

文章编号:1671-6833(2022)06-0077-06

进水碳磷比对 SBR 系统污泥沉降及脱氮除磷性能的影响

彭赵旭,王 炬,娄天宇,姜 昆,牛宁琪

(郑州大学 水利科学与工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:为了探究磷冲击负荷对活性污泥系统特性的影响,采用厌氧-好氧运行的 SBR 进行试验,通过改变进水磷含量,研究了在进水碳磷比(质量浓度的比)为 330/8、330/12、330/16 和 330/20 的条件下活性污泥系统的污染物去除特性、污泥沉降性等方面的表现。结果表明:碳磷比降低会强化聚磷菌活性,改善污泥沉降性,显著提高系统的脱氮除磷性能。当进水碳磷比由 330/8 改变至 330/20 时,系统好氧段比吸磷量由 9.502 mg/g 增加到了 17.764 mg/g,提升了 86.95%。在磷浓度升高冲击作用下,聚磷菌厌氧释磷会吸收更多的有机物,试验出水水质得到提升。厌氧期间 pH 值下降速率与释磷速率显著相关(R^2 为 0.667),pH 值曲线反映了系统中厌氧生物呼吸的特征。氧化还原电位(ORP)在厌氧阶段不断下降,在好氧阶段出现了 2 个平台期,通过在线监测 ORP 变化可以指示出 PO_4^{3-} -P 的质量浓度变化过程,并可确定厌氧释磷结束的时间点。在进水化学需氧量(COD)不变时,提高进水磷浓度可以使微生物活性增强,污泥沉降性能和系统脱氮除磷性能提高,给活性污泥系统带来有利影响。

关键词:磷冲击负荷;活性污泥;SBR 反应器;脱氮除磷;污泥沉降性

中图分类号:X773 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2022.03.012

0 引言

随着城市化进程的加快,污水处理厂的尾水已成为河湖内氮磷的主要来源,过量的营养盐(尤其是磷)易引发水体富营养化,破坏水生生态平衡。为了提高水环境质量,污水处理厂目前普遍执行一级 A(GB 18918—2006)或更严格的排放标准。与此同时,由于生产的季节性波动,以及部分区域管网建设滞后,造成污水厂进水水质波动较大(例如 TP),导致处理效果不稳定。而应急性的化学除磷不但成本高昂,而且产生固废。因此,在进水磷负荷冲击下,如何最大化依靠生物除磷实现达标排放,具有重要的现实意义。

目前有关进水碳磷比对活性污泥的影响主要表现为系统除磷性能,许多学者认为低碳磷比对活性污泥系统除磷性能的提高有一定的影响。王榕等^[1]发现低碳磷比时活性污泥系统对 TP 的去除速率均优于高碳磷比,低碳磷比有利于富集聚磷菌(PAOs),部分 PAO 能够利用 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 作为电子受体实现反硝化除磷;甄建园等^[2]发现适当降低碳磷比可以提高反硝化除磷

系统的除磷性能,当碳磷比为 30 时系统除磷性能最高;彭赵旭等^[3]发现在磷浓度恒定时,系统除磷性能随着碳磷比增加而显著增强,在碳源浓度恒定时,低碳磷比有助于 PAOs 在和聚糖菌(GAOs)的竞争取得优势。然而,生物除磷与脱氮之间存在碳源竞争,且与污泥沉降性关系密切,但目前关于进水磷冲击对脱氮除磷、污泥沉降性等方面综合影响的研究还鲜有报道。

鉴于此,本试验以序批式活性污泥反应器(SBR)为研究对象,通过改变进水碳磷比,在以往研究系统脱氮除磷表现的基础上,探讨了污泥沉降性变化,并进一步考察了活性污泥微生物的活性及系统 pH 值、ORP 等参数的变化,为污水厂应对进水磷波动提供理论借鉴和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验用水来源与水质

试验采用人工合成废水,以 $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ 作为碳源, NH_4Cl 作为氮源, KH_2PO_4 作为磷源,投加 $NaHCO_3$ 补充废水碱度,投加 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 和

MgSO₄ 以满足活性污泥微生物生长所需的营养要求。合成废水成分及水质参数如表 1 所示。

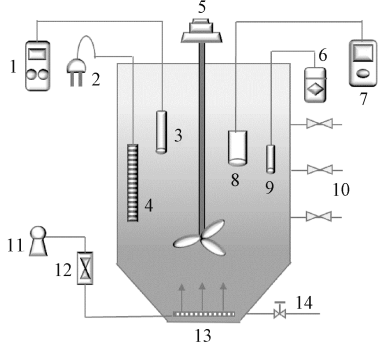
表 1 合成废水成分及水质

Table 1 Composition and quality of synthetic wastewater			
投加药剂	投加量/ (mg·L ⁻¹)	水质成分	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)
CH ₃ COONa·3H ₂ O	663.80	COD	326.9
NH ₄ Cl	166.90	NH ₄ ⁺ -N	43.7
KH ₂ PO ₄	34.98~87.44	PO ₄ ³⁻ -P	8.0~20.0
NaHCO ₃	375.00	碱度	400.0
CaCl ₂ ·2H ₂ O	40.00		
MgSO ₄	80.00		

注:质量浓度为投加药剂后水质成分的质量浓度。

1.2 试验装置及方法

采用 SBR 进行试验。反应器上部为圆柱体,下部为圆锥体,总有效容积为 12 L(图 1)。反应器垂直方向设置一排间隔 10 cm 的取样口,底部设有放空管。以曝气砂头作为微孔曝气器,由转子流量计调节曝气量,恒温加热器将温度控制在(21±1)℃,pH 值、DO、ORP 探头置于反应器内,在线监测各参数变化。好氧末期排放污泥混合液 100 mL,以使混合液悬浮固体(MLSS)质量浓度保持在 1 800~2 700 mg/L。



1—pH 测定仪;2—加热棒插头;3—pH 探头;4—加热棒;
5—调速调节器;6—ORP 测定仪;7—DO 测定仪;8—DO 探头;
9—ORP 探头;10—取样口;11—曝气泵;
12—转子流量计;13—曝气口;14—放空阀。

图 1 SBR 反应装置

Figure 1 SBR reaction equipment

1.3 技术路线

试验污泥取自中试规模厌氧-缺氧-好氧(AAO)反应器,处于丝状菌膨胀状态,其污泥容积指数(SVI)为 335.38 mL/g,MLSS 的质量浓度为 2 773 mg/L。试验共运行 4 个阶段 142 个周期,在进水 COD、NH₄⁺-N 浓度不变的情况下,通过调节 PO₄³⁻-P 来改变碳磷比,进而考察了磷冲击对活性污泥系统的影响。具体方式如表 2 所示。每个周期的运行模式均为首先脉冲进水 3 L,其次厌氧混合

0.5 h,好氧曝气 2 h,静置沉淀 0.5 h,滗水排放 1 h,闲置待机 4 h。

表 2 不同试验阶段的运行模式

Table 2 Operation mode of different test stages		
阶段	碳磷比	运行周期/个
1	330/8	1~39
2	330/12	40~72
3	330/16	73~105
4	330/20	106~142

1.4 检测分析项目

COD、MLSS、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、MLVSS(混合液挥发性悬浮固体浓度)、SV(污泥沉降比)、SVI 和 PO₄³⁻-P 等均采用国家标准方法测定,利用 WTW Multi 340i DO 仪监测系统厌氧和好氧阶段的 DO、pH 和 ORP,利用光学显微镜 OLYMPUS BX51 观察微生物形态。比释磷量和比吸磷量分别按照式(1)、(2)进行计算,比释磷(比吸磷)速率按照式(3)计算:

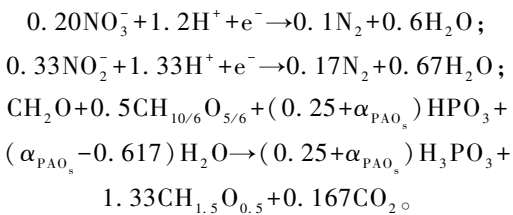
$$K_r = \frac{10^3(c_2 - c_1)V}{c(\text{MLSS}) \times V}; \tag{1}$$

$$K_a = \frac{10^3(c_4 - c_3)V}{c(\text{MLSS}) \times V}; \tag{2}$$

$$U_{r/a} = \frac{K_{r/a}}{T}. \tag{3}$$

式中:K_r 为比释磷量,mg/g;K_a 为比吸磷量,mg/g;c₁ 为厌氧初混合液磷质量浓度,mg/L;c₂ 为厌氧末混合液磷质量浓度,mg/L;c₃ 为好氧初混合液磷质量浓度,mg/L;c₄ 为好氧末混合液磷质量浓度,mg/L;V 为混合液体积,L;c(MLSS)为混合液污泥质量浓度,mg/L;U_{r/a} 为比释磷(比吸磷)速率,mg/(g·min);T 为释磷(吸磷)时间,min。

反硝化和厌氧释磷消耗 COD 的量为



反硝化 1 g 硝酸盐为 N₂ 需要 2.86 g COD,考虑到同化作用,实际需要 8.67 g COD。转化 1 g 亚硝酸盐为氮气,考虑到同化作用实际需要 5.20 g COD^[4]。

2 结果与讨论

2.1 磷冲击负荷对污泥沉降性能的影响

试验中 SVI 的平均变化速率随碳磷比的降低

而减小(图 2)。相关性分析发现,好氧段的比吸磷量与 SVI 平均变化速率呈极显著负相关(R^2 为 -0.985)。 SVI 平均变化速率降低意味着污泥沉降性趋于稳定,聚磷菌(PAOs)活性较高,可以更好地进行释磷和吸磷,因此好氧段的比吸磷量呈增加趋势^[5]。

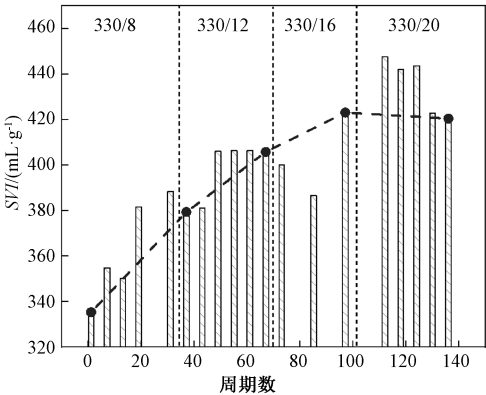


图 2 不同碳磷比下反应器 SVI 值

Figure 2 SVI in the reactor at different carbon-phosphorus ratios

2.2 磷冲击负荷对脱氮除磷的影响

生物除磷系统中除 PAOs 以外,还存在代谢过程与 PAOs 类似的聚糖菌(GAOs),但 GAOs 的代谢过程中没有磷参与^[6],仅消耗外界碳源,因此 GAOs 的存在会与 PAOs 竞争进水中的碳源^[7],从而导致 PAOs 的生长及活性受到限制。不同的碳磷比会影响 PAOs 和 GAOs 的竞争关系,进而影响污水生物处理系统的稳定性和污染物去除效果。图 3 为不同碳磷比下反应器比释磷(比吸磷)量。当碳磷比分别为 330/8、330/12、330/16、330/20 时,厌氧段比释磷量分别为 4.157、5.779、7.882、8.074 mg/g,好氧段比吸磷量分别为 9.502、11.701、11.001、17.764 mg/g。在外界碳源含量相同时,系统中释磷量和吸磷量均随着碳磷比降低呈升高趋势。在第 3 到第 4 阶段,厌氧段释磷量的少量上升就会引起好氧段吸磷量的大量增加。研究表明,系统中磷负荷越高,PAOs 相对 GAOs 在系统中越占据竞争优势,除磷效果也越好^[8]。本试验中随着碳磷比降低,PAOs 富集且活性增强,在厌氧阶段能竞争到更多的外部能量用于合成体内的 PHA,使好氧阶段可利用的 PHA 较多,从而为大量吸磷提供了能量保证,最终表现为较高的除磷效率。

好氧段平均 DO 质量浓度与好氧段比吸磷速率、厌氧段比释磷速率及好氧段比硝化速率之间也呈负相关, R^2 分别为 -0.832 、 -0.950 、 -0.890 ,

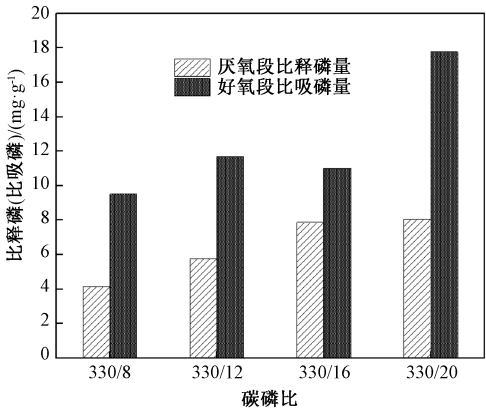


图 3 不同碳磷比下反应器比释磷/比吸磷量

Figure 3 Phosphorus release and phosphorus absorption in the reactor at different carbon-phosphorus ratios

如图 4 所示。随着系统磷含量增加,微生物活性增强,耗氧量相应增加,造成溶解氧下降。PAOs 好氧吸磷速率是由厌氧释磷速率决定的,厌氧阶段释磷速率高,磷释放量较大,聚磷菌体内合成的 PHB 增多,那么在好氧阶段由于分解 PHB 而合成的聚磷酸盐速率就较高^[9]。而当 PAOs 富集后生物除磷利用了更多的有机物,为自养硝化菌的生长创造了更好的环境,因此,比硝化速率也随之增加^[10]。

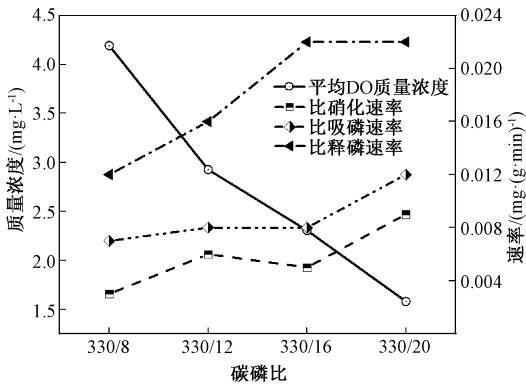


图 4 不同碳磷比下反应器脱氮除磷速率变化

Figure 4 Changes of nitrogen and phosphorus removal rate at different carbon-phosphorus ratios

2.3 磷冲击负荷对去除有机物的影响

反硝化过程是反硝化菌将硝酸盐和亚硝酸盐还原成氮气。反硝化菌是一类化能异养兼性厌氧细菌,在无氧时可利用有机物做电子供体进行反硝化作用^[11]。分别计算反硝化和释磷消耗的 COD,发现进水碳磷比与比厌氧释磷消耗的 COD 呈线性相关,如图 5 所示,表明增加进水磷含量将提升厌氧段释磷所消耗的 COD,废水中有机物也消耗得越充分。且在系统中由厌氧释磷消耗的 COD 远高于由反硝化消耗的 COD,这说明大部分

的 COD 在厌氧阶段被用来除磷,这与王文琪等^[12]的研究结果一致。

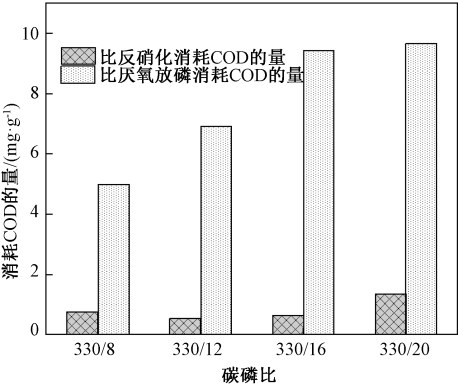


图5 不同碳磷比下反应器消耗 COD 的量
Figure 5 COD utilization in the reactor at different carbon-phosphorus ratios

2.4 磷冲击负荷对 pH 值、ORP、DO 的影响

在厌氧阶段,系统中的 pH 值持续缓慢下降,在厌氧期末达到谷点,如图 6(a)所示,主要是由聚磷酸盐在厌氧条件下释放 PO₄³⁻-P 和有机物水解酸化所致。经相关性分析,pH 值的下降速率

与厌氧段比释磷速率密切相关(R^2 为 0.667)。好氧阶段初期 PAOs 吸磷,且异养菌好氧呼吸产生的 CO₂ 不断被吹脱,pH 值持续上升,随后由于硝化过程消耗碱度,pH 值上升趋势减缓,并在好氧段末期保持稳定^[13]。在厌氧阶段,DO 曲线趋近于零,如图 6(b)所示,好氧阶段前期 DO 质量浓度仍未上升,主要原因是曝气后 DO 被吸附的有机物消耗了。好氧阶段中后期吸附的有机物完成分解,DO 质量浓度逐渐上升。ORP 曲线在厌氧阶段下降速率先快后慢,如图 6(c)所示,分别对应了反硝化和释磷过程。至厌氧结束时 ORP 降至谷点,释磷量达到最大^[14]。随后在好氧阶段由于 DO 含量升高,ORP 曲线不断上升,并且上升途中形成 2 个平台期。在好氧初期,因异氧菌降解吸附的有机物,DO 质量浓度难以升高,导致 ORP 缓慢增加形成小平台期。当吸附的有机物被降解完,耗氧速率下降,DO 质量浓度加速升高,ORP 曲线也随之跃迁形成大平台。由此可见,厌氧段在线监测 ORP 有利于严格控制厌氧释磷条件^[15]。

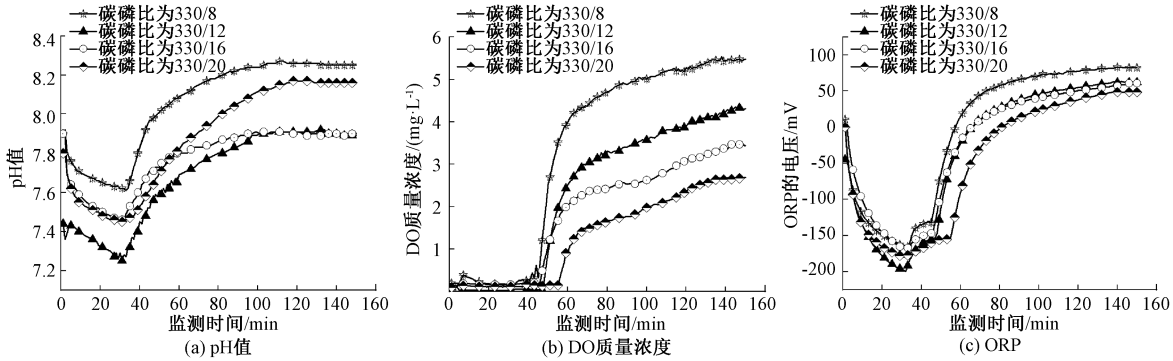


图6 不同碳磷比下 pH 值、DO 质量浓度和 ORP 值
Figure 6 Values of pH,DO and ORP at different carbon-phosphorus ratios

3 结论

- (1)进水 COD 恒定,磷浓度升高引起碳磷比下降时,厌氧(好氧)运行的活性污泥系统会强化厌氧释磷对有机物的吸收,进而提高 PAOs 活性,改善污泥沉降性。同时好氧段较少的有机物为自养硝化菌创造了良好生长环境,提高比硝化速率。
- (2)通过分析 pH 值、ORP、DO 曲线的变化趋势,能够间接掌握系统脱氮除磷进程。厌氧阶段 pH 值的下降速率与聚磷菌释磷速率相关,ORP 下降的最低点与释磷量最高点对应。好氧阶段 ORP 曲线出现 2 个平台期,中间的过渡段与 DO 突跃期对应,指示耗氧物质降解结束。
- (3)本研究集中于进水磷浓度长期冲击对系统的综合影响,短期间歇性冲击的影响特点,还需

要进一步研究。

参考文献:

[1] 王榕,成鹏飞,张建,等. 碳磷比对 SND 过程污染物去除及 N₂O 释放的影响[J]. 中国环境科学,2014, 34(2):378-382.
WANG R, CHENG P F, ZHANG J, et al. Effects of COD/P ratio on contaminant removal and N₂O emission during simultaneous nitrification and denitrification process[J]. China environmental science, 2014, 34(2): 378-382.

[2] 甄建园,于德爽,王晓霞,等. 进水 C/P 对 SNEDPR 系统脱氮除磷性能的影响[J]. 环境科学,2019,40 (1):343-351.
ZHEN J Y, YU D S, WANG X X, et al. Effect of the influent C/P ratio on the nutrient removal characteris-

- tics of the SNEDPR system[J]. Environmental science, 2019, 40(1): 343-351.
- [3] 彭赵旭,韩微,彭志远,等. 反应时间和碳磷比对单级好氧除磷的影响[J]. 郑州大学学报(工学版), 2018,39(4):46-50.
- PENG Z X, HAN W, PENG Z Y, et al. Impacts of reaction time and C to P ratio on single aerobic phosphorus removal system[J]. Journal of Zhengzhou university (engineering science), 2018, 39(4): 46-50.
- [4] 王维奇,王秀杰,李军,等. 部分反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮性能研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2):641-647.
- WANG W Q, WANG X J, LI J, et al. Study on the performance of partial denitrification coupled with anaerobic ammonia oxidation for nitrogen removal[J]. China environmental science, 2019, 39(2): 641-647.
- [5] 杨雄,彭永臻,宋姬晨,等. 进水中碳水化合物分子大小对污泥沉降性能的影响[J]. 中国环境科学, 2015,35(2):448-456.
- YANG X, PENG Y Z, SONG J C, et al. Effect of influent carbohydrates with different molecule-size on sludge settleability[J]. China environmental science, 2015, 35(2): 448-456.
- [6] TORRESI E, TANG K, DENG J, et al. Removal of micropollutants during biological phosphorus removal; impact of redox conditions in MBBR[J]. Science of the total environment, 2019, 663:496-506.
- [7] KANG X R, LIU Y L. Effect of intracellular carbon resource on competition between PAOs and GAOs for enhanced biological phosphorus removal[J]. Advanced materials research, 2014, 1073-1076:1007-1010.
- [8] 王建辉,赵鑫,林爽,等. 影响聚磷菌和聚糖菌竞争的若干因素分析[J]. 吉林农业大学学报, 2019, 41(3):303-307.
- WANG J H, ZHAO X, LIN S, et al. Analysis of several factors influencing the competition of PAOs and GAOs[J]. Journal of Jilin agricultural university, 2019, 41(3): 303-307.
- [9] LI W, ZHANG H Y, SUN H Z, et al. Influence of pH on short-cut denitrifying phosphorus removal[J]. Water science and engineering, 2018, 11(1):17-22.
- [10] 谷雨. 污水处理中硝化细菌生存的影响因素分析[J]. 江西化工, 2020(3): 130-132.
- GU Y. Analysis of factors affecting the survival of nitrifying bacteria in sewage treatment[J]. Jiangxi chemical industry, 2020(3): 130-132.
- [11] ZHANG L L, SONG Y D, ZUO Y, et al. Integrated sulfur-and iron-based autotrophic denitrification process and microbial profiling in an anoxic fluidized-bed membrane bioreactor[J]. Chemosphere, 2019, 221:375-382.
- [12] 王文琪,李冬,高鑫,等. 不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4406-4413.
- WANG W Q, LI D, GAO X, et al. Combining different aerobic/anoxic durations with zoned sludge discharge to optimize short-cut nitrification denitrifying phosphorus removal granules in domestic sewage[J]. Environmental science, 2021, 42(9): 4406-4413.
- [13] 王天龙. 生活污水处理过程影响因素分析及调控策略探究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- WANG T L. Analysis on influencing factors of domestic sewage treatment and the study of control process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [14] 贾艳萍,贾心情,张兰河,等. 序批式生物反应器工艺脱氮除磷过程控制参数[J]. 化学反应工程与工艺, 2015, 31(2): 136-141.
- JIA Y P, JIA X Q, ZHANG L H, et al. Control parameters for removal of nitrogen and phosphorus in sequencing batch reactor[J]. Chemical reaction engineering and technology, 2015, 31(2): 136-141.
- [15] LI S Y, MU J N, DU Y F, et al. Study and application of real-time control strategy based on DO and ORP in nitrification-denitrification SBR start-up[J]. Environmental technology, 2021, 42(1):114-125.

Effect of Influent Carbon-phosphorus Ratio on Sludge Sedimentation and Nitrogen and Phosphorus Removal in SBR System

PENG Zhaoxu, WANG Ju, LOU Tianyu, JIANG Kun, NIU Ningqi

(School of Water Conservancy and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to explore the impact of phosphorus shock load on the characteristics of activated sludge system, the anaerobic aerobic SBR was used for experiments. By changing the influent phosphorus content, the pollutant removal characteristics and sludge sedimentation performance of activated sludge system were in-

vestigated in the conditions of influent carbon-phosphorus ratios of 330/8, 330/12, 330/16, 330/20. The results showed that the decrease of carbon-phosphorus ratios could enhance the activity of phosphorus accumulating bacteria, could improve the sludge settleability, and could significantly improve the system's nitrogen and phosphorus removal performance. When the influent carbon-phosphorus ratios changed from 330/8 to 330/20, the specific phosphorus uptake in the aerobic stage increased from 9.502 mg/g to 17.764 mg/g, increasing by 86.95%. With the impact of increasing phosphorus concentration, the phosphorus accumulating bacteria would absorb more organic matter by anaerobic phosphorus releasing, and the experimental effluent quality will be improved. During the anaerobic period, the pH decreasing rate was significantly correlated with the phosphorus release rate ($R^2=0.667$), and the pH curve reflected the characteristics of anaerobic respiration in the system. ORP decreased continuously in the anaerobic stage, and two platform appeared in the aerobic stage. The change process of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration could be indicated by online monitoring of ORP changes, and the time point of the end of anaerobic phosphorus release could be determined. When the influent COD remained unchanged, increasing the influent phosphorus concentration could enhance the microbial activity, improve the sludge sedimentation performance and the system's nitrogen and phosphorus removal performance, which would have a favorable impact on the activated sludge system.

Keywords: phosphorus shock loading; activated sludge; SBR reactor; nitrogen and phosphorus removal; sludge settleability

(上接第 63 页)

Aerodynamic Characteristics Analysis of Smooth Circular and Non Smooth Circular Ice-coated Conductors

ZHAO Guifeng, WEI Danyang, ZHANG Meng

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Most of the existing simulation studies on the wind-induced vibration of ice-coated conductors simplify the conductor to an ideal smooth circular section and accept its aerodynamic characteristics, but the section characteristics of the actual conductor twist are not considered enough. In this study, Fluent software is used to study the aerodynamic characteristics of ice-coated smooth circular and non smooth circular twisted section conductors, and to analyze the characteristics and differences of their aerodynamic coefficients at different wind speeds, icing thickness, icing shape and conductor diameter. The results showed that the aerodynamic coefficients of ice-coated conductors with two sections were quite different, among which the maximum relative deviation of drag coefficient and torsion coefficient could reach 100%, and the maximum relative deviation of lift coefficient could reach -175%. The use of non smooth circular twisted section conductor could increase the number of vortex shedding in the cycle and made its fluctuation more violent. When the icing was crescent shaped, the smooth circular section conductor could underestimate the downwind displacement and overestimate the crosswind displacement of the conductor. When the icing was D-shaped, the fluctuation of smooth circular section conductor was smoother and more regular than that of non smooth circular twisted section, which could overestimate the downwind displacement and underestimate the crosswind displacement. In view of the large differences in aerodynamic force, vortex shedding diagram and displacement response between the two types of coated ice conductors, the influence of conductor cross-section stranded characteristics on aerodynamic force should be considered in the fine wind resistance design of coated ice transmission line system.

Keywords: aerodynamic characteristics; smooth and non smooth fine conductor; ice-coated conductors; wind attack angle; vortex shedding