

水环境净化及废水处理 微生物学

〔日〕 须藤隆一 著
俞辉群 全浩 编译
全浩 张自杰 校

中国建筑工业出版社

水环境净化及废水处理 微生物学

〔日〕 须藤隆一 著
俞辉群 全浩 编译
全浩 张自杰 校

中国建筑工业出版社

废水生物处理是利用微生物的代谢反应而进行的一种处理方法。本书较全面地介绍了各种生物处理的原理和方法；论述了各种生物处理法的微生物学基础、机理、处理设备、实验方法、占优势的微生物种属和指标性微生物种属、应用实例等。本书的特点是较详细地论述了各种生物处理设施的运行过程中与处理的各个不同阶段中常见的微生物种属，它们的名称、习性、生态、摄食性、培养、增长和驯化的具体方法，并收录了约2000种废水处理中常见的微生物。

本书可供给水排水、环境保护、废水处理等专业的科学研究人员、工程技术人员及大专院校师生、研究生等参考。

水环境净化及废水处理微生物学

[日] 须藤隆一 著

俞辉群 全 浩 编译

全 浩 张自杰 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/16 印张：26½ 字数：642 千字

1988年5月第一版 1988年5月第一次印刷

印数：1—6,550册 定价：6.40元

ISBN7—112—00247—8/X·5

统一书号：15040·5281

中文版序言

这次，我的拙著《废水处理生物学》、《环境净化微生物学》和《应用生物相判断水处理功能》三本书由全浩、俞辉群两位先生编译成中文本《水环境净化及废水处理微生物学》、在中国出版发行，使我深感荣幸。

1982年5月，我同东京都环境科学研究所川原浩先生一起到中国进行了为期三周的访问。在中国期间，我先后访问了北京、沈阳、抚顺等城市，并就污水的生物处理问题进行了专题讲学和座谈。当时，我被中国技术人员和研究人员的认真求学精神所感动，而且使我深信，中国在污水处理方面研究成果的积累和技术的发展必将促进中国的环境保护和废水处理事业迅速发展。

城市污水、食品加工废水等含有大量有机物的废水处理，是以活性污泥为中心的生物处理作为其基础的。然而，生物处理的运行管理是极其困难的，在很多方面必须依靠人们长期积累下来的经验。为了恢复和改善受纳水域的水质，必须加强处理设施的运行管理，使处理水水质保持稳定的同时，进一步去除污染物质。

污水的生物处理法是利用微生物的代谢反应而进行的一种处理方法，因此在生物处理设施的运行管理中必须以创造出净化微生物的最适环境与营养条件为目标。不过，参与水处理的生物大部分为微生物，是一种包括细菌、原生动物等很多种类的生物在内的混合培养体系。当然，在混合培养体系中必然存在着各种微生物种群之间复杂的生存竞争和生态平衡关系，因而会出现纯种培养时想象不到的现象。这就是生物处理难于运行管理的根本原因所在。本书根据这一观点，论述了与生物处理有关的微生物的种类和生态等问题，而且为了从事污水处理的技术人员和研究人员应用上的方便，尽可能收集了污水处理微生物学以及生物处理中经常遇到的各种具体问题。

如果本书对中国的环境保护和废水处理事业有所帮助的话，对我来说将是一个莫大的喜悦。

日本环境厅国立公害研究所 微生物环境研究室 室长 须藤隆一 博士
1985.6.1 日本科学城——筑波

编译者的话

地球上所有的物质中，对人类以及一切生物来说最基本的物质就是水和空气。现在人类居住的这个地球表面上四分之三为水，因而有人把地球叫做“水球”。然而在这个“水球”上，大约97.5%的水是海水，而适合人类使用的淡水只占2.5%。在这些淡水中，南极、北极、格陵兰的冰雪约占70%，因而人们能够直接加以利用的淡水只有0.8%。虽然自然界以地下水、地表水、降雨、降雪以及水循环等形式补充和再生人们所需要的水，但是自然界的补充和再生是有限的。加之，人类社会进入工业化时代以来，由于环境污染，很多淡水水体亦随之遭到污染，水质恶化，清洁的水愈来愈少。将来，随着世界人口的增长，工农业生产的进一步发展以及人们生活水平的不断提高，水资源不足的问题将会更加严重。所以，只要人类在地球上生存下去，那么，水处理将是人类在任何时候都不可能中断的一项重要工程。

水资源与煤、石油、矿物、木材等经济资源不同，它是一种可以再生的资源。所谓水处理就是水资源再生的一种手段。迄今为止，人类在水处理方面积累了很丰富的经验，其中利用微生物的生物处理法乃是借助于自然界的力量来处理污水的一种技术，无论是现在和将来，它都将是水处理的主要途径之一。

近十多年来，我国有关方面的科学工作者和工程技术人员，在废水处理方面取得了不少成果，但同时也认识到我们自己的不足。例如，我们有些科学工作者虽然对微生物学颇有研究，但他们很少接触水处理工程，缺乏工程实践经验，不能单独解决水处理的实际问题。相反，有些工程技术人员多年从事污水处理，实际工程经验比较丰富，但又因缺乏微生物学方面的知识，导致污水的生物处理技术未能得到充分的发展。为此，我们一直期望能向从事水处理工程的研究人员和工程技术人员推荐一本书，以弥补上述的不足。

须藤隆一博士是日本颇有名望的水处理专家，特别对污水的生物处理方面的研究有很深的造诣，并有许多著作。《水环境净化及废水处理微生物学》一书即是从他的《废水处理微生物学》（日本产业用水调查会，1975年版）、《环境净化微生物学》（日本讲谈社，1983年版）和《应用生物相判断水处理功能》（日本产业用水调查会，1983年版）三本书摘译汇编而成。因而本书较全面地介绍了各种生物处理的原理和方法，从理论和实践两个方面阐述了各种生物处理方法的微生物学基础、机理、设备、实验方法、指标性微生物种属、实际应用例子及其优缺点。本书的特点是比较详细地论述了在各种生物处理法的各个处理阶段中出现的微生物的种属名称、习性、生态、摄食性、培养、增长、驯化方法，以及指标生物等，并收录约2000种微生物。我们希望，这些内容对从事污水生物处理和水环境净化的科学技术人员能有启示和参考价值。

本书第一，三，八，九，十章由全浩翻译，第二，四，五，六，七，十一章由俞辉群翻译。在本书的编译过程中，中国科学院水生生物研究所原生动物学专家沈韞芬审阅了全部译文，审定了全部微生物的译名，并提出了许多宝贵的意见；书中还有部分微生物名词由南

目 录	
第一章 微生物在环境净化中的作用.....	1
1.1 微生物的特征.....	1
1.2 微生物的代谢.....	10
1.3 水的自净作用.....	14
1.4 土壤的自净作用.....	19
第二章 微型动物的习性及其作用.....	22
2.1 原生动物的增长速度.....	22
2.2 原生动物的营养条件.....	26
2.3 原生动物的增长和环境条件.....	32
2.4 原生动物的捕食作用.....	48
2.5 微小后生动物的增长.....	64
第三章 合成有机化合物的微生物降解.....	71
3.1 微生物降解的意义.....	71
3.2 生物降解.....	71
3.3 生物降解性的试验方法.....	73
3.4 难降解性物质.....	80
3.5 有机化合物的化学结构与生物降解特性.....	91
第四章 活性污泥法.....	94
4.1 处理过程.....	94
4.2 运行条件.....	98
4.3 与净化有关的生物群.....	107
4.4 原生动物的作用.....	133
4.5 曝气池中原生动物的增长速度.....	142
4.6 活性污泥的形成过程中生物相的变化.....	146
4.7 管理中使用的指标生物.....	151
4.8 污泥膨胀及其控制.....	158
4.9 活性污泥的脱氢酶活性.....	163
4.10 二次沉淀池的生物相.....	171
第五章 生物膜法.....	176
5.1 处理过程.....	176
5.2 参与净化的生物群.....	182

5.3	生物膜法的特征	196
5.4	生物膜中微型动物的作用	207
5.5	管理中使用的指标生物	210
第六章	厌氧处理	213
6.1	处理过程	213
6.2	与净化有关的微生物群	222
6.3	管理指标	226
第七章	特定的生物处理	229
7.1	藻类	229
7.2	光合细菌和酵母	233
7.3	环形动物	238
第八章	富营养化的防止	240
8.1	富营养化的机理	240
8.2	藻类生产的潜在能力	246
8.3	防止富营养化的措施	260
第九章	富营养化的水处理	266
9.1	脱磷	266
9.2	脱氮	290
第十章	微生物反应的控制	309
10.1	微生物增长动力学	309
10.2	混合培养系统	310
10.3	微生物反应控制中模式的目的与意义	311
10.4	富营养化模式	313
10.5	河流模式	321
10.6	废水的生物处理模式	326
第十一章	生物处理功能判断实例	336
11.1	判断活性污泥功能的指标性生物	336
11.2	判断生物膜功能的指标性生物	339
11.3	判断活性污泥功能的实例	341
11.4	生物膜功能判断实例	346
11.5	指标性生物形态	349
微生物名词对照		401

第一章 微生物在环境净化中的作用

1.1 微生物的特征

1. 微生物的种类

微生物，顾名思义是指形体微小，只有在显微镜下才能加以辨别的生物，但从分类系统上同一般大型动植物是难以严格区别的。从狭义上讲，微生物包括细菌、真菌、病毒等；从广义上讲，还包括原生动物和藻类等。在水和土壤中大量存在着与人类生活没有直接关系的微生物，它们的特性和生活方式多种多样。因此，研究探讨环境问题的微生物学，即环境微生物学（environmental microbiology）就必须把存在于环境中的所有微生物作为研究的对象。本书中不仅要涉及到细菌、真菌、病毒、微型藻类和原生动物，而且根据需把一部分小于1~2mm的微小后生动物、即袋形动物、环节动物、节肢动物也作为微生物加以探讨。通常把不具有被核膜隔开的细胞核的生物叫做原核生物（Procaryote），而把那些具有被核膜隔开的细胞核的生物叫做真核生物（eucaryote）。除蓝藻类以外的藻类均属于真核生物。

分类学是为了将150万种以上的动植物加以整理分类、并为鉴别某种生物属于哪种生物群而发展起来的。在系统分类上，种（Species）是基本的分类单位，而且具有在形态学、生态学和生理学方面能够与其他种加以区别的特征。一般在种的表示方法中采用双名法，即同时表示属名和种名的方法。根据双名法用拉丁文表示的生物种名称为学名，这是全世界通用的，是早已被确定下来的。在日本被命名的种的固有名称为“和名”。不过在环境微生物学中所接触的微生物中很多就没有“和名”，而一般使用学名。另外，在分类学上若干个种依次分为属、科、目；而且根据其亲缘关系又依次分为纲、门、界。如再作更细的分类时，在门与纲之间还有亚门；纲与目之间有亚纲；目与科之间有亚目；科与属之间有亚科等。如对种再作详细记载时，有时还使用亚种、变种、血清型、株名等。经过纯种分离培养的微生物多记载到种以下。然而，目前人们还没有积累到能够建立微生物的系统分类所需要的全部资料，所以现在还不能建立一个完整的微生物分类体系。正由于这个原因，微生物的分类尚处于过渡性阶段，而且往往因研究者不同而其分类方法也有所不同。

2. 微生物的形态

（1）细菌

细菌体形极小，缺乏一定的形态特征，因此单靠观察形态来进行分类是很困难的。随着人们对具有各种生理活性细菌的发现，在分类学上不但重视形态，而且更重视生理及生化特征。现在在细菌的分类和鉴定上需要了解如表1.1.1所列举的各项性质。其中，革兰

氏染色法在细菌分类上占有最重要的地位。

细菌的鉴定试验

表 1.1.1

细菌的形态	细胞的形状(球形、杆形、螺旋形、大小) 运动能力与鞭毛(极毛、周毛) 孢子(形状与大小)、孢子囊(孢子的位置) 细胞繁殖的方式(分裂、出芽、二倍体、念珠状、丝状) 染色性质(革兰氏染色、抗酸性染色、异染粒)
培养时的特征	菌落的性质(增长的程度、形状、表面特点、周围的形状、颜色、光泽) 斜面培养的性质(增长的程度、形状、颜色、性质) 液体培养的性质(增长的程度、皮膜、沉淀、颜色)
生物化学性质	硝酸盐的还原, 脱氮, 产酸, MR 试验, 甲基乙基甲醇的生成, 吲哚的生成, 硫化氢的生成, 淀粉水解, 明胶水解, 可利用的含碳化合物, 可利用的含氮化合物, 由糖类生成酸, 氧化发酵试验, 色素生成, 由甘油生成二羟基丙酮, 乳酸生成, 尿素分解, 氨基酸的脱羧作用, 细胞色素氧化酶作用, 过氧化氢酶作用
生理学性质	生长温度, 需氧程度(好氧或厌氧), 生长繁殖 pH, 高渗溶液中的生长, 血清学性质(抗原分析)
生态学特征	生活场所, 分布, 寄生性、致病性

革兰氏染色方法是菌体先经过龙胆紫 (Gentian violet) 染色后, 用罗果氏液 (Lugol's solution) 进行处理, 然后用番红 (Safranin) 进行对比染色。在这种染色中, 如菌体被染成紫色, 则判断为革兰氏阳性菌; 如被染成淡红色则判断为革兰氏阴性菌。人们已经了解到革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌在细胞壁的化学组成以及对抗菌素的感受性等方面具有很多不同点。

细菌的形态并不是固定的, 而且因培养时间、营养的好坏、氧浓度等条件不同而有着很大变化。一般说来, 幼龄细菌比老化细菌大。例如, 经 4 h 培养的枯草杆菌比 24 h 培养的要大 5~7 倍。虽然细菌因营养或环境条件不同而在形态上发生变化, 但不同的菌种必然各自具有大体相同的大小和形状。细菌的形状如图 1.1.1 所示。

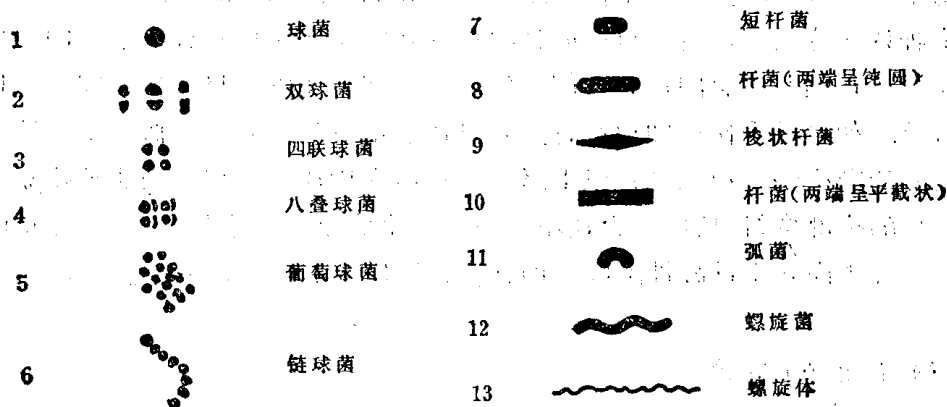


图 1.1.1 细菌的形状

球菌可根据每一个球的形状和排列方式分为若干种类。双球菌是两个球菌双双成对排列着, 而且每一个细菌呈椭圆形或半月形。链球菌是各个球菌细胞排列成一条链状或念珠

状。葡萄球菌是各个球菌细胞好似吊起来的葡萄一样无规律地联成块。四联球菌是四个球菌细胞按田字形联在一起，而八叠球菌的形状如同两个四联球菌重叠起来一样。杆菌也有几种，其中包括两端呈钝圆形的（大肠杆菌、动胶杆菌、浮游球衣菌等），尖形的（白喉菌）以及长而细的长杆菌和短而粗的短杆菌（痘疫苗）。螺旋菌的菌体细长而呈螺旋状。细菌中最大的可达 $80\mu\text{m}$ ，小的则为 $0.2\mu\text{m}$ ，即已接近于光学显微镜的临界点。硫细菌和铁细菌就是属于最大的细菌。就大多数细菌的大小而言，球菌中直径为 $0.5\sim 1.0\mu\text{m}$ 的占多数，杆菌中则以 $(0.5\sim 1.0)\times 1.0\times 2.0\mu\text{m}$ 左右的居多。放线菌在形态上已分化为菌丝体、呈菌丝状，而且菌丝的直径为 $0.3\sim 1.0\mu\text{m}$ 左右。当然，在放线菌中包括在整个生活史中具有菌丝体的和菌丝体被断裂而变成球菌或杆菌状态的细菌两种。放线菌在土壤中分布很广、而且作为抗菌素生产菌受到重视。

细胞在核和细胞质发生分化时，其变化最为明显。一般认为，核具有与遗传有关的功能、而细胞质则与代谢活动有关。在这一点上，细菌的细胞与高等植物的细胞没有多大差别。不过在细菌的细胞中不存在被膜包围着的核和线粒体等。细菌细胞是由含有细胞内颗粒物和细胞内含物的细胞质以及核组成。有些种类的细菌可产生孢子或具有鞭毛。

(2) 真菌

真菌属于低等植物的一个门，即菌藻植物门。它属营养性，而且在形态学和繁殖方式上与高等植物有着很大区别。真菌包括霉菌、蘑菇和所有的酵母菌，主要以伸长菌丝的方式摄取营养，是和细菌同样重要的微生物群之一（图1.1.2）。真菌是由孢子发芽开始逐渐伸长菌丝呈丝状，而且其中很多种类是经再次分枝之后，由许多菌丝聚合在一起形成菌丝体。当菌丝生长到一定程度后，在多数情况下则形成能够产生孢子的生殖器官。生殖器官的形状和孢子形成的方式，是真菌分类的重要依据。所谓霉菌就是在通常的真菌中除了酵母和蘑菇之外，凡是菌体呈丝状的真菌的总称。

通常真菌可分为如下几类。

- 藻菌纲 (*phycomycetes*)：菌丝没有隔膜
- 子囊菌纲 (*ascomycetes*)：有性孢子着生在孢子囊内
- 半知菌纲 (*deuteromycetes*)：没有有性孢子，而依靠无性孢子来繁殖。

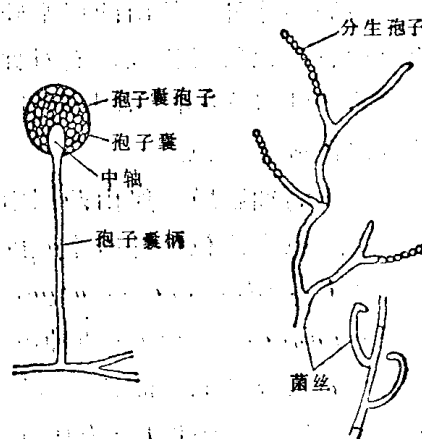


图 1.1.2 真菌的形态

左：毛霉属 (*Mucor*)；右：白地霉属 (*Geotrichum*)

(3) 病毒

一般认为病毒是生物与非生物的中间体，是在普通光学显微镜下无法观察到的最小微生物。病毒不仅体形小，而且具有与细菌完全不同的结构，并可提纯为结晶。一般微生物的细胞同时含有DNA和RNA，但病毒只含有DNA和RNA两者中的一种以及保护这种核酸的蛋白质。因此，病毒几乎不具有独立的代谢功能，只能寄生在一般动植物或微生物的细胞内生长繁殖。寄生在微生物体内并能产生溶菌现象的病毒称为噬菌体 (*phage*)。

那些寄生在细菌的病毒叫做细菌噬菌体 (*bacteriophage*)，而寄生在蓝藻类的病毒叫做蓝藻噬菌体 (*cyanophage*)，而且在菌体内增长起来的噬菌体一旦被释放出来就能溶解细胞。

(4) 藻类

藻类是属于一种水生生物，但亦可生长在潮湿的土壤、石块、木头等表面上，而且有时也可以与菌类或动物共生。藻类具有叶绿素 a ，因而是能够进行光合作用而产氧的生物群。藻类是所有水生动物食物链的基础，也是最重要的生产者。水中有机物生产的绝大多数是依靠微小藻类，即浮游植物 (*phytoplankton*)。

藻类细胞的大小一般为 $5\sim 50\mu\text{m}$ ，而且根据细胞结构和色素体不同而分为若干个门。其中包括蓝藻门 (*cyanophyta*)、绿藻门 (*chlorophyta*) 硅藻门 (*bacillariophyta*)、金藻门 (*chrysophyta*) 和甲藻门 (*dinophyta*) 等。而有时将后两个门划为原生动物门鞭毛虫纲。

蓝藻类往往形成由单细胞或很多细胞集合而成的丝状体，或者在琼脂膜内形成群体。能够形成丝状体的藻类除营养细胞外，还能生成异形胞 (*heterocyst*) 或厚壁孢子 (*akinetes*)。因而这种特点便成为分类的一个标准。蓝藻类除了叶绿素 a 和 b 以及藻蓝素外，有时还含有藻红素。正是这些色素使蓝藻呈蓝绿色或蓝紫色。实际上，在湖泊中形成水花的藻类多属于蓝藻类。

硅藻的藻体外膜是由两层坚硬的硅酸质壳组成，其形状很象盖着盖子的箱体，而且在壳两边均有呈辐射对称或左右对称排列的点或花纹。这种形态就成为分类的一个标准。由于硅藻除了叶绿素 a 外，还具有叶黄素 (*xanthophyll*) 硅藻素 (*diatomin*) 等色素，所以呈黄褐色或黄绿色。

绿藻类的细胞膜一般由两层组成，其内层为纤维素，外层为果胶糖。细胞内含有核与若干色素。色素体包括叶绿素 a 和 b 以及胡萝卜素 (*carotin*)，所以呈鲜艳的绿色。金褐色鞭毛藻类 (*golden brown algae*) 通常依靠一至二根鞭毛运动，而且含有叶绿素 a 和藻金黄素 (*phycochrysin*) 两种色素体，因而呈黄褐色或黄绿色。甲藻类是在膜一侧具有长短不一的两根鞭毛，而且多数甲藻类具有坚硬的纤维素壳。在赤潮中经常出现的藻类中以这种藻类居多。图1.1.3为具有代表性的藻类形态。

(5) 原生动物

原生动物亦称为原虫，与多细胞的后生动物不同，是一种单细胞动物。

原生动物可分为如下四个纲：

- a. 依靠一至几根鞭毛运动的鞭毛虫纲；
- b. 依靠伪足运动的肉足虫纲；
- c. 没有运动能力但能形成孢子而寄生的孢子虫纲；
- d. 借助于纤毛运动并具有大核和小核的纤毛虫纲。

在这些原生动物中，孢子虫纲是属于寄生性的，而且与环境没有直接的关系。通常原生动物呈叶片状、球形、圆锥形等形状，但左右对称者甚少。其大小也很不一样，最小者为 $5\mu\text{m}$ 左右，最大者甚至可达 3mm ，一般 $50\sim 100\mu\text{m}$ 者居多。另外，原生动物并不是通

过细胞的任何部位都能摄取食物的,而只能通过胞口 (cytostom) 摄取 (图1.1.4), 而且胞口与胞咽、食物胞等细胞器联结在一起。收缩胞 (亦称储蓄胞) 具有将在体内形成的多余水分排出体外, 或在代谢过程中产生的废物排出体外的作用, 而且其位置和大小因种类不同而有所不同。

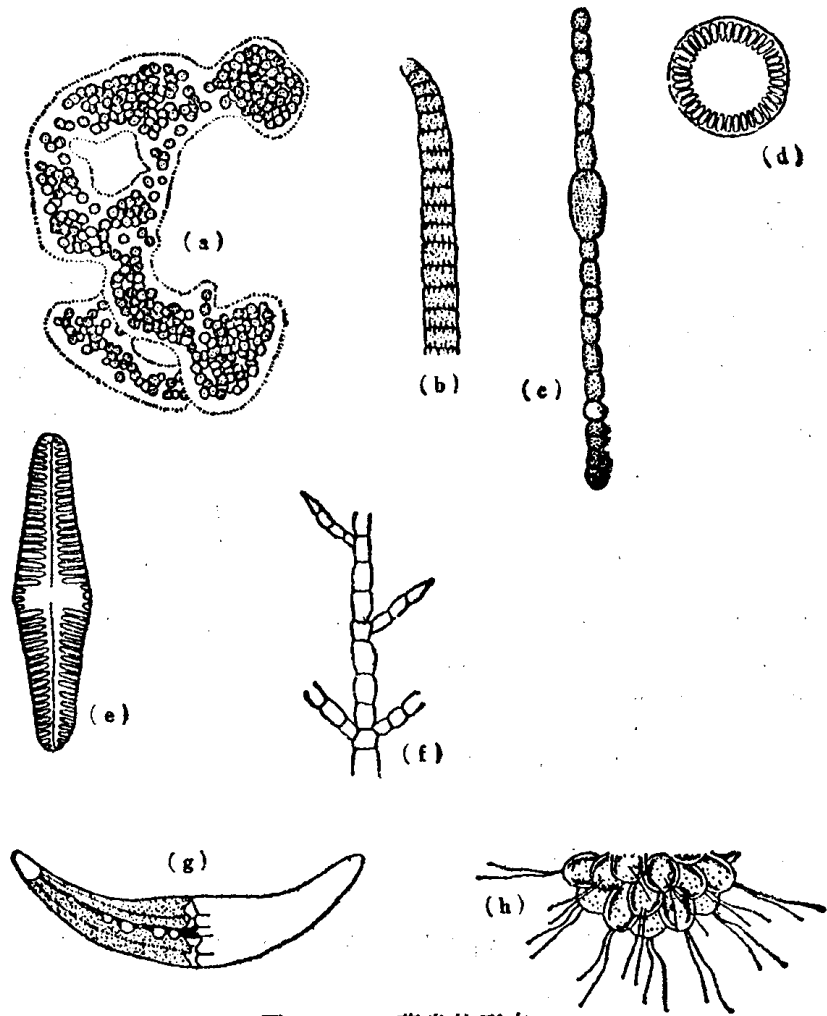


图 1.1.3 藻类的形态

- (a) 铜锈微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*),
- (b) 美丽颤藻 (*Oscillatoria formosa*),
- (c) 螺旋鱼腥藻 (*Anabaena spiroides*),
- (d) 梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*),
- (e) 披针曲壳藻 (*Achnanthes lanceolata*),
- (f) 小毛枝藻 (*Stigeoclonium tenue*),
- (g) 项圈新月藻 (*Closterium moniliforme*),
- (h) 黄群藻 (*Synura uvella*)

(6) 微型后生动物

微型后生动物中很多种类是属于袋形动物、环节动物、节肢动物的。袋形动物中有轮虫纲、腹毛虫纲、线形虫纲。其中, 轮虫纲广泛分布在水和潮湿土壤中, 体长一般为100~150 μ m左右, 如图1.1.5所示, 轮虫纲的体形左右对称, 身体的上部为具有纤毛环的头盘。从口摄取的食物便通过咽头进入咀嚼囊 (mastax)。咀嚼囊的中间有一个咀嚼器。咀嚼器的这种构造是轮虫纲分类的重要依据。

在环节动物中属于寡毛纲原始寡毛目者 (如水蚯蚓等) 多数属于微型后生动物。这种

生物是雌雄同体，体长为0.5~3mm左右，生殖腺位于身体的前半部，而且其位置因种类不同而有所不同。身体各节上的刚毛形态是分类的重要标准。节肢动物中体形较小的生物（如水蚤等）多属于甲壳类，其体长为1~3mm。这些生物多在水中呈浮游方式，所以连同上述的轮虫类一起统称为浮游生物。

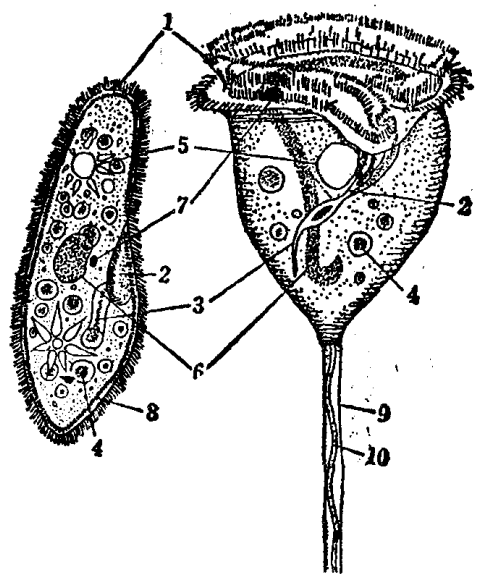


图 1.1.4 原生动物的构造
左：尾草履虫(*Paramecium caudatum*)；右：沟钟虫(*Vorticella convallaria*)
1—纤毛；2—胞口；3—胞咽；4—食泡；5—收缩泡；6—大核；7—小核；8—毛胞；9—柄；10—肌丝

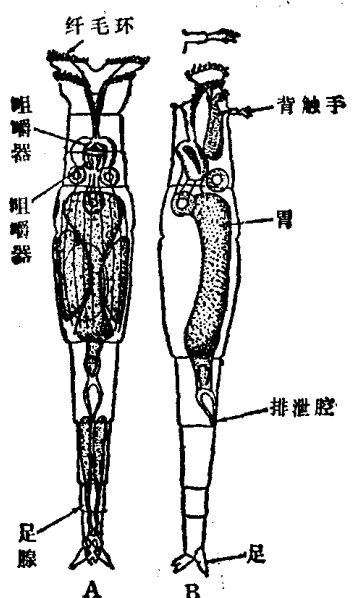


图 1.1.5 轮虫类(旋轮虫属，未定种)的构造
A：腹面；B：侧面

3. 微生物的生长繁殖

微生物除少数行有性繁殖外，多数行无性繁殖。如细菌和鞭毛虫类按垂直分裂方式进行繁殖，而纤毛虫类则以横分裂方式进行繁殖。微生物的生长繁殖按时间顺序可分为诱导期、对数增长期、恒定期和内源呼吸期。在对数增长期由于没有空间和营养等条件的抑制影响，因而具有一定的增长速度。通常，微生物的增长速度可用倍增时间 (doubling time) t_d 或比增长速度 (单位增长速度) μ 表示。在表1.1.2中列举了各种微生物的增长速度。由于培养温度和培养条件等大不相同，不宜把这些增长速度直接地加以比较，但一般说来，细胞越小的微生物，其比增长速度越大。细菌和酵母的比增长速度一般在藻类和原生动物的十倍以上，但轮虫类和寡毛类的比增长速度却小得多，约等于原生动物的十分之一左右。

微生物的增长速度 表 1.1.2

微 生 物 名 称		增 长 速 度 $\mu(d^{-1})t_d(h)$	培 养 温 度 (°C)	1 个细胞的干重 (mg)
细 菌 类	巨大芽孢杆菌(<i>Bacillus megatherium</i>)	31.8 0.52	30	3.8×10^{-9}
	大肠埃希氏菌(<i>Escherichia coli</i>)	59.1 0.28	37	4.0×10^{-10}
	球形红假单胞菌(<i>Rhodopseudomonas spheroides</i>)	6.9 2.4	34	—
	亚硝化毛杆菌(<i>Nitrosomonas</i> sp)	1.3 12.7	25	—
	金黄色葡萄球菌(<i>Staphylococcus aureus</i>)	37.6 0.44	37	1.5×10^{-10}

				续表	
微 生 物 名 称		增 长 速 度 $\mu(d^{-1})$ $t_d(h)$		培养温度 (°C)	1 个细胞的干重 (mg)
藻 类	柱胞鱼腥藻(<i>Anabaena cylindrica</i>)	0.66	25.0	25	—
	铜锈微囊藻(<i>Microcystis aeruginosa</i>)	0.64	25.9	25	—
	最小舟形藻(<i>Navicula minima</i>)	0.97	17.1	25	—
	椭圆小球藻(<i>Chlorella ellipsoidea</i>)	2.5	6.7	25	—
	羊角月芽藻(<i>Selenastrum capricornutum</i>)	1.9	8.7	25	1.9×10^{-8}
真 菌	低发酵度酿酒酵母(<i>Saccharomyces cerevisiae</i>)	8.3	2.0	30	7.1×10^{-8}
原生动物	小口钟虫(<i>Vorticella microstoma</i>)	3.3	5.0	20	3.9×10^{-6}
	褶裂枝虫(<i>Epistylis plicatilis</i>)	1.6	10.2	20	—
	弯豆形虫(<i>Colpidium campylum</i>)	3.6	4.7	20	1.6×10^{-6}
	尾草履虫(<i>Paramecium caudatum</i>)	1.4	12.0	20	3.0×10^{-4}
	梨形四膜虫(<i>Tetrahymena pyriformis</i>)	5.3	3.1	25	1.4×10^{-6}
	隆额肾形虫(<i>Colpoda steinii</i>)	5.5	3.0	30	1.2×10^{-6}
	天蓝喇叭[纤]虫(<i>Stentor coeruleus</i>)	0.75	22.1	19	5.0×10^{-8}
后生动物	有肋栖纤虫(<i>Aspidisca costata</i>)	1.2	13.6	20	—
	轮 虫 属(<i>Rotaria</i> sp.)	0.28	59.1	20	—
	旋轮虫属(<i>Philodina</i> sp.)	0.23	72.0	20	—
	腔轮虫属(<i>Lecone</i> sp.)	0.31	54	20	—
	汉波瓢体虫(<i>Aeolosoma hemprichi</i>)	0.35	47.3	20	—
	仙女虫属(<i>Nais</i> sp.)	0.12	138	20	—
	吻盲虫属(<i>Pristina</i> sp.)	0.12	138	20	—
	尾盘虫属(<i>Dero</i> sp.)	0.07	238	20	—

微生物的生长繁殖与温度有着密切的关系、而且其最适温度因种类不同而异。很多藻类和原生动物的最适增长温度为20~30°C。例如，小口钟虫(*Vorticella microstoma*)的增长温度范围为3~33°C，但最适温度为25°C。玫瑰施轮虫(*Philodina roseola*)在5~38°C范围内都可以生长繁殖，而最适温度为35°C。

4. 微生物的相互作用

通常，微生物即使是在没有其他种类的微生物存在的情况下，也不是长期处于对数增长期，而是以S字形达到某一个值后，种群的增长便停止下来。这个曲线称为对数增长曲线，可用下式表示。

$$N = \frac{K}{1 + e^{-at}} \tag{1.1}$$

式中 N ——个体数，
 K ——饱和密度，
 a ——常数。

人们业已证明，式(1.1)亦可适用于人和高等动物。它是由如下微分方程中推导出来的。

$$\frac{dN}{dt} = N(\mu - hN) \tag{1.2}$$

式中， h 为Verhulst—Pearl系数。

饱和常数 K 就是当 $\mu - hN = 0$ 时的密度，即 $K = \mu/h$ ，所以式(1.2)可改写为如下形式。

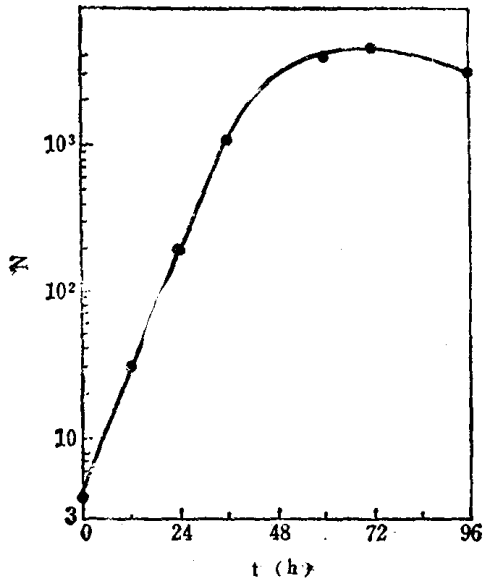


图 1.1.6 小口钟虫的增长曲线 (22.5°C)

$$dN/dt = \mu N \frac{K - N}{K} \tag{1.3}$$

式(1.3)说明，密度的增加会使环境阻力(拥挤效果)增加，而且这种环境阻力可用式 $1 - (K - N)/K$ 表示。图1.1.6为小口钟虫的增长曲线。这是将0.1mL细菌悬浊液置于凹面载玻片上，进行培养而得到的。当个体数较少时，细菌呈几何指数增加，但随着环境阻力的增加而细菌个体数的增加逐渐变慢，并接近于饱和状态。假如这个曲线符合对数增长曲线，那么计算环境阻力的结果如表1.1.3所示。从表1.1.3可知，培养初期， $1 - (K - N)/K$ 值很小，后来逐渐接近于1.0。换言之，随着培养时间的推移，环境阻力就要增大。

小口钟虫的增长与环境阻碍 表 1.1.3

培 养 时 间 (h)	24	48	72
① N	180	3000	4700
② μN	690	11400	17800
③ $(K - N)/K$	0.97	0.38	0.02
④ $1 - (K - N)/K$	0.03	0.62	0.98
⑤ $\mu N (K - N)/K$	670	4300	350
⑥ $(② - ⑤)/⑤$	0.03	1.7	50

注： $\mu = 3.8/d$ ，按 $K = 4800$ 来计算， $h = 0.00079$ ， N 为在细菌悬浊液0.1ml中的个体数。

现设想有一个由两种微生物组成的种群，那么在式(1.3)中应加上另一种个体群的效果，而且在这种情况下微生物的增长速度可用如下形式表示。

$$\frac{dN}{dt} = \mu N - \left(\frac{\mu}{K} - N^2 \right) - C N_2 N \tag{1.4}$$

式中， N_2 为另一种种群的密度， C 为常数。右侧第一项为同一种群的拥挤效果，第三项为对另一种群的有害效果。若对另一种群产生有害作用， C 为正数；相反，若产生促进作用，则 C 变为负数；若不存在任何作用，则 C 等于零。这种两种种群之间的关系称为异种之间的相互作用。通常异种之间的相互作用有如下几种形式。

a. 共处关系 (neutralism)：即使有两种个体群存在，两种种群的生长繁殖都不受任何影响。

b. 竞争关系 (competition)：不同的微生物种群对食物、营养、空间和其他共同要求的物质存在着竞争，因而互相受到不利影响。

c. 共生关系 (mutualism)：两种微生物的共存对双方的生长繁殖都有好处，而且在自然条件下如果失去一方，则另一方就不能生存。

d. 原始共生关系 (protocooperation): 两种微生物的共存 虽然对双方都有利, 但共存并非绝对不可缺少的因素。

e. 偏利共生关系 (commensalism): 共生对一方微生物有利, 但对另一方则没有任何影响。

f. 偏害共生关系 (amensalism): 共生对一方微生物 有不利影响, 但对另一方则没有任何影响。

g. 寄生 (parasitism) 或捕食 (predation) 关系: 一种微生物直接向另一种微生物发动进攻, 所以对另一方产生不利影响。

在自然界里, 包括微生物在内的一切生物, 根本不存在一种生物单独生存的现象, 而总是在某些方面同其他生物保持着某种关系。所有的异养生物都依靠由自养生物合成的有机物而生存。同样, 捕食者依靠被捕食者而生存。环境中的微生物就是一个复杂的混合培养系统, 因而在各种微生物之间必然存在着各式各样的相互作用。若以活性污泥为例, 腐生性细菌处于最低的营养水平, 在细菌上面是以细菌为食物的原生动物、而轮虫类和线虫类则处于最高的营养水平。另外在同一个营养水平上也存在着多种微生物, 而且在它们之间同样存在着营养需求上的竞争关系。当然, 还有可能存在着共生、偏利共生、偏害共生、寄生等相互作用。污水净化就是在这些相互作用下完成的。

在活性污泥中只有微生物, 所以只能有微生物之间的相互作用。但在湖泊和土壤中则不同, 还存在着微生物与大型动植物之间的相互作用。另外, 在大型动植物的体表组织、器官里经常有微生物生存。这些微生物中有的对动植物起着有害的作用, 而有的则属于共生关系。例如发光红眼鲷属 (*Photoblepharon*) 鱼中, 在位于眼睛下面的大器官里充满了发光细菌, 而且这些发光细菌会发出强大的绿色光。在反刍动物的第一个胃, 即瘤胃里有数目众多的细菌和纤毛虫类, 它们对纤维素和淀粉等物质进行厌氧分解, 变成脂肪酸。由于这些分解产物和微生物体最终成为反刍动物的营养物质, 所以这种关系也属于动物与微生物之间的共生关系。在豆科植物的根部形成的根瘤中大量存在着具有固氮能力的根瘤菌 (*Rhizobium*), 这是属于植物与微生物的共生关系。

在上述的特殊情况下, 微生物与其他生物之间的相互关系是比较清楚的, 但在通常的环境中微生物与其他生物之间的相互关系是相当复杂的, 目前对它们之间的关系还了解得很少。不过, 我们认为微生物的种与种之间的关系是决定环境中微生物分布和密度的最重要因素。在微生物之间的相互关系中, 人们最熟悉的一个例子就是细菌或藻类与噬菌体之间的寄生关系。现已查明, 绝大多数细菌少则对一噬菌体, 多则对几种噬菌体 具有感受性。蛭弧菌 (*Bdellovibrio*) 是寄生于细菌的寄生细菌。它具有小型鞭毛 以及攻击特定的革兰氏阴性细菌的能力, 而且广泛分布在生活污水和土壤中。当蛭弧菌与寄主细胞接触之后便侵入到细胞壁与细胞膜之间, 从寄主吸收营养物质而生长起来, 并形成4~10个子细胞。蛭弧菌为一种绝对寄生细菌, 所以一旦离开寄主细菌以后, 无论在什么样的人工培养中都不能生长繁殖。除此之外, 还有一种寄生在原生动物的寄生原生动物。足吸管虫属 (*Podophrya*) 和锤吸管虫属 (*Tokophrya*) 等吸管虫类 寄生在其他 纤毛虫类而生长 (亦可称为捕食, 但捕食与寄生的界限并不明显)。这就是说, 吸管虫类将吸管插入到纤毛虫类的体内而吸吮细胞成分。

原生动物与藻类的共生关系也是人们所熟悉的。有的纤毛虫类、放射虫类、有孔虫类

与藻类共生。绿草履虫 (*Paramecium bursaria*) 的细胞质被小球藻充满, 这叫做动物内生小球藻 (*Zoochlorella*)。这时, 绿草履虫从小球藻那里获得在光合作用中合成的有机物。由于袋状草履虫具有趋光性, 所以使小球藻容易接受光, 并同时供给代谢产物。不过这种纤毛虫在明处可用无机培养基进行培养, 但在暗处则不能与藻类共生, 所以必须把细菌作为食物。

偏害共生的例子有细菌、放线菌、真菌等生产的抗菌素。所谓抗菌素就是杀死或抑制微生物的化学物质, 而且随着抗菌素的种类不同而对微生物的感受性也大不相同。目前, 抗菌素大约有一千种, 但应用在医学上的只不过10%而已。现在生产抗菌素的绝大多数微生物是从土壤中分离出来的, 而且其中的多数则属于链霉菌属 (放线菌类)。

全动性营养的原生动物和轮虫类等微生物捕食细菌、藻类和其他微生物, 所以在它们之间必然存在着捕食者与被捕食者的关系。纤毛虫类中捕食细菌的种类较多。不过, 栉毛虫属 (*Didinium*) 和裂口虫属 (*Amphileptus*) 分别喜欢捕食草履虫属和周毛虫属。很显然, 这里不仅有如长颈虫属一样把纤毛虫类、轮虫类、寡毛类等后生动物作为营养的、食性广泛的纤毛虫类, 而且也有把藻类、鞭毛虫类细菌等作为营养的纤毛虫类。另外, 真菌捕食微小后生动物的例子有将线虫类作为食物的节丛孢属 (*Arthrobotrys*) 和将轮虫类作为食物的食肉动物 (*Zoophayus*)。

1.2 微生物的代谢

1. 微生物的化学作用

(1) 自然环境中的微生物

我们几乎在自然界的任何地方都可以找到微生物。人们在南极已分离出多种以 -20°C 以下为最适温度的低温菌 (*Psychrophiles*), 而且在温泉中也分离出在 100°C 温度下能够生长繁殖的高温菌 (*Thermophiles*)。此外, 人们还证实了在 pH 值为 1 左右的环境中仍然能够生长繁殖的某种硫细菌和在食盐浓度高达 25% 以上的条件下生长繁殖的耐盐菌 (*halophiles*) 以及在水深超过一万米以上的深海海底等地方都有多种微生物存在。另外, 在氧分压方面, 不仅有生长繁殖时需要氧的好氧细菌 (*aerobes*), 而且也存在着只要有一点氧就不能生长繁殖的绝对厌氧细菌 (*absolute anaerobes*)。这就说明, 在自然界里厌氧细菌也起着十分重要的作用。近几年来, 人们已发现了能够耐受高浓度汞、镉、铬等重金属离子的微生物, 而且正在陆续发现微生物的新的功能。

(2) 微生物的作用

自然界里存在着各种各样的微生物, 所以它的作用也是多方面的。在这里着重说明微生物在环境中的主要作用。

1) 氧化作用

a. 醇类的氧化