第二篇　环境工程微生物

第一章　微生物学基础

第一节　微生物的分类与特点

一、微生物的特点

微生物（microorganisms，microbes）并非生物分类学上的名词，而是指所有体积微小、结构简单，大多数是单细胞的，必须用光学显微镜甚至电子显微镜观察其形态的微小生物的统称。

微生物由于其个体都极其微小，使它们普遍具有以下5个特点：个体小，面积大；吸收多，转化快；生长旺，繁殖快；适应强，易变异；分布广，种类多。

（一）个体小，面积大

微生物体积小，有极大的表面积/体积比值，或称比面值。

【例2-1-1】 已知金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）的直径约为0.6 μm，求其比面值。

解： 比面值 $=\dfrac{\text{表面积}}{\text{体积}}=\dfrac{4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3}=\dfrac{3}{r}=\dfrac{3}{0.3\times10^{-6}\ \text{m}}=10\times10^6\ \text{m}^{-1}$

即若假设球菌的相对密度为1，则每克球菌具有10 000 m^2的表面积。

由于微生物是一个如此突出的小体积、大面积系统，它们能与环境之间迅速进行物质交换，吸收营养和排泄废物，而且有最大的代谢速率。

（二）吸收多，转化快

有资料表明，发酵乳糖的细菌在1 h内可分解其自重1 000～10 000倍的乳糖。微生物的这个特性为它们的高速生长繁殖和产生大量代谢产物提供了充分的物质基础，从而使微生物有可能更好地发挥“活的化工厂”的作用。人类对微生物的利用，主要是利用它们的生物化学转化能力。

（三）生长旺，繁殖快

微生物繁殖速度极快，是其他生物不能比拟的。大多数微生物的世代期只有几十分钟，如大肠杆菌（*Escherichia coli*），其细胞在合适的生存条件下，每分裂一次的时间是12.5～20.0 min。如按20 min分裂一次计，则每小时分裂3次，每昼夜可分裂72次，后代数为：4 722 366 500万亿个（重约4 722 t）。

事实上，由于种种客观条件的限制，微生物的指数分裂速度只能维持数小时，因而在液体培养中，细菌的浓度一般仅能达到每毫升10^8～10^9个左右。

微生物的这一特性在发酵工业上具有重要的实践意义，主要体现为它的生产效率高、发酵周期短上。大多数微生物都能在常温常压下，利用简单的营养物质生长，在生长过程中积累代谢产物，不受季节限

制，可因地制宜、就地取材，这就为开发微生物资源提供了有利的条件。

微生物繁殖速度快的生物学特性，也为生物学基本理论研究带来了极大的便利——它使科学研究周期大大缩短，经费减少，效率提高。一些危害人、畜和植物等的病原微生物，或使物品发生霉腐的霉腐微生物会干扰甚至危害人类的生产、生活，需认真对待。

（四）适应性强，易变异

微生物有极其灵活的适应性，这是高等动、植物所无法比拟的。其原因主要是因为其体积小和面积大，即比表面积大，或称比面值大。为了适应多变的环境条件，微生物在其长期的进化过程中产生了许多灵活的代谢调控机制，并有种类繁多的诱导酶（可占细胞蛋白质含量的10%）。

微生物的个体一般都是单细胞、简单多细胞或非细胞的。它们通常都是单倍体，加之它们具有繁殖快、数量多和与外界直接接触等原因，即使其变异频率十分低（一般为 10^{-5} ~ 10^{-10}），也可以在短时间内产生大量变异后代。最常见的变异形式是基因突变，它可以涉及任何形状，诸如形态构造、代谢途径、生理类型以及代谢产物的质或量的变异等。

人们利用微生物易变异的特点进行菌种选育，可以在短时间内获得优良菌种，提高产品质量。这在工业上已有许多成功的例子。但若保存不当，菌种的优良特性易发生退化，这种易变异的特点又是微生物应用中不可忽视的。

由于微生物具有生物的一般特性，又具有其他生物所没有的特点，因而微生物也成为了许多生物学基本问题研究最理想的实验材料。

（五）种类多，分布广

微生物在自然界是一个十分庞杂的生物类群。迄今为止，我们所知道的微生物约有20万种（1995年），这一数字还在急剧增长。预计微生物总数在600万种左右。

微生物的代谢类型多样，是动、植物所不及的。它们中大多数是以有机物为营养物质，具有分解地球上贮量最丰富的初级有机物——天然气、石油、纤维素、木质素的能力；对复杂有机物分子的生物转化能力；分解氰、酚、多氯联苯等有毒物质的能力；微生物有着多种产能方式，如细菌光合作用、嗜盐菌紫膜的光合作用、自养细菌的化能合成作用、各种厌氧产能途径；生物固氮作用；合成各种复杂有机物——次生代谢产物的能力；抵抗热、冷、酸、碱、高渗、高压、高辐射剂量等极端环境能力；以及独特的繁殖方式——病毒的复制增殖等。

微生物代谢产物种类繁多。不同微生物可以有不同的代谢产物，如抗生素、酶类、氨基酸及有机酸等。自然界的物质循环是由各种微生物参与才得以完成的。

微生物在自然界的分布极为广泛，土壤、水域、大气，几乎到处都有微生物的存在，特别是土壤是微生物的大本营。任意取一把土或一粒土，就是一个微生物世界，其中含有不同种类的微生物。凡是有高等生物存在的地方，就有微生物存在，即使在极端的环境条件下，如高山、深海、冰川、沙漠等高等生物不能存在的地方，也有微生物存在。

由于微生物的自身特点，其在环境污染防治方面发挥着不可或缺的作用。近年来随着现代生物技术的发展，大大扩展了微生物在环境污染治理方面的应用领域。

二、微生物的分类与命名

（一）微生物的分类

生物按其基本属性（个体形态及大小、染色反应、菌落特征、细胞结构、生理生化反应、与氧的关系、血清学反应等）及它们的亲缘关系，从大到小，按界、门、纲、目、科、属、种等进行分类。根据最基本的属性把生物分为不同的界。再根据各界内生物性状的差别，分为不同的门，以此类推，一直分到种。在两个分类单位之间可加亚门、亚纲、亚目、亚科、亚属、亚种及变种等次要分类单位。

生物分类工作是在200多年前 Linnaeus（1707—1778）的工作基础上建立的。他将生物划分为动物界

和植物界，二者在概念上是十分明确的。自从发现了微生物以后，学者们习惯于把它们分别归入动物界或植物界内，列为动植物的低等类型。但是有些微生物具有动物和植物的共同特征，将它们归入动物界或植物界都不合适。随着微生物研究技术的发展和提高，对微生物特征的认识不断深入，相应的微生物分类系统也逐步完善。1969 年，Whittaker 提出五界生物分类系统，这五界是：原核生物界，包括细菌（放线菌在内）和蓝细菌（又称蓝藻）；原生生物界，包括除蓝细菌以外的藻类和原生动物；真菌界，包括酵母菌和霉菌；动物界和植物界。这一分类系统目前已被大多数科学家承认。我国学者提出六界分类系统，即病毒界、原核生物界、真核原生生物界、真菌界、植物界和动物界，这一分类系统解决了病毒这类特殊微生物的分类问题，但这种分类方法目前尚有争议。

近几十年，关于微生物在生物界中的地位不断有新的研究成果。20 世纪 70 年代末，通过对微生物 16S（或 18S）核糖体核糖核酸（rRNA）的寡核苷酸序列的分析，发现一些极端环境生物，包括产甲烷、嗜盐和嗜酸热细菌等，具有独特的生物化学组成。有学者提出，将这类生物与其他细菌（真细菌）及真核生物并列为生物的三大类，称古菌（archaea）或古细菌（archaebacteria）。随着生物技术的发展，生物分类也将更加反应生物的本质特征。

微生物中类群十分庞杂，包括不具有细胞结构的病毒，单细胞的立克次氏体、细菌、放线菌，属于真菌的酵母菌与霉菌，单细胞藻类、微型原生动物、微型后生动物，古菌等。与环境科学技术密切相关的主要微生物类群如下：

- 环境科学技术涉及的主要微生物类群
  - 原核生物
    - 细菌
    - 放线菌
    - 蓝藻（又称蓝细菌）
  - 真核生物
    - 藻类
    - 真菌
      - 霉菌
      - 酵母菌
    - 微型原生动物
      - 肉足类
      - 纤毛类
      - 鞭毛类
    - 微型后生动物
  - 古菌
  - 非细胞形态微生物
    - 病毒
    - 噬菌体
    - 类病毒

（二） 微生物的命名

微生物的命名与其他生物一样，采样国际统一的命名法则，林耐“双名法”（binomial）。它是由两个名字组成的命名方法，即一个物种的名字，由有它所属的属名后面加上种名的形容词所组成。因此，每种微生物的学名都依据属和种而命名，由两组拉丁字、希腊字或拉丁化的其他文字组成。属名在前，规定用拉丁名词表示，字首字母要大写，由微生物的构造、形状或科学家的名字构成，用以描述微生物的主要特征；种名在后，常用拉丁字形容词表示，字首字母小写，为微生物的色素、形状、来源、病名或科学家的姓名等，用以描述微生物的次要特征。

【例 2－1－2】 金黄色葡萄球菌（*Stapylococcus aures*）的名称中 *Stapylococcus* 与 *aure* 各是指其哪个分类名称？

解： *Stapylococcus* 是其属名；*aures* 是其种名。

自然界中的微生物种类繁多，有时会发生同物异名或同名异物的现象。为避免混乱，常需要在种名之后附加命名人的姓，例如，大肠埃希氏杆菌的名称是：*Escherichia coli* Cadtellani & Chalmers。另外，大家熟知的学名，其属可以缩写，如 *E. coli*，但属名第一个字母后应加实心圆点。再有，当泛指一属的微生物时，可以在属名后面加 sp. 或 spp.，例如，*Pseudomonas* sp. 表明是假单胞菌属的某一种菌，具体种名不知。

总结起来，微生物“双名法”即属名＋种名（＋命名者等）。

第二节　细　　菌

一、细菌的形态

细菌按照其基本形态分为球菌、杆菌、螺旋菌（包括弧菌）和丝状菌四类。由于细菌分裂后细胞排列方式不同，形成的菌落形态各异。图 2－1－1 为常见细菌的形态。

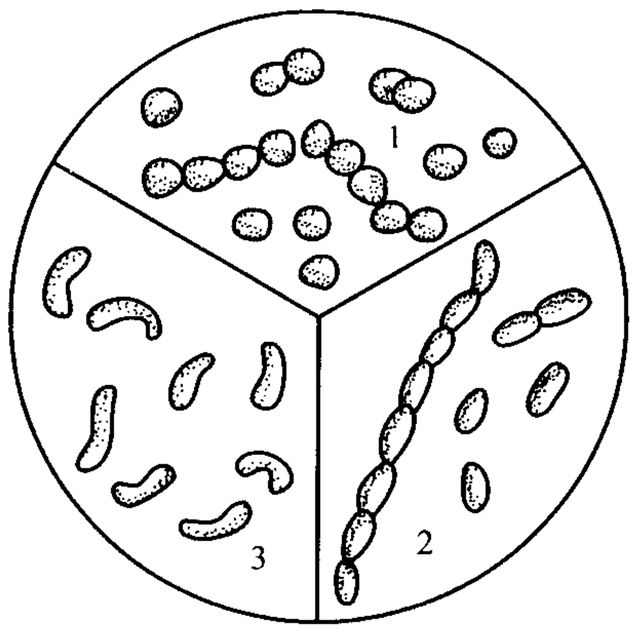


图 2－1－1　常见细菌的形态

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1. 球菌；2. 杆菌；3. 螺旋菌

（一）球菌

根据球菌生长排列方式分为单球菌（如脲微球菌 *Micrococcus ureae*）、双球菌（如肺炎双球菌 *Diplococcus pneumoniae*）、四个球菌叠在一起呈田字形的（如四联微球菌 *Micrococcus tertagenus*）、八叠球菌（如甲烷八叠球菌 *Sarcina methanica*）、链球菌（如乳链球菌 *Streptococcus lactic*）、不规则排列、呈葡萄状的葡萄球菌（如金黄色葡萄球菌 *Staphylococcus aureus*）等。

（二）杆菌

杆菌按性状分为长杆菌、短杆菌（有的近似球菌）、产芽孢杆菌等；按细胞排列分为单杆状、双杆状、链杆状菌等。

（三）螺旋菌

螺旋菌呈螺旋卷曲状，螺旋的数目和螺距随菌种不同而不同。厌氧污泥中有紫硫螺旋菌（*Thiospirillum violaceum*）和红螺菌属（*Rhodopirillum*）。螺纹不满一圈的称弧菌，如脱硫弧菌（*Vibrio desulfuricans*），有逗号形的，如逗号弧菌（*Vibrio comma*）。弧菌可互相连接成螺旋形。

（四）丝状菌

在水生环境、潮湿土壤及活性污泥中生存着大量丝状菌，例如，球衣菌属（*Sphaerotilus*）、原铁细菌属（*Crenothrix*）、纤发菌属（*Leptothrix*）、发硫菌属（*Thiothrix*）、贝日阿托氏菌属（*Beggiatoa*）、亮发菌属（*Leucothrix*）等。丝状菌体是上述丝状菌的基本特征。

在正常的生长条件下，细菌的形态相对稳定。但是培养基的化学组成、浓度、培养温度、pH、培养时间等的改变，会引起细菌的形态改变、死亡、细胞破碎、出现畸变型等。另外，有些细菌是多形态的，有周期性的发育史，如黏细菌可形成无细胞壁的营养细胞和子实体。

各种细菌的大小是不同的。大多数球菌的大小为 0.5～2.0 μm，杆菌为（0.5～1）×（1～5）μm，螺旋菌为（0.25～1.7）×（2～60）μm，丝状菌可长达数百微米。

在个体发育过程中，细菌的大小有变化，刚分裂的新细菌小，随发育逐渐变大，老龄细菌变小。培养基的渗透压增加也会引起细胞变小。

自然界中，以杆菌最为常见，球菌次之，螺旋菌最少。

二、细菌的细胞结构

细菌是单细胞的微生物，细胞结构复杂，有一般结构和特殊结构。一般结构有细胞壁、细胞质膜（原生质膜）、细胞质（原生质）、内含物、细胞核物质。特殊结构有芽孢、荚膜、衣鞘和鞭毛等，为某些细菌所特有，是细菌的分类特征。光合细菌还具有光合作用片层。图 2－1－2 为细菌的一般构造。

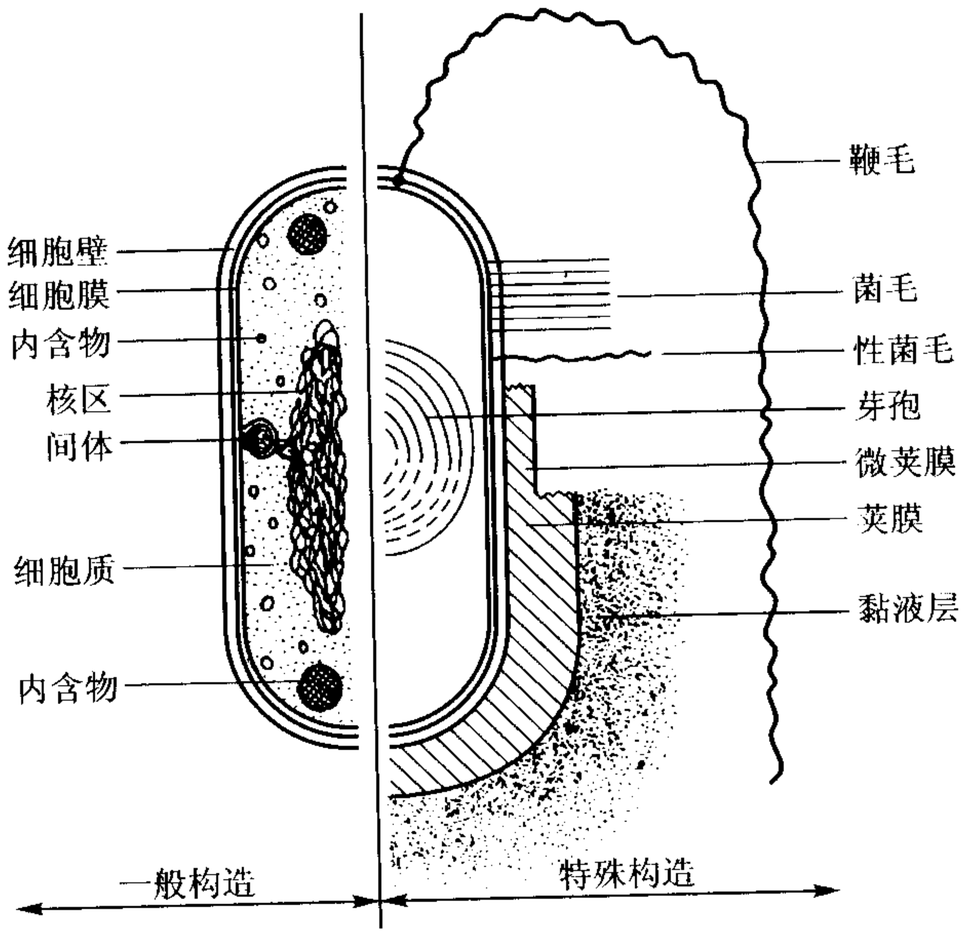


图 2-1-2 细菌的一般构造

（周德庆. 微生物学教程. 2004）

（一）细胞壁

细胞壁是包在细胞表面最外层的、具有坚韧而略带弹性的薄膜，约占菌体干重的 10% ~25%。细胞壁含肽聚糖使细胞具有刚性，决定了细胞的形态。构成细胞壁的主要成分是肽聚糖、脂类和蛋白质。

细菌对结晶紫的着染力不同，据此将其分为革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌，其原因是两者的细胞壁结构和化学组成不同。图 2-1-3 为革兰氏阳性菌及革兰氏阴性菌的细胞壁结构。革兰氏阳性细菌的细胞壁较厚，约为 20 ~80 nm，单层，其组分比较均匀一致，主要由肽聚糖组成，还有一定数量的磷壁酸，脂类组分很少。肽聚糖含量占细胞壁组成的 90%。革兰氏阴性菌的细胞壁很薄，约 10 nm，由肽聚糖层和外壁层组成。肽聚糖层约 2 ~3 nm 厚，占细胞壁组成的 5% ~20%，紧贴近细胞质膜，在它的外面为外壁层，其表面不规则，呈波浪形，由脂多糖、脂蛋白和脂类等组成。

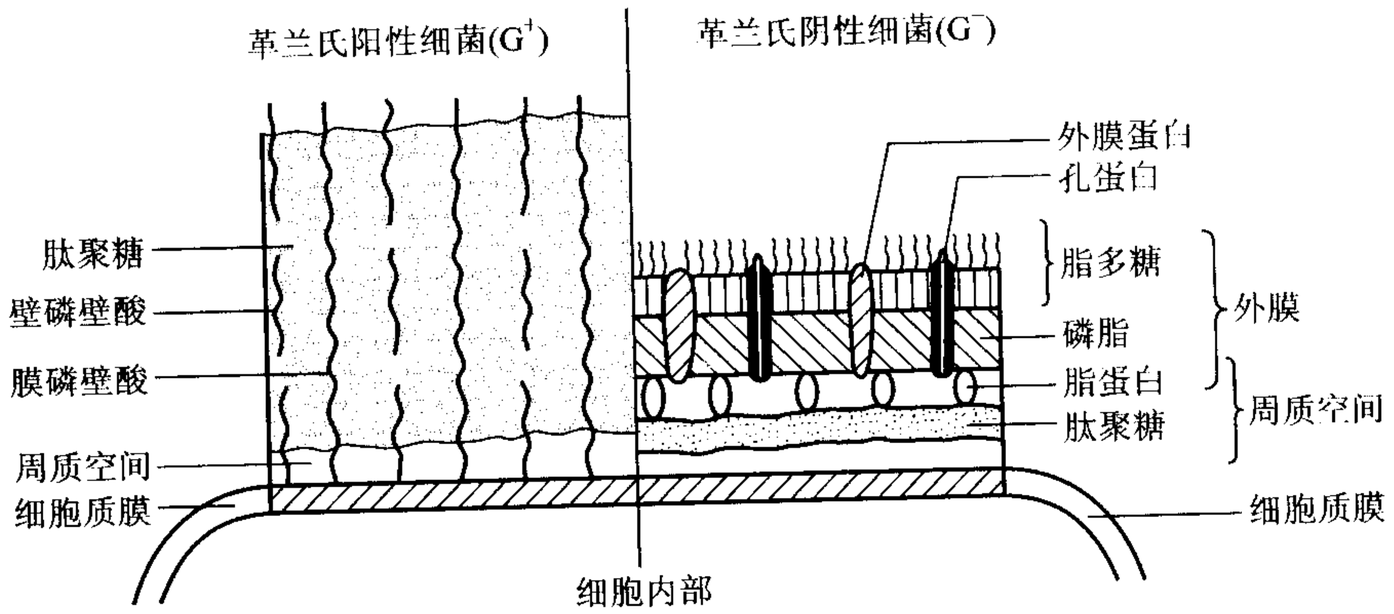


图 2-1-3 革兰氏阳性菌及革兰氏阴性菌的细胞壁结构

（周德庆. 微生物学教程. 2004）

革兰氏染色法为复染法，由丹麦病理学家 Hans Christian Gram 1884 年发明，用于细菌的形态观察和分类。其操作过程是：结晶紫初染，碘液媒染，然后酒精脱色，最后用番红或沙黄复染。这就是最常采用的革兰氏（Gram，简写为 G）染色法。根据染色反应特征，可以把细菌分成两大类：G 阳性（G^+）和 G 阴性（G^-），前者经过染色后细菌细胞仍然保留初染结晶紫的蓝紫色，后者经过染色后细菌细胞则先脱去了初染结晶紫的颜色，而带上了复染番红或沙黄的红色。后来的研究发现革兰氏染色的反应结果主要与细菌细胞壁有关。事实上，革兰氏阳性和阴性细菌具有截然不同的细胞壁结构（图 2-1-3）。

细胞壁有固定细菌细胞形态，保护脆弱的原生质体，避免渗透压引起原生质膜破裂的作用；细胞壁为有效的分子筛，可阻挡某些分子进入和保留在间质（革兰氏阴性菌细胞壁和细胞质膜之间的区域）中的蛋白质；细胞壁还为鞭毛提供支点，使鞭毛摆动。

（二）细胞膜

细胞质膜简称质膜，它是紧靠着细胞壁内侧而包围着细胞质的一层柔软而富有弹性的薄膜，属半渗透膜。约占菌体干重的10%，含有60%～70%的蛋白质、30%～40%的脂类和约2%的多糖。所含的蛋白质与膜的透性及酶活性有关。脂类是磷脂，由磷酸、甘油、脂肪酸和含氮碱组成。

细胞质膜具有“膜单位”的结构（图2-1-4）：上、下两层致密的着色层被一不着色区域分开，由具有正、负电荷，有极性的磷脂分子组成的双分子层，是两性分子，亲水基朝着膜表面的水相，疏水基（由脂肪酰基团组成）在不着色区域。蛋白质主要结合在膜的表面上，有的包藏在均匀的双层磷脂中，疏水键占优势；有的蛋白质由外侧伸入膜的中部，有的甚至穿透两层磷脂分子，膜表面的蛋白质还带有多糖；有些蛋白质在膜内的位置不固定，有活动性，能转动和扩散。所以，膜是一个流动镶嵌的功能区域。这种细胞膜整体结构“镶嵌模型”的要点是：①磷脂双分子层组成膜的基本骨架。②磷脂分子在细胞膜中以多种不同方式不断运动，因而膜具有流动性。③膜蛋白以不同方式分布于膜两侧或磷脂层中。

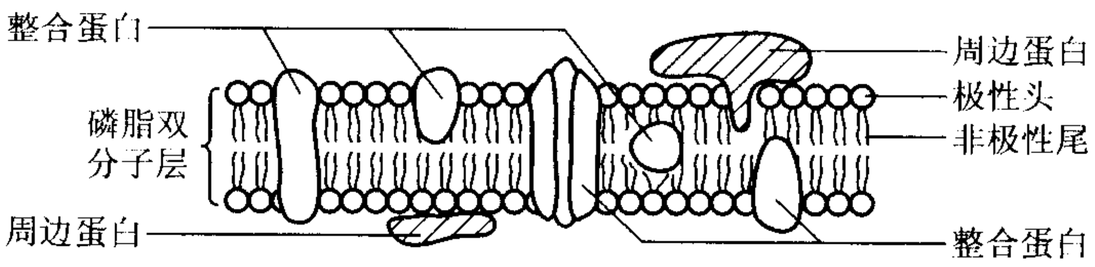


图2-1-4 细胞质膜结构模式图

（周德庆. 微生物学教程. 2004）

细胞膜的主要功能为：①控制细胞内外物质（营养物质和代谢废物）的运送和交换。②维持细胞内正常的渗透压。③合成细胞壁及荚膜的场所。④进行氧化磷酸化或光合磷酸化的产能基地。⑤许多代谢酶和运输酶以及电子呼吸链组分的所在地。⑥参与细胞壁的合成。

（三）细胞质及其内含物

1. 细胞质

细胞质在细胞质膜以内，是除核物质（核区）以外的无色透明、黏稠的复杂的胶体，也称原生质。由蛋白质、核酸、脂类、多糖、无机盐和水组成。幼龄菌的细胞质稠密、均匀，富含核糖核酸（RNA），占固体物的15%～20%，嗜碱性强，易被碱性和中性染料着染。成熟细胞的细胞质中形成各种贮藏颗粒，有的还产生气泡。老龄菌细胞因营养缺乏，核糖核酸被细菌作为氮源和磷源利用而降低含量，故细菌着色不均匀。根据这个特点，可以通过染色均匀与否，判断细菌的生长阶段。

2. 细胞内含物

（1）核糖体（ribosome）：核糖体是分散在细胞质中的亚微颗粒，是合成蛋白质的场所。它由核糖核酸（RNA）和蛋白质组成，其中RNA占60%，蛋白质占40%。核糖体的沉降常数为70S，由大（50S）、小（30S）两部分构成，它的直径为30 nm。

（2）内含颗粒（inclusion granule）：在细菌生长期间，细胞成熟时，由于营养物过剩形成一些颗粒贮藏物，如异染颗粒、聚β-羟基丁酸（PHB）、硫粒、肝糖（多糖）粒和淀粉粒等。

①异染颗粒（volutin或metachromatic granule），异染颗粒由多聚偏磷酸盐、核糖核酸、蛋白质、脂类与Mg^{2+}组成。被碱性和中性染料着色较深，用甲苯胺或甲烯蓝染成紫红色。在生长的细胞中含量较多，老龄细胞中被作为碳源和磷源使用。②聚β-羟基丁酸（poly-β-hydroxybutyric acid）颗粒，聚β-羟基丁酸（PHB）是一种聚酯类，被一单层蛋白质膜包围，不溶于水，是脂溶性物质。易被脂溶性染料苏丹黑（SudanBlack）着染，在光学显微镜下清楚可见。③肝糖（glucogen）和淀粉粒，大肠杆菌含肝糖粒，有的细菌含淀粉粒，均能用碘液染色，前者染成红褐色，后者染成深蓝色。肝糖和淀粉粒可作为碳源和能

源利用。④硫粒（sulfur granule），贝日阿托氏菌和发硫菌、紫硫螺菌及绿硫菌（*Chlorobium*）利用 H_2S 作能源，氧化 H_2S 为硫元素积累在菌体内。当外界缺乏 H_2S 时，细菌即氧化体内硫粒为 SO_4^{2-}，从中取得能量。硫粒具有很强的折光性，在光学显微镜下极易看到。

上述各种内含颗粒并不集中在一个菌体内，通常一个菌体内含一种或两种，如巨大芽孢菌只含聚 β-羟基丁酸；贝日阿托氏菌含硫粒，也含聚 β-羟基丁酸，发硫菌含硫粒；大肠杆菌产气杆菌含肝糖，通常，环境中缺氮源，而碳源和能源过剩时，细胞积累大量内含颗粒，有的可达细胞干重的 50%，聚 β-羟基丁酸异常增加会导致细胞死亡。

（3）气泡（gas vacuole）：紫色光合细菌和蓝绿细菌体内有气泡，细菌借以调节浮力。专性好氧的嗜盐细菌（*Halobacterium*）体内气泡最多，在浓盐水中氧气少，气泡使细胞浮到水表接触空气，以便吸收氧气。

（4）质粒（plasmid）：是能自主复制的双链环状 DNA 分子，它们在细菌中以独立于染色体之外的方式存在，一个质粒就是一个 DNA 分子，其大小可从 1 kb 到 200 kb（1kb = 1 000 bp）。质粒广泛存在于细菌之中，在某些蓝细菌、绿藻和真菌细胞中也存在质粒。

质粒 DNA 的特点为：双链环状；相对分子质量很小，自主或半自主复制，不同生物质粒中的基因种类不同。

3. 核物质

细菌的核没有核膜、核仁，没有固定形态，这是原核生物与真核生物的主要区别。细菌的核由一条环状双链 DNA 分子高度折叠缠绕而成的脱氧核糖核酸（DNA）纤维组成，由于细菌的核比较原始（亦可以说没有真正的核），一般细菌的核称为原始形态的核（primitive form of nucleus）或称拟核（nucleoid）。以大肠杆菌 DNA 为例：菌体长为 1 ~ 2 μm，其 DNA 长度为 1 100 μm，是菌体长度的 1 000 倍，由于高度紧密折叠，只占菌体的一部分，在电子显微镜下揭示出一个透明的、不易着色的纤维状物质区域，由于它较原始，称为拟核或类核（nucleoid）结构，亦称细胞染色体。用特异性的富尔根（Feulgen）染色法染色后，在光学显微镜下可见，拟核结构一般呈球状、棒状或哑铃状，在分裂时还可呈其他形状。

拟核与真核微生物的核一样，携带着细菌的全部遗传信息，它的功能是决定遗传性状和传递遗传性状的重要遗传物质。

（四）细菌的特殊结构

1. 荚膜（capsule）

一些细菌在一定营养条件下，可向细胞壁表面分泌一层松散透明、黏度极大的胶状物质，使细胞与外界环境隔离，这层黏性胶状物质称为荚膜。荚膜相对稳定地附着在细胞壁上。一般的细菌荚膜很厚，有的很薄（200 nm 以下），称为微荚膜。产生荚膜的能力是微生物的一种遗传特性。

荚膜含水率在 90% 以上，有的可达 98%。固体物主要成分是多糖（单体有 D-葡萄糖、D-葡萄糖醛酸、D-半乳糖、L-鼠李糖、L-岩藻糖等）、多肽（单体为 D-谷氨酸）或蛋白质。巨大芽孢杆菌的荚膜是由多糖组成的网状结构，其间隙嵌以由 D-谷氨酸组成的多肽。有的荚膜含脂类或脂类蛋白复合体。

产荚膜细菌在固体培养基表面形成的菌落表面湿润、有光泽、黏液状者称为光滑型（S 型）。不产荚膜的细菌菌落表面干燥、粗糙的称粗糙型（R 型）。荚膜的有无是分类鉴定的依据之一。

荚膜很难着色，用负染色法（或衬托法）将背景涂黑，用染料染菌体，衬托出背景和菌体之间的透明区，在光学显微镜下清晰可见。

2. 黏液层（slime layer）

有些细菌不产生荚膜，仍分泌多糖黏性物质，疏松地附着在细胞壁的表面，与外界环境没有明显的边缘，称为黏液层。在废水生物处理过程中其具有一定吸附作用。

3. 菌胶团（zoogloea）

细菌按一定的排列方式互相粘集在一起，由公共荚膜包藏形成一定形态的细菌集团，称为菌胶团。菌胶团形状有球形、椭圆形、蘑菇形、分枝状、垂丝状，也有不规则形的。上述各形状的菌胶团在活性污泥中均

有，主要有动胶菌属（*Zoogloea*）中的两个种：枝状动胶菌（*Z. ramigera*）和垂丝状动胶菌（*Z. filipendula*）。

4. 鞘（sheath）

水生丝状菌多数有鞘，如：球衣菌属、纤发菌属、发硫菌属、亮发菌属、泉发菌属等的丝状体周围的黏液层或荚膜硬质化，形成一个透明坚韧的空壳，叫鞘。

黏液层、菌胶团和鞘与荚膜一样，对染料的亲和力很低，很难着色，染色方法与荚膜相同。

5. 芽孢（spore）

好氧芽孢杆菌属（*Bacillus*）和厌氧梭状芽孢杆菌属（*Clostridium*）中的所有细菌都产生芽孢。球菌中只有芽孢八叠球菌属（*Sporosarcina*）产生芽孢，弧菌中只有芽孢弧菌属（*Sporovibrio*）产生芽孢。

芽孢是在细菌体内形成的一个圆形、椭圆形或圆柱形的内生孢子。有的细菌在它发育过程的某一阶段产生芽孢。如枯草芽孢杆菌（*Bacillus subtilis*），有的细菌则在一定环境条件下才产生芽孢。芽孢形成的位置、形状和大小是相对稳定的，是分类鉴定的依据之一。如枯草芽孢杆菌的芽孢位于细胞的中央或近中央，其直径小于或稍小于营养细胞的宽度。而梭状芽孢杆菌的芽孢位于细胞中央，直径大于营养细胞的宽度，使菌体成中间大、两头小的梭状，因而得名。有的芽孢位于细胞的一端，呈鼓槌状。

芽孢具有下述四个特点：

①厚而致密的壁，不易透水。芽孢壁分三层：外层是蛋白质孢子外壳；中层为肽聚糖构成的皮层，含大量吡啶二羧酸；内层为肽聚糖构成的孢子壁，较薄，包围着芽孢胞质和核质。萌发后孢子壁形成营养细胞的细胞壁。②含水率低，一般在40%左右。③芽孢中2，6－吡啶二羧酸（DPA）含量高，达芽孢干重的5%～15%，吡啶二羧酸以钙盐形式存在。在营养细胞的不产芽孢的细菌体内均未发现吡啶二羧酸。芽孢形成过程中，吡啶二羧酸随即合成，使芽孢具备耐热性。芽孢萌发后吡啶二羧酸消失，耐热性亦随之丧失。④含耐热性酶。

由于具有上述四特点，芽孢对不良环境，如，高温、低温、干燥、光线和化学药物等有很强的抵抗力。细菌的营养细胞在70～80 ℃时煮10 min就死亡，而芽孢在120～140 ℃还能生存几小时。营养细胞在5%苯酚溶液中很快死亡，芽孢却能耐受15 d。

芽孢内大多数酶处于休眠状态，其代谢活力极低，对不良环境有很强的抵抗力，故又称芽孢为抵抗恶劣环境的休眠体。

6. 鞭毛（flagellae）

鞭毛是细菌的运动胞器，绝大多数能运动的细菌都具有鞭毛。大多数杆菌具鞭毛，螺旋菌和弧菌都长鞭毛，球菌中仅有芽孢八叠球菌属长鞭毛。

少数能运动的细菌是不具鞭毛的。如颤藻（蓝绿细菌）、贝日阿托氏菌、透明颤菌及黏细菌等，它们可在固体物上缓慢地滑动。

鞭毛从细胞质膜上的鞭毛基粒上长出，穿过细胞壁伸向体外形成细长的丝状物，直径为0.01～0.02 μm，长度为2～50 μm不等。鞭毛的着生部位、数目和排列是种的特征，例如，有单根鞭毛，两根鞭毛（有一端和两端着生），有一束鞭毛（一端和两端着生），一端生的还有正端生和亚极端生，还有周生鞭毛的，是分类鉴定的依据。鞭毛的运动可能是细胞质膜上ATP酶水解ATP提供能量，通过鞭毛基粒传到鞭毛而产生运动的。鞭毛虽然很纤细，但用鞭毛染色法将染料沉积在鞭毛上可使鞭毛变粗，在光学显微镜下就可看见。

7. 纤毛（pilus或fimbriae）

在许多细菌菌体上还具有纤毛，又称菌毛或伞毛，比鞭毛更细、短而直硬，数目多，遍布菌体表面，不具运动功能。纤毛分为普通纤毛和性纤毛。普通纤毛广泛存在于肠道细菌中，每个细菌有50～400根，具有黏附能力。性纤毛数量较少，一个细菌只有1～4根，比普通纤毛稍长且粗。带有性纤毛的细菌具有致育性，称F^+菌，它在细菌的接合中遗传物质的传递等方面有重要作用。

第三节 原生动物与微型后生动物

一、原生动物

（一）形态特征与分类

原生动物是最原始、最低等、结构最简单的单细胞动物，属原生动物门（Protozoa）。原生动物形体微小，在10～300 μm之间，一般约250 μm左右。原生动物虽是单细胞的，却是完整的有机体，具有分化的细胞器，有具核膜的细胞核（较高级类型有两个核），属真核微生物，具有独立生活的生命特征和生理功能（如摄食营养、呼吸、排泄、生长、繁殖、运动及对刺激的反应等）。各种生理功能是由分化的细胞器完成的，如鞭毛、纤毛、刚毛、伪足是运动胞器；胞口、胞咽、食物泡、吸管是摄食、消化、营养的胞器；收集管、伸缩泡和胞肛是排泄胞器；眼点是感光胞器。有的胞器具有多功能，例如，波多虫的鞭毛除具运动功能外，还具摄食功能。又如，伪足、鞭毛、纤毛、刚毛还有感觉功能。

根据原生动物的胞器和其他特点，在废水生物处理构筑物中的原生动物主要有三类：鞭毛类、肉足类、纤毛类。

（二）营养和生殖方式

1. 营养

原生动物的营养类型主要有三种：

（1）动物性营养（holozoic）：即吞食其他生物（如：细菌、酵母菌、霉菌、藻类、比自身小的原生动物）和有机颗粒为食。绝大多数原生动物为全动物性营养。

（2）植物性营养（holophytic）：有色素体的原生动物和植物一样，在有阳光的条件下，利用二氧化碳和水合成有机物供自身营养。属植物性营养的有绿眼虫、衣滴虫等少数几种。

（3）腐生性营养（saprophytic）：某些无色鞭毛虫及寄生的原生动物，借助体表的原生质膜，吸收环境或寄主中的可溶性有机物为营养。

2. 生殖

在营养丰富、环境良好的条件下，原生动物大量生殖。其生殖方式有无性生殖和有性生殖。无性生殖是二分裂法（纵分裂或横分裂）、出芽生殖（如吸管虫）及多分裂法（如寄生的孢子虫）。有人认为二分裂法是原生动物的主要生殖方式。有性生殖通常在环境条件差时出现，或种群连续进行较长时间的无性生殖，比较衰老时，需要交替有性生殖以增强其生活力，如钟虫。

（三）各类原生动物的特征及生态分布

1. 鞭毛类（Mastigophora）

鞭毛类原生动物统称鞭毛虫，具有一根或多根鞭毛，作为运动胞器，鞭毛的长度和身体相等或更长一些。在废水生物处理中出现的鞭毛虫，如眼虫、屋滴虫、杆囊虫等具一根鞭毛，粗袋鞭虫、衣滴虫、波多虫和内管虫等具两根鞭毛。大多数为个体自由生活，也有聚集成群体的，如聚屋滴虫、团藻等。鞭毛类的营养类型有动物性营养、植物性营养和腐生性营养。有些营植物性营养的鞭毛虫（如绿眼虫），有机物浓度增加或其他环境条件改变或鞭毛虫失去色素体时，改营腐生性营养，环境条件恢复正常时，恢复植物性营养。

（1）植物性鞭毛虫：植物性鞭毛虫多数有绿的色素体，是仅有的植物性营养的原生动物。此外，有少数无色的植物性鞭毛虫，它们没有绿色的色素体，但具有植物性鞭毛虫所专有的某些物质，如坚硬的表膜和副淀粉粒等。形体一般都很小，它们也可利用动物性营养。在自然界中绿色的种类较多，在活性污泥中则无色的植物性鞭毛虫较多。

最普通的植物性鞭毛虫是眼虫目（Euglenoidina）的原生动物。它们形体小，一般呈纺锤形，前端钝圆，后端尖，虫体前端凹陷深入体内的叫胞咽，胞咽末端膨大成贮蓄泡，鞭毛由此通过胞咽伸出体外。靠近胞咽处有一环状的眼点，含有血红素，能感受光线，是原始的感光器官，使眼虫具趋光性。在贮蓄泡的一侧为伸缩泡，有排泄和调节渗透压的机能。其中绿眼虫（*Euglena viridis*）体内充满放射状排列的绿色色素体，有的眼虫体内有黄色色素体或褐色色素体，营植物性营养，不含色素的眼虫营腐生性营养。眼虫运动时鞭毛快速摆动并做颤抖式前进。绿眼虫（图 2－1－5）的最适生活环境是 α－中污性小水体，同时也能适应多污性水体。在生活污水中较多，在寡污性的静水或流水中极少。在活性污泥中和生物滤池表层滤料的生物膜上均有发现，但数量不多。

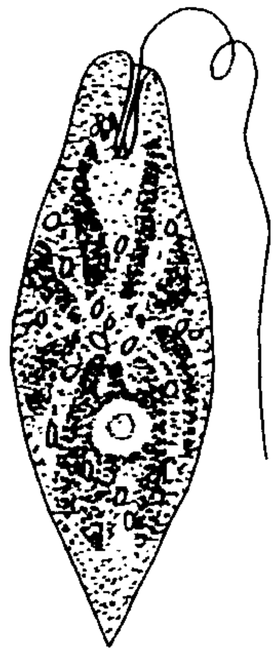


图 2－1－5　绿眼虫

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

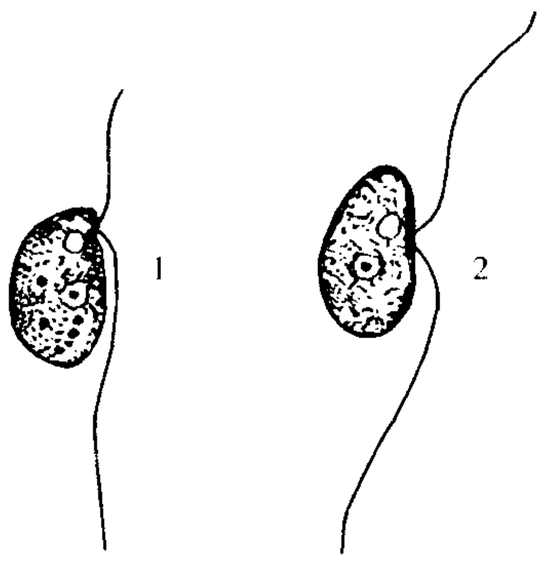


图 2－1－6　动物性鞭毛虫

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1. 梨波豆虫；2. 跳侧滴虫；

（2）动物性鞭毛虫：这类鞭毛虫体内无绿色色素体，也没有表膜、副淀粉粒等物质。一般形体很小，它们靠吞噬细菌等微生物和其他固体食物生存，部分不具色素体的鞭毛虫专营腐生性营养。在自然界中动物性鞭毛虫生活在腐化有机物较多的水体内。在废水处理厂曝气池运行的初期阶段，往往出现动物性鞭毛虫。

常见的动物性鞭毛虫有梨波豆虫（*Bodo edax*）和跳侧滴虫（*Pleuromonas jaculans*）等（图 2－1－6）。

2. 肉足类（Sarcodina）

肉足类的原生动物称肉足虫（图 2－1－7）。机体表面仅有由细胞质形成的一层薄膜，没有胞口、胞咽等结构。形体小，无色透明，大多数没有固定形态，细胞质不定方向地流动，形成伪足作为运动和摄食的胞器，绝大多数为动物性营养。少数种类呈球形，也具伪足。肉足纲可分两个亚纲：①根足亚纲（Rhizopoda），这一亚纲的肉足虫可改变形状，所以叫变形虫（*Amoeba*），或称根足变形虫。变形虫有好几个种，如大变虫（*A. proteus*）、辐射变形虫（*A. radiosa*）及蜗足变形虫（*A. limax*）。②辐足亚纲（Actinopoda），伪足呈针状，体形不变呈球形，常见的有太阳虫（*Actinophrys*）和辐球虫（*Actinosphaerium*）。

肉足纲中大多数自由生活，也有寄生种类，例如，痢疾阿米巴。以无性生殖为主，也有多分裂和芽生殖。

肉足类原生动物在自然界分布很广，土壤和水体中都有。中污带水体是最多种类的最适宜的生活环境，在污水和废水处理构筑物中也有发现。

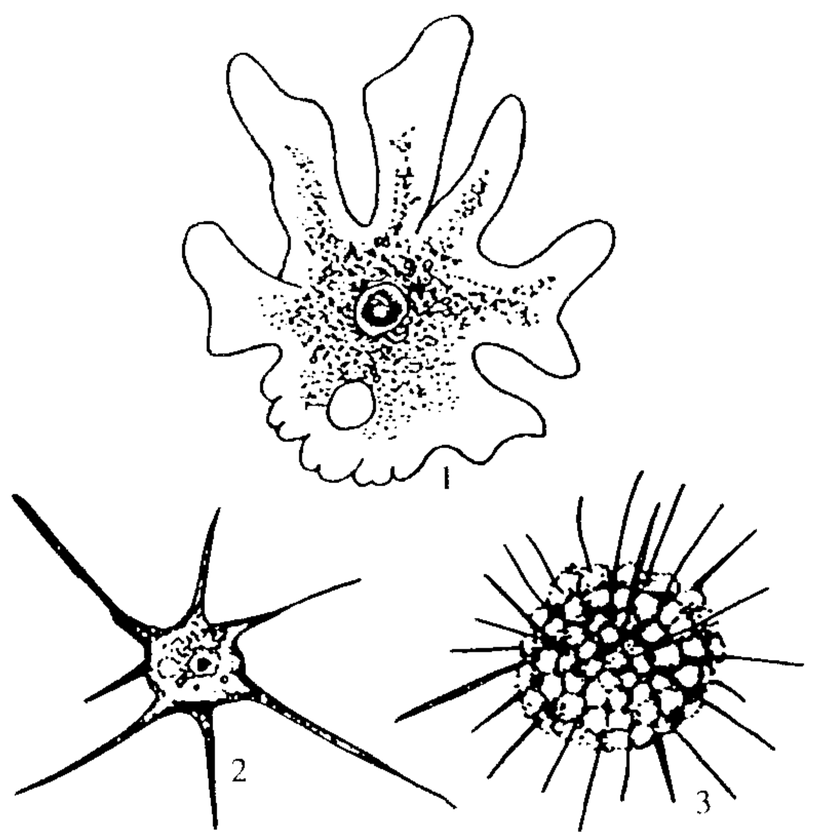


图 2－1－7　几种肉足类原生动物

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1. 变形虫；2. 辐射变形虫；3. 太阳虫

3. 纤毛类（ciliata）

纤毛类的原生动物叫纤毛虫。以纤毛作为运动和摄食的胞器。纤毛虫是原生动物中最高级的一类，不仅有比较明显的胞口，还有口围、口前庭和胞咽等固定的、结构细致的司吞食和消化的细胞器官。固着型纤毛虫大多数有肌原纤维，细胞核有大核（营养核）和小核（生殖核）之分。草履虫有肛门点。纤毛虫的营养为全动物性营养，有分裂生殖和接合生殖。纤毛类原生动物分为两种类型：游泳型和固着型。

（1）游泳型：游泳型纤毛虫属全毛目（Holotricha），有四膜虫（*Tetrahymena*）、斜管虫（*Chilodonella*）、豆形虫（*Colpidium*）、肾形虫（*Colpoda*）、草履虫（*Paramecium candatum*）、漫游虫（*Lionotns*）、裂口虫（*Amphileptus*）、膜袋虫（*Cyclidium*）、楯纤虫（*Aspidisca*）及棘尾虫（*Stylongchia*）。纤毛虫喜吃细菌及有机颗粒，竞争性也较强，所以与废水生物处理关系较为密切。废水处理中常见的游泳型纤毛虫有草履虫、肾形虫、豆形虫、漫游虫、楯纤虫等（图2-1-8）。

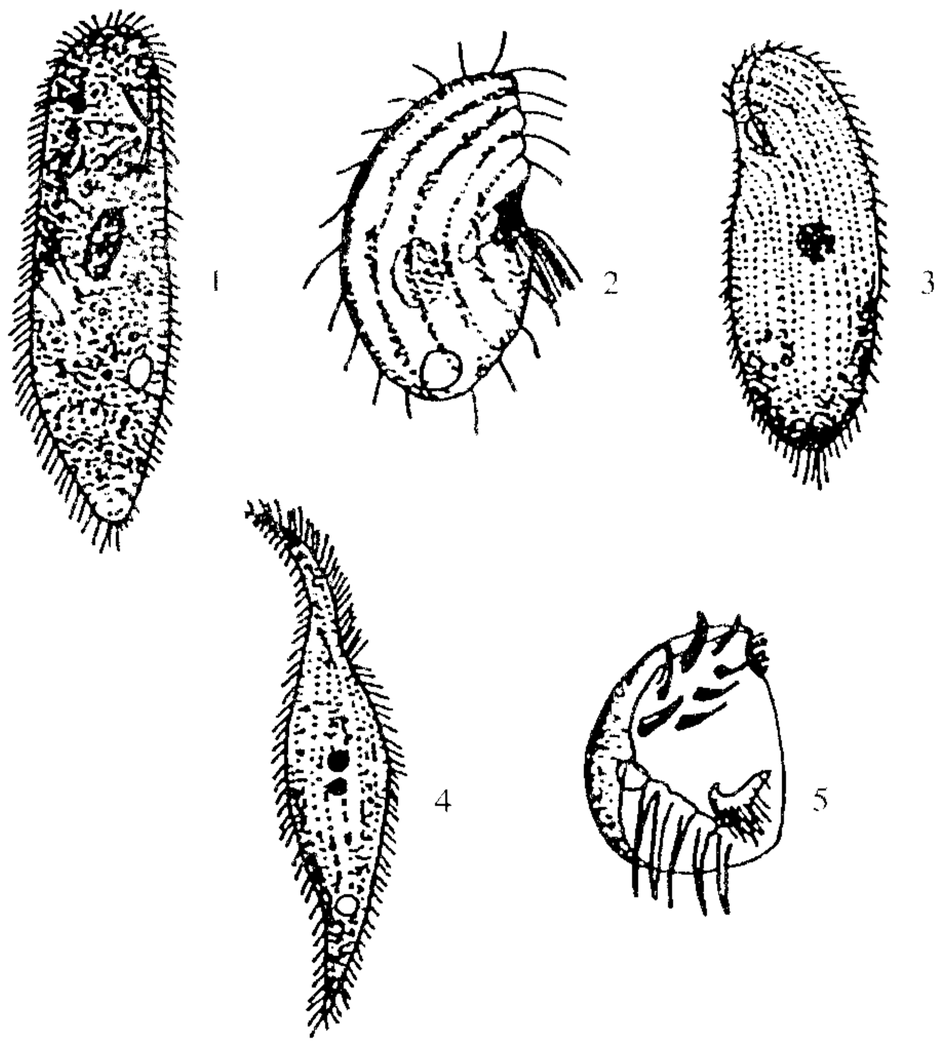


图2-1-8 游泳型纤毛虫

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1. 草履虫；2. 肾形虫；3. 豆形虫；4. 漫游虫；5. 楯纤虫

（2）固着型：固着型纤毛虫属于缘毛目（Peritricha）。虫体前端口缘有纤毛带（由两圈能波动的纤毛组成），形成类似波动膜的构造。纤毛摆动时使水形成旋涡，把水中的细菌、有机物颗粒引进胞口。虫体呈典型的钟罩形，所以，又叫钟虫类。它们多数有尾柄，利用其附着在其他物质上，营固着生活。在钟罩的基部和柄内有肌原纤维，能收缩。柄内有肌丝。常见的单个的钟虫又称普通钟虫有小口钟虫（*Vorticella. microstoma*）、大口钟虫（*V. campanula*）等（图2-1-9）。群体的种类有独缩虫属（*Carchesium*）、聚缩虫属（*Zoothamnium*）、累（等）枝虫属（*Epistylis*）和盖纤虫属（*Opercularia*）等（图2-1-10）。

钟虫在不良环境中会发生变态。生殖方式有裂殖和有性结合生殖。

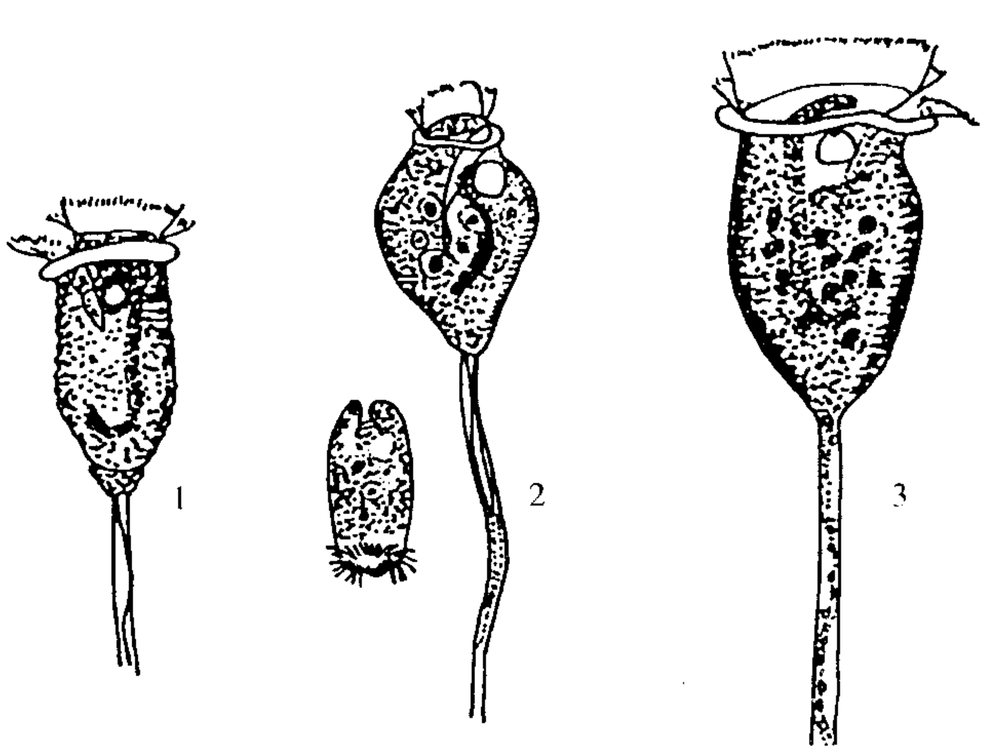


图2-1-9 几种单个个体的钟虫

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1. 领钟虫；2. 小口钟虫；3. 沟钟虫

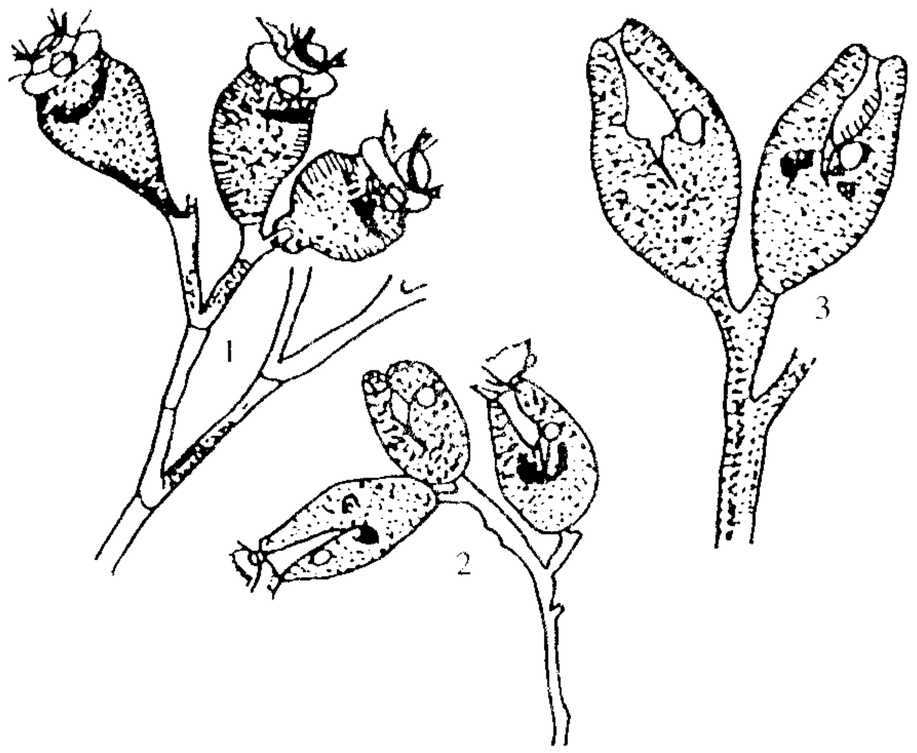


图2-1-10 群体钟虫

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1. 瓶累枝虫；2. 集盖虫；3. 彩盖虫

除上述几种原生动物外，还有吸管纲（Suctoria）的原生动物，称吸管虫。幼体有纤毛，成虫纤毛消失，长出吸管，长短不等，有些种的吸管末端膨大，有的削尖。靠一根柄固着生活，虫体呈球形、倒圆锥

形或三角形等。没有胞口，以吸管为捕食胞器。营动物性营养，通过吸管粘住原生动物和轮虫等，分泌毒素将其麻醉，溶化其细胞膜，吮吸其体液。吸管虫的生殖有有性生殖和内出芽生殖。

在正常环境条件下，原生动物保持各自的形态特征。当环境条件恶化时，例如，水温和 pH 过高或过低、溶解氧不足、食料缺乏、排泄物积累、毒物浓度超标等，都会使原生动物形成胞囊。所以，胞囊是原生动物抵抗不良环境的一种休眠体。首先虫体变圆，鞭毛、纤毛或伪足等胞器缩入体内或消失，细胞水分陆续由伸缩泡排出，形体缩小最后伸缩消失，分泌一种胶状物质于体表，凝固形成胞壳。胞壳有两层，外层较厚，表面有许多突起，内层薄而透明。胞囊很轻，易被尘埃或其他动物带至他处。胞囊遇适宜环境时，胞壳破裂恢复虫体原形。

（四）原生动物在污水生物处理中的作用

细菌数量多，分解有机物的能力强，并且繁殖迅速，是污水生物处理中污染物去除的主要承担者。原生动物在污水中的数量也比较大，常占微型动物总数的 95% 以上，因而也有一定的净化污染物的能力；原生动物多以细菌等为食物，其吞食活性污泥的能力近年来得到了较多的关注和研究，成为可能的污泥减量化方法；原生动物还可作为指示生物，用以反映活性污泥和生物膜的质量以及污水净化的程度。

在氧化塘一类的构筑物中，藻类的作用则比原生动物更重要，但细菌还是起最主要的作用。

1. 原生动物对污水净化的影响

动物性营养型的原生动物，如动物性鞭毛虫、变形虫、纤毛虫等能直接利用水中的有机物质，对水中有机物的净化起一定的积极作用。但是这些原生动物是以吃细菌为主的，它们直接提高有机物去除率的作用，还需进一步研究。

在活性污泥法中，纤毛虫可促进生物絮凝作用。活性污泥凝聚的好，则在二次沉淀池中沉降的好，从而改善出水水质。纤毛虫能大量吞食细菌，特别是游离细菌，改善出水水质。

2. 以原生动物为指示生物

由于不同种类的原生动物对环境条件的要求不同，对环境变化的敏感程度也不同，所以可以利用原生动物种群的生长情况，判断生物处理构筑物的运转情况及污水净化的效果。原生动物的形体比细菌大得多，用低倍显微镜即可观察，因此以原生动物为指示生物是较为方便的。

对污水处理构筑物中的原生动物进行镜检时，需注意以下几个方面：①原生动物种类的组成。②种类的数量变化。③各种群的代谢活力。

在生物处理构筑物中会有一些常见种类。有分析表明，我国一些污水处理厂的活性污泥中，最常见的纤毛虫是小口钟虫、沟钟虫、八钟虫、领钟虫、瓶累（等）枝虫、褶累（等）枝虫、关节累（等）枝虫、集盖虫、微盘盖虫、彩盖虫、螅状独缩虫、有肋楯纤虫、盘状游仆虫、卑怯管叶虫；肉足类是蛞蝓变形虫、点滴简变虫、小螺足虫；鞭毛虫是尾波豆虫、梨波豆虫、粗袋鞭虫等。

由于大多数原生动物是广栖性的，即能忍受很宽的环境范围，所以某些种类的少量出现并不能完全说明构筑物的处理效果，必须注意各种类的数量变化。

研究表明，当活性污泥法曝气池的有机负荷、曝气时间、有机物去除率等大幅度变化时，种类组成差别相当小，而各主要种类的数量变化则是很大的。这说明原生动物对环境的忍受幅度虽然很宽，但大量生长的最适宜环境的范围还是窄的。例如，某些原生动物对溶解氧的有无很敏感，特别是普通的钟虫，当水中溶解氧含量适中时，很活跃；当溶解氧少于 1 mg/L 时，就很不活跃，前端会出现一个大气泡（也有人发现氧过多时钟虫前端也会有大气泡）。所以，钟虫前端出现气泡，往往说明充氧不正常，水质将变坏。此外，环境条件恶劣时，也发现钟虫尾柄脱落，虫体变形，甚至变成圆柱形，如果环境不改善，则虫体越变越长，以致死亡。等枝虫对恶劣环境的耐受力一般比普通钟虫强。根据有些污水处理站的运转经验，在处理含硫废水时，当含硫量提高到 100 mg/L，其他原生动物均不出现了，普通钟虫大大减少，而等枝虫仍正常生活。

原生动物生长适宜的 pH 范围与细菌和藻类的相仿，但很多原生动物对于毒物的影响比细菌敏感，所以在污水生物处理系统中根据原生动物的变化情况，常可在细菌受到影响之前采取适当的措施。

一般情况下，在活性污泥的培养和驯化阶段中，原生动物种类的出现和数量的变化往往按一定的顺序进行。在运行初期，曝气池中常出现鞭毛虫和肉足虫。若钟虫出现且数量较多，则说明活性污泥已成熟，充氧正常。在正常运行的曝气池中，如果固着型纤毛虫减少，游泳型纤毛虫突然增加，表明处理效果将变坏。

除原生动物的种类和数量外，还应注意各种群的代谢活力。例如，纤毛虫在环境适宜时，用裂殖方式进行生殖；当食物不足，或溶解氧、温度、pH 不适宜，或者有毒物质超过其忍受限度时，就变为接合生殖，甚至形成胞囊以保卫其身体。所以，当观察到纤毛虫活动力差，钟虫类口盘缩进、伸缩泡很大、细胞质空泡化、活动力差、畸形、接合生殖、有大量孢囊形成等现象时，即使虫数较多，也说明处理效果不好。

根据以上叙述可知，在污水的生物处理厂（站）中应对原生动物进行长期的显微镜观察，以掌握本厂正常运转时常见且数量多的种类。然后根据日常的镜检结果，就可对污水处理的效果进行判断。如果发现突然猛增或其他不正常现象，就说明运转出现了问题，应及时采取补救措施，以保证处理工艺正常运行。

应当指出，无论用原生动物或下节将要提到的其他微型动物作为指示生物，使用时都要谨慎，因为它们虽然可以直接在显微镜下观察，但作为指示物都还没有准确的定性方法，目前只能起辅助理化分析的作用。

二、微型后生动物

后生动物也称多细胞动物，其机体由多细胞组成。在水处理工作中常见的微型后生动物主要是多细胞的无脊椎动物，包括轮虫、甲壳类动物和昆虫及其幼虫等。

（一）轮虫（Rotifers）

常见的轮虫有旋轮属（*Philodina*）、猪吻轮属（*Dicranophorus*）、腔轮属（*Lecane*）和水轮属（*Epiphanes*）等。

轮虫（图 2－1－11）形体微小，长约 0.04～2 mm，多数不超过 0.5 mm。它们分布广，多数自由生活，有寄生的，有个体也有群体。废水生物处理中的轮虫为自由生活的。身体为长形，分头部、躯干及尾部。头部有一个由 1～2 圈纤毛组成的、能转动的轮盘，形如车轮故叫轮虫。轮盘为轮虫的运动和摄食的器官，咽内有一个几丁质的咀嚼器。躯干呈圈筒形，背腹扁宽，具刺或棘，外面有透明的角质甲膜。尾部末端有分叉的趾，内有腺体分泌黏液，借以固着在其他物体上。雌雄异体，卵生，多为孤雌生殖。

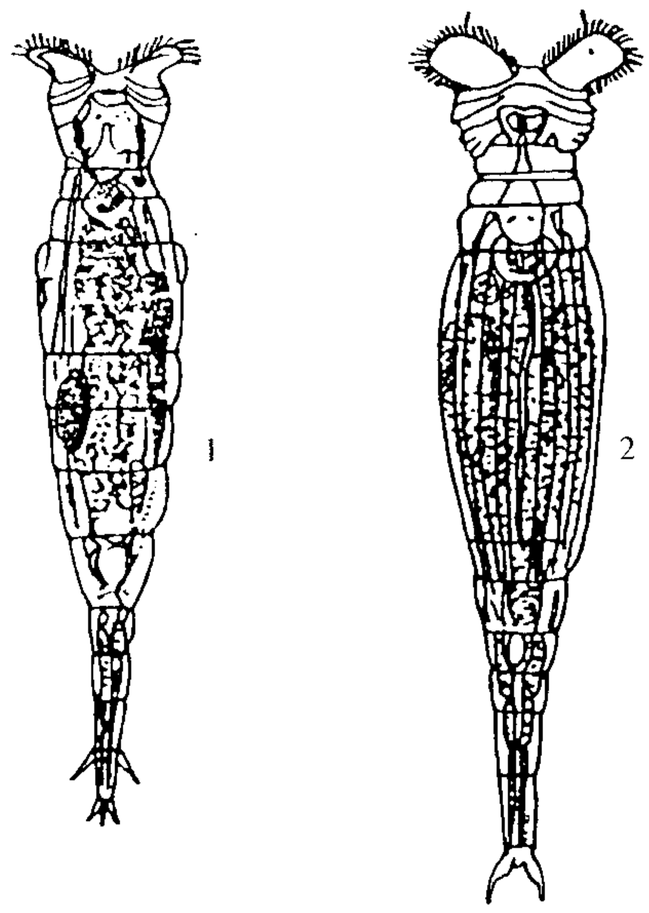


图 2－1－11 轮虫

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1. 转轮虫；2. 红眼旋轮虫

大多数轮虫以细菌、霉菌、酵母菌、藻类、原生动物及有机颗粒为食，属杂食性。猪吻轮虫是肉食性的。轮虫以细菌、小的原生动物和有机颗粒等为食物，所以在污水的生物处理中有一定的净化作用。

在污水生物处理过程中，轮虫也可作为指示生物。当活性污泥中出现轮虫时，往往表明处理效果良好，但如数量太多，则有可能破坏污泥的结构，使污泥松散而上浮。活性污泥中常见的轮虫有转轮虫（*Rotaria ratatioria*）、红眼旋轮虫（*Philodina erythrophthalma*）等。

轮虫在水源水中大量繁殖时，有可能阻塞水厂的砂滤池。

（二）甲壳动物

浮游甲壳动物数量大、种类多，是鱼类的基本食料，它们的数量对鱼类影响很大（图 2－1－12）。广泛分布于河流、湖泊和水塘等淡水水体及海洋中，以淡水种类为多。甲壳类生物的主要特点是具有坚硬的甲壳，营浮游生活，摄食方式有滤食性和肉食性两种。它们是河流污染和水体自净的指示生物。水处理中

常见的有剑水蚤（*Cyclops*）和水蚤（*Daphnia pulex*），属节肢动物门（Arthropoda）的甲壳纲（Crustacea）。它们以细菌和藻类为食料。它们若大量繁殖，可能影响水厂滤池的正常运行。氧化塘出水中往往含有较多藻类，可以利用甲壳类动物去净化这种出水。

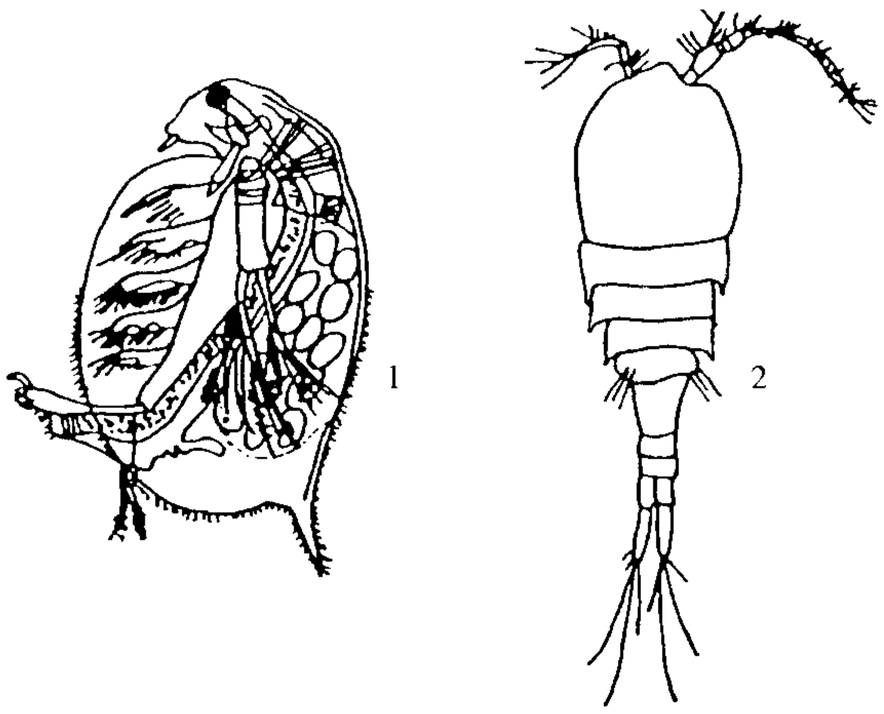


图 2－1－12　甲壳类动物

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1. 大型水蚤；2. 刘氏剑水蚤

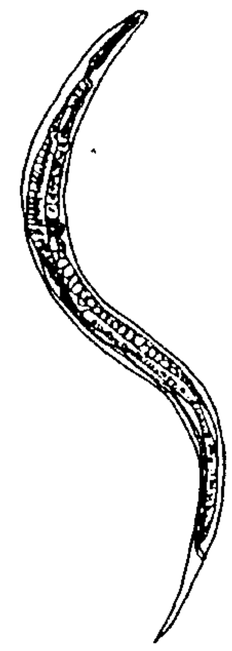


图 2－1－13　线虫

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

（三）其他小动物

1. 线虫

线虫营寄生或自由生活。废水生物处理中出现的线虫多是自由生活的。线虫形体微小（图 2－1－13），长线形，长度多在 1mm 以下。自由生活的线虫体两侧的纵肌交替收缩，做蛇状拱曲运动。线虫前端口上有感觉器官，体内有神经系统，消化道为一直管，食道由辐射肌组成。雌雄异体，卵生。营养类型三种：腐食性（以动、植物的残体及细菌等为食）、植食性（以绿藻和蓝细菌为食）和肉食性（以轮虫和其他线虫为食）。

2. 颤体虫、颤蚓及水丝蚓

颤体虫、颤蚓和水丝蚓属环节动物门（Annelida）的寡毛纲（Oligochaeta），比轮虫和线虫高级。在污水生物处理中有红斑颤体虫（*Aeolosoma hemprichii*），它的前叶腹面有纤毛，是捕食工具，营杂食性，主要食污泥中的有机碎片和细菌。它分布广，夏、秋两季在水体中生长适宜，适宜生长温度为 20 ℃，6 ℃以下活动力降低并形成胞囊。颤蚓和水丝蚓为河湖底泥污染指示生物，它们中有些种是厌氧生活的，以土壤为食。

习　　题

2－1－1　假设球菌的直径为 0.5 μm，相对密度为 1，则每克球菌的表面积为：（　　）

A　60 000 m^2　　B　12 000 m^2　　C　600 m^2　　D　6 m^2

2－1－2　细菌属于下列哪类生物？（　　）

A　原核生物　　B　真核生物　　C　动物　　D　非细胞形态生物

2－1－3　大肠杆菌 *Escherichia coli* 的名称中，*coli* 是其：（　　）

A　属名　　B　种名　　C　科学家名　　D　分类名

2－1－4　对细菌进行革兰氏染色，主要是根据它们（　　）

A　细胞质组成成分不同　　B　细胞内含物组成成分不同

C　所含的质粒类型不同　　D　细胞壁结构与化学组成不同

2－1－5　革兰氏阴性菌（G^-）与革兰氏阳性菌（G^+）的细胞壁结构与化学组成不同，下列哪个说

法是正确的？（ ）

A G^+的细胞壁很薄　　B G^-的细胞壁化学组成简单

C G^+的细胞壁主要由肽聚糖组成　　D G^-的细胞壁主要由肽聚糖组成

2－1－6 革兰氏染色是一种复染色法，使用的两种主要染料的种类与顺序应当是：（ ）

A 沙黄或番红、结晶紫　　B 结晶紫、沙黄或蕃红

C 结晶紫、品红或大黄　　D 品红或番红、结晶紫

2－1－7 细菌细胞的基本构造主要包括：（ ）

A 细胞壁、细胞膜、芽孢、鞭毛　　B 细胞壁、细胞膜、细胞质及内含物

C 细胞质、芽孢、细胞核、硫粒　　D 细胞核、核糖体、质粒、鞭毛

2－1－8 细菌细胞的构造中，哪一构造的功能是维持细胞形状的？（ ）

A 细胞膜　　B 细胞壁　　C 细胞核　　D 核糖体

2－1－9 细菌细胞的构造中，哪一构造的功能是维持细胞体内渗透压的？（ ）

A 细胞膜　　B 细胞壁　　C 细胞核　　D 核糖体

2－1－10 球菌的直径通常为（ ）

A 0.5～2.0 μm　　B 0.5～2.0 mm　　C 10～15 μm　　D 2～5 μm

2－1－11 细胞膜的主要组分是：（ ）

A 蛋白质、核酸、碱类物质　　B 多糖、金属离子、蛋白质

C 磷酸、甘油、脂肪酸　　D 蛋白质、脂类和多糖。

2－1－12 鞭毛是细菌的（ ）

A 摄食胞器　　B 运动胞器　　C 代谢胞器　　D 休眠体

2－1－13 在废水生物处理构筑物中常见的原生动物在分类上主要属三类，它们是：（ ）

A 鞭毛类、肉足类、纤毛类　　B 轮虫类、钟虫类、甲壳类

C 甲壳类、鞭毛类、肉食类　　D 肉足类、腐生类、鞭毛类

2－1－14 原生动物的营养类型主要有三种，分别是：（ ）

A 有机营养、无机营养、混合营养　　B 葡萄糖、氨氮、磷酸盐

C 细菌、真菌、藻类　　D 动物性营养、植物性营养、腐生性营养

2－1－15 纤毛虫的营养类型是：（ ）

A 无机营养　　B 腐生性营养　　C 动物性营养　　D 植物性营养

2－1－16 原生动物在污（废）水生物处理中的主要作用是：（ ）

A 吞噬细菌　　B 指示生物　　C 促进絮凝　　D 净化水质

第二章　微生物的生理特性

第一节　微生物的营养

微生物同其他生物一样，为了生存，必须从其环境中获取各种物质、提供能量及在新陈代谢中起调节作用，这些物质就称为营养物质，微生物吸收和利用营养物质的过程称为营养。

一、微生物细胞的化学组分及生理功能

（一）化学组成

微生物细胞中最重要的组分是水，约占细胞总质量的80%，一般为80%～90%，其他10%～20%为干物质。干物质中有机物占90%～97%左右，其主要化学元素是碳、氢、氧、氮、磷、硫；另外约3%～10%为无机盐分（或称灰分）。其化学组成如下：

- 细胞质量（湿重）
  - 80%～90%水
  - 10%～20%干物质（干重）
    - 90%～97%有机物
      - 碳水化合物
      - 蛋白质
      - 脂肪
      - DNA
    - 3%～10%无机盐（灰分）

有关微生物细胞的化学组分还应注意以下几个特点：不同的微生物细胞化学组分不同；同一种微生物在不同的生长阶段，其化学组分也有差异。

（二）微生物的六种营养要素

与其他生物一样，微生物在元素水平上都需要20种左右的营养物质，且以碳、氢、氧、氮、硫、磷为主；在营养水平上则都在六大类的范围内，即碳源、氮源、能源、生长因子、无机盐和水。

1. 碳源

凡是能供给微生物碳素营养的物质，称为碳源。碳源的主要作用是构成微生物细胞的含碳物质（碳架）和供给微生物生长、繁殖及运动所需要的能量。从简单的无机碳化合物到复杂的天然有机含碳化合物，都可作为碳源，例如，糖类、脂肪、氨基酸、蛋白质、脂肪酸及丙酮酸、柠檬酸等有机酸，淀粉、纤维素、半纤维素、果胶、木质素，醛类、烷烃类、芳香族化合物（例如酚、萘、菲及蒽等）、氰化物（例如，氰化钾、氰氢酸和丙烯腈）及各种低浓度的染料等。微生物的少数种还能以CO_2或CO_3^{2-}中的碳素为唯一的或主要的碳源。微生物最好的碳源是糖类，尤其是葡萄糖、蔗糖。

细胞中的碳元素含量相当高，占干物质的50%左右，所以，微生物对碳的需要量最大。根据微生物对各种碳素营养物的同化能力不同，可把微生物分为无机营养型（自养）和有机营养型（异养）两种。凡是有光合色素的微生物属于无机营养型，例如，藻类、光合细菌及原生动物中的植物性鞭毛虫。大部分细菌、放线菌、酵母菌、霉菌、病毒等属于有机营养型。

2. 氮源

凡是能够供给微生物含氮物质的营养物，叫氮源。可以作为微生物氮源的物质有N_2、NH_3、尿素、硫酸铵、硝酸铵、硝酸钾、硝酸钠、氨基酸和蛋白质等。氮源的作用是提供微生物合成细胞蛋白质的物

质，一般不提供能量。根据对氮源要求不同，微生物分为四类。

（1）固氮微生物：利用空气中分子氮（N_2）合成自身的氨基酸和蛋白质，例如根瘤菌和蓝细菌。

（2）利用无机氮为氮源的微生物：能利用氨（NH_3）、铵盐（NH_4^+）、亚硝酸盐、硝酸盐，例如，亚硝化细菌、硝化细菌、大肠杆菌、产气杆菌、枯草杆菌、铜绿色假单胞菌、放线菌、霉菌、酵母菌及藻类等。

（3）需要某种氨基酸作氮源的微生物：这类微生物也叫氨基酸异养微生物，不能利用简单的无机氮化物合成蛋白质，必须供给某些现成的氨基酸才能生长繁殖，例如，乳酸细菌、丙酸细菌等。

（4）从分解蛋白质取得铵盐或氨基酸合成蛋白质的微生物：这类微生物都有分解蛋白质的能力，产生 NH_3、氨基酸和肽，再合成细胞蛋白质，例如，氨化细菌、霉菌、酵母菌及一些腐败细菌。

3. 能源

能为微生物生命活动提供最初能量来源的营养物质和辐射能，称为能源。各种异养生物的能源就是碳源。微生物的能源种类如下：

能源种类
- 化学物质（化能营养型）
  - 有机物：化能异养型微生物的能源（同碳源）
  - 无机物：化能自养型微生物的能源（不同于碳源）
- 辐射能（光能营养型）：光能自养和光能异养微生物的能源

化能自养型微生物的能源十分独特，它们都是一些还原态的无机物，如 NH_4^+、NO_2^-、S、H_2S、H_2和 Fe^{2+}等。能利用这些能源的微生物都是一些原核生物，包括亚硝酸细菌、硝酸细菌、硫化细菌、硫细菌、氢细菌和铁细菌等。

4. 无机盐

无机盐也是微生物生长不可缺少的营养物质。无机盐的主要生理功能是：①构成细胞组分。②构成酶的组分和维持酶的活性。③调节渗透压、氢离子浓度、氧化还原电位等。④供给自养型微生物能源。

微生物需要的无机盐有磷酸盐、硫酸盐、氯化物、碳酸盐、碳酸氢盐，其中含有钾、钠、钙、镁、铁等元素，以磷和硫的需要量最大。此外，微生物还需要锌、锰、钴、铜、硼、钒、镍等微量元素。

（1）磷：所有微生物都需要磷酸盐，它对微生物的生长、繁殖、代谢都起极重要的作用。

①磷是微生物细胞合成核酸、核蛋白、磷脂及其他含磷化合物的重要元素。②磷是辅酶Ⅰ（NAD）、辅酶Ⅱ（NADP）、辅酶 A、辅羧化酶、各种磷酸腺苷（AMP、ADP、ATP）等的组分。③在糖代谢磷酸化作用中起关键性作用。④磷酸腺苷中的高能磷酸键在能量贮存和传递中起重要作用。⑤磷酸盐是重要的缓冲剂，调节 pH。⑥磷酸盐可促进巨大芽孢杆菌的芽孢发芽和发育。

（2）硫：硫是蛋白质组成中某些氨基酸如胱氨酸、半胱氨酸、蛋氨酸的组分。硫是在代谢过程中起重要作用的物质，硫胺素、生物素、辅酶 A、谷胱甘肽等都含有巯基（－SH，亦称硫氢基）。硫和硫化物是好氧硫细菌的能源，它们从无机硫化物和有机硫化物的氧化过程中取得能源、硫元素和供氢体。

（3）镁：镁是有机体中一些重要的酶如己糖磷酸化酶、异柠檬酸脱氢酶、肽酶、羧化酶等的活化剂，是光合细菌的菌绿素和藻类叶绿素的重要组分。镁在细胞中起稳定核糖体、细胞质膜和核酸的作用。如果缺镁，核糖体和细胞质膜会遭受破坏，微生物的生长停止。不同微生物对镁的需要量不同。一般革兰氏阳性菌对镁的需要量比革兰氏阴性菌大 10 倍。

（4）铁：铁是细胞中过氧化氢酶、过氧化物酶、细胞色素、细胞色素氧化酶等的组分，若缺铁，酶的合成受影响。例如，大肠杆菌缺铁时，影响甲酸脱氢酶合成，不能分解甲酸为 H_2和 CO_2，所以分解葡萄糖时，产酸不产气。铁是铁细菌的能源，在氧化镁的过程中取得能量。铁对细胞分裂有影响，在细胞色素和铁氧还原蛋白的氧化还原反应中作为一种必不可少的电子载体。

（5）钙：钙是蛋白酶的激活剂，也是细菌芽孢的重要组分，钙使芽孢具有耐热性。钙离子还起着稳定细胞壁的作用。

（6）钾：钾是微生物细胞中的重要阳离子，是酶的激活剂。钾离子在磷的传递、ATP 的水解、苹果

酸的脱羧作用中起着重要作用。

（7）微量元素：微量元素是微生物维持正常生长发育所必需的，有锰、锌、钴、镍、铜、钼、钒、碘、溴、硼等，微量就可刺激微生物的生命活动，一般 0.1 mg/L 就够了，一般天然有机物都含上述微量元素，过量的微量元素引起微生物中毒。许多微量元素是酶的组分，或是酶的激活剂。当用天然有机物配培养基时通常不需添加微量元素。

锰是黄嘌呤氧化酶的组分，铜是多酚氧化酶、乳糖酶及抗坏血酸氧化酶的组分。钴参与维生素 B_{12} 的组成。锌是乙醇脱氢酶和乳酸脱氢酶的活性基，是酶的激活剂。钼与钒促进固氮作用。微量元素之间有协同作用，也有拮抗作用。铁、锌和锰可促进铜的作用，锰却抵消锌的促进作用。

镍、钴、钼对产甲烷菌的生长特别有意义，尤其是镍。例如，嗜热自养甲烷杆菌形成 1 g 细胞干物质，需要 150 nmol/L $NiCl_2$、20 nmol/L $CoCl_2$ 和 20 nmol/L Na_2MoO_4。镍是产甲烷菌的 F420 和一氧化碳脱氢酶的组分，促进产甲烷菌的生长和甲烷的形成。培养基中含镍量可达 100 ~ 500 nmol/L，其中有 50% ~ 70% 的镍用于合成 F420，其余吸收的镍，被结合在蛋白质上。

5. 生长因子

微生物仅有上述各种营养后仍生长不良，还需供给必要的生长因子。微生物需要的生长因子有 B 族维生素、维生素 C、氨基酸、嘌呤、嘧啶、生物素及烟酸等。氨基酸被吸收后合成蛋白质；嘌呤和嘧啶进入细胞后先转变为核苷和核苷酸，进而合成核酸和辅酶。

多数异养型微生物及自养型微生物具有合成某些生长因子的能力，例如，酵母菌能合成核黄素，链霉菌和丙酸杆菌能合成维生素 B_{12}，酵母浸出液、动物肝浸出液和麦芽浸出液均含各种生长因子。

6. 水

水是微生物最重要的组分之一，也是不可缺少的化学组分。各类微生物细胞中都含有大量的水分。例如，细菌细胞的平均含水量为鲜重的 75% ~85%；酵母菌约 75% ~85%；霉菌约为 85% ~90%；细菌的芽孢和霉菌的孢子含水量较少，芽孢含水量约为 40%，霉菌孢子含水约 38%。

水又是微生物代谢过程中必不可少的溶剂和物质运输的载体，有助于营养物质溶解，并通过细胞质膜被微生物吸收，保证细胞内、外各种生物化学反应在溶液中正常进行。

需要注意的是，不同的微生物对各营养元素的比例要求不同，这里主要指碳氮比（或碳氮磷比）。根瘤菌要求碳氮比为 11.5∶1，固氮菌要求碳氮比为 27.6∶1，霉菌要求碳氮比为 9∶1，土壤中微生物混合群体要求碳氮比为 25∶1，污（废）水生物处理中好氧微生物群体（活性污泥）要求碳氮比为 BOD_5（C）∶N∶P = 100∶5∶1，厌氧消化中的厌氧微生物群体对碳氮比要求为 BOD_5（C）∶N∶P = 200∶5∶1；有机固体废物堆肥发酵要求的碳氮比为 30∶1，碳磷比为 75 ~100∶1。

二、微生物的营养类型

微生物种类繁多，各种微生物要求的营养物质不尽相同，自然界中的所有物质几乎都可以被这种或那种微生物所利用，甚至对一般机体有毒害的某些物质，如硫化氢、酚等，也是某些细菌的必需营养物。因此，微生物的营养类型是多种多样的。但就某一种微生物来说，它们对其必需的营养物有特定的要求。

营养类型指根据微生物需要的主要营养元素，即能源和碳源的不同，而划分的微生物类型。前已述及根据碳源的不同，微生物可分成**自养微生物**和**异养微生物**。根据生活所需能量来源的不同，微生物又分为**光能营养**（phototroph）和**化能营养**（chemotroph）两类。结合碳源的不同，则一共有**光能自养**、**化能自养**、**化能异养**和**光能异养**四种营养类型。表 2-2-1 列出了各种微生物的营养类型及特点。

表 2-2-1 微生物的营养类型

营养类型	能源	氢供体	基本碳源	实例
光能自养型（光能无机营养型）	光	无机物	CO_2	蓝细菌、紫硫细菌、绿硫细菌、藻类
光能异养型（光能有机营养型）	光	有机物	CO_2及简单有机物	红螺菌科的细菌（即紫色无硫细菌）
化能自养型（化能无机营养型）	无机物*	无机物	CO_2	硝化细菌、硫化细菌、铁细菌、氢细菌、硫黄细菌等
化能异养型（化能有机营养型）	有机物	有机物	有机物	绝大多数细菌和全部真核微生物

* 包括 NH_4^+、NO_2^-、S、H_2S、H_2、Fe^{2+}等。

（一）光能自养（photoautotroph）

属于这一类的微生物都含有光合色素，能以光（辐射能）作为能源，CO_2作为碳源。例如，绿色细菌（*Chlorodium*）含有菌绿素（近似有色植物的叶绿素）能利用光能，将 CO_2 合成细胞所需的有机物质。但这种细菌进行光合作用时，除了需要光能以外，还要有硫化氢存在，它们从硫化氢中获得氢，而高等绿色植物则是在水的光解中获得氢以还原 CO_2。

绿色细菌：

$$CO_2 + 2H_2S \xrightarrow[\text{菌绿素}]{\text{光能}} [CH_2O] + H_2O + 2S$$

高等绿色植物：

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow[\text{叶绿素}]{\text{光能}} [CH_2O] + O_2$$

式中：$[CH_2O]$ ——最初合成的有机碳化物。

（二）化能自养（chemoautotroph）

这一类微生物的生长需要无机物，在氧化无机物的过程中获取能源，同时无机物又作为电子供体，使CO_2还原为有机物，一般反应通式如下。

$$\text{无机物} + 2O_2 \longrightarrow \text{氧化产物} + \text{能量}$$

$$CO_2 + [4H] \longrightarrow [CH_2O] + H_2O$$

这一作用称为化学合成作用。这类菌有氨氧化菌、硝化细菌、铁细菌、某些硫磺细菌等。

几乎所有化能自养菌都为专性好氧菌。它们的专性很强，一种细菌只能氧化某一种无机物质，如氨氧化菌就只能氧化氨氮。自然界中化能营养细菌的分布较光能营养细菌普遍，对于自然界中氮、硫、铁等物质的转化具有重大的作用。

（三）化能异养（chemoheterotroph）

大部分细菌都以这种营养类型生活和生长，利用有机物作为生长所需的碳源和能源。化能异养微生物又可分成腐生（metatrophy）和寄生（paratrophy）两类，前者利用无生命有机物，后者则依靠活的生物体而生活。在腐生和寄生之间，存在着不同程度的即可腐生又可寄生的中间类型，称为兼性腐生或兼性寄生。腐生微生物在自然界的物质转化中起着决定性作用，很多寄生微生物则是人和动植物的病原微生物。

（四）光能异养（photoheterotroph）

这类微生物利用光能作为能源，以有机物作为电子供体，其碳源来自有机物，也可利用 CO_2。属于这一营养类型的微生物很少，主要包括紫色非硫细菌与绿色非硫细菌等微生物，其光合作用举例如下。一般来说，光能异养型细菌生长时大多需要生长因子。

$$2\ (CH_3)_2CHOH + CO_2 \xrightarrow[\text{光合色素}]{\text{光能}} [CH_2O] + 2CH_3COCH_3 + H_2O$$

上面介绍的是微生物的四种基本营养类型。一种微生物通常以一种营养类型的方式生长。但有些微生物随着生长条件的改变，其营养类型也会由一种向另一种改变。微生物的营养和营养类型的划分是研究微生物生长的一个重要方面。在应用微生物进行水和废水处理的过程中，应充分注意微生物的营养类型和营养需求，通过控制运行条件，尽可能地提供和满足微生物所需的各种营养物质，使微生物生长在最佳状态，以期实现最佳的处理效果。

三、培养基（medium 或 culture medium）

培养基是人工配制的适合于不同微生物生长繁殖或积累代谢产物的营养基质。由于各种微生物所需要的营养不同，所以培养基的种类也很多，据估计目前有数千种不同的培养基。

（一）培养基的配制原则

不同微生物所要求的营养物质比例是不同的，配制培养基的原则是：①根据不同微生物的营养需要配制不同的培养基。如微生物的营养类型有自养型和异养型，培养自养微生物所用的培养基应完全是简单的无机物，而培养异养微生物的培养基则必须含有有机营养成分。②注意各营养物质的浓度、配比。如蔗糖是良好的营养物质，但其浓度必须适中，浓度过高时会成为抑菌因子。在培养基中各营养物之间的浓度配比也直接影响菌体的生长繁殖和代谢产物的积累，其中碳氮比（C/N）的影响极为明显。③调节适宜的酸碱度（pH）。各类微生物生长繁殖所需的 pH 不同。一般来讲，大多数细菌、放线菌的 pH 为中性至微碱性（pH 7.0～7.5），酵母菌和霉菌则偏酸性（pH3.8～6.0）。微生物在生长和代谢过程中会引起培养基酸碱度的变化，这种变化往往造成它们生长的抑制。为了维持培养基较恒定的 pH，一般在培养基配制时加入一些缓冲剂或碳酸盐。④根据培养微生物的目的，如目标是得到微生物菌体，培养基成分中一般氮源含量比较高，以利于菌体蛋白的合成。如果为了得到代谢产物，则需考虑该产物产生菌的生理及遗传特性，以及该代谢产物的化学成分。

对于某些特殊要求的培养基还需做某些特殊的处理。如对于观察和定量测定微生物生长所用的合成培养基，需要加入少量螯合剂，以避免沉淀。

（二）培养基的类型及应用

培养基的种类很多。按照对于培养基组成物质的化学成分是否完全了解，可以把培养基分为合成培养基与天然培养基。合成培养基是用已知化学成分的物质配制成的，成分精确。如高氏Ⅰ号培养基、查氏培养基等。天然培养基采用成分不完全已知或化学成分不完全恒定的天然有机物（如肉汁、酵母浸汁、土壤浸液、豆芽汁、麸皮、牛奶、血清等）制成的培养基。如肉汁蛋白胨培养基、麦芽汁培养基等。

1. 按其制成后的物理状态分类

（1）液体培养基：液体培养基常用于大规模的工业生产及生理代谢等基本理论的研究工作。

（2）固体培养基：液体培养基加一定量的凝固剂便成为固体培养基。制备固体培养基常用的凝固剂有琼脂、明胶、硅胶等，其中最合适的凝固剂是琼脂。固体培养基常用于微生物的分离、鉴定、计数、保藏等。

（3）半固体培养基：含少量琼脂（0.2%～0.5%）的培养基称为半固体培养基。半固体培养基可用于观测微生物的特征、鉴定菌种、噬菌体的效价滴定等。

2. 根据培养基的特殊用途分类

（1）加富培养基：在培养基中加入血、血清、动物组织提取液或植物组织提取液，用以培养营养要求比较苛刻的某些异养菌。

（2）选择性培养基：是根据某一种或某一类微生物的特殊营养要求或对一些物理、化学条件的抗性而设计的培养基。利用这种培养基可以把所需要的微生物从混杂的其他微生物中分离出来。如以纤维素为唯一碳源的培养基可用于分离分解纤维素的微生物，缺氮培养基可用以分离固氮微生物等。利用某些微生

物对一些物理、化学因素的抗性设计的培养基，最常用的是在培养基中加入某种化学物质，以抑制不需要的微生物的生长。如分离放线菌时，培养基中添加数滴 10% 的酚可以抑制细菌和霉菌的生长。分离酵母和霉菌时可添加青霉素、四环素、链霉素抑制细菌和放线菌的生长。

（3）鉴别培养基：在培养基中加入某种试剂或化学药品，视培养后发生的某种变化，从而区别不同的微生物。如在不含糖的肉汤中加入各种糖类及指示剂，由于细菌对各种糖所产生的发酵作用不同，有的利用某些糖产酸或产气，有的只产酸不产气，有的不产酸也不产气即可以鉴定菌种。此外，属于鉴别培养基的还有明胶培养基，可以试验微生物是否液化明胶；硝酸盐肉汤培养基可以检查是否有硝酸盐还原作用；醋酸铅培养基可以检查 H_2S 是否产生等。

病毒和立克次氏体不能在一般的培养基上生长，一般是将它们培养在动植物体内、动植物组织或细胞当中。最常用的动物有小白鼠、家兔、豚鼠等。鸡胚是某些病毒及立克次氏体培养的良好场所。

四、营养物质的吸收和运输

除原生动物、微型后生动物外，微生物没有专门的摄食器官或细胞器。各种营养物通过细胞质膜进入细胞。细胞质膜是疏水的膜蛋白与不连续的脂双层的镶嵌结构，其上有许多小孔，双层膜中还有由碳氢链组成的非极性区。不同的营养物进入细胞的方式不同，主要分为四种：单纯扩散、促进扩散、主动运输、基团转位。

（一）单纯扩散（simple diffusion）

单纯扩散是物理过程。水溶性的溶质分子（水、无机盐、O_2、CO_2）通过细胞质膜中含水的小孔从高浓度区向低浓度区扩散，不与膜上的分子发生反应，这种扩散是非特异性的，扩散速度慢。脂溶性物质被磷脂层溶解而进入细胞，脂溶性物质比水溶性物质易透过细胞质膜。结果是化合物在细胞内的浓度与细胞外趋于相等。单纯扩散不消耗能量。

（二）促进扩散（facilitated diffusion）

单纯扩散是被动的运输过程，营养物透过细胞质膜的速度慢，不能满足微生物对营养物的需要，有些非脂溶性物质，例如，糖、氨基酸、金属离子等不能通过由碳氢组成的非极性区。促进扩散是利用渗透酶将营养物从细胞质膜的外表面运送到细胞质膜的内表面并释放的过程，这一过程依靠扩散梯度驱动，不消耗代谢能量，由渗透酶起加速运输的作用。促进扩散多见于真核生物。

（三）主动运输（active transport）

当微生物细胞内所积累的营养物浓度高于细胞外的营养物浓度时，营养物就不能按浓度梯度扩散到细胞内，而是逆浓度梯度被“抽”进细胞内。这过程需要渗透酶和消耗代谢能量。这种需要能量和渗透酶的逆浓度梯度积累营养物的过程，叫主动运输。

主动运输的浓度梯度由细胞代谢形成，伴随产生一个电动势，通过电位差做功。

（四）基团转位（group translcoation）

基团转位与主动运输非常相似，但有一个不同，即基团转位过程中被吸收的营养物质与载体蛋白之间发生化学反应，因此物质结构有所改变。通常是营养物质与高能磷酸键结合，从而处于“活化”状态，进入细胞以后有利于物质的代谢反应。

第二节 酶及其作用

一、酶的命名和分类

酶（enzyme）是生物细胞中自己合成的一种催化剂（生物催化剂），其基本成分是蛋白质，催化效率

比一般的无机催化剂高得多，一般高达千、万倍，乃至千万倍。20 世纪 80 年代之后，相继发现了核酸酶（ribozyme）、抗体酶（abzyme），合成了模拟酶（mimic enzyme）等新的生物酶。

酶具有高度的专一性，一种酶只能催化一种反应或一类相似的反应。酶不仅能推动分解作用，而且也可以推动相应的合成作用，也就是说，酶的作用是可逆的。但是实际情况下，作用常趋向一个方向。热力学条件是影响反应方向的重要因素。

酶的名称，可根据它的作用性质或它的作用物，即基质（substrate，在生物化学中常称“底物”）而命名。例如，促进水解作用的各种酶统称水解酶，促进氧化还原作用的各种酶统称氧化还原酶，水解蛋白质的酶称为蛋白酶，水解脂肪的酶称为脂肪酶等。这是习惯命名法。这种命名法比较直观和简单，但缺乏系统性，有时会出现一酶数名和一名数酶的情况。

为了适应酶学研究的发展，避免命名的重复，国际酶学委员会于 1961 年提出了一个系统命名法和系统分类法。系统命名法的原则是：每种酶有一个系统名称。系统名称应明确标明酶的基质和催化反应的性质。若有两个基质，则应将两个基质同时列出，中间用冒号“:”将它们隔开。如果基质是水时，可将水略去不写。举例来说，习惯名称为谷丙转氨酶，则系统名称是丙氨酸：α-酮戊二酸氨基转移酶。在科学文献中，为严格起见，一般使用酶的系统名称。但系统名称往往太长，也不利于记忆。为了方便起见，有时仍用酶的习惯名称。

系统分类法是对酶进行分类编号的规定。每个酶都有一个特定的编号。系统分类编号的原则是每一种酶都用四个数来表示，数字间用圆点号“·”隔开，编号前冠以 EC 缩写符号。第一个数字指明该酶属于哪一大类，第二个数字指出属于大类中的哪一个亚类，第三个数字说明该酶属于哪一个亚亚类，第四个数字表示在亚亚类中的序号。每个数字都用阿拉伯数字编序 1，2，3，…来表示。大类是根据酶促反应的性质来分，一共分成六大类。亚类和亚亚类则分别根据基质中被作用的基团和键的特点来分类。表 2-2-2 列出了这六大类酶的特性。

表 2-2-2　六大类酶的特性

分类号	名　　称	催化反应类型	举　　例
1	氧化还原	电子转移　$A^- + B \rightleftharpoons A + B^-$	乙醇脱氢酶
2	转移酶	官能团转移　$A—B + C \rightleftharpoons A + B—C$	己糖激酶
3	水解酶	水解反应　$A—B + H_2O \rightleftharpoons A—H + B—OH$	胰蛋白酶
4	裂解酶	通常形成双键　$C=C,\ C=O,\ C=N$；$A—B \rightleftharpoons A=B$（$A$ 带 X，B 带 Y）	丙酮酸脱氢酶
5	异构酶	分子内的基团转移　$A—B—A—B$（X，Y，Y，X）	马来酸异构酶
6	连接酶或合成酶	化学键形成与 ATP 水解偶联　$A + B + ATP \rightleftharpoons A—B + ADP + P_i$	丙酮酸羧化酶

【例 2-2-1】某酶的系统编号是 EC3.4.21.4，它是哪一大类的酶？

解：由于第一位编号的数字是 3，那么它是水解酶。

二、酶的催化特性

酶是一种催化剂，因此它的作用特点具有一般催化剂的共性：用量少而催化效率高；加快反应速率，

不改变化学反应的平衡点，可降低反应活化能。但酶是特殊的生物催化剂，所以它又有普通催化剂不具备的一些特点：

（1）高催化效率：酶可加快反应速率高达 1 017 倍；

（2）高度专一性：大多数酶所作用的基质和催化反应都是高度专一的；

（3）酶活性可调节：酶浓度、激素水平、抑制剂、产物浓度等因素影响酶催化反应速率。

此外，酶反应条件温和，如常温、常压、接近中性的酸碱度等即可发挥酶的催化能力，高温、高压、强酸或强碱条件反而易使酶活性破坏甚至丧失。

酶促反应动力学研究基质浓度对酶催化反应速率的影响。酶催化的过程是一个两步过程，可用下式表达：

$$E + S \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} ES \underset{k_4}{\overset{k_3}{\rightleftharpoons}} E + P \qquad (2-2-1)$$

式中：E——酶；

S——基质；

ES——酶与基质的复合物；

P——产物；

k_1，k_2，k_3，k_4——分别为各步反应的速率常数。

米－门公式（Michaelis-Menten 公式）是研究酶反应动力学的一个最基本的公式（式 2－2－2），它描述了反应速率与基质浓度之间的关系。

$$r = \frac{r_m S}{K_m + S} \qquad (2-2-2)$$

式中：r——反应速率；

S——基质浓度；

r_m——最大反应速率；

K_m——酶催化反应中中间复合物 ES 分解速率与生成速率常数之比，常称米氏常数。

当 $K_m = S$ 时，由式（2－2－2），可得：

$$r = \frac{r_m}{2} \qquad (2-2-3)$$

即当基质浓度等于米氏常数时，酶促反应速率正好为最大反应速率的一半（图 2－2－1），故 K_m 又称半饱和常数。

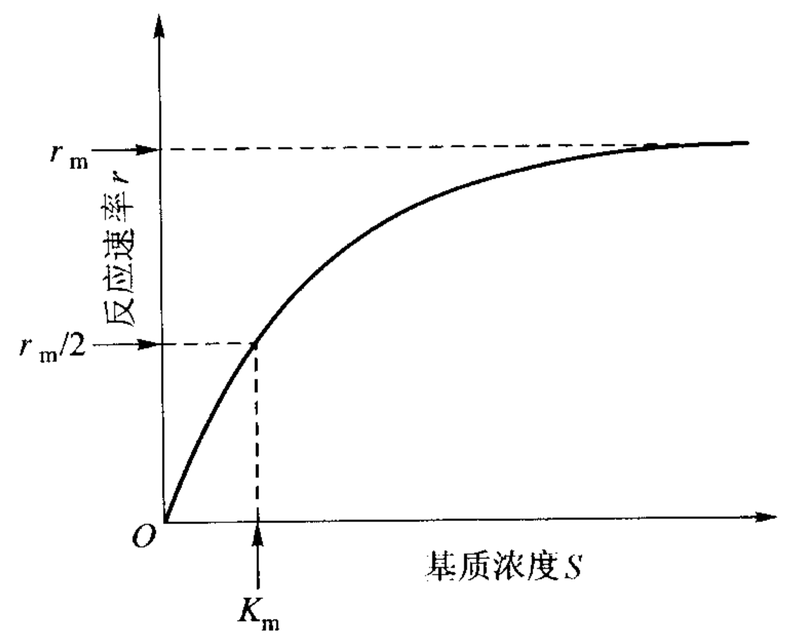


图 2－2－1 米－门公式图示

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

三、酶促反应的影响因素

从米－门方程看，底物浓度、酶浓度都会对酶促反应产生影响。温度和 pH 是对酶活力影响较大的两个因素，进而也会影响酶促反应速率。

1. 温度

要发挥酶最大的催化效率，必须保证酶有它最适宜的温度条件。高温会破坏酶蛋白，而低温又会使酶作用降低或停止。一般讲，动物组织中的各种酶的最适温度为 37～40 ℃，微生物各种酶的最适温度在 30～60 ℃范围内，有的酶的最适温度则可达 60 ℃以上，如黑曲糖化酶的最适温度为 60～64 ℃，Taq 聚合酶的反应温度在 72 ℃以上。在适宜温度范围内，温度每增高 10 ℃，酶催化的化学反应速率约可提高1～2 倍。图 2－2－2 为温度、pH 和基质浓度对酶活力影响。

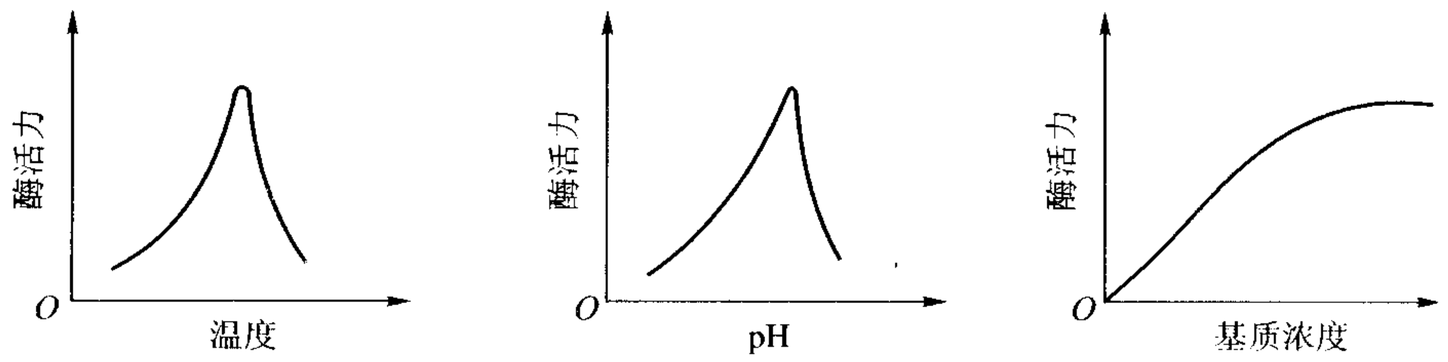


图 2－2－2　温度、pH 和基质浓度对酶活力影响

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

在污水处理厂的污泥消化中，人们早就认识到控制温度的重要性。在生物滤池的设计中，也考虑了针对于不同气候条件选择不同的设计数据。

2. pH

不同的酶具有不同的最适反应 pH。大多数酶的最适 pH 在 6～7 左右。污水生物处理主要利用混合微生物，应保持 pH 在 6～9 之间。pH 影响酶活力的原因是，酶的基本成分是蛋白质，是具有解离基团的两性电解质。它们的解离与 pH 有关，解离形式不同，催化性质也就不同。例如，蔗糖酶只有处于等电状态时才具有酶活性，在酸或碱溶液中酶的活性都要减弱或丧失。此外，酶的作用还决定于基质的电离状况。例如，胃蛋白酶作用的最适 pH 分别在此等电点偏酸或偏碱的一边。

第三节　微生物的代谢

一、微生物的新陈代谢

新陈代谢（metabolism）简称代谢，是推动一切生命活动的动力源，通常指在活细胞中的各种合成代谢（anabolism）与分解代谢（catabolism）的总和。合成代谢又称同化作用或合成作用，是微生物不断从外界吸收营养物质，合成细胞物质的过程，在此过程中需要吸收能量；分解代谢又称异化作用或分解作用，是微生物将自身或外来的各种复杂有机物分解为简单化合物的过程，在此过程中有能量释放。

由于一切生命活动都是耗能反应，因此，能量代谢是新陈代谢中的核心问题。物质的代谢与能量的代谢过程偶联发生。对微生物而言，它们能利用的最初能源有三大类，即有机物、还原态无机物和光能。微生物的能量来源有呼吸作用和光合作用两个途径。化能营养型微生物主要从营养基质的氧化分解中获取化学能，其中化能异养型微生物通过呼吸作用氧化各种有机物获得能量，化能自养型微生物通过呼吸作用氧化各种无机物获得能量；光能营养型微生物则通过光合磷酸化将光能转变为化学能。微生物产生的能量有些以热的形式释放，有些用于运动、物质合成、运输、组装、发光等，而最常见的途径是将最初能源转换为一切生命活动都能利用的通用能源——高能化合物腺三磷（即三磷酸腺苷，adenosine triphosphate，ATP），以化学键的形式存储起来。

二、呼吸作用的本质

呼吸作用（respiration）是微生物在氧化分解基质的过程中，释放电子，生成水或其他还原性物质，并释放能量的过程。是与分解代谢相关的氧化还原的统一过程，有以下几方面的生物学现象：

（1）通过呼吸作用使复杂的有机物变成二氧化碳、水和其他简单的物质；或使还原态无机物转化为氧化态无机物。

（2）在呼吸作用的过程中，发生能量的转换。一部分能量供给合成作用，另一部分供维持生命活动，还有一部分能量变成热能释放出来。

（3）在呼吸作用的一系列化学变化中，产生许多中间产物。这些中间产物一部分继续分解，一部分作为合成机体物质的原料。

（4）在进行呼吸作用的过程中，吸收和同化各种营养物质。

以上各项反应都是在细胞内由酶催化的反应。

三、微生物的呼吸类型

前已述及，呼吸作用是生物氧化和还原的统一过程，即电子、原子或化学基团转移的过程，而在有机物分解和合成过程中都有电子的转移。氧化表现为物质失去电子，同时伴随着脱氢或加氧；还原表现为获得电子，同时可能伴随加氢或脱氧。大多数微生物代谢过程中的电子来源于脱氢反应，因此电子供体又称为供氢体（hydrogen donor），电子受体又称受氢体（hydrogen acceptor）。根据基质脱氢后，其最终受氢体（电子受体）的不同，微生物的呼吸作用可分为好氧呼吸、厌氧呼吸和发酵。

（一）好氧呼吸

好氧呼吸（aerobic respiration），以分子氧（O_2）作为最终电子受体，将底物彻底氧化为 H_2O 与 CO_2，是一种最普遍又最重要的生物氧化或产能方式。这类微生物既有脱氢酶又有氧化酶。其特点是基质脱氢后，脱下的氢（常以还原力［H］形式存在）经完整的**呼吸链**（或称电子传递链）传递，最终被外源氧分子接受，产生水并释放 ATP 形式的能量。这是一种递氢和受氢都必须在有氧条件下完成的氧化作用，是一种高效产能方式。图 2-2-3 是好氧呼吸过程的反应图式。

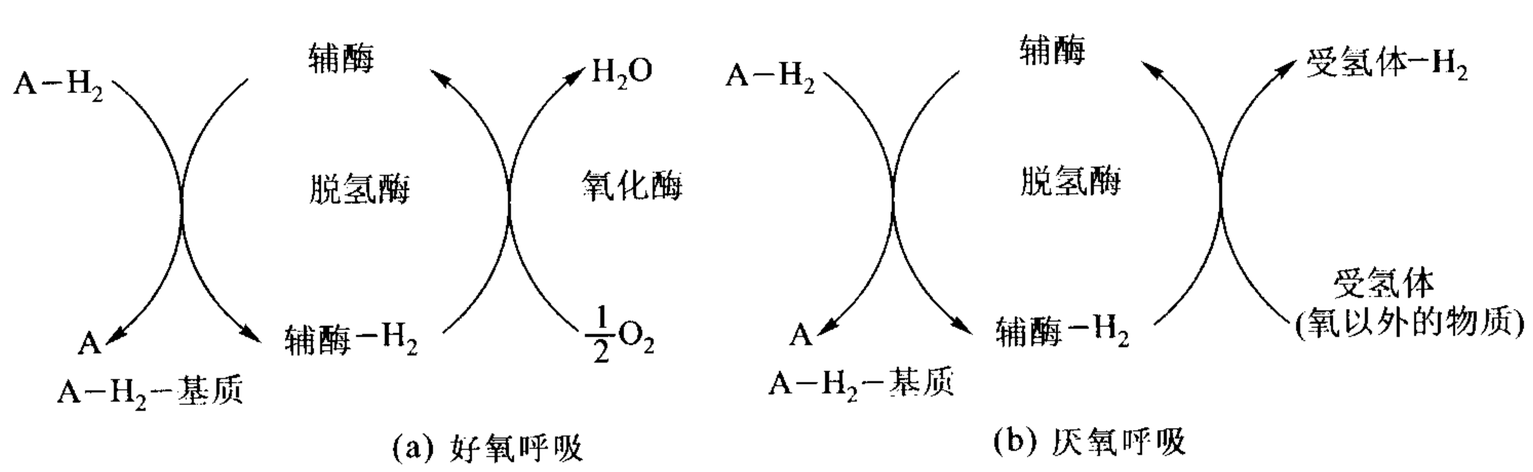


图 2-2-3 微生物呼吸过程反应图式

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

各种好氧微生物在呼吸过程中，由于基质不同，因而氧化产物也多种多样。例如，**好氧异养微生物**以葡萄糖作为基质彻底氧化时，最后形成 CO_2、H_2O，并放出大量能量。

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2\ 872\ kJ$$

葡萄糖是细菌吸收利用的常见营养物质，在代谢过程中具有特别重要的地位。它的好氧分解分两个阶段：第一阶段通过糖酵解途径，又称 EMP 途径，由 1 个六碳糖变成 2 个三碳糖丙酮酸；第二阶段经三羧酸（TCA）循环，丙酮酸彻底氧化分解变成 CO_2和 H_2O。

好氧性自养微生物在呼吸过程中可以氧化硫化氢、铁等，从中获得能量。

$$H_2S + 2O_2 \longrightarrow H_2SO_4 + 能量$$

$$4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \longrightarrow 4Fe(OH)_3 + 能量$$

$$4NH_3 + 9O_2 \longrightarrow 4NO_3^- + 6H_2O + 能量$$

（二）厌氧呼吸

厌氧呼吸（anaerobic respiration）又称无氧呼吸，指以某些无机氧化物（如 SO_4^{2-}、NO_3^-、CO_2等）作

为受氢体（电子受体）的生物氧化。这是一类在无氧的条件下进行的、产能效率低的呼吸。其特点是基质按常规途径脱氢后，经部分呼吸链递氢，最终由氧化态无机物或有机物受氢，并完成氧化磷酸化产能反应。根据呼吸链末端受氢体的不同，可把无氧呼吸分为以下多种类型。

- 厌氧呼吸
  - 无机物呼吸
    - 硝酸盐呼吸（$NO_3^- \longrightarrow NO$，$N_2O$，$N_2$）
    - 硫酸盐呼吸（$SO_4^{2-} \longrightarrow SO_3^{2-}$，$S_3O_6^{2-}$，$S_2O_3^{2-}$，$H_2S$）
    - 硫呼吸（$S^0 \longrightarrow HS^-$，S^{2-}）
    - 铁呼吸（$Fe^{3+} \longrightarrow Fe^{2+}$）
    - 碳酸盐呼吸
      - 产乙酸细菌（CO_2，$HCOO^- \longrightarrow CH_3COOH$）
      - 产甲烷细菌（CO_2，$HCOO \longrightarrow CH_4\uparrow$）
  - 有机物呼吸
    - 延胡索酸呼吸（延胡索酸——琥珀酸）
    - 甘氨酸呼吸（甘氨酸——乙酸）
    - 氧化三甲胺呼吸（氧化三甲胺——三甲胺）

某些特殊营养和代谢类型的微生物，由于它们具有特殊的氧化酶，在无氧时能使某些无机氧化物如硝酸盐、亚硝酸盐、硫酸盐等中的氧活化而作为电子受体，接受基质中被脱下的电子。

1. 硝酸盐呼吸

又称反硝化作用。硝酸盐在微生物生命活动中具有两种功能，其一是在有氧或无氧条件下作为微生物生长的氮源营养物，称为同化性硝酸盐还原作用；另一是在无氧条件下，某些厌氧微生物利用硝酸盐作为最终电子受体，把它还原为 NO_2、NO、N_2O，直至 N_2的过程，称异化性硝酸盐还原作用，在此过程中微生物获得能量。

反硝化细菌可以利用有机碳为碳源，进行如下反应：

$$C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \longrightarrow 6CO_2\uparrow + 24H^+$$

$$24H^+ + 4NO_3^- \longrightarrow 12H_2O + 2N_2\uparrow$$

总反应式：$C_6H_{12}O_6 + 4NO_3^- \longrightarrow 6CO_2\uparrow + 2N_2\uparrow + 6H_2O + 1\,758\ kJ$

此外，自养性微生物脱氮硫杆菌（*Thiobacillus denitrificans*）和脱氮副球菌（*Paracoccus denitrificans*）在厌氧条件下，以 CO_2为碳源，以 NO_3^-为电子受体进行反硝化反应。

$$5S + 6NO_3^- + 8H_2O \longrightarrow 5H_2SO_4 + 6OH^- + 3N_2\uparrow + 能量$$

$$5H_2 + 2NO_3^- \longrightarrow 4H_2O + 2OH^- + N_2\uparrow + 能量$$

2. 硫酸盐呼吸

无氧条件下硫酸盐还原菌（或称反硫化细菌）以 SO_4^{2-}为受氢体，以乳酸、醋酸作为碳源，进行产能反应，最终的还原产物是 H_2S。

$$2CH_3CHOHCOOH + SO_4^{2-} + 2H^+ \longrightarrow 2CH_3COOH + 2CO_2\uparrow + H_2S\uparrow + 2H_2O + 能量$$

$$CH_3COOH + SO_4^{2-} + 2H^+ \longrightarrow 2CO_2\uparrow + H_2S\uparrow + 2H_2O + 能量$$

能进行硫酸盐呼吸的严格厌氧菌有脱硫弧菌（*Desulfovibrio desulfuricans*）、巨大脱硫弧菌（*D. gigas*）、致黑脱硫肠状菌（*Desulfotomaculum nigrificans*）等。

3. 碳酸盐呼吸

以 CO_2或重碳酸盐为最终电子受体的无氧呼吸，包括产乙酸细菌与产甲烷细菌的呼吸。产甲烷细菌的典型呼吸作用如下：

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O + 135.6\ kJ$$

除此之外，产甲烷细菌还可以利用乙酸生成甲烷，即乙酸营养型产甲烷细菌。产甲烷细菌的无氧呼吸及其他细菌的无氧呼吸是污水厌氧生物处理的微生物学基础。

（三）发酵

发酵（fermentation）作用也是无氧条件下进行的呼吸作用，它以有机物被氧化分解的中间代谢产物（即分子内有机物）作为氢及电子受体，主要通过底物水平磷酸化产生 ATP。由于基质氧化不彻底，发酵

结果仍积累有机物，释放能量较少，其余的能量保留在最终产物中。“发酵”在此处指不需氧的产能代谢，这与微生物对有机物的作用，甚至微生物的活动通常也称为发酵的意义是不同的。

以乳酸发酵为例，乳酸杆菌属等细菌可以葡萄糖为呼吸基质，在无氧条件下以中间产物丙酮酸为受氢体，使之还原为乳酸：

$$CH_3COCOOH + NADH + H^+ \xrightarrow{\text{乳酸脱氢酶}} CH_3CHOHCOOH + NAD^+$$

总反应式为：

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2CH_3CHOHCOOH + 94\ kJ$$

（四）不同呼吸类型的微生物

微生物以什么方式进行产能代谢，主要取决于微生物的呼吸类型，其次决定外界环境条件。根据微生物与氧气的关系，微生物可分为**好氧微生物**（aerobic microorganism）、**厌氧微生物**（ananerobic microorganism）和**兼性微生物**（facultative microorganism）。

1. 好氧微生物

它们在有氧环境中生长，通过有氧呼吸的方式获得能量。它们在有氧的条件下，可以将有机物分解成二氧化碳和水。这个物质分解的过程叫**好氧分解**。很多常见的细菌、放线菌、真菌均属于此类。这类微生物在琼脂平板表面及液体培养基的浅表层中生长良好。在不振荡的液体培养基中，生长通常只局限在表面，在液体大规模培养中，要采用通气措施，以保证氧气的充分供给。

虽然好氧微生物需氧，但高浓度的氧对它们也是有毒的。很多严格好氧菌不能在氧的浓度高于大气环境（也就是说 >20%，体积分数）条件下生长。有些则需要氧的浓度远远低于大气的氧浓度（2% ~ 10%）。

2. 厌氧微生物

它们的生长不需要分子氧，依靠无氧呼吸或发酵而生活。这些微生物分为两种类型。一类是专性厌氧微生物（obligate anaerobes），这类微生物必须在严格无氧的条件下生长，氧对它们有毒。如梭状芽孢杆菌（*Clostridium*）、拟杆菌属（*Bacteriodes*）、梭杆菌属（*Fusobacterium*）、产甲烷杆菌属（*Methanobacterium*）、脱硫弧菌属（*Desulfovibrio*）等均属此类。另一类是耐氧性厌氧微生物，这类微生物暴露在氧中并不被杀死。如大多数乳酸菌，它们的产能反应不需要氧，但氧分子对它们无害。

专性厌氧菌的培养要求在培养基制备及贮存过程中避免与空气接触，使用时无氧状态的维持可通过向容器内通入无菌、无氧的 CO_2 或 N_2 实现。

3. 兼性微生物

它们在有氧及无氧环境中都能生长，可以不同的氧化方式获得能量。如酵母菌在缺氧时进行乙醇发酵，积累乙醇；有氧时进行有氧呼吸，将有机物彻底氧化为 CO_2 和 H_2O。

应当指出，根据微生物与氧气的关系来划分它们的类型是不够全面也不够确切的，但在实际应用中，这样的分类仍然是有意义的。好氧呼吸、厌氧呼吸和发酵在污水生物处理中都有应用，如活性污泥法就是应用好氧呼吸的原理处理有机污水，而厌氧消化则是应用发酵和厌氧呼吸的原理来处理高浓度有机污水和剩余污泥。

（五）微生物呼吸过程中的能量问题

微生物进行生命活动需要的能量都是通过其产生的酶，催化分解、氧化各种营养物质取得的。从前面的化学反应式可以看到微生物呼吸过程中分解、氧化各种营养物都是放能反应。微生物体内各种物质的合成过程则是需能反应。化能自养微生物通过呼吸作用，氧化各种无机物质获得能量。而异养微生物通过呼吸作用，氧化各种有机物质获得能量。一种物质产生能量多少与微生物呼吸类型和氧的供应有关。一般讲，物质完全氧化时，放出的能量多，氧化不完全时，放出的能量少。

微生物在呼吸过程中，氧化各种物质时产生的能量并不能全部被微生物利用。但它们的利用率是相当高的（一般在 40% ~60%），一般机器的能量利用率只有 20% 左右。这是因为微生物体内有一套完善的

能量转移系统，即在微生物体内有一种连接放能反应和需能反应的物质，其中常见的是含有高能磷酸化合物的腺三磷。微生物在呼吸过程中氧化营养物质所产生的能量先以腺三磷的形式贮存于细胞内。然后利用所合成的腺三磷分解转化成腺二磷（即二磷酸腺苷，adenosine diphosphate，ADP）时释放的能量供各种生理活动所用。腺二磷获得营养物质被氧化分解所释放的能量后，又形成腺三磷。这就是所谓 ATP 循环（图 2－2－4）。

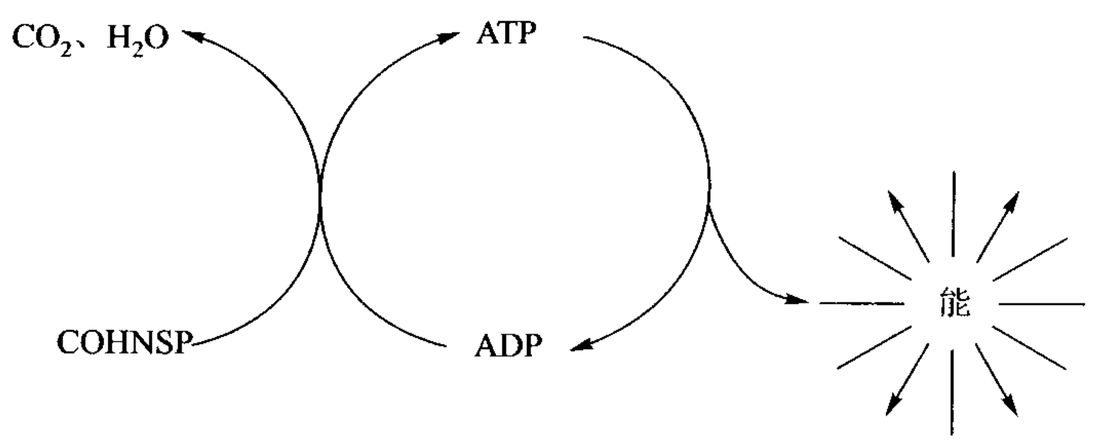


图 2－2－4　ATP 循环（异养微生物）

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

腺三磷合成代谢的方式，由于微生物的种类、条件和营养物质的种类的不同而不同。大多数微生物主要利用氧化淀粉、蔗糖和葡萄糖等有机营养物质所产生的能量合成腺三磷，光能营养微生物则利用光能，化能自养生物则利用氧化无机物所产生的能量来合成腺三磷的。通过腺二磷－腺三磷的转换，大大提高了微生物的能量利用率。由此也可以看出磷酸盐对于生物的重要性。

ATP 的形成途径，在好氧呼吸过程中主要是通过氧化磷酸化，发酵中主要是底物水平磷酸化，无氧呼吸的途径尚不清楚。氧化磷酸化指的是脱下的氢和电子通过电子呼吸链的传递生成 ATP 和水，这种方式是产生 ATP 的主要途径。电子呼吸链的组成见图 2－2－5。一般来说，辅酶 NADH + H^+ 可生成 3 个 ATP，而黄素蛋白（FAD · 2H）生成 2 个 ATP。至于电子传递是如何生成 ATP 的（即 ATP 的形成机理），目前较为接受的是“化学渗透假说”。

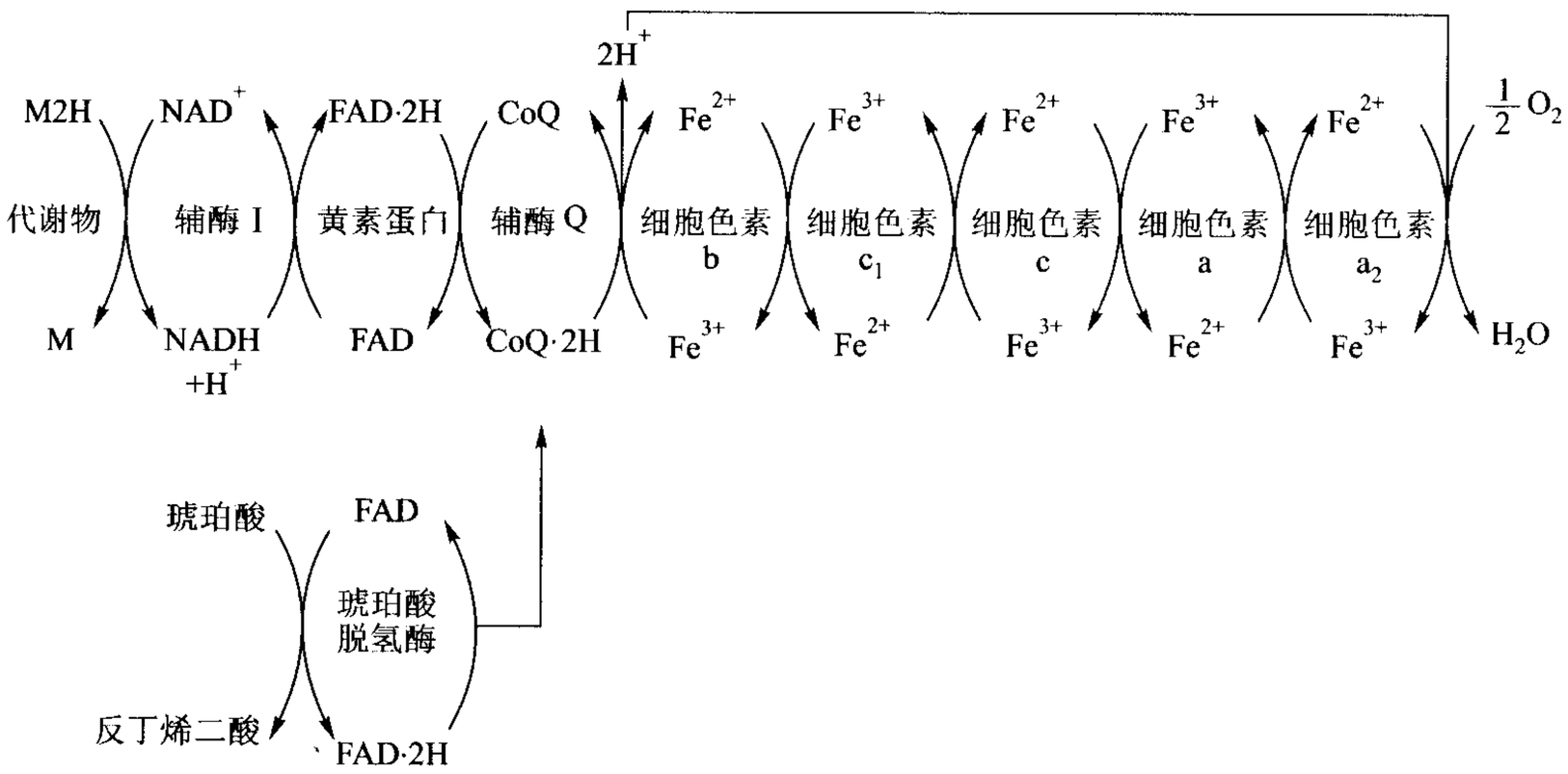


图 2－2－5　电子呼吸链的组成

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

图 2－2－6 是异养微生物新陈代谢过程中能量释放和利用的示意图。呼吸过程中所释放的能量，除用于合成细胞物质和维持生命活动外，还有一部分以热的方式散失掉。

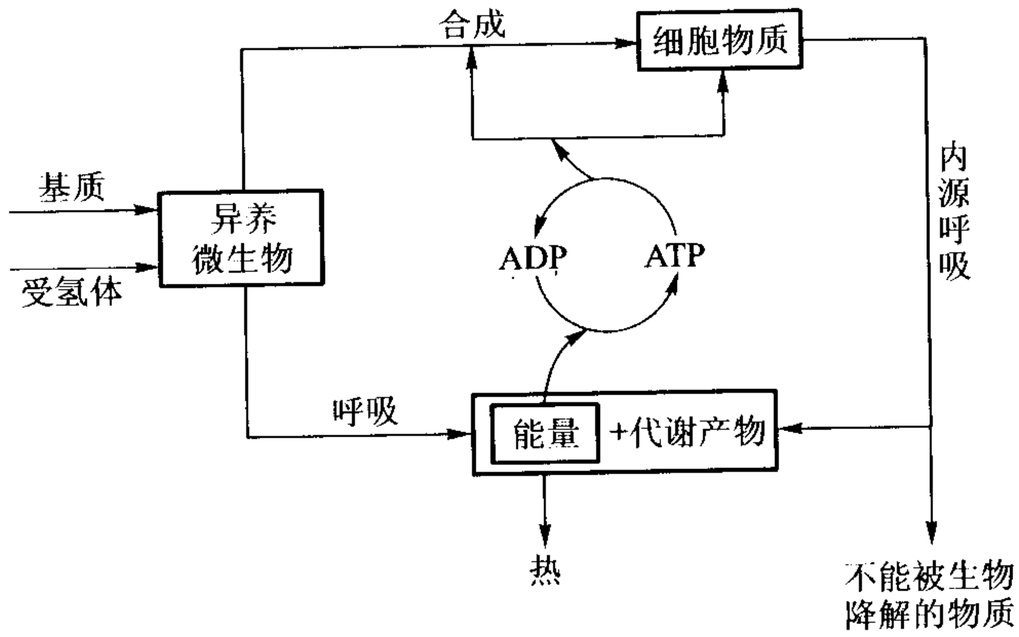


图 2-2-6 异养微生物新陈代谢过程中能量释放和利用示意图

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

第四节 微生物的生长与繁殖

一、生长与繁殖的基本概念

微生物的生长是指在适宜条件下，微生物的细胞不断吸收营养物质，进行新陈代谢，有序地增加化学组分使其总量增加。对于单个细胞来说，生长指细胞的大小随时间延长而增大。体积增加，说明微生物能较好适应环境，从环境中摄取必要的化学组分，使自身的核酶、蛋白质、脂类、糖类、水及无机盐数量增加。细胞的生长是有限度的，当细胞增长到一定程度时，就开始分裂，形成两个基本相似的子细胞。每个子细胞又可以重复以上过程。在单细胞微生物中，细胞分裂的结果是个体数目增加，称为**繁殖**。在多细胞微生物中，细胞数目增加不伴随着个体数目的增加时只能算生长。一般情况下，环境条件适宜时，生长与繁殖总是交替进行的，这一过程就是发育。

因为测定微生物细胞化学组成不容易，单细胞生长的概念，在科研和生产中很难得到应用，所以讨论微生物生长基本上指群体生长。

微生物的群体生长，是指在适宜条件下，微生物细胞在单位时间内数目或细胞总质量的增加。它的实质是细胞的繁殖。当微生物细胞化学组分随时间延长而增加到一定程度后，DNA 的复制表现为细胞分裂，一个细胞变成了两个细胞。通常把一个细胞分裂成两个细胞所需要的时间，称为世代期。

显然，微生物群体生长包含着繁殖的概念。因此，微生物生长与动植物的生长不同。多细胞的高等生物方面，个体的体积增加或增长称为生长，性成熟后产生后代称为繁殖。动植物的生长与繁殖有明确的区分。而微生物生长，除指明单细胞的生长外，其他都是指包括繁殖在内的群体生长。

二、微生物生长测定方法

微生物生长的测定，实际上是指测定微生物群体的细胞数目的增加、群体细胞质量的增加或群体某项化学组分的增加。

（一）平板生物细胞数目的测定

通常使用四种方法。

1. 涂片显微镜直接计数法

将一已知体积，已知稀释倍数的菌液滴在载玻片上，涂布均匀，固定和染色后，在显微镜下借目测，测得视野半径，并计算出面积，然后从涂布的总面积上数出微生物细胞总数；再后推算出涂布总菌数，最后推算出原菌液总菌数。

2. 血球计数器计数法

使用特制的已知容积的血球计数器，将一滴已知稀释倍数的菌液滴入计数器内，盖上盖玻片，使多余的菌液流出计数器外，镜检计数器内细胞数目，再推算原菌液总菌数。

上述两种方法设备简单，较为快速，缺点是不能区别细胞的死活，所测结果是一个总菌数。仅适用于单细胞微生物的生长测定，不宜应用到丝状菌或链状细胞群上。

3. 活菌平板计数法

活菌平板计数法根据一个细胞在固体培养基表面上能生长成为一个菌落的原理而设计。通常使用的固化剂是琼脂。取一定量的稀释菌液注入培养皿内无菌固体培养基上，立刻摇匀。经过一定时间培养后，平板培养基上将生长出一个个菌落。原菌液稀释倍数要使平板上生长出 30～300 个菌落。过密过稀都不易准确计数。

平板计数法能确定活细胞数目，但是操作较复杂，需时较长。只能适用于单细胞微生物的生长计数。

4. 薄膜过滤计数法

使用微孔薄膜（如硝化纤维薄膜）过滤器，过滤一定体积的空气或水样。当空气或水样通过薄膜后，微生物细胞就挂在膜上。然后将薄膜放入培养基上进行最适温度下的培养。经过一定时间的培养后，可观察菌落的个数，推算出活的微生物细胞数量。

本法需无菌操作，薄膜应事先做无菌处理。适于较低浓度样品的测验。

（二）微生物群体细胞质量测定法

常用的有细胞干重测定法和浊度测定法。

1. 细胞干重测定法

取相同容积的培养物样品，经相同速度的离心处理或过滤、无菌水或缓冲液冲洗 1～2 次再重新离心或过滤，置 80 ℃温度下干燥 24 h（或真空干燥），称重。比较两个时间内的细胞干重，就可了解该培养物生长状况。

该法的优点是快速而相对准确。缺点是不能区分活细胞与死亡细胞，并且要求被测培养物菌浓度很高。

2. 浊度测定法

根据在一定范围内，菌悬液中微生物细胞浓度与液体的吸光度呈正比，与透光度呈反比，可使用光电比色计直接比较不同时间内培养物的混浊度来表示菌体生长。混浊度大表示生长量高。

（三）微生物细胞化学组分测定法

细胞化学组成中除大量水之外，固体以蛋白质、脂肪和糖类为主。测定蛋白质、脂肪、核酸、叶绿素、ATP 或糖类在单位时间内的增重，可以反映细胞的生长。

近年来不断发展出一些新的微生物生长测定方法，使用时可参考相关说明。

三、微生物的生长特性

研究微生物群体的生长规律通常采用分批培养和连续培养两种方法，它们适用于纯培养或混合菌种培养研究。各种微生物的生长速度虽然不同，但它们在分批培养中均表现出类似的生长规律。

（一）间歇培养

将少量微生物接种于一定量的液体培养基内，在适宜的温度下培养，在培养过程中不加入也不取出培养基和微生物，这就是间歇培养。定时取样测定活微生物数目或质量的变化，以活微生物个数或微生物质

量的对数为纵坐标，培养时间为横坐标，即可画得一曲线，此曲线称为微生物的生长曲线。

一般说，微生物质量的变化比个数的变化更能在本质上反映出生长的过程，因为微生物个数的变化只反映了微生物分裂的数目，而质量则包括微生物个数的增加和每个个体的增长。图 2－2－7 是按微生物质量绘制的生长曲线。整个曲线可分为 3 个阶段（或 3 个时期）：生长率上升阶段（对数生长阶段），生长率下降阶段及内源呼吸（内源代谢）阶段。

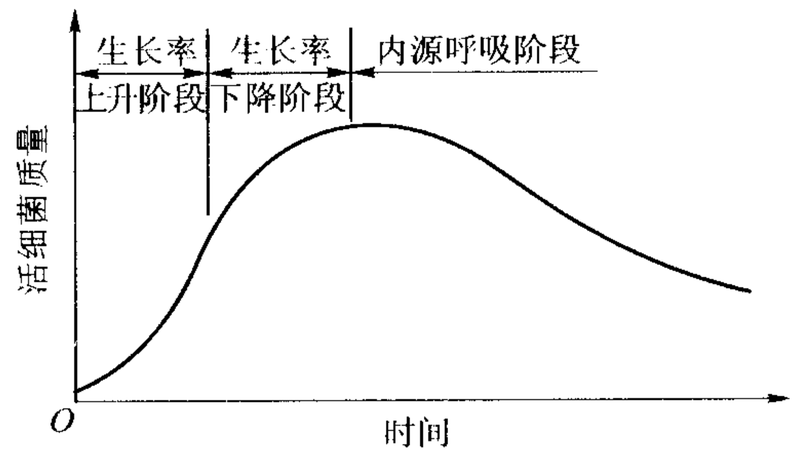


图 2－2－7 微生物生长曲线（按活细菌质量绘制）

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

在生长率上升阶段初期，微生物是在适应新的环境，一般不进行分裂，故数量不增加，但个体则在逐渐增大，以后很快进入迅速繁殖的阶段。在上升阶段，食料（营养物）充分，微生物的生长不受食料数量的影响，只受自身生理机能的限制。到这一阶段的后期，生长率达到最高，这时它们分解培养基中有机物的速率也最高。在这一阶段中微生物数目的对数与培养时间之间呈直线关系。所以又称对数生长阶段。

经过一定时间后，由于食料减少（食料逐渐被微生物吸收掉）和对微生物有毒的代谢产物的积累，环境逐渐不利于微生物的生长，因而进入生长率下降阶段。此时的微生物生长率主要已不是受自身生理机能的限制，而是食料不足起着抑制微生物生长的主导作用。

在内源呼吸阶段，培养基中的食料已经很少，微生物体内的贮藏物质，甚至体内的酶都被当做营养物质来利用，也就是说，微生物这时所合成的新细胞质已不足以补充因内源呼吸（即菌体内贮藏物质、酶等一部分细胞物质的氧化）而耗去的细胞质，因此微生物质量逐渐减少。所以在这一阶段微生物质量的减少一方面是由于微生物的死亡，另一方面是由于内源呼吸。

在以上 3 个阶段中，处于第一阶段的微生物可说是微生物的年轻阶段，到第三个阶段是微生物的衰亡（衰老）阶段。在年轻阶段时整个群体都是年轻的，到了衰老阶段尽管也有新分裂的微生物，但仍然属于衰老的。

图 2－2－8 是按微生物数目的对数绘制的生长曲线图。曲线可分为缓慢期（lag phase）、对数期（log phase）、稳定期（stationary phase）和衰亡期（death phase）四个阶段。

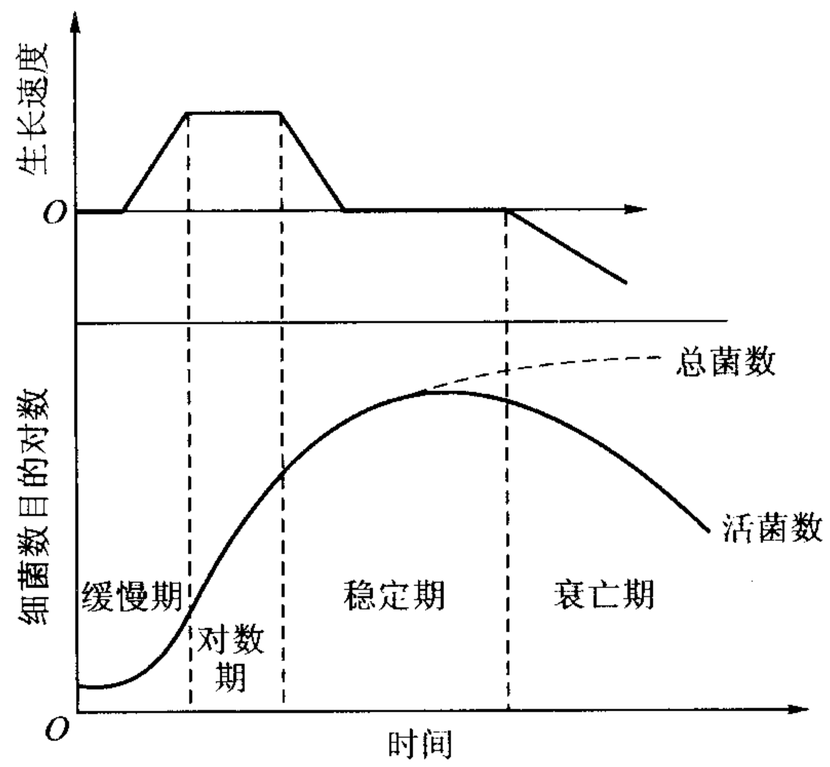


图 2－2－8 微生物生长曲线（按细菌数目的对数绘制）

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

1．缓慢期

微生物刚接种到培养基中时，并不繁殖，数目不增加，但细胞生理活性很活跃，菌体体积增长很快，而在其后期只有个别菌体繁殖，故称这阶段为缓慢期。不同种微生物的缓慢期长短不同，停滞期影响因素

主要有：

（1）接种量：接种量大，缓慢期短。

（2）接种微生物菌龄：处于对数期的微生物接种到另一种培养基中，则其缓慢期可大大缩短；处于稳定期或衰亡期的微生物接种到另一种不同成分的培养基中，缓慢期则延长。

（3）营养：一个群体从营养丰富的培养基中转接到营养贫乏的培养基中会经历较长的停滞期。

接种量适中，群体菌龄小（对数期），营养和环境条件均适宜，缓慢期就短，世代时间短的细菌其缓慢期也短。

2. 对数增长期

处于对数期的微生物代谢活力强，合成新细胞物质快，微生物数目的对数与培养的时间呈直线关系，所以又称对数生长阶段。微生物分裂时间短，世代时间稳定，群体中的细胞化学组分及形态、生理特性都比较一致。在这一阶段中营养物质充分，微生物的生长只受自身生理机能的限制。

在对数生长阶段，微生物的增长过程一般可用下式表示：

$$\frac{dX}{dt} = K_1 X \tag{2-2-4}$$

式中：X——某一时间 t 时微生物的质量或浓度；

K_1——微生物增长率。

积分，得：

$$\ln \frac{X}{X_0} = K_1 t \tag{2-2-5}$$

式中：X_0——微生物的起始质量或浓度。

对于污水生物处理中的活性污泥来说，微生物的质量或浓度可以粗略地用挥发性污泥的质量或浓度来表示，而 K_1 则表示挥发性污泥的增长率（在实际工作中也可用污泥总量代表挥发性污泥）。

在对数期，对于纯培养的微生物来说有一个很重要的概念——世代时间（generation time），或称倍增时间（doubling time）。它指的是微生物繁殖一代即个体数目增加一倍的时间。对数期的微生物细胞代谢活性最强，合成新细胞物质最快，微生物数目呈几何级数增加，世代时间稳定。因此世代时间的测定需以对数期的生长细胞作为最佳和最快生长的对象。其测定计算如下：

设时间 t_0 时微生物浓度（或数目）为 X_0，到时间 t 时微生物浓度（或数目）为 X，其间微生物共繁殖分裂了 n 代，则：

$$X = X_0 \cdot 2^n \tag{2-2-6}$$

$$n = \frac{\lg X - \lg X_0}{\lg 2} = 3.3 \lg \frac{X}{X_0} \tag{2-2-7}$$

$$G = \frac{t - t_0}{n} \tag{2-2-8}$$

式中：G——世代时间。

微生物的浓度 X_0、X 可通过生长测定方法得到，时间 t_0、t 是确定的，这样就可以测定计算得出微生物的世代时间。

【例 2-2-2】 于液体培养基中，在 $t = 0$ 时接种某种微生物 1 个，$t = 10$ h 时测得微生物数目为 1 048 576个，问该微生物的世代期？

解：根据式（2-2-7），可以计算，

$$n = 3.3 \lg \frac{X}{X_0} = 3.3 \lg \frac{1\ 048\ 576}{1} = 19.88$$

世代期 $G = \dfrac{t - t_0}{n} = \dfrac{10 - 0}{19.88}$ h $= 0.50$ h

因此，该微生物的世代期是 0.5 h。

一般来说，微生物（细菌）生长繁殖极快。多数种 20 ~ 30 min 繁殖一代，最快的世代时间仅 9.8 min，有的则长达几十小时。好氧微生物比厌氧微生物的世代时间短，单细胞比多细胞微生物的世代时间短，原核比真核微生物的世代时间短。同一种微生物，世代时间受培养基组成和培养条件的影响，如培养温度、pH、营养物浓度和性质等。但是，在一定条件下，各种微生物的世代时间是一定的。

3. 稳定期

在稳定期中，菌体生长繁殖速度逐渐下降，同时菌体死亡数目逐渐上升，最后达到新增殖的微生物数与死亡数基本相等。稳定期的活菌数保持相对平衡并处于最大值。

导致细菌群体进入稳定期的主要因素是营养物质浓度降低。处于稳定期的细菌开始积累贮存物质，如肝糖、异染颗粒、脂肪粒或聚 β - 羟基丁酸等。大多数芽孢菌在稳定期形成芽孢。

4. 衰亡期

衰亡期中，微生物死亡速率增加，甚至死亡微生物数远超过新生数，总微生物数显著下降，生长曲线显著下降。衰亡期的微生物常出现畸形或衰退型，有些细菌产生芽孢。

（二）连续培养

连续培养与间歇培养不同，它的特点是一方面连续进料，另一方面又连续出料的培养方式。它又分为两种：恒浊连续培养和恒化连续培养。

1. 恒浊连续培养

培养基提供足够量的营养元素，微生物保持最大速率生长。通过控制进料流速使装置内微生物浊度保持一定，保持理论上的对数生长期，可获得大量菌体或与菌体代谢相平衡的代谢产物。这种方式往往用于微生物的生理生化研究。

2. 恒化连续培养

这种方式与水处理装置的运行方式比较相似。固定恒定的进料流速，又以同样的速率排出，进水组分及反应器中营养物浓度基本不变。这种方式往往有一种限制性营养物控制生长。实际情况也确实如此。

恒化连续培养装置中描述与控制微生物生长的最重要参数是稀释速率 D，其含义如下：

$$\text{稀释速率 } D = \frac{F}{V}$$

式中：F——进料体积流量；

V——培养装置体积。

稀释速率 D 与停留时间（reten - tion time，RT）互为倒数，后者指一定流量的进料在反应器中的滞留时间。运行控制中 D 的大小需与微生物的生长相联系，即与微生物的倍增时间（doubling time，DT）有关。为了保证微生物在反应器内能很好生长，停留时间 RT 必须大于倍增时间 DT，这样微生物才能滞留在反应器内，微生物越来越多。反之，停留时间小于 DT，微生物就会被冲出（wash - out）反应器，微生物越来越少。

四、环境因素对微生物生长的影响

微生物除了需要必须的营养物质和对氧的要求外，还需要其他适宜的生活条件，如温度、酸碱度、无毒环境等，才能很好地生长繁殖。影响微生物生长的主要环境因素分述如下。

（一）温度

微生物的生长温度范围很广，在 5 ~ 85 ℃范围内均有微生物生长，少数嗜热微生物的上限温度可达 100 ℃以上。大多数细菌生长的适宜温度在 20 ~ 40 ℃之间，但有的细菌喜欢高温，适宜的繁殖温度是 50 ~ 60 ℃，有机污泥的高温厌氧处理就是利用这一类细菌来完成的。按照温度的不同，可将微生物（主要是细菌）分为低温、中温和高温三类（表 2 - 2 - 3）。

表 2-2-3　微生物对温度的适应范围

微生物类型	生长温度/ ℃			主要存在处所
	最低	最适	最高	
低温型	-5 ~ 10	10 ~ 20	25 ~ 30	海水及冷藏食品
中温型	10 ~ 20	18 ~ 35	40 ~ 45	腐生细菌
		35 ~ 40		寄生细菌
高温型	25 ~ 45	50 ~ 60	70 ~ 85	土壤、堆肥、温泉

高温可以杀死微生物，只要加热超过微生物致死的最高温度，微生物很快就会死亡。温度愈高，死亡愈快。此外，细胞内所含水分愈少，微生物的致死温度愈高。例如，许多没有芽孢的细菌在水中加热到70 ℃经 10 ~ 15 min 死亡，100 ℃时很快就死亡，但有芽孢的细菌细胞由于其含水量较少，在 100 ℃沸水中需煮几十分钟，有时甚至 1 ~ 2 h 才会死去。在干热的情况下，细菌不容易被杀死。一般细菌在100 ℃左右干热，要 1 ~ 2 h 才死去，而芽孢即使被加热到 140 ℃，还需 2 ~ 3 h 才能被杀死。

湿热比干热容易杀死微生物，原因是蛋白质的含水量越多，加热时愈容易凝固，而且湿热所用的水蒸气的传导力与穿透力都比较强，更容易破坏蛋白质。微生物在其最低生长温度下代谢活动减弱，处于休眠状态，维持生命而不发育。实验室中常利用冰箱保存菌种，一般以 4 ℃左右为保存菌种的适宜温度。反复冻融会使细胞受到破坏，微生物死亡。

（二）氢离子浓度

各种细菌都有它们所适宜的氢离子浓度。在酸性太强或碱性太强的环境里，它们一般不能生活。大多数细菌适宜于繁殖的 pH 范围在 6 ~ 8 之间，而 pH 在 4 ~ 10 之间也能生存。微生物的代谢活动可能导致某些物质的积累，从而影响环境 pH。

（三）氧化还原电位

不同微生物对氧化还原电位（E_h）的要求不同。

一般好氧微生物要求 E_h 在 +0.3 ~ 0.4 V 左右，而 E_h 值在 +0.1 V 以上均可生长；厌氧微生物则需要 E_h 值在 0.1 V 以下才能生活；对于兼性微生物来说，E_h 值在 +0.1 V 以上，进行好氧呼吸，E_h 值在0.1 V 以下，进行无氧呼吸。

（四）干燥

水是生物生存的必要条件，没有水一切生命都不能存在。前面已提到，微生物细胞中含有大量水分。干燥会使微生物细胞失去水分，导致代谢终止或死亡。不同的微生物对于干燥的抵抗力有强有弱。一般没有荚膜、芽孢的微生物对干燥环境比较敏感。细菌的芽孢和其他微生物的孢子耐旱性较强，在干燥环境中可以保持几十年，当遇到适宜的生活条件，仍会发芽繁殖。

（五）渗透压

微生物细胞的细胞膜是半透性的，在不同渗透压的溶液中呈现不同的反应。当微生物周围的水溶液的渗透压同其细胞内液体的渗透压相等时，微生物生活得最好。

生活在高渗透压溶液中，微生物细胞失水，发生质壁分离，影响其生命活动，甚至死亡。在低渗透压溶液中，微生物细胞容易膨胀，甚至破裂。

（六）光及辐射

除光合细菌外，一般细菌都不喜欢光线。许多微生物在日光直接照射下容易死亡，特别是病原微生物。日光中具有杀菌作用的主要成分是紫外线。细菌细胞吸收紫外线后，会因其蛋白质和核酸发生变化而引起死亡。

紫外线是非电离辐射，以波长 265 ~ 266 nm 的紫外线杀菌力最强。紫外辐射对微生物有明显的致死作用，是强杀菌剂。但紫外线穿透性很弱，因此只有表面杀菌能力。一般细菌在紫外线下照射 5 min 即能被

杀死，芽孢则需 10 min。由于紫外线不能透过普通玻璃，所以一般紫外线常用于杀死空气中的微生物，如在无菌或无菌箱中用得较多。

电离辐射 X 射线与 α 射线、β 射线和 γ 射线均为电离辐射。在足够剂量时，对各种微生物均有致死作用。常用于一次性塑料制品的消毒，也用于食品的消毒。

（七）化学药剂

化学物质作用于微生物的结果可以是灭菌、消毒、防腐。灭菌（sterilization）指杀死一切微生物及孢子。消毒（disinfection）指杀灭病原微生物，而不一定完全杀死非病原微生物及芽孢和孢子，用来消毒的药物称为消毒剂。防腐（antisepsis）是一种抑菌而非灭菌的作用，用于防腐的化学药品称为防腐剂。某些化学药物在低浓度时为防腐剂，在高浓度时则成为消毒剂。常用的化学药剂包括，重金属及其化合物、有机化合物、卤族元素及其化合物、氧化剂、表面活性剂、染料等。

习　题

2-2-1　光能异养微生物的能源物质是：（　　）

A　有机碳　　B　无机氮　　C　无机碳　　D　辐射能

2--2-2　水是微生物最重要的组分之一，也是不可缺少的化学组分。一般微生物体的含水量占其体重的（　　）。

A　10% ~15%　　B　40% ~50%　　C　80% ~90%　　D　20% ~30%

2-2-3　污（废）水生物处理中好氧微生物群体（活性污泥）要求碳氮磷比［BOD_5（C）：N：P］为：（　　）

A　300：8：1　　B　10：5：1　　C　200：5：1　　D　100：5：1

2-2-4　根据微生物所需碳源与能源物质的不同，它们被划分为下列哪4种不同的营养类型？（　　）

A　化能自养、化能异养、无机营养、有机营养

B　光能自养、化能异养、无机营养、光能异养

C　化能异养、化能自养、光能异养、光能自养

D　化能自养、光能异养、无机营养、有机营养

2-2-5　根据微生物所需碳源物种的不同，它们被划分为下列哪两种营养类型？（　　）

A　光能自养、化能异养　　B　无机营养型（自养）、有机营养型（异养）

C　化能自养、光能自养　　D　无机营养、光能异养

2-2-6　酵母菌和霉菌适宜的生长环境是下列哪一种？（　　）

A　强酸（pH <2）　　B　偏酸性（pH 3.8 ~6）

C　中性（pH =7）　　D　强碱性（pH >10）

2-2-7　不同的营养物进入细胞的方式不同，主要分为四种，它们是：（　　）

A　主动扩散、被动扩散、单纯扩散，促进扩散

B　单纯扩散、促进扩散、主动运输、基团转移

C　主动运输、被动运输、主动扩散、被动扩散

D　促进扩散、主动运输、被动运输，被动扩散

2-2-8　国际酶学委员会提出的酶的系统命名法将酶分为多少大类？（　　）

A　六　　B　五　　C　八　　D　四

2-2-9　某酶的系统编号是 EC3.4.21.4，它是哪一大类的酶？（　　）

A　转移酶　　B　异构酶　　C　水解酶　　D　氧化还原酶

2-2-10　与一般催化剂相比，酶催化具备一些特殊的特点，它们是：（　　）

A　高催化效率、加快反应速率、降低反应活化能

B　高催化效率、高度专一性、酶活性可调节

C　加快反应速率、降低反应活化能、催化反应可逆

D　加快反应速率、催化剂可反复使用、降低反应活化能

2-2-11　影响酶活性的最重要的因素是：（　　）

A　温度、pH　　B　底物浓度、反应活化能

C　初始底物浓度、产物种类　　D　酶的种类、底物类型

2-2-12　研究酶催化动力学反应规律的米-门方程描述的是哪两种变量之间的关系？（　　）

A　反应速率与酶浓度　　B　酶浓度与基质浓度

C　反应速率与基质浓度　　D　反应速率与反应时间

2-2-13　新陈代谢主要包括合成代谢与分解代谢，其中合成代谢是指：（　　）

A　产生能量的过程　　B　产生高能化合物三磷酸腺苷的过程

C　分解细胞物质的过程　　D　从外界吸收营养物质，合成细胞物质的过程

2-2-14　根据最终受氢体（电子受体）的不同，微生物的呼吸作用可分为哪三种主要类型？

A　好氧呼吸、厌氧呼吸、发酵　　B　氧化、还原、产能

C　释氢、受氢、同化　　D　同化、异化、发酵

2-2-15　一种物质产生能量多少与微生物呼吸类型和氧的供应有关，微生物营不同呼吸类型呼吸所产生的能量是不同的，下列哪种产能顺序是正确的？（　　）

A　发酵＞好氧呼吸　　B　好氧呼吸＞厌氧呼吸

C　发酵＞厌氧呼吸　　D　厌氧呼吸＞好氧呼吸

2-2-16　狭义地讲，发酵是哪类微生物的产能方式？（　　）

A　好氧微生物　　B　自养微生物

C　厌氧微生物　　D　光能自养微生物

2-2-17　在描述微生物分批培养的群体特性时，按微生物数目的对数绘制的生长曲线常分为哪四个阶段（期）？（　　）

A　平稳期、上升期、下降期、慢速期　　B　快速期、中速期、慢速期、停滞期

C　停滞期、准备期、增长期、衰退期　　D　缓慢期、对数期、稳定期、衰亡期

2-2-18　在微生物分批培养过程中，其生长曲线中的哪个阶段（期）微生物生长最快？

A　缓慢期　　B　对数期　　C　稳定期　　D　衰亡期

2-2-19　培养某一种微生物，在对数增长期，第 3 h 其量为 5×10^7 个，第 5 h 其量为 10^8 个，请问其世代期是几小时？

A　1　　B　2　　C　3　　D　4

2-2-20　芽孢杆菌一般在生长的哪个阶段产生芽孢？（　　）

A　缓慢期　　B　对数期　　C　稳定期　　D　衰亡期

2-2-21　下列哪个温度范围最适合中温微生物的生长？（　　）

A　10～20 ℃　　B　8～15 ℃　　C　18～35 ℃　　D　55～65 ℃

2-2-22　关于消毒，下列哪一说法是正确的？（　　）

A　杀死一切微生物　　B　杀死病源微生物

C　抑制所有微生物生长　　D　抑制病源微生物生长

第三章　病　　毒

一、病毒的分类、特点与形态结构

（一）病毒的分类与特点

病毒（virus）是寄生于宿主，包括人、动物、植物、微生物细胞中的一类微生物。根据宿主的不同，病毒可以分为动物病毒、植物病毒和微生物病毒即噬菌体（bacteriophage）。

病毒与其他微生物不同，没有细胞结构，一般只由核酸（每种病毒只含有一种核酸，DNA 或 RNA）和蛋白质外壳构成，是一类非细胞生物。

病毒的基本特征是：①无细胞结构，只含有一种核酸（RNA 或 DNA）；②没有自身的酶合成机制，不具备独立代谢的酶系统，营专性寄生生活；③个体微小能通过细菌滤器，一般无法用普通光学显微镜辨认（普通光学显微镜只能辨别 0.2 μm 以上的物体）。这种无法用光学显微镜辨认的微生物常称为超显微镜微生物。近年来使用电子显微镜可以较清楚地观察病毒。④对抗生素不敏感，对干扰素敏感；⑤在活细胞外具有一般化学大分子特征，进入宿主细胞后具有生命特征。

噬菌体是寄生在细菌或放线菌细胞内。除病毒的一般特征外，噬菌体的寄生具有高度的专一性，即一种噬菌体只能侵染某一种细菌。因此可以利用已知的噬菌体来鉴定细菌的种类。噬菌体的平均大小约为 30 ~ 100 nm。当它侵入细菌的细胞后，迅速繁殖，引起细菌细胞的裂解和死亡。

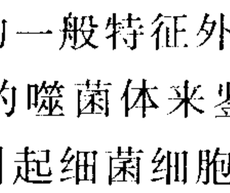
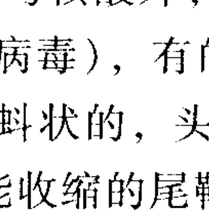
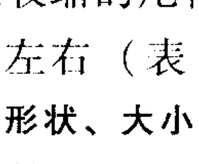
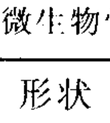
（二）病毒的化学组成与形态结构

成熟的具有侵染力的病毒颗粒称为病毒粒子（viron）。大多数病毒粒子的组成成分只有蛋白质与核酸，有些病毒，如个体较大的痘病毒，除含有蛋白质与核酸外，还含有脂类、多糖等。

各种病毒形状不一，有的是球形（如脊髓灰质炎病毒），有的是杆状（如烟草花叶病毒），有的是椭圆形，还有呈立方体和六面体的。噬菌体大部分都是蝌蚪状的，头部为对称的二十面体，还具有螺旋对称的尾，尾的长短不等，有的尾部僵硬。有的噬菌体具有能收缩的尾鞘，如大肠杆菌 T 偶数噬菌体。病毒的大小也相差悬殊，大的直径超过 200 nm，而小的仅 10 nm 左右（表 2 - 3 - 1）。

表 2 - 3 - 1　一些病毒的形状、大小和核酸类型

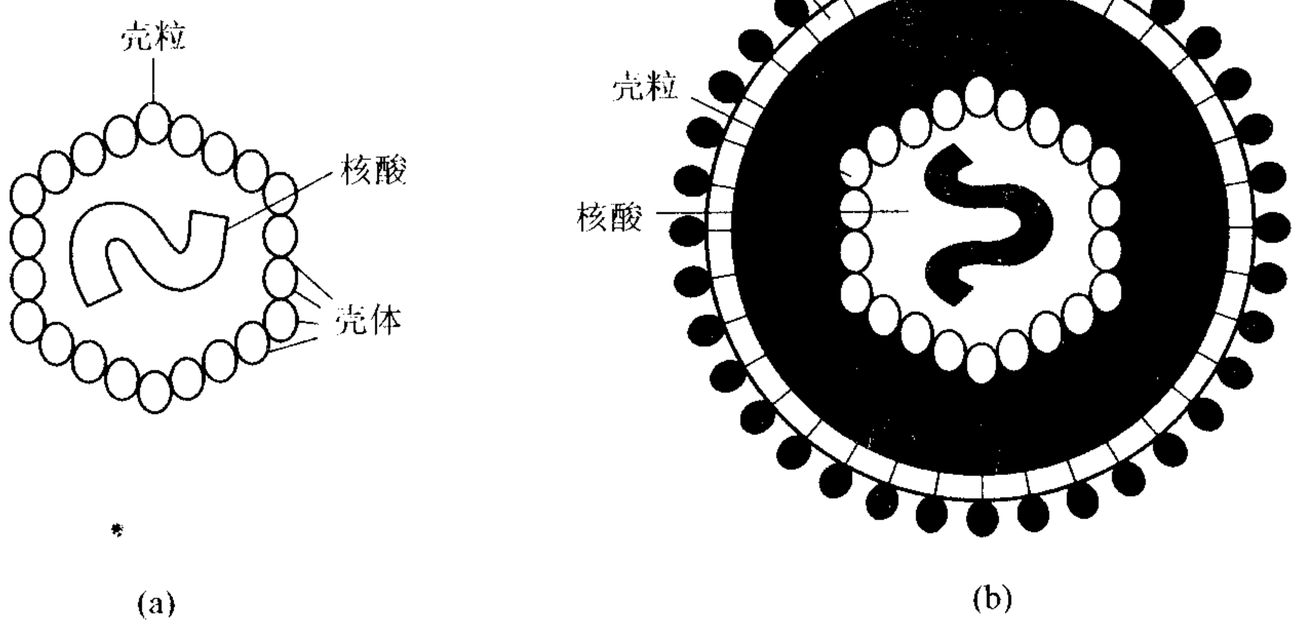
（任南卉，等. 污染控制微生物学. 2002）

	病毒	核酸型	形状	大小（或直径 × 长）/nm
动物病毒	痘苗	DNA		230 × 300
	腮腺炎	RNA		150 × 300
	疱疹	DNA		100 × 200
	流感	RNA		80 × 120
	腺病毒	DNA		70 × 90
	脊髓灰质炎病毒	RNA		28

续表

	病毒	核酸型	形状	大小（或直径×长）/nm
植物病毒	伤瘤病毒	RNA		55×60
	烟草花叶病毒	RNA		18×300
	马铃薯X病毒	RNA		10×500
噬菌体	T噬菌体	DNA		65×200
	ϕ×174	DNA		25

病毒的基本结构包括位于中心的核酸，以及包围着病毒核酸的蛋白质衣壳，又称壳体或外壳构成（图2-3-1）。有些动物病毒的衣壳外面还有一层薄膜，称囊膜。没有囊膜的病毒则为裸露的病毒颗粒。大多数可由水传染疾病的病毒都没有囊膜。囊膜由蛋白质、多糖类等物质组成。破坏病毒的囊膜往往也会破坏它的传染性能。



(a)　　(b)

图2-3-1　病毒结构示意图

（王家玲．环境微生物学．2004）

二、病毒的繁殖

（一）病毒繁殖的过程

病毒缺乏完整的酶系统，不能单独进行物质代谢，必须由宿主细胞提供合成的原料、能量与场所，而且只能在易感活细胞中才能繁殖。病毒不是二分裂繁殖，而是以复制方式繁殖。繁殖过程分为吸附、侵入与脱壳、复制与合成、装配与释放四个步骤。以大肠杆菌T4噬菌体为例叙述病毒繁殖过程如下（图2-3-2）：

1. 吸附

病毒与易感细胞接触时，由于细胞膜表面有特异的受体，与病毒表面相互结合而使病毒吸附于细胞表面，非易感细胞没有这种受体，故病毒不能吸附。

2. 侵入与脱壳

大肠杆菌T偶数噬菌体尾部末端附着在大肠杆菌的细胞壁上，分泌一种能水解细胞壁的酶，使细菌细胞壁产生一个小孔，尾鞘收缩，此时头部的DNA注入宿主细胞内，蛋白质的衣壳留在细胞外，称为脱壳。

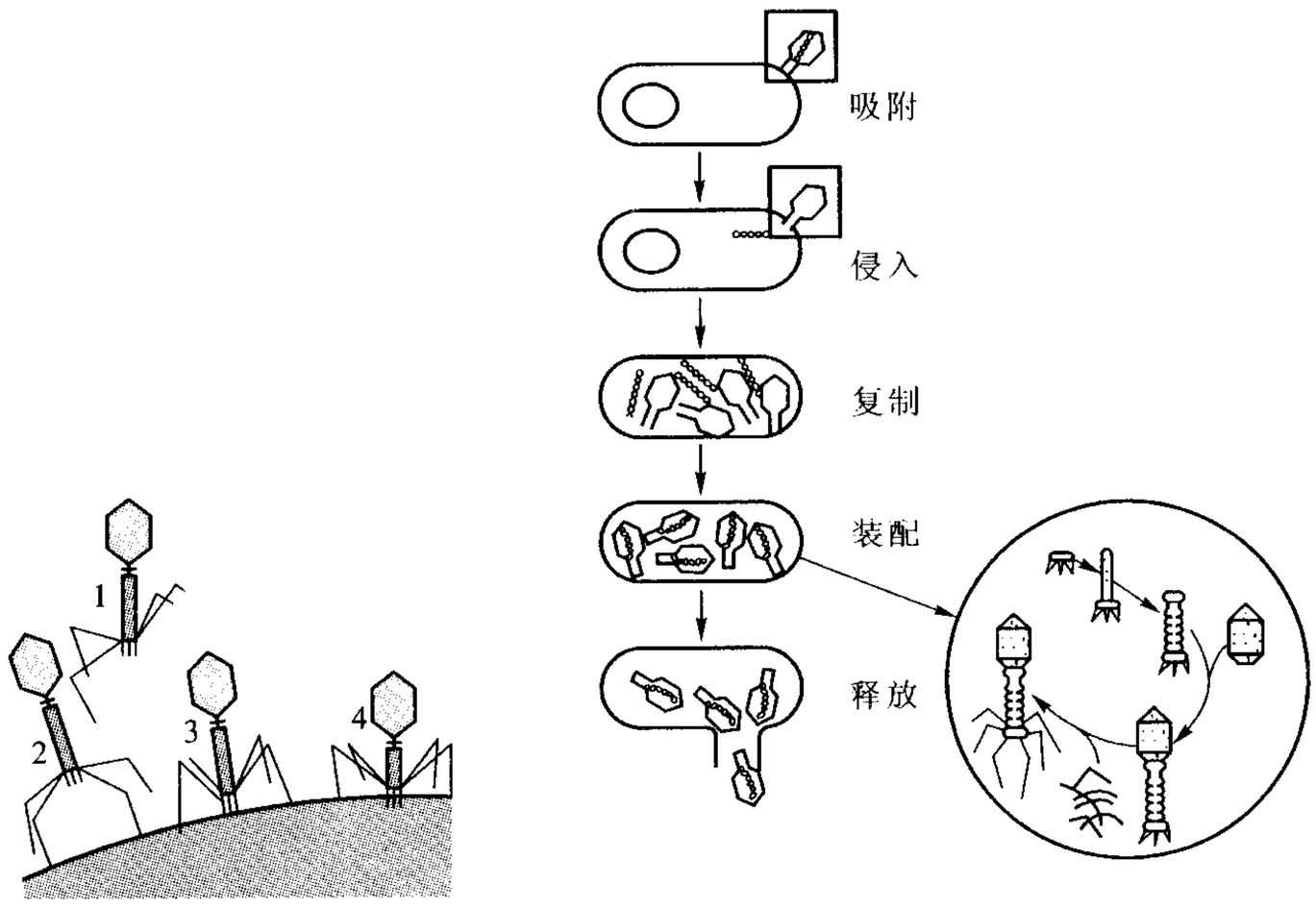
3. 复制与合成

侵入宿主细胞的噬菌体DNA，迅速支配宿主细胞的代谢机构，大量复制与合成新噬菌体的核酸与蛋

白质。

4. 装配和释放

当噬菌体的 DNA 和蛋白质分子复制到一定数量后，装配成子代新的大肠杆菌 T 偶数噬菌体。此时溶解宿主细胞壁的溶菌酶迅速增加，促使宿主细胞裂解，噬菌体释放出来，又侵入新的细胞，如此反复进行。进入宿主细胞的 1 个噬菌体增殖后，往往可释放 10 ~ 1 000 个左右新的噬菌体。



(a) 吸附过程　　(b) 复制过程

图 2 -3 -2　大肠杆菌 T4 噬菌体的吸附及复制过程

（王家玲．环境微生物学．2004）

1. 未附着的噬菌体；2. 用长的尾丝附着在细胞壁上；3. 用尾针接触细胞壁；4. 尾鞘收缩和 DNA 注入

（二）烈性噬菌体与温和噬菌体

1. 烈性噬菌体

能使细菌细胞裂解的噬菌体，称为烈性噬菌体（virulent phage）。被侵染的细菌，称为敏感细菌。

2. 温和噬菌体和溶源性细菌

有一些噬菌体侵入宿主细胞后，其核酸整合到宿主细胞的核酸上同步复制，并随宿主细胞分裂而带到子代宿主细胞内，宿主细胞不裂解。这些噬菌体，称为**温和噬菌体**（temperate phage）。这一现象称为**溶源现象**（lysogeny）。被温和噬菌体侵染的细菌，称为**溶源性细菌**（lysogenic bacteria）。溶源性细菌在细胞分裂中有时也可失去噬菌体的核酸成为非溶源性细菌，但出现概率很低，约为 0.1% ~0.001%。细胞中噬菌体的核酸可自发脱离细菌的核酸，导致细胞裂解、释放成熟的噬菌体。

三、病毒的去除

去除病毒的方法有物理、化学与生物方法。

物理方法主要是加温及光照，其中加温处理的效果较好。沉淀、吸附、过滤等方法能去除部分水中的病毒，但不能破坏和杀死病毒。

化学方法中，高 pH、化学消毒剂及染料可以破坏与灭活水中的病毒，其中，加石灰、漂白粉或碘的方法较为常用。

生物法，主要是生物直接吞噬病毒，产生生物热，分泌抑制病毒存活的物质或影响 pH 而导致病毒失活。

在污水生物处理工艺中，各工艺单元对病毒的去除率不同。一般初沉池可以去除部分病毒，最高去除

率达50%。生物处理单元可去除60%～99%的病毒。

习　题

2-3-1　根据宿主的不同，病毒可以分为哪几种？(　　)

A　朊病毒、亚病毒、动物病毒　　B　动物病毒、植物病毒、噬菌体

C　朊病毒、拟病毒、传染病毒　　D　亚病毒、疱疹病毒、噬菌体

2-3-2　噬菌体属于哪类病毒？(　　)

A　植物病毒　　B　动物病毒

C　微生物病毒　　D　水体病毒

2-3-3　病毒与其他微生物不同，没有细胞结构，一般只由下列哪两种物质构成？(　　)

A　核酸和蛋白质外壳　　B　RNA和DNA

C　RNA和多糖　　D　核酸和多糖外壳

2-3-4　病毒的繁殖过程包括四个步骤，下列哪种步骤顺序是正确的？(　　)

A　侵入与脱壳、吸附、装配与释放、复制与合成

B　吸附、复制与合成、装配与释放、侵入与脱壳

C　吸附、侵入与脱壳、复制与合成、装配与释放

D　复制与合成、吸附、侵入与脱壳、装配与释放

2-3-5　根据噬菌体与宿主细胞的关系，可以将噬菌体分为烈性噬菌体与温和噬菌体，其中烈性噬菌体能使细菌细胞发生哪种变化？(　　)

A　增长　　B　繁殖　　C　膨胀　　D　裂解

2-3-6　被下列哪种病毒侵染的细菌称为溶源性细菌？(　　)

A　烈性噬菌体　　B　温和噬菌体　　C　植物病毒　　D　动物病毒

2-3-7　常规水处理方法如混凝、过滤、生物处理单元等去除病毒的效果如何？(　　)

A　不能去除　　B　可以去除一部分　　C　全部去除　　D　全部杀死

第四章　微生物的生态

第一节　微生物生态的基本概念

生态学（ecology）研究生命系统与其环境系统间的相互作用规律。微生物生态学是生态学的一个分支，研究对象是微生物群体与其周围生物和非生物之间的关系，主要内容包括微生物在自然环境中的分布、微生物与其他生物之间的关系即微生物的生物环境、微生物在生态系统物质循环中的作用等。

一、种群、群落和生态系统

在生命科学的研究领域中，从宏观到微观一般可分为 10 个层次：生物圈（bioshphere）、生态系统（ecosystem）、群落（community）、种群（population）、个体（individual）、器官（organ）、组织（tissue）、细胞（cell）、细胞器（organelle）和分子（molecule），其中前四个客观层次都是生态学研究的范围。

一个物种在一定空间范围内的所有个体的总和在生态学中称为**种群**，所有不同种的生物的总和为**群落**。生物群落及其生存环境共同组成的动态平衡系统就是**生态系统**。**生物圈**是指地球上所有生物及其生活的那部分非生命环境的总称，包括非生命部分和生命部分。例如，森林、草原、河流、湖泊、山脉或其一部分都是自然生态系统；农田、水库、城市则是人工生态系统。生态系统的大小不一，小如一滴水、大如生物圈。生态系统具有等级结构，即较小的生态系统组成较大的生态系统，简单的生态系统组成复杂的生态系统，最大的生态系统是生物圈。

生态系统是生物圈的组成单元，生物圈内的任何一个相对完整的自然整体都是一个生态系统。生态系统是生物群落和它们所生活的非生物环境结合起来的一个整体。生物群落同其生存环境之间以及生物群落内不同种群生物之间不断进行着物质交换和能量流动，并处于互相作用和互相影响的动态平衡之中。

二、生态系统的结构与功能

（一）生态系统的结构

任何一个生态系统都由生物群落和其所生活的非生物环境或称理化环境两大部分组成，如下列简图所示。

$$\text{生物群落} \underset{\text{能量流动}}{\overset{\text{物质循环}}{\longleftrightarrow}} \text{非生物环境}$$

1. 非生物环境

非生物环境包括参加物质循环及影响生物生存的非生物因子。这些因子主要包括温度、光辐射、渗透压、pH、氧化还原电位、氧、毒性物质、抗生素等。

2. 生物及其群落

生态系统中的生物有三种：生产者、消费者和分解者，它们分别由不同种类的生物充当。

（1）生产者：吸收太阳能并利用无机营养元素（C、H、O、N 等）合成有机物，将吸收的一部分太阳能以化学能的形式贮存在有机物中。生产者的主体是绿色植物，以及一些能够进行光合作用的微生物。

（2）消费者：是直接或间接地利用生产者所制造的有机物作为食物和能源，而不能直接利用太阳能和无机态的营养元素的生物，包括草食动物、肉食动物、寄生生物和腐食动物。消费者以动物为主。消费

者可以划分为数个营养级，较小的消费者被较大的消费者所食，形成食物链。

（3）分解者：是指所有能够把有机物分解为简单无机物的生物，它们主要是各种细菌和部分真菌。分解者以动植物的残体或排泄物中的有机物作为食物和能量来源，通过它们的新陈代谢作用，有机物被分解为无机物并最终还原为植物可以利用的营养物。消费者和分解者都不能够直接利用太阳能和理化环境中的无机营养元素，称它们为异养生物（heterotroph）。

特别值得指出的是，理化环境、生产者和分解者是生态系统缺一不可的组成部分，而消费者是可有可无的。

（二）生态系统的功能

生态系统的功能包括生物生产、能量流动、物质循环、信息传递及系统调节等。

1. 生物生产

生产者利用太阳能或化学能将 CO_2 和 H_2O 合成有机体。

2. 能量流动

一切生物所需要的能力归根结底都来自太阳能。太阳能通过光合作用进入生态系统，将简单的无机物（H_2O、CO_2）转变成有机体，及转化为贮存与有机分子中的化学能。这种化学能以食物形式沿着食物链的各个环节，即各营养级中依次流动，不断被利用与消耗。因此，能量流动是单方向的。

3. 物质循环

构成生态系统中的生物个体与生物群落的各种化学元素，经由生产者、消费者、分解者所组成的营养级依次转化，从无机物→有机物→无机物，最后返回环境，构成物质循环。

4. 信息传递

包括物理信息（声、光、颜色等）、化学信息（生长素、抗菌素、酶等）、行为信息和营养信息，这些信息最终都经由基因和酶的作用形成，并以激素和神经系统为中介体现出来，它们对生态系统的调节有重要作用。

5. 调节能力

指生态系统具有自动调节恢复稳定状态的能力。系统的组成成分越多样、能量流动和物质循环的途径越复杂，调节能力就越强。反之亦反。这种调节能力有一定限度，超过此限度，生态系统就会被破坏。使生态系统失去调节能力的主要因素，一是种群成分的改变，二是环境因素的变化。

三、微生物在生态系统中的作用

微生物在自然生态系统中发挥重要的作用。

1. 微生物是有机物的主要分解者

微生物最大的价值在于其分解功能。它们分解生物圈内存在的动物和植物残体等复杂有机物质，并最后将其转化成最简单的无机物，再供初级生产者使用。

2. 微生物是物质循环中的重要成员

微生物参与所有的物质循环，大部分元素及其化合物都受到微生物的作用。在一些物质的循环中，微生物是主要的成员，起主要作用；而一些过程只有微生物才能进行，起独特作用；而有的是循环中的关键过程，起关键作用。

3. 微生物是生态系统中的初级生产者

光能营养和化能营养微生物是生态系统的初级生产者，它们具有初级生产者所具有的两个明显特征，一方面可直接利用太阳能、无机物的化学能作为能量来源；另一方面其积累下来的能量又可以在食物链、食物网中流动。

4. 微生物是物质和能量的贮存者

微生物和动、植物一样也是由物质组成和由能量维持的生命有机体。在土壤、水体中有大量的微生物生物量，贮存着大量的物质和能量。

5. 微生物在地球生物演化中的作用

微生物是最早出现的生物体，并进化成后来的动、植物。藻类的产氧作用，改变大气圈中的化学组成，为后来动、植物出现打下基础。

第二节 微生物之间的相互关系

在自然界中，微生物之间，微生物与高等动、植物之间的关系都是非常复杂而多样化的，它们彼此相互制约，相互影响，共同促进了整个生物界的发展和进化。它们之间的相互关系，归纳起来基本上可分为互生（mutualism）、共生（symbiosis）、拮抗（对抗）（antagonism）和寄生（parasitism）四种。下面着重讨论微生物之间的这四种关系。

一、互生关系

两种不同的生物，当其生活在一起时，可以由一方为另一方提供或创造有利的生活条件，这种关系称为互生关系。在自然界与污水生物处理过程中，普遍存在着互生关系。例如，天然水体或生物处理构筑物中的氨化菌、氨氧化菌（亚硝酸菌）和亚硝酸氧化菌（硝酸菌）之间存在着互生关系。水中溶解的有机物会抑制氨氧化菌的发育，甚至可能导致氨氧化菌死亡。由于与氨氧化菌生活在一起的氨化细菌能将溶解的有机氮化物分解成氨或铵盐，这样既为氨氧化菌解了毒，又为氨氧化菌提供了氮素养料。氨对亚硝酸氧化菌有抑制作用，可是由于氨氧化菌能把氨氧化成亚硝酸，就为亚硝酸氧化菌解了毒，还提供了养料。以上都是单方面有利的互生关系。

互生关系除了单方面有利作用外，有时也可以是双方面的。例如，氧化塘中藻类与细菌之间的关系就是双方面互利的例子。藻类利用光能，并以水中二氧化碳为碳源进行光合作用，放出氧气。它既移除了对好氧菌有害的二氧化碳，又将它的代谢产物（氧）供给好氧菌。好氧菌利用氧去氧化分解有机污染物质，同时放出二氧化碳供给藻类做营养。这种互生关系在自然界中也大量存在。

二、共生关系

两种不同种的生物共同生活在一起，互相依赖并彼此取得一定利益，当这种关系高度发展时，会形成共生体。即在生理上表现出一定的分工，在组织和形态上产生新的结构。其中，互惠共生时两者相互得利；偏利共生时一方得利，对另一方无害。

地衣是微生物中典型的互惠共生关系，它是藻和真菌所形成的一种共生体，常形成固定形态的叶状结构。微生物之间的共生关系并不普遍。

三、拮抗（对抗）关系

一种微生物可以产生不利于另一种微生物生存的代谢产物，这些代谢产物能改变微生物的生长环境条件，如改变 pH 等，造成某些微生物不适合生长的环境。这些代谢产物也可能是毒素或其他物质，能干扰其他生物的代谢作用，以致抑制其生长和繁殖或造成死亡。此外，一种微生物还可以以另一种微生物为食物。微生物之间的这种关系称为拮抗或对抗关系。拮抗作用的结果，有产生有利的一面，也有产生不利的一面。

在污水生物处理系统中，动物性营养的原生动物主要以细菌和真菌等为食物，它们能吃掉一部分细菌等微生物和一些有机颗粒，并促进生物的凝聚作用，从而使出水更加澄清。这是由于拮抗作用而产生的有利一面。但对污水净化起主要作用的毕竟是细菌，如细菌被吃掉过多或活性污泥的结构被破坏过大，就会

产生不利影响。

不仅原生动物和细菌之间，原生动物和原生动物之间以及后生动物和原生动物之间也存在着拮抗关系。但是，这种拮抗是无选择性的，是强的吃弱的，大的吃小的，是非特异性的。这种关系也可称为捕食关系。

拮抗的另一种形式则是特异性的，即一种微生物在生活过程中，产生一种特殊的物质去抑制另一种微生物的生长，杀死它们，甚至使它们的细胞溶解。这种特殊物质就叫做抗菌素。医药上用的青霉素、链霉素都是抗菌素，分别是真菌中的青霉菌和放线菌中的灰链霉菌的分泌物。这些微生物在其生命活动过程中，分泌抗菌素都是为了抑制或杀死其他微生物而使自己得以优势发展。

四、寄生关系

一个生物生活在另一个生物体内，摄取营养以生长和繁殖，使后者受到损害，这种关系称为寄生关系，前者称为寄生物，后者称为寄主。噬菌体和细菌之间就存在着寄生的关系。

第三节　土壤微生物生态

自然界中土壤是微生物生活最适宜的环境，它具有微生物所需要的一切营养物质，以及微生物进行生长繁殖及生命活动的各种条件。

一、土壤的环境条件

土壤具有绝大多数微生物生活所需的各种条件，是自然界微生物生长繁殖的良好基地。其原因在于土壤含有丰富的动植物和微生物残体，可供微生物作为碳源、氮源和能源。土壤含有大量而全面的矿质元素，供微生物生命活动所需。土壤中的水分可满足微生物对水分的需求。不论通气条件如何，都可适宜某些微生物类群的生长。通气条件好可为好氧性微生物创造生活条件；通气条件差，处于厌氧状态时又成了厌氧性微生物发育的理想环境。土壤中的通气状况变化时，生活其间的微生物各类群之间的相对数量也会随之变化。土壤的 pH 范围在 3.5 ~ 10.0 之间，多数在 5.5 ~ 8.5 之间。而大多数微生物的适宜生长 pH 也在这一范围。即使在较酸或较碱性的土壤中，也有耐酸、喜酸或耐碱、喜碱的微生物发育繁殖。土壤温度变化幅度小而缓慢，这一特性极为有利于微生物的生长，其温度范围恰恰是中温性和低温性微生物生长的适宜范围。

因此，土壤是微生物资源的巨大宝库。事实上，许多对人类有重大影响的微生物种大多是从土壤中分离获得的，如大多数产生抗生素的放线菌都分离自土壤。

二、土壤中微生物的数量和分布

土壤中微生物的类群、数量与分布，由于土壤质地、发育母质、发育历史、肥力、季节、作物种植状况、土壤深度和层次等不同，而有很大差异。肥沃土壤，如 1 g 菜园土中常可含有 10^8 个甚至更多的微生物，而在贫瘠土壤如生荒土中仅有 $10^3 \sim 10^7$ 个微生物，甚至更低。

对我国主要土壤微生物数量和分布的调查结果表明，在有机质含量丰富的黑土、草甸土、磷质石灰土、某些森林土或其他植被茂盛的土壤中微生物数量多；而西北干旱地区的栗钙土、盐碱土及华中、华南地区的红壤土、砖红壤土中微生物数量较少。土壤中微生物的水平分布主要决定于碳源的种类。例如，油田地区存在以碳氢化合物为碳源的微生物；森林土壤中存在分解纤维素的微生物；含动、植物残体多的土壤中含氨化细菌、硝化细菌较多。

不同深层土壤中微生物的含量也有很大不同，且分布极不均匀。土壤中微生物的垂直分布与紫外线照

射、营养、水、温度等因素有关，表面土因受紫外线照射和缺乏水，微生物容易死亡而数量少，在5～20 cm处微生物数量最多，每克土可含6.5×10^4个微生物，在植物根系附近微生物数量更多。在耕作层20 cm以下微生物的数量随土层深度增加而减少，距表面1 m深处每克土含3.6×10^4个微生物，在离表面2 m深处每克土只有几个微生物，这是由于缺乏营养和氧气造成的。

土壤中微生物的数量和种类都很多，包含细菌、放线菌、真菌、藻类和原生动物等类群。其中细菌最多，大部分细菌为G^+细菌；放线菌、真菌次之，藻类和原生动物等较少。土壤微生物通过其代谢活动可改变土壤的理化性质，进行物质转化，是构成土壤肥力的重要因素。

（一）细菌

土壤中细菌可占土壤微生物总量的70%～90%，占土壤有机质的1%左右。它们数量大、个体小，与土壤接触的表面积特别大，是土壤中最大的生命活动面，也是土壤中最活跃的生物因素，推动着土壤中的各种物质循环。

土壤中的细菌大多为异养型细菌，少数为自养型细菌。土壤细菌有许多不同的生理类群，如固氮细菌、氨化细菌、纤维分解细菌、硝化细菌、反硝化细菌、硫酸盐还原细菌、产甲烷细菌等在土壤中都有存在。常见的细菌属包括不动杆菌（*Acinetobacter*）、农杆菌（*Agrobacterium*）、产碱杆菌（*Alcaligenes*）、节杆菌（*Arthrobacter*）、芽孢杆菌（*Bacillus*）、短杆菌（*Brevibacterium*）、柄杆菌（*Caulobacter*）、纤维单胞菌（*Cellulomonas*）、梭状芽孢杆菌（*Clostriduium*）、棒杆菌（*Corynebacterium*）、黄杆菌（*Flavobacterium*）、微球菌（*Micrococcus*）、分支杆菌（*Mycobacterium*）、假单胞菌（*Pseudomonas*）、葡萄球菌（*Staphylcoccus*）和黄单胞菌（*Xanthomonas*）等，但是他们在不同的土壤中相对比例有很大的不同。

细菌在土壤中一般黏附于土壤团粒表面，形成菌落或菌团，也有一部分散于土壤溶液中，且大多处于代谢活动活跃的营养体状态。但由于它们本身的特点和土壤状况不一样，其分布也很不一样。

细菌积极参与有机物的分解、腐殖质的合成和各种矿质元素的转化。

（二）放线菌

土壤中放线菌的数量仅次于细菌，它们以分枝丝状营养体缠绕于有机物或土粒表面，并伸展于土壤孔隙中。1 g土壤中的放线菌孢子可达$10^7 \sim 10^8$个，占土壤微生物总数的5%～30%，在有机物含量丰富和偏碱性土壤中这个比例更高。由于单个放线菌菌丝体的生物量较单个细菌大得多，因此尽管其数量上少些，但放线菌总生物量与细菌的总生物量相当。

土壤中放线菌的种类十分繁多，其中链霉菌属和诺卡氏菌属在土壤放线菌中所占的比例最大，其次是微单胞菌（*Micromonospora*）、放线菌属和其他放线菌。放线菌对干燥条件抗性比较大，并能在沙漠土壤中生存。目前已知的放线菌种大多是分离自土壤。放线菌主要分布于耕作层中，随土壤深度增加其数量、种类减少。

（三）真菌

在土壤中可以找到大多数真菌，并广泛分布于土壤耕作层，在30 cm处以下很难找到真菌。在土壤中真菌的生物量相当大，如果土壤含有大量的氧气，那么真菌的量就很大。1 g土壤中可含$10^4 \sim 10^5$个真菌。土壤中的真菌有藻状菌、子囊菌、担子菌和半知菌类，其中以半知菌类最多。

真菌中霉菌的菌丝体像放线菌一样，发育缠绕在有机物碎片和土粒表面，向四周伸展，蔓延于土壤孔隙中，并形成有性或无性孢子。

土壤霉菌为好氧性微生物，一般分布于土壤表层，深层较少发育。且较耐酸，在pH5.0左右的土壤中，由于细菌和放线菌的发育受到限制而使得土壤真菌在土壤微生物总量中占有较高的比例。

真菌菌丝比放线菌菌丝宽几倍至几十倍，因此土壤真菌的生物量并不比细菌或放线菌少。据估计，每克土壤中真菌菌丝长度可达40 m，以平均直径5 mm计，则每克土壤中的真菌鲜重为0.6 mg左右。

土壤中酵母菌含量较少，每克土壤在$10 \sim 10^3$个，但在果园、养蜂场土壤中含量较高，每克果园土可含10^5个酵母菌。

大部分土壤真菌可以代谢碳水化合物，包括多糖，甚至进入土壤的外来真菌也可以生长并降解植物残

体的大部分组分，少数几种真菌还会降解木质素。

（四）藻类

土壤中藻类的数量远较其他微生物类群少，在土壤微生物总量中不足1%。在潮湿的土壤表面和近表土层中，发育有许多大多为单细胞的硅藻或呈丝状的绿藻和裸藻，偶见有金藻和黄藻。在温暖季节的积水土面可发育有衣藻、原球藻、小球藻、丝藻、绿球藻等绿藻和黄褐色的硅藻，水田中还有水网藻和水绵等丝状绿藻。这些藻类为光合型微生物，因此易受阳光和水分的影响，但它们能将CO_2转化为有机物，可为土壤积累有机物质。

土层表面的土著藻类可以进入土壤的亚表层，这时这些藻类又成为外来藻类，并有可能被其他微生物吞噬。

（五）原生动物

大部分原生动物往往只存在于土壤的表层15 cm处，因为它们需要相对高浓度的氧气。土壤中原生动物的数量变化很大，每克有$10 \sim 10^5$个。在富含有机质的土壤中含量较高。种类有纤毛虫、鞭毛虫和根足虫等单细胞能运动的原生动物。它们形态和大小差异都很大，主要以分裂方式进行无性繁殖。原生动物吞食有机物残片和土壤中的细菌、单细胞藻类、放线菌和真菌的孢子，因此原生动物的生存数量往往会影响土壤中其他微生物的生物量。原生动物对于土壤有机物质的分解具有显著作用。

三、土壤自净与环境容量

土壤是一个半稳定状态的复杂物质体系，对外界环境条件的变化和外来的物质有很大的缓冲能力。从广义上说，**土壤的自净作用**是指污染物进入土壤后经生物和化学降解变为无毒害物质，或通过化学沉淀、络合和螯合作用、氧化还原作用变为不溶性化合物，或为土壤胶体牢固地吸附，植物难以利用而暂时退出生物小循环，脱离食物链或排出土壤。**狭义的土壤自净能力**则主要是指微生物对有机污染物的降解作用，以及使污染化合物转变为难溶性化合物的作用。

土壤在自然净化过程中，随着时间的推移，土壤本身也会遭到严重污染。因为土壤污染及其对污染物的净化过程决定于污染物进入量与土壤天然净化能力之间的消长关系，当污染物的数量和污染速度超过了土壤的净化能力时，破坏了土壤本身的自然动态平衡，使污染物的积累过程逐渐占优势，从而导致土壤正常功能失调、土壤质量下降。在通常情况下，土壤的净化能力决定于土壤物质组成及其特性，也和污染物的种类和性质有关。不同土壤对污染物质的负荷量（或容量）不同，同一土壤对不同污染物的净化能力也是不同的。

土壤的净化速度是比较缓慢的，净化能力也是有限的，特别是对于某些人工合成的有机农药、化学合成的某些产品以及一些重金属，土壤是难以使之净化的。因此，必须充分合理地利用和保护土壤的自净作用。

土壤环境容量是指土壤生态系统中某一特定的环境单元内，土壤所允许容纳污染物质的最大数量。也就是说在此土壤时空内，土壤中容纳的某污染物质不至于阻滞植物的正常生长发育，不引起植物可食部分中某污染物积累到危害人体健康的程度，同时又能最大限度地发挥土壤的净化功能。

土壤环境容量的计算公式如下：

$$Q = (C_k - B) \times 10^5$$

式中：Q——土壤环境容量，kg/hm^2；

C_k——土壤环境标准值，mg/kg；

B——区域土壤背景值，mg/kg。

可见，在一定区域的土壤特性和环境条件下，B值是一定的，Q的大小决定于C_k。土壤环境标准值大，土壤环境容量也大；反之容量则小。土壤环境标准的制定，一般根据田间采样测定统计和盆栽试验，求出土壤中不同污染物使某一作物体内残毒达到食品卫生标准或使作物生长发育受阻时的浓度，以此作为土壤环境标准。根据土壤环境容量与实际含量相比较，可以深刻反映区域内的污染状况和环境质量水平，从总量控制上提出环境治理和管理的具体措施。

第四节 空气微生物生态

空气中没有微生物生长繁殖所需要的营养物质和充足的水分，还有日光中有害的紫外线的照射，因此空气不是微生物良好的生存场所，但空气中却飘浮着许多微生物。这是由于空气微生物来源很多，土壤、水体、各种腐烂的有机物以及人和动植物体上的微生物，都可随着气流的运动被携带到空气中去，微生物身小体轻能随空气流动到处传播，因而微生物的分布是世界性的。空气微生物数量取决于空气的相对湿度、紫外线强度、尘埃大小和数量，微生物的适应能力等。室外空气中微生物数量与环境卫生状况、环境绿化程度、尘埃颗粒多寡及大小等有关。若环境卫生，环境绿化程度高，尘埃颗粒少，则微生物数量少。反之，微生物就多。室内（包括住宅、公共场所、医院、办公室、集体宿舍及教室等）空气微生物数量与人员密度和活动情况、空气流通程度关系很大，也与室内卫生状况有关，室内空气中存在很多种致病微生物。城市空气微生物数量比农村多，畜舍、公共场所、医院、宿舍、街道空气中微生物多，海洋、森林、终年积雪的山脉、高纬度地带的空气微生物少，雨、雪过后空气干净，微生物极少。

由于尘埃的自然沉降，所以越近地面的空气，其含菌量越高。然而微生物在高空中分布的记录却越来越高，由 20 km 到 30 km、70 km，直至 85 km，这是目前所知道的生物圈的上限。

空气微生物没有固定的类群，在空气中存活时间较长的主要有芽孢杆菌、霉菌和放线菌的孢子、野生酵母菌、原生动物及微型动物的胞囊。从高空分离到的细菌有产碱杆菌属、芽孢杆菌属、八叠球菌属、冠氏杆菌属、小球菌属等。霉菌有曲霉属、格孢菌属、权孢属、单孢枝霉属及青霉属等。也可能有病原菌，如结核分支杆菌、白喉杆菌等，尤其在医院附近。

测定空气中微生物的数目可用培养皿沉降方法进行。凡需进行空气消毒的场所，如手术室、病房、微生物接种室或培养室等处可用紫外线消毒、甲醛等药物熏蒸。

第五节 水体微生物生态

水体是人类赖以生存的重要环境。地球表面有 71% 为海洋，贮存了地球上 97% 的水。其余 2% 的水贮于冰川与两极，0.009% 存于湖泊中，0.000 09% 存于河流，还有少量存于地下水。凡有水的地方都会有微生物存在。水体微生物主要来自土壤、空气、动植物残体及分泌排泄物、工业生产废物、废水及市政生活污水等。许多土壤微生物在水体中也可见到。水中溶有或悬浮着各种无机和有机物质，可供微生物生命活动之需。但由于各水体中所含的有机物和无机物种类和数量以及酸碱度、渗透压、温度等的差异，各水域中发育的微生物种类和数量各不相同。

根据水体微生物的生态特点，可将水域中的微生物分为两类。一是清水型水生微生物，主要是那些能生长于含有机物质不丰富的清水中的化能自养型或光能自养型微生物。如硫细菌、铁细菌、衣细菌等，还有蓝细菌、绿硫细菌、紫细菌等，它们仅从水域中获取无机物质或少量有机物质作为营养。清水型微生物发育量一般不大。二是腐生型水生微生物。腐败的有机残体、动物和人类排泄物，生活污水和工业有机废物、废水大量进入水体，随着这些废物、废水进入水体的微生物利用这些有机废物、废水作为营养而大量发育繁殖，引起水质腐败。随着有机物质被矿化为无机态后，水被净化变清。这类微生物以不生芽孢的细菌和革兰氏阴性杆菌为多，如变形杆菌、大肠杆菌、产气杆菌、产碱杆菌以及芽孢杆菌、弧菌和螺菌等，原生动物有纤毛虫类、鞭毛虫类和根足虫类。

水体也常成为人类和动植物病原微生物的重要传播途径。

自然界的水圈可以分为淡水生境和海水生境，淡水生境包括湖水、池塘、沼泽地、温泉、溪流和河流。海水生境就是海洋。

一、淡水微生物群落

各类水体中的微生物种类、数量和分布特征很不一样。大气水和雨雪中仅为空气尘埃所携带的微生物所污染，一般微生物数量不高，尤其在长时间降雨过程的后期，菌数较少甚至可达无菌状态。高山积雪中也很少。种类主要有各种球菌、杆菌和放线菌、真菌的孢子。

在流动的江河流水中微生物区系的特点与流经接触的土壤和是否流经城市密切相关。土壤中的微生物随雨水冲刷、灌水排放和随刮风等进入河水，或悬浮于水中，或附着于水中有机物上，或沉积于江河淤泥中。河流经城市时由于大量的城市污水废物进入河流而有大量的微生物进入河水，因此城市下游河水中的微生物无论在数量上还是在种类上都要比上游河水中的丰富得多。河水中藻类、细菌和原生动物等都有存在。

池塘水一般由于靠近村舍，有机物进入量较丰富，且受人畜粪便污染，因此往往有大量腐生性细菌、藻类、原生动物生存和繁殖。在水体表层常有好氧性细菌生长和单细胞或丝状藻类繁殖，而在下层和底泥层则常有厌氧性或兼性厌氧性细菌分布。

湖泊中的微生物分布与池塘中的相类似。但在大型湖泊中，由于水体的不流动性和污染物分布的不均匀性，微生物的分布在各部分水体中有所差异。一般来说沿岸水域中的微生物要比湖泊中心水域中的微生物丰富得多，其活性也高。自养菌是许多湖泊的土著微生物，这些微生物对湖泊的营养物循环起着非常重要的作用。在湖泊中常见的自养菌是蓝细菌和紫色、绿色厌氧光合细菌。在湖泊较深的地方，常见的是绿菌科和红硫菌科等能营光能自养生活的细菌。

地下水一般无有机物污染而很少有甚至无微生物生长繁殖。石油岩石地下水含分解烃的细菌；含铁泉水中有铁细菌；含硫温泉中有硫磺细菌，它们是耐热和嗜热的种，能在 70 ~ 80 ℃水中生长，有的甚至可在90 ℃水中生长。

在淡水中具有代表性的细菌有：无色细菌、黄杆菌、短杆菌、微球菌、芽孢杆菌、假单胞菌、诺卡氏菌、链霉菌、小单胞菌、噬纤维菌、螺旋菌和弧菌。许多有柄细菌，例如柄杆菌和生丝微菌生长在水中的一些固体表面上。

在淡水生态系统中真菌和细菌是重要的外来有机物的降解者，当植物碎片进入水生态时，微生物开始吸附在这些碎片上，并进行有机物的再循环。这样微生物就介入了外来有机碳的转移，使有机碳转化成淡水生态系统中土著微生物的细胞生物碳，在淡水生态系统中微生物对许多其他元素的转化和循环也起着关键作用。

二、海洋中微生物群落

海水含盐量高、渗透压大、温度低，海面阳光照射强烈，深海处光线极暗，静水压力大。海洋中的微生物有固定栖息者，也有许多随河水、雨水及污水排入的。微生物群落分布和数量受海洋环境变化、土壤、河流及人类活动的影响。

1. 水平分布

沿海人口密集，工厂多，海港停泊的船多，有机物含量高，温度适宜时，港口海水每毫升含菌 10 万个。外海人类活动少，有机物含量少，每毫升仅含菌 1 ~ 250 个。海洋微生物的水平分布除了受气候、雨量等影响外，还受潮汐的影响，涨潮时，因海水稀释含菌量明显减少，退潮时含菌量增加。

2. 垂直分布

距海面 0 ~ 10 m 的深度因受阳光照射含菌量较少，浮游藻类较多，主要有绿藻、硅藻和甲藻等，为浮游动物和鱼、虾提供饵料。5 ~ 10 m 以下至 25 ~ 50 m 处的微生物数量较多，而且随海水深度增加而增加。50 m 以下微生物的数量随海水深度增加而减少。在海底，因沉积了很丰富的有机物，微生物数量增多。

因此就某一区域微生物群落的垂直分布而言：海面溶解氧量高，有藻类和好氧性异养菌，继之为兼性厌氧微生物。海底有兼性厌氧菌、厌氧异养菌及硫酸还原菌等。

三、水体自净污染水体的微生物生态

（一）水体自净过程

广义的水体自净是指在物理、化学和生物的作用下，受污染的水体逐渐自然净化，水质复原的过程。**狭义的水体自净**是指水体中微生物氧化分解有机污染物而使水体净化的作用。水体自净可以发生在水中，如污染物在水中的稀释、扩散和水中生物化学分解等；可以发生在水与大气界面，如酚的挥发；也可以发生在水与水底间的界面，如水中污染物的沉淀、底泥吸附和底质中污染物的分解等。水体是一个环境生态系统，天然水体都有一定的自净能力或称自净容量，指水体正常生物循环中能够同化有机物的最大数量，即所谓的环境容量。

在环境容量的范围内，当污染物质随各种污水排入水体后，水中的细菌会由于丰富的有机营养而大量繁殖，分解有机物。随着有机物浓度的降低，藻类的量增加，原生动物以细菌及藻类为食而繁殖，又成为轮虫和甲壳动物的食物，轮虫与甲壳类动物为鱼类提供食料，鱼类为人食用，形成生物循环，构成食物链。河流的水体自净过程大致如下：①有污染物排入河流后被水体稀释，部分有机与无机固体沉降至水体底部。②水中好氧微生物利用溶解氧，把有机物分解为无机物，并组成生物体，水中溶解氧下降，各种原后生动物、鱼类死亡。厌氧菌繁殖，继续对有机物进行分解。③水体中溶解氧在被好氧微生物消耗的同时，大气中的氧刚溶于水就被迅速利用，藻类在白天进行光合作用能提供一定量的氧，但水体的总体复氧速率小于耗氧速率。在最缺氧点，有机物耗氧速率等于河流复氧速率。再往下游，有机物逐渐减少，河流复氧速率逐步大于有机物耗氧速率。如果不再有有机物进入水体，河水中的溶解氧逐渐恢复到原有的程度，甚至达到饱和。④随着水体的自净，有机物缺乏和其他原因（如光照、温度、pH 变化等）使细菌死亡。

由上面的分析可以看出，在自净过程中，复氧和耗氧同时进行。溶解氧的变化状况反映了水体中有机污染物净化的过程，因而可把溶解氧作为水体自净的标志。溶解氧的变化可用氧垂曲线表示（图 2－4－1）。该图反应了耗氧和复氧的协同作用。图中 a 为有机物分解的耗氧曲线，b 为水体复氧曲线，c 为氧垂曲线，最低点 C_p 为最大缺氧点。若 C_p 点的溶解氧量大于有关规定的量，从溶解氧的角度看，说明污水的排放未超过水体的自净能力。若排入有机污染物过多，超过水体的自净能力，则 C_p 点低于规定的最低溶解氧含量，甚至在排放点下的某一段会出现无氧状态，此时氧垂曲线中断，说明水体已经污染。在无氧情况下，水中有机物因厌氧微生物作用进行厌氧分解，产生硫化氢、甲烷等，水质变坏，腐化发臭。

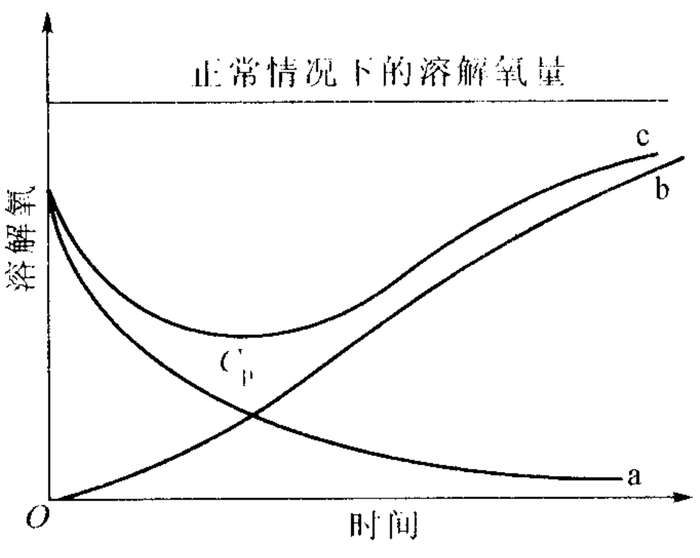


图 2－4－1　氧垂曲线

水体自净能力除与水体本身因素有关外，还与有机污染物的数量和性质有关，一般生活污水和食品工业废水中的蛋白质、脂肪和糖类等极易被分解，但多数有机污染物分解较慢，甚至难以分解，并且有毒性，这就是说水体被污染了。

（二）污染水体的微生物生态

当有机污染物质排入河流后，在其下游的河段中发生正常的自净过程，在自净中形成了一系列连续的“带”。因为各种水生生物需要不同的生存条件，随着水体自净程度的变化，各个带中都可找到一些有代表性的动植物。污化指示生物包括细菌、真菌、原生动物、藻类、底栖动物、鱼类等。常用来指示污染的底栖动物有颤蚓类、寡毛类、软体动物及一些水生昆虫。底栖动物个体较大，生命周期较长，在其生境中相对位移较小，便于缺少专门仪器的非专业人员采集和观察。

污化系统中各个带的划分及其特点如下：

1. 多污带

此带在靠近污水出水口的下游，水色一般呈暗灰色，很浑浊，含有大量有机物，如碳水化合物、蛋白质和多肽等，但溶解氧极少，甚至完全没有。在有机物分解过程中，则产生 H_2S、SO_2 和 CH_4 等气体。由于环境恶劣，所以多污带水生生物的种类很少，几乎全部是异养性生物，无显花植物，鱼类绝迹。

多污带有代表性的指示生物是细菌。细菌的种类很多，数量也很大，有时每毫升水中有几亿个细菌。其中有一部分硫磺细菌，能转化水中的 H_2S。多污带的水底被沉降下来的悬浮物所覆盖，在沉积淤泥中有大量寡毛类蠕虫。多污带有代表性的指示生物举例如下：贝日阿托氏菌、球衣细菌、颤蚯蚓、摇蚊幼虫、蜂蝇幼虫。

2. α－中污带

中污带在多污带下游，可分为两个亚带，α－中污带和β－中污带。前者污染得更严重些。

α－中污带的水色仍为灰色；溶解氧仍很少，为半厌氧状态，有氨和氨基酸等存在。此带中，含硫化合物已开始氧化，但还有 H_2S 存在，BOD（生化需氧量）已有减少，有时水面上有泡沫和浮泥。

生物种类比多污带稍多。细菌含量仍高，每毫升约几千万个。水中有蓝细菌和绿色鞭毛藻，出现纤毛虫和轮虫，在已经部分无机化的水底淤泥中，滋生很多颤蚯蚓。

α－中污带有代表性的指示生物举例如下：天蓝喇叭虫、美观单缩虫、椎尾水轮虫、臂尾水轮虫、大颤藻、菱形藻、小球藻、栉虾。

3. β－中污带

在β－中污带中绿色植物大量出现，水中溶解氧升高，有机物质含量已很少，BOD 和悬浮物的含量都较低，蛋白质的分解产物氨基酸和氨进一步氧化，转变成铵盐、亚硝酸盐和硝酸盐，水中 CO_2 和 H_2S 含量很少。

此带中，生物种类变得多种多样。由于环境不利于细菌生长，故细菌的数量明显减少，每毫升水中有几万个，藻类大量繁殖，轮虫、甲壳动物和昆虫也很多，可发现生根的植物，也可看到泥鳅、鲫鱼和鲤鱼等鱼类。

β－中污带有代表性的生物举例如下：水花束丝藻、梭裸藻、变异直链硅藻、短棘盘星藻、前节晶囊轮虫、腔轮虫、卵形鞍甲轮虫、盖状潘、大型水蚤、绿草履虫、帆口虫、鼻栉毛虫、聚缩虫、隐端舟形硅藻、卵形龙骨硅藻、静水椎实螺、肿胀珠蚌、盖状钩虾。

4. 寡污带

在寡污带，河流的自净作用已经完成，溶解氧已恢复到正常含量，无机化作用彻底，有机污染物质已完全分解，CO_2 含量很少，H_2S 几乎消失，蛋白质已分解成硝酸盐类，BOD 和悬浮物含量都很低。

寡污带的生物种类很多，但细菌数量很少，有大量浮游植物，显花植物也大量出现，鱼类种类也很多。

寡污带的代表性指示生物举例如下：水花鱼腥藻、玫瑰旋轮虫、平突船卵水蚤、窗格纵隔硅藻、圆钵砂壳、黄团藻、大变形虫。

应当注意，上述的污化系统只能反映有机污染的程度，不能反映有毒工业污水的污染。这种根据水生生物种类的更迭来评价水体污染程度的方法也缺乏定量的标准。实际应用中，发展了一些根据水生生物的种类和数量定义的“指数”，用以评价水体污染程度的研究。

第六节　微生物与物质循环

微生物在自然界物质循环中有重要意义。

(1) 微生物对于保持生态系统中的物质循环和能量流动处于平衡状态非常重要。如果自然界中不存

在异养菌，那么就不能对动物和植物尸体以及它们的分泌物进行矿化作用，地球上所有的碳都累积于这些残体上，许多重要元素也都无法循环。

（2）微生物对于动物和植物群体的生长和生存是必不可少的，微生物的某些代谢活动会直接影响动物和植物的生命活动。

（3）微生物对于消除目前自然界中越来越多的环境污染物起着重要的作用，是环境自净的主要力量。

（4）微生物在很大程度上决定了生态系统中的生产力。微生物矿化有机物，释放出 CO_2，促进光合作用的进行。

一、碳循环

碳是构成生物体的主要元素。自然界的碳元素物质主要来源于大气中的 CO_2，而 CO_2通过植物、光合细菌和自养型微生物被合成碳水化合物固定在细胞组织中，它们是有机碳的重要合成者。光合微生物和植物在合成有机物的同时，还通过呼吸、发酵等途径将部分有机物降解以获得生长所需的能量和中间代谢产物，也将部分 CO_2归还到空气中。植物和微生物积累的有机质中的一部分可为动物直接或间接利用，并通过动物的呼吸作用将一部分有机碳分解为 CO_2。水域及土壤中的异养微生物通过降解死亡的生物残体、生物的排泄物及各种有机污染物中的含碳化合物，得到供其生长的能量和基质以合成细胞物质，同时将有机物降解成为其他有机代谢产物、CO_2及 H_2O 释放到环境中。大气中 CO_2来自微生物的生命活动、呼吸作用和物质燃烧，其中以微生物活动为主（图 2－4－2）。

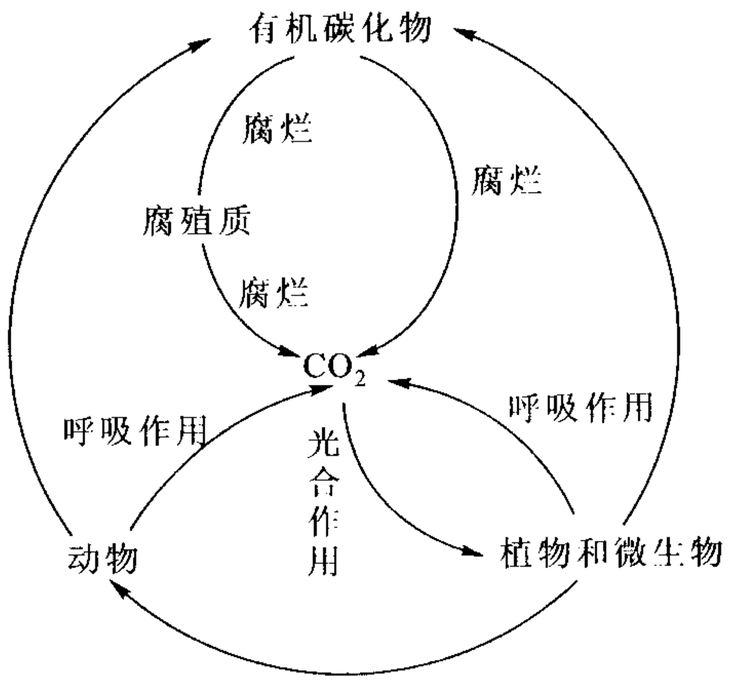


图 2－4－2 微生物在自然界碳素循环中的作用

（任南琪，等．污染控制微生物学．2002）

总结起来，微生物即参加固定 CO_2的光合作用又参加再生 CO_2的分解作用。

二、氮素循环

元素氮也是生命所必需的。在活细胞内，生物活体中的有机物和无生命有机物分子上的氮原子通常是以还原形式存在，即以氨基形式存在。

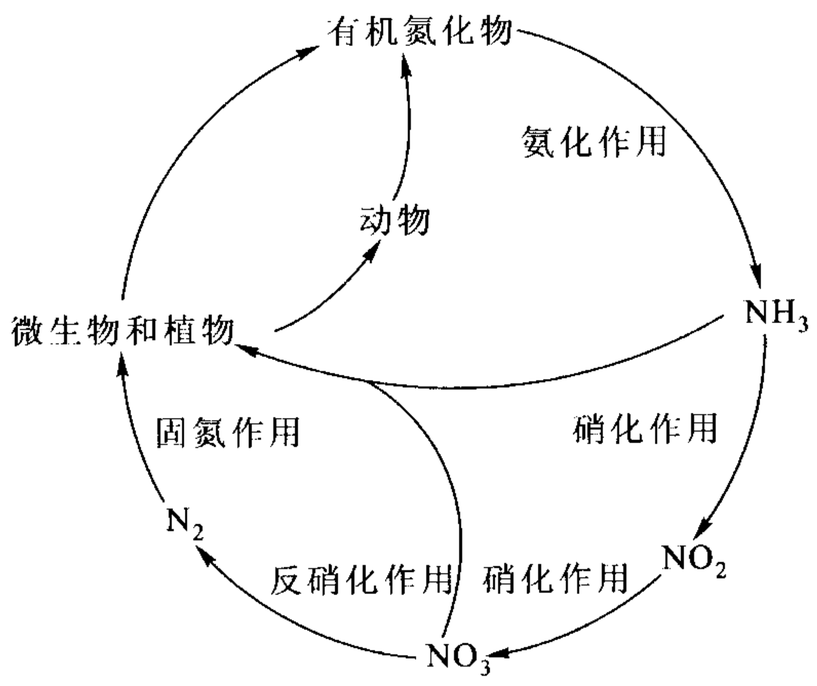


图 2－4－3 微生物在氮素循环中的作用

（任南琪，等．污染控制微生物学．2002）

大气中的分子氮被自由生活的微生物固定为 NH_3并转化为微生物体即有机氮化合物，或被微生物与植物联合作用转化为供植物直接利用的形式。存在于植物和微生物体内的有机氮化物又能为动物所食，形成动物体。动植物和微生物残体及排泄物等有机氮化合物（以蛋白质为主），又是微生物分解的对象。许多植物、动物和微生物都能进行氨化作用。即把有机氮转化成氨，酸性和中性环境中，氨是以 NH_4^+的形式存在；在碱性环境中氨化作用所产生的部分 NH_3将释放到大气中去。氨在通气条件下容易被硝化细菌进一步氧化成硝酸和亚硝酸，硝酸盐在厌氧条件下又可被反硝化细菌还原为分子氮（图 2－4－3）。

三、硫素循环

硫是生物体内某些氨基酸、维生素和辅酶的成分。自然界的硫素主要以元素硫、硫化物、亚硫酸盐和有机硫等形式存在。生物圈中的硫进行着许多复杂的氧化还原反应，这些反应大多数是由微生物调节的（图2-4-4）。自然界中的硫化氢，经微生物作用形成 SO_4^{2-}，SO_4^{2-} 在缺氧环境中可被微生物还原成 H_2S，也可被植物或微生物同化还原成有机硫化物，成为自身的组成成分。动物食用植物和微生物，又将其转变为动物的有机硫化物。动植物和微生物的残体，以及排泄物中的有机硫化物被微生物分解，再以 H_2S 和 S 的形态返回自然界。概括地说硫素循环包括分解作用、同化作用、硫化作用和反硫化作用。微生物参与硫循环的各个过程，并在其中起重要作用。

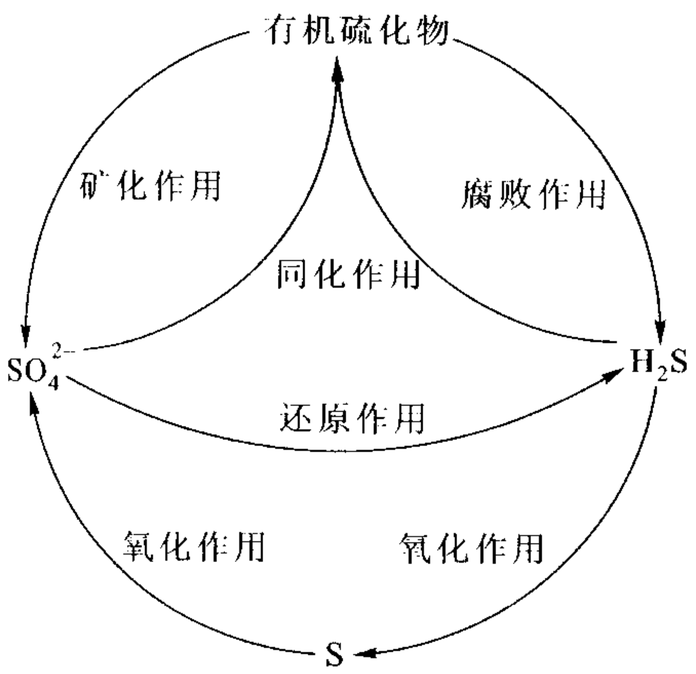


图2-4-4　自然界中的硫素循环

（任南琪，等. 污染控制微生物学. 2002）

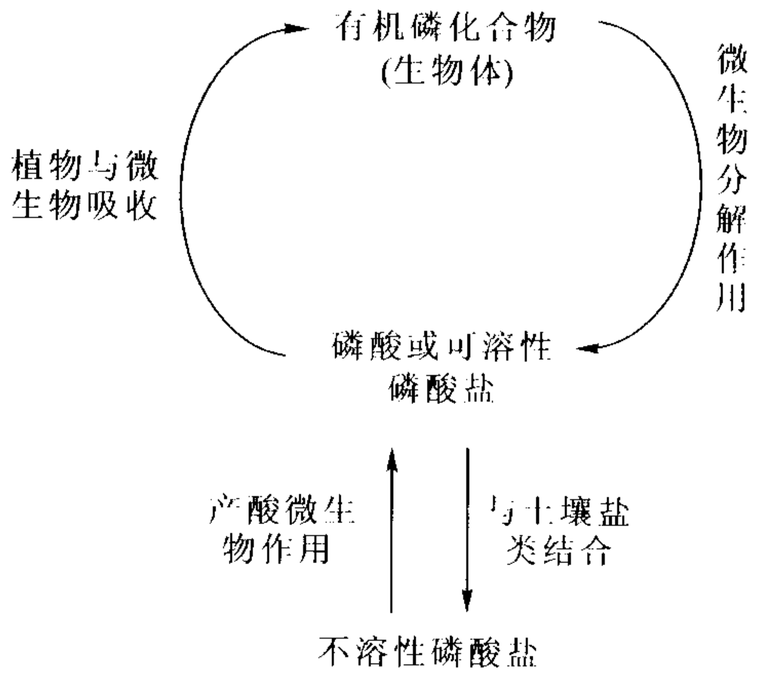


图2-4-5　微生物在自然界磷素循环中的作用

（任南琪，等. 污染控制微生物学. 2002）

四、磷素循环

元素磷是所有生物细胞必不可少的。磷存在于一些核苷酸结构中，三磷酸腺苷（ATP）与生物体内的能量转化密切相关。在生物圈内磷主要以三种形式存在，即以溶解状态存在于水中，在生物体内与大分子结合，不溶解的磷酸盐大部分存在于沉积物中。难溶解的无机磷化物和来自生物残体中的有机磷化物一般均难于为植物所利用，微生物活动能促进磷素的生物循环（图2-4-5）。

五、其他元素循环

1. 铁

铁是地壳中一种丰富的元素，仅有少部分的铁参与生物地球化学循环，铁循环主要为氧化还原反应。Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 具有不同的溶解性能，Fe^{3+} 可以形成不溶性的 $Fe(OH)_3$ 而发生沉淀；在厌氧环境中，Fe^{3+} 可以被还原成溶解性较大的 Fe^{2+}；硫化氢可以与 Fe^{2+} 起反应生成 FeS 沉淀；在水淹没土壤的厌氧条件下，有利于 Fe^{2+} 的累积，而在好氧条件下铁主要以 Fe^{3+} 形式存在。在有机物中，铁通过螯合作用结合到有机物的配位基上，螯合的铁离子能进行氧化还原反应，如电子传递链细胞色素系统通过铁的化合价变化进行电子传递。螯合的铁可以被微生物所同化。在酸性有氧条件下，某些化能自养菌，如氧化亚铁硫杆菌，能氧化 Fe^{2+}，获得能量。许多铁细菌也能氧化 $Fe(OH)_2$ 中的 Fe^{2+}。大多数淡水环境中存在的某些铁细菌能产生鞘，鞘中充满不溶性的 $Fe(OH)_3$，有些是化能自养菌，有些是异养菌。在地下，由于缺少 O_2，Fe^{2+} 不会受到氧化；当地下水渗出地面时，铁细菌便把 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+}，Fe^{3+} 与 OH^- 起反应形成不溶性的

$Fe(OH)_3$沉淀物。在氧的扩散受到限制的环境中，Fe^{3+}便可以作为电子受体并被还原成Fe^{2+}。许多异养细菌，如芽孢杆菌、假单胞菌、变形杆菌、产碱杆菌、梭状芽孢杆菌和肠道细菌都可以进行铁的还原。

2. 锰

锰是植物、动物和许多微生物生长所必需的一种基本微量元素。锰有二价的Mn^{2+}和四价的Mn^{4+}，其中Mn^{2+}是水溶性的。在好氧条件下，pH小于5.5时，Mn^{2+}是主要的；在厌氧条件下，pH较高时，Mn^{2+}也是稳定的；在有O_2条件下，pH大于8时，Mn^{2+}自发地氧化成Mn^{4+}。MnO_2不溶于水，不能被生物吸收。许多微生物能使Mn^{4+}还原成Mn^{2+}，兼性厌氧菌在无O_2条件下，可以产生有机酸促进Mn^{4+}的还原。微生物能把Mn^{2+}氧化成Mn^{4+}，各种土壤和水生细菌和真菌可以催化这一反应。某些球衣细菌能在它们的鞘中沉积MnO_2。某些细菌在呼吸过程中，可以利用Mn^{4+}取代O_2作为最终电子受体，产生Mn^{2+}。微生物还原Mn^{4+}的结果，增加了锰元素的溶解性。

3. 钙

钙在微生物作用下，能在可溶性形式和不溶性形式之间转化，$Ca(HCO_3)_2$是可溶性的，而$CaCO_3$溶解性较差。许多海洋微生物呼吸作用产生CO_2，与Ca^{2+}起反应形成$Ca(HCO_3)_2$和$CaCO_3$，导致$CaCO_3$沉淀，形成石灰石沉淀。微生物产生的有机酸和无机酸可以从这些钙盐和含钙的岩石中溶解出Ca^{2+}。钙与磷酸盐起反应，形成不溶性的磷酸钙。

4. 硅

自然界中的硅主要以SiO_2形式存在，溶解性极低。许多微生物可以产生各种有机酸从岩石中溶解出硅酸盐，引起岩石风化。硅是硅藻、原生动物放射虫（*Radiolarians*）和硅鞭毛虫（*Silicoflagellates*）等微生物的必要成分，这些微生物体具有硅质外壳，死亡之后，它们的外壳累积形成含硅的淤泥。

习　题

2-4-1　生态系统中的生物有三种类型，它们是什么？（　　）

A　消费者、分解者和捕食者　　B　生产者、寄生者和捕食者

C　生产者、消费者和分解者　　D　生产者、捕食者和碎食者

2-4-2　下列哪种生物是生物圈中最主要的分解者？（　　）

A　原生动物　　B　细菌　　C　植物　　D　藻类

2-4-3　天然水体或生物处理构筑物中的氨化菌、氨氧化菌（亚硝酸菌）和亚硝酸菌氧化菌（硝酸菌）之间的关系是：（　　）

A　拮抗关系　　B　寄生关系　　C　互生关系　　D　共生关系

2-4-4　噬菌体和细菌之间的关系是：（　　）

A　拮抗关系　　B　寄生关系　　C　互生关系　　D　共生关系

2-4-5　下列哪种环境最不适宜微生物生长？（　　）

A　土壤　　B　空气　　C　河水　　D　湖水

2-4-6　土壤中哪类微生物的数目最多？（　　）

A　原生动物　　B　植物　　C　细菌　　D　酵母菌

2-4-7　下列哪种土壤中酵母菌量最多？（　　）

A　果园土壤　　B　贫瘠土壤　　C　耕作土壤　　D　苯酚污染土壤

2-4-8　下列哪种水体中微生物数量最少？（　　）

A　河水　　B　池塘　　C　湖水　　D　地下水

2-4-9　当有机污染物质排入河流后，在其下游的河段中发生正常的自净过程，在自净中形成了一系列连续的“污化带”。这些污化带的名称及出现顺序是：（　　）

A　多污带、中污带、寡污带　　B　中污带、寡污带、多污带

C　排污带、稀释带、自净带　　D　自净带、排污带、中污带

2-4-10　反映河流自净过程的“污化带”中，哪个带中的污染物浓度最低？（　　）

A　多污带　　B　α-中污带　　C　β-中污带　　D　寡污带

2-4-11　反映河流自净过程的“污化带”中，哪个带中的溶解氧浓度最低？（　　）

A　多污带　　B　α-中污带　　C　β-中污带　　D　寡污带

2-4-12　自然界碳循环过程中，哪类微生物参与CO_2转化为有机碳的过程？（　　）

A　原生动物　　B　异养微生物　　C　自养微生物　　D　后生动物

2-4-13　自然界碳循环过程中，哪类微生物参与有机碳转化为CO_2的过程？（　　）

A　原生动物　　B　异养微生物　　C　自养微生物　　D　后生动物

2-4-14　自然界氮循环过程中，微生物通过下列哪种途径转化有机氮？（　　）

A　固氮、氨化、反硝化　　B　无机化、硝化、固氮

C　固氮、硝化、氨化　　D　氨化、硝化、反硝化

2-4-15　与生物体内的能量转化密切相关的元素是下列哪种元素？（　　）

A C　　B N　　C S　　D P

第五章　生物处理基础知识

生物降解指由生物催化的复杂化合物的分解过程。生物处理就是在设计的工程设施内，利用生物降解作用去除水、废（污）水、固体废弃物、废气等介质内的污染物质。

本章将重点讨论废（污）水生物处理技术。在水处理构筑物中，微生物与污染物质接触，通过微生物产生的胞外酶与胞内酶的作用将复杂的有机物分解为简单的无机物，将有毒物质转化为无毒物质。微生物在转化有机物质的过程中，将部分分解产物合成微生物自身的细胞物质，另一部分变为代谢产物排出体外，并释放能量，供微生物生命活动之用。

在废（污）水生物处理装置中微生物主要以活性污泥和生物膜的形式存在，在废水厌氧生物处理的升流式厌氧污泥床（UASB）反应器中，微生物还可以颗粒污泥的形式存在。

第一节　好氧生物处理

好氧生物处理（或称好气生物处理）是在有氧的情况下，借好氧微生物（主要是好氧菌）的作用来进行的。在处理过程中，污水中的溶解性有机物质透过细菌的细胞壁和细胞膜而为细菌所吸收；固体的和胶体的有机物先附着在细菌细胞体外，由细菌所分泌的胞外酶分解为溶解性物质，再渗入细胞。

细菌通过自身的生命活动——氧化、还原、合成等过程，把一部分被吸收的有机物氧化成简单的无机物，并放出细菌生长活动所需要的能量，而把另一部分有机物转化为生物体所必需的营养物质，组成新的细胞物质，于是细菌逐渐生长繁殖，产生更多的细菌。其他微生物摄取营养后，在它们体内也发生相同的生物化学反应（图 2－5－1）。

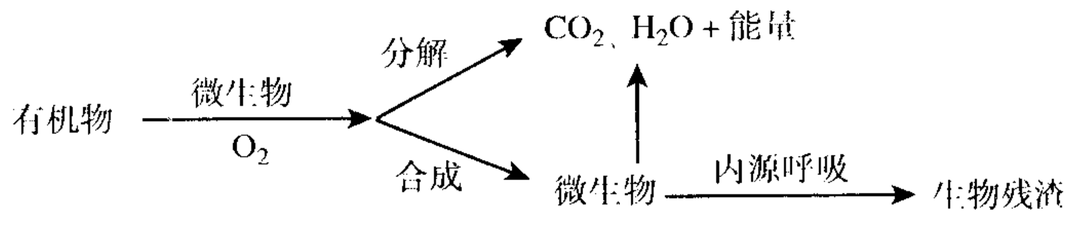


图 2－5－1　好氧生物处理的基本原理

好氧生物处理过程的生化反应方程式：

（1）分解反应（又称氧化反应、异化代谢、分解代谢）：

$$\underset{\text{（有机物的组成元素）}}{CHONS + O_2} \xrightarrow{\text{异氧微生物}} CO_2 + H_2O + NH_3 + SO_4^{2-} + \cdots + \text{能量}$$

（2）合成反应（也称合成代谢、同化作用）：

$$C、H、O、N、S + \text{能量} \longrightarrow C_5H_7NO_2$$

（3）内源呼吸（也称细胞物质的自身氧化）：

$$C_5H_7NO_2 + O_2 \xrightarrow{\text{微生物}} CO_2 + H_2O + NH_3 + SO_4^{2-} + \cdots + \text{能量}$$

在正常情况下，各类微生物细胞物质的成分是相对稳定的，一般可用下列实验式来表示：细菌，$C_5H_7NO_2$；真菌，$C_{16}H_{17}NO_6$；藻类，$C_5H_8NO_2$；原生动物，$C_7H_{14}NO_3$。

分解与合成的相互关系：

（1）二者不可分，而是相互依赖的：分解过程为合成提供能量和前体物，而合成则给分解提供物质基础；分解过程是一个产能过程，合成过程则是一个耗能过程。

（2）对有机物的去除，二者都有重要贡献。

（3）合成量的大小，对后续污泥的处理有直接影响（污泥的处理费用一般可以占整个城市污水处理

厂的 40% ~50%)。

不同形式的有机物被生物降解的历程也不同。结构简单、小分子、可溶性物质，直接进入细胞；结构复杂、大分子、胶体状或颗粒状的物质，则首先被微生物吸附，随后在胞外酶的作用下被水解液化成小分子有机物，再进入细胞内。有机物的化学结构不同，其降解过程也会不同，如糖类、脂类、蛋白质。

新生成的微生物就是废水生物处理中的活性污泥或生物膜的增长部分，通常称其剩余活性污泥或生物膜，又称生物污泥。在废水生物处理过程中，生物污泥经固－液分离后，需进行进一步处理和处置。

好氧生物处理过程中，氧一般是通过机械设备向生物反应器中通入压缩空气，也可提供纯氧。这个过程称为曝气，处理废水的生物反应器称为曝气池。好氧生物处理的反应速度较快，所需的反应时间较短，故处理构筑物容积较小，且处理过程中散发的臭气较少。所以，目前对中、低浓度的有机废水，或者说 BOD 浓度小于 500 mg/L 的有机废水，基本上采用好氧生物处理法。

按照微生物在处理构筑物内的存在状态，好氧生物处理工艺可分为活性污泥法和生物膜法两大类。

一、活性污泥法

(一) 原理与工艺

活性污泥是由各种微生物、有机物和无机物胶体、悬浮物构成的结构复杂且肉眼可见的絮状体。活性污泥法是以废水中的有机物质作为底物，在充分供氧的条件下，对活性污泥进行培养，并将有机物无机化的过程。活性污泥具有良好的吸附、氧化有机物与有毒物的能力，并具有良好的沉淀性能。

活性污泥法是由曝气池、沉淀池（初沉池和二沉池）、污泥回流和剩余污泥排除系统所组成（图 2-5-2）。污水和回流的活性污泥一起进入曝气池形成混合液。曝气池是一个生物反应器，通过曝气设备充入空气，空气中的氧溶入污水使活性污泥混合液产生好氧代谢反应。曝气设备不仅传递氧气进入混合液，且使混合液得到足够的搅拌而呈悬浮状态。这样，污水中的有机物、氧气同微生物能充分接触和反应。随后混合液流入沉淀池，混合液中的悬浮固体在沉淀池中沉下来和水分离。流出沉淀池的就是净化水。沉淀池中的污泥大部分回流，称为回流污泥。回流污泥的目的是使曝气池内保持一定的悬浮固体浓度，也就是保持一定的微生物浓度。曝气池中的生化反应引起了微生物的增殖，增殖的微生物通常从沉淀池中排除，以维持活性污泥系统的稳定运行。这部分污泥叫剩余污泥。剩余污泥中含有大量的微生物，排放环境前应进行处理，防止污染环境。

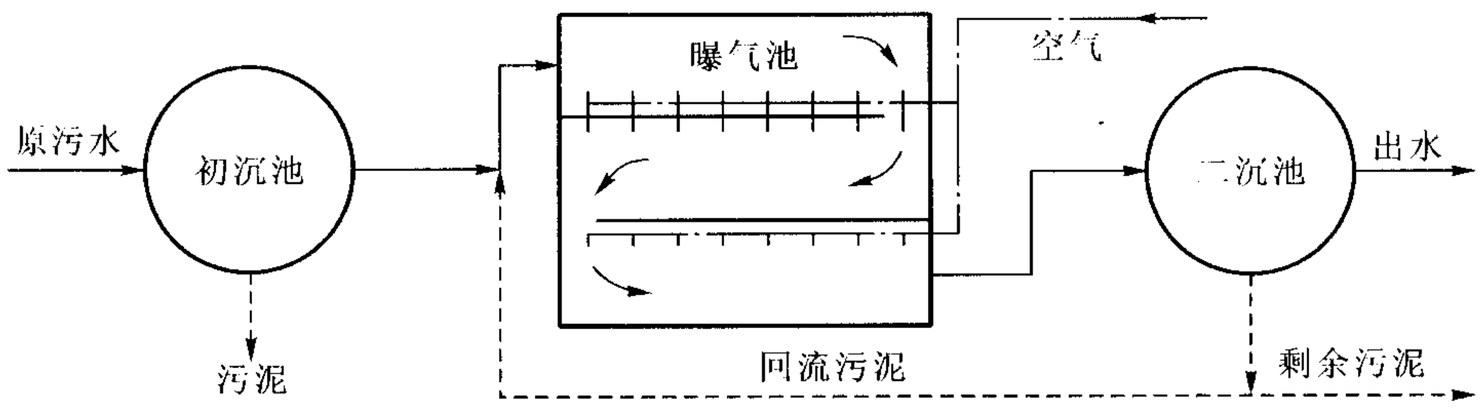


图 2-5-2　活性污泥法的基本流程

（任南琪，等. 污染控制微生物学. 2002）

从上述流程可以看出，要使活性污泥法形成一个实用的处理方法，污泥除了有氧化和分解有机物的能力外，还要有良好的凝聚和沉淀性能，以使活性污泥能从混合液中分离出来，得到澄清的出水。活性污泥中的细菌是一个混合群体，常以菌胶团的形式存在，游离状态的较少。菌胶团是由细菌分泌的多糖类物质将细菌包覆成的黏性团块，使细菌具有抵御外界不利因素的性能。菌胶团是活性污泥絮凝体的主要组成部分。游离状态的细菌不易沉淀，而混合液中的原生动物可以捕食这些游离细菌，使沉淀池的出水更清澈。

根据去除的污染物质的种类及去除目标，活性污泥法有各种工艺形式。

（二）活性污泥生态学及常见微生物

活性污泥中的微生物主要有假单胞菌、无色杆菌、黄杆菌、硝化细菌、球衣细菌、贝日阿托氏菌、发硫菌、地霉等，此外，还有钟虫、盖纤虫、等枝虫、草履虫等原生动物，以及轮虫等后生动物。

与所有生物处理过程一样，活性污泥系统具有混合培养的、主要起氧化有机物作用的细菌和其他较高级的水生微生物，形成了一个具有不同营养水平的生态系统。由于不断的人工充氧和污泥回流，使曝气池不适于某些水生生物生存，特别是那些比轮虫和线虫（*Nematodes*）更大型的种群和那些生命周期长的微生物。活性污泥反应器中主要生物种群是细菌、原生动物和线虫。其他种群如剑水蚤属（*Cyclops*），甚至某些双翅目（*Dipterans*）的幼虫也偶尔可见。在混合液中也可见藻类，但很难生长。传统活性污泥法处理过程的食物金字塔较详细地示于图 2－5－3 中。

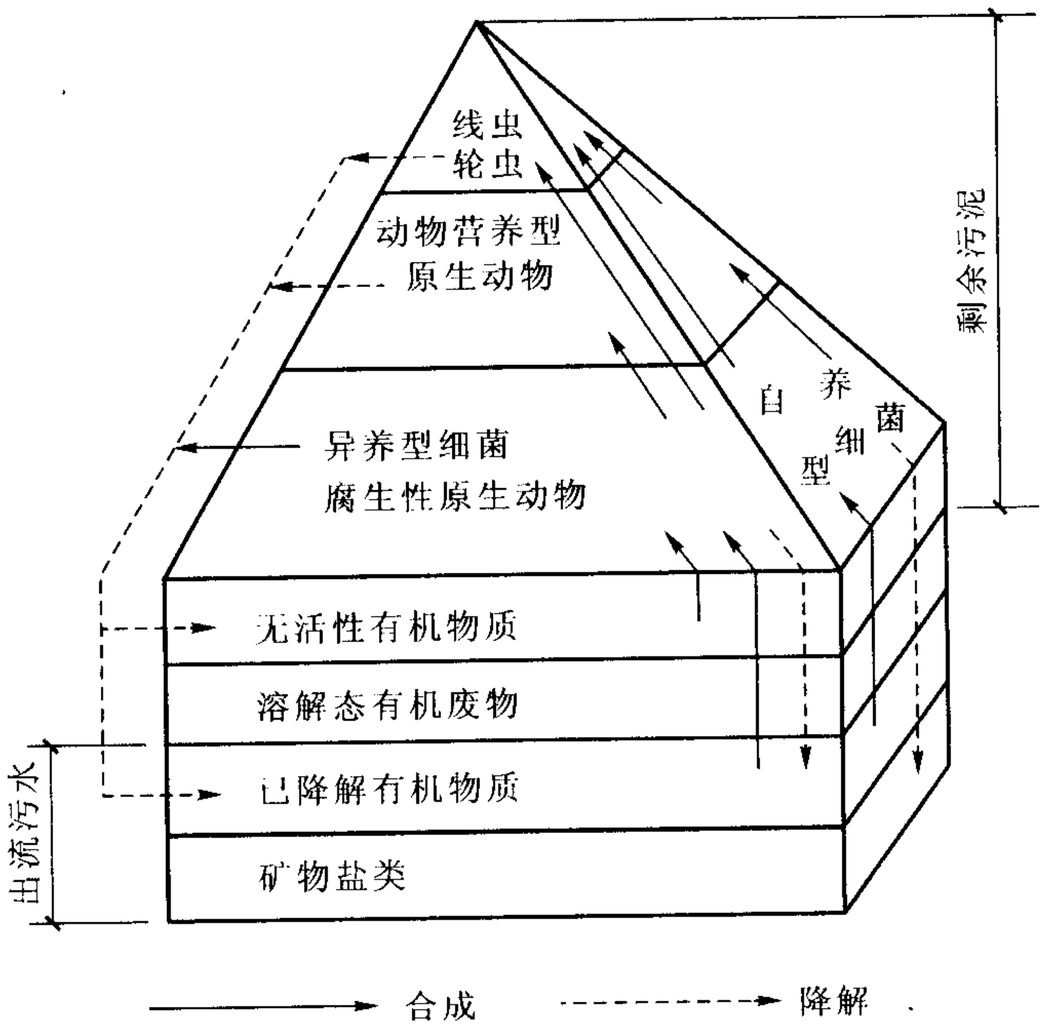


图 2－5－3 活性污泥法过程的食物金字塔

（顾夏声．水处理微生物学．2000）

曝气池中的异养型细菌形成了池中生物絮体的主体，它们是个体细菌的凝聚或者由丝状菌促使它们聚集在一起。絮体的生物条件决定了基质的去除率，其物理结构又决定了它们在二沉池中的沉降效果。

原生动物是活性污泥的重要组成部分，其个数可达 5 000 个/mL，可占混合液干重的 5% ~12%。

完全混合活性污泥曝气池内的原生动物的种类在空间上观察不到有什么差别（在生物滤池中纵向是有差别的）。随着活性污泥的逐步成熟，混合液中的原生动物的优势种类也会顺序变化，从肉足类、鞭毛类优势动物开始，依次出现游泳型纤毛虫、爬行型纤毛虫、附着型纤毛虫。爬行型纤毛虫和附着型纤毛虫与活性污泥絮体紧密连接，一旦达到一定密度就会随着二沉池中沉淀的回流活性污泥返回曝气池，而被冲洗掉的大部分是鞭毛类优势动物和游泳型纤毛虫。

当活性污泥达到成熟期，其原生动物发展到一定数量后，出水水质则明显改善。新运行的曝气池或运行得不好的曝气池，池中主要含鞭毛类原生动物和根足虫类（*Rhizopods*），只有少量纤毛虫；相反的，出水水质好的曝气池混合液中，主要含纤毛虫，只有少量鞭毛型原生动物和变形虫。常见的纤毛虫有斜管虫属（*Chilodonclla* spp.）、豆形虫属（*Colpidium* spp.）、术纤毛虫属（*Aspidisca* spp.）、某些独缩虫属（*Carchesium* spp.）和钟虫属（*Vorticella* spp.）等。这种污泥状态和出水水质与微生物种类的连带关系是利用原生动物指示活性污泥处理厂出水水质的理论基础。

二、生物膜法

生物膜法中，微生物固着生长于固体表面，形成生物膜。生物膜中的生物相丰富，形成比较稳定的生态系统。特别是生物膜上容易生长与持留一些代谢能力强、生长缓慢的微生物，有利于污染物的去除。

生物膜法的工艺形式多样，包括生物滤池、生物转盘、生物流化床等。生物滤池是最早出现的生物膜法污水处理设备，由滤床、滤料、布水系统、排水系统等组成。滤床由滤料组成。滤料是微生物生长栖息的场所。生物滤池建成后，就开始进水，不需要接种，因为污水中含有滤池生物膜需要的各种微生物。在夏天约 3 ~4 周就可在滤料上长成正常的生物膜，冬天约需 2 个月。生物膜上生长着一个复杂的生物群体。

一般来说，生长在生物滤池中的细菌大多是革兰氏阴性菌，例如，无色杆菌、黄杆菌、极毛杆菌、产

碱杆菌等。其中很多都能形成菌胶团。丝状细菌则有球衣细菌、贝氏硫细菌等。在生物滤池下层，主要是硝化细菌。真菌有镰刀霉、青霉、毛霉、地霉、分枝孢属等以及多种酵母菌。藻类仅生长在滤池表面，主要有小球藻、席（蓝）藻、丝（绿）藻等。原生动物最常见的有钟虫、盖纤虫、等枝虫和草履虫等纤毛类原生动物。此外，还有一些其他种类的小型动物，如轮虫、蠕虫、昆虫的幼虫，甚至灰蝇等小动物也会在滤池（特别是低负荷滤池）内生长繁殖。灰蝇很小，能穿过纱窗，不咬人，但能飞进人或动物的耳、鼻、眼和口。它们飞行距离不超过数百米，有风时则可被带至较远的地区。

污水中的有机物主要被好氧的异养微生物所降解。生物膜的结构似海绵状，很像活性污泥的絮体，生物膜被生长在膜内的驯养动物（grazing fauna）连续不停地挖洞，使膜变得更加多孔。污水可穿过膜表面直至相当的深度，其穿透限度取决于膜厚和滤池的水力负荷。

第二节　厌氧生物处理

一、原理

厌氧生物处理是在没有游离氧存在的条件下，兼性细菌与厌氧细菌降解和稳定有机物的生物处理方法。在厌氧生物处理过程中，复杂的有机化合物被降解，转化为简单的化合物，同时释放能量。在这个过程中，有机物的转化分为三部分进行：部分转化为 CH_4，这是一种可燃气体，可回收利用；还有部分被分解为 CO_2、H_2O、NH_3、H_2S 等无机物，并为细胞合成提供能量；少量有机物被转化、合成为新的原生质的组成部分。由于仅少量有机物用于合成，故相对于好氧生物处理法，其污泥增长率小得多。废水厌氧生物处理过程中有机物的转化如（图 2－5－4）所示。

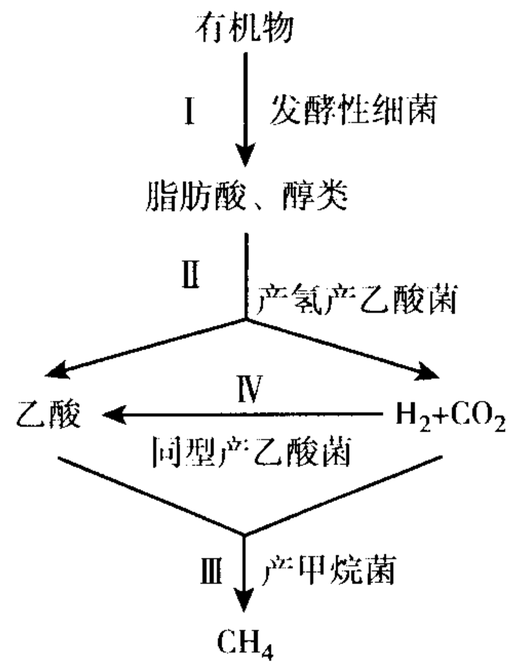


图 2－5－4　厌氧反应的三阶段理论和四菌群学说

注：1. Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ为三阶段理论，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ为四类群理论；
2. 所产生的细胞物质未表示在图中

厌氧微生物学的研究表明，产甲烷细菌是一类十分特别的古细菌（archaebacteria），除了在分类学和其特殊的细胞结构外，其最主要的特点是：产甲烷细菌只能利用一些简单有机物作为基质，其中主要是一些简单的一碳化合物如甲酸、甲醇、甲基胺类以及 H_2/CO_2 等，两碳化合物中只有乙酸，而不能利用其他含两碳或以上的脂肪酸和甲醇以外的醇类；

20 世纪 70 年代，Bryant 发现原来认为是一种被称为“奥氏产甲烷细菌”的细菌，实际上是由两种细菌组成的，一种细菌首先把乙醇氧化为乙酸和 H_2（一种产氢产乙酸细菌），另一种细菌则利用 H_2 和 CO_2 产生 CH_4（一种真正意义上的产甲烷细菌——嗜氢产甲烷细菌）。

因而，Bryant 提出了厌氧消化过程的“三阶段理论”：

（1）水解、发酵阶段：大分子物质水解为小分子物质。

（2）产氢产乙酸阶段：产氢产乙酸菌，将丙酸、丁酸等脂肪酸和乙醇等转化为乙酸、H_2/CO_2。

（3）产甲烷阶段：产甲烷菌利用乙酸、H_2 和 CO_2 产生 CH_4。一般认为，在厌氧生物处理过程中约有 70% 的 CH_4 产自乙酸的分解，其余的则产自 H_2 和 CO_2。

几乎与 Bryant 提出“三阶段理论”的同时，又有人提出了厌氧消化过程的“四菌群学说”（图 2-5-4）。实际上，是在上述三阶段理论的基础上，增加了一类细菌——同型产乙酸菌，其主要功能是可以将产氢产乙酸细菌产生的 H_2/CO_2 合成为乙酸。但研究表明，实际上这一部分由 H_2/CO_2 合成而来的乙酸的量较少，只占厌氧体系中总乙酸量的 5% 左右。

总体来说，“三阶段理论”、“四菌群学说”是目前公认的对厌氧生物处理过程较全面和较准确的描述。

由于废水厌氧生物处理过程不需另加氧源，故运行费用低。此外，它还具有剩余污泥量少，可回收能量（CH_4）等优点。其主要缺点是反应速度较慢，反应时间较长，处理构筑物容积大等。但通过对新型构筑物的研究开发，其容积可缩小。此外，为维持较高的反应速度，需维持较高的反应温度，就要消耗能源。

对于有机污泥和高浓度有机废水（一般 $BOD_5 \geq 2\ 000$ mg/L）可采用厌氧生物处理法。厌氧生物处理反应器形式多样。

二、参与厌氧生物处理的微生物

厌氧生物处理中有各种微生物参与，一般分为两大类：不产甲烷微生物和产甲烷微生物。

1. 不产甲烷微生物（non-mothanogens）

不产甲烷微生物包括厌氧菌和兼性厌氧菌，其种类很多，具体种类及数量随发酵原料和发酵工艺而定。此外，还有真菌和原生动物。细菌除厌氧菌和兼性厌氧菌之外，在厌氧设备中还有一定数量的好氧细菌。好氧细菌在厌氧发酵过程中的作用，目前尚研究得不够。

常见的不产甲烷细菌可分为三类：

（1）发酵细菌：梭菌属（*Clostridium*），例如丁酸梭菌等；枝杆菌属（*Ramibacterium*）；乳杆菌属（*Laclobacillus*）等。

（2）产氢产乙酸细菌：大多数为发酵细菌，也有专性产氢产乙酸细菌。这类细菌有脱硫弧菌（*Desulforibrio*）、沃尔非互营单胞菌（*Syntrophomonas wolfei*）、沃林互营杆菌（*Syntrophobacter wolinii*）等。

（3）同型产乙酸细菌群：乙酸梭菌、甲酸乙酸化梭菌、乌氏梭菌、伍迪乙酸杆菌等。

此外，在厌氧发酵中能经常见到原生动物，但数量不多，大约有 18 种，如鞭毛虫、纤毛虫和变形虫等，其生存条件目前尚不清楚。

2. 产甲烷细菌（methanogen）

产甲烷细菌属于古菌。产甲烷细菌对于温度和酸碱度的都相当敏感。几度的温度变化或环境中的 pH 稍超过适宜的范围时，就会在较大程度上影响有机物的分解。一般的产甲烷细菌都是中温性的、最适宜的温度在 25 ~ 40 ℃之间，高温性产甲烷细菌的适宜温度则在 50 ~ 60 ℃之间。在污水厌氧分解处理构筑物内，如果要保持较高的温度则需增加燃料费用，且高温细菌对于温度的变化更为敏感，故常采用 30 ~ 35 ℃的发酵温度，但完成高温发酵所需的时间较短，杀菌效果也较好。

产甲烷细菌生长最适宜的 pH 范围约在 6.8 ~ 7.2 之间。如 pH 低于 6 或高于 8，细菌的生长繁殖将受到极大影响。产酸细菌对酸碱度不及产甲烷细菌敏感，其适宜的 pH 范围也较广，在 4.5 ~ 8 之间。所以在用厌氧法处理污水的应用中，由于有机物的酸性发酵和碱性发酵在同一构筑物内进行，故为了维持产生的酸和形成的甲烷之间的平衡，避免产生过多的有机酸，常保持处理构筑物内的 pH 在 6.5 ~ 7.5（最好在 6.8 ~ 7.2）的范围内。在实际运转中，有机酸的控制较 pH 更为重要，因当酸量积累至足以降低 pH 时，厌氧处理的效果已经显著下降，甚至停止产气。有机酸本身不毒害产甲烷菌，而 pH 的下降则会抑制产甲烷菌的生长。

第三节 影响微生物降解污染物的主要因素

一、微生物的活性

这是最重要的因素。微生物的活性既受自身条件的影响和限制，也受环境条件的制约。不同种类的微

生物对同一种有机底物或有毒重金属反应不同。处于不同生长期的微生物对污染物的反应也不同。微生物的种类组成与活性可以决定化合物的降解方向和程度。而微生物的种类组成与活性又与环境中化学物质的种类、浓度有关，并受温度、湿度、酸碱度、氧气、营养供应以及种间竞争等环境条件的影响。

微生物对各种物质的降解与转化有一定顺序，糖和蛋白质首先降解，然后是淀粉、脂肪、几丁质、纤维素、木质素及其他高分子化合物。糖和蛋白质是最必要的细胞物质，也是最容易被微生物降解和转化的基质，所以它们优先被降解。

二、化合物种类和结构

一般情况下，低分子化合物比高分子化合物及有毒化合物更容易降解，相对分子质量小的化合物较相对分子质量大的化合物容易降解，聚合物和复合物较难生物降解。大多数自然界原来存在的化合物易降解，人工合成的许多化合物，由于生物陌生性难以被生物降解。

三、pH、温度、溶解氧、营养

每一微生物种群均有其最适生长的环境条件，包括 pH、温度、溶解氧和营养条件等。环境条件适于微生物生长，则有机物降解的速度就快。

四、污染物的浓度

有机化合物浓度对其降解速率有明显影响。某些化合物高浓度时可以促进微生物迅速增长而导致快速降解。某些在低浓度易生物降解的化合物，高浓度时会抑制微生物活性。

五、底物适应

微生物对底物尤其是异生物质（xenobiotics）的降解需要特定降解酶的诱导合成，或通过自发突变建立新的酶体系，进行代谢调节，这一过程即适应。在这一过程中微生物群体结构向着适应于环境条件的方向变化。

随着生物技术的进步，已经可以通过强化筛选、驯化微生物的程序，定向培育出具有高效降解能力的微生物，应用分子生物学技术已成功地培育出一些高效基因功能菌，它们对一些传统的难生物降解化合物具有较高效降解能力，如对合成染料、农药、合成洗涤剂等有机物的降解均取得了较好效果。这些成果拓展了微生物对底物种类、浓度的适应范围，提高了微生物的降解能力。

习　题

2-5-1　按照微生物在处理构筑物内的存在状态，好氧生物处理工艺可分为哪两类？（　　）

A　活性污泥、延时曝气　　B　曝气池、二沉池

C　活性污泥法、生物膜法　　D　生物滤池、生物转盘

2-5-2　活性污泥的主体是什么？（　　）

A　无机物　　B　微生物　　C　有机物　　D　微生物代谢产物

2-5-3　曝气池的生物絮体中，以哪类微生物为主体？（　　）

A　自养菌　　B　异养菌　　C　光合细菌　　D　藻类

2-5-4　在废（污）水生物处理装置中微生物主要以哪两种形式存在？（　　）

A　生物颗粒、生物沉淀　　B　活性污泥、生物膜

C　活性污泥、单个微生物　　D　生物絮体、单个微生物

2-5-5　下列哪种微生物属于厌氧微生物？（　　）

A　产甲烷菌　　B　硝化菌　　C　原生动物　　D　藻类

2-5-6　下列哪种物质不能作为产甲烷菌的可利用基质？（　　）

A　乙酸　　B　乙醇　　C　甲醇　　D　H_2/CO_2

第二篇习题参考答案

2-1-1	B	2-1-2	A	2-1-3	B	2-1-4	D	2-1-5	C	2-1-6	B
2-1-7	B	2-1-8	B	2-1-9	A	2-1-10	A	2-1-11	D	2-1-12	B
2-1-13	A	2-1-14	D	2-1-15	C	2-1-16	B				

2-2-1	D	2-2-2	C	2-2-3	D	2-2-4	C	2-2-5	B	2-2-6	B
2-2-7	B	2-2-8	A	2-2-9	C	2-2-10	B	2-2-11	A	2-2-12	C
2-2-13	D	2-2-14	A	2-2-15	B	2-2-16	C	2-2-17	D	2-2-18	B
2-2-19	B	2-2-20	C	2-2-21	C	2-2-22	B				

2-3-1	B	2-3-2	C	2-3-3	A	2-3-4	C	2-3-5	D	2-3-6	B
2-3-7	B										

2-4-1	C	2-4-2	B	2-4-3	D	2-4-4	B	2-4-5	B	2-4-6	C
2-4-7	A	2-4-8	D	2-4-9	A	2-4-10	D	2-4-11	A	2-4-12	C
2-4-13	B	2-4-14	D	2-4-15	D						

2-5-1	C	2-5-2	B	2-5-3	B	2-5-4	B	2-5-5	A	2-5-6	B