DOI:10.12441/spyswjs.20250213001 [文章编号] 1673-1689(2025)06-0030-12

蒸制-干燥循环加工对黄精品质变化的影响及其机理研究

于子聪 范柳萍*

(江南大学食品学院,江苏 无锡 214122)

摘要:【目的】研究蒸制-干燥循环加工对黄精品质变化的影响规律,优化黄精加工工艺,提升其应用价值。【方法】制备经0~5次蒸制-干燥循环加工的黄精切片,分析每次循环蒸制后干燥阶段的干燥速率及干燥动力学,并进行干燥模型拟合;测定每次蒸制-干燥循环后黄精切片的色差、表观、硬度以及多糖、还原糖、多酚、黄酮、皂苷和草酸钙质量分数的变化。【结果】蒸制-干燥循环加工次数显著影响黄精品质。干燥速率随干燥时间增加而减小,符合Modified Page干燥模型,水分活度降低。随着蒸制-干燥循环次数的增加,样品微观孔壁结构被破坏,活性物质释放显著,C4组相较C0组的皂苷、黄酮、多酚质量分数分别增长161.28%、67.15%、417.93%。非酶褐变反应导致色差值增加,草酸钙针晶质量分数显著降低,减少了食用刺激性。多糖在加工过程中有损失,但C4组与C5组相比,多糖保留率提高了5.15%,硬度降低了141.63%。【结论】蒸制-干燥循环加工对黄精品质具有显著改善作用,四蒸四制方法在活性物质释放、多糖保存及硬度控制方面表现优异,具有广阔的应用前景。

关键词:黄精加工;蒸制-干燥循环加工;品质变化;干燥特性

Mechanisms of the Quality Changes of *Polygonati rhizoma* Processed by Steaming-drying Cycles

YU Zicong *FAN Liuping**

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

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the effects of steaming-drying cycles on the quality changes of *Polygonati rhizoma* and optimize the processing technology to enhance its application value. [**Method**] Slices of *Polygonati rhizoma* processed by 0~5 steaming-drying cycles were prepared. The drying rate and drying kinetics during the drying stage after each cycle were analyzed, and a drying model was fitted. Changes in color difference, appearance, hardness, and mass fractions of polysaccharides, reducing sugars, polyphenols, flavonoids, saponins, and calcium oxalate raphides were measured. [**Result**] The number of steaming-drying cycles significantly affected the quality of *Polygonati rhizoma*. The drying rate decreased as the drying time increased, conforming to the Modified Page model, while the water activity reduced. As the number of steaming-drying cycles increased, the sample microstructure was disrupted, which promoted the release of active substances. The mass fractions of saponins, flavonoids, and polyphenols in the C4 group increased by 161.28%, 67.15%, and 417.93%, respectively, compared with those in the C0 group. Non-enzymatic browning reactions led to increased color difference and significantly decreased mass fraction of calcium oxalate raphides, which

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2100801)

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:2025-02-13 **修回日期:**2025-03-24

reduced oral irritation. Although the mass fraction of polysaccharides declined during processing, the C4 group exhibited 5.15% higher polysaccharide retention rate and 141.63% lower hardness than the C5 group. [**Conclusion**] The processing with steaming-drying cycles significantly improves the quality of *Polygonati rhizoma*. The processing method of four steaming-drying cycles demonstrates outstanding performance in releasing active substances, preserving polysaccharides, and controlling hardness, showing broad application prospects.

Keywords: *Polygonati rhizoma* processing; processing with steaming-drying cycles; quality change; drying characteristic

黄精属（*Polygonatum*）植物在中国有两千多年的食用和药用历史。黄精具有补气养阴、健脾、润肺、益肾等功效。现代药理学研究表明，黄精的主要功效成分包括多糖、皂苷、黄酮，此外还含有多酚、生物碱及多种机体必需的氨基酸和微量元素[1]。黄精根茎具有调节血糖、抗炎[2]、抗氧化[3]、免疫调节等保健功效，在食品行业中备受瞩目。然而，新鲜多花黄精根茎因具有草酸钙这一成分导致麻舌性且活性物质质量分数低，难以直接用于食品加工。

炮制是许多中药材重要的处理方式，蒸制-干燥循环处理是最常用的方法，具体操作是将中药整根或切片蒸制，之后晾晒或烘干作为一次循环，如此循环数次，这种方法常用于黄精等富含黏液、碳水化合物的中药[4]，其目的在于将中药中有毒或刺激性成分消除或转化，保障食用安全性，同时富集活性成分，提升营养价值。蒸制是以气态水蒸气为介质加热，逐渐将热量从表面传递到内部的过程。Ai等[5]研究发现，蒸制增加了肉苁蓉可溶性糖质量分数，降低了多糖质量分数，蒸制程度显著影响了后续干燥过程。Wu等[6]研究了蒸制后干燥处理对天麻活性成分及抗氧化活性的影响，结果表明蒸制对总酚、总黄酮等质量分数均有不利影响，而后续的热风和冷冻干燥则表现出补偿效应。采取单一蒸制-干燥加工对黄精等食药同源中药的研究较多，而综合多次蒸制-干燥循环加工进行干燥的特性及品质变化的研究较少。

作者对不同蒸制-干燥循环加工次数的黄精切片品质变化规律进行了探讨，进行了干燥特性分析、理化指标及营养成分分析，以数字化形式描述了不同蒸制循环加工过程中的黄精品质变化情况，为黄精后续的炮制加工优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

黄精：产自四川九华山，洗净其表面土壤和污垢；薯蓣皂苷元：纯度≥98%，上海源叶生物科技有限公司；甲醇、乙腈、葡萄糖、芦丁、没食子酸、福林酚：分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

热风循环干燥箱：FD23型，德国Binder公司；冷冻干燥机：FreeZone型，美国Labconco公司；台式冷冻离心机：Velocity14型，英国Dynamica公司；物性分析仪：TA-XT. Plus型，英国SMS公司；旋转蒸发仪：RV 3 V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。

1.3 实验方法

1.3.1 蒸制-干燥循环加工黄精制备

首先将鲜黄精洗净，切成3 mm的切片。黄精切片1次蒸制-干燥循环的操作方法为：置于蒸锅蒸制4 h，之后于50 ℃热风干燥6 h。如此重复循环1~5次，分别收集1~5次循环制得的黄精切片，记为C1~C5。鲜黄精洗净，切成3 mm的切片，不经蒸制，直接于50 ℃热风干燥6 h的样品记为C0。C0~C5组样品粉碎过50目筛，用于测定其品质的变化。

1.3.2 干燥特性测定

烘箱设置为50 ℃、相对湿度6%、风速3 m/s，将蒸制后的黄精切片均匀放置在托盘上，恒质量干燥。在开始干燥之前，打开烘箱30 min预热，以达到规定的条件。

1）水分质量分数测定：水分质量分数测定参照式（1）计算。

$$M_r=\frac{M_t-M_e}{M_0-M_e}\approx\frac{M_t}{M_0} \quad (1)$$

式中：

M_r——水分质量分数；

M_t——每个蒸制-干燥循环中，黄精切片经蒸制后干燥时间t时的水分质量分数，g/g；

M_0——每个蒸制-干燥循环中，黄精切片蒸制结束后未干燥的水分质量分数，g/g；

M_e——每个蒸制-干燥循环中，黄精切片经蒸制后干燥的平衡水分质量分数，g/g。

由于M_e与M_t、M_e与M_0之间的差异相对较小，为简化起见，在计算中可以忽略不计。

2）干燥速率测定：干燥速率测定参照式(2)计算。

$$D_r = \frac{M_t - M_{t+\Delta T}}{\Delta T} \quad (2)$$

式中：

D_r——干燥速率，g/(g·h)；

M_t——每个蒸制-干燥循环中，黄精切片经蒸制后干燥时间t时的水分质量分数，g/g；

$M_{t+\Delta T}$——每个蒸制干燥循环中，黄精切片经蒸制后干燥时间($t+\Delta T$)时的水分质量分数，g/g；

ΔT——2次取样之间的时间间隔，h。

3）有效水分扩散系数计算：水分质量分数计算公式可描述为费克第二扩散定律，见式(3)。

$$M_r = \frac{M_t}{M_0} \approx \frac{8}{\pi^2}\exp(\frac{\pi^2 D_{eff}}{L_0^2}t) \quad (3)$$

式中：

M_r——水分质量分数；

D_{eff}——有效水分扩散系数，$\times 10^{-6}$ m^2/h；

t——干燥时间，h；

L_0——黄精切片的厚度，mm。

式(3)进一步简化，取两边的自然对数，见公式(4)。

$$\ln M_r = \ln(\frac{8}{\pi^2}\exp(\frac{\pi^2 D_{eff}}{L_0^2}t)) = \ln(\frac{8}{\pi^2}) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{L_0^2}t \quad (4)$$

式中：

M_r——水分质量分数；

D_{eff}——有效水分扩散系数，$\times 10^{-6}$ m^2/h；

t——干燥时间，h；

L_0——黄精切片的厚度，mm。

式(4)表明水分质量分数的对数与干燥时间t成线性关系，ln M_r-t图像斜率大小可表示为($-\frac{\pi^2 D_{eff}}{L_0^2}$)，则根据式(5)推导$D_{eff}$。

$$D_{eff} = -\frac{L_0^2}{\pi^2}k \quad (5)$$

式中：

D_{eff}——有效水分扩散系数，$\times 10^{-6}$ m^2/h；

L_0——黄精切片的厚度，mm；

k——ln M_r-t图像的斜率。

4）干燥动力学模型：参照An等[7]采用的方法并稍加修改。根据干燥试验的结果，建立了数学模型来描述黄精切片干燥过程中的水分损失模式。选择了7个常用的干燥动力学数学模型来拟合试验数据，见表1。

表1 薄层干燥数学模型信息

Table 1 Information of thin layer drying mathematical models

编号	模型名称	模型方程	参数
1	Lewis	M_r=exp(−kt)	k
2	Page	M_r=exp(−kt^n)	k,n
3	Modified Page	M_r=αexp[−kt^n]	α,k,n
4	Overhults	M_r=exp(−(kt)^n)	k,n
5	Henderson and Pabis	M_r=αexp(−kt)	α,k
6	Logarithmic	M_r=αexp(−kt)+c	α,k,c

数学模型的拟合度以决定系数(R^2)、均方根误差(R_{MSE})作为评价指标。R^2值越大，R_{MSE}值越小，表示拟合程度越高。R^2值与R_{MSE}值计算公式分别按照式(6)~(7)计算。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(M'_{r\,i,pre} - M'_{r\,i,exp})^2}{\sum_{i=1}^{n}(M'_{r\,i,pre} - M'_{r\,i,pre})^2} \quad (6)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(M'_{r\,i,pre} - M'_{r\,i,exp})^2}{N}} \quad (7)$$

式中：

R^2——决定系数；

R_{MSE}——均方根误差；

$M'_{r\,i,exp}$——在干燥时间为i时黄精切片实际水分质量分数；

$M'_{r\,i,pre}$——在干燥时间为i时预测黄精切片水分质量分数；

N——试验数据集的数量。

5）水分状态和水分分布测定：制取每一循环蒸制后干燥时间为0~210 min的黄精切片，采用低场核磁共振(LF-NMR)分析仪测量黄精切片的水分状态和水分分布，该设备的共振频率为23.3 MHz，设定其检测温度为32 ℃。每次测定取相同质量黄精切片置于直径为25 mm的核磁线圈中，采用脉冲回波序列(CPMG)采集衰减信号，操作参数如下：

S_w = 100 kHz，S_f = 21 MHz，R_{fd} = 0.080 ms、R_{g1} = 20.0 dB，P_1 = 7.52 μs、D_{grl} = 3、T_d = 299 992 ms、P_{rg} = 1，T_w = 2 500 ms，T_e = 0.3 ms，N_{ech} = 10 000，扫描次数为2次。采用核磁共振分析软件Carr-Purcell-Meiboom-Gill（CPMG）序列分析样品横向弛豫时间（T_2）和相对峰面积（A_2）。

1.3.3　色差测定

将粉碎后的黄精粉末放入透明自封袋中，用色差仪测量色泽变化。用CIE-$L^*a^*b^*$系统表示，其中L^*值代表亮度值，a^*值代表绿色/红色值，b^*值代表蓝色/黄色值，ΔE代表样品总色差，ΔE越大表明样品颜色变化越大。按照式（8）计算ΔE。

$$\Delta E=\sqrt{(L^*-L_0^*)^2+(a^*-a_0^*)^2+(b^*-b_0^*)^2} \quad (8)$$

式中：

ΔE——总色差；

L^*——黄精在蒸制-干燥循环加工后的亮度；

L_0^*——黄精在未蒸制-干燥循环加工时的亮度；

a^*——黄精在蒸制-干燥循环加工后的绿色/红色值；

a_0^*——黄精在未蒸制-干燥循环加工时的绿色/红色值；

b^*——黄精在蒸制-干燥循环加工后的蓝色/黄色值；

b_0^*——黄精在未蒸制-干燥循环加工时的蓝色/黄色值。

1.3.4　多糖质量分数测定

参照曹雨欣等[8]的方法并稍加修改。准确称取0.5 g黄精粉末置于100 mL锥形瓶中，用30 mL蒸馏水在80 ℃下搅拌提取1 h，于5 000 r/min下离心10 min，收集上清液，重复提取3次。将上清液旋蒸浓缩，加入浓缩液3倍体积的无水乙醇，沉淀12 h后离心，收集沉淀，冷冻干燥后获得粗多糖，将粗多糖加蒸馏水定容至100 mL，得到黄精多糖提取液。测定方法采用苯酚-硫酸法。以无水葡萄糖质量浓度为横坐标、吸光值为纵坐标建立标准曲线。按照以上方法测定样品吸光度，并通过标准曲线计算黄精中多糖的质量分数。

1.3.5　还原糖质量分数测定

准确称取0.5 g黄精粉末置于100 mL锥形瓶中，用30 mL去离子水在80 ℃下搅拌提取1 h，于5 000 r/min下离心10 min，收集上清液，重复提取3次，合并提取液定容至100 mL，得黄精还原糖提取液。测定方法采用3，5-二硝基水杨酸法，以无水葡萄糖质量浓度为横坐标、吸光度为纵坐标建立标准曲线。取2 mL提取液按照上述操作测定吸光度，通过标准曲线计算黄精中的还原糖质量分数。

1.3.6　皂苷质量分数测定

参照康佳茜等[9]的方法并稍加修改。准确称取0.5 g黄精粉末置于100 mL烧杯中，用30 mL体积分数90%乙醇溶液在80 ℃下搅拌提取40 min，于5 000 r/min下离心10 min，收集上清液，用上述方法提取3次后合并提取液，使用旋转蒸发仪在55 ℃将上清液蒸发至干燥，最后用体积分数90%乙醇溶液将提取液定容至10 mL，得到黄精总皂苷提取液。测定方法采用香草醛-冰醋酸法，以薯蓣皂苷元质量浓度为横坐标、吸光度为纵坐标建立标准曲线。取1 mL提取液按照上述操作测定吸光度，通过标准曲线计算黄精中的皂苷质量分数。

1.3.7　黄酮质量分数测定

参照徐虹等[10]的方法并稍加修改。准确称取0.5 g黄精粉末置于100 mL烧杯中，用30 mL体积分数70%乙醇溶液在30 ℃下搅拌提取40 min，于5 000 r/min下离心10 min，收集上清液。用上述方法提取3次后合并提取液，使用旋转蒸发仪在55 ℃下将上清液蒸发至干燥，最后用体积分数70%乙醇溶液将提取液定容至10 mL，得到样品黄精黄酮提取液。精确吸取不同体积的1 mg/mL芦丁标准品溶液于10 mL具塞试管中，加乙醇至1 mL，与0.5 mL的5 g/dL $NaNO_2$溶液混合反应5 min，再加入0.3 mL的10 g/dL $Al(NO_3)_3$溶液反应6 min，最后加入2.5 mL 4 g/dL NaOH溶液并用蒸馏水定容至10 mL。室温下避光反应12 min后，在510 nm处测定其吸光度。以芦丁质量浓度为横坐标、吸光度为纵坐标，建立标准曲线。取1 mL提取液按照上述操作测定吸光度，通过标准曲线计算黄精中的黄酮质量分数。

1.3.8　多酚质量分数测定

参照陈荣华等[11]的方法并稍加修改。提取液的提取方法与黄酮提取方法相同。测定方法采用福林酚法，以没食子酸质量浓度为横坐标、吸光度为纵坐标，建立标准曲线。取0.5 mL提取液按照上述操作测

定吸光度，通过标准曲线计算黄精中的多酚质量分数。

1.3.9 硬度测定

利用质构分析仪测定干燥后黄精切片的硬度。采用 P-2N 探针进行切片的穿刺测试，仪器开始记录并分析穿刺过程中的力学数据，从而得出样品的硬度。具体测试参数如下：测试前速度、测试中速度和测试后速度均为 2 mm/s，触发力为 10 g，穿刺深度 5 mm。

1.3.10 草酸钙质量分数测定

通过酸处理使草酸钙转化为草酸，具体操作方法为：将 0.1 g 样品粉末置于 2 mL 离心管中，加 1.5 mL 去离子水，60 ℃加热 30 min，离心，弃上清液；沉淀加入体积分数 25% 盐酸（去离子水配制）1 mL，提取 3 次，每次 20 min，取上清液，定容至 10 mL，得黄精样品中草酸提取液。采用配备有 Waters Atlantis C18 反相柱（长度 15 cm，宽度 4.6 mm，厚度 3 μm）的高效液相色谱仪来分析黄精样品中草酸钙的质量分数，选择 0.02 mol/L 的 KH_2PO_4 缓冲液（pH 2.50）和甲醇（二者体积比 98∶2）溶液作为流动相。流动相采用等梯度洗脱，流量为 0.6 mL/min，柱温为 30 ℃，检测波长为 210 nm。将样品通过 0.22 μm 的水膜过滤用于测定，进样量为 10 μL。使用草酸作为标准品，以质量浓度为横坐标、峰面积为纵坐标建立标准曲线。通过对比样品的保留时间和峰面积对样品中的草酸进行定性和定量，换算而得到样品中草酸钙质量分数。

1.3.11 数据处理

使用 Graphpad Prism 9.0、Origin 2021 作图。样本间差异采用 SPSS 25 进行统计分析，数值以平均值 ± 标准偏差表示。以 0.05 为显著水平，进行单因素方差分析（ANOVA）。所有试验均重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片干燥特性研究

2.1.1 干燥动力学

果蔬干燥过程中的水分质量分数主要反映的是物料中未被干燥除去水分的百分比，同时也可以用来反映物料干燥过程中干燥速率的快慢。图 1 为不同蒸制-干燥循环加工次数下，黄精切片蒸制后干燥过程中水分质量分数的动态变化曲线。随着干燥时间的增加，黄精切片水分质量分数持续降低，呈指数趋势，干燥初期水分质量分数下降较快，干燥后期水分质量分数下降缓慢。热风作为干燥介质，不仅提供热量，还通过流动带走物料表面蒸发的水汽，从而在物料内部和表面之间形成水分梯度差，水分梯度差是推动物料内部水分向表面扩散的主要动力。干燥初期黄精切片水分质量分数高，水分梯度差较大，水分散失较快；干燥后期黄精切片表面水分质量分数减小，不易脱除，水分质量分数下降变慢。同时，蒸制-干燥循环加工次数显著影响干燥时间，干燥时间随着漂烫周期的增加而逐渐缩短。C0 组未进行蒸制-干燥循环处理样品的干燥时间最长，为 330 min。在第 4 次和第 5 次蒸制-干燥循环处理样品期间，观察到最低的干燥时间为 120 min 与 150 min。干燥时间的缩短可能是由于大量组织细胞在热加工过程中破裂后导致细胞持水能力降低，从而促进水分更快转移和扩散[12]；重复的蒸制-干燥循环加剧了细胞结构的破裂及细胞组织的塌陷，影响了细胞壁结构和成分的变化以及水分分布状态，从而缩短干燥时间。

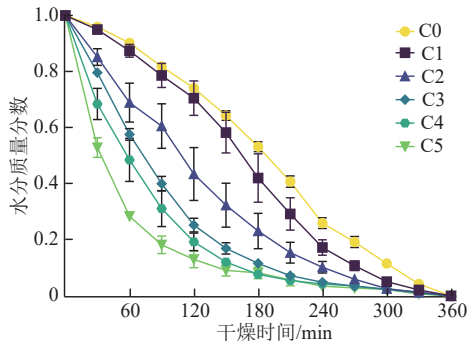


图 1 蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片水分质量分数与干燥时间的关系曲线

Fig. 1 Water mass fraction-drying time curves of *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles

由图 2 可知，在不同蒸制-干燥加工循环次数组别内，黄精切片的蒸制后干燥速率与典型果蔬干燥的一般规律相符合，均呈先增加后降低的趋势，且达到最大干燥速率的时间分别为 4.0、1.5、1.0、1.0、0.5、0.5 h。C0 组样品干燥速率在干燥时间 0~4.0 h 内持续增长，之后缓慢下降。C1~C4 组样品在干燥时间 0~2.0 h 范围内，随着蒸制加工循

环次数增加，黄精切片蒸制后干燥速率呈持续增加趋势；干燥时间2.0~6.0 h范围内，蒸制加工循环次数对黄精切片干燥速率的影响并不显著，不同组别黄精切片的干燥速率均降低至0~0.3 g/(g·h)，即水分先快速流失，后缓慢损失。这一现象可能是因为黄精在切片干燥过程中其表面形成刚性壳结构，阻碍了水的逸出并降低了干燥速率[13]。在干燥初期，自由水的大量蒸发导致干燥速率迅速加快；随着干燥的进行，不易流动水的迁移和蒸发使得干燥速率逐渐减慢；在干燥后期，结合水的释放成为主要的水分去除方式，但由于其蒸发所需的热量高且释放速度慢，因此干燥速率下降的趋势变得更加平缓。随着蒸制干燥循环次数增加，每次蒸制后干燥时自由水质量分数降低，从而导致达到最大干燥速率的时间逐渐减少。

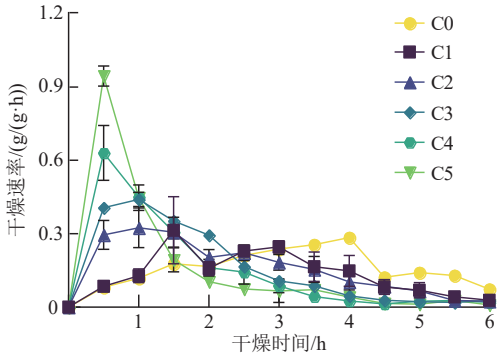
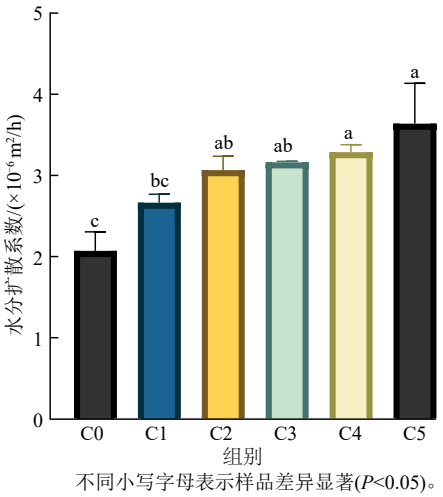


图2　蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片干燥速率与干燥时间的关系曲线

Fig. 2　Drying rate-drying time curves of *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles

2.1.2　有效水分扩散系数

有效水分扩散系数反映了物料在特定干燥条件下的去除水分能力，同时也表征了物料本身的水分传质特性。图3说明了蒸制循环加工次数对有效水分扩散系数的影响。C0组的有效水分扩散系数最低，达2.06×10^{-6} m^2/h；随着蒸制-干燥加工循环次数增加，黄精切片蒸制后干燥的有效水分扩散系数持续增加，C5组有效水分扩散系数达最大，为3.62×10^{-6} m^2/h，相较C0组增加了75.73%，反映了物质内部水分扩散能力的增强，这一现象与黄精切片组织结构的破坏程度有关。黄精切片未经加工时，细胞组织无明显塌陷，表观较平整；随着蒸制-干燥循环加工次数增加，细胞组织破坏塌陷，造成皱缩现象，



不同小写字母表示样品差异显著(P<0.05)。

图3　蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片有效水分扩散系数变化

Fig. 3　Changes in effective moisture diffusion coefficient of *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles

与水的结合能力减弱，水分去除较快[14]。

2.1.3　干燥动力学模型拟合

干燥过程是一个复杂而系统的传质和传热过程，与干燥材料的特性和外部环境直接相关。选取Lewis、Page、Modified Page、Overhults、Logarithmic和Henderson and Pabis共6种果蔬薄层干燥数学模型，分别拟合不同蒸制-干燥循环次数处理的黄精切片在蒸制后热风烘干干燥过程中水分质量分数随时间变化的试验数据，结果见表2。与其他5个模型相比，Modified Page模型的拟合效果最好，R^2范围最大（0.993 39~0.999 60），R_{MSE}范围最小（0.000 03~0.000 43）。这表明，Modified Page模型高度拟合了不同蒸制-干燥循环次数处理次数下黄精切片的干燥曲线，使得蒸制后干燥过程中黄精切片的水分质量分数变化得到了有效反映。因此，该模型有助于更好地分析和预测各种不同蒸制-干燥循环次数处理次数下黄精切片的干燥过程。

2.2　蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片水分分布变化

LF-NMR作为一种非侵入性技术，用于检测食物的水分质量分数和状态，可更好地检测果蔬产品的水分分布。结果表明，蒸制-干燥循环加工显著改变了黄精切片的水分分布状态，见图4。弛豫谱中4个特征峰T21、T22、T23、T24分别对应细胞壁强结合水、细胞壁结合水、细胞质水、游离

表 2 干燥动力学数学模型和拟合结果

Table 2 Mathematical models of drying dynamics and fitting results

模型名称	模型参数	C0	C1	C2	C3	C4	C5
Lewis	R_{MSE}	0.014 31	0.012 39	0.001 02	0.001 47	0.000 36	0.000 34
	R^2	0.950 32	0.960 22	0.984 40	0.979 21	0.990 03	0.988 56
	k	0.270 99	0.517 38	0.582 04	0.599 93	0.840 94	1.171 04
Page	R_{MSE}	0.000 72	0.000 34	0.000 46	0.000 04	0.000 03	0.000 35
	R^2	0.992 93	0.997 08	0.992 96	0.999 46	0.999 19	0.988 43
	k	0.082 88	0.118 52	0.517 78	0.502 29	0.884 21	1.174 67
	n	1.989 77	1.993 81	1.160 22	1.255 42	0.879 73	0.949 36
Modified Page	R_{MSE}	0.000 37	0.000 20	0.000 43	0.000 03	0.000 03	0.000 08
	R^2	0.996 38	0.998 30	0.993 39	0.999 60	0.999 22	0.997 39
	α	0.943 42	0.959 10	0.954 57	0.967 85	1.034 52	2.888 40
	k	0.054 34	0.093 13	0.467 29	0.466 37	0.921 92	2.322 72
	n	2.262 08	2.164 08	1.232 97	1.312 06	0.853 14	0.511 67
Overhults	R_{MSE}	0.000 72	0.000 34	0.000 46	0.000 04	0.000 03	0.000 35
	R^2	0.992 93	0.997 08	0.992 96	0.999 46	0.999 19	0.988 43
	k	0.286 05	0.343 12	0.567 03	0.577 83	0.869 46	1.184 77
	n	1.992 46	1.994 96	1.160 28	1.255 47	0.879 73	0.949 42
Henderson and Pabis	R_{MSE}	0.007 95	0.007 34	0.000 62	0.000 39	0.000 08	0.000 39
	R^2	0.962 41	0.977 33	0.990 50	0.994 41	0.997 86	0.987 21
	α	1.266 64	1.330 46	1.104 47	1.169 08	0.890 72	0.986 32
	k	0.354 93	0.459 25	0.639 83	0.693 58	0.749 60	1.156 02
Logarithmic	R_{MSE}	0.002 23	0.001 98	0.000 50	0.000 19	0.000 05	0.000 14
	R^2	0.981 58	0.983 10	0.992 30	0.997 30	0.998 61	0.995 48
	α	2.679 15	1.90 920	1.100 90	1.160 34	0.901 36	1.059 79
	k	0.105 53	0.177 13	0.563 92	0.611 19	0.799 24	1.358 37
	c	−1.530 98	−0.749 79	−0.039 00	−0.039 24	0.012 54	0.024 85

水[15]。随着蒸制-干燥循环次数的增加，总峰面积呈下降趋势，其中 C4、C5 组较 C0 组显著降低（$P<0.05$），表明水分流失加剧。进一步分析发现，各组分弛豫时间随蒸制-干燥循环次数增加而缩短，表明水分自由度降低，流动性减弱。这种变化可能与热处理导致的细胞结构损伤有关：热处理使细胞壁多糖降解，膜系统完整性破坏，导致结合水向游离水转化并加速蒸发。水分状态的改变影响了黄精的质构特性，这与后续质构分析结果中硬度升高的趋势相吻合。

2.3 蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片理化指标变化

2.3.1 色差分析

色差对于评估食品的质量至关重要。图 5(a)~(b)分别说明了不同蒸制-干燥循环加工次数对样品 L^*值、a^*值、b^*值及 ΔE 的影响。ΔE 是不同样本之间色差大小的度量[16]。颜色差异[17]通常被归类为色差大（$\Delta E>3$），不同（$1.5<\Delta E<3$）和色差小（$\Delta E<1.5$）。结果表明，黄精切片样品的颜色受蒸制-干燥循环加工次数的显著影响，相对于新鲜样品，炮制样品均呈现 $\Delta E>3$ 的水平，肉眼可以观察到颜色变化，表明蒸制-干燥循环加工显著改变了黄精切片的颜色。

颜色变化主要是由于 L^*值和 b^*值的变化引起的。由于加工过程中发生的褐变，所有处理样品的 L^*值随着 b^*值和 ΔE 逐渐增加而降低，C4 组的 b^*值最高，为 18.75。C5 具有最高的 ΔE 值（46.37）和最低的 L 值（17.09）。在干燥的情况下，酶促和非酶促褐变可能涉及几个反应。首先，脱水通常会改变膜通透性和细胞壁的变形损失，这可能导致酚类底物与多酚氧化酶结合生成醌，并进一步为聚合生成褐变产物的反应提供条件；同时，由于多酚的热不稳定性，干燥后其可能会降解或发生变化，从而导致褐变现象[18]；此外，加工过程发生了美拉德反应，这是因为蒸制-干燥循环处理破坏了细胞结构，促进了细胞内还原糖的释放；同时反应产物逐渐累积，蒸制过程是持续的高温高湿加热环境，热风烘干也是加热过程，二者结合循环导致黄精切片表面的温度分布不均匀，局部过热加速了黄精切片表面的褐变[19]，内部水分分布的不均匀影响了干燥速率，还可能导致干燥后期出现

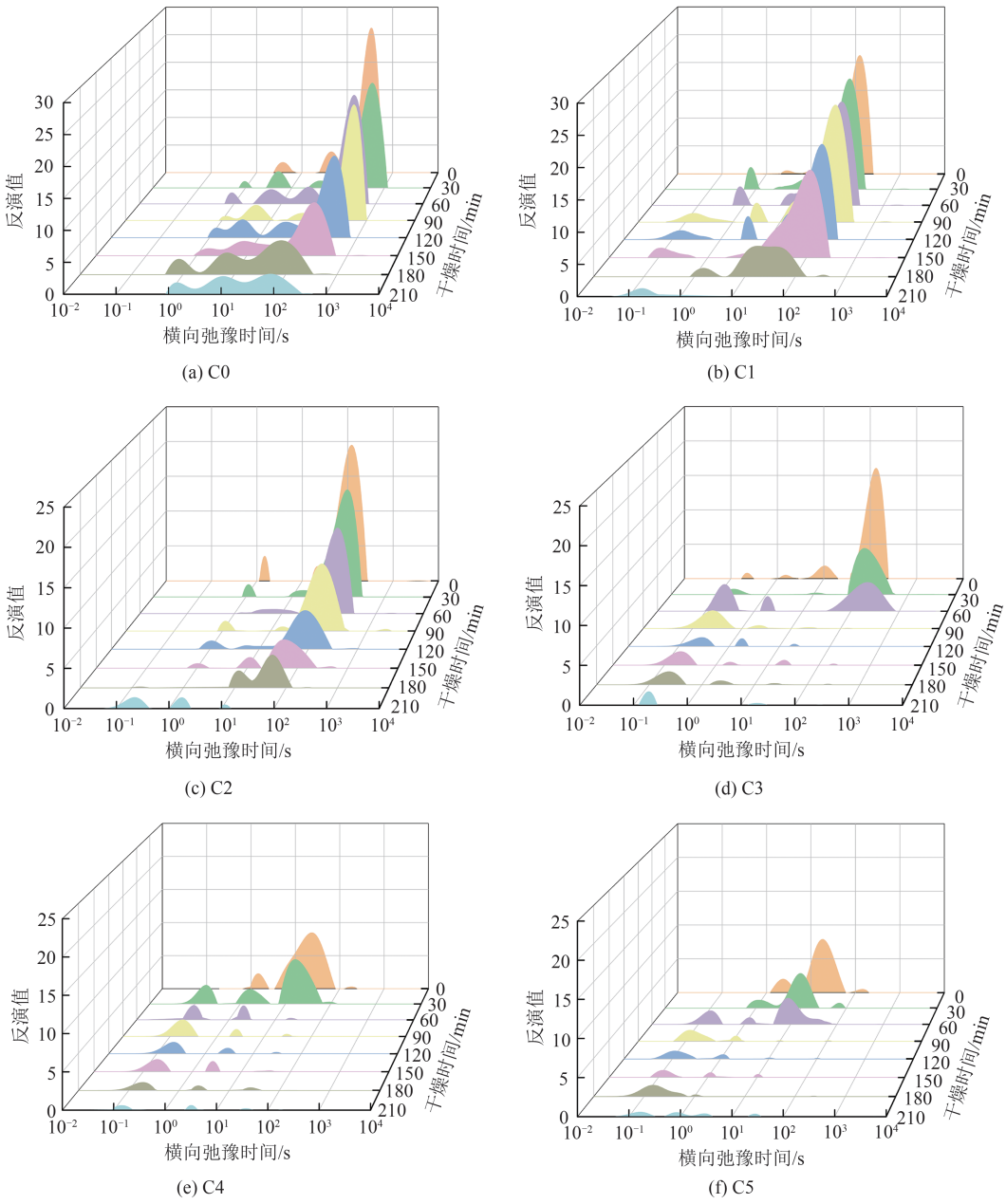
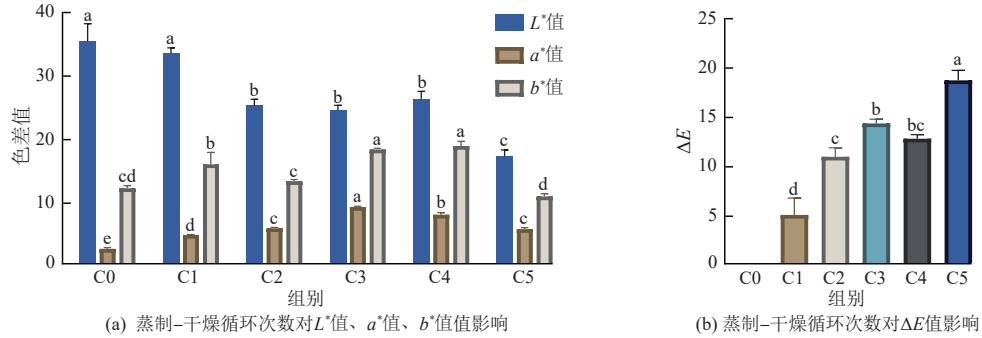


图 4　蒸制−干燥循环加工过程中黄精切片水分分布变化

Fig. 4　Changes in moisture distribution of *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles



(a) 蒸制−干燥循环次数对L^*值、a^*值、b^*值值影响　　(b) 蒸制−干燥循环次数对ΔE值影响

不同小写正体字母表示样品差异显著($P<0.05$)。

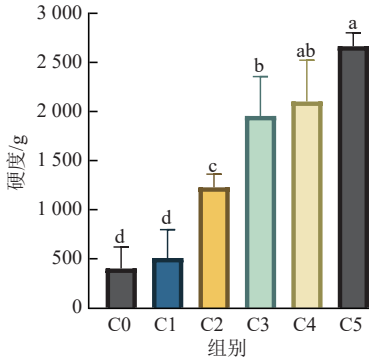
图 5　蒸制−干燥循环加工过程中黄精切片色差变化

Fig. 5　Changes in color difference of *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles

表面结壳现象，此时黄精内部结构未达到安全的水分质量分数，从而促进非酶促褐变和相关生化反应，导致颜色变差。

2.3.2 硬度分析

片状产品的酥脆度和硬度是决定其口感的最重要因素。根据最大断裂力评估黄精切片的硬度，结果见图 6。C0 组表现出最低的硬度，为（401.84±218.56）g，C5 则硬度最高，为（2 673.98±138.33）g，相较 C0 增长 565.43%。这可能是因为干燥过程中热空气迅速带走了黄精切片表面的水分，当表面水分迁移的速度高于内部时，切片表面变硬，进而形成结壳现象，使得在干燥的后期难以将切片内部水分转移到表面，最终形成坚硬的质地。同时，由于干燥过程中水分去除，包括纤维素、半纤维素、果胶在内的细胞壁多糖发生微观结构变形和降解，细胞壁修饰引起硬度的变化，黄精切片硬度增加[20]。



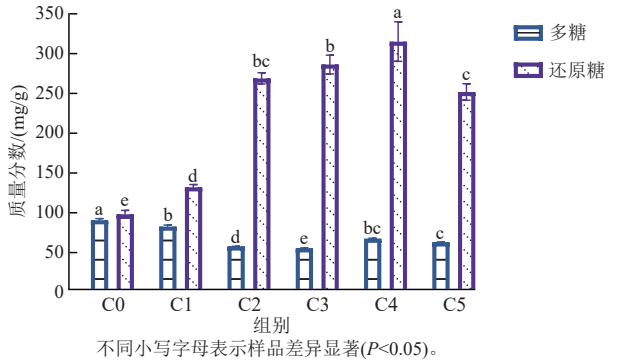
不同小写字母表示样品差异显著(P<0.05)。

图 6 蒸制−干燥循环加工过程中黄精切片硬度变化

Fig. 6 Changes in hardness of *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles

2.4 蒸制−干燥循环加工过程中黄精切片多糖、还原糖成分变化

黄精味甜，多糖是黄精特征性功能成分之一，已成为黄精质量控制的一项重要指标，《中国药典》规定黄精饮片多糖质量分数应≥4%。蒸制−干燥循环加工过程中黄精切片的多糖、还原糖质量分数变化见图 7。鲜黄精 C0 组多糖质量分数最高，达 87.51 mg/g，经蒸制−干燥循环加工后黄精切片多糖质量分数有所下降，C4 组多糖质量分数为 63.90 mg/g，C5 组多糖质量分数为 59.39 mg/g，分别较 C0 组下降 26.98% 和 32.13%。与多糖质量分数变化趋势不同，还原糖质量分数在 C0~C4 组内持续上升，鲜黄精 C0 组还原糖质量分数为 95.24 mg/g；C3 组显著提升，达 268.60 mg/g；C5 组还原糖质量分数有所下降，这与还原糖作为消耗物质参与了美拉德反应有关。



不同小写字母表示样品差异显著(P<0.05)。

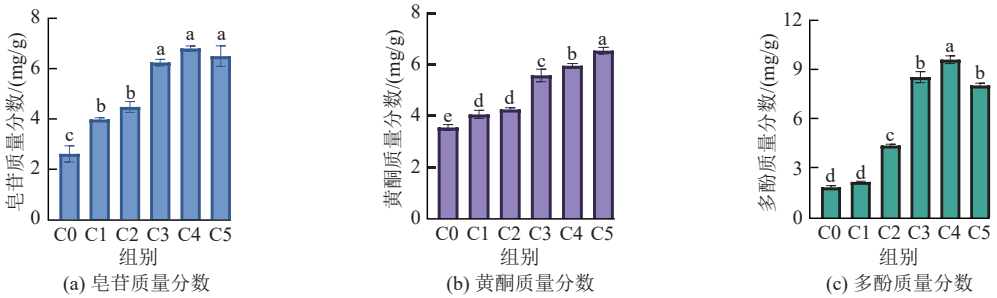
图 7 蒸制−干燥循环加工过程中黄精切片多糖、还原糖质量分数变化

Fig. 7 Changes in mass fractions of polysaccharides and reducing sugars in *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles

黄精多糖主要含有果聚糖、果胶、半乳甘露聚糖、葡甘露聚糖、阿拉伯半乳聚糖、半乳甘露聚糖和其他中性多糖[21]，加工后的黄精中约有 50% 是碳水化合物，其中 70% 以上是果糖。黄精多糖多为水溶性多糖[22]，Zhu 等[4]研究表明，蒸制过程中结构多糖可能与细胞骨架分离，导致溶出速率增加，进而导致多糖损失，还原糖质量分数增加。在蒸制过程中，果聚糖可能降解为低聚果糖，从而增加了水溶性，更容易溶解在蒸发液中流失。果糖脱水分解的产物中包含 5-羟甲基糠醛，随着蒸制与烘干循环次数增加，果聚糖降解导致多糖质量分数减少，5-羟甲基糠醛质量分数增加。此外，5-羟甲基糠醛是美拉德反应的一种中间产物，这一发现在一定程度上解释了黄精切片褐变程度加剧的原因。据报道，长时间的加热会使果胶发生非酶催化的分解，分解程度受 pH、温度和酯化度的影响[23]。在弱酸性和长时间加热的条件下，黄精中的半乳糖醛酸可能发生了分解。根据之前的报道，在 55 °C 以上的温度下蒸天麻会导致多糖水解，导致细胞内形成黏附片段。这些都归因于纤维素酶、木质素酶、半乳糖醛酸酶和果胶酶在这些条件下的强大活性，可能会破坏细胞壁的结构成分[12]。

2.5　蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片活性成分变化

蒸制-干燥循环加工过程中，黄精切片皂苷、黄酮及多酚呈现动态变化，其质量分数受细胞结构破坏、成分释放与热降解等多种因素影响。如图8所示，随蒸制-干燥循环加工次数增加，皂苷类化合物包括甾体皂苷和三萜皂苷显著积累，C4组较C0组皂苷质量分数提升161.28%，主要归因于热湿条件促使薯蓣皂苷糖苷键断裂水解，释放薯蓣皂苷元等苷元及糖基[24]。然而，C5组过度加工导致皂苷降解，总质量分数较C4组下降4.54%，表明高温长时间处理对皂苷稳定性具有阈值效应。黄酮类成分以高异黄酮为主[25]，随蒸制-干燥循环加工次数增加持续上升，C4组和C5组的黄酮质量分数分别较C0组提升67.15%和83.77%，其机制与微观孔隙结构演化密切相关。蒸制-干燥循环通过蒸气渗透膨胀破坏细胞壁，提升传质效率并释放结合态黄酮[26]。此外，多酚质量分数在C4组达峰值，为9.62 mg/g，较C0组提升417.93%，主要是由于细胞基质降解及热效应打破酚类物质与细胞壁多糖的氢键/共价键连接[27]，增强可提取性；同时，蒸制过程使多酚氧化酶失活，减少酚类物质氧化损失[28]。但C5组多酚质量分数较C4组下降16.20%，可能与过度热暴露引发酚类物质分解有关。综上所述，蒸制-干燥循环加工通过调控细胞结构与成分相互作用，实现活性成分的富集，而C4组为平衡成分释放与降解的较好处理方式。



(a) 皂苷质量分数　(b) 黄酮质量分数　(c) 多酚质量分数

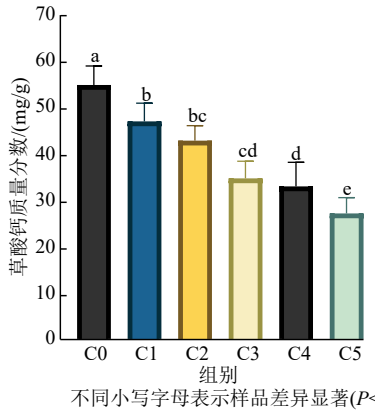
不同小写字母表示样品差异显著(P<0.05)。

图8　蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片皂苷、黄酮、多酚质量分数变化

Fig. 8　Changes in mass fractions of saponins, flavonoids, and polyphenols in *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles

2.6　蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片草酸钙质量分数变化

研究表明，黄精的刺激性可能源于草酸钙针晶的机械损伤作用，在消费者食用咀嚼过程中会产生麻舌口感。该作用在芋属植物中已获证实[29]，蒸制加工2 h可使植物中草酸钙针晶质量分数减少67.33%。蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片草酸钙质量分数变化见图9。在整个处理过程中，样品的草酸钙质量分数随着处理循环次数的增加而减少。与C0组相比，C4、C5组草酸钙质量分数分别降低了39.94%、50.55%，C4组草酸钙质量分数达33.18 mg/g。蒸制形成的高温湿热环境可软化植物细胞壁，促使针晶从细胞中释放并暴露于水蒸气中；同时，水蒸气渗透可能会加速草酸钙的部分水解，生成可溶性草酸及钙离子。此外，蒸制过程中植物组织收缩可能导致针晶断裂，进一步降低机械刺激性。



不同小写字母表示样品差异显著(P<0.05)。

图9　蒸制-干燥循环加工过程中黄精切片草酸钙质量分数变化

Fig. 9　Changes in the mass fraction of calcium oxalate raphides in *Polygonati rhizoma* slices during processing with steaming-drying cycles

3　结论

研究了蒸制循环次数对黄精品质变化及干燥

动力学的拟合机制，结果表明，蒸制-干燥循环加工次数是影响黄精品质变化的重要指标。黄精的每次蒸制后干燥过程中，干燥动力学符合Modified Page模型（R^2>0.98），自由水迁移速率与干燥效率正相关，结合水占比随蒸制-干燥次数增加提升；适度蒸制-干燥循环加工（4次）可使皂苷、黄酮及多酚质量分数达较高水平（较C0组分别提升161.28%、67.15%、417.93%），多糖保留率提高5.15%（与C5组相比），硬度降低141%（与C5组相比），且草酸钙质量分数降低39.94%（与C0组相比）。结果证实适度蒸制-干燥循环（4次）可提升功能成分与质构特性，这为传统“九蒸九晒”工艺的优化提供了科学依据，在一定程度上修正了单纯增加蒸制-干燥循环次数可线性提升药效成分的传统认知。当前研究局限性在于未定量研究蒸制温度及时间对成分转化的动态影响，后续研究可通过建立蒸制工艺参数与成分变化的定量模型，评估活性成分变化。

参考文献

[1] SHI Y, SI D, CHEN D H, et al. Bioactive compounds from *Polygonatum* genus as anti-diabetic agents with future perspectives[J]. Food Chemistry, 2023, 408: 135183.

[2] LU Q X, LI R, YANG Y X, et al. Ingredients with anti-inflammatory effect from medicine food homology plants [J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130610.

[3] ZHENG M X, SU H L, XIAO R F, et al. Effects of *Polygonatum cyrtonema* extracts on the antioxidant ability, physical and structure properties of carboxymethyl cellulose-xanthan gum-flaxseed gum active packaging films [J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134320.

[4] ZHU S Q, LIU P, WU W X, et al. Multi-constituents variation in medicinal crops processing: investigation of nine cycles of steam-Sun drying as the processing method for the rhizome of *Polygonatum cyrtonema*[J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2022, 209: 114497.

[5] AI Z P, XIE Y K, LI X Y, et al. Revealing color change and drying mechanisms of pulsed vacuum steamed *Cistanche deserticola* through bioactive components, microstructural and starch gelatinization properties [J]. Food Research International, 2022, 162: 112079.

[6] WU Z, GAO R P, LI H, et al. How steaming and drying processes affect the active compounds and antioxidant types of *Gastrodia elata* Bl. f. *glauca* S. Chow [J]. Food Research International, 2022, 157: 111277.

[7] AN N N, SUN W H, LI D, et al. Effect of microwave-assisted hot air drying on drying kinetics, water migration, dielectric properties, and microstructure of corn[J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139913.

[8] 曹雨欣，郑淘，罗堃，等. 挤压蒸煮改性黄精粉的制备及品质评价[J]. 食品与机械，2024，40（2）：184-191.
CAO Y X, ZHENG T, LUO K, et al. Preparation and quality evaluation of *Polygonati rhizoma* modified powder by extrusion cooking[J]. Food & Machinery, 2024, 40 (2): 184-191. (in Chinese)

[9] 康佳茜，刘艳红，张玉瑶，等. 灵芝总皂苷对结肠癌HCT116细胞的抑制作用[J]. 食品与生物技术学报，2023，42（12）：90-97.
KANG J X, LIU Y H, ZHANG Y Y, et al. Inhibition of colon cancer cell line HCT116 by total saponins from *Ganoderma lucidum* [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(12): 90-97. (in Chinese)

[10] 徐虹，王琮琮，龚凌霄. 莲子红衣黄酮对馒头品质和消化特性的影响[J]. 食品与生物技术学报，2024，43（10）：120-129.
XU H, WANG C C, GONG L X. Effect of lotus seed red-skin flavonoids on quality and digestibility of steamed buns[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(10): 120-129. (in Chinese)

[11] 陈荣华，王明伟，江波，等. 红糖中酚类化合物的抗氧化活性研究[J]. 食品与生物技术学报，2024，43（10）：153-162.
CHEN R H, WANG M W, JIANG B, et al. Study on antioxidant activities of phenolic compounds in non-centrifugal sugar [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(10): 153-162. (in Chinese)

[12] 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.

[13] XU Y M, LIU W C, LI L L, et al. Dynamic changes of non-volatile compounds and evaluation on umami during infrared assisted spouted bed drying of shiitake mushrooms[J]. Food Control, 2022, 142: 109245.

[14] 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.

[15] YANG Z X, DUAN X K, YANG J Y, et al. Effects of high hydrostatic pressure and thermal treatment on texture properties of pickled kohlrabi [J]. LWT-Food Science

and Technology，2022，157：113078.

[16] ENGIN D. Effect of drying temperature on color and desorption characteristics of oyster mushroom[J]. Food Science and Technology，2020，40(1)：187-193.

[17] ISMAIL B B，LIU D H，PU Y F，et al. High-intensity ultrasound processing of baobab fruit pulp：effect on quality，bioactive compounds，and inhibitory potential on the activity of α-amylase and α-glucosidase[J]. Food Chemistry，2021，361：130144.

[18] LI J F，DENG Z Y，DONG H H，et al. Substrate specificity of polyphenol oxidase and its selectivity towards polyphenols：unlocking the browning mechanism of fresh lotus root (*Nelumbo nucifera* Gaertn.)[J]. Food Chemistry，2023，424：136392.

[19] GENG Z H，ZHU L C，WANG J，et al. Drying sea buckthorn berries (*Hippophae rhamnoides* L.)：effects of different drying methods on drying kinetics，physicochemical properties，and microstructure [J]. Frontiers in Nutrition，，2023，10：1106009.

[20] SUBRAHMANYAM K，GUL K，PARIDALA S，et al. Effect of cold plasma pretreatment on drying kinetics and quality attributes of apple slices in refractance window drying [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2024，92：103594.

[21] LIU D，TANG W，HAN C，et al. Advances in *Polygonatum sibiricum* polysaccharides：extraction，purification，structure，biosynthesis，and bioactivity[J]. Frontiers in Nutrition，，2022，9：1074671.

[22] WANG S Q，LI G，ZHANG X F，et al. Structural characterization and antioxidant activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. Carbohydrate Polymers，2022，291：119524.

[23] DIAZ J V，ANTHON G E，BARRETT D M. Nonenzymatic degradation of citrus pectin and pectate during prolonged heating：effects of pH，temperature，and degree of methyl esterification[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2007，55(13)：5131-5136.

[24] REN W K，WU M，WANG B，et al. Constant temperature and humidity combined with vacuum-steam pulsed steaming of *Polygonatum cyrtonema* rhizome：quality attribute and browning mechanism [J]. Food Chemistry，2025，463：141472.

[25] LI X L，MA R H，ZHANG F，et al. Evolutionary research trend of *Polygonatum* species：a comprehensive account of their transformation from traditional medicines to functional foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2023，63(19)：3803-3820.

[26] FAN X Y，SU Y L，WU Y，et al. Comprehensive understanding of impacts of steam explosion on facilitated extraction and transformation of flavonoids from *Astragali radix*[J]. Food Chemistry，2025，463：141410.

[27] CHAO E P，LI J W，FAN L P. Influence of combined freeze-drying and far-infrared drying technologies on physicochemical properties of seed-used pumpkin[J]. Food Chemistry，2023，398：133849.

[28] BALASUBRAMANIAN P，XIAO H W，SUTAR P P. Effect of cyclic vacuum-steam blanching on the quality characteristics and functional properties of Malabar spinach (*Basella alba*) dried by non-water infrared refractance window drying[J]. Food Chemistry，2025，465：141901.

[29] ZI H Y，CHEN R，JIA N，et al. Impact of cooking duration on calcium oxalate needle-like crystals in plants：a case study of vegetable taro flowers in Yunnan[J]. Foods，2024，13(23)：3730.

（责任编辑：李春丽）