

文章编号 :0253-2468(2001)-03-0267-04

中图分类号 :X703 ;TP18

文献标识码 :A

硫酸盐还原过程中 SRB 的限制性生态因子的 BP 神经网络建模与仿真

王爱杰,任南琪,甄卫东,林 明,张 颖,周雪飞 (哈尔滨工业大学环境生物技术研究中心,哈尔滨 150090)

摘要:利用 BP 神经网络对产酸脱硫反应器(专利设备,ZL:98240801.3)处理高浓度硫酸盐废水时硫酸盐还原菌(SRB)的限制性生态因子(COD/SO₄²⁻比、pH 值、ALK、SO₄²⁻负荷率)进行建模与仿真,从而实现了多变量函数关系的映射与泛化,并从数学生态学角度定量表征了产酸脱硫微生物生态系统中 SRB 种群的代谢活性与实现生态位。

关键词:硫酸盐还原菌(SRB);限制性生态因子;BP 神经网络;建模;仿真

Model identification and simulink of BPNN on restrictive ecological factors of SRB

WANG Aijie ,REN Nanqi ,ZHEN Weidong ,LIN Ming ZHANG Ying ,ZHOU Xuefei (Harbin Institute of Tchnology , Harbin 150090)

Abstract: This paper put forward a model and simulink of back-propagation neural network (BPNN) on the four restrictive ecological factors (COD/SO₄²⁻ ,pH value ,ALK,SO₄²⁻ loading rate) which affect the ability of sulfacte-reducing of Sulfate Reducing Bacteria (SRB) in the acidogenic-desulfate reactor (patent number :9824080 1. 3) for treating high strength sulfate wastewater. The model presents the realized niche of SRB population and its activity of mechanism in the eco-system of the reactor. The experimental results shows that BPNN has the ability of generalization and corresponding of the multi-parameters.

Key words: sulfate-reducing bacteria (SRB) ,restrictive ecological factors ,back-propagation neural network (BPNN) ,model identification ,simulink

硫酸盐废水厌氧处理系统的实质是一个人工创建的微生物生态系统,认识和揭示硫酸盐还原菌(SRB)的生态学规律可以提高处理系统的水平与能力,因此,SRB的生态学研究成为国内外学者关注的热点^[1-3]。但截止到目前,研究仍处于单因子水平,亟待解决的问题很多^[4-6]。我们承担的国家自然科学基金项目“厌氧处理中硫酸盐还原菌的生理生态学研究”提出“序贯式高浓度硫酸盐废水处理的系统工艺”,专门探讨产酸脱硫反应器(专利设备,ZL:98240801.3)中,限制性生态因子的种类与强度及其量化指标对SRB代谢活性和生理调节的影响,探讨如何利用动力学控制手段,使AB(产酸菌)、SRB和HPA(产氢产乙酸菌)种群建立起协同代谢污染物的“生物链”,建立起SRB种群的实现生态位。这些工作需要定量地描述反应器状态空间中多生态因子对硫酸盐去除过程的控制与影响,而传统的数学手段无法刻划这一多变量到单变量的映射关系。本研究引入BPNN(Back Propagation Neural Network,简称BPNN)^[7]的理论和方法,通过对比试验与计算机仿真的结果,证明采用BP神经网络模型可以很好地实现多变量函

收稿日期:2000-05-22;修订日期:2000-11-06

基金项目:国家自然科学基金项目(批准号:59978012)资助

作者简介:王爱杰(1972-),女,讲师(博士)

数关系的映射与泛化,并可实现对 SRB 多维生态位的建模与仿真.

1 原型试验的原理与方法

采用的产酸脱硫反应器为 CSTR 型一体化装置(发明专利号 98240801.3),内设气-液-固三相分离器和搅拌器,总容积 20.7 L,反应区有效容积 9.63 L,温度控制在 34 ± 1 ,试验底物为按一定比例投加了硫酸盐的糖蜜生产废水.通过连续流试验考察不同 COD/SO_4^{2-} 比(C/S)和硫酸盐负荷率梯度条件下,硫酸盐的去除率和产气量稳定期,产酸脱硫反应器中微生物群落的生态特征,顶极群落的组成,SRB 与 AB 和 HPA 的种群间关系等.

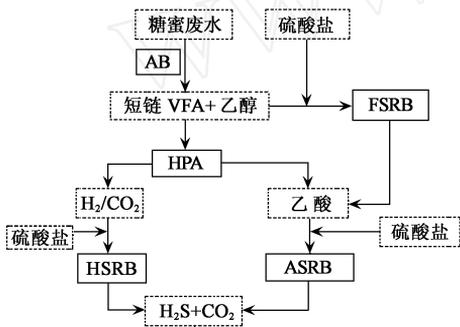


图 1 产酸脱硫微生物生态系统中的“生物链式”种群间关系

Fig. 1 Bio-chain in acidogenic de-sulfate eco-system

产酸脱硫反应器内的微生物群落结构组成,可以简化为三类特征性种群—SRB、AB 和 HPA,种群间的关系模型如图 1 所示.3 种群构成了协同代谢硫酸盐有机废水的完整“生物链”,只要生态条件允许,即生态因子具有最优的组合,底物可被彻底降解为 H_2S 和 CO_2 .在产酸脱硫反应器这一密闭的小生境中,影响微生物群落变化及代谢产物组成的非生物因子主要有 COD/SO_4^{2-} 、pH 值、碱度(ALK)、温度、底物浓度及硫酸盐容积负荷与污泥负荷,生物因子主要有中间代谢产物 H_2S 、氧化还原电位(ORP)和氢分压等.其中, COD/SO_4^{2-} 比、pH 值、ALK 与硫酸盐容积负荷既是限制性生态因子,它们对 SRB 的影响体

现在:(1)质的方面,决定 SRB 种群在反应器中的适应能力、生长和活性,即决定其实现生态位;(2)量的方面,决定 SRB 的种群动态,即种群在时间与空间上的变动规律和生态演替.

原型试验按不同的 COD/SO_4^{2-} 比划分为 4 个运行阶段,每一阶段按硫酸盐负荷率梯度递增运行至稳定期,控制进水的碱度以维持反应系统一定的 pH 值和 ALK.各阶段启动期至稳定期 4 因子随着 SRB 种群动态而呈现明显的变化规律,稳定期均获得 85%—90% 的硫酸盐去除率.仅从硫酸盐去除率看,是限制性生态因子彼此联系、相互促进、相互制约而综合作用于 SRB 的结果,较高的去除率指示着 SRB 的活跃代谢和优势地位,而量化限制性生态因子的综合作用恰恰定量描述了 SRB 的多维生态位.

2 BP 神经网络模型的建立

产酸脱硫微生物生态系统具有多变量、强耦合、非线性的特点,传统的辨识方法和优化策略显得无能为力,而许多学者的工作均已证实 BP 神经网络所实现的映射可以一致逼近紧集上的连续函数或以范数的意义逼近紧集上的平方可积函数.这种任意逼近能力使它在非线性系统建模和控制方面体现出强大的优越性,用于系统建模方法简单,不需要被辨识对象的阶次结构等先验知识,是一种普遍适用的辨识方法^[8].采用 BP 网络建立起 SRB 代谢硫酸盐的过程中限制性生态因子与硫酸盐去除率的映射关系,可以揭示由生态因子直接作用和 SRB 通过生理代谢的内平衡与反馈调节二次作用所反映出的 SRB 种群的实现生态位.

2.1 神经元与激活函数的选取

图 2 给出一个基本的 BP (Back-Propagation Network) 神经元模型. 它具有 R 个输入, 每个输入都通过一个适当的权值与下一级相连.

其中 $a = F(w \cdot p, b)$, F 为所要选定的神经元激活函数. 由于所选的生态因子多在 $[0, 1]$ 区间上, 输出的硫酸盐去除率也在此区间上, 所以激活函数选取对数 S 形状函数^[9], 即

$$F = \frac{1}{1 + \exp[-(u + b)]}$$

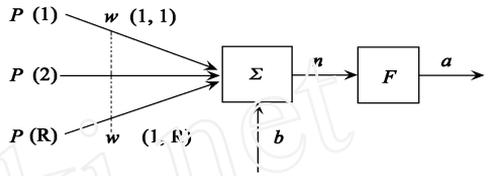


图 2 BP 神经元模型
Fig.2 Model of neuron

2.2 网络的拓扑关系

一些学者提出增加神经元的数目、隐含层数可以提高 BP 非线性前馈网络的逼近精度, 但往往以训练速度和稳定性下降为代价, 因而合适的隐含层数和神经元的数目是达到解决问题的关键. 试验结果证明, 我们构建的网络拓扑关系可以很好地实现所要的逼近与泛化的效果, 同时训练速度很高. 其网络拓扑模型如图 3. 图中每个节点是一个 BP 神经元; 第一个隐含层含 10 个神经元; 第二个隐含层含 5 个神经元; 每个神经元除了与输入端有连接权值外, 自带一个可调整的偏差 b .

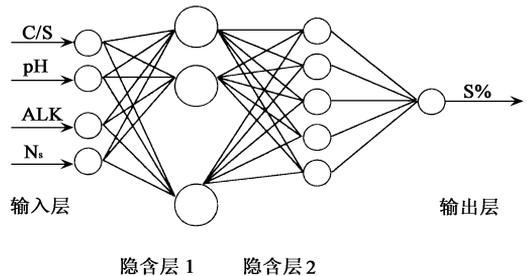


图 3 BP 网络拓扑关系
Fig.3 Topological relation of BPNN

2.3 BP 学习算法与网络训练

众所周知学习速率 r 对 BP 网络的学习、训练有很大的影响, r 过大可导致网络的振荡, 甚至不收敛; r 过小训练速度又太慢. 诚然, 目前很多学者提出了自适应学习速率以修正这一算法, 但效果并不明显. 本研究的网络训练开始人为选定一个较大的 r 值, 观察误差下降曲线, 当发生振荡时, 实时存储振荡前的训练结果, 调小 r 值, 再继续训练. 这样做不仅大大加速了训练的过程, 而且提高了训练结果的精度 (图 4、图 5). 同时采用附加动能训练方法使网络越过局部最小收敛于全局最小. 作者已编有程序可实时监控网络的学习与训练过程.

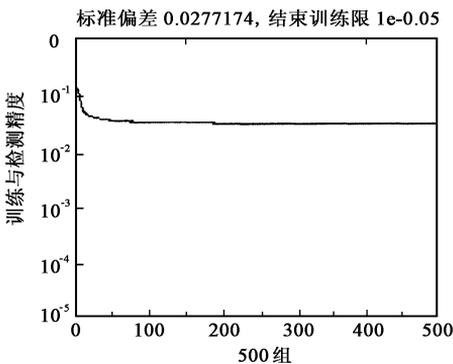


图 4 最初训练的误差下降曲线
Fig.4 Error descending curve of primang training

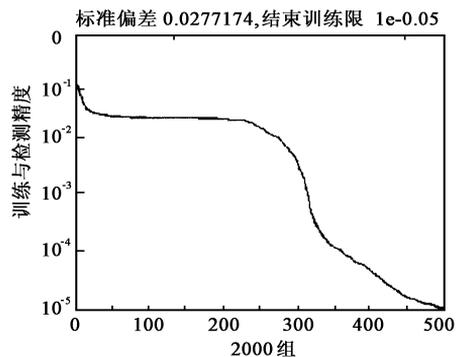


图 5 最终训练的误差下降曲线
Fig.5 Error descending curve of training

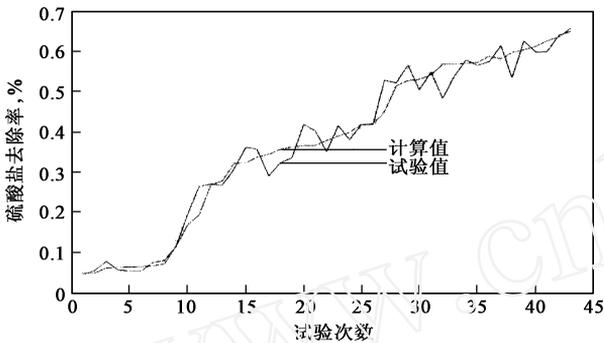


图 6 BP 网络输出值与原型试验值的比较

Fig. 6 Comparison between experimental value and BPNN value

4 结论

(1) 本研究将 BP 神经网络的理论与方法引入硫酸盐废水处理过程的微生物生态学研究, 对影响 SRB 种群代谢的限制性生态因子与硫酸盐去除率之间的关系进行了逼近与泛化, 取得了较好的效果。

(2) 通过样本实验数据即可建立较为准确的生态因子仿真模型, 模型的适用性取决于样本试验数据的完备及准确。为污水处理过程的在线控制提供了一条可行的途径。

(3) 由于 BP 神经网络具有良好的泛化能力, 可以在计算机上实现某些设计或运行参数的选取过程, 作到提高效率, 节省人力、物力、财力。

参考文献:

- [1] Larry L. Barton Sulfate-reducing bacteria[M]. New York and London: Plenum Press. 1995. 150—180
- [2] Widdel F, Bak F. Gram-negative mesophilic sulfate-reducing bacteria, in: The Prokaryotes: A Handbook on the Biology of Bacteria: Ecophysiology, Isolation, Identification, Applications, 2nd ed., Volume IV[Z]. Now York. Springer-Verlag, 1992, 3352 - 3378
- [3] Fauque G, Le Gall J, Barton L L. Sulfate-reducing bacteria[M]. London: Variations in Autotrophic Life Academic Press, 1991. 271 - 338
- [4] Hansen T A. Carbon metabolism of sulfate-reducing bacteria[M]. Berlin: The Sulfate-Reducing Bacteria: Contemporary Perspectives Springer-verlag, 1993. 21 - 40
- [5] 贺延龄. 废水的厌氧生物处理[M]. 北京: 中国轻工业出版社. 1998
- [6] 左剑恶, 胡纪萃. 含硫酸盐有机废水的厌氧生物处理[J]. 环境科学, 1996, 12(3): 69
- [7] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社. 1998
- [8] 田 禹. 基于人工神经网络的臭氧生物活性炭系统建模研究[D]. 哈尔滨建筑大学博士学位论文. 1996
- [9] 汤忠镭. 神经网络模型在微生物工程中的应用[J]. 微生物通报, 1997, 24(1): 57—59

3 试验结果与计算机仿真的对比分析

取出若干具有代表性的试验样本值, 作为训练的学习样板, 然后由计算机仿真计算测试集中的四变量, 对比计算值与试验值的误差, 给出硫酸盐去除率的误差曲线, 如图 6 所示。

图 7 是 BP 神经网络对 4 个限制性生态因子的仿真模型, 通过建模, 可以将数据信息转化为物理图形, 获得系统变化的规律与趋势, 指导反应器的运行管理与其生态学规律的研究。

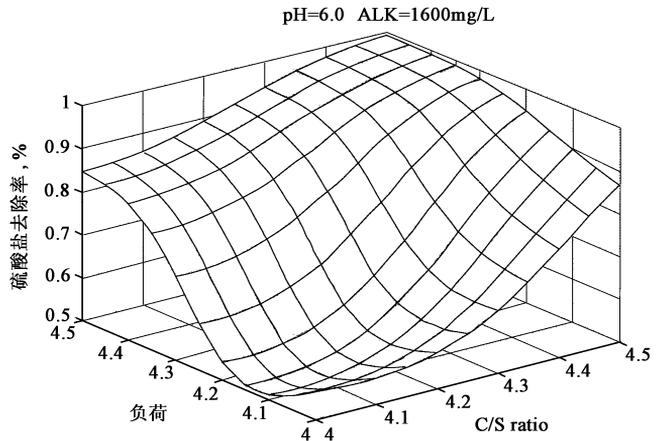


图 7 BP 神经网络的四因子仿真模型

Fig. 7 Simulink model of four eco-factors by BPNN