

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0033

王希越,刘东方,王伟斌,等.高盐景观水体除磷、除藻药剂优选及复配[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):49-54. WANG X Y, LIU D F, WANG W B, et al. Optimal selection and compounding of algae and phosphorus removal agents for high-salinity landscape water[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2): 49-54. (in Chinese)

## 高盐景观水体除磷、除藻药剂优选及复配

王希越<sup>1</sup>,刘东方<sup>1</sup>,王伟斌<sup>1</sup>,张庆明<sup>2</sup>,包迪<sup>2</sup>

(1.南开大学 环境科学与工程学院,天津 300350;2.天津裕川清林环境科技发展有限公司,天津 300450)

**摘要:**淡水盐碱化是全球范围内面临的一个新兴环境问题,其中城镇内人工景观水体表现尤为突出。高盐景观水体盐度大,导致植物不易生长,藻类逐渐成为优势种群,影响观感。通过絮凝法同时除磷、除藻,使景观水体恢复藻类爆发前的状态。研究11种絮凝药剂对TP、Chla(叶绿素a)的去除效率,其中PAC除磷效果很好,CPAM可以有效除藻。经过质量浓度梯度优选实验,优选出PAC和CPAM的最优投加质量浓度,并进行复配试验。复配结果为当PAC投加质量浓度10 mg/L,CPAM投加质量浓度3 mg/L时组合除磷、除藻效果最佳,TP平均去除率为92.52%,Chla平均去除率为98.32%。

**关键词:**絮凝剂;CPAM;PAC;除磷;除藻

中图分类号:X703 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Optimal selection and compounding of algae and phosphorus removal agents for high-salinity landscape water

WANG Xiyue<sup>1</sup>, LIU Dongfang<sup>1</sup>, WANG Weibin<sup>1</sup>, ZHANG Qingming<sup>2</sup>, BAO Di<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Yuchuan Qinglin Environmental Technology Development Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

**Abstract:** Freshwater salinization is an emerging environmental problem worldwide. It is especially prominent in the artificial landscape water in urban areas. High-salinity landscape water body makes it hard for plants to grow, so that the algae gradually becomes the dominant population, affecting the beauty of the water. In this study, we used the flocculation method to simultaneously remove phosphorus and algae, so as to recover the landscape water body to the state before the algae bloom. In this paper, we studied the removal efficiency of 11 flocculants on TP and Chla (chlorophyll-a). Among them, PAC showed good effect on TP removal, and CPAM could effectively remove algae. After the mass concentration gradient optimization experiment, we selected the optimal dosage of PAC and CPAM, and performed compounding experiment. The results of the compounding were as follows: when PAC was 10 mg/L and CPAM was 3 mg/L, the combination had the best removal effect. The average removal rate of TP was 92.52%, and that of Chla was 98.32%.

**Key words:** flocculant; CPAM; PAC; phosphorus removal; algae removal

淡水生态系统盐碱化是世界范围内的一个新兴环境问题<sup>[1]</sup>。近几十年,由于冬季道路盐的使用,淡

收稿日期:2018-09-13 修回日期:2018-12-17 网络出版时间:2018-12-25

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181221.1437.002.html>

基金项目:2017年天津市生态环境治理科技示范工程项目(17ZXSTSF00100)

作者简介:王希越(1996—),女,天津人,主要从事水污染控制工程研究。E-mail:15902286521@163.com

通信作者:刘东方(1966—),男,河北人,教授,博士,主要从事再生水处理、废水处理及回用研究。E-mail:dongfangli@nankai.edu.cn

水生态系统盐度急剧上升<sup>[2]</sup>。随着我国经济快速发展,城市化进程的加快,城市不透水面积加大,盐的使用量加大<sup>[3]</sup>,更加剧了城市淡水盐碱化问题,而景观水体地处城镇内部,其盐碱化程度在城市淡水中尤为突出。

天津市作为经济发达的代表城市,其特殊的地理位置(临海)及气候条件(年降雨量低)导致土地及淡水盐碱化问题十分严重。其中天津某地区土壤含盐量为 25~33 g/L<sup>[4]</sup>,景观水体平均含盐量达到 2~3 g/L。含盐量过高不利于水生动植物生长,而藻类对盐度的适应范围较广。Xuyang Li 等<sup>[5]</sup>对小球藻的研究发现,当盐度高达 10~15 g/L 时,对小球藻的生长仍未有显著影响。在高盐景观水体中,藻类由于没有竞争,易成为优势群落,而发生藻类爆发。氮、磷是藻类生长的主要营养元素,其中磷对藻类的影响优于氮对藻类的影响<sup>[6-8]</sup>。有研究表明,春季无机磷含量在 0.01 mg/L 时就可以使藻类爆发<sup>[9]</sup>,而景观水体 TP 含量远远高于 0.01 mg/L。因此本研究欲从两方面出发控制景观水体藻类爆发,一方面去除藻类<sup>[10]</sup>,另一方面降低磷含量<sup>[11]</sup>。

目前国内外的研究中,对水中磷的去除,多采用生物法或化学法。而 Intrasingkha<sup>[12]</sup>等研究表明,对高盐水,若采用生物除磷,在盐浓度为 5 g/L、水力停留时间为 18 h 时,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的去除率仅为 15%;而盐度大于 5 g/L 时,则无法进行生物除磷。Panswad<sup>[13]</sup>通过研究对此做出了解释,他认为在含盐环境中,盐度在聚磷菌细胞内累积,导致细胞内渗透压急剧增加,使得聚磷菌失去吸收磷的能力,从而无法进行生物除磷。与此同时,众多研究表明,化学除磷中絮凝法对除磷、除藻兼具较好处理效果,并且所用的药剂也有重合部分。如刘丽娟等<sup>[14]</sup>选用 PAC、PAFC、PFS、PAS、AS 五种絮凝剂,研究其除藻效果,这五种絮凝剂同样可以用于除磷。目前,利用絮凝法同时除磷、除藻的絮凝工艺研究甚少,尤其关于高盐景观水体同时除磷、除藻絮凝剂的研究还未见报导。

因此,本文拟通过对比研究 11 种除磷/除藻絮凝剂(以下统称为絮凝剂),优选出效果好的絮凝剂并进行复配实验,寻找出高效且经济,适用于高盐水同时除磷、除藻的絮凝剂配方。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 藻种的来源及培养

藻种购买于南京优活生物技术有限公司,为复合藻种,主要成分包括小球藻、栅藻、卵囊藻等。其中小球藻为优势藻种,占比 99% 以上。

### 1.2 待处理高盐水的配制

实验模拟水主要成分见表 1,与天津市某景观水体成分相似,总盐度 3 g/L。

表 1 实验模拟水各成分浓度

Tab. 1 Mass concentration of each component in experimental water

成分	质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )
CH <sub>3</sub> COONa	19.20
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	14.05
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O	3.93
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2.30
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.72
KNO <sub>3</sub>	36.07
KNO <sub>2</sub>	30.36
MgSO <sub>4</sub>	261.00
硼酸	2.50
ZnSO <sub>4</sub>	0.50
MnSO <sub>4</sub>	2.50
CuSO <sub>4</sub>	0.08

### 1.3 絮凝剂浓缩液浓度的选取

本文选用单宁酸、高铁酸钾、阳离子聚丙烯酰胺(CPAM)、壳聚糖(CTS)、聚合氯化铝(PAC)、阴离子聚丙烯酰胺(PAM)、氯化铁、聚合氯化铝铁(PAFC)、硫酸铝(AS)、聚合硫酸铁(PFS)、某公司除藻剂等 11 种药剂进行优选实验。考虑到絮凝剂由于生产工艺等的不同成本也不尽相同,11 种药剂中高者每吨过万、低者每吨几千。不仅要考虑除磷、除藻效果,还要考虑实际工程应用的成本问题。本文尽量平衡成本问题,选择每吨售价过万的絮凝剂配制低浓度浓缩液,售价每吨未过万的絮凝剂配制高浓度浓缩液。选用浓缩液浓度见表 2。

表 2 絮凝剂售价及浓缩液配制质量浓度

Tab. 2 Price of flocculant and mass concentration of concentrated liquor

药剂	售价/(元·t <sup>-1</sup> )	质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
单宁酸	45 000~55 000	5
高铁酸钾	22 000~25 000	5
CPAM	55 000~90 000	5
CTS	135 000~170 000	5
PAM	59 000~120 000	5
氯化铁	—	50
PAFC	1 000~2 000	50
PAC	1 300~2 000	50
AS	780~1 580	50
PFS	1 000~2 000	50
某公司除藻剂	—	50

## 1.4 实验方法

### 1.4.1 絮凝剂优选

将 4 mL 各絮凝剂浓缩液加入装有 400 mL 藻液的六联搅拌器专用搅拌杯中,快搅 3 min、慢搅 0.5 min、静置 40 min。取上清液测定叶绿素 a(Chla)及 TP,通过比较 Chla 及 TP 去除率选择最优絮凝剂。

### 1.4.2 除磷、除藻最优絮凝剂浓度确定

优选出的絮凝剂设置 5 个浓度梯度,将 4 mL 各浓度絮凝剂浓缩液加入装有 400 mL 藻液的六联搅拌器专用搅拌杯中,快搅 3 min、慢搅 0.5 min、静置 40 min。取上清液测定叶绿素 a(Chla)及 TP,通过比较 Chla 及 TP 去除率选择最优絮凝剂质量浓度。每吨售价过万的考察低质量浓度时对 TP 及藻的去除效果;每吨售价未过万的考察高质量浓度时对 TP 及藻的去除效果,以平衡成本问题。

### 1.4.3 复配

将 PAC 及 CPAM 分别设定 3 个浓度梯度进行复配实验,每个复配做 3 个平行实验。复配序号见表 3。

表 3 复配对应序号  
Tab. 3 Corresponding serial numbers

序号	PAC/(mg · L <sup>-1</sup> )	CPAM/(mg · L <sup>-1</sup> )
1	5	3
2	5	5
3	5	7
4	10	3
5	10	5
6	10	7
7	20	3
8	20	5
9	20	7

## 1.5 检测方法

藻类的去除效果以叶绿素 a 去除率为标准。叶绿素 a 的测定采用《水质叶绿素 a 的测定分光光度法》HJ 897—2017。

TP 的测定采用《水质总磷的测定钼酸铵分光光度法》GB 11893—89。

## 1.6 实验固定参数

温度为 20 ℃、盐度 3 g/L、pH 为 8、快搅速度 200 r/min、慢搅速度 50 r/min。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 絮凝剂优选

#### 2.1.1 TP 去除效果

11 种絮凝剂对 TP 的去除效果见图 1。由图 1 可以看出 PAC、氯化铁、PAFC、AS、PFS 对 TP 的去除率均高于 69%,明显高于其它 6 种絮凝剂,其中 PAC、PFS 对 TP 的去除效果最为明显。研究表明,铝盐和铁盐对磷的去除效果更好,由于铝盐和铁盐在溶液中分解成多种形态的铝、铁与磷结合产生絮体沉淀,并通过铝盐、铁盐吸附架桥、电中和、网捕等作用增大絮体粒径,使其快速沉降,从而可将水中的磷去除<sup>[15-17]</sup>,同时 PAC 和 PFS 对 TP 的去除效果高于氯化铁和 AS,说明大分子聚合物除磷效果优于小分子无机盐。另外,张大群等<sup>[18]</sup>对 PFS 和 PAC 除磷效果进行了研究比较,研究结果表明 PAC 除磷效果优于 PFS,这与本试验结果相符。

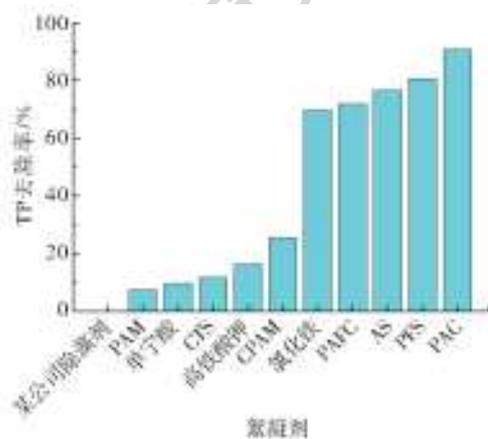


图 1 11 种絮凝剂除磷效果

Fig. 1 Phosphorus removal efficiency of 11 flocculants

#### 2.1.2 Chla 去除效果

11 种絮凝剂对藻液中叶绿素 a 的去除率见图 2。分析可知,11 种絮凝剂中,除单宁酸和某公司除藻剂之外,其余絮凝剂除藻效率均高于 54%。其中 AS、CPAM、氯化铁对 Chla 的去除率达到了 100%。这主要是因为微藻带负电<sup>[20]</sup>,易于与带正电的离子结合。硫酸铝、氯化铁能够产生大量的铝离子和铁离子吸附微藻并形成絮凝沉淀<sup>[19]</sup>。CPAM 电荷较高,其水溶液带有正电<sup>[20]</sup>,易与微藻结合而沉淀。且 CPAM 对藻类的去除率(100%)要明显好于 PAM 对藻类的去除率(73.15%)也能印证此结论。另外,PAC 对 Chla 的去除率为 96.10%,其对藻类的高去除率可能来源于 PAC 水溶液分解产生的铝离子对藻类的吸附沉淀作用以及 PAC 除磷的过程中产生的絮体对藻类的网捕作用。

综合以上实验结果,11 种絮凝剂中 PAC 除磷效果最佳,除藻效果也较好,从处理效果来说,选用 PAC 作为除磷、除藻絮凝剂最为适合,但 PAC 处理

存在产生絮体量大的缺点。另外,采用 CPAM 除藻效果非常好,且除藻类絮体外无其他絮体产生,上清液澄清透明。因此,可以采用 CPAM 和 PAC 复配,将 CPAM 作为 PAC 的辅助絮凝剂,降低絮体量。

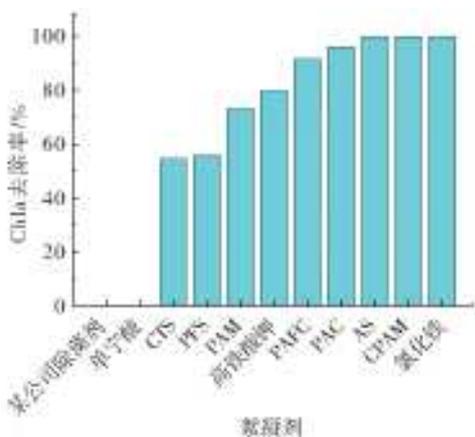


图 2 11 种絮凝剂除叶绿素 a 效果

Fig. 2 Chlorophyll-a removal efficiency of 11 flocculants

## 2.2 PAC 最优质量浓度确定

图 3 为 PAC 加入质量浓度为 20~60 mg/L 时对 TP 和 Chl a 的去除效果。当加入 PAC 质量浓度为 20 mg/L 时,TP 去除率仅为 67.5%,Chl a 去除率为 95.7%。继续增大 PAC 质量浓度,TP 去除率急剧升高,达到 83.82%,Chl a 的去除率也增加到 95.79%。当加入 PAC 质量浓度高于 40 mg/L 时,Chl a 去除率基本不变,TP 去除率上升趋势开始趋于平缓。因此选择 PAC 质量浓度 20 mg/L 作为与 CPAM 的复配结点,探索 PAC 与 CPAM 复配对同时除磷、除藻的效果。选择 PAC 复配的实验质量浓度为 5、10、20 mg/L。

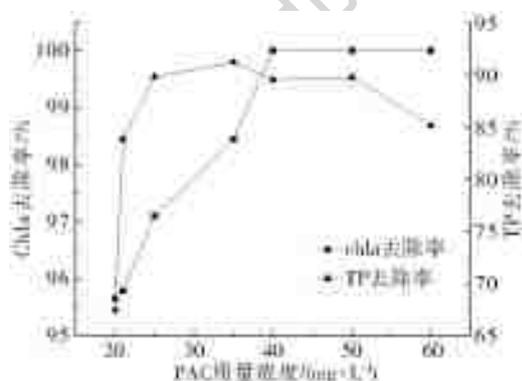


图 3 不同质量浓度 PAC 去除 TP 和 Chl a 效果

Fig. 3 Effects of different mass concentrations of PAC on TP and Chl a removal

## 2.3 CPAM 质量浓度优选

图 4 为不同浓度 CPAM 对 TP 和 Chl a 的去除效果。CPAM 质量浓度由 3 mg/L 增加到 8 mg/L 时,Chl a 去除率急剧升高。CPAM 加入质量浓度为

3 mg/L 和 7 mg/L 时,Chl a 去除率分别为 63.52% 和 88.02%。另外,由图 4 可知,CPAM 投加量由 3 mg/L 增加到 8 mg/L 时对 TP 去除率在 60%~70%。

CPAM 主要作为助凝剂辅助 PAC 除藻,降低 PAC 加入质量浓度,从而降低 PAC 产生的絮体量。所以主要考虑 CPAM 对藻的絮凝效果即可。20 mg/L PAC 对 Chl a 的去除率已经高于 90%,不需要太高的质量浓度的 CPAM,所以选择 3、5、7 mg/L CPAM 与 PAC 进行复配。

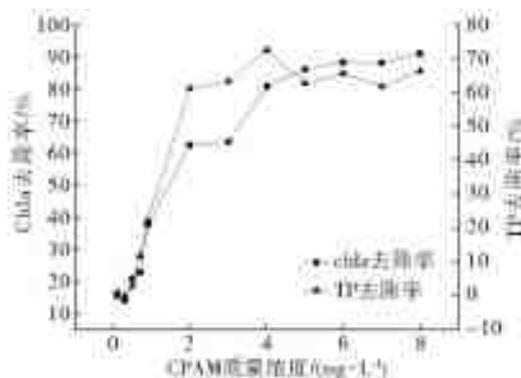


图 4 不同质量浓度 CPAM 去除 TP 和 Chl a 效果

Fig. 4 Effects of different mass concentrations of CPAM on TP and Chl a removal

## 2.4 PAC 与 CPAM 复配

### 2.4.1 复配对 TP 的去除效果

图 5 中各柱状图分别对应 PAC 质量浓度 5、10、20 mg/L 复配不同质量浓度 CPAM 时,复配药剂对 TP 的去除效果。可以看出,PAC 质量浓度相同时,改变 CPAM 投加量,TP 的去除率基本相同。而复配相同质量浓度的 CPAM 时,增加 PAC 投加量,TP 去除率明显增加。PAC 质量浓度为 20 mg/L,CPAM 质量浓度分别为 3、5、7 mg/L 时,TP 去除率均在 96% 以上,最高平均去除率为 96.95%,TP 由最初的 0.75 mg/L 最低降到 0.02 mg/L,达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) IV 类水水质标准。单就 TP 去除率而言,PAC 复配加入量为 20 mg/L 时为最优,CPAM 三个加入量区别不大。

综合比较,单独使用 PAC 作为絮凝剂,PAC 质量浓度为 20 mg/L 时,TP 的去除率为 67.5%,PAC 质量浓度增加为 21 mg/L,TP 的去除率增加至 83.83%,与 5 mg/L PAC 复配药剂对 TP 的去除效果相当,其去除效果远小于 20 mg/L PAC 复配药剂,可见复配药剂综合除磷效果明显优于单独 PAC 絮凝。

图 6 从左至右分别为 1 号加入 20 mg/L PAC 和 3 mg/L CPAM;2 号加入 20 mg/L PAC;3 号加

入 10 mg/L PAC;4号加入 5 mg/L PAC;5号加入 3 mg/L CPAM。1号絮体量与 2号相当;3号和 4号不但产生的絮体量比 1号高,而且没有 1号对 TP 去除效果好;1号上清液浊度远小于 2号至 5号上清液,絮体沉降效果好。

综上所述,PAC 与 CPAM 复配比单独使用 PAC、CPAM 除磷效果好;复配明显降低了 PAC 的加入量,减少了絮体量。同时考虑除磷效果及 CPAM 用量带来的成本因素,选择最优复配质量浓度为,PAC 20 mg/L,CPAM 3 mg/L。

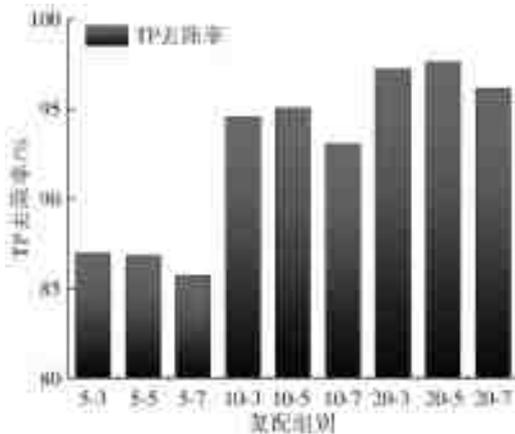


图 5 不同复配方式去除 TP 效果

Fig. 5 Removal of TP by different combinations



图 6 絮体量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of floc volume

### 2.4.2 复配对 Chla 的去除效果

图 7 为不同 PAC 和 CPAM 复比对 Chla 的去除效果。可以看出,PAC 与 CPAM 复配对 Chla 去除效果显著。当 PAC 质量浓度为 10、20 mg/L 时 6 种复配方式中 Chla 去除率均在 99.4% 以上。由图 3、图 4 可知,单独加入 PAC(20 mg/L)或当单独加入 CPAM(7 mg/L)时 Chla 去除率分别为 95.7%、88.02%,均没有复配效果好。说明 CPAM 与 PAC 复配可以有效提高 Chla 去除率。

综上所述,PAC 与 CPAM 复配可以有效提高对 Chla 的去除效果。PAC 质量浓度在 10 mg/L

时,CPAM 三个质量浓度对 Chla 去除率基本相同。因此,综合考虑,确定最优复配比为:PAC 10 mg/L、CPAM 3 mg/L。

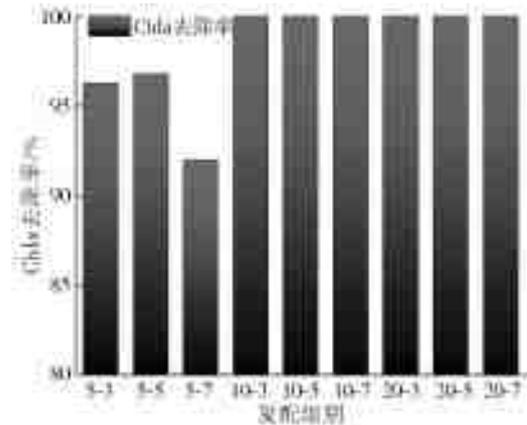


图 7 不同复配比例去除 Chla 效果

Fig. 7 Effects of different compounding ratios on Chla removal

综合考虑除磷、除藻效果及经济因素,最终确定高盐再生水体除磷、除藻选择复配药剂“PAC + CPAM”作为絮凝剂,其最优复配比为 PAC 20 mg/L、CPAM 3 mg/L。

## 3 结论

(1) 单宁酸、高铁酸钾、CPAM、CTS、PAC、PAM、氯化铁、PAFC、AS、PFS、某公司除藻剂等 11 中絮凝剂中,PAC 同时除磷、除藻效果最佳。

(2) 上述 11 中絮凝剂中,CPAM 对藻的絮凝效果突出,且产生的絮体量少。

(3) PAC 与 CPAM 复配比单独使用相应絮凝剂效果更佳,最优复配方式为 PAC 20 mg/L、CPAM 3 mg/L。

### 参考文献(References):

- [1] M CAÑEDOARGÜELLES, HAWKINS C P, KEFFORD B J, et al. WATER. Saving freshwater from salts[J]. Science, 2016, 351(6276): 914-916. DOI: 10.1126/science.aad3488.
- [2] CAÑEDO-ARGÜELLES M, KEFFORD B J, PISCART C, et al. Salinisation of rivers; an urgent ecological issue[J]. Environmental Pollution, 2013, 173: 157-167. DOI: 10.1016/j.envpol.2012.10.011.
- [3] BESTER M L, FRIND E O, MOLSON J W, et al. Numerical Investigation of Road Salt Impact on an Urban Wellfield[J]. Ground water, 2006, 44(2): 165-175. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2005.00126.x.
- [4] 付春平,唐运平,张志扬,等.美人蕉对泰达高含盐再生水景观河道水体净化效果研究[J].灌溉排水学报, 2005(5): 70-73. (FU C P, TANG Y P, ZHANG Z Y,

- et al. Study on the purification effect of canna on the water body of Teda High Salt reclaimed water landscape river[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2005(5):70-73. (in Chinese))
- [5] LI X Y, YUAN Y Z, CHENG D J, et al. Exploring stress tolerance mechanism of evolved freshwater strain *Chlorella* sp. S30 under 30 g/L salt[J]. Biore-source Technology, 2017(250):495. DOI:10.1016/j.biortech. 2017. 11. 072.
- [6] 郑朔方, 杨苏文, 金相灿. 铜绿微囊藻生长的营养动力学[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 152-156. (ZHENG S F, YANG S W, JIN X C. Dynamic studies on the effect of nutrients on the growth of microcystis aerugi-nosa[J]. Environmental Science, 2005, 26(2): 152-156. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0250-3301. 2005. 02. 031.
- [7] HUSZAR V L M, SILVA L H S, DOMINGOS P, et al. Phytoplankton species composition is more sensitive than OECD criteria to the trophic status of three Brazilian tropical lakes[J]. Hydrobiologia, 1998(369-370):59-71. DOI:10.1023/a:1017047221384.
- [8] 高学庆, 任久长, 宗志祥, 等. 铜绿微囊藻营养动力学研究[J]. 北京大学学报:自然科学版, 1994(4):461-469. (GAO X Q, REN J C, ZONG Z X, et al. Studies on the nutrient energetics of microcystis aeruginosa[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1994(4):461-469. (in Chinese))
- [9] 汪俊三. 植物碎石床人工湿地污水处理技术和我的工程案例[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009. (WANG J S. Sewage treatment technology of constructed wetland with plant gravel bed and my engineering case[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese))
- [10] 朱亮. 水体氮磷营养源控制对策研究[J]. 给水排水, 1998(1):23-25. (ZHU L. Study on control strategy of nitrogen and phosphorus nutrient sources in water [J]. Water Supply and Drainage, 1998(1): 23-25. (in Chinese))
- [11] 郭迎庆. 城市景观水体的污染控制和修复技术[J]. 环境科学与技术, 2005, 28(S1):148-150. (GUO Y Q. Pollution control and remediation technology of urban landscape water body[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 28(S1): 148-150. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1003-6504. 2005. z1. 066.
- [12] INTRASUNGKHA N, JÜRIG Keller, BLACKALL L L. Biological nutrient removal efficiency in treatment of saline wastewater[J]. Water Science & Technology, 1999, 39(6): 183-190. DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00138-9.
- [13] PANSWAD T, ANAN C. Impact of high chloride wastewater on an anaerobic/anoxic/aerobic process with and without inoculation of chloride acclimated seeds[J]. Water Research, 1999, 33(5): 1165-1172. DOI: 10.1016/S0043-1354(98)00314-5.
- [14] 刘丽娟, 汪琳, 李明玉, 等. 不同混凝剂强化除藻、除浊的研究[J]. 中国给水排水, 2010, 26(5): 80-83. (LIU L J, WANG L L, LI M Y, et al. Study on enhanced algae removal and turbidity removal by different coagulants[J]. China Water Supply and Drainage, 2010, 26(5):80-83. (in Chinese))
- [15] OMOIKE A I, VANLON G W. Removal of phosphorus and organic matter removal by alum during wastewater treatment[J]. Water Research, 1999, 33(17): 3617-3627. DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00075-5.
- [16] 周长波. PAC-生物联合絮凝除磷效能及机理分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013. (ZHOU C B. Efficiency and mechanism analysis of PAC-bio-flocculation and phosphorus removal[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)) DOI:10.7666/d. D414399.
- [17] 张卫飞. 聚合氯化铝中 Al(III) 的形态分布影响因素及混凝性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003. (ZHANG W F. Influencing factors and coagulation properties of Al(III) in polyaluminum chloride[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [18] 张大群, 曹井国, 姜亦增. 三种除磷药剂的除磷性能比较[J]. 中国给水排水, 2011, 27(5): 75-76. (ZHANG D Q, CAO J G, JIANG Y Z. Comparison of phosphorus removal performance of three phosphorus removal agents[J]. China Water Supply and Drainage, 2011, 27(5):75-76. (in Chinese))
- [19] JOSÉ F. REYES, LABRA C. Biomass harvesting and concentration of microalgae *scenedesmus* sp. cultivated in a pilot photobioreactor[J]. Biomass & Bioenergy, 2016(87):78-83. DOI:10.1016/j.biombioe. 2016. 02. 014.
- [20] 麦永发, 朱宏, 林建云, 等. 阳离子聚丙烯酰胺的重要研究技术进展[J]. 高分子通报, 2012(8): 105-110. (MAI Y F, ZHU H, LIN J Y, et al. Advances in important research techniques of cationic polyacrylamide [J]. Polymer Bulletin, 2012(8): 105-110. (in Chinese))