

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

杨丽阳, 卢琪, 杨德, 王轶, 王琼, 郭鹏, 薛淑静*

(湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064)

摘要: 为了研究养心菜的加工适用性, 拓展其利用途径, 采用未预处理 (Untreated, UT)、沸水漂烫 (Boiling Water Blanching, BWB)、沸水+护色漂烫 (COLOR Protection+Water Blanching, CPB)、蒸汽漂烫 (Steam Blanching, SB) 与冻融 (Freeze-Thawing, FT) 五种预处理方式处理后, 分别进行热风干燥 (Hot Air Drying, HA)、热泵干燥 (Heat Pump Drying, HP), 得到 UT HP、UT HA、BWB HP、BWB HA、CPB HP、CPB HA、SB HP、SB HA、FT HP 及 FT HA 10 种养心菜粉, 比较不同预处理方式和干燥方式下养心菜色泽、功能成分及抗氧化能力水平的变化。结果表明: UT HP 没食子酸和山茶酚含量最高, 但色泽差、叶绿素含量较低, 干燥时间长; CPB HP 的干燥时间短, Vc 含量最高, 具有较高的抗氧化水平, 但没食子酸含量较低; SB HP 总酚、总黄酮、槲皮素含量最高, 其他品质指标介于中间; FT HP 养心菜具有最好的色泽、最高的叶绿素、游离氨基酸含量, 但总酚、总黄酮、槲皮素、山茶酚以及抗氧化水平低。从主成分分析来看, BWB HP、CPB HP、SB HP 和 BWB HA、CPB HA、SB HA 的养心菜品质分别具有一定的相似性, UT HP、FT HP、UT HA、UT HA 和其有明显差异。该文综合比较了养心菜不同预处理及干燥方法的优劣, 在养心菜下游的功能性食品的开发过程中, 可以根据需求选择合适的干燥方法。

关键词: 养心菜; 预处理; 干燥方式; 功能成分; 抗氧化活性

文章编号: 1673-9078(2024)04-245-256

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.4.0242

Effect of Pre-processing and Drying Techniques on Physical, Bioactive Compound, and Antioxidant Properties of *Sedum aizoon* L.

YANG Liyang, LU Qi, YANG De, WANG Yi, WANG Qiong, GUO Peng, XUE Shujing*

(Institute of Agriculture Products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China)

Abstract: To evaluate the processing adaptability of *Sedum aizoon* L. and expand its utilization, five pretreatment techniques (untreated [UT], boiling water blanching [BWB], color protection+water blanching [CPB], steam blanching [SB], and freeze thawing [FT]), followed by two drying methods (hot-air drying [HA], and heat-pump drying [HP]) were used. Ten types of water spinach powders, namely UT HP, UT HA, BWB HP, BWB HA, CPB HP, CPB HA, SB HP, SB HA, FT HP, and FT HA, were obtained. Changes in color, bioactive compound levels, and antioxidant capacities were compared. UT HP

引文格式:

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.

YANG Liyang, LU Qi, YANG De, et al. Effect of pre-processing and drying techniques on physical, bioactive compound, and antioxidant properties of *Sedum aizoon* L. [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(4): 245-256.

收稿日期: 2023-03-01

基金项目: 湖北恩施州科技项目 (XYZ2020000017)

作者简介: 杨丽阳 (1998-), 女, 本科, 研究方向: 生物技术, E-mail: 1697564725@qq.com

通讯作者: 薛淑静 (1980-), 女, 博士生, 副研究员, 研究方向: 食品科学, E-mail: 37802227@qq.com

had the highest content of gallic acid and kaempferol, but had low color brightness, low chlorophyll content, and a longer drying time. CPB HP had a shorter drying time, the highest Vc content, and relatively high antioxidant levels, but lower gallic acid content. The contents of total phenols, total flavonoids, and quercetin were the highest in SB HP, whereas other quality indices fell within intermediate ranges. FT HP had the best color, the highest content of chlorophyll, and the highest free amino acid content, but lower contents of total phenols, total flavonoids, quercetin, and kaempferol, and a lower antioxidant capacity. Principal component analysis revealed similarities in water spinach quality among BWB HP, CPB HP, SB HP, BWB HA, CPB HA and SB HA, but there were distinct differences between UT HP, FT HP, UT HA, and UT HA. This study comprehensively compared the advantages and disadvantages of different pretreatments and drying techniques for *S. aizoon*. The findings of this study can serve as a valuable reference for guiding the selection of drying techniques in the development of functional foods.

Key words: *Sedum aizoon* L.; drying techniques; pre-processing methods; bioactive compounds; antioxidant activity

养心菜,学名景天三七(*Sedum aizoon* L.),又称费菜、救心菜、土三七等,为蔷薇目景天科红景属多年生草本植物,广泛分布于中国,日本,韩国,蒙古和俄罗斯^[1]。养心菜富含黄酮类、生物碱和多酚等多种活性成分,具有抗菌、消炎、止血、降血压等功效^[2],民间将其作为药食两用植物用于降血脂、降血压及相关疾病的防治,是一种具有广阔开发前景的药膳两用的特色保健蔬菜^[3]。

新鲜养心菜采收季节温度高,不易保存,常干燥后制粉,既可以加工成饮品,或作为辅料进行食品或饲料的加工,又可以进行活性成分提取^[4]。果蔬干燥技术,国内外开展了多方面的研究,总体来看,分为热干燥和非热干燥。热干燥方法主要有热风干燥、红外干燥、微波干燥、热泵干燥等,真空冷冻干燥属于非热干燥^[5]。不同的干燥方式,粉体特性、营养成分以及挥发性成分等不尽相同^[6]。近几年,热泵干燥,相对于热风干燥,具有低能耗、高效率,改善干燥品物理、化学特性等优点,在工业化干燥中应用日趋广泛^[7]。与热风干燥相比,热泵干燥葡萄渣可降低51%的能耗^[8]。Xiong等^[9]对荔枝加工副产物进行干燥时,热泵干燥的粉末中结合的酚类含量比热风干燥的高44.8%。此外,为了减少营养成分在干燥过程中的损失以及加快干燥脱水进程,干燥前预处理获得了越来越多的关注与应用。预处理,可以降低水分向外扩散的阻力,促进水分迁移,有效提升干燥速率^[10]。漂烫预处理,果蔬加工使用最广泛的预处理方式之一。通过加热预处理,软化组织,提高渗透性,增强热和质的传递;同时,可以钝化酶活力,阻止一些不良的反应^[11]。冻融是一种非热的预处理方式,其原理是通过低温以及冰晶对细胞的破坏,促进自由水的流出,加速

质的传递^[12]。冻融预处理多用在肉制品的加工,目前在果蔬加工中也有越来越多的应用^[12]。

养心菜的研究主要集中于功能成分的分析、检测和功效分析^[1,2],涉及养心菜干燥的研究较少。养心菜叶子肉质,表面蜡质,且常茎叶一起干燥,这些特点造成养心菜干燥时容易出现不均匀,时间长,品质差等缺点。目前的研究也是侧重于减少干燥时间,提高干燥品质。孙庆运等^[4]得出提高热风干燥的温度以及进行压扁、压扁+切段处理,可以显著提高干燥速率,利于减少全株养心菜可溶性蛋白质的损失,但会造成Vc含量的下降。但总体来看,一方面热风干燥存在干燥时间长、效率低、能耗高、破坏营养成分等缺点^[13],已经不能满足养心菜的加工利用需求,另一方面,干燥对养心菜品质特别是活性成分影响的综合评价也十分匮乏。将多种预处理和不同干燥方式进行组合,综合评价养心菜品质,将利于养心菜功能型高价值产品的开发。

本研究以新鲜养心菜为原料,分别采用未预处理和沸水漂烫、沸水+护色漂烫、蒸汽漂烫、冻融5种预处理方式,然后分别进行热风干燥和热泵干燥,获得10种养心菜粉。比较不同养心菜粉的色泽、功能成分(叶绿素、抗坏血酸、总黄酮、总酚、酚类化合物、游离氨基酸)含量及抗氧化水平的变化,并和真空冷冻干燥粉进行了对比,综合评价预处理及干燥方式对养心菜品质的影响,以期对养心菜的干燥加工和下游功能型产品开发利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与方法

养心菜,湖北省恩施;NaCl、丙酮、无水乙醇、

柠檬酸钠、草酸、2,6-二氯酚靛酚、HCl、Na₂CO₃、NaNO₂、AlCl₃、NaOH、甲醇、甲酸，国药集团化学试剂有限公司；福林-酚试剂，北京索莱宝科技有限公司；抗坏血酸、芦丁、山萘酚和槲皮素标准品、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)，1,3,5-三(2-吡啶基)-2,4,6-三嗪 (1,3,5-triazine,2,4,6-tri-4-pyridinyl, TPTZ)，源叶生物科技有限公司；ABTS⁺ 试剂盒，上海碧云天生物技术有限公司；甲醇（色谱纯），美国 Sigma-Aldich 公司。

1.2 仪器与设备

LG-500A 型植物粉碎机，瑞安百信药机械厂；ME204-分析天平（精确到 0.001 g），梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；IKE 热泵干燥机，佛山维尔讯智能包装设备有限公司；DHG-9140 热风干燥机，上海一恒科学仪器有限公司；L-8800 冷冻干燥机，浙江宁波新芝冻干设备股份有限公司；Multiskan GO 酶标仪，美国 Thermo Fisher 公司；UV-1800 型紫外-可见分光光度计，日本岛津仪器有限公司；CR-400 色差仪，日本 Minolta Camera 公司；L-8900 氨基酸分析仪，日本 Hitachi 公司；LC-20AT HPLC 系统，日本 Shimadzu 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 养心菜的预处理及干燥

新鲜养心菜洗净后，分别进行未处理（UT）、沸水漂烫（BWB）、护色+沸水漂烫（CPB）、蒸汽漂烫（SB）、冻融（FT）5 种方式进行处理，控干水分后，分别采用热泵干燥（HP，温度 60 °C）和热风干燥（HA，温度 60 °C）。另取新鲜养心菜，进行真空冷冻干燥（VFD，-40 °C 预冷冻 12 h 后进行 VFD，冷阱温度 -55 °C，真空度 < 10.0 Pa）。所有干燥好的样品，分别进行粉碎，过 80 目筛，备测。

BWB、CPB、SB 及 FT 处理方法如下：

BWB：按固液比 1:20 (g:mL)，将 1 000 g 新鲜养心菜放入沸水中漂烫 60 s 后，立即用流动水冷却至室温；

CPB：按固液比 1:20 (g:mL)，将 1 000 g 新鲜养心菜放入 0.5% NaCl (m/m) 溶液，沸腾漂烫 60 s，立即用流动水冷却至室温；

SB：1 000 g 新鲜养心菜蒸汽漂烫 60 s，立即用流动水冷却至室温；

FT：1 000 g 新鲜养心菜，-5 °C 冷冻 12 h 后室

温解冻。

1.3.2 干燥特性

采用等时称重的方法，采用多点取样进行称重。按 (1) 式^[14]进行计算养心菜的水分比 (Moisture Ratio, MR)：

$$A = \frac{M_t - M_e}{M_o - M_e} \quad (1)$$

式中：

A——养心菜的水分比，MR；

M_o、M_e、M_t——分别为初始、平衡和 t 时刻的干基含水率，g/g。

按 (2) 式进行计算干燥速率 (Drying Rate, DR)^[15]：

$$B = \frac{M_2 - M_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中：

B——干燥速率 (DR)，g/(g·h)；

t₁、t₂——干燥时间，h；

M₁、M₂——分别为 t₁、t₂ 时的干基含水率，g/g。

1.3.3 色泽的测定

采用色差计测定样品表面的色泽，测试采用国际标准 CIE-LAB 颜色系统，总色差 ΔE 计算公式如下^[16]：

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2} \quad (3)$$

式中：

ΔE——为干燥处理后和冷冻干燥养心菜的总色差；

L*、a*、b*——分别为干燥处理后养心菜粉的亮度值、红绿值、黄蓝值；

L₀、a₀、b₀——分别为真空冷冻干燥养心菜的亮度、红绿值和黄蓝值。

1.3.4 叶绿素含量的测定

参照 Xu 等^[12]的方法并稍修改。0.5 g 养心菜粉，加丙酮：乙醇 (1:1, V/V) 溶液 10 mL，避光 4 h 萃取成无色，定容后摇匀、过滤。取上清液，分别在 663 nm 和 645 nm 处测定吸光值，通过公式计算：

$$C_a = \frac{(12.77D_{663} - 2.59D_{645}) V}{W \times 1000}$$

$$C_b = \frac{(22.88D_{645} - 4.68D_{663}) V}{W \times 1000} \quad (4)$$

$$C_t = \frac{(8.02D_{663} + 20.29D_{645}) V}{W \times 1000}$$

式中:

C_a ——叶绿素 a 的含量, mg/g 干质量;

C_b ——叶绿素 b 的含量, mg/g 干质量;

C_t ——叶绿素的总量, mg/g 干质量;

V ——定容体积, mL;

W ——称样量。

1.3.5 Vc测定

采用 2,6-二氯酚靛酚滴定法^[17]。结果以每 100 g 干重养心菜粉 Vc 含量表示。

1.3.6 游离氨基酸的测定

采用氨基酸分析仪检测^[18]。取 0.2 g 养心菜粉, 加入 $\phi=75\%$ 的乙醇 20 mL, 在 70 °C 震荡提取 30 min, 10 000 r/min, 4 °C 离心 15 min, 收集上清, N₂ 吹干, 加入 0.2 mol/L 的柠檬酸钠缓冲液, 调整 pH 值至 2.2, 定容至 10 mL。过 0.22 μm 滤膜, 进行游离氨基酸分析, 结果以每 g 干重养心菜粉游离氨基酸含量表示。

1.3.7 提取液的制备

提取液用作总酚、总黄酮、抗氧化水平 DPPH (1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl)、ABTS (2,2-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulfphonate)、FRAP (Ferric Ion Reducing Antioxidant Power) 的测定。0.5 g 养心菜粉用 20 mL 含 0.1% HCl (V/V) 的 $\phi=60\%$ 乙醇超声提取, 工作频率 40 kHz, 温度 50 °C, 提取 10 min, 4 000 r/min 下离心 15 min, 收集上清液, 残渣继续萃取一次, 收集两种上清液, 定容, 4 °C 保存, 在 24 h 内进行分析。作为总酚、总黄酮、抗氧化水平的测定液。

1.3.8 总酚和总黄酮的测定

总酚采用 Folin-Ciocalteu 法^[19]。总黄酮按照 NaNO₂-AlCl₃-NaOH 法测定^[20]。

1.3.9 没食子酸、山萘酚和槲皮素的测定

样品前处理^[21]: 称取 1.00 g 样品, 加入 10 mL 甲醇 (色谱纯), 浸泡 1 h, 50 °C, 40 kHz 超声波萃取 30 min, 6 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 定容。吸取提取液 5 mL 放入 75 °C 水浴锅中, 蒸发即将结束时加入同等体积蒸馏水, -4 °C 保存 4 h, 离心 (5 000 r/min, 20 min), 取上清液蒸发 (95 °C) 水分, 蒸发结束后用甲醇溶解定容, 颜色较深或存在絮状物可重复操作, 过 0.45 μm 膜上样, 进行 HPLC 检测。

高效液相色谱测定: 参考梁泰刚等^[22]的方法并略做改进。C₁₈ 色谱柱, 检测波长 260 nm, 柱温 25 °C, 流动相为 1% (V/V) 的甲酸溶液 (A), 甲

醇 (B)。采用梯度洗脱程序, 洗脱程序为: 初始, 10% (V/V) B; 0~10 min, 50% (V/V) B; 10~30 min, 90% (V/V) B; 30~35 min, 90% (V/V) B; 35~37 min, 10% B; 37~57 min, 10% (V/V) B。流量为 0.8 mL/min, 进样体积为 15 μL 。结果分别以每 g 干质量重养心菜粉没食子酸、山萘酚和槲皮素含量表示。

1.3.10 抗氧化性能的测定

DPPH 测定: 根据 Liu 等^[23]的方法测量 DPPH 测定, 并稍作修改。280 μL DPPH 乙醇溶液 (65 $\mu\text{mol/L}$) 添加到 20 μL 样品中, 室温下避光反应 30 min, 用酶标仪在 517 nm 波长处测量吸光度, 空白以甲醇代替提取液。以抗坏血酸 (50~450 $\mu\text{mol/L}$) 浓度为自变量, 吸光度的差值为因变量, 制作标准曲线。干质量养心菜中自由基清除活性以毫摩尔抗坏血酸当量表示 ($\mu\text{mol/g}$)。

ABTS 测定^[19]: 200 μL ABTS 和 200 μL 氧化剂混合, 室温避光存放 16 h, 然后用 $\phi=80\%$ 乙醇稀释 55 倍得到 ABTS 工作液, 以 Trolox (0~0.75 mmol/L) 为抗氧化物总抗氧化能力为参照做标准曲线, 将样品稀释至标准曲线范围内, 10 μL 样品和 200 μL ABTS 工作液混合, 室温孵育 6 min, 酶标仪 734 nm 波长下测定吸光度。结果以每 g 干质量养心菜以毫摩尔 Trolox 当量表示 ($\mu\text{mol/g}$)。

FRAP 测定^[24]: 称取 0.078 g TPTZ 溶解于 40 mmol/L 盐酸配成 10 mmol/L TPTZ 溶液, 再将乙酸盐缓冲液 (300 mmol/L, pH 值 3.6)、TPTZ 溶液 (0 mmol/L)、FeCl₃·6H₂O (20 mmol/L) 按照 10:1:1 混合配成 ferric-TPTZ 溶液。取 20 μL 样品, 加入 280 μL ferric-TPTZ, 室温避光反应 30 min, 用酶标仪在 593 nm 下测量吸光度。用抗坏血酸 (0~600 $\mu\text{mol/L}$) 作为标准品制作标准曲线。FRAP 值以每 g 干质量养心菜中毫摩尔抗坏血酸当量表示 ($\mu\text{mol/g}$)。

1.4 统计分析

所有测定数据重复三次, 采用 SPSS 20.0 进行统计分析, 计算平均值和标准偏差, 结果以平均值 \pm 标准偏差表示, 并进行单因素方差分析, 采用 Duncan 进行事后差异性分析, 显著水平 P 为 0.05。Origin 2021 进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 干燥特性分析

水分比表示物料还有多少水分未被干燥除去,

同时还可以反映物料干燥速度的快慢^[25]。不同样品的水分比随时间的变化曲线如图1所示。从图中可以看出,预处理能够明显缩短干燥时间,以水分比到达0.1的时间进行比较,BWB HP、SB HP及FT HP分别比UT HP干燥时间减少75.00%、50.00%、12.50%。沸水漂烫、蒸汽漂烫预处理的热效应可以直接破坏细胞膜结构和细胞壁的半纤维素-纤维素网络,降低细胞间的黏附力,促进细胞分离,加速能量传递^[26],干燥时间缩短。冻融预处理通过冷冻和解冻两个过程,细胞受到低温和冰晶双重影响,细胞膜受到损伤,部分磷脂沉积,出现微孔,细胞间隙增加,为细胞内水向外扩散提供了通道^[12],因此干燥速度加快。Ramirez等^[27]采用漂烫、冻融等预处理苹果片后,热风干燥时间减少,但冻融处理的苹果片干燥速度更快。但Miao等^[28]得出乌饭树叶经不同预处理热风干燥后,沸水漂烫干燥时间少于冻融预处理,这和本试验趋势一致。不同原料、不同的结构、不同的成分,预处理对干燥时间的影响不同。

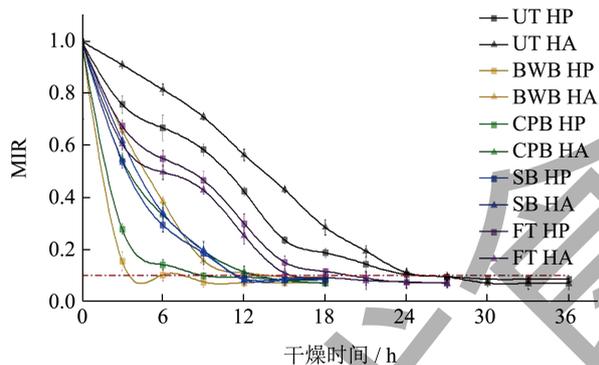


图1 不同预处理的养心菜在不同干燥方式下水分比变化曲线
Fig.1 Variation curve of moisture ratio of *Sedum aizoon* L. with different pretreatments and drying methods

注: UT HP: 未处理热泵干燥; UT HA: 未处理热风干燥; BWB HP: 沸水漂烫热泵干燥; BWB HA: 沸水漂烫热风干燥; CPB HP: 沸水+护色漂烫热泵干燥; CPB HA: 沸水+护色漂烫热风干燥; SB HP: 蒸汽漂烫热泵干燥; SB HA: 蒸汽漂烫热风干燥; FT HP: 冻融处理热泵干燥; FT HA: 冻融处理热风干燥。(下同)。

为了进一步比较养心菜的干燥特性,对其干燥速率进行计算,其结果如图2。由图可知,在干燥初始阶段,FT的HP和HA干燥速率相差不明显,除此之外,试验所有的处理(包括未处理),在初始阶段,HP干燥速率大于HA干燥速率,在中后期,HA干燥速率大于HP干燥速率。热泵干燥过程中,物料的水分迁移是由物料表面与循环空气/水蒸气之间的压差所致,压差越大,水分迁移速率越快。

因此高含水量的食品原材料可以通过热泵进行高效干燥^[29],热泵干燥后期由于物料表面与循环空气/水蒸气之间的压差变小,干燥效率降低,能耗升高^[30]。总体来看,当MR到达0.1时,BWB HP比BWB HA干燥时间减少60.00%,CPB HP比CPB HA干燥时间减少40.00%,其他没有明显差异。

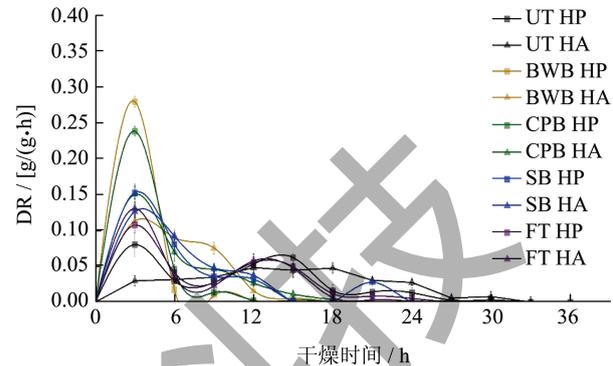


图2 不同预处理的养心菜在不同干燥方式下干燥速率曲线
Fig.2 Variation curve of drying rate of *Sedum aizoon* L. with different pretreatments and drying methods

2.2 色泽变化分析

不同预处理、干燥方式加工的养心菜色泽变化如图3,其色差值如表1。不同的预处理、干燥方式对养心菜粉的色泽有显著的影响($P < 0.05$)。在漂烫过程中,叶绿素形成脱镁叶绿素,颜色从亮绿变为橄榄绿^[31],如图3。 L^* 值在91.86~93.22之间变动, L^* 值代表了亮度,与表面水和其他物质的光散射强度有关^[32],不同处理的养心菜粉 L^* 值变动可能与其水分含量不同有关。 a^* 值,UT养心菜粉的值最低,经过预处理后 a^* 升高,从小到大依次为BWB、CPB、SB及FT;值得注意的是,UT HP和UT HA a^* 值差异不显著($P < 0.05$),但经过预处理后 a^* 值差异显著($P < 0.05$),统一的变化趋势是HP小于HA,特别是BWB、CPB、SB这三种预处理,即经过预处理后,HA的养心菜粉更红。UT HP和UT HA的 b^* 最高,经过预处理后, b^* 均有不同程度的降低,FT明显小于其它预处理;HP的 b^* 值显著大于HA($P < 0.05$),即HP的养心菜粉更黄。 b^* 值的差异可能与叶绿素的降解、非酶褐变和棕色色素的产生有关^[33]。VFD由于低温和低压的结合,使得产品的颜色得到很好的保存,试验将其作为对照,进行 ΔE 的计算。UT的养心菜,不论是HP还是HA,其 ΔE 最大;而经过预处理后,其 ΔE 有了显著的降低($P < 0.05$),其效果优劣次序为FT>SB>CPB>BWB。

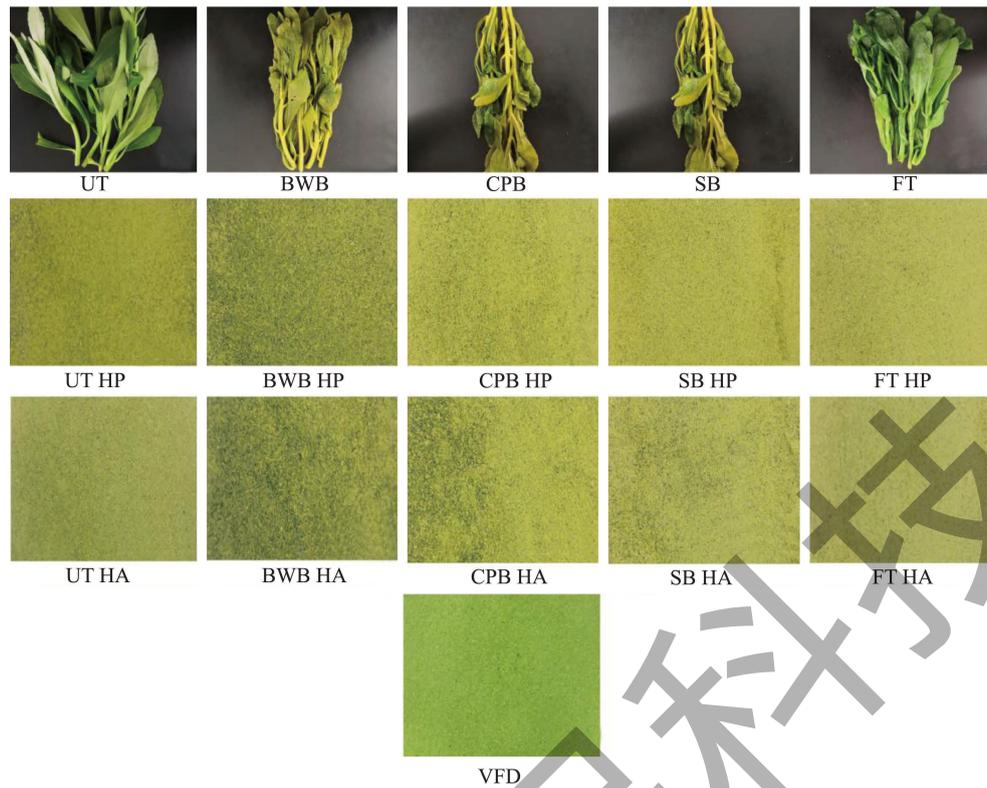


图 3 经过不同预处理后的养心菜

Fig.3 *Sedum aizoon* L. obtained by different pretreatments

注: UHP: 未处理; BWB: 沸水漂烫; CPB: 沸水+护色漂烫; SB 蒸汽漂烫; FT: 冻融处理。

表 1 不同预处理干燥方式养心菜色泽的影响

Table 1 Effects of different pretreatments and drying methods on the color of *Sedum aizoon* L.

指标	UT HP	UT HA	BWB HP	BWB HA	CPB HP	CPB HA
L^*	93.22 ± 0.12^a	93.22 ± 0.21^a	92.75 ± 0.06^b	91.86 ± 0.21^d	93.21 ± 0.18^a	93.23 ± 0.06^a
a^*	3.86 ± 0.41^f	3.36 ± 0.11^f	2.07 ± 0.08^c	3.78 ± 0.76^a	1.07 ± 0.32^d	0.68 ± 0.05^c
b^*	3.36 ± 0.01^a	2.73 ± 0.19^b	2.22 ± 0.34^c	1.16 ± 0.28^e	2.95 ± 0.14^b	0.76 ± 0.28^f
指标	SB HP	SB HA	FT HP	FT HA	VFD	
L^*	93.21 ± 0.01^a	91.97 ± 0.27^d	92.76 ± 0.21^b	92.44 ± 0.22^c	92.46 ± 0.31^c	
a^*	1.00 ± 0.23^d	3.52 ± 0.98^a	0.70 ± 0.08^c	1.96 ± 0.83^b	2.10 ± 0.92^b	
b^*	2.82 ± 0.09^b	1.03 ± 0.37^e	2.08 ± 0.01^c	1.48 ± 0.30^d	0.97 ± 0.31^e	

注: 同行不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

表 2 不同预处理干燥方式对养心菜叶绿素含量的影响 (mg/g)

Table 2 Effects of different pretreatments and drying methods on chlorophyll contents in *Sedum aizoon* L. (mg/g)

指标	UT HP	UT HA	BWB HP	BWB HA	CPB HB	CPB HA
C_a	1.33 ± 0.02^c	1.25 ± 0.04^{dc}	1.36 ± 0.02^{abc}	1.35 ± 0.03^{ab}	1.38 ± 0.01^{ab}	1.28 ± 0.01^d
C_b	0.26 ± 0.02^c	0.20 ± 0.01^e	0.16 ± 0.00^f	0.20 ± 0.00^e	0.22 ± 0.01^d	0.23 ± 0.00^d
C_t	1.53 ± 0.01^{fg}	1.53 ± 0.00^{fg}	1.53 ± 0.01^{fg}	1.54 ± 0.02^f	1.60 ± 0.00^c	1.51 ± 0.01^g
指标	SB HP	SB HA	FT HP	FT HA	VFD	
C_a	1.34 ± 0.01^c	1.24 ± 0.02^c	1.39 ± 0.01^a	1.35 ± 0.00^{bc}	1.37 ± 0.02^{abc}	
C_b	0.27 ± 0.10^c	0.23 ± 0.01^d	0.32 ± 0.00^b	0.23 ± 0.00^d	0.62 ± 0.01^a	
C_t	1.61 ± 0.02^c	1.57 ± 0.02^{dc}	1.70 ± 0.01^b	1.58 ± 0.00^d	1.99 ± 0.02^a	

2.3 叶绿素含量变化分析

为了进一步了解不同预处理、干燥方式对色泽的影响,对养心菜粉的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素进行了测定,结果见表2。相比较VFD,HP、HA的 C_a 、 C_b 以及 C_t 均减少,这表明HP、HA过程中, C_a 与 C_b 都会因为降解或转化为其它衍生物或异构体而损失^[31]。不同的预处理,总叶绿素含量从高到低依次为 $FT>SB>CPB>BWB>UT$ 。FT HP比UT HP总叶绿素高11.24%。HP的叶绿素含量高于HA,特别是经过HT后,HP比HA总叶绿素含量高8.07%。

2.4 Vc含量变化分析

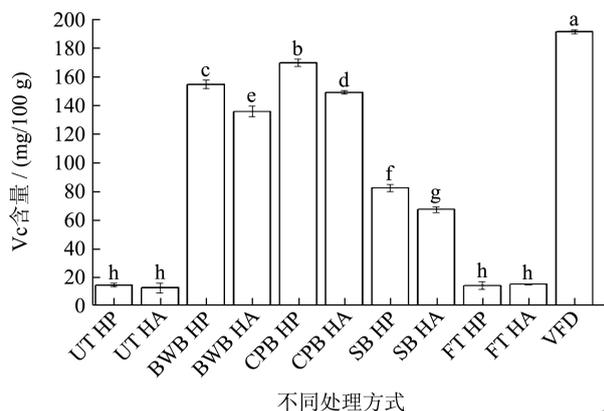


图4 不同预处理干燥方式对养心菜抗坏血酸含量的影响
Fig.4 Effects of different pretreatments and drying methods on ascorbic acid contents in *Sedum aizoon* L.

注:图中不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Vc作为一种重要的亲水性微量营养元素,其含量易受加工条件影响。不同预处理经过不同干燥方式加工的养心菜粉Vc含量如图4所示。Vc由于烯醇结构,具有较强的还原力,但同时其含量易受光、氧、温度、湿度影响而降解^[15]。Vc的保留效果优劣次序为 $CPB>BWB>SB>FT>UT$ 。UT养心菜,Vc损失最为严重,相比较VFD,平均损失率高达85.89%。Li等^[15]研究不同温度干燥秋葵时,也发现相对高的温度(60℃、70℃)Vc损失严重,相比较真空冷冻干燥,保留率平均为26.52%。FT养心菜,Vc损失率同样很大,和UT没有显著性差异($P<0.05$)。张哲等^[34]研究发现温度波动越大,娃娃菜、尖椒等Vc含量下降越快,这可能是UT HA和UT HP养心菜Vc大幅下降的主要原因之一。张功龄等^[35]研究发现在漂烫过程中,食盐的加入可利于Vc的保存,其原因可能是食盐破坏了蔬菜的酶及酶系统,减少了氧的量,从而保护Vc。HP对Vc的保留效果优于HA,这和Li等^[15]得出的热泵和热风干燥对秋葵中Vc的影

响结论一致。CPB HP的养心菜粉中Vc含量比CPB HA高25.06%,是UT HA的13.54倍。

2.5 游离氨基酸含量变化分析比较

不同预处理、干燥方式处理养心菜中游离氨基酸含量如表3所示。从样品中检测了17种氨基酸,其中蛋氨酸的含量最少,几乎为零,谷氨酸、天门冬氨酸相对较高。VFD的总游离氨基酸,显著高于除FT外的处理($P<0.05$)。FT相比较UT和其他预处理,总游离氨基酸含量有了显著提高($P<0.05$),比UT均提高了1.84倍,BWB、CPB总游离氨基酸的含量较低。HP游离氨基酸含量高于HA。真空冷冻干燥对游离氨基酸的影响,因原料的不同影响结果不同。真空冷冻干燥桑叶粉中的游离氨基酸含量低于微波和热泵干燥^[6],而热风干燥的枣花总游离氨基酸是真空冷冻干燥的49.74%^[36]。冻融处理造成游离氨基酸含量增高的原因可能是,植物采后面对冷冻、冷害等逆境,会促进氨基酸代谢,将其作为碳源,特别是谷氨酸、脯氨酸、精氨酸、天门冬氨酸等^[37]。漂烫处理会造成游离氨基酸流失,又通过加热干燥使游离氨基酸含量较低。加热一方面可以促进蛋白质分解,提高游离氨基酸的含量;另一方面,氨基酸可与还原糖发生美拉德,减少游离氨基酸的含量^[18],养心菜在加热干燥过程中游离氨基酸含量减少,可能是蛋白质水解释放的游离氨基酸量低于美拉德反应损失的量。这也可能是热泵干燥游离氨基酸高于热风干燥的原因。在热泵干燥过程中,养心菜的褐变程度低于热风干燥(表1, b^* 值)。

2.6 总黄酮和总酚含量分析比较

不同预处理、干燥方式处理对养心菜总酚含量的影响如图5所示。与VFD相比,HA、HP养心菜的总酚显著降低($P<0.05$),这与Xiong等^[9]得出的真空冷冻干燥秋葵中的总酚含量显著高于热风干燥的结论相似。BWB、CPB和SB样品,HP、HA后没有显著性差异($P<0.05$),但FT显著降低,Miao等^[28]采用不同预处理进行乌饭树叶干燥时得出了同样的结论。HP稍优于HA。不同干燥条件对酚类化合物的影响与多种因素有关,例如植物组织的结构,多酚的种类和位置,化学成分的热敏性,以及氧化酶的水平等,许多研究人员^[38]得出了不规则的变化规律。热风干燥可能会释放更多的结合酚类化合物,但也会降解热敏性酚类化合物^[39],热风干燥后的养心菜总酚降低,可能是加热对热敏性

酚类的降解作用更强。冻融使总酚含量偏低，可能是因为解冻过程中，造成了营养物质的损失^[40]，也可能是因为多酚氧化酶的酶活引起总酚含量降低^[41]。

预处理、干燥方式不同，养心菜中总黄酮含量

不同（图5）。和总酚类似，VFD养心菜中总黄酮最高。SB能够较高保持养心菜中总黄酮含量，文海朝等^[42]得出蒸汽漂烫桑叶中的黄酮显著高于其他预处理，合适的加热条件可以促进黄酮的产生。HP稍优于HA。

表3 不同预处理干燥方式养心菜中游离氨基酸的含量 (μg/g)

Table 3 The contents of free amino acid in different pretreatments and drying methods of *Sedum aizoon* L. (μg/g)

氨基酸种类	UTHP	UT HA	BWB HP	BWB HA	CPB HP	CPB HA
天门冬氨酸	1.09 ± 0.02 ^f	1.02 ± 0.01 ^g	1.32 ± 0.01 ^c	1.34 ± 0.02 ^{cd}	1.34 ± 0.02 ^{cdc}	1.32 ± 0.01 ^{dc}
苏氨酸	0.53 ± 0.01 ^g	0.48 ± 0.02 ^h	0.63 ± 0.01 ^f	0.63 ± 0.01 ^{ef}	0.68 ± 0.01 ^d	0.64 ± 0.02 ^{ef}
丝氨酸	0.53 ± 0.01 ^d	0.47 ± 0.01 ^e	0.61 ± 0.01 ^{cd}	0.63 ± 0.01 ^c	0.54 ± 0.02 ^d	0.52 ± 0.01 ^d
谷氨酸	1.28 ± 0.08 ^c	1.22 ± 0.02 ^c	1.55 ± 0.02 ^d	1.54 ± 0.02 ^d	1.91 ± 0.02 ^c	1.84 ± 0.04 ^c
甘氨酸	0.63 ± 0.03 ^d	0.55 ± 0.03 ^d	0.74 ± 0.05 ^c	0.76 ± 0.05 ^c	0.61 ± 0.10 ^d	0.60 ± 0.09 ^d
丙氨酸	0.81 ± 0.05 ^c	0.75 ± 0.03 ^c	0.97 ± 0.02 ^{cd}	0.98 ± 0.04 ^{cd}	0.92 ± 0.06 ^d	0.82 ± 0.04 ^c
胱氨酸	0.18 ± 0.03 ^f	0.10 ± 0.01 ^g	0.17 ± 0.02 ^f	0.28 ± 0.02 ^d	0.27 ± 0.02 ^d	0.23 ± 0.02 ^c
缬氨酸	0.86 ± 0.02 ^{dc}	0.64 ± 0.04 ^f	0.86 ± 0.03 ^{dc}	0.93 ± 0.03 ^c	0.94 ± 0.03 ^c	0.83 ± 0.03 ^c
蛋氨酸	0.00 ^{cd}	0.01 ^{cd}	0.01 ^{cd}	0.00 ^d	0.00 ^{cd}	0.00 ^d
异亮氨酸	0.69 ± 0.06 ^{fg}	0.64 ± 0.01 ^g	0.76 ± 0.04 ^c	0.77 ± 0.02 ^{de}	0.82 ± 0.04 ^{cd}	0.74 ± 0.03 ^{ef}
亮氨酸	1.05 ± 0.03 ^f	0.96 ± 0.02 ^g	1.27 ± 0.02 ^c	1.20 ± 0.02 ^{de}	1.27 ± 0.02 ^c	1.14 ± 0.02 ^c
酪氨酸	0.29 ± 0.03 ^{de}	0.27 ± 0.02 ^c	0.36 ± 0.03 ^c	0.34 ± 0.03 ^c	0.35 ± 0.05 ^c	0.34 ± 0.04 ^{cd}
苯丙氨酸	0.72 ± 0.03 ^f	0.83 ± 0.02 ^d	1.05 ± 0.04 ^c	0.73 ± 0.04 ^f	0.86 ± 0.05 ^d	0.75 ± 0.05 ^{ef}
赖氨酸	0.89 ± 0.03 ^c	0.85 ± 0.02 ^c	1.06 ± 0.03 ^{bc}	1.05 ± 0.02 ^{bc}	0.96 ± 0.09 ^c	0.94 ± 0.04 ^c
组氨酸	0.33 ± 0.03 ^{fg}	0.30 ± 0.03 ^g	0.37 ± 0.02 ^{ef}	0.38 ± 0.03 ^{de}	0.36 ± 0.04 ^{ef}	0.30 ± 0.01 ^g
精氨酸	0.47 ± 0.02 ^d	0.42 ± 0.01 ^d	0.56 ± 0.05 ^c	0.56 ± 0.03 ^c	0.56 ± 0.04 ^c	0.53 ± 0.03 ^c
脯氨酸	0.54 ± 0.01 ^d	0.41 ± 0.03 ^e	0.53 ± 0.03 ^d	0.53 ± 0.04 ^d	0.55 ± 0.03 ^d	0.53 ± 0.02 ^d
总和	10.91 ± 0.08 ^f	9.91 ± 0.14 ^g	12.83 ± 0.11 ^{cd}	12.66 ± 0.15 ^d	12.93 ± 0.12 ^{cd}	12.08 ± 0.04 ^c

氨基酸种类	SB HP	SB HA	FT HP	FT HA	VFD
天门冬氨酸	1.36 ± 0.01 ^c	1.31 ± 0.02 ^c	3.32 ± 0.02 ^a	3.26 ± 0.01 ^b	3.24 ± 0.02 ^b
苏氨酸	0.65 ± 0.01 ^c	0.64 ± 0.01 ^{ef}	1.09 ± 0.01 ^c	1.11 ± 0.01 ^b	1.21 ± 0.03 ^a
丝氨酸	0.62 ± 0.01 ^c	0.62 ± 0.01 ^c	1.57 ± 0.02 ^b	1.62 ± 0.01 ^a	1.61 ± 0.03 ^a
谷氨酸	1.57 ± 0.06 ^d	1.58 ± 0.02 ^d	5.91 ± 0.05 ^b	6.07 ± 0.22 ^a	5.98 ± 0.01 ^{ab}
甘氨酸	0.81 ± 0.07 ^c	0.77 ± 0.08 ^c	1.85 ± 0.05 ^a	1.78 ± 0.02 ^{ab}	1.74 ± 0.02 ^b
丙氨酸	1.04 ± 0.03 ^c	0.98 ± 0.05 ^{cd}	1.77 ± 0.08 ^a	1.64 ± 0.03 ^b	1.63 ± 0.02 ^b
胱氨酸	0.37 ± 0.03 ^{cd}	0.29 ± 0.01	0.43 ± 0.03 ^a	0.43 ± 0.02 ^a	0.26 ± 0.03 ^{dc}
缬氨酸	0.97 ± 0.02 ^c	0.91 ± 0.06 ^{cd}	1.71 ± 0.04 ^{ab}	1.65 ± 0.03 ^b	1.76 ± 0.04 ^a
蛋氨酸	0.01 ^{cd}	0.01	0.04 ± 0.01 ^{ab}	0.03 ± 0.01 ^b	0.05 ± 0.01 ^a
异亮氨酸	0.83 ± 0.03 ^c	0.82 ± 0.03 ^{cd}	1.30 ± 0.02 ^a	1.24 ± 0.03 ^b	1.23 ± 0.03 ^b
亮氨酸	1.25 ± 0.01 ^{cd}	1.34 ± 0.03 ^b	2.12 ± 0.05 ^a	2.10 ± 0.06 ^a	2.13 ± 0.04 ^a
酪氨酸	0.37 ± 0.02 ^c	0.32 ± 0.02 ^{cd}	0.62 ± 0.02 ^a	0.58 ± 0.02 ^a	0.51 ± 0.001 ^b
苯丙氨酸	0.85 ± 0.04 ^d	0.82 ± 0.04 ^{de}	1.70 ± 0.05 ^a	1.54 ± 0.04 ^b	1.60 ± 0.05 ^b
赖氨酸	1.09 ± 0.02 ^{bc}	1.08 ± 0.02 ^{bc}	1.57 ± 0.02 ^{ac}	1.33 ± 0.03 ^{abc}	1.01 ± 0.06 ^b
组氨酸	0.43 ± 0.03 ^d	0.36 ± 0.04 ^{ef}	0.83 ± 0.02 ^a	0.76 ± 0.01 ^b	0.52 ± 0.03 ^c
精氨酸	0.57 ± 0.02 ^c	2.25 ± 0.03 ^c	2.15 ± 0.01 ^a	2.16 ± 0.01 ^b	2.17 ± 0.03 ^b
脯氨酸	0.52 ± 0.04 ^d	0.54 ± 0.02 ^d	1.92 ± 0.02 ^b	1.74 ± 0.02 ^c	2.17 ± 0.04 ^a
总和	13.26 ± 0.00 ^c	12.96 ± 0.00 ^{cd}	30.01 ± 0.11 ^a	29.03 ± 0.08 ^b	28.80 ± 0.75 ^b

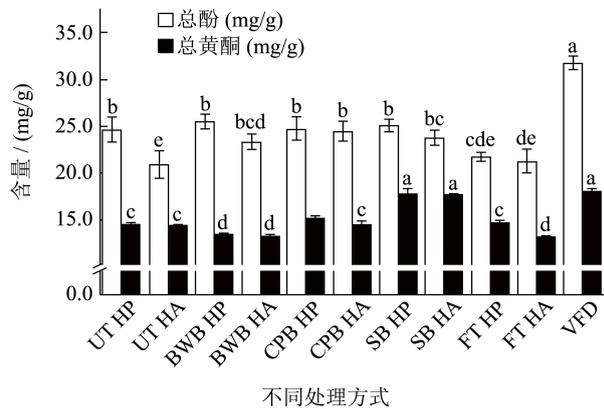


图5 不同预处理干燥方式对养心菜总黄酮和总酚含量的影响

Fig.5 Effects of different pretreatments and drying methods on the contents of total phenols and total flavonoids in *Sedum aizoon L.*

2.7 没食子酸、山萘酚和槲皮素含量分析比较

没食子酸、山萘酚和槲皮素为养心菜中酚类代表化合物，其对心脑血管系统疾病有很好的防治作用，是养心菜的主要功能性成分^[22]。不同预处理、干燥方式对养心菜的没食子酸、山萘酚和槲皮素有不同的影响（图6）。没食子酸是次生代谢产物中含有羧基官能团的芳香族酚酸^[43]，VFD含量最少，UT HP、UT HA含量最多，FTHP、FTHA含量其次，HA优于HP。周子丹等^[21]发现热风干燥的油菜花粉没食子酸含量显著高于真空冷冻干燥；Coklar等^[40]发现山楂中表儿茶素在烘干样品中的含量低于真空冷冻干燥，而没食子酸含量却高于真空冷冻干燥。Romelle等^[38]在新鲜的芒果皮中没有检测到没食子酸，但在微波漂烫的芒果皮中检测到，且随着微波漂烫的时间延长而增加。加热处理会导致共轭形式的没食子酸从其酯化等结合形态中解离为游离酚酸类化合物，从而使其含量增加^[44]。FTHP、FTHA含量显著高于其他预处理，可能是养心菜面对冷冻等逆境时，促进没食子酸等抗氧化剂的代谢，来减轻氧化对自身的伤害，也有可能是通过冻融对细胞的破坏，促进了没食子酸的溶出。山萘酚和槲皮素属于黄酮醇类，是黄酮类化合物中的一种独特化合物。对于山萘酚，和没食子酸一样，UT HP、UT HA含量最多，但FT HP、UT HA含量却最少，HP稍优于HA。槲皮素，SB HP、SB HA最多；而FT HP、UT HA中槲皮素，同山萘酚一样，最少；HP明显优于HA。

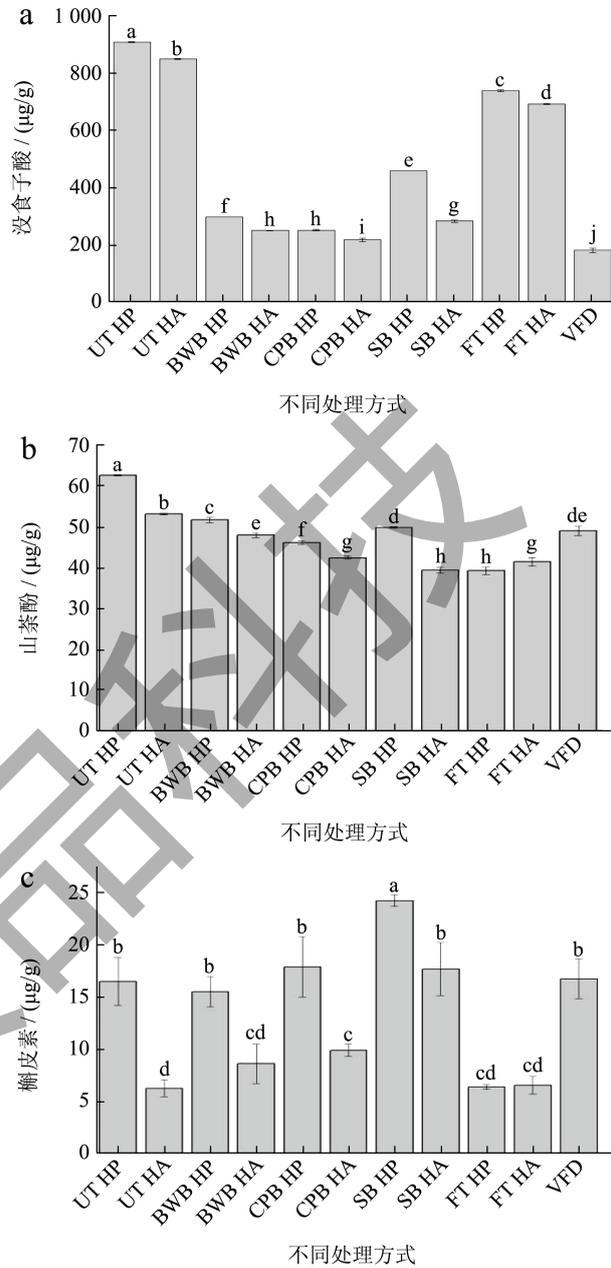


图6 不同处理方式养心菜中没食子酸(a)、山萘酚(b)和槲皮素(c)的含量

Fig.6 The contents of gallic acid (a), kaempferol (b) and quercetin (c) in various phenolic compounds in the different treatments of *Sedum aizoon L.*

2.8 不同处理方式的养心菜粉抗氧化能力分析

通过测定DPPH、ABTS、FRAR反映养心菜在不同预处理、不同干燥方式下的抗氧化能力，其结果如图7。VFD不论是DPPH、ABTS还是FRAR均最高，表明其抗氧化能力最强，这和前面的Vc、总多酚和总黄酮含量高具有一致性。UT HP、UT HA和CPB HP、CPB HA的DPPH仅次于VFD，

特别是 UT HP 和 CPB HP, 和 VFD 没有显著性差异 ($P < 0.05$), 这和 Takuya 等^[45]研究的在相对低得温度 ($\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下干燥, DPPH 水平和冷冻干燥的桑叶之间没有显著差异 ($P < 0.05$) 的结果一致; 不同预处理, 不同干燥方式是之间的 ABTS、FRAR 差异不明显, 但还是可以看出 CPB HP、CPB HA 要稍优于其他处理, FT HP、FT HA 稍逊于其他处理, HP 优于 HA。NaCl 的添加会影响蔬菜的抗氧化能力, 5% 的 NaCl 溶液漂烫可以使积雪草的 DPPH 降低, 但可以使睡莲叶提高 7%, 这可能是由于不同的组织基质或化合物结构造成的^[46]。

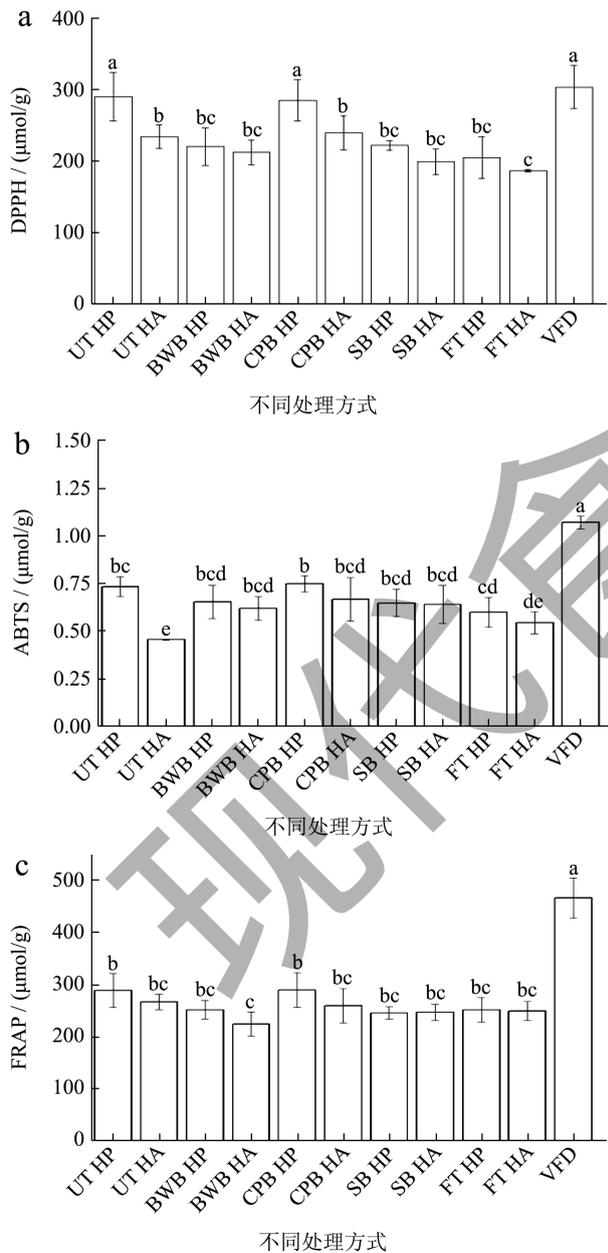


图 7 不同预处理干燥方式养心菜抗氧化能力分析
Fig.7 Antioxidant ability analysis of different pretreatments and drying methods of *Sedum aizoon* L.

2.9 主成分分析

基于色差、叶绿素、Vc、总酚、总黄酮、没食子酸、山萘酚、槲皮素以及抗氧化水平, 对不同预处理、不同干燥方式进行主成分分析, 其得分图和荷载图如图 8 所示。第一主成分和第二主成分累积方差贡献率为 70.7%。从不同的预处理来看, UT 和 FT 分别位于第二、三象限, 且和其他预处理有明显的区分, BWB、CPB 和 SB 具有一定的聚集性; 从不同的干燥方式来看, BWBHP、CPB HP、SB HP 在对应的 BWBHA、CPB HA、SB HA 的右上, FT HP 在 FT HP 右边, 均有明显区分。总体来看, UT HP 和 UT HA 位于第二象限, 没食子酸和山萘酚含量较高, 但色泽和其他品质指标最差; FT HP 和 FT HA 位于第三象限, 拥有较好的色泽、较高的游离氨基酸; SB HP 和 CPB HP 位于第一象限, 拥有较高的叶绿素、Vc、总酚、总黄酮含量和较高的抗氧化水平。

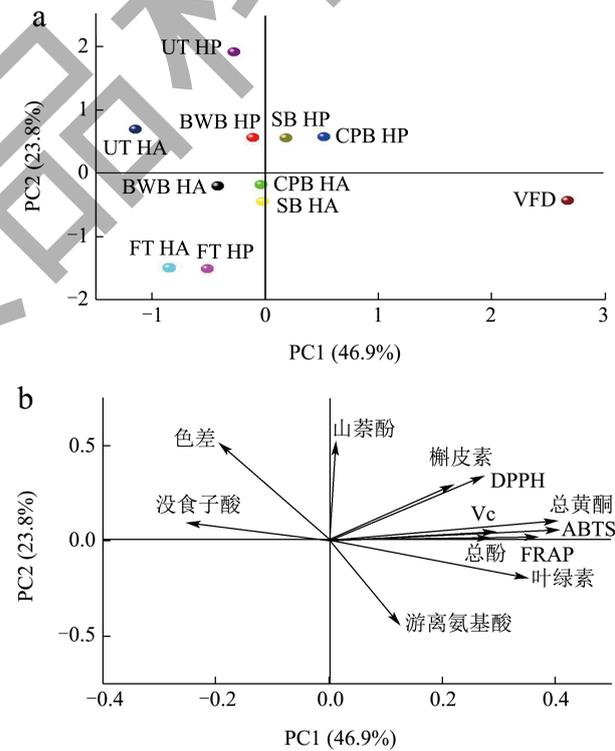


图 8 不同预处理、不同干燥方式的 PCA 得分图 (a) 和荷载图 (b)

Fig.8 PCA score plot (a) and loading plot (b) of *Sedum aizoon* L. treated by different pretreatments and drying methods

3 结论

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变化明显。预处理后进行 HP 或 HA, 可以缩短养心菜的干燥时间, HP 总体上优

于 HA。UT HP 没食子酸和山萘酚含量最高,但色泽差、叶绿素含量较低,干燥时间长;CPB HP 的干燥时间短,Vc 含量最高,具有较高的抗氧化水平,但没食子酸含量较低;SB HP 总酚、总黄酮、槲皮素含量最高,其他品质指标介于中间;FT HP 养心菜具有最好的色泽、最高的叶绿素、游离氨基酸含量,但总酚、总黄酮、槲皮素、山萘酚以及抗氧化水平低。从主成分分析来看,BWB HP、CPB HP、SB HP 和 BWB HA、CPB HA、SB HA 的养心菜品质分别具有一定的相似性,UT HP、FT HP、UT HA、UT HA 和其有明显差异。本文综合比较了养心菜不同预处理及干燥方法的优劣,在养心菜下游的功能型食品的开发过程中,可以根据需求选择合适的干燥方法。

参考文献

- [1] XIONG Y, YI P, DU C X, et al. A new adduct of iriflophenone and flavonoid from *Sedum aizoon* L. [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2020, 92: 104119.
- [2] QI X, LU X T, SUN X H, et al. The regulatory effect of total flavonoids of *Sedum aizoon* L. on oxidative stress in type 1 diabetic mice [J]. *Current Research in Food Science*, 2022, 5: 1140-1147.
- [3] 刘扬,李欣欣,张玉洁.养心菜漂烫工艺的研究[J].*食品工业科技*,2015,36(12):216-220.
- [4] 孙庆运,张宗超,贾振超,等.预处理方式及干燥温度对养心菜热风干燥特性与品质的影响[J].*食品工业科技*, 2021,42(13):210-215.
- [5] ONWUDE D I, HASHIM N, CHEN G. Recent advances of novel thermal combined hot air drying of agricultural crops [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 57: 132-145.
- [6] 盛金凤,陈坤,王雪峰,等.不同干燥方式桑叶粉物理特性、氨基酸及挥发性成分分析[J].*食品工业科技*,2022, 43(9):108-118.
- [7] DENG Y, LUO Y, WANG Y, et al. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets [J]. *Food Chemistry*, 2015, 171: 168-176.
- [8] AKTAS M, KHANLARI A, AMINI A, et al. Performance analysis of heat pump and infrared-heat pump drying of grated carrot using energy-exergy methodology [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 132: 327-338.
- [9] XIONG X, CAO X, ZENG Q, et al. Effects of heat pump drying and superfine grinding on the composition of bound phenolics, morphology and microstructure of lychee juice by-products [J]. *Food Science and Technology*, 2021, 144: 111206.
- [10] CHAO E, LI J, FAN L. Enhancing drying efficiency and quality of seed-used pumpkin using ultrasound, freeze-thawing and blanching pretreatments [J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132496.
- [11] DEBC S, COONEY J, BREWSTER D, et al. The effects of blanching on composition and modification of proteins in navy beans (*Phaseolus vulgaris*) [J]. *Food Chemistry*, 2021, 346: 128950.
- [12] XU X, ZHANG L, FENG Y, et al. Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) moench) and the quality characteristics of the dried product [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105300.
- [13] 卢琪,薛淑静,杨德,等.不同干燥条件下福白菊花茶风味品质的比较分析[J].*食品科学*,2020,41(20):249-255.
- [14] ANDO Y, HAGIWARA S, NABETANI H, et al. Effects of prefreezing on the drying characteristics, structural formation and mechanical properties of microwave-vacuum dried apple [J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 244: 170-177.
- [15] LI H, XIE L, MA Y, et al. Effects of drying methods on drying characteristics, physicochemical properties and antioxidant capacity of okra [J]. *Food Science and Technology*, 2019, 101: 630-638.
- [16] ZHANG X, YI W, LIU G, et al. Colour and chlorophyll level modelling in vacuum-precooled green beans during storage [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 301: 110523.
- [17] DING F, WANG R. Amelioration of postharvest chilling stress by trehalose in pepper [J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 232: 52-56.
- [18] YANG R L, LI Q, HU Q P. Physicochemical properties, microstructures, nutritional components, and free amino acids of *Pleurotus eryngii* as affected by different drying methods [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 121.
- [19] WANG Q, REHMAN M, PENG D, et al. Antioxidant capacity and α -glucosidase inhibitory activity of leaf extracts from ten ramie cultivars [J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 122: 430-437.
- [20] FENG Y, XU B, 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.
- [21] 周子丹,彭文君,倪家宝,等.不同干燥方式对油菜蜂花粉色泽、酚酸含量和抗氧化活性的影响[J].*食品科学*, 2021,42(17):76-83.
- [22] 梁泰刚,刘伟,赵承孝,等.HPLC法同时测定养心草中没食子酸、槲皮素和山萘酚的含量[J].*光谱实验室*,2009, 26(4):881-884.
- [23] LIU T, WANG Y, YU X, et al. Effects of freeze-drying and

- spray-drying on the physical and chemical properties of perineis aibuhitensis hydrolysates: sensory characteristics and antioxidant activities [J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132317.
- [24] TIAN X, LIU Y, FENG X, et al. The effects of alcohol fermentation on the extraction of antioxidant compounds and flavonoids of pomelo peel [J]. Food Science and Technology, 2018, 89: 763-769.
- [25] 何新益,郭婷,邓放明,等.冻融处理对甘薯变温压差膨化干燥动力学的影响[J].中国粮油学报,2016,31(5):32-37.
- [26] WANG H, KARIM M, VIDYARTHI S, et al. Vacuum-steam pulsed blanching softens texture and enhances drying rate of carrot by altering cellular structure, pectin polysaccharides and water state [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 74: 102801.
- [27] RAMÍREZ C, TRONCOSO E, MUÑOZ J, et al. Microstructure analysis on pre-treated apple slices and its effect on water release during air drying [J]. Journal of Food Engineering, 2011, 106(3): 253-261.
- [28] MIAO X, TAO Y, SHI Y, et al. Effects of freezing and thermal pretreatments on drying of vaccinium bracteatum thunb leaves: drying mechanism, physicochemical properties and ability to dye glutinous rices [J]. Food and Bioproducts Processing, 2020, 122: 1-12.
- [29] CHUA K J, CHOU S K, HO J C, et al. Heat pump drying: recent developments and future trends [J]. Drying Technology, 2002, 20(8): 1579-1610.
- [30] 刘静,吴小恬,赵亚,等.果蔬热泵联合干燥技术的研究进展[J].中国果菜,2022,42(1):8-15.
- [31] KAO T H, CHEN C J, CHEN B H. An improved high performance liquid chromatography-photodiode array detection-atmospheric pressure chemical ionization-mass spectrometry method for determination of chlorophylls and their derivatives in freeze-dried and hot-air-dried *Rhinacanthus nasutus* (L.) kurz [J]. Talanta, 2011, 86: 349-355.
- [32] LI J, GONG Y, LI J, et al. Stir-frying treatment improves the color, flavor, and polyphenol composition of *Flos sophorae immaturus* tea [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 116: 105045.
- [33] LAKSHMI D, MUTHUKUMAR P, NAYAK PK. Experimental investigations on active solar dryers integrated with thermal storage for drying of black pepper [J]. Renewable Energy, 2021, 167: 728-739.
- [34] 张哲,李立民,田津津,等.冷藏车温度场不均匀度对蔬菜保鲜效果的影响[J].农业工程学,2014,30(15):309-316.
- [35] 赵功玲,梁新红,孔瑾.烫漂对菠菜和苋菜中草酸和Vc的影响[J].食品工业科技,2010,31(1):367-368,401.
- [36] 赵金梅,孙蕊,巩丽莉,等.干燥方式对沙枣花品质和挥发性风味成分的影响[J].食品科学,2020,41(22):265-270.
- [37] LIU D, XU C, GUO C, et al. Sub-zero temperature preservation of fruits and vegetables: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 275: 109881.
- [38] LIU X, YAN X, BI J, et al. Identification of phenolic compounds and antioxidant activity of guava dehydrated by different drying methods [J]. Drying Technology, 2020, 38(8): 987-1000.
- [39] HACER C, MEHMET A, SEMIH K, et al. Effect of freeze, oven and microwave pretreated oven drying on color, browning index, phenolic compounds and antioxidant activity of hawthorn (*Crataegus orientalis*) fruit [J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2018, 46(2): 449-456.
- [40] DENG L, MUJUMDAR A S, ZHANG Q, et al. Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: effects on drying characteristics and quality attributes-a comprehensive review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 59: 1408-1432.
- [41] CELLI G B, GHANEM A, BROOKS M S. Influence of freezing process and frozen storage on the quality of fruits and fruit products [J]. Food Reviews International, 2015, 32: 280-304.
- [42] 文海朝,张溪芸,李红姣.基于主成分分析法对不同杀青方式桑叶品质影响的综合评价[J].蚕业科学,2022, 48(3):247-260.
- [43] LIU Z, XIE L, ZIELINSKA M, et al. Pulsed vacuum drying enhances drying of blueberry by altering micro-, ultrastructure and water status and distribution [J]. Food Science and Technology, 2021, 142: 111013.
- [44] BENLLOCHT M, IGUAL M, RODRIGO D, et al. Comparison of microwaves and conventional thermal treatment on enzymes activity and antioxidant capacity of kiwifruit puree [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 19: 166-172.
- [45] KATSUBE T, TSURUNAGA Y, SUGIYAMA M, et al. Effect of air-drying temperature on antioxidant capacity and stability of polyphenolic compounds in mulberry (*Morus alba* L.) leaves [J]. Food Chemistry, 2009, 113: 964-969.
- [46] SINGH S, SWAIN S, SINGH D, et al. Changes in phytochemicals, anti-nutrients and antioxidant activity in leafy vegetables by microwave boiling with normal and 5% NaCl solution [J]. Food Chemistry, 2015, 176: 244-253.