

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM₁₀可替代源成分谱的建立方法及其应用 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe²⁺和 Fe³⁺对厌氧氨氧化污泥活性的影响 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N₂O 产生量的影响 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 产生的影响 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究

蒋新跃¹, 栾清², 丛海兵^{3*}, 徐思涛³, 刘玉娇³, 朱学源³

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225127; 2. 扬州自来水有限责任公司, 扬州 225009; 3. 扬州大学环境科学与工程学院, 扬州 225127)

摘要: 为了研究预压力强化混凝沉淀蓝藻水处理工艺中, 外加压力是否会引起藻细胞破裂, 导致细胞内藻毒素泄漏到水体中, 影响供水安全, 实验对比研究了预压力和预氧化含藻水后藻毒素浓度的变化, 以及预压力混凝沉淀和预氧化混凝沉淀除藻工艺中藻毒素浓度的变化和藻类去除效果. 结果表明, 含藻水经 0.4~0.8 MPa 压力加压后, 水中藻毒素浓度没有增加, 而次氯酸钠预氧化后水中藻毒素浓度大幅度增加. 在 0.5~0.8 MPa 压力范围内, 加压后混凝沉淀取得了较好的除藻除浊效果, 蓝藻去除率达到 90%~93.5%, 浊度 1.23~1.95 NTU, 而次氯酸钠预氧化混凝沉淀后, 蓝藻去除率 56.2%~78.8%, 浊度 8.01~10.7 NTU, 说明压力强化混凝沉淀除藻工艺是安全有效的.

关键词: 蓝藻; 藻毒素; 预压力; 预氧化; 混凝沉淀

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4171-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.018

Microcystin Safety Study During *Cyanobacteria* Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process

JIANG Xin-yue¹, LUAN Qing², CONG Hai-bing³, XU Si-tao³, LIU Yu-jiao³, ZHU Xue-yuan³

(1. College of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Yangzhou Drinking Water Limited Company, Yangzhou 225009, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Pressure enhanced coagulation and sedimentation technique is an effective way for blue algae treatment. It is not clear whether *Cyanobacteria* balloon rupture will cause *Cyanobacteria* cells rupture, resulting in high intracellular concentrations of microcystin LR leak into the water, affecting drinking water safety. Therefore, in this study experimental comparative study of pressure and pre-oxidation of water containing *Cyanobacteria* was carried out to examine the microcystin LR concentration changes and *Cyanobacteria* removal efficiency. The results showed that microcystin concentration increase was not significant by the pre-treatment with *Cyanobacteria* water pressure, while the pre-oxidation process caused a significant increase in the concentration of microcystin. After 0.5-0.8 MPa pressure coagulation and sedimentation, removal of *Cyanobacteria* basically was over 90%, up to 93.5%, while the removal rate by pre-oxidation was low and unstable. Effluent turbidity is also significantly better in the pre-pressure method than the pre-oxidation. The results indicated that pressure enhanced coagulation is a safe and reliable method for *Cyanobacteria* removal.

Key words: *Cyanobacteria*; microcystin; pre-pressure; pre-oxidation; coagulation and sedimentation

随着经济的发展, 人类的活动使含有大量氮、磷等营养物质的污水进入湖泊、水库, 加速了水体的富营养化, 由此而引起的蓝藻水华发生的频率与严重程度都呈迅猛的增长趋势, 发生的地点遍布全球各地^[1~3]. 淡水中引起水华的藻类主要是蓝藻门的微囊藻等^[4]. 我国饮用水水源约有 25% 是湖泊水或水库水^[5,6]. 蓝藻水处理一直是供水领域面临的难题^[7,8], 蓝藻颗粒易上浮, 不易沉淀^[9], 蓝藻颗粒带有电荷, 且胞外由胶质包衣包裹, 不易混凝, 因而混凝沉淀效果差^[10]. 目前水处理中普遍采用预氧化沉淀工艺和预氧化气浮工艺^[11], 但预氧化过程会引起蓝藻细胞破裂, 细胞内的藻毒素随藻液泄漏进入水体^[12~14]. 微囊藻毒素 (microcystins, MC) 结构稳定, 能抵抗极端 pH 值和 300℃ 高温, 具有明显

的肝毒性^[15,16]. 流行病学调查显示^[17], 饮水中的微囊藻毒素 (MC-LR) 与肝癌的发病率高度相关. 同时蓝藻毒素具有致染色体断裂、致基因诱变以及较高的急性毒性, 对人体的潜在危害极大. 2012 年开始实施的《含藻水给水处理设计规范》中明确指出: 含藻水给水处理应避免破坏藻类细胞壁, 控制藻毒素的升高, 保障饮用水的安全^[18].

蓝藻易上浮, 难以混凝沉淀, 是因为蓝藻细胞内存在的气囊为藻类提供浮力, 以便使其能悬浮于水体表层, 得到充足的光照而生长繁殖. 蓝藻气囊能

收稿日期: 2014-04-08; 修订日期: 2014-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178408); 江苏省水利动力工程重点实验室项目 (K13020)

作者简介: 蒋新跃 (1977~), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为饮用水安全和水生态, E-mail: xinyuej@126.com

* 通讯联系人, E-mail: chb9903@126.com

承受 0.4 ~ 0.7 MPa 的外压,当外部压力超过这一压力时气囊就会破裂^[19]. 利用蓝藻的这一特性,采用加压方法使蓝藻气囊破裂^[20,21],蓝藻颗粒快速下沉^[22],再进行混凝沉淀,将能提高蓝藻混凝沉淀去除效率^[23]. 但加压过程是否会引起蓝藻细胞壁破裂,造成细胞内高浓度的藻毒素外泄到水中,影响供水安全,还需要进一步研究. 本研究通过预压力混凝沉淀和预氧化混凝沉淀处理工艺中,水中藻毒素浓度的变化,以及两种工艺对藻类和浊度物质的去除效果,探讨了压力强化混凝沉淀工艺在处理蓝藻水时的安全性.

1 材料与方 法

1.1 水 样

实验水样取自太湖梅梁湖,取样时间为 2013 年 8 月、9 月,水样取回后注入有机玻璃容器中,置于室内阴凉通风处,给予光照和缓慢搅拌,一周内用完. 原水中优势藻种为铜绿微囊藻,占 95% 以上.

1.2 材 料

混凝剂为硫酸铝 [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$] 分析纯,配置成 $5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 使用液. 预氧化剂为 NaClO 分析纯,配置成有效氯 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 使用液. 预氧化剂为 NaClO 分析纯,配置成有效氯 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 使用液.

1.3 实 验 装 置

含藻水加压装置如图 1 所示,包括有机玻璃压力罐、加压泵、循环水箱. 自制有机玻璃压力罐容积 2 L,耐压 1.0 MPa,加压水泵为 GY2A035F 型不锈钢滑片泵,功率 80 W.

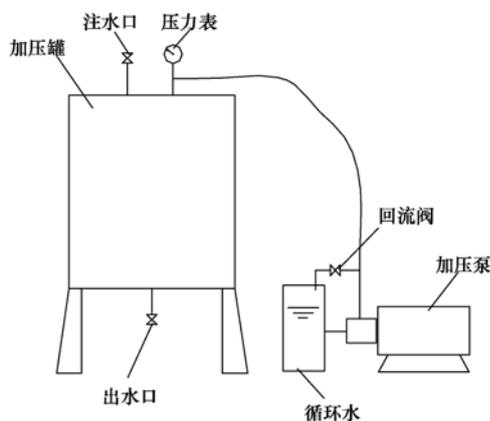


图 1 含藻水加压装置示意

Fig. 1 Algae containing water pressuring device

含藻水混凝沉淀静态实验装置为深圳中润水工业公司生产的 ZR4-6 型六联搅拌机.

1.4 实 验 方 法

1.4.1 水 样 加 压 方 式

将原水注满加压罐,关闭进出水阀,开启加压泵,缓缓关闭回流阀,使加压罐内压力上升到指定压力,维持 1 min,开启回流阀,使加压罐中压力下降到 0.

根据增压和卸压速度的不同,加压分 4 种形式,分别是快压快卸、缓压缓卸、缓压快卸和快压缓卸. 每次加压过程,是将外加压力从 0 增加到 0.7 MPa; 每次卸压过程,是将外加压力从 0.7 MPa 降到 0. 快压时,瞬间关闭回流阀,压力快速上升,升压过程不超过 3 s; 快卸时,瞬间打开回流阀,压力快速下降到 0,卸压过程不超过 2 s; 缓压时,缓缓关闭回流阀,压力缓慢上升,升压过程耗时不少于 1 min; 缓卸时,缓缓打开回流阀,压力缓慢下降到 0,卸压过程不少于 1 min.

1.4.2 不同加压速度对藻毒素泄漏的影响

取适量原水混匀,测得叶绿素 a 浓度 $64.50 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,藻毒素 (MC-LR) 浓度为 $1.22 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 8.02$. 取 4 份水分别用快压快卸、缓压缓卸、缓压快卸和快压缓卸方式加压,加压压力为 0.7 MPa. 再取 4 份水加入次氯酸钠,有效氯浓度分别为 1.0、2.0、3.0、4.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下搅拌 30 min. 用孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤各种预处理水,测定水中藻毒素 (MC-LR) 浓度. 用原水藻和加压藻制作超薄切片,用透射电镜对超薄切片进行拍照.

1.4.3 不同加压压力对藻毒素泄漏的影响

取适量原水混匀,测得叶绿素 a 浓度 $42.44 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,浊度 41.50 NTU,藻毒素 (MC-LR) 浓度为 $0.32 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 8.09$. 取 5 份水分别采用 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 MPa 的压力加压,采用缓压缓卸方式. 再取 2 份水加入次氯酸钠,有效氯浓度分别为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在 $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下搅拌 30 min. 取少量水用孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤,测定水中藻毒素 (MC-LR) 浓度. 其余水用于下述实验.

1.4.4 加压混凝沉淀对蓝藻去除效果

将原水、0.4 ~ 0.8 MPa 加压水、 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 次氯酸钠预氧化水进行混凝沉淀实验,取各种水样 2 L 加入两个 1 L 烧杯中,分别加入 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 混凝剂, $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 快速搅拌 1 min, $100 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌 10 min, $60 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 搅拌 10 min,静沉 30 min. 虹吸出烧杯上层 800 mL 水混匀,测定叶绿素 a 和浊度,用孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤后测定藻

毒素(MC-LR)。

1.4.5 测试方法

藻类叶绿素 a 采用分光光度法测定^[24], 丙酮提取时间 24 h。浊度采用哈希公司生产的 2100q01 型浊度仪测定。藻毒素(MC-LR)委托扬州大学测试中心测定, 采用固相萃取富集浓缩后用液相色谱-串联质谱法测定, 液质联用仪为美国 Agilent 公司 Agilent 1200-6460 QQQ 型。藻细胞超薄切片拍照透射电镜为荷兰 Philips 公司生产的 CM100 型。

2 结果与讨论

2.1 不同加压速度对藻毒素泄漏的影响

原水、不同速度加压水、预氧化水中藻毒素(MC-LR, 下同)浓度如图 2 所示。从中可见, 叶绿素 a 浓度为 $64.50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的含藻水, 采用 $1\sim 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 次氯酸钠预氧化时, 水中藻毒素大幅度增加到 $2.21\sim 4.60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 且在预氧化剂浓度 $2\sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时藻毒素浓度最高, 说明次氯酸钠预氧化导致了藻细胞内的藻毒素泄漏到水中。次氯酸钠的强烈氧化作用使藻细胞壁破裂, 导致藻细胞内含有大量藻毒素的藻液外泄进入水体。在 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 低浓度预氧化剂条件下, 预氧化能力弱, 藻毒素泄漏量少; 随着预氧化剂量增加到 $2\sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 藻类被充分氧化, 水中藻毒素的浓度急剧增加到 $4.60 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 比投加 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时浓度大幅增加 177%, 远远超过生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)中 MC-LR 的含量限值 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; 当预氧化剂浓度增加到 $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 水体中藻毒素浓度却从 $4.53 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $2.98 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 主要是因为随着水中有效氯的增加, 过量的 NaClO 将水体中的藻毒素分子氧化分解^[25], 造成藻毒素浓度反而降低了。

采用快压快卸、缓压缓卸、缓压快卸和快压缓卸

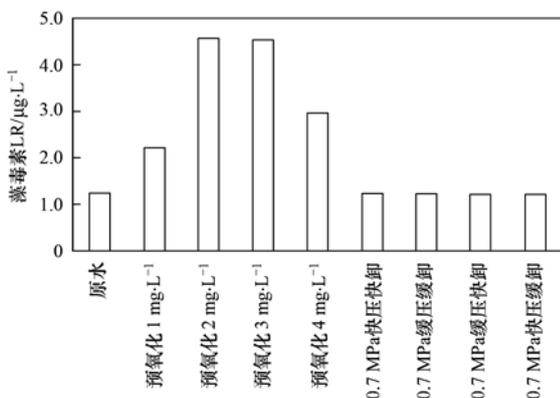


图 2 不同加压方式对藻毒素泄漏的影响

Fig. 2 Effects of different compression methods on microcystin leak

4 种加卸压方式, 加卸压方法如 1.4.1 所述, 加压时从 0 增加到 0.7 MPa, 卸压时从 0.7 MPa 降低到 0。采用 4 种加卸压方法处理后, 水中藻毒素浓度如图 2。从中可见, 加压卸压后水中藻毒素浓度在 $1.22\sim 1.24 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 与原水持平。这说明各种加压方式均没有造成藻细胞的破裂, 没有藻毒素泄漏到水中。

2.2 不同加压压力对藻毒素泄漏的影响

原水、0.4~0.8 MPa 加压水、预氧化水及其混凝沉淀水中藻毒素浓度如图 3 所示。从中可见, 原水经 $30\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 混凝剂混凝沉淀后, 水中藻毒素浓度基本没有变化, 说明混凝沉淀对水中溶解性藻毒素没有去除效果。在投加 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度的有效氯预氧化后, 水体中藻毒素浓度都有大幅度的增加, 最大增幅达到 244%。 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 预氧化水经 $30\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 混凝剂混凝沉淀后, 藻毒素浓度没有明显变化; 而 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 预氧化水经 $30\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 混凝剂混凝沉淀后, 藻毒素浓度继续增加。这是因为在 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 预氧化剂浓度时, 预氧化剂与水中耗氧物质充分反应, 预氧化剂很快消耗殆尽, 藻细胞的氧化及藻液泄漏在预氧化阶段已基本完成, 故藻毒素浓度在混凝沉淀过程中不再增加; 而在 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 预氧化剂浓度时, 预氧化剂过量, 过量的预氧化剂对蓝藻细胞的氧化作用一直持续到混凝沉淀阶段, 藻液不断泄漏, 因而混凝沉淀后水中藻毒素浓度继续增加。

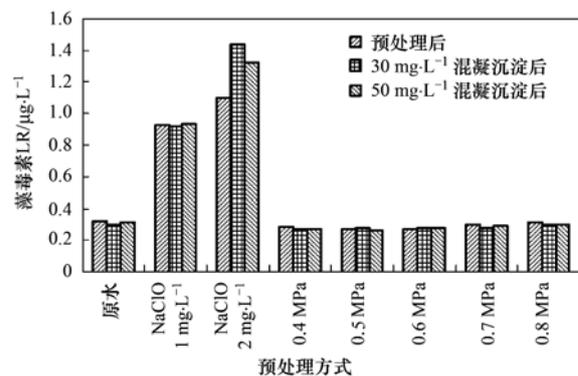


图 3 不同处理方式后水中藻毒素浓度

Fig. 3 Microcystin concentration after different treatment methods

在 0.4~0.8 MPa 压力范围内, 加压后水样中藻毒素的浓度范围 $0.27\sim 0.31 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 与原水藻毒素浓度 $0.32 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 相比略有减少, 这表明在此压力范围内均不会导致藻细胞的破裂, 不会引起藻毒素的泄漏。

2.3 不同处理方式对藻类和浊度物质的去除

叶绿素 a 浓度为 $42.44 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 浊度 41.50 NTU

的含藻水在不同方式下混凝沉淀后叶绿素 a 浓度和浊度的比较如图 4 和图 5 所示。

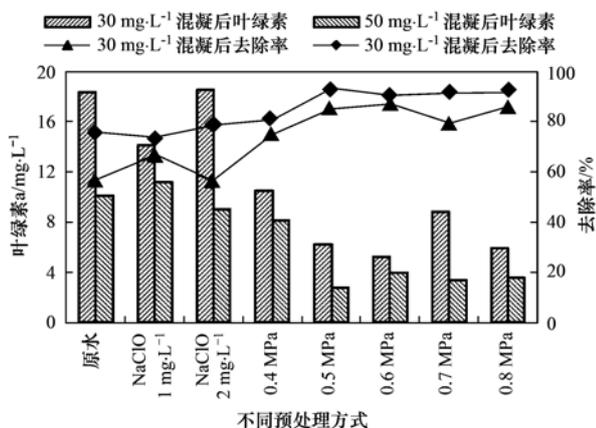


图 4 不同处理方式混凝沉淀后叶绿素

Fig. 4 Chlorophyll-a concentration after different coagulation and sedimentation methods

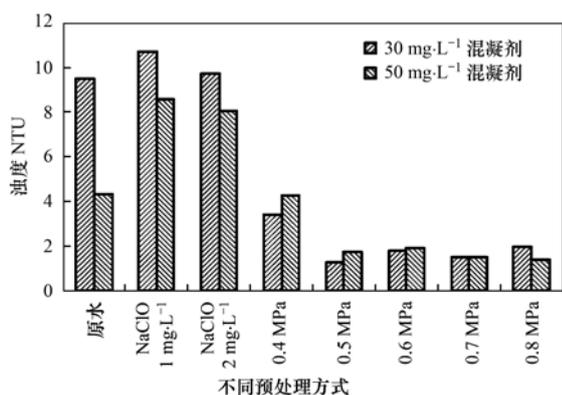


图 5 不同处理方式混凝沉淀后浊度

Fig. 5 Water turbidity after different coagulation and sedimentation methods

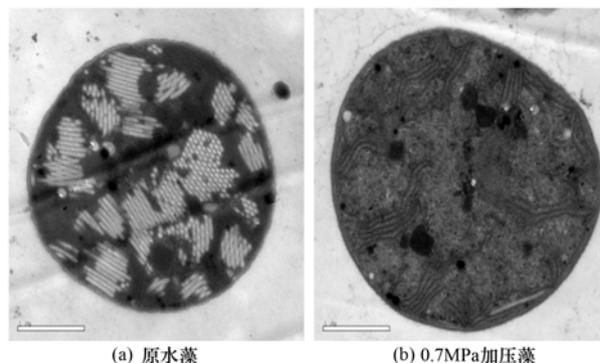
从中可见,原水、预氧化水和加压水混凝沉淀后对蓝藻的去除率差异较大。在投加 30 ~ 50 mg·L⁻¹的混凝剂时,原水藻类叶绿素 a 去除率 56.9% ~ 76.3%,浊度 9.50 ~ 4.30NTU; 1 ~ 2 mg·L⁻¹次氯酸钠预氧化后叶绿素 a 去除率 56.2% ~ 78.8%,比原水叶绿素 a 去除率小幅增加,浊度 8.01 ~ 10.7NTU; 在 0.4 ~ 0.8 MPa 加压水混凝沉淀后藻类和浊度去除效果大幅度提高,其中 0.4 MPa 加压后效果稍差,0.5 ~ 0.8 MPa 加压后效果相当,叶绿素 a 去除率 85.4% ~ 93.5%,浊度 1.23 ~ 1.95NTU。

投加预氧化剂可以氧化藻细胞外胞衣,有利于絮凝剂与藻类结合,因而上述原水在预氧化后处理藻类去除效果有所提高,但提高幅度不大。相应地,预氧化对浊度去除效果不佳,主要是因为次氯酸钠

预氧化能力过强,导致藻细胞中有机物泄漏到水中,吸附包裹在水中无机颗粒表面,干扰了颗粒絮凝。

加压后藻类去除率的提高,主要是因为加压后藻细胞内气囊破裂,藻类失去浮力而下沉,如图 6 所示。加压前,藻细胞内存在大量白色的气囊,经 0.7 MPa 加压后,气囊消失,气囊气体释放到细胞液中,并透过细胞壁扩散到水中。当加压压力较低时(0.4 MPa),气囊破裂不充分,因而去除效果稍差。

加压后混凝沉淀对藻类和浊度物质去除率的增加,能大幅度减轻对过滤的压力,延长过滤周期,减少反冲洗水量,提高出水水质。



(a) 原水藻

(b) 0.7MPa加压藻

图 6 藻类细胞加压前后结构变化

Fig. 6 Structure change before and after the algal cells being pressurized

3 结论

(1) 含蓝藻水使用预加压方式处理,在不同加压速度和 0.4 ~ 0.8 MPa 压力范围内均不会引起藻细胞的破裂,不会导致胞内藻毒素泄漏到水中,而使用 1 ~ 2 mg·L⁻¹次氯酸钠(有效氯)预氧化后,水中藻毒素浓度大幅度增加,大量藻毒素泄漏到水中。因而,预加压混凝沉淀处理蓝藻水是安全的。

(2) 含蓝藻水经 0.5 ~ 0.8 MPa 加压后进行混凝沉淀,蓝藻去除率基本在 90% 以上,最高达 93.5%,浊度 1.23 ~ 1.95NTU。处理效果比预氧化混凝沉淀大幅度提高。

参考文献:

- [1] Jurczak T, Tarczyska M, Izydorczyk K, et al. Elimination of microcystins by water treatment processes: Examples from Sulejow Reservoir, Poland [J]. Water Research, 2005, 39 (11): 2394-2406.
- [2] Barco M, Flores C, Rivera J, et al. Determination of microcystin variants and related peptides present in a water bloom of *Planktothrix (Oscillatoria) rubescens* in a Spanish drinking water reservoir by LC/ESI-MS[J]. Toxicon, 2004, 44(8): 881-886.
- [3] Van Apeldoorn M E, Van Egmond H P, Speijers G J A, et al.

- Toxins of cyanobacteria [J]. *Molecular Nutrition and Food Research*, 2007, **51**(1): 7-60.
- [4] 左金龙, 崔福义, 刘智晓. 饮用水中蓝藻毒素污染研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7**(3): 8-13.
- [5] 连民, 俞顺章, 陈传炜, 等. 淡水湖泊周围水厂源水及出厂水微囊藻毒素的季节性调查[J]. *中国公共卫生*, 2001, **17**(9): 797-798.
- [6] 王伟琴, 金永堂, 吴斌, 等. 水源水中微囊藻毒素的遗传毒性与健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2011, **30**(4): 468-476.
- [7] 黎雷, 高乃云, 殷娣娣, 等. 自来水厂对藻类、藻毒素的控制研究[A]. 见: 中国水网 2008 水业高级技术论坛论文集[C]. 北京, 2008. 259-267.
- [8] 崔福义, 马华. 水源水中藻的危害与饮用水除藻技术[J]. *给水排水*, 2011, **37**(6): 1, 103.
- [9] 丛海兵, 黄廷林, 周真明. 于桥水库铜绿微囊藻上浮运动规律及其控制[J]. *给水排水*, 2009, **35**(11): 140-145.
- [10] 赵晓蕾, 张跃军, 李潇潇, 等. 预氯化下 PAC/PDM 对冬季太湖水的除藻脱浊性能[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(19): 77-80.
- [11] 梁恒, 李圭白, 李星, 等. 不同水处理工艺流程对除藻效果的影响[J]. *中国给水排水*, 2005, **21**(3): 5-7.
- [12] 赵建伟, 黄廷林, 何文杰, 等. 水源水中藻类及藻毒素控制试验研究[J]. *给水排水*, 2006, **32**(8): 24-28.
- [13] 苏雅玲, 邓一荣. 富营养化湖泊中微囊藻毒素及其控制去除技术[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(6): 62-66.
- [14] 董敏殷. 化学预氧化对于藻类藻毒素释放和降解的特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [15] Majstereka I, Sicinskaa P, Tarczynskac M, *et al.* Toxicity of microcystin from cyanobacteria growing in a source of drinking water. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2004, **139**(1-3): 175-179.
- [16] 李天凤, 曹裕, 唐松林, 等. 微囊藻毒素-LR 污染饮水的健康风险及其机制[J]. *环境监控与预警*, 2013, **5**(5): 15-18.
- [17] Codd G A, Morrison L F, Metcalf J S. Cyanobacterial toxins: Risk management for health protection [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, **203**(3): 264-272.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. CJJ32-2011 含藻水给水处理设计规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [19] 胡鸿钧. 水华蓝藻生物学[M]. 北京: 科学出版社, 2011. 228-233.
- [20] 丛海兵, 高郑娟, 孙秀秀. 压力强化混凝沉淀除藻水处理系统和水处理方法[P]. 中国专利, ZL201210076485. 3, 2013-08-01.
- [21] 丛海兵, 张颖, 丁凯耘, 等. 一种管道连续流液体加压装置[P]. 中国专利, ZL201220503555. 4, 2013-04-17.
- [22] 丛海兵, 高郑娟, 孙秀秀. 压力作用后太湖蓝藻沉淀性能及其去除研究[J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(1): 43-47.
- [23] 丛海兵, 陈雯婧, 徐亚军, 等. 压力强化混凝沉淀除藻工艺研究[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(7): 1862-1867.
- [24] 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. 670-671.
- [25] 冯景伟, 孙亚兵, 郑正, 等. 微囊藻毒素降解的高级氧化技术[J]. *工业水处理*, 2006, **26**(4): 7-11.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行