

# 第九章 微生物的生态

**[教学目标]**通过本章的教学,使学生掌握什么是生态学?

**[教学的重点和难点]**微生物的分布;微生物与环境保护及微生物与污水处理。

**[教学方法和手段]**主要以讲授为主。

**[教学内容]**

近代生态学的研究推进到了生态系统生态学的水平,生态系统生态学从生态系统的整体出发考察系统中生物之间,生物与环境之间的生态关系,形成了生态系统、食物链、食物网、能量流、物质循环、信息传递以及生产者、消费者、分解者的新概念和新的理论框架,微生物是生态系统的重要成员,特别是作为分解者分解系统中的有机物,对生态系统乃至整个生物圈的能量流动、物质循环发挥着独特的、不可替代的作用。

近几十年和科学技术、社会经济迅速发展相伴而来的是环境问题——环境污染和生态破坏。微生物降解污染物的巨大潜力在控制污染,修复污染环境发挥重要作用。微生物对植物生长的促进和其他有益作用,有助于缓解生态破坏,恢复受损生态系统。

第一节 微生物在生态系统中的作用

一、微生物在生态系统中的角色

生态系统是指在一定的空间内生物的成分和非生物的成分通过物质循环和能量流动互相作用、互相依存而构成的一个生态学功能单位。

生物成分按其在生态系统中的作用,可划分为三大类群:生产者、消费者和分解者。微生物可以在多个方面但主要作为分解者而在生态系统中起重要作用。

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、植物和微生物残体等复杂有机物质,并最终将其转化成最简单的无机物,再供初级生产者利用。

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二个明显特征,即可直接利用太阳能、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

微生物和动物、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、微生物是地球生物演化中的先锋种类

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。

二、微生物与生物地球化学循环

具体过程 LP205—233

生物地球化学循环(biogeochemical cycles)是指生物圈中的各种化学元素,经生物化学作用在生物圈中的转化和运动。这种循环是地球化学循环的重要组成部分。

地球上的大部分元素都以不同的循环速率参与生物地球循环。生命物质的主要组成元素(C、H、O、N、P、S)循环很快,微量元素(Mg、K、Na、卤素元素)和微量元素(Al、B、Co、Cr、Cu、Mo、Ni、Se、V、Zn)则循环较慢。属于少量和微量元素的Fe、Mn、Ca和Si是例外,铁和锰以氧化还原

的方式快速循环。钙和硅在原生质中含量较少，但在其他结构中含量很高。

碳、氮、磷、硫的循环受二个主要的生物过程控制，一是光合生物对无机营养物的同化，二是后来进行的异养生物的矿化。实际上所有的生物都参与生物地球化学循环。微生物在有机物的矿化中起决定性作用，地球上 90%以上有机物的矿化都是由细菌和真菌完成的。

### 1、 碳循环

碳元素是一切生命有机体的最大组分，接近有机物质干重的 50%。碳循环是最重要的物质循环(图 11—1)。

#### i 碳在生物圈中的总体循环

初级生产者把 CO<sub>2</sub> 转化成有机碳。初级生产的产物为异养消费者利用，并进一步进行循环，部分有机化合物经呼吸作用被转化为 CO<sub>2</sub>。初级生产者和其他营养级的生物残体最终也被分解而转化成 CO<sub>2</sub>。大部分绿色植物不是被动物消费，而是死亡后被微生物分解，CO<sub>2</sub> 又被生产者利用。

#### ii 生境中的碳循环

生境中的碳循环是生物圈总循环的基础，异养的大生物和微生物都参与循环，但微生物的作用是最重要的。在好氧条件下，大生物和微生物都能分解简单的有机物和生物多聚物(淀粉，果胶，蛋白质等)，但微生物是唯一在厌氧条件下进行有机物分解的。微生物能使非常丰富的生物多聚物得到分解，腐殖质、蜡和许多人造化合物只有微生物才能分解。

碳的循环转化中除了最重要的 CO<sub>2</sub> 外，还有 CO、烃类物质等。藻类能产生少量的 CO 并释放到大气中，而一些异养和自养的微生物能固定 CO 作为碳源(如氧化碳细菌)。烃类物质(如甲烷)可由微生物活动产生，也可被甲烷氧化细菌所利用(图 11—1)。大气 CO<sub>2</sub> 浓度的持续提高引起的“温室效应”是一个全球性环境问题。

### 2、 氮循环

氮循环(图 11—2)由 6 种氮化合物的转化反应所组成，包括固氮、氨化(脱氨)、硝化作用、反硝化作用及硝酸盐还原。它们大多实际上是氧化还原反应。氮是生物有机体的主要组成元素，氮循环是重要的生物地球化学循环。

#### i 固氮

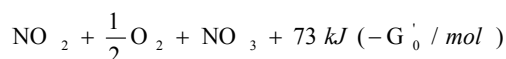
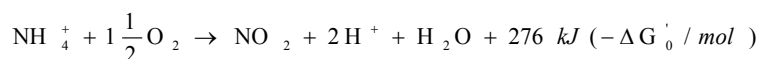
固氮是大气中氮被转化成氨(铵)的生化过程。其对氮在生物圈中的循环有重要作用，据测算 每年全球有约 2.40×10<sup>8</sup> 吨氮被固定，这和反硝化过程失去的氮大致相等。生物固氮是只有微生物或有微生物参与才能完成的生化过程。具有固氮能力的微生物种类繁多，游离的主要有固氮菌、梭菌、克雷伯氏菌和蓝细菌；共生的主要是根瘤菌和弗兰克氏菌。

#### ii 氨化作用(ammonification)

氨化作用是有机氮化物转化成氨(铵)的过程。微生物、动物和植物都具有氨化能力，可以发生在好氧和厌氧环境中。氨化作用放出的氨可被生物固定利用和进一步转化，同时也挥发释放到大气中去，这个部分可占总氮损失的 5%(其他 95%为反硝化损失)。

#### iii 硝化作用(nitrification)

硝化作用是好氧条件下在无机化能硝化细菌作用下氨被氧化成硝酸盐的过程。它的重要性是产生氧化态的硝酸盐，产物又可以参与反硝化作用。硝化作用分两步进行：



把铵氧化成亚硝酸的代表性细菌是亚硝化单胞菌属，此外还有亚硝化叶菌属、亚硝化螺菌属、亚硝化球菌属、亚硝化弧菌属。把亚硝酸氧化成硝酸代表性细菌是硝化杆菌属，此外还有硝化刺菌属、硝化球菌属。前者称为亚硝化菌(nitrosobacteria)，后者称为硝化菌(nitrobacteria)，两者统称为硝化(作用)细菌(nitrifying bacteria)。硝化作用是一个产能过程，硝化细菌经卡尔文循环和不完全的三羧酸循环

利用 CO<sub>2</sub> 合成细胞物质。

#### iv 硝酸盐还原和反硝化作用(nitrate reduction and denitrification)

硝酸盐还原包括异化硝酸盐还原和同化硝酸盐还原。异化硝酸盐还原又分为发酵性硝酸盐还原(fermentative nitrate reduction)和呼吸性硝酸盐还原(respiratory nitrate reduction)。如呼吸性硝酸盐还原的产物是气态的 N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub>，则这个过程被称为反硝化作用。同化硝酸盐还原是硝酸盐被还原成亚硝酸盐和氨，氨被同化成氨基酸的过程。这里被还原的氮化物成为微生物的氮源。异化硝酸盐还原是在无氧或微氧条件下，微生物进行的硝酸盐呼吸即以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>或 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>代替 O<sub>2</sub> 作为电子受体进行呼吸代谢。与同化硝酸盐还原相比，它的酶系一般是颗粒性的，可被氧竞争性抑制，但不受氢的抑制。发酵性硝酸盐还原中硝酸盐是发酵过程的“附带”电子受体，而不是末端受体，为不完全还原，发酵产物主要是亚硝酸盐和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>。其特点是没有膜结合酶，细胞色素和电子传递磷酸化。这种现象在自然界非常普遍，大多数由兼性厌氧菌来完成，如肠杆菌属、埃希氏菌属和芽孢杆菌属细菌。呼吸性硝酸盐还原中硝酸盐作为末端电子受体被还原成亚硝酸盐、氨或产生气态氮(反硝化作用)。在反硝化过程中硝酸盐经一系列酶的作用，细胞色素传递电子，最后被还原成 N<sub>2</sub>O 和 N<sub>2</sub>，大量的 N<sub>2</sub>O、N<sub>2</sub> 释放到大气中去。反硝化过程也是一个偶联产能过程，但电子传递链较短，一个硝酸盐还原过程产生 2 个 ATP，反硝化细菌的生长缓慢。具有异化硝酸盐还原能力的微生物很多，大部分是异养的，少量自养，有的能兼营异养和自养。但它们都是好氧菌或兼性厌氧菌。反硝化作用的效应是造成氮的损失从而降低氮肥效率，N<sub>2</sub>O 的释放可破坏臭氧层，损失的氮因固氮过程增加的氮而得到平衡。

### 3、 硫循环

硫是生命有机体的重要组成部分，大约占干物质的 1%。生物圈中含有丰富的硫，一般不会成为限制性营养。硫的生物地球化学循环如图 11—3。从图可见生物地球化学循环包括还原态无机硫化物的氧化，异化硫酸盐还原，硫化氢的释放(脱硫作用)，同化硫酸盐还原。微生物参与所有这些循环过程。

#### i 硫的氧化

硫氧化是还原态的无机硫化物(如 S<sup>0</sup>、H<sub>2</sub>S、FeS<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>O<sub>2</sub><sup>2-</sup>和 S<sub>4</sub>O<sub>6</sub><sup>2-</sup>等)被微生物氧化成硫酸的过程。具有硫氧化能力的微生物在形态，生理上各有不同的特点，一般可分为两个不同的生理类群，包括好氧或微好氧的化能营养硫氧化菌和光营养硫细菌。此外异养微生物(如曲霉、节杆菌、芽孢杆菌、微球菌等)也具有氧化能力。

#### ii 硫酸盐还原

和硝酸盐相似，硫酸盐也可以被微生物还原成 H<sub>2</sub>S，这部分微生物称为硫酸盐还原菌。硫酸盐还原产物 H<sub>2</sub>S 在胞内被结合到细胞组分中称为同化硫酸盐还原。硫酸盐作为末端电子受体还原成不被同化的 H<sub>2</sub>S，称为异化硫酸盐还原，也称为反硫化作用。电子供体一般是丙酮酸，乳酸和分子氢。主要的硫酸盐(异化)还原菌包括脱硫杆菌、脱硫叶菌。

#### iii 硫化氢的释放(有机硫化物的矿化)

生物尸体和残留物中含硫蛋白质经微生物的作用释放出 H<sub>2</sub>S、CH<sub>3</sub>SH、(CH<sub>2</sub>)<sub>3</sub>S 等含硫气体，一般的腐生细菌都具有分解有机硫化物能力。

### 4、 磷循环

磷是所有生物都需要的生命元素，遗传物质的组成和能量贮存都需要磷。磷的生物地球化学循环包括三种基本过程：①有机磷转化成溶解性无机磷(有机磷矿化)，②不溶性无机磷变成溶解性无机磷(磷的有效化)，③溶解性无机磷变成有机磷(磷的同化)。微生物参与磷循环的所有过程，但在这些过程中，微生物不改变磷的价态，因此微生物所推动的磷循环可看成是一种转化。

### 5、 铁循环

铁循环的基本过程是氧化和还原。微生物参与的铁循环包括氧化、还原和螯合作用。由此延伸出的微生物对铁作用的三个方面：①铁的氧化和沉积 在铁氧化菌作用下亚铁化合物被氧化高铁化合物而沉积下来；②铁的还原和溶解 铁还原菌可以使高铁化合物还原成亚铁化合物而溶解；③铁的吸收

微生物可以产生非专一性和专一性的铁整合体作为结合铁和转运铁的化合物。通过铁整合化合物使铁活跃以保持它的溶解性和可利用性。

## 6、其他元素的循环

锰的转化与铁相似。许多细菌和真菌有能力从有机金属复合物中沉积锰的氧化物和氢氧化物。钙是所有生命有机体的必需营养物质，芽孢形成菌内生孢子含有钙吡啶，钙离子影响膜透性与鞭毛运动。钙的循环主要是钙盐的溶解和沉淀， $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  高溶解度，而  $\text{CaCO}_3$  难溶解。硅是地球上除氧外的最丰富元素，主要化合物是  $\text{SiO}_2$ 。硅是某些生物细胞壁的重要组分。硅的循环表现在溶解和不溶解硅化物之间的转化。陆地和水体环境中溶解形式是  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ，不溶性的是硅酸盐。硅利用微生物(主要是硅藻，硅鞭藻等)可利用溶解性硅化物。一些真菌和细菌产生的酸可以溶解岩石表面的硅酸盐。

## 第二节 生态环境中的微生物

微生物所具有的个体微小、代谢营养类型多样、适应能力强等特点使微生物分布广泛，可以在其他生物不能生存，甚至极端的生境中存在。同一种细菌可见于多种生境，也可以不同形式(共生或游离)存在。微生物的分布也反映了生境的特征，是生境各种物理、化学、生物因素对微生物的限制、选择的结果。在某些生境中，高度专一性的微生物存在并仅限于这种生境中，并成为特定生境的标志。

### 一、微生物群落

生态环境中的微生物也存在个体、种群、群落和生态系统从低到高的组织层次，与动物、植物相比，微生物具有更强的群体性。在这个系列中，群落处在关键的位置上，种群的相互作用是特定群落形成和结构的基础，生态系统所表现出来的生态功能也取决于群落的功能。

#### 1、种群的相互作用

种群 是指具有相似特性和生活在一定空间内的同种个体群，种群是组成群落的基本组分。种群的相互作用复杂多样，种群密度、代谢能力、增长速率等方面表述两个种群之间的相互影响及作用。相互作用的基本类型包括：

①中立生活 两种群之间在一起彼此没有影响或仅存无关紧要的影响。

②偏利作用 一种种群因另一种种群的存在或生命活动而得利，而后者没有从前者受益或受害。

③协同作用 相互作用的两种种群相互有利，二者之间是一种非专性的松散联合。

④互惠共生 相互作用的两个种群相互有利，两者之间是一种专性的和紧密的结合，是协同作用的进一步延伸。联合的种群发展成一个共生体，有利于它们去占据限制单个种群存在的生境。地衣是互惠共生的典型例子。

⑤寄生 一种种群对另一种群的直接侵入，寄生者从寄主生活细胞或生活组织获得营养，而对寄主产生不利影响。

⑥捕食 一种种群被另一种种群完全吞食，捕食者种群从被食者种群得到营养，而对被食者种群产生不利影响。

⑦偏害作用 一种种群阻碍另一种种群的生长，而对第一种种群无影响。

⑧竞争 两个种群因需要相同的生长基质或其他环境因子，致使增长率和种群密度受到限制时发生的相互作用，其结果对两种种群都是不利的。

#### 2、群落结构与功能

群落 是一定区域内或一定生境中各种微生物种群相互松散结合的一种结构和功能单位。这种结构单位虽然结合松散，但并非是杂乱的堆积，而是有规律的结合，并由于其组成的种群种类及特点而显现出一定的特性。任何微生物群落都是由一定的微生物种群所组成，而每个种群的个体都有一定的形态和大小，它们对周围的生态环境各有其一定的要求和反应，它们在群落中处于不同的地位和起着不同的作用。一定生境条件下的微生物群落具有相应的生态功能，结构和功能紧密相连。一种群有多种生理功能，多个种群组合成一个群落完成一种生态功能。

生态位 是生物个体、种群或群落所占据的具有时空特点的位置。微生物的群落结构受到生态位的生物和非生物环境的严格选择，因此群落的组成实际上是生态位的状况的真实反映。一定生态位上

的微生物群落也是长期的适应性进化的结果。反刍动物和非反刍动物，都能食纤维素，经过长期的适应进化，它们的消化器官内都有相似的以能分解纤维素的细菌、真菌为主的微生物群落。

种多样性、垂直结构、水平结构和优势种 是表征群落结构的重要参数。种多样性可以用“多样性指数”(diversity index)来表示，多样性指数是以群落组成结构中种的数量和各个种的个体数量的分配有一定的特点为依据而设计的一种数值指标，种类数越多或各个种的个体数分配越均匀，则种多样性指数值就越大，反之，种多样性指数值就越小。垂直结构是不同种群在垂直方向上的排列状况，垂直分布是种群间及种群与环境之间相互关系的一种特定形式，因此生境中的任何一个群落均有其本身的垂直结构。水平结构主要反映随着纬度的变化而产生的大气温度的变化，微生物在不同温度环境下而形成不同的结构。在任何群落中，组成群落的各个种群所表现的作用是不同的，所以群落中的各种种群不具有同等的重要性。其中有部分种群，因其数量、大小或活性而在群落中起着主要的控制作用。这些对群落和环境具有决定性意义的种群称为优势种群。

营养物、环境条件的改变以及环境污染都会对微生物群落产生乐迫，群落的结构会有相应的改变，这实际上反映了环境对群落的选择。这种选择原理是我们富集特定生理功能微生物的重要理论基础，例如，向生活污水投加表面活性剂，使其浓度从低到高达到“定水平，最后生活污水中的表面活性剂降解菌会成为优势菌，而易于从其中分离。

### 3、 群落水平的相互作用

群落水平上的相互作用对它们所处的生态系统的过程及功能有重要的影响。如在稳定塘处理污水过程中细菌群落的氧化分解作用所产生的  $\text{CO}_2$  和  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ ，藻类群落在有光条件下利用  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$  进行光合作用放出  $\text{O}_2$ ，又提供给细菌群落好氧分解，两个群落的相互作用使稳定塘完成有机物的净化过程。在有强光照条件下，藻类群落的光合作用会得到增强，可以放出更多的氧，这样又对细菌群落的氧化分解起到促进作用，从而提高稳定塘的净化能力。

### 二、 陆生生境的微生物

陆生生境的主要载体是土壤。土壤是固体无机物(岩石和矿物质)、有机物、水、空气和生物组成的复合物。溶解在土壤水中的有机和无机组分可被微生物所利用，土壤是微生物的合适生境。

土壤微生物种类齐全、数量多、代谢潜力巨大，是主要的微生物源(表 11—1)。但一般来说微生物处于饥饿状态，繁殖速率极低，当可用的营养物被加到土壤中，微生物数量和它们的代谢活性迅速增加直到营养物被消耗，而后微生物活性回复到较低的基线水平。

表 11—1 典型花园土壤不同深度每克土壤的微生物菌落数/CFU

深度/cm	细菌	放线菌*	真菌	藻类
3~8	9750000	2080000	119000	25000
20~25	2179000	245000	50000	5000
35~40	570000	49000	14000	500
65~75	11000	5000	6000	100
135~145	1400	---	3000	---

\*丝状细菌

土壤微生物的数量和分布主要受到营养物、含水量、氧、温度、pH 等因子的影响，集中分布于土壤表层和土壤颗粒表面。另外土壤具有高度的异质性，在它内部包含有许多不同的微生境，因而甚至在微小土壤颗粒中也存在着不同的生理类群。

### 三、 水生生境的微生物

水生生境主要包括湖泊、池塘、溪流、河流、港湾和海洋。水体中微生物的数量和分布主要受到营养物水平、温度、光照、溶解氧、盐分等因素的影响。含有较多营养物或受生活污水、工业有机污水污染的水体有相应多量的细菌，如港湾(河流入海口)具有较高的营养水平，其水体中也有较高的微生物数。在水体中，特别是在低营养浓度水体中，微生物倾向于生长在固体的表面和颗粒物上，它们要比悬浮和随水流动的微生物能吸收利用更多的营养物，常常有附着器和吸盘，这有助于附着在各种

表面上。微生物在较深水体(如湖泊)中具有垂直层次分布的特点。在光线充足好氧的沿岸带(littoral zone)、浅水区(limnetic zone)分布着大量光合藻类和好氧微生物,如假单胞菌、噬纤维菌、柄细菌、生丝微菌等。深水区(profundal zone)位于光补偿水平面以下,光线少、溶解氧低,可见紫色和绿色硫细菌及其他兼性厌氧菌。湖底区(benthic zone)是厌氧的沉积物,分布着大量厌氧微生物,主要有脱硫弧菌、甲烷菌、芽孢杆菌、梭菌等。

#### 四、 大气生境的微生物

大气中没有可为微生物直接利用的营养物质和足够的水分,这种环境不适合微生物的生长繁殖。大气中没有固定的微生物种类。但由于微生物能产生各种休眠体以适应不良环境,有些微生物可以在大气中存在一段相当长的时间而不至死亡。所以,在大气中仍能找到多种微生物。大气中的微生物来源于土壤、水体和其他微生物源。进入大气的土壤尘粒,水面吹来的小水滴,污水处理厂曝气产生的气溶胶,人和动物体表的干燥脱落物,呼吸道呼出的气体都是大气微生物的来源。主要种类是霉菌和细菌,霉菌常见种类是曲霉、木霉、青霉、毛霉、白地霉和色串孢(*Torulasp*)等。细菌有球菌、杆菌和一些病原菌。微生物在大气中的分布很不均匀,所含数量取决于所处环境和飞扬的尘埃量(表 11—2)。

表 11—2 不同地点大气中的微生物数量

地点	微生物数量/CFu · m <sup>-3</sup>
北极(北纬 800)	0
海洋上空	1~2
市区公园	200
城市街道	5000
宿舍	20000
畜舍	1000000~2000000

#### 五、 极端环境下的微生物

极端环境下微生物的研究有三个方面的重要意义:①开发利用新的微生物资源,包括特异性的基因资源;②为微生物生理、遗传和分类乃至生命科学及相关学科许多领域,如功能基因组学、生物电子器材等的研究提供新的课题和材料;③为生物进化、生命起源的研究提供新的材料。

##### 1、 嗜热微生物

按微生物生长的最适温度,可将它们分为嗜冷、兼性嗜冷、嗜温、嗜热和超嗜热五种类型。

细菌是嗜热微生物中最耐热的,按它们耐热程度的不同又可以被分成五个不同类群:耐热菌、兼性嗜热菌、专性嗜热菌、极端嗜热菌和超嗜热菌。

嗜热微生物生长的生态环境有热泉(温度高达 100℃),高强度太阳辐射的土壤,岩石表面(高达 70℃),各种堆肥、厩肥、干草、锯屑及煤渣堆,此外还有家庭及工业上使用的温度比较高的热水及冷却水。

嗜热微生物生物大分子蛋白质、核酸、类脂的热稳定结构以及存在的热稳定性因子是它们嗜热的生理基础。新的研究还表明专性嗜热菌株的质粒携带与热抗性相关的遗传信息。

嗜热微生物有远大的应用前景,高温发酵可以避免污染和提高发酵效率,其产生的酶在高温时有更高的催化效率,高温微生物也易于保藏。嗜热微生物还可用于污水处理。嗜热细菌的耐高温 DNA 多聚酶使 DNA 体外扩增的技术得到突破,为 PCR 技术的广泛应用提供基础,这是嗜热微生物应用的突出例子。

##### 2、 嗜冷微生物

嗜冷微生物(psychrophilic microorganisms)能在较低的温度下生长,可以分为专性和兼性两类,前者的最高生长温度不超过 20℃,可以在 0℃或低于 0℃条件下生长;后者可在低温下生长,但也可以在 20℃以上生长。

嗜冷微生物的主要生境有极地、深海、寒冷水体、冷冻土壤、阴冷洞穴、保藏食品的低温环境。从这些生境中分离到的主要嗜冷微生物有针丝藻、粘球藻、假单胞菌等。从深海中分离出来的细菌既

嗜冷，也耐受高压。

嗜冷微生物适应环境的生化机理是因为细胞膜脂组成中有大量的不饱和、低熔点脂肪酸。

嗜冷微生物低温条件下生长的特性可以使低温保藏的食品腐败，甚至产生细菌毒素。研究开发嗜冷微生物的最适反应温度低的酶，在工业和日常生活中都有应用价值。如从嗜冷微生物中获得低温蛋白酶用于洗涤剂，不仅能节约能源，而且效果很好。

### 3、嗜酸微生物

生长最适 pH 在 3-4 以下，中性条件不能生长的微生物称为嗜酸微生物(acidophilic microorganisms)；能在高酸条件下生长，但最适 pH 接近中性的微生物称为耐酸微生物(acidotolerant microorganisms)。

温和的酸性(pH3-5.5)自然环境较为普遍，如某些湖泊、泥碳土和酸性的沼泽。极端的酸性环境包括各种酸矿水、酸热泉、火山湖、地热泉等。嗜酸微生物一般都是从这些环境中分离出来，其优势菌是无机化能营养的硫氧化菌、硫杆菌。酸热泉不但具有高酸度，而且还具有高温的特点，从这些环境中分离出独具特点的嗜酸嗜热细菌，如嗜酸热硫化叶菌等。嗜酸微生物的胞内 pH 从不超出中性大约 2 个 pH 单位，其胞内物质及酶大多数接近中性。

嗜酸微生物能在酸性条件下生长繁殖，需要维持胞内外的 pH 梯度，现在一般认为它们的细胞壁、细胞膜具有排斥 H<sup>+</sup>，对 H<sup>+</sup>离子不渗透或把 H<sup>+</sup>从胞内排出的机制。而嗜酸微生物的外被要高 H<sup>+</sup>来维持其结构。

嗜酸菌被广泛用于微生物冶金、生物脱硫。

下生长繁殖，需要维持胞内外的 pH 梯度，现在一般认为它们的细胞壁、细胞膜具有排斥 H<sup>+</sup>，对 H<sup>+</sup>离子不渗透或把 H<sup>+</sup>从胞内排出的机制。而嗜酸微生物的外被要高 H<sup>+</sup>来维持其结构。嗜酸菌被广泛用于微生物冶金、生物脱硫。

### 4、嗜碱微生物

一般把最适生长 pH 在 9 以上的微生物称为嗜碱微生物(alkaliphilic microorganisms)，中性条件不能生长的为专性嗜碱微生物，中性条件甚至酸性条件都能生长的称为耐碱微生物(alkalitolerant microorganisms)或碱营养微生物(alkalitrophic microorganisms)。

地球上碱性最强的自然环境是碳酸盐湖及碳酸盐荒漠，极端碱性湖[如肯尼亚的玛格达(Magadi)湖，埃及的 wady natrun 湖]是地球上最稳定的碱性环境，那里 pH 达 10.5-11.0。我国的碱性环境有青海湖等。碳酸盐是这些环境碱性的主要来源。人为碱性环境是石灰水、碱性污水。

嗜碱微生物有两个主要的生理类群：盐嗜碱微生物和非盐嗜碱微生物。前者的生长需要碱性和高盐度(达 33%NaCl + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)。代表性种属有外硫红螺菌、甲烷嗜盐菌、嗜盐碱杆菌、嗜盐碱球菌等。

嗜碱微生物生长最适 PH 在 9 以上，但胞内 pH 都接近中性。细胞外被是胞内中性环境和胞外碱性环境的分隔，是嗜碱微生物嗜碱性的重要基础。其控制机制是具有排出 OH<sup>-</sup>的功能。

嗜碱微生物产生大量的碱性酶，包括蛋白酶(活性 pH 10.5-12)、淀粉酶(活性 pH 4.5-11)、果胶酶(活性 pH 10.0)、支链淀粉酶(活性 pH 9.0)、纤维素酶(活性 pH 6-11)、木聚糖酶(活性 pH 5.5-10)。这些碱性酶被广泛用于洗涤剂或作其他用途。

### 5、嗜盐微生物

含有高浓度盐的自然环境主要是盐湖，如青海湖(中国)、大盐湖(美国)、死海(黎巴嫩)和里海(俄罗斯)，此外还有盐场、盐矿和用盐腌制的食品。海水中含有约 3.5%的氯化钠，是一般的含盐环境。根据对盐的不同需要，嗜盐微生物(halophilic microorganisms)可以分为弱嗜盐微生物、中度嗜盐微生物、极端嗜盐微生物。弱嗜盐微生物的最适生长盐浓度(氯化钠浓度)为 0.2-0.5mol/L，大多数海洋微生物都属于这个类群。中度嗜盐微生物的最适生长盐浓度为 0.5-2.5mol/L，从许多含盐量较高的环境中都可以分离到这个类群的微生物。极端嗜盐微生物的最适生长盐浓度为 2.5-5.2mol/L(饱和盐浓度，aw =0.75)，它们大多生长在极端的高盐环境中，已经分离出来的主要有藻类：盐生杜氏藻、绿色杜氏藻；细菌：盐杆菌，如红皮盐杆菌、盐沼盐杆菌，盐球菌，如鳕盐球菌。可以在高盐浓度下生长，但最适

生长盐浓度较低的称为耐盐微生物。

嗜盐微生物的嗜盐机制仍在不断探索研究(见第十三章), 盐杆菌和盐球菌具有排出  $\text{Na}^+$ 和吸收浓缩  $\text{K}^+$ 的能力,  $\text{K}^+$ 作为一种相容性溶质, 可以调节渗透压达到胞内外平衡, 其浓度高达  $7\text{mol/L}$ , 以此维持胞内外同样的水活度。

嗜盐细菌具有许多生理特性, 其中紫膜引人注目。紫膜是在细胞膜上形成的一种特殊的紫色物质, 吸收的光能以质子梯度的形式部分储存起来, 并用于合成 ATP。此外紫膜是由类视紫蛋白和脂质组成, 具有独特的特性, 吸引着许多科学家进行研究, 探索其作为电子器件和生物芯片的可能性。

## 6、嗜压微生物

需要高压才能良好生长的微生物称为嗜压微生物(barophilic microorganisms)。最适生长压力为正常压力, 但能耐受高压的微生物被称为耐压微生物(barotolerant microorganisms)。海洋深处和海底沉积物平均水压超过  $4.05 \times 10^7\text{Pa}$ (400 个大气压)。从深海底部  $1.01 \times 10^8\text{Pa}$ (1000 大气压) 处, 分离到嗜压菌 *Pseudomonas bathycetes*, 从油井深部约  $4.05 \times 10^7\text{Pa}$ (400 大气压)处, 分离到耐压的硫酸盐还原菌。

## 六、动物体中的微生物

生长在动物体上的微生物是一个种类复杂, 数量庞大, 生理功能多样的群体。从生境空间位置来说有体表和体内的区别, 从生理功能上说任何生活在动物上的微生物都有其相应的功能, 总体上可以分为有益、有害两个方面。对动物有害的微生物可以称为病原微生物, 包括病毒、细菌、真菌、原生动物的一些种类。病原微生物可以通过不同的作用方式造成对动物的损害和致病。也可变害为利, 如利用昆虫病原微生物防治农林害虫。对动物有益的微生物和动物的互惠共生关系受到广泛的注意和深入研究, 如微生物和昆虫的共生、瘤胃共生、海洋鱼类和发光细菌的共生等。

### 1、微生物和昆虫的共生

多种多样的微生物和昆虫都有共生关系, 情况错综复杂, 但大部分的共生都具有三个显著的特点, 第一, 微生物具有昆虫所不具有的代谢能力, 昆虫利用微生物的代谢能力得以存活于营养贫乏或营养不均衡的食料(如木材, 植物液汁或脊椎动物血液)环境中; 第二, 昆虫和微生物双方都需要联合, 不形成共生体的昆虫生长缓慢, 繁殖少而不产生幼体, 而许多共生微生物未在昆虫外的生境中发现, 有些是不能培养的; 第三, 许多共生体可以在昆虫之间转移, 一般是从亲代到子代, 相互和交叉转移也存在。白蚁的消化道中的共生具有典型性, 微生物共生体是细菌和原生动物, 两者均能分解纤维素, 转化昆虫氮素废物尿酸和固氮, 这些过程的代谢产物都可以被昆虫同化利用。

### 2、瘤胃共生

草食动物直接食用绿色植物, 植物所固定的能量流动到动物, 这是生态系统中能量流动和食物链的重要一环。纤维素是最丰富的植物成分, 然而大部分动物缺乏能利用这种物质的纤维素酶, 生长在动物瘤胃内的微生物能产生分解纤维素的胞外酶, 帮助动物消化此类食物。微生物分解纤维素和其他植物多聚物产生有机酸可被动物消化和利用。没有微生物酶的作用, 这样丰富的食物资源就不能被充分利用, 微生物对这里的能量流动和物质循环起重要作用。反刍动物瘤胃微生物与动物的共生具有代表性, 是微生物和动物互惠共生的典型例子。

瘤胃是一个独特的不同于其他生态环境的生态系统, 它是温度( $38-41^\circ\text{C}$ )、pH(5.5-7.3)、渗透压(250-350mOsm)相应稳定的还原性环境(Eh-350mv), 同时有相应频繁和高水平营养物供应。大量基质的输入和相应恒定适宜的环境条件使瘤胃微生物种类繁多, 数量庞大。细菌数达  $10^{10}-10^{11}\text{CFU/g}$  内含物。大多数细菌是专性厌氧菌, 但也有兼性厌氧菌和好氧菌。真菌的游动孢子达  $10^3-10^5$  个/g 内含物。在瘤胃内可完成从孢子萌发, 长出菌丝, 而后又形成孢子的生活周期。细菌噬菌体数量可以达到  $10^6-10^7$  噬菌体/ml 内含物, 大部分是温和噬菌体。瘤胃原生动物数量约  $10^5-10^6$  个/g 内含物, 大小  $20-200\mu\text{m}$ 。

纤维素、蛋白质、半纤维素等多聚物可被瘤胃微生物分解转化, 产生的小相对分子质量脂肪酸、维生素以及形成的菌体蛋白(含原生动物)可提供给反刍动物。而反刍动物则为微生物提供了丰富的营养物和良好的生境, 此外, 动物的生理代谢活动也有助于微生物对有机物的分解和生长繁殖。



### 3、 发光细菌和海洋鱼类的共生

一些海洋无脊椎动物、鱼类和发光细菌也可建立一种互惠共生的关系。发光杆菌属(Photobacterium)和贝内克氏菌属(Beneckea)的发光细菌见于海生鱼类。发光细菌生活在某些鱼的特殊的囊状器官中,这些器官一般有外生的微孔,微孔允许细菌进入,同时又能和周围海水相交换。发光细菌发出的光有助于鱼类配偶的识别,在黑暗的地方看清物体。光线还可以成为一种聚集的信号,或诱惑其他生物以便于捕食。发光也有助于鱼类的成群游动以抵抗捕食者。

## 七、 植物体中的微生物

### 1、 植物表面微生物与植物病害

植物的茎叶和果实表面是某些微生物的良好生境,细菌、蓝细菌、真菌(特别是酵母)、地衣和某些藻类常见于这些好气的植物表面。邻接植物表面的生境称为叶际(phyllosphere)。叶际主要为各种细菌和真菌种群所占据。叶的直接表面生境称为叶面(phyllplane),也为不同的微生物占据。花是附生微生物的短期生境,花从受精到果实成熟,环境条件发生了改变,微生物群落也会发生演替。果实成熟时,酵母属有时成为优势种群。不同种的植物果实有特定的群落组成。

某些病毒、细菌、真菌和原生动物能引起植物的病害,主要的病害是由真菌引起的。微生物引起的植物病害是微生物对植物的偏害作用。病害使植物功能失常,因而降低了植物生长和维持它们生态位的能力。病原体通过不同的途径进入植物体内,通过产生分解酶、毒素和生长调节因子干扰植物的正常功能。被感染植物能产生各种形态上和代谢上的异常,有的植物会快速死亡,或经历缓慢的变化过程,而走向死亡。

### 2、 微生物和植物根相互关系

#### i 根际微生物(rhizosphere microorganisms)

根际是邻接植物根的土壤区域,其中的微生物称为根际微生物。由于植物根在生长过程中和土壤进行着频繁的物质交换,不断改变周围的养分、水分、pH、氧化还原电位和通气状况。从而使根际范围内土壤的化学环境不同程度上区别于根际以外的土壤,成为微生物生长的特殊微生态环境。根际效应对土壤微生物最重要的是营养选择和富集,使根际微生物在数量、种类以及生理类群上不同于非根际。根际微生物对植物的生长有明显的影晌。根际微生物以各种不同的方式有益于植物,包括去除H<sub>2</sub>S降低对根的毒性,增加矿质营养的溶解性,合成维生素、氨基酸、生长素和能刺激植物生长的赤霉素。另外由于竞争关系,根际微生物对潜在的植物病原体具有拮抗性,产生的抗生素能抑制病原菌的生长。一些根际微生物可能成为植物病原体或和植物竞争可利用的生长因子、水和营养物,而有害于植物。

#### ii 菌根(mycorrhiza)

一些真菌和植物根以互惠关系建立起来的共生体称为菌根。菌根共生体可以促进磷、氮和其他矿物质的吸收。真菌和植物根形成的共生体增强了它们对环境的适应能力,使它们能占据它们原来所不能占据的生境。根为真菌的生长提供能源。菌根菌为植物提供矿物质和水,产生的植物之间的抑制物质使生长植物对其他植物存在偏害关系,削弱外来者的竞争,以保持占据的生境。结合以后的共生体不同于单独的根和真菌,它们除保留原来的各自的特点外,又产生了原来所没有的优点,体现了生物种间的协调性。

菌根分为两大类,外生菌根和内生菌根(图 11-4)。外生菌根的真菌在根外形成致密的鞘套,少量菌丝进入根皮层细胞的间隙中;内生菌根的菌丝体主要存在于根的皮层中,在根外较少。内生菌根又分为两种类型,一种是由有隔膜真菌形成的菌根,另一种是无隔膜真菌所形成的菌根,后一种一般称为VA菌根,即“泡囊-丛枝菌根”(vesicular-arbuscular mycorrhizae)。外生菌根主要见于森林树木,内生菌根存在于草、林木和各种作物中。陆地上97%以上的绿色植物具有菌根。

#### iii 共生固氮

①根瘤菌和豆科植物的共生固氮 根瘤菌和豆科植物的共生固氮作用是微生物和植物之间最重要的互惠共生关系。共生固氮把大气中不能被植物利用的氮转变可被植物合成其他氮素化合物的氨,

这对于增加土壤肥力和推动氮循环有重要意义。

共生固氮是一个十分复杂的生理、生化过程。根瘤菌和植物根经过一系列的相互作用过程而形成具固氮能力的成熟根瘤。固氮酶由根瘤菌提供，根瘤菌和植物根共同创造一个有助于同氮的生态位。根瘤菌专性好氧，固氮是耗能和对氧敏感过程。这些几乎完全对立的特征被融合在豆科植物根瘤中，根瘤中的中心侵染组织是一个微好氧生态位。根瘤周围未被侵染植物细胞的连续层限制和控制氧的内部扩散。内部组织维持大约百分之一的大气浓度(0.2%氧)，这个氧量低到能进行固氮过程。另外中心组织的植物细胞合成大量豆血红蛋白携带氧，有利于低氧浓度扩散通过植物细胞质膜，提供胞内根瘤菌(类菌体)以充分氧流进行呼吸和氧化磷酸化。固氮过程产生的氨穿过类菌体膜被植物同化利用。

共生固氮的遗传机理也十分复杂。根瘤的形成需要特定的植物和细菌基因的协调和有序的表达。根瘤菌 *nif*(固氮)基因是编码固氮酶酶系的基因，基因组包括固氮酶的结构基因(*nif/H*、*nif/D* 和 *nif/K*)、合成铁-钼辅因子的结构基因(*nif/B*、*nif/E*)，与根瘤形成有关的基因是 *nod*、*nol*，决定后期共生固氮根瘤发展的基因是 *fix*。此外还有影响表面外多糖和脂多糖的基因 *exo* 和 *lps*，以及决定类菌体二羧酸吸收的基因(*dct*)。植物方面的遗传控制工作以豌豆、大豆和其他材料进行了大量的研究工作，已经发现有大约 50 个位点(*loci*)与共生固氮有关。有研究报道植物的 *ENOD2* 基因的作用可以改变根瘤中央固氮组织的微生境，改变根瘤薄壁组织的细胞外形，因而影响氧进入根瘤通道的扩散阻力。

②放线菌和非豆科植物共生固氮 已知放线菌目中的弗兰克氏菌可与 200 多种非豆科植物共生形成放线菌根瘤(*actinorrhizas*)。这些根瘤也具有较强的共生固氮能力。结瘤植物多为木本双子叶植物，如凯木、杨梅、沙棘等。

### 3、 蓝细菌和植物的共生固氮

蓝细菌(蓝藻)中的许多属种除能自生固氮外，念珠藻属、鱼腥藻属等属的蓝细菌与部分苔类植物、藓类植物、蕨类植物、裸子植物和被子植物可建立具有固氮功能的共生体。

从根际、菌根到根瘤，微生物和植物根之间的互惠共生关系越来越密切，形态结构越来越复杂，生理功能越来越完备，遗传调节越来越严密，这也是生物相互作用的高级形式。在共生体中，植物根是主导方面。共生体的建立促进了植物的生长，从生态学的观点可以看成是生物克服恶劣环境，抵抗环境压力达到生物和环境协调统一的一种手段。

### 八、 工农业产品上的微生物及生物性霉腐的控制

人类赖以生存的食品以及其他许多生活、生产资料都是微生物生长的潜在基质，可以不同程度上为微生物所利用。在大多数情况下，微生物对这些物质的作用导致酸败、腐烂及霉腐，消除微生物或抑制有害微生物的代谢活动，特别是应用微生物生态学原理抑制有害微生物的活动是防止食品、材料腐败变质的重要方法。

工业产品中的微生物大多来源于原料和成品对环境微生物的吸附，在一定条件下微生物生理活动造成对产品的严重损害。食品是微生物生长繁殖的天然培养基，在加工、包装、运输和贮藏等过程中，都可能被霉菌、细菌、酵母菌等微生物污染，在合适的温、湿度条件下可以迅速生长，产生各种毒素。在农产品上存在着大量的微生物，全世界每年因霉变而损失的粮食就占总产量的 2%左右。花生、玉米、大米、棉籽、胡桃、麦类受霉菌污染产生霉菌毒素是农产品霉腐的突出问题，常引起食物中毒或癌变。

控制微生物，防止生物霉腐的方法概括起来有三种，这些方法可以单独或结合使用。①用物理或化学方法杀死或去除物品上的一切微生物，再用物理方法防止微生物的再污染。这种方法是使微生物在不能耐受的环境条件下被杀灭。②把食品和其他材料保存于微生物不能进行代谢活动或代谢活动水平极低的环境条件下。这种方法是造成微生物不具代谢活性或代谢活性极低的环境条件，但不是要杀死所有微生物或完全消除微生物的代谢活动。这种控制环境条件的方法要注意极端环境微生物代谢活动所造成的腐败。③通过加工或加入对人无害的添加剂来抑制微生物的活动或降低食品和材料的微生物可利用性。最常用的是苯甲酸、山梨酸、乙酸等有机酸(或盐)。最具生态学色彩的方法是用一类微生物活性来抑制另一类微生物活性。常用乳杆菌、丙酸细菌、醋化醋杆菌等产生的乳酸、丙酸、乙酸

等酸性物质来抑制其他酸败细菌的活动，达到保藏食物的目的。

## 九、原位研究方法

微生物生态学所涉及的主要是微生物在复杂生态环境中的结构与功能，实验室的纯培养方法尽管在一定程度上可以研究自然环境中的微生物，但并不能完全揭示它们的组成和活动，因此需要发展自然状况下的研究方法，或称为原位研究方法。

### 1、原位观察

生态环境中微生物群落的原位观察由于激光聚焦(laserconfocal)显微镜的出现而得以实现。这种显微镜产生的少量 x-射线可以在不扰动或固定的条件下成像。而且激光光学捕集(trapping)可以把单个细胞从生境中剥离，这种技术提供了新的洞察力，以便了解群落的种群组成。此外还有荧光标记等技术，能够进行群落的原位观察。

### 2、微生境模拟技术

微生境是直接对微生物产生效应的环境，研究微生境可以对微生物活动有深入的了解。通过控制生境中光、营养、氧、硫等环境因素可以模拟微生境和发生在微生境中理化因子的梯度变化。微宇宙(microcosms)模型系统类似于微小的生态圈，它包括各种微生物、植物和动物，多种生境和各种界面。使用微宇宙系统能够检查生态系统内更复杂的相互关系。原位培养是另一种模拟微生境技术，一般使用瓶、实验桶、透析袋或微孔滤膜组成围隔，将要研究的样品放入原来位置进行培养。

### 3、现代分子生物学技术的应用

微生物群落样品可以在不进行微生物培养和显微镜观察条件下被分析。首先核酸被从样品中分离出来，再与相应的基因探针进行杂交，可以推断出所测样品群落组成。分子生物学技术方法，用于微生物生态的研究是发展的趋势，正方兴未艾。

## 第三节 人体微生物及病原微生物的传播

人体器官表面一般为无侵袭力的“土著”微生物所占据。皮肤、口腔和胃肠道有各具特色的微生物群落，占据不同生境的微生物表现出各自的群落特征，有不同的生理功能。

### 一、人体微生物

#### 1、皮肤

皮肤表面温度适中(33-37℃)，pH 稍偏酸(4-8)，可利用水一般不足，汗液中有无机离子和其他有机物，是微生物生长的合适生境。表面的脂类物质和盐度对微生物组成有重要影响。优势的细菌种群是革兰氏阳性菌，它们包括葡萄球菌属、微球菌属、棒杆菌属等。革兰氏阴性菌较少见于皮肤。真菌有瓶形酵母属。皮肤表面正常栖居的微生物对外来微生物具有排斥作用，可以防止外来微生物和病原微生物的侵染，对皮肤有保护作用。

#### 2、口腔

口腔是一个有利于微生物生长的生境：①温度稳定；②水分充足；③口腔内高低不平的表面为微生物提供多样的微生境；④营养丰富；⑤唾液提供微生物生长因子，也含有抗微生物物质；⑥好氧的大环境和厌氧的微生境并存。口腔微生物分初于软组织粘膜(脱落与未脱落)表面、牙齿表面和唾液。同时存在好氧和厌氧的微生物，主要类群包括细菌、放线菌、酵母菌、原生动物，以细菌数量最多。

口腔疾病(龋齿和牙龈炎)和口腔微生物有重要关系，但不是外部病原微生物的侵染而是内部微生物群落组成和结构的改变。人食物中的糖分(特别是蔗糖)含量增加导致在牙齿表面形成一个产酸和耐酸的细菌群落，这个群落中的主要属种是突变链球菌，表兄链球菌、乳杆菌属细菌。它们代谢糖产酸，使口腔 pH 急剧下降，而唾液尚不足以中和其酸度，使牙齿表面 pH 甚至下降到 4，酸溶解齿表面的珐琅质，最终造成龋齿。氟能恢复和促进牙齿珐琅质和抑制细菌对糖的代谢，因此是良好的防治牙病的药物。免疫方法已被研究用于龋齿的防治，突变链球菌制备的单克隆抗体具有正向的免疫效应。

#### 3、胃肠道

胃肠道所包含的人体器官有胃、小肠和大肠，胃肠道微生物研究的主要是大肠内的微生物。胃的特点是酸度高(pH 值甚至低于 3)，含大量的消化酶，这种生境不适合于微生物生长，因此胃内仅有数

量较低的附在胃壁上的抗酸微生物,包括酵母、链球菌、乳杆菌等,但当胃酸度降低,细菌数量会增加。小肠连接胃和大肠,主要功能是消化食物和吸收营养。其正常环境 pH 值稍偏碱,表面多腺体,含有消化酶,强烈蠕动。微生物数量从近胃端的低量(103Cfu/ml)到近大肠端的高量(108Cfu/ml)。大肠的主要功能是吸收粪便中的水分,也吸收少量的营养。其正常环境 pH 偏碱到中性,表面多腺体,温和蠕动。微生物数量巨大(10<sup>11</sup>Cfu/ml),区系组成包括拟杆菌、真杆菌、厌氧链球菌、双歧杆菌、肠球菌、肠杆菌、乳酸菌、梭菌、酵母等。

人和胃肠道微生物存在着对双方都有利的共生关系。微生物合成的维生素、蛋白质,产生的能源可以为人吸收利用,低水平的肠道区系(通常使用抗生素后的第二天)将会导致叶酸和维生素K的缺乏。

胃肠道易于受到外来微生物或病原微生物的侵染。能侵染胃的微生物有细菌(幽门螺杆菌)、病毒(细胞巨化病毒)、酵母、寄生虫。幽门螺杆菌可能与人类 B 型胃炎、消化性溃疡及胃癌等有着密切关系,倍受临床医学、微生物学工作者关注。

## 二、病原微生物通过水体的传播

水携带的病原微生物可以通过多种途径进入人体,这包括直接饮用、接触和吸入。饮水不洁所造成的传染病在发展中国家中十分普遍。接触污染水体会引起皮肤、眼睛疾病。吸入带有病原微生物的水珠会导致呼吸道传染病。水传播的病原微生物及其引起的传染病如表 11—3。

表 11—3 通过水传播的主要病原微生物及所引发的传染病

细菌		
病原微生物	潜伏期	临床症状细菌
空肠弯曲杆菌	2-5 天	胃肠炎,常伴有发热
产肠道毒素大肠埃希氏菌	6-36h	胃肠炎
沙门氏菌属	6-48h	胃肠炎,常伴有发热;伤寒或肠外感染
伤寒沙门氏菌	10-14 天	伤寒 发热、厌食、不适、短暂疹、脾肿大
病原微生物	潜伏期	临床症状
志贺氏菌属	12-48h	胃肠炎,常伴有发热和血样腹泻
霍乱弧菌 01	1-5 天	胃肠炎,常有明显的脱水
小肠结肠炎耶尔森氏菌	3-7 天	胃肠炎,肠系淋巴结炎,或急性末端回肠炎;可能类似阑尾炎
病毒		
A 型肝炎病毒	2-6 星期	肝炎——恶心、厌食、黄疸和黑尿
诺沃克病毒	24-48h	胃肠炎——短期
轮状病毒	24-72h	胃肠炎——常有明显脱水
原生动		
痢疾内变形虫	2-4 星期	从温和的胃肠炎到急性暴发性痢疾,有发热和血样腹泻
表吮贾第虫	1-4 星期	慢性腹泻,上腹部疼痛,胃胀,吸收不良和消瘦

## 三、病原微生物通过土壤的传播

带有病原微生物未经处理的固体废弃物随意丢弃、堆放及作为农田肥料使用,污水灌溉都可能造成对土壤的污染。病原微生物在土壤中的迁移机制包括物理过程、化学过程和生物学过程。物理过程:土壤是一种多孔介质,微生物在土壤中的迁移类似于溶质在水体中的迁移,包括对流、平流和水动力弥散。同时微生物也受到土壤介质的作用,包括过滤、吸附、解吸和沉降。化学过程:化学过程可以认为是一种趋化性迁移。可以游动的微生物响应于化学物质的梯度而迁移,迁移具有方向性,或顺浓度梯度,或逆浓度梯度移动。生物过程:生物过程是病原微生物自身属性与土壤环境相互作用对迁移的影响。病原微生物对土壤环境中养分的利用能力,与“土著”微生物及其他生物的竞争,对环境条件的适应能力,都影响它们的生长、繁殖和存活,因此影响它们的数量以及迁移传播。

## 四、病原微生物通过空气的传播

病原微生物通过生物气溶胶在空气中传播。生物气溶胶(bioaerosols)是悬浮在大气中的气溶胶、

微生物、微生物副产物和花粉的集合体。生物气溶胶的迁移扩散主要受到自身的物理特性和环境条件的影响。颗粒越大移动速度越慢，扩散能力就越低。高温和干燥有利于扩散，而低温、潮湿(特别是下雨)则起相反的作用。风对生物气溶胶在室外的扩散有重要的影响，可以使室外的微生物进入室内，还使办公室、商业场所等室内环境的微生物向外扩散。

气溶胶中的病原微生物主要来源于城市污水处理厂、宿主、土壤和许多带菌者。空气传播的病原菌和疾病主要有白喉棒状杆菌和白喉，溶血性链球菌和猩红热、风湿热，分枝杆菌和结核，肺炎链球菌、肺炎支原体和肺炎，奈瑟氏球菌和脑膜炎，博德特氏菌和百日咳，病毒和天花、流感等。

#### 第四节 微生物与环境保护

环境保护涉及范围很广，主要是消除污染和保护生态环境，微生物在这两个方面都有重要作用。

##### 一、微生物对污染物的降解与转化

###### 1、生物降解

生物降解(biodegradation)是微生物(也包括其他生物)对物质(特别是环境污染物)的分解作用。生物降解和传统的分解在本质上是一样的，但又有分解作用所没有的新的特征(如共代谢，降解质粒等)，因此可视为分解作用的扩展和延伸。生物降解是生态系统物质循环过程中的重要一环。研究难降解污染物的降解是当前生物降解的主要课题。

###### 2、降解性质粒

污染物的生物降解反应和其他生物反应本质上都是酶促反应，降解过程中大部分降解酶是由染色体编码的，但其中有些酶，特别是降解难降解化合物的酶类是由质粒控制的，这类质粒被称为降解性质粒(catabolic plasmids)。细菌中的降解性质粒和分离的细菌所处环境污染程度密切相关，从污染地分离到的细菌 50%以上含有降解性质粒，与从清洁区分离的细菌质粒相比，不但数量多，其分子也大(信息量大)，被广泛深入研究的质粒列于表 11-4。

###### 3、降解反应和生物降解性

发生在自然界的有机物的氧化分解过程也见于污染物的降解，主要包括氧化反应、还原反应、水解反应和聚合反应。化学结构是决定化合物生物降解性的主要因素，一般一种有机物其结构与自然物质越相似，就越易降解，结构差别越大，就越难降解。具有不常见取代基和化学结构使部分化学农药难于生物降解而残留。塑料薄膜因分子体积过大而抗降解，造成白色污染。

评价化合物的降解性有两种基本的试验方法，微生物学方法和环境学方法。前者通常使用纯培养在最适条件下研究化合物的降解，然而其条件是自然环境所没有的，因此其结果不能直接预测它们在实际环境中的实际行为，降解性通常被高估，但对进行生物处理仍有重要参考价值。环境学方法着眼于化学物在受污染水体和土壤中的降解性，通常使用取自污染区域或废水处理厂的混合微生物源或模拟自然条件培养于实验室的混合微生物培养物来进行实验研究，对所得结果的评价更接近于野外的实际情况。

#### 走出化学农药污染的“围城”

瑞士化学家默勒(Paul Muller)1939年发明 DDT(二氯二苯三氯乙烷)并用作杀虫剂，从而开创了以 DDT 为代农药新时代。在第二次世界大战期间及以后 DDT 被广泛用于防治疟疾、脑炎、斑疹伤寒等传染病，挽救了数百万人。印度在 1952 年疟疾的发病率达 7500 万病例，使用 DDT 控制后，到 1964 年减少到 10 万。DDT 把人类从传染病的“围城”中救出来，由此默勒获得 1948 年度的诺贝尔奖。此后 DDT 被广泛使用，据估算全世界使用了 500 万吨。成功中蕴含着具有脂溶性、致癌性和难于被降解的特点，DDT 对益虫的杀害以及沿食物链富集造成不良的生态效应，鱼类、蛙类其他高营养级生物繁殖能力下降以至灭绝，对人类健康也构成严重威胁。美国从 1973 年起，我国从 1983 年起禁用 DDT 有机氯农药也相继退出历史舞台。但残存有有机氯农药仍像幽灵一样在生态环境中徘徊，而且其他化学农药污染(以有机磷为主)的

“围城”仍然存在，生物农业，尤其是微生物杀虫剂和带抗病虫害基因的转基因植物、动物，可以帮助我们走出“围城”，那我们又会走入一个什么样的“围城”呢。

##### 二、重金属的转化

环境污染中所说的重金属一般指汞、镉、铬、铅、砷、银、硒、锡等。微生物特别是细菌、真菌在重金属的生物转化中起重要作用。微生物可以改变重金属在环境中的存在状态，会使化学物毒性增强，引起严重环境问题，还可以浓缩重金属，并通过食物链积累。另一方面微生物直接和间接的作用也可以去除环境中的重金属，有助于改善环境。

汞所造成的环境污染最早受到关注，汞的微生物转化及其环境意义具有代表性。汞的微生物转化包括三个方面：无机汞( $Hg^{2+}$ )的甲基化；无机汞( $Hg^{2+}$ )还原成  $Hg^0$ ；甲基汞和其他有机汞化合物裂解并还原成  $Hg^0$ 。包括梭菌、脉孢菌，假单胞菌等和许多真菌在内的微生物具有甲基化汞的能力。能使无机汞和有机汞转化为单质汞的微生物也被称为抗汞微生物，包括铜绿假单胞菌、金黄色葡萄球菌、大肠埃希氏菌等。微生物的抗汞功能是由质粒控制的，编码有机汞裂解酶和无机汞还原酶的是 *mer* 操纵子。

微生物对其他重金属也具有转化能力，硒、铅、锡、镉、砷、铝、镁、钡、金、铀也可以甲基化转化。微生物虽然不能降解重金属，但通过对重金属的转化作用，控制其转化途径，可以达到减轻毒性的作用。

### 三、 污染介质的微生物处理

人类生产和生活活动产生的污水(废水)、废气及固体废弃物都可以用生物方法进行处理。

#### 1、 污水处理

微生物处理污水过程的本质是微生物代谢污水中的有机物，作为营养物取得能量生长繁殖的过程，这和一般的微生物培养过程是相同的。微生物在对溶解性和悬浮的有机物酶解(降解)过程中产生能量，所产生的能量 2/3 被转化成生物量，1/3 被用于维持生长，而当外源有机物减少，微生物进入内源呼吸，以消耗胞内有机物来维持微生物的存活。

好氧处理系统

厌氧处理系统

生态工程处理方法

氮、磷去除技术

#### 2、 固体废弃物处理与资源化技术

利用微生物分解固体废弃物中的有机物，从而实现其无害化和资源化，是处理固体废弃物的有效而经济的技术方法。它包括堆肥化处理、生态工程处理法、废纤维糖化、废纤维饲料化等。

堆肥化处理

生态工程处理方法

废纤维糖化技术

废纤维饲料化——生产单细胞蛋白技术

#### 3、 气态污染物的生物处理

气态污染物的生物处理技术是生物降解污染物的新应用。生物处理气态污染物的原理与污水处理是一致的，本质上是对污染物的生物降解与转化。生物降解作用难于在气相中进行，所以废气的生物处理中，气态污染物首先要经历由气相转移到液相或固体表面液膜中的过程。降解与转化液化污染物的也是混合的微生物群体。处理过程在悬浮或附着系统的生物反应器中进行。提高净化效率需要增强传质过程(即污染物从气相转入液相)和创造有利于转化和降解的条件。

### 四、 污染环境的生物修复

生物修复 是微生物催化降解有机污染物，转化其他污染物从而消除污染的一个受控或自发进行的过程。生物修复基础是发生在生态环境中微生物对有机污染物的降解作用。

由于自然的生物修复过程一般较慢，难于实际应用，生物修复技术则是工程化在人为促进条件下的生物修复；它是传统的生物处理方法的延伸，其创新之处在于它治理的对象是较大面积的污染。由于污染环境和污染物的复杂多样，因而产生了不同于传统治理点源污染的新概念和新的技术措施。

目前生物修复技术主要用于土壤、水体(包括地下水)、海滩的污染治理以及固体废弃物的处理。

主要的污染物是石油烃及各种有毒有害难降解的有机污染物。

生物修复的本质是生物降解，能否成功取决于生物降解速率，在生物修复中采取强化措施促进生物降解十分重要。这包括：

①接种微生物 目的是增加降解微生物数量，提高降解能力，针对不同的污染物可以接种人工筛选分离的高效降解微生物，接入单种、多种或一个降解菌群，人工构建的遗传工程菌被认为是首选的接种微生物；

②添加微生物营养盐 微生物的生长繁殖和降解活动需要充足均衡的营养，为了提高降解速度，需要添加缺少的营养物；

③提供电子受体 为使有机物的氧化降解途径畅通，要提供充足的电子受体，一般为好氧环境提供氧，为厌氧环境的降解提供硝酸盐；

④提供共代谢底物 共代谢有助于难降解有机污染物的生物降解；

⑤提高生物可利用性 低水溶性的疏水污染物难于被微生物所降解，利用表面活性剂、各种分散剂来提高污染物的溶解度，可提高生物可利用性；

⑥添加生物降解促进剂 一般使用  $H_2O_2$  可以明显加快生物降解的速度。

## 五、 环境污染的微生物监测

生态环境中的微生物是环境污染的直接承受者，环境状况的任何变化都对微生物群落结构和生态功能产生影响，因此可以用微生物指示环境污染。由于微生物易变异，抗性强，微生物作为环境污染的指示物在应用上不及动物和植物广泛而规范。但微生物的某些独有的特性使微生物在环境监测中有特殊作用。

### 1、 粪便污染指示菌

粪便中肠道病原菌对水体的污染是引起霍乱、伤寒等流行病的主要原因。沙门氏菌、志贺氏菌等肠道病原菌数量少，检出鉴定困难。因此不能把直接检测病原菌作为常规的监测手段，从而提出了检测与病原菌并存于肠道，且具相关性的“指示菌”，从它们的数量来判定水质污染程度和饮水(包括食品等)的安全性。总大肠菌群是最基本的粪便污染指示菌，最常用的水质指标之一。检测水体中总大肠菌群的方法主要是 MPN(most probable number) 试验法和膜滤试验法(membrane filtration test)。

### 2、 致突变物的微生物检测

环境污染物的遗传学效应主要表现在污染物的致突变作用，致突变作用是致癌和致畸的根本原因。具有致突变作用或怀疑具有致突变效能的化合物数量巨大，这就要求发展快速准确的检测手段。微生物生长快的特点正适合这种要求，微生物监测被公认是对致突变物最好的初步检测方法。

现在被广泛使用的是美国 Ames 教授等建立称为 Ames 试验的方法。其原理是利用鼠伤寒沙门氏菌(*Salmonella typhimurium*)的组氨酸营养缺陷型菌株在致突变物的作用下发生回复突变的性能，来检测物质的致突变性。一般采用纸片点试法和平皿掺入法监测环境污染物的致突变性。当培养基中含有微量组氨酸时，倾注过量菌液的平板上形成一层微小的菌落，但当受到致突变物作用时，缺陷型菌株回复为野生型菌株，这时在培养基上长出明显的菌落。

### 3、 发光细菌检测法

发光细菌发光是菌体生理代谢正常的一种表现，这类菌在生长对数期发光能力极强。当环境条件不良或有毒物质存在时，发光能力受到影响而减弱，其减弱程度与毒物的毒性大小和浓度成一定的比例关系。通过灵敏的光电测定装置，检查在毒物作用下发光菌的发光强度变化可以评价待测物的毒性。其中研究和应用最多的为明亮发光杆菌(*Photobacterium phosphoreum*)。

### 4、 硝化细菌的相对代谢率试验

硝化细菌所进行的把铵离子( $NH_4^+$ )在好氧条件下氧化成硝酸根( $NO_3^-$ )的硝化作用在生态系统的氮循环中有重要作用，这个过程只有微生物才能进行。用测定硝化细菌相对代谢率的方法检测水及土壤中的有毒物，并以此评判水体、土壤环境及环境污染物的生物毒性，对于宏观生态环境健康程度的评价有重要意义。

在环境污染的微生物监测中以上介绍的几种方法重复性好,易于规范,可以作为标准的监测方法。依照同样原理的其他微生物监测方法(以微生物组成、数量、代谢活性、遗传特性为指标)也在不断研究和使用。

#### 小 结

1.微生物生态的核心问题是微生物与环境的相互关系,不同生态环境中微生物的组成和生态功能不同。

2.微生物主要作为分解者,而在生态系统的能量流动、物质循环和信息传递中发挥重要作用。

3.存在于土壤、水体、动植物体和人体等生境的微生物群落是环境条件选择和生物适应、进化的结果,也在各自的生境中发挥着独特的生态功能。

4. 极端环境微生物具有特定的生态分布,特有的适应机制和特别的资源潜力。

5.微生物在污染环境的修复和三废处理中起重要作用,进一步提高微生物的降解活性是面临的主要课题。