

不同贮藏条件下脱水贡菜色泽变化规律 与货架期预测

江一鸣¹, 宝鲁尔¹, 梅文强², 李娟², 姜永雷³, 卢艳霞², 苏家恩², 赵华⁴, 刘铭^{2*}, 王军^{1*}

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

(2. 云南省烟草公司大理州公司, 云南大理 671000) (3. 云南省烟草农业科学研究院, 云南昆明 650000)

(4. 仓衣农创(大理)农业有限公司, 云南大理 671000)

摘要: 绿色是脱水贡菜的关键品质, 但脱水贡菜在贮藏期间极易发生脱色现象, 制约其产业发展。为研究脱水贡菜在贮藏期间的颜色变化情况, 本研究以脱水贡菜为试验对象, 研究了贮藏温度(4、25和37℃)、氧气(有氧和无氧)和光照(有光和无光)对其色泽的影响, 从酚类物质氧化、叶绿素降解和酶促反应角度解析色泽变化的原因。研究结果表明, 在相同温度条件下, 光照和氧气对脱水贡菜叶绿素含量变化的影响并不显著, 温度是引起脱水贡菜的色泽劣变主要因素; 4℃低温贮藏有利于脱水贡菜色泽的保持, 在贮藏60 d内无肉眼可见的变化, 25℃贮藏条件下, 样品在第30 d出现明显褐变, 37℃贮藏条件下样品第10 d发生明显褐变; 与4℃低温贮藏相比, 25℃和37℃温度下贮藏50 d的脱水贡菜褐变指数分别显著增加了24.69%和54.18% ($P<0.05$), 总酚和维生素C含量均显著降低 ($P<0.05$); 不同贮藏条件下脱水贡菜的多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)和苯丙氨酸解氨酶(Phenylalanine Ammonia-Lyase, PAL)与褐变密切相关的酶活性均呈降低趋势; 4℃和37℃贮藏温度下, 脱水贡菜的叶绿素含量损失分别为37.51%和89.24%; 基于叶绿素含量建立的零级动力学货架期模型能够较好的预测脱水贡菜的货架期。研究结果为脱水贡菜贮藏过程中品质劣变规律的探索及贮藏条件的选择提供一定的基础。

关键词: 脱水贡菜; 色泽劣变; 贮藏稳定性; 品质变化动力学; 货架期

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0613

Color Change Patterns and Shelf Life Prediction of Dehydrated Gongcai under Different Storage Conditions

JIANG Yiming¹, BAO Lu'er¹, MEI Wenqiang², LI Juan², JIANG Yonglei³, HU Yanxia², SU Jia'en², ZHAO Hua⁴,
LIU Ming^{2*}, WANG Jun^{1*}

(1. College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

(2. Yunnan Provincial Tobacco Company Dali Prefecture Company, Dali 671000, China)

(3. Yunnan Academy of Tobacco Agricultural Sciences, Kunming 650000, China)

(4. Cangyi Agricultural Innovation (Dali) Agriculture Co. Ltd., Dali 671000, China)

Abstract: Green is a key quality attribute of dehydrated tribute vegetable (Gongcai), but it is highly prone to discoloration during storage, which restricts the development of its industry. To investigate the color changes of dehydrated tribute vegetable during storage. In this study, dehydrated tribute vegetable (Gongcai) was used as the experimental subject to investigate the effects of storage temperature (4, 25, and 37 °C), oxygen (aerobic and anaerobic conditions), and light (light and dark conditions) on its color. The underlying mechanisms of color change were elucidated from the perspectives of phenolic compound oxidation, chlorophyll degradation, and enzymatic reactions. The results showed that under identical temperature conditions, the effects of light exposure and oxygen availability on the chlorophyll content of dehydrated dried lettuce were not statistically significant. Temperature was identified as the primary factor responsible for the color deterioration of dehydrated dried lettuce. Storage at a low temperature of 4 °C was conducive to the preservation of the product's color, with no visible

收稿日期: 2026-04-20; 修回日期: 2026-07-15; 接受日期: 2026-07-16

基金项目: 高原特色优质贡菜加工及贮藏专家工作站(20240112503108)

作者简介: 江一鸣(2003-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 脱水蔬菜贮藏, E-mail: jiang.ym@nwafu.edu.cn

通讯作者: 王军(1988-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: jun.wang@nwafu.edu.cn; 共同通讯作者: 刘铭(1994-), 男, 博士, 农艺师, 研究方向: 烟叶调制, E-mail: lium0615@163.com

changes observed within 60 days of storage. Under storage at 25 °C, samples exhibited noticeable browning by day 30, whereas under storage at 37 °C, pronounced browning occurred as early as day 10. Compared with storage at a low temperature of 4 °C, the browning index of dehydrated dried lettuce stored at 25 °C and 37 °C for 50 days increased significantly by 24.69% and 54.18%, respectively ($P<0.05$). Concurrently, the contents of total phenols and vitamin C decreased significantly under both temperature conditions ($P<0.05$). Under different storage conditions, the activities of enzymes closely associated with browning, including PPO, POD, and PAL, all exhibited a decreasing trend in dehydrated dried lettuce. At storage temperatures of 4 °C and 37 °C, the chlorophyll content loss of dehydrated dried lettuce was 37.51% and 89.24%, respectively. A zero-order kinetic shelf-life model established based on chlorophyll content could effectively predict the shelf life of dehydrated dried lettuce. These findings provide a fundamental basis for exploring the patterns of quality deterioration during storage and for selecting appropriate storage conditions for dehydrated dried lettuce.

Key words: dehydrated gongcai; colour deterioration; storage stability; quality change kinetics; shelf life

贡菜是菊科莴苣属一年生草本植物,因清乾隆年间被选为宫廷贡品而得名“贡菜”,又因咀嚼清脆,被称为“响菜”^[1]。贡菜采后易腐烂变质,因此常将贡菜进行脱水干制来延长保藏期,与葡萄干^[2]、干香菇^[3]和红薯干^[4]等脱水蔬菜类似,脱水贡菜方便储运的同时兼具独特的口感。脱水后的贡菜经复水后色泽翠绿、口感鲜美,已成为贡菜的主要商品形式之一^[5]。然而,脱水贡菜在贮藏期间褐变褪色问题突出,影响商品价值。绿色脱水蔬菜贮藏过程中色泽劣变现象普遍存在,与叶绿素的降解息息相关。陈学玲等^[6]研究了光照和贮藏温度对脱水香葱品质的影响,发现 4 °C 贮藏、避光等因素均显著缓解了脱水香葱的叶绿素降解,有效地维持了脱水香葱的绿色;王丹等^[7]发现铝箔包装的脱水青椒外观品质保持更好。真空、非真空包装方式的影响较小。而目前关于脱水贡菜贮藏期间色泽劣变影响的研究报道尚未见到。

色泽是评价蔬菜品质的最直观指标,直接影响消费者的购买欲望^[8]。贮藏条件对蔬菜的色泽变化有着显著影响,其中,温度、氧气、湿度和光照是影响蔬菜贮藏品质与色泽变化的重要因素。Syamila 等^[9]研究发现贮藏温度对菠菜粉贮藏过程中的 β -胡萝卜素和叶黄素的稳定性有显著影响;陈柄言等^[10]研究发现对比普通包装和真空包装,氮气包装更有利于延长干辣椒的货架期;赵紫迎等^[11]研究发现贮藏时高湿度条件(95%~98%)会通过影响糖代谢相关酶活性以及可溶性糖含量,从而抑制总叶绿素含量的下降,延缓青花菜的黄化;Liu 等^[12]研究发现,贮藏结束时,光照组的西兰花叶绿素含量是对照组(黑暗)的 1.58 倍,说明其绿色保持更好。低温贮藏可以显著延缓脱水蔬菜的品质劣变速度,保留其营养成分,与暴露在空气中相比,低氧环境更有利于脱水蔬菜在贮藏过程中的品质保持,不同的湿度环境对蔬菜的色泽劣变也有影响,此外,光照也会影响蔬菜中色素的降解速率,从而影响色泽^[13]。

蔬菜的色泽劣变是受环境因素影响的复杂生化变化,包括非酶褐变、酶促褐变和色素物质的变化等^[14]。非酶褐变主要包括美拉德反应、焦糖化褐变和抗坏血酸的降解^[15],其中,抗坏血酸的氧化降解在果蔬体系中尤为活跃,王鑫等^[16]研究发现抗坏血酸氧化分解是蓝莓汁发生褐变的主要原因。在酶促褐变反应中,多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)和苯丙氨酸解氨酶(PAL)是与酶促褐变相关的三种关键酶^[17],当果蔬受到逆境胁迫时,PAL 活性被诱导升高,促进总酚的合成,PAL 活性越高,酚类底物积累越多,褐变潜力就越大^[18]。这些的酚类物质作为 PPO 和 POD 的底物,在有氧条件下,催化酚类底物氧化为醌类,进一步发生聚合反应,生成黑色或棕褐色的高聚物,即我们肉眼看到的褐色^[19]。色素物质包括叶绿素、类胡萝卜素与花青素等,其中与绿色消退相关的是叶绿素的降解^[20]。

探究脱水贡菜贮藏期间颜色劣变的主要原因,明确影响脱水贡菜色泽劣变的主要因素是亟待解决的问题。因此,本研究以经自然晾晒后的脱水贡菜为试验原料,在湿度为 70%~75%的条件下,以 70 d 为贮藏期分别研究贮藏温度(4、25 和 37 °C)、氧气(有氧和无氧)与光照(避光和非避光)对脱水贡菜色泽(色度值和褐变指数)、呈色物质(叶绿素含量)、酶促褐变(PPO、POD 和 PAL 酶活)、非酶褐变(总酚、黄酮和维生素 C 含量)等的影响。并对实验结果进行货架期预测以期对脱水贡菜贮藏过程中品质劣变规律的探索研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

脱水贡菜由云南仓衣农创(大理)农业有限公司提供,选择新鲜采摘经自然晾晒后大小均匀、无霉变与机械损伤等劣变的脱水贡菜(含水率为15%±1%)作为试验材料。

无水乙醇、盐酸、草酸和丙酮均为分析纯,购自天津致远化学试剂有限公司;芦丁标准品,购自上海源叶生物科技有限公司;没食子酸标准品,购自上海源叶生物科技有限公司;愈创木酚、亚硝酸钠、碳酸钙、氯化铝、石英砂、氢氧化钠、乙酸、乙酸钠、聚乙二醇、聚乙烯吡咯烷酮、过氧化氢、硼酸、邻苯二酚、乙酸乙酯和福林酚购自北京索莱宝科技有限公司。

UV-1780 紫外可见分光光度计,岛津仪器苏州有限公司;YP5002 电子天平,余姚市金诺天平仪器有限公司;SN-HWS-6DJ 水浴锅,上海尚普仪器设备有限公司;HC-3018R 高速冷冻离心机,上海森信实验仪器有限公司;CM-5 色差仪,科尼卡美能达中国有限公司;KQ-400DE 型数控超声波清洗器,昆山超声仪器有限公司;victorX3 酶标仪,美国贝克曼库尔特有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品处理

挑选色泽一致、无病虫害的脱水贡菜,用透明聚乙烯袋(氧气透过率 $\leq 800 \text{ cm}^3 (\text{m}^2 \text{ day atm})^{-1}$,水蒸气透过率为 $20 \sim 50 \text{ g} (\text{m}^2 \text{ d})^{-1}$,封口强度 $\geq 35 \text{ N/15 mm}$)封装,选取4、25、37℃三个温度水平,其中4℃作为常见的冷藏温度,25℃模拟常温与实际货架温度,37℃模拟常见高温天气的货架温度,避光保存(包锡纸)与正常自然光保存两个水平,抽真空与不抽真空两个水平来对脱水贡菜进行不同环境条件下的贮藏实验,共贮藏有十二组,分别是4℃、无光和无氧;4℃、无光和有氧;4℃、有光和无氧;4℃、有光和有氧;25℃、无光和无氧;25℃、无光和有氧;25℃、有光和无氧;25℃、有光和有氧;37℃、无光和无氧;37℃、无光和有氧;37℃、有光和无氧;37℃、有光和有氧。在湿度为70%~75%的条件下(本研究选用的贡菜购于云南省,每年10月份后成熟采摘,当地环境较为干燥,湿度较小,因此选择一个恒定的湿度进行贮藏来模拟实际贮藏情况)将脱水贡菜放置于相应条件下的恒温恒湿培养箱中进行贮藏,每隔10 d取样,每个指标重复测定三次,每个贮藏条件每个时间段中测量的数据求出平均值作为各指标最终值。

1.2.2 总酚含量的测定

参考An等^[21]的方法,并略作修改。称取5.0 g脱水贡菜样品,加入20 mL浓度为90%乙醇,打成匀浆,在4℃、8000 r min⁻¹条件下离心15 min,取上清液,定容至100 mL用于总酚和总黄酮的测定。采用福林酚法测定脱水贡菜提取液中总多酚含量。将没食子酸标准溶液稀释为0、20、40、60、80和100 mg L⁻¹梯度,分别吸取没食子酸和样品提取液0.5 mL,依次加入2.5 mL 10%的福林酚试剂,避光反应5 min后,加入2 mL 120 g L⁻¹ Na₂CO₃溶液,避光反应1 h,以不加没食子酸为空白对照,采用酶标仪于765 nm波长处测定吸光值,以没食子酸的质量浓度作为横坐标,吸光值作为纵坐标,绘制没食子酸的标准曲线,通过标准曲线计算样品总酚含量($y=0.0098x+0.0132$, $R^2=0.9991$)。总酚含量用毫克没食子酸当量每克样品干基表示。

1.2.3 总黄酮含量的测定

参考吕亭亭等^[22]的方法,并略作修改。配置50 g L⁻¹的NaNO₂溶液,100 g/L的AlCl₃溶液,2 mol/L的NaOH溶液。将芦丁母液稀释至0、20、40、60、100和120 mg L⁻¹梯度。将提取液稀释5倍后,取4 mL样品,加入0.5 mL NaNO₂溶液,在避光条件下反应5 min,加入1 mL的AlCl₃溶液,在避光条件下反应5 min,再加入2 mL的NaOH溶液,在避光条件下反应10 min,以不加芦丁的溶液作为空白对照,使用酶标仪在510 nm波长下测吸光值。以芦丁母液的质量浓度作为横坐标,吸光值为纵坐标,绘制芦丁标准曲线($y=0.0065x+0.0634$, $R^2=0.9997$)。通过标准曲线计算样品总黄酮含量。总黄酮含量用毫克芦丁当量每克样品干基表示。

1.2.4 褐变指数的测定

参考康苇佳等^[23]的方法,并略作修改。用色差仪测定脱水贡菜的 L^* 、 a^* 、 b^* 值,根据公式(1)测定脱水贡菜的褐变指数BI。

$$BI = \left(\frac{a^* + 1.75L^*}{5.645L^* + a^* - 3.012b^*} - 0.31 \right) \times 17.2 \quad (1)$$

式中:

BI——为褐变指数;

L^* 、 a^* 、 b^* ——为脱水贡菜测定的颜色指标。

1.2.5 叶绿素含量的测定

参考 Liu 等^[24]的方法,并略作修改。称取 1.0 g 的脱水贡菜样品放入研钵中,加入少量碳酸钙粉和石英砂以及 5 mL 80%的丙酮溶液,研磨成匀浆,在 4℃、8 000 r/min 的条件下离心 15 min,取上清液,用 80%丙酮溶液定容至 50 mL。以 80%丙酮溶液为空白参比调零,用 1 cm 光径比色皿分别在波长 663 nm 和 645 nm 处分别比色测定提取液的吸光度值,重复三次,根据公式(2)计算得叶绿素含量。

$$\rho = \frac{(20.29A_{645} + 8.05A_{663}) \times V}{m \times 1000} \quad (2)$$

式中:

ρ ——为叶绿素的含量, mg L^{-1} ;

A_{645} ——为样品在 645 nm 处的吸光度值;

A_{663} ——为样品在 663 nm 处的吸光度值;

V ——为样品提取液总体积, mL;

m ——为样品质量, g。

1.2.6 PPO 酶活性的测定

参考 Wan 等^[25]的方法,并略作修改。称取脱水贡菜样品 5 g,加入提取缓冲液(含 1 mmol L^{-1} PEG、4% PVPP 和 1% Triton X-100)并研磨成匀浆,在 4℃、8 000 r min⁻¹ 条件下离心 15 min,收集上清液保存备用。在试管中加入乙酸-乙酸钠缓冲液和邻苯二酚溶液,酶提取液,立即开始计时。将混合液倒入比色杯中测定在波长 420 nm 处吸光度值作为初始值,每隔 1 min 记录一次,至少获取 6 个点的数据。以每克脱水贡菜样品每分钟吸光度变化值增加 0.01 为 1 个 PPO 酶活性单位,单位是 $\text{U min}^{-1} \text{g}^{-1}$ 。

1.2.7 POD 酶活性的测定

参考 Singh 等^[26]的方法,并略作修改。POD 粗酶液的提取与 PPO 粗酶液的提取方法相同。在试管中加入愈创木酚溶液酶提取液,再加入 H_2O_2 溶液启动反应,同时立即开始计时。将混合液倒入比色杯中测定在波长 470 nm 处吸光度值作为初始值,每隔 1 min 记录一次,至少获取 6 个点的数据。以每克脱水贡菜样品每分钟吸光度变化值增加 0.01 为 1 个 POD 酶活性单位,单位是 $\text{U min}^{-1} \text{g}^{-1}$ 。

1.2.8 PAL 酶活性的测定

参考 Liu 等^[27]的方法,并略作修改。PAL 酶液的提取与 PPO 和 POD 相似。提取缓冲液包含 40 g L^{-1} 的 PVP、 2 mmol L^{-1} 的 EDTA 和 5 mol L^{-1} 的 β -巯基乙醇。取 2 支试管,都分别加入硼酸缓冲液和 L-苯丙氨酸溶液。向一支试管中加入酶提取液,另一支试管中加入经煮沸 5 min 的失活酶液作为对照。将 2 支试管置于 37℃ 保温 60 min。保温结束时向 2 支试管中分别加入盐酸溶液以终止反应。测定样品反应管和对照反应管中溶液在波长 290 nm 处的吸光度值。以每小时每克脱水贡菜样品中酶促反应体系吸光度值增加 0.01 为 1 个 PAL 活性单位(U)。

1.2.9 维生素 C 含量的测定

参考薛源等^[28]的方法,并略作修改。用分光光度计法测定维生素 C 含量。

1.2.10 货架期的预测

贮藏过程中食品的品质劣化通常用零级和一级动力学来表征^[29]。表示质量劣化的方程可以使用如下方程来表示:

$$y = y_0 \pm kt \quad (3)$$

$$y = y_0 e^{\pm kt} \quad (4)$$

式中:

y_0 ——是初始值;

y ——是贮藏时间 t 的测量值;

k ——是反应速率;

t ——是贮藏时间。

Arrhenius 方程 (5) 反映了反应速率和温度之间的关系, 可以用于预测本研究中不同贮藏温度条件下脱水贡菜的货架期。

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (5)$$

式中:

k ——是反应的速率常数;

E_a ——是反应的活化能, kJ mol^{-1} ;

T ——是贮藏的绝对温度, K ;

k_0 ——是指前因子;

R ——是气体常数, $8.314 \text{ J (mol K)}^{-1}$ 。

结合零级化学反应动力学模型和 Arrhenius 方程, 可以得到脱水贡菜的货架期预测模型见式 (6); 结合一级化学反应动力学模型和 Arrhenius 方程, 可以得到脱水贡菜的货架期预测模型见式 (7)。

$$SL = \frac{|v - v_0|}{k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (6)$$

$$SL = \frac{|\ln y - \ln y_0|}{k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (7)$$

式中:

SL ——是货架期预测;

y ——是所测品质的指标值;

y_0 ——是初始值;

k ——是反应速率。

1.3 数据处理与分析

所有实验至少进行 3 次平行。采用 SPSS 22.0 统计软件进行统计分析。多组间比较, 对计量资料进行正态、方差齐性检验, 数据结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义, 采用 Origin 2023 作图。

2 结果与讨论

2.1 贮藏条件对脱水贡菜表观色泽的影响

色泽是脱水贡菜品质优劣的重要评价指标。贮藏温度是影响脱水贡菜贮藏品质的主要因素, 随着贮藏温度的升高, 脱水贡菜色泽劣变明显加快 (如图 1 所示), 4°C 贮藏组在贮藏前 60 d 内色泽无肉眼可见的变化; 25°C 在贮藏 20 d 后出现褐变, 色泽由绿色逐渐转变成黄色, 这可能是叶绿素发生降解产生脱镁叶绿素, 脱镁叶绿素呈黄褐色, 因此绿色会变浅转黄^[30]; 37°C 贮藏 10 d 就已发生明显的褐变, 色泽由绿色转变为红褐色, 这可能是叶绿素降解同时酚类物质与抗坏血酸发生氧化, 导致表观色泽呈现红褐色^[31]。贮藏 50 d 时脱水贡菜已无商品价值, 不再进行后续贮藏实验。低温贮藏可能是通过减缓叶绿素的降解, 抑制总酚和黄酮等的氧化, 从而延缓颜色劣变, 延长贮藏时间^[32], 邓其海等^[33]通过贮藏亦发现相似情况。而氧气与光照条件对脱水贡菜贮藏期间色泽变化的影响不显著, 其原因可能在包装的影响下, 与外界环境相比, 内部贮藏环境的氧气浓度相对较低, 并不直接影响叶绿素的降解过程, 而光催化在一定程度上促进了叶绿素的降解引发色泽劣变, 但与温度相比并非主导因素^[34]。

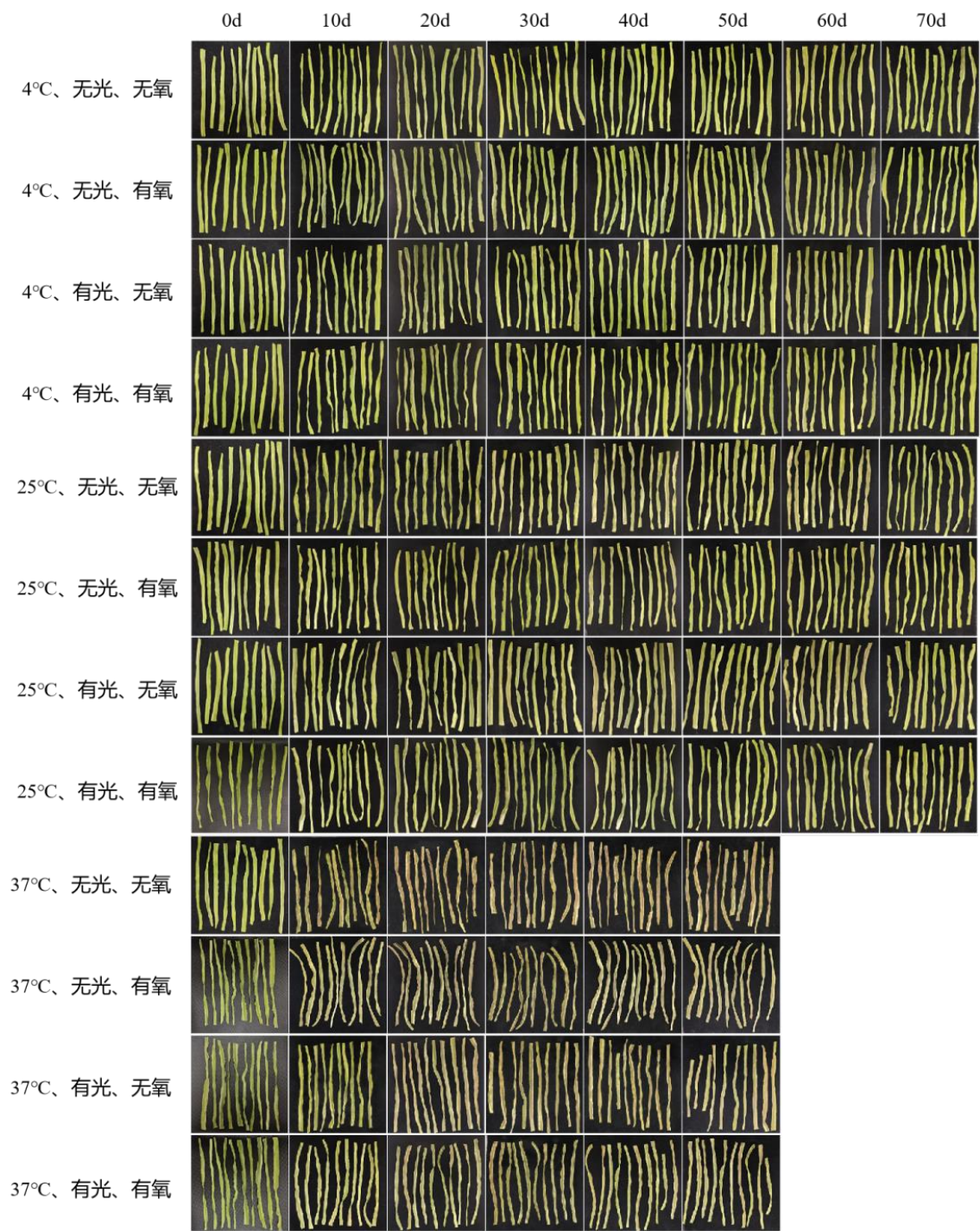


图 1 不同贮藏条件下脱水贡菜的外观变化情况

Fig.1 Changes in the appearance of dehydrated Gongcai under different storage conditions

2.2 贮藏条件对脱水贡菜叶绿素含量的影响

叶绿素是维持绿色蔬菜色泽的重要天然色素物质^[35]，在果蔬贮藏期间绿色的消退与叶绿素含量的减少密不可分^[36]。在贮藏过程中，脱水贡菜中的叶绿素含量均呈下降趋势（见图 2），且贮藏温度对叶绿素含量的变化具有显著影响（ $P<0.05$ ），贮藏温度越高，脱水贡菜中叶绿素含量下降越快，贮藏第 50 d 时，与 37 ℃相比，4 ℃低温贮藏下脱水贡菜的叶绿素含量损失由 89.24%降低为 37.51%，与刁恩杰等^[37]的研究结果相一致。氧气与光照对脱水贡菜叶绿素含量的影响不显著，这可能是由于氧化反应程度微弱，不足以直接主导叶绿素降解。尽管光照具有一定催化作用，但温度才是驱动脱水贡菜色泽劣变的核心因素^[38]。

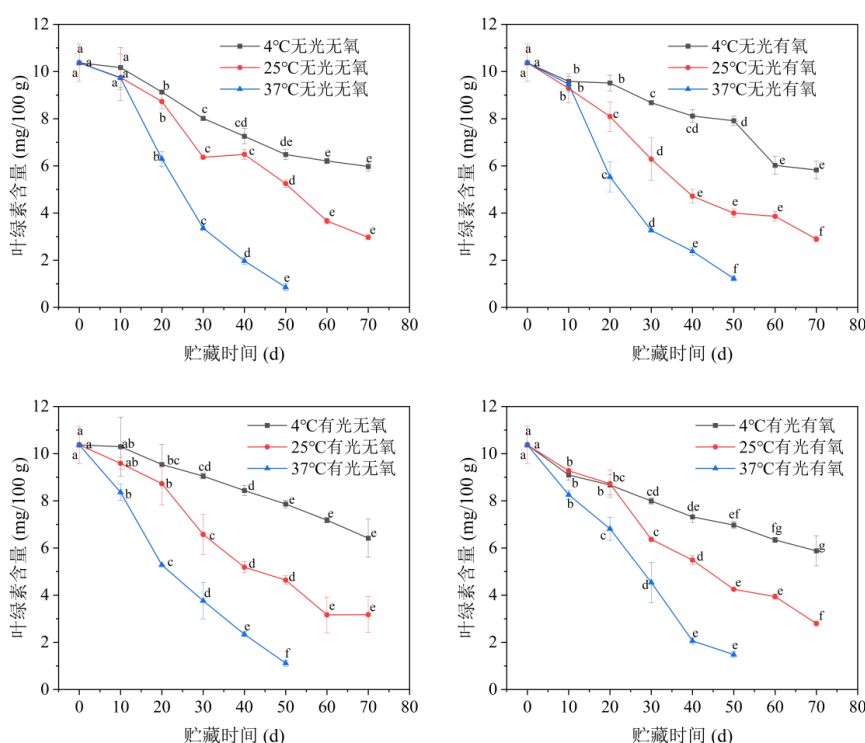


图2 不同贮藏条件对脱水贡菜叶绿素含量的影响

Fig.2 Effects of different storage conditions on chlorophyll content in dehydrated Gongcai

注: 不同的小写字母表示相同处理组在不同贮藏时间下的指标显著性差异 ($P < 0.05$), 下同。

2.3 贮藏条件对脱水贡菜褐变指数及相关酶活性的影响

各贮藏组的褐变指数在贮藏期间均呈增长趋势 (如图 3a), 且贮藏温度对褐变指数具有显著影响 ($P < 0.05$)。与 4 °C 低温贮藏相比, 25 °C 和 37 °C 温度下贮藏 50 d 的脱水贡菜褐变指数分别增加了 24.69% 和 54.18%。在贮藏 0~10 d 时, 有光无氧条件下, 25 °C 贮藏组褐变指数增加程度低于 4 °C 贮藏组, 这可能是由于脱水贡菜低温贮藏初期表面发生凝霜结露的现象, 导致其外观色泽褐变现象严重。

多酚氧化酶 (PPO)、过氧化物酶 (POD) 和苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 的活性在整个贮藏期均呈下降趋势 (分别见图 3b~d), 低温贮藏下酶活逐渐降低可能是由于酶蛋白活性受到抑制, 与底物结合效率降低。贮藏温度对三种酶活性具有显著影响 ($P < 0.05$)。其中, 37 °C 贮藏温度下的脱水贡菜酶活性显著低于其它两个贮藏温度下的脱水贡菜 ($P < 0.05$), 在 25 °C 和 37 °C 温度下, 酶活逐渐降低可能是由于贡菜组织的生化反应较为活跃, 酶蛋白质分子也会因热效应而发生微小的构象变化。当这种变化积累到一定程度, 酶的活性中心 (催化反应的关键部位) 就会变形, 失去催化能力。这一结果与预期相反, 通常认为褐变加深与酶活升高有关, 而本研究中褐变指数升高 (图 3a) 却伴随酶活下降, 说明酶促褐变并非脱水贡菜色泽劣变的主要原因, 高温 (37 °C) 下, PPO、POD、PAL 活性快速失活, 可能与酶蛋白空间结构的热变性有关^[39]。较高的温度会加速蛋白质的周转, 高温会促进植物体内与褐变相关基因的表达, 但同时与酶蛋白降解相关的途径也可能被激活, 导致酶蛋白的合成与降解平衡被打破, 使酶活性下降^[40]。

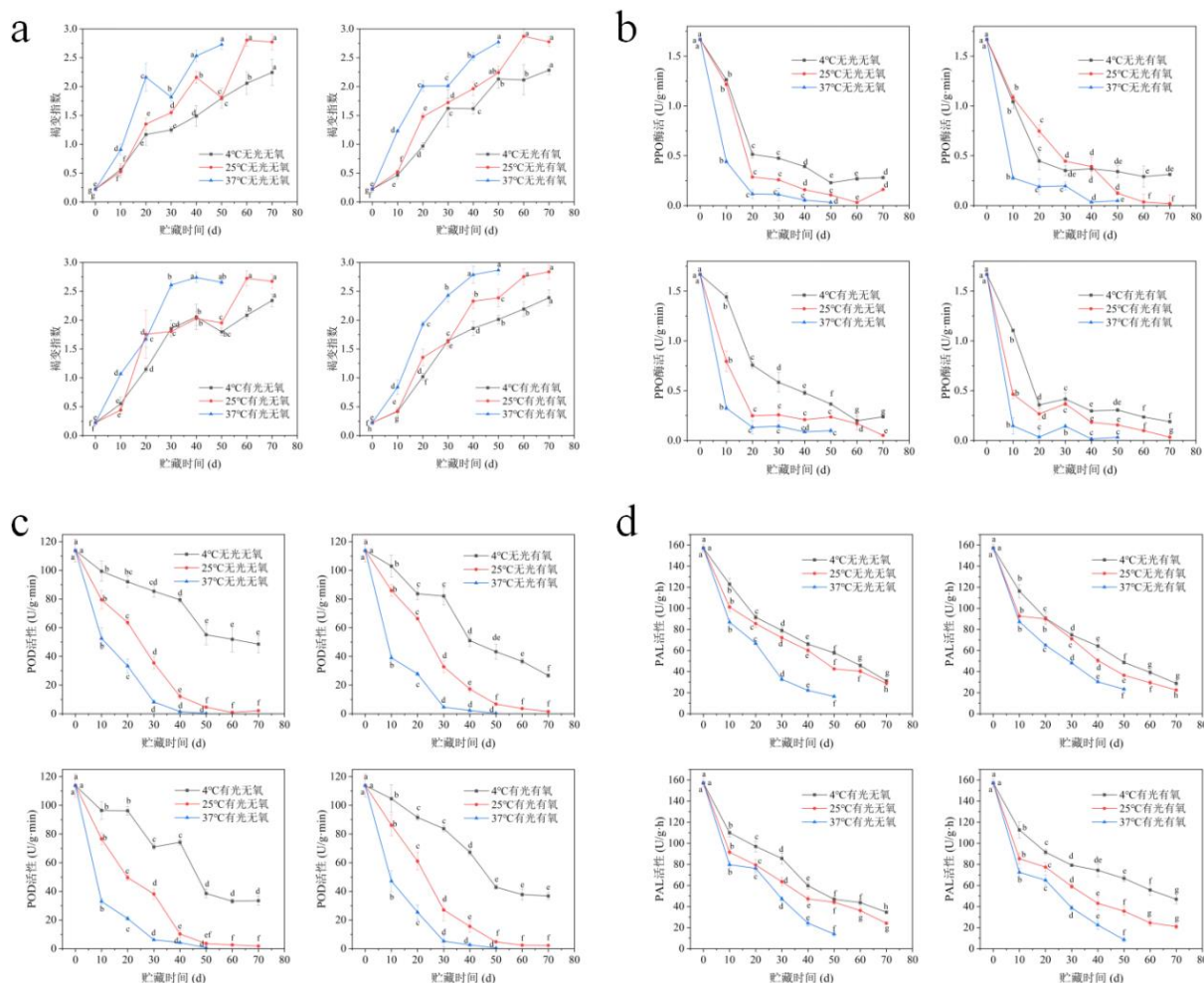


图3 不同贮藏条件对脱水贡菜褐变指数、PPO、POD 和 PAL 酶活性的影响

Fig.3 Effects of different storage conditions on browning index and activities of PPO, POD, and PAL in dehydrated Gongcai

2.4 贮藏条件对脱水贡菜总酚、黄酮及维生素 C 含量的影响

如图 4a 所示,不同贮藏温度下脱水贡菜总酚含量随贮藏时间的延长而下降,贮藏第 70 d 时,4℃和 25℃下脱水贡菜总酚含量均下降近 70%,37℃贮藏组的总酚含量在贮藏第 50 d 时下降近 65%。贮藏温度越高,总酚含量下降越快,高温加速了酚类物质的酶促氧化聚合,为酚类物质的热降解提供了更多活化能,导致氧化损失加剧。总酚含量在贮藏前 10 d 快速下降,随后减慢,这可能是由于在贮藏初期,酚类物质作为酶的底物浓度最高,因此酶促氧化反应速率最快。酚类被氧化为醌类,进一步聚合形成褐色色素,导致酚类含量快速下降^[41]。

脱水贡菜在不同贮藏条件下总黄酮含量随贮藏时间延长而逐渐降低,在无光无氧条件下,37℃贮藏组在第 50 d 时黄酮含量仅为 0.175 7mg/g DW,4℃组在第 70 d 时为 0.158 7 mg/g DW。不同贮藏组总黄酮含量在贮藏前期均显著下降(见图 4b)。贮藏第 30 d 后,总黄酮含量下降速率变缓,到贮藏后期(50~70 d)基本不变,这可能是在贮藏初期,结构不稳定的黄酮单体(如槲皮素类)优先被氧化消耗,同时 PPO 与 POD 酶活在贮藏初期较高,加速酶促氧化^[42]。贮藏 30 d 后,降解速率减缓,可能是易氧化黄酮组分已基本消耗殆尽,剩余组分结构稳定性更高^[43],随贮藏时间延长,酶活性逐渐下降,酶促氧化受限,黄酮与细胞壁多糖等基质成分相互作用形成稳定复合物,降低反应活性^[44]。

在整个贮藏期间,脱水贡菜的维生素 C 含量呈现下降趋势(如图 4c 所示),对比不同贮藏组,发现 4℃低温贮藏组的维生素 C 含量保留最多,25℃次之,37℃损失最大,在无光无氧条件下贮藏第 50 d 时,4℃低温组维生素 C 含量为贮藏初期的 56.35%,37℃组仅为贮藏初期的 18.87%。低温贮藏可以通过调控抗氧化物质的含量来减缓脱水贡菜的色泽劣变,这与杨洋等^[45]的研究结果一致。光照和氧气对维生素 C 含量影响并不显著。

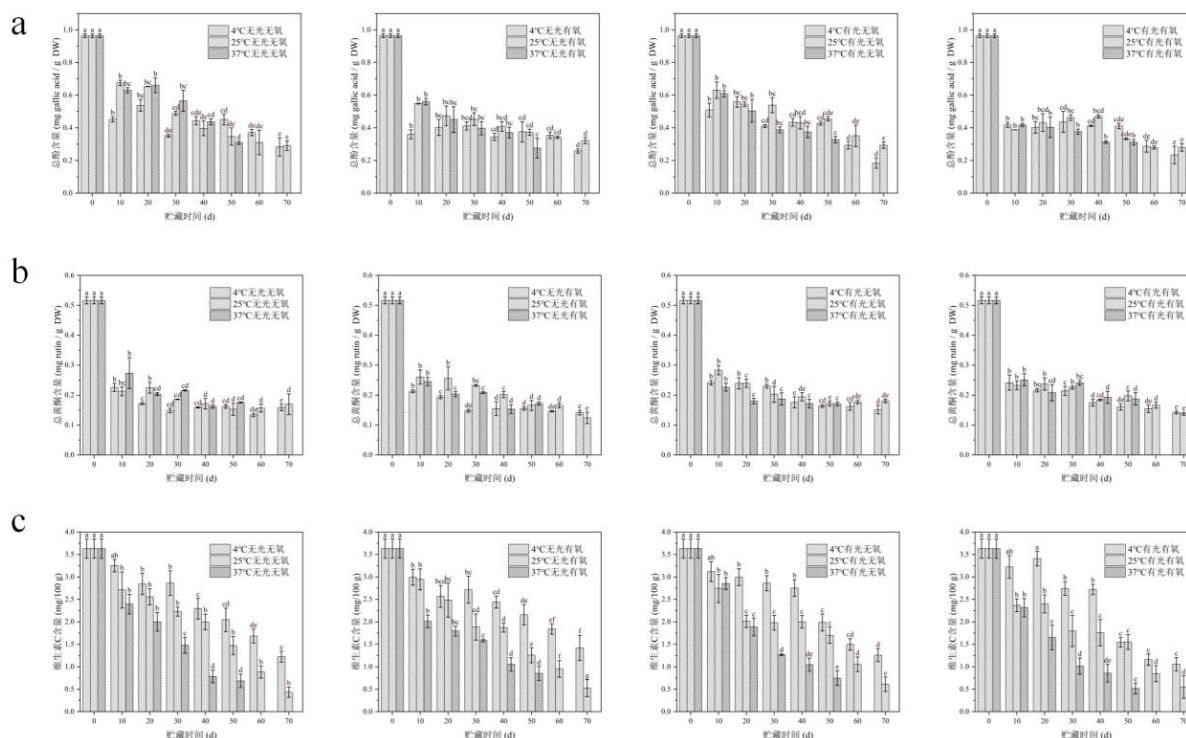


图4 不同贮藏条件对脱水贡菜总酚、黄酮、维生素C含量的影响

Fig.4 Effects of different storage conditions on total phenolic content, flavonoid content, and vitamin C content in dehydrated Gongcai

2.5 脱水贡菜在不同贮藏条件下各指标之间的相关性分析

选取贮藏 50 d 时脱水贡菜的 L^* 、 a^* 、 b^* 和色差作为指标进行贮藏环境条件的筛选,如图 5a 所示,温度与脱水贡菜的 a^* 与色差之间呈显著正相关关系 ($P<0.05$),而光照和氧气的影响并不显著,因此筛选温度作为后续货架期模型构建的环境因素。选取同一贮藏温度下的四组脱水贡菜品质指标的平均值作为初始数据构建脱水贡菜货架期预测模型。

在脱水贡菜贮藏期间,各个理化指标与贮藏时间之间的相关性如图 5b~d 所示。发现,在不同贮藏温度下,总酚含量、维生素 C、叶绿素和 PAL 与贮藏时间之间均呈显著负相关 ($P<0.05$);褐变指数与贮藏时间之间呈显著正相关 ($P<0.05$)。其中,叶绿素含量与贮藏时间之间的相关性较其他指标更高,在 4℃ 下,叶绿素含量与 L^* 、 a^* 、 b^* 值的相关性较弱,这可能是因为低温环境显著抑制了 PPO 等褐变相关酶的活性,使得褐变产物的积累速率远低于叶绿素的降解速率^[46],导致表观色泽的改变与叶绿素含量之间的相关性较弱,在 25℃ 与 37℃ 下,叶绿素含量与 a^* 值呈极显著负相关, a^* 值反映了样品的红绿程度, a^* 值越小,表明样品绿色程度越大^[47],同时叶绿素含量也越大,说明叶绿素含量指标相较其他指标而言更能体现脱水贡菜在贮藏过程中的颜色劣变情况,因此,将叶绿素含量作为脱水贡菜品质变化和货架期动力学预测模型的关键因素。

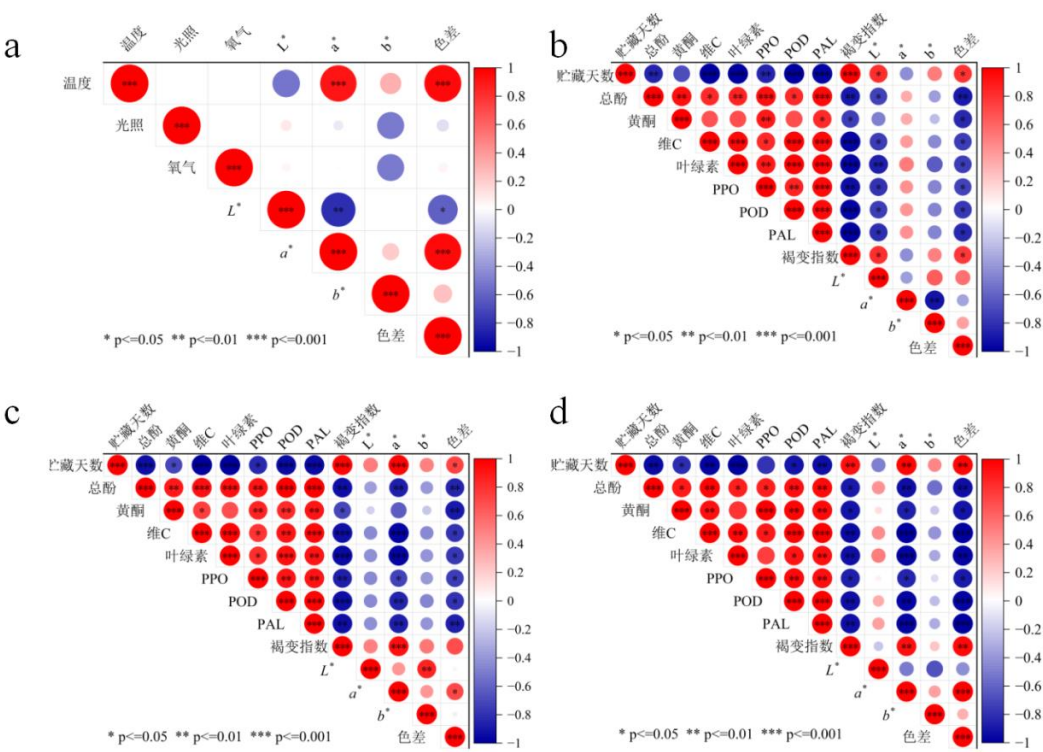


图 5 脱水贡菜在贮藏期间的相关性

Fig.5 Correlation of dehydrated Gongcai during storage

注: a: 贮藏第 50 d 时温度、氧气、光照与脱水贡菜色泽指标的相关性; b、c、d 分别是 4、5、37 °C 贮藏温度下脱水贡菜理化指标与贮藏时间之间的相关性。

2.6 脱水贡菜在贮藏期间的品质变化动力学分析及货架期预测

在食品的加工和贮藏过程中，大多数食品的品质变化通常可以用零级或一级动力学模型来描述^[48]，本研究以脱水贡菜的品质变化参数为参考依据，对相关数据进行线性与非线性拟合分析，进而求得零级和一级反应的速率常数以及对应的决定系数 R^2 。其中， R^2 值越大，表明数据的总体线性关系越强，拟合效果也越好。由表 1 可知，在不同贮藏温度条件下，零级和一级回归方程的决定系数 R^2 均大于 0.95，表明所建立的回归模型拟合度较好。叶绿素含量的零级动力学方程 $\sum R^2$ 大于一级动力学方程，表明零级动力学方程的拟合精度更高。综合分析，脱水贡菜的叶绿素含量变化规律符合零级化学反应动力学模型。在 4、25、37 °C 贮藏条件下对脱水贡菜的叶绿素含量 (y) 与贮藏时间 (x) 进行线性回归拟合，得到其在不同贮藏温度下的线性回归方程和反应速率常数 (k)。回归方程的决定系数 R^2 均大于 0.95，表明回归方程能够较好地反映叶绿素含量与贮藏条件之间的关系。因此，可以认为叶绿素含量是反映脱水贡菜品质变化的关键因素之一。以表中 k 的绝对值和贮藏温度来计算 $\ln k$ 与 $1/T$ (此处 T 的单位为 103 K)，得到线性回归方程。

由表 2 中 Arrhenius 方程结合公式 (6)，计算得到叶绿素含量对应的活化能 E_a 为 22.308 kJ mol⁻¹，如式 (8) 所示。借助所获得的叶绿素含量的货架期预测方程，当明确贮藏温度以及品质指标的初始水平和终点水平后，便能够计算出在某一确定温度条件下脱水贡菜的货架期，从而实现对其货架期的预测。

$$SL_{\text{叶绿素}} = \frac{|y - y_0|}{1068.488 \times \exp(-\frac{22.308 \times 10^3}{RT})}$$

(8)

根据实验结果，利用建立的脱水贡菜货架期预测模型对 4、25 与 37 °C 贮藏温度下的脱水贡菜进行货架期预测，将货架期预测值与实测值进行比较，由表 2 可知，本研究所建立的货架期预测模型的预测值与实测值的相对误差均控制在 10% 以内，可作为三个贮藏温度下的通用货架期预测模型。

表 1 脱水贡菜在不同贮藏温度下叶绿素变化的动力学模型参数与回归方程

Table 1 Kinetic model parameters and regression equations of chlorophyll changes in dehydrated Gongcai at different storage temperatures

指标	温度/℃	k	R ²	ΣR ²	温度/℃	回归方程	R ²	k
零级动力学方程								
叶绿素	4	-0.071	0.962	2.899	4	y=10.420-0.071x	0.961	-0.071
	25	-0.11	0.975					
	37	-0.211	0.963					
	一级动力学方程				25	y=10.554-0.110x	0.975	-0.11
	4	-0.009	0.974					
	25	-0.018	0.952	2.876				
37	-0.051	0.95						

表 2 以叶绿素为指标的 Arrhenius 方程及不同贮藏温度下货架期的预测值与实际值

Table 2 Predicted versus actual shelf life at different storage temperatures based on the chlorophyll-based Arrhenius equation

指标	温度/℃	Arrhenius 方程	R ²	货架期预测值/d	货架期实测值/d	相对误差/%
叶绿素	4	lnk=-2.683/T+6.974	0.914	80	84	4.76
	25			40	43	6.98
	37			29	27	7.41

3 结论

本研究以脱水贡菜为试验对象，系统研究了贮藏温度、氧气和光照对其色泽的影响，从酚类物质氧化、叶绿素降解和酶促反应角度解析色泽变化的原因。研究表明，在脱水贡菜的贮藏期间，叶绿素降解是引起脱水贡菜色泽劣变主要原因，此外，与氧气和光照相比，温度是影响脱水贡菜色泽变化的主要环境因素，在脱水贡菜贮藏过程中严格控制贮藏温度可减少脱水贡菜贮藏品质降解，延长货架期。低温贮藏可以有效减缓脱水贡菜的色泽劣变，抑制总酚、维生素 C 与叶绿素含量的下降和 PPO、POD 和 PAL 酶活性的降低。以叶绿素含量为指标构建的零阶模型可较好地拟合贮藏过程中各指标的变化，预测脱水贡菜的货架期。

参考文献

[1] 商学兵.营养贡菜说苔干[J].农产品加工,2009,9:46-47.

[2] WANG D, JAVED H, KARGAR M, et al. Effects of drying process and time of storage on fatty acid composition in raisins [J]. Journal of Food Measurement and Characterization. 2021, 15(4): 2974-2983.

[3] XU Y, ZHAO Y, ZHANG Y, et al. Effect of postharvest storage time on quality characteristics of explosion puffing dried whole shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) crisps [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2024, 104(2): 629-642.

[4] WANG S, BU Q, FENG Y. Non-targeted metabolomics reveals substrates and products of maillard reaction related to changes of color and aroma of dried sweet potato during storage [J]. Food Chemistry: X. 2025, 31: 103031.

[5] 晏文秀, 吴洋洋, 李小艳, 等. 贡菜高产种植[J]. 云南农业, 2023, 23(3): 82-83.

[6] 陈学玲, 张莉会, 范传会, 等. 影响脱水香葱色泽稳定的因素分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 142-147.

[7] 王丹, 马越, 赵肖肖, 等. 包装方式对脱水青椒品质的影响[J]. 食品科技, 2017, 42(7): 55-58.

[8] 吕莹, 陈芹芹, 李旋, 等. 干燥对果蔬加工色泽影响的研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(13): 368-377.

[9] SYAMILA M, GEDI MA, BRIARS R, et al. Effect of temperature, oxygen and light on the degradation of β-carotene, lutein and α-tocopherol in spray-dried spinach juice powder during storage [J]. Food Chemistry, 2019, 284: 188-197.

[10] 陈柄言, 闫璐, 田利, 等. 不同的包装方式及贮藏环境对干辣椒品质的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(5): 76-79.

[11] 赵紫迎. 高湿贮藏对青花菜保鲜效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.

[12] LIU S, LIU B, ZHAO S, et al. LED red and blue light source fresh preservation improved the quality of celery and broccoli during cold storage [J]. Food Science and Biotechnology. 2025, 34(9): 1879-1887.

- [13] ZHANG J, ZHANG J, ZHANG L, et al. Mechanistic insights into vegetable color stability: discoloration pathways and emerging protective strategies [J]. *Foods*. 2025, 14(13): 2222.
- [14] 李燕,戴桂芝,刘鲁红.果蔬产品变色原因分析及其控制[J].农产品加工(学刊),2006,6(2):75-77.
- [15] QIAO J, WANG X, LIU L, et al. Nonenzymatic browning and protein aggregation in royal jelly during room-temperature storage [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2018, 66(8):1881-1888.
- [16] 王鑫,魏婧,马蕊,等.蓝莓果汁贮藏中非酶褐变影响因素评价[J].食品工业科技,2019,40(14):94-99.
- [17] ARNOLD M, GRAMZA M. Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022, 21(6): 5038-5076.
- [18] 潘腾飞,朱学亮,潘东明,等.低温贮藏对琯溪蜜柚汁胞粒化与木质素代谢的影响[J].热带作物学报,2013,34(4):710-714.
- [19] ZOU H, XIAO Q, LI G F, et al. Revisiting the advancements in plant polyphenol oxidases research [J]. *Scientia Horticulturae*, 2025, 342: 113960.
- [20] HE Y, MA Y, LI Q, et al. The effect of colored film on the drying characteristics and color of featured forest fruits and vegetables under direct solar drying: a case of mulberry leaves and sea buckthorn [J]. *Solar Energy*. 2026, 303: 114177.
- [21] AN K, TANG D, WU J, et al. Comparison of pulsed vacuum and ultrasound osmotic dehydration on drying of Chinese ginger (*Zingiber officinale Roscoe*): Drying characteristics, antioxidant capacity, and volatile profiles [J]. *Food Science & Nutrition*, 2019, 7(8): 2537-2545.
- [22] 吕亭亭,杨志华,谢奇,等.泡桐花总黄酮含量测定方法研究[J].化学与生物工程,2020,37(10):64-68.
- [23] 廉苇佳,陈雅,韩琛,等.响应面法优化热泵干燥绿色葡萄干防褐变工艺[J].新疆农业科学,2022,59(3):625-633.
- [24] LIU Y, ZHAO J, TANG Y, et al. Construction of a chlorophyll content prediction model for predicting chlorophyll content in the pericarp of Korla Fragrant Pears during the storage period [J]. *Agriculture*. 2022, 12(9): 1348.
- [25] WAN C, KAHRAMANOĞLU İ, CHEN J, et al. Effects of hot air treatments on postharvest storage of Newhall navel orange [J]. *Plants*. 2020, 9(2): 170.
- [26] SINGH V, JAWANDHA SK, Gill PS, et al. Pre-storage putrescine treatment alleviates internal browning of stored pear fruit by regulating enzyme activity [J]. *Erwerbs-Obstbau*. 2023, 65(5): 1291-301.
- [27] LIU Z, JIANG F, MO Y, et al. Effects of ethanol treatment on storage quality and antioxidant system of postharvest papaya [J]. *Frontiers in plant science*. 2022, 13: 856499.
- [28] 薛源,吴剑南.猕猴桃果肉维生素C含量测定方法比较[J].种业导刊,2024,2:47-48.
- [29] XING S H, LIU L, ZHANG X R, et al. A mathematical model to predict the color change of fresh dough sheets under fluctuation temperatures [J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2022, 162. Article 113447.
- [30] 王晓艳,韩延超,吴伟杰,等.气调贮藏对毛豆采后叶绿素降解的影响[J].中国食品学报,2023,23(11):191-201.
- [31] 穆光远,王琳,马琳军,等.冬枣采后果皮生理变化与转色关系研究[J].保鲜与加工,2017,17(4):15-19.
- [32] 刘振,唐蕾,王海鸥,等.低温贮藏和短波紫外线辐照对芥蓝采后叶绿素降解及脱镁叶绿素酶活性的影响[J].食品工业科技,2013,34(15):332-334+347.
- [33] 邓其海,侯小桢,丁心,等.包装形式和贮藏条件对柠檬冻干片在贮藏过程中色泽变化的影响[J].安徽农业科学,2016,44(33):77-79.
- [34] 杨义,杨野,徐小花,等.不同贮藏保鲜条件对秀珍菇品质的影响[J].食药用菌,2025,33(1):40-46.
- [35] DAS A, CHRIST B, HORTENSTENINER S. Characterization of the pheophorbide a oxygenase/phyllobilin pathway of chlorophyll breakdown in grasses [J]. *Planta*. 2018, 248(4):875-892.
- [36] 龙洋洋,雷宇洁,马小云,等.热加工过程中蔬菜叶绿素的降解及护色技术研究进展[J].食品科学,2025,46(4):285-294.
- [37] 刁恩杰,李向阳,丁晓雯.脱水菠菜贮藏过程中颜色变化动力学[J].农业工程学报,2010,26(8):350-355.
- [38] 赵紫迎,贾雯茹,左小霞,等.高湿贮藏对青花菜黄化和糖代谢的影响[J].食品科学,2020,41(5):193-199.
- [39] ZHU Y, ELLIOT M, ZHENG Y ET AL. Aggregation and conformational change of mushroom (*Agaricus bisporus*) polyphenol oxidase subjected to atmospheric cold plasma treatment [J]. *Food Chemistry*. 2022, 386: 132707.
- [40] CHATTOPADHYAY K, MAZUMDAR S. Structural and conformational stability of horseradish peroxidase: effect of temperature and pH [J]. *Biochemistry*. 2000, 39(1):263-270.
- [41] LIU X, CHEN D, YANG Z, et al. Non-enzymatic browning induced by chlorogenic acid quinone mediated catechin oxidation [J]. *Food Research International*. 2022, 56: 111297.

- [42] ANDERSON W, KEYLLA D, KATIA D, et al. In vitro antioxidant properties of the biflavonoid agathisflavone [J]. BMC Chemistry, 2018, 12(1): 75.
- [43] 梁展鸿,吴炜俊,程丽娜,等.不同前处理的冻融荔枝果壳色泽和微观结构比较分析[J].现代食品科技,2025,41(1):211-220.
- [44] CAO X, WANG L, LIU M, et al. Study on solubilization and stabilization of eight flavonoids by 17 chinese herbal polysaccharides [J]. Journal of Chemistry, 2020, 2020(1): 6235284.
- [45] 杨洋,陈琪琪,郭丽红,等.低温维持果蔬采后活性氧代谢平衡的抗氧化转录调控机制研究进展[J].食品工业科技,2023,44(5):451-458.
- [46] 郝一帆,何文华,孙洁,等.壶瓶枣低温贮藏期间红变规律及转录组学分析[J].农业工程学报,2025,41(2):338-348.
- [47] 黄光荣.绿色蔬菜叶绿素含量与颜色的关系[J].江苏食品与发酵,1999,4:11-13.
- [48] VAN MA. Kinetic modeling of food quality: a critical review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2008, 7(1):144-158.