

# 工业废水处理工程

(下)

湘潭大学化工系环境工程教研室

1983.11.

# 目 录 (下)

第五篇 废水处理的生物方法	
第二十章 废水生物处理的理论基础	( 1 )
第一节 微生物的基本知识	( 1 )
第二节 酶及酶反应	( 11 )
第三节 微生物的代谢作用	( 16 )
第四节 废水的可生化性	( 27 )
第五节 生长的动力学	( 32 )
第六节 废水生物处理法总述	( 39 )
第二十一章 活性污泥法	( 42 )
第一节 活性污泥法原理和分类	( 42 )
第二节 活性污泥法参数	( 55 )
第三节 氧的传递	( 68 )
第四节 曝气池的构造	( 74 )
第五节 活性污泥法设计	( 86 )
第六节 活性污泥法的运行与管理	( 108 )
第七节 活性污泥法的发展	( 113 )
第二十二章 生物膜法	( 120 )
第一节 生物膜法原理与分类	( 120 )
第二节 生物过滤	( 122 )
第三节 生物转盘	( 141 )
第四节 生物膜法的运行管理	( 153 )
第五节 其他型式的生物膜处理设备	( 155 )
第二十三章 厌气处理法	( 160 )
第一节 厌气法的原理与流程	( 160 )
第二节 影响正常厌气消化过程的因素	( 166 )
第三节 消化池的形式与构造	( 169 )
第四节 消化池的设计	( 173 )
第五节 消化池的运行管理	( 186 )

<b>第二十四章 其他生物处理法</b> .....	( 189 )
第一节 氧化塘.....	( 189 )
第二节 废水灌溉与养鱼.....	( 198 )

## 第六篇 工业废水污泥处理与处置

<b>第二十五章 废水污泥的处理与处置</b> .....	( 199 )
第一节 污泥的基本特性及处理要点.....	( 199 )
第二节 污泥浓缩.....	( 208 )
第三节 有机污泥稳定化处理.....	( 219 )
第四节 污泥脱水及其强化措施.....	( 222 )
第五节 污泥干燥与焚烧.....	( 240 )
第六节 污泥最终处置与利用.....	( 244 )

## 第七篇 几种工业废水的处理

<b>第二十六章 石油炼厂的废水处理</b> .....	( 248 )
第一节 石油炼制工艺简述.....	( 248 )
第二节 石油炼厂废水特性与分类.....	( 250 )
第三节 炼油厂废水的处理.....	( 254 )
<b>第二十七章 石油工业废水处理</b> .....	( 271 )
第一节 几种石油化工产品的废水排放及废水处理.....	( 271 )
第二节 大型石油化工联合企业的废水处理.....	( 285 )
<b>第二十八章 重金属废水处理</b> .....	( 293 )
第一节 重金属废水处理的一般方法.....	( 293 )
第二节 几种重金属废水处理实例.....	( 301 )
<b>第二十九章 含酚废水处理</b> .....	( 309 )
第一节 酚的性质及含酚废水的来源.....	( 309 )
第二节 含酚废水中酚的回收.....	( 310 )
第三节 含酚废水处理.....	( 318 )
<b>第三十章 含氰废水处理</b> .....	( 323 )
第一节 含氰废水的来原与回收利用.....	( 323 )
第二节 含氰废水处理.....	( 325 )

## 第八篇 废水处理厂(站)设计

<b>第三十一章 设计任务与程序</b> .....	( 340 )
第一节 原始资料.....	( 341 )
第二节 设计任务与程序.....	( 342 )
<b>第三十二章 废水处理厂(站)设计</b> .....	( 344 )
第一节 设计原则.....	( 344 )
第二节 废水处理厂(站)位置的确定.....	( 347 )
第三节 废水处理厂(站)的总平面布置.....	( 348 )
第四节 废水处理系统的水力计算及高程布置.....	( 349 )
第五节 废水处理厂(站)设计中的其他问题.....	( 356 )
<b>附    录</b> .....	( 360 )
附录 I 泵型叶轮计算图.....	( 360 )
附录 II 平板叶轮计算图.....	( 361 )
附录 III 空气管沿程阻力计算.....	( 362 )
附录 IV 工业废水的排放标准.....	( 363 )
附录 V 地面水有害物质的最高容许浓度.....	( 364 )
附录 VI 地面水水质卫生要求.....	( 366 )
附录 VII 渔业水域水质标准.....	( 366 )
附录 VIII 农田灌溉用水水质标准.....	( 367 )
附录 IX 环境影响报告书的基本内容.....	( 368 )

## 第五篇 工业废水处理的生物方法

# 第二十章 废水生物处理的理论基础

废水的生物处理是利用生物（主要是微生物）的生命活动过程，对废水污染物进行转移和转化作用，使废水获得净化的处理方法。它主要用于处理有机废水和含硫、氰等无机废水。

废水生物处理法最初用于生活污水处理，它已有数十年的历史，但是，随着工业污染物的形成与排放，利用生物方法处理废水面临一个毒性问题，由于生物处理技术和生物科学的发展，又提供有毒有机废水处理的条件。目前，在工业废水的处理中，已普遍采用生物方法作为有机废水的二级处理的手段。

由于微生物具有来源广、易培养、繁殖快、对环境适应性强和易变异等特性，在生产上能较容易地采集菌种，加以培养增殖，并对这些微生物进行特定条件下的驯化，使之适应有毒工业废水环境，在废水中所含有有机碳、氮、磷及其他营养物质条件下，能进行正常的代谢，使有机物无机化，有毒物质无害化。

微生物的生存条件是温和的，用生物法促使物质的转化过程同一般化学方法相比优越得多，过程中不需高温和高压操作，它是不需投加催化剂的催化反应，因此，处理废水的费用是低廉的。

但是，生物处理法仅能对可降解物质起作用，其适用面就受到限制，幸而废水中绝大多数有机物都不同程度地被生物所降解，选择最佳菌种以及对菌种进行良好的驯化，将提高生物处理效果。此外，由于微生物是一种活体，对有毒物质的忍受浓度不是无限的，因此，控制被处理废水有毒物质浓度、均衡水量与水质，以及予处理的要求比其他方法高。

随着生物处理技术的发展，新型高效生物处理设备的出现，一定程度上改善了生物方法的缺点，尤其是采用生物——物化法合并的处理流程，使生物方法的适用性大大提高，成为当前普遍重视的一种发展方向。

### 第一节 微生物的基本知识

#### 一、微生物的分类

所谓微生物是肉眼不能看见，只能凭借显微镜才能观察到的单细胞及多细胞生物。

从狭义角度说主要是指菌类生物，包括细菌、放线菌、真菌（霉菌、酵母菌）以及病毒等。从广义角度说，除了菌类生物及病毒外，还包括藻类、原动物和一些微型动物。其中，病毒是一种比较特殊的微生物，在微生物领域中比较小，可以说是“微微生物”，只能用电子显微镜才能观察到，它是依附于活细胞生活的，具有致病性。废水中（如医院废水）病毒是消毒的对象之一，在废水处理中无积极作用。

(一) 细菌、放线菌、真菌

细菌是一种原核生物，依靠溶解性营养物的体外摄取而自身繁殖的。单个细胞大小约在 $0.5\sim 5\mu$ 之间，体型有球形、杆形和弧形（包括螺旋型）。单个细菌细胞的构造示于图20—1。

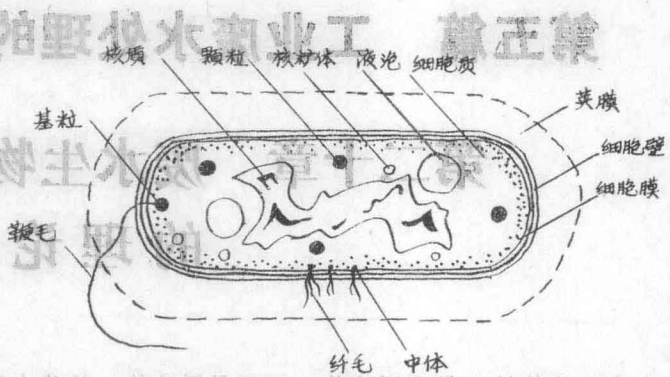


图 20—1 单个细菌的构造

细菌通过裂殖（成熟细胞分裂成为二个新细胞）来繁殖。大多数细菌的繁殖速度极快，一般在环境条件适宜时， $20\sim 30$ 分钟即可分裂一次，这个繁殖一代的时间称为世代时间。如果细菌在荚膜内繁殖，将形成一个荚膜粘状物中包围若干个细菌个体的胶团（图20—2）；在菌胶团里，粘状物主要是多糖类物质及多肽组成，它起着保护细胞和营养贮存的作用。荚膜发达呈鞘状者称为鞘皮，在铁细菌、球衣细菌都可以见到。



图 20—2 菌胶团

如果细菌连续裂殖，将会出现链状、联球状等群体形态。细菌的细胞壁具有固定的形状，起着保护细胞的作用，它同细胞膜一起，能对环境物质进行选择透过，营养物质从体外透过细胞壁和细胞膜进入细胞质，经体内代谢后，代谢产物又能释放到环境中去。细胞质是大量酶贮存的场所，物质代谢过程主要在细胞质内进行，细胞质内还有各种贮备物颗粒和用以遗传用的核糖体。光合细菌的细胞质还含有载色体，能起光合作用。核质具有传递信息的功能。

一些细菌在生长的某一阶段里，能形成芽孢，芽孢能抵抗高温、干燥及许多化学药物的危害。细菌所形成的芽孢是细菌处于休眠和抵抗不良环境的特殊结构，当环境条件适宜时，芽孢可从新萌发形成新的营养细胞。

不同细菌细胞其内含物不同，如硫细菌贮存元素硫颗粒。当环境条件适宜，外界营养充足时，细胞通过内含物贮存营养；当外界营养缺乏时，细胞利用内含物作营养，可

见到细胞内含物减少和消失。细胞质亦是一个营养贮存的场所。

细菌细胞的主要成分是水、无机物、蛋白质、核酸、糖类、脂类及色素等。常以  $C_5H_7NO_2$  的化学式表示。细菌细胞的组成元素及有机物见表20—1及表20—2。

表 20—1 细菌的组成元素

细菌	水分80% 固体物质20%	有机物90% 无机物10%	碳53%、氧29%
			氮12%、氢6%
			磷、铁、硫 其他

表 20—2 组成细菌细胞的有机物

蛋白质	50~80%
核糖核酸 (RNA)	3~14%
脱氧核糖核酸 (DNA)	1~6%
糖 类	10~30%
脂 类	10~40%

放线菌菌体是丝状的，直径一般在  $1\mu$  左右，一个菌丝内有许多相当于细胞核的结构，但无核膜，故亦属于原核微生物。放线菌的繁殖是由片断的菌丝生出分枝成为新的菌丝体，但更主要是依靠生出孢子或孢囊孢子来繁殖后代的。

真菌包括霉菌和酵母菌。霉菌的菌体比较大，是由许多菌丝组成的菌丝体。平均宽度为  $3-10\mu$ ，比一般细菌和放线菌大几倍到几十倍，菌丝内有无隔膜的，也有有隔膜的。细胞核外有核膜包围，内有核仁，属于真核微生物。酵母是单细胞微生物，也属真核微生物类型，有典型细胞结构，一般菌体成球形、卵形或成椭圆形，体积大约在  $5-30\mu \times 3-5\mu$  左右，在高倍显微镜下即可清楚看到。

细菌，放线菌及真菌在废水处理中，能把废水中的有机污物作为自身发育的营养和能量，一方面菌体数量获得增加，同时，废水中有机污物获得降解。废水的生物处理主要依靠这些菌类微生物来完成。

由于这些菌类微生物的个体比较小，观察与鉴别比较困难，同时，在废水生物处理过程，大多数是采用混合菌种的培养方式，所以，一般废水处理工程的管理和工艺研究方面，不把它们作为一项研究和监测的主要内容。但是，通过筛选、培养和变异，选择和获得特异微生物用以高效处理有毒废水，已成为微生物学家们普遍重视的课题。

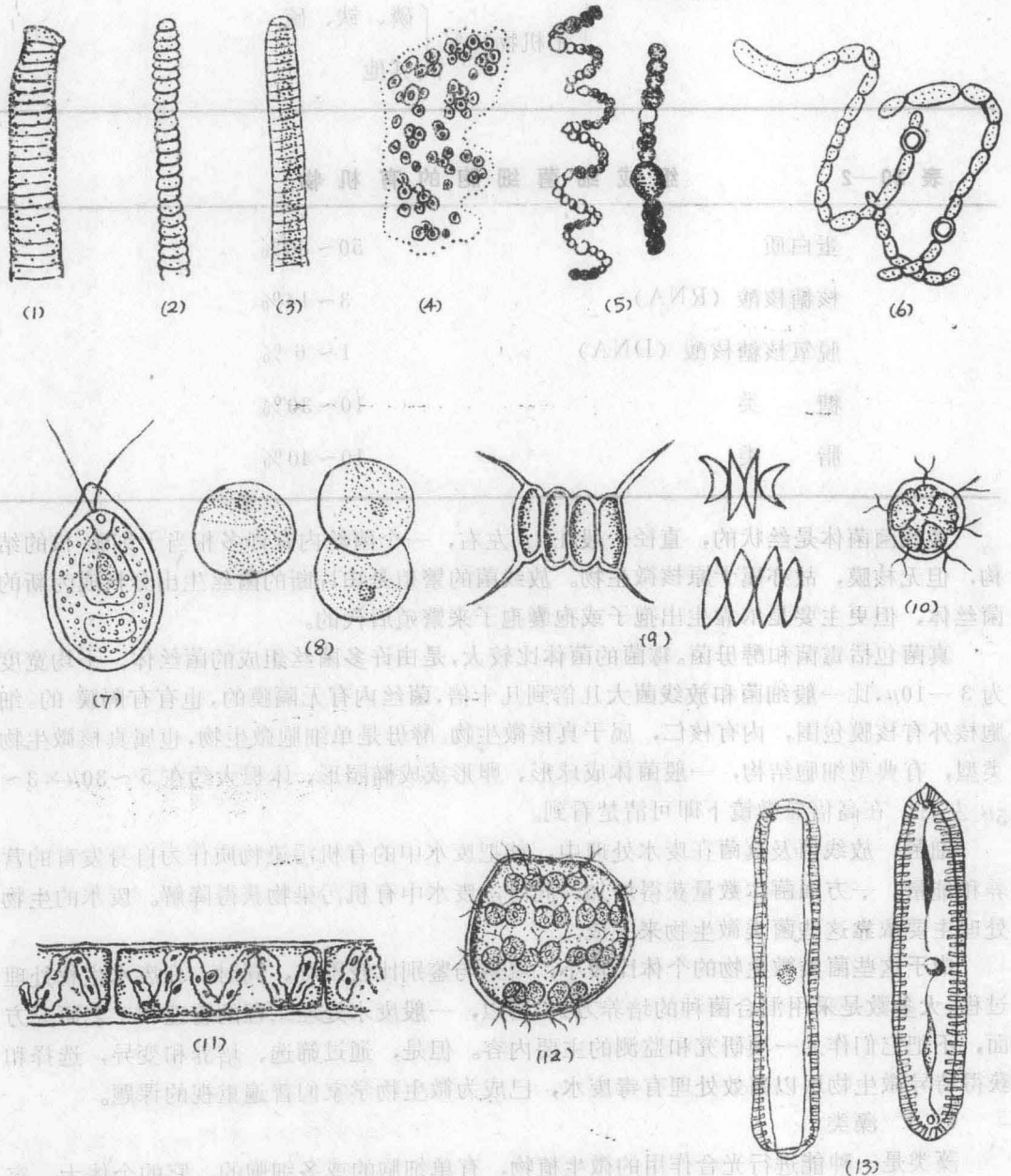
## (二) 藻类

藻类是一种能进行光合作用的微生物植物，有单细胞的或多细胞的。它的个体大，容易观察与鉴别。细胞内含多种色素，如蓝绿、黄绿、棕色和红色等。藻类主要是在好气氧

化塘及某些生物膜法废水处理装置中出现，能对废水进行供氧，也可对废水中重金属离子、放射性物质进行吸附。

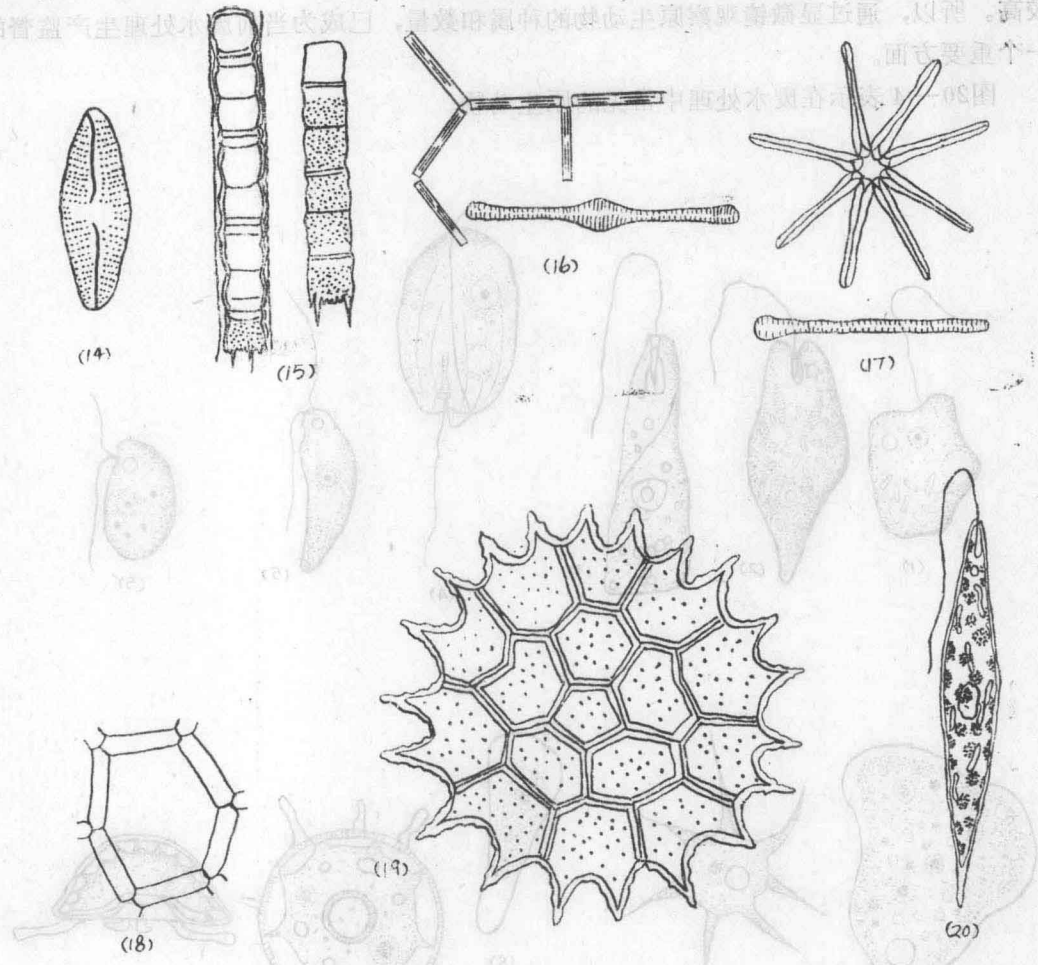
废水处理设备中，存在的藻类和菌类将形成一种共生关系，藻类植物通过光合作用向废水供氧，藻类死亡后，其残留有机物成为菌类的有机营养物，废水中有机污染物及其他有机物降解为二氧化碳时，又提供藻类所要求的生存环境。不同藻类所要求的生存环境不同，反过来说，废水处理过程出现不同的藻类，将表征废水不同的处理程度。

图20—3为在废水处理过程中常见的藻类。





奥登眼状的水刺示非，机主式生于产壁管同以要主... 物阿... 行世... 函管益气生康状水... 世式状口... 呈球球... 呈长画... 以... 清穿... 面式要重个... 图



- |          |           |           |            |
|----------|-----------|-----------|------------|
| 1. 大颤藻   | 2. 小颤藻    | 3. 沼生颤藻   | 4. 微囊藻     |
| 5. 鱼腥藻   | 6. 水花项圈藻  | 7. 衣藻     | 8. 小球藻     |
| 9. 栅藻    | 10. 实心藻   | 11. 水绵    | 12. 空心球藻   |
| 13. 舟形硅藻 | 14. 短纺锤硅藻 | 15. 丝状硅藻  | 16. 窗格纵格栅藻 |
| 17. 星杆藻  | 18. 水网藻   | 19. 短棘盘星藻 | 20. 梭裸藻    |

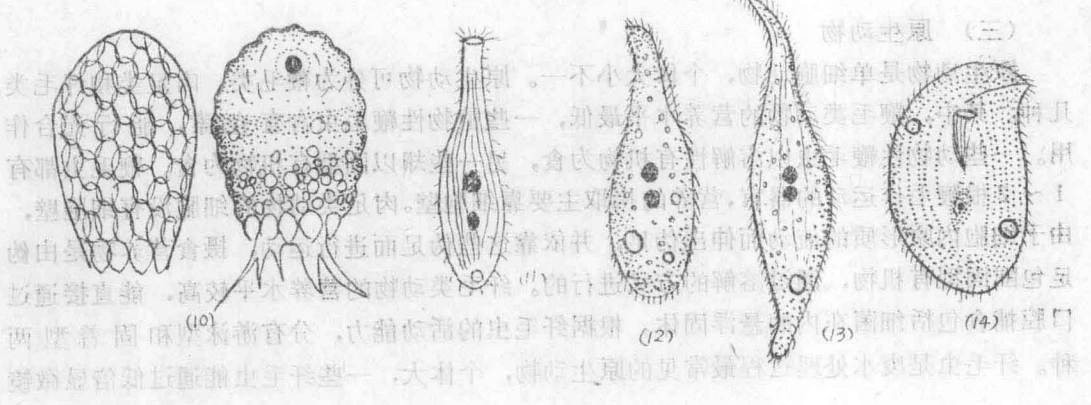
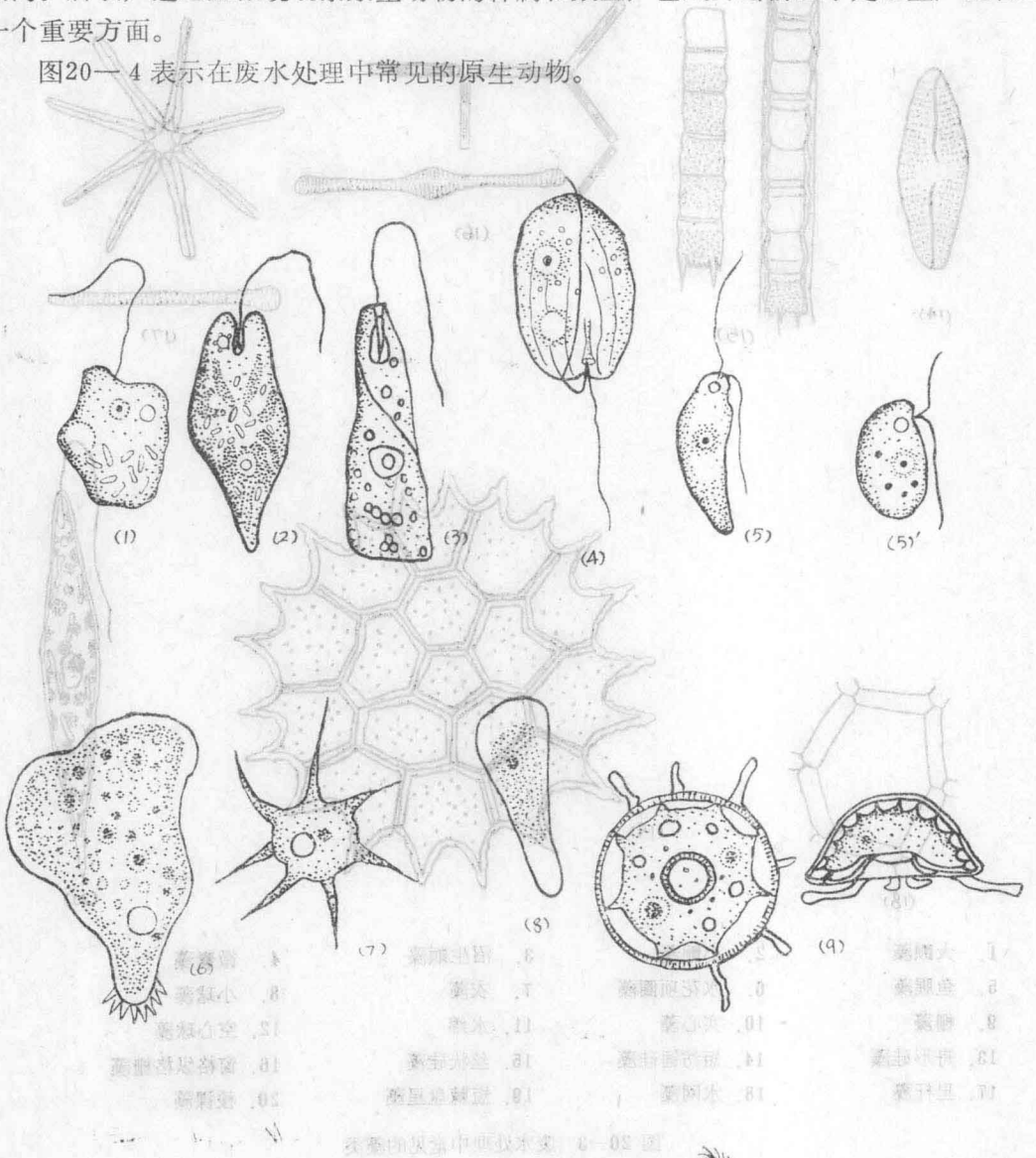
图 20-3 废水处理中常见的藻类

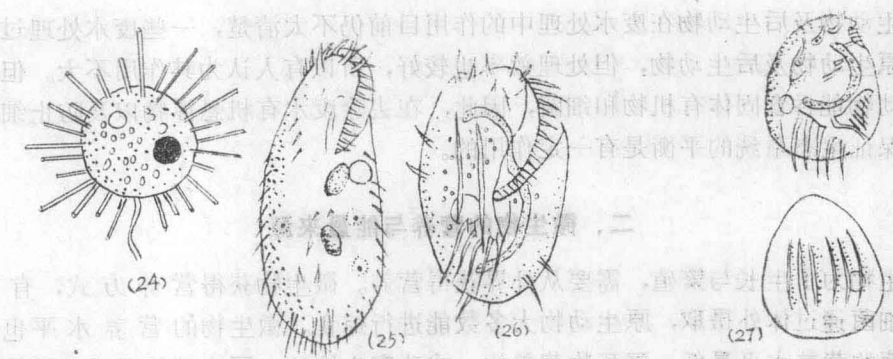
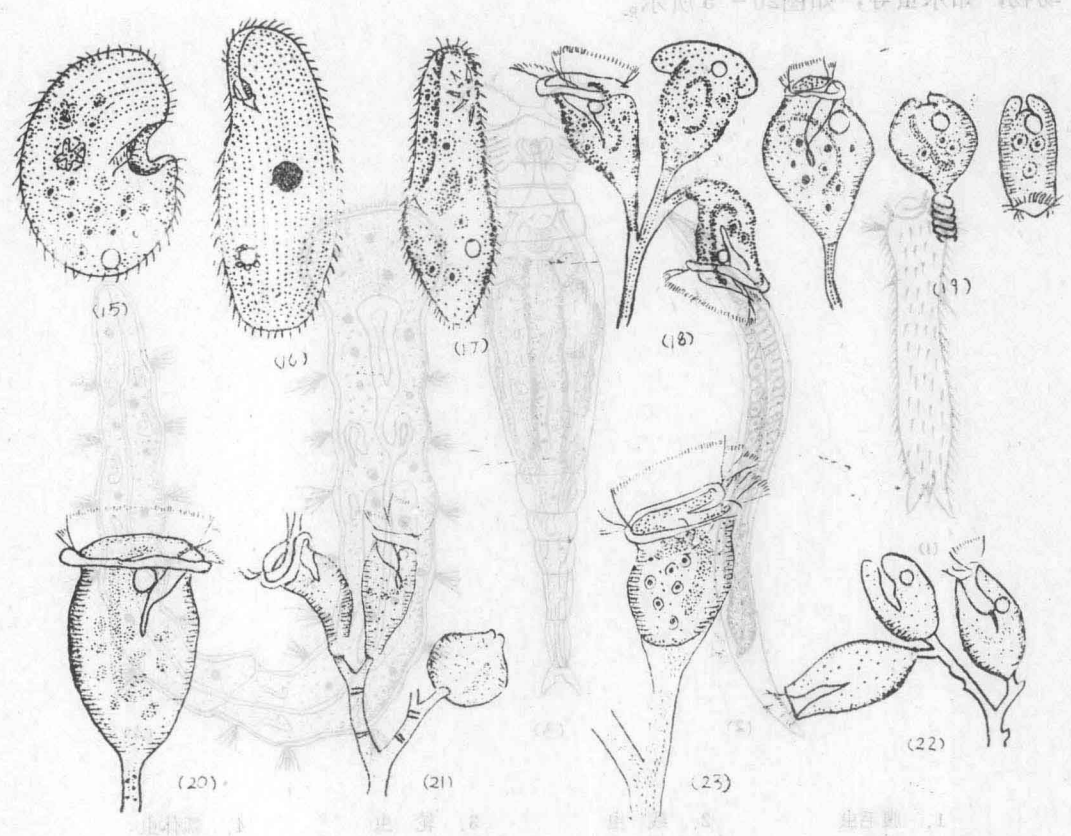
### (三) 原生动物

原生动物是单细胞动物，个体大小不一。原生动物可分为鞭毛类、肉足类和纤毛类几种。其中，鞭毛类动物的营养水平最低，一些植物性鞭毛虫含有色素，能行光合作用。一些动物性鞭毛虫以溶解性有机物为食，另一些却以固型有机物为食。鞭毛虫都有 1~2 根鞭毛作运动的器官，营养的摄取主要靠细胞壁。肉足类动物的细胞没有细胞壁，由于细胞内原形质的流动而伸出伪足，并依靠这些伪足而进行运动，摄食营养物是由伪足包围固型有机物，通过溶解的方式进行的。纤毛类动物的营养水平较高，能直接通过口腔捕食包括细菌在内的悬浮固体。根据纤毛虫的活动能力，分有游泳型和固着型两种。纤毛虫是废水处理过程最常见的原生动物，个体大，一些纤毛虫能通过低倍显微镜

进行辨认。同时，当废水中原生动物主要以固着型纤毛虫为主时，表示废水的处理程度较高。所以，通过显微镜观察原生动物的种属和数量，已成为当前废水处理生产监督的一个重要方面。

图20—4 表示在废水处理中常见的原生动物。





- |          |          |           |          |         |
|----------|----------|-----------|----------|---------|
| 1. 屋滴虫   | 2. 眼虫    | 3. 袋鞭虫    | 4. 内管虫   | 5. 波多虫  |
| 6. 多核变形虫 | 7. 幅射变形虫 | 8. 变形虫    | 9. 表壳虫   | 10. 鳞壳虫 |
| 11. 管叶虫  | 12. 纯漫游虫 | 13. 龙骨漫游虫 | 14. 斜管虫  | 15. 肾形虫 |
| 16. 豆形虫  | 17. 草履虫  | 18. 独缩虫   | 19. 小口钟虫 | 20. 钩钟虫 |
| 21. 累枝虫  | 22. 盖虫   | 23. 聚缩虫   | 24. 吸管虫  | 25. 尖毛虫 |
| 26. 游仆虫  | 27. 橘纤虫  |           |          |         |

图 20-4 废水处理常见的原生动物

(四) 其他后生动物

在废水处理过程中常见的后生动物主要是轮虫、瓢体虫等微型动物，以及一些节枝

动物，如水蚤等，如图20-5所示。

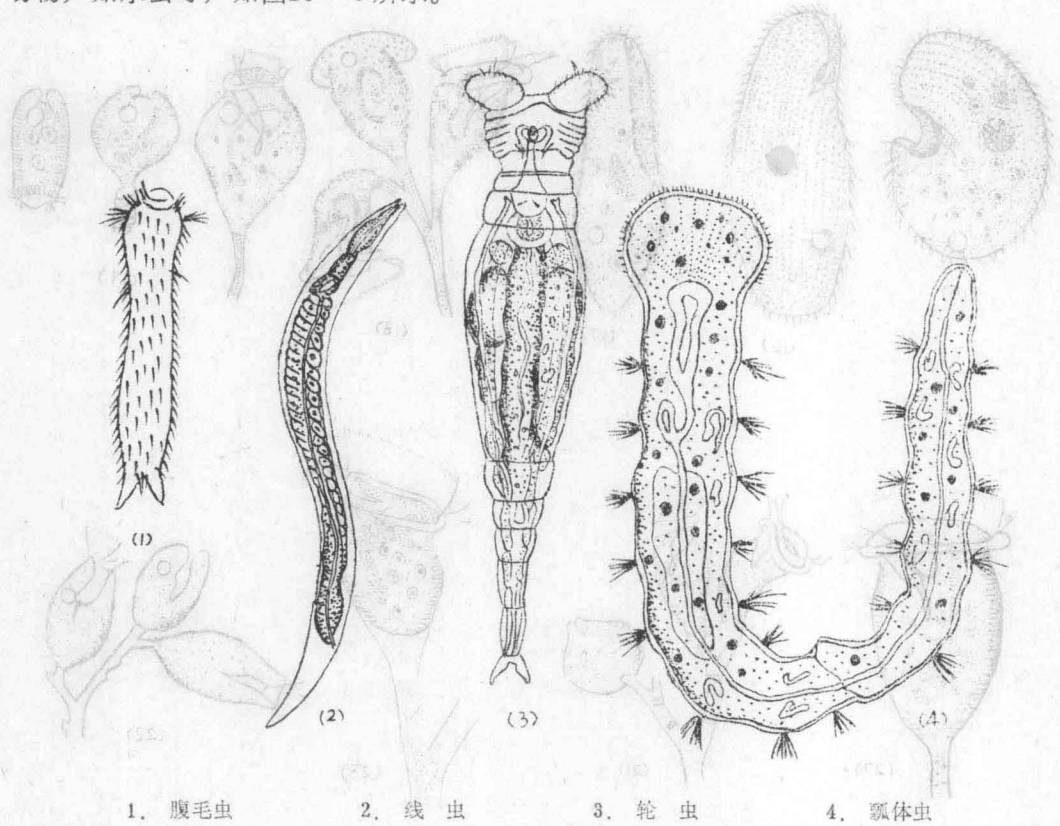


图 20-5 几种后生动物

原生动物及后生动物在废水处理中的作用目前仍不太清楚，一些废水处理过程中，未见到原生动物及后生动物，但处理效率也较好，所以有人认为其作用不大。但是，由于原生动物能吞食固体有机物和细菌，因此，在去除废水有机悬浮物以及防止细菌数量过多，保证生态系统的平衡是有一定作用的。

## 二、微生物的营养与能量来源

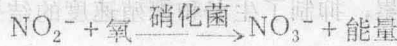
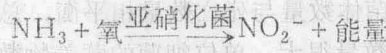
微生物为了生长与繁殖，需要从外界获得营养。微生物获得营养方式，有各种各样，如细菌通过体外摄取，原生动物大多数能进行掠食。微生物的营养水平也大不相同，细菌的营养水平最低，属死物营养的，或称腐生性的；原生动物和后生动物是活物营养的；藻类主要通过光合作用，利用二氧化碳作碳营养源。

就细菌而言，不同种属细菌的营养要求也不同。从表20-1中可见，构成细菌的物质，除了水分之外，主要是碳、氮、磷以及其他元素（硫、氧和其他微量元素），尤其是碳、氮的数量比较大。不同微生物对碳、氮的要求也不同。

根据细菌营养的需要，细菌分为他养细菌（也称异养细菌）和自养细菌。

他养细菌以有机化合物作为生物体合成的能源和碳源，它是腐生性的生物，靠死的或腐烂的有机物质生活。绝大多数细菌以及全部的放线菌、真菌都是他养的。自养细菌以二氧化碳作为唯一碳源并通过氧化无机物取得能量。最常见的自养细菌为硝化细菌、

硫细菌及铁细菌。硝化菌完成以下反应



硫细菌完成的反应为



铁细菌完成的反应为



废水有机污染物无机化是他养细菌利用有机物中碳的结果。所以，在有机废水处理中，起主要作用的是他养细菌。

根根细菌有机体合成，从较低级的有机物或无机物合成为高级的生命物质，如蛋白质，脂肪及多糖类等，都需要吸取能量，根据能量的来源，细菌分为化能型与光能型两种。化能型细菌所需要的能量来自化学物质降解过程所释放的能量。光能型细菌所需要的能量来自光能，这种细菌常称为光合成细菌。

### 三、细菌的生长繁殖及影响因素

废水生物处理过程要求培养一定数量的微生物。有机物降解过程，也是微生物一种连续的培养过程。细菌细胞内原生质的总含量不断增加，个体逐渐长大或菌丝的延长，称为生长。由于细胞分裂，引起细胞数量的增多，称为繁殖。

如果将细菌菌种接种在培养基上，进行培养，随着培养时间的延长，细菌数量的增加将有一定的规律性，以细胞数量的对数值作纵坐标，培养时间作横坐标绘成曲线，这一曲线称为生长曲线（图20—6）。

根据细菌生长曲线所示生长速度，可将整个过程划分为四个生长期。

#### 1. 停滞期（适应期或调态期）

少量菌种接种在培养基后，开始一段时间，细胞数量未增加，生长速度接近于零，称为停滞期。在这个生长期里，主要是细菌适应环境，调整其代谢活动。

#### 2. 对数生长期

当细菌代谢活动经调整，适应其培养环境后，在很高的营养物量条件下，细菌以最高速度繁殖，不受营养物量的限制。

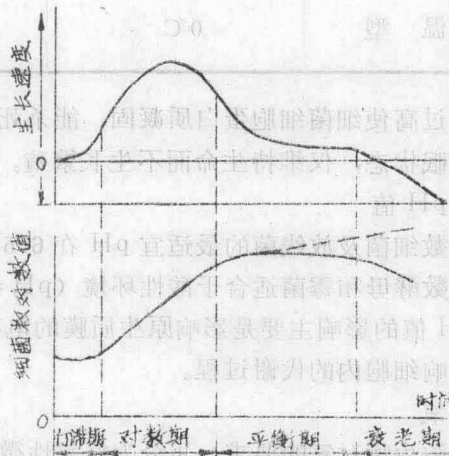


图 20—6 细菌生长曲线

### 3. 恒定期 (稳定期)

在恒定期里, 新繁殖的菌体数量与死亡数量相平衡, 总的活菌数达到恒定。这是由于经上一个生长期后, 细菌数量很大, 单位细菌的营养物数量相对减少, 同时, 有害的代谢产物在培养基中大量积累, 抑制了生长和繁殖速度的结果。

### 4. 衰亡期

在这一生长期里, 细胞死亡速度超过分裂速度, 在群体中活菌数量急剧下降, 有些细菌开始自溶, 培养基中营养物量缺乏。

细菌生长速度除了受营养条件限制外, 还受到其他外界环境因素的影响, 它们同样起着促进或抑制生长繁殖的作用。这些影响因素有:

#### 1. 温度

各类微生物生长所需温度范围不同, 从微生物总体说, 生长温度范围为  $0 \sim 80^{\circ}\text{C}$  之间。根据其生长最适温度, 可分为高温、中温和低温三种, 其最低生长温度、最适生长温度及最高生长温度如下表 20—3。在自然界中以中温型微生物最多。

表 20—3 各类微生物生长的温度范围

类 型	最低温度	最适温度	最高温度
高 温 型	$30^{\circ}\text{C}$	$50 \sim 60^{\circ}\text{C}$	$70 \sim 80^{\circ}\text{C}$
中 温 型	$5^{\circ}\text{C}$	$25 \sim 27^{\circ}\text{C}$	$45 \sim 50^{\circ}\text{C}$
低 温 型	$0^{\circ}\text{C}$	$5 \sim 10^{\circ}\text{C}$	$20 \sim 30^{\circ}\text{C}$

温度过高使细菌细胞蛋白质凝固, 能杀死微生物; 低温时, 因微生物活力被抑制, 而处于休眠状态, 仅维持生命而不生长繁殖。

#### 2. pH 值

大多数细菌及放线菌的最适宜 pH 在  $6.5 \sim 7.5$  之间, pH =  $4.0 \sim 10.0$  之间仍可生长。大多数酵母和霉菌适合于酸性环境 (pH =  $3 \sim 6$ ) 中生长, 其生存范围为  $1.5 \sim 10.0$  之间。pH 值的影响主要是影响原生质膜的电荷, 影响对营养物的吸收, 此外还对酶起作用, 影响细胞内的代谢过程。

#### 3. 氧

根据微生物对氧的要求, 可分为好氧性微生物、厌氧性微生物及兼性厌氧微生物。

好氧微生物要求环境中分子氧, 能进行好氧呼吸。厌氧微生物的生存环境要完全隔绝氧 (大气)。兼性厌氧微生物对氧的要求不严格, 能在有分子氧或无分子氧的环境下生存。

#### 4. 水分与温度

水是微生物生存的必要条件, 环境过于干燥, 微生物就不能生长。无荚膜的细菌或无芽孢的微生物对环境的干燥比较敏感。细菌的芽孢或放线菌、酵母及霉菌的孢子耐旱力较强, 在干燥环境中可以保持几十年。

#### 5. 其他物理与化学因素

光对微生物生长有一定影响，紫外光能起杀菌作用，化学药物、重金属离子对微生物起毒害作用，包括摧毁和破坏细胞结构、干扰细胞的代谢过程或生物合成。如酚和表面活性剂能改变细胞膜的透过性；乙醇能使蛋白质凝固；染料能与核酸结合；重金属抑制酶的作用；氰化物使酶失去活力等。

## 第二节 酶及酶反应

微生物以废水有机物作为营养源，并利用这些营养，进行生长、运动和繁殖。这就必须将这些物质吸入细胞，加以分解，取得能量和合成生物体。物质的转化和能量的释放与吸收都是由许多极其复杂的化学反应完成的。这些反应的迅速完成，条件又如此温和，主要是由于微生物体内存在各种生物催化剂——酶。它就象一般催化剂一样，能催化各种复杂的生物化学反应过程。在酶的作用下降低活化能峰，使这些被反应物质活化。所以人们常把反应物质称为“被酶作用物”有时也称为底质或底物。

酶是由蛋白质和活性原子基团相结合而成的复合蛋白质。活性原子基团一般是非蛋白质部分。非蛋白质部分如果与蛋白质部分结合较紧密时，称之为辅基；结合不牢固时，称之为辅酶。在酶的组成中，蛋白质部分决定催化什么样的底质以及什么样的部位发生反应，辅基与辅酶则是决定催化什么样的化学反应。

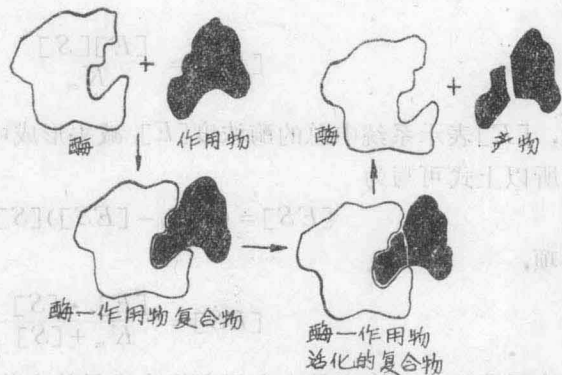


图 20-7 酶反应的模型

酶具有一般无机催化剂相同的性质，但也有其自己的特性。微量酶亦能产生催化效果；它只能促进有关的反应速度，不产生新的反应；反应前后酶不发生变化；酶催化反应具有特异性，有的酶只能对某一种底质的某一种反应起催化作用；酶的耐热性差，温度过高，酶将失去活性，酶催化反应有其最适宜温度；由于蛋白质的特性，决定了酶催化反应有其最适宜的 pH 值，大多数的酶反应最适宜 pH 值在 5~8 之间。

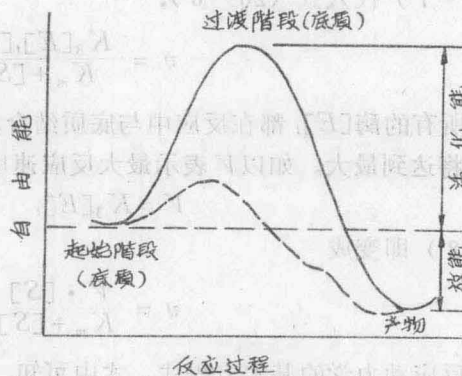
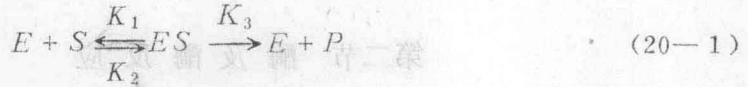


图 20-8 反应过程的能量变化

酶催化作用可以用米凯利斯——门坦(Michaelis—Menten)的中间产物学说加以解释。米氏

认为，在酶催化反应过程的第一阶段是酶与底质结合生成中间复合物，再由中间产物分离出酶和最终产物，通过中间产物降低活化能峰（图20—7、20—8）。

假定用  $E$  表示酶， $S$  表示底质， $ES$  表示中间产物， $P$  表示酶反应最终产物。由中间产物学说，可列出酶反应过程式



其中， $K_1$ 、 $K_2$  及  $K_3$  表示速度常数。如果以  $[ ]$  表示物质浓度，则在平衡状态下，第一阶段

$$K_1[E][S] = K_2[ES] + K_3[ES] \quad (20-2)$$

移项得

$$\frac{K_2 + K_3}{K_1} = \frac{[E][S]}{[ES]} \quad (20-3)$$

用  $K_m$  代表  $\frac{K_2 + K_3}{K_1}$ ，代入上式即得

$$[ES] = \frac{[E][S]}{K_m} \quad (20-4)$$

这里， $[E]$  表示系统中总的酶浓度  $[E]_t$ ，减去形成中间产物的浓度  $[ES]$ ，即游离酶浓度。所以上式可写为

$$[ES] = ([E]_t - [ES])[S]/K_m \quad (20-5)$$

经移项，

$$[ES] = \frac{[E]_t \cdot [S]}{K_m + [S]} \quad (20-6)$$

由于酶的反应速度是由中间产物生成最终产物的速度所决定，如以  $v$  表示反应速度，则

$$v = K_3[ES] \quad (20-7)$$

以式 (20—7) 代入式 (20—6)，

$$v = \frac{K_3[E]_t[S]}{K_m + [S]} \quad (20-8)$$

如果所有的酶  $[E]_t$  都在反应中与底质结合，所生成的中间产物  $[ES]$  将等于  $[E]_t$ ，反应速度将达到最大。如以  $V$  表示最大反应速度，则

$$V = K_3[E]_t$$

式 (20—8) 即变成

$$v = \frac{V \cdot [S]}{K_m + [S]} \quad (20-9)$$

这就是酶反应动力学的基本方程式。式中可知，酶反应速度  $v$ ，取决于底质浓度  $[S]$ 、 $K_m$  及  $V$ 。

式 (20—9) 中  $K_m$  是一个常数，在数值上



$$K_m = \frac{K_2 + K_3}{K_1} \quad (20-10)$$

称之为米氏常数。

当  $K_3 \ll K_2$  时,  $(K_2 + K_3)$  一项中可近似认为等于  $K_2$ , 则

$$K_m = \frac{K_2}{K_1} \quad (20-11)$$

此时,  $K_m$  可认为是  $[ES]$  的解离常数,  $K_m$  越小, 表示  $[ES]$  越易解离, 亦即酶与底质的结合力越大。相反,  $K_m$  越大, 表示酶与底质的结合力越小。不同的底质和酶, 其  $K_m$  值不同。

如果酶促反应中  $K_3$  不是远小于  $K_2$ ,  $K_3$  不可忽略不计,  $K_m$  则不是中间产物  $[ES]$  的单独解离常数, 而是中间产物在整个酶促反应中的复合常数, 常用  $K_m$  表示。

$K_m$  在常数值上等于当实际反应速度为最大反应速度的一半时, 系统的底质浓度, 故亦称半速度系数。即当

$$v = \frac{1}{2} V \quad (20-12)$$

由式 (20-9) 得

$$\frac{1}{2} V = \frac{V[S]}{K_m + [S]} \quad (20-13)$$

$$K_m = [S] \quad (20-14)$$

酶反应基本方程式, 反映出反应速度与底质浓度的关系。在极限情况下, 当  $K_m \ll [S]$ , 底质浓度极高或酶与底质的结合力很大时,

$$v = \frac{V[S]}{K_m + [S]} \approx \frac{V[S]}{[S]} \quad (20-15)$$

$$v = V \quad (20-16)$$

反应速度将达到最大值, 所有酶都参予反应, 反应速度只与酶浓度  $[E]$  有关, 而与底质浓度  $[S]$  无关, 即与  $[S]$  呈零次反应。

当  $K_m \gg [S]$  时, 即底质浓度极低或酶与底质的结合力较小时,

$$v = \frac{V[S]}{K_m + [S]} \approx \frac{V[S]}{K_m} \quad (20-17)$$

反应速度除了与酶浓度  $[E]$  有关外, 还与底质浓度  $[S]$  呈一次反应。

在上述两极限情况之间, 酶反应速度受底质浓度的限制, 底质浓度成为限速因素。根据酶反应方程, 绘出反应速度与底质浓度间的关系曲线, 如图

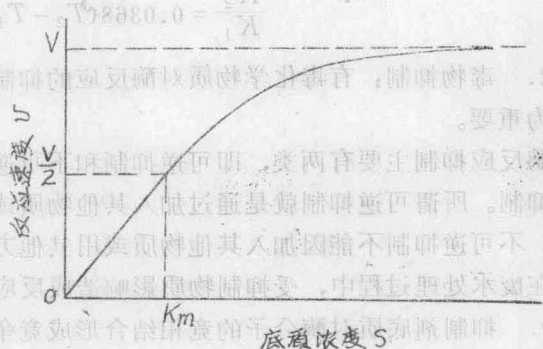


图 20-9 反应速度与底质浓度的关系