

聚合铝的水解形态对混凝过程中磷分布转化的影响

刘海龙¹, 赵霞¹, 焦茹媛¹, 王相文¹, 王瑞军²

(1. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006; 2. 山西吉瑞新能源科技有限公司, 太原 030006)

摘要:用碱化度不同的混凝剂对水体进行混凝处理, 对混凝前后水体中磷的含量、形态分布以及藻类可利用性等进行了研究. 结果表明, 不同碱化度的混凝剂除磷效果不同, 对水体中磷形态分布的影响差别显著; Al_3 在混凝剂去除磷实验过程中起重要作用, 碱化度越低的混凝剂除磷率越高, $PACl_0$ 除磷效果最好. 随着混凝剂 ($PACl_0$) 投量的增加, 水体中溶解态磷及颗粒态磷逐渐减少, 当混凝剂含量超过一定剂量 ($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, 水体中的溶解态磷及颗粒态磷都沉入底泥. 浊度控制和除磷所需混凝剂投量不一致, 控制浊度时混凝剂投量 $3\sim5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 效果最好, 但理想的总磷去除率要求更高的混凝剂投量. 底泥中藻类可利用磷 (algal available phosphorus, AAP) 的量随混凝剂 ($PACl_0$) 投量的增加呈现先升后降的变化, 在 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 前 AAP 随混凝剂投量的增加逐渐增加; 当超过 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, AAP 随混凝剂投量的增加而减少. 投加过量 (相对除浊要求) 的混凝剂可以抑制底泥磷被生物利用, 对长效控磷有重要意义. 混凝除磷时混凝剂投量不能以浊度去除率为唯一标准, 而应参考总磷去除率和底泥藻类可利用磷等磷释放控制的要求, 使用较大的投量.

关键词: 混凝; 碱化度; 磷; 分布

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2011) 01-0102-06

Effects of Polymer Aluminum Hydrolysis on Phosphorus Distribution in Coagulation

LIU Hai-long¹, ZHAO Xia¹, JIAO Ru-yuan¹, WANG Xiang-wen¹, WANG Rui-jun²

(1. School of Environmental Sciences and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Jirui New Energy Technology Co. Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: Coagulation treatment was conducted by using coagulants of different basicity (ratio of OH^-/Al); contents, distributions and algal availability of phosphorus in water were studied before and after coagulation. Results show that: phosphorus removals and its distribution in water were markedly different according to the coagulant with different basicity used; Al_3 plays an important role in the coagulation experiment for P removal. The lower the coagulant basicity was, the higher phosphorus removal was achieved; and $PACl_0$ showed the best performance. Dissolved and particulate phosphorus reduced gradually with the increase of the coagulant ($PACl_0$). They were entirely turned into deposit phosphorus when the coagulant dosage was above $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The demand of coagulant for turbidity control was proved to be unequal to that for phosphorus removal. The coagulant dosages of about $3\sim5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ achieved the best turbidity removal in the experiment; while much higher dosage was needed to get desired phosphorus removal. The amount of AAP (algal available phosphorus) in the sediments changed according to coagulant ($PACl_0$) dosages. AAP increased with the increase of coagulant dosage when the dosage was less than $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, then it decreased with further addition of coagulant above $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. It was proved that release of phosphorus in sediments would be controlled effectively by addition of coagulant overdosed compared to the need for turbidity removal, which is important to long-term control of phosphorus. It was indicated that the dosage of coagulant used for phosphorus removal can not use the sole criterion for turbidity removal; the need for total phosphorus removal, sediment release of available phosphorus (such as AAP) and other phosphorus control requirements should be considered; and a larger dosage would be needed.

Key words: coagulation; basicity; phosphorus; distribution

水体富营养化日益受到人们的关注, 而磷是引起水体富营养化的限制因素之一^[1,2]. 有效控制水体中的磷, 切断藻类生存的营养来源, 是防治水体富营养化的重要手段, 也是地表水处理技术领域的研究热点之一^[3,4]. 水体中溶解态正磷酸盐能够被生物直接利用, 颗粒态磷也能被直接或间接利用^[2], 颗粒态磷由微生物内磷和颗粒物 (包括微生物细胞) 表面吸附磷构成, 往往成为水中磷的主要形态; 底泥中沉积态磷与上述 2 种形态磷之间存在相互转

化, 它的释放往往构成水中磷素的内源. 目前国内外除磷主要有生物法和化学法两大类^[5~7], 混凝是水处理中颗粒物和藻类控制的重要方法, 也是常用的化学除磷方法, 在除磷技术中占有重要地位. 某些混凝剂可以和磷发生化学沉淀而被去除^[8~11], 并且有

收稿日期: 2010-01-17; 修订日期: 2010-05-09

基金项目: 太原市科技局战略性新兴产业培育专项项目 (2010)

作者简介: 刘海龙 (1971~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境水化学与水处理技术, E-mail: hlliu827@yahoo.com.cn

研究报告,把硫酸铝等用作底泥磷释放的钝化剂,控制湖泊内源底泥磷的释放^[12,13]。

除磷的研究报告已有很多,但系统性混凝除磷研究较少,混凝剂的选择、其对磷形态分布的影响以及所产生底泥磷生物可利用性的影响仍不明确。本实验选用不同碱化度混凝剂对富营养化水体做混凝处理,研究混凝过程对水中磷形态及分布的影响,确定碱化度和混凝剂剂量对混凝除磷效果的影响;分

表 1 实验水样主要水质指标

Table 1 Key parameters of the sample water				
浊度/NTU	藻类/个·mL ⁻¹	总磷/μg·L ⁻¹	总氮/μg·L ⁻¹	COD/mg·L ⁻¹
4.3~6.2	2.75×10 ⁴ ~4.33×10 ⁴	37~115	1.85~2.92	4.9~9.2

聚合氯化铝(PACl):实验室缓慢滴碱法合成,碱化度分别为 1.0、1.5、2.5,制备成 0.1 mol·L⁻¹ 溶液^[14,15];所用 AlCl₃ 为分析纯试剂,并制备 0.1 mol·L⁻¹ 溶液,作为碱化度为 0 的混凝剂,记作 PACl₀。以 Ferron 逐时比色法,测定聚合氯化铝的铝形态分布^[16]。

实验方法:分别取 1L 实验用水注入混凝搅拌仪的烧杯中,加入不同剂量的混凝剂,先以 200 r·min⁻¹ 快速搅拌 5 min,再以 60 r·min⁻¹ 慢速搅拌 15 min,静置 30 min 后取样口取样,测定总磷及溶解态磷浓度等指标,总磷减去溶解态磷即定为颗粒态磷。并用虹吸管将上清液吸走,将剩余沉积物与水离心获得沉积物,用 H₂SO₄-HClO₄ 法测定沉积物中磷的含量^[17]。总磷和溶解态磷采用过硫酸钾消解分光光度法^[17];AAP 主要采用 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 提取后用磷钼蓝比色法^[18]测定。

2 结果与分析

2.1 聚合铝形态分布

以 Ferron 逐时比色法测定聚合氯化铝的铝形态分布结果如表 2。

表 2 聚合铝形态分布

Table 2 Aluminum distributions of different coagulants				
混凝剂	B	Al _a /%	Al _b /%	Al _c /%
AlCl ₃	0	99.1	0.90	0.00
PACl _{1.0}	0.5	63.1	31.7	5.20
PACl _{1.5}	1.5	35.2	56.1	8.70
PACl _{2.5}	2.5	6.30	73.0	20.7

铝形态分析数据表明,碱化度不同,Al_a、Al_b、Al_c 的含量各不相同。随着碱化度的增加,Al_a 的含量不断减少,Al_b、Al_c 的含量逐渐增加;PACl_{1.5} 和 PACl_{2.5} 中 Al_b 的含量较高,而且以 PACl_{2.5} 的 Al_b 含量为最

析水体中磷的形态分布变化及其中底泥的生物可利用性,得出控制底泥磷释放的混凝条件,以期为混凝法控制水体富营养化提供依据。

1 材料与方法

实验水样取自中国山西省晋阳湖。主要水质指标如表 1。

实验中所用试剂均为分析纯。

高,达到 73%,其中铝的主要形态是 Al_b 和 Al_c。研究证明聚合氯化铝(PACl)的 3 种形态中:Al_a 为单体形态,主要包括铝的自由离子、单体和低聚物;Al_b 为二维片状或笼状聚合形态;Al_c 为三维溶胶形态,主要是三羟化铝溶液或凝胶^[19~21],各种不同形态的铝在混凝中发挥各自的特点,混凝效果不同^[22,23]。本实验采用上述混凝剂对晋阳湖水进行混凝处理,研究其对水体中磷形态分布的影响。

2.2 不同碱化度的混凝剂对水体浊度的影响

由图 1 可知,整体上混凝除浊效率不高,最高的去除率约 75% 左右。当混凝剂投量不超过 5 mg·L⁻¹ 时,各混凝剂处理后水的浊度随着剂量增大逐步下降;不同碱化度的混凝剂对浊度的去除效果存在显著的不同,碱化度较低 PACl₀ 和 PACl_{1.0}、PACl_{1.5} 去除效果较好,而 PACl_{2.5} 除浊效果较差;PACl_{1.5} 处理浊度去除率最高,在较低投量(3 mg·L⁻¹)时对水体浊度就有较好的去除效果,浊度去除率达 75% 左右。当混凝剂剂量超过 5 mg·L⁻¹ 时,沉后水浊度都开始升高,出现复稳现象(如图 1)。

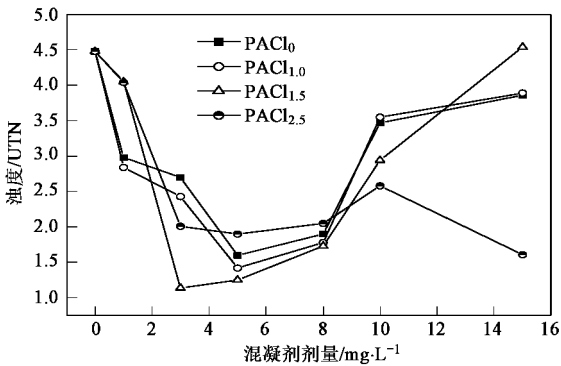


图 1 混凝对浊度的去除效果
Fig. 1 Turbidity removal by coagulation

2.3 混凝处理后各形态磷的去除率

由图2可知,随着混凝剂投量的增加,总磷的去除率逐渐升高,但不同碱化度的混凝剂效果有明显差异.混凝剂碱化度越高,除磷效果越差. PACl_0 除磷效果最好,投量在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,除磷率达到100%;同样剂量下, $\text{PACl}_{1.0}$ 、 $\text{PACl}_{1.5}$ 和 $\text{PACl}_{2.5}$ 除磷率逐次降低,投量为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\text{PACl}_{1.0}$ 、 $\text{PACl}_{1.5}$ 的除磷率也达到100%,但 $\text{PACl}_{2.5}$ 除磷率仅为82.73%.

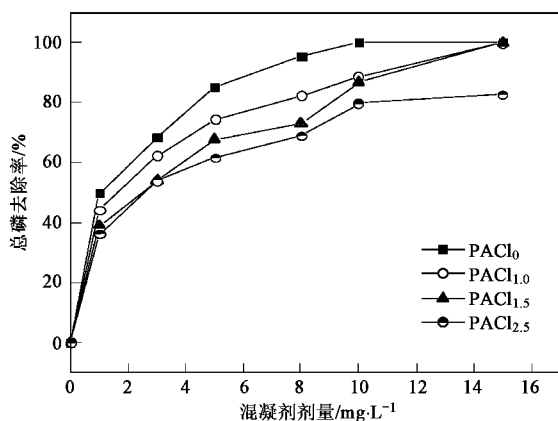


图2 混凝对总磷的去除效果

Fig. 2 Total phosphorus removal by coagulation

由图3可知,各碱化度的混凝剂对水体溶解态磷都有较好的去除作用,碱化度越低的混凝剂除磷效果越好。 PACl_0 在投量为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,溶解态磷去除率已达90%以上.继续增大投量,除 $\text{PACl}_{2.5}$ 外,各混凝剂都可将水体中的溶解态磷全部去除。 $\text{PACl}_{2.5}$ 去除效果较其他混凝剂差,从图3中可以看出,在所有实验剂量范围内水体中均有少量的溶解态磷,不能全部去除.

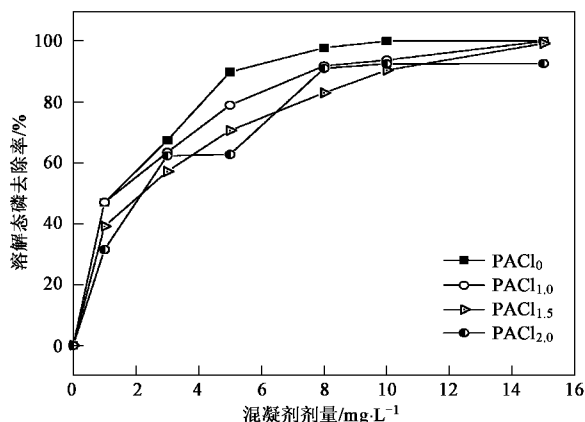


图3 混凝对溶解性磷的去除效果

Fig. 3 Dissolved phosphorus removal by coagulation

投量增加而增大,碱化度不同的混凝剂除磷率差异较明显。 PACl_0 、 $\text{PACl}_{1.0}$ 、 $\text{PACl}_{1.5}$ 和 $\text{PACl}_{2.5}$ 对颗粒态磷的去除率逐次降低.投量为 $8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上时, PACl_0 对颗粒态磷去除率达到100%;投量为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\text{PACl}_{1.0}$ 、 $\text{PACl}_{1.5}$ 的颗粒态磷去除率也达到100%,但 $\text{PACl}_{2.5}$ 除磷率仅为75.64%.

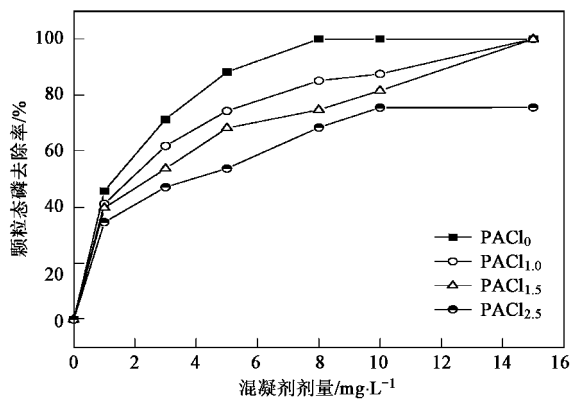


图4 混凝对颗粒态磷的去除效果

Fig. 4 Particulate phosphorus removal by coagulation

2.4 混凝处理后水体中磷的形态分布

2.4.1 不同碱化度对水体磷形态分布的影响

从以上实验结果可以得出,当各碱化度的混凝剂量为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水体浊度去除率最高,对各形态磷的去除效果也较好,因此选用混凝剂剂量 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 进行实验,取各碱化度混凝剂处理后的水体测定磷的形态分布,如图5所示.

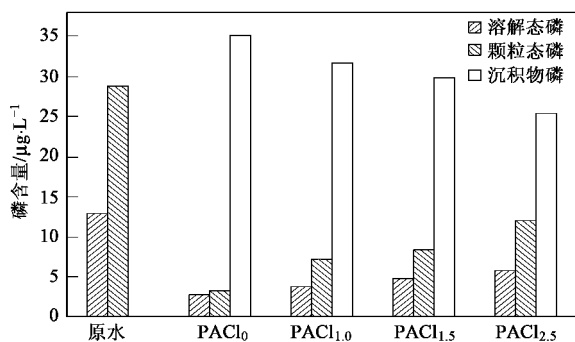


图5 碱化度不同的混凝剂混凝对磷分布的影响

Fig. 5 Effects of coagulation with coagulant of different basicity on phosphorus distribution

结果显示,原水中颗粒态磷较多,溶解态磷较少,分别占总磷的66%和34%.混凝剂投量均为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,混凝后各形态的磷分布呈现不同的变化;碱化度越低,溶解态磷及颗粒态磷的量残余量越少,而沉积态磷的量相应增加;其中 PACl_0 对水中磷

由图4可知,颗粒态磷的去除率随着混凝剂的

去除效果最好,总磷去除率达到 81.2%,沉后水中溶解态磷和颗粒态磷分别降至 $2.817\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.338\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{PACl}_{2.5}$ 去除效果最差,沉后水中仍然有较高浓度的溶解态磷及颗粒态磷,分别为 $5.82\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $11.06\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

PACl_0 除磷效果最好,用 AlCl_3 混凝后,研究混凝剂投量对磷形态分布的影响.

2.4.2 混凝剂投量对水体磷分布的影响

如图 6 所示,随着混凝剂投量的增加,水体中溶解态磷及颗粒态磷逐渐降低,沉积态底泥磷逐渐增加.当混凝剂投量 $<10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,颗粒态磷的去除率略高于溶解态;当混凝剂投量 $>15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水体中的溶解态磷及颗粒态磷均已除尽,转化为沉积态底泥磷.

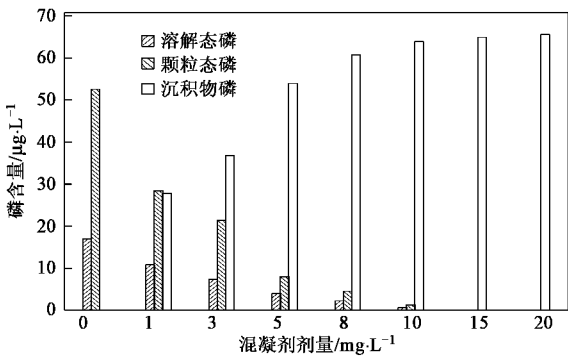


图 6 混凝剂投量对磷分布的影响

Fig. 6 Effects of coagulant dosages on phosphorus distribution

2.4.3 水体沉积磷与藻类可利用磷(AAP)

混凝后水体中各形态的磷都主要转化为沉积态形式存在,测试混凝沉积物中藻类可利用磷(AAP)的含量,以确定沉积磷生物利用的潜力.水体中沉积物与 AAP 的关系见图 7.

沉积态总磷(TP)的含量随着混凝剂(AlCl_3)投量的增大而增大,当混凝剂投量 $>10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后,几乎水中的磷都以沉积态存在. AAP 的量随混凝剂量的变化呈现先升后降的变化,在 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 前 AAP 的量逐渐增加;当超过 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, AAP 的量不随沉积态 TP 的增加而增加,而呈明显地下降趋势;当投量 $>10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, AAP 含量已经到 $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,显示出大剂量混凝剂的投入对底泥磷生物可利用性的良好控制效果.

3 讨论

碱化度不同的混凝剂除磷效果呈现较大差异,碱化度越低除磷效果越好,主要与其混凝剂的形态

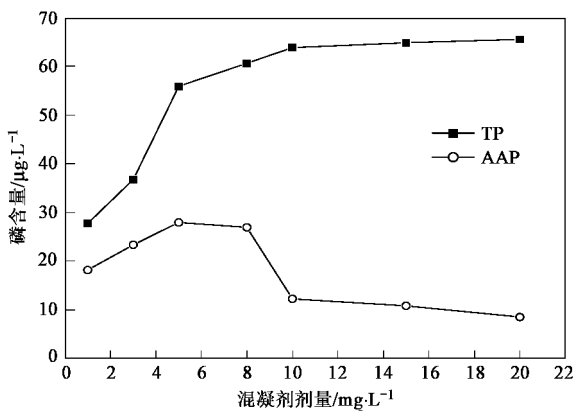


图 7 底泥中总磷和 AAP 随混凝剂投量的变化

Fig. 7 Various amount of TP and AAP in the sediments according to coagulant dosage

分布有关.在铝混凝剂水解产物的形态分布中, Al_a 代表铝离子等铝水解过程中的小离子成分,聚合度低,单位铝正电荷高,电中和能力强,但架桥能力有限. Al_b 代表中等程度聚合的水解产物,该类成分不仅保留了较高的正电荷,单个粒子正电荷高,具有良好的吸附电中和、架桥功能,而且具有相对的稳定性,保证了混凝作用的有效发挥. Al_c 则属于铝离子的多聚体,粒度大,易于沉淀,正电性较弱,通过架桥、吸附共沉淀作用来起到一定的除污作用.因此,一般认为 Al_b 形态比重大的混凝剂具有较好的混凝效果^[22-24].混凝剂碱化度越低 Al_a 含量越高, AlCl_3 相当于 PACl_0 , Al_a 含量达 99.1%,而 $\text{PACl}_{1.0}$ 、 $\text{PACl}_{1.5}$ 和 $\text{PACl}_{2.5}$ 中 Al_a 的含量分别为 63.1%、35.2% 和 6.3%; Al_b 的含量随碱化度升高而逐渐升高, Al_c 的含量也逐渐增大.上述理论可以解释混凝对水体中胶体颗粒物以及浊度的处理效果.但随着混凝剂碱化度的增加,混凝除磷率逐渐降低.由此可知,磷的混凝去除中最有效的成分显然是 Al_a ,可能的机制有 3 种:一是以化学沉淀为主,依据下式进行: $\text{Al}^{3+} + \text{PO}_4^{3-} \rightarrow \text{AlPO}_4$;二是根据 Schulze-Hardy 规则, Al^{3+} 价态高,具备强大的聚沉能力,因而对颗粒态磷和浊度也有很强的去除能力;三是 Al_a 成分投加到水中后迅速水解生成不同的聚合形态(水解中间物)进而转化为铝的氢氧化物沉淀,这些水解中间物对溶解磷和颗粒磷有较强的去除作用^[13,25].而 Al_b 与磷形成化学沉淀的能力弱于 Al_a ;它一方面通过电中和作用凝聚交替颗粒;另一方面通过黏结架桥等对颗粒磷有一定去除;同时形成絮体的过程中对磷有吸附作用,这一点和 Al_c 的作用相似.因而 Al_b 和 Al_c 除浊效果强,而除磷效果弱于 Al_a .结果提

示混凝除磷使用 AlCl_3 效果最好。

PACl_0 混凝除磷过程中,颗粒态磷和溶解态磷去除率相差不大,颗粒态磷去除率稍高。颗粒态磷和溶解态磷之间存在着动态的平衡,同一体系中在一种形态磷减少的情况下由另一形态补充,也可能是造成 2 种形态去除率相差不大的原因。

富营养化内源磷的控制需要防范底泥磷的释放。如果水体中的各形态磷混凝后都以底泥磷形态存在且不易释放,则水体中藻类及其他微生物利用的磷将暂时缺乏供给,将对水体富营养化控制发挥重要作用。结合本研究结果,当混凝剂投量 $> 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后,几乎水中的磷都以沉积物形式存在。底泥中 AAP 的量随混凝剂 (PACl_0) 投量的变化呈现先升后降的变化。在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 前,底泥 TP 随投量增大而显著增多, AAP 的量逐渐增加;当超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随投量增大底泥 TP 的增量减小,更多的铝盐水解产物沉入底泥,抑制底泥磷的释放,因而 AAP 的量随 AlCl_3 投量的增加而明显下降;当投量 $> 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, AAP 含量已经到 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。因此,增大混凝剂投量能抑制沉积物中磷的释放,对长效控磷有重要意义。

控制浊度时投加混凝剂的剂量 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 达到最高,但此时除磷率仍然较低,这一点与文献[8]报道一致;理想的总磷去除率要求更高的混凝剂量,要到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, PACl_0 、 $\text{PACl}_{1.0}$ 和 $\text{PACl}_{1.5}$ 等混凝剂的除磷率才先后达到 100%,而实验过程中 $\text{PACl}_{2.5}$ 的除磷率最高只有 75.64%。结合底泥中 AAP 变化关系,混凝除磷时投量不能以浊度去除率为唯一标准,而应参考总磷去除率和底泥 AAP 等磷释放控制的要求,使用较大的投量。

4 结论

(1) 不同碱化度的混凝剂除磷效果不同,对水体中磷形态分布的影响差别显著; Al_3 在混凝剂去除磷实验过程中起重要作用,因而碱化度越低的混凝剂除磷率越高, PACl_0 除磷效果最好。

(2) 随着混凝剂投量的增加,水体中溶解态磷及颗粒态磷逐渐减少,当混凝剂投量超过一定剂量时,水体中的溶解态磷及颗粒态磷都以沉积态磷沉入底泥。控制浊度时混凝剂投量 $3 \sim 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 效果最好,但理想的总磷去除率要求更高的混凝剂投量。

(3) AAP 的量随混凝剂 (PACl_0) 投量的增加呈现先升后降的变化,在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 前 AAP 随混凝剂投量的增加逐渐增加;当超过 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, AAP 随混

凝剂投量的增加而减少。投加过量(相对除浊要求)的混凝剂可以抑制底泥磷被生物利用,对长效控磷有重要意义。

(4) 混凝除磷时混凝剂投量不能以浊度去除率为唯一标准,而应参考总磷去除率和底泥藻类可利用磷等磷释放控制的要求,使用较大的投量。

参考文献:

- [1] 宗宫功. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京:中国环境科学出版社,1987. 3-4.
- [2] 郭沛涌,叶青,李庆华,等. 泉州城区浅水湖泊生物有效磷分布特征及其与叶绿素 a 的相关性[J]. 环境化学,2008,27(5):644-647.
- [3] 桑军强,李灵芝,王占生. 饮用水净化工艺中磷的去除研究[J]. 中国环境科学,2003,23(2):189-191.
- [4] 邱慎初. 化学强化一级处理(CEPT)技术[J]. 中国给水排水,2000,16(1):26-29.
- [5] 高廷耀,顾国维. 水污染控制工程(下册)[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- [6] 梁文艳,曲久辉. 饮用水处理中藻类去除方法的研究进展[J]. 应用与环境生物学报,2004,10(4):502-506.
- [7] 姜登岭,张晓健. 饮用中的磷及其在常规处理工艺中的去除[J]. 环境科学学报,2004,24(5):796-801.
- [8] Gonsiorczyk T, Casper P, Koschel R. Phosphorus-binding forms in the sediment of an oligotrophic and an eutrophic hardwater lake of Baltic Lake district[J]. Water Science & Technology, 1998, 37(3):51-58.
- [9] 杨艳玲,李星,李圭白,等. 给水处理强化混凝除磷研究[J]. 北京工业大学学报,2006,32(10):939-943.
- [10] Wei M X, Qun H W, Hong Z M, et al. Study of phosphorus removal using a coagulation system[J]. Process Biochemistry, 2005,40(6):2623-2627.
- [11] 白少元,谢庆林. 混凝沉淀法处理低含磷废水实验研究[J]. 净水技术,2006,25(2):462-468.
- [12] 胡小贞,金相灿,梁丽丽,等. 不同改良条件下硫酸铝对滇池污染底泥磷的钝化效果[J]. 环境科学学报,2008,28(1):44-49.
- [13] 王红斌,杨敏,唐阳光,等. 聚合氯化铝的混凝除磷性能研究[J]. 化学世界,2004,(1):7-10.
- [14] 李凡修,陈武. 聚合氯化铝制备技术的研究现状和进展[J]. 工业水处理,2003,23(3):5-8.
- [15] 陈辅君,李凤亭. 高盐基度聚合氯化铝的制备研究[J]. 中国给水排水,1994,10(6):45-48.
- [16] Wang D S, Tang H, Gregory J. Relative importance of charge neutralization and precipitation on coagulation of kaolin with PACl : effect of sulfate ion[J]. Environmental Science & Technology, 2002,36:1815-1820.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社,2002. 243-246.
- [18] 王琦,姜霞,金相灿,等. 太湖不同营养水平湖区沉积物磷形态与生物可利用磷的分布及相关关系[J]. 湖泊科学,2006,18(2):120-126.
- [19] 曲久辉,刘会娟,雷鹏举,等. 电解法制备 PAC 在水处理中的

- 应用研究[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(5):16-19.
- [20] 赵华章, 彭凤仙, 栾兆坤, 等. 微量加碱法合成聚合氯化铝的改进及 Al_{13} 的形成机理[J]. 环境化学, 2004, **23**(2):202-207.
- [21] 王秋阳, 李涛, 王东升, 等. 不同混凝剂除磷性能的对比研究[J]. 供水技术, 2008, **29**(1):33-36.
- [22] 刘海龙, 王东升, 王敏, 等. 臭氧对有机物混凝的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(3):456-460.
- [23] Liu H L, Wang D, Wang M, *et al.* Effect of pre-ozonation on coagulation with IPF-PACls: Role of coagulant speciation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2007, **294**:111-116.
- [24] 李风亭, 何艳, 潘宏杰, 等. 聚合氯化铝混凝性能的影响因素研究[J]. 工业水处理, 2008, **28**(10):40-43.
- [25] 王挺, 王三反. 混凝剂对去除不同水质污水中磷的效果分析[J]. 工业安全与环保, 2008, **34**(11):7-9.