

# 污水生物除磷若干影响因素分析

尹 军 王建辉 王雪峰 解艳萃 霍玉丰 谭学军

(吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 长春 130021)

**摘 要** 在系统阐述污水生物除磷机理的基础上,深入分析了微生物群体平衡、城市污水水质、环境因子以及工艺运行参数和运行方式等方面对生物除磷效果的影响。分析结果表明:生物除磷系统的溶解氧浓度不宜太高,一般好氧区  $DO < 2 \text{ mg/L}$ ,厌氧区  $DO < 0.2 \text{ mg/L}$ ;厌氧段存在硝酸盐对生物释磷有负面影响,缺氧段存在一定浓度的硝酸盐有利于生物聚磷;碳源必须充分、易降解;  $TKN/COD < 0.1$  的城市污水有利于生物除磷; pH 偏碱性可提高生物除磷效率;低温对生物除磷效果影响不明显。

**关键词** 城市污水 生物除磷 影响因素

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2007)04-0006-06

## Influencing factors of biological phosphorus removal in sewage treatment

Yin Jun Wang Jianhui Wang Xuefeng Xie Yancui Huo Yufeng Tan Xuejun

(School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Architectural and Civil Engineering Institute, Changchun 130021)

**Abstract** Based on the introduction of mechanism of biological phosphorus removal, the influences of microorganisms' population balance, wastewater quality, environmental factors, operating parameters and manner on phosphorus removal effect were adequately analyzed in this paper. Among all influencing factors, too high dissolved oxygen (DO) concentration must be avoided, which in aerobic zone should be less than  $2 \text{ mg/L}$  and which in anaerobic zone less  $0.2 \text{ mg/L}$ . Nitrate in anaerobic zone exhibited negative effect on phosphorus release, but certain concentration of nitrate in anoxic zone was beneficial to phosphorus accumulation. Carbon source must be adequate and easily degraded. Municipal wastewater with  $TKN/COD < 0.1$  was helpful to biological phosphorus removal. Alkaline environment could increase the effect of phosphorus removal. The influence of low temperature on phosphorus removal was not evident.

**Key words** municipal wastewater; biological phosphorus removal; influencing factors

长期以来,我国城市污水处理厂主要以去除 BOD 和 SS 为目标。然而,随着工业化和城市化程度的不断提高,合成洗涤剂、化肥和农药的广泛使用,大量氮、磷营养物质进入水体,致使水体富营养化日益严重,人们开始重视城市污水厂出水中氮磷的排放量,并提出了相应的排放标准。我国新颁布的《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)对污水厂出水中磷的含量规定了严格的标准。因此,新建及已建污水处理厂都面临着除磷脱氮的更高要求。污水除磷技术主要有化学除磷和生物除磷 2 大类。化学除磷效果稳定可靠,但需消耗化学药剂并产生大量化学污泥,处理费用较高。而与化学除磷相比,生物除磷工艺由于减少或避免使用化学药剂,处理成本较低,因此生物除磷技术在污水处理领域得到越来越多的应用,并且成为众多研究人员关注的对象。因此本文根据污水生物除磷的技术原理,结合实际污水处理工程的运行经验,对生

物除磷工艺的影响因素进行了分析与探讨。

## 1 污水生物除磷技术原理及其影响因素

### 1.1 传统污水生物除磷原理

污水生物除磷技术的发展源于微生物在好氧条件下过量吸磷现象的发现,而生物除磷的设想则是由 Greenburg 在 1955 年首先提出来的<sup>[1]</sup>。该研究者设想,活性污泥可以吸收超过其正常生长所需要的 P,从而把污水中的 P 转移到剩余活性污泥中而去除。根据霍尔米(Holmers)提出的化学式,活性污

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”项目(2004AA601020);  
吉林省重大科技发展计划项目(20040405-1)

收稿日期:2006-06-20; 修订日期:2006-09-30

作者简介:尹军(1954~),男,日本早稻田大学博士,教授,博士生导师,主要从事水污染控制技术研究。

E-mail: huiwang111@tom.com

泥的组成是:  $C_{118}H_{170}O_5N_{17}P$  或  $C N P = 46 8 1$ 。

如果原污水中的 N、P 的含量低于此值,则需要另行从外部投加,如恰好等于此值,则在理论上应当是能够全部摄取而加以去除的。20 世纪 60 年代在美国一些污水厂发现,由于曝气不足,呈厌氧状态的混合液中  $PO_4^{3-}$  的浓度增加,从而引起人们对生物除磷原理的关注,为此进行了广泛的研究。生物除磷的原理是:聚磷菌在厌氧条件下释放磷,有氧条件下摄取磷,通过排除富磷污泥达到除磷目的。聚磷菌属于兼性异养型细菌,在厌氧环境中,没有溶解氧(DO)和大量  $NO_3^-$  存在的前提下,聚磷菌通过将细胞中聚磷水解成正磷酸盐获取能量,并利用污水中易降解的有机物,如挥发性脂肪酸(VFA),合成贮能物质聚 羟基丁酸(PHB)存于细胞中;在好氧环境中,聚磷菌以游离氧为电子受体,氧化细胞内储藏的 PHB,并利用该反应产生的能量,过量地从污水中摄取磷酸盐,合成高能物质 ATP,其中一部分转化为聚磷,作为能量物质贮存于细胞中。由于好氧环境下磷的摄取量远大于厌氧环境下的释放量,所以通过排放富磷污泥可以达到高效生物除磷的目的<sup>[1]</sup>。研究表明,在废水生物除磷中,聚磷菌厌氧释放磷是好氧吸收和除磷的前提条件,但厌氧条件下聚磷菌释放磷水平的充分与否,并不是决定除磷能力的必要条件。而聚磷菌在厌氧条件下能否有效释放磷,与水中有机物的类型和  $NO_3^-$  含量密切相关<sup>[2]</sup>。

## 1.2 反硝化除磷原理

在对除磷脱氮系统的研究过程中发现,活性污泥中的一部分聚磷菌能以硝酸盐作为电子受体在进行反硝化的同时完成过量吸磷。1993 年荷兰 Delft 大学的 Kuba<sup>[6]</sup>在试验中观察到:在厌氧 缺氧交替的运行条件下,易富集一类兼有反硝化作用和除磷作用的兼性厌氧微生物,该微生物能利用  $O_2$  或  $NO_3^-$  作为电子受体,且其胞内 PHB 和糖原质的生物代谢作用与传统 A/O 法中的聚磷菌(PAO)相似。针对此现象有研究者解释为:生物除磷系统中的 PAO 可分为 2 类菌属,其中一类 PAO 只能以氧气作为电子受体,而另一类则既能以氧气又能以硝酸盐作为电子受体,因此它们在吸磷的同时能进行反硝化,而反硝化除磷正是利用厌氧 缺氧交替环境来代替传统的厌氧 好氧环境,驯化培养出这类以硝酸根作为最终电子受体的反硝化聚磷菌(DPB)为优势菌种,通过它们的代谢作用来同时完成过量吸磷和反硝化过程而达到脱氮除磷的双重目的<sup>[3]</sup>。就  $NO_3^-$  是否可作为生物除磷过程的电子受体,研究者<sup>[5]</sup>分别利用厌氧 缺氧 SBR 系统和固定生物膜反

应器进行了试验研究。结果表明,作为氧化剂  $NO_3^-$  和氧气在除磷系统中起着相同的作用,而且通过创造厌氧、缺氧交替的环境可筛选出以  $NO_3^-$  作为电子受体的聚磷菌优势菌属即 DPB。类似的实验室和生产性规模的生物除磷脱氮研究也表明,当微生物依次经过厌氧、缺氧和好氧 3 个阶段后,约占 50% 的聚磷菌既能利用氧气又能利用  $NO_3^-$  作为电子受体来聚磷,即 DPB 的除磷效果相当于总聚磷菌 50% 左右。这些发现一方面说明了硝酸盐亦可作为某些微生物氧化 PHB 的电子受体,另一方面也证实了在污水的生物除磷系统中的确存在着 DPB 属微生物,而且通过驯化可得到富集 DPB 的活性污泥。

## 1.3 污水生物除磷技术的影响因素

影响污水生物除磷的因素很多,而且非常复杂,考虑到工艺的运行与处理效果可以归纳为以下 4 方面:一是除磷系统内的微生物群体平衡因素,主要为除磷系统内的 DO、硝酸盐、碳源、污泥糖类物质含量等;二是城市污水的水质,主要为基质的可利用性及其特征;三是环境因子,主要为环境的 pH、温度等;四是工艺的运行参数和运行方式,主要为泥龄、污泥处理过程中厌氧污泥停留时间等。

### 1.3.1 除磷系统内的微生物群体平衡因素

任何生物处理工艺,在生物处理过程中都存在着微生物群体与营养条件、环境条件的动态平衡<sup>[4]</sup>。生物除磷工艺只有一个污泥系统,同时存在着分解有机物的异养菌群、反硝化菌群和硝化菌群、聚磷菌群,处理过程中存在着微生物群体的动平衡关系<sup>[1]</sup>。因此,孤立地考虑满足某种菌群的生长繁殖需要显然是不够的,必须综合考虑所有菌群的代谢特性控制条件,充分发挥所有菌群的处理效能,使生物除磷系统取得最佳的处理效果。

#### 1.3.1.1 溶解氧

聚磷菌是一种运动性能差、增殖缓慢、只能利用低分子有机物的好氧菌,与其他好氧或兼氧异养生物相比竞争能力差,因此好氧区应保持一定浓度的溶解氧,使聚磷菌能利用好氧代谢氧化磷酸化释放出的大量能量充分吸收磷。但好氧区 DO 值也不宜太高,否则,溶解氧会随回流污泥带至厌氧区影响磷的释放<sup>[5]</sup>。根据工程实践经验,当好氧池出水端 DO 值控制为 1.5~2 mg/L 时,除磷效果较好。在厌氧环境下,由于没有外部电子受体,其他好氧异养菌群失去活力,厌氧微生物的生长繁殖对有机物进行酸化发酵作用,提高了污水中的易降解有机物浓度。这些低分子有机物在缺氧和厌氧条件下均能诱导聚磷菌释磷,使能贮藏 PHB 和聚磷的聚磷菌在与其他微生物的竞争中具有双重优势,由于不断产生 ATP,

使聚磷菌在厌氧条件下比其他好氧性异养菌能更好的存活。但由于氧是易接受的最终电子受体,只要有氧存在,兼性厌氧细菌就不会启动其发酵代谢,不会产生脂肪酸,也不会诱导放磷。一般来说,厌氧区的 DO 应小于 0.2 mg/L。有学者<sup>[7]</sup>研究了 NBAS 系统(一池无回流间歇曝气系统)中 DO 对整个生物除磷过程的具体影响,如图 1 所示。

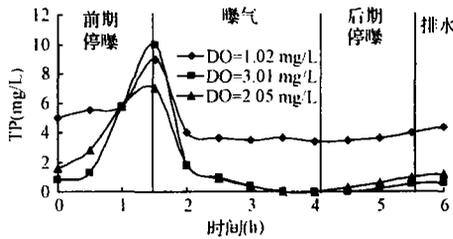


图 1 DO 对吸磷、释磷的影响

Fig 1 DO effects on phosphorus uptake and phosphorus release

### 1.3.1.2 硝酸盐

硝酸盐在生物除磷脱氮中具有特殊的意义,在除磷过程中影响磷的释放和吸收。若在释磷的厌氧段存在硝态氮,会对生物除磷效率造成负面的影响,而且硝态氮浓度越高,聚磷菌厌氧释磷所受的影响越大。因为反硝化速度快于释磷速度,反硝化先消耗易降解的 COD,聚磷菌难以获得充足的有机物,释磷处于缓慢状态。所以,当厌氧段存在硝态氮时对于生物除磷是不利的,应尽量避免<sup>[8]</sup>,如图 2 所示。

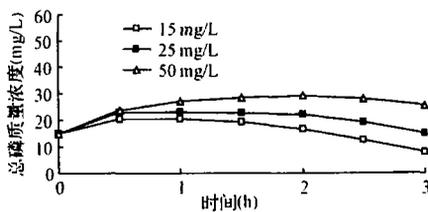


图 2 不同硝酸盐浓度的厌氧释磷

Fig 2 Anaerobically phosphate release with different nitrate concentrations

但最近的研究表明<sup>[6]</sup>,聚磷菌中有一部分可以在缺氧条件下利用硝酸盐作为电子受体进行吸磷,这一类微生物称为反硝化聚磷菌。反硝化聚磷菌被证实具有和好氧聚磷菌极为相似的代谢特征。Kuba 等<sup>[6]</sup>从动力学性质上对这 2 类聚磷菌进行了比较,认为以硝酸盐作为电子受体的反硝化聚磷菌有着和好氧聚磷菌同样高的强化生物除磷性能。因为反硝化聚磷菌可以在缺氧环境摄磷,这就使得摄磷

和反硝化脱氮这两个生物过程借助同一类微生物在同一种环境下一并完成,可见在厌氧段若存在少量的硝酸盐对提高除磷效率是有帮助的,有关的研究结果见图 3。

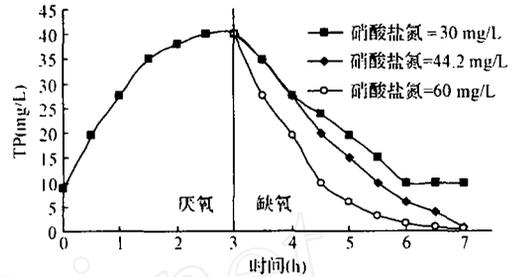


图 3 硝酸盐浓度对反硝化除磷过程的影响

Fig 3 Effect of nitrate concentration on denitrifying phosphorus removal

### 1.3.1.3 碳源

在生物除磷系统中进水碳源是一个很重要的问题,它为微生物的生存和繁殖提供营养物质和能量来源,如果污水处理系统中缺乏碳源会影响整个系统的除磷效果。影响生物除磷效果最明显的碳源因素是污水中易生物降解的溶解性小分子有机物含量和生物除磷工艺的 COD 负荷率。

(1) 污水中易生物降解的溶解性小分子有机物含量

生物除磷主要靠聚磷菌(PAOs)来实现<sup>[9]</sup>。聚磷菌交替处于厌氧与好氧条件下与其他细菌竞争基质。聚磷菌本身是好氧菌,在厌氧池中,其运动能力很弱,只能利用溶解性的小分子有机物,是竞争能力差的弱势细菌。只有当厌氧池内有足够浓度的 VFA 等小分子有机物时,聚磷菌才能充分吸收这些物质,并将其运输到细胞内,同化成胞内碳源存贮物(PHB),同时将细胞原生质中聚合磷酸盐(poly-P)的磷释放出来,提供能量且成为工艺系统中的优势菌群。有研究表明<sup>[10,11]</sup>,聚磷菌每释放 1 mg 磷需吸收 7.5 mg VFA。城市污水中溶解性小分子有机物含量是有限的,但一些大分子有机物经一定时间的厌氧发酵可转化成溶解性小分子有机物。因此,适当延长厌氧时间,创造可生物降解的大分子有机物厌氧发酵和同化吸收的良好条件,提高厌氧池内 VFA 浓度,是促使磷充分释放,实现生物除磷的前提,且进水中的 VFA 含量越高,释磷速度越快,整体除磷效果也越好。

(2) 生物除磷工艺中 COD 负荷率

随着快速降解 COD 理论的发展,人们发现在生物除磷工艺中 COD 负荷率对除磷效果也有很大的

影响。当进水 COD 负荷率较低时,一方面聚磷菌不能产生足够多的 PHB 用作磷的吸收,去除率较低;另一方面在保证产生足够的 PHB 用作磷的吸收同时,由于 COD 负荷率低,聚磷菌不能实现自身生物的净增长,吸收的磷无法通过剩余污泥排除,除磷效率低。当进水 COD 负荷率较高时,非聚磷菌的好氧异养微生物将与聚磷菌产生竞争,而聚磷菌与其他好氧异养菌相比是生长缓慢的微生物,最终导致活性污泥中的聚磷菌因非聚磷菌的好氧异养微生物的增殖而减少,反过来使磷的去除率降低。因此为了获得稳定的生物除磷效率,必须控制好运行系统的 COD 负荷率,以保证能够产生足够的 PHB,同时实现活性污泥的净增长。而且厌氧时间的长短应该根据进水 COD 负荷率和厌氧释放磷量的情况而定,防止厌氧出水 COD 浓度较高,在好氧段内引起聚磷菌和非聚磷性好氧异养微生物的竞争<sup>[12]</sup>。图 4 给出了 SBR 工艺不同 COD 负荷的生物除磷曲线。

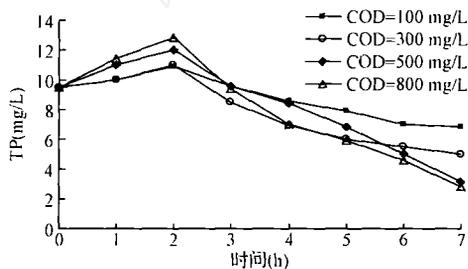


图 4 SBR 工艺不同 COD 负荷的生物除磷曲线  
Fig 4 Curves of biological phosphorus removal under different COD load in SBR process

### (3) 污泥糖类物质含量

污泥含糖类物质(carbohydrates简称为 CH)代谢是除磷工艺中活性污泥的一个普遍而重要的生命活动<sup>[13,14]</sup>。在生物除磷工艺中,污泥 CH 含量是变化的,其含量的上升与污泥除磷能力的下降同步,因此将污泥 CH 含量控制在较低水平是实现高效生物除磷的一个重要条件。在好氧条件下,反硝化脱氮后的泥水混合液进入好氧池,微生物将代谢体内吸收的未被降解的有机物,并吸收磷合成聚磷。同时,微生物还将合成一定数量的糖,供回流到泥水接触分离池后降解体内糖、吸收有机物和释放磷,实现污泥 CH 和聚磷酸盐的再生。在厌氧条件下,微生物倾向于利用降解体内的糖提供能量维持生活,而不倾向于利用聚磷水解提供能量吸收有机物,只有当活性污泥中的含糖量降到 10% 以下时,微生物才会利用聚磷水解提供能量吸收有机物,同时释放磷。换言之,活性污泥含糖量很高时,微生物虽然也可能

吸收有机物,但不能除磷;只有当含糖量低于 10% 时,才能取得满意的除磷效果<sup>[14]</sup>,如图 5 所示。

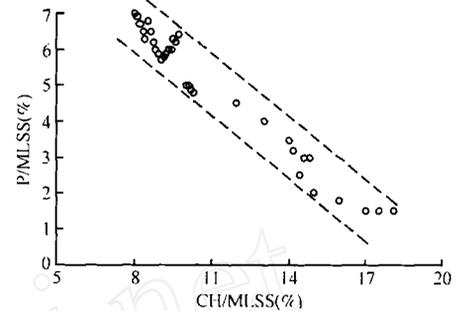


图 5 污泥 CH 含量与其除磷能力之间的关系  
Fig 5 Relation between sludge CH content and sludge phosphorus content

由此可见,活性污泥和微生物体内含糖量的高低,将是决定生物除磷效果的关键因素。而且对微生物体内糖的合成积累和降解变化过程的认识,为控制活性污泥含糖量,进而提高生物除磷效果提供了可能性。

### 1.3.2 城市污水的水质

生物除磷的另一个影响因素是城市污水的水质即城市污水中污染物构成及其含量。南非开普敦大学的研究组<sup>[15-17]</sup>对当地城市污水水质作了研究,发现进水 TKN/COD < 0.1 时,城市污水中的有机物易降解利用,反硝化进行的比较完全,除磷效果也相对比较好;TKN/COD 在 0.10~0.13 时,城市污水中的有机物不易降解利用,反硝化进行的不彻底进而影响磷的释放,因此,在此情况下要小心管理才能去磷。而且根据他们的实验数据可知,不同国家的不同工艺对 TKN/COD 比值的控制也各不相同,为了保证稳定高效的除磷效果,必须对所处理的城市污水的水质进行详尽的调查,进而将 TKN/COD 控制在合理的范围内。

### 1.3.3 环境因子

#### 1.3.3.1 pH

在酶动力学中,pH 值是一个重要因素。对于一种酶反应,pH 值在某一特定处存在一个最佳峰。对于常规生物处理来说,pH 过高或者过低都有可能影响活性污泥内生物的生化反应进程甚至使活性污泥中毒<sup>[1,2]</sup>。生物除磷系统合适的 pH 范围与常规生物处理相同,为中性和微碱性。在好氧状态下,系统内必须有足够的碱度确保氨氮完全降解,使硝化反应彻底完成,进而保证聚磷菌最大程度氧化细胞内储藏的 PHB,并利用该反应产生的能量,过量地从

污水中摄取磷酸盐,合成高能物质 ATP。在厌氧状态下磷的释放很大程度上取决于 pH,因为反硝化进程将会提高污水中絮状物的 pH 而产生化学沉淀,这些化学沉淀对磷的去除是十分有利的<sup>[18]</sup>。图 6 给出了不同 pH 条件下 SBR 工艺 TP 去除量的变化曲线。

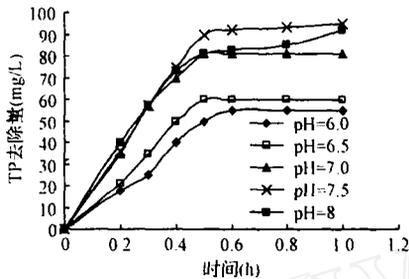


图 6 不同 pH 条件下 SBR 工艺中 TP 去除量的变化

Fig 6 Changes of TP removal at various pH values in SBR process

综上所述,为了得到稳定高效的除磷效果,在生物除磷工艺的实际运行中必须严格控制进水的 pH 值。

### 1.3.3.2 温度

理论上,温度对生物除磷能力的影响是通过影响有机物的水解即影响 VFA 的含量而间接产生作用的,在生化反应允许的范围内,温度越高,生化反应速度越快,有机物水解速度越快,若其他条件相同,则厌氧释磷和好氧吸磷越充分,降磷效率越高<sup>[2,3]</sup>。但实际的工程运行和实验室研究发现温度对生物除磷影响是较小的。虽然在低温条件下生物除磷系统中的聚磷菌生长速率会减慢,但是由于聚磷菌是一种嗜冷性细菌<sup>[19~21]</sup>,所以在低温的条件下仍能获得良好的生物除磷效果。Kelowna 污水厂运行资料表明,在池温降至 8~9 时,出水磷仍稳定地低于 2 mg/L。此外,研究表明<sup>[21]</sup>,5 时聚磷菌的生物除磷量比 15 时高 40%,如图 7 所示。

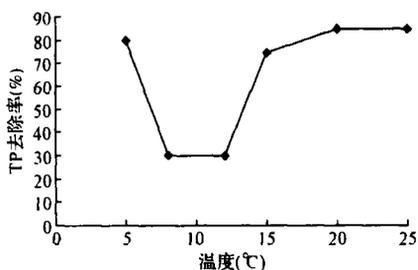


图 7 温度与 TP 去除率的关系

Fig 7 Relation between temperature and phosphorus removal efficiency

虽然温度对生物除磷的影响较小,但考虑到其他生化反应还是受温度影响的,所以应该对工艺运行温度进行严格控制。

### 1.3.4 工艺的运行参数和运行方式

#### 1.3.4.1 泥龄

生物除磷系统的泥龄影响系统中污泥的含磷量及剩余污泥的排放量,从而影响到系统的除磷效果,是除磷效率至关重要的影响因素<sup>[1]</sup>。

泥龄反映了微生物在曝气池中的平均停留时间,泥龄的长短与污水处理效果有 2 方面的关系:一方面是泥龄越长,微生物在曝气池中停留时间越长,对有机污染物降解越彻底,处理效果越好;另一方面是泥龄长短对微生物种群有选择性,因为不同种群的微生物有不同的世代周期,如果泥龄小于某种微生物的世代周期,这种微生物还来不及繁殖就排出池外,不可能在池中生存。因此为了培养繁殖所需要的某种微生物,选定的泥龄必须大于该种微生物的世代周期<sup>[22]</sup>。表 1 给出了 Lawrence-McCarty 模式同化除磷效率与泥龄的关系。

表 1 同化除磷效率与泥龄的关系

Table 1 Relation between sludge age and phosphorus removal efficiencies

泥龄 (d)	水中磷的浓度 (mg/L)	效率 (%)
20	1.10	15.7
15	1.32	18.9
10	1.64	23.4
5	2.15	30.7

磷的最终去除途径大体上有 2 种:一种是通过排放过量吸收磷的贮磷菌污泥而去除;另一种是微生物机体同化除磷。第 2 种除磷途径所占比例很小,主要是通过第 1 种途径完成。因此一般期望系统内维持较高的污泥量,聚磷菌在污泥中所占的比例要高;聚磷菌体内应有较高的含磷量;排放的剩余污泥要多<sup>[22,23]</sup>。Kuba 等<sup>[23]</sup>的研究表明聚磷菌为短泥龄微生物,泥龄越短,反硝化速率越快,除磷效果越好。此外,泥龄短的活性污泥具有较高的活性,其体内的含磷水平也较高,这是缩短泥龄可提高除磷效率的原因之一。若系统的泥龄过长,则会使污泥的活性降低,污泥的含磷量下降,使得去除单位重量的磷需消耗的 BOD 增加。

#### 1.3.4.2 污泥处理过程中厌氧污泥停留时间

在生物除磷工艺的运行控制中,厌氧污泥停留时间 (SRT) 是一个非常重要的影响因素。污泥在厌氧区停留时间长虽不会影响到环境因子相当敏感的硝化细菌以及随后污泥回流至好氧区的硝化作用,

但是随着工艺运行的 SRT由短到长,污泥中所吸收的磷的释放量明显增加,造成浓缩池上清液和污泥脱水液中磷浓度很高,而这部分水回流至污水处理系统的前端会增加系统的磷负荷<sup>[24,25]</sup>。根据美国空气产品和化学品公司的试验,污泥消化后磷的溶出量可达进水负荷的 20%左右。因此,应重视厌氧污泥停留时间的控制,避免磷从污泥中再次释放。

## 2 结 语

为了控制水污染,保护城市水环境,保障人体健康,维护生态平衡,污水必须经处理后达标排放。虽然目前污水厂出水磷酸盐浓度要达到 0.5 mg/L 的一级标准存在一定的困难,但是通过以上对影响污水生物除磷因素的分析,在污水处理厂的设计和运行管理中,如果合理选择工艺运行参数,严格控制影响因素,将会大大提高生物除磷的效率,使污水处理厂实现达标排放。

## 参 考 文 献

- [1] 张自杰,顾夏声.排水工程(下册).北京:中国建筑工业出版社,1997. 318
- [2] 张波,高廷耀.生物脱氮除磷工艺厌氧 缺氧环境倒置效应.给水排水,1997,14(3): 7~10
- [3] 王亚宜,彭永臻,王淑莹.反硝化除磷理论、工艺及影响因素.给水排水,2003,19(1): 33~36
- [4] 郑元景,等.生物膜法处理污水.北京:中国建筑工业出版社,1983. 171~178
- [5] Larose A., et al. Respiriometric control of the anaerobic period duration of an SBR Bio-P process Wat Sci Tech, 2003, 36(5): 293~300
- [6] Kuba T., Smolders G., VanLoosdrecht M. C. M., et al. Biological phosphorus removal from wastewater by an aerobic-anoxic-sequencing batch reactor Wat Sci Tech, 1993, 27(3): 5~6
- [7] 吉方英.溶解氧对 NB AS系统生物除磷脱氮的影响.重庆建筑大学学报,1999,21(6): 49~52
- [8] 李勇智,彭永臻,张艳萍,等.硝酸盐浓度及投加方式对反硝化除磷的影响.环境污染与防治,2003,12(6): 323~325
- [9] Canucci A., et al. Biological phosphorus removal with different organic substrates in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor Wat Sci Tech, 2002, 35(1): 161~168
- [10] Canucci A., et al. Different mechanisms for the anaerobic storage of organic substrates and their effect on enhanced biological phosphate removal Wat Sci Tech, 1999, 39(6): 21~28
- [11] Meinhold J., et al. Effect of continuous addition of an organic substrate to the anoxic phase on biological phosphorus removal Wat Sci Tech, 2001, 38(1): 97~105
- [12] 江田民,杨海光,陈筛林.污水成分的变化对生物除磷效果的影响.环境保护,2003,(7): 24~27
- [13] Mino T., et al. Bioassay for glycogen determination in biological phosphorus removal systems Wat Sci Tech, 1998, 37(4~5): 541~547
- [14] 冯生华,刘延华.生物除磷糖控制(CHC)工艺的试验研究.给水排水,2000,11(6): 11~16
- [15] Wang J. C., et al. Effect of wastewater composition on microbial populations in biological phosphorus removal processes Wat Sci Tech, 1998, 38(1): 159~166
- [16] 李捷,熊必永,张杰.厌氧好氧生物除磷影响因素的控制.生态环境,2004,13(4): 506~507,511
- [17] 竺建荣,顾夏声,何建中,等.厌好氧交替工艺的生物除磷特性研究.环境科学学报,1999,19(4): 394~398
- [18] Kuba T., et al. Biological dephosphatation by activated sludge under denitrifying conditions: pH influence and occurrence of denitrifying dephosphatation in a full-scale wastewater treatment plant Wat Sci Tech, 1997, 36(12): 75~82
- [19] Knoop S., et al. Influence of temperature and sludge loading on activated sludge settling, especially on microthrix parvicella Wat Sci Tech, 1998, 37(4~5): 27~35
- [20] Choi E., et al. Temperature effects on biological nutrient removal system with weak municipal wastewater Wat Sci Tech, 1998, 37(9): 219~226
- [21] Helmer C., Kunst S. Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in EBPR plants Wat Sci Tech, 1998, 37(4~5): 531~539
- [22] 刘勤亚,张业健.泥龄应用中有关问题的探讨.污染防治技术,2003,16(2): 13~16
- [23] Kuba T., et al. Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-Type wastewater treatment plant Wat Res, 1997, 31: 777~786
- [24] Fukase T., et al. The role of an anaerobic stage on biological phosphorus removal Wat Sci Tech, 2000, 17: 68~80
- [25] 李成江,郑兴灿.污水生物除磷脱氮技术.北京:中国建筑工业出版社,1992. 244