

# 反硝化聚磷菌的脱氮除磷特性研究

李相昆<sup>1</sup>, 张 杰<sup>1</sup>, 黄荣新<sup>1</sup>, 马 力<sup>2</sup>, 鲍林林<sup>1</sup>, 姜安玺<sup>1</sup>

(1 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2 哈尔滨市供排水集团, 黑龙江 哈尔滨 150010)

**摘 要:** 为研究反硝化聚磷菌的脱氮除磷特性,对接触氧化、SBR、A/O、A<sup>2</sup>/O 和双污泥系统的活性污泥做了好氧吸磷和缺氧吸磷的静态烧杯试验,单独考察了双污泥系统的污泥在厌氧条件下以不同碳源为底物和缺氧条件下以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为电子受体的释 吸磷特性。结果表明, SBR、A<sup>2</sup>/O、双污泥系统的污泥在好氧和缺氧条件下均有很好的吸磷效果,其中双污泥系统污泥的缺氧吸磷速率和反硝化速率最大。而且在缺氧条件下,当 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 充足时其浓度对吸磷效果影响不大,吸磷速率为 7.52 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P/(gMLVSS · h),反硝化速率为 9.74 mgNO<sub>x</sub><sup>-</sup> - N/(gMLVSS · h)。在厌氧条件下,以蔗糖为碳源的释磷量最小,释磷速率亦最低,而以 CH<sub>3</sub>COONa 为碳源的释磷量和释磷速率均最大,释磷速率为 4.2 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P/(gMLVSS · h)。

**关键词:** 反硝化除磷; DPB; 电子受体; 碳源

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2006)03-0035-05

## Study on Characteristic of Denitrification Phosphorus Removal Bacteria

LI Xiang-kun<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, HUANG Rong-xin<sup>1</sup>, MA Li<sup>2</sup>,

BAO Lin-lin<sup>1</sup>, JIANG An-xi<sup>1</sup>

(1 School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2 Harbin Water Supply and Drainage Group, Harbin 150010, China)

**Abstract:** To study the characteristics of denitrification phosphorus removal bacteria, a series of batch experiments were carried out, in which the activated sludge samples depended on contact oxidation, SBR, A/O, A<sup>2</sup>/O and two-sludge system. At the same time, the sludge only based on two-sludge system was used to study the effect of different types of carbon source on P-release under anaerobic condition and the effects of different concentrations of nitrate on P-uptake under anoxic condition. Results indicate that the sludge based on SBR, A<sup>2</sup>/O and two-sludge system has high P-uptake rates either under anoxic condition or under aerobic condition. And the sludge based on two-sludge system shows the highest P-uptake rate under anoxic condition. Furthermore the concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> has minor effect on anoxic P-uptake, and the P-uptake rate is 7.52 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P/(gMLVSS · h) with denitrification rate of 9.74 mgNO<sub>x</sub><sup>-</sup> - N/(gMLVSS · h). Under anaerobic condition with CH<sub>3</sub>COONa as carbon source, the maximal P-release rate is 4.2 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> - P/(gMLVSS · h), while it is low with cane sugar as carbon source.

基金项目: 黑龙江省科学技术计划项目 (GA01C201-03)

**Key words:** denitrification phosphorus removal; DPB; electron acceptor; carbon source

传统的生物脱氮除磷工艺存在自身难以解决的矛盾:聚磷菌和反硝化菌对碳源的竞争始终存在;硝化菌、反硝化菌、聚磷菌菌龄不同,各种菌群混合在一起互相制约,难以使系统达到最优的运行条件。为此各国水处理专家有针对性地进行了大量研究,在工艺形式和工艺流程上进行了一系列的革新,尤其是反硝化聚磷菌 DPB (denitrification phosphorus removal bacteria)的发现使脱氮除磷工艺有了更为广阔的发展前景<sup>[1~7]</sup>。以兼性厌氧反硝化聚磷菌的特性研究为基础,开展以生物体内储存的聚羟基烷酸(PHA)为碳源的新工艺和硝化菌与反硝化聚磷菌相分离的双污泥系统的研究<sup>[8~12]</sup>,逐渐得到学者的重视。

DPB有着与完全好氧的聚磷菌(phosphorus accumulating organism, PAO)相似的除磷机理和潜力<sup>[13]</sup>,所不同的是 DPB 利用  $\text{NO}_3^-$  而非  $\text{O}_2$  作为电子受体,并通过氧化内碳源(主要为聚- $\beta$ -羟基烷酸,即 PHB)过量吸磷,同时将  $\text{NO}_3^-$  还原成  $\text{N}_2$ ,使吸磷和反硝化这两个原本对立的过程统一在了一起<sup>[14]</sup>。

为了研究 DPB 的特性,对不同系统的污泥分别做了厌氧、缺氧和好氧交替条件的烧杯试验,并对双污泥系统活性污泥的反硝化除磷特性做了深入的研究。

1 试验材料和方法

1.1 污泥来源

所用污泥来源见表 1 (均取自各系统的终沉淀池)。

表 1 活性污泥来源

Tab 1 Activated sludge source

| 系统                                 | 规模         | 处理对象 |
|------------------------------------|------------|------|
| 接触氧化(1 <sup>#</sup> )              | 实验室小试      | 啤酒废水 |
| SBR(2 <sup>#</sup> )               | 实验室小试      | 生活污水 |
| A/O(3 <sup>#</sup> )               | 哈尔滨文昌污水处理厂 | 市政污水 |
| A <sup>2</sup> /O(4 <sup>#</sup> ) | 实验室小试      | 生活污水 |
| 双污泥系统(5 <sup>#</sup> )             | 实验室小试      | 生活污水 |

1.2 配水水质及分析方法

试验 1 中配制了两种不同的污水,一种为含碳源污水:每升水加 1.5 g 的  $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  和 0.6 mL 营养液;另一种为含磷而无碳源污水:每升

水加入 100 mg 的  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  和 0.6 mL 营养液。营养液(1 L):1.5 g  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 0.15 g  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 0.03 g  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , 0.18 g  $\text{KI}$ , 0.12 g  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 0.06 g  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0.12 g  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 0.15 g  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , 10 g EDTA。

试验 2 中配制了 3 种不同碳源的污水:实际生活污水; $\text{CH}_3\text{COONa}$  溶液加入 0.6 mL 营养液/L;蔗糖污水加入 0.6 mL 营养液/L。营养液的配制同试验 1。

所取水样经离心机离心后采用国家规定的标准方法测定相关指标。

2 试验步骤

试验 1:将取自不同系统的 5 种污泥各均分成两份,其中一份控制为厌氧、缺氧条件,另一份控制为厌氧、好氧条件,计 10 个反应器同时运行。厌氧时段加入有碳源污水,考察释磷和碳源消耗情况,反应时间控制为 180 min,结束后静沉 30 min 换含磷而无碳源污水,进入缺氧或好氧吸磷时段。10 个反应器在吸磷阶段的初始条件见表 2,聚磷菌在厌氧/缺氧反应器内以  $\text{NO}_3^-$  为电子受体,其起始浓度为 31.25 mg/L (缺氧结束后  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  均有剩余,说明电子受体充足);在厌氧、好氧反应器内以  $\text{O}_2$  为电子受体,溶解氧控制在 2~3 mg/L。缺氧和好氧时段的反应时间均控制为 195 min。反应结束后先静沉 30 min,然后把上清液排掉,加入含碳源污水进入下一个循环。所有反应温度均为室温(20℃),pH 值通过滴加 HCl 和 NaOH 溶液控制在  $7 \pm 0.2$ 。为避免溶解氧的干扰,在反应过程中通入氮气吹脱搅拌。

表 2 试验 1 中吸磷阶段各反应器的初始条件

Tab 2 Starting conditions of P-up take stage in first experiment

| 项目                                                              | 1 <sup>#</sup> 2 <sup>#</sup> 3 <sup>#</sup> 4 <sup>#</sup> 5 <sup>#</sup> |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                 | 缺氧                                                                         | 好氧    | 缺氧    | 好氧    | 缺氧    | 好氧    | 缺氧    | 好氧    | 缺氧    | 好氧    |
| $\text{NO}_3^- - \text{N} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$    | 31.25                                                                      |       | 31.25 |       | 31.25 |       | 31.25 |       | 31.25 |       |
| MLVSS / $(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$                        | 3 476                                                                      | 3 245 | 3 109 | 2 960 | 3 587 | 3 742 | 2 692 | 2 437 | 2 275 | 2 258 |
| $\text{PO}_4^{3-} - \text{P} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$ | 28.43                                                                      | 28.43 | 22.82 | 22.82 | 20.75 | 20.75 | 19.8  | 19.8  | 27.54 | 27.54 |
| 时间 / min                                                        | 195                                                                        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

试验 2:将连续流双污泥系统的污泥平均分成 3 份,分别置于反应器 a、b、c 中,厌氧阶段加入不同碳

源,缺氧阶段加入  $\text{NO}_3^-$  溶液,其他试验步骤同试验 1,各反应器的初始条件见表 3。

表 3 试验 2 中厌氧释磷阶段各反应器的初始条件

Tab 3 Starting conditions of anaerobic stage in second experiment

| 反应器                                       | a      | b                         | c     |
|-------------------------------------------|--------|---------------------------|-------|
| MLVSS/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 2 659  | 2 209                     | 2 545 |
| 碳源                                        | 生活污水   | $\text{CH}_3\text{COONa}$ | 蔗糖    |
| COD/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )   | 129.39 | 220.8                     | 284.8 |

3 试验结果与讨论

① 试验 1

试验结果表明,接触氧化系统的污泥无论是以氧为电子受体还是以  $\text{NO}_3^-$  为电子受体,吸磷量均很少,说明污泥中聚磷菌不占优势;A/O 系统的污泥在好氧状态下吸磷量较大,吸磷速率也较快,但在缺氧状态下吸磷量相对较小,说明污泥中完全好氧聚磷菌占优势,而 DPB 在聚磷菌中所占比例较小;SBR、 $\text{A}^2/\text{O}$ 、双污泥系统的活性污泥无论是在缺氧还是在好氧状态,均表现出良好的吸磷特性,而双污泥系统污泥的缺氧吸磷速率和吸磷量均是最大的(见图 1),说明在 SBR、 $\text{A}^2/\text{O}$ 、双污泥系统 3 种活性污泥中,DPB 所占比例较大,而双污泥系统中 DPB 所占比例最大。综上所述,反硝化聚磷菌容易在厌氧、缺氧或者是厌氧、缺氧、好氧交替环境下富集。

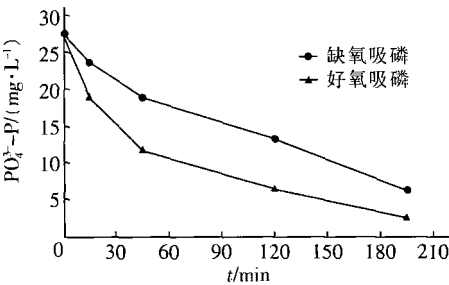


图 1 双污泥系统污泥的吸磷曲线

Fig 1 P-up take curve of sludge taken from two-sludge system

② 试验 2

图 2 是以  $\text{CH}_3\text{COONa}$  为碳源时厌氧、缺氧过程中各物质的浓度变化曲线,图 3 为  $\text{NO}_3^-$  浓度对缺氧吸磷效果的影响曲线。

从图 2 可以看出,厌氧反应开始时的释磷速率最大,COD 消耗速率最高,在随后的反应中两速率逐渐降低,至第 180 min 左右时速率都趋近于零。缺氧反应开始时磷的吸收速率及反硝化速率均是最

大的,随着反应的进行则速率逐渐降低。图 3 表明,在  $\text{NO}_3^-$  充足的条件下,其浓度对缺氧吸磷效果的影响很小。另外在试验中发现,如果缺氧反应时间过长,则污泥呈褐色,较破碎且容易上浮。在厌氧反应结束后,如果残留的 COD 过多,则污泥也会大量上浮,而且吸磷速率降低。

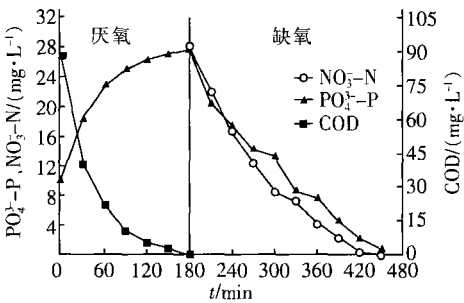


图 2 各物质的浓度变化

Fig 2 Variation of  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ , COD and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  concentrations under anaerobic and anoxic conditions

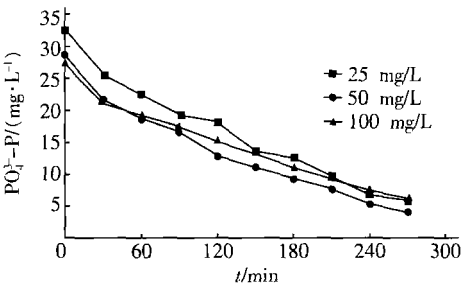


图 3 不同  $\text{NO}_3^-$  浓度下的吸磷曲线

Fig 3 P-up take curve at different concentrations of  $\text{NO}_3^-$

表 4 列出了反应初始 1 h 内的平均吸磷/释磷速率 (PUR/PRR) 和反硝化速率 (DNR)。

表 4 初始 1 h 内的平均吸磷/释磷速率和反硝化速率

Tab 4 Rates of P-up take, P-release and denitrification

| 电子受体                                                                                      | $\text{NO}_3^-$ | $\text{O}_2$ |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------|
| PUR/( $\text{mgPO}_4^{3-}-\text{P} \cdot \text{g}^{-1}\text{MLVSS} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 7.52            | 15.84        |
| DNR/( $\text{mgNO}_x^- - \text{N} \cdot \text{g}^{-1}\text{MLVSS} \cdot \text{h}^{-1}$ )  | 9.74            |              |
| PRR/( $\text{mgPO}_4^{3-}-\text{P} \cdot \text{g}^{-1}\text{MLVSS} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 4.2             | 4.5          |

碳源对释磷的影响如图 4 所示。可以看出,以  $\text{CH}_3\text{COONa}$ 、生活污水为碳源时,厌氧反应开始时的释磷速率较大,反应进行了 3 h 左右后释磷速率变得很小。与之相对应,在反应的最初 3 h 内 COD 降解速率较快,随着释磷速率的减小则 COD 的降解也趋于停滞。相反,在以蔗糖为碳源时,TP 一直以偏小的速率均匀释放,COD 也一直保持较为均匀的降解速率直至消耗殆尽。

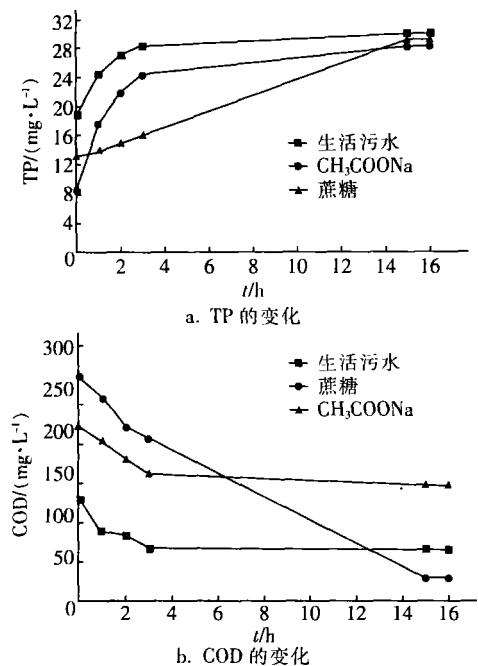


图 4 不同碳源对厌氧释磷的影响

Fig 4 Effect of different carbon sources on anaerobic P-release

表 5 列出了 3 个反应器在厌氧反应阶段的几种特殊速率和碳源利用情况,其中 CR 代表厌氧反应最初 1 h 的 COD 消耗速率,TRP 和 TCC 分别代表厌氧反应 0~3 h 的释磷总量和 COD 消耗总量,C/P 代表厌氧反应 0~3 h 消耗的 COD 放磷量。可见,以 CH<sub>3</sub>COONa 为碳源时的释磷速率最大,以蔗糖为碳源时的释磷速率最小。

表 5 厌氧时段各反应器中的几种特殊速率

Tab 5 Specific rates under anaerobic condition

| 反应器                                                                                    | a     | b     | c     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| PRR / (mgPO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> · P · g <sup>-1</sup> MLVSS · h <sup>-1</sup> ) | 2.15  | 4.2   | 0.26  |
| CR / (mgCOD · g <sup>-1</sup> MLVSS · h <sup>-1</sup> )                                | 15.47 | 8.26  | 10.78 |
| TRP / mg                                                                               | 9.53  | 15.99 | 2.98  |
| TCC / mg                                                                               | 61.09 | 59.42 | 77.71 |
| C : P / (mgCOD · mg <sup>-1</sup> P)                                                   | 6.41  | 3.72  | 26.08 |

不同碳源对厌氧释磷的影响机理,目前看法仍不统一,比较合理的解释为:污泥中存在其他异养菌群,这些异养菌群能够以不同的方式利用污水中以不同形式存在的碳源,而且它们在吸收碳源时所需要的能量并不是来自于细菌体内储存的聚合磷酸盐的水解,因此在吸收碳源过程中不会释磷。而 PAO /DPB 利用聚磷水解提供的能量优先吸收小分子的碳源如乙酸、丙酸等,当污水中缺少这些小分子碳源时,聚磷菌厌氧释磷就会受到影响。这样,就存

在着不同的异养菌群在厌氧反应阶段对污水中碳源的竞争。比如 Carucci<sup>[15]</sup> 提到的异养菌 GAO (Glycogen accumulating organism),在厌氧阶段 GAO 可以直接吸收葡萄糖、蔗糖,并以糖苷 (Glycogen) 的形式储存在体内,在此过程中是不释磷的, Glycogen 吸收碳源所需要的能量来自于 Glycogen 转化成 PHA 过程中释放的能量,还有一部分能量来自蔗糖的厌氧水解。当然,蔗糖中有一部分也会水解为小分子物质 (VFA),DPB 会利用聚合磷酸盐水解提供的能量吸收这些小分子物质,释放少量的磷。

4 结论

- ① 不同的系统中 DPB 所占比例不同,表现出来的反硝化吸磷特性也不同。厌氧、缺氧、好氧交替环境或厌氧、缺氧环境有利于 DPB 的生长富集。
- ② DPB 的反硝化速率为 9.74 mgNO<sub>x</sub><sup>-</sup> · N / (gMLVSS · h),吸磷速率为 7.52 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> · P / (gMLVSS · h),约为好氧吸磷速率的一半。
- ③ 在以蔗糖为碳源时,释磷速率仅为 0.26 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> · P / (gMLVSS · h);而在以 CH<sub>3</sub>COONa 为碳源时,释磷速率为 4.2 mgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup> · P / (gMLVSS · h)。

参考文献:

[1] 张杰,臧景红,杨宏,等. A<sup>2</sup>/O 工艺的固有缺陷和对策研究 [J]. 给水排水, 2003, 29 (3): 22 - 26

[2] 王亚宜,王淑莹,彭永臻. MLSS、pH 及 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> · N 对反硝化除磷的影响 [J]. 中国给水排水, 2005, 21 (7): 47 - 51.

[3] Kuba T, van Loosdrecht M C M, Brandse F A, et al. Occurrence of denitrifying phosphorus removal bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants [J]. Wat Res, 1997, 31 (41): 777 - 786

[4] 王亚宜,彭永臻,王淑莹,等. 反硝化除磷理论、工艺及影响因素 [J]. 中国给水排水, 2003, 19 (1): 33 - 35.

[5] Kuba T, Mumleitner E, van Loosdrecht M C M, et al. A metabolic model for the biological phosphorus removal by denitrifying organisms [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1996, 52 (6): 685 - 695.

[6] Mumleitner E, Kuba T, van Loosdrecht M C M, et al. An integrated metabolic model for the aerobic and denitrifying biological phosphorus removal [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1997, 54 (5): 434 - 450.

[7] 卢峰,杨殿海. 反硝化除磷工艺的研究开发进展 [J]. 中国给水排水, 2003, 19 (9): 32 - 34.

[ 8 ] Bortone G, Saltarelli R, Alonso V, *et al* Biological anoxic phosphorus removal—the DEPHANOX process[ J ]. Wat Sci Tech, 1996, 34 (1 - 2): 119 - 128

[ 9 ] Wanner J, Cech J S, Kos M. New process design for biological nutrient removal[ J ]. Wat Sci Tech, 1992, 25 (4 - 5): 445 - 448

[ 10 ] Som R, Bortone G, Saltarelli R, *et al* Phosphate uptake under anoxic conditions and fixed-film nitrification in nutrient removal activated sludge system [ J ]. Wat Res, 1996, 30 (8): 1573 - 1584

[ 11 ] Ng W J, Ong S L, Hu J Y. Denitrifying phosphorus removal by anaerobic - anoxic sequencing batch reactor [ J ]. Wat Sci Tech, 2001, 43 (3): 139 - 146

[ 12 ] 邹伟国,张善发,张辰,等. 新型双污泥脱氮除磷工艺处理生活污水 [ J ]. 中国给水排水, 2004, 20 (6): 16 - 18

[ 13 ] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying and dephosphatation and nitrification in a two sludge system [ J ]. Wat Res, 1996, 30 (10): 1702 - 1710

[ 14 ] Som R, Wanner J, Bortone G, *et al* Verification of anoxic phosphate uptake as the main biochemical mechanism of the “Dephanox process”[ J ]. Wat Sci Tech, 1997, 35 (1): 87 - 94

[ 15 ] Canucci A, Kihni M, Brun R, *et al* Microbial competition for the organic substrates and its impact in EBPR systems under conditions of changing carbon feed [ J ]. Wat Sci Tech, 1999, 39 (2): 75 - 85

作者简介:李相昆 (1975 - ), 男, 吉林省吉林市人, 博士研究生, 研究方向为水污染控制。

电话: (0451) 86282767

传真: (0451) 86282358

E - mail: xkl312@sohu.com

收稿日期: 2005 - 09 - 27

(上接第 34 页)

TOC 和  $UV_{260}$  的去除率分别为 68.1% 和 51.7%。

化学生物絮凝工艺中微生物对溶解性有机物的去除主要表现为生物吸附作用,由于化学生物絮凝反应池反应时间较短,微生物的再生水平较低,因而对溶解性有机物的吸附能力有限。

参考文献:

[ 1 ] Crozes G, Capdeville B, Moro A. Gel permeation: a means to characterize wastewater and residual dissolved organic matter in effluents[ J ]. Desalination, 1996, 106: 213 - 224

[ 2 ] 裴海燕,李富生,汤浅晶,等. 污水中有机物分子量分布及去除特性 [ J ]. 中国给水排水, 2003, 19 (12): 51

- 53

[ 3 ] 尤作亮,蒋展鹏,师绍琪,等. 回流污泥强化城市生活污水一级处理的研究 [ J ]. 中国给水排水, 1999, 15 (12): 12 - 14

[ 4 ] Xia S Q, Wang F, Fu Y G, *et al* Biodiversity analysis of microbial community in the chem-biofloculation treatment process[ J ]. Biotechnology Bioengineering, 2005, 89 (6): 656 - 659

作者简介:张志斌 (1975 - ), 男, 山西运城人, 博士研究生, 研究方向为水污染控制。

电话: (021) 65986123

E - mail: zhazhb@163.com

收稿日期: 2005 - 09 - 13

加大污水处理和回用力度 推进污水资源化