

关于环境工程原理 微生物反应器

第一节 微生物与微生物反应

本节的主要内容

- 一、微生物及其特性
- 二、微生物反应及其在污染防治中的利用

第一节 微生物与微生物反应

一、微生物及其特性

(一) 微生物的分类

(二) 微生物的特性

1. 菌体成分（水分含量、元素组成）
2. 细菌细胞的物理性质（大小与大小分布、密度）
3. 微生物培养液的性质

第一节 微生物与微生物反应

二、微生物反应及其在污染防治中的利用

(一) 微生物反应的特点

复杂反应体系

参与微生物反应的主要组分

基质、营养物、活细胞、非活性细胞、分泌产物等。

微生物反应的总反应式（概括式）



第一节 微生物与微生物反应

微生物反
应的类型

- ① 基质利用
- ② 细胞生长
- ③ 细胞死亡/溶化
- ④ 产物生成。

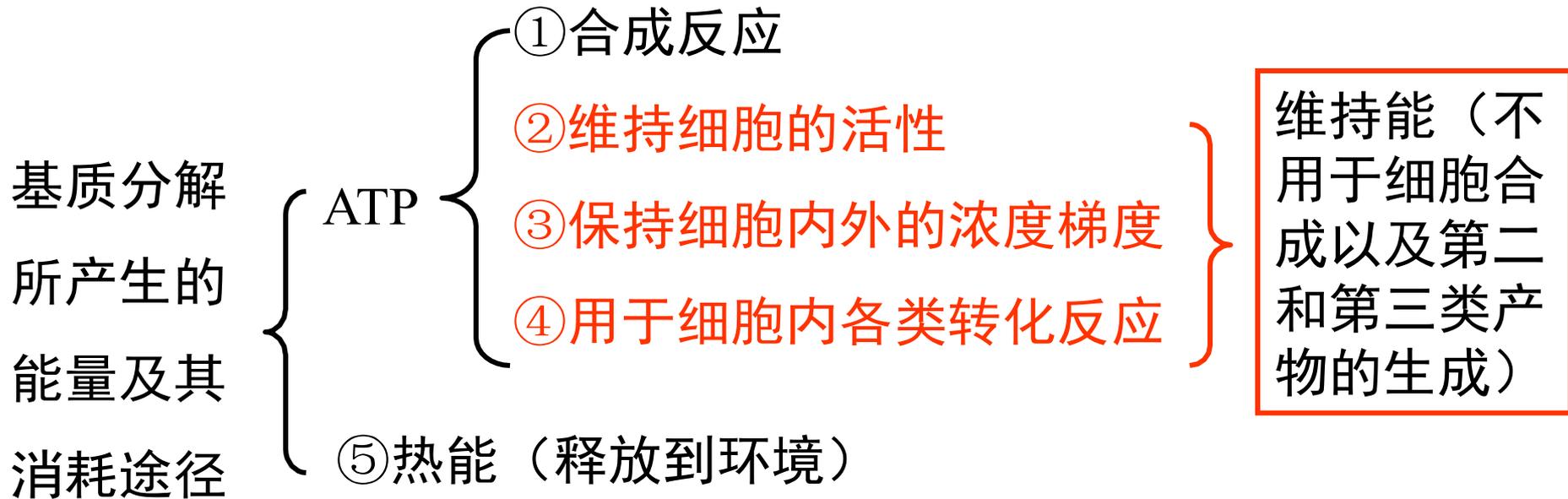
类似于化学
反应中的自
催化反应

第一类产物：基质水平磷酸化产生的产物（如乙醇、乳酸，柠檬酸）。

第二类产物：由合成代谢生成的较复杂的物质（如胞外酶、多糖、抗生素、激素、维生素、生物碱等）

第三类产物：一般指在碳源过量、氮源等受到限制的条件下产生的一类物质（蓄能化合物，如多糖、储存于细胞内的糖原、脂肪等。）

第一节 微生物与微生物反应



第一节 微生物与微生物反应

(二) 微生物反应的影响因素

- 微生物的种类
- 基质的种类和浓度（注意抑制作用）
- 环境条件
- 共存物质（注意刺激效应、抑制作用）

第一节 微生物与微生物反应

(三) 微生物反应在环境领域中的应用

污染物的生物分解与转化

- 污染水体、土壤的修复
- 城市污水及工业废水的生物处理
- 有机废气、挥发性有机物(VOC)及还原性无机气体的生物处理
- 有机废弃物的堆肥处理

工业微生物反应与环境微生物反应器的
不同目的、微生物种类、规模

第一节 微生物与微生物反应

本节思考题

- (1) 为什么说微生物反应类似于化学反应中的自催化反应？
- (2) 微生物反应一般可分为哪几类反应？
- (3) 微生物反应中的基质有哪些作用？
- (4) 微生物反应的产物有哪几类？
- (5) 有机物的微生物分解反应中产生的能量有哪些用途？

第二节 微生物反应的计量关系

本节的主要内容

- 一、微生物反应综合方程
- 二、细胞产率系数
- 三、代谢产物的产率系数

第二节 微生物反应的计量关系

一、微生物反应综合方程

(一) 微生物浓度的表达方式

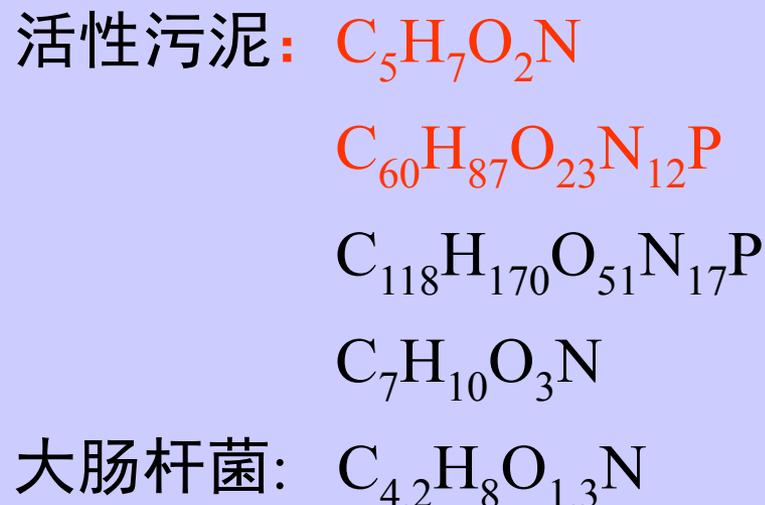
一般用重量浓度表示：单位体积培养液中所含细胞的干燥重量来表示(g-dry cell/L)。

(二) 微生物细胞的组成式

在一定条件下，同一类微生物的细胞元素组成可以视为相对稳定。

表15.2.1

表15.2.2



第二节 微生物反应的计量关系

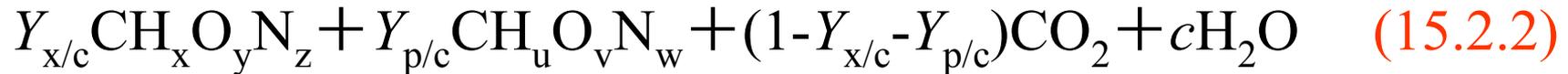
(三) 微生物反应的综合计量式

$$S = Y_x X + Y_p P \quad (15.2.1)$$

产物产率系数(product yield)。

细胞产率系数(cell yield)

好氧微生物反应：



$$a = z Y_{x/c} + w Y_{p/c}$$

$$b = (1 - Y_{x/c} - Y_{p/c} + m/4 - n/2) + (Y_{p/c}/4)(-u + 2v + 3w) + (Y_{x/c}/4)(-x + 2y + 3z) \quad c = m/2 +$$

$$(Y_{p/c}/2)(-u + 3w) + (Y_{x/c}/2)(-x + 3z)$$

第二节 微生物反应的计量关系

计量学限制性物质：

细胞生长过程中首先完全消耗掉的物质

生长速率限制性基质：

在一定的环境条件下，向反应系统中加入某一基质，能使微生物生长速率增加，则该基质被称生长速率限制性基质。（富营养化湖泊的营养限制因子）

第二节 微生物反应的计量关系

二、细胞产率系数

(一) 以基质重量为基准的细胞产率系数 $Y_{x/s}$

反应系统中细胞的生长量（细胞干燥重量）与反应消耗掉的基质的重量之比（单位：g-dry cell formed/g-substrate consumed）

$$Y_{x/s} = \frac{\text{细胞的生长量}}{\text{反应消耗的基质量}} = \frac{\Delta X}{-\Delta S} \quad (15.2.6)$$

$Y_{x/s}$ 值的大小：可能小于1，也可能大于1

第二节 微生物反应的计量关系

表15.2.3 细菌的细胞产率系数

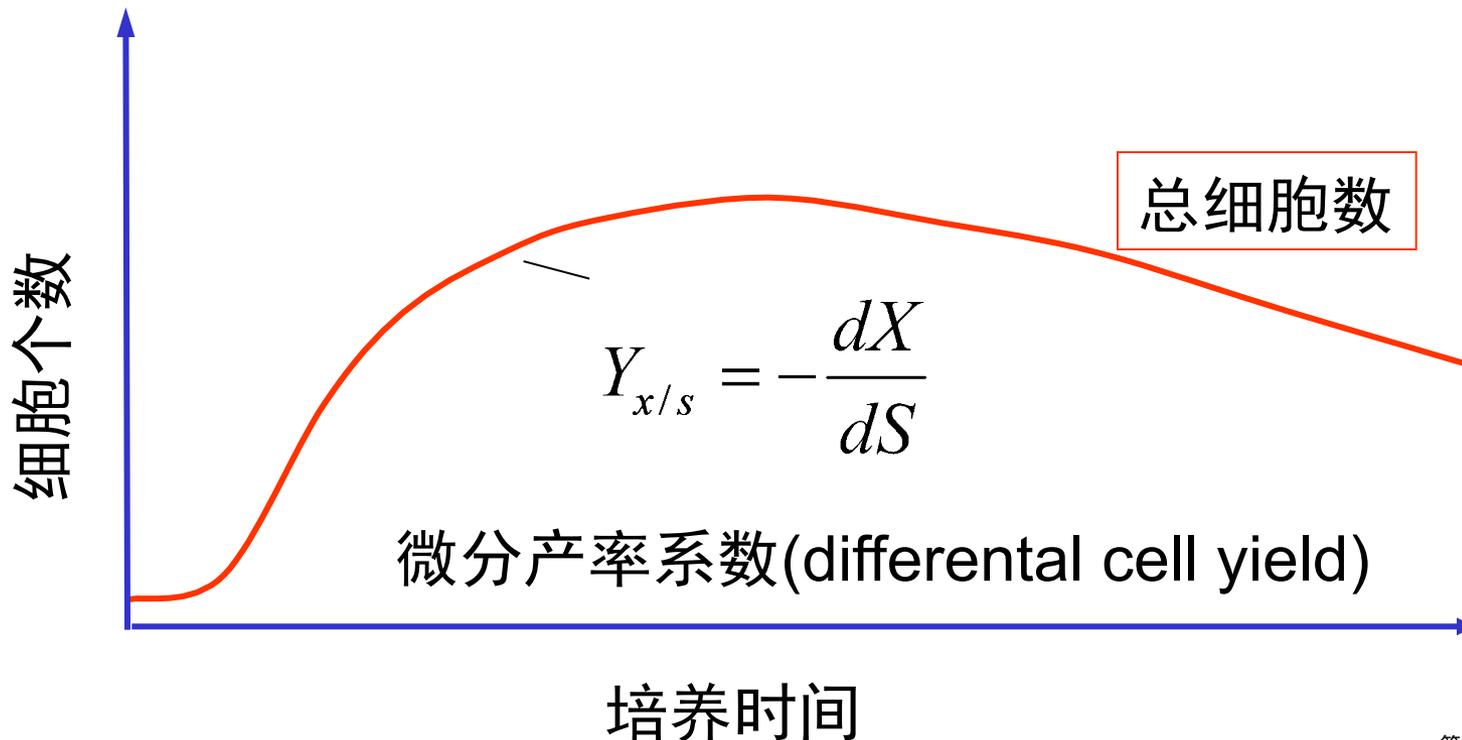
微生物	基质	$Y_{x/s}$ [g·g ⁻¹]
<i>Saccharomyces cereviside</i>	葡萄糖（好氧）	0.53
<i>Saccharomyces cereviside</i>	葡萄糖（厌氧）	0.14
<i>Aerobacter aerogenes</i>	葡萄糖（好氧）	0.40
<i>Aerobacter aerogenes</i>	乳酸	0.18
<i>Aerobacter aerogenes</i>	丙酮酸	0.20
<i>Escherichia Coli</i>	NH ₄ ⁺	3.5
<i>Candida utilis</i>	NH ₄ ⁺	10~22

第二节 微生物反应的计量关系

间歇培养过程中的细胞产率

总产率系数(overall cell yield)

$$Y_{x/s} = \frac{X_t - X_0}{S_0 - S_t}$$



第二节 微生物反应的计量关系

(二) 以碳元素为基准的细胞产率系数

$$Y_{x/c} = \frac{\text{细胞生长量} \times \text{细胞的含碳率}}{\text{碳源消耗量} \times \text{碳源的含碳率}} = \frac{\Delta X \gamma_x}{-\Delta S \gamma_s} = Y_{x/s} \frac{\gamma_x}{\gamma_s}$$

$Y_{x/c}$ 值的大小：只能小于1，一般在0.5—0.7之间。

第二节 微生物反应的计量关系

(三) 以氧消耗量为基准的细胞产率系数

$$Y_{x/o} = \frac{\Delta X}{-\Delta m_{O_2}}$$

好氧微生物反应：



$$Y_{x/o} = Y_{x/c} \frac{12 + x + 16y + 14z}{32b}$$

第二节 微生物反应的计量关系

例题15.2.1

以葡萄糖($C_6H_{12}O_6$)为碳源, NH_3 为氮源, 在好氧条件下培养某细菌, 得到的细胞的元素组成为 $CH_{1.66}O_{0.273}N_{0.195}$ 。设该细菌的 $Y_{x/c}=0.65$, 反应产物只有 CO_2 和水。试计算 $Y_{x/s}$ 和 $Y_{x/o}$ 。

解: 将葡萄糖的元素组成式写为 CH_2O , 且根据题意 $Y_{p/c}=0$, 则微生物反应的计量方程如下:



根据基质和细胞的元素组成可得:

$$Y_s = 12 / (12 + 1 \times 2 + 16 \times 1) = 0.4$$

$$Y_x = 12 / (12 + 1.66 \times 1 + 0.273 \times 16 + 0.195 \times 14) = 0.578$$

第二节 微生物反应的计量关系

根据 $Y_{x/s}$ 与 $Y_{x/c}$ 的关系:

$$Y_{x/s} = Y_{x/c} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_x} = 0.65 \times \frac{0.4}{0.578} = 0.450 \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

由计量方程, 求得各元素的物料衡算式如下:

O的物料衡算: $1+2b=Y_{x/c} \times 0.273+(1-Y_{x/c}) \times 2+c$

N的物料衡算: $a=Y_{x/c} \times 0.195$

H的物料衡算: $2+3a=1.66Y_{x/c}+2c$

解上述联立方程得: $a=0.127, b=0.264, c=0.651$

$$Y_{x/o} = Y_{x/c} \cdot (12+x+16y+14z)/32b = 1.60 \text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

第二节 微生物反应的计量关系

(四) 以ATP为基准的细胞产率系数

以基质分解反应生成的ATP量为基准表示细胞的产率

$Y_{x/ATP}$ (单位: g-cell/mol-ATP) 定义为:

$$Y_{x/ATP} = \frac{\Delta X}{\Delta n_{ATP}} = \frac{Y_{x/s} M_s}{Y_{ATP/s} Y_E} \quad (15.2.13)$$

每消耗1mol的基质实际产生的ATP量

Y_e : 消耗基质中用于产能的比率

$$Y_E = 1 - Y_{x/c}$$

$Y_{ATP/s}$: 1mol的基质全部用于产能时产生的ATP量

第二节 微生物反应的计量关系

$$Y_{x/ATP} = \frac{Y_{x/s} M_s}{Y_{ATP/s} (1 - Y_{x/c})} \quad (15.2.15)$$

$$Y_{x/ATP} = \frac{Y_{x/s} M_s}{Y_{ATP/s} \left(1 - \frac{\gamma_x}{\gamma_s} Y_{x/s}\right)} \quad (15.2.16)$$

$$Y_{x/s} = \frac{Y_{x/ATP} Y_{ATP/s}}{M_s + Y_{x/ATP} Y_{ATP/s} \frac{\gamma_x}{\gamma_s}} \quad (15.2.17)$$

$Y_{x/ATP} = 8\sim 11$, 平均10

利用该式可以从理论上计算细胞产率系数

第二节 微生物反应的计量关系

例题15.2.2

某假单胞菌在好氧条件下，以葡萄糖为基质时的细胞产率系数为： $Y_{x/s}=180$ g-cell/mol-glucose， $Y_{x/o}=30.4$ g-cell/mol- O_2 ，若基质水平磷酸化的ATP生成量为2 mol(ATP)/mol-glucose，呼吸链反应的ATP生成量 $Y_{ATP/O}$ （1摩尔氧原子生成的ATP的摩尔数）为1。试求出 $Y_{x/ATP}$ 。

解：1mol葡萄糖生成的菌体量 ΔX 为：

$$\Delta X=1.0 \cdot Y_{x/s}=1.0 \times 180=180 \text{ g-cell}$$

1mol葡萄糖糖酵解产生的ATP量：2 mol

第二节 微生物反应的计量关系

1mol葡萄糖经呼吸链产生的ATP量:

$$Y'_{ATP/S} = \frac{\Delta n_{ATP}}{-\Delta S} = \frac{\Delta n_{ATP}}{\Delta n_{O_2}} \cdot \frac{\Delta n_{O_2}}{-\Delta S} = 2 \cdot Y_{ATP/O} \cdot \frac{\Delta n_{O_2}}{-\Delta S} = 2 \cdot Y_{ATP/O} \cdot \frac{\Delta X}{-\Delta S} \cdot \frac{\Delta n_{O_2}}{\Delta X}$$

$$= 2 \cdot Y_{ATP/O} \cdot Y_{x/s} / Y_{x/o} = 2 \times 1 \times 180 / 30.4 = 11.8 \text{ mol-ATP/mol-glucose}$$

1mol葡萄糖分解所产生的总ATP量: $2 + 11.8 = 13.8 \text{ molATP}$

$$Y_{x/ATP} = \frac{180 \text{ g-cell}}{13.8 \text{ mol-ATP}} = 13.0 \text{ g-cell/mol-ATP}$$

第二节 微生物反应的计量关系

(五) 以有效电子数为基准的细胞产率系数

以有效电子(available electron)为基准的细胞产率系数

$Y_{x/av.e^-}$ (单位: g-cell/mol-av.e⁻):

$$Y_{x/av.e^-} = \frac{\text{细胞生长量}}{\text{消耗基质的有效电子数}} = \frac{\Delta X}{\Delta n_{av.e^-}}$$

$$Y_{x/av.e^-} = \frac{Y_{x/s} M_s}{4\Delta n_{O_2}} \quad (15.2.20)$$

$$\Delta n_{av.e^-} = \frac{\Delta S}{M_s} 4\Delta n_{O_2}$$

Δn_{O_2} : 每摩尔的基质完全燃烧时需要的氧的摩尔数

第二节 微生物反应的计量关系

例题15.2.3

已知某细菌在以葡萄糖为基质时的 $Y_{x/s}=0.404$ g-cell/g-glucose, 试求 $Y_{x/av.e}$

解：葡萄糖的分子量 $M_s=12\times 6+1\times 12+16\times 6=180$

葡萄糖完全燃烧时的需要量 $\Delta n_{O_2}=6\text{mol-O}_2/\text{mol-glucose}$

$$\text{故： } Y_{x/av.e} = \frac{Y_{x/s} \cdot M_s}{4 \cdot \Delta n_{O_2}} = \frac{0.404 \times 180}{4 \times 6} = 3.03 \text{ g-cell/mol-av.e}^-$$

第二节 微生物反应的计量关系

三、代谢产物的产率系数

代谢产物的产率系数($Y_{p/s}$)定义为:

$$Y_{p/s} = \frac{\text{代谢产物生成量}}{\text{基质消耗量}} = \frac{\Delta P}{-\Delta S} = \frac{r_p}{-r_s} \quad (15.2.21)$$

以碳元素为基准的代谢产物的产率系数 $Y_{p/c}$:

$$Y_{p/c} = \frac{\text{代谢产物生成量} \times \text{产物含碳率}}{\text{基质消耗量} \times \text{基质含碳率}} = Y_{p/s} \frac{\gamma_p}{\gamma_s} \quad (15.2.22)$$

第二节 微生物反应的计量关系

本节思考题

- (1) 什么是计量学限制性基质？
- (2) 什么是生长速率限制性基质？
- (3) 细胞产率系数有哪些用途？
- (4) 细胞产率系数有哪几种？它们取值范围各是什么？
- (5) 什么是有效电子？如何计算？
- (6) 什么是代谢产物的产率系数？

第三节 微生物反应动力学

本节的主要内容

- 一、微生物生长速率
- 二、基质消耗速率
- 三、微生物生长速率与基质消耗速率的关系
- 四、代谢产物的生成速率

第三节 微生物反应动力学

一、微生物生长速率

(一) 微生物的生长速率的定义

$$r_x = \frac{dX}{dt} = \mu X \quad (15.3.1)$$

X : 活细胞浓度(mg/L)

μ : 比生长速率(specific growth rate, 1/h)

$$\mu = \frac{dX}{dt} \frac{1}{X} \quad \mu = \frac{\ln 2}{t_d} = \frac{0.693}{t_d}$$

T_d : 倍增时间(doubling time)

第三节 微生物反应动力学

例题15.3.1

用50mL的培养液培养大肠杆菌，大肠杆菌的初期总量为 8×10^5 cell，培养开始后即进入对数生长期（无诱导期）。在284min后达到稳定期（细胞浓度 3×10^9 cell/mL），试求大肠杆菌的 μ 和 t_d 。（设在培养过程中 μ 保持不变）

解：开始时的细胞浓度 $X_0 = 8 \times 10^5 / 50 = 1.6 \times 10^4$ cell/mL。

根据细胞增长方程

$$\mu = \frac{dX}{dt} \cdot \frac{1}{X} \qquad \mu dt = \frac{dX}{X}$$

第三节 微生物反应动力学

设培养过程中 μ 保持不变，则

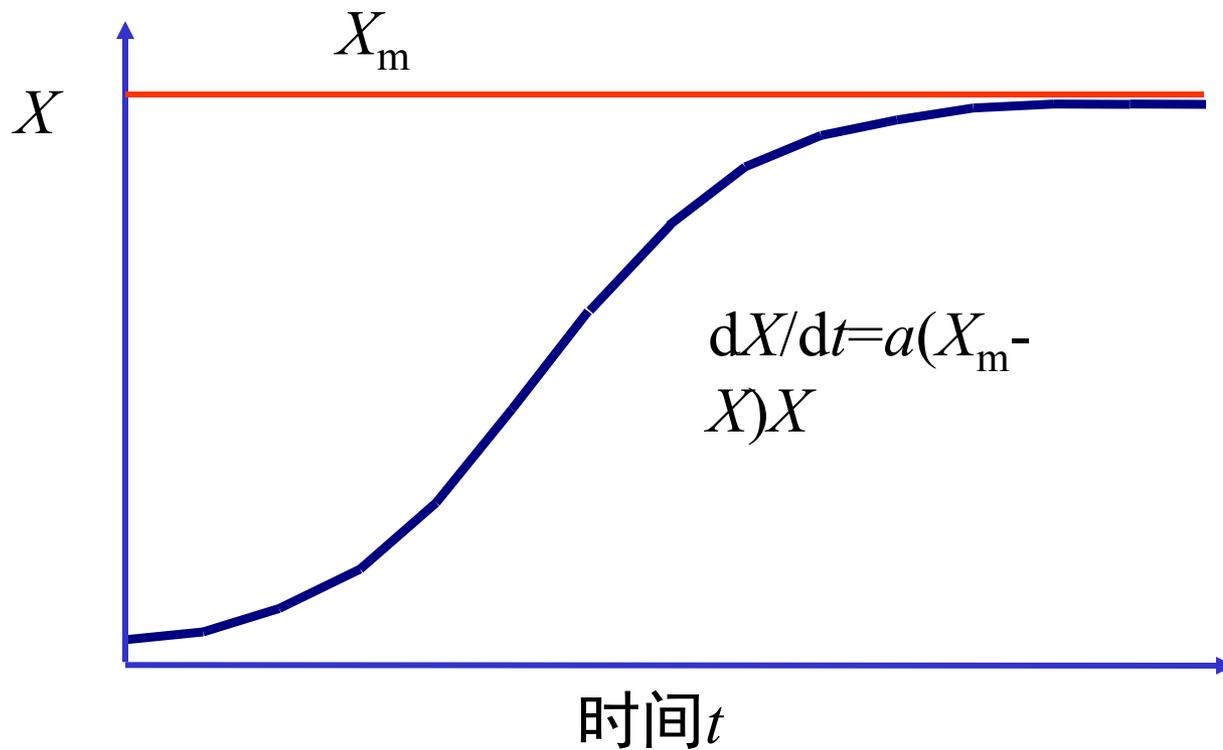
$$\mu t = \ln\left(\frac{x}{x_0}\right)$$

$$\mu = \frac{\ln(x/x_0)}{t} = \frac{\ln(3 \times 10^9 / 1.6 \times 10^4)}{284/60} = 2.5 \text{h}^{-1}$$

$$t_d = \frac{0.693}{\mu} = \frac{0.693}{2.5} = 16.6 \text{min}$$

第三节 微生物反应动力学

微生物的Logistic增长曲线

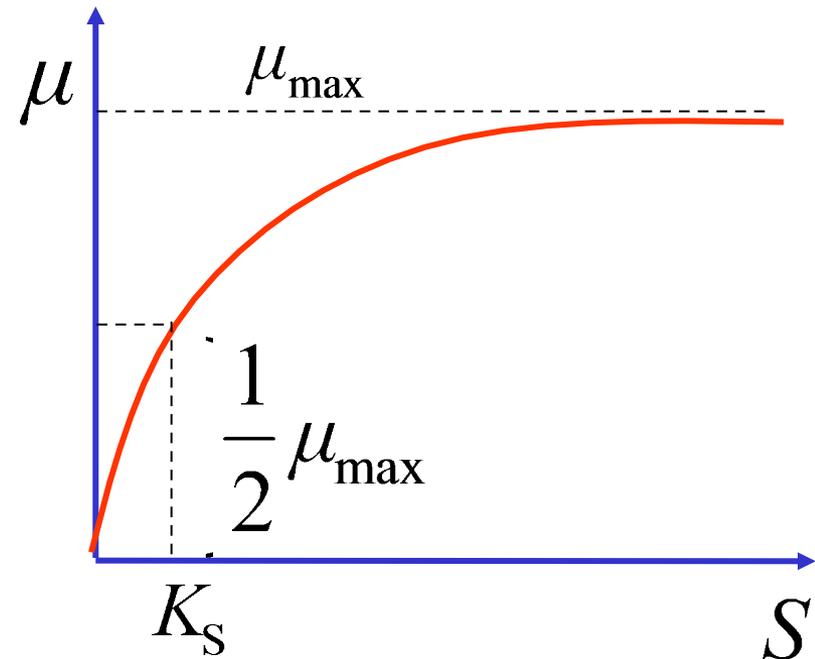


第三节 微生物反应动力学

(二) 微生物生长速率与基质浓度的关系

Monod (莫诺特) 方程

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S}$$



S : 生长限制性基质的浓度(mg/L)

μ_{\max} : 最大比生长速率(1/h)

K_s : 饱和系数(mg/L)。 K_s 与 $\mu = \mu_{\max}/2$ 时的 S 值相等

第三节 微生物反应动力学

Monod方程成立的假设条件

- ①随着细胞重量的增加，细胞内所有物质如蛋白质、RNA、DNA、水分等以同样的比例增加，即细胞内各组分含量保持不变。这种生长称为**协调型生长**（balanced growth）。
- ②系统中各细胞具有相同的生理生化特性，或不考虑细胞间的差异，即用平均性质和量来描述。
- ③培养系统中**只存在一种生长限制性基质**，其它成分过量存在且不影响微生物的生长。
- ④在培养过程中，**细胞产率不变，为一常数**。

第三节 微生物反应动力学

Monod方程与麦氏(Michaelis-Menten)方程的区别

- Michaelis-Menten方程中的 K_s 有明确的物理意义（与基质和酶的亲和力有关），而Monod方程中的 K_s 仅是一个试验值。
- Michaelis-Menten方程有理论推导基础，而Monod方程是纯经验公式，没有明确的理论依据。

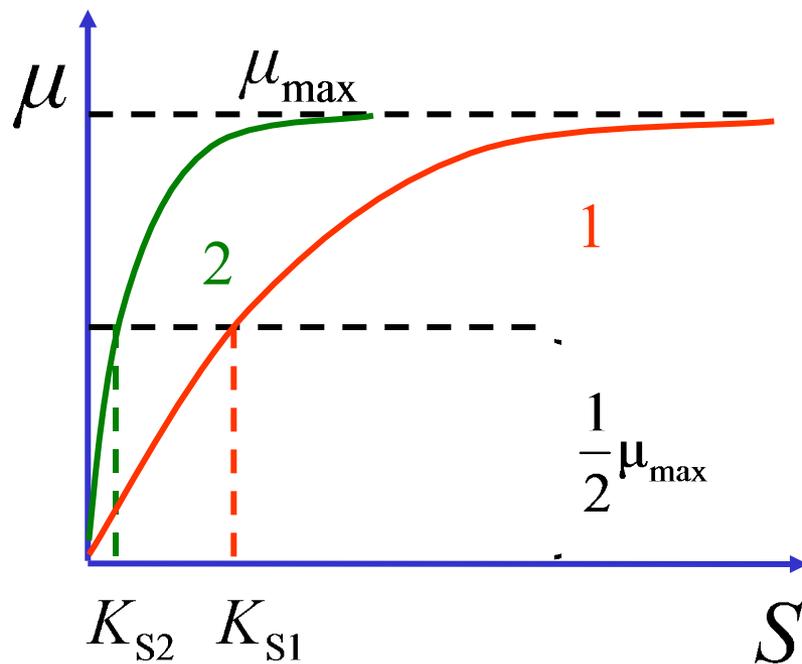
第三节 微生物反应动力学

富营养细胞 (Eutroph) 与贫营养细胞 (Oligotroph) 的比较

富营养细胞: K_s 值较大, 在低基质浓度时的生长速率低。

贫营养细胞: K_s 值较小, 在低基质浓度时的亦能快速生长。

即能使基质消耗到很低的水平。



环境治理中哪种微生物比较理想?

第三节 微生物反应动力学

维持代谢(maintenance metabolism)

自呼吸/内源呼吸(endogenous metabolism)现象

由Monod方程可知, $S > 0$, 则 $\mu > 0$

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S}$$

实际上, $S < S_{\min}$ 时, $\mu = 0$ (观察不到微生物的生长)

该现象由维持代谢或自呼吸/内源呼吸引起

考虑维持代谢时的微生物生长速率方程:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} - b$$

b : 自我衰减系数(1/h)

第三节 微生物反应动力学

两种生长限制性基质共存时的生长速率方程

当两种基质 S_1 和 S_2 均为限制性基质时，微生物的比增长速率可表示为：

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S_1}{K_{s1} + S_1} \frac{S_2}{K_{s2} + S_2} \quad (15.3.5)$$

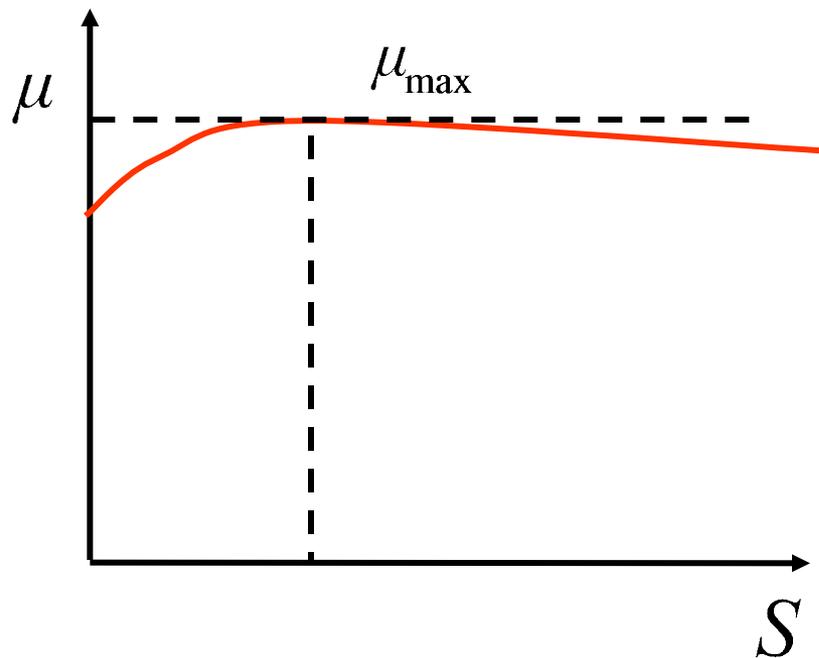
第三节 微生物反应动力学

(三) 抑制性物质共存时的生长速率方程

1. 基质抑制

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S + S^2 / K_i} \quad (15.3.7)$$

Haldane Equation



常见的抑制性基质：苯酚、氨、醇类

2.代谢产物抑制

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{(K_s + S)(1 + P / K_p)} \quad (15.3.8)$$

P : 代谢产物抑制系数(mg/L)

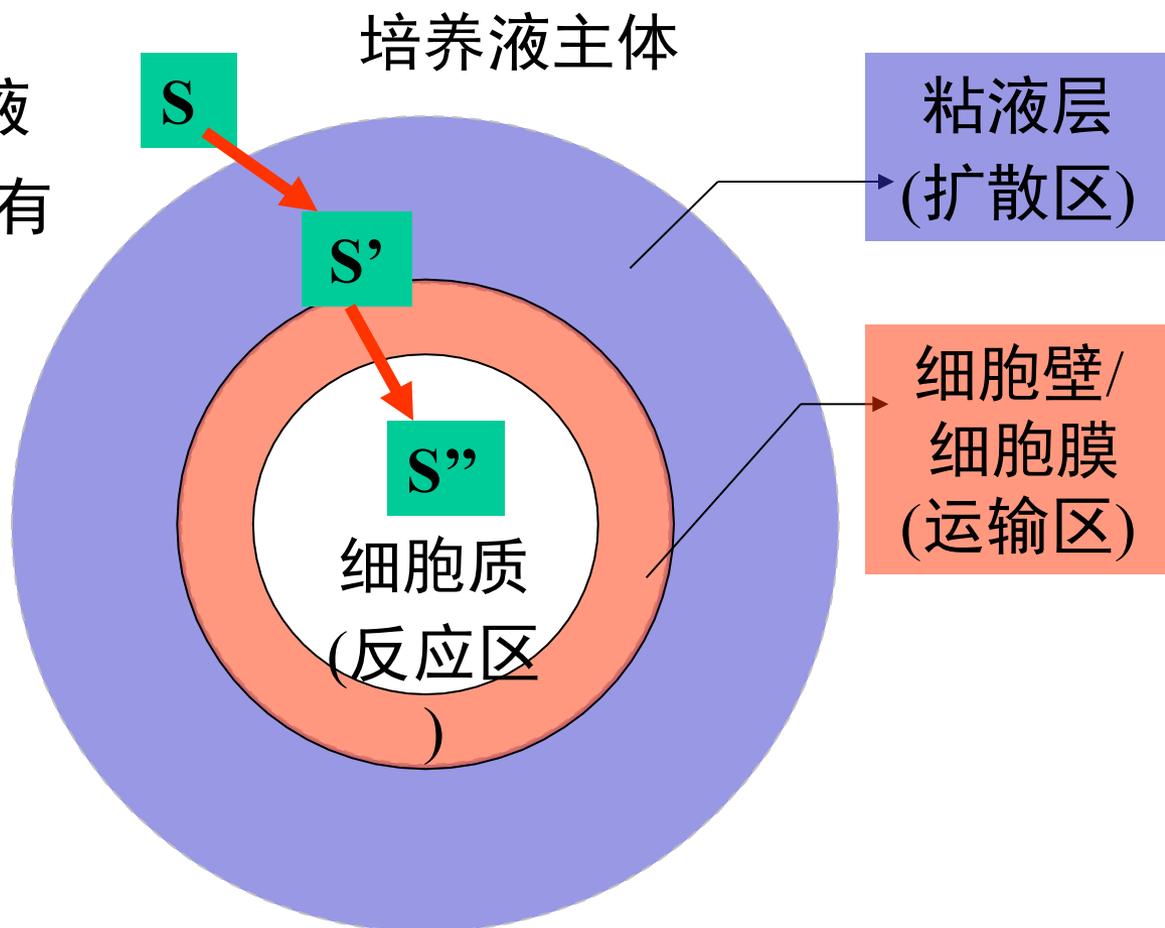
K_p : 代谢产物抑制系数(mg/L)

该关系式也适合于其它共存物质（非基质）

二、基质消耗速率

(一) 基质消耗反应的微观步骤

- ① 从培养液主体穿过粘液层，到达细胞壁表面(有时伴随着水解反应)
- ② 细胞壁表层的基质产物进入细胞质
- ③ 进入细胞质（反应区）的基质，在细胞内被分解。



第三节 微生物反应动力学

(二) 分散体系的基质消耗速率

1. 基质消耗速率的表达式

基质消耗速率(volumetric substrate consumption rate)

比基质消耗速率
(specific substrate consumption rate, $-v_s$)

细胞(表观)产率系数

$$-r_s = \frac{1}{Y_{x/s}} r_x = \frac{1}{Y_{x/s}} \mu X \quad (15.3.12)$$

$$-v_s = \frac{-r_s}{X} \quad \text{定义式}$$

$$-v_s = \frac{1}{Y_{x/s}} \mu \quad (15.3.14)$$

第三节 微生物反应动力学

当 μ 可以用Monod方程表达时, (15.3.14)可改写为:

$$-v_s = \frac{\mu_{\max}}{Y_{x/s}} \frac{S}{K_s + S} = v_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (15.3.15)$$

最大比基质消耗速率

式中 v_{\max} 为最大比基质消耗速率。

第三节 微生物反应动力学

2.考虑维持代谢的基质消耗速率表达式

基质消耗速率= 用于微生物生长的消耗速率
+用于维持细胞活性的消耗速率

$$-r_s = \frac{1}{Y_{x/s}^*} r_x + m_x X$$

(15.3.16)

$$-v_s = \frac{1}{Y_{x/s}^*} \mu + m_x$$

(15.3.17)

细胞**真实**产率系数

第三节 微生物反应动力学

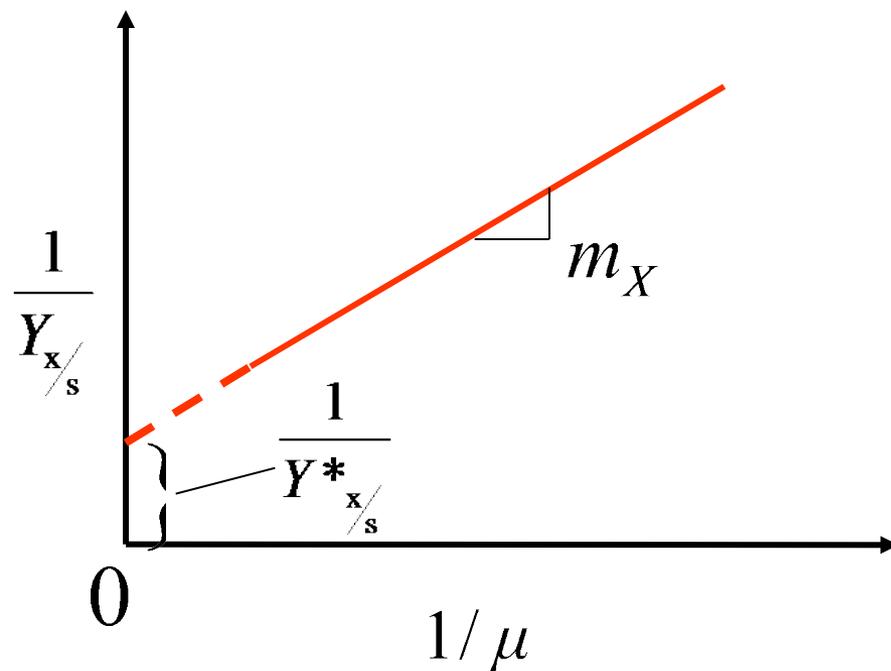
$$-v_s = \frac{1}{Y_{x/s}^*} \mu + m_x \quad (15.3.17)$$

$$-v_s = \frac{1}{Y_{x/s}} \mu \quad (15.3.14)$$



$$\frac{\mu}{Y_{x/s}} = \frac{\mu}{Y_{x/s}^*} + m_x \quad (15.3.18)$$

$$\frac{1}{Y_{x/s}} = \frac{1}{Y_{x/s}^*} + \frac{1}{\mu} m_x \quad (15.3.19)$$



第三节 微生物反应动力学

例题15.3.2

以葡萄糖为唯一碳源，在好氧条件下（30℃，pH 7.0）用连续培养槽培养固氮菌*Azotobacter Vinelandii*，通过改变稀释率，测定不同 μ 时的 $Y_{x/s}$ 的数据如下：

μ (1/h)	0.303	0.270	0.250	0.167	0.137	0.11
$Y_{x/s}$ (g-cell/g-glucose)	0.053	0.049	0.047	0.034	0.029	0.024
$1/\mu$						
$1/Y_{x/s}$						

试求出该固氮菌的细胞真实产率系数 $Y_{x/s}^*$ 和维持系数 m_x 。

第三节 微生物反应动力学

解：根据

$$\frac{1}{Y_{x/s}} = \frac{1}{Y_{x/s}^*} + \frac{1}{\mu} m_x$$

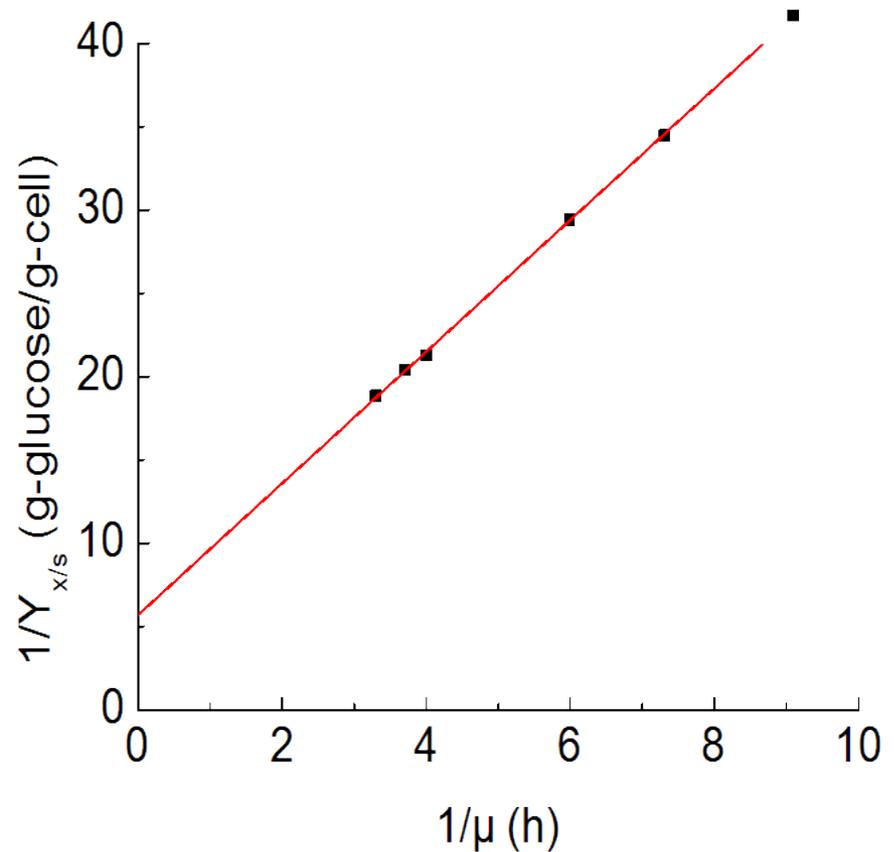
对 $1/Y_{x/s} \sim 1/\mu$ 作图得一直线。

该直线的截距为5.5，

故 $Y_{x/s}^* = 1/5.5 = 0.18$ g-cell /g-glucose；

直线的斜率为4，

故 $m_x = 4$ g-glucose/g-cell。



第三节 微生物反应动力学

3. 氧摄取速率

$$-r_{O_2} = \frac{1}{Y_{x/o}^*} r_x + m_{x,O_2} X$$

$$-v_{O_2} = \frac{1}{Y_{x/o}^*} \mu + m_{x,O_2}$$

m_{x,O_2} ——维持系数, kg-O₂ consumed/(kg-cell·h);

$-v_{O_2}$ ——比氧消耗速率, kg-O₂ consumed/(kg-cell·h)。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/858124053015007010>