

“清时捷”供排水企业运行及管理成果专栏

徐锦涛, 张葆华. 基于 HACCP 体系的水厂投加系统的风险管理[J]. 净水技术, 2022, 41(11):179-184.

XU J T, ZHANG B H. Risk management of WTP chemical dosing system based on HACCP system[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(11):179-184.



扫我试试?

基于 HACCP 体系的水厂投加系统的风险管理

徐锦涛, 张葆华*

(佛山市顺德区水业控股有限公司, 广东佛山 528000)

摘要 水厂投加系统的安全风险严重影响整体的正常运行, 是水厂风险管理的重点, 若采用事后控制的措施进行风险管控, 会对水厂运行带来较大的管理风险。以水厂常规投矾加氯系统为例, 通过技术分析手段, 简要论述了危害分析和关键控制点(HACCP)体系在水厂投加系统风险管理的具体应用。结果显示, 常规水厂的投加系统一般包括 7 个关键控制点, 其中投矾系统要注意铝、浑浊度超标、断药等 4 个控制点; 加氯系统要关注微生物、余氯超标等 3 个控制点。文中结合技术理论分析和 HACCP 体系构建制定了投加系统 HACCP 计划表, 总结了通过投加设备 PID 改造、调整投加工艺和新建消毒池等降低投加系统管理风险的手段, 对于提高供水安全保障有一定的借鉴意义。

关键词 投加系统 次氯酸钠 聚合氯化铝 危害分析和关键控制点(HACCP) 风险管理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2022) 11-0179-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.11.025

Risk Management of WTP Chemical Dosing System Based on HACCP System

XU Jintao, ZHANG Baohua*

(Foshan Shunde Water Industry Holding Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract The safety risk of the water treatment plant (WTP) dosing system seriously affects the overall normal operation and it is the focus of the risk management of WTP. If the risk management and control measures are adopted after the event, it will bring greater management risks to the operation of WTP. With polyaluminium chloride and sodium hypochlorite dosing system as an example, by means of technical analysis, it briefly discussed the hazard analysis and critical control points (HACCP) system in WTP dosing system concrete application of risk management. Results showed that the dosing system of conventional WTP generally included seven key control points, of which the dosing system of polyaluminum chloride should pay attention to four control points such as aluminum, turbidity exceeding the standard, and drug discontinuation and so on; the sodium hypochlorite dosing system needed to pay attention to three control points such as microorganisms, excess chlorine and so on. Combined with technical theoretical analysis and HACCP system construction, the paper formulated the HACCP plan for the dosing system, and summarized the means to reduce the management risk of the dosing system through the PID transformation of the dosing equipment, the adjustment of the dosing process, and the construction of a new disinfection tank. It has certain reference significance for improving the security of water supply.

Keywords dosing system sodium hypochlorite polyaluminum chloride hazard analysis and critical control points (HACCP) risk management

[收稿日期] 2022-03-08

[作者简介] 徐锦涛(1995—), 男, 研究方向为水厂运营管理及水处理技术研究, E-mail: jtxu163@163.com。

[通信作者] 张葆华(1972—), 女, 高级工程师, 研究方向为供水生产及电气自动化, E-mail: zhangbh@shunde.gov.cn。

水厂常规投加系统包括投矾系统和投氯系统两大部分,通过投加系统自动精准地投加混凝剂和消毒剂,是确保工艺效果稳定和提高生产效率的前提和保障。相对于其他生产环节,在供水生产中,对于投加系统的风险管理和控制至关重要,一旦该系统出现故障,其他生产环节将直接瘫痪。近几年来,随着智慧水务的推进发展,供水行业对投矾、加氯系统的研究更多地倾向于智能化投加领域,追求智慧决策和自动控制,但对于投加系统在供水生产中的风险管理则较少被研究^[1]。风险管理流程的实施是为了更好地应对突发故障的影响并防止其发生。其中,危害分析和关键控制点(hazard analysis and critical control points, HACCP)体系是食品行业对食品生产的全过程质量控制体系,是生产过程的有效监测,目前已经成功应用于水厂生产的风险管理,是一种可接受的用于指导在供水系统中识别危害和建立控制体系的水质管理工具,但研究较多集中在水厂水质管理的整体内部控制,缺少技术理论分析和对局部系统管理风险的深入探讨^[2-5]。

本文以自来水厂常规投矾、加氯系统为例,按照 HACCP 体系,通过对药剂性质和投加系统进行技术分析,并结合故障树分析方法确定主要危害,确定关键控制点和关键限值,提出实现投加系统风险可控的有效措施。

1 投加系统基本情况

案例水厂设计处理能力为 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实际供水量约为 $8.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。原水取自西江,浊度为 10~20 NTU,原水各项水质指标中,除总磷和粪大肠菌群在 II~IV 类指标限值,其余项目均符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)基本项目 I 类指标和补充项目指标限值要求。水厂出厂水水质较好,浊度控制在 0.15~0.20 NTU,各项指标均符合《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

该水厂采用常规混凝-沉淀-过滤工艺,在配水井投加聚合氯化铝作为混凝剂,整个工艺流程中分 3 次加氯,分别是配水井前加氯助凝、滤池出水管道中后加消毒以及清水池出水管道中补加氯保持余氯。具体工艺流程如图 1 所示。

聚合氯化铝投加系统包括储存系统、投加系统和控制系统,质量分数为 4% 的聚合氯化铝溶液储存在混凝土矾池,通过计量泵投加。次氯酸钠投加

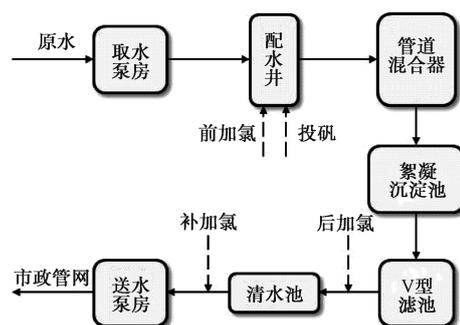


图 1 案例水厂工艺流程及投加系统示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Process Flow and Dosing System of the WTP of Case

系统主要包括进药系统、软水系统、储存系统、投加系统和控制系统,质量分数为 10% 的成品次氯酸钠溶液被软水稀释成 4.8% 有效氯的次氯酸钠溶液后,再进行储存和投加。投加控制系统设置 PLC 子站,投矾采用常规流量比例前馈控制系统,加氯根据制水流量、余氯反馈进行控制,由中控室统一控制。

2 HACCP 体系的构建方法

首先对次氯酸钠、聚合氯化铝进行产品特性分析,如表 1 所示。

其次,总结其对投加系统的影响,确定投加系统风险点。根据风险发生的评分标准进行半定量分析,通过故障分析树的方法进行危害分析,制作危害分析表、风险综合评估表,并根据“确定关键控制点流程图”制作危害分析流程表和 HACCP 计划表,具体分析参考厦门水务集团的研究经验^[2]。

2.1 投加系统风险分析

2.1.1 投矾系统风险分析

(1) 聚合氯化铝是广泛使用的混凝剂,通常是由铝灰或含铝矿物通过酸溶、碱溶或两步法加工制得的无机高分子化合物,在长期使用过程中自身容易沉积附着在矾池和管道中形成矾泥,堵塞管道。根据实践经验,可以通过加装冲洗管道,每隔 30 d 反冲洗约 4 h,或每隔 15 d 采用 60 L 20% 的 NaOH 溶液浸泡 30 min 去除^[6]。除此之外,对计量泵进行技改也是其中一个可行办法。选用磁力离心泵、智能调节电动球阀、电磁流量计及控制单元等设备实现恒流投加,通过控制器对智能电动球阀、流量计进行数据采集及 PID 进行控制,即使出现管道堵塞,PLC 也能自动调节电动阀开度进行冲洗^[7]。

表 1 产品特性分析

Tab. 1 Analysis of Product Characteristics

类别	产品特性	对投加的影响
4% 聚合氯化铝溶液	无机高分子絮凝剂, 絮凝体成型快, 可以调节盐基度和添加助凝成分以适应原水水质变化	产品成分发生变化时, 新旧产品之间容易发生反应形成水不溶物, 进而堵管断药
	沉淀性能好, 易沉积	沉积物容易滞留管道, 进而堵管断药
	有较小的腐蚀性	存在管道漏损的风险
	水解消耗原水碱度, 导致出厂水 pH 降低	出水化学稳定性下降, 容易腐蚀管道, 诱发用户端黄水/红水现象
	原水 pH 较低时, 由于水解形态的变化, 氢氧化铝含量减少, 絮凝效果不好	出厂水浑浊度容易超标
	pH 值 > 8.5 时, 水解形成的氢氧化铝胶体被明显溶解成铝酸离子	铝酸离子溶于水, 无法通过混凝过滤去除, 容易导致出厂水铝超标
4.8% 次氯酸钠溶液	强氧化性、腐蚀性	存在管道漏损的风险
	次氯酸钠常温下可自然分解	导致加药管积气断流
	强碱性、游离碱 (NaOH) 含量较高	水中钙、镁离子形成 CaCO_3 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 结晶沉淀, 堵管断药
	与氨发生氧化还原反应形成氯胺, 化合性余氯无法通过仪表快速检测获得数值	原水氨氮浓度高时, 容易导致余氯不足或超标
	次氯酸钠消毒需要一定的接触时间	接触时间不足容易导致微生物超标
	后加氯需要通过反馈调节, 对投加工艺的要求较高	投加点和在线检测点的设计不合理会导致出厂水余氯难以控制, 存在超标风险

(2) 对于南方水厂, 供水企业经常要求聚合氯化铝厂家根据低温低浊的原水条件调整药剂配方, 在药剂中加入助凝剂并降低盐基度以提高混凝效果。研究^[8-9]分析, 降低盐基度利于低温低浊水质的处理, 但絮凝剂的形态分布会发生变化。如果配方调整不佳, 新旧混凝剂混合后, 随着盐基度的大幅改变, 多核羟基络合物的形态逐渐发生变化, 助凝剂成分很可能会参与该过程, 导致水不溶物出现。前期研究在实践中曾观察到白色混合物大量析出, 一旦出现, 投加系统就会堵塞断药。因此, 建议尽可能减少聚合氯化铝配方的调整, 若确实需要调整, 应做好配方调整记录和到货检验记录, 及时在化验室开展新旧混凝剂的混合试验和混凝沉淀试验, 密切关注药剂投加量的变化, 一旦出现堵塞现象, 应立即切换备用管道, 清洗或更换堵塞管道。

(3) 聚合氯化铝不适用于低碱度原水, 因为聚合氯化铝水解会导致氢离子浓度增加, 影响混凝反应效果, 这种情况可以通过补充碱性物质的方法来解决。

(4) 聚合氯化铝具有腐蚀性, 管道接口容易渗

漏, 影响投加效果。该问题可以通过加强巡检、双表法实现在线监测等方式来解决。

(5) 在藻类暴发或原水 pH 异常时, 原水 pH 值升高至 8.0 以上, 容易导致聚合氯化铝形成偏铝酸可溶物质, 导致出水铝超标。解决办法是投加碱性物质调节反应池 pH。

2.1.2 加氯系统风险分析

(1) 研究发现, 当水质受到污染时 (氨氮等超标), 在线仪表监测余氯结果与实验室结果偏差较大, 导致补加氯无法精准控制, 出厂水余氯容易超标。另外, 每次校正后监测 1 个月左右, 余氯在线仪表在正常水质条件下仍会出现偏差。解决的方法是在氨氮污染期间, 通过对原水氨氮的化验结果, 利用折点加氯的原理投加氯, 控制仪表校正周期在 29 d 内, 水质污染恢复正常后立即校正仪表, 并建立岗位化验室^[6], 在特殊时期采用化验强化检测制度。

(2) 自来水卫生消毒主要依靠后加氯, 后加氯的投加点一般选择在滤后出水管, 但是清水池液位不断变化, 容易导致消毒 CT 值不达标, 出水微生物超标。一般在运行过程中应尽量保持清水池高水位

运行,若清水池水位较低,此时应注意提高后加氯的投加量并减少补加氯量。最切实的消毒保障是建设消毒池。

(3)后加氯投加点和余氯检测仪若选择不佳,容易导致后加氯与滤后水混合不充分、余氯反馈结果有误等问题,导致消毒控制混乱。一般的经验办法是后加氯点设于滤池集水渠始端,总余氯检测仪置于清水池进水口,采用比例控制与反馈调节的模式^[10]。

(4)为了抑制次氯酸钠分解,通常厂家在溶液中加入碳酸钠和硅酸钠,软水器故障也会导致溶液中钙、镁离子浓度升高,这时次氯酸钠较高的游离碱容易导致溶液中的钙、镁离子形成氢氧化物结晶沉淀,堵塞管道。解决的办法是对插入水面以下投加管道进行斜面切割,切口顺水流方向,以形成局部真空,插入管采用快速装卸方法,并定期检查软化水系统等,避免堵塞^[10]。

(5)次氯酸钠容易自然分解产生氧气,导致加药管积气断流,解决办法是采取小管径(DN20)减少内积气,并加装高位排气阀^[10]。

(6)次氯酸钠具有腐蚀性,管道接口容易渗漏,

影响投加效果。该问题可以通过加强巡检、双表法实现在线监测等方式来解决。

(7)原水氨氮超标或有机物较多,容易导致前加氯过量投加,生成三卤甲烷等消毒副产物,影响饮用水安全,解决办法是采用氯胺消毒或折点加氯。

2.2 制定危害分析流程表

根据上述技术分析结果和投加系统特点,结合故障树分析、决策树分析和 HACCP 分析方法,可做出危害分析流程表(仅列出显著危害),如表 2 所示。对每个潜在危害从可能性(5分)、严重性(5分)、不可探测性(5分)3个维度进行评价,3个评分乘积不低于 25 分为显著性危害,但一旦发生会造成严重供水安全事件的,将打破常规分值限值而列为显著性危害。其他流程步骤均参照成熟的经验案例^[2,4-5],这里暂不列出。水厂常规投加系统的显著危害总结为 7 个,分别是投矾系统的铝超标、浑浊度偏高、矾泥堵塞管道导致断药、不溶物堵管断药,以及加氯系统的 CT 值不达标导致残留微生物超标、投加和控制不合理导致微生物超标、仪表不准导致余氯超标。

表 2 投加系统危害分析流程表

Tab. 2 Hazard Analysis Flow Table of Dosing System

工艺步骤	确定本步骤引入的,受控的或增加的危害和潜在危害	分值 (可能×严重×不可探测)	潜在饮用水安全危害是显著的吗 (Y/N)	对显著危害的判断依据(经验、试验、结果、法律法规等)	可采取的预防措施
投矾	化学 铝超标	3×4×3=36	Y	水质日检结果	调节反应池 pH,保持碱性物质和碱铝投加的平衡
	物理 浑浊度偏高	4×5×1=20	Y	在线水质仪表、日常巡视、日常经验和水质日检报告	加强日常监测,通过混凝试验和经验分析,人工干预加药量
	设备 矾泥堵塞管道导致断药	4×5×1=20	Y	自控系统检测报警、日常巡检	预防性维护保养,保证日常巡检,及时手动投加,定期用 NaOH 浸泡管道或者采用能够自动调节流量冲刷管道的自控改造技术
	不溶物堵管断药	2×5×1=10	Y	自控系统检测报警、日常巡检	严格控制不同批次药剂的到货检验,尽量避免新旧药剂混合,降低配方调整的频次,尽量保持配方的稳定
加氯	生物 CT 值不达标导致残留微生物超标	4×5×2=40	Y	化验检测报告	尽量保持清水池高水位运行,提高后加氯的投加量并减少补加氯量,新建消毒池
	投加和控制不合理导致微生物超标	3×5×2=30	Y	化验检测报告	后加氯点设于滤池集水渠始端,总余氯检测仪置于清水池进水口,采用比例控制与反馈调节的模式
	化学 仪表不准导致余氯超标	5×5×1=25	Y	化验检测报告	控制仪表校正周期在 29 d 内,水质污染恢复正常后立即校正仪表,并建立岗位化验室

注:Y 表示是,N 表示不是

2.3 确定关键控制点和建立 HACCP 计划

运用决策树分析确定 HACCP 体系中的关键控制点^[2],可以发现,常规的投矾加氯系统一共有 7 个关键控制点,针对这 7 个关键控制点,需要制定关

键限值和纠偏措施,用于记录和验证关键控制点的监测值是否能够达到要求,按照水厂内控要求和国家、行业技术标准,制定如下 HACCP 计划表,如表 3 所示。

表 3 投加系统 HACCP 计划
Tab. 3 HACCP Plan for Dosing System

关键控制点	国家和行业标准	关键限值	监控系统			纠偏行动	记录	验证
			对象	方法	频率			
投矾 铝超标	出厂水 ≤ 0.2 mg/L	滤后水 ≤ 0.15 mg/L	滤后水余铝	化验室检验	1 次/d	检查反应池 pH,保持碱性物质与混凝剂投加平衡	余铝记录;碱性物质、混凝剂投加记录	铝达标
浑浊度偏高	沉后水 ≤ 3 NTU	沉后水 ≤ 3 NTU	待滤水浑浊度	化验室检验	1 次/(2 h)	混凝搅拌试验;调整投药量	混凝试验记录;混凝剂和浑浊度记录	浑浊度达标
矾泥堵塞管道导致断药	不得断药	不得断药	投矾设备	自控系统报警,运行人员巡检	1 次/(2 h)	启动备用泵和备用管道;冲洗投加管道	药剂投加记录;管道清洗记录	设备恢复正常
不溶物堵管断药	不得断药	不得断药	投矾设备	自控系统报警,运行人员巡检	1 次/(2 h)	启动备用泵和备用管道;冲洗投加管道	聚合氯化铝配方调整记录;到货检验记录;药剂投加记录;管道清洗记录	设备恢复正常
加氯 CT 值不达标导致残留微生物超标	菌落总数 ≤ 100 CFU/mL	菌落总数 ≤ 80 CFU/mL	出厂水	化验室检验	1 次/(2 h)	提高清水池液位;提高后加氯,降低补加氯	加氯记录;微生物检验记录	菌落总数达标
投加不合理导致微生物超标	菌落总数 ≤ 100 CFU/mL	菌落总数 ≤ 80 CFU/mL	出厂水	化验室检验	1 次/(2 h)	调整后加氯的投加量,加强余氯人工化验	加氯记录;微生物检验记录;余氯检测记录	菌落总数达标
仪表不准导致余氯超标	0.3 mg/L ≤ 出厂水余氯 ≤ 4 mg/L	0.3 mg/L ≤ 出厂水余氯 ≤ 2 mg/L	原水、待滤水和出厂水	化验室检验	1 次/h	加测浑浊度、色度、余氯和氨氮;调整余氯投加量;及时校准在线仪表	加氯记录;水质和余氯检测记录;在线仪表校准记录	余氯达标

3 结论和建议

(1)通过技术理论分析,有利于确定水厂常规投加系统的各种风险点,以此为基础建立水厂局部系统 HACCP 体系,更具有技术针对性和实践性,容易实现对局部系统的深入和透彻分析,可操作性强,有一定的推广应用价值。

(2)常规水厂的投加系统一般包括 7 个关键控制点,其中投矾系统 4 个关键控制点综合评分有 3 个低于 25 分,其评定为显著性危害是考虑到其可能导致的水质风险并带来较大的社会影响,因此,投矾系统的风险控制尤为重要,在生产运行中应以事前控制为主。加氯系统的风险显然比投矾系统要大,

在生产过程中需要着重控制。

(3)对于投矾系统中的矾泥堵塞管道以及加氯系统的微生物超标,完全可通过技术改造消除关键控制点,如通过以磁力离心泵、智能调节电动球阀为核心的 PID 改造,实现恒流自动冲洗防堵塞;通过新建消毒池、合理调整后加氯、在线余氯取样点以及加氯控制方式,可以避免微生物超标,从而缩减控制点至 4 个,大大降低管理难度。

(4)应加强水厂投矾加氯系统的智能化改造,更好地解决投加系统风险管理问题,切实保障供水生产的安全。

参考文献

- [1] 沈泽华. 智能水厂投矾加氯控制系统的研究设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [2] 欧瑜婷. 厦门水务集团供水水质风险管理研究[D]. 泉州: 华侨大学, 2020.
- [3] 李洪兴, 姚建义, 付彦分, 等. 农村供水系统中应用危害分析和关键控制点原理的实例研究[J]. 卫生研究, 2005(6): 110-112.
- [4] 张健. HACCP 体系在水厂生产过程控制中的应用[J]. 供水技术, 2018, 12(2): 60-64.
- [5] 张金松, 徐荣, 刘波, 等. 推进饮用水 HACCP 体系建设实现水质全过程管控的探索与实践[J]. 净水技术, 2021, 40(8): 1-8.
- [6] 黄小丽. 给水生产过程单元细节修正与优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [7] 丁文东, 何英华, 宋振洪. 磁力离心泵在水厂加药系统技改中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(10): 139-142.
- [8] 狄春华, 施学峰. 高盐基度聚氯化铝对控制饮用水中铝的应用[J]. 净水技术, 2021, 40(5): 69-74, 107.
- [9] 杨晓凡, 孙运运, 程澍, 等. 不同水温条件下聚合氯化铝优化试验研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 86-91.
- [10] 邵志昌, 纪宏卓, 翁巧龙, 等. 净水厂次氯酸钠投加系统技术改造[J]. 中国给水排水, 2016, 32(24): 97-100.

【编辑推荐】基于 HACCP 的风险管理体系正逐渐得到水务行业的认可并被使用, 此前基于供水系统的风险点研究的工作较多, 但在实际具体水厂生产运行中的应用还需要更多深入的研究和探索。文章以水厂投加系统为具体应用场景, 应用 HACCP 理念开展风险管理体系建设, 详细描述了 7 个关键控制点的研判和确认过程, 具有操作性, 对于正尝试开展 HACCP 体系建设的同行水厂具有实战的指导价值。

(上接第 84 页)

- [57] ZHANG T, WANG B, LI X, et al. Achieving partial nitrification in a continuous post-denitrification reactor treating low C/N sewage[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 335: 330-337. DOI: 10.1016/j.cej.2017.09.188.
- [58] 韦琦, 罗方周, 徐相龙, 等. A²/O 工艺处理低温低碳氮比生活污水的脱氮效率及反应动力学[J]. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1367-1376.
- [59] 张勇, 韩京龙, 冉治霖. CAST 工艺处理低温低碳氮比市政污水中试研究[J]. 环境工程, 2017, 35(9): 44-47.
- [60] LI D, LI W, ZHANG K, et al. Nutrient removal by full-scale Bi-Bio-Selector for nitrogen and phosphorus removal process treating urban domestic sewage at low C/N ratio and low temperature conditions[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 140: 199-210. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.011.
- [61] ZHANG W, PENG Y, ZHANG L, et al. Simultaneous partial nitrification and denitrification coupled with polished anammox for advanced nitrogen removal from low C/N domestic wastewater at low dissolved oxygen conditions[J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 123045. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123045.
- [62] 方德新, 吉芳英, 许晓毅, 等. 高原高寒污水处理系统的微生物群落特征[J]. 中国环境科学, 2020, 40(3): 1081-1088.
- [63] 王未. 紫外线辐射对活性污泥脱氮除磷效果的影响[J]. 湖北造纸, 2012(1): 19-24.
- [64] 黄德才. 适用于高原地区的不同来源脱氮复合菌剂的构建及环境适应性研究[D]. 拉萨: 西藏大学, 2021.
- [65] 王建芳, 金文标, 赵庆良, 等. 好氧-沉淀-厌氧工艺处理效能及抗冲击负荷研究[J]. 环境科学, 2007(11): 2488-2493.
- [66] ZONG Y, LI Y, HAO K, et al. Influence of transient change of water temperature on pilot-scale anaerobic-anoxic-oxic process under plateau environmental factors[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17(5): 12191-12202. DOI: 10.15666/aeer/1705_1219112202.
- [67] 周杨. 低进水浓度下微曝氧化沟的运行与管理[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [68] 罗国强, 侯巧玲, 尉国红, 等. 低浓度生活污水处理工艺调试运行[J]. 环境工程, 2010, 28(4): 4-5.