

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2016.04.020

# 津河水体藻污染监测识别及无机混凝剂除藻效能研究

杜进炜<sup>1,2</sup>, 张 硕<sup>1,2</sup>, 钟 远<sup>1,2</sup>, 孙力平<sup>1,2</sup>

(1. 天津城建大学环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384)

**摘要:** 针对津河水体开展长达18个月的定点采样监测分析,对造成藻华现象的优势藻种进行了显微识别。结果表明,近两年津河水体总体为富营养化状态,其中每年7、8月份藻华暴发,呈现重富营养化特征,经观察鉴别属于微囊藻型蓝藻污染。以Chl-a、浊度及UV<sub>254</sub>为主要水质参数,探索投加无机混凝剂用于藻污染控制的可行性,并对4种混凝剂的藻污染控制效果进行了比较。结果表明,投加无机混凝剂控制津河藻污染效果显著(聚合氯化铝对Chl-a和浊度去除率分别高达89%和92%),相同实验环境下混凝净化效能依次为:PAC(聚合氯化铝)>PFS(聚合硫酸铁)>FC(三氯化铁)>AS(硫酸铝)。

**关键词:** 藻污染; Chl-a; 无机混凝剂; 聚合氯化铝

中图分类号: X522

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2016)04-0122-05

## Monitoring and identification of algae contamination in Jinhe River and purification effect of inorganic coagulants

DU Jinwei<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuo<sup>1,2</sup>, ZHONG Yuan<sup>1,2</sup>, SUN Liping<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;  
2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** Sampling and monitoring analysis was conducted over a period of 18 months in the Jinhe River Basin, and the dominant species causing the algae bloom in the river were identified through microscopic examination. The results show that the Jinhe River has been in a eutrophic state on the whole over the last two years, especially in July and August, when severe eutrophication has taken place, and microcystic cyanobacteria have largely contributed to the algae contamination. The applicability of inorganic coagulants to algae contamination control was investigated, using chlorophyll a, turbidity, and UV<sub>254</sub> as the major water quality parameters. The effects of four kinds of coagulants in controlling the algae contamination were compared. The results show that the inorganic coagulants were effective in controlling algae contamination of the Jinhe River (the removal rates of chlorophyll a and turbidity reached 89% and 92%, respectively, when polyaluminium chloride was used). Under the same experimental conditions, the four coagulants were ranked by performance in the following descending order: polyaluminium chloride, polymeric ferric sulfate, ferric chloride, and aluminum sulfate.

**Key words:** algae contamination; chlorophyll a; inorganic coagulant; polyaluminium chloride

近些年河流地表水藻类物质大量繁殖,富营养化问题日益突出,已引起广泛关注<sup>[1-5]</sup>。藻类具有季节性突发生长的特点,在温度、营养盐等条件适宜时

会大量繁殖,呈胶质状覆盖在水体表面,严重阻碍水生植物光合作用的同时,造成溶解氧迅速降低,引起水生动植物死亡,并可能通过这些水生动植物残骸

基金项目: 国家科技重大专项水专项(2012ZX07308-002); 国家自然科学基金(51478292)

作者简介: 杜进炜(1990—),男,硕士研究生,研究方向为污水处理及其资源化。E-mail: jiyoudjw@126.com

通信作者: 孙力平,教授。E-mail: slpyqs@vip.sina.com

将有害物质释放回水体而造成二次污染。客观把握河流藻群的季节性变化规律特点,并相应采取合理有效的应对处理措施,是必要的。

河流藻类污染的控制目前尚处于尝试摸索阶段,其中物理法(如光控<sup>[6-7]</sup>)处理成本偏高且效率较低,而生物法(如栽种水生植物<sup>[8-9]</sup>)见效时间长且对水质要求高。混凝净化技术通常见效快且易于操控,其中无机絮凝剂(通常为铁或铝盐化合物<sup>[10]</sup>)价格相对低廉,应用较为广泛,能迅速溶解于水体并发生水解聚合等表面化学过程,通过电中和、分子架桥及网捕卷扫等作用,实现水污染控制。河流水体中藻细胞体积通常很微小(浮游藻类直径一般为 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ ),且大部分细胞表面带有电荷,这使得水华期的藻群通常表现出类似胶体的较强动力学稳定性和聚集稳定性。理论上,合理选择无机絮凝剂并控制混凝条件,能够通过有效降低目标物质表面电势及架桥等作用,改变表面活性,使藻群脱稳去除的同时,还可降低水体中共存有机污染物的含量,而且在工程上也较为简便易行。开展应用无机絮凝剂进行除藻的研究,以应对河流藻污染突发事件,具有较高的可行性。

本研究以天津市津河水体为研究对象,监测分析了近两年津河藻污染现状及季节性变化规律,并对其中典型藻种进行分析识别,在此基础上尝试采用4种常用无机混凝剂,即硫酸铝(AS)、聚合氯化铝(PAC)、三氯化铁(FC)、聚合硫酸铁(PFS),对目标藻污染水体进行混凝净化效能研究与比较,旨在为津河藻污染及其他类似水体可能的藻类应急处理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 药剂与设备

硫酸铝(AS)和三氯化铁(FC)均由天津市福晨化学试剂厂提供(分析纯),聚合氯化铝(PAC)、聚合硫酸铁(PFS)均由天津光复化工厂提供(工业级)。

水体浊度采用HACH2100W型浊度仪(美国哈希公司生产)测定;藻类Chl-a质量浓度通过丙酮研磨-比色法测定<sup>[11]</sup>;254 nm波长紫外吸光度(即 $UV_{254}$ )采用T6紫外分光光度计(北京普析通用仪器)测定;通过显微镜(Olympus IX71)镜检法对浓缩水样进行浮游植物种类鉴别<sup>[11]</sup>;含藻水体zeta电位采用英国马尔文Nano ZS型zeta电位仪测定;混凝实验采用深圳市中润水工业技术发展有限公司生产的ZR4-6型混凝搅拌机来提供动力。

## 1.2 实验过程

津河原水取样点位于天津市一中心医院桥下,该河段藻类生长旺盛,随四季更替呈现一定规律性变化,故将其作为有效反映津河水体藻污染的代表性水样采集点。

对河流藻污染特征进行监测的时间跨度为18个月(2013年3月—2014年8月),每个月中旬取样,及时测定水样中Chl-a质量浓度,并对水藻种类进行显微观察与鉴别。

混凝实验过程:室温下( $23 \sim 25^\circ\text{C}$ )分别向6个装有1L原水的烧杯中添加混凝剂并开始搅拌反应,快速搅拌速度控制在 $300 \text{ r/min}$ ,搅拌时间为1 min;慢速搅拌速度控制在 $50 \text{ r/min}$ ,搅拌时间为15 min。随后静置沉淀30 min。每个烧杯中分别取600 mL上清液来测定Chl-a、浊度和 $UV_{254}$ 等水质参数值,重复测定3次,取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 津河藻污染状况研究

#### 2.1.1 Chl-a 监测分析

河流水体中Chl-a质量浓度可直接反映水体富营养化水平及水华消长情况,因此常用来间接表征水体的藻污染状况。图1为2013年3月至2014年8月津河原水中Chl-a质量浓度的变化情况。从图1可以看出,2014年津河Chl-a质量浓度整体上比2013年明显降低,推测可能是由于2014年年初对津河进行底泥疏浚所致。根据经济合作与发展组织(OECD)对湖泊营养状态Chl-a的划分标准,Chl-a质量浓度介于 $11 \sim 78 \mu\text{g/L}$ 之间的水体为富营养型,大于 $78 \mu\text{g/L}$ 的为重富营养型<sup>[12]</sup>。从图1可知,除2013年3月和2014年的1月、2月外,其余时间水体均为富营养型,其中2013年6—10月和2014年6—8月期间监测出的Chl-a质量浓度较高,属于重富营养型。

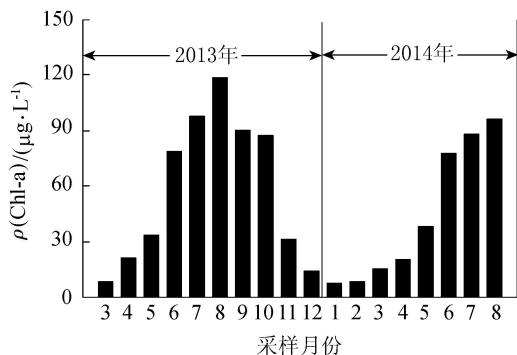


图1 2013年3月至2014年8月津河原水中Chl-a质量浓度变化情况

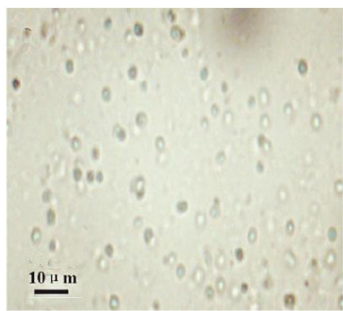
### 2.1.2 藻种观察与识别

课题组对津河水体经 18 个月连续采样检测和观察,注意到每年的 7、8 月份藻类会大量繁殖形成水华。这是由于夏季温度较高、光照充足等,相应的 Chl-a 质量浓度也表现出明显升高的特征(图 1)。因此,选择 2013 年 7—8 月和 2014 年 7—8 月等具有典型意义的几个月份所对应河流水样进行藻种观察与鉴别,结果见表 1。图 2 是 2014 年 8 月的水样中优势藻种的显微视图。从图 2 中可以看出优势藻种主要为铜绿微囊藻和水华微囊,其余为皮状席藻、细小平列藻等共生藻类。从优势藻种的组成来看,各个月份均是蓝藻类的比重最大,由此判定相应采样时期内津河水体水华现象属于重富营养蓝藻型,特别是 7—8 月份属于微囊藻型蓝藻污染。

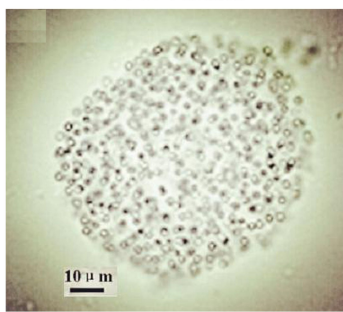
表 1 津河水体不同月份优势藻种识别结果

2013 年 7 月	2013 年 8 月	2014 年 7 月	2014 年 8 月
铜绿微囊藻	铜绿微囊藻	铜绿微囊藻	铜绿微囊藻
粉末微囊	小颤藻	粉末微囊	水华微囊
小颤藻	水华微囊	无常蓝纤维藻	皮状席藻
	粉末微囊		细小平列藻
	皮状席藻		

注:优势藻种按优势度从上往下列出。



(a) 铜绿微囊藻



(b) 水华微囊藻

图 2 2014 年 8 月水样中优势藻种放大 400 倍的显微视图

蓝藻是水中危害很大的藻种,它的大量繁殖会消耗水中溶解氧,使水体发黑发臭,不仅直接破坏水体自然生态景观,而且它的多种次生代谢产物(如藻毒素)会通过鱼虾等生物链累积,并进入人体,从而严重威胁人类健康<sup>[13-14]</sup>。

### 2.2 混凝净化效能分析与比较

根据津河藻污染监测及藻种鉴别结果,水体在近

两年 7、8 月份均表现为重富营养蓝藻型污染。针对研究结果,尝试采用无机混凝剂进行相应的藻污染控制及河流水质净化效能的研究与比较。将 Chl-a、浊度和 UV<sub>254</sub> 作为主要的水质考察参数,实验目标水样确定为 2014 年 8 月份的津河藻污染水体,其相关水质参数见表 2。

表 2 混凝实验所用原水水质参数

水质参数	单位	范围	平均值
pH		7.9 ~ 8.2	8.1 ± 0.1
水温	°C	25 ~ 31	27 ± 3
浊度	NTU	8.2 ~ 10.5	9.6 ± 0.8
叶绿素 a	μg/L	94.68 ~ 97.72	96.52 ± 1.13
UV <sub>254</sub>	cm <sup>-1</sup>	0.085 ~ 0.092	0.088 ± 0.003

#### 2.2.1 除藻过程研究

图 3 是投加 4 种混凝剂经凝聚、絮凝、沉淀后水体藻类去除情况(采用叶绿素 a 质量浓度变化表征),可观察到在实验条件下无机混凝剂投加量为 30 mg/L 时,除藻率均大于 70%,其中 PAC 明显优于其他几种混凝剂,除藻率大小顺序为 PAC(89%) > PFS(81%) > FC(76%) > AS(71%)。随着混凝剂添加剂量的减少,PAC 表现出的混凝除藻效果明显优于其他 3 种无机混凝剂。

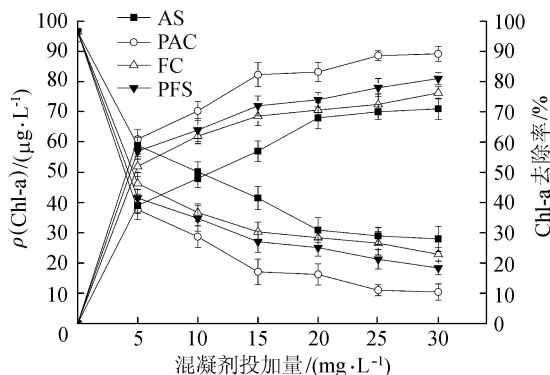


图 3 不同混凝剂藻类去除变化曲线

混凝反应机制主要包括压缩双电层、吸附电中和、吸附架桥和网捕卷扫等几类,而实际混凝净化效果的影响因素较多,包括混凝剂的物化性质、投加量、藻细胞颗粒物性质、水力搅拌工况等。实验观察到混凝过程对藻类的去除率总是低于对水体浊度的去除率,说明混凝去除水中藻类要比去除悬浮物或其他微小固体颗粒物更为困难。分析其原因,可能是藻类细胞密度较小、藻类表面电负性<sup>[15]</sup>、藻类分泌物会原位干扰凝聚反应<sup>[16]</sup>等因素所致。本研究目标含藻水体的实测 zeta 电位值为 -20 mV,这通常比水中普通颗粒物带有更高的表面电荷,因此藻污染水样具有较高的化学稳定性,在混凝去除上难度相对较大。对藻细胞进行静电中和及压缩双电层等,使其达到脱稳状态时,需要投加相比同水平去除

浊度所需的更多药剂剂量。

铝盐和铁盐等阳离子型电解质混凝剂可与带电藻细胞表面发生吸附电中和等作用,同时这些无机盐的聚合态还可有效通过化学网捕、架桥等作用聚集分散的藻细胞群,从而加大藻细胞的聚合程度和单位聚合藻的比重,最终强化除藻效果。这些通过实验分析和对比给予了验证(图3)。相比其他几种无机混凝剂,PAC除藻效果更好,因为铝系净水剂中起主要絮凝作用的组分是 $Al_13$ ,通过水解会形成大量含 $Al_13$ 的、带有高电荷的中等摩尔质量水解产物<sup>[17]</sup>。作为聚合物的PAC由于形成多核络合物,通常具有较高的电荷密度,能够有效降低或消除水中藻类的 $\xi$ 电位。

将PAC和AS的混凝沉淀效果进行对比观察,结果见图4。藻类细胞会在絮体沉淀之前吸附在絮体表面或絮体内部,随着絮体沉淀。PAC能够有效凝聚、附着水体中的微小藻细胞颗粒,形成较大絮体团状物。这些含藻的矾花较大且沉降速率适中,用肉眼观察到的絮体呈淡绿色(图4(a))。相比之下,AS絮体粒径小很多,且分布较松散(图4(b)),这使得絮凝后的藻团沉降性能较差,吸附去除藻细胞能力最小。实验结果表明,若使Chl-a的去除率达到70%,需投加AS的剂量为25 mg/L,而仅需投加10 mg/L PAC混凝剂即可达到相同的除藻率。这也反映出科学筛选无机混凝剂用于河流藻污染控制的重要性。

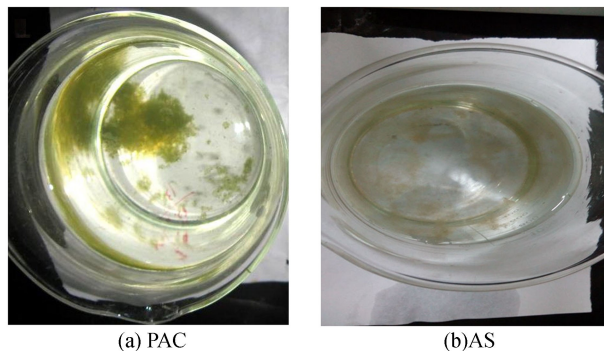


图4 PAC和AS絮体外观图(混凝剂投加量30 mg/L)

### 2.2.2 浊度及有机物去除研究

水体浊度是评价河流水质优劣的一个重要指标,它既能反映水体自身的感官质量,也能从一定程度体现出水体受污染的状况。尽管浊度并不能精确表示水样中各种悬浮物、胶体物质、浮游生物及微生物等杂质的含量,但在数值上能够反映出一定的正相关关系。总而言之,有效控制河流地表水浊度,就能够从本质上改善水质<sup>[18]</sup>。

图5是4种无机混凝剂在不同投加量条件下对津河水体浊度去除率变化曲线。随着混凝剂投加量

增加,浊度去除率相应迅速增加;而当混凝剂剂量达到20 mg/L时,浊度去除率缓慢上升甚至停止。从图5可以观察到水体浊度去除不仅和混凝剂投加量有关,而且与所添加的混凝剂类型关系密切。PAC表现出相对较高的浊度去除率,当投加量为20 mg/L时,对应的浊度去除率分别为PAC(88%)>PFS(78%)>FC(75%)>AS(71%)。AS、FC等低分子混凝剂主要通过消除胶体颗粒之间的静电斥力使之能相互凝聚,而PAC、PFS等高分子聚合混凝剂一方面利用链状大分子上的活性基团吸附胶体颗粒<sup>[19]</sup>,另一方面水解生成多核配位物,配位物具有较高的正电荷和比表面积,能通过静电引力迅速凝聚水中带负电的杂质,故聚合无机盐对津河水体的絮凝除浊效果明显优于普通无机絮凝剂。相同投加量下,PAC对水体浊度的去除效率高于PFS,原因之一是PAC水解能力更强者于PFS(20℃时,氢氧化铝溶度积常数为 $1.9 \times 10^{-33}$ ,小于 $1.1 \times 10^{-36}$ 的氢氧化铁溶度积常数),在原河水水质的弱碱性pH条件下PAC水解程度更大,PAC借助水解多核络合物絮凝净化能力更高。实验表明,若要达到75%的浊度去除率,实验条件下需要的混凝剂量及大小顺序依次为PAC(10 mg/L)<PFS(15 mg/L)<FC(20 mg/L)<AS(30 mg/L)。

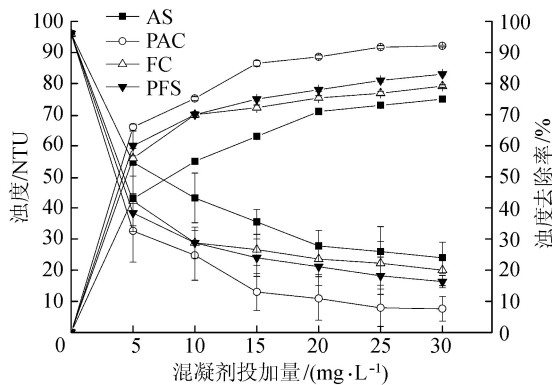


图5 不同混凝剂浊度去除率变化曲线

水样在254 nm的紫外吸光度(即 $UV_{254}$ )是溶解性有机碳(DOC)以及三卤甲烷(THMs)等前驱物的表征参数,能够从吸光度的角度反映出水体中有机物质的污染聚集程度<sup>[20]</sup>。图6是选择不同混凝剂及改变投加量对水体中 $UV_{254}$ 的去除情况。可以观察到,实验所选的无机混凝剂在能够有效控制藻污染及降低水体浊度的同时,还可以在在一定程度上减小水体的有机负荷,尽管对 $UV_{254}$ 的去除效率明显低于对Chl-a和浊度的去除率。通过混凝去除的 $UV_{254}$ 主要是一些大分子胶体物质以及极性较强的溶解有机物。随着混凝剂投加量的增大, $UV_{254}$ 的去除效率相应提高,因为增加混凝剂投加量可以增

加静电引力、吸附架桥和卷扫作用的机会。实验数据表明,若要达到35%的  $UV_{254}$  去除率,实验条件下需要的混凝剂量依次为 PAC (10 mg/L) < PFS (15 mg/L) < FC (25 mg/L) < AS (30 mg/L)。

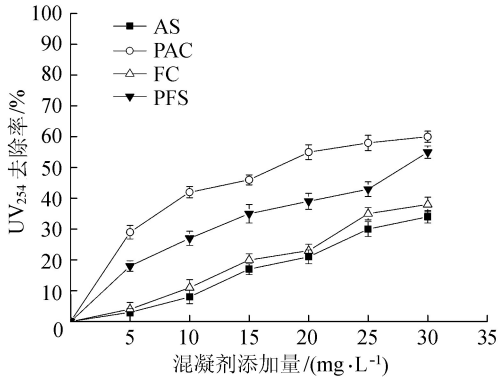


图6 不同混凝剂添加量对  $UV_{254}$  的去除率影响

### 3 结论

a. 津河水体的富营养化是由于微囊藻型蓝藻污染引起。

b. 无机高分子絮凝剂 PAC 对藻污染水体水质净化效果最为明显。

#### 参考文献:

[ 1 ] WITHERS P J A, NEAL C, JARVIE H P, et al. Agriculture and eutrophication; where do we go from here? [ J ]. Sustainability, 2014, 6(9) : 5853-5875.

[ 2 ] SMITH V H, TILMAN G D, NEKOLA J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems [ J ]. Environmental Pollution, 1999, 100(1/3) : 179-196.

[ 3 ] 单保庆, 菅宇翔, 唐文忠, 等. 北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价 [ J ]. 环境科学, 2012, 33(2) : 352-358. ( SHAN Baoqing, JIAN Yuxiang, TANG Wenzhong, et al. Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in downstream river network areas of North Canal River Watershed [ J ]. Environmental Science, 2012, 33(2) : 352-358. ( in Chinese ) )

[ 4 ] WHITTON B A. Changing approaches to monitoring during the period of the “use of algae for monitoring rivers” symposia [ J ]. Hydrobiologia, 2012, 695(1) : 7-16.

[ 5 ] ROTT E, SCHNEIDER S C. A comparison of ecological optima of soft-bodied benthic algae in Norwegian and Austrian rivers and consequences for river monitoring in Europe [ J ]. Science of the Total Environment, 2014, 475 : 180-186.

[ 6 ] 陈雪初, 孔海南, 李春杰. 富营养化湖库水源地原位控藻技术研究进展 [ J ]. 水资源保护, 2008, 24(2) : 10-13. ( CHEN Xuechu, KONG Hainan, LI Chunjie. In situ algae control in water source areas of eutrophicated lakes and

reservoirs [ J ]. Water Resources Protection, 2008, 24(2) : 10-13. ( in Chinese ) )

[ 7 ] MARSHALL J S, HUANG Yan. Simulation of light-limited algae growth in homogeneous turbulence [ J ]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(12) : 3865-3875.

[ 8 ] ZUO S P, WAN K, MA S M, et al. Combined allelopathic potential of aquatic plants species to control Algae [ J ]. Allelopathy Journal, 2014, 34(2) : 315-324.

[ 9 ] 鲁志营, 高云霓, 刘碧云, 等. 水生植物化感抑藻作用机制研究进展 [ J ]. 环境科学与技术, 2013, 36(7) : 64-69. ( LU Zhiying, GAO Yunni, LIU Biyun, et al. Advances in research on mechanism of inhibitory effects on phytoplankton mediated by aquatic plant allelochemicals [ J ]. Environmental Science and Technology, 2013, 36(7) : 64-69. ( in Chinese ) )

[ 10 ] 王东升, 韦朝海. 无机混凝剂的研究及发展趋势 [ J ]. 中国给水排水, 1997, 13(5) : 20-21. ( WANG Dongsheng, WEI Chaohai. Research and development trends of inorganic coagulant [ J ]. China Water and Wastewater, 1997, 13(5) : 20-21. ( in Chinese ) )

[ 11 ] 金相灿. 湖泊富营养化调查规范 [ M ]. 2 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990 : 239-245.

[ 12 ] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化 [ M ]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990 : 58-59.

[ 13 ] SEVILLA E, LUNA B M, BES M T, et al. An active photosynthetic electron transfer chain required for mcyd transcription and microcystin synthesis in microcystis aeruginosa PCC7806 [ J ]. Ecotoxicology, 2012, 21(3) : 811-819.

[ 14 ] 吴幸强, 龚艳, 王智, 等. 微囊藻毒素在滇池鱼体内的积累水平及分布特征 [ J ]. 水生生物学报, 2010, 34(2) : 388-393. ( WU Xingqiang, GONG Yan, WANG Zhi, et al. Residue levels and distribution features of microcystins in fish samples from lake Dianchi [ J ]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34(2) : 388-393. ( in Chinese ) )

[ 15 ] 蒋绍阶, 蒋晖, 向平, 等. 强化混凝去除尖刺杆藻 [ J ]. 环境工程学报, 2013, 7(9) : 3312-3318. ( JIANG Shaojie, JIANG Hui, XIANG Ping, et al. Removal of synedra acus by enhanced coagulation [ J ]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(9) : 3312-3318. ( in Chinese ) )

[ 16 ] 施国键, 乔俊莲, 王国强, 等. 胞外分泌物和天然有机物对混凝的影响 [ J ]. 环境科学, 2010, 31(3) : 673-677. ( SHI Guojian, QIAO Junlian, WANG Guoqiang, et al. Effect of extracellular organic matter and natural organic matter on coagulation [ J ]. Environmental Science, 2010, 31(3) : 673-677. ( in Chinese ) )

[ 17 ] YAN M Q, WANG D S, YU J F. et al. Enhanced coagulation with polyaluminum chlorides: Role of pH/Alkalinity and speciation [ J ]. Chemosphere, 2008, 71(9) : 1665-1673.

( 下转第 153 页 )

[11] WOSSINK A, SWINTON S M. Jointness in production and farmers' willingness to supply non-marketed ecosystem services [J]. *Ecological Economics*, 2007, 64 (2): 297-304.

[12] Van HECKEN G, Bastiaensen J, VÁSQUEZ W F. The viability of local payments for watershed services: empirical evidence from Matiguas, Nicaragua [J]. *Ecological Economics*, 2012, 74: 169-176.

[13] SCHOMERS S, MATZDORF B. Payments for ecosystem services: a review and comparison of developing and industrialized countries [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 6: 16-30.

[14] KWAYU E J, SALLU S M, PAAVOLA J. Farmer

(上接第 126 页)

[18] 岳舜琳. 水的浊度问题[J]. *中国给水排水*, 1995, 11 (4): 33-35. (YUE Shunlin. Water turbidity [J]. *China Water and Wastewater*, 1995, 11 (4): 33-35. (in Chinese))

[19] 汤利华, 许建华. 浊度和色度的混凝去除机理与混凝剂的选择[J]. *净水技术*, 1996, 56(2): 2-4, 24. (TANG Lihua, XU Jianhua. The choose of coagulant and coagulation mechanism of turbidity as well as color [J].

(上接第 130 页)

[5] CAO Xuliang, CORRIVEAU J. Migration of bisphenol A from polycarbonate baby and water bottles into water under severe conditions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(15): 6378-6381.

[6] SCHMIDA P, KOHLER M, MEIERHOFER R, et al. Does the reuse of PET bottles during solar water disinfection pose a health risk due to the migration of plasticisers and other chemicals into the water? [J]. *Water Research*, 2008, 42(20): 5054-5060.

[7] CERETTI E, ZANI C, ZERBINI I, et al. Comparative assessment of genotoxicity of mineral water packed in polyethylene terephthalate (PET) and glass bottles [J]. *Water Research*, 2010, 44(5): 1462-1470.

(上接第 146 页)

[7] 马秀娟, 沈建忠, 孙金辉, 等. 天津于桥水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2356-2364. (MA Xiujian, SHEN Jianzhong, SUN Jinghui, et al. Macrozoobenthos community structure and water quality evaluation of Yuqiao Reservoir in Tianjin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31 (9): 2356-2364. (in Chinese))

[8] 戴友芝, 唐受印, 张建波. 洞庭湖底栖动物种类分布及水

participation in the equitable payments for watershed services in Morogoro, Tanzania [J]. *Ecosystem Services*, 2014, 7: 1-9.

[15] 齐珊娜, 侯光辉, 张磊. 扩展津冀间水生态补偿模式初探: 以新环境保护法出台为背景[J]. *城市*, 2015(2): 62-65. (QI Shanna, HOU Guanghui, ZHANG Lei. Research on the spread of PES style between Tianjin and Hebei: based on the publishment of new environmental law [J]. *City*, 2015(2): 62-65. (in Chinese))

[16] 张翼飞. 城市内河生态系统服务的意愿价值评估[D]. 上海: 复旦大学, 2008.

(收稿日期: 2015-10-29 编辑: 徐娟)

*Water Purification Technology*, 1996, 56(2): 2-4, 24. (in Chinese))

[20] 蒋绍阶, 刘宗源. UV<sub>254</sub> 作为水处理中有机物控制指标的意义[J]. *重庆建筑大学学报*, 2002, 24(2): 61-65. (JIANG Shaojie, LIU Zongyuan. The meaning of UV<sub>254</sub> as an organic matter monitoring parameter in water supply & wastewater treatment [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2002, 24(2): 61-65. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-07-05 编辑: 彭桃英)

[8] ANDRA S S, MAKRIS K C, SHINE J P. Frequency of use controls chemical leaching from drinking-water containers subject to disinfection [J]. *Water Research*, 2011, 45 (20): 6677-6687.

[9] VANDENBERG L N, EHRlich S, BELCHER S M, et al. Low dose effects of bisphenol A: an integrated review of in vitro, laboratory animal, and epidemiology studies [J]. *Endocrine Disruptors*, 2013, 1(1) e25078: 1-20.

[10] SCHÖPEL M, JOCKERS K F G, DÜPPE P M, et al. Bisphenol A binds to ras proteins and competes with guanine nucleotide exchange: implications for GTPase-selective antagonists [J]. *Journal of Medicinal Chemistry*, 2013, 56(23): 9664-9672.

(收稿日期: 2015-07-21 编辑: 徐娟)

质生物学评价[J]. *生态学报*, 2000, 20(2): 277-282. (DAI Youzhi, TANG Shouyin, ZHANG Jianbo. The distribution of zoobenthos species and bio-assessment of water quality in Dongting Lake [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(2): 277-282. (in Chinese))

[9] 天津市水利局, 天津市环保局. 海河流域天津市水功能区划报告[R]. 天津: 天津市水利局, 2008.

(收稿日期: 2015-07-30 编辑: 彭桃英)