

# PAC絮凝沉积藻量对水-底泥系统营养盐释放的影响

丁卓<sup>1,2</sup>, 王怡<sup>1</sup>, 刘晶晶<sup>3</sup>, 谢维科<sup>3</sup>, 张博<sup>3</sup>, 李超<sup>3</sup>, 张云<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学  
陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院  
有限公司, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 聚合氯化铝(PAC)絮凝除藻对降低水体藻密度效果显著,但絮凝形成的沉积藻量对水-底泥系统营养盐释放的影响鲜有报道。通过监测不同量的絮凝藻沉积于一定量的底泥表面上覆水水质和底泥组成的变化,探究使用PAC絮凝除藻时沉积藻量对水体水质及底泥内源释放的影响。结果表明,沉积藻会显著增加底泥中的氮向上覆水释放,当泥与藻的干质量之比为167.2、83.6和41.8时,反应器上覆水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均值分别为控制反应器(CK)的2.86、2.42和1.43倍,对应TN浓度均值分别为CK的2.06、1.66和1.09倍。此外,沉积藻会促进泥水界面处的反硝化过程,促进效果与沉积藻量呈负相关。然而,沉积藻对于控制底泥磷释放具有积极作用,试验期间CK上覆水中TP和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度均值分别为0.35和0.22 mg/L,而覆有沉积藻的所有反应器中TP和 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 浓度均值分别都低于0.05和0.03 mg/L,且沉积藻量越大,对应的磷浓度越低。

**关键词:** PAC絮凝; 沉积藻; 上覆水水质; 底泥组成; 营养盐释放

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)07-0078-06

## Effect of Algae Deposition Formed by PAC Flocculation on Nutrient Release in Water-sediment System

DING Zhuo<sup>1,2</sup>, WANG Yi<sup>1</sup>, LIU Jing-jing<sup>3</sup>, XIE Wei-ke<sup>3</sup>, ZHANG Bo<sup>3</sup>, LI Chao<sup>3</sup>,  
ZHANG Yun<sup>3</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Northwest Engineering Corporation Limited of PowerChina, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Polyaluminium chloride (PAC) flocculation is an efficient approach to reduce algae density in water, but the effect of the algae deposition formed by PAC flocculation on nutrient release in the water-sediment system is rarely reported. By monitoring the changes of overlying water quality and sediment composition when different amounts of flocculated algae were deposited on a certain amount of sediment surface, the effects of algae deposition formed by PAC flocculation on water quality and sediment endogenous release were investigated. Algae deposition could significantly increase the nitrogen release from sediment to the overlying water. When the dry mass ratios of sediment to algae were 167.2,

83.6 and 41.8, the mean concentrations of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  in the overlying water of the reactor were 2.86 times, 2.42 times and 1.43 times of the control reactor (CK), and the corresponding mean concentrations of TN were 2.06 times, 1.66 times and 1.09 times of CK, respectively. Furthermore, the algae deposition could promote denitrification at the water-sediment interface, and the effect was negatively correlated with algae amount. However, the algae deposition played an active role in controlling the phosphorus release from the sediment. The mean concentrations of TP and  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  in the overlying water of CK were 0.35 mg/L and 0.22 mg/L during the experiment. However, all the corresponding values in the algae deposition reactors were lower than 0.05 mg/L and 0.03 mg/L, and the lower concentration of phosphorus would be achieved with the higher algae deposition amount.

**Key words:** PAC flocculation; algae deposition; overlying water quality; sediment composition; nutrient release

全球变暖及过量污染物输入使得水体富营养化问题日趋严重,富营养化引发的藻类暴发和水华问题会大幅降低水体透明度,加快水中溶解氧消耗,严重时导致水体生态系统崩溃。加药絮凝是控制水华最直接有效的方法之一,该方法在国外研究应用较多<sup>[1-3]</sup>。在我国,聚合氯化铝(PAC)因其除藻时的高效性常作为一种应急措施用于控制水体蓝绿藻的暴发<sup>[4]</sup>。然而,目前研究多关注于 PAC 絮凝除藻效果和 PAC 投加量优化,关于絮凝后形成的沉积藻对水体水质及底泥内源释放的影响却鲜有报导。在我国水体外源污染得到有效控制的前提下,内源污染成为引起水体富营养化的主要因素。因此,研究 PAC 絮凝除藻形成的沉积物对水体内源释放的影响十分必要。本研究在模拟不同量的 PAC 絮凝藻沉积于相同量底泥表面的基础上,通过监测上覆水水质和底泥组成的变化,研究 PAC 絮凝形成的沉积藻量对景观水体水质及底泥内源释放的影响,以期科学评估 PAC 絮凝除藻对水环境的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

在西安市护城河采集一定量的底泥和发生重度富营养化的上覆水,底泥过 100 目筛网后浓缩备用并测定相关指标,上覆水中的藻通过 PAC 絮凝后收集浓缩备用并测定相关指标。试验用底泥的性质如下:TN 为 13.64 mg/g、TP 为 1.56 mg/g、Fe/Al-P 为 0.62 mg/g、 $\text{Al}^{3+}$  为 27.20 mg/g、SS 为 256.89 g/L、VSS 为 38.36 g/L、VSS/SS 值为 0.15;沉积藻的性质如下:TN 为 19.66 mg/g、TP 为 0.79 mg/g、Fe/Al-P 为 0.42 mg/g、 $\text{Al}^{3+}$  为 41.20 mg/g、SS 为 4.61 g/L、VSS 为 2.08 g/L、VSS/SS 值为 0.45。

### 1.2 试验设计

试验采用 4 个直径为 18 cm 的圆柱形玻璃反应器,每个反应器中均加入 1.5 L 均质化处理的底泥,其中一个不添加沉积藻的反应器作为控制反应器(CK),其他 3 个反应器中分别加入 0.5、1.0 和 2.0 L 絮凝沉积藻作为试验反应器。经核算,3 个试验反应器中底泥与沉积藻干质量之比(泥/藻值)分别为 167.2、83.6 和 41.8。为避免扰动,采用虹吸法分别向各反应器中缓慢加入 5 L 去离子水。为模拟一定深度处的实际水体环境,对 4 个反应器均进行密封及弱光化处理。试验期间,各反应器上覆水 pH 值为  $7.2 \pm 0.6$ ,上覆水温度为  $20.2 \sim 31.9^\circ\text{C}$ 。

### 1.3 采样与测定

采用 HACH 便携式多功能水质测定仪(HQ-30d)检测反应器泥水界面处的 ORP 值,采用蠕动泵(BT100-2J)定期采集各反应器水面下 5 cm 处水样作为上覆水代表水样用于水质分析。此外,pH 值采用 pH 计(pHS-3C)测定,TCOD 采用重铬酸钾法测定,TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  和 TP 等采用 XINMAO752N 分光光度计测定。

分别在试验开始和结束时测定底泥各指标,其中 SS 和 VSS 采用重量法测定;TN 采用奈氏比色-分光光度法测定;TP 采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定;Fe/Al-P 采用氢氧化钠/盐酸提取-钼锑抗比色法测定; $\text{Al}^{3+}$  通过四酸消解法提取,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-5000)测定。

### 1.4 数据分析

利用 Origin 9.0 软件对试验数据进行分析、计算及绘图。沉积物中营养盐总量通过沉积物中营养盐含量与沉积物质量(DW)相乘获得,释放量通过

试验前后沉积物中营养盐总量的差值进行计算。

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积藻量对水体沉积物性质的影响

#### 2.1.1 对沉积物主要组成性质的影响

试验结束后(160 d)测得 CK 反应器沉积物的 TN 为 10.03 mg/g、TP 为 1.28 mg/g、Fe/Al-P 为 0.42 mg/g、SS 为 317.94 g/L、VSS 为 45.96 g/L、VSS/SS 值为 0.14;泥/藻值为 167.2 时,试验结束后反应器沉积物的 TN 为 7.09 mg/g、TP 为 1.28 mg/g、Fe/Al-P 为 0.46 mg/g、SS 为 268.79 g/L、VSS 为 39.71 g/L、VSS/SS 值为 0.15;泥/藻值为 83.6 时,试验结束后反应器沉积物的 TN 为 8.53 mg/g、TP 为 1.32 mg/g、Fe/Al-P 为 0.49 mg/g、SS 为 215.02 g/L、VSS 为 32.12 g/L、VSS/SS 值为 0.15;泥/藻值为 41.8 时,试验结束后反应器沉积物的 TN 为 9.56 mg/g、TP 为 1.33 mg/g、Fe/Al-P 为 0.49 mg/g、SS 为 168.93 g/L、VSS 为 27.58 g/L、VSS/SS 值为 0.16。可知,与 CK 相比,PAC 絮凝藻沉积于底泥表面 160 d 后,所有试验反应器中沉积物的 TN 含量均明显降低,且沉积物的 TN 含量随絮凝沉积藻量的增大而增大。与此相反,试验反应器中沉积物的 TP 含量均不低于 CK 中的,且沉积物的 TP 含量随沉积藻量的增大而增大;沉积物中 Fe/Al-P 含量与 TP 含量的变化规律相似。各反应器沉积物的 VSS/SS 值差异不大,均略大于 CK 的 VSS/SS 值。

#### 2.1.2 对泥水界面 ORP 及沉积物释氮量的影响

试验结果表明,整个试验过程中,CK 及泥/藻值分别为 167.2、83.6 和 41.8 反应器泥水界面处的 ORP 均值分别为 -18.66、-88.52、-77.10 和 -62.90 mV,可见试验反应器中泥水界面处 ORP 均值明显低于 CK 中泥水界面处 ORP 均值,原因在于絮凝沉积藻的形成成为底泥中微生物提供了更多的有机质<sup>[5]</sup>,从而促进了底泥中微生物的新陈代谢,因此耗氧活动增强导致泥水界面处的 ORP 值降低。然而本研究表明,试验反应器之间絮凝沉积藻的量越大,泥水界面处的 ORP 值越高,这可能与沉积藻中存活藻的光合作用产氧量增多有关,因为部分藻在弱光环境下能够进行一定程度的光合作用<sup>[6]</sup>。另一方面,结合试验开始前和试验结束时沉积物的性质可以核算,CK 以及泥/藻值分别为 167.2、83.6 和 41.8 反应器中单位质量沉积物的 TN 释放量分别为 4.20、6.81、5.82 和 5.04 mg/g,可见试验反应

器中单位质量沉积物的 TN 释放量明显高于 CK,且沉积物的 TN 释放量随沉积藻量的增加而降低。Yang 等人的研究表明<sup>[7]</sup>,较低的 ORP 环境更有利于底泥中氮的释放,4 个反应器中底泥 TN 的释放规律与泥水界面处 ORP 的变化一致。

#### 2.1.3 对沉积物释磷量的影响

试验期间,CK 及泥/藻值分别为 167.2、83.6 和 41.8 反应器中单位质量沉积物的 TP 释放量分别为 0.44、0.26、0.21 和 0.14 mg/g,与 CK 相比,试验反应器中单位质量沉积物的 TP 释放量较低,且释放量随藻沉积量的增加而下降[见图 1(a)]。试验结束时,试验反应器中沉积物的  $\text{Al}^{3+}$  含量均高于 CK,且随沉积藻量的增加而上升[见图 1(b)]。

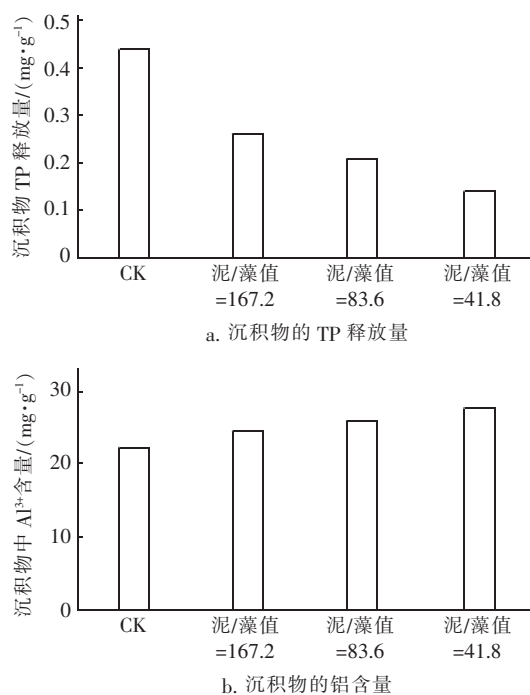


图1 各反应器单位质量沉积物的 TP 释放量及铝含量

Fig.1 Release amount of TP and  $\text{Al}^{3+}$  content of per unit sediment in each reactor

结合试验结束后 Fe/Al-P 含量变化及 TP 释放量可知,PAC 絮凝沉积藻中所含有的  $\text{Al}^{3+}$  能与沉积物释放的磷相结合形成 Al-P,从而抑制底泥中磷的释放。姜敬龙等人研究表明,随着铝盐投加量的提高,底泥中磷的释放量线性递减,且在中性条件下磷的释放量最低<sup>[8]</sup>。还有研究表明,在低 ORP 情况下,可还原态金属被还原会导致可还原态磷向上覆水体释放<sup>[9]</sup>,或是转换生成 Al-P<sup>[10]</sup>。综上所述,PAC 絮凝沉积藻的形成,增大了底泥中的  $\text{Al}^{3+}$  含

量,促进了系统中 Al-P 的生成,而 Al-P 在中性条件下稳定性较高,从而减少了底泥中磷的释放。

## 2.2 沉积藻量对上覆水水质的影响

### 2.2.1 对上覆水中氮浓度的影响

试验期间各反应器上覆水中氮浓度历时变化如图2所示。

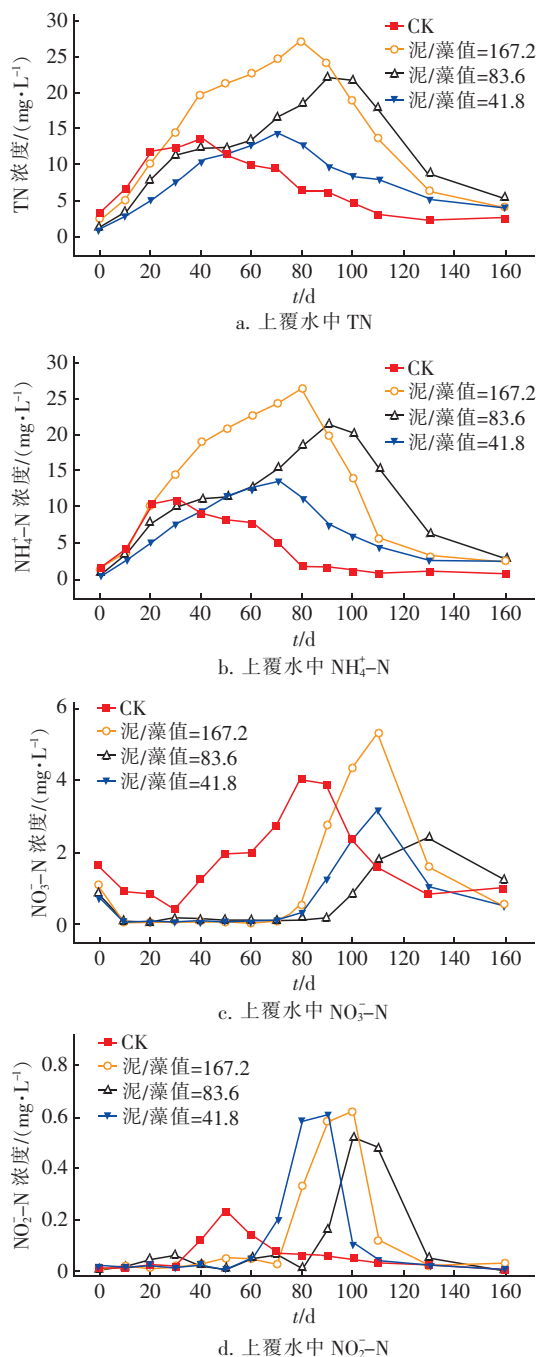


图2 上覆水中氮浓度的历时变化

Fig. 2 Time course of nitrogen concentration in overlying water

试验反应器中上覆水的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和 TN 浓度均高于 CK, 而  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度则低于 CK。由图2(a)和(b)可知, 各反应器上覆水中 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度变化趋势相同。CK 上覆水的 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度分别在第40和30天时达到最大值 13.40 mg/L 和 11.07 mg/L, 然后逐渐降低至趋于稳定。然而, 泥/藻值 = 167.2、83.6、41.8 反应器中上覆水的 TN 浓度最大值分别为 27.31、22.17、14.40 mg/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度最大值分别为 26.19、21.54 和 13.69 mg/L, 远大于 CK 中上覆水的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 浓度最大值。整个试验过程中, CK、泥/藻值 = 167.2、泥/藻值 = 83.6 和泥/藻值 = 41.8 反应器中上覆水的 TN 浓度均值分别为 7.18、15.40、12.38 和 8.15 mg/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度均值分别为 4.64、13.25、11.22 和 6.62 mg/L。因此, 沉积藻会引起上覆水中 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度上升, 但沉积藻量越大上覆水中 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度越低。

由图2(c)和(d)可以看出, 各反应器上覆水的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度均出现阶段性峰值, 然后逐渐降低。CK 上覆水的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度在第80天时达到 4.04 mg/L, 第160天时下降至 1.02 mg/L; 泥/藻值 = 167.2、83.6、41.8 反应器上覆水的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度分别第110、130和110天时达到最大值 5.33、2.43和 3.22 mg/L, 至第160天时分别降至最小值。表明所有反应器中均存在一定程度的硝化和反硝化过程, 但 PAC 藻沉积推迟了  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  最大浓度的出现时间,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度变化与此类似。

总之, 在缺氧条件下, 试验前期各反应器中上覆水的 TN 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度迅速增加, 在达到释放高峰后, 由于沉积藻在弱光环境下的光合作用产氧, 促进了硝化反应进行, 使  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度迅速下降。与此同时, 泥水界面发生的反硝化作用使  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和 TN 浓度相应减少。而 PAC 絮凝沉积藻明显增加了上覆水的 TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度, 且增加趋势与沉积藻量呈负相关。

### 2.2.2 对上覆水中磷浓度的影响

试验期间各反应器上覆水中磷浓度的历时变化如图3所示。可知, 上覆水中 TP 与  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度变化趋势相同。其中, CK 上覆水的 TP 与  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度在试验前20 d急剧增至最大值 0.93 和 0.66 mg/L, 随后逐渐下降并趋于稳定, 而各试验反应器



上覆水的 TP 和  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  浓度全程稳定在较低水平。整个试验过程中,CK 及泥/藻值分别为 167.2、83.6 和 41.8 反应器上覆水中 TP 浓度均值分别为 0.35、0.05、0.05 和 0.03 mg/L,对应的  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  浓度均值分别为 0.22、0.03、0.02 和 0.01 mg/L。因此,试验反应器中絮凝沉积藻显著降低了上覆水中 TP 与  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  浓度,这主要是由于沉积藻中较高的  $\text{Al}^{3+}$  含量对底泥释放的磷具有再沉淀作用。

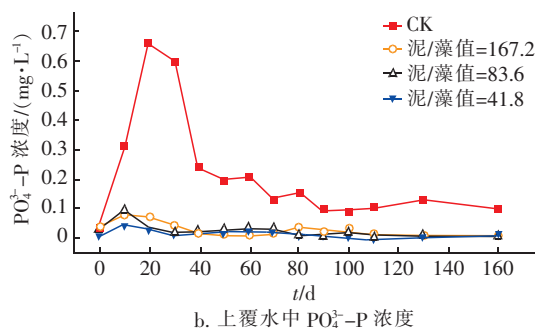
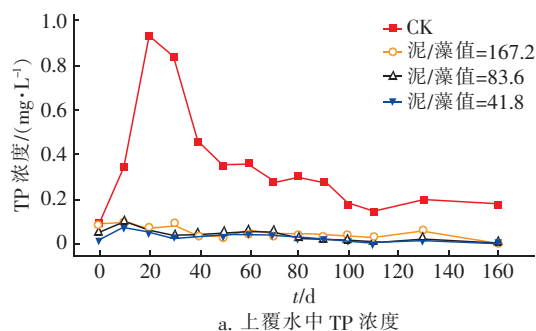


图3 上覆水中磷浓度的历时变化

Fig.3 Time course of phosphorus concentration in overlying water

### 2.2.3 对上覆水中 TCOD 的影响

试验期间各反应器上覆水中 TCOD 浓度的历时变化见图4。

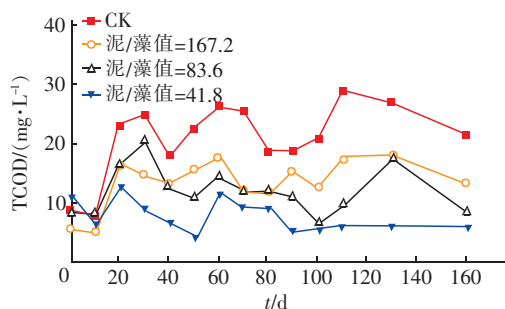


图4 上覆水中 TCOD 浓度的历时变化

Fig.4 Time course of TCOD concentration in overlying water

各反应器上覆水中 TCOD 浓度波动较大,试验全程中,CK 及泥/藻值分别为 167.2、83.6 和 41.8 反应器中 TCOD 浓度平均值分别为 20.78、13.48、11.93 和 7.72 mg/L,可见随着藻沉积量的增多,上覆水中 TCOD 平均浓度降低。这可能是由于沉积藻中 PAC 引起系统中铝离子与部分胶体或悬浮有机物絮凝沉淀,从而减少了上覆水中的 TCOD 浓度。相应地,系统中沉积藻量越大,PAC 含量越高,TCOD 浓度越低。

### 3 结论

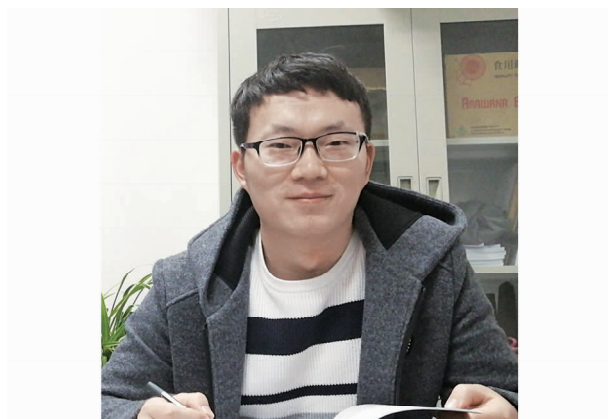
不同量的 PAC 絮凝藻沉积于相同量的底泥表面时,显著影响水环境及底泥中营养盐的释放。模拟水体系统中的底泥在缺氧条件下会向上覆水释放大量污染物,沉积藻加剧了底泥中氮向上覆水的释放,使得上覆水中氮浓度急剧增加,但抑制了底泥中磷和 TCOD 的释放,引起上覆水中磷浓度和 TCOD 浓度显著降低。此外,上覆水中  $\text{TN}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_2^--\text{N}$  浓度的增加与沉积藻量呈负相关,而上覆水中 TP、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  和 TCOD 浓度的削减量与沉积藻量呈正相关。因此,使用 PAC 絮凝除藻时除了需考虑对浮游藻类的去除效果,还应同时考虑沉积藻量对水体底泥内源释放的影响。

### 参考文献:

- [1] Sengco M R, Anderson D M. Controlling harmful algal blooms through clay flocculation [J]. Journal of Eukaryotic Microbiology, 2004, 51(2): 169-172.
- [2] Wyatt N B, Gloe L M, Brady P V, et al. Critical conditions for ferric chloride-induced flocculation of freshwater algae [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, 109(2): 493-501.
- [3] Pierce R H, Henry M S, Higham C J, et al. Removal of harmful algal cells (*Karenia brevis*) and toxins from seawater culture by clay flocculation [J]. Harmful Algae, 2004, 3(2): 141-148.
- [4] 谢婉莹. 新型凝胶法制备 PAC 及其在除藻、低温低浊水处理中的应用[D]. 重庆:重庆大学, 2015.  
Xie Wanying. Algae Removing and Low Temperature Raw Water Treating Performance of PAC Prepared via Advanced Gel Method [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015 (in Chinese).
- [5] Huang Y, Chen X, Li P, et al. Pressurized *Microcystis* can help to remove nitrate from eutrophic water [J].

- Bioreour Technol,2018,196(Pt B):280-287.
- [6] Fan P, Wang Y, Wang W H, *et al.* Release characteristics of nitrogen and phosphorus from sediments formed under different supplemental water sources in Xi'an moat, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 10746 - 10755.
- [7] Yang Z P, Wang L Q, Liang T, *et al.* Nitrogen distribution and ammonia release from the overlying water and sediments of Poyang Lake, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(1): 771 - 778.
- [8] 姜敬龙, 吴云海. 底泥磷释放的影响因素[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(6): 43 - 46.  
Jiang Jinglong, Wu Yunhai. The factors on release of phosphorus from the sediment [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(6): 43 - 46 (in Chinese).
- [9] Ingall E, Jahnke R. Evidence for enhanced phosphorus regeneration from marine sediments overlain by oxygen depleted waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(11): 2571 - 2575.

- [10] Wang C H, Wu Y, Wang Y Q, *et al.* Lanthanum-modified drinking water treatment residue for initial rapid and long-term equilibrium phosphorus immobilization to control eutrophication[J]. Water Research, 2018. DOI: 10.1016/j.watres.2018.03.018.



作者简介:丁卓(1994 - ),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要研究方向为景观水体的治理与修复。

E-mail: 1455204625@qq.com

收稿日期:2019-08-13

(上接第77页)

402.  
Sui Guanghua, Li Jianjun, Sun Guoping. Investigation of odor pollution in a municipal wastewater treatment plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(3): 399 - 402 (in Chinese).
- [13] 王智超, 席劲瑛, 欧阳云, 等. 城市污水厂  $H_2S$  排放浓度与水质和泥质指标的相关性[J]. 环境科学研究, 2013, 26(9): 989 - 994.  
Wang Zhichao, Xi Jinying, Ouyang Yun, *et al.* Correlation between  $H_2S$  concentration and characteristic parameters of wastewater and sludge in a municipal wastewater treatment plant [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(9): 989 - 994 (in Chinese).
- [14] Yan L, Ye J, Zhang P, *et al.* Hydrogen sulfide formation control and microbial competition in batch anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater sludge: Effect of initial sludge pH[J]. Bioresource Technology, 2018,

259: 67 - 74.



作者简介:韩彩云(1992 - ),女,山西太原人,硕士,科研助理,主要研究方向为 VOCs 和恶臭控制技术。

E-mail: 541143494@qq.com

收稿日期:2019-07-12