

热风 and 热风-脉动压差闪蒸联合干燥对草莓色泽及品质的影响

李斌¹, 赵悦¹, 毕金峰^{1,2}, 陈芹芹², 易建勇², 毕延娣¹

(1. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866)

(2. 中国农业科学院农产品加工研究所, 农业部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

摘要: 为探究草莓热风单一干燥和热风-脉动压差闪蒸联合干燥后产品品质变化, 对草莓实施均匀试验, 研究不同干燥温度、真空干燥温度和预干燥含水量对草莓干燥特性、色泽和理化品质的影响, 并采用层次分析法优化干燥工艺条件。实验结果得到: 草莓热风-脉动压差闪蒸联合干燥最佳工艺条件为预干燥含水率 60%, 闪蒸温度 90 °C、停滞时间 15 min、闪蒸压力差 0.10 MPa, 真空干燥温度 70 °C(60 min)-60 °C(40 min), 总干燥时间 255 min; 温度对草莓热风干燥影响较为显著, 其最优工艺条件为干燥温度 70 °C, 干燥时间 360 min。两种最优工艺条件相比, 草莓热风-脉动压差闪蒸联合干燥品质佳, 硬度低(为 2323.65N), Vc 含量较高, 达到 339.38×10^{-2} mg/g DW, Pg-3-Glu 和 Cy-3-Glu 的保留率也远远大于单一热风干燥, 分别是热风干燥含量的 2.5 倍和 2.2 倍; 且干燥产品色相值为 24.66, 色泽好, 干燥时间短。

关键词: 热风干燥; 脉动压差闪蒸干燥; 草莓; 层次分析法

文章编号: 1673-9078(2016)12-204-210

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.12.032

Effect of Hot Air Drying and Hot Air-pulsed Sudden Decompression Flash

Drying on the Color and Quality of Strawberries

LI Bin¹, ZHAO Yue¹, BI Jin-feng^{1,2}, CHEN Qin-qin², YI Jian-yong², BI Yan-di¹

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China) (2. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture, Beijing 100193, China)

Abstract: To study changes in strawberry quality after drying by hot air drying (HAD) or hot air-pulsed sudden decompression flash drying (HA-PSDFD), the effects of drying temperature, vacuum drying temperature, and pre-drying water content on drying characteristics, color, and physical and chemical qualities of dry strawberry products were studied. Uniform design tests and drying technologies were analyzed and evaluated using analytic hierarchy processes. The results showed that the optimum HA-PSDFD drying conditions were a pre-drying water content of 60%, flashing temperature of 90 °C, dead time of 15 min, pressure difference of 0.10 MPa, vacuum drying temperature of 70 °C (60 min) -60 °C (40 min), and a total drying time of 255 min. Drying temperature had a more significant impact on strawberry drying rate during HAD. The optimum HAD drying process was a drying temperature of 70 °C for 360 min. Comparing these two optimal process conditions, the quality of strawberry products dried by HA-PSDFD was superior to the quality of products dried by HAD, resulting in a lower hardness value (2323.65 N) and a higher Vc content (339.38×10^{-2} mg/g DW). In addition, pelargonidin-3-glucoside and cyanidin-3-glucoside contents after HA-PSDFD were 2.5 and 2.2 higher than those by HAD, respectively. Moreover, drying time was reduced and the color of the product was superior, upon HA-PSDFD treatment, with a hue value of 24.66.

Key words: hot air drying; hot air-pulsed sudden decompression flashing drying; strawberry; analytic hierarchy process

收稿日期: 2015-11-12

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费资助(201303073)

作者简介: 李斌(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 浆果深加工关键技术研究及功能食品开发

通讯作者: 毕金峰(1970-), 男, 博士, 研究员研究方向, 研究方向: 果蔬精深加工与副产物综合利用技术

草莓为草本浆果植物, 柔软多汁, 酸甜可口, 且果实营养价值高, 富含酚类等抗氧化活性物质^[1], 特别是 Vc 含量较高, 有很好的营养、保健和药用价值。我国草莓栽培面积已超过 8 万公顷, 年产量 188 万 t 多^[2], 种植约 2000 多个品种^[3], 种植面积大、品种齐全及资源广泛, 除部分以取食鲜果销售外, 由于草莓

的季节性和贮存等诸多原因,大部分是加工成多元化农产品,例如速冻草莓、草莓汁、草莓酱和草莓果干等,通过一些加工技术,来较好地保留存在草莓中的营养物质,改善产品的营养品质,以适用于市场的需求。

干燥方式是目前果蔬加工常用的一种加工方法,不仅保留原料原有的经济价值及营养成分^[4,5],节约果蔬资源的浪费,而且味道醇香,食用方便,便于贮藏和运输。目前,应用于食品干燥中最常见的加工技术是热风干燥,其操作便捷,应用广范,适用性强。但在加工过程中,也存在一些弊端,热风干燥干燥时间长^[6],营养物质损失大,这对干燥产品的品质有很大影响。脉动压差闪蒸干燥是一种新型的干燥方式,在变温压差膨化干燥技术基础上,精密调控干燥温度和干燥环境压力,并以脉动形式触发干燥环境压力的瞬间变化,从而引起干燥原料内部水分迅速沸腾汽化,借助水分汽化产生的作用力,带动高分子物质发生上闪蒸形变,致使被干燥原料形成多孔网络结构,干燥速度快,干燥产品品质较优,此技术已成为果蔬干燥加工的新宠,具有极大的加工优势和发展空间。本文以草莓为研究对象,研究热风干燥和热风-脉动压差闪蒸联合干燥对干燥产品品质的影响。重点探究热风干燥温度及脉动压差闪蒸干燥的预干燥含水量和真空干燥温度等因素,对草莓干燥产品的色泽和一些理化营养品质的影响。再通过层次分析法,综合优选出两种干燥技术的工艺条件,对比其产品品质,为草莓干燥加工提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验原料

草莓原料购于北京市上地小营水果批发市场,产地为辽宁丹东,品种为幸香。选择表面无腐烂,大小和颜色也相近的果实,去除蒂部。草莓纵向切片,厚

度为 4 ± 0.5 mm,放置-20℃冰箱冷藏备用。

1.2 主要仪器设备

QDPH10-1 脉动压差闪蒸果蔬干燥机,天津市勤德新材料科技有限公司;DHG-9123A 电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;TA.XT 2i/50 型物性分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;BSA 42025 电子天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;HunterLab-D25LT 型色差仪,美国 HunterLab 公司;Waters 2489 高效液相色谱仪,Waters 公司;Agilent 1200 高效液相色谱仪,美国安捷伦公司。

1.3 试验方法

室温下草莓解冻 30 min 后,整齐平摆在网状铁托盘中间,在风速为 2.1 m/s 的条件下,选取不同干燥温度 60、70、80、90℃进行试验。每隔 10 min 测定一次样品质量变化,直至干燥样品前后两次称量均无变化,结束试验(精确到 0.01 g)。

1.3.1 热风干燥试验

室温下草莓解冻 30 min 后,整齐平摆在网状铁托盘中间,在风速为 2.1 m/s 的条件下,选取不同干燥温度 60、70、80、90℃进行试验。每隔 10 min 测定一次样品质量变化,直至干燥样品前后两次称量均无变化,结束试验(精确到 0.01 g)。

1.3.2 热风-脉动压差闪蒸干燥试验

室温下草莓解冻 30 min 后,整齐平摆在网状铁托盘中间,在温度为 70℃的条件下先进行热风预干燥,分别达到不同预干燥含水量 50、60、70%,再在闪蒸温度 90℃、停滞时间 15 min、闪蒸压力差 0.10 MPa 的条件下,选用不同抽空温度 60 和 70℃进行试验,直至干燥样品前后两次称量无变化,结束试验(精确到 0.01 g)。每组试验重复 3 次,根据预实验结果,确定具体实验安排如表 1 所示。

表 1 热风-脉动压差闪蒸联合干燥试验设计与参数

Table 1 Design and parameters of hot air-pulsed sudden decompression flash drying experiments

工艺条件	试验名称	预干燥含水量/%	预干燥时间/min	真空干燥温度/℃与干燥时间/min
工艺 1	HA-PSDFD 1	50	200	70℃(80 min)
工艺 2	HA-PSDFD 2	50	200	60℃(120 min)
工艺 3	HA-PSDFD 3	70	140	70℃(135 min)
工艺 4	HA-PSDFD 4	60	155	70℃(60 min)+60℃(40 min)
工艺 5	HA-PSDFD 5	60	155	70℃(30 min)+60℃(90 min)

1.3.3 理化指标的测定

(1) 色泽的测定:采用 HunterLab-D25LT 型色差仪,测量样品的 $L/a/b$ 值, L 为明或暗值, a 为红或

绿值, b 为黄或蓝值, ΔE 表示色差。式中 L^* 、 a^* 和 b^* 表示草莓干燥产品的色泽值, L_0 、 a_0 和 b_0 为草莓鲜样的色泽值。 $h^{0[24]}$ 为色相,接近 0°或 360°表示为红色。

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

$$h^0 = \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

(2) 硬度的测定：取大小相近的样品，采用 TA.XT2i/50 物性分析仪测定，值的大小表示样品阻碍探头切断的最大力，即为样品的硬度，由计算机直接输出，单位/N。每个样品试验重复测定 10 次，最后取平均值。

(3) 复水比的测定^[7]：准确称取 2 g 左右的样品，放入 100 mL 烧杯中，加入 50 mL 蒸馏水，室温下浸泡 30 min，擦干样品表面水分称重，前后两次样品的质量比值即为复水比。

(4) 维生素 C (Vc) 的测定：

样品的制备：将草莓样品打成粉末，准确称取样品 1 g 左右（精确到 0.0001），加入 10 mL 6%偏磷酸提取后，4 °C 条件下离心 20 min，转速为 8000 r/min。取上清液过滤，再过 0.45 μm 滤膜，以备 HPLC 分析。

高效液相色谱法条件：采用 C18 分析柱(4.6×250 mm, 5 μm)，流动相 A 为体积 V_{磷酸缓冲溶液}:V_{甲醇}=98:2 的磷酸缓冲溶液，流动相 B 为甲醇溶液，进行梯度洗脱，0 min 用 100%A 洗脱，9 min 用 20%A 洗脱并维持 1 min，14.1~20 min 100%A 洗脱，流速为 0.5 mL/min，柱温为 30 °C，检测波长为 245 nm，进样量为 10 μL。

(5) 天竺葵素-3-葡萄糖苷 (Pg-3-Glu) 和矢车菊素-3-葡萄糖苷 (Cy-3-Glu) 的测定：

样品的制备：先将草莓打成粉末状，准确称取样品 1 g 左右（精确到 0.0001），用 10 mL、0.1% HCl 无水甲醇溶液提取，均质 1 min 后，置于 4 °C 冰箱避光浸提 14 h~16 h，收集上清液过滤，剩余残留固体采用相同方法再次提取 2 h，最后合并两次上清液，抽滤，旋转蒸发浓缩，用 5%甲酸定容至 5 mL，过 0.45 μm 滤膜，贮存在-20 °C 冰箱，以备 HPLC 分析。

高效液相色谱法条件：采用 Agilent 1200 高效液相色谱仪测定，配有四元泵系统、自动进样器和 DAD 检测器。分析条件为：C18 分析柱(4.6×250 mm, 5 μm)，流动相 A 为 5%的甲酸水溶液，流动相 B 为甲醇溶液，流速为 1 mL/min，进行等速洗脱，柱温 30 °C，进样体积为 20 μL，检测波长为 520 nm，标曲浓度范围为 0.5~50 μg/mL，结果以 Pg-3-Glu 和 Cy-3-Glu 表示。

1.4 数据处理分析

通过软件 Origin 8.0 作图，用 EXCEL 2007 和 SPSS 19.0 软件进行数据分析。

2 结果与讨论

2.1 热风干燥对草莓品质的影响

2.1.1 热风干燥对草莓色泽品质的影响

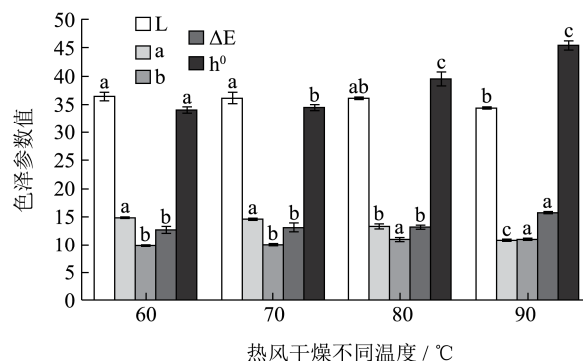


图 1 热风干燥不同温度对草莓色泽的影响

Fig.1 Effect of drying temperature on strawberry color

注：不同字母代表不同热风干燥温度，草莓色泽参数数值差异具有显著性 ($p < 0.05$)，其中两两比较有重叠字母的差异无显著性。

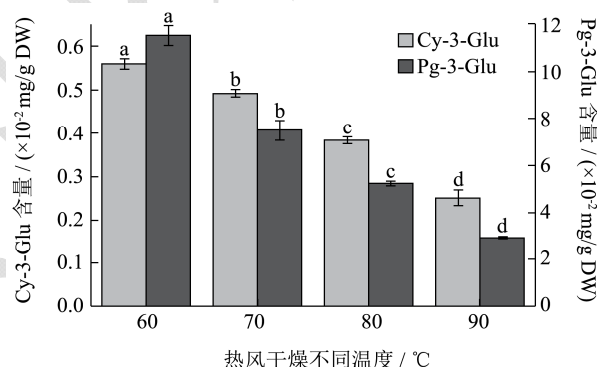


图 2 热风干燥不同温度对草莓 Cy-3-Glu 和 Pg-3-Glu 的影响

Fig.2 Effect of drying temperature on strawberry Cy-3-Glu and Pg-3-Glu content

注：不同字母代表不同热风干燥温度，草莓 Cy-3-Glu 和 Pg-3-Glu 含量差异具有显著性 ($p < 0.05$)，其中两两比较有重叠字母的差异无显著性。

干燥产品的色泽属性直接影响产品被消费者接受的程度，是衡量干燥产品品质的最直接判断标准。图 1 是不同的热风干燥温度对草莓色泽参数的影响，由图可知，代表红色的 a 值与明亮程度的 L 值均随着干燥温度的升高而减少，且代表黄色的 b 值、ΔE 和 h⁰ 的变化趋势正与之相反，其值是逐渐升高的，且随温度变化较为显著。说明随着干燥温度的升高，草莓产品的红色逐渐显弱，亮度逐渐降低，色泽品质变差。

花青素是一种存在植物中的天然色素，草莓红色主要与花青素的两种单体存在有关，即为天竺葵素-3-

葡萄糖苷 (Pg-3-Glu) 与矢车菊素-3-葡萄糖苷 (Cy-3-Glu), 有学者^[8]研究得到其含量比大概为20:1, 这与本文的研究结果相似。由图 2 可得到, 花青素单体 Pg-3-Glu 和 Cy-3-Glu 的含量, 随着温度的升高也呈降低趋势。这与草莓产品 *a* 值和 *L* 值的变化趋势一致, 表明草莓色泽随干燥温度的变化, 部分原因是由于热敏性花青素 Pg-3-Glu 和 Pg-3-Glu 在高温条件下的降解, 生成了黑色素所致。也有可能是由于草莓果实中富含的还原糖发生焦糖化或发生非酶褐变反应, 生成褐色物质的原因。

2.1.2 热风干燥对草莓理化品质的影响

干燥产品的表面结构、硬度以及孔隙的形成也可以影响到产品的最终品质, 间接反应出原料的一些理化品质变化, 试验中以测定样品硬度和复水比表示。由表 2 可知, 干燥温度越高, 草莓样品的硬度越低,

说明草莓产品的脆度越好, 在干燥过程中, 草莓中纤维素的结晶、果胶的降解以及淀粉的糊化都有可能影响硬度的变化。而草莓复水能力随干燥温度的升高, 先变大再减少。由于草莓热风干燥时间相对较长, 部分细胞结构与组织遭受迫害, 形成了孔隙, 在复水时, 液体入侵容易, 所以复水能力强; 而温度大于 80/90 °C 时, 干燥温度过高, 细胞中蛋白质变质, 组织受害严重, 难以贮存补液, 造成复水程度显弱。再者, 草莓中 Vc 含量丰富, 具有高效抗氧化性能及有抗癌作用, 能有效抑制某些致癌物的形成。由表可得知, 草莓样品中 Vc 的含量在 60 °C 时含量最高, 达到 164.50×10^{-2} mg/g DW, 其次是 70 °C 时含量 (161.81×10^{-2} mg/g DW), 但 90 °C 时 Vc 降解严重, 含量偏低, 可见干燥温度对草莓样品中 Vc 含量的影响较为显著。

表 2 不同热风干燥条件对草莓理化品质的影响

Table 2 Effect of hot air drying conditions on strawberry physical and chemical qualities

干燥温度/°C	干燥时间/min	硬度	复水比	Vc($\times 10^{-2}$ mg/g DW)
60	420	23971.82 \pm 417.95 ^a	3.55 \pm 0.06 ^{bc}	164.50 \pm 5.18 ^a
70	360	3259.27 \pm 306.21 ^b	3.72 \pm 0.03 ^a	161.81 \pm 4.01 ^a
80	285	1624.71 \pm 105.86 ^c	3.60 \pm 0.02 ^b	119.79 \pm 5.34 ^b
90	255	1428.69 \pm 53.15 ^c	3.50 \pm 0.03 ^c	100.01 \pm 7.39 ^c

注: 不同字母代表不同热风干燥温度下, 硬度、复水比和 Vc 含量差异具有显著性 ($p < 0.05$), 其中两两比较有重叠字母的差异无显著性。

2.2 热风-脉动压差闪蒸联合干燥对草莓品质的影响

的影响

2.2.1 热风-脉动压差闪蒸联合干燥对草莓色泽品质的影响

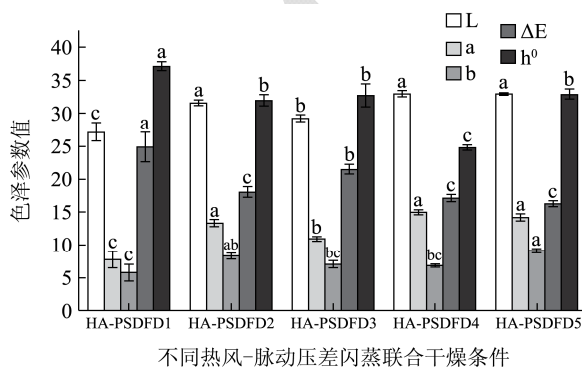


图 3 不同脉动压差闪蒸干燥条件对草莓色泽的影响

Fig.3 Effect of different pulsed sudden decompression flash drying conditions on strawberry color

注: 不同字母代表不同工艺条件, 草莓色泽参数值差异具有显著性 ($p < 0.05$), 其中两两比较有重叠字母的差异无显著性。

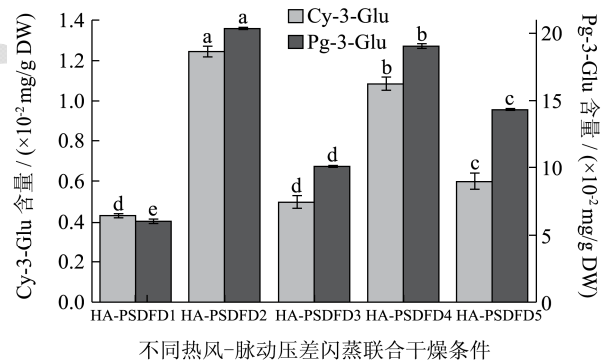


图 4 不同脉动压差闪蒸干燥条件对草莓 Cy-3-Glu 和 Pg-3-Glu 的影响

Fig.4 Effect of different pulsed sudden decompression flash drying conditions on Cy-3-Glu and Pg-3-Glu in strawberries

注: 不同字母代表不同工艺条件, 草莓 Cy-3-Glu 和 Pg-3-Glu 含量差异具有显著性 ($p < 0.05$), 其中两两比较有重叠字母的差异无显著性。

图 3 是不同热风-脉动压差闪蒸联合干燥条件对草莓色泽品质的影响, 由图 3 所述, 工艺 4 和工艺 5 的 *a* 值和 *L* 值较高, *b* 值、色差 ΔE 和色相 h^0 均较低, 说明工艺 4 和工艺 5 条件下的草莓产品色泽较好。其

次工艺 2 的草莓由于真空干燥温度最低, 所以色泽也较好。而工艺 3 与之相比预干燥含水量高, 脉动压差闪蒸干燥时间长, 造成色泽欠佳, a 值偏低, 色差 ΔE 值偏高。工艺 1 真空干燥温度一直维持在相对高温的 $70\text{ }^\circ\text{C}$, 草莓色泽最差。其次, 各工艺条件的 a 值与图 4 所表述的 Pg-3-Glu 和 Cy-3-Glu 含量呈正相关关系, 说明草莓色泽的变化受二者含量影响较大。

2.2.2 热风-脉动压差闪蒸联合干燥对草莓理化品质的影响

表 3 为不同脉动压差闪蒸干燥条件对草莓理化品质的影响, 由表可知, 工艺 4 和工艺 5 的硬度值低, 反之复水能力高。这干燥条件有关, 工艺 4 和工艺 5 草莓预干燥含水量均为 60%, 真空干燥温度属于降温

干燥过程, 能更好的保留样品的闪蒸膨胀结构, 所以硬度低, 复水能力好。而工艺 3 与之相比, 预干燥含水量大, 闪蒸过程中组织结构难以支撑大量水分的扩散, 在真空干燥过程中结构有所塌陷, 造成产品硬度大, 复水弱。工艺 2 真空干燥温度最低, 干燥时间长, 所以硬度最大。反之工艺 1 的真空干燥温度最高, 细胞结构损伤最重, 复水能力最弱。由表还可知 5 个工艺条件下, 工艺 4 的 VC 含量最高, $339.38 \times 10^{-2} \text{ mg/g DW}$, 是最低含量 ($72.15 \times 10^{-2} \text{ mg/g DW}$) 的 4.7 倍, 可见不同脉动压差闪蒸工艺条件能显著影响产品中 Vc 含量, 且真空干燥温度比预干燥含水量影响更为显著。

表 3 不同脉动压差闪蒸干燥条件对草莓理化品质的影响

Table 3 Effect of pulsed sudden decompression flashing drying conditions on strawberry physical and chemical qualities

工艺条件	干燥试验名称	干燥时间/min	硬度	复水比	Vc($\times 10^{-2} \text{ mg/g DW}$)
工艺 1	HA-PSDFD 1	200+80	3218.85 \pm 172.99 ^b	2.33 \pm 0.09 ^c	72.15 \pm 2.67 ^e
工艺 2	HA-PSDFD 2	200+120	4621.53 \pm 45.57 ^a	2.77 \pm 0.12 ^{bc}	253.40 \pm 9.15 ^c
工艺 3	HA-PSDFD 3	140+135	3179.92 \pm 334.51 ^b	2.76 \pm 0.04 ^{bc}	189.95 \pm 9.36 ^d
工艺 4	HA-PSDFD 4	155+100	2323.65 \pm 218.94 ^c	3.42 \pm 0.27 ^a	339.38 \pm 4.74 ^a
工艺 5	HA-PSDFD 5	155+120	2942.05 \pm 545.32 ^{bc}	2.99 \pm 0.08 ^{ab}	310.79 \pm 5.55 ^b

注: 不同字母代表不同工艺条件下, 硬度、复水比和 VC 含量差异具有显著性 ($p < 0.05$), 其中两两比较有重叠字母的差异无显著性。

2.3 层次分析法优化草莓干燥条件

2.3.1 优选草莓干燥条件层次结构模型的建立

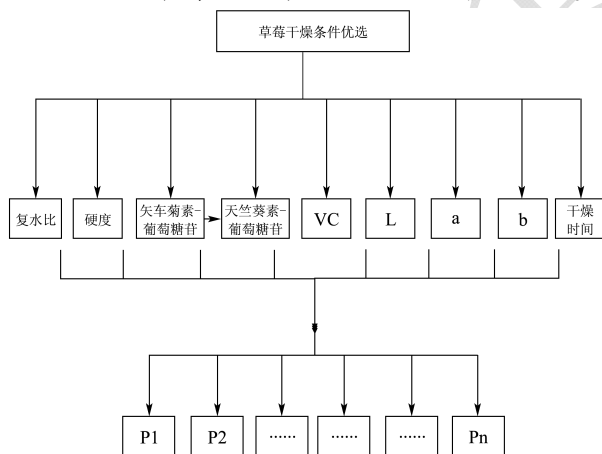


图 5 草莓干燥工艺条件优选的层次结构模型

Fig.5 Hierarchical structure model of optimal strawberry drying process conditions

由于单一指标分析的局限性, 不能综合评价干燥条件的优劣, 现将层次分析法 (AHP) 应用在草莓干燥条件的优选, 对多项指标进行赋权求和, 使结果更具科学性。AHP 是将目标分为若干层次, 按照准则层

指标的不同权重进行综合评价, 草莓干燥条件的优选层次结构模型如图 5 所示, 依次为目标层、准则层和方案层。

2.3.2 构建判断矩阵及一致性检验

依据 1~9 的层次评分标准 (表 4), 评价草莓干燥产品指标的重要性。评价标度越大, 说明此指标在同层结构中所占的比重越大。干燥时间越短, 其能源利用率越高, Vc 是草莓重要的营养指标, 所以二者指标的评价标度最大。其次, 草莓色泽 a 值和 L 值越大, 产品颜色越好, 为较重要标度。Pg-3-Glu 与草莓色泽密切相关, 复水比体现出产品的内部结构变化, 一般重要。评价标度最小为含量少的 Cy-3-Glu、b 和硬度。所以全部指标评价标度的重要顺序为: 干燥时间 = VC > a = L > Pg-3-Glu > 复水比 > Cy-3-Glu > b > 硬度。再建立成对判断矩阵, 计算权重值^[9], 详见表 5。各判断矩阵构造的合理性直接影响着草莓优选干燥条件的最终结果, 它是对同一层次上的不同元素的重要性分析比较。

判断矩阵的一致性检验, 根据 $CI = (\lambda_{\max} - 9) / (9 - 1) = 0.0366$, 当 $n = 9$ 时, 随机一致性标准值 $RI = 1.45$, 求得 $CR = CI / RI = 0.025 < 0.1$, 说明判断矩阵的一致性较好。

表4 草莓干燥产品指标的层次评分标度

Table 4 Evaluation standard of dry strawberry product indices

评价标度	说明
1	两个元素相互比较, 具有同等重要性
3	两个元素相互比较, 一个元素比另一个元素略微重要
5	两个元素相互比较, 一个元素比另一个元素比较重要
7	两个元素相互比较, 一个元素比另一个元素非常重要
9	两个元素相互比较, 一个元素比另一个元素绝对重要
2、4、6和8	介于相邻程度的中间值

表5 草莓干燥产品品质成对比较判断矩阵 0-C 及一致性检验

Table 5 Dry strawberry product quality paired comparison judgment matrix and consistency testing

0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	w _i
C1	1	1/4	2	1	1/3	4	1/3	3	1/4	0.0756
C2	4	1	4	4	2	7	2	5	1	0.2174
C3	1/2	1/4	1	1/2	1/3	3	1/4	2	1/4	0.0538
C4	1	1/4	2	1	1/2	4	1/2	3	1/4	0.0827
C5	3	1/2	3	2	1	5	1	4	1/2	0.1408
C6	1/4	1/7	1/3	1/4	1/5	1	1/5	1	1/7	0.0290
C7	3	1/2	4	2	1	5	1	5	1/2	0.1490
C8	1/3	1/5	1/2	1/3	1/4	1	1/5	1	1/5	0.0344
C9	4	1	4	4	2	7	2	5	1	0.2174

$\lambda_{\max}=9.2928, CI=0.0366, RI=1.45, CR=0.0252<0.1$

注: C1~C9 依次为复水比、Vc、Cy-3-Glu、Pg-3-Glu、L 值、硬度、a 值、b 值和干燥时间。

2.3.3 草莓干燥条件优选的综合排名

先将评价干燥草莓片的 9 种品质指标进行标准化处理, 再根据层次分析法中所确定的权重系数, 加权求和得到各种工艺条件的综合评价, 从而优选草莓干燥条件:

综合得分=复水比×0.0756+Vc×0.2174+矢车菊素-3-葡萄糖苷×0.0538+天竺葵素-3-葡萄糖苷×0.0827

+L×0.1428+硬度×(-0.0290)+a×0.1490+b×0.0344+干燥时间×(-0.2174)

结果如表 6 所示。根据 AHP 综合评分的标准, 得到草莓热风干燥条件的优选顺序为: 70 °C>60 °C>80 °C>90 °C, 热风-脉动压差闪蒸联合干燥的优选顺序为: 工艺 4>工艺 5>工艺 2>工艺 3>工艺 1, 这与单因素对草莓品质影响的分析结果一致。

表6 草莓不同干燥工艺条件的品质及综合评价结果

Table 6 Quality and overall evaluation results of different drying process conditions for strawberries

工艺条件	综合评价指标										综合评分	排名
	Vc	Cy-3-Glu	Pg-3-Glu	硬度	复水比	L	a	b	T			
HA	HA-60°C	0.8794	1.0340	1.2881	1.4958	-0.5446	0.751	0.75602	-0.9548	1.2081	0.19168	2
	HA-70°C	0.7948	0.5170	0.1969	-0.393	1.3227	0.41371	0.68322	-0.7689	0.4027	0.37435	1
	HA-80°C	-0.5262	-0.2954	-0.4266	-0.5423	0.1816	0.30831	-0.0392	0.78581	-0.6040	0.05980	3
	HA-90°C	-1.1480	-1.2555	-1.0584	-0.5602	-0.9596	-1.4730	-1.4000	0.9379	-1.0067	-0.6258	4
HA-PS DFD	PSDFD 1	-1.5093	-0.9117	-1.3234	-1.1080	-0.9270	-1.4301	-1.5356	-1.2379	-0.0420	-1.0190	5
	PSDFD 2	0.1905	1.2861	1.0614	-0.3740	-0.8406	0.3615	0.36446	0.6677	1.63712	-0.1399	3
	PSDFD 3	-0.4050	-0.7489	-0.6392	-0.0917	1.5200	-0.6247	-0.4301	-0.3315	-0.2519	-0.1723	4
	PSDFD 4	0.9960	0.8520	0.8428	-0.0455	-0.0921	0.8369	0.94597	-0.4168	-1.0914	0.83895	1
	PSDFD 5	0.7278	-0.4776	0.0584	1.6193	0.3397	0.8565	0.65522	1.3184	-0.2519	0.49223	2

3 草莓热风 and 热风-脉动压差闪蒸联合干燥的对比

通过实验单因素及 AHP 法的分析得出, 草莓热风干燥的最佳工艺为 70 °C, 热风-脉动压差闪蒸联合干燥的优选条件为工艺 4, 即预干燥含水量为 60%,

表 7 草莓热风干燥与热风-脉动压差闪蒸联合干燥的产品品质对比

Table 7 Quality comparison of strawberries dried with hot air drying and hot air-pulsed sudden decompression flash drying

干燥方式	Vc /($\times 10^{-2}$ mg/g DW)	Cy-3-Glu /($\times 10^{-2}$ mg/g DW)	Pg-3-Glu /($\times 10^{-2}$ mg/g DW)	硬度	复水比	a	h^0	T /min
HA	161.81 \pm 4.01	0.49 \pm 0.01	7.51 \pm 0.40	3259.27 \pm 306.21	3.72 \pm 0.03	14.67 \pm 0.16	34.43 \pm 0.58	360
HA-PSDFD	339.38 \pm 4.74	1.08 \pm 0.04	19.00 \pm 0.17	2323.65 \pm 218.94	3.42 \pm 0.27	15.03 \pm 0.28	24.66 \pm 0.31	255

4 结论

单一热风干燥与热风-脉动压差闪蒸联合干燥条件, 对草莓产品品质的影响较为明显, 通过单因素和 APH 法分析优选得出, 草莓热风干燥温度 70 °C, 热风-脉动压差闪蒸联合干燥预干燥含水量 60%、闪蒸温度 90 °C、停滞时间 15 min、闪蒸压力差 0.10 MPa 及真空干燥温度 70 °C(60 min)~60 °C(40 min), 草莓干燥产品的品质最好。对两种干燥方式的草莓品质对比得到, 草莓热风-脉动压差闪蒸联合干燥产品色泽好, 硬度低, 且 Vc、Cy-3-Glu 和 Pg-3-Glu 含量明显要比单一热风干燥产品高, 品质较佳。

参考文献

- [1] 罗学兵, 贺良明. 草莓的营养价值与保健功能[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(4): 74-76
LUO Xue-bing, HE Liang-ming. Nutritional value and health function of strawberry [J]. Food and Nutrition in China, 2011, 17(4): 74-76
- [2] 王忠和. 中国草莓生产现状及发展建议[J]. 中国农村小康科技, 2008, 11: 21-22, 27
WANG Zhong-he. The production status and development suggestions of strawberry in China [J]. Chinese Countryside Well-off Technology, 2008, 11: 21-22, 27
- [3] 兰伟, 刘青. 阜阳草莓产业发展现状问题及对策研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(13): 295-297
LAN Wei, LIU Qing. Development status problems and counter measure of strawberry industry in Fuyang [J]. Journal

of Anhui Agricultural Science, 2015, 43(13): 295-297

- [4] Wojdyło A, Figiel A, Oszmiański J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(4): 1337-1343
- [5] Roknul A S M, Zhang M, Mujumdar A S, et al. A comparative study of four drying methods on drying time and quality characteristics of stem lettuce slices (*Lactuca sativa* L.) [J]. Drying Technology, 2014, 32(6): 657-666
- [6] Orikasa T, Koide S, Okamoto S, et al. Impacts of hot air and vacuum drying on the quality attributes of kiwifruit slices [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 125(1): 51-58
- [7] Agnieszka C, Andrzej L. Rehydration and sorption properties of osmotically pretreated freeze-dried strawberries [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 97(2): 267-274
- [8] Torreggiani D, Forni E, Guercilena I, et al. Modification of glass transition temperature through carbohydrates additions: effect upon colour and anthocyanin pigment stability in frozen strawberry juices [J]. Food Research International, 1999, 32(6): 441-446
- [9] 许绍双. Excel 在层次分析法中的应用[J]. 中国管理信息化 (综合版), 2006, (9): 17-19
XU Shao-shuang. The application of excel in the analytic hierarchy process [J]. Chinese Management Informationization (Comprehensive version), 2006, 9(11): 17-19