

玉米纤维胶的理化性质和抗氧化活性研究

冯慧敏, 黄强, 李超

(华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 本文采用碱性过氧化氢法从玉米麸皮中提取两种玉米纤维胶组分, 命名为 CFG1 和 CFG2, 分别对它们的理化性质、乳化性质和抗氧化活性进行了研究。结果表明 CFG1 和 CFG2 的提取率分别为 16.3% 和 5.7% (以玉米麸皮干重计); 在 220 °C 以内具有较好的热稳定性, 且 CFG2 呈现出较大的表观粘度。乳化性能分析表明 CFG2 比 CFG1 具有较高的乳化活性指数和乳化稳定性指数, 且 CFG2 稳定乳液具有较大的粘度。抗氧化活性结果表明 CFG1 和 CFG2 具有显著的 DPPH 自由基清除活性和氧自由基吸收能力 (Oxygen radical absorbance capacity, ORAC), 并呈剂量依赖性, 当样品浓度为 6 mg/mL, CFG1 和 CFG2 的清除率分别达到 71.8% 和 83.1%; 此外, CFG1 和 CFG2 的 ORAC 值分别为 69 $\mu\text{mol TE/g}$ 和 120 $\mu\text{mol TE/g}$, 表明 CFG2 具有较强的抗氧化活性。CFG 的 DPPH 和 ORAC 结果表明 CFG (尤其针对 CFG2) 可开发一种具有良好抗氧化活性的天然乳化剂, 可广泛应用于食品和医药工业。

关键词: 玉米纤维胶; 理化性质; 乳化性; 抗氧化性

文章编号: 1673-9078(2017)12-109-114

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.12.018

Physicochemical Property and Antioxidant Activity of Corn Fiber Gum

FENG Hui-min, HUANG Qiang, LI Chao

(School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Two kinds of corn fiber gum fractions, named CFG1 and CFG2, were extracted from de-oiled and de-starched corn fiber by the alkaline hydrogen peroxide method, and the physicochemical property, emulsifying capacity and antioxidant activity of CFG1 and CFG2 were investigated. The yields of CFG1 and CFG2 were 16.3 and 5.7%, respectively (based on the dry weight of corn bran). CFG1 and CFG2 showed good thermal stability at 220 °C and CFG2 exhibited a higher apparent viscosity. The thermodynamics analysis indicated that both CFG1 and CFG2 had stronger emulsifying activity index and emulsification stability index, and the stable emulsion of CFG2 exhibited higher viscosity. The antioxidant activity analysis showed that CFG1 and CFG2 had significant DPPH radical scavenging activity and oxygen radical absorption capacity (ORAC) in a dose-dependent manner. The scavenging rates of CFG1 and CFG2 were 71.8 and 83.1%, respectively, at the concentration of 6.0 mg/mL. In addition, the ORAC values of CFG1 and CFG2 were 69 and 120 $\mu\text{mol TE/g}$, respectively, indicating that CFG2 had stronger antioxidant activity. The DPPH and ORAC results of CFG suggested that CFG (especially for CFG2) could be developed as a natural emulsifying agents with favorable antioxidant activity.

Key words: corn fiber gum; physicochemical property; emulsifying property; antioxidant activity

我国是玉米种植大国, 在生产加工玉米作物时, 一般会产生 20% 左右的副产物, 而这些副产物的利用, 当前仅仅停留在动物饲料、直接燃烧或者掩埋丢掉等层面, 致使资源浪费, 产业附加值较低。麸皮作为玉米深加工产业链副产物之一, 大多被添加在低蛋白、低脂质动物饲料中。后来人们从中分离出一种性能优异的多糖, 受到越来越多研究者的关注, 并开始对玉米加工副产物的有效利用进行深入研究。本着变废为宝, 玉米副产物的进一步研究使其深度价值也逐渐被开发。玉米纤维胶 (corn fiber gum, CFG), 一种来源

收稿日期: 2017-05-19

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目 (2017BQ100)

作者简介: 冯慧敏 (1993-), 女, 硕士, 研究方向: 功能碳水化合物

通讯作者: 黄强 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能碳水化合物

于玉米麸皮中的多聚木糖, 主要由木糖、阿拉伯糖、半乳糖和葡萄糖醛酸等通过糖苷键连接而成的生物大分子^[1]。由于其具有黏度低、摩尔质量高和乳化性能好等优点, 近年来引起了越来越多的研究^[2]。化学组成分析表明玉米纤维胶含有的蛋白质和阿魏酸有利于其吸附分散油滴的表面, 从而起到较好乳化作用, 而且其复杂的分子结构, 又具有较好的乳化稳定能力, 因此玉米纤维胶是目前最有可能替代阿拉伯胶的物质, 具有较高开发前景的可再生自然资源^[3,4]。Kokubun 等^[5]报道了 CFG 能够有效地稳定柠檬油水包油型乳液, 具有较好的乳化效果。Yadav 等^[6]报道了将玉米纤维胶与牛奶蛋白进行美拉德反应制备复合物, 来稳定橙油水包油型乳液, 研究发现复合物的乳化性能明显优于单一的玉米纤维胶。

目前国内外主要集中在玉米纤维胶提取工艺等初期研究, Chanliaud^[7]等人曾选用 KOH 溶液, 在 100 °C 条件下提取 19 h, 提取率约 870 g/kg。Hespell 等人^[8]利用 KOH 和 2% 铵水的混合碱液在 70 °C 条件下提取 56 h, 得到黑色产物, 其含糖量约 93.4%。然而, 目前提取工艺, 时间较长, 产品质量不高, 不利于商业化应用。因此, 本论文采用碱性过氧化氢法从玉米麸皮中提取两种玉米纤维胶组分 (CFG1 和 CFG2), 提取工艺简单, 产率高, 并对其理化性质、乳化性质及抗氧化活性进行了研究, 这些将为玉米纤维胶的提取和深入应用提供一定的基础理论。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料与试剂

玉米麸皮, 由内蒙古通辽市玉王生物科技有限公司提供; 阿拉伯胶 (gum arabic, GA), 购自美国 Cargill 公司; 玉米油, 购自中国丰益贸易有限公司; 高温 α -淀粉酶, 购自诺维信生物科技有限公司; 2,7'-二氯荧光二乙酸盐 (DCFH-DA), Trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchroman-2-carboxylic acid)、维生素 C (Vc)、AAPH(2,2-azobis(2-methylpropionamide)-dihydrochloride)、DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) 购自美国 Sigma 公司; 其它材料和试剂均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

DELTA 冷冻干燥机, 德国 Christ 公司; M-110EH 高压均质机, 美国 MFIC 公司; BROOKFIELD DV II 转子粘度计, 美国 BROOKFIELD 公司; T25 数显高速分散均质机, 德国 IKA 公司; JSM-7500F 扫描电镜, 日本 JROL 公司; Multiskan MK3 型多功能荧光/化学分析仪, 美国 Thermo Scientific 公司; TGA/DSC 同步热分析仪, 德国耐驰仪器仪表有限公司; RE-52A 型旋转蒸发器, 上海亚荣仪器有限公司; DHG-9240A 型恒温鼓风干燥箱, 上海一恒科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 玉米纤维的提取

玉米纤维胶的提取方法参考 Yadav 等^[9]的工艺并稍作修改。将干燥玉米麸皮研磨粉碎, 过 20 筛, 称取 80 g 麸皮, 加入到 800 mL 的正己烷 (0.01% BHT, 二叔丁基对甲酚), 搅拌 2 h, 布氏漏斗过滤后用, 无水乙醇洗涤一次。然后添加蒸馏水 (液料比 10:1 mL/g) 进行沸水浴加热, 10 min 后调节 pH 为 6.5, 加入高温 α -淀粉酶 (添加量为干基 0.4%), 在 90 °C 水浴中搅拌

2 h。随后离心分离得到麸皮, 依次用无水乙醇、蒸馏水洗涤, 于 60 °C 烘箱中干燥, 得到去油去淀粉的玉米麸皮处理样。

称取 50 g 处理后玉米麸皮, 2 g NaOH 和 1.9 g Ca(OH)₂, 混匀后加入到 0.5 L 蒸馏水中, 混合物在沸水浴条件下加热并搅拌 1 h。冷却后在 6000 r/min 下离心 20 min, 上清液 A1 被倾注与残渣 B1 分离。加入约 300 mL 蒸馏水溶解残留物 B1, 在沸水浴中搅拌 10 min 后, 混合物离心 20 min 得上清液 A2 和残渣 B2。上清液 A1 和 A2 总量约 0.7 L (pH 11.6), 加入 5.1 g H₂O₂ 溶液 (30 wt%), 并用 NaOH 溶液 (20 wt%) 调整溶液的 pH 为 11.5, 室温下搅拌 2 h。添加浓盐酸将 pH 调到 4.0, 高速离心 30 min, 除去沉淀, 得上清液 A3, 然后添加约 1.4 L 的无水乙醇, 搅拌 10 min, 得到白色絮状沉淀物, 半纤维素 B (CFG1)。向残渣 B2 加入适量蒸馏水 (液面没过残渣 3 cm), 再次加入 5.0 g 的过氧化氢溶液 (按照干基的 0.1% 添加), 调节 pH 到 11.5, 置于沸水浴中搅拌 1.5 h。冷却, 残渣液 6000 r/min 下离心 15 min 得到清液 A3。于上清液 A3 添加浓盐酸使 pH 到 4.0~4.5, 离心 (10000 r/min, 30 min) 去除沉淀得上清液 A4, 向剩余清液 A4 逐渐加入 2 倍体积的乙醇, 搅拌 10~15 min 得到灰白色絮状沉淀物 CFG2。用无水乙醇分别溶解 CFG1 和 CFG2, 然后在 5000 r/min 条件下, 离心 10 min, 得残留物, 然后冷冻干燥即得到干燥的 CFG1 和 CFG2。

1.2.2 玉米纤维胶提取率及组成测定

玉米纤维胶的提取率按照公式 (1) 所示计算。

$$\text{玉米纤维胶提取率}(\%) = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

其中 m 为得到玉米纤维胶的质量, M 为玉米麸皮的质量。

CFG1 和 CFG2 的多糖含量采用苯酚硫酸法测定; 蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定; 阿魏酸含量采用比色法测定^[10]。

1.2.3 玉米纤维胶的粘度测定

分别称取 1.0 g、2.0 g、4.0 g、8.0 g 的 CFG 和 8.0 g、20.0 g、30.0 g 和 40.0 g 的 GA 于 200 mL 的烧杯中, 加入适量水, 并不断搅拌至完全溶解, 制备 1%、2%、4% 和 8% 浓度的 CFG 溶液和 8%、20%、30% 和 40% 浓度的 GA 溶液。分别将其转移到 50 mL 的圆底塑料管中, 采用旋转粘度计上进行表观粘度的测定, 实验条件: 选择 1 号转子, 速度选择 60 r/min, 25 °C 条件下每个样品测量 3 次。

1.2.4 热稳定性测定

采用 TGA/DSC 同步热分析仪来研究样品的热稳定性。称取 10 mg CFG, 升温速 10 °C/min, 氮气作

为保护气, 流量设为 40 mL/min, 在 40~700 °C 间对样品进行热综合分析测定。

1.2.5 乳化性能测定

1.2.5.1 乳液的制备

分别称取 5 g 不同的样品, 加入磷酸缓冲液 (5 mM, pH 7) 溶解, 室温条件下, 于 1000 r/min 搅拌速度下搅拌 2 h, 然后加入 0.12% (*m/m*) 的苯甲酸钠和适量的柠檬酸, 静置过夜, 使其充分水化, 然后加入 5 g 的玉米油, 并用缓冲液定量至 100 g, 并用柠檬酸调溶液 pH 为 4。混合溶液用高速剪切均质机在 13000 r/min 下剪切 2~3 min, 立即通过超高压均质机进行均质, 均质压力设为 50 MPa, 循环 3 次, 即制备出乳液样品。

1.2.5.2 乳化特性

分别量取适量得乳液, 用 0.1% (*m/m*) 的十二烷基苯磺酸钠溶液稀释 500 倍, 在分光光度计上于 500 nm 处进行比色。十二烷基苯磺酸钠溶液作为参比液。乳化活性指数 (EAI) 和乳化稳定指数 (ESI) 计算公式如 (2) 和 (3) 所示^[11]:

$$EAI = \frac{A_0 \times DF}{\rho\phi(1-\theta) \times 10000} \quad (2)$$

$$ESI = \frac{A_0}{A_0 - A_{10}} \quad (3)$$

式中: DF 为稀释倍数, DF=500; ρ 代表乳化剂浓度, ϕ 是容器的路径长度, $\phi=0.01$ m, θ 为油相所占比例分数, A_0 和 A_{10} 分别表示 0 和 10 min 时的吸光度。

1.2.5.3 乳液粘度测定

测定方法同 1.2.3。

1.2.6 抗氧化活性

1.2.6.1 DPPH 自由基清除活性

参照 Arifelev 等人^[12]的方法并稍作修改。精确称量一定量的样品, 配置浓度为 0.5~6 mg/mL。取 2.0 mL 不同浓度的溶液, 分别加入 2.0 mL 的 DPPH 乙醇溶液 (200 μ M), 充分混匀, 室温下避光放置 1 h, 利用可见光分光光度计在 517 nm 处检测吸光度, 用 A_S 表示, 空白管以无水乙醇代替样品溶液, 对照管以无水乙醇取代 DPPH, 其吸光度分别用 A_C 和 A 表示, 相同浓度的维生素 C 溶液作为阳性对照, 每个浓度重复三次试验, 取平均值。CFG 样品的 DPPH 自由基清除率的计算公式如 (4) 所示:

$$DPPH \text{ 清除率}(\%) = [1 - (A_S - A_C) / A] \times 100\% \quad (4)$$

1.2.6.2 氧自由基吸收能力 (ORAC)

样品的 ORAC 的测定参照 Zhang 等^[13]的方法并稍作修改。采用摩尔浓度为 75 mM 的磷酸盐缓冲液 (pH 7.4) 配制不同浓度的样品溶液。20 μ L 的样品溶液或

生育酚 (Trolox) 溶液加入到黑色的 96 孔板中, 然后加入 200 μ L 荧光钠盐 (95.6 nm)。将混合物置于 37 °C 条件下, 避光孵育 20 min, 最后向每个样品池中加入 20 μ L 的 AAPH (119.4 mM), 自动混匀, 用多功能酶标仪以 35 循环/4.5 min 的速率在 485 nm 激发波长和 538 nm 发射波长条件下读取荧光强度。ORAC 值表示每克样品相当于 Trolox 当量, 单位为 μ mol Trolox equivalent (TE)/g。

1.3 数据分析处理

采用 Origin 8.0 进行作图, 各组实验数据均为 3 次重复测定之后的平均值。

2 结果与讨论

2.1 玉米纤维胶的基本组成

提取工艺、原料来源等将对提取的 CFG 产率有一定影响。本实验采用碱性过氧化氢工艺, CFG 的总产率达到 22% 左右, CFG1 和 CFG2 分别为 16.57% 和 5.74%, 产率较高。经检测, CFG1 的多糖、蛋白质和阿魏酸含量分别为 88.9%、0.27% 和 0.45%; 而 CFG2 的多糖、蛋白质和阿魏酸含量分别为 85.6%、1.0% 和 1.2%, 表明 CFG1 和 CFG2 具有不同的化学组成。

2.2 玉米纤维胶的粘度性质

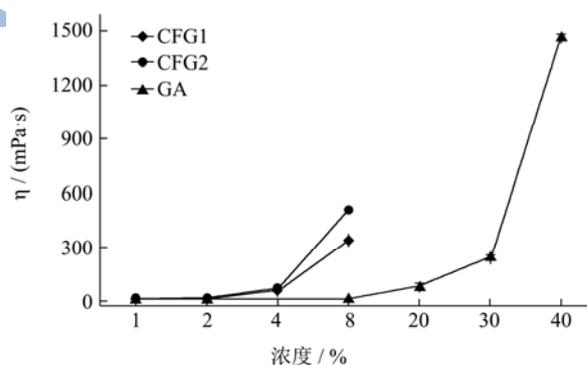


图 1 CFG 和 GA 的表现粘度比较

Fig.1 Comparison of apparent viscosity of CFG and GA

粘度是指液体流动时, 分子间产生内摩擦的性质。三种样品在不同浓度下的表现粘度如图 1 所示。可以看出, 三种样品的粘度随着质量浓度的增加逐渐增加。当 CFG1 和 CFG2 处于低浓度时, 粘度较小, 随着浓度的不断增加, 增加趋势明显。尤其是当浓度大于 4% 时, 粘度增加幅度急剧变大, 当浓度为 8% 时, CFG2 的浓度达到 509 mpa·s, CFG1 为 340 mpa·s, CFG2 的粘度比 CFG1 大, 这可能是因为 CFG2 的分子量较大, 空间结构分支度大, 所以与溶剂间的接触表面大, 产

生的摩擦就大,表现出的粘度较大^[1]。而在同一种浓度下,GA的粘度仅为14 mpa·s,当浓度为30%时,达到246 mpa·s,远远小于浓度为8%的CFG的粘度。而当浓度达到40%时,GA的粘度较高。样品溶液粘度越大,溶液越粘稠,形成的乳液油滴的运动缓慢,阻止分散油滴的聚集,增加乳液的稳定性,因此较高粘度的乳化剂对稳定乳液有一定的促进作用^[3]。

2.3 热稳定性分析

热重分析(TGA),是指在程序控制温度下测量待测样品的质量与温度变化关系的一种热分析技术,用来研究材料的热稳定性。差示扫描量热法(DSC),也是一种热分析方法。它是在程序控制温度下,测量输入试样和参比物的功率差与温度的关系。CFG1和CFG2的热重结果如图2所示。

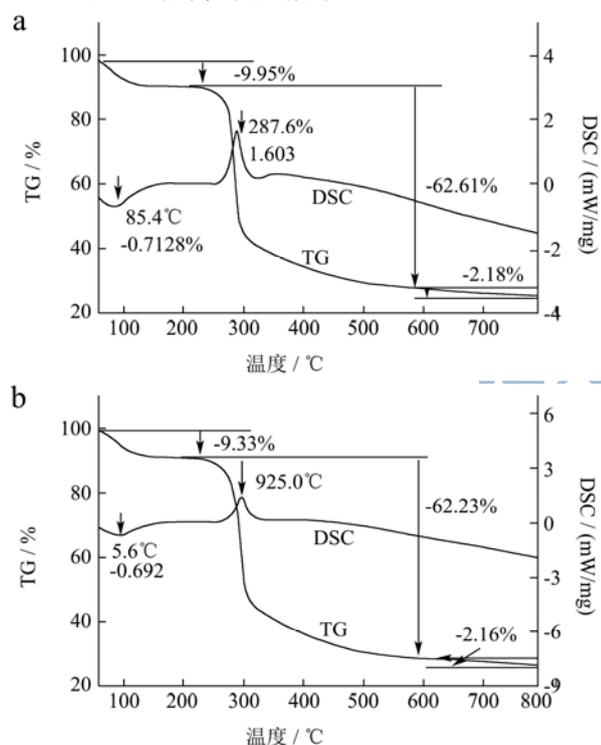


图2 CFG1和CFG2的热图谱

Fig.2 Thermograms of CFG1 and CFG2

由图中可以看出,CFG1和CFG2的热稳定性非常类似,均有两次较明显失重过程,这可能与样品的水分含量、结构组成等因素有关。第一个失重峰出现在85.4℃(85.6℃)左右,失重率为9.95%(9.33%),这可能是CFG加热失水造成的失重峰,因为采用冷冻干燥方法制备的CFG在干燥过程中仍然吸附了约10%的水分;第二个失重峰出现在220~600℃左右,失重率是62.61%(62.23%),在此温度区间失重快速,且失重率比重较大。这种现象说明CFG在220℃以内分解相对稳定,220~600℃区间分解比较剧烈。

220~600℃区间,CFG链发生断裂、支链发生碎片化并伴随着一系列化学反应,可能会产生CO、CO₂、CH₄、CH₃COOH和HCOOH等。在最后一阶段,质量损失减缓,失重率2.18%(2.16%),至600℃仍然有未降解的残渣存在,这一方面可能是CFG样品在制备过程中产生的盐所致,另一方面可能由于CFG的热稳定性较高,在600℃仍然有一部分不能降解。DSC分析谱有两个峰,与TG的两个峰相对应。第一个吸热峰,在85℃左右,是失去吸附水的吸热过程,第二个峰是放热峰,在290℃,是CFG热分解所致。

2.4 乳化性分析

EAI和ESI是评价乳化特性的常用标准。一般来讲,前者表征乳化剂的乳化能力,其值越大说明乳化性能越好;后者则是代表乳液储存稳定性,变化程度反应乳液稳定性大小,变化程度越大说明乳液稳定性越差。粘度是评价乳状液稳定性的另一个重要指标,高粘度的乳液能够降低其颗粒的移动速度,油滴难以聚集,乳状液稳定性较好。CFG和GA的乳化性质如表1所示。由表中可以看出,三者的乳化稳定指数都较高,比较稳定,CFG1最小。三种乳化剂的乳化活性指数为GA>CFG2>CFG1,乳液粘度数值大小差异显著,分子量最大的CFG2粘度最高,远大于CFG1和GA。CFG1的乳液粘度为23.9 mpa·s,GA乳液粘度最低,这可能和乳液的分子量大小,空间结构以及蛋白质,脂质含量有关。

表1 不同样品的乳化特性

Table 1 Emulsifying property of different samples

类别	EAI	ESI	乳液粘度/(mpa·s)
CFG1	261.00±1.50 ^b	0.95±0.04 ^a	24.23±0.31 ^b
CFG2	706.00±1.23 ^c	0.99±0.05 ^a	71.47±0.60 ^c
GA	1023.00±2.01 ^a	1.00±0.12 ^a	10.17±0.85 ^a

注:同一列数据标示不同字母表示具有显著性差异(p<0.05)。

作为传统性质优良的乳化剂,GA乳化稳定性和乳化活性指数分都比CFG稍高,说明其制备的乳液稳定,内部结构中高含量的蛋白质发挥了关键作用。CFG2乳化稳定性较CFG1好,这是由于CFG2分子量大,则它与溶剂间的接触表面也愈大,摩擦就大,形成的乳液粘度也较大,分散油滴更加均匀。乳液油滴运动缓慢,难以聚集,乳液更加稳定。与小分子的乳化剂相比,多糖长链在油水界面上形成的界面膜更厚,更加牢固,因此乳液不易破乳。由以上分析,CFG2的乳化性能比CFG1优越,未来有望能够成为阿拉伯胶的替代品。

2.5 抗氧化能力

DPPH 自由基清除活性实验主要是利用光化学性质对抗氧化剂的抗氧化活性进行评价。DPPH 自由基单电子能够与抗氧化物质配对, 在 517 nm 波长会发生强吸收效应, 导致吸收减弱至消失, 根据减弱的程度来判断抗氧化活性的大小。不同样品的 DPPH 自由基清除活性, 结果如图 3 所示。其中, Vc 用作阳性对照, 可作为标准物质用来评价其他物质的抗氧化能力。

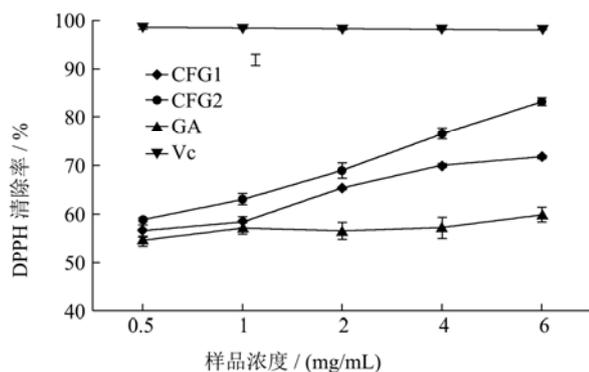


图3 不同样品的 DPPH 清除活性

Fig.3 DPPH scavenging activity of different samples

由图 3 可知, CFG1 和 CFG2 对 DPPH 自由基的清除率随着浓度 (0.5~6.0 mg/mL) 的增加而升高, 当样品浓度达到 6.0 mg/mL 时, 其清除能力分别为 83.1% 和 71.8%。而 GA 样品在实验浓度范围内, 其 DPPH 自由基清除率基本保持不变, 清除率约为 55%。这些结果表明 CFG1 和 CFG2 的抗氧化活性强于 GA。不过与维生素 C 相比, 在低浓度时, 三个样品对 DPPH 自由基的清除活性较低, 在高浓度下, 活性虽有显著提高, 但仍远远低于 Vc, 可能是因为 CFG2 供电子能力弱于 Vc^[14]。

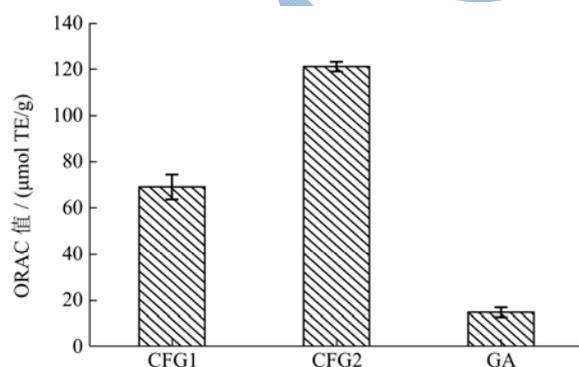


图4 CFG1、CFG2 和 GA 的氧自由基吸收能力

Fig.4 ORAC of CFG1, CFG2 and GA

ORAC 值是衡量活性物质的抗氧化能力的另一重要标准, 数值越高, 抗氧化能力越强。不同样品的氧自由基吸收能力结果如图 4 所示。在相同浓度下, CFG2 的氧自由基吸收能力最强, 达到 120 μmol TE/g,

CFG1 为 69 μmol TE/g, GA 最小。这可能与 CFG2 含有较多的蛋白质、阿魏酸和糖醛酸含量有关, 研究发现多糖的蛋白质、阿魏酸和糖醛酸含量越高, 其给电子或氢质子的能力越强, 清除自由基能力越强^[15]。这些结果表明 CFG1 和 CFG2 具有良好的抗氧化活性。

3 结论

3.1 从玉米麸皮中分离得到两种玉米纤维胶 CFG1 和 CFG2, 提取率分别为 16.3% 和 5.7%; CFG1 的多糖、蛋白质和阿魏酸含量分别为 88.9%、0.27% 和 0.45%; CFG2 的多糖、蛋白质和阿魏酸含量分别为 85.6%、1.0% 和 1.2%。其中蛋白质和阿魏酸可能对 CFG 的乳化性和抗氧化能力有一定的影响。

3.2 在 220 °C 以内具有较好的热稳定性; 与 CFG1 相比, 同浓度下 CFG2 溶液具有较大的表观粘度。

3.3 与 CFG1 和 GA 相比, CFG2 具有较强的乳化活性指数和乳化稳定性指数, 表明 CFG2 具有较好的乳化性能, 可替代传统乳化剂阿拉伯胶。

3.4 CFG1 和 CFG2 具有显著的 DPPH 自由基清除活性和氧自由基吸收能力, 并呈剂量依赖性, 当样品浓度为 6 mg/mL, 其清除率分别达到 71.8% 和 83.1%; CFG1 和 CFG2 的 ORAC 值分别为 69 μmol TE/g 和 120 μmol TE/g; 这些结果表明 CFG2 具有较强的抗氧化活性。

参考文献

- [1] Yadav M P, Fishman M L, Chau H K, et al. Molecular characteristics of corn fiber gum and their influence on CFG emulsifying properties [J]. *Cereal Chemistry Journal*, 2007, 84(2): 175-180
- [2] Mikkonen K S, Yadav M P, Cooke P, et al. Films from spruce galactoglucomannan blended with poly (vinyl alcohol), corn arabinoxylan, and konjac glucomannan [J]. *BioResources*, 2008, 3(1): 178-191
- [3] Yadav M P, Johnston D B, Hotchkiss Jr A T, et al. Corn fiber gum: a potential gum arabic replacer for beverage flavor emulsification [J]. *Food Hydrocolloids*, 2007, 21(7): 1022-1030
- [4] Jesus Cirre, Al-Assaf S, Jesus Cirre, et al. Improved emulsification performance of corn fibre gum following maturation treatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 35(3): 122-128
- [5] Kokubun S, Yadav M P, Moreau R A, et al. Components responsible for the emulsification properties of corn fibre gum [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 41(20): 164-168

- [6] Yadav M P, Parris N, Johnston D B, et al. Corn fiber gum and milk protein conjugates with improved emulsion stability [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2010, 81(2): 476-483
- [7] Chanliaud E, Saulnier L, Thibault J F. Alkaline extraction and characterisation of heteroxylans from maize bran [J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 21(2): 195-203
- [8] Devinj R, George I, Liu S. Utilisation of corn (*Zea mays*) bran and corn fiber in the production of food components [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(6): 915-924
- [9] Yadav M P, Moreau R A, Hotchkiss A T, et al. A new corn fiber gum polysaccharide isolation process that preserves functional components [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(2): 1169-1175
- [10] Fissore E N, Rojas A M, Gerschenson L N, et al. Butternut and beetroot pectins: characterization and functional properties [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 31(2): 172-182
- [11] 徐昌洪. 木质纤维素类原料生物炼制预处理技术的研究进展[J]. *精细与专用化学品*, 2011, 19(9): 38-41
- XU Chang-hong. The technology progress of biorefinery preprocessing for lignocelluloses materials [J]. *Fine and Specialty Chemicals*, 2011, 19(9): 38-41
- [12] Arifealev K, Bengi E, Yeldaçalmaz E, et al. Antioxidant activity and proline content of leaf extracts from *Dorystoechas hastata* [J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(2): 400-407
- [13] Zhang W, Li C, You L J, et al. Structural identification of compounds from *Toona sinensis* leaves with antioxidant and anticancer activities [J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 10(3): 427-435
- [14] Esmaili M A, Sonboli A. Antioxidant, free radical scavenging activities of *Salvia brachyantha* and its protective effect against oxidative cardiac cell injury [J]. *Food & Chemical Toxicology*, 2010, 48(3): 846-853
- [15] Wang Z J, Xie J H, Kan L J, et al. Sulfated polysaccharides from *Cyclocarya paliurus* reduce H₂O₂-induced oxidative stress in RAW264. 7 cells [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 80: 410-417