DOI:10.12441/spyswjs.20260519002 [文章编号] 1673-1689(2026)07-0103-10

藻蓝蛋白-牡丹籽油Pickering乳液对马铃薯淀粉凝胶3D打印性能的影响

侯 艳[1] 刘张欢[2] 李 鑫[2]

(1. 洛阳文化旅游职业学院教育学院,河南 洛阳 471000; 2. 河南科技大学食品与生物工程学院,河南 洛阳 471023)

摘要:【目的】提高马铃薯淀粉凝胶对特殊造型食品的3D打印适配性。**【方法】**以质量分数15%的马铃薯淀粉凝胶为连续相,添加不同质量分数(2%、4%、6%、8%、10%)的藻蓝蛋白-牡丹籽油Pickering乳液,探究该Pickering乳液对体系打印成形性能、流变行为、水分状态及打印后产品品质的影响。**【结果】**Pickering乳液质量分数显著影响体系的打印性能和品质特征,适量添加Pickering乳液可促使部分自由水向结合水转化。Pickering乳液质量分数为4%(PE-4)的产品色泽均匀协调、结构完整,在剪切变稀特性、触变恢复能力及黏弹平衡性能方面表现较优,综合品质最佳。**【结论】**藻蓝蛋白-牡丹籽油Pickering乳液可有效改善马铃薯淀粉凝胶的3D打印性能,为特殊造型的可食化表达与创意食品开发提供了参考。

关键词:藻蓝蛋白;牡丹籽油;Pickering乳液;马铃薯淀粉凝胶;3D打印

Effect of Phycocyanin-Peony Seed Oil Pickering Emulsion on the 3D Printing Performance of Potato Starch Gel

HOU Yan[1] *LIU Zhanghuan*[2] *LI Xin*[2]

(1. School of Education, Luoyang Vocational College of Culture and Tourism, Luoyang 471000, China; 2. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: [**Objective**] This study aimed to improve the 3D printing adaptability of potato starch gels for special-shaped food products. [**Method**] A potato starch gel with a mass fraction of 15% was used as the continuous phase, and phycocyanin-peony seed oil Pickering emulsions were incorporated at different mass fractions (2%, 4%, 6%, 8%, and 10%) to investigate their effects on the shape-forming performance, rheological behavior, and water state of the system and the post-printing product quality. [**Result**] The mass fraction of Pickering emulsion significantly affected the printing performance and quality characteristics of the system. Appropriate Pickering emulsion addition promoted the conversion of part of free water into bound water. The product of the PE-4 (Pickering emulsion added at the mass fraction of 4%) group exhibited a coordinated color and an intact shape and showed superior shear-thinning behavior, thixotropic recovery, and viscoelastic balance, demonstrating the best comprehensive quality. [**Conclusion**] Phycocyanin-peony seed oil Pickering emulsion can effectively improve the 3D printing performance of potato starch gels. The findings provide a reference for the edible expression in special-shaped forms and for the development of creative food products.

Keywords: phycocyanin; peony seed oil; Pickering emulsion; potato starch gel; 3D printing

食品3D打印作为数字化食品制造的重要技术手段,在个性化营养配餐、特殊质构食品及功能食品开发等领域具有广阔的应用前景[1]。对于挤出式3D打印而言,打印材料需同时具备喷嘴内流

通信作者:侯艳(1980—),女,硕士,讲师,主要从事文创产品研发。E-mail:hykeer2012@126.com

收稿日期:2026-05-19 **修回日期:**2026-06-18

动性、沉积后结构恢复性能和层间支撑性能。因此，材料的流变特性、结构稳定性及水分状态共同决定了其打印精度与成形质量。淀粉材料来源广泛、成胶性好，是食品3D打印领域的重要材料，但纯淀粉体系普遍存在挤出阻力大、保形性差、打印窗口较窄等缺陷[2]。马铃薯淀粉凝胶虽具有基础的3D打印潜力，但其在加工过程中的结构转变、水分迁移及回生行为易导致打印性能劣化，因此需要引入结构调控组分以改善马铃薯淀粉凝胶的3D打印适配性[3]。

相较于传统增稠剂或多糖单一改性的方式，将Pickering乳液引入淀粉连续相，为食品3D打印墨水的结构优化提供了新的技术路径。乳液液滴可填充于淀粉网络内部，一方面通过润滑作用改善材料的挤出特性，另一方面可作为填充相参与凝胶网络构建，有效调控体系的屈服特性、形状保持能力与打印精度[4]。牡丹籽油富含α-亚麻酸及多种脂溶性活性成分，营养价值较高，但其疏水性强、易氧化变质，直接添加至高水分淀粉体系时分散稳定性较差[5]。藻蓝蛋白是一种天然功能性组分，兼具着色、抗氧化及界面活性等优势，可通过复合或自组装方式构建稳定的Pickering乳液，有望作为界面调控组分用于淀粉基3D打印材料设计[6]。

目前，国内外关于马铃薯淀粉3D打印、结构化植物油递送及藻蓝蛋白界面改性已有一些相关研究，但在高淀粉体系下，Pickering乳液能否通过调控体系流变行为和水分分布改善马铃薯淀粉凝胶的可打印性，同时调控打印产品的色泽、质构及分子相互作用，尚缺乏系统研究。基于此，作者以马铃薯淀粉凝胶为连续相，引入不同质量分数的藻蓝蛋白-牡丹籽油Pickering乳液，系统探究其对体系打印成形性能、流变特性、水分分布及产品品质的影响，并通过复杂造型打印验证实际打印效果，旨在为淀粉基特殊造型打印食品的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

马铃薯淀粉：石家庄凯泽食品有限公司；牡丹籽油：菏泽商圣农业发展有限公司；藻蓝蛋白：江苏萃谷食品有限公司；溴化钾：天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

高速剪切机：A25型，上海欧河机械设备有限公司；食品3D打印机：Food-Bot-D1型，杭州时印科技有限公司；流变仪：DHR-2型，美国Waters公司；质构仪：TA-XT2i型，英国Stable Micro Systems公司；低场核磁共振分析仪：MINI20-015V-I型，上海纽迈电子科技有限公司；傅里叶变换红外光谱仪：VERTEX 70型，德国BRUKER公司；色差仪：Color i5型，美国X-Rite公司。

1.3 样品制备

按藻蓝蛋白与牡丹籽油质量比1∶4配制Pickering乳液，体系中藻蓝蛋白、牡丹籽油与去离子水质量分数分别为7.50%、30.00%和62.50%。将藻蓝蛋白分散于去离子水中，(25±1) ℃水化2 min，缓慢加入牡丹籽油，并采用高速剪切机于10 000 r/min剪切2 min，制得藻蓝蛋白-牡丹籽油Pickering乳液。

将质量分数15%的马铃薯淀粉悬浮液于85 ℃糊化20 min，静置30 min后冷却至30 ℃，得到马铃薯淀粉凝胶基质。以淀粉凝胶质量为基准，分别添加质量分数2%、4%、6%、8%、10%的Pickering乳液，混匀后于10 000 r/min剪切6 min，静置20 min，最终得到复合凝胶体系，依次记为PE-2、PE-4、PE-6、PE-8、PE-10。

1.4 3D打印测试

采用Food-Bot-D1型食品3D打印机进行打印。打印温度25 ℃，喷嘴直径0.6 mm，层高0.3 mm，喷嘴移动速度4 800 mm/min，挤出速度20 mm/s，打印13层。常规打印模型选用心形平面结构，外形尺寸为20 mm×20 mm，高度3.9 mm，填充率40%，填充模式为Stars。本研究将3D打印性能划分为3个等级，分级标准见表1。

表1 3D打印性能分级标准

Table 1 Criteria for grading 3D printing performance

打印性能等级	标准
可打印性良好	打印样品能够较好地保持设计形状，整体轮廓清晰、边缘平整、线条连续，内部孔隙或镂空结构完整，无明显铺展、塌陷或黏连现象
可打印性一般	打印样品整体形状基本可辨，局部存在轻微铺展、线条增粗、边缘不整齐、孔隙缩小或轻度塌陷现象，但整体结构仍可识别
可打印性较差	打印样品整体形状难以保持，线条铺展明显、边缘模糊、局部或整体塌陷严重，内部孔隙结构破坏，难以维持设计形状

为验证最优配方对复杂造型的打印适配性，在保持上述打印参数的前提下，进一步开展四叶草及“洛”“阳”字样图案的3D打印测试。

1.5　流变性能测定

参照杨帆等[7]的方法并稍加修改，采用流变仪对样品进行动态流变学测定。选用直径40 mm的平板，设定板间距1 mm，测试温度25 ℃，剪切速率0.1~100.0 s^{-1}。振荡应变测试采用0.1%—10.0%—0.1%的应变循环模式，其中低应变阶段用于表征样品静置状态下的结构稳定性，高应变阶段用于表征外界扰动下的结构破坏，应变恢复阶段用于表征扰动后结构的恢复能力。动态流变测试在线性黏弹区内进行，固定应变为0.1%，扫描频率0.1~100.0 Hz，测定储能模量（G'）、损耗模量（G''）及损耗因子（tan δ）随角频率的变化规律。

1.6　水分分布及水分状态测定

参照王爱苗等[8]的方法并稍加修改，采用低场核磁共振仪分析样品中不同迁移状态质子组分的分布特征。称取2.0 g样品置于核磁管中，采用CPMG序列进行测定。测试参数为：主频率21.0 MHz，回波时间0.2 ms，采样频率200.0 kHz，扫描次数16，采样点数80 022，重复扫描间隔3 500 ms。通过反演拟合获得横向弛豫时间（T_2）分布图谱，用于表征不同状态质子组分的弛豫特征。由于本研究中的样品含有油相，油脂质子信号可能会对局部信号产生一定的干扰，因此试验主要对比不同处理组间T_2分布及峰面积的变化规律。

1.7　FTIR及蛋白质二级结构分析

参照贾立奥等[9]的方法，采用傅里叶变换红外光谱仪对样品分子结构特征进行分析。将打印后的样品于-25 ℃预冻12 h，随后置于真空冷冻干燥机中，冻干至样品含水量基本稳定或最终水分质量分数约为5%。将冻干样品粉碎后过100目筛，于干燥器中密封保存。测试时，将样品粉末与干燥KBr按质量比1∶100混匀压片，以KBr为空白，在4 000~400 cm^{-1}范围内扫描，分辨率4 cm^{-1}，扫描64次。采用OMNIC和Peakfit对酰胺I带进行拟合，计算样品中蛋白质二级结构各构象的占比。

1.8　色差测定

采用Color i5色差仪测定样品的色差。使用黑白标准板对仪器进行校准后，将样品置于相同光源下测定其色泽参数L^*、a^*、b^*值。

1.9　质构特性测定

参照Bao等[10]的方法并稍加修改，采用质构仪对冻干打印样品的质构特性进行测定。压缩试验采用P/36探头，测试模式为Compression，测前速度、测中速度和测后速度分别为1.0、1.0、10.0 mm/s，触发力5.0 g，压缩形变量50%，由测试曲线获得最大硬度和破裂力。穿刺试验采用TA/0.5S球形探头，测试模式为Compression，测前速度、测中速度和测后速度分别为2.0、1.0、2.0 mm/s，触发力4.0 g，穿刺距离4.0 mm，由测试曲线获得样品最大硬度和脆度。

1.10　感官评定

参照GB/T 16291.1—2012对感官评价员进行筛选和培训。选取50名志愿者组成感官评价小组，评价前通过问卷调查了解其健康状况、食品过敏史、感官敏感性及参与意愿，排除服用影响感官功能药物者。感官评价员接受4次且每次2 h的培训，内容包括评价指标熟悉、评分尺度统一和样品评价程序说明。感官评定在（25±2）℃、无异味、光线均匀的实验室内进行。样品采用随机三位数编码，以随机顺序单独呈递，评价过程采用盲评方式，样品评价间以温水漱口。每个样品设置重复评价，各项得分取平均值作为最终结果。本研究经河南科技大学审核批准，所有受试者在参与前均签署知情同意书。感官评分标准见表2。

1.11　数据处理与分析

所有试验至少平行测定3次，结果以平均值±标准差表示。采用SPSS 27.0进行方差分析和显著性检验，$P<0.05$表示差异显著。采用Origin 2025软件作图。

2　结果与讨论

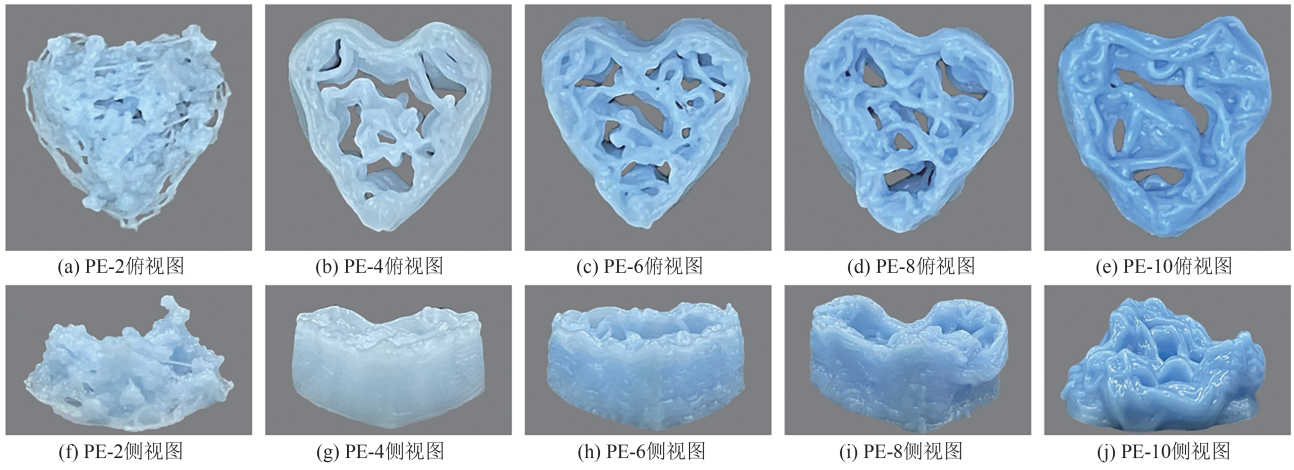
2.1　Pickering乳液质量分数对样品打印成形性能的影响

添加不同Pickering乳液质量分数打印的样品形貌差异明显，整体呈现由成形不足到成形良好，再到过度铺展和塌陷加重的变化规律，其中PE-4样品的打印成形效果最优，见图1。PE-2样品的打印轮廓不完整、边界模糊、高度较低且边缘塌缩明显，表明Pickering乳液质量分数较低时，体系仍主要由高质量分数马铃薯淀粉凝胶连续相主导，凝胶内部网络较致密，挤出阻力较大，难以实现物料连续、均匀沉积。PE-4样品轮廓完整、边缘清晰、

表 2　打印样品感官评分标准

Table 2　Criteria for sensory evaluation of the printed samples

评价指标	评分标准	得分/分
外观（25 分）	造型完整，轮廓清晰，边缘整齐，无明显塌陷、断裂或变形	20~25
	造型较完整，存在轻微塌陷、边缘不齐或局部缺损现象	14~19
	造型基本可辨，但塌陷、变形或断裂较明显	7~13
	塌陷严重或失去设计形状	0~6
色泽（20 分）	色泽均匀，蓝色自然，综合色调协调，明亮度较好	16~20
	色泽较均匀，蓝色基本正常，亮度略低或有轻微色差	11~15
	颜色分布不均匀，存在较明显发暗、偏灰或局部色差	6~10
	色泽差，蓝色不自然或明显不均匀	0~5
风味（20 分）	气味与滋味自然协调，无异味及不良后味	16~20
	风味基本正常，香气或滋味略弱，协调性稍差	11~15
	风味一般，存在轻微异味、苦涩味或不协调感	6~10
	风味差，有明显异味或不愉快后味	0~5
口感（35 分）	口感酥脆或松脆适宜，质地细腻，无明显粗糙、黏牙或过硬现象	28~35
	口感较好，存在轻微偏硬、偏软、粗糙或轻度黏牙	20~27
	口感一般，质地协调性不足，影响食用体验	10~19
	口感差，明显过硬、粗糙或黏牙	0~9



(a) PE-2俯视图　(b) PE-4俯视图　(c) PE-6俯视图　(d) PE-8俯视图　(e) PE-10俯视图

(f) PE-2侧视图　(g) PE-4侧视图　(h) PE-6侧视图　(i) PE-8侧视图　(j) PE-10侧视图

图 1　Pickering 乳液质量分数对样品打印成形性能的影响

Fig. 1　Effect of Pickering emulsion mass fraction on the shape-forming performance of the printed samples

内部孔隙结构保持较好且侧壁支撑稳定，表明加入适量 Pickering 乳液可有效改善物料的挤出连续性，同时维持良好的结构支撑能力。其原因可能是适量乳液降低了体系内部摩擦阻力，促使乳液液滴与淀粉连续相形成较稳定的复合凝胶网络结构[11]。当 Pickering 乳液质量分数≥6% 时，样品的打印线条逐渐增粗，挤出过度、整体塌陷现象加重，在 PE-10 样品中表现最为明显。这表明高质量分数的 Pickering 乳液虽提升了体系流动性，但会破坏淀粉连续相的结构完整性，削弱物料沉积后的结构恢复能力。综上，Pickering 乳液质量分数对淀粉凝胶的 3D 打印性能具有显著调控作用，添加质量分数 4% 的 Pickering 乳液可使体系在挤出连续性与结构稳定性之间达到较好平衡。

2.2　Pickering 乳液质量分数对样品流变特性的影响

为解析不同 Pickering 乳液质量分数下样品 3D 打印行为的差异，作者对各处理组凝胶体系的稳态剪切、交替应变及频率扫描黏弹特性进行了分析。所有样品均表现出典型的剪切变稀特性，表明体系具备良好的挤出成形基础[12]，见图 2(a)。在低剪切速率下，随着 Pickering 乳液质量分数的提升，体系流动阻力逐渐减小，表明 Pickering 乳液对高淀粉质量分数的凝胶体系具有一定的润滑和稀释作用。各样品的 G' 在低应变阶段均较高，在高应变作用下

迅速下降，恢复至低应变条件后出现不同程度回升，表明所有样品均具有一定的触变恢复能力，见图2(b)。其中PE-2和PE-4样品的G'明显高于其他样品，表明其初始结构完整性更优；PE-2样品的凝胶网络最为致密，但也因此产生更大的挤出阻力。PE-6样品的G'处于中等水平，而PE-8和PE-10样品的触变恢复能力明显下降，说明高Pickering乳液质量分数会导致体系经剪切作用后的触变恢复能力变弱[13]。所有样品的G'和G''均随角频率增大呈逐渐升高的趋势，且均满足$G'>G''$，表明该体系以弹性响应为主要特征，见图2(c)~(d)。其中PE-4样品的G'最高，PE-2与PE-6样品次之，PE-8和PE-10样品的G'最低，说明适量添加Pickering乳液可有效维持体系的弹性支撑能力，而Pickering乳液质量分数过高会破坏凝胶连续相结构的完整性。tan δ随Pickering乳液质量分数的升高略有增大，表明高Pickering乳液质量分数会提升体系的黏性贡献，弱化材料的弹性主导特性，见图2(e)。

综上，Pickering乳液质量分数对马铃薯淀粉凝胶体系的流变行为具有显著调控作用。PE-2样品弹性最优，但流动性较差；PE-8和PE-10样品流动性过大，结构支撑能力不足；PE-4样品在黏度、触变恢复及黏弹平衡性之间能实现最佳平衡，兼具喷嘴内良好的流动性与打印沉积后的形状保持能力。这表明藻蓝蛋白-牡丹籽油Pickering乳液并非单纯降低凝胶黏度，而是通过调控体系流动性与结构支撑之间的动态平衡来改善材料的3D打印适配性。

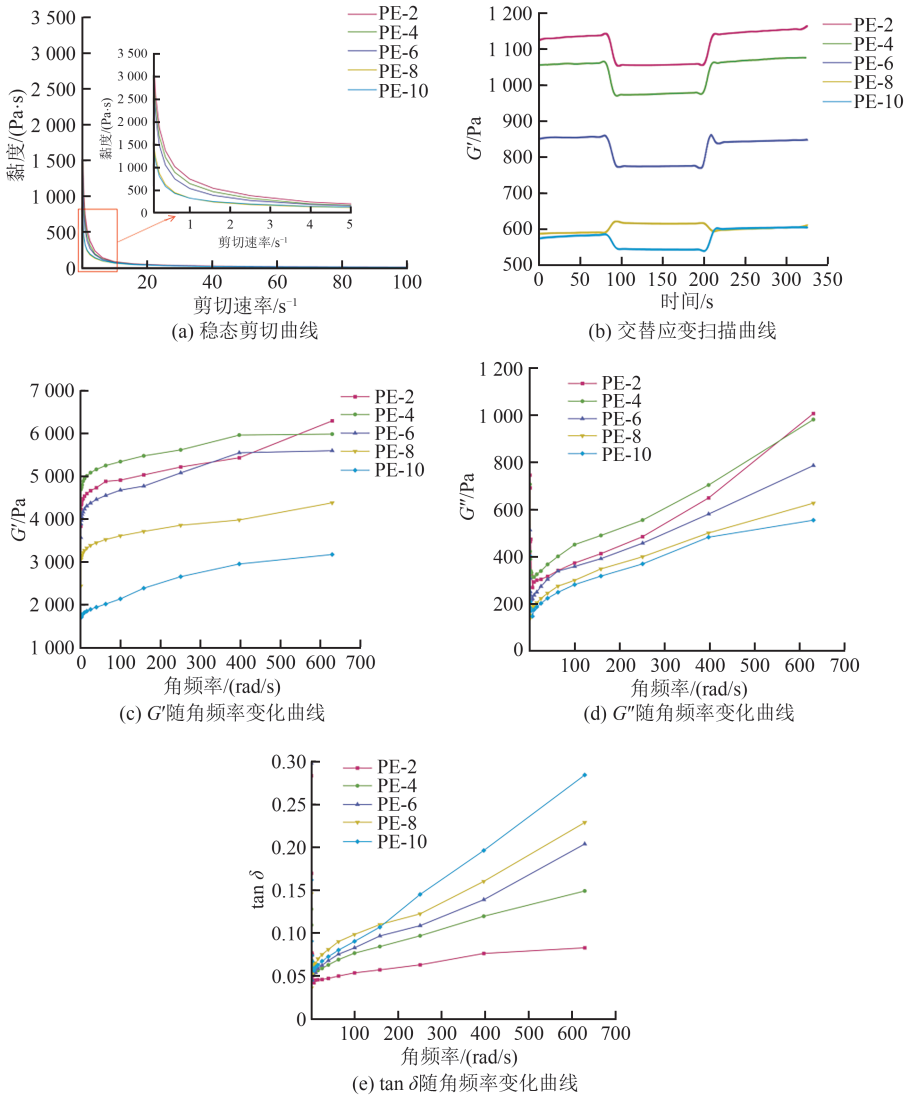


图2　Pickering乳液质量分数对样品流变特性的影响

Fig. 2　Effects of Pickering emulsion mass fraction on the rheological properties of the samples

2.3 Pickering 乳液质量分数对样品水分分布及水分状态的影响

为进一步阐明不同 Pickering 乳液质量分数下样品的 3D 打印行为差异，作者对各处理组的凝胶体系开展了 LF-NMR 分析，见图 3。所有样品均出现 3 个典型的弛豫峰，分别对应 T_{21} 强结合水、T_{22} 弱结合水和 T_{23} 自由水。其中 T_{23} 的峰面积最大，表明体系内水分以自由水为主，为高含水量淀粉凝胶在喷嘴内流动提供了基础条件。随着 Pickering 乳液质量分数的升高，T_{22} 与 T_{23} 的峰整体向短弛豫时间偏移，说明弱结合水与自由水的迁移运动受到限制，水分与淀粉网络、乳液界面的相互作用增强。已有研究证实，蛋白质、脂质等非淀粉组分与淀粉形成复合结构后，可通过界面吸附、氢键作用及凝胶网络重构等方式抑制水分迁移，从而提高体系的持水能力与结构稳定性[14]。

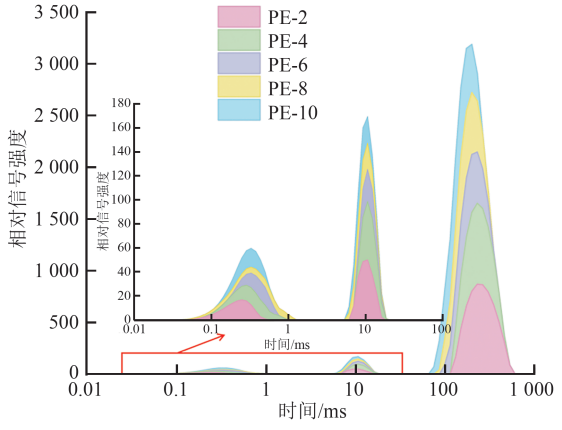
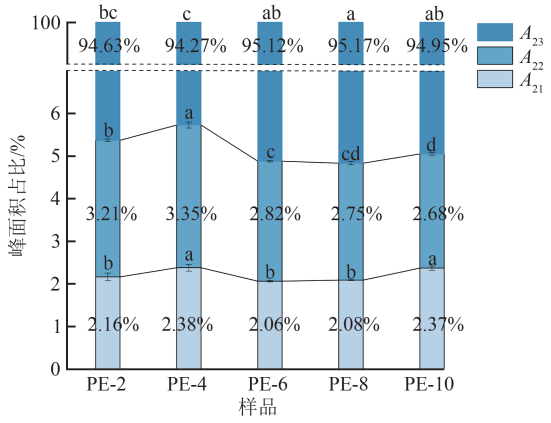


图 3 Pickering 乳液质量分数对样品水分分布的影响

Fig. 3 Effect of Pickering emulsion mass fraction on the moisture distribution of the samples

各处理组虽均以自由水为主，但不同水分状态的占比存在差异，见图 4。PE-4 样品的强结合水与弱结合水占比相对较高，自由水占比相对较低，说明添加适量 Pickering 乳液可促使体系中部分自由水向结合水转化，有效增强了体系对水分的约束能力，抑制了打印沉积后体系水分迁移和结构松弛[15]。PE-6 和 PE-8 样品的自由水占比增大、弱结合水占比下降，说明体系流动性增强，但凝胶网络对水分迁移和局部形变的约束能力减弱，打印成形后易出现线条增粗、边缘铺展等问题。PE-2 样品的水分再分配效果较弱，体系仍以高淀粉质量分数的连续相为主，表现为凝胶网络结构致密、



同一指标不同小写字母表示组间差异显著（$P<0.05$）。

图 4 Pickering 乳液质量分数对样品水分状态的影响

Fig. 4 Effect of Pickering emulsion mass fraction on the water state of the samples

挤出受限。PE-10 样品虽局部结合水占比略有提升，但整体网络结构的约束性能较差，样品沉积后易发生流动变形和结构塌陷。

综上，Pickering 乳液可通过调控体系不同水分状态的分配比例来改变凝胶体系的流动性与打印保形性能。其中 PE-4 样品具有最优的水分分布特征，与其优异的打印成形效果一致。由于本复合体系含油相组分，LF-NMR 测试结果更适用于对比不同处理组间 T_2 分布与峰面积的相对变化，因此水分状态分析结果需结合流变特性与打印成形效果进行综合判定。

2.4 Pickering 乳液质量分数对样品分子相互作用及蛋白质二级结构的影响

各样品在 3 450~3 420 cm^{-1} 内均出现宽吸收峰，该吸收峰主要归属于 O—H 和 N—H 的伸缩振动。由图 5 可以看出，与 PE-2 样品相比，其余样品的特征吸收峰整体向高波数偏移，说明 Pickering 乳液的添加改变了体系中羟基、氨基及结合水所处的微环境，使体系氢键作用模式发生重构[16]。2 920、2 850、1 740、1 470 cm^{-1} 处的特征吸收峰强度随 Pickering 乳液质量分数升高逐渐增强，分别对应脂肪链—CH_2 不对称与对称伸缩振动、酯基 C═O 伸缩振动及—CH_2 弯曲振动，表明牡丹籽油成功引入体系并参与复合结构的构建。1 650 cm^{-1} 处的吸收峰为蛋白质酰胺 I 带，其峰位与峰形的变化表明藻蓝蛋白所处微环境发生改变。1 160 cm^{-1} 及 1 024 cm^{-1} 附近的特征吸收峰主要对应淀粉分子 C—O、C—O—C 伸缩振

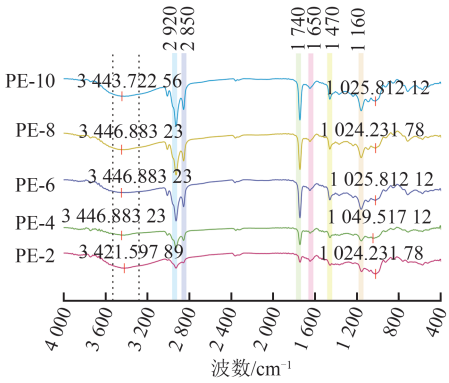
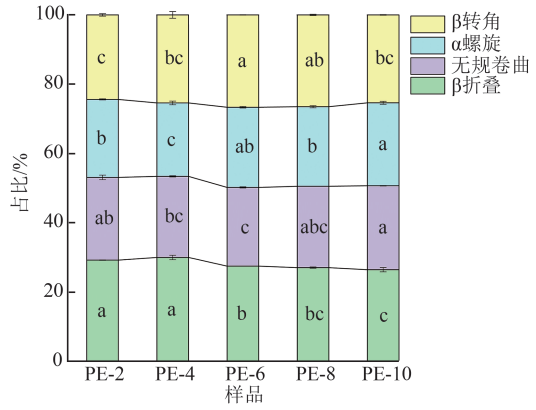


图5　不同质量分数Pickering乳液制备样品的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 5　Fourier transform infrared spectra of samples prepared with different mass fractions of Pickering emulsion

动及糖苷键骨架振动。与其他样品相比，PE-4样品在1 049~1 024 cm^{-1}区域变化更明显，表明该样品淀粉骨架振动环境与其他样品存在明显差异。

由图6可以看出，PE-4样品的β折叠占比较高，而α螺旋占比较低，说明添加适量Pickering乳液可使蛋白质构象分布趋于有序状态。随着Pickering乳液质量分数进一步提升，β折叠占比逐渐降低，β转角、α螺旋、无规卷曲占比整体升高，蛋白质构象分布发生明显改变。Pickering乳液质量分数高的样品中β折叠占比减少，而无规卷曲占比增加，表明蛋白质分子有序性降低、构象重排增强。综上，Pickering乳液可通过调控体系的氢键环境与非共价相互作用来影响蛋白质二级结构的构象分布。其中PE-4样品呈现更稳定、有序的结构特征，与该样品较优的3D打印成形效果相互印证。



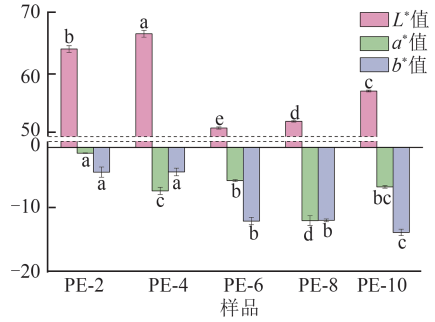
同一指标不同小写字母表示组间差异显著（P<0.05）。

图6　Pickering乳液质量分数对样品中蛋白质二级结构占比的影响

Fig. 6　Effect of Pickering emulsion mass fraction on the proportion of protein secondary structures in the samples

2.5　Pickering乳液质量分数对样品色泽的影响

由图7可以看出，各处理组样品的a^*、b^*值均为负值，且b^*值绝对值大多高于a^*值绝对值，表明样品以蓝绿色为主体色调。随着Pickering乳液质量分数升高，样品的色泽参数发生明显变化。其中PE-4样品的L^*值最大，样品亮度最高，这可能是由于适量Pickering乳液可形成较稳定、分散较均匀的界面结构，有利于藻蓝蛋白在体系中均匀分散，从而增强体系的光散射效应[17]。相比之下，PE-6、PE-8样品的L^*值明显下降，样品整体色泽加深；PE-10样品的L^*值虽略有回升，但仍低于PE-4样品，表明提高Pickering乳液质量分数不能持续提升样品亮度。



同一指标不同小写字母表示组间差异显著（P<0.05）。

图7　Pickering乳液质量分数对样品色泽的影响

Fig. 7　Effects of Pickering emulsion mass fraction on the color characteristics of the samples

PE-8样品的a^*值绝对值最大，样品绿色特征最显著；高Pickering乳液质量分数的样品b^*值绝对值增大，说明蓝色特征增强。结果表明，添加Pickering乳液不仅影响样品的蓝色强度，还可改变样品亮度和整体色调平衡。藻蓝蛋白是体系蓝色色调的主要来源，其颜色呈现效果对自身分子构象、界面环境及分散状态较为敏感[18]。添加适量Pickering乳液有利于维持藻蓝蛋白的稳定分布，使PE-4样品的综合色泽最协调；而高质量分数Pickering乳液虽使样品蓝色色调有所增强，但体系表面稳定性下降、打印结构变形加剧，最终导致整体色泽未进一步提升。综上，适量添加Pickering乳液可有效改善样品的色泽，获得亮度高、色调协调的样品，其中PE-4样品的综合色泽表现最优。

2.6　Pickering乳液质量分数对冻干打印样品质构特性的影响

Pickering乳液质量分数对冻干打印样品的质构特性具有显著调控作用。样品穿刺硬度、脆度及

破裂力变化规律基本一致，均表现为PE-4样品数值较高，PE-6、PE-8样品数值降低，PE-10样品数值略有回升，见图8。各组样品的最大硬度无显著差异，数值波动较小。结果表明，添加Pickering乳液主要改变样品局部受力状态下的破坏行为与整体断裂特征，对样品压缩终点抗力的影响较小。其中，PE-4样品具有较高的穿刺硬度、脆度和破裂力，说明适量添加Pickering乳液可有效提升冻干打印样品的结构完整性和断裂抗性。随着Pickering乳液质量分数的进一步提升，PE-6、PE-8样品的穿刺硬度、脆度及破裂力均下降，样品局部骨架完整性下降，整体抗断裂能力减弱。这可能是由于高Pickering乳液质量分数下体系流动性增强、打印沉积后连续相支撑能力下降[19]，使冻干打印样品凝胶网络更易出现分布不均匀或局部薄弱等缺陷，样品在外力作用下更易发生破损或断裂。PE-10样品的穿刺硬度与脆度较PE-6、PE-8样品有所回升，但破裂力仍低于PE-4样品，说明Pickering乳液质量分数过高仅可小幅改善样品局部结构，无法改善凝胶整体网络的连续性与受力均匀性。综上，Pickering乳液主要通过调控样品局部断裂行为与整体结构协调性来改变冻干打印样品的质构特性。适量添加Pickering乳液有利于形成结构较完整、受力响应较协调的冻干网络，而Pickering乳液质量分数过高会破坏凝胶结构的均一性与整体稳定性。在本研究条件下，PE-4冻干打印样品的质构特征最优。

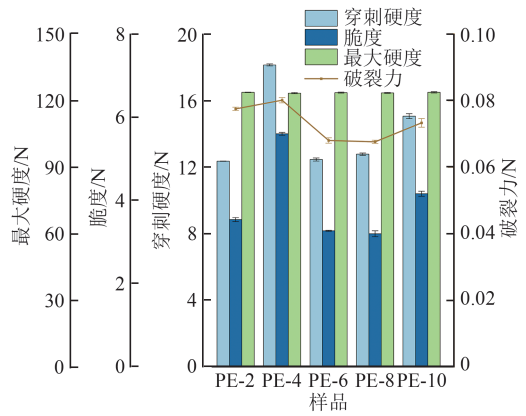


图8 Pickering乳液质量分数对冻干打印样品质构特性的影响

Fig. 8 Effects of Pickering emulsion mass fraction on the textural properties of the freeze-dried printed samples

2.7 Pickering乳液质量分数对冻干打印样品感官评分的影响

Pickering乳液质量分数对冻干打印样品的感官品质具有显著影响，见表3。其中PE-4样品的外观、色泽、风味和口感等各项指标得分均最高，总分显著高于其他样品，而PE-10样品的总分最低。整体而言，样品的综合感官品质随Pickering乳液质量分数的升高呈先升高后降低的趋势，表明其质量分数存在最适范围，过低或过高均不利于样品感官品质的提升[20]。外观评分结果表明，PE-4样品评分最高，打印造型完整、轮廓清晰、冻干后形态保持较好；PE-2样品评分较低，主要与其成形不足有关；PE-8、PE-10样品外观评分下降，与其边缘模糊、结构变形及塌陷有关。色泽评分结果显示，PE-4样品评分最高，证实添加适量Pickering乳液可有效提升样品亮度，提升整体色调协调性；Pickering乳液质量分数高的样品虽蓝色特征增强，但整体色泽协调性下降，从而降低了样品的视觉接受度。风味评分结果显示，PE-4样品风味协调性最佳，而高质量分数样品的评分明显降低，这是由于牡丹籽油含量过高会使油脂气味特征过于突出，破坏整体风味平衡。口感评分结果显示，PE-4样品得分最高，样品在酥脆性、咀嚼感和整体协调性方面表现较优；PE-8、PE-10样品得分较低，说明Pickering乳液质量分数过高会导致样品质地松散，整体口感协调性显著下降。综上，添加适量Pickering乳液可有效改善冻干打印样品的外观、色泽、风味和口感，显著提升样品的综合感官品质；而Pickering乳液质量分数过低或过高，均会不同程度地降低样品的感官接受性。

表3 Pickering乳液质量分数对样品感官评分的影响

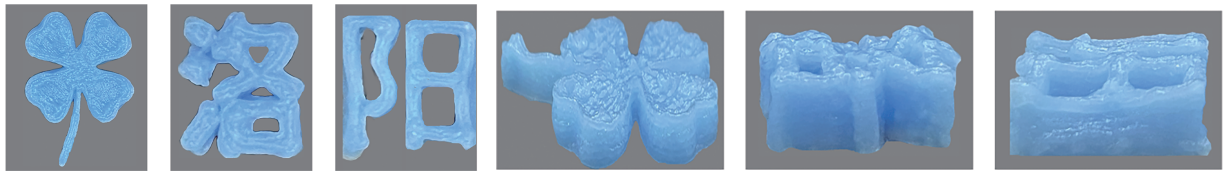
Table 3 Effects of Pickering emulsion mass fraction on the sensory scores of the samples

样品	外观评分/分	色泽评分/分	风味评分/分	口感评分/分	总分/分
PE-2	11.15±0.49^{e}	14.10±0.57^{c}	16.50±0.42^{c}	22.05±0.78^{e}	63.80±0.71^{d}
PE-4	24.65±0.21^{a}	19.05±0.35^{a}	19.30±0.28^{a}	34.15±0.49^{a}	97.15±0.35^{a}
PE-6	20.20±0.42^{b}	17.15±0.49^{b}	17.95±0.21^{b}	31.25±0.49^{b}	86.55±1.63^{b}
PE-8	16.90±0.57^{c}	14.80±0.42^{c}	14.15±0.49^{d}	27.00±0.28^{c}	72.85±0.07^{c}
PE-10	13.05±1.06^{d}	12.85±0.49^{d}	11.00±0.28^{e}	24.05±0.35^{d}	60.95±1.20^{e}

注：同列不同小写字母表示组间差异显著（P<0.05）。

2.8　最优配方在复杂文创图案中的打印适配性验证

为进一步验证最优配方在复杂结构中的打印适配性，选取PE-4配方对四叶草、“洛”“阳”等特殊图案进行3D打印测试，见图9。由俯视图可以看出，四叶草叶片轮廓完整、叶柄连续，“洛”“阳”的外轮廓及内部镂空结构均能较好成形，说明该配方在曲线边缘、细长线条及封闭孔洞等复杂几何结构中均具有较好的沉积精度。由侧视图可以看出，样品层间堆叠较稳定，仅顶部存在轻微起伏，高度一致性良好，无明显塌陷或整体失稳现象。结果表明，PE-4配方不仅适用于规则模型的打印，也可满足特殊图案的成形要求，在可食化表达与个性化食品制造领域具有较好的应用潜力。



(a) 四叶草俯视图　(b) “洛”俯视图　(c) “阳”俯视图　(d) 四叶草侧视图　(e) “洛”侧视图　(f) “阳”侧视图

图9　PE-4对复杂文创图案的打印效果

Fig. 9　Printing performance of PE-4 for complex cultural and creative patterns

3　结论

以马铃薯淀粉凝胶为连续相，引入不同质量分数的藻蓝蛋白-牡丹籽油Pickering乳液，系统探究了其对食品3D打印性能及打印后产品品质的影响。结果表明，Pickering乳液质量分数对体系打印适配性具有显著调控作用。当Pickering乳液质量分数较低时，体系流动性不足，挤出过程受限；当Pickering乳液质量分数较高时，体系流动性增强，但结构支撑能力下降，易导致挤出受限与沉积塌陷。在本研究条件下，PE-4样品的打印成形效果最优。流变测试结果显示，PE-4样品在黏度、触变恢复能力及黏弹平衡方面表现较优，可同时兼顾连续挤出与沉积后形状保持。LF-NMR结果表明，添加适量Pickering乳液能够促进部分自由水向结合水转化，增强体系对水分的束缚作用。FTIR及蛋白质二级结构结果表明，Pickering乳液主要通过影响氢键环境、非共价相互作用及蛋白质构象分布改变体系结构；其中PE-4样品的β折叠占比较高，分子相互作用更强。另外，PE-4样品的色泽协调，冻干打印样品的质构特性与感官品质均优于其他样品。综上，藻蓝蛋白-牡丹籽油Pickering乳液能够有效改善马铃薯淀粉凝胶的3D打印性能，本研究条件下的最适Pickering乳液质量分数为4%。本研究可为淀粉基3D打印材料设计及特殊造型食品3D打印开发提供参考。

参考文献

[1] 胡晖，谢晖，万成，等. 食品3D打印技术在新型食品开发中的应用进展[J]. 食品科技，2026，51(3)：111-119.
Hu H，Xie H，Wan C，et al. Progress in the application of food 3D printing technology in the development of new foods[J]. Food Science and Technology，2026，51(3)：111-119.(in Chinese)

[2] Qiu R K，Wang K，Tian H，et al. Analysis on the printability and rheological characteristics of bigel inks：potential in 3D food printing[J]. Food Hydrocolloids，2022，129：107675.

[3] 朱莹莹，仵华君，朱嘉文，等. 基于淀粉原料的食品3D打印研究进展[J]. 食品科学，2024，45(3)：257-265.
Zhu Y Y，Wu H J，Zhu J W，et al. Research progress on food 3D printing based on starch[J]. Food Science，2024，45(3)：257-265.(in Chinese)

[4] 张法立，岳尧，黄万成，等. 改善食品级皮克林乳液稳定性的新策略及其潜在应用价值[J]. 保鲜与加工，2025，25(7)：144-156.
Zhang F L，Yue Y，Huang W C，et al. New strategies for improving stability of food-grade Pickering emulsions and their potential application values[J]. Storage and Process，2025，25(7)：144-156.(in Chinese)

[5] He W S，Wang Q Z，Zhao L Y，et al. Nutritional composition，health-promoting effects，bioavailability，and encapsulation of tree peony seed oil：a review[J]. Food & Function，2023，14(23)：10265-10285.

[6] Wang H X，Ouyang Z Y，Hu L D，et al. Self-assembly of gelatin and phycocyanin for stabilizing thixotropic emulsions and its effect on 3D printing[J]. Food Chemistry，2022，397：133725.

[7] 杨帆，张憨，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)

[8] 王爱苗，王博，王玉川，等．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[J]．食品与生物技术学报，2025，44(10)：39-51．
Wang A M，Wang B，Wang Y C，et al．Dual-nozzle 3D printing and drying characteristics of a hawthorn snack based on dual-material combination gel[J]．Journal of Food Science and Biotechnology，2025，44(10)：39-51．(in Chinese)

[9] 贾立奥，王颖颖，寇锟，等．pH偏移预处理对核桃蛋白-羧甲基壳聚糖复合颗粒的影响及在高内相Pickering乳液中的应用[J]．食品与发酵工业，2025，51(21)：243-253．
Jia L A，Wang Y Y，Kou K，et al．Effect of pH migration pretreatment on walnut protein-carboxymethyl chitosan composite particles and its application in high internal phase Pickering emulsion [J]．Food and Fermentation Industries，2025，51(21)：243- 253．(in Chinese)

[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] 吴超，刘哲，黑雪，等．含油量及蛋白颗粒含量对高内相Pickering乳液及其3D打印特性的影响[J]．食品科学，2024，45(20)：92-99．
Wu C，Liu Z，Hei X，et al．Effects of oil content and protein particle concentration on characteristics and 3D printing properties of high internal phase Pickering emulsions [J]．Food Science，2024，45(20)：92-99．(in Chinese)

[12] Ballon A，Sessa S，Cito S，et al．High internal phase emulsions stabilized by insect proteins：a path to 3D printable fat analogues[J]．Food Hydrocolloids，2025，166：111330．

[13] 邓帅，赵明慧，郝春雪，等．叶黄素乳液凝胶3D打印间隔多层结构的构建及释放特性研究[J]．食品工业科技，2025，46(3)：133-142．
Deng S，Zhao M H，Hao C X，et al．Construction and release characteristics of 3D printed spaced multi-layer structure of lutein emulsion gel[J]．Science and Technology of Food Industry，2025，46(3)：133-142．(in Chinese)

[14] Feng S Y，Liu Y W，Li J R，et al．Mechanism of improving water-holding capacity of *Nemipterus virgatus* myosin gel by soy protein isolate-stabilized Pickering emulsion[J]．LWT-Food Science and Technology，2025，218：117512．

[15] 施思淳，刘瑞玲，陈慧芝，等．蓝莓复合凝胶体系3D打印特性与后处理评价及风味分析[J]．农业工程学报，2025，41(10)：332-342．
Shi S T，Liu R L，Chen H Z，et al．Three dimensional printing characteristics，post-processing evaluation，and flavor analysis of blueberry composite gel system [J]．Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2025，41(10)：332-342．(in Chinese)

[16] 刘树萍，刘昱晓，杨静，等．pH改性SPI-CS稳定高内相乳液及其在猪肉丸中的应用[J]．中国食品学报，2026，26(3)：214-231．
Liu S P，Liu Y X，Yang J，et al．High internal phase emulsion using pH modified SPI-CS stabilized and its application in pork balls[J]．Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2026，26(3)：214-231．(in Chinese)

[17] 王丽敬，王美涵，邵俊花，等．高内相Pickering乳液对猪肉糜3D打印性能及产品品质的影响[J]．中国食品学报，2025，25(6)：98-109．
Wang L J，Wang M H，Shao J H，et al．Effect of high internal phase Pickering emulsion on minced pork 3D printing performance and product quality[J]．Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2025，25(6)：98-109．(in Chinese)

[18] Wang Y X，Zhu Y M，Li Y，et al．Mechanistic insights into transglutaminase-mediated self-crosslinking of C-phycocyanin：structural reinforcement underlying enhanced UV-light stability in acidic conditions [J]．International Journal of Biological Macromolecules，2026，348：150852．

[19] Li G H，Wang B，Lv W Q，et al．Effect of κ-carrageenan on physicochemical and 3D printing properties of walnut protein-stabilized emulsion gel[J]．Food Hydrocolloids，2024，156：110288．

[20] Chirico Scheele S，Binks M，Christopher G，et al．Printability，texture，and sensory trade-offs for 3D printed potato with added proteins and lipids[J]．Journal of Food Engineering，2023，351：111517．