



不同复合凝固剂全豆腐营养品质分析

岳文婷¹, 卢丽霞¹, 杨文钰², 张清¹

(1. 四川农业大学 食品学院, 四川 雅安 625014; 2. 四川省作物带状复合种植工程技术研究中心, 四川 雅安 611130)

摘要:为探究不同复合凝固剂条件下,全豆腐中主要营养品质差异及感官差异,本研究采用干法制浆工艺制作全豆腐,选取硫酸钙(CaSO_4)、氯化镁(MgCl_2)和葡萄糖酸- δ -内酯(GDL)分别与谷氨酰胺转氨酶(TG酶)配成复合凝固剂,以凝胶强度为评价指标,考察不同复合凝固剂对全豆腐营养品质的影响。结果表明:3种复合凝固剂的最佳配比分别为0.5% CaSO_4 + 0.3% TG酶、0.4% MgCl_2 + 0.3% TG酶和0.4% GDL + 0.1% TG酶。 CaSO_4 + TG酶全豆腐的必需氨基酸含量为18.475%,总纤维含量为16.535%,感官评分为75.3,均为最高;脂肪含量最低,为9.337%;水分与蛋白质含量、脂肪酸组成差异不显著。综合来看,不同复合凝固剂对全豆腐的营养品质与感官评分有一定影响,且 CaSO_4 + TG酶全豆腐的营养品质和感官评分高于另外两类复合凝固剂制备的全豆腐。

关键词:全豆腐;复合凝固剂;凝胶强度;营养品质

Analysis of Different Compound Coagulants on the Nutritional Quality of Whole Soybean Tofu

YUE Wen-ting¹, LU Li-xia¹, YANG Wen-yu², ZHANG Qing¹

(1. College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China; 2. Sichuan Engineering Research Center for Crop Strip Intercropping System, Chengdu 611130, China)

Abstract: In order to explore the differences in the main nutritional quality and sensory grades in whole soybean tofu under different compound coagulants, dry-pulping technology was used to make whole soybean curd (WSC). Calcium sulfate (CaSO_4), magnesium chloride (MgCl_2) and gluconic-delta-lactone (GDL) were respectively selected to prepare for compound coagulants with transglutaminase (TG), and the effect of different compound coagulants on nutritional quality of WSC was investigated with gel strength as evaluation index. Results showed that the optimal ratio of the three compound coagulants was 0.5% CaSO_4 + 0.3% TG, 0.4% MgCl_2 + 0.3% TG and 0.4% GDL + 0.1% TG respectively. The essential amino acid content of CaSO_4 + TG-WSC was 18.475%, total fiber content was 16.535% and sensory score was 75.3, which were the highest. Fat content was the lowest as 9.337%. There were no significant differences in water content, protein content and fatty acid composition. To sum up, different compound coagulants had certain effects on the nutritional quality and sensory grades of WSC, and the nutritional quality and sensory grades of CaSO_4 + TG-WSC was higher than those of the other two types of compound coagulants.

Keywords: Whole soybean tofu; Compound coagulant; Gel strength; Nutritional quality

豆腐是大豆蛋白在凝固剂作用下相互结合形成具有三维网状结构的凝胶产品,是我国消费量最大的传统大豆食品。豆腐富含优质蛋白质、矿物质和维生素,还含有异黄酮、苷元、磷脂、多肽等生物活性物质,是高蛋白、低脂肪、低热量、零胆固醇的理想绿色食品。

全豆腐是以整粒大豆为原料,加工中无任何废料产生的营养型豆腐^[1]。开发全豆腐可以解决我国传统豆制品加工中豆渣排放量多、利用率低的问题,利于企业清洁化生产,并保留随豆渣排放而损失的大豆异黄酮、膳食纤维等成分,提高豆腐的营养价值和经济效益^[2]。由于豆浆中含有大量的不溶性纤维和豆渣多糖,全豆腐的蛋白有序网

络结构的形成受阻^[3]。

当豆浆中大豆蛋白浓度低于10%时,只有加入凝固剂,大豆蛋白才能结合到一起,形成凝胶网络结构,使豆浆固化^[5]。凝固剂种类丰富,一般包括盐类、酸类和酶类凝固剂,实际生产中常用氯化镁(MgCl_2)、硫酸钙(CaSO_4)和葡萄糖酸- δ -内酯(GDL)以及TG酶。TG酶是一种可催化转酰胺基反应的酶,可以使得蛋白质发生共价交联,应用较为广泛。所以利用复合凝固剂促进蛋白凝胶体的形成并提高凝胶强度是全豆腐加工技术的关键。为改善豆腐品质,适应现代化生产,复合凝固剂的研究与应用成为热点。复合凝固剂是人为地用两种或两种以上的成分加工成的凝固剂^[6]。李玉娥

等^[7]研究发现当 GDL 与卤片的比例为 0.20% : 0.15% , 同时在添加 0.6 mL NaCl (0.1 mol · L⁻¹) 及 3 mL 淀粉的条件下, 可以得到细腻光滑、保水性好、凝胶强度大的豆腐。王岩东等^[8]研究确定 GDL、石膏与氯化镁用量比例为 5:3:2 时, 豆腐的品质得到改善; 陈杰等^[9]研究发现使用 0.07% MgCl₂、0.5% GDL 和 0.02% TG 酶可制得凝胶强度大和微观结构致密均匀的全豆腐。凝固剂的种类及添加量对豆腐的微观结构和品质特征有很大影响^[4]。

目前, 关于利用复合凝固剂制做全豆腐的研究主要集中在凝胶形成原理及制作工艺方面, 对全豆腐的营养品质研究较少。本试验以南豆 12 为原材料, 制作全豆腐, 探究以 TG 酶为助凝剂, 按照不同比例分别复配 CaSO₄、MgCl₂ 和 GDL 的全豆腐主要营养成分以及感官评分的差异, 为全豆腐凝固剂的选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

南豆 12, 套作品种, 由四川省作物带状复合种植工程研究中心提供。CaSO₄、MgCl₂、GDL、TG 酶 (100 U · g⁻¹)、豆浆消泡剂均为食品级; 茚三酮、硫酸、石油醚、苯酚、无水硫酸钠均为分析纯; 乙腈、二甲基亚砜 (DMSO) 均为色谱纯, 所用试剂均购于成都科龙化工。

12 种大豆异黄酮标准样品中, 6 个大豆异黄酮苷元及糖苷 (大豆苷元 DE、大豆苷 DG、黄豆黄素 GLE、黄豆黄苷 GLG、染料木素 GE 和染料木苷 GEG) 购自维科奇生物科技有限公司; 6 个酰基化大豆异黄酮糖苷 (乙酰大豆苷 AD、乙酰染料木苷 AG、乙酰黄豆黄苷 AGL、丙二酰大豆苷 MD、丙二酰染料木苷 MG、丙二酰黄豆黄苷 MGL) 为日本“Wako”系列试剂。

1.2 仪器与设备

摇摆式高速粉碎机, HK-20B, 广州市旭朗机械设备有限公司; 料理机, JYL-C16D, 九阳机械; 电子天平, JY-10002, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; 数显恒温水浴锅, XMTE-200, 邦西仪器科技有限公司; 冷冻干燥机, LGJ-18S, 宁波新艺超声设备有限公司; 高效液相色谱仪 - 二极管阵列检测器, Agilent1200, 美国安捷伦科技公司; 数控超声波清洗器, KQ-250DB, 广州市旭朗机械设备有限公司; 质构仪, TA-XT Plus, 英国 Stable micro system 公司; 全自动凯氏定氮仪, KDN-1, 上海仪电科学仪器有限公司; 粗脂肪测定仪, SZF-06A, 上海新嘉电子有限公司; 全自动氨基酸分析仪, L-8900, 日本日立公司; 气

质联用仪, 7890A-5975C, 美国安捷伦科技公司。

1.3 方法

1.3.1 全豆腐的制作 参照 Zhang 等^[10]的方法, 将 300 g 清理干燥后的大豆用粉碎机粉碎 1 min (转速 26 000 r · min⁻¹), 取豆粉以豆水比 1:6 加水后加入料理机中搅拌 2 min 得生豆浆。煮浆期间加入大豆干重 0.3% 的消泡剂并不停搅拌, 煮至 95 °C 保温 10 min 得熟豆浆。将熟豆浆用冰浴冷却至 10 °C, 往豆浆中加入以少量蒸馏水溶解好的复配凝固剂, 于 55 °C 恒温水浴锅中保温 1 h, 保温完毕后将水浴温度升高至 80 °C 灭酶 20 min。灭酶后的全豆腐于冷水中静置 30 min 后放入 4 °C 冷藏 24 h, 待测。

1.3.2 凝固剂的复配 考虑到全豆腐成型困难, 根据所选定单一凝固剂的添加量范围, 以 TG 酶作为助凝剂, 复配以下 3 种复合凝固剂即 CaSO₄ + TG 酶、MgCl₂ + TG 酶和 GDL + TG 酶。确定 4 种单一凝固剂的用量 (以豆浆质量计): CaSO₄ 为 0.3%、0.4%、0.5%; MgCl₂ 为 0.2%、0.4%、0.6%; GDL 为 0.2%、0.4%、0.6%; TG 酶为 0.1%、0.2%、0.3%。每类复合凝固剂都有 9 个单一凝固剂配比, 为简化表达, 下文分别以 C、M、G、T 代表 CaSO₄、MgCl₂、GDL、TG 酶, 分别以数字 1~9 代表质量浓度 0.1%~0.9%。

以凝胶强度为判断依据, 筛选出 3 种复合凝固剂各自最佳的凝固剂配比; 然后对 3 种复合凝固剂最佳配比条件下全豆腐的营养组成进行比较分析。

1.3.3 凝胶强度的测定 采用质构仪在 Return to Start 模式下测定凝胶强度。测定参数: 探头型号 P 0.5, 探头下降速度 5 mm · s⁻¹, 探头穿刺速度 1 mm · s⁻¹, 应变 30%, 返回速度 5 mm · s⁻¹。每个样品在不同的位置测定至少 5 次。

1.3.4 全豆腐品质分析 参照 GB 5009.3 - 2016^[11], 采用直接干燥法测定水分含量。参照 GB 5009.5 - 2016^[12], 采用凯氏定氮法测定粗蛋白质含量。参照 GB 5009.124 - 2016^[13], 采用氨基酸分析仪测定氨基酸组成。参照 GB 5009.6 - 2016^[14], 采用索氏抽提法测定粗脂肪含量。脂肪酸组成的测定参照 GB 5009.168 - 2016^[15], 采用索氏抽提法提取出的全豆腐中的脂肪, 经过碱化催化法进行脂肪酸的甲酯化^[16], 采用气相色谱质谱联用仪进行测定, 采用面积归一化法进行相对定量分析。参照 GB 5009.88 - 2014^[17], 采用酶重量法测定总纤维和可溶性膳食纤维。

参照 NY/T1740 - 2009^[18], 采用高效液相色谱法测定大豆异黄酮组成。具体测定条件参照 Kao

等^[25]的方法,并作一定修改。豆腐样品提取加入80% 甲醇后经超声提取、离心,上清液再加入甲醇定容至 10 mL,过 0.22 μm 有机相滤膜至进样瓶待测。

HPLC 色谱条件如下,色谱柱:RP-18,5 μm × 4.6 mm × 250 mm,YMC-Pack ODS-AQ;流动相 A:

0.1% 乙酸水溶液;B:乙腈,洗脱程序如表 1 所示。流速 0.3 mL·min⁻¹、检测波长 260 nm、进样量3 μL。通过测定不同浓度的标准品,绘制标准曲线,将测得的样品数值带入标准曲线中,求得样品中异黄酮含量。

表 1 大豆异黄酮的高效液相色谱洗脱程序表

Table 1 Elution program for the measurement of isoflavones by HPLC					
时间 Time/min	0.00	16.00	24.00	24.10	30.00
A/%	85.00	75.00	60.00	85.00	85.00
B/%	15.00	25.00	40.00	15.00	15.00
最大压力限值 Maximum pressure limit/Bar	500.00	400.00	400.00	400.00	400.00

1.3.5 感官评价 参照 Zhang 等^[10]的方法,制定如表 2 所示的全豆豆腐感官评定细则。感官评分表采用百分制,在光线良好的环境下由 10 人(男女各

5 人)组成的评定小组对全豆豆腐的各项感官指标进行评分,最终结果取其平均值。

表 2 全豆豆腐感官评定打分表

Table 2 Sensory evaluation table of whole-soy tofu			
指标 Index	分值 Score	描述 Describe	得分 Score
颜色 Color	15	颜色均一,呈白色、乳白色或微黄色,富有光泽	11 ~ 15
		颜色均一,呈黄色或灰色,有一定光泽	6 ~ 10
		颜色暗淡无光泽	0 ~ 5
风味 Flavor	15	具有浓郁豆香味,无豆腥味(生味)	11 ~ 15
		具有淡淡豆香味,有一定豆腥味	6 ~ 10
		无豆香味,豆腥味较浓	0 ~ 5
口感 Taste	30	具有豆腐固有滋味,无酸味和涩味;无或稍有细小颗粒感	21 ~ 30
		具有豆腐固有滋味,有一定的酸味和涩味;有较强的细小颗粒感	11 ~ 20
		不具有豆腐固有滋味,酸味和涩味较重;有较强的粗糙颗粒感	0 ~ 10
形态 Form	20	块形完整,不易碎;断面均匀一致(光滑),无孔隙	15 ~ 20
		块形完整,不易碎;断面较为均匀一致(光滑),有细小孔隙	8 ~ 14
		块形不完整,易碎;断面粗糙(不光滑),有大小和分布不均匀的孔隙	0 ~ 7
质地 Texture	20	质地坚实、细腻,有弹性和韧性	15 ~ 20
		质地坚实、不细腻,稍有弹性和韧性	8 ~ 14
		质地过于坚硬或过于松软,无弹性和韧性	0 ~ 7

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 处理数据,采用 SPSS Statistics 22 软件进行差异性分析($P < 0.05$),采用 Origin 8.0 作图。

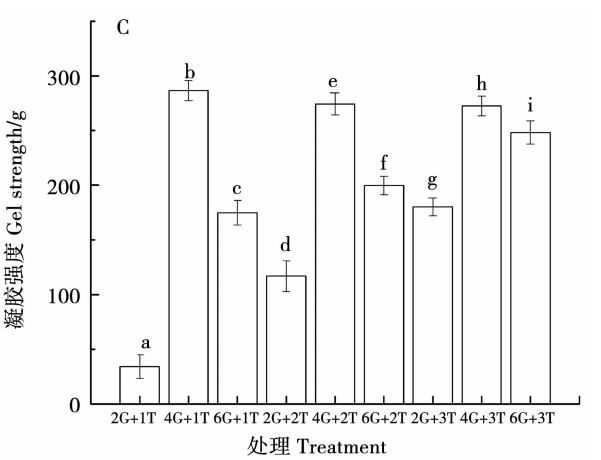
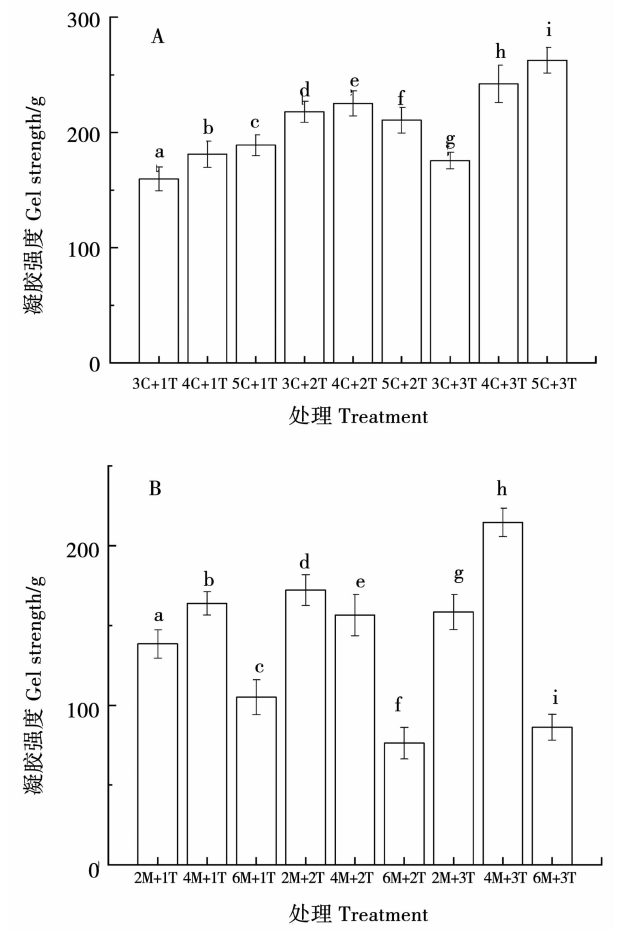
2 结果与分析

2.1 全豆豆腐复合凝固剂最优配比的筛选

由图 1(A)可知,所用凝固剂为 CaSO₄ + TG 酶时,5C + 3T 的全豆豆腐的凝胶强度最大。因为随着盐浓度的不断增加,蛋白质分子间的斥力降低,引

力增加,相互结合的速度加快,形成的网络变得粗厚,但网孔变得稀疏,使得凝胶强度最大。由 1(B)可知所用凝固剂为 MgCl₂ + TG 酶时,豆腐的凝胶强度呈波浪式增长,4M + 3T 的全豆豆腐的凝胶强度最大,可能的原因是,当凝固剂浓度过高时,打破了蛋白质分子间的斥力和引力平衡,由于豆腐的 pH 进一步降低,分子的净电斥力相当小,疏水作用、氢键等引力占明显优势。由图 1(C)可知,所用凝固剂为 GDL + TG 酶时,4G + 1T 的全豆豆腐的凝胶强度最大,可能的原因是 GDL 为酸性凝固剂,产生了

H⁺,导致pH下降,下降到接近蛋白质等电点,导致蛋白质表层电量下降,破坏了胶体的稳定性,形成了凝胶强度较强的凝胶蛋白。豆腐质地是判断豆腐品质好坏的一个重要影响因素,对豆腐的可接受性起着决定性作用^[19]。故最终确定3种复合凝固剂的配方分别为:5C+3T、4M+3T、4G+1T。



A:CaSO₄+TG 酶豆腐;B:MgCl₂+TG 酶豆腐;C:GDL+TG 酶豆腐。

A : Tofu with CaSO₄+TG;B:MgCl₂+TG tofu;C:GDL+TG tofu.

图中不同小写字母表示 P<0.05 水平差异显著。
Different lowercase indicate significant differences at P≤0.05 level.

图1 不同复合凝固剂制备豆腐的凝胶强度
Fig.1 The gel strength of tofu with different compound coagulants

2.2 全豆腐品质分析

2.2.1 水分、粗蛋白质和粗脂肪含量分析 由表3可知,3种凝固剂配方制备的全豆腐的水分、蛋白质含量均无显著性差异,水分含量约为85%,蛋白质含量约为5.7%,与李加双^[20]、刘昱彤^[21]的研究结果一致。而脂肪含量存在显著性差异(P<0.05),豆腐的脂肪含量由高到低依次为:GDL豆腐>MgCl₂豆腐>CaSO₄豆腐。

表3 不同复配凝固剂全豆腐的水分、蛋白质和脂肪含量
Table 3 Moisture,protein and fat contents of whole-soy tofu with different compound coagulant (%)

成份 Content	C + T	M + T	G + T
水分 Moisture	84.50 ± 0.675 a	84.48 ± 0.294 a	85.34 ± 0.450 a
粗蛋白质 Crude protein	5.680 ± 0.111 a	5.780 ± 0.192 a	5.806 ± 0.098 a
粗脂肪 Crude fat	9.337 ± 0.132 c	15.40 ± 2.274 b	22.22 ± 2.318 a

同行不同小写字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Different lowercases of the same row indicate significant differences between the two tofu samples (P<0.05). The same below.

2.2.2 氨基酸组成分析 由表4可知,3种全豆腐的氨基酸种类一致,包含17种常见氨基酸。豆腐的必需氨基酸含量由高到低依次为:CaSO₄豆腐>MgCl₂豆腐>GDL豆腐,三者的氨基酸总量差异显著(P<0.05),CaSO₄豆腐氨基酸总量最高,GDL豆腐则最低,前者是后者的1.06倍。

2.2.3 脂肪酸组成分析 由表5可知,不同凝固剂制作的豆腐,其脂肪酸组分的含量也有一定差异,3组全豆腐的脂肪酸差异不显著。而南豆12的硬脂酸与油酸的含量显著低于另外3种豆腐,软脂酸与亚油酸含量与另外3种豆腐差异不显著。

表 4 不同全豆腐中主要氨基酸含量

Table 4 Main amino acid of tofu with different compound angulants

(mg·g⁻¹)

氨基酸 Amino acids		C + T	M + T	G + T
天冬氨酸	Asp	6. 651 ±0. 024 a	6. 141 ±0. 148 b	6. 112 ±0. 057 b
苏氨酸	Thr	2. 238 ±0. 124 a	1. 813 ±0. 036 c	2. 016 ±0. 054 b
丝氨酸	Ser	3. 018 ±0. 020 a	2. 968 ±0. 054 a	2. 821 ±0. 056 b
谷氨酸	Glu	9. 995 ±0. 102 a	8. 703 ±0. 305 c	9. 225 ±0. 030 b
甘氨酸	Gly	2. 136 ±0. 042 b	2. 248 ±0. 016 a	2. 188 ±0. 019 b
丙氨酸	Ala	2. 907 ±0. 064 a	2. 755 ±0. 051 b	2. 301 ±0. 012 c
半胱氨酸	Cys	0. 875 ±0. 009 b	0. 965 ±0. 009 a	0. 880 ±0. 002 b
缬氨酸	Val	2. 677 ±0. 059 a	2. 463 ±0. 109 b	2. 057 ±0. 023 c
甲硫氨酸	Met	0. 434 ±0. 019 a	0. 357 ±0. 007 b	0. 326 ±0. 015 c
异亮氨酸	ILe	2. 472 ±0. 073 b	2. 821 ±0. 084 a	2. 598 ±0. 062 b
亮氨酸	Leu	4. 347 ±0. 060 a	4. 159 ±0. 017 b	4. 177 ±0. 068 b
酪氨酸	Tyr	1. 976 ±0. 048 b	2. 534 ±0. 139 a	2. 538 ±0. 017 a
苯丙氨酸	Phe	2. 940 ±0. 123 a	3. 158 ±0. 209 a	3. 090 ±0. 028 a
赖氨酸	Lys	3. 365 ±0. 014 b	3. 522 ±0. 054 a	3. 444 ±0. 073 ab
组氨酸	His	1. 668 ±0. 025 a	1. 636 ±0. 037 a	1. 295 ±0. 020 b
精氨酸	Arg	4. 413 ±0. 068 b	4. 876 ±0. 083 a	4. 301 ±0. 010 b
脯氨酸	Pro	2. 886 ±0. 016 a	2. 348 ±0. 020 c	2. 561 ±0. 039 b
必需氨基酸	EAA	18. 475 ±0. 101 a	18. 294 ±0. 326 a	17. 708 ±0. 135 b
氨基酸总量	TAA	54. 998 ±0. 089 a	53. 468 ±0. 740 b	51. 928 ±0. 118 c

表 5 南豆 12 及全豆腐脂肪酸主要组成分析

Table 5 The analysis of fatty acids in soybean and whole-soy tofu

(%)

成份 Content	南豆 12 Nandou 12	C + T	M + T	G + T
软脂酸 Palmitic acid	12. 09 ±0. 437 b	12. 83 ±0. 297 a	12. 72 ±0. 200 ab	12. 70 ±0. 589 ab
硬脂酸 Stearic acid	2. 875 ±0. 348 b	3. 183 ±0. 100 a	3. 313 ±0. 137 a	3. 237 ±0. 802 a
油酸 Oleic acid	32. 40 ±0. 357 c	36. 31 ±0. 413 ab	35. 40 ±0. 788 b	36. 82 ±0. 760 a
亚油酸 Linoleic acid	46. 43 ±0. 944 a	46. 30 ±0. 171 a	46. 32 ±0. 205 a	45. 91 ±1. 268 a

2.2.4 总纤维和可溶性膳食纤维含量分析 由表 6 可知 CaSO₄ 豆腐的总纤维含量为 16.535%,可溶性膳食纤维含量为 4.078%,不溶性纤维含量为 12.458%,均最高,与 MgCl₂ 豆腐、GDL 豆腐的纤维含量存在显著性差异($P<0.05$)。而传统滤渣豆腐的总纤维含量约为 7%,远低于全豆豆腐,主要是因为全豆豆腐保留了豆渣,而豆渣中纤维含量高达 60%~70%,说明全都豆腐对居民的膳食结构更有益。

表 6 豆腐中总纤维和可溶性膳食纤维含量分析

Table 6 Total fiber and soluble dietary fiber of tofu with different compound coagulants

(%)

指标 Index	C + T	M + T	G + T
TDF	16. 535 ±0. 141 a	16. 099 ±0. 030 b	16. 048 ±0. 076 b
SDF	4. 078 ±0. 042 a	3. 997 ±0. 014 b	3. 857 ±0. 045 c
IDF	12. 458 ±0. 099 a	12. 102 ±0. 041 b	12. 191 ±0. 118 b

2.2.5 异黄酮含量分析 由表 7 可知大豆中的异黄酮含量为 $24.691\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 远高于豆腐中的异黄酮含量,这是因为异黄酮主要在凝固过程中损失。豆腐的总异黄酮含量由高到低依次为: CaSO_4 豆腐

14.702 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 MgCl_2 豆腐 14.305 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、GDL 豆腐 14.260 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 且三者存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

表 7 大豆及豆腐中异黄酮含量变化

Table 7 Isoflavone content in soybean and tofu with different compound coagulants ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)

大豆异黄酮 Soy isoflavones	南豆 12 Nandou 12	C + T	M + T	G + T
DG	8.343 ± 0.041 a	4.748 ± 0.003 b	4.735 ± 0.005 b	4.737 ± 0.016 b
GLG	—	—	—	—
GEG	0.394 ± 0.007	—	—	—
MD	8.078 ± 0.006 a	2.795 ± 0.057 b	2.427 ± 0.006 b	2.419 ± 0.004 b
MGL	0.388 ± 0.002 a	0.201 ± 0.002 b	0.194 ± 0.003 c	0.192 ± 0.003 c
AD	—	—	—	—
MG	—	—	—	—
AGL	0.910 ± 0.003 a	0.052 ± 0.017 b	0.048 ± 0.015 c	0.045 ± 0.015 c
DE	6.549 ± 0.002 c	6.906 ± 0.007 a	6.901 ± 0.014 a	6.867 ± 0.004 b
GLE	—	—	—	—
AG	—	—	—	—
GE	0.029 ± 0.002	—	—	—
总异黄酮含量 Total isoflavone content	24.691 ± 0.008 a	14.702 ± 0.013 b	14.305 ± 0.183 c	14.260 ± 0.204 c

2.3 不同凝固剂制得豆腐感官评价分析

由图 2 可知,3 种豆腐在风味上无显著性差异,而在颜色、口感、形态、质地 4 方面均存在显著性差异。3 种豆腐的感官总分从高到低依次为 CaSO_4 豆腐 75.3, GDL 豆腐 67.6, MgCl_2 豆腐 61.6。 CaSO_4 豆腐在口感、形态、质地 3 方面评分均最高,而 MgCl_2 豆腐得分最低。

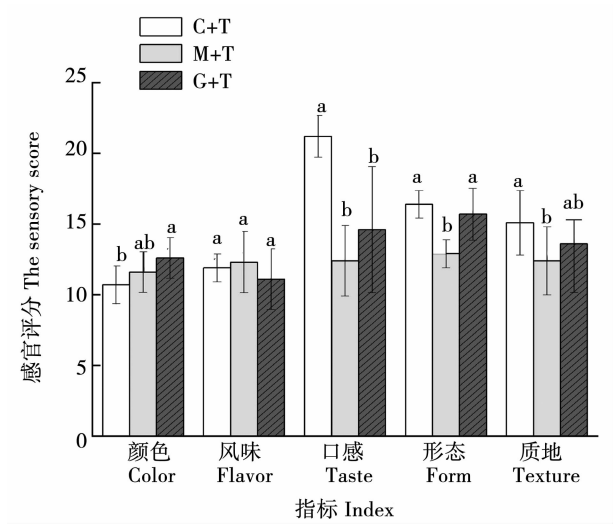


图 2 不同豆腐的感官得分

Fig. 2 Sensory grades of different tofu

3 讨论

凝胶强度的研究结果表明,当 TG 酶作为促凝剂添加量不变时,豆腐的凝胶强度随凝固剂添加量的增加先增大后减小,这一结果与 Murekatete 等^[22]的研究结论相一致。另外, MgCl_2 浓度大于 0.4% 时,豆腐的凝胶强度急剧下降,这是由于 MgCl_2 浓度过大,凝胶网络形成速度过快导致凝胶网络不致密、强度弱化甚至坍塌^[20]。氨基酸是体内合成蛋白质的基本单元,而 8 种必须氨基酸是人体不能自身合成,必须从食物中获得,由 CaSO_4 与 TG 酶复配形成的全豆腐必需氨基酸含量达到了最高,对人体最佳。谷氨酸在生物体内的蛋白质代谢过程中占重要地位,参与动物、植物和微生物中的许多重要化学反应,而 3 种添加了复合凝固剂的全豆腐中,均以谷氨酸含量最高,且远高于其它氨基酸。3 种豆腐中,半胱氨酸、甲硫氨酸的含量较低,可阻止尿钙损失,降低人体肾脏的工作负荷^[23]。脂肪酸构成和配比的差异会直接影响大豆油脂的营养价值和人体的吸收利用。大豆及豆腐中脂肪酸组分主要有软脂酸 (C16:0)、硬脂酸 (C18:0)、油酸 (C18:1) 和亚油酸 (C18:2), 含量由高到低依次为亚油酸、油

酸、软脂酸和硬脂酸^[24]。此外,还有少量的豆蔻酸(C14:0)、花生酸(C20:0)以及微量的棕榈油酸(C16:1)、月桂酸(C12:0)和二十二碳酸(C22:0)等脂肪酸成分^[25]。与钱宗耀等^[26]、周宇锋^[27]的研究结果相比,本研究未检测到亚麻酸,可能是由于亚麻酸具有高度不饱和键,极易氧化变质,而试验所用南豆12存放时间过长,致使亚麻酸全部氧化变质。

CaSO₄处理的感官评分最高,可能是因为CaSO₄凝固豆浆时凝固速度较慢,在水中溶解度较低,可与豆浆缓慢反应,因此可形成持水性较高的凝胶结构,制成的豆腐组织光滑细嫩,风味鲜美,保水性好。MgCl₂处理感官评分最低,可能是因为MgCl₂凝固豆浆时反应速度快且剧烈,形成的网络组织较粗糙,网络间空隙大^[28],且MgCl₂属苦味盐类,添加过量会使豆腐产生苦涩味,缺乏大豆香味,影响其口感。

4 结 论

本研究中添加0.5% CaSO₄ + 0.3% TG酶制成CaSO₄豆腐;0.4% MgCl₂ + 0.3% TG酶制成MgCl₂豆腐;0.4% GDL + 0.1% TG酶制成GDL豆腐。3种全豆腐中,CaSO₄豆腐的感官评分为75.3,必需氨基酸含量为18.475%,总纤维含量为16.535%,高于MgCl₂豆腐和GDL豆腐;脂肪含量最低,为9.337%,水分含量约为85%,蛋白质含量约为5.7%,脂肪酸组成一致,差异不显著($P < 0.05$)。综合来看,不同复合凝固剂对全豆腐的营养品质有一定影响,CaSO₄豆腐的营养品质高于MgCl₂豆腐和GDL豆腐。本研究为复合凝固剂在全豆腐加工中的应用提供了一定理论支持。

参考文献

[1] 刘显彤, 钱和. 不同加工条件对全豆腐凝胶强度的影响[J]. 食品工业科技, 2013, 34(5): 126-129. (Liu Y T, Qian H. Effect of different processing conditions on gel strength of whole soybean curd [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(5): 126-129.)

[2] Zhang Q, Wang C Z, Li B K, et al. Research progress in tofu processing: From raw materials to processing conditions[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(9): 1448-1467.

[3] 芦鑫, 程永强, 李里特. 全子叶豆腐凝胶性质研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 128-133. (Lu X, Cheng Y Q, Li L T. Gelatin properties of okara-containing tofu[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2010, 41(9):

128-133.)

[4] 张红梅, 顾和平, 陈华涛. 国内外豆腐加工主要研究进展[J]. 江苏农业科学, 2010, 26(5): 409-410. (Zhang H M, Gu H P, Chen H T. Research progress of tofu processing at home and abroad [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2010, 26(5): 409-410.)

[5] Liu Z S, Chang S C. Effect of soy milk characteristics and cooking conditions on coagulant requirements for making filled tofu[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(11): 3405-3411.

[6] 李雨露, 刘丽萍, 毕海燕. 豆腐凝固剂的研究现状及发展前景[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(36): 7-8. (Li Y L, Liu L P, Bi H Y. The research and development status of tofu coagulant [J]. Food and Fermentation Technology, 2015, 51(36): 7-8.)

[7] 李玉娥, 王愈, 陈振家. 复合凝固剂条件对豆腐凝胶品质的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(8): 277-284. (Li Y E, Wang Y, Chen Z J. Effect of composite coagulant on quality of tofu gel [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(8): 277-284.)

[8] 王岩东, 徐晓旭, 叶素萍. 复合凝固剂对豆腐品质的影响[J]. 粮油加工, 2010(11): 133-135. (Wang Y D, Xu X X, Ye S P. Influences of compound coagulants on quality of tofu [J]. Cereals and Oils Processing, 2010(11): 133-135.)

[9] 陈杰, 谭琳, 彭钰琪, 等. 响应面法优化全豆腐凝固剂配方的研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(5): 16-23. (Chen J, Tan L, Peng Y Q, et al. Optimization of coagulant formulation for whole soybean curd based on response surface methodology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(5): 16-23.)

[10] Zhang Q, Zhou S Y, Chen J, et al. Fabrication of whole soybean curd using three soymilk preparation techniques[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 104: 91-99.

[11] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009. 3 — 2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2. (National Health and Family Planning Commission of PRC. Determination of moisture in foods: GB 5009. 3 — 2016 [S]. Beijing: China Standard Press, 2016: 1-2.)

[12] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中蛋白质的测定: GB 5009. 5 — 2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3. (National Health and Family Planning Commission of PRC. Determination of protein in foods: GB 5009. 5 — 2016 [S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 1-3.)

[13] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中氨基酸的测定: GB 5009. 124 — 2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-6. (National Health and Family Planning Commission of PRC. Determination of amino acids in foods: GB 5009. 124 — 2016 [S]. Beijing: China Standard Press, 2016: 1-6.)

[14] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中脂肪的测定: GB 5009. 6 — 2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2. (National Health and Family Planning Commission of PRC. Determination of fat in foods: GB 5009. 6 — 2016 [S]. Beijing: China Standard Press, 2016: 1-2.)

[15] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中脂肪酸的测定: GB

5009. 168 — 2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016; 1-6. (National Health and Family Planning Commission of PRC. Determination of fatty acids in foods; GB 5009. 168 — 2016[S]. Beijing: China Standard Press, 2016; 1-6.)

[16] 刘帅, 王爱武, 李美艳, 等. 脂肪酸甲酯化方法的研究进展[J]. 中国药房, 2014, 25(37): 3535-3537. (Liu S, Wang A W, Li M Y, et al. Research progress on methods of fatty acid methyl ester[J]. China Pharmacy, 2014, 25(37): 3535-3537.)

[17] 国家卫生和计划生育委员会. 食品中膳食纤维的测定: GB 5009. 88—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014; 1-5. (National Health and Family Planning Commission of PRC. Determination of dietary fiber in foods; GB 5009. 88—2014[S]. Beijing: China Standard Press, 2016; 1-5.)

[18] 中华人民共和国农业部. 大豆中异黄酮含量的测定高效液相色谱法: NY/T 1740-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 1-3. (The Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Determination of isoflavones in soybean by HPLC: NY/T 1740-2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009; 1-3.)

[19] 王红燕. 豆腐凝固剂及保鲜研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014; 34-35. (Wang H Y. Research on tofu of coagulant and preservation[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2014; 34-35.)

[20] 李加双. 全豆腐与传统豆腐的品质差异性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(7): 3-4. (Li J S. Study on the quality differences of whole soybean curd and traditional[J]. Food Science and Technology, 2018, 43(7): 3-4.)

[21] 刘昱彤. 全豆腐加工工艺及质构的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013; 32-33. (Liu Y T. Study on processing technology and textural characteristics of tofu prepared from whole soybeans[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013; 32-33.)

[22] Murekatete N, Zhang C M, Karangwa E, et al. Salt and acid-induced soft tofu-type gels: Rheology, structure and fractal analysis of viscoelastic properties as a function of coagulant concentration [J]. International Journal of Food Engineering, 2014, 10(4): 56-61.

[23] 高晓延. 大豆与豆腐品质的相关性研究及豆腐酸性凝固剂的开发[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013; 10-11. (Gao X Y. Relevant research between soybean and tofu quality and exploitation of acid coagulant for tofu[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013; 10-11.)

[24] Penalvo J L, Castilho M C, Silverira M I N, et al. Fatty acid profile of traditional soymilk [J]. European Food research Technology, 2004, 219: 251-253.

[25] 范胜栩, 李斌, 孙君明, 等. 气相色谱方法定量检测大豆 5 种脂肪酸[J]. 中国油料作物学报, 2015, 37(4): 548-553. (Fan S X, Li B, Sun J M, et al. A quantitative gas chromatographic method for determination of soybean seed fatty acid components[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(4): 548-553.)

[26] 钱宗耀, 刘河疆, 张维维, 等. 气质联用-内标法测定豆类中脂肪酸含量及因子分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(2): 2-3. (Qian Z Y, Liu H J, Zhang W W, et al. Determination of fatty acids and factor analysis from beans by gas chromatography mass spectrometry using internal standard method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(2): 2-3.)

[27] 周宇锋. 大豆与豆腐中蛋白质和脂肪酸组分的相关性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013, 18-30. (Zhou Y F. Relevant research of soybean proteins and fatty acids compositions between the seeds and tofu[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2013, 18-30.)

[28] 赵永程. 不同品种大豆制备填充豆腐的最佳凝固剂用量及质构的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015. (Zhao Y C. Study on the relationship between the critical point of coagulant concentration of soybean of different varieties and filled tofu textural[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015.)