

# 基于模型分析的水驱油藏硫酸盐还原菌生物竞争抑制技术

刘建华<sup>1</sup>, 李庚<sup>1</sup>, 李宗田<sup>2</sup>, 郑承纲<sup>2</sup>

1. 中国石油渤海钻探工程有限公司第一钻井分公司, 天津 300280
2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要** 利用生物竞争(Lotka-Volterra)数学模型,以油藏条件下硝酸盐还原菌(NRB)和硫酸盐还原菌(SRB)的菌群演替为对象,研究了两种群竞争性生态关系。利用该数学模型,通过平衡点求解方式,探索了在人工补给硝酸盐电子受体条件下硝酸盐还原菌-硫酸盐还原菌的群态变化规律。在模型分析的基础上,获得了在硝酸盐补给条件下,油藏中NRB和SRB经菌体增殖、底物竞争而实现的稳态抑制系统。同时,该模型还很好地解释了在硝酸盐耗尽时,NRB抑制SRB系统的瓦解和崩溃。通过对NRB-SRB两种群生态系统临界点的求算,获得模拟油藏条件下精确的稳态抑制期规律和计算方法。本研究成果可用于指导油田生产中NRB抑制SRB技术的硝酸盐补给浓度和具体工艺实施。

**关键词** 硝酸盐还原菌;硫酸盐还原菌;生物竞争;Lotka-Volterra模型

中图分类号 X172

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.23.010

## Biological Competitive Inhibition Technique of Sulfate Reducing Bacteria in Oil Reservoir based on Model Analysis

LIU Jianhua<sup>1</sup>, LI Geng<sup>1</sup>, LI Zongtian<sup>2</sup>, ZHENG Chenggang<sup>2</sup>

1. No.1 Drilling Branch, CNPC Bohai Drilling Engineering Co. Ltd., Tianjin 300280, China
2. Sinopec Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China

**Abstract** The biological competition (Lotka-Volterra) mathematic model is employed to establish the bio-inhibition system; the population succession of Nitrate Reducing Bacteria (NRB) and Sulfate Reducing Bacteria (SRB) under the oil reservoir conditions is taken as the subject, the competitive ecology relation of these two microflora is studied. The equilibrium point solution is used to explore the microflora population variations of NRB and SRB on the condition that the artificial addition of nitrate was adopted as an electron acceptor. Based on the Lotka-Volterra model, the steady-state bio-inhibition system is established between NRB and SRB. In the meantime, when the nitrate is depleted, the bio-inhibition system is collapse and finally breakdown is explained quite well by the model. According to the two critical points of NRB-SRB microflora bio-system, the precise steady-state inhibition period and the nitrate concentration under the condition of oil reservoir are able to be calculated and controlled. The results could greatly improve NRB-SRB bio-inhibition technology and accurately direct the implementation of practical process in the oilfield, which has great significance in the crude oil production.

**Keywords** nitrate reducing bacteria; sulfate reducing bacteria; biological competition; Lotka-Volterra model

### 0 引言

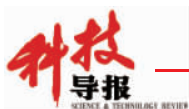
硫酸盐还原菌(Sulfate Reducing Bacteria, SRB)是油田生

产活动中的一类重要的有害微生物,其引发的油田生产系统腐蚀和污染是长期困扰各油田的难题。在油田生产系统中,

收稿日期:2013-01-23;修回日期:2013-03-01

基金项目:国家自然科学基金项目(E0403/51104106)

作者简介:刘建华,高级工程师,研究方向为油田HSE技术开发和管理,电子信箱:liujianhua1964@yeah.net;郑承纲(通信作者),博士,研究方向为油田化学基础,电子信箱:cg1982zheng@gmail.com



由于硫酸盐还原菌的活动(产生酸性的 H<sub>2</sub>S 产物)会导致广泛的金属材料的腐蚀,包括油水井套管、各类管道、金属储罐和原油处理设备装置等。不仅如此,在联合站脱水系统中常见黑色老化油(主要成分为胶态硫化物),也是因硫酸盐还原菌大量繁殖而代谢 H<sub>2</sub>S 造成的金属腐蚀产物,由于其相对密度介于油水之间而悬浮在油水界面,增强了油水混和物的导电性,导致电脱水器运行不稳或跳闸,甚至造成电脱水器极板击穿。每年因硫酸盐还原菌造成的油田生产系统的停产检修和设备更换的经济损失无法估算<sup>[1,2]</sup>。

为了避免 SRB 对油田生产的危害,必须对其在油田生产系统中的数量和代谢活性予以严格的控制。目前,硫酸盐还原菌的防治方法主要包括物理方法、化学方法和生物方法。硫酸盐还原菌生物防控方法的机理是利用某些与 SRB 在代谢规律上相似的微生物,如硝酸盐还原菌(Nitrate Reducing Bacteria, NRB)、亚硝酸盐还原菌(Nitrite Reducing Bacteria, 本文中为讨论方便,将其与硝酸盐还原菌列为同一群体)等,由于 NRB 和 SRB 生存环境极为相似,属于厌氧或兼性厌氧微生物,这些微生物都主要以环境中的挥发性脂肪酸(Volatile Fatty Acids, VFA)为底物生长,因此,它们之间存在着对基质和生存空间的竞争;不同的是,NRB 的代谢并不产生 H<sub>2</sub>S,而是通过呼吸还原硝酸盐形成 N<sub>2</sub>,对环境和整个油气生产系统无害。利用硝酸盐还原菌、亚硝酸盐还原菌的生物竞争抑制技术<sup>[3]</sup>,不仅可以通过改变氧化还原电位影响 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>还原酶活性,阻碍 HSO<sub>3</sub><sup>-</sup>的进一步还原<sup>[4]</sup>,还能通过阻止 SRB 获得所需营养底物而抑制其产 H<sub>2</sub>S 的活性<sup>[5]</sup>。生物竞争抑制技术可以通过添加硝酸盐/亚硝酸盐激活油藏中原本存在的 NRB<sup>[6,7]</sup>,使其对 SRB 的生长代谢产生竞争性抑制作用;也可以利用外源添加的 NRB 来抑制 SRB 的数量和活性。

利用生物竞争抑制技术防控水驱油藏中 SRB 研究虽然早有报道<sup>[8]</sup>,但在油田实际操作中尚处于探索和研究阶段,主要原因在于:①对现有油藏微生物的认识还比较有限,只有少数的微生物(包括 NRB)能够人工培养;②对环境中微生物生命活动和生物竞争控制技术的规律认识不足,无法准确地指导工业生产。鉴于此,本研究提出利用竞争型生态系统的数学模型,分析 SRB 生物竞争性控制技术中两菌群的动态变化规律,从而为指导该技术的工业应用奠定理论基础<sup>[9]</sup>。

### 1 生态系统中两个种群竞争的数学模型

在一个生态系统中,分别以 A,B 表示生态系统中的两个不同的种群,它们通过对环境中同一资源的争夺而表现出竞争生态关系<sup>[10-13]</sup>。借助最常用和有效的两种群相互作用的 Lotka-Volterra 模型描述它们的数量关系:

$$\begin{cases} \frac{dN_{[A]}}{dt} = \mu_{[A]} = r_{[A]}N_{[A]} \left( 1 - \frac{N_{[A]}}{N_{[A-max]}} - \frac{c_{[B \rightarrow A]}N_{[B]}}{N_{[B-max]}} \right) \\ \frac{dN_{[B]}}{dt} = \mu_{[B]} = r_{[B]}N_{[B]} \left( 1 - \frac{N_{[B]}}{N_{[B-max]}} - \frac{c_{[A \rightarrow B]}N_{[A]}}{N_{[A-max]}} \right) \end{cases} \quad (1)$$

$N_{[A]} > 0, N_{[B]} > 0, c_{[B \rightarrow A]} > 0, c_{[A \rightarrow B]} > 0$

其中,  $N_{[A]}, N_{[B]}$  分别为两个种群的密度;  $\mu_{[A]}, \mu_{[B]}$  分别为两个种群的增殖速率;  $N_{[A-max]}, N_{[B-max]}$  分别为两个种群在该生态系统中理论上可达到的最大种群密度;  $r_{[A]}, r_{[B]}$  分别为两个种群的内禀增长率;  $c_{[A \rightarrow B]}, c_{[B \rightarrow A]}$  分别为两个种群相互间的竞争因素,称为竞争作用系数。基于生态系统的意义和两种群间相互竞争的生态关系,限定在  $N_{[A]} > 0, N_{[B]} > 0, c_{[A \rightarrow B]} > 0, c_{[B \rightarrow A]} > 0$  前提下进行讨论,式(1)反映了种群内部及种群间的竞争性关系。显然,该群态存在极限情况  $N_{[A]}$  或者  $N_{[B]}$  等于 0, 此时,上述模型即可简化为 Logistic 模型:

$$\frac{dN}{dt} = \mu = rN \left( 1 - \frac{N}{N_{[max]}} \right) \quad (2)$$

为了掌握竞争群态内不同种群的变化规律,本文并不计算该方程组的精确积分解,而是选择利用平衡点求解的方式研究菌群的动态变化过程,以获得该生态系统所能达到的平衡状态:

$$\begin{cases} \frac{dN_{[A]}}{dt} = \mu_{[A]} = 0 \\ \frac{dN_{[B]}}{dt} = \mu_{[B]} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

将方程组(1)、(3)联立,获得如下方程组:

$$\begin{cases} L_1: \frac{N_{[A]}}{N_{[A-max]}} + \frac{c_{[B \rightarrow A]}N_{[B]}}{N_{[B-max]}} = 1 \\ L_2: \frac{N_{[B]}}{N_{[B-max]}} + \frac{c_{[A \rightarrow B]}N_{[A]}}{N_{[A-max]}} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

方程(4)中  $L_1$  和  $L_2$  分别表示 A,B 两物种同时达到种内竞争和种间竞争条件种群密度平衡点时的平衡曲线。根据上述方程,可以将同一生态系统中处于竞争关系的两种种群的平衡状态区分为 4 种情形(图 1)。

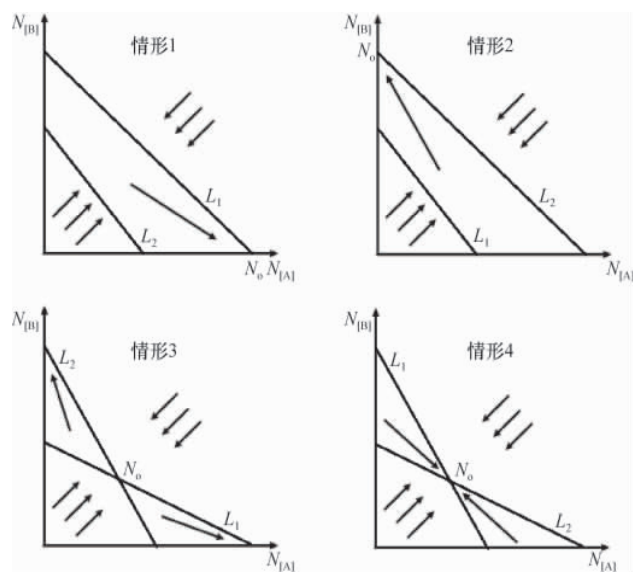


图 1 两种群竞争型模型

Fig. 1 Competitive model between two species

情形 1: 当  $c_{[A \rightarrow B]} > 1, c_{[B \rightarrow A]} < 1$  时,即种群 A 对 B 的作用效果显著,超过种群 A 对其自身种群的影响,而种群 B 对 A 的作用较弱,甚至低于其对自身种群的竞争效应。该情形下,无论两

个种群的初始菌种密度如何,最终种群 A 都将达到该生态系统所能支持的最大种群密度  $N_{[A-max]}$ ,并在该系统中稳定存在。

情形 2:当  $c_{[A-B]} < 1, c_{[B-A]} > 1$  时,与情形 1 相反,即种群 B 对 A 的作用效果显著,超过种群 B 对其自身种群的影响,而种群 A 对 B 的作用较弱。在该情形下,无论两个种群的初始菌种密度如何,最终种群 B 都将达到该生态系统所能支持的最大种群密度  $N_{[B-max]}$ ,并在该系统中稳定存在。

情形 3:当  $c_{[A-B]} > 1, c_{[B-A]} > 1$  时,表明种群 A、B 对彼此的作用效果都非常显著,当初始种群密度均较低时,两个种群密度都会同时增加,反之则会减少,该生态系统的平衡状态取决于初始时刻两种种群的密度情况,即当初始种群浓度偏离  $N_0$  时,可能会出现两种平衡状态,即  $(N_{[A-max]}, 0)$  或  $(0, N_{[B-max]})$ ,而  $N_0$  点为不稳定平衡点。

情形 4:当  $c_{[A-B]} < 1, c_{[B-A]} < 1$  时,表明种群 A、B 对彼此的作用效果均较弱,该生态系统中两种种群的最终密度会达到平衡点  $N_0$ ,该点又被称为稳定平衡点。

## 2 基于模型分析的生物控制技术

### 2.1 SRB 稳态抑制体系的建立

在油藏微生态系统中,NRB 和 SRB 同时利用相同底物 VFA 作为碳源和能源物质生存,由于氧化还原电位控制和底物竞争优势,NRB 可在添加硝酸盐作为电子受体时竞争性抑制硫酸盐还原菌<sup>[4]</sup>。假设油藏获得足够浓度的硝酸盐补给,则油藏中 NRB 与 SRB 的生态关系满足上述竞争模型中的情形 1,即  $c_{[NRB-SRB]} > 1, c_{[SRB-NRB]} < 1$  (式(5)),最终油藏内 NRB 菌群密度达到最大。

$$\begin{cases} \frac{dN_{[NRB]}}{dt} = \mu_{[NRB]} - r_{[NRB]} N_{[NRB]} \left( 1 - \frac{N_{[NRB]}}{N_{[NRB-max]}} - \frac{c_{[SRB-NRB]} N_{[SRB]}}{N_{[SRB-max]}} \right) > 0 \\ \frac{dN_{[SRB]}}{dt} = \mu_{[SRB]} - r_{[SRB]} N_{[SRB]} \left( 1 - \frac{N_{[SRB]}}{N_{[SRB-max]}} - \frac{c_{[NRB-SRB]} N_{[NRB]}}{N_{[NRB-max]}} \right) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$c_{[NRB-SRB]} > 1, c_{[SRB-NRB]} < 1$

在油田注水满足碎屑岩油藏注水水质推荐指标及分析方法(SY/T 5329—2012)的条件下,注入水中仅含有极低密度的细菌,在水体进入地层后,油藏微生物会对水体接种,同时,事先需检测注入水体和油藏环境的 NRB 菌群,必要时做适量外源接种。注入油藏中的水体中 SRB 和 NRB 的菌群密度将按图 2 的方式变化。

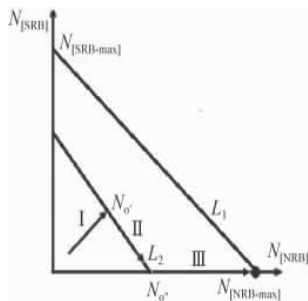


图 2 NRB-SRB 稳态抑制体系的建立

Fig. 2 Establishment of NRB-SRB steady-state bio-inhibition system

过程 I 中,初始时刻,即水体注入油藏后,  $N_{[NRB]}$  和  $N_{[SRB]}$  均较低,菌群内及菌群间竞争作用较弱,  $N_{[NRB]}$  和  $N_{[SRB]}$  均会有所增加,在  $N_0$  (为竞争性抑制条件下的 SRB 极限菌浓点,与初始情况 NRB 和 SRB 菌浓度有关。)处,由于菌群间竞争作用的增加,SRB 的增长会受到抑制不再增加,即  $\mu_{[SRB]} = 0$ ,而此刻,  $\mu_{[NRB]} > 0$ 。过程 II 开始,随  $N_{[SRB]}$  进一步增加,SRB 受到的来自 NRB 的竞争作用进一步增强,导致  $\mu_{[SRB]} < 0, N_{[SRB]}$  开始降低,而在整个 I, II 过程中,  $\mu_{[NRB]}$  始终大于 0,即  $N_{[NRB]}$  始终在增加(式(6))。

$$\begin{cases} \frac{dN_{[NRB]}}{dt} = \mu_{[NRB]} - r_{[NRB]} N_{[NRB]} \left( 1 - \frac{N_{[NRB]}}{N_{[NRB-max]}} - \frac{c_{[SRB-NRB]} N_{[SRB]}}{N_{[SRB-max]}} \right) > 0 \\ \frac{dN_{[SRB]}}{dt} = \mu_{[SRB]} - r_{[SRB]} N_{[SRB]} \left( 1 - \frac{N_{[SRB]}}{N_{[SRB-max]}} - \frac{c_{[NRB-SRB]} N_{[NRB]}}{N_{[NRB-max]}} \right) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$\mu_{[SRB]} \text{ 经历 } > 0 \rightarrow = 0 \rightarrow < 0 \text{ 的变化,}$   
 $N_{[NRB]} > 0, N_{[SRB]} > 0$

在  $N_0$  (Lotka-Volterra 与 Logistic 模型临界点,仅 NRB 存在)处,  $N_{[SRB]}$  降为 0,且  $\mu_{[SRB]} = 0$ ,SRB 的生长被完全抑制,而 NRB 的增殖仍未结束,过程 III 开始,由于 SRB 对 NRB 的菌群间竞争作用完全消失,故此时  $N_{[NRB]}$  符合 Logistic 模型,即  $N_{[NRB]}$  趋向于  $N_{[NRB-max]}$  (式(7))。

$$\begin{cases} \frac{dN_{[NRB]}}{dt} = \mu_{[NRB]} - r_{[NRB]} N_{[NRB]} \left( 1 - \frac{N_{[NRB]}}{N_{[NRB-max]}} \right) > 0 \\ \frac{dN_{[SRB]}}{dt} = \mu_{[SRB]} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$N_{[NRB]} > 0, N_{[SRB]} = 0$

在  $(N_{[NRB-max]}, 0)$  处,依据 Monod 方程,当底物浓度  $N_{[Ni total]}$  远远大于底物半饱和常数  $K_{[NRB-nit rate]}$  时,NRB 增殖速率  $\mu_{[NRB-growth]}$  约等于  $\mu_{[NRB-max]}$ ,同时,由于细胞衰老、产物积累等因素导致  $\mu_{[NRB-dead]}$ ,  $\mu_{[NRB-growth]}$  与  $\mu_{[NRB-dead]}$  实现平衡,因此  $\mu_{[NRB]} = 0$ ,表现为  $N_{[NRB]} = N_{[NRB-max]}$ ,  $N_{[SRB]} = 0$ ,体系进入 NRB 对 SRB 的稳定抑制期(式(8))。

$$\begin{cases} \mu_{[NRB-growth]} = \frac{\mu_{[NRB-max]} S_{[nit rate]}}{K_{[NRB-nit rate]} + S_{[nit rate]}} \approx \mu_{[NRB-max]} (S_{[nit rate]} \gg K_{[NRB-nit rate]}) \\ \mu_{[NRB-dead]} = K_{[NRB-dead]} N_{[NRB]} \\ \frac{dN_{[NRB]}}{dt} = \mu_{[NRB]} = \mu_{[NRB-growth]} - \mu_{[NRB-dead]} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$N_{[NRB]} = N_{[NRB-max]}, N_{[SRB]} = 0$

### 2.2 SRB 稳态抑制体系的失效与瓦解

VFA 是 NRB 和 SRB 的共同底物,它主要来自油藏中互营代谢型厌氧发酵菌,该菌群能够以原油作为底物,持续为硫酸盐还原或者硝酸盐还原作用提供 VFA 底物,因此认为油藏中 VFA 的浓度是相对稳定的。同时,油藏水体中硫酸根浓度由于地层水和矿物的补给也被认为是相对稳定的,而硝酸根则仅能通过外源添加实现补给。因此,在水驱过程中,硝酸盐浓度会因硝酸盐还原作用的消耗而降低,当硝酸根浓度降低到不足以支持稳态条件下的  $N_{[NRB-max]}$  代谢需求时,稳态抑制体系会瓦解进而失效<sup>[5]</sup>,如图 3 所示。

在过程 IV 中,NRB 的增殖速率  $\mu_{[NRB-growth]}$  会因硝酸盐电子受体浓度的限制而减小,而  $\mu_{[NRB-dead]}$  却因  $N_{[NRB]}$  菌浓度较高而保持较高水平,因此,  $N_{[NRB]}$  会因  $\mu_{[NRB-growth]} < \mu_{[NRB-dead]}$  而不断下降。而在

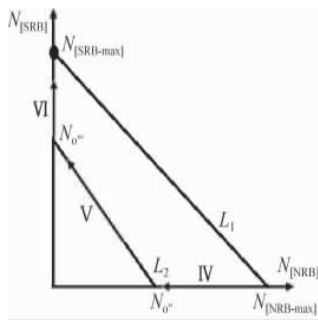
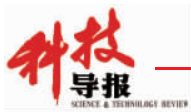


图3 SRB 稳态抑制体系的失效与瓦解

Fig. 3 Stale and breakdown of SRB steady-state bio-inhibition of system

NRB 和 SRB 抑制体系中,固然  $N_{[NRB]}$  有所下降,但对 SRB 竞争作用仍处于较高水平,因此  $N_{[SRB]}=0, \mu_{[SRB]}=0$  (式(9))。

$$\begin{cases} \mu_{[NRB-growth]} = \frac{\mu_{[NRB-max]} S_{[nitrate]}}{K_{[NRB-nitrate]} + S_{[nitrate]}} < \mu_{[NRB-max]} \\ \frac{dN_{[NRB]}}{dt} = \mu_{[NRB]} - \mu_{[NRB-growth]} - \mu_{[NRB-decal]} < 0 \\ \frac{dN_{[SRB]}}{dt} = \mu_{[SRB]} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$N_{[NRB]} > 0, N_{[SRB]} = 0$$

随硝酸盐电子受体底物的持续消耗和浓度的不断降低,  $N_{[SRB]}$  已不再满足完全竞争性抑制 SRB 的最低菌浓度需要,从而使  $\mu_{[SRB]} > 0$ , 系统中  $N_{[SRB]}$  开始再次增加 (过程 V, 式(10))。

$$\begin{cases} dS_{[SRB]} < 0, dN_{[SRB]} < 0 \\ \frac{dN_{[NRB]}}{dt} = \mu_{[NRB]} - \mu_{[NRB-growth]} - \mu_{[NRB-decal]} < 0 \\ \frac{dN_{[SRB]}}{dt} = \mu_{[SRB]} = r_{[SRB]} N_{[SRB]} \left( 1 - \frac{N_{[SRB]}}{N_{[SRB-max]}} - \frac{c_{[NRB-SRB]} N_{[NRB]}}{N_{[NRB-max]}} \right) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$N_{[NRB]} > 0, N_{[SRB]} > 0$$

在  $N_{[SRB]}$  (Lotka-Volterra 与 Logistic 模型临界点, 仅 SRB 存在) 处, 随着  $S_{[nitrate]}$  彻底耗尽,  $N_{[NRB]}$  因电子受体限制降至 0 并保持稳定, 至此 NRB 对 SRB 的抑制作用完全消失, 体系中仅存在 SRB, 并且 SRB 将经过程 VI 趋近于  $N_{[SRB-max]}$  (式(11)), 整个系统进入抑制失效期。

$$\begin{cases} \frac{dN_{[NRB]}}{dt} = \mu_{[NRB]} = 0 \\ \frac{dN_{[SRB]}}{dt} = \mu_{[SRB]} = r_{[SRB]} N_{[SRB]} \left( 1 - \frac{N_{[SRB]}}{N_{[SRB-max]}} \right) > 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$N_{[NRB]} > 0, N_{[SRB]} \text{ 趋向于 } N_{[SRB-max]}$$

### 2.3 模型分析和生物抑制技术应用

向油藏中添加硝酸盐, 从而实现 NRB 生物竞争抑制 SRB 的技术。在油藏条件下, NRB 与 SRB 的菌群变化规律如图 4 所示。可见, NRB 在硝酸盐电子受体充分补充的条件下可以很好地抑制 SRB, 而该抑制行为随硝酸盐的耗尽而耗尽, 而稳定抑制期的长度很大程度上是由注入水体中硝酸盐的浓度决定的。从应用角度出发, 考虑到油藏实际驱替周期, 应使注入水中补充的硝酸盐电子受体浓度足以支持稳定抑制期

长于注入水实际采出周期, 以保证油藏环境下 NRB 对 SRB 充分的生物抑制作用。

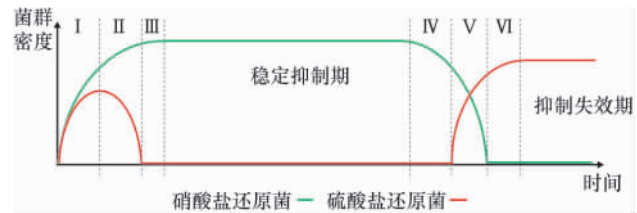


图4 NRB 与 SRB 菌群变化规律

Fig. 4 Population variation rules of NRB microflora and SBR microflora

### 3 结论

(1) 将两种群的生物竞争抑制数学模型应用到 NRB 生物抑制 SRB 技术中, 应用模型分析方法研究了两种群模型模拟油藏条件下, 对同底物 VFA 竞争条件下的 NRB 和 SRB 菌群的增殖过程。

(2) 借助数学模型研究了在共同底物 VFA 竞争, 硫酸盐电子受体充足补给而硝酸盐电子受体枯竭情况下的 NRB 和 SRB 菌群动态变化规律。

(3) 上述模型分析有利于求算 SRB 生物竞争抑制作用的稳态抑制期, 从而能够有效指导油藏条件下利用 NRB 抑制 SRB 的硝酸盐补给浓度确定和具体工艺实施, 对油田生产有重大的指导意义。

### 参考文献 (References)

- [1] 何正国, 王修垣. 油藏中硫酸盐还原菌引起的腐蚀诊断及其生物学防治[J]. 油田化学, 1999, 16(4): 390-392.  
He Zhengguo, Wang Xiuyuan. Oil field Chemistry, 1999, 16(4): 390-392.
- [2] 周鹏, 陈秋实, 辜旋. 油气田生产系统中硫化物的预防和控制[J]. 重庆科技学院学报: 自然科学版, 2011, 13(2): 46-48.  
Zhou Peng, Chen Qiushi, Gu Xuan. Journal of Chongqing University of Science and Technology: Natural Sciences Edition, 2011, 13(2): 46-48.
- [3] Grigoryan A A, Comish S L, Buziak B. Competitive oxidation of volatile fatty acids by sulfate- and nitrate-reducing bacteria from an oil field in Argentina [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, 74(14): 4324-4335.
- [4] Voordouw G, Armstrong S M, Reimer M F. Characterization of 16S rRNA genes from oil field microbial communities indicates the presence of a variety of sulfate-reducing, fermentative, and sulfide-oxidizing bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, 62(5): 1623-1629.
- [5] Sorensen J, Christensen D, Jorgensen B B. Volatile fatty acids and hydrogen as substrates for sulfate-reducing bacteria in anaerobic marine sediment [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1981, 42(1): 5-11.
- [6] Hirschler A, Rontani J, Raphael D. Anaerobic degradation of hexadecan-2-one by a microbial enrichment culture under sulfate-reducing conditions [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(4): 1576-1579.
- [7] Lie T J, Godchaux W, Leadbetter E R. Sulfonates as terminal electron



acceptors for growth of sulfite-reducing bacteria (*Desulfitobacterium* spp.) and sulfate-reducing bacteria: effects of inhibitors of sulfidogenesis [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65(10): 4611-4617.

[8] 马莎莎, 张凡, 舒福昌. 新疆低温稠油油藏厌氧硝酸盐还原菌与硫酸盐还原菌富集产物菌群分析[J]. *化学与生物工程*, 2011, 28(4): 32-35. Ma Shasha, Zhang Fan, Shu Fuchang. *Chemistry and Bioengineering*, 2011, 28(4): 32-35.

[9] 倪文林, 徐本龙. 反应-扩散-趋向生物模型中的集中现象 [J]. *上海师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 41(3): 237-242. Ni Wenlin, Xu Benlong. *Journal of Shanghai Normal University: Natural Sciences Edition*, 2012, 41(3): 237-242.

[10] 王喜平. 两个生物种群竞争的模型分析 [J]. *农业与技术*, 2006, 26(6): 88-90. Wang Xiping. *Agriculture and Technology*, 2006, 26(6): 88-90.

[11] 陈兰荪, 王东达. 数学、物理学与生态学的结合[J]. *物理*, 1994, 23(7): 408-413. Chen Lansun, Wang Dongda. *Physics*, 1994, 23(7): 408-413.

[12] An S J, Tang K, Nemat M. Simultaneous biodesulphurization and denitrification using an oil reservoir microbial culture: Effects of sulphide loading rate and sulphide to nitrate loading ratio [J]. *Water Research*, 2010, 44(5): 1531-1541.

[13] Halim A, Watkin E, Gubner W. Short term corrosion monitoring of carbon steel by bio-competitive exclusion of thermophilic sulphate reducing bacteria and nitrate reducing bacteria[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 77(30): 348-362.

[14] 徐崇刚, 胡远满, 常禹. 生态模型的灵敏度分析 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1056-1062. Xu Chonggang, Hu Yuanman, Chang Yu. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 1056-1062.

[15] 戴春妮, 姚萌, 谢祝捷. 一种新的进化计算算法模型——种群竞争消亡算法[J]. *计算机应用*, 2005, 25(1): 224-225. Dai Chunni, Yao Meng, Xie Zhujie. *Computer Applications*, 2005, 25(1): 224-225.

(责任编辑 王媛媛)

·学术动态·



《科技导报》8 篇论文入选“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”

中国科学技术信息研究所“精品期刊顶尖论文平台”发布“领跑者 5000”论文名单,《科技导报》8 篇论文入选。

第一作者	论文题目	作者单位	年(期):页码
朱锡锋	生物质快速热解制备生物油	中国科学技术大学	2007(21): 69-75
陈运泰	汶川特大地震的震级和断层长度	中国地震局地球物理研究所	2008(10): 26-27
汪玉	舰艇抗冲瓦整体冲击隔离新概念及其机理研究	中国人民解放军海军装备研究院	2009(3): 19-24
许冲	汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积	中国科学院地质与地球物理研究所	2009(11): 79-81
孙智辉	气候变化对中国农业的影响	延安市气象局	2010(4): 110-117
王飞跃	网络虚拟社会中非常规安全问题与社会计算方法	中国科学院自动化研究所	2011(12): 15-22
邵舸	辅助给水系统配置改进的概率安全评价	上海交通大学机械与动力工程学院	2012(28): 24-28
李克文	油田伴生地热资源评价与高效开发	中国地质大学(北京)能源学院	2012(32): 32-41

2012年10月,中国科学技术信息研究所在中国科学技术部立项实施“精品期刊顶尖论文平台——领跑者 5000”的平台建设工作,从科技部2008年、2011年遴选的两届“中国精品科技期刊”中,根据定量、定性指标,遴选出5000篇2007—2012年发表的原创性研究论文。入选论文将发布在WOK(web of knowledge)国际检索系统平台上,与SCI数据库在同一平台内实现文献链接和国际引文检索,有助于在更大范围内向世界科技同行展示和推广中国最重要的科研成果。

