

羊肚菌粉对南京香肠理化性质与氧化稳定性的影响

扶庆权^{1,2} 史奎春³ 宋尚新¹ 于小波⁴

(1. 南京晓庄学院食品科学学院, 江苏 南京 211171; 2. 南京市工程研究中心, 江苏 南京 211171;
3. 统幸食品贸易(上海)有限公司, 上海 200050; 4. 南京农业大学食品科技学院, 江苏 南京 210095)

摘要: [目的] 探究不同添加量羊肚菌粉对南京香肠理化性质及氧化稳定性的影响。[方法] 将不同量的羊肚菌粉添加到香肠中, 测定并分析香肠的 pH、营养成分、游离氨基酸含量、游离脂肪酸含量、挥发性物质含量、色泽、质构特性、感官品质、2-硫代巴比妥酸值、羰基值和游离巯基值等指标。[结果] 与对照组相比, 添加羊肚菌粉的香肠的蛋白质含量、游离氨基酸含量、不饱和脂肪酸含量、醇类物质含量、酯类物质含量、 b^* 值和总体可接受性得分显著提高 ($P < 0.05$), 而醛类物质含量、烃类物质含量、 L^* 值、 a^* 值、硬度、胶着性和咀嚼性显著降低 ($P < 0.05$)。添加羊肚菌粉可有效抑制香肠中的脂肪和蛋白质氧化。当羊肚菌粉添加量为 2% 时, 香肠的总体可接受性最佳。[结论] 添加羊肚菌粉可显著提升香肠的营养价值和风味品质, 同时增强其氧化稳定性。

关键词: 南京香肠; 羊肚菌粉; 挥发性物质; 理化性质; 氧化稳定性

Effects of *Morchella esculenta* powder on the physicochemical properties and oxidative stability of Nanjing sausages

Fu Qingquan^{1,2} Shi Kuichun³ Song Shangxin¹ Yu Xiaobo⁴

(1. School of Food Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing, Jiangsu 211171, China; 2. Nanjing Engineering Research Center, Nanjing, Jiangsu 211171, China; 3. Toko Food Trading (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200050, China;
4. College of Food Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of different addition amounts of *Morchella esculenta* powder on the physicochemical properties and oxidative stability of Nanjing sausages. [Methods] Different amounts of *M. esculenta* powder are added to sausages. The pH values, nutritional components, free amino acids content, free fatty acids content, volatile compound content, color, textural characteristics, sensory scores, 2-thiobarbituric acid value, carbonyl group value, and free thiol group value are measured and analyzed. [Results] Compared with the control group, the addition of *M. esculenta* powder increases the protein content, free amino acid content, unsaturated fatty acid content, alcohol content, ester content, b^* value, and overall acceptability score ($P < 0.05$), while decreasing the aldehyde content, hydrocarbon content, L^* value, a^* value, hardness, adhesiveness, and chewiness of sausages ($P < 0.05$). At the same time, the addition of *M. esculenta* powder effectively inhibits the lipid oxidation and protein oxidation of sausages. When the addition amount of *M. esculenta* powder is 2%, the overall acceptability of sausages is the optimal. [Conclusion] The addition of *M. esculenta* powder not only enhances the nutritional value and flavor but also inhibits the oxidative stability of sausages.

Keywords: Nanjing sausage; *Morchella esculenta* powder; volatile compound; physicochemical property; oxidative stability

南京香肠是南京知名的传统半干类腌制肉制品, 凭借其独特的质构、风味和口感, 深受当地消费者的喜爱。然而, 香肠通常含有 20%~30% 的动物脂肪, 过量摄入会增加肥胖、心血管疾病等慢性疾病的发病风险^[1]。此外, 香肠在贮藏过程中, 高含量的脂肪会加速脂肪氧化, 进而导致香肠品质的劣化, 甚至生成有毒有害的物质^[2]。而脂

通信作者: 于小波 (1981—), 女, 南京农业大学高级实验师, 硕士。E-mail: yuxiaobo@njua.edu.cn

收稿日期: 2025-10-14 改回日期: 2026-08-07

引用格式: 扶庆权, 史奎春, 宋尚新, 等. 羊肚菌粉对南京香肠理化性质与氧化稳定性的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 189-196.

Citation: Fu Qingquan, Shi Kuichun, Song Shangxin, et al. Effects of *Morchella esculenta* powder on the physicochemical properties and oxidative stability of Nanjing sausages[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 189-196.

抗氧化产生的自由基还会诱导香肠中的蛋白质发生氧化,造成氨基酸含量下降和蛋白质体外消化性降低,最终引发香肠营养价值流失,甚至增加人体患病风险^[3]。因此,添加抗氧化剂能够有效抑制脂肪和蛋白质氧化带来的不利影响。近年来,肉品企业出于生产升本考量,长期使用低价高效的合成抗氧化剂。但长期摄入 BHA、BHT 等合成抗氧化剂可能引发胃肠道不适、呼吸系统紊乱等问题,甚至增加癌症发生风险^[4]。相比之下,植物源天然抗氧化剂因安全性优势,始终受到国内外消费者的广泛认可。

长期以来,食用菌被公认为富含特征香味物质和生物活性成分^[5]。羊肚菌又名羊肚蘑、羊肚菜或包菇菌,是一类极其珍贵的药食两用真菌^[6],因其营养丰富,味道鲜美、风味独特,被誉为食用菌皇后^[7]。羊肚菌富含丰富的活性多糖和多酚类物质,具有抗氧化、降血压、抗疲劳、抗肿瘤、减少动脉粥样硬化和提高机体免疫力等多种生理功能^[8-9];同时还含有丰富的蛋白质、氨基酸、脂肪酸和甾醇类物质,这些成分赋予其浓郁风味,使其深受国内外消费者青睐^[10]。中国目前已实现羊肚菌大规模人工栽培,2024 年产量已超过 7.2 万 t,位列世界首位^[11]。然而,新鲜羊肚菌水分含量高,即便在冷藏条件下仍易腐烂,保鲜难度大,货架期短的问题严重影响其商品价值^[12]。干燥是食用菌贮藏中经济有效的方法,在干燥密封条件下,食用菌可以贮藏 1 年甚至更久。

目前,已发现草菇粉^[5]、金针菇粉^[13]及蟹味菇粉^[14]可改善香肠的理化性质、营养价值、感官特性与氧化稳定性,但羊肚菌粉对香肠理化性质及氧化稳定性的影响尚未见报道。研究拟探究不同添加量羊肚菌粉对南京香肠理化性质与氧化稳定性的影响,以期对羊肚菌粉在肉制品中的开发和应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜羊肚菌:四川茵之味农业开发有限公司;

猪前腿肉、猪肥膘、食盐、白糖、味精、白酒、亚硝酸盐:南京雨润食品有限公司;

无水磷酸氢二钠、无水磷酸二氢钠、六水氯化镁、乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸、无水氯化钠、五水硫酸铜:分析纯,南京化学试剂股份有限公司;

氢氧化钠:分析纯,四川西陇化工有限公司;

牛血清蛋白:生化级,北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

冷冻干燥机:BLK-FD-30 型,江苏博莱客冷冻科技发展有限公司;

电子天平:PX224ZH 型,奥豪斯仪器(常州)有限公司;

多功能绞肉机:JR120-II 型,河北晓进机械制造有限公司;

真空全自动搅拌机:ZJB50 型,河北晓进机械制造有限公司;

真空灌装机:VF200 型,德国汉德曼公司;

全自动真空包装机:DLZ-420 型,山东诸城小康食品机械包装有限公司;

烟熏炉:50 型,德国菲斯曼集团;

高速冷冻离心机:HR21M 型,湖南赫西仪器装备有限公司;

高速分散机:XHF-DY 型,宁波新芝生物科技有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-2400 型,日本岛津公司;

质构分析仪:TA-XT2i 型,英国 Stable Micro System 公司;

便携式色差计:CR-400 型,日本柯尼美能达公司;

食品成分近红外快速分析仪:FT120 型,丹麦福斯公司;

高效液相色谱仪:S6000 型,华谱科仪(北京)科技有限公司;

氨基酸测定仪:835 型,日本日立公司;

气质联用色谱仪:DSQ II 型,美国赛默飞世尔科技公司。

1.3 试验方法

1.3.1 羊肚菌粉的制备 新鲜羊肚菌清晰干净,整齐平铺在不锈钢料盘中,于-40℃冰箱冷冻 48 h,接着转移到真空冷冻机进行冷冻干燥,真空度设置 100 Pa,冷冻干燥温度和时间设置-30℃、1 h,-25℃、1 h,-20℃、1 h,-15℃、1 h,-10℃、1 h,-5℃、2 h,0℃、2 h,5℃、1 h,10℃、1 h,20℃、1 h,30℃、1 h,40℃、1 h。当羊肚菌温度和设定温度(40℃)相同时冷冻干燥结束,取出冻干的羊肚菌,采用高速粉碎机粉碎,过 100 目筛后密封避光保存备用(蛋白含量 31.26%,脂肪含量 1.02%,水分含量 4.16%,膳食纤维含量 15.38%)。

1.3.2 南京香肠制作 南京香肠的基本配方:猪瘦肉 1 700 g,猪肥膘 300 g,食盐 68 g,白糖 132 g,味精 3 g,白酒 12 g,亚硝酸钠 0.006 g,冰水混合物 20 g。将冷冻猪瘦肉与猪肥膘置于 4℃冷藏环境解冻至中心温度 0~4℃,猪瘦肉解冻后剔除可见脂肪及结缔组织,采用 8 mm 孔径绞肉机进行绞制,猪肥膘解冻后切成 3 mm×3 mm×3 mm 肉丁,随后放入 90℃热水烫漂 3 s 以去除脂肪表面浮油,捞出沥干备用。准确称取 5 份等量上述配方用量的瘦肉和肥膘,置于真空搅拌机中充分混匀,依次加入配方量的调味料、冰水混合物以及羊肚菌粉(占原料肉总质量 0%,1%,2%,3%,4%),在真空条件下搅拌混合 10 min,用 28~30 mm 羊肠衣定量灌装,控制每根长度为 20 cm。灌

装完成后用自来水冲洗香肠表面的肉泥及杂质,沥干表面水分,将香肠送入烟熏炉中进行分段烘烤(58℃烘烤4 h,55℃烘烤10 h,50℃烘烤10 h),烘烤结束后,待香肠冷却至室温后进行真空包装,置于4℃冰箱中贮藏,所有检测指标均在1周内测完测定。

1.3.3 pH测定 参照Fu等^[15]的方法。

1.3.4 营养成分测定 取适量的腊肠样品,用高速粉碎机打碎至均匀粉末状,取打碎后的样品铺满红外分析仪专用圆盘,轻轻压平使其表面平整无空隙。将圆盘放入近红外快速分析仪中,测定样品中蛋白质、脂肪及水分含量。每组样品平行测定3次,结果以平均值表示。

1.3.5 游离氨基酸含量测定 参照Fu等^[14]的方法。

1.3.6 游离脂肪酸含量测定 参照Laranjo等^[16]的方法。

1.3.7 挥发性物质含量测定 参照Fu等^[17]的方法。

1.3.8 色泽测定 取适量的香肠样品,用高速粉碎机打碎至均匀粉末,平铺于直径10 cm的培养皿中,确保样品表面平整。测定前采用白色瓷板对色差仪进行校正,完成矫正后,在样品表面不同分布位置进行多点测定。每组样品平行测定5次,结果以平均值表示。

1.3.9 质构测定 将香肠样品切成高度为10 mm圆柱形,选用P/0.5R探头进行测定。测定条件:触发力0.098 N,测定前速度2 mm/s,测定中速度1 mm/s,测定后速度2 mm/s,压缩距离5 mm,两次压缩间隔距离5 s,测定温度25℃。每组样品平行测定5次,结果以平均值表示。

1.3.10 感官评定 参照Fu等^[18]的方法并进行适当修改。由30人组成评定小组(男女各15人),评定前对所有成员进行统一培训。将香肠样品切成5 mm厚的薄片,均匀铺在蒸笼中,置于100℃沸水浴中蒸制10 min,蒸制完成后取出放入洁净盘中,采用3位数随机代码对每个样品进行标识,随机分发给评定人员。感官评定总分10分,根据嗜好程度评分(1分表示非常不满意,10分表示非常满意),评定人员从样品的颜色、质构、口味、滋味和总体可接受性5个维度进行独立评分。每个样品的最终感官评分为30名评定小组成员的平均值。

1.3.11 2-硫代巴比妥酸(TBA)值测定 参照Fu等^[14]的方法。

1.3.12 羰基值和游离巯基值测定 参照Shi等^[19]的方法。

1.3.13 数据统计与分析 每个处理组设置5批次独立重复试验,每批次样品平行测定3次,所有试验数据均用平均值和标准差表示。采用SAS 8.1软件对数据进行单因素方差分析,采用邓肯的多重比较法检验不同处理组间的显著差异性,当 $P<0.05$ 时表明各处理组之间数据差异性显著。

2 结果与分析

2.1 对南京香肠营养成分和pH的影响

由表1可知,与对照组相比,随着羊肚菌粉添加量的增加,香肠的蛋白质含量显著提高($P<0.05$),脂肪含量略有下降,水分含量则显著降低($P<0.05$)。pH方面,各添加组与对照组存在显著性差异($P<0.05$),且pH随羊肚菌粉添加量的增加呈显著下降的趋势($P<0.05$),可能与羊肚菌粉本身的pH低于原料肉有关。这与Qing等^[20]研究的结果存在差异,其研究发现添加5%双孢菇粉可显著增加牛肉糜的pH,推测该差异源于食用菌种类的不同。而pH的降低有助于抑制腐败微生物生长,从而延长香肠的货架期。

表1 羊肚菌粉添加量对南京香肠pH和营养成分的影响[†]

Table 1 Effects of *Morchella esculenta* powder addition on nutritional components and pH values of Nanjing sausages

羊肚菌添加量/%	蛋白质含量/%	脂肪含量/%	水分含量/%	pH
0	22.77±0.19 ^e	10.56±0.08 ^a	19.21±0.75 ^a	6.31±0.01 ^a
1	23.87±3.63 ^d	10.34±0.11 ^a	15.62±0.52 ^b	6.19±0.01 ^b
2	25.50±0.10 ^c	10.32±0.09 ^a	12.74±0.40 ^c	6.14±0.01 ^{bc}
3	27.17±0.16 ^b	10.20±0.12 ^b	11.31±0.16 ^d	6.07±0.01 ^c
4	31.56±0.24 ^a	10.15±0.07 ^b	11.07±0.09 ^d	5.95±0.01 ^d

† 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

2.2 对南京香肠游离氨基酸含量的影响

由表2可知,羊肚菌粉的添加对香肠游离氨基酸总量及各组分含量均产生显著性影响($P<0.05$)。随着羊肚菌粉添加量的增加,香肠中的必需氨基酸含量及非必需氨基酸含量均呈显著上升趋势($P<0.05$)。这可能源于两方面:①羊肚菌粉和肉蛋白之间的相互作用促进了蛋白质的降解转化,生成更多的游离氨基酸;②食用菌粉中含有的内源蛋白酶能够特异性水解肉蛋白,释放游离氨基酸^[21]。此外,羊肚菌粉本身富含游离氨基酸,其添加至香肠后也会增加游离氨基酸的含量。Wang等^[5]和Fu等^[14]也发现,添加草菇粉和蟹味菇粉可显著提高广式腊肠的游离氨基酸含量。说明食用菌粉对肉制品游离氨基酸含量的提升作用具有一定普遍性。由表2还可以看出,添加羊肚菌粉后,香肠的游离亮氨酸、赖氨酸及谷氨酸的含量增加尤为显著($P<0.05$),进一步证实羊肚菌粉富含这类游离氨基酸,因此羊肚菌粉有望作为改善香肠营养价值和风味品质的新型天然配料。

2.3 对南京香肠游离脂肪酸含量的影响

由表3可知,随着羊肚菌粉添加量的增加,香肠中饱和脂肪酸含量呈逐渐降低的趋势(29.96%~34.33%),单不

表 2 羊肚菌粉添加量对南京香肠游离氨基酸含量的影响[†]

Table 2 Effects of <i>Morchella esculenta</i> powder addition on free amino acid content of Nanjing sausages %					
氨基酸	羊肚菌添加量				
	0%	1%	2%	3%	4%
苏氨酸	0.59±0.02 ^d	0.63±0.01 ^c	0.70±0.05 ^b	0.72±0.03 ^b	0.82±0.02 ^a
缬氨酸	0.20±0.01 ^e	0.23±0.02 ^d	0.26±0.02 ^c	0.30±0.01 ^b	0.35±0.02 ^a
蛋氨酸	0.14±0.01 ^e	0.17±0.01 ^{bc}	0.19±0.02 ^b	0.21±0.01 ^{ab}	0.23±0.01 ^a
异亮氨酸	0.20±0.01 ^d	0.22±0.02 ^{cd}	0.24±0.01 ^c	0.28±0.02 ^b	0.32±0.02 ^a
亮氨酸	0.34±0.02 ^e	0.41±0.02 ^d	0.45±0.03 ^c	0.52±0.02 ^b	0.58±0.02 ^a
苯丙氨酸	0.15±0.02 ^c	0.17±0.01 ^{bc}	0.19±0.02 ^b	0.21±0.01 ^{ab}	0.24±0.01 ^a
赖氨酸	0.38±0.03 ^e	0.45±0.02 ^d	0.49±0.03 ^{bc}	0.53±0.02 ^b	0.60±0.02 ^a
色氨酸	3.65±0.15 ^c	3.70±0.32 ^c	3.75±0.12 ^{bc}	3.80±0.20 ^b	4.10±0.32 ^a
天门冬氨酸	0.04±0.01 ^b	0.05±0.01 ^b	0.06±0.01 ^{ab}	0.07±0.01 ^a	0.08±0.01 ^a
丝氨酸	0.23±0.02 ^c	0.24±0.01 ^c	0.27±0.02 ^{bc}	0.29±0.02 ^b	0.34±0.01 ^a
谷氨酸	1.89±0.12 ^e	2.08±0.02 ^d	2.24±0.12 ^c	2.37±0.06 ^b	2.53±0.02 ^a
甘氨酸	0.18±0.01 ^c	0.20±0.01 ^{bc}	0.22±0.02 ^b	0.24±0.02 ^{ab}	0.26±0.01 ^a
丙氨酸	0.72±0.02 ^c	0.75±0.02 ^c	0.86±0.03 ^b	0.91±0.03 ^b	1.09±0.05 ^a
半胱氨酸	0.04±0.01 ^b	0.05±0.01 ^a	0.05±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a
酪氨酸	0.16±0.01 ^c	0.17±0.01 ^{bc}	0.19±0.02 ^b	0.22±0.01 ^a	0.24±0.01 ^a
组氨酸	0.12±0.01 ^b	0.13±0.01 ^b	0.14±0.01 ^{ab}	0.15±0.03 ^a	0.16±0.01 ^a
精氨酸	0.21±0.02 ^c	0.31±0.02 ^d	0.36±0.02 ^c	0.42±0.35 ^b	0.48±0.02 ^a
脯氨酸	0.18±0.01 ^c	0.20±0.01 ^{bc}	0.23±0.01 ^b	0.25±0.05 ^{ab}	0.29±0.06 ^a
必需氨基酸总量	5.65	5.98	6.27	6.57	7.24
非必需氨基酸总量	3.77	4.18	4.62	4.98	5.53

[†] 同行小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

饱和脂肪酸含量(25.52%~26.98%)与多不饱和脂肪酸含量(40.15%~43.96%)则呈逐渐增加趋势($P<0.05$)。与对照组相比,随着羊肚菌粉添加量的增加,香肠中油酸($C_{18:1}$)和亚油酸($C_{18:2}$)的含量显著升高($P<0.05$),而十六酸($C_{16:0}$)和十八酸($C_{18:0}$)的含量则显著降低($P<0.05$),表明羊肚菌粉的添加有助于改善香肠的脂肪酸组成,提升其营养品质。值得注意的是,亚油酸($C_{18:2}$)作为人体必需脂肪酸,其含量随羊肚菌粉添加量的增加显著提高($P<0.05$),表明羊肚菌粉本身含有一定量的亚油酸,可为香肠补充有益人体健康的功能性脂肪酸。Wang 等^[5]、Qing 等^[20]也发现,食用菌粉的添加可显著提升香肠的营养价值。

2.4 对南京香肠挥发性物质含量的影响

由表 4 可知,添加羊肚菌粉的香肠共检测出 33 种挥发性物质,显著多于对照组的 30 种,表明羊肚菌粉的添加可丰富香肠挥发性成分的种类。鉴定出的挥发性成分主要为醇类、醛类、酯类、烃类及其他类物质。随着羊肚菌粉添加量的增加,香肠中总醇类、总酯类和其他类物质含量显著升高($P<0.05$),而总醛类和总烃类物质显著降低($P<0.05$)。醇类物质是香肠特征风味物质形成的关键组分,其中异戊醇和乙氧基乙醇含量随着羊肚菌粉添加量

的增加显著提高,推测其可能来源于外源添加乙醇或香肠发酵过程中的代谢产物^[22]。尽管乙醇含量随着羊肚菌粉添加量增加显著下降,但仍是香肠中主要的挥发性化合物,对风味形成发挥关键作用。醛类物质的形成可能与脂肪氧化、氨基酸降解、微生物代谢以及羊肚菌粉和香肠基质各种成分的相互作用有关^[23],而部分酯类物质随着羊肚菌粉添加显著增加,主要归因于羊肚菌粉中含有的微生物或酶类在烘干过程中催化发生酯化反应^[24]。综上所述,羊肚菌粉不仅是优质的功能性食品原料,同时也是优良的酶和微生物的来源^[25],可通过调控挥发性成分组成改善香肠风味品质。

2.5 对南京香肠色泽的影响

由表 5 可知,与对照组相比,羊肚菌粉的添加对香肠的 L^* 值和 b^* 值产生显著性影响($P<0.05$),这可能与羊肚菌粉在干燥过程中发生美拉德反应,导致其本身亮度较低有关。随着羊肚菌粉添加量的增加,香肠的 L^* 值和 a^* 值均呈显著下降的趋势($P<0.05$),而 b^* 值则呈显著上升的趋势($P<0.05$)。该结果除了与羊肚菌粉本身的颜色变化有关外,还可能与香肠加工过程中各成分间发生的褐变反应有关^[26]。添加羊肚菌粉南京香肠的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值的变化趋势与添加草菇粉的广式香肠^[5]的一致。但 Fu

表3 羊肚菌粉添加量对南京香肠游离脂肪酸含量的影响[†]

脂肪酸	羊肚菌粉添加量					%
	0%	1%	2%	3%	4%	
C _{10:0}	0.07±0.01	0.08±0.01	0.06±0.01	0.07±0.03	0.07±0.01	
C _{12:0}	0.08±0.01	0.08±0.01	0.07±0.02	0.07±0.03	0.06±0.02	
C _{14:0}	0.85±0.02 ^a	0.83±0.02 ^a	0.68±0.06 ^b	0.66±0.02 ^b	0.62±0.02 ^c	
C _{15:0}	0.09±0.01 ^a	0.08±0.02 ^a	0.07±0.01 ^a	0.07±0.01 ^a	0.04±0.01 ^b	
C _{16:0}	21.50±0.82 ^a	21.22±1.08 ^a	20.00±0.21 ^b	19.88±0.41 ^{bc}	19.35±0.10 ^c	
C _{17:0}	0.21±0.02	0.22±0.01	0.21±0.01	0.21±0.02	0.20±0.01	
C _{18:0}	11.40±0.39 ^a	10.30±0.31 ^b	10.23±0.59 ^b	10.02±0.62 ^c	9.52±0.30 ^d	
C _{20:0}	0.12±0.01	0.12±0.02	0.12±0.01	0.10±0.01	0.10±0.39	
C _{16:1}	1.42±0.08 ^a	1.36±0.12 ^b	1.22±0.08 ^c	1.23±0.05 ^c	1.20±0.02 ^c	
C _{18:1}	23.70±0.43 ^c	24.40±0.83 ^b	24.70±1.20 ^{ab}	25.00±0.51 ^a	25.40±0.30 ^a	
C _{20:1}	0.40±0.02	0.40±0.05	0.38±0.08	0.39±0.02	0.38±0.08	
C _{18:2}	30.40±0.95 ^c	31.10±0.40 ^d	32.50±0.42 ^c	33.20±0.36 ^b	34.20±0.51 ^a	
C _{20:2}	0.69±0.02 ^a	0.70±0.01 ^a	0.67±0.02 ^{ab}	0.66±0.02 ^b	0.65±0.02 ^b	
C _{18:3}	1.17±0.05	1.18±0.03	1.17±0.23	1.16±0.31	1.15±0.26	
C _{20:3}	0.61±0.02 ^{ab}	0.59±0.04 ^b	0.63±0.02 ^a	0.60±0.01 ^b	0.56±0.01 ^c	
C _{20:4}	6.84±0.55 ^b	6.92±0.23 ^a	6.58±0.80 ^c	6.31±0.58 ^d	6.22±0.50 ^e	
C _{20:5}	0.18±0.01 ^a	0.18±0.02 ^a	0.17±0.02 ^a	0.16±0.03 ^{ab}	0.15±0.01 ^b	
C _{22:6}	0.26±0.01 ^{ab}	0.24±0.02 ^b	0.25±0.03 ^b	0.25±0.01 ^b	0.28±0.01 ^a	
饱和脂肪酸总量	34.33	32.93	31.46	31.08	29.96	
单不饱和脂肪酸总量	25.52	26.16	26.30	26.62	26.98	
多不饱和脂肪酸总量	40.15	40.91	41.94	42.30	43.06	

† 同行小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

等^[14]发现,蟹味菇粉的添加会使广式香肠的 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值显著降低,推测这一差异与不同品种食用菌本身颜色相关,羊肚菌粉与蟹味菇粉的基础色泽及加工过程中的发色特性存在固有区别。

2.6 对南京香肠质构特性的影响

由表6可知,与对照组相比,羊肚菌粉的添加降低了香肠的硬度、胶着性和咀嚼性($P<0.05$),同时增加了香肠的弹性($P<0.05$)。随着羊肚菌粉添加量的增加,除香肠的弹性无显著性影响外($P>0.05$),香肠的硬度、胶着性和咀嚼性均显著降低($P<0.05$)。这可能是由于羊肚菌粉含有碱性蛋白酶和丝氨酸蛋白酶^[26-27],这些内源蛋白酶在香肠烘烤过程中降解肉蛋白,导致香肠形成孔隙和海绵状结构,随后肉蛋白网络结构开始松弛,最终形成致密的海绵状结构^[9]。另外,羊肚菌粉含有丰富的不溶性膳食纤维,这些膳食纤维未能与肉蛋白及水很好地相互作用,从而弱化香肠的凝胶强度,导致香肠的硬度、胶着性和咀嚼性降低^[28]。该结果与Wang等^[13]的报道一致。

2.7 对南京香肠感官品质的影响

由表7可知,随着羊肚菌粉添加量的增加,香肠的气味和风味评分显著上升($P<0.05$),而颜色、质构和总体可

接受性评分呈先升高后降低的趋势($P<0.05$)。表明羊肚菌粉的添加能够改善香肠的风味。此外,所有香肠样品的感官结果都能被感官评定小组成员接受,其中羊肚菌粉添加量为2%时样品的总体可接受性评分最高,添加量超过3%时,会对香肠的颜色和质构产生不利影响。

2.8 对南京香肠脂肪和蛋白质氧化的影响

氧化作用影响南京香肠的感官品质、风味、口感及营养价值,适当氧化有利于香肠风味的形成,而过氧化则会导致香肠品质劣变,并产生有毒有害化合物^[2]。脂肪和蛋白质氧化程度分别用TBA值及羰基和游离巯基值表示。由表8可知,与对照组相比,随着羊肚菌粉添加量的增加,香肠的TBA值显著降低($P<0.05$),可能是羊肚菌粉中的抗氧化物质抑制了脂肪氧化进程,从而提升了香肠的脂肪稳定性。该结果与表4中醛类物质的减少呈正相关性,且与Jo等^[29]的研究结论一致。然而,Qing等^[20]发现,草菇粉、蟹味菇粉、平菇粉和双孢菇粉的添加会促进牛肉糜中的脂肪氧化,这可能与上述食用菌中含有的脂肪氧化酶有关。从表8还可以观察到,随着羊肚菌粉添加量的增加,蛋白羰基值显著降低($P<0.05$),而蛋白游离巯基值显著升高($P<0.05$),表明羊肚菌粉对香肠中蛋白

表 4 羊肚菌粉添加量对南京香肠挥发性物质含量的影响[†]

Table 4 Effects of <i>Morchella esculenta</i> powder addition on volatile compound content of Nanjing sausages					%
挥发物	羊肚菌粉添加量				
	0%	1%	2%	3%	4%
乙醇	3.85±0.08 ^a	2.69±0.10 ^b	1.91±0.12 ^c	1.43±0.05 ^d	1.08±0.03 ^e
2-甲基-1-十六烷醇	0.48±0.01 ^a	0.34±0.03 ^b	0.23±0.02 ^c	0.20±0.05 ^c	0.12±0.01 ^d
异戊醇	2.64±0.08 ^e	5.23±0.18 ^d	7.39±0.59 ^c	9.79±0.82 ^b	11.60±0.37 ^a
13-十七炔-1-醇	0.54±0.03 ^a	0.42±0.02 ^b	0.34±0.01 ^c	0.22±0.01 ^d	0.11±0.02 ^e
乙氧基乙醇	17.64±0.88 ^e	23.82±0.24 ^d	30.15±0.63 ^c	35.89±0.57 ^b	40.36±0.98 ^a
乙基异胆甾醇	1.02±0.19 ^a	0.86±0.12 ^b	0.68±0.08 ^c	0.43±0.05 ^d	0.23±0.02 ^e
叔十六硫醇	0.28±0.03 ^a	0.20±0.02 ^b	0.14±0.03 ^c	0.09±0.02 ^d	0.05±0.01 ^e
苯甲醛	1.49±0.08 ^a	1.18±0.05 ^b	0.95±0.03 ^c	0.73±0.03 ^d	0.59±0.02 ^e
4-(1-甲基乙基)苯甲醛	0.92±0.04 ^a	0.68±0.05 ^b	0.51±0.02 ^c	0.39±0.03 ^d	0.21±0.02 ^e
乙酸乙酯	0.71±0.03 ^e	1.05±0.06 ^d	1.24±0.03 ^c	1.40±0.05 ^b	1.58±0.04 ^a
乙酸乙烯酯	1.33±0.03 ^d	1.58±0.06 ^c	1.60±0.05 ^c	1.72±0.02 ^b	1.99±0.03 ^a
9-十八烯酸(Z)-苯甲酯	未检出	0.18±0.02 ^c	0.21±0.01 ^c	0.41±0.02 ^b	0.65±0.03 ^a
油酸 3-(十八烷基氧基)丙基酯	0.88±0.01 ^d	1.23±0.03 ^c	1.28±0.03 ^{bc}	1.33±0.02 ^b	1.58±0.03 ^a
12,15-十八二烯酸甲酯	0.56±0.03 ^e	0.70±0.01 ^d	0.92±0.02 ^c	1.15±0.03 ^b	1.38±0.02 ^a
10,13-十八二甲酸甲酯	未检出	0.15±0.01 ^c	0.28±0.03 ^b	0.31±0.02 ^b	0.43±0.05 ^a
N-苄基-2-氨基乙酸甲酯	0.17±0.02 ^e	0.26±0.05 ^d	0.35±0.01 ^c	0.44±0.02 ^b	0.52±0.05 ^a
十八烯酸甲酯	0.18±0.01 ^d	0.20±0.02 ^d	0.43±0.01 ^c	0.60±0.03 ^b	0.96±0.06 ^a
1,13-二羟基十四-5-乙烯酸甲酯	0.21±0.01 ^d	0.22±0.03 ^d	0.51±0.08 ^c	0.75±0.04 ^b	0.91±0.05 ^a
2-辛基环丙十二酸甲酯	未检出	0.38±0.05 ^d	0.52±0.01 ^c	0.69±0.02 ^b	0.87±0.04 ^a
八甲基环四硅氧烷	1.39±0.12 ^a	1.08±0.05 ^b	0.85±0.02 ^c	0.63±0.02 ^d	0.38±0.02 ^e
(3-辛基十一烷基)苯	0.91±0.05 ^a	0.70±0.02 ^b	0.66±0.02 ^{bc}	0.59±0.03 ^c	0.40±0.02 ^d
十甲基环五硅氧烷	3.36±0.21 ^a	2.38±0.14 ^b	1.52±0.06 ^c	0.98±0.05 ^d	0.64±0.02 ^e
十二甲基环六硅氧烷	1.37±0.11 ^a	1.15±0.08 ^b	0.95±0.05 ^c	0.67±0.04 ^d	0.41±0.02 ^e
1,3-二叔丁基苯	3.03±0.28 ^a	2.58±0.16 ^b	1.72±0.09 ^c	1.21±0.06 ^d	0.08±0.02 ^e
十四甲基环七硅氧烷	0.29±0.03 ^a	0.15±0.02 ^b	0.12±0.01 ^{bc}	0.10±0.01 ^c	0.04±0.01 ^d
十六甲基环辛硅氧烷	0.19±0.01 ^a	0.16±0.01 ^{ab}	0.14±0.01 ^b	0.09±0.02 ^c	0.06±0.01 ^d
十六烷基七硅氧烷	1.12±0.10 ^a	0.86±0.08 ^b	0.72±0.01 ^c	0.58±0.02 ^d	0.45±0.03 ^e
辛乙烯醇单正十二烷基酯	0.29±0.01 ^a	0.26±0.02 ^{ab}	0.25±0.01 ^b	0.22±0.02 ^{bc}	0.20±0.02 ^c
肌氨酸	4.52±0.57 ^e	6.14±0.21 ^d	8.22±0.14 ^c	9.21±0.28 ^b	11.81±0.03 ^a
丙酮	2.20±0.03 ^a	1.70±0.05 ^b	1.24±0.03 ^c	1.05±0.04 ^d	0.92±0.05 ^e
乙酸	1.37±0.45 ^d	1.39±0.10 ^d	1.73±0.12 ^c	1.89±0.14 ^b	2.09±0.09 ^a
2,6-二(1,1-二甲基乙基)-4-(1-氧代丙基)苯酚	3.25±0.18 ^a	2.13±0.22 ^b	1.01±0.02 ^c	0.86±0.02 ^d	0.63±0.03 ^e
乙基麦芽酚	1.24±0.15 ^e	1.56±0.11 ^d	2.06±0.10 ^c	2.65±0.16 ^b	2.93±0.09 ^a
醇类物质总量	26.45	33.56	40.84	48.05	53.55
醛类物质总量	2.41	1.86	1.46	1.12	0.80
酯类物质总量	4.31	5.95	6.06	8.80	10.87
烃基化合物总量	11.95	9.32	6.93	5.07	2.66
其他物质总量	12.58	12.92	14.26	15.66	18.38

[†] 同行小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

质的氧化有抑制作用。其潜在机制为:羊肚菌粉富含活性多酚、多糖及其他活性物质,这些成分可有效阻断蛋白质的氧化反应,增强香肠的贮藏稳定性。该结果与 Wang 等^[13]和 Jo 等^[29]报道的结果相符。而 Qing 等^[20]的研究显

示,草菇粉、蟹味菇粉、平菇粉和双孢菇粉的添加会促进牛肉糜中的蛋白质氧化。这是因为食用菌中的蛋白酶可降解肌肉蛋白,将大分子蛋白水解为小分子肽段,肽链暴露大量活性位点,大幅提高蛋白氧化敏感性,进而促进氧

表5 羊肚菌粉添加量对南京香肠色泽的影响[†]

Table 5 Effects of *Morchella esculenta* powder addition on color parameters of Nanjing sausages

羊肚菌添加量/%	<i>L</i> *值	<i>a</i> *值	<i>b</i> *值
0	39.80±0.11 ^a	16.38±0.08 ^a	11.93±0.10 ^d
1	33.17±0.12 ^b	12.77±0.11 ^b	12.60±0.05 ^c
2	31.64±0.14 ^c	11.32±0.09 ^c	12.75±0.11 ^b
3	28.75±0.11 ^d	10.81±0.12 ^d	12.82±0.08 ^a
4	27.49±0.08 ^d	10.05±0.07 ^e	12.86±0.12 ^a

[†] 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

表6 羊肚菌粉添加量对南京香肠质构的影响[†]

Table 6 Effects of *morchella esculenta* powder addition on textural characteristics of Nanjing sausages

羊肚菌粉添加量/%	硬度/N	弹性	胶着性/N	咀嚼性/N
0	113.76±0.26 ^a	0.73±0.01 ^b	70.25±0.22 ^a	51.53±0.25 ^a
1	108.59±0.19 ^b	0.80±0.01 ^a	61.09±0.13 ^b	47.79±0.12 ^b
2	96.42±0.17 ^c	0.79±0.01 ^a	54.08±0.12 ^c	45.78±0.17 ^c
3	89.33±0.24 ^d	0.78±0.02 ^a	51.29±0.16 ^d	40.75±0.18 ^d
4	48.47±30.00 ^e	0.78±0.01 ^a	47.71±0.27 ^c	35.95±0.20 ^c

[†] 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

表7 羊肚菌粉添加量对南京香肠感官评价的影响[†]

Table 7 Effects of *morchella esculenta* powder addition on sensory scores of Nanjing sausages

羊肚菌粉添加量/%	颜色	质构	气味	风味	总体可接受性
0	8.52±0.25 ^b	8.36±0.13 ^c	6.54±0.15 ^c	6.85±0.17 ^c	7.86±0.22 ^d
1	8.60±0.31 ^a	9.04±0.15 ^b	7.02±0.12 ^d	7.58±0.22 ^d	8.01±0.15 ^c
2	8.62±0.18 ^a	9.32±0.19 ^a	7.55±0.16 ^c	7.86±0.13 ^c	8.96±0.10 ^a
3	8.26±0.21 ^c	7.52±0.22 ^d	8.06±0.18 ^b	8.25±0.21 ^b	8.34±0.12 ^b
4	8.02±0.15 ^d	6.85±0.17 ^e	8.32±0.14 ^a	8.66±0.20 ^a	7.12±0.21 ^e

[†] 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

表8 羊肚菌粉添加量对南京香肠脂肪和蛋白质氧化的影响

Table 8 Effects of *morchella esculenta* powder addition on lipid oxidation and protein oxidation of Nanjing sausages

羊肚菌添加量/%	TBA 值/ (mg MDA·kg ⁻¹)	羰基值/ (nmol·mg ⁻¹)	游离巯基值/ (nmol·mg ⁻¹)
0	0.18±0.01 ^a	1.23±0.07 ^a	40.39±0.96 ^c
1	0.14±0.01 ^b	1.04±0.05 ^b	46.82±0.57 ^d
2	0.11±0.01 ^c	0.82±0.06 ^c	53.60±0.82 ^c
3	0.09±0.01 ^c	0.66±0.08 ^d	60.20±0.63 ^b
4	0.06±0.01 ^d	0.45±0.03 ^e	66.15±0.91 ^a

[†] 同列小写字母不同表示显著差异($P<0.05$)。

化反应发生。此外,食用菌含有的多酚氧化酶也会推动蛋白质氧化进程。

3 结论

研究系统探究了不同羊肚菌粉添加量对南京香肠理化指标及氧化稳定性的影响。结果表明,与对照组相比,羊肚菌粉的添加可显著提高香肠的游离氨基酸含量、游离脂肪酸含量及挥发性物质含量,能提升香肠的风味和气味评分,改善其质构特性,并增强香肠的营养价值和整体可接受性。此外,羊肚菌粉的添加还能有效抑制香肠中脂肪和蛋白质的氧化进程。羊肚菌粉作为一种潜在的

功能性辅料添加至香肠中,可显著提升产品的营养价值与食用品质。鉴于氧化产物对人体的严重危害,未来研究将聚焦于羊肚菌粉中活性多糖、多酚类物质的提取与纯化,并将其应用于香肠的基础研究,深入阐明其对香肠氧化抑制作用的潜在分子机制。

参考文献

[1] Carlotti F, Bazuine M, Kekarainen T, et al. Lentiviral vectors efficiently transduce quiescent mature 3T3-L1 adipocytes[J]. Molecular Therapy, 2004, 9(2): 209-217.

[2] Lapidot T, Granit R, Kanner J. Lipid peroxidation by free iron ions and myoglobin as affected by dietary antioxidants in simulated gastric fluids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(9): 3 383-3 390.

[3] Estévez M. Protein carbonyls in meat systems: a review[J]. Meat Science, 2011, 89(3): 259-279.

[4] Saito M, Sakagami H, Fujisawa S. Cytotoxicity and apoptosis induction by butylated hydroxyanisole (BHA) and butylated hydroxytoluene (BHT) [J]. Anticancer Research, 2003, 23(6): 4 693-4 701.

[5] Wang X P, Zhou P F, Cheng J R, et al. Use of straw mushrooms (*Volvariella volvacea*) for the enhancement of physicochemical, nutritional and sensory profiles of Cantonese sausages[J]. Meat Science, 2018, 146: 18-25.

[6] Hibbett D S, Binder M, Bischoff J F, et al. A higher-level phylogenetic classification of the Fungi[J]. Mycological

- Research, 2007, 111(5): 509-547.
- [7] 张景. 羊肚菌多糖的提取分离、结构表征及抗氧化研究[D]. 聊城: 聊城大学, 2023: 1.
- Zhang J. Study on extraction, isolation, structural characterization and antioxidant activities of polysaccharides from *Morchella esculenta*[D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2023: 1.
- [8] Seoung R L, Hyun-Soo R, Seul L, et al. Bioactivity-guided isolation and chemical characterization of antiproliferative constituents from morel mushroom (*Morchella esculenta*) in human lung adenocarcinoma cells[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 40: 249-260.
- [9] Mirzadeh M, Arianajad M R, Khedmat L. Antioxidant, antiradical, and antimicrobial activities of polysaccharides obtained by microwave-assisted extraction method: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115421.
- [10] Yang C L, Meng Q F, Zhou X, et al. Separation and identification of chemical constituents of *Morchella conica* isolated from Guizhou province China[J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2019, 86: 103919.
- [11] 李朝东, 吴霖, 王世伟, 等. 我国羊肚菌的生产规模与田间种植技术要点[J]. 食药菌, 2021, 29(6): 461-465.
- Li C D, Wu L, Wang S W, et al. Production scale and key field cultivation techniques of *Morchella* in China[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2021, 29(6): 461-465.
- [12] 王俊, 夏伶俐, 谢玲, 等. 不同干燥方式对羊肚菌品质的影响[J]. 食药菌, 2024, 32(2): 109-117.
- Wang J, Xia L L, Xie L, et al. Effects of different drying methods on the quality of *Morchella*[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2024, 32(2): 109-117.
- [13] Wang X P, Xu M Y, Cheng J R, et al. Effect of *Flammulina velutipes* on the physicochemical and sensory characteristics of Cantonese sausages[J]. Meat Science, 2019, 154: 22-28.
- [14] Fu Q Q, Zhang W, Chen Q Z. The effects of *Hypsizygus marmoreus* powder on the physicochemical properties, sensory characteristics, and oxidative stability of Chinese Cantonese-style sausages[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2025, 2 025(1): 4346162.
- [15] Fu Q Q, Song S X, Xia T L, et al. Effects of cherry (*Prunuscerasus* L.) powder addition on the physicochemical properties and oxidation stability of Jiangsu-type sausage during refrigerated storage[J]. Foods, 2022, 11(22): 3 590.
- [16] Laranjo M, Gomes A, Agulheiro-Santos A C, et al. Impact of salt reduction on biogenic amines, fatty acids, microbiota, texture and sensory profile in traditional blood dry-cured sausages[J]. Food Chemistry, 2017, 218: 129-136.
- [17] Fu Q Q, Yang J T, Lv L Y, et al. Effects of replacing chicken breast meat with *Agaricus bisporus* mushrooms on the qualities of emulsion-type sausages[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 184: 114983.
- [18] Fu Q Q, Shi H B, Hu D X, et al. Pork *Longissimus dorsi* marinated with edible mushroom powders: evaluation of quality traits, microstructure, and protein degradation[J]. Food Research International, 2022, 158: 111503.
- [19] Shi H B, Zhang R Y, Zheng J B, et al. Reduction of NaCl in oxidized myofibrillar protein by substitution with chloride salts: underlining the gel changes and gastric digestive properties[J]. Food Science and Human Wellness, 2026, 15 (1): 9250331.
- [20] Qing Z L, Cheng J R, Wang X P, et al. The effects of four edible mushrooms (*Volvariella volvacea*, *Hypsizygus marmoreus*, *Pleurotus ostreatus* and *Agaricus bisporus*) on physicochemical properties of beef paste[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 135: 110063.
- [21] Lee K H, Kim H K, Kim S H, et al. Effects of mushroom extract on textural properties and muscle protein degradation of bovine *Longissimus dorsi* muscle[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2017, 81(3): 558-564.
- [22] Montanari C, Bargossi E, Gardini A, et al. Correlation between volatile profiles of Italian fermented sausages and their size and starter culture[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 736-744.
- [23] Mottram D S. Flavour formation in meat and meat products: a review[J]. Food Chemistry, 1998, 62(4): 415-424.
- [24] Jeleń H, Wasowicz E. Volatile fungal metabolites and their relation to the spoilage of agricultural commodities[J]. Food Reviews International, 1998, 14(4): 391-426.
- [25] Diamantopoulou P, Papanikolaou S, Aggelis G, et al. Adaptation of *Volvariella volvacea* metabolism in high carbon to nitrogen ratio media[J]. Food Chemistry, 2016, 196: 272-280.
- [26] Guan G P, Zhang G Q, Wu Y Y, et al. Purification and characterization of a novel serine protease from the mushroom *Pholiota nameko*[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2011, 111(6): 641-645.
- [27] Cui L, Liu Q H, Wang H X, et al. An alkaline protease from fresh fruiting bodies of the edible mushroom *Pleurotus citrinopileatus*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, 75(1): 81-85.
- [28] Han M Y, Bertram H C. Designing healthier comminuted meat products: effect of dietary fibers on water distribution and texture of a fat-reduced meat model system[J]. Meat Science, 2017, 133: 159-165.
- [29] Jo K, Lee J, Jung S. Quality characteristics of low-salt chicken sausage supplemented with a winter mushroom powder[J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2018, 38(4): 768-779.