

西兰花热风干燥特性及品质研究

王宏达¹, 孙萍¹, 李晓丹^{1,2}, 肖军霞^{1,2}, 郭丽萍^{1,2*}

(1. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 青岛 266109; 2. 青岛特种食品研究院, 青岛 266109)

摘要: 目的 探究不同切分大小和不同干燥温度对西兰花粉品质的影响。**方法** 新鲜的西兰花经过汽蒸80 s处理后进行切分(3 cm×3 cm、0.5 cm×0.5 cm)和干燥(55、60、65、70、75、80 °C)处理, 并对干燥后制得的西兰花粉的含水量变化以及叶绿素、花色苷、总酚、维生素 C、可溶性蛋白、萝卜硫苷含量和萝卜硫素形成量进行研究。**结果** 随着干燥温度的升高, 切分程度越小的西兰花干燥速率增长越快。高温使西兰花粉中绿色损失, 80 °C (0.5 cm×0.5 cm) 处理的粉末颜色较差, 叶绿素损失显著多于其他粉末。西兰花粉总酚含量随温度变化无显著差异($P>0.05$)。70 °C (3 cm×3 cm)处理的西兰花粉花色苷、维生素 C 和可溶性蛋白含量最高。65 °C (3 cm×3 cm)的西兰花粉中萝卜硫素形成量最高, 为 5.37 mg/g, 与 70 °C (3 cm×3 cm)的无显著差异。**结论** 西兰花粉花色苷、维生素 C 和可溶性蛋白均随干燥温度升高呈先升高后降低的趋势, 3 cm×3 cm 的切分可以更好的保留西兰花粉中营养品质。经 80 s 汽蒸预处理, 花球直径和茎梗长度切分为 3 cm, 在 70 °C 热风干燥处理 200 min 制得的西兰花粉品质最佳。

关键词: 西兰花粉; 热风干燥; 萝卜硫苷; 萝卜硫素

Study on hot air drying characteristics and quality of *Brassica oleracea* L. var. *italica* Planch.

WANG Hong-Da¹, SUN Ping¹, LI Xiao-Dan^{1,2}, XIAO Jun-Xia^{1,2}, GUO Li-Ping^{1,2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;
2. Qingdao Special Research Institute, Qingdao 266109, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of different cut sizes and different drying temperatures on the qualities of broccoli powder. **Methods** Fresh broccoli was steamed for 80 s, and then processed with different cut sizes (3 cm×3 cm, 0.5 cm×0.5 cm), and dried under different temperatures (55, 60, 65, 70, 75, 80 °C). The changes of water content, chlorophyll, anthocyanins, total phenols, vitamin C, soluble protein, glucoraphanin content, and sulforaphane formation in broccoli powder were studied. **Results** With the drying temperature increased, the drying rate of broccoli increased. High temperature reduced the green color of broccoli powder. The powder at 80 °C (3 cm×3 cm) had poorer color and lower chlorophyll content than other powders, the content of chlorophyll and glucoraphanin in broccoli powder were increased firstly and then decreased with the increasing of drying temperature. The drying temperature had no significant effects on the total phenol content ($P>0.05$). Broccoli powder dried at 70 °C (3 cm×3 cm) contained the highest content of anthocyanin, vitamin C and soluble protein. Dried at

基金项目: 国家自然科学基金项目(31801457)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31801457)

*通信作者: 郭丽萍, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与检测。E-mail: happyglp@126.com

*Corresponding author: GUO Li-Pin, Ph.D, Associate Professor, Qingdao Agricultural University, NO.700, Changcheng Road, Chengyang District, Qingdao 266109, China. E-mail: happyglp@126.com

65 °C (3 cm×3 cm) led to the highest sulforaphane formation, which reached 5.37 mg/g; there was no significant difference between 65 °C (3 cm×3 cm) and 70 °C (3 cm×3 cm). **Conclusion** The content of anthocyanin, vitamin C and soluble protein in broccoli powder are increased firstly and then decreased with the increasing of drying temperature. Nutritional quality of broccoli powder divided by 3 cm×3 cm is better preserved. The quality of broccoli powder prepared by the pretreatment with the diameter of the flower bulb and the length of the stem cut into 3 cm, and dried at 70 °C for 200 min after steaming for 80 s.

KEY WORDS: broccoli powder; hot air drying; glucoraphanin; sulforaphane

0 引言

西兰花(*Brassica oleracea* L. var. *italica* Planch.)又称为青花菜、绿花菜,是十字花科芸薹属甘蓝变种^[1]。西兰花含有丰富的抗坏血酸、花色苷、多酚和硫代葡萄糖苷等活性成分^[2],其中硫代葡萄糖苷在黑芥子酶的作用下的降解产物异硫氰酸酯具有显著的防癌、抗癌等功效,萝卜硫素是西兰花中含量最高的异硫氰酸酯,也是目前发现的抗癌活性最强的天然物质^[3]。

蔬菜加工利用率低是导致我国蔬菜损失的重要因素^[4],干燥制粉可以有效降低贮藏运输成本^[2],提升蔬菜加工利用率。蔬菜粉含有丰富的营养物质,可以作为食品加工原辅料,有利于商品化加工生产,同时可提高其生物利用度。研究发现,西兰花粉作为配料添加到面粉中,可使面团具有更好的感官品质和质构特性^[5],也可以提高其制品中生物活性成分和抗氧化能力^[6]。

常见的果蔬干燥方式有热风干燥、真空冷冻干燥、喷雾干燥和变温压差膨化干燥等。其中,冷冻干燥可以最大限度保留食品中的营养成分和风味物质,但成本高、能耗大;喷雾干燥易于连续化生产,适合热敏性物料的干燥生产,但对样品要求高、设备复杂;变温压差膨化干燥结合了热风干燥和冷冻干燥的优点,但干燥效率和连续化生产还需进一步发展。热风干燥操作简单、成本较低,是目前工业化生产中最常用的干燥方式,我国大多数脱水果蔬企业采用常压热风干燥^[7]。杨华等^[8]研究发现,喷雾干燥西兰花粉还原糖含量较高,冷冻干燥西兰花粉的颜色较好、蛋白质含量较高;张明等^[7]对比了不同干燥方式对西兰花老茎粉体营养品质的影响,发现真空冷冻干燥后粉体持水、膨胀能力最强,维生素 C 含量高;喷雾干燥粉吸湿性最强,总糖含量高。上述研究均通过对西兰花粉中的抗氧化物质含量以及重要的营养成分的测定来反应粉体品质,但未涉及萝卜硫苷和萝卜硫素的变化。适当的热处理可以钝化上皮硫特异蛋白(epithiospecifier protein, ESP)活性且保留黑芥子酶活性,从而提高萝卜硫素的产量^[9];而且在热风干燥中保留黑芥子酶的西兰花产品在消化过程中能够最大化形成萝卜硫素并产生功能^[10]。因此,本研究采取汽蒸处理后的西兰花进行干燥处理,以期得到最大化形成萝卜硫素

的工艺条件,通过考察不同切分和热风干燥温度对西兰花热风干燥粉中叶绿素、花色苷、多酚、维生素 C、可溶性蛋白、萝卜硫苷含量和萝卜硫素形成量的影响,为进一步的功能产品开发提供可靠的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

西兰花购自青岛城阳大润发。

DEAE Sephadex A-25 离子交换树脂(北京 Solarbio 公司);烯丙基硫苷(纯度 98%,美国 Sigma 公司);硫酸酯酶(29390 U/g,上海源叶生物科技有限公司);二氯甲烷、甲醇、乙腈(色谱纯,国药集团上海化学试剂公司);无水乙醇、福林酚(分析纯,天津巴斯夫化工有限公司);考马斯亮蓝、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、草酸、没食子酸(分析纯,莱阳市康德化工有限公司)。

1.2 仪器与设备

Thermo Fisher U3000 液相色谱仪(美国赛默飞世尔科技公司);Eclipse XDB-C₁₈ 液相色谱柱(150 cm×6 cm, 5 μm)[安捷伦科技(中国)有限公司];TS7030 分光色差仪(深圳市三恩时科技有限公司);AX124ZH 万分之一分析天平[奥豪斯仪器(常州)有限公司];UV-5100B 紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司);H1650 高速台式离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司);FW177 中草药粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司);304 不锈钢蒸盘(山东祥永机械设备有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理

取新鲜的西兰花,清洗后切分为:(1)花球部分直径为 3 cm,茎梗部分长度 3 cm;(2)花球部分直径为 0.5 cm,茎梗部分长度为 0.5 cm。将 100 g 西兰花平铺在蒸盘上,汽蒸处理 80 s 后平铺在托盘中,物料厚度约为 3 cm,分别置于 55、60、65、70、75、80 °C 烘箱中干燥,每隔 20 min 取样测定其重量,干燥至物料水分含量 7% 以下。干燥后的西兰花粉碎后过 60 目筛网,4 °C 低温贮藏待测。

1.3.2 干基含水量的测定

根据周明等^[11]的方法测定西兰花粉干基含水量

(moisture, M), 计算干燥速率, 分别按照公式(1)和(2)计算:

$$M_t = \frac{W_t - W}{W} \quad (1)$$

式中: M_t 为 t 时刻样品的干基含水量, g/g; W_t 为 t 时刻样品的质量, g; W 为干物质重量, g。

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

式中: D_R 为干燥速率, g/(g·min); M_1 和 M_2 分别为干燥到 t_1 和 t_2 时刻西兰花的干基水分含量, g/g。

1.3.3 颜色的测定

使用 TS7030 分光色差仪测定西兰花粉的颜色, 用 CIELab 表色系统分析记录西兰花粉的 L^* (值从小到大表示黑暗到明亮的变化)、 a^* (值从小到大表示颜色从绿色到红色的变化) 和 b^* (值从小到大表示颜色从蓝色到黄色的变化) 值。

1.3.4 花色苷和总酚含量的测定

根据 GUO 等^[12]的方法测定西兰花粉的花色苷含量, 结果以 mg/g 干重表示; 以没食子酸为标准品, 计算西兰花粉中的总酚含量, 以 mg/g 干重表示。

1.3.5 叶绿素含量的测定

根据安荣慧等^[13]的方法测定西兰花粉的叶绿素含量, 取 0.50 g 样品, 加入 10 mL 95%乙醇, 避光反应 8 h, 过滤后取上清液, 在 649 和 665 nm 波长下测定吸光度。

1.3.6 维生素 C 含量的测定

根据 MARTINEZ 等^[14]的方法测定西兰花粉的维生素 C 含量。取 0.50 g 样品用 0.2%草酸研磨, 5000 r/min 离心 10 min, 取上清液过 0.45 μm 膜, 测定维生素 C 含量。结果以 mg/g 干重表示。

1.3.7 可溶性蛋白含量的测定

根据安容慧等^[13]的方法测定西兰花粉的可溶性蛋白含量, 取 0.50 g 样品, 加 5 mL 0.1 mol 的磷酸缓冲液 (pH 7.2) 匀浆, 离心后取上清, 加入 5 mL 考马斯亮蓝混匀后于 595 nm 波长处测定吸光度。

1.3.8 萝卜硫苷含量的测定

根据 ZHUANG 等^[15]的方法测定西兰花粉的萝卜硫苷含量。取 0.50 g 西兰花粉, 加入 4 mL 煮沸的蒸馏水, 研磨, 于 85 °C 水浴提取 15 min, 收集上清。取 2 mL 上清液经 DEAE Sephadex™ A-25 离子交换树脂交换后, 加入 500 μL 硫酸酯酶, 于 35 °C 下反应 16 h 进行脱硫, 用 4 mL 去离子水洗脱, 用于高效液相色谱法 (high performance liquid chromatography, HPLC) 分析。

分析条件: 色谱柱为 Eclipse XDB-C₁₈, 流动相 A 为超纯水, B 为 20%乙腈, 梯度洗脱程序: 0.01 min 0% B, 21 min 100% B, 26 min 0%B。检测波长为 226 nm, 流速 1 mL/min, 柱温 30 °C, 进样体积 20 μL, 以烯丙基硫苷作为内标。结果以干重计, 单位为 μmol/g。

1.3.9 萝卜硫素含量的测定

参考 MIAO 等^[16]的方法测定西兰花粉的萝卜硫素含量。取 0.1 g 西兰花粉, 用蒸馏水研磨后, 于 37 °C 下酶解反应 3 h, 经 4 mL 二氯甲烷萃取, 经 10%乙腈溶解后过 0.45 μm 滤膜, 进 HPLC 分析, 分析条件: 色谱柱为 Eclipse XDB-C₁₈ 色谱柱, 检测波长: 254 nm, 流速为 0.6 mL/min, 柱温 30 °C, 进样量 20 μL, 洗脱程序: 0.01 min 10%乙腈, 25 min 60%乙腈, 30 min 100%乙腈。

1.4 数据处理

每个处理设 3 次重复, 每个实验平行测定 3 次, 试验数据采用 SPSS 18.0 进行统计分析, 均值间采用 Duncan's 多重比较, 在 0.05 水平上进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同温度下西兰花热风干燥速率

由图 1~2 可知, 西兰花干燥速率随着干燥温度的增加而升高, 干燥初始阶段的速率最大, 然后逐渐下降。切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花在 55 °C 的干燥速率略高于切分为 3 cm×3 cm 的西兰花在 60 °C 下的干燥速率。西兰花干燥主要是降速过程, 由于在干燥中后期水分的迁移阻力增加, 干燥速率下降, 重量变化幅度减小, 出现不规则速度变化直至干燥完成。同温度处理的西兰花, 切分越小降速越明显, 水分蒸发越快, 这是由于切分后, 物料与热风的接触面积增加, 断面处水分更容易流失, 且茎秆部分结构破坏更加严重, 植物组织内部水分向表面迁移和扩散的速度更快^[17]。

2.2 不同温度对西兰花粉颜色和叶绿素含量的影响

西兰花脱水后的颜色变化是影响产品质量和价值的关键因素, 贮藏和加工中绿色蔬菜产品由绿转黄, 是西兰花加工中亟待解决的难点问题^[8]。因此, 加工过程中的护色保鲜尤为重要。热风干燥温度和切分大小对西兰花的 L^* 、 a^* 、 b^* 值的影响不同。如表 1 所示, 除 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花在 60 °C 的 L^* 要显著高于 55 °C ($P < 0.05$) 外, 随着温度增加, L^* 值逐渐减小, 亮度逐渐降低, 较小的切分会促进西兰花与空气接触加快表面的酶促褐变, 同时低温长时间处理会导致叶绿素降解成呈橄榄绿的脱镁叶绿素, 使颜色暗沉^[18]。经 55 °C 干燥的西兰花粉, 切分大小为 0.5 cm×0.5 cm 的亮度显著低于切分大小为 3 cm×3 cm 的西兰花粉; a^* 值表示从红色到绿色的范围, 值越小, 表示绿色程度越深, 干燥温度越低, 绿色越深, 切分为 3 cm×3 cm 的西兰花经 80 °C 干燥后绿色最少; b^* 反映黄色程度, 西兰花粉的 a^* 相较 b^* 变化更加明显, 从外观可以看出干燥温度较低的西兰花粉呈现鲜绿色, 干燥温度越高颜色越偏红色。

由图 3 可知, 在较低的 55~65 °C 干燥过程中, 叶绿素含量没有显著变化。75 °C 干燥处理后的西兰花粉中叶绿素含量显著降低, 切分为 3 cm×3 cm 的西兰花经 75 °C 干燥后的叶绿素含量为 55 °C 处理后的 60.8%。温度越高、切分越小的西兰花, 干燥后的叶绿素含量越低, 切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花干燥后最低为 1.46 mg/g。西兰花中的色素

组成和含量是颜色变化主要原因, 其中叶绿素处于生物环境中时具有良好的稳定性, 但遇热不稳定会降解成脱镁叶绿素等衍生物^[19]。如图 3 所示, 温度高于 70 °C 时叶绿素含量显著降低, 这可能是部分叶绿素分解成叶黄素等物质所致^[7]。综上, 55~65 °C 干燥更有利于保持西兰花粉中的叶绿素含量。

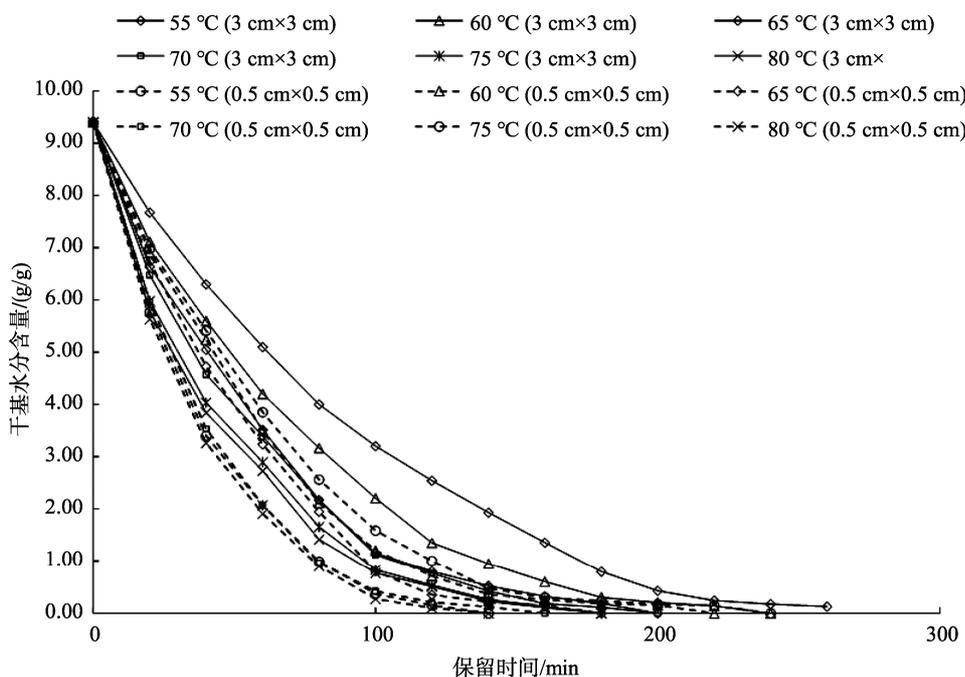


图 1 不同干燥温度对西兰花干燥曲线的影响(n=3)

Fig.1 Effects of different drying temperatures on broccoli drying curves (n=3)

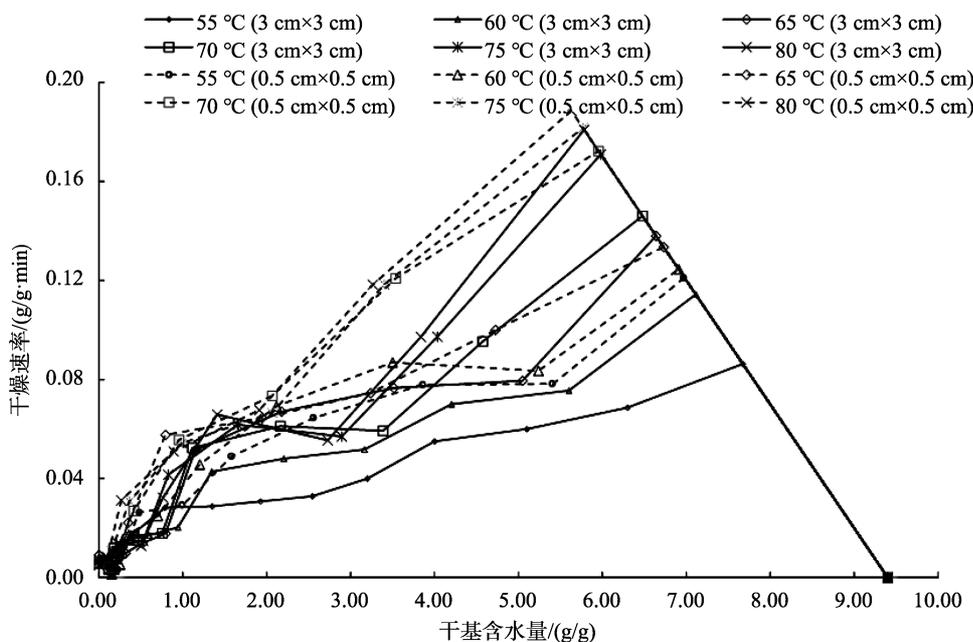


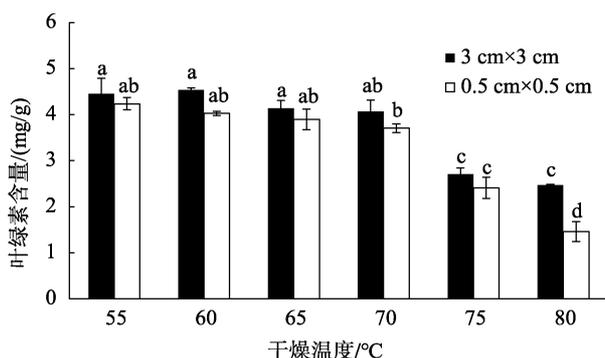
图 2 不同干燥温度对西兰花干燥速率曲线的影响(n=3)

Fig.2 Effects of different drying temperatures on broccoli drying rate curves (n=3)

表 1 不同干燥温度对西兰花粉颜色的影响($n=3$)
Table 1 Effects of different drying temperatures on the color of broccoli powder ($n=3$)

干燥温度/°C	3 cm×3 cm			0.5 cm×0.5 cm		
	L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
55	77.37±1.26 ^a	-9.13±0.36 ^f	23.40±0.97 ^b	74.31±0.39 ^b	-9.24±0.07 ^f	22.46±0.21 ^c
60	77.37±0.45 ^a	-8.05±0.10 ^d	24.59±0.44 ^{ab}	77.00±0.89 ^a	-8.73±0.19 ^e	25.18±0.48 ^a
65	75.53±0.11 ^{bc}	-7.91±0.14 ^{cd}	23.36±0.40 ^b	76.28±0.97 ^{ab}	-8.12±0.57 ^d	24.56±0.97 ^a
70	74.08±1.12 ^{cd}	-7.57±0.48 ^e	22.96±0.55 ^e	73.78±0.41 ^d	-7.78±0.10 ^e	23.89±0.27 ^b
75	73.33±0.80 ^d	-7.13±0.13 ^{bc}	24.59±0.61 ^a	73.26±1.31 ^d	-7.62±0.12 ^e	25.11±0.60 ^a
80	72.86±0.49 ^d	-4.03±0.07 ^a	23.40±0.37 ^b	70.32±1.16 ^e	-6.95±0.24 ^b	24.42±0.80 ^a

注: a~d: 不同小写字母表示不同温度之间存在显著性差异, $P<0.05$ 。



注: a~d: 不同小写字母表示各处理组之间存在显著性差异, $P<0.05$, 下同。

图 3 不同干燥温度对西兰花粉叶绿素含量的影响($n=3$)
Fig.3 Effects of different drying temperatures on chlorophyll content in broccoli powder ($n=3$)

2.3 不同干燥温度对西兰花粉花色苷含量的影响

由图 4 可以看出, 切分较大的西兰花经干燥制粉后的花色苷含量随温度增加先升高后下降。切分为 3 cm×3 cm 的西兰花经 65 和 70 °C 干燥后的花色苷含量最高。切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花, 干燥温度低于 70 °C 时, 各温度条件下处理的西兰花粉中花色苷含量无显著差异 ($P>0.05$), 干燥温度达到 75 °C 及以上花色苷含量开始显著降低 ($P<0.05$)。切分为 3 cm×3 cm 的西兰花在 70 °C 干燥所得粉体花色苷含量是切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花粉 1.34 倍, 切分小的西兰花受热空气影响更大, 导致花色苷氧化损失, 含量低于同温度干燥处理的切分为 3 cm×3 cm 的西兰花粉体。CHARMONGKOLPRADIT 等^[20]通过研究 60~80 °C 热风干燥紫糯玉米, 发现紫糯玉米热风干燥温度为 60~70 °C 时, 干燥粉中可以得到较高的花色苷, 这一现象与本研究结果一致, 其中 65 °C 处理得到的样品中花色苷含量最高。花色苷很容易在热处理过程中发生降解, 热处理温度过高或者热处理时间过长, 都会导致花色苷的损失^[21], 故不宜采用过高温度进行处理, 本研究

结果显示, 以 65~70 °C 为宜。

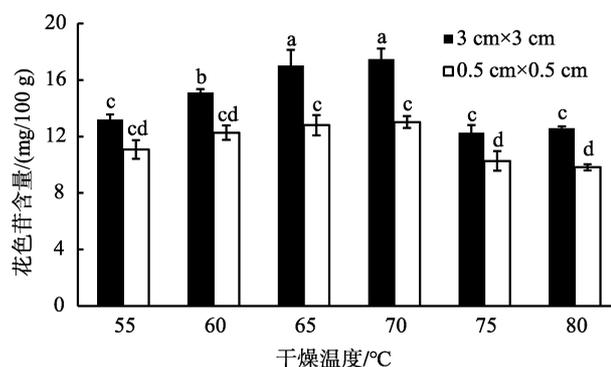


图 4 不同干燥温度对西兰花粉花色苷含量的影响($n=3$)
Fig.4 Effects of different drying temperatures on anthocyanin content in broccoli powder ($n=3$)

2.4 不同干燥温度对西兰花粉总酚和维生素 C 含量的影响

总酚和维生素 C 均具有较强的抗氧化活性, 化学性质不稳定, 受热易分解。由图 5 可知, 切分为 3 cm×3 cm 干燥温度为 70 °C 的西兰花粉中总酚含量最高。通常情况下干燥温度越高, 酚类物质降解速率越快^[22], 但短时间的热处理可以造成西兰花中酚类物质发生热降解, 使酚类含量减少, 但同时也破坏了蔬菜细胞结构, 有利于改善从细胞基质中提取酚类化合物的能力, 从而增加多酚物质的释放量^[18,23], 所以本研究中出现部分温度处理的西兰花总酚含量无显著差异。

如图 6 所示, 随着温度增加, 维生素 C 含量呈现先升高后下降的趋势, 在相同干燥条件下, 切分为 3 cm×3 cm 的西兰花中维生素 C 含量均高于切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花, 其中 70 °C 干燥处理差异最大, 为 1.64 倍。切分较大的西兰花经 80 °C 干燥处理后的西兰花粉中维生素 C 含量较 70 °C 干燥处理下降了 53.8%。温度升高导致植物组织破坏, 有利于维生素 C 的释放, 但维生素 C 在高温条件下不稳定, 易被

氧化^[19]。本研究中 60~70 °C 下干燥的西兰花粉中维生素 C 含量显著高于 55 °C 干燥的西兰花粉, 表明一定程度的高温有助于组织破碎促进维生素 C 溶出, 但温度进一步增加到 75 和 80 °C 造成维生素 C 氧化, 从而降低其含量。

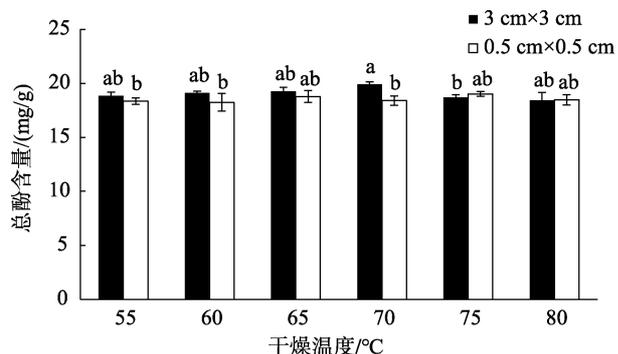


图 5 不同干燥温度对西兰花粉总酚含量的影响($n=3$)

Fig.5 Effects of different drying temperatures on the content of total phenols in broccoli powder ($n=3$)

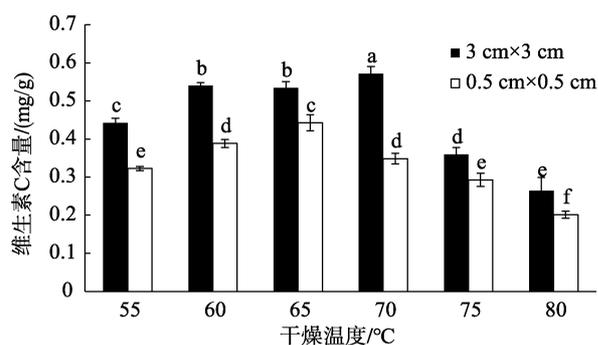


图 6 不同干燥温度对西兰花粉维生素 C 含量的影响($n=3$)

Fig.6 Effects of different drying temperatures on vitamin C content in broccoli powder ($n=3$)

2.5 不同干燥温度对西兰花粉可溶性蛋白含量的影响

从图 7 可以看出, 可溶性蛋白含量同时受切分大小和干燥时间和温度所影响, 温度升高后, 蛋白含量先升高后降低, 切分程度越小, 蛋白流失越快, 蛋白损失程度越高, 这与热风干燥对切段处理后养心菜可溶性蛋白含量影响结果一致^[24]。切分为 3 cm×3 cm 的西兰花经 70 °C 干燥后的可溶性蛋白含量最高, 比 55 °C 干燥处理的西兰花高 0.31 倍。切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花经 80 °C 干燥后的可溶性蛋白含量与 55、60、65 °C 处理的无显著性差异, 较 70 °C 处理的西兰花中可溶性蛋白含量降低了 23.4%。低温干燥损失较大可能是由于干燥时间长, 细胞呼吸和酶的作用时间长, 导致蛋白消耗大^[24], 所以 70 °C 干燥后的可溶性蛋白含量要高于低温干燥。

2.6 不同干燥温度对西兰花粉萝卜硫苷含量的影响

萝卜硫苷是广泛存在于十字花科植物中的一种特有

的次生代谢产物, 其降解产物萝卜硫素具有显著的抗癌活性^[25]。由图 8 可知, 热风干燥温度对萝卜硫苷含量无显著影响, 这表明萝卜硫苷具有较强的热稳定性, JIN 等^[26]通过研究干燥西兰花的降解动力学, 发现干燥对萝卜硫苷的影响很小, 在热风干燥的过程中萝卜硫苷没有发生进一步的降解, 具有较强的热稳定性。然而, 切分大小会导致萝卜硫苷含量发生显著变化, 65 °C 干燥处理下, 切分为 3 cm×3 cm 的西兰花为 0.5 cm×0.5 cm 的 1.28 倍, 切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花经 55、60、70、75 和 80 °C 干燥处理后萝卜硫苷含量分别为同干燥温度切分为 3 cm×3 cm 的 86.4%、72.5%、86.5%、91.8% 和 82.5%。这表明切分较大的西兰花制得的粉末更有效地保留了萝卜硫苷含量, 这可能是由于切分破碎促使萝卜硫苷和黑芥子酶接触, 从而使萝卜硫苷含量降低^[25]。

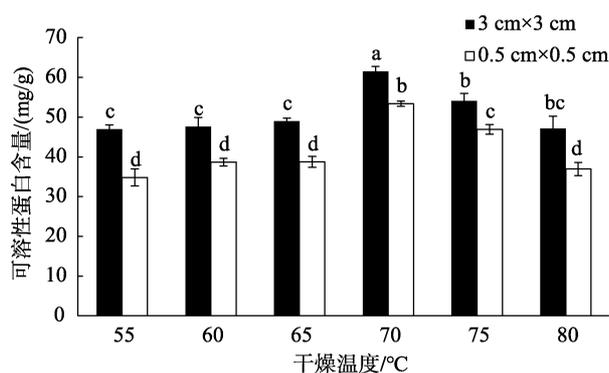


图 7 不同干燥温度对西兰花粉可溶性蛋白含量的影响($n=3$)

Fig.7 Effects of different drying temperature on soluble protein content in broccoli powder ($n=3$)

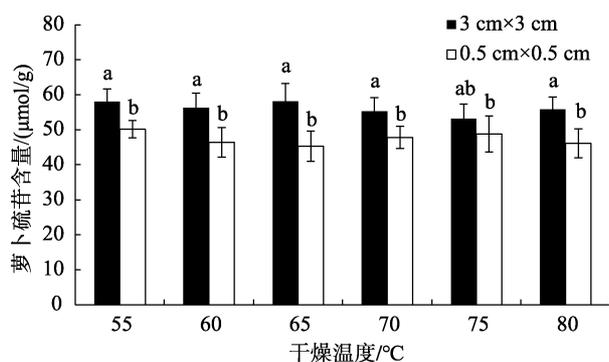


图 8 不同干燥温度对西兰花粉萝卜硫苷含量的影响($n=3$)

Fig.8 Effects of different drying temperatures on glucoraphanin content in broccoli powder ($n=3$)

2.7 不同干燥温度对西兰花粉萝卜硫素形成量的影响

萝卜硫素在植物中以前体化合物萝卜硫苷的形式存在, 在黑芥子酶的催化下发生水解反应的形成。由于 ESP 的存在, 萝卜硫苷会向腈类物质方向水解, 由于 ESP 蛋白

的热敏性更高,因此合适的热处理可以灭活 ESP 蛋白而保留黑芥子酶活力^[27]。WANG 等^[28]研究发现西兰花经过微波、水煮和汽蒸后可以使 ESP 蛋白失活的同时保留较高的黑芥子酶活性,从而可以生成较多的萝卜硫素和少量的萝卜硫腈。方孟玮等^[29]等研究发现甘蓝叶片在 40、50、60 °C 热风干燥处理后均保持较高的异硫氰酸酯形成量,在这些温度的干燥过程中黑芥子酶均保持了较高活性。图 8 结果表明,萝卜硫素的形成量随着干燥温度的增加先增加后降低,切分为 3 cm×3 cm 的西兰花在 65 °C 干燥的西兰花粉中萝卜硫素形成量最高,为 5.37 mg/g,与 70 °C 处理无显著性差异;经 65 °C 处理并切分为 3 cm×3 cm 和 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花粉萝卜硫素形成量分别为 80 °C 干燥的 2.31 倍和 1.73 倍,切分为 3 cm×3 cm 的西兰花在 70 °C 干燥后萝卜硫素形成量比切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花高 1.56 倍;这与孙萍等^[30]研究的紫甘蓝热风干燥后的异硫氰酸酯变化规律基本一致。这可能是由于在 65 °C 干燥时,最大程度保留了黑芥子酶活力,并钝化 ESP 蛋白活性,从而萝卜硫素形成量得以显著增加;而随着温度继续增加,黑芥子酶活力也降低,从而导致萝卜硫素形成量降低。监测干燥过程中黑芥子酶和 ESP 蛋白活性,将作为进一步研究的方向。

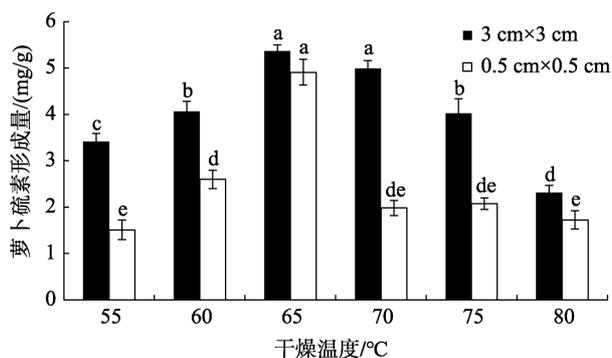


图 9 不同干燥温度对西兰花粉萝卜硫素形成量的影响($n=3$)

Fig.9 Effects of different drying temperatures on sulforaphane formation in broccoli powder ($n=3$)

3 结 论

本研究结果表明,随着干燥温度的升高,西兰花粉亮度和叶绿素含量逐渐降低,粉体绿色逐渐减少,呈现暗黄色。干燥温度对西兰花粉中总酚含量无显著影响,花色苷、维生素 C、可溶性蛋白因其本身性质不稳定,随温度升高均呈现出先增高后降低的趋势,高温和长时间干燥均会造成营养成分的损失。切分大小为 3 cm×3 cm 的西兰花粉花色苷、维生素 C、可溶性蛋白、萝卜硫苷含量均高于切分为 0.5 cm×0.5 cm 的西兰花。经不同干燥温度处理后的萝卜硫苷含量无显著差异,萝卜硫素含量却呈现随温度先升高后降低的趋势,但本研究未检测干燥过程中黑芥子酶和

ESP 蛋白活性变化规律,今后将深入研究。综上所述,切分花球直径和茎梗长度为 3 cm,热风干燥温度为 70 °C,干燥时间为 200 min 时制备的西兰花粉营养品质更高。本研究为富含活性成分西兰花粉的工业化生产提供理论依据。

参考文献

- [1] 王娟,肖亚冬,徐亚元,等.不同预处理方式对花椰菜干制品品质影响研究[J].食品工业科技,2020,41(24):36-43.
WANG J, XIAO YD, XU YY, *et al.* Effect of different pretreatment methods on the quality attributes of dried cauliflower [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(24): 36-43.
- [2] GUO QH, GUO LP, WANG ZY, *et al.* Response surface optimization and identification of isothiocyanates produced from broccoli sprouts [J]. *Food Chem*, 2013, 141(3): 1580-1586.
- [3] 王丽,李淑荣,罗红霞.国内外蔬菜粉加工研究进展[J].食品研究与开发,2016,37(7):215-219.
WANG L, LI SR, LUO HX. Research progress of vegetable powder processing at home and abroad [J]. *Food Res Dev*, 2016, 37(7): 215-219.
- [4] 张明,马超,杨立风,等.不同预处理方式对西兰花等外品热风干燥粉体性质的影响[J].食品工业科技,2018,39(14):12-17.
ZHANG M, MA C, YANG LF, *et al.* Effects of different pretreatment methods on properties of broccoli and other foreign products in hot air drying [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2018, 39(14): 12-17.
- [5] 孟庆然.超微粉碎对天然可食植物组织理化性质及营养素释放效率影响的研究[D].无锡:江南大学,2019.
MENG QR. Study on the effect of superfine grinding on physicochemical properties and nutrients release efficiency [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [6] DRABINSKA N, CISKA E, SZMATOWICZ B, *et al.* Broccoli by-products improve the nutraceutical potential of gluten-free mini sponge cakes [J]. *Food Chem*, 2018, 267: 170-177.
- [7] 张明,吴茂玉,杨立风,等.不同干燥方式对西兰花老茎粉体物理性质及营养品质的影响[J].食品科技,2018,43(10):60-66.
ZHANG M, WU MY, YANG LF, *et al.* Effects of different drying methods on physical properties and nutritional quality of broccoli old stems powder [J]. *Food Sci Technol*, 2018, 43(10): 60-66.
- [8] 杨华,杨性民,孙金才.不同干燥方式对西兰花蔬菜粉品质的影响[J].中国食品学报,2013,13(7):152-158.
YANG H, YANG XM, SUN JC. Effects of different drying methods on the quality of broccoli vegetable powder [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2013, 13(7): 152-158.
- [9] MAHN A, MARTIN C, REYES A, *et al.* Evolution of sulforaphane content in sulforaphane-enriched broccoli during tray drying [J]. *J Food Eng*, 2016, 186: 27-33.
- [10] OLIVIERO T, VERKERK R, DEKKER M. A research approach for quality based design of healthy foods: Dried broccoli as a case study [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2013, 30(2): 178-184.
- [11] 周明,徐明生,陈金印,等.‘修水化红’甜橙皮热风干燥动力学及其品质特性分析[J].食品科学,2020,41(11):141-149.
ZHOU M, XU MS, CHEN JY, *et al.* Drying kinetics and quality characteristics of ‘Xiushui Huahong’ sweet orange peel dried by hot air [J]. *Food Sci*, 2020, 41(11): 141-149.
- [12] GUO LP, YANG RQ, WANG ZY, *et al.* Effect of NaCl stress on

- health-promoting compounds and antioxidant activity in the sprouts of three broccoli cultivars [J]. *Int J Food Sci Nutr*, 2013, 65(4): 476–481.
- [13] 安容慧, 周宏胜, 罗淑芬, 等. 真空预冷及不同流通方式对上海青货架品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 43(13): 241–248.
AN RH, ZHOU HS, LUO SF, *et al.* The effect of vacuum pre-cooling and different circulation methods on the quality of shanghai green shelf [J]. *Food Sci*, 2020, 43(13): 241–248.
- [14] MARTINEZ S, ARMESTO J, GOMEZ-LIMIA L, *et al.* Impact of processing and storage on the nutritional and sensory properties and bioactive components of *Brassica* spp. A review [J]. *Food Chem*, 2020, 313: 126065.
- [15] ZHUANG L, XU KX, ZHU YL, *et al.* Calcium affects glucoraphanin metabolism in broccoli sprouts under ZnSO₄ stress [J]. *Food Chem*, 2021, 334: 127520.
- [16] MIAO HY, LIN JY, ZENG W, *et al.* Main health-promoting compounds response to long-term freezer storage and different thawing methods in frozen broccoli florets [J]. *Foods*, 2019, 8(9): 375.
- [17] 楚文靖, 盛丹梅, 张楠, 等. 红心火龙果热风干燥动力学模型及品质变化[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 150–155.
CHU WJ, SHENG DM, ZHANG N, *et al.* Hot-air drying of red-fleshed pitaya: Kinetic modelling and quality changes [J]. *Food Sci*, 2019, 40(17): 150–155.
- [18] 康三江, 张海燕, 苟丽娜, 等. 野生蒲公英漂烫中叶绿素和颜色的热降解动力学[J]. *食品工业*, 2020, 41(2): 66–70.
KANG SJ, ZHANG HY, GOU LN, *et al.* Kinetics of chlorophyll degradation and color in wild dandelion [J]. *Food Ind*, 2020, 41(2): 66–70.
- [19] 樊田利, 刘若男, 王凤丽, 等. 不同蒸制功率对西兰花营养品质的影响研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(19): 161–167.
FAN TL, LIU RN, WANG FL, *et al.* Study on the effect of different steaming power on the nutritional quality of broccoli [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(19): 161–167.
- [20] CHARMONGKOLPRADIT S, SOMBOON T, PHATCHANA R, *et al.* Influence of drying temperature on anthocyanin and moisture content in purple waxy corn kernel using a tunnel dryer [J]. *Case Stud Therm Eng*, 2021, 25: 100886.
- [21] 陈景秋, 陈士国, 傅丽, 等. 中式烹饪对紫甘蓝的抗氧化物质和抗氧化活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(2): 136–144.
CHEN JQ, CHEN SG, FU L, *et al.* Effects of Chinese cooking methods on antioxidants and antioxidant activity of red cabbage [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2020, 20(2): 136–144.
- [22] 唐璐璐, 易建勇, 毕金峰, 等. 预处理对压差闪蒸干燥丰水梨脆片品质及微观结构的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(21): 73–78.
TANG LL, YI JY, BI JF, *et al.* Effects of pretreatments on the quality and microstructure of crispy Housui pear slices dried by decompression flash drying [J]. *Food Sci*, 2016, 37(21): 73–78.
- [23] 苗文娟, 何鑫, 夏玥, 等. 滁菊多酚氧化酶和过氧化物酶热钝化动力学研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(13): 9–14.
MIAO WJ, HE X, XIA Y, *et al.* Thermal inactivation kinetics of polyphenol oxidase and peroxidase from Chuju [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(13): 9–14.
- [24] 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.
SUN QY, ZHANG ZC, JIA ZC, *et al.* Effects of physical pretreatment methods and hot air temperatures on the hot air drying characteristics and quality of Yangxincai [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(13): 210–215.
- [25] NUGRAHEDI PY, OLIVIERO T, HEISING JK, *et al.* Stir-frying of Chinese cabbage and pakchoi retains health-promoting glucosinolates [J]. *Plant Food Hum Nutr*, 2017, 72(4): 439–444.
- [26] JIN X, OLIVIERO T, SMAN R, *et al.* Impact of different drying trajectories on degradation of nutritional compounds in broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, 59(1): 189–195.
- [27] 姜睿, 李红燕, 薛长湖. 不同处理方法对菜菔子中菜菔素和萝卜硫苷的影响[J]. *食品科技*, 2019, 44(11): 84–90.
JIANG R, LI HY, XUE CH. Effect of different methods on glucoraphane contents in radish seed [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(11): 84–90.
- [28] WANG GC, FARNHAM M, JEFFERY E. Impact of thermal processing on sulforaphane yield from broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *italica*) [J]. *J Agric Food Chem*, 2012, 60(27): 6743–6748.
- [29] 方孟玮, 杨润强, 郭丽萍, 等. 切分、汽蒸及脱水对甘蓝叶片中硫苷-黑芥子酶系统的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(5): 41–45.
FANG MW, YANG RQ, GUO LP, *et al.* Effects of cutting, steaming and dehydration on glucosinolate-myrosinase system of cabbage [J]. *Food Sci*, 2016, 37(5): 41–45.
- [30] 孙萍, 王宏达, 王凤舞, 等. 紫甘蓝粉热风干燥动力学及其品质研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(8): 61–67.
SUN P, WANG HD, WANG FW, *et al.* Study on kinetic modeling of hot-air and quality of red cabbage powder [J]. *Food Sci Technol*, 2020, 45(8): 61–67.

(责任编辑: 郑丽 韩晓红)

作者简介



王宏达, 硕士研究生, 主要研究方向为食品营养与检测。
E-mail: 376189297@qq.com



郭丽萍, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品营养与检测。
E-mail: happygpl@126.com