

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.07.020

# 滚筒式催化红外联合保温处理对返潮干香菇 杀菌效果及品质的影响

Effect of combined drum catalytic infrared with holding treatment for  
disinfection and quality of rewetting-dried shiitake mushrooms

李 婷<sup>1</sup> 曲文娟<sup>1,2</sup> 吴本刚<sup>1,2</sup> 王 蓓<sup>1,2</sup>

LI Ting<sup>1</sup> QU Wen-juan<sup>1,2</sup> WU Ben-gang<sup>1,2</sup> WANG Bei<sup>1,2</sup>

马海乐<sup>1,2</sup> 潘忠礼<sup>3</sup> 蒋群辉<sup>4</sup>

MA Hai-le<sup>1,2</sup> PAN Zhong-li<sup>3</sup> JIANG Qun-hui<sup>4</sup>

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏大学食品物理加工研究院,  
江苏 镇江 212013; 3. 美国加州大学戴维斯分校生物与农业工程系, 美国 加州 95616;  
4. 镇江美博红外科技有限公司, 江苏 镇江 212013)

(1. School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;  
2. Institute of Food Physical Processing, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;  
3. Department of Biological and Agricultural Engineering, University of California, Davis, California  
95616, USA; 4. Maybo Innovation Co., Ltd., Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**摘要:**目的:提高返潮干香菇食用安全性。方法:采用滚筒式催化红外设备对黑曲霉含量超标的返潮干香菇进行红外联合保温热处理杀菌试验,考察工艺参数对杀菌效果、干燥效果及品质的影响,并对杀菌过程进行动力学分析。结果:60~80℃下红外处理 8.7~21.2 min,后续保温 20~80 min,初始水分含量为 16.0%~21.4%的返潮干香菇均可达到霉菌总数小于 2 lg(CFU/g)的食品卫生标准。Log-Linear+Tail 模型能很好地拟合保温热处理对黑曲霉的杀菌动力学特征( $R^2>0.98$ )。杀菌同时可除去 2.2%~6.0%的水分,实现同步干燥。综合杀菌时间和香菇品质,最适杀菌条件为滚筒催化红外 70℃处理 10.8~15.2 min(进料速度 38~50 kg/h),后续 70℃保温 30~60 min。结论:采用滚筒催化红外联合保温热处理对返潮干香菇杀菌具有一定的可行性。

**关键词:**香菇;返潮;滚筒式催化红外;保温处理;杀菌;动力学

**Abstract; Objective:** The aim of this work is to improve the food

**基金项目:**国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(编号:2017YFE0105300)

**作者简介:**李婷,女,江苏大学在读硕士研究生。

**通信作者:**马海乐(1963—),男,江苏大学教授,博士。

E-mail: mhl@ujs.edu.cn

**收稿日期:**2021-03-06

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

safety of rewetting-dried shiitake mushrooms. **Methods:** The drum catalytic infrared device was used to carry out the infrared combined holding treatment disinfection test on rewetting-dried shiitake mushrooms with excessive *Aspergillus niger* (*A. niger*), and the effect of process parameters on disinfection effectiveness, drying effectiveness and quality of mushrooms were investigated. Moreover, the kinetics of the microbial inactivation process was analyzed. **Results:** The results showed that after disinfected with DCIR at 60~80℃ for 8.7~21.2 min, followed by holding for 20~80 min, the total number of moulds on mushrooms with IMCs of 16.0%~21.4% was less than 2 lg(CFU/g), which could meet the national food hygiene standard. The Log-Linear plus Tail model fitted well the inactivation regularity of *A. niger* during the holding process ( $R^2>0.98$ ). Meanwhile, moisture (w. b.) of 2.2%~6.0% was removed from the mushrooms to achieve simultaneous drying. Considering the disinfection time and product quality indicators, it was recommended that mushrooms treated with DCIR for 10.8~15.2 min to 70℃ (the feed rate of DCIR was 38~50 kg/h), followed by holding at 70℃ for 30~60 min as the most suitable disinfecting process condition. Under the control of this process condition, the high-quality product was obtained. **Conclusion:** Drum catalytic infrared radiation combined with holding treatment was a promising disinfection technology during rewetting-dried shiitake mushrooms disinfecting.

**Keywords:** shiitake mushroom; rewetting; drum catalytic infrared; holding treatment; disinfection; kinetics

干香菇是一种高蛋白、低脂肪的绿色食品,营养价值、药用价值和经济价值较高<sup>[1]</sup>。然而,干香菇组织结构疏松,富含亲水性胶体成分<sup>[2]</sup>,从加工到消费环节都可能因贮藏不当吸湿返潮<sup>[2-3]</sup>。课题组前期研究<sup>[4]</sup>发现,黑曲霉(*Aspergillus niger*)作为一种常见的湿生性腐生致霉菌,很容易污染返潮干香菇,导致香菇霉菌含量超标、品质劣变、质量等级下降、甚至丧失食用价值。干香菇一旦霉变可能产生具有肾毒性和致癌性的赈曲霉毒素 A (OTA)<sup>[5]</sup>。

现阶段,高温蒸汽、熏蒸、<sup>60</sup>Co 辐照是工业上应用最广泛的杀菌技术<sup>[6-7]</sup>,然而,这些技术不同程度地存在能耗高、不环保、品质差、食用安全隐患等局限性<sup>[7-10]</sup>。近年来,催化式红外辐射(CIR)作为一种优质的新型热杀菌技术,以天然气为主要热源,加热过程中仅产生少量的水蒸气和二氧化碳,具有能量利用率高、节能环保、成本低等优点<sup>[11-13]</sup>,在食品杀菌领域备受关注。它是在铂、钯等催化剂的作用下,由空气与天然气在辐射板表面发生氧化反应产生的波长在 3.3~8.0 μm 的电磁波形式的热辐射<sup>[13]</sup>,加热效率高,可使物料表面瞬时达到高温,使得物料表面微生物的 DNA、RNA、核糖体、蛋白质、细胞膜等结构被破坏<sup>[14-15]</sup>,从而达到杀菌目的。尽管国内外已有一些采用催化式红外进行农副产品杀菌的报道<sup>[15-19]</sup>,但都是建立在静态杀菌基础上的,还未见采用滚筒式催化红外设备开展返潮干香菇杀菌研究的相关报道。

研究拟在实验室前期研究的基础上,采用滚筒式催化红外设备研究不同杀菌温度下红外联合保温热处理对黑曲霉含量超标返潮干香菇杀菌的可行性,分析杀菌动力学特性,考察同步干燥效果,并对不同杀菌条件处理后香菇的品质进行评价,以为催化式红外联合保温热处理杀菌技术在返潮干香菇杀菌的工业化应用提供理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验原料

椴木干冬菇:申香 215,湿基含水率为(9.79±0.20)%,湖北十堰伏龙山绿色食品开发有限公司(同一批次);

黑曲霉菌株(*Aspergillus niger* NG\_065763.1):实验室前期于霉变干香菇上分离纯化,并采用 18S rDNA 全序列分析鉴定。

### 1.2 主要仪器设备

滚筒式催化红外设备(见图 1):江苏大学自制;  
商用电子台秤:K-FINE 型,浙江凯丰集团有限公司;

高压蒸汽灭菌锅:HVE-50 型,日本 Hirayama 公司;  
拍击式无菌均质器:LC-PJ-400M 型,上海力辰邦西仪器科技有限公司;

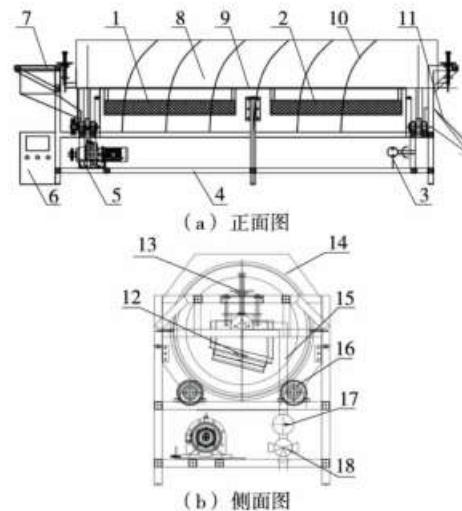
非接触式手持红外测温仪:AS872B 型,香港希玛仪表设备公司;

高精度色差仪:SC-10 型,深圳三思驰科技有限公司;  
电子鼻传感器:PEN3 型,德国 AIRSENSE 公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 返潮干香菇制备 试验挑选无病害、无机械损伤、菇体完整、厚度均匀[(1.22±0.23) cm]、大小相近[直径为(3.61±0.31) cm]、菌盖圆平、色泽自然的香菇为试验材料。根据前期试验所测自然霉变干香菇湿基水分含量(16.1%~21.5%),将原料干香菇紫外灭菌 20 min,然后以其质量为基数,加入不同比例的无菌水,密封于无菌均质袋中于(4±1)℃下保存 5 d 以平衡样品水分<sup>[20]</sup>。采用直接干燥法<sup>[21]</sup>测定样品水分含量,最终得到初始湿基水分含量(IMC)分别为(16.0±0.5)%,(18.1±0.9)%,(21.4±0.4)%的“返潮干香菇”样品。每次试验前,将样品取出于(25±1)℃放置 4 h 以平衡样品温度。

1.3.2 返潮干香菇染菌 按  $m_{\text{香菇}}:V_{\text{悬液}}=20:1$  (g/mL) 的比例,将孢子数为 10<sup>8</sup> CFU/mL 的对数生长期(培养 96 h)黑曲霉孢子悬液均匀喷洒至不同初始湿基含水率返潮干香菇样品上,得到霉菌含量超标的返潮干香菇样品,将染菌样品单层平铺于无菌平皿内,置于超净工作台,于



1、2. 催化式红外发生器(1 800 mm×480 mm×40 mm) 3. 空气泵 4. 机架 5. 滚筒转动电机 6. 电器控制箱 7. 进料料斗 8. 滚筒干燥室(Φ1 000 mm×4 000 mm) 9. 支撑轴 10. 滚筒干燥室内壁挡板 11. 出料料斗 12. 温度传感器 13. 红外板距调整装置 14. 滚筒干燥室外壁 15. 燃气管道 16. 传动齿轮 17. 燃气压力表 18. 燃气调节阀门

图 1 滚筒式催化红外设备

Figure 1 Drum catalytic infrared device

(25±1)℃干燥 4 h,使样品初始水分含量与染菌前一致。

1.3.3 滚筒式催化红外联合保温热处理杀菌试验 根据课题组前期研究结果所得,调节催化式红外辐射距离至 25 cm、调节催化式红外辐射温度至 350℃,选取 3 个杀菌温度(60,70,80℃)进行杀菌试验。通过前期预试验,初始水分含量为 16.0%,18.1%,21.4%返潮干香菇达到各目标杀菌温度所需的滚筒转速、红外处理时间、进料速度见表 1。根据表 1,不同初始水分含量返潮干香菇经滚筒式催化红外加热至各目标温度后立即密封于无菌均质袋中,并迅速转移至恒温烘箱于各自温度下进行保温杀菌处理。试验中每个保温处理结束后,立即将香菇样品从无菌均质袋中取出,单层平铺于无菌环境下自然冷却,直至香菇温度与室温相差小于 2℃时对样品称重并进行菌落计数,同时收集各杀菌温度下滚筒式催化红外出料时的样品进行称重和菌落计数。

《干香菇辐照杀虫防霉工艺》<sup>[22]</sup>规定,干香菇辐照后霉菌数<100 CFU/g 即达到合格标准。为了研究一种有效的可应用性的返潮干香菇杀菌方法,将最低杀菌要求设置霉菌总数<2 lg(CFU/g)。

1.3.4 霉菌总数测定 采用平板计数法<sup>[23]</sup>。

1.3.5 杀菌动力学建模 选用 Log-Linear+Tail 模型<sup>[24]</sup>对不同杀菌温度下滚筒式催化红外杀菌处理后保温热处理对返潮干香菇中黑曲霉的杀菌动力学进行拟合。该模型的数学表达式:

$$N = (N_0 - N_{res}) \times \exp^{-k_{max} \times t} + N_{res}, \quad (1)$$

换位后式(1)两边同时取对数,得:

$$\lg\left(\frac{N - N_{res}}{N_0 - N_{res}}\right) = \lg e^{-k_{max} \times t}, \quad (2)$$

式中:

$N$ ——杀菌  $t$  时刻样品中存活的黑曲霉总数,CFU/g;

$N_0$ ——杀菌前返潮干香菇样品中的黑曲霉总数,CFU/g;

$N_{res}$ ——抗逆稳定孢子数,CFU/g;

$k_{max}$ ——单位时间的最大失活速率, $\text{min}^{-1}$ ;

$t$ ——杀菌处理时间,min。

$$D = \frac{\ln 10}{k_{max}}, \quad (3)$$

式中:

$D$ ——指数递减时间(表示灭活 90%微生物所需时间),min;

$k_{max}$ ——单位时间的最大失活速率, $\text{min}^{-1}$ 。

选用精确因子( $A_i$ )、偏差因子( $B_i$ )、拟合指数( $R^2$ )和均方根误差(RMSE)4 个参数对模型拟合效果进行评价<sup>[25]</sup>。其中  $A_i$ 用来评价模型的精确度, $A_i$ 值越接近 1 则表明模型越精确; $B_i$ 和  $R^2$ 用来评价模型的拟合度, $B_i$ 值越接近 1, $R^2$ 值越大则表明模型拟合度越高;RMSE 用来评价模型的可靠度,RMSE 越小则表明模型可靠度越高。 $A_i$ 、 $B_i$ 和 RMSE 的计算公式如下:

$$A_i = 10^{\frac{\sum |\lg(p/a)|}{n}}, \quad (4)$$

$$B_i = 10^{\frac{\sum \lg(p/a)}{n}}, \quad (5)$$

$$S_{RME} = \sqrt{\frac{\sum (p - a)^2}{n}}, \quad (6)$$

式中:

$A_i$ ——精确因子;

$B_i$ ——偏差因子;

$S_{RME}$ ——均方根误差;

$p$ ——预测值;

$a$ ——实测值;

$n$ ——实测值的数目。

1.3.6 杀菌同步干燥试验 采用直接干燥法<sup>[21]</sup>测定杀菌处理前返潮干香菇样品、红外加热至不同温度时香菇样品和红外加热至不同温度后于各自温度下保温不同时间并自然冷却处理后香菇样品的水分含量,并根据式(7)计算红外阶段和自然冷却处理后的水分损失百分比。

$$M_R = M_t - M_i, \quad (7)$$

式中:

$M_R$ ——水分损失百分比,%;

$M_t$ ——香菇在  $t$  时刻的湿基水分含量,%;

$M_i$ ——返潮干香菇初始湿基水分含量,%。

1.3.7 品质评价指标测定

(1) 颜色:使用 SC-10 型色差仪测定杀菌前、后香菇表面颜色,采用 CIE-L\* a\* b\* 系统<sup>[13]</sup>表示样品的色值。由于不同香菇个体表面不同部位颜色差异较大,为了保证测量的准确性,每朵香菇至少测定 10 次,最后取  $L^*$ (亮度)、 $a^*$ (红色/绿色)和  $b^*$ (黄色/蓝色)值的平均值记

表 1 不同温度下红外杀菌阶段的工艺参数  
Table 1 Process parameters of infrared disinfection stage under different temperatures

初始水分含量/%	杀菌温度/℃	滚筒转速/Hz	红外处理时间/min	进料速度/(kg·h <sup>-1</sup> )
16.0	60	50	8.7	62
	70	40	10.8	50
	80	35	13.0	42
18.1	60	45	9.5	58
	70	35	13.0	43
	80	25	17.3	32
21.4	60	40	10.8	54
	70	30	15.2	38
	80	20	21.2	27

为每个测试组香菇的表面色值<sup>[26]</sup>,色泽变化根据式(8)计算。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}, \quad (8)$$

式中:

$\Delta E$ ——色泽变化;

$L_0^*$ 、 $a_0^*$ 、 $b_0^*$ ——杀菌前返潮干香菇色值;

$L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ——杀菌后香菇色值。

(2) 香气:使用具有 10 个 MOS 传感器的 PEN3 型电子鼻对杀菌前、后香菇样品的香气变化进行分析。分析条件<sup>[27]</sup>:空气为载气,流速为 150 mL/min,注射速度为 2.5 mL/s,数据采集时间为 360 s,数据采集延迟时间为 120 s。

(3) 复水比:分别称取不同杀菌温度下香菇样品于室温(25 ℃)水中进行复水性试验,待样品质量不变时取出,拭干其表面水分后称重,以复水比反映香菇复水性的高低<sup>[28]</sup>。复水比根据式(9)计算。

$$R_k = \frac{m_m}{m_0}, \quad (9)$$

式中:

$R_k$ ——复水比;

$m_m$ ——复水后香菇的质量,g;

$m_0$ ——复水前香菇的质量,g。

#### 1.4 数据统计

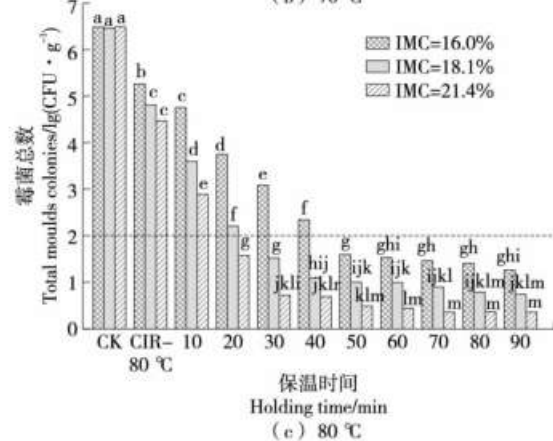
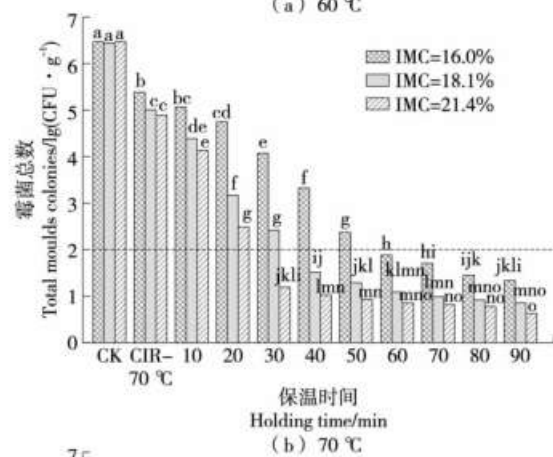
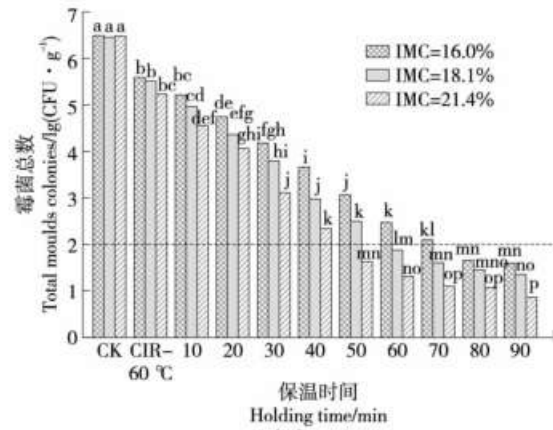
所有试验至少做 3 次不同批次的重复试验,所得数据以“平均值±标准偏差”的形式表示。采用 SPSS 22.0 中的 Duncan 检验对试验数据进行显著性差异分析( $P < 0.05$ ),采用 Ginfat 1.6 进行动力学分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 联合处理工艺下返潮干香菇的杀菌效果

由图 2 可知,返潮干香菇经滚筒催化红外处理后霉菌总数显著降低( $P < 0.05$ ),在随后的保温过程中,保温前期,杀菌效果较强,黑曲霉总数随保温时间迅速降低,当保温时间继续延长,杀菌效果逐渐减弱,霉菌总数下降幅度逐渐减缓。杀菌过程中,香菇初始水分含量和温度显著影响( $P < 0.05$ )杀菌效果。初始水分含量为 16.0%~21.4%的返潮干香菇达到霉菌总数 $< 2 \lg(\text{CFU/g})$ 的杀菌要求,60 ℃下需保温 50~80 min,70 ℃下保温时间降至 30~60 min,80 ℃下仅需保温 20~50 min,表明香菇初始水分含量和杀菌温度越高,杀菌效果越好,杀菌效率越高。这可能是因为微生物的热抗性会随水分活度的升高而降低<sup>[29]</sup>,因此红外保温处理对较高初始水分含量返潮干香菇中黑曲霉杀菌效果更强。张鑫等<sup>[16]</sup>研究也证实,在较高的湿度和温度条件下红外保温处理能更好地灭活脱水菠菜中的细菌。

综上,采用滚筒催化红外联合保温热处理可在较低的温度下有效灭活返潮干香菇中的黑曲霉。这得益于催化式红外可快速提高香菇表面温度,减少孢子的耐受时间,从而降低孢子在后续保温过程中的热抗性,易于被灭活<sup>[17]</sup>。此外,返潮干香菇经催化式红外加热处理后,立



字母不同表示在水平  $P < 0.05$  时存在显著性差异

图 2 不同温度联合处理不同初始水分含量返潮干香菇的杀菌效果

Figure 2 Disinfection effect of combined treatment on rewetting-dried shiitake mushrooms with differential IMCs under different temperatures

即进行保温热处理,可形成一个高温高湿的环境,有利于霉菌孢子蛋白质凝结沉淀致使其死亡<sup>[19]</sup>。

### 2.2 联合处理工艺下返潮干香菇杀菌动力学分析

由图 3 可知,各温度下的拟合曲线与霉菌对数存活

率的实测值均具有较高吻合度。由图 4 可知,模型预测值与实测值接近程度很高。分析拟合曲线特征发现,在保温前期黑曲霉均呈线性失活,随着保温时间的延长,孢子下降幅度趋于平缓,出现明显的“拖尾”现象,且出现

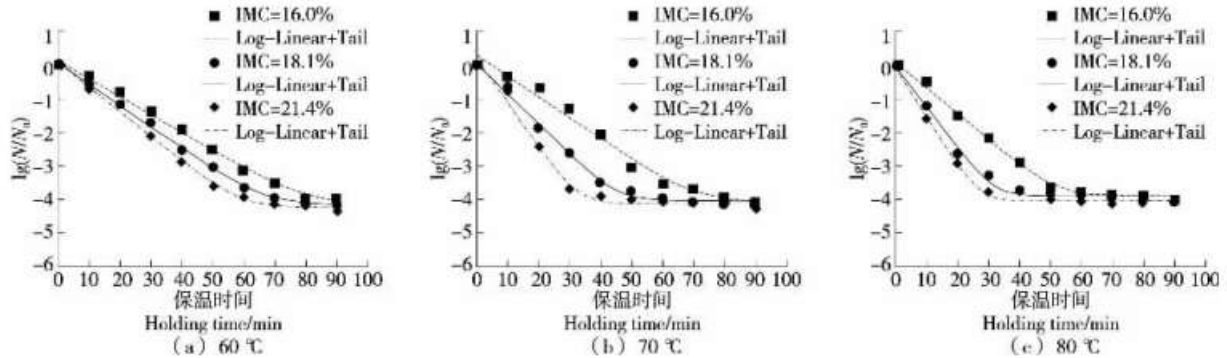


图 3 Log-Linear+Tail 模型拟合不同温度下返潮干香菇中黑曲霉在保温阶段的失活曲线

Figure 3 Survival curves of *A. niger* on rewetting-dried shiitake mushrooms in the holding phase fitted with Log-Linear+Tail model under different temperatures

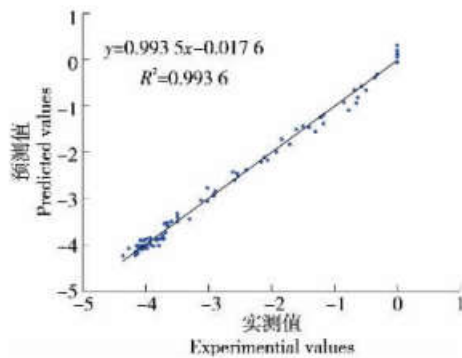


图 4 不同温度下保温热处理对返潮干香菇中黑曲霉杀菌效果的实测值和预测值的相关性

Figure 4 Correlation between experimental value and predicted value for inactivation effects of *A. niger* on rewetting-dried shiitake mushrooms by holding treatment at different temperatures

“拖尾”现象的时间随杀菌温度和香菇初始水分含量的升高而缩短。

表 2 模型评价参数显示,不同温度下 Log-Linear+Tail 模型的  $A_i$  值均接近 1,  $B_i$  值均在 1 左右波动,  $R^2$  值在 0.98 以上, RMSE 值小于 0.86, 表明 Log-Linear+Tail 模型能很好地拟合不同杀菌温度下不同初始水分含量干香菇中黑曲霉在保温阶段的失活动力学曲线。Wang 等<sup>[19]</sup> 利用催化式红外联合保温处理对稻谷中黄曲霉杀菌也发现, Log-Linear+Tail 模型具有较高的拟合度。模型参数  $k_{max}$  能够量化杀菌工艺参数对杀菌效果的影响。由表 2 可知,  $k_{max}$  随香菇初始水分含量和杀菌温度的升高而增大, 对应的  $D$  值随香菇初始水分含量和杀菌温度的升高而减小, 进一步说明杀菌效果随水分含量和杀菌温度升高而增强。

表 2 不同温度下返潮干香菇中黑曲霉在保温阶段的失活动力学模型参数<sup>†</sup>

Table 2 Kinetics parameters of Log-Linear+Tail model for *A. niger* inactivation by holding treatment under different temperatures

初始水分含量/%	处理工艺	$k_{max}/\text{min}^{-1}$	$D/\text{min}$	$S_{RME}$	$R^2$	$A_i$	$B_i$
16.0	CIR 60 °C—H 60 °C	$0.12 \pm 0.01$	18.65	0.088 4	0.996 4	1.034 0	1.023 6
	CIR 70 °C—H 70 °C	$0.14 \pm 0.01$	16.12	0.222 2	0.980 3	1.080 0	1.047 4
	CIR 80 °C—H 80 °C	$0.18 \pm 0.01$	12.84	0.112 7	0.994 3	1.048 4	1.026 5
18.1	CIR 60 °C—H 60 °C	$0.15 \pm 0.02$	15.85	0.071 7	0.997 8	1.019 9	1.007 4
	CIR 70 °C—H 70 °C	$0.21 \pm 0.01$	11.10	0.131 8	0.992 6	1.049 7	1.021 1
21.4	CIR 80 °C—H 80 °C	$0.28 \pm 0.02$	8.37	0.142 5	0.989 5	1.030 5	0.998 3
	CIR 60 °C—H 60 °C	$0.17 \pm 0.01$	13.61	0.113 4	0.995 1	1.033 4	1.009 1
	CIR 70 °C—H 70 °C	$0.30 \pm 0.02$	7.70	0.187 2	0.985 3	1.054 7	1.032 1
	CIR 80 °C—H 80 °C	$0.33 \pm 0.02$	6.94	0.124 7	0.992 0	1.024 3	0.994 9

† “CIR 60 °C—H 60 °C”读作物料经催化式红外加热至 60 °C 后于 60 °C 下进行保温处理。

### 2.3 联合处理工艺对返潮干香菇干燥效果的影响

由图 5 可知,不同初始水分含量返潮干香菇的水分损失百分比随杀菌温度的升高而增大。当温度为 60 ℃ 时,联合处理可去除香菇 2.2%~4.0% 的水分;当温度为 70 ℃ 时,联合处理可去除香菇 3.3%~5.1% 的水分;当温度为 80 ℃ 时,联合处理可去除香菇 4.3%~6.0% 的水分。由此得出,联合处理对返潮干香菇具有显著的干燥效果,且杀菌温度越高,干燥效果越好。这可能是由于温度升高,可加快香菇中水分迁移的速率,因此干燥效果越好<sup>[20]</sup>。对同一温度条件下不同初始水分含量返潮干香菇的水分损失百分比进行分析,发现香菇初始水分含量越高,达到杀菌要求时水分损失比越大。这可能是由于初始水分含量高的香菇其自由水含量相对较多,因此水分损失量较高。Pan 等<sup>[30]</sup>的研究结论也证实红外保温处理过程中稻谷水分的损失量随稻谷水分含量和温度的升高而增加。

综上,采用滚筒式催化红外联合保温处理和自然冷却处理对返潮干香菇杀菌,可实现同步干燥。

### 2.4 联合处理工艺对返潮干香菇色泽的影响

由表 3 可知,不同初始水分含量返潮干香菇达到杀菌要求时  $L^*$  值无明显变化、 $a^*$  和  $b^*$  略有减小,但与杀菌前相比均无显著性差异 ( $P > 0.05$ ),表明催化红外联合保温热处理杀菌对返潮干香菇色泽影响较小。将 60、70、80 ℃ 下的香菇色泽进行比较,发现各初始水分含量返潮干香菇在 3 个杀菌温度下的色泽 ( $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ) 和色泽变化 ( $\Delta E$ ) 无显著性差异 ( $P > 0.05$ ),整体来看,70 ℃ 下色泽变化相对较小。综上,在保证杀菌合格的前提下,70 ℃ 下采用滚筒催化红外联合保温热处理杀菌可获得色泽较好的香菇产品。

### 2.5 联合处理工艺对返潮干香菇香气的影响

由图 6 可知,不同初始水分含量返潮干香菇经杀菌处理后 W5S、W2W、W2S、W1W 和 W1S 传感器响应值均显著升高,其中 80 ℃ 下响应值最大,70 ℃ 次之,60 ℃ 最小,表明红外联合保温热处理杀菌可同步增强香菇的香味,温度越高,香菇产品香味越浓郁。这主要归因于杀菌过程中发生的美拉德反应,使得香菇中具有特征风味的含硫化合物、醇类、呋喃类等香味成分含量增加,从而赋予香菇特殊的香甜气息<sup>[21]</sup>。

由图 7 可知,各水分含量下的总贡献率均在 85% 以上,且第一主成分的贡献率远高于第二主成分,说明两主成分可有效解释各香菇产品的总体气味特征,与未处理返潮干香菇相比,杀菌后香菇的风味物质变化主要体现在第一组分的变化。各水分含量下,不同样品的气味散点图被很好地区分开,表明不同样品之间的风味存在显著差异,其中 60 ℃ 下香菇风味与未处理返潮干香菇差异较 70 ℃ 和 80 ℃ 小。

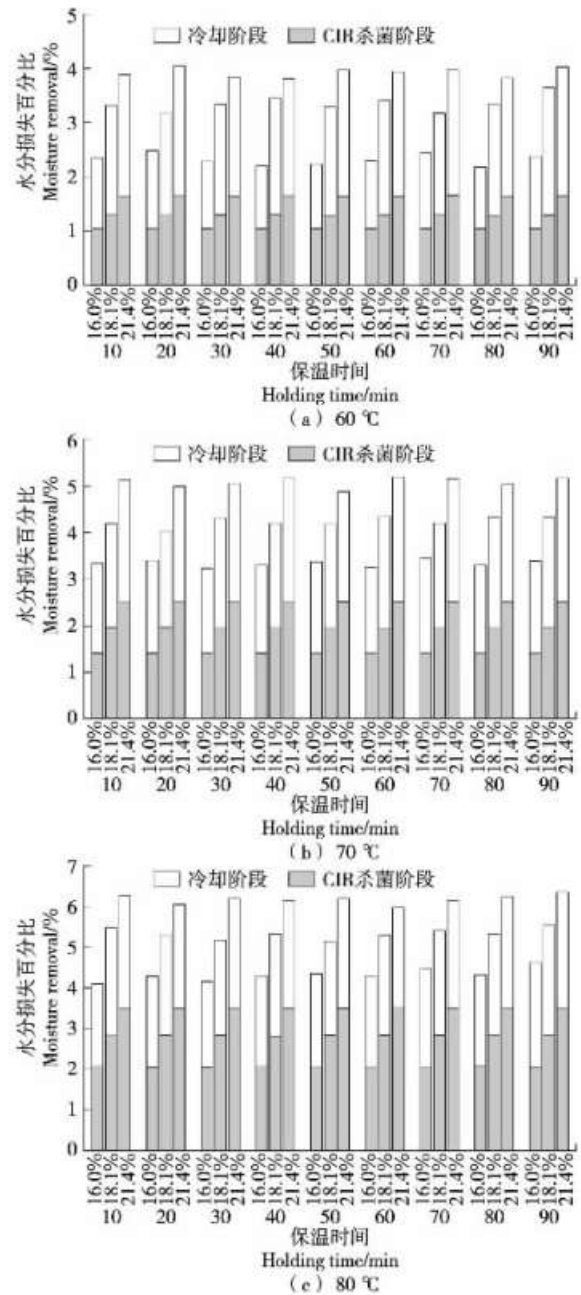


图 5 不同温度联合处理不同初始水分返潮干香菇的水分损失百分比

Figure 5 Percentage of moisture removal of rewetting-dried shiitake mushrooms with differential IMCs by combined treatment under different temperatures

### 2.6 联合处理工艺对返潮干香菇复水性的影响

由表 4 可知,各初始水分含量香菇产品在 60 ℃ 和 70 ℃ 下的复水比无显著性差异 ( $P > 0.05$ ),但均显著高于 ( $P < 0.05$ ) 80 ℃ 下的,表明在保证杀菌合格的前提下,60 ℃ 和 70 ℃ 下采用催化式红外联合保温热处理对返潮干香菇杀菌可获得复水性较好的香菇产品。80 ℃ 下香菇

表 3 不同温度下联合处理工艺对返潮干香菇色泽的影响<sup>†</sup>

Table 3 Effect of combined treatment on the surface color of rewetting-dried shiitake mushrooms under different temperatures

初始水分含量/%	处理工艺	杀菌总时间/min	<i>L</i> <sup>*</sup>	<i>a</i> <sup>*</sup>	<i>b</i> <sup>*</sup>	Δ <i>E</i>
16.0	返潮香菇	—	31.20±0.61 <sup>a</sup>	11.01±1.07 <sup>a</sup>	11.45±0.88 <sup>a</sup>	—
	CIR 60 ℃—H 60 ℃	88.7	30.75±1.23 <sup>a</sup>	10.66±0.83 <sup>a</sup>	9.96±1.27 <sup>a</sup>	2.33±0.60 <sup>a</sup>
	CIR 70 ℃—H 70 ℃	70.8	31.08±0.81 <sup>a</sup>	10.82±2.02 <sup>a</sup>	11.13±1.08 <sup>a</sup>	2.10±0.89 <sup>a</sup>
	CIR 80 ℃—H 80 ℃	63.0	31.08±1.52 <sup>a</sup>	10.93±1.38 <sup>a</sup>	11.36±1.09 <sup>a</sup>	2.12±0.17 <sup>a</sup>
18.1	返潮香菇	—	28.29±0.54 <sup>d</sup>	12.25±1.39 <sup>d</sup>	7.35±0.42 <sup>d</sup>	—
	CIR 60 ℃—H 60 ℃	69.5	28.90±1.53 <sup>d</sup>	11.14±1.20 <sup>d</sup>	7.04±1.10 <sup>d</sup>	2.40±0.33 <sup>d</sup>
	CIR 70 ℃—H 70 ℃	53.0	28.37±1.01 <sup>d</sup>	11.56±1.71 <sup>d</sup>	6.93±1.48 <sup>d</sup>	2.36±0.47 <sup>d</sup>
	CIR 80 ℃—H 80 ℃	47.3	28.93±1.14 <sup>d</sup>	11.28±1.27 <sup>d</sup>	7.07±0.80 <sup>d</sup>	2.22±0.37 <sup>d</sup>
21.4	返潮香菇	—	26.04±1.55 <sup>e</sup>	13.70±2.58 <sup>e</sup>	5.64±0.96 <sup>eF</sup>	—
	CIR 60 ℃—H 60 ℃	60.8	26.43±1.28 <sup>e</sup>	11.93±1.20 <sup>e</sup>	5.57±1.56 <sup>e</sup>	2.65±1.01 <sup>e</sup>
	CIR 70 ℃—H 70 ℃	45.2	26.24±1.52 <sup>e</sup>	12.81±1.57 <sup>e</sup>	5.27±1.19 <sup>e</sup>	2.29±1.02 <sup>e</sup>
	CIR 80 ℃—H 80 ℃	41.2	27.83±0.46 <sup>e</sup>	12.47±0.96 <sup>e</sup>	5.65±0.68 <sup>e</sup>	2.37±0.72 <sup>e</sup>

<sup>†</sup> “CIR 60 ℃—H 60 ℃”读作物料经催化式红外加热至 60 ℃后于 60 ℃下进行保温处理；同列数据中字母不同代表相同指标中不同处理条件之间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

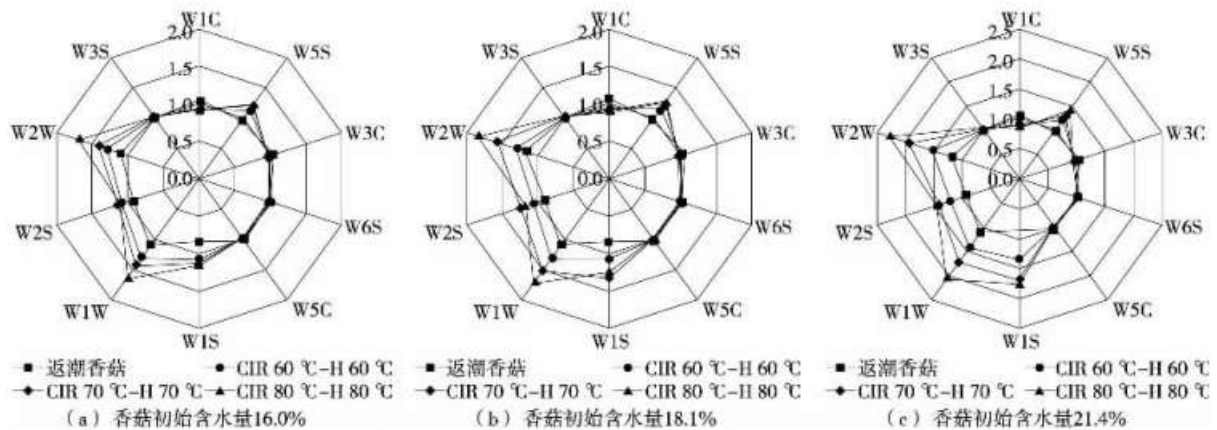


图 6 不同温度联合处理工艺下返潮干香菇挥发性成分的响应雷达图

Figure 6 Radar plots of volatile components of rewetting-dried shiitake mushrooms under combined treatment at different temperatures

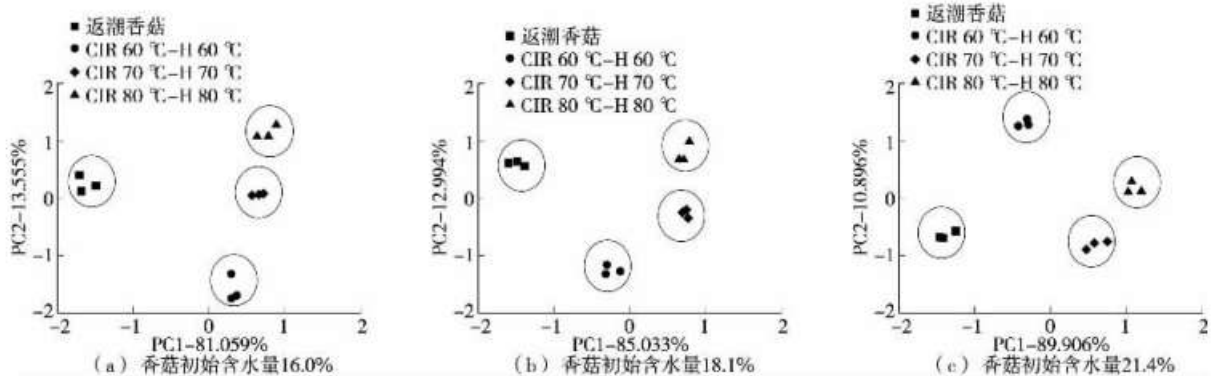


图 7 不同温度联合处理工艺下返潮干香菇挥发性成分的主成分分析

Figure 7 PCA of volatile components of rewetting-dried shiitake mushrooms under combined treatment at different temperatures

表4 不同温度下联合处理工艺对返潮干香菇复水性的影响<sup>†</sup>

Table 4 Effect of combined treatment on the rehydration ratio of rewetting-dried shitake mushrooms under different temperatures

处理工艺	初始水分含量/%		
	16.0	18.1	21.4
CIR 60 ℃—H 60 ℃	5.55±0.30 <sup>a</sup>	5.57±0.31 <sup>a</sup>	5.62±0.28 <sup>a</sup>
CIR 70 ℃—H 70 ℃	5.49±0.42 <sup>a</sup>	5.63±0.38 <sup>a</sup>	5.86±0.18 <sup>a</sup>
CIR 80 ℃—H 80 ℃	5.17±0.52 <sup>b</sup>	5.23±0.48 <sup>b</sup>	5.19±0.45 <sup>b</sup>

† 同列数据中字母不同代表相同指标中不同处理条件之间存在显著性差异( $P<0.05$ )。

产品的复水性较差可能是因为温度高,返潮干香菇达到目标温度所需的滚筒转速低,红外处理时间长,香菇内部细胞的细胞壁渗透性被破坏,导致其再吸水的能力降低<sup>[32]</sup>,且高温会破坏香菇中的亲水物质,导致其亲水性能下降<sup>[33]</sup>。

### 3 结论

采用滚筒式催化红外联合 60~80 ℃ 下的保温热处理对霉菌含量超标的返潮干香菇进行杀菌,可以达到工业上辐照杀菌的要求,并实现同步干燥。采用 Log-linear+Tail 模型能很好地描述不同温度条件下保温热处理对返潮干香菇中黑曲霉的杀菌动力学特征,根据模型参数  $k_{max}$  可预测霉菌总数降低一定数量级所需的时间,为实际生产操作和控制提供参考。综合杀菌时间和香菇品质,推荐滚筒式催化红外 70 ℃ 处理 10.8~15.2 min(进料速度 38~50 kg/h),后续 70 ℃ 保温 30~60 min 为最适杀菌工艺条件,在此条件下,香菇色泽变化较小、香气较浓郁、复水性较好。研究结果证实滚筒式催化红外联合保温热处理是一种适用于返潮干香菇杀菌的高效保质杀菌技术,应用前景广阔,工业化推广价值较高。后续可对能耗指标进行分析,进一步展示联合处理技术的优越性。

#### 参考文献

- [1] JIANG Tian-jia, LUO Zi-sheng, YING Tie-jin. Fumigation with essential oils improves sensory quality and enhanced antioxidant ability of shitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Food Chemistry, 2015, 172: 692-698.
- [2] 斯波. 干制食品生虫发霉的原因分析及应对措施[J]. 农产品加工, 2008(9): 18-19.  
SI Bo. Analysis on the causes of insect and mould of dried foods [J]. Agricultural Products Processing, 2008(9): 18-19.
- [3] QIN Lei, GAO Jing-xuan, XUE Jia, et al. Changes in aroma profile of shitake mushroom (*Lentinus edodes*) during different stages of hot air drying [J]. Foods, 2020, 9(4): 444.
- [4] CABANES F J, BRAGULAT M R. Black aspergilli and ochratoxin A-producing species in foods [J]. Current Opinion in Food Science, 2018, 23: 1-10.
- [5] FRISVAD J C, LARSEN T O, THRANE U, et al. Fumonisin and ochratoxin production in industrial *Aspergillus niger* strains [J]. PLoS One, 2011, 6(8): e23496.
- [6] 黄晓燕, 刘铨璐, 李长城, 等. 低水分活度食品微生物控制技术研究现状 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 286-292.  
HUANG Xiao-yan, LIU Cheng-jun, LI Chang-cheng, et al. Research progress in microbiological control of food with low water activity [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 286-292.
- [7] ANDERSON N M. Recent advances in low moisture food pasteurization [J]. Current Opinion in Food Science, 2019, 29: 109-115.
- [8] MOTEVALI A, MINAEI S, BANAKAR A, et al. Comparison of energy parameters in various dryers [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 87: 711-725.
- [9] 任浩, 于官楚, 孙炳新, 等. 食用菌贮藏保鲜技术研究进展 [J]. 包装工程, 2019, 40(13): 1-11.  
REN Hao, YU Guan-chu, SUN Bing-xin, et al. Research advance on the storage and preservation of edible fungi [J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 1-11.
- [10] VAJDI M, PEREIRA R R. Comparative effects of ethylene oxide, gamma irradiation and microwave treatments on selected spices [J]. Journal of Food Science, 2010, 38(5): 893-895.
- [11] 曲文娟, 凡威, 马海乐, 等. 核桃滚筒催化红外—热风干燥试验及能耗分析 [J]. 食品与机械, 2021, 37(5): 163-168, 193.  
QU Wen-juan, FAN Wei, MA Hai-le, et al. Experiment and energy consumption analysis of walnut drum catalytic infrared-hot air drying [J]. Food & Machinery, 2021, 37(5): 163-168, 193.
- [12] 刘美娟, 吴本刚, 潘忠礼, 等. 胡萝卜丁催化式红外干法杀青同步脱水试验及动力学研究 [J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 55-64.  
LIU Mei-juan, WU Ben-gang, PAN Zhong-li, et al. Experiments and kinetics study of carrot dices by simultaneous catalytic infrared dry-blanching and dehydration [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(1): 55-64.
- [13] FENG Ya-bin, WU Ben-gang, YU Xiao-jie, et al. Effect of catalytic infrared dry-blanching on the processing and quality characteristics of garlic slices [J]. Food Chemistry, 2018, 266: 309-316.
- [14] 杨大恒, 付健, 李晓燕. 食品红外辅助冷冻干燥技术的研究进展 [J]. 包装工程, 2021, 42(3): 100-106.  
YANG Da-heng, FU Jian, LI Xiao-yan. Research progress of infrared assisted freeze-drying technology for food [J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 100-106.
- [15] FU Rui-peng, XIAO Zheng, PAN Zhong-li, et al. Effects of infrared radiation combined with heating on grape seeds and oil quality [J]. Food Science and Technology International, 2018, 25(2): 160-170.
- [16] 张鑫, 曲文娟, 马海乐, 等. 脱水菠菜的催化式红外辐射灭菌研究 [J]. 食品科学, 2013, 34(23): 133-137.  
ZHANG Xin, QU Wen-juan, MA Hai-le, et al. Effectiveness of catalytic infrared radiation in the sterilization of



- dehydrated spinach [J]. *Food Science*, 2013, 34 (23): 133-137.
- [17] 王蓓, 赵兴, 马海乐, 等. 不同模式催化式红外辐射对香葱杀菌效果及品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(21): 210-215.  
WANG Bei, ZHAO Xing, MA Hai-le, et al. Effect of different modes of catalytic infrared radiation on sterilization and quality of Chives[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(21): 210-215.
- [18] VENKITASAMY C, ZHU C, BRANDL M T, et al. Feasibility of using sequential infrared and hot air for almond drying and inactivation of *Enterococcus faecium*. *NRRL B-2354*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 95: 123-128.
- [19] WANG Bei, KHIR R, PAN Zhong-li, et al. Effective disinfection of rough rice using infrared radiation heating[J]. *Journal of Food Protection*, 2014, 77(9): 1 538-1 545.
- [20] KHIR R, PAN Zhong-li, THOMPSON J F, et al. Moisture removal characteristics of thin layer rough rice under sequenced infrared radiation heating and cooling[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2014, 38(1): 430-440.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定; GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-2.  
The National Health and Family Planning Commission of People's Republic of China. Food moisture determination; GB 5009.3—2016[S]. Beijing: China Quality and Standards Press, 2016: 1-2.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 干香菇辐照杀虫防霉工艺; GB/T 18525.5—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 788.  
The National Health and Family Planning Commission of People's Republic of China. Dried shiitake mushroom irradiation insecticidal and anti-mildew technology; GB/T 18525.5—2001[S]. Beijing: China Quality and Standards Press, 2001: 788.
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品微生物学检验 霉菌和酵母菌测定; GB 4789.15—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3.  
The National Health and Family Planning Commission of People's Republic of China. Food microbiology inspection-mold and yeast determination; GB 4789.15—2016[S]. Beijing: China Quality and Standards Press, 2016: 1-3.
- [24] GEERAERD A H, HERREMANS C H, IMPE J. Structural model requirements to describe microbial inactivation during a mild heat treatment [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2000, 59(3): 185-209.
- [25] 王蓓, 洪晨, KHIR R, 等. 脉冲强光对黄曲霉菌孢子的杀菌效果、微观结构及动力学的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(4): 10-17.  
WANG Bei, HONG Chen, KHIR R, et al. Effect of pulsed light irradiation on the inactivation effect, microstructure and kinetics model of spores of *Aspergillus flavus*[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(4): 10-17.
- [26] 沈超怡, 吴清燕, 饶景珊, 等. 等离子水处理对马铃薯杀菌保鲜效果的影响[J]. *包装工程*, 2019, 40(19): 9-15.  
SHEN Chao-yi, WU Qing-yan, RAO Jing-shan, et al. Effect of plasma water treatment on sterilization and preservation of potato[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40 (19): 9-15.
- [27] 赵圆圆, 易建勇, 毕金峰, 等. 干燥方式对复水香菇感官、质构及营养品质的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(3): 101-108.  
ZHAO Yuan-yuan, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Sensory, texture and nutritional quality of dried shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) as affected by different drying methods[J]. *Food Science*, 2019, 40(3): 101-108.
- [28] 张海伟, 鲁加惠, 张雨露, 等. 干燥方式对香菇品质特性及微观结构的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(11): 150-156.  
ZHANG Hai-wei, LU Jia-hui, ZHANG Yu-lu, et al. Effects of drying methods on the quality characteristics and microstructure of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) [J]. *Food Science*, 2020, 41(11): 150-156.
- [29] BINGOL G, YANG J, BRANDL M T, et al. Infrared pasteurization of raw almonds [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 104: 387-393.
- [30] PAN Zhong-li, KHIR R, GODFREY L D, et al. Feasibility of simultaneous rough rice drying and disinfections by infrared radiation heating and rice milling quality[J]. *Journal of Food Engineering*, 2008, 84(3): 469-479.
- [31] 刘培基, 崔文甲, 王文亮, 等. 美拉德反应改善香菇柄酶解液的风味[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(22): 71-78.  
LIU Pei-ji, CUI Wen-jia, WANG Wen-liang, et al. Flavor improvement of enzymatic hydrolysate of *Lentinus edodes* stalk by maillard reaction[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(22): 71-78.
- [32] KOTWALIWALE N, BAKANE P, VERMA A. Changes in textural and optical properties of oyster mushroom during hot air drying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78 (4): 1 207-1 211.
- [33] 宋洪波, 毛志怀. 干燥方法对植物产品物理特性影响的研究进展[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(6): 117-121.  
SONG Hong-bo, MAO Zhi-huai. Review of drying methods on the physical characteristics of plant materials[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2005, 36(6): 117-121.