

反硝化除磷工艺研究进展

王军一¹ 李伟光^{2,3}

(1. 同江市自来水公司, 黑龙江 佳木斯 154000; 2. 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090;
3. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 反硝化除磷技术的提出与发展为解决城市已建和拟建的污水处理厂的脱氮除磷问题提供技术支持。文章综述了反硝化除磷机理的研究进展, 分析了典型的反硝化除磷脱氮工艺即单污泥系统工艺和双污泥系统工艺的流程, 阐述了反硝化除磷脱氮的主要影响因素, 概述了反硝化除磷的 ASM2D 数学模型、厌氧缺氧 Delft 代谢模型及 TUDP 联合模型的特点, 展望了未来生物除磷脱氮工艺的发展前景。

关键词: 反硝化除磷工艺; 反硝化聚磷菌; 聚糖菌; 温度; 代谢特征

中图分类号: X703.1

文献标识码: A

Technology and research progress of denitrifying dephosphatation

Wang Junyi¹, Li Weiguang^{2,3}

(1. Tongjiang Water-Supply General Corporation, Jiamusi 154000, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The majority of our existing waste water treatment plants can't achieve the latest phosphorus discharge standard. It is most pressing matter of the moment to explore a high efficiency, low consumption biological phosphorus removal technology, luckily denitrifying dephosphatation technology seemingly could offer the possibility though marginal engineering applications. Therefore, review on the theory and development of denitrifying dephosphatation process was conducted in terms of the origin of denitrifying phosphorus removal, typical denitrifying phosphorus removal processes namely single and dual sludge system technology, and this paper elaborated main impact factors of denitrifying phosphorus removal, and two kinds of model of denitrification and phosphorus removal namely ASM2D mathematical model anoxic and anaerobic metabolism Delft model. The development of biological nitrogen removal process for the future was prospected.

Key words: denitrifying dephosphatation technology; DPAO; GAO; temperature; metabolic characteristics

0 引言

强化生物除磷(EBPR)技术以其高效、经济和

潜在的磷回收等优点在世界范围内广泛应用。相对于传统的生物脱氮除磷分开实现的工艺,反硝化除磷工艺可节省 50% 的碳源需求,降低 30% 的需氧

收稿日期: 2014 - 06 - 05

基金项目: “十二五”水体污染控制与治理科技重大专项产业化项目(2011ZX07415 - 001); 城市水资源与水环境国家重点实验室自主课题项目(2012DX01)。

作者简介: 王军一(1962 -), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事饮用水工艺及深度处理技术等方面的研究。E-mail: amanda318@126.com

量,减少50%的剩余污泥产量。因此,反硝化除磷工艺被业内公认为“可持续的生物除磷脱氮工艺”^[1]。反硝化除磷的关键是通过在各种典型工艺的活性污泥系统中富集反硝化聚磷菌(DPAO)而实现的,DPAO是反硝化除磷菌(DPB)体系中的一类特殊菌群。但是聚磷菌的竞争菌—聚糖菌(GAO)也经常存在于除磷系统中,这使得反硝化除磷技术仍具有一定的不稳定性。因此,综合分析反硝化除磷的典型工艺及其研究进展,对于发现并解决各种反硝化除磷典型工艺存在的不足,创新并发明更加合理的工艺流程具有重要的理论和现实意义。

1 反硝化除磷机理及典型工艺

1.1 反硝化除磷机理

利用厌氧—缺氧间歇式反应器(A^2 SBR)所富集的兼具反硝化能力和除磷能力的兼性厌氧微生物,此类微生物被称为反硝化聚磷菌(DPAO)^[2]。反硝化除磷机理与传统的厌氧/好氧除磷机理基本相似,在厌氧段,DPAOs利用来自于糖原和聚磷水解的能量,将污水中的挥发性有机酸(VFAs)转化为内碳源物质聚羟基脂肪酸酯(PHA)储存起来,同时将磷酸盐释放到水中;好氧段,DPAOs利用硝酸盐(NO_3^-)代替氧气作为电子受体,氧化内碳源物质PHA,为自身的细胞生长、磷酸盐吸收、糖原的补充提供能量,完成同时缺氧吸磷并将 NO_3^- 反硝化,在缺氧段实现了碳源同时脱氮和除磷的目的,即“一碳两用”^[3-4]。

1.2 反硝化除磷脱氮典型工艺

反硝化除磷脱氮工艺主要分为两类,即单污泥和双污泥系统^[5]。单污泥系统典型的工艺有UCT(University of Cape Town)工艺和BCFS(Biologische Chemische Fosfaat Stikstof Verwijdering)工艺。双污

泥系统最典型的工艺为Dephanox工艺和 A^2N (Anaerobic-Anoxic-Nitrification)工艺^[6]。

1.2.1 UCT工艺

UCT工艺是由南非开普顿大学基于厌氧—缺氧—好氧生物脱氮除磷工艺(A^2/O 工艺)基础上,通过改变污泥回流方式,避免硝酸盐对厌氧释磷的影响,从而强化生物除磷效果。其工艺流程如图1所示。UCT工艺的设计并不是基于反硝化除磷原理,而这种工艺流程无意间强化了厌氧缺氧交替的环境,为DPAOs的生长提供了有利条件^[7]。UCT工艺缺点在于反硝化聚磷菌、硝化细菌和普通的反硝化异养菌共存,共同经历厌氧、缺氧和好氧交替环境,反硝化聚磷菌与其它脱氮除磷功能菌都存在着不同程度的竞争^[8]。

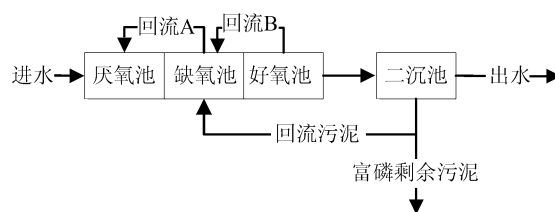


图1 UCT工艺示意图^[8]

1.2.2 BCFS工艺

BCFS工艺将Carrousel氧化沟与UCT工艺有机结合,从工艺角度本身出发最大程度地提供DPB富集条件的一种变型UCT工艺^[9]。工艺流程如图2所示,BCFS工艺由5个功能独立的反应池和3个循环系统组成。该工艺在设计上摒除了回流污泥携带硝酸盐对厌氧释磷的影响,缺氧选择器的设置可吸附厌氧残留的化学需氧量(COD),同时迅速反硝化来自污泥回流中的硝酸盐,因此具有抑制污泥膨胀的作用。BCFS工艺的缺点在于其缺氧、好氧混合池(氧化沟)单元占整个系统的1/3体积,占地面积较大。

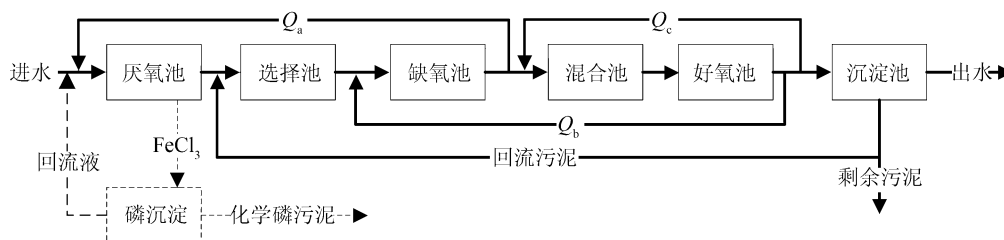


图2 BCFS工艺示意图^[1]

1.2.3 Dephanox 工艺

Dephanox 双污泥反硝化除磷脱氮工艺流程如图3所示。Dephanox 工艺的最显著特点在于好氧硝化细菌附着在生物膜上生长,不暴露在缺氧环境下,可解决聚磷菌和硝化细菌在污泥龄上的矛盾^[11]。缺点在于

进水氮磷比经常不能满足缺氧吸磷的要求,限制了 Dephanox 工艺反硝化除磷在工程上的应用^[12]。Dephanox 工艺可用于处理 C/N 较低的城市污水,当进水 COD 浓度很高时,缺氧池无法实现完全除磷,此时可通过好氧池进一步去除剩余的磷^[13-14]。

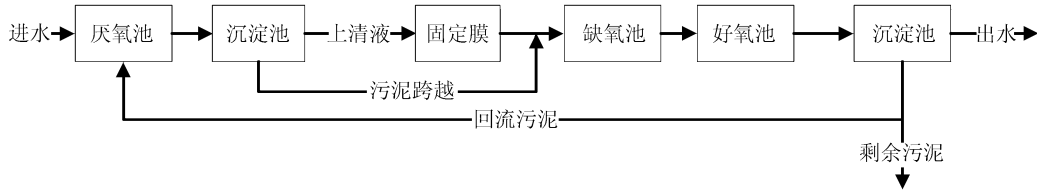


图3 Dephanox 工艺流程图^[2]

1.2.4 A²N 工艺

A²N 双污泥系统(如图4所示)将反硝化除磷菌和硝化细菌在不同的污泥系统中培养,各自沉淀之后只交换上清液,来实现硝化和反硝化除磷,解决了反硝化细菌和聚磷菌对基质的竞争以及硝化细菌和聚磷菌污泥龄矛盾的问题^[15]。该工艺尤其适用

于低 C/N 比的水质。该工艺的缺点在于当缺氧段硝酸盐不足时将影响缺氧吸磷效果,硝酸盐过量又使得剩余硝酸盐随回流污泥进入厌氧段,干扰厌氧释磷和聚羟基丁酸酯(PHB)的合成;未经硝化过程直接和 DPB 污泥一起进入缺氧段,无法实现反硝化脱氮,往往导致出水的氨氮浓度较高。

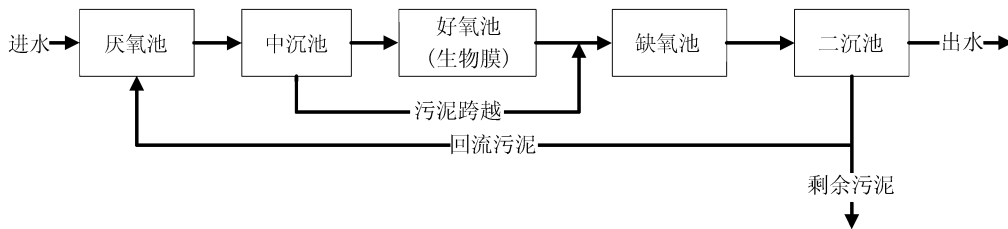


图4 A²N 工艺流程图^[15]

1.2.5 两级生物选择反硝化除磷脱氮工艺(BBSNP 工艺)

哈尔滨工业大学的研究者通过在原有厌氧好氧工艺法(A/O 工艺)基础上,在 A/O 工艺前端增加了一个厌氧选择器和一个缺氧选择器,开发了一种两级生物选择反硝化除磷脱氮工艺—BBSNP 工艺

(Bi-Bio-Selector for Nitrogen and Phosphorus removal process),为有效解决低 C/N 比城市生活污水同步除磷脱氮提供了新的思路^[16]。BBSNP 工艺(如图5所示)在设计上解决了前置反硝化型工艺硝酸盐回流对厌氧释磷的影响,亦可抑制污泥膨胀,对低 C/N 比城市生活污水处理具有独特的现实意义。

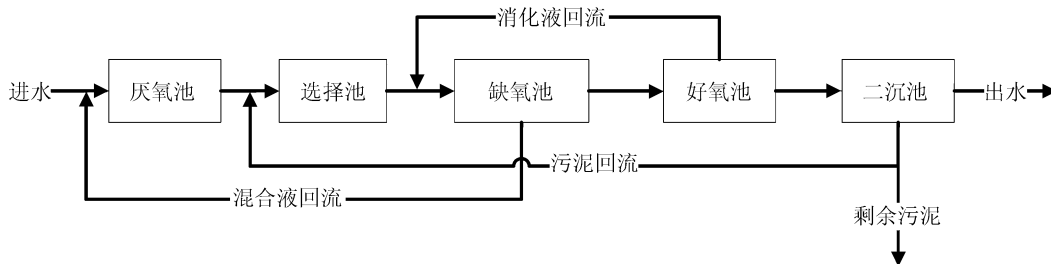


图5 BBSNP 工艺示意图^[16]

2 反硝化除磷脱氮的主要影响因素

2.1 碳源类型

不同类型的碳源对于生物强化除磷工艺微生物种群影响较大^[17]。污水中含量最高的VFA为乙酸,其次为丙酸。在反硝化除磷系统的厌氧段投加一定比例的乙酸和丙酸有助于DPAO厌氧释磷,同时储存较多的内碳源物质PHB,为缺氧吸磷提供有利条件,较多的研究表明丙酸更适合作为强化生物除磷(EBPR)的碳源^[18]。

2.2 有机负荷

C/N比和C/P比对于反硝化除磷系统的脱氮除磷表现影响较大。C/N比既要满足厌氧释磷对碳源的需求,又要同时避免过量的碳源进入缺氧区会导致普通的异氧反硝化细菌与反硝化聚磷菌竞争 NO_3^- ;而进水C/N比过低会使得厌氧合成的内碳源PHA较低,不能满足缺氧反硝化聚磷能量的需求,致使 NO_3^- 和磷的去除都不好^[19]。不同的工艺类型或者运行条件下,最佳C/N也会有所不同。一般认为较低的C/P比更适合DPAO的繁殖,而较高的C/P比使得磷处于受限的状态^[20]。

2.3 温度

DPAO属于嗜冷菌,在温度低于 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时比较有竞争的优势;而GAO属于中温菌,适宜生长的温度在 $25\sim 32.5\text{ }^\circ\text{C}$ 之间^[21]。低温下DPAO似乎逐渐丧失除磷能力而表现为GAO的代谢特征,而且较低的糖酵解能力很慢满足乙酸摄取和PHA合成的需要^[22]。很多EBPR污水厂夏天的除磷效果要比冬天的差,也从工程实际方面提供了有力的证据^[23]。

2.4 pH值

一般来说,厌氧段较高的pH值会促进DPAO对底物的利用,同时需要水解更多的聚磷酸酯(poly-P)来获得能量^[24]。研究表明,pH对于 A^2SBR 中DPAO厌氧释磷影响比较大,当pH为8.0时由于化学沉淀的影响,实际的P/C比为理论值的80%;中性pH的进水对于生物除磷系统比较合适,并且系统内部的pH控制在 $6.4\sim 7.2$ 范围内除磷效果较好^[25]。

2.5 电子受体

硝酸盐可以作为反硝化除磷的电子受体^[26-27]。研究发现,亚硝酸盐(NO_2-N)浓度低于 $4\sim 5\text{ mg/L}$

时可作为反硝化除磷的电子受体,而高于 $8\text{ mg NO}_2-\text{N/L}$ 时会完全抑制反硝化吸磷。而亚硝酸作为反硝化过程的中间产物,如何控制好硝酸盐的浓度以及相应条件下的自由亚硝酸(FNA)浓度,将对于DPAO的大量繁殖以及反硝化除磷效果十分重要^[28]。

2.6 阳离子

在生物除磷系统中, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 等阳离子起到十分重要的作用^[29]。 Mg^{2+} 和 K^+ 为聚磷颗粒组成的成分,与厌氧释磷和好氧吸磷的过程是同步的。 K^+ 离子对于生物除磷系统的作用显著,严重缺少 K^+ 离子的情况下会干扰厌氧磷酸盐的释放以及后续好氧/缺氧吸磷的顺利进行,聚磷颗粒的形成遭到破坏。 Ca^{2+} 离子对于聚磷颗粒的稳定有一定的贡献。但是关于阳离子对生物除磷系统的作用和影响仅仅停留在单一浓度的比较上,而其间相对的摩尔比例是否是影响生物除磷的关键所在,仍有待探究。

2.7 污泥龄(SRT)

对于反硝化除磷工艺而言,由于其单、双污泥系统硝化段设置的方式不同,SRT的要求也不一样。单污泥系统的最小污泥龄应优先考虑硝化菌而不是反硝化聚磷菌;而双污泥系统则可分别兼顾硝化细菌和反硝化聚磷菌的SRT。低温情况下,由于反硝化聚磷菌在低温下较慢的代谢活性,它们的最小SRT要大于硝化细菌生长的最小SRT^[30]。

3 反硝化除磷模型

反硝化除磷的模型主要有国际水协会(IWA)推出的ASM2D数学模型和厌氧缺氧Delft代谢模型。

3.1 ASM2D除磷模型

最初的反硝化除磷ASM2D模型是在ASM2号模型基础上,将反硝化除磷引入到模型中,在缺氧条件下聚磷菌增殖时乘一个折减系数 η_{NO_3} ,意味着不是所有的聚磷菌都能在缺氧条件下生长和贮磷,或者说反硝化聚磷菌的生长速率、贮磷速率比好氧聚磷菌要低^[31]。ASM模型都是基于乙酸为唯一碳源,厌氧合成的内碳源物质主要为PHB,且假设GAO不存在的假设条件下得出的。最重要的是此模型中未包括糖原的代谢,尽管糖原代谢对于基质的吸收和贮存意义较大。根据不同实际应用的需要,研究人员修改和补充了很多因素到ASM模型中,例如考虑

到利用进水基质直接生长的问题、两级硝化反硝化过程中的应用、评估水厂的不同控制策略、决定控制污泥膨胀过程中生物量吸附和存储能力、溶解性微生物产物对膜污染的影响、GAO与DPAO竞争影响评估以及糖原代谢和反硝化能力的作用等。这些修改使ASM模型逐步完善,然而逐渐复杂的ASM模型在实际应用中的校正及优化是一个比较棘手的问题。此外,ASM2D并没有很好地区别氧聚磷菌和反硝化聚磷菌的代谢机理^[32]。

3.2 反硝化吸磷 Delft 代谢模型

Delft 工业大学在在厌氧代谢和好氧代谢化学计量学参数表征不变的前提下,推出了厌氧/缺氧除磷代谢模型,被称为 Delft 代谢模型^[33]。其最大的特点在于其集两种除磷机制于一套动力学方程和代谢过程中,区别在于动力学参数和化学计量学参数不同,并且两种除磷机制下厌氧代谢模型是一样的,只有电子氧化磷酸化过程不同,模型中认为以硝酸盐作为电子受体比以氧气作为电子受体时的电子传递链效率要低,即在好氧条件下三磷酸腺苷(ATP)与辅酶(NADH₂)的比值为 $\delta_{\text{好氧}} = 1.8 \text{ mol/mol}$,而缺氧条件下为 $\delta_{\text{缺氧}} = 0.9 \text{ mol/mol}$ 。 δ 是区别好氧吸磷和缺氧吸磷的唯一参数,此值进而影响到DPB的产率比好氧聚磷菌的产率要低。因此缺氧条件下可利用的能量要少于好氧条件下,缺氧吸磷量也要比好氧吸磷量要低。

3.3 ASM2D-Delft 联合模型

ASM2D和Delft联合模型,简称TUDP模型,由于其兼顾了ASM模型的关于碳和氮的转化以及Delft模型中对于磷代谢计量学的评估,当将该模型应用于处理实际污水的混合培养基系统时,尤其在一些生产性规模的污水处理厂应用时采用TUDP联合模型更为准确。但是由于模型本身都是基于SBR系统,并使用单一的乙酸作为碳源以及假设厌氧和好氧保持阶段不发生化学反应的情况等条件下开发的,所以实际的应用过程中面对不同的工艺系统、复杂的底物以及预测不到的制约性因素等会存在一定的问题。尽管如此,ASM2D和Delft联合模型已经成功应用于很多实际的工业、市政污水厂的模拟优化中^[28,34],而且模型的校正和优化没有想象中那么复杂。

4 展望

我国很多城市的已建和拟建的污水处理厂都面

临着同步脱氮除磷的问题,寻求一种经济高效、环境友好、易于操作的生物除磷脱氮工艺迫在眉睫。由于目前我国大多数污水处理厂采用A/O和A²/O工艺,仅靠生物除磷却往往难以实现出水磷达标,常常需要辅以化学除磷,增加了污水处理的成本,同时污泥产量高且脱水性不好,为后续的污泥处理带来很大的干扰。因此,以A/O和A²/O工艺为基础研发的BBSNP工艺,为解决我国城市生活污水同步除磷脱氮问题提供了技术支持,但目前BBSNP工艺尚处于实验室探索阶段,尚未应用到实际工程中。针对BBSNP工艺的运行参数优化尚需更加深入的研究,以便为反硝化除磷工艺的实际应用提供可靠的运行参数。

参考文献:

- [1] 王亚宜. 反硝化除磷脱氮机理及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [2] Kang D. W., Noguera D. R.. Candidatus accumilibacter phosphatis: elusive bacterium responsible for enhanced biological phosphorus removal[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2014, 140(1): 2-10.
- [3] Zeng W., Li B. X., Yang Y., et al.. Impact of nitrite on aerobic phosphorus uptake by poly-phosphate accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal sludges[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2014, 37(2): 277-287.
- [4] Mesquita D. P., Amaral A. L., Leal C., et al.. Monitoring intracellular polyphosphate accumulation in enhanced biological phosphorus removal systems by quantitative image analysis[J]. *Water Science and Technology*, 2014, 69(11): 2315-2323.
- [5] Ginige M. P., Kayaalp A. S., Cheng K. Y., et al.. Biological phosphorus and nitrogen removal in sequencing batch reactors: effects of cycle length, dissolved oxygen concentration and influent particulate matter[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 68(5): 982-990.
- [6] 王秀薇. 同步脱氮除磷新工艺开发与运行效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [7] Hao X., Loosdrecht M. C. M. V., Meijer S. C. F., et al.. Model-based evaluation of two BNR processes-UCT and A²N[J]. *Water Research*, 2001, 35(12): 2851-2860.
- [8] Acevedo B., Oehmen A., Carvalho G., et al.. Metabolic shift of polyphosphate-accumulating organisms with different levels of polyphosphate storage[J]. *Water Research*, 2012, 46(6): 1889-1900.
- [9] 郭旋, 李伟光, 田文德. 化学生物絮凝处理生活污水优化试验研究[J]. *水处理技术* 2011, 37(12): 64-67.
- [10] Zhou Z., Xing C., Wu Z. C., et al.. Optimization of a full-scale Unitank wastewater treatment plant for biological phosphorus removal[J]. *Environmental Technology*, 2014, 35(6): 766-772.

- [11] Bortone G. ,Saltarelli R. ,Alonso V. , *et al.* . Biological anoxic phosphorus removal-The DEPHANOX process [J]. *Water Science & Technology* ,1996 ,34(1) : 119 –128.
- [12] Bortone G. ,Libelli S. M. ,Tilche A. , *et al.* . Anoxic phosphate uptake in the DEPHANOX process [J]. *Water Science & Technology* ,1999 ,40(1) : 177 –185.
- [13] Sorm R. ,Wanner J. ,Saltarelli R. , *et al.* . Verification of anoxic phosphate uptake as the main biochemical mechanism of the DEPHANOX process [J]. *Environmental Technology* ,1997 ,35(1) : 87 –94.
- [14] Zhu R. ,Wu M. ,Yang J. . Effect of sludge retention time and phosphorus to carbon ratio on biological phosphorus removal in HS-SBR process [J]. *Environmental Technology* ,2013 ,34(4) : 429 –435.
- [15] Zuthi M. F. R. ,Guo W. S. ,Ngo H. H. , *et al.* . Enhanced biological phosphorus removal and its modeling for the activated sludge and membrane bioreactor processes [J]. *Bioresource Technology* ,2013 ,139(1) : 363 –374.
- [16] 李伟光,田文德,康晓荣,等. 强化反硝化除磷工艺微生物种群结构分析[J]. *化工学报* 2011 62(12) : 3532 –3538.
- [17] Schönborn C. ,Bauer H. D. ,Röske I. . Stability of enhanced biological phosphorus removal and composition of polyphosphate granules [J]. *Water Research* ,2001 ,35(13) : 3190 –3196.
- [18] 马勇,彭永臻,王晓莲,等. 新型高效反硝化除磷工艺[J]. *环境污染与防治* ,2004 26(1) : 51 –53.
- [19] Hollender J. ,Van-Der-Krol D. ,Kornberger L. , *et al.* . Effect of different carbon sources on the enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* ,2002 ,18(4) : 355 –360.
- [20] Wang R. D. ,Peng Y. Z. ,Cheng Z. L. , *et al.* . Understanding the role of extracellular polymeric substances in an enhanced biological phosphorus removal granular sludge system [J]. *Bioresource Technology* ,2014 ,169(1) : 307 –312.
- [21] Chen H. B. ,Wang D. B. ,Li X. M. , *et al.* . Biological phosphorus removal from real wastewater in a sequencing batch reactor operated as aerobic/extended-idle regime [J]. *Biochemical Engineering Journal* ,2013 ,77(1) : 147 –153.
- [22] Schuler A. J. ,Jenkins D. . Enhanced biological phosphorus removal from wastewater by biomass with different phosphorus contents , part I: Experimental results and comparison with metabolic models [J]. *Water Environment Research* ,2003 ,75(6) : 485 –498.
- [23] Panswad T. ,Dongchai A. ,Anotai J. . Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system [J]. *Water Research* ,2003 ,37(2) : 409 –415.
- [24] Erdal U. G. ,Erdal Z. K. ,Daigger G. T. , *et al.* . Is it PAO-GAO competition or metabolic shift in EBPR system? Evidence from an experimental study [J]. *Water Science and Technology* ,2008 ,58(6) : 1329 –1334.
- [25] Wang D. B. ,Zheng W. ,Liao D. X. , *et al.* . Effect of initial pH control on biological phosphorus removal induced by the aerobic/extended – idle regime [J]. *Chemosphere* ,2013 ,90(8) : 2279 –2287.
- [26] Pijuan M. ,Saunders A. M. ,Guisasola A. , *et al.* . Enhanced Biological Phosphorus Removal in a Sequencing Batch Reactor Using Propionate as the Sole Carbon Source [J]. *Biotechnology and Bioengineering* ,2004 ,85(1) : 56 –67.
- [27] Liu Y. ,Chen Y. ,Zhou Q. . Effect of initial pH control on enhanced biological phosphorus removal from wastewater containing acetic and propionic acids [J]. *Chemosphere* ,2007 ,66(1) : 123 –129.
- [28] Zhang C. ,Chen Y. ,Liu Y. . The long-term effect of initial pH control on the enrichment culture of phosphorus-and glycogen-accumulating organisms with a mixture of propionic and acetic acids as carbon sources [J]. *Chemosphere* ,2007 ,69(11) : 1713 –1721.
- [29] Ji Z. ,Chen Y. . Using sludge fermentation liquid to improve wastewater short-cut nitrification-denitrification and denitrifying phosphorus removal via nitrite [J]. *Environmental Science and Technology* ,2010 ,44(23) : 8957 –8963.
- [30] Jiang Y. F. ,Wang L. ,Yu Y. , *et al.* . Characterization of phosphorus removal bacteria in (AO) 2 SBR system by using different electron acceptors [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology (New Series)* ,2007 ,14(2) : 155 –159.
- [31] Li J. ,Xiong B. ,Zhang S. , *et al.* . Effects of nitrite on phosphate uptake in anaerobic-oxic process [J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China* ,2007 ,1(1) : 39 –42.
- [32] Soejima K. ,Oki K. ,Terada A. , *et al.* . Effects of acetate and nitrite addition on fraction of denitrifying phosphate-accumulating organisms and nutrient removal efficiency in anaerobic/aerobic/anoxic process [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering* ,2006 ,29(5 –6) : 305 –313.
- [33] Vargas M. ,Guisasola A. ,Artigues A. , *et al.* . Comparison of a nitrite-based anaerobic-anoxic EBPR system with propionate or acetate as electron donors [J]. *Process Biochemistry* ,2011 ,46(3) : 714 –720.
- [34] Zhou S. ,Zhang X. ,Feng L. . Effect of different types of electron acceptors on the anoxic phosphorus uptake activity of denitrifying phosphorus removing bacteria [J]. *Bioresource Technology* ,2010 ,101(6) : 1603 –1610.

(学科责编: 吴芹)