

## 糖含量对大豆蛋白起泡性的影响

薛远<sup>1,2</sup>, 宋春丽<sup>1,2\*</sup>, 任健<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 齐齐哈尔大学食品与生物工程学院 黑龙江齐齐哈尔 161006

<sup>2</sup> 植物性食品加工技术教育部工程研究中心 黑龙江齐齐哈尔 161006)

**摘要** 采用美拉德反应协同 $\beta$ -淀粉酶定向断裂共聚糖链,获得具有不同糖含量的大豆蛋白(SPI),分析糖含量对SPI起泡性及其相关特性的调控作用。通过美拉德反应制备糖基化产物,随后利用 $\beta$ -淀粉酶对糖基化大豆蛋白的侧链糖基进行水解,得到糖含量分别为8.10,4.88,2.21 g/100 g大豆蛋白的糖基化修饰产物,并对其起泡性及相关性分析。SDS-PAGE电泳图谱证实SPI与麦芽糊精发生糖基化反应。内源荧光光谱分析结果表明,糖基化产物的三级结构变得更加疏松;美拉德反应提高了SPI(pH 7.0)的起泡性及泡沫稳定性,即:起泡性从83.48%提高到132.63%,泡沫稳定性从57.95%提高到71.56%。糖含量的变化对SPI的起泡性影响显著,随糖含量的增加,起泡性逐渐增大;而(4.88~8.10 g/100 g大豆蛋白)对SPI的泡沫稳定性影响不显著。随着糖含量的下降,糖基化产物的水合粒径、Zeta电位的绝对值、溶解性逐渐减小,表现黏度逐渐降低。研究结果为定向开发特定功能的大豆蛋白提供理论参考。

**关键词** 大豆蛋白; 麦芽糊精; 美拉德反应;  $\beta$ -淀粉酶; 起泡性

**文章编号** 1009-7848(2023)10-0118-07 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.10.013

大豆蛋白营养价值高,必需氨基酸种类齐全,接近动物蛋白,是一种优质植物蛋白<sup>[1]</sup>。此外,该蛋白作为重要的蛋白质配料而广泛应用于食品加工领域<sup>[2]</sup>。蛋白质的起泡性是赋予食品良好的质构、稳定性和加工特性的重要内在因素。例如,利用蛋白质包裹的方式保留住空气,赋予面包、蛋糕、饼干、蛋白霜、冰淇淋和一些烘焙产品理想的结构属性<sup>[3-4]</sup>。然而,天然食品蛋白质的溶解性、起泡性等性质常常不能满足产品的需求<sup>[5-6]</sup>。因此,有必要对食品蛋白质进行改性处理,以获得理想的功能性质。

美拉德反应在一定温度和湿度条件下,能够改变蛋白质分子结构,将糖分子的亲水性羰基引入蛋白质分子之中,该反应无需加入化学试剂,安全性高。国内外许多学者利用美拉德反应显著提高了大豆蛋白的起泡性,探索不同种类糖基的导入对蛋白质功能性质的影响规律<sup>[7-9]</sup>。值得注意的是,在利用美拉德糖基化反应实现蛋白质糖基化

的同时,会伴随着蛋白质自交联反应<sup>[10]</sup>。在剖析蛋白质糖基化对功能性质的影响规律时,无法充分界定导入糖分子含量变化本身所带来的影响。

本研究采用美拉德反应获得大豆蛋白糖基化产物,利用 $\beta$ -淀粉酶依次断裂导入糖基的麦芽糖单位,改变糖基化产物侧链糖基含量,从而获得具有不同糖含量的大豆蛋白。构建出自交联程度相同,而侧链糖基不同的糖基化产物模型,通过对各指标的分析 and 评估,确定、剖析糖基化产物的起泡性变化,从而为定向开发具有特定功能的蛋白质提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

脱脂豆粕,哈尔滨市宾县禹王植物蛋白有限公司;麦芽糊精(Maltodextrin, MD, DE值:8~10),山东禹城保龄宝生物有限公司; $\beta$ -淀粉酶(30 U/mg),上海麦克林生物有限公司;十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(Sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)预制胶片,金斯瑞生物科技有限公司;低分子量标准蛋白质,北京欣经科生物技术有限公司;考马斯亮蓝R-250,美国Sigma公司;其它试剂均为分析纯级。

收稿日期: 2022-10-23

基金项目: 黑龙江省优势特色学科攻关项目(YSTSXK 202202);黑龙江省“百千万”工程“玉米加工”科技重大专项(2019ZX06B02-2)

第一作者: 薛远,女,硕士生

通信作者: 宋春丽 E-mail: songchunlily@sina.com

## 1.2 仪器与设备

XW-80A型涡旋混合器,上海青浦沪西仪器厂;T25型均质机,德国IKA公司;RF-530IPC型荧光分光光度计,日本岛津公司;Nano-ZS90型纳米粒度、Zeta电位分析仪,英国Malvern公司;DYY-10型三恒电泳仪,北京市六一仪器厂。

## 1.3 方法

**1.3.1 大豆蛋白的提取** 将脱脂豆粕与蒸馏水按1:10(m/V)的比例低温溶胀过夜,使其充分水合,然后用2 mol/L的NaOH调节pH值至8.5,50℃水浴搅拌2 h,转速为30~35 r/min。随后将混合物在3 000 r/min离心20 min,收集上清液。用2 mol/L的HCl将pH值调至4.5,将其4℃放置分层后3 000 r/min离心20 min,收集沉淀,用蒸馏水(pH 4.5)水洗2次后,用2 mol/L的NaOH调节pH值至8.0。随后冷冻干燥48 h,制得SPI,蛋白质含量为91.36%。

**1.3.2 糖基化产物的制备** 制备SPI分散液(70 mg/mL,pH 8.0),将SPI溶液与麦芽糊精溶液(pH 8.0)按一定比例充分混合,进行美拉德反应(4% SPI,40 min,质量比1:2),得到反应产物。将反应产物的pH值调至4.5,3 000 r/min离心10 min,收集沉淀,加蒸馏水溶解并调节pH值至7.0。在4℃下透析(8~14 ku)24 h,除去游离的麦芽糊精分子,将透析产物(M0)冷冻干燥,备用。

**1.3.3 不同糖含量糖基化修饰产物的制备** 制备蛋白质分散液(M0,40 mg/mL,pH 7.0)于50℃时添加150 U/g(以蛋白质质量为基准) $\beta$ -淀粉酶,恒温振荡不同时间(5,40,80 min)。反应结束后,立刻取出,于95℃灭酶5 min,冷冻干燥,得到修饰产物M1(反应5 min)、M2(反应40 min)和M3(反应80 min)。将其在4℃其下透析(8~14 ku)24 h,除去游离的麦芽糊精,将糖基化修饰产物冷冻干燥,备用。

**1.3.4 糖基化修饰产物中糖含量的测定** 多糖在硫酸的作用下先水解成单糖,并迅速脱水生成糖醛衍生物,最后与苯酚生成橙黄色化合物,以比色法测定。

葡萄糖标准曲线的绘制:配制0.1 mg/mL葡萄糖标准溶液,分别取0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 mL葡萄糖标准溶液于具塞试管中,用蒸馏水补至1.0

mL,再分别加入1.0 mL的5%苯酚溶液,然后快速加入5.0 mL浓硫酸,摇匀后静止10 min。随后30℃水浴处理20 min。反应液在490 nm波长处测定吸光度。标准曲线的横坐标为葡萄糖质量浓度,纵坐标为吸光度。

样品的测定:将样品(40 mg/mL)稀释100倍,取1 mL样品溶液同法测定样品的吸光度,SPI作为空白对照组(4.06 g/100 g大豆蛋白)。

**1.3.5 SDS-PAGE电泳** 参照Song等<sup>[11]</sup>的方法稍作修改,配制3 mg/mL蛋白溶液,取100  $\mu$ L样品溶液和等量的样品缓冲液进行混合,离心后取上清液煮沸5 min,冷却待用。分离胶含量120 mg/mL,浓缩胶含量50 mg/mL。上样量12  $\mu$ L,电压调为120 V,随着溴酚蓝进入,待溴酚蓝距下缘0.5~1.0 cm时,结束电泳。

蛋白染色:电泳结束后,取出胶片放入考马斯亮蓝染色液中染色30 min,随后用脱色液进行脱色,至背景色完全褪去为止。

糖蛋白染色:电泳结束后,用12.5%三氯乙酸溶液固定胶片15 min后用双蒸水振荡水洗3次(每次5 min),再用1%的高碘酸浸泡胶片15 min,将浸泡后的胶片用双蒸水振荡水洗4次(每次10 min);将水洗后的胶片放入Schiff试剂避光染色30 min后,再用0.5%偏重亚硫酸钠振荡水洗,直至被染色的粉色糖蛋白条带出现。

**1.3.6 内源荧光光谱分析** 参照Liu等<sup>[12]</sup>的方法,进行内源荧光光谱的测定。将蛋白质样品溶于0.01 mol/L磷酸盐缓冲溶液(pH 7.0)配制成1 mg/mL的蛋白样品溶液,随后在10 000 r/min的条件下离心15 min后,取上清液4 mL,在发射波长为290 nm,激发和发射狭缝光度为5 nm条件下,扫描300~400 nm范围的发射光谱。以波长为横坐标,相对荧光强度为纵坐标作图。

**1.3.7 起泡性及泡沫稳定性** 将蛋白质样品溶于磷酸盐缓冲液(pH 7.0)中,配制质量浓度为10 g/L的蛋白质溶液。取100 mL该溶液,以12 000 r/min的转速搅打1 min,记录数据,平行测定3次<sup>[13]</sup>。蛋白质的起泡性( $F_c$ )和泡沫稳定性( $F_s$ )的计算方法见式(1)和式(2)。

$$F_c = \frac{V_0}{V_L} \times 100\% \quad (1)$$

$$F_s = \frac{V_{30}}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $V_L$ ——搅打前液体的体积(mL);  $V_0$ ——搅打刚停止时泡沫的体积(mL);  $V_{30}$ ——搅打后静置 30 min 时泡沫的体积(mL)。

1.3.8 溶解性 参照 Peng 等<sup>[14]</sup>的方法测定蛋白质的溶解性。将蛋白质样品溶于 pH 值为 7.0 的缓冲液, 配制成 2 g/L 蛋白质溶液。涡旋后 4 °C 存放, 使其充分水合。次日 8 000 r/min 离心 20 min, 收集上清液, 采用福林酚法测定其可溶性蛋白的含量。以待测样品中可溶性蛋白质含量的占比表示蛋白质溶解性。

1.3.9 水合粒径分布和 Zeta 电位 参照 Hayakawa 等<sup>[15]</sup>的方法, 配制一定浓度的蛋白质分散液并将浓度稀释至 0.1 mg/mL, 用 0.45 μm 水膜过滤, 随后用粒度分析仪测定样品的水合粒径分布和 Zeta

电位, 平行测定 3 次。

1.3.10 表观黏度的测定 参照 Gu 等<sup>[16]</sup>的方法用马尔文流变仪测定蛋白质的表观黏度。配制质量浓度为 40 mg/mL 蛋白样品溶液 (pH 7.0)。测定时, 将样品分散液缓慢注入、充满夹具 (直径为 60 mm, 锥角为 0.5° 的锥板)。在温度 25 °C, 频率 0.1~100 s<sup>-1</sup> 时, 测试样品的表观黏度。

## 2 结果与分析

### 2.1 糖基化修饰产物的糖含量

控制 β-淀粉酶对 SPI 美拉德产物 (M0) 的水解时间 (分别为 5, 40, 80 min) 得到糖含量不同的修饰产物, 其糖含量分别为 8.10, 4.88, 2.21 g/100 g 大豆蛋白。与 M0 (12.44 g/100 g 大豆蛋白) 相比, 修饰产物糖含量均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

表 1 4 种糖基化修饰产物的糖含量分析结果

Table 1 Glycan contents of the modified soy protein isolates

蛋白名称	M0	M1	M2	M3
糖含量/g·(100g) <sup>-1</sup> 大豆蛋白	12.44 ± 0.60 <sup>a</sup>	8.10 ± 0.19 <sup>b</sup>	4.88 ± 0.25 <sup>c</sup>	2.21 ± 0.09 <sup>d</sup>

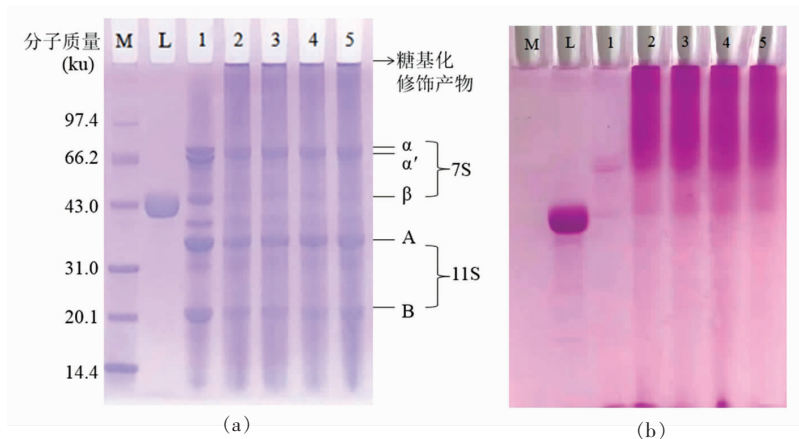
注: 不同小写字母表示具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 表 2 同。

### 2.2 SDS-PAGE 电泳

由图 1a 可以看出, 与 SPI (泳道 1) 相比, 糖基化修饰产物 (泳道 2~5) 的 7S 亚基 α 和 β 谱带以及 11S 亚基的 B 谱带显色反应减弱, 高分子区域显色反应明显增强, 且出现了新的谱带。表明大豆蛋白的 7S 亚基和 11S 亚基成分与麦芽糊精发生

共价结合, 形成了高分子共聚物, 并且被截留在分离胶顶部<sup>[17]</sup>。

由图 1b 可以看出, 糖基化修饰产物 (泳道 2~5) 在分离胶顶端有一条明显的条带, 而且与阳性对照辣根过氧化物酶 (糖蛋白, 泳道 L) 相似, 具有明显的糖染色现象。SDS-PAGE 分析结果显示大



注: M. 蛋白质标准品; L. 辣根过氧化物酶; 泳道 1~5 分别为 SPI、M0、M1、M2、M3。

图 1 大豆蛋白及其糖基化修饰产物的 SDS-PAGE 电泳图

Fig.1 SDS-PAGE of soy protein isolates and its glycosylated products

豆蛋白修饰产物是一个交联的大豆蛋白,而且含有糖基。结果表明,大豆蛋白与麦芽糊精发生了美拉德反应,生成了蛋白质共聚物,且该物质为糖蛋白。这直接证实了通过美拉德反应,可以将麦芽糊精导入到大豆蛋白分子中<sup>[18]</sup>。

### 2.3 内源荧光光谱分析

内源荧光光谱是对蛋白质分子的内源性荧光发色团(色氨酸、酪氨酸残基等)的研究<sup>[19]</sup>。SPI 及糖基化修饰产物的荧光光谱如图 2 所示。

从图 2 可以看出,SPI 的最大激发波长( $\lambda_{\max}$ )是 337 nm,是典型的色氨酸荧光光谱<sup>[20]</sup>。与 SPI 相比,糖基化修饰产物的最大激发波长分别增加到 346 nm (M0),343 nm (M1),343 nm (M2),342 nm (M3),表示荧光吸收呈现红移现象,表明糖基化修饰产物具有更疏松的蛋白质三级结构。这是因为蛋白质的色氨酸残基随反应的进行暴露在极性环境中,同时蛋白质分子与糖分子的共价结合也使环境极性增强<sup>[21]</sup>。同时由于  $\beta$ -淀粉酶作用位点的不同,产生不同空间位阻作用,也对大豆蛋白微环境造成不同影响<sup>[22]</sup>。

### 2.4 起泡性及泡沫稳定性

SPI 及糖基化修饰产物的起泡性及泡沫稳定性如图 3 所示。SPI 的起泡能力为 84.48%,M0 的起泡能力最高,为 136.62%。由于糖基的导入显著提高了大豆蛋白的溶解性,糖基化修饰产物亲水性增强,当受到急速搅打时,混入大量气体,从而形成气液薄膜<sup>[23]</sup>,表现为起泡性增强<sup>[24]</sup>。修饰产物随着糖含量变化起泡能力分别达到 98.66%(M1),96.08%(M2),91.36%(M3),且差异显著。结果表明,修饰产物的糖含量对大豆蛋白的起泡性影响显著。

与 SPI(57.05%)相比,M0 泡沫稳定性最高,为 71.56%,修饰产物的泡沫稳定性均显著增强。这可能是蛋白质肽链受热展开,疏水基团暴露出来,增强了蛋白质分子在气液界面的张力,形成厚度高于 SPI 的气液薄膜,从而增加泡沫稳定性<sup>[25]</sup>。此外,糖含量为 4.88~8.10 g/100 g 大豆蛋白时,对泡沫稳定性影响不显著。

### 2.5 水合粒径分布、Zeta 电位及溶解性分析

水合粒径反映了糖基化修饰产物的聚集行为。如表 2 所示,糖基化修饰产物的水合粒径由

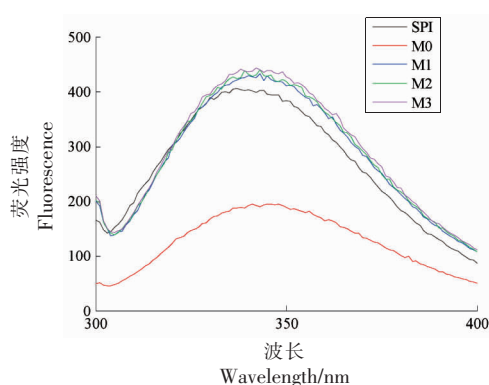
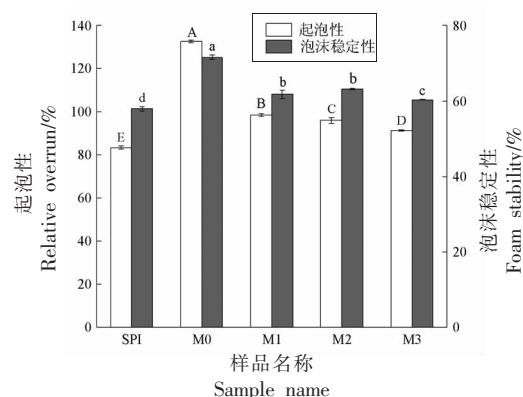


图 2 大豆蛋白及其糖基化修饰产物的内源荧光光谱图  
Fig.2 Internal fluorescence spectrum of soy protein isolates and its glycated products



注:不同大写、小写字母表示组间具有显著性差异( $P < 0.05$ )。

图 3 大豆蛋白及其糖基化修饰产物的起泡性及泡沫稳定性

Fig.3 Relative overrun and foam stability of soy protein isolates and its glycated products

SPI 的 134.4 nm 分别增大到 169.4,165.4,162.6,151.2 nm。由于 SPI 的游离氨基与麦芽糊精的羰基发生了结合,糖基化修饰产物的糖含量升高,水合能力增强,表现为平均粒径增大。

溶液稳定性与溶液形成的界面面积有关,进而表现出不同的泡沫稳定性。Zeta 电位是在蛋白质溶液中带电粒子剪切面的电势,通常电势被用来度量粒子之间的相互吸引力和相互排斥力;也是对体系分散稳定性度量的重要参数之一。糖基化修饰产物的电位绝对值增大(从 18.3 增大到 30.9)。这是因为 SPI 经过糖基化改性后,空间结构发生变化,带电基团暴露出来,导致 Zeta 电位绝对值进一步增大。此外,随着糖含量的减少,电位的绝对值逐渐减小(30.3,29.4,28.7)。电位的绝对

值越大,粒子之间的排斥作用越显著<sup>[26]</sup>,糖含量减少,粒子之间排斥力减小,导致溶液的稳定性降低。

在 pH 值为 7.0 时,糖基化修饰产物的溶解性显著升高。美拉德反应引起的 SPI 分子结构变化会产生特定的表面特性和功能特性。通过美拉德

反应,糖分子上的亲水性羟基与蛋白质的游离氨基相结合,将大量的亲水基团导入蛋白质分子之中,蛋白质分子的空间稳定<sup>[27]</sup>。蛋白质分子结构伸展且空间稳定,溶液受到搅拌时,迅速与水分子反应且产生大而稳定的界面面积,进而表现为起泡能力以及泡沫稳定性增强。

表 2 大豆蛋白及其糖基化修饰产物的水合粒径分布、电位及溶解性

蛋白名称	SPI	M0	M1	M2	M3
水合粒径/nm	134.4 ± 2.75 <sup>d</sup>	169.4 ± 2.93 <sup>a</sup>	165.4 ± 4.28 <sup>ab</sup>	162.6 ± 0.26 <sup>b</sup>	151.2 ± 3.18 <sup>c</sup>
电位/mV	-18.3	-30.9	-30.3	-29.4	-28.7
溶解性/%(pH 7.0)	36.13 ± 0.28 <sup>c</sup>	45.36 ± 0.34 <sup>a</sup>	43.65 ± 0.78 <sup>b</sup>	41.36 ± 0.23 <sup>c</sup>	38.02 ± 0.49 <sup>d</sup>

## 2.6 表观黏度

当蛋白质溶液受到急速较搅打时,会形成气液薄膜产生泡沫,气液薄膜的黏性与蛋白质溶液的泡沫稳定性有关。表观黏度可以评价流体黏稠度,用于表征液体中分子间吸引力<sup>[28]</sup>。SPI 及其糖基化修饰产物的表观黏度测定结果如图 6 所示。与 SPI 相比,糖基修饰化产物分散液的表观黏度均显著增加,且表现出非牛顿流体的特征(随剪切速率的增加,表观黏度逐渐降低)。可能是蛋白质游离氨基与糖的亲水性羰基结合生成大分子物质,糖基化修饰产物的相对分子质量、水合粒径和亲水性增加,因此 M0 表观黏度增加<sup>[29]</sup>。随着糖基化修饰产物侧链糖基含量变少,水合作用变小,糖基化修饰产物的表观黏度逐渐减小,然而仍高于 SPI。当体系的黏度增大,溶液被急速搅打时,蛋白质分子迅速吸附在气液薄膜上,表面张力降低,形成一个有较强凝聚力和黏性的气液薄膜,泡沫稳

定性显著增强。

## 3 结论

美拉德反应协同  $\beta$ -淀粉酶定向断裂共聚糖链,能够构建出自交联程度相同,而侧链糖含量不同的糖基化大豆蛋白。该反应显著提高了 SPI 的起泡性及泡沫稳定性;起泡性从 83.48% 提高到 132.63%;泡沫稳定性从 57.95% 提高到 71.56%。糖含量对 SPI 的起泡性有显著影响,而且随糖含量的增加,起泡性逐渐增大;然而糖含量变化(4.88~8.10 g/100 g 大豆蛋白)对 SPI 的泡沫稳定性影响不显著。相应的,随着糖含量减少,糖基化产物的水合粒径、Zeta 电位绝对值、溶解性逐渐减小,表观黏度逐渐降低。研究结果为定向开发特定功能的大豆蛋白功能性配料提供理论支撑。

## 参 考 文 献

- [1] MATSUMURA Y, SIRISON J, ISHI T, et al. Soybean lipophilic proteins: Origin and functional properties as affected by interaction with storage proteins [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2017, 28: 120-128.
- [2] TANG C H. Nanostructured soy proteins: Fabrication and applications as delivery systems for bioactives (a review)[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 91: 92-116.
- [3] ASHAOLU T J. Applications of soy protein hydrolysates in the emerging functional foods: A review[J]. *International Journal of Food Science &*

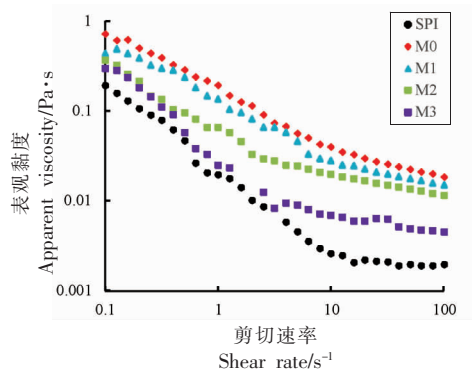


图 4 大豆蛋白及其糖基化修饰产物的表观黏度  
Fig.4 Apparent viscosity of soy protein isolates and its glycosylated products

- Technology, 2020, 55(2): 421–428.
- [4] WOLF W J. Soybean proteins their functional, chemical, and physical properties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1970, 18(6): 969–976.
- [5] LI J, YANG X, SWALLAH M S, et al. Soy protein isolate: An overview on foaming properties and air–liquid interface[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(1): 188–200.
- [6] ZHANG Q, LI L, LAN Q Y, et al. Protein glycosylation: A promising way to modify the functional properties and extend the application in food system [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(15): 2506–2533.
- [7] 王鲁慧, 肖军霞, 徐同成, 等. 湿热条件下大豆分离蛋白与葡萄糖、麦芽糖的美拉德反应[J]. 食品科学, 2018, 39(16): 19–26.
- WANG L H, XIANG J X, XU T C, et al. Maillard reaction of soybean protein isolate with glucose and maltose under wet heating conditions[J]. Food Science, 2018, 39(16): 19–26.
- [8] 黄翠萍, 龙迪, 杨智皓, 等. 大豆分离蛋白–壳聚糖美拉德反应产物的制备条件优化[J]. 中国油脂, 2021, 46(10): 29–36.
- HUANG C P, LONG D, YANG Z H, et al. Optimization of preparation of Maillard reaction products of soybean protein isolate–chitosan[J]. China Oils and Fats, 2021, 46(10): 29–36.
- [9] LI J, YANG X, SWALLAH M S, et al. Soy protein isolate: An overview on foaming properties and air–liquid interface[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(1): 188–200.
- [10] LI Q Y, ZHENG J B, GE G, et al. Impact of heating treatments on physical stability and lipid–protein cooxidation in oil–in–water emulsion prepared with soy protein isolates [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105167.
- [11] SONG C L, ZHAO X H. Structure and property modification of an oligochitosan–glycosylated and crosslinked soybean protein generated by microbial transglutaminase [J]. Food Chemistry, 2014, 163: 114–119.
- [12] LIU J H, LUO Y H, GU S Q, et al. Physicochemical, conformational and functional properties of silver carp myosin glycosylated with konjac oligo–glucosaminan: Implications for structure–function relationships[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 136–144.
- [13] GUAN J J, ZHANG T B, HUI M, et al. Mechanism of microwave–accelerated soy protein isolate–saccharide graft reactions[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2647–2654.
- [14] PENG X Q, XU Y T, LIU T X, et al. Molecular mechanism for improving emulsification efficiency of soy glycinin by glycation with soy soluble polysaccharide[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(46): 12316–12326.
- [15] HAYAKAWA S, NAKAI S. Relationships of hydrophobicity and net charge to the solubility of milk and soy proteins[J]. Journal of Food Science, 1985, 50(2): 486–491.
- [16] GU X, CAMPBELL L J, EUSTON S R. Influence of sugars on the characteristics of glucono– $\delta$ –lactone–induced soy protein isolate gels[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(2): 314–326.
- [17] DING Y, CHEN L, SHI Y G, et al. Emulsifying and emulsion stabilizing properties of soy protein hydrolysates, covalently bonded to polysaccharides: The impact of enzyme choice and the degree of hydrolysis[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106519.
- [18] SONG C L, ZHAO X H. The preparation of an oligochitosan–glycosylated and cross–linked caseinate obtained by a microbial transglutaminase and its functional properties[J]. International Journal of Dairy Technology, 2014, 67(1): 110–116.
- [19] EL FADIL E B, KHAN M A S, MATSUDOMI N, et al. Polymerization of soy protein digests by microbial transglutaminase for improvement of the functional properties[J]. Food Research International, 1996, 29(7): 627–634.
- [20] ALIEVA R R, KUDRYASHEVA N S. Variability of fluorescence spectra of coelenteramide–containing proteins as a basis for toxicity monitoring[J]. Talanta, 2017, 170: 425–431.
- [21] HALDER U C, CHAKRABORTY J, DAS N, et al. Tryptophan dynamics in the exploration of micro–conformational changes of refolded  $\beta$ –lactoglobulin after thermal exposure: A steady state and time–resolved fluorescence approach[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2012, 109: 50–57.
- [22] MORALES F J, VAN BOEKEL M. A study on advanced Maillard reaction in heated casein sugar solutions: Fluorescence accumulation [J]. International

- Dairy Journal, 1997, 7(11): 675–683.
- [23] CHENG Y H, TANG W J, XU Z, et al. Structure and functional properties of rice protein–dextran conjugates prepared by the Maillard reaction[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(2): 372–380.
- [24] 王晓杰, 刘晓兰, 丛万锁, 等. 壳寡糖酶法糖基化修饰对玉米醇溶蛋白功能性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 13–20.
- WANG X J, LIU X L, CONG W S, et al. Effect of transglutaminase–catalyzed glycosylation with chitosan on the functional properties of zein[J]. Food Science, 2018, 39(8): 13–20.
- [25] LI J, YANG X, SWALLAH M S, et al. Soy protein isolate: An overview on foaming properties and air–liquid interface[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(1): 188–200.
- [26] XIA N, LU X X, ZHENG Z, et al. Study on preparation of acylated soy protein and stability of emulsion[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(12): 4959–4968.
- [27] MUHOZA B, ZHANG Y, XIA S, et al. Improved stability and controlled release of lutein–loaded micelles based on glycosylated casein via Maillard reaction[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 45: 1–9.
- [28] TAVARES L, NOREÑA C P Z. Characterization of rheological properties of complex coacervates composed by whey protein isolate, chitosan and garlic essential oil[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 16(1): 295–306.
- [29] SUN T, QIN Y Y, XIE J, et al. Effect of Maillard reaction on rheological, physicochemical and functional properties of oat  $\beta$ -glucan[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 90–94.

## Effect of Glycan Contents on the Foaming Properties of Soy Protein

Xue Yuan<sup>1,2</sup>, Song Chunli<sup>1,2\*</sup>, Ren Jian<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Food and Bioengineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, Heilongjiang

<sup>2</sup>Engineering Research Center of Plant Food Processing Technology, Ministry of Education, Qiqihar 161006, Heilongjiang)

**Abstract** The effects of glycan contents on foaming property and related induces of soy protein isolates (SPI) were investigated. The glycated products were prepared by Maillard reaction, and the congauated saccharide chain of the modified SPI was then hydrolyzed by  $\beta$ -amylase. The glycan contents of the modified products with 8.10, 4.88, 2.21 g/100 g SPI were obtained, and their foaming property and related induces were analyzed. SDS–PAGE analysis confirmed the glycated SPI were generated. Internal fluorescence spectrum analysis showed that the tertiary structure of prepared products became more flexible. Maillard reaction improved foaming ability and foam stability of SPI at pH 7.0. Relative overrun (foaming ability) of the modified SPI increased from 83.48% (SPI) to 132.63%. Meanwhile, foam stability of the modified SPI increased from 57.95% (SPI) to 71.56%. Glycan content was significantly affected the relative overrun (foaming ability) of SPI, and the evaluated values increased gradually with the increase of glycan contents. However glycan contents from 4.88 g/100 g to 8.10 g/100 g SPI showed no significantly effect on the foam stability of SPI. Correspondingly, the hydration particle size, the absolute value of Zeta potential, solubility and apparent viscosity of glycated products gradually decreased with the decrease of glycan contents. Detailed understanding of glycan contents effect can be explored for improving the functional properties of food protein.

**Keywords** soy protien isolates (SPI); maltodextrin; Maillard reaction;  $\beta$ -amylase; foaming property