中短波红外线对胡萝卜粉的杀菌效果及动力学分析

毕延娣[1,2]，陈芹芹[2]，毕金峰[1,2]，颜廷才[1]，彭健[2]，吴昕烨[2]，赵悦[1,2]
(1.沈阳农业大学食品学院，辽宁沈阳 110866)
(2.中国农业科学院农产品加工研究所 农业部农产品加工重点实验室，北京 100193)

摘要： 本文研究了中短波红外线分别在 100 ℃、110 ℃、120 ℃条件下处理 1 min、2 min、3 min、4 min 和 5 min 对胡萝卜粉菌落总数、霉菌酵母的杀菌效果及杀菌动力学，并探讨了对胡萝卜粉水分含量和色泽的影响。研究表明：随着温度的升高和时间的延长，杀菌效果增强，霉菌、酵母对温度较为敏感，120 ℃处理 3 min 时可全部杀死；水分含量降低，有利于贮藏时间的延长；色差值变大，尤其 110 ℃处理 4、5 min 和 120 ℃处理 2 min 以上，色差值显著增加。应用 Weibull 模型对不同处理条件下胡萝卜粉的杀菌效果进行拟合，动力学曲线的决定系数 R^2 均大于 0.98，χ^2、RMSE 的值均不高于 0.01 和 0.40，拟合效果较好。综合考虑杀菌效果，对水分含量、色泽的影响以及设备运行成本，认为中短波红外线对胡萝卜粉杀菌处理的较适宜条件为 120 ℃处理 1 min。

关键词： 中短波红外线；胡萝卜粉；杀菌；水分；色泽；Weibull 模型

文章篇号： 1673-9078(2016)6-213-219 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.6.034

Bactericidal Effect and Kinetics of Short- and Medium-wave Infrared Radiation on Carrot Powder

BI Yan-di[1,2], CHEN Qin-qin[2], BI Jin-feng[1,2], YAN Ting-cai[1], PENG Jian[2], WU Xin-ye[2], ZHAO Yue[1,2]
(1.College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China) (2.Key Laboratory of Agro-products Processing, Ministry of Agriculture, Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The total colony number, the bactericidal effect against mold and yeast, and bactericidal kinetics were studied, after short and medium-wave infrared radiations were applied on carrot powder at various temperatures (100 ℃, 110 ℃, and 120 ℃) for 1, 2, 3, 4, and 5 min. The effects of the treatments on carrot powder moisture-content and color were evaluated. The results showed that the bactericidal effects of infrared radiation were strengthened with increasing temperature and time; mold and yeast were more sensitive to temperature and could be inactivated by subjecting to 120 ℃ for 3 min, and the resulting decrease in moisture content was beneficial for prolonging storage time. The color difference value was increased after infrared radiation, particularly by treatments at 110 ℃ for 4 min and 5 min or 120 ℃ for 2~5 min. The Weibull model was used to fit the survival curve for bacteria grown on the carrot powder subjected to different treatments. The correlation coefficients (R^2) of kinetic curves determined at three temperature levels were higher than 0.98, and the values of χ^2 and root-mean-square error (RMSE) were less than 0.01 and 0.40, respectively, indicating a good fit. Based on the bactericidal effect, the effects on water content and color, and the equipment operating cost, the optimal conditions for microbial inactivation of carrot powder using short- and medium-wave infrared radiation was determined to be 120 ℃ for 1 min.

Key words: short and medium-wave infrared radiation; carrot powder; microbial inactivation; water moisture; color; Weibull model

胡萝卜（carrot），别名红萝卜、丁香萝卜、葫芦菔金等，是伞形二年生草本植物，以呈肉质的根作为蔬菜来食用。胡萝卜具有极高的营养价值和保健功能，富含多种活性物质如维生素 E、矿物质（钙、钾、钠）和膳食纤维，其主要成分是胡萝卜素，含量高达约 4~13 mg/100 g，是番茄的 6 倍，大白菜、芹菜的 19 倍。不仅可以预防和治疗某些疾病，同时也能提高机体免疫功能[1~5]。中国是世界上主要的胡萝卜生产国，但目前我国对胡萝卜及其产品的开发单一落后，很多地区胡萝卜滞销，因此开发新型的胡萝卜产品迫在眉睫[6]。胡萝卜粉是将新鲜胡萝卜经过切分、干燥后，粉碎成粉，其水分含量低，贮藏稳定性好，改善了胡萝卜贮藏时间短的缺点。胡萝卜粉不仅可以做成速溶

收稿日期：2015-08-19
基金项目：国家“十二五”科技支撑计划课题（2012BAD31B06）
作者简介：毕延娣（1991-），女，研究生，研究方向：果蔬加工
通讯作者：毕金峰（1970-），男，博士，研究员，研究方向：果品蔬菜深加工与活性物质提取

饮料，也可与其他粉混合做成复合型产品，大大拓展了胡萝卜产业的发展方向[7]。目前，果蔬粉的主要杀菌方式是辐照杀菌和热风高温杀菌。辐照杀菌需要专门设备来生产辐射线（辐射源），投资较大；在高剂量的条件下，产品的感官性状会发生变化；并且其安全问题仍让人存在顾虑，欧洲很多国家严格限制进口经过辐照处理的食品原料。热风高温杀菌设备庞大，杀菌效果不理想，且热敏性营养物质在杀菌过程中容易受到破坏[8-10]。

红外射线是介于可见光和微波之间的一种看不见的电磁波，波长范围为 0.76~1000 μm，中短波红外线的波长范围为 2~4 μm[11]。中短波红外线具有很强的穿透能力，可以穿过物料表面进行杀菌，因此杀菌速度快，时间短，减少了粉内营养物质的损失。另外，中短波红外线杀菌设备具有无污染，能耗低，易操作的特点，有利于推广和使用[12~14]。目前国内只有利用远红外线加热对液体食品酱油汤杀菌的报道[15]，而利用中短波红外线杀菌未见报道。本实验研究了中短波红外线对胡萝卜粉的杀菌效果，并分析其杀菌动力学，同时探讨对胡萝卜粉水分含量和色泽的影响，为胡萝卜粉等果蔬粉采用中短波红外线杀菌方式的产业化应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

胡萝卜，购于北京市海淀区幸福超市；营养琼脂、孟加拉红培养基，北京陆桥技术有限责任公司；氯化钠，国药集团化学试剂有限公司；一次性使用塑料培养皿，浙江柏美特医用塑料有限公司。

1.2 仪器与设备

VO200 真空干燥机，德国 Memert 公司；FW100 高速万能粉碎机，天津市泰斯特仪器有限公司；辐照设备，中国农业科学院原子能利用研究所 ^{60}Co γ 辐照源；中短波红外线干燥机 STC，圣泰科红外科技有限公司；LDZX-50KBS 立式压力蒸汽灭菌器，上海申安医疗器械厂；SW-CJ-1F 洁净工作台，苏净集团苏州安泰空气技术有限公司；SHP-250 生化培养箱，上海精宏实验设备有限公司；电子天平，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；DHG-9023A 电热恒温鼓风干燥箱，上海精宏实验设备有限公司；D-25L 色差计，美国 Hunter Lab 公司。

1.3 方法

1.3.1 胡萝卜粉的制备

采用真空干燥方法对胡萝卜进行干燥，条件如下：干燥温度为 70 ℃，真空度为 10 mbar，干燥时间为 4 h。将干燥后胡萝卜片放入高速万能粉碎机中制粉，每次打粉时间 10 s，打粉间隔 2 min，共打粉 3 次。

1.3.2 中短波红外线杀菌方法

称取 3 g 胡萝卜粉平铺于经辐照杀菌的的直径为 8 cm 的干燥铝盒中，将其放入中短波红外线杀菌箱中，待温度平衡后开始计时，分别在 1 min、2 min、3 min、4 min、5 min 取出样品。功率 1125 W，温度分别为 100 ℃、110 ℃、120 ℃。实验重复两次。

1.3.3 微生物的测定

样品取出后立即进行微生物的测定。菌落总数的检测根据 GB 4789.2-2010《食品微生物学检验菌落总数测定》[16]，霉菌和酵母菌计数根据 GB 4789.15-2010《食品微生物学检验霉菌和酵母计数》[17]。菌落总数培养基选用营养琼脂，平板 36±1 ℃条件下培养 48 h±2 h；霉菌和酵母菌培养基选用孟加拉红培养基，平板在 28 ℃±1 ℃条件下培养 5 d。杀菌效果以细菌存活率对数值 $\ln(N/N_0)$表示，其中 N 为中短波红外线杀菌后样品的菌数，CFU/g；N_0 为中短波红外线杀菌前样品的菌数，CFU/g。每个样品两个重复，两个平行。

1.3.4 动力学分析

参照 Albert 等[18]、Avsaroglu 等[19]、Chen 等[20]的方法，杀菌效果用 Weibull 模型分析。

$$\ln(N/N_0)=-\alpha t^{\beta} \quad (1)$$

式中：N 为中短波红外线处理后样品中菌落总数，(CFU/g)；N_0 为中短波红外线处理前样品中初始菌落总数，(CFU/g)；α 为尺度参数，β 为形状参数，当 $\beta<1$ 时 Weibull 分布为一个凹面向上的曲线，$\beta>1$ 时曲线凹面向下，$\beta=1$ 时为一条直线；t 为处理时间。

1.3.5 水分含量的测定

水分含量的测定参照 GB 5009.3-2010《食品安全国家标准 食品中水分的测定》[21]中规定的直接干燥法，结果以干基含水率表示。为保证实验的准确性，测三组平行取其平均值。

1.3.6 色泽的测定[22]

采用 D-25L 色差计测定胡萝卜粉的色泽。用 CIELAB 表色系统测定胡萝卜粉的 L、a 和 b 值，其中 L 代表明度指数，从黑暗（-）到明亮（+）的变化；a 代表颜色从绿色（-）到红色（+）的变化，b 代表颜色从蓝色（-）到黄色（+）的变化。色差值△E 代表胡萝卜粉杀菌后的色泽(L、a、b)与胡萝卜粉杀菌前的色泽(L*、a*、b*)变化。△E 计算计算方程如公式（2）所示。

$$\triangle E=\sqrt{(L-L^*)^2+(a-a^*)^2+(b-b^*)^2} \quad (2)$$

每组试验 3 次平行，结果取平均值。

1.4 数据分析

采用 Excel 和 origin8.0 进行绘图及 Weibull 模型分析，采用 SPSS Statistics17.0 进行单因素方差显著性分析，p<0.01 影响极显著，0.01< p <0.05 影响显著，p >0.05 影响不显著。

2 结果与讨论

2.1 不同条件中短波红外线杀菌对菌落总数的影响

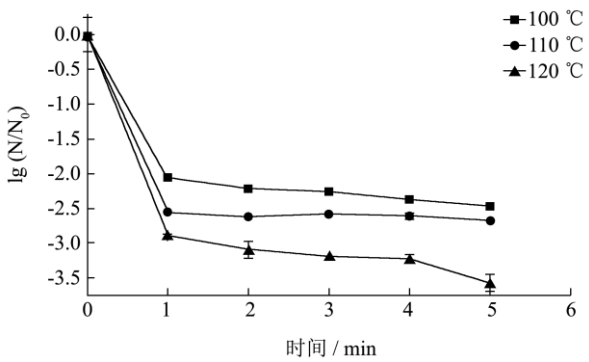


图 1 不同温度、时间对胡萝卜粉中菌落总数的影响

Fig.1 Effect of different radiation temperatures and times on the total colony number in carrot powder

图 1 为在温度 100 ℃、110 ℃、120 ℃的条件下，中短波红外线处理 1 min、2 min、3 min、4 min、5 min 对胡萝卜粉菌落总数的杀菌效果。由图可知，温度和时间是影响菌落总数的重要因素。在同一温度条件下，随着时间的增加，菌落总数逐渐降低。100 ℃条件下，杀菌时间对菌落总数的影响极显著(p<0.01)，处理 1 min 菌落总数降低了 2.06 个对数，杀菌时间每增加 1 min，菌落总数的降幅均在 0.1 个对数左右；110 ℃条件下菌落总数降幅相对其它温度较小，处理 1 min 菌落总数降低了 2.57 个对数，而处理 5 min 仅比 1 min 时多降低了 0.12 个对数，但杀菌时间对菌落总数的影响仍达到显著水平(p<0.05)；120 ℃条件下的杀菌效果较好，影响极显著(p<0.01)，处理 1 min 菌落总数降低了 2.91 个对数，而处理 5 min 菌落总数骤降了 3.58 个对数，说明在 4~5 min 时多数残留细菌被杀灭；同一时间条件下，随着温度的增加，菌落总数逐渐降低。在杀菌时间 1min 时，处理温度 110 ℃比 100 ℃多降低了 0.51 个对数，处理温度 120 ℃比 110 ℃多降低了 0.34 个对数，杨继红[23]的论文结果也表明，红外杀菌温度越高，杀菌效果越好。利用中短波红外线杀菌处理后，胡萝卜粉中菌落总数最高为 408 CFU/g，最低为 13 CFU/g，均符合 NY/T 1884-2010《绿色食品 果蔬粉》关于即食果蔬粉菌落总数应低于 1000 CFU/g 的行业标准[24]。对不同温度下各时间水平进行显著性分析(p<0.01)，可得不同温度下杀灭胡萝卜粉中菌落总数的适宜条件分别为 100 ℃处理 5 min；110 ℃处理 2 min 和 120 ℃处理 5 min，通过杀菌结果可知，120 ℃处理 5 min 时杀灭菌落总数的效果最好。

2.2 不同条件中短波红外线杀菌对霉菌、酵母数量的影响

图 2 为在温度 100 ℃、110 ℃、120 ℃的条件下，中短波红外线处理 1 min、2 min、3 min、4 min、5 min 对胡萝卜粉霉菌、酵母的杀菌效果。由图可知，随着温度和时间的增加，霉菌、酵母的数量降低。利用中短波红外线杀菌后，胡萝卜粉中霉菌、酵母总数最高为 40 CFU/g，最低小于 10 CFU/g，均符合 NY/T 1884-2010《绿色食品 果蔬粉》关于即食果蔬粉中霉菌、酵母总数应低于 50 CFU/g 的行业标准[24]。结果表明，当温度升高到 120 ℃，对胡萝卜粉处理 3 min 及以上无霉菌、酵母检出。对不同温度下各时间水平进行显著性分析(p<0.05)，可得不同温度下杀灭胡萝卜粉中霉菌、酵母的适宜条件分别为 100 ℃处理 4 min；110 ℃处理 4 min 和 120 ℃处理 1 min，通过杀菌结果可知，120 ℃处理 1 min 时杀灭霉菌、酵母的效果最好。

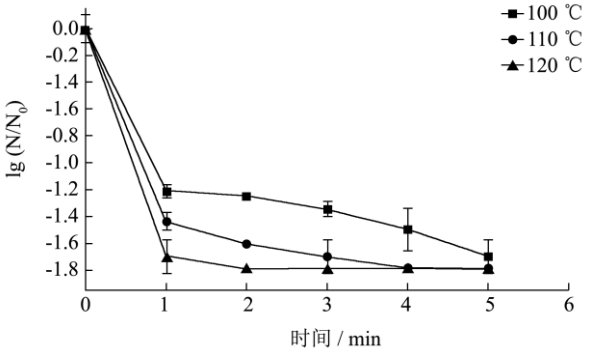


图 2 不同温度、时间对胡萝卜粉中霉菌、酵母计数的影响

Fig.2 Effect of different radiation temperatures and times on the counts of mold and yeast in carrot powder

2.3 中短波红外线杀菌杀菌效果的动力学分析

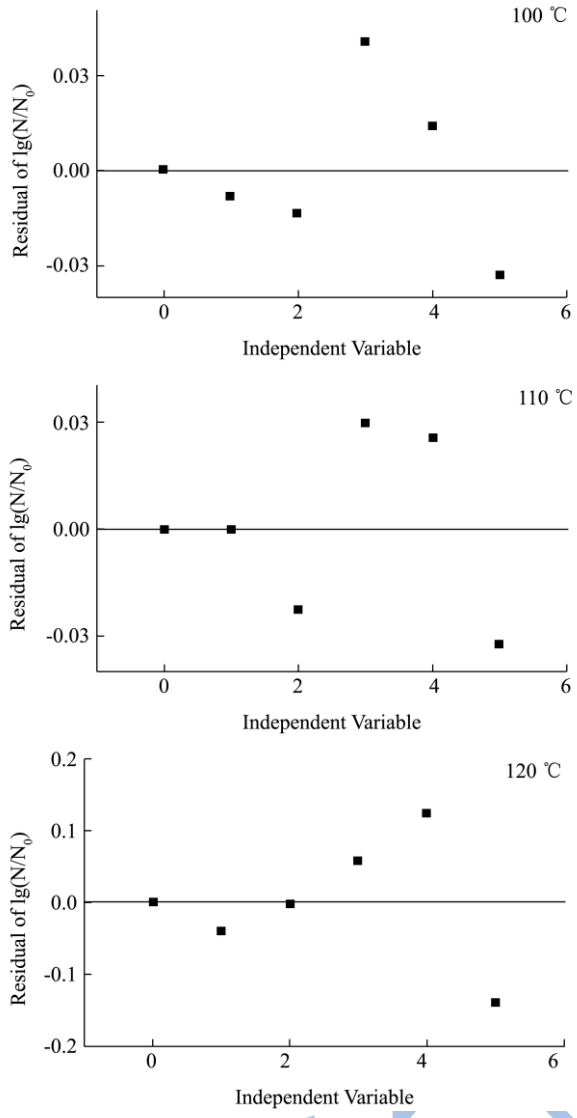


图 3 100° C、110° C、120° C 条件下 Weibull 模型拟合菌落总数的残差图

Fig.3 Residual plots of the total colony number fitted with the Weibull model at 100, 110, and 120 ℃

模型拟合精度通过相关系数（R^2）、卡方检验值（χ^2）、均方根误差（RMSE）统计参数来确定。R^2 越高，χ^2、RMSE 越低，模型拟合度越高。由表 1 可知，3 个温度下 Weibull 模型拟合菌落总数的 R^2 均在 0.99 以上，霉菌、酵母的 R^2 均在 0.98 以上，所有 χ^2 和 RMSE 的值均低于 0.5。菌落总数和霉菌、酵母拟合的残差图如图 3 和图 4 所示，一般认为，描绘点围绕残差为 0 的直线上下随机分布时，模型拟合精度较高[25~26]，由图可以看出，Weibull 模型拟合的菌落总数和霉菌、酵母拟合的描绘点在残差图上显示出随机分布，且残差值均在±0.02 之间，因此拟合精度较高。模型的拟合值与试验值的对比如图 5 和 6 所示，由图可以看出，试验值与预测值的拟合性较好，表明 Weibull 模型能够较好的拟合中短波红外线处理对胡萝卜粉的灭菌效果。

表 1 Weibull 模型拟合中短波红外线杀灭胡萝卜粉中微生物的动力学参数

Table 1 Weibull model for kinetic parameters of bacterial inactivation in carrot powder treated with short- and medium-wave infrared radiation

温度/℃	微生物类型	α	β	R^2	$\chi2$	RMSE
100	菌落总数	2.05	0.11	0.99	7.96×10^{-4}	3.2×10^{-3}
110	菌落总数	2.57	0.02	0.99	7.68×10^{-4}	3.1×10^{-3}
120	菌落总数	2.87	0.11	0.99	0.01	0.40
100	霉菌、酵母	1.13	0.22	0.98	7.10×10^{-3}	0.03
110	霉菌、酵母	1.45	0.14	0.99	4.63×10^{-4}	1.9×10^{-3}
120	霉菌、酵母	1.72	0.03	0.99	4.76×10^{-4}	1.9×10^{-3}

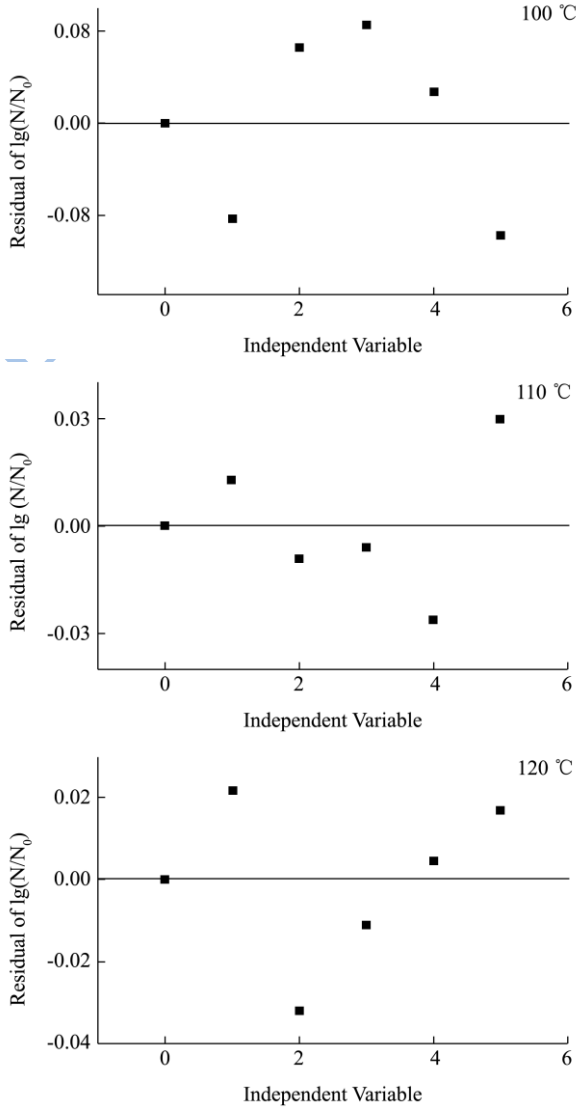


图 4 100° C、110° C、120° C 条件下 Weibull 模型拟合霉菌、酵母的残差图

Fig.4 Residual plots of the counts of mold and yeast fitted with the Weibull model at 100, 110, and 120 ℃

由表 1 可知，Weibull 模型中尺度参数 α 与温度有关，随着温度的增加而增加。当形状参数 β>1 时，图形为向下的凹曲线，样品中残存的微生物会逐渐减少；β<1 时，图形为向上的凹曲线，样品中残存的微生物会适应处理条件，几乎不会再减少[27]。由表 1 可知，所有条件下的 β 均小于 1，拟合的图形均为向上的凹曲线，如图 5 和 6 所示。对于菌落总数的拟合，形状参数 β 在温度 110 ℃时最小，说明此温度下菌落总数对温度最不敏感，杀菌速率最低；120 ℃时 β 值略高于 100 ℃，说明在 120 ℃的杀菌速率最高，杀菌效果最好，这与 Buzrul 等人[28]的文献报道一致。霉菌、酵母的拟合结果表明，形状参数 β 随着温度的升高逐渐降低，说明霉菌、酵母的敏感性逐渐降低，由图 5 可知，温度 120 ℃时虽然杀菌速率在降低，但其杀菌效果仍然最好。

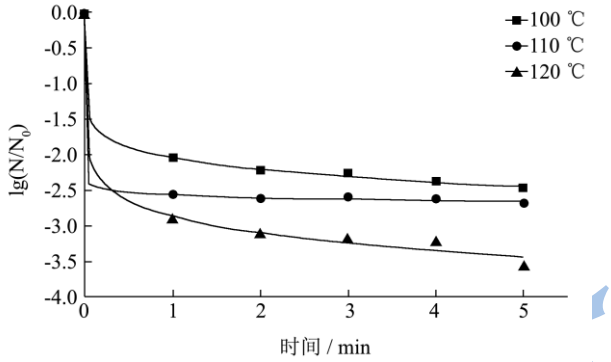


图 5 100° C、110° C、120° C 条件下 Weibull 模型拟合菌落总数的杀菌动力学曲线

Fig.5 Survival curves of bacteria in carrot powder at 100, 110, and 120 ℃ fitted with the Weibull model

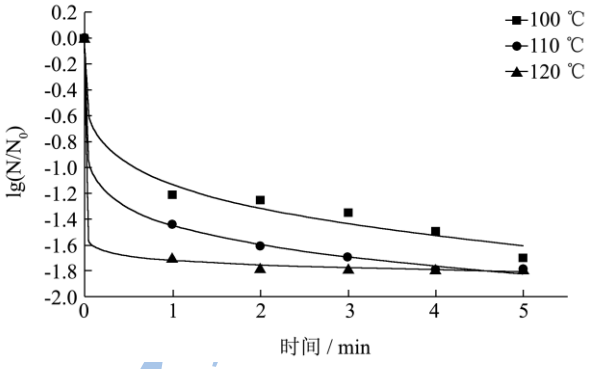


图 6 100° C、110° C、120° C 条件下 Weibull 模型拟合霉菌、酵母的杀菌动力学曲线

Fig.6 Survival curves of the counts of mold and yeast in carrot powder at 100, 110, and 120 ℃ fitted with the Weibull model

2.4 不同条件中短波红外线杀菌对胡萝卜粉水分含量的影响

图 7 为不同处理条件对胡萝卜粉水分含量的影响。未处理胡萝卜粉水分含量为 6.56%，随着温度和时间的增加，水分含量逐渐降低。由图可知，处理时间 1 min 时，三个温度下样品水分含量基本都在 4.50%，随着时间的增加，120 ℃条件下的水分含量最低，在 120 ℃处理 5 min 时水分含量为 1.06%。红外线杀菌过程中水分含量的降低，可有利于贮藏时间的延长。

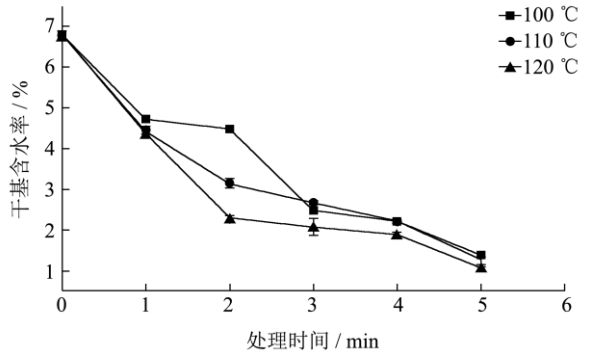


图 7 不同温度、时间对胡萝卜粉水分含量的影响

Fig.7 Effect of different radiation temperatures and times on the moisture content of carrot powder

2.5 不同条件中短波红外线杀菌对胡萝卜粉色泽的影响

图 8 为不同处理条件对胡萝卜粉色泽的影响。未处理胡萝卜粉 L、a、b 值分别为 79.00、21.46 和 37.50。由图 8a 可知，100 ℃处理 1、2 min 和 110 ℃处理 1 min，L 值略有减小，由于褐变颜色略有变暗，而后随着温度和时间的增加，L 值增加，这是由于中短波红外线使细胞内的成色物质溶出使其颜色变亮[29]。由图 8b、8c 可以看出，同一温度下，随着时间的增加，a 值显著变小，b 值逐渐变大，说明胡萝卜粉红色减少很多，而黄色略有增加。图 8d 显示了胡萝卜粉中短波红外线杀菌前后色差值的变化，由图可知，同一温度下，随着时间的增加，色差值逐渐变大，可能由于高温下处理时间长，导致胡萝卜粉轻微变糊，色差变化较大，因此杀菌时间不宜过长。

对比 2.1 和 2.2 得到的不同温度下的杀菌适宜条件，在所做实验范围内，100 ℃和 110 ℃的杀菌效果均低于 120 ℃，120 ℃条件下处理 1 min 时色差值最低，与 110 ℃、1 min 和 100 ℃、3 min 相近，且低于

其他杀菌适宜条件，因此考虑到色泽对产品的重要性，选择较适宜条件为 120 ℃杀菌 1 min。

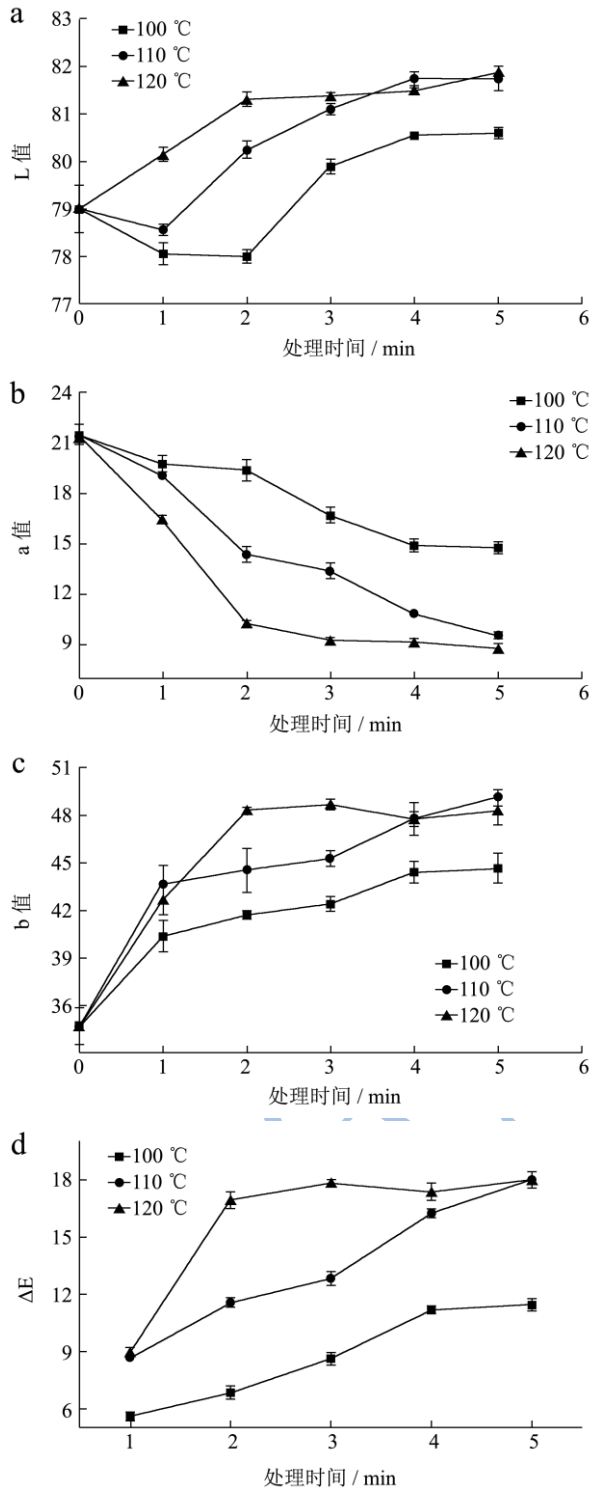


图 8 不同温度、时间对胡萝卜粉色泽的影响

Fig.8 Effect of different radiation temperatures and times on the color of carrot powder

3 结论

中短波红外线处理温度及时间对胡萝卜粉杀菌效果的影响显著，在实验设定的温度和时间条件下，温度越高，时间越长，杀菌效果越好；120 ℃处理 5 min 可使胡萝卜粉菌落总数降低 3.58 个对数，经 120 ℃处理 3 min 后，无霉菌、酵母检出；Weibull 模型能够较好的拟合中短波红外线处理对胡萝卜粉菌落总数和霉菌、酵母的灭菌效果，相关系数 R^2 均大于 0.98；随着处理温度和时间的增加，胡萝卜粉水分含量下降，色差值增大。综合考虑杀菌效果，对水分含量、色泽的影响以及设备运行成本，认为中短波红外线技术对胡萝卜粉杀菌的较适宜条件为 120 ℃、1 min。

参考文献

[1] 郑瑶瑶,夏延斌.胡萝卜营养保健功能及其开发前景[J].包装与食品机械,2006,24(5):35-37
ZHENG Yao-yao, XIA Yan-bin. Nutrition and health care production with carrot and the foreground of exploitation [J]. Packaging and Food Machinery, 2006, 24(5): 35-37

[2] 廖小军,胡小松,刘葳.胡萝卜粉的理化性质及其应用研究[J].食品科学,2004,25(2):61-64
LIAO Xiao-jun, HU Xiao-song, LIU Wei. Study on physical and chemical properties of 50 mesh and 100 mesh carrot powder and their application [J]. Food Science, 2004, 25(2): 61-64

[3] LEE J, KIM M, CHOE E. Effects of carrot powder in dough on the lipid oxidation and carotene content of fried dough during storage in the dark [J]. Food Chemistry and Toxicology, 2004, 69(5): 411-414

[4] 陈瑞娟,毕金峰,陈芹芹,等.不同干燥方式对胡萝卜粉品质的影响[J].食品科学,2014,35(11):48-53
CHEN Rui-juan, BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, et al. Effects of different drying methods on carrot powder quality [J]. Food Science, 2014, 35(11): 48-53

[5] 李浩权,龚丽,陈人人.胡萝卜全粉干燥加工工艺研究[J].现代食品科技,2009,25(4):401-404
LI Hao-quan, GONG Li, CHEN Ren-ren. Study on drying technology of carrot powder [J]. Modern Food Science and Technology, 2009, 25(4): 401-404

[6] 刘均洪,刘颖,张媛媛.胡萝卜产品的加工及前景[J].食品工业科技,2012,33(11):430-432
LIU Jun-hong, LIU Ying, ZHANG Yuan-yuan. Processing and prospect of the carrot products [J]. Food Industry Science and Technology, 2012, 33(11): 430-432

[7] 毕金峰,陈芹芹,刘璇,等.国内外果蔬粉加工技术与产业现状及展望[J].中国食品学报,2013,13(3):8-14
BI Jin-feng, CHEN Qin-qin, LIU Xuan, et al. Research on techniques and industry situation and prospect for

fruit-vegetable powder processing in domestic and aboard [J]. Chinese Journal of Food, 2013, 13(3): 8-14

[8] 李梦颖,李建科,何晓叶,等.食品加工中的热杀菌技术和非热杀菌技术[J].农产品加工(学刊),2013,328(8):109-113
LI Meng-ying, LI Jian-ke, HE Xiao-ye, et al. Thermal and non- thermal sterilization technologies in food processing [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2013, 328(8): 109-113

[9] 范林林,韩鹏祥,冯叙桥,等.电子束辐照技术在食品工业中应用的研究与进展[J].食品工业科技,2014,14:374-380
FAN Lin-lin, HAN Peng-xiang, FENG Xu-qiao, et al. Research progress in the application development of electron beam irradiation in food industry [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 14:374-380

[10] 耿建暖.食品辐照技术及其食品中的应用[J].食品研究与开发,2013,34(15):109-112
GENG Jian-nuan. Food irradiation and its application in food processing [J]. Food Research and Development, 2013, 34(15): 109-112

[11] 廖正瑜,褚治德.红外辐射加热干燥原理与应用[M].北京:机械工业出版,1996
LIAO Zheng-yu, ZHU Zhi-de. Principle and Application of infrared radiation heating and drying [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1996

[12] 张鑫.脱水菠菜催化式红外辐射灭菌试验研究[D].南京:江苏大学,2013:4-7
ZHANG Xin. Effect of catalytic infrared radiation sterilization on dehydrated spinach [D]. Nan Jing: Jiang Su University, 2013: 4-7

[13] 夏朝勇,朱文学,张仲欣.红外辐射技术在农副产品加工中的应用与进展[J].农机化研究,2006,(1):196-201
XIA Chao-yong, ZHU Wen-xue, ZHANG Zhong-xin. Application and development of infrared radiation technology on processing agricultural products and byproducts [J]. Agricultural Mechanization Research, 2006, (1): 196-201

[14] 高云.短波红外辐射技术在工业加热中的应用[C]// 十三届全国红外加热暨红外医学发展研讨会论文及论文摘要集.湖北省武汉市:2010-11-6
GAO Yun. Application of short wave infrared radiation technology in industrial heating [C]// The Thirteen National Infrared Radiation Heating and Development Seminar Papers and Abstracts. Hu Bei Province, Wuhan: 2010-11-6

[15] 毛伟杰,大岛由子,山中庸子,等.利用远红外线加热对液体食品杀菌的模拟[C]//“亚运食品安全保障与广东食品产业创新发展”学术研讨会暨 2009 年广东省食品学会年会论文集.广东省广州市:2009-11-27
MAO Wei-jie , Yuko OSHIMA , Youko YAMANAKA, et al. Simulation of liquid food pasteurization using far infrared radiation heating[C]//“Asian Games Food Safety and Innovation Development of Food Industry in Guangdong province” Seminar and 2009 Guangdong Province Food Association Annual Meeting Papers. Guang Dong Province, Guagnzhou: 2009-11-27

[16] GB 4789.2-2010 中华人民共和国国家标准《食品微生物学检验菌落总数测定》[S]
GB 4789.2-2010 State Standard of the People's Republic of China《Food microbiological examination: Aerobic plate count》[S]

[17] GB 4789.15-2010 中华人民共和国国家标准《食品微生物学检验霉菌和酵母计数》[S]
GB 4789.15-2010 State Standard of the People's Republic of China《Food microbiological examination: Enumeration of moulds and yeasts》[S]

[18] Albert I, Mafart P. A modified Weibull model for bacterial inactivation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 100(1): 197-211

[19] Aysaroglu M D, Buzrul S, Alpas H, et al. Use of the Weibull model for lactococcal bacteriophage inactivation by high hydrostatic pressure [J]. International Journal of Food Microbiology 2006, 108: 78-83

[20] Haiqiang Chen, Dallas G. Hoover. Use of Weibull model to describe and predict pressure inactivation of Listeria monocytogenes Scott A in whole milk [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2004, 5: 269-276

[21] GB 5009.3-2010 中华人民共和国国家标准《食品中水分的测定》[S]
GB 5009.3-2010 State Standard of the People's Republic of China《Determination of water activitv in foods》[S]

[22] Qinqin Chen, Jinfeng Bi, Yuhan Zhou, et al. Multi-objective optimization of spray drying of jujube(Zizyphus jujuba Miller) powder using response surface methodology [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7: 1807-1818

[23] 杨继红.红外加热技术对大杏仁的杀菌程度及烘烤效率的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2011
YANG Ji-hong. Infrared heating for improved safety and processing efficiency of dry-roasted almonds [D]. Yanglin: Northwest Agriculture and Forestry University, 2011

[24] NY/T 1884-2010 中华人民共和国农业行业标准 《绿色食品 果蔬粉》[S]

NY/T 1884-2010 State Standard of the People's Republic of China《Green food-Fruit and Vegetable powder》[S]

[25] Togrul H, Arslan N. Moisture sorption behavior and thermodynamic characteristics of rice stored in a chamber under controlled humidity [J]. Biosystems Engineering, 2006, 95: 181-195

[26] 仇丽霞,陈利民,肖琳.趋势面和残差分析法在研究死亡水平地域分布中的应用[J].实用预防医学,2008,4:708-710
QIU Li -xia, CHEN Li-min, XIAO Lin . The application of trend surface analysis and residual analysis in geographical distribution of mortality [J]. Practical Preventive Medicine, 2008, 4: 708-710

[27] Martinus A.J.S. van Boekel. On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 74: 139-159

[28] Buzrul S, Alpas H, Bozoglu F. Use of Weibull frequency distribution model to describe the inactivation of Alicyclobacillus acidoterrestris by high pressure at different temperatures [J]. Food Research International, 2005, 38(2): 151-157

[29] Patras A, Tiwari B K, Brunton, N P, et al. Modelling the effect of different sterilisation treatments on antioxidant activity and colour of carrot slices during storage [J]. Food Chemistry, 2009, 114(2): 484-491

现代食品科技