

# 复合混凝沉淀用于生态补水水体除磷

安宗胜, 张浏, 袁步先, 方春霞, 刘乐 (安徽省环境科学研究院, 安徽合肥 230071)

**摘要** [目的]考察 PAC、硅藻土和 PAM 这 3 种混凝剂协同混凝沉淀法的除磷效率。[方法]在研究 PAC 和硅藻土对湖泊原水除磷控藻效率的基础上,进一步研究了 PAM 作为助凝剂在混凝沉淀过程中的强化作用,探索不同总磷浓度进水条件下复合混凝剂的最佳比例及投加量。[结果]投加少量的 PAM 可有效降低硅藻土和 PAC 用量;当进水总磷浓度为 0.59 mg/L 时,投加 40 mg/L 硅藻土+PAC(1:1)复合无机混凝剂及 0.75 mg/L 高分子助凝剂 PAM,即可达 86% 的总磷去除率。[结论]塘西河生态补水工程采用混凝沉淀法去除巢湖原水中磷,为塘西河提供清洁水源,解决了其水量短缺、水质恶化的难题。

**关键词** 混凝沉淀;生态补水;除磷

中图分类号 X52 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)07-0087-03

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2019.07.028



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

## Composite Coagulating Sedimentation Used for Phosphorus Removal in Ecological Water Replenishing

AN Zong-sheng, ZHANG Liu, YUAN Bu-xian et al (Anhui Academy of Environmental Science, Hefei, Anhui 230071)

**Abstract** [Objective] The research aimed to investigate the phosphorus removal efficiency of the coagulation and sedimentation method of PAC, diatomaceous earth and PAM. [Method] On the basis of studying the efficiency of PAC and diatomite in removing phosphorus and controlling algae in lake raw water, the strengthening effect of PAM as coagulant during coagulation and precipitation was further studied, and the optimal proportion and dosage of compound coagulant under different total phosphorus concentration were explored. [Result] The amount of diatomaceous earth and PAC could be effectively reduced by adding a small amount of PAM. When the total phosphorus concentration of water was 0.59 mg/L, the removal rate of about 86% of total phosphorus could be achieved by adding 40 mg/L diatomite+PAC(1:1) composite inorganic coagulant and 0.75 mg/L polymer coagulant PAM. [Conclusion] The ecological water replenishing project of Tangxi River uses coagulation sedimentation method to remove phosphorus from Chaohu Lake raw water, provides clean water source for Tangxi River, and solves the problem of water shortage and water quality deterioration.

**Key words** Coagulating sedimentation; Ecological water replenishing; Phosphorus removal

近年来,随着我国经济快速发展和城市规模急剧扩大,城市景观河道呈现出水体污染严重、生态基流缺乏、生态功能退化等特征<sup>[1]</sup>。城市景观河道水污染防治过程中,在截污控源、水质净化等基本措施基础上,生态补水措施对于河道生态基流的维持和生态系统的改善尤为重要<sup>[2-3]</sup>。相比于污水厂再生水和水库清洁水源,利用净化后的湖水作为城市景观河道补水水源,具有水质好、水量充足等优势<sup>[4]</sup>。为有效避免湖水富营养化问题随补水过程进入河道,快速去除湖水中的磷营养元素成为生态补水成功之关键<sup>[5]</sup>。

混凝沉淀法除磷工艺广泛应用于生活污水和工业废水,相比于生物法具有水力停留时间短、操作控制简便、运行稳定等优点。混凝沉淀法中常用的混凝剂有聚合氯化铝(PAC)、硅藻土等无机混凝剂及聚丙烯酰胺(PAM)等有机高分子絮凝剂。研究发现,硅藻土和 PAC 均对污水中的总磷具有很好的去除效果<sup>[6-7]</sup>。然而有关以 PAM 和硅藻土作为助凝剂协同 PAC 混凝沉淀,用于生态补水除磷控藻的研究鲜有报道。笔者在研究 PAC 和硅藻土对湖泊原水除磷控藻效率的基础上,进一步研究 PAM 作为助凝剂在混凝沉淀过程中的强化作用,考察这 3 种混凝剂协同混凝沉淀法除磷效率,探索不同总磷浓度进水条件下混凝剂的最佳组合比例及投加量,为相关生态补水水体除磷工程实践提供参考。

## 1 材料与方法

**1.1 混凝剂** 该试验所用硅藻土是由云南庆中科技有限公司生产,以 92% 以上的硅藻精土与常规铝盐、铁盐复配所得的改性硅藻土污水处理剂,其化学成分主要为 SiO<sub>2</sub> 87%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1%,其余为 CaO、MgO 及一些有机物等。PAM、PAC 均为天津市鼎盛鑫化工有限公司生产的分析纯级试剂。

**1.2 试验用水** 该试验采用巢湖原水。巢湖水 COD、氨氮浓度较低,总磷含量相对较高,西半湖污染较东半湖严重。2017 年 6—10 月总体污染状况为中度污染,主要污染因子为总磷,水质如下:COD<sub>mn</sub> 4.2~8.6 mg/L(Ⅲ~Ⅳ类)、氨氮 0.16~0.42 mg/L(Ⅱ类)、总磷 0.19~0.97 mg/L(劣Ⅴ类)。

**1.3 试验方法** 将湖水加入六联搅拌机容量为 1 L 的烧杯中,加入混凝剂 PAC,快搅(500 r/min) 1 min 后,加入助凝剂硅藻土和(或)PAM,然后慢搅(60 r/min) 15 min 进行絮凝反应,沉淀 60 min 后从烧杯中取上清液分析。其中,PAM 采取预先配成 0.1% 溶液方式投加。上清液总磷测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)。

## 2 结果与分析

**2.1 硅藻土、PAC、PAM 单独投加时总磷的去除效果** 采用总磷浓度为 0.59 mg/L 原水为试验对象,单因子试验表明,硅藻土和 PAC 均对总磷具有较好的去除效果,如图 1 所示。硅藻土对总磷的去除率为 43.2%~48.7%,而 PAC 对总磷的去除率为 31.5%~38.3%。同等投加量条件下,硅藻土对总磷的去除率比 PAC 高约 10%。而 PAM 对总磷去除率较低,为 11.2%~17.6%,且随着投加量增加去除率反而有所

**基金项目** 安徽省省级环保科研项目(2016-08);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07103-004)。

**作者简介** 安宗胜(1987—),男,安徽宿州人,工程师,硕士,从事水环境管理、环境政策研究。

**收稿日期** 2019-02-18

下降,单独投加 PAM 混凝沉淀效果不佳。研究分析,高分子絮凝剂常作为助凝剂使用,通过其长链结构的吸附架桥作用

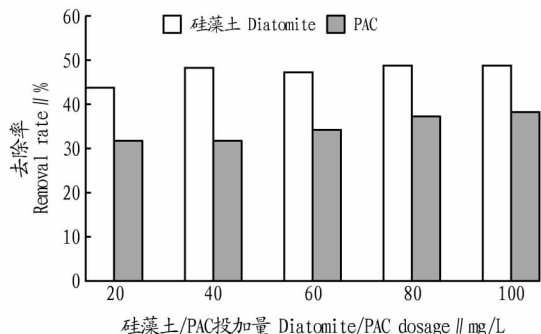


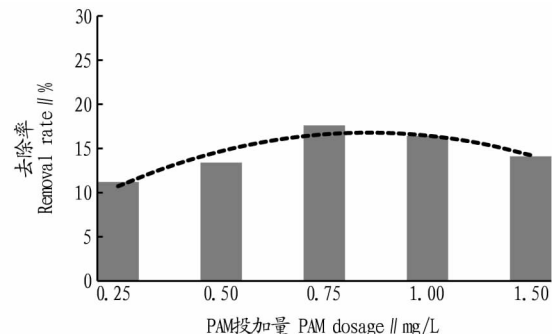
图1 硅藻土/PAC/PAM对总磷的去除率

Fig. 1 Removal rate of TP by diatomite/PAC/PAM

**2.2 PAC+硅藻土(或PAM)组合投加时总磷的去除效果** 试验发现,当PAC投加量较大时,混凝反应后絮体的沉降性较差,在反应器底部有较厚的泥渣层。为了加快沉降速度,提高泥渣密实度,需在混凝过程中投加一定量的助凝剂。

采用总磷浓度为0.59 mg/L原水为试验对象,分别进行PAC+硅藻土和PAC+PAM正交试验,结果如图2所示。由图2a可知,当硅藻土投加量一定时,增加PAC的投加量,总磷去除率均有不同程度提高;而当PAC投加量一定时,随着硅藻土投加量的增加,总磷去除率亦有所提高。在硅藻土投

去除悬浮颗粒。水中颗粒浓度过低或高分子絮凝剂投加过量,都不利于混凝沉淀发生<sup>[8]</sup>。



加量为40 mg/L、PAC投加量为40 mg/L时,总磷去除率达89.6%。

由图2b可知,当PAC的投加量为20 mg/L时,总磷去除率随PAM投加量增加而小幅提高,由55.6%提高至59.3%;当PAC投加量为40 mg/L、PAM投加量为1.0 mg/L时的总磷去除率最高,达76.5%,而PAM投加量为0.5和1.5 mg/L时,总磷去除率分别为71.2%和72.4%;当PAC投加量为60 mg/L时,总磷去除率随PAM投加量增加而降低,由70.5%降为61.3%。

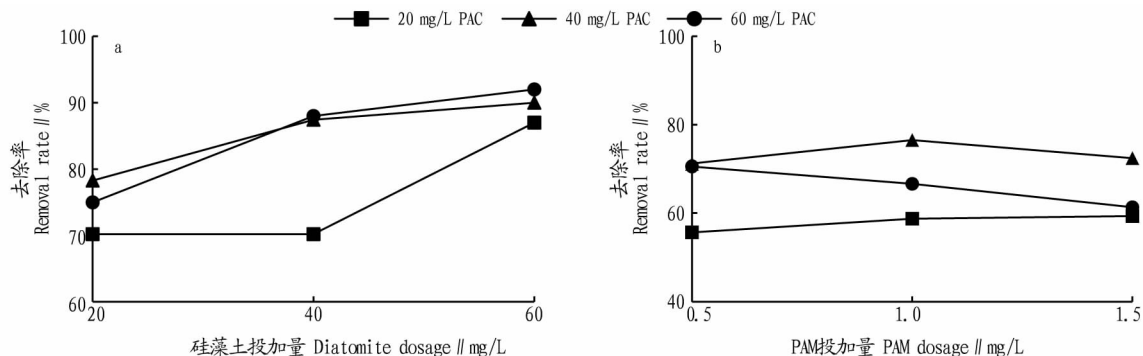


图2 硅藻土+PAC组合(a)和PAM+PAC组合(b)对总磷的去除率

Fig. 2 Removal rate of TP by diatomite +PAC combination(a) and PAM+PAC combination(b)

**2.3 硅藻土+PAM+PAC组合对总磷去除效果** 为了有效控制无机混凝剂PAC和硅藻土的用量,研究助凝剂PAM对PAC与硅藻土组合混凝沉淀除磷效果的影响。采用总磷浓度为0.59 mg/L原水为试验对象,分2组进行。一组分别投加PAC+硅藻土组合絮凝剂(比例为1:1)20、40、60、80 mg/L,再各添加1 mg/L PAM;另一组不添加PAM仅投加PAC+硅藻土组合絮凝剂。研究发现(图3),不加PAM时,需要40 mg/L PAC+硅藻土组合絮凝剂才能达到85%以上总磷去除率,而添加1 mg/L PAM时,只需要20 mg/L组合絮凝剂就可以达到85%以上总磷去除率,PAM助凝效果明显。

**2.4 助凝剂最佳投加量研究** 为进一步研究不同总磷初始浓度条件下PAM助凝剂适宜的投加量,针对0.34、0.59、0.97 mg/L 3种不同总磷浓度的原水,PAC+硅藻土(1:1)无机复合混凝剂的投加量分别对应为20、40、60 mg/L,PAM投加量为0.25~2.00 mg/L,试验结果如图4所示。

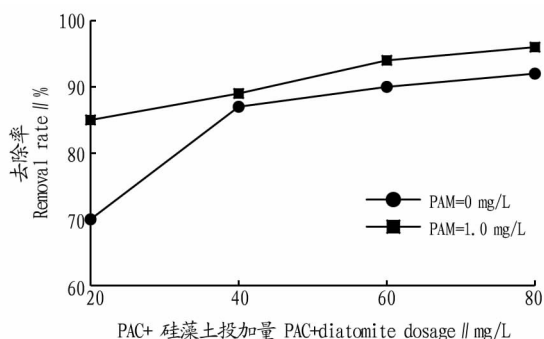


图3 PAM+PAC+硅藻土组合对总磷的去除率

Fig. 3 Removal rate of TP by PAM+PAC+ diatomite combination

从图4可看出,对于总磷浓度为0.34和0.59 mg/L的原水,PAM投加量为0.50 mg/L时,总磷去除率即接近85%,随后随着PAM投加量增加,总磷去除率提升幅度较小,当PAM投加量超过1.00 mg/L时,总磷去除率反而有所下降;对于

总磷浓度为 0.97 mg/L 的原水,当 PAM 投加量为 0.50 mg/L 时,总磷去除率约 75%,PAM 投加量为 0.75 mg/L 时,总磷去除率约 86%,随后随着 PAM 投加量增加,总磷去除率小幅度提升,PAM 投加量为 1.25 mg/L 时,总磷去除率为 90.3%。

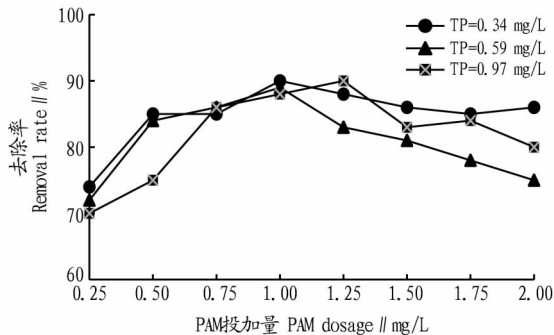


图 4 PAM+PAC+硅藻土对不同初始浓度进水总磷去除率

Fig. 4 Removal rate of TP by PAM+PAC+ diatomite at different initial concentrations

**2.5 工程实践** 塘西河生态补水工程选址于原合肥市供水集团巢湖水源厂内,利用已废弃泵房取水管道提供进水资源,在已废弃的泵房取水井位置建设藻水分离膜式过滤设施和混凝沉淀水处理设施。巢湖蓝藻暴发月份,巢湖原水先经过藻水分离膜式过滤器去除大部分蓝藻后再进入混凝沉淀段,其余月份巢湖原水则直接进入混凝沉淀段进行除磷处理。工程出水经厂外长约 14 km 的输水管道送至塘西河上游。工程实施目的是为塘西河补充清洁水源、改善水体流动性、修复河道生态系统和自净能力,既消除塘西河劣 V 类入湖水质,同时又去除巢湖水体污染物。工程设计规模为 5 万 m<sup>3</sup>/d,设计出水 TP ≤ 0.05 mg/L。

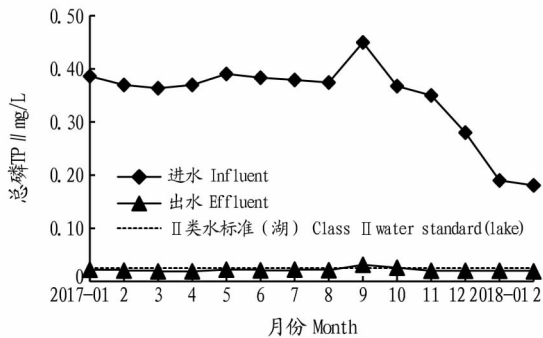


图 5 2017—2018 年 2 月工程混凝沉淀开始段进出水总磷浓度动态变化

Fig. 5 Dynamic change of TP concentration of influent and effluent water in the coagulation and sedimentation section of the project in February from 2017 to 2018

通过对塘西河生态补水工程每天进、出水总磷浓度进行检测,分析总磷月均值动态变化(图 5)得出,塘西河生态补水工程混凝沉淀段进水总磷浓度为 0.18~0.45 mg/L,水质类别为 V 类~劣 V 类。经过混凝沉淀处理后,工程出水总磷浓度为 0.019~0.031 mg/L,稳定达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)湖、库 III 类水标准。进一步分析发现,大部分月份工程出水总磷浓度甚至达到湖、库 II 类水标准,处理效果非常显著。该工程以巢湖水为水源,湖水净化后补给城市景观河道,既从巢湖中移出了污染物,又有助于解决城市景观河道水量短缺、水质恶化的难题;既有利于巢湖水质改善,又促进了城市河道水质稳定达标。

### 3 结论

(1) 硅藻土和 PAC 均对巢湖湖水总磷具有很好的去除效果,而单独投加 PAM 对总磷去除率较低。当采用硅藻土+PAC 组合混凝剂处理巢湖湖水时,大大提高了净化效率。综合考虑经济成本和净化效果,硅藻土与 PAC 最佳投加比例为 1:1,具体投加量应根据进水性质和总磷浓度确定。

(2) 助凝剂 PAM 具有很好的助凝效果,投加少量的 PAM 可有效降低硅藻土和 PAC 用量。当进水总磷浓度为 0.59 mg/L 时,投加 40 mg/L 硅藻土+PAC(1:1)复合无机混凝剂及 0.75 mg/L 高分子助凝剂 PAM,即可达 86% 的总磷去除率。

(3) 塘西河生态补水工程以巢湖水为水源,经硅藻土、PAC 和 PAM 复合混凝剂快速、高效去除巢湖原水中的总磷后补入河道上游,在有效防范了巢湖原水补入城市景观河道后带来水体富营养化风险的前提下,解决了城市河道水量短缺、水质恶化的难题。

### 参考文献

- [1] 李学平,李甲亮,任加云.生态城市主要景观生态河道的水污染研究[J].环境科学与技术,2014,37(120):428-431.
- [2] 郑天柱,周建仁.污染河道的生态恢复机理研究[J].环境科学动态,2002(3):11-13.
- [3] 陈昂,隋欣,廖文根,等.我国河流生态基流理论研究回顾[J].中国水利水电科学研究院学报,2016,14(6):401-411.
- [4] 吴蕾.巢湖水用于城市景观河道生态补水工程[J].中国给水排水,2013,29(6):69-72.
- [5] WANG H J, LIANG X M, JIANG P H, et al. TN:TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes[J]. Freshwater biology, 2008, 53(5):935-944.
- [6] 郑西强,陈云峰.高效除磷硅藻土用于城市景观水体的治理[J].中国给水排水,2012,28(5):32-35.
- [7] 郑利祥,周如祿,郭中权.混凝技术处理塌陷区低浊水的试验研究[J].环境科学与技术,2013,36(10):157-160.
- [8] 李凤亭,张善发,赵艳.混凝剂与絮凝剂[M].北京:化学工业出版社,2005.