DOI:10.12441/spyswjs.20260306001 [文章编号] 1673-1689(2026)05-0060-13

# 天麻干燥方式优化及其抑制乙酰胆碱酯酶的作用机制研究

南亦美 范柳萍*

(江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

**摘要:**【目的】探究不同干燥方式对天麻(*Gastrodia elata*, *G. elata*)理化品质与功能特性的影响,阐明天麻活性成分抑制乙酰胆碱酯酶(AChE)的分子作用机制。【方法】分别采用热风干燥(hot air drying,HAD)、真空冷冻干燥(vacuum freeze drying,FD)、真空干燥(vacuum drying,VD)、远红外干燥(far-infrared drying,FIRD)、真空冷冻联合热风干燥5种方式处理天麻,系统评价天麻品质变化规律;通过相关性分析和主成分分析筛选具有AChE抑制活性的成分,并结合分子动力学模拟阐明其作用机制。【结果】FD12-HAD3联合干燥工艺可有效弥补单一干燥方式的缺陷,显著促进巴利森苷类物质向天麻素、对羟基苯甲醇转化,两者总质量分数较真空冷冻干燥组提高了8.19%;该工艺处理后的天麻AChE抑制率达60.84%,显著优于其他干燥处理组。分子动力学模拟结果表明,对羟基苯甲醇、天麻素等小分子物质可锚定AChE催化中心,巴利森苷类大分子物质可空间封锁外周阴离子位点,从而形成多靶点协同竞争性抑制网络。【结论】FD12-HAD3联合干燥工艺可高效富集天麻活性成分、显著提升AChE抑制活性,为天麻的高品质加工提供了理论依据。

**关键词:**天麻;干燥方式;活性成分;抗氧化活性;乙酰胆碱酯酶

# Drying Method Optimization and Acetylcholinesterase Inhibition Mechanism of *Gastrodia elata*

*NAN Yimei FAN Liuping**

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** [**Objective**] This study aimed to investigate the effects of different drying methods on the physicochemical quality and functional properties of *Gastrodia elata* (*G.elata*) and to elucidate the molecular mechanisms underlying the inhibition of acetylcholinesterase (AChE) by the active components of *G. elata*. [**Method**] *G. elata* samples were processed by hot air drying (HAD), vacuum freeze drying (FD), vacuum drying (VD), far-infrared drying (FIRD), and vacuum freeze-hot air combined drying. The variations in the physicochemical quality of *G. elata* were systematically evaluated. The components responsible for AChE inhibition were screened *via* correlation and principal component analyses, and their inhibitory mechanisms were elucidated through molecular dynamics simulations. [**Result**] Overcoming the limitations of single method drying, the FD12-HAD3 combined drying process significantly promoted the conversion of parishins into gastrodin and *p*-hydroxybenzyl alcohol, increasing the mass fraction of the two compounds by 8.19% compared with the vacuum freeze drying group. The AChE inhibition rate of *G. elata* processed with the combined drying process reached 60.84%, which was significantly higher than those in other drying groups. The molecular dynamics simulations revealed that small

**基金项目:**新疆自治区重点研发计划项目(2025B04044-003)。

**通信作者:**范柳萍(1972—),女,博士,教授,博士研究生导师,主要从事食品功能评价与调控研究。E-mail:fanliuping@ jiangnan.edu.cn

**收稿日期:**2026-03-06 **修回日期:**2026-04-12

molecules (*p*-hydroxybenzyl alcohol and gastrodin) precisely anchored the catalytic active site of AChE, while macromolecules (parishins) sterically blocked the peripheral anionic site, thereby establishing a network of multi-target synergistic competitive inhibition. [**Conclusion**] The FD12-HAD3 combined drying process exhibits outstanding efficacy in both enriching active components and enhancing AChE-inhibitory functions, providing a robust scientific basis for the high-quality processing of *G. elata*.

**Keywords:** *Gastrodia elata*; drying method; active component; antioxidant activity; acetylcholinesterase

天麻为兰科天麻属多年生草本植物，是我国传统的药食同源中草药，富含天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷类等多种生物活性成分[1]。现代药理学研究证实，天麻具有改善认知障碍及神经保护功效，在功能食品开发领域具有良好的应用前景[2]。

阿尔茨海默病是一种不可逆的、多诱导的神经退行性疾病。已有研究表明，脑内过量活性氧引发的神经细胞凋亡及AChE异常升高导致的神经信号传递受阻，是诱发认知功能障碍的核心病理机制[3-4]。因此，开发兼具自由基清除能力与AChE抑制活性的天然多靶点活性物质，对预防和改善阿尔茨海默病具有重要作用[5]。天麻富含多种神经保护活性成分，是开发抗阿尔茨海默病功能产品的天然候选原料。

由于鲜天麻含水量高且内源性糖苷酶活跃，极易腐败变质，因此干燥是其产地加工与贮藏的重要环节。干燥过程中的热力学变化与水分迁移行为，不仅会改变天麻的外观品质，还会影响天麻活性成分的保留与转化，进而影响天麻产品的神经保护活性与应用价值[6]。传统单一干燥方式存在明显弊端：HAD易引发非酶褐变及热敏性酚类物质降解[7]；FD虽能最大限度地保留天麻原有色泽与小分子活性成分，但存在干燥时间长、能耗高等问题，难以实现规模化应用[8-9]。为弥补单一干燥技术的不足，研究人员多采用联合干燥工艺，即先通过FD保持天麻的结构与营养品质，再利用HAD快速去除残余水分，提升干燥效率[10]。联合干燥不仅能够克服单一干燥的缺陷，还可实现天麻活性成分的可控释放与定向转化。

作者以鲜天麻为研究对象，系统探究单一干燥及真空冷冻-热风联合干燥对天麻理化品质、抗氧化能力及AChE抑制活性的影响，并结合分子对接与动力学模拟技术，从微观层面阐明特征成分与AChE的动态结合机制，旨在为开发改善认知障碍的功能性食品提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

鲜天麻：产自云南昭通小草坝，购于云南聚名品农业发展有限公司；天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷A、巴利森苷B、巴利森苷C、巴利森苷E、原儿茶酸、儿茶素、咖啡酸、香草酸、阿魏酸：上海源叶生物科技有限公司；甲醇、乙腈、没食子酸、福林酚：均为分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器与设备

冷冻干燥机：FreeZone型，美国Labconco公司；热风循环干燥箱：FD23型，德国Binder公司；真空干燥箱：DP33C型，日本yamato公司；液相色谱分析仪：LC-20A型，日本岛津公司；旋转蒸发仪：RV 3V型，德国IKA公司；色差仪：UltraScan Pro1166型，美国HunterLab公司；紫外-可见分光光度计：L8型，上海仪电分析仪器有限公司；酶标仪：Multiskan 1510型，美国Thermo Fisher Scientific公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 干燥处理

将鲜天麻洗净后切成（3.0±0.2）mm厚度的薄片，于40 ℃的氢氧化钠溶液（pH 4）中浸泡4 h，沥干后将天麻片均匀平铺于不锈钢物料盘中，控制物料装载量为2.0 kg/m$^2$，随后进行干燥处理。

1）单一干燥：HAD为温度60 ℃、风速3 m/s、环境相对湿度6%、干燥时间5 h；VD为温度60 ℃、真空度-0.098 MPa、干燥时间5 h；FD是将-80 ℃冰箱中预冻12 h的天麻片转移到真空冷冻干燥机中，设置冷阱温度-50 ℃、真空度10 Pa、干燥时间24 h；FIRD为温度60 ℃、红外辐射波长5~15 μm、干燥时间5 h。

2）联合干燥：天麻经真空冷冻干燥 12、24、36 h 后，分别进行热风干燥处理 3、2、1 h，联合干燥方式分别记为 FD12-HAD3、FD24-HAD2、FD36-HAD1。

1.3.2 色泽的测定

用色差仪测定天麻粉末的色泽变化，其中 $L^*$ 代表亮度值，$a^*$ 代表红绿值，$b^*$ 代表黄蓝值。每组进行 5 次测定，色相角值通过式（1）计算[11]。

$$h^\circ = \arctan(b^*/a^*) \quad (1)$$

式中：

$h^\circ$——色相角值；

$a^*$——样品的红绿值；

$b^*$——样品的黄蓝值。

1.3.3 醇溶性浸出物的测定

称取 2.0 g 样品，加入 50 mL 体积分数 50% 的乙醇，浸泡 1 h 后回流提取 1 h。冷却后补足损失质量，过滤。取 10 mL 滤液蒸干，于 80 ℃干燥 5 h 后称质量，计算醇溶性浸出物质量分数。

1.3.4 特征性成分的测定

参照 Ma 等[12]的方法制备待测液。HPLC 分析条件为：采用 Waters Atlantis C18 反相色谱柱（150 mm×4.6 mm×3 μm），流量 0.8 mL/min，检测波长 220 nm，柱温 30 ℃，进样量 20 μL。流动相 A 为体积分数 0.1% 的磷酸溶液，流动相 B 为乙腈。采用梯度洗脱，0~10 min，流动相 B 体积分数为 10%；10~15 min，流动相 B 体积分数升至 12%；15~25 min，流动相 B 体积分数升至 18%；25~40 min，流动相 B 体积分数为 18%；40~42 min，流动相 B 体积分数升至 95%。

1.3.5 酚类物质和总黄酮的测定

将 1 g 天麻粉与体积分数 75% 的甲醇溶液混合，超声 20 min，分离上清液，重复上述步骤，合并 2 次滤液，定容至 25 mL，得到天麻提取液。酚类物质和总黄酮的测定参照 Chao 等[13]的方法并稍加修改。酚类物质采用福林酚法测定，于 750 nm 测定吸光度，通过没食子酸标准曲线计算天麻的酚类物质质量分数。总黄酮采用氯化铝比色法测定，于 510 nm 测定吸光度，通过芦丁标准曲线计算天麻的总黄酮质量分数。

1.3.6 单体酚的测定

单体酚的测定参照 Yu 等[14]的方法并稍加修改。流动相 A 为体积分数 0.1% 的乙酸-水溶液，流动相 B 为体积分数 0.1% 的乙酸-乙腈溶液。梯度洗脱程序为：0~5 min，流动相 B 体积分数为 30%；5~10 min，流动相 B 体积分数升至 40%；10~20 min，流动相 B 体积分数升至 45%；20~22 min，流动相 B 体积分数升至 100%；22~25 min，流动相 B 体积分数降至 7%。检测波长 280 nm，流量 0.6 mL/min，柱温 30 ℃。通过对比保留时间及峰面积进行定性与定量分析。

1.3.7 抗氧化活性测定

1）$ABTS^+$ 自由基清除能力测定：参照 Feng 等[15]的方法并稍加修改。将 ABTS 储备液避光 12 h 后稀释至吸光度为 0.70±0.02，取 0.5 mL 样液与 2 mL 工作液反应 10 min，于 734 nm 测定吸光度。通过 6-羟基-2，5，7，8-四甲基色烷-2-羧酸（Trolox）标准曲线计算 $ABTS^+$ 自由基清除能力。

2）铁离子还原能力测定：参照 Vidal-Gutiérrez 等[16]的方法并稍加修改。将样液与铁氰化钾、三氯乙酸进行反应，离心后取上清液，加入三氯化铁，于 700 nm 测定吸光度。通过 Trolox 标准曲线计算铁离子还原能力。

3）羟自由基清除能力测定：参照 Liu 等[17]的方法并稍加修改。$FeSO_4$、$H_2O_2$ 与水杨酸体系反应后，于 510 nm 测定吸光度。通过 Trolox 标准曲线计算羟自由基清除能力。

4）DPPH 自由基清除能力测定：参照 Feng 等[15]的方法并稍加修改。取 0.5 mL 样液与 2.5 mL DPPH 工作液避光反应 30 min，于 517 nm 测定吸光度。通过 Trolox 标准曲线计算 DPPH 自由基清除能力。

1.3.8 AChE 抑制活性的测定

参照 Li 等[7]的方法并稍加修改。取 50 μL 样液与 25 μL AChE（1 U/mL）于 37 ℃孵育 15 min，加入显色剂 5，5’-二硫代双-（2-硝基苯甲酸）及底物乙酰硫代胆碱碘化物，反应 20 min。以石杉碱甲（纯度>98%）为阳性对照，于 412 nm 测定吸光度。AChE 抑制率按式（2）计算。

$$R = \left(1 - \frac{A_1 - A_0}{A_2 - A_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中：

$R$——AChE 抑制率，%；

$A_1$——样品组的吸光度；

$A_2$——对照组的吸光度；

$A_0$——空白组的吸光度。

1.3.9　基于Chai-1的蛋白质-配体复合物建模与分子动力学模拟

利用Chai-1模型进行蛋白质-配体复合物建模[18]，以AChE序列（NCBI Accession NP_001262530.1）及活性小分子SMILES建模，随后利用Schrödinger 2024.2软件的Desmond模块进行100 ns全原子分子动力学模拟。采用OPLS4力场及TIP3P水模型，系统设置生理盐环境（0.15 mol/L的NaCl溶液），在模拟前对系统进行最陡下降法能量最小化，随后在NPT系统中进行平衡与生产模拟。通过Nosé-Hoover恒温器控制温度为310 K，通过Martyna-Tobias-Klein恒压器控制压力为101 kPa。采用PME方法计算长程静电相互作用，截断半径为9.0 Å，积分步长为2.0 fs，总模拟时长为100 ns，每100 ps记录一次轨迹，评估均方根偏差、均方根涨落及关键相互作用。利用MM-GBSA计算蛋白质复合物中小分子相对蛋白质的结合能，并使用Pymol 2.5进行可视化展示。分子动力学模拟重复3次，展示数据为代表性结果。

1.3.10　数据处理

使用Origin 2021作图，采用SPSS 27进行统计分析，数值以平均值±标准偏差表示。采用单因素方差分析（ANOVA）进行显著性分析，$P<0.05$表示差异显著，所有试验均重复3次。

## 2　结果与讨论

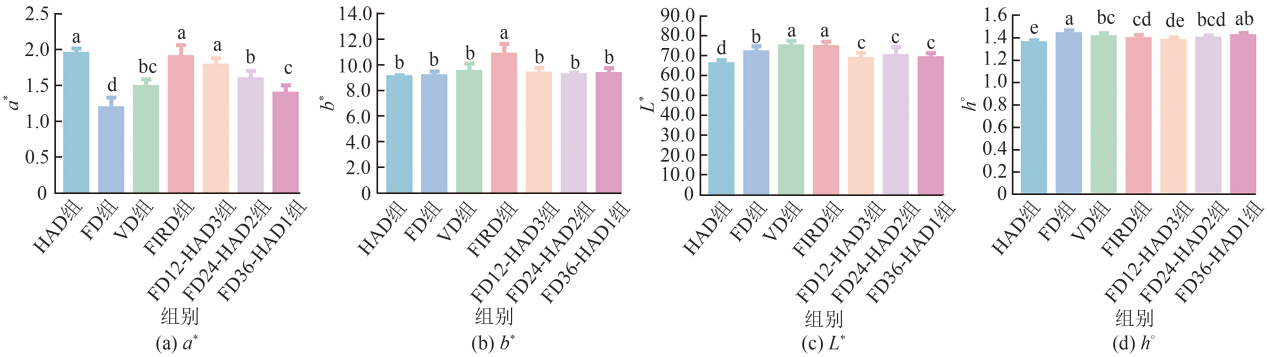
### 2.1　干燥方式对天麻色泽的影响

色泽参数可直观反映不同干燥方式处理后天麻的外观褐变程度与感官品质，同时能够表征物料内部色素降解、美拉德反应等复杂化学反应的发生程度。不同干燥方式处理后，天麻的$L^*$、$a^*$、$b^*$及$h^\circ$均存在显著差异（$P<0.05$），说明干燥工艺对天麻外观色泽具有显著影响，见图1。HAD组天麻的$L^*$最低，为65.97±0.51，$a^*$较高，样品呈暗红色，表现出典型的非酶褐变特征。这是由于长时间高温处理会促使天麻中还原糖与氨基酸发生美拉德反应，生成了类黑精等深色聚合物[19-20]。相比之下，VD组与FIRD组天麻的$L^*$较高，分别为74.96±1.18和74.58±0.20，表明低氧干燥环境与高效辐射传热可有效抑制天麻的氧化褐变进程[21]。但FIRD处理后，天麻的$a^*$和$b^*$显著上升，推测红外辐射的高能量会诱导部分热敏性色素发生分子重排或降解[22]。FD组天麻的$h^\circ$最高、$a^*$最低，分别为1.44±0.01和1.19±0.14，整体色泽最接近天然黄色，表明FD可最大限度保留天麻原有色泽，护色效果优异。引入FD-HAD联合工艺后，各联合干燥组样品的$L^*$均随冻干时间的延长显著上升，$a^*$持续降低。从微观动力学角度分析，适度的冻干预处理可去除天麻中大部分自由水，有效降低后续美拉德反应底物的分子流动性与反应速率[23]。综上，FD12-HAD3在样品亮度保持与色泽稳定性之间可实现良好平衡，有效改善了传统热风干燥导致的天麻色泽劣变问题。

### 2.2　干燥方式对天麻活性成分的影响

#### 2.2.1　醇溶性浸出物、酚类和总黄酮结果

醇溶性浸出物及多酚、黄酮类物质质量分数不仅能够反映不同干燥工艺下天麻的整体有效物质提取率，还可表征天麻细胞壁骨架的完整性及活性成分在温度应激下的理化稳定性。由图2（a）可以看出，各干燥处理组天麻的醇溶性浸出物质量分数均符合《中国药典》中“浸出物质量分数不低于15%”的标准。其中，FD组醇溶性浸出物质




不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

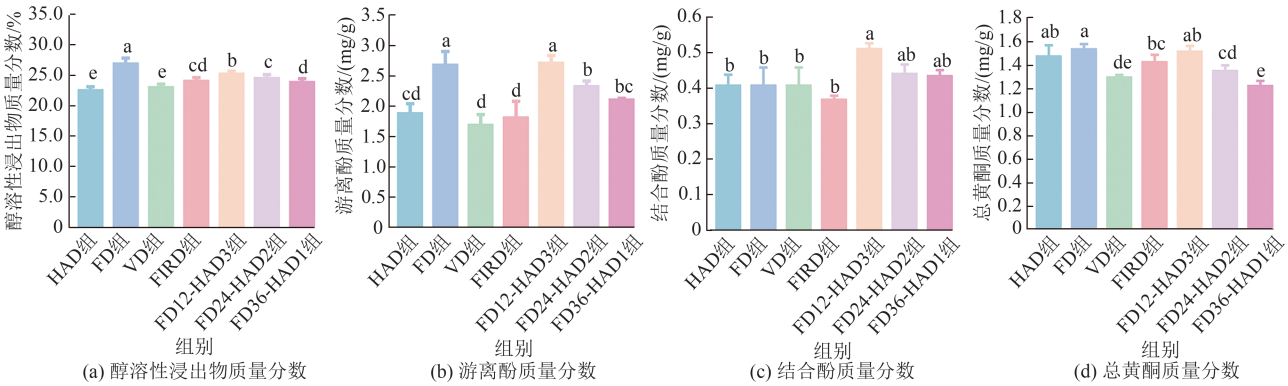
图1　干燥方式对天麻色泽的影响

Fig. 1　Effects of drying methods on the color of *G. elata*

量分数最高，为（27.09±0.83）%，显著高于 HAD 组的（22.69±0.50）%。相较于单一 HAD 处理，FD-HAD 联合干燥可显著提高天麻醇溶性浸出物得率，其中 FD12-HAD3 组较 HAD 组提高了 11.7%。这主要是由于低温低氧的冻干环境结合冻干预处理可有效抑制小分子醇溶性成分的热降解与挥发，弥补了持续高温热处理造成的损失。

不同干燥方式对游离酚和结合酚质量分数的影响存在明显差异。由图 2（b）~（c）可以看出，FD 组游离酚质量分数最高，为（2.69±0.21）mg/g，较其他单一干燥组提高了 42.3%~58.2%，说明游离酚易受热氧化，而 FD 能有效抑制其氧化聚合与热降解[24-25]。在联合干燥处理组中，FD12-HAD3 组游离酚质量分数最高，为（2.72±0.11）mg/g，较 HAD 组提高了 43.8%。这是由于在冻干过程中植物基质内部形成的冰晶会破坏天麻细胞壁结构，促进细胞内活性成分的释放，从而提高溶剂提取效率；同时后续短时热风干燥的温度低、时间短，不会引起游离酚发生明显热降解[26-27]。各组天麻的结合酚质量分数为 0.37~0.51 mg/g，整体波动较小，仅 FD12-HAD3 组略有升高，表明结合酚多以共价键形式稳定存在于细胞壁中，对干燥方式的敏感性较低[28]。

由图 2（d）可以看出，FD、HAD、FIRD 组样品中总黄酮质量分数差异较小，为 1.43~1.54 mg/g，但均显著高于 VD 组。结果表明，适度热处理或低温脱水有利于黄酮类物质的保留，而真空干燥在促进黄酮释放方面效果稍差，这可能是由于长时间的低湿高热环境导致黄酮苷键水解或结构破坏，造成总黄酮质量分数较低[29-30]。在联合干燥处理组中，FD12-HAD3 组总黄酮质量分数为（1.52±0.05）mg/g，较 FD36-HAD1 组提高了 23.6%，表明适度热风干燥有助于黄酮糖苷向苷元转化，从而提高了黄酮的提取效率；而热处理不足或细胞壁结构过度破坏均不利于黄酮类物质的保留[30]。综上，FD12-HAD3 组在醇溶性浸出物得率提升、游离酚富集与总黄酮保留之间实现了最佳平衡。




不同小写字母表示差异显著（$P$<0.05）。

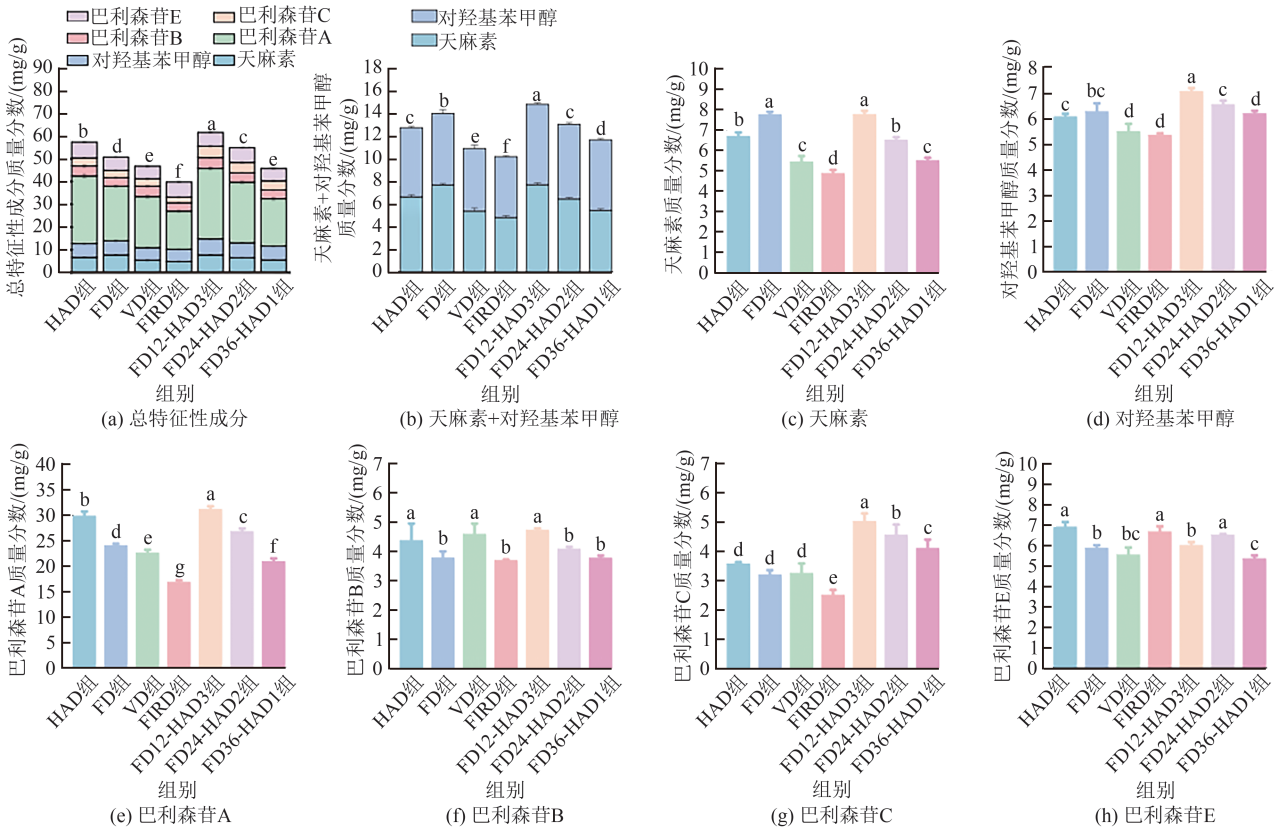
图 2　干燥方式对天麻醇溶性浸出物、酚类物质和总黄酮质量分数的影响

Fig. 2　Effects of drying methods on the mass fractions of alcohol-soluble extract, phenols, and total flavonoids of *G. elata*

### 2.2.2　特征性成分测定结果

天麻素、对羟基苯甲醇及巴利森苷类等特征性成分是天麻发挥神经保护功能的核心物质基础，该类物质极易在热力学变化与水分迁移过程中发生降解与转化[6]。不同干燥方式对天麻特征性成分质量分数具有显著影响（$P$<0.05），见图 3。可以看出，单一干燥方式中 HAD 组天麻的特征性成分总质量分数最高，为（58.35±0.25）mg/g；其中巴利森苷 A 质量分数最高，为（28.91±0.42）mg/g，巴利森苷 B 和巴利森苷 C 质量分数也维持在较高水平。这表明持续热风处理可有效破坏细胞壁结构，促进结合型大分子巴利森苷类的释放并维持其稳定性；同时，加热过程促使巴利森苷类物质的酯键断裂，释放的产物在一定程度上补偿了天麻素与对羟基苯甲醇的热损失[8,31-32]。FD 组在提高天麻素与对羟基苯甲醇质量分数方面表现出明显优势，两者总质量分数达（13.67±0.61）mg/g，且天麻素单体质量分数最高，为（7.40±0.28）mg/g。结果表明，低温低氧条件能够有效抑制小分子酚类物质的热降解与氧化损

失，但大分子巴利森苷类物质结构稳定性较高，向天麻素的转化程度较低，因此更有利于天麻素和对羟基苯甲醇的定向保留。相比之下，VD组和FIRD组天麻的巴利森苷类质量分数整体偏低，这可能是由于红外辐射导致物料局部过热，加速巴利森苷类大分子结构裂解，进而导致其质量分数降低[33]。




不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图3　干燥方式对天麻特征性成分的影响

Fig. 3　Effects of drying methods on the marker components of *G. elata*

为了实现巴利森苷类大分子释放与小分子活性成分保留的平衡，作者采用FD-HAD联合干燥工艺，结果表明该联合工艺具有明显的优势。FD12-HAD3组的天麻素和对羟基苯甲醇质量分数分别提升至（7.71±0.08）、（7.08±0.04）mg/g，不仅优于HAD组，且高于FD组；同时，巴利森苷A、巴利森苷B、巴利森苷C质量分数也维持在较高水平。从作用机制分析，适度冻干预处理可通过低温脱水与冰晶生成破坏天麻细胞结构，增加组织孔隙率，该微孔结构的改变为后续热风干燥过程中大分子成分的转化创造了有利条件；而适度的热风处理为酯键和糖苷键的断裂提供了必要的能量，进一步促进了天麻素和对羟基苯甲醇的生成[31-32]。而当冻干时间过长、热风干燥时间不足时，会导致天麻素和对羟基苯甲醇的生成效率下降。综上，FD12-HAD3联合干燥工艺可实现天麻特征成分的差异化保留与定向转化，综合效果最优。

### 2.2.3　单体酚结果

单体酚类化合物是天麻重要的功能性次生代谢产物，不同干燥方式对天麻中主要单体酚类化合物的组成及质量分数具有显著影响，见表1。整体来看，低温低氧环境（FD组、VD组）能有效抑制多酚的氧化与热降解，游离酚保留量普遍高于热干燥组（HAD组、FIRD组）。其中，FD组儿茶素和阿魏酸质量分数显著高于HAD组，分别为（578.34±1.18）、（182.03±0.12）μg/g。这主要是因为含邻二酚结构的儿茶素在高温条件下极易发生氧化聚合反应并生成醌类物质，羟基肉桂酸类化合物（如阿魏酸）也易发生脱羧与氧化降解，而低温环境可有效阻断上述热降解途径[34]。相反，部分黄酮类化合物在高温组中反而呈现升高趋势。

在单一处理组中，VD组和FIRD组的槲皮素质量分数分别为（305.67±0.74）、（301.53±1.29）μg/g，显著高于FD处理组的（226.89±1.18）μg/g；山柰酚在HAD组中质量分数最高，为（136.69±0.28）μg/g。这一结果可能是由于高温可破坏黄酮苷与细胞壁多糖之间的氢键或酯键结构，促进了苷元的释放，在一定程度上抵消了热降解带来的损失[35-36]。

为兼顾热敏性酚酸的高效保留与黄酮类苷元的释放，作者采用FD-HAD联合干燥工艺。结果显示，FD12-HAD3处理可明显提升酚酸类化合物质量分数，其中原儿茶酸、咖啡酸和阿魏酸较HAD处理组分别提高了6.3%、7.4%、24.4%。这表明适度冻干预处理可疏松天麻细胞壁结构，促进原本与多糖或木质素网络结合的酚酸类物质在后续热风干燥与提取过程中更易释放[37]。但当冻干时间延长至36 h时（FD36-HAD1）时，咖啡酸、山柰酚等活性成分质量分数显著降低。这说明过度冻干脱水不仅会导致基质孔隙过度暴露，加剧热敏性酚酸在后续热相阶段的氧化降解，还可能引发细胞骨架的二次致密化，从空间位阻上限制胞内黄酮大分子的向外扩散[38]。

在结合酚方面，各处理组差异相对较小。其中FD组在结合态阿魏酸和香草酸质量分数上仍表现出一定优势，FD12-HAD3组在结合态槲皮素和山柰酚质量分数上表现出一定升高趋势，证实了低温干燥可维持细胞结构完整性，减少酚类物质由结合态向游离态或降解产物的非选择性转化[39]。综上，FD12-HAD3联合干燥工艺将低温、低氧脱水与适度热处理相结合，是提升天麻单体酚品质与功能活性的有效干燥策略。

**表1 干燥方式对天麻单体酚的影响**

Table 1 Effects of drying methods on the monomer phenols of *G. elata*

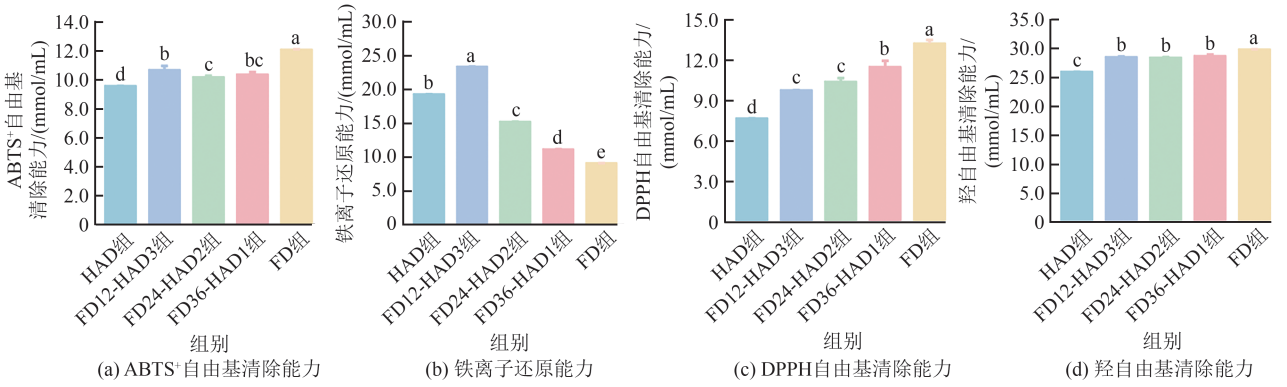
| 组别 | 游离酚质量分数/（μg/g） | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 原儿茶酸 | 儿茶素 | 咖啡酸 | 香草酸 | 阿魏酸 | 槲皮素 | 山柰酚 |
| HAD组 | 317.15±0.99$^{f}$ | 481.81±0.28$^{cd}$ | 653.98±0.49$^{e}$ | 249.17±0.49$^{ab}$ | 133.44±0.34$^{c}$ | 301.11±0.26$^{b}$ | 136.69±0.28$^{c}$ |
| FD组 | 523.24±3.30$^{a}$ | 578.34±1.18$^{a}$ | 769.81±0.97$^{b}$ | 250.84±0.10$^{ab}$ | 182.03±0.12$^{a}$ | 226.89±1.18$^{c}$ | 131.21±0.47$^{c}$ |
| VD组 | 420.35±0.67$^{c}$ | 524.67±0.04$^{bc}$ | 904.00±2.79$^{a}$ | 253.15±1.38$^{ab}$ | 140.66±1.38$^{bc}$ | 305.67±0.74$^{b}$ | 134.83±0.74$^{c}$ |
| FIRD组 | 451.34±1.53$^{b}$ | 566.22±2.00$^{ab}$ | 675.42±0.83$^{d}$ | 233.11±0.83$^{b}$ | 158.93±0.12$^{ab}$ | 301.53±1.29$^{b}$ | 132.50±0.59$^{c}$ |
| FD12-HAD3组 | 337.15±1.07$^{d}$ | 460.99±33.22$^{d}$ | 702.33±9.61$^{c}$ | 259.83±15.67$^{ab}$ | 165.96±8.46$^{ab}$ | 452.35±5.24$^{a}$ | 241.62±13.09$^{a}$ |
| FD24-HAD2组 | 331.32±2.05$^{e}$ | 467.27±20.18$^{d}$ | 629.87±3.05$^{f}$ | 252.44±14.52$^{ab}$ | 162.34±10.39$^{ab}$ | 444.34±16.76$^{a}$ | 246.42±12.64$^{a}$ |
| FD36-HAD1组 | 331.42±1.65$^{e}$ | 462.93±35.77$^{d}$ | 627.83±4.24$^{f}$ | 272.46±19.89$^{a}$ | 169.13±23.64$^{a}$ | 448.63±19.53$^{a}$ | 211.54±1.94$^{b}$ |
| 组别 | 结合酚质量分数/（μg/g） | | | | | | |
| | 原儿茶酸 | 儿茶素 | 咖啡酸 | 香草酸 | 阿魏酸 | 槲皮素 | 山柰酚 |
| HAD组 | 31.16±0.42$^{b}$ | 37.29±1.87$^{ab}$ | 27.57±1.33$^{b}$ | 88.02±2.12$^{a}$ | 74.29±1.53$^{bc}$ | 59.69±1.74$^{bc}$ | 54.89±2.27$^{b}$ |
| FD组 | 37.01±1.26$^{a}$ | 38.45±1.34$^{a}$ | 27.92±1.70$^{b}$ | 89.43±2.09$^{a}$ | 85.22±4.64$^{a}$ | 57.00±1.34$^{c}$ | 52.57±2.40$^{b}$ |
| VD组 | 28.87±1.42$^{b}$ | 33.55±1.61$^{bc}$ | 29.98±2.89$^{ab}$ | 83.56±1.97$^{bc}$ | 69.36±0.45$^{cd}$ | 56.58±0.54$^{c}$ | 53.63±2.43$^{b}$ |
| FIRD组 | 31.28±1.45$^{b}$ | 36.33±1.85$^{ab}$ | 26.46±2.30$^{b}$ | 86.20±0.45$^{ab}$ | 83.43±3.42$^{a}$ | 61.50±1.33$^{b}$ | 52.77±0.20$^{b}$ |
| FD12-HAD3组 | 37.50±0.57$^{a}$ | 30.10±1.99$^{c}$ | 30.55±2.02$^{ab}$ | 79.43±0.74$^{de}$ | 76.97±1.45$^{b}$ | 65.71±0.49$^{a}$ | 65.01±1.22$^{a}$ |
| FD24-HAD2组 | 31.90±1.37$^{b}$ | 23.97±1.37$^{d}$ | 33.11±1.54$^{a}$ | 82.19±0.02$^{cd}$ | 75.36±1.87$^{bc}$ | 64.90±1.82$^{a}$ | 62.72±2.31$^{a}$ |
| FD36-HAD1组 | 29.15±1.56$^{b}$ | 36.00±2.31$^{ab}$ | 26.10±1.79$^{b}$ | 77.46±1.32$^{e}$ | 66.41±0.80$^{d}$ | 61.42±1.44$^{b}$ | 56.17±0.36$^{b}$ |

注：同列不同小写字母代表差异显著，$P<0.05$。

### 2.3 干燥方式对天麻抗氧化活性的影响

VD和FIRD对天麻活性物质的保留效果较差，因此作者重点对比分析HAD、FD及FD-HAD联合干燥工艺对天麻品质的影响。体外抗氧化能力可反映天麻提取物清除自由基和缓解机体氧化应激的生理潜能，同时能够表征体系中多酚、黄酮等活性物质提供氢质子或转移电子的能力[40-41]。干燥加工是伴随热力学胁迫与氧气暴露的复杂理化过程，该过程引发的相变与微观结构破坏会直接导致热敏性抗氧化成分发生降解，或促使结合态抗氧化分子释放。不同干燥方式对天麻抗氧化活性的影响存在显著差异，表现出明显的机制依

赖性，见图4。在ABTS$^{+}$、DPPH及羟自由基清除能力评价体系中，活性强弱主要取决于多酚分子中酚羟基的供氢能力[42]。FD组样品的ABTS$^{+}$自由基清除能力、羟自由基清除能力和DPPH自由基清除能力最高，分别为（12.07±0.03）、（29.81±0.02）、（13.21±0.27）mmol/mL。这是由于低温环境可有效保留黄酮及多羟基酚类物质的结构完整性，避免热氧化作用造成的活性位点损失，使样品保持较高的自由基清除能力[43]。铁离子还原能力主要取决于体系中游离态电子供体的浓度[44]。结果表明，FD12-HAD3组的铁离子还原能力显著升高，为（23.35±0.01）mmol/mL，较HAD组和FD组分别提高了21.1%、157.0%。这是由于适度的升温促进了结合态酚酸（如阿魏酸、咖啡酸）的酯键断裂，从而显著增强了其还原能力。综上，FD12-HAD3联合干燥工艺可有效平衡低温结构保护与适度热激释放之间的双重作用，是提升天麻抗氧化活性的最优干燥方式。




不同小写字母表示差异显著（$P$<0.05）。

图4　干燥方式对天麻抗氧化活性的影响

Fig. 4　Effects of drying methods on the antioxidant activities of *G. elata*

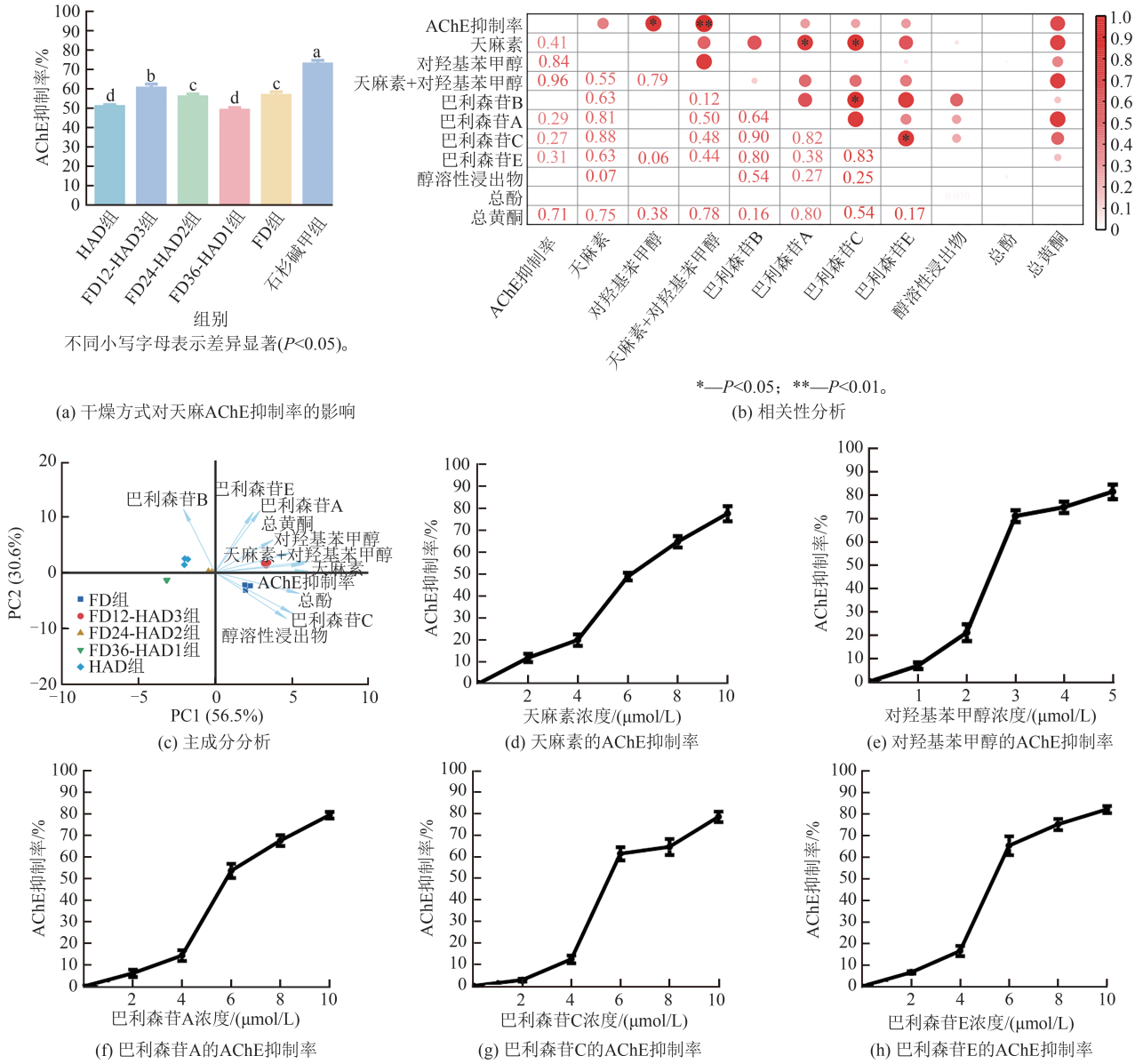
### 2.4　天麻对AChE抑制活性的影响

AChE抑制率可反映天麻提取物体外干预神经递质水解、改善认知功能的药理活性潜力。由图5（a）可知，不同干燥方式处理后天麻提取物的AChE抑制活性存在显著差异（$P$<0.05）。联合干燥处理明显优于单一热风干燥，其中FD12-HAD3组的AChE抑制率最强，为60.84%，较HAD组提高了18.7%。各干燥组样品的AChE抑制率为49.34%~60.84%，虽然低于阳性对照石杉碱甲（73.29%），但仍表现出良好的天然抑酶潜力。为了明确AChE抑制活性的关键物质，作者开展了相关性分析。结果表明，AChE抑制率与天麻素及对羟基苯甲醇的总质量分数呈极显著正相关（$R^2$=0.96，$P$<0.01），见图5（b）。其中对羟基苯甲醇单体与AChE抑制率相关性最强（$R^2$=0.84，$P$<0.05），推测其为靶向抑制AChE的核心效应成分。此外，总黄酮（$R^2$=0.71）、天麻素（$R^2$=0.41）、巴利森苷类（巴利森苷A、巴利森苷C、巴利森苷E，$R^2$为0.27~0.31）均与AChE抑制率呈正相关，但其抑酶潜力有待进一步验证。主成分分析结果显示，AChE抑制率载荷射线与天麻素、对羟基苯甲醇高度聚集，且FD12-HAD3组样本点显著富集于核心活性区域，从多维统计学尺度印证了该联合干燥工艺的综合优势，见图5（c）。

基于提取物活性与多维统计学筛选结果，为进一步验证特征成分的实际抑酶效能，作者进一步测定了5种核心单体在不同浓度下的AChE抑制率，见图5（d）~（h）。结果表明，5种化合物的抑酶效应均表现出显著的浓度依赖性，抑酶活性依次为：对羟基苯甲醇>天麻素>巴利森苷E>巴利森苷A>巴利森苷C。该结果进一步证实了天麻作为天然AChE抑制剂候选原料的潜在应用价值。

### 2.5　计算机辅助解析天麻特征性成分对AChE的抑制机理

为进一步阐明天麻活性成分抑制AChE的分子机制，使用计算机辅助分子模拟分析不同活性成分与AChE的相互作用模式。分子对接结果见




不同小写字母表示差异显著($P$<0.05)。

(a) 干燥方式对天麻AChE抑制率的影响

*—$P$<0.05；**—$P$<0.01。

(b) 相关性分析

(c) 主成分分析

(d) 天麻素的AChE抑制率

(e) 对羟基苯甲醇的AChE抑制率

(f) 巴利森苷A的AChE抑制率

(g) 巴利森苷C的AChE抑制率

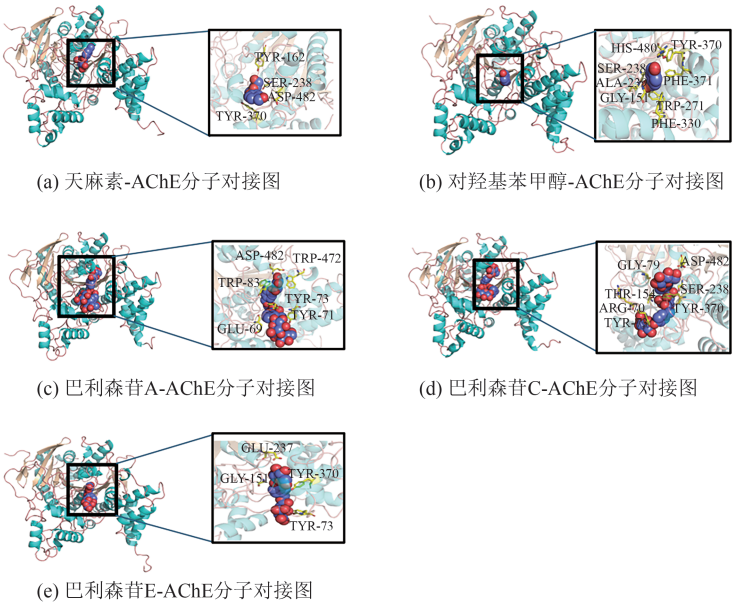
(h) 巴利森苷E的AChE抑制率

图 5　天麻对 AChE 抑制活性的影响

Fig. 5　Inhibitory effects of *G. elata* on AChE activity

图 6，天麻中天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 A、巴利森苷 C 和巴利森苷 E 均能稳定结合于 AChE 活性口袋，且各组分结合位点与作用模式存在显著差异。带有葡萄糖环结构的天麻素凭借适中的空间体积卡定于活性峡谷中部，主要通过其极性羟基与 SER-238 和 ASP-482 等关键残基形成氢键网络，有效阻滞底物向催化中心渗透。小分子对羟基苯甲醇较低的空间位阻精准锚定于催化中心底部，通过与 PHE-371、HIS-480 及 GLY-151 等核心残基形成稳健的氢键网络直接占据底物口袋，从分子识别角度验证了对羟基苯甲醇质量分数与 AChE 抑制率呈正相关。相比之下，大分子巴利森苷类呈现典型的“空间屏蔽”策略：巴利森苷 A 与巴利森苷 E 通过与外周阴离子位点及峡谷入口处的 TRP-83、TRP-472、TYR-370 等残基产生强烈的疏水堆积与 π-π 相互作用，构建了严密的物理屏障；巴利森苷 C 主要依赖 ARG-70、THR-154 及 GLY-79 构成的复杂极性网络锚定于活性位点，共同阻断底物扩散。

基于复合物的分子对接分析，作者进一步通过分子动力学模拟展示复合物在模拟生理环境中的动态稳定过程，见图 7。配体均方根偏差




(a) 天麻素-AChE分子对接图　(b) 对羟基苯甲醇-AChE分子对接图

(c) 巴利森苷A-AChE分子对接图　(d) 巴利森苷C-AChE分子对接图

(e) 巴利森苷E-AChE分子对接图

图 6　天麻特征性成分与 AChE 结合的分子对接图

Fig. 6　Molecular docking diagrams of the binding between marker components in *G. elata* and AChE

（ligand root mean square deviation，lig-RMSD）与蛋白质骨架均方根偏差（protein root mean square deviation，pro-RMSD）见图 7（a）~（b）。结果表明，所有复合物体系在 100 ns 模拟后期均达到稳定的结合状态。其中小分子对羟基苯甲醇展现出极佳的结合稳定性，其 lig-RMSD 维持在 0.6 Å 的极低水平，pro-RMSD 稳定在 2.1 Å。这说明对羟基苯甲醇凭借较小的空间位阻，能深入 AChE 活性中心底部并被精准锁定。天麻素的 lig-RMSD 波动略高于对羟基苯甲醇，但整体稳定，这与其结构中的葡萄糖环在 AChE 峡谷中部通过极性网络微调局部构象、适配氢键结合网络的动态特征相符。大分子巴利森苷类表现出显著的诱导契合效应，模拟初期（0~20 ns）构象波动较大（lig-RMSD 为 2.4~3.6 Å），反映了多分支长侧链结构在活性峡谷及外周位点内的快速构象重排与适配过程，20 ns 后各体系构象逐渐趋于稳定。

均方根涨落（root mean square fluctuation，RMSF）结果见图 7（c）。结果显示，5 种特征配体与 AChE 结合后，AChE 底物口袋及峡谷区域的核心氨基酸残基涨落值均保持在较低水平，进一步印证了结合位点在识别配体后的高度刚性与稳定性。从体系的紧密度来看，溶剂可及表面积（solvent accessible surface area，SASA）与回转半径（radius of gyration，Rg）的变化进一步验证了配体的空间占据模式，见图 7（d）~（f）。对羟基苯甲醇与天麻素的 SASA 较低且波动较小，表明小分子物质被受体疏水核心紧密包裹，有效隔绝了水分子的干扰；而巴利森苷类体系的 SASA 和 Rg 相对较高，这与其大分子物质体积横跨并暴露于 AChE 催化口袋入口形成“空间屏蔽”的物理特性完全一致。综上，多维度动力学轨迹进一步验证了天麻的竞争性多靶点协同抑制策略，即小分子深层占据催化中心与中部通道、大分子外部封锁活性通道，确证了天麻特征成分抑酶复合物在动态环境下的微观稳定性。

分子对接构象与相互作用网络反映了天麻特征成分与 AChE 的结合亲和力，基于分子动力学轨迹的 MM-GBSA 结合自由能量化了各成分与受体的微观结合强度。结果显示，天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 A、巴利森苷 C、巴利森苷 E 的结合自由能分别为（−154.72±4.69）、（−126.15±9.79）、（−339.57±17.24）、（−269.28±10.08）、（−165.52±6.36）kJ/mol。所有复合物体系的结合自由能均为负值，表明这 5 种成分均能自发且稳定地与 AChE 活性口袋结合，且各组分存在显著的位点选择性与能量驱动差异。

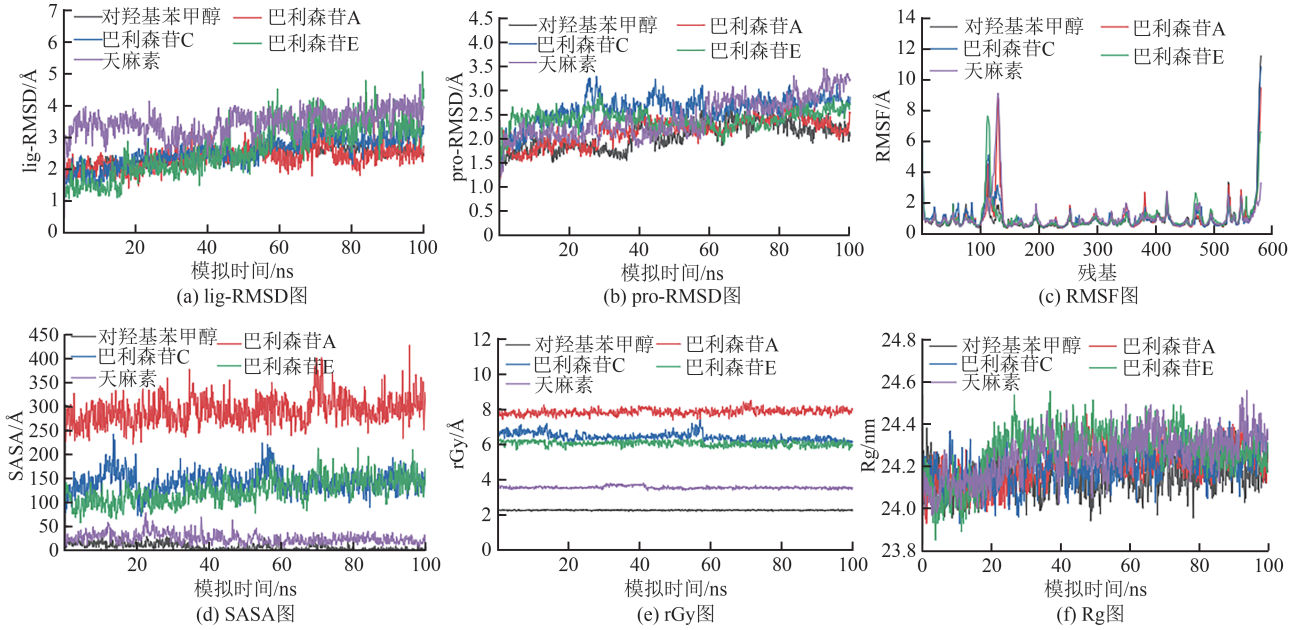



图 7　天麻特征性成分与 AChE 结合的分子动力学模拟图

Fig. 7　Molecular dynamics simulations of the binding between marker components in *G. elata* and AChE

## 3　结论

作者探究了不同干燥方式对天麻理化品质、活性成分转化的影响及 AChE 的抑制机制。结果表明，FD12-HAD3 联合干燥工艺是调控天麻品质与功能活性的重要手段。冷冻预处理结合短时热风干燥可有效驱动巴利森苷类向天麻素、对羟基苯甲醇小分子活性成分定向转化，两者总质量分数较 FD 组提高了 8.19%，同时巴利森苷 A 也维持在较高水平，为（31.04±0.06）mg/g。另外，FD12-HAD3 组在保持高抗氧化能力的同时，表现出的高 AChE 抑制率，明确了干燥工艺对神经保护功能的正向调控作用。分子对接与动力学模拟结果阐明了天麻特征成分多靶点协同抑酶的分子机制：对羟基苯甲醇和天麻素等小分子物质可精准锚定 AChE 催化中心，而巴利森苷类大分子物质可通过空间位阻效应封锁外周活性位点，形成多靶点协同竞争性抑制体系。FD12-HAD3 联合干燥工艺不仅有效解决了传统冷冻干燥耗时长、能耗高的问题，还提高了产品的神经保护附加值。该工艺在天麻高品质饮片及抗神经退行性功能食品的工业化开发中具有良好的应用前景，未来可结合动物模型系统评估其药代动力学与营养干预效果。

## 参考文献

[1] Gong M Q, Lai F F, Chen J Z, et al. Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, applications, and quality control of *Gastrodia elata* Blume: a comprehensive review [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 319: 117128.

[2] Li C M, Li J Q, Wang Y Z. A review of *Gastrodia elata* Bl.: extraction, analysis and application of functional food [J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2024, 56(1): 1-30.

[3] Sharma P, Srivastava P, Seth A, et al. Comprehensive review of mechanisms of pathogenesis involved in Alzheimer's disease and potential therapeutic strategies [J]. Progress in Neurobiology, 2019, 174: 53-89.

[4] Djeridane A, Hamdi A, Bensania W, et al. The *in vitro* evaluation of antioxidative activity, *α*-glucosidase and *α*-amylase enzyme inhibitory of natural phenolic extracts [J]. Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews, 2015, 9(4): 324-331.

[5] Khan T, Waseem R, Shahid M, et al. Recent advancement in therapeutic strategies for Alzheimer's disease: insights from clinical trials[J]. Ageing Research Reviews, 2023, 92: 102113.

[6] Hu M H, Yan H, Fu Y Y, et al. Optimal extraction study of gastrodin-type components from *Gastrodia elata* tubers by response surface design with integrated phytochemical and bioactivity evaluation[J]. Molecules, 2019, 24(3): 547.

[7] Li S, He X H, Zhang X C, et al. Integration of volatile and non-volatile metabolite profile, and *in vitro* digestion

reveals the differences between different preparation methods on physico-chemical and biological properties of *Gastrodia elata*[J]. Food Chemistry,2025,463:141177.

[8] Li M X, Wang B, Li Y, et al. Exploration of the impact of different drying methods on the quality of *Gastrodia elata*: a study based on drying kinetics and multidimensional quality evaluation [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141628.

[9] Nowak D, Jakubczyk E. The freeze-drying of foods-the characteristic of the process course and the effect of its parameters on the physical properties of food materials[J]. Foods,2020,9(10):1488.

[10] 王沛,吕文平,王洪新. 真空冷冻与热风联合干燥对新疆楹梓果肉理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业,2025,51(9):296-303.
Wang P, Lyu W P, Wang H X. Effect of vacuum freezing and hot air combined drying on physicochemical properties of Xinjiang quince pulp [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51 (9): 296-303. (in Chinese)

[11] Zhang Z W, Li J Y, Fan L P. Evaluation of the composition of Chinese bayberry wine and its effects on the color changes during storage[J]. Food Chemistry, 2019,276:451-457.

[12] Ma J, Deng Y, Wang Y Q, et al. A comparative study on ingredient and efficiency difference between fresh and steamed *Gastrodia elata* Blume: an herbal material to a novel functional food[J]. Journal of Functional Foods, 2021,82:104512.

[13] Chao E P, Tian J J, Fan L P, et al. Drying methods influence the physicochemical and functional properties of seed-used pumpkin [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130937.

[14] Yu Q, Duan J J, Yu N, et al. Enhancing the antityrosinase activity of saponins and polyphenols from *Asparagus* by hot air coupled with microwave treatments[J]. LWT-Food Science and Technology,2020,124:109174.

[15] Feng Y B, Xu B G, ElGasim A Yagoub A, et al. Role of drying techniques on physical, rehydration, flavor, bioactive compounds and antioxidant characteristics of garlic[J]. Food Chemistry,2021,343:128404.

[16] Vidal-Gutiérrez M, Robles-Zepeda R E, Vilegas W, et al. Phenolic composition and antioxidant activity of *Bursera microphylla* A. Gray[J]. Industrial Crops and Products, 2020,152:112412.

[17] Liu T H, Wang Y, Yu X Q, et al. Effects of freeze-drying and spray-drying on the physical and chemical properties of *Perinereis aibuhitensis* hydrolysates: sensory characteristics and antioxidant activities [J]. Food Chemistry,2022,382:132317.

[18] Discovery C, Boitreaud J, Dent J, et al. Chai-1: decoding the molecular interactions of life[J]. bioRxiv, 2024, 10: 615955.

[19] Zhang R H, Lv J H, Li P P, et al. Analysis of changes in nutritional compounds of dried yellow chili after different processing treatments[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 21639.

[20] 于子聪,范柳萍. 蒸制-干燥循环加工对黄精品质变化的影响及其机理研究[J]. 食品与生物技术学报,2025,44(6):30-41.
Yu Z C, Fan L P. Mechanisms of the quality changes of polygonati rhizoma processed by steaming-drying cycles [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2025, 44(6):30-41.(in Chinese)

[21] Zang Z P, Huang X P, Ma G J, et al. Sodium carboxymethyl cellulose coating pretreatment combined with multi-frequency ultrasound assisted vacuum far-infrared drying: an emerging approach to enhance drying characteristics, physicochemical properties, and sensory attributes of *Cornus officinalis* [J]. Ultrasonics Sonochemistry,2025,123:107657.

[22] Guo Y T, Wu B G, Guo X Y, et al. Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: moisture migration and quality characterizations [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 126: 109312.

[23] Wu X G, Zhang Z G, He Z Y, et al. Effect of freeze-thaw cycles on the oxidation of protein and fat and its relationship with the formation of heterocyclic aromatic amines and advanced glycation end products in raw meat [J]. Molecules,2021,26(5):1264.

[24] Benincasa C, Pellegrino M, Romano E, et al. Qualitative and quantitative analysis of phenolic compounds in spray-dried olive mill wastewater [J]. Frontiers in Nutrition,2021,8:782693.

[25] Sharma K, Ko E Y, Assefa A D, et al. Temperature-dependent studies on the total phenolics, flavonoids, antioxidant activities, and sugar content in six onion varieties[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2015, 23(2):243-252.

[26] Chan K H, Chang C K, Gavahian M, et al. The impact of different pretreatment processes (freezing, ultrasound and high pressure) on the sensory and functional properties of black garlic (*Allium sativum* L.)[J]. Molecules, 2022, 27(20):6992.

[27] Mustafa I, Chin N L, Fakurazi S, et al. Comparison of

phytochemicals, antioxidant and anti-inflammatory properties of sun-, oven- and freeze-dried ginger extracts [J]. Foods, 2019, 8(10): 456.

[28] Lee M, Lee K G. Effect of ultrasound and microwave treatment on the level of volatile compounds, total polyphenols, total flavonoids, and isoflavones in soymilk processed with black soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 99: 106579.

[29] Chumroenphat T, Dechakhamphu A, Saensouk S, et al. Drying conditions affected chemical profiles and health promoting properties of *Castanopsis piriformis* Hickel & A. Camus[J]. Food Chemistry: X, 2025, 29: 102874.

[30] Tu Z, Liu Y Y, Lin J Z, et al. Comparison of volatile and nonvolatile metabolites in green tea under hot-air drying and four heat-conduction drying patterns using widely targeted metabolomics[J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100767.

[31] Rongru L, Bo W, Bingzheng L, et al. Microwave-assisted drying techniques to enhance the drying efficiency and quality of dried *Gastrodia elata* [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025(8): 4537-4548.

[32] Liu Y, Chen W F, Fan L P. Effects of different drying methods on the storage stability of barley grass powder [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(3): 1076-1084.

[33] He Y Y, Wang B, Cao Y F, et al. Infrared-microwave freeze-drying of *Gastrodia elata*: effect of desorption mode on heating uniformity, porous structure, and quality [J]. Food and Bioprocess Technology, 2025, 18(8): 7731-7748.

[34] Bei X R, Yu X J, Zhou C S, et al. Improvement of the drying quality of blueberries by catalytic infrared blanching combined with ultrasound pretreatment [J]. Food Chemistry, 2024, 447: 138983.

[35] Wang J, Pei Y P, Chen C, et al. High-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) enhances drying behavior of red pepper *via* altering cellular structure, pectin profile and water state [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 83: 103246.

[36] Li Q X, Chai J, Deng S H, et al. The comparison of the profile of phenolic compounds in noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit by different drying methods [J]. Foods, 2025, 14(8): 1398.

[37] Yang R, Zhao L H, Wang W, et al. Quality assessment of prune jam with different concentration methods based on physicochemical properties, GC-IMS, and intelligent sensory analysis[J]. Foods, 2025, 14(12): 2084.

[38] Chen J, Jiang C Y, Liu Z Y, et al. Study on optimization of extraction and purification processes for total flavonoids from Lycopi Herba roots and their anti-proliferative effects on fibrous synoviocytes in human rheumatoid arthritis [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 112: 107164.

[39] Mashitoa F M, Shoko T, Shai J L, et al. Influence of different types of drying methods on color properties, phenolic metabolites and bioactivities of pumpkin leaves of var. butternut squash (*Cucurbita moschata* Duchesne ex Poir)[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 694649.

[40] 虞世帅, 郝怡宁, 彭勃, 等. 茶树花提取物的体外抗氧化、抗炎活性及其对细胞衰老的抑制作用[J]. 食品与生物技术学报, 2025, 44(7): 74-84.
Yu S S, Hao Y N, Peng B, et al. *In vitro* antioxidant and anti-inflammatory activities of tea flower extract and its inhibitory effect on cell aging [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2025, 44(7): 74-84. (in Chinese)

[41] 刘均, 冯巩, 谭蓉, 等. 做形与烘焙工艺对圆炒青绿茶抗氧化活性的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2025, 44(11): 132-142.
Liu J, Feng G, Tan R, et al. Effects of shaping and baking processes on the antioxidant activity of round roasted green tea [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2025, 44(11): 132-142. (in Chinese)

[42] 吴晓菲. 特色蔬菜的红外冷冻干燥及其减损机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 72.

[43] 林嘉聪, 邱丽青, 林志汉, 等. 改性工艺和干燥方法对代餐粉营养与功能组分的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(2): 73-80.
Lin J C, Qiu L Q, Lin Z H, et al. Effects of modification process and drying method of meal substitute powder on its nutritional/functional components[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(2): 73-80. (in Chinese)

[44] Qi N X, Zhao W, Xue C H, et al. Phenolic acid and flavonoid content analysis with antioxidant activity assessment in Chinese *C. pi. Shen* honey[J]. Molecules, 2025, 30(2): 370.