

植物功能成分浸提过程动力学研究进展

王唯涌^{1,2,3} 韩鲁佳^{1,2} 王振^{1,2} 吴万灵^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院,北京 100083; 2. 现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083;
3. 中国水产科学研究院,北京 100039)

摘要 针对植物功能成分浸提过程动力学研究的核心问题,结合扩散原理,对国内外相关研究进展进行综述,并就不同类型模型的基本内容及特点进行分析。研究表明:由于植物组织结构和所含功能成分的多样性以及浸提过程的复杂性,目前尚无一个普遍适用的模型。依据物料组织结构以及功能成分浸提过程的特点,探索和建立适用范围更广的动力学模型仍是该领域研究的核心问题;而对于应用研究,改进模型参数的确定方法,提高模型在提取工艺优化方面的实用性及预测精度应是研究的重点。

关键词 植物功能成分;浸提过程;动力学研究

中图分类号 TS 201.7; TS 272.5+2

文章编号 1007-4333(2006)01-0100-05

文献标识码 A

Survey of kinetic studies on infusion of functional components from plants

Wang Weiyong^{1,2,3}, Han Lujia^{1,2}, Wang Zhen^{1,2}, Wu Wanling^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. Chinese Academy of Fishery Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Literatures of studies on plant infusion kinetics were surveyed, and analysis of different models and relevant methods were also given. It was demonstrated that none of the current models fits the experimental data of plant infusion satisfactorily, because of the difference of plant matrices, the variety of extracting components and the complexity of infusion processes. In future work, based on analyzing the characteristics of plant matrices and infusion processes, setting up a model with a wider applicability is an attraction, and improving the methods of calculating parameters of model to increase its precision of prediction is the key point.

Key words plant functional components; infusion; kinetic studies

提取是植物功能成分开发与利用的重要环节。提取技术和工艺不仅对植物功能成分的得率、纯度和生产成本产生直接影响,而且对下游产品的功能和品质具有重要意义。近年来随着植物功能产品生产的规范化和产品有效成分的标准化进程的推进,提取工艺优化的基础研究逐步深入,其中植物功能成分浸提过程动力学研究得到国内业内的重视。本研究旨在通过对近年来国内外浸提过程动力学相关研究进展的总结和分析,探讨今后的重点研究方向,以为植物功能成分浸提工艺的研究提供一定的理论借鉴。

1 基本原理

从传质角度,植物功能成分浸提过程是溶质从植物内部(固相)向溶液(液相)进行扩散的两相间传质过程,可以看作是由溶剂扩散进入物料颗粒,颗粒内部有效成分被溶剂溶解后向表面扩散,以及溶质由颗粒表面向溶液主体扩散等3个同时发生的过程组成。其中所涉及到的基本原理——扩散理论^[1-2]源自 Thomas Graham 的气体、液体扩散试验,以及 Adolf Eugen Fick 在假设扩散与导热数学基础相同的前提下,类比 Fourier 定律所推导出的扩散定律

收稿日期:2005-09-15

基金项目:国家“十五”科技攻关计划课题(2001B501A30);北京市科技计划项目课题(Y704003040511)

作者简介:王唯涌,博士研究生;韩鲁佳,教授,博士生导师,通讯作者,主要从事生物质资源开发利用的研究, E-mail:hanlj@cau.edu.cn

—Fick 第一定律

$$J_a = A j_a = - A D_{ab} \frac{\partial C_a}{\partial z} \quad (1)$$

式中: J_a 为目标化合物组分 a 的质量通量, 表示通过扩散发生面积 A 传递的组分 a 的质量, kg/s ; j_a 为组分 a 的质量通量密度, 表示单位时间内通过扩散发生面积 A 传递的组分 a 的质量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; D_{ab} 为组分 a 在传质介质 b 中的扩散系数, m^2/s ; $\partial C_a/\partial z$ 为组分 a 在 z 方向的质量浓度梯度, $\text{kg}/(\text{L} \cdot \text{m})$ 。Adolf Eugen Fick 进一步导出了一般形式的守恒方程

$$\frac{\partial C_a}{\partial t} = D_{ab} \left[\frac{\partial^2 C_a}{\partial z^2} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial z} \frac{\partial C_a}{\partial z} \right] \quad (2)$$

其中面积 A 为常数时, 式(2)即为一维非稳态扩散的基本方程——Fick 第二定律。

假设组分 a 质量通量 J_a 与其质量浓度差成正比, 可引入另一含有比例常数 k 为传质系数的动力学模型

$$J_a = A j_a = k(C_1 - C_2) \quad (3)$$

式中: k 为传质系数, m/s ; $(C_1 - C_2)$ 为质量浓度差, kg/L 。

实际应用中可根据问题特点选择上述 2 种模型解决浸提过程扩散问题。对于较为基础的研究, 需要知道浓度与位置及时间的关系, 可用含有扩散系数的模型; 对于较为实际的问题, 希望用一个实验去预测类似实验结果, 则可用含有传质系数的模型。

2 相关研究进展

2.1 国外相关研究进展

将植物功能成分浸提过程动力学作为重点研究始于对茶叶、咖啡等植物中功能成分浸提特性的考察。Long^[3]对红茶中可溶成分的浸提速率进行了测定; Spiro 和 Siddique^[4]则对 Koonsong Broken Pekoe 茶中茶黄素、茶玉红精和咖啡因等成分的浸提速率常数进行了考察。Long 与 Spiro 的 2 个研究组都推导出了浸提动力学基本模型

$$\ln \left(\frac{C}{C - C_0} \right) = k_{\text{obs}} t \quad (4)$$

式中: C 为随时间 t 变化的溶液质量浓度, g/mL ; C_0 为平衡时的溶液质量浓度, g/mL ; k_{obs} 为总速率常数, $1/\text{s}$ 。

Spiro 等^[5-6]分别将茶叶和咖啡豆假设为平板和球形, 给出了式(4)的具体推导过程, 并分别建立

了茶叶和咖啡豆的传质系数与扩散系数之间的关系

$$\frac{1}{k_{\text{obs}}} \left(\frac{A}{V} + \frac{K}{d} \right) = \frac{1}{k} = \frac{1}{k_{-1}} + \frac{Kd}{2D_{\text{茶叶}}} + \frac{1}{D_{\text{液}}} + \frac{K^2}{2D_{\text{液}}d} \quad (5)$$

式中: A 为茶叶总表面积, m^2 ; V 为溶剂体积, mL ; K 为分配系数, $K = k_1/k_{-1} = C/C_0$; d 为叶片厚度的 $1/2$, m ; k 为代换的传质系数, $1/\text{s}$; k_{-1} 为溶剂向茶叶片内的传质系数, $1/\text{s}$; $D_{\text{茶叶}}$ 为茶叶片内扩散系数, m^2/s ; d 为茶叶片表面边界层厚度, m ; $D_{\text{液}}$ 为溶质在溶剂中的扩散系数, m^2/s 。

$$\frac{1}{k_{\text{obs}}} \left(1 + \frac{m}{KV} \right) = \frac{1}{k} = \frac{r^2}{12D_{\text{咖啡}}} + \frac{r}{3k_1} + \frac{r}{3KD_{\text{液}}} \quad (6)$$

式中: m 为咖啡物料的质量, g ; ρ 为咖啡物料的质量, kg/m^3 ; r 为咖啡豆的平均半径, m ; $D_{\text{咖啡}}$ 为咖啡豆内部的扩散系数, m^2/s ; k_1 为由咖啡豆内部向溶剂的传质系数, $1/\text{s}$; d 为咖啡豆表面边界层厚度, m ; $D_{\text{液}}$ 为溶质在溶剂中的扩散系数, m^2/s 。

假设球形物料内部功能成分的扩散是整个传质过程的控制步骤, 则式(6)可简化为

$$k = 12D_{\text{物}}/r^2 \quad (7)$$

式(7)将 2 类扩散模型联系在一起, 在后来浸提动力学相关研究当中与基本模型(式(4))都得到了广泛的应用。

根据实验数据求解模型(式(4))参数, 多数结果存在一个很小的截距。Price^[7]对式(4)进行了修正

$$\ln \frac{C}{C - C_0} = k_{\text{obs}} t + \quad (8)$$

式中: 待定参数 k_{obs} 、待定常数 由图解法求得。

So 和 MacDonald^[8]在对菜籽油浸提过程动力学研究时提出, 从压榨后的油菜籽中浸提油脂的过程可分为洗涤和扩散 2 个阶段, 而扩散阶段又可以分为快速扩散和慢速扩散 2 个同时发生的过程。其根据是: 在压榨加工过程中, 油脂从菜籽细胞中挤出, 有一些细胞发生破裂, 其余完好无损; 被挤出的油脂大部分流到菜籽外——被压榨出, 其余的一部分被留在破碎细胞内和细胞间隙中, 菜籽表面也会附着一层油脂。浸提过程中, 菜籽表面这部分油脂在初始阶段($t=0$)瞬间即从菜籽表面洗涤下来溶入溶剂——洗涤过程; 破碎细胞以及细胞间隙中的油脂由于扩散阻力小会以较快的速度扩散到溶剂中——快速扩散过程; 完好细胞当中的油脂由于扩散阻力大则会以较慢的速度扩散到溶剂中——慢速扩

散过程。按照这样的假设,所建立的三项模型为

$$C = C_w [1 - \exp(-k_w t)] + C_{d1} [1 - \exp(-k_{d1} t)] + C_{d2} [1 - \exp(-k_{d2} t)] \quad (9)$$

$$C = C_w + C_{d1} + C_{d2} \quad (10)$$

式中: C 为菜籽油在浸提液中随时间 t 变化的质量浓度, g/mL ; C_w 为假设在浸提液中由于洗涤作用所贡献的质量浓度, g/mL ; C_{d1} 为假设在浸提液中由于快速扩散过程所贡献的质量浓度, g/mL ; k_{d1} 为快速扩散过程速率常数, $1/s$; C_{d2} 为假设在浸提液中由于慢速扩散过程所贡献的质量浓度, g/mL ; k_{d2} 为慢速扩散过程速率常数, $1/s$; C 为平衡时浸提液中菜籽油的质量浓度, g/mL 。式(9)中的6个待定参数可采用多元回归方法求得。该模型是根据外扩散发生前植物功能成分——菜籽油已存在于物料表面这一现象,提出了洗涤这一浸提过程,并在表达式中进行了合理的数学描述;但对快速扩散过程与慢速扩散过程存在的机理未做深入研究。

Spiro 和 Kandiah^[9]采用 So 的模型(式(9))对姜根中提取姜辣素的浸提过程进行动力学研究认为:在式(9)中 k_w 很大的情况下,可将 $\exp(-k_w t)$ 项略去;式(9)和(10)经整合后可得到一级两项浸提过程动力学模型

$$\frac{C - C_w}{C} = \frac{C_{d1}}{C} \exp(-k_{d1} t) + \frac{C_{d2}}{C} \exp(-k_{d2} t) \quad (11)$$

在待定参数求解方面,他们认为在浸提过程的后半程(t 较大时)浸提液中功能成分浓度 C 主要来自 C_{d2} 的贡献,则式(11)经整理得

$$\ln \frac{C - C_w}{C} = \ln \frac{C_{d2}}{C} - k_{d2} t \quad (12)$$

此时,待定参数 C_{d2} 和 k_{d2} 可由图解法求得。而在浸提过程的前半程(t 较小时)浸提液中功能成分浓度 C 的贡献率则主要来自 C_{d1} 。此时可将 C_{d2} 、 k_{d2} 作为常数项代入式(11),整理得

$$\ln \left[\frac{C - C_w}{C} - \frac{C_{d2}}{C} \right] = \ln \frac{C_{d1}}{C} - k_{d1} t \quad (13)$$

式中的待定参数 C_{d1} 和 k_{d1} 同样由图解法求得。

Zanoni 等^[10]在考察咖啡可溶物提取速率时发现,咖啡中大多数可溶组分以极快的速率溶出,并将咖啡的浸提过程看作洗涤和扩散等2个阶段,其中扩散阶段只作为一个单一过程,相应的一级浸提过程动力学模型为

$$\ln \left[\frac{C - C_0}{C - C_w} \right] = k_{obs} t \quad (14)$$

式中: C 为浸提液中目标化合物随时间 t 变化的质量浓度, g/mL ; C_0 为初始时的质量浓度, g/mL ; C_w 为平衡时的质量浓度, g/mL ; k_{obs} 为总速率常数。整理得

$$\ln \left[\frac{C}{C - C_0} \right] = k_{obs} t + \ln \left[\frac{C}{C - C_0} \right] \quad (15)$$

笔者认为可以将该式看作是给出了 Price 修正模型(式(8))中待定系数的具体形式—— $\ln [C / (C - C_0)]$ 。

2.2 国内相关研究进展

国内对植物功能成分浸提过程动力学的研究多集中于传统中草药和茶叶的功能成分提取。李有润和 Hou 等^[11-12]以当归芍药散为例研究了中草药成分的浸提过程。依据传质系数模型,建立了提取过程中溶质在中草药颗粒内部和外部的传质微分方程

$$\frac{dM_1}{dt} = k_1 A_1 (C_0 - C_1) - (k_D + k_V) C_1 \quad (16)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = k_2 A_2 (C_1 - C_2) \quad (17)$$

式中: M_1 和 M_2 分别为通过细胞膜和从颗粒表面向溶液主体扩散的溶质质量, g ; k_1 和 k_2 分别为通过细胞膜向溶液主体扩散的总传质系数和通过颗粒表面向溶液主体扩散的总传质系数, m/s ; k_D 和 k_V 分别为溶质分解系数和溶质挥发系数, mL/s ; C_0 、 C_1 和 C_2 分别为细胞内溶质、细胞外溶质和溶液主体的质量浓度, g/mL 。

银又新^[13]在研究微波辅助浸提丹参中丹参酮时,运用了 So 和 MacDonald 的含有洗涤过程、快速扩散和慢速扩散过程的三项模型(式(9)),将物料简化为一维平板,建立以 Fick 第二定律为基础的平板一维非稳态扩散微分方程,利用分离变量法进行求解^[14],并通过合理简化得到了快速扩散速率常数和慢速扩散速率常数的表达式

$$\begin{aligned} k_{d1} &= 2 D_{ed1} / b^2 \\ k_{d2} &= 2 D_{ed2} / b^2 \end{aligned} \quad (18)$$

式中: D_{ed1} 和 D_{ed2} 分别为快速和慢速扩散系数, m^2/s ; b 为平板厚度, m 。式(18)可以认为是对 Spiro 模型中提取速率常数与扩散系数之间关系(式(7))的一个补充。

林亚平等^[15]提出, Fick 第一扩散定律中的扩散系数并非严格常数,而是溶液中目标组分质量浓度

的函数

$$D = D_0 C^n \quad n > 0 \quad (19)$$

式中： D_0 为固有扩散系数，是一个仅与扩散体系的物质特性、温度有关的常数， m^2/s ； C 为扩散面处溶液质量分数， g/g ； n 为常数。而浓度梯度则是时间的函数

$$\frac{dC}{dx} = C_0 \exp(-t) \quad (20)$$

式中： C_0 为某扩散面上的初始浓度梯度， $g/(mL \cdot m)$ ； t 为待定常数，当 $t < 0$ 、 $t > 0$ 、 $t = 0$ 时分别反映浓度梯度随时间 t 衰减、增加和恒定不变的情况。则修正后的 Fick 第一定律为

$$\frac{dW}{dt} = -D_0 C^n A C_0 \exp(-t) \quad (21)$$

dW/dt 为通过扩散面物质质量随时间的变化率， kg/s 。该修正不仅将扩散系数 D 与质量浓度 C 联系起来，而且也将浓度梯度 dC/dx 与时间 t 联系起来，使得 Fick 第一定律中的空间变量转换为时间变量，可操作性进一步增强。

储茂泉等^[16]在林亚平等研究的基础上导出了中草药浸提过程动力学模型

$$C_B = [t / (M - R)]^{1/(1-n)} \quad (22)$$

式中： C_B 为药液中溶质 B 随时间 t 变化的质量浓度， g/mL ； $M = K(1-n)D_0^{1/n}$ ， $R = 1 + \dots$ ，分别为式 $dC_B/dx = t$ ($t > 0$ ， $-1 < t < 0$) 中的常数； m 为颗粒粒度， m ； M 为溶剂倍量（溶剂体积与物料质量之比）， mL/g ； R 为药材充分吸湿所需的溶剂体积与干药材质量比， mL/g 。该模型在浸提温度对丹参酮浸出浓度影响以及姜辣素沸腾浸提过程等研究中得到了应用^[16-17]。但在药材粒度过细时，扩散过程不再是浸提过程的唯一控制步骤，而料液比过小将会影响溶质的溶解过程，因此该模型不适用于药材粒度过细和料液比过小的情况。储茂泉等^[18]还对中草药颗粒预浸后再提取的浸提过程动力学进行了考察，依据 Fick 第二定律建立了浸提动力学微分方程，并利用分离变量法进行求解，得到了形式与 Zanoni 模型完全一致的表达式（式 15）。

宋洪波等^[19]针对成熟红茶叶片组织结构具有细胞内空间和细胞外空间的特点，将红茶颗粒内部细胞内的区域作为浸提过程中的高阻力区，将细胞外以及颗粒边缘破碎细胞的区域作为浸提过程中的低阻力区；认为可溶组分扩散过程中，低阻力区的组分直接向颗粒表面进行扩散，而高阻力区的组分需

经过低阻力区再向颗粒表面进行扩散。基于这一假设构建两个区域的质量平衡微分方程，联立求解，推导出浸提过程中溶液浓度随时间变化的一级两项表达式

$$C_t = C_1[1 - \exp(-\lambda_1 t)] + C_2[1 - \exp(-\lambda_2 t)] \quad (23)$$

其中

$$C_1 = -\frac{m_0}{(P_{1-w} + w_1) H_m (1 - \lambda_2)} \left\{ 1 + \frac{(1 - r_{ms}) d_{cell}}{6 \phi_s s_s} \left[\frac{3k}{R} + H_m \right] \right\}$$

$$C_2 = -\frac{m_0}{(P_{1-w} + w_1) H_m (1 - \lambda_1)} \left\{ 1 + \frac{(1 - r_{ms}) d_{cell}}{6 \phi_s s_s} \left[\frac{3k}{R} + H_m \right] \right\}$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2} \left[\frac{3k}{H_m R} + \frac{6 \phi_s s_s H_m + H_s}{d_{cell} H_m H_s} \right] \pm$$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\left[\frac{3k}{H_m R} + \frac{6 \phi_s s_s H_m + H_s}{d_{cell} H_m H_s} \right]^2 - \frac{72 \phi_s s_s k}{H_m H_s d_{cell} R}}$$

式中： C_t 为 t 时刻溶液中溶质的质量浓度， g/mL ； C_1 为快速溶质浸提平衡质量浓度，即低阻力区溶质的贡献， g/mL ； C_2 为慢速溶质浸提平衡质量浓度，即高阻力区溶质的贡献， g/mL ； λ_1 为快速溶质浸提速率常数， $1/s$ ，即低阻力区溶质浸提速率常数； λ_2 为低速溶质浸提速率常数，即高阻力区溶质浸提速率常数 $1/s$ ； H_m 为代换项， $H_m = \frac{r_{ms}}{m} + (1 - \phi) r_{ms} \cdot s P_{1-w}$ ； H_s 为代换项， $H_s = \frac{r_{ms}}{m} + (1 - \phi) (1 - r_{ms}) \cdot s P_{1-w}$ ； m_0 为每 g 茶叶中目标成分的含量， g/g ； P_{1-w} 为浸提平衡时溶质在茶叶与溶液之间的分配系数； w_1 为茶叶吸水膨胀后实际的溶剂倍量， mL/g ； k 为茶叶颗粒与溶剂之间的传质系数， $1/s$ ； r_{ms} 为组分在低阻力区与高阻力区的分配系数； R 为茶叶颗粒的平均半径， m ； d_{cell} 为细胞平均直径， m ； ϕ 为茶叶颗粒的孔隙率， $\%$ ； ϕ_s 为高阻力区的孔隙率， $\%$ ； s_s 为细胞的传质系数， $1/s$ ； s_s 为吸水后高阻力区的含水率， $\%$ ； s_s 为吸水后高阻力区的含水率， $\%$ ； ρ_f 为溶剂的密度， kg/m^3 ； ρ_s 为茶叶的密度， kg/m^3 。可以看出式 (24) 中 4 个待定参数分别由多个参数组成，难以通过实验测定直接确定，但可采用多元回归方法求得。

该项模型可看作是对前人“洗涤、快速扩散过程、慢速扩散过程——三过程假设”机理进行的较为深入的研究，只是将洗涤过程纳入到快速扩散过程之中。另外可以看出，平衡时溶液的浓度 $C_{eq} =$

$C_1 + C_2$,式(24)可改写为

$$C_f = C_{eq} \{ r [1 - \exp(-k_1 t)] + (1 - r) [1 - \exp(-k_2 t)] \} \quad (25)$$

式中 r 为快速项所占的比例, %。

3 结束语

研究者所建模型都是在扩散传质基本原理的基础上,对特定植物物料结构抽象简化而推导出的,基本揭示了相应植物功能成分浸提过程的动力学规律,但是由于植物组织结构的复杂性,其所含功能成分的多样性,加之浸提过程又是一个非常复杂的固-液两相间传质过程,所以至今还没有一个普遍适用的模型。今后该领域的核心问题仍是:依据物料固有属性以及功能成分浸提过程的特点,探索、建立适用应用范围更广的动力学模型,从而更好地揭示植物功能成分浸提过程的规律。

现有对模型中的待定参数求解方法多是根据特定浸提工艺条件下的实验数据采用最小二乘法拟合求得,所得参数不能用于其他工艺条件,因此还无法将模型直接用于工艺参数优化的工作。如何改进模型参数的求解方法,提高其实用性及预测精度,并能够直接用于工艺参数优化应是今后研究的重点。

参 考 文 献

- [1] EL 柯斯乐. 扩散-流体系统中的传质[M]. 王宇新, 姜忠义,译. 北京:化学工业出版社,2002:1-30
- [2] 王运东,骆广生,刘谦. 传递过程原理[M]. 北京:清华大学出版社,2002
- [3] Long V D. Aqueous extraction of black leaf tea, Experiments with a stirred column[J]. J Food Technol, 1979,14:449-462
- [4] Spiro M, Siddique S. Kinetics and equilibria of tea infusion: Kinetics of Extraction of Theaflavins and Caffeine from Koonsong Broken Pekoe [J]. J Sci Food Agric, 1981,32:1135-1139
- [5] Spiro M, Jago D S. Kinetics and equilibria of tea infusion (Part), Rotating-disc experiments interpreted by a steady-state model[J]. J Chem Soc Faraday Trans,1982, 78:295-305
- [6] Spiro M, Selwood R M. Kinetics and mechanism of caffeine infusion from coffee: The Effect of Particle Size[J]. J Sci Food Agric,1984,35:915-924
- [7] Price W E. Kinetics and equilibria of tea infusion [D]. London:University of London,1985
- [8] So G C, MacDonald D G. Kinetics of oil extraction from canola (rapeseed) [J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering,1986,64:80-86
- [9] Spiro M, Kandiah M. Extraction of ginger rhizome: kinetic studies with acetone [J]. International Journal of Food Science and Technology,1989,24:589-600
- [10] Zaroni B, Pagliarini E, Peri C. Modelling the aqueous extraction of soluble substances from ground roasted coffee[J]. J Sci Food Agric,1992,58:275-279
- [11] 李有润,郑青. 中草药提取过程的数学模拟与优化[J]. 中草药,1997,28(7):399-401
- [12] Hou K, Zheng Q, Li Y, et al. Modeling and optimization of herb leaching processes[J]. Computers & Chemical Engineering,2000 (24):1343-1348
- [13] 银又新. 微波辅助提取丹参中有效成分丹参酮的研究[D]. 上海:华东理工大学,1997:40-44
- [14] 南京工学院数学教研组编. 数学物理方程与特殊函数[M].北京:高等教育出版社,1988:19-34
- [15] 林亚平,卢维伦. 非溶蚀型药物体系的释放动力学新模型——Fick 第一扩散定律的修正及其应用[J]. 药学学报,1997,32(11):869-873
- [16] 储茂泉,古宏晨,刘国杰. 中草药浸提过程的动力学模型[J]. 中草药,2000,31(7):504-506
- [17] 戴素娟. 中草药沸腾浸取过程研究[D]. 大连:大连理工大学,2001
- [18] 储茂泉,刘国杰. 中草药提取过程的动力学[J]. 中草药,2002,32(1):559-562
- [19] 宋洪波,毛志怀,Lian G. 植物物料红茶的浸提动力学研究[J]. 农业工程学报,2005,21(3):24-28