

MB(A²/O)工艺的好氧、缺氧摄磷及微生物特性

吴 剑,王世和

(东南大学市政工程系,南京 210096)

[摘要] 为开发高效除磷脱氮技术,研制了将 MBR 与 A²/O 工艺有机集成的新型 MB(A²/O)组合工艺。研究了 MB(A²/O)工艺处理城市污水的好氧、缺氧摄磷性能及微生物特性,并分析了其机理。结果表明:在 MB(A²/O)系统中,聚磷菌约占活性污泥总量的 20%~40%,其中大量存在能够利用 NO_x-N 作为电子受体进行反硝化除磷的 DPB,约占聚磷菌数量的 35.66%~67.83%。好氧摄磷的平均速率为 2.30 mgP·gMLSS⁻¹·h⁻¹,最大摄磷速率为 5.44 mgP·gMLSS⁻¹·h⁻¹;缺氧摄磷的平均速率为 1.56 mgP·gMLSS⁻¹·h⁻¹,最大摄磷速率为 1.94 mgP·gMLSS⁻¹·h⁻¹。

[关键词] 好氧摄磷;反硝化除磷;聚磷菌;电子受体

[中图分类号] X703.1 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)11-0191-05

聚磷菌在好氧环境下以氧为电子受体分解细胞内的 PHB(poly beta-hydroxy butyric acid,聚β羟基丁酸)产生能量,供其在好氧环境中过量摄磷,合成高能物质 ATP(adenosine triphosphate,三磷酸腺苷),其中一部分转化为聚磷,作为能量贮存于细胞内。相对于正常细胞的磷含量(1%~2%),聚磷菌的摄磷量数倍于此,可达到 12%^[1,2]。近年来的研究表明^[3~8],除 PAO(phosphate accumulating organisms,聚磷菌)可在好氧环境下摄磷外,另一种兼性厌氧反硝化除磷菌 DPB(denitrifying phosphorus removing bacteria)被证明具有同 PAO 极为相似的除磷原理,只是氧化细胞内贮存 PHB 时的电子受体不同(PAO 为氧气,而 DPB 为 NO_x⁻)而已。因 DPB 可在缺氧环境下释磷,这就使释磷和反硝化两个过程可借助同一种细菌在同一环境下完成。这样,不仅节省了脱氮对碳源的需求,而且,摄磷在缺氧区内完成可缩小曝气池的体积,节省能源。研究表明,充分利用 DPB 除磷原理可使 COD 需求量减少 50%,耗氧量减少 30%,剩余污泥量减少 50%^[9]。针对城市污水碳磷比较小、除磷困难的问题,作者提出了 MB(A²/O)(membrane biological (anaerobic/anoxic/oxygenous),膜

生物厌氧/缺氧/好氧工艺)工艺,利用聚磷菌在好氧、缺氧状态摄磷和厌氧状态释磷的“搬运”作用,将磷从反应器移出,保证出水磷浓度维持在较低水平。同时,使磷在厌氧区高度富集,辅以化学协同处理,达到除磷的目的。

1 材料与方法

1.1 工艺流程

试验流程如图 1 所示。调节区可确保后续反应

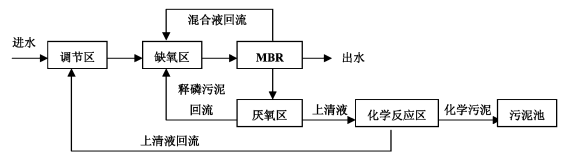


图 1 MB(A²/O)工艺流程

Fig.1 Craft flow of MB(A²/O)

器水位和水流稳定;缺氧区主要进行反硝化,兼有反硝化除磷功能,有效容积 35 L;好氧区为 MBR(membrane biological reator,膜生物反应器),内置聚

[收稿日期] 2007-09-05

[基金项目] 江苏省建设厅科研资助项目(JS200308)

[作者简介] 吴 剑(1981-),男,江苏扬州市人,东南大学市政工程系硕士,主要研究方向:水污染控制,E-mail:wj5400119@163.com;王世和(1945-),男,东南大学市政工程系教授,博士生导师,E-mail:wshhj@seu.edu.cn

丙烯(PP)中空纤维微滤膜组件,用以去除碳源有机物、氨氮硝化和微生物好氧摄磷,有效容积为 42 L;厌氧区主要功能为释磷(本试验富磷上清液 TP 质量浓度可达 $30\sim 45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [10]),有效容积 40 L;化学反应区主要完成化学除磷过程。

1.2 试验用水

本试验采用南京锁金村污水处理厂初沉池出水,水质条件见表 1。试验启动阶段所用接种污泥为该厂曝气池的活性污泥,污泥质量浓度为 $2.0\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥沉降比为 30%,污泥指数为 150。

表 1 污水水质条件

Table 1 Qualities of municipal sewage

| 测量统计值 | COD _{Cr} /mg·L ⁻¹ | pH | 水温 /℃ | NH ₃ -N /mg·L ⁻¹ | NO ₃ -N /mg·L ⁻¹ | TN /mg·L ⁻¹ | TP /mg·L ⁻¹ |
|-------|--|-----------|----------|---|---|---------------------------|---------------------------|
| 范围 | 186.09~359.51 | 7.68~8.36 | 4~21 | 45.28~73.23 | 0~3.72 | 48.48~74.57 | 3.89~9.79 |
| 均值 | 260 | 8.06 | 13.5 | 57.83 | 0.083 | 60.02 | 5.28 |

2 结果与分析

2.1 静态好氧摄磷试验

为了了解释磷后的聚磷菌在好氧条件下的摄磷特性,进行了静态好氧摄磷试验:取 SRT=48 h 的厌氧区污泥 500 mL (MLSS=11.28 g·L⁻¹),加入 4 500 mL 原水,曝气 72 h。试验结果如图 2 所示。

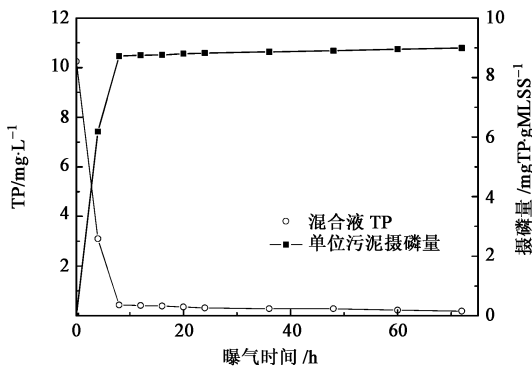


图 2 静态好氧摄磷试验

Fig.2 Experiment of aerobic phosphorus uptake

由图可见,在 0~8 h 内,混合液 TP 急剧下降,8 h 时即降至 $0.43\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随后趋于稳定,并最终降至 $0.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。由图中单位污泥摄磷量的变化也可看出,在 0~8 h 内,聚磷菌摄磷迅速,8 h 时即基本达到摄磷饱和,此时单位污泥的摄磷量为 $8.64\text{ mgTP}\cdot\text{gMLSS}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$,是曝气 72 h 时最大摄磷量 $8.9\text{ mgTP}\cdot\text{gMLSS}^{-1}$ 的 97.08%。这说明,聚磷菌在碳源和供氧充足的条件下,活性恢复很快,此条件下的摄磷过程是一个比较迅速的生化反应过程。

2.2 好氧水力停留时间(HRT, hydraulic retention time)对除磷的影响

图 3 为实际试验系统除磷效果随好氧区 HRT 的变化。由图可见,随着好氧区 HRT 增大到 8 h,出

水 TP 浓度降低,去除率升高,达 97.30%。此后,随 HRT 增大,出水 TP 浓度和去除率变化不大。分析原因,这是由于厌氧释磷后处于“饥饿”状态的聚磷菌的摄磷量有一个极限,当好氧区 HRT 很短时,单位时间内需去除的 TP 量变大(即 TP 负荷变高),使聚磷菌的摄磷能力很快枯竭,导致出水 TP 浓度上升;当好氧区 HRT 能满足聚磷菌完成摄磷极限后,继续增大 HRT 作用已不明显。此外,当 HRT 增长,聚磷菌在好氧区的摄磷总量减少,使厌氧上清液中的磷浓度降低。因此,好氧区 HRT 合理缩短会有利于厌氧释磷。

综合以上两方面因素可知,好氧区 HRT 既不宜过短,也不宜过长,过短则进水流量大,聚磷菌浓度和摄磷能力有限,达不到除磷效果,影响出水水质;过长则因磷负荷较低而影响释磷效果,且增大能耗。通过对试验结果的分析,本研究好氧区的 HRT 以 8~10 h 为宜。

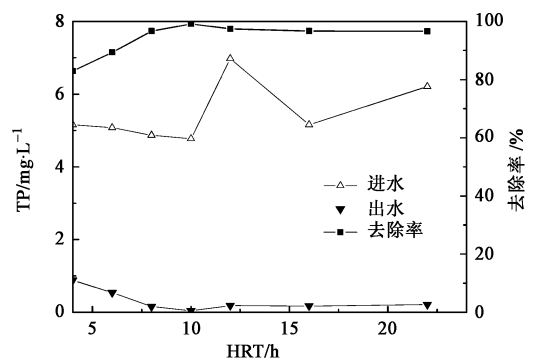


图 3 HRT 对除磷效果的影响

Fig.3 Effect of HRT to phosphorus removal

2.3 好氧区曝气强度对除磷的影响

图 4 为好氧区曝气强度与除磷效果的关系。由图可见,随着好氧区曝气强度的增大,出水 TP 浓度

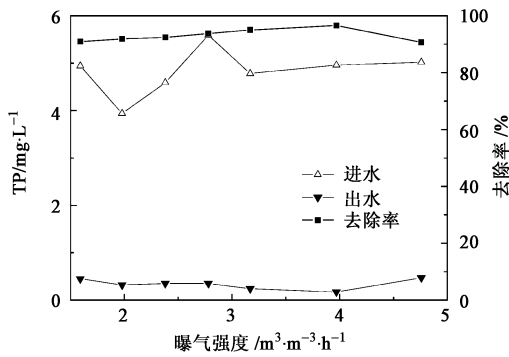


图4 曝气强度对除磷效果的影响

Fig.4 Effect of aeration intensity to phosphorus removal

稳定在 0.5 mg/L 以下,且略呈下降趋势,但当曝气强度大于 $4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,出水 TP 浓度有所上升。分析原因,随曝气强度增大,聚磷菌可在好氧区充分摄磷,但当曝气强度大于 $4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ (即过量曝气)时,为了维持微生物的生长,聚磷菌内部储存的 PHB 将被作为能量而部分或完全地被消耗,出现内源呼吸,导致聚磷菌摄磷能力下降。为此,确定本研究好氧区的最佳曝气强度为 $3 \sim 4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.4 反硝化除磷

试验:取好氧区污泥 1200 mL ($\text{MLSS} = 2.15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$),回流至厌氧区,投加适量醋酸盐厌氧释磷 200 min 后,将污泥平均分成 2 份,分别进行曝气好氧摄磷和投加过量硝酸钠缺氧摄磷,在缺氧摄磷过程中,保持污泥与空气隔绝。如在厌氧释磷中仍有剩余醋酸盐将会影响接下来的摄磷试验,所以,厌氧释磷试验中应尽量保证碳源恰好完全反应。释磷过程醋酸盐吸收速率为 $-0.4 \text{ mgP/mg 醋酸盐 COD}^{[11,12]}$,试验中总释磷量约为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此,试验中投加醋酸钠 $\text{COD } 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为厌氧释磷碳源。试验结果如图 5 所示。

由图 5(a)可见,经过 200 min 的厌氧释磷,单位污泥的释磷量达到 $10.12 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1}$ (即释磷量占自身重量的 1.012%)。进入摄磷阶段后,好氧摄磷比缺氧摄磷速率快得多,这是因为在缺氧条件下只有兼性 DPB 能进行摄磷,而在好氧条件下,专性好氧 PAO 和兼性 DPB 都能进行摄磷。由于 DPB 摄磷的原理和速率与好氧 PAO 类似,因此,缺氧摄磷与好氧摄磷速率的比值一定程度上可间接反映反硝化除磷菌在整个聚磷菌数量中所占的比例。试验中缺氧摄磷的平均速率为 $1.56 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,最大摄磷速率为 $1.94 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;好氧摄磷的平

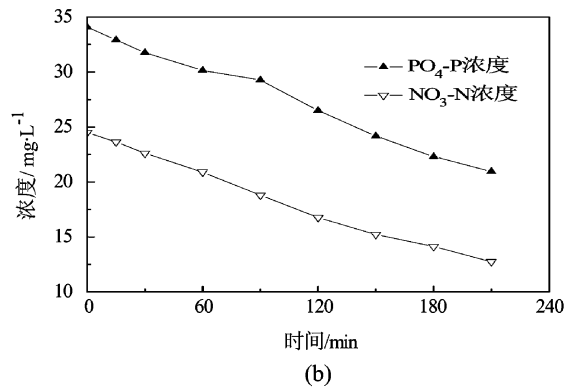
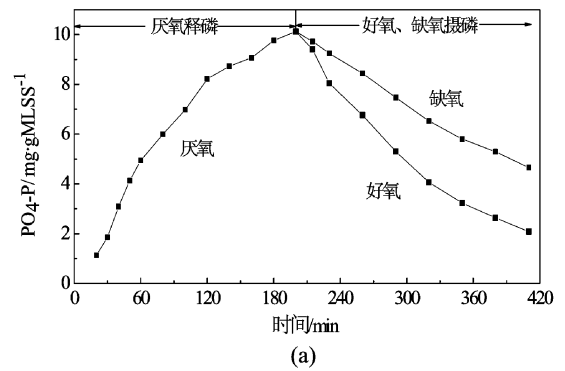


图5 反硝化摄磷试验

Fig.5 Experiment of denitrifying phosphorus removal

均速率为 $2.30 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,最大摄磷速率为 $5.44 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。缺氧摄磷的平均速率和最大摄磷速率分别为好氧摄磷的 67.83% 和 35.66% ,由此初步认为,MB(A^2/O)系统中反硝化除磷菌约占聚磷菌数量的 $35.66 \% \sim 67.83 \%$ 。

图 5(b)为缺氧摄磷时 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 浓度与 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 浓度的变化。可以看出, $\text{NO}_3 - \text{N}$ 浓度与 $\text{PO}_4 - \text{P}$ 浓度几乎成等趋势下降,进一步说明缺氧摄磷是以 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 作为电子受体的,在摄磷的同时完成了反硝化。本节的试验证明,MB(A^2/O)系统中大量存在着反硝化除磷菌,能够进行缺氧摄磷,实现“一碳两用”,不仅验证了 DPB 除磷理论,也为 MB(A^2/O)工艺以较低的碳源消耗达到很好的除磷效果打下了理论基础,解决了城市污水生物除磷中碳源不足的矛盾。

2.5 脱氢酶活性对除磷的影响

图 6 为本试验测得的好氧污泥脱氢酶活性的变化与厌氧释磷效果的关系。由图可见,脱氢酶活性升高,厌氧污泥和上清液中磷浓度均呈平稳上升趋势;当脱氢酶活性由 $2.23 \text{ } \mu\text{gTF} \cdot \text{mL 活性污泥}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 升高到 $15.69 \text{ } \mu\text{gTF} \cdot \text{mL 活性污泥}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,厌氧污

泥中磷浓度从 $56.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $79.88 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 增加了 41.21%, 而上清液中磷浓度占厌氧污泥中磷浓度的比例也从 36.11% 增高到 51.97%。

分析认为, 脱氢酶活性的增强促进了好氧摄磷, 聚磷菌摄磷充分对于厌氧释磷也有很大促进, 提高了综合除磷效果。

2.6 最大释磷速率与最大释磷量

为了研究好氧污泥回流至厌氧区后的释磷速率, 作者进行了如下试验: 取好氧区活性污泥 600 mL ($\text{MLSS} = 2.41 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3 - \text{N}$ 浓度为 $12.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 投加过量醋酸钠 (0.8 g), 与空气隔绝, 厌氧 24 h 进行释磷试验, 分别测定 10 min, 20 min, 30 min, 40 min, 50 min, 60 min, 80 min, 100 min, 120 min, 12 h, 24 h 的释磷量。试验中, 前 2 h 释磷较快, 以后速率缓慢, 图 7 为本试验 120 min 内的释磷情况。

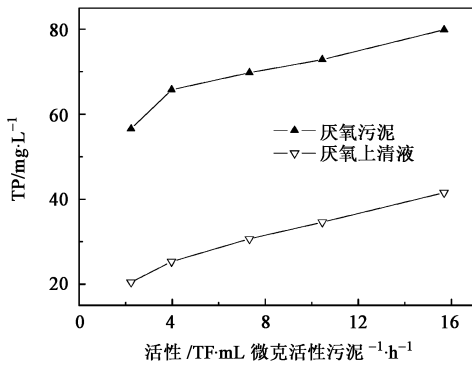


图 6 脱氢酶活性对厌氧释磷效果的影响
Fig.6 Effect of dehydrogenase activity to anaerobic phosphate release

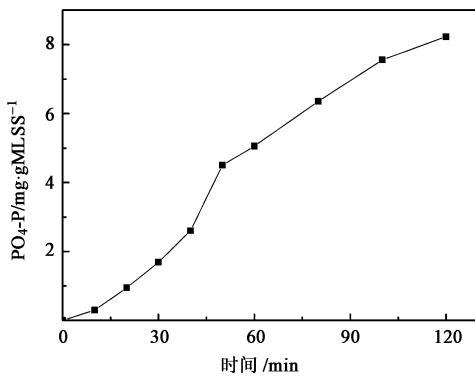


图 7 单位污泥释磷量曲线

Fig.7 Phosphate release curve of unitage MLSS

经典理论认为^[13], 初始阶段释磷最快, 而后速率趋缓, 最后达到完全。由图 7 可见, $\text{MB}(\text{A}^2/\text{O})$ 系统中的污泥释磷与经典理论有所不同, 初始阶段释

磷较慢, 30~40 min 后释磷速率达到最大, 一段时间后趋于平稳。分析原因, 这是因为进入厌氧区的污泥来自 MBR, DO (dissolved oxygen, 溶解氧) 和 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 浓度均较高, 初始阶段会对释磷有所影响, 待 30~40 min 后, DO 和 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 基本耗竭, 释磷效果迅速提高并达到最大速率。计算得到, 40~50 min 时的最大释磷速率为 $11.42 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 120 min 内的平均释磷速率为 $3.97 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。试验中, 在释磷 12 h 和 24 h 时测得的释磷量分别为 $12.73 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1}$ 和 $13.57 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1}$, 通过曲线拟合得到的最大释磷量为 $15 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1}$, 24 h 内的释磷量占最大释磷量的 90.47%, 基本释磷完全。

3 讨论

$\text{MB}(\text{A}^2/\text{O})$ 工艺中磷的迁移转化是通过聚磷菌在好、厌氧条件下摄、放磷实现的, 因此, 各阶段中微生物体内含磷量的多少直接关系到除磷效果的好坏。本试验测得好氧区平均单位污泥的含磷量为 $25.8 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1}$, 即体内平均磷含量为 2.58%; 厌氧区平均单位污泥含磷量为 $16.5 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1}$, 即体内平均磷含量为 1.65%。基于合理的假设: 普通活性污泥含磷量为 1%~1.5%, 好氧区中聚磷菌含磷量为 5%~8%, 可推算出系统中聚磷菌约占活性污泥总量的 20%~40%。可见, 在不排泥的 $\text{MB}(\text{A}^2/\text{O})$ 系统中, 聚磷菌的数量大大高于普通工艺, 这正是 $\text{MB}(\text{A}^2/\text{O})$ 能取得远高于一般工艺的除磷效果, 保证出水磷浓度稳定在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下的重要原因。

4 结论

$\text{MB}(\text{A}^2/\text{O})$ 除磷工艺是一个系统工程, 工艺中的每一环节都对最终的除磷效果产生影响, 只有控制好各阶段的工况条件, 才能达到理想的除磷效果。

1) 通过试验, 确定好氧区的最佳参数为: $\text{HRT} = 8 \sim 10 \text{ h}$, 曝气强度为 $3 \sim 4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ 。此条件下好氧摄磷迅速, 可迅速将混合液的 TP 浓度降至 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。连续运行中 TP 在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 可保证出水达标。

2) 经试验测定与计算, 在 $\text{MB}(\text{A}^2/\text{O})$ 系统中, 聚磷菌约占活性污泥总量的 20%~40%; 其中大量存在着能够利用 $\text{NO}_x - \text{N}$ 作为电子受体进行反硝化除磷的 DPB, 约占聚磷菌总量的 35.66%~

67.83 %。从而保证在处理 C/P 比不高的城市污水时仍可取得很好的除磷效果。

3) 试验中,好氧摄磷的平均速率为 $2.30 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,最大摄磷速率为 $5.44 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;缺氧摄磷的平均速率为 $1.56 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,最大摄磷速率为 $1.94 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

4) 微生物活性作为生物处理状态的综合表征之一,对考察除磷效果有很大影响,本研究充分表明,随着脱氢酶活性的升高,除磷效果变好。

参考文献

- [1] 王宝贞. 水污染控制工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990
- [2] Van Loosdrecht M C M, Hooijmans C M, Brdjanovic D, et al. Biological phosphate removal processes [J]. Appl microbial Biotechnol, 1997, 48: 289~296
- [3] 钱易, 米祥友. 现代废水处理新技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- [4] 郝晓地. 欧洲水环境控磷策略与污水除磷技术(上)[J]. 给水排水, 1998, 24(8): 69~73
- [5] Kuba Tetal. Biological phosphorus removal from wastewater by

anaerobic-anoxic sequencing batch reactor[J]. Wat. Res. 1993, 27(2): 241~252

- [6] Kern-Jespersen J P, Henze M. Biological phosphorus uptake under anoxicandoxic condition[J]. Wat Res, 1993, 27(4): 617~624
- [7] Kuba Tetal. Phosphorus and nitrogen removal with minimal COD requirement by integration of denitrifying dephosphorization and nitrification in a two-sludge system[J]. Wat Res, 1996, 30(7): 1702~1710
- [8] Kuba Tetal. Effect of nitrate on phosphorus release in biological phosphorus removal systems[J]. Wat Sci Tech. 1994, 30(6): 263~269
- [9] 张波. 城市污水生物脱氮除磷工艺与机理研究[D]. 上海同济大学, 1996
- [10] 吴剑. MB(A²/O)工艺及其除磷特性[D]. 江苏东南大学, 2007
- [11] Janssen P M J, Meinema K, Roest H F van der. Biological phosphorus removal manual for design and operation[M]. 祝贵兵, 彭永臻译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005. 194
- [12] 姚重华. 废水处理计量学导论[M]. 北京: 化学工业出版社环境科学与工程出版中心, 2002. 95
- [13] 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. 195~197

The Performances of Aerobic and Anaerobic Phosphorus Uptake and the Characters of Microorganism in MB(A²/O) Craft

Wu Jian, Wang Shihe

(Department of Municipal Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] Combining membrane bioreactor and A²/O crafts, MB(A²/O) craft is developed to promote the technology with high efficiency for phosphorus and nitrogen removal. This report studies the performances of aerobic and anaerobic phosphorus uptake and the characters of microorganism of municipal sewage treated by MB(A²/O) craft, and analyzes its mechanism as well. The results indicate that the phosphate accumulating organisms take up 20 %~40 % of active sludge. There are a great deal of DPB which make use of NO_x-N as electron acceptor to have denitrifying phosphorus removal and take up approximately 35.66 %~67.83 % of PAOs. The average rate of aerobic phosphorus uptake is $2.30 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, and the highest rate is $5.44 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. The average velocity of anaerobic phosphorus uptake is $1.56 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, and the biggest rate is $1.94 \text{ mgP} \cdot \text{gMLSS}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

[Key words] aerobic phosphorus uptake; denitrifying phosphorus removal; phosphate accumulating organisms (PAOs); electron acceptor