

文章编号:1000-8551(2020)11-2492-07

pH 值和温度对燕麦蛋白溶解与聚集特性的影响

高晓莉 王丽丽 刘丽娅 佟立涛 周闲容 周素梅*

(中国农业科学院农产品加工研究所,北京 100193)

摘要:为研究燕麦蛋白的理化性质,本研究采用碱提酸沉法提取燕麦蛋白,并分析不同 pH 值与温度对燕麦蛋白溶解性、 ζ -电位和粒径分布的影响。结果表明,在等电点附近(pH 值 5.0),燕麦蛋白的表面电荷数最低,蛋白粒度较大,溶解性和乳化性较低。当 pH 值远离等电点时,燕麦蛋白的表面电荷增加,蛋白粒度逐渐减小,溶解度升高,乳化性也随之升高;随着温度升高(55~95℃),燕麦蛋白聚集体解离,粒度变小,溶解度增加,稳定性变好;温度进一步升高(121、130℃),燕麦蛋白重新聚集形成粒径较大的聚集体,溶解度降低,稳定性变差。本研究结果为燕麦蛋白资源的利用提供了重要的理论指导。

关键词:燕麦蛋白; pH 值; 温度; 溶解性; 聚集特性

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2020.11.2492

燕麦(*Avena sativa* L.)在我国北方又称莜麦,属禾本科农作物,分为裸燕麦和皮燕麦。燕麦不仅富含蛋白质、碳水化合物、脂质等营养成分,而且富含 β -葡聚糖、不饱和脂肪酸、酚酸等功能性成分^[1],具有预防心血管疾病、降低胆固醇、平稳血糖^[2]、帮助胃肠消化^[3-4]、抗癌^[5-6]等功效。燕麦的蛋白质含量居粮谷类作物首位,研究表明,受产地、品种等因素的影响,燕麦中的蛋白质含量在 12%~20% 之间,平均值达到 16% 左右^[7]。燕麦蛋白被公认为是氨基酸配比全面且合理的谷物蛋白^[8],其赖氨酸的含量更接近联合国粮食及农业组织(FAO)/世界卫生组织(WHO)推荐标准^[9]。

按照 Osborne 蛋白分类方法可将燕麦蛋白分为球蛋白、清蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白,其中球蛋白作为贮藏蛋白含量最高(55%~75%)^[10]。燕麦蛋白的理化性质和某些豆科植物的 11S 贮藏蛋白相似^[11],后者已被作为食品添加剂广泛用于食品工业,但燕麦在加工过程中,由于温度、pH 值的变化,其蛋白的结构和构象会发生改变,导致其功能特性会受到一定影响,限制了其在食品工业中的作用。

蛋白质在受热时都有发生聚集的趋势,但是蛋白聚集机理却随其种类而异。对于具有复杂四级结构的

寡聚蛋白而言,加热会引起寡聚体的联结或分离,同时蛋白分子四级结构本身的破坏也会导致聚集发生。Zhao 等^[12]利用排阻色谱和十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)研究了燕麦球蛋白的热凝固现象,结果表明,加热过程中燕麦球蛋白在分解成小亚基的同时也交联形成了大分子量的聚集体。依据蛋白结构展开和聚集体尺寸不同,热处理在不同程度上可影响蛋白的聚集和溶解特性。蛋白质的溶解性与其功能特性(如乳化性、起泡性、凝胶性)密切相关,是蛋白变性程度的一个重要表征。蛋白质的溶解性取决于蛋白分子表面亲水基团与疏水基团的相互作用以及表面电荷数。当 pH 值接近蛋白质的等电点时,电荷的静电屏蔽导致蛋白质分子的静电斥力减小^[13],分子之间的吸引力(主要是通过疏水相互作用的吸引)增大,致使蛋白分子发生聚集^[14]。pH 值的变化导致可溶性或不可溶性聚集体形成,而不溶性聚集体正是影响蛋白质在水相体系中溶解性以及稳定性的主要成分。

本研究以燕麦蛋白为研究对象,考察不同 pH 值条件下燕麦蛋白溶解性与表面电荷的变化;通过分析燕麦蛋白粒径分布与乳化性的变化,进一步揭示 pH 值对燕麦蛋白聚集特性与乳化特性的关系以及对其稳

收稿日期:2019-04-22 接受日期:2019-06-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31501525)

作者简介:高晓莉,女,主要从事谷物加工与品质调控研究。E-mail: xiaoligaolily@163.com

* 通讯作者:周素梅,女,研究员,主要从事谷物加工与品质调控研究。E-mail: zhousumei@caas.cn

定性的影响。同时,分析了不同温度处理条件下燕麦蛋白溶解度、表面电荷和聚集体粒径的变化趋势,进而揭示温度处理对燕麦蛋白溶解特性以及聚集特性变化的影响机制,以期对燕麦蛋白资源的利用提供重要的指导依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

燕麦:白燕 2 号,由吉林省白城市农业科学院提供;佳格(中国)葵花籽油,佳格食品(北京)有限公司;其余化学试剂均为国产分析纯,国药集团化学试剂有限公司。BCA 试剂盒,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

Kieltec Analysister 全自动凯氏定氮仪,瑞典 FOSS 仪器有限公司;FW100 万能粉碎机,科伟永兴(北京)仪器公司;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;TGL-16 台式高速冷冻离心机,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;Scientz-10N 冻干机,宁波新芝生物科技有限公司;DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱,上海精宏实验设备有限公司;Zeta 电位及纳米粒度分析仪,英国马尔文公司;S3500SI 激光粒度粒形分析仪,美国 Microtrac 公司;TU-1900 紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器公司;PB-20 pH 计,德国赛多利斯股份公司;APV-2000 均质机,德国 SPX 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 燕麦蛋白制备 采用碱溶酸沉法提取燕麦蛋白,参照 Liu 等^[15]的方法,并进行适当修改。燕麦籽粒经挑选除杂后,采用万能粉碎机制粉,过 80 目筛,收集筛下物为燕麦粉样品,4℃ 保存,备用。

准确称取燕麦粉 200 g,按照 1:6(m:m)的料液比添加去离子水,用 1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液调体系 pH 值至 9.0,磁力搅拌器搅拌 2 h。7 000×g、4℃ 离心 20 min,留上清液。用 1 mol·L⁻¹ HCl 溶液调上清液 pH 值至 4.5,4℃ 静置过夜,7 000×g、4℃ 离心 20 min,留沉淀,制得燕麦蛋白样品,备用。

1.3.2 燕麦蛋白纯度测定 采用凯氏定氮法^[1]测量 1 g 燕麦蛋白样品中的蛋白含量,燕麦蛋白换算系数为 6.25。

1.3.3 pH 值对燕麦蛋白特性的影响试验 分别取 100 mg 燕麦蛋白样品分散于 10 mL 去离子水,磁力搅拌器搅拌 30 min,然后用 1 mol·L⁻¹ NaOH 或 HCl 溶液调节溶液 pH 值分别为 2、3、4、5、6、7、8、9、10,在 500

r·min⁻¹ 条件下搅拌 1 h 后观察 pH 值变化,如有变化再调回。随后进行乳化性、溶解度、ζ-电位和粒径分析。每个处理设 2 个平行,试验重复 3 次。

1.3.4 温度对燕麦蛋白特性的影响试验 分别取 100 mg 燕麦蛋白样品分散于 10 mL 去离子水,磁力搅拌 30 min,然后用 1 mol·L⁻¹ NaOH 或 HCl 溶液调节溶液 pH 值为 7,在 500 r·min⁻¹ 条件下搅拌 1 h,充分水化后的样品分别置于常温(25℃)、55、75、95、121[工业中杀菌温度 UHT(ultra-high temperature instantaneous sterilization)]和 130℃(油浴)中保持 10 min。迅速降温冷却。随后进行溶解度、ζ-电位和粒径分析。每个处理设 2 个平行,试验重复 3 次。

1.3.5 乳化性测定 取 15 mL 蛋白溶液与 5 mL 葵花籽油混合,置于 50 mL 玻璃试管中。在高速乳化均质机下 13 500 r·min⁻¹ 乳化 2 min,将乳化液迅速倒入小烧杯中,立即取样。取样点固定在离烧杯底部 0.5 cm 处,取 20 μL 乳状液与 5 mL 0.1% SDS 溶液均匀混合,在 500 nm 波长处测定其吸光度值(A₀),乳状液静置 30 min 后,采用相同的方法测定乳状液吸光度值(A₃₀),用 0.1% SDS 做空白对照^[16]。按照公式计算乳化活性(emulsion activity index,EAI,m²·g⁻¹)和乳化稳定性(emulsion stability index,ESI,min):

$$EAI = 2T(A_0 \times N) / (c \times \varphi \times 10\,000) \quad (1)$$

$$ESI = A_0 / (A_0 - A_{30}) \times 30 \quad (2)$$

式中,T=2.303;N 稀释倍数,250;c 为乳化液形成前蛋白质水溶液中蛋白质浓度,g·mL⁻¹;φ 为乳化液中油的体积分数,0.25。

1.3.6 溶解度测定 将蛋白样品 10 000×g、4℃ 离心 20 min 后取上清液,采用 BCA 试剂盒测定上清液中的蛋白含量^[17],以牛血清白蛋白为标准物制作标准曲线。溶解度=(上清液蛋白质量浓度/总蛋白质量浓度)×100。

1.3.7 ζ-电位分析 采用 Zeta 纳米粒度分析仪对燕麦蛋白溶液的电位进行测定^[18]。测试条件:电压 30 mW,温度 25±1℃,平衡 2 min,每个样品重复测量 3 次以上并取其平均值。

1.3.8 粒径分析 以去离子水为分散剂,使用激光粒度仪测定乳状液的粒径分布和平均粒径^[19]。蛋白粒子和水的折射率分别为 1.570 和 1.333。利用 Excel 2003 软件计算样品粒径分布的比例。

1.4 数据处理

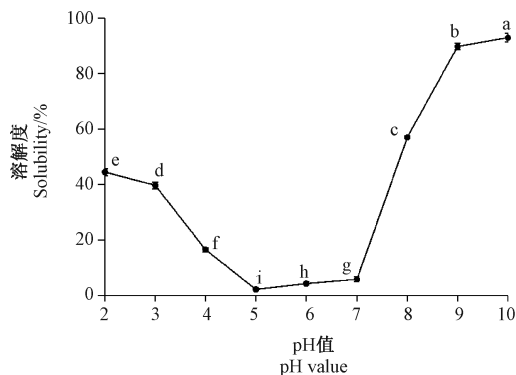
每组试验重复 3 次,采用 Microsoft Excel 2003 软件制图,采用 SPSS 19.0 软件 Duncan 检验法进行差异显著性分析(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 pH 值对燕麦蛋白溶解性的影响

本试验通过凯氏定氮分析碱溶酸沉法提取的燕麦蛋白纯度为 86%。

由图 1 可知,随着 pH 值的增加,燕麦蛋白的溶解度先减小后增大;当 pH 值为 5 时,燕麦蛋白的溶解度最低。当 pH 远离等电点(pH 值 5.0)时,燕麦蛋白的溶解度提高,当 pH 值为 9 和 10 时,燕麦蛋白的溶解度达到 80% 以上。这是由于在等电点附近,蛋白分子表面电荷含量几乎为零,分子间的排斥力减弱,蛋白颗粒极易碰撞、凝聚而产生沉淀,溶解度降低;当溶液的 pH 值远离蛋白质的等电点时,蛋白分子间的电荷数增多,分子之间的排斥力增强,致使蛋白分散,水溶性增加,从而提高其溶解性^[20]。



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same as following.

图 1 pH 值对燕麦蛋白溶解性的影响

Fig.1 Effect of pH value on the solubility of oat protein

2.2 pH 值对燕麦蛋白 ζ -电位值的影响

由图 2 可知,当 pH 值从 2 增加至 10 时, ζ -电位值从正值变为负值(由 20.5 mV 变化至 -23.8 mV)。当 pH 值为 2、3、4 时,燕麦蛋白所带电荷为正值,pH 值为 5 左右时电位值接近于零,而 pH 值为 6~10 时, ζ -电位值为负值。尤其当 pH 值为 9 和 10 时, ζ -电位绝对值显著增加,液滴表面带有大量的负电荷^[19]。这可能是由于当蛋白溶液 pH 值低于等电点时,氨基基团带正电荷,羧基基团呈中性,高于等电点时,氨基基团呈中性而羧基基团带负电荷,因此,当蛋白溶液 pH 值小于等电点时,带正电的氨基基团数量大于带负电的羧基基团总数,此时蛋白质具有净正电荷;而当 pH 值大于等电点时带电结果正好相反;当蛋白溶液 pH

值位于等电点附近时,其正电荷和负电荷的总数平衡,因此蛋白质的净电荷为零。

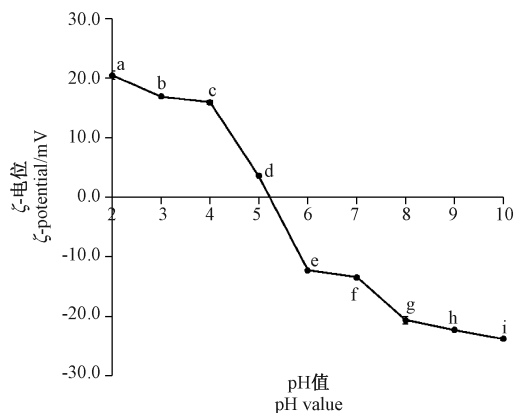


图 2 pH 值对燕麦蛋白 ζ -电位值的影响

Fig.2 Effect of pH value on the ζ -potential of oat protein

2.3 pH 值对燕麦蛋白粒径分布比例的影响

由图 3 可知,当 pH 值为 5 时,燕麦蛋白粒径的分布范围集中在 40~100、100~200、200~2 000 μm ,其中 200~2 000 μm 大粒径占比为 22.72%。这可能是由于在等电点附近蛋白质表面电荷几乎为零,液滴之间失去了静电斥力,蛋白质相互作用形成较大的聚集体,导致溶液粒径较大,此时燕麦蛋白的溶解性也最差。当 pH 值为 7 时,蛋白溶液中小于 40 μm 的粒径增多,溶液中仍存在 200~2 000 μm 的大粒径,占比降至 10.44%。pH 值为 10 时,燕麦蛋白溶液中几乎没有 200~2 000 μm 的大粒径颗粒,粒径集中分布在 40 μm 以下、40~100 μm 、100~200 μm 范围内,其中小于 100 μm 粒径燕麦蛋白的占比为 98.18%。随着 pH 值的增加,蛋白表面负电荷逐渐增多,因此蛋白粒子间斥力增大,溶液中蛋白粒子均匀分布在体系中,形成较为稳定的溶液^[21]。

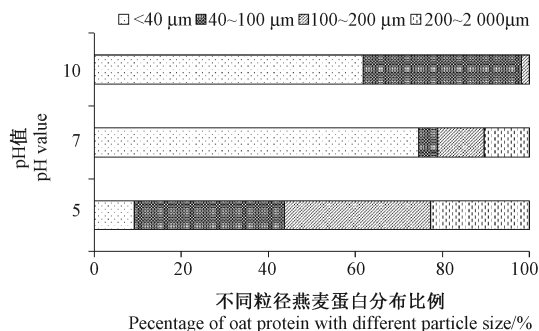


图 3 pH 值对燕麦蛋白粒径分布比例的影响

Fig.3 Effect of pH value on the percentage of oat protein with different particle size

2.4 pH 值对燕麦蛋白乳化性的影响

蛋白质乳化性是指蛋白质作为乳化剂乳化稳定乳化液的能力,主要包括乳化活性和乳化稳定性。由图 4 可知,随着 pH 值的增加,燕麦蛋白乳化活性和乳化稳定性均呈先降低后增加的趋势。当 pH 值大于 8 时,蛋白乳化活性的增势趋于平稳;在等电点范围(pH 值 5.0 左右)内,燕麦蛋白的乳化活性和乳化稳定性均最差,主要是由于在等电点附近,燕麦蛋白表面电荷基本为零,分子间排斥力消失^[22],蛋白质相互作用形成较大聚集体,溶解性最差,能够吸附在油、水界面上的蛋白质减少,形成乳状液的能力降低,燕麦蛋白在等电点附近的乳化活性和乳化稳定性较差。

由上述试验结果可知,pH 值通过影响蛋白溶解度的方式来影响蛋白质的乳化性。在 pH 值接近燕麦蛋白的等电点(pH 值 5.0 左右)时,蛋白的表面电荷数最低,质与体系中极性基团的作用力降至最低,溶解性最低,乳化性也降至最低。当 pH 值远离等电点时,燕麦蛋白的表面电荷增加,与周围基团的作用力增强,溶解度增加,乳化性也随之升高。

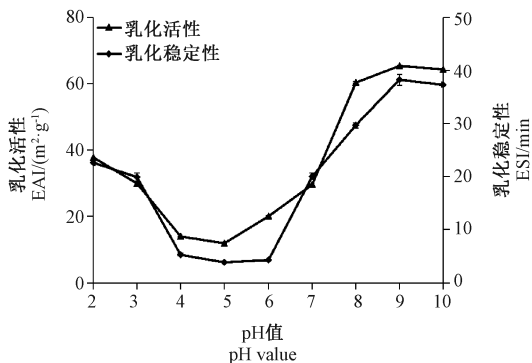


图 4 pH 值对燕麦蛋白乳化性的影响

Fig.4 Effect of pH value on emulsifying property of oat protein

2.5 温度对燕麦蛋白溶解度的影响

由图 5 可知,随着温度的升高,燕麦蛋白溶解度呈先升高后降低的趋势。当温度为 95℃ 时,燕麦蛋白的溶解度达到最大(35.1%)。这表明,溶液中的蛋白质粒子在热作用下先解离而后聚集。适当升高温度,有利于蛋白质和水分子的运动以及相互作用,部分原是聚集体的蛋白开始解离,溶解于水中,因此对燕麦蛋白的溶解性起到促进作用,且在 95℃ 时这种解离作用达到最大,体系中蛋白质的溶解度也相应达到最大;但当达到燕麦蛋白的变性温度(100℃ 左右)时,部分蛋白质变性或解离的蛋白粒子发生重新聚集,导致蛋白质溶解度降低^[23]。

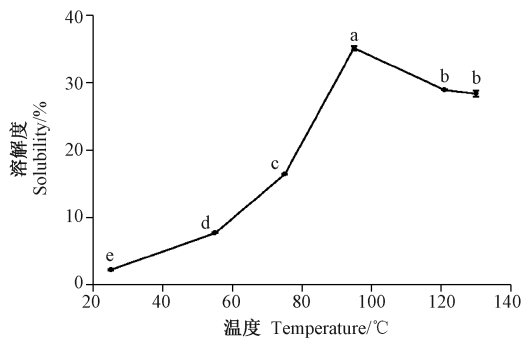


图 5 温度对燕麦蛋白溶解度的影响

Fig.5 Effect of temperature on the solubility of oat protein

2.6 温度对燕麦蛋白电位值的影响

燕麦蛋白在 pH 值 7.0 时带负电荷,其溶液的 ζ -电位值在未加热(25℃)时为 -10.5 mV,随着温度的升高, ζ -电位绝对值增大,温度为 95℃ 时燕麦蛋白溶液的电位绝对值最大,18.4 mV(图 6)。这是由于热处理导致燕麦蛋白结构更大程度的展开,暴露出更多的带电基团^[19];121 和 130℃ 热处理蛋白 ζ -电位值绝对值下降,此时液滴之间的斥力势能较小,燕麦蛋白聚集程度增加,稳定性变差。

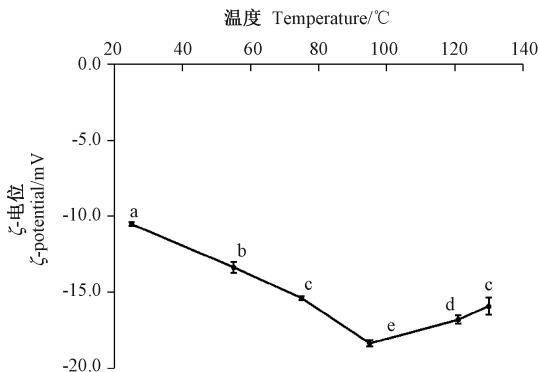


图 6 温度对燕麦蛋白电位值的影响

Fig.6 Effect of temperature on the ζ -potential of oat protein

2.7 温度对燕麦蛋白粒径分布的影响

由图 7 可知,随着温度升高,燕麦蛋白液滴聚集变化相对较小,当热处理温度为 55、75 和 95℃ 时,粒径分布峰左移,主要集中在 100 μm 以下,此时燕麦蛋白解离,粒径变小;而 121 和 130℃ 热处理组燕麦蛋白粒径分布峰向右移动,在 100 μm 以上出现大的粒径分布峰,表明蛋白粒子进一步发生聚集。当处理温度大于燕麦蛋白的变性温度时,热处理诱导蛋白部分展开,从而形成新的键合以及疏水等相互作用,导致较大的聚集体形成。如,球状蛋白对温度非常敏感,当温度超

过蛋白变性温度时,蛋白内部的疏水分子链和活性基团会暴露出来^[24]。

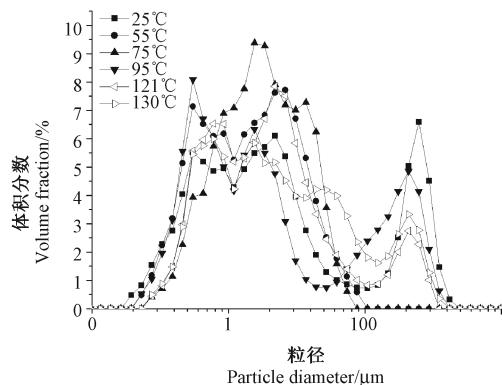


图7 温度对燕麦蛋白粒径分布的影响

Fig.7 Effect of temperature on the particle size distribution of oat protein

3 讨论

蛋白质的溶解性与乳化性、起泡性、凝胶性等诸多加工特性密切相关,是蛋白变性程度的一个重要表征^[25]。pH 值、温度和盐浓度等会改变这种平衡,影响水分子与蛋白质间的相互作用,从而影响蛋白质的溶解度^[26]。食品体系包含一系列 pH 值和温度的变化,如从酸性软饮料和中性营养饮料的制备,食品加工过程中的温度变化等。因此,确定 pH 值和温度对燕麦蛋白功能特性的影响十分重要。

本研究发现,在燕麦蛋白等电点附近,蛋白表面电荷数几乎为零,分子间斥力减小,液滴聚集,溶解度降低,稳定性最差。说明在中性或微酸性环境下,燕麦蛋白质的溶解度有限。当远离等电点,蛋白质表面电荷数增多,小粒径颗粒增多。许英一等^[27]采用酶解法提取燕麦蛋白并研讨其理化性质时发现,在燕麦蛋白等电点处,其溶解度最低,燕麦蛋白的起泡性最差,泡沫稳定性最好,乳化性最低。Ercili-Cura 等^[28]发现燕麦蛋白分散液在 pH 值为 7 时平均粒径约为 70 nm,而当 pH 值增加至 9 时平均粒径下降到 30 nm。上述研究均表明,当 pH 值接近蛋白质等电点时,蛋白质表面电荷减少,液滴之间静电斥力减小,导致可溶性或不溶性聚集体的形成;当 pH 值远离蛋白质等电点时,分子间静电斥力增大,可有效抵御蛋白分子间的范德华引力,防止相邻液滴相互聚集,导致蛋白质分散,粒径变小,溶液稳定性增加^[29]。蛋白质的溶解性可以间接反映其水化作用,蛋白质在水中通过肽键或者氨基酸侧链与水分子结合,生成蛋白质-水分子,并且与蛋白质-

蛋白质相互作用达到热力学平衡。本研究发现,随着温度的升高,燕麦蛋白的溶解度升高,电位值增大,说明燕麦蛋白水化能力增强,这有助于其在水相的分散,溶液稳定性增强,并在 95℃ 达到最优。Ma 等^[29]研究发现燕麦蛋白在加热后被分解为不同的亚基,同时也会互相连接形成高分子量的聚集体。Guo 等^[30]考察了热诱导不同粒径大豆蛋白聚集体的表面性质、乳化性和乳化稳定性,结果发现经热处理后,二硫键形成,导致聚集体的产生,聚集体的表面疏水性增加。结果证明,热处理使蛋白分子内部的疏水基团暴露于分子表面,改变分子尺寸、柔性和表面疏水性等,进而影响其溶液中的聚集行为以及其在界面上的吸附特性^[31]。

4 结论

本研究结果表明,当 pH 值在燕麦蛋白的等电点附近(pH 值 5.0 左右)内,燕麦蛋白的表面电荷数几乎为零,ζ-电位绝对值最低,此时的蛋白粒径最大,燕麦蛋白溶解性最差,乳化性也降到最低。当 pH 值远离蛋白质等电点时,燕麦蛋白的表面电荷增加,蛋白质液滴之间静电斥力增强,液滴分布分散,粒径变小,溶解度增加,乳化性也随之升高。在不同的温度处理下,随着温度升高(55~95℃),燕麦蛋白解离,ζ-电位绝对值显著增大,粒径变小,燕麦蛋白溶解度显著升高,燕麦蛋白溶液的稳定性变好;当温度进一步升高(121、130℃),燕麦蛋白溶解度降低,稳定性变差。燕麦蛋白是一种优质的植物蛋白,本研究结果阐明了不同环境因素(pH 值和温度)对燕麦蛋白溶解的聚集特性的影响,为进一步改善燕麦蛋白的功能特性,使其更好地应用于食品工业生产提供了一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 李笑蕊,王世霞,么杨,负婷婷,刘珊,任贵兴,蔡文涛. 裸燕麦和皮燕麦的营养及功能活性成分对比分析[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(5): 50-54
- [2] Antonio C, Rosalia F, Paola V. Potential bioaccessibility and functionality of polyphenols and cynaropicrin from breads enriched with artichoke stem [J]. Food Chemistry, 2018, 245(15): 838-844
- [3] Fan Z. Structures, properties, modifications, and uses of oat starch [J]. Food Chemistry, 2017, 229(15): 329-340
- [4] Sunilkumar B A, Leonova S, Öste R, Olsson O. Identification and characterization of high protein oat lines from a mutagenized oat population [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 75: 100-107
- [5] Sun L, Gidley M J, Warren F J. Tea polyphenols enhance binding of porcine pancreatic α-amylase with starch granules but reduce

- catalytic activity [J]. *Food Chemistry*, 2018, 258: 164–173
- [6] Jakobek L. Interactions of polyphenols with carbohydrates, lipids and proteins [J]. *Food Chemistry*, 2015, 175: 556–567
- [7] 张雪莹, 翟爱华. 酶解法对燕麦蛋白水解性的影响[J]. *安徽农学报*, 2017, 23(6): 32–33
- [8] Zhao C B, Zhang H, Xu X Y, Cao Y, Zheng M Z, Liu J S, Wu F. Effect of acetylation and succinylation on physicochemical properties and structural characteristics of oat protein isolate [J]. *Process Biochemistry*, 2017, 57: 117–123
- [9] Chen L, Kivelä J, Helenius J, Kangas A. Meat bone meal as fertiliser for barley and oat [J]. *Agricultural and Food Science*, 2015, 20(3): 235–244
- [10] Walters M E, Udenigwe C C, Tsopmo A. Structural characterization and functional properties of proteins from oat milling fractions[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2018, 95(8): 991–1000
- [11] Zwer P. Oats: Grain-Quality Characteristics and Management of Quality Requirements [M]. Florida: Woodhead Publishing, 2017: 235–256
- [12] Zhao Y, Mine Y, Ma C Y. Study of thermal aggregation of oat globulin by laser light scattering [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(10): 3089–3096
- [13] Sarkar A, Kamaruddin H, Bentley A, Wang S. Emulsion stabilization by tomato seed protein isolate: Influence of pH, ionic strength and thermal treatment [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 57: 160–168
- [14] Teo A, Goh K K T, Wen J, Oey I Ko S, Kwak H S, Lee S J. Physicochemical properties of whey protein, lactoferrin and Tween 20 stabilised nanoemulsions: Effect of temperature, pH and salt [J]. *Food Chemistry*, 2016, 197: 297–306
- [15] Liu G, Li J, Shi K, Wang S, Chen J W, Liu Y, Huang Q R. Composition, secondary structure, and self-assembly of oat protein isolate [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2009, 57(11): 4552–4558
- [16] 蔺瑞, 张美丽, 刘全旺. 裸燕麦球蛋白提取条件及其功能特性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(7): 188–191
- [17] Walker J M. The Bicinchoninic Acid (BCA) Assay for Protein Quantitation [M]. Totowa, NJ: Humana Press, 2002: 11–14
- [18] Zhao C B, Zhang H, Xu X Y, Cao Y, Zheng M Z, Liu J S, Wu F. Effect of acetylation and succinylation on physicochemical properties and structural characteristics of oat protein isolate [J]. *Process Biochemistry*, 2017, 57: 117–123
- [19] Chen E, Wu S, McClements D J, Li B, Li Y. Influence of pH and cinnamaldehyde on the physical stability and lipolysis of whey protein isolate-stabilized emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 69: 103–110
- [20] 许英一, 王宇, 林巍. 燕麦蛋白理化性质研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2018, 45(3): 385–388
- [21] Tian W L, Lei L L, Zhang Q, Li Y. Physical stability and antimicrobial activity of encapsulated cinnamaldehyde by self-emulsifying nanoemulsion [J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2016, 39(5): 462–471
- [22] Ramadhan K, Foster T J. Effects of ball milling on the structural, thermal, and rheological properties of oat bran protein flour [J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 229: 50–56
- [23] Croguennec T, Renault A, Beaufils S, Dubois J J, Pezennec S. Interfacial properties of heat-treated ovalbumin [J]. *Journal of Colloid Interface Science*, 2007, 315: 627–636
- [24] Setiowati A D, Saeedi S, Wijaya W, Van der Meeren P. Improved heat stability of whey protein isolate stabilized emulsions via dry heat treatment of WPI and low methoxyl pectin: Effect of pectin concentration, pH, and ionic strength [J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 716–726
- [25] Zhu Z B, Zhu W D, Yi J H, Liu N, Cao Y G, Lu J L, McClements D J. Effects of sonication on the physicochemical and functional properties of walnut protein isolate [J]. *Food Research International*, 2018, 106: 853–861
- [26] Konak Ü İ, Ercili Cura D, Sibakov J, Sontag-Strohm T, Certel M, Loponen J. CO₂-defatted oats: Solubility, emulsification and foaming properties [J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(1): 37–41
- [27] 许英一, 徐艳霞, 王宇. 不同方式提取的燕麦蛋白功能特性比较[J]. *食品与机械*, 2018, 34(3): 166–169
- [28] Ercili-Cura D, Miyamoto A, Paananen A, Yoshii H, Poutanen K, Partanen R. Adsorption of oat proteins to air–water interface in relation to their colloidal state[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 44: 183–190
- [29] Ma C Y, Khanzada G, Harwalkar V R. Thermal gelation of oat globulin[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1988, 36(2): 275–280
- [30] Guo S T, Tomotada O, Masayuki M, Mikami M. Interaction between protein and lipid in soybean milk at elevated temperature [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1997, 45(12): 4601–4605
- [31] Tokle T, McClements D J. Physicochemical properties of lactoferrin stabilized oil-in-water emulsions: Effects of pH, salt and heating [J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(5): 976–982

Effects of pH and Temperature on the Solubility and Aggregation of Oat Protein

GAO Xiaoli WANG Lili LIU Liya TONG Litao ZHOU Xianrong ZHOU Sumei *

(Institute of Agro-products Processing Sciences and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193)

Abstract: To study the physical and chemical properties of oat protein and make better use of oat protein resources, oat protein was extracted from oat by alkaline extraction and acid precipitation. The effects of different pH and temperature on the solubility, ζ -potential and particle size distribution of oat protein were analyzed. The results showed that around pH 5.0, oat protein had the lowest surface charge, larger particle size, and lower solubility and emulsification. When the pH value was far away from the isoelectric point, the surface charge of oat protein increased, particle size gradually decreased and the solubility and emulsification increased. As the temperature increases (55–95°C), oat protein was dissociative, particle size was smaller. As the solubility of oat protein increased, the stability was improved. When increasing the temperature to 121 and 130°C, oat protein precipitated to form larger particle size of aggregate. However, solubility and stability were significantly reduced.

Keywords: oat protein, pH, temperature, solubility, aggregation