

污泥回流分离工艺(RSSP)除磷脱氮试验研究

唐蕾 陈立伟* 蔡天明 王世梅

(南京农业大学资源与环境科学学院,南京 210095)

摘要 介绍了一种新型的脱氮除磷工艺——回流污泥分离工艺(return sludge separate process),及其运行情况。该工艺在传统的厌氧-缺氧-好氧(A^2/O)的模式下,针对硝酸盐对厌氧释磷的抑制问题进行改进,提出回流污泥的气浮浓缩分离方案,以提高系统的脱氮除磷效果。研究结果表明,在进水 COD 为 250~400 mg/L, NH_4^+-N 为 30~45 mg/L, $PO_4^{3-}-P$ 为 8~10 mg/L 左右时,该工艺对 NH_4^+-N 和 $PO_4^{3-}-P$ 的去除率分别可达 79.3% 和 95%。该系统与 A^2/O 的平行比较数据表明,该系统能够提高氮磷综合处理效率,解决 A^2/O 处理工艺中存在无效释磷和硝酸根抑制问题。

关键词 RSSP 污泥浓缩 气浮 脱氮除磷

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2009)09-1552-05

Research on phosphorus and nitrogen removal of an urban wastewater by return sludge separate process

Tang Lei Chen Liwei Cai Tianming Wang Shimei

(College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract The research emphasized on the process parameters of a new phosphorus and nitrogen removal process named return sludge separate process(RSSP). It was fed with municipal wastewater under anaerobic-anaerobic-aerobic stages conditions. In order to solve the problem of nitrate inhibition on phosphate release in anaerobic stage, RSSP added an air floatation sludge thickening system in its sludge return stage. The results showed that under the conditions of influent COD of 250~400 mg/L, NH_4^+-N of 30~45 mg/L, and $PO_4^{3-}-P$ of 8~10 mg/L, the removal rates of NH_4^+-N and $PO_4^{3-}-P$ in RSSP were 79.3% and 95% respectively. Compared with traditional A^2/O process, RSSP had better performance on phosphorus and nitrogen removal. It could solve the problems of void phosphorus release and inhibition on phosphorus release in anaerobic stage of nitrate exposure.

Key words RSSP; sludge thickening; air floatation; phosphorus and nitrogen removal

目前广泛应用于城镇污水处理工程实践的生物脱氮除磷技术主要有以下一些工艺: A^2/O 工艺、改良 UCT 工艺、Phostrip 工艺、Bardenpho 工艺、氧化沟工艺和 SBR 工艺等^[1~4]。现有处理工艺在氮、磷处理上的问题主要存在于 2 个方面^[5~9]:第一,反硝化细菌和聚磷细菌对碳源有机物的竞争,尤其是对于一些易快速降解 COD(如挥发性有机酸 VFA)的竞争,而事实上反硝化细菌在这一竞争中占有明显优势,这种竞争结果往往导致除磷效率难以达到理想状态;第二,硝酸盐对厌氧释磷的影响,硝酸盐的存在使得反硝化过程优先利用污水中的有机底物,从而影响磷的厌氧释放过程。此外,当原废水中 VFA 浓度较低时,硝酸盐的存在还可以诱导聚磷菌进行缺氧吸磷,抑制厌氧释磷过程的顺利进行,进而影响生物除磷的效果。目前许多工艺都考虑将回流污泥先回流到缺氧区或者中间接触池(使硝酸盐因在此

段进行反硝化而去除),然后再回流至厌氧区。但是这些工艺的内回流太多,而回流的控制非常困难,因此实际应用效果并不理想。

以传统的 A^2/O 工艺为例^[10],混合液回流的主要目的是让好氧池出水中溶解在上清液中的硝酸盐大量回流到缺氧池内进行反硝化,但是回流液中携带的大量污泥对反硝化过程是没有任何意义的,相反污泥中的大量聚磷细菌会在缺氧池内进行无效磷释放^[11,12]。污泥回流的主要目的是让二沉池内沉淀的污泥回流到厌氧池内进行厌氧释磷过程,因此

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50308011);江苏省环保科研项目(2007023)

收稿日期:2008-11-09; **修订日期**:2008-12-30

作者简介:唐蕾(1984~),女,硕士研究生,主要从事水污染控制工程研究工作。E-mail:tanglei0206@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail:clw@njau.edu.cn

真正需要回流的是回流污泥中的固体部分,但是二沉池沉淀的污泥含水量往往非常高(一般含水率在 99.2%~99.6%),回流污泥中携带的上清液(液体部分)对厌氧释磷过程是没有益处的,相反上清液中含有的硝酸根离子会对厌氧释磷过程产生抑制。针对以上问题,在 A²/O 工艺的基础上,我们提出污泥回流分离工艺(RSSP),将回流污泥通过气浮浓缩分离后再分别回流,其中浓缩污泥部分回流到厌氧池(释磷池),上清液部分直接回流到缺氧池(反硝化池),从而实现厌氧磷释放和反硝化过程各自独

立高效的进行,以提高总体除磷脱氮效率。

1 试验工艺机理与试验方案

1.1 回流污泥分离工艺(RSSP)工艺机理

回流污泥分离工艺(return sludge separate process)简称为 RSSP,该工艺在常规的 A²/O 工艺基础上,将回流污泥通过气浮浓缩分离后再分别回流,其中浓缩污泥部分回流到厌氧池(释磷池),上清液部分直接回流到缺氧池(反硝化池)。具体流程如图 1 所示。

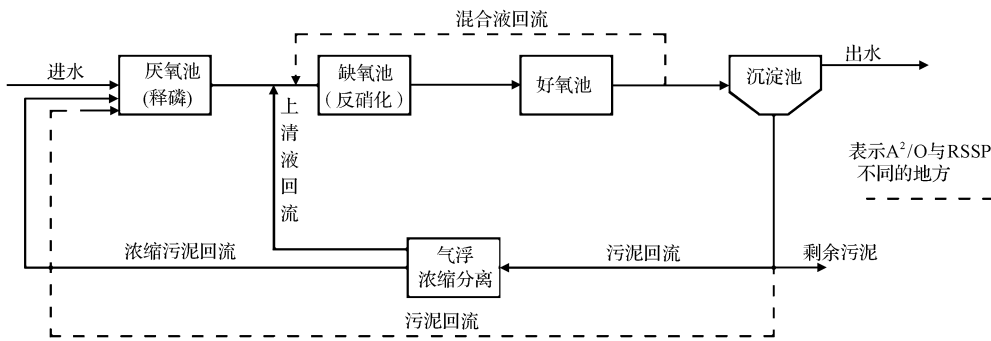


图 1 回流污泥分离工艺(RSSP)与 A²/O 流程框图

Fig. 1 Return sludge separate process and A²/O process

考虑到采用常规的重力浓缩工艺中,污泥在浓缩池内停留时间相对过长,而且污泥处于厌氧环境下容易导致聚磷细菌的无效磷释放。因此我们在工艺中优先考虑采用气浮浓缩工艺对回流污泥进行浓缩,回流污泥在气浮池内平均停留时间不超过 1 h。

1.2 回流污泥分离工艺具体内容

- (1)将二沉池底部的污泥回流,污泥回流比 R ($R = Q_r/Q$) 是工艺控制重要参数之一,本研究将 R 的变化范围控制在 25%~100% 之间;
- (2)回流污泥进入气浮浓缩处理系统进行浓缩分离,将回流污泥分离成为上清液和浓缩污泥 2 部分。本研究中气浮浓缩分离过程的浓缩倍率 f ($f = Q_r/Q_s$) 变化范围在 1.5~5.0 之间;
- (3)经过分离后的上清液部分直接回流到缺氧池进行反硝化,而浓缩污泥部分单独回流到厌氧池。

以上公式中符号代表:

- Q :进水体积流量(m^3/h);
- Q_r :污泥回流体积流量(m^3/h);
- Q_L :分离后上清液体积流量(m^3/h);
- Q_s :分离后浓缩污泥体积流量(m^3/h)。

1.3 试验水质

试验用水采用某典型城市污水处理厂的实际生

活污水,测定其主要水质指标如下:pH 为 7.3,COD 为 250~400 mg/L,BOD₅ 为 160~280 mg/L,NH₄⁺-N 为 30~45 mg/L,NO₃⁻-N 为 0.2 mg/L,PO₄³⁻-P 为 8~10 mg/L,碱度为 380~440 mg/L。

1.4 具体试验方案

试验过程中,我们设计厌氧段水力停留时间 2 h,缺氧段 2 h,好氧段 6 h,二沉池沉淀时间 1.5 h。我们的 RSSP 实验装置采用了回流式加压溶气气浮工艺对二沉池回流污泥进行浓缩分离。共进行了如下 3 个阶段的试验:

(1)在稳定运行过程中,我们利用已经建立的 4 套装置(50 L)来摸索 R 和 f 对 RSSP 工艺整体除磷脱氮效率的影响。在控制 $f = 3.0$ 条件下,分别进行 $R = 25\%$ 、 50% 、 75% 和 100% 的试验研究。针对不同的 R ,每天采集水样进行水质分析,测定进出水水中 COD、PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 浓度,连续采集 10 次。分析数据,以确定合适的污泥回流比。

(2)根据(1)的结果,在 4 个装置中研究最适污泥浓缩倍率,分别选取 $f = 1.7$ 、 2.5 、 3.2 和 5.0 的进行试验。稳定运行后,针对不同的 f ,每天采集水样进行水质分析,测定进出水水中 COD、PO₄³⁻-P 和 NH₄⁺-N 浓度,连续采集 10 次。

(3)我们将其中 2 套改为典型的 A^2/O 工艺,另 2 套则保持回流污泥分离工艺 (RSSP) 进行运行,其中 RSSP 运行中的 R 值和 f 值参照 (1) 和 (2) 的结果。在试验过程中保证进水水质和外界环境条件相同的状况,维持 RSSP 和 A^2/O 连续稳定运行 60 d,每隔一天采样一次,测定厌氧段结束时混合液中 $PO_4^{3-}-P$ 浓度、厌氧段开始时 $NO_3^- -N$ 浓度以及进出水中 $PO_4^{3-}-P$ 和 $NH_4^+ -N$ 浓度,比较 2 种工艺在厌氧磷释放效率、氮去除效率和磷去除效率的差异。

1.5 分析方法

水质分析方法参照国家环保局编制的《水和废水监测分析方法》^[13]:COD 采用重铬酸钾法;BOD₅ 采用培养法测定; $PO_4^{3-}-P$ 采用钼锑抗分光光度计法测定; $NH_4^+ -N$ 采用纳氏试剂光度法; $NO_3^- -N$ 采用紫外分光光度法;碱度采用酸碱指示剂滴定法;pH 采用 DELTA320 型 pH 计。

2 试验结果与讨论

2.1 R 对 RSSP 氮、磷整体去除效率的影响

图 2 显示的是 R 对 RSSP 工艺除磷效果的影响,当 R 为 50%,磷的平均去除率为 94.9%;75% 时磷去除率平均在 95.3%,比 25% 和 100% 这 2 个条件下的去除率分别高了 9% 和 19%。随着污泥回流比从 25% 增加到 100%,可以看出除磷效率有先增加再减小的趋势,并且污泥回流比过大所造成的影响比回流比过小更为显著。这可能与污泥浓度以及硝酸盐浓度有关,有文献报道^[14],随着污泥回流比的增加,回流量加大,污泥浓度变大,有利于厌氧池中聚磷菌的主导地位,但当 R 增加到一定程度时,硝酸盐浓度成为抑制因素,磷的去除效率大幅降低。

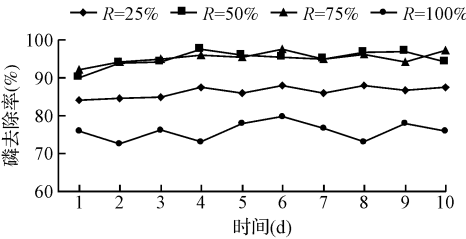


图 2 污泥回流比与除磷效率的关系
Fig. 2 Relationship between sludge return ratios and P removal efficiency

污泥的回流明显有利于 NH_3-N 的去除 (图 2 和图 3), R 为 100% 时比 25% 时对 NH_3-N 去除率有了 21% 左右的提高。这与 R 的增大导致了缺氧区 COD 去除率的升高有关。由于大量的 COD 在缺氧

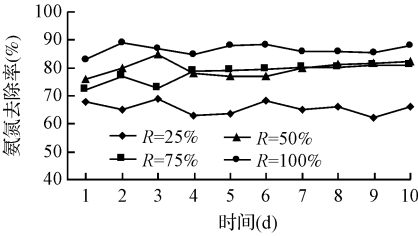


图 3 污泥回流比与除氮效率的关系
Fig. 3 Relationship between sludge return ratios and N removal efficiency

段被反硝化菌降解,进入好氧区的 COD 量减少,即好氧区进水 COD 负荷变低, NH_3-N 含量较高,好氧区内的异氧菌由于缺少足够的有机基质作为碳源,而在与自养型硝化菌的竞争中处于劣势,此时的 COD 降解率也相应降低。同时,由于好氧区中存在大量的 NH_3-N 作为硝化细菌能量来源,使得增殖速率慢的硝化细菌形成了优势生长和繁殖,从而 NH_3-N 的浓度被大大降低。

RSSP 工艺通过回流污泥的液固再分离途径,使回流到厌氧池内的污泥中携带的硝酸盐总量大幅度降低 (因为回流液中的硝酸盐主要以溶解方式存在于水中,详见 2.3.2 节),以消除高浓度硝酸盐对厌氧释磷过程的抑制;而加大 R ,将使回流污泥中的硝酸盐浓度升高,在 f 一定的情况下, R 的变大必将导致气浮浓缩污泥中携带的硝酸盐也相应有所增加,影响厌氧池中聚磷菌的释磷。所以为了兼顾除磷和脱氮的要求,应该将 R 控制在 50% ~ 75% 这样一个范围之内。

2.2 f 对 RSSP 氮、磷整体去除效率的影响

污泥浓缩倍率是指污泥回流量与浓缩污泥量的比值 $f = Q_r/Q_s$ 。由此定义可知,在污泥回流量一定的情况下,回流污泥中的硝酸盐浓度是一定的, f 越大,则表示污泥越浓缩,浓缩污泥中的硝酸盐总量越少,而随上清液进入缺氧池反硝化的硝酸盐总量越多,有利于厌氧释磷和缺氧反硝化的高效进行; f 越小,效果反之。但结合现实考虑,污泥含固率越高,污泥越浓缩,则停留时间越长,这样会影响泥层的稳定性,另外停留的时间太长会引起浓缩污泥中聚磷菌的无效释磷。所以,应该将 f 控制在一个合理的范围之内。

由图 4 和图 5 可知, f 从 1.7 增加到 5.0 的过程中,除磷效率从 68% 左右提高到 96% 左右,影响非常显著。由此可见, f 太小,随浓缩污泥进入厌氧池的硝酸盐总量会相对增多,使除磷效率大大降低。但随着 f 的增大,除磷效率增加的趋势是逐渐减小

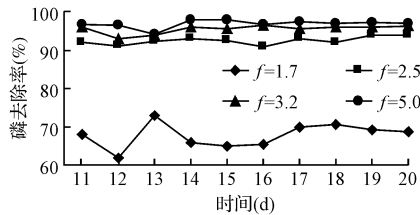


图 4 f 与除磷效率的关系

Fig. 4 Relationship between sludge concentration ratios and P removal efficiency

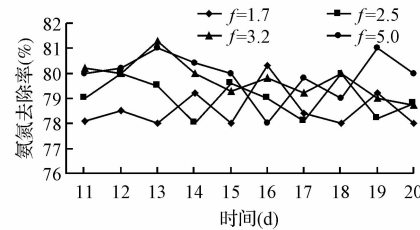


图 5 f 与除氮效率的关系

Fig. 5 Relationship between sludge concentration ratios and N removal efficiency

的;而脱氮效率受 f 的影响比较小,当 f 从 1.7 增加到 5.0 的过程中,脱氮效率的变化小于 2 个百分点,基本上稳定在 79% 左右。所以,我们建议,将污泥浓缩倍率控制在 2.5 ~ 3.2 的范围之内。在该范围内,可以兼顾高效除磷和脱氮的要求。

2.3 RSSP 与 A²/O 工艺的比较

2.3.1 2 种处理工艺对 COD、氮和磷的总体处理效率比较

在连续 60 d 的运行过程中,我们保持每天连续取样监测,测定出水中 COD、氮和磷的浓度。试验结果如图 6 所示。

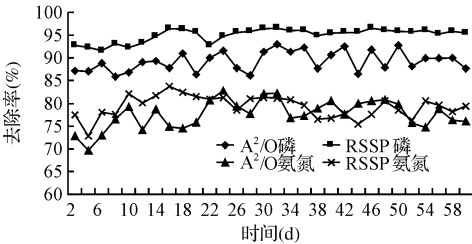


图 6 2 种工艺条件下氮、磷去除效率的变化

Fig. 6 Variation of P and N removal efficiency of RSSP and A²/O process

在 2 种工艺条件下,COD 都能得到有效的去除,平均去除率稳定维持在 93% 以上;

在 A²/O 工艺条件下出水中氨氮浓度维持在

7.52 ~ 10.65 mg/L 之间,去除率在 69.6% ~ 82.8%。出水中磷浓度维持在 0.65 ~ 1.23 mg/L,去除率为 86.1% ~ 93.1%;

在 RSSP 工艺条件下出水中氨氮浓度维持在 6.33 ~ 9.58 mg/L 之间,去除率为 72.8% ~ 83.7%。出水中磷浓度维持在 0.32 ~ 0.71 mg/L,去除率为 91.6% ~ 96.5%;

从我们的结果可以看出,与 A²/O 工艺相比,RSSP 工艺在保持良好脱氮效率的基础上,有效地提高了磷的去除率,实现污水处理系统对氮、磷去除效率的兼顾。

2.3.2 厌氧池内硝酸盐浓度和厌氧出水中磷浓度的对比

在连续 60 d 的运行过程中,生活污水进水平均磷浓度 8.90 mg/L。60 d 中,RSSP 工艺和 A²/O 工艺在厌氧阶段结束时,上清液中的磷浓度平均值分别为 22.6 ± 1.91 mg/L 和 18.5 ± 1.11 mg/L(图 7)。扣除进水原来的正磷酸盐浓度,聚磷细菌在厌氧阶段释放的磷浓度分别为 13.70 mg/L 和 9.60 mg/L,与 A²/O 工艺相比 RSSP 工艺的磷释放效率提高了 42.7%。

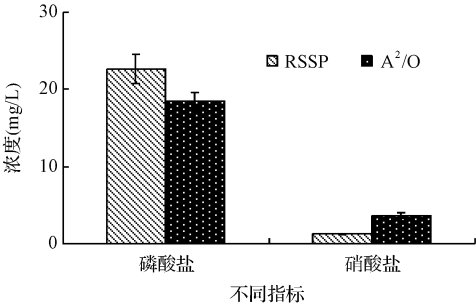


图 7 2 种工艺条件下厌氧池内硝酸盐和磷浓度的对比

Fig. 7 Variation of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the anaerobic stage of RSSP and A²/O

在我们的系统中,2 种工艺条件下厌氧反应器内硝酸盐的浓度也存在明显差异(图 7),RSSP 工艺和 A²/O 工艺条件下硝酸盐浓度分别为 1.23 ± 0.14 mg/L 和 3.65 ± 0.32 mg/L,RSSP 工艺条件下厌氧池内硝酸盐浓度明显降低。我们推测,由于通过对回流污泥分离,大量含有硝酸盐的上清液被单独回流到了缺氧池,因此减少了进入厌氧池的硝酸盐的量;而由于厌氧池内硝酸盐浓度的降低,使得 RSSP 工艺厌氧池内聚磷细菌磷释放过程能够充分,从而提高了厌氧磷释放效率。

3 结 论

与目前常规应用的生物脱氮除磷工艺 A^2/O 相比,污泥回流分离工艺 RSSP 脱氮除磷工艺的厌氧磷释放效率提高了 42.7%,可以从一定程度上反映由于污泥的气浮浓缩使得在厌氧段聚磷菌的作用得到了大幅度的增强,但厌氧池内反硝化细菌和聚磷细菌对挥发性有机酸(VFA)争夺的机理方面的内容有待进一步研究;同时,RSSP 新工艺解决了以往处理工艺中容易出现的聚磷菌缺氧吸磷和无效释磷现象^[15],使聚磷细菌厌氧释磷/好氧吸磷交替过程得到充分和稳定的进行,最终提高系统对磷的去除效率。RSSP 工艺稳定运行条件下磷的去除率达到 95%;由于含硝酸盐的上清液单独回到缺氧池内进行反硝化脱氮,而不再受到厌氧释磷对大回流比的限制,因此整个系统的脱氮效率可以达到 79.3% 以上。

另外,在常规的 A^2/O 工艺基础上,可以在不改变主体处理构筑物和处理设备的前提下,仅仅通过在污泥回流管路上增加一级气浮浓缩处理工艺,就可以实现 RSSP 脱氮除磷工艺的运行方式。因此有利于对现有城镇污水处理厂废水处理设施进行改造升级。

实际运行试验表明,RSSP 工艺的 2 个重要参数污泥回流比和污泥浓缩倍率分别控制在 50% ~ 75% 和 2.5 ~ 3.2 之间,可以保证除磷和脱氮同时高效运行。

本发明回流污泥分离工艺(简称 RSSP 工艺)是一种提高城镇污水处理厂氮磷综合处理效率的方法,克服了目前常用的 A^2/O 处理工艺中存在无效释磷和硝酸根抑制问题,从而达到提高废水处理中氮、磷去除效率的目的。

参 考 文 献

- [1] Van Loosdrecht M. C. M., Hooijmans C. M., Brdjanovic D., *et al.* Biological phosphate removal processes. *Microbial Biotechnology*, **1997**, 48(2):289 ~ 296
- [2] 郝晓地. 可持续污水-废物处理技术. 北京: 中国建筑工业出版社, **2006**. 5 ~ 16
- [3] Saktaywin W., Tsuno H., Nagare H., *et al.* Advanced sewage treatment process with excess sludge reduction and phosphorus recovery. *Water Research*, **2007**, 41(19): 4329 ~ 4338
- [4] 尹军, 王建辉, 王雪峰, 等. 污水生物除磷若干影响因素分析. *环境工程学报*, **2007**, 1(4):6 ~ 10
- [5] Mulkerrins D., Dobson A. D. W., Collieran E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters. *Environment International*, **2003**, 30(4):249 ~ 259
- [6] 荣宏伟, 彭永臻, 张朝升. 低碳城市污水反硝化除磷试验. *环境工程*, **2008**, 26(1):11 ~ 14
- [7] Ahn J., Daidou T., Tsuneda S., *et al.* Metabolic behavior of denitrifying phosphate-accumulating organisms under nitrate and nitrite electron acceptor conditions. *Biosci. Bioeng.*, **2001**, 92(5):442 ~ 446
- [8] Saito T., Brdjanovic D., Van Loosdrecht M. C. M. Effect of nitrite on phosphate uptake by phosphate accumulating organisms. *Wat. Res.*, **2004**, 38(14):3760 ~ 3768
- [9] 彭铁, 彭永臻, 吴昌永. A^2/O 工艺中的反硝化除磷. *环境工程学报*, **2008**, 2(6):752 ~ 756
- [10] Donal Mulkerrins, Clodagh Jordan, Sinead McMahon, *et al.* Evaluation of the parameters affecting nitrogen and phosphorus removal in anaerobic/anoxic/oxic ($A/A/O$) biological nutrient removal systems. *Chem. Technol. Biotechnol.*, **2000**, 75(4):261 ~ 268
- [11] Yong-zhen Peng, Xiao-lian Wang, Bai-kun Li. Anoxic biological phosphorus uptake and the effect of excessive aeration on biological phosphorus removal in the A^2/O process. *Desalination*, **2006**, 189(6):155 ~ 164
- [12] Delia Teresa Sponza, Hulya Atalay. Influence of nitrate and COD on phosphorus nitrogen and dinitrotoluene (DNT) removal under batch anaerobic and anoxic conditions. *Anaerobe*, **2004**, 10(5):287 ~ 293
- [13] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法(第4版). 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [14] Wang Y. Y., Peng Y. Z., Peng C. Y., *et al.* Influence of ORP variation, carbon source and nitrate concentration on denitrifying phosphorus removal by DPB sludge from dephanox process. *Wat. Sci. Tech.*, **2004**, 50(10):153 ~ 161
- [15] Bond P. L., Keller J., Blackall L. L. Characterisation of enhanced biological phosphorus removal activated sludges with dissimilar phosphorus removal performances. *Water Sci. & Technol.*, **1998**, 37(4):567 ~ 577