

# 一体化活性污泥法降解氮和磷的研究

石明岩<sup>1</sup>, 张海龙<sup>2</sup>, 吕锡武<sup>3</sup>, 吴华明<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨工业大学应用化学系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨绍和供水有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150080;  
3. 东南大学环境工程系, 江苏 南京 210096; 4. 南京市市政设计研究院, 江苏 南京 210008)

**摘要:**考察了不同阶段运行时间的设置、水力停留时间、溶解氧浓度和污泥龄条件下,一体化活性污泥法除磷脱氮的规律。结果表明,将系统控制在适宜的条件下,出水NH<sub>3</sub>-N可达到污水综合排放一级标准。提出了后续研究中改善除磷效果的措施。

**关键词:**一体化活性污泥法;城市污水;水力停留时间;溶解氧浓度;污泥龄;除磷;脱氮

**中图分类号:**TQ085.413 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3770(2004)01-0039-05

一体化活性污泥法以其结构紧凑、操作简单、智能化控制和可以除磷脱氮等优点在国际上已被广泛应用。但是,目前国内还未见应用该项技术除磷脱氮的研究报道,因此,深入摸索一体化活性污泥法的运行规律和技术特性,对于研究开发适合我国国情、高效经济的氮磷去除技术,解决日益严重的水质富营养化问题具有重要的现实意义。

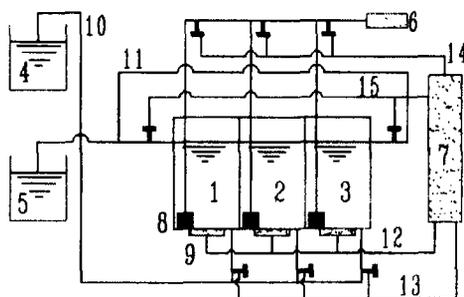


图1 一体化活性污泥反应器试验装置图

1、2、3 反应器的三池;4 进水槽;5 出水槽;6 曝气器;  
7 PLC 可编程控制器;8 曝气头;9 搅拌器;10 进水管;  
11 出水管;12 搅拌器控制线;13 进水管控制线;  
14 曝气控制线;15 出水管控制线

## 1 试验装置与工艺流程

一体化活性污泥反应器箱体为聚乙烯塑料制成,分成3格反应室,每格长、宽、高分别为200、

200、450mm,总容积42L(图1)。三室通过隔板下部的过流孔水力连通。每室配有曝气和搅拌系统,两外侧边室设有剩余污泥排放口。装置带有一套专家控制系统(Bioscan-biomaster),可自动调控运行。

一个运行周期分为六个阶段,顺次为:主体1→过渡1→沉淀1→主体2→过渡2→沉淀2。具体运行方式是:1)主体1阶段,1池进水并低速搅拌,仅维持池内污泥在悬浮状态下环流;2)过渡1阶段,1室停止搅拌,开始曝气,2室进水,3室出水;3)沉淀1阶段,1室停止曝气开始沉降,2室进水,3室出水;4)改变污水流向,重复1)~3)过程。运行初期,进水边室在主体阶段出现污泥上浮现象。研究中通过主体段之前增加短时曝气供氧的办法解决了该问题。即将运行模式变为:短时曝气1→主体1→过渡1→沉淀1→短时曝气2→主体2→过渡2→沉淀2。短时曝气时间设为5min。

## 2 试验方法

### 2.1 进水来源及性质

表1 试验用水水质(mg/L)

指标	TP	NH <sub>3</sub> -N	TN
最大值	7.0	52.3	66.5
最小值	4.7	25.6	49.8
平均值	5.9	39.0	58.2

收稿日期:2002-07-15

基金项目:南京市人才科研计划项目(99159)

试验用水取自南京市某污水处理厂,基本水质情况见表 1。其 BOD/COD 平均为 0.52,可生化性较好。接种污泥取自该厂曝气池。

## 2.2 水质分析方法

TP: 钼锑抗分光光度法,  $\text{NH}_3\text{-N}$ : 纳氏试剂光度法, TN: 过硫酸钾氧化—紫外分光光度法, 溶解氧采

用 TDO-100 型溶氧仪测定。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 运行周期内各阶段时间设置对除磷脱氮的影响

表 2 各阶段时间设置试验条件

	水温 (°C)	中室溶解氧 (mg/L)	水力停留时间 (d)	污泥龄 (d)	其它阶段时间设置
主体段时间	11~18	1.0~1.5	0.43	10	过渡段时间 15min、沉淀段时间 30min
过渡段时间	11~13	1.0~1.5	0.75	10	主体段时间 130min、沉淀段时间 30min
沉淀段时间	9~11	1.0~1.5	0.75	10	主体段时间 130min、过渡段时间 75min

在表 2 所列的条件下,分别考察运行周期内主体段时间、过渡段时间及沉淀段时间对处理系统除磷脱氮效率的影响。需要说明的是,因一体化活性污泥法不同阶段进水点不同,故相应的水力停留时间表达也不相同。本文统一用反应器的总体积与进水流量的比值定义。

#### 3.1.1 对硝化的影响

图 2 显示,当主体阶段时间延长 1h 时,  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率下降达 23 个百分点;主体阶段时间超过 130min 时,出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度已开始超标,说明延长主体阶段时间对硝化极为不利。由一体化活性污泥工艺的技术特点可知,好氧和缺氧时间比值的大小直接关系到好氧污泥龄的长短<sup>[3]</sup>。主体段时间越长,其比值越低,好氧污泥比例也随之降低,相应的好氧泥龄缩短,硝化菌活性降低,硝化效果变差。

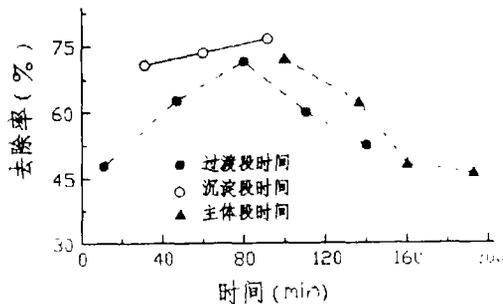


图 2 阶段运行时间对硝化效果的影响

从图 2 发现,当过渡阶段时间由 15min 增长至 75min 时,  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率提高了 19 个百分点。由  $\text{NH}_3\text{-N}$  的处理效果与曝气速率(曝气速率=每个周期的曝气时间/周期)的关系可知,速率大则好氧时间长,污泥的好氧污泥龄长,硝化菌的处理效率也相应提高。但曲线并非单调增加,超过 75min 后,硝

化率出现明显下降,分析是过度曝气削弱了硝化菌的活性所致。

图 2 的试验结果表明,  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除对沉淀阶段时间的变化较为敏感,延长沉淀阶段时间可以一定程度上提高  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率。原因在于沉淀段是中室进水,边室曝气,沉淀时间的延长,相应地延长了中室进水和边室混合液的硝化时间,强化了对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的处理。

#### 3.1.2 对脱氮的影响

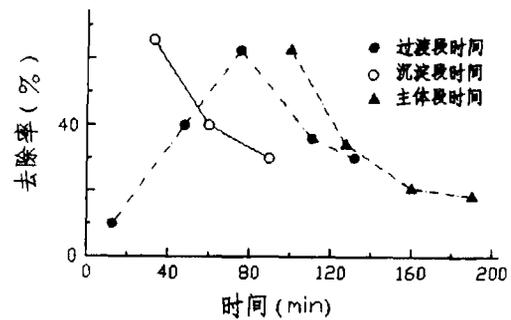


图 3 阶段运行时间对脱氮效果的影响

图 3 显示主体阶段时间延长导致 TN 去除率在短时间内出现大幅下降。分析得到,在一定范围内,反硝化效果与硝化混合液中硝态氮浓度呈正相关关系。因主体阶段时间延长对硝化菌活性的不利影响,使得硝化混合液中硝态氮浓度降低, TN 去除率下降。

另由图 3 可知,在 15min~75min 的范围内,适当延长过渡阶段时间有利于提高 TN 去除率,超过 75min, TN 去除率出现下降。分析可知,在达到系统具体条件下允许的最大反硝化能力之前,过渡段时间的延长,使硝化混合液向反硝化区的回流量增加,提高了反硝化的效果。但时间过长,大量曝气区的溶

解氧随硝化混合液进入反硝化区,破坏了沉淀区及下半周期缺氧/厌氧区的缺氧或无氧环境,影响了硝态氮的脱除。

沉淀区处于缺氧状态,一方面反硝化菌将好氧期间贮存体内的碳源释放,进行贮存性反硝化作用,对硝态氮的脱除有利;另一方面,中室向沉淀区通水时,水流中含有的较大的能量不断推动边室中的一侧沉淀污泥,污泥不能得到充分沉淀,同时混合液携带大量溶解氧由中室进入沉淀区,影响沉淀区和下半周期主体阶段的缺氧反硝化,沉淀时间越长,该作用越明显。二者协同作用的结果(图3)表明,延长沉淀时间不利于TN的去除。

### 3.1.3 对脱磷的影响

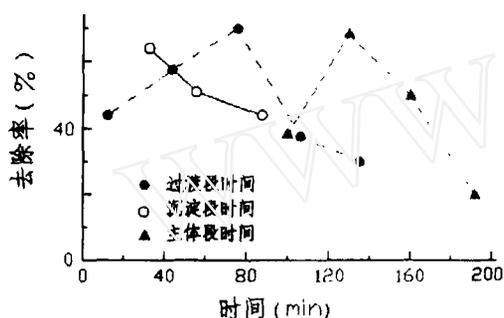


图4 阶段运行时间对除磷效果的影响

由图4发现,在主体阶段时间低于130min的情况下,主体阶段时间越长,除磷效果越好。分析认为,1)充足的厌氧时间是保证除磷效果的必要条件。厌氧时间不足将影响聚磷菌的活性及其释磷;2)随着反应的进行,搅拌池中的污泥不断被推流进入曝气池,搅拌池中残留的污泥越来越少,相对可利用的碳源增多,利于释磷;3)当污泥中糖源(以CH表示)含量高时污泥降解CH多而释放磷较少,因此,要达到可靠的除磷结果必须避免活性污泥使用CH作为厌氧代谢的能源<sup>[1]</sup>。在进水水质一定的条件下,延时厌氧反应能使污泥CH降到较低的水平,因此,一定范围内延长厌氧时间利于除磷。同时看到,当缺氧/厌氧时间持续约120min时,释磷量已达到一定程度。超过160min时,出水含磷量明显增加,190min时,出水磷增加量达1.0mg/L。说明过长的厌氧时间一方面导致了内源损耗引起的磷的无效释放,影响了磷的去除;另一方面发生了没有VFA吸收的磷释放,造成碳源贮存物量不足,不能在好氧区产生足够的能量来摄取所有释放的磷<sup>[2]</sup>。

分析图4得到,过渡段时间为75min时,进水中

约50%的磷被去除,但过度延时曝气不能提高磷的去除率,反而使出水磷的含量增加。可能原因是:1)长时间曝气后废水中的有机物基本耗尽,污泥进入内源呼吸阶段,聚磷菌自身的群体性衰减死亡和溶解导致了磷的释放;2)前述分析得到,过长的过渡时间使得硝态氮的脱除不彻底。其直接对厌氧释磷产生不利影响;一方面诱导磷释放的厌氧“压抑”程度下降;另一方面,其还原过程将消耗大量可供聚磷菌吸收的基质,从而大幅降低进水的有效BOD/TP值<sup>[2]</sup>,影响释磷。

观察沉淀阶段时间对除磷的影响发现,沉淀时间延长了1h,TP去除率下降了约10个百分点。分析得到:1)延长沉淀时间促使NH<sub>3</sub>-N去除率提高,相应地,中室流入边室混合液中的硝态氮浓度增加,使除磷受到影响;2)活性污泥在沉淀区中停留时间过长,造成污泥中所吸收的磷二次释放,增加了出水含磷量。

### 3.2 水力停留时间(HRT)对除磷脱氮的影响

运行条件是:主体段130min,过渡段45min,沉淀段30min,中室DO浓度1.0~1.5mg/L,水温12~15℃,污泥龄约40d。

由图5所示的结果发现:1)水力停留时间对除磷脱氮的影响程度不同:当水力停留时间由0.43d增加到0.91d时,除磷率仅增加了4个百分点,说明延长水力停留时间不是提高除磷效果的有效手段。当水力停留时间为0.43d时,NH<sub>3</sub>-N的去除率仅为41.3%,当水力停留时间延长至0.75d时,硝化率提高了20个百分点,TN去除率也相应提高了10%,说明氮的去除受水力停留时间的影响较为显著,充足的水力停留时间对于保证一定的脱氮效果尤为重要;2)当水力停留时间在0.43d~0.75d范围内变化时,水力停留时间越长,处理效果越好。原因是水力停留时间越长,则处理水实际经历的运行周期数越多,出水水质也就越好;3)水力停留时间>0.75d时,出水氮磷浓度基本稳定。

进一步分析可知,水力停留时间并非越长越好,这是由于:1)>0.75d时,水力停留时间对出水水质的影响不明显,若继续延长水力停留时间,则在保证一定处理规模的前提下,需相应扩大处理构筑物容积,增加基建投资和占地面积,会降低处理工艺的经济性;2)水温较高(25℃~30℃)时的运行结果表明,当水力停留时间控制在0.59d以上时,出水边池出现污泥上浮现象,说明高温期水力停留时间不宜过

长。

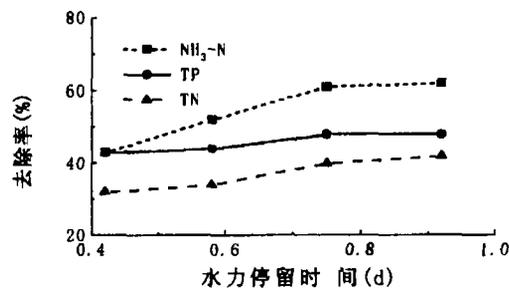


图 5 水力停留时间对除磷脱氮效果的影响

### 3.3 中室溶解氧(DO)对除磷脱氮的影响

好氧操作氧的供给主要满足有机物的好氧代谢、硝化菌将  $\text{NH}_3\text{-N}$  转化成硝态氮去除水中氨态氮以及聚磷菌摄磷。因此,为了保证除磷脱氮效果及避免曝气区溶解氧浓度过高浪费能量,设置适当的溶解氧范围十分重要。一体化活性污泥法中室为主曝区,因而这里主要讨论中室溶解氧的影响。

运行条件是:主体段 130min,过渡段 75min,沉淀段 30min,  $\text{HRT}=0.75\text{d}$ ,水温  $=7\sim 9\text{C}$ ,污泥龄约 40d。

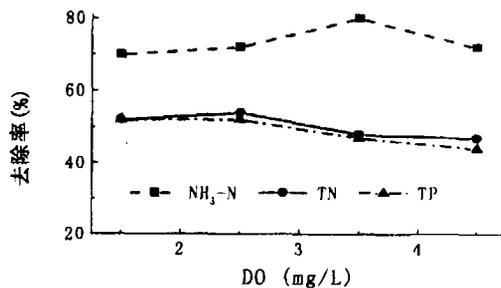


图 6 中室溶解氧对除磷脱氮效果的影响

分析图 6 的结果得到,当溶解氧浓度由 1.0~

1.5mg/L 变化到 2.0~2.5mg/L 时,磷的去除不受影响。说明 1.0~1.5mg/L 的溶解氧浓度即可满足好氧摄磷的要求,同时说明发氧时间充足时,磷吸收区溶解氧浓度的增加对提高磷的吸收量无明显促进作用。溶解氧浓度过高,相应地进入缺氧区的溶解氧增加,对厌氧释磷产生了不利影响,除磷率呈下降趋势。

另外看到,当溶解氧浓度增加 2mg/L 时,  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率增加了约 10 个百分点,说明提高溶解氧浓度对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的去除有促进作用。分析原因是,对于同时去除有机物和进行硝化反硝化的工艺中,硝化菌在活性污泥中约占 5% 左右,大部分硝化菌将处于生物絮体内部。这种情况下,溶解氧浓度的增加将提高溶解氧对生物絮体的穿透力,使整个生物絮体保持好氧状态,从而提高了硝化反应速率和氧的传质速率,硝化效能增强<sup>[2]</sup>。

溶解氧浓度不超过 2.5mg/L 时,增大曝气量,提高溶解氧浓度对硝态氮的脱除有利。这与溶解氧浓度增加,硝化率提高有关。溶解氧浓度超过 2.5mg/L 时,脱氮率出现了明显下降。分析原因是,大量溶解氧由中室进入缺氧区干扰了反硝化;另外,氧会与硝态氮竞争电子供体,同时分子态氧也会抑制硝态氮还原酶的合成及其活性,影响脱氮。

### 3.4 污泥龄对除磷脱氮的影响

在运行周期内各阶段时间为主体段 130min、过渡段 75min、沉淀段 30min、水温为 7~18℃、中室 DO 浓度为 2.0~2.5mg/L、水力停留时间为 0.75d 的条件下,研究污泥龄对系统除磷脱氮的影响规律。结果如表 3,表中的污泥龄为  $\infty$  表示试验期间不排泥。

表 3 污泥龄对除磷脱氮的影响

平均 污泥龄 (d)	TP			NH <sub>3</sub> -N			TN		
	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)	进水 (mg/L)	出水 (mg/L)	去除率 (%)
18	5.5	2.0	63.2	42.5	21.5	49.5	66.2	38.8	41.4
13	5.6	2.8	50.0	46.3	13.8	70.1	60.1	28.7	52.2
$\infty$	5.5	4.9	10.1	45.3	2.8	93.8	62.1	26.0	58.2

表 3 显示,除磷脱氮效果对污泥龄变化较为敏感。平均污泥龄为 18d 时,可去除进水中约 2/3 的磷,此试验期间平均水温仅为 7℃,但仍可以获得约 50% 的  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除率,表现了处理系统较强的硝化能力;在不排泥的情况下,污水基本可无机化稳定,  $\text{NH}_3\text{-N}$  去除接近完全,而磷去除率则降为 10.1%。

## 4 问题讨论

3.1~3.4 试验结果表明,一体化活性污泥法去除氨氮的效能较强,除磷效率还亟待提高。分析出水磷含量未能达标的可能原因是:1)反硝化菌优先获得碳源进行反硝化脱氮,并快速消耗掉厌氧发酵区

的溶解性 BOD, 降低了有效 BOD/TP 值, 以致聚磷菌的优势得不到有效发挥, 厌氧释磷不彻底; 2) 硝态氮的脱除不彻底, 干扰了磷的释放和聚磷菌体 PHB 的合成; 3) 初沉池之前采用曝气沉砂池除砂。进水可能携带游离态氧分子进入缺氧/厌氧区, 破坏了缺氧或无氧状态, 降低了除磷功效。拟采取的解决办法有: 1) 外碳源补给或主体阶段采用多点进水的方式; 2) 优化反应器构造。通过增加单室个数的办法增加缺氧反硝化的处理阶段, 达到强化反硝化的目的; 或者在一体化活性污泥工艺之前加设厌氧生物选择器<sup>[3]</sup>, 强化除磷; 3) 物化法深度除磷。

## 5 结 论

延长主体阶段时间对脱氮极为不利; 适当延长主体阶段时间利于除磷。

适当提高过渡阶段时间可降低出水  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量, 并使除磷脱氮效果有所改进, 75min 时, 可同步达到除磷脱氮的最佳效果; 继续延长曝气时间, 导致活性污泥处于内源呼吸状态, 处理效能减弱。

在 30~90min 范围内, 延长沉淀阶段时间对  $\text{NH}_3\text{-N}$  的脱除较为有利, 而对 TP 和 TN 的去除不利。

在 0.43d~0.75d 范围内, 水力停留时间越长, 处理效果越好。氮的去除受水力停留时间的影响较

为显著, 充足的水力停留时间对保证一定的脱氮效果尤为重要。

运行周期设置为 8h 为宜。半周期运行时间的最佳分配是: 短时曝气段 5min、主体阶段 130min、过渡阶段 75min、沉淀阶段 30min。

中室溶解氧浓度在 1.0~3.5mg/L 范围内持续提高时, 对除氮最为有利; 中室溶解氧浓度超过 2.5mg/L 时, 对反硝化和厌氧释磷存在抑制作用。

综合考虑除磷和氨氮的效果, 平均污泥龄宜取 18d。

下一步的研究中还可以考虑利用溶解氧和氧化还原电位优化控制曝气量、缺氧/厌氧/好氧时间等, 从而高效地同时脱氮除磷。

### 参考文献:

- [1] 冯生华, 刘延华. 生物除磷糖控制(CHC)工艺的试验研究[J]. 给水排水, 2000, 26(6): 11~15.
- [2] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 45~47.
- [3] 邓荣森, 谭显春, 焦斌权. 一体化氧化沟的生物除磷试验研究[J]. 给水排水, 2000, 26(1): 14~17.

## STUDIES ON NITROGEN AND PHOSPHORUS DEGRADATION BY INTEGRATED ACTIVE SLUDGE METHOD

SHI Ming-yan<sup>1</sup>, ZHANG Hai-long<sup>1</sup>, LU Xi-wu<sup>2</sup>, WU Hua-ming<sup>3</sup>

(1. Dept of Applied Chemistry, Haerbin University of Technology, Haerbin 150001, China

2. Dept of Environmental Engineering, Dengnan University, Nanjing 210096, China;

3. Nanjing Municipal Design and Research Institute, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Under the conditions of the set of operating time, hydraulic residence time, dissolved oxygen concentration and sludge age at different stages, the law of removing phosphorus and nitrogen by integrated active sludge method was investigated. The results showed that when the system was controlled under proper conditions,  $\text{NH}_3\text{-N}$  in effluent could reach the standard of one-class discharge of sewage. In addition, the measures to improve the effect of phosphorus removal were put forward in subsequent researches.

**Key words:** integrated active sludge method; hydraulic residence time; dissolved oxygen concentration; removing phosphorus and nitrogen