

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.031

铜绿假单胞菌的温度、pH值和乳酸钠主参数模型构建*

董庆利¹ 姚远¹ 赵勇² 陈浩¹

(1. 上海理工大学医疗器械与食品学院, 上海 200093; 2. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

摘要: 采用全自动微生物生长曲线分析仪 Bioscreen 测定分离自腐败冷却猪肉的铜绿假单胞菌在不同温度(25~40℃)、pH值(5.0~7.5)、乳酸钠质量浓度(0~0.035 g/mL)影响下的生长曲线。基于最小二乘法运用 Matlab 软件中的 fminsearch 函数拟合铜绿假单胞菌迟滞期关于温度、pH值和乳酸钠质量浓度的主参数模型,经参数估计求得铜绿假单胞菌的最低生长温度、最适生长温度、最高生长温度、最低生长 pH值、最适生长 pH值、最高生长 pH值、乳酸钠的最小抑菌浓度,进而通过 10 组随机数据进行验证。结果表明,构建的主参数模型能较好预测铜绿假单胞菌的相关生长参数,决定系数 R^2 为 0.929 1,偏差因子 B_f 为 1.097 5,准确因子 A_f 为 1.393 6,平方根误差为 1.598 9。验证组的决定系数 R^2 为 0.854 6,偏差因子 B_f 为 1.122 5,准确因子 A_f 为 1.211 7,都在可接受的范围内。

关键词: 铜绿假单胞菌 迟滞期 温度 pH值 乳酸钠 主参数模型

中图分类号: TS251.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0197-06

引言

假单胞菌属一直被认为是在有氧条件下引起冷却肉腐败的主导作用菌之一^[1-2],研究假单胞菌的生长预测模型对冷却肉货架期和安全性的预测与监控具有重要意义。温度、pH值、水分活度 a_w 和防腐剂等因素是影响假单胞菌生长的主要限制因素。很多模型已被用于预测食品中微生物的生长,Ratkowsky^[3]和 Rosso^[4]分别提出平方根模型和主参数模型(CPM)来描述温度对微生物生长速率的影响。与平方根模型相比,主参数模型经常被用于模拟多种独立因素对微生物生长的影响。已有研究对热死环丝菌和乳球菌在不同温度、pH值和 NaCl 浓度下的最大比生长率 μ_{max} 进行模拟^[5],得出了两株菌的最低生长温度 T_{min} ,最适生长温度 T_{opt} ,最高生长温度 T_{max} 。Carlin^[6]利用主参数模型模拟蜡样芽胞杆菌的最大比生长率 μ_{max} 和温度、pH值和 NaCl 浓度的关系,确定了 7 株蜡样芽胞杆菌的 T_{min} 、 T_{opt} 、 T_{max} 、最低生长 pH值、最适生长 pH值、最小水分活度 a_{wmin} 和最适生长率 μ_{opt} 。

国外已建立了蜡样芽胞杆菌、单增李斯特菌、大肠杆菌等菌种的二级动力学模型^[6-8],作为冷却肉中优势腐败菌之一的假单胞菌属,尚无构建主参数模型的相关报道。前期研究乳酸钠(NaL)可作为防腐剂显著抑制铜绿假单胞菌的生长^[9-10],可考虑将

NaL 整合到主参数模型中用于确定 NaL 抑制铜绿假单胞菌的最小抑菌浓度。另外,细菌的迟滞期是影响细菌生长的重要因素之一,控制迟滞期的增长从某种意义上比控制细菌的生长更重要^[11-12]。本研究以营养肉汤为基质,研究温度、pH值和 NaL 质量浓度对假单胞菌属之一铜绿假单胞菌迟滞期的影响,由此建立铜绿假单胞菌的一级生长模型和二级主参数模型,并验证用此数学模型预测假单胞菌在营养肉汤上生长的有效性,为实际食品中控制铜绿假单胞菌生长提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 菌株来源及菌悬液制备

铜绿假单胞菌分离自市售冷鲜猪肉中,实验时进行平板划线,在 27℃ 下活化 3 次,选择性培养基的配制参照文献[13]。取一环菌苔接种于 300 mL 的营养肉汤培养基中培养 12~18 h,使菌体浓度达到 8 lgCFU/mL,经无菌生理盐水稀释后制成 6 lgCFU/mL 的菌悬液备用。

1.2 主要试剂与设备

乳酸钠(纯度 53.4%,上海国药化学集团有限公司)用一次性有机系针头过滤器(0.45 μ m)过滤除菌。

MLS-3750 型高压灭菌锅(三洋电机生物医药株式会社);SW-CJ-1FD 系列超净工作台(上海新苗医疗器械制造有限公司);GHP-9270 型隔水式

收稿日期:2013-06-30 修回日期:2013-08-03

* 国家自然科学基金资助项目(31271896)和上海市自然科学基金资助项目(12ZR1420500)

作者简介:董庆利,副教授,主要从事预测微生物学研究,E-mail: dongqingli@126.com

恒温培养箱(上海一恒科技有限公司); Bioscreen FP-1100C 型全自动微生物生长曲线分析仪(芬兰 Oy Growth Curves Ab Ltd 公司)。

1.3 试验设计与生长曲线观测

试验中采用的温度、pH 值和乳酸钠(NaL)质量浓度三因素的水平设计如表 1 所示,进行 $4 \times 6 \times 8$ 全析因设计,共 192 组试验。将乳酸钠溶液直接添加到肉汤中,其质量浓度如表 1 所示。

表 1 温度、pH 值和乳酸钠质量浓度水平设计
Tab.1 Levels of temperature, pH value and the mass concentration of sodium lactate

水平	因素		
	温度/°C	pH 值	乳酸钠质量浓度/g·mL ⁻¹
1	25	5.0	0.005
2	30	5.5	0.010
3	35	6.0	0.015
4	40	6.5	0.020
5		7.0	0.025
6		7.5	0.030
7			0.035

向 Bioscreen 分析仪 100 孔板中加入 180 μL 上述不同条件的营养肉汤,然后将 20 μL 6 lgCFU/mL 浓度的菌悬液加入至上述孔中,使得初始菌体浓度达到 5 lgCFU/mL。通过 Bioscreen 分析仪设定上述温度,中等强度振动,测定波长 600 nm 的 OD 值,每 30 min 检测一次,直至细菌稳定期。绘制铜绿假单胞菌在不同条件下的生长曲线。

$$C_i = \begin{cases} 0 & (X \leq X_{\min}) \\ \frac{(X - X_{\max})(X - X_{\min})^i}{(X_{\text{opt}} - X_{\min})^{i-1} \{ (X_{\text{opt}} - X_{\min})(X - X_{\text{opt}}) - (X_{\text{opt}} - X_{\max}) [(i-1)X_{\text{opt}} + X_{\min} - iX] \}} & (X_{\min} < X < X_{\max}) \\ 0 & (X \geq X_{\max}) \end{cases} \quad (i=1,2)$$

$$N(C_i) = \begin{cases} (1 - C_i/M_i)^2 & (C_i < M_i) \\ 0 & (C_i \geq M_i) \end{cases} \quad (i=1,2)$$

式中 T ——温度 P ——pH 值

C_i ——乳酸钠的浓度

X ——温度或者 pH 值

X_{\min} ——无增长下的 X_i 值的下限

X_{\max} ——无增长下的 X_i 值的上限

X_{opt} —— L 等于它的最适值 L_{opt} 时的值

M_i ——没有铜绿假单胞菌增长存在时乳酸钠的最小抑菌浓度, mol/L

1.6 模型的数学检验与验证

获得主参数(最低生长温度 T_{\min} , 最适生长温度 T_{opt} , 最高生长温度 T_{\max} , 最低生长 pH 值 P_{\min} , 最适

1.4 生长曲线拟合与生长参数估计

应用英国食品研究所(IFR)Baranyi 博士开发的 DMFit v3.0 软件,应用 Baranyi 生长模型对铜绿假单胞菌的生长曲线进行拟合^[14]。根据拟合的生长曲线由 DMFit 软件计算生长曲线的迟滞期,公式为

$$y = y_0 + \frac{y_1}{\ln y} + \frac{y_2}{\ln y} \quad (1)$$

其中 $y_1 = \mu_{\max} t + \ln(e^{-\mu_{\max} t} - e^{-\mu_{\max}(t+L)} + e^{-\mu_{\max} L})$

$$y_2 = \ln(1 + 10^{y_0 - y_{\max}} (e^{\mu_{\max}(t-L)} + e^{-\mu_{\max} L}))$$

式中 t ——菌体生长时间, h

y_0, y_{\max} ——最初、最终菌落 OD 值

μ_{\max} ——最大比生长率, h⁻¹

L ——迟滞期时间, h

1.5 主参数模型(CPM)的建立

主参数值的确定采用 Matlab R2012b(美国 Mathworks 公司)中的 fminsearch 函数进行迭代计算,迭代计算基于最小二乘法(残差平方和达到最小)的原理。利用 nlparci 函数求得主参数值 95% 的置信区间。根据 Rosso^[4]提出的主参数模型拟合 μ_{\max} 和 3 种环境因素(温度、pH 值和 NaL 质量浓度)的关系, Baranyi 和 Roberts^[15]、Smith^[16] 和 McMeekin^[17] 研究发现以相同接种量接种到不同环境条件中的微生物迟滞期与其生长速率成反比,因此对主参数模型修正为

$$L = \left(L_{\text{opt}} C_2(T) C_1(P) \prod_{i=1}^2 N(C_i) \right)^{-1} \quad (2)$$

其中

$$(X \leq X_{\min})$$

$$(X_{\min} < X < X_{\max})$$

$$(X \geq X_{\max})$$

生长 pH 值 P_{opt} , 最高生长 pH 值 P_{\max} 和乳酸钠的最小抑菌浓度 M)后,在设定的试验条件范围内(温度 25 ~ 40°C, pH 值 5.0 ~ 7.5, 乳酸钠质量浓度 0 ~ 0.035 g/mL)设置 10 组随机数据组合,按上述方法应用 DMFit 软件重新拟合生长曲线,计算生长参数迟滞期 L 作为观测值。

用建立的主参数预测方程对建模数据组和验证数据组进行处理,预测生长参数迟滞期 L , 数学检验应用平方根误差(E)、决定系数(R^2)、准确性因子(A_f)和偏差因子(B_f)^[18-19],表达式为

$$E = \sqrt{\frac{\sum (V_o - V_p)^2}{n}} \quad (3)$$

式中 n ——试验组数

V_o ——用 Baranyi 生长模型拟合生长曲线的参数 L 观测值

V_p ——建立的主参数模型对 L 的预测值

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (V_p - V_o)^2}{\sum (V_o - V_{mo})^2} \quad (4)$$

式中 V_{mo} —— L 观测值的平均值

$$B_f = 10 \frac{\sum \lg(\frac{V_p}{V_o})}{n} \quad (5)$$

$$A_f = 10 \frac{\sum |\lg(\frac{V_p}{V_o})|}{n} \quad (6)$$

2 结果

2.1 生长曲线的拟合与生长参数的观测

通过 DMFit v3.0 软件应用 Baranyi 生长模型拟合铜绿假单胞菌的生长曲线,并根据拟合的生长曲线计算生长曲线的参数 L 。结果表明 Baranyi 生长模型能够较好地拟合不同试验条件下铜绿假单胞菌的生长状况 ($R^2 > 0.90$),典型生长曲线和拟合结果如图 1 所示。

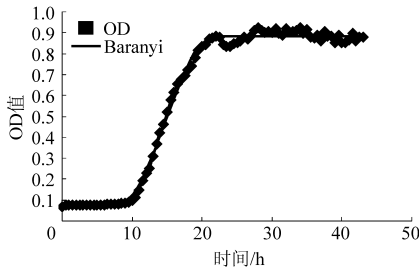


图 1 铜绿假单胞菌典型生长曲线

Fig. 1 Typical growth curve of *P. aeruginosa*

2.2 主参数模型的建立

本研究中建立的主参数模型是用来描述铜绿假单胞菌迟滞期 (L) 与温度、pH 值和乳酸钠质量浓度之间的关系,如图 2 所示,都呈现了一定的规律性。利用主参数模型求得的铜绿假单胞菌的相关生长参数条件如表 2 所示, $R^2 = 0.9291$,模型的拟合效果良好。

2.3 主参数模型的验证

运用验证数据组所得到的观测值与预测值如图 3 所示。 R^2 在 0.85 以上,说明主参数模型的拟合效果良好,模型具有极高的参考价值。偏差因子 B_f 和准确因子 A_f 分别为 1.1225 和 1.2117,皆在可接受的范围内。因此,本试验建立的主参数模型能较好地预测铜绿假单胞菌的生长。

3 讨论

由图 2 中铜绿假单胞菌迟滞期试验观测值与预

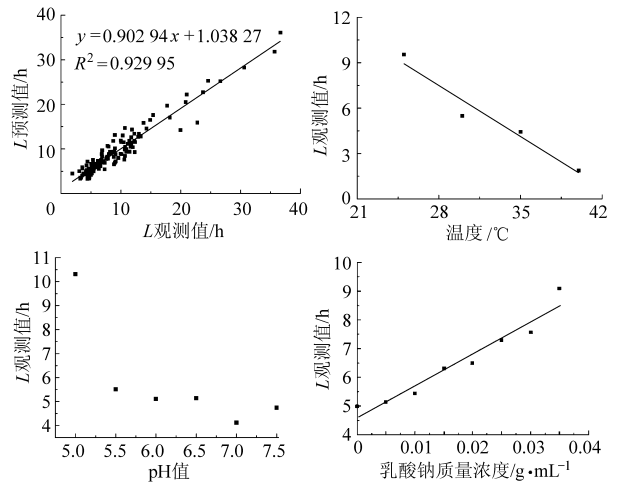


图 2 铜绿假单胞菌迟滞期与温度、pH 值和乳酸钠质量浓度之间的关系

Fig. 2 Relation between lag values of *P. aeruginosa* and temperature, pH value and mass concentration of sodium lactate

表 2 铜绿假单胞菌主参数模型的参数值与数学检验值

Tab. 2 Cardinal parameters and mathematical test values of *P. aeruginosa*

主参数	模型	置信	数学
	主参数值	区间	
L_{opt}/h	2.6889	[2.1650, 3.5474]	
$T_{min}/^{\circ}C$	1.4525×10^{-5}	[-0.0015, 0.0015]	
$T_{opt}/^{\circ}C$	38.6692	[19.5456, 57.7928]	$E = 1.5989$
$T_{max}/^{\circ}C$	40.3490	[33.8422, 46.8559]	$R^2 = 0.9291$
P_{min}	4.7695	[4.7464, 4.7926]	$B_f = 1.0975$
P_{opt}	6.6597	[6.1774, 7.1421]	$A_f = 1.3936$
P_{max}	11.3966	[6.6447, 16.1485]	
$M/mol \cdot L^{-1}$	0.1118	[-0.9910, 1.2145]	

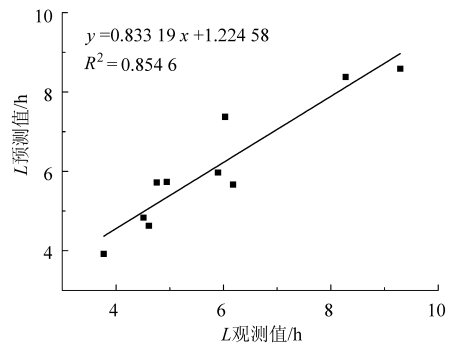


图 3 铜绿假单胞菌实际观测值与模型预测值验证图

Fig. 3 Observed and predicted lag time of *P. aeruginosa* growth

测值(主参数模型求得的数值)二者之间的比较图可见,观测点和预测点分布在线性模型的两面,相关系数 R^2 为 0.9300,说明模型准确性较好。由图 2 可知,随着温度升高,铜绿假单胞菌 L 值减小,这与 Augustin 和 Carrier^[20] 研究一致,用线性模型拟合后 $R^2 = 0.9227$,拟合度较好。当 pH 值升高时,铜绿假

单胞菌 L 值先减小,后增大,在 7.0 左右达到了最小值,与前人研究的铜绿假单胞菌的最适 pH 值在 7.2 相符^[21],本试验建立的主参数模型得出铜绿假单胞菌的 P_{opt} 在 6.659 7,也在可接受的范围内。随着 NaL 质量浓度增大,铜绿假单胞菌 L 值明显增大,Sallam^[22] 发现,乳酸钠可以显著延长假单胞菌的迟滞期,熊成^[9] 等证实了乳酸钠浓度越高,对假单胞菌的抑制效果越强,本文的研究结果与二者一致,用线性模型拟合后 $R^2 = 0.9279$,拟合度较高。乳酸钠是 FDA 规定的 GRAS 添加剂,1988 年 USDA(美国农业部)允许在食品中添加乳酸钠作为防腐剂(4.8%)。因此,利用主参数模型求得的乳酸钠的 M 可作为乳酸钠的添加限量加入到食品中抑制铜绿假单胞菌的生长。

微生物的迟滞期反映的是细胞适应一个新的环境开始二分裂的时间。本文中求得的最适迟滞期为 2.688 9 h,代表铜绿假单胞菌在最适环境条件下的适应时间,时间越短,表明假单胞菌越能较快适应环境,从而迅速进入对数生长期。表 1 中铜绿假单胞菌的主参数值都落在 95% 的置信区间内,且都位于置信区间的中点附近,说明所求得的主参数值都是可信的。根据 ICMSF^[23] 公布的数据可知,椰毒假单胞菌在 30℃ 可以观测到生长,在 4、10、45℃ 不能生长。铜绿假单胞菌培养适宜温度为 35℃,特点是在 4℃ 不能生长,而在 42℃ 可以生长,最适 pH 值为 7.2^[21]。另有研究表明^[24],铜绿假单胞菌最适生长温度为 35℃,在 41℃ 也能生长,这是铜绿假单胞菌的显著特点。也有研究提出,铜绿假单胞菌的最适生长温度为 37℃^[25],李明远^[26] 指出,假单胞菌的最适 pH 值为 5.0 ~ 7.0。假单胞菌属可以生存的 pH 值范围是 5.0 ~ 9.0,最适 pH 值为 7.0^[27]。本试验得出铜绿假单胞菌的温度范围与 pH 值范围与上述研究提出的比较接近,都处于可以接受的范围内。42℃ 能生长是铜绿假单胞菌的最显著特点之一,而本试验中求得的铜绿假单胞菌能承受的最高温度为 40.349 0℃,模型中不能考虑这些特殊的因素,所以求得的参数值都是比较合理的。

主参数模型预测的 NaL 的最小抑制铜绿假单胞菌浓度为 0.111 8 mol/L,而 Houstma^[28] 提出的最

小抑制假单胞菌的浓度为 0.714 ~ 0.982 mol/L,二者相差较大,可能是因为 pH 值的原因,本试验所建立的主参数模型认为各环境因素之间是相互独立的,彼此之间不受影响,但 Houstma^[28]、熊成^[22] 认为 pH 值是影响乳酸钠抑菌效果的重要因素,pH 值越低,乳酸钠抑菌效果越强。罗欣等^[29] 指出有机酸的非解离成分是有有机酸保鲜剂的有效成分,低 pH 值有利于 NaL 解离平衡向乳酸分子形成方向移动,提高乳酸分子浓度,从而影响细菌生长,解释了熊成提出的理论。Young 和 Foegeding^[30] 观测到同样浓度未解离的酸在较低的 pH 值条件下发挥较好的作用。Augustin^[31] 指出 M 是否独立于 pH 值还有待探讨。本研究中,没有考虑 pH 值是影响乳酸钠发挥抑菌作用的因素,从而求得的 M 与上述条件有差异,在后续研究中,可以考虑此因素,求得更准确的 NaL 的 M 值。

铜绿假单胞菌的实际观测值与模型预测值的 R^2 、 B_f 和 A_f 如表 2 所示。模型的判定系数高于 0.90 说明预测值与实测值有较高的相关性,主参数模型的拟合效果良好。偏差因子 B_f 和准确因子 A_f 是公认的评估模型拟合效果的有效工具之一^[32],Neumeyer 等^[33] 认为偏差因子在 0.52 ~ 1.34 范围内,准确因子在 1.06 ~ 1.81 范围内,模型具有良好的精度。李敏等^[34] 认为偏差因子在 0.75 ~ 1.25 之间,准确因子一般在 1.1 ~ 1.9 之间,模型即可以被接受。本研究的偏差因子为 1.097 5,准确因子为 1.393 6,都能满足前二者的评判要求,在模型可接受的范围内。

4 结束语

建立了铜绿假单胞菌的主参数模型,求得铜绿假单胞菌的相关生长参数 T_{min} 、 T_{opt} 、 T_{max} 、 P_{min} 、 P_{opt} 、 P_{max} 和乳酸钠抑制铜绿假单胞菌的最小抑菌浓度 M ,模型回归系数 R^2 在 0.90 以上,偏差因子 B_f 和准确因子 A_f 都在可接受范围内,表明模型具有良好的拟合度,较好地预测了铜绿假单胞菌的生长条件,验证组实际观测值与模型预测值的回归系数 R^2 在 0.85 以上,偏差因子 B_f 和准确因子 A_f 可以被接受,主参数模型可为预测铜绿假单胞菌的生长提供理论参考。

参 考 文 献

- Gill C O, Newton K G. The development of aerobic spoilage flora on meat stored at chill temperature [J]. Journal of Applied Microbiology, 1977, 43(2): 189 ~ 195.
- Gill C O, Newton K G. The ecology of bacterial spoilage of fresh meat at chill temperatures [J]. Meat Science, 1978, 2(3): 207 ~ 217.
- Ratkovsky D A, Lowry R K, McMeekin T A, et al. Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature range [J]. Journal of Bacteriology, 1983, 154(3): 1 222 ~ 1 226.

- 4 Rosso L, Lobry J R, Flandrois J P. An unexpected correlation between cardinal temperatures of microbial growth highlighted by a new model [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1993, 162(4):447~463.
- 5 Leroi F, Fall P A, Pilet M F. Influence of temperature, pH and NaCl concentration on the maximal growth rate of *Brochothrix thermosphacta* and bioprotective bacteria *Lactococcus piscium* CNCM I-4031 [J]. *Food Microbiology*, 2012, 31(2):222~228.
- 6 Carlin F, Albagnac C, Rida A. Variation of cardinal growth parameters and growth limits according to phylogenetic affiliation in the *Bacillus cereus* Group. Consequences for risk assessment [J]. *Food Microbiology*, 2013, 33(1):69~76.
- 7 Augustin J C, Carlier V. Modelling the growth rate of *Listeria monocytogenes* with a multiplicative type model including interactions between environmental factors [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2000, 56(1):53~70.
- 8 Maria B, Eva V D, Kathleen B. Impact of pH on the cardinal temperatures of *E. coli* K12: evaluation of the gamma hypothesis [J]. *Food Control*, 2013, 29(2):328~335.
- 9 熊成,董庆利,姚远. 乳酸钠对铜绿假单胞菌生长的影响[J]. *食品科学*, 2012, 33(13):144~146.
Xiong Cheng, Dong Qingli, Yao Yuan. Effect of sodium lactate on the growth of *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Food Science*, 2012, 33(13):144~146. (in Chinese)
- 10 姚远,董庆利,熊成. 乳酸钠抑制铜绿假单胞菌生长的机理[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(3):54~57.
Yao Yuan, Dong Qingli, Xiong Cheng. Mechanism analysis of sodium lactate inhibiting *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2012, 38(3):54~57. (in Chinese)
- 11 McKellar R C, Lu X. Modelling microbial responses in food [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003.
- 12 McMeekin T A, Olley J N, Ross T, et al. Predictive microbiology [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1993.
- 13 陈天寿. 微生物培养基的制造与应用[M]. 北京:中国农业出版社, 1995:250~579.
- 14 Baranyi J, Roberts T A. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1994, 23(3~4):277~294.
- 15 Baranyi J, Roberts T A. Mathematics of predictive food microbiology [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1995, 26(2):119~218.
- 16 Smith M G. The generation time, lag time and minimum temperature of growth of coliform organisms on meat, and the implications for codes of practice in abattoirs [J]. *J. Hyg. (Camb.)*, 1985, 94:289~300.
- 17 McMeekin T A, Chandler R E, Doe P E, et al. Model for the combined effect of temperature and salt concentration/water activity on growth rate of *Staphylococcus xylosum* [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1987, 62(6):543~550.
- 18 Ross T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1996, 81(5):501~508.
- 19 Baranyi J, Pin C, Ross T. Validating and comparing predictive models [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1999, 48(3):159~166.
- 20 Augustin J C, Carlier V. Mathematical modeling the growth rate and lag time for *Listeria monocytogenes* [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2000, 56(1):29~51.
- 21 李一经. 兽医微生物学[M]. 北京:高等教育出版社, 2011:187.
- 22 Sallam K L. Antimicrobial and antioxidant effects of sodium acetate, sodium lactate, and sodium citrate in refrigerated sliced salmon [J]. *Food Control*, 2007, 18(5):566~575.
- 23 International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF). Microorganisms in foods 5—microbiological characteristics of food pathogens [M]. Holland: Kluwer Academic /Plenum Publishers, 1996:214.
- 24 徐建国. 现场细菌学[M]. 北京:科学出版社, 2010:721.
- 25 夏征农. 辞海生物学分册[M]. 上海:上海辞书出版社, 1987:146.
- 26 李明远. 微生物学与免疫学[M]. 北京:高等教育出版社, 2010:290.
- 27 洪秀华,刘运德. 临床微生物学检验[M]. 北京:中国医药科技出版社, 2010:336.
- 28 Houtsma P C, Kusters B J M, de Wit J C, et al. Modelling growth rates of *Listeria innocua* as a function of lactate concentration [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1994, 24(1~2):113~123.
- 29 罗欣,朱燕. 乳酸钠在牛肉冷却肉保鲜中的应用研究[J]. *食品与发酵工业*, 2000, 26(3):1~5.
Luo Xin, Zhu Yan. Studies on sodium lactate used in the preservation of beef [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2000, 26(3):1~5. (in Chinese)
- 30 Young K M, Foegeding P M. Acetic, lactic and citric acids and pH inhibition of *Listeria monocytogenes* Scott A and the effect on intracellular pH [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1993, 74(5):515~520.
- 31 Augustin J C, Carlier V. Modelling the growth rate of *Listeria monocytogenes* with a multiplicative type model including interactions between environmental factors [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2000, 56(1):53~70.
- 32 Te-Giffel M C, Zwietering M H. Validation of predictive models describing the growth of *Listeria monocytogenes* [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 1999, 46(2):135~149.
- 33 Marinez L, Djenane D, Cilla I, et al. Effect of different concentrations of carbon dioxide and low concentration of carbon monoxide on the shelf-life of fresh pork sausages packaged in modified atmosphere [J]. *Meat Science*, 2005, 71(3):563~570.
- 34 李敏,李耘,韩北忠. 金华火腿中杂色曲霉的生长预测模型[J]. *食品与发酵工业*, 2005, 31(11):56~59.
Li Min, Li Yun, Han Beizhong. Predictive growth model of *Aspergillus versicolor* in Jinhua Ham [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2005, 31(11):56~59. (in Chinese)

Modelling Establishment of the Cardinal Parameters Model as a Function of Temperature, pH Value and Sodium Lactate for *Pseudomonas aeruginosa*

Dong Qingli¹ Yao Yuan¹ Zhao Yong² Chen Hao¹

(1. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

2. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: An automated turbidimetric system, Bioscreen C, was used to monitor the growth of *Pseudomonas aeruginosa*, which was separated from spoilage pork at a range of temperature (25 ~ 40°C), pH (5.0 ~ 7.5) and mass concentration of sodium lactate (0 ~ 0.035 g/mL). The cardinal parameters model (CPM) was built on the basis of nonlinear least squares method using `fminsearch` function of Matlab software, and CPM represented the lag time of *P. aeruginosa* growth as a function of temperature, pH value and sodium lactate mass concentration. The CPM is able to determine the cardinal parameters T_{\min} , T_{opt} , T_{\max} , P_{\min} , P_{opt} , P_{\max} and the minimum inhibitory concentration of sodium lactate, respectively. This model was validated with ten random data within above ranges. The results showed that the growth parameters are predicted well by CPM with $R^2 = 0.9291$, $B_f = 1.0975$, $A_f = 1.3936$, and $E = 1.5989$, respectively. The validation parameters are 0.8546, 1.1225 and 1.2117 for R^2 , B_f and A_f , respectively.

Key words: *Pseudomonas aeruginosa* Lag time Temperature pH value Sodium lactate cardinal Parametric model

(上接第 196 页)

Tenderness and Apoptotic Activity of Yak Meat during Postmortem Aging

Sun Zhichang¹ Feng Xiaoqin¹ Han Ling¹ Zhao Huiping^{2,3} Yu Qunli¹

(1. College of Food Science and Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China

3. University of Washington, Washington 98133, U. S. A.)

Abstract: Totally 24 Gannan yak were slaughtered at 0 ~ 4°C, wind speed 0.5 m/s conditions to aging, then the shear force, MFI and apoptotic enzymes activity were determined during postmortem aging. Results from this research show that the shear force values of TB, ML and SM decrease by 35.6%, 27.4%, 33.5%, and the MFI values increase by 69.7%, 65.7%, 63.0%. This investigation also indicated that TB and SM at 1d postmortem aging caspase-3 activity reach the highest value ($P < 0.001$), while ML at 10 h postmortem aging caspase-3 activity reaches the highest value; caspase-8 activity reaches the highest value activity ($P < 0.001$) at 5 h postmortem aging, and the caspase-8 activity of TB and SM reach highest value earlier than ML; at 5 h postmortem aging, caspase-9 activity is significantly higher than that at 0.5 h postmortem aging ($P < 0.001$), at the same time caspase-9 activity reaches the highest value in ML and SM muscles, while the caspase-9 activity of TB reaches the highest value at 10 h postmortem aging, it is 2.39 times than its initial value; the caspase-3 and caspase-8 activity is related to shear force and MFI significantly ($P < 0.01$), while caspase-3, caspase-8 and caspase-9 activity show significant correlation with each other ($P < 0.05$).

Key words: Yak Postmortem aging Share force MFI Apoptotic