

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.05.013

高效聚磷菌的分离鉴定及除磷性能分析

王图锦,潘 瑾,刘雪莲

(重庆交通大学河海学院,重庆 400074)

摘要:从连续稳定运行的 AAO 污水处理系统曝气池污泥中分离筛选出 4 株聚磷菌(编号为 P1,P2,P3,P4)进行吸放磷实验。结果表明:4 株聚磷菌具有较强的去除污水中磷酸盐的能力,均表现出明显的厌氧释放磷、好氧吸收磷的特征,其中 P1 细菌的吸放磷特征最为显著,对废水磷的最大去除率可达到 75.51%,P2、P3、P4 对磷的最大去除率分别为 8.77%、47.26%、30.19%。通过对 4 株细菌的 16S rDNA 序列进行测序分析,鉴定出 P1、P2、P3、P4 分别属于微杆菌属、芽孢杆菌属、塚村氏菌属、塚村氏菌属细菌。

关键词:生物除磷;聚磷菌;废水;生物学鉴定

中图分类号:X172 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2016)05-0063-04

Study on screening of phosphate-accumulating organisms and analysis of phosphorus removal characteristics

WANG Tujin, PAN Jin, LIU Xuelian

(School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Four phosphate-accumulating bacterial strains, designated as P1, P2, P3, and P4, were separated from biological sludge in a stably operated AAO system for phosphorus absorption and release experiments. The results show that the four strains had high capabilities of removing phosphate from the waste water, and they exhibited high levels of phosphorus release in the anaerobic stage and phosphorus absorption in the oxic stage. P1 had the most significant phosphorus absorption and release characteristics. The maximum phosphorus removal rates of P1, P2, P3, and P4 were 75.51%, 8.77%, 47.26%, and 30.19%, respectively. Through sequence analysis of 16S rDNA, it was determined that P1 and P2 belonged to *Microbacterium* and *Bacillus*, respectively, and both P3 and P4 belonged to *Tsukamurella*.

Key words: biological phosphorus removal; phosphate-accumulating organisms; wastewater; biological identification

强化生物除磷系统(enhanced biological phosphorous removal,EBPR)广泛用于去除废水中的磷酸盐,采用不同结构不同工艺的生物除磷污水处理厂大多依据经验设计建造,缺乏对生物除磷微生物学机理的深入了解,导致许多污水处理厂设计及运行参数并不符合生物除磷系统最佳条件,出现除磷效果差、污泥膨胀、剩余污泥过多、能耗高等诸多问题^[1-4]。因此,加大对生物除磷系统中微生物特别是聚磷菌的研究显得尤为重要,目前这方面也取得了显著的进展。聚磷菌(polyphosphate accumulating organisms,PAOs)具有从废水中超量吸

收磷酸盐的能力,从而有效去除废水中的磷酸盐污染物,对污水处理系统生物除磷起着关键性作用,聚磷菌是生物除磷系统中主要的功能菌群之一。目前使用传统的纯培养方法以及非培养方法(如克隆文库,FISH,DNA 指纹图谱等)对这类菌群进行了较多研究。被认为属于 PAOs 类群的微生物有:产碱杆菌属^[5-6]、肠杆菌属^[7-8]、葡萄球菌属^[9]、变形菌属^[10]等,在不同的生物除磷系统工艺以及不同的污水成分下,PAOs 类群可能由不同的种群组成。对生物除磷机理的深入了解还有待于进一步分离聚磷菌,探讨菌种去除污水中磷的机理。

基金项目:重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2014jcyjA20011)
作者简介:王图锦(1981—),男,讲师,博士,主要从事环境微生物方面的研究。E-mail:wangtujian@163.com

本研究从一个实验室稳定运行的 AAO 反应器曝气池污泥中分离筛选出 4 株聚磷菌 (P1、P2、P3、P4),并对菌株去除废水中磷的性能进行了初步探讨,为深入了解生物除磷微生物学机理提供技术支持,同时为高效聚磷菌应用于工程实际打下基础。

1 试验方法

1.1 聚磷菌的分离纯化

将 5 mL 的活性污泥装入灭菌离心管内,加入几粒 2~3 mm 直径的玻璃珠,在旋涡振荡器上充分振荡,使活性污泥均匀分散在水中,采用涂布法分离纯化菌株。采用的培养基配方为:酵母膏:0.3 g;酪蛋白:1.2 g;CH₃COONa·3 H₂O:1.0 g;CaCl₂·2 H₂O:30 mg;KH₂PO₄:20 mg,MgSO₄·7H₂O:100 mg;NaCl:100 mg;pH:6.8~6.9;蒸馏水:1 000 mL;微量元素溶液 0.6 mL。

微量元素配方 (1L):H₃BO₃:0.15 g;FeCl₃·6H₂O:1.5 g;KI:0.03 g;CuSO₄·5 H₂O:0.03 g;Na₂MoO₄·2 H₂O:0.06 g;ZnSO₄·7 H₂O:0.12 g;MnCl₂·4 H₂O:0.12 g;CoCl₂·2 H₂O:0.15 g。

1.2 聚磷菌的筛选与吸放磷实验

将涂布分离获得的菌株转接到 100 mL 分离纯化培养基中进行富集培养,取富集培养后的菌液于离心机上 4 000 r/min 离心 10 min,离心管底的菌泥使用模拟废水洗涤一次并离心,洗涤后的菌泥转移到装有 100 mL 模拟废水的锥形瓶中,充分振荡,使菌体细胞均匀分散在模拟废水中。将锥形瓶与氮气钢瓶连接组成厌氧培养装置,进行厌氧释放磷实验,装置如图 1 所示。向锥形瓶中连续充氮气,为充分认识菌株在连续厌氧培养下释放磷的特征,于 30℃ 水浴中厌氧连续培养 3 h,每隔 1 h 从锥形瓶中取一次样,取得菌液于 10 000 r/min 离心 10 min,上清液用于测定 PO₄³⁻-P 含量。厌氧培养结束后将菌液转移到恒温振荡器中,于 200 r/min,30℃ 好氧培养,每隔 1 h 取样 1 次,连续好氧培养 10 h,每次取得的样品于 10 000 r/min 离心 10 min,取上清液立即测定 PO₄³⁻-P 含量。

吸放磷实验中采用的模拟废水配方如下:
蛋白胨 0.1 g,酵母膏:0.01 g;CH₃COONa·3 H₂O:0.925 g;KH₂PO₄·3 H₂O:65.51 mg;NaCl

0.05 g;MgSO₄·7 H₂O:153.7 mg;NaHCO₃:0.075 g;CaCl₂·2 H₂O:33.1 mg。

1.3 菌种的 16S rDNA 序列测定与系统发育树分析

PCR 简易 DNA 模板的制取:使用无菌牙签从纯菌落中挑取少许,置于 30 μL 的无菌水中混匀,使用 98℃ 高温加热 5 min,菌液转移到 1.5 mL 离心管中,于 10 000 r/min 离心 5 min,取上清液备用。

使用 16S rDNA 引物^[11]进行 PCR 扩增。正向引物为 8F 序列:AGAGTTTGATCCTGGCTCAG,反向引物为 1495R 序列:CTACGGCTACCTTGTTACGA。25 μL 的 PCR 反应体系为:简易 DNA 模板 2 μL,10xbuffer(Mg²⁺)2.5 μL,10 mmol/L dNTP 0.5 μL,10 pmol/L 引物各 1 μL,2.5 U TaqDNA 聚合酶。以无菌的 TE 缓冲液取代模板作空白对照。

PCR 温度设置:95℃ 预变性 5 min;94℃ 变性 1 min;56℃ 退火 1 min,72℃ 延伸 1 min 30s,共 35 个循环,最后 72℃ 延伸 10 min 结束反应。PCR 产物取 5 μL 作琼脂糖凝胶电泳检测。

PCR 产物 16S rDNA 测序工作交由上海生工生物工程有限公司完成。将测得序列用 Blast 软件提交 GenBank,与 GenBank 中的已知序列进行同源性分析,选取同源性较高的序列用 Clustal x (1.8) 软件比对,用 MEGAversion 2 中的 Kimura2-Parameter Distance 模型计算进化距离,用 Neighbor-Joining 法构建系统发育树。

2 结果与讨论

2.1 菌株吸放磷实验结果

通过涂布分离法获得 55 株纯菌株,对菌株作吸放磷试验得到具有较强除磷能力的 4 株细菌,其吸放废水中磷能力测定结果如图 2 所示。

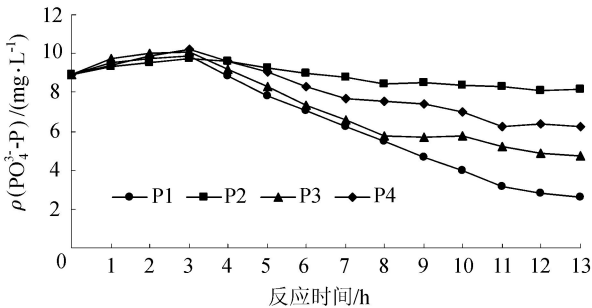


图 2 菌株吸放磷能力测定结果

由图 2 可见,4 株细菌具有明显的厌氧释放磷、好氧超量吸收磷的特征,在前 3 h 厌氧培养条件下,4 株聚磷菌释放磷,使得废水中磷浓度升高,转入好氧培养后,聚磷菌从废水中超量吸收磷,废水中磷含量下降明显。4 株菌株除磷效果如表 1 所示。模拟废水初始 PO₄³⁻-P 质量浓度为 8.91 mg/L,P1 号细菌

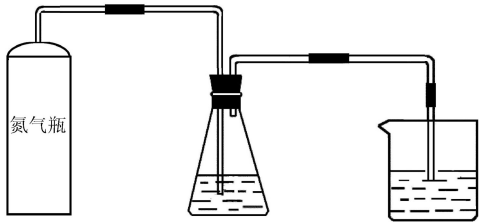


图 1 厌氧培养装置

除磷效果最好,厌氧释磷,废水中磷质量浓度增高1 mg/L达到 9.91 mg/L,好氧培养条件下超量吸收磷,废水最低磷质量浓度达到 2.18 mg/L,P1 在好氧条件下吸收的磷量是厌氧条件下释放磷量的 7.7 倍,吸磷量远高于释磷量,P1 对废水中磷的最大去除率达到 75.51%。此外,P2、P3、P4 的除磷率分别为 8.77%、47.26%、30.19%。

表 1 菌株除磷效果

菌株	初始磷质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	3 h 磷质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	13 h 磷质量 浓度/(mg·L ⁻¹)	磷去除 率/%
P1	8.91	9.91	2.18	75.51
P2	8.91	9.74	8.12	8.77
P3	8.91	10.11	4.70	47.26
P4	8.91	10.24	6.22	30.19

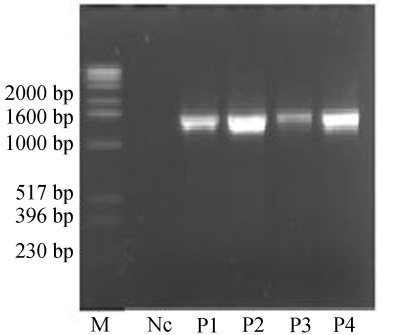
废水的强化生物除磷理论^[12-14]指出:在厌氧培养条件下,聚磷菌将胞内存储的多聚磷酸盐分解,以正磷酸盐的形式释放到废水中,同时利用废水中的有机物用于合成聚β羟基丁酸(PHB)贮存能量。在好氧培养条件下,聚磷菌储存的聚β羟基丁酸分解提供能量,用于聚磷菌从废水中超量吸收磷酸盐合成多聚磷酸盐颗粒,在好氧培养阶段聚磷菌吸磷量远高于厌氧释磷量,从而废水中的磷酸盐污染物得以去除。本研究分离纯化获得的 4 株细菌具有典型的吸放磷特征,可以判定 4 株细菌属于聚磷菌类群。

2.2 菌株的 16S rDNA 扩增结果

4 个菌株 P1、P2、P3、P4 的 16S rDNA 扩增结果

GACGTCGTGATGTGCAGTCTGAACGGTGACACGGAGCTTGCTCTGTGGGATCACTGGCGAACGGG
TGAGTAACACGTGAGCAACCTGCCCTGACTCTGGGATAAGCGCTGGAACGGCGTCTAATACTGGAT
ATGTGACGTGACCGCATGGTCTGCGTCTGGAAGAATTTCGGTTGGGGATGGGCTCGCGGCCATCAG
CTTGTGTTGGTGAGGTAATGGCTCACCAAGCGCTCGACGGGTAGCCGGCCTGAGAGGGTGACCGGCCAC
ACTGGGACTGAGACACGGCCCAGACTCCTACGGGAGGCAGCAGTGGGGAATATTGCACAAATGGGCG
CAAGCCTGATGCAGCAACGCCGCTGAGGGACGACGGCCTTCGGGTTGTAAACCTCTTTAGCAGGG
AAGAAGCGAAAGTGACGGTACCTGCAGAAAAAGCGCCGGTAACTACGTGCCAGCAGCCGCGGTAA
TACGTAGGGCGCAAGCGTTATCCGGAATTATTGGGCGTAAAGAGCTCGTAGGCGGTTTGTGCGGTCTG
CTGTGAAATCCGGAGGCTCAACCTCCGGCCTGCAGTGGGTACGGGCAGACTAGAGTGCGGTAGGGG
AGATTGGAATTCTTGGTGTAGCGGTGGAATGCGCAGATATCAGGAGGAACACCGATGGCGAAGGCAG
ATCTCTGGGCCGTAACTGACGCTGAGGAGCGAAAGGGTGGGGAGCAAACAGGCTTAGATACCCTGGT
AGTCCACCCCGTAAACGTTGGGAAGTGTGTTGGGTCCATTCCACGGATTCCGTGACGCAGCTAAC
GCATTAAGTTCCCGCCCTGGGGAGTACGGCCGCAAGGCTAAAACTCAAAGGAATTGACGGGGACCCG
CACAAGCGGCGGAGCATGCGGATTAATTGATGCAACGCGAAGAACCCTTACCAAGGCTTGACATATAC
GAGAACGGGCCAGAAATGGTCAACTCTTTGGACACTCGTAAACAGGTGGTGCATGGTTGTCGTCAGC
TCGTGTCTGTGAGATGTTGGGTTAAGTCCCGCAACGAGCGCAACCCTCGTTCTATGTTGCCAGCAGCTA
ATGGTGGGAAGTCAATGGGATACTGCCGGGTCAACTCGGAGGAAGGTGGGGATGACGTCAAATCATC
ATGCCCCCTTATGTCTTGGGCTTCACGCATGTACAATGGCCGGTACAAAGGGCTGCAATACCGCGAGG
TGGAGCGAATCCCAAAAAGCCGGTCCCAGTTCGGATTGAGGTCTGCAACTCGACCTCATGAAGTCGG
AGTCGCTAGTAATCGCAGATCAGCAACGCTGCGGTGAATACGTTCCCGGGTCTTGTACACACCGCCCG
TCAAGTCATGAAAGTCGGTAACACCTGAAGCCGGTGGCCTAACCTTGTGGAGGGAGCCGCTAGATA
CGCCCCCA

如图 3 所示,结果表明 PCR 产物均单一明亮,大小约为 1 500 bp。



M—1 Kb ladder DNA Marker; Nc—阴性对照

图 3 16S rDNA 扩增结果

2.3 菌株 16S rDNA 的序列测定与系统发育树分析

将 P1 菌株的 16S rDNA 核酸序列在 GenBank 作 BLAST 比对,结果表明该序列与 *Microbacterium oxydans*(DQ105974)最为接近,相似度达到 99.9%。同时与 *Microbacterium saperdae*(Y17236),*Microbacterium luteolum* (Y17235), *Microbacterium maritypicum* (AJ853910),*Microbacterium paraoxydans*(AJ581908)相似度均达到 99% 以上。选择同源性最高的 10 个 16S rDNA 全序列构建系统发育树,结果如图 4 所示。由图 4 可见,P1 菌株与 *Microbacterium maritypicum* (AJ853910)与 *Microbacterium oxydans* (DQ105974)严格聚为一族,根据同源性分析结果将 P1 菌株鉴定为微杆菌属细菌。

P1 菌 16S rDNA 测序结果如下:

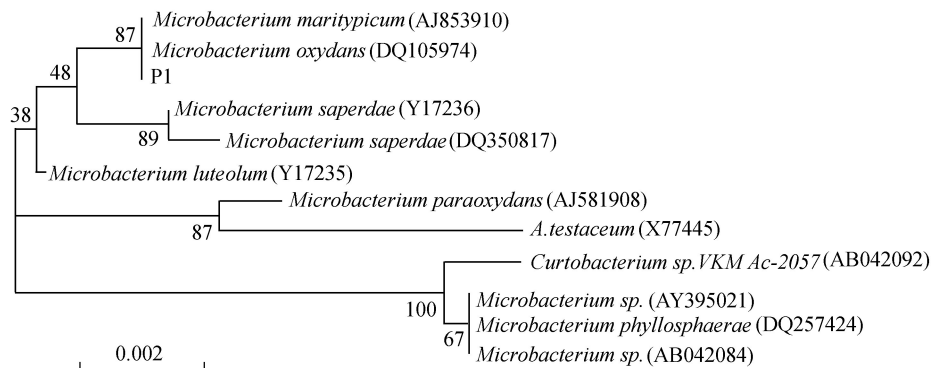


图 4 根据 P1 菌株 16S rDNA 序列构建的系统发育树

此外,经鉴定菌株 P2 属于芽孢杆菌属细菌,P3 为塚村氏菌属细菌,P4 为塚村氏菌属细菌。本实验获得的 4 株细菌具有聚磷菌明显的厌氧释磷、好氧吸磷特征,在现有文献中还未见报道这几个属的聚磷菌,本研究表明聚磷菌是一个宽泛的微生物类群,在不同地域、不同污水处理系统中存在不同的聚磷菌类群发挥除磷功能。

3 结 论

a. 本研究分离获得的 4 株聚磷菌具有典型的厌氧释磷、好氧吸磷特征,在厌氧培养条件下,4 株聚磷菌向废水中释放磷,使得废水中磷浓度略有升高,转入好氧培养后,4 株聚磷菌从废水中超量吸收磷,废水中磷浓度持续下降,约 10 h 后浓度趋于稳定。

b. P1 号聚磷菌除磷效果最为显著,对废水中磷的最大去除率可达 75.51%。P2、P3、P4 号聚磷菌最大除磷率分别为 8.77%、47.26%、30.19%。

c. 对 4 株聚磷菌作 16S rDNA 的测序分析,并将 16S rDNA 核酸序列在 GenBank 中作核酸序列鉴定出比对,P1 菌株为微杆菌属的细菌,P2 为芽孢杆菌属细菌,P3 为塚村氏菌属细菌,P4 为塚村氏菌属细菌。

参考文献:

[1] 宋姬晨,王淑莹,杨雄,等. 亚硝酸盐对 A^2O 系统脱氮除磷的影响[J]. 中国环境科学,2014,34(9):2231-2238. (SONG Jichen, WANG Shuying, YANG Xiong, et al. Effect of nitrite on nutrient removal in A^2O system [J]. China Environmental Science, 2014,34(9):2231-2238. (in Chinese))

[2] 白雪,张荣兵,顾剑,等. 大型污水处理厂污泥膨胀原因分析及控制方法[J]. 中国给水排水,2011,27(23):31-35. (BAI Xue, ZHANG Rongbing, GU Jian, et al. Cause analysis and control of sludge bulking in large-scale WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2011,27(23):31-35. (in Chinese))

[3] SEVIOUR R J, MINO T, ONUKI M. The microbiology of

biological phosphorus removal inactivated sludge systems [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2003, 27(1): 99-127.

[4] 周可新,许木启,曹宏. 生物除磷活性污泥系统微生物学研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2005,11(5):638-641. (ZHOU Kexin, XU Muqi, CAO Hong. Advance in microbiological research of activated sludge system for phosphorus removal[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2005,11(5):638-641. (in Chinese))

[5] FLORES III A, NISOLA G M, CHO E, et al. Bioaugmented sulfur-oxidizing denitrification system with *Alcaligenes defragrans* B21 for high nitrate containing wastewater treatment [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering,2007,30(3):197-205.

[6] ZHOU Yan, LIM M, HARJONO S,et al. Nitrous oxide emission by denitrifying phosphorus removal culture using polyhydroxyalkanoates as carbon source [J]. Journal of Environmental Sciences,2012,24(9):1616-1623.

[7] 张培玉,孙梦,张晨. 一株嗜盐聚磷菌的筛选及除磷性能初探[J]. 环境科学学报,2011,31(11):2368-2373. (ZHANG Peiyu, SUN Meng, ZHANG Chen. Preliminary study on screening and phosphorus removal characteristics of a halophilic phosphate accumulating bacterial strain[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011,31(11):2368-2373. (in Chinese))

[8] NAKAMURA K, HIRAISHI A, YOSHIMI Y, et al. *Microbacterium phosphovorans* gen. nov., sp. Nov.: a new Gram-positive poly-phosphate accumulating bacterium isolated from activated sludge[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 1995,45(1):17-22.

[9] 南亚萍,袁林江,王洋. 金黄色葡萄球菌聚磷特性研究[J]. 环境科学学报,2013,33(4):1028-1034. (NAN Yaping, YUAN Linjiang, WANG Yang. Characteristic and performance of phosphate accumulation by *Staphylococcus aureus* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013,33(4):1028-1034. (in Chinese))

(下转第 78 页)

95. (ZHANG Qiuwen, ZHANG Yongzhi, ZHONG Ming. A cloud model based approach for multi-hierarchy fuzzy comprehensive evaluation of reservoir-induced seismic risk [J]. Journal of Hydranlic Engineering, 2014, 45 (1): 87-95. (in Chinese))
- [7] 王贺, 刘高峰, 王慧敏. 基于云模型的城市极端雨洪灾害风险评价[J]. 水利经济, 2014, 32(2): 15-18. (WANG He, LIU Gaofeng, WANG Huimin. Urban extreme rainstorm flood loss based on cloud model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014, 32(2): 15-18. (in Chinese))
- [8] 杨文. 基于云模型的宁海县地表水环境质量评价[D]. 金华: 浙江师范大学, 2013.
- [9] 丁昊, 王栋. 基于云模型的水体富营养化程度评价方法[J]. 环境科学学报, 2013, 33(1): 251-257. (DING Hao, WANG Dong. The evaluation method of water eutrophication based on cloud model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(1): 251-257. (in Chinese))
- [10] 白晓燕, 赖成光, 陈晓宏, 等. 基于 Critic-cloud 模型的东江干流水质评价[J]. 水资源保护, 2014, 30(5): 26-31, 59. (BAI Xiaoyan, LAI Chengguang, CHEN Xiaohong, et al. Evaluation of water quality of trunk stream of Dongjiang River based on Critic-cloud model[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(5): 26-31, 59. (in Chinese))
- [11] 王昭洋, 王立, 王小艺, 等. 改进赋权的水体富营养化多维云模型评价[J]. 计算机与应用化学, 2015, 32(3): 346-350. (WANG Zhaoyang, WANG Li, WANG Xiaoyi, et al. Multi-dimensional cloud model evaluation of water eutrophication based on improved weight method[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, 32(3): 346-350. (in Chinese))
- [12] 丁昊. 云模型在水体富营养化评价及水文序列展延中的应用[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [13] WANG Yunqiang, YANG Liyuan, KONG Linghao, et al. Spatial distribution, ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediments from Dongping Lake, Shandong, East China[J]. Catena, 2015, 125: 200-205.

(收稿日期: 2015-10-22 编辑: 王芳)

(上接第 57 页)

- [4] JJ101—2004 埋地聚乙烯给水管道技术规程[S]
- [5] 胡平, 刘毅, 唐忠敏, 等. 水库水温数值预测方法[J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1045-1053. (HU Ping, LIU Yi, TANG Zhongmin, et al. Numerical prediction method of reservoir water temperature [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1045-1053. (in Chinese))
- [6] 杨伟. 半晶聚合物的应力应变行为及其与形态结构的关系[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [7] 关长涛, 陆光炯, 林德芳, 等. 圆形网箱框架用 PE 管材的弯曲疲劳试验[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(2): 236-240. GUAN Changtao, LU Guangjiong, LIN Defang, et al. Bending fatigue test on pepipes used for circular cage floating collars [J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Sciences Edition), 2006, 36(2): 236-240. (in Chinese))
- [8] 尹华杰. 压力管道强度及应力分析. [EB/OL]. [2010-07-13]. <http://wenku.baidu.com/view/e4253a7f5acfa1c7aa00cc69.html>
- [9] 李俊琦, 樊友权, 于兰英, 等. 铁道车辆液压减振器低速特性的 CFD 仿真[J]. 机床与液压, 2012, 40(9): 127-129. (LI Junqi, FAN Youquan, YU Lanying, et al. CFD simulation for low-speed performance of train damper[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(9): 127-129. (in Chinese))
- [10] 熊跃辉, 刘蔚. 污水处理厂排放标准要进行分类指导[N]. 中国环境报, 2014-07-08(02).

(收稿日期: 2016-01-20 编辑: 彭桃英)

(上接第 66 页)

- [10] NGUYEN H T T, NIELSEN J L, NIELSEN P H. 'Candidatus Halomonas phosphatis', a novel polyphosphate accumulating organism in full-scale enhanced biological phosphorus removal plants [J]. Environmental Microbiology, 2012, 14(10): 2826-2837.
- [11] AMANN R I, LUDWIG W, SCHLEIFER K H. Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation[J]. Microbiological and Molecular Biology Reviews, 1995, 59(1): 143-169.
- [12] 郑金伟, 冉炜, 钟增涛, 等. 增强型生物除磷过程中聚磷酸盐积累微生物的研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(8): 1487-1490. (ZHENG Jinwei, RAN Wei, ZHONG Zengtao, et al. Research advance in polyphosphate-accumulating microorganisms in enhanced biological phosphorus removal process [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(8): 1487-1490. (in Chinese))
- [13] WANG Yayi, REN Zhongjia, JIANG Fan, et al. Effect of copper ion on the anaerobic and aerobic metabolism of phosphorus-accumulating organisms linked to intracellular storage compounds [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 186(1): 313-319.
- [14] AL-NAJJARA M M, COATSB E R, LOGE F J. The role of the microbial stringent response in excess intracellular accumulation of phosphorous in mixed consortia fed synthetic wastewater [J]. Water Research, 2011, 45(16): 5038-5046.

(收稿日期: 2015-12-29 编辑: 徐娟)