

亚麻胶-琼脂混合凝胶体系物理和流变性质*

汪立君¹ 黄鑫² 毕崇浩² 李栋²

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 研究了亚麻胶-琼脂混合凝胶体系物理性质和流变性质,通过透光性和持水性,研究了亚麻胶含量对亚麻胶-琼脂混合凝胶体系物理性质的影响。利用温度扫描、频率扫描试验研究了亚麻胶对混合凝胶体系凝胶温度、融化温度及凝胶强度等流变特性的影响。频率扫描试验得到亚麻胶-琼脂混合凝胶体系的储能模量符合幂律模型。

关键词: 亚麻胶 琼脂 物理性质 流变性质

中图分类号: TS201.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0193-05

Physical Properties and Rheological Properties of Flax Gum – Agar Mixed Gel System

Wang Lijun¹ Huang Xin² Bi Chonghao² Li Dong²

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The physical properties and rheological properties of flax gum – agar mixed gels were researched. The effect of flax gum content on the physical properties of the mixed gels system were investigated in light transmission and freeze dried experiments. The influence in gel temperature, melting temperature and gel strength were also tested in both temperature sweep and frequency sweep. Storage modulus was regressed with power-law model in frequency sweep test.

Key words: Flax gum Agar Physical properties Rheological properties

引言

琼脂是食品生产中常用的食品添加剂,其凝胶形式广泛应用于各种产品中,并且具有很强的凝胶特性^[1~2]。亚麻胶是一种从亚麻籽中提取的天然食品胶,具有良好的功能特性,可用作增稠剂、粘合剂、稳定剂、乳化剂和发泡剂,在食品、日用化工、制药等行业具有广泛的用途,是一种极具潜力的天然植物胶资源^[3~5]。琼脂和亚麻胶作为重要的食品胶、添加剂,在食品工业上都有着广泛的应用。琼脂的应用已经被证明,而亚麻胶虽然应用才刚刚起步,但已被证明在很多方面的应用优于其他食用胶^[6~9]。所以研究琼脂和亚麻胶的功能特性对它们在食品中的应用具有指导作用。同时,正是由于琼脂和亚麻胶

的特殊性质,将不同浓度的亚麻胶加入到琼脂中,会对琼脂凝胶在理化性质和流变性质方面产生影响。本文在不同质量分数琼脂中添加不同质量分数的亚麻胶,形成亚麻胶-琼脂混合凝胶体系。通过分光光度计测定混合凝胶的吸光度,利用凝胶的冷冻脱水收缩性质测定混合凝胶的脱水率,用流变仪对凝胶进行频率扫描测试、凝胶温度与强度测试,探讨亚麻胶-琼脂混合凝胶的物理性质及流变性质,以期对亚麻胶和琼脂在食品工业上的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验原料

试验中所用的琼脂粉(生化级)购自北京奥博星生物技术有限责任公司,干燥失重不大于18%,

收稿日期: 2012-10-28 修回日期: 2013-04-06

* 国家自然科学基金资助项目(31000813)

作者简介: 汪立君,副教授,博士生导师,主要从事食品科学与工程研究, E-mail: wlj@cau.edu.cn

灰分不大于 5%。亚麻籽(湿基含水率为 6.2%)购自河北省香河县农贸市场,品种类型为油用亚麻籽。

1.2 主要仪器设备

AR2000ex 型动态流变仪(TA 仪器公司,美国),TU-1810 型紫外-可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司),S10-2 型磁力搅拌器(江苏金坛精达仪器厂),AL204 型分析天平(Mettler-Toledo International Inc,瑞士),101-3 型电热恒温鼓风干燥箱(上海路达实验仪器有限公司),BD-518A 型冰柜(海尔有限公司)。

1.3 亚麻胶的制备

称取 100 g 亚麻籽,在筛子中用水冲洗以去除尘土,同时去除亚麻籽中的异物。然后将亚麻籽置于装有 900 mL 去离子水的锥形瓶中。根据文献[10]的提取方法,将亚麻籽和水的混合物的锥形瓶置于 60℃ 水浴锅中用搅拌器搅拌 5 h,转速设定为 600 r/min。提取的亚麻胶溶液用 40 目的筛子过滤,然后用 2 倍体积的 95% 酒精沉淀,最后用玻璃棒缓慢搅拌,沉淀的亚麻胶会缠绕在玻璃棒上。将搜集的亚麻胶置于 80℃ 的热风干燥箱中干燥 8 h。

1.4 亚麻胶-琼脂混合凝胶的制备

亚麻胶(质量分数为 0%, 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.3%)与琼脂(质量分数为 0.5%, 1%, 2%)的混合凝胶按照如下方法制备:先将一定量的琼脂溶于 50 g 去离子水中,并用磁力搅拌器以 600 r/min 混合均匀,然后将不同含量的亚麻胶加入琼脂溶液中并保持搅拌,使亚麻胶-琼脂混合液在磁力搅拌器台面温度 150℃ 下加热煮沸并在沸腾状态下保持 2 min。未加亚麻胶的琼脂(质量分数为 0.5%, 1%, 2%)也用相同的方法制备。将加热煮沸的混合液冷却形成凝胶进行透光性和冷冻脱水测试,将煮沸的混合液冷却至 75~80℃,利用流变仪进行流变试验。

1.5 亚麻胶-琼脂混合凝胶物理性质的测试

(1) 透光性

亚麻胶-琼脂混合凝胶的透光性用其在分光光度计中的吸光值来表示。将煮沸的亚麻胶-琼脂混合物放置 5 min,将液体倒入比色皿中,形成凝胶后放置 2 h,待其稳定后使用 TU-1810 型紫外-可见吸光光度计在波长 500 nm 处测定其吸光值,使用去离子水作为空白对照。

(2) 持水性

亚麻胶-琼脂混合凝胶的冷冻脱水测试是将煮沸的混合液冷却 5 min 后将 20 mL 的液体倒入离心管中,待其形成凝胶并放置 2 h,将装有凝胶的离心管置于冰柜(-15℃)中冷冻 8 h 后将其从冰柜中取

出解冻,待其温度上升到室温(25℃)测定其脱出水分的含量(mL),并计算脱水率。

1.6 亚麻胶-琼脂混合凝胶流变性质的测试

流变测试均在 AR2000ex 流变仪上完成。流变仪底部样品台配备的 Peltier 系统可以通过循环水精确控制试验温度。每次试验前,将底部金属盘的温度设置为 60℃,然后将样品置于盘上,60℃ 可以保证样品保持液体状态,不形成凝胶。加样后,立即将夹具降下,在样品四周滴加硅油以防止样品在试验过程中蒸发。在测试前设定 2 min 的平衡时间。

(1) 温度扫描

温度扫描试验分为降温试验和升温试验两个部分,降温扫描试验从 60℃ 开始,以 5℃/min 的降温速率冷却至 20℃ 结束;升温扫描试验从 20℃ 开始,以 5℃/min 的升温速率升温到 90℃ 结束。选用直径为 40 mm 的铝制平板夹具,间隙设定为 1 000 μm,应变范围设定为 2% (在线性粘弹区域内),角频率为 6.283 rad/s。在降温扫描试验中,将储能模量 G' 和损失模量 G'' 相交点的温度取作凝胶温度;在升温扫描试验中,将储能模量 G' 和损失模量 G'' 相交点的温度取作融化温度。将降温扫描试验结束时(温度为 20℃)的储能模量 G' 的值定义为混合凝胶的凝胶强度。

(2) 频率扫描

混合凝胶的小幅震荡频率扫描试验是在降温扫描试验结束后,混合凝胶在 20℃ 下形成后进行的。震荡的角频率范围为 0.1~10 rad/s,选用直径为 40 mm 的铝制平板夹具,间隙设定为 1 000 μm;根据应变扫描测试预试验的结果,将频率扫描测试的应变范围设定为 2% (线性粘弹区内)。

1.7 动态流变特性模型参数与统计分析

频率扫描试验中,样品动态模量随频率变化的规律主要是储能模量 G' 随着频率变化的关系,可用幂律模型进行描述和拟合,幂律模型方程为

$$G' = K' f^{n'}$$

式中 K' ——幂律模型常数,Pa·s^{n'}/rad^{n'}

n' ——频率的幂律指数(无量纲)

f ——角频率,rad/s

n' 值可以用来描述在限定的频率范围内样品的弹性模量对频率的敏感程度,它可以有效地提供食品原料粘弹特性的信息^[11]。

流变试验的数据通过 TA Rheology Advantage Data Analysis software V 5.4.7 软件直接获取。所有数据均用 3 次测定的平均值及标准差表示。同时利用 SPSS 软件,通过邓肯多重检验确定不同质量分数亚麻胶在不同指标上的显著性(<0.05)。所有流

变学测试均重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 亚麻胶-琼脂混合凝胶的物理性质

2.1.1 透光性

亚麻胶-琼脂混合凝胶在波长 500 nm 处的吸光值被用作透光性的表征,其结果如图 1 所示。随着亚麻胶质量分数的增加,亚麻胶-琼脂混合凝胶的吸光值逐渐增加,凝胶的透光性逐渐降低。同时,在亚麻胶质量分数相同的情况下,混合凝胶的吸光值随着琼脂质量分数的增加而增大,凝胶的透光性逐渐降低。

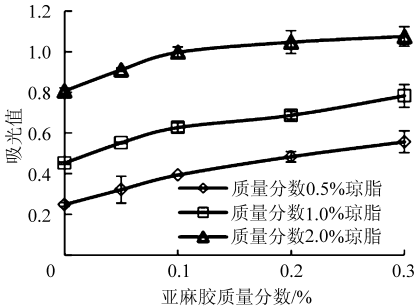


图 1 琼脂不同质量分数条件下亚麻胶质量分数对混合凝胶透光性的影响

Fig. 1 Influence of agar content on variation of translucency of mix gel with flax gum content

2.1.2 持水性

亚麻胶对琼脂凝胶持水性的影响是用凝胶的冷冻脱水率来表征的,其结果如图 2 所示。在琼脂质量分数一定的情况下,随着亚麻胶质量分数的增加,亚麻胶-琼脂混合凝胶的冷冻脱水率逐渐降低,这表明亚麻胶的存在提高了凝胶的持水性。其中在琼脂质量分数为 0.5% 时亚麻胶对混合凝胶影响最为显著,不加入亚麻胶的琼脂凝胶的脱水率为 84.0%,添加质量分数为 0.3% 的亚麻胶时,脱水率降至 46.5%,说明亚麻胶对混合凝胶具有显著的持水作用。同时,在亚麻胶质量分数一定时,随着琼脂质量分数的增加,凝胶的脱水率也逐渐下降。

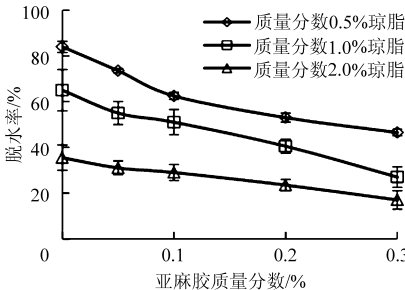


图 2 琼脂不同质量分数条件下亚麻胶质量分数对混合凝胶脱水率的影响

Fig. 2 Influence of agar content on variation of frozen dehydration rate of mix gel with flax gum content

2.2 亚麻胶-琼脂混合凝胶的流变性质

2.2.1 温度扫描

亚麻胶-琼脂混合溶液在高于凝固点的温度下处于熔融态,遇冷后形成半透明的固体凝胶。图 3 为质量分数 0.1% 亚麻胶和质量分数 1% 琼脂混合凝胶体系在降温过程中的储能模量 G' 和损失模量 G'' 随温度的变化。降温扫描试验中,在温度为 60℃ 的条件下,混合体系的损失模量 G'' 略高于储能模量 G' ,说明其液态性质。当温度开始以 5℃/min 的降温速率匀速下降后,混合体系的储能模量 G' 和损失模量 G'' 快速升高,其中储能模量 G' 的增幅明显大于损失模量 G'' ,当储能模量 G' 与损失模量 G'' 的值相等时,达到凝胶形成的临界点 A 点,此时的温度定义为凝胶温度。随温度继续下降,分子间逐渐呈现牢固的网络结构形成凝胶。试验中,其他质量分数组成的亚麻胶-琼脂凝胶混合体系的动态模量(储能模量 G' 和损失模量 G'') 变化趋势与质量分数为 0.1% 亚麻胶和 1% 琼脂混合体系相同。混合物分子在受热的状态下,激活的分子激烈运动使粘弹性均处于较低的水平,随着温度的逐渐降低,分子运动减慢,最终导致分子重排并形成稳定的化合键,从而构建牢固凝胶网络结构。

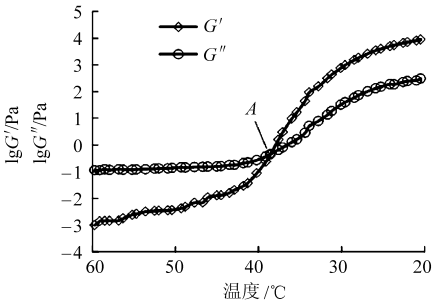


图 3 质量分数 0.1% 亚麻胶和质量分数 1% 琼脂混合体系降温扫描时温度对储能模量 G' 和损失模量 G'' 的影响

Fig. 3 Influence of temperature on storage modulus G' and loss modulus G'' of 0.1% flax gum and 1% agar mixed system in cooling scan experiment

亚麻胶-琼脂混合凝胶属于热可逆凝胶,在受热后会重新转变为熔融态。图 4 为质量分数 0.1% 亚麻胶和质量分数 1% 琼脂凝胶混合体系在升温过程中的储能模量 G' 和损失模量 G'' 随温度的变化。升温扫描试验的温度变化范围设定为 20 ~ 90℃,在 20℃ 时,储能模量 G' 远大于损失模量 G'' ,当温度以 5℃/min 的升温速率匀速上升后,储能模量 G' 和损失模量 G'' 先是缓慢下降;在温度到达 70℃ 左右时,储能模量 G' 和损失模量 G'' 快速下降,但储能模量 G' 的降幅明显大于损失模量 G'' ;当储能模量 G' 与损失模量 G'' 的值相等时,达到凝胶融化的临界点 B 点,

此时的温度定义为融化温度。试验中,其他质量分数组成的亚麻胶-琼脂凝胶混合体系的动态模量(储能模量 G' 和损失模量 G'')变化趋势与质量分数 0.1% 亚麻胶和质量分数 1% 琼脂混合体系相同。琼脂凝胶的融化温度明显高于凝胶温度是琼脂的特有现象,称为滞后现象,亚麻胶-琼脂混合凝胶也表现有滞后现象,琼脂的许多应用优越性就是体现在它的这种高滞后性。

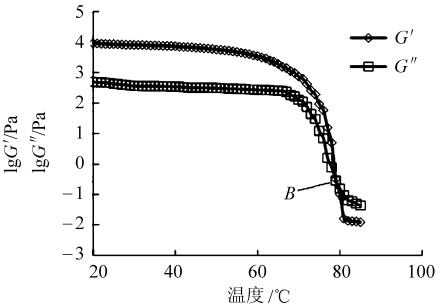


图 4 质量分数 0.1% 亚麻胶和质量分数 1% 琼脂混合体系升温扫描时温度对储能模量 G' 和损失模量 G'' 的影响
Fig.4 Influence of temperature on storage modulus G' and loss modulus G'' of 0.1% flax gum and 1% agar mixed system in heating scan experiment

图 5 为亚麻胶质量分数对亚麻胶-琼脂混合凝胶的凝胶温度的影响。凝胶温度随着亚麻胶质量分数的升高呈降低趋势。当亚麻胶质量分数大于 0.1% 时,亚麻胶对亚麻胶-琼脂混合凝胶的凝胶温度影响减小。在质量分数 0.5% 琼脂中加入质量分数 0.05% 亚麻胶制备混合凝胶时,凝胶温度就有明显下降,从 38.0℃ 降低到 33.6℃,再增加亚麻胶质量分数时凝胶温度变化不显著。在相同亚麻胶质量分数下,随着琼脂质量分数的增加,混合凝胶的凝胶温度升高。

图 6 为亚麻胶质量分数对亚麻胶-琼脂混合凝胶融化温度的影响。从图中可以看出,融化温度随

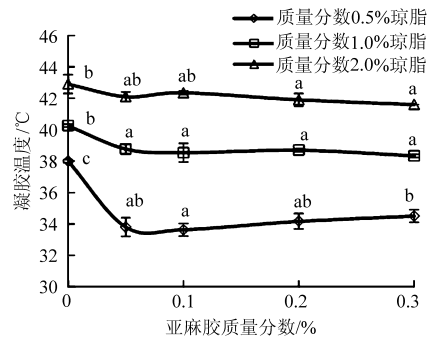


图 5 琼脂不同质量分数条件下亚麻胶质量分数对混合凝胶凝胶温度的影响
Fig.5 Influence of agar content on variation of gelling temperature of mix gel with flax gum content

* 不同字母表示数据间有显著区别 ($P < 0.05$),下同。

着亚麻胶质量分数的升高有降低的趋势,在质量分数 0.5% 琼脂中混合凝胶的融化温度有明显下降,但在质量分数 2% 琼脂中混合凝胶的融化温度变化不显著。在相同亚麻胶质量分数下,随着琼脂质量分数的增加,混合凝胶的融化温度升高。

在上述温度扫描试验中,通过对亚麻胶-琼脂混合凝胶的凝胶温度和融化温度的测定,说明亚麻胶的添加,明显降低了亚麻胶-琼脂凝胶的凝胶温度,而对融化温度的影响不明显。质量分数 0.5% 琼脂中不加入亚麻胶,温度滞后为 46.2℃,当加入质量分数 0.05% 亚麻胶的混合凝胶,温度滞后为 50.3℃。这表明,亚麻胶的加入增加了混合凝胶的滞后温度范围,提高了琼脂凝胶的滞后性。

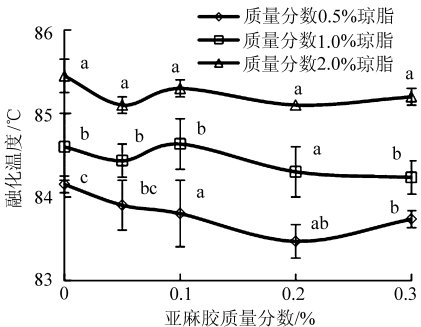


图 6 琼脂不同质量分数条件下亚麻胶质量分数对混合凝胶融化温度的影响
Fig.6 Influence of agar content on variation of melting temperature of mix gel with flax gum content

图 7 为亚麻胶质量分数对亚麻胶-琼脂混合凝胶的凝胶强度的影响。在降温扫描试验中,储能模量 G' 随着温度的降低而升高,在温度达到 20℃ 时储能模量 G' 达到最大值,将温度为 20℃ 时琼脂凝胶和亚麻胶-琼脂混合凝胶的储能模量 G' 定义为凝胶强度。在琼脂质量分数为 0.5% 时,凝胶强度随着亚麻胶质量分数增加而显著增加,亚麻胶增加了亚麻胶-琼脂凝胶的凝胶强度。在琼脂质量分数为 1% 和 2% 时,凝胶强度随着亚麻胶质量分数的添加而略有增加,但增幅不显著,这可能因为随着琼脂质量分数的增大,琼脂逐渐成为影响凝胶强度的主要因素,质量分数 0.3% 的亚麻胶不足以大幅度地影响混合凝胶的凝胶特性。在相同亚麻胶质量分数下,随着琼脂质量分数的增加,混合凝胶的凝胶强度增大。

2.2.2 频率扫描

图 8 为 20℃ 时,角频率 ω 对亚麻胶与质量分数为 0.5% 琼脂混合凝胶的储能模量 G' 的影响。由图可知,储能模量 G' 随着角频率的增加而增加。相同角频率条件下,随着亚麻胶质量分数的增大,混合凝胶的储能模量 G' 增大,说明亚麻胶-琼脂混合凝胶的结构比琼脂凝胶的结构坚硬,即亚麻胶的加入加

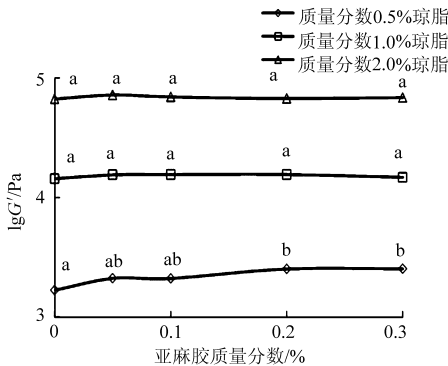


图 7 20℃ 时,琼脂不同质量分数条件下亚麻胶质量分数对混合凝胶凝胶强度的影响

Fig. 7 Influence of agar content on variation of gel strength of mix gel with flax gum content at 20℃

强凝胶的网络结构。

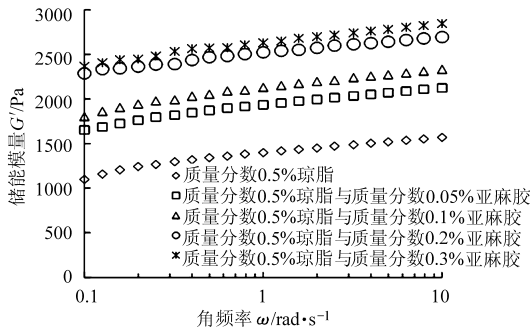


图 8 不同质量分数亚麻胶与质量分数 0.5% 琼脂混合凝胶角频率 ω 对储能模量 G' 的影响

Fig. 8 Influence of angular frequency ω on storage modulus G' of flax gum and 0.5% agar mix gel

表 1 为亚麻胶质量分数和琼脂质量分数对混合凝胶幂律模型参数 K' 、 n' 的影响。 G' 符合幂律模型,且决定系数都大于 0.956。结果显示,在测试范围内,当琼脂质量分数一定的情况下,与单独琼脂凝胶相比,亚麻胶的添加改变了亚麻胶-琼脂混合凝胶的动态粘弹性。

当琼脂质量分数为 0.5% 时,亚麻胶添加显著增加了 K' 值,这种结果可归因于亚麻胶加固了胶体结构。在琼脂质量分数为 1% 和 2% 时,添加质量分数较小的亚麻胶,增大了 K' 值,但当亚麻胶质量分数为 0.2% 和 0.3% 时,其混合凝胶的 K' 呈下降趋势,但变化不显著。在相同的亚麻胶质量分数下,随着琼脂质量分数的升高, K' 值逐渐增大。在琼脂质量分数为 0.5% 时,随着亚麻胶的加入,凝胶的 n' 值逐渐降低,这说明亚麻胶的加入降低了混合凝胶的频率敏感性;在琼脂质量分数为 1% 和 2% 时凝胶的 n' 变化不显著,即亚麻胶的加入不影响混合凝胶的频率敏感性。在相同的亚麻胶质量分数下,随着琼脂质量分数的升高, n' 值逐渐降低,降低了混合凝胶的频率敏感性。

表 1 亚麻胶-琼脂混合凝胶频率扫描试验中幂律模型参数
Tab. 1 Parameters of power-law model of flax gum-agar mix gel in frequency sweep experiment

琼脂 质量分 数/%	亚麻胶 质量分 数/%	$G' = K' \omega^{n'}$		
		K'	n'	R^2
0.5	0	1 578.3 ± 96.2 ^a	0.063 7 ± 0.004 6 ^c	0.956 6
	0.05	1 581.9 ± 158.7 ^{ab}	0.050 4 ± 0.009 3 ^b	0.967 6
	0.10	1 723.6 ± 94.4 ^b	0.052 4 ± 0.002 7 ^b	0.971 2
	0.20	2 145.6 ± 98.1 ^c	0.040 7 ± 0.002 8 ^a	0.977 2
	0.30	2 196.9 ± 154.8 ^c	0.037 3 ± 0.003 1 ^a	0.967 1
1.0	0	11 484 ± 1 132.6 ^a	0.037 1 ± 0.003 2 ^a	0.973 7
	0.05	13 538 ± 452.3 ^{ab}	0.035 4 ± 0.001 9 ^a	0.973 7
	0.10	14 059 ± 1 054.1 ^b	0.036 1 ± 0.001 0 ^a	0.976 3
	0.20	13 053.5 ± 25.6 ^b	0.036 1 ± 0.001 1 ^a	0.978 2
	0.30	13 031.3 ± 155.0 ^{ab}	0.032 8 ± 0.002 8 ^a	0.969 6
2.0	0	60 950 ± 1 350.0 ^{ab}	0.026 0 ± 0.007 3 ^a	0.973 3
	0.05	64 656 ± 756.3 ^b	0.029 0 ± 0.002 1 ^a	0.978 0
	0.10	62 308 ± 1 387.0 ^b	0.029 0 ± 0.003 3 ^a	0.978 0
	0.20	59 027 ± 195.7 ^{ab}	0.033 0 ± 0.001 6 ^a	0.976 5
	0.30	55 673 ± 1 480.0 ^a	0.032 2 ± 0.002 2 ^a	0.974 8

注:数据用 3 次重复的均值 ± 标准差形式表示,同一列中数据的不同字母上标代表数据间有显著区别 ($P < 0.05$)。

3 结论

(1) 在亚麻胶-琼脂混合凝胶体系透光性试验中,随着亚麻胶质量分数的增加,亚麻胶-琼脂混合凝胶的吸光值逐渐增大;在亚麻胶质量分数一定时,随着琼脂质量分数的增加,凝胶的吸光值逐渐增大。亚麻胶的加入降低了混合凝胶体系的透光性。

(2) 在亚麻胶-琼脂混合凝胶体系冷冻脱水试验中,在琼脂质量分数一定的情况下,随着亚麻胶质量分数的增加,亚麻胶-琼脂混合凝胶体系的脱水率显著降低,这表明亚麻胶的存在有效地增加了混合凝胶的持水性。同时,在亚麻胶质量分数一定时,随着琼脂质量分数的增加,凝胶体系的脱水率也逐渐下降。

(3) 亚麻胶的添加明显降低了亚麻胶-琼脂凝胶体系的凝胶温度,而对融化温度的影响不显著,亚麻胶的加入增加了混合凝胶的滞后温度范围,提高了凝胶的滞后性。混合凝胶储能模量 G' 均随着亚麻胶质量分数的增加而提高,说明亚麻胶-琼脂混合凝胶的结构比琼脂凝胶的结构坚硬,即亚麻胶的加入改善了凝胶的网络结构。

(4) 亚麻胶-琼脂混合凝胶体系的储能模量 G' 随角频率的变化趋势符合幂律模型。当琼脂质量分数为 0.5% 时,亚麻胶的加入使凝胶 n' 值逐渐降低,这表明少量亚麻胶(质量分数小于 1%)的存在降低了混合凝胶的频率敏感性,而当琼脂质量分数为 1% 和 2% 时,亚麻胶的加入不影响凝胶频率敏感性。

CSAE, 2012,28(9):208~212. (in Chinese)

10 何东健,邹志勇,周曼. 果园环境参数远程检测 WSN 网关节点设计[J]. 农业机械学报,2010,41(6):182~186.
He Dongjian, Zou Zhiyong, Zhou Man. Design of WSN gateway nodes for remote detection of orchards environment parameters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):182~186. (in Chinese)

11 包长春,李志红,张立三,等. 基于 Zigbee 技术的粮库监测系统的设计[J]. 农业工程学报,2009,25(9):197~201.
Bao Changchun, Li Zhihong, Zhang Lisan, et al. Design of monitoring system for grain depot based on Zigbee technology [J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(9):197~201. (in Chinese)

12 宁静红,刘圣春,严雷. 太阳能蔬菜生产配送基地组合系统[J]. 农业机械学报,2012,43(9):131~135.
Ning Jinghong, Liu Shengchun, Yan Lei. Combined system of solar energy vegetable growth and distribution center [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(9):131~135. (in Chinese)

13 郭文川,程寒杰,李瑞明,等. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报,2010,41(7):181~185.
Guo Wenchuan, Cheng Hanjie, Li Ruiming, et al. Greenhouse monitoring system based on wireless sensor networks [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(7):181~185. (in Chinese)

14 卿晓霞,王文章,王波. 基于节点转移的 Zigbee 网络孤立点减免算法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(7):1 650~1 656.
Qing Xiaoxia, Wang Wenzhang, Wang Bo. Algorithm of reducing Zigbee network isolated nodes based on node-transporting [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010,31(7):1 650~1 656. (in Chinese)

15 郑凯,赵宏伟,张孝临. 基于 Zigbee 心电监护网络的定位系统的研究[J]. 仪器仪表学报,2008,29(5):1 000~1 005.
Zheng Kai, Zhao Hongwei, Zhang Xiaolin. Research on localization system of electrocardiograph monitoring network based on Zigbee [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008,29(5):1 000~1 005. (in Chinese)

16 熊迎军,沈明霞,孙玉文. 农田图像采集与无线传输系统设计[J]. 农业机械学报,2011,42(3):184~187.
Xiong Yingjun, Shen Mingxia, Sun Yuwen. Design on system of acquisition and wireless transmission for farmland image [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(3):184~187. (in Chinese)

17 韩安太,何勇,陈志强,等. 基于无线传感器网络的茶园分布式灌溉控制系统[J]. 农业机械学报,2011,42(9):173~180.
Han Antai, He Yong, Chen Zhiqiang, et al. Design of distributed precision irrigation control system based on wireless sensor network for tea plantation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(9):173~180. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 197 页)

参 考 文 献

1 刘梅森,何唯平,陈胜利. 魔芋胶、琼脂及他拉胶对软冰淇淋品质影响研究[J]. 中国乳品工业,2005,33(11):17~20.  
Liu Meisen, He Weiping, Chen Shengli. Study on the influence of knojac gum, agar and tara gum on soft-serve ice cream quality [J]. China Dairy Industry, 2005,33(11):17~20. (in Chinese)

2 Khalloufi S, Corredig M, Alexander M, et al. Flaxseed gums and their adsorption on whey protein-stabilized oil-in-water emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2009,23(3):611~618.

3 倪培德,张建华,江志炜,等. 提高含胶亚麻蛋白乳化性能的机理初探[J]. 中国粮油学报,1998,13(4):11~13.  
Ni Peide, Zhang Jianhua, Jiang Zhiwei, et al. Probing into the mechanism on improving the emulsifying properties of linseed protein [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 1998,13(4):11~13. (in Chinese)

4 陈海华,许时婴,王璋. 亚麻籽胶化学组成和结构的研究[J]. 食品工业科技,2004,25(1):103~105.

5 Phillips G O. Gum and stabilizer for the food industry[M]. Oxford:Pergamon Press, 1983:213~216.

6 Cui W, Mazza G. Physicochemical characteristics of flaxseed gum[J]. Food Research International, 1996,29(3~4):397~402.

7 Stewart S, Mazza G. Effect of flaxseed gum on quality and stability of a model salad dressing[J]. Journal of Food Quality, 2000,23(4):373~390.

8 Oomah B D. Flaxseed as a functional food source[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2001,81(9):889~894.

9 Wang Y, Wang L J, Li D, et al. Effects of drying methods on rheological properties of flaxseed gum[J]. Carbohydrate Polymers, 2009,78(2):213~219.

10 Wang Y, Li D, Wang L J, et al. Rheological study and fractal analysis of flaxseed gum gels[J]. Carbohydrate Polymers, 2011,86(2):594~599.

11 汪立君,吴敏,王勇,等. 豆渣-玉米粉挤压膨化分散体系流变特性[J]. 农业机械学报,2012,43(4):119~125.  
Wang Lijun, Wu Min, Wang Yong, et al. Rheological properties of extruded okara-maize blend based on extrusion technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(4):119~125. (in Chinese)