

基于阻抗法的洛菲不动杆菌生长模型*

刘东红¹ 唐佳妮¹ 徐淑臻² 张爱萍¹

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310029; 2. 烟台大学生命科学学院, 烟台 264005)

【摘要】 利用平板计数法和阻抗法研究环境因子(温度和 pH 值)对洛菲不动杆菌最大生长速率比、培养液电导、导纳最大增长速率比的影响,采用二次旋转组合设计,分别获得了洛菲不动杆菌最大生长速率比对数值、电导最大增长速率比对数值、导纳最大增长速率比对数值与温度、pH 值关系的多项式方程($P_r < 0.05$),并对建立的方程进行了验证。结果表明,洛菲不动杆菌最大生长速率模型优于另两个模型, $R^2 = 0.9455$,另两个模型在最大增长速率比小于 0.06 时效果较好。分别将阻抗法获得的电导最大增长速率比、导纳最大增长速率比与平板计数法获得的洛菲不动杆菌最大生长速率比进行相关关系分析,建立了立方模型,模型的 R^2 分别为 0.859 和 0.806。

关键词: 洛菲不动杆菌 最大生长速率比 阻抗法 生长模型

中图分类号: TS252.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)07-0130-06

Growth Model of *Acinetobacter lwoffii* Based on Impedance Method

Liu Donghong¹ Tang Jiani¹ Xu Shuzhen² Zhang Aiping¹

(1. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2. College of Life Science, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract

Acinetobacter lwoffii was studied by impedance and plate count method throughout rotational combination design to define the effects of temperature and pH value on maximal specific growth rate (μ_m) of *A. lwoffii*, conductance and admittance. Polynomial models were established ($P_r < 0.05$) and validated. The results showed that the established model with viable count method was better than the other two ($R^2 = 0.9455$), which fit well when μ_m was less than 0.06. The correlation equation between μ_m of conductance/admittance and μ_m of *A. lwoffii* were established and the R^2 were 0.859 and 0.806, respectively.

Key words *Acinetobacter lwoffii*, Maximal specific growth rate, Impedance method, Growth model

引言

阻抗法作为微生物快速检测方法已在食品工业中,尤其是乳制品行业得到了较广泛的应用,2006年,该法成为鲜乳中菌落总数快速测定的行业标准^[1]。该法不仅能够快速测定原料乳中嗜冷菌、中温菌和细菌总数等,还能够对原料奶或酸奶中微生物水平进行质量控制。而利用阻抗或电导变化曲线建立微生物生长模型及货架期预测的研究还处于起步阶段,仍需进一步研究、探索。

微生物生长模型的建立是以微生物的生长曲线为基础的,虽然传统的平板计数法结果准确,但却费时耗力,且无法实现自动化。因此,利用间接法获得微生物生长曲线或其主要参数(如延滞期、最大生长速率比等)成为研究者关注的内容^[2~7]。本文以洛菲不动杆菌(*Acinetobacter lwoffii*)为研究对象,分别采用阻抗法和平板计数法获得它的导纳(阻抗的倒数)、电导变化曲线和菌落数对数值变化曲线,通过非线性拟合分别得到不同温度、pH 值条件下的初级模型——Gompertz 方程,在此基础上建立最大生

长速率比的二级模型——多项式方程,并分析这两种方法获得结果之间的相关关系。

1 材料与方法

1.1 仪器与材料

6420 型精密阻抗分析仪 (Wayne Kerr Electronics)、DC1006 型低温恒温槽、316 型电极 (长度 11 cm, 直径 2 mm)、试管、超净台、恒温培养箱、高压灭菌锅、水浴锅、移液枪、玻璃培养皿、锥形瓶。

生理盐水(0.85%氯化钠溶液)、乳平板计数培养基(酵母提取物 2.5 g、胰蛋白胨 5.0 g、脱脂奶粉 1.0 g、葡萄糖 1.0 g、琼脂 10 g、蒸馏水 1 000 mL、pH 值 6.9 ± 0.1)、阻抗培养基(不加琼脂,其余成分与乳平板计数培养基相同)、营养肉汤(杭州微生物试剂有限公司)。

菌种:洛菲不动杆菌,从原料奶中分离获得,于 0℃ 冰箱中保存。

1.2 方法

1.2.1 初级模型的建立

初级模型可表征微生物数量与时间的关系,最常用的是 Gompertz 模型^[8-10],其函数式为

$$Y_t = A + C \exp(-\exp(-B(t - M))) \quad (1)$$

式中 A ——较低渐近线的数值

C ——较高渐近线值与较低渐近线值之差

M ——绝对生长速率最大时对应的时间

B ——最大生长速率(斜率)

Y_t —— t 时刻对应的检测参数(菌种浓度对数值、导纳、电导等)

则最大生长速率比 $\mu_m = BC/e$ 。

将冻干菌体制成悬浮液,并移植于琼脂斜面上在 30℃ 条件下进行恢复培养;将已形成可见菌落的琼脂斜面置于冰箱中保存;挑取琼脂斜面上的菌种在营养肉汤中进行活化(30℃ 培养 24 h),按 2% 接种量转接至含 200 mL 阻抗培养基的锥形瓶中,摇匀;从锥形瓶中移取 5 mL 混合菌液至无菌检测管中,插上电极密封后放至已设置好温度的恒温槽中(温度波动 0.04℃ 以内),用阻抗分析仪(检测电压 20 mV,频率 1 kHz)进行连续检测,系统每隔 0.5 h 记录检测管内的阻抗和电导值。同时,每隔一段时间(2~4 h)从锥形瓶中无菌移取 1 mL 菌液,用平板计数法测定其菌体浓度(菌种浓度对数值,单位为 cfu/mL)。

对导纳-时间变化曲线、电导-时间变化曲线及菌体浓度对数值-时间变化曲线进行非线性拟合,得到 Gompertz 方程各个参数的估计值。

1.2.2 二级模型的建立

二级模型用于描述环境因子对初级模型中参数

的影响。本试验选择培养温度和阻抗培养液的起始 pH 值作为变化因子,研究这两个因素变化对初级模型中参数(最大生长速率比 μ_m)的影响。选用多项式模型为

$$Y = m + a_1 X_1 + a_2 X_2 + a_3 X_1^2 + a_4 X_1 X_2 + a_5 X_2^2 \quad (2)$$

式中 X_1, X_2 ——温度、pH 值编码值

m ——常数 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 ——各项系数

在不同的温度(5~30℃)、pH 值(5~8.8)条件下,按照 1.2.1 节中所述方法得到 Gompertz 方程各个参数的估计值。分别对阻抗法和平板计数法得到的 μ_m 进行分析,建立多项式方程。试验采用二元二次旋转设计,因素水平编码如表 1 所示,试验方案如表 2 所示。

表 1 因素水平编码

Tab. 1 Independent factors and levels

编码	因素	
	温度 $x_1/^\circ\text{C}$	pH 值 x_2
-1.414	5.0	5.00
-1	8.7	5.56
0	17.5	6.90
1	26.3	8.24
1.414	30.0	8.80

表 2 二元二次旋转组合设计

Tab. 2 Rotational combination design

试验序号	X_1	X_2
1	1	1
2	1	-1
3	-1	1
4	-1	-1
5	1.414	0
6	-1.414	0
7	0	1.414
8	0	-1.414
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0

1.2.3 模型的验证

采用残差图、偏差度和准确度来定性、定量评价所建立模型的可靠性。残差图即残差值和预测值的散点坐标图,该图能够直观地展现实测值与预测值的差距。

偏差度 B_f 是用来衡量预测值与实测值之间的相对平均偏差,其计算公式为

$$B_f = 10 \sum \lg(P/O)/n \quad (3)$$

式中 P ——预测值,即采用建立的模型获得的最大生长速率比 μ_m

O ——实测值,即试验获得的最大生长速率比 μ_m

$B_f > 1$ 表明,平均而言,预测值大于实测值,即会出现“假危险”(fail dangerous)结果; $B_f < 1$ 表明,平均而言,预测值小于实测值,即会出现“假安全”(fail safe)结果^[8]。

考虑到各组试验结果间的正负抵消作用,引入了准确度 A_f 来衡量预测值和实测值之间的偏差程度,其计算公式为

$$A_f = 10^{\sum \lg(P/O)1/n} \quad (4)$$

$A_f = 1$ 时,说明预测值与实测值完全一致,该值越大,说明模型准确度越低^[11]。

2 结果与讨论

2.1 预测模型的建立与验证

2.1.1 平板计数法

用 Gompertz 方程对洛菲不动杆菌生长曲线进行拟合,并计算其在不同 pH 值、温度条件下的最大生长速率比 μ_{ml} 。按照表 2 的试验方案,试验结果如表 3 所示,表中 μ_{ml} 是由 Gompertz 方程中各参数计算获得的。方差分析如表 4 所示。利用 SAS 统计软件进行二次多项回归拟合,得到洛菲不动杆菌最大生长速率比 μ_{ml} 对数值的多项式方程为

$$Y_1 = -0.251814 + 0.106266X_1 - 0.030355X_2 - 0.119999X_1^2 + 0.023162X_1X_2 - 0.089546X_2^2 \quad (5)$$

表 3 洛菲不动杆菌最大生长速率比 μ_{ml} 试验结果

Tab.3 Observed value of μ_{ml} of *A. lwoffii*

X_1	X_2	μ_{ml}
1	1	0.216
1	-1	0.203
-1	1	0.043
-1	-1	0.076
1.414	0	0.251
-1.414	0	0.039
0	1.414	0.122
0	-1.414	0.229
0	0	0.265
0	0	0.239

由表 4 ($R^2 = 0.9455$) 可知,模型 $F = 13.88$, $P_r = 0.0123 < 0.05$, 回归是显著的;复相关系数 $R^2 = 0.9455$, 表明该模型能解释洛菲不动杆菌最大生长速率比 μ_{ml} 随温度、pH 值变化的关系;失拟 $F = 3.51$, $P_r = 0.3697 > 0.05$, 说明拟合不足是不显著的,因此该模型是合适的,可用于洛菲不动杆菌最大

生长速率比 μ_{ml} 在不同温度、pH 值条件下的预测。

通过响应面分析,可求得洛菲不动杆菌的最佳生长环境为温度 22.9℃, pH 值 6.68, 在该条件下, $\mu_{ml} = 0.276$ 。

表 4 洛菲不动杆菌最大生长速率比回归方程方差分析

Tab.4 ANOVA for the regression model on maximal specific growth rate of *A. lwoffii*

变异源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值 ($P_r > F$)
回归	5	0.067542	0.013508	13.88	0.0123
误差	4	0.003892	0.000973	-	-
失拟	3	0.003554	0.001185	3.51	0.3697
纯误差	1	0.000338	0.000338	-	-
总和	9	0.071434	-	-	-

根据式 (5), 可计算出特定温度、pH 值条件下 μ_{ml} 的预测值。图 1 是残差值-预测值散点图, 由该图可知, 残差值的绝对值小于 0.04, 且随机分布于 $[-0.04, 0.04]$ 这一带状区域之间, 说明该回归方程对试验数据的拟合是良好的。

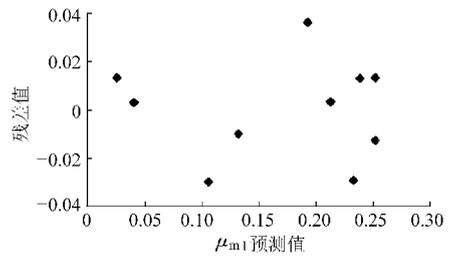


图 1 洛菲不动杆菌最大生长速率比 μ_{ml} 的残差图

Fig.1 Residual plot of μ_{ml} of *A. lwoffii*

图 2 显示的是洛菲不动杆菌最大生长速率比 μ_{ml} 的实测值与预测值坐标图, 各点均匀分布于 45° 线两侧, 根据实测值和预测值可计算出偏差度 $B_f = 0.981$, 准确度 $A_f = 1.148$ 。

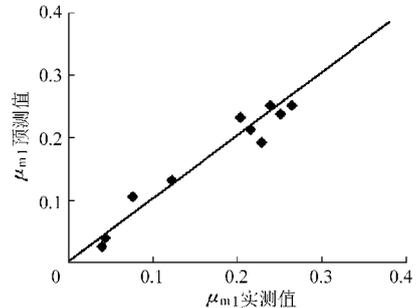


图 2 洛菲不动杆菌最大生长速率比 μ_{ml} 的实测值与预测值

Fig.2 Observed and predicted μ_{ml} of *A. lwoffii*

当 B_f 在 0.9 ~ 1.05 范围内时, 模型良好; 当 B_f 在 0.7 ~ 0.9 或 1.06 ~ 1.15 范围内时, 模型可接受; 当 $B_f > 1.15$ 或 $B_f < 0.7$ 时, 模型不可接受。准确度 A_f 越大, 说明模型的准确度越低。它的评判则没有既定的准则, 但有一个经验法则, 即: 每一个变量会

带来约 10% 的误差, 如有两个变量, 则当 $1 \leq A_f \leq 1.2$ 时, 模型的准确性较好^[8]。

由此可知, 预测值与实测值的相对平均偏差小于 2%, 绝对偏差小于 20%, 说明该多项式模型能够较好地预测洛菲不动杆菌在阻抗培养基中的生长动态, 但有时可能会出现“假安全”的结果, 即预测值小于实测值的情况。

2.1.2 阻抗法

用 Gompertz 方程对洛菲不动杆菌的电导变化曲线进行拟合, 并计算其在不同 pH 值、温度条件下的最大增长率比 μ_{m2} 。试验结果如表 5 所示, 方差分析如表 6 所示。利用 SAS 统计软件进行二次多项回归拟合, 得到电导最大增长率比对数值的多项式方程为

$$Y_2 = -1.339030 + 0.450935X_1 - 0.075964X_2 - 0.129232X_1^2 + 0.174218X_1X_2 + 0.054138X_2^2 \quad (6)$$

表 5 电导最大增长率比的试验结果

Tab.5 Observed value of μ_{m2} of conductance

X_1	X_2	μ_{m2}
1	1	0.152
1	-1	0.113
-1	1	0.017
-1	-1	0.028
1.414	0	0.060
-1.414	0	0.012
0	1.414	0.031
0	-1.414	0.054
0	0	0.044
0	0	0.041
0	0	0.053

表 6 电导最大增长率比回归方程方差分析

Tab.6 ANOVA for the regression model on maximal specific growth rate of conductance

变异源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值($P_r > F$)
回归	5	0.899420	0.179884	6.33	0.0320
误差	5	0.142065	0.028413	-	-
失拟	3	0.135471	0.045157	13.70	0.0688
纯误差	2	0.006594	0.003297	-	-
总和	10	1.041485	-	-	-

由表 6 ($R^2 = 0.8636$) 可知, 模型 $F = 6.33$, $P_r = 0.0320 < 0.05$, 回归是显著的; 复相关系数 $R^2 = 0.8636$, 表明该模型能较好地解释含洛菲不动杆菌培养液的电导最大增长率比对数值随温度、pH 值变化的关系; 失拟 $F = 13.7$, $P_r = 0.0688 > 0.05$, 说明拟合不足是不显著的, 因此该模型是合适的, 可用

于电导最大增长率比在不同温度、pH 值条件下的预测。

根据式 (6), 可计算出特定温度、pH 值条件下 μ_{m2} 的预测值。图 3 是残差值-预测值散点图, 由该图可知, 残差值的绝对值小于 0.06, 随机分布于 $[-0.036, 0.058]$ 这一带状区域之间, 3 个残差值较大的点分布于横坐标 $[0.08, 0.10]$ 区间内。图 4 是实测值与预测值坐标图, 当电导最大增长率比 μ_{m2} 的实测值小于 0.06 时, 坐标点均匀分布于 45° 线两侧且偏离小; $\mu_{m2} \geq 0.06$ 时, 3 个点与 45° 线有较大偏离。3 个偏离较大的点的温度和 pH 值分别为 26.3°C、8.24, 26.3°C、5.56 和 30°C、6.9, 说明在温度较高时, 该二级模型的预测结果不是十分理想, 而在较低温度时 ($\leq 17.5^\circ\text{C}$), 该二级模型的预测效果则较为理想。根据表 5 中的实测值和预测值计算获得偏差度 $B_f = 0.999$, 准确度 $A_f = 1.222$ 。由此可知, 虽然预测值与实测值的相对平均偏差小于 0.1%, 但绝对偏差略大于 20%。

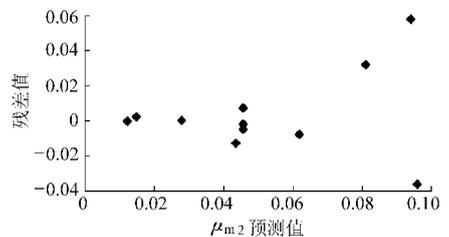


图 3 阻抗培养基(含洛菲不动杆菌)电导最大增长率比 μ_{m2} 的残差图

Fig.3 Residual plot of conductance of medium

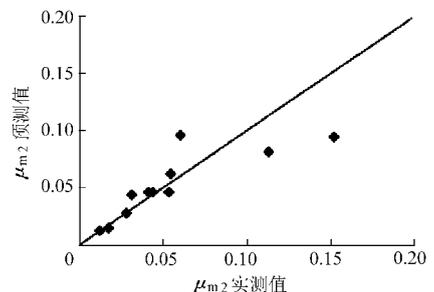


图 4 阻抗培养基(含洛菲不动杆菌)电导最大增长率比 μ_{m2} 的实测值与预测值

Fig.4 Observed μ_{m2} of conductance vs predicted μ_{m2} of conductance

用 Gompertz 方程对洛菲不动杆菌的导纳变化曲线进行拟合, 并计算其在不同 pH 值、温度条件下的最大增长率比 μ_{m3} 。试验结果如表 7 所示, 方差分析如表 8 所示。利用 SAS 统计软件进行二次多项回归拟合, 得到导纳最大增长率比对数值的多项式方程

$$Y_3 = -1.312636 + 0.409399X_1 - 0.087560X_2 - 0.142673X_1^2 + 0.150049X_1X_2 + 0.067721X_2^2 \quad (7)$$

表 7 导纳最大增长速率比的试验结果
Tab. 7 Observed value of μ_{m3} of admittance

X_1	X_2	μ_{m3}
1	1	0.142
1	-1	0.118
-1	1	0.020
-1	-1	0.033
1.414	0	0.057
-1.414	0	0.013
0	1.414	0.033
0	-1.414	0.059
0	0	0.046
0	0	0.043
0	0	0.058

由表 8 ($R^2 = 0.8421$) 可知,模型 $F = 5.33$, $P_r = 0.0450 < 0.05$, 回归是显著的;复相关系数 $R^2 = 0.8421$, 表明该模型能较好地解释含洛菲不动杆菌培养液的导纳最大增长速率比对数值随温度、pH 值变化的关系;失拟 $F = 9.68$, $P_r = 0.0950 > 0.05$, 说明拟合不足是不显著的, 因此该模型是合适的, 可用于导纳最大增长速率比在不同温度、pH 值条件下的预测。

表 8 导纳最大增长速率比回归方程方差分析
Tab. 8 ANOVA for the regression model on maximal specific growth rate of admittance

变异源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值($P_r > F$)
回归	5	0.767572	0.153514	5.33	0.0450
误差	5	0.143878	0.028776	-	-
失拟	3	0.134612	0.044871	9.68	0.0950
纯误差	2	0.009267	0.004633	-	-
总和	10	0.911450	-	-	-

根据式(7), 可计算出特定温度、pH 值条件下 μ_{m3} 的预测值。图 5 是残差值-预测值散点图, 由该图可知, 残差值的绝对值小于 0.055, 且随机分布于 $[-0.033, 0.052]$ 这一带状区域之间, 但有 3 个残差值较大的点均分布于横坐标 $[0.08, 0.1]$ 区间内。图 6 是实测值与预测值坐标图, 当导纳最大增长速率比 μ_{m3} 的实测值小于 0.06 时, 坐标点均匀分布于 45° 线两侧且偏离小; $\mu_{m3} \geq 0.06$ 时, 3 个点与 45° 线有较大偏离。与电导最大增长速率比情况相同, 该模型在较低温度时 ($\leq 17.5^\circ\text{C}$), 该二级模型的预测效果则较为理想。根据表 7 中的实测值和预测值计算获得偏差度 $B_f = 1.000$, 准确度 $A_f = 1.242$ 。由此可知, 预测值与实测值的相对平均偏差为 0, 但绝对

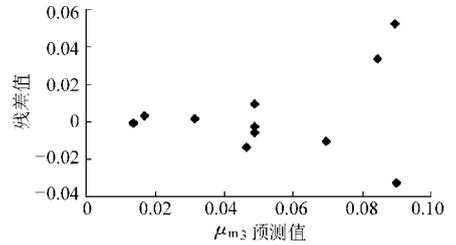


图 5 阻抗培养基(含洛菲不动杆菌)导纳最大增长速率比 μ_{m3} 的残差图

Fig. 5 Residual plot of admittance of medium

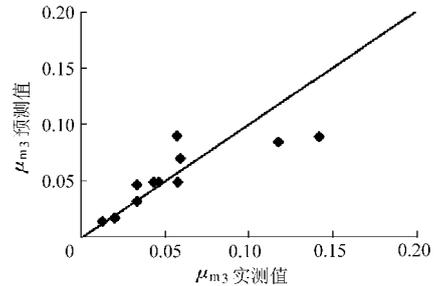


图 6 阻抗培养基(含洛菲不动杆菌)导纳最大增长速率比 μ_{m3} 的实测值与预测值

Fig. 6 Observed μ_{m3} of admittance vs predicted μ_{m3} of admittance

偏差为 24.2%。

2.2 阻抗法与平板计数法的相关关系

为研究洛菲不动杆菌最大生长速率比与电导、导纳最大增长速率比的相关关系, 应用 SPSS 软件的 Curve Estimation 功能, 采用线性模型、二次方模型、立方模型、S 模型、指数模型、Logistic 模型等对表 9 中的数据进行回归拟合, 根据各回归模型的相关系数平方值 (R^2) 和拟合效果图, 选择最理想的回归模型。

表 9 不同条件下的洛菲不动杆菌最大生长速率比和电导、导纳最大增长速率比

Tab. 9 μ_m of *A. lwoffii*, conductance and admittance under different conditions

X_1	X_2	洛菲不动杆菌最大生长速率比	电导最大增长速率比	导纳最大增长速率比
1	1	0.216	0.152	0.142
1	-1	0.203	0.113	0.118
-1	1	0.043	0.017	0.02
-1	-1	0.076	0.028	0.033
1.414	0	0.251	0.06	0.057
-1.414	0	0.039	0.012	0.013
0	1.414	0.122	0.031	0.033
0	-1.414	0.229	0.054	0.059
0	0	0.265	0.044	0.046
0	0	0.239	0.041	0.043

2.2.1 与电导最大增长速率比的相关关系

以电导最大增长速率比为自变量,洛菲不动杆菌最大生长速率比为因变量,用上述模型进行曲线估计,发现立方模型的相关系数平方值和拟合效果图最为理想,立方模型为

$$y = -0.139 + 13.584x - 146.841x^2 + 478.456x^3 \quad (8)$$

该模型的相关系数平方(R^2)值为 0.859,修正后的 R^2 值为 0.789。由方差分析可知(表 10),该回归方程的 F 值为 12.204, $P_r = 0.006 < 0.01$;从图 7 回归方程模型图中也可看出该模型的拟合程度较好。

表 10 回归方程方差分析
Tab.10 ANOVA results

	平方和	自由度	均方	F	P_r
回归	0.061	3	0.020	12.204	0.006
残差	0.010	6	0.002		
总和	0.071	9			

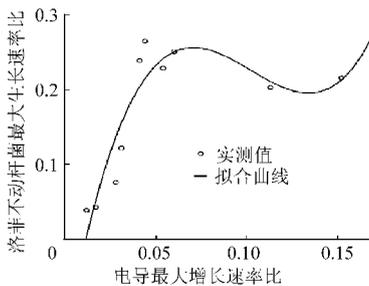


图 7 洛菲不动杆菌最大生长速率比与电导最大增长速率比关系模型拟合图

Fig.7 Cubic model plot of μ_m of *A. lwoffii* and conductance

2.2.2 与导纳最大增长速率比的相关关系

以导纳最大增长速率比为自变量,洛菲不动杆菌最大生长速率比为因变量,用不同模型进行曲线估计,发现立方模型的相关系数平方值(R^2)和拟合效果图最为理想,立方模型为

$$y = -0.148 + 13.036x - 133.191x^2 + 416.04x^3 \quad (9)$$

该模型的相关系数平方值为 0.806,修正后的

R^2 值为 0.71;由方差分析可知(表 11),该回归方程的 F 值为 8.334, $P_r = 0.015 < 0.05$;从图 8 回归方程模型图中也可看出该模型的拟合程度较好。

表 11 回归方程方差分析表
Tab.11 ANOVA results

	平方和	自由度	均方	F	P_r
回归	0.058	3	0.019	8.334	0.015
残差	0.014	6	0.002		
总和	0.071	9			

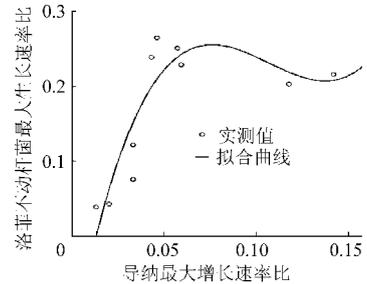


图 8 洛菲不动杆菌最大生长速率比与导纳最大增长速率比关系模型拟合图

Fig.8 Cubic model plot of μ_m of *A. lwoffii* and admittance

3 结论

(1)建立的洛菲不动杆菌最大生长速率比、电导最大增长速率比和导纳最大增长速率比的二次回归方程都是有效的;经验证,洛菲不动杆菌最大生长速率比多项式模型的可靠性优于另两个模型,能有效地预测温度和 pH 值变化对洛菲不动杆菌最大生长速率比的影响。电导、导纳最大增长速率比的回归方程在一定范围内的预测效果较为理想,当因变量增大时,预测值与试验值有一定的偏差。

(2)电导、导纳最大增长速率比与洛菲不动杆菌最大生长速率比之间的相关关系可用立方模型来描述。通过曲线估计拟合得到的立方方程的相关系数分别为 0.859 和 0.806。比较两个模型,电导最大增长速率比与洛菲不动杆菌最大生长速率比的关系模型优于导纳模型。

参 考 文 献

- 1 SN/T 1749—2006 鲜乳中菌落总数快速测定 阻抗法[S]. 2006.
- 2 Borch E, Wallentin C. Conductance measurements for data generation in predictive modeling [J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 1993, 12(3~5): 286~290.
- 3 Linderg Wallentin C, Borch E. Predicting the aerobic growth of *Y. enterocolitica* O:3 at different pH-values, temperatures and L-lactate concentrations using conductance measurements[J]. International Journal of Food Microbiology, 1994, 22(2~3): 141~153.

- Journal of North China Electric Power University, 2009, 36(2): 74 ~ 79. (in Chinese)
- 12 陈彤. 垃圾焚烧过程飞灰中二噁英的分布特性及控制技术初步研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
 - 13 de Toro F, Ortega J, Fernandez J, et al. PSFGA: a parallel genetic algorithm for multiobjective optimization [C]. Proceedings 10th Euromicro Workshop on Parallel, Distributed and Network-based Processing, 2002: 384 ~ 391.
 - 14 姜健, 赵杰, 臧希喆. 基于并列选择遗传算法的多机器人协作探测 [J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(5): 1 218 ~ 1 221.
Jiang Jian, Zhao Jie, Zang Xizhe. Coordinated multi-robot exploration based on parallelism selection genetic algorithm [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(5): 1 218 ~ 1 221. (in Chinese)
 - 15 Carlos A, Coello Coello. An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques [R]. Technical Report Lania-RD-98-08, Laboratorio Nacional de Informatica Avanzada (LANIA), 1998.
 - 16 周泽宇, 刘书敏, 蔡德耀, 等. 垃圾焚烧中二噁英脱除方法及机理 [J]. 能源与环境, 2009(1): 80 ~ 81.
 - 17 丁历威, 李凤瑞. 城市垃圾焚烧发电技术及其污染物控制策略 [J]. 浙江电力, 2010, 29(2): 55 ~ 58.
Ding Liwei, Li Fengrui. Technology features and pollution control strategy of MSW incineration [J]. Zhejiang Electric Power, 2010, 29(2): 55 ~ 58. (in Chinese)
 - 18 石谊双. 硫对垃圾焚烧过程中二噁英生成的抑制作用的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
Shi Yishuang. Experimental study on inhibitory effect of sulfur on the formation of poly-chlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzofurans during waste incineration process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
 - 19 李永华, 胡小翠, 郭建, 等. 生活垃圾混烧生物质特性研究 [J]. 华东电力, 2009, 37(2): 324 ~ 325.
Li Yonghua, Hu Xiaocui, Guo Jian, et al. Study of characteristics of MSW combustion with biomass [J]. East China Electric Power, 2009, 37(2): 324 ~ 325. (in Chinese)
 - 20 解海卫. 城市生活垃圾与生物质混烧发电及烟气净化的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
Jie Haiwei. Study on co-combustion power generation of municipal solid waste with biomass and flue gas purification [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
 - 21 GB18485—2001 生活垃圾焚烧污染控制标准 [S]. 2001.
-

(上接第 135 页)

- 4 Koutsoumanis K, Tassou C C, Taoukis P S, et al. Modelling the effectiveness of a natural antimicrobial on *Salmonella enteritidis* as a function of concentration, temperature and pH, using conductance measurements [J]. Journal of Applied Microbiology, 1998, 84(6): 981 ~ 987.
- 5 Neumeyer K, Ross T, McMeekin T A. Development of a predictive model to describe the effects of temperature and water activity on the growth of spoilage *pseudomonads* [J]. International Journal of Food Microbiology, 1997, 38(1): 45 ~ 54.
- 6 Nerbrink E, Borch E, Blom H, et al. A model based on absorbance data on the growth rate of *Listeria monocytogenes* and including the effects of pH, NaCl, Na-lactate and Na-acetate [J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 47(1 ~ 2): 99 ~ 109.
- 7 Heo S K, Lee H S, Ha S D. A predictive model for the growth rate of *Bacillus cereus* in broth by response surface methodology [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2009, 14(2): 202 ~ 206.
- 8 Zwietering M H, Jongenburger I, Rombouts F M. Modeling of the bacterial growth curve [J]. Appl. Environ. Microbiol., 1990, 56: 1 875 ~ 1 881.
- 9 Koutsoumanis K, Nychas G J E. Application of a systematic experimental procedure to develop a microbial model for rapid fish shelf life predictions [J]. International Journal of Food Microbiology, 2000, 60(2 ~ 3): 171 ~ 184.
- 10 Valeroa A, Pérez-Rodríguez F, Carrasco E, et al. Modelling the growth boundaries of *Staphylococcus aureus*: effect of temperature, pH and water activity [J]. International Journal of Food Microbiology, 2009, 133(1 ~ 2): 186 ~ 194.
- 11 Mellefont L A, McMeekin T A, Ross T. Performance evaluation of a model describing the effects of temperature, water activity, pH and lactic acid concentration on the growth of *Escherichia coli* [J]. International Journal of Food Microbiology, 2003, 82(1): 45 ~ 58.