微波杀灭霉变玉米中寄生曲霉动力学模型*

靳志强[1,2]　王顺喜[1]　韩　培[1]

（1. 中国农业大学工学院，北京 100083；2. 长治学院生物科学与技术系，长治 046011）

【摘要】 为描述微波对霉菌的杀菌过程和预测杀菌效果，建立了微波对霉变玉米中寄生曲霉孢子的杀菌动力学模型。在50～75℃的微波加热条件下获得了寄生曲霉孢子的致死曲线。选取线性模型、Weibull模型和Weibull简化模型来拟合微波杀菌的动力学过程，以决定系数、均方误差、精确因子和偏差因子作为模型拟合度优劣的评判指标。结果表明，Weibull模型较线性模型能更好地拟合微波处理下寄生曲霉孢子失活动力学变化；Weibull模型简化后与原模型具有相似的拟合性，可有效预测特定温度-时间组合下的微波灭菌效果；通过Weibull模型预测微波杀菌时间可避免线性模型导致的杀菌不彻底或者过度杀菌的现象。

关键词： 寄生曲霉　微波杀菌　线性模型　Weibull模型

中图分类号： TS201.3　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-1298(2011)12-0148-06

Inactivation Kinetics Model of *Aspergillus parasiticus* in Mouldy Maize by Microwave Processing

Jin Zhiqiang[1,2]　Wang Shunxi[1]　Han Pei[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*

2. *Department of Biological Science and Technology*, *Changzhi College*, *Changzhi* 046011, *China*)

Abstract

The inactivation models of *Aspergillus parasiticus* in mouldy maize by microwave processing were studied in order to describe and predict the inactive effects. *Aspergillus parasiticus* spores were inactivated under 50～75℃ by microwave processing, then the survival curves were determined. Linear, Weibull and reduced Weibull models were selected to fit the inactivation kinetics of *Aspergillus parasiticus* spores. Accuracy factor, Bias factor, mean square error and regression coefficients were used to compare the goodness-of-fit of the linear, Weibull and reduced Weibull models. The results suggested that Weibull model could provide better fit to the inactivation of *Aspergillus parasiticus* spores by microwave processing than linear model. The reduced Weibull model produced a fit as good as the original Weibull model and lead to an improvement of the robustness of the model, which would be beneficial to select optimum combinations of temperature and time to obtain the desired target levels of spores inactivation. Incomplete or excessive sterilization could be avoided when Weibull model was used to predict microwave sterilization time instead of linear model.

Key words　*Aspergillus parasiticus*, Microwave sterilization, Linear model, Weibull model

引言

玉米安全储藏问题是我国目前迫切需要解决的问题之一。玉米防霉处理一般通过严格控制水分达到防霉目的。但在实际储藏中，由于环境相对湿度较大，玉米往往吸湿严重、水分增加、导致霉变[1]。

收稿日期：2011-03-07　修回日期：2011-04-18

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD26B04)

作者简介： 靳志强，博士生，长治学院讲师，主要从事农产品加工与贮藏工程研究，E-mail：jinzhiqiang888@sohu.com

通讯作者： 王顺喜，教授，博士生导师，主要从事机电一体化、农产品加工与贮藏工程研究，E-mail：wsx68@cau.edu.cn

与传统的热力杀菌相比，微波加热具有穿透力强、加热快速均匀、营养成分及色、香、味在杀菌过程中损失小等特点[2]。Lakins 等研究发现，微波加热可有效控制面包产品的霉菌生长和延长货架期[3]。目前，用微波加热方法对玉米灭霉处理国内外尚未见报道。

微波作用下的微生物失活变化用数学模型表示是微波杀菌技术的理论关键和研究重点。一级动力学模型采用 D 值或 Z 值来定量描述热力杀菌过程中食品体系的微生物变化，是至今最为经典的杀菌模型。Welt 等将杀菌样品置于循环水浴夹套中，通过循环水浴将微波产生的多余热量带走，从而得到恒温条件下微波杀菌的 D 值和 Z 值[4]。但有研究表明，微波致死速率曲线并不遵循一级动力学方程，呈现肩峰曲线、拖尾曲线或 S 型曲线[5~6]。因此，一些非线性模型被用来描述微波的致死过程，如杭峰等选取 SWeibull、Slogistic 和 Dose-response 3 种数学模型来拟合微波加热连续升温到 100℃过程中大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的致死动力学[6]，但上述 3 种模型仅能描述 S 型的失活曲线。近年来，许多研究表明 Weibull 模型可以很好地描述脉冲电场、臭氧和超高压等杀菌过程中的微生物失活过程，其精确性也优于一级动力学方程[7~9]。

微波加热机理与传统热力杀菌不同，其杀菌动力学不遵循一级动力学方程，加上微波场中的温度缺乏精确的检测手段，因此关于微波杀菌动力学报道尚不多见。本文选取霉变玉米中可产生黄曲霉毒素的寄生曲霉作为研究对象，采用可在线控温的微波炉光纤测试系统，以线性模型、Weibull 模型和 Weibull 简化模型来拟合 50 ~ 75℃微波加热条件下的动力学曲线，以期得到适合描述和预测微波灭霉过程的动力学模型，并将新的灭菌指示参数用于指导微波灭霉的实际生产。

1　材料与方法

1.1　试验材料

寄生曲霉 JS01（*Aspergillus parasiticus* JS01），由中国农业大学应用微生物实验室自霉变玉米中分离鉴定得到。

1.2　培养基

马铃薯葡萄糖琼脂培养基（马铃薯质量浓度 200 g/L，葡萄糖质量浓度 20 g/L，琼脂粉质量浓度 15 g/L，pH 值自然）。

1.3　主要仪器

MWS－8 型微波炉光纤测试系统（加拿大 Fiso 公司）。

1.4　试验方法

1.4.1　孢子悬液制备

挑取斜面保藏的霉菌菌丝转接至马铃薯葡萄糖琼脂培养基中，25℃下培养 5 d，加入一定量的灭菌磷酸盐缓冲液（含体积分数 0.05% 的吐温－80）将孢子洗涤下来，用滤纸过滤除去菌丝残体。将孢子浓度调整为 1×10^7 cfu/mL，4℃待用[10]。

1.4.2　孢子悬液的微波处理

微波杀菌由 MWS－8 型微波炉光纤测试系统完成，利用光纤探针可以在线检测微波场的物料温度、压力变化。检测温度范围为 －40 ~ 250℃，检测精度 0.02℃。通过软件设置可以将连续微波加热方式改变为脉冲微波加热，设置脉冲间隔可将物料的温度控制在相对恒定的范围内。

将孢子悬液置于微波场中，在 50、55、60、65、70、75℃下微波处理 16 min，期间每隔 2 min 取样 1 mL培养计数。试验重复 3 次。

1.4.3　微生物计数

处理后的孢子悬液立即进行微生物计数，得到的菌落数记为 N（cfu/mL），未经微波处理的孢子悬液的菌落数记为 N_0（cfu/mL）。评价微波处理对霉菌孢子的致死效果采用孢子减少的对数周期（$\lg N-\lg N_0$）来表示。

霉菌孢子的计数采用平板计数法[11]。在无菌操作台上，将微波处理样品制备成 10 倍梯度的稀释液，选择 3 个合适的稀释度，吸取 0.1 mL 稀释液均匀涂布于马铃薯葡萄糖琼脂培养基表面，倒扣培养皿，放入培养箱在 25℃下培养，每个稀释度在 3 个培养皿中培养生成菌落，取其平均值。培养 3 d 后开始观察菌落的生长情况，观察至第 5 天，选取菌落数为 10 ~ 150 之间的培养皿进行计数，用于研究不同温度下微波处理对于霉菌孢子的杀灭效果。

1.5　数学模型的建立

1.5.1　线性模型

该模型假设微生物具有相同的抗逆性，致死动力学可以用线性模型来描述，微生物下降的对数值随时间的变化呈线性变化，即

$$\lg\frac{N}{N_0}=-\frac{t}{D} \tag{1}$$

式中　D——指数递减时间，即在某一致死温度条件下，每杀死 90% 的活菌数时所需的时间，min

t——处理时间，min

1.5.2　Weibull 模型

Weibull 方程属于分布函数，最早应用于医学中的生存分析和工程学的可靠性研究。该模型假设菌

体间的热抗性有差别且符合 Weibull 分布[10]。其数学模型为

$$\lg \frac{N}{N_0} = -bt^n \tag{2}$$

式中 b——尺度参数

n——形状参数

当 $n>1$ 时,曲线呈单调下凹(肩峰);当 $n<1$ 时,曲线呈单调上凹(拖尾);当 $n=1$ 时,曲线为一条直线,此时 Weibull 模型变为 $\lg(N/N_0)=-bt$,与一级动力学方程一致,$b=1/D$,因此一级动力学方程可看作 Weibull 模型的特定形式[12]。

1.5.3 模型的拟合度比较

采用 SPSS 16.0 软件对试验数据分别进行线性模型和 Weibull 模型的拟合处理,得到微波灭菌随加热时间和温度变化的动力学方程。以均方误差(MSE)e、决定系数 R^2、精确因子 A_f和偏差因子 B_f 这 4 个参数来评判拟合度的优劣[6,9]。e 和 A_f、B_f的计算公式如下

$$e = \frac{\sum(\alpha-\beta)^2}{m} \tag{3}$$

$$\lg B_f = \left(\sum \lg(\alpha/\beta)\right)\Big/ m \tag{4}$$

$$\lg A_f = \left(\sum |\lg(\alpha/\beta)|\right)\Big/ m \tag{5}$$

式中 α——预测值 β——实测值

m——测定值数目

其中,A_f反映了预测值与实测值偏离的程度,A_f值越小表明模型预测值与实测值越接近,模型越精确。当 $B_f>1$ 表示模型预测值比实测值高,当 $B_f<1$ 表示模型预测值比实测值低,B_f越接近 1,模型拟合度越高。决定系数 R^2和 e 表示模型的精确度、可靠度,R^2越接近于 1,e 越小,模型拟合度越高。

2 结果与分析

2.1 模型拟合曲线

利用 SPSS 软件,选取线性模型和 Weibull 模型拟合微波对寄生曲霉孢子的杀菌动力学曲线,孢子在 50、60、70℃ 的微波致死拟合曲线如图 1 所示(55、65、75℃ 的致死曲线未列出)。从图中可以看出,Weibull 模型较线性模型有更好的拟合性。

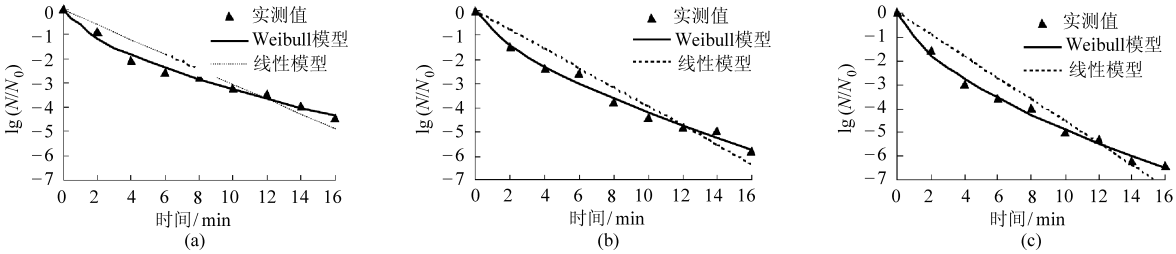

图 1 在不同微波温度条件下寄生曲霉孢子线性模型和 Weibull 模型的致死拟合曲线

Fig. 1 Survival curves of *Aspergillus parasiticus* spores at different temperatures fitted with linear and Weibull mode

(a) 50℃ (b) 60℃ (c) 70℃

2.2 模型拟合有效性比较

线性模型和 Weibull 模型对寄生曲霉孢子在 50~75℃下微波致死曲线拟合的评价参数 R^2、e、B_f 和 A_f如表 1 所示。Weibull 模型对 6 个温度下致死曲线有较好的拟合性,R^2、e、B_f和 A_f的平均值分别为 0.984、0.031、1.005 和 1.052;相比较而言,线性模型对 6 个温度下致死曲线的拟合性较差,R^2、e、B_f和 A_f的平均值分别为 0.972、0.361、0.851 和 1.233。

表 1 不同微波温度下线性模型和 Weibull 模型的致死曲线拟合参数

Tab. 1 Fitting parameters of linear and Weibull models for inactivation curves of *Aspergillus parasiticus* spores under different temperatures

温度/℃	R^2		e		B_f		A_f	
	Weibull	线性	Weibull	线性	Weibull	线性	Weibull	线性
50	0.972	0.951	0.031	0.231	1.018	0.857	1.081	1.229
55	0.985	0.965	0.030	0.264	1.013	0.871	1.055	1.208
60	0.980	0.972	0.039	0.299	1.000	0.855	1.049	1.227
65	0.985	0.992	0.033	0.397	0.991	0.838	1.045	1.233
70	0.987	0.972	0.031	0.473	1.006	0.846	1.048	1.239
75	0.992	0.978	0.019	0.502	1.001	0.837	1.033	1.260
平均值	0.984	0.972	0.031	0.361	1.005	0.851	1.052	1.233

为了进一步验证模型的有效性，通过残差分析图和相关图衡量预测值和实测值的一致性[13]。70℃微波灭霉的线性模型和 Weibull 模型的残差分析图以及实测值与预测值相关图显示了 2 个模型拟合度的差异，如图 2、3 所示。从残差分析图来看，Weibull 模型残差的大小与拟合值的顺序无关，残差自由分布于以零为中心的水平条带里，没有任何证据显示残差存在系统变化趋势；而线性模型的残差以增大趋势偏离零基线，这表明 Weibull 模型可以更好地描述孢子的致死过程。从相关图可以看出，实测值与 Weibull 模型的拟合值有更好的相关性，也证明了 Weibull 模型的精确性。

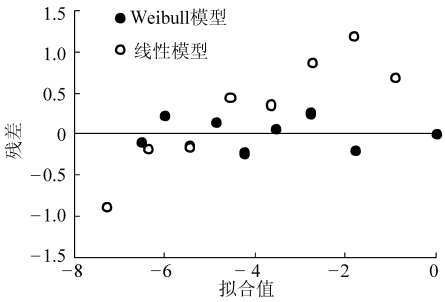

图 2　70℃微波灭霉下线性模型和 Weibull 模型的残差分析

Fig. 2　Residual analysis of inactivation of *Aspergillus parasiticus* spores at 70℃ according to Weibull and linear models

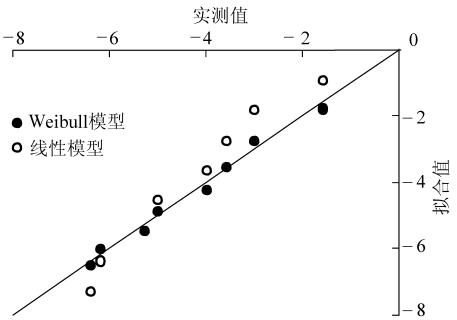

图 3　70℃微波灭霉下线性模型和 Weibull 模型实测值与预测值相关关系

Fig. 3　Correlation between experimentally determined and calculated values for inactivation of *Aspergillus parasiticus* spores at 70℃ according to Weibull and Linear models

判别 Weibull 模型适用性的另一方法是风险图。风险图是以 ln*t* 为横坐标，$\ln(-\ln(N/N_0))$ 为纵坐标的双对数图。如果 Weibull 模型适用，实测值在风险图中的趋势线应是直线。这种检验方法也见于分析食源性病原体的等温灭菌和抗菌素的超高压失活[13~14]。70℃微波灭霉的风险图如图 4 所示，所得直线的 R^2 为 0.983 9，表明 Weibull 模型适于拟合寄生曲霉孢子在 70℃ 的致死过程。其他温度下 2 个模型的残差分析图和相关图以及分析孢子失活过程的风险图也得到了相似的结果（数据未列出）。

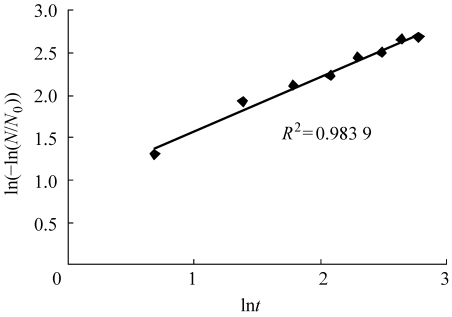

图 4　70℃微波灭霉的风险图

Fig. 4　Hazard plot of inactivation of *Aspergillus parasiticus* spores at 70℃ by microwave processing

2.3　Weibull 模型参数的求解

Weibull 模型可以很好地描述微波杀菌过程，因此在此基础上求解该模型的尺度参数 *b* 和形状参数 *n*，考察温度对 *b* 值和 *n* 值的影响。

尽管 Weibull 模型是一个经验性模型，但在微生物致死方面有其理论意义[9]。尺度参数 *b* 反映了灭菌效果的优劣。*n* 值作为形状参数，一方面反映了致死曲线的形状，另一方面其值的大小代表特定的意义。当 $n>1$ 时，呈肩峰曲线，表明模型曲线随着时间的延续呈现降低变快的趋势，即时间越长微生物越容易死亡；当 $n<1$ 时，呈拖尾曲线，表明模型曲线随着时间的延续呈现降低减缓的趋势，即时间越长微生物的抗性越强[15]。

通过 Weibull 模型拟合得到的参数值如表 2 所示。可以看出，*b* 值随温度升高而增大，表明微波杀菌温度越高，灭菌效果越好；不同温度下 *n* 值皆小于 1，说明在 50 ~ 75℃的微波处理条件下，随着时间的延续，残余孢子由于对处理条件表现出适应特性，其抗性增强。对 *n* 值进行 ANOVA 分析，处理温度不同，*n* 值间存在显著差异，表明形状参数与温度相关。该结果与 Peleg 研究结果一致，Peleg 等用 Weibull 模型方程拟合肉毒梭菌（*Clostridium botulinum*）孢子热力致死曲线时也发现 *b* 值和 *n* 值与温度相关[16]。但 Fernandez 等对仙人掌杆菌（*Bacillus cereus*）孢子热力杀菌时却发现 *n* 值与温度和 pH 值无关[17]。

2.4　Weibull 模型的简化

尽管 Weibull 模型方程比线性模型可以更好地描述致死曲线，但该模型求解参数需要非线性回归。由于含有两个参数，Weibull 模型方程本质上比一级动力学模型更为复杂。如果形状参数 *n* 设定为常数，Weibull 模型的待定参数由 2 个变为 1 个，*b* 值可通过线性回归求解，于是 Weibull 模型方程将变得简单而利于计算，*b* 值预测也更为可靠[18]。因此，

本文将 n 值在 50 ~ 75℃ 视为定值，取其平均值 0.635，得到简化的 Weibull 模型方程为

$$\lg \frac{N}{N_0} = -bt^{0.635} \tag{6}$$

表 2 不同温度下 Weibull 模型的参数

Tab. 2 Parameters of Weibull model at different temperatures

温度/℃	Weibull 模型参数	
	b	n
50	0.780	0.623
55	0.869	0.671
60	0.924	0.658
65	1.097	0.632
70	1.166	0.620
75	1.211	0.606

对微波杀菌动力学曲线重新拟合，用参 R^2、e、B_f 和 A_f 评价该方程对寄生曲霉孢子在 50 ~ 75℃ 下微波致死曲线拟合的有效性，结果如表 3 所示。将 n 值设定为 0.635，Weibull 简化模型的拟合评价参数的平均值与原模型相比没有变化或变化很小，表明 Weibull 模型简化后与原模型具有相似的拟合性。应该指出的是，某些情况下将 n 值固定后会使方程的拟合度有所下降，但却改善了模型的稳健性。可以设想，如果 n 值随温度而变化，那就需要建立 2 个方程分别描述温度对形状参数 n 和尺度参数 b 的影响。n 值和 b 值预测中的微小误差可能协同作用，从而导致总体误差的放大[9]。

表 3 Weibull 简化模型的致死曲线拟合参数（形状参数设定为 0.635）

Tab. 3 Fitting parameters of reduced Weibull model for inactivation curves of *Aspergillus parasiticus* spores (setting n at a value of 0.635)

温度/℃	R^2	e	B_f	A_f
50	0.972	0.032	1.013	1.080
55	0.986	0.033	1.027	1.057
60	0.980	0.040	1.009	1.045
65	0.985	0.033	0.989	1.233
70	0.987	0.032	1.001	1.048
75	0.991	0.023	0.990	1.038
平均值	0.984	0.032	1.005	1.084

Weibull 简化方程对微波杀菌动力学曲线拟合得到新的 b 值如图 5 所示。b 值随温度升高而增大，b 值与温度 T 呈线性相关。在 50℃ ≤ T ≤ 75℃ 范围内，回归方程为

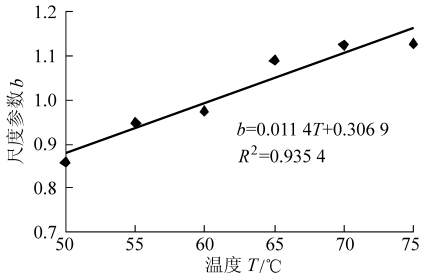

图 5 温度对 Weibull 模型 b 值的影响

Fig. 5 Effect of temperature on b values of Weibull model

$$b = 0.306\,9 + 0.011\,4T \tag{7}$$

将式(7)代入式(6)，得

$$\lg \frac{N}{N_0} = -(0.306\,9 + 0.011\,4T)t^{0.635} \tag{8}$$

该模型方程仅含有 2 个自变量：温度 T 和保温时间 t。对于任一微波等温灭菌条件，灭菌温度和保温时间这 2 个变量是给定的，所以该方程在理论上可以用来定量说明微波等温处理时特定温度-时间组合下寄生曲霉孢子的致死情况。

2.5 动力学模型对微波等温杀菌工艺参数的预测

传统热力杀菌采用 D 值来表征微生物数量减少与反应时间的关系。但 Weibull 模型作为一种非线性模型，不能继续应用线性方程基础上获得的灭菌指示参数，有学者在研究 Weibull 方程时引入一个新的参数 t_d[14]。t_d 定义为使微生物数量下降 d 个对数周期所需的时间，其计算公式为

$$t_d = \left(\frac{d}{b}\right)^{1/n} \tag{9}$$

式中 d——微生物数量下降的对数周期数

当 $d = 1$ 时，t_1 表述的意义为杀死 90% 初始活菌数时所需的时间，类似于 D 值的意义。由于 D 值和 t_1 是基于不同的动力学方程基础上建立的，D 值与 t_1 并不相等。例如，70℃ 时对寄生曲霉微波杀菌，Weibull 模型的 n 值为 0.620，b 值为 1.166，计算求得 $t_1 = 0.83$ min。然而，线性模型计算求得 D 值为 2.19 min（图 6）。这表明，如果杀菌目标是菌数下降 1 个对数周期，通过线性模型预测杀菌时间，将会出现杀菌过度的结果。

然而，下降 1 个对数周期作为杀菌目标在食品加工中很少见到，在商业灭菌中，一般要求产品中的菌数下降 6 ~ 7 个对数周期，因此预测该目标下的杀菌工艺参数更有意义[14]。对于线性模型，微生物数量下降 6 个对数周期所需时间为 $6D$，对于 Weibull 模型，菌数下降 6 个对数周期所需时间为 t_6，而不是 $6t_1$，这是由于 Weibull 模型描述的菌数下降并非呈线性下降的缘故。例如，寄生曲霉在 70℃ 微波灭菌，

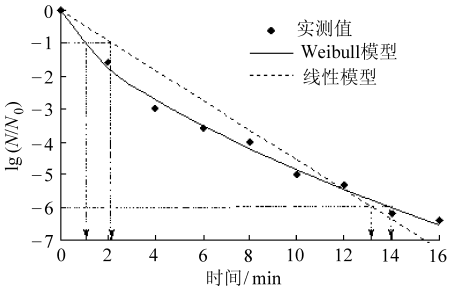

图 6　70℃微波处理时寄生曲霉孢子的致死曲线

Fig. 6　Inactivation curves of *Aspergillus parasiticus* spores at 70℃ by microwave processing

t_6为 13.96 min，6D 为 13.14 min 图 6 中箭头分别表示线性模型和 Weibull 模型中活孢子数减少 1 个对数周期和 6 个对数周期所需时间。这表明，如果杀菌目标是菌数下降 6 个对数周期，通过线性模型预测杀菌时间，将会出现杀菌不彻底的结果。

不同温度下 t_1与 D 值、t_6与 6D 进行比较，如表 4 所示。可以看出，在 50～75℃范围内微波灭霉，t_1小于 D 值，t_6大于 6D。因此，在商业灭菌中，当微生物致死曲线呈现拖尾曲线时，通过线性模型计算得到的热力杀菌时间至少在理论上要比真正需要的杀菌时间要短。尽管需要有更多的研究来考察非线性模型的适用性，但本研究至少表明了应该重新考量经典一级反应动力学对微波致死时间的计算，从而避免杀菌不彻底或者过度杀菌的现象[14, 18]。

表 4　不同温度下 t_1与 D 值、t_6与 6D 比较

Tab. 4　Comparison of t_1 and D value, t_6 and 6D at different temperatures

温度/℃	Weibull 模型		线性模型	
	t_1	t_6	D	6D
50	1.27	21.39	3.26	19.56
55	1.09	18.28	2.60	15.60
60	1.04	17.46	2.53	15.18
65	0.87	14.69	2.27	13.62
70	0.83	13.96	2.19	13.14
75	0.83	13.88	2.18	13.08

3　结论

（1）Weibull 模型较线性模型能更好地拟合微波处理下寄生曲霉孢子失活动力学变化，Weibull 模型的尺度参数和形状参数与温度相关。

（2）将形状参数固定为 0.635，得到的 Weibull 简化模型与原模型具有相似的拟合性，改善了模型的稳健性；Weibull 简化模型方程 $\lg(N/N_0) = -(0.3069 + 0.0114T)t^{0.635}$可有效预测特定温度-时间组合下的微波灭菌效果。

（3）通过 Weibull 模型预测微波杀菌时间可避免线性模型导致的杀菌不彻底或者过度杀菌现象。

参　考　文　献

1　张若寒，卢国洪，沈凌君. 丙酸铵复合物对不同贮存时间高水分玉米防霉效果的研究[J]. 中国饲料，2002(21)：7～9.

2　余恺，胡卓炎，黄智洵，等. 微波杀菌研究进展及其在食品工业中的应用现状[J]. 食品工业科技，2005，26(7)：187～191.
Yu Kai, Hu Zhuoyan, Huang Zhixun, et al. Progress in microwave sterilization and its application in food industry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2005, 26(7): 187～191. (in Chinese)

3　Lakins D G, Echeverry A, Alvarado C Z, et al. Quality of and mold growth on white enriched bread for military rations following directional microwave treatment [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(3): 99～103.

4　Welt B A, Tong C H, Rossen J L, et al. Effect of microwave radiation on inactivation *Clostridium sporogenes* (PA 3679) spores [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60(2): 482～488.

5　Fujikawa H, Ushioda H, Kudo Y. Kinetics of *Escherichia coli* destruction by microwave irradiation [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, 58(3): 920～924.

6　杭峰，陈卫，陈帅，等. 食品微波加热杀菌动力学描述模型的选择[J]. 农业工程学报，2008，24(6)：49～52.
Hang Feng, Chen Wei, Chen Shuai, et al. Comparison of inactivation kinetics models for microwave heating food [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 49～52. (in Chinese)

7　钟葵，吴继红，廖小军，等. 高压脉冲电场对植物乳杆菌的杀菌效果及三种模型的比较分析[J]. 农业工程学报，2006，22(11)：238～243.
Zhong Kui, Wu Jihong, Liao Xiaojun, et al. Inactivation ef fect of pulsed electric field on *Lactobacillu plantarum* in apple juice and comparative analyses of three models [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 238～243. (in Chinese)

8　Patil S, Bourke P, Frias J M, et al. Inactivation of *Escherichia coli* in orange juice using ozone [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(4): 551～557.

9　Chen H, Hoover D G. 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(3): 269～276.

（下转第 170 页）

12 Parraravivat J, Morioka K, Shirsaki M, et al. Effect of washing conditions on the removal of lipid from the fatty fish escolar (*Lepidocybium flavobrunneum*) meat[J]. Journal of Biological Sciences, 2008, 8(1): 34 ~ 42.

13 Özogul Y, Özogul F, Kuley E, et al. Biochemical, sensory and microbiological attributes of wild turbot (*Scophthalmus maximus*), from the Black Sea, during chilled storage[J]. Food Chemistry, 2006, 99(4): 752 ~ 758.

14 Benjakula S, Visessanguan W, Thongkaewa C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage[J]. Food Research International, 2003, 36(8): 787 ~ 795.

15 Romuald C, Christine D L, Marie L A, et al. High-pressure effects on the proteolytic enzymes of sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) fillets[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(10): 3 969 ~ 3 973.

16 胡飞华,陆海霞,陈青,等. 超高压处理对梅鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 水产学报, 2010, 34(3): 329 ~ 335.
Hu Feihua, Lu Haixia, Chen Qing, et al. Effects of ultra-high pressure on gel properties of big head croaker (*Collichthys lucidus*) surimi[J]. Journal of Fisheries of China, 2010, 34(3): 329 ~ 335. (in Chinese)

17 张秋勤,徐幸莲,胡萍,等. 超高压处理对肉及肉制品的影响[J]. 食品工业科技, 2008, 29(12): 267 ~ 269.
Zhang Qiuqin, Xu Xinglian, Hu Ping, et al. Effects of ultra high pressure processing on meat and meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008, 29(12): 267 ~ 269. (in Chinese)

18 陈艳,丁玉庭,邹礼根,等. 鱼糜凝胶过程的影响因素分析[J]. 食品研究与开发, 2003, 24(3): 12 ~ 15.

19 刘茹,钱蔓,熊善柏,等. 白鲢鱼糜凝胶劣化的影响因素[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(5): 709 ~ 713.
Liu Ru, Qian Man, Xiong Shanbai, et al. Influencing factors of silver carp surimi modori[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(5): 709 ~ 713. (in Chinese)

(上接第 153 页)

10 曹冬梅, 何成华, 景晟, 等. 一株具霉菌抑制活性细菌的鉴定[J]. 微生物学报, 2006, 46 (3): 467 ~ 469.
Cao Dongmei, He Chenghua, Jing Sheng, et al. Identification of a bacterium with activities of inhibiting growth of fungi [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2006, 46 (3): 467 ~ 469. (in Chinese)

11 刘嫣红, 唐炬明, 毛志怀, 等. 射频-热风与热风处理保鲜白面包的比较[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 323 ~ 328.
Liu Yanhong, Tang Juming, Mao Zhihuai, et al. Comparison between combined radio frequency and hot air treatment and hot air treatment on bread fresh-keeping[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9): 323 ~ 328. (in Chinese)

12 Mafart P, Couvert O, Gaillard S, et al. On calculating sterility in thermal preservation methods: application of the Weibull frequency distribution model [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 72(2): 107 ~ 113.

13 Avsaroglu 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(1): 78 ~ 83.

14 Buzrul S, Alpas H. Modeling inactivation kinetics of food borne pathogens at a constant temperature [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(4): 632 ~ 637.

15 van Boekel, M A J S. On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 74(2): 139 ~ 159.

16 Peleg M, Cole M B. Estimating the survival of *Clostridium botulinum* spores during heat treatments [J]. Journal of Food Protection, 2000, 63(2): 190 ~ 195.

17 Fernandez A, Collado J, Cunha L M, et al. Empirical model building based on Weibull distribution to describe the joint effect of pH and temperature on the thermal resistance of *Bacillus cereus* in vegetable substrate [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 77(2): 147 ~ 153.

18 Buzrul S. A suitable model of microbial survival curves for beer pasteurization [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(8): 1 330 ~ 1 336.