

# 低温生物脱氮法处理污水的研究进展

李林宝<sup>1</sup>, 文一波<sup>2</sup>, 侯巧玲<sup>1</sup>, 张晶莉<sup>1</sup>

(1.兰州交通大学 环境科学与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2.北京桑德集团, 北京 101102)

摘要: 从微生物学角度分析了温度对污水污泥脱氮效果影响的原因, 介绍了低温下生物脱氮处理的现状, 总结了国内外为提高污水污泥低温生物脱氮处理效率采取的措施, 对以后的研究提出了几点建议。

关键词: 低温; 脱氮; 低温微生物

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1008-9500(2007)05-0026-04

## Research Advances of Biological Nitrogen Removal in Low Temperature

Li Linbao<sup>1</sup>, Wen Yibo<sup>2</sup>, Hou Qiuling<sup>1</sup>, Zhang Jingli<sup>1</sup>

(1.School of Environmental & Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2.Sound Group, Beijing 101102, China)

Abstract: In this article, the effects of temperature on nitrogen removal are analyzed from the perspective of microbiology. The status of low-temperature on biological denitrification are introduced. Some domestic and foreign measures to improve the efficiency of low-temperature biological denitrification are summed up and several research proposals are also given.

Keywords: low temperature; nitrogen removal; cold-adapted microorganism

氮是引起水体富营养化的原因之一, 对水体氮污染的控制直接关系到国民经济的可持续发展。然而常规的污水污泥生物脱氮法在北方寒冷地区一直受到处理效果差、出水难以达标等问题的困扰。我国北方地区冬季气候严寒, 最低气温一般在-30℃以下, 冬季平均水温一般不超过10℃, 冰冻期长达3~6个月, 使得该地区氮污染非常严重。

### 1 温度对脱氮效果影响的原因

生物法是目前我国城市污水处理的主要方法, 该法是在污水处理系统的生化反应池中培养能分解污染物的微生物, 使污水得以净化。生物处理中氮的转化过程包括氨化、同化、硝化和反硝化, 这些过程都是依靠微生物的作用, 而微生物的生存受很多因素的限制, 其中温度是一个重要的生态因素。从宏观角度来看, 冬季寒冷的气候条件致使污水处理系统中微生物数量减少, 活性降低; 从微观角度来看, 温度的降低对微生物的生理特性有重要的影响, 如微生物对营养物质的转运减慢, 吸收减少, 对蛋白质合成速率降低, 生命代谢活动减缓等, 这对污水的生物净化极为不利, 导致冬季低温条件下污水污泥生物处理效果大为降低。

1.1 温度对脱氮微生物种群分布和种群数量的影响  
微生物按其最适合生长温度可分为: 低温型微生物

物、中温型微生物和高温型微生物。各种微生物都有其生长繁殖的最低温度、最适温度、最高温度。不同温度下微生物的生长及代谢的特性不同, 温度改变了, 污水处理系统中微生物群系也会发生改变。全球气温随着季节呈周期性变化, 而水温则随气温变化, 由于各种脱氮细菌的最适生长温度范围和最低、最高生长温度都不一致, 于是就存在着一个天然驯化或淘汰的过程, 与变化的水温相适宜的脱氮细菌会逐渐繁殖并不断增多。温度降低过程中温型脱氮微生物的活性会逐渐降低直至失去活性, 而低温型脱氮微生物会逐渐繁殖并不断增多, 但适应低温环境的脱氮微生物由于自身的生理特性及各种生态因子的抑制作用, 在数量上没有积累到一定的程度, 从而导致了低温条件下活性污泥中低温脱氮微生物群数量少, 进而导致低温下生物脱氮处理效果差。

### 1.2 温度对脱氮微生物活性的影响

#### 1.2.1 温度对硝化细菌的影响

温度不但影响硝化菌的比增长速率, 而且影响硝化菌的活性。大量研究结果表明硝化细菌最适宜的生长温度为25~30℃, 当温度小于15℃时硝化速度明显下降, 硝化细菌的活性也大幅度降低, 温度低于5℃时, 硝化细菌的生命活动几乎停止<sup>[1,2]</sup>。

收稿日期: 2007-02-05

作者简介: 李林宝(1982-), 男, 江西上饶人, 在读硕士研究生, 研究方向为水污染控制。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

表 1 不同温度下亚硝化菌的最大比增长速率

温度( )	$\mu_N(d^{-1})$
10	0.30
20	0.65
30	1.20

表 1 列出了不同温度下亚硝化菌的最大比增长速率  $\mu_N$  值, 可以看出,  $\mu_N$  值与温度的关系符合 Arrhenius 方程, 即温度每升高 10 , 其值提高 1~2 倍。所以温度对硝化的影响在于低温状态对硝化细菌的最大比增长速率和活性有强烈的抑制作用。

### 1.2.2 温度对反硝化细菌的影响

反硝化反应的适宜温度为 20~40 , 低于 15 时, 反硝化细菌的繁殖速度和代谢速率降都低<sup>[3]</sup>。有资料<sup>[4]</sup>表明 8 环境下的反硝化速率还不到 30 条件下反硝化速率的 1/7。寒冷的气候条件影响着污水生物处理中反硝化菌的活性, 进而导致了脱氮效果的下降。同时水温的降低使得缺氧区中溶解氧的含量增加, 也抑制了硝酸盐氮的还原。

## 1.3 温度对微生物生理特性的影响

### 1.3.1 温度对微生物细胞膜及摄取养分的影响

膜中脂的组成提供了膜流动和相结构的前提条件, 从而保证膜中镶嵌的蛋白质发挥正确的功能如离子和营养的吸收、电子转移等。膜中脂类的改变会引起膜流动性的改变, 微生物为适应温度的变化必须调节膜中脂类的组成以调节膜的流动性和相的结构。当微生物处于低温时, 低温微生物不饱和脂肪酸含量增加, 酰基链的长度缩短, 脂肪酸支链的比例增加和环状脂肪酸的比例得到减少等, 从而保证了膜在低温下的流动性, 使细胞在低温条件下不断从外界环境中吸收营养物质。而中温微生物在低温时对溶质吸收不活跃, 其细胞膜中的运输蛋白对冷敏感, 溶质分子不能与相应的运载蛋白结合, 且在低温条件下由于能量缺乏不能支持营养物质的跨膜运输, 导致对营养物质的转运和吸收大大减少。

### 1.3.2 温度对微生物代谢的影响

嗜冷菌比中温菌具有较低的代谢速率<sup>[5]</sup>, 这是低温对微生物最显著的影响。随着温度的降低, 嗜冷菌的生长速率降低较慢。生长的嗜冷菌比中温菌的温度系数低, 嗜冷菌一般不能在高于 20 生长, 这是由于细菌的最高生长温度不能超过破坏呼吸链酶类的最低温度。嗜冷菌的呼吸酶对热的敏感性是这类微生物必须生活在低温条件下的一个因素。一些嗜冷菌若生活在高于它们最高生长温度的环境时细胞死亡, 并伴随着细胞成分的外泄<sup>[6]</sup>。

### 1.3.3 温度对蛋白质合成的影响

随着温度降低, 蛋白质的合成速率降低, 但细胞中 DNA 的含量没有变化。这可能是在低温下分子内氢键增加导致酶的折叠增加, 从而催化活性降低。另一方面, 蛋白质合成的降低与在低温下单个蛋白质分子合成的减少有关。但温度影响蛋白质合成减少的精确机制还不完全清楚<sup>[7]</sup>。温度对蛋白质合成的影响还表现在当微生物的生长温度突然升高时(不超过其致死温度), 细胞中可诱导合成一组蛋白质即热休克蛋白<sup>[8]</sup>。热休克蛋白属应激蛋白, 他们具有多种生物学功能。

### 1.3.4 温度对细胞分裂、基因调控和 RNA 合成的影响

温度提高影响低温微生物细胞分裂繁殖的正常进行<sup>[9]</sup>。这可能是通过影响分裂早期 DNA 的复制及新生 DNA 分子与母链的分开, 也可能是通过影响细胞分裂的晚期新生细胞壁的分开。有人比较了嗜冷菌和中温菌在不同温度时的增代时间(Generation Time), 发现嗜冷菌的增代温度范围向低温移动。当温度升高时低温微生物细胞中的阻遏蛋白可能发生空间构象变化, 从而更紧密地与 DNA 结合并阻碍酶的转录<sup>[10]</sup>。当微生物生长的温度发生变化时, 细胞首先感受这一变化并将这一信号传递到细胞内, 然后通过不同基因的表达产生应激反应以适应改变了的环境。嗜冷菌和耐冷菌在环境温度超过它们的最适温度时 RNA 的合成便停止。如耐冷菌(Micrococcus Cryophilus)当温度升高时蛋白质和 DNA 的含量不变, 但 RNA 却急剧降低。这可能是由于温度升高引起膜结构的破坏, 释放出 RNA 酶, 使 RNA 大量降解<sup>[11]</sup>。

## 2 低温生物脱氮处理的现状

目前采用的常规生物脱氮处理法中, 一般要求水温在 13 以上, 但当水温低于 10 , 常规脱氮处理基本上就丧失效果。刘长青<sup>[12]</sup>等人试验表明: 当进水温度下降到 15~7 时, 小试的硝化效果会随之明显下降, 该水质条件下生物硝化效果变差的临界水温为 13 。张代钧<sup>[13]</sup>等研究发现: 当温度为 0~10 时, 温度条件对硝化作用有非常大的影响; 而当温度大于 10 后, 其对硝化作用的影响已不明显; 当温度在 10~30 时, 出水总氮浓度会随温度升高而逐渐降低。

## 3 国内外提高低温生物脱氮处理效率的措施

### 3.1 降低污泥负荷, 延长污泥龄, 增加水力停留时间, 采取池体升温或保温

韩洪军<sup>[14]</sup>等人研究表明所有反应器的硝化反硝化在 10~15 时都无明显差别, 从 7 降低到 3 , 需

要同步降 F/M, 当 3 时控制较低负荷为 0.07 kg BOD<sub>5</sub>/(kg MLSS·d) 可以实现很好的脱氮效果。

白晓慧等<sup>[15]</sup>研究了低水温条件下实现高效硝化的运行控制条件, 指出通过保持较高的污泥浓度, 在控制较低负荷 (<0.15 kg BOD<sub>5</sub>/(kg MLSS·d)) 下运行, 即使水温为 8~10, 仍然可达到 80% 以上的硝化效果和有机物的较好去除。

在活性污泥中硝化细菌的活性主要依赖于温度和污泥龄, Randall<sup>[16]</sup>等研究发现: 在温度为 20, 污泥龄为 2.7 d, 硝化反应能达到完全; 当温度下降为 10, 污泥龄延长为 5 d 硝化效率不低于 65%; 在温度为 10~20, 延长污泥龄为 15 d 温度对硝化效率没有影响。Sinkjaer<sup>[17]</sup>等研究表明温度每下降 1 污泥龄应相应提高 10%。

Maria Rothman<sup>[18]</sup>对瑞士第二大污水厂 Bromma 进行运行管理时发现, 通过降低 F/M 值可以改变污水厂在冬季气温较低时, 丝状菌大量繁殖造成污泥膨胀致使硝化反应几乎不能发生的现象, 同时维持溶解氧浓度在 4 mg/L, 最终可以达到全年硝化反应的发生。

## 3.2 生物强化作用

### (1) 使用生物增效法

生物增效技术是近年来国际上兴起的一种用于提高水处理生物系统及垃圾堆肥系统降解能力的新技术, 通过加入有特定降解能力的生物菌群, 以增强污水处理系统自身细菌群功能的方法。生物增效法引入的生物助剂本身并不替代现有生物修复的功能菌群, 但可以提高功能菌群在某些特定情况下的反应能力, 增强活性污泥的絮凝性, 提高功能菌群数量和多样性。从而达到增强菌群降解污水组分的能力和 提高污水处理效率的目的。

何成达<sup>[19]</sup>的研究表明在低温期间为保证正常的硝化速率, 反应器的容积要求达到高温期间的 3 倍以上, 通过向活性污泥反应系统投加硝化菌的方法有效解决了活性污泥工艺在低温期间泥龄要求长和反应容器大的问题。

该方法存在的问题是: 在运行过程中菌种会逐渐流失, 需要定期补充菌种, 同时由于温度下降致使菌种的活性受到影响, 菌种的利用率比较低。

### (2) 采取固定化技术

目前国内外对氮污染的处理主要采用生物脱氮技术, 即硝化—反硝化工艺, 由于硝化细菌生长缓慢 (在低温下则生长更慢), Tramper<sup>[20, 21]</sup>等一些学者作了固定化细胞的尝试, 以期持留足量的生物体, 改善生物反应器的运作性能。研究发现, 固定化硝化细菌

具有较强的耐低温能力<sup>[21]</sup>。

郑平等<sup>[22]</sup>对固定化硝化细菌的耐低温机理进行了研究, 结果表明, 固定化硝化细菌的耐低温性能优于相应的悬浮细胞。他分析固定化硝化细菌较耐低温的主要机理是: 低温相对提高了硝化细菌对基质的亲和力; 过程反应受扩散控制, 扩散对温度变化的敏感程度较低。

固定化技术受到固定化载体自身的强度、传质性能、使用寿命、成本、抗微生物分解等原因的限制, 目前固定化细胞大多尚处于实验室的水平, 属初级研究阶段, 该技术处理污水的例子还不多。

## 3.3 选择合适的处理工艺

Chrai Euiso<sup>[23]</sup>等人研究表明, 通过工艺改良, 在有机营养物去除系统中即使在 8 的低温条件下, 硝化反应能达到 90%, 然而, 反硝化是提高营养物去除率的限制性因素。

赵立军<sup>[24]</sup>等认为固定膜工艺处理低温污水时比污泥分散生长工艺更稳定, 选择污水处理工艺时, 中小污水厂宜优先考虑生物膜工艺技术, 而大型污水厂则应优先考虑延时曝气的活性污泥法。

## 3.4 人工筛选, 培育耐低温微生物

低温菌由于具有特殊的遗传背景和代谢途径, 能够产生适合低温环境且具有特殊功能的各种酶类及其它活性物, 从而使低温菌在寒冷环境条件下表现出其他微生物无法替代的生物活性。

姜安玺教授<sup>[25]</sup>率先通过对低温环境条件下的活性污泥进行长期驯化培养, 筛选出低温高效硝化菌和聚磷菌, 并自主开发反应装置, 使低温环境条件下污水的总氮、总磷去除率分别达到了 60%、85%。

2000 年 Chevalier<sup>[26]</sup>成功地从南极和北极分离到 4 株耐冷的丝状蓝细菌 (Cyanobacteria), 该菌在低温环境条件下对氮和磷有较高的去除率, 从而为低温环境下污水中氮和磷的去除提供了新的思路。

低温菌在低温环境条件下所拥有的普通微生物无法替代的活性优势为未来低温菌的开发和工程应用提供了广阔的前景, 同时也为进一步降低寒冷地区污水处理项目投资, 节约项目运行费用打下良好的基础。

## 4 低温生物脱氮处理的研究建议

对于解决低温下生物脱氮处理效率差的问题研究, 在不改变工艺流程的基础上提出以下建议:

(1) 从低温自然环境中分离、筛选出具有较高代谢活性的耐冷型脱氮菌, 据适当的情况进行驯化和扩大培养, 然后投加到脱氮工艺中, 以提高脱氮效率。

(2) 探索出一种生物添加剂使在常温下具有较高

活性的中温型微生物在低温下也有较好的活性。

(3) 利用基因工程技术将耐冷型脱氮菌的适冷性基因克隆到中温菌中, 使这种工程菌既可在常温下具有高效脱氮功能又可在低温下发挥作用, 使微生物的活性不受季节的影响。

#### 参 考 文 献

- Randall C W, Buth D. Nitrite build-up in activated sludge resulting from temperature effects [J]. *Water Pollut Control Federation*, 1984, 56(9): 1 039- 1 044.
- Mauret M, Paul E, Peutch- Costes E, Maurette MT, Baptiste P. Application of experimental research methodology to the study of nitrification in mixed culture. *Water Sci Technol*, 1996, 34(1-2): 245- 252.
- 徐亚同. pH 和温度对反硝化的影响 [J]. *中国环境科学*, 1994, 14(4): 309- 313.
- Henze M. Capabilities of biological nitrogen removal process from wastewater [J]. *Wat Sci Tech*, 1991, 23(4): 669- 679.
- Jay, J.M. Characteristics and growth of psychrophilic microorganisms. In: *Modern Food Microbiology*, 3rd edn. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1986, 579- 592.
- Roger D, Haight and Richard Y, Morita. Thermally induced leakage from *Vibrio marinus*, an obligately psychrophilic bacterium [J]. *Bacteriol*, 1966, 92(5): 1 388- 1 393.
- Zenechinn, L. Claverie, P., Collins, T., et al. Did psychrophilic enzymes really win the challenge? *Extremophiles*, 2001(5): 313- 321.
- Morimoto R I. *Stress Proteins in Biology and Medicine*. New York: Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990, 166- 190.
- Gounot, A.M. Effects of temperature on the growth of psychrophilic bacteria from glaciers. *Can [J]. Microbia*. 1976, 22(6): 839- 846.
- P.W. Hochachka, G.N. Somero. *Strategien biochemischer Anpassung*. G. Thieme, Stuttgart, New York, 1980.
- Gray, R.J.H, Jackson, H. Growth of a macromolecular composition of a psychrophilic *Micrococcus cryophilus* at elevated temperature. *Antonie van Leeuwenhoek*. 1973(39): 497- 504.
- 刘长青, 毕学军, 张 峰, 等. 低温对生物脱氮除磷系统影响的试验研究. *水处理技术 [J]*, 2006, 32(8): 18- 21.
- 张代钧, 卢培利, 陈丹琴. 传统活性污泥法 COD 去除及脱氮改造的模拟. *环境科学学报 [J]*, 2002, 22(4): 448- 454.
- 韩洪军, 黄集华, 马文成. 低温对于脱氮效果影响的试验研究 [J]. *现代化工*, 2005, 25(增刊): 171- 177.
- 白晓慧, 陈英旭, 王宝贞. 活性污泥法低温硝化及运行控制条件研究. *环境科学学报 [J]*, 2001, 21(5): 569- 572.
- Randall C W, Pattarkine V M, McClintock S A. Nitrification kinetics in single sludge biological nutrient removal activated sludge systems. *Water sci Technol*, 1992, 25(6): 195- 241.
- Snkjaer O, Yndgaard L, Harremoes P. Characterisation of the nitrification process for design purposes. *Water Sci Technol*, 1994, 30(4): 47- 56.
- Maria Rothman. Operation with biological nutrient removal with stable nitrification and control of filamentous growth [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(4-5): 549- 554.
- 何成达. 投加硝化菌的活性污泥工艺硝化效率特性. *环境化学 [J]*, 2002, 21(6): 581- 583.
- Van Ginkel, C.G., J. Tramper, K.C.A., M. Luyben, and A. Klapwijk. Characterization of *Nitrosomonas europaea* immobilized in calcium alginate. *Enzyme Microb Technol*, 1983(5): 297- 303.
- Tramper J, Grootjen D R J. *Enzyme Microb technol*, 1986(8): 472- 476.
- 郑 平, 等. 固定化硝化细菌耐低温机理的研究. *生物工程学报 [J]*, 1997, 13(3): 334- 338.
- Euiso Chri, Daewhan Rhu, Zuwhan Yun, et al. Temperature effects on biological nutrient removal system with weak municipal wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 1998, 37(9): 219- 226.
- 赵立军, 马 放, 陆青海, 等. 低温地区市政污水厂工艺选择、设计与运行的探讨 [J]. *环境工程*, 2005, 23(1): 27- 29.
- 李亚选, 张晓玲, 姜安玺, 等. 低温菌去除污染物的研究现状 [J], 2006, 21(2): 14- 18.
- Chevalier P. Nitrogen and phosphorus removal by high latitude mat-forming cyanobacteria for potential use in tertiary wastewater treatment. *J Appl Phycology*, 2000, 12(2): 105- 113.

(责任编辑/荆小旦)