

不同干燥方式下灵芝茸干燥特性和品质的比较

魏盟想¹, 贺黎铭², 罗舒², 吴运杨², 杨园², 罗霞^{1,2*}

(1. 成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106) (2. 四川省中医药科学院菌类药材研究所、菌类药材系统研究与开发实验室、中药材品质及创新中药研究四川省重点实验室、中药新药创制川渝共建重点实验室, 四川成都 610041)

摘要: 以新鲜灵芝茸为研究对象, 分别采用真空冷冻干燥 (Vacuum Freeze Drying, VFD)、热风干燥 (Hot Air Drying, HAD)、微波干燥 (Microwave Drying, MD)、远红外干燥 (Far Infrared Drying, FIRD)、真空干燥 (Vacuum Drying, VD) 的方法对其进行干燥处理, 研究不同干燥方式对灵芝茸干燥特性和品质的影响。结果表明: VFD 在保留宏观品质、以及多酚 (4.35 mg/g)、黄酮 (3.07 mg/g)、可溶性蛋白 (6.28 mg/g) 等活性成分含量方面表现最佳, 同时抗氧化活性最强, 但所需干燥时间最长 (8 h)。MD 在保留多糖 (25.92 mg/g) 含量方面表现最好, 且干燥速度最快, 仅需 0.75 h。HAD 在保留三萜 (19.95 mg/g) 含量方面具有优势。通过主成分分析法, 上述干燥方式对灵芝茸综合评分后得到的结果排序为: VFD>MD>HAD>VD>FIRD, VFD 综合评分最高为 2.69。综上所述, 本研究通过评估不同干燥方式对灵芝茸干燥特性及品质的影响, 并结合主成分分析法综合评价, 旨在获得一种较佳的灵芝茸干燥方式, 得到高品质的灵芝茸原料, 并为后续的相关研究提供一定的理论依据。

关键词: 灵芝茸; 干燥方式; 干燥特性; 品质; 主成分分析

文章编号: 1673-9078(2025)11-222-230

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.11.1432

Comparison of the Drying Characteristics and Quality of Baby *Ganoderma lucidum* Dried by Different Drying Methods

WEI Mengxiang¹, HE Liming², LUO Shu², WU Yunyang², YANG Yuan², LUO Xia^{1,2*}

(1.School of Food and Biotechnology, Chengdu University, Chengdu 610106, China) (2.Institute of Fungi and Medicinal Materials, Fungi and Medicinal Materials System Research and Development Laboratory, Sichuan Provincial Key Laboratory of Quality and Innovation of Traditional Chinese Medicine, Sichuan Chongqing Joint Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine New Drug Creation, Chengdu 610041, China)

Abstract: Fresh baby *Ganoderma lucidum* was taken as the research object, and five different drying methods were employed in this study, including Vacuum Freeze Drying (VFD), Hot Air Drying (HAD), Microwave Drying (MD), Far Infrared Drying (FIRD), and Vacuum Drying (VD), to examine the effects of the different drying methods on the drying characteristics and quality of baby *Ganoderma lucidum*. The results showed that VFD performed the best in retaining macroscopic quality and the contents of active components, such as polyphenols (4.35 mg/g), flavonoids (3.07 mg/g), and soluble protein (6.28 mg/g), while also

引文格式:

魏盟想,贺黎铭,罗舒,等.不同干燥方式下灵芝茸干燥特性和品质的比较[J].现代食品科技,2025,41(11):222-230.

WEI Mengxiang, HE Liming, LUO Shu, et al. Comparison of the drying characteristics and quality of baby *Ganoderma lucidum* dried by different drying methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(11): 222-230.

收稿日期: 2024-09-25; 修回日期: 2025-02-07; 接受日期: 2025-02-14

基金项目: 国家现代农业产业技术体系四川道地中药材创新团队项目 (SCCXTD-2024-19); 菌类药材系统研究与转化创新团队 (2022C004); 四川省科技计划资助项目 (2021YFYZ0012); 四川省中医药管理局科学技术研究专项课题 (2023zd009); 四川省“天府万人计划”资助资金 (创新领军) (2020WRCXLJ)

作者简介: 魏盟想 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工, E-mail: 2036935618@qq.com

通讯作者: 罗霞 (1974-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 菌类药材系统研究与转化, E-mail: 287748567@qq.com

exhibiting the strongest antioxidant activity, although it required the longest drying time (8 hours). MD was the best in preserving polysaccharide content (25.92 mg/g) and exhibited the fastest drying speed (taking only 0.75 hours). HAD showed an advantage in retaining triterpene content (19.95 mg/g). Principal Component Analysis (PCA) was used to rank the drying methods based on their comprehensive scores, and the order was VFD>MD>HAD>VD>FIRD, with VFD achieving the highest comprehensive score (2.69). In conclusion, this study evaluated the effects of different drying methods on the drying characteristics and quality of bady *Ganoderma lucidum*, and assessed comprehensively through principal component analysis, aiming to identify an optimal drying method for obtaining high-quality bady *Ganoderma lucidum* raw materials, providing a theoretical basis for subsequent related research.

Key words: bady *Ganoderma lucidum*; drying method; drying characteristics; quality; principal component analysis

灵芝茸 (Bady *Ganoderma lucidum*) 是指灵芝在生长过程中处于菌盖未打开的幼茸阶段, 即分化期^[1]。为了提高灵芝子实体的产量, 多余的灵芝茸通常会在修枝过程中被丢弃。然而, 在这一阶段, 灵芝质地柔软, 富含多种有益成分, 如灵芝多糖、三萜类化合物、腺苷、超氧化物歧化酶 (SOD) 和有机锗等, 这些成分赋予了灵芝茸抗炎、抗肿瘤、降血压、降血糖及免疫调节等多重药理活性^[2]。随着人们对健康、天然食品的关注不断增加, 灵芝茸可以广泛应用于多个领域。但目前有关灵芝茸开发的产品极少, 未来灵芝茸作为一种重要的产品原料, 可以广泛应用于保健品、天然护肤品和食品等多个领域。在保健品和护肤品领域, 可以被加工成胶囊、片剂、粉末、护肤霜、面膜和精华液等产品。在食品领域, 灵芝茸可以被加工为保健茶、糕点、饮料及日常烹饪食材。然而, 由于新鲜灵芝茸的平均含水率高达 80%, 且具有较强的呼吸作用, 极易发生腐败变质, 因此, 刚采摘的灵芝茸不易长期保存, 必须及时进行处理。干制是食用菌常见的加工方式, 能够有效延长其保存时间并便于后续利用。

目前, 食用菌的常见干燥方法包括自然干燥、真空冷冻干燥、热风干燥、微波干燥、真空干燥和红外辐射干燥等。其中, 热风干燥因其成本低和操作方便而广泛应用于灵芝及其他食用菌的干燥^[3]。微波干燥以其快速加热和高效率的特点, 使得物料内外能够同时加热, 因此常用于食品的干燥与杀菌^[4]。真空冷冻干燥则通过将水分从固态直接升华为气态, 能够较好地保持食品原料的外观和形状^[5]。真空干燥通过隔绝空气, 降低了物料在干燥过程中氧化和其他化学变化的风险, 从而有助于保持其原有特性^[6]。远红外干燥是一种利用远红外线辐射加热物体, 使物料内部水分蒸发, 同时具有一定的灭菌作用^[7]。

本试验旨在使用真空冷冻干燥 (Vacuum Freeze Drying, VFD)、热风干燥 (Hot Air Drying, HAD)、微波干燥 (Microwave Drying, MD)、远红外干燥 (Far Infrared Drying, FIRD)、真空干燥 (Vacuum Drying,

VD), 5 种不同干燥方式对灵芝茸进行处理, 研究不同干燥方式对灵芝茸干燥特性和宏观品质、显微结构、营养成分、抗氧化活性等品质的影响。通过运用主成分分析方法, 对各干燥方式的综合效果进行评价, 以期筛选出一种较佳的干燥方式, 进而为灵芝茸的后续产品开发提供高品质的原料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 供试材料

采收无损伤, 大小均匀的灵芝茸, 用超纯水洗净后, 沿长方向切成厚度为 4 mm 的薄片, 放入 4 °C 冰箱备用。新鲜灵芝茸初始水分含量约为 78%±1.51%。

1.1.2 供试试剂

硫酸、高氯酸, 成都金山化学试剂有限公司; 蒽酮、DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl), 上海麦克林生化科技有限公司; 无水葡萄糖、考马斯亮蓝、香草醛, 成都市科隆化学有限公司; 没食子酸、NaNO₂、Al(NO₃)₃、Vc, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 福林酚、碳酸钠, 罗恩试剂有限公司; 牛血清白蛋白, 如吉生物科技有限公司; 磷酸、甲醇、高氯酸、无水乙醇、氢氧化钠, 成都长联化工试剂有限公司; 芦丁, 四川省维克奇生物科技有限公司; 齐墩果酸, 成都普思生物科技股份有限公司, ABTS+ (2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), 福州飞净生物科技有限公司。

1.1.3 供试仪器

BGZ-240 电热鼓风干燥机, 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; MOOULYOD-230 真空冷冻干燥系统, ERM; YHG-300-S-II 远红外干燥箱, 上海精胜科学仪器有限公司; DZF-6050 真空干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; PJ21C-AU 微波炉, 微波炉美的微波炉制造有限责任公司; WFZ UV-2802SH 型紫外可见分

光光度计, 尤尼柯(上海)仪器有限公司; 全波长酶标仪, 赛默飞世尔科技有限公司; FRU 测色色差仪, 深圳威福光电科技有限公司; Universal TA 质构仪, 上海腾拔仪器科技有限公司; SU8100 扫描电子显微镜, HITACHI。

1.2 实验方法

1.2.1 热风干燥

称取 150 g 新鲜灵芝茸单层均匀铺放在料盘上, 设置温度 50 ℃, 进行干燥, 每隔 30 min 取样放入干燥器进行称重, 直至样品质量达到平衡, 重复三次。

1.2.2 真空干燥

称取 150 g 新鲜灵芝茸单层均匀铺放在料盘上, 设置温度 50 ℃, 压强为 0.5 MPa 进行干燥, 每隔 30 min 取样放入干燥器进行称重, 直至样品质量达到平衡, 重复三次。

1.2.3 红外干燥

称取 150 g 新鲜灵芝茸单层均匀铺放在料盘上, 设置温度 50 ℃, 进行干燥, 每隔 30 min 取样放入干燥器进行称重, 直至样品质量达到平衡, 重复三次。

1.2.4 真空冷冻干燥

称取 150 g 新鲜灵芝茸单层均匀铺放在料盘上, 在 -20 ℃ 冰箱, 冷冻 24 h, 在温度为 -50 ℃, 压强为 500 Pa 条件下进行干燥, 每隔 2 h 取样放入干燥器进行称重, 直至样品质量达到平衡, 重复三次。

1.2.5 微波干燥

称取 150 g 新鲜灵芝茸单层均匀铺放在料盘上, 在功率 700 W 微波炉中进行干燥, 每隔 5 min 取样放入干燥器进行称重, 直至样品质量达到平衡, 重复三次。

1.3 指标测定

1.3.1 干燥特性

1.3.1.1 干基水分含量

干基水分含量计算据公式 1 计算。

$$S_t = \frac{Q_t - Q}{Q} \quad (1)$$

式中:

S_t ——时刻样品的干基含水量, g/g;

Q_t ——时刻样品的质量, g;

Q ——样品干燥后的质量, g。

1.3.1.2 水分比

灵芝茸干燥的水分比 (MR) 据公式 2 计算:

$$B = \frac{S_t}{S_0} \quad (2)$$

式中:

B ——水分比 (MR);

S_t ——时间 t 时样品的干基含水量, g/g;

S_0 ——初始干基含水量, g/g。

1.3.1.3 干燥速率测定

灵芝茸干燥速率 (DR) 据公式 3 计算:

$$D = \frac{S_{t1} - S_{t2}}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

式中:

D ——干燥速率 (DR), g/(g·h);

S_{t1} 、 S_{t2} ——干燥 t_1 、 t_2 时刻物料干基含水量, g/g;

t_1 、 t_2 ——干燥时刻。

1.3.2 色差

参照杨丽阳等^[8]的方法进行分析, L^* 表示亮度, a^* 表示红绿度, b^* 表示黄蓝度, ΔE 代表总色差值。以新鲜灵芝茸切片为对比, 选取灵芝茸切片中间部位进行测量, 测得 L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ; 测定样品的 L_1^* 、 a_1^* 、 b_1^* 值, 以此反映样品色泽的变化。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_1^*)^2 + (a_0^* - a_1^*)^2 + (b_0^* - b_1^*)^2} \quad (4)$$

1.3.3 收缩率

灵芝茸片的体积参照采用置换法^[9]进行测定, 置换介质为粒径 0.9~1.1 mm 的小米。具体的操作方法为: 将小米放入 250 mL 的烧杯中, 取出一部分小米倒入量筒中, 取出的小米体积稍大于灵芝茸的质量, 将灵芝茸置于烧杯中, 用量筒里的灵芝茸将烧杯填满, 尽量少压灵芝茸, 读出量筒中剩余小米的体积, V_0 、 V_t 。按照公式 (5) 计算收缩率 (%)。

$$S = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \quad (5)$$

式中:

S ——收缩率, %;

V_0 ——新鲜灵芝茸的体积, cm^3 ;

V_t ——干燥后中 t 时间的灵芝茸体积, cm^3 。

1.3.4 复水比

通过重量法^[10]对不同干燥方式下的灵芝茸进行复水, 即对干燥结束的灵芝茸进行称量, 记为 m_0 , 然后将其加入 50 ℃ 的水中, 每隔 5 min 取出沥干称重, 记为 m_1 后重复该操作, 直至质量不再变化, 然后按式 (6) 计算复水比, 记为 F 。

$$F = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \quad (6)$$

式中:

F ——复水比;

m_0 ——干燥灵芝茸的质量, g;

m_1 —复水后灵芝茸的质量, g。

1.3.5 质构

采用质构仪 (Universal TA) 进行全质构 (Texture Profile Analysis, TPA) 测定, 测定时采用 P/36R 圆柱形探头, 样品厚度为 3 mm 测量前后的速度为 1 mm/s, 压缩比为 10%, 触发力为 10 g, 停留时间为 3 s, 每一个干燥后的灵芝茸均取中间平整均匀部分进行测定。每组测量 5 个样品, 结果取平均值^[11]。

1.3.6 微观结构

将灵芝茸片切成 4 mm×4 mm×4 mm 小块, 放置在样品台上, 并用导电胶固定。采用扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 将其放大 200 倍进行观察^[12]。

1.3.7 多糖含量

参照《中国药典》2020 年版第一部^[13]。采用蒽酮-硫酸法测定多糖含量。

1.3.8 三萜含量

参照《中国药典》2020 年版第一部^[13]。采用高氯酸-香草醛测定法测定三萜含量。

1.3.9 可溶性蛋白含量

采用考马斯亮蓝 G250 染色法^[14]测定可溶性蛋白含量。

1.3.10 多酚含量

采用 Folin-Ciocalteu 法^[15]测定多酚含量。

1.3.11 黄酮含量

采用亚硝酸钠-硝酸铝-氢氧化钠比色法^[16]测定黄酮含量。

1.3.12 抗氧化活性

清除 DPPH 自由基能力参照邓成林等^[17]的方法略作修改。

清除 ABTS⁺ 自由基能力参照马文华等^[18]的方法略作修改。

1.4 数据分析

在试验中, 每次试验均进行 3 次平行实验, 取其平均值, 并计算标准差 (SD)。试验数据的处理使用 Excel 2016 软件进行基本的数据整理与计算, 而数据分析及主成分分析则通过 SPSS 软件进行统计分析。绘制曲线图表使用 Origin 95 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 不同干燥方式对灵芝茸干燥特性的影响

由图 1 可知, 灵芝茸在干燥过程中水分含量逐

渐降低, 不同干燥方式对灵芝茸的干燥所需时间影响显著。HAD、MD、FIRD、VD 和 VFD 的干燥时间分别为 4、0.75、5.5、6 和 8 h。相比 VFD, HAD、MD、FIRD 和 VD 的干燥时间分别缩短了 50.00%、89.37%、31.25% 和 25.00%。干燥速率依次为 MD>HAD>FIRD>VD>VFD。其中 MD 干燥速率明显大于其他干燥方式, 黄纪民等^[19]研究干燥方式对黄精片的影响时也表明 MD 干燥方式速率最快。这可能是因为微波照射到物质时, 水分子在电场的作用下快速振动, 产生的摩擦热会迅速转化为热能, 从而加热物质。这种加热方式能更有效地促进内部水分的扩散, 加快脱水过程^[20]。VFD 是一种先冻结物料, 然后在真空环境下直接从固态升华为气态的干燥方式。在这个过程中, 水分子需要克服冰晶之间的结合力, 因此升华速率相对较慢, 导致干燥速率也较慢^[21]。而在同样干燥温度下 VD 干燥速率要低于 HAD 和 FIRD 的原因是因为 VD 是真空环境, 在真空环境下传热效率和沸点降低而导致 VD 干燥速率要低于 HAD 和 FIRD^[22]。

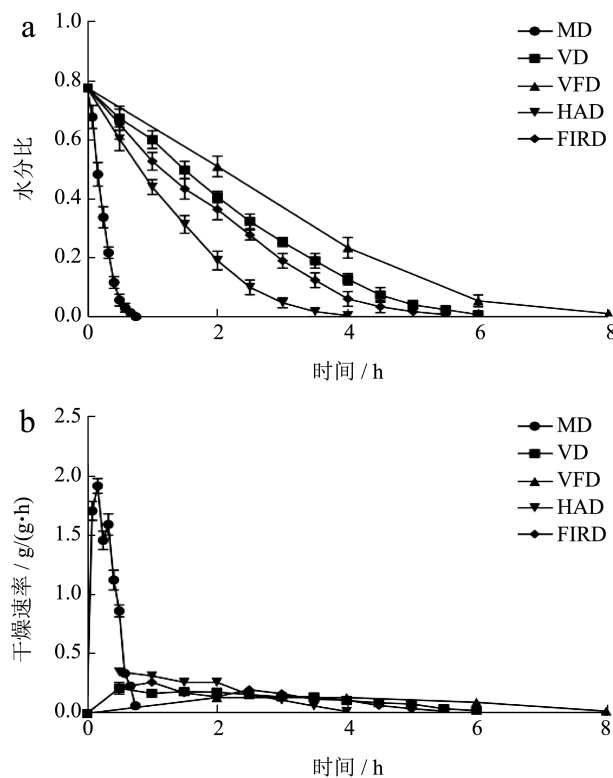


图 1 不同干燥方式下灵芝茸 MR、DR 与时间的关系曲线
Fig.1 The relationship curve between moisture ratio, drying rate and time for baby *Ganoderma lucidum* under different drying methods

2.2 不同干燥方式对灵芝茸品质的影响

2.2.1 不同干燥方式对灵芝茸色泽的影响

颜色是食品表观质量的重要指标, 干燥产品的理

想颜色要接近于鲜样颜色。由图 2 和表 1 可知，以鲜样为参照，发现除 VFD 方式外，其他 4 种干燥方式对其颜色变化都有显著变化。 ΔE 表示干燥后灵芝茸与新鲜灵芝茸的色差值，由表 1 可知，VFD 最有利于于灵芝茸原始色泽的保持，其 ΔE 值最低为 2.77，显著低于 MD、HAD、VD、FIRD 四种干燥方式。陈冰洁等^[24]研究干燥方式对花菇品质的影响，也发现 VFD 方式下花菇的颜色保持最佳。这是由于在真空低温条件下，灵芝茸在干燥过程中酶促褐变、非酶褐变以及美拉德反应的程度相对较低，从而较好地保持了其色泽品质。相比之下，采用 HAD、FIRD、VD 和 MD 这 4 种方法时，由于高温和氧化作用引起的酶促褐变、非酶褐变、美拉德反应以及热对色素的分解等因素，导致样品的色泽变化较为明显。

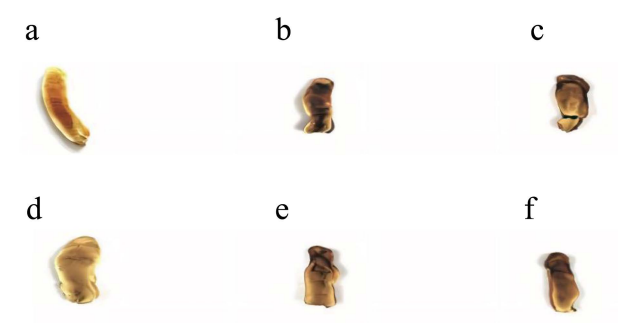


图 2 不同干燥方式下灵芝茸样品

Fig.2 Different drying methods for baby *Ganoderma lucidum* samples

注：(a) 新鲜灵芝茸；(b) 微波干燥；(c) 热风干燥；(d) 冷冻真空干燥；(e) 真空干燥；(f) 远红外干燥。

表 1 不同干燥方式对灵芝茸色泽的影响

Table 1 Effects of different drying methods on the color of *baby Ganoderma lucidum*

干燥方式	L^*	a^*	b^*	ΔE
Fresh	56.28 ± 1.41^a	17.24 ± 1.89^{ab}	34.88 ± 0.16^a	—
MD	43.50 ± 1.02^c	18.19 ± 0.57^a	30.62 ± 2.21^b	13.60 ± 1.55^a
HAD	46.60 ± 2.10^b	17.33 ± 0.60^{ab}	30.66 ± 0.58^b	10.57 ± 2.12^b
VFD	57.68 ± 2.12^a	16.17 ± 0.91^{ab}	34.32 ± 1.04^a	2.77 ± 0.47^c
VD	47.61 ± 0.85^b	16.35 ± 1.37^{ab}	29.64 ± 2.67^b	10.35 ± 1.96^b
FIRD	46.16 ± 0.76^b	15.34 ± 0.55^b	29.61 ± 1.15^b	11.63 ± 0.95^{ab}

注：同一列不同小写字母表示存在显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

2.2.2 不同干燥方式对灵芝茸收缩率和复水比的影响

由表 2 可知，干燥后的灵芝茸均有不同程度的收缩。这可能是由于新鲜食用菌中饱满的菌丝在干燥过程中会变得扁平、塌陷，甚至出现卷曲现象。5 种干

燥方式收缩率顺序为 MD>FIRD>HAD>VD>VFD，郭红莲等^[25]研究不同干燥方式对柠檬片品质的影响也表明 MD 柠檬片收缩率最高。MD 收缩率最高为 66.67%，可能是由于 MD 内部加热的特性，灵芝茸内部水分快速蒸发，导致灵芝茸内部和外部之间的温度梯度较大，从而引起较高的收缩率。VFD 收缩率最低为 24.33%，可能是因为 VFD 过程中，灵芝茸中的水分以冰晶形式直接升华，从而有效保持了其结构的完整性，导致其收缩率相对较低。干燥方式对灵芝茸复水比也存在显著影响。Wang 等^[26]认为，食用菌干品在复水时，依赖其多孔结构来有效吸水。这些多孔结构包括均匀分布的菌丝和细胞间的蜂窝状孔隙。孔隙的内部结构完整性是影响复水能力的主要因素。由表 2 可以得出不同干燥方式对灵芝茸复水比有着显著影响，其中 VFD 复水比最高为 3.67，HAD 次之为 2.20。VD、FIRD、MD 3 种方式的复水比无明显差异。可能是由于 MD、HAD、VD、FIRD 4 种干燥方式都是高温加热的干燥过程经干燥处理后灵芝茸菌丝的蜂窝状结构受到严重破坏，这导致菌丝严重收缩，结构较厚，从而降低了在复水过程中的保水能力。而在 VFD 方式中，灵芝茸的水分直接升华，保持了其纤维结构的相对完整性，内部则呈现疏松多孔的特性，使其在复水时具有较强的水分容纳能力，复水比达到了最高。

表 2 不同干燥方式对灵芝茸收缩率和复水率的影响

Table 2 Effects of different drying methods on the shrinkage rate and rehydration rate of baby *Ganoderma lucidum*

干燥方式	收缩率/%	复水比 g/g
MD	66.67 ± 1.45^a	1.76 ± 0.08^c
HAD	56.00 ± 1.53^b	2.20 ± 0.10^b
VFD	24.33 ± 1.76^c	3.63 ± 0.10^a
VD	54.67 ± 1.67^b	1.91 ± 0.06^c
FIRD	59.00 ± 2.52^b	1.86 ± 0.04^c

2.2.3 不同干燥方式对灵芝茸质构的影响

硬度是样品断裂所需的最大力，直接与其组织结构相关，是评估物质口感的重要指标之一^[27]。通常物质的咀嚼性和脆度与硬度呈正相关关系，这意味着咀嚼性和脆度越高，物质的硬度也往往会增加。根据表 3 的数据，采用 5 种不同干燥方式的灵芝茸在硬度、脆度和咀嚼性方面均表现出显著差异。这些差异可能源于干燥过程中物质的结构变化，从而影响其感官特性和食用体验。选择适当的干燥方式对改善灵芝茸的口感和质地至关重要。5 种不同干燥方式的灵芝茸硬度顺序为 MD>FIRD>HAD>VD>VFD；MD 硬度值最大为 793.38 g，HAD、VD、FIRD 3 种干燥

方式下的灵芝茸硬度差异不大分别为 450.03、421.69、453.36 g，VFD 硬度值最小为 316.69 g。这可能是因 为 MD 干燥过程中，水分快速损失、灵芝茸内部疏松 的组织破外和细胞收缩更加严重，使得灵芝茸的组织 结构更加紧密，因此 MD 方式下的灵芝茸硬度最大。 VFD 过程中灵芝茸内部组织的结构和形状得到最大程 度保存，细胞结构变化小，收缩程度低，从而获得最 小的硬度值。这与马宁等^[28]结果相类似。在脆度和咀 嚼性大小顺序也展现出相同的趋势。

表 3 不同干燥方式对灵芝茸质构的影响
Table 3 Effects of different drying methods on the texture of baby *Ganoderma lucidum*

干燥方式	硬度 /N	脆度 /N	咀嚼性 /MJ
MD	793.38 ± 8.33 ^a	95.01 ± 2.89 ^a	423.62 ± 18.09 ^a
HAD	450.03 ± 8.66 ^b	72.87 ± 1.67 ^b	217.92 ± 2.73 ^b
VFD	316.69 ± 10.14 ^d	48.334 ± 2.01 ^c	184.47 ± 12.26 ^c
VD	421.69 ± 6.01 ^c	71.67 ± 3.33 ^b	232.82 ± 5.41 ^b
FIRD	453.36 ± 4.41 ^b	75.00 ± 2.89 ^b	229.12 ± 5.56 ^b

2.2.4 不同干燥方式对灵芝茸微观结构的影响

由图 3 可知，不同干燥方式对灵芝茸的微观结构 有显著影响。在 5 种干燥方式下，灵芝茸的表面均出 现了不规则的收缩现象，且内部结构发生了塌陷。特 别是在 MD 方式下，灵芝茸菌丝明显出现收缩和褶 皱，细胞组织塌陷更为显著，纤维结构变得紧密，原 始菌丝结构几乎消失，呈现扁平化状态。这可能是由 于 MD 过程中，热量主要从物料内部传导，使得物料 内部迅速升温，导致内部和外部之间温度差异大，产 生热点，从而引起热应力造成对内部结构破坏。此外， 微波加热还伴随着分子极化、离子迁移等非热效应， 如蛋白质变性、细胞壁破裂等，这些效应也会导致物 料内部结构的破坏。VFD 方式下灵芝茸菌丝收缩与褶 皱最不明显，这是由于 VFD 过程中灵芝茸的水分为冰 晶状态，直接从灵芝茸内部升华，因此干燥后的灵芝 茸结构没有明显的破坏变形现象，较好的保持了灵芝 茸的原貌。

表 4 不同干燥方式对灵芝茸活性成分含量（干重）的影响（mg/g）
Table 4 Effects of different drying methods on the active components (DW) of baby *Ganoderma lucidum* (mg/g)

干燥方式	多酚	黄酮	可溶性蛋白	多糖	三萜
Fresh	5.69 ± 0.25 ^a	3.62 ± 0.05 ^a	7.73 ± 0.08 ^a	32.58 ± 0.17 ^a	22.96 ± 0.27 ^a
MD	4.19 ± 0.04 ^b	2.46 ± 0.02 ^c	3.47 ± 0.07 ^c	25.69 ± 0.23 ^b	13.06 ± 0.06 ^c
HAD	3.27 ± 0.05 ^c	2.42 ± 0.03 ^{cd}	3.68 ± 0.13 ^{cd}	14.30 ± 0.12 ^e	18.97 ± 0.21 ^b
VFD	4.35 ± 0.02 ^b	3.07 ± 0.09 ^b	6.28 ± 0.09 ^b	21.63 ± 0.30 ^c	14.67 ± 0.07 ^d
VD	3.16 ± 0.06 ^{cd}	2.37 ± 0.04 ^{cd}	3.59 ± 0.06 ^d	15.42 ± 0.09 ^d	13.92 ± 0.18 ^d
FIRD	3.05 ± 0.03 ^d	2.35 ± 0.03 ^d	3.77 ± 0.04 ^c	12.33 ± 0.11 ^f	17.56 ± 0.33 ^c

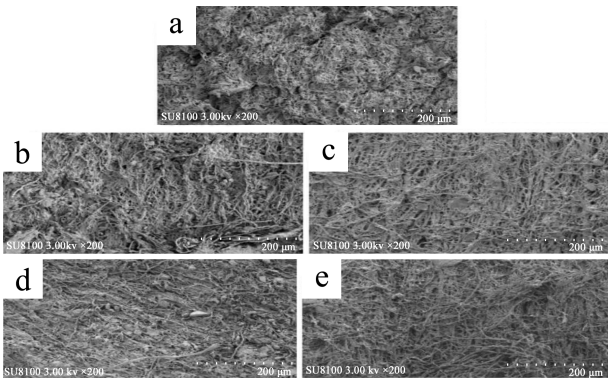


图 3 不同干燥方式对灵芝茸微观结构的影响
Fig.3 Effect of different drying methods on the microstructure of baby *Ganoderma lucidum*

注：a 为微波干燥；b 为热风干燥；c 为冷冻真空干燥；d 为真空干燥；e 为远红外干燥。

2.2.5 不同干燥方式对灵芝茸活性成分和抗氧化活性的影响

由表 4 可以得知不同干燥方式对灵芝茸活性成分 的含量影响具有显著差异，与新鲜样品对比五种不同 干燥方式下活性成分含量都有一定程度的下降。VFD 灵芝茸的多酚（4.35 mg/g）、黄酮（3.62 mg/g）、可溶 性蛋白（6.28 mg/g）含量均显著高于其余干燥组，表 明低温、真空环境是保持热敏性、易氧化成分稳定和 活性的关键条件^[29]，这与不同干燥方式对花椒^[30]主要 活性含量影响的研究结果相似。从多糖含量上来看， MD>VFD>VD>HAD>FIRD。MD 多糖含量最高， 这可能是由于 MD 过程中，水分的去除速度快，减少 了水分与热的长期接触，从而减少了多糖的水解或降 解^[31]。HAD、VD、FIRD 多糖含量明显低于 MD 原因， 可能是由于三种干燥方式在较长时间内暴露于较高温 度，影响多糖的分子结构，使其遭受水解或其它化学 反应的影响，降低最终的多糖含量。孟令帅等^[32]研究 不同干燥方式对红托竹荪品质的影响，也发现 MD 红 托竹荪多糖含量明显高于 HAD（45℃）红托竹荪多 糖含量。在从三萜含量上来看，HAD 保留能力最佳为 18.97 mg/g；FIRD 次之为 17.56 mg/g，VFD 与 VD 两 者差异无统计学意义。

表 5 不同干燥方式对灵芝茸抗氧化活性的影响
Table 5 Effects of different drying methods on the antioxidant activity of baby *Ganoderma lucidum*

干燥方式	DPPH/%	ABTS ⁺ /%
MD	96.30 ± 0.48 ^a	42.83 ± 1.36 ^{ab}
HAD	95.75 ± 0.55 ^a	39.25 ± 0.60 ^{bc}
VFD	97.12 ± 1.09 ^a	45.66 ± 1.63 ^a
VD	95.47 ± 0.41 ^a	37.58 ± 1.53 ^c
FIRD	95.16 ± 0.49 ^a	37.27 ± 0.97 ^c

表 5 可以得知，5 种干燥方式处理的灵芝茸在 DPPH· 清除率上差异无统计学意义，且均达到 95% 以上，显示出良好的 DPPH· 清除能力。张明等^[33]的研究结果也表明不同干燥方式处理的灵芝样品 DPPH 清除率均在 90% 以上。5 种干燥方式灵芝茸 ABTS⁺ 清除率存在显著差异，顺序为 VFD>MD>HAD>VD>FIRD。VFD 处理下灵芝茸 ABTS⁺ 清除率最高为 45.66%。这与蔡沙等^[34]研究发现 VFD 处理下甘薯叶 ABTS⁺ 清除能力最佳的结果类似。Sim 等^[35]研究也发现 VFD 干燥下的木槿叶，保留了更多抗氧化化合物，其抗氧化能力更强。

2.3 综合评价

2.3.1 相关性分析

进行综合评价前，要对各评价指标进行相关性检验。从图 4 可见，各变量之间的相关性显著，表明指标间存在较强的联系，因此可以采用主成分分析法进行深入

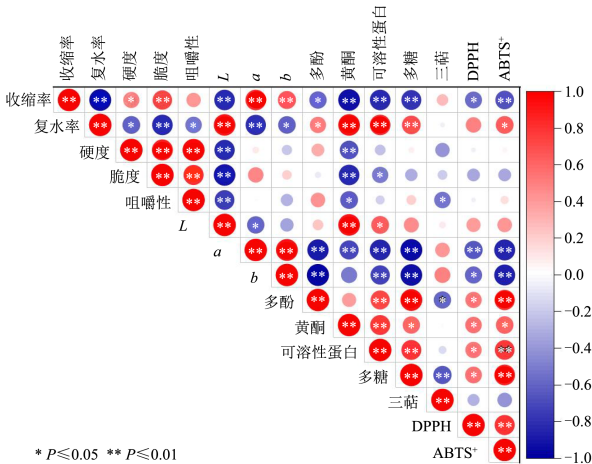


图 4 相关性热图
Fig.4 Correlation heat map

2.3.2 主成分分析

干燥后的灵芝茸作为一种天然原料，可以广泛应用于保健品、天然护肤品和食品等多个领域。在保健

品和护肤品领域，灵芝因其增强免疫力、抗疲劳、调理身体以及抗衰老的作用，可以被加工成胶囊、片剂、粉末、护肤霜、面膜和精华液等产品。在这些应用中，干燥后灵芝茸的活性成分含量和抗氧化活性是评价其品质的重要指标。在食品领域，灵芝茸可以被加工为保健茶、糕点、饮料及日常烹饪食材。在这种应用中，不仅要考虑干燥后灵芝茸的活性成分含量和抗氧化活性，还需要关注其色泽、收缩率、复水比、质构特性等宏观品质，以满足消费者对产品的多重需求。因此，本研究将从灵芝茸的宏观特性、活性成分和抗氧化活性等多个角度进行综合评价，旨在确定一种最优的干燥方式，以提供高品质的原料，推动灵芝茸在各个领域的产品开发。

在进行主成分分析前，需对宏观特性、活性成分含量、抗氧化活性（包括多糖、三萜、多酚、黄酮、可溶性蛋白、收缩率、复水比、质构特性、色泽、DPPH、ABTS⁺）进行标准化后，形成新的数据矩阵，以便于后续分析。表 6 列出了各主成分的特征值及其贡献率，表 7 则展示了品质指标的主成分荷载矩阵。根据特征值大于 1 的标准，共确定了两个主成分，其累积贡献率达到了 82.01%，第 1 主成分的方差贡献率为 50.85%，而第 2 主成分的方差贡献率为 31.17%^[36,37]。

表 6 各个主成分的特征值和贡献率
Table 6 Eigenvalues and contribution rates of principle

主成分	特征值	贡献率	累积贡献率
1	7.627	50.847	50.847
2	4.675	31.166	82.013
3	0.935	6.237	88.249
4	0.693	4.623	92.872
5	0.51	3.401	96.273
6	0.197	1.315	97.588
7	0.17	1.13	98.718
8	0.099	0.661	99.379
9	0.048	0.323	99.703
10	0.023	0.152	99.854
11	0.014	0.09	99.944
12	0.006	0.041	99.985
13	0.002	0.014	100
14	0	0	100
15	0	0	100

在第 1 主成分中，多酚、黄酮、可溶性蛋白、DPPH、ABTS、复水比、L*、b* 被认为是主要指标，其对应的载荷值分别为 0.581、0.951、0.862、0.622、

0.748、0.972、0.92、0.817。其中，复水比的贡献值最大，其次是黄酮。收缩率、脆度、硬度则为负载荷的主要指标，载荷值分别为-0.97、-0.794、-0.542。这表明在第1主成分中，多酚、黄酮、可溶性蛋白、多糖、DPPH、ABTS、复水比、 L^* 、 b^* 较高的样品表现较好，反之，收缩率、脆度、硬度较低的样品也表现良好。

在第2主成分中，多酚、多糖、ABTS、硬度、脆度、咀嚼性和 a^* 为主要指标，载荷值分别为0.749、0.91、0.545、0.828、0.527、0.876和0.696，其中多糖对第2主成分的贡献最大，咀嚼性次之。同时，三萜为负载荷的主要指标，载荷值分别为-0.662。这说明在第2主成分中，多酚、多糖、ABTS、硬度、脆度、咀嚼性和 a^* 较高的样品表现较好，而三萜较低的样品同样表现优异。

表 7 各品质指标的主成分荷载矩阵
Table 7 Loading matrix of principle components of quality indexes

品质指标	主成分	
	1	2
多酚	0.581	0.749
黄酮	0.951	-0.205
可溶性蛋白	0.862	0.27
多糖	0.364	0.91
三萜	-0.154	-0.662
DPPH	0.622	0.34
ABTS ⁺	0.748	0.545
收缩率	-0.97	-0.036
复水比	0.972	-0.118
硬度	-0.542	0.828
脆度	-0.794	0.527
咀嚼性	-0.456	0.876
L^*	0.92	-0.255
a^*	-0.099	0.696
b^*	0.817	0.153

以主成分得分系数矩阵（表 7）所得模型为：
 $F_1=0.210X_1+0.344X_2+0.312X_3+0.132X_4-0.056X_5+0.225X_6+0.271X_7-0.351X_8+0.352X_9-0.196X_{10}-0.288X_{11}-0.165X_{12}+0.333X_{13}-0.036X_{14}+0.296X_{15}$
 $F_2=0.347X_1-0.095X_2+0.125X_3+0.421X_4-0.306X_5+0.157X_6+0.252X_7-0.017X_8-0.055X_9+0.383X_{10}+0.244X_{11}+0.405X_{12}-0.118X_{13}+0.322X_{14}+0.071X_{15}$
式中， F_1 、 F_2 表示第1个、第2个主成分得分； $X_1\sim X_{15}$ 表示不同干燥方式灵芝茸多酚含量、黄酮含量、

可溶性蛋白含量、多糖含量、三萜含量、DPPH清除率、ABTS⁺清除率、收缩率、复水比、硬度、脆度、咀嚼性、 L^* 、 a^* 、 b^* 共15项品质指标数值。

以各主成分对应方差贡献率为权重，根据主成分得分和对应的权重线性加权求和得到主成分的综合得模型： $F=0.620F_1+0.380F_2$

接下来，将不同干燥方式下灵芝茸各项指标的标准化数据分别代入 F_1 和 F_2 的函数中，然后将计算得出的得分带入上述公式中，从而得出不同干燥方式灵芝茸的品质综合评价总得分。最后，根据计算结果进行排序，得分 F 值越大，表示品质越高。综合评分结果排序为（表8）： $VFD>MD>HAD>VD>FIRD$ 。

综合考虑上述指标，采用VFD方式进行灵芝茸加工可以获得高品质的灵芝茸，在此干燥方式下的灵芝茸综合评分最高，可达2.69。

表 8 不同干燥方式的综合评分
Table 8 Comprehensive score of different drying methods

干燥方式	主成分 1	主成分 2	综合评分
MD	-1.11	3.76	0.74
HAD	-1.05	-0.42	-0.66
VFD	4.43	-0.41	2.69
VD	-1.27	-1.31	-1.28
FIRD	-2.04	-1.67	-1.90

3 结论

不同干燥方式对灵芝茸品质有显著影响。在干燥特性上，干燥速率排序为 $MD>HAD>VD>FIRD>VFD$ ，其中MD干燥速率最高，VFD最低，MD比VFD干燥时间缩短89.37%。在宏观品质上，VFD干燥的灵芝茸 L^* 值、复水比最佳，收缩率、硬度、脆度、咀嚼性最小，表现出最佳品质。在微观结构方面，VFD干燥的菌丝收缩与塌陷最少，MD干燥菌丝变化最明显。在活性成分和抗氧化活性上，VFD干燥的多酚、多糖、黄酮、可溶性蛋白含量及抗氧化活性最佳，MD次之，但HAD在三萜含量保留上最优。主成分分析综合评估显示，VFD干燥可获得高品质灵芝茸，综合评分最高（2.69）。然而，VFD设备成本高、干燥时间长且能耗大，不适合除非对品质要求极高的情况下使用。相比之下，MD干燥不仅能缩短干燥时间、降低能耗，还能较好地保留营养成分与抗氧化能力，是一个理想选择。HAD设备成本低，操作简便，适用于需要高三萜含量的灵芝茸干燥。因此，实际生产中根据不同需求选择合适的干燥方式。

参考文献

- [1] XU A, YANG X, LI Y, et al. Fresh-eating Lingzhi becomes possible: Comparative evaluation of nutritional and taste profile of *Ganoderma tsugae* at different fruiting body morphogenesis stages [J]. LWT, 2024, 201: 116234.
- [2] NAKAGWA T, ZHU Q, TAMRAKAR S, et al. Changes in content of triterpenoids and polysaccharides in *Ganoderma lingzhi* at different growth stages [J]. Journal of Natural Medicines, 2018, 72: 734-744.
- [3] HUENSUN T, CHEWONARIN T, LAOPAJON W, et al. Comparative evaluation of physicochemical properties of Lingzhi (*Ganoderma lucidum*) as affected by drying conditions and extraction methods [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56(6): 2751-2759.
- [4] 郑先哲,张雨涵,刘成海,等.微波技术在食品和农产品加工中应用研究进展[J].农业工程学报,2024,40(6):14-28.
- [5] SALEHI F. Recent progress and application of freeze dryers for agricultural product drying [J]. ChemBioEng Reviews, 2023, 10(5): 618-627.
- [6] 王政文,张万尧,崔建航.真空干燥技术研究进展与展望[J].化工机械,2021,48(3):321-325.
- [7] HUANG D, YANG P, TANG X, et al. Application of infrared radiation in the drying of food products [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 765-777.
- [8] 杨丽阳,卢琪,杨德,等.不同预处理和干燥方式下养心菜粉色泽、功能成分和抗氧化性水平的比较[J].现代食品科技,2024, 40(4):245-256.
- [9] 邢晓凡,刘浩楠,姚飞,等.不同干燥方式对黄桃果干品质的影响[J].食品工业科技,2023,44(24):327-333.
- [10] GAO J R, LI M Y, CHENG Z Y, et al. Effects of Different drying methods on drying characteristics and quality of small white apricot (*Prunus armeniaca* L.) [J]. Agriculture, 2024, 14(10): 1716.
- [11] GRASSINO A N, KARLOVIC S, SOSO L, et al. Influence of different drying processes on the chemical and texture profile of *Cucurbita maxima* Pulp [J]. Foods, 2024, 13(4): 520.
- [12] LI C, REN G, ZHANG L, et al. Effects of different drying methods on the drying characteristics and drying quality of *Cistanche deserticola* [J]. Lwt, 2023, 184: 115000.
- [13] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[M].北京:中国医药科技出版社,2020.
- [14] 赵璐,何婷,丁文欢,等.考马斯亮兰法(Bradford法)测定驼乳中蛋白质的含量[J].应用化工,2016,45(12):2366-2368,2372.
- [15] GALAZ P, VALDENEGRO M, RAMIREZ C, et al. Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 208: 19-27.
- [16] PAPOUTSIS K, PRISTIJONO P, GOLDING J B, et al. Effect of vacuum-drying, hot air-drying and freeze-drying on polyphenols and antioxidant capacity of lemon (*Citrus limon*) pomace aqueous extracts [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(4): 880-887.
- [17] 邓成林,王芙苒,周金萍,等.发酵绿茶饮料工艺优化、抗氧化活性及贮藏品质研究[J].食品研究与开发,2022,43(19):134-142.
- [18] 马文华,李苗苗,迟晓君,等.不同干燥方式对芦笋功能成分及体外抗氧化活性的影响[J].中国果菜,2024,44(1):35-41.
- [19] 黄纪民,王溱兰,邱展鸿,等.干燥方式对黄精片干燥特性和微观结构的影响[J].广西科学院学报,2023,39(4):445-451.
- [20] 耿铁,孟斐,杨卫东,等.不同干燥技术在农产品干燥领域的研究进展[J].农产品加工,2022,14:81-84.
- [21] LI X, YI J, HE J, et al. Comparative evaluation of quality characteristics of fermented napa cabbage subjected to hot air drying, vacuum freeze drying, and microwave freeze drying [J]. LWT, 2024, 192: 115740.
- [22] ZHENG C, LI J, LIU H, et al. Review of postharvest processing of edible wild-grown mushrooms [J]. Food Research International, 2023, 173(1): 113223.
- [23] 吕莹,陈芹芹,李旋,等.干燥对果蔬加工色泽影响的研究进展[J].食品科学,2023,44(13):368-377.
- [24] 陈冰洁,刘贵阁,路遥,等.不同干燥方式对花菇品质的影响[J].上海农业学报,2023,39(2):82-87.
- [25] 郭红莲,张曼,白亚辉,等.不同干燥方式对柠檬片品质的影响[J].中国调味品,2024,49(6):31-35.
- [26] WANG J, JIANG S, MIAO S, et al. Effects of drying on the quality characteristics and release of umami substances of *Flammulina velutipes* [J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102338.
- [27] 王浩,祖正梅,程晨霞,等.不同处理与干燥方式对黄瓜脆片理化特性和抗氧化性的比较[J].现代食品科技,2024,40(4):113-120.
- [28] 马宁,仲磊,赵立艳,等.干燥方法对印度块菌(*Tuber indicum*)品质的影响 [J].食品工业科技, 2020,41(23):15-19,24.
- [29] LEE S Y, FERDINAND V, SIOW L F. Effect of drying methods on yield, physicochemical properties, and total polyphenol content of chamomile extract powder [J]. Frontiers in Pharmacology, 2022, 13: 1003209.
- [30] 王安娜,王赞,彭小伟,等.不同干燥方式对竹叶花椒叶品质的影响[J].中国农业科学,2023,56(18):3655-3669.
- [31] HU D, LIU X, QIN Y, et al. The impact of different drying methods on the physical properties, bioactive components, antioxidant capacity, volatile components and industrial application of coffee peel [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100807.
- [32] 孟令帅,聂玉,雷燕,等.不同干燥方式对红托竹荪复水特性及其品质的影响[J].食品科技,2024,49(10):68-77.
- [33] 张明,孟晓峰,吴茂玉,等.不同干燥方式对灵芝子实体干燥品质的影响[J].中国果菜,2024,44(3):43-47.
- [34] 蔡沙,施建斌,隋勇,等.不同干燥方式对甘薯叶理化特性和抗氧化能力的影响[J].食品安全质量检测学报,2023,14(11):78-86.
- [35] SIM Y Y, NYAM K L. Effect of different drying methods on the physical properties and antioxidant activities of *Hibiscus cannabinus* leaves [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13: 1279-1286.
- [36] SHI S, WANG E, LI C, et al. Comprehensive evaluation of 17 qualities of 84 types of rice based on principal component analysis [J]. Foods, 2021, 10(11): 2883.
- [37] YU Y, YANG G, SUN L, et al. Comprehensive evaluation of 24 red raspberry varieties in northeast China based on nutrition and taste [J]. Foods, 2022, 11(20): 3232.