

不同pH值生物聚合物无固相钻井液中 巴氏芽孢杆菌的生长预测模型

李之军^{1,2}, 杜泽华^{1,2}, 霍力焯^{1,2}, 武新凯^{1,2}

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术为地质钻探行业解决破碎地层孔壁失稳难题提供了有益借鉴,探究微生物在钻井液环境条件下的生长规律是成功应用MICP技术解决破碎地层孔壁失稳的首要前提。因此,本研究检测了pH值为7.0、7.4、7.8、8.2、8.6、9.0、9.4、9.8、10.0条件下巴氏芽孢杆菌在生物聚合物(XC)钻井液中的生长情况,对其生长规律进行分析和拟合,并构建了其生长预测模型。结果表明:在实验设定的pH值条件下,巴氏芽孢杆菌均能正常生长。综合比较各模型的回归系数、均方误差、赤池信息量准则、准确因子和偏差因子可知,修正Gompertz模型更适合描述巴氏芽孢杆菌在XC钻井液中的生长情况,Arrhenius模型更适合描述pH值对XC钻井液中巴氏芽孢杆菌的最大比生长率的影响规律。研究结果为利用MICP技术稳定破碎地层孔壁的成功应用奠定了良好的理论基础和提供了科学依据。

关键词:破碎地层;孔壁失稳;巴氏芽孢杆菌;MICP技术;生长预测模型;生物聚合物钻井液

中图分类号:P634;TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2023)S1-0106-07

Predictive model for the growth of *Bacillus sp.* in biopolymer solid-free drilling fluids at different pH conditions

LI Zhijun^{1,2}, DU Zehua^{1,2}, HUO Lixuan^{1,2}, WU Xinkai^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection

(Chengdu University of Technology), Chengdu Sichuan 610059, China;

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology,

Chengdu Sichuan 610059, China)

Abstract: Microbially induced calcium carbonate deposition (MICP) technology provides a useful reference for the geological drilling industry to solve the problem of borehole wall instability in fractured formations. Exploring the growth pattern of microorganisms under the environmental conditions of drilling fluids is the primary prerequisite for the successful application of MICP technology to solve borehole wall instability in fractured formations. Therefore, in this study, we examined the growth of *Bacillus sp.* in XC drilling fluid at pH 7.0, 7.4, 7.8, 8.2, 8.6, 9.0, 9.4, 9.8, and 10.0, analyzed and fitted its growth pattern, and constructed its growth prediction model. The results showed that *Bacillus sp.* could grow normally under the experimentally set pH conditions. A comprehensive comparison of regression coefficient, mean square error, red pool information criterion, accuracy factor and bias factor of the models showed that the modified Gompertz model was more suitable to describe the growth of *Bacillus sp.* in XC drilling fluid,

收稿日期:2023-05-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.016

基金项目:国家自然科学基金青年基金“微生物无固相钻井液固壁作用与机理研究”(编号:41702388)

第一作者:李之军,男,汉族,1984年生,副教授,博士,主要从事钻井液及井壁稳定理论与技术方面科研与教学工作,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,lizhijun2014@cdut.edu.cn.

引用格式:李之军,杜泽华,霍力焯,等.不同pH值生物聚合物无固相钻井液中巴氏芽孢杆菌的生长预测模型[J].钻探工程,2023,50(S1):106-112.

LI Zhijun, DU Zehua, HUO Lixuan, et al. Predictive model for the growth of *Bacillus sp.* in biopolymer solid-free drilling fluids at different pH conditions[J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):106-112.

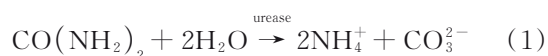
and the Arrhenius model was more suitable to describe the influence law of pH on the maximum specific growth rate of *Bacillus sp.* in XC drilling fluid. The results of the study lay a good theoretical foundation and provide a scientific basis for the successful application of using MICP technology to stabilize the borehole wall of fractured formations.

Key words: fractured strata; borehole wall instability; *Bacillus sp.*; MICP technique; growth prediction model; biopolymer drilling fluid

0 引言

破碎地层是地质钻探工程常见的复杂地层之一,此类地层具有裂隙发育、胶结性差、破碎不完整、强度低等特点,在钻进过程中,极易发生孔壁失稳^[1-3],对钻孔施工造成了巨大困难。优质钻井液体系具有良好的稳定孔壁能力,但钻遇破碎地层时,在孔内钻柱、钻具的机械扰动和钻井液渗入地层产生的润滑作用下,其护壁效果十分有限^[4-6]。因此,亟需探索一种钻井液新技术解决破碎地层孔壁失稳难题。研究表明,增强破碎地层的胶结力,提升孔壁完整性,是维持该类地层孔壁稳定的技术关键。

微生物诱导碳酸钙沉积(MICP)技术为解决破碎地层孔壁失稳问题提供了很好的借鉴。MICP利用微生物产生的脲酶催化尿素分解产生 CO_3^{2-} ,与周围环境中的 Ca^{2+} 相互作用,产生具有胶结作用的碳酸钙沉淀。其化学反应见式(1)和式(2):



研究发现,利用巴氏芽孢杆菌构建的微生物钻井液体系,可以诱导碳酸钙产生沉淀,胶结碎石土成型,并且有一定的无侧限抗压强度和更低的渗透性^[8-9]。但巴氏芽孢杆菌的生长会受到pH值变化的影响^[10],在钻探过程中,钻井液的pH值会产生波动,但总体处在碱性环境中^[11]。因此,探究巴氏芽孢杆菌在不同pH值条件下的生长规律并构建其生长预测模型具有重要意义。

常用的生长预测模型分为一级模型和二级模型,一级生长预测模型主要有Logistic模型、Baranyi模型和Gompertz模型等,二级生长预测模型有平方根模型、Arrhenius模型和Cardinal模型等。在食品、医疗等领域中,利用生长预测模型预测、分析得到的微生物生长规律,为食品的制造和加工,药物研发提供了重要的科学依据^[12-14]。

因此,本文将通过实验,研究生物聚合物(XC)无固相钻井液中,在30℃、不同pH值(7.0、7.4、7.8、

8.2、8.6、9.0、9.4、9.8、10.0)条件下,巴氏芽孢杆菌的生长规律。采用不同的生长预测模型,对巴氏芽孢杆菌生长的实验数据进行拟合,利用回归系数、均方误差、赤池信息量准则、准确因子和偏差因子等为判别标准,探究适合描述巴氏芽孢杆菌在不同pH值条件下的生长预测模型,以此为利用MICP技术稳定破碎地层孔壁的成功应用奠定良好的理论基础并提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

本文使用巴氏芽孢杆菌菌种采购自中国微生物菌种查询中心[冻干粉,编号DSM33(2015-01-07)],其他材料见表1。

表1 实验用其他材料

材料	来源	规格型号
生物聚合物(XC)	山东圣煌化工产品有限责任公司	
酪蛋白胨、大豆蛋白胨	北京索莱宝科技有限公司	生物试剂
氯化钠	福晨(天津)化学试剂有限公司	化学纯
氢氧化钠	西陇化工股份有限公司	化学纯
去离子水	成都市科隆化学品有限公司	

1.2 实验方法

1.2.1 巴氏芽孢杆菌的活化与培养

取1L去离子水,在其中加入5g大豆蛋白胨、15g酪蛋白胨、5g氯化钠并搅拌均匀,后用1mol/L的氢氧化钠溶液滴定至其pH为7.3,得到巴氏芽孢杆菌液体培养基。使用高温高压灭菌锅(上海博迅实业有限公司, YXQ-SG46-280S)对液体培养基在1.05MPa、110℃条件下进行灭菌10min,后放置于超净工作台(苏州安泰空气技术有限公司, SW-CJ1FD),待其冷却至室温。

用无菌移液枪吸取少量灭菌后的液体培养基于

安瓿瓶中,待瓶内乳白色粉末全部变为悬浮状后,将其全部转移至灭菌的装有液体培养基的三角瓶中,用医用纱布封口。放置于恒温振荡培养箱(上海知楚仪器有限公司,ZHTY-50s)内,在30℃、200 r/min条件下培养24 h后,观察到液体培养基明显浑浊,说明活化成功。后进行2次继代培养,获得菌液。

1.2.2 XC无固相钻井液配置及其性能参数

将3 g XC加入到1 L去离子水中,充分搅拌,获得0.3%(质量/体积,下同)浓度的XC无固相钻井液,其性能参数见表2。

表2 XC无固相钻井液的性能参数

浓度/ %	密度/ (g·cm ⁻³)	漏斗粘 度/s	表观粘度/ (mPa·s)	塑性粘度 (mPa·s)	动切力/ Pa
0.3	0.99	29.76	13.75	7.0	6.90

1.2.3 巴氏芽孢杆菌接种

将5 mL菌液、45 mL灭菌的液体培养基、50 mL浓度为0.6%的无固相钻井液注入锥形瓶中混合均匀,用1 mol/L的氢氧化钠溶液将混合液体的pH值调节到实验设定值,用医用纱布封口后置于振荡培养箱中,30℃、200 r/min条件下培养24 h。

1.2.4 巴氏芽孢杆菌数量检测

每隔2 h取样5 mL于比色皿中,放入分光光度计(上海尤尼柯仪器有限公司,UV2000),在600 nm波长时的吸光度(OD_{600})来测定菌种数量,因此,直接采用 OD_{600} 值来表示菌种浓度。每次实验重复3次,取平均值作为结果。

1.3 生长预测模型

1.3.1 一级生长预测模型

一级生长预测模型是用来描述微生物的数量与时间的关系。本文采用修正的Gompertz模型和Logistic模型拟合不同pH下巴氏芽孢杆菌的生长规律,对比拟合精度,选择更优模型用于描述巴氏芽孢杆菌生长情况。

1.3.1.1 修正Gompertz模型

修正Gompertz模型如式(3)所示:

$$N(t) = A + C \cdot \exp\left[-\exp\left(\frac{2.718\mu_{\max}(\lambda - t)}{C} + 1\right)\right] \quad (3)$$

式中: $N(t)$ ——在时间 t 时微生物数量; A ——随时

间无限减小时的渐近值(相当于初始菌种数量); C ——时间无限增加时菌种的增量,即初始菌种数和最大菌种数之间的差值; μ_{\max} ——微生物的最大比生长速率; λ ——延滞期时长。

1.3.1.2 Logistic模型

Logistic模型如式(4)所示:

$$N(t) = \frac{A}{1 + \exp\left[\frac{4\mu_{\max}}{A}(\lambda - t) + 2\right]} \quad (4)$$

式中: $N(t)$ ——在时间 t 时微生物数量; A ——最大菌种数量, OD_{600} ; μ_{\max} ——微生物的最大比生长速率; λ ——延滞期时长。

1.3.2 二级生长预测模型

二级生长预测模型用于描述一级模型参数与单个或多个环境变量之间的关系,包括Arrhenius模型、平方根模型等^[15]。本研究选用这2种模型拟合pH与最大比生长速率 μ_{\max} 之间的关系,从而构建二级生长预测模型。

1.3.2.1 Arrhenius模型

Arrhenius模型表达式见式(5):

$$\ln \mu_{\max} = a + b/H + c/H^2 \quad (5)$$

为方便模型应用,将式(5)变形为式(6):

$$\sqrt{\mu_{\max}} = \sqrt{\exp(a + b/H + c/H^2)} \quad (6)$$

式中: μ_{\max} ——微生物的最大比生长速率; a 、 b 、 c ——模型系数; H ——pH值。

1.3.2.2 平方根模型

平方根模型是由Ratkowsky等建立的一种简便的经验模型^[16],用于描述温度与微生物最大生长比速率。Zwietering等^[17]研究认为,pH对微生物生长速率的影响可以用平方根模型来反映,得到pH与 μ_{\max} 间的平方根模型,见式(7):

$$\sqrt{\mu_{\max}} = \alpha(H - H_{\min}) \quad (7)$$

式中: μ_{\max} ——微生物的最大比生长速率; α ——模型系数; H ——pH值; H_{\min} ——微生物生长速率为零时的pH值。

1.3.3 模型拟合评价

本文采用均方误差(MSE)、赤池信息量准则(AIC)和回归系数(R^2)等3种指标来对比评价一级生长预测模型的拟合精确度,其中MSE、AIC值越小, R^2 越接近于1,则表示模型拟合越精确。采用MSE、 R^2 、准确因子(A_f)和偏差因子(B_f)等4种指标

来对比评价二级生长预测模型的拟合精确度,其中MSE值越小, R^2 、 A_f 、 B_f 值越接近于1,则表示模型拟合越精确^[18]。评价公式见式(8)~式(12):

$$MSE = \frac{SSE}{N} \quad (8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (9)$$

$$AIC = N \times \ln\left(\frac{SSE}{N}\right) + 2(P+1) + \frac{2(P+1)(P+2)}{d_f - 2} \quad (10)$$

$$A_f = 10 \frac{\sum_{i=1}^N \left| \lg\left(\frac{\hat{y}_i}{y_i}\right) \right|}{N} \quad (11)$$

$$B_f = 10 \frac{\sum_{i=1}^N \lg\left(\frac{\hat{y}_i}{y_i}\right)}{N} \quad (12)$$

式中: y_i ——实际观测值; \hat{y} ——模型拟合值; N ——数据点个数; P ——模型中参数个数; d_f ——自由度; $SSE = \sum_i (\hat{y} - y_i)^2$; $SST = \sum_i (\hat{y} - \bar{y})^2$; \bar{y} ——实际观测值均值。

2 结果与讨论

2.1 巴氏芽孢杆菌在液体培养基中的生长情况

巴氏芽孢杆菌在液体培养基中的生长情况见图1。

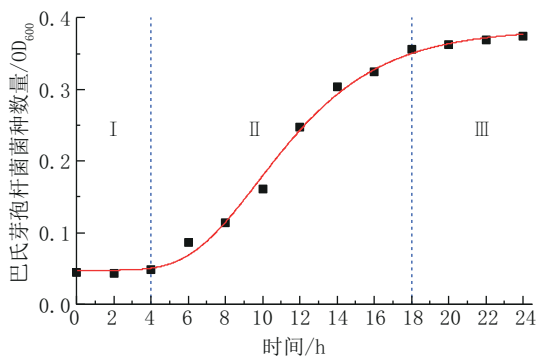


图1 巴氏芽孢杆菌在培养基中的生长情况

图1中,I、II、III分别对应了巴氏芽孢杆菌在培养基中生长的延滞期、对数生长期和稳定期。前4 h内,巴氏芽孢杆菌处于延滞期,主要以个体增长为主,数量变化不明显。4 h后,巴氏芽孢杆菌进入对数生长期,经过延滞期的适应和物质积累,开始迅速繁殖,数量增长明显,且此时数量增长不受底物限制,只受其生理机能影响。18 h后,巴氏芽孢杆菌进

入稳定期,随着底物的消耗,其生长速率明显放缓,其数量达到最高且趋于稳定,细胞代谢产物积累达到最高,芽孢开始形成^[19]。

2.2 巴氏芽孢杆菌在XC无固相钻井液中的生长情况

在XC无固相钻井液中,巴氏芽孢杆菌在不同pH值条件下的生长情况见图2。

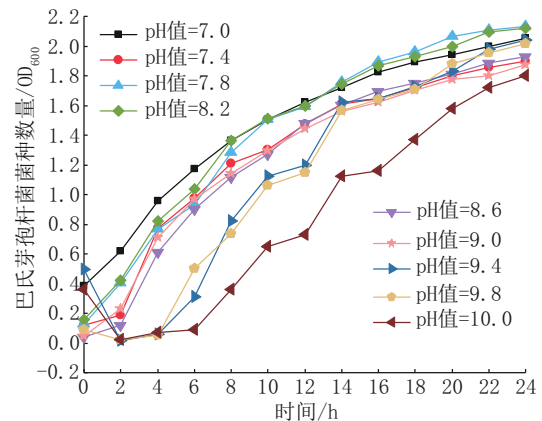


图2 巴氏芽孢杆菌在不同pH值条件下的生长情况

由图2可知,pH值在7.0~9.0范围内,巴氏芽孢杆菌并没有明显的延滞期,直接进入对数生长期,20 h后有进入稳定期的趋势,24 h内并未进入衰退期,整体的生长曲线接近,生长速率都随着时间增长下降。pH值在9.4~10.0范围内,巴氏芽孢杆菌受到碱性环境的影响,在经过2~4 h的延滞期后开始进入对数生长期,22 h后逐渐进入稳定期,但生长速率比pH值在7.0~9.0条件下的巴氏芽孢杆菌更高,整体的菌种数量更低。随着pH值的升高,巴氏芽孢杆菌在24 h时的数量并未表现为逐渐下降的趋势,而是表现为波动下降。pH值在7.0~10.0范围内,pH值的升高对巴氏芽孢杆菌的生长有较明显的影响。

2.3 一级生长预测模型

采用修正Gompertz模型和Logistic模型对不同pH值条件下巴氏芽孢杆菌的生长规律进行拟合,拟合曲线见图3。

由图3可知,2种模型可以较好地拟合出巴氏芽孢杆菌在0.3%XC无固相钻井液的生长状况,曲线反映出巴氏芽孢杆菌24 h内的生长与时间呈正相关关系。通过对比2种一级生长预测模型拟合参数(表3),选择出能够更加精确描述各pH条件下巴氏

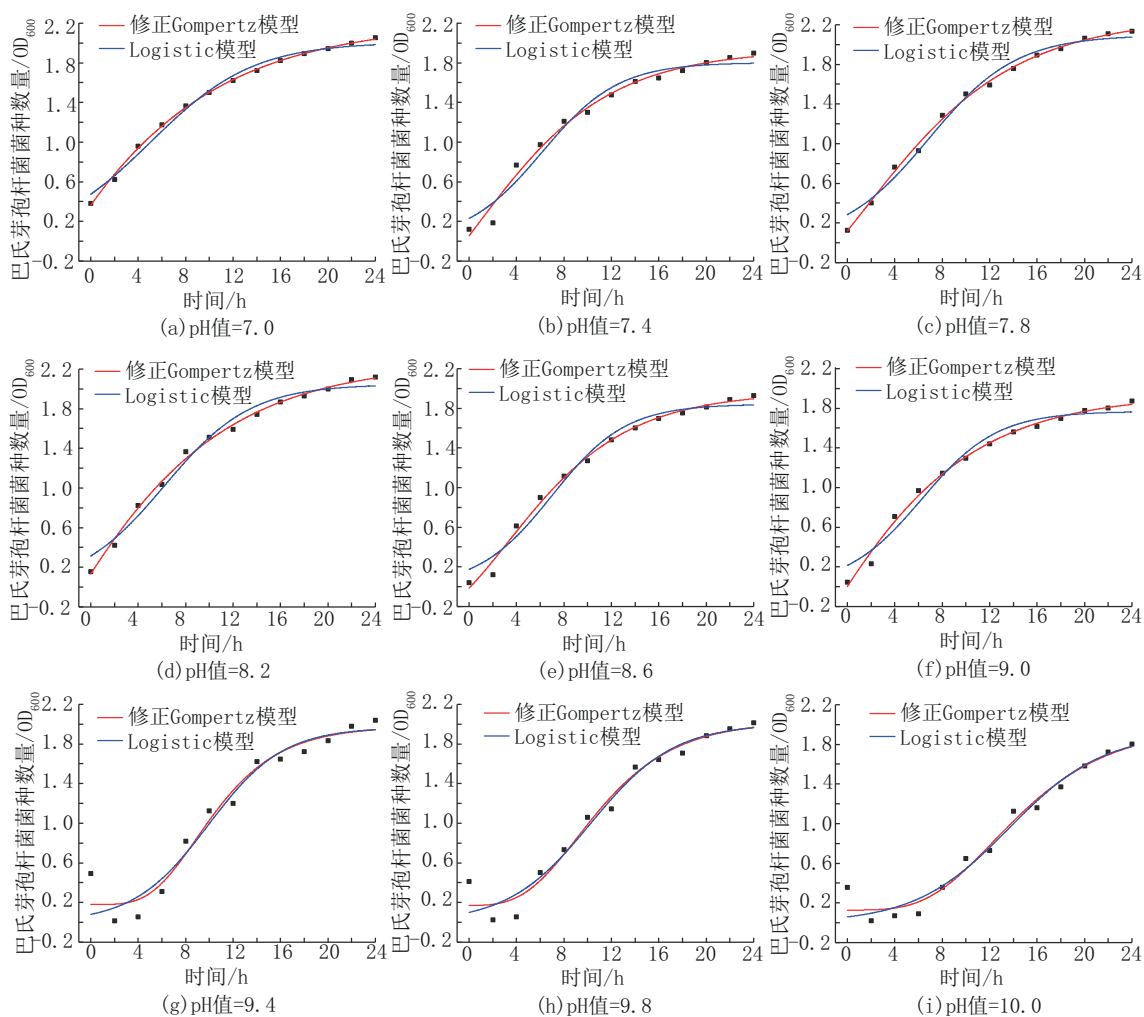


图3 巴氏芽孢杆菌在各pH值下一级生长预测模型拟合曲线

芽孢杆菌生长规律的一级生长预测模型。

由表3可知,pH值为7.0、7.4、7.8、8.2、8.6、9.0时,修正Gompertz模型的MSE、AIC值更小, R^2 更接近1,且都高于0.98,说明以上条件下修正Gomp-

ertz模型可以更好地描述巴氏芽孢杆菌在XC无固相钻井液的生长状况。pH值为9.4、9.8、10.0时,修正Gompertz模型的MSE值更小, R^2 更接近1,尽管Logistic模型的AIC值更小,但二者极其接近,所以

表3 各pH值条件下巴氏芽孢杆菌一级生长预测模型拟合参数

pH值	修正Gompertz模型			Logistic模型		
	MSE	R^2	AIC	MSE	R^2	AIC
7.0	0.000371	0.99816	-84.1145	0.002706	0.98791	-63.8584
7.4	0.004513	0.98205	-51.6377	0.009923	0.96447	-46.9675
7.8	0.001036	0.99671	-70.77	0.005122	0.98536	-55.5667
8.2	0.001227	0.99572	-68.5702	0.006664	0.97909	-52.1444
8.6	0.002425	0.99175	-59.7129	0.008345	0.97445	-49.2198
9.0	0.001872	0.99248	-63.0785	0.008761	0.96831	-48.587
9.4	0.018537	0.95038	-33.2724	0.025029	0.9397	-34.9403
9.8	0.012916	0.96428	-37.9693	0.016591	0.9587	-40.2859
10.0	0.009551	0.96726	-41.8935	0.012622	0.96106	-43.8399

认为修正 Gompertz 模型的拟合更优。由此可知,在 XC 无固相钻井液中,巴氏芽孢杆菌在不同 pH 值条

件下,修正 Gompertz 模型更适合描述其生长规律。各 pH 值条件下其一级生长预测模型见表 4。

表 4 巴氏芽孢杆菌在各 pH 值条件下的一级生长预测模型

pH 值	预测模型	表达式
7.0	修正 Gompertz	$N(t) = -5.80559 + 8.014 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.12737 \times (-22.4508 - t)}{8.014} + 1)]$
7.4	修正 Gompertz	$N(t) = -0.78989 + 2.72346 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.14785 \times (-5.3437 - t)}{2.72346} + 1)]$
7.8	修正 Gompertz	$N(t) = -0.73275 + 3.00865 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.15266 \times (-5.5678 - t)}{3.00865} + 1)]$
8.2	修正 Gompertz	$N(t) = -2.56674 + 4.83611 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.15172 \times (-12.92903 - t)}{4.83611} + 1)]$
8.6	修正 Gompertz	$N(t) = -0.42322 + 2.38727 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.15034 \times (-2.51697 - t)}{2.38727} + 1)]$
9.0	修正 Gompertz	$N(t) = -1.95087 + 3.89056 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.19527 \times (-10.05199 - t)}{3.89056} + 1)]$
9.4	修正 Gompertz	$N(t) = -0.179 + 1.79929 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.17279 \times (5.03696 - t)}{1.79929} + 1)]$
9.8	修正 Gompertz	$N(t) = 0.16821 + 1.86668 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.15253 \times (4.61742 - t)}{1.86668} + 1)]$
10.0	修正 Gompertz	$N(t) = 0.12724 + 1.86133 \times \exp[-\exp(2.718 \times \frac{0.12369 \times (6.72533 - t)}{1.86133} + 1)]$

2.4 二级生长预测模型

一级生长预测模型可以准确描述巴氏芽孢杆菌在 XC 无固相钻井液中指定 pH 值条件下的生长情况,但不能直接反映出 pH 值对与生长的影响规律。因此采用 Arrhenius 模型和平方根模型分别拟合巴氏芽孢杆菌的最大比生长速率与 pH 值之间的关系,拟合结果如图 4 所示,拟合参数如表 5 和表 6 所示。

由表 5 知,平方根模型拟合得到的 $R^2 < 0.5$,不

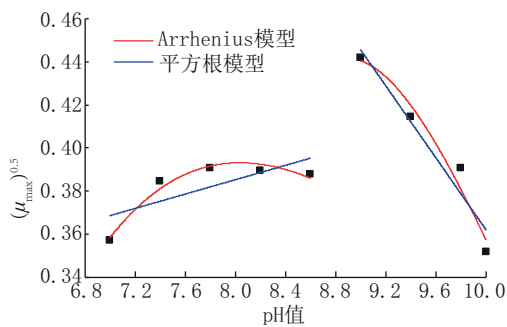


图 4 不同 pH 值条件下巴氏芽孢杆菌二级生长预测模型拟合曲线

表 5 pH 值为 7.0~8.6 时的拟合参数

预测模型	MSE	R ²	A _f	B _f
Arrhenius	2.04 × 10 ⁻⁶	0.93377	1.00551	0.99997
平方根	2.75 × 10 ⁻⁵	0.40608	1.02043	0.99975

表 6 pH 值为 9.0~10.0 时的拟合参数

预测模型	MSE	R ²	A _f	B _f
Arrhenius	1.21 × 10 ⁻⁵	0.89212	1.01299	0.99837
平方根	2.04 × 10 ⁻⁵	0.90930	1.01710	0.99827

能很好地描述最大生长比速率与 pH 值间的关系,而 Arrhenius 模型的 MSE 值更小, R²、A_f、B_f 值更接近 1,可知 Arrhenius 模型可以更好地描述 pH 值与最大比生长速率之间的关系,因而得到二级生长预测模型如式(13)。

$$\sqrt{\mu_{\max}} = \sqrt{\exp(-10.32442 + \frac{135.89083}{T} - \frac{545.895}{T^2})} \tag{13}$$

由表 6 可知,2 个模型的拟合都较优且十分接近,平方根模型的 R² 略高于 Arrhenius 模型,但

MSE 、 A_i 更大, B_i 更小, 综合选择 Arrhenius 模型描述巴氏芽孢杆菌最大生长比速率与 pH 值间的关系, 得到二级生长预测模型如式(14)。

$$\sqrt{\mu_{\max}} = \sqrt{\exp(-35.89991 + \frac{609.16129}{T} - \frac{2707.37405}{T^2})} \quad (14)$$

3 结论

本文通过实验及理论研究, 探讨在 XC 无固相钻井液中, 巴氏芽孢杆菌在不同 pH 值条件下的生长规律, 并通过模型拟合分析, 得到了在不同 pH 值条件下, 巴氏芽孢杆菌的一级生长预测模型和二级生长预测模型, 为利用 MICP 技术维护破碎地层孔壁稳定的成功应用奠定了良好的理论基础和提供了科学依据。取得的研究结论如下:

(1) 通过检测 pH 值为 7.0、7.4、7.8、8.2、8.6、9.0、9.4、9.8、10.0 条件下巴氏芽孢杆菌在 XC 钻井液中的生长情况, 发现巴氏芽孢杆菌数量随着 pH 值的升高, 表现出波动下降, 在 pH 值为 7.8 时的生长情况最好。

(2) 对巴氏芽孢杆菌在 XC 无固相钻井液中生长规律的拟合显示, 修正 Gompertz 模型更适合作为其一级生长预测模型, 能更准确描述各 pH 值条件下巴氏芽孢杆菌的生长规律; Arrhenius 模型更适合作为其二级生长预测模型, 能更准确描述各 pH 值与最大比生长速率之间的关系。

(3) 本文研究表明, 钻井液 pH 值的变化对巴氏芽孢杆菌的生长情况具有明显的影响, 为了弱化 pH 值对其生长的影响, 甚至使巴氏芽孢杆菌在更高 pH 值条件下能够良好生长, 需要开展巴氏芽孢杆菌耐碱诱导驯化研究工作, 使其在工程应用过程中护壁能力更加稳定。

参考文献:

- [1] 许俊良. 疏松及破碎地层取心新技术[J]. 钻采工艺, 2009, 32(1): 22-23, 26.
- [2] 吴金生, 陈礼仪, 张伟. 破碎松软地层取心钻头孔底流场数值模拟及应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(7): 107-110.
- [3] 李国才. 凤县小梨园矿区复杂地层典型事故钻孔施工技术[J]. 世界有色金属, 2019(6): 296-298.
- [4] 唐林, 罗平亚. 破裂岩体中井壁稳定性分析[J]. 石油钻采工艺,

- 1997, 19(3): 1-5, 105.
- [5] 陈勉, 金衍. 深井井壁稳定技术研究进展与发展趋势[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(5): 28-34.
- [6] 齐恒之, 马德新. 塔河油田三开井段井壁稳定分析及实践[J]. 石油钻探技术, 2005, 33(1): 19-20.
- [7] 胡继良, 陶士先, 纪卫军. 破碎地层孔壁稳定技术的探讨与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(9): 30-32, 64.
- [8] 李之军, 赵淦, 向浩天, 等. 微生物-CMC 无固相钻井液固壁作用与机理初探[J]. 钻探工程, 2021, 48(S1): 261-265.
- [9] 李之军, 朱茂, 智晶子, 等. 微生物无固相钻井液体系构建及其固壁作用机理研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 187-194.
- [10] Gunjo Kim, Janghwan Kim, Heejung Youn. Effect of temperature, pH, and reaction duration on microbially induced calcite precipitation[J]. Applied Sciences, 2018(8): 1127.
- [11] 刘东明, 黄进军, 王瑞莲, 等. 钻井液 pH 值的影响因素研究[J]. 油田化学, 2007, 24(1): 1-4, 29.
- [12] Fazlollah Rezvani, Fatemeh Ardestani, Ghasem Najafpour. Growth kinetic models of five species of Lactobacilli and lactose consumption in batch submerged culture[J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2017, 48(2): 251-258.
- [13] Kasbawati Kasbawati, Mardawati Efri, Samsir Rusni, et al. An appropriate unstructured kinetic model describing the batch fermentation growth of; Debaryomyces hansenii; for xyloitol production using hydrolysis of oil palm empty fruit bunch[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2022, 36(1): 462-471.
- [14] Fuchisawa Yuto, Abe Hiroki, Koyama Kento, et al. Competitive growth kinetics of Campylobacter jejuni, Escherichia coli O157: H7, and Listeria monocytogenes with enteric microflora in a small-intestine model[J]. Journal of Applied Microbiology, 2021, 132(2): 1467-1478.
- [15] Whiting R C. Microbial modeling in foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1995, 35(6): 467-494.
- [16] Ratkowsky D A, Olley J, Memeekin T A, et al. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures[J]. Journal of Bacteriology, 1982, 154(1): 1222-1226.
- [17] Zwietering, MH. Validation of predictive models describing the growth of Listeria monocytogenes[J]. International Journal of Food Microbiology, 1999, 46(2): 135-149.
- [18] Ross T. Indices for performance evaluation of predictive models in food microbiology[J]. Journal of Applied Bacteriology, 1996, 81(5): 501-508.
- [19] 孙斌. 微生物生长曲线方程讨论[J]. 辽阳石油化工高等专科学校学报, 2002(9): 93.

(编辑 李艺)