

综合评价不同干燥方式下连翘叶功效成分及降糖降脂活性的变化

王俊朋, 张立攀*, 李冰, 赵梦瑶, 王法云
(河南省商业科学研究所有限责任公司, 河南郑州 450003)

摘要: 考察不同干燥方式对连翘叶关键功效成分及体外降糖降脂活性的影响。分别采用自然晾干、热风烘干、真空冻干三种方式处理连翘叶, 以芦丁、连翘苷、连翘酯素、连翘酯苷 A、槲皮素含量及胰脂肪酶、 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶抑制率为评价指标, 采用 CRITIC 权重法结合灰色关联度法综合评价不同干燥方式对连翘叶生物活性的影响。结果表明相比其他干燥方式, 真空冻干能够最大限度的保留连翘叶中芦丁、连翘酯素、连翘苷、连翘酯苷 A、槲皮素含量, 此处理的连翘叶降糖降脂活性良好。PCA 分析共提取出 2 个主要成分, 累积贡献率达 85.95%, PCA 图显示 3 种干燥方式区分度良好, 皮尔逊相关性分析表明胰脂肪酶、 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶抑制率均与连翘酯苷 A、芦丁、槲皮素含量呈显著性正相关。经 CRITIC 法赋权和灰色关联度加权后可得真空冻干法综合评分最高, 活性品质最优。该研究综合比较了连翘叶不同干燥方式的优劣, 真空冻干方式获得的连翘叶功效成分含量最高, 降糖降脂活性最强, 适合于高品质产品开发。

关键词: 连翘叶; CRITIC 法; 生物活性; 灰色关联度; 干燥方式
文章编号: 1673-9078(2025)10-211-219 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1017

Comprehensive Evaluation of the Changes in Functional Ingredients and Hypoglycemic and Lipid-lowering Activities of *Forsythia suspensa* Leaves Subjected to Different Drying Methods

WANG Junpeng, ZHANG Lipan*, LI Bing, ZHAO Mengyao, WANG Fayun
(Henan Commerce Science Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The effects of different drying methods on the key functional components and *in vitro* hypoglycemic and lipid-lowering activities of *Forsythia suspensa* leaves were investigated. Natural air drying, hot air drying, and vacuum freeze-drying were used to dry *Forsythia suspensa* leaves. The contents of rutin, phillyrin, phillygenin, forsythiaside A and quercetin, as well as inhibition rates of pancreatic lipase, α -amylase, and α -glucosidase were selected as evaluation indicators. The effects of different drying methods on the biological activity of *Forsythia suspensa* leaves were comprehensively evaluated using the CRITIC weighting

引文格式:

王俊朋,张立攀,李冰,等.综合评价不同干燥方式下连翘叶功效成分及降糖降脂活性的变化[J].现代食品科技,2025,41(10):211-219.

WANG Junpeng, ZHANG Lipan, LI Bing,et al. Comprehensive evaluation of the changes in functional ingredients and hypoglycemic and lipid-lowering activities of *Forsythia suspensa* leaves subjected to different drying methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 211-219.

收稿日期: 2024-07-16 ; 修回日期: 2024-08-28 ; 接受日期: 2024-08-29
基金项目: 河南省科学院科技成果转化项目 (231611005); 河南省科学院助推科技成果转化专项 (220211009); 河南省科技开放合作项目 (220911010); 河南省科学院基本科研业务费项目 (240611009); 河南省科学院创新团队项目 (20230104); 中央引导地方项目 (Z20241471145); 河南省科技研发计划联合基金 (235200810019); 河南省重大科技专项 (231100310200)
作者简介: 王俊朋 (1990-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 功能性食品配料, E-mail : 1025628665@qq.com
通讯作者: 张立攀 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 食品和生物化学, E-mail : lipanzhang@163.com

method combined with the grey correlation method. The results showed that compared with other drying methods, the vacuum freeze-drying method could maximize the retention of rutin, phillygenin, phillyrin, forsythiaside A and quercetin contents in *Forsythia suspensa* leaves, and had good hypoglycemic and lipid-lowering activities. PCA analysis extracted two main components with a cumulative contribution rate of 85.95%. The PCA plot showed good discrimination among the three drying methods. Pearson correlation analysis showed that the inhibition rates of pancreatic lipase, α -amylase, and α -glucosidase were significantly positively correlated with the contents of forsythiaside A, rutin, and quercetin. After the evaluation by the CRITIC weighting method and grey correlation method, the vacuum freeze-drying method led to the highest comprehensive score and obtained the best active quality of *Forsythia suspensa*. This study comprehensively compared the advantages and disadvantages of three drying methods for *Forsythia suspensa* leaves. The *Forsythia suspensa* leaves obtained by the vacuum freeze-drying method had the highest content of functional ingredients and the strongest hypoglycemic and lipid-lowering activities of *Forsythia suspensa* leaves, which is suitable for the development of high-quality products.

Key words: *Forsythia suspensa* leaves; CRITIC method; biological activity; grey correlation degree; drying methods

连翘 [*Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl] 为木犀科连翘属植物, 是我国常见的大宗中药材之一, 茎叶果皆可入药, 具有清热解毒、消肿散结等功效, 主要分布于河南、山西、河北等地, 资源丰富^[1,2]。连翘叶是连翘的成熟干燥叶片, 具有与连翘果类似的活性成分, 包括木质素、黄酮、苯乙醇苷类、三萜酸等^[3], 其中连翘苷、连翘酯素含量远高于连翘果^[4,5], 现代药理学表明连翘叶在抗氧化、消炎、降糖、护肝、降血脂等方面具有明显疗效。近年来, 连翘叶在食品领域的应用取得了一些重要进展, 2017 年, 山西省首次发布《食品安全地方标准 连翘叶》, 将连翘叶纳入食品范畴管理^[6], 2018 年连翘叶被国家卫健委批准为新食品原料^[7], 这为连翘叶食品开发创造了有利条件。一直以来连翘叶资源未得到有效利用, 造成了严重浪费, 其产品类型较单一, 常作保健茶饮用, 连翘叶绿茶是经挑选、摊晾、杀青、烘干等工艺制成的天然植物叶茶, 其中烘干工序对连翘叶活性的影响最大, 合适的干制方式能够减少功效成分损失, 保持药效。李蒙蒙^[8]考察了蒸制、煮制、微波对连翘叶连翘苷、连翘酯素含量的影响, 发现微波方式对连翘叶有效成分影响最小。邓媛^[9]采用晒干、阴干、烘干、蒸后阴干、煮后阴干处理连翘叶, 发现蒸后阴干能够提升连翘叶对自由基的清除能力。然而以上研究均以单一指标评价干燥方式对连翘叶活性成分或功效的影响, 具有一定片面性。灰色关联法基于与理想序列曲线拟合程度的高低来判断曲线联系的紧密性, 该评价方法得到的关联值越高表明结果越优异, 但在计算关联度时需要考虑权重影响, 采用专家赋权存在一定主观性偏差^[10], 不能反映连翘叶整体的活性特征信息, CRITIC 权重法是一种合理、科学、公正的客观赋权法, 基于多项评价指标的对比强度和指标之间的冲突性来综合衡量指标的客观

权重, 能够消除强相关性指标的影响, 减少指标之间的信息叠加, 评价结果可信度较高^[11]。因此本研究利用 CRITIC 法对评价体系各指标进行权重赋值, 然后结合灰色关联法计算不同干燥方式下连翘叶主要活性成分及降糖降脂活性综合得分, 采用本评价模型能够综合分析评价连翘叶的活性差异, 为连翘叶茶的加工提供一定的理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

连翘叶, 2024 年采自卢氏县杨献民茶业有限公司; 连翘苷标准品 (纯度 $\geq 98\%$)、连翘酯苷 A 标准品 (纯度 $\geq 96\%$)、连翘酯素标准品 (纯度 $\geq 98\%$)、芦丁标准品 (纯度 $\geq 95\%$)、槲皮素标准品 (纯度 $\geq 96\%$), 国药集团化学试剂有限公司; 猪胰脂肪酶 (30 000 U/g)、月桂酸 4-硝基苯酯 (分析纯)、三羟甲基氨基甲烷 (Tris)、 α -淀粉酶 (5 U/mg)、 α -葡萄糖苷酶 (50 U/mg), 上海源叶生物科技有限公司。

1.2 设备与仪器

FA2004 电子分析天平 (精度 0.1 mg), 上海衡际科学仪器有限公司; TG20-WS 台式高速离心机, 常州金坛良友仪器有限公司; HH 恒温水浴锅, 金坛市中大仪器厂; FW400A 高速万能粉碎机, 背景中兴伟业世纪仪器有限公司; DHS-20A 电子水分测定仪, 宁波市鄞州华丰电子仪器厂; KQ-700DE 型数控超声波清洗仪, 昆山市超声仪器有限公司; 101-1AB 型电热鼓风烘箱, 天津市泰斯特仪器有限公司; LGJ-12 真空冷冻干燥机, 北京松源华兴科技有限公司; TU-1901 双光束紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; 1290 Infinity II 超高效液相色谱仪, 安捷伦科技 (中国)

有限公司; LD-96B 多功能酶标检测仪, 山东莱恩德智能科技有限公司; Xtimate-C18 色谱柱, 美国日旭公司。

1.3 方法

1.3.1 连翘叶的不同干燥方式

自然晾干 (Natural Air Drying, ND): 将 5 kg 连翘鲜叶平铺在竹席上, 置于太阳下自然晾干, 每隔 30 min 翻动一次, 干燥至含水率 $\leq 8\%$; 热风干燥 (Hot Air Drying, HD): 将 5 kg 连翘鲜叶平铺放置于热风烘箱内, 温度设置为 70 $^{\circ}\text{C}$, 每隔 30 min 翻动一次, 每 1 h 称重一次, 干燥至含水率 $\leq 8\%$; 真空冻干 (Vacuum Freeze-drying, VD): 将 5 kg 连翘鲜叶先进行预冻 ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$), 然后分批放入冻干机干燥仓, 将冷阱温度设置为 $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 真空冻干 72 h 后结束。以上干制连翘叶每种干制方式为 7 个平行样品, 将连翘叶粉碎处理, 过筛 40 目, 置于真空干燥器内储存备用。

1.3.2 连翘叶提取液的制备

准确称取 2 g 连翘叶干粉于烧杯中, 以 1:30 料液比 (m/V) 加入 $\varphi=75\%$ 乙醇超声提取 1 h, 抽滤, 离心 (5 000 r/min, 10 min), 取上清液定容至 100 mL, $2\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱内储存备用。

1.3.3 活性成分的检测

参考杨莹莹^[12]方法, 略有修改。利用高效液相色谱仪测定芦丁、连翘苷、连翘酯苷 A、连翘酯素、槲皮素的含量, 精密量取 1 mL 提取液, 过 0.22 μm 微孔膜, 进样测定。色谱条件: 日旭 Xtimate-C18 色谱柱 (3.0 mm $\times$ 100 mm $\times$ 1.8 μm), 流动相 A: 甲醇, 流动性 B: 0.3% (V/V) 的磷酸溶液, 梯度洗脱: 0~1 min, A 相为 5% (V/V); 1~5 min, A 相为 5%~35% (V/V); 5~13 min, A 相为 35%~100% (V/V); 13~15 min, A 相为 100% (V/V)。检测波长 280 nm, 柱温 30 $^{\circ}\text{C}$, 流量为 1 mL/min, 进样量 10 μL 。

样品中主要活性成分含量按照下式 (1) 计算:

$$M = \frac{C \times V \times n \times 10^{-6}}{m \times (1 - W_g)} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

M ——活性成分含量 (wt.%), %;

C ——质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

V ——溶液体积, mL;

n ——稀释倍数,

m ——连翘叶质量, g;

W_g ——含水量 (wt.%), %。

1.3.4 胰脂肪酶的抑制率

参考 Qiu 等^[13]方法, 略有修改。使用 0.1 mol/L

Tris-HCl 配制质量浓度 5 mg/mL pH 值 8 的胰脂肪酶溶液, 依次向 1.5 mL 离心管内加入 100 μL 连翘叶提取液、100 μL 酶液、200 μL Tris-HCl, 混合均匀, 于 37 $^{\circ}\text{C}$ 下水浴保持 10 min, 加入 300 μL 质量浓度 0.8 mg/mL 的月桂酸 4-硝基苯酯, 继续反应 20 min, 沸水浴 5 min 终止反应, 按照下式 (2) 计算抑制率:

$$W = \frac{(A_0 - A'_0) - (A_1 - A'_1)}{(A_0 - A'_0)} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

A_0 ——空白组吸光值;

A'_0 ——空白对照组吸光值;

A_1 ——样品组吸光值;

A'_1 ——样品对照组吸光值;

W ——抑制率。

1.3.5 α -淀粉酶的抑制率

参考王俊朋等^[14]方法测定。

吸取 0.5 mL 样品提取液加入 0.5 mL α -淀粉酶 (质量浓度 0.02 mg/mL) 在 37 $^{\circ}\text{C}$ 下水浴 5 min, 加入 0.5 mL 质量分数 1% 的淀粉溶液, 在 37 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 15 min, 加入 0.5 mL 的 DNS 试剂, 混合溶液, 沸水浴 5 min, 冷却至室温, 定容至 25 mL, 540 nm 波长下测定吸光值。抑制率按式 (3) 计算:

空白组: 0.5 mL 蒸馏水 + 0.5 mL α -淀粉酶 + 0.5 mL 淀粉溶液 + 0.5 mL 的 DNS 试剂;

空白对照: 0.5 mL 蒸馏水 + 0.5 mL 蒸馏水 + 0.5 mL 淀粉溶液 + 0.5 mL 的 DNS 试剂;

样品组: 0.5 mL 提取液 + 0.5 mL α -淀粉酶 + 0.5 mL 淀粉溶液 + 0.5 mL 的 DNS 试剂;

样品对照: 0.5 mL 提取液 + 0.5 mL 蒸馏水 + 0.5 mL 淀粉溶液 + 0.5 mL 的 DNS 试剂。

α -淀粉酶活性抑制率计算公式同式 (2)。

1.3.6 α -葡萄糖苷酶的抑制率

参考罗粤鹏等^[15]方法测定。吸取 0.1 mL 提取液加入 0.1 mL (质量浓度 0.01 mg/mL) α -葡萄糖苷酶, 混合, 37 $^{\circ}\text{C}$ 下水浴 20 min, 加入 0.1 mL 的 10 mmol/L PNPG, 混匀后, 37 $^{\circ}\text{C}$ 下水浴 30 min, 然后加入 5 mL 质量浓度 0.1 mol/L Na_2CO_3 , 终止反应, 405 nm 波长下测定吸光值。抑制率按式 (4) 计算:

空白组: 0.1 mL 蒸馏水 + 0.1 mL α -葡萄糖苷酶 + 0.1 mL PNPG + 5 mL Na_2CO_3 ;

空白对照: 0.1 mL 蒸馏水 + 0.1 mL 蒸馏水 + 0.1 mL PNPG + 5 mL Na_2CO_3 ;

样品组: 0.1 mL 提取液 + 0.1 mL α -葡萄糖苷酶 + 0.1 mL PNPG + 5 mL Na_2CO_3 ;

样品对照: 0.1 mL 提取液 + 0.1 mL 蒸馏水 + 0.1 mL PNPg + 5 mL Na₂CO₃。

α -淀粉酶活性抑制率计算公式同式 (2)。

1.3.7 相关性分析

采用 R 语言中的“corrplot”安装包进行相关性热图分析。

1.3.8 主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA)

利用 SPSS 进行主成分分析。

1.3.9 评价模型构建

1.3.9.1 CRITIC 权重

首先利用 SPSSAU (<https://spssau.com/index.html>) 在线分析工具“生成变量”进行无量纲处理, 然后对处理后的数据进行“综合评价”中的“CRITIC 权重”模块计算权重。

1.3.9.2 灰色关联分析及综合评分

参考韩自强等^[16]方法, 略有修改。共分为 5 个步骤: (1) 构建数据矩阵; (2) 确定参考序列和比较序列, 将评价对象的每一个指标中最优的数据作为参考序列值; (3) 无量纲化处理; (4) 确定权重, 本次采用 CRITIC 权重法赋权; (5) 计算灰色关联度, 通过以下公式计算灰色关联系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta MIN + \zeta * \Delta MAX}{|X_0(k) - X_i(k)| + \zeta * \Delta MAX} \quad (3)$$

$$\Delta MAX = \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)| \quad (4)$$

$$\Delta MIN = \min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| \quad (5)$$

式中:

$\xi_i(k)$ —— $X_i(k)$ 对 $X_0(k)$ 关于 k 指标的关联系数;

$X_0(k)$ —— 参考序列数据;

$X_i(k)$ —— 比较序列数据;

ζ —— 分辨系数, 一般取 0.5;

ΔMAX —— 两级最大值;

ΔMIN —— 两级最小值。

综合评分的计算, 采用灰色关联系数加权法, 公式如下:

$$r_i = \sum_{k=1}^n W(k) \times \xi_i(k) \quad (6)$$

式中:

$W(k)$ —— 权重系数;

$\xi_i(k)$ —— 关联系数;

r_i —— 综合评分。

1.4 数据分析

采用 WPS Excel 记录数据并计算灰色关联系数, 采用 SPSS 进行 PCA 分析及组间单因素方差分析, 以 $P < 0.05$ 表示组间差异显著, 利用 SPSSAU 在线网站进行 CRITIC 权重计算, 利用 R 语言绘制相关性热图。

2 结果与分析

2.1 混合标准品和样品的测定结果及标准曲线绘制

按照 1.3.3 方法中的步骤进行标准品和样品含量测定, 混合标准品及样品色谱图见图 1, 由图 1 可知连翘酯苷 A、芦丁、连翘苷、槲皮素、连翘酯素分离度较好, 保留时间分别为: 7.777、8.301、9.046、9.701、10.326 min, 以各指标峰面积为纵坐标, 以质量浓度 ($\mu\text{g/mL}$) 为横坐标, 绘制标准曲线, 回归方程见表 1, 由表 1 可知, 连翘酯苷 A、芦丁、连翘苷、槲皮素、连翘酯素的回归曲线线性关系良好, R^2 均达到 0.99 以上。

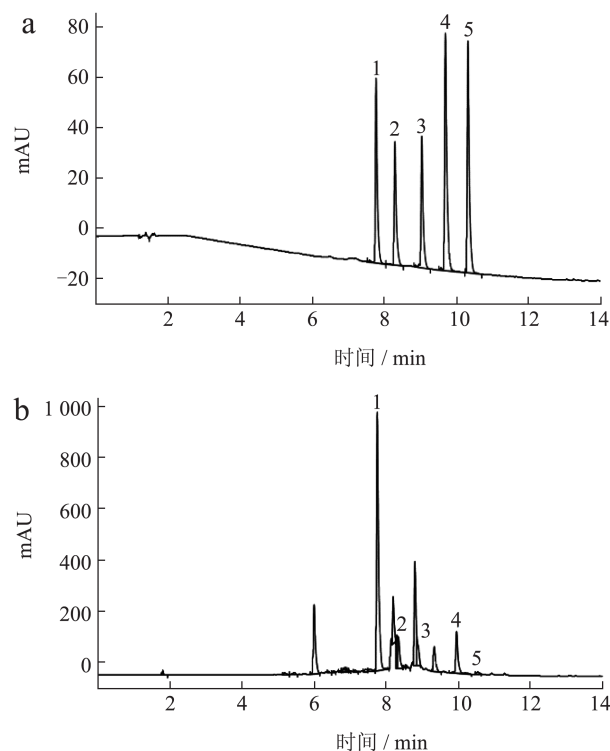


图 1 混合标准品 (a) 和样品 (b) 的色谱图

Fig.1 Chromatogram of mixed standard (a) and samples of *Forsythia suspensa* leaves (b)

注: 1: 连翘酯苷 A; 2: 芦丁; 3: 连翘苷; 4: 槲皮素; 5: 连翘酯素。

表 1 连翘叶主要活性成分标准曲线

Table 1 Standard curve of main active ingredients in *Forsythia suspensa* leaves

指标成分	标准曲线	相关系数 R^2
连翘酯苷 A	$Y=2.308\ 96X+0.006\ 7$	0.996 7
芦丁	$Y=1.708\ 53X+0.010\ 1$	0.999 6
连翘苷	$Y=1.793\ 71X+0.004\ 3$	0.999 8
槲皮素	$Y=3.559\ 71X+0.000\ 6$	0.999 3
连翘酯素	$Y=3.167\ 22X+0.000\ 7$	0.999 9

2.2 不同干燥方式对连翘叶活性成分及活性的影响

由表 2 可知不同干燥方式对连翘叶活性成分的影响较大。经 ND、HD、VD 处理后，连翘叶中芦丁含量 (wt.%) 的分布分别为 0.76%~0.96%、0.74%~1.01%、0.98%~1.3%，平均值为 0.85%、0.89%、1.15%，大小顺序为 VD>HD>ND，ND 和 HD 之间差异不显著 ($P>0.05$)，芦丁属于黄酮类物质，具有热敏、易氧化等特点，林伟雄等^[17]发现阴干、晒干、烘干三种方式对桑叶中绿原酸、芦丁等化学成分的影响无统计学意义，建议选择低温、快速的干燥方式。

连翘苷的含量 (wt.%) 分别为：3.46%~5.01%、2.31%~4.72%、4.87%~7.14%，平均值为 4.33%、3.56%、5.93%，大小顺序为 VD>ND>HD，这是由于连翘苷极易氧化^[18]，在自然晾干、热风烘干时直接将连翘叶长时间暴露在空气中，导致连翘苷氧化损失，麻景梅等^[5]研究发现真空冻干下连翘叶茶中的连翘苷和连翘酯苷 A 含量分别为 5.41 mg/g 和 18.57 mg/g，优于热风烘干下的 4.12 mg/g 和 12.1 mg/g。

连翘酯素的含量 (wt.%) 分布为 0.06%~0.17%、0.04%~0.15%、0.17%~0.32%，平均值为 0.13%、0.09%、0.14%，大小顺序为 VD>ND>HD，ND 和 VD 之间无明显差异 ($P>0.05$)，连翘酯素是连翘苷的苷元属于木质素类成分，连翘酯素稳定性较差，由于其结构中存在酚羟基，因此稳定性差、极易发生氧化、降解。

连翘酯苷 A 的含量 (wt.%) 分别为 1.34%~2.31%、

2.78%~3.91%、4.57%~5.68%，平均值为 1.86%、3.51%、5.07%，大小顺序为 VD>HD>ND，差异性显著 ($P<0.05$)。王曙宾等^[19]研究了连翘酯苷 A 原料中连翘酯苷 A 的稳定性，发现固态条件下湿度对其稳定性影响最多，其次为光照，温度对其影响较小，空气中高水分含量和充足光照对连翘酯苷 A 的破坏性最大。

槲皮素常作为总黄酮的评价指标，其含量 (wt.%) 分别为 0.96%~1.27%、0.87%~1.19%、1.43%~1.83%，平均值为 1.14%、1.08%、1.72%，大小顺序为 VD>ND>HD，ND 和 HD 之间无显著性差异 ($P<0.05$)，刘敏等^[20]研究发现阴干地稔药材中的没食子、槲皮素含量均高于烘干方式，左亚锋等^[21]采用不同干燥方法对合欢花药材处理，发现相比冻干、晾干方式，烘干对槲皮素的保留率更高，这与本次研究结果不一致，槲皮素苷元受热易分解为槲皮素^[22]，因此槲皮素含量增加，但槲皮素稳定性较差，易受 pH、温度、金属离子等影响^[23]，因此考虑可能热风烘干时间较长导致槲皮素发生进一步降解，孟宪昉等^[24]研究发现，随着温度升高，香椿叶中槲皮素吸光度增大，表明高温可使槲皮素发生降解，因此本研究 ND 处理的槲皮素含量相对较低，可能是热风烘干时间较长导致槲皮素发生了降解。

胰脂肪酶是主要消化脂肪的酶，膳食脂肪在脂肪酶作用下水解为甘油和脂肪酸，被机体吸收利用合成甘油三酯，储存在脂肪细胞内，引起肥胖，因此抑制脂肪酶活性是减肥降脂的主要干预策略^[25]，胰脂肪酶抑制率的分布为 43.3%~55.2%、58.9%~64.2%、65.5%~77.3%，平均值为 47.7%、63.2%、72.9%，大小顺序为 VD>HD>ND，周菲等^[26]发现相比烘干、自然阴干，烘干后连翘叶对脂肪酶活性抑制率较强。 α -淀粉酶抑制率的分布分别为 61.7%~69.3%、60.6%~67.2%、71.5%~77.4%，平均值为 66.9%、64%、73.2%，大小顺序为 VD>ND>HD，三种方式之间差异显著 ($P<0.05$)。 α -葡萄糖苷酶抑制率分布分别为：46.8%~55.2%、58%~63.2%、59.3%~65.7%，平均值为 50.1%、59.7%、62%，大小顺序为 VD>HD>ND，HD 和 VD 之间差异性不显著 ($P>0.05$)。

表 2 不同干燥方式的连翘叶成分含量及活性

Table 2 Contents and activities of components in *Forsythia suspensa* leaves with different drying methods

样品	芦丁 /(wt.%)	连翘苷 /(wt.%)	连翘酯素 /(wt.%)	连翘酯苷 A /(wt.%)	槲皮素 /(wt.%)	猪胰脂肪酶抑 制率/%	α -淀粉酶 抑制率/%	α -葡萄糖苷酶 抑制率/%
ND	0.85±0.08 ^b	4.33±0.55 ^c	0.13±0.04 ^a	1.85±0.39 ^c	1.14±0.11 ^b	47.7±4.21 ^c	66.9±2.50 ^b	50.1±3.31 ^b
HD	0.88±0.09 ^b	3.56±0.80 ^b	0.09±0.04 ^b	3.50±0.45 ^b	1.08±0.10 ^b	63.2±2.62 ^b	64.0±2.00 ^c	59.7±2.14 ^a
VD	1.15±0.13 ^a	5.93±0.72 ^a	0.14±0.03 ^a	5.06±0.35 ^a	1.72±0.13 ^a	72.9±4.72 ^a	73.2±2.73 ^a	62.0±2.23 ^a

注：表中同列不同的小写字母代表差异性显著 $P<0.05$ ，相同字母代表差异性不显著 $P>0.05$ 。

经单因素 ANOVA 方差分析可知不同干燥方式之间存在一定差异 ($P<0.05$), 真空冻干下的连翘叶活性整体较好, 这是因为真空冻干下水分直接由冰晶升华, 对结构完整性破坏较小, 能够减缓活性成分损失, 保留热敏和易氧化成分较多^[27]。

2.3 主成分分析 (PCA)

表 3 连翘叶主要成分含量和活性的特征值及贡献率
Table 3 Eigenvalues and contribution rates of contents and activities of components in *Forsythia suspensa* leaves

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	5.53	69.08	69.08
2	1.35	16.87	85.95
3	0.46	5.76	91.71
4	0.26	3.23	94.94
5	0.18	2.26	97.21
6	0.12	1.44	98.65
7	0.07	0.88	99.47
8	0.04	0.53	100.00

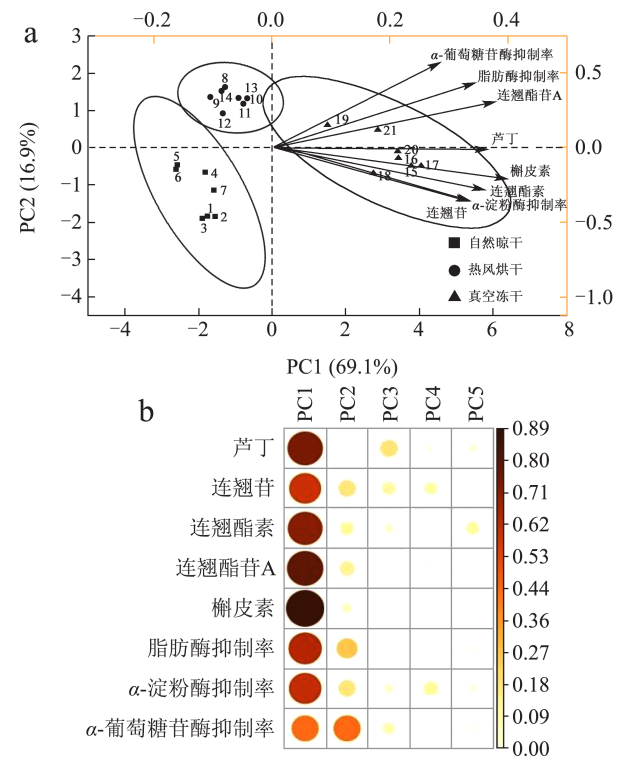


图 2 PCA 分析图谱
Fig.2 PCA Analysis spectrums

本研究对连翘叶 5 种主要活性成分及脂肪酶抑制率、 α -淀粉酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率进行 PCA 分析, 以特征值 >1 、累积贡献百分比 $>80\%$ 为条件, 获得主成分 1 和主成分 2, 其中主成分 1 的方差贡献率为 69.08%, 主成分 2 为 16.87%, 累积贡献率达

85.95%, 可以反映连翘叶大部分特征信息, 结果见表 3。由图 2a 可知 3 种方式分布于不同象限, 同组内数据聚散度良好, 不同组在坐标轴相距一定距离, 表明自然晾干、热风烘干、真空冻干之间的区分度较好, 其中自然晾干、热风烘干均分布于 PC1 负向端, 真空冻干分布于 PC1 轴正向端, 结合载荷图可知热风烘干组与槲皮素、连翘酯素、 α -淀粉酶抑制率、连翘苷相关性为负, 表明这 4 种指标在热风烘干组相关性相对较低, 自然晾干组与 α -葡萄糖苷酶抑制率、脂肪酶抑制率、连翘酯苷 A 相关性为负, 表明这 3 种指标在自然晾干组相关性也较低, 这与 2.2 结果较一致。由图 2b 反映了主成分 1 中芦丁、连翘酯素、连翘苷、连翘酯苷 A、槲皮素、脂肪酶抑制率和 α -淀粉酶抑制率的变异信息, 主成分 2 中 α -葡萄糖苷酶抑制率、脂肪酶抑制率、连翘酯苷 A 的变异信息, 表明 PC1 包含了更多的原始数据变异信息。

2.4 相关性热图分析

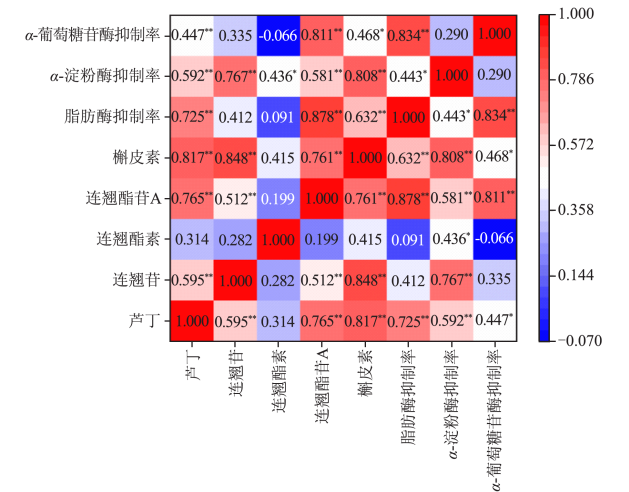


图 3 相关性热图
Fig.3 Correlation heatmap

注: * 代表相关显著 ($P<0.05$), ** 代表相关极显著 ($P<0.01$)。

通过 2.3 可知不同干制方式对连翘叶体外降糖降脂活性的影响较明显, 自然晾干后的连翘叶胰脂肪酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率均较低, 热风烘干后的连翘叶对 α -淀粉酶活性的抑制效果较差, 真空冻干后的连翘叶整体上对 3 种酶的抑制作用均较高, 根据 2.2 结果可知不同干燥方式下的活性成分差别较大, 由此可以推测不同干燥方式可能通过影响活性成分含量进而改变酶的活性强弱, 因此可以利用相关性分析探索连翘叶主要活性成分与相关酶活性的联系, 以确定发挥功效作用的物质基础。在 PCA 分析基础上, 采用相关性热图 (图 3) 进一步分析了连翘叶中 3 种酶抑制率与 5 种活性成分的关系。其中, 胰脂肪酶抑制率与

连翘酯苷 A、芦丁、槲皮素呈显著性正相关，因为连翘酯苷 A、芦丁等是连翘叶抑制胰脂肪酶活性强弱的关键成分^[28]； α -淀粉酶抑制率与芦丁、连翘苷、连翘酯素、连翘酯苷 A、槲皮素呈显著性正相关； α -葡萄糖苷酶抑制率均与芦丁、连翘酯苷 A、槲皮素呈正相关。芦丁和槲皮素均可通过疏水键、氢键与淀粉酶结合，进行竞争性抑制^[29]。康文艺等^[30]利用体外降糖试验筛选出了连翘叶中抑制 α -葡萄糖苷酶的活性成分，即（-）-松脂素、（+）-松脂素、熊果酸和槲皮素；褚绪伟^[31]从连翘和川芎提取物中获得了两种 α -葡萄糖苷酶抑制剂，其中连翘酯苷 A 的 IC₅₀ 为 312.7 μ mol/L；高胜敏^[32]研究发现发酵后的连翘叶对 α -淀粉酶、 α -葡萄糖苷酶抑制活性增强。综上，连翘酯苷 A、芦丁和槲皮素与胰脂肪酶抑制率和 α -葡萄糖苷酶抑制率均呈正相关性，因此推测连翘酯苷 A、芦丁和槲皮素可能是其发挥降糖降脂作用的物质基础。

2.5 评价模型构建

2.5.1 CRITIC法对评价指标赋权

利用 SPSSAU 在线分析工具中“CRITIC 权重”

模块进行分析，以芦丁、连翘苷、连翘酯苷 A、连翘酯素、槲皮素、脂肪酶抑制率、 α -淀粉酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率为评价指标，以指标之间对比强度和冲突性综合分析权重，变异性以标准差表示，标准差越大权重越大，冲突性以指标间的相关系数表示，相关性越强冲突越低，权重越小^[33]，计算结果见表 4。由表 4 可知， α -葡萄糖苷酶抑制率权重最高，胰脂肪酶抑制率次之，权重越高表明指标越重要，表明这两个指标对综合评分的影响较大，较重要。

表 4 CRITIC权重计算结果

Table 4 CRITIC weight calculation results

指标	变异性	冲突性	信息量	权重
芦丁	0.302	2.291	0.691	11.56%
连翘苷	0.251	2.823	0.707	11.83%
连翘酯素	0.281	2.402	0.674	11.27%
连翘酯苷 A	0.316	2.056	0.651	10.88%
槲皮素	0.331	1.793	0.593	9.92%
胰脂肪酶抑制率	0.331	2.546	0.843	14.10%
α -淀粉酶抑制率	0.270	2.759	0.744	12.44%
α -葡萄糖苷酶抑制率	0.308	3.49	1.076	17.99%

表 5 灰色关联系数

Table 5 Grey correlation coefficient

样品	芦丁	连翘苷	连翘酯素	连翘酯苷 A	槲皮素	脂肪酶抑制率	α -淀粉酶抑制率	α -葡萄糖苷酶抑制率
ND1	0.389	0.489	0.467	0.377	0.444	0.343	0.447	0.336
ND2	0.431	0.485	0.438	0.373	0.462	0.347	0.477	0.342
ND3	0.346	0.496	0.483	0.378	0.440	0.353	0.457	0.333
ND4	0.341	0.531	0.368	0.333	0.400	0.435	0.477	0.474
ND5	0.452	0.396	0.400	0.337	0.387	0.394	0.349	0.368
ND6	0.350	0.449	0.350	0.377	0.356	0.369	0.435	0.398
ND7	0.400	0.417	0.483	0.396	0.403	0.333	0.509	0.431
HD1	0.431	0.333	0.378	0.552	0.414	0.561	0.385	0.551
HD2	0.389	0.433	0.368	0.432	0.387	0.480	0.333	0.687
HD3	0.431	0.417	0.452	0.478	0.390	0.630	0.373	0.654
HD4	0.333	0.436	0.412	0.524	0.393	0.533	0.452	0.791
HD5	0.368	0.499	0.333	0.465	0.403	0.523	0.387	0.574
HD6	0.491	0.384	0.359	0.555	0.429	0.565	0.382	0.529
HD7	0.431	0.362	0.389	0.549	0.333	0.559	0.406	0.564
VD1	1.000	0.709	0.778	0.764	0.889	0.971	0.712	0.624
VD2	0.933	0.697	0.609	0.812	0.774	1.000	0.737	0.596
VD3	0.848	0.724	1.000	0.781	0.980	0.934	0.700	0.724
VD4	0.491	0.625	0.583	0.708	0.889	0.639	1.000	0.673
VD5	0.467	0.515	0.483	0.665	0.545	0.769	0.622	0.741
VD6	0.667	1.000	0.560	1.000	1.000	0.590	0.587	1.000
VD7	0.571	0.576	0.778	0.831	0.873	0.872	0.494	0.804

2.5.2 灰色关联系数

按照方法中 1.3.7.2 步骤计算灰色关联系数，结果见表 5。由表计算可知，ND 方式下，芦丁、连翘苷、连翘酯素、连翘酯苷 A、槲皮素、脂肪酶抑制率、 α -淀粉酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率的平均关联度为 0.387、0.466、0.427、0.367、0.413、0.368、0.450、0.383，HD 方式下，芦丁、连翘苷、连翘酯素、连翘酯苷 A、槲皮素、脂肪酶抑制率、 α -淀粉酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率的平均关联度为 0.411、0.409、0.384、0.508、0.393、0.550、0.388、0.621，VD 方式下，芦丁、连翘苷、连翘酯素、连翘酯苷 A、槲皮素、脂肪酶抑制率、 α -淀粉酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率的平均关联度为 0.711、0.692、0.684、0.794、0.850、0.825、0.693、0.737。

2.5.3 综合评分

将 CRITIC 法与灰色关联法结合建立连翘叶活性评价模型，可以避免主观评价带来的随意性误差，关联系数经过客观、准确的赋权得到最终的综合评分，结果见表 6。综合评分排名显示三种干燥方式对连翘叶活性的影响大小顺序为 VD>HD>ND，VD 方式处理后的连翘叶表现活性最佳。真空冷冻干燥是近年来果蔬加工广泛应用的干燥方式之一，对营养成分保留率较高，具有保色、保香、保味、复水性良好等优点^[34]，魏婷等^[35]发现真空冻干对鲜枣的营养水平及抗氧化活性等品质影响较好。

表 6 关联度结果与排名
Table 6 Correlation results and ranking

样品	关联度	排名	方式	关联度	排名
ND1	0.405	18	VD1	0.796	3
ND2	0.413	17	VD2	0.764	4
ND3	0.404	19	VD3	0.828	1
ND4	0.426	15	VD4	0.697	6
ND5	0.384	21	VD5	0.615	7
ND6	0.387	20	VD6	0.803	2
ND7	0.421	16	VD7	0.728	5
HD1	0.459	12			
HD2	0.456	13			
HD3	0.494	9			
HD4	0.506	8			
HD5	0.455	14			
HD6	0.468	10			
HD7	0.460	11			

3 结论

本研究考察了三种干燥方式对连翘叶关键功效成分及体外降糖降脂活性的影响，结果表明自然晾

干、热风烘干、真空冻干对连翘叶中活性成分含量及脂肪酶抑制率、 α -淀粉酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率影响的差异性较大，其中对芦丁、连翘酯素、胰脂肪酶抑制率、 α -葡萄糖苷酶抑制率影响强度次序为 VD>HD>ND，对连翘苷、连翘酯苷 A、槲皮素、 α -淀粉酶抑制率影响强弱次序为 VD>ND>HD。经过 PCA 分析得到两个主成分，其中 PC1 反映了主要的变异信息。PCA 分析图显示三种干燥方式区分度良好，表明 3 种干燥方式之间存在明显差异。相关性分析结果显示芦丁、连翘酯苷 A、槲皮素与胰脂肪酶抑制率之间存在正相关关系，芦丁、连翘苷、连翘酯素、连翘酯苷 A、槲皮素与 α -淀粉酶抑制率呈显著性正相关，连翘酯苷 A、芦丁、槲皮素与 α -葡萄糖苷酶抑制率呈显著性正相关，因此连翘酯苷 A、芦丁、槲皮素可能是连翘叶发挥降糖降脂作用的物质基础。CRITIC 法与灰色关联法综合评分表明真空冻干能够最大程度的保留连翘叶活性成分，发挥更佳生物活性。

参考文献

[1] 李敬,尤颖,赵庆生,等.连翘叶成分及生物活性研究进展[J].食品工业科技,2020,41(18):344-352.

[2] 杨丽霞,武楦丽,白霞.连翘叶绿茶制备工艺研究[J].包装与食品机械,2022,40(3):20-26.

[3] 潘秀珍,刘路路,任晓红,等.基于近红外光谱技术建立连翘叶中5种活性成分动态定量模型[J].北京中医药大学学报,2023,46(9):1280-1290.

[4] 李曦,赵珊,仲伶俐,等.连翘绿茶和连翘红茶的特征成分测定及营养成分比较[J].现代食品科技,2022,38(6):312-317,326.

[5] 麻景梅,王迎春,李琛,等.不同干燥条件连翘叶茶有效成分含量比较[J].中国中医药信息杂志,2017,24(8):76-79.

[6] DBS14/001-2017,食品安全地方标准 连翘叶[S].

[7] 王学方,陈玲,宁二娟,等.连翘叶中7种成分的抗氧化活性研究[J].饲料研究,2023,46(2):94-99.

[8] 李蒙蒙.连翘和连翘叶的采收加工与质量相关性研究[D].郑州:河南大学,2019.

[9] 邓媛.不同干燥方法对连翘叶清除自由基活性及活性成分的影响[J].中国中医药报,2016,23(6):679-682.

[10] 王传鑫,袁永生,周铭华.基于熵权灰色关联法的粮食产量影响因素[J].贵州农业科学,2018,46(9):142-145.

[11] 倪志婧,王薇,马文平,等.CRITIC权重法优化肉苁蓉葡萄酒酿造工艺研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(9):1252-1256.

[12] 杨莹莹.一测多评法同时测定连翘叶红茶中5种指标成分的含量[J].中国酿造,2023,42(10):244-249.

[13] QIU X L, ZHANG Q F. Chemical profile and pancreatic lipase inhibitory activity of *Sinobambusa tootsik* (Sieb.) Makino leaves [J]. PeerJ, 2019, 7: e7765.

[14] 王俊朋,张立攀,胡桂芳,等.牡丹花黄酮的提取及对 α -淀粉酶的抑制作用[J].食品科技,2022,47(1):196-202.

[15] 罗粤鹏,杨远帆,于洋君,等.乳酸菌发酵茶花粉对 α -葡萄糖苷酶

抑制率的影响[J].食品与机械,2022,38(9):29-33,39.

[16] 韩自强,莫虎,林云姣,等.基于熵权灰色关联法的加工过程资源环境属性评价[J].机械设计与制造工程,2022,51(8):113-116.

[17] 林伟雄,邓李红,钟志奎,等.不同干燥方法对桑叶主要成分和芦丁含量的影响[J].中南药学,2023,21(5):1270-1276.

[18] 刘许媛,寇立朝,寇随林,等.感冒退热颗粒中连翘苷稳定性的研究[J].中成药,2010,32(1):149-151.

[19] 王曙宾,郑亚杰.连翘提取物和连翘酯苷A原料中连翘酯苷A的稳定性研究[J].中草药,2010,41(6):909-911.

[20] 刘敏,刘帅英,余乐,等.干燥温度和采收时间对畚药地稔中没食子酸及槲皮素含量的影响[J].中国现代中药,2014,16(7):561-564.

[21] 左亚锋,徐秀泉,李巧月,等.不同干燥方法对合欢花药材化学成分及其抗氧化活性影响[J].天然产物研究与开发,2024,36(1):125-136.

[22] 侯腾飞,张群群,陈媛媛,等.不同干燥方式及清炒对荷叶中荷叶碱和槲皮素含量的影响[J].中国药师,2019,22(1):170-173.

[23] 舒心,郭擎,高彦祥.槲皮素及其递送体系的研究进展[J].食品科学,2022,43(7):202-212.

[24] 孟宪昉,陆兰丽.香椿叶中提取槲皮素的稳定性研究[J].食品研究与开发,2007,28(1):46-48.

[25] 陈光萱,袁慧聪,王旭.红茶的体外模拟消化及TFDG对胰脂肪酶活性的抑制作用[J].食品研究与开发,2024,45(12):59-65.

[26] TULY S S, MAHIUDDIN M, KARIM A. Mathematical modeling of nutritional, color, texture, and microbial activity changes in fruit and vegetables during drying: A critical review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(13): 1877-1900.

[27] 周菲,胡荣,刘晨杰,等.不同连翘叶炮制品抑制胰脂肪酶活性比较[J].山西大学学报(自然科学版),2018,41(2):406-412.

[28] 张磊.连翘叶减肥机制研究与颗粒剂开发[D].太原:山西大学,2021.

[29] 罗佳倩,周丽玲,李高阳,等.发芽和水热处理对苦荞活性成分及功能特性的影响[J].食品与机械,2023,39(4):142-150.

[30] 康文艺,王金梅,张丽.河南产连翘叶抑制 α -糖苷酶活性成分研究[J].中国中药杂志,2010,35(9):1156-1159.

[31] 祁绪伟.基于微通道的新型配体垂钩在天然生物活性成分筛选中的应用[D].北京:中国科学院大学,2022.

[32] 高胜敏.生物转化法提高连翘叶木脂素苷元含量工艺及质量标准[D].太原:山西大学,2023.

[33] 倪志婧,王薇,马文平,等.CRITIC权重法优化肉苁蓉葡萄酒酿造工艺研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(9):1252-1256.

[34] 吴雨豪,吕瑞玲,周建伟,等.真空冷冻干燥技术在果蔬类食品加工中的应用现状[J].包装工程,2023,44(7):85-95.

[35] 魏婷,高彩凤,沈静,等.真空冷冻干燥过程中鲜食枣营养品质的变化研究[J].现代食品科技,2017,33(5):161-167.