

研究论文

进水 C/P 比对 A^2/O 工艺性能的影响

王晓莲, 王淑莹, 彭永臻

(北京工业大学北京市水环境恢复重点实验室, 北京 100022)

摘要: 我国当前面临着严重的水体富营养化问题, A^2/O 工艺是一种有效的同步脱氮除磷工艺, 但其中进水 C/P 比是其运行效果的重要影响因素, 为深入考察不同进水 C/P 比对 A^2/O 工艺运行性能的影响, 试验设计了 4 种进水 C/P 比 (55、45、34、23), 研究了 A^2/O 工艺中 COD、总氮、磷和污泥特性的变化。实验结果表明, 当进水 C/P 比小于 32 时, 磷的去除效果随 C/P 比的降低而线性降低; 当进水 C/P 比高于 32 时, 磷的去除效果稳定在 90%~98%, 出水磷浓度小于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。但是 C/P 比的变化, 对 COD 和总氮的去除率影响较小, 平均去除率分别高于 90% 和 75%。而剩余污泥中磷含量则随 C/P 比的下降而增加。实验发现, 不同 C/P 比系统均存在反硝化除磷现象, 可以实现“一碳两用”, 有利于氮磷去除效果的提高。

关键词: A^2/O 工艺; 进水 C/P 比; 生物脱氮除磷

中图分类号: X 703.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2005) 09-1765-06

Effects of feed water C/P ratio on performance of anaerobic-anoxic-oxic process

WANG Xiaolian, WANG Shuying, PENG Yongzhen

(Key Laboratory of Beijing Water Environment Recovery, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: With the deterioration of eutrophication in China, nitrogen and phosphorus removal from wastewater have caught more and more attention, while influent C/P ratio is one of the most important influence factors. To investigate the effects of feed water C/P ratio on the performance of anaerobic-anoxic-oxic process, four different feed water C/P ratios were designed, that is 55, 45, 34, 23, so as to study the variations of COD, TN, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and sludge characteristics with the C/P ratio. The results showed that when the C/P ratio was lower than 32, P removal efficiency increased as C/P ratio increased linearly, while the C/P ratio was higher than 32, the P removal efficiency maintained at 90%~98%, and effluent P concentration was lower than $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In contrast, regardless of the C/P ratio, excellent COD (90%) and good total nitrogen removal (75%~84%) were maintained throughout the experiments. However, P percentage in the wasted activated sludge (WAS) increased as the C/P ratio decreased. It was also found that denitrifying P removal existed under different C/P ratios by controlling the operation, and nitrogen and phosphorus removal efficiency could be improved.

Key words: A^2/O process; feeding C/P ratio; simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal

2004-08-30 收到初稿, 2004-11-24 收到修改稿。

联系人: 彭永臻。第一作者: 王晓莲 (1977—), 女, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20377003); 国家高技术发展计划项目 (2003AA601010, 2003AA601110)。

Received date: 2004-08-30.

Corresponding author: Prof. PENG Yongzhen. E-mail: wxl921@yahoo.com

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20377003) and the National High Technology Development Program of China (2003AA601010, 2003AA601110).

引 言

为有效控制水体富营养化，迫切需要去除排放废水中过量植物性营养物——氮和磷。但是，城市污水水质、水量的波动性和生物营养物去除工艺本身的局限性使得污水处理厂很难实现稳定的脱氮除磷性能。影响生物脱氮除磷工艺性能的因素是多方面的，诸如温度、泥龄、厌氧区硝态氮浓度、DO 浓度、进水水质特征等。在上述诸多影响因素中，Randall 等^[1]认为生物营养物去除 BNR（生物营养物去除）效果的好坏受进水磷浓度的限制和溶解性 COD（SCOD）的限制，并且提出了进水 C/P 比可作为 BNR 的影响因子之一。Janssen 等^[2]研究表明，污水成分的组成如 BOD/P 和 BOD/N 是生物营养物去除的关键。Andrew 等^[3]也认为进水 C/P 比是影响聚磷菌（PAOs）和聚糖菌（GAOs）内部能源库竞争的关键因素，因为二者均利用内部储存的聚磷和糖源作为乙酸合成 PHA 的能源，同时维持生长。尽管许多研究者对 BOD₅/P 或 C/P 比对工艺性能的影响及其影响机理进行了探讨，但是，上述研究大多以 UCT 工艺和 SBR 工艺为研究对象，而关于对 A²/O 工艺性能的影响尚无深入报道。

本文重点研究了 A²/O 工艺中不同进水 C/P（COD/TP）比对 COD、总氮、磷去除以及污泥特性变化的影响，同时，实验也考察了 A²/O 工艺在不同 C/P 比时的反硝化除磷情况，以期实现提高系统脱氮除磷效果，并为污水厂运行提供理论依据。

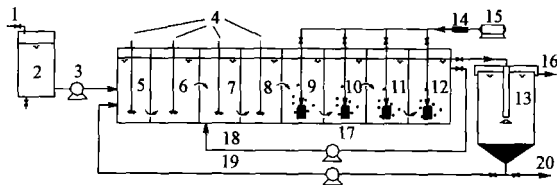


Fig. 1 Schematic diagram of A²O process

- 1—feed; 2—tank; 3—peristaltic pump; 4—stirrer;
- 5—anaerobic 1; 6—anaerobic 2; 7—anoxic 1; 8—anoxic 2;
- 9—aerobic 1; 10—aerobic 2; 11—aerobic 3; 12—aerobic 4;
- 13—settling tank; 14—air flow meter; 15—air pressure;
- 16—effluent; 17—diffuser; 18—recirculation flow;
- 19—recycle flow; 20—excess sludge

1 材料和方法

1.1 实验装置

A²/O 系统实验装置如图 1 所示。装置用有机

玻璃制成，由合建式厌氧-缺氧-好氧反应器和二沉池组成。合建式反应器有效容积为 47.5 L，反应器分为 8 个格室，前两个为厌氧段，随后的两个为缺氧段，剩下的 4 个为好氧段，厌氧：缺氧：好氧体积比 1.25：1：2.75，每个格室内均为完全混合。二沉池有效容积为 20 L。在厌氧区和缺氧区内设搅拌机保持泥水混合液处于悬浮状态。压缩空气通过曝气砂头通入每个好氧格室。进水、内循环混合液和回流污泥混合液流量均由蠕动泵控制。每个格室装有 DO、pH、ORP 和温度在线传感器。反应器每个格室设有取样口，稳定状态每天取样测定。系统运行条件见表 1。

Table 1 Operational parameters of A²/O system

Parameters	Data	Parameters	Data
HRT/h	9	Q _{in} /L·d ⁻¹	127
SRT/d	10	Q _R /L·d ⁻¹	404
MLSS/mg·L ⁻¹	3000	Q _r /L·d ⁻¹	64
DO/mg·L ⁻¹	2—3	R	3.2
T/°C	20	r	0.5

Note: Q_{in}—influent flow rate; Q_R—internal recycling flow rate; R—internal recirculation ratio; Q_r—return sludge flow rate; r—return sludge ratio.

1.2 污泥和污水组成

实验采用的是配制啤酒废水，其配方如下：啤酒（3~3.4 ml·L⁻¹），氯化铵（0.1~0.30 g·L⁻¹），磷酸二氢钾（0.02~0.07 g·L⁻¹），碳酸氢钠（0.05~0.15 g·L⁻¹），七水硫酸镁（0.05 g·L⁻¹），氯化钙（0.01 g·L⁻¹），进水 COD 和 NH₄⁺-N 浓度分别维持在 300 mg·L⁻¹（BOD₅/COD 比为 0.53）和 50 mg·L⁻¹左右，根据实验要求，通过改变磷酸二氢钾投量调节进水磷的浓度，C/P 比最低值和最大值分别为 18 和 62，整个实验过程中 C/P 比作为独立变量，考察 4 种平均 C/P 比 55、45、34 和 23 对 A²/O 工艺性能的影响，同时投加 NaHCO₃ 控制进水 pH 在 6.5~7.5 之间。实验接种污泥为哈尔滨文昌污水处理厂排放的剩余污泥，待系统脱氮除磷效果稳定后，开始调节进水 C/P 比并进行跟踪实验。实验过程见表 2。

Table 2 Operations of whole experiments

Operations	C/P ratio	Average C/P ratio
Run I	18—25	23
Run II	30—36	34
Run III	41—51	45
Run IV	53—61	55

1.3 分析方法

检验分析方法采用国家规定的标准方法^[4]，项目包括 TCOD、SCOD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TN、PO₄³⁻-P、pH、TP、总碱度、DO、ORP、MLSS、MLVSS，水样值经过滤后测定。DO、ORP、pH 测定采用 WTW-pH/OXi340i 便携式在线测定仪。污泥中磷含量的测定：取一定量好氧区末端泥水混合液，按照文献 [5] 给出的总磷测量方法，消解测定泥水混合物的 TP 浓度。为了提高准确度，选择测量多个稀释度的 TP 值，取平均值记录为 P_1 (mg · L⁻¹)；然后再测出好氧区末端泥水混合液的 PO₄³⁻-P 浓度，记录为 P_2 (mg · L⁻¹)，计算得到 $P_1 - P_2$ 的差值为 P_3 (mg · L⁻¹)；测定好氧区末端泥水混合液的污泥浓度 MLSS (mg · L⁻¹)，则 P_3 与 MLSS 的比值就是聚磷污泥的含磷率，用公式可以表示为： $P = (P_1 - P_2) \times 100 / \text{MLSS}$ ，其中 P 为污泥含磷率。PHB 按 Smolders 等^[6]提出的气相色谱法测定。

2 结果和讨论

2.1 对磷去除的影响

图 2 和图 3 分别为不同 C/P 比系统磷浓度的变化及不同格室中磷浓度的变化。由图 2 可以看出，当 C/P 比低于 32 时，磷的去除率随 C/P 比的增加而直线提高，当 C/P 比为 32 时磷的去除率高达 98 %。而当 C/P 比从 32 到 66 的整个增加过程中，磷的去除率始终稳定在 90 %~98 %，出水磷浓度一直小于 0.5 mg · L⁻¹，表明 C/P 比在 32 时系统即可满足出水标准，该结果明显低于 Tetreault 等^[7]提出的满足出水磷浓度低于 0.5 mg · L⁻¹所必需的进水 C/P 比。

从图 3 各格室 PO₄³⁻-P 浓度在 4 种不同 C/P 比的变化可知，厌氧区磷的释放随 C/P 比的增加而下降。归其原因，低 C/P 比时，进入厌氧区的 SCOD 被充分利用，利于促进 PAOs 的生长；高 C/P 比时，进水 SCOD 的量相对于进水磷的浓度充足，SCOD 不能在厌氧区得以充分利用，过剩的 SCOD 将利于 GAOs 的生长，而 PAOs 与 GAOs 相比，前者是除磷的主导微生物菌群而后者则不能作出任何贡献，结果在低 C/P 比时，磷的释放量更高。这与 Andrew 等^[3]提出的在除磷微生物菌群中 PAO 或 GAO 所占优势程度决定了吸收单位质量的 COD 所释放的磷量相一致。由图 2 中也可以

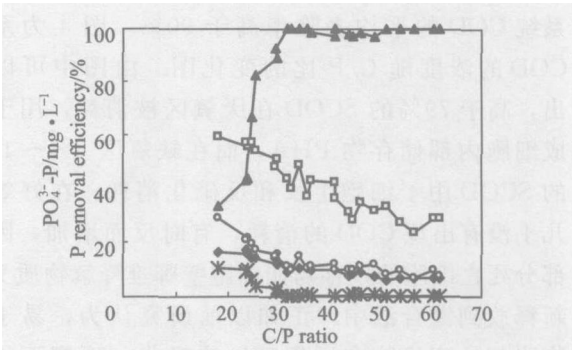


Fig. 2 Variation of P with C/P ratio

◆ influ. P; □ ana. eff. P; ○ ano. eff. P;
* aer. efflu. P; ▲ P rem. effi.

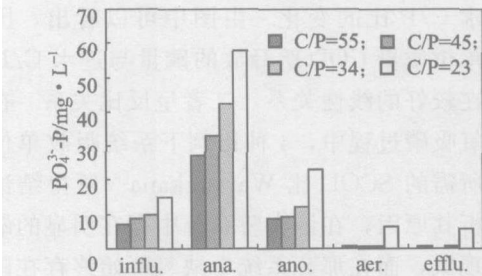


Fig. 3 Variation of PO₄³⁻-P at different zone with C/P ratio

观察到缺氧区磷的吸收，而且磷的吸收量在不同 C/P 比时缺氧与好氧吸磷量之比稳定在 60 %~70 %。在实验过程中，为了更好地提高系统的脱氮除磷效果，根据 Yuan 的理论^[8]，控制缺氧区末端硝酸盐为 1~3 mg · L⁻¹以提供给缺氧区足够的硝酸盐，既提供反硝化吸磷所需的电子供体，又节省能耗。结果也说明，利用内循环控制策略可以有效地强化反硝化除磷，实现“一碳两用”，提高脱氮除磷效果。

表 3 给出了不同 C/P 比时厌氧区磷的释放与好氧和缺氧磷吸收之和之间的相关关系，磷的吸收与释放之比稳定在 1.2~1.32，实现了 EBPR 有效除磷所期望的理论值。

2.2 对 COD 去除的影响

无论进水 C/P 比如何变化，整个实验过程中，

Table 3 P uptake and P release at different C/P ratios

C/P	P release / mg · L ⁻¹	P uptake / mg · L ⁻¹	P uptake / P release ratio
23	42.5	51.0	1.2
34	32.2	41.9	1.3
45	24.3	32.1	1.31
55	20.4	26.8	1.32

系统 COD 的平均去除率高于 90 %。图 4 为系统 COD 的浓度随 C/P 比的变化图。由图中可以看出, 高于 79 % 的 SCOD 在厌氧区被消耗, 用于合成细胞内部储存物 PHA, 而在缺氧区 6 %~11 % 的 SCOD 用于细胞生长和反硝化消耗, 在好氧区几乎没有出现 COD 的消耗, 有时反而增加, 因为部分死亡细胞的残存物如细胞壁等难降解物质又重新释放到混合液中。正如以前研究认为, 易于生物降解的有机物在厌氧区迅速吸收, 而剩下的慢速生物降解有机物则通过发酵或水解后逐渐被利用。

图 5 为厌氧区去除单位质量 COD 所释放的磷量随进水 C/P 比的变化。由图中可以看出, 厌氧区去除单位质量 COD 所释放的磷量与进水 C/P 比之间存在较好的线性关系, 二者呈反比关系。在随后的好氧吸磷过程中, 4 种比例下系统吸收单位质量的磷所需的 SCOD 比 Warangkana^[9] 所得结论偏低, 分析其原因, 在该实验系统中存在明显的缺氧磷吸收现象, 而在那套系统中缺氧区始终存在磷的释放。

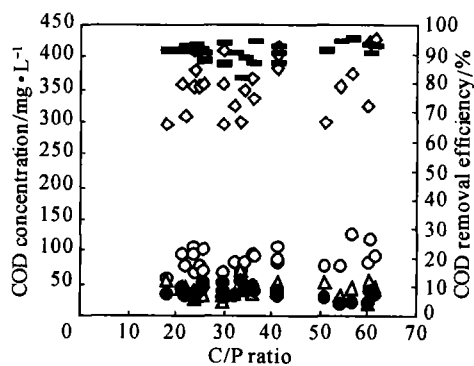


Fig. 4 Variation of COD with C/P ratio

◇ influ., ○ ana. eff., △ ano. eff.,
● aer. efflu., ■ rem. effi.

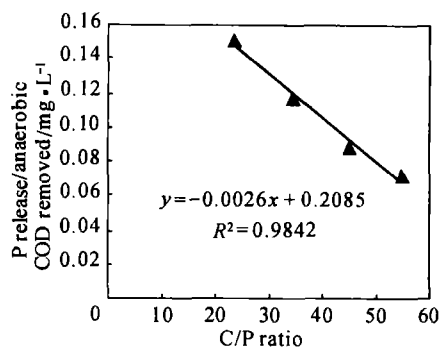


Fig. 5 Relationship of average anaerobic COD uptake/P release ratio with C/P ratio

2.3 对氮去除的影响

尽管进水 C/P 比不断变化, 氮的去除效果始终稳定在 75 %~84 % 之间, 如图 6 所示。图 7 为 C/N 比为 6 时系统缺氧吸磷的过程。由图 7 看出, 实验中存在反硝化除磷现象, 而且缺氧区实现了很好的反硝化反应, 第一缺氧格室的反硝化速率随进水 C/P 比的增加而增加, 对应 4 种进水 C/P 比 23、34、45 和 55 的反硝化速率分别为 $1.43 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{g}^{-1} \text{ MLSS} \cdot \text{h}^{-1}$, $1.54 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{g}^{-1} \text{ MLSS} \cdot \text{h}^{-1}$, $1.60 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{g}^{-1} \text{ MLSS} \cdot \text{h}^{-1}$, $1.91 \text{ mg NO}_3^- \cdot \text{N} \cdot \text{g}^{-1} \text{ MLSS} \cdot \text{h}^{-1}$ 。分析原因, 进入缺氧区 PHB 的量随进水 C/P 比的增加而增加, 对应 PHB 的变化如图 8 所示。由图中可以看出, 在每种 C/P 比条件下缺氧区始终存在 PHB 的消耗, 说明在该系统中, PHB 可作为反硝化除磷菌的内部碳源提供电子供体进行反硝化反应, 合成的 PHB 量越充足, 提供的内碳源越多, 反硝化程度越大。

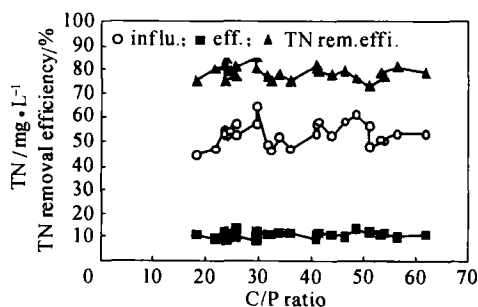


Fig. 6 Variation of TN concentration with C/P ratio

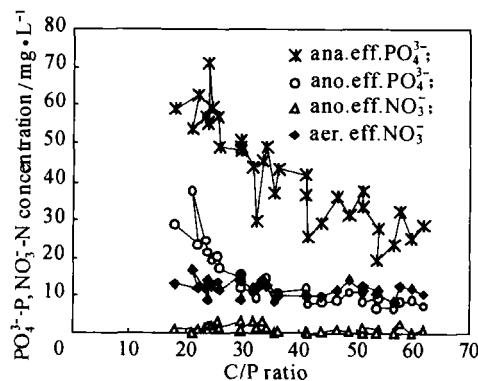


Fig. 7 Anoxic P uptake with C/P ratio

2.4 对剩余污泥产量及污泥含磷量的影响

表 4 为不同 C/P 比对应的微生物浓度比较表, 由表中看出, 污泥的含磷率从进水 C/P 比为 23 的 10.4 % 降到 C/P 比为 55 时的 4.9 %, 而污泥表现产率系数 Y_{obs} 受进水 C/P 比的影响不大; 污泥干重

Table 4 Comparison of biomass production

C/P	Average aerobic MLSS/ mg · L ⁻¹	Average aerobic MLVSS/ mg · L ⁻¹	(MLVSS / MLSS)/ %	Average system COD removal/ mg · d ⁻¹	WAS / mg · d ⁻¹	Y _{obs}	P/ %	P wasted / mg · d ⁻¹
23	3782	2572	68	41431	15522	0.375	10.4	1614
34	3173	2411	76	38643	15036	0.389	8.1	1217
45	2872	2298	80	42064	14742	0.35	6.4	944
55	2420	2057	85	43838	13840	0.315	4.9	678

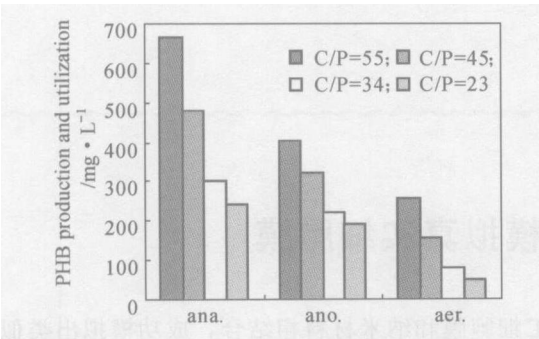


Fig 8 Variation of PHB at different zone with C/P ratio

MLVSS 随进水 C/P 比的增加而下降，而对应的 COD 的变化则随进水 C/P 比没有明显的变化规律，说明主要是无机物积累产生 MLVSS 浓度的变化。

由表 4 也可看出，MLVSS/MLSS 随进水 C/P 比的增加而增加，C/P 比为 55 时的 MLSS 浓度仅为 C/P 比为 23 时的 64 %。分析原因，MLSS 的主要成分为聚磷和阳离子，主要是钾和镁，随剩余污泥中磷含量的增加，聚磷比例加大，导致 MLVSS 增加，结果进水 C/P 比越低，MLVSS/MLSS 比越高。McClintock^[10] 于 1990 年报道在污泥高磷含量时（> 10 % P/VSS）MLVSS/MLSS 比约为 70 %，而在污泥低磷含量（< 4 % P/VSS）时，MLVSS/MLSS 比为 80 % 甚至更高，与实验结果基本相符。该实验结果可用于指导污泥处理过程中磷的二次释放和及时掌握污泥的含磷率。

3 结 论

本研究通过深入考察进水 C/P 比对系统磷、氮、有机物去除效果及污泥特性的影响，结果表明，当进水 C/P 比小于 32 时，A²/O 系统对磷的去除效果随 C/P 比的上升而线性增加；当进水 C/P 比高于 32 时，系统磷的去除效果稳定在 90 %~98 %，出水磷浓度小于 0.5 mg · L⁻¹，表明在 A²/O 系统中进水 C/P 比高于 32 时就可以实现稳定高

效的出水水质；在 A²/O 系统中进水 C/P 比的变化对系统有机物和氮的去除没有明显的影响，系统 COD 的去除率超过 90 %，氮的去除率稳定在 75 %~84 %，出水 TN 的浓度低于 15 mg · L⁻¹，满足城市污水 GB 18918—2002 一级排放标准；好氧末端污泥磷的含量和系统出水溶解性磷的浓度随进水 C/P 比的下降而增加，而 MLVSS/MLSS 随进水 C/P 比的增加而增加，但这种变化没有对污泥表观产率系数产生明显影响，该实验结果可用于指导污泥处理过程中磷的二次释放和及时掌握污泥的含磷率。通过控制系统运行过程，可在传统 A²/O 工艺中实现稳定的反硝化除磷效果，达到既提高脱氮除磷效果又节省能源的目的。鉴于此，建议将进水 C/P 比与生物营养物去除系统的设计和运行过程有机结合。

References

[1] Randall C W, Barnard J L, David H S. Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal. Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc., 1992

[2] Janssen P M. Operating Experiences on Two Full-Scale Plants, Retrofitted for Biological Phosphorus Removal-Nutrient Removal From Wastewaters. Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc., 1994

[3] Andrew J S, David J. Enhanced biological phosphorus removal from wastewater by biomass with different phosphorus contents, Part I: Experimental results and comparison with metabolic models. Wat. Environ. Res., 2003, 75 (6): 485—498

[4] APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th Edn. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association And Water Environment Federation, 1992

[5] Zhao Qingxiang (赵庆祥). Technology of Sludge Resource (污泥资源化技术). Beijing: Chemical Industry Press, 2002. 30—32

[6] Smolders G J F, Meij J V D, Loosdrecht M C M, Heijnen J

- J. Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: stoichiometry and pH influence. *Biotech Bioeng*, 1994, 49: 461—470
- [7] Tetreault M J, Benedict A H, Kaempfer C, Barth E F. Biological phosphorus removal: a technological evaluation. *J. Wat. Pollut. Contr. Fed.*, 1986, 58 (8): 823—837
- [8] Yuan Zhiguo, Adrian Oehmen, Pernille Ingildsen. Control of nitrate recirculation flow in predenitrification systems. *Wat. Sci. Tech*, 2002, 45 (4—5): 29—36
- [9] Warangkana Punrattanasin. Investigation of the effects of COD/ TP ratio on the performance of a biological nutrient removal system: [dissertation]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997
- [10] McClintock S A. Effects of temperature and mean cell residence time on the performance of high-rate nutrient removal processes: [dissertation]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1990

信息与交流

美国科学家用纳米材料模拟真实细胞膜

美国加州大学戴维斯分校的科学家们，最近通过将人工细胞膜和纳米材料相结合，成功模拟出类似真实细胞的人工细胞膜系统。所有活细胞都被包裹在一个由磷脂双分子层构成的细胞膜中。镶嵌着蛋白质和其他分子的细胞膜负责细胞养料和排泄物的进出，控制细胞对外部环境发出信号或做出反应，并且“打理”细胞的分裂与增长“事务”。

以前，人工膜的研究者们将它们放置在诸如金、玻璃、高分子聚合物等固体制成的底垫上，这样人工细胞膜只有一边是向外界开通的。现在，研究者改用一种新型的纳米介孔材料——气凝胶作为支撑的底垫。气凝胶堪称世界上最轻的固体，密度只有空气的 2~3 倍，因为其内部布满无数小孔，所以几乎是完全中空的。最重要的是，采用这种新型纳米材料作为底垫的人工细胞膜，两边都可与外界相通，就像真正的细胞膜那样。

这项由美国国家基金会资助、为期 4 年的研究，预计将揭示出更多关于细胞膜行为的奥秘，例如血小板细胞如何使血液凝结。