

## 超声制备抗性淀粉及其对香肠品质和血糖生成指数的影响

胡方洋, 陈金玉\*, 张坤生, 许时慧, 耿亚鑫

(天津市食品生物技术重点实验室 天津商业大学生物技术与食品科学学院 天津 300134)

**摘要** 探究抗性淀粉对香肠品质和血糖生成指数的影响,以扩展抗性淀粉在肉制品加工中的应用。以马铃薯淀粉、玉米淀粉、豌豆淀粉为原料,综合比较糊化-回生、糊化-超声-回生、超声-糊化-回生法制备得到的抗性淀粉的含量、颗粒形态、粒径、糊化性质和热力学性质。结果表明:经糊化-回生、糊化-超声-回生、超声-糊化-回生处理后的马铃薯淀粉、玉米淀粉和豌豆淀粉的颗粒粒径增大到原来的 3.5~8.7 倍,糊化温度分别从原来的 70.00、78.93、73.38 °C 最高增大到 80.45、94.65、95 °C 以上,热焓值  $\Delta H$  呈数百倍增大,热稳定性增强。其中,以豌豆淀粉为原料,经糊化-超声-回生处理后得到的抗性淀粉含量最高,为 14.29%,是原淀粉的 1.88 倍。进一步研究此淀粉对香肠品质和血糖生成指数的影响,与添加原淀粉相比,添加抗性淀粉制备的香肠具有更低的血糖生成数( $eGI=55.04$ ),而二者在营养成分、质构等方面无明显差异。添加 GUR-PS 的香肠在 4 °C 贮藏 7 d,其气味与滋味无明显变化,在 25 °C 贮藏 5 d,滋味无明显变化。本试验结果可为抗性淀粉的制备以及开发低 GI 肉制品提供理论依据。

**关键词** 超声-糊化-回生法; 抗性淀粉; 热力学性质; 香肠品质; 血糖生成指数

**文章编号** 1009-7848(2022)04-0125-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.04.013

抗性淀粉(Resistant starch, RS), 又称抗酶解淀粉、难消化淀粉,是指那些不能被健康人体小肠所吸收,在结肠中能被大肠菌群发酵或部分发酵的淀粉及其降解物的总称<sup>[1]</sup>。一些 RS 存在于天然食物如香蕉、土豆、谷物和豆类中,而大部分是通过商业方式生产或改性后应用到食品中。RS 具有很多独特的生理功能,如控制血糖指数,降低血清和肝脏中的甘油三酯与胆固醇含量,预防肠道疾病等<sup>[2-4]</sup>。根据 RS 来源与抗消化性的不同,可将抗性淀粉分为 RS1、RS2、RS3、RS4 和 RS5 五大类<sup>[5]</sup>,其中 RS3 为老化淀粉,又称回生淀粉,主要是由糊化后的淀粉经冷却回生后形成,与其它种类的 RS 相比,其保持了淀粉的基本官能团且具有较高的安全性,成为抗性淀粉工业主要生产类型。近年来,许多高新技术,如超声波、微波等被应用于 RS3 的制备<sup>[6]</sup>。超声波引发的机械力学效应和空穴

效应能加速溶剂与溶质分子之间的摩擦,切断聚合物分子连接键形成较短的分子链<sup>[7]</sup>,有利于通过氢键作用形成双螺旋结构,提高 RS 的得率,且超声处理因操作简单而逐渐被用来制备 RS。问燕梅<sup>[8]</sup>研究发现适宜的超声处理可明显提高 RS 的得率。抗性淀粉的得率还与直链、支链淀粉所占比例有关。然而,超声处理在制备 RS 阶段过程中所发挥的作用及其对不同来源原淀粉制备 RS 的影响有待进一步研究。本试验选取直链淀粉含量较高的禾谷类玉米淀粉、薯类马铃薯淀粉和豆类豌豆淀粉为原料,比较糊化-回生、糊化-超声-回生、超声-糊化-回生 3 种制备工艺对 RS 含量与性质的影响,筛选最优的 RS 制备原料与方法。

RS 在食品工业中可作为添加剂添加至面包、饼干、饮料等食品中,在不影响其风味的同时可改善产品品质,提高营养价值<sup>[9]</sup>。Mehrddad 等<sup>[10]</sup>研究发现,在香肠中添加适量的淀粉可降低香肠脂肪含量与热量,增强香肠的保水性。然而,将 RS 添加到肉制品中鲜有研究报道。考虑到 RS 对肉糜制品持水性的改善<sup>[11]</sup>及其具有控制餐后血糖上升<sup>[12]</sup>的优势,本试验将通过超声法制备的 RS 添加至香肠中,通过测定香肠的质构、估计血糖生成指数( $eGI$ )等指标,考察 RS 对肉制品品质的影响。本文旨在为 RS 的制备工艺及其在肉制品中的应用提供

收稿日期: 2021-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31701612,31671873); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0401503); 天津市“131”创新型人才团队建设计划项目(201927); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202110069018)

作者简介: 胡方洋(1996—),女,硕士生

通信作者: 陈金玉 E-mail: 920162744@tjcu.edu.cn

新思路,为研究开发低GI值的肉制品提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

玉米淀粉(Maize starch,MS),梁山菱花生物科技有限公司;马铃薯淀粉(Potato starch,POS),北京古松经贸有限公司;豌豆淀粉(Pea starch,PS),新乡良润全谷物食品有限公司;鸡胸肉,天津市西青区华润万家超市;耐高温 $\alpha$ -淀粉酶(BR),北京 Biotopped 科技有限公司;葡萄糖淀粉酶(BR),北京 Solarbio 科技有限公司;95%乙醇、甘油,天津市风船化学试剂科技有限公司;焦磷酸盐,河南三化生物科技有限公司;葡萄糖,天津市化学试剂一厂;氯化钠,天津渤化化学试剂有限公司;葡萄糖试剂盒,上海荣盛生物药业有限公司;人工唾液、人工胃液、人工肠液,飞净生物科技有限公司;其余试剂均为分析纯级。

### 1.2 仪器与设备

HH-SY21-Ni 电热恒温水浴锅,北京市长风仪器有限公司;CE-9600 便携式超声仪,东莞市洁康超声波设备有限公司;LT-DBX120F 精密可编程热风循环烘箱,立德泰勃(上海)科学仪器有限公司;800Y 多功能粉碎机,铂欧五金厂;GB6003-88 标准 100 目筛,浙江上虞市华康化验仪器厂;FA1104A 电子天平,上海精天电子仪器有限公司;ME2002/02 电子天平,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;H1850R 台式高速冷冻离心机,湘仪离心机仪器有限公司;HJ-3 数显恒温磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;BC-117F C 海尔冷藏冰箱,青岛海尔股份有限公司;2102486-TMA 快速粘度分析仪,澳大利亚 NEWPORT SCIENTIFIC 仪器公司;RISE-2008 激光粒度分析仪,济南润芝科技有限公司;Q20 差示扫描量热仪,美国 TA 仪器有限公司;SU506 手动 U 型打卡机,衡水鸿昊企业有限责任公司;CM-21 斩拌机、EC-12 灌肠机,西班牙 Carnicos 设备有限公司;SIM-124 制冰机,台湾三洋电机有限公司;CA-HM 食品热量分析仪,日本 JWP 公司;SMSTA TA.XT plus 物性测定仪,英国 Stable Micro Systems 公司;Hera-cles II 全自动快速电子气味分析仪、Astree II 电子

舌味觉指纹分析仪、VA400 复杂非均质视觉分析仪,法国 Alpha MOS 公司。

### 1.3 方法

1.3.1 抗性淀粉的制备 加蒸馏水调节淀粉质量浓度为 400 g/L,25℃放置 30 min。

糊化-回生法 (Gelatinization-retrogradation, GR):将样品置于 95℃水浴处理 30 min,冷却至 25℃后置于 4℃冰箱老化 24 h,取出 25℃放置 1 h 后 105℃条件下干燥恒重,粉碎,过筛,即得糊化-回生法抗性淀粉(GRS)。

糊化-超声-回生法 (Gelatinization-ultrasound-retrogradation, GUR):样品在 95℃条件下水浴处理 30 min,冷却后 40℃下超声处理(70 W)30 min,冷却至 25℃后置于 4℃冰箱老化 24 h,取出 25℃放置 1 h,105℃条件下干燥恒重,粉碎,过筛,即得糊化-超声-回生法抗性淀粉(GURS)。

超声-糊化-回生法 (Ultrasound-gelatinization-retrogradation, UGR):样品在 40℃条件下超声处理(70 W)30 min 后,转至 95℃水浴处理 30 min,冷却至 25℃后,放入 4℃冰箱老化 24 h,取出 25℃放置 1 h,105℃条件下干燥恒重,粉碎,过筛,即得超声-糊化-回生法抗性淀粉(UGRS)。

#### 1.3.2 抗性淀粉性质的测定

1.3.2.1 含量的测定 参照俞东宁<sup>[13]</sup>的方法测定 RS 含量。取适量样品以 pH 6.0 的柠檬酸-柠檬酸钠缓冲溶液稀释后,加入过量的耐高温 $\alpha$ -淀粉酶(500 U/g),90℃水浴 30 min 后,沸水浴灭酶,取出冷却至 60℃,用柠檬酸调 pH 值至 4.5 后加入过量葡萄糖淀粉酶(5 000 U/g),60℃水浴 30 min 后,离心(10 000 r/min,10 min),用 95%乙醇反复洗涤离心(10 000 r/min,10 min)3 次,取沉淀物干燥。按式(1)计算 RS 含量:

$$\text{抗性淀粉含量}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

式中, $m_1$ ——样品质量,g; $m_2$ ——处理烘干后样品质量,g。

1.3.2.2 颗粒形态的测定 普通光学显微镜:淀粉样品加水调制成淀粉乳,取一滴样品置于载玻片上,盖上盖玻片,轻按压紧,以 10×的物镜和 10×的目镜(放大倍数 100×)观察。

偏光显微镜:淀粉样品用甘油稀释,取一滴样品置于载玻片上,盖上盖玻片,轻按压紧(尽量不要有空隙),置于偏光显微镜载物台上,以物镜10×、目镜10×观察拍摄照片(放大倍数100×)。

1.3.2.3 粒径的测定 取2~3 mg样品于激光粒度分析仪样品室中。测试参数如下:1 500 r/min, 25 ℃,颗粒折射率1.50,颗粒吸收率0.01,分散体系为蒸馏水(折射率为1.330)。

1.3.2.4 糊化性质的测定 根据《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度仪法》(GB/T 24853-2010)<sup>[14]</sup>测定淀粉样品的糊化特性。先量取(25.0±0.1)mL蒸馏水于干净样品筒中,再准确称取(3.00±0.01)g抗性淀粉样品移入样品筒,快速搅动至完全分散后,立即置于快速粘度分析仪测定。测定程序如下:起始转速960 r/min维持10 s后一直保持160 r/min,起始温度为50 ℃保持1 min,之后3.7 min内以恒定温度速率升至95 ℃,保持2.5 min后,在3.8 min内以恒定温度降至50 ℃,保持2 min。平行3次测定。

1.3.2.5 热力学性质的测定 称淀粉样品3~5 mg,以1:1的比例添加蒸馏水于坩埚中,加盖密封,置于差示扫描量热仪(DSC)中测定。测定条件:起始温度60 ℃,以10 ℃/min速率升温至200 ℃后,以20 ℃/min速率降温至60 ℃。每个样平行测3次。

1.3.3 香肠的制备 将鲜肉从冰箱中取出于4 ℃解冻12 h后,切成2~3 cm小块,4 ℃下以食盐腌制1.5 h后,加入辅料斩拌3 min(斩拌温度≤12 ℃),将斩拌好的肉糜放入灌肠机灌肠后将香肠放入蒸锅,蒸煮45 min后,冷水迅速冷却至室温,分别置于4 ℃和25 ℃贮藏备用。

1.3.4 香肠性质的测定

1.3.4.1 营养成分分析 将香肠粉碎后置于热量分析仪分析盘中,选择折射模式,选定香肠测定程序,分析产品营养成分。

1.3.4.2 估计血糖生成指数的测定 参照崔亚楠<sup>[15]</sup>的方法。准确称取含500 mg可利用碳水化合物的样品于试管中,以样品:蒸馏水=1:1的质量比加入蒸馏水混匀后加入1 mL人工唾液,15~20 s后加入5 mL人工胃液,37 ℃振荡水浴30 min后,用5 mL 0.02 mol/L NaOH中和,随后加入25 mL 0.2

mol/L 醋酸钠缓冲溶液,加入5 mL包含胰蛋白酶(6 μg/g)的人工肠液,继续在37 ℃水浴锅中温育,于0,10,30,60,90,120,180 min分别取4 mL沸水浴灭酶。用葡萄糖试剂盒测定其葡萄糖含量。以标准葡萄糖为参考物。参照Goni等<sup>[16]</sup>的方法计算样品的eGI。

$$\text{水解率 HI}(\%) = \frac{G_t}{G_0} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{eGI} = 39.71 + 0.549 \text{HI} \quad (3)$$

式中, $G_t$ —— $t$ 时刻样品中葡萄糖含量(mmol/L); $G_0$ ——样品中葡萄糖总含量(mmol/L)。

1.3.4.3 质构的测定 将样品切成长×宽×高约为4 cm×2.5 cm×2 cm的块状,切面平整,置于物性分析仪测定其质构特性,选取探头P50,测试前速度1 mm/s,测试速度1 mm/s,测试后速度1 mm/s,压缩比50%,触发类型为自动,触发力5 g。每个样品平行测4次。

1.3.4.4 气味的测定 称取5 g样品切成2 mm左右小方块置于小瓶中,在快速自动气味分析仪上分析,试验参数:60 ℃下孵化10 min,进样量500 μL,注射速度125 μL/s。平行测3次。

1.3.4.5 滋味的测定 称取5 g香肠样品切碎与100 mL蒸馏水混合,均质机下均质3 min后,用4层纱布过滤,取滤液倒入电子舌专用小杯中,于味觉分析仪上检测分析,采集参数:搅拌速率1 r/s,采集时间120 s,采集周期1 s,采集延迟0 s,每个样品平行3次。

1.3.4.6 颜色的测定 取香肠较中间部分,切片于视觉分析仪上分析香肠切面颜色,平行4次。

## 1.4 数据处理

利用Excel 2010、WPS 2018以及Origin 8.5进行数据处理及绘图,通过SPSS 16.0进行显著性差异分析。

## 2 结果与分析

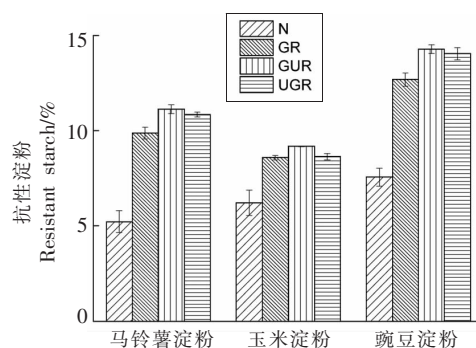
### 2.1 RS性质测定结果

2.1.1 RS含量分析 图1为淀粉的RS含量。由图1可知,处理后的RS含量较原淀粉均升高,不同淀粉处理后的RS含量不同,同种淀粉不同处理方法其RS含量也不同,然而不论何种方式处理,豌豆淀粉的RS含量均最高。这可能与直链、支链



淀粉含量有关,3种原淀粉的直链淀粉含量排序为豌豆淀粉(35%)>玉米淀粉(28%)>马铃薯淀粉(21%)<sup>[17]</sup>。与支链淀粉相比,较短的直链淀粉在糊化后相对更易聚集形成结晶,在适宜范围内随着直链淀粉含量的增大,RS含量升高<sup>[12]</sup>。由图1还可知,GUR、UGR的RS含量均高于GR,超声处理顺序不同,RS含量不同。GUR处理的RS含量较UGR处理高的原因可能是经糊化后的淀粉颗粒崩解使淀粉分子链溶出,超声后形成较短的C-C链,更有利于直链淀粉聚集到晶核上形成回生抗性淀粉(RS3)<sup>[18]</sup>。

**2.1.2 颗粒形态** 图2为处理前、后的淀粉颗粒形态图,其中图2(a、b、c)为普通光学显微镜观察图片,图2(d、e、f)为偏光显微镜观察图片。由图2(a、b、c)可知,原淀粉的淀粉颗粒形态完整,处理后淀粉颗粒完整性均被破坏,表面有裂纹。在图2(d、e、f)中可明显观察到原淀粉的偏光十字现象,然而经GR、GUR、UGR处理后的淀粉偏光十字均消失。这是因为处理后的淀粉颗粒内部分子链的径向有序排列的晶体结构被破坏,导致淀粉颗粒

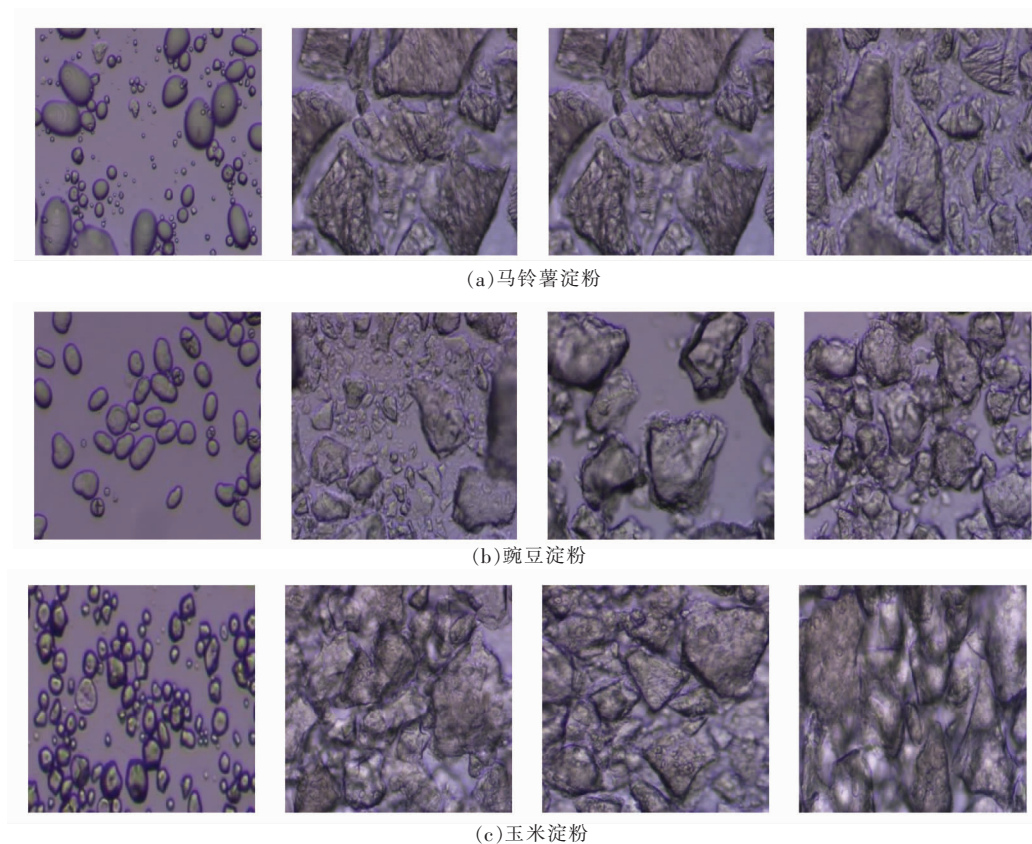


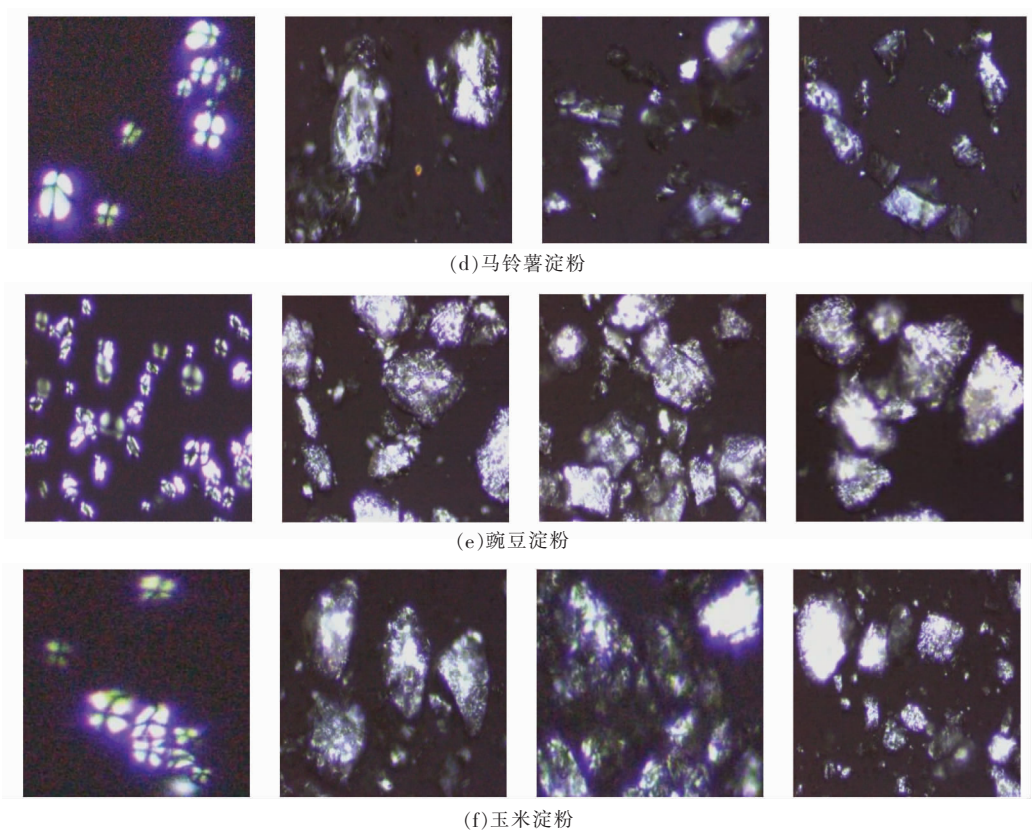
注:N表示未经处理的原淀粉,下同。

图1 不同处理方式下的RS含量

Fig.1 RS content under different treatment methods

偏光十字消失<sup>[19]</sup>。GR处理过程中的热能促进了淀粉双螺旋链的流动性,使淀粉分子的有序性降低,从而导致双折射强度下降,偏光十字消失<sup>[20]</sup>。而在GUR与UGR处理过程中除发生淀粉糊化颗粒崩解外,超声波的机械力学效应与空穴效应等作用损害了原淀粉的内部径向排列结构,淀粉颗粒晶体结构被破坏,从而导致偏光十字消失<sup>[21]</sup>。





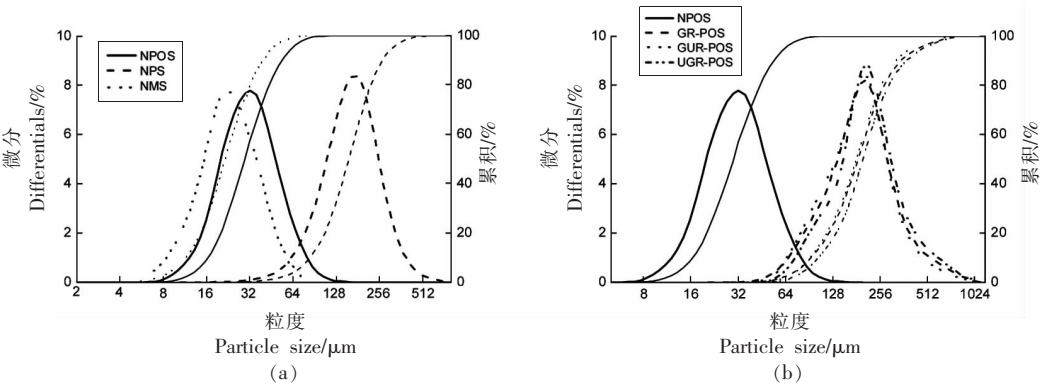
注:从左至右分别为 NS、GRS、GURS、UGRS。

图 2 不同处理方式下的淀粉颗粒形态图(×100)

Fig.2 The morphology of starch granules under different treatment methods (×100)

2.1.3 粒径 由图 3 和表 1 可知,豌豆、马铃薯和玉米淀粉经 GR、GUR、UGR 处理后粒径增大,粒径范围变宽。多数马铃薯、豌豆、玉米淀粉颗粒粒径在 50  $\mu\text{m}$  左右,而处理后的大部分淀粉颗粒在 180  $\mu\text{m}$  左右。由此说明,原淀粉经处理后,淀粉颗粒发生膨化或聚集成了更大的颗粒。这与周一鸣等<sup>[22]</sup>和俞东宁<sup>[13]</sup>的结果相似。

2.1.4 糊化性质 图 4 为不同处理方式下的淀粉 RVA 曲线图。由图可知,玉米、豌豆及马铃薯原淀粉的 RVA 曲线变化趋势相同(图 4a),经 GR、GUR、UGR 处理后 RVA 曲线发生改变(图 4b、4c、4d)。不同淀粉的 RVA 特征参数存在极大差异的原因是原料淀粉的来源不同。Gelencsér 等<sup>[23]</sup>发现不同来源的淀粉 RVA 曲线与参数差异显著。处理



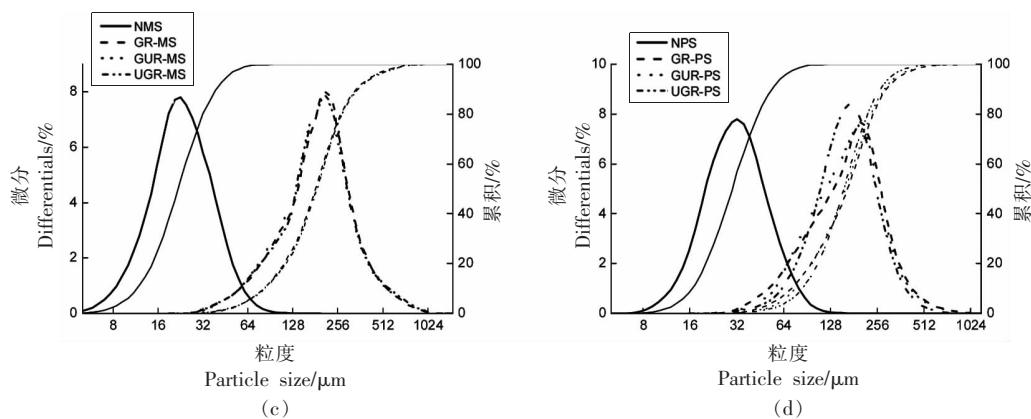


图 3 不同处理方式下的淀粉粒度分布图

Fig.3 Starch grain size distribution under different treatment methods

表 1 不同处理方式下的淀粉粒径分布

Table 1 Starch particle size distribution under different treatment methods		粒径/ $\mu\text{m}$		
样品	处理方式	D10	D50	D90
马铃薯淀粉	N	17.29	32.15	55.84
	GR	95.91	197.30	370.88
	GUR	95.91	197.30	338.90
	UGR	104.96	215.91	405.87
豌豆淀粉	N	20.71	32.15	51.02
	GR	73.18	180.29	309.68
	GUR	80.08	180.29	309.68
	UGR	87.64	180.29	282.98
玉米淀粉	N	12.057	22.66	42.60
	GR	87.64	197.30	370.88
	GUR	87.64	197.30	370.88
	UGR	87.64	197.30	370.88

前、后的玉米、豌豆及马铃薯淀粉的 RVA 参数如表 2 所示,与原淀粉相比 GR、GUR、UGR 处理后的淀粉峰值黏度、崩解值、最终黏度、回生值均降低。这与尹婧<sup>[24]</sup>的结果相似。这是因为原淀粉经处理后淀粉颗粒被破坏而重新缔合形成更紧密的结构<sup>[25]</sup>,热稳定性变化,也不易回生。也有可能是在标准 RVA 程序里,温度达不到处理后淀粉的糊化温度,致使淀粉未完全糊化甚至不糊化,故检测不出淀粉成糊温度,以及测出的峰值黏度、崩解值、最终黏度等均低于原淀粉。对于玉米淀粉,其成糊温度依次为 GURS>UGRS>GRS>NS, 马铃薯淀粉依次为 GURS>UGRS>NS>GRS, 而豌豆淀粉不论经过 GR、GUR、UGR 中的哪种方式处理均未在 95℃内未检测到其成糊温度。说明处理后的淀粉热

稳定性增强,淀粉糊化需要更多的热量。此外,处理后的豌豆淀粉崩解值均低于 40 cp,说明处理后的豌豆淀粉热稳定性好。

2.1.5 热力学性质分析 玉米、豌豆与淀粉马铃薯处理前、后的 DSC 曲线和热特性参数分别见图 5 和表 3。从图 5 可知,处理前、后的 3 种淀粉均出现一个向下的吸热峰,不同来源淀粉与处理方式之间的峰值温度不同,然而均有 NS>GRS>UGRS>GRUS 的出峰顺序。与 RVA 中的成糊温度结果类似。这可能与 RS 淀粉含量有关。淀粉经处理后主要通过回生作用制得 RS,GUR 处理可得到较多的短直链淀粉分子,利于通过氢键作用重新形成有序的晶体结构而得到更多的 RS,破坏其结构需要更多的热量和更高的温度<sup>[7]</sup>。



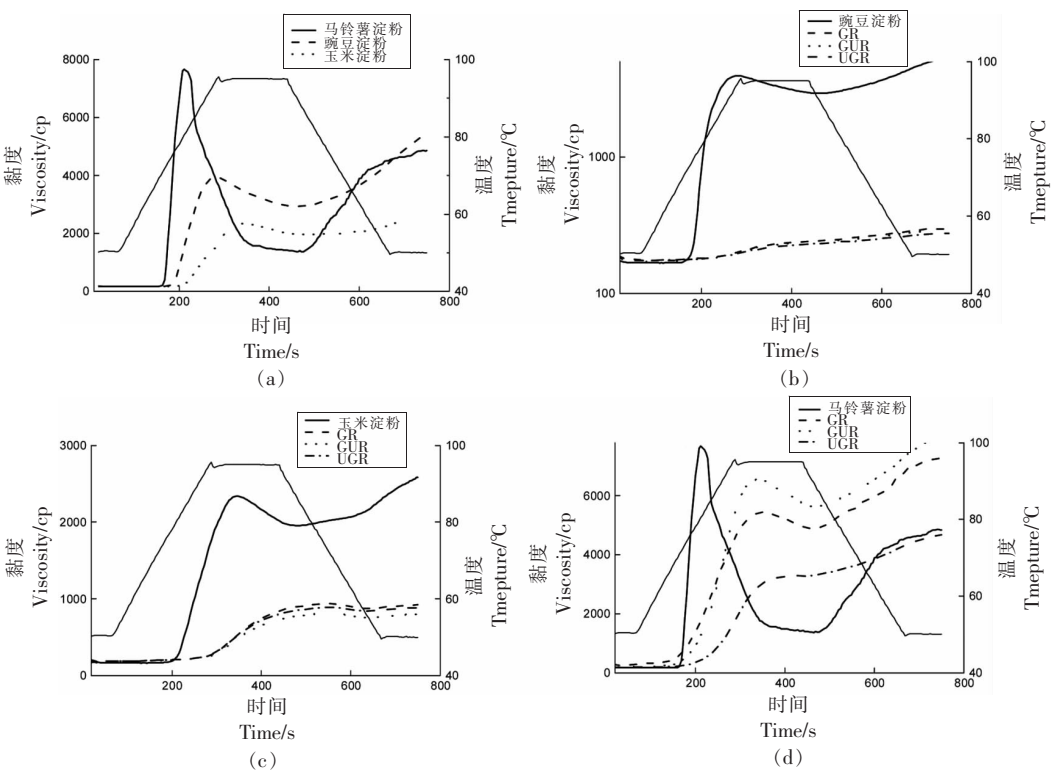


图 4 不同处理方式下的淀粉黏度变化  
Fig.4 Starch viscosity changes under different treatment methods

表 2 不同处理方式下的淀粉糊化主要参数

Table 2 The main parameters of starch gelatinization under different treatment methods							
样品	处理方式	峰值黏度/cp	崩解值	最终黏度/cp	回生值	峰值时间/min	成糊温度/°C
豌豆淀粉	N	4 309.50	1 181.00	4 560.00	1 431.50	4.70	73.38
	GR	363.00	33.00	511.00	181.00	7.00	—
	GUR	295.00	19.50	404.50	129.00	6.97	—
	UGR	302.00	22.00	405.00	125.00	7.00	—
玉米淀粉	N	2 339.50	384.00	2 586.00	630.50	5.77	78.93
	GR	1 910.50	458.00	2 407.00	954.50	7.00	91.48
	GUR	1 365.50	241.00	1 612.50	488.00	7.00	94.65
	UGR	1 507.50	300.50	1 955.00	748.00	7.00	94.25
马铃薯淀粉	N	7 675.00	6 311.00	4 115.00	2 751.00	3.53	70.00
	GR	5 439.00	546.00	7 312.00	2 419.00	5.87	65.85
	GUR	4 390.00	1 877.00	8 248.00	2 535.00	4.73	80.45
	UGR	3 279.00	147.00	4 675.00	1 543.00	7.00	75.75

由表 3 可知，经 GR、GUR、UGR 处理后的淀粉  $T_0$ 、 $T_p$ 、 $T_c$  较原淀粉均明显增大。这是因为处理后的淀粉晶体结构更加有序，形成稳定性更好的淀粉结构<sup>[25-26]</sup>。而  $\Delta H$  从原来的 4.58~8.98 J/g 跃升至 2 775.40~4 464.70 J/g，进一步说明了 GR、GUR、UGR 处理后形成的淀粉颗粒晶体稳定性高

于原淀粉。峰高指数 PHI 表示 DSC 图谱的吸热或放热峰的相对形状，与  $\Delta H$  成正比，与  $T_r$  成反比关系<sup>[27]</sup>。从表 3 可知，处理后的淀粉的 PHI 较原淀粉升高了百倍以上，除马铃薯淀粉外 GUR 处理的 PHI 最高。表明 GUR 处理可形成更加紧密稳定的结构，淀粉分子分布更集中。

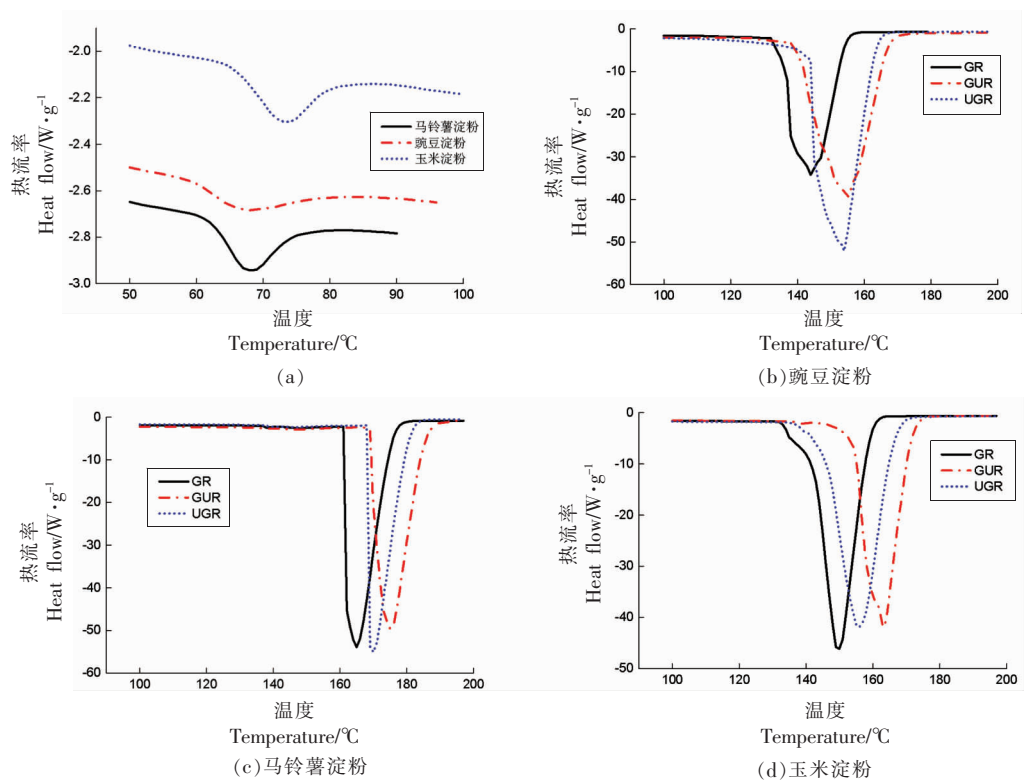


图 5 不同处理方式下的淀粉 DSC 图

Fig.5 The DSC diagram of starch under different treatment methods

表 3 不同处理方式下的淀粉 DSC 数据表

Table 3 The DSC data table of starch under different treatment methods

样品	处理方式	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{H}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{G}}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$T_{\text{f}}/^{\circ}\text{C}$	$\text{PHI}/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$
马铃薯淀粉	N	$62.32 \pm 0.02^{\text{b}}$	$67.30 \pm 0.01^{\text{b}}$	$74.28 \pm 0.11^{\text{b}}$	$7.71 \pm 0.71^{\text{c}}$	$11.96 \pm 0.09^{\text{b}}$	$0.65 \pm 0.07^{\text{d}}$
	GR	$161.34 \pm 0.58^{\text{a}}$	$165.64 \pm 0.65^{\text{a}}$	$182.90 \pm 1.37^{\text{a}}$	$2\,942.50 \pm 84.58^{\text{b}}$	$21.56 \pm 1.63^{\text{a}}$	$137.21 \pm 3.82^{\text{c}}$
	GUR	$164.04 \pm 2.33^{\text{a}}$	$168.73 \pm 3.55^{\text{a}}$	$186.19 \pm 3.52^{\text{a}}$	$3\,081.00 \pm 59.70^{\text{a}}$	$22.15 \pm 1.43^{\text{a}}$	$138.60 \pm 2.86^{\text{ab}}$
	UGR	$158.56 \pm 5.51^{\text{a}}$	$165.72 \pm 2.49^{\text{a}}$	$181.53 \pm 1.84^{\text{a}}$	$3\,255.33 \pm 73.08^{\text{a}}$	$22.97 \pm 3.74^{\text{a}}$	$146.98 \pm 2.88^{\text{a}}$
豌豆淀粉	N	$59.92 \pm 0.07^{\text{b}}$	$66.07 \pm 0.10^{\text{b}}$	$75.71 \pm 0.32^{\text{d}}$	$4.58 \pm 0.12^{\text{d}}$	$15.80 \pm 0.39^{\text{b}}$	$0.29 \pm 0.00^{\text{e}}$
	GR	$141.68 \pm 1.38^{\text{a}}$	$152.08 \pm 0.67^{\text{a}}$	$168.83 \pm 1.10^{\text{b}}$	$4\,464.70 \pm 94.80^{\text{a}}$	$27.15 \pm 2.44^{\text{b}}$	$165.53 \pm 30.96^{\text{a}}$
	GUR	$142.10 \pm 3.57^{\text{a}}$	$151.68 \pm 4.67^{\text{a}}$	$158.89 \pm 3.21^{\text{c}}$	$2\,775.40 \pm 50.42^{\text{c}}$	$16.79 \pm 2.57^{\text{a}}$	$174.73 \pm 31.00^{\text{a}}$
	UGR	$145.85 \pm 4.35^{\text{a}}$	$157.29 \pm 2.34^{\text{a}}$	$171.74 \pm 0.75^{\text{a}}$	$3\,116.20 \pm 43.85^{\text{b}}$	$25.89 \pm 3.60^{\text{a}}$	$120.43 \pm 0.15^{\text{b}}$
玉米淀粉	N	$66.71 \pm 0.38^{\text{c}}$	$71.58 \pm 0.53^{\text{d}}$	$76.05 \pm 2.62^{\text{c}}$	$8.98 \pm 0.32^{\text{c}}$	$9.35 \pm 3.01^{\text{b}}$	$1.22 \pm 0.42^{\text{b}}$
	GR	$142.97 \pm 0.75^{\text{b}}$	$151.40 \pm 1.02^{\text{c}}$	$165.59 \pm 1.50^{\text{b}}$	$3\,079.80 \pm 60.48^{\text{a}}$	$22.62 \pm 0.75^{\text{a}}$	$136.31 \pm 1.87^{\text{a}}$
	GUR	$157.29 \pm 2.09^{\text{a}}$	$161.97 \pm 0.98^{\text{a}}$	$175.94 \pm 0.34^{\text{a}}$	$2\,617.00 \pm 29.62^{\text{b}}$	$18.66 \pm 1.75^{\text{a}}$	$140.03 \pm 1.36^{\text{a}}$
	UGR	$144.85 \pm 2.20^{\text{b}}$	$157.12 \pm 1.83^{\text{b}}$	$168.85 \pm 2.33^{\text{b}}$	$3\,118.50 \pm 62.90^{\text{a}}$	$24.00 \pm 0.51^{\text{a}}$	$130.19 \pm 8.31^{\text{a}}$

注：同列中不同小写字母 a~d 表示不同处理方式间存在差异。

2.2 RS 在中式香肠中的应用

2.2.1 营养成分分析 研究发现经 GUR 处理后的豌豆淀粉具有较好的理化性质。故以 4% 的添加量分别将豌豆原淀粉与抗性淀粉（经 GUR 处理）

添加至鲜肉中制备香肠，并对产品品质进行测定。表 4 为香肠的营养成分表，由表 4 可知，PS 与 PRS 香肠营养成分无明显差别 ( $P>0.05$ )，表明 RS 在营养成分上可替代普通淀粉，添加 RS 不会导致



表 4 香肠营养成分表

Table 4 Nutrition facts of sausages

样品	质量/g	能量/kcal	蛋白/g	脂肪/g	碳水化合物/g	水/g
PS 香肠	100	195.33 ± 3.86 <sup>a</sup>	18.57 ± 0.12 <sup>a</sup>	12.00 ± 0.16 <sup>a</sup>	3.63 ± 0.09 <sup>a</sup>	65.80 ± 0.14 <sup>a</sup>
PRS 香肠	100	199.00 ± 5.10 <sup>a</sup>	18.60 ± 0.65 <sup>a</sup>	12.47 ± 0.31 <sup>a</sup>	3.80 ± 0.29 <sup>a</sup>	65.13 ± 0.73 <sup>a</sup>

注:PS 香肠与 PRS 香肠分别为添加豌豆淀粉与豌豆抗性淀粉制成的香肠。小写字母 a 表示同列中不同样品营养成分无差异。

香肠营养成分发生改变。

2.2.2 血糖生成指数分析 血糖生产指数 (Glycemic index, GI)是用来衡量食物中碳水化合物对血糖浓度影响的指标,反映某种食物能够引起人体血糖升高量的能力。根据测试食物对餐后 2 h 的血糖反应可将食物分为高 GI 食物 (GI ≥ 75)、中 GI 食物 (GI 为 55~75)与低 GI 食物 (GI ≤ 55)<sup>[28]</sup>。长期食用高 GI 食物可导致慢性胰岛素血症,引发癌症等<sup>[29]</sup>。肉制品作为人类营养物质主要来源之一,长期食用易导致高血糖、高血脂等一系列慢性疾病。故低 GI 肉制品的开发具有重要意义。

图 6 为香肠的体外消化淀粉水解率。由图 6 可知,随着体外消化时间的延长,淀粉发生水解,水解作用增强,而总有 PRS 低于 PS 的结果。表明 RS 具有抗消化作用。可将 RS 添加至食品中调节糖脂代谢,控制体重等<sup>[30-31]</sup>。

图 7 为香肠的体外估计血糖生成指数。由图 7 可知,随着体外消化时间的延长,香肠的 eGI 逐渐升高,然而总有 PRS 小于 PS 的结果,且差异显著 ( $P < 0.05$ )。在 180 min 处,PS 香肠的 eGI 为 64.86,而 PRS 香肠的 eGI 仅为 55.04,明显低于 PS 香肠。与普通淀粉相比添加 RS 使香肠血糖值降低了 15.14%。表明将普通淀粉替换为 RS 对香肠具有显著的降糖作用。这与肖兵<sup>[32]</sup>的玉米 RS3 可明显降低小鼠血糖值的结果类似。Wang 等<sup>[33]</sup>也得出莲子 RS3 可有效降低糖尿病小鼠的血糖水平。将 RS 添加至肉制品中降低产品的血糖生成指数,对于开发营养健康的低 GI 肉制品具有重要意义。

2.2.3 质构分析 从表 5 可知,PS 香肠与 PRS 香肠的质构参数无明显差异 ( $P > 0.05$ )。图 8 为 PRS 香肠在不同温度下贮藏 7 d 的质构变化图。由图可知,无论是 4 ℃还是 25 ℃贮藏,7 d 后的硬度、弹性和咀嚼度均大于 0 d,弹性则变化不大。表明 RS 不仅能降低香肠的血糖水平,还能保证产品

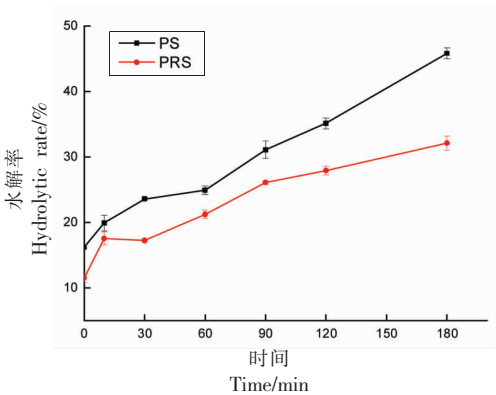
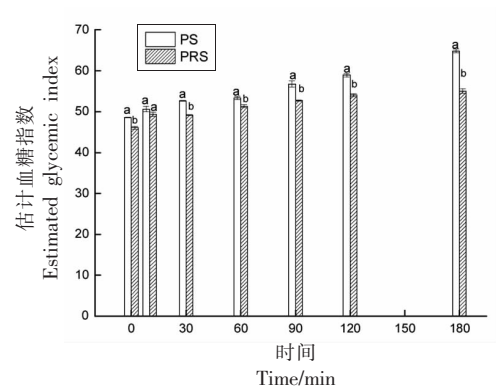


图 6 香肠的体外消化曲线

Fig.6 In vitro digestion curve of sausages



注:小写字母 a~b 表示同一时刻下 PS 香肠与 PRS 香肠的 eGI 具有差异性。

图 7 香肠的估计血糖生成指数

Fig.7 The estimated glycemic index of sausages

质构。

2.2.4 气味分析 主成分分析 (Principal component analysis, PCA) 是指将传感器响应值的特征向量进行数据转换和降维后,以散点图的形式分布在 PCA 图谱中<sup>[34]</sup>。当主成分贡献率超过 70%~85%时,则 PCA 方法可行<sup>[35]</sup>。图 9 为 PS 香肠与 PRS 香肠的 PCA 图。从图 9 可知,主成分 1 的贡献率为 83.369%,主成分 2 的贡献率为 11.817%,总贡献率 95.186% > 85%。识别指数为 -0.1,表明

表 5 香肠质构

Table 5 The texture of sausages

样品	硬度	弹性	黏聚性	胶着度	咀嚼度	回复性
PS 香肠	126.46 ± 15.86 <sup>a</sup>	0.80 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.45 ± 0.02 <sup>a</sup>	56.38 ± 6.46 <sup>a</sup>	45.01 ± 3.90 <sup>a</sup>	0.18 ± 0.02 <sup>a</sup>
PRS 香肠	122.63 ± 8.78 <sup>a</sup>	0.79 ± 0.03 <sup>a</sup>	0.46 ± 0.02 <sup>a</sup>	56.51 ± 5.54 <sup>a</sup>	44.75 ± 5.16 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.01 <sup>a</sup>

注:同列中小写字母 a 表示 PS 香肠与 PRS 香肠质构性质无明显差异。

PS 香肠与 PRS 香肠的气味相似或相近,RS 可维持香肠原有风味,从侧面反映在产品中添加 RS 不会产生影响产品风味的物质。

图 10 为不同温度下贮藏 7 d 的香肠气味变化 PCA 图。图中主成分 1 将贮藏于 4 ℃ 和 25 ℃

1~5 d 的样品与贮藏于 25 ℃ 6~7 d 样品的区别开。表明 PRS 香肠在 4 ℃ 贮存 7 d 与 25 ℃ 贮存 5 d 后仍保有原味道,RS 保证了香肠的品质。

2.2.5 滋味分析 图 11 为 PS 香肠和 PRS 香肠的滋味 PCA 图。由图 11 可知,PS 香肠与 PRS 香肠在味觉上也无明显差异。图 12 为 PRS 香肠在不同温度下贮藏 1~7 d 的滋味 PCA 图。从图中可以看出,4 ℃ 与 25 ℃ 贮藏的香肠滋味在 7 d 内差异不大,RS 可很好的维持香肠滋味。

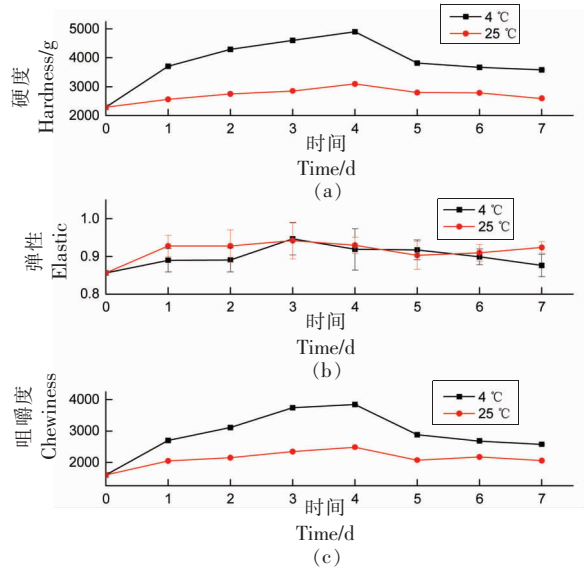


图 8 不同贮藏温度下香肠质构变化  
Fig.8 Changes of texture of sausages under different storage temperatures

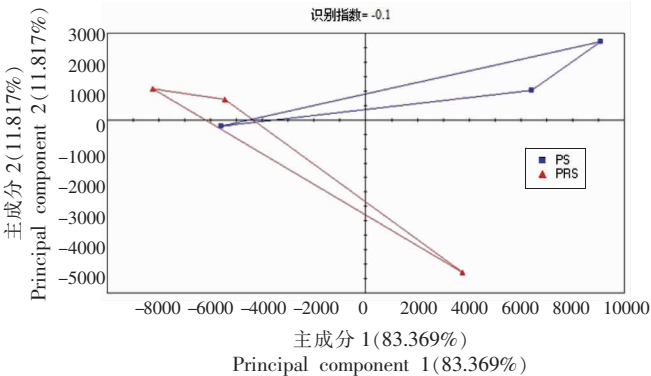


图 9 香肠气味变化的主成分分析  
Fig.9 Principal component analysis of sausages odor changes

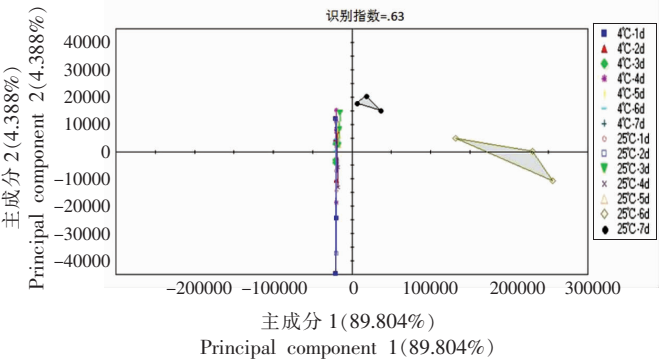


图 10 不同贮藏温度下香肠气味变化的主成分分析  
Fig.10 Principal component analysis of sausages odor changes under different storage temperatures

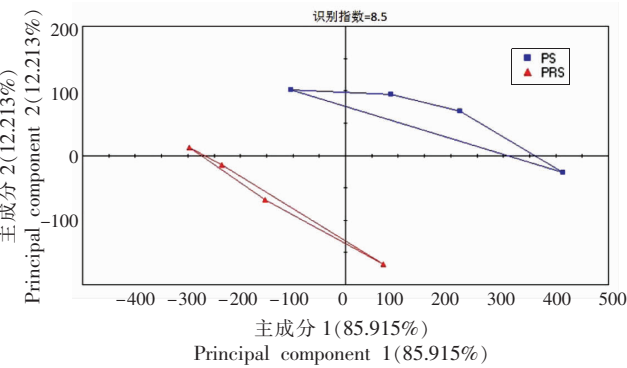


图 11 香肠的味觉主成分分析  
Fig.11 Analysis of taste principal component of sausage

2.2.6 颜色分析 对于肉制品来说,颜色的变化直接影响产品品质,进而影响消费者的购买欲。图 13、14 分别为香肠颜色变化 PCA 与分布图。从图 13 可知,PCA 识别指数为 78,表明 PRS 与 PS 香肠存在颜色差。从图 14 中可知其主要颜色差异为 3515(温和的粉红色)与 3531(褐色的粉红色)。PRS 香肠在 3515 处具有较高响应值,表明 RS 可

更好的保持鲜肉原有的粉红色。

图 15 是以 3515、3531 为主要传感器来反映香肠在不同贮藏条件下的颜色变化 PCA 图。由图可知,主成分 1 和主成分 2 将 PCA 图谱分为 4 个区域,不同区域之间表明存在一定的差异性。PRS 香肠的颜色在 4℃与 25℃下分别可维持 4 d 与 3 d 不发生变化。

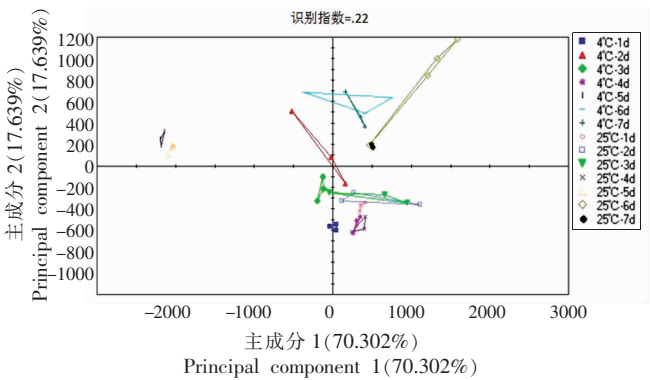


图 12 不同贮藏温度下香肠滋味变化的主成分分析  
Fig.12 Principal component analysis of sausage taste changes under different storage temperatures

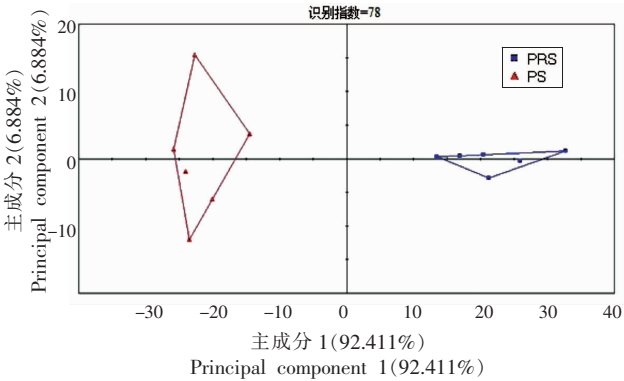


图 13 香肠颜色变化的主成分分析  
Fig.13 Principal component analysis of sausages color changes

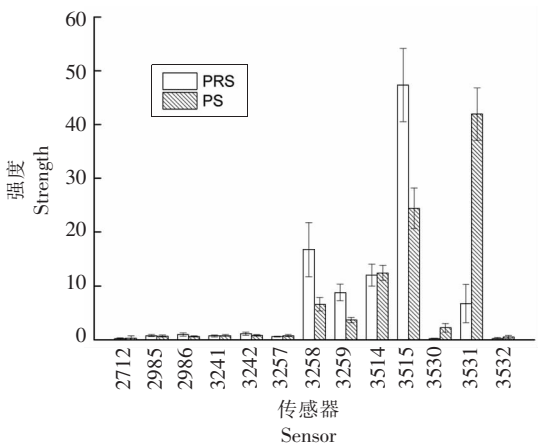


图 14 香肠颜色分布图  
Fig.14 The color distribution of sausage

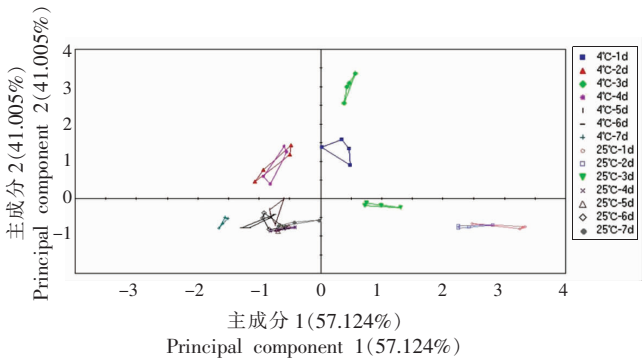


图 15 不同贮藏温度下香肠颜色变化的主成分分析  
Fig.15 Principal component analysis of sausage color changes under different storage temperatures

3 结论

本试验以马铃薯淀粉、玉米淀粉以及豌豆淀粉为原料,比较 GR、GUR、UGR 处理后的抗性淀粉的相关性质。结果表明:淀粉经处理后可得到粒径大、糊化温度升高、热稳定性增强的抗性淀粉,且豌豆淀粉经 GUR 处理后,RS 含量最高,热稳定性最好。将豌豆抗性淀粉(经 GUR 处理)添加至香

肠中,发现制备的 PRS 香肠具有更低的 eGI 值,为 55.04,与添加原淀粉 PS 香肠相比,其血糖值降低了 15.14%;且香肠的营养成分、质构以及风味等均没有发生明显改变。此外,香肠在 4℃贮藏 7 d 后,PRS 香肠的气味与滋味无明显变化,25℃贮藏 5 d 香肠的气味也无明显变化。RS 可很好地维持香肠品质,在不改变营养成分与品质的前提下降



低了香肠的 eGI。试验结果可为 RS 在肉制品中的应用, 以及开发营养健康的低 GI 食物提供理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions[J]. *Eur J Clin Nutr*, 1992, 46(Suppl 2): S33-S50.
- [2] GRABITSKE H A, SLAVIN J L. Low-digestible carbohydrates in practice[J]. *Journal of the American Dietetic Association*, 2008, 108(10): 1677-1681.
- [3] SCHOLZ-AHRENS K E, PETER A, BERIT M, et al. Prebiotics, probiotics, and synbiotics affect mineral absorption, bone mineral content, and bone structure[J]. *The Journal of Nutrition*, 2007, 137(3): 838S-946S.
- [4] SHARMA A, YADAV B S. Resistant starch: Physiological roles and food applications[J]. *Food Reviews International*, 2008, 24(2): 193-234.
- [5] LOCKYER S, NUGEN A P. Health effects of resistant starch[J]. *Nutrition Bulletin*, 2017, 42(1): 10-40.
- [6] 王怡, 陈祖琴, 李萍, 等. 抗性淀粉的制备、生理功能及应用[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(2): 396-400.
- WANG Y, CHEN Z Q, LI P, et al. Preparation and physiological function of resistant starch and its application[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(2): 396-400.
- [7] ZHANG H, JIN Z. Preparation of products rich in resistant starch from maize starch by an enzymatic method[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 86(4): 1610-1614.
- [8] 问燕梅. 小麦 RS3 型抗性淀粉的制备、性质及其应用的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
- WEN Y M, The preparation properties and application of resistant starch type 3 from wheat starch[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2014.
- [9] MINDY M, MELANIE S, SHANIL J, et al. Sensory characteristics of high-amylose maize-resistant starch in three food products[J]. *Food Science & Nutrition*, 2013, 1(2): 117-124.
- [10] MEHRDAD M, FIROUZ O. Development of low-fat and low-calorie beef sausage using modified starch as fat replacement agent[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 92(6): 1291-1296.
- [11] 钱菲. 玉米抗性淀粉对猪肉肉糜持水性及中式香肠品质的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- QIAN F. Study on the effect of maize resistant starch to the water-holding capacity of minced pork and the sausage quality[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010.
- [12] 杨麒. 小麦 RS<sub>3</sub> 型抗性淀粉的制备及其功能性质的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016.
- YANG L. The preparation of the wheat resistant starch and the research on its functional properties [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2016.
- [13] 俞东宁. 不同抗性淀粉理化特性及其体外发酵的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2018.
- YU D N. Physicochemical properties and *in vitro* fermentation characteristics of different resistant starches[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2018.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局国家标准化管理委员会. 小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度仪法: GB/T 24853-2010[S]. 北京: 国家粮食局科学研究院, 2010: 1-6.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. General pasting method for wheat or rye flour or starch-using the rapid visco analyzer: GB/T 24853-2010[S]. Beijing: Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, 2010: 1-6.
- [15] 崔亚楠. 低血糖指数原料(谷物、豆类)及工艺筛选和配方冲调粉的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- CUI Y N. Screening of low glycemic index raw materials (cereals, legumes), processing methods and study on low glycemic index mixing powder [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [16] GOÑI I, GARCIA-ALONSO A, SAURA-CALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index[J]. *Nutrition Research*, 1997, 17(3): 427-437.
- [17] 李岫怡, 杨桂芹, 郭东新. 不同来源淀粉的组成、结构及其在动物生产上的应用研究进展[J]. *动物营养学报*, 2019, 31(3): 1053-1060.
- LI X Y, YANG G Q, GUO D X. Research progress

- on composition, structure and application of different starch sources in animal production[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(3): 1053–1060.
- [18] 连喜军, 罗庆丰, 刘学燕, 等. 超声波对甘薯回生抗性淀粉生成的作用[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(1): 61–64.
- LIAN X J, LUO Q F, LIU X Y, et al. The influence of ultrasonic on formation of retrograded resistant starch from sweet potato starch[J]. Food Research And Development, 2011, 32(1): 61–64.
- [19] LI Q, WU Q, JIANG W, et al. Effect of pulsed electric field on structural properties and digestibility of starches with different crystalline type in solid state[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 207: 362–370.
- [20] CHUNG H, LIU Q, HOOVER R. Impact of annealing and heat–moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 75(3): 436–447.
- [21] 张玉杰. 超声对淀粉结构、性质的影响及制备辛烯基琥珀酸淀粉酯的作用机理[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- ZHANG Y J. Effect of ultrasound on structures and properties of starch and mechanism of preparing octenyl succinic anhydride modified starch [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020.
- [22] 周一鸣, 李保国, 崔琳琳, 等. 荞麦淀粉及其抗性淀粉的颗粒结构[J]. 食品科学, 2013, 34(23): 25–27.
- ZHOU Y M, LI B G, CUI L L, et al. Granular structure of buckwheat starch and resistant starch[J]. Food Science, 2013, 34(23): 25–27.
- [23] GELENCSE R, JUHASZ R, HODSAGI M, et al. Comparative study of native and resistant starches[J]. Acta Alimentaria, 2008, 37(2): 255–270.
- [24] 尹婧. 传统湿热及微波湿热处理对薏苡仁淀粉理化特性影响的研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016.
- YING J. Effects of traditional humid heat and microwave humid heat treatment on physicochemical properties of Coix seed starch [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2016.
- [25] CHEN X, HE X, FU X, et al. *In vitro* digestion and physicochemical properties of wheat starch/flour modified by heat–moisture treatment[J]. Journal of Cereal Science, 2015, 63: 109–115.
- [26] LU Z, DONNER E, YADA R Y, et al. Physicochemical properties and *in vitro* starch digestibility of potato starch/protein blends[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 154: 214–222.
- [27] 黄欢, 王绍帆, 刘敏, 等. 微波–酶解法处理对马铃薯淀粉结构及理化性质的影响[J]. 食品科技, 2019, 44(1): 308–315.
- HUANG H, WANG S F, LIU M, et al. Effect of microwave–enzymatic hydrolysis on structure and physicochemical properties of potato starch[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(1): 308–315.
- [28] JENKINS D J, WOLEVER T M, TAYLOR R H, et al. Glycemic index of foods: A physiological basis for carbohydrate exchange[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1981, 34(3): 362–366.
- [29] 张萌, 张家雨, 刘芳华, 等. 碳水化合物血糖生成指数及血糖负荷与卵巢癌发病关系研究进展[J]. 公共卫生与预防医学, 2020, 31(6): 105–109.
- ZHANG M, ZHANG J Y, LIU F H, et al. Research progress on the relationship between carbohydrate, glycemic index, glycemic load and the incidence of ovarian cancer[J]. Journal of Public Health and Preventive Medicine, 2020, 31(6): 105–109.
- [30] DOAN H X N, SONG Y, LEE S, et al. Characterization of rice starch gels reinforced with enzymatically–produced resistant starch[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 91: 76–82.
- [31] ASHWAR B A, GANI A, SHAH A, et al. Preparation, health benefits and applications of resistant starch—a review[J]. Starch–Stärke, 2016, 68(3/4): 287–301.
- [32] 肖兵. 抗性淀粉对糖尿病小鼠血糖和短链脂肪酸的影响及代餐产品开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
- XIAO B. Resistant starch to diabetic mice the regulation of blood sugar and the effect of short chain fatty acid[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [33] WANG Q, ZHENG Y, ZHUANG W, et al. Genome–wide transcriptional changes in type 2 diabetic mice supplemented with lotus seed resistant starch[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 427–434.
- [34] 李双艳, 邓力, 汪孝, 等. 基于电子鼻、电子舌比较分析冷藏方式对小香鸡风味的影响[J]. 肉类研究, 2017, 31(4): 50–55.
- LI S Y, DENG L, WANG X, et al. Comparative

analysis of the effect of different storage methods on the flavor of small fragrant chicken broth by electronic nose and electronic tongue[J]. Meat Research, 2017, 31(4): 50–55.

- [35] 刘雨霞, 张玲, 张小军, 等. 基于电子舌技术分类评价核桃内种皮的口感品质[J]. 食品与发酵工业,

2020, 46(19): 258–263.

LIU Y X, ZHANG L, ZHANG X J, et al. Classification and evaluation of walnut kernel pellicle taste quality based on electronic tongue technology [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(19): 258–263.

### Ultrasonic Preparation of Resistant Starch and Its Effect on the Quality and Glycemic Index of Sausage

Hu Fangyang, Chen Jinyu\*, Zhang Kunsheng, Xu Shihui, Geng Yaxin

(Tianjin Key Laboratory of Food and Biotechnology, College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134)

**Abstract** To explore the effect of resistant starch on the quality and glycemic index of Chinese sausage in order to expand the application of resistant starch in meat processing. Using potato starch, corn starch and pea starch as raw materials, the content, particle shape, particle size, gelatinization and thermodynamic properties of resistant starch prepared by gelatinization–retrogradation, gelatinization–ultrasonic–retrogradation and ultrasonic–gelatinization–retrogradation were comprehensively compared. The results showed that the particle sizes of potato starch, corn starch and pea starch increased by 3.5–8.7 times after gelatinization–retrogradation, gelatinization–ultrasonic–retrogradation and ultrasonic–gelatinization–retrogradation. The gelatinization temperature increased from 70.00, 78.93 °C and 73.38 °C to 80.45, 94.65 °C and 95 °C, respectively. The enthalpy  $\Delta H$  increased by several hundred times, and the thermal stability was enhanced. And the content of resistant starch was the highest after the treatment of pea starch with gelatinization–ultrasound–retrogradation, 14.29%, which was 1.88 times that of original starch. The effects of this starch on the quality and glycemic index of sausage were further investigated. It was found that compared with the addition of the original pea starch, the sausage prepared by adding pea resistant starch had a lower glycemic number (eGI=55.04), but there was no significant difference between the two in terms of nutritional composition and texture. Moreover, the sausage with GUR–PS added was stored at 4 °C for 7 days without obvious changes in smell and taste, while the sausage was stored at 25 °C for 5 days without obvious changes in taste. The results can provide a theoretical basis for the preparation of resistant starch and the development of low GI meat products.

**Keywords** ultrasonic–gelatinization–regeneration treatment; resistant starch; thermodynamic properties; sausage quality; glycemic index