梅州, 王文君, 冯鑫璐, 等. 燕麦 β-葡聚糖和茶多酚共存对面条品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 286−293. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060081

MEI Zhou, WANG Wenjun, FENG Xinlu, et al. Effect of the Coexistence of Oat β-Glucan and Tea Polyphenols on the Quality of Wheat Flour Noodles[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 286−293. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060081

· 食品添加剂 ·

燕麦 β-葡聚糖和茶多酚共存对面条品质的影响

梅　州[1], 王文君[1], 冯鑫璐[1], 谢文静[1], 陈凌利[1], 陈　慧[1], 肖　青[2,*], 林苏芸[1,*]

（1.江西农业大学食品科学与工程学院, 江西南昌 330045;
2.江西省科学院应用化学研究所, 江西南昌 330096）

摘　要: 通过添加膳食纤维和多酚等生物活性成分强化面条营养，已成为用来满足消费者健康需求的重要策略，但是两者共存对面条品质的影响有待进一步探究。因此，本文旨在探究燕麦 β-葡聚糖（OβG）和茶多酚（TP）共存对面条品质的影响，主要通过测定面条蒸煮、质构和消化等特性进行品质表征。结果表明，TP 的添加增加了面条硬度，而 OβG（1%→5%）的添加导致 OβG+TP 复合组中面条硬度和咀嚼度分别下降 23.02% 和 20.47%，说明 OβG 的存在有利于恢复 TP 对面条硬度和咀嚼度造成的负面影响。当 TP 含量增加到 2%，在 OβG+TP 复合组中，面条最佳蒸煮时间（2.56 min）低于单独添加 TP 组别（3.00 min），蒸煮损失率（5.85%）高于单独添加 TP 的组别（5.23%）。此外，TP 会显著抑制蛋白质和淀粉消化，但随着 OβG 的添加（5%），与对应的单独添加 TP 的组别（蛋白质消化率为 40.33%）相比，OβG+TP 复合组中观察到的蛋白质消化率显著升高（45.73%）；复合组含更高比例的快消化淀粉（35.02% vs. 32.41%），及更低比例的抗消化淀粉（46.38% vs. 50.18%）。综上，OβG 的存在会削弱 TP 对面条体外蛋白质和淀粉消化的抑制作用。

关键词: 面条, 燕麦, β-葡聚糖, 茶多酚, 蒸煮特性, 质构特性, 消化特性

中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0286−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060081　　本文网刊:

Effect of the Coexistence of Oat β-Glucan and Tea Polyphenols on the Quality of Wheat Flour Noodles

MEI Zhou[1], WANG Wenjun[1], FENG Xinlu[1], XIE Wenjing[1], CHEN Lingli[1], CHEN Hui[1], XIAO Qing[2,*], LIN Suyun[1,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;
2.Institute of Applied Chemistry, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China）

Abstract: Enhancing the nutritional profile of noodles by incorporating bioactive components such as dietary fiber and polyphenols has become an important strategy to meet consumers' health demands. However, the impact of their coexistence on noodle quality requires further investigation. Therefore, this study aims to explore the effect of the combined addition of oat β-glucan (OβG) and tea polyphenols (TP) on noodle qualities, primarily through the evaluation of cooking, textural, and digestive properties. The results showed that the addition of TP increased noodle hardness, whereas the incorporation of OβG (1%→5%) led to decrease (about 23.02%) in hardness and chewiness (about 20.47%) in the OβG+TP groups, indicating that OβG can mitigate the adverse effects of TP on noodle textural properties. When the TP content increased to 2%, the optimal cooking time of the OβG+TP groups (2.56 min) was lower than the TP groups (3.00 min), while the cook-

收稿日期: 2025−06−09

基金项目: 国家自然科学基金（32560541）; 江西省自然科学基金项目（20242BAB25405）; 江西省自然科学基金项目（20232BAB215064）。

作者简介: 梅州（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能性食品的开发与利用, E-mail: 1557029538@qq.com。

*** 通信作者:** 肖青（1969−）, 女, 本科, 副研究员, 研究方向: 天然产物提取与食品检测, E-mail: 837768890@qq.com。

林苏芸（1990−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 功能性食品开发与研究, E-mail: ncusklinsuyun@163.com。

ing loss (5.85%) was higher compared to the TP groups (5.23%). Furthermore, TP significantly inhibited the protein and starch digestion of noodle. However, with the addition of OβG (5%), the protein digestibility in the OβG+TP group was significantly higher (45.73%) compared to the corresponding TP group (40.33%). Moreover, the OβG+TP group also had a higher proportion of rapidly digestible starch (35.02% vs. 32.41%) and a lower proportion of resistant starch (46.38% vs. 50.18%). These results demonstrated that the presence of OβG attenuates the inhibitory effect of TP on *in vitro* protein and starch digestion in noodles.

Key words: wheat flour noodles; oat; β-glucan; tea polyphenols; cooking properties; textural properties; digestive properties

面条因其加工便捷、口感优良等特点，是最常见的传统主食之一。然而，传统精制面条在营养组成方面已难以满足消费者日益增长的营养健康需求。因此，通过向面条中引入膳食纤维和多酚等生物活性成分以提高其营养健康价值，已成为食品营养强化领域的重要策略和研究热点[1]。已有研究表明，单独添加多酚或膳食纤维会对面条的蒸煮、质构和消化特性等品质特性造成影响。例如 Wang 等[2] 发现添加姜黄素可会降低面条的硬度、粘附性、咀嚼性。Tang 等[3] 研究表明表没食子儿茶素没食子酸酯在降低面条的淀粉消化率的同时，可显著改善其蒸煮品质。Aravind 等[4] 证实添加 5% 可溶性菊粉可有效抑制淀粉水解，但会显著延长面条最佳蒸煮时间并增加蒸煮损失率。

燕麦 β-葡聚糖（OβG）具有调节血脂血糖、抗癌等生理活性，同时其较高的持水性和黏性也能在食品加工中有效增加食品粘稠度和改善品质[5]。茶多酚（TP）具有抗炎、降血糖等生理功能，同时在食品加工中能赋予食品抗氧化、抑菌性等特性[6]。OβG 和 TP 各自独特的健康功效和食品加工特性使其广泛应用于食品原料或添加剂领域，因此，两种活性成分在面条制品中共存的现象也日渐普遍。近年来，研究人员通过单独添加 OβG 或 TP 至面条体系，探究其对面条品质的影响。例如 Lee 等[7] 发现适量添加 OβG 能改善面条的蒸煮特性，但过量 OβG 对面条的硬度、风味等质量特性造成负面影响。Han 等[8] 研究表明适量 TP 能提高面条弹性和咀嚼度。此外，研究还发现单独添加 OβG 或 TP 均会抑制淀粉体外消化[9−10]。然而，现有研究多聚焦于 OβG 或 TP 单独添加对面条的影响，而关于二者共存对面条影响的研究相对匮乏。本课题先前研究表明 OβG 和 TP 共存时，OβG 能增强 TP 对面筋蛋白聚集性的影响[11]，增强对 TP 面团流变特性，削弱对面团糊化特性的影响[12]，这极有可能会对最终面条的品质造成负面影响。

然而，目前两者共存对面条品质特性的影响有待进一步探明，基于此，本研究选取面条作为研究对象，解析 OβG、TP 和 OβG+TP 对面条品质包括面条蒸煮特性（最佳蒸煮时间、断条率、吸水率和蒸煮损失率）、质构特性（硬度、弹性、内聚性和咀嚼度）以及消化特性（蛋白质消化和淀粉消化）的影响，为研发膳食纤维和多酚共存的面条提供理论依据与技术支持，同时为研发膳食纤维和多酚共存的食品提供一些新的灵感。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

中筋面粉　来源于佛山市南海平南面粉有限公司；81.1%OβG　来源于广州中康食品有限公司；91.4%TP　来源于湖州荣凯叶提取物有限公司；麦芽糖标准品、P8160 胃蛋白酶（≥250 U/mg）、T8150 胰蛋白酶（250 U/mg）、3,5-二硝基水杨酸（DNS）试剂、淀粉含量试剂盒　均来自北京索莱宝有限公司；A769410 猪胰 α-淀粉酶（40~60 U/mg）　来自上海麦克林生化科技股份有限公司；其余实验试剂均为分析级；实验用水均为蒸馏水。

Kitchen Aid 5 QT 和面机　美国凯膳怡公司；DM-DYYM02 压面机　浙江俊媳妇厨具有限公司；Scientz-10N 冷冻干燥机　宁波新芝生物科技有限公司；FW-100 高速万能粉碎机　北京市永光明医疗仪器有限公司；SMS 质构仪　厦门超技仪器设备有限公司；M2 酶标仪　美国 MDC 公司；DU-19 GW 磁力搅拌水浴锅　宁国沙鹰科学仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　面条的制备　在面粉中添加不同比例替代物（OβG、TP 和 OβG+TP）用于制备混合粉。OβG≥5% 会对面团特性产生负面影响[13]，因此选用 1%、3% 和 5% 的 OβG 作为浓度梯度进行研究。根据中国食品安全国家标准食品添加剂使用标准（GB 2760-2014），小麦粉产品的 TP（儿茶素为指标）浓度在 0.02 g/100 g 以内，考虑到 TP 研究的其他一些实际应用[14−15]，最后，计算出小麦面粉中 TP 的最高添加量为 2%，因此，选择 0.5%、1% 和 2% 的 TP 作为研究的梯度浓度。

对于 OβG 组别，OβG 含量分别占混合粉总重量的 1%、3%、5%（w/w）；对于 TP 组别，TP 含量分别占混合粉总重量的 0.5%、1%、2%（w/w）；对于 OβG+TP 组别，替代物分别占混合粉总重量的 1%OβG+0.5%TP、3%OβG+1%TP、5%OβG+2%TP（w/w）；不添加 OβG、TP 作为空白对照，记为“0”。面条的制备参考 Han 等[8] 的方法并进行适当修改。根据预实验结果，水分添加量为面团吸水率的 75%，即含有 1%、3% 和 5%OβG 组别的水分添加量分别为 44.03、47.00 和 50.29 mL/100 g；含有 0.5%、1% 和 2%TP 组别的水分添加量分别为 42.34、42.04 和 41.74 mL/100 g；含有 1%OβG+0.5%TP、3%OβG+

1%TP 和 5%OβG+2%TP 组别的水分添加量分别为 43.61、46.77和 49.39 mL/100 g; 空白对照组的水分添加量为 42.90 mL/100 g。随后使用和面机先 2 档(高速)运行 2 min, 再切换成 1 档(低速)运行 5 min, 收集面絮并立即密封静置 20 min。使用压面机将面絮先 5 档压 3 次, 然后 7 档压 2 次成面片, 面片被切成长 15 cm、厚 1.5 mm、宽 2.5 mm 的面条。

1.2.2 面条蒸煮特性测定

1.2.2.1 面条最佳蒸煮时间 参考 Li 等[16] 的方法并进行适当修改。取 20 根 1.2.1 制备的面条置于 400 mL 沸水中, 每间隔 10 s 取样一根, 将其切成 1 cm 长段后夹在两块玻璃板之间观察面条中间白芯的变化, 以白芯刚好完全消失的时间记为最佳蒸煮时间。

1.2.2.2 面条断条率 取 1.2.1 制备的鲜面条 20 根置于 400 mL 沸水中, 在最佳蒸煮时间下, 记录面条断条数量, 并根据以下公式计算面条断条率:

$$断条率(\%)=\frac{断条数量}{总蒸煮面条数量}\times 100 \qquad 式(1)$$

1.2.2.3 面条吸水率 取 20 g 鲜面条置于 400 mL 沸水中蒸煮至最佳蒸煮时间, 随后捞出面条至冷水中 5 s, 然后将其取出, 擦干表面水分后测量重量[17]。面条吸水率(Water absorption index, %)按照下列公式计算:

$$面条吸水率(\%)=[m_2-m_1\times(1-w)]/[m_1\times(1-w)]\times 100 \qquad 式(2)$$

其中, m_2 为面条煮熟擦干水分后的重量, g; m_1 为未蒸煮前鲜面条的重量, g; w 为未蒸煮前鲜面条水分含量, %。

1.2.2.4 面条蒸煮损失率 收集 1.2.2.3 的面汤, 冷却后加蒸馏水定容至 500 mL。取其中 50 mL 面汤转移至 100 mL 烧杯中, 经电炉初步干燥后, 于 105 ℃下鼓风干燥机烘干至恒重[18]。蒸煮损失率按照下列公式计算:

$$面条蒸煮损失率(\%)=m_3\times 10/[m_1\times(1-w)]\times 100 \qquad 式(3)$$

其中, m_3 为烘干残留物质重量, g, m_1 为未蒸煮前鲜面条的重量, g, w 为未蒸煮前鲜面条水分含量, %。

1.2.3 面条质构特性 参考 Nguyen 等[19] 方法。将煮至最佳蒸煮时间的面条迅速置于蒸馏水中冷却 5 s, 取出后擦干表面水分, 密封于自封袋中静置 6 min。质构仪经校准后, 选择 Pasta 硬度/黏度实验。测试条件: TPA 模式, P50 探头, 应变 70%, 测试前速度 4.0 mm/s, 测试中速度 1.0 mm/s, 测试后速度 1.0 mm/s, 触发力 10.0 g, 间隔时间 1 s。记录面条硬度、弹性、内聚性和咀嚼度。

1.2.4 面条消化特性

1.2.4.1 蛋白质消化 参考 Englyst 等[20] 的方法并稍微修改测定蛋白质消化。根据 1.2.2.1 所得的最佳蒸煮时间制备熟面条, 面条冷却后立即置于−80 ℃保存一晚, 随后转移至−20 ℃ 冰箱保存, 利用冷冻干燥机对面条进行干燥处理, 再将干燥后的面条用粉碎机使其粒度小于 80 目。消化分为胃和小肠消化两个阶段。在胃消化阶段: 称取 0.5 g 冻干面条粉置于 50 mL 离心管中, 加入 5 mL 10 mg/mL 胃蛋白酶溶液(胃蛋白酶溶于 0.01 mol/L, pH1.5 HCl-KCl 缓冲液), 将混合体系置于 37 ℃ 恒速磁力搅拌水浴锅中培养 30 min。在小肠消化阶段: 将胃消化阶段结束的混合溶液用 NaOH 溶液调节至中性, 再依次加入 15 mL、0.1 mol/L 乙酸钠缓冲液(pH6.8), 1 mL、1 mg/mL 胰蛋白酶溶液(胰蛋白酶溶解在乙酸钠缓冲液中), 0.1 mL、250 U/mL 猪胰 α-淀粉酶溶液(猪胰 α-淀粉酶溶解在乙酸钠缓冲液), 继续在 37 ℃ 恒速磁力搅拌水浴锅中孵育 2 h 后, 取其中 1 mL 消化液, 于沸水中加热 5 min 使酶失活。采用考马斯亮蓝法, 用牛血清蛋白标准品制作标准曲线测量蛋白质含量, 根据以下公式计算蛋白质消化率:

$$蛋白质消化率(\%)=(c_0-c_1)/c_0\times 100 \qquad 式(4)$$

其中, c_0 代表消化前面条中蛋白质的含量; c_1 代表消化结束后面条中蛋白质的含量。

1.2.4.2 淀粉消化 根据 1.2.4.1 步骤进行细微调整测量淀粉消化。在 1.2.4.1 步骤中小肠消化阶段取 0、20、120 min 时间节点混合物 0.2 mL 于 0.6 mL 无水乙醇中使酶失活, 离心(10000×g, 20 min)后用 3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测量上清液中还原糖含量。用淀粉含量试剂盒测定面条中总淀粉含量(TS)。快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)计算参考下列式:

$$RDS(\%)=(G_{20}-G_0)\times 0.95/TS\times 100 \qquad 式(5)$$

$$SDS(\%)=(G_{120}-G_{20})\times 0.95/TS\times 100 \qquad 式(6)$$

$$RS(\%)=100\%-RDS-SDS \qquad 式(7)$$

其中, G_0 为游离还原糖含量; G_{20} 为 20 min 后释放还原糖含量; G_{120} 为 120 min 后释放还原糖含量; TS 为样品中总淀粉含量; 0.95 为淀粉转换系数[21]。

1.3 数据处理

所有试验至少重复三次, 实验结果以平均值±标准差表示。采用 SPSS 27.0 软件, 选择 Duncan 多元极差检验法分析样本间统计学差异, 同一指标的所有数据一起分析, 不同的字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

2 结果与分析

2.1 面条蒸煮特性

2.1.1 面条最佳蒸煮时间与断条率 如表 1 所示, 同

表 1　OβG、TP 和 OβG+TP 对面条最佳蒸煮时间和断条率的影响

Table 1　Effect of OβG, TP, and OβG+TP on the optimum cooking time and breakage rate of noodles

样品	最佳蒸煮时间(min)	断条率(%)
对照(0%)	4.83±0.00^{a}	0^{b}
1%OβG	4.94±0.08^{a}	0^{b}
3%OβG	4.61±0.08^{b}	0^{b}
5%OβG	4.17±0.14^{c}	0^{b}
0.5%TP	4.22±0.08^{c}	0^{b}
1%TP	3.78±0.08^{d}	0^{b}
2%TP	3.00±0.14^{e}	11.7±2.36^{a}
1%OβG+0.5%TP	4.50±0.00^{b}	0^{b}
3%OβG+1%TP	3.83±0.14^{d}	0^{b}
5%OβG+2%TP	2.56±0.08^{f}	13.3±2.36^{a}

注：不同小写字母表示同列数据差异显著，P<0.05。

一添加物(OβG、TP 或 OβG+TP)组中，随着添加物含量的增加，面条最佳蒸煮时间呈显著(P<0.05)下降的趋势。

在仅添加 OβG 组中，造成这种现象可能是一方面，OβG 阻碍和破坏面筋网络结构，这有利于水分进入面条内部，导致面条更容易煮熟[22−23]。另一方面，推测 OβG 可能作为填料分布于面筋蛋白网络结构[24]，其高亲水性有利于水分快速渗透至面条内部，增加淀粉和蛋白质与水接触效率，从而导致蒸煮时间变短。值得指出的是，与空白对照组相比，单独添加 1%OβG 的面条最佳蒸煮时间无显著变化，这可能是由于 OβG 添加量较低，对面筋蛋白破坏程度有限。

在仅添加 TP 组中，造成这种现象可能是，其一，TP 亲水性酚羟基与支链淀粉侧链相互作用，不同程度的结合到淀粉颗粒的非晶态区，从而改变晶体和非晶体基质之间的耦合力，使得淀粉颗粒用以水化、凝胶化所需的热能较少，蒸煮时间下降[25]。其二，随着 TP 含量增加，面条中游离巯基含量显著(P<0.05)增加[11]，导致面筋网络被破坏，水分更容易进入面条内部，引起最佳蒸煮时间降低。

在二者共存组中，面条最佳蒸煮时间与单独添加 TP 组别的相似，这表明 TP 是影响面条最佳蒸煮时间的主要因素。而当面条中 OβG 与 TP 含量分别达到 5% 与 2%，面条最佳蒸煮时间(2.56 min)显著(P<0.05)低于单独添加 TP(3 min)和 OβG(4.17 min)的组别，这表明高浓度的 OβG 促使含有 TP 的面条更快成熟。这与 OβG 会诱导面筋扩张，促进更多 TP 进入和攻击面筋蛋白，导致面筋网络进一步被破坏，使得水分更容易进入面条内部有关[11]。

此外，OβG 不会导致面条断条，但不论是否添加 OβG，当 TP 含量到达 2% 时，面条断条率均显著(P<0.05)增加，这表明 TP 含量是影响面条断条率的主要因素。一般而言，面团延展性越好，面条断条率越低。但过量 TP 破坏面筋网络结构，从而使面条断裂。

2.1.2　面条吸水率　在蒸煮过程中，面条中淀粉、蛋白质等基质会吸水膨胀，从而导致面条吸水率出现改变。如图 1 所示，添加 OβG 并不会导致面条吸水率出现显著(P<0.05)差异。无论是否添加 OβG；添加 TP 均会降低面条吸水率，这表明 TP 是影响面条吸水率的主要因素。推测这可能与 TP 和水竞争与面筋蛋白、淀粉之间氢键结合位点有关[11,26]。此外，由于 TP 促使面筋蛋白解聚，面筋网络结构被破坏[11]，导致被面筋蛋白包裹的淀粉颗粒暴露程度增加，促使面条在蒸煮过程中有更多淀粉、蛋白等基质溶出，从而造成面条吸水率下降。王瑞斌等[27] 也报道了多酚的添加导致面条蒸煮吸水率下降。

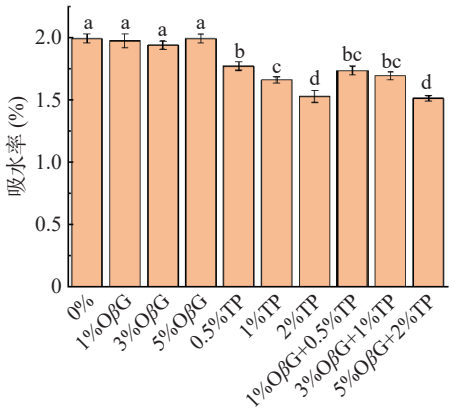


图 1　OβG、TP 和 OβG+TP 对面条吸水率的影响

Fig.1　Effects of OβG, TP, and OβG+TP on the water absorption index of noodles

注：不同小写字母表示数据差异显著，P<0.0；图 2、图 3 同。

2.1.3　面条蒸煮损失率　如图 2 所示，随着 OβG 含量增加(0→5%)，面条蒸煮损失率增大，这可能是因为，一方面，OβG 与面筋蛋白竞争吸水，阻碍形成面筋网络[13]，从而导致镶嵌或被面筋蛋白网络包裹的淀粉颗粒暴露，在蒸煮过程中溶出。另一方面，OβG 属于水溶性膳食纤维，在蒸煮过程中溶出同样会增加面条蒸煮损失。

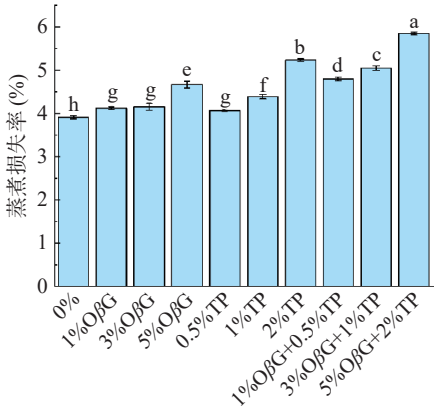


图 2　OβG、TP 和 OβG+TP 对面条蒸煮损失率的影响

Fig.2　Effects of OβG, TP, and OβG+TP on the cooking loss rate of noodles

随着 TP 含量增加(0→2%)，面条蒸煮损失率增大，这可能是由于 TP 破坏维持稳定面筋网络的二硫

键，促使面筋蛋白分解，面筋网络发生断裂，增大淀粉颗粒暴露程度和数量[14]，导致面条在蒸煮过程中蛋白质、淀粉颗粒损失高于对照组。

而随着二者共存含量增加，面条蒸煮损失（5.85%）增大，且高于单独添加 OβG（4.67%）和 TP（5.23%）组别，这表明二者共存会促使面条基质损失。原因可能是 OβG 促使面筋形成开放结构，增加 TP 进入面筋蛋白内部，加剧面筋网络破坏程度，增加淀粉暴露程度，使其在蒸煮过程中更容易流失，从而造成蒸煮损失率显著（P<0.05）增加。

2.2 面条质构特性

面条质构特性直接影响消费者接受度，通过使用质构仪 TPA 模型可以科学准确测定面条硬度、弹性、内聚性和咀嚼度等指标，从而有助于客观判断面条品质[23]。面条硬度越大，咬断时所需要力越大，在一定范围内，面条硬度越小，淀粉凝胶越软，咀嚼度越小[28]。咀嚼度数值上与硬度、弹性、内聚性三者乘积相同[29]。

如表 2 所示，随着 TP 含量增加（0→2%），面条硬度显著（P<0.05）增加，这可能是因为当淀粉糊化和老化时，直链淀粉和支链淀粉发生聚集和重排，并通过氢键和空间构象形成稳定淀粉网络结构[30]。由于 TP 酚羟基和直链淀粉之间易通过氢键发生交联和重排，形成结构更加致密淀粉凝胶，从而增加面条硬度[3]。添加 TP 导致面条硬度显著（P<0.05）上升，而面条咀嚼度无显著变化，这可能与添加 TP 导致面条弹性下降有关。因为过量 TP 通过促进游离巯基含量来破坏面筋网络结构，并促使面筋蛋白发生解聚，从而导致面条弹性降低，降低面条品质[11,31]。OβG 的存在会导致 TP 面条弹性无显著性变化，这说明 OβG 能改善添加 TP 导致面条弹性下降的影响。推测这与 OβG 能与 TP 相结合[32]，弱化 TP 对淀粉弹性的负面影响。

不管是否添加 TP，随着 OβG 含量增加（1%→5%），面条硬度和咀嚼度分别下降 23.02% 和 20.47%（表 2），且质构相关参数与单独添加 OβG 值更接近，这表明当 TP 与 OβG 共存时，OβG是影响面条质构特性的主要因素。这可能是因为 OβG 降低淀粉回生，抑制淀粉老化，从而降低面条硬度和咀嚼度[33]。有文献报道，淀粉老化现象会增加面条硬度，这对于维持面条质构特性具有负面影响[34]。此外，随着 OβG 含量增加，面筋网络结构被稀释，也会降低面条硬度和咀嚼度[35]。

2.3 面条消化特性

2.3.1 蛋白质消化 如图 3A 所示，同一添加物（OβG、TP 或 OβG+TP）均会抑制面条蛋白质消化。在仅添加 OβG 组中，造成这一现象的原因可能是 OβG 黏度高，可能形成凝胶，从物理层面上阻碍蛋白酶与面筋蛋白相结合，从而导致蛋白质消化率下降。此外，添加 OβG 导致面筋蛋白聚集，面筋蛋白构象发生改变[36−37]，这可能会减少面筋蛋白与蛋白酶结合位点从而导致消化率降低。Zhang 等[37] 也报道了膳食纤维的添加导致小麦面条蛋白质消化受到抑制。

在仅添加 TP 组中，当 TP 含量增加到 2% 时，蛋白质消化率下降 34.11%。这一现象与 TP 同酶结合，抑制蛋白酶活性有关[38]。在添加 5%OβG+2%TP 共存组中，蛋白质消化率降低了 25.29%，这是因为 OβG 可能与 TP 相互作用，削弱 TP 对蛋白酶活性的抑制作用[39−40]，从而使 OβG 与 TP 共存面条蛋白质消化率（45.73%）相比于同浓度下 TP 面条的消化率（40.33%）有所增加。此外，OβG 与 TP 共存会使得面筋蛋白解聚，面筋蛋白展开或被破坏[11]，增加蛋白质与蛋白酶结合位点，从而一定程度上增加蛋白质消化率，削弱 TP 对蛋白质消化抑制效果。

2.3.2 淀粉消化 OβG、TP 和 OβG+TP 的添加导致面条快消化淀粉含量下降（图 3B），慢消化淀粉无显著变化（图 3C），抗性淀粉含量上升（图 3D），表明添加二者均会抑制淀粉消化。这与前人研究结果存在差异，主要是由于原料来源，实验方法、条件以及环境因素等影响所导致，但本文研究的总体趋势与前人相同[41−42]。OβG 降低淀粉消化，可能是因为，一方面，OβG 作为部分替代组分添加至面条体系时，OβG 作为膳食纤维具有抗酶解性[43]；另一方面，OβG 能增加混合物体系黏度，从物理层面上阻碍淀

表 2 OβG、TP 和 OβG+TP 对面条质构特性的影响

Table 2 Effects of OβG, TP, and OβG+TP on the texture properties of noodles

样品	硬度(g)	弹性	内聚性	咀嚼度(g)
0%	1365.23±29.24^{b}	0.897±0.015^{a}	0.640±0.09^{abcd}	784.42±37.27^{abc}
1%OβG	1238.59±23.28^{c}	0.923±0.004^{a}	0.651±0.09^{ab}	744.72±25.72^{c}
3%OβG	1099.92±32.40^{d}	0.914±0.003^{a}	0.639±0.09^{abcd}	642.92±28.93^{de}
5%OβG	928.56±56.41^{e}	0.906±0.009^{a}	0.659±0.09^{a}	553.74±15.26^{fg}
0.5%TP	1407.06±29.30^{b}	0.897±0.019^{a}	0.636±0.09^{bcd}	803.13±30.58^{ab}
1%TP	1474.45±17.56^{a}	0.902±0.007^{a}	0.626±0.09^{cd}	831.78±5.74^{a}
2%TP	1527.87±20.83^{a}	0.828±0.016^{b}	0.617±0.09^{d}	779.89±22.47^{bc}
1%OβG+0.5%TP	1198.66±7.43^{c}	0.906±0.015^{a}	0.630±0.09^{bcd}	684.19±9.90^{d}
3%OβG+1%TP	1053.36±24.87^{d}	0.907±0.016^{a}	0.629±0.09^{bcd}	600.04±8.08^{ef}
5%OβG+2%TP	923.46±31.46^{e}	0.911±0.008^{a}	0.647±0.09^{abc}	544.39±16.71^{g}

注：不同小写字母表示数据差异显著（P<0.05）。

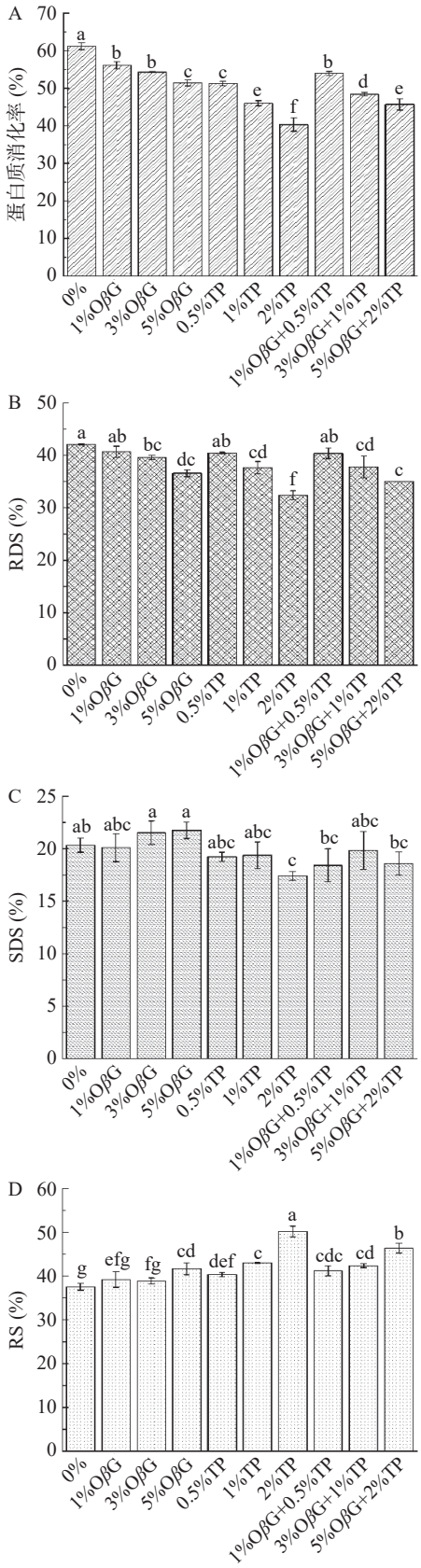


图 3　OβG、TP 和 OβG+TP 对面条蛋白质消化率(A)、快消化淀粉(B)、慢消化淀粉(C)和抗消化淀粉(D)的影响

Fig.3　Effects of OβG, TP, and OβG+TP on the protein digestibility (A), RDS (B), SDS (C), and RS (D) of noodles

粉酶与淀粉相结合[44]。

而 TP 降低面条消化率，其原因可能是 TP 会与直链淀粉形成 V 形络合物，增加抗性淀粉含量[45]，从而抑制淀粉消化。此外，TP 会抑制淀粉酶活性，导致淀粉消化受到抑制[46]。

当二者共存，在低剂量下淀粉消化率与单独添加 TP 时的淀粉消化率一致，但在高剂量下淀粉消化率低于同剂量下单独添加 TP 的淀粉消化率，例如当 TP 含量达到 2% 时，共存组别的快消化淀粉(35.02%)高于 TP 单独存在(32.41%)组，抗消化淀粉(46.38%)低于 TP 单独存在(50.18%)组。这可能是因为，一方面，OβG 同 TP 竞争酶的结合位点，削弱 TP 对淀粉酶活性抑制效果，一定程度上提高淀粉消化率[40]。另一方面，OβG 自身能从物理层面降低淀粉消化率。在低剂量时，前者与后者进行一定程度上抵消，从而导致淀粉消化率相比于同条件下单独添加 TP 时的淀粉消化率无显著变化，而高剂量时前者作用大于后者，从而表现出削弱效果。

3　结论

本文通过与单独添加 OβG 和 TP 面条比较，研究 OβG+TP 对面条品质的影响。结果表明，当 OβG 与 TP 在面条中共存时，OβG 是影响面条质构特性(硬度和咀嚼度)的主要因素，TP 是影响面条最佳蒸煮时间、吸水率和蒸煮损失率的主要因素，且添加 OβG 会增强 TP 对面条的影响，造成这一现象主要是由于 OβG 会诱导面筋扩张，促进更多 TP 进入和攻击面筋蛋白，从而增强 TP 对面条的影响。此外，OβG 和 TP 均会抑制面条体外消化(蛋白质消化和淀粉消化)，TP 对面条体外消化抑制作用更强，且当二者同时存在时，OβG 能削弱 TP 对面条体外消化的抑制作用。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 张珊，任传英，程建军，等. 基于主成分和响应面分析三种改良剂对发酵玉米面条品质的影响[J]. 现代食品科技，2024，40(1)：214−223. [ZHANG Shan, REN Chuanying, CHENG Jianjun, et al. Influence of three improvers on the quality of fermented corn noodles based on principal component and response surface methodology[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 214−223.]

[2] WANG Z, JIA Y, ZHANG M. Effect of curcumin on the quality properties of millet fresh noodle and its inhibitory mechanism against the isolated spoilage bacteria[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(3): 1451−1460.

[3] TANG P, ZHANG S, MENG L, et al. Effects of different content of EGCG or caffeic acid addition on the structure, cooking, antioxidant characteristics and *in vitro* starch digestibility of extruded buckwheat noodles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 252: 126426.

[4] ARAVIND N, SISSONS M J, FELLOWS C M, et al. Effect of inulin soluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti[J]. Food Chemistry,

2012, 132(2): 993−1002.
[5] 杨成峻, 陈明舜, 戴涛涛, 等. 燕麦 β-葡聚糖功能与应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 301−311. [YANG Chengjun, CHEN Mingshun, DAI Taotao, et al. Research progress on the functionality and applications of oat β-glucan[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 301−311.]
[6] 苏绍辉, 蒋磊. 茶多酚的生理功能及其在食品和饲料中的应用[J]. 现代食品, 2022, 28(24): 61−64. [SU Shaohui, JIANG Lei. Physiological functions of tea polyphenols and their applications in food and feed[J]. Modern Food, 2022, 28(24): 61−64.]
[7] LEE K Y, PARK S Y, LEE S, et al. Suitability of TEMPO-oxidized oat β-glucan for noodle preparation[J]. Food Science and Biotechnology, 2014, 23(6): 1897−1901.
[8] HAN Chuanwu, MA Meng, ZHANG Haihua, et al. Progressive study of the effect of superfine green tea, soluble tea, and tea polyphenols on the physico-chemical and structural properties of wheat gluten in noodle system[J]. Food Chemistry, 2020, 308: 125676.
[9] NGUYEN T T L, FLANAGAN B M, TAO Keyu, et al. Effect of processing on the solubility and molecular size of oat β-glucan and consequences for starch digestibility of oat-fortified noodles[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131291.
[10] XIE Fang, HUANG Qiang, FANG Fang, et al. Effects of tea polyphenols and gluten addition on *in vitro* wheat starch digestion properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 525−530.
[11] MEI Zhou, WANG Wenjun, FENG Xinlu, et al. Mechanism underlying the effect of soluble oat β-glucan and tea polyphenols on wheat gluten aggregation characteristics[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 288: 138669.
[12] MEI Zhou, WANG Wenjun, FENG Xinlu, et al. Effect of soluble oat β-glucan and tea polyphenols on the rheological properties and microstructure of wheat dough[J]. Lwt, 2024, 198: 116004.
[13] LONDONO D M, GILISSEN L J W J, VISSER R G F, et al. Understanding the role of oat β-glucan in oat-based dough systems [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 62: 1−7.
[14] 皮俊翔. 茶多酚对面筋蛋白网络结构影响机制的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [PI Junxiang. Study on the mechanism of tea polyphenols affecting the network structure of gluten proteins [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
[15] 姚月华, 王亚琴, 贾鑫, 等. 茶多酚对生鲜面品质及抗氧化特性的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(10): 2261−2270. [YAO Yuehua, WANG Yaqin, JIA Xin, et al. Effects of tea polyphenols on the quality and antioxidant properties of fresh noodles[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(10): 2261−2270.]
[16] LI Man, LUO Lijun, ZHU Kexue, et al. Effect of vacuum mixing on the quality characteristics of fresh noodles[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(4): 525−531.
[17] DU Jin, TAO Hongxun, QI Yajing, et al. Exploring the underlying mechanisms on starch restricted swelling-induced reduction in digestion rate of buckwheat noodles[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134430.
[18] WANG Zhuochen, LI Yuhuan, QIAN Chao, et al. Processing quality and aroma characteristics of fresh noodles intermingled with large-leaf yellow tea powder[J]. Lwt, 2023, 174: 114391.
[19] NGUYEN T T L, GILBERT R G, GIDLEY M J, et al. The contribution of β-glucan and starch fine structure to texture of oat-fortified wheat noodles[J]. Food Chemistry, 2020, 324: 126858.
[20] ENGLYST H N, KINGMAN S M, CUMMINGS J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. European Journal of Clinical Nutrition, 1992: S33−S50.
[21] 唐华丽, 熊汉国, 王兆丹, 等. 豌豆缓慢消化淀粉性质及其制备[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 202−205,219. [TANG Huali, XIONG Hanguo, WANG Zhaodan, et al. Characterization and preparation of pea slowly digestible starch[J]. Food & Machinery, 2012, 28(5): 202−205,219.]
[22] 李玉栋. 麦麸不溶性膳食纤维改性及对面条品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. [LI Yudong. Modification of wheat bran insoluble dietary fiber and its effect on noodle quality [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.]
[23] 宁恒. 麦麸膳食纤维对发酵挂面品质及孔隙率的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023. [NING Heng. Study on the effects of wheat bran dietary fiber on the quality and porosity of fermented noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.]
[24] 申茹晓, 唐浩国, 杨同香, 等. 白芸豆粉对面团及饼干品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 136−143. [SHEN Ruxiao, TANG Haoguo, YANG Tongxiang, et al. Effect of white kidney bean powder on dough and biscuit quality characteristics[J]. Food Industry Science and Technology, 2025, 46(14): 136−143.]
[25] WU Yue, CHEN Zhengxing, LI Xiaoxuan, et al. Effect of tea polyphenols on the retrogradation of rice starch[J]. Food Research International, 2009, 42(2): 221−225.
[26] 谷宗艳. 球磨制备黑米淀粉-茶多酚复合物及其理化和消化性研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2024. [GU Zongyan. Preparation of black rice starch-tea polyphenol complex via ball milling and its physicochemical and digestibility properties[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024.]
[27] 王瑞斌, 李明, BRENNAN C, 等. 淀粉与多酚交联对荞麦意面食用品质和营养特性的影响[C]. 中国食品科学技术学会第十七届年会, 2020: 254−255. [WANG Ruibin, LI Ming, BRENNAN C, et al. Effects of starch-polyphenol interaction on the eating quality and nutritional properties of buckwheat pasta[C]. Proceedings of the 17th Annual Conference of the Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020: 254−255.]
[28] 周颖. 米糠膳食纤维对小麦淀粉老化和馒头品质的影响[D]. 南京: 江苏科技大学, 2020. [ZHOU Ying. The effects of rice bran dietary fiber on wheat starch aging and mantou quality[D]. Nanjing: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.]
[29] 张艳香. 菠萝味甘露子泡菜的开发及其杀菌条件探究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023. [ZHANG Yanxiang. Development of pineapple-flavored mango pickles and exploration of their sterilization conditions[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.]
[30] FU Meixia, SUN Xuyang, WU Di, et al. Effect of partial substitution of buckwheat on cooking characteristics, nutritional composition, and *in vitro* starch digestibility of extruded gluten-free rice noodles[J]. LWT, 2020, 126: 109332.
[31] 曹汝鸽, 郭子聪, 王丽娟, 等. 荞麦面条加工工艺及其品质提升的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(1): 174−183. [ZHANG Ruge, GUO Zicong, WANG Lijuan, et al. Research progress on processing technology and quality improvement of buckwheat noodles[J]. Food Research and Development, 2023, 44(1): 174−183.]
[32] WU Zhen, LI Hong, MING Jian, et al. Optimization of adsorption of tea polyphenols into oat β-glucan using response surface methodology[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011,

59(1)：378−385.
［33］ ZHANG Bo, ZHANG Qian, WU Hao, et al. The influence of repeated versus continuous dry-heating on the performance of wheat starch with different amylose content[J]. Lwt, 2021, 136: 110380.
［34］ 田宇. 微波协同碱浸渍对方便湿面品质特性影响的研究[D]. 郑州：河南工业大学, 2023. ［TIAN Yu. Study on the effects of microwave-assisted alkali impregnation on the quality characteristics of instant wet noodles[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023.］
［35］ 裴曾薇. 黑曲霉发酵改性香菇柄膳食纤维及其性质研究与应用[D]. 沈阳：辽宁大学, 2021. ［PEI Zengwei. Study on the modification of dietary fiber from mushroom stem by *Aspergillus niger* fermentation and its properties and application[D]. Shenyang: Liaoning University, 2021.］
［36］ 邹慧芳. 微波加热对面筋结构及营养与安全性影响的研究[D]. 南昌：南昌大学, 2017. ［ZOU Huifang. Research on the effects of microwave heating on the structure, nutrition, and safety of gluten[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.］
［37］ ZHANG Lingfang, QIAN Xiaojie, SUN Binghua, et al. Protein digestibility in wheat noodles: The inhibitory effect and its mechanism of wheat bran dietary fiber[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 120: 104040.
［38］ 周珊珊, 张国胜. 常见茶叶对人体健康的生理效应[J]. 福建茶叶, 2025, 47(1)：33−35. ［ZHOU Shanshan, ZHANG Guosheng. Physiological effects of common teas on human health[J]. Tea in Fujian, 2025, 47(1): 33−35.］
［39］ RAEESSI-BABAHEYDARI E, FARHADIAN S, SHAREGHI B. The interaction of the green tea polyphenol (catechin) with pepsin: Insights from spectroscopic to molecular dynamics studies[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 326: 115196.
［40］ SUN Lijun, WARREN F J, GIDLEY M J. Soluble polysaccharides reduce binding and inhibitory activity of tea polyphenols against porcine pancreatic α-amylase[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 63−70.
［41］ 汪磊. 燕麦 β-葡聚糖对面粉、面团特性及馒头品质的影响和机制[D]. 重庆：西南大学, 2017. ［WANG Lei. Effects and mechanisms of oat β-glucan on flour and dough properties and mantou quality[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.］
［42］ 马钧婷. 儿茶素的制备及其对小麦淀粉特性和面条品质的影响[D]. 郑州：河南工业大学, 2021. ［MA Junting. Preparation of catechin and its effects on wheat starch properties and noodle quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.］
［43］ 王赛笛, 张高阳, 吕欢欢, 等. 植物中直链淀粉合成及其含量提高策略的研究进展[J]. 生物技术通报, 2025, 41(8)：22−33. ［WANG Saidi, ZHANG Gaoyang, LÜ Huanhuan, et al. Research progress on amylose biosynthesis in plants and strategies for enhancing its content[J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(8): 22−23.］
［44］ 谷少涵, 孙冰华, 马森, 等. 谷物膳食纤维减缓淀粉消化性的机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13)：326−332. ［GU Shaohan, SUN Binghua, MA Sen, et al. Research progress on mechanisms of cereal dietary fiber in slowing starch digestibility[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 326−332.］
［45］ AMOAKO D B, AWIKA J M. Resistant starch formation through intrahelical V-complexes between polymeric proanthocyanidins and amylose[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 326−333.
［46］ PENG Shanli, CHAI Yanwei, LUO Kaiyun, et al. Tea polyphenols: Enzyme inhibition effect and starch digestibility[J]. Starch - Stä rke, 2017, 69(7−8): 1600195.