

脱氮除磷与城市污水深度处理

第一节、概述

第二节、生物脱氮 

第三节、磷的去除 

第四节、同步生物脱氮除磷 

第五节、城市污水深度处理 

第一节、概述

□ N、P的来源

1. 农田化肥
2. 牲畜粪便
3. 污水灌溉
4. 城镇地表径流
5. 矿区地表径流
6. 大气沉降
7. 水体人工养殖

富营养化

氮、磷等植物营养物质含量过多所引起的水质污染现象。





基本控制项目最高允许排放浓度（日均值）

GB 18918—2002，城镇污水处理厂污染物排放标准

序号	基本控制项目		一级标准		二级标准	三级标准
			A 标准	B 标准		
1	化学需氧量（COD）		50	60	100	120 ^①
2	生化需氧量（BOD ₅ ）		10	20	30	60
3	悬浮物（SS）		10	20	30	50
4	动植物油		1	3	5	20
6	石油类		1	3	5	15
7	阴离子表面活性剂		0.5	1	2	5
8	总氮（以N计）		15	20	—	—
9	氨氮（以N计） ^②		5(8)	8(15)	25(30)	—
10	总磷 （以P计）	2005年12月31日前建设	1	1.5	3	5
		2006年1月1日起建设的	0.5	1	3	5

脱氮除磷

➤ 物化法

➤ 沸石选择性交换吸附、石灰法、折点氯化脱氮、空气吹脱法、化学沉淀

➤ 生物法

➤ 生物脱氮除磷



第二节、生物脱氮

- 生物脱氮原理及其影响因素
- 生物脱氮工艺
 - 传统三段生物脱氮工艺 ▶
 - 两段生物脱氮工艺
 - A_1/O (Anoxic/Oxic)生物脱氮工艺流程及其设计

有机废水中含氮物质

- 有机氮：蛋白质、多肽、氨基酸、胞壁酸、尿素
- 无机氮：氨氮、亚硝态氮和硝态氮

来源	氨氮浓度 (mg/L)	来源	氨氮浓度 (mg/L)
酒厂废水	5-380	谷物加工	45
制革废水	83-159	咖啡废水	11-78
纸浆废水	264	乳品废水	5-625
木材防腐工业	32	土豆加工	5-40
铝二次冶炼	0.3-350	合成橡胶废水	31-76
二硫化钠生产	260	胶合板	397-450
印刷电路板	300+	动物胶	78

生物脱氮原理及影响因素

- 氨化反应
- 硝化反应
- 反硝化反应

1. 氨化反应

有机氮化合物在好氧菌和氨化菌的作用下：

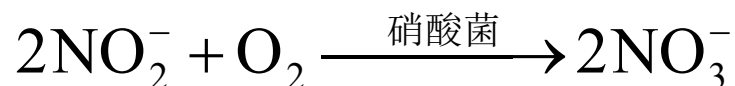
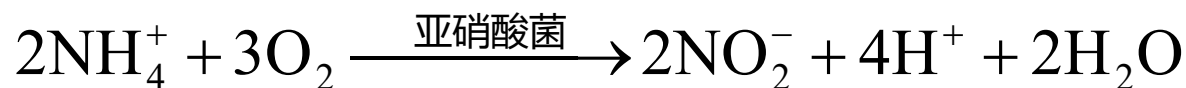
- 有机碳被降解为 CO_2
- 有机氮被分解转化为氨氮



2. 硝化反应

好氧

硝化菌将氨态氮进一步分解氧化，使 NH_4^+ 转化为硝酸盐氮。



14

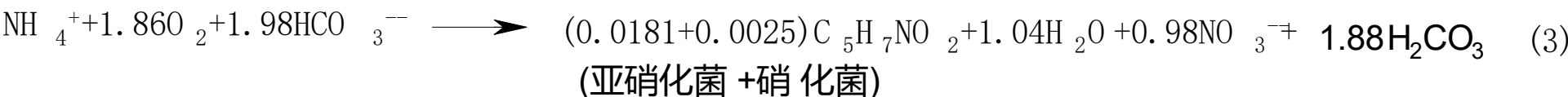
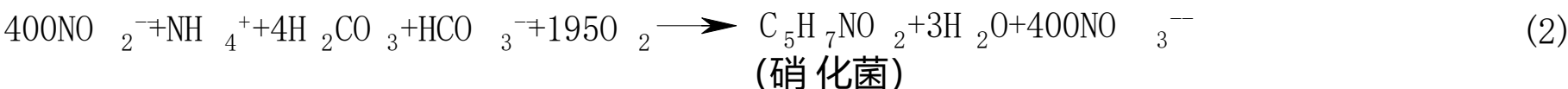
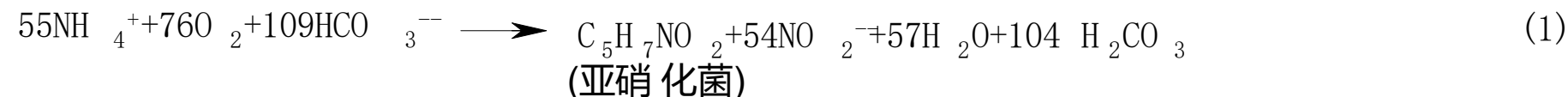
64

1 g

4.57g

硝化需氧量
(NOD)

2. 硝化反应(con'd)



根据(3)式，每氧化1g $\text{NH}_3\text{-N}$ ：

- 消耗**7.07g**碱度(以 CaCO_3 计)
- 合成**0.17g**新细胞。

硝化过程的影响因素

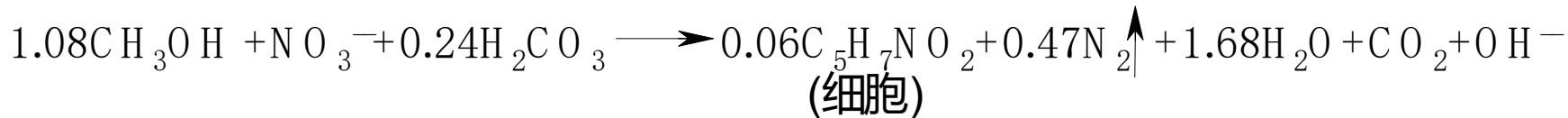
- **溶解氧**: 1.2~2.0mg/L
- **pH**: 8.0~8.4
- **有机物含量**: 不应过高
 - **BOD**值过高, 将使增殖速度较快的异养型细菌迅速增殖, 限制硝化菌增殖
- **适宜温度**: 20~30°C
- **硝化菌在反应器内的停留时间**: >最小世代时间
(在适宜的温度条件下为3d)
- **有毒物质**: 重金属、高浓度的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、高浓度的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 、高浓度的有机基质、部分有机物以及络合阳离子等。

3. 反硝化反应

缺氧

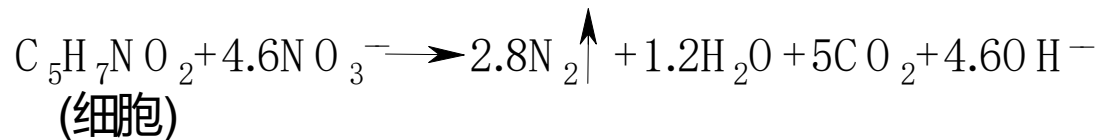
- 在缺氧状态下，利用反硝化菌将硝酸盐和亚硝酸盐转化成 N_2

- 外源反硝化：外来碳源



每利用1g NO_3^- -N，消耗2.47g 甲醇(约合3.7g COD)，产生0.48g 新细胞和3.57g 碱度。

- 内源反硝化：以机体内的有机物为碳源



- 总反应式：

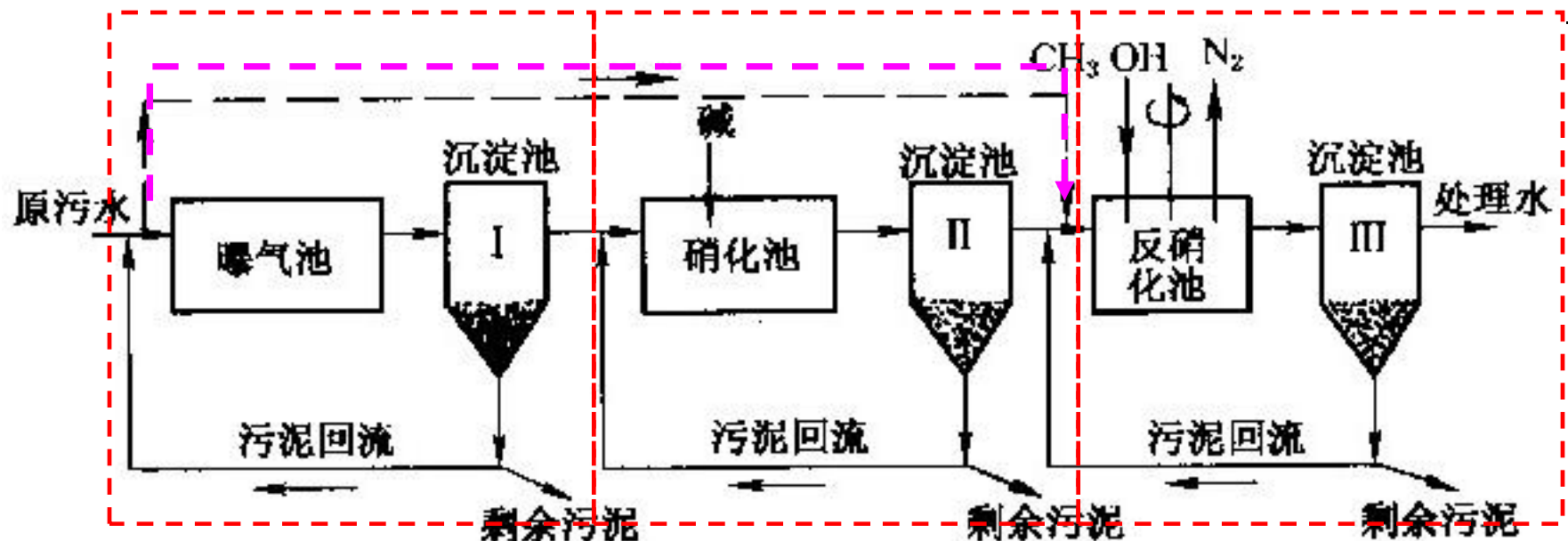


反硝化过程的影响因素

- 碳源: BOD_5 : TN之比大于4
- pH: 最适宜的pH是6.5~7.5。
- 溶解氧浓度: $\leq 0.5 \text{ mg/L}$ 。
- 温度: $20\sim 40^\circ\text{C}$ 。



传统三段生物脱氮工艺



Barth 三段生物脱氮工艺

三级生物脱氮工艺的主要特点

□ 优点

- 氨化、硝化和反硝化分别在各自的反应器内进行，并各自回流在沉淀池分离的污泥，过程控制明确，反应速度快且反应进行较彻底，脱氮效果较好。

□ 缺点：

- 流程长，构筑物多，基建费用高；
- 需要外加碱和碳源，运行费用高；
- 出水中往往存在一定量的甲醇，形成BOD₅及COD，需要后曝气池加以去除；
- 管理较为复杂。

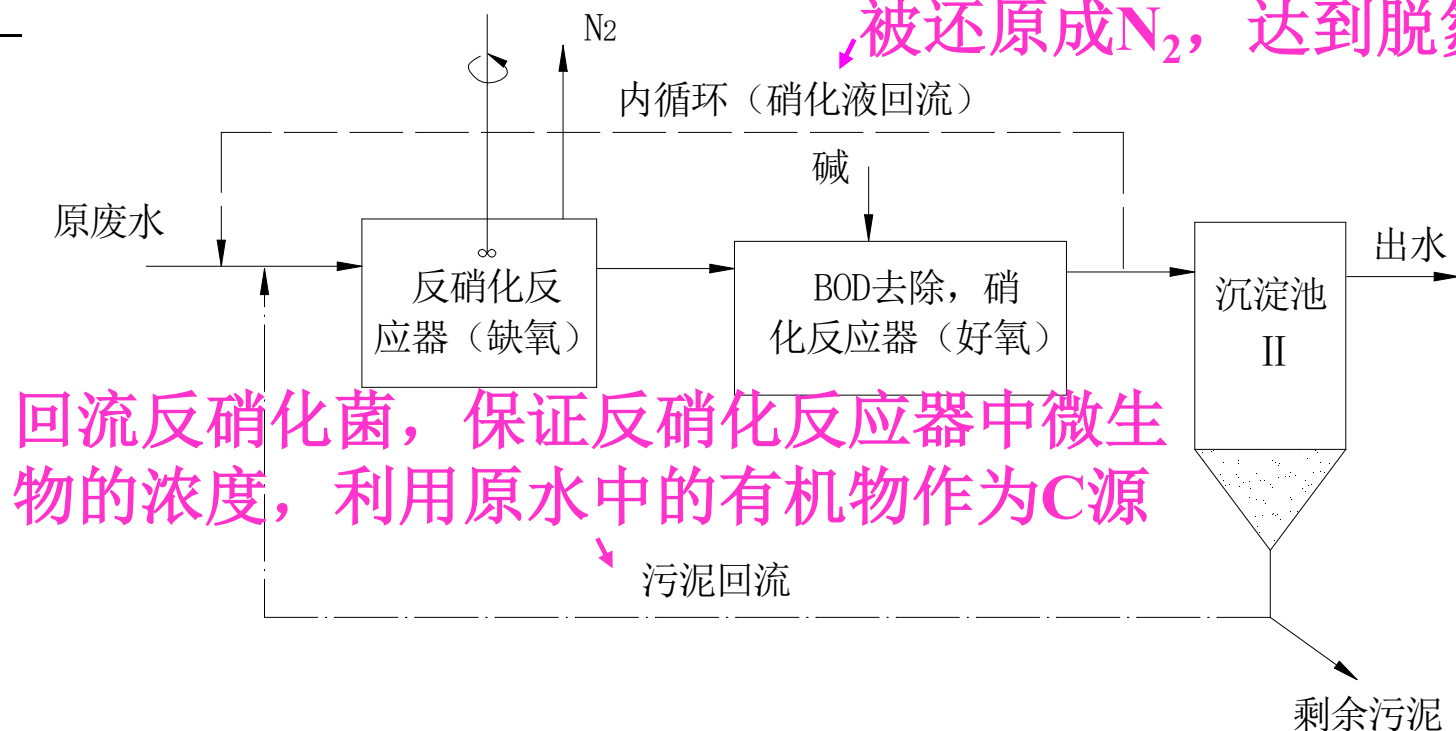
两级生物脱氮工艺

- 将三级生物脱氮工艺的一、二级合并



A₁/O (Anoxic/Oxic)生物脱氮工艺流程

回流硝酸盐，在反硝化反应器中被还原成N₂，达到脱氮目的；



回流反硝化菌，保证反硝化反应器中微生物的浓度，利用原水中的有机物作为C源

分建式A₁/O 生物脱氮工艺流程

A₁/O流程中的缺氧和好氧池可以是两个独立的构筑物，也可以合建在一个构筑物内，使用隔板将两段分开。🎥 ▶

A₁/O优点

- 流程简单，构筑物少，基建费用大幅度节省；
- 不需要外加碳源，降低了运行费用；
- 好氧池设在缺氧池后，不需要再建后曝气池；
- 缺氧池在好氧池前，既可减轻好氧池的有机负荷，也有利于控制污泥膨胀；
- 反硝化过程中产生的碱度可补偿硝化过程消耗的碱度一半左右，对含氮浓度不高的废水可不必另行加碱。

A₁/O法局限性：

- 回流的混合液含有一定的溶解氧，使反硝化区难于保持理想的缺氧状态，影响反硝化效率，工程实际中A/O法的脱氮效率一般在85%以下；
- 要取得满意的脱氮效果，必须保证足够大的混合液回流比—增加系统的运行费用；
- 运行管理要求较高，如沉淀池管理不当会产生污泥上浮，内循环比或反硝化区DO控制不当会影响反硝化处理效率等。

A₁/O生物脱氮的设计要点:

- **BOD₅ : TN >4**
 - <4: 需外加甲醇作为碳源。
 - 好氧池剩余碱度: >70mg/L (以CaCO₃计)
 - 计算反应池总容积
 - 按污泥负荷计算
- 动力学计算:

$$V = \frac{Q \cdot S_0}{X \cdot N_s}$$

$$V = \frac{YQ(S_0 - S_e)\theta_c}{X_v(1 + K_d\theta_c)}$$

- 反应池中缺氧池和好氧池的容积比: 按试验数据或工程经验确定,一般为1: 2 — 1: 1
- 好氧池需氧量

常用参数:

V —曝气池的容积 (m^3) ;

S_0 —曝气池进水 BOD_5 (mg/L)

S_e —曝气池出水 BOD_5 (mg/L)

Q —曝气池的设计流量 (m^3/d) ;

U_s —污泥负荷 [$kgBOD_5/(kg MLSS \cdot d)$];

X_a —混合液悬浮固体平均浓度 ($g MLSS/L$)

U_v —容积负荷($kgBOD_5/m^3$);

X —混合液挥发性悬浮固体浓度 ($g MLVSS/L$) ;

V_1 —好氧池容积

根据污泥泥龄：

$$V_1 = \frac{\text{泥龄} \times \text{剩余污泥量}}{\text{曝气池污泥浓度}}$$

Y ：污泥产率系数（kg MLVSS/kgBOD₅）；在20℃时， $Y=0.3-0.5$ 。如无初沉池， Y 值须通过试验确定；

Y_{obs} ：污泥净产率系数（kg MLVSS /kgBOD₅），有初沉池时取0.2-0.6，无初沉池时取0.4-0.8；

Θ_c ：设计污泥泥龄，12-30d；

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_d \cdot \theta_c}$$

K_d ：衰减系数（d⁻¹），20℃的数值为0.04-0.075，常取0.06。

A₁/O法生物脱氮的主要设计参数

项 目	单 位	A ₁ /O参数值	传统法参数值
BOD污泥负荷U _s	kgBOD ₅ /(kgMLSS·d)	0.05~0.15	0.2-0.4
总氮负荷率	kgTN/(kgMLSS·d)	≥ 0.05	—
污泥浓度(MLSS)X _a	g/L	2.5~4.0	1.5-2.5
污泥龄θ _c	d	12~30	5-15
污泥产率Y	kgVSS/kgBOD ₅	0.3~0.5	0.4-0.8
需氧量O ₂	kgO ₂ /kgBOD ₅	1.1~1.8	0.7-1.2
水力停留时间HRT		8~16	4-12
	h	其中缺氧段0.5~3.0h	
污泥回流比 R	%	50~100	25-50
混合液回流比 R _i	%	100~400	
总处理效率	%	90~95(BOD ₅)	90-95
	%	60~85(TN)	

V_2 : 缺氧池容积

$$V_2 = \frac{N \times 1000}{K_{de} \times X_a}$$

V_2 : 反硝化池所需容积 (m^3) ;

N : 需要还原的硝酸盐氮 ($\text{kgNO}_3\text{-N/d}$) ;

K_{de} : 反硝化速率 ($\text{kg N/kg MLSS} \cdot \text{d}$) , 20°C 的 K_{de} 值可采用 $0.03\text{--}0.06$ ($\text{kgNO}_3\text{-N/kg MLSS} \cdot \text{d}$) ; 温度修正:

$$K_{de(t)} = K_{de(20)} 1.08^{(t-20)}$$

X_a : 混合液悬浮固体浓度 (MLSS) (mg/L) ;

好氧池需氧量

生物脱氮系统去除每公斤BOD₅需氧量可取用1.1-1.8 kg O₂。

$$O_2 = 1.47Q(S_0 - S_e) - 1.42\Delta X + 4.57[Q(N_k - N_{ke}) - 0.12\Delta X] - 2.6[Q(N_t - N_{te}) - 0.12\Delta X]$$

O₂: 污水需氧量(kgO₂/d); Q: 好氧池进水流量(m³/d);

S₀、S_e: 进出水BOD₅(mg/L)

ΔX: 系统的剩余污泥量(kg VSS/d)

N_k、N_{ke}—进出水总凯氏氮浓度(mg/L)

N_t、N_{te}—进出水总氮浓度(mg/L)

计算实例

某工业废水处理厂，日处理水量为 60000 m^3 ，进水COD为 447 mg/L ， BOD_5 为 220.8 mg/L ，SS为 357 mg/L ，TKN为 40 mg/L 。混合液悬浮固体MLSS为 4 g/L ， BOD_5 负荷为 0.15 kg/kgSS.d ，要求出水 BOD_5 为 20 mg/L ，SS为 22 mg/L (65%为可生化部分)，TKN去除率达到91%，反硝化率65%。

假设废水平均温度为 20°C ， θ_c 为15d， $K_d = 0.05 \text{ d}^{-1}$ ， $Y = 0.5 \text{ mgVSS/mg BOD}_5$ ， $\text{MLVSS/MLSS} = 0.8$

试确定推流式A/O反应池的容积、剩余污泥量和空气量。

解答

(1) 估算出水中的溶解性BOD₅ (S_e)

出水中SS可生化的部分为 $0.65 \times 22 = 14.3 \text{ mg/L}$;

可生化SS的最终BOD_L = $14.3 \times 1.42 = 20.3 \text{ mg/L}$;

可生化SS的BOD_L折算成BOD₅ = $20.3 \times 0.68 = 13.8 \text{ mg/L}$;

∴ 出水S_e = $20.0 - 13.8 = 6.2 \text{ mg/L}$ 。

解答 (con'd)

(2) 好氧池容积 (V)

a. 按动力学公式:

$$V = \frac{YQ(S_0 - S_e)\theta_c}{X_v(1 + K_d\theta_c)} = \frac{0.5 \times 60000(220.8 - 6.2) \times 15}{4000 \times 0.8(1 + 0.05 \times 15)} = 21556 m^3$$

b. 按有机负荷率公式确定反应池的容积:

$$V = \frac{Q \cdot S_0}{X \cdot N_s} = \frac{60000 \times 220.8}{4000 \times 0.15} = 22080 m^3$$

解答 (con'd)

设计脱氮反应池容积选用 22080m^3 ，缺氧池和好氧池容积比按3/5设计，则各池容积应为：

- 缺氧池 8280 m^3 ；
- 好氧池 13800 m^3 。
- 反应池总水力停留时间为 8.8h ，其中缺氧池为 3.3h ，好氧池为 5.5h 。

解答 (con'd)

(3) 剩余污泥量的计算 (ΔX)

$$Y_{abc} = \frac{Y}{1 + K_d \theta_c} = \frac{0.5}{1 + 0.05 \times 15} = 0.2857$$

$$\therefore \Delta X = Y_{\text{obs}} Q (S_0 - S_e)$$

$$= 0.2857 \times 60000 \times (220.8 - 6.2) \times 10^{-3}$$

$$= 3679 \text{ KgVSS/d};$$

解答 (con'd)

(4) 计算曝气池所需空气量

$$O_2 = 1.47Q(S_o - S_e) - 1.42\Delta X + 4.57[Q(N_k - N_{ke}) - 0.12\Delta X] - 2.6[Q(N_t - N_{te}) - 0.12\Delta X]$$

$$= \frac{60000(220.8 - 6.2)}{1000 \times 0.68} - 1.42 \times 3679 + \frac{4.57 \times 40 \times 0.91 \times 60000}{1000} - 0.56 \times 3679$$
$$- \frac{2.6 \times 40 \times 0.91 \times 0.65 \times 60000}{1000}$$

$$= 18935.3 - 5224.2 + 10046.4 - 2060.0 - 3691.0$$

$$= 18006.5 \text{ kg/d} = 750.3 \text{ kgO}_2/\text{h}。$$

解答 (con'd)

(4) 空气量 Q_A 的计算:

考虑到水质水量的冲击负荷的影响, 安全系数取1.3, 曝气装置氧的利用率取10%, 空气容重取 $1.201\text{Kg}/\text{m}^3$, 空气中含氧率为23.2%, 则空气量 Q_A 为:

$$\begin{aligned} Q_A &= \frac{750}{1.3 \times 0.232 \times 0.1} \\ &= 25000\text{m}^3 / \text{h} = 416\text{m}^3 / \text{min} \end{aligned}$$

解答 (con'd)

(5) 回流污泥量和混合液回流量的计算

回流污泥比 R 取0.5 (0.25~1.0) ;

硝化混合液回流比 r 取2 (常用2~3) ;

$$\therefore Q_R = 0.5Q = 1250 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$Q_r = 2Q = 5000 \text{ m}^3/\text{h}。$$

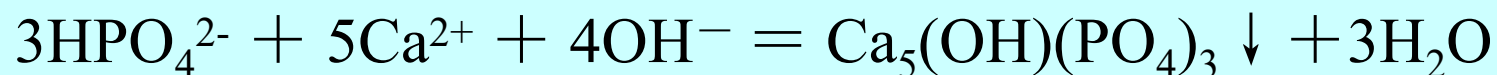


第三节、磷的去除

- 化学法
- 生物除磷法
 - 原理
 - 影响因素
 - A_2/O 工艺

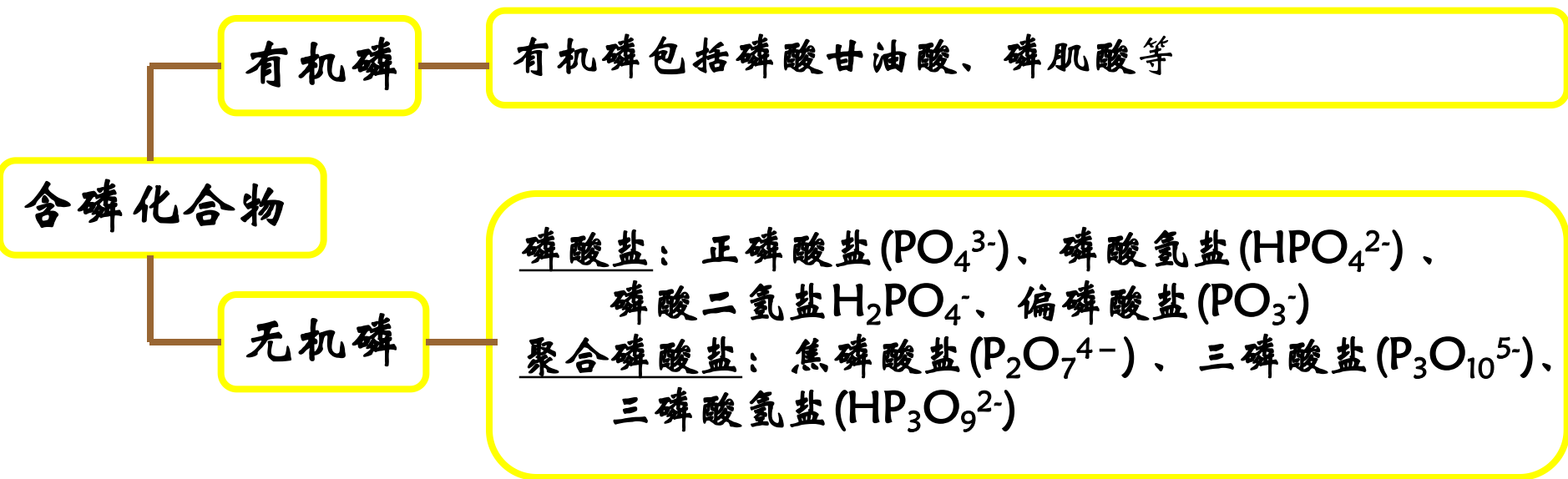
化学法除磷

- 投加石灰或铝盐、铁盐形成难溶性的磷酸钙等沉淀。



- 磷的去除率较高，处理结果稳定，污泥在处理与处置过程中不会重新释放磷而造成二次污染；
- 污泥的产量比较大。

生物除磷



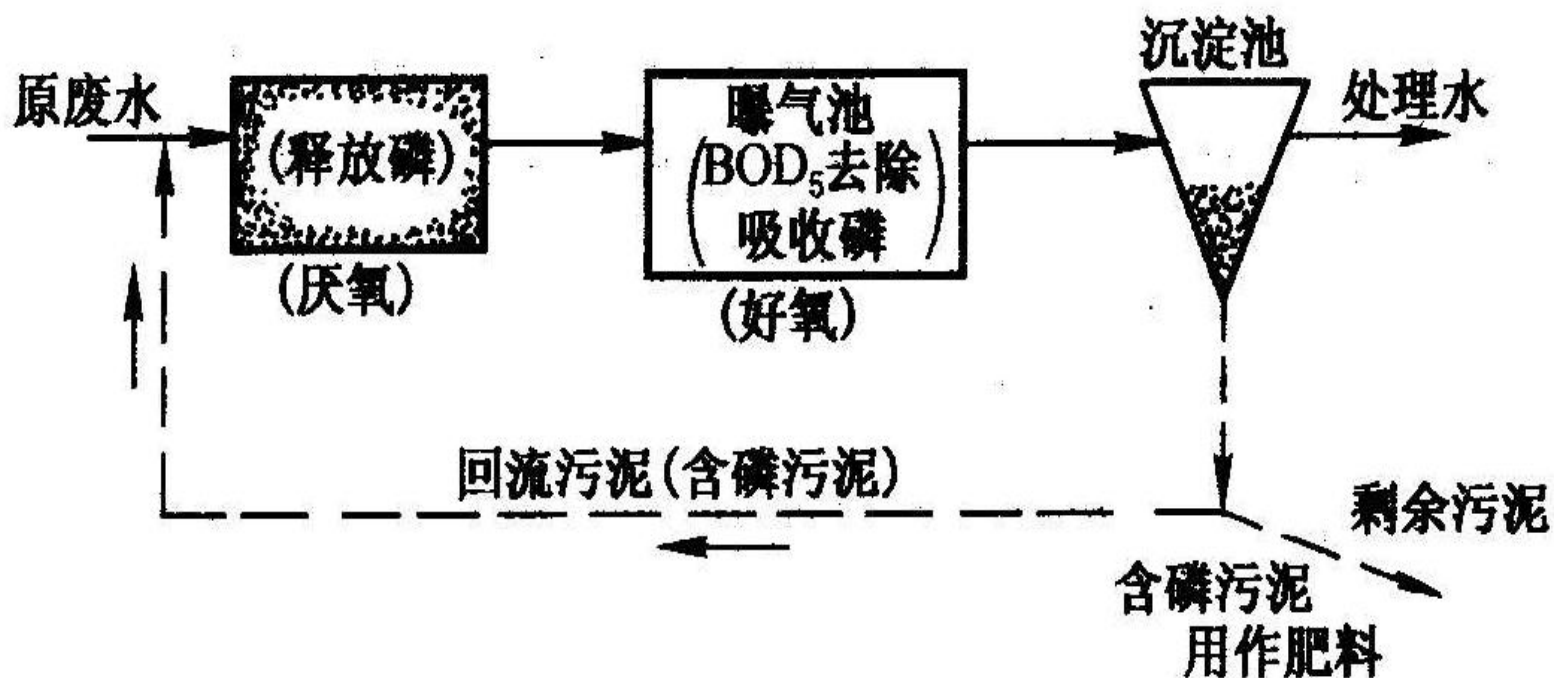
生物除磷原理

- **除磷菌过量摄取磷**：在**好氧**条件下，除磷菌合成聚磷酸盐并将之贮存在体内；
- **除磷菌的磷释放**：在**厌氧**条件下，除磷菌分解聚磷酸盐产生磷酸，并将之排除体外；
- **富磷污泥的排放**：在**好氧**条件下所摄取的磷比在厌氧条件下所释放的磷多，废水生物除磷工艺是利用除磷菌的这一过程，将多余剩余污泥排出系统而达到除磷的目的。

生物除磷的影响因素

1. **溶解氧**：厌氧段 $< 0.2\text{mg/L}$ ，好氧段 $\sim 2\text{mg/L}$ ；
2. **厌氧区硝态氮**： $\text{NO}_3^- - \text{N} < 2\text{mg/L}$
3. **温度**：5 -- 30 °C
4. **pH值**：6 -- 8
5. **BOD负荷**： $\text{BOD/TP} > 20\sim 30$ ，才能保证聚磷菌有足够的基质需求；
6. **污泥龄**：5 -- 10天，厌氧段的停留时间不宜过长。

A₂/O(Anaerobic/Oxic)工艺



厌氧-好氧除磷工艺流程



A₂/O生物除磷工艺的主要特点:

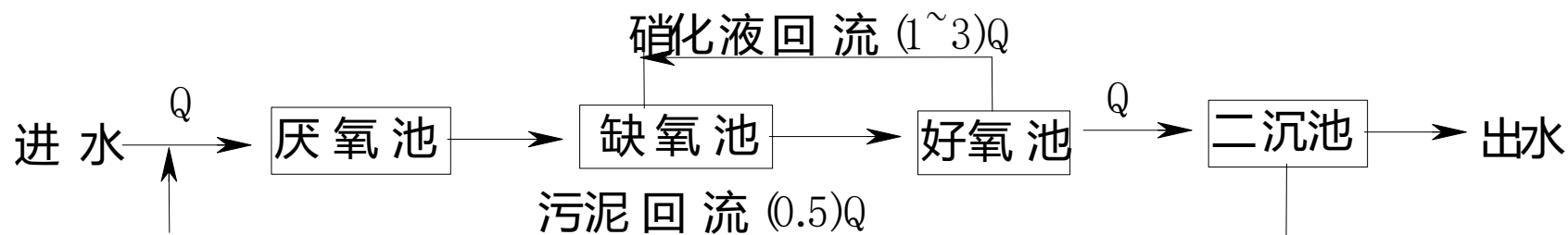
- 工艺流程简单
- 厌氧池在前，好氧池在后，有利于抑制丝状菌的生长。混合液的SVI<100,沉降性能好。
- 在反应池内水力停留时间较短:厌氧池1~2h, 好氧池2~4h
- 剩余污泥含P率高(>2.5%), 施肥效果好
- 除磷率难于进一步提高
- 污泥在沉淀池内停留时间较长时，聚磷菌会在厌氧状态下产生P的释放，降低P的去除率



第四节、同步生物除磷脱氮工艺

- **A²/O(anaerobic/anoxic/oxic)工艺**
- **Bardenpho工艺**
- **3. Phoredox工艺**
- **UCT工艺**
- **VIP工艺**
- **AP工艺**

A²/O(anaerobic/anoxic/oxic)工艺



A²/O工艺特点

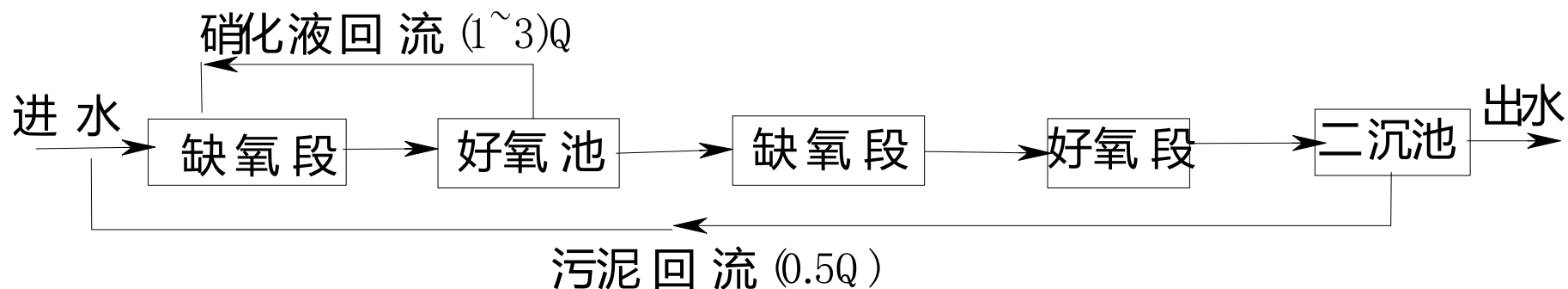
□ 主要优点

- 厌氧、缺氧、好氧交替运行，可以同时达到去除有机物、脱氮、除磷的目的
- 运行不利于丝状细菌的繁殖，基本不存在污泥膨胀问题；
- 工艺流程简单，总的水力停留时间少，不需外加碳源，搅拌少，运行费用低。

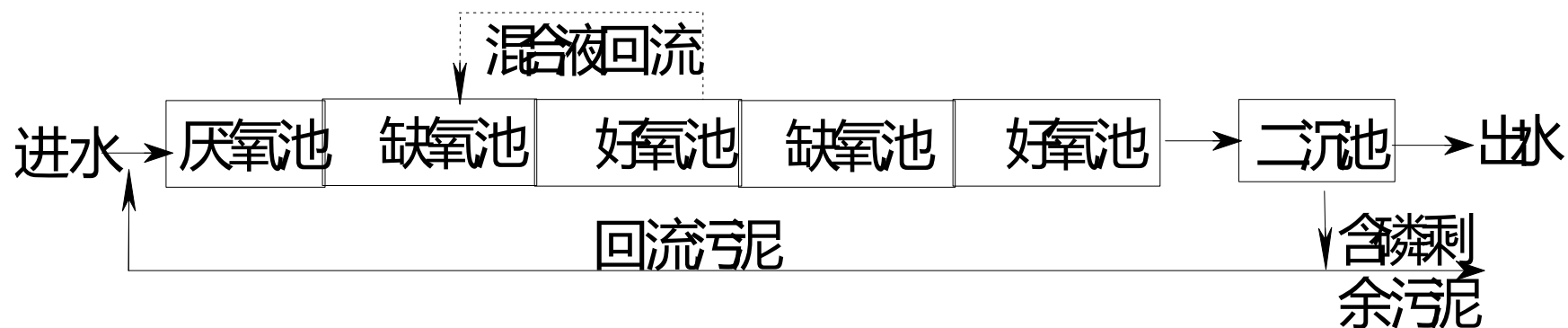
□ 缺点：

- 除磷效果受污泥龄、回流污泥中含DO和NO₃—N限制，可能不十分理想
- 脱氮效果取决于混合液回流比，因该工艺回流比不宜太高(200%)，故脱氮效果不能满足较高要求。

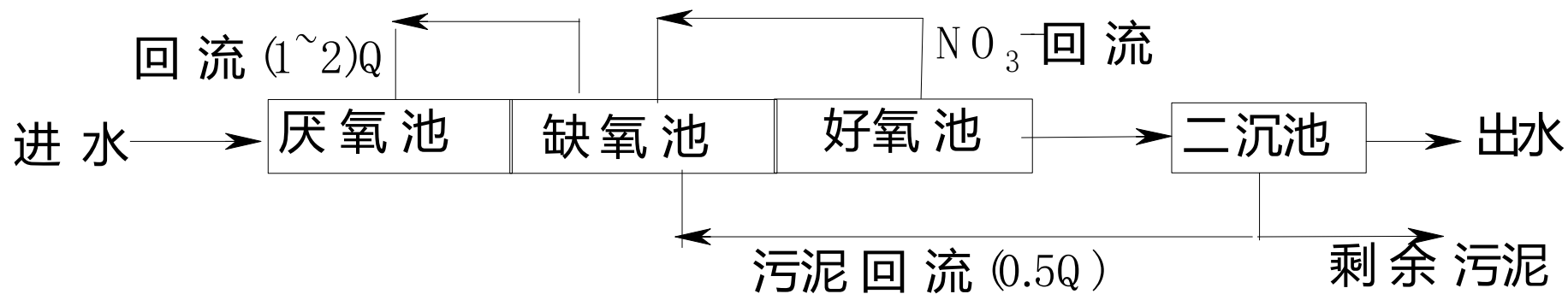
Bardenpho工艺



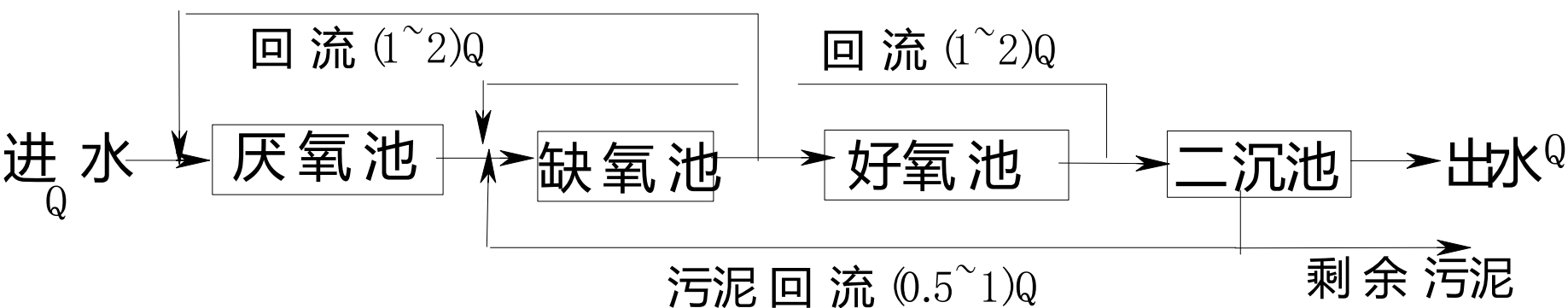
Phoredox工艺



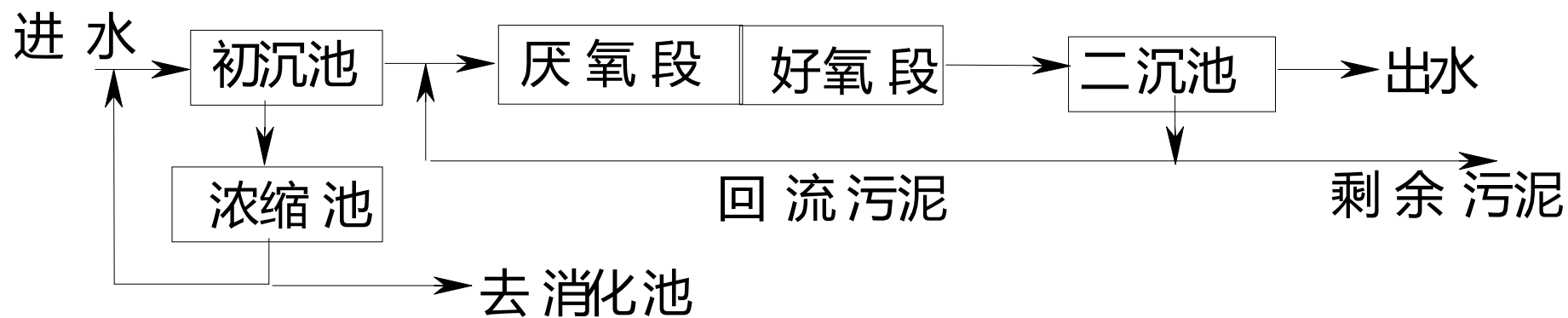
UCT工艺



VIP工艺



AP工艺



第五节、城市污水的深度处理

□ 主要目的

- 除二级处理出水中残存的SS、有机物，或脱色、杀菌；
- 脱氮、除磷：防止水体富营养化。

□ 主要方法

- 物化法：超滤、混凝、活性炭吸附、臭氧氧化、加氯消毒等；
- 生物法：生物脱氮除磷等

废水深度处理过程

- 完善的三级处理包括：
 - 除P
 - 脱N
 - 除有机物(主要是难以降解的有机物)
 - 除溶解性无机物
 - 除病毒和病原菌
 - 除SS和矿物质

有机污染物的去除

□ 活性炭(AC)吸附

- 有效地去除二级处理出水中的大部分有机污染物。

□ 臭氧氧化+活性炭吸附

- 更有效地去除有机物
- 延长活性炭的使用寿命。

溶解性无机物的去除

- 离子交换
- 电渗析
- 反渗透
 - 总溶解性固体可去除90%~95%，磷酸盐95%~99%，氨氮80%~90%，硝酸盐氮50%~85%，SS 99%~100%，TOC90%~95%。

病毒的去除

- 铝盐和铁盐混凝沉淀
 - 可去除致病菌和病毒~90%
 - 经滤池过滤能进一步提高去除率,但致病菌在污泥中仍存活。
- 石灰混凝沉淀
 - 能杀灭污泥中的病毒
- O_3 杀灭病毒