

基于氧利用速率表征好氧吸磷过程特性

肖剑波¹ 卢培利^{1,2,*} 曾善文¹ 王磊¹ 闫力源¹ 寇双伍¹

(1. 重庆大学环境科学系, 重庆 400044; 2. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要 过程监测及调控是废水生物除磷工艺得以长期稳定运行的基础。为了获取氧利用速率 (OUR) 在生物除磷过程的潜在应用及该过程氧利用特性, 开展聚磷菌好氧吸磷过程的呼吸测量实验, 分析了 OUR 曲线变化与磷酸盐浓度变化、胞内聚合物 (PHAs) 氧化、外源 COD 存在与否与浓度变化及 pH 变化之间的响应关系。研究得到如下结果: 富集污泥无磷酸盐存在时, 体系依然存在明显的氧利用行为, 在不吸磷的情况下聚磷菌胞内的 PHAs 依然会好氧氧化; 外源 COD 的存在将改变 PAOs 吸磷速率并延长好氧吸磷的结束时间; 体系初始 pH 的不同导致好氧吸磷效率、吸磷过程 pH 变化趋势及变化程度的不同; 不同的初始条件得到不同的 OUR。分析证实, 利用测量 OUR 来监测聚磷菌好氧吸磷过程的运行状态是可行的。

关键词 PAOs; 呼吸测量; 好氧吸磷; OUR; EBPR

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)10-5479-06 DOI 10.12030/j.cjee.201505081

Characteristic of aerobic phosphorus uptake process based on OUR

XIAO Jianbo¹ LU Peili^{1,2,*} ZENG Shanwen¹ WANG Lei¹ YAN Liyuan¹ KOU Shuangwu¹

(1. Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract Process monitoring and regulation are the basis of long-term stability in wastewater biological phosphorus removal processes. To determine the characteristics of oxygen uptake and potential application of process monitoring in wastewater biological phosphorus removal, respiratory measurement experiments of the absorption of phosphorus by PAOs were launched under varying conditions. Measurement of oxygen uptake rate (OUR) is a very useful tool that reflects the consumption of biodegradable substrates. We investigated the response relationship of the OUR change with phosphate concentration, the concentration of exogenous COD, pH, and the oxidation of PHAs. When phosphate was absent, the system still presented oxygen utilization. Intracellular PHA of the PAOs remained aerobic oxidation without phosphorus uptake. The presence of exogenous COD changed the phosphorus uptake rate of the PAOs and led to an extension of the aerobic uptake of phosphorus process length. The initial, varying pHs led to a difference in phosphorus uptake efficiency, pH trends, and degrees of variation in the phosphorus uptake processes. Varying initial conditions resulted in different OURs. It was shown that condition monitoring of aerobic phosphorus uptake processes can be achieved by respirometry.

Key words PAOs; respiratory test; aerobic phosphorus uptake; OUR; EBPR

强化生物除磷技术 (enhanced biological phosphorus removal, EBPR) 作为一种最经济和可持续的废水除磷手段已得到广泛认可和应用。通过引导含磷废水进入活性污泥系统的厌氧阶段以及活性污泥在厌氧、缺氧和好氧条件下的再循环, EBPR 工艺过程促进了活性污泥系统中聚磷微生物 (phosphate

accumulating organisms, PAOs) 对磷的富集作用^[1]。利用反应器的厌氧好氧条件交替及供给挥发性短链脂肪酸作为主要基质, 能够使 PAOs 逐渐成为支配菌群^[2-3]已经取得共识。但是生物除磷系统的不稳定性屡有报道^[4-7]。生物除磷系统的复杂性使得除磷效果受到 pH、磷酸盐、污泥内部菌群和碳磷比等

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50908241)

收稿日期: 2015-05-13; 修订日期: 2015-07-31

作者简介: 肖剑波 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水污染控制理论与技术。E-mail: 1120502402@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: lupl@cqu.edu.cn

因素的影响^[8-12]。传统的离线监测方法由于测试时间长、测试过程易受样品中磷浓度及显色程度影响等原因^[13-14]不能及时发现除磷系统存在的问题,不利于除磷系统的正常运行。当前,呼吸测量在重金属抑制评估、COD组分划分与测定、参数测定与校核、动力学参数估计等方面已得到广泛的研究和相应的应用^[15-21]。然而,对于呼吸测量在EBPR过程中可能的应用以及该过程的呼吸特性还没有得到充分的认识与研究。

本研究采用成熟的呼吸测量技术,在前期以两种不同VFAs作为唯一碳源对吸磷过程影响的研究基础上^[22],开展了多种条件下的聚磷菌好氧吸磷实验,意在揭示各因素对于好氧吸磷过程的影响,从实验角度说明氧利用速率(oxygen uptake rate, OUR)应用于生物除磷过程在线监测的可能性。

1 实验部分

1.1 实验材料

1.1.1 实验装置

采用厌氧-好氧SBR来富集聚磷菌,反应器为圆柱形有机玻璃材质,总容积为8 L。装置利用时间继电器进行自动控制,运行周期见图1。

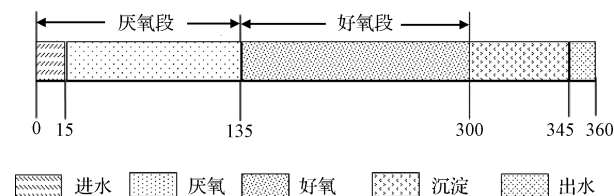


图1 SBR一个周期各阶段运行时间

Fig. 1 Running time with in a cycle of SBR system

1.1.2 富积污泥

参考LU等^[23]使用乙酸钠和丙酸钠交替作为碳源,每十天交替一次的方法富集聚磷菌,利用实验室已富集成功的活性污泥^[22]开展实验。

1.2 实验方法

1.2.1 磷酸盐对OUR的影响

取SBR好氧运行结束后污泥,淘洗后置入呼吸仪曝气室中,通氮气并加入乙酸钠使理论COD浓度约为 $200\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,厌氧运行2 h后,再次淘洗去除残留COD及厌氧释放的磷;曝氧气在无磷酸盐、仅有PHAs下进行呼吸测量;30 min后加入 KH_2PO_4 使磷约为 $20\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,继续呼吸测量同时分析胞内聚合物(polyhydroxyalkanoates, PHAs)。

1.2.2 外源COD与OUR的响应

1) 存在外源COD:取SBR好氧段结束后污泥,淘洗以去除残留COD和磷,曝气确保PHA消耗殆尽且OUR趋于内源呼吸,投加乙酸钠和 KH_2PO_4 储备液,使反应器COD理论浓度和磷浓度分别约为 100 和 $28\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进行呼吸测量。

2) 存在内、外源COD:取SBR厌氧段结束后污泥,均分3份,通氮气淘洗污泥,并依次放入呼吸仪曝气室内,分别投加乙酸钠使COD理论浓度约为 0.80 和 $150\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,同时投加 KH_2PO_4 使磷浓度约为 $60\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进行呼吸测量同时分析磷。

1.2.3 pH与OUR的响应

取SBR厌氧运行结束污泥均分3份,通氮气淘洗污泥,将污泥放入呼吸仪曝气室内,投加 KH_2PO_4 使磷浓度约为 $30\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,控制初始pH分别在 $7.2 \sim 8.0$ 、 $8.5 \sim 9.5$ 和 $5.9 \sim 6.5$ 条件下进行呼吸测量同时分析磷。

1.3 化学分析

利用混合呼吸仪^[24]测定氧利用速率(OUR),COD与磷按标准方法^[25-26]进行分析;PHAs采用气相色谱法进行测定^[23,27]。

PHAs测定具体做法:取反应器污泥按1%体积比与甲醛混合,经离心后除去上清液,然后以磷酸盐混合液清洗样品,再次离心除去上清液,后在 $-36\text{ }^\circ\text{C}$, 7.6 Pa 下冷冻干燥脱水20 h。称取冻干污泥 30 mg 放入有胶塞玻璃管中,加入 2 mL 氯仿和 2 mL 酸化甲醇酯化液(含 $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 苯甲酸),密封后在干式恒温器中 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 下消解6 h。冷却至室温后加入 1 mL 超纯水,混合后剧烈振荡。静沉1 h,然后以移液器吸出下层氯仿相放入另一瓶中,以硫酸钠干燥后, $2\text{ }\mu\text{L}$ 上色谱分析。

2 结果与讨论

2.1 磷酸盐对好氧吸磷过程OUR的影响

图2所示,在未添加磷酸盐情况下,体系依然存在较明显的氧利用行为,OUR从约 $0.7\text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 的最大值开始,随PHAs的氧化而快速下降,证实在不吸磷的情况下聚磷菌胞内PHAs依然会好氧氧化。初始阶段PHAs浓度虽然最大,却没有达到饱和状态。在PHAs降解24 min后投加磷酸盐,呼吸速率曲线发生了明显变化:OUR值增加并显示出接近基质饱和的呼吸特性,出现较平稳的平台;到约70 min时,尽管PHAs的总量还有 $20 \sim 30\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

磷酸盐浓度仅为约 $5\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,此时呼吸速率快速下降进入较低的近似平稳的状态。

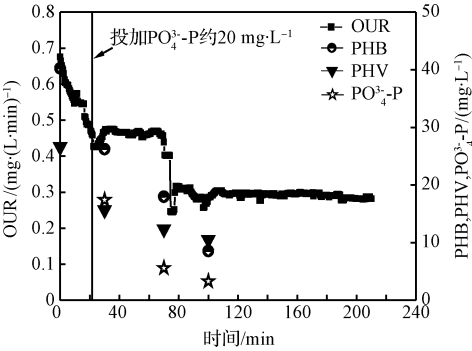


图 2 磷酸盐对 OUR 的影响
Fig. 2 Effect of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ on OUR

经上述分析,聚磷菌胞内聚合物好氧氧化的发生并不伴随着吸磷,但吸磷过程的存在将改变体系的氧利用特征,这对于污水处理的运行调控具有重要意义,即可根据磷酸盐的浓度采用合适曝气策略,以控制能耗并满足除磷要求。

2.2 利用外源 COD 的 OUR 响应

图 3 为仅含外源 COD 条件下得到的呼吸实验结果。结果显示,好氧运行过程前约 15 min,伴随着 OUR 曲线上升至最高点后的快速下降,系统出现释磷行为,磷浓度增加 $9.2\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;但 15 min 后,体系从释磷转入好氧吸磷,OUR 下降趋势产生拐点并出现明显平台,与图 1 所示特征一致,证实好氧吸磷行为对系统的氧利用行为有决定性影响。

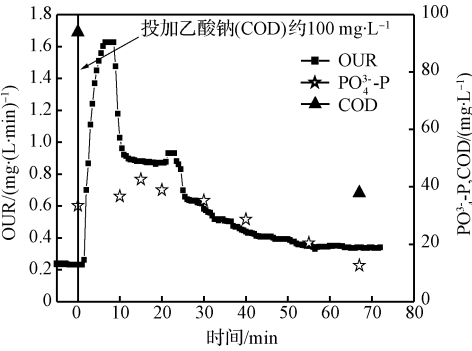


图 3 仅含外源 COD 时 OUR 与磷酸盐和 COD 的响应
Fig. 3 Response of OUR to $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and COD in a batch experiment with exogenous COD

如图 4(a)所示,仅含内源 COD 状态下,好氧吸磷过程开始,OUR 从最大值开始下降,约 90 min 时,伴随 OUR 进入内源呼吸,吸磷过程结束,磷吸收率为 85.8%。图 4(b)和图 4(c)显示,内外源 COD 同

时存在条件下,外源 COD 分别为 70.54 及 $143\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,约 120 min 时进入内源呼吸,磷吸收率分别为 86.4% 和 85.3%,呼吸速率进入内源呼吸的转折点仍与吸磷结束相对应,即不论外源 COD 量的多少,呼吸测量仍可指示好氧吸磷过程终点。图 4 的 3 个实验结果对比发现,PAOs 吸磷过程的吸磷总量大致不变,即外源 COD 的存在不会造成吸磷量的变化,但影响 PAOs 好氧吸磷过程的瞬时速率,并最终导致好氧吸磷结束时间的延迟。随着外源 COD 浓度的增加,OUR 曲线下降趋势变缓且其最大速率平台越发明显。

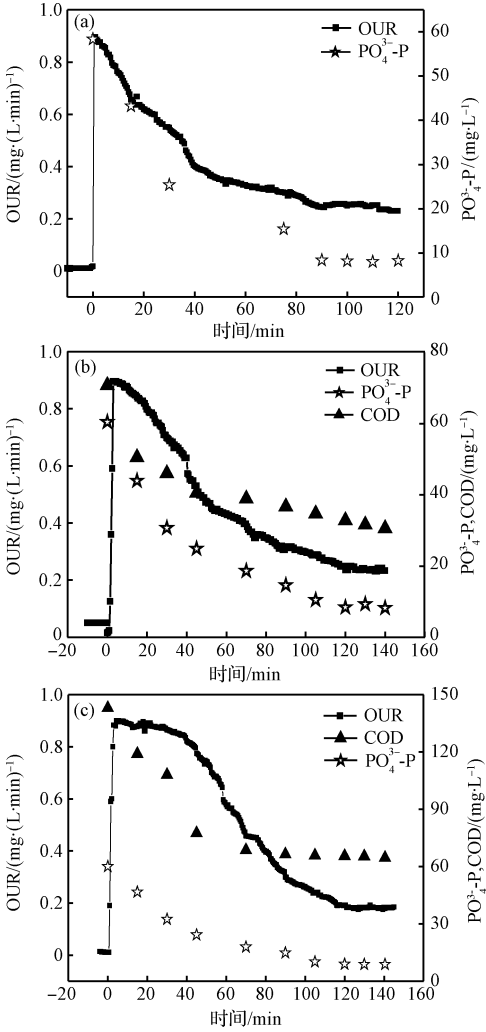


图 4 外源 COD 浓度约为 0 (a)、80(b)和 $150\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (c)时 OUR 与磷酸盐的响应
Fig. 4 Response of OUR to $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ with exogenous COD of 0 (a), 80 (b), $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (c)

2.3 不同 pH 条件下的吸磷过程 OUR 响应

图 5 显示,3 组 pH 条件下好氧吸磷过程的

OUR 和磷酸盐浓度变化。由图 5(a)可以看出,正常 pH 下,OUR 最大值为 $0.58 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$, OUR 在好氧反应运行 60 min 时,OUR 出现拐点,之后 OUR 变化缓慢。磷酸盐的变化规律与 OUR 的曲线较为一致,磷的好氧吸收过程根据吸收速率可分为快速吸磷和慢速吸磷两阶段。好氧运行前 60 min 为快速吸磷阶段,磷的比吸收速率为 $18.51 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$;在 60 ~ 120 min 内,磷的比吸收速率仅为 $0.86 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 。整个过程 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率为 68.3%。在前 60 min 和 60 ~ 120 min, pH 分别上升 0.45 和 0.02,变化速率在逐步降低,说明 pH 的变化与磷酸盐的吸收和 OUR 的变化也具有一致性。初步表明, pH 可反映磷吸收过程却不及 OUR 曲线变化灵敏,原因主要在于缓冲体系及磷吸收过程中

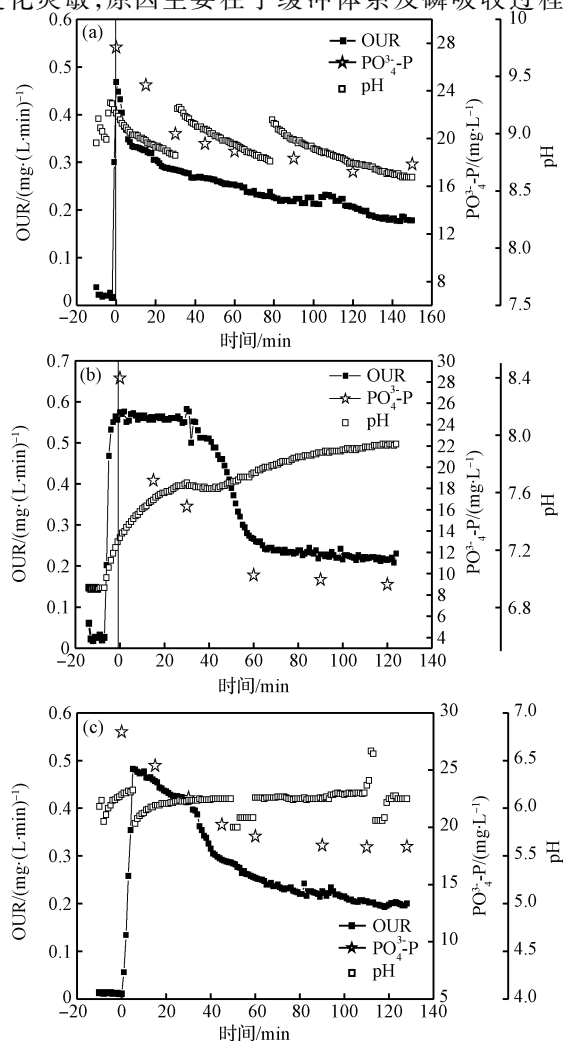
伴随 H^+ 的吸收能够影响到体系 pH 变化。

图 5(b)和(c)显示,在 pH 为 8.5 ~ 9.5 和 5.9 ~ 6.5 等 2 种非正常状态下, OUR、pH 和磷酸盐的变化规律, OUR 最大值分别为 0.468 和 $0.482 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$, 低于正常状态下的最大 OUR 值,磷酸盐去除率降至 35.4% 和 35.3%。表明 pH 的不适宜将不利于 EBPR 除磷,但 pH 影响的机制有待研究。OEHMEN 等^[28]研究发现, pH 由 7 增加到 8 时, PAOs 相比于 GAOs 成为优势菌群, EBPR 除磷效率及 PAOs 菌群数量出现较大程度增加。AHN 等^[29]利用 FISH 及 PCR 技术证实, α -变形菌在 pH 由 7.5 降至 7.0 时开始出现,其分析认为,较低的 pH 条件能促进 EBPR 系统中 GAOs 的出现,并削弱 EBPR 除磷效果。

体系的 pH 对于 PAOs 吸磷效果的影响直接体现在呼吸特征的变化上。pH 冲击状态下的 OUR 变化曲线和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的变化规律与 pH 正常条件下一样具有较好的响应,但 OUR 曲线的阶段特征渐趋模糊,表现出缓慢下降的拖尾现象,拐点变得不很明显。pH 变化与正常状态下 pH 的变化趋势和变化幅度均不同。正常运行状态下 pH 呈上升状态,而在碱性状态下 pH 呈下降状态,分析原因在于 pH 为 8.5 ~ 9.5 的碱性环境可能抑制了 PAOs 代谢活性致使 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸收速率变缓,好氧 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸收伴随着 H^+ 吸收的数量过小低于其他因素引起的 H^+ 吸收,最终导致 pH 下降;在 pH 为 5.9 ~ 6.5 酸性环境下, pH 整体走势呈现出微上升后的平稳状态且波动较小。对比酸性和碱性两种冲击下,磷的吸收量大致相等但显著低于正常 pH 条件的磷吸收量,且 pH 变化趋势有逆人为干预的变化趋势。

3 结 论

好氧吸磷过程中环境因子包括磷酸盐、COD 和 pH 的改变均能引起 OUR 曲线的特征性变化, OUR 曲线均可指示好氧吸磷过程的开始与结束。无外源 COD 时, OUR 与好氧吸磷呈现较好的对应关系;内外源 COD 同时存在时,伴随着外源 COD 浓度的升高, OUR 曲线逐渐出现最大速率平台及吸磷时间的延长;体系 pH 超出正常 pH 范围,无论升高或降低均会造成最大 OUR 的降低及吸磷量的降低。证实可通过测量 OUR 实现对好氧吸磷过程运行状态监测的目的。利用呼吸测量的方法探究 EBPR 过程有待进一步深究。



((a) pH = 7.2 ~ 8.5, (b) pH = 8.8 ~ 9.5, (c) pH = 5.9 ~ 6.5)

图 5 不同 pH 情况下 OUR 和 pH 与磷酸盐之间的响应

Fig. 5 Response of OUR and pH to $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$

in different pH

参 考 文 献

- [1] OEHMEN A., LEMOS P. C., CARVALHO G., et al. Advances in enhanced biological phosphorus removal: From micro to macro scale. *Water Research*, **2007**, 41(11): 2271-2300
- [2] COMEAU Y., HALL K. J., HANCOCK R. E. W., et al. Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal. *Water Research*, **1986**, 20(12): 1511-1521
- [3] WANG Niandong, PENG Jian, HILL G. Biochemical model of glucose induced enhanced biological phosphorus removal under anaerobic condition. *Water Research*, **2002**, 36(1): 49-58
- [4] SATOH H., MINO T., MATSUO T. Deterioration of enhanced biological phosphorus removal by the domination of microorganisms without polyphosphate accumulation. *Water Science & Technology*, **1994**, 30(6): 203-211
- [5] CECHE J. S., HARTMAN P. Competition between polyphosphate and polysaccharide accumulating bacteria in enhanced biological phosphate removal systems. *Water Research*, **1993**, 27(7): 1219-1225
- [6] PATEL J., NAKHLA G. Interaction of denitrification and P removal in anoxic P removal systems. *Desalination*, **2006**, 201(1/2/3): 82-99
- [7] GUERRERO J., GUISASOLA A., BAEZA J. A. The nature of the carbon source rules the competition between PAO and denitrifiers in systems for simultaneous biological nitrogen and phosphorus removal. *Water Research*, **2011**, 45(16): 4793-4802
- [8] ACEVEDO B., OEHMEN A., CARVALHO G., et al. Metabolic shift of polyphosphate-accumulating organisms with different levels of polyphosphate storage. *Water Research*, **2012**, 46(6): 1889-1900
- [9] LOPEZ-VAZQUEZ C. M., OEHMEN A., HOOIJMANS C. M., et al. Modeling the PAO-GAO competition: Effects of carbon source, pH and temperature. *Water Research*, **2009**, 43(2): 450-462
- [10] CHEN Yinggang, GU Guowei. Effect of changes of pH on the anaerobic/aerobic transformations of biological phosphorus removal in wastewater fed with a mixture of propionic and acetic acids. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **2006**, 81(6): 1021-1028
- [11] ZHOU Yan, PIJUAN M., ZENG R. J., et al. Could polyphosphate-accumulating organisms (PAOs) be glycogen-accumulating organisms (GAOs)? *Water Research*, **2008**, 42(10/11): 2361-2368
- [12] 郝王娟, 薛涛, 黄霞. 进水磷碳比对聚磷菌与聚糖菌竞争生长的影响. *中国给水排水*, **2007**, 23(17): 95-98
- HAO Wanhuan, XUE Tao, HUANG Xia. Effect of influent P/C ratio on competition between phosphate- and glycogen-accumulating organisms. *China Water & Wastewater*, **2007**, 23(17): 95-98 (in Chinese)
- [13] 袁静. 水和废水中高含量总磷测定方法探讨. *环境科学与管理*, **2006**, 31(2): 132-133
- YUAN Jing. Determine high concentration total phosphorus in wastewater. *Environmental Science and Management*, **2006**, 31(2): 132-133 (in Chinese)
- [14] 张丰如, 吴馥萍, 梁奇峰. 水体中总磷测定的影响因素研究. *分析科学学报*, **2006**, 22(3): 361-362
- ZHANG Fengru, WU Fuping, LIANG Qifeng. Research of the influencing factors on the determination of the total phosphorus in water sample. *Journal of Analytical Science*, **2006**, 22(3): 361-362 (in Chinese)
- [15] 卢培利, 张代钧, 张欣, 等. 混合呼吸仪评估 pH 值和重金属对污泥活性的抑制. *中国环境科学*, **2008**, 28(5): 422-426
- LU Peili, ZHANG Daijun, ZHANG Xin, et al. Evaluating the inhibition of pH and heavy metals on activated sludge using a hybrid respirometer. *China Environmental Science*, **2008**, 28(5): 422-426 (in Chinese)
- [16] 卢培利, 张代钧, 张欣, 等. 呼吸测量法测定废水中活性异养菌 COD 组分. *环境工程学报*, **2008**, 2(8): 1017-1020
- LU Peili, ZHANG Daijun, ZHANG Xin, et al. Determination of active heterotrophic biomass-COD in wastewater using respirometry. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2008**, 2(8): 1017-1020 (in Chinese)
- [17] MÜNCH E. V., POLLARD P. C. Measuring bacterial biomass-COD in wastewater containing particulate matter. *Water Research*, **1997**, 31(10): 2550-2556
- [18] VANROLLEGHEM P. A., SPANJERS H. A hybrid respirometric method for more reliable assessment of activated sludge model parameter. *Water Science and Technology*, **1998**, 37(12): 237-246
- [19] 周振, 吴志超, 王志伟, 等. 基于呼吸计量法的异养菌动力学参数优化估计. *中国环境科学*, **2010**, 30(3): 322-327
- ZHOU Zhen, WU Zhichao, WANG Zhiwei, et al. Optimization estimation of kinetic parameters for heterotrophic biomass based on batch respirometric method. *China Environmental Science*, **2010**, 30(3): 322-327 (in Chinese)
- [20] 周振, 吴志超, 王志伟, 等. 基于批式呼吸计量法的溶解性 COD 组分划分. *环境科学*, **2009**, 30(1): 75-79
- ZHOU Zhen, WU Zhichao, WANG Zhiwei, et al. Fractiona-

- tion of soluble COD in wastewater based on batch respirometric method. *Environmental Science*, **2009**, 30(1):75-79 (in Chinese)
- [21] 华立娜,赵剑强,毛鹤群,等.呼吸计量法对甲醇和葡萄糖为基质的 ASM1 参数测定. *环境工程学报*, **2013**, 7(5):1871-1877
- HUA Lina, ZHAO Jianqiang, MAO Hequn, et al. Determination of parameters in Activated Sludge Model No. 1 (ASM1) with respirometric method and methanol or glucose as substrate. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2013**, 7(5):1871-1877 (in Chinese)
- [22] 肖剑波,卢培利,曾善文,等.好氧吸磷过程胞内聚合物氧化的 OUR 响应及其软测量//2014 中国环境科学学会学术年会论文集.成都:中国环境科学学会, **2014**
- XIAO Jianbo, LU Peili, ZENG Shanwen, et al. Our response to the oxidation of PHA and its soft measurement during the process of aerobic phosphorus uptake//Proceedings of 2014 Academic Annual Meeting of China Environmental Science Society. Chengdu: Chinese Society for Environmental Sciences, **2014** (in Chinese)
- [23] LU Huabing, OEHMEN A., VIRDIS B., et al. Obtaining highly enriched cultures of *Candidatus Accumulibacter* phosphates through alternating carbon sources. *Water Research*, **2006**, 40(20):3838-3848
- [24] 卢培利,张代钧,张欣,等.自动混合呼吸测量仪的开发与验证. *环境工程学报*, **2007**, 1(5):118-123
- LU Peili, ZHANG Daijun, ZHANG Xin, et al. Development and validation of automated hybrid respirometer. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **2007**, 1(5):118-123 (in Chinese)
- [25] 中华人民共和国环境保护部. HJ/T 399-2007 水质化学需氧量的测定 快速消解分光光度法.北京:中国环境科学出版社, **2008**
- [26] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法.4版.北京:中国环境科学出版社, **2002**
- [27] 由阳,彭永臻,王淑莹,等.强化生物除磷系统胞内聚合物测定方法优化. *哈尔滨工业大学学报*, **2010**, 42(2):207-211
- YOU Yang, PENG Yongzhen, WANG Shuying, et al. Optimization of intracellular polymer analysis for enhanced biological phosphorous removal system. *Journal of Harbin Institute of Technology*, **2010**, 42(2):207-211 (in Chinese)
- [28] OEHMEN A., TERESA VIVES M., LU Huabing, et al. The effect of pH on the competition between polyphosphate-accumulating organisms and glycogen-accumulating organisms. *Water Research*, **2005**, 39(15):3727-3737
- [29] AHN J., SEVIOUR R. Influence of different operational pH conditions to microbial community in biological sequencing batch phosphorus removal process. *Journal of Korean Society on Water Environment*, **2013**, 29(4):459-465