870	DCL	LF
S53	0.856	0.797	0.816	0.824	0.858	0.820	0.937	GJH	GJH

表3 用不同方法对不同品种化橘红的识别结果

Table 3 Recognition results of different varieties of Exocarpium Citrus Grandis by different methods

%

Variety	Entropy grey relation analysis		Norm grey relation analysis		Mean grey relation analysis	
	FRR	FAR	FRR	FAR	FRR	FAR
	DCL	0.00	3.70	0.00	7.40	0.00
JXY	0.00	0.00	9.09	0.00	18.18	0.00
FW	11.11	0.00	11.11	0.00	11.11	2.13
JQD	0.00	0.00	0.00	0.00	11.11	0.00
HRG	0.00	0.00	0.00	0.00	16.67	0.00
LF	7.69	0.00	15.38	0.00	46.15	2.33
GJH	0.00	0.00	0.00	0.00	33.33	0.00
Recognition rate	96.42		92.85		76.78	

FRR: False reject rate; FAR: False accept rate.

为了识别出不同品种的化橘红,通过构建相应的学习模型,引入模糊匹配中“最大匹配度”原则获取识别结果,能较好地辨别化橘红的品种。然而,各栽培品种的化橘红药材之间虽然存在差异,但因物种亲缘相近,不同品种化橘红的化学成分种类与含量仍十分接近^[13],这可能导致“匹配度”较接近,如样品45号与大茶岭、陆福的参照图谱的熵权灰色关联度分别为0.909与0.905,这时就需要药学分析者进行进一步的比较,找出合理识别结果。

4 结论

灰色关联分析对数据要求较低,既可直接采用中药色谱指纹图谱的全谱吸收强度数据,又可采用色谱峰数据(峰面积或峰高);相对聚类、神经网络以及相似度等常用的数据挖掘方法,灰色关联分析的计算量较低;通过信息熵与范数确定权重,可修正各特征属性的差异。

引入模糊匹配中的“匹配度”这一概念,很好地体现了中药色谱指纹图谱所具有的“整体性”和“模

糊性”的特点。通过灰色关联分析结果可以得出样本属于不同品种或等级中药的匹配度(关联度)能够科学、有效地提供品种识别或质量分析的依据。当理想图谱的学习模型完备时,分析者可根据“最大匹配度”原则获取识别结果;当理想图谱的学习模型不完备时,识别的关键是阈值的设定。在实际应用时,分析者可根据接收者操作特征(ROC)曲线分析确定阈值^[14]。

研究表明,灰色系统理论在中药色谱指纹图谱模式识别的应用中具有很大的指导意义,是一种科学、简单、有效的方法。

参考文献:

- [1] Wang Y, Liang Q L, Hu P, et al. Chinese Journal of Chromatography (王勇,梁琼麟,胡坪,等. 色谱), 2008, 26(2): 136
- [2] Yi L Z, Wu H, Liang Y Z. Chinese Journal of Chromatography (易伦朝,吴海,梁逸曾. 色谱), 2008, 26(2): 166
- [3] Deng J L. Grey Theory. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press (邓聚龙. 灰理论基础. 武汉: 华中科技大学出版社), 2002
- [4] Pharmacopoeia Commission of the People's Republic of China. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: Part I. Beijing: China Medical Science Press (国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部. 北京: 中国医药科技出版社), 2010: 69
- [5] Lin L, Chen Z X, Yuan X J, et al. Journal of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine (林励,陈志霞,袁旭江,等. 广州中医药大学学报), 2004, 21(4): 308
- [6] Ke H F, Liu S F, Chen Y G, et al. Systems Engineering and Electronics (柯宏发,刘思峰,陈永光,等. 系统工程与电子技术), 2010, 32(3): 544
- [7] Zhou Y N, Zhu Y A. Journal of Northwestern Polytechnical University (周延年,朱怡安. 西北工业大学学报), 2011, 29(1): 12
- [8] Tao Z S, Wei H, Lin J L. Journal of Machine Design (陶志穗,魏航,林健良. 机械设计), 2009, 26(8): 69
- [9] Wei H, Lin L, Chen Q Q, et al. Traditional Chinese Drug Research & Clinical Pharmacology (魏航,林励,陈沁群,等. 中药新药与临床药理), 2011, 22(2): 190
- [10] Li H M, Qin G H, Hao B, et al. Computer Engineering (李红明,秦贵和,郝勃,等. 计算机工程), 2010, 36(6): 184
- [11] Zhao H Y, Wen H T, Lin L, et al. Traditional Chinese Drug Research & Clinical Pharmacology (赵红英,文海涛,林励,等. 中药新药与临床药理), 2010, 21(2): 183
- [12] Wei H, Lin L, Zhang H L, et al. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2012 9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2012). Chongqing, 2012: 292
- [13] Wang L J, Lin L, Wei H, et al. China Journal of Chinese Materia Medica (王莲婧,林励,魏航,等. 中国中药杂志), 2012, 37(20): 3092
- [14] Wang X H, Shu P, Cao L. Computer Science (王旭辉,舒平,曹立. 计算机科学), 2010, 37(8): 240