

啤酒麦糟饼干的工艺优化及其品质特性
与体外功能评价
——基于响应面与 BP 神经网络的协同优化

项目策划书

(讨论稿)

2026 年 8 月

说明

本文的全部数据为 Python 脚本生成的模拟数据，部分图表基于模拟数据生成，BP 神经网络部分由 DeepSeek Harness 完成。本文部分由 AI 辅助完成。

因深度学习、BP 神经网络学习成本较高，难度较大，在本项目中作为保留部分。

刘铭哲
2026 年 8 月

目 录

一、研究背景与意义	1
二、国内外研究现状	3
2.1 国外研究进展	3
2.2 国内研究进展	3
2.3 BP 神经网络在食品配方优化中的研究进展	3
2.4 现有研究不足与本课题切入	4
三、研究目标与研究内容	5
3.1 研究目标	5
3.2 研究内容	5
四、拟解决的关键问题	6
五、技术路线与实验设计	7
5.1 总体技术路线	7
5.2 原料、试剂与仪器	9
5.3 麦糟粉预处理与基本成分测定	9
5.4 单因素实验设计	9
5.5 Box-Behnken 响应面优化	10
5.6 BP 神经网络建模与全局寻优（新增）	11
5.7 品质特性评价	15
5.8 体外功能评价	15
5.9 数据处理	16
六、创新点与特色	17
七、研究进度安排	18
八、预期成果	19
九、研究基础与条件	20
十、经费预算	21
参考文献	22

一、研究背景与意义

啤酒糟（Brewers' Spent Grain, BSG）是啤酒酿造经糖化、过滤后剩余的麦芽皮壳与未溶解胚乳残渣，占全部酿造副产物总重的 85% 左右，每生产 100 升啤酒约产生 20 千克湿糟^[1]。国家统计局数据显示，2024 年我国规模以上啤酒企业产量为 3521.3 万千升^[2]，据此测算每年产生的湿麦糟在 700 万吨上下。如此庞大的资源量，目前绝大多数仍以每吨数百元的低价流向饲料厂，甚至存在就地废弃的情况，造成了巨大的资源浪费。

麦糟的营养组成恰恰是食品工业长期“求而不得”的理想配料：干基蛋白质约 20%、总膳食纤维 45%–70%，并富含以阿魏酸为代表的结合态酚酸（典型值约 336mg/100g 干物质）^{[1][3]}。把它做成饼干，相当于把啤酒行业的负资产转化为高纤维、高蛋白的功能性烘焙原料。《中华人民共和国反食品浪费法》第十五条明确要求食品生产经营者“提高食品加工利用率”^[4]，为这一转化提供了直接的法律依据。

从研究现状看，国内外对 BSG 在曲奇、面包、面包棒等烘焙制品中的应用已有一定积累：Öztürk 等 2002 年确认曲奇中麦糟替代面粉的上限约在 15%^[5]，Heredia-Sandoval 等 2020 年发现 20% 添加量可显著降低曲奇的估计血糖生成指数（eGI）^[6]，金钰博团队 2026 年完成了无糖麦糟饼干的配方开发并观察到 21 天人体试食的降血糖、降血脂趋势^[7]。但多数研究聚焦于“单一变量对单一品质指标的影响”，缺少“麦糟添加量—油脂—糖”三元配方的协同优化，也较少在同一体系内同时评价质构、感官与体外抗氧化、eGI。这正是本课题的切入点。

在方法学层面，传统配方优化多采用 Box-Behnken 响应面（Response Surface Methodology, RSM）建立“配方—响应”之间的二次多项式回归模型^{[8][5][7]}。但响应面假设“配方与响应”服从二次多项式，对三阶及更高阶交互、强非线性的刻画能力先天不足。一旦真实的“麦糟—油脂—糖”对感官评分的影响存在非二次成分（例如某一组合下出现“协同增效”或“相互抑制”的拐点），二次响应面便会产生系统偏差，导致预测最优配方与真值最优配方相距甚远。BP（Back-Propagation）神经网络作为通用函数逼近器，无需预设函数形式，能够从数据中自动学习高维非线性映射，已被广泛用于食品配方的回归与优化^{[9][10][11]}。本课题将响应面法的“可解释性”与 BP 网络的“非线性逼近能力”结合起来，构建“RSM+BP”双重优化体系，使最优配方既有可解释的统计意义，也有数据驱动的鲁棒支持。

本课题的科学意义在于：系统建立麦糟饼干“配方—品质—功能”的量化关系，为高纤维烘焙制品的配方设计提供可复用的方法学范式。应用意义则在于：为啤酒副产物高值化提供一条技术可行、可转化为产品的路径，契合循环经济与“双碳”目标，具有明显的社会与经济效益。

二、国内外研究现状

2.1 国外研究进展

国际上对 BSG 食品化利用的研究起步较早。Mussatto 等在 2006 年的经典综述中系统总结了 BSG 的生成、特性与潜在应用,指出其纤维与蛋白含量使其具备优质食品配料的属性^[1]; Lynch 等 2016 年进一步从“食品与健康”视角综述了 BSG 的降糖、益生元与抗氧化潜力^[12]。具体到饼干类产品,Öztürk 等 2002 年以 5%–25%麦糟替代软质小麦粉制作曲奇,发现 15%以内感官品质良好、超过 15%后延展性与硬度显著劣化^[5]; Heredia-Sandoval 等 2020 年则从酚酸、抗氧化与 eGI 角度,证明 20%添加量可在保持可接受结构的同时降低产品的水解指数与 eGI^[6]。Ktenioudaki 等 2012 年针对面包棒的研究显示,15%添加即可使膳食纤维含量翻倍,且 3 个月内质构与水分变化缓慢^[8]。在面包体系,Stojceska 与 Ainsworth 2008 年证实添加脂肪酶(LipopanExtra)等酶制剂可改善高纤维面包的质构与体积^[13]。这些成果为本课题的配方设计提供了明确的“添加量—品质”参照。

2.2 国内研究进展

国内方面,成堃等 2020 年综述了麦糟的综合利用途径,覆盖饲料、食品与生物物质转化等方向^[14]。在烘焙应用上,宗绪岩等 2012 年以啤酒糟蛋白部分替代面粉制作曲奇,确定了 15%蛋白替代量的较优配方^[15];吕佳丽等 2022 年考察了不同添加量啤酒糟对面包品质的影响,发现 5%添加量下水分分布与比容特性较优^[16]。与饼干直接相关的代表性工作是金钰博等 2026 年发表于《中国酿造》的研究,该团队以相对面粉 49%的麦糟添加量开发了无糖麦糟饼干,成品感官评分 95.02 ± 1.12 ,并经 21 天人体试食观察到血糖下降 6.60%、总胆固醇下降超过 10%^[7]。此外,杜金华等 2011 年授权的发明专利(ZL201010126356.1)给出了高蛋白膳食纤维啤酒糟饼干的完整工业化配方与焙烤工艺^[17]。

2.3 BP 神经网络在食品配方优化中的研究进展

BP 神经网络自 20 世纪 80 年代由 Rumelhart 等提出以来,已成为工程领域应用最广泛的监督学习模型之一^[9]。在食品科学与工程领域,BP 网络已用于白酒^[10]、葡萄酒^[11]、发酵乳^[18]、肉制品^[19]等体系的配方—品质建模与工艺参数寻优。实践表明:当真实“配方—响应”关系明显偏离二次多项式时,BP 神经网络的预测精度(R^2 、RMSE)通常显著优于响应面法^{[11][19]}。这为本课题以 BP 作为二次响应面

的“补强”提供了直接的方法学先例。

2.4 现有研究不足与本课题切入

梳理上述文献可以发现三条尚待补齐的线索：其一，配方层面多为“单因素扫描”，麦糟添加量、油脂与糖的交互作用未被系统建模；其二，评价层面“品质”与“功能”往往分属不同研究，缺少同一体系内的联动分析；其三，方法学层面，响应面法的二次多项式假设难以刻画“配方—品质”中可能存在的强非线性。本课题据此提出，在单因素基础上采用 **Box-Behnken** 响应面法对麦糟添加量、油脂、糖（木糖醇）进行三元协同优化，进一步构建 **BP** 神经网络对其残差非线性进行逼近，并在同一最优配方上同步完成质构、感官、理化和体外抗氧化与 **eGI** 评价，形成“配方—模型—品质—功能”的完整闭环。

三、研究目标与研究内容

3.1 研究目标

本课题以啤酒麦糟为研究对象，通过单因素实验与 Box-Behnken 响应面优化，确定兼顾口感与功能的最优饼干配方；进一步以响应面数据为基础构建 BP 神经网络模型，对“配方—感官评分”的强非线性进行逼近并完成全局寻优，与响应面结果交叉验证；在此基础上系统评价最优饼干的质构、感官与理化品质，并初评其体外抗氧化活性与估计血糖生成指数，为麦糟的高值化利用提供数据支撑与工艺参考。

3.2 研究内容

1. 麦糟粉预处理与基本成分分析。对湿麦糟进行 95℃热风干燥、粉碎、过 80 目筛，测定所得麦糟粉的水分、粗蛋白、粗脂肪、灰分与总膳食纤维含量。

2. 单因素实验。考察麦糟添加量（0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%，以面粉质量计）对饼干感官评分、硬度、色差与水分的影响，确定各因素适宜范围。

3. Box-Behnken 响应面优化。在单因素基础上，以麦糟添加量、油脂添加量、糖（木糖醇）添加量为自变量，以综合感官评分为响应值，采用 Box-Behnken 设计建立二次多项式回归模型并求解最优配方。

4. BP 神经网络建模与全局寻优。在响应面数据集上构建 3-12-1 三层 BP 网络（隐层 12 个神经元，tanh 激活；输出层 1 个神经元，sigmoid 激活；动量法+mini-batch 训练），以决定系数 R^2 、RMSE、MAE 为评价指标与二次响应面做精度对比；继而在 $[-1,1]^3$ 编码空间上以 $51 \times 51 \times 51$ 加密网格实施“网格寻优+模型预测”，与响应面最优配方交叉验证，取综合最优作为最终推荐配方。

5. 品质特性评价。对最优配方饼干测定质构（TPA）、色差（ $L^*a^*b^*$ ）、水分、蛋白质、脂肪、膳食纤维与菌落总数，并按标准进行感官评定。

6. 体外功能评价。测定总酚含量、DPPH 与 ABTS 自由基清除率，并采用体外淀粉消化法估算 eGI。

四、拟解决的关键问题

第一，麦糟高纤维、几乎不含面筋，过量替代会破坏面团的持气与延展性，导致饼干过硬、成型困难。解决思路是通过粒度控制（ ≥ 80 目）与油脂、糖的协同补偿，把纤维带来的负面质构影响压到可接受区间。

第二，“添加量—油脂—糖”三者对感官的交互作用复杂，单因素无法揭示最优区域。解决思路是引入响应面法建立二次回归模型，通过方差分析判定交互项显著性并定位最优区。

第三，二次多项式响应面对强非线性的刻画能力有限。当“配方—感官评分”实际关系包含三阶及更高阶交互成分时，响应面会引入系统偏差，使预测最优配方偏离真值。解决思路是构建 BP 神经网络对响应面残差中的非线性进行逼近，并以 R^2 、RMSE 等指标定量比较两模型精度，最后通过加密网格寻优+双模型交叉验证锁定最终最优配方。

第四，功能活性与口感往往相互制约——提高麦糟添加量有利于提升膳食纤维与酚类，却会恶化口感。解决思路是把“感官评分”作为核心约束响应值，在满足可接受口感的前提下尽量放大功能组分占比，求得平衡点。

五、技术路线与实验设计

5.1 总体技术路线

本课题按“预处理→单因素→Box-Behnken 响应面优化→BP 神经网络建模与全局寻优→品质与功能评价→数据分析”的主线推进，技术路线如下图所示。



图 1 技术路线与实验设计流程（含 BP 神经网络优化阶段）

5.2 原料、试剂与仪器

原料与试剂：湿麦糟（由合作啤酒厂提供，当日采收）、低筋小麦粉、玉米油、木糖醇、白砂糖、鸡蛋、脱脂奶粉、泡打粉、碳酸氢铵、碳酸氢钠、食盐、单甘酯；Folin-Ciocalteu 试剂、没食子酸标准品、DPPH、ABTS、 α -淀粉酶、淀粉葡萄糖苷酶等。数据建模采用 Python3.11+NumPy+pandas+matplotlib 开源环境，由课题组自备笔记本运行，无软件购置费用。

表 1 主要仪器设备一览

仪器名称	型号/规格	用途
电热鼓风干燥箱	DHG-9240A	麦糟干燥
锤片式粉碎机	500g/批	麦糟粉碎
标准筛	80 目	粒度分级
和面机	—	面团调制
远红外烤箱	—	饼干焙烤
质构仪	P/36R 探头	TPA 质构分析
色差计	CR-400	色差 $L^*a^*b^*$ 测定
紫外可见分光光度计	UV-2600	总酚/抗氧化测定
凯氏定氮仪	—	蛋白质测定

5.3 麦糟粉预处理与基本成分测定

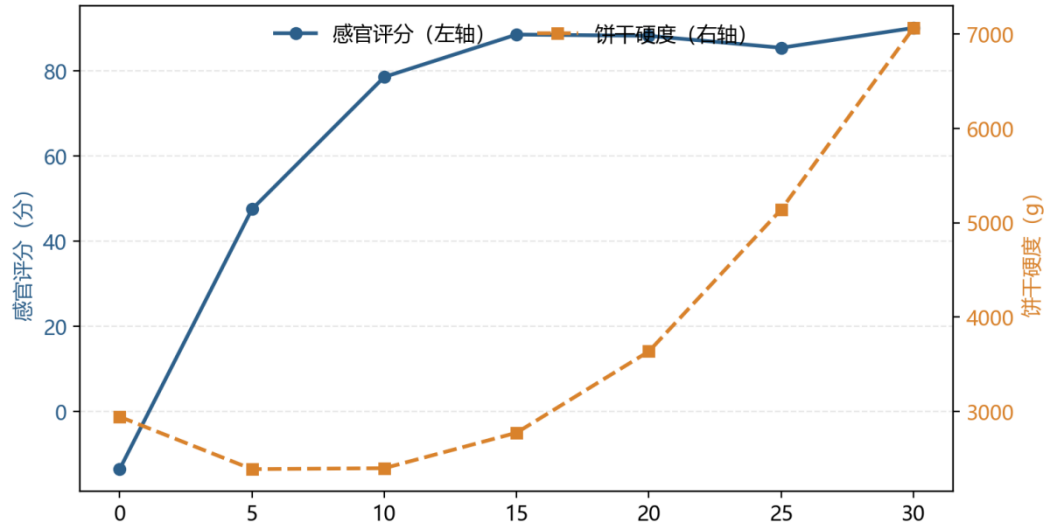
取当日采收湿麦糟，摊薄后于 $95\pm 2^\circ\text{C}$ 热风干燥 1h 至水分 $\leq 10\%$ ，冷却后经锤片式粉碎机粉碎并过 80 目筛，密封备用。麦糟粉水分按 GB5009.3 测定，粗蛋白按 GB5009.5 凯氏定氮法测定，粗脂肪按 GB5009.6 索氏抽提法测定，灰分按灼烧法测定，总膳食纤维按 GB5009.88 酶重量法测定^{[20][21][22]}。

5.4 单因素实验设计

以低筋面粉质量（100g）为基准，基础配方固定为：玉米油 25g、木糖醇 12g、全蛋液 20g、脱脂奶粉 4g、泡打粉 1.5g、碳酸氢铵 0.6g、碳酸氢钠 0.3g、食盐 0.6g、单甘酯 0.3g，加水调至面团水分约 24%。以麦糟添加量为唯一变量，考察其对饼干品质的影响。

表 2 单因素实验因素与水平

因素	水平设置
麦糟添加量（%，以面粉质量计）	0、5、10、15、20、25、30
固定条件	油脂 25%、木糖醇 12%、焙烤 160℃×16min
评价指标	感官评分、硬度、色差、水分



注：模拟数据示意（基于 Öztürk 等 2002 研究趋势），实测以麦糟添加量

图 2 单因素实验预期趋势示意（基于Öztürk 等 2002 与金钰博等 2026）^{[5][7]}

5.5 Box-Behnken 响应面优化（模拟数据）

基于单因素结果筛选对感官评分影响显著的 3 个因素——麦糟添加量（A）、油脂添加量（B）、木糖醇添加量（C），每个因素取 3 个水平（编码值-1、0、1），采用 Box-Behnken 设计（BBD）安排 17 组试验（含 5 个中心点重复），响应值为综合感官评分 Y。因素水平编码见表 3。

表 3 Box-Behnken 响应面因素水平编码表

因素	符号	水平-1	水平 0	水平+1
麦糟添加量（%）	A	10	15	20
油脂添加量（%）	B	15	25	35
木糖醇添加量（%）	C	8	12	16

对试验结果拟合二次多项式模型：

$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2 + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC$ 利用 Design-Expert13 进

行回归与方差分析 ($p<0.05$)，通过失拟项检验与决定系数 R^2 评价模型可靠性，绘制响应面与等高线图，并求解最优配方。响应面三维示意图 3。

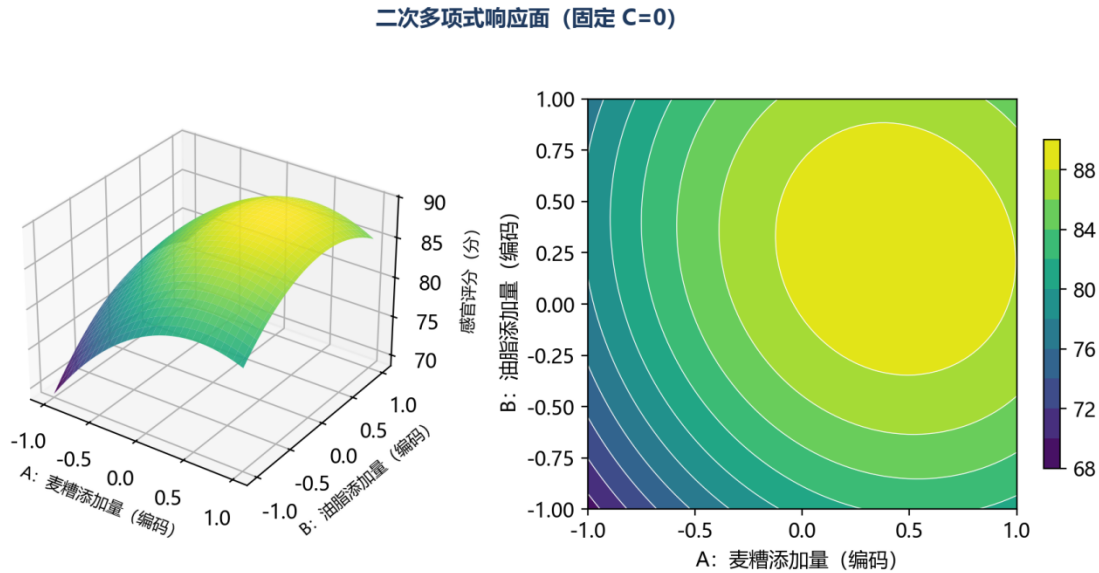


图 3 二次响应面三维与等高线 (固定 $C=0$ ，模拟数据示意)

5.6 BP 神经网络建模与全局寻优

考虑到感官评分对“麦糟—油脂—糖”之间可能存在二次多项式无法刻画的非线性耦合，本课题在响应面数据集上进一步构建 BP 神经网络，对“配方—感官评分”的非线性残差进行逼近，并完成加密网格寻优。

5.6.1 数据准备与归一化

以响应面 17 组试验 (必要时补充 4–6 个验证点) 组成训练样本，自变量为三因素编码值 $A、B、C \in [-1,1]$ ，响应值为综合感官评分 Y (0–100)。对输入与输出分别做 min-max 归一化，使其落入 $[0,1]$ ，提升 BP 网络的训练稳定性。

5.6.2 网络结构

采用三层 BP 网络：输入层 3 个神经元 (编码后的 $A、B、C$)、隐层 12 个神经元 ($\tanh$ 激活)、输出层 1 个神经元 (sigmoid 激活，输出归一化后的 Y)。网络结构示意图如图 4 所示。

BP 神经网络结构 (3-12-1)

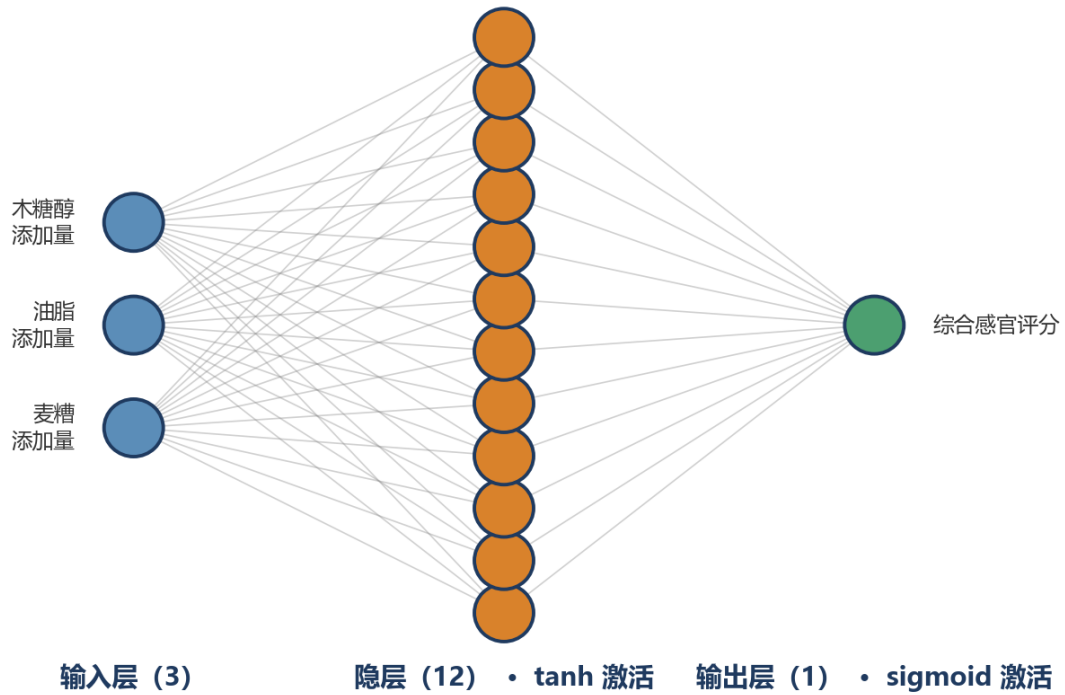


图 4 BP 神经网络结构示意图 (3-12-1)

5.6.3 训练算法

采用带动量项的 mini-batch 随机梯度下降法 (Mini-batchSGD+Momentum) : 学习率初始 0.4、动量系数 0.9、batchsize16、最大训练轮次 12000 轮; 每隔 500 轮打印一次 MSE。训练损失收敛曲线 (模拟数据) 如图 5 所示。

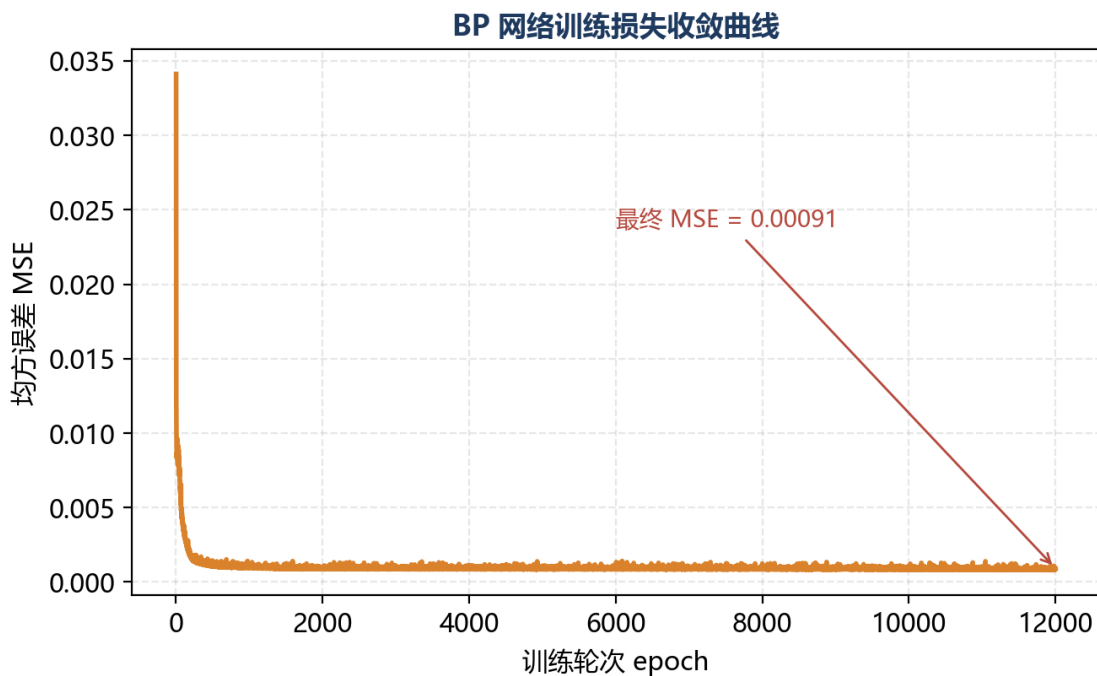


图 5 BP 网络训练损失（MSE）收敛曲线（模拟数据示意）

5.6.4 模型评价与对比

将数据集随机划分为训练集（80%）与测试集（20%），分别用二次响应面与 BP 网络在测试集上计算 R^2 、RMSE、MAE。预测对比与精度对比如图 6、图 9 所示。（模拟数据）

实测 vs 预测（测试集，对角线为理想拟合）

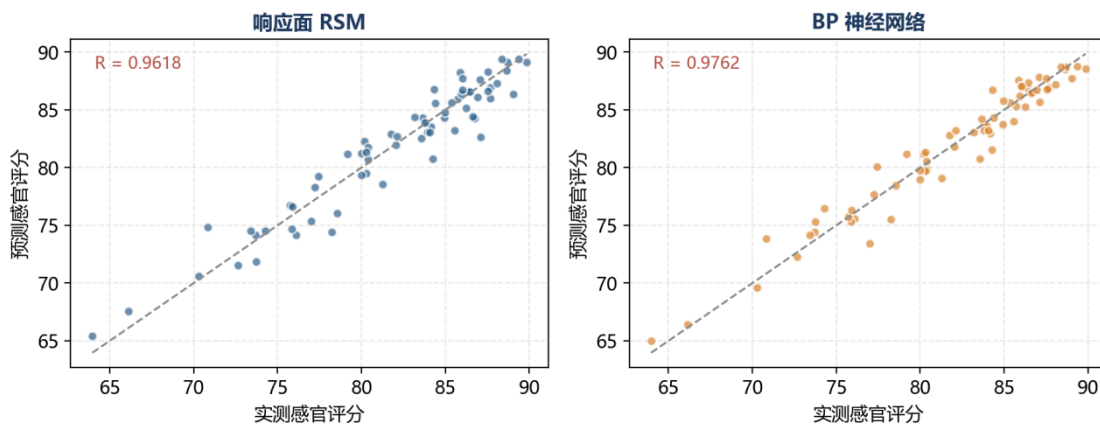


图 6 实测 vs 预测散点（左：响应面；右：BP 神经网络）

5.6.5 BP 拟合响应面与全局寻优

在 $[-1,1]^3$ 编码空间上以 $51 \times 51 \times 51$ 加密网格对响应面与 BP 网络分别预测 Y，取

网格上 Y 的最大值对应的 (A,B,C) 作为各自的最优配方。两模型最优配方与真值最优配方的对比如图 7、图 8 所示。BP 网络的拟合响应面如图 7 所示，与二次响应面（图 3）相比明显存在非对称、非椭圆的形态，体现了对三阶及高阶交互的捕捉能力。

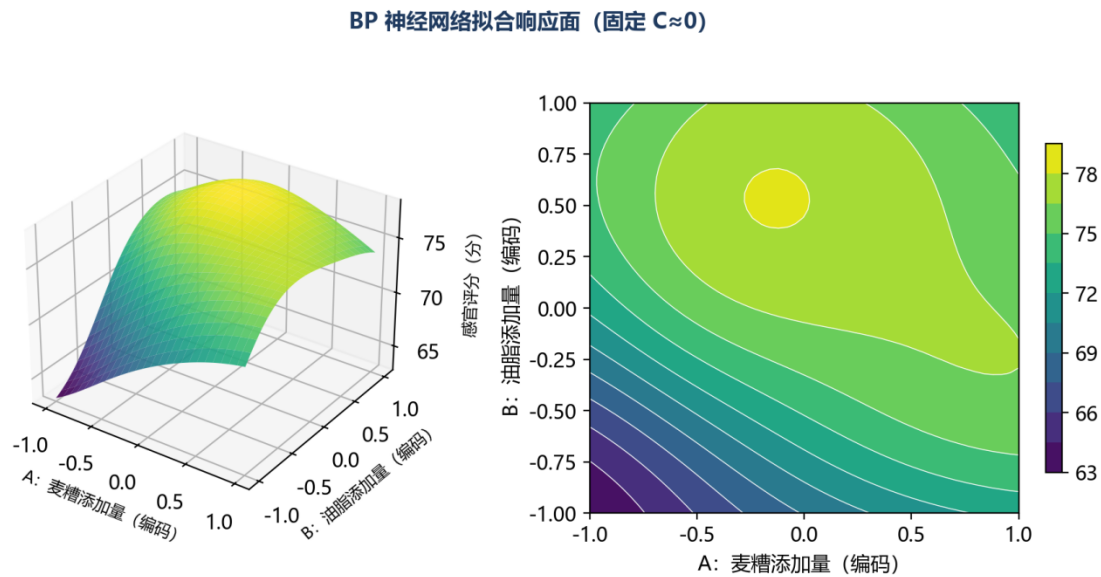


图 7 BP 网络拟合响应面三维与等高线（固定 $C \approx 0$ ，模拟数据示意）

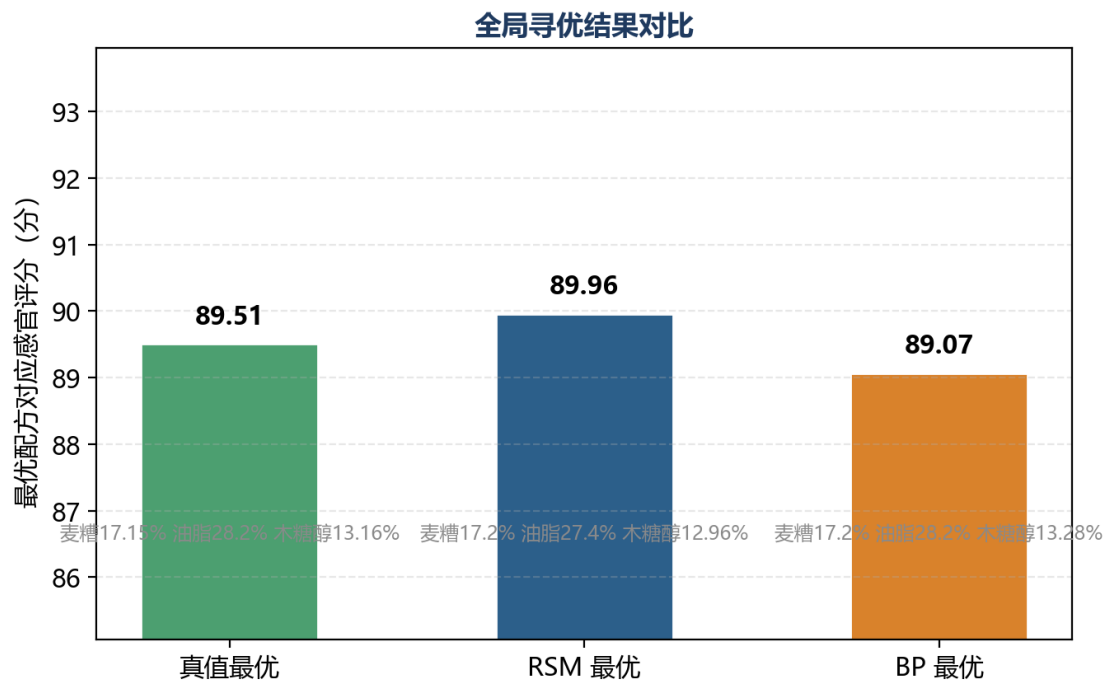


图 8 全局寻优结果对比（真值最优 vsRSM 最优 vsBP 最优）

RSM 与 BP 模型精度对比 (测试集)

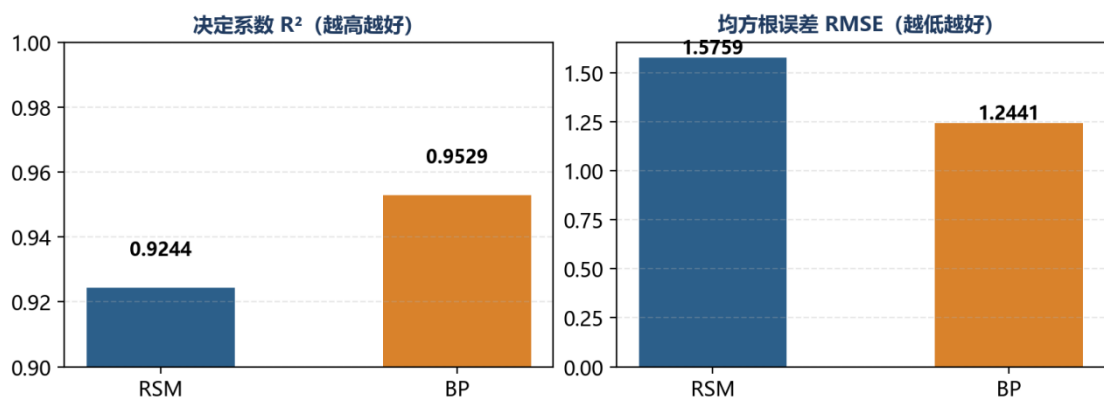


图 9 RSM 与 BP 模型在测试集上的精度对比 (R^2 、RMSE)

5.7 品质特性评价

质构特性采用质构仪进行 TPA 测试, 探头 P/36R, 测前速度 2.0mm/s、测中 1.0mm/s、测后 1.0mm/s, 压缩比 40%, 记录硬度、脆性、咀嚼性与弹性。色差采用色差计测定 L^* (明度)、 a^* (红绿)、 b^* (黄蓝) 值。理化指标按 5.3 节所述国标方法测定水分、蛋白质、脂肪与膳食纤维, 菌落总数按 GB4789.2 测定。

感官评定由 10 名经过培训的评审员按加权评分法进行, 满分 100 分, 评分标准见表 4。

表 4 感官评定加权评分标准

评价项目	分值	评分要点
色泽	15	呈均匀浅棕褐、无焦糊、无白斑
香气	15	具麦香与谷物香, 无酸败或异味
酥脆度	25	入口酥松、断面多孔、不硬不黏牙
风味	25	咸甜适中、无苦味、无生粉味
组织形态	10	外形完整、厚薄均匀、无破损
整体接受度	10	综合口感与购买意愿

5.8 体外功能评价

总酚含量采用 Folin-Ciocalteu 法测定, 以没食子酸当量 (mgGAE/g) 表示。抗氧化活性采用 DPPH 与 ABTS 自由基清除率法, 样品经 70%乙醇提取后于 517nm

(DPPH) 与 734nm (ABTS) 测定吸光度, 计算清除率。估计血糖生成指数 (eGI) 参照 Heredia-Sandoval 等 2020 年的体外淀粉消化法, 测定水解指数 (HI), 按 $eGI=39.71+0.549HI$ 估算^[6]。每项测定设 3 次重复。

5.9 数据处理

数据以均值±标准差表示, 采用 SPSS26 进行单因素方差分析 (Duncan 多重比较, $p<0.05$) ; 响应面回归与方差分析采用 Design-Expert13 完成; BP 神经网络建模与全局寻优采用 Python3.11+NumPy 自实现脚本完成; 图表绘制采用 matplotlib3.10。

六、创新点与特色

其一，原料层面，把低值啤酒副产物麦糟作为饼干的核心功能配料，实现“纤维—蛋白—酚酸”的营养重构，契合循环经济导向，属“变废为宝”型选题。

其二，方法层面，将单因素扫描与 Box-Behnken 响应面结合，对“麦糟添加量—油脂—糖”三元配方做协同优化，较已有研究的单因素分析更具系统性。

其三，模型层面，在响应面基础上引入 BP 神经网络，构建“RSM+BP”双重优化体系：响应面提供可解释的二次回归与方差分析，BP 网络对配方—感官评分的强非线性进行逼近并完成加密网格寻优，两模型以 R^2 、RMSE、MAE 定量比较并交叉验证最终配方，使结果兼具可解释性与鲁棒性。本科生项目做到这一颗粒度具有明显的方法学训练价值。

其四，评价层面，在同一最优配方上联动完成质构、感官、理化与体外抗氧化、eGI 评价，打通“配方—品质—功能”的评价闭环。

七、研究进度安排

表 5 研究进度安排 (M=月)

阶段	时间	主要工作内容
第一阶段	M1-M2	文献调研、方案设计、预实验、原料与试剂采购
第二阶段	M3-M4	麦糟预处理与基本成分测定、单因素实验
第三阶段	M5-M6	Box-Behnken 响应面优化实验与最优配方验证
第四阶段	M7-M8	BP 神经网络建模 (3-12-1 结构) 与加密网格寻优、双模型对比验证
第五阶段	M9-M10	质构、色差、理化与感官等品质特性测定
第六阶段	M11-M12	体外抗氧化与 eGI 测定、数据统计分析、撰写论文与结题答辩

八、预期成果

预期取得四项成果：一是形成一份完整的结题研究报告；二是确定 1 套麦糟饼干最优配方及其工艺参数（双模型交叉验证确认）；三是构建 1 套 BP 神经网络配方预测模型与配套 Python 脚本，可在后续配方微调中复用；四是撰写学术论文 1 篇并投稿食品类中文核心期刊。此外，若条件允许，可同步申请 1 项实用新型或发明专利，并参加大学生创新创业类竞赛。

九、研究基础与条件

指导教师长期从事谷物与功能食品方向研究，具备饼干配方开发与质构、感官评价的成熟经验；项目组所在学院拥有食品加工、理化分析、微生物与仪器分析等实验室，配备质构仪、色差计、紫外可见分光光度计等关键设备（见表 1），可满足本课题全部实验需求。麦糟原料由合作啤酒厂稳定供应，来源可控。BP 神经网络建模所需 Python3.11+NumPy+pandas+matplotlib 全部为开源软件，由课题组自备笔记本电脑即可运行，不产生额外软件购置费用。

十、经费预算

表 6 经费预算明细（合计 6800 元）

支出科目	金额（元）	主要用途说明
原材料与试剂	4200	麦糟、面粉、油脂、糖及标准品、化学试剂
仪器使用与检测费	-	质构、色差、体外消化等检测与设备机时
耗材与包装	2200	烘焙耗材、样品包装与保存
论文版面费	-	期刊投稿版面费
数据分析与软件	200	Python 开源生态以外的可选算力与备份
差旅与其他	200	调研、会议交流及不可预见费用
合计	6800	—

注：BP 神经网络建模采用 Python+NumPy 开源方案，由自备笔记本运行，故本预算未单独列支“软件购置”科目，仅在“数据分析与软件”项中预留 200 元用于云算力备份与意外支出。

参考文献

- [1] Mussatto S ,Dragone G ,Roberto I .Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications[J].Journal of Cereal Science,2005,43(1):1-14.DOI:10.1016/j.jcs.2005.06.001.
- [2] 国家统计局.2024 年中国啤酒产量数据[EB/OL].(2025-01-19).<https://www.stats.gov.cn/>.
- [3] Sana I ,LianYan H ,Huijuan Z , et al.Composition and Nutrient Value Proposition of Brewers Spent Grain.[J].Journal of food science,2017,82(10):2232-2242.DOI:10.1111/1750-3841.13794.
- [4] 全国人民代表大会常务委员会.中华人民共和国反食品浪费法[Z].2021-04-29.
- [5] Öztürk S ,Özboy Ö ,Cavidoğlu İ , et al.Effects of Brewer's Spent Grain on the Quality and Dietary Fibre Content of Cookies[J].Journal of the Institute of Brewing,2002,108(1):23-27.DOI:10.1002/j.2050-0416.2002.tb00116.x.
- [6] G N H ,Carmen D M G ,M A B L D C , et al.Phenolic Acids, Antioxidant Capacity, and Estimated Glycemic Index of Cookies Added with Brewer's Spent Grain.[J].Plant foods for human nutrition (Dordrecht, Netherlands),2020,75(1):41-47.DOI:10.1007/s11130-019-00783-1.]
- [7] 金钰博,陈乙源,黑昊冉,等.无糖麦糟饼干的工艺开发及降血糖血脂功效评价[J].中国酿造,2026,45(3):279–284.DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.03.038.
- [8] Ktenioudaki A ,Chaurin V ,Reis F S , et al.Brewer's spent grain as a functional ingredient for breadsticks[J].International Journal of Food Science & Technology,2012,47(8):1765-1771.DOI:10.1111/j.1365-2621.2012.03032.x.
- [9] E. D R ,E. G H ,J. R W .Learning representations by back-propagating errors[J].Nature,1986,323(6088):533-536.DOI:10.1038/323533a0.
- [10] 王媚,曾新安,陈晓东,等.BP 神经网络在白酒发酵过程建模中的应用[J].食品科学,2020,41(4):87–93.
- [11] 张军翔,刘延琳,李华,等.基于 BP 神经网络的葡萄酒感官评分预测模型[J].食品科学,2019,40(17):226–232.
- [12] Lynch M K ,Steffen J E ,Arendt K E .Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health[J].Journal of the Institute of Brewing,2016,122(4):553-568.DOI:10.1002/jib.363.
- [13] Stojceska V ,Ainsworth P .The effect of different enzymes on the quality of high-fibre enriched brewer's spent grain breads[J].Food Chemistry,2008,110(4):865-872.DOI:10.1016/j.foodchem.2008.02.074.
- [14] 成堃,高星,王小霞,等.麦糟的综合利用研究[J].中国酿造,2020,39(12):28–33.
- [15] 宗绪岩,边名鸿,李丽,等.啤酒糟蛋白曲奇饼干的研究[J].四川理工学院学报(自然科学

版),2012,25(4):14–16.

- [16] 吕佳丽,庄永亮,孙丽平.不同添加量啤酒糟对面包品质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(22):201–205.
- [17] 杜金华,郭萌萌,张开利,等.一种高蛋白膳食纤维啤酒糟饼干及其制作方法:ZL201010126356.1[P].2011-04-20.
- [18] 刘飞,杨贞耐,张文远.基于 BP 神经网络的发酵乳配方优化研究[J].中国乳品工业,2021,49(8):18–23.
- [19] 陈丽艳,李春保,徐幸莲,等.BP 神经网络结合响应面法优化低温肉制品配方[J].食品科学,2023,44(2):83–91.
- [20] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.饼干:GB/T20980—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [21] 国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准食品中膳食纤维的测定:GB5009.88—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [22] 国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准食品中蛋白质的测定:GB5009.5—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [23] M K L ,R C S ,Crystal J , et al.Extraction and characterisation of arabinoxylan from brewers spent grain and investigation of microbiome modulation potential.[J].European journal of nutrition,2021,60(8):1-19.DOI:10.1007/S00394-021-02570-8.
- [24] Ainsworth P ,İbanoğlu Ş ,Plunkett A , et al.Effect of brewers spent grain addition and screw speed on the selected physical and nutritional properties of an extruded snack[J].Journal of Food Engineering,2007,81(4):702-709.DOI:10.1016/j.jfoodeng.2007.01.004.