

# 湿热降解对花魔芋魔芋胶/ $\kappa$ -卡拉胶 复配凝胶性能的影响

The effect of hygrothermal degradation on the properties of *A. guripingensis*  
konjac/ $\kappa$ -carrageenan compound gel

任艳艳 李斌 商龙臣 李晶

REN Yan-yan LI Bin SHANG Long-chen LI Jing

(华中农业大学食品科学技术学院, 湖北 武汉 430070)

(College of Food Science and Technology, Huazhong Agriculture University, Wuhan, Hubei 430070, China)

**摘要:**以湿热降解法对花魔芋魔芋胶进行有限降解,获取分子量为137.8~621.5 kDa的5种材料,比较其与 $\kappa$ -卡拉胶溶胶—凝胶转变过程中关键性能指标的差异。结果显示,相对于未降解魔芋胶(621.5 kDa),有限降解魔芋胶(415.6 kDa)显著提升了凝胶转变温度(5.98 °C);同时,其储能模量、剪切应力、黏度小幅增加,致使冷却成胶后其凝胶断裂强度、断裂伸长率、凝胶持水性显著增强( $P < 0.05$ );SEM分析显示,其凝胶结构更加紧密有序;而在其质构特征上,233.3 kDa的魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶形成的复配凝胶表现出较大的硬度和弹性。试验确证利用湿热法对中国花魔芋魔芋胶进行有限降解,是提升魔芋胶/ $\kappa$ -卡拉胶复配凝胶性能的一种有效方法。

**关键词:**魔芋胶; $\kappa$ -卡拉胶;有限降解;湿热法;复合凝胶

**Abstract:** Five kinds of konjac gum from *A. guripingensis* which molecular weight ranges from 137.8 kDa to 621.5 kDa were obtained by hygrothermal degradation, and the differences of the key performance indicators during the sol-gel transition between them and the  $\kappa$ -carrageenan were compared. The results showed that the gel/sol transition temperature of the compound gel was significantly improved by the partial degraded konjac gum (415.6 kDa), compared with the original one (621.5 kDa), and the transition temperature was increase by 5.98 °C. Meanwhile, the breaking force, the elongation at break and the water holding capacity of the compound gel were significantly improved ( $P < 0.05$ ) as well as the storage modulus, the shear stress and the apparent viscosity of the compound was moderately elevated by

using the partial degraded konjac gum. Moreover, a dense and ordered structure of the gel was observed by the SEM. A greater hardness and elasticity were showed in the compound gel prepared with the partial degraded konjac gum (233.3 kDa). Our experiments confirmed that the limited degradation of konjac gum from *A. guripingensis* by using the hygrothermal method, and this is effective way to improve the properties of konjac/ $\kappa$ -carrageenan compound gel.

**Keywords:** konjac gum;  $\kappa$ -carrageenan; limited degradation; hygrothermal; compound gel

魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)是魔芋胶的关键组分,由 $\beta$ -1,4吡喃糖苷键将 $\beta$ -D-葡萄糖和 $\beta$ -D-甘露糖以1.00:1.60或1.00:1.69的摩尔比连接而成<sup>[1]</sup>。研究<sup>[2]</sup>表明,1% KGM多糖溶液黏度可达90 Pa·s,是已知黏度最高的多糖溶胶之一。其超高黏度在于其分子为巨型线性分子,运动时需要巨大的自由空间,因此在水体系中其分子运动易受阻并缠结交联,从而显示出较大的表观黏度<sup>[3]</sup>。由于其巨大的分子量,魔芋胶具有优良的凝胶性、增稠性、成膜性等功能性性质,但另一方面其应用也因此受到了很大限制,尤其在凝胶复配领域,其水合过程中表现出的巨大黏度会严重影响其他组分在溶胶—凝胶转变中的相分离或自组装进程。因此,对其进行有限降解,推测可能对这一进程产生调控作用<sup>[4]</sup>。

$\kappa$ -卡拉胶是由1,3- $\alpha$ -D-吡喃半乳糖和1,4- $\beta$ -D-吡喃半乳糖为基本骨架交替连接而成的一种线性多糖,其具有凝胶、成膜、增稠等特性,从而使其在食品添加剂领域具有较为广泛的应用<sup>[5]</sup>。然而,由 $\kappa$ -卡拉胶自身形成的凝胶往往具有脆性大、弹性小、易脱水收缩等缺陷,因此,在应用时多将其与其他胶体复配使用,如刺槐豆胶、黄原胶等,以提升凝胶性能<sup>[6]</sup>。另有研究<sup>[7]</sup>表明,魔芋胶与 $\kappa$ -

基金项目:湖北省技术创新专项重大项目(编号:2017ABA150)

作者简介:任艳艳,女,华中农业大学在读硕士研究生。

通信作者:李斌(1972—),男,华中农业大学教授,博士生导师,博士。E-mail: libinfood@mail.hzau.edu.cn

收稿日期:2020-02-24

卡拉胶复配,可形成弹性好、强度大、不易脱水收缩的凝胶。目前关于这两种多糖配比、溶质浓度、溶剂离子强度等因素对复合凝胶性能的探讨已见于诸多报道<sup>[8-10]</sup>,但利用特定分子量的魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶复配从而提升复配凝胶性能的研究并不多见。研究<sup>[11]</sup>表明,不同分子量魔芋胶与黄原胶复配可对其凝胶性能产生较大影响。贺雪姣<sup>[12]</sup>以分子量范围为 1 898.36~4 436.50 kDa 的 4 种魔芋胶与卡拉胶进行复配,同样也发现一定限度降解的魔芋胶有利于复配凝胶性能的提升。所以笔者推测不同降解度魔芋胶在复配体系冷却成胶的过程中,由于分子量不同,势必对凝胶组装过程和最终的性能产生影响。受品种、加工方式、贮藏时间等因素影响,KGM 精细结构和分子量并不一致,通常分子量在 200~2 000 kDa 范围内变动<sup>[13-15]</sup>,而中国产花魔芋品种中葡甘聚糖分子量一般在 1 000 kDa 以下<sup>[16]</sup>,基于中国商业上应用的魔芋胶基本上来源于花魔芋(占 98%以上),KGM 分子量 1 000 kDa 以下的魔芋胶,是否仍然存在可以提升与卡拉胶复合凝胶性能的某个降解范围,目前依然没有定论,因此研究拟以源于花魔芋的魔芋胶为原料,采取湿热降解的方法制备分子量范围为 137.8~621.5 kDa 的魔芋胶,将其与 $\kappa$ -卡拉胶进行复配,考察其对凝胶拉伸性能、质构特性、流变特性、持水性等关键性能指标的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

花魔芋魔芋胶:食品级,湖北强森魔芋制品有限公司;

$\kappa$ -卡拉胶:食品级,上海北连生物科技有限公司;

超纯水:实验室自制。

#### 1.1.2 主要仪器设备

分析天平: BAS1245-CW 型,德国 Sartorius 公司;

电动搅拌机: HD2010W 型,上海司乐仪器有限公司;

集热式恒温加热磁力搅拌器: DF-101S 型,武汉德力祥仪器设备有限公司;

真空冷冻干燥机: LGJ-30FD 型,北京松源华兴科技发展有限公司;

低速离心机: SC-3614 型,安徽中科中佳仪器有限公司;

18 角度激光光散射凝胶色谱: DAWN HELEOSII 型,美国 WYATT 公司;

质构仪: TA.XT plus 型,英国 TA 公司;

扫描电子显微镜: JSM-6390LV 型,日本 NTC 公司;

流变仪: AR2000ex 型,美国 TA 公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 降解魔芋胶的制备

将花魔芋魔芋粉在高压蒸汽灭菌锅中采用 4 种不同加热温度加热一定时间,收集干燥后,采用凝胶排阻色谱—激光光散射联用法测定分子量。未降解魔芋胶分子量为 621.5 kDa,4 个降解魔芋胶样品其分子量分别为 415.6,325.6,233.3,137.8 kDa。

1.2.2 凝胶样品的制备 室温下将 0.5% 魔芋胶溶入水中搅拌 2 h,搅拌结束后静置 1 h,待其充分溶胀后置于 75 °C 水浴中,根据配比添加 2% 的 $\kappa$ -卡拉胶,不断搅拌使两者充分混合,经一定时间水浴消泡后,倒入相应模具中初步成型,再将其放入 25 °C 恒温培养箱中凝胶 12 h 即可。样品 A 由 $\kappa$ -卡拉胶单独制备,样品 B~F 分别由分子量为 621.5,415.6,325.6,233.3,137.8 kDa 的魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶混合制备。

1.2.3 机械性能测定 采用质构仪对凝胶机械性能进行测定。

(1) 拉伸性能测定参数:横轴拉伸模式,A/TG 探头,测前速率 2 mm/s,测试速度 2 mm/s,测后速率 10 mm/s,拉伸距离 140 mm,试样每份平行测 5 次。

(2) 弹性、硬度测定参数:TPA 模式,P/0.5 探头,测前速率 1 mm/s,测试速度 1 mm/s,试后速率 2 mm/s,触发力 5.00 g,形变量 50%,试样每份平行测 3 次,各测 4 个点,共 12 个点。

1.2.4 流变特性测定 将凝胶置于帕尔贴板上,进行温度扫描、频率扫描、稳态剪切扫描测试。使用直径 60 mm 的平行板夹具,平行板间距均设置为 500  $\mu$ m,平衡时间 120 s。温度扫描在应变 1%(通过应变扫描确定),频率 10 rad/s 的条件下考察凝胶黏弹性与温度的关系,扫描范围 75~25 °C,降温速率 2 °C/min;频率扫描在 25 °C,应变 1%的条件下考察凝胶黏弹性随频率的变化,扫描范围为 0.1~100.0 rad/s;稳态剪切扫描在 75 °C 下进行,剪切速率为 0.01~100.00  $s^{-1}$ 。

1.2.5 持水性测试 将制备好的凝胶,离心前擦干表面水分称重,然后在 25 °C 条件下将样品置于 10 000 r/min 转速下离心 15 min 后取出凝胶,用吸水纸擦干其表面水分称重,每个样品设 6 次重复,凝胶的持水性可由式(1)求得。

$$WHC = \frac{m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

WHC——凝胶持水性,%;

$m_2$ ——凝胶离心后的质量,g;

$m_1$ ——凝胶离心前的质量,g。

1.2.6 SEM 分析 凝胶样品通过浸入液氮中进行冷冻破碎,以避免水分迁移。然后将冷冻的样品立即转移到真空冷冻干燥机中冷冻干燥 48 h 得到所需冻干样品。再用扫描电镜观察之前,样品需进行喷金处理,涂布时间约为 30 s,最后在 15 kV 的加速电压下捕获图像以观察样品的表面形态。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同降解度魔芋胶对凝胶机械性能的影响

2.1.1 拉伸性能 由图1可以看出,凝胶的断裂强度(TS)和断裂伸长率(EIO)均随魔芋胶分子量的减小呈先增大后减小的趋势。单独的 $\kappa$ -卡拉胶形成的凝胶具有最小的TS和较小的EIO,当未降解魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶复配后其TS和EIO增大,这是因为KGM分子穿插在 $\kappa$ -卡拉胶形成的网络结构中,形成分子间氢键从而增强了凝胶性能<sup>[17]</sup>。魔芋胶经有限降解后(分子量415.6 kDa),复配胶的TS、EIO同时显著增大;当进一步降解后(分子量<325.6 kDa)凝胶机械性能急剧下降。综上所述,魔芋胶在分子量为415.6 kDa时对复配凝胶机械性能的提升最显著。Kohyama等<sup>[18]</sup>在研究中提出“在KGM与 $\kappa$ -卡拉胶的复配体系中,随着KGM分子量的增大,分子链长度增加,与 $\kappa$ -卡拉胶的弱结合位点越多,因此形成的凝胶拥有更为紧密的结构,其断裂应力和模量也会增加”,这在137.8~325.6 kDa的分子量分布范围内是成立的,但分子量>415.6 kDa时并不成立,但这种现象与Mitchel<sup>[19]</sup>提出的“一个凝胶体系中当其中一种成分的分子量大于某临界值时,则体系的规则程度和弹性模量便不再直接受

到分子量影响”的观点是一致的。基于此,笔者对复合凝胶机械强度增强的原因进行如下推测:①魔芋胶的分子量在415.6 kDa附近时与 $\kappa$ -卡拉胶弱结合位点较多;②有限降解使KGM分子运动性增强,从而对复合凝胶在溶胶—凝胶转变中两组分的相分离和自组装进程产生影响。

2.1.2 质构性能 由图2可以看出,凝胶的硬度随魔芋胶降解度的增大呈先增大后减小的趋势,并在233.3 kDa时达到最大,此时凝胶依然维持高弹性状态,但当凝胶分子量<233.3 kDa时,这两个质构关键指标显著降低。推测分子量为233.3 kDa的魔芋胶在浓度为0.5%时,仍大于其临界缠结浓度,此时KGM分子间相互缠绕并能够更加均匀地穿插在由 $\kappa$ -卡拉胶构成的凝胶骨架中,从而赋予复合凝胶良好的硬度和弹性。更低分子量的魔芋胶(137.8 kDa)则因为KGM分子无法相互缠结,仅起到填充作用<sup>[20]</sup>。

### 2.2 不同降解度魔芋胶对凝胶流变性能的影响

2.2.1 凝胶频率扫描 图3显示了凝胶体系的储能模量( $G'$ )、损耗模量( $G''$ )随振荡频率变化的关系图,稳定状态下6种凝胶的储能模量 $G'$ 均大于其损耗模量 $G''$ ,呈显著

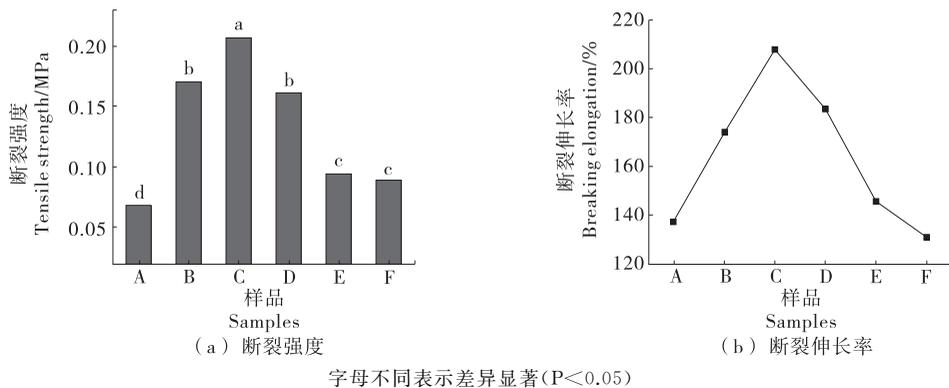


图1 不同降解度魔芋胶对凝胶断裂强度和断裂伸长率的影响

Figure 1 Effect of different degrees of degradation of KGM on the tensile strength and breaking elongation of gel

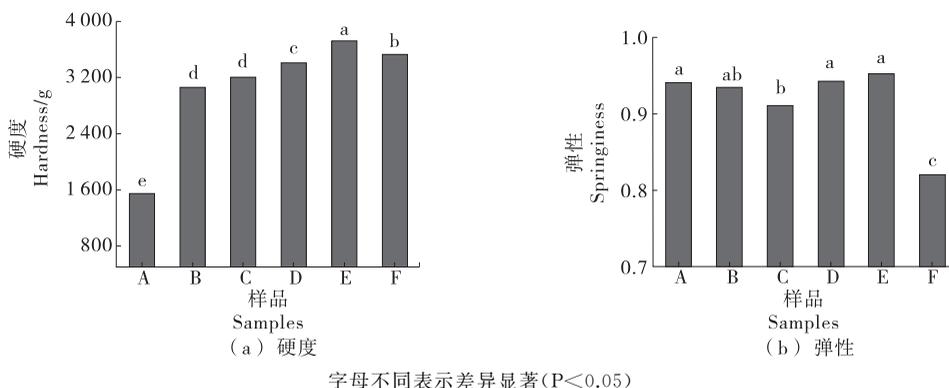


图2 不同降解度魔芋胶对凝胶质构性能的影响

Figure 2 Effect of different degrees of degradation of KGM on the texture properties of gel

的凝胶特性。图 3(b)中未降解魔芋胶与  $\kappa$ -卡拉胶复配后其储能模量  $G'$  稍低于  $10^4$  Pa, 而图 3(c)中分子量为 415.6 kDa 的魔芋胶与  $\kappa$ -卡拉胶复配后的  $G'$  值则稍高于  $10^4$  Pa, 但随着魔芋胶的进一步降解,  $G'$  呈下降趋势, 且凝胶变得不稳定, 与图 4 中剪切应力和黏度随魔芋胶分子量的变化是一致的。有研究<sup>[21]</sup>表明, 二者复合凝胶体系内存在两类凝胶区, 其一由  $\kappa$ -卡拉胶自身的螺旋结构形成, 另一个由魔芋胶与  $\kappa$ -卡拉胶共同构成。魔芋胶分子量轻微地降低(415.6 kDa), 可能使 KGM 更好地穿插在与  $\kappa$ -卡拉胶共同构成的凝胶区中, 从而提高其凝胶性能, 但是 KGM 分子量的进一步降低会导致凝胶区 KGM 之间的缠接减弱, 表现为凝胶储能模量的减弱。

2.2.2 凝胶稳态剪切扫描 图 4(a)显示了不同降解度魔芋胶与  $\kappa$ -卡拉胶复合溶胶剪切应力与剪切速率的关系。在较低的剪切速率( $0.01 \sim 0.10 \text{ s}^{-1}$ )下, 凝胶的剪切应力缓慢增加, 当剪切速率达到  $0.10 \text{ s}^{-1}$  时, 凝胶的剪切应力迅速增大。这可能是在低速剪切区, 分子在剪切力作用下发生了较为明显的结构解缠结, 随着时间的延长, 使凝胶内部的分子会逐渐恢复刚开始的缠结状态, 使得凝胶的网络结构得以维持, 而在高剪切速率范围内则无法恢复。图 4(b)显示了不同降解度魔芋胶与  $\kappa$ -卡拉胶复合溶胶表观黏度与剪切速率的关系。较低的剪切速率( $0.01 \sim 0.10 \text{ s}^{-1}$ )下, 凝胶的表观黏度降低缓慢, 但在高剪切速率范围内, 表观黏度迅速下降, 说明在高剪切速率范围内,

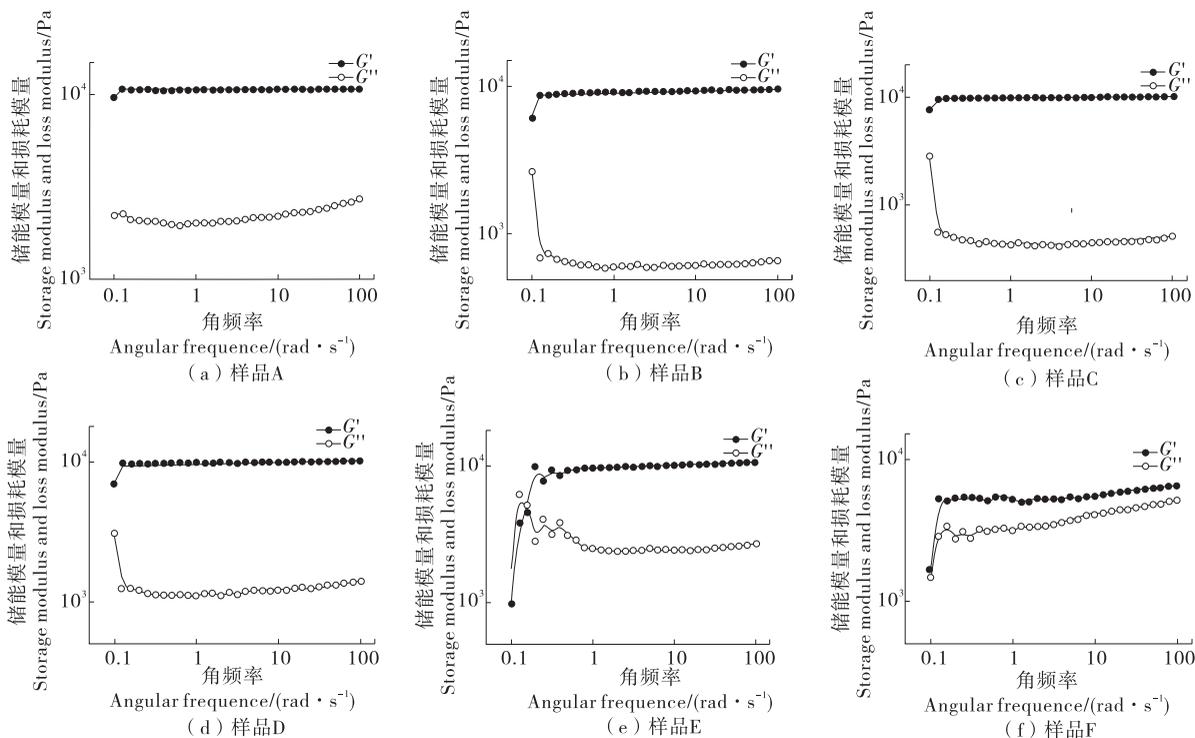


图 3 不同降解度魔芋胶与  $\kappa$ -卡拉胶复合凝胶的频率扫描模式曲线

Figure 3 The curves of  $G'$  (solid) and  $G''$  (open) of KGM and  $\kappa$ -carrageenan compound gels with different degrees of degradation of KGM in frequency scanning mode

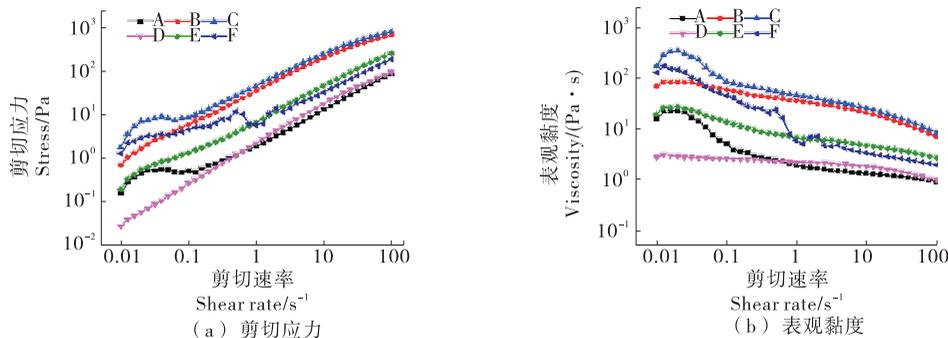


图 4 不同降解度魔芋胶与  $\kappa$ -卡拉胶复合溶胶的稳态剪切扫描模式曲线

Figure 4 The steady state flow curves of KGM/  $\kappa$ -carrageenan solution with different degrees of degradation of KGM

链缠结点被破坏的速度大于重构速度,分子的结构无法恢复,表现为表观黏度的下降。另外表观黏度可以反映凝胶内部结构被破坏的难易程度<sup>[22]</sup>,由图4可知,破坏 $\kappa$ -CA/KGM(415.6 kDa)形成的网络结构最难,说明分子量为415.6 kDa的魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶形成的复合凝胶协同增效性最强。而且,在整个剪切速率范围内,分子量为415.6 kDa的魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶形成的复合凝胶的剪切应力和表观黏度均大于未降解魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶形成的凝胶。

**2.2.3 凝胶温度扫描** 图5显示了不同降解程度的魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶复合凝胶的储能模量( $G'$ )、损耗模量( $G''$ )与温度的关系,各类混合凝胶与 $\kappa$ -卡拉胶凝胶过程相似,说明复配凝胶体系是以 $\kappa$ -卡拉胶形成的双螺旋结构为主。整个降温过程中,复合凝胶的储能模量 $G'$ 均高于 $\kappa$ -卡拉胶独自形成的凝胶,且分子量为415.6 kDa的魔芋胶与卡拉胶所复配出的凝胶储能模量相对更大。值得注意的是:未降解魔芋胶的加入几乎没有改变 $\kappa$ -卡拉胶的凝胶转变温度,但分子量为415.6,325.6 kDa魔芋胶的添加使得凝胶转变温度显著升高,但进一步降解后其凝胶转变温度又回到原位。凝胶转变温度的高低,影响到溶胶—凝胶转变中两组分的相分离或自组装进程<sup>[23]</sup>,推测 $\kappa$ -卡拉胶与分子量为415.6 kDa的魔芋胶复配后之所以展示出良好机械特性,与其冷却过程中,处于溶胶状态下

的时间更短、相分离发生更少;相反处于凝胶状态下时间更长,自组装更加充分有关。

**2.3 不同降解度魔芋胶对凝胶持水性的影响**

图6为不同降解度的魔芋胶对凝胶持水特性的影响,加入未降解魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶复配后,凝胶持水性稍有增加但不显著,当分子量为415.6 kDa的魔芋胶与卡拉胶复配后其持水性有显著性的增加( $P < 0.05$ ),但魔芋胶进一步降解后其持水性降低,与以上机械特性、流变特性的规律一致。

**2.4 不同降解度魔芋胶对凝胶结构的影响**

图7是不同降解度魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶复配后得到的扫描电子显微镜图,由前文各项表征得知魔芋胶经轻度降解后(415.6 kDa),复配凝胶的性能得到显著提升,但过度降解的魔芋胶(137.8 kDa)却适得其反。所以,选取有代表性的样品,针对魔芋胶最高分子量、最适分子量、最低分子量分别进行复合凝胶微观结构的观察比较。从图7可以看出, $\kappa$ -卡拉胶单独形成的凝胶多孔、孔径较大且不规则;加入未降解的魔芋胶后其孔洞变小,均一性增大,但表面粗糙;加入415.6 kDa魔芋胶后其网络结构紧密且有序、呈均匀细密孔状,且表面光滑,而最大降解度魔芋胶与卡拉胶复配后形成的凝胶结构松散,孔洞大且不均一,这一表征与水凝胶的性能表现相呼应。

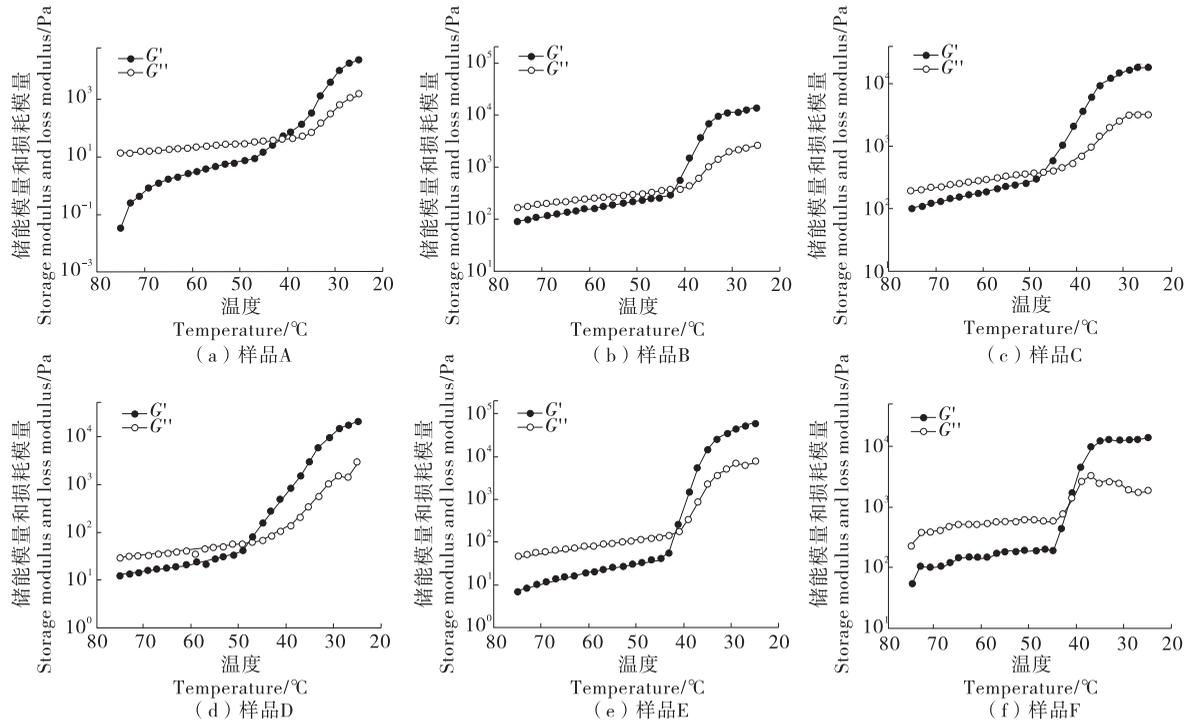
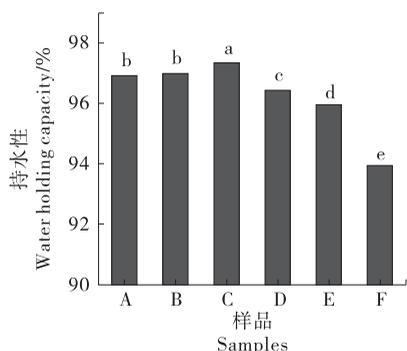


图5 不同降解度魔芋胶与 $\kappa$ -卡拉胶复合凝胶的温度扫描模式曲线

Figure 5 The curves of  $G'$  (solid) and  $G''$  (open) of KGM and  $\kappa$ -carrageenan compound gels with different degrees of degradation of KGM in temperature scanning mode



字母不同表示差异显著(P<0.05)

图 6 不同降解度魔芋胶对凝胶持水性的影响

Figure 6 Effect of different degradation degrees of KGM on water holding capacity (WHC) of gels

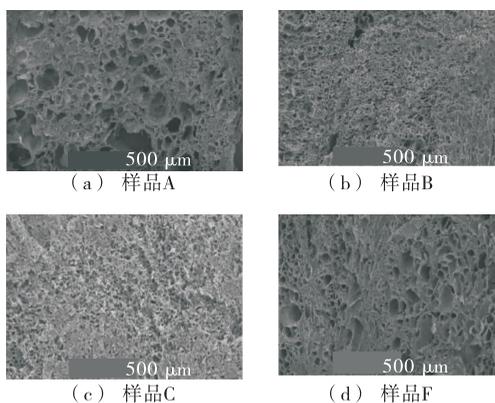


图 7 不同降解度魔芋胶与 κ-卡拉胶复配后凝胶的微观结构

Figure 7 TEM image of freeze-dried KGM/κ-carrageenan mixed gels with different degradation degrees of KGM (×50)

### 3 结论

对花魔芋魔芋胶进行有限湿热降解处理,是提升魔芋胶/κ-卡拉胶复配凝胶性能的有效方法,但降解程度的控制必须恰当。试验中未降解魔芋胶(621.5 kDa)经轻度降解后(415.6 kDa),显著提升了复配凝胶的凝胶转变温度(5.98 ℃),同时储能模量 G′、剪切应力、黏度小幅增加,分别增加了 592.04 Pa、126.09 Pa、1.26 Pa·s,致使冷却成胶后,凝胶断裂强度、断裂伸长率、凝胶持水性显著增加(P<0.05),分别提高了 21.64%,163.35%,0.39%,SEM 显示凝胶结构更加紧密有序。

在多糖水凝胶研究中心,通常认为分子量大更利于凝胶优越性能的形成。但试验揭示在溶胶—凝胶转变中,尽管魔芋胶/κ-卡拉胶的配比一致,但由于魔芋胶具有分子量大、分子运动性小,分子量小、分子运动性大的性质,导致各复配凝胶特性的不同。有限湿热降解的魔芋

胶(分子量 415.6 kDa)与卡拉胶复配之所以展现出良好的凝胶特性,与其在溶胶—凝胶转变中的相分离或自组装进程有关,这不仅为诸如冷冻产品的生产提供了一个新的配料,更揭示了高浓度多糖水凝胶复杂体系的最终性能受到各种消长因素的影响,而对这一个消长过程的综合优化,可为相关产品开发的思路作为借鉴。此外,关于有限降解魔芋胶对复合凝胶体系的冷却凝胶演变过程的作用机制,仍有待深入研究。

### 参考文献

- [1] 代佳佳,高娃,李艳,等.混配魔芋多糖胶凝胶特性的研究[J].沈阳医学院学报,2019,21(1):54-58.
- [2] 商龙臣,王凌,李晶,等.不同黏度魔芋葡甘聚糖对食欲和能量摄入量的影响[J].食品安全质量检测学报,2019,10(15):5 044-5 051.
- [3] 李斌.魔芋葡甘聚糖物理共混研究新进展[J].冷饮与速冻食品工业,2004(1):35-37.
- [4] 梅婷.魔芋葡甘聚糖湿热降解特性研究[D].武汉:华中农业大学,2012:13.
- [5] 林瑞君.复配卡拉胶在改善火腿肠品质方面的应用研究[D].厦门:集美大学,2018:4-5.
- [6] 胡国华.复合食品胶的研究及其在食品工业中的应用[J].中国食品添加剂,2004(增刊1):165-170.
- [7] 何东保,彭学东,詹东风.卡拉胶与魔芋葡甘聚糖协同相互作用及其凝胶化的研究[J].高分子材料科学与工程,2001,17(2):28-30.
- [8] 魏玉.κ-卡拉胶的凝胶化作用及其与魔芋胶协同作用特性研究[D].长沙:中南林业科技大学,2010:28-49.
- [9] 吴佳煜,杨丹,龚静妮,等.魔芋葡甘聚糖/κ-卡拉胶复合凝胶制备条件的优化[J].食品工业科技,2018,39(15):171-175.
- [10] PENROJ P, MITCHELL J, HILL S, et al. Effect of konjac glucomannan deacetylation on the properties of gels formed from mixtures of kappa carrageenan and konjac glucomannan[J]. Carbohydrate, 2005, 59(3): 367-376.
- [11] SHEN D, WAN C, GAO Shan-jun. Molecular weight effects on gelation and rheological properties of konjac glucomannan-xanthan mixtures[J]. Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, 2010, 48(3): 313-321.
- [12] 贺雪姣.低限度降解魔芋胶与 κ-卡拉胶的复配研究及应用[D].无锡:江南大学,2012:22-33.
- [13] 姚雪,罗学刚,韩本超.不同分子量魔芋葡甘露低聚糖的流变特性[J].化工进展,2011(11):168-174.
- [14] 向进乐,陈文品,刘勤晋.魔芋低聚糖的研究进展[J].中国食品添加剂,2004(1):20-23.
- [15] 段蕾,孟艳芬,高润池.魔芋低聚糖的制备及其应用[J].广西轻工业,2007,23(12):7-8.

(下转第 54 页)

板栗聚为一类,此类群板栗可溶性蛋白含量高、持水性强,脂肪含量低。

### 3 结论

以广西天峨、隆安、隆林 3 个产地的生熟板栗为原料,分析其色泽、营养成分、功能成分以及加工特点,并对其品质进行了评价。结果表明,板栗品质因产地和生熟状态而不同;熟板栗的色泽更深,脂肪含量、氨基酸含量和持水量更高,生板栗的可溶性蛋白和  $V_C$  含量更高、抗氧化能力更强;生板栗中,天峨的更亮黄、可溶性糖、脂肪含量、 $V_C$ 、氨基酸含量和必需氨基酸总量最高;熟板栗中,天峨的氨基酸和必需氨基酸总量最高,隆林的持水性最高。聚类分析显示,天峨生板栗与熟板栗聚为一类,其色泽更亮黄,多酚、 $V_C$ 、DPPH 自由基清除率高。综上,天峨板栗的各营养成分含量较高,品质较好。3 个产地的生板栗持水性均显著低于熟板栗( $P < 0.05$ ),持油性均显著高于熟板栗( $P < 0.05$ ),表明生板栗更适合应用于曲奇、桃酥、膨化等食品,熟板栗更适合应用于板栗糊、面包等产品。后续可将不同的板栗粉进行深加工,丰富市场上的板栗产品。

### 参考文献

- [1] 高海生, 常学东, 蔡金星, 等. 我国板栗加工产业的现状与发展趋势[J]. 中国食品学报, 2006, 6(1): 429-436.
- [2] 聂牧, 王云, 郭守东, 等. 板栗多糖抗动脉血栓形成的作用[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 187-190.
- [3] 李清宇, 杨颖, 贾琳斐, 等. 板栗多糖的分离纯化、结构分析及抗疲劳作用的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32(7): 767-772.
- [4] 彭毅秦, 肖猛, 何江红, 等. 板栗粉面皮工艺及品质研究[J]. 食品与发酵科技, 2019, 55(1): 53-58.
- [5] 李瑶琪, 张慧, 孔繁东, 等. 板栗馒头开发研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(11): 135-139.
- [6] YANG Fang, HUANG Xing-jian, ZHANG Cong-lan, et al. Amino acid composition and nutritional value evaluation of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* Blume) and its protein subunit[J]. RSC Advances, 2018, 8(5): 2 653-2 659.
- [7] 张乐, 王赵改, 杨慧, 等. 不同板栗品种营养成分及风味物质分析[J]. 食品科学, 2016, 37(10): 164-169.
- [8] MORRONE L, DALLI'ASTA C, SILVANINI A, et al. The influence of seasonality on total fat and fatty acids profile, protein and amino acid, and antioxidant properties of traditional Italian flours from different chestnut cultivars[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 192: 132-140.
- [9] 裘纪莹, 庞婷婷, 周庆新, 等. 银杏花粉抗氧化成分的提取工艺优化[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1 365-1 372.
- [10] 周葵, 张雅媛, 黄会玲, 等. 不同熟化过程中板栗品质的变化研究[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 103-108.
- [11] 蔡菁华, 王芳, 庞美霞, 等. 影响熟化板栗褐变的因素研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(10): 103-106.
- [12] 阚黎娜, 李倩, 谢爽爽, 等. 我国板栗种质资源分布及营养成分比较[J]. 食品工业科技, 2016, 37(20): 396-400.
- [13] 张瑞霞, 熊善柏, 赵思明, 等. 蒸煮工艺对米饭脂质及感官品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(5): 4-7.
- [14] 宋慧敏. 热处理对牛乳风味及保藏品质的影响[D]. 黑龙江: 东北农业大学, 2015: 34-35.
- [15] 张建军, 谢丽源, 赵树海, 等. 不同产地银耳抗氧化活性物质及抗氧化能力分析[J]. 西南农业学报, 2015, 28(1): 333-338.
- [16] 李晓丽, 王成, 陶永霞, 等. 干燥方式对无核紫葡萄品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(11): 143-146, 211.
- [17] GONCALVES B, BORGES O, COSTA H S, et al. Metabolite composition of chestnut (*Castanea sativa* Mill.) upon cooking: Proximate analysis, fibre, organic acids and phenolics[J]. Food Chemistry, 2010, 122(1): 154-160.
- [18] KOHYAMA K, IIDA H, NISHINARI K. A mixed system composed of different molecular weights konjac glucomannan and kappa carrageenan: Large deformation and dynamic viscoelastic study[J]. Food Hydrocolloids, 1993, 7(3): 213-226.
- [19] MITCHELL J R. The rheology of gels[J]. Journal of Texture Study, 1980(11): 315-337.
- [20] LI Bin, XIE Bi-jun, KENNEDY John F. Study on the molecular chain morphology of konjac glucomannan[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 64(4): 510-515.
- [21] 余思敏. 不同脱乙酰度魔芋胶/ $\kappa$ -卡拉胶共混体系溶液行为及凝胶特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 18-24.
- [22] 王晓园, 杨晓泉, 朱建华. 大豆蛋白组分与  $\kappa$ -卡拉胶混合凝胶的流变学研究[J]. 现代食品科技, 2008(6): 9-13.
- [23] LIU Si-jun, LI Lin. Thermoreversible gelation and scaling behavior of  $Ca^{2+}$ -induced  $\kappa$ -carrageenan hydrogels[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 61: 793-800.

(上接第 22 页)

- [16] 李斌, 汪超. 国外魔芋葡甘聚糖结构及其溶液行为研究进展[J]. 包装与食品机械, 2003(5): 23-26.
- [17] 王元兰, 黄寿恩, 魏玉.  $\kappa$ -卡拉胶与魔芋胶复配胶的流变性能及其微观结构研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(7): 49-54.
- [18] KOHYAMA K, IIDA H, NISHINARI K. A mixed system composed of different molecular weights konjac glucomannan and kappa carrageenan: Large deformation and dynamic viscoelastic study[J]. Food Hydrocolloids, 1993, 7(3): 213-226.
- [19] MITCHELL J R. The rheology of gels[J]. Journal of Tex-