

## 不同物理形态淀粉凝胶体系的建立

林顺顺<sup>1</sup>, 赵杰<sup>1</sup>, 宋晓燕<sup>1</sup>, 马兵团<sup>2</sup>, 金钰<sup>3</sup>, 马常云<sup>3</sup>,  
孙晓薇<sup>3</sup>, 陈慧<sup>3</sup>, 王佩茹<sup>1</sup>, 李梦琴<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>河南农业大学食品科学技术学院 郑州 450002

<sup>2</sup>河南同昌实业有限公司 郑州 450000

<sup>3</sup>河南省林业科学研究院 郑州 450008)

**摘要** 为建立不同物理形态的淀粉凝胶模型体系,采用视觉成像、倾斜平板残留分析,SPSS 方差分析、PCA 分析,对 6 种淀粉经糊化老化后所得液态、半固态、软固态、固态、硬固态 5 种物理形态的凝胶体系进行客观界定,建立 6 种淀粉的 5 种物理形态凝胶体系。该体系的建立为研究不同物理形态淀粉基质食品在口腔加工过程中的摩擦学行为和口感影响机制提供基础数据。

**关键词** 淀粉凝胶; 质构特性; 口感; 凝胶形态

**文章编号** 1009-7848(2022)11-0114-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.11.013

人们对食物的选择和对食物的看法和经济社会的发展息息相关。研究表明,目前中国消费者对食物的看法,从原来的方便、餐饮、零食向质量、个性化、营养和健康方向转变,并认为食物是一种享受性消费。人类倾向于从食物消费中获得最大程度的感官愉悦,食物的质感是影响消费者对食品的偏爱、接受及接受程度的重要品质属性之一,其中,对润滑度和乳化度的感官感知通常是享乐性食物备受喜好的主要因素<sup>[1]</sup>。

在适当的条件下,高分子溶液体系转变成一种弹性的半固体状态的稠厚物质,失去流动性的现象称为凝胶作用,所形成的产物叫做凝胶或冻胶。根据高分子溶质浓度的差异,其形成的凝胶体系可分为液态、半固态、软固态、固态等物理形态。淀粉是食品的重要组成部分。淀粉凝胶吸引水分子和捕获脂肪的能力使其可在食品生产中作为润滑质地调节剂使用,淀粉水凝胶对产品的厚度、质地等口感感知至关重要<sup>[2-4]</sup>。众多研究表明,淀粉凝胶作为食品口感、润滑质地的调节剂的是合理的<sup>[5-8]</sup>。淀粉凝胶的质构特性与食品加工品质有密切关系,淀粉凝胶作为重要的食品基质参与甚至主导

影响食品的质地、口感等品质特性<sup>[2,9]</sup>。不同物理形态食品体系在口腔加工中给人的润滑感觉和质地享受程度是显著不同的。相关研究显示,不同物理形态体系食品中的润滑机理存在差异。例如,淀粉、卡拉胶和脂肪对半固体乳制品的摩擦曲线产生不同影响,且脂肪的存在与否会影响润滑机制的差异<sup>[10]</sup>;Liu 等<sup>[11]</sup>研究表明微颗粒乳清蛋白作为脂肪替代物在液体和半固体模型食品中的润滑性能源于滚珠轴承机制;Krop 等<sup>[12]</sup>研究表明凝胶滤液润滑性降低是由于凝胶珠“球轴承”能力的缺失。此外,水胶体的类型、浓度、均匀程度均对食品体系的流动和摩擦学行为产生显著影响<sup>[12-13]</sup>。对淀粉凝胶物理形态的客观界定,对于研究不同形态淀粉基质食品中不同物质组分的润滑机理,食品中多组分及其相互作用等都具有重要意义,这将有助于更准确控制淀粉基质食品的质感,改善其感官行为。

研究显示:淀粉粒径、形状、聚合度等结构因素也会影响凝胶的物理形态。不同品种淀粉的颗粒尺寸、直链/支链淀粉含量、直支比等存在差异,会对淀粉凝胶的形态和质地产生影响<sup>[14]</sup>。淀粉经糊化、老化后形成凝胶,在相同质量分数时,不同淀粉所得凝胶形态会有所不同,由此可能产生不同机制的口腔摩擦学行为。Zhang 等<sup>[15]</sup>研究指出,玉米和马铃薯淀粉煮熟后的颗粒悬浮液表现出明显不同的摩擦学性质。总之,淀粉粒径、形状、聚合

**收稿日期:** 2021-11-08

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目(31901820);  
河南省高等学校重点科研项目(20A550010)

**第一作者:** 林顺顺,女,博士,讲师

**通信作者:** 李梦琴 E-mail: lmqfood@163.com

度等结构因素也直接影响淀粉的凝胶状态,进而影响产品的润滑质地。建立不同种类淀粉的凝胶形态模型体系,对于研究不同凝胶形态对食品的口腔润滑行为具有重要意义。

本文选用谷类淀粉(玉米、小麦)、薯类淀粉(马铃薯、红薯)、豆类淀粉(豌豆、绿豆),研究不同淀粉形成的凝胶模型体系。采用质量分数梯度法,结合淀粉在不同质量分数下生成凝胶形态的视觉图像、成型性及质构性能,建立 6 种淀粉的液态、半固态、软固态、固态和硬固体的凝胶模型体系。对各模型体系的质量分数、操作方法及条件进行反复验证,以确保结果的准确性和重复性。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要材料及设备

马铃薯淀粉、红薯淀粉和豌豆淀粉,重庆佳仙食品有限公司;绿豆淀粉,山东金城股份有限公司;小麦淀粉,苏州市云可食品有限公司;玉米淀粉,梁山葵花生物科技有限公司。

TA.XTplus 物性分析仪,英国 SMS 公司。

### 1.2 淀粉凝胶的制备

采用浓度梯度法制备不同物理形态的凝胶<sup>[6]</sup>,具体为:准确称取淀粉样品,用适量的蒸馏水配制淀粉悬浮液。通过准确控制淀粉悬浮液的浓度,即分别制备淀粉质量分数梯度为 1%~10% 的 6 种淀粉悬浮液(约 200 mL),放入 500 mL 的烧杯中;将烧杯置于(98±2)℃水浴中搅拌加热 30 min<sup>[7]</sup>,缓慢倒入 2 cm 高的培养皿中,并控制液面高度为 1.5 cm;然后将培养皿平放于 4℃冰箱中进行凝胶老化 24 h,形成稳定的淀粉凝胶。

### 1.3 淀粉凝胶的视觉图像分析

基于 1.2 节中制备得到的淀粉凝胶,取成型的淀粉凝胶块(1.5 cm×1.5 cm×1.5 cm),放置在 30°倾斜的干净玻璃平板上,拍摄凝胶的视觉效果图像。

### 1.4 淀粉凝胶的质构特性测定

将制备好的淀粉凝胶块切割成长、宽、高均为 3 cm 的小方块在 TA.XTplus 物性分析仪上测定。探头为 P50,测前速度 2 mm/s,测试时及测试后的速度均为 1 mm/s,压速比为 40%,测定凝胶的硬

度、黏性、弹性、内聚性、咀嚼性和韧性<sup>[8]</sup>。

### 1.5 数据分析

采用 SPSS 13.0 进行凝胶质构数据的差异检验分析。采用 PCA(Unscrambler version 9.7)对凝胶质构参数进行进一步分析,在 PCA 分析时,对所有数据进行标准化(1/Sdev)处理,使每个变量都得到公正的贡献分析<sup>[19-22]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 不同淀粉凝胶形态的视觉效果分析

图 1 为 6 种淀粉在质量分数梯度 1%~10% 范围制得的淀粉凝胶形态视觉效果图像(图 1 和 2)。由图 1 可以看出,不同淀粉在相同质量分数下生成凝胶的物理形态差异显著。首先,6 种淀粉在 1% 质量分数时,所得到的凝胶形态均呈液体,其中马铃薯淀粉和红薯淀粉凝胶溶液色泽透亮,小麦淀粉、玉米淀粉和豌豆淀粉凝胶溶液色泽较白,绿豆淀粉凝胶溶液色泽位于以上二颜色中间。在 2% 质量分数时,马铃薯淀粉和绿豆淀粉凝胶形态虽已呈现类固体状,但凝胶块放置于 30°斜板时会变形,有一定程度下滑,并在斜板上有凝胶残留,说明此时凝胶类固体形态弱,易变性,为明显半固态形态,而 2% 的小麦淀粉、玉米淀粉、红薯淀粉、豌豆淀粉凝胶仍为较黏稠液体形态。在 3% 质量分数时,小麦淀粉、红薯淀粉和豌豆淀粉凝胶形态呈现类固体状态,将其置于 30°斜板时,形态易变形、下滑,且在斜板上有凝胶残留,为明显半固态形态。4% 质量分数的玉米淀粉凝胶形态呈半固态状。

图 1 中,当马铃薯淀粉、绿豆淀粉质量分数 3%~4%,小麦淀粉、豌豆淀粉和红薯淀粉质量分数 4%,玉米淀粉质量分数 5% 时,其对应凝胶块置于 30°斜板时,虽有一定程度下滑,但板上未见凝胶残留,说明此时凝胶的类固体形态增强,但易变性,呈明显软固体形态。

由图 2 可知,当质量分数 ≥ 5% (玉米淀粉质量分数 ≥ 6%) 淀粉形成的凝胶块置于倾斜平板时,其正方体形态未见明显变形,并可稳定立于斜板上(或沿斜板滑下后板上没有凝胶残留),此时凝胶具有明显固体性质,为固体形态。

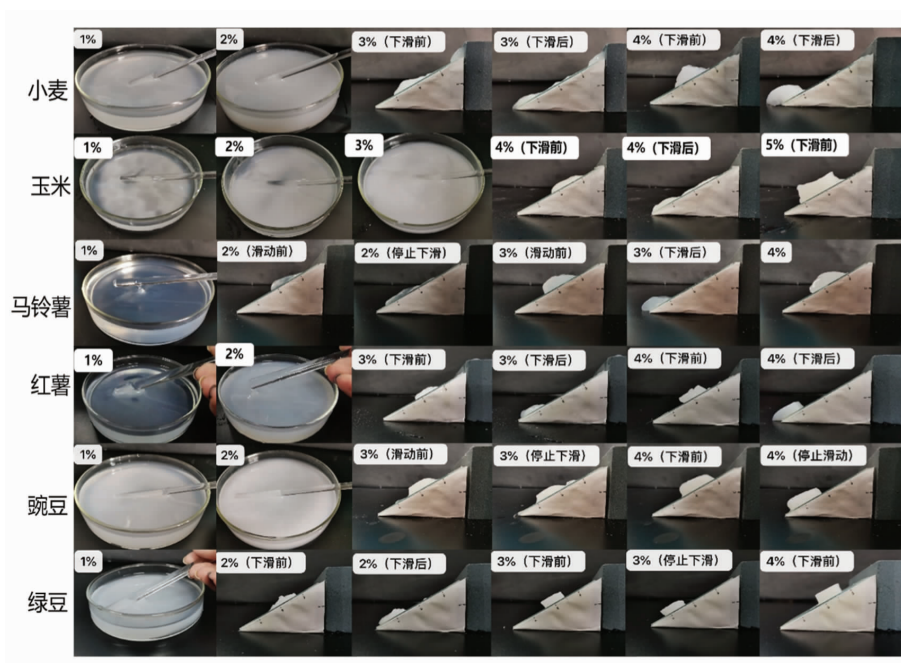


图1 不同淀粉凝胶物理形态视觉效果(淀粉质量分数1%~4%)

Fig.1 Visual effects of different starch gelling physical forms (starch mass fraction 1%~4%)

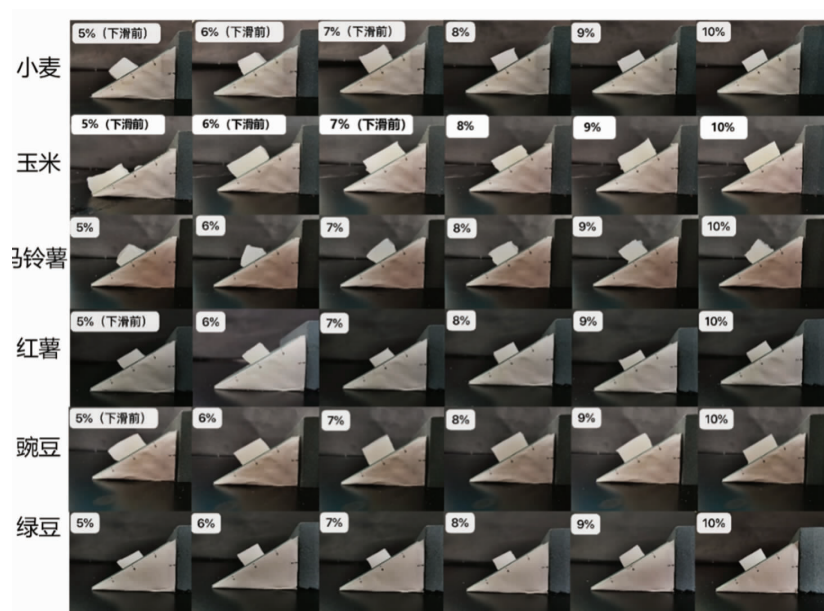


图2 不同淀粉凝胶物理形态视觉效果(淀粉质量分数5%~10%)

Fig.2 Visual effects of different starch gel physical forms (starch mass fraction 5%~10%)

## 2.2 不同淀粉固态凝胶质构参数的方差分析

为了对淀粉凝胶形态中固态与硬固态进行客观界定,本研究对5%~10%淀粉含量的凝胶硬度、黏性、弹性、内聚性、咀嚼性和韧性参数进行分析(表1)。

对同种淀粉不同质量分数凝胶质构性能的方

差分析发现(表1),随着淀粉质量分数增加,6种淀粉凝胶的硬度整体呈显著增加趋势( $P<0.05$ );弹性方面,淀粉质量分数从5%增加6%时,小麦、豌豆、红薯凝胶的弹性均显著增加( $P<0.05$ )。随着淀粉质量分数的增加,6种淀粉凝胶的咀嚼性(除马铃薯淀粉9%、豌豆淀粉10%)呈不同程度的增

表 1 不同质量分数淀粉凝胶的质构性能分析  
Table 1 Analysis of texture properties of starch gels with different mass fraction

样品	质量分数/%	硬度	黏性	弹性	内聚性	咀嚼性	韧性
小麦淀粉	5	139.31 ± 10.95 <sup>ab</sup>	-23.16 ± 5.79 <sup>cb</sup>	0.84 ± 0.04 <sup>ab</sup>	0.58 ± 0.07 <sup>ac</sup>	67.20 ± 7.64 <sup>ab</sup>	0.38 ± 0.04 <sup>ab</sup>
	6	317.52 ± 13.68 <sup>bc</sup>	-4.64 ± 4.87 <sup>dc</sup>	0.97 ± 0.02 <sup>bd</sup>	0.88 ± 0.02 <sup>ce</sup>	269.16 ± 15.21 <sup>bd</sup>	0.60 ± 0.02 <sup>cd</sup>
	7	522.75 ± 39.36 <sup>cb</sup>	-32.57 ± 20.45 <sup>cbC</sup>	0.96 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.87 ± 0.02 <sup>cb</sup>	436.18 ± 33.32 <sup>cd</sup>	0.53 ± 0.04 <sup>hb</sup>
	8	923.98 ± 53.26 <sup>dc</sup>	-65.46 ± 12.75 <sup>ba</sup>	0.97 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.86 ± 0.00 <sup>bc</sup>	764.96 ± 40.40 <sup>dc</sup>	0.50 ± 0.01 <sup>bc</sup>
	9	1 126.17 ± 35.62 <sup>cb</sup>	-116.19 ± 15.61 <sup>aa</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.83 ± 0.01 <sup>bc</sup>	884.58 ± 34.09 <sup>db</sup>	0.52 ± 0.01 <sup>hb</sup>
	10	1 197.67 ± 189.79 <sup>cbC</sup>	-76.16 ± 9.81 <sup>ba</sup>	0.96 ± 0.02 <sup>bc</sup>	0.82 ± 0.05 <sup>bc</sup>	937.90 ± 86.67 <sup>eb</sup>	0.51 ± 0.03 <sup>hb</sup>
玉米淀粉	6	210.83 ± 36.72 <sup>aa</sup>	-29.30 ± 9.17 <sup>ab</sup>	0.90 ± 0.03 <sup>bc</sup>	0.55 ± 0.08 <sup>ac</sup>	104.00 ± 26.77 <sup>aa</sup>	0.42 ± 0.08 <sup>ab</sup>
	7	449.61 ± 83.79 <sup>hb</sup>	-13.65 ± 16.50 <sup>bc</sup>	0.97 ± 0.03 <sup>bc</sup>	0.81 ± 0.07 <sup>hb</sup>	357.75 ± 89.94 <sup>bc</sup>	0.68 ± 0.05 <sup>hb</sup>
	8	729.15 ± 46.09 <sup>cb</sup>	-27.12 ± 27.04 <sup>ab</sup>	0.97 ± 0.03 <sup>bc</sup>	0.92 ± 0.01 <sup>cd</sup>	655.68 ± 61.80 <sup>bc</sup>	0.73 ± 0.01 <sup>ce</sup>
	9	961.36 ± 74.80 <sup>db</sup>	-44.51 ± 28.12 <sup>abcd</sup>	0.96 ± 0.02 <sup>bc</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>cd</sup>	868.59 ± 78.63 <sup>db</sup>	0.74 ± 0.02 <sup>ce</sup>
	10	1 003.16 ± 112.96 <sup>db</sup>	-38.15 ± 9.93 <sup>abc</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.93 ± 0.01 <sup>cd</sup>	876.66 ± 105.06 <sup>db</sup>	0.72 ± 0.03 <sup>cd</sup>
马铃薯淀粉	5	129.52 ± 8.88 <sup>ab</sup>	-7.72 ± 2.33 <sup>cc</sup>	0.93 ± 0.02 <sup>abc</sup>	0.85 ± 0.04 <sup>ad</sup>	102.60 ± 4.29 <sup>ac</sup>	0.64 ± 0.03 <sup>bc</sup>
	6	175.74 ± 8.98 <sup>abA</sup>	-8.93 ± 4.42 <sup>bc</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>abcd</sup>	0.84 ± 0.03 <sup>ae</sup>	139.11 ± 4.68 <sup>abA</sup>	0.65 ± 0.01 <sup>bd</sup>
	7	196.98 ± 26.38 <sup>abA</sup>	-13.20 ± 5.37 <sup>cc</sup>	0.95 ± 0.02 <sup>bc</sup>	0.92 ± 0.01 <sup>bc</sup>	172.02 ± 27.45 <sup>abca</sup>	0.66 ± 0.03 <sup>hb</sup>
	8	316.31 ± 13.71 <sup>ca</sup>	-24.09 ± 6.23 <sup>db</sup>	0.93 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.89 ± 0.04 <sup>bcd</sup>	260.18 ± 27.83 <sup>ca</sup>	0.63 ± 0.03 <sup>bd</sup>
	9	271.05 ± 29.96 <sup>bcA</sup>	-23.15 ± 6.12 <sup>de</sup>	0.94 ± 0.03 <sup>abc</sup>	0.92 ± 0.04 <sup>cd</sup>	233.30 ± 28.19 <sup>bcA</sup>	0.63 ± 0.03 <sup>bd</sup>
	10	462.82 ± 85.20 <sup>da</sup>	-39.57 ± 13.54 <sup>cd</sup>	0.92 ± 0.02 <sup>abc</sup>	0.91 ± 0.04 <sup>cd</sup>	384.68 ± 58.69 <sup>da</sup>	0.62 ± 0.03 <sup>bc</sup>
	11	655.51 ± 179.03 <sup>e</sup>	-65.28 ± 17.56 <sup>ab</sup>	0.93 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.91 ± 0.02 <sup>bc</sup>	550.90 ± 142.88 <sup>e</sup>	0.63 ± 0.02 <sup>b</sup>
	12	875.20 ± 86.14 <sup>f</sup>	-84.69 ± 10.99 <sup>a</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>ab</sup>	0.94 ± 0.02 <sup>c</sup>	772.63 ± 83.04 <sup>f</sup>	0.57 ± 0.03 <sup>a</sup>
	13	1 110.18 ± 134.76 <sup>g</sup>	-55.47 ± 32.39 <sup>bc</sup>	0.95 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.94 ± 0.01 <sup>c</sup>	986.84 ± 124.28 <sup>g</sup>	0.57 ± 0.04 <sup>a</sup>
	14	1 563.34 ± 161.29 <sup>h</sup>	-70.67 ± 46.42 <sup>ab</sup>	0.95 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.93 ± 0.02 <sup>bc</sup>	1 374.78 ± 110.10 <sup>h</sup>	0.57 ± 0.04 <sup>a</sup>
红薯淀粉	5	108.64 ± 16.51 <sup>aa</sup>	-26.26 ± 7.86 <sup>cb</sup>	0.82 ± 0.05 <sup>ab</sup>	0.52 ± 0.08 <sup>abc</sup>	47.81 ± 16.01 <sup>ab</sup>	0.33 ± 0.07 <sup>ab</sup>
	6	260.25 ± 39.56 <sup>hb</sup>	-19.73 ± 9.82 <sup>bc</sup>	0.92 ± 0.04 <sup>bcd</sup>	0.72 ± 0.10 <sup>bd</sup>	177.51 ± 56.20 <sup>hb</sup>	0.50 ± 0.09 <sup>bc</sup>
	7	473.58 ± 32.87 <sup>cb</sup>	-14.07 ± 5.47 <sup>cc</sup>	0.97 ± 0.01 <sup>cc</sup>	0.81 ± 0.04 <sup>cb</sup>	371.74 ± 43.23 <sup>cc</sup>	0.57 ± 0.03 <sup>cb</sup>
	8	692.09 ± 15.69 <sup>db</sup>	-20.63 ± 8.22 <sup>cb</sup>	0.97 ± 0.01 <sup>cc</sup>	0.85 ± 0.01 <sup>cc</sup>	566.12 ± 9.41 <sup>db</sup>	0.60 ± 0.02 <sup>cd</sup>
	9	1 127.18 ± 111.95 <sup>eb</sup>	-35.74 ± 10.88 <sup>bcd</sup>	0.97 ± 0.01 <sup>cc</sup>	0.80 ± 0.05 <sup>cc</sup>	881.27 ± 42.65 <sup>eb</sup>	0.59 ± 0.04 <sup>cc</sup>
	10	1 405.91 ± 66.89 <sup>fc</sup>	-76.80 ± 24.09 <sup>aa</sup>	0.94 ± 0.02 <sup>bc</sup>	0.79 ± 0.03 <sup>bc</sup>	1 048.17 ± 99.55 <sup>fb</sup>	0.60 ± 0.03 <sup>cc</sup>
豌豆淀粉	5	222.69 ± 23.05 <sup>cc</sup>	-28.44 ± 20.51 <sup>ab</sup>	0.74 ± 0.04 <sup>aa</sup>	0.37 ± 0.04 <sup>aa</sup>	59.74 ± 2.81 <sup>aa</sup>	0.11 ± 0.02 <sup>aa</sup>
	6	926.31 ± 51.61 <sup>hd</sup>	-34.84 ± 20.65 <sup>ab</sup>	0.78 ± 0.05 <sup>abA</sup>	0.30 ± 0.02 <sup>aa</sup>	213.31 ± 12.15 <sup>ac</sup>	0.12 ± 0.01 <sup>aa</sup>
	7	1 165.72 ± 338.19 <sup>bc</sup>	-37.16 ± 28.39 <sup>ab</sup>	0.71 ± 0.18 <sup>aa</sup>	0.40 ± 0.28 <sup>aa</sup>	264.47 ± 55.63 <sup>ab</sup>	0.25 ± 0.29 <sup>aa</sup>
	8	4 156.26 ± 104.43 <sup>ce</sup>	-49.58 ± 20.73 <sup>aa</sup>	0.88 ± 0.04 <sup>bcA</sup>	0.55 ± 0.09 <sup>bb</sup>	2 008.41 ± 315.60 <sup>bd</sup>	0.41 ± 0.05 <sup>hb</sup>
	9	8 501.90 ± 470.19 <sup>ed</sup>	-52.25 ± 9.21 <sup>abc</sup>	0.92 ± 0.02 <sup>cb</sup>	0.76 ± 0.03 <sup>cb</sup>	5 907.16 ± 447.19 <sup>cc</sup>	0.54 ± 0.02 <sup>hb</sup>
	10	5 571.77 ± 540.70 <sup>ed</sup>	-50.33 ± 21.66 <sup>abc</sup>	0.90 ± 0.05 <sup>cb</sup>	0.71 ± 0.07 <sup>cb</sup>	3 528.94 ± 440.74 <sup>db</sup>	0.53 ± 0.06 <sup>hb</sup>
绿豆淀粉	5	148.93 ± 15.68 <sup>ab</sup>	-77.07 ± 12.59 <sup>abA</sup>	0.85 ± 0.02 <sup>ab</sup>	0.46 ± 0.03 <sup>bb</sup>	58.51 ± 7.71 <sup>aa</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>aa</sup>
	6	329.87 ± 49.53 <sup>cc</sup>	-101.11 ± 44.80 <sup>aa</sup>	0.86 ± 0.05 <sup>ab</sup>	0.40 ± 0.02 <sup>cb</sup>	114.84 ± 19.88 <sup>aa</sup>	0.10 ± 0.01 <sup>aa</sup>
	7	486.92 ± 28.76 <sup>ab</sup>	-76.94 ± 17.97 <sup>abA</sup>	0.83 ± 0.06 <sup>ab</sup>	0.42 ± 0.03 <sup>ca</sup>	168.20 ± 18.99 <sup>abA</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>aa</sup>
	8	1 127.47 ± 243.41 <sup>bd</sup>	-67.86 ± 23.28 <sup>ba</sup>	0.86 ± 0.04 <sup>abA</sup>	0.37 ± 0.01 <sup>abA</sup>	358.71 ± 89.21 <sup>ba</sup>	0.12 ± 0.01 <sup>aa</sup>
	9	2 389.89 ± 757.87 <sup>cc</sup>	-65.14 ± 25.21 <sup>bb</sup>	0.90 ± 0.05 <sup>ba</sup>	0.35 ± 0.01 <sup>aa</sup>	742.66 ± 235.44 <sup>cb</sup>	0.13 ± 0.01 <sup>aa</sup>
	10	5 825.82 ± 289.99 <sup>ed</sup>	-65.44 ± 4.89 <sup>ab</sup>	0.82 ± 0.03 <sup>aa</sup>	0.43 ± 0.07 <sup>ca</sup>	2 038.70 ± 307.84 <sup>bc</sup>	0.30 ± 0.06 <sup>ba</sup>

注:每列不同小写字母表示同种淀粉凝胶、不同质量分数间存在显著性差异( $P < 0.05$ );每列不同大写字母表示不同种淀粉凝胶、相同质量分数间存在显著性差异( $P < 0.05$ );每个样品至少平行测定 6 次( $n \geq 6$ )。

加趋势。

对相同质量分数、不同淀粉凝胶质构性能的差异分析结果显示(表1),马铃薯淀粉凝胶(6%,7%,8%,9%,10%)的硬度显著小于其它淀粉凝胶( $P<0.05$ ),为此后续又对11%~14%质量分数马铃薯淀粉的凝胶样品进行辅助分析。在相同质量分数时,豌豆淀粉凝胶和绿豆淀粉凝胶的硬度显著高于其它淀粉凝胶( $P<0.05$ );另外,凝胶的黏性、弹性、内聚性、咀嚼性和韧性性质在不同淀粉间也存在不同程度的显著性差异( $P<0.05$ )。

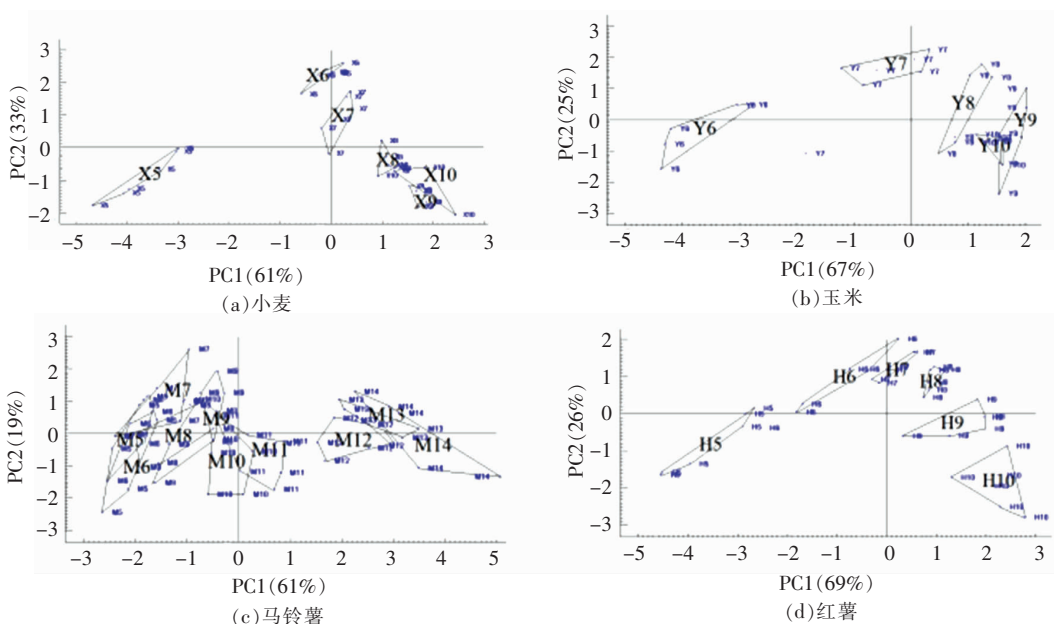
### 2.3 同种淀粉、不同质量分数的凝胶质构性能PCA分析

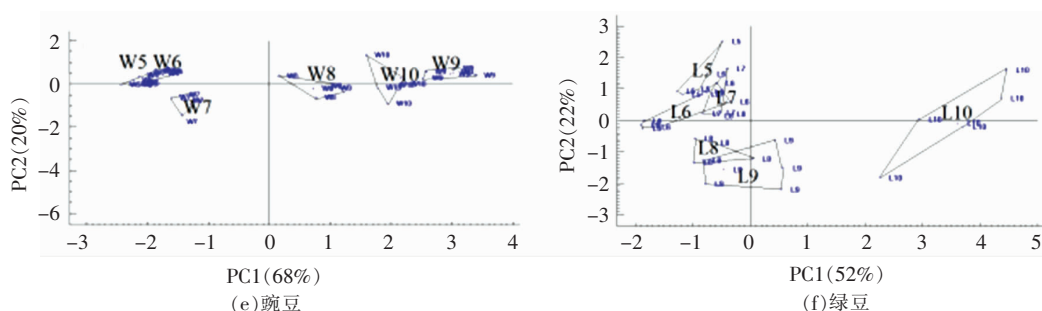
由于淀粉凝胶的质构属性不是由某一个或某几个参数决定,凝胶的硬度、黏性、弹性、内聚性、咀嚼性和韧性分别从不同方面反映了凝胶的质构性质。为了全面掌握不同质量分数间凝胶质构性能的差异性,文中对数据进行了回归分析和主成分分析(PCA),分析过程中对各指标数值进行标准化处理,即消除了指标间数值差异性<sup>[20-22]</sup>。分析发现,前2个主成分累计方差贡献率均大于80%,说明前两个主成分已经包含了大量能够反映样品整体差异特征的信息(图2)。图中不同样品间的距离可清晰、直观地反映样品之间的差异,即样品间距离越远,表明该样品间的差异越大。

图3结果显示,第一主成分均为主要解释变量,因此均沿PC1轴方向进行分析。不同质量分数

小麦淀粉凝胶样品沿PC1轴方向,从左到右可明显分成3组,其中X5(小麦淀粉质量分数5%凝胶)位于图的左侧,X6、X7(淀粉质量分数6%和7%)样品位于轴中心处,X8、X9和X10(淀粉质量分数8%、9%和10%)样品位于右侧位置,这一结果说明小麦淀粉质量分数6%和7%凝胶的(X6和X7)质构性能较为相似,小麦淀粉质量分数8%~10%凝胶的(X8、X9和X10)质构性能较为相似,且它们分别与淀粉质量分数5%凝胶的存在显著差异( $P<0.05$ )。

类似地,玉米淀粉凝胶样品间的位置结果表明,淀粉质量分数6%凝胶的质构性能与7%凝胶存在显著差异,且均显著区别于淀粉质量分数8%~10%的凝胶样品( $P<0.05$ )。5%~7%质量分数马铃薯淀粉凝胶的质构性能较为近似,8%~11%质量分数凝胶的质构性能较为相近,且它们分别与12%~14%质量分数凝胶存在显著性差异( $P<0.05$ )。质量分数6%和7%的红薯淀粉凝胶的质构性能较为相似,质量分数8%~10%凝胶的质构性能较为相似,且它们均与5%凝胶有显著差异( $P<0.05$ )。5%和6%豌豆淀粉凝胶的质构性能极为相近,且和7%凝胶样品分别显著区别于8%、9%和10%样品( $P<0.05$ )。绿豆淀粉凝胶样品间的位置表明,绿豆淀粉质量分数5%~7%凝胶的质构性能极为相似,质量分数8%和9%凝胶极为相似,且它们均与10%凝胶样品存在显著差异( $P<0.05$ )。





注：图中 X5~X10 分别表示小麦淀粉质量分数 5%~10%的凝胶样品；类似地，Y5~Y10 分别表示玉米淀粉质量分数为 5%~10%的凝胶样品；M5~M14 分别表示马铃薯淀粉质量分数为 5%~14%的凝胶样品；H5~H10 分别表示红薯淀粉质量分数为 5%~10%的凝胶样品；W5~W10 分别表示豌豆淀粉质量分数为 5%~10%的凝胶样品；L5~L10 分别表示绿豆淀粉质量分数为 5%~10%的凝胶样品；下同。

图 3 不同质量分数淀粉凝胶的质构性能 PCA 分析

Fig.3 The PCA analysis of texture properties of starch gels with different mass fraction

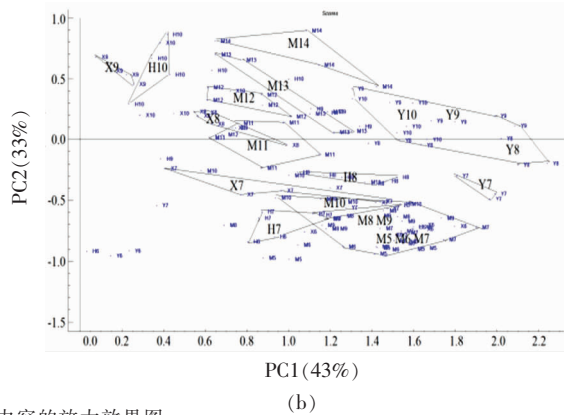
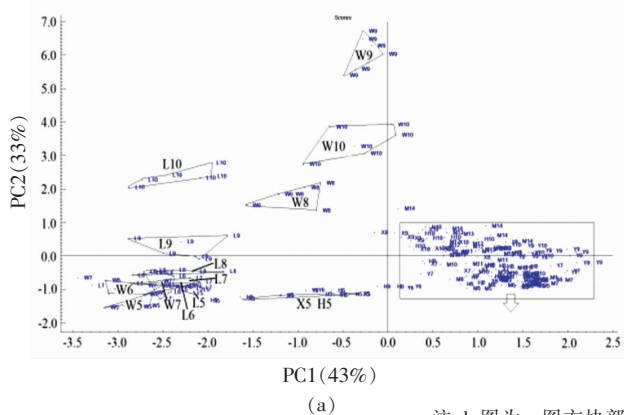
2.4 6 种淀粉凝胶固态和硬固态的综合界定

为进行淀粉凝胶固态和硬固态的客观界定，对 6 种质量分数在 5%~10%范围的淀粉凝胶样品（其中马铃薯质量分数 5%~14%）的质构参数进行综合分析（图 4），发现前 2 个主成分已经包含了大量信息（总方差贡献率 76%），能够反映样品的整体差异特征，因此，这里建立了 PC1-PC2 二维 Score 图分析样品的整体信息。

图 4 发现，小麦 X5、X6 样品位于坐下方，X8~X10 样品位于右上方，X7 样品位于右下方，结合 2.1 节凝胶视觉效果及 2.3 节分析结果，将质量分数 5%、6%、7% 小麦淀粉形成的凝胶界定为固态，质量分数 8%~10% 得到的凝胶界定为硬固态；类似地，玉米 Y6~Y7 样品、马铃薯 M5~M10 样品、红

薯 H5~H8 样品均位于右下方，玉米 Y8~Y10 样品、马铃薯 M11~M14 样品、红薯 H9~H10 样品位于右上方，因此将质量分数 6%~7% 玉米淀粉、5%~10% 马铃薯、5%~8% 红薯形成的凝胶界定为固态，质量分数 8%~10% 玉米淀粉、11%~14% 马铃薯、9%~10% 红薯形成的凝胶界定为硬固态。

同样地，豌豆 W6~W7 样品、绿豆 L5~L8 样品均位于左下方，且其位置极为接近，豌豆 W8~W10 样品、绿豆 L9~L10 样品均位于左上方，说明质量分数 6%~7% 豌豆淀粉与 5%~8% 绿豆形成的凝胶的质构性能极其相似，可将其均界定为固态，而质量分数 8%~10% 豌豆淀粉、9%~10% 绿豆形成的凝胶界定为硬固态。



注：b 图为 a 图方块部分内容的放大效果图。

图 4 6 种淀粉不同质量分数凝胶质构性能 PCA 分析

Fig.4 The PCA analysis of gel texture properties of six starches with different mass fraction

## 2.5 不同物理形态淀粉凝胶模型体系的建立

通过以上分析及后续试验验证,得到了6种淀粉的5种物理形态淀粉凝胶模型体系所需要的淀粉质量分数参数(表2)。该5种物理形态淀粉凝胶模型体系的建立,为后续研究不同淀粉凝胶形态在口腔加工过程中淀粉摩擦学行为及口感影响机制提供基础。

## 3 结论

本文通过视觉成像、倾斜平板残留方法,判定并建立了6种淀粉的液态、半固态、软固态形态凝胶模型体系;采用SPSS方差分析、PCA分析对淀粉固态凝胶的质构性能参数进行综合分析,得到同种淀粉不同质量分数间的凝胶质构性能的差异性结果,以及6种淀粉不同质量分数间的凝胶质构性能差异结果,从而建立了6种淀粉5种物理形态的淀粉凝胶模型体系,该体系的建立为后续研究口腔加工过程中淀粉凝胶摩擦学行为和口感影响机制提供基础。

## 参 考 文 献

- [1] 李立, 张晓琴, 张昀, 等. 食品口腔摩擦学研究进展[J]. 摩擦学报, 2019, 39(1): 118-129.  
LI L, ZHANG X Q, ZHANG Y, et al. Progress of oral tribology in food[J]. Tribology, 2019, 39(1): 118-129.
- [2] 刘玉华, 魏宏亮, 李松茂, 等. 基于淀粉的水凝胶的研究进展[J/OL]. 化工进展, (2021-06-15)[2021-07-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1954.TQ.20210615.1254.001.html>.  
LIU Y H, WEI H L, LI S M, et al. Research progress of starch-based hydrogels [J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress, (2021-06-15) [2021-07-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1954.TQ.20210615.1254.001.html>.
- [3] 甘爱园, 骞银强, 刘松继, 等. 蛋清蛋白对豌豆淀粉凝胶化及凝胶特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 68-79.  
GAN A Y, HUO Y Q, LIU S J, et al. Effects of egg white protein on gelation and gel properties of pea starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(1): 68-79.

表2 不同物理形态淀粉凝胶(%)模型体系的建立

Table 2 Establishment of starch gel (%) model system with different physical forms

淀粉种类	液态	半固态	软固态	固态	硬固态
小麦	1~2	3	4	5~7	8~10
玉米	1~3	4	5	6~7	8~10
马铃薯	1	2	3~4	5~10	11~14
红薯	1~2	3	4	5~8	9~10
豌豆	1~2	3	4	5~7	8~10
绿豆	1	2	3~4	5~8	9~10

- [4] 林鑫, 杨宏. 食品胶协同干热处理对马铃薯淀粉理化特性的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(3): 245-252.  
LIN X, YANG H. Effects of food gums combined with dry heating on physicochemical properties of potato starch [J]. Food Science and Technology, 2021, 46(3): 245-252.
- [5] YAKUBOV G E, ZHONG L, LI M, et al. Lubrication of starch in ionic liquid-water mixtures: Soluble carbohydrate polymers form a boundary film on hydrophobic surfaces[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 133: 507-516.
- [6] ZINOVIADOU K G, JANSSEN A M, DE JONGH H H. Tribological properties of neutral polysaccharide solutions under simulated oral conditions [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(2): E88-E94.
- [7] NGUYEN P T M, KRAVCHUK O, BHANDARI B, et al. Effect of different hydrocolloids on texture, rheology, tribology and sensory perception of texture and mouthfeel of low-fat pot-set yoghurt [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 90-104.
- [8] JAVIDI F, RAZAVI S M A, MOHAMMAD AMINI A. Cornstarch nanocrystals as a potential fat replacer in reduced fat O/W emulsions: A rheological and physical study [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 172-181.
- [9] 罗惠元, 熊玉竹. 淀粉基吸水凝胶材料研究进展[J/OL]. 化工新型材料, (2021-05-12)[2021-07-06].

- <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20210512.1120.231.html>.
- LUO H Y, XIONG Y Z. Research progress of starch-based water-absorbing gel materials[J/OL]. *New Chemical Materials*, (2021-05-12)[2021-07-06]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20210512.1120.231.html>.
- [10] GODOI F C, BHANDARI B R, PRAKASH S. Tribo-rheology and sensory analysis of a dairy semi-solid[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 70: 240-250.
- [11] LIU K, TIAN Y, STIEGER M, et al. Evidence for ball-bearing mechanism of microparticulated whey protein as fat replacer in liquid and semi-solid multi-component model foods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 403-414.
- [12] KROP E M, Hetherington M M, Holmes M, et al. On relating rheology and oral tribology to sensory properties in hydrogels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 88: 101-113.
- [13] ZHU Y, BHANDARI B, PRAKASH S. Tribo-rheometrybehaviour and gel strength of  $\kappa$ -carrageenan and gelatin solutions at concentrations, pH and ionic conditions used in dairy products[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 84: 292-302.
- [14] 王林. 淀粉的糊化与凝胶特性及食用品质研究[J]. *保鲜与加工*, 2021, 21(2): 67-73.  
WANG L. Study on gelatinization and gelation characteristics of starches and their edible qualities[J]. *Storage and Press*, 2021, 21(2): 67-73.
- [15] ZHANG B, SELWAY N, SHELAT K J, et al. Tribology of swollen starch granule suspensions from maize and potato[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 155: 128-135.
- [16] 杜先锋, 许时婴, 王璋. 淀粉凝胶力学性能的研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(2): 16-19.  
DU X F, XU S Y, WANG Z. Study on the mechanical properties of starch gels[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(2): 16-19.
- [17] 刘紫薇, 李欣, 高菲, 等. 煮制时间对绿豆中淀粉性质的影响及相关性分析[J/OL]. *包装工程*, (2021-05-26)[2021-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.TB.20210525.1322.004.html>.
- LIU Z W, LI X, GAO F, et al. Effect of cooking time on starch properties of mung bean and correlation analysis[J/OL]. *Packaging Engineering*, (2021-05-26)[2021-07-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.TB.20210525.1322.004.html>.
- [18] 江帆, 杜春微, 任妍婧, 等. 不同藜麦品种淀粉的理化性质与消化特性[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(7): 77-83.  
JIANG F, DU C W, REN Y J, et al. Physico-chemical properties and digestibility of starches of different quinoa varieties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(7): 77-83.
- [19] HADI B, MAHDI K, MEHRAN A, et al. The application of PLS regression to study the relationships between sensory and texture characteristics[J]. *Iranian Food Science & Technology Research Journal*, 2017, 13(4): 540-552.
- [20] 林顺顺, 赵盼蕾, 马兵团, 等. 添加丝瓜纤维对花生饼干感官及风味的影响[J]. *食品研究与开发* 2019, 40(17): 123-128.  
LIN S S, ZHAO P L, MA B T, et al. Effects of loofah fibers addition on sensory and flavor of peanut biscuits[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(17): 123-128.
- [21] LIN S S, ZHANG X M, SONG S Q, et al. Tobacco alkaloids reduction by casings added/enzymatic hydrolysis treatments assessed through PLSR analysis[J]. *Regulatory Toxicology Pharmacology*, 2016, 75: 27-34.
- [22] LIN S S, ZHANG X M. A rapid and novel method for predicting nicotine alkaloids in tobacco through electronic nose and partial least-squares regression analysis[J]. *Analytical Methods*, 2016, 8(7): 1609-1617.

### Establishment of Starch Gelling System with Different Physical Forms

Lin Shunshun<sup>1</sup>, Zhao Jie<sup>1</sup>, Song Xiaoyan<sup>1</sup>, Ma Bingtuan<sup>2</sup>, Jin Yu<sup>3</sup>, Ma Changyun<sup>3</sup>,  
Sun Xiaowei<sup>3</sup>, Chen Hui<sup>3</sup>, Wang Peiru<sup>1</sup>, Li Mengqin<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002

<sup>2</sup>Henan Tongchang Industrial Co. Ltd., Zhengzhou 450000



*<sup>3</sup>Henan Academy of Forestry, Zhengzhou 450008)*

**Abstract** In order to establish starch gelling model system with different physical forms, visual imaging, inclined plate residual analysis, SPSS variance analysis and PCA analysis were used to objectively define the gelling system with five physical forms of liquid, semi-solid, soft solid, solid and hard solid, that obtained after gelatinization and aging of six kinds of starch. Thus, a gelling system with five physical forms of six starches was established. The establishment of the system provides a basis for the study of tribological behavior and taste influencing mechanism of starch matrix foods with different physical forms during oral processing.

**Keywords** starch gel; texture characteristics; taste; gelling form