

活性污泥生物学 与 反应动力学

张自杰 周 帆 编

中国环境科学出版社

活性污泥生物学 与反应动力学

张自杰 周 帆 编

中国环境科学出版社

1989

内 容 简 介

本书包括活性污泥生物学和反应动力学两部分。前部分对在活性污泥净化反应中起主导作用的微生物作了重点叙述；在反应动力学部分里介绍了著名学者提出的动力学模式，并对这些模式的理论、数学推导作了系统的介绍，还对活性污泥净化反应过程的某些功能和各种类型曝气池系统作了深入的动力学分析。

本书的一些理论、公式和数据对于城市污水和工业有机废水的处理均有实践和理论的指导作用，可供水污染防治方面的工程技术人员、环境工程、给水排水专业的本科生、研究生和教师参考。

活性污泥生物学与反应动力学

张自杰 周 帆 编

责任编辑 周玉泉

中国环境科学出版社出版

北京崇文区东兴隆街69号

北京市永乐印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

*

1989年9月第 一 版 开本 850×1168 1/32

1989年9月第一次印刷 印张 22 3/8

印数 1—2700 字数 579千字

ISBN 7-80010-332-3/X·192

定价：7.90元

目 录

前言	(1)
第一章 污水的生物处理与活性污泥法	(3)
第一节 自然界的物质循环及其在污水处理领 域的应用	(3)
一、水污染物质	(3)
二、自然界的物质循环	(5)
三、自然界物质循环规律在污水处理领域中的应用	(6)
第二节 活性污泥的性质与组成	(8)
一、活性污泥的性质	(8)
二、活性污泥的组成	(12)
第三节 活性污泥法的发展沿革与处理流程	(14)
一、活性污泥法的产生——从间歇式到连续式	(16)
二、传统曝气及其改进	(17)
三、曝气池中的流态——从推流到完全混合	(22)
四、提高氧的转移能力——从空气曝气到纯氧曝气、 深井曝气	(25)
五、曝气设备——从气泡曝气到机械曝气	(29)
第四节 参与活性污泥反应的生物	(38)
第二章 活性污泥系统中的菌类	(43)
第一节 细菌的形态与构造	(43)
一、细菌的形态	(43)
二、细菌细胞的构造	(48)
第二节 细菌的生理功能	(55)
一、细菌细胞的化学组成	(55)
二、细菌的营养	(57)

三、细菌的营养机制	(62)
第三节 酶	(67)
一、酶的概念与特性	(67)
二、酶的命名与分类	(69)
三、酶在化学上的性质	(72)
四、酶催化作用的专一性	(75)
五、酶的催化机理	(77)
六、影响酶促反应速度的主要因素	(81)
七、酶的应用	(88)
第四节 细菌的生命活动与环境条件	(89)
一、细菌的生命活动与物理因素	(89)
二、细菌的生命活动与化学因素	(95)
三、细菌的生命活动与生物因素	(98)
第五节 细菌的增殖与遗传变异	(100)
一、细菌的增殖	(100)
二、细菌的遗传与变异	(107)
第六节 细菌的分类与系统	(138)
一、概述	(138)
二、细菌的分类依据	(143)
第七节 在活性污泥系统出现的细菌	(145)
一、在正常运行条件下的细菌	(145)
二、活性污泥系统污泥膨胀微生物学	(154)
第三章 活性污泥系统中的微型动物	(178)
第一节 原生动物	(178)
一、原生动物的形态与生理功能	(178)
二、原生动物的分类与在活性污泥系统中出现的原生动物	(190)
第二节 轮虫动物	(231)
一、轮虫动物的形态与构造	(231)
二、轮虫动物的分类	(239)
第三节 其它微型动物	(257)

一、线虫	(257)
二、寡毛纲	(260)
三、节肢动物	(264)
第四节 活性污泥系统的微生物生态系	(267)
一、活性污泥系统的食物链	(267)
二、活性污泥净化反应过程微型动物的生态演替	(268)
第五节 根据出现的微型动物种属判断活性污泥的状 态	(275)
一、活性污泥生成良好时出现的微型动物	(275)
二、活性污泥恶化时出现的微型动物	(277)
三、活性污泥解体时出现的微型动物	(279)
四、流入原污水浓度极低时出现的微型动物	(282)
五、溶解氧不足时出现的微型动物	(284)
六、曝气过度时出现的微型动物	(286)
七、污泥堆积, 存在死水区时出现的微型动物	(286)
八、在活性污泥恢复过程中出现的微型动物	(287)
第四章 活性污泥净化反应机理	(290)
第一节 有机污染物的生物降解性	(290)
一、概述	(290)
二、有机污染物生物降解性的评定	(292)
三、有机污染物生物降解的普遍规律及其与结构的相关性	(299)
第二节 生物降解机制理论基础	(304)
第三节 糖类、脂肪、蛋白质的好氧降解	(317)
一、糖类的降解	(317)
二、脂肪的代谢与降解	(325)
三、蛋白质降解	(330)
第四节 某些难降解物质的降解	(337)
一、碳氢化合物的降解	(337)
二、人工合成有机物的降解	(344)
第五节 活性污泥对有机污染物的降解	(347)

一、降解的基本过程	(347)
二、有机污染物向活性污泥的传递——传质	(349)
三、活性污泥对有机污染物的吸附与有机污染物的 附聚——初期降解	(350)
四、有机污染物的水解与吸收	(354)
第六节 活性污泥絮凝体形成机理	(355)
一、形成活性污泥絮凝体的细菌	(356)
二、活性污泥絮凝体形成机制的各家学说	(358)
三、活性污泥絮凝体的有利因素和不利因素	(364)
第五章 活性污泥反应动力学基础	(366)
第一节 化学反应动力学	(366)
一、基本概念	(366)
二、简单基元反应的动力学微分方程	(368)
三、复杂反应的动力学微分方程	(377)
四、反应级数的确定方法	(379)
第二节 酶反应动力学	(384)
一、单底物酶反应动力学	(384)
二、多种底物的酶反应动力学	(398)
第三节 细菌增殖动力学	(402)
一、对数增殖期增殖动力学	(403)
二、增殖率下降期的增殖与底物的降解	(403)
三、内源呼吸-细菌衰减动力学	(404)
第四节 温度对反应速度的影响	(405)
第五节 有机物好氧生物降解模式图	(408)
第六节 反应器水力混合方式及液流扩散动力学	(409)
一、水力混合方式	(409)
二、反应器内液流的扩散模式	(418)
三、液体在反应器内停留时间的分布	(422)
第六章 莫诺模式与埃肯费尔德模式——一相说 与二相说	(427)

第一节 概述	(427)
一、活性污泥的BOD负荷	(428)
二、限制细菌增殖的底物浓度	(429)
三、微生物的比增殖速度	(430)
四、单位底物利用率与单位底物降解率	(431)
五、产率 Y	(432)
第二节 莫诺模式——活性污泥反应一相说	(433)
一、分批培养的莫诺模式	(433)
二、连续培养的莫诺模式	(438)
三、莫诺模式的推论	(440)
四、 K_s 与 V_{max} 的求解	(441)
五、有毒底物时的莫诺修正式	(442)
第三节 埃肯费尔德模式——活性污泥反应	
二相说	(444)
一、二相说要点	(444)
二、应用	(447)
三、 K_s 值求解	(452)
第四节 二相说与一相说的比较	(454)
第五节 哥莱夫模式	(457)
第六节 活性污泥系统的设计计算	(461)
一、活性污泥的沉淀性能	(461)
二、曝气时间(t)	(464)
三、有机物降解与生物量增长的关系	(465)
四、有机物降解与需氧量间关系	(467)
五、污泥回流比	(472)
第七章 劳伦斯-麦卡蒂模式	(477)
第一节 概述	(477)
第二节 劳伦斯-麦卡蒂模式	(479)
一、劳伦斯-麦卡蒂基本方程式	(479)
二、劳伦斯-麦卡蒂模式的推论——基本方程式在完全混	

合系统方面的应用	(482)
三、基本方程式在推流系统方面的应用	(495)
四、剩余污泥量、需氧量与营养要求	(497)
第三节 对假设条件的讨论	(505)
第四节 生物固体停留时间	(511)
一、 θ_c^m 和 θ_c^d	(511)
二、出水中溶解性有机物浓度与 θ_c 关系	(513)
三、出水中生物固体浓度与 θ_c 关系	(516)
四、氧吸收速率与 θ_c 关系	(518)
五、用 θ_c 控制运行的方法	(519)
第五节 生物动力学常数测定	(520)
第六节 劳伦斯-麦卡蒂模式在活性污泥法各种运行 方式中的运用	(525)
一、多点进水(阶段曝气)法	(526)
二、吸附再生法	(533)
三、延时曝气法	(538)
第八章 麦金尼模式	(542)
第一节 概述	(542)
一、麦金尼模式建立的基础条件	(542)
二、麦金尼的有氧代谢理论	(544)
第二节 完全混合系统的模式	(551)
一、无回流污泥的系统	(551)
二、有回流污泥的系统	(558)
第三节 推流系统的模式	(567)
一、食料代谢	(568)
二、活性污泥量	(569)
三、其它	(571)
第四节 生物量的测定与计算, 常数 K_d 的测定	(579)
一、生物量的间接测定法	(580)
二、 K_d 的测定	(586)

第五节	双参数计算方法	(589)
第六节	戈德曼-恩格兰德的统一模式	(596)
一、	埃肯费尔德模式和麦金尼模式的比较	(596)
二、	统一模式	(602)
第九章	对活性污泥系统各功能环节的动力学分析	(607)
第一节	对细菌增殖与活性污泥增长的动力学分析	(607)
一、	对纯菌种增殖的动力学分析	(607)
二、	对活性污泥增长的动力学分析	(614)
第二节	对活性污泥吸附作用的动力学分析	(617)
第三节	对活性污泥絮凝体形成与解体的动力 学分析	(619)
第四节	对活性污泥系统物质传递的动力学分析	(623)
一、	介质与污泥絮凝体之间的物质交换	(623)
二、	扩散作用的简化模式	(627)
三、	扩散作用的精确模式	(630)
第五节	对溶解氧控制浓度的动力学分析	(637)
第十章	各种类型曝气池系统的合理计算与动力 学分析	(644)
第一节	曝气池合理型式的选定与工作稳定条 件	(644)
一、	概述	(644)
二、	完全混合曝气池	(655)
三、	多段曝气池	(659)
四、	曝气池合理计算举例及分析	(665)
五、	不同型式曝气池工作稳定性的评定比较	(670)
第二节	吸附-再生曝气系统的合理计算与动力 学分析	(674)
一、	概述	(674)
二、	吸附模式常数的选定与物料平衡式	(676)
三、	计算举例	(679)

第三节 曝气池-二次沉淀池系统的合理计算与动力 学分析 (I)	(683)
一、基本方程式	(683)
二、计算举例	(688)
第四节 曝气池-二次沉淀池系统的合理计算与 动力学分析 (I)	(693)
——考虑污泥特性与二次沉淀池工作的 关系	(693)
一、污泥龄的确定	(693)
二、活性污泥特性与污泥龄的关系	(696)
三、计算举例及对其分析	(701)

前 言

自从安德登 (Arden) 和洛凯脱 (Lockett) 于1914年在英国化学学会发表有关活性污泥法的论文以来, 活性污泥法已经有70多年的历史了。今天活性污泥法已广为世界各国所采用, 成为污水生物处理技术的中坚。但是, 活性污泥法在理论上的研究、探讨, 还是最近二三十年才得到长足进展的。几十年来活性污泥法系统的设计与运行还主要依靠实践经验来进行, 曝气时间是活性污泥法系统的主要计算与设计参数。从学术观点上来看, 处于这个阶段的活性污泥法仍然属于土木工程的范畴。

50年代以后, 活性污泥微生物的增殖、生理功能以及它们在活性污泥系统中的演替规律等理论问题得到不断地发展, 并在其基础上比较深入地揭示了有机底物在曝气池内降解过程的微生物学和生物化学实质。人们对活性污泥及其净化功能的认识, 由宏观到微观, 由表及里不断深化。一些名家学者先后提出了旨在描述在活性污泥系统中有机底物降解速度、微生物增殖速度以及耗氧速度与各有关参数关系的半经验、半理论性的动力学模式。

于是, “活性污泥生物学”、“活性污泥反应动力学”应运而生, 并逐步发展而走向成熟。在今天, 它们已经成为污水生物处理科学领域的两个重要的分支。

作为必修的专业课, 几年来, 我们为研究生开出了“活性污泥生物学”和“活性污泥反应动力学”, 并在科学研究工作中应用和不断深化。

本书就是在我们为研究生讲课的讲稿的基础上编写的。

本书共十章, 包括活性污泥生物学和反应动力学两部分。在前一部分中, 对在活性污泥净化反应中起主要作用的微生物: 细菌和原生动物作了重点阐述。除了对它们的形态特征、生理功能、出现的种属以及它们在净化反应中所起的作用和演变规律等

问题作了较系统的阐述外，还从微生物学和生物化学的观点对活性污泥絮凝体的形成和它对有机底物降解过程的机制作了较深入的阐述。

在反应动力学部分里，我们以较多的篇幅系统而比较详尽地向读者介绍了影响较大且为各国大多数污水生物处理技术人员所接受的名家学者所提出的动力学模式，其中有莫诺（Monod）模式、埃肯费尔德（Eckenfelder）模式、劳伦斯—麦卡蒂（Lawrence-McCarthy）模式和麦金尼（M.C. Kinney）模式等。除对这些模式的理论基础、论点、模式的数学推导等作了系统的介绍外，还特别注意到这些模式在活性污泥系统计算中的实用性，在各名家模式之后，都安排有一定数量的计算例题。

为了使反应动力学的讨论更为深入，本书还用一定的篇幅，就活性污泥净化反应过程的某些功能环节（如活性污泥增长、吸附）和各种类型曝气池系统的合理计算，作了系统而深入的动力学分析。

我们力求对这两部分综合地加以论述，使其前后呼应。

在编写的过程中，我们参阅了大量的英、俄、日文书刊、资料，为了保持原文的风格，在引用时我们沿用了原文所使用的表示符号，例如，有机底物在本书中就用了三种不同的表示符号（ S 、 F 、 L ）。

本书第二、三、四、九、十等五章由张自杰编写，第一、五、六、七、八等五章由周帆编写，张自杰也参与了第五章中的部分内容的编写。在编写过程中，我们始终保持着密切的联系，并多次集中讨论、互审。

限于我们的水平，书中缺点、错误以及不妥之处在所难免，欢迎广大读者不吝斧正。

编者

第一章 污水的生物处理 与活性污泥法

第一节 自然界的物质循环及其 在污水处理领域的应用

一、水污染物质

人类在日常生活和生产活动过程中,必须用水。这些用过的水将挟带污染物质排出,污染环境,影响社会的正常生活 and 生产活动,甚至危害居民健康。随着生产的发展,污水污染问题益愈突出,人们对污水的危害性和污水治理必要性的认识也随之而加深。

污水挟带的水分以外的物质统称杂质,其中可能污染环境的叫污染物质。水污染物的分类方法很多,下列分类方法是可取的:

①耗氧污染物 主要来自于生活污水和某些工业废水,是一种可生物降解的有机物质。这些有机物被细菌分解时要消耗水中的氧。若水中溶解氧量降低到一定程度,可导致鱼类死亡。

②致病污染物 通常是随同人类排泄物一起进入水体的各种病原微生物。饮水或与水接触的各种活动都是沾染这些微生物的途径。

③沉淀物 是指土粒、砂粒和从土地上冲刷下来的无机矿物质的沉淀,一些淤塞在水库和海港底部的贝类动物或珊瑚也属此类。土壤管理方法不适当而导致的侵蚀是沉淀物量增加的一个

主要原因。

④合成有机化合物 主要是指包括洗涤剂在内的家用有机合成制品、农药以及许多合成的工业化学试剂。这些化合物中的大多数对水中生物是有毒害作用的，因而对人类也是有害的。

⑤无机化合物及矿物性物质 这是指从矿山排水过程中形成的酸以及汞、镉等重金属。

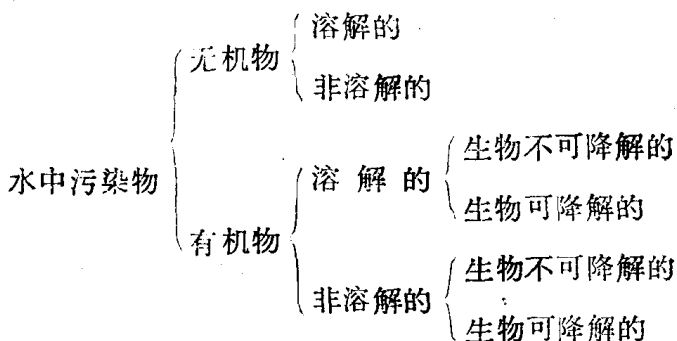
⑥植物性营养物质 主要是指氮和磷，一级污水处理厂排出的污水，施肥农田的迳流都含这种营养物质。这种营养物质能够促使藻类和水草异常急剧繁殖。

⑦放射性污染物 开采和加工放射性矿石，核发电站，医院以及核武器实验，是水体受到放射性污染的主要原因。典型的放射性污染物在食物链中的富集在很大程度上和DDT在食物链中的富集完全类同。

⑧热污染 常指水体水温的升高。热电站排出的温度较高而含其它污染物较少的废水通常是这类污染的污染源。热污染的结果是使该地区的生态系统发生严重变化。

水体污染通常是上述若干种污染物综合作用造成的，它将给环境带来严重影响。

本书主要讨论有机性污染问题。为便于后面章节的讨论，又可将污水中的污染物质按其化学成分加以分类，即将其分为无机



物质和有机物质两大类，它们以溶解和非溶解的状态存在于污水中，而有机物又可区分为生物可降解与不可降解两部分（如上图解所示）。

二、自然界的物质循环

组成一切有机物的基本元素是C、H或C、H、O，某些种类的有机物如蛋白质等还含有N、S、P等元素，称为含氮有机物，故只含C、H、O三种基本元素的有机物称为不含氮有机物。天然来源的有机物大致可分为碳水化合物、脂肪和蛋白质三大类。各种有机物大多可归属于这三类以及它们的衍生物。大千世界成千上万的有机物主要是由这少数几种元素的不同组合变换所组成。简单的有机物组成复杂的有机物、复杂的有机物又向简单的有机物转化，有机物的元素就是这样地进行着循环。

自然界里生息着从微生物到高等动物的无数生物。一种生物以另一种生物为食料。其尸骸或排泄物又为另一种生物所食用。结果，在有机物从一种生物向另一生物体内转移的同时，组成有机物的元素得以变换组合并在自然界内进行循环。

绿色植物和一部分微生物能够将水、二氧化碳、铵盐、硝酸盐、硫酸盐等无机物合成为有机物，从而使自然界的有机物有所增加，这是一方面。而另一方面，为生物所摄取的有机物中的一部分，作为生物从事生理活动的能源而被消耗，于是，有机物又在循环中有所减少。

绝大多数有机物，特别是天然有机物，总是“不稳定”的，是要向无机物方向转化，这种现象称为有机物的无机化或矿化，而这主要借助于微生物的作用。有机物在微生物参与下逐步降解而转化为无机物是一种生物化学过程。

采取人工措施，以促进、强化有机物在自然界循环中的无机化过程，就是污水生物处理的实质。

三、自然界物质循环规律

在污水处理领域中的应用

有机物在微生物作用下降解、转化为无机物的过程，在自然界中广为存在。参杂于土壤中的有机物，由于土壤结构中含有水份和空气，在种类繁多、数量巨大的土壤微生物作用下而被生物降解、转化为无机物。这种作用称为土壤自净作用。有机污染物排放于水中，河水遭到污染，但污水与空气广泛接触，氧溶解于水中，于是好氧微生物以有机污染物为食料而将其转化为无机物，河水再次得到净化。这种作用称为水体自净作用。

人工污水生物处理法就是根据这一原理产生的：模拟土壤的自净过程而创造了生物过滤（生物膜）法（图1-1），模拟水体的自净过程，创造了活性污泥法（图1-2）。这两类方法都是利用好氧微生物转化污水中的有机物，都需及时地、充分地供应空气（或氧气），以满足好氧微生物新陈代谢的需要。它们的基本不同点在于微生物的存在方式不同。在生物膜法中，微生物是附着生长；而在活性污泥法中，微生物是分散地悬浮生长。

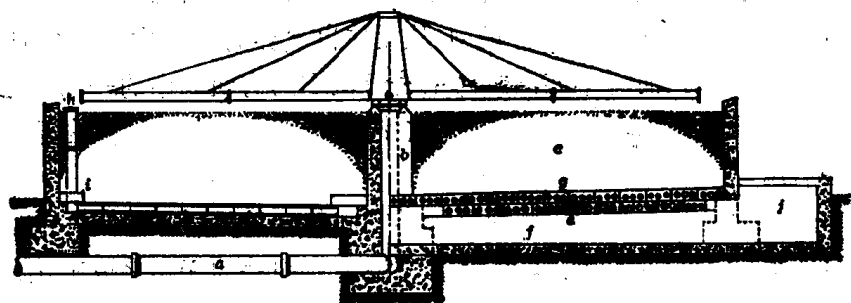


图1-1 普通生物滤池示意图

- a——入流管；b——布水器支座；c——滤床；d——布水器；e——排水假底；
f——集水沟；g——沟的栅盖；h——通风管；i——通风沟；j——窖井