

基于主成分分析构建混合多糖凝胶品质综合评价模型

詹磊¹, 徐卓越², 蓝国玮¹, 钟庆玲¹, 刘倩桐¹, 陈佩^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 领航食品(肇庆)有限公司, 广东肇庆 526000)

摘要: 为了构建混合多糖凝胶的综合评价预测模型, 该研究采用全质构分析法(TPA)和感官评价法对5种亲水胶体复配得到的25种混合多糖凝胶进行测定。结果表明, 混合凝胶质构硬度与感官硬度、脆性呈极显著正相关; 质构内聚性、咀嚼性与感官硬度、脆性、咀嚼性、弹性、总体可接受度呈极显著正相关; 质构弹性与感官弹性、咀嚼性呈极显著正相关, 而感官气味与质构指标均不相关。利用主成分分析法从混合凝胶的11个评价指标中提取出3个主成分, 累计方差贡献率达到82.45%, 建立了混合多糖凝胶的综合评价模型。根据综合评分结果知, 当混合凝胶配方为k-卡拉胶0.8%、魔芋胶1.2%、低酰结冷胶0.4%、刺槐豆胶0.6%、海藻酸钠0.4%时, 混合多糖凝胶的得分最高为1476.17; 而当混合凝胶中不添加k-卡拉胶时, 综合评分最低为424.56。基于主成分分析得到的综合评价模型对混合多糖凝胶品质进行评价, 可以客观的反映出混合多糖凝胶的品质。

关键词: 混合多糖凝胶; 质构特性; 感官评价; 相关性分析; 主成分分析; 综合评价模型

文章编号: 1673-9078(2023)04-214-223

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.4.0384

Construction of a Comprehensive Evaluation Model for Assessing the Quality of Mixed Polysaccharide Gels Based on Principal Component Analysis

ZHAN Lei¹, XU Zhuoyue², LAN Guowei¹, ZHONG Qingling¹, LIU Qiantong¹, CHEN Pei^{1*}

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

(2. Linghang Food (Zhaoqing) Co. Ltd., Zhaoqing 526000, China)

Abstract: To establish a comprehensive evaluation and prediction model for mixed polysaccharide gels, 25 mixed polysaccharide gels obtained by combining five hydrocolloids were determined by texture profile analysis (TPA) and sensory evaluation. The results indicated that the textural hardness of mixed gels was significantly and positively correlated with sensory hardness and brittleness, whereas cohesion and chewiness were significantly and positively correlated with sensory hardness, brittleness, chewiness, elasticity, and overall acceptability. Textural elasticity was significantly and positively correlated with sensory elasticity and chewiness; however, no correlation was observed between sensory odor and the textural indicators. A cumulative variance contribution rate of 82.45% was obtained for the three principal components extracted from 11 indices, and a comprehensive evaluation model of the mixed polysaccharide gels was established. According to the comprehensive scoring results, the highest score of 1476.17 was obtained for the gel comprising 0.8% *k*-carrageenan, 1.2% konjac gum, 0.4% lectin, 0.6% locust bean gum, and 0.4% sodium alginate, whereas the lowest score of 424.56 was obtained for gels to which no *k*-carrageenan was added. The comprehensive evaluation model can thus objectively reflect the quality of mixed polysaccharide gels.

Key words: mixed polysaccharide gel; texture property; sensory evaluation; correlation analysis; principal component analysis; comprehensive evaluation model

引文格式:

詹磊,徐卓越,蓝国玮,等.基于主成分分析构建混合多糖凝胶品质综合评价模型[J].现代食品科技,2023,39(4):214-223.

ZHAN Lei, XU Zhuoyue, LAN Guowei, et al. Construction of a comprehensive evaluation model for assessing the quality of mixed polysaccharide gels based on principal component analysis [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 214-223.

收稿日期: 2022-04-05

基金项目: 广东省省级现代化农业产业园项目(粤农函515号)

作者简介: 詹磊(1998-),女,硕士在读,研究方向:生物与医药, E-mail: leizhan@stu.scau.edu.cn

通讯作者: 陈佩(1983-),女,博士,副教授,研究方向:食品加工, E-mail: peichen@scau.edu.cn

亲水胶体通常称为食用胶^[1], 主要成分是多糖类或蛋白质类的大分子, 凝胶类食品常用的物质^[2]。目前使用范围较广的亲水胶体主要是卡拉胶、魔芋胶、刺槐豆胶、结冷胶、海藻酸钠、瓜尔豆胶、明胶以及琼脂等^[1]。在食品的生产加工中仅使用单一胶体会使产品因为弹性不足或者脱水收缩等问题而影响品质, 因此需要将不同的亲水胶体进行复配使用^[3], 以提高凝胶的某一特性或增强食物的口感^[4-6]。

国内外关于亲水胶体的研究大多是将其添加到食品中以提高产品的品质, 例如王艳等^[7]将亲水胶体添加到汤圆中降低了汤圆的水分损失率和冻裂率, 并利用主成分分析构建了汤圆的综合评价模型; 林致通等^[8]在凉皮中添加黄原胶和阿拉伯胶延缓了凉皮的老化, 通过主成分分析对鲜凉皮的感官指标与质构色差进行分析得到凉皮的综合评价模型; Da 等^[9]研究了五种亲水胶体对一种新品种大米淀粉消化性质和流变学性质的影响; Mahmut 等^[10]研究了淀粉与亲水胶体对牛奶可可饮料流变学性质的影响; Naghavi 等^[11]用亲水胶体对土豆条进行预处理能够降低油炸土豆条的水分含量和含油量。目前很少有人研究亲水胶体复配得到的混合多糖凝胶质地和口味的变化, 以及复配凝胶的感官评价与质构指标之间的相关关系。不同的亲水胶体复配得到的混合胶体凝胶质地性质各不相同, 凝胶产品口感也不相同, 所以研究混合凝胶的质构特性和感官指标对果冻、布丁等凝胶类产品的研究具有参考性意义, 因此本文将对混合多糖凝胶的质构指标和感官评价指标进行相关性分析、主成分分析以得到混合多糖凝胶的综合评价模型。

文中选用 *k*-卡拉胶、魔芋胶、低酰结冷胶、刺槐豆胶、海藻酸钠五种亲水胶体作为原材料, 混合制备成一种多糖凝胶。采用质构仪和感官评价相结合的方法测定混合多糖凝胶在不同胶体添加量作用下各指标的变化, 研究多糖凝胶质构指标与感官评价之间的相关关系, 并对多糖凝胶的质构指标和感官评价指标进行主成分分析得到一个综合评价模型。

1 材料与方法

1.1 试验原料

k-卡拉胶、魔芋胶, 绿新(福建)食品有限公司; A-175 型刺槐豆胶, LBG Sicilia Ingredients; 低酰结冷胶, 斯比凯可(山东)生物制品有限公司; 600-800 型海藻酸钠, 青岛海之林生物科技开发有限公司; 乳酸钙, 河南金丹乳酸科技有限公司; 氯化钾, 砀山县景悦科技有限公司; 果葡糖浆, 肇庆焕发生物科技有

限公司; 三氯蔗糖, 捷康股份有限公司; 安赛蜜, 陕西晨明生物科技有限公司; 柠檬酸, 潍坊英轩实业有限公司; 羧甲基纤维素钠, 常熟威怡科技有限公司; 山梨酸钾, 南通醋酸纤维有限公司。

1.2 试验仪器

JJ1000 型电子天平, 常熟市双杰测试仪器厂; BL160.S 型顶置式恒速强力电动搅拌机, 江阴市保利科研器械有限公司; 富兴 1 kW 电子万用炉, 沪兴电热电器厂; DU-30G 型电热恒温油浴锅, 上海一恒科学仪器有限公司; 硅胶冰模 160 孔, 义乌市巧诗电子商务有限公司; BCD-579WE 型冰箱, 青岛海尔股份有限公司; EZ-X 型质构仪, 日本岛津有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 混合多糖凝胶工艺流程

根据前期实验探索, 混合多糖凝胶的工艺流程如下所示:

原材料称取→搅拌溶胶→高温煮胶→倒模、脱模→钙化→清洗→装罐、糖浸→杀菌→成品

1.3.2 混合多糖凝胶工艺配方

通过前期对混合凝胶的探索, 本文中各亲水胶体添加量范围分别为 *k*-卡拉胶 ($m=0\%、0.4\%、0.8\%、1.2\%、1.5\%$), 魔芋胶 ($m=0\%、0.3\%、0.6\%、0.9\%、1.2\%$), 低酰结冷胶 ($m=0\%、0.2\%、0.4\%、0.6\%、0.8\%$), 刺槐豆胶 ($m=0\%、0.3\%、0.6\%、0.9\%、1.2\%$), 海藻酸钠 ($m=0\%、0.4\%、0.8\%、1.2\%、1.6\%$), 将其分别记为 K1~K5、M1~M5、J1~J5、C1~C5、H1~H5, 实验具体分组见表 1。浸泡液的配方: 果葡糖浆 45%、三氯蔗糖 0.04%、安赛蜜 0.02%、柠檬酸 0.3%、羧甲基纤维素钠 0.3%、山梨酸钾 0.05%、蒸馏水 54.29% 配制而成。

1.3.3 混合多糖凝胶操作要点

原料称取: 按照 1.3.2 中的工艺配方称取 5 种亲水胶体的质量, 保证称取的亲水胶体、氯化钾和水的比例总和为 100%。(注: 海藻酸钠提前泡发至透明状凝胶。)

搅拌溶胶: 将称好的 4 种粉末状胶体倒入于 600 r/min 电动搅拌机搅拌的蒸馏水中, 搅拌约 2 min 后, 至其完全溶解成均匀溶胶后停止搅拌, 倒入 0.1% 的氯化钾溶液搅拌均匀。

高温煮胶: 将溶解好的胶体于电炉上加热至溶胶沸腾, 维持此状态连续搅拌 10 min 后倒入提前泡好的海藻酸钠继续加热, 沸腾状搅拌 7 min。

倒模、脱模: 将煮好的热胶倒入体积为 1 cm×1 cm×1 cm 的正方体小方格中, 待其微成型后取出。

表 1 不同混合凝胶的具体配方

Table 1 Specific components of different varieties of mixed hydrocolloids

编号	凝胶样品	添加量/%				
		k-卡拉胶	魔芋胶	低酰结冷胶	刺槐豆胶	海藻酸钠
1	K1	0	1.2	0.1	0.6	0.4
2	K2	0.4	1.2	0.1	0.6	0.4
3	K3	0.8	1.2	0.1	0.6	0.4
4	K4	1.2	1.2	0.1	0.6	0.4
5	K5	1.5	1.2	0.1	0.6	0.4
6	M1	0.8	0	0.1	0.6	0.4
7	M2	0.8	0.3	0.1	0.6	0.4
8	M3	0.8	0.6	0.1	0.6	0.4
9	M4	0.8	0.9	0.1	0.6	0.4
10	M5	0.8	1.2	0.1	0.6	0.4
11	J1	0.8	1.2	0	0.6	0.4
12	J2	0.8	1.2	0.2	0.6	0.4
13	J3	0.8	1.2	0.4	0.6	0.4
14	J4	0.8	1.2	0.6	0.6	0.4
15	J5	0.8	1.2	0.8	0.6	0.4
16	C1	0.8	1.2	0.1	0	0.4
17	C2	0.8	1.2	0.1	0.3	0.4
18	C3	0.8	1.2	0.1	0.6	0.4
19	C4	0.8	1.2	0.1	0.9	0.4
20	C5	0.8	1.2	0.1	1.2	0.4
21	H1	0.8	1.2	0.1	0.6	0
22	H2	0.8	1.2	0.1	0.6	0.4
23	H3	0.8	1.2	0.1	0.6	0.8
24	H4	0.8	1.2	0.1	0.6	1.2
25	H5	0.8	1.2	0.1	0.6	1.6

钙化：将微成型的凝胶块置于 2% 乳酸钙冰水浴中钙化 30 min。

清洗：捞出浸泡好的正方体凝胶块，用三级水将其冲洗干净。

装罐糖浸：将清洗干净的凝胶块装入玻璃罐中，倒入配好的浸泡液，至完全浸没凝胶块后封罐。

杀菌：密封好的玻璃罐于 75 °C 的水浴锅中杀菌 30 min。

成品：将杀菌完的产品冷却至室温后，于 4 °C 冰箱中冷藏 4 h 后进行质构测定和口感评价。

1.3.4 质构指标测定

采用全质构分析法进行凝胶的质构指标检测，选用直径为 36 mm 的圆柱形探头。具体的测量参数为：测试前速度 2 mm/s，测试中速度 2 mm/s，测试后速度 2 mm/s，压缩程度 70%，停留时间 2 s，初始触发力 10 gf，测定混合多糖凝胶的硬度、内聚性、

弹性、咀嚼性。每个样品重复测定 5 次。

1.3.5 感官指标测定

参考姚焯等^[12]的感官评价表，以气味、组织形态、硬度、脆性、咀嚼性、弹性、总体可接受度 7 个方面对混合多糖凝胶进行口感评定。从食品学院选取 10 名食品加工专业的人员组成感官评分小组，在感官评价之前针对混合多糖凝胶的口感，对每一位感官人员进行相关知识的培训以及凝胶产品口感的培训，以保证感官评价小组成员对不同混合多糖凝胶产品更加敏感，随后根据表 2 进行实际的感官评价。

1.4 数据分析

实验数据采用 Excel 2019 软件对实验数据进行处理，结果以平均值 ± 标准差的形式表示。用 IBM SPSS Statistics 25 软件单因素 ANOVA 分析检验差异性，多重比较采用 Duncan 法，对质构数据和感官数

据进行差异性分析；用 Origin 19 软件中 Pearson 相关性分析和主成分分析法对质构数据和感官数据进行相

关性分析和主成分分析；实验结果用 Origin 2022 软件进行绘制。

表 2 不同混合凝胶的感官评价表

Table 2 Sensory evaluation of different varieties of mixed hydrocolloids

评定指标	评分标准	评分/分
气味(10分)	无海藻腥味或其他异味	8~10
	有海藻腥味或其他异味较淡	5~7
	有海藻腥味或其他异味浓郁	0~4
组织形态(15分)	内外结构均匀，表面光滑，透明度高，基本无气泡	11~15
	内部稍软，表面有少量凸起或凹陷，透明度一般，有少量气泡	6~10
	内部流心状，表面凹凸不平明显，较浑浊或有大量气泡	0~5
硬度(15分)	软硬适中	11~15
	稍软或稍硬	6~10
	偏软塌或偏硬	0~5
脆性(15分)	脆性好	11~15
	脆性较差	6~10
	脆性不明显或没有脆性	0~5
咀嚼性(15分)	咀嚼阻力适中	11~15
	咀嚼阻力稍大或稍小	6~10
	咀嚼阻力过大或过小	0~5
弹性(15分)	弹性适中	11~15
	弹性稍大或稍小	6~10
	基本没有弹性	0~5
总体可接受度(15分)	很好，总体满意	11~15
	一般，可以接受	6~10
	很差，较难接受	0~5

2 结果与讨论

2.1 食用混合多糖凝胶的质构特性分析

全质构分析法(Texture Profile Analysis, TPA), 又称二次咀嚼测试^[13], 是质构仪模仿人类进食的咀嚼过程^[14], 能够消除测试人员主观判断的影响, 通过测试数据(硬度、内聚性、弹性、咀嚼性等指标)客观的反映凝胶性质^[15]。TPA 测试指标包括硬度、内聚性、弹性、咀嚼性。其中硬度是第一次下压时达到的最大力, 常用于表示被压缩物品的坚实度; 内聚性是指探头抵抗第二次压缩的能力与抵抗第一次压缩能力的比例; 弹性是第一次压缩结束到第二次压缩时产品恢复的程度; 咀嚼性是指咀嚼食物至其可以吞咽的程度, 数值上等于硬度、内聚性、弹性的乘积^[16]。

表3是25个样品的质构测试结果, 从表中可以看出k-卡拉胶、魔芋胶、海藻酸钠添加量的改变, 会引起凝胶质构硬度、内聚性的显著变化, 其中硬度随胶

体添加量的增加均呈先增加后降低的趋势, 而内聚性随添加量的增加而增加。因为胶体结合的复杂性, 目前没有关于五元凝胶体系的研究, 因此后期需要深入研究各胶体之间的关联。混合凝胶的硬度随魔芋胶添加量增加而减小, 在 Jin 等^[17]的研究中发现魔芋胶含量的增加也会降低明胶凝胶强度和硬度, 与本文的结论基本一致。同时 Marta 等^[18]研究发现, 随着魔芋胶添加量的增加, 明胶-卡拉胶-魔芋胶三体系凝胶的韧性和咀嚼性降低。混合凝胶的内聚性显著增加, 因为魔芋胶吸水能形成高粘度凝胶^[19]。低酰结冷胶和刺槐豆胶添加量的改变对内聚性、弹性均没有显著性影响, 且随着两者添加量的增加, 内聚性、弹性基本保持不变。混合多糖凝胶的硬度随刺槐豆胶添加量的增加而降低, 可能是因为刺槐豆胶与卡拉胶结合形成了弹性键^[20], 导致凝胶的硬度下降。混合多糖凝胶的弹性随着结冷胶添加量的增加呈先降低后增加趋势, 这与 Huang 等^[21]的研究类似, 低浓度的结冷胶会降低混合凝胶的弹性, 高浓度的结冷胶会增加混合凝胶的弹性。

表3 不同混合凝胶样品的质构特性分析

Table 3 Texture properties analysis of different varieties of mixed hydrocolloids

编号	硬度	内聚性	弹性	咀嚼性
1	1 441.36±132.24 ^j	0.23±0.03 ^l	0.84±0.35 ^{cdef}	281.82±118.53 ^k
2	2 225.77±78.22 ^h	0.38±0.01 ^{ij}	1.08±0.11 ^{abcd}	912.64±109.56 ^{ij}
3	2 804.08±59.76 ^f	0.49±0 ^{cd}	1.12±0.18 ^{abc}	1 536.4±225.18 ^{cdef}
4	3 255.59±46.06 ^e	0.49±0.01 ^{cd}	0.88±0.02 ^{bcd}	1 421.07±29.94 ^{cdefg}
5	2 769.45±131.89 ^f	0.54±0.02 ^b	1.11±0.2 ^{abc}	1 682.62±379.63 ^{cde}
6	3 252.56±75.11 ^e	0.27±0.05 ^k	0.85±0.22 ^{cdef}	745.84±261.65 ^j
7	3 811.09±150.23 ^b	0.35±0.02 ^j	0.8±0.04 ^{def}	1 063.54±90.76 ^{ghij}
8	3 251.04±230.57 ^e	0.4±0.02 ^{hi}	0.58±0.01 ^g	748.73±35.77 ^j
9	2 282.47±175.79 ^{gh}	0.48±0.01 ^{de}	0.74±0.02 ^{ef}	806.77±88.78 ^j
10	2 515.56±229.82 ^g	0.52±0.03 ^{bc}	0.76±0.03 ^{ef}	1 003.68±72.73 ^{hij}
11	2 483.35±45.46 ^g	0.48±0.01 ^{de}	1.19±0.06 ^{ab}	1 403.27±80.84 ^{defgh}
12	3 527.25±88.05 ^{cd}	0.43±0.01 ^{gh}	1.08±0.25 ^{abcd}	1 628.31±362.63 ^{cdef}
13	4 413.39±119.71 ^a	0.44±0.01 ^{fgh}	0.84±0.07 ^{cdef}	1 620.87±156.27 ^{cdef}
14	3 323.28±237.26 ^{de}	0.48±0.02 ^{de}	1.00±0.19 ^{abcde}	1 587.40±253.73 ^{cdef}
15	3 627.37±195.18 ^{bc}	0.48±0.02 ^{de}	1.00±0.19 ^{abcde}	1 725.26±318.28 ^{bcd}
16	3 599.57±127.44 ^{bc}	0.44±0.02 ^{fg}	1.12±0.15 ^{abc}	1 757.54±230.08 ^{bcd}
17	3 790.40±164.98 ^b	0.45±0.02 ^{efg}	1.22±0.01 ^a	2 084.65±219.28 ^{ab}
18	2 848±184.13 ^f	0.47±0.01 ^{def}	1.21±0.00 ^a	1 631.05±66.91 ^{cdef}
19	2 900.59±122.93 ^f	0.49±0.00 ^{cd}	1.10±0.12 ^{abcd}	1 567.67±202.16 ^{cdef}
20	2 306.03±60.81 ^{gh}	0.48±0.01 ^{de}	1.11±0.20 ^{abc}	1 228.43±196.21 ^{fghi}
21	2 212.76±55.49 ^h	0.45±0.01 ^{efg}	1.10±0.18 ^{abcd}	1 090.44±189.12 ^{ghij}
22	3 136.77±83.68 ^e	0.43±0.02 ^{gh}	0.97±0.09 ^{abcde}	1 320.82±195.11 ^{efgh}
23	3 812.81±93.61 ^b	0.44±0.02 ^{efg}	1.08±0.25 ^{abcd}	1 838.45±485.97 ^{bc}
24	3 543.38±79.3 ^{cd}	0.54±0.01 ^b	1.22±0.01 ^a	2 336.88±119.15 ^a
25	1 800.39±102.2 ⁱ	0.68±0.00 ^a	1.11±0.09 ^{abc}	1 358.51±100.43 ^{defgh}

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。表4同。

2.2 不同食用混合多糖凝胶的感官评分分析

由表4知, 5种不同亲水胶体添加量的改变对凝胶的气味、组织形态均没有显著性影响, 说明气味和形态对凝胶的口感影响不大。在Liu等^[20]的研究中也表示, 食品胶类型对食品风味影响不大。凝胶的脆性、咀嚼性、弹性、总体可接受度随着k-卡拉胶和魔芋胶添加量的增加逐渐增加, 随低酰结冷胶、刺槐豆胶添加量的增加呈先增加后降低的趋势, 说明低酰结冷胶和刺槐豆胶添加量有极值限制, 添加过量会导致口感的劣变。其中低酰结冷胶、刺槐豆胶添加量的增加还会使凝胶的硬度呈先增加后降低的趋势, 而海藻酸钠添加量的增加使凝胶的硬度逐渐降低, 感官脆性和总体可接受度呈先增加后降低的趋势。Tom等^[22]

的研究中, 卡拉胶在冷却过程中会形成部分结晶凝胶, 魔芋胶和刺槐豆胶都能通过结合、交联的方式与卡拉胶双螺旋结构进行连接, 因此会形成弹性更强的三维网络结构。其中, 刺槐豆胶上与卡拉胶的结合位点较多, 即使卡拉胶与魔芋胶形成弹性结构, 刺槐豆胶也能和卡拉胶形成弹性键, 但当结合达到饱和时, 多余的刺槐豆胶仍然可以形成新的弹性键来增强凝胶的弹性, 与本文的结论不太一致, 可能是因为本文中添加的海藻酸钠和低酰结冷胶对混合凝胶造成了影响, 后期将继续研究。海藻酸钠与钙离子结合达到交联饱和点时, 凝胶网络中的网络链和结晶区会形成一种机械阻力, 因此混合凝胶的硬度随着海藻酸钠浓度的增加呈现先增加后降低, 可能是因为达到了交联饱和点^[23]。

表 4 不同混合凝胶样品的感官评价

Table 4 Sensory evaluation of different varieties of mixed hydrocolloids

样品	S 气味	S 组织形态	S 硬度	S 脆性	S 咀嚼性	S 弹性	S 总体可接受度
1	7.33±0.75 ^{ab}	9.33±2.29 ^c	6.17±2.27 ^c	6.33±3.40 ^d	7.67±3.68 ^e	7.33±3.35 ^e	7.33±3.59 ^d
2	8.00±0.58 ^{ab}	10.83±1.95 ^{abc}	9.5±2.43 ^b	9.17±3.2 ^c	10.50±2.75 ^{abcd}	9.50±2.43 ^{cde}	9.83±2.41 ^{abc}
3	7.67±1.11 ^{ab}	12.67±1.49 ^a	10.33±1.49 ^{ab}	11.33±1.37 ^{abc}	12.33±0.94 ^{ab}	11.33±0.75 ^{abc}	11.33±1.11 ^{abc}
4	8.50±0.76 ^a	11.33±2.75 ^{abc}	11.5±1.26 ^{ab}	11.33±0.94 ^{abc}	11.83±1.07 ^{ab}	12.33±1.11 ^{ab}	11.67±1.60 ^{ab}
5	8.00±0.58 ^{ab}	11.67±1.97 ^{abc}	10.5±0.96 ^{ab}	11.50±0.76 ^{abc}	12.00±1.15 ^{ab}	12.17±0.37 ^{ab}	11.83±0.69 ^{ab}
6	7.67±0.75 ^{ab}	11.33±1.60 ^{abc}	9.33±2.43 ^b	9.50±1.89 ^{bc}	8.50±1.26 ^{de}	8.33±1.60 ^{de}	8.83±2.19 ^{cd}
7	7.67±1.25 ^{ab}	11.33±1.80 ^{abc}	10.33±2.36 ^{ab}	10.17±1.77 ^{abc}	9.00±1.15 ^{cde}	8.67±1.37 ^{de}	9.50±1.38 ^{abcd}
8	7.67±1.11 ^{ab}	9.5±1.26 ^{bc}	9.83±2.27 ^b	10.17±2.67 ^{ab}	10.83±2.41 ^{abcd}	9.67±2.36 ^{bcd}	10.83±2.03 ^{abc}
9	7.33±0.47 ^{ab}	10.50±1.80 ^{abc}	11.17±2.41 ^{ab}	10.83±2.48 ^{abc}	10.50±2.81 ^{abcd}	10.17±1.86 ^{abcd}	11.33±1.37 ^{abc}
10	6.67±2.29 ^b	10.33±2.13 ^{abc}	9.50±2.22 ^b	10.00±2.45 ^{abc}	10.50±2.29 ^{abcd}	11.33±2.75 ^{abc}	11.67±1.11 ^{ab}
11	8.67±1.37 ^{ab}	9.83±2.34 ^{bc}	10.17±1.07 ^{ab}	10.67±1.37 ^{abc}	11.67±1.70 ^{bcd}	12.00±2.00 ^{cde}	11.17±1.21 ^{abc}
12	8.17±1.07 ^{ab}	12.33±1.80 ^{abc}	11.33±1.11 ^{ab}	12.33±0.94 ^{abc}	11.33±0.75 ^{abcd}	11.67±1.49 ^{bcd}	11.33±0.94 ^{abc}
13	8.17±0.90 ^{ab}	11.67±1.11 ^{abc}	12.33±0.75 ^{ab}	13.00±1.15 ^{ab}	12.83±1.07 ^{abcd}	12.17±1.07 ^{abcd}	12.50±1.12 ^{abc}
14	8.00±0.82 ^{ab}	12.00±1.15 ^{abc}	12.50±0.96 ^{ab}	12.67±0.75 ^a	13.17±0.37 ^{abcd}	12.50±1.26 ^{bcd}	13.00±0.82 ^{ab}
15	8.33±0.94 ^{ab}	10.33±0.94 ^{abc}	10.67±1.37 ^b	11.17±0.90 ^{abc}	11.67±1.37 ^{abcd}	11.67±0.75 ^{cde}	11.50±0.50 ^{abc}
16	8.67±0.47 ^a	10.67±1.97 ^{abc}	11.83±1.07 ^{ab}	11.83±1.07 ^{abc}	12.33±1.11 ^{ab}	12.67±0.94 ^a	12.17±0.69 ^a
17	7.67±1.49 ^{ab}	11.50±1.26 ^{abc}	11.83±0.69 ^{ab}	12.00±0.82 ^a	12.33±1.25 ^{ab}	12.33±0.94 ^{ab}	12.00±1.41 ^{ab}
18	7.50±0.50 ^{ab}	12.00±1.00 ^{abc}	13.00±1.00 ^a	11.83±0.69 ^{abc}	12.67±0.94 ^a	12.17±1.46 ^{ab}	12.00±0.82 ^{ab}
19	7.67±1.22 ^{ab}	11.33±1.50 ^{abc}	11.67±1.22 ^{ab}	11.67±1.22 ^{abc}	12.00±1.12 ^{ab}	11.50±0.71 ^{abc}	11.00±0.43 ^{abc}
20	7.33±1.09 ^{ab}	11.67±1.09 ^{abc}	11.17±2.06 ^b	11.67±2.06 ^{abc}	11.67±0.83 ^{abc}	11.67±1.48 ^{abc}	11.00±1.12 ^{ac}
21	7.83±0.90 ^{ab}	10.67±1.60 ^{abc}	11.17±1.57 ^{ab}	9.50±1.26 ^{bc}	12.33±1.49 ^{ab}	12.33±1.37 ^{ab}	10.67±1.80 ^{abc}
22	7.83±0.69 ^{ab}	10.33±1.49 ^{abc}	11.33±1.25 ^{ab}	10.50±1.12 ^{abc}	11.83±1.07 ^{ab}	11.50±1.12 ^{abc}	11.33±0.94 ^{abc}
23	8.17±0.90 ^{ab}	12.17±1.95 ^{ab}	11.5±1.50 ^{ab}	12.50±1.12 ^a	12.33±1.11 ^{ab}	10.83±0.69 ^{abcd}	11.83±0.90 ^{ab}
24	8.17±1.07 ^{ab}	12.00±1.83 ^{abc}	10.00±2.00 ^b	11.17±2.19 ^{abc}	11.00±2.24 ^{abcd}	9.67±2.81 ^{bcd}	10.00±2.00 ^{abc}
25	8.00±0.82 ^{ab}	9.83±1.46 ^{bc}	9.33±1.60 ^b	11.17±1.77 ^{abc}	10.83±2.11 ^{abcd}	10.33±2.21 ^{abcd}	9.33±2.36 ^{bcd}

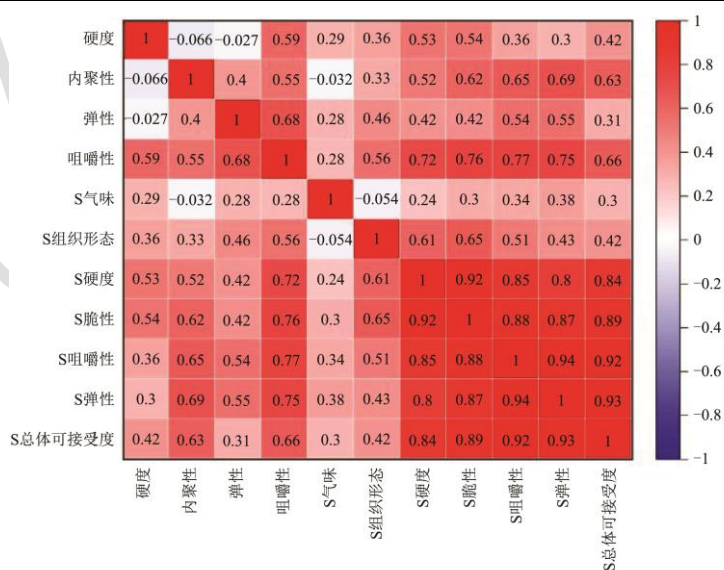


图 1 不同混合凝胶样品品质与感官之间的相关性热图

Fig.1 Correlation plot between quality and texture of different varieties of mixed hydrocolloids

注: S 是感官属性。

2.3 食用混合多糖凝胶质构指标与感官评分之间的相关性分析

相关性分析热图中根据颜色的深浅和数据的大小来判断指标之间的相关程度。以图 1 为例，红色越深，说明两指标之间的正相关性越强；蓝色越深，说明两指标之间的负相关性越强。方框中的数字为两指标之间的相关系数。

图 1 是不同亲水胶体添加量制成的 25 个凝胶样品质构和感官之间的皮尔逊相关性结果，由图 1 可知，感官硬度、脆性、咀嚼性、弹性、总体可接受度与质构内聚性、咀嚼性具有显著相关性。其中，质构硬度与感官硬度、脆性之间存在极显著相关($r=0.53、0.54, P<0.01$)，与总体可接受度之间存在显著相关($r=0.42, P<0.05$)；质构内聚性与感官硬度、脆性、咀嚼性、弹性、总体可接受度之间存在极显著相关($r=0.52、0.62、0.65、0.69、0.63, P<0.01$)；质构弹性与感官弹性、咀嚼性呈极显著相关($r=0.55、0.54, P<0.01$)，与感官组织形态、硬度、脆性呈显著相关($r=0.46、0.42、0.42, P<0.05$)；质构咀嚼性与感官组织形态、硬度、脆性、咀嚼性、弹性、总体可接受度之间存在极显著相关($r=0.56、0.72、0.76、0.77、0.75、0.66, P<0.01$)；其余指标之间的相关性不显著($P>0.05$)。通常二次压缩模式测定的食品质构指标与感官评定指标具有较显著的相关性^[24,25]，与本文研究结果相一致。

2.4 混合多糖凝胶感官评分指标的主成分分析

由图 1 发现，感官评价各指标之间存在较强的相关性，因此对感官评价指标进行主成分分析，利用降维的原理把原始数据中重叠的信息去掉，只留关键性的信息^[26]，表现为用几个综合的指标代替原指标，将感官评分简单化的同时还能够保留原有的趋势和变化规律^[27]。主成分分析通常是数据处理的初始步骤，为的是用一个多维的潜在主成分去解释原有变量的信息，其实是一种双线性的建模方式^[28]。其中靠前的主成分相继包含了原数据中的大部分信息，一般根据主成分载荷值分析样品之间的关系，从而解释样品的特点、相似度及差别等^[29]。

利用 SPSS 软件对 11 个质构特性和感官评分指标进行主成分分析，以得到影响混合凝胶品质评价的主要因素。表 5 为主成分的初始值、方差贡献率以及累

计方差贡献率。由表 5 知，第一主成分、第二主成分和第三主成分的初始特征值均大于 1，分别为 6.651、1.33、1.088，方差贡献率分别为 60.46%、12.09%、9.89%，累计方差贡献率为 82.45%，说明前三个主成分能够在保留原始数据 82.45% 的信息，因此提取前 3 个成分作为主成分对多糖凝胶进行综合评价。

表 5 主成分的初始特征值、方差贡献率和累计方差贡献率

Table 5 Initial eigenvalues, contribution rates of variance and cumulative contribution rates of variance of principal components

主成分	初始特征值		
	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	6.651	60.46	60.46
2	1.330	12.09	72.55
3	1.088	9.89	82.45
4	0.945	8.59	91.03
5	0.442	4.02	95.05
6	0.267	2.43	97.48
7	0.145	1.32	98.79
8	0.058	0.53	99.32
9	0.037	0.34	99.65
10	0.025	0.22	99.88
11	0.013	0.12	100.00

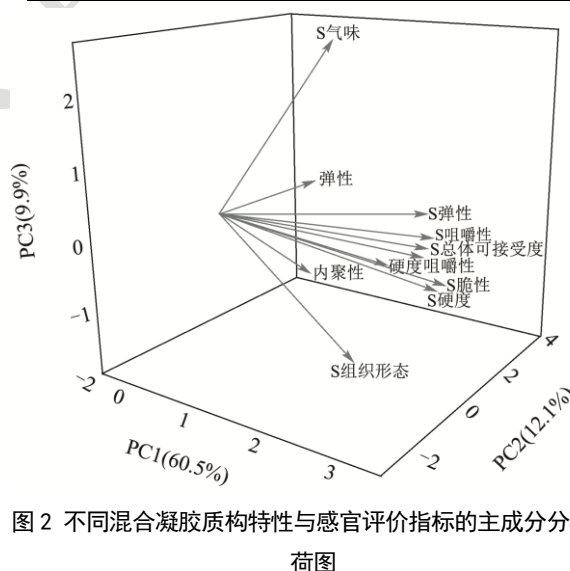


图 2 不同混合凝胶质构特性与感官评价指标的主成分分析载荷图

Fig.2 Loading plot between quality and texture of different varieties of mixed hydrocolloids

图 2 为混合凝胶质构特性与感官评价指标的主成分分析载荷图，X 轴为方差贡献率最大的主成分 1(PC1)，Y 轴为方差贡献率第二大的主成分 2(PC2)，Z 轴为方差贡献率第三大的主成分 3(PC3)。其中射线

的箭头终点代表各自变量在三维空间的投影；射线的箭头终点与原点的距离越远表示该变量被主成分 1、2、3 解释的程度越高^[24]，每个指标在空间位置对应的坐标值表示该指标被相应主成分所解释的程度。三维载荷图中变量在某一主成分上的系数绝对值越大，表明变量对主成分之间的贡献越大^[30]。

由图 2 知，对混合凝胶评价指标分析得到三个主成分，且累计方差贡献率达到 82.45%的。其中主成分 1 与 8 个指标均呈正相关关系，包括感官脆性、感官咀嚼性、感官弹性、感官硬度、感官总体可接受度、质构咀嚼性、质构内聚性、感官组织形态，说明以上指标均能够较好被主成分 1 解释。主成分 2 与质构硬度呈正相关关系，与质构内聚性呈负相关关系，其中质构硬度能够较好的被主成分 2 解释，而质构内聚性不能被主成分 2 较好的解释，因为质构内聚性被主成分 1 解释的程度高。主成分 3 中只与感官气味呈正相关关系。

表 6 为主成分在各感官指标上的因子载荷矩阵表，表示各个感官指标对两个主成分的贡献率。在每个主成分中，载荷值越大说明此指标的贡献率越大^[31]。由表知，主成分 1 中感官脆性、感官咀嚼性、感官弹性、感官硬度、感官总体可接受度、质构咀嚼性、质构内聚性、感官组织形态、质构弹性的载荷值较大，分别为 0.956、0.950、0.935、0.911、0.905、0.870、0.67、0.633、0.589，说明主成分 1 中这些指标的贡献率大；主成分 2 中质构硬度的载荷值最大，为 0.778，说明主成分 2 中质构硬度的贡献率最大；主成分 3 中感官气味的载荷值为 0.753，说明感官气味对主成分 3 的贡献率最大。

根据各指标在三个主成分中的载荷量，计算每个指标在不同主成分上的系数，各指标的线性组合系数是用不同指标的各主成分特征向量除以该主成分特征值的算数平方根得到，表 7 为各凝胶评价指标在三个主成分中的系数。具体主成分函数表达式如下：

$$F1=0.19X_1+0.26X_2+0.32X_3+0.34X_4+0.13X_5+0.25X_6+0.35X_7+0.37X_8+0.37X_9+0.36X_{10}+0.35X_{11}$$

$$F2=0.68X_1-0.5X_2-0.3X_3+0.06X_4+0.41X_5-0.04X_6+0.1X_7+0.07X_8-0.07X_9-0.1X_{10}+0.02X_{11}$$

$$F3=-0.027X_1+0.29X_3-0.02X_4+0.72X_5-0.49X_6-0.15X_7-0.12X_8+0.1X_9+0.19X_{10}+0.03X_{11}$$

其中，主成分 1、主成分 2、主成分 3 分别记为 $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 。根据主成分的方差贡献率，建立混合

凝胶的一个综合评价模型： $F=0.733F1+0.147F2+0.12F3$ ， F 为综合评价因子，即 $F=0.236X_1+0.117X_2+0.225X_3+0.256X_4+0.242X_5+0.119X_6+0.253X_7+0.267X_8+0.273X_9+0.272X_{10}+0.263X_{11}$ 。

表 6 主成分在各指标上的因子载荷矩阵

Table 6 Factor load matrix of principal component on each

指标	index		
	PC1	PC2	PC3
S 脆性	0.956	0.084	-0.121
S 咀嚼性	0.950	-0.075	0.102
S 弹性	0.935	-0.119	0.199
S 硬度	0.911	0.111	-0.161
S 总体可接受度	0.905	0.018	0.031
咀嚼性	0.870	0.069	-0.022
内聚性	0.670	-0.579	-0.003
S 组织形态	0.633	-0.048	-0.509
弹性	0.589	-0.341	0.298
硬度	0.490	0.778	-0.285
S 气味	0.344	0.475	0.753

表 7 主成分特征向量

Table 7 Eigenvectors for principal components

变量	指标	主成分		
		1	2	3
X_1	硬度	0.19	0.68	-0.27
X_2	内聚性	0.26	-0.50	-0.00
X_3	弹性	0.23	-0.30	0.29
X_4	咀嚼性	0.34	0.06	-0.02
X_5	S 气味	0.13	0.41	0.72
X_6	S 组织形态	0.25	-0.04	-0.49
X_7	S 硬度	0.35	0.10	-0.15
X_8	S 脆性	0.37	0.07	-0.12
X_9	S 咀嚼性	0.37	-0.07	0.10
X_{10}	S 弹性	0.36	-0.10	0.19
X_{11}	S 总体可接受度	0.35	0.02	0.03

由表 8 知，综合得分前三的分别是 J3、H4、C2，综合得分分别是 1 476.17、1 452.51、1 447.05，说明由这三种配方制得的混合多糖凝胶更受感官评价人员的欢迎；相反，K1 综合得分排名最靠后，分值为 424.56，说明这种配方制成的混合多糖凝胶品质最差。因为 K1 配方中不含有 k -卡拉胶，制成的混合多糖凝胶难以成型，只能形成糊状物，导致凝胶没有食品的质地口感。

表 8 不同混合凝胶样品综合得分

Table 8 Comprehensive evaluation score of different varieties of mixed hydrocolloids

编号	凝胶样品	主成分 1 (F1)	主成分 2 (F2)	主成分 3 (F3)	综合评价因子 (F)	综合排名
1	K1	385.84	999.24	-42.91	424.56	25
2	K2	754.85	1 570.72	-76.96	774.97	23
3	K3	1 080.22	2 001.07	-105.98	1 073.24	15
4	K4	1 127.19	2 301.70	-114.71	1 150.82	10
5	K5	1 123.63	1 986.43	-107.15	1 102.77	13
6	M1	891.76	2 259.14	-102.36	973.47	17
7	M2	1 107.04	2 658.07	-123.91	1 187.33	9
8	M3	894.36	2 258.20	-101.16	975.38	16
9	M4	731.34	1 602.96	-77.07	762.46	24
10	M5	842.07	1 772.65	-87.11	867.37	20
11	J1	973.10	1 775.41	-92.37	963.18	18
12	J2	1 249.29	2 498.82	-127.14	1 267.80	7
13	J3	1 416.63	3 101.05	-150.61	1 476.17	1
14	J4	1 198.62	2 357.57	-120.62	1 210.67	8
15	J5	1 300.32	2 572.69	-130.43	1 315.67	6
16	C1	1 307.65	2 555.86	-130.19	1 318.60	5
17	C2	1 455.12	2 704.82	-143.07	1 447.05	3
18	C3	1 122.36	2 036.76	-109.08	1 109.00	11
19	C4	1 109.26	2 068.79	-108.82	1 104.14	12
20	C5	880.76	1 643.95	-86.31	876.90	19
21	H1	817.34	1 572.80	-79.41	820.78	21
22	H2	1 071.14	2 214.60	-110.22	1 097.47	14
23	H3	1 376.14	2 705.33	-139.31	1 389.68	4
24	H4	1 492.98	2 551.98	-141.52	1 452.51	2
25	H5	828.97	1 307.81	-75.26	790.85	22

3 结论

本文选取 5 种亲水胶体制作 25 种混合多糖凝胶, 对其质构特性和感官评价指标进行测定和相关性分析, 结果发现质构硬度与感官评价指标之间具有显著相关性。将 4 个质构特性指标与 7 个感官评定指标进行主成分分析得到 3 个综合评价指标, 累计方差贡献率达到 82.45%。根据方差贡献率处理后得到混合凝胶的综合评价模型为 $F=0.236X_1+0.117X_2+0.225X_3+0.256X_4+0.242X_5+0.119X_6+0.253X_7+0.267X_8+0.273X_9+0.272X_{10}+0.263X_{11}$ (其中 $X_1\sim X_{11}$ 分别为质构硬度、内聚性、弹性、咀嚼性和感官气味、组织状态、硬度、脆性、咀嚼性、弹性、总体可接受度), 对每个凝胶样品的综合评价指标计算比较发现 J3 号凝胶样品的综合评分最高, 其亲水胶体的配方为 *k*-卡拉胶 0.8%、魔芋胶 1.2%、低酰结冷胶 0.4%、刺槐豆胶 0.6%、海藻酸钠 0.4% 时, 综合评价得分最高为 1 476.17, 而当混

合凝胶中不添加 *k*-卡拉胶时, 综合评分最低为 424.56。

参考文献

- [1] 孙蓬.亲水胶体-红薯淀粉复合物的流变特性及其应用研究[D].烟台:烟台大学,2021.
- [2] Kumar Nishant, Neera J. Polysaccharide-based component and their relevance in edible film/coating: a review [J]. Nutrition and Food Science, 2019, 49(5): 793-823.
- [3] 杜徐楠.*k*-卡拉胶/刺槐豆胶混合凝胶的协同作用机理及应用[D].武汉:湖北工业大学,2020.
- [4] Xiong Y, Noel D C, Moody W G. Textural and sensory properties of low-fat beef sausages with added water and polysaccharide -s as affected by pH and salt [J]. Journal of Food Science, 1999, 64(3): 550-554.
- [5] Karim A A, Bhat Rajeev. Fish gelatin: properties, challenges, and prospects as an alternative to mammalian gelatins [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(3): 563-576.

- [6] 祝竞芳, 聂曼曼, 陈洁, 等. 卡拉胶与亚麻籽胶复配在枸杞果冻中的应用研究[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(7): 162-167.
- [7] 王艳, 王睿, 张艳艳, 等. 基于主成分分析和模糊数学构建亲水胶体影响汤圆品质的综合评价模型[J]. 食品科学, 2021: 1-13.
- [8] 林致通, 张东霞, 雷雯, 等. 基于模糊数学与感官质构分析建立鲜凉皮食用品质评价标准[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 225-233.
- [9] Jung D S, Bae I Y, Oh I K, et al. Classification of hydrocolloids based on in vitro starch digestibility and rheological properties of segoami gel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 104(Pt A): 442-448.
- [10] Dogan M, Goksel Sarac M, Toker O S. Investigation of rheological synergistic interactions between hydrocolloids and starch in milky cacao beverages model: principal component analyses [J]. European Food Research & Technology, 2016, 243(6): 1031-1039.
- [11] Naghavi E, Dehghannya J, Ghanbarzadeh B. Effect of hydrocolloid type on transfer phenomena during deep-fat frying of coated potato strips: Numerical modeling and experimental analysis [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 382-399.
- [12] 姚焯. 模拟脂肪丁制备和评价体系建立及其在红肠中应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016.
- [13] 李晓, 陈科冰, 韩明, 等. 质构仪在烟叶力学特性检测中的应用进展[J]. 轻工学报, 2021, 36(3): 63-69.
- [14] 周慧宁, 田玉潭, 李海峰. 不同热处理方式对燕麦粉体特性和面团流变特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(20): 90-96.
- [15] 孙彩玲, 田纪春, 张永祥. TPA 质构分析模式在食品研究中的应用[J]. 实验科学与技术, 2007, 2: 1-4.
- [16] 徐渊, 韩敏义, 陈艳萍, 等. 三个品种白切鸡食用品质评价[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 89-95.
- [17] JIN Weiping, XU Wei, GE Honghe, et al. Coupling process of phase separation and gelation in konjac glucomannan and gelatin system [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 188-192.
- [18] CHENG Zihang, ZHANG Binjia, QIAO Dongling, et al. Addition of κ -carrageenan increases the strength and chewiness of gelatin-based composite gel [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 128.
- [19] ZHANG Chang, YANG Xiaoshuang, HU Wanqing, et al. Preparation and characterization of carboxymethyl chitosan/collagen peptide/oxidized konjac composite hydrogel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 31-40.
- [20] LIU Jing, Pedersen Heidi Liva, Lisbeth Knarreborg, et al. Stabilization of directly acidified protein drinks by single and mixed hydrocolloids-combining particle size, rheology, tribology, and sensory data [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(12): 6433-6444.
- [21] HUANG Min, Kennedy J F, Li B, et al. Characters of rice starch gel modified by gellan, carrageenan, and glucomannan: a texture profile analysis study [J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 69(3): 411-418.
- [22] Tom Brenner, WANG Zheng, Piyada Achayuthakan, et al. Rheology and synergy of kappa-carrageenan/locust bean gum/konjac glucomannan gels [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 98(1): 754-760.
- [23] Md Nazmus Saqib, LIU Fei, CHEN Maoshen, et al. Thermo-mechanical response of liquid-core beads as affected by alginate molecular structure [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107777.
- [24] 李树长, 艾民珉, 龙姣丽, 等. 潮汕脆性肉丸的感官评定与质构评价相关性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 62-70.
- [25] 殷俊, 梅灿辉, 陈斌, 等. 肉丸品质的质构与感官分析[J]. 现代食品科技, 2011, 27(1): 50-55.
- [26] 王兴波, 饶雷, 王永涛, 等. 3 个品种干辣椒的品质分析及评价[J]. 食品工业科技, 2022: 1-17.
- [27] 郑美玲, 刘前进, 杨金初, 等. 基于主成分分析与聚类分析综合评价不同甘薯浸膏的香气品质[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(3): 196-206.
- [28] 王丽, 罗红霞, 李淑荣, 等. 不同品种马铃薯全粉面条品质特性及主成分分析[J]. 现代食品科技, 2018, 34(1): 111-118.
- [29] 林海明, 杜子芳. 主成分分析综合评价应该注意的问题[J]. 统计研究, 2013, 30(8): 25-31.
- [30] 张梦潇, 周文化, 周虹, 等. 不同品种紫薯营养主成分及聚类分析[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(1): 19-25.
- [31] Wold Svante, Kim Esbensen, Paul Geladi. Principal component analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1987, 2(1-3): 37-52.