

海藻酸钠及复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白品质的影响

于晓薇¹, 彭慧慧², 岳明慧¹, 张姗姗¹, 王思花¹, 张静¹, 王鑫³, 马成业^{1*}

(¹ 山东理工大学 农业工程与食品科学学院 山东淄博 255000)

(² 杭州膳策食品科技有限公司 杭州 310018)

(³ 山东健源生物工程股份有限公司 山东烟台 265400)

摘要 为改善豌豆蛋白模拟肉制品的品质,以豌豆蛋白(PPI)为原料,添加海藻酸钠(SA)、复合磷酸盐(CP),使用带有冷却模具的双螺杆挤压机,在不同温度下制备高湿组织化豌豆蛋白(EPPi),探究组织化产品的复水性、持油性、氮溶解指数、质构特性、色差、感官、微观结构等指标,评价其品质。结果表明,加入 0.1% SA 的组织化产品的复水性提高了 44.15%,加入 0.3% SA 的挤出物样品的 NSI(5.10)、组织化度(1.793)及感官评分(7.85)达到最大值。SA 和 CP 的加入,使豌豆蛋白产品色泽加深。CP 使得组织化蛋白产品复水率下降 21.86%,且对弹性影响不显著。蛋白质在挤压机筒内发生变性,分子链展开的同时,疏水基团暴露,增强了蛋白质与油之间的相互作用,导致持油性增加 19.39%。加入 0.3% 的 CP 后蛋白产品的组织化度达到最大值 1.806,扫描电镜观察发现产品具有较明显的纤维结构。结论:添加适当含量的海藻酸钠(0.3%)及复合磷酸盐(0.3%),可改善组织化豌豆蛋白的品质特性。

关键词 豌豆蛋白; 海藻酸钠; 复合磷酸盐; 高水分挤压; 组织化

文章编号 1009-7848(2024)06-0288-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.06.025

随着未来几十年世界人口增长以及富裕水平的提高,需要大量的蛋白质食品以满足生产和生活的需要^[1]。然而,肉制品不断出现的伦理问题,生产加工过程的土地资源、水资源消耗及碳基温室气体排放等环境问题一直是人们关注的焦点,利用植物资源生产高蛋白仿肉制品的研究引起人们的广泛关注^[2]。一些学者提出使用细胞培养肉及植物基模拟肉来代替动物肉^[3],其中植物基模拟肉以工艺稳健、成本较低等因素受到较多关注。以植物蛋白为原料生产的模拟肉制品,在很大程度上能够满足消费者的美味追求及健康保障,被认为是目前食品研究中热门的主题之一^[4]。

豌豆中含 23%~25% 的蛋白质,其营养价值较高,具有较低的致敏性,也不会带来转基因问题,被认为是一种优质的植物蛋白来源^[5]。豌豆蛋白作为豌豆深加工生产淀粉的副产物,基本用作饲料,产品利用途径少,附加值较低^[6]。研究发现在豌豆蛋白(水分含量为 55%,蛋白质含量为 83.2%~84.9%)160 °C 高水分挤压过程中,豌豆蛋白挤压

产品呈明显纤维状^[7]。140 °C 时豌豆蛋白-谷朊粉挤出组织化产品的机械抗拉强度与大豆蛋白组织化产品相当^[8],表明豌豆蛋白具有开发纤维状模拟肉制品的潜力。然而,目前组织化豌豆蛋白产品在纤维强度方面无法满足市场要求。添加剂(乳化剂、持水剂等)的加入可有效改善蛋白组织化制品的质构特性。海藻酸钠可吸附大量水分并形成黏弹性胶体,使得产品结构细腻。磷酸盐在挤压过程中与蛋白质中的离子键产生作用,从而改善挤压产品的品质。添加 0.1% 的海藻酸钠可显著改善花生蛋白的组织化度及抗拉强度^[9]。大豆浓缩蛋白与海藻酸钠混合后,可增强挤出物的纤维结构,使得产品具有较高的组织化度和咀嚼性^[10]。三聚磷酸盐可有效改善小麦蛋白的组织化结构,当添加量为 0.5% 时咀嚼度达到最大值(2 713.64)^[11]。非蛋白成分在挤压过程中对于构建植物基模拟肉同样重要,并已成功应用于小麦蛋白及大豆蛋白等植物蛋白制品。有关利用海藻酸钠及复合磷酸盐来改善豌豆蛋白模拟肉制品品质的研究还有待进一步探索。

本研究以豌豆蛋白为原料,通过对高水分组织化蛋白挤出物的质构特性、感官评价及微观结构等指标的分析,明确海藻酸钠及复合磷酸盐对

收稿日期: 2023-06-18

基金项目: 招远工业创新基金项目(2018281)

第一作者: 于晓薇,女,硕士生

通信作者: 马成业 E-mail: meycn2002@163.com

组织化豌豆蛋白品质的影响,以期提高其附加值,为改善组织化豌豆蛋白产品品质提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

豌豆分离蛋白(PPI)由山东健源生物工程股份有限公司提供,其化学组成为蛋白质含量 71.23%、淀粉含量 7.26%、脂肪含量 0.85%;海藻酸钠、复合磷酸盐均为食品级,购于浙江一诺生物科技有限公司;花生油,购于烟台龙源油食品有限公司;牛血清白蛋白(纯度 98%),赛国生物科技;考马斯亮蓝、95%乙醇、磷酸、硫酸铜、硫酸钾、硫

酸、硼酸、氢氧化钠,均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司。

UVTE36-24 型双螺杆挤压机(长沙创享生物科技有限公司),最大产能为 50 kg/h,螺杆长 960 mm,长径比 27.4:1;挤出机由进料区、混合区、挤压蒸煮区、成型区和冷却模具区等 5 部分组成(1~5 区,图 1 所示);挤出机通过外泵加水,并通过电加热系统加热;挤出机末端连接冷却模具(1 000 mm×170 mm×15 mm,长×宽×高)^[12]。TA.XTplus 物性测试仪,英国 SMS 公司。酶标仪,德国 Thermo Fisher 公司。

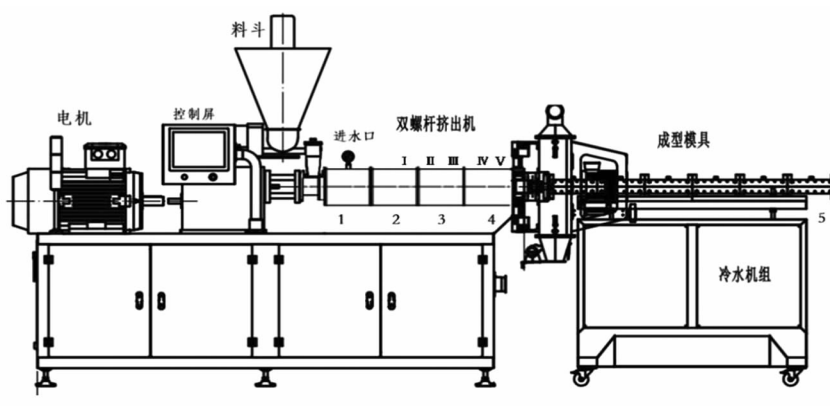


图 1 挤出机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of extruder structure

1.2 方法

1.2.1 豌豆蛋白-海藻酸钠/复合磷酸盐挤出物的制备 豌豆分离蛋白与海藻酸钠(质量分数 0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%)和复合磷酸盐(质量分数 0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%)预先混合均匀,而后进行挤压操作。将原料以 10 kg/h 的喂料速度加入挤压机,设置喂水速度使得物料水分含量为 54%,螺杆转速为 162 r/min,模口处压力为 6.0~6.3 MPa,挤压主温区(Ⅲ)设定为 169 ℃,其它温区(Ⅰ~Ⅴ)依次设置为 40,120,145,140 ℃。挤出机末端连接一个长为 100 cm 的冷却模具,待挤压机稳定运行一段时间后即可收集新鲜样品(图 2 为部分样品图)。待样品冷却后,取一部分样品切成粒状后烘干(55 ℃,8 h),经粉碎后过 60 目筛,继续于烘箱内干燥 2 h,另取一部分样品冻干后密封保存于干燥器内,备用。

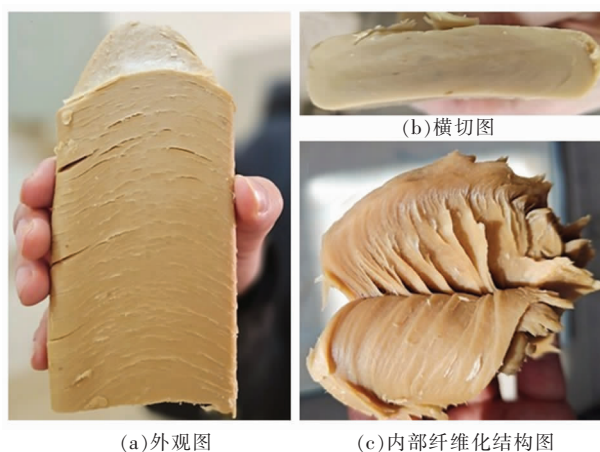


图 2 挤压样品实物图

Fig.2 Physical view of extruded sample

1.2.2 复水性 参考 Onwulata 等^[13]的方法,称取粒状组织化豌豆蛋白约 5 g,记录样品质量为 W_1 ,

挤压产品在 25 ℃ 条件下复水 30 min 后取出并沥干水分,再次称量样品质量,记为 W_2 ,每个样品平行测定 3 次。

$$\text{复水性}(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

1.2.3 持油性 参考 Mazaher 等^[14]的方法,称取 1 g 组织化豌豆蛋白粉末(W_1)与 10 mL 花生油于混匀仪上完全混合,静置 15 min 后离心(4 500 r/min, 20 min),缓慢倾倒入清液,称量剩余样品的质量(W_2)。持油性表示 1 g 样品所吸附的油的质量。重复测定 3 次并取平均值。

$$\text{持油性}(\%) = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

1.2.4 氮溶解指数(NSI) 将 1 g 组织化豌豆蛋白粉末均匀分散在 40 mL 蒸馏水中,30 ℃ 恒温振荡 1 h(200 r/min),收集上清液并定容至 100 mL。用蒸馏水配置 1 mg/mL 的牛血清白蛋白(BSA)作为蛋白标准溶液,采用考马斯亮蓝法测定上清液中蛋白质的含量(W_1)。采用凯氏定氮法测定样品中的总蛋白含量(W_2),相应的换算系数为 6.25。氮溶解指数表示为上清液中蛋白质含量与样品总蛋白含量的比值。每个样品重复进行 3 次^[15]。

$$\text{氮溶解指数}(\%) = \frac{W_1}{W_2} \times 100 \quad (3)$$

1.2.5 质构特性 将新鲜的组织化豌豆蛋白切成圆柱体(15 mm×13 mm,H×D)放置在质构仪上,利用 P/36R 探头在 TPA 模式下测定样品的硬度、弹性及咀嚼性等指标。具体操作参数设置:测试前、中、后速度分别为 2,1,2 mm/s,下压程度 50%,每个样品重复测定 4~6 次^[16]。

1.2.6 组织化度 将新鲜的组织化豌豆蛋白切成长方体(12 mm×12 mm×15 mm,H×W×D),利用 HDP/BS 探头在剪切模式下对样品进行纵向和横向的剪切操作,以 1 mm/s 的速度将样品切割至其初始高度的 75%,组织化度表示为横向剪切力/纵向剪切力所做的功。重复测定 4~6 次并记录数据^[17]。

1.2.7 色差 参考 Palanisamy 等^[18]的方法,采用色差计(CM-3600A)测定挤出物样品的 L 、 a 、 b 值,依次进行黑板零位校准和白板校准,记录标样白色板的 L^* (亮度)=98.68, a^* (红度)=0.09, b^* (黄度)=-0.4,每个被测样品重复测定至少 3 次。 ΔE 表示

色差,根据公式(1)计算:

$$\Delta E = \sqrt{(L-L^*)^2 + (a-a^*)^2 + (b-b^*)^2} \quad (4)$$

1.2.8 感官评价 感官评价员由课题组老师及同学组成,经过认识感官特性及接受感官刺激的培训,一共 10 名评价员组成评价小组,其中男女比例为 4:6。组织化豌豆蛋白的感官评分参考文献^[19]。产品的感官总分根据相应的权重计算,从色泽(0.15)、外观(0.15)、组织形态(0.15)、咀嚼性(0.4)、风味(0.15)等 5 个方面对组织化豌豆蛋白进行评价。色泽:色泽异常 1~3 分;发暗 4~6 分;微黄颜色不均 7~9 分;色泽均一呈黄色 10 分。外观:大量横纵向裂纹 1~3 分;少量裂纹 4~6 分;表面无裂纹,结构致密 7~9 分;表面光滑且质地均一 10 分。组织形态:无纤维结构 1~3 分;纤维结构较弱 4~6 分;有一定的纤维走向 7~9 分;有明显纤维结构 10 分。咀嚼性:较硬 1~3 分;不易咀嚼 4~6 分;有一定咀嚼性 7~9 分;咀嚼性良好 10 分。风味:怪味异味 1~3 分;稍有异味 4~6 分;无异味 7~9 分;香味 10 分。

1.2.9 扫描电镜 Quanta 25F 型扫描电子显微镜观察挤出物样品的微观结构。在 2.5 kV、25 mA 条件下喷金处理 1.5 min,放大倍数分别为 300 倍和 500 倍。

1.2.10 统计分析 每组试验至少重复 3 次,数据结果均呈现为平均值±标准偏差。OriginPro2022 软件进行图片绘制,试验数据采用 SPSS22.0 软件进行单因素方差分析,统计分析采用 Duncan 检验,以 5% 的显著性水平进行评价。

2 结果与分析

2.1 复水性

复水性表示组织化蛋白产品中组织结构吸附水的能力,主要与挤压过程中蛋白质分子形成的微孔数量及大小有关。窦微等^[10]研究发现加入海藻酸钠(3%,6%,9%)后组织化产品挤出物的 β -折叠含量增加, α -螺旋含量降低,能够容纳更多的水分子,使得其吸水率始终高于对照组的大豆浓缩蛋白样品。挤压过程使得原料蛋白形成松散的片状结构,在干燥状态下更容易吸收水分。海藻酸钠能够吸附大量水分形成黏弹性胶体以提高蛋白产品的持水能力并赋予其细腻的结构。Yao 等^[20]研

究发现3种不同分子质量(2 660, 3 890, 4 640 ku)的海藻酸钠在0.1%~0.5%添加量时均能提高肌球蛋白凝胶的持水能力。持水能力的增加主要是由于海藻酸钠的亲水性和蛋白网络凝胶的形成,该凝胶具有限制水的能力。随着海藻酸钠分子质量的增加亲水基团和带电基团也会增加,因此SA/水和SA/蛋白的更多相互作用将发生。0.1%复合磷酸盐加入后组织化豌豆蛋白的复水性显著增加,表明在挤压过程中蛋白质与水的相互作用增强。但当继续加入复合磷酸盐(0.2~0.5)后,组织化豌豆蛋白交联程度增加,蛋白制品的结构致密、堆积密度较高,稳定水分的气腔减少以及蛋白质与水的相互作用减弱使得复水性显著下降^[21]。

2.2 持油性

持油性表示食品体系中的基质与油结合的能力,主要取决于蛋白质分子表面疏水性基团的数量^[22]。如图4所示,添加海藻酸钠(0.1%~0.5%)后组织化蛋白制品的持油性始终高于未添加海藻酸钠的豌豆蛋白挤出物,表明海藻酸钠能够显著提高产品的持油性。当海藻酸钠添加量为0.3%时,豌豆蛋白制品的持油性下降了5.38% ($P>0.05$),表明在挤压机筒内豌豆蛋白变性,分子链展开疏水性残基暴露的同时也更容易发生定向交联。复合磷酸盐在一定程度上对持油性起促进作用,且在0.3%添加水平时持油率达到109.7%。海藻酸钠及复合磷酸盐与豌豆蛋白复配物在高温高湿高剪切力的挤压过程中使得组织化豌豆蛋白网状结构被破坏,蛋白质发生变性,被折叠在蛋白质分子内部的疏水基团暴露出来,从而增强了蛋白质与油的相互作用,与油的结合位点增加使得挤出物的持油性增加^[23]。Carmo等^[24]研究发现经挤压后蚕豆浓缩蛋白挤出物的持油性从116.1%下降至93.1%,并解释为在挤压过程中蛋白质同时发生着变性和聚集,在聚集物中,疏水基团之间存在相互作用导致蛋白质分子表面的疏水性整体下降使得挤出物的持油性低于原料蚕豆蛋白^[22]。总的来说,持油性表示食品的疏水性指标,其主要受到蛋白质与油的相互作用的影响。

2.3 氮溶解指数

氮溶解指数是指蛋白质样品中可溶解于水的氮含量与总氮量的比值,是反映蛋白质变性程度

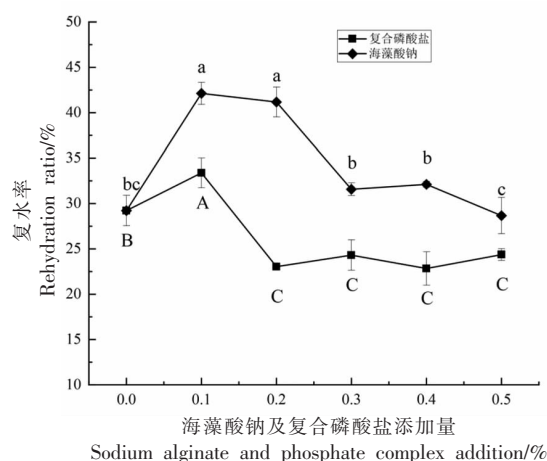


图3 海藻酸钠及复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白复水率的影响

Fig.3 Effect of sodium alginate (SA) and compound phosphate (CP) on the rehydration rate of extruded pea protein isolation (EPPI)

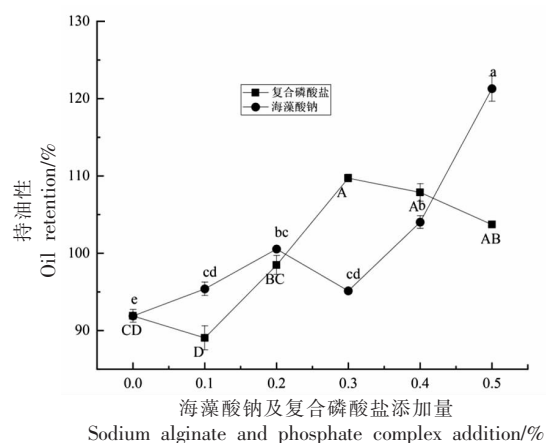


图4 海藻酸钠及复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白持油性的影响

Fig.4 Effect of SA and CP on oil holding capacity of EPPI

的指标^[26]。由图5可得,海藻酸钠及复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白的NSI表现出相同的趋势,即随着添加量的增加呈现出先增加后降低的总趋势,并在0.3%添加量时表现出最大值。且经添加剂与豌豆蛋白原料复配后,其挤出物产品的NSI(3.42%~5.17%, 4.48%~5.41%)均高于零水平(3.28%)组织化豌豆蛋白挤出物样品。蛋白质在挤压机的机筒内发生变性,在加入添加剂(海藻酸钠、复合磷酸盐)后变性程度增加,蛋白质的结构被削弱,分子链展开同时组成蛋白质的多亚基开

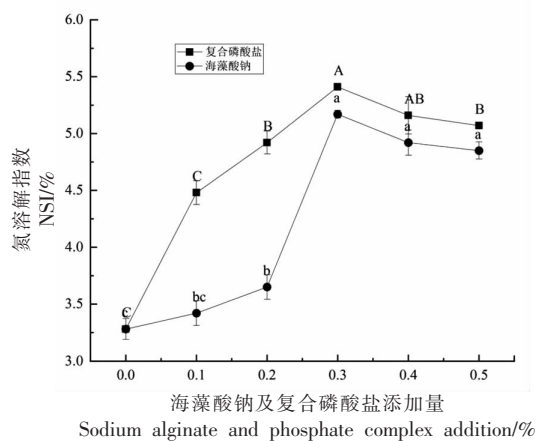


图5 海藻酸钠及复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白 NSI 的影响

Fig.5 Effect of SA and CP on nitrogen solubility (NSI) index of EPPI

始分离使得分子质量减小,另外包络在碳水化合物大分子中的蛋白质也可以溶出,由此 NSI 升高。但当添加剂量继续增加后,NSI 表现出下降的趋势,表明在豌豆蛋白充分组织化后,蛋白质线性分子链发生交联且各分子间的疏水相互作用增加而表现出较小的溶解性^[25]。总的来说,海藻酸钠及复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白的 NSI 起到一定程度的改善作用。

2.4 质构特性

如表 1 所示,少量的海藻酸钠会显著降低蛋白制品的咀嚼性,但随着海藻酸钠含量增加至

0.4%时,组织化豌豆蛋白的硬度及咀嚼度达到最大值(8 037.795,4 199.125)。海藻酸钠作为一种乳化剂可与蛋白质发生络合反应,使得蛋白质结构紧密,导致其硬度值及咀嚼性增加。窦微等^[10]认为随着海藻酸钠加入到大豆浓缩蛋白中,挤出物样品黏度升高,从而引起咀嚼度增加。复合磷酸盐(0.3%~0.4%)可显著增加组织化蛋白产品的硬度及咀嚼性,有助于打开蛋白质侧链,使活性基团暴露从而增强了蛋白质的交联作用。但当继续增大添加剂含量时,挤压产品的质地特性下降。海藻酸钠的加入使得组织化豌豆蛋白的弹性稍有变化,但仍一定的范围内(0.720~0.815),复合磷酸盐对弹性无显著性影响。

组织化度是评价纤维结构形成的重要指标。由于沿着纤维结构垂直方向切割比平行方向需要更多的力,一般认为组织化度>1^[26]。随着海藻酸钠及复合磷酸盐含量增大,组织化度表现出先上升后下降的总趋势,适当的添加剂能够促进蛋白质分子交联。彭晶^[11]研究结果显示,三聚磷酸盐的加入使得小麦蛋白的组织化度基本维持在 2.0,处于一个较高的水平。但当继续增大其含量时不利于纤维结构的形成,由于离子强度等原因可能会改变蛋白质分子间的结合方式,并干扰蛋白质沿着挤出方向聚集。海藻酸钠及复合磷酸盐在豌豆蛋白挤出物的纤维结构形成方面起着重要作用。

表 1 海藻酸钠及复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白质构的影响

Table 1 Effect of SA and CP on the texture characteristics of EPPI

样品	硬度/g	咀嚼性	弹性	组织化度
PPI	7 946 ± 109 ^{ad}	3 151 ± 212 ^c	0.751 ± 0.006 ^{abcA}	1.480 ± 0.047 ^{cd}
PPI+0.1%SA	4 272 ± 132 ^e	2 450 ± 127 ^d	0.720 ± 0.077 ^c	1.529 ± 0.033 ^e
PPI+0.2% SA	6 342 ± 107 ^e	3 866 ± 244 ^{ab}	0.747 ± 0.069 ^{bc}	1.672 ± 0.055 ^b
PPI+0.3% SA	5 912 ± 72 ^d	3 537 ± 98 ^b	0.783 ± 0.057 ^{abc}	1.793 ± 0.026 ^a
PPI+0.4% SA	8 037 ± 41 ^a	4 199 ± 325 ^a	0.815 ± 0.016 ^a	1.645 ± 0.043 ^b
PPI+0.5% SA	6 670 ± 188 ^b	3 507 ± 125 ^{bc}	0.790 ± 0.049 ^{ab}	1.454 ± 0.089 ^e
PPI+0.1%CP	5 406 ± 137 ^E	2 857 ± 52 ^C	0.755 ± 0.020 ^A	1.461 ± 0.036 ^D
PPI+0.2%CP	8 640 ± 296 ^C	4 247 ± 116 ^B	0.755 ± 0.013 ^A	1.596 ± 0.035 ^C
PPI+0.3%CP	9 223 ± 134 ^{AB}	5 016 ± 99 ^A	0.753 ± 0.015 ^A	1.806 ± 0.067 ^A
PPI+0.4%CP	9 394 ± 136 ^A	4 723 ± 47 ^A	0.755 ± 0.011 ^A	1.730 ± 0.026 ^B
PPI+0.5%CP	8 728 ± 296 ^{BC}	4 023 ± 190 ^B	0.751 ± 0.008 ^A	1.445 ± 0.024 ^D

注:同列小写字母表示海藻酸钠显著性,大写字母表示复合磷酸盐显著性($P < 0.05$)。

2.5 色泽

色泽作为感官的一个重要元素直接影响消费者对组织化豌豆蛋白产品的评价,因此,产品偏白色且亮度色差较小适宜。由图 6 可知,随着添加剂含量的增加, L 值表现为先下降后升高的总趋势。相反,海藻酸钠含量增加时, ΔE 先增加后降低,复合磷酸盐在 0.1%~0.5% 添加量时均提高了豌豆蛋白挤出物的 ΔE 值。蛋白质可在机筒高温条件下参与美拉德反应,使得挤出物产品的色泽加深。Palanisamy 等^[18]在大豆蛋白中加入卡拉胶(0.75%, 1.5%, 2.25%, 3%) 结果发现对照组和卡拉胶样品的 L 值及 ΔE 值只有细微的变化。一般来说,组织化蛋白制品应该尽量模拟出新鲜和蒸煮后肉制品的色泽及色泽变化以获得与真肉相似的外观,但事实上大多数的植物蛋白如大豆蛋白、谷朊粉等都呈现出黄色或者米黄色^[27]。

2.6 感官评价

组织化豌豆蛋白挤出物产品的感官评分主要从色泽、外观、组织状态、气味、咀嚼性等方面进行评价,再通过权重计算出总分。如图 7 所示,相比于豌豆蛋白挤出物,加入添加剂后的样品色泽降低,与 2.5 结果保持一致。随着海藻酸钠及复合磷酸盐添加剂量的增加,产品的表面裂纹减少,质地均匀,异味较少且有一定的纤维结构和组织形态,但当添加剂含量继续增加时,产品的组织化度降低,影响最终产品的感官评分。海藻酸钠及复合磷酸盐组织化豌豆蛋白产品的感官评分在 0.3% 添加量时达到了最大值(7.85, 7.65)。产品总分较低是因为并没有加入任何调味品及香料,另外,食品的风味是影响消费者产品接受度的一个重要因素,如果最终产品加入上述并生产出类似汉堡的产品,产品可接受度会得到进一步提高。然而,由于挤压加工过程中发生的物理化学变化,产品的调味注定是一个复杂的过程^[18,28]。

2.7 微观结构

原料豌豆蛋白中含大小不一的球状蛋白,在天然状态下呈现出无规则的散乱颗粒分布(图 8A,a)。豌豆蛋白由白蛋白和球蛋白组成,储藏性球蛋白占比 90%,依据沉降系数可分为 7S 球蛋白和 11S 球蛋白^[29]。原料在高温高压及高剪切力作

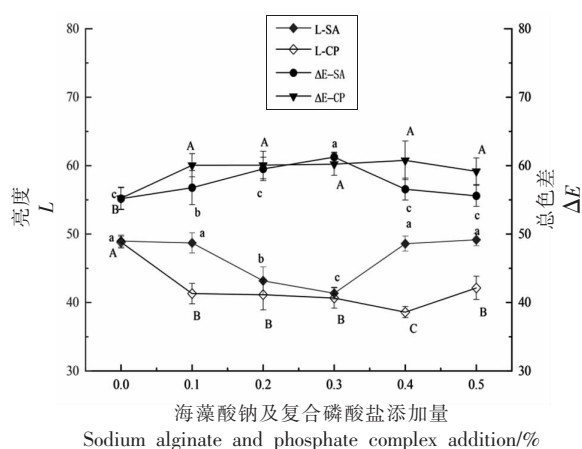


图 6 海藻酸钠及复合磷酸盐对组织化豌豆蛋白色泽的影响

Fig.6 Effect of SA and CP on L and ΔE of EPPi

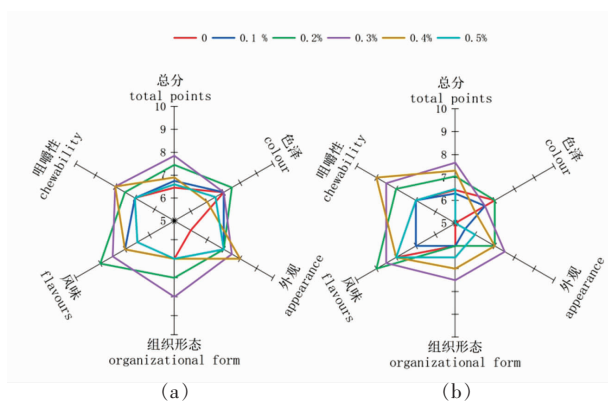
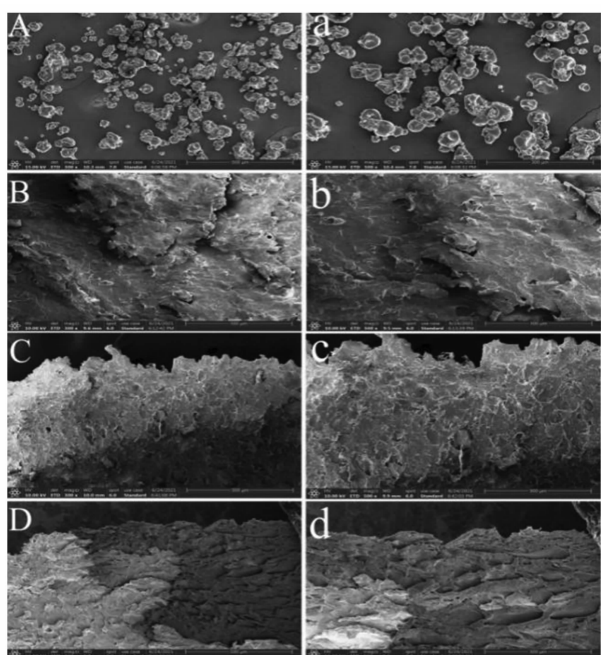


图 7 海藻酸钠(a)及复合磷酸盐(b)对组织化豌豆蛋白产品的感官评分

Fig.7 Effect of SA and CP on sensory evaluation of EPPi

用下的挤压机筒内形成熔融状态的豌豆蛋白,再经过模头冷却形成具有纤维状结构的组织化豌豆蛋白^[30],挤压可显著改变豌豆蛋白的组织状态及结构(图 8B,b)。加入 0.3% 海藻酸钠后,挤出物结构变得松散(图 8C,c)。Zhang 等^[9]发现将 0.1% 的海藻酸钠与花生蛋白混合后挤压可促进蛋白质的交联效果并促进纤维结构的形成。加入 0.3% 复合磷酸盐后,组织化豌豆蛋白挤出物表面空隙增加,气腔数量增加,结构致密并呈现出一定的纤维走向(图 8D,d)。扫描电镜观察更有利于理解添加剂的加入在挤压过程中对组织化豌豆蛋白的影响。



注:放大倍数分别为300 \times ,500 \times 。

图8 (A,a)豌豆蛋白原料、(B,b)组织化豌豆蛋白、(C,c)0.3%海藻酸钠添加量、(D,d)0.3%复合磷酸盐添加量挤出物的扫描电镜图

Fig.8 Scanning electron micrograph of (A, a) PPI, (B, b) EPI, (C, c) PPI+0.3% SA, (D, d) PPI+0.3% CP

3 结论

海藻酸钠及复合磷酸盐与豌豆蛋白混合后经高湿挤压,通过考察豌豆蛋白挤出物的复水性、持油性、NSI、质构特性等指标,探究添加剂对组织化豌豆蛋白品质的影响。结果表明海藻酸钠可显著提高复水率,而复合磷酸盐表现出相反的趋势。蛋白质在挤压机筒内变性,SA和CP加入后蛋白质在挤压机筒内变性程度增加,分子链展开疏水基团暴露,具体表现为持油性及NSI增加。海藻酸钠与蛋白发生络合反应促进蛋白质结构紧密,在0.4%添加量时硬度(8 037 g)及咀嚼性(4 199)达到最大值,并0.3%添加量时获得得较好的纤维结构及感官评分。复合磷酸盐通过促进蛋白质分子的交联而增强蛋白的纤维取向,在0.3%添加量时组织化度达到1.806,质构特性也得到改善,因此得到7.65的感官总分。扫描电镜可观察到海藻酸钠(0.3%)加入后豌豆蛋白挤出结构变得松散,复合磷酸盐(0.3%)加入后豌豆蛋白结构致密并呈现

较好的纤维结构。本研究表明,海藻酸钠及复合磷酸盐可改善豌豆蛋白模拟肉制品的组织化度及纤维结构进而提高产品品质,以期为豌豆蛋白高湿挤压技术的研究内容提供参考。

参 考 文 献

- [1] DEKKERS B L, BOOM R M, VAN DER GOOT A J. Structuring processes for meat analogues[J]. Trends in Food Science and Technology, 2018, 81: 25-36.
- [2] 寻崇荣, 薛洪飞, 刘宝华, 等. 高湿挤压技术制备持香型仿肉制品工艺[J]. 食品科学, 2019, 40(4): 292-298.
XUN C R, XUE H F, LIU B H, et al. Processing of flavored meat analogues by high-moisture extrusion[J]. Food science, 2019, 40(4): 292-298.
- [3] 刘业学, 王稳航. 从肌肉的组织结构和生成机制探讨“人造肉”开发的仿生技术[J]. 中国食品学报, 2020, 20(8): 295-307.
LIU Y X, WANG W H. Bionic technology for the development of ‘artificial meat’ from the tissue structure and production mechanism of muscle[J]. Chinese Journal of Food, 2020, 20(8): 295-307.
- [4] 朱星桐, 吕新河, 焦锐. 植物肉行业发展现状与挑战[J]. 中国食品工业, 2022(17): 50-53.
ZHU X T, LÜ X H, JIAO R. Current situation and challenges in the development of the plant meat industry[J]. Chinses Food Industry, 2022(17): 50-53.
- [5] 夏轩泽, 李言, 钱海峰, 等. 改性处理对豌豆蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(5): 32-38.
XIA X Z, LI Y, QIAN H F, et al. Effects of modification treatments on structural characteristics and functional properties of pea protein[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 39(5): 32-38.
- [6] 仪登霞, 庞永珍. 世界豌豆蛋白生产现状与发展对策[J]. 中国种业, 2022(11): 14-16.
YI D X, PANG Y Z. Current status of world pea protein production and development countermeasures [J]. Chinese Seed Industry, 2022(11): 14-16.
- [7] OSEN R, TOELSTED S, WILD F, et al. High moisture extrusion cooking of pea protein isolates: Raw material characteristics, extruder responses, and texture properties[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 127: 67-74.

- [8] SCHREUDERS F K G, DEKKERS B L, BODNÁR I, et al. Comparing structuring potential of pea and soy protein with gluten for meat analogue preparation[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 32–39.
- [9] ZHANG J C, LIU L, JIANG Y R, et al. High-moisture extrusion of peanut protein-/carrageenan/sodium alginate/ wheat starch mixtures: Effect of different exogenous polysaccharides on the process forming a fibrous structure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 99: 105311.
- [10] 窦薇, 张鑫, 赵煜, 等. 海藻酸钠添加对大豆浓缩蛋白植物肉特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(12): 147–152.
- DOU W, ZHANG X, ZHAO Y, et al. Effect of sodium alginate addition on the extrusion characteristics of soy protein concentrate[J]. *Food Science*, 2022, 43(12): 147–152.
- [11] 彭晶. 小麦蛋白组织化改性及口腔加工特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
- PENG J. Study on the histochemical modification and oral processing properties of wheat protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022.
- [12] PENG H H, ZHANG J, WANG S H, et al. High moisture extrusion of pea protein: Effect of L-cysteine on product properties and the process forming a fibrous structure[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107633.
- [13] ONWULATA C I, PHILLIPS J G, TUNICK M H, et al. Texturized dairy proteins[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(2): E100–E109.
- [14] MAZAHARI TEHRANI M, EHTIATI A, SHARIFI AZGHANDI S. Application of genetic algorithm to optimize extrusion condition for soy-based meat analogue texturization[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2017, 54(5): 1119–1125.
- [15] SAMARD S, RYU G H. A comparison of physico-chemical characteristics, texture, and structure of meat analogue and meats[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(6): 2708–2715.
- [16] 耿永然, 李文军, 王奕云, 等. 复合蛋白原料组成对挤压组织化产品特性的影响[J]. *天津科技大学学报*, 2016, 31(1): 17–21.
- GENG Y R, LI W J, WANG Y Y. Influence of composite protein raw material composition on the characteristics of extruded organised products [J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2016, 31(1): 17–21.
- [17] 李婷, 朱科学, 郭晓娜. 加水量对小麦拉丝蛋白品质的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(4): 18–22.
- LI T, ZHU K X, GUO X N. Effect of water addition on the quality of wheat pulling protein[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(4): 18–22.
- [18] PALANISAMY M, TÖPFL S, AGANOVIC K, et al. Influence of iota carrageenan addition on the properties of soya protein meat analogues[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 546–552.
- [19] 彭慧慧, 王思花, 张静, 等. 添加剂对豌豆蛋白高水分组织化挤出物品质的影响及复配配方优化[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(8): 188–195.
- PENG H H, WANG S H, ZHANG J, et al. Effects and compound formula optimization of additives on the quality of pea protein high-moisture textured extrudates[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(8): 188–195.
- [20] YAO J, ZHOU Y, CHEN X, et al. Effect of sodium alginate with three molecular weight forms on the water holding capacity of chicken breast myosin gel[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239(15): 1134–1142.
- [21] 刘晓庆, 刘松继, 陈江平, 等. 不同改良剂对豌豆淀粉凝胶化及凝胶特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(1): 143–148.
- LIU X Q, LIU S J, CHEN J P, et al. Effect of different modifiers on gelation and gel characteristics of pea starch[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2020, 35(1): 143–148.
- [22] SALDANHA DO CARMO C, KNUTSEN S H, MALIZIA G, et al. Meat analogues from a faba bean concentrate can be generated by high moisture extrusion[J]. *Future Foods*, 2021, 3: 100014.
- [23] TEHRANI M M, EHTIATI A, AZGHANDI S S. Application of genetic algorithm to optimize extrusion condition for soy-based meat analogue texturization [J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2017, 54(5): 1–7.
- [24] CARMO C, KNUTSEN S H, MALIZIA G, et al. Meat analogues from a faba bean concentrate can be generated by high moisture extrusion[J]. *Future Foods*, 2021, 3: 100014.
- [25] 康立宁. 大豆蛋白高水分挤压组织化技术和机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- KANG L N. Texturization technology and mechanism

- of soy protein by high-moisture extrusion[D]. Yan-ling: Northwest A & F University, 2007.
- [26] CHIANG J H, LOVEDAY S M, HARDACRE A K, et al. Effects of soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical properties of extruded meat analogues[J]. *Food Structure*, 2019, 19: 100102.
- [27] HE J, EVANS N M, LIU H, et al. A review of research on plant-based meat alternatives: Driving forces, history, manufacturing, and consumer attitudes[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(5): 2639–2656.
- [28] KYRIAKOPOULOU K, DEKKERS B, GOOT A. Plant-Based Meat Analogues[J]. *Sustainable Meat Production and Processing*, 2019, 103–126.
- [29] SHA L, XIONG Y L. Plant protein-based alternatives of reconstructed meat: Science, technology, and challenges [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 102: 51–61.
- [30] 王强, 张金闯. 高水分挤压技术的研究现状、机遇及挑战[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(7): 1–9.
- WANG Q, ZHANG J C. Research status, opportunities and challenges of high moisture extrusion technology[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(7): 1–9.

Effect of Sodium Alginate/Compound Phosphate on the Quality of Extruded Pea Protein

Yu Xiaowei¹, Peng Huihui², Yue Minghui¹, Zhang Shanshan¹, Wang Sihua¹,
Zhang Jing¹, Wang Xin³, Ma Chengye^{*}

¹*School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong*

²*Hangzhou Shance Food Technology Co., Ltd., Hangzhou 310018*

³*Shandong Jianyuan Bioengineering Co., Ltd., Yantai 265400, Shandong*

Abstract In this paper, pea protein (PPI) with sodium alginate (SA) and phosphate complex (CP) was used as raw material to improve the quality of pea protein simulated meat products. The quality of the organised pea protein was evaluated by examining the rehydration, oil retention, nitrogen solubility index, textural properties, colour difference, sensory and microstructure of the organised product. The results showed that the addition of 0.1% SA increased the rehydration of the organised product by 44.15%, and the extrudates with 0.3% SA achieved the maximum NSI (5.10), degree of organisation (1.793) and sensory score (7.85). The denaturation of the protein in the extruder barrel and the exposure of the hydrophobic groups while the molecular chains unfolded enhanced the interaction between the protein and the oil causing a 19.39% increase in the oil-holding properties. The addition of 0.3% CP resulted in a maximum of 1.806 organisational degree of the protein product, which was observed by scanning electron microscopy to have a more pronounced fibrous structure. Thus, appropriate levels of sodium alginate (0.3%) and phosphate complex (0.3%) improved the quality characteristics of the organised pea protein product.

Keywords pea protein; sodium alginate; complex phosphate; high-moisture extrusion; organization