

引用格式:潘萌,姚大伟,江梅,等. 再生水除磷工艺中聚合氯化铝投放的控制研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2020,47(1):8-12.

PAN Meng, YAO DaWei, JIANG Mei, et al. Control of polyaluminum chloride addition in the dephosphorization process in a reclaimed water plant[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020,47(1):8-12.

# 再生水除磷工艺中聚合氯化铝投放的控制研究

潘 萌<sup>1</sup> 姚大伟<sup>1</sup> 江 梅<sup>1</sup> 陈 畅<sup>2\*</sup>

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100044; 2. 北京化工大学 化学工程学院, 北京 100029)

**摘 要:** 对某再生水厂再生水处理工艺除磷过程中化学药剂聚合氯化铝(PAC)的投放量进行了优化计算与控制。通过对两年再生水相关指标的统计分析,采用最小二乘法拟合出了 PAC 投放体积与进、出水总磷和水量之间的关系方程。稳定运行一年的结果表明按照拟合方程精准投放药剂后,出水的总磷符合标准要求,而且波动范围明显减小。本文所建立的方程为再生水厂的一线操作提供了参考,在不影响再生水处理效率的基础上节约了经济成本。

**关键词:** 再生水; 除磷; 聚合氯化铝; 拟合方程; 精准投放

**中图分类号:** X799.3 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2020.01.002

## 引 言

除磷是再生水处理工艺中的重要环节,再生水厂出水中的磷含量是评价其是否符合排放标准的重要指标<sup>[1-2]</sup>。为了确保再生水排放时总磷含量达标,在除磷工艺中需要辅以化学絮凝除磷技术,通过投加沸石、无机盐等将溶解性的磷转化为固体沉淀物,从而达到除磷的目的<sup>[3-5]</sup>。本文的目标再生水厂通过在 V 型滤池中投放聚合氯化铝(PAC),将水体中过量的磷元素脱除,同时通过絮凝作用去掉一部分悬浮物<sup>[6]</sup>。如果 PAC 投放的量不够,不足以达到除磷和絮凝的效果,影响出水水质达标;而 PAC 投放过量,对企业经济效益不利。

近年来,有文献将 PAC 纯药/总磷去除比作为一个衡量 PAC 投放是否合理的指标<sup>[7-10]</sup>。所谓 PAC 纯药/总磷去除比,是指单位体积水中 PAC 纯药的投放量(mg/L)与总磷去除量(mg/L)的比值,代表所投放的纯 PAC 与磷去除量之间的比例关系。去除比值越大,说明除去单位量的磷所投放的 PAC 药剂量越大,超过一定值可能造成浪费。然而,目前

尚未有文献给出公认的 PAC/总磷去除比合理范围。本文拟建立 PAC 投放量与多影响因素之间的关系方程,为一线操作工人提供投放标准,以期为保证企业再生水处理效率、提高经济效益提供帮助。

## 1 材料与方法

研究对象为北京市某再生水厂,该厂日处理规模 10 万 m<sup>3</sup>,采用两级生物滤池工艺,上游污水厂处理后的污水作为再生水厂的进水,经提升泵房,送入两级生物滤池中进行脱氮处理,之后再生水送入 V 形滤池进行化学絮凝除磷,投放药剂为聚合氧化铝(质量分数 10%,沧州临港六环化工有限公司);通过臭氧完成除色消毒后送入清水池,经配水泵房出水。为表述方便,以下统一以进水、出水代表该再生水厂的进、出水。总磷含量采用钼酸铵分光光度法<sup>[10]</sup>及哈希总磷 Phosphax Sigma 在线分析仪(HACH 上海水质分析仪器有限公司)测定。

PAC 投放量与进水总磷值、出水总磷值、处理水量等因素均有关系。为了能够精准控制 PAC 参与除磷的过程,得出 PAC 投放量及与各因素之间的关系,必须在长期运行数据的基础上归纳、总结规律。为此,本文监测采集了 2015 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日两年的运行数据,包括进水总磷(input TP)、出水总磷(output TP)、PAC 药剂(质量分数 10%)投放量、总磷去除率(TP removal)、日进水总

收稿日期: 2019-05-30

第一作者: 女,1985 年生,硕士,工程师

\* 通信联系人

E-mail: chenchang@mail.buct.edu.cn

量等指标。经最小二乘法线性分析拟合推导 PAC 精准投放公式,在 2017 年推广使用,采集全年运行数据,进行检验。

2 结果与讨论

2.1 两年再生水各指标监测结果

由 2015—2016 年数据分析可知,日进水总磷浓度(图 1(a))在 0.045 ~ 1.38 mg/L 之间波动,平均值为 0.405 mg/L;处理后的出水(再生水)总磷含量(图 1(b))在 0.017 ~ 0.299 mg/L 之间波动,平均值为 0.113 mg/L。

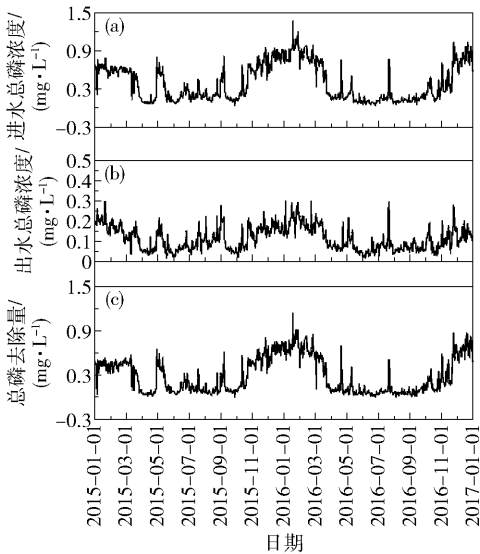


图 1 2015—2016 年每日进水总磷浓度(a)、出水总磷浓度(b)和总磷去除量(c)

Fig. 1 Total phosphate concentration in daily inflow water (a), daily outflow water (b), and phosphate removal (c) data for 2015—2016

经计算,日总磷去除量(图 1(c))处于 0.007 ~ 1.148 mg/L 之间,平均值为 0.292 mg/L。进水总磷值越高,所需 PAC 量也就越大,直接影响出水中总磷的含量。以上长期运行数据将直接作为分析 PAC 投放规律的重要基础,用于后续拟合公式的推导。2015—2016 两年的每日水处理量、PAC 药剂投放量、PAC 纯药投配率  $R_{PAC}$  (单位水体中 PAC 纯药的投放质量,mg/L)、PAC 纯药/总磷去除比数据如图 2 所示。从图 2(a)可知,两年内日水处理量处于 (5.30 ~ 13.42) 万 t 之间,日均水处理量为 10.29 万 t,基本符合日处理量 10 万 t 的设计负荷。在水厂运行中,日水量波动属正常情况,会直接影响 PAC 投放量。图 2(b)是两年运行过程中的日 PAC 药剂投放量曲线,其值在 8.33 ~ 7007 kg 之间波动,均值为

2203.5 kg。日纯 PAC 投配率(图 2(c))在 0.08 ~ 7.74 mg/L 之间波动,均值为 2.17 mg/L。从图 2(d)中可以看到 PAC 纯药/总磷去除比在 0.137 ~ 180 之间,波动非常大,也表明现场急需要一个方便使用的规律公式,以便指导工人随时根据实时情况准确控制 PAC 的投放量。

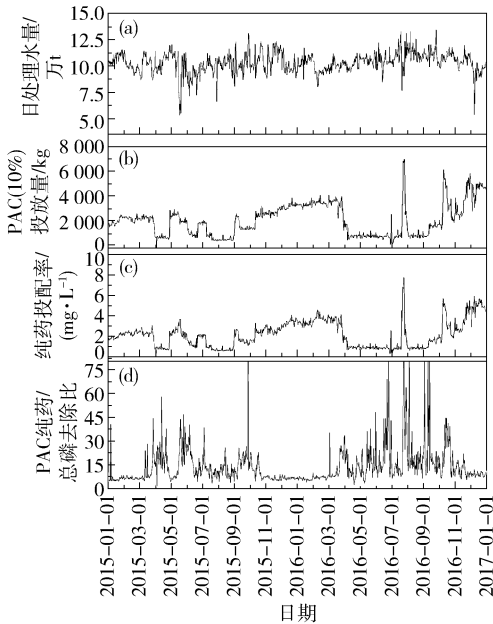


图 2 2015—2016 年每日水处理量(a)、每日 PAC 投放量(b)、纯 PAC 投配率(c)和纯药/总磷去除比(d)

Fig. 2 Daily treated water amount (a), daily added PAC (10%) amount (b), daily PAC addition rate (c), and PAC/phosphate removal ratio (d) in 2015—2016

2.2 除磷工艺中 PAC 投放量方程的拟合

在 PAC 投放量方程拟合过程中,需要甄别 2015—2016 年数据,利用投放量比较合理的数据进行规律推导。将 2015—2016 年每日进水总磷含量、PAC 纯药/总磷去除比曲线放在一起进行比较,如图 3 所示,可以发现,以进水磷浓度 0.3 mg/L 为界,高于此值时 PAC 纯药/总磷去除比相对较小,而低于此浓度时去除比要大得多。这是因为当需去除的磷较少时,PAC 主要起絮凝作用,PAC 投放未能根据进水总磷浓度进行及时精准的调整,因而得到偏高的去除比。

考虑到《城镇污水处理厂水污染物排放标准》(DB11/890—2012)中对于再生水出水中磷的限值为 0.3 mg/L,若进水时磷浓度已经小于 0.3 mg/L,则 PAC 只需维持基本絮凝作用,无需多加;若进水磷浓度高于 0.3 mg/L,则需要增加 PAC 投放量,发

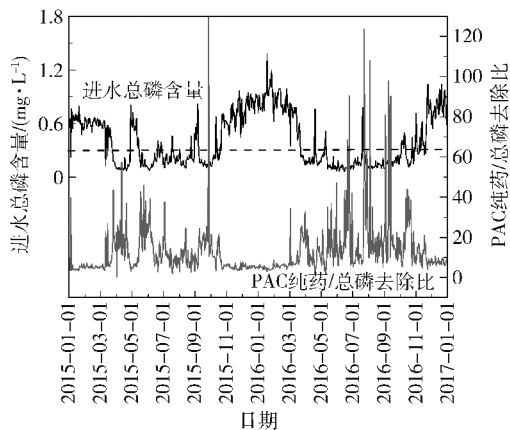


图3 2015—2016年每日进水总磷含量、PAC纯药/总磷去除比曲线

Fig.3 Comparison of daily inflow phosphate concentration and PAC/phosphate removal ratio in 2015 and 2016

挥其除磷和絮凝作用。对数据进行筛选,以进水磷浓度在  $0.3 \text{ mg/L}$  以上的点为研究对象,同时选取去除比在 7 及以下的各点数据(过大的数值代表投放明显过量,不符合经济性要求,应予舍弃)拟合规律方程。共筛选出合理点 256 d,对纯 PAC 投配率( $R_{\text{PAC}}$ )、进水总磷( $P_{\text{进}}$ )、出水总磷( $P_{\text{出}}$ )进行皮尔逊相关性分析,结果可知,PAC 投配率与进水总磷、出水总磷呈显著正相关,即去除的磷越多,所需的 PAC 投配率就越高,符合科学规律。在此基础上,以 PAC 投配率为因变量,以进、出水总磷含量为自变量,进行最小二乘法线性拟合,得拟合方程为

$$R_{\text{PAC}} = 0.371 + 4.316P_{\text{进}} - 4.082P_{\text{出}} \quad (1)$$

经方差分析得  $F$  值为 151.106,  $\sigma$  值为 0.000,说明可信度为 100%。经共线性诊断可知,各自变量参数之间相互独立。

### 2.3 公式的变形

式(1)是在 2015—2016 年数据基础上拟合出的原始方程,然而在实际应用中必须考虑方程使用的简便性。 $R_{\text{PAC}}$  不方便在现场使用,一线工人在操作时,习惯使用流量计控制 PAC 药剂投放体积  $V_{\text{PAC}}$  ( $\text{L/h}$ )。PAC 药剂中 PAC 的质量分数为 10%,为了便于使用,将式(1)变形,10% PAC 药剂的密度( $\rho_{\text{PAC}}$ )按  $1.15 \text{ kg/L}$  换算成体积,即

$$V_{\text{PAC}} = R_{\text{PAC}} \times 10 \times V_{\text{水}} / \rho_{\text{PAC}} = (0.371 + 4.316P_{\text{进}} - 4.082P_{\text{出}}) \times V_{\text{水}} \times 10^{-2} / 1.15 \quad (2)$$

在变形后的公式中, $P_{\text{进}}$ 、 $P_{\text{出}}$  可以通过快速在线监测仪读数读出,每小时处理的再生水量( $V_{\text{水}}$ ,  $\text{m}^3$ )由流量计进行监控,将实时数值代入式(2),即可确

定每小时需要的 PAC 药剂投放体积  $V_{\text{PAC}}$ 。这样使 PAC 投配率转换为容易操控的 PAC 流量,同时也将再生水的流量考虑在内,方程更为合理、方便,工人可根据每小时的监控数据随时代入式(2)计算,以控制投放流量。然而,式(2)只适用于进水总磷浓度大于  $0.3 \text{ mg/L}$  的情况,若实时监测进水总磷小于  $0.3 \text{ mg/L}$ ,则依照以往总结得到的絮凝经验系数,按  $40 \text{ L/h}$  的流量投放 10% PAC 药剂。

### 2.4 除磷工艺 PAC 投放量方程应用效果评估

2017 年全年的每日水处理量、PAC 药剂投放量、PAC 纯药投配率、PAC 纯药/总磷去除比数据如图 4 所示。

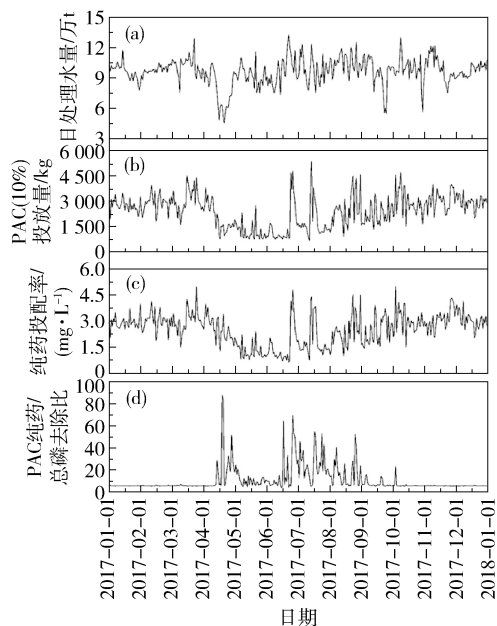


图4 2017年每日水处理量(a)、每日 PAC(10%) 投放量(b)、纯 PAC 投配率(c)、纯药/总磷去除比(d)

Fig.4 Daily treated water amount (a), daily added PAC (10%) amount (b), daily PAC addition rate (c), and PAC/phosphate removal ratio (d) in 2017

由图4(a)可知,2017年内日水处理量在(4.58 ~ 13.29)万 t 之间,日均水处理量为 9.68 万 t,波动较 2015—2016 年略大。日水处理量波动属正常情况,该因素已经考虑在式(2)内,可以随时根据不同水量调整所需 PAC 量,使投药过程更加准确。图4(b)为2017年的每日 PAC 药剂投放量曲线,其值在 694 ~ 5452 kg 之间波动,均值为 2437.6 kg;日纯 PAC 投配率(图4(c))在  $0.63 \sim 5.00 \text{ mg/L}$  之间波动,均值为  $2.52 \text{ mg/L}$ 。在图4(d)中可以看出 PAC 纯药/总磷去除比在 4.37 ~ 83.22 之间,从均值上看,2017 年 PAC 纯药/总磷去除比为 6.95,与

2015—2016 年的值(7.38)相比有显著降低,说明采用本文式(2)进行精准投放有显著效果。

2017 年每日监测进水、出水的总磷浓度,数据如图 5 所示。经分析可知,日进水总磷浓度(图 5(a))在 0.09 ~ 1.02 mg/L 之间波动,平均值为 0.479 mg/L;处理后的日出水(再生水)总磷浓度(图 5(b))在 0.039 ~ 0.299 mg/L 之间波动,平均值为 0.120 mg/L,全年均未超过 0.3 mg/L 的标准,全部合格。经计算,日总磷去除量(图 5(c))在 0 ~ 0.917 mg/L 之间,平均值为 0.360 mg/L。利用本文所推导公式进行精准投放后,出水总磷符合平稳与经济原则,与 2015—2016 年相比波动较小。

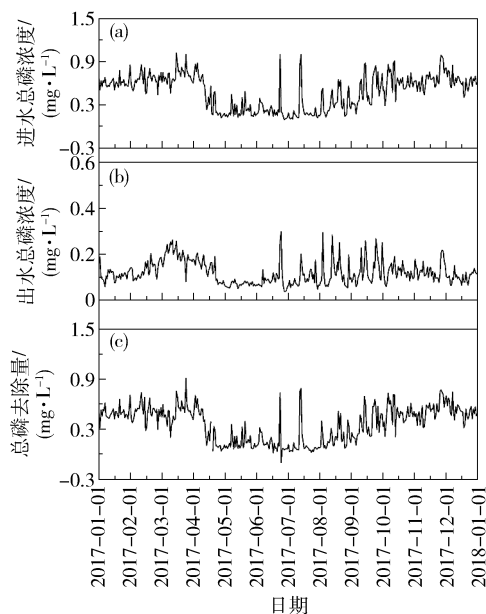


图5 2017 年每日进水总磷浓度(a)、出水总磷浓度(b)、总磷去除量(c)

Fig. 5 Total phosphate concentration in daily inflow water (a), daily outflow water (b), and phosphate removal (c) data for 2017

## 2.5 经济效益评价

利用拟合公式进行精准投放后,在保持出水总磷达标和平稳的同时,2017 年共使用 10% PAC 药剂 889 758 kg, PAC 纯药/总磷去除比为 6.95,如按照 2015—2016 年的 7.38 水平计算,10% PAC 少投放 55 881 kg,按照 700 元/t 的价格计算,节约了约 3.91 万元。

## 3 结论

以某再生水厂为对象,对其再生水处理工艺除磷过程中外加药剂的投放量进行了研究。通过对两

年再生水的相关指标进行统计分析,拟合得出 PAC 投放体积与进、出水总磷和水量处理量之间的关系方程。稳定运行一年的结果表明,按照拟合方程的要求投放 PAC 药剂后,出水的总磷符合标准要求,且波动范围明显减小。经济效益评价表明,按照拟合方程投放药剂,全年可为该再生水厂节省约 3.91 万元的成本投入,在不影响再生水处理效率的基础上节约了经济成本。

## 参考文献:

- [1] AHMA A, AZAM T. Water purification technologies [M] // ALEXANDRU M G, ALINA M H. Bottled and packaged water. London: Woodhead Publishing, 2019: 83-120.
- [2] AHUJA S. Overview: water reclamation and sustainability [M] // SATINDER A. Water reclamation and sustainability. Amsterdam: Elsevier, 2014: 1-18.
- [3] RÖSKE I, SCHÖNBORN C. Interactions between chemical and advanced biological phosphorus elimination [J]. Water Research, 1994, 28(5): 1103-1109.
- [4] MARSMAN E H, ROELEVELD P J, RENSINK J H. High nutrient removal in the three-sludge sewage treatment system: results and economic evaluation [J]. Water Science and Technology, 1997, 35(10): 129-136.
- [5] OMOIKE A I, VANLOON G W. Removal of phosphorus and organic matter removal by alum during wastewater treatment [J]. Water Research, 1999, 33(17): 3617-3627.
- [6] DU L, CHEN Q R, LIU P P, et al. Phosphorus removal performance and biological dephosphorization process in treating reclaimed water by integrated vertical-flow constructed wetlands (IVCWs) [J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 204-211.
- [7] JU X X, WU S B, ZHANG Y S, et al. Intensified nitrogen and phosphorus removal in a novel electrolysis-integrated tidal flow constructed wetland system [J]. Water Research, 2014, 59: 37-45.
- [8] LEE E J, CRIDDLE C S, GEZA M, et al. Decision support toolkit for integrated analysis and design of reclaimed water infrastructure [J]. Water Research, 2018, 134: 234-252.
- [9] MA X Y, LI Q Y, WANG X C, et al. Micropollutants removal and health risk reduction in a water reclamation and ecological reuse system [J]. Water Research, 2018, 138: 272-281.
- [10] 王璐. 改性沸石联合聚合氯化铝处理生活污水中氨氮



和总磷效果和机理的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2016.

WANG L. Study on effect and mechanism of modified zeolite combined with polymerization aluminum chloride in

treating ammonia nitrogen and total phosphorus in domestic sewage[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2016. (in Chinese)

## Control of polyaluminum chloride addition in the dephosphorization process in a reclaimed water plant

PAN Meng<sup>1</sup> YAO DaWei<sup>1</sup> JIANG Mei<sup>1</sup> CHEN Chang<sup>2\*</sup>

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100044; 2. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The dephosphorization (phosphorus removal) process in a reclaimed water plant has been optimized. The correlation equation between polyaluminum chloride (PAC) addition, inflow and outflow phosphorus concentrations, and water flow was established through linear fitting analysis of the monitoring data from 2015—2016. After validating the results in 2017, it was found that the phosphorus concentrations in the outflow water met the water quality requirements. Our correlation equation not only provides a basis for the efficient operation of the reclaimed water plant, which reduces economic costs without affecting the efficiency of reclaimed water treatment, but also has important practical significance.

**Key words:** reclaimed water; dephosphorization; polyaluminum chloride; correlation equation; accurate addition

(责任编辑: 吴万玲)