

给水管网细菌生长的动力学模型

鲁巍^{1,2}, 张晓健²

(1. 北京市市政工程设计研究总院, 北京 100045; 2. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 建立给水管网中的细菌生长动力学模型是模拟实际管网中细菌生长的情况, 揭示管网悬浮菌、生物膜、营养基质浓度以及消毒剂浓度之间的相互作用机理的主要途径。为此综合比较了目前国外提出的几种主要动力学模型, 包括SSB模型、SANCHO模型和BAM模型等, 详细介绍了各种模型的基本原理及其在该研究领域的优点和局限性, 为我国在该领域的研究提出了建议。

关键词: 细菌; 生物膜; 饮用水管网; 动力学模型

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2006)18-0008-03

Dynamic Model of Bacteria Growth in Water Distribution System

LU Wei^{1,2}, ZHANG Xiao-jian²

(1. Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute, Beijing 100045, China; 2. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Establishing dynamic models to describe the process of bacterial growth in drinking water distribution systems is an important method to explain the common relationships among suspended bacteria, biofilm, disinfectants and nutrients. Some models which are applied in the research of bacterial growth are compared, including steady state biofilm model, SANCHO model, BAM model, etc. The advantages and disadvantages of the models which are widely applied in this field are summarized. By the review of some research conclusions, the suggestions in this research field in China are given.

Key words: bacteria; biofilm; drinking water distribution system; dynamic model

目前, 国内外在管网细菌生长的研究领域已经进行了大量的研究^[1], 但是我国在动力学模型领域仍缺乏系统研究。

1 模型研究的主要对象及基本组成

目前提出的管网细菌生长动力学模型的研究对象主要包括: 悬浮菌、管壁生物膜、消毒剂余量以及营养基质(可生物降解有机碳), 它们之间的相互作用关系如图1所示。

一个可有效模拟管网中微生物、消毒剂、营养基质之间的相互作用关系的模型通常应包括: 描述水体流动的水力学模型、描述生物膜生长和脱落的模型、描述悬浮菌生长和附着的模型、描述消毒剂衰减和灭活微生物的模型以及描述营养基质被微生物利

用的模型, 具体如表1所示。

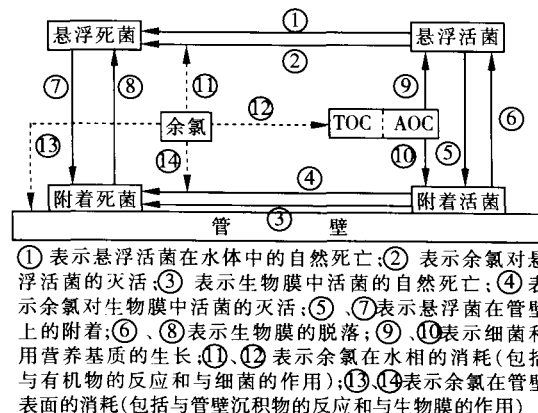


图1 模型机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of model mechanism

表 1 模型基本组成

Tab. 1 Basic composition of models

模型组成	初始输入	转换函数	最终输出	所需参数
水力学模型	初始流量、流速、流向、水压等	水力平衡计算方法	水压、流速、流向、水力停留时间等	管道摩擦系数等
生物膜及悬浮菌生长模型	基质浓度、初始菌量等	Monod 方程	生长速率	半饱和系数、最大比增长速率
悬浮菌附着模型	悬浮菌浓度	动力学表达式	附着速率	附着速率常数
生物膜脱落模型	生物膜生物量	动力学表达式	脱落速率	脱落速率常数
营养物质降解模型	微生物浓度	Monod 方程	降解速率	半饱和系数、最大比增长速率、产率系数
消毒剂衰减模型	消毒剂初始浓度	动力学表达式	消毒剂浓度	衰减速率常数
微生物灭活模型	微生物初始浓度	动力学表达式	微生物浓度	灭活速率常数

水力学模型是建立整个模型的基础,所需的模型参数主要通过实际管道的检测和计算机模型的拟合得到。由于实际管网经常进行改造,因此水力学模型建立后还需要不断进行调整和维护。我国目前只有少数水厂建立了完备的水力学模型,而且还缺乏日常所需要的模型维护,在建立管网水质模型方面存在着较大的困难。

2 各种模型的比较

2.1 SSB 模型

SSB 模型的核心是生物膜稳态模型,该模型是 Rittman 等在 1980 年建立的,用于描述营养物质通过扩散边界层从水体扩散至生物膜表面与微生物发生生化反应的动力学过程。该一维模型假设基质浓度仅在垂直于生物膜表面的方向上存在变化梯度而不影响该方向上微生物的分布密度。其核心表达式为:

$$D \frac{\partial^2 S_f}{\partial z^2} = \frac{kXS_f}{K_s + S_f} \quad (1)$$

式中 D ——分子扩散系数, m^2/s

S_f ——生物膜中的基质浓度, mg/L

z ——垂直于生物膜方向的距离, m

k ——最大比基质降解速率, h^{-1}

K_s ——半饱和系数, mg/L

X ——生物量, mg/L

该模型多用于计算或预测水处理工艺中生物处

理单元(生物滤池等)对营养基质的降解量。水处理工艺中一般具有较高的有机物负荷和相对较高的可生物降解有机物(BOM)浓度,生物膜可生长发育至一定的厚度,进而造成营养基质的传质速率限制,使得生物膜生长逐渐达到稳态。然而在实际饮用水管网中,水源水经过一系列传统工艺和深度处理工艺处理后,BOM 得到了一定的去除,管网水中 BOM 浓度相对较低,加上消毒剂对微生物生长的抑制作用,管壁生物膜往往无法生长发育到限制营养物质或消毒剂传质速率的厚度。因此,研究实际管网管壁生物膜的生长时往往忽略了生物膜厚度对传质速率的影响,SANCHO 模型正是如此。

2.2 SANCHO 模型

SANCHO 模型是 Servais 等^[2]在 H3SB 模型的基础上修改后建立的。H3SB 模型描述的是细菌在贫营养河流中降解有机物的动力学模型。SANCHO 模型主要考虑了管网中发生的如下生化反应:

- ① 胞外水解酶水解有机物,悬浮菌和生物膜的生长繁殖利用水解产物,细菌的死亡释放有机物;
- ② 管壁上发生的吸附和生物附着过程为可逆过程;
- ③ 游离氯的化学消耗及其对微生物活性的影响。

SANCHO 模型中应用的动力学模型没有在科技期刊中公开发表过,仅有吸附、脱附及余氯消耗动力学模型公开发表过,但是可以从相关文献中了解到:

① SANCHO 模型中以 BDOC (Biodegradable Dissolved Organic Carbon) 作为管网微生物生长的限制性营养元素,BDOC 无法被微生物直接利用,而是先被微生物胞外酶水解成小分子单体基质。水解过程又被分成快反应阶段和慢反应阶段。

② SANCHO 模型中细菌的附着由两个参数控制,即吸附速率和管壁的最大吸附容量。其中细菌吸附速率与细菌浓度成正比,最大吸附容量由管材决定,通常为 $2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。

Servais 等人 1995 年通过试验证明,SANCHO 模型预测值与试验值之间具有很好的一致性。然而,也正是由于 SANCHO 模型详细考虑了各污染物间的相互作用,才导致了模型中存在着大量的未知参数(19 个),以至于未能在更大范围内应用。因此,应进一步研究如何简化模型、减少试验参数。

2.3 BAM 模型

BAM 模型的基本内核是 BIOSIM 模型,该模型由 Wanner 和 Gujer 提出,之后由许多学者进行了改进,但是模型的主要目的和基本假设并没有改变。该模型的基本目标就是考虑某一特定环境条件下微生物群落间的相互作用,可预测生物膜厚度、生物膜中异养菌的空间分布情况以及营养基质的利用情况等。

BAM 模型最大的优势就在于其应用的灵活性,用户可根据实际情况更改模型中的动力学级数和动力学参数。然而到目前为止尚没有有关该模型应用于实际管网中的文献报道,因此对其实用性无法作出具体评价。

2.4 模型比较

上述三个模型的比较如表 2 所示。

表 2 模型间的比较

Tab. 2 Comparison of models

项目	SSB ^[3]	SANCHO ^[2,4]	BAM
参数测试的反应器	直管	CSTR	CSTR
消毒剂衰减模型	一级动力学	准一级	一级
基质负荷	高	低	用户自定义
基质降解模型	Monod	Monod	用户自定义
纵向扩散	考虑	未考虑	考虑
生物膜生长模型	考虑单一基质在生物膜内的扩散过程,不考虑多物种间的相互作用	假定生物膜极薄,均匀分布,其生长不受营养基质和消毒剂在生物膜内的传质速率限制	考虑基质在生物膜内的扩散过程,考虑多物种间的相互作用
生物膜脱落模型	一级动力学	一级动力学	用户自定义
应用情况	以游离氯作为消毒剂的管网	以游离氯作为消毒剂的管网	以游离氯作为消毒剂的管网

尽管目前国外已经对细菌生长的模型进行了一定的研究,但是相关的动力学参数仍缺乏试验数据支持,应用中应采用相关试验方法进行测定和修正^[5,6]。

3 结语

① 水力学模型是建立整个管网细菌生长模型的基础,我国目前在建立和维护管网水质模型方面

相对落后,是需要解决的首要问题。

② 各模型均含有大量未知动力学参数,其普适性受到了很大的限制,还需要进一步研究如何对模型进行简化,减少动力学参数,以提高模型的工程适用性。

③ 尽管目前国外已经对细菌生长模型进行了一定的研究,但是相关的动力学参数仍缺乏试验数据支持,我国需要结合自身水质特点,采用相关试验方法进行测定和修正。

④ 我国有越来越多的水厂以氯胺作为消毒剂进行饮用水的消毒,但是目前国内外均未报道以氯胺作为消毒剂时各模型的相关动力学参数,还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] Zhang Weidong, DiGianol Francis A. Comparison of bacterial regrowth in distribution systems using free chlorine and chloramine: a statistical study of causative factors [J]. Water Res, 2002, 36(6): 1469 - 1482.
- [2] Servais P, Billen G, Laurent P, et al. Development of a model of BDOC and bacterial biomass fluctuation in distribution system [J]. J Water Sci, 1995, 8(4): 427 - 462.
- [3] Lund Vidar, Ormerod k. The influence of disinfection processes on biofilm formation in water distribution systems [J]. Water Res, 1995, 29(4): 1013 - 1021.
- [4] Zhang X. The treatment of algae-laden raw water with compact floater of dissolved air flotation and GAC deep bed filtration [J]. Water Sci Technol: Water Supply, 2004, 4(5-6): 35 - 41.
- [5] 鲁巍, 王云, 张晓健. BAR 反应器中生物膜分离及定量方法的研究 [J]. 中国给水排水, 2004, 20(5): 5 - 8.
- [6] 鲁巍, 唐峰, 张晓健, 等. 研究供水管壁生物膜的模拟系统 [J]. 中国给水排水, 2005, 21(1): 22 - 24.

电话: (010) 68024030

E-mail: luw02@bmedi.cn

通讯方式: 100045 西城区月坛南街乙 2 号 512 室

收稿日期: 2006 - 02 - 03

贯彻执行《中华人民共和国水土保持法》