

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 ..... 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 ( 1 )

中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 ..... 林海涛,李琦路,张干,李军 ( 10 )

广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 ..... 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 ( 16 )

南京地区大气PM<sub>2.5</sub>潜在污染源硫碳同位素组成特征 ..... 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 ( 22 )

青奥会前后南京PM<sub>2.5</sub>重金属污染水平与健康风险评估 ..... 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 ( 28 )

南昌市秋季大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素富集特征及来源分析 ..... 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 ( 35 )

南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 ..... 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 ( 41 )

边界层低空急流导致北京PM<sub>2.5</sub>迅速下降及其形成机制的个例分析 ..... 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 ( 51 )

电厂燃煤烟尘PM<sub>2.5</sub>中化学组分特征 ..... 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 ( 60 )

2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 ( 66 )

APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 ( 74 )

晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 ..... 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 ( 82 )

北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 ..... 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 ( 88 )

长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 ..... 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 ( 94 )

长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 ..... 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 ( 102 )

查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 ..... 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 ( 112 )

不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 ..... 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 ( 123 )

大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 ..... 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 ( 132 )

西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 ..... 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 ( 141 )

合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 ..... 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 ( 148 )

辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 ..... 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 ( 156 )

水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 ..... 黄廷林,刘飞,史建超 ( 166 )

低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 ..... 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 ( 173 )

北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 ..... 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 ( 180 )

紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 ..... 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 ( 187 )

二氧化钛光催化氧化阿散酸 ..... 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 ( 193 )

紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 ..... 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 ( 198 )

氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 ..... 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 ( 208 )

纳米TiO<sub>2</sub>吸附HgCl<sub>2</sub>水溶液中Hg(II) ..... 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 ( 220 )

好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 ..... 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 ( 228 )

3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 ..... 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 ( 240 )

Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 ..... 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 ( 247 )

长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 ..... 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 ( 253 )

直链烷基苯指示城市化过程初步研究 ..... 徐特,曾辉,倪宏刚 ( 262 )

龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 ..... 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 ( 270 )

水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 ..... 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 ( 280 )

中水浇灌对土壤重金属污染的影响 ..... 周益奇,刘云霞,傅慧敏 ( 288 )

生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 ..... 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 ( 293 )

3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 ..... 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 ( 301 )

丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 ..... 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 ( 309 )

珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 ..... 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 ( 317 )

三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 ..... 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 ( 325 )

起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 ..... 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 ( 335 )

序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 ..... 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 ( 342 )

铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 ..... 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 ( 350 )

运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 ..... 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 ( 359 )

通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 ..... 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 ( 366 )

高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 ..... 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 ( 377 )

应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 ..... 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 ( 384 )

乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 ..... 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 ( 391 )

废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 ..... 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 ( 397 )

《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

# 紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨

王文东<sup>1,2</sup>, 张轲<sup>1</sup>, 许洪斌<sup>1</sup>, 刘国旗<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 嘉兴 314006)

**摘要:** 针对藻类在常规水处理过程中难以被有效去除的现状, 采用紫外辐射对藻类混凝过程进行强化处理. 结果表明, 随着紫外照射时间的增加, 混凝后对藻细胞和浊度的去除均呈先上升后下降的趋势, 并在照射 50 min 时达到最大值. PAC(聚合氯化铝)投加量为 5 mg·L<sup>-1</sup>时, 照射样的除藻率和去浊率达到最大, 分别比空白样高 20.1% 和 18% 左右. pH 值在 6~9 范围内, 紫外辐射强化混凝效果的变化较小. 溶液 pH=8、紫外照射 50 min, 混凝后的除藻率和去浊率分别达到了 93.5% 和 90.6%. 此时, 藻细胞 Zeta 电位最大, 同时释放出藻黏液, 有利于混凝沉降. 而当紫外照射超过 60 min 后, 出现细胞膜破裂, 胞内有机物渗出, 使得溶液中的有机物浓度急剧上升, Zeta 电位开始下降, 不利于后续混凝的进行.

**关键词:** 紫外线; 辐射; 混凝; 去除; 绿藻

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0187-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.025

## Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism

WANG Wen-dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Ke<sup>1</sup>, XU Hong-bin<sup>1</sup>, LIU Guo-qi<sup>1</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Department of Environmental Technology and Ecology, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China)

**Abstract:** Considering algae were difficult to be effectively removed in conventional water treatment process, UV radiation was used to enhance the coagulation of algae in this study. The results showed that with the increase of radiation time, the removal rates of both algae and turbidity experienced a decrease after an increase, and reached their maximum values at 50 min. When the dosage of PAC was 5 mg·L<sup>-1</sup>, the removal rates of algae and turbidity of the radiated sample were 20.1% and 18% higher than the blank sample, respectively. When pH ranged from 6 to 9, the coagulation efficiency varied little. At pH 8 and with a radiation time of 50 min, the removal rates of algae and turbidity reached 93.5% and 90.6%, respectively. Meanwhile, the Zeta potential reached the maximum, and the algae generated extracellular organic matter, which favored the subsequent coagulation. After radiated for 60 min, the algal cells was destroyed, leading to a release of intracellular organic matter into the solution. Accordingly, the Zeta potential decreased, which had a negative effect on the subsequent coagulation process.

**Key words:** UV; radiation; coagulation; removal; chlorella

目前, 我国的城市湖泊、水库几乎都处于富营养或者重富营养化状态, 而藻类是水体富营养化过程的重要参与者, 不仅对水质、水处理过程和水处理效果影响较大<sup>[1-4]</sup>, 还会堵塞滤池、穿透滤床、堵塞或腐蚀管道、增加氯化消毒过程中的副产物、释放藻毒素威胁人类健康. 蓝藻、绿藻<sup>[5,6]</sup> 是富营养化水体中常见的藻种, 我国湖泊水华的主要优势藻是蓝藻, 但在一些以再生水为补水的小型景观水体中, 则是绿藻占优势<sup>[5,7]</sup>. 当前水厂对发生富营养化的水体所采取的最主要、最有效、最经济的方法是混凝除藻<sup>[5]</sup>, 但是藻细胞自身性质会干扰混凝效果导致高藻水混凝困难, 不易形成良好的絮体, 沉淀效果差、藻类去除效率低<sup>[8]</sup>.

为提高除藻效率, 国内外学者开展了针对常规混凝工艺的强化研究, 如预氧化<sup>[9]</sup>、强化混凝<sup>[10-14]</sup>、气浮<sup>[15-21]</sup>除藻、高梯度磁场磁滤法以及电场杀藻法<sup>[22]</sup>等. 长期以来, 国内水处理一直以氯

气预氧化为主, 预氯化对藻类的灭活以及对提高藻类的去除虽有较好的效果<sup>[9,23]</sup>, 但近年来, 氯化、消毒产生的消毒副产物所引发的健康问题引起了国内外饮用水处理界的高度重视<sup>[24]</sup>. 紫外线技术由于不会产生副产物<sup>[25]</sup>, 近年来在饮用水处理方面的应用越来越广泛, 并且目前的应用还仅限于后续工艺的消毒阶段, 将其用于预处理在国内外均很少报道<sup>[26]</sup>, 为此, 本研究以实验室配制的高藻水为实验原水, 以绿藻中常见的小球藻为主要处理对象, 把紫外线对藻的辐射作为预处理手段, 分析紫外辐射对藻类混凝去除的强化, 探讨紫外强化混凝除藻的机制, 以期对藻的强化混凝研究提供理论依据.

收稿日期: 2015-07-28; 修订日期: 2015-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(21007050); 西安市科技局项目(HM1105); 浙江省水质科学与技术重点实验室开放基金项目

作者简介: 王文东(1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: wdwang\_xauat@hotmail.com

## 1 材料与方法

### 1.1 实验仪器

日本岛津 TOC-VCPH 型总有机碳分析仪,美国 Quanta 600FEG 型场发射扫描电镜,普析 TU-1901 型双光束紫外可见分光光度计,英国马尔文 Nano-ZS90 型 Zeta 电位分析仪,MY3000-6G 智能型混凝实验搅拌仪,意大利 HANNA HI93703-11 型浊度仪,美国 Thermo 310P-01 离子酸度计,MGC-100P 型光照培养箱。

### 1.2 实验药剂与材料

ELECTRIC BALLAST BOS-1T5 型紫外灯,功率 16 W、主波长 254 nm、为 UV-C 波输出,灯管长 27 cm、有效长度 22 cm,外有防水石英套管、套管直径 3 cm;紫外光强测量仪;聚合氯化铝 PAC;0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜;小球藻,购自中科院武汉水生生物研究所,采用 BG11 培养基进行培养,无菌条件下接种置于玻璃锥形瓶中,放在生化培养箱中培养,培养条件:温度  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ,光照强度 2 000 lx,光暗比(L:D) = 12 h:12 h。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 紫外辐射实验

本紫外辐射实验在封闭的不锈钢圆柱桶中进行,圆桶顶部可以打开且中心处垂直悬挂一个紫外灯管,底部设一个旋转底座,保证样品均匀地接受紫外线的照射,紫外辐射实验装置如图 1 所示。实验时,将装有样品的烧杯置于旋转底座上,然后将灯管插入烧杯中,开启紫外灯使样品接受设定时间的紫外线照射。

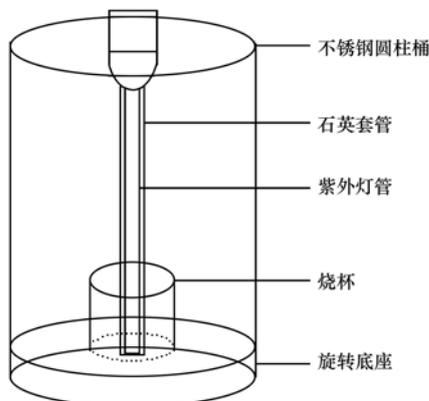


图 1 紫外辐射实验装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of UV radiation experimental device

#### 1.3.2 紫外光强的测定

打开紫外辐射装置的紫外灯,预热 20 min 后进行紫外光强的测定。把紫外光强测量仪的探头置于

紫外辐射装置的烧杯中并朝向紫外灯,在烧杯壁与紫外灯之间的中点处测量光强,取 3 次测量结果的平均值。

#### 1.3.3 溶液中藻密度、浊度的测定

小球藻的藻细胞密度和悬浮液吸光度具有良好的线性关系,因此本研究以小球藻悬浮液在 680 nm 下的吸光度<sup>[5]</sup> ( $D_{680}$ ) 作为藻细胞密度的度量标准<sup>[3]</sup>,吸光度用普析 TU-1901 型双光束紫外可见分光光度计测定,取 3 次测量结果的平均值。

溶液的浊度与溶液中悬浮物含量密切相关,混凝后溶液浊度越低则溶液悬浮物含量越少,表明混凝效果越好。反之,混凝效果越差。浊度测定采用意大利 HANNA HI93703 便携式浊度测定仪,取 3 次测量结果的平均值。

#### 1.3.4 藻细胞表面 Zeta 电位的测定

在不同的紫外线照射时间内,取 2 mL 藻液用 Zeta 电位分析仪测定藻细胞表面的 Zeta 电位<sup>[5]</sup>,比较照射前后藻细胞表面 Zeta 电位的变化。

#### 1.3.5 DOC 的测定

将原藻液和经过紫外线照射的藻液分别经 0.45  $\mu\text{m}$  的滤膜过滤,然后用总碳分析仪直接测定藻液中的 DOC 浓度。

#### 1.3.6 藻细胞扫描电镜

将待观察的样品用 2.5% 的戊二醛固定,然后用浓度为 30%、50%、70%、90%、95%、100% 酒精梯度脱水,每级 5~10 min,经醋酸异戊酯置换酒精 2 次,每次 10 min,最后用  $\text{CO}_2$  临界点干燥,真空喷金,在 Quanta 600FEG 型场发射扫描电镜下观察紫外线照射对藻细胞结构的影响。

#### 1.3.7 混凝效果的测定

向 250 mL 烧杯中加入 250 mL 藻悬液,经紫外线照射后投加一定量的混凝剂,以  $200 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  快速搅拌 1 min,  $50 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  慢速搅拌 15 min,静沉 30 min,于液面下 2 cm 处取样。

## 2 结果与分析

紫外线对藻破坏或灭活的程度与紫外线辐射剂量直接相关,紫外线剂量越大,对藻的破坏程度越大,灭活的可能性越高,紫外线辐射剂量的计算公式为:

$$D = It$$

式中, $D$  为紫外线辐射剂量,  $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  $I$  为紫外线强度,  $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ;  $t$  为辐射时间,  $\text{s}$ <sup>[25]</sup>。本实验的紫外线强度不可调,为  $0.23 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,那么,藻的破

坏、灭活程度就与紫外线照射时间密切相关<sup>[27]</sup>。

2.1 紫外辐射时间对藻密度、浊度去除率的影响

紫外线照射时间是一个非常重要的参数,一方面决定紫外线强化混凝的处理效果,另一方面也是紫外线工艺经济性的关键因素. 实验中考察了在 PAC 投加量为 4 mg·L<sup>-1</sup>、溶液 pH = 7 的条件下,紫外线照射时间对光照期小球藻的除藻率、去浊率的影响,以确定紫外线最佳照射时间. 由于藻溶液中最主要的物质就是藻类,因此笔者以除藻率及去浊率作为藻溶液混凝效果的指标.

从图 2 可以看出,随着紫外线照射时间的增加,混凝后藻溶液的浊度逐渐降低,在照射 50 min 时降到最低值,但继续增加照射时间,浊度有增加的趋势;混凝后溶液去浊率的变化与浊度的变化趋势相反,即随着照射时间的增加,去浊率呈先上升后下降的趋势,在照射 50 min 时达到最大值.

从图 3 可以看出,随着紫外线照射时间的增加,混凝后除藻率呈先上升后下降的趋势,并在照射 50 min 时达到最大值,藻密度则呈先下降后上升的趋势. 比较图 2、3 可知,紫外线强化混凝除藻和去浊的效果是一致的<sup>[7]</sup>,即混凝后溶液浊度越低其藻密度也越低,这是因为实验所用样品是用 BG11 培养的小球藻悬浮液,混凝后溶液浊度越低,那么溶液悬浮物就越少则藻类也越少,所以溶液藻密度也越低.

由本实验可知,紫外线照射时间过长或过短都不利于混凝后藻密度、浊度的去除,根据本实验紫外线照射时间对混凝后藻液除藻率、去浊率的影响,笔者以 50min 作为紫外线最佳照射时间.

2.2 紫外辐射强化混凝除藻、去浊效果

在光照期用紫外线对处于对数生长期的小球藻照射 50 min,然后向藻液中加入不同浓度的 PAC 进行混凝实验,混凝后分别测试上清液的藻密度、浊

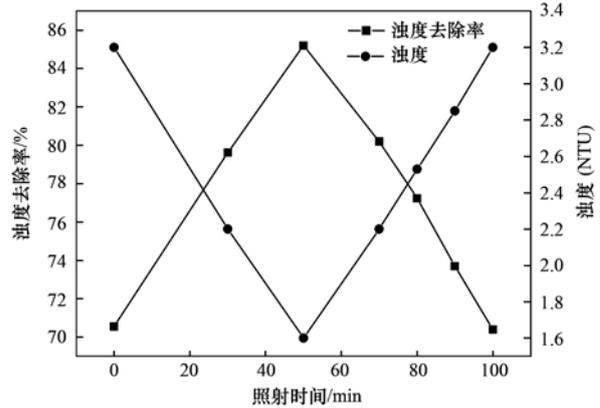


图 2 混凝后溶液浊度、浊度去除率随紫外照射时间的变化曲线  
Fig. 2 Relationship between UV radiation time and turbidity, turbidity removal rate

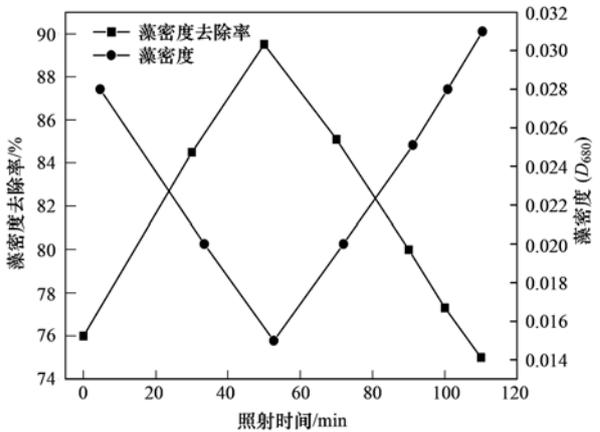


图 3 混凝后溶液藻密度、藻密度去除率随紫外照射时间的变化曲线

Fig. 3 Relationship between UV radiation time and algae, algae removal rate

度,并设空白样. 空白样的测试样品中,不进行紫外线照射,直接加入不同浓度的 PAC 进行混凝实验. 紫外照射强化混凝效果如图 4、5 所示.

从图 4、5 可以看出,混凝剂投加量相同时,照

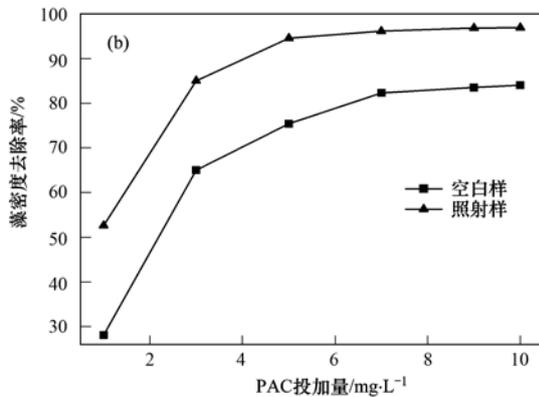
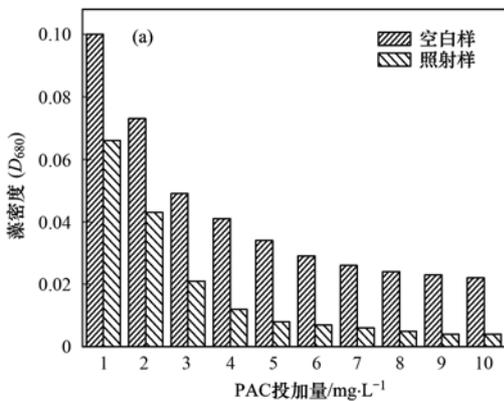


图 4 藻液照射前后混凝除藻效果

Fig. 4 Algae removal with or without radiation

射样的藻密度和浊度明显低于空白样,且藻密度和浊度去除率要高于空白样,也就是说照射样的除藻和去浊效果都明显高于空白样. 当 PAC 投加量为  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,照射样的除藻率达到了 94.5%,较未照

射时提高 20.1%,而且要达到相同的除藻率,照射样所投加的混凝剂量要小于空白样,除藻率都为 85% 时,照射样的混凝剂投加量还不到空白样的 1/3.

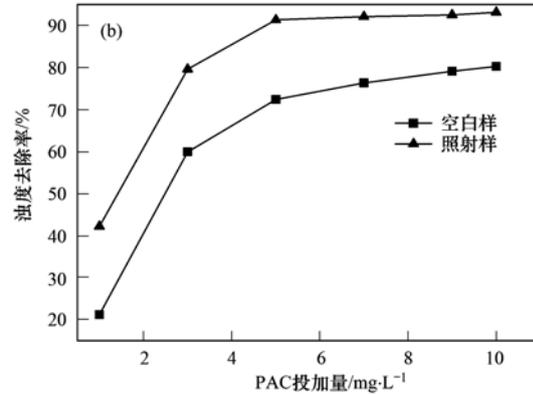
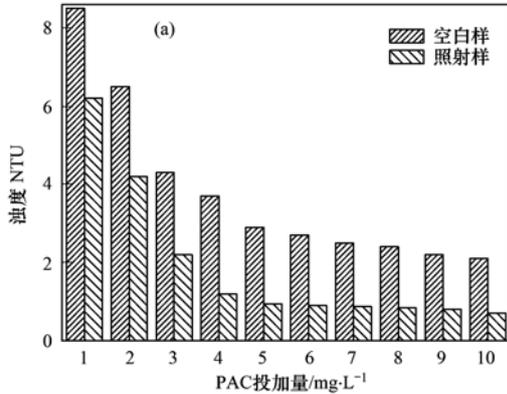


图 5 藻液照射前后混凝去浊效果

Fig. 5 Turbidity removal with or without radiation

当 PAC 投加量为  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,照射样的去浊率达到了 91.3%,较未照射时提高 18%,同样,要达到相同的去浊率,照射样所投加的混凝剂量要小于未照射样. 照射样的 PAC 投加量为  $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,浊度去除率就已经达到了 79.6%,而空白样的 PAC 投加量为  $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,浊度去除率才达到 80.2%. 这说明紫外辐射对藻液混凝有一定的强化作用.

### 2.3 pH 值对紫外辐射强化混凝的影响

pH 值影响溶液中胶体颗粒的 Zeta 电位,控制水体的化学反应动力学,同时 pH 值决定混凝剂的水解速率和混凝剂水解产物的类型、浓度和电荷等. 因此,pH 值的变化直接影响紫外线强化混凝过程中藻类和浊度的去除效果. 实验时向待照射的藻溶液滴加盐酸和氢氧化钠来调节藻溶液的 pH 值分别为 5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0、11.0,而后控制紫外线照射和 PAC 投加量分别在 50 min 和  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,进行混凝实验. 笔者通过分析不同 pH 值条件下,溶液混凝后藻密度、浊度的变化来考察 pH 值对紫外辐射强化混凝的影响.

结果表明,当 pH 值在 6~9 范围内时,除藻率在 85%~95% 之间,去除效果比较好(图 6). pH 为 5 时,除藻率效果不佳,仅为 57%; pH 值大于 9 时,除藻率开始下降. 这表明 pH 过高或过低均对除藻不利. 浊度的去除效果随 pH 值的变化与藻密度的变化基本一致. 当溶液的 pH 值为 8 时,溶液去浊率最高. 发生水华的水体一般呈微碱性,这说明实际应用时紫外辐射强化混凝无需对原水的 pH 进行调

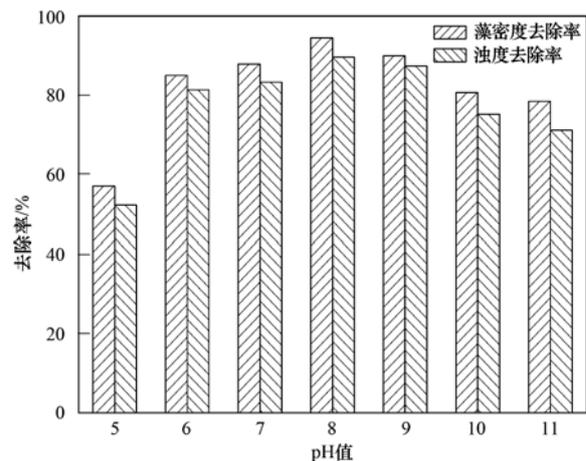


图 6 紫外辐射强化混凝的去浊率、除藻率随 pH 值的变化

Fig. 6 Relationship between pH and turbidity removal rate, algae removal rate

整就能达到较满意的效果.

### 2.4 紫外辐射强化混凝的机制分析

取对数生长期的微小藻,配制一定浓度的原藻液( $D_{680} = 0.15$ ,此浓度接近发生水华时水体中的藻细胞密度<sup>[5]</sup>),用紫外线照射,照射时间为 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100、110 min,在对应的照射时间内,取出一定量藻液过  $0.45 \mu\text{m}$  的滤膜准备样品,测定其 DOC 浓度;另取一部分藻液,用 Zeta 电位分析仪测定其 Zeta 电位.

从图 7 中 DOC 浓度的变化曲线可知,随着紫外线照射时间的增加,溶液中 DOC 浓度不断上升,照射初期,上升幅度不大,照射 60 min 时上升幅度突然增大,而后又上升缓慢. 分析认为紫外线照射初

期,紫外线会胁迫藻细胞分泌 EOM<sup>[5]</sup> (胞外分泌物),导致溶液中 DOC 浓度上升,当照射时间为 50 min 时,溶液中 DOC 浓度为  $3.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,这些低浓度的有机物与混凝剂结合使得絮凝过程中的网捕卷扫作用增加,有利于后续混凝. 当照射时间超过 60 min 时,细胞壁在紫外线作用下破裂,大分子有机物释放到胞外,溶液中 DOC 浓度急剧上升,这些高浓度的有机物与混凝剂容易形成络合物或水合离子<sup>[28]</sup>,干扰后续混凝. 继续增加照射时间,由于细胞完全破裂,大分子有机物基本已释放到胞外,DOC 浓度上升幅度减小.

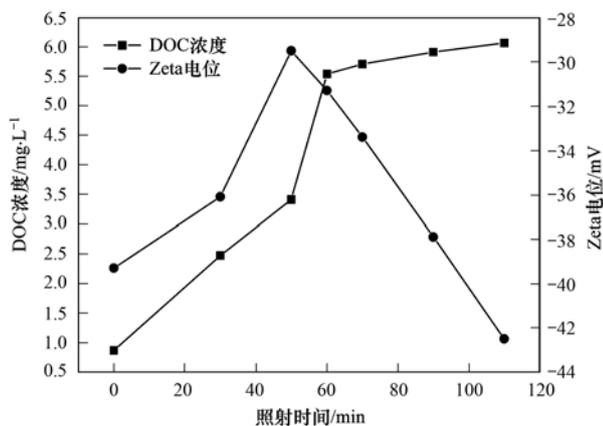


图7 藻溶液中的 DOC、Zeta 电位随紫外照射时间的变化曲线

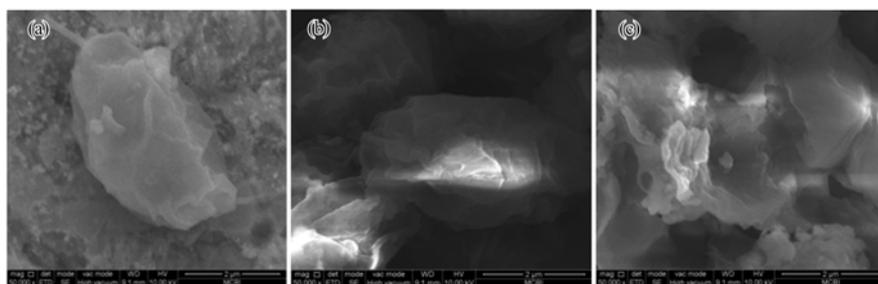
Fig. 7 Relationship between UV radiation time and DOC,Zeta potential

从图 7 中 Zeta 电位的变化曲线可知,随着紫外线照射时间的增加,Zeta 电位呈先上升后下降的趋势,并在 50 min 达到最大值,分析认为照射初期,紫外线虽然会胁迫呈阴离子特性的 EOM 释放,但它对有机物的氧化作用大于 EOM 的释放,导致 Zeta 电位升高<sup>[5]</sup>,藻细胞的稳定性下降,细胞之间更容易聚集沉淀,有利于后续混凝;当照射时间超过 60 min 时,藻细胞破裂,大量的胞内有机物释放出来,胞内呈阴离子特性的有机物的释放抵消甚至大于紫外线引起的细胞膜表面电位的增加,使得藻细胞表面 Zeta 电位不升高反而降低,藻细胞的稳定性上升,不利于细胞之间的聚集沉淀,干扰后续的混凝.

为分析紫外照射时间对藻细胞结构的影响,以及观察长时间紫外线照射下藻细胞壁是否破裂,笔者通过扫描电镜深入观察了不同照射时间藻细胞结构形态的变化,结果如图 8 所示.

从图 8 可以看出,未经处理的小球藻细胞结构完好无损;紫外照射 50 min 后,藻细胞结构也基本保持完整,细胞表面无破坏,同时 EOM 释放出现藻黏液,使细胞有成团聚集的倾向,有利于混凝沉降;紫外照射 60 min 后,藻细胞膜破裂,细胞结构发生很大程度的变化,胞内有机物渗出,细胞氧化严重.

由上述实验可知,紫外线照射 50 min 时,藻液的 Zeta 电位处在最大值,有助于吸附电中和作用的



(a) 空白藻细胞; (b) 紫外照射 50 min; (c) 紫外照射 60 min

图 8 不同紫外照射时间下藻细胞扫描电镜图

Fig. 8 SEM micrographs of algal cell surface morphology with different radiation time

进行,EOM 浓度为  $3.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  同样对藻的去除起到助凝作用<sup>[28]</sup>. 扫描电镜则验证了紫外线照射 50 min 藻细胞结构保持完整,国外也有研究指出保持细胞结构的完整,没有胞内物质的释放<sup>[29]</sup>有利于后续混凝. 因此笔者认为紫外辐射是在不破坏藻细胞结构的前提下通过改变藻细胞 Zeta 电位、促使藻细胞分泌低浓度的且有助凝作用的 EOM 从而对藻的混凝去除起到了强化的作用.

### 3 结论

(1) 混凝后溶液的除藻率和去浊率均与紫外线照射时间密切相关. 照射时间过长或过短均对除藻和去浊不利,采用紫外线照射 50 min 时混凝效果最好.

(2) 紫外线照射对混凝有一定的强化作用. 紫外线照射 50 min 后,采用  $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  PAC 对藻液进

行混凝去除,除藻率可达 94.5%,较未照射时提高 20.1%。类似的,去浊率较未照射时也提高了 18%。

(3)溶液 pH 环境的变化对紫外辐射后高藻水混凝过程的影响并不显著。偏碱性环境有利于混凝过程的进行。在 pH = 8、紫外线照射 50 min、PAC 投加量为  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,除藻率和去浊率分别达到了 93.5% 和 90.6%。

(4)紫外辐射对高藻水混凝过程的促进作用主要与光照后藻细胞表面电位的上升有关。而当照射时间超过 60 min 后,藻细胞壁破裂,藻液中溶解性有机物急剧上升,由于细胞质的大量释放,使得 Zeta 电位下降,不利于后续混凝的进行。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Plummer J D, Edzward J K. Effects of chlorine and ozone on algal cell properties and removal of algae by coagulation [ J ]. *Journal of water supply: Research and technology*, 2002, **51** ( 6 ): 307-318.
- [ 2 ] Sukenik A, Telcht B, Wachs A W, *et al.* Effect of oxidants on microalgal flocculation [ J ]. *Water Research*, 1987, **21** ( 5 ): 533-539.
- [ 3 ] 陈杰,王波,张光明,等. 超声强化混凝去除蓝藻实验研究 [ J ]. *环境工程学报*, 2007, **1**(3): 66-69.
- [ 4 ] 金相灿. 湖泊富营养化控制和管理技术 [ M ]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [ 5 ] 张龙,乔俊莲,雷青. 高锰酸钾预氧化强化混凝去除绿藻的研究 [ J ]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 73-78.
- [ 6 ] 王淑芳. 水体富营养化及其防治 [ J ]. *环境科学与管理*, 2005, **30**(6): 63-65.
- [ 7 ] 周律,邢丽贞,陈华东,等. 生物制剂 H 对水华优势藻的生长抑制作用 [ J ]. *中国给水排水*, 2007, **23**(17): 37-40.
- [ 8 ] 刘伟,马军. 高铁酸盐预氧化对藻类细胞的破坏作用及其助凝机理 [ J ]. *环境科学学报*, 2002, **22**(1): 24-28.
- [ 9 ] 赵志伟,崔福义,任刚,等. 预氧化对滦河天津段高藻期藻类的控制效果 [ J ]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2006, **22**(4): 617-621.
- [ 10 ] 张锦,陈忠林,范洁,等. 高锰酸钾及其复合药剂强化混凝除藻除臭对比 [ J ]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, **36**(6): 736-738.
- [ 11 ] 石颖,马军,蔡伟民,等. 湖泊、水库水的强化混凝除藻的试验研究 [ J ]. *环境科学学报*, 2001, **21**(2): 251-253.
- [ 12 ] 吴思聪,延克军,郭恒超,等. 交变电磁场强化混凝对河水中藻类去除的研究 [ J ]. *水处理技术*, 2014, **40**(11): 28-31.
- [ 13 ] 宋源,王帅,于水利,等. 微气泡水力空化强化混凝除藻的试验研究 [ J ]. *中国给水排水*, 2015, **31**(3): 116-119.
- [ 14 ] 蒋新跃,栾清,丛海兵,等. 压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 [ J ]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4171-4175.
- [ 15 ] 王玉恒,王启山,吴玉宝,等. 分段回流式逆流气浮工艺处理高藻水的研究 [ J ]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3071-3076.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] Kiuru H J. Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest ( third ) one ( DAF in turbulent flow conditions ) [ J ]. *Water Science and Technology*, 2001, **43** ( 8 ): 1-7.
- [ 18 ] Scriven R J, Ouki S K, Daggart A S, *et al.* The impact of physico-chemical water treatment on a novel flotation/filtration process [ J ]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(10-11): 211-215.
- [ 19 ] Officer J, Ostrowski J A, Woollard P J. The design and operation of conventional and novel flotation systems on a number of impounded water types [ J ]. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2001, **1**(1): 63-69.
- [ 20 ] Eades A, Brignall W J. Counter-current dissolved air flotation/ filtration [ J ]. *Water Science and Technology*, 1995, **31**(3-4): 173-178.
- [ 21 ] 贾伟建,张克峰,王永磊,等. 混凝-气浮处理低浊高藻水库水的试验研究 [ J ]. *山东建筑大学学报*, 2015, **30**(1): 41-46.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] 刘卫华,季民,杨洁,等. 高藻水预氧化除藻效能与水质安全性分析 [ J ]. *中国公共卫生*, 2005, **21**(11): 1323-1325.
- [ 24 ] 刘海龙,杨栋,赵智勇,等. 高藻原水预臭氧强化混凝除藻特性研究 [ J ]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 1914-1919.
- [ 25 ] 张胜华,靳慧征,马熹晨. 超声预处理强化紫外线消毒效果的研究 [ J ]. *中国给水排水*, 2009, **25**(15): 96-99.
- [ 26 ] 刘茜,张金松,尤作亮. 紫外线给水预处理技术的试验研究 [ J ]. *给水排水*, 2004, **30**(9): 12-16.
- [ 27 ] 杨波,王社平,张林军,等. 紫外线消毒技术在再生水处理中的应用 [ J ]. *中国给水排水*, 2010, **26**(19): 81-83.
- [ 28 ] 乔俊莲,董磊,徐冉,等. 胞外分泌物对铜绿微囊藻混凝去除的影响 [ J ]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, **39**(6): 879-883.
- [ 29 ] Drikas M, Chow C W K, House J, *et al.* Using coagulation, flocculation, and settling to remove toxic cyanobacteria [ J ]. *Journal American Water Works Association*, 2001, **93**(2): 100-111.

## CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe .....	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> ( 1 )
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure .....	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> ( 10 )
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou .....	..... HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> ( 16 )
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Region .....	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 22 )
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games .....	..... ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> ( 28 )
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Autumn in Nanchang City .....	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 35 )
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring .....	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> ( 41 )
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism .....	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> ( 51 )
Characteristics of Chemical Components in PM <sub>2.5</sub> from the Coal Dust of Power Plants .....	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> ( 60 )
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> ( 66 )
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> ( 74 )
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng .....	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> ( 82 )
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> ( 88 )
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> ( 94 )
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China .....	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 102 )
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn .....	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 112 )
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China .....	..... SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> ( 123 )
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River .....	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> ( 132 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff .....	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> ( 141 )
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban .....	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> ( 148 )
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River .....	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> ( 156 )
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir .....	..... HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao ( 166 )
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....	..... YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> ( 173 )
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing .....	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 180 )
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism .....	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> ( 187 )
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO <sub>2</sub> .....	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> ( 193 )
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV .....	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> ( 198 )
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution .....	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 208 )
Experimental Research of Hg( II ) Removal from Aqueous Solutions of HgCl <sub>2</sub> with Nano-TiO <sub>2</sub> .....	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 220 )
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters .....	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> ( 228 )
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System .....	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> ( 240 )
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate .....	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> ( 247 )
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta .....	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> ( 253 )
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization .....	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang ( 262 )
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City .....	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> ( 270 )
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration .....	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 280 )
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min ( 288 )
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil .....	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings .....	..... PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> ( 301 )
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils .....	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> ( 309 )
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China .....	..... LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> ( 317 )
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors .....	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> ( 325 )
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland .....	..... JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> ( 335 )
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill .....	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 342 )
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction .....	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> ( 350 )
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy .....	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> ( 359 )
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying .....	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 366 )
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> ( 377 )
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens .....	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 384 )
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants .....	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> ( 391 )
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact .....	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> ( 397 )

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行