

不同淀粉对魔芋葡聚糖凝胶特性的影响及复合凝胶的制备

齐慧^{1†}, 易春兰^{1†}, 白菊红¹,
朱安妮^{1,2*}, 孙玉侠^{1,2}, 黄国保², 刘亮^{3*}

¹成都农业科技职业学院, 成都 611130; ²广西农产资源化学与生物技术重点实验室/玉林师范学院化学与食品科学学院, 玉林 537000; ³川北医学院, 南充 637100

摘要:为探究不同淀粉及添加量对魔芋葡聚糖(konjac glucomannan, KGM)凝胶特性的影响,本研究选取了豌豆淀粉、红薯淀粉、玉米淀粉、土豆淀粉、木薯淀粉五种淀粉制备KGM/淀粉复合凝胶,通过质构仪、色差仪、感官评定、冷场扫描电镜分析其凝胶特性的变化,采用正交试验和综合评分设计优化KGM/淀粉复合凝胶配方。结果表明,这五种淀粉均能改善KGM凝胶感官性质、质构特性,提高凝胶强度和持水性(water-holding capacity, WHC),但不同淀粉间存在差异;通过优化配方,确定KGM/淀粉复合凝胶最佳配比为玉米淀粉添加量0.5%、豌豆淀粉添加量1.5%、土豆淀粉添加量1.5%,此条件制备的KGM/淀粉复合凝胶的持水率、凝胶强度、质构特性及色泽均良好,感官评分最高。通过扫描电子显微镜观察优化后的KGM/淀粉复合凝胶,三维结构更紧密,孔径更均匀,结构更稳定。因此,添加适量淀粉制备复合魔芋葡聚糖凝胶在一定程度上能够改善纯KGM凝胶现存的不足,可为其在魔芋凝胶食品的应用提供参考。

关键词:魔芋葡聚糖;不同淀粉;正交试验;凝胶特性

中图分类号:TS213

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2024)12-2074-14

DOI:10.16333/j.1001-6880.2024.12.009

Effect of different starches on konjac glucomannan gel properties and preparation of composite gel

QI Hui^{1†}, YI Chun-lan^{1†}, BAI Ju-hong¹,
ZHU An-ni^{1,2*}, SUN Yu-xia^{1,2}, HUANG Guo-bao², LIU Liang³

¹Chengdu Agricultural College, Chengdu 611130, China;

²Guangxi Key Laboratory of Agricultural Resources Chemistry and Biotechnology, College of Chemistry and Food Science, Yulin Normal University, Yulin 537000, China; ³North Sichuan Medical College, Nanchong 637100, China

Abstract:To investigate the effects of different starches and their additions on the properties of konjac glucomannan (KGM) gel, five kinds of starch (pea starch, sweet potato starch, corn starch, potato starch, and cassava starch) were selected to prepare KGM/starch composite gels in this study. The changes of their properties were analyzed by texture meter, color difference meter, sensory evaluation and cold field scanning electron microscope. The formula of KGM/starch composite gels was optimized by orthogonal test and comprehensive score design. The results showed that these five kinds of starches could significantly improve the sensory properties, texture properties, strength and water-holding capacity (WHC) of KGM gel, but there were differences among different starches. By optimizing the formula, the optimal ratio of KGM/starch composite gel was determined to be 0.5% of corn starch, 1.5% of pea starch, and 1.5% of potato starch which this condition water holding capacity, gel strength, texture characteristics and color of the KGM/starch composite gel prepared were on good form with the highest sensory score. The three-dimensional structure was more compact, the pore diameter was more uniform, and the structure was

收稿日期:2024-05-17

接受日期:2024-09-02

基金项目:成都市科技局项目(2022-YF05-00917-SN);广西农产资源化学与生物技术重点实验室开放基金(2021KF09);成都农业科技职业学院校级基金(23ZD001);川北医学院2024年本科教学工程项目(101/1017202418)

† 共同第一作者

* 通信作者 E-mail:zhuanni0421@163.com, liuliang@nsmc.edu.cn

more stable of the optimized KGM/starch composite gel observed by scanning electron microscope. Therefore, the existing shortcomings of pure KGM gel to a certain extent can be improved by adding appropriate amount of starch to prepare compound konjac glucomannan gel, which can provide a reference for its application in konjac gel food.

Key words: konjac glucomannan; different starches; orthogonal experiment; gel properties

魔芋是天南星科魔芋属 (*Amorphophallus*) 单子叶多年生植物,其葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)含量丰富,是制备休闲食品凝胶类素食最常用的基材之一^[1]。魔芋葡甘聚糖作为一种非离子水胶体的膳食纤维,因具有良好的加工性能与减肥、降脂、降糖、抗肿瘤、益生元活性等特殊功效^[2],受到国内外研究学者青睐,被广泛应用于保健食品、食品添加剂和食品保鲜剂等^[1]加工领域中,具有较大的研究价值。

现有研究表明,KGM在不同条件作用下会形成热可逆和热不可逆两种凝胶结构,热不可逆凝胶结构是KGM在碱性加热条件下脱除乙酰基,通过分子间的氢键作用形成的三维网络结构^[3],其热稳定性好,但在冷冻过程中形成的冰晶易破坏网状结构,导致解冻过程中高度脱水收缩,严重影响产品感官性状;同时单一魔芋葡甘聚糖分子因相互作用力不强,形成的三维网状结构对水的束缚力较弱,导致纯KGM凝胶出现持水性低、弹性较低、硬度小、易塌陷、凝胶强度和稳定性较弱等问题^[4]。因此,改善KGM凝胶特性是近年来魔芋凝胶研究的热点。Xu^[5]发现不同木薯淀粉均可以提高冻融KGM凝胶的热稳定性和抗脱水收缩能力,且使用木薯乙酰化二淀粉磷酸酯淀粉制备的KGM复合凝胶热稳定性以及抗脱水收缩能力最佳。Dai等^[6]制备了KGM/k-卡拉胶凝胶,发现加入改性玉米淀粉可以填充凝胶的网络结构。Li等^[7]研究绿豆淀粉、玉米淀粉和甘薯淀粉对KGM凝胶特性影响,结果表明三种淀粉均有利于提高KGM凝胶强度、持水性与粘度。由此可见,KGM与各种植物淀粉协同作用可以显著提升成品的凝胶特性^[8]。综上所述,本研究以不同种类淀粉及添加量为因素,深入探究KGM凝胶的品质特点,并利用无量纲化多指标正交试验设计优化KGM/淀粉复合凝胶配比,为魔芋食品产业提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

土豆淀粉(食用级,批号:2023101412,上海枫未实业有限公司);魔芋粉(特级粉,批号:20231013,

云南朝升农业发展有限公司);玉米淀粉(食用级,批号:20231101,北京吉得利有限公司);红薯淀粉(食用级,批号:20230905,成都达恒毛实业有限公司);豌豆淀粉(食用级,批号:20230818203,新乡良润全谷物有限公司);木薯淀粉(食用级,批号:20231211,南京甘汁园有限公司);食用碱(食用级,批号:20231211,云南朝升农业发展有限公司)。

1.2 仪器与设备

AL104型精密电子天平(上海梅特勒一托利多仪器设备有限公司);DW-86L626超低温冰箱(青岛海尔生物医疗股份有限公司);LC-MSA-HD磁力搅拌器(上海力辰仪器科技有限公司);Rapid TA+质构仪(上海腾拔科技有限公司);L2-4K台式低速离心机(湖南可成仪器设备有限公司);CM-5色差仪(柯尼卡美能达公司);Smart Coater离子溅射仪(日本电子公司JEOL);JSM-IT700HR扫描电子显微镜(日本电子公司JEOL)。

1.3 方法

1.3.1 制备KGM/淀粉复合凝胶的工艺流程

参考Shang^[9]的方法并稍作修改,称取2g的魔芋粉在70℃的55g去离子水中溶胀,同时称取一定量的淀粉在35g去离子水中,于80℃水浴糊化,两者充分搅拌混匀,再加入10g2%的食用碱水溶液,在磁力搅拌器上以500r/min的转速搅拌5min,倒入模具中蒸煮30min形成凝胶,待KGM/淀粉复合凝胶冷却至室温后,将其置于-80℃超低温冰箱速冻12h,随后于25℃室温下解冻6h,即制得经冻融处理的KGM/淀粉复合凝胶成品。

1.3.2 全质构分析及凝胶强度的测定

参考He等^[10]的方法并稍作修改,成品凝胶置于室温平衡30min。全质构分析条件:采用SMS P/36R探头测定,测前速度和测试后速度均为1mm/s,测试速度为2mm/s,形变程度50%,触发力5g,不同淀粉种类及添加量的试样均做3次平行,测定KGM/淀粉复合凝胶的硬度、咀嚼性、弹性、回复性、胶着性、黏聚性、粘性指标。

凝胶强度测定条件:采用P/5柱形探头,测前速度、测试速度和测试后速度均为1mm/s,形变程

度 70%, 停留时间 3 s, 触发力 8 g, 不同淀粉种类及添加量的试样均做 3 次平行, 取平均值。

1.3.3 持水率的测定

参考 Zhang 等^[11]将冻融处理后的魔芋复合凝胶的质量(a)与在 4 000 r/min 离心 25 min 后的魔芋淀粉凝胶的质量(b), 按照(1)式进行计算持水率(k), 不同淀粉种类及添加量的试样均做 3 次平行。

$$k = \frac{b}{a} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.4 色泽测定

参考 He 等^[10]的方法。色差仪经校正后对样品进行测定, 用 L 、 a^* 、 b^* 空间法表示色泽, 其中 L 值代表亮度, 数值越大亮度越高。 a^* 值代表红绿, 数

值越大颜色偏红, b^* 值代表蓝, 数值越大颜色偏黄。样品白度值(W)按公式(2)计算。

$$W = 100 - \sqrt{(100-L)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

1.3.5 感官分析

KGM 凝胶感官定量描述性分析参考 Lin 等^[12]方法并稍作修改。按照《感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则第 1 部分: 优选评价员》^[13] 选评 8 人构成的感官评定小组, 按照表 1 对样品分别从色泽、口感、外观形态、韧性、总体可接受程度五个方面对产品进行感官评分, 评定结果取 8 人的算术平均值。

表 1 KGM 凝胶感官评定标准
Table 1 Criteria for sensory evaluation of KGM gels

项目 Project	评定标准 Evaluation criterion	分值 Score
色泽 Color	凝胶颜色灰白, 色泽明亮	5
	凝胶颜色较灰白, 色泽较明亮	4
	凝胶颜色灰白偏黄, 色泽一般	3
	凝胶颜色偏黄, 色泽较暗淡	2
	凝胶颜色黄, 色泽暗淡	1
口感 Taste	口感爽脆	5
	口感较爽脆	4
	口感一般	3
	口感较绵密	2
	口感绵密	1
外观形态 Appearance	凝胶没有软化, 结构紧实, 手感光滑	5
	凝胶没有软化, 结构紧实, 手感一般	4
	凝胶没有软化, 结构一般, 手感一般	3
	凝胶软化, 结构较紧实, 手感较粗糙	2
	凝胶软化, 结构不紧实, 手感粗糙	1
韧性 Resilience	产品在受到咀嚼时, 咀嚼性和弹性好	5
	产品在受到咀嚼时, 咀嚼性良好, 弹性较好	4
	产品在受到咀嚼时, 咀嚼性良好, 弹性一般	3
	产品在受到咀嚼时, 嚼劲和弹性较差	2
	产品在受到咀嚼时, 嚼劲和弹性差	1
总体可接受度 Overall acceptability	满意	5
	可以接受	4
	勉强接受	3
	不能接受	2
	完全不能接受	1

1.3.6 KGM 凝胶微观形貌观察

参考 Zhu 等^[14]方法加以改动,称取 4.00 mg 冻干 KGM 凝胶样品,放置扫描电镜样品盘上,并放入离子溅射仪进行喷金处理,最大加速电压 10.0 kV,通过电镜扫描放大 500 倍,观察 KGM 凝胶表面形貌。

1.3.7 复合凝胶制备工艺试验设计

1.3.7.1 单因素试验

以物性特性、色泽、感官评价、持水率为评定指标,研究表 2 中不同淀粉种类及添加量对 KGM 凝胶物性、色差、凝胶强度等影响,并以淀粉 0 添加作为空白对照组。

表 2 不同淀粉种类及添加量

Table 2 Different types of starch and addition amounts of starch

淀粉种类 Starch type	淀粉添加量 Starch addition amount(%)						
豌豆淀粉 Pea starch(S1)	0	1	2	3	4	5	
红薯淀粉 Sweet potato starch(S2)	0	1	2	3	4	5	
玉米淀粉 Corn starch(S3)	0	1	2	3	4	5	
土豆淀粉 Potato starch(S4)	0	1	2	3	4	5	
木薯淀粉 Cassava starch(S5)	0	1	2	3	4	5	

1.3.7.2 正交试验设计

在单因素基础上,以物性特性、色泽、持水率、感官评分等指标为依据,筛选出三种淀粉及最佳添加

浓度,设计 3 因素 3 水平正交试验(如表 3),通过综合评分(Y)确定复合凝胶最佳工艺参数。

表 3 复合凝胶 $L_9(3^3)$ 正交试验表

Table 3 Composite gel used for $L_9(3^3)$ orthogonal array design

水平 Level	因素 Factor		
	A 玉米淀粉添加量 Corn starch addition(%)	B 豌豆淀粉添加量 Pea starch addition(%)	C 土豆淀粉添加量 Potato starch addition(%)
1	0.5	0.5	0.5
2	1	1	1
3	1.5	1.5	1.5

1.3.8 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2019 软件和 IBM SPSS Statistics 26 进行数据处理,其中多重比较采用 Duncan 法进行显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著;主成分分析法采用 Kaider-Meyer-Olkin(KMO)统计量,巴特利特(Barlett's)球形检验,评价指标是否适用于因子分析(KMO 值 > 0.6 ,且 Barlett's 球形检验 $P < 0.05$ 为适用)^[15]。每个样品做 3 个平行,结果以平均值 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 不同淀粉种类及添加量对 KGM 凝胶质构特

现有研究表明,淀粉填充在 KGM 凝胶三维网络结构中,可使分子间作用力增强,从而增大凝胶的

硬度、弹性等质构指标,使 KGM 凝胶结构更稳定^[16]。因此,在一定范围内,凝胶硬度、弹性、回复性等质构指标越大,凝胶品质越优^[17]。由表 4 可知,在相同添加量下,不同淀粉种类对 KGM 凝胶硬度、咀嚼性、胶着性、粘性的影响差异显著,但对 KGM 凝胶的弹性、黏聚性影响较小,这一研究结果与 Xu^[5]研究一致。而对比 KGM 凝胶回复性指标发现,在相同添加量条件下,豌豆淀粉、红薯淀粉、玉米淀粉对 KGM 凝胶回复性影响显著,土豆淀粉和木薯淀粉影响不显著。

同一种类不同添加量的淀粉对 KGM 凝胶质构指标影响差异显著,其中 KGM/豌豆淀粉复合凝胶的硬度、咀嚼性、胶着性显著提升,均高于其他淀粉复合凝胶;不同添加量的土豆淀粉对 KGM 凝胶硬

度影响较小,这与 Wu^[18]的研究结果一致,相较于其他种类淀粉,豌豆淀粉中直链淀粉占比高,直链淀粉在水中加热糊化后不稳定,会迅速老化形成质地硬凝胶体^[18],有助于淀粉形成三维立体网状结构,增强了淀粉制品的凝胶强度、硬度、胶着性和咀嚼性^[19],而土豆淀粉中支链淀粉含量多,淀粉颗粒较大,受热过程中因内部张力增大,导致溶解度及膨胀度变大,从而撑大了 KGM 凝胶三维结构的空隙,导

致结合的水分容易流失^[20],影响产品硬度。由此说明直链淀粉有助于增强 KGM 凝胶特性,而支链淀粉对 KGM 凝胶硬度影响较大^[19]。不同添加量的豌豆淀粉、红薯淀粉、木薯淀粉、土豆淀粉对 KGM 凝胶弹性影响显著,而不同玉米淀粉对 KGM 凝胶弹性影响不显著。综上所述,豌豆淀粉对 KGM 凝胶质构特性的提升效果最为明显。

表 4 不同淀粉种类及添加量对 KGM 凝胶质构特性的影响($\bar{x} \pm s, n=3$)

Table 4 Effects of different types of starch and addition amounts on characteristics of KGM gels($\bar{x} \pm s, n=3$)

淀粉种类 Starch type	添加量 Addition amount(%)	硬度 Durometer(gf)	弹性 Resilient(mm)	咀嚼性 Chewiness(gf)	回复性 Resilience	胶着性 Gumminess(gf)	黏聚性 Cohesive	粘性 Viscosity(gf·s)	
S1	0	376.10 ± 90.53 ^{Ad}	0.76 ± 0.03 ^{Ac}	237.66 ± 69.80 ^{Ad}	0.61 ± 0.02 ^{Ad}	312.90 ± 80.20 ^{Ad}	0.83 ± 0.01 ^{Aa}	-15.469 ± 1.18 ^{Aa}	
		776.96 ± 40.67 ^{Ad}	0.82 ± 0.03 ^{Bb}	542.71 ± 51.73 ^{Ad}	0.67 ± 0.00 ^{Dcd}	663.56 ± 43.11 ^{Accl}	0.85 ± 0.01 ^{Ba}	-17.4195 ± 1.76 ^{Aa}	
	1	2342.39 ± 264.18 ^{Ac}	0.91 ± 0.02 ^{Aa}	1821.68 ± 260.28 ^{Ac}	0.80 ± 0.00 ^{Ba}	2010.79 ± 249.85 ^{Aa}	0.86 ± 0.00 ^{Ba}	-10.3935 ± 0.72 ^{Aa}	
		3454.45 ± 481.67 ^{Ab}	0.92 ± 0.01 ^{Aa}	2745.35 ± 394.55 ^{Ab}	0.78 ± 0.01 ^{Ab}	2987.62 ± 409.51 ^{Ab}	0.87 ± 0.00 ^{Aa}	-9.682 ± 1.92 ^{Aa}	
	2	5119.91 ± 227.04 ^{Aa}	0.89 ± 0.02 ^{Aa}	3801.42 ± 152.72 ^{Aa}	0.75 ± 0.01 ^{ABbc}	4248.57 ± 59.36 ^{Abc}	0.83 ± 0.01 ^{Ba}	-16.331 ± 0.40 ^{Aa}	
		5115.41 ± 135.80 ^{Aa}	0.87 ± 0.04 ^{ABab}	3614.42 ± 363.52 ^{Aa}	0.71 ± 0.07 ^{ABab}	4136.03 ± 248.03 ^{Abc}	0.81 ± 0.04 ^{Aa}	-8.4535 ± 0.29 ^{Bb}	
	S2	0	376.10 ± 90.53 ^{Ae}	0.76 ± 0.03 ^{Ac}	237.66 ± 69.80 ^{Ac}	0.61 ± 0.02 ^{Ac}	312.90 ± 80.20 ^{Ac}	0.83 ± 0.01 ^{Ab}	-15.469 ± 1.18 ^{Aa}
			641.43 ± 13.09 ^{Bd}	0.88 ± 0.01 ^{Ab}	518.23 ± 20.91 ^{Ab}	0.79 ± 0.02 ^{BCa}	587.12 ± 15.55 ^{Aa}	0.92 ± 0.01 ^{Aa}	-9.788 ± 1.91 ^{Bb}
		1	759.46 ± 39.26 ^{Bcd}	0.89 ± 0.02 ^{Aa}	620.36 ± 0.56 ^{Bb}	0.79 ± 0.00 ^{Ba}	695.43 ± 15.48 ^{Ba}	0.92 ± 0.03 ^{ABa}	-7.1175 ± 0.96 ^{Bb}
			820.73 ± 77.80 ^{Bc}	0.88 ± 0.01 ^{Aab}	627.61 ± 39.06 ^{Bb}	0.73 ± 0.03 ^{Bb}	712.43 ± 49.12 ^{Bb}	0.87 ± 0.02 ^{Bb}	-11.3815 ± 1.23 ^{Aa}
2		1540.92 ± 22.63 ^{Bb}	0.87 ± 0.02 ^{Aab}	1075.61 ± 115.20 ^{Ba}	0.71 ± 0.05 ^{Bb}	1242.56 ± 109.07 ^{Bb}	0.81 ± 0.06 ^{Bb}	-17.2585 ± 0.25 ^{Aa}	
	1707.22 ± 5.30 ^{Ba}	0.84 ± 0.01 ^{Bb}	1168.25 ± 7.66 ^{Ba}	0.74 ± 0.03 ^{ABab}	1384.90 ± 25.22 ^{Bab}	0.81 ± 0.02 ^{Ab}	-4.3935 ± 1.34 ^{Bb}		
S3	0	376.10 ± 90.53 ^{Ae}	0.76 ± 0.03 ^{Ab}	237.66 ± 69.80 ^{Ac}	0.61 ± 0.02 ^{Ab}	312.90 ± 80.20 ^{Ab}	0.83 ± 0.01 ^{Aa}	-15.469 ± 1.18 ^{Aa}	
		414.61 ± 9.20 ^{Ce}	0.85 ± 0.03 ^{ABa}	307.85 ± 18.38 ^{Bc}	0.82 ± 0.01 ^{Ba}	364.18 ± 10.84 ^{Ba}	0.88 ± 0.05 ^{ABa}	-12.1025 ± 1.88 ^{Aa}	
	1	743.70 ± 72.14 ^{Bd}	0.91 ± 0.03 ^{Aa}	599.80 ± 9.95 ^{Bb}	0.81 ± 0.05 ^{ABa}	662.02 ± 12.37 ^{Ba}	0.89 ± 0.07 ^{ABa}	-7.6985 ± 0.98 ^{Bb}	
		792.97 ± 121.30 ^{Bc}	0.88 ± 0.04 ^{Aa}	628.53 ± 133.10 ^{Bb}	0.78 ± 0.00 ^{Aa}	707.58 ± 114.70 ^{Ba}	0.89 ± 0.01 ^{ABa}	-6.221 ± 1.00 ^{Bb}	
	2	1067.54 ± 43.50 ^{Cb}	0.90 ± 0.03 ^{Aa}	841.70 ± 59.48 ^{BCa}	0.80 ± 0.04 ^{Aa}	932.66 ± 39.91 ^{Ca}	0.87 ± 0.00 ^{ABa}	-13.4235 ± 0.35 ^{Aa}	
1314.61 ± 125.55 ^{Ca}		0.88 ± 0.05 ^{ABa}	999.24 ± 32.60 ^{Ba}	0.77 ± 0.06 ^{ABa}	1138.26 ± 29.81 ^{BCa}	0.87 ± 0.06 ^{Aa}	-15.323 ± 0.39 ^{Aa}		
S4	0	376.10 ± 90.53 ^{Ac}	0.76 ± 0.03 ^{Ab}	237.66 ± 69.80 ^{Ac}	0.61 ± 0.02 ^{Ac}	312.90 ± 80.20 ^{Ad}	0.83 ± 0.01 ^{Aa}	-15.469 ± 1.18 ^{Aa}	
		691.44 ± 8.84 ^{Bb}	0.87 ± 0.03 ^{ABa}	550.25 ± 24.29 ^{Ab}	0.88 ± 0.00 ^{Ab}	629.01 ± 5.07 ^{Aa}	0.91 ± 0.00 ^{ABb}	-13.579 ± 1.06 ^{Aa}	
	671.43 ± 3.18 ^{Bb}	0.91 ± 0.02 ^{Aa}	586.38 ± 17.66 ^{Bb}	0.87 ± 0.01 ^{Ab}	644.25 ± 2.14 ^{Ba}	0.96 ± 0.00 ^{Ab}	-8.178 ± 0.63 ^{Bb}		

续表 4 (Continued Tab. 4)

淀粉种类 Starch type	添加量 Addition amount (%)	硬度	弹性	咀嚼性	回复性	胶着性	黏聚性	粘性
		Durometer (gf)	Resilient (mm)	Chewiness (gf)	Resilience	Gumminess (gf)	Cohesive	Viscosity (gf · s)
S5	3	727.70 ± 4.95 ^{Ba}	0.92 ± 0.00 ^{Aa}	611.98 ± 10.85 ^{Bb}	0.68 ± 0.01 ^{Cab}	662.75 ± 8.22 ^{Bc}	0.91 ± 0.00 ^{Ab}	-11.774 ± 0.61 ^{Aa}
		814.97 ± 153.13 ^{Ca}	0.89 ± 0.02 ^{Aa}	664.64 ± 98.09 ^{Cb}	0.72 ± 0.00 ^{ABab}	746.83 ± 127.92 ^{Bb}	0.92 ± 0.02 ^{Ab}	-8.8225 ± 0.51 ^{Bb}
	4	1113.31 ± 32.54 ^{Ca}	0.93 ± 0.03 ^{Aa}	932.44 ± 80.29 ^{Ba}	0.68 ± 0.03 ^{Ba}	1003.37 ± 58.26 ^{Cc}	0.90 ± 0.03 ^{Ab}	-6.9185 ± 1.17 ^{Bb}
		376.10 ± 90.53 ^{Ac}	0.76 ± 0.03 ^{Ab}	237.66 ± 69.80 ^{Ad}	0.61 ± 0.02 ^{Ad}	312.90 ± 80.20 ^{Ac}	0.83 ± 0.01 ^{Aa}	-15.469 ± 1.18 ^{Aa}
	1	795.47 ± 104.33 ^{Ab}	0.87 ± 0.02 ^{ABa}	619.93 ± 32.17 ^{Ac}	0.76 ± 0.03 ^{Ca}	714.51 ± 107.89 ^{Ab}	0.90 ± 0.02 ^{ABb}	-14.809 ± 1.66 ^{Aa}
		764.96 ± 81.69 ^{Bb}	0.87 ± 0.01 ^{Aa}	589.59 ± 38.51 ^{Bc}	0.76 ± 0.02 ^{Ba}	681.36 ± 86.27 ^{Bb}	0.89 ± 0.02 ^{ABb}	-12.345 ± 1.04 ^{Aa}
	2	1042.04 ± 118.47 ^{Bb}	0.88 ± 0.01 ^{Aa}	788.91 ± 32.03 ^{Bab}	0.81 ± 0.01 ^{Ac}	900.16 ± 92.96 ^{Bab}	0.86 ± 0.01 ^{Bb}	-12.014 ± 1.14 ^{Aa}
		1100.30 ± 74.97 ^{Cb}	0.87 ± 0.01 ^{Aa}	807.68 ± 47.01 ^{Bca}	0.79 ± 0.00 ^{Ab}	927.07 ± 46.73 ^{Cab}	0.84 ± 0.02 ^{ABb}	-11.9335 ± 0.52 ^{Aa}
	3	1162.32 ± 103.27 ^{Ca}	0.89 ± 0.01 ^{ABa}	913.19 ± 57.02 ^{Ba}	0.82 ± 0.02 ^{Ac}	1025.73 ± 73.09 ^{Ca}	0.88 ± 0.02 ^{Ab}	-15.6675 ± 0.96 ^{Aa}
		1162.32 ± 103.27 ^{Ca}	0.89 ± 0.01 ^{ABa}	913.19 ± 57.02 ^{Ba}	0.82 ± 0.02 ^{Ac}	1025.73 ± 73.09 ^{Ca}	0.88 ± 0.02 ^{Ab}	-15.6675 ± 0.96 ^{Aa}

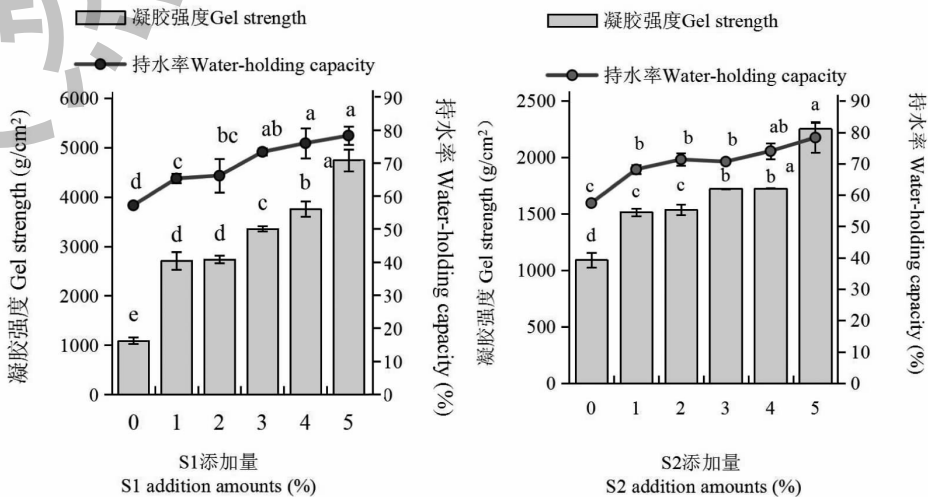
注:同淀粉不同添加量用不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$);同添加量不同淀粉用不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。
 Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level among different addition groups. Different capital letters indicate significant difference at 0.05 level among different type groups.

2.1.2 不同淀粉种类及添加量对 KGM 凝胶持水性和凝胶强度的影响

凝胶强度是指凝胶在受力作用下抵抗变形、破坏的能力,其强度大小由化学键相互作用强弱决定^[21]。由图 1 可知,KGM 凝胶强度随淀粉添加量增加而增强,不同种类的淀粉对 KGM 凝胶强度的影响大小为:豌豆淀粉(S1) > 土豆淀粉(S4) > 木薯淀粉(S5) > 红薯淀粉(S2) > 玉米淀粉(S3),其中豌豆淀粉对凝胶强度增强最显著,分析其原因可能是当淀粉添加量增大时,多糖分子之间可发生簇集缠结导致凝胶中氢键的强度增加,分子间的交联作用增强,从而形成了更致密的网状结构^[21]。

KGM 凝胶的持水性与三维网络结构中束缚作用、体系的 pH 值和氢键等作用力有关^[3]。由图 1 所知,KGM 凝胶持水性随淀粉添加量增加而增强,不同种类的淀粉对 KGM 凝胶持水性的影响大小为:豌豆淀粉(S1) > 红薯淀粉(S2) > 木薯淀粉(S5) > 玉米淀粉(S3) > 土豆淀粉(S4),其中豌豆淀粉对持水性影响最大。当淀粉添加量从 0% 升高到 5% 时持水率增加了 21.165%,这一结论与 Xu^[5] 一致,不同种类淀粉分子与 KGM 相互作用,形成了更加致密的凝胶结构^[22],这说明部分淀粉代替 KGM 提高了凝胶的持水率。

因此,在相同添加量下,豌豆淀粉的持水率与凝



续图 1 (Continued Fig. 1)

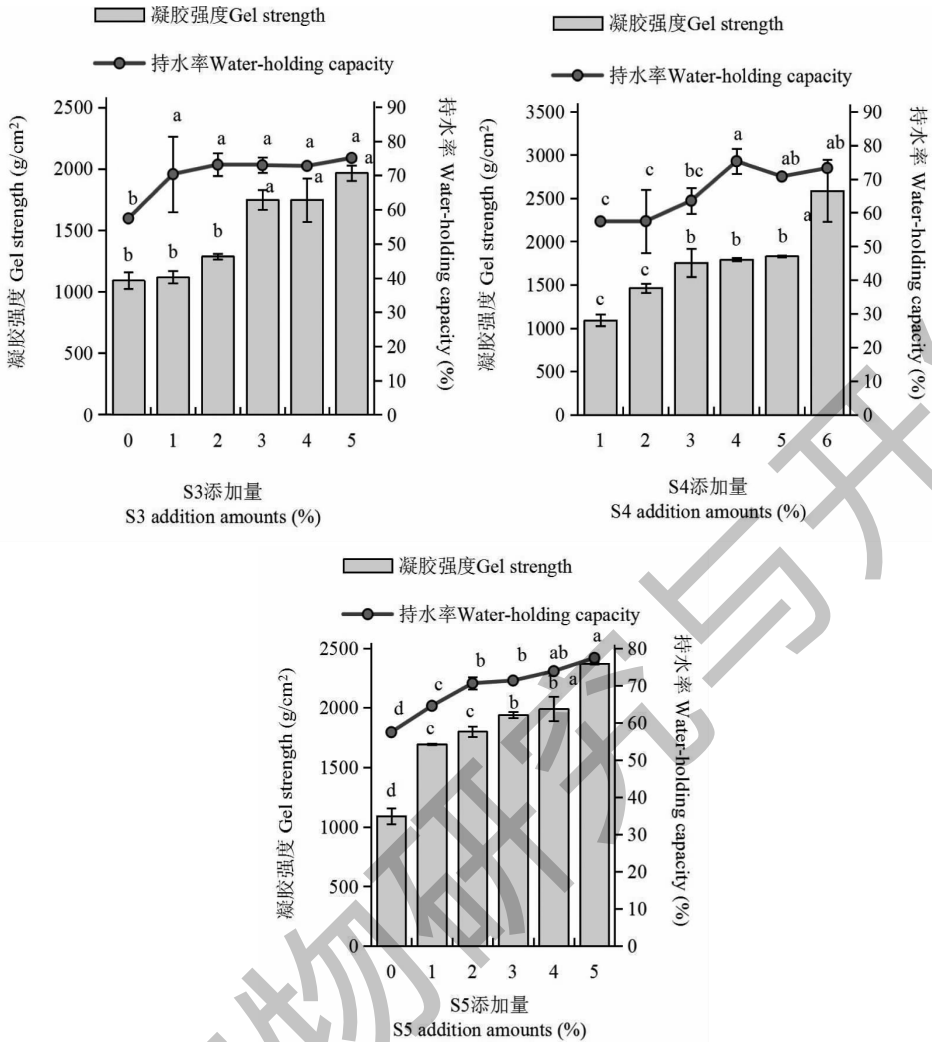


图 1 不同淀粉种类及添加量对 KGM 凝胶持水性和凝胶强度的影响

Fig. 1 Effects of different types of starch and addition amounts on water-holding capacity and gel strength of KGM gels

注:同淀粉不同添加量用不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 同添加量不同淀粉用不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level among different addition groups. Different capital letters indicate significant difference at 0.05 level among different type groups, the same below.

胶强度均大于其他种类的淀粉,原因是豌豆淀粉中直链淀粉多,更利于 KGM 的凝胶网络结构形成。另一方面,不同添加量的豌豆淀粉、红薯淀粉、木薯淀粉、土豆淀粉、玉米淀粉的 KGM 凝胶强度与持水率呈正相关,分析原因可能是随着淀粉添加量增加,淀粉与 KGM 因相互作用形成的三维网状结构越紧密,对水的保留作用更好,从而增强 KGM 凝胶强度;此外淀粉也会结合一部分水,促进产品持水率的提升^[3,22]。

2.1.3 不同淀粉种类及添加量对 KGM 凝胶色泽的影响

由图 2 可知,不同淀粉种类对 KGM 凝胶白度值

影响差异不显著;同种淀粉不同添加量对 KGM 凝胶白度值影响差异显著,其中玉米淀粉在不同添加量下白度值均高于其他种类的淀粉,当玉米淀粉添加量为 5% 时,白度值由 38.045 到上升至 52.285。因此,玉米淀粉能够提升 KGM 凝胶的色泽,从而提升产品感官性状。

2.1.4 不同淀粉种类及添加量对 KGM 凝胶感官评价的影响

由图 3 可知,与空白对照相比,不同种类淀粉均可增加 KGM 凝胶的外观形态、色泽、韧性、口感,总体可接受度的感官评分;同种淀粉的外观形态、色泽的感官评分分值随淀粉添加量的增加逐渐上升,而

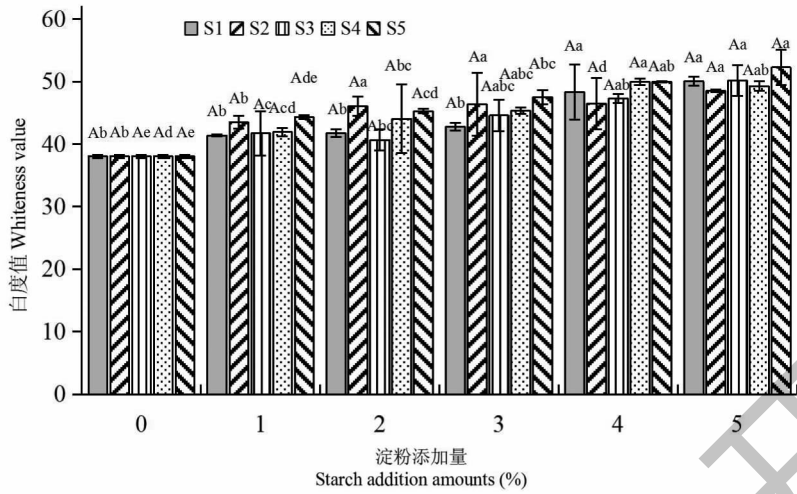


图 2 不同种类及添加量的淀粉对 KGM 凝胶白度值的影响

Fig. 2 Effects of different types of starch and addition amounts on the whiteness value of KGM gels

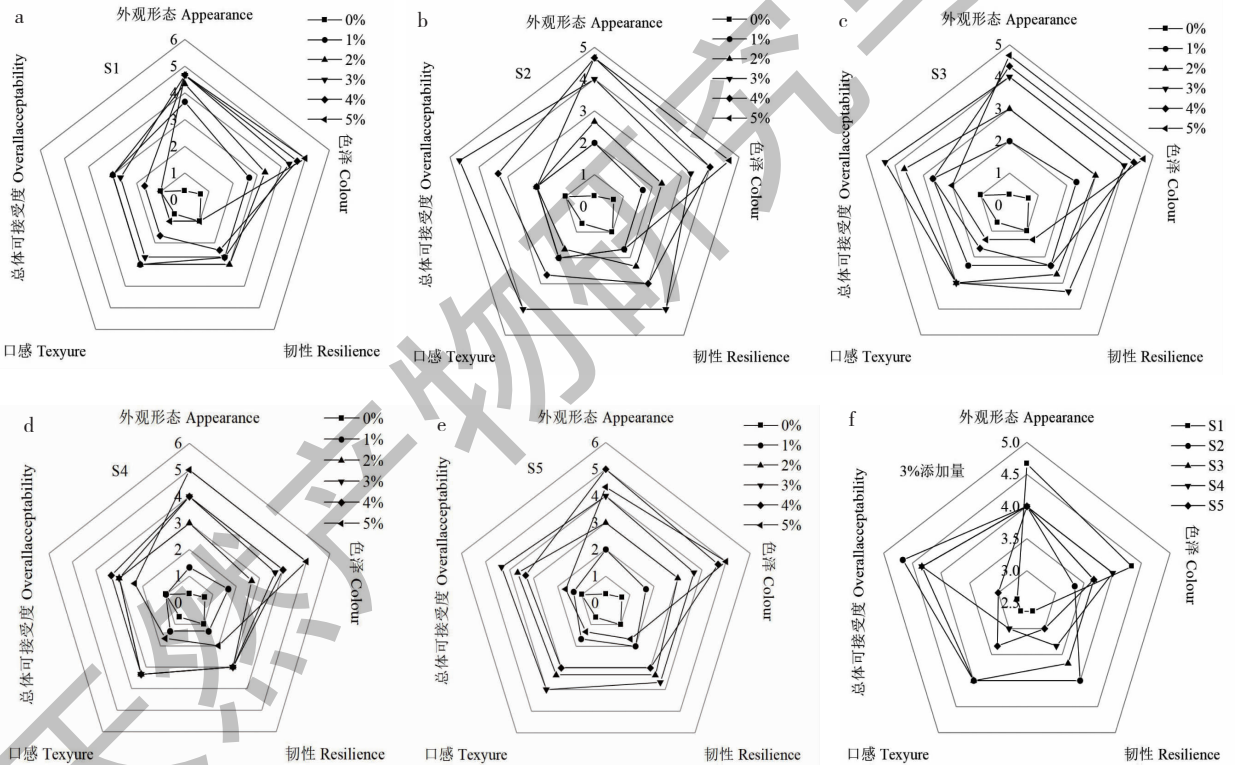


图 3 不同种类及添加量的淀粉对 KGM 凝胶感官评价的影响

Fig. 3 Effects of different types of starch and addition amounts on the sensory evaluation of KGM gels

口感、韧性、总体接受度三个感官评分指标分值呈正态分布。当淀粉添加量约 2% ~ 3% 时,感官评分指标分值最高,结合质构特性分析,可能是淀粉添加量过多,产品硬度较大,使口感和韧性下降,从而出现口感偏老、口感层单一等问题。在淀粉添加量为 3% 时,KGM 凝胶的感官评价分值大小为:土豆淀粉

(S4) > 木薯淀粉(S5) > 玉米淀粉(S3) > 红薯淀粉(S2) > 豌豆淀粉(S1)。因此,土豆淀粉最利于改善 KGM 凝胶的感官性状。

2.2 正交试验结果

在单因素试验基础上,基于 KGM 凝胶的质构特性、持水率、凝胶强度、感官评价、白度值五项指标

实验结果,选择豌豆淀粉、玉米淀粉、土豆淀粉三种淀粉以3%添加总量为最优组合,采用 $L_9(3^3)$ 正交试验进行KGM凝胶配方工艺优化,以凝胶性质、质构品质和感官评分对产品进行综合评分试验,以确定KGM/淀粉复合凝胶最佳配比。

2.2.1 正交试验优化KGM/淀粉复合凝胶的凝胶性质

参考He等^[10]用z-score模型对KGM凝胶品质指标进行无量纲化处理,将凝胶强度(x_1)和持水率(x_2)两个指标合并为综合指标(y_1)以减小不同单位带来的影响,综合指标(y_1)按照公式(3)计算。

$$y_1 = x_1 + x_2 \quad (3)$$

无量纲化处理结果详见表5。由表6极差分析可知不同种类淀粉对KGM/淀粉复合凝胶的凝胶性质的影响的主次顺序为:豌豆淀粉(B) > 玉米淀粉(A) > 土豆淀粉(C)。比较 K_1 、 K_2 、 K_3 可得KGM/淀粉复合凝胶的凝胶性质最佳配比为 $A_1B_2C_2$,即玉米淀粉添加量为0.5%,豌豆淀粉添加量为1%,土豆淀粉添加量为1%,在此条件下KGM/淀粉复合凝胶的凝胶持水率和凝胶强度较好,凝胶的综合评价指标(y_1)评分最高。

表5 凝胶性质正交试验结果(无量纲化)

Table 5 Results of gel properties from orthogonal array design (dimensionless)

试验号 Test number	凝胶强度 Gel strength (g/cm^2)	持水率 Water-holding capacity (%)	x_1	x_2	y_1
1	1963.549	66.475	-1.050	-0.711	-1.761
2	2816.465	81.150	1.754	1.457	3.211
3	2648.049	80.245	1.200	1.323	2.523
4	2235.309	61.155	-0.157	-1.498	-1.655
5	2225.740	72.935	-0.188	0.243	0.055
6	2436.256	64.500	0.504	-1.003	-0.499
7	2079.016	71.750	-0.671	0.068	-0.603
8	1897.842	74.320	-1.266	0.448	-0.818
9	2244.878	69.080	-0.125	-0.327	-0.452

表6 KGM凝胶品质的 $L_9(3^3)$ 正交试验设计及结果

Table 6 $L_9(3^3)$ orthogonal array design and experimental result for KGM gel quality

试验号 Test number	因素 Factor			y_1
	A	B	C	
1	1	1	1	-1.761
2	1	2	2	3.211
3	1	3	3	2.523
4	2	1	2	-1.655
5	2	2	3	0.055
6	2	3	1	-0.499
7	3	1	3	-0.603
8	3	2	1	-0.818
9	3	3	2	-0.452
K_1	1.32	-1.340	-0.719	-
K_2	-0.70	0.816	0.703	-
K_3	-0.624	0.524	0.017	-
R	2.024	2.156	1.422	-

2.2.2 正交试验优化 KGM/淀粉复合凝胶的质构品质

利用主成分分析法 (principal component analysis, PCA) 将咀嚼性、硬度、弹性、白度值、胶着性、黏聚性、粘性七项质构品质指标组合成新的综合指标, 各指标检测结果如表 7 所示, 通过 KMO 检验和 Barlett's 球形检验, KMO 检测值为 0.618 > 0.6; Barlett's 球形检验测试值为 109.427, 显著性水平 0.000 < 0.05, 表示各变量是独立的假设。因此, 七项质构品质指标可做主成分分析。

令咀嚼性、硬度、胶着性、白度值、弹性、黏聚性、粘性分别为 1、2、3、4、5、6、7。各主成分的特征值、方差贡献率、累计方差贡献率如表 8 所示, 前两个因子特征值大于 1, 累计方差贡献率为 85.905%, 因此, 选取前两个主成分进行分析。质构综合得分 (y_2) 按照公式(4)计算。

$$y_2 = \sum_k^i = {}_1\beta_k F_k \quad (4)$$

式中, β_k 为各成分的方差贡献率; F_k 为主成分得分。

表 7 复合凝胶的质构品质正交试验结果

Table 7 Texture quality of composite gel from orthogonal array design

试验号 Test number	咀嚼性 Chewiness (gf)	硬度 Durometer (gf)	弹性 Resilient (mm)	白度值 Whiteness value	胶着性 Gumminess (gf)	黏聚性 Cohesive	粘性 Viscosity (gf · s)
1	8.581	10.719	0.890	46.090	9.638	0.823	-21.919
2	22.563	25.727	0.941	51.175	23.968	0.908	-6.857
3	20.675	23.938	0.946	50.880	21.847	0.899	-0.217
4	7.682	9.381	0.909	44.075	8.448	0.780	-13.895
5	11.148	14.351	0.869	52.830	12.823	0.783	-36.289
6	12.978	15.415	0.940	44.625	13.950	0.798	-5.317
7	13.346	17.385	0.909	44.490	14.689	0.746	-4.747
8	9.627	12.204	0.898	48.625	10.719	0.765	-12.366
9	15.997	19.502	0.929	45.305	17.228	0.770	-16.956

表 8 相关成分特征值, 方差贡献率与累计贡献

Table 8 Eigenvalues and cumulative contribution percentages of Principal components

成分 Component	特征值 Characteristic value	方差贡献率 Variance contribution rate (%)	累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate (%)
1	4.326	61.804	61.804
2	1.687	24.101	85.905
3	0.720	10.283	96.188
4	0.234	3.341	99.53
5	0.033	0.469	99.998
6	0.000 076 5	0.001	99.999
7	0.000 047 7	0.001	100

根据主成分特征向量 (见表 9) 可构建主成分 F_1 、 F_2 与 KGM 凝胶质构指标的线性关系表达式: $F_1 = 0.472X_1 + 0.462X_2 + 0.468X_3 + 0.191X_4 + 0.397X_5 + 0.253X_6 + 0.295X_7$; $F_2 = 0.063X_1 + 0.060X_2 + 0.087X_3 + 0.660X_4 - 0.376X_5 + 0.336X_6 - 0.544X_7$ 。

各指标化处理后的评价 F_1 、 F_2 详见表 10, 基于 F_1 和 F_2 两个主成分以及它们的方差贡献率和累计方差贡献率, 构建了一个综合评价指标 y_2 。 y_2 是 F_1 、 F_2 的线性组合, 具体计算公式为: $y_2 = 0.618 04F_1 + 0.241 01F_2$, 表示正交试验中质构品质的综合评价结果。

表 9 主要指标的特征向量

Table 9 Eigenvalues of principal components for texture characteristics

指标 Index	主成分特征向量 1 Eigenvector 1	主成分特征向量 2 Eigenvector 2
1	0.982	0.082
2	0.96	0.078
3	0.973	0.113
4	0.398	0.857
5	0.826	-0.489
6	0.526	0.436
7	0.613	-0.706

表 10 主成分分析法分析复合凝胶的质构品质正交试验结果

Table 10 Results of PCA for texture quality of composite gel from orthogonal array design

试验号 Test number	F_1	F_2	y_2
1	16.431	44.333	20.840
2	42.114	42.515	36.275
3	41.303	38.289	34.755
4	16.822	38.391	19.649
5	17.850	57.262	24.832
6	27.332	35.250	25.388
7	28.878	35.050	26.295
8	21.417	41.048	23.129
9	28.867	42.750	28.144

由表 11 可知不同淀粉种类对 KGM/淀粉复合凝胶综合得分的影响依主次排序分别是:玉米淀粉(A) > 豌豆淀粉(B) > 土豆淀粉(C)。由 K 值得出 KGM/淀粉复合凝胶最佳配比为 $A_1B_3C_3$, 即玉米淀粉添加量为 0.5%、豌豆淀粉添加量为 1.5%, 土豆淀粉添加量为 1.5%, 此时 KGM/淀粉复合凝胶的质构品质最佳。这一结论与单因素试验结果不一致, 原因可能是不同种类淀粉之间有交联性, 使得玉米淀粉成为影响 KGM/淀粉复合凝胶质构品质的主要因素。

2.2.3 正交试验优化 KGM/淀粉复合凝胶的感官评价

正交试验凝胶的感官评价结果详见表 12, 不同淀粉种类对 KGM/淀粉复合凝胶的感官评价的影响的主次顺序为: $R_B > R_A > R_C$, 豌豆淀粉对 KGM/淀

表 11 质构品质 $L_9(3^3)$ 正交试验设计及结果Table 11 $L_9(3^3)$ orthogonal array design experimental results for texture quality

试验号 Test number	A	B	C	y_2
1	1	1	1	20.84
2	1	2	2	36.275
3	1	3	3	34.755
4	2	1	2	19.649
5	2	2	3	24.832
6	2	3	1	25.388
7	3	1	3	26.295
8	3	2	1	23.129
9	3	3	2	28.144
K_1	30.623	22.261	23.119	-
K_2	23.290	28.079	28.023	-
K_3	25.856	29.429	28.672	-
R	7.333	7.168	4.714	-

粉复合凝胶的感官有较大的影响, 其次是玉米淀粉, 土豆淀粉对感官评分的影响较小。通过感官评价指标优化 KGM/淀粉复合凝胶配方, 最佳配比为 $A_1B_3C_2$, 即玉米淀粉添加量为 0.5%、豌豆淀粉添加量为 1.5%, 土豆淀粉添加量为 1%。

表 12 感官评价 $L_9(3^3)$ 正交试验设计及结果Table 12 $L_9(3^3)$ orthogonal array and experimental results for sensory evaluation

试验号 Test number	A	B	C	y_3
1	1	1	1	8.5
2	1	2	2	18
3	1	3	3	21
4	2	1	2	15.5
5	2	2	3	7.5
6	2	3	1	16
7	3	1	3	16
8	3	2	1	14
9	3	3	2	15.5
K_1	15.833	13.333	12.833	-
K_2	13.000	13.167	16.333	-
K_3	15.167	17.500	14.833	-
R	2.833	4.333	3.500	-

2.2.4 KGM/淀粉复合凝胶的综合评价

采用隶属度的综合评分法,以凝胶性质、质构品质和感官评价3项指标对KGM/淀粉复合凝胶进行综合评分,凝胶性质(Y_1)、质构品质(Y_2)和感官评价(Y_3)指标数值与KGM/淀粉复合凝胶呈正相关,统一用公式(5)进行计算。

$$Y_n = \frac{y_i - y_m}{y_M - y_m} \quad (5)$$

式中: y_M 为指标的最大值, y_m 为指标的最小值, y_i 为平均值。

参考 He 等^[10] 方法,设定感官指标和质构品质指标权重系数为 0.4,凝胶性质指标权重系数为 0.2。综合评分(Y)用公式(6)计算。

$$Y = 0.2 \times Y_1 + 0.4 \times Y_2 + 0.4 \times Y_3 \quad (6)$$

由表 13 可知 $R_B > R_A > R_C$,说明不同种类淀粉对 KGM/淀粉复合凝胶的综合评分影响大小排序为:豌豆淀粉(B) > 玉米淀粉(A) > 土豆淀粉(C)。通过对比 K 值,得到对 KGM/淀粉复合凝胶最佳配比为 $A_1B_3C_3$,即玉米淀粉添加量为 0.5%,豌豆淀粉添加量为 1.5%,玉米淀粉添加量为 1.5%。

表 13 $L_9(3^3)$ 正交试验设计及结果

Table 13 $L_9(3^3)$ orthogonal array and experimental results

试验号 Test number	A	B	C	空列 Null column	Y_1	Y_2	Y_3	Y
1	1	1	1	1	0	0.072	0.074	0.058
2	1	2	2	2	1	1	0.778	0.911
3	1	3	3	3	0.862	0.909	1	0.936
4	2	1	2	3	0.021	0	0.593	0.241
5	2	2	3	1	0.365	0.312	0	0.201
6	2	3	1	2	0.254	0.345	0.630	0.441
7	3	1	3	2	0.233	0.400	0.630	0.459
8	3	2	1	3	0.190	0.209	0.481	0.314
9	3	3	2	1	-0.091	0.511	0.593	0.423
K_1	0.635	0.253	0.271	0.227	-	-	-	-
K_2	0.294	0.475	0.525	0.604	-	-	-	-
K_3	0.339	0.600	0.532	0.497	-	-	-	-
R	0.341	0.347	0.261	0.377	-	-	-	-

2.3 KGM 凝胶扫描电子显微镜观察分析

由图 4 可知,KGM 凝胶、单一种类淀粉 KGM 凝胶与最佳配比的 KGM/淀粉复合凝胶的微观结构均呈现多孔性结构,但孔隙大小、数量和排列各不相同,存在明显差异,这一研究与 Li 等^[23] 研究结果一致。纯 KGM 凝胶的立体网状结构呈现多孔蜂窝结构,可以保持一定弹性,但孔径大小不一,并以纤维状物质连接,容易受到外力破坏。

单一种类淀粉 KGM 凝胶由于淀粉与 KGM 的相互作用,提高了交联密度,从而增加 KGM 凝胶三维网络结构的支撑性。KGM/豌豆淀粉复合凝胶与 KGM/玉米淀粉复合凝胶微观结构致密,褶皱多但壁厚,孔洞均匀性较差,分析其原因是淀粉与水分子相互作用形成较多的非均相凝胶所致^[23],而淀粉中

直链淀粉与 KGM 结合,填补了交联过程中形成的三维网状结构的孔隙^[16];KGM/木薯淀粉复合凝胶、KGM/红薯淀粉复合凝胶与 KGM/土豆淀粉复合凝胶微观结构呈多孔蜂窝状,孔隙较大且均匀,网络结构清晰,但片层交界处的壁薄,凝胶产品支撑性较差。

最佳配比制作的 KGM/淀粉复合凝胶,其三维网状结构中孔隙适中,结构连贯,更加紧密且孔洞分布均匀,呈蜂窝状,片层厚薄适中,凝胶产品弹性、支撑性较好。研究指出,高浓度下的聚集分子增强了两者的相互作用,从而形成了稳固的网络结构^[19]。因此,最佳配比的 KGM/淀粉复合凝胶体系内部的相互作用增强,稳定性提升,有效提升了 KGM 凝胶的结构和性能。

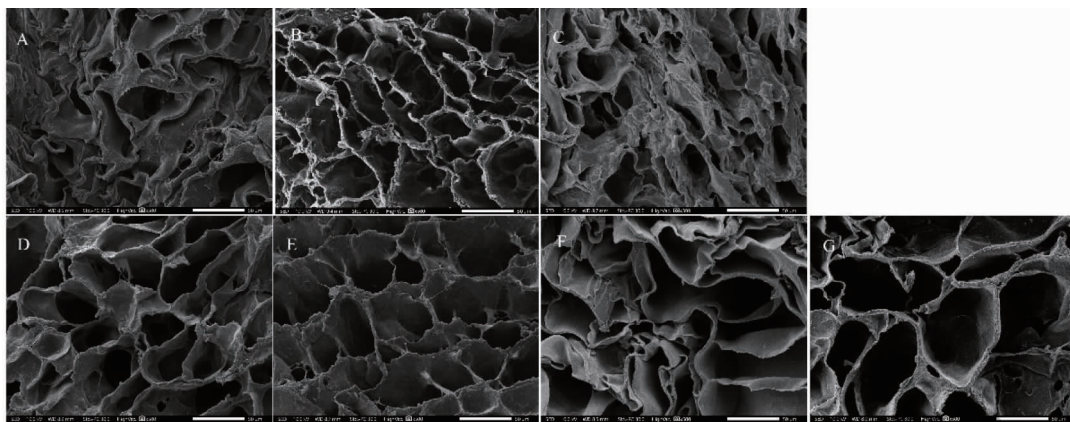


图4 不同复合凝胶的扫描电镜图(×500)

Fig. 4 Scanning electron microscopic images of different composite gels (×500)

注:A;KGM-S1 复合凝胶;B;KGM-S2 复合凝胶;C;KGM-S3 复合凝胶;D;KGM-S4 复合凝胶;E;KGM-S5 复合凝胶;F:纯 KGM 凝胶;G:最佳配比的 KGM-淀粉复合凝胶。Note:A,KGM-S1 composite gel;B;KGM-S2 composite gel;C;KGM-S3 composite gel;D;KGM-S4 composite gel;E;KGM-S5 composite gel;F:Pure KGM gel;G:KGM-starch composite with optimal ratio.

3 结论

本研究深入探讨了不同淀粉种类对 KGM 凝胶感官及质构特性的影响。研究发现,各类淀粉均能改善 KGM 凝胶感官性质和质构特性,提高凝胶强度和持水性,其中豌豆淀粉对改善 KGM 凝胶的质构特性、凝胶强度、持水性效果最显著,玉米淀粉在提升凝胶色泽方面效果最佳,而土豆淀粉对改善 KGM 凝胶感官效果最明显,因此选择豌豆淀粉、玉米淀粉、土豆淀粉配制 KGM/淀粉复合凝胶。通过多指标正交试验设计优化淀粉配方,确定 KGM/淀粉复合凝胶最佳配比为玉米淀粉添加量 0.5%、豌豆淀粉添加量 1.5%、土豆淀粉添加量 1.5%。通过扫描电镜对 KGM 凝胶、单一种类淀粉 KGM 凝胶、最佳配比的 KGM/淀粉复合凝胶的微观结构对比,发现单一种类淀粉 KGM 凝胶与最佳配比的 KGM/淀粉复合凝胶均可提升 KGM 凝胶网络结构稳定性,但后者的三维结构更紧密,孔径更均匀,褶皱厚薄适中,结构更稳定。本研究表明,添加适量淀粉能解决纯 KGM 凝胶强度低、持水性弱、结构不稳定等问题,复合淀粉提升效果更佳,但淀粉与 KGM 在微观层面上相互作用机理尚不清楚。本研究对魔芋凝胶产品的开发与应用提供科学依据,为后续深入探究淀粉对 KGM 凝胶形成品质的影响机制奠定基础。

参考文献

1 Han Q,Zho TX,Li YP,et al. Effects on starch properties and

application in functional foods of konjac glucomannan[J].
Sci Technol Food Ind(食品工业科技),2023,44:441-447.

2 Ren HF,Yan J,Peng MM,et al. Evaluation of characterization and thermal stability of konjac glucomannan gel by zeaxanthin[J]. Food Ferment Ind(食品与发酵工业),2024,50:218-224.

3 Shi WJ,Miao LK,Sun WW,et al. Research progress on the konjac glucomannan-based thermoreversible gels[J]. J Chin Inst Food Sci Technol(中国食品学报),2022,22:422-433.

4 Zhou Y,Jiang RS,Wade S. Perkins,et al. Morphology evolution and gelation mechanism of alkali induced konjac glucomannan hydrogel[J]. Food Chem,2018,269:80-88.

5 Xu C. Effects of ultrasonic assisted freezing combined with cassava starch on gel properties of konjac glucomannan and research on its application[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University of Light Industry(郑州轻工业大学),2022.

6 Dai JJ,Ding MG,Chen J,et al. Optimization of gel mixture formulation based on weighted value using response surface methodology[J]. CyTA-J Food,2020,18:500-507.

7 Li L,Zhang L,Han Y,et al. Effect of the addition of mung bean,corn,and sweet potato starch on the properties of konjac gel[J]. J Food Sci Technol,2023,60:3094-3101.

8 Fang F. Shear-induced synergistic effects of konjac glucomannan and waxy potato starch on viscosity and gel strength[J]. Food Hydrocolloids,2020,114:106540.

9 Shang LC,Wu CL,Wang SS,et al. The influence of amylose and amylopectin on water retention capacity and texture properties of frozen-thawed konjac glucomannan gel[J]. Food Hydrocolloids,2021,113:106521.

10 He LJ,Li SQ,Chen ZG. Effects of sweet potato starch and

- soybean protein isolate on konjac gel properties and preparation of composite gels[J]. Food Sci(食品科学),2023,44:58-67.
- 11 Zhang C, Lim ST. Physical modification of various starches by partial gelatinization and freeze-thawing with xanthan gum [J]. Food Hydrocolloid,2020,11:106210.
 - 12 Lin ZT, Zhang DX, Lei W, et al. Establish comprehensive quality standard of fresh Liangpi based on sensory evaluation combined with fuzzy mathematics[J]. Food Ferment Ind(食品与发酵工业),2020,46:225-233.
 - 13 General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Sensory analysis-General guidance for the selection, training and monitoring of assessors-Part 1; Selection assessors(感官分析 选拔、培训与管理评价员一般导则 第1部分:优选评价员):GB/T 16291.1-2012[S]. Beijing:Standards Press of China,2012.
 - 14 Zhu D, Zhu LB, Liu GC et al. Optimization on ultra high pressure processing conditions and microstructural characteristics of the dietary fiber from *Malus asiatica* Nakai residue [J]. Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发),2020,32:118-126.
 - 15 Li P, Li RF, Yu SQ, et al. Reliability and validity of Chinese version of MLHFQ scale in evaluating the quality of life of patients with chronic Keshan disease [J]. Chin J Endemiol(中华地方病学杂志),2022,41:871-875.
 - 16 Han Y, Zong XY, Zhao HF, et al. Preparation and characterization of konjac gel with added mung bean starch[J]. Mod Food Sci Technol(现代食品科技),2022,38:191-197.
 - 17 Tang HH, Fan ZW, Deng LL, et al. Effects of alum and konjac glucomannan on the quality of sweet potato noodles and their interaction mechanisms[J]. Food Ferment Ind(食品与发酵工业),2019,45:233-241.
 - 18 Wu CL. Study on the regulation of water retention capacity and texture property of frozen composite konjac glucomannan gel[D]. Hubei:Huazhong Agricultural University(华中农业大学),2020:31-40.
 - 19 Irani M, Razavi SMA, Abdel-Aal ESM, et al. Viscoelastic and textural properties of canary seed starch gels in comparison with wheat starch gel[J]. Int J Biol Macromol,2018,124:270-281.
 - 20 Wang L. Study on gelatinization and gelation characteristics of starches and their edible qualities[J]. Storage Process(保鲜与加工),2021,21:67-73.
 - 21 Lin Y, Zhang L, Li XX, et al. Effect and characterization of konjac glucomannan on xanthan gum/ κ -carrageenan/agar system[J]. Int J Biol Macromol,2024,257:128639.
 - 22 Zhu K, Liu YQ, Fan SY, et al. Preparation and characteristics of konjac glucomannan-soybean protein isolate-capsanthin coloring composite gel[J]. Food Ferment Ind(食品与发酵工业),2021,47:213-219.
 - 23 Li L, Zhang L, Han Y, et al. Effect of the addition of mung bean, corn, and sweet potato starch on the properties of konjac gel[J]. J Food Sci Technol,2023;60:3094-3101.