DOI:10.12441/spyswjs.20231207001　　[文章编号] 1673-1689(2025)03-0102-08

# 高载量γ-氨基丁酸在淀粉粉圆体系中的应用特性

艾　政[1]　张天萌[1]　张沁怡[2,3,4]　李　航[2,3,4]　钟　芳[2,3,4]　刘　飞[2,3,4*]

(1. 华熙生物科技股份有限公司,山东 济南　250101; 2. 江南大学未来食品科学中心,江苏 无锡 214122; 3. 江苏省食品安全与质量控制协同创新中心,江苏 无锡 214122; 4. 嘉兴未来食品研究院,浙江 嘉兴 314015)

**摘要:**【目的】γ-氨基丁酸(γ-aminobutyric acid, GABA)在食品中的应用日益增多,作者探究了高载量GABA对粉圆体系流变学特性、质构等性质及粉圆成品品质的影响。【方法】利用流变仪、低场核磁共振波谱仪、冷场发射扫描电子显微镜等探究GABA对粉圆的流变学特性、体系水分分布及微观结构的影响,通过快速黏度分析仪对添加不同质量分数GABA的粉圆糊化特性进行分析,并利用物性分析仪结合感官评定分析熟化后粉圆成品的品质。【结果】GABA会使粉圆的弹性模量($G'$)、黏性模量($G''$)下降。当添加GABA质量分数为14%(按粉体质量计)时,粉圆自由水和结合水质量分数分别为(33.38±0.23)%和(6.46±0.02)%,吸附水质量分数为(60.16±0.25)%。同时,相较于未添加GABA的粉圆混合粉,含GABA(质量分数14%)的混合粉的糊化峰值黏度和最终黏度分别下降了32.87%、36.19%。当GABA质量分数为10%时,感官评分最高,粉圆口感最佳。【结论】综合来看,添加GABA会弱化粉圆网络结构,使粉圆持水性能下降,降低粉圆的黏弹性和硬度,从而影响粉圆成品的品质。

**关键词:**淀粉粉圆;γ-氨基丁酸;流变学特性;糊化特性;粉圆品质

# Application Characteristics of High-loading γ-Aminobutyric Acid in Tapioca Pearls

*AI Zheng*[1]　*ZHANG Tianmeng*[1]　*ZHANG Qinyi*[2,3,4]　*LI Hang*[2,3,4]
*ZHONG Fang*[2,3,4]　*LIU Fei*[2,3,4*]

(1. Bloomage Biotechnology Corporation Limited, Jinan 250101, China; 2. Science Center for Future Foods, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Collaborative Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province, Wuxi 214122, China; 4. Jiaxing Institute of Future Food, Jiaxing 314015, China)

**Abstract:** [**Objective**] The application of γ-aminobutyric acid (GABA) in food has become increasingly popular in recent years. The effects of high-loading GABA on the rheological and textural properties and the quality of tapioca pearls were studied. [**Method**] Rheometry, low-field nuclear magnetic resonance, field emission scanning electron microscopy were employed to study the effects of GABA on the rheological properties, moisture distribution, and microstructure of tapioca pearls, respectively. A rapid viscosity analyzer was used to examine the gelatinization properties of tapioca pearls with the addition of GABA at different mass fractions. The quality of cooked tapioca pearls was measured by a texture analyzer combined with sensory evaluation. [**Result**] GABA decreased the elastic modulus ($G'$) and viscous modulus ($G''$) of tapioca pearls. The proportion of peak area of free water, bound water, and adsorbed water in the tapioca pearls added with mass fraction 14% GABA (calculated by the mass of all powder) were (33.38±0.23)%, (6.46±0.02)%, and (60.16±0.25)%, respectively. Compared with the mixed powder without GABA, the mixed powder with the addition of GABA (mass fraction is 14%) showed the gelatinization peak viscosity and final viscosity decreases of 32.87% and 36.19%,

**基金项目:**国家自然科学基金面上项目(32072153)。
**通信作者:**刘飞(1989—),男,博士,副研究员,博士研究生导师,主要从事食品胶体研究。E-mail:feiliu@jiangnan.edu.cn
**收稿日期:**2023-12-07　**修回日期:**2024-02-21

respectively. The tapioca pearls with 10% GABA got the highest sensory score and had the best taste. [**Conclusion**] The addition of GABA could weaken the network structure to reduce the water holding properties, viscoelasticity, and hardness, thus affecting the quality of tapioca pearls.

**Keywords:** tapioca pearls; γ-aminobutyric acid; rheological properties; gelatinization properties; tapioca pearl quality

近年来，奶茶等饮品深受消费者喜爱，奶茶中的小料种类也日益丰富，例如淀粉粉圆、爆爆珠、仙草、米麻薯等。其中，淀粉粉圆是近几年来深受消费者喜爱的奶茶小料，其主要是以木薯淀粉和羧甲基纤维素钠（carboxymethylcellulose sodium，CMC）为原料制作而成，熟化后的粉圆口感Q弹，有嚼劲。随着工艺的改进，部分粉圆中会加入变性淀粉[1]，一方面能够提高粉圆的口感，使其更有嚼劲；另一方面，能够提高粉圆的冷藏稳定性。近年来，人们对于健康的关注不断加强，对日常饮食的营养要求也日益提高。由于传统的淀粉粉圆用料单一，营养价值有限，因此在粉圆中加入外源性功能活性物质逐渐成为提升粉圆营养价值的重要方式。然而，在粉团或面团中添加外源性物质（如水果浓缩汁、蛋白质、谷物淀粉、膳食纤维等）会不可避免地影响其性质及成品品质[2-5]。徐卓越等[6]通过添加海藻糖、羟丙基二淀粉磷酸酯和环糊精来改善粉圆在贮藏过程中的老化，3种添加剂的添加量增大后，粉圆质构参数均呈现先增加后降低的趋势。Zhang等[7]研究了银耳粉对面团流变学特性及面条品质和风味的影响，结果表明银耳粉提高了面团的黏弹性，影响了面筋网络的形成并且延缓了水分迁移，改善了面条的营养价值和风味。徐露等[8]在粉圆中分别添加单宁酸、茶多酚及原花青素来改善粉圆的质构及蒸煮特性，结果发现3种多酚均增大了粉圆的干物质吸水率和蒸煮损失率。Ansari等[9]研究了聚右旋糖、菊粉和抗性淀粉对面团和面包的影响，发现3种物质都对面团的流变学特性和面包品质产生了影响，其中抗性淀粉效果最佳，能够提高面团的持水性能，有效延缓面包老化。

GABA是一种具有多种功能活性的非蛋白质氨基酸，我国卫生健康委员会将其定义为新资源食品，具有改善机体睡眠质量、降血压等功效[10]，每人每天推荐摄入量不超过500 mg。外源摄入的GABA能够提高机体的抗应激能力，通过内分泌途径缓解应激所致的焦虑或抑郁，进而改善睡眠质量。GABA广泛存在于蔬菜水果中，但含量较少。例如在生菠菜中，GABA质量摩尔浓度较高，为4 140 nmol/kg（以生菠菜干质量计）[11]。在粉圆中添加GABA能够提高粉圆的食用价值，未来有望成为日常补充GABA的有效方式之一。由于GABA本身带有麻味，直接服用其水溶液难以下咽，以粉圆为载体在一定程度上能够掩盖其不良风味。目前，在淀粉粉圆体系中添加GABA的研究较少。

为探究GABA的添加对粉圆质构、口感及风味等性质的影响，分别在粉圆中添加质量分数为6%~14%（按粉体质量计）的GABA，通过流变仪、低场核磁共振波谱仪、冷场发射扫描电子显微镜等技术分析GABA对粉圆的流变学特性、体系水分分布及微观结构的影响，并利用快速黏度分析仪对添加GABA的混合粉的糊化特性进行分析，采用物性分析仪结合感官评定评价熟化后粉圆成品的品质，以期为制备具有良好口感的GABA粉圆提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　材料与试剂

GABA：食品级，华熙生物科技股份有限公司；木薯淀粉：食品级，曼谷淀粉有限公司；CMC：食品级，重庆力宏精细化工有限公司；羟丙基二淀粉磷酸酯：食品级，江苏天将生物科技有限公司；焦糖色：食品级，山东爱普食品工业有限公司。

### 1.2　仪器与设备

物性分析仪：TA.XT Plus100C型，英国Stable Micro Systems公司；流变仪：HR-10型，美国TA公司；低场核磁共振波谱仪：MesoMR23-060VI型，苏州纽迈分析仪器股份有限公司；快速黏度分析仪：RVA型，Perten公司；冷场发射扫描电子显微镜：SU8100型，日本株式会社日立高新技术公司。

### 1.3　方法

#### 1.3.1　预制粉的制备方法

将木薯淀粉和羟丙基二淀粉磷酸酯按质量比7∶3混合均匀，加入质量分数1%的CMC制成混合粉，并以此为基础，分别在混合粉中添加不同质量分数（6%、8%、10%、12%、14%，按粉体质量计）的

GABA，得到粉圆预制粉。按照每颗粉圆的总质量计算，实际GABA质量分数分别为4.00%、5.33%、6.67%、8.00%、9.33%。以不添加GABA的基准混合粉为空白对照。

1.3.2 粉圆的制备方法

按照表1所示配方在上述预制粉中加入90 ℃热水（含有质量分数1%的焦糖色）并揉制均匀，形成表面光滑的粉团，之后使用粉圆机经过挤压、切条、制丸得到粉圆。制备的粉圆大小均一，每颗质量为0.5 g，直径为1 cm。

表1 粉圆的制备配方

Table 1 Composition of tapioca peals

| GABA质量分数/% | 淀粉质量分数/% | CMC质量分数/% | 水分质量分数/% | 焦糖色质量分数/% |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 99 | 1 | 50 | 0.5 |
| 6 | 93 | 1 | 50 | 0.5 |
| 8 | 91 | 1 | 50 | 0.5 |
| 10 | 89 | 1 | 50 | 0.5 |
| 12 | 87 | 1 | 50 | 0.5 |
| 14 | 85 | 1 | 50 | 0.5 |

1.3.3 粉圆的流变学特性测定

参考Gu等[12]的方法并稍加修改。线性黏弹区测定：应用具有平板（直径25 mm，间隙1 mm）的动态流变仪，设置温度25 ℃，频率1 Hz。取2~3 g粉圆置于载物台上，平衡松弛3 min，在应变范围为0.01%~100.00%时进行对数扫描，确定应变为0.10%。动态流变学特性测定：在25 ℃下对粉圆进行频率扫描测试。取2~3 g粉圆置于帕尔贴板上，平衡松弛3 min，进行频率扫描（0.1~10.0 Hz）测试，应变为0.10%。记录$G'$、$G''$。

1.3.4 粉圆的水分分布测定

利用低场核磁共振技术测定粉圆的自旋-自旋弛豫时间（$T_2$）。取3 g新制备的鲜湿粉圆样品置于NMR玻璃管中，采用CPMG脉冲序列测定样品。主要参数设置为：射频信号频率偏移量为393 459.26 Hz，采样点数为39 998，90°脉冲宽度为7.00 μs，180°脉冲宽度为15.04 μs，采样带宽为100 kHz，回波时间为0.4 ms，重复采样等待时间为1 500 ms，射频延时为0.08 ms，模拟增益为20.0 dB，数字增益为3，累加次数为16，回波数为1 000。使用NMRAS分析软件采集信号，反演后对数据进行归一化处理。每个样品进行3次低场核磁共振测试，数据取平均值。

1.3.5 混合粉的糊化特性测定

称一定质量样品放入铝钵中，然后用搅拌叶片将混合淀粉快速搅拌使之混匀，将铝钵和搅拌叶片放入快速黏度分析仪中安装好并进行测试。具体参数如下：50 ℃保持1 min，12 ℃/min升温到95 ℃保持2.5 min，之后降温到50 ℃保持1.5 min。前10 s搅拌速度为960 r/min，之后保持在160 r/min，得到峰值黏度、谷值黏度、衰减值、最终黏度、回生值、峰值时间，以未加GABA的混合粉为空白对照。

1.3.6 粉圆的质构特性测试

质构测定参考朱津津等[13]的方法并稍加修改。在锅中加入180 g水，加热至沸腾，取20 g粉圆放入沸水中焖煮5 min后捞出并浸入冷水中，冷却后置于物性分析仪的探头底座上测定其质构参数。采用P36R探头，测试条件如下：探头测试前速度3.0 mm/s，测试速度1.5 mm/s，测试后速度3.0 mm/s，压缩比50.0%，触发力5.0 g，持续时间30.0 s，二次下压压缩率80.0%，停留间隔2 s，测定粉圆的硬度、弹性、内聚性、胶着性和咀嚼性5个指标。

1.3.7 淀粉粉圆感官评价

参考苏可珍等[14]的方法进行感官评价。感官评定标准见表2，由经过专门培训的10名专业人员组成评价小组，对粉圆进行感官评定。

1.3.8 粉圆微观结构

利用冷场发射扫描电子显微镜观测粉圆微观形貌。取1 g粉圆样品进行真空冻干处理，将冻干后的样品均匀固定在直径1 cm的样品台上，喷金，然后置于扫描电子显微镜下以1 500的放大倍数观察样品。

### 1.4 数据统计分析

数据均为重复3次测定后的平均值。使用Prism9.0软件制作图表，SPSS 26.0软件对数据进行差异显著性分析及方差分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 GABA质量分数对粉圆流变学特性的影响

流变学特性可以反映淀粉制品的品质。在流变学参数中，$G'$代表材料的弹性，$G''$代表材料的黏性，损耗角正切值（tan $\delta$）代表材料弹性与黏性的比值，tan $\delta$越大，材料越表现出液体性质；tan $\delta$越小，材料越表现出固体性质。

表2　淀粉粉圆感官评定标准

Table 2　Standard for sensory evaluation of tapioca pearls

| 评定项目 | | 评定细则 |
|---|---|---|
| 外观（30分） | 色泽（15分） | 色泽均匀，无色差（11~15分）；色泽均匀，稍有色差（6~10分）；色泽不均匀，色差严重（1~5分） |
| | 组织状态（15分） | 表面光滑，圆润饱满，大小均匀（11~15分）；表面稍粗糙，不够圆润饱满，大小稍不均匀（6~10分）；表面粗糙，塌陷，大小不均匀（1~5分） |
| 口感（50分） | 硬度（10分） | 软硬适中（7~10分）；偏硬或偏软（4~6分）；很硬或很软（1~3分） |
| | 弹性（10分） | 弹性适中（7~10分）；弹性一般（4~6分）；弹性较差（1~3分） |
| | 黏性（10分） | 爽滑，不黏牙（7~10分）；基本不黏牙（4~6分）；黏牙或无黏性（1~3分） |
| | 熟化程度（10分） | 无硬芯（7~10分）；稍有硬芯（4~6分）；硬芯（1~3分） |
| | 咀嚼性（10分） | 咀嚼性较好（7~10分）；咀嚼性适中（4~6分）；咀嚼性较差（1~3分） |
| 风味（20分） | 滋味（20分） | 味感协调，无异味（15~20分）；味感不够协调，稍有异味（8~14分）；味感不协调，有明显异味（0~7分） |

动态应变扫描结果表明，粉圆线性黏弹区应变为0.05%~0.10%，与Zhang等[15]的研究结果一致，淀粉粉圆的线性黏弹区应变小于含面筋的粉团。如图1所示，GABA的添加影响了粉圆的$G'$和$G''$。所有粉圆的$G'$和$G''$都随着频率的增大而升高，说明它们具有频率依赖性。添加GABA后粉圆的$G'$和$G''$均低于空白对照组，且$G'$和$G''$均随着GABA质量分数的增加而减小。说明GABA的加入降低了粉圆的黏弹性，一方面，可能是由于GABA的加入会影响水分子与淀粉分子之间的相互作用，抑制淀粉分子吸水膨胀，阻碍淀粉网络结构的形成，从而使粉圆黏弹性下降；另一方面，随着GABA的加入，体系中淀粉被稀释，导致其黏弹性下降。

## 2.2　GABA质量分数对粉圆水分分布的影响

$T_2$是用于定量和定性分析水的重要参数。图2为添加不同质量分数GABA后，粉圆样品的$T_2$图谱。图2中每条曲线都有3个峰，分别代表样品中存在的3种形态的水分：$T_{21}$为结合水，$T_{22}$为介于结合水和自由水之间的吸附水，$T_{23}$为自由水。加入GABA后，粉圆$T_{21}$和$T_{22}$相比于空白对照组没有明显变化，而$T_{23}$变化较为明显。随着GABA质量分数的增加，粉圆的$T_{23}$呈现先减小后增加的趋势。$T_{22}$的峰面积占比最大，为65%，表明吸附水为粉圆中水分的主要存在形式。

不同形态水分的占比可以用峰面积来反映。表3为GABA质量分数对粉圆的$T_2$及峰面积的影响。从不同形态水分对应的峰面积可以看出，在粉圆中加入GABA会使结合水峰面积占比$A_{21}$和自由水峰面积占比$A_{23}$增大，吸附水峰面积占比$A_{22}$减小，说明添加GABA后，粉圆中与淀粉相互作用

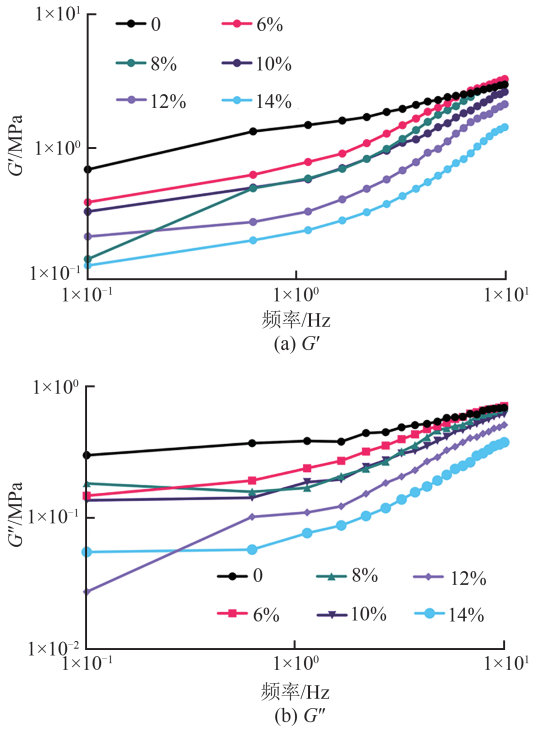



图1　添加不同质量分数GABA的粉圆$G'$和$G''$

Fig. 1　$G'$ and $G''$ of tapioca pearls with the addition of different mass fractions of GABA

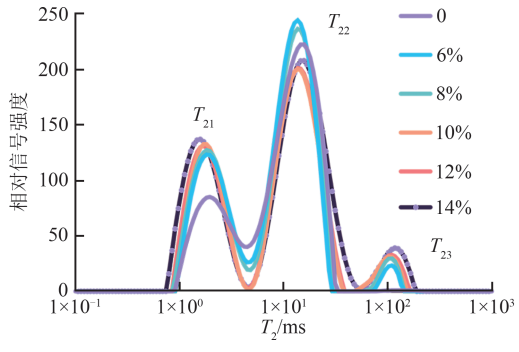



图2　不同质量分数GABA的粉圆样品$T_2$图谱

Fig. 2　$T_2$ spectra of tapioca pearls with the addition of different mass fractions of GABA

的吸附水会向结合水和自由水迁移，导致自由水和结合水占比升高。吸附水主要是由粉圆中的淀粉分子和水分子相互作用产生的。随着GABA质量分数的增加，吸附水占比下降，这可能是由于GABA相对于淀粉是一种小分子物质，能够增加粉圆体系中的空间位阻，使淀粉与水分子的相互作用减小，同时GABA的吸水作用占据了一部分水分子，从而延缓了淀粉颗粒的吸水溶胀[16]。自由水以游离态的形式存在，随着GABA质量分数的提高，粉圆中的自由水占比增加，说明添加GABA后降低了粉圆的持水性能。相比于和淀粉颗粒之间形成氢键，氨基酸会优先与水分子作用，从而改变粉圆中水分子的存在状态[17]。

### 2.3 GABA质量分数对粉圆糊化特性的影响

添加不同质量分数的GABA后，混合粉的糊化特性如表4所示。不添加GABA时，混合粉的峰值黏度和最终黏度分别为（4 543.00±26.87）mPa·s和（3 021.50±38.89）mPa·s；添加GABA后，混合粉体系黏度均显著降低，同时衰减值和回升值也有所下降。一方面，添加GABA使淀粉在糊化体系中的质量分数减少，导致糊化参数发生变化；另一方面，由于GABA吸水性强，在糊化过程中会与淀粉竞争水分，阻碍淀粉颗粒吸水溶胀[18]，使体系黏度降低。氨基酸与水分子和淀粉分子之间的物理相互作用可能是影响糊化黏度最主要的原因[19]。添加GABA后衰减值显著降低，说明淀粉糊稳定性提高[20]。回升值是判断淀粉老化程度的重要指标之一[21]，回升值越小，表明短期内淀粉糊的稳定性越好、淀粉重结晶程度越小。混合粉体系的回升值显著降低，说明GABA可以干扰淀粉分子间相互作用，一定程度增强淀粉的抗老化性能，延缓淀粉老化[22]。

### 2.4 GABA质量分数对熟化后粉圆质构特性的影响

由表5可知，添加GABA对粉圆的质构产生了影响，随着GABA质量分数的增大，粉圆的硬度、胶着性和咀嚼性降低。粉圆的硬度与其直链淀粉质量分数有关，当直链淀粉质量分数高时，淀粉分子之间相互缠绕，交联程度高，因此硬度大。此外，硬度还与淀粉凝胶老化回生有关[23]。粉圆硬度显著下降可能是由于GABA的添加阻碍了粉圆中直链淀粉分子间的交联聚集，减弱了淀粉分子间的相互作用力，阻碍淀粉回生形成有序结构，这与上述粉圆回升值下降的结果一致。粉圆的胶着性随着GABA质量分数的增加而降低，这可能是因为GABA降低了混合粉加热后的糊化峰值黏度[24]。粉圆的咀嚼性下降可能是因为GABA阻碍了淀粉分子间形成氢键，使生成的凝胶网络结构

表3 GABA质量分数对粉圆$T_2$和峰面积的影响

Table 3 Effects of GABA mass fraction on the $T_2$ and peak area of tapioca pearls

| GABA质量分数/% | $T_{21}$/ms | $T_{22}$/ms | $T_{23}$/ms | $A_{21}$/% | $A_{22}$/% | $A_{23}$/% |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.85±0.00$^{ab}$ | 4.82±0.00$^{ab}$ | 62.95±0.00$^{b}$ | 27.04±0.58$^{c}$ | 72.67±0.66$^{a}$ | 0.28±0.07$^{d}$ |
| 6 | 0.88±0.04$^{a}$ | 5.00±0.25$^{a}$ | 67.48±0.00$^{a}$ | 32.60±0.68$^{b}$ | 64.94±0.71$^{b}$ | 2.46±0.04$^{c}$ |
| 8 | 0.83±0.12$^{ab}$ | 5.36±0.26$^{a}$ | 67.48±0.00$^{a}$ | 33.43±0.18$^{ab}$ | 63.40±0.00$^{bc}$ | 3.17±0.18$^{c}$ |
| 10 | 0.88±0.04$^{a}$ | 5.00±0.25$^{a}$ | 44.49±0.00$^{e}$ | 33.15±0.66$^{ab}$ | 62.00±1.33$^{cd}$ | 4.85±0.67$^{b}$ |
| 12 | 0.74±0.07$^{ab}$ | 5.00±0.25$^{a}$ | 47.69±0.00$^{d}$ | 34.00±0.08$^{a}$ | 60.26±0.53$^{de}$ | 5.74±0.61$^{a}$ |
| 14 | 0.67±0.10$^{b}$ | 4.35±0.21$^{b}$ | 54.79±0.00$^{c}$ | 33.38±0.23$^{b}$ | 60.16±0.25$^{e}$ | 6.46±0.02$^{a}$ |

注：同一列中不同字母表示差异显著（$P$<0.05）。

表4 GABA质量分数对混合粉糊化特性的影响

Table 4 Effects of GABA mass fraction on the gelatinization properties of mixed powder

| GABA质量分数/% | 峰值黏度/（mPa·s） | 谷值黏度/（mPa·s） | 衰减值/（mPa·s） | 最终黏度/（mPa·s） | 回升值/（mPa·s） |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 4 543.00±26.87$^{a}$ | 1 530.00±16.97$^{a}$ | 3 013.00±9.90$^{a}$ | 3 021.50±38.89$^{a}$ | 1 491.50±21.92$^{a}$ |
| 6 | 3 753.50±48.79$^{b}$ | 1 193.50±12.02$^{b}$ | 2 560.00±36.77$^{b}$ | 2 237.00±33.94$^{b}$ | 1 043.50±21.92$^{b}$ |
| 8 | 3 643.50±6.36$^{b}$ | 1 176.50±7.78$^{bc}$ | 2 467.00±1.41$^{bc}$ | 2 221.50±2.12$^{bc}$ | 1 045.00±9.90$^{b}$ |
| 10 | 3 388.50±13.34$^{c}$ | 1 154.00±36.77$^{bc}$ | 2 234.50±20.11$^{cd}$ | 2 202.00±15.97$^{bc}$ | 1 048.00±79.20$^{b}$ |
| 12 | 3 302.00±4.24$^{c}$ | 1 103.50±33.23$^{c}$ | 2 198.50±28.99$^{cd}$ | 2 079.50±84.15$^{c}$ | 976.00±50.91$^{bc}$ |
| 14 | 3 049.50±30.41$^{d}$ | 1 016.50±7.78$^{d}$ | 2 033.00±38.18$^{d}$ | 1 928.00±25.46$^{d}$ | 911.50±17.68$^{c}$ |

注：同一列中不同字母表示差异显著（$P$<0.05）。

表5　GABA质量分数对熟化后粉圆质构特性的影响

Table 5　Effects of GABA mass fraction on the textural properties of cooked tapioca pearls

| GABA质量分数/% | 硬度/g | 弹性/% | 内聚性 | 胶着性 | 咀嚼性 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 233.06±9.84$^{a}$ | 51.08±1.71$^{bc}$ | 0.64±0.03$^{bc}$ | 153.39±5.49$^{a}$ | 7 811.19±321.70$^{a}$ |
| 6 | 220.75±10.68$^{a}$ | 51.50±0.38$^{abc}$ | 0.68±0.02$^{a}$ | 149.71±11.21$^{ab}$ | 7 709.02±571.63$^{a}$ |
| 8 | 205.74±11.21$^{b}$ | 52.70±1.01$^{a}$ | 0.69±0.02$^{a}$ | 141.20±10.39$^{b}$ | 7 442.63±589.62$^{a}$ |
| 10 | 187.73±6.89$^{c}$ | 52.39±1.27$^{ab}$ | 0.67±0.03$^{ab}$ | 125.55±3.67$^{c}$ | 6 577.74±269.78$^{b}$ |
| 12 | 181.12±13.39$^{c}$ | 50.73±0.81$^{c}$ | 0.62±0.04$^{c}$ | 111.58±9.69$^{d}$ | 5 663.95±554.64$^{c}$ |
| 14 | 169.41±13.48$^{d}$ | 48.82±0.75$^{d}$ | 0.58±0.02$^{d}$ | 97.74±7.48$^{e}$ | 4 769.95±351.10$^{d}$ |

注：同一列中不同字母表示差异显著（$P$<0.05）。

不均匀，内部抗剪切和恢复能力降低，粉圆更易咀嚼[25-26]。在混合体系中加入GABA对粉圆的弹性和内聚性影响不显著。

## 2.5　GABA质量分数对粉圆感官品质的影响

为探究GABA对粉圆风味及口感的影响，对添加不同质量分数GABA的粉圆进行感官评定。由图3可以看出，随着GABA质量分数的增加，各项感官评分基本均呈现先增加后减小的趋势，当GABA质量分数为10%时，粉圆整体接受度高于其他组，粉圆口感最佳。当GABA质量分数为8%时，粉圆硬度较高，弹性较小，导致整体接受度较差。当质量分数大于10%时，粉圆硬度较低，较为黏牙，导致口感变差，粉圆整体接受度降低。与空白对照组相比，添加GABA对粉圆的外观有所改善。GABA对粉圆的口感影响较大，其中，硬度和弹性评分随着GABA质量分数的增加呈先增加后下降的趋势，并且质量分数为14%时，粉圆黏性评分最低。当质量分数为6%~14%时，GABA的加入对粉圆的风味影响较小。

## 2.6　粉圆的微观结构

为了进一步探究GABA对粉圆内部结构的影响，用冷场发射扫描电子显微镜观察含有不同质量分数GABA的粉圆结构。由图4可知，空白对照组中淀粉颗粒完整，结合紧密。当GABA质量分数为

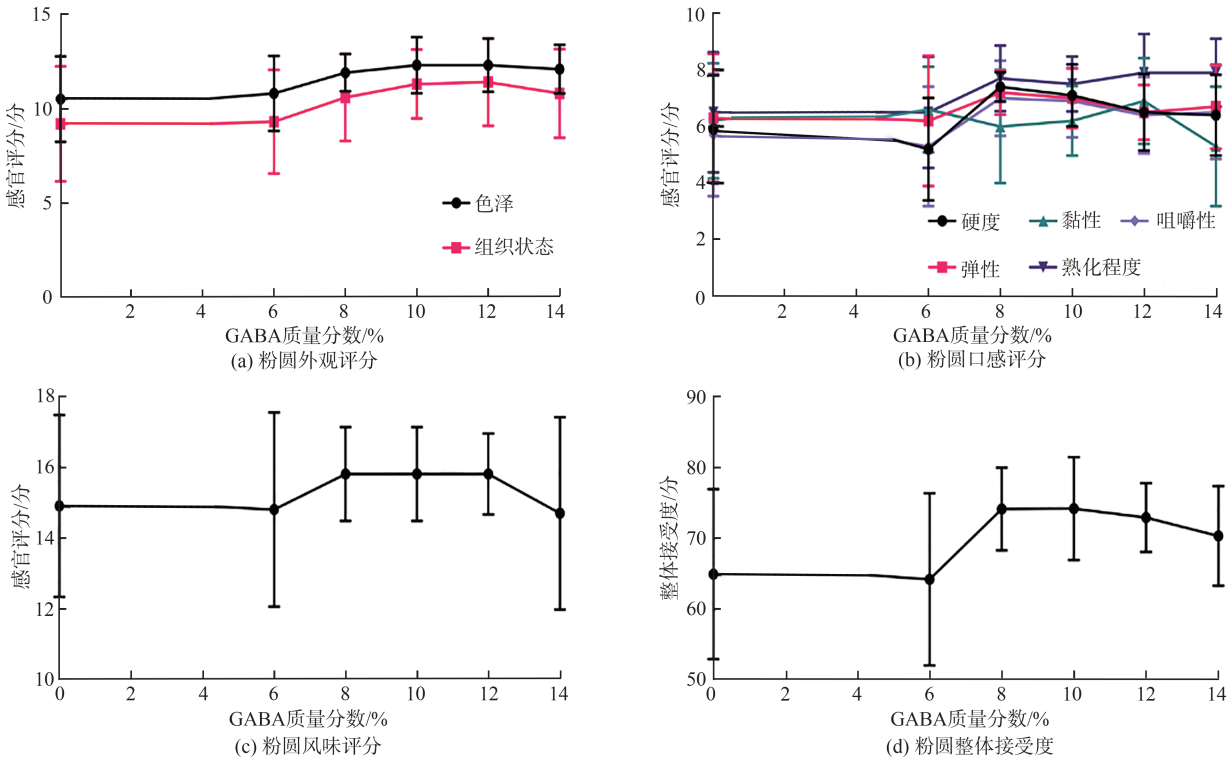
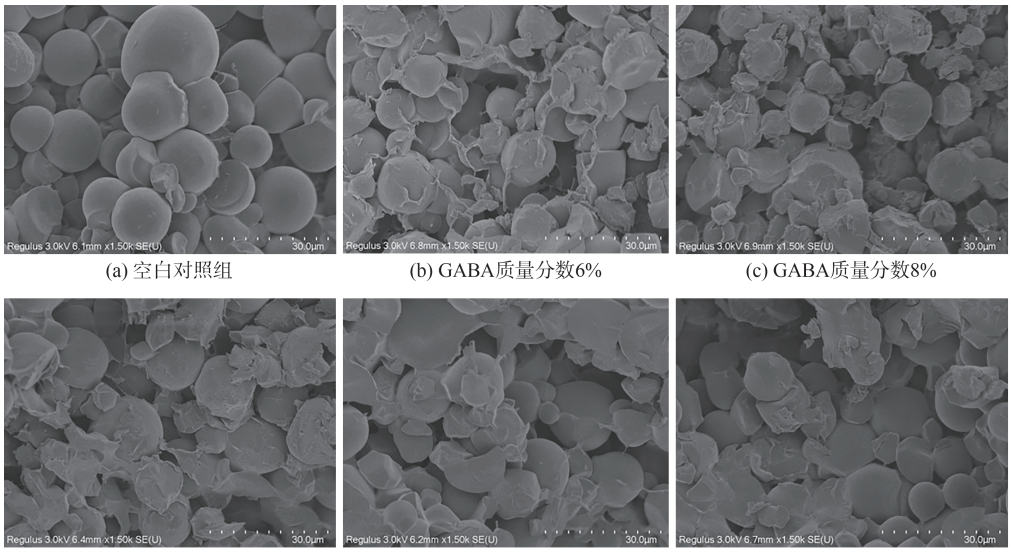



图3　GABA对粉圆感官品质的影响

Fig. 3　Effects of GABA on the sensory quality of tapioca pearls



(a) 空白对照组 (b) GABA质量分数6% (c) GABA质量分数8%

(d) GABA质量分数10% (e) GABA质量分数12% (f) GABA质量分数14%

图 4 不同质量分数 GABA 对粉圆微观结构的影响

Fig. 4 Effects of GABA added at different mass fractions on the microstructure of tapioca pearls

6%时，淀粉表面出现膜状物。当GABA质量分数达到14%时，淀粉网络结构塌陷，出现空洞。未添加GABA时，淀粉颗粒团聚，加入GABA后，淀粉颗粒松散，可能是由于添加GABA后，体系中水分子质量分数不变而淀粉质量分数降低，进而使淀粉分子间的CMC显露，表面出现膜状物。随着GABA质量分数的增加，粉圆内部水分发生迁移，水分状态分布改变，使淀粉分子之间结构松散，粉圆硬度下降。同时，淀粉颗粒之间空隙增大，CMC与淀粉颗粒之间的网络结构变弱，持水性能降低，这与低场核磁共振波谱仪检测结果一致。

## 3 结论

GABA的添加会使粉圆的$G'$、$G''$下降，降低粉圆的黏弹性。随着GABA质量分数的增加，粉圆自由水和结合水占比有所升高，吸附水占比降低。同时，添加GABA后，粉圆混合粉糊化黏度、衰减值和回升值都有所减小，能够延缓淀粉老化。当GABA质量分数为6%~14%时，GABA对粉圆风味影响较小。当GABA质量分数为10%时，感官评分最高，粉圆口感最佳。综合来看，添加GABA会弱化粉圆网络结构，使粉圆持水性能下降，降低粉圆的黏弹性和硬度，从而影响粉圆成品的品质。

## 参考文献


[1] 徐慧敏，胡荣柳，张淑芬，等. 木薯变性淀粉在芋圆制作中的应用研究[J]. 江苏调味副食品，2020，4：11-14.

XU H M，HU R L，ZHANG S F，et al. Study on the application of different tapioca modified starch in taro[J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food，2020，37(4)：11-14.(in Chinese)

[2] AL-ATTAR H，AHMED J，THOMAS L. Rheological，pasting and textural properties of corn flour as influenced bythe addition of rice and lentil flour[J]. LWT-Food Science and Technology，2022，160：113231.

[3] HU X，CHENG L，HONG Y，et al. Impact of celluloses and pectins restrictions on gluten development and water distribution in potato-wheat flour dough [J]. International Journal of Biological Macromolecules，2022，206：534-542.

[4] POURMOHAMMADI K，ABEDI E，FARAHMANDI S，et al. Modeling the effects of corn and wheat resistant starch on texture properties and quality of resistant starch-enrichment dough and biscuit [J]. Journal of Food Process Engineering，2019，42(2)：12962.

[5] 谷绒，董道顺. 桂圆珍珠粉圆的研制[J]. 农产品加工学刊，2014，22：7-9.

GU R，DONG D S. The development of Longan pearl powder [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing，2014(22)：7-9.(in Chinese)

[6] 徐卓越，詹磊，王玉牛，等. 三种食品添加剂对粉圆抗老化特性的研究[J]. 中国食品添加剂，2023，34(2)：197-202.

XU Z Y，ZHAN L，WANG Y N，et al. Effects of three food additives on tapioca pearls anti-aging properties[J]. China Food Additives，2023，34(2)：197-202.(in Chinese)

[7] ZHANG L，CHEN J，XU F，et al. Effect of *Tremella fuciformis* on dough structure and rheology，noodle flavor，

and quality characteristics[J]. LWT-Food Science and Technology,2022,172:114180.

[8] 徐露,蔡淑玉,陈乐宜,等. 不同改良剂对木薯粉圆品质的影响[J]. 中国粮油学报,2023,38(10):81-89.
XU L, CAI S Y, CHEN L Y, et al. Effect of different modifiers on the quality of tapioca pearl[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 81-89.(in Chinese)

[9] ANSARI F, PIMENTEL T C, POURJAFAR H, et al. The influence of prebiotics on wheat flour, dough, and bread properties; resistant starch, polydextrose, and inulin[J]. Foods,2022,11(21):3366.

[10] DIANA M, QUILEZ J, RAFECAS M. Gamma-aminobutyric acid as a bioactive compound in foods: a review[J]. Journal of Functional Foods, 2014, 10: 407-420.

[11] OH S H, MOON Y J, OH C H. γ-Aminobutyric acid (GABA) content of selected uncooked foods[J]. Preventive Nutrition and Food Science,2003,8(1):75-78.

[12] GU Y, QIAN X, SUN B, et al. Effects of gelatinization degree and boiling water kneading on the rheology characteristics of gluten-free oat dough[J]. Food Chemistry,2023,404:134715.

[13] 朱津津,潘治利,谢新华,等. 汤圆TPA质构特性测试条件的优化[J]. 食品科学,2013,34(6):171-174.
ZHU J J, PAN Z L, XIE X H, et al. Optimization of testing conditions for TPA analysis of rice dumplings[J]. Food Science,2013,34(6):171-174.(in Chinese)

[14] 苏可珍,唐月登,王玉牛,等. 响应面法优化软糯口感的粉圆制作配方[J]. 南方农业学报,2022,53(2):516-525.
SU K Z, TANG Y D, WANG Y N, et al. Response surface methodology for the optimization of soft waxy taste from Fenyuan processing formula[J]. Journal of Southern Agriculture,2022,53(2):516-525.(in Chinese)

[15] ZHANG D, MU T, SUN H. Comparative study of the effect of starches from five different sources on the rheological properties of gluten-free model doughs[J]. Carbohydrate Polymers,2017,176:345-355.

[16] 裴斐,倪晓蕾,孙昕炀,等. 低聚果糖对大米淀粉回生特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(2):27-33.
PEI F, NI X L, SUN X Y, et al. Effects of fructose-oligosaccharides on retrogradation characteristics of rice starch[J]. Food Science,2022,43(2):27-33.(in Chinese)

[17] 罗登林,梁旭苹,徐宝成,等. 菊粉对面团中水分迁移行为的影响规律研究[J]. 农业机械学报,2017,48(2):335-341.
LUO D L, LIANG X P, XU B C, et al. Effect of inulin on moisture migration behavior in wheat dough[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):335-341.(in Chinese)

[18] 许慧娴. 氨基酸对淀粉聚集态结构形貌及相变行为的影响研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.

[19] CHEN X, LUO J, FU L, et al. Structural, physicochemical, and digestibility properties of starch-soybean peptide complex subjected to heat moisture treatment[J]. Food Chemistry,2019,297:124957.

[20] GAŁKOWSKA D D G U E P J, LESŁAW. Effects of amino acids on gelatinization, pasting and rheological properties of modified potato starches[J]. Food Hydrocolloids,2019,92:143-154.

[21] LUO S J, CHEN R Y, HUANG L, et al. Investigation on the influence of pectin structures on the pasting properties of rice starch by multiple regression[J]. Food Hydrocolloids,2017,63:580-584.

[22] CORREA M J, FERRERO C. Thermal behaviour of wheat starch and flour at different water levels: effect of pectins, modified celluloses and NaCl[J]. Starch-Starke,2015,67(3-4):338-347.

[23] 姜小苓,李淦,胡喜贵,等. 麦麸膳食纤维对小麦粉糊化及凝胶质构特性的影响[J]. 食品工业科技,2018,39(8):1-5,12.
JIANG X L, LI G, HU X G, et al. Effect of wheat bran dietary fiber on pasting and gel textural properties of wheat flour[J]. Science and Technology of Food Industry,2018,39(8):1-5,12.(in Chinese)

[24] LUO D, LI Y, XU B, et al. Effects of inulin with different degree of polymerization on gelatinization and retrogradation of wheat starch[J]. Food Chemistry, 2017,229:35-43.

[25] 陆益钡, 杜童申, 马骏骅,等. 汤圆粉团混料设计及抗冻性优化[J]. 食品与机械,2022,38(10):201-209.
LU Y B, DU T S, MA J H, et al. Study on mixing design and freezing resistance optimization of glutinous rice balls[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 201-209.(in Chinese)

[26] 翟羽恒. 果胶对糯米淀粉特性的影响及在汤圆中的应用[D]. 无锡:江南大学,2022.

（责任编辑：史润东东）