

米渣谷蛋白卡拉胶糖基化改性及功能性质

杜研学, 史苏华, 熊 华*, 蒋 岩, 张 忠, 李 捷
(南昌大学 食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047)

摘 要: 采用干法美拉德反应, 对米渣谷蛋白进行糖基化改性, 考察谷蛋白-卡拉胶的质量比和反应时间对接枝反应进程和接枝产物功能性质的影响, 并对最佳工艺共价接枝产物的溶解性、乳化性和乳化稳定性进行研究。结果表明: 在谷蛋白-卡拉胶的质量比 1:2、相对湿度 79%、温度 60℃条件下, 反应 24h, 产物接枝度达到 28.84%; 相比谷蛋白, 接枝产物溶解性、乳化性和乳化稳定性分别提高了 2.04、4.84 倍和 0.63 倍。经糖基化改性后的米渣谷蛋白表面疏水性显著降低, 功能性质在广泛 pH 值范围内也得到显著改善。

关键词: 米渣谷蛋白; 卡拉胶; 溶解性; 乳化性

Glycosylation of Rice Dregs Glutelin and Functional Properties of Glutelin-Carrageenan Conjugates

DU Yan-xue, SHI Su-hua, XIONG Hua*, JIANG Yan, ZHANG Zhong, LI Jie
(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

Abstract: Rice dregs glutelin (RDG) was glycosylated with carrageenan (Car) by dry-heated Maillard reaction. The effects of mass ratio of RDG to Car and reaction time on degree of graft reaction and functional properties of RDG-Car conjugates were investigated. The results showed that the degree of graft reaction was 28.84% under the optimal conditions: RDG-to-Car mass ratio 1:2, temperature 60 °C, relative humidity 79% and reaction time 24 h. The solubility, emulsifying property and emulsion stability of the resulting RDG-Car conjugate were improved obviously, which were increased by 2.04, 4.84 and 0.63 times, respectively when compared with those of RDG. Meanwhile, we found that the surface hydrophobicity of glutelin was reduced dramatically after glycosylation with Car. Compared with RDG, its conjugate with Car exhibited much higher solubility, emulsifying capacity and emulsion stability in a wide pH range.

Key words: rice dregs glutelin; carrageenan; solubility; emulsifying properties

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2011)16-0011-05

米蛋白中 75%~90% 是谷蛋白, 其氨基酸组成与大米蛋白基本一致。米谷蛋白的氨基酸组成平衡合理, 接近 FAO/WHO 所推荐的营养配比模式。米谷蛋白中第一限制性氨基酸赖氨酸含量高于其他谷类, 精氨酸含量也较高, 是其他植物蛋白甚至很多动物蛋白无法比拟的^[1]。大米低过敏, 是唯一可免于过敏试验的谷物^[2]; 米谷蛋白可以作为一种低抗原性蛋白资源, 特别适合作为混合饮料、布丁、冰淇淋等食品的添加剂。尽管米谷蛋白的市场应用前景广泛, 但它的高疏水性、低溶解性限制其在食品中的应用, 米谷蛋白的改性研究也越来越被重视。

蛋白质与多糖的接枝改性近年来受到越来越多的关注, 蛋白质经接枝改性后的功能性(如水溶性、乳化性)等有一定的改善, 是目前蛋白改性中比较理想的方法之一^[3-6]。目前, 对米蛋白糖基化改性的报道较少, 且较单一。研究显示米蛋白经美拉德接枝改性后功能性质均得到不同程度提高^[7-10]。卡拉胶是一种应用广泛的亲水性胶体, 在食品工业中常被用作乳化剂和稳定剂等, 适合制备乳化性蛋白接枝物。但是关于米渣谷蛋白-卡拉胶的接枝改性研究较少, 对其接枝产物功能性质的研究鲜有报道。本实验采用卡拉胶对米渣谷蛋白进行接枝改性, 在干热条件下, 利用美拉德反应制备谷蛋白-卡拉

收稿日期: 2011-04-26

基金项目: 国家发展与改革委员会项目(发改投资[2009]2825 号); 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室目标导向项目(SKLF-MB-201005); 江西省高新技术产业化重大项目(赣财教[2008]212 号)

作者简介: 杜研学(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为粮食、油脂及植物蛋白工程。E-mail: oduyanxue@163.com

* 通信作者: 熊华(1957—), 男, 教授, 硕士, 研究方向为蛋白质、微胶囊与功能性食品。

E-mail: huaxiong100@yahoo.com.cn

胶共价接枝物,研究蛋白和糖的配比以及反应时间对接枝物的接枝度、溶解性、乳化性和乳化稳定性的影响,确定最优工艺,探讨 pH 值对共价接枝物的溶解性和乳化性等功能性质的影响。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

米渣 江西省恒天实业有限公司;卡拉胶 天津光复精细化工有限公司; α -淀粉酶 诺维信酶制剂有限公司;大豆油 市售;邻苯二甲醛、1-苯胺基萘-8-磺酸(ANS) 美国 Sigma 公司;硼砂、甲醇、赖氨酸、 β -巯基乙醇、十二烷基硫酸钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钾、考马斯亮蓝等(均为分析纯) 天津市永大化学试剂开发中心。

1.2 仪器与设备

RH basic 1 型磁力搅拌器 德国 IKA 公司;LXJ-IIB 离心机 上海安亭科学仪器厂;新世纪 T6 紫外分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司;F-4500 荧光分光光度计 日本日立公司;KDY-9820 凯氏定氮仪 厦门精艺兴业科技有限公司;SPX-250 微电脑人工气候箱 上海博迅实业有限公司;QZP-8 型喷雾干燥塔 无锡林洲干燥厂。

1.3 方 法

1.3.1 米渣谷蛋白的制备及纯化

称取 150g 脱脂米渣以液固比(10mL/g)于 0.1mol/L NaOH 溶液中,并置于 50℃ 水浴中浸提 1h,将浸提液在 4800r/min 离心分离 10min,沉淀按上述方法重复提取 2 次,合并 3 次上清液,得到米渣谷蛋白粗提液。将米渣谷蛋白粗提液于水浴锅中保温至 65℃,调 pH 值至 6.3(淀粉酶生产厂家推荐的最佳值)。加入 0.25mg/mL α -淀粉酶,水解 3h 后调 pH4.8 进行酸沉,将沉淀分别用 5% NaCl 溶液、70% 乙醇溶液和蒸馏水洗涤 3 次,除去碱提过程中提取出的球蛋白、醇溶蛋白、清蛋白以及残留的无机盐。再用 0.1mol/L NaOH 溶液调 pH 值至中性,然后进行冷冻干燥,最后得米渣谷蛋白粉。采用全自动凯氏定氮仪测得谷蛋白粉的蛋白含量为 90.53%。

1.3.2 米渣谷蛋白-卡拉胶共价复合物的制备工艺

称取一定质量比例的米渣谷蛋白和卡拉胶,考察谷蛋白与卡拉胶以不同质量比(1:3、1:2、1:1、2:1、3:1),反应不同时间(0、6、12、24、36h)对接枝反应的影响。两者溶于去离子水中,调节 pH8.5,配成蛋白质质量浓度为 20mg/mL 的悬浮液,搅拌 30min。

将米渣谷蛋白和卡拉胶的混合溶液进行喷雾干燥,将得到的样品置入一容器中,然后保存在恒温恒湿箱中反应,参照 Kato 等^[11]的干热反应方法。反应条件控制

为温度 60℃、相对湿度 79%。在不同反应时间分别取样,测定共价复合物的性质。

1.3.3 共价接枝物接枝度的测定

采用 OPA 法^[12]。准确称量 40mg OPA 溶解于 1mL 甲醇中,分别加入 2.5mL 质量分数 20% 的 SDS、25mL 0.1mol/L 硼砂及 100 μ L β -巯基乙醇,最后用蒸馏水定容至 50mL,此为 OPA 试剂,每次使用前即时配制。测定时,取 4mL OPA 试剂于试管中,注入 200 μ L 样品液(5mg/mL),混匀后于 35℃ 反应 2min,在 340nm 测其吸光度 A_{340} ,以在 OPA 试剂中加入 200 μ L 水为空白。接枝度(degree of graft, DG)计算公式:

$$DG/\% = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100$$

式中: C_0 为未反应时蛋白质自由氨基总量; C_t 为反应 t 时刻蛋白质自由氨基的含量。

1.3.4 米渣谷蛋白及其共价接枝物溶解性的测定

称取一定质量的样品于去离子水中,配制成蛋白质质量浓度 1mg/mL 溶液,在常温搅拌 1h 后,在 4800r/min 离心 10min,收集上清液,用考马斯亮蓝法测定其中蛋白质质量浓度,以谷蛋白的氮溶解指数(nitrogen soluble index, NSI)表示蛋白质的溶解度。

$$NSI/\% = \frac{\text{上清液中谷蛋白含量}}{\text{样品中谷蛋白含量}} \times 100$$

1.3.5 米渣谷蛋白及其共价接枝物乳化性的测定

称取一定量共价接枝物,溶解到于去离子水中,配成蛋白质质量浓度 1mg/mL 的溶液。在常温搅拌 1h 后,取 9mL 蛋白溶液与 1mL 大豆油混合,放入 40mL 离心管中。机械乳化机 12000r/min 乳化 1min,将乳化液迅速倒入 25mL 小烧杯中,取样点固定在离烧杯底部 0.5cm 处,取 50 μ L 的乳化液与 5mL 0.1% SDS 混合,在 500nm 处测定,用 0.1% SDS 做空白对照^[13]。以乳化活力指数(emulsification activity index, EAI)表示谷蛋白乳化活性:

$$EAI/(m^2/g) = \frac{2 \times 2.303 \times A \times D}{c \times (1 - \theta) \times 10000}$$

式中: D 为稀释倍数; C 为乳化液形成前蛋白质水溶液中蛋白质质量浓度; θ 为乳化液中油的体积分数。

乳化稳定性用乳化稳定指数(emulsifying stability index, ESI)表示如下:

$$ESI/\text{min} = \frac{A_0 \times \Delta t}{\Delta A}$$

$$\Delta A = A_0 - A_{10}$$

式中： A_0 为 0min 时取样测定的吸光度； Δt 为 10min； A_{10} 为静置 10min 后重新取样测定的吸光度。

1.3.6 最优工艺共价接枝物的制备与纯化

以最优质量比称取米渣谷蛋白和卡拉胶制备共价接枝物，后续方法同 1.3.2 节。采用超滤法对接枝物进行纯化，由于卡拉胶的分子质量约为 200kD，故选择分子质量为 200kD 的超滤膜进行超滤，收集浓缩物并进行冷冻干燥。

1.3.7 表面疏水性测定

采用荧光探针剂 ANS 法^[14]。将样品用 0.01mol/L、pH8.5 磷酸缓冲液稀释至 0.002%、0.004%、0.008%、0.016%，取 20 μ L 1-苯胺基-8-萘磺酸(1-anilino-8-naphthalene sulfonic acid, ANS)溶液(8mmol/L ANS 溶于 0.01mol/L 磷酸盐缓冲液)加入至 4mL 蛋白溶液中，立即漩涡混匀，在荧光分光光度计中于 390nm 激发 470nm 检测发射荧光强度，用荧光强度对蛋白溶液质量浓度作图并进行线性回归，以线性回归斜率作为表面疏水性的指标。

1.3.8 pH 值对最优工艺共价接枝物功能性质的影响

1.3.8.1 pH 值对接枝物溶解性的影响

测定方法同 1.3.4 节。将样品溶于去离子水中，用 0.1mol/L HCl 溶液或 NaOH 溶液调节溶液 pH 值为 3、4、5、6、7、8、9、10，4800r/min 离心 10min，收集上清液，测定其溶解性随 pH 值的变化。

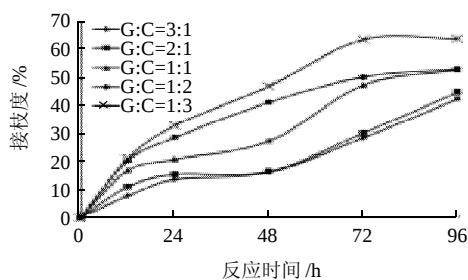
1.3.8.2 pH 值对接枝物乳化性能的影响

测定方法同 1.3.5 节。将样品溶于去离子水中，用 0.1mol/L HCl 溶液或 NaOH 溶液调节溶液 pH 值为 3、4、5、6、7、8、9、10，常温搅拌 1h 后，测定其乳化性及乳化稳定性随 pH 值的变化。

2 结果与分析

2.1 谷蛋白与卡拉胶的糖基化反应

2.1.1 糖基化反应对接枝度的影响



G. 谷蛋白；C. 卡拉胶。下同。

图1 不同质量比的谷蛋白与卡拉胶混合物在不同反应时间接枝度的变化

Fig.1 Effect of reaction time and RDG-to-Car ratio on degree of graft reaction

由图 1 可知，随着卡拉胶与谷蛋白接枝反应时间的增长，其产物的接枝度均增大，且谷蛋白与卡拉胶的质量比越小，接枝反应的速率越快。质量比为 1:3 的卡拉胶与谷蛋白在反应前期，接枝度快速增大，反应 12h，接枝度即达到 21%，随着反应的进行，反应速率放缓，接枝度平稳增大，当反应进行 72h 之后，接枝反应进入后期，产物的接枝度不再增加。而随着谷蛋白与卡拉胶质量比的提高，反应物的羰基减少，接枝反应较为缓慢，质量比 3:1 的谷蛋白与卡拉胶在反应 96h，接枝度才达到 42%。

2.1.2 糖基化反应对接枝物溶解性的影响

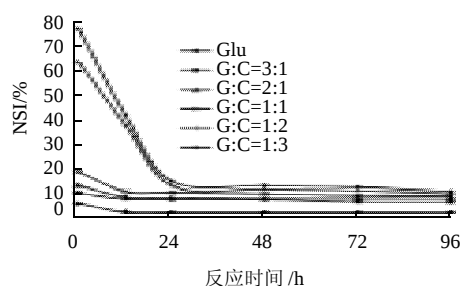


图2 不同反应时间下谷蛋白-卡拉胶接枝物的溶解性变化

Fig.2 Effect of reaction time and RDG-to-Car ratio on solubility of glutelin-carrageenan conjugates

如图 2 所示，随着反应的进行，接枝产物的溶解度呈现下降趋势，但不同糖配比的接枝产物的溶解性均优于未接枝的谷蛋白，质量比为 1:2 和 1:3 的谷蛋白与卡拉胶反应 12h 的接枝产物的溶解度是谷蛋白的 4 倍多。但谷蛋白与卡拉胶的混合物的溶解性均优于接枝产物的溶解性，因为卡拉胶作为一种阴离子多糖，当蛋白质也带净的负电荷时，卡拉胶能与蛋白质分子片段上带正电荷的区域发生静电吸引，形成可溶性复合物，所以在接枝前，卡拉胶的加入显著提高了谷蛋白的溶解性，且卡拉胶添加量越大，对谷蛋白溶解性的改善也越大。谷蛋白与卡拉胶在 60℃ 干热条件下发生美拉德反应，其溶解性反而下降的原因可能是由于糖基引起的主要构象的改变导致溶解性的下降。

2.1.3 糖基化反应对接枝物乳化性能的影响

研究表明，不同的蛋白与多糖的质量配比进行糖基化反应，会影响到接枝物产物的乳化性能：穆利霞等^[15]将大豆分离蛋白与阿拉伯胶以 1:2、1:1、2:1 等配比进行接枝反应，当大豆分离蛋白与阿拉伯胶配比为 1:2 时，接枝物乳化活性最高，而在大豆分离蛋白与阿拉伯胶质量比 2:1、反应时间 16h 条件下大豆分离蛋白-阿拉伯胶接枝物的乳化稳定性达到最大。

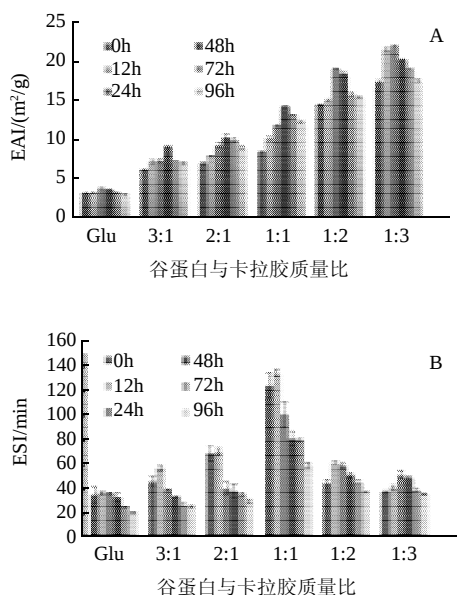


图3 谷蛋白与卡拉胶质量比及反应时间对接枝物乳化性(A)和乳化稳定性(B)的影响

Fig.3 Effect of reaction time and RDG-to-Car ratio on emulsification activity and stability index of glutelin-carrageenan conjugates

从图3可以看出,在反应初期,随着谷蛋白与卡拉胶的质量比降低,即卡拉胶含量增加,乳化活性和乳化稳定性均得到显著提高。谷蛋白与卡拉胶通过美拉德反应共价结合后,亲水基团的接入使得谷蛋白可以更有效地吸附到油-水界面,降低界面张力,提高乳化活性,谷蛋白与卡拉胶以1:3的质量比反应24h的乳化活性最高,达到 $22.19\text{m}^2/\text{g}$;当反应进行到后期,接枝度的增大,更多亲水基团的接入反而会破坏油-水界面的平衡,导致乳化活性和乳化稳定性的降低。谷蛋白与卡拉胶的结合,也使得界面蛋白膜加厚,其乳化稳定性也大大提高,但继续增加卡拉胶,过量的未与谷蛋白共价交联的卡拉胶也会因渗透压的差异造成乳液的排斥絮凝^[16],从而破坏蛋白质的乳化稳定性,故当蛋白与卡拉胶的质量比为1:1时,反应12h的接枝产物乳化稳定性达到最大,为134.76min。

但考虑到成本,且过多的卡拉胶会增加乳液的黏度,不利于食品中的应用,蛋白与卡拉胶以1:2的质量比反应24h的接枝物也有较高的乳化活性,ESI达到 $19.28\text{m}^2/\text{g}$,乳化稳定性虽不及质量比1:1的接枝产物,但也优于谷蛋白, EAI为59.79min。相比谷蛋白,乳化活性及乳化稳定性分别提高了4.84倍和63.39%。

2.2 表面疏水性分析

从图4结果可知,米渣谷蛋白的表面疏水性很高,表面疏水性指数达到1627,高疏水性限制了米渣谷蛋白的溶解性,也限制了它在食品中的应用。当具有多羟基的卡拉胶与米渣谷蛋白发生共价交联,表面疏水性降

低了66.5%。随着卡拉胶接枝到米渣谷蛋白上,谷蛋白的表面疏水性降低,整个体系的亲水性增强,米渣谷蛋白更易于在体系中分散,故糖基化改性能改善米渣谷蛋白的溶解性。较大的溶解性不仅有利于蛋白质在水相中的分散,也有利于蛋白质分子向气-水或油-水界面的扩散,故也有利于其他功能性质的改善,如乳化性质^[17]。

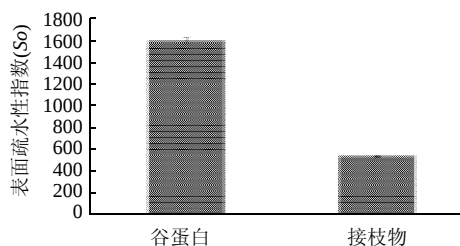


图4 米渣谷蛋白及谷蛋白-卡拉胶接枝物的表面疏水性

Fig.4 Surface hydrophobicity of glutelin and glutelin-carrageenan conjugates

2.3 pH值对谷蛋白-卡拉胶共价接枝物的功能性质的影响

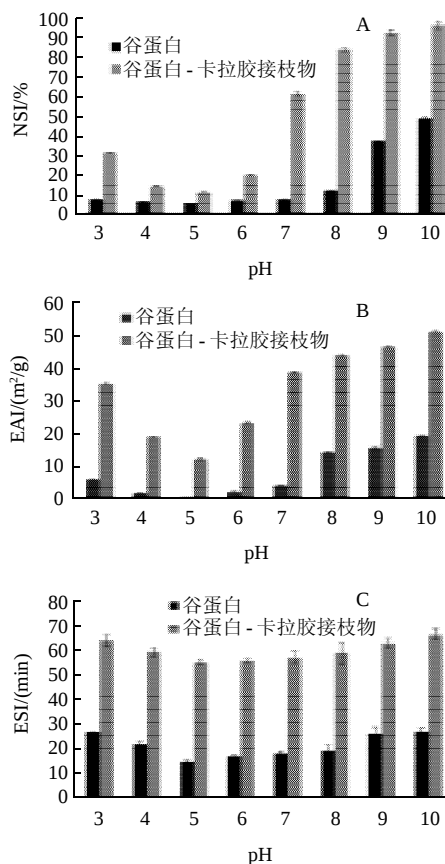


图5 不同pH值条件下谷蛋白与谷蛋白-卡拉胶共价接枝物的溶解(A)、乳化(B)和稳定(C)性质

Fig.5 Effect of pH on solubility, emulsification activity and stability index of glutelin and glutelin-carrageenan conjugates

蛋白质随着 pH 值的变化, 表面的带电情况及溶解度随之变化, 乳化与乳化稳定性同样也发生变化。米渣谷蛋白及其与卡拉胶共价接枝物的功能性质(溶解性、乳化性及乳化稳定性)见图 5。

由图 5A 可知, 谷蛋白及共价接枝物的溶解度均在 pH5.0(等电点附近)时最小, 在低于或高于 pH5.0 时, 蛋白质分别带净的正电荷和净的负电荷, 带电氨基酸残基的静电排斥和水合作用促进了蛋白质溶解, 溶解度增加, 且碱性条件下的溶解度明显高于酸性条件下的溶解度。但谷蛋白经糖基化改性后, 溶解性明显得到改善, 谷蛋白在 pH7.0 的 NSI 仅为 7.59%, 而谷蛋白-卡拉胶共价接枝物的 NSI 提高至 61.57%, 当 pH 值增至 9.0 时, 接枝物几乎全溶。随着具有亲水性羟基的多糖链的接入, 一方面促进了蛋白质的水合作用, 另一方面也抑制了蛋白质相互间的疏水作用。

通常蛋白质乳化性或乳化稳定性和溶解度呈正相关^[18], 同样米渣谷蛋白及接枝物乳化性及乳化稳定性变化趋势与溶解性有相似之处, 图 5B、5C 显示, 在 pH5.0 处, 乳化活力最小且乳化稳定性也最低。这是因为在等电点附近, 蛋白质溶解度最低, 吸附在油-水界面的蛋白质减少, 界面面积小^[19]; 且在等电点处, 蛋白质表面净电荷为零, 蛋白质的亲水性降低, 因而导致其乳化活力及乳化稳定性在该点时最低; 而随着 pH 值高于或低于 5.0, 蛋白质溶解度增大, 更多的蛋白质移动到油-水界面, 溶液界面蛋白膜加厚, 使得蛋白质的乳化性增大, 同时当 pH 值远离等电点, 蛋白质的净电荷增多, 增加了分子间的静电斥力, 使离散双电层加厚, 避免了液滴的聚集, 因此乳化稳定性能得到提高。同时谷蛋白与卡拉胶发生美拉德接枝反应后, 一方面提高了谷蛋白的溶解性, 从而大大提高了接枝产物的乳化性; 另一方面谷蛋白与卡拉胶的结合, 使得界面蛋白膜加厚, 其乳化稳定性也显著提高。

3 结 论

研究蛋白-多糖质量比、反应时间等因素对米渣谷蛋白-卡拉胶干热接枝反应的进程及接枝产物功能性质的影响, 并从多方面因素考虑, 确定最佳的反应条件为谷蛋白-卡拉胶质量比 1:2、相对湿度 79%、60℃干热反应 24h, 此条件下, 接枝产物接枝度达到 28.84%, 相比谷蛋白, 在去离子水中的溶解性、乳化性和乳化稳定性分别提高了 2.04、4.84 倍和 0.63 倍。米渣谷蛋白经糖基化改性后, 其与卡拉胶共价接枝产物在广泛 pH 值范围内的功能性质得到显著改善。采用 ANS 荧光探针法测定米渣谷蛋白及谷蛋白-卡拉胶接枝物的表面疏水性, 结果表明, 糖基化改性显著降低了谷蛋白的表面疏水性。

参考文献:

- [1] 周世英, 钟丽玉. 粮食学与粮食化学[M]. 北京: 中国商业出版社, 1987: 127-150.
- [2] VAN HOOSER B, CRAWFORD L V. Allergy diets for infants and children[J]. Compr Ther, 1989, 15(10): 38-47.
- [3] AKHTAR M, DICKINSON E. Whey protein — maltodextrin conjugates as emulsifying agents: an alternative to gum Arabic[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(4): 607-616.
- [4] DIFTIS N, KIOSSEOGLOU V. Physicochemical properties of dry-heated soy protein isolate-dextran mixtures[J]. Food Chemistry, 2006, 96(2): 228-233.
- [5] LIU Shuanghui, ELMER C, LOW N H, NICKERSON M T. Effect of pH on the functional behaviour of pea protein isolate-gum Arabic complexes [J]. Food Research International, 2010, 43(2): 489-495.
- [6] MIRALLES B, MARTINEZ-RODRIGUEZ A, SANTIAGO A, et al. The occurrence of a Maillard-type protein-polysaccharide reaction between β -lactoglobulin and chitosan[J]. Food Chemistry, 2007, 100(3): 1071-1075.
- [7] 华静娴. 米蛋白-葡聚糖微波加热接枝耦联反应的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [8] 吴姣, 郑为完, 赵伟学. 响应面分析法在米渣水解蛋白: 麦芽糊精 Maillard 反应物乳化特性研究中的应用[J]. 食品科学, 2007, 28(10): 155-158.
- [9] 赵强, 钟红兰, 熊华, 等. 米肽-葡萄糖湿法接枝反应产物的功能性质[J]. 食品科学, 2010, 31(19): 115-120.
- [10] 纪晟. 酶法及美拉德反应改进大米蛋白功能性质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- [11] KATO A, SASAKI Y, FURUTA R. Functional protein-polysaccharide conjugate prepared by controlled dry-heating of ovalbumin-dextran mixtures [J]. Agric Bio Chem, 1990, 54(1): 107-112.
- [12] SORAGENTINI D A, WAGNER J R. Comparative study of structural characteristics and thermal behavior of whey and isolate soybean proteins [J]. Journal of Food Biochemistry, 1999, 23(5): 489-507.
- [13] RAMÍREZ-SUÁREZ J C, XIONG Youling. Rheological properties of mixed muscle/nonmuscle protein emulsions treated with transglutaminase at two ionic strengths[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2003, 38(7): 777-785.
- [14] MU Lixia, ZHAO Mouming, YANG Bao, et al. Effect of ultrasonic treatment on the graft reaction between soy protein isolate and gum acacia and on the physicochemical properties of conjugates[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(7): 4494-4499.
- [15] 穆利霞, 崔春, 赵谋明, 等. 阿拉伯胶-大豆分离蛋白接枝工艺优化及产物理化特性的研究[J]. 食品工业科技, 2009, 30(8): 174-177.
- [16] DICKINSON E. Stability and rheological implications of electrostatic milk protein-polysaccharide interactions[J]. Trends in Food Science and Technology, 1998, 9(10): 347-354.
- [17] EI NASRI N A, EI TINAY A H. Functional properties of fenugreek (*Trigonella foenum graecum*) protein concentrate[J]. Food Chemistry, 2007, 103(2): 582-589.
- [18] 管斌, 林洪, 王广策. 食品蛋白质化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [19] GUAN Xiao, YAO Huiyuan, CHEN Zhengxing, et al. Some functional properties of oat bran protein concentrate modified by trypsin[J]. Food Chemistry, 2007, 101(1): 163-170.