

多环境因素调控下3D打印用果蔬凝胶品质保真度的变化

许金洁, 过志梅*, 潘怡丹

(无锡海核装备科技有限公司, 江苏无锡 214000)

摘要: 为了探究环境因素对3D打印加工前果蔬凝胶物料(南瓜、香蕉、菠菜)品质保真度的影响,测定了不同环境(室温、低温、高温、低氧)下贮藏的凝胶品质(色泽、水分、总叶绿素/类胡萝卜素、维生素C、总酚、黄酮含量及ABTS自由基清除率)变化情况,并进一步结合主成分分析与品质保真度计算对其进行综合评价。结果表明:多环境因素调控下(低温+高温+低氧)贮藏能显著抑制三种果蔬凝胶品质的劣变,贮藏期间凝胶中上述活性成分保留率均大于60%,色差值显著降低($P<0.05$),并具有最高的综合得分。多环境因素调控下贮藏4d,南瓜、香蕉、菠菜凝胶依然可维持较高的品质保真度,分别为72.23%、64.83%、68.35%,比室温对照组(32.72%、24.27%、33.22%)提升2倍以上。综上所述,低温+高温+低氧的多环境因素协同调控可有效改善果蔬凝胶物料的品质保真度。该研究为果蔬凝胶类原料的贮藏保鲜工艺提供了理论基础。

关键词: 果蔬凝胶; 环境调控; 主成分分析; 品质保真度

文章编号: 1673-9078(2026)07-161-170

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0658

Quality Fidelity Changes in Fruit and Vegetable Gels Used for 3D Printing under Coordinated Control of Multiple Environmental Factors

XU Jinjie, GUO Zhimei*, PAN Yidan

(Wuxi Marine & Nuclear Equipment Tech Co. Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: To investigate the effects of environmental factors on the quality fidelity of fruit and vegetable gel materials (pumpkin, banana, spinach) before 3D printing processing, changes in quality parameters (including colorimetric values, moisture content, total chlorophyll/carotenoids, vitamin C, total phenolic content, flavonoid content, and ABTS radical scavenging rate) of the gels were quantified under varying environmental conditions (room temperature, low temperature, high humidity, low oxygen). These parameters were then comprehensively evaluated using principal component analysis and a quality-fidelity calculation model. The deterioration of the three fruit and vegetable gels was effectively inhibited when stored under coordinated control of multiple environmental factors (low temperature+high humidity+low oxygen). During storage, retention rates of bioactive components exceeded 60%, color differences were significantly reduced ($P<0.05$), and the highest composite scores were achieved. Under the coordinated control of multiple environmental factors, the quality fidelity of pumpkin, banana, and spinach was effectively maintained after four days of storage, reaching 72.23%, 64.83%, and 68.35%, respectively, which were more than two-fold higher than those of the control group (32.72%, 24.27%, and 33.22%). In conclusion, the quality fidelity of fruit and vegetable gels can be successfully improved through coordinated control of multiple environmental factors (low temperature+high humidity+low oxygen).

引文格式:

许金洁,过志梅,潘怡丹.多环境因素调控下3D打印用果蔬凝胶品质保真度的变化[J].现代食品科技,2026,42(7):161-170.

XU Jinjie, GUO Zhimei, PAN Yidan. Quality fidelity changes in fruit and vegetable gels used for 3D printing under coordinated control of multiple environmental factors [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 161-170.

收稿日期: 2025-05-12; 修回日期: 2025-07-22; 接受日期: 2025-07-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF11001700)

作者简介: 许金洁(1998-),女,硕士,研究方向:食品保鲜,E-mail: 1450960175@qq.com

通讯作者: 过志梅(1981-),女,高级工程师,研究方向:船舶机电设备,保鲜技术,E-mail: guozm@wxmnet.com

This study provides a theoretical basis for the storage and preservation technology of raw materials for fruit and vegetable gels.

Key words: fruit and vegetable gel; environmental control; principal component analysis; quality fidelity

果蔬凝胶物料通常是由果蔬为主要原料与淀粉、黄原胶等增稠剂或稳定剂复配后制备而成的半固态食品材料,一般具有良好的可塑性、可食用性和果蔬本身具有的良好感官品质和丰富的营养价值。果蔬凝胶物料常被作为3D打印墨水,广泛应用于3D打印的食品加工领域^[1-3]。例如,Umeda等^[4]制备了类似可打印的南瓜凝胶,Armstrong等^[5]利用纳米晶纤维素制备了可打印的菠菜凝胶,Kim等^[6]通过添加豌豆分离蛋白改善了香蕉凝胶的打印流畅性。

在上述的研究中主要考虑的是果蔬凝胶物料的可打印性,以此提高打印后果蔬凝胶产品的形状保真度。但在3D打印过程中,果蔬凝胶产品的色泽的稳定性、营养成分能否保留等品质变化情况也同样需要关注,这很大程度上取决于果蔬凝胶物料的品质保真度。果蔬凝胶物料通常不耐贮藏,针对连续化和较大规模的3D打印加工过程,果蔬凝胶物料从制备完成到开始打印需要较长的等待时间。若在不适宜的环境条件下较长时间存放,易加速氧化褐变、营养成分流失等品质劣变的过程^[7]。例如,南瓜凝胶中含有较高的水分含量,当在较高温度下贮藏时可能加速水分的流失,南瓜凝胶中的类胡萝卜素在较长的贮藏过程中易被降解^[8]。菠菜凝胶中含有较多的叶绿素成分,受氧气、温度等环境因素的影响同样可能发生降解^[9]。香蕉凝胶若长时间暴露于空气极易发生氧化褐变,严重影响感官品质。因而,为了避免环境因素对果蔬凝胶物料品质保真度的影响^[10,11],对贮藏条件中温度、湿度和氧气体积分数等环境因素的控制就显得尤为重要。

因此,本文以加入预糊化马铃薯淀粉或黄原胶制备而成的南瓜、菠菜、香蕉凝胶物料为例,对比研究在不同环境条件下贮藏的果蔬凝胶物料的品质变化情况,以期多环境因素下果蔬凝胶物料品质保真度的调控提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

香蕉(*Musa nana* Lour.)、菠菜(*Spinacia oleracea* L.)、南瓜(*Cucurbita moschata* D.)、马铃薯淀粉、黄原胶,无锡麦德龙超市;抗坏血酸,国药集团化学试剂有限公司;没食子酸(纯度 $\geq 99.1\%$),坛墨质检-标准物质中心;ABTS清除能力检测试剂盒,上海源叶生物科技有限公司;2,6-二氯酚钠、草酸、福林-酚

均为分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司。

1.2 实验设备

GQ-300 气调保鲜箱,广州标际包装设备有限公司;DS220 色差仪,杭州彩谱科技有限公司;UV9000S 紫外分光光度,上海元析仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 凝胶物料的制备

凝胶物料的制备参考专利所述^[12]:每99 g煮熟的南瓜泥中添加1 g黄原胶混合均匀制备南瓜凝胶;将新鲜菠菜清洗、榨汁,每80 g菠菜汁与20 g马铃薯淀粉混合均匀制备菠菜凝胶;将去皮香蕉在密封袋内捣成泥,每99 g香蕉泥中加入1 g黄原胶混合均匀制备香蕉凝胶。

1.3.2 环境调控方法

基于预实验结果和设备条件,将上述每种凝胶物料分成四组(每组样品再分装于4个烧杯),置于密闭的气调保鲜箱内避光贮藏,并设置不同环境条件。包括对照组:即室温环境条件(20℃左右),无加湿(环境湿度约70%)及常氧条件。环境一:保鲜舱内4℃冷藏,无加湿及常氧条件。环境二:保鲜舱内4℃冷藏环境,同时设置相对湿度为90% RH,常氧条件。环境三:保鲜舱内4℃冷藏,设置相对湿度为90% RH,同时设置舱内气体体积分数:5% O₂+95% N₂。初始样记为第0天,每天定时取样至实验结束。

1.4 检测方法

1.4.1 水分的测定

参考Bi等^[13]的方法进行测定,每次称取1 g左右样品置于105℃烘箱进行干燥,直至恒重后称量剩余样品质量,按式(1)计算凝胶水分质量分数。

$$X = \frac{m_0 - m_x}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

X—凝胶水分质量分数, %;

m_0 —干燥前样品质量, g;

m_x —干燥后样品质量, g。

1.4.2 色差的测定

色差仪测定凝胶的 L^* 值(代表明暗度)、 a^* 值(代表红绿色)、 b^* 值(代表黄蓝色),并计算色差值 ΔE ^[14]。

1.4.3 总叶绿素和类胡萝卜素的测定

称取 1 g 样品用 10 mL 体积分数 95% 的乙醇避光静置提取 5 h, 分别测定提取液在 470、662、663、645 nm 处的吸光值, 计算总叶绿素和类胡萝卜素的含量^[14,15]。

1.4.4 维生素C的测定

采用 2,6- 二氯酚酚滴定法测定^[16]。

1.4.5 总酚的测定

采用超声辅助乙醇提取并测定总酚^[17]: 取 2 g 凝胶样品用 8 mL 体积分数 75% 的乙醇超声提取 40 min, 提取温度为 60 ℃。取 0.5 mL 提取液加入 1.0 mL 的福林酚试剂和 2 mL 0.71 mol·L⁻¹ 的 Na₂CO₃ 溶液, 50 ℃ 水浴 5 min 并冷却 1 h 后测定 760 nm 处的吸光度。通过构建没食子酸标准曲线 ($y=17.442x+0.0211$, $R^2=0.9992$) 计算总酚含量。

1.4.6 黄酮的测定

采用 NaNO₂-Al(NO₃)₃-NaOH 显色法^[18]: 取上述总酚提取液 2 mL, 依次加入体积分数 5% 的 NaNO₂ 溶液 0.3 mL, 蒸馏水 5 mL, 体积分数 10% 的 Al(NO₃)₃ 溶液 0.3 mL, 1 mol·L⁻¹ 的 NaOH 溶液 2 mL, 定容至 10 mL, 测 510 nm 吸光值。通过构建芦丁标准曲线 ($y=2.5661x-0.0017$, $R^2=0.9942$), 计算黄酮含量。

1.4.7 ABTS⁺自由基清除率

将上述总酚提取液稀释 10 倍, 采用试剂盒测定, 按式 (2) 计算。

$$S = (1 - \frac{A_x - A_y}{A_0}) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

S —ABTS⁺ 自由基清除率, %;

A_x —测定组在 734 nm 处的吸光度;

A_y —对照组在 734 nm 处的吸光度;

A_0 —空白组在 734 nm 处的吸光度。

1.5 保真度计算

为进一步对比贮藏过程中凝胶物料营养成分的保留, 色泽的稳定性, 抗氧化能力的变化以评价其综合品质保真度。将上述获得的各项指标的保留率和色差值通过极差法进行标准化处理, 其中色差值为负向指标, 其余为正向指标, 标准化后的值均在 0~1 之间。按照式 (3)、式 (4) 通过变异系数法计算各项指标权重^[19]。

$$V_i = \frac{\sigma_i}{X_i} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (4)$$

式中:

V_i —第 i 项指标的变异系数;

σ_i —第 i 项指标的标准差;

X_i —第 i 项指标的平均值;

W_i —第 i 项指标权重值。

根据指标权重和对应保留率按式 (5) 累计相加计算综合保真度对凝胶品质进行综合性评, 其中色差以标准化后的值进行计算。

$$FD = \sum (W_i \times X_i) \quad (5)$$

式中:

FD —品质保真度, %;

W_i —第 i 项指标权重值;

X_i —第 i 项指标的保留率, %。

1.6 数据处理

采用 Excel 2013 进行数据整理, 实验结果以平均值 ± 标准差表示。采用 SPSS 27 的因子分析法进行主成分分析, 单因素方差分析和 Duncan 多重比较的方法进行显著性分析, 不同字母表示数据具有显著性差异 ($P < 0.05$)。Origin 2022 进行作图。

2 结果与讨论

2.1 环境因素对凝胶物料品质的影响

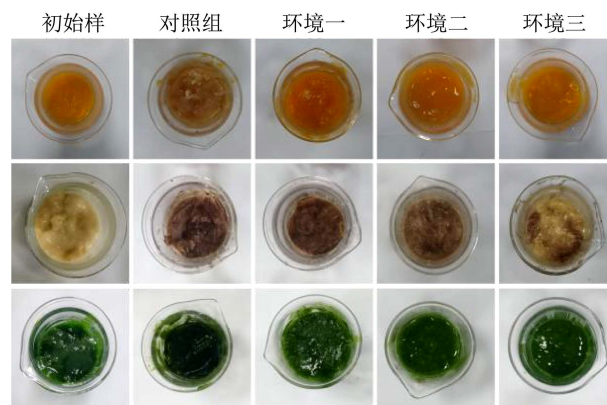


图 1 不同环境条件下贮藏 4 d 后果蔬凝胶的实物图

Fig.1 Physical drawings of fruit and vegetable gels after 4 days of storage under different environmental conditions

注: 环境一: 仅 4 ℃ 冷藏; 环境二: 4 ℃ +90% RH+21% O₂; 环境三: 4 ℃ +90% RH+5% O₂。

如图 1 所示, 凝胶物料在不同条件下贮藏时, 物料的色泽、表面状态等都发生一定改变。对照组的凝胶物料变化最明显, 贮藏期间, pH 值很快降低, 凝胶结构变得较为松散, 流动性增强, 色泽发生肉眼可见

的改变。随后通过对果蔬凝胶物料贮藏期间色泽、水分含量、色素成分、维生素 C、总酚、黄酮及 ABTS 自由基清除能力的变化进一步探讨环境因素对品质的影响。

2.1.1 贮藏环境对果蔬凝胶物料色泽的影响

环境因素对凝胶色泽具有较大影响。如图 1 和图 2a 所示,贮藏前的南瓜凝胶物料呈橘黄色,室温下贮藏 4 d 后表面色泽灰白,相对初始样的 L^* 值增加 (ΔL 为正值) 和 b^* 值下降 (Δb 为负值),色差较为显著 ($\Delta E > 7$),此时的南瓜凝胶已变质,霉菌产生白色菌丝,色素降解;4℃冷藏条件下贮藏的南瓜物料(环境一、二), L^* 值下降,色泽变暗, $\Delta E > 5$,表明南瓜凝胶物料出现一定程度褐变^[20]。在降低贮藏环境中氧气体积分数后(环境三), ΔE 值显著降低 ($\Delta E < 2$),此时的色泽变化一般肉眼难以分辨^[14]。如图 2b 所示,未进行气调的香蕉凝胶物料在贮藏不到 1 d 后表面均发生严重褐变,从淡黄色转变为深褐色,其 ΔE 值均大于 20。对比降低贮藏环境中氧气体积分数后(环境三),香蕉凝胶物料的色差值显著降低,在贮藏初期有效抑制褐变,但随贮藏时间延长,香蕉凝胶物料表面依然出现部分黑斑, $\Delta E > 5$,后续将考虑进一步降低氧气体积分数进行贮藏。如图 2c 所示,室温对照组的菠菜凝胶物料,的 b^* 值显著上升, $-a^*$ 值下降,由于 $-a^*$ 值与叶绿素含量呈正相关^[21],表明菠菜凝胶物料在室温贮藏时叶绿素损失。降低氧气体积分数后(环境三)相对于仅冷藏条件下(环境一、环境二), Δa 值、 Δb 值和 ΔE 值均显著降低。上述试验结果表明,调控贮藏环境温度和氧气体积分数有助于减少果蔬凝胶的色差。这主要源于在低温条件下,能够抑制多酚氧化酶、过氧化物酶等的活性^[14],但不能完全使之失活,在高氧条件下依然存在酶促褐变反应的进行,同时氧气也能直接氧化酚类物质、抗坏血酸等营养成分^[8],生成褐色聚合物。而在低氧环境条件下进一步抑制褐变,延缓色素等成分的降解,从而有效降低色差。

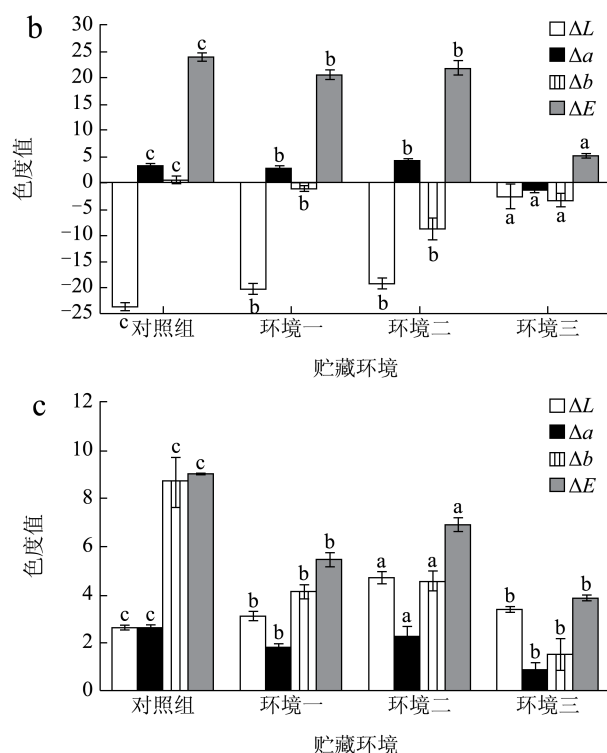
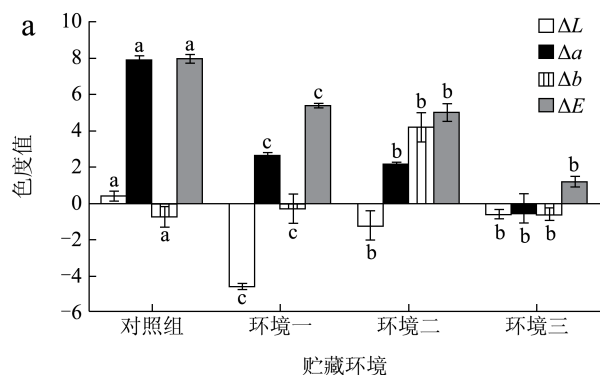
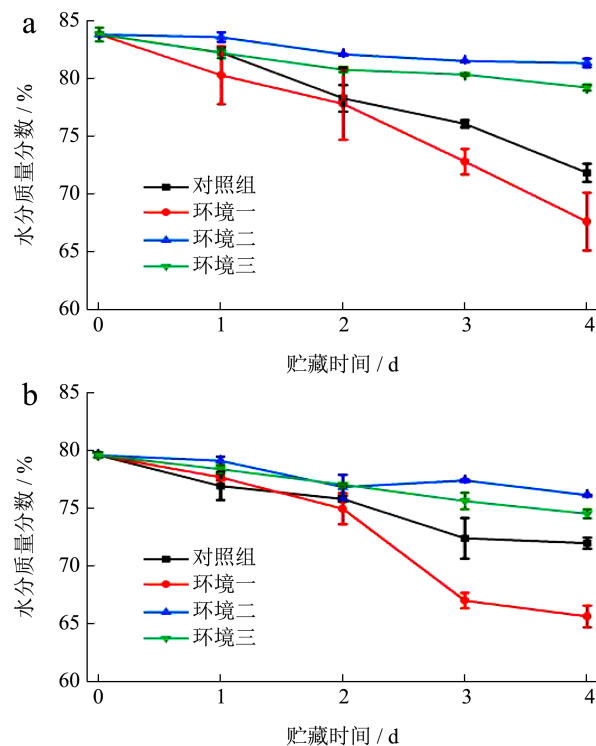


图 2 不同贮藏环境下凝胶物料的色差值

Fig.2 Color difference of gel samples under different storage conditions

注: 不同字母表示凝胶在不同贮藏条件存在显著差异 ($P < 0.05$)。环境一: 仅 4℃冷藏; 环境二: 4℃+90% RH+21% O_2 ; 环境三: 4℃+90% RH+5% O_2 。(a) 南瓜凝胶; (b) 香蕉凝胶; (c) 菠菜凝胶, 除图 4 外, 其他图同。

2.1.2 贮藏环境对果蔬凝胶物料水分的影响



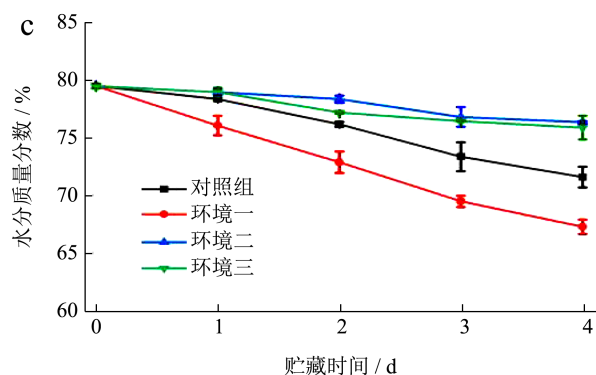


图3 不同贮藏环境下凝胶物料的水分质量分数

Fig.3 Water mass fraction of gel samples under different storage conditions

上述果蔬凝胶中均含有较高的水分，如图3所示，对照组贮藏的三种果蔬凝胶物料随储藏时间延长，水分损失增加，表面出现干裂现象。这可能由于室内温度较高，水分蒸发速率加快。无加湿时（环境一）贮藏的凝胶物料同样表面出现干裂现象。这主要由于淀粉凝胶网络结构束缚水分的能力较弱^[22]，凝胶中大部分是自由水，结合水的占比较少^[14]，在保鲜舱内风机的作用下，空气流动加快，不断带走凝胶物料表面水分，导致未开加湿时凝胶物料表面水分加速损失。在开启加湿后（环境二、环境三），凝胶物料表面干裂现象有所缓解，此状态下三种凝胶物料水分保留率均大于93%。

2.1.3 贮藏环境对凝胶物料总叶绿素和类胡萝卜素的影响

通常贮藏时间、温度、氧气体积分数对总叶绿素、类胡萝卜素有重要影响^[23]。如图4所示，贮藏期间凝胶中总叶绿素和类胡萝卜素含量总体呈下降趋势。在上述菠菜凝胶物料中含有较丰富的叶绿素含量（图4c），而南瓜和香蕉中的类胡萝卜素含量相对更高（图4a、b）。在室温对照组的菠菜凝胶中叶绿素随贮藏时间的延长显著降低，第4天时仅保留30.09%。而在4℃条件下贮藏（环境一、环境二）的菠菜凝胶物料中叶绿素的损失相对减少，保留率分别为42.31%和45.24%，在降低氧气体积分数后（环境三），叶绿素的损失进一步降低，保留率为72.92%（图4c）。叶绿素降解机制主要包括光降解和酶降解^[24]。其中，酶降解过程主要受一系列酶的调控，而叶绿素酶的活性受温度和氧气的影响较大^[25]。当温度和氧气体积分数降低时，叶绿素酶的活性降低，减缓了叶绿素的降解过程，这也与上述色差测定的实验结果相符。

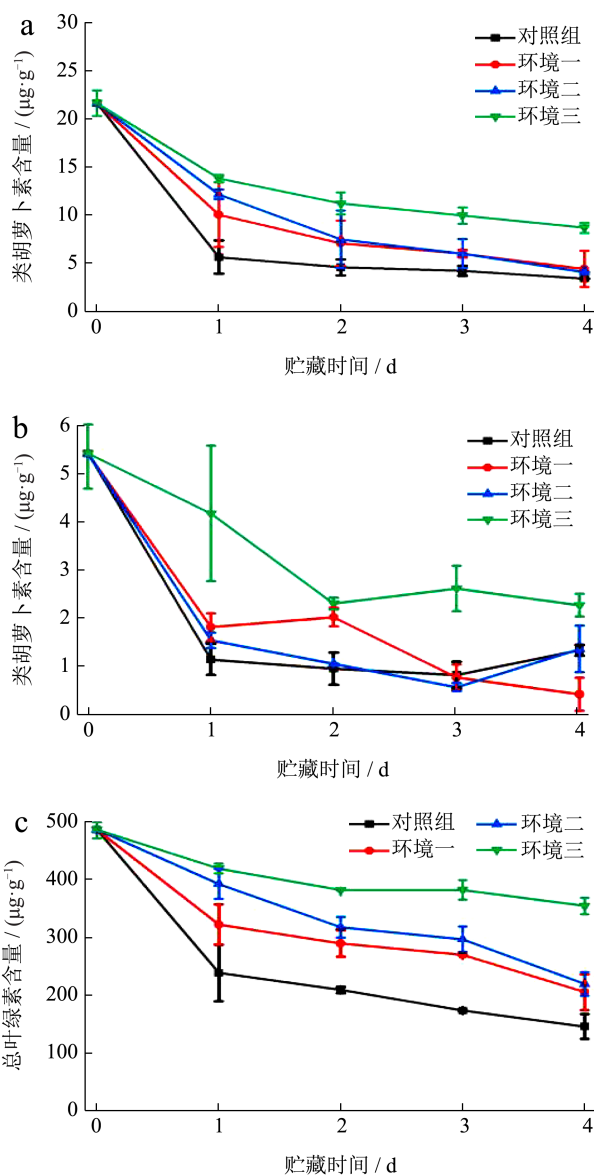


图4 不同贮藏环境下凝胶物料的主要色素成分

Fig.4 Main pigment components of gel samples under different storage conditions

注：(a) 南瓜凝胶的类胡萝卜素；(b) 香蕉凝胶的类胡萝卜素；(c) 菠菜凝胶的总叶绿素。

南瓜和香蕉中的类胡萝卜素也有相似的变化情况。凝胶在仅冷藏环境条件下（环境一、环境二）类胡萝卜素的保留率相对室温条件略有提升。而在低温、低氧环境下（环境三）类胡萝卜素的保留率更高。类胡萝卜素的降解主要受物理、化学和生物等多方面的影响，这里主要考虑温度、氧气体积分数和酶的影响^[23]。类胡萝卜素在加热条件下会发生环氧化，破坏原本的稳定结构。而在常温条件下，也会发生自氧化，双键断裂产生系列副产物。这个过程相对温和，耗时较长。

同时,果蔬中本身含有的过氧化物酶、脂肪氧合酶也可催化类胡萝卜素的降解,在低温低氧环境下可降低酶的活性,抑制降解过程。Wang 等^[14]也指出类胡萝卜素的饱和和特性易发生氧化和异构化,使之更易受到温度和氧气的影响。

2.1.4 贮藏环境对凝胶物料维生素C的影响

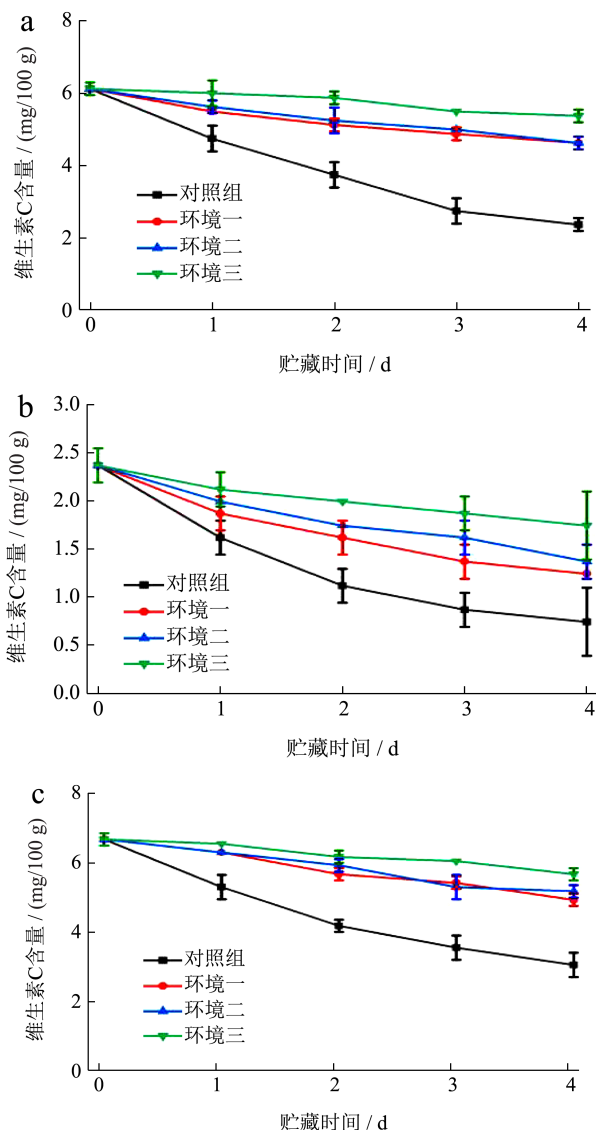


图5 不同贮藏环境下凝胶物料的维生素C含量

Fig.5 Vitamin C content of gel samples under different storage conditions

如图5所示,对照组的南瓜、香蕉和菠菜凝胶物料随时间延长维生素C含量显著降低,至第4天时,其保留率分别下降至38.78%、31.58%、45.28%。这可能源于室温贮藏的凝胶物料已发生变质,维生素C被降解。而降低贮藏环境的温度,有助于提高维生素C的保留率(环境一),此时保留率分别为75.51%、52.63%和73.58%。Diego 等^[26]将富含维生素C的新

型饮料分别贮藏于4℃和20℃,发现维生素C在4℃时的降解速率低于20℃,表明维生素C对热较为敏感。在此基础上加湿条件下凝胶物料中维生素C的保留率略有增加(环境二),这可能是源于加湿后凝胶物料中水分损失降低,维生素C含量的下降与物料失水程度成正相关^[27]。同时低温低氧环境能抑制维生素C氧化酶的活性,因而低氧条件有助于进一步维持果蔬凝胶物料中维生素C的保留率,此时上述三种凝胶维生素C的保留率分别为87.86%、73.68%、84.91%(环境三)。

2.1.5 贮藏环境对凝胶物料总酚和黄酮的影响

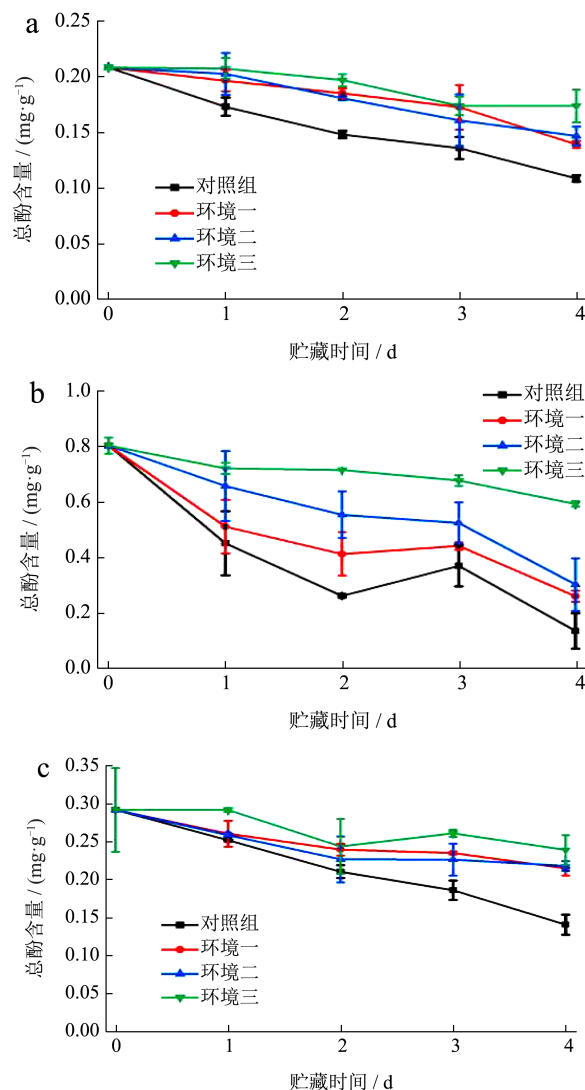


图6 不同贮藏环境下凝胶物料的总酚含量

Fig.6 Total phenolic content of gel samples under different storage conditions

如图6和图7所示,上述凝胶中总酚和黄酮同样随贮藏时间延长而呈现下降趋势。相对室温对照组,贮藏期间低温下贮藏的凝胶物料总酚和黄酮的含量更

高（环境一、二）。而低氧环境贮藏后（环境三）物料中保留的总酚和黄酮含量进一步提升，此条件下贮藏4 d后南瓜、香蕉、菠菜的总酚保留率分别为83.38%、73.87%和81.91%，黄酮保留率分别为66.74%、61.85%和68.63%。这主要基于酚类物质是酶促褐变的主要底物，在低温低氧条件下多酚氧化酶的活性较低，而在有氧环境条件下，酚类物质易被氧化成醌类，并进一步聚合形成黑色色素，这在香蕉凝胶中体现最明显^[28,29]。

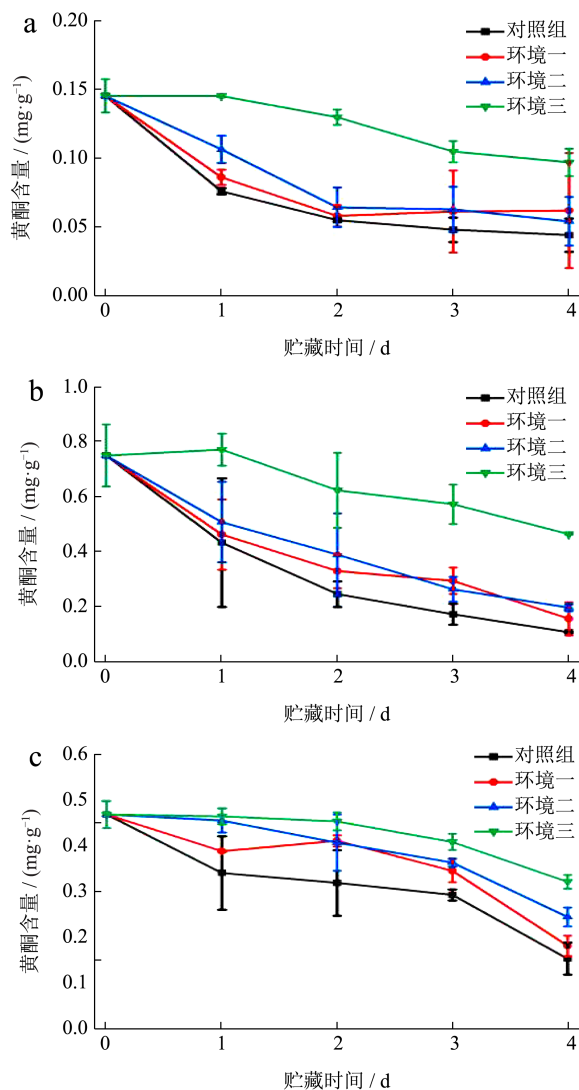


图7 不同贮藏环境下凝胶物料的黄酮含量

Fig.7 Flavonoid content of gel samples under different storage conditions

2.1.6 贮藏环境对ABTS⁺自由基清除能力的影响

如图8所示，贮藏期间，上述三种凝胶物料的ABTS⁺自由基清除率呈下降趋势，其中对照组的ABTS⁺自由基清除率最低。研究表明，ABTS的抗氧化机制主要涉及氢原子转移，抗氧化能力随温度升高而降低^[30]。试验中环境一和环境二条件下凝胶的

ABTS⁺自由基清除能力总体未出现显著性差异。Ana等^[31]认为相对湿度的增加会导致抗氧化活性的降低，但Pitalua等^[32]认为相对湿度的增加可能形成或释放新的中间化合物增加抗氧化活性。相比之下，低氧控制下（环境三）凝胶物料的ABTS⁺自由基清除率更高。其中，香蕉的变化趋势最明显（图8b）。这与上述色差测定结果，以及总酚、黄酮的变化趋势相符合。Wang等^[33]制备了类似的香蕉凝胶，调控了3D打印过程中的氧气体积分数，结果同样显示当打印环境中氧气体积分数越低，香蕉基材褐变程度越小，酚类物质、类黄酮和抗氧化能力的损失程度越小。

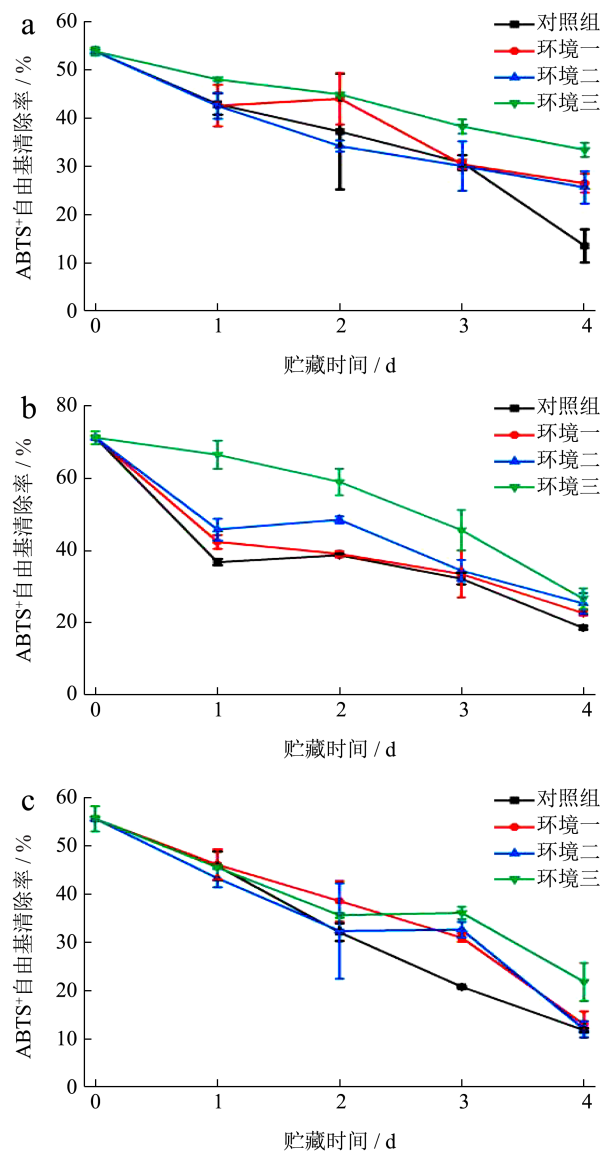


图8 不同环境下凝胶物料的ABTS 自由基清除率

Fig.8 ABTS free radical scavenging capacity of gel samples under different conditions

2.2 主成分分析

为对比贮藏环境与相应指标间的关系，通过主成

分分析的方法对贮藏期的三种果蔬凝胶进行了综合评价。分别对凝胶物料的水分、色素（南瓜香蕉为类胡萝卜素、菠菜为总叶绿素）、维生素 C、总酚、黄酮、 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值、 ΔE 值、ABTS⁺ 自由基清除率等 10 项指标进行分析，并依次设为 $Z_1\sim Z_{10}$ 。按特征值 >1 的原则，三种果蔬凝胶均可提取 2 个主成分。南瓜（NG）凝胶（式 6~8）、香蕉（XJ）凝胶（式 9~11）和菠菜（BC）凝胶（式 12~14）的主成分的线性方程（ Y_1 和 Y_2 ）和综合得分的计算方程（ Y ）如下所示：

$$Y_{1_{NG}}=0.31Z_1+0.34Z_2+0.36Z_3+0.37Z_4+0.36Z_5+0.07Z_6-0.34Z_7+0.01Z_8-0.38Z_9+0.36Z_{10}$$

(6)

$$Y_{2_{NG}}=0.63Z_1+0.70Z_2+0.73Z_3+0.75Z_4+0.72Z_5+0.13Z_6-0.69Z_7+0.02Z_8-0.76Z_9+0.73Z_{10}$$

(7)

$$Y_{NG}=0.67Y_{1_{NG}}+0.16Y_{2_{NG}}$$

(8)

$$Y_{1_{XJ}}=0.28Z_1+0.31Z_2+0.35Z_3+0.34Z_4+0.36Z_5+0.34Z_6-0.25Z_7+0.20Z_8-0.35Z_9+0.34Z_{10}$$

(9)

$$Y_{2_{XJ}}=-0.14Z_1+0.39Z_2+0.01Z_3-0.05Z_4+0.07Z_5-0.26Z_6+0.55Z_7+0.65Z_8+0.11Z_9+0.14Z_{10}$$

(10)

$$Y_{XJ}=0.76Y_{1_{XJ}}+0.12Y_{2_{XJ}}$$

(11)

$$Y_{1_{BC}}=0.28Z_1+0.36Z_2+0.35Z_3+0.35Z_4+0.35Z_5-0.27Z_6-0.02Z_7-0.24Z_8-0.26Z_9+0.24Z_{10}$$

(12)

$$Y_{2_{BC}}=0.69Z_1+0.08Z_2+0.85Z_3+0.87Z_4+0.86Z_5-0.66Z_6-0.05Z_7-0.85Z_8-0.89Z_9+0.84Z_{10}$$

(13)

$$Y_{BC}=0.73Y_{1_{BC}}+0.12Y_{2_{BC}}$$

(14)

得分结果显示，随贮藏时间延长，凝胶综合得分

不断下降。如图 9 所示，箱型图上下界限分别代表初始样的最高得分值和贮藏第 4 天的最低得分值。环境三条件下的最低得分值和综合得分均值均高于其他三组，这在香蕉凝胶中的体现更为明显，表明在多环境因素调控下更有利于凝胶物料的贮藏。

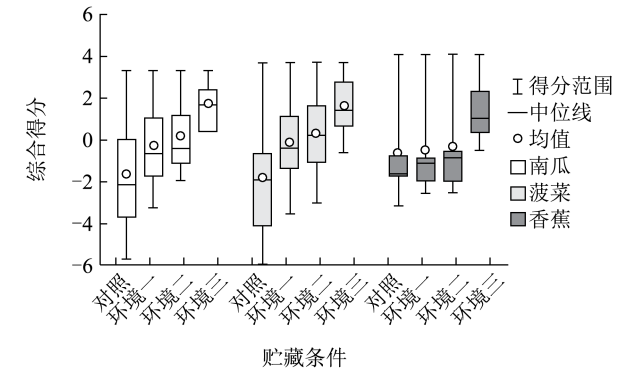


图 9 不同环境下果蔬凝胶的综合得分箱型图

Fig.9 Box plots of the comprehensive scores of fruit and vegetable gels under different environments

2.3 保真度分析

为进一步比较不同贮藏环境条件下凝胶物料的品质保真度，首先对上述三种凝胶的相关指标数据标准化后通过变异系数法进行权重分析，结果如表 1 所示。其中，南瓜凝胶的类胡萝卜素和黄酮含量权重占比更高，香蕉凝胶的类胡萝卜素权重占比更高，菠菜凝胶的色差权重占比相对更高。

表 1 凝胶各项指标权重分析结果								
Table 1 Weights analysis results of various indicators of the gels								
		水分	类胡萝卜素 / 总叶绿素	维生素 C	总酚	黄酮	色差	ABTS
南瓜	平均值	0.74	0.44	0.72	0.68	0.47	0.67	0.63
	标准差	0.28	0.36	0.28	0.29	0.38	0.31	0.27
	变异系数	0.37	0.81	0.40	0.43	0.80	0.46	0.43
	权重	0.10	0.22	0.11	0.12	0.22	0.12	0.12
香蕉	平均值	0.73	0.43	0.60	0.61	0.53	0.53	0.50
	标准差	0.28	0.35	0.30	0.31	0.35	0.37	0.33
	变异系数	0.39	0.82	0.50	0.51	0.66	0.69	0.67
	权重	0.09	0.19	0.12	0.12	0.16	0.16	0.16
菠菜	平均值	0.72	0.54	0.71	0.68	0.69	3.81	0.55
	标准差	0.29	0.33	0.29	0.26	0.31	2.75	0.33
	变异系数	0.40	0.61	0.41	0.38	0.44	0.72	0.60
	权重	0.11	0.17	0.11	0.11	0.12	0.20	0.17

如表 2 所示，基于各项指标权重计算所得三种凝胶物料在不同环境条件下贮藏的品质保真度。凝胶物料的品质保真度随贮藏时间的增加而下降，其中南瓜和菠菜凝胶物料相对香蕉凝胶更易贮藏。贮藏相同时间内，环境三相对环境一和环境二的品质保真度可提升超过 10%，相对对照组可提升超过 20%。在贮藏第 4 天时，环境三条件下贮藏的南瓜、香蕉、菠菜的综合保真度分别为 72.23%、64.83%、68.35%，高于环境一的仅冷藏条件下 48.70%、34.11%、49.75%，远高于对照组的 32.72%、24.27%、33.22%。试验结果表明，在贮藏过程中对多环境因素的调控能更好的维持果蔬凝胶的品质。在类似易变质的鲜切果蔬贮藏中也发现，气调和低温等多环境因素的同步调控能更好维持其品质^[34]。

表 2 不同环境下凝胶物料品质保真度对比
Table 2 Quality fidelity of gel materials under different environments

凝胶种类	贮藏时间/d	保真度/%			
		对照组	环境一	环境二	环境三
南瓜	0	100.00	100.00	100.00	100.00
	1	61.52	73.82	82.52	93.15
	2	49.13	64.96	66.01	85.65
	3	43.20	57.73	59.23	76.64
	4	32.72	48.70	49.60	72.23
香蕉	0	100.00	100.00	100.00	100.00
	1	51.41	65.13	69.17	89.39
	2	39.17	56.22	59.24	81.32
	3	34.73	49.32	46.50	75.32
	4	24.27	34.11	36.25	64.83
菠菜	0	100.00	100.00	100.00	100.00
	1	65.91	78.55	83.12	90.21
	2	51.39	72.16	70.51	81.92
	3	44.32	65.96	65.77	81.69
	4	33.22	49.75	50.14	68.35

3 结论

本文研究对比了用于 3D 打印的南瓜、香蕉、菠菜凝胶物料打印前在不同环境条件贮藏期间的色泽和营养品质变化情况，并通过主成分分析和品质保真度计算对果蔬凝胶物料的品质进行了综合评价。结果表明，在室温环境下贮藏的果蔬凝胶物料很快变质，而低温高湿低氧的多环境因素调控有助于提高凝胶物料色泽的稳定性、抑制营养成分的损耗、减少抗氧化能力的降低，且在贮藏相同时间下综合得分始终最高。贮藏第 4 天时，多环境因素调控下凝胶物料品质保真

度仍高于 60%，相对室温或单一环境调控时品质保真度提升超过 20%，证实多环境因素调控有助于维持果蔬凝胶物料品质。由于果蔬凝胶物料后续还需要进一步加工，目前暂时缺少对微生物指标的考虑。在后续的应用研究中，我们将结合 3D 打印技术，更全面的探讨环境调控对果蔬凝胶物料打印前后全过程品质保真度的影响，并加强对食用安全性的综合评估。

参考文献

[1] TOMAŠEVIĆ I, PUTNIK P, VALJAK F, et al. 3D printing as novel tool for fruit-based functional food production [J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 41: 138-145.

[2] WAGHMARE R, SURYAWANSHI D, KARADBHAJNE S. Designing 3D printable food based on fruit and vegetable products-opportunities and challenges [J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(5): 1447-1460.

[3] CHEN Y Y, ZHANG M, PHUHONGSUNG P. 3D printing of protein-based composite fruit and vegetable gel system [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 141: 110978.

[4] UMEDA T, KOZU H, KOBAYASHI I. Analysis of pumpkin paste printability for screw-based 3D food printer [J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(1): 188-204.

[5] ARMSTRONG C, YUE L, DENG Y, et al. Enabling direct ink write edible 3D printing of food purees with cellulose nanocrystals [J]. Journal of Food Engineering, 2022, 330: 111086.

[6] KIM Y, KIM H W, PARK H J. Effect of pea protein isolate incorporation on 3d printing performance and tailing effect of banana paste [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 150(3): 111916.

[7] JIANG Q, ZHANG M, MUJUMDAR A S. Novel evaluation technology for the demand characteristics of 3D food printing materials: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 62(17): 4669-4683.

[8] LYU Y, BI J F, CHEN Q Q, et al. Color, carotenoids, and peroxidase degradation of seed-used pumpkin byproducts as affected by heat and oxygen content during drying process [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(11): 1929-1939.

[9] KOC G C, DIRIM S N. Spray drying of spinach juice: characterization, chemical composition, and storage [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(12): 2873-2884.

[10] GIL M I, TRUCHADO P, TUDELA J A, et al. Environmental monitoring of three fresh-cut processing facilities reveals harborage sites for *Listeria monocytogenes* [J]. Food Control, 2024, 155: 110093.

[11] KROFT B, GU G, BOLENT S, et al. Effects of temperature abuse on the growth and survival of *Listeria monocytogenes* on a wide variety of whole and fresh-cut fruits and vegetables during storage [J]. Food Control, 2022, 137: 108919.

[12] 张慇,王欣,过志梅,等.易氧化果蔬凝胶体系3D打印的品质监测与协同调控方法:中国,CN202310210220.6[P].2024-12-03.

[13] BI L, LIU B, YANG Z D, et al. Analysis of heat and moisture transfer in the microwave drying of potatoes [J]. Drying

- Technology, 2020, 41(9): 1397-1410.
- [14] WANG X, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Study on improving flavor and antioxidant capacity of 3D printed spinach gel system by combining modified atmosphere and ambient temperature [J]. Food Bioscience, 2024, 59: 103888.
- [15] 罗学平,李腊,张丽,等.乙醇浸泡法测定绿茶叶绿素含量的试验研究[J].现代食品,2023,29(1):148-154.
- [16] 曹建康,姜微波,赵玉梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [17] 齐娜,李涵,张志宇,等.新疆红肉苹果多酚的超声波辅助提取工艺优化[J].食品与机械,2016,32(9):177-182.
- [18] 宋娟,张海燕,袁晶,等.不同干燥方式下菠菜粉理化性质的比较[J].现代食品科技,2021,37(9):207-215.
- [19] 任广跃,刘亚男,乔小全,等.基于变异系数权重法对怀山药干燥全粉品质的评价[J].食品科学,2017,38(1):53-59.
- [20] DEMIR H G, KLN A. Effect of batch and continuous thermosonication on the microbial and physicochemical quality of pumpkin juice [J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(11): 5036-5045.
- [21] DONLAO N, OGAWA Y. The influence of processing conditions on catechin, caffeine and chlorophyll contents of green tea (*Camelia sinensis*) leaves and infusions [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 116: 108567.
- [22] ZHONG Y, WANG B, LV W, et al. Egg yolk powder-starch gel as novel ink for food 3D printing: Rheological properties, microstructure and application [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2024, 91: 103545.
- [23] WANG Y, HAO Y, ZHOU D, et al. Differences in commercial quality and carotenoids profile of yellow- and white-fleshed nectarine fruit during low temperature storage and the regulation of carotenoids by sugar [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 169: 112773.
- [24] LINGVAY M, AKHTAR P, SEBŐK-NAGY K, et al. Photobleaching of chlorophyll in light-harvesting complex II increases in lipid environment [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 849.
- [25] 马阳历.O₂对西兰花叶绿素降解及硫代葡萄糖苷代谢的影响[D].淄博:山东理工大学,2022.
- [26] DIEGO H, FRANCISCO J, ALBERTO G, et al. Kinetic modelling of anthocyanins and vitamin C degradation in a maqui-citrus beverage during storage for different sweeteners and pasteurization treatments [J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 199: 116082.
- [27] 李文钊,杜依登,史宗义,等.菠菜维生素C降解动力学及其快速识别方法研究[J].食品工业,2014,35(10): 202-205.
- [28] SARKAR S, AKHTER S, ROY J, et al. Preventing enzymatic browning of freshly cut green bananas through immersion in normal water, lemon juice, and coconut water [J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(9): 6612-6626.
- [29] LIU Z, WANG P, LIU Z, et al. Dynamic changes and correlation analysis of pumpkin quality and physiological indicators during postharvest storage [J]. HortScience, 2024, 59(10): 1543-1549.
- [30] QIU L M, ZHANG M, CHANG L. Effects of lactic acid bacteria fermentation on the phytochemicals content, taste and aroma of blended edible rose and shiitake beverage [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134722.
- [31] ANA M C, EZEQUIEL J P, DIANA M G, et al. Effect of temperature and relative humidity on the stability of betalains encapsulated in cryogels from protein and polysaccharide [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(5): 2007-2018.
- [32] PITALUA E, JIMENEZ M, VERNON-CARTER E J, et al. Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material [J]. Food and Bioproducts Processing, 2010, 88: 253-258.
- [33] WANG X, ZHANG M, TANG T T, et al. A novel banana-based gel system 3D printing: effect of oxygen content in printing environment on browning development [J]. Journal of Food Process Engineering, 2025, 48(1): e70017.
- [34] 方宗壮,何艾,窦志浩,等.不同气调包装结合低温处理对鲜切菠萝贮藏品质的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2018, 39(4):102-107.