DOI:10.12441/spyswjs.20240921002 [文章编号] 1673-1689(2025)10-0039-13

基于双物料组合凝胶的双喷头3D打印休闲山楂制品及其干燥特性研究

王爱苗[1] 王 博[2] 王玉川[1*] 刘继光[3]

(1. 江南大学食品学院,江苏 无锡 214122; 2. 江苏大学食品与生物工程学院,江苏 镇江 212013; 3. 山东公社联盟食品有限公司,山东 临沂 276034)

摘要:【目的】解决传统休闲山楂制品干燥时间长、造型单一及3D打印过程中打印喷头易堵塞、打印后产品支撑性差的难题。**【方法】**以低糖山楂酱和高糖香蕉酱为凝胶组分,开展双物料组合凝胶配方优化、双喷头3D打印工艺优化及其干燥特性研究,并将3D打印制品的干燥特性与传统山楂干制品进行对比。**【结果】**蔗糖质量分数26%的山楂酱与蔗糖质量分数38%的香蕉酱组合(A_2B_3组)具有适宜3D打印的储能模量(G')、损耗模量(G'')和表观黏度;A_2B_3组的双喷头3D打印精度最高,3D打印山楂干制品的外径和高度偏差分别为1.04%和1.08%。与传统山楂干制品相比,A_2B_3组双喷头3D打印山楂干制品的干燥时间缩短了16.67%,硬度降低了20.65%,总糖质量分数降低了2.48%,黄酮、总酚质量分数分别提高了23.32%和25.94%,且抗氧化能力与风味均显著增强。**【结论】**该研究可为食品3D打印结构支撑及特殊造型休闲食品的开发提供参考。

关键词:双喷头3D打印;山楂酱;香蕉酱;组合凝胶;品质

Dual-nozzle 3D Printing and Drying Characteristics of a Hawthorn Snack Based on Dual-material Combination Gel

WANG Aimiao[1] *WANG Bo*[2] *WANG Yuchuan*[1*] *LIU Jiguang*[3]

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Shandong Commune Union Food Co., Ltd., Linyi 276034, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims at solving the problems such as long drying time, single product shape, and poor 3D printing capacity (easy blockage and weak bracing ability) in conventional processing of hawthorn snack products. [**Method**] The low-sugar hawthorn jam and high-sugar banana jam were used as gel components. The 3D printing was carried out with the optimization of dual-material combination gel formula and the optimization of dual-nozzle 3D printing process. Furthermore, the drying characteristics of 3D printing were analyzed and compared with those of conventional dried hawthorn products. [**Result**] The combination of hawthorn jam with the sugar mass fraction of 26% and banana jam with the sugar mass fraction of 38% (A_2B_3 group) had the storage modulus (G'), loss modulus (G''), and apparent viscosity suitable for 3D printing. The dual-nozzle 3D printing accuracy of A_2B_3 group was the highest, with the outer diameter and height deviations of 1.04% and 1.08%, respectively. Compared with the production of conventional dried hawthorn products, dual-nozzle 3D printing with A_2B_3 group showed reductions of 16.67%, 20.65%, and 2.48% in drying time,

基金项目:国家"十四五"重点研发计划项目(2022YFF1101300,2023YFF1104205)。

通信作者:王玉川(1966—),男,博士,副教授,硕士研究生导师,主要从事生鲜食品物理加工新技术研究。E-mail: wyc453@163.com

收稿日期:2024-09-21 **修回日期:**2024-10-29

hardness, and total sugar mass fraction but increases of 23.32% and 25.94% in mass fractions of flavonoids and total phenols, respectively. Moreover, it enhanced the antioxidant capacity and flavor of the product. [**Conclusion**] This study provides a solid reference of structural support for food 3D printing and the development of the special-shape snacks.

Keywords: dual-nozzle 3D printing; hawthorn jam; banana jam; combination gel; quality

山楂属蔷薇科，富含果胶、膳食纤维、矿物质、维生素等营养成分，广泛应用于食品加工领域[1]。山楂果实既可鲜食，也可加工成山楂条、山楂片、山楂糖果、山楂糕点等休闲食品。传统山楂干制品酸甜可口，具有开胃健脾、改善消化不良等功效，因此深受消费者青睐。然而，山楂果实中果胶含量较高[2]，传统工艺制备的山楂酱需使糖质量分数达到65%以上才能形成凝胶结构。高糖导致传统山楂制品在干燥过程中水分难以去除，进而造成干燥时间长、能耗高、成本高等问题；此外，传统山楂干制品造型单一。随着人们膳食观念的转变，休闲山楂制品逐渐向健康、营养、个性化方向发展，高糖特性与造型单一已成为限制休闲山楂制品发展的主要因素。因此，针对传统山楂干制品的高糖和造型单一的问题开展改良研究，具有重要的现实意义。

3D打印技术被称为快速成型技术或增材制造技术[3-4]，其核心是通过数字化操作控制复杂生产过程，进而通过该技术实现个性化产品开发，具有精度高、成型快、成本低、操作简便等优势[5-6]，已广泛应用于机械、医药、化工、电子、航空等领域。近年来，3D打印技术开始应用于个性化食品开发，如适用于老年人的易吞咽食品、具有特殊造型的儿童休闲食品、满足成年人个性化需要的食品等。但在实际应用中，由于食材含水量高、自身支撑性差，易出现打印过程中产品塌陷、成型精度低、生产效率低等问题，导致其应用场景与规模化生产受限。为改善食材的可打印性，研究者通过添加奶粉[7]、胶体[8]、淀粉[9]等辅料进行调节，但过多辅料会改变食材原有的成分，不仅影响产品品质，还会限制其应用场景（大多仅适用于鲜食）。另外，高含量辅料（如胶体）的添加会导致打印产品干燥后出现体积收缩、硬度升高的问题，难以适用于休闲干制品的加工。已有研究证实，利用物理场辅助食材相变或食材组合相变是提高食品3D打印结构支撑性的有效方法[10]。传统休闲山楂制品加工正是利用果胶-蔗糖组合相变凝胶机理，实现山楂酱支撑性与切割性的提升，同时降低产品硬度。但凝胶山楂酱在3D打印过程中易引发打印喷头堵塞问题。香蕉作为一种高糖水果，含有大量淀粉、纤维素及丰富的多酚物质，这些成分使得香蕉浆液浓稠，水分含量低于其他果酱，且高糖的香蕉酱与低糖的山楂酱在3D打印过程中结合性较好。基于此，可通过双物料双喷头3D打印实现打印过程中果胶与蔗糖交替薄层混合相变凝胶，既能改善产品支撑性，解决单一喷头打印凝胶态山楂酱易堵塞的问题，又能丰富产品花色和造型。目前，关于该技术的研究仍鲜见报道。

针对传统休闲山楂制品干燥时间长、造型单一的问题，以及3D打印过程中打印喷头易堵塞、打印后产品支撑性差的难题，作者根据果胶与蔗糖组合凝胶机理，以山楂酱、香蕉酱、蔗糖为原料，采用双喷头3D打印方法，研究不同蔗糖质量分数的山楂酱与香蕉酱（蔗糖载体）组合的凝胶特性、双物料组合打印特性及其干燥特性，并与传统山楂干制品的干燥特性进行对比，旨在探讨双物料组合凝胶与双喷头3D打印技术结合应用于开发特殊造型休闲山楂干制品的可行性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜山楂：山东伟嵩商贸有限公司；蔗糖：云南滇鹏糖业有限公司；山楂粉（100目）：山东省临沂市平邑御茗庄食品有限公司；新鲜香蕉：无锡市永辉超市。

DPPH、ABTS、芸香叶苷、没食子酸、甲醇、三氯乙酸、磷酸氢二钠、碳酸钠、铁氰化钾、磷酸二氢钠、氯化铁、福林酚试剂、亚硝酸钠、硫酸亚铁、水杨酸、硝酸铝、无水乙醇、质量分数30%过氧化氢、氢氧化钠、无水葡萄糖、盐酸、硫酸铜、亚甲蓝、酒石酸钾钠、乙酸锌、冰乙酸、亚铁氰化钾：国药集团化学试剂有限公司；超纯水：上海迈瑞尔生化科技有限公司。

1.2　仪器与设备

挤出式双喷头3D打印机：FOODBOT-MF型，长兴时印科技有限公司；流变仪：DHR-3型，美国沃特世公司；低场核磁共振仪：MicroMR20-030V-I型，苏州纽迈电子科技有限公司；恒温水浴锅：HH-S8型，济南欧莱博生物科技公司；质构分析仪：TA-XT Plus型，英国Stable Micro Systems公司；打浆机：JYL-C022E型，九阳股份有限公司；电热恒温鼓风干燥箱：101-1-BS型，上海跃进医疗器械厂；紫外-可见分光光度计：UV-2600型，上海天美科学仪器有限公司；离心机：SIGMA2-16K型，德国Sigma公司。

1.3　方法

1.3.1　物料制备

1）喷头A物料制备：从冰箱中取出新鲜山楂，剔除腐烂果实，依次进行清洗、去梗、去核、护色（在20 g/L的NaCl溶液中浸泡5 min）处理；将处理后的去核山楂放入电饭锅内蒸煮15 min，取出后用打浆机破碎，再通过60目筛网挤出，山楂浆置于4 ℃冰箱备用。参照传统山楂干制品制作配方，将喷头A物料中山楂酱与蔗糖质量比设置为3组，其中A_1组为山楂酱与蔗糖质量比1∶0.30，A_2组为山楂酱与蔗糖质量比1∶0.35（蔗糖质量分数26%），对照组（CK组）为山楂酱与蔗糖质量比1∶0.45（传统山楂条配方）。

2）喷头B物料制备：香蕉去皮后切成5 mm厚的片状，放入打浆机破碎成香蕉酱；取一定量香蕉酱放入烧杯，加入蔗糖和山楂粉；将烧杯放入70 ℃水浴锅中不断搅动，待蔗糖充分溶解在香蕉酱中后取出烧杯，置于4 ℃冰箱备用。参照传统山楂干制品制作配方，将喷头B物料中香蕉酱、蔗糖、山楂粉质量比设置为3组，其中B_1组为香蕉酱、蔗糖、山楂粉质量比1∶0.55∶0.05，B_2组为香蕉酱、蔗糖、山楂粉质量比1∶0.60∶0.05，B_3组为香蕉酱、蔗糖、山楂粉质量比1∶0.65∶0.05（蔗糖质量分数38%）。

1.3.2　双物料双喷头3D打印试验方案

参照传统山楂干制品制作配方，通过低糖山楂酱（喷头A物料，不能形成凝胶、易打印）与高糖香蕉酱（喷头B物料，不能形成凝胶、易打印）的组合研究，筛选出与传统山楂干制品凝胶效果一致的组合方案，具体组合为CK组、A_1B_1组、A_1B_2组、A_1B_3组、A_2B_1组、A_2B_2组、A_2B_3组。其中A_1、A_2为喷头A的打印物料，B_1、B_2、B_3为喷头B的打印物料，CK组为对照样物料。通过指标分析，探究双物料双喷头组合对凝胶特性、3D打印特性及干燥特性的影响。

1.3.3　双物料双喷头3D打印模型与参数

3D打印模型为外径25 mm、内径15 mm、高20 mm的空心圆柱体结构，见图1。该模型均采用Rhinoceros 7软件设计并保存为STL格式。通过Repetier-Host软件导入模型进行切片，FOODBOT-MF挤出式双喷头3D打印机参数基于前期预试验优化确定。打印工艺基本参数为：喷头A、B的层高与喷嘴直径均为1.2 mm，打印速率30 mm/s，z轴方向偏移量2.7 mm，喷头B在x轴方向和y轴方向的偏移量分别为66.5、0.5 mm。喷头B（香蕉酱）的丝直径为28 mm，喷头A（山楂酱）的丝直径为24 mm。丝直径越大，挤出压力越小，由于香蕉酱质地较稀，因此丝直径设定值较大。所有打印试验均在室温条件下进行。

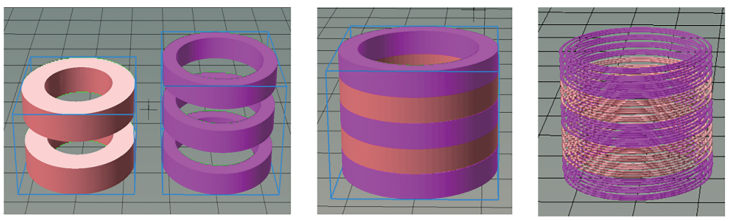


图1　双物料双喷头3D打印休闲山楂制品模型图

Fig. 1　Dual-material dual-nozzle 3D printing model of a hawthorn snack

1.3.4　双物料双喷头3D打印产品干燥方法与参数

传统山楂条制作工艺为：将山楂酱和蔗糖按质量比1∶0.45混合均匀，倒入厚度为1.3 cm的模具中，室温静置1 h至形成凝胶后，从模具中取出。

将其放入 50 ℃烘箱干燥 24 h，取出后切成长 3 cm 的条状，继续干燥 3 h，随后揉条，再干燥 45 h 至水分质量分数降至 18% 左右。

分别取 370 g 双物料双喷头 3D 打印产品和传统山楂条，均放入电热恒温鼓风干燥箱中进行干燥。基于预试验结果设定干燥温度为 50 ℃，风速为 1.0 m/s。3D 打印样品的初始水分质量分数依据国家标准的方法进行测定[11]，干燥过程中每 6 h 取出样品并称质量，停留时间不超出 1 min，避免影响试验结果。待样品水分质量分数降至 18% 左右时停止干燥，取出样品并用铝箔材料包装。

1.3.5 流变特性测定

采用流变仪对双物料双喷头组合凝胶体系的流变学特性进行测定，测定方法与参数参照杨帆等[12]的研究并稍加修改。选用直径 40 mm 的平行板，设定测量间隙 1 000 μm，测量温度 25 ℃。试验前，将凝胶样品置于装置平台上平衡 2 min，以确保达到稳定测试状态。首先，在 0.01%~100.00% 的应变幅度内，以 1 Hz 的恒定振荡频率进行振荡应变扫描，确定体系的线性黏弹性区域；随后，在 0.1% 的恒定应变（处于振幅试验确定的线性黏弹性区域内）条件下进行振荡频率扫描，在 0.01~100.00 Hz 的振荡频率范围内测定打印物料的 G' 和 G''；最后，在 0.1~100.0 s^{-1} 的剪切速率范围内进行流动扫描试验，分析表观黏度随剪切速率的变化规律。

1.3.6 水分状态与水分分布测定

使用低场核磁共振仪对双物料双喷头组合凝胶体系的水分状态与水分分布进行测定，测定方法和参数参照何畅[13]的研究并稍加修改。称取 4.00 g 样品，用保鲜膜包裹后置于核磁管中，将核磁管置于仪器内进行检测。采用 Carr-Purcell-Meiom-Gill（CPMG）脉冲序列模式，采样频率 100 kHz，回波时间 0.400 ms，等待时间 2 000 ms，扫描次数 12 次，回波次数 1 000 次。测试完成后，对检测结果进行反演处理，得到打印物料的横向弛豫时间（T_2）。

1.3.7 双物料双喷头 3D 打印产品精度测定

参照 Chen 等[14]的方法对双物料双喷头 3D 打印空心圆柱体的产品打印精度进行测量。使用游标卡尺测量打印产品的外径和高度，并与模型的外径和高度进行比较，打印尺寸偏差按式（1）计算。

$$D=\frac{L-L_0}{L_0}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

D——打印尺寸偏差，%；

L——打印产品的尺寸，mm；

L_0——设计模型的尺寸，mm。

1.3.8 双物料双喷头 3D 打印产品结构支撑测定

选取不同高度（1.5、2.0、2.5、3.0 cm）的双物料双喷头 3D 打印产品，观察其塌陷程度，并测定打印精度及干燥前后的凝胶强度。参照 Liu 等[15]的方法，采用质构仪测定凝胶强度，以第一峰的最大力作为凝胶强度。选用 P/0.5 探头，测前速度、测中速度、测后速度均为 1 mm/s，触发力 5 N，形变量 50%，2 次压缩间隔时间 5 s。

1.3.9 质构特性测定

采用质构仪测定双物料组合凝胶及其干燥产品的质构特性。选用 TA20 探头，测前速度、测中速度、测后速度均为 1 mm/s，触发力 5 N，形变量 50%，2 次压缩间隔时间 5 s。

1.3.10 双物料双喷头 3D 打印干制品主要营养成分测定

还原糖、总糖质量分数分别参照 GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》、GB/T 10782—2021《蜜饯质量通则》中的方法进行测定；总酚质量分数采用 Folin-Ciocalteau 法测定；黄酮质量分数参照 Paz 等[16]的方法测定；总花色苷质量分数采用 pH 示差分光光度法测定。

1.3.11 双物料双喷头 3D 打印干制品抗氧化能力测定

将双物料双喷头 3D 打印干制品粉碎后，准确称取 15 g 样品，按料液比 1 g∶10 mL 加入体积分数 60% 的乙醇溶液，提取 2 h 后过滤，所得滤液作为抗氧化能力测定的样品溶液。DPPH 自由基清除率测定参照 Amami 等[17]的方法，还原力测定参照 Dos 等[18]的方法，$ABTS^+$ 自由基清除率测定参照 Lao 等[19]的方法。

1.3.12 双物料双喷头 3D 打印干制品感官评价

感官评价小组由 12 位成员（5 男 7 女，年龄 22~28 岁）组成。参照 Ghazal 等[20]的方法，采用 9 点标度法对不同样品的色泽、风味、外观、口感及总体可接受度进行感官评价。得分 1 表示极度不喜欢，得分 9 表示极度喜欢。

1.4　数据分析和处理

使用SPSS 25.0和Origin 2024软件进行数据分析和绘图，所有试验均重复3次，用平均值±标准差表示，$P<0.05$表示差异显著。

2　结果与讨论

2.1　双物料组合凝胶特性

2.1.1　凝胶效果

3D打印前，将喷头A物料与喷头B物料等质量充分混合，常温放置12 h后观察凝胶效果，见图2。CK组常温放置后凝胶形成速率最快、凝胶效果最好，其次是A_1B_3组、A_2B_1组、A_2B_2组、A_2B_3组，而A_1B_1组与A_1B_2组凝胶形成速率最慢且凝胶效果最差。结果表明，喷头A物料与喷头B物料组合后能够形成凝胶，其中高蔗糖质量分数的山楂酱（A_2）与3种不同蔗糖质量分数的香蕉酱（B_1、B_2、B_3）均能形成凝胶，且A_2B_3组的凝胶效果最好，与CK组无明显差异。产生该现象的原因可能是蔗糖可通过促进甲基酯基团之间的疏水相互作用，稳定果胶聚合物之间的连接区，从而有利于凝胶的形成[21]。双物料组合的总糖质量分数如表1所示，其总糖来源于外源添加的蔗糖及山楂、香蕉中的内源糖。A_2B_3组的总糖质量分数与CK组最为接近，表明在降低总糖质量分数的同时，采用双物料组合的方式仍可促使山楂酱形成凝胶。

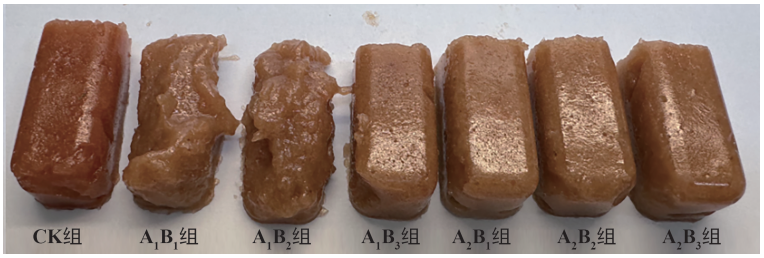


图2　双物料组合的凝胶效果图

Fig. 2　Images of dual-material combination gels

表1　双物料组合的总糖质量分数

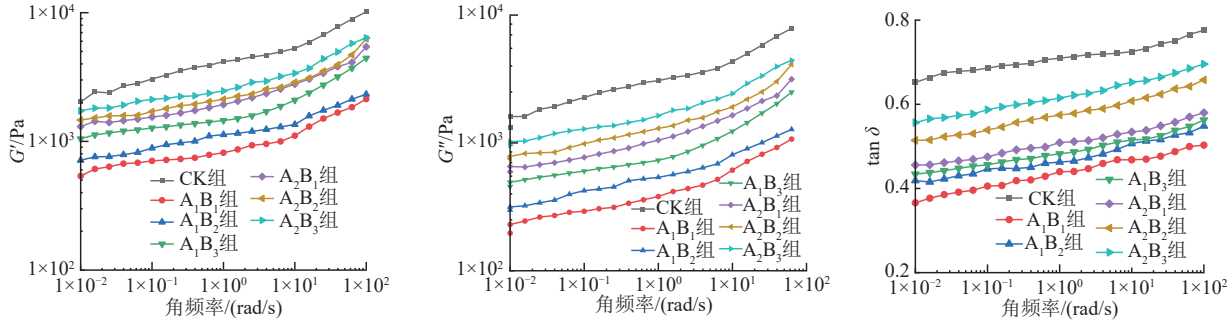
Table 1　Total sugar mass fractions of dual-material combinations

组别	总糖质量分数/%
CK组	48.89±0.86^{a}
A_1B_1组	39.55±0.39^{f}
A_1B_2组	40.46±0.22^{e}
A_1B_3组	41.42±0.40^{cd}
A_2B_1组	40.88±0.22^{d}
A_2B_2组	41.81±0.56^{c}
A_2B_3组	43.21±0.38^{b}

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

2.1.2　动态黏弹性

食品材料的流变学特性与其加工特性、打印特性密切相关，是衡量食材可打印性的重要指标之一[22-23]。在挤出型食品3D打印过程中，食材会受到压力与剪切力的共同作用，而流变学指标可用于评价双物料组合凝胶的流动挤出性能及成型支撑能力[24]。食材流变学特性主要通过G'、G''和损耗因子（tan δ）表征，其中G'反映食材的弹性，与食材的机械强度和食材打印后的支撑性能相关；G''代表食材变形时的能量耗散程度，与食材的黏度密切相关；tan δ为G'与G''的比值。如图3所示，所有双物料组合的G'和G''均呈现角频率依赖性，即随着角频率的增大而升高；其中CK组的G'和G''最大，其次为A_2B_3组、A_2B_2组、A_2B_1组、A_1B_3组，A_1B_2组与A_1B_1组的G'和G''最小。G'和G''较高，表明对应体系具有更强的机械强度和自支撑能力，能够在打印后较长时间内保持样品的形状与结构稳定性。这一现象表明，蔗糖的添加可改善低蔗糖质量分数山楂体系的凝胶强度，使混合后的凝胶效果显著增强。随着角频率的增加，G'和G''持续上升，整个过程中山楂混合凝胶体系表现出类固体流变行为。所有双物料组合的山楂混合凝胶的G'均大于G''，tan δ均小于1，表明凝胶处于弹性固体主导状态[22]。在整个角频率范围内，A_1B_3组、A_2B_1组、A_2B_2组、A_2B_3组的tan δ均小于CK组，进一步说明降低蔗糖质量分数会提升双物料组合的凝胶效果和支撑性能。高蔗糖质量分数的山楂酱（CK组）虽具有较高的G'和G''，但由于其果胶含



(a) 双物料组合凝胶的G'　(b) 双物料组合凝胶的G''　(c) 双物料组合凝胶的tan δ

图 3　双物料组合凝胶的动态黏弹性

Fig. 3　Viscoelasticity dynamics of dual-material combination gels

量高、凝胶速度快，物料进入打印管后易迅速凝固为固态，丧失流动性，进而造成喷头堵塞；而双物料组合可有效改善高蔗糖质量分数山楂酱因快速凝胶而不利于打印的问题[14]。

2.1.3　表观黏度

表观黏度是评价双物料组合凝胶剪切变稀或剪切变稠流变特性的关键指标，与食材的挤出特性有关。当物料克服最小流动应力开始流动后，推动其持续流动的压力主要取决于物料的表观黏度和剪切稀化特性[25]。如图4所示，所有双物料组合的表观黏度均随剪切速率的增加而逐渐减小，表现出典型的剪切稀化凝胶特性[22,26]。这可能是由于剪切作用破坏了果胶与蔗糖形成的内部凝胶网络结构，导致分子间相互作用减弱，进而使物料的流动阻力减小、表观黏度降低[13]。山楂酱与香蕉酱组合凝胶的表观黏度随总糖质量分数的增加而升高，该变化趋势与G'、G''的变化一致。双物料组合的表观黏度排序为：CK组>A_2B_3组>A_2B_2组>A_2B_1组>A_1B_3组>A_1B_2组>A_1B_1组。表观黏度越高，3D打印时物料在打印管中的挤出难度越大，A_2B_3组的表观黏度相较于CK组有所降低，更利于3D打印的顺利进行。

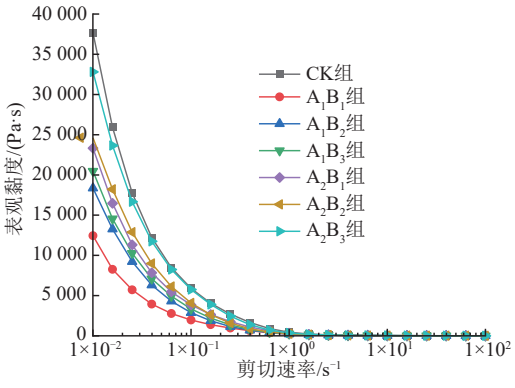


图 4　双物料组合凝胶的表观黏度

Fig. 4　Apparent viscosity of dual-material combination gels

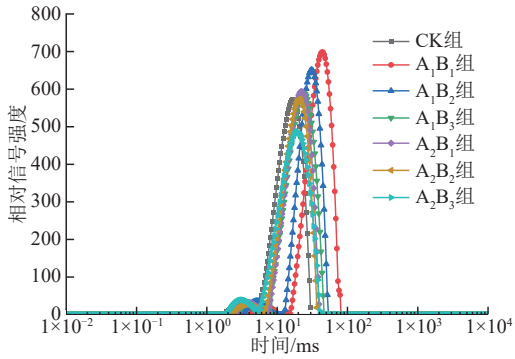


图 5　双物料组合凝胶的低场核磁共振图

Fig. 5　LF-NMR spectra of dual-material combination gels

2.1.4　水分状态与水分分布

低场核磁共振可有效表征双物料组合凝胶的水分状态与水分分布，见图5。通常T_{21}峰中心位于1~10 ms，对应与凝胶体系大分子紧密结合的结合水，其自由度低、难以去除；T_{22}峰中心位于10~100 ms，对应凝胶基质中的半结合水，具有一定的流动性；T_{23}峰中心位于100~1 000 ms，对应可自由移动的自由水，这类水分易迁移和蒸发[26-27]。由图5可以看出，与CK组相比，双物料组合后T_{21}、T_{22}峰均向右偏移，而易蒸发的T_{23}峰未显示。这一结果表明，山楂酱与香蕉酱组合后，水分结合能力减弱、凝胶性能下降，但有利于干燥过程中水分的迁移与去除。另外，不同双物料组合的水分迁移也存在差异，A_2B_3组的T_{21}、T_{22}峰与CK组接近，说明A_2B_3组的水分结合状态相对牢固，但仍低于CK组。这可能与组合物料中的蔗糖质量分数有关，蔗糖质量分数降低会进一步阻碍山楂酱果胶链上羟基的结合，导致水分含量升高；而果胶溶剂化程度增加，会使果胶与

蔗糖的结合作用力下降。这一结果与流变结果一致，水分状态分布也能较好地反映不同物料组合的特性。

峰面积常用于反映样品中不同状态水的占比（A），进而体现水分的分布情况和转变规律[27-28]。结合图5和表2可知，双物料组合与CK组均仅显示T_{21}、T_{22}峰，未出现T_{23}峰，说明双物料组合与CK组形成凝胶后，水分状态发生转变，自由水转变为半结合水。这一变化有利于双物料双喷头3D打印后的结构支撑，但不利于干燥脱水。与CK组相比，所有双物料组合凝胶中半结合水占比更高、结合水占比更低，有利于干燥脱水；其中A_2B_3组的半结合水与结合水占比最接近CK组，表明该组合既可以提升双物料双喷头3D打印后的结构支撑性，又可以缩短干燥时间。

表2　双物料组合凝胶的低场核磁共振分析

Table 2　LF-NMR analysis of dual-material combination gels

组别	T_{21}/ms	T_{22}/ms	A_{21}/%	A_{22}/%
CK组	1.97±0.17^{e}	4.98±0.42^{g}	7.23±0.31^{a}	92.77±0.31^{d}
A_1B_1组	5.05±0.16^{a}	14.35±0.44^{a}	0.86±0.10^{e}	99.02±0.91^{a}
A_1B_2组	3.39±0.34^{b}	12.83±0.14^{b}	1.62±0.35^{e}	98.44±0.28^{a}
A_1B_3组	2.77±0.38^{c}	8.38±0.22^{c}	2.57±0.22^{d}	97.29±0.35^{b}
A_2B_1组	2.71±0.16^{c}	7.33±0.13^{d}	3.40±0.15^{c}	96.50±0.32^{b}
A_2B_2组	2.48±0.24^{cd}	6.62±0.18^{e}	4.51±0.31^{b}	95.42±0.40^{c}
A_2B_3组	2.14±0.21^{de}	5.68±0.25^{f}	6.47±0.42^{a}	93.29±0.45^{d}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.2　双物料双喷头3D打印特性

2.2.1　可打印性

单物料（A_1、A_2、B_1、B_2和B_3）的单喷头3D打印效果见图6（a）。所有单物料在打印过程中及打印后均出现塌陷现象，不具备可打印性。这是因为单物料蔗糖含量低，导致凝胶强度不足、支撑性较差，喷头A的山楂酱需添加蔗糖才能达到良好的凝胶效果。但是所有单物料在单喷头打印过程中均未出现打印喷头堵塞的问题。

双物料双喷头3D打印效果见图6（b）。A_1B_3组、A_2B_1组、A_2B_2组、A_2B_3组的凝胶打印模型表面细腻、结构分明，这可能是由于高糖组合的凝胶强度较高，使双物料之间的黏附作用更强。A_1B_1组因糖质量分数相对较低，凝胶强度较弱，打印后模型抵抗重力的能力不足，易发生变形和塌陷，产品形状偏向矮胖，这一结果与流变数据中较低的G'相吻合。A_2B_3组打印的空心圆柱体表面相对光滑，形状无明显改变，说明该组合体系中蔗糖质量分数适宜，与流变数据中的G'结果一致。从空心圆柱体俯视图可以看出，物料A_2的挤出过程较为顺滑，因此后续对含A_2的组合进行双物料双喷头打印。其中A_2B_2组、A_2B_3组的打印产品主观可接受度较高，有效减弱了物料过黏或过稀带来的负面影响。

A_2B_3组双喷头3D打印产品的凝胶强度及其干燥后的凝胶强度见图6（d）。结合图6（c）~（d）可以看出，不同打印高度的产品，双物料接触紧密且无分层现象；干燥处理使产品内部结构更紧密，凝胶强度显著提升，不同打印高度产品干燥前后的凝胶强度均存在显著差异。另外，随着打印产品高度的增加，其支撑性能逐渐变差，这可能是由于底部双物料组合的作用时间较短，凝胶强度不足以支撑上部双物料的重力。研究表明，双物料双喷头3D打印产品在打印高度2.0 cm以下时，凝胶效果较好，支撑力大于上部双物料重力，有助于提高打印精度。

2.2.2　打印精度

打印精度是衡量食品凝胶体系3D打印性能的一个重要指标[14]，双物料双喷头3D打印产品的尺寸偏差见图7。A_2B_3组的打印精度最高，打印尺寸偏差最小，其外径和高度方向上的打印尺寸偏差分别为1.04%和1.08%；A_1B_1组的打印尺寸偏差最大（均为正值），外径和高度方向上的打印尺寸偏差分别为6.22%和7.33%；而A_2B_1组和A_2B_2组的打印尺寸偏差为负值，表明打印后的样品尺寸小于导入的模型尺寸。这可能是由于与A_2B_3组相比，A_2B_1组和A_2B_2组的香蕉固形物含量更高，增大了组合凝胶的挤出难度。A_2B_3组具有较高的G'和G''，能够保证打印后的形状保真度，因此其打印精度最接近模型尺寸[29]。该研究结果与Liu等[30]的结论一致，说明A_2B_3组具备优越的3D打印性能。

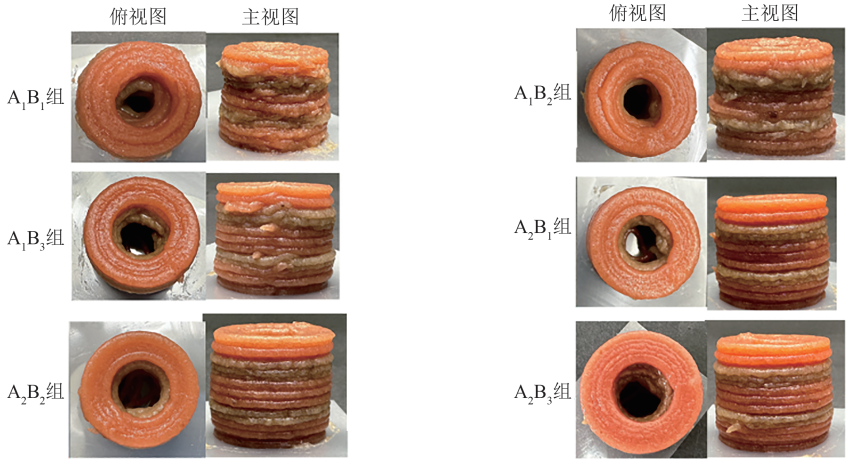
2.3　双物料双喷头3D打印产品干燥特性

2.3.1　干燥时间

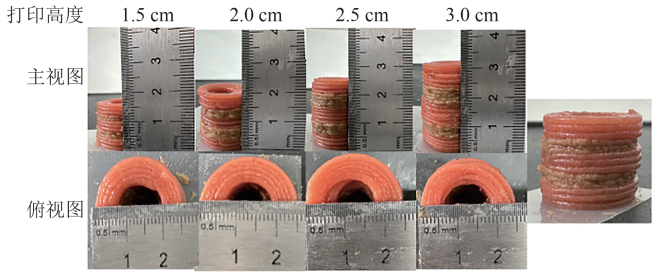
双物料双喷头3D打印山楂干制品的干燥曲线见图8。采用双物料双喷头3D打印加工的休闲山楂制品，其干燥时间无明显差异，6种双物料双喷头3D打印产品的干燥时间均为60 h，相较于CK组（72 h）缩短了16.67%。双物料双喷头3D打



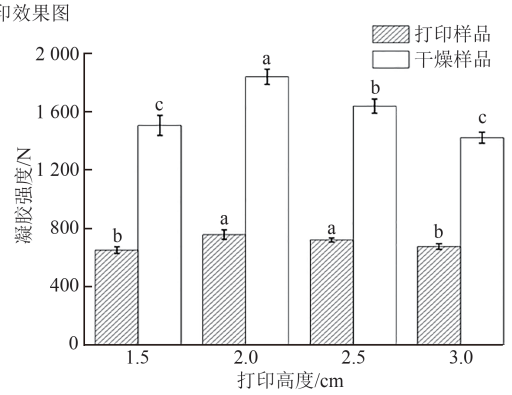
(a) 单物料单喷头3D打印效果图



(b) 双物料双喷头3D打印效果图



(c) A_2B_3组效果图

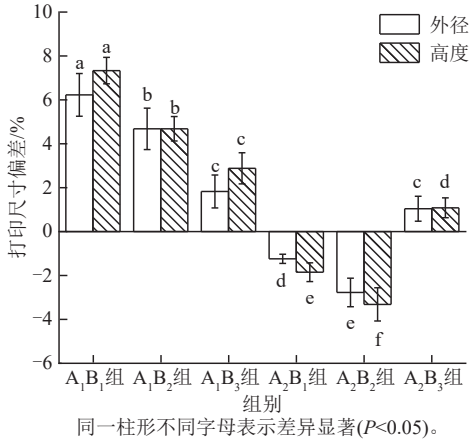


同一柱形不同字母表示差异显著(P<0.05)。

(d) A_2B_3组双喷头3D打印产品凝胶强度与打印高度关系

图 6　3D 打印相变凝胶过程

Fig. 6　Phase change processes of gels in 3D printing



同一柱形不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 7　双物料双喷头 3D 打印山楂凝胶的精度

Fig. 7　Accuracy of dual-material dual-nozzle 3D printing of hawthorn gels

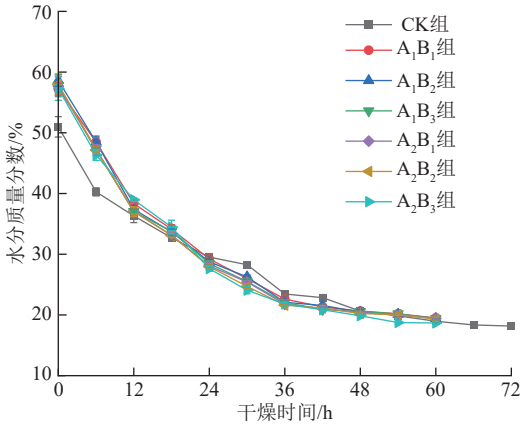


图 8　双物料双喷头 3D 打印山楂干制品的干燥曲线

Fig. 8　Drying curves of dried hawthorn products in dual-material dual-nozzle 3D printing

印山楂干制品干燥前后的水分质量分数见表3。双物料双喷头3D打印山楂制品干燥前的水分质量分数差异较小，且均显著高于CK组。产生这一现象的原因可能为：相较于CK组，山楂酱与香蕉酱双物料组合的半结合水占比更低，有利于干燥过程中水分的迁移与去除；同时，双物料组合的凝胶强度更低，内部结构相较于CK组更为疏松，水分迁移阻力更小，有利于水分蒸发。该研究结果与Feng等[31]的报道一致，即疏松的内部结构可有效缩短物料的干燥时间。

表3　双物料双喷头3D打印山楂制品干燥前后的水分质量分数

Table 3　Water mass fractions of hawthorn products before and after drying in dual-material dual-nozzle 3D printing

组别	干燥前水分质量分数/%	干燥后水分质量分数/%
CK组	50.03±0.80^{c}	18.07±0.16^{c}
A_1B_1组	58.13±0.44^{a}	19.34±0.59^{a}
A_1B_2组	57.84±0.60^{a}	19.55±0.43^{a}
A_1B_3组	57.81±0.41^{a}	18.90±0.46^{ab}
A_2B_1组	57.21±0.70^{ab}	19.06±0.37^{ab}
A_2B_2组	56.59±0.48^{b}	18.93±0.17^{ab}
A_2B_3组	56.72±0.46^{ab}	18.47±0.43^{bc}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.3.2　干制品质构特性

质构特性是评价产品品质的重要指标，双物料双喷头3D打印山楂干制品的质构结果见表4。采用双物料双喷头3D打印加工的休闲山楂干制品，其硬度、脆度等质构指标随总糖质量分数的增加而降低；A_2B_2组、A_2B_3组的质构指标均低于CK组，其中A_2B_3组的硬度较CK组降低了20.65%，其他组的硬度均高于CK组。这是由于A_2B_3组的G'和G''低于CK组，导致其机械强度下降；高糖物料经干燥后蔗糖会发生重结晶，赋予产品松软感；而低糖物料干燥后，固形物含量增加，蔗糖重结晶程度较弱，进而导致硬度增加。该研究结果与栗丽[32]的报道一致。综上，A_2B_3组更适合作为休闲山楂干制品的配方。

表4　双物料双喷头3D打印山楂干制品的质构

Table 4　Texture properties of dried hawthorn products from dual-material dual-nozzle 3D printing

组别	硬度/g	脆度/g	弹性	咀嚼性/g	胶着性/g	内聚性
CK组	3 574±93^{d}	1 457±66^{d}	0.65±0.04^{d}	1 088±40^{d}	1 857±59^{d}	0.52±0.03^{d}
A_1B_1组	5 175±167^{a}	2 841±133^{a}	0.76±0.05^{a}	2 933±159^{a}	3 878±88^{a}	0.75±0.04^{a}
A_1B_2组	4 805±206^{b}	2 670±66^{b}	0.66±0.03^{b}	2 197±142^{b}	3 311±125^{b}	0.69±0.04^{b}
A_1B_3组	3 961±141^{c}	1 835±108^{c}	0.54±0.03^{de}	1 380±159^{c}	2 551±207^{c}	0.64±0.03^{bc}
A_2B_1组	4 197±154^{c}	1 679±96^{c}	0.60±0.05^{bcd}	1 544±13^{c}	2 559±86^{c}	0.61±0.02^{c}
A_2B_2组	3 356±176^{d}	1 350±106^{d}	0.59±0.03^{cd}	1 035±156^{d}	1 759±197^{d}	0.52±0.04^{d}
A_2B_3组	2 836±60^{e}	1 154±70^{e}	0.50±0.04^{e}	789±77^{e}	1 200±66^{e}	0.42±0.03^{e}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.3.3　主要营养成分

A_2B_3组3D打印山楂制品与CK组干燥前后的营养成分见表5。A_2B_3山楂干制品的总糖质量分数为（71.62±0.73）%，较CK山楂干制品降低了2.48%；其黄酮、总酚、花色苷质量分数分别为（20.73±0.28）、（24.47±0.40）mg/g和（12.31±0.13）μg/g，较CK干制品分别提高了23.32%、25.94%、22.00%，且均存在显著差异（P<0.05）。这是由于A_2B_3组的总糖来源于喷头A与喷头B配方中添加的蔗糖及山楂酱与香蕉酱自身含有的糖。另外，A_2B_3山楂鲜制品的总糖质量分数低于CK山楂鲜制品，因此干燥后其总糖质量分数相应低于对照样。干燥后总糖质量分数均增加，这是因为干燥过程中失去的主要是水分，水分散失后导致总糖质量分数增加[32]。无论是干燥前还是干燥后，A_2B_3组的黄酮、总酚、花色苷质量分数均高于CK组，但干燥后样品中黄酮、总酚和花色苷质量分数均降低。这可能是由于A_2B_3配方中含有香蕉，而香蕉富含多酚、类黄酮等物质[33-34]；另外，干燥过程会引发酚类等营养物质分解[35]，而A_2B_3组的干燥时间更短，可在一定程度上降低酚类物质的氧化降解。综上，A_2B_3组不仅能达到传统山楂制品的质构水平，还能降低山楂干制品的总糖质量分数，提高其他营养成分质量分数，实现产品品质的整体提升。

表 5　不同山楂制品干燥前后的营养成分变化

Table 5　Differences in nutrient composition of different hawthorn products before and after drying

组别	总糖质量分数/%	还原糖质量分数/%	黄酮质量分数/（mg/g）	总酚质量分数/（mg/g）	花色苷质量分数/（μg/g）
CK 山楂鲜制品组	48.89±0.86^{c}	12.46±0.47^{d}	22.42±0.44^{b}	27.96±0.67^{b}	15.70±0.42^{b}
CK 山楂干制品组	74.10±0.97^{a}	20.09±0.19^{b}	16.81±0.64^{d}	19.43±0.31^{d}	10.09±0.23^{d}
A_2B_3 山楂鲜制品组	43.21±0.38^{d}	13.91±0.38^{c}	25.31±0.19^{a}	30.24±0.49^{a}	17.44±0.32^{a}
A_2B_3 山楂干制品组	71.62±0.73^{b}	21.32±0.46^{a}	20.73±0.28^{c}	24.47±0.40^{c}	12.31±0.13^{c}

注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.3.4　干制品抗氧化能力

A_2B_3 山楂干制品与 CK 山楂干制品抗氧化能力见表 6。可以看出，A_2B_3 山楂干制品的 DPPH 自由基清除率、$ABTS^+$ 自由基清除率、还原力分别为（48.29±0.82）%、（81.38±0.56）%、0.51±0.01，与 CK 山楂干制品相比分别提高 21.76%、21.07%、24.39%，且存在显著差异（P<0.05）。这可能是由于 A_2B_3 山楂干制品的主要营养成分有所增加，而营养物质的增加会提升产品的抗氧化能力，这与 Liu 等[36]的研究结果一致。

表 6　不同山楂干制品抗氧化能力变化

Table 6　Differences in antioxidant capacity of different dried hawthorn products

组别	DPPH 自由基清除率/%	$ABTS^+$ 自由基清除率/%	还原力
CK 山楂干制品组	39.66±0.13^{b}	67.22±0.59^{b}	0.41±0.02^{b}
A_2B_3 山楂干制品组	48.29±0.82^{a}	81.38±0.56^{a}	0.51±0.01^{a}

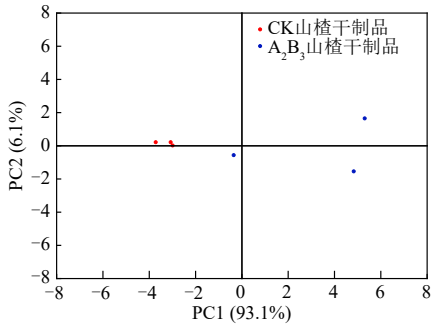
注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）。

2.3.5　干制品气味

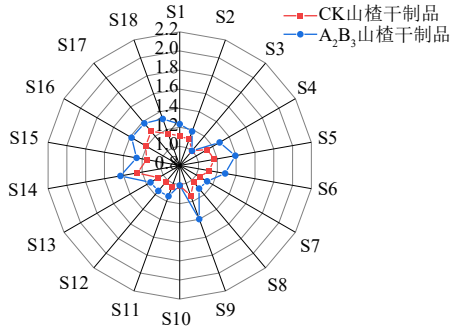
A_2B_3 山楂干制品与 CK 山楂干制品的电子鼻结果见图 9。2 个样品的主成分 1（PC1）贡献率为 93.1%，主成分 2（PC2）贡献率为 6.1%，累积贡献率达 99.2%，表明主成分分析（PCA）可以很好地反映 2 个样品的差异。不同样品在 PCA 图中未出现重合，各自形成独立空间，表明两者都有自己独特的挥发性成分。A_2B_3 山楂干制品各传感器响应值均高于 CK 山楂干制品。表明香蕉自身的香甜风味中和了山楂的酸味，也证明了采用双物料双喷头打印山楂酱与香蕉酱开发休闲食品的必要性与优势。

2.3.6　干制品感官评价结果

双物料双喷头 3D 打印山楂干制品的外观图和感官评价结果见图 10。A_1B_1 组和 A_1B_2 组在相变凝胶过程中凝胶效果较差，出现塌陷现象，而其他组干燥后仍能维持打印后的结构形态。感官评价结果表明，CK 组感官评分最高，A_2B_3 组感官评分与 CK 组最为接近，其他组感官评分较低。这主要是由于 A_2B_3 组经双喷头 3D 打印后表面光滑，而其他组由于 G' 和 G'' 较低，导致



(a) 不同山楂干制品的电子鼻数据的PCA图

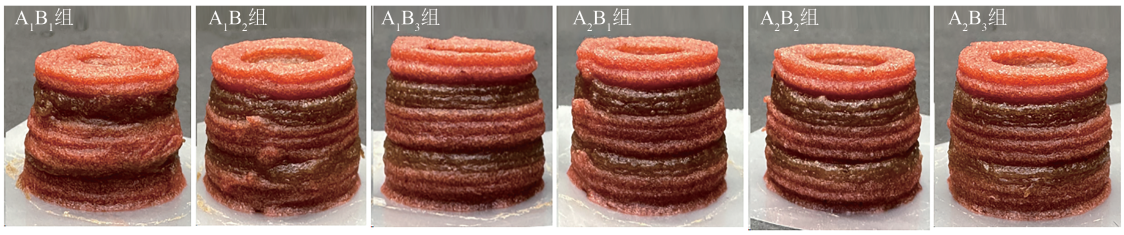


S1—烷烃、烟雾类；S2—醇类、醛类、短链烷烃类；S3—臭氧；S4、S16—硫化物；S5—有机胺；S6—有机气体、苯酮类、醇醛类、芳香化合物；S7、S8、S12—短链烷烃类；S9—醇醛类、芳香化合物；S10—含氢气体；S11—烷烃类、烯烃类；S13、S14—可燃气体类；S15—烷烃类、有机气体；S17—氮化物；S18—酮类、醇类。

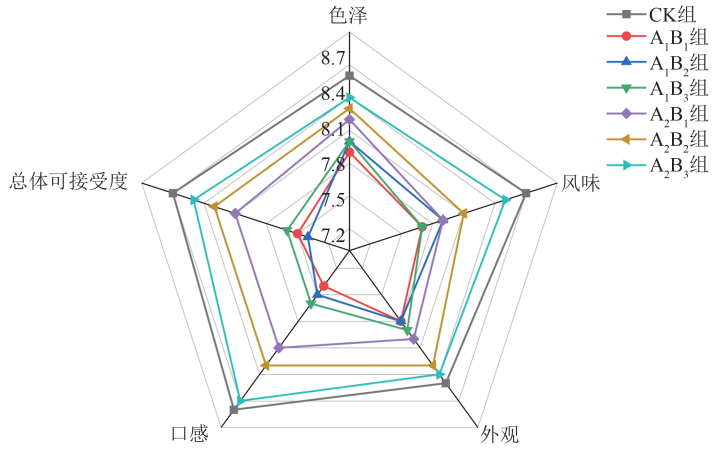
(b) 不同山楂干制品的特征值

图 9　不同山楂干制品的电子鼻数据

Fig. 9　Electronic nose data of different dried hawthorn products



(a) 外观图



(b) 感官评价雷达图

图 10　双物料双喷头3D打印产品干燥后的外观图和感官评价雷达图

Fig. 10　Sample pictures and sensory evaluation of the products from dual-material dual-nozzle 3D printing after drying

形状保真度不佳，该结果与流变及打印尺寸偏差结果一致。山楂酱与香蕉酱组合后出现的颜色变化与酶促褐变和非酶促褐变反应相关，同时热处理也会引发色素的损失与变化[37]，而鲜艳的颜色更易被儿童接受。双物料双喷头3D打印产品经干燥后未出现分层，黏结状态较为紧密。综上，A_2B_3组的打印精度及干燥特性均更接近甚至优于CK组，因此可作为休闲食品开发的优先选择。

3　结论

基于果胶与蔗糖组合的凝胶机理，作者以不同蔗糖质量分数的山楂酱、香蕉酱（蔗糖载体）为原料制备双物料组合凝胶，采用双喷头3D打印技术，系统研究了双物料组合凝胶特性、双物料双喷头3D打印特性及其干燥特性。结果表明，山楂酱与香蕉酱双物料组合在总糖质量分数低于单一山楂酱的条件下仍可形成凝胶，其中蔗糖质量分数26%的山楂酱与蔗糖质量分数38%的香蕉酱组合，其凝胶效果与单一山楂酱无显著差异；双物料双喷头3D打印产品的结构支撑性增强、打印精度提升，且未出现喷头堵塞现象；与传统单一山楂酱相比，双物料双喷头3D打印产品的干燥时间缩短了12 h，硬度降低、质地松软、总糖质量分数下降，主要营养成分质量分数、抗氧化能力及风味均有所提升。综上所述，该研究基于双物料组合凝胶的双喷头3D打印技术可替代单一山楂酱单喷头打印技术，有效解决了喷头堵塞问题，为高效开发优质、特殊造型的休闲山楂制品提供了新思路。

参考文献

[1] LOU X M，XU H D，HANNA M，et al. Identification and quantification of free，esterified，glycosylated and insoluble-bound phenolic compounds in hawthorn berry fruit（*Crataegus pinnatifida*）and antioxidant activity evaluation[J]. LWT-Food Science and Technology，2020，130：109643.

[2] LI L，GAO X L，LIU J G，et al. Hawthorn pectin：extraction，function and utilization[J]. Current Research in Food Science，2021，4：429-435.

[3] 廖小军，赵婧，饶雷，等. 未来食品：热点领域分析与展望[J]. 食品科学技术学报，2022，40(2)：1-14，44.
LIAO X J，ZHAO J，RAO L，et al. Prospective analysis of hot topics in future foods[J]. Journal of Food Science and Technology，2022，40(2)：1-14，44.(in Chinese)

[4] SEVERINI C，DEROSSI A，AZZOLLINI D. Variables affecting the printability of foods：preliminary tests on cereal-based products[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2016，38：281-291.

[5] DEROSSI A，PAOLILLO M，CAPORIZZI R，et al. Extending the 3D food printing tests at high speed. Material deposition and effect of non-printing movements on the final quality of printed structures[J]. Journal of Food Engineering，2020，275：109865.

[6] SINGHVI G，PATIL S，GIRDHAR V，et al. 3D-printing：an emerging and a revolutionary technology in pharmaceuticals[J]. Panminerva Medica，2018，60(4)：170-173.

[7] DEROSSI A，CAPORIZZI R，AZZOLLINI D，et al. Application of 3D printing for customized food. A case on the development of a fruit-based snack for children[J]. Journal of Food Engineering，2018，220：65-75.

[8] QIU L Q，ZHANG M，BHANDARI B，et al. Investigation of 3D printing of apple and edible rose blends as a dysphagia food[J]. Food Hydrocolloids，2023，135：108184.

[9] LEAW Z E，KONG I，PUI L P. 3D printed corn starch-gelatin film with glycerol and hawthorn berry (*Crataegus pinnatifida*) extract[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2021，45(9)：e15752.

[10] BAO Y F，LIU W C，LI L L，et al. Improvement of 3D printing and subsequent microwave freeze-drying solidification accuracy of pineapple gel-based inks：infill percentage control and internal models design[J]. Journal of Food Engineering，2025，386：112286.

[11] YIN C，SIM C，JAMES Y，et al. Pectin as a rheology modifier：origin，structure，commercial production and rheology[J]. Carbohydrate Polymers，2017，161：118-139.

[12] 杨帆，张慜，王维琴. 麻薯配方与3D打印特性研究[J]. 食品与生物技术学报，2020，39(4)：71-75.
YANG F，ZHANG M，WANG W Q. 3D printing physical properties of mochi as affected by different compositions[J]. Journal of Food Science and Biotechnology，2020，39(4)：71-75.(in Chinese)

[13] 何畅. 基于自发变形和变色的薯泥体系4D打印研究[D]. 无锡：江南大学，2021.

[14] CHEN H Z，ZHANG M，RAO Z M. Effect of ultrasound-assisted thawing on gelling and 3D printing properties of silver carp surimi[J]. Food Research International，2021，145：110405.

[15] LIU Z B，ZHANG M，BHANDARI B. Effect of gums on the rheological，microstructural and extrusion printing characteristics of mashed potatoes[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2018，117：1179-1187.

[16] PAZ M，GÚLLON P，BARROSO M F，et al. Brazilian fruit pulps as functional foods and additives：evaluation of bioactive compounds[J]. Food Chemistry，2015，172：462-468.

[17] AMAMI E，KHEZAMI W，MEZRIGUI S，et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the convective drying of strawberry[J]. Ultrasonics Sonochemistry，2017，36：286-300.

[18] DOS SANTOS C，GALAVERNA R S，ANGOLINI C F F，et al. Antioxidative，antiproliferative and antimicrobial activities of phenolic compounds from three *Myrcia* species[J]. Molecules，2018，23(5)：986.

[19] LAO Y Y，ZHANG M，DEVAHASTIN S，et al. Effect of combined infrared freeze drying and microwave vacuum drying on quality of kale yoghurt melts[J]. Drying Technology，2020，38(5/6)：621-633.

[20] GHAZAL A F，ZHANG M，GUO Z M. Microwave-induced rapid 4D change in color of 3D printed apple/potato starch gel with red cabbage juice-loaded WPI/GA mixture[J]. Food Research International，2023，172：113138.

[21] OAKENFULL D，SCOTT A. Hydrophobic interaction in the gelation of high methoxyl pectins[J]. Journal of Food Science，1984，49(4)：1093-1098.

[22] YANG F L，GUO C F，ZHANG M，et al. Improving 3D printing process of lemon juice gel based on fluid flow numerical simulation[J]. LWT-Food Science and Technology，2019，102：89-99.

[23] ZHU S C，STIEGER M A，VAN DER GOOT A J，et al. Extrusion-based 3D printing of food pastes：correlating rheological properties with printing behaviour[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies，2019，

58：102214.

[24] 郭超凡. 重组果蔬及其混合凝胶体系的微波高效3D/4D打印研究[D]. 无锡：江南大学，2021.

[25] LIU Z B，BHANDARI B，PRAKASH S，et al. Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing[J]. Food Hydrocolloids，2019，87：413-424

[26] YANG F L，ZHANG M，BHANDARI B，et al. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters [J]. LWT-Food Science and Technology，2018，87：67-76.

[27] 陈杰灵. 基于营养组分自发转变的紫薯泥体系增材制造研究[D]. 无锡：江南大学，2022.

[28] ZHANG Q Q，LI W，LI H K，et al. Low-field nuclear magnetic resonance for online determination of water content during sausage fermentation[J]. Journal of Food Engineering，2017，212：291-297.

[29] GUO C F，ZHANG M，DEVAHASTIN S. Improvement of 3D printability of buckwheat starch-pectin system *via* synergistic Ca^{2+}-microwave pretreatment [J]. Food Hydrocolloids，2021，113：106483.

[30] LIU Z B，ZHANG M，YE Y F. Indirect prediction of 3D printability of mashed potatoes based on LF-NMR measurements[J]. Journal of Food Engineering，2020，287：110137.

[31] FENG C Y，ZHANG M，BHANDARI B，et al. Use of potato processing by-product：effects on the 3D printing characteristics of the yam and the texture of air-fried yam snacks[J]. LWT-Food Science and Technology，2020，125：109265.

[32] 栗丽. 山楂果胶的提取及减糖山楂条的制备与干燥[D]. 无锡：江南大学，2022.

[33] LIU H，JIAO Z G，LIU J C，et al. Optimization of supercritical fluid extraction of phenolics from date seeds and characterization of its antioxidant activity[J]. Food Analytical Methods，2013，6(3)：781-788.

[34] FERNANDO H R P，SRILAONG V，PONGPRASERT N，et al. Changes in antioxidant properties and chemical composition during ripening in banana variety ‘Hom Thong’（AAA group）and ‘Khai’（AA group）[J]. International Food Research Journal，2014，21：749-754.

[35] QIN J Y，WANG Z H，WANG X C，et al. Effects of microwave time on quality of grass carp fillets processed through microwave combined with hot-air drying[J]. Food Science & Nutrition，2020，8(8)：4159-4171.

[36] LIU H，LIU J C，LV Z Z，et al. Effect of dehydration techniques on bioactive compounds in hawthorn slices and their correlations with antioxidant properties[J]. Journal of Food Science and Technology，2019，56(5)：2446-2457.

[37] TEKIN Z H，BAŞLAR M，KARASU S，et al. Dehydration of green beans using ultrasound-assisted vacuum drying as a novel technique：drying kinetics and quality parameters[J]. Journal of Food Processing and Preservation，2017，41(6)：e13227.

（责任编辑：刘冬梅）