

AHP-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化蒲公英多成分提取工艺

廖香莲^{1,2}, 吴新¹, 陈志元¹, 张帆¹, 吴涛¹, 杨焯辉¹, 杨强¹, 胡力飞^{1,3*}

1. 湖北省中药配方颗粒工程技术研究中心, 湖北 黄石 435100

2. 湖北师范大学 生命科学学院, 湖北 黄石 435002

3. 湖北工业大学 生命科学与健康工程学院, 湖北 武汉 430068

摘要: 目的 建立蒲公英超高效液相色谱 (UPLC) 多成分定量分析方法, 优化其多成分提取工艺, 为蒲公英质量控制提供参考。方法 采用 Shim-pack Scepter C₁₈-120 (100 mm×2.1 mm, 1.9 μm) 色谱柱, 流动相为乙腈 (A)-0.1%磷酸水溶液 (B) 梯度洗脱, 体积流量 0.3 mL·min⁻¹, 检测波长 327 nm (0~35 min)、210 nm (35~50 min), 进样量 1 μL, 柱温 30 ℃, 建立蒲公英 6 个酚类成分 (单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸、异绿原酸 A、木犀草素) 和 3 个三萜类成分 (羽扇豆醇、蒲公英甾醇、蒲公英萜醇) 的同步定量分析方法; 以乙醇体积分数、溶剂倍数、提取时间、提取次数为考察因素, 各成分质量分数的综合评分为评价指标, 结合化学计量学分析确定层次分析法 (AHP) 的判断矩阵, 通过 AHP-熵权法计算各成分质量分数的综合权重系数, 最终运用 Box-Behnken 设计-响应面法 (BBD-RSM) 优选蒲公英多成分提取工艺。结果 建立的 UPLC 分析方法可实现 9 种目标成分的快速、准确同步定量; 最优提取工艺下, 单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸、异绿原酸 A、木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇、蒲公英萜醇的平均质量分数分别为 3.51、0.60、0.56、6.37、0.26、0.20、0.42、0.62、0.56 mg·g⁻¹; 乙醇体积分数对 2 类成分质量分数的影响与成分的极性有关, 其中对高极性酚类成分质量分数影响更为显著, 对低极性三萜类成分影响呈现不同规律; AHP-熵权法计算得出的样本提取综合评分受各考察因素的协同作用影响, BBD-RSM 建立的模型显著, 最优提取条件为 20 倍 70%乙醇提取 3 次, 每次 100 min。结论 建立的蒲公英 UPLC 多成分定量分析方法稳定, AHP-熵权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法的研究策略可有效实现蒲公英多成分提取工艺的综合评价与高效提取, 为蒲公英的质量研究及应用提供参考。

关键词: 碱地蒲公英; 超高效液相色谱 (UPLC); 层次分析法; 熵权法; Box-Behnken 设计-响应面法; 单咖啡酰酒石酸; 绿原酸; 咖啡酸; 菊苣酸; 异绿原酸 A; 木犀草素; 羽扇豆醇; 蒲公英甾醇; 蒲公英萜醇

中图分类号: R284.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-6376(2026)01-0191-11

DOI:10.7501/j.issn.1674-6376.2026.01.017

Optimization of multi-component extraction of *Taraxacum borealisinense* by AHP-entropy weight method combined with Box-Behnken response surface methodology

LIAO Xianglian^{1,2}, WU Xin¹, CHEN Zhiyuan¹, ZHANG Fan¹, WU Tao¹, YANG Yehui¹, YANG Qiang¹, HU Lifei^{1,3}

1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center of Traditional Chinese Medicine Formula Granules, Huangshi 435100, China

2. College of Life Science, Hubei Normal University, Huangshi 435002, China

3. School of Life and Health Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

Abstract: Objective To establish a multi-component quantitative analysis method for *Taraxacum borealisinense* using ultra-performance liquid chromatography (UPLC), optimize the multi-component extraction process, and provide a reference for the quality control of *T. borealisinense*. **Methods** Using a Shim-pack Scepter C₁₈-120 (100 mm × 2.1 mm, 1.9 μm) chromatographic column, the mobile phase was acetonitrile (A)-0.1% phosphoric acid aqueous solution (B) with a gradient elution. The volume flow rate

收稿日期: 2025-10-30

基金项目: 湖北省科技重大专项 (2022ACA003)

作者简介: 廖香莲 (1989—), 女, 工程师, 从事中药及保健食品开发研究。E-mail: 993659285@qq.com

*通信作者: 胡力飞 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 从事中药新药及天然药物研究。E-mail: lfyhu@hotmail.com

was 0.3 mL·min⁻¹. The detection wavelength was 327 nm (0—35 min) and 210 nm (35—50 min). The injection volume was 1 μ L. The column temperature was 30 $^{\circ}$ C. To establish a synchronous quantitative analysis method for six phenolic components (monocaffeoyltartaric acid, chlorogenic acid, caffeic acid, chicoric acid, isochlorogenic acid A, 6-luteolin) and three triterpenoid components (lupeol, taraxasterol, and taraxerol) in *T. borealisinense*. The extraction process was optimized by considering the volume fraction of ethanol, solvent ratio, extraction time, and extraction times as factors, with the comprehensive score of the mass fraction of each component as the evaluation index. The Analytic Hierarchy Process (AHP) judgment matrix was determined by chemometrics analysis, and the comprehensive weight coefficient of the mass fraction of each component was calculated by the AHP-entropy weight method. Finally, the Box-Behnken design-response surface method (BBD-RSM) was used to optimize the multi-component extraction process of *T. borealisinense*. **Results** The established UPLC analytical method can achieve rapid and accurate simultaneous quantification of nine target components. Under the optimal extraction process, the average mass fractions of monocaffeoyltartaric acid, chlorogenic acid, caffeic acid, chicoric acid, isochlorogenic acid A, luteolin, lupeol, taraxasterol, taraxerol were 3.51, 0.60, 0.56, 6.37, 0.26, 0.20, 0.42, 0.62, and 0.56 mg·g⁻¹, respectively. The influence of ethanol volume fraction on the mass fractions of the two types of components is related to the polarity of the components. Among them, the influence on the mass fraction of highly polar phenolic components is more significant, while the influence on the mass fraction of low-polarity triterpenoid components shows different patterns. The comprehensive score of the sample extraction is affected by the synergistic effect of the factors. The established model by BBD-RSM is significant, and the optimal extraction conditions are 20 times 70% ethanol extraction for three times, each time for 100 min. **Conclusion** The established UPLC multi-component quantitative analysis method for *T. borealisinense* is stable. The research strategy combining AHP-entropy weight method with BBD-RSM can effectively achieve the comprehensive evaluation and optimization of the multi-component extraction process of *T. borealisinense*, providing a reference for the quality research and application of *T. borealisinense*.

Key words: *Taraxacum borealisinense* Kitam.; ultra-performance liquid chromatography (UPLC); analytic hierarchy process; entropy weight method; Box-Behnken design-response surface method; monocaffeoyltartaric acid; chlorogenic acid; caffeic acid; chicoric acid; isochlorogenic acid A; luteolin; lupeol; taraxasterol; taraxerol

蒲公英为菊科植物蒲公英 *Taraxacum mongolicum* Hand.-Mazz.、碱地蒲公英 *Taraxacum borealisinense* Kitam. 或同属数种植物的干燥全草^[1]。作为典型的药食同源中药材，蒲公英不仅在药品、食品领域应用广泛，其提取物亦可用作化妆品原料，在我国相关产业中占据重要地位^[2]。现代研究表明蒲公英含有酚酸、黄酮、三萜等多种活性成分，已被证实具有抗肿瘤、抗炎、抗菌、抗氧化等多种药理作用^[3-4]。

《中国药典》2025 年版已明确将菊苣酸列为蒲公英项下的指标成分^[1]，但单一成分指标难以全面表征蒲公英的整体质量。多成分综合评价已成为近年蒲公英质量研究的核心方向之一，然而现有研究多集中于菊苣酸、绿原酸等酚类化合物^[5-6]，针对三萜类成分的系统性研究仍较为薄弱。值得注意的是，蒲公英甾醇、蒲公英萜醇等三萜类成分同样具有显著的药理活性，尤其在肝损伤修复、关节炎治疗等方面展现出良好应用潜力^[7-8]。当前蒲公英质量评价研究多局限于单一成分类别的考察，尚缺乏可同时酚类与三萜类成分进行同步定量的分析方法，这使得多成分综合评价体系存在明显局限性。因此，建立酚类

与三萜类成分的同步定量分析方法，对实现蒲公英质量的全面控制具有重要意义。

在蒲公英提取工艺优化的评价中，科学的多指标综合评价技术亦至关重要。层次分析法 (AHP) 与熵权法的组合赋权模式，是一种兼顾主客观权重的科学赋权方法，已在中药提取、炮制等多因素评价领域得到广泛应用^[9-11]。基于此，本研究采用超高效液相色谱法 (UPLC)，建立同时测定蒲公英中 6 个酚类成分与 3 个三萜类成分的定量分析方法；采用单因素分析结合 Box-Behnken 设计-响应面法 (BBD-RSM)，以这 9 个成分的质量分数为核心考察指标，综合运用 AHP-熵权法对上述指标赋权，确定不同工艺的综合评分，优化蒲公英提取工艺，旨在为蒲公英的质量控制与产业化应用提供科学依据。

1 实验材料

1.1 仪器

Agilent 1290 Infinity II 型超高效液相色谱仪，美国安捷伦有限公司；XS-105DU 型电子分析天平，梅特勒托利多科技有限公司；DZKW-S-8 恒温水浴锅，北京永光明仪器有限公司；SK8200HP 超声波清洗器，上海科导超声仪器有限公司；ELGA

PURELAB Classic 超纯水系统。

1.2 材料

对照品单咖啡酰酒石酸(批号 112087-202101, 质量分数 98.3%)、绿原酸(批号 110753-202119, 质量分数 96.3%)、咖啡酸(批号 110885-201703, 质量分数 99.7%)、菊苣酸(批号 111752-202105, 质量分数 98.3%)、异绿原酸 A (3,5-*O*-二咖啡酰奎宁酸)(批号 111782-202208, 质量分数 95.9%)、木犀草素(批号 111520-202107, 质量分数 96.3%)均购自中国食品药品检定研究院;羽扇豆醇(批号 wkq21031904, 质量分数 $\geq 98\%$),购自四川省维克奇生物科技有限公司;蒲公英甾醇(批号 B20939, 质量分数 $\geq 98\%$),购自上海源叶生物科技有限公司;蒲公英萜醇(批号 CFN99381, 质量分数 $\geq 98\%$),购自武汉天植生物技术有限公司;乙腈(色谱纯),Fisher chemical 公司;磷酸(色谱纯),山东科源生化有限公司,甲醇(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;水为超纯水。蒲公英饮片购自佛山市南海天福药业有限公司(批号 20240427),经劲牌持正堂药业有限公司孙代华研究员鉴定为碱地蒲公英 *T. borealisinense* Kitam. 的干燥全草。实验前将饮片粉碎,过二号筛(24 目),密封保存,备用。

2 方法与结果

2.1 含量测定方法的建立

2.1.1 检测波长的选择 采用 DAD 检测器在 190~400 nm 波长范围进行全扫描,根据所生成的等吸收线图 and 成分的紫外吸收情况确定各类成分的检测波长。结果显示,酚酸类成分的最大吸收波长($\lambda_{\max}$)位于 324~330 nm,而木犀草素在此范围内亦有较强吸收($\lambda_{\max}$ 为 348 nm),故选择 327 nm 作为上述成分的检测波长;三萜类成分的吸收光谱较为相似(在短波长区末端吸收较强),因此选择末端吸收法进行测定,同时结合短波长条件下的谱图情况(35 min 后等度洗脱条件下色谱基线平稳),选择三萜类成分的检测波长为 210 nm,波长切换时间为 35 min。

2.1.2 色谱条件 采用 Shim-pack Scepter C₁₈-120 (100 mm $\times$ 2.1 mm, 1.9 μ m) 色谱柱;流动相为乙腈(A)-0.1%磷酸水溶液(B),梯度洗脱 0~12 min, 5% $\rightarrow$ 15% A; 12~20 min, 15% $\rightarrow$ 28% A; 20~25 min, 28% $\rightarrow$ 35% A; 25~27 min, 35% $\rightarrow$ 95% A, 27~35 min, 95% $\rightarrow$ 97% A; 35~50 min, 97% A; 体

积流量 0.3 mL $\cdot$ min⁻¹;检测波长 0~35 min 为 327 nm, 35~50 min 为 210 nm;进样量 1 μ L;柱温 30 $^{\circ}$ C。

2.1.3 混合对照品溶液制备 分别精密称取单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸、异绿原酸 A、木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇和蒲公英萜醇对照品适量,用甲醇配制成质量浓度分别为 79.66、19.70、14.36、168.37、7.04、8.84、18.47、20.42、32.50 μ g $\cdot$ mL⁻¹ 的混合对照品溶液。

2.1.4 供试品溶液的制备 取 20 g 碱地蒲公英粉末,采用 20 倍量 70%乙醇回流提取 3 次,每次 90 min,合并提取液并混匀,经 0.22 μ m 微孔滤膜滤过,取续滤液,即得供试品溶液。

2.1.5 专属性考察 精密吸取混合对照品溶液、供试品溶液和空白溶剂,按“2.1.2”项下色谱条件分别进样测定,记录色谱图(图 1)。结果各待测成分与相邻成分分离较好,阴性样品溶液无干扰。

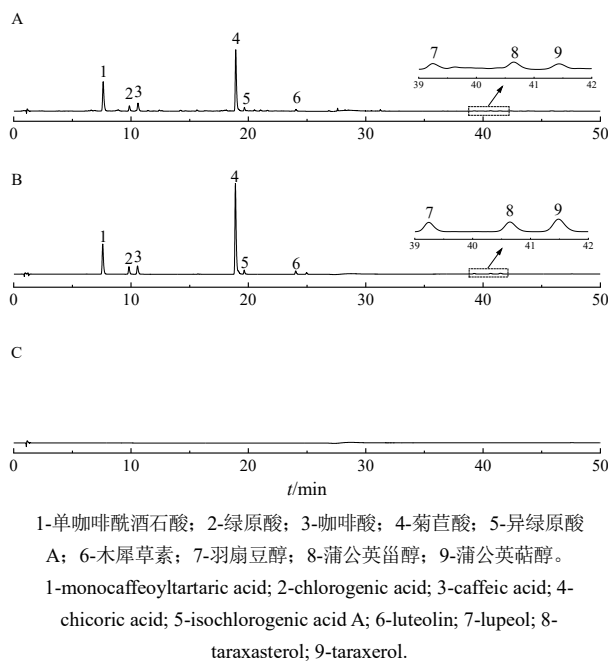


图 1 供试品溶液(A)、混合对照品溶液(B)及空白溶剂(C)的UPLC图

Fig. 1 UPLC chromatograms of test solution (A), mixed reference substance solution (B) and blank solvent (C)

2.1.6 线性关系考察 精密吸取“2.1.3”项下混合对照品溶液,等比稀释制备 6 个不同质量浓度的系列溶液,进样测定,以质量浓度为横坐标(*X*)、峰面积为纵坐标(*Y*)进行线性回归分析,并以信噪比 10:1 确定定量限(LOQ),得到的线性方程、线性范围及 LOQ 见表 1。所得线性相关系数(*r*)均在 0.999 82 及以上,表明各成分线性关系良好。

表 1 各成分线性关系、LOQ、精密度、重复性及稳定性

Table 1 Linear relationship, LOQ, precision, repeatability, and stability of various constituents

成分	回归方程	<i>r</i>	线性范围/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	LOQ/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	RSD/% (<i>n</i> =6)		
					精密度	重复性	稳定性
单咖啡酰酒石酸	$Y=6.642 X-4.963$	0.999 95	7.97~238.99	0.06	0.39	0.37	0.40
绿原酸	$Y=6.291 X-1.074$	0.999 95	1.97~59.10	0.06	0.21	0.33	0.53
咖啡酸	$Y=10.659 X-1.637$	0.999 93	1.44~43.07	0.04	0.46	0.42	0.71
菊苣酸	$Y=9.440 X-14.015$	0.999 95	16.84~505.10	0.04	0.53	0.86	1.08
异绿原酸 A	$Y=9.039 X-0.589$	0.999 94	0.70~21.11	0.04	0.35	0.53	0.66
木犀草素	$Y=6.412 X-0.967$	0.999 82	0.88~26.51	0.06	0.49	0.78	0.64
羽扇豆醇	$Y=0.859 X-0.084$	0.999 98	1.85~55.42	0.74	0.64	0.94	0.75
蒲公英甾醇	$Y=0.920 X-0.119$	0.999 98	2.04~61.26	0.79	0.45	1.13	0.88
蒲公英萜醇	$Y=0.772 X-0.119$	0.999 99	3.25~97.49	1.03	0.38	1.06	0.98

2.1.7 精密度考察 取“2.1.3”项下混合对照品溶液,连续进样 6 次,计算单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸、异绿原酸 A、木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇和蒲公英萜醇 9 个成分峰面积的 RSD 均在 0.21%~0.64% (表 1),表明仪器精密度良好。

2.1.8 重复性考察 分别取 6 份蒲公英,按“2.1.4”项下方法制备供试品溶液并进样测定,计算 9 个指标成分含量的 RSD 均在 0.33%~1.13% (表 1),表明该方法重复性较好。

2.1.9 稳定性考察 取蒲公英适量,按“2.1.4”项下方法制备供试品溶液,分别于 0、2、4、8、16、24 h 进样测定,计算 9 个指标成分的峰面积的 RSD 均在 0.40%~1.08% (表 1),表明供试品在 24 h 内稳定性良好。

2.1.10 加样回收率考察 精密量取已测指标成分的蒲公英提取液,按对照品与样品含量比“1:1”分别加入单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸、异绿原酸 A、木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇和蒲公英萜醇对照品溶液适量,平行制备 6 份供试品溶液并进样测定,结果 9 个成分的平均回收率依次为 99.35%、101.04%、99.61%、101.14%、99.37%、99.85%、101.57%、99.07%、100.32%,RSD 分别为 0.36%、0.45%、0.59%、0.23%、0.47%、0.73%、0.67%、0.68%、0.79%,表明该方法准确度良好。

2.2 单因素考察蒲公英提取工艺

2.2.1 乙醇体积分数考察 取 5 份 20 g 蒲公英粉末分别置于 5 个 1 L 圆底瓶中,分别加入 20 倍 0、30%、

50%、70%、90%乙醇,回流提取 3 次,每次 90 min,测定 9 个成分的质量分数 (表 2)。随着乙醇体积分数的增加,单咖啡酰酒石酸、菊苣酸等极性成分提取率有先升后降的趋势,在 30%~70%乙醇体积分数条件下具有较高质量分数,而蒲公英甾醇等三萜类成分在 0、30%乙醇提取液中未检出,而 70%及以上乙醇则具有较高质量分数,综合各指标变化情况,选择 50%、70%、90%乙醇开展响应面实验。

2.2.2 溶剂倍数考察 取 20 g 蒲公英粉末分别置于 5 个 1 L 圆底瓶中,分别加入 10、15、20、25、30 倍 50%乙醇,回流提取 3 次,每次 90 min,测定 9 个成分的质量分数 (表 3)。随着溶剂倍数的增加,各成分质量分数有所增加,溶剂倍数对三萜类成分提取率的影响相对较大,各成分整体在 20 倍及以上 50%乙醇条件下可达到较好提取效果,结合提取成本因素,选择 15、20、25 倍溶剂开展后续实验。

2.2.3 提取时间考察 称取 20 g 蒲公英粉末,分别置于 5 个 1 L 圆底瓶中,采用 20 倍 50%乙醇回流提取 3 次,提取时间分别设定为 30、60、90、120、150 min,测定 9 个成分的质量分数 (表 4)。随着提取时间增加,各成分质量分数均呈逐步提升趋势,90 min 后变化幅度减小,综合提取效率与实操成本,选择提取时间 60、90、120 min 开展后续实验。

2.2.4 提取次数考察 取 20 g 蒲公英粉末分别置于 5 个 1 L 圆底瓶中,采用 20 倍 50%乙醇分别回流提取 1、2、3、4、5 次,每次提取 90 min,测定 9 个成分的质量分数 (表 5)。提取次数对提取率有促进作用,

表 2 乙醇体积分数的影响 ($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 2 Influence of ethanol volume fraction ($\bar{x} \pm s, n=3$)

体积分数/%	质量分数/(mg·g ⁻¹)				
	单咖啡酰酒石酸	绿原酸	咖啡酸	菊苣酸	异绿原酸 A
0	3.003±0.020 ^c	0.279±0.006 ^d	0.025±0.001 ^d	4.092±0.020 ^c	0.011±0.001 ^b
30	3.720±0.038 ^a	0.504±0.008 ^b	0.362±0.002 ^c	6.307±0.024 ^b	0.247±0.002 ^a
50	3.596±0.039 ^b	0.501±0.009 ^b	0.548±0.006 ^a	6.371±0.013 ^a	0.245±0.004 ^a
70	3.533±0.034 ^b	0.562±0.017 ^a	0.540±0.004 ^a	6.391±0.038 ^a	0.252±0.004 ^a
90	1.144±0.012 ^d	0.454±0.008 ^c	0.411±0.002 ^b	3.524±0.016 ^d	0.237±0.002 ^c

体积分数/%	质量分数/(mg·g ⁻¹)			
	木犀草素	羽扇豆醇	蒲公英甾醇	蒲公英萜醇
0	—	—	—	—
30	0.107±0.002 ^c	—	—	—
50	0.179±0.004 ^b	0.211±0.002 ^c	0.258±0.003 ^c	0.248±0.003 ^c
70	0.211±0.005 ^a	0.407±0.004 ^b	0.530±0.007 ^b	0.555±0.004 ^b
90	0.216±0.001 ^a	0.417±0.004 ^a	0.576±0.007 ^a	0.584±0.005 ^a

同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

表 3 提取溶剂倍数的影响 ($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 3 Influence of extraction solvent multiple ($\bar{x} \pm s, n=3$)

溶剂倍数	质量分数/(mg·g ⁻¹)				
	单咖啡酰酒石酸	绿原酸	咖啡酸	菊苣酸	异绿原酸 A
10	3.176±0.013 ^d	0.535±0.004 ^{ab}	0.450±0.008 ^c	5.637±0.032 ^c	0.241±0.004 ^b
15	3.358±0.014 ^c	0.546±0.008 ^a	0.532±0.003 ^a	6.237±0.027 ^b	0.240±0.003 ^b
20	3.576±0.035 ^b	0.524±0.005 ^b	0.550±0.009 ^a	6.341±0.039 ^a	0.243±0.004 ^b
25	3.609±0.019 ^{ab}	0.540±0.005 ^a	0.539±0.008 ^a	6.328±0.019 ^a	0.260±0.003 ^a
30	3.656±0.026 ^a	0.538±0.006 ^{ab}	0.510±0.009 ^b	6.301±0.029 ^{ab}	0.258±0.003 ^a

溶剂倍数	质量分数/(mg·g ⁻¹)			
	木犀草素	羽扇豆醇	蒲公英甾醇	蒲公英萜醇
10	0.163±0.003 ^c	0.116±0.002 ^c	0.091±0.002 ^c	0.096±0.001 ^c
15	0.212±0.001 ^b	0.166±0.003 ^d	0.150±0.003 ^d	0.179±0.003 ^d
20	0.179±0.002 ^d	0.212±0.003 ^c	0.258±0.002 ^c	0.248±0.002 ^c
25	0.238±0.003 ^a	0.232±0.003 ^b	0.326±0.003 ^a	0.332±0.003 ^a
30	0.198±0.003 ^c	0.247±0.005 ^a	0.312±0.005 ^b	0.320±0.004 ^b

同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

但在提取 3 次之后各个成分质量分数变化较小, 结合提取效率情况, 选择 2、3、4 次开展后续实验。

2.3 BBD-RSM 优化提取工艺

在单因素考察的基础上, 采用 BBD-RSM 模型对提取工艺进一步优化, 以乙醇体积分数 (A)、溶剂倍数 (B)、提取时间 (C) 和提取次数 (D) 为考察因素, 以单咖啡酰酒石酸 ($C1$)、绿原酸 ($C2$)、咖啡酸 ($C3$)、菊苣酸 ($C4$)、异绿原酸 A ($C5$)、

木犀草素 ($C6$)、羽扇豆醇 ($C7$)、蒲公英甾醇 ($C8$) 和蒲公英萜醇 ($C9$) 9 个定量成分质量分数的综合评分 (Y) 作为响应值, 设计 4 因素 3 水平共计 29 次实验, 实验方案、设计及结果如表 6 所示。

2.4 Pearson 相关性分析

以表 6 中 4 种因素及 9 种成分的质量分数进行 Pearson 相关性分析, 结果如图 2 所示, 虽然 4 种因素均只有 3 个水平, 9 种成分在整体上仍呈一定的

表 4 提取时间的影响 ($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 4 Influence of extraction time ($\bar{x} \pm s, n=3$)

提取时间/min	质量分数/(mg·g ⁻¹)				
	单咖啡酰酒石酸	绿原酸	咖啡酸	菊苣酸	异绿原酸 A
30	3.057±0.016 ^c	0.463±0.002 ^d	0.368±0.003 ^e	5.789±0.016 ^d	0.236±0.004 ^d
60	3.627±0.019 ^{ab}	0.491±0.002 ^c	0.454±0.003 ^d	6.011±0.021 ^c	0.246±0.004 ^c
90	3.621±0.015 ^{ab}	0.528±0.008 ^b	0.532±0.005 ^c	6.502±0.031 ^a	0.259±0.004 ^{ab}
120	3.659±0.024 ^a	0.567±0.005 ^a	0.547±0.007 ^b	6.495±0.033 ^{ab}	0.260±0.003 ^a
150	3.595±0.033 ^b	0.538±0.004 ^b	0.561±0.003 ^a	6.429±0.023 ^b	0.249±0.003 ^{bc}

提取时间/min	质量分数/(mg·g ⁻¹)			
	木犀草素	羽扇豆醇	蒲公英甾醇	蒲公英萜醇
30	0.161±0.003 ^a	0.206±0.002 ^c	0.211±0.004 ^c	0.261±0.004 ^c
60	0.121±0.002 ^c	0.213±0.003 ^c	0.213±0.003 ^c	0.266±0.002 ^b
90	0.150±0.001 ^b	0.212±0.003 ^c	0.246±0.004 ^b	0.244±0.004 ^b
120	0.149±0.002 ^b	0.228±0.003 ^b	0.285±0.005 ^a	0.291±0.003 ^a
150	0.198±0.003 ^c	0.247±0.005 ^a	0.312±0.005 ^b	0.320±0.004 ^b

同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

表 5 提取次数的影响 ($\bar{x} \pm s, n=3$)
Table 5 Influence of extraction time ($\bar{x} \pm s, n=3$)

提取次数	质量分数/(mg·g ⁻¹)				
	单咖啡酰酒石酸	绿原酸	咖啡酸	菊苣酸	异绿原酸 A
1	2.275±0.013 ^c	0.349±0.004 ^c	0.257±0.001 ^d	4.613±0.010 ^c	0.196±0.003 ^c
2	3.330±0.017 ^b	0.464±0.008 ^b	0.476±0.002 ^c	6.103±0.020 ^d	0.244±0.002 ^b
3	3.586±0.017 ^a	0.493±0.002 ^a	0.531±0.004 ^b	6.411±0.018 ^c	0.242±0.002 ^b
4	3.611±0.057 ^a	0.505±0.006 ^a	0.557±0.003 ^a	6.462±0.011 ^b	0.251±0.003 ^a
5	3.602±0.026 ^a	0.472±0.003 ^b	0.555±0.006 ^a	6.514±0.023 ^a	0.174±0.002 ^d

提取次数	质量分数/(mg·g ⁻¹)			
	木犀草素	羽扇豆醇	蒲公英甾醇	蒲公英萜醇
1	0.144±0.002 ^d	0.066±0.001 ^e	0.066±0.001 ^e	0.070±0.001 ^e
2	0.154±0.001 ^c	0.133±0.002 ^d	0.127±0.002 ^d	0.138±0.003 ^d
3	0.179±0.002 ^a	0.250±0.002 ^c	0.258±0.003 ^d	0.248±0.005 ^c
4	0.171±0.002 ^b	0.278±0.003 ^b	0.293±0.003 ^b	0.270±0.002 ^b
5	0.168±0.002 ^b	0.303±0.003 ^a	0.348±0.004 ^a	0.337±0.003 ^a

同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

相关性,特别是 A 对极性不同的成分提取效果影响不同,与单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸呈显著性负相关,与木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇和蒲公英萜醇呈显著性正相关,其中各三萜类成分之间呈极强正相关 ($r>0.96$)。B、C、D 与大部分成分呈正相关,其中 D 对酚酸类提取率的影响较三萜类成分更强,且与木犀草素的提取率之间呈显著性正相关 ($r=0.49$)。整体上 A 的选择需要兼顾酚酸类成分及三萜类成分的提取率,其他因素

的选择可结合响应面优化结果进一步分析。

2.5 主成分分析 (PCA)

将 29 个蒲公英样品的 9 个成分质量分数数据导入 OriginPro 2025 软件进行 PCA,以主成分特征值>1 为标准,共确定了 PC1 和 PC2 共 2 个主成分(累积方差贡献率为 82.82%),分别解释了总方差的 50.63%、32.19%,9 个成分的载荷情况如表 7 所示,以 2 个主成分的方差贡献率为权重,对载荷绝对值进行线性加权求和^[12],得到载荷综合得分。以 PC1、

表 6 响应面试验设计及结果
Table 6 Design and results of response surface test

序号	A/%	B/倍	C/min	D/次	质量分数/(mg·g ⁻¹)									Y
					C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	
S1	90 (1)	15 (-1)	90 (0)	3 (0)	1.07	0.45	0.41	3.47	0.23	0.22	0.38	0.63	0.50	0.453 3
S2	70 (0)	25 (1)	90	4 (1)	3.52	0.54	0.53	6.29	0.27	0.20	0.38	0.58	0.49	0.869 1
S3	50 (-1)	25	90	3	3.52	0.54	0.55	6.35	0.20	0.18	0.21	0.23	0.21	0.563 6
S4	50	20 (0)	90	4	3.74	0.57	0.54	6.35	0.21	0.19	0.21	0.23	0.22	0.601 4
S5	90	20	120 (1)	3	1.18	0.41	0.42	4.01	0.24	0.20	0.39	0.62	0.51	0.488 2
S6	70	25	90	2 (-1)	3.44	0.49	0.50	6.13	0.23	0.13	0.35	0.56	0.46	0.708 6
S7	70	15	90	4	3.49	0.52	0.52	6.24	0.26	0.19	0.36	0.58	0.49	0.828 5
S8	50	20	90	2	3.65	0.52	0.50	6.13	0.22	0.13	0.15	0.15	0.16	0.459 2
S9	70	15	120	3	3.45	0.53	0.48	6.21	0.22	0.19	0.36	0.51	0.43	0.732 8
S10	70	20	90	3	3.53	0.57	0.53	6.34	0.27	0.21	0.41	0.60	0.53	0.916 4
S11	90	20	90	4	1.67	0.46	0.38	4.51	0.24	0.21	0.42	0.64	0.57	0.587 0
S12	70	15	60 (-1)	3	3.36	0.50	0.52	6.01	0.21	0.16	0.35	0.55	0.46	0.704 5
S13	70	20	90	3	3.54	0.61	0.56	6.35	0.25	0.20	0.41	0.58	0.51	0.903 1
S14	70	20	90	3	3.48	0.57	0.53	6.39	0.27	0.21	0.41	0.59	0.53	0.914 5
S15	70	20	60	2	3.16	0.48	0.50	6.02	0.21	0.17	0.34	0.56	0.44	0.680 2
S16	50	20	60	3	3.49	0.46	0.51	6.24	0.21	0.17	0.20	0.20	0.23	0.511 3
S17	70	20	120	4	3.21	0.55	0.55	6.35	0.25	0.20	0.42	0.61	0.47	0.862 6
S18	70	20	60	4	3.16	0.54	0.53	6.27	0.23	0.18	0.34	0.56	0.46	0.762 5
S19	50	15	90	3	3.41	0.49	0.54	6.27	0.25	0.16	0.18	0.19	0.20	0.549 1
S20	70	20	120	2	2.90	0.51	0.52	6.24	0.24	0.18	0.36	0.57	0.45	0.750 8
S21	70	20	90	3	3.51	0.60	0.56	6.37	0.24	0.20	0.41	0.58	0.54	0.897 2
S22	70	20	90	3	3.47	0.57	0.52	6.33	0.24	0.21	0.42	0.62	0.55	0.889 8
S23	70	15	90	2	3.35	0.46	0.50	6.01	0.22	0.13	0.34	0.52	0.42	0.650 6
S24	90	20	60	3	1.19	0.39	0.41	3.71	0.23	0.19	0.37	0.58	0.49	0.417 3
S25	70	25	60	3	3.53	0.47	0.58	6.17	0.21	0.17	0.34	0.43	0.43	0.705 4
S26	50	20	120	3	3.58	0.51	0.54	6.34	0.22	0.19	0.22	0.21	0.24	0.588 5
S27	70	25	120	3	3.48	0.57	0.54	6.35	0.25	0.21	0.42	0.56	0.47	0.873 7
S28	90	25	90	3	1.18	0.46	0.42	4.35	0.24	0.22	0.36	0.51	0.47	0.491 1
S29	90	20	90	2	1.04	0.35	0.36	3.40	0.23	0.20	0.43	0.58	0.53	0.394 9

PC2 及成分载荷值绘制了蒲公英样本及载荷的 PCA 双标图 (图 3)。结果表明, PCA 的样本均在置信椭圆内,从样本的分布趋势上被分为 3 组(差异为 A),可见对样本提取效果影响最大的因素为 A;同时,从双标图的载荷分布情况可见,3 组样本的差异主要受 PC1 的影响,单咖啡酰酒石酸、咖啡酸、菊苣酸可聚为 1 组,木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇和蒲公英萜醇可聚为 1 组,且这 7 个成分对 3 组样本 PCA 得分的影响较大。

2.6 AHP-熵权法组合赋权

2.6.1 AHP 主观权重分析 AHP 是一种结合定性与定量分析的多准则决策方法,适用于处理复杂问题

中的权重分配问题^[13]。结合 PCA 载荷综合得分情况,同时考虑到菊苣酸为《中国药典》2025 年版蒲公英项下指标成分,确定 9 个指标成分的优先顺序为菊苣酸>单咖啡酰酒石酸=绿原酸=咖啡酸=羽扇豆醇=蒲公英甾醇=蒲公英萜醇>异绿原酸 A=木犀草素,构建成对比较的优先判断矩阵,结果见表 8。

基于 R 4.5.1 对 9 个成分的权重系数进行分析,参见文献报道^[9],首先基于矩阵计算几何平均值 G,再对平均值进行归一化处理,得到各指标的权重向量 w_{li} 。再采用一致性比率 (CR) 来判断矩阵的一致性可接受、评价权重系数是否合理;计算过程随机一致性指标取值为 1.45,结果表明,矩阵的最大

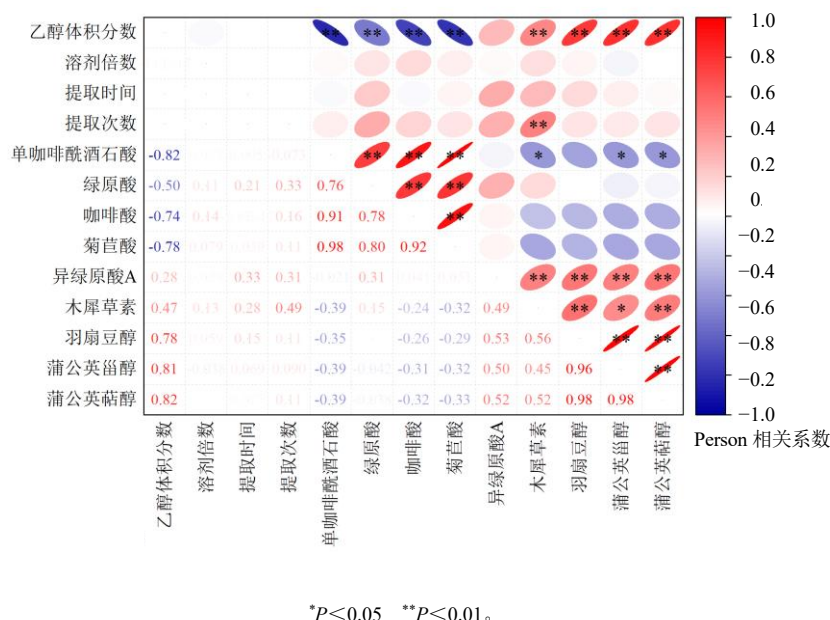


图 2 工艺因素与成分提取率相关性分析结果

Fig. 2 Correlation analysis results between process factors and component extraction yields

表 7 PCA 成分载荷值

Table 7 Loading values of PCA

成分	PC1	PC2	综合得分
单咖啡酰酒石酸	-0.391	0.294	0.293
绿原酸	-0.225	0.468	0.264
咖啡酸	-0.356	0.337	0.289
菊苣酸	-0.372	0.337	0.297
异绿原酸 A	0.175	0.390	0.214
木犀草素	0.277	0.218	0.210
羽扇豆醇	0.370	0.320	0.290
蒲公英甾醇	0.375	0.283	0.281
蒲公英萜醇	0.382	0.293	0.288

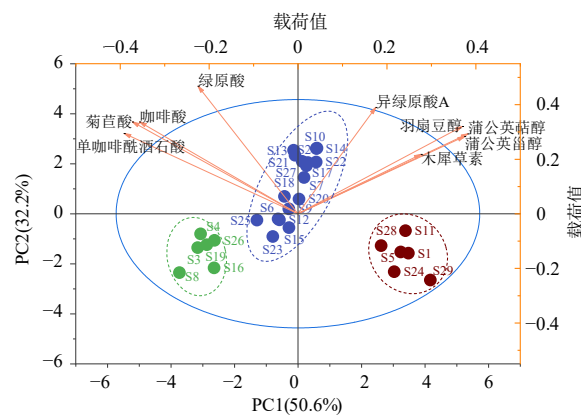


图 3 PCA 双标图

Fig. 3 PCA biplot

表 8 指标成分比较的判断优先矩阵

Table 8 Judgment priority matrix for comparison of indicator components

评价指标	菊苣酸	单咖啡酰酒石酸	绿原酸	咖啡酸	羽扇豆醇	蒲公英甾醇	蒲公英萜醇	异绿原酸 A	木犀草素
菊苣酸	1	2	2	2	2	2	2	3	3
单咖啡酰酒石酸	1/2	1	1	1	1	1	1	2	2
绿原酸	1/2	1	1	1	1	1	1	2	2
咖啡酸	1/2	1	1	1	1	1	1	2	2
羽扇豆醇	1/2	1	1	1	1	1	1	2	2
蒲公英甾醇	1/2	1	1	1	1	1	1	2	2
蒲公英萜醇	1/2	1	1	1	1	1	1	2	2
异绿原酸 A	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1
木犀草素	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1

特征根为 9.012 3, 一致性比例因子 (CI) 为 0.001 5, $CR=0.001\ 1<0.1$, 表明所构建的矩阵满足一致性要求。单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸、异绿原酸 A、木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇、蒲公英萜醇的 AHP 权重系数分别为 0.112 3、0.112 3、0.112 3、0.210 6、0.057 9、0.057 9、0.112 3、0.112 3、0.112 3。

2.6.2 熵权法客观权重分析 熵权法为一种基于信息熵理论的客观评价方法, 通过计算各指标值的变异程度来确定权重^[14-15]。依据文献报道^[9], 首先对 29 批样本的测定数据进行归一化处理, 计算各指标的比重, 再计算各指标的信息熵值、差异系数, 采用 R 4.5.1 软件计算单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸、异绿原酸 A、木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇、蒲公英萜醇的熵权法权重系数分别为 0.141 6、0.077 3、0.088 9、0.103 8、0.142 5、0.119 2、0.098 4、0.118 8、0.109 5。

2.6.3 AHP-熵权法计算 Y 以各指标的 AHP 法主观权重 (w_1) 与熵权法所得客观权重 (w_2) 计算单咖啡酰酒石酸、绿原酸、咖啡酸、菊苣酸、异绿原酸 A、木犀草素、羽扇豆醇、蒲公英甾醇、蒲公英萜醇的综合权重系数 (w_j) 分别为 0.146 9、0.080 2、0.092 2、0.201 9、0.076 2、0.063 7、0.102 1、0.123 2、0.113 6。根据 w_j 计算 29 组实验的 Y (表 6)。

$$w_j = w_1 w_2 / \sum_{j=1}^m w_1 w_2$$

$Y = w_j \times (\text{单咖啡酰酒石酸}_i + \text{绿原酸}_i + \text{咖啡酸}_i + \text{菊苣酸}_i + \text{异绿原酸 A}_i + \text{木犀草素}_i + \text{羽扇豆醇}_i + \text{蒲公英甾醇}_i + \text{蒲公英萜醇}_i)$

采用 Design-Expert 12 软件, 以 Y 结果进行多元回归拟合, 建立 4 个因素的回归方程: $Y = 0.904\ 2 - 0.036\ 8 A + 0.024\ 4 B + 0.043\ 0 C + 0.072\ 2 D + 0.005\ 8 AB - 0.001\ 6 AC + 0.012\ 5 AD + 0.035\ 0 BC - 0.004\ 4 BD + 0.007\ 4 CD - 0.323\ 7 A^2 - 0.070\ 6 B^2 - 0.077\ 1 C^2 - 0.067\ 4 D^2$, $R^2 = 0.991\ 0$ 。方差分析结果如表 9 所示, 模型具有极显著性 ($P < 0.001$), 失拟项 $P = 0.061\ 8$, 表明该模型可用于蒲公英的提取实验优化。依据一次项系数绝对值大小确定 4 个因素对 Y 的影响大小依次为 $D > C > A > B$ 。A、B、C、D 及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对综合评分具有极显著影响 ($P < 0.001$); 交互因素 BC 同样具有极显著影响 ($P < 0.01$), 不同因素交互作用所绘制的响应面图如图 4 所示。以 Y 最大为优化目标, 预测最佳提取条件为乙醇体积分数 69.11%、溶剂倍数 21.22 倍、提取时间 100.81 min, 提取次数 3.54 次, 结合工业化应用控制的便捷性、成本等因素, 将最优提取工艺组合调整为 20 倍 70%乙醇提取 3 次, 每次 100 min。

表 9 响应面方差分析

Table 9 Analysis of variance in response surface methodology

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.796 00	14	0.056 9	109.73	<0.000 1	CD	0.000 20	1	0.000 2	0.42	0.527 5
A	0.016 20	1	0.016 2	31.32	<0.000 1	A ²	0.679 90	1	0.679 9	1 312.05	<0.000 1
B	0.007 10	1	0.007 1	13.78	0.002 3	B ²	0.032 30	1	0.032 3	62.34	<0.000 1
C	0.022 10	1	0.022 1	42.72	<0.000 1	C ²	0.038 60	1	0.038 6	74.48	<0.000 1
D	0.062 60	1	0.062 6	120.83	<0.000 1	D ²	0.029 50	1	0.029 5	56.92	<0.000 1
AB	0.000 10	1	0.000 1	0.261	0.616 8	残差	0.007 30	14	0.000 5		
AC	0.000 01	1	0.000 1	0.02	0.891 9	失拟项	0.006 70	10	0.000 7	5.26	0.061 8
AD	0.000 60	1	0.000 6	1.20	0.291 5	纯误差	0.000 50	4	0.000 1		
BC	0.004 90	1	0.004 9	9.46	0.008 2	总和	0.803 30	28			
BD	0.000 10	1	0.000 1	0.15	0.708 1						

2.7 工艺验证

根据所预测的理论最优提取条件开展 3 次平行实验, 结果表明综合评分均值为 0.963 5, RSD 值为 1.21% (表 10), 同时 9 个成分的指标均处于较高水平, 表明预测结果与实际有较好的一致性。

3 讨论

酚类与三萜类成分均是蒲公英的核心活性成分, 但当前相关成分分析研究多以酚类成分为核心对象, 尚无成熟的分析方法能同时兼顾 2 类成分的检测方法。本研究建立了可同时测定蒲公英中 6 种

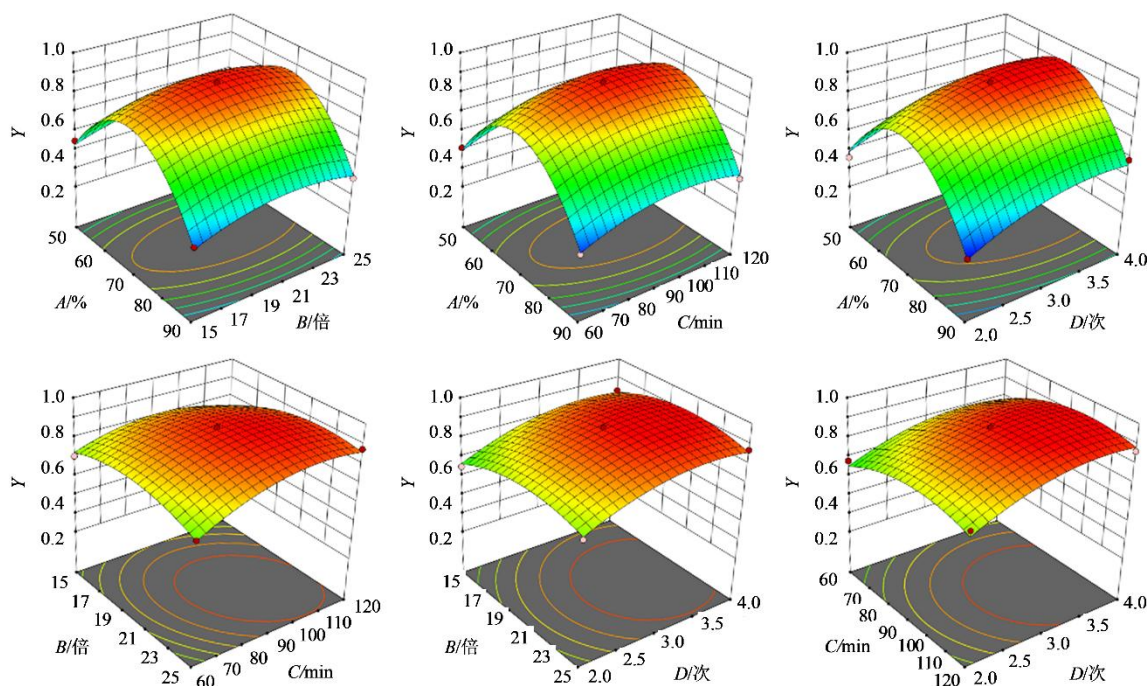


图 4 各因素间交互作用的三维响应面图

Fig. 4 3D response surface plots of interaction effects between factors

表 10 响应面试验设计及结果

Table 10 Design and results of response surface test

序号	质量分数/(mg·g ⁻¹)									Y
	单咖啡酰 酒石酸	绿原酸	咖啡酸	菊苣酸	异绿原酸 A	木犀草素	羽扇豆醇	蒲公英甾醇	蒲公英萜醇	
1	3.51	0.6	0.56	6.37	0.25	0.2	0.42	0.62	0.57	0.930 1
2	3.50	0.6	0.55	6.38	0.27	0.21	0.42	0.62	0.55	0.949 3
3	3.52	0.59	0.56	6.37	0.26	0.2	0.41	0.61	0.56	0.929 5
平均值	3.51	0.60	0.56	6.37	0.26	0.20	0.42	0.62	0.56	0.936 3
RSD/%	0.28	0.97	1.04	0.09	3.85	2.84	1.39	0.94	1.79	1.21

酚类成分与 3 种三萜类成分的 UPLC 定量分析方法, 以这 9 种成分的质量分数为核心考察指标, 结合响应面法对提取工艺展开系统优化, 最终明确最优提取条件为 20 倍 70%乙醇提取 3 次, 每次 100 min。

基于响应面法的工艺优化结果, 本研究进一步实施 Pearson 相关性分析与 PCA。结果显示, 4 个提取条件因素与目标成分间均存在关联性, 其中乙醇体积分数的影响最为显著, 与高极性酚酸类成分呈极显著负相关, 而与低极性的三萜类及黄酮类成分呈极显著正相关, 提示提取工艺参数的优选需建立多维度综合评价体系。PCA 结果亦显示, 29 个样本间最显著的差异来源为乙醇体积分数。结合 PCA 成分载荷分析结果, 并参照《中国药典》2025 年版蒲公英项下指标成分要求, 本研究明确了 AHP 中

各成分的权重标度, 构建完成判断矩阵; 进一步联合 AHP 主观赋权与熵权法客观赋权, 最终确定各评价指标的综合权重系数, 为蒲公英提取效果的客观评价提供了可靠依据。响应面法分析结果显示, 提取效果综合评分受多因素协同作用影响, 在优化后的提取条件下, 酚类、三萜类成分的质量分数及综合评分均达较高水平。

综上所述, 本研究建立的蒲公英 UPLC 多成分定量分析方法稳定性与可靠性良好, 结合 AHP 主观与熵权法客观的组合赋权模式, 能够基于酚类与三萜类成分的同步检测实现对蒲公英提取效果的评价, 为蒲公英的开发应用及质量标准控制提供重要参考。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S].一部. 2025.
Pharmacopoeia of the People's Republic of China [S]. Volume I. 2025.
- [2] 闫志华, 周骏辉, 华羽彤, 等. UPLC 同时测定不同产地蒲公英中 6 种成分含量 [J]. 现代中药研究与实践, 2025, 39(2): 44-48.
Yan Z H, Zhou J H, Hua Y T, et al. Simultaneous determination of 6 components in *Taraxacum mongolicum* from different habitats by UPLC [J]. Res Pract Chin Med, 2025, 39(2): 44-48.
- [3] 石爱文, 姚佳靖, 王庆, 等. 蒲公英化学成分和药理作用研究进展及其质量标志物预测分析 [J]. 中华中医药学刊, 2024, 42(9): 38-45.
Shi A W, Yao J J, Wang Q, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Taraxacum mongolicum* and prediction and analysis of its quality markers [J]. Chin Arch Tradit Chin Med, 2024, 42(9): 38-45.
- [4] Wu J H, Sun J L, Liu M Q, et al. Botany, traditional use, phytochemistry, pharmacology and quality control of taraxaci herba: Comprehensive review [J]. Pharmaceuticals, 2024, 17(9): 1113.
- [5] 孟然, 吴哲, 冯薇, 等. 基于 HPLC 指纹图谱结合化学模式识别及多成分定量的蒲公英质量评价研究 [J]. 中草药, 2022, 53(24): 7887-7896.
Meng R, Wu Z, Feng W, et al. Quality evaluation of dandelion based on HPLC fingerprint combined with chemical pattern recognition and multi-component determination [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2022, 53(24): 7887-7896.
- [6] 洪博, 刘荣宏, 侯玉娇, 等. 蒲公英药材 UPLC 指纹图谱及 10 个成分含量测定研究 [J]. 药物分析杂志, 2023, 43(11): 1858-1865.
Hong B, Liu R H, Hou Y J, et al. Study on UPLC fingerprint of *Taraxaci Herba* and determination of ten components [J]. Chin J Pharm Anal, 2023, 43(11): 1858-1865.
- [7] 张含, 李文静, 林宇, 等. UPLC 法测定蒲公英不同用药部位中 3 种活性成分含量 [J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(11): 51-56.
Zhang H, Li W J, Lin Y, et al. Determination of active components in different medicinal parts of *Taraxacum mongolicum* by UPLC [J]. Chin Wild Plant Resour, 2024, 43(11): 51-56.
- [8] Chen L, Lin M, Wang Y Y, et al. *Taraxacum mongolicum* total triterpenoids and taraxasterol ameliorate benign prostatic hyperplasia by inhibiting androgen levels, inflammatory responses, and epithelial-mesenchymal transition via the TGF β 1/Smad signalling pathway [J]. J Ethnopharmacol, 2025, 349: 119995.
- [9] 梅佳华, 查学志, 柯瑾, 等. 基于 AHP-熵权法及化学计量学的虎力散提取工艺研究 [J]. 中草药, 2025, 56(13): 4643-4653.
Mei J H, Zha X Z, Ke J, et al. Research on extraction process of Hulisan based on AHP-entropy weight method and chemometrics [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2025, 56(13): 4643-4653.
- [10] 董珂旭, 张媛, 高如汐, 等. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选枸杞汁制巴戟天炮制工艺 [J]. 中草药, 2025, 56(7): 2301-2311.
Dong K X, Zhang Y, Gao R X, et al. AHP-entropy weight method combined with Box-Behnken design-response surface method optimized processing technology of wolfberry juice processed *Morindae Officinalis Radix* [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2025, 56(7): 2301-2311.
- [11] 王锐, 邱智东, 刘滢, 等. Box-Behnken 响应面结合 FAHP-熵权法和基准关联度优化经典名方泻白散的提取工艺 [J]. 中草药, 2023, 54(18): 5923-5932.
Wang R, Qiu Z D, Liu Y, et al. Optimization of extraction process for classical prescription Xiebai San based on Box-Behnken response surface combined with fuzzy analytic hierarchy process-entropy method and benchmark correlation degree [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2023, 54(18): 5923-5932.
- [12] 田祥涛, 赵小娜, 郑伟, 等. 不同工艺参数下枇杷叶茶品质差异 [J]. 食品研究与开发, 2025, 46(18): 121-129.
Tian X T, Zhao X N, Zheng W, et al. Quality differences of loquat leaf tea under different processing parameters [J]. Food Res Dev, 2025, 46(18): 121-129.
- [13] 史俊祖, 王雪峰, 武瑞莉, 等. 基于 AHP-CRITIC 结合 Box-Behnken 响应面法优选小儿定喘颗粒的提取工艺 [J]. 时珍国医国药, 2023, 34(12): 2928-2932.
Shi J Z, Wang X F, Wu R L, et al. Optimization of extraction process of Xiaoer Dingchuan Granules based on AHP-CRITIC analysis [J]. Lishizhen Med Mater Med Res, 2023, 34(12): 2928-2932.
- [14] 申柯, 姚晓煜, 李建国, 等. 多组分定量结合 AHP-熵权法对不同产地梅花鹿茸饮片质量综合评价 [J]. 中草药, 2024, 55(21): 7474-7482.
Shen K, Yao X Y, Li J G, et al. Comprehensively evaluation of quality of Sika deer antler decoction pieces from different origins by determination of multi-component content combined with AHP-entropy weight method [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2024, 55(21): 7474-7482.
- [15] 刘燎原, 程钰洁, 张正, 等. 基于指纹图谱和盐酸水苏碱、盐酸益母草碱含量测定的鲜益母草质量评价 [J]. 药物评价研究, 2024, 47(12): 2830-2843.
Liu L Y, Cheng Y J, Zhang Z, et al. Study on quality evaluation of fresh *Leonurus japonicus* Houtt. based on fingerprint and component determination of leonurine hydrochloride and stachydrine hydrochloride [J]. Drug Eval Res, 2024, 47(12): 2830-2843.