

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放	何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气 CH ₄ 和 CO 在线观测方法研究	汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子	朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究	王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征	段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究	王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征	丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究	许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素	蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化	陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟	马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究	侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析	张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究	陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO ₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究	张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响	冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究	陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价	宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析	曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究	谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响	庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究	吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用	徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究	廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究	陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究	贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法	宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数	王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响	董峰,张捍民,杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响	刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究	曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究	陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估	陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究	杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建	朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究	别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)
纳米 TiO ₂ 对短裸甲藻的毒性效应	李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险	李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析	王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险	刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价	刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律	项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究	吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复	付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征	江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响	黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究	张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地表微生物群落结构	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究	封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析	张健,关连珠,颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响	赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)
《环境科学》征稿简则(7) 《环境科学》征订启事(19) 信息(47,70,202,304)	

给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究

陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超*

(清华大学环境学院,北京 100084)

摘要: 使用4种常见消毒剂对从实际管网中分离出来的7株耐氯性细菌进行消毒实验。结果表明,这7株细菌均具有较高的耐氯性,其中1株耐氯性最高的类龟分支杆菌自由氯99.9%灭活的CT值为 $120 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$,另外2株血红鞘氨醇单胞菌和甲基杆菌99.9%灭活的CT值分别为 $7 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 。比较4种消毒剂的消毒效果发现,二氧化氯和单过硫酸氢钾的消毒效果较好,能够在30 min内使分支杆菌的灭活率达到5个数量级。自由氯由于衰减较快,消毒效果不佳。一氯胺能够维持一定的消毒剂浓度,但由于其氧化性较弱,因此需要提高浓度,才能满足消毒要求。能在1 h内灭活3个数量级以上分支杆菌的消毒剂投加量为:3.0 mg/L一氯胺、1.0 mg/L二氧化氯(以 Cl_2 计)和1.0 mg/L单过硫酸氢钾(以 Cl_2 计)。考虑到我国水厂消毒的实际情况,建议采用间歇性提高一氯胺浓度或改换二氧化氯消毒的方法,提高对耐氯性细菌的灭活效果。

关键词: 给水系统;类龟分支杆菌;血红鞘氨醇单胞菌;甲基杆菌;消毒;灭活特性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0104-06

Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System

CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, WANG Qian, ZHANG Xiao-jian, CHEN Chao

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Inactivation experiments of seven strains of chlorine-resistant bacteria, isolated from a drinking water distribution system, were conducted with four kinds of disinfectants. All the bacteria showed high resistance to chlorine, especially for *Mycobacterium mucogenicum*. The CT value of 99.9% inactivation for *M. mucogenicum*, *Sphingomonas sanguinis* and *Methylobacterium* were $120 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$, $7 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ and $4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$, respectively. The results of inactivation experiments showed that chlorine dioxide and potassium monopersulfate could inactivate 5 lg of *M. mucogenicum* within 30 min, which showed significantly higher efficiency than free chlorine and monochloramine. Free chlorine was less effective because the disinfectant decayed very quickly. Chloramination needed higher concentration to meet the disinfection requirements. The verified dosage of disinfectants, which could effectively inactivate 99.9% of the highly chlorine-resistant *M. mucogenicum* within 1 h, were 3.0 mg/L monochloramine, 1.0 mg/L chlorine dioxide (as Cl_2), and 1.0 mg/L potassium monopersulfate (as Cl_2). It was suggested that the water treatment plants increase the concentration of monochloramine or apply chlorine dioxide intermittently to control the disinfectant-resistant bacteria.

Key words: drinking water system; *Mycobacterium mucogenicum*; *Sphingomonas sanguinis*; *Methylobacterium*; disinfection; inactivation characteristics

研究发现某些细菌对氯消毒剂的耐受能力比较强,能够在含有较高余氯浓度的自来水厂、管网等供水系统中存活。早在1947年人们就在氯浓度足够大的水中观察到有细菌生存,此后对次氯酸钠具有抗性的大肠埃希菌株、肠球菌株,对氯胺有抗性的克雷伯杆菌株、铜绿假单胞菌株、伤寒杆菌株等陆续被报道^[1,2]。这些对氯具有较高耐受性的细菌被称作“耐氯菌”(disinfectant-resistant bacteria,也翻译为“抗氯菌”)^[3]。近年来很多国家的供水系统中检出分支杆菌,引起了人们广泛的关注^[4~6]。通常研究认为分支杆菌具有条件致病性,可导致免疫功能低下的人感染疾病^[7,8]。也有研究报道称,某些分支杆菌如鸟分支杆菌,能够诱发有免疫缺陷的人感染肺病和支气管扩张症^[9]。埃默里大学医学中心的研究指出^[10],

越来越多的临床检测样本中分离出了类龟分支杆菌复合物,其中涉及最多的病例是生物导管相关的感染。

目前氯消毒仍是我国最普遍使用的消毒方法^[11,12],因此“耐氯菌”的存在对饮用水微生物安全构成了威胁。一方面有些耐氯菌属于病原菌或者条件致病菌,如分枝杆菌、军团菌等^[13,14];如果它们没有被净水工艺去除或被消毒灭活,进入管网后,会直接引起用户感染介水传染病的风险。另一方面,某

收稿日期: 2011-03-15; 修订日期: 2011-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(50708050); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07420-005)

作者简介: 陈雨乔(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为饮用水消毒, E-mail: chenyo04@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: chen_water@tsinghua.edu.cn

些非致病性耐氯菌在管网中以生物膜或悬浮生长的形式长期存在,会降低供水管网的生物稳定性,导致用户龙头水细菌总数等指标超标^[15]. 目前我国对于供水系统中存在的耐氯菌的研究还不多,缺乏对其有效的控制手段. 本文通过对从南方某供水管网中分离出的 7 株“耐氯菌”开展较为全面的灭活研究,得出有效灭活这 7 株耐氯菌的消毒剂有效浓度等参数,对于提高供水管网的生物稳定性,保证饮用水的微生物安全,具有重要的意义.

1 材料与方法

1.1 实验菌种分离鉴定

在南方某大型城市的自来水管网水样中富集分

离到 7 株细菌. 这些细菌在该城市管网中长期存在,并能在实验室 1 mg/L 的一氯胺溶液条件下存活 10 h. 由此可以断定这几株细菌对含氯消毒剂尤其是一氯胺有很强的耐受性,于是将其富集保藏作为进一步实验菌种.

这 7 株细菌经中国工业微生物菌种保藏中心(CICC)对其 16S rRNA 和 *ropB* 基因序列^[16] 测序鉴定,分别属于类龟分支杆菌、血红鞘氨醇单胞菌以及甲基杆菌. 各菌株的特性见表 1.

为了解这几株细菌的耐氯性,选取饮用水中常见的大肠杆菌和耐氯性较强的金黄色葡萄球菌作为对比. 金黄色葡萄球菌(CGMCC1. 2465)购自中国科学院微生物菌种保藏中心.

表 1 所研究的耐氯菌株特性

Table 1 List of bacteria studied in the experiment

编号	中文名	英文名	颜色	革兰氏染色	营养类型	菌体形状	体积/ μm
1	类龟分枝杆菌	<i>Mycobacterium mucogenicum</i>	白色	阳性	异养	杆状或球菌状	$(0.2 \sim 0.6) \times (1.0 \sim 10)$
2	血红鞘氨醇单胞菌	<i>Sphingomonas sanguinis</i>	黄色	阴性	异养; 好氧	短杆状	—
3	甲基杆菌	<i>Methylobacterium</i>	红色	阴性	异养; 严格好氧	直杆状	0.6×1.0

1.2 实验菌株的富集培养

由于 7 株细菌中有 3 株成团现象严重,极难分散,不利于初期对于悬浮态细菌灭活特性的研究,本实验选取了 3 号和 7 号这 2 株分枝杆菌,以及 4 号血红鞘氨醇单胞菌和 5 号甲基杆菌开展进一步的消毒实验. 其中 3 号和 7 号这 2 株细菌虽然都属于类龟分枝杆菌,但在实验中却具有明显不同的消毒抵抗特性,限于鉴定条件,无法给出更为明确的区分. 在文中以 3 号分枝杆菌和 7 号分枝杆菌予以说明.

富集培养:挑取一环斜面上的菌株,接种在已灭菌的 R2A 培养液中,22℃ 水浴摇床振荡培养 7 d. 用接种环取第 1 代培养的菌悬液,划线接种于 R2A 琼脂培养基平板上,22℃ 培养 7 d. 再挑取第 2 代培养物的典型菌落于 R2A 培养液中^[17],恒温振荡培养至浊度达到 0.6 (此时细菌从对数期到达稳定期)作为实验菌种.

分枝杆菌、血红鞘氨醇单胞菌及甲基杆菌均采用 R2A 平板计数法,22℃ 培养 7 d. 金黄色葡萄球菌采用营养肉汤平板计数法,37℃ 培养 24 h. 实验采用不同的稀释比以及 3 组平行实验和空白对照保证实验精度^[18,19].

1.3 消毒实验流程

将培养液以 $4\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度离心 10 min,弃去上清. 沉淀用 pH = 7 的磷酸盐缓冲溶液洗涤 3 次后,稀释到约为 10^6 CFU/mL ,制成污染水样,进行

消毒实验.

实验中采用的次氯酸钠溶液为 5% 标准溶液稀释配制得到,采用 DPD 法标定浓度. 一氯胺采用次氯酸钠溶液和硫酸铵溶液按照 $\text{Cl}_2:\text{N} = 4:1$ (质量比)的比例配制得到,此时一氯胺中自由氯小于总浓度的 5%. 二氧化氯溶液通过稀释标准品得到,并采用五步碘量法标定其浓度. 单过硫酸氢钾溶液采用 DPD 法标定浓度.

综合考虑菌种的耐氯性以及实际供水系统中消毒剂的浓度,选择相当于 1 mg/L 有效氯的各种消毒剂进行实验(下文中各消毒剂浓度均以 Cl_2 计). 消毒实验条件为: $\text{pH} = 7$ 、 $t = 25^\circ\text{C}$,实验流程如图 1 所示. 向含有 1 L 人工污染水样的反应器中加入待测消毒剂,接触一定时间(5 min、10 min、15 min、30

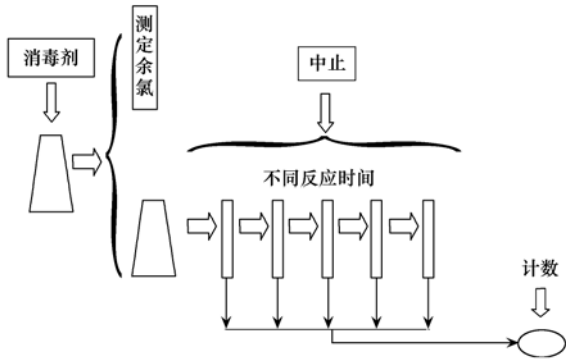


图 1 消毒灭活微生物的实验流程

Fig. 1 Flow chart of disinfection experiment

min、1 h、2 h、4 h、6 h、12 h、24 h)后,从消毒反应器中快速取出 10 mL 样品,加入 100 μL 无菌终止剂(0.01 mol·L⁻¹的 Na₂S₂O₃ 溶液)终止,测试残余菌株数量和消毒剂余量^[20].

2 结果与讨论

2.1 不同菌株的耐氯性研究

用 1 mg/L 自由氯灭活 4 株耐氯菌,分别作消毒特性曲线,并辅以余自由氯衰减情况,如图 2 所示.4 株耐氯菌的初始菌浓度在 10⁶ ~ 10⁷ CFU/mL. 从图 2 可以看出,在反应前 30 min 4 株细菌存在一个快速被灭活的阶段,同时消毒剂迅速衰减. 此后随着消毒剂浓度的下降,灭活速率也相应降低,这一现象与 Luh 等^[21]对分支杆菌的消毒动力学研究中的结果一致.

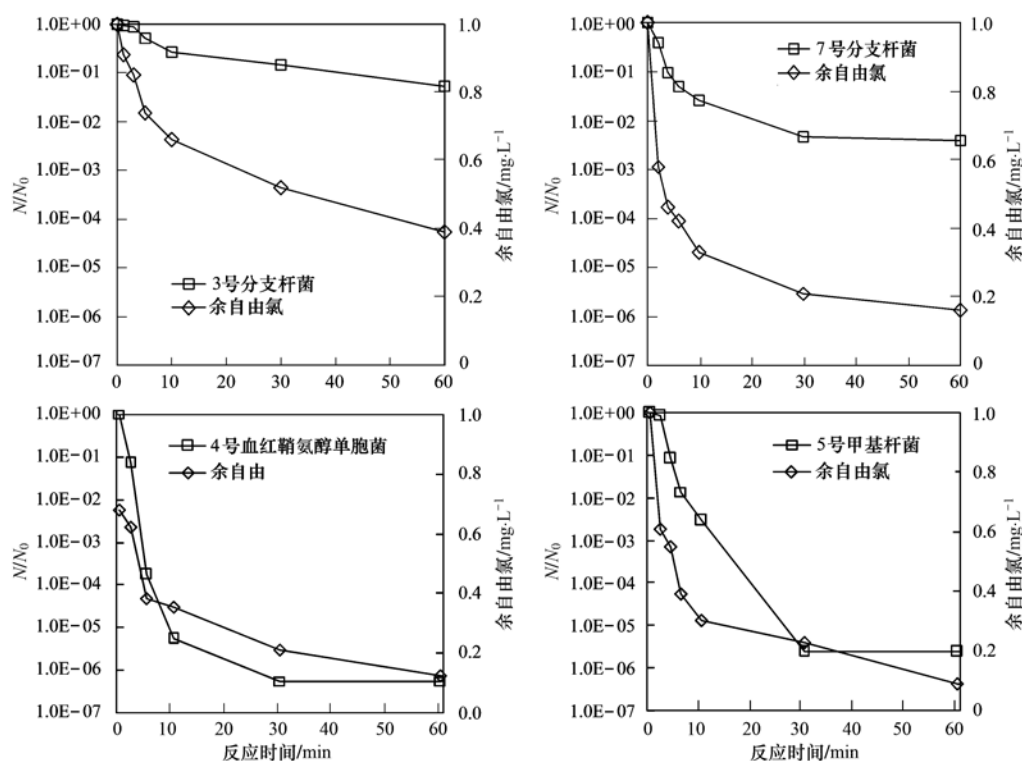


图 2 1 mg/L 自由氯灭活 4 株耐氯菌的消毒特性曲线

Fig. 2 Inactivation curve and free chlorine decay kinetics of four strains of chlorine-resistant bacteria

由图 2 可以看出,3 号和 7 号 2 株分枝杆菌具有很强的耐氯性. 反应 1 h 后,7 号分枝杆菌被灭活了 2.2 个数量级,而 3 号分枝杆菌只被灭活了 1.3 个数量级. 反应进行了 24 h 后,7 号分枝杆菌的灭活率达到 2.6 个数量级,而 3 号分枝杆菌只被灭活了 1.7 个数量级.(考虑到 4 株耐氯菌之间的比较,1 h 后分枝杆菌的灭活曲线没有给出).4 号血红鞘氨醇单胞菌和 5 号甲基杆菌在 1 h 左右全部被灭活.

将以对数表示的细菌存活率对 CT 值进行线性回归,得出灭活率为 99.9% 时的 CT 值如表 2,CT 值以消毒剂浓度 (mg/L) 和反应时间 (min) 的乘积表示. 由于在消毒的过程中,消毒剂会与菌体等物质反应而被消耗,因此采用积分的方法计算出 CT 值^[22],计算方法见公式(1).

$$\lg\left(\frac{N}{N_0}\right) = -k \int_0^t c dt$$

(1)

表 2 自由氯消毒灭活率达到 99.9% 时各菌种的 CT 值/(mg·(L·min))⁻¹

Table 2 Calculated free chlorine CT_{99.9%} values for the chlorine-resistant bacteria/(mg·(L·min))⁻¹

菌名(编号)	分枝杆菌(3 号)	分枝杆菌(7 号)	甲基杆菌(4 号)	血红鞘氨醇单胞菌(5 号)	金黄色葡萄球菌
CT 值	120	30	4	7	0.46

由表 2 可见,本研究所涉及的 4 株菌的耐氯性均强于饮用水中常见细菌,如金黄色葡萄球菌

(CT_{99.9%} = 0.46)、大肠杆菌 (CT_{99.9%} 为 0.034 ~ 0.05^[23]). 其中分枝杆菌的耐氯性最强,尤其是 3 号

分枝杆菌,其 $CT_{99.9\%}$ 值约为金黄色葡萄球菌的 260 倍,大肠杆菌的 3 000 倍,需要予以充分关注。

2.2 消毒剂种类的影响

由于分支杆菌具有很强的耐氯性以及条件致病性,因此选取分支杆菌进行进一步实验,考察不同消毒剂对于类龟分支杆菌灭活效果的影响. 由于 3 号分支杆菌纯化培养较为困难,实验选用性状稳定且具有代表性的 7 号分枝杆菌进一步开展灭活研究. 初始菌液浓度为 6.1×10^6 CFU/mL,4 种消毒剂的投加量为 1.0 mg/L(以 Cl_2 计),消毒接触时间为 24 h,得到灭活特性曲线如图 3 所示。

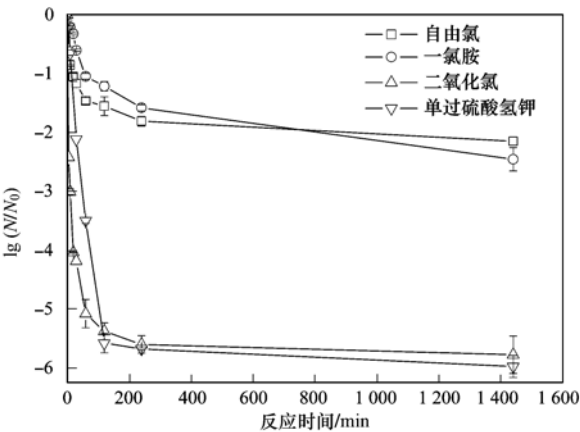


图 3 4 种消毒剂灭活类龟分枝杆菌的灭活特性
Fig. 3 Inactivation of *M. mucogenicum* with four kinds of disinfectants

实验过程中同时测定消毒剂的衰减曲线(图 4),考虑到 4 h 后剩余消毒剂浓度较低,且后续实验的时间间隔较长,因此只标出了反应前 240 min 消毒剂的衰减曲线。

使用公式(1)的方法对不同消毒剂灭活类龟分

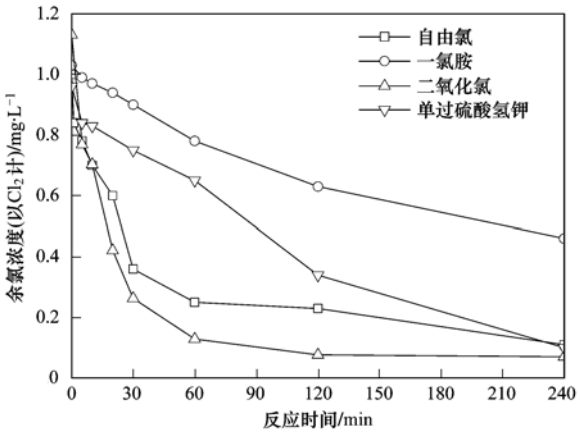


图 4 灭活实验中 4 种消毒剂的衰减曲线
Fig. 4 Four kinds of disinfectants decay kinetics in *M. mucogenicum* inactivation experiment

支杆菌的 CT 值进行计算,得到结果如表 3 所示。

表 3 类龟分支杆菌灭活率 99.9% 时

各消毒剂的 CT 值/(mg·(L·min)⁻¹)

Table 3 Calculated disinfection $CT_{99.9\%}$ values for *M. mucogenicum*/mg·(L·min)⁻¹

消毒剂	自由氯	一氯胺	二氧化氯	单过硫酸氢钾
CT 值	30	170	11	34

根据实验结果可以看出,自由氯的灭活效果较差,1 mg/L 的自由氯 24 h 灭活分支杆菌的灭活率仅能达到 2 个数量级左右. 这主要是由于其衰减过快,余氯浓度过低造成的. 由于分支杆菌需要较长的灭活时间,而自由氯具有很高的反应活性,容易被水中的有机物消耗,尤其会与含氮有机物反应生成没有消毒效果的有机氯胺^[24]. Lee 等^[25]的研究发现自由氯与有机物反应的速度大大快于一氯胺. 在与天然有机物的反应中,自由氯快速生成有机氯胺,反应速率比一氯胺快 6 ~ 720 倍. 从实验结果可以看出,在消毒实验初期的 60 min 内,自由氯的灭活速率大于一氯胺,但是随着反应的进行,自由氯被消耗而快速衰减. 60 min 时自由氯的浓度不足 0.3 mg/L,而一氯胺此时的浓度约为 0.75 mg/L 左右. 因此在 24 h 接触时间后,自由氯对该分枝杆菌的灭活效果差于一氯胺。

一氯胺虽然在灭活过程中较稳定,一直保持较高的余氯浓度,但由于其氧化性较弱^[26],灭活效果也较差,24 h 灭活不足 3 个数量级。

二氧化氯和单过硫酸氢钾的灭活效果很好,60 min 就将分支杆菌全部灭活,其灭活效率明显优于自由氯和一氯胺. 过硫酸氢钾复合盐为过氧化氢与硫酸盐的加成物,分子式为 $2KHSO_5 \cdot KHSO_4 \cdot K_2SO_4$,能够分解生成过氧化氢和硫酸盐,同时产生各种高能量、高活性的小分子的自由基、活性氧衍生物等^[27]. 对分支杆菌的灭活实验中发现其对于耐氯菌具有较好的灭活效果,但其成本较高,每吨水的消毒成本约为一氯胺的 5 ~ 6 倍。

2.3 消毒剂浓度对灭活的影响

根据以上实验可以看出,在使用 1 mg/L 的一氯胺灭活分支杆菌时,灭活效果不理想,24 h 的灭活率不足 3 个数量级. 考虑到一氯胺衰减较为缓慢,能够在较长时间内保持有效余氯,适于对耐氯性细菌的消毒,因此提高消毒剂的浓度,选择 3 mg/L^[28] 的一氯胺进一步进行实验,将其灭活效果与 1 mg/L 的灭活效果进行对比(图 5)。

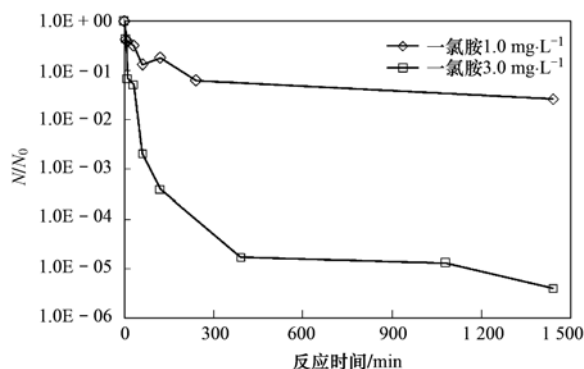


图5 不同浓度的一氯胺的灭活效果比较

Fig. 5 Effect of concentration of monochloramine to inactivation efficiency of *M. mucogenicum*

将一氯胺浓度提高到3.0 mg/L后,消毒1 h后细菌浓度下降了3个数量级,6 h后分支杆菌几乎全部被灭活,可以达到消毒要求.因此若使用一氯胺灭活耐氯菌,必须提高其浓度.

实验结果表明,能在2 h内(一般清水池停留时间)灭活管网中耐氯菌,使灭活率达99.9%的消毒剂有效投加量为:3.0 mg/L一氯胺、1.0 mg/L二氧化氯(以Cl₂计)和1.0 mg/L单过硫酸氢钾(以Cl₂计).

根据实验结果,提出以下控制措施.

(1)对于具有二氧化氯投加条件的水厂,可以定期间歇性提高二氧化氯投加量(或者减少产水量)到1 mg/L(以Cl₂计).如果不具备如此高的消毒剂投加能力,可以定期投加单过硫酸氢钾来强化对分枝杆菌等耐氯菌的灭活效果.

(2)对于使用氯胺消毒的水厂,可以定期间歇性提高氯胺投加量(或者减少产水量)到3 mg/L.或者也可以采用间歇更换二氧化氯或过硫酸氢钾的方法以达到控制耐氯性细菌的目标.

3 结论

(1)从实际管网中分离出7株耐氯菌,经鉴定为类龟分支杆菌、血红鞘氨醇单胞菌和甲基杆菌.这些细菌均具有较高的耐氯性,其中1株耐氯性最强的类龟分枝杆菌自由氯99.9%灭活的CT值达到120 mg·(L·min)⁻¹,另外2株血红鞘氨醇单胞菌和甲基杆菌的CT_{99.9%}分别为7 mg·(L·min)⁻¹和4 mg·(L·min)⁻¹.

(2)在相同的有效氯投加量情况下,二氧化氯灭活上述耐氯菌的效果最优.单过硫酸氢钾的效果较好,使用也较为灵活,不足之处是消毒成本较高.

自由氯衰减快,很难维持长时间的消毒剂余量,灭活效果较差.一氯胺比较稳定,但氧化性较弱,低浓度下也不能保证有效的灭活,需要大幅提高一氯胺浓度才能满足灭活要求.

(3)本实验得到有效控制上述耐氯菌的消毒剂投加量为:3.0 mg/L一氯胺、1.0 mg/L二氧化氯(以Cl₂计)和1.0 mg/L单过硫酸氢钾(以Cl₂计).考虑到我国水厂的实际情况,综合分析经济因素和消毒效果,建议采用间歇性提高一氯胺浓度或改换二氧化氯消毒的方法,提高对耐氯性细菌的灭活效果.

参考文献:

- [1] 杨柳, 许欣. 细菌对消毒剂抗性的研究进展 [J]. 预防医学情报杂志, 2005, 21(6): 676-679.
- [2] 顾春英, 薛广波. 细菌对消毒剂的抗性研究进展 [J]. 中华医院感染学杂志, 1997, 7(4): 252-256.
- [3] 邢玉斌, 索继红, 贾宁, 等. 细菌的消毒剂耐药性 [J]. 微生物学通报, 2006, 33(3): 184.
- [4] Pryor M, Springthorpe S, Riffard S, et al. Investigation of opportunistic pathogens in municipal drinking water under different supply and treatment regimes [J]. Water Science and Technology, 2004, 50(1): 83-90.
- [5] Adékambi T, Ben Salah S, Khlif M, et al. Survival of environmental mycobacteria in acanthamoeba polyphaga [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72(9): 5974-5981.
- [6] Falkinham J O III. Factors influencing the chlorine susceptibility of *Mycobacterium avium*, *Mycobacterium intracellulare*, and *Mycobacterium scrofulaceum* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(9): 5685-5689.
- [7] Leoni E, Legnani P, Mucci M T, et al. Prevalence of mycobacteria in a swimming pool environment [J]. Journal of Applied Microbiology, 1999, 87(5): 683-688.
- [8] Mario J M, Vaerewijck H G, Palomino J C, et al. Mycobacteria in drinking water distribution systems: ecology and significance for human health [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2005, 29(5): 911-934.
- [9] Field S K, Fisher D, Cowie R L. *Mycobacterium avium* complex pulmonary disease in patients without HIV infection [J]. Chest, 2004, 126(2): 566-581.
- [10] Adékambi T. *Mycobacterium mucogenicum* group infections: a review [J]. Clinical Microbiology and Infection, 2009, 15(10): 911-920.
- [11] 刘文君. 现代给水处理消毒技术的发展 [J]. 给水排水动态, 2010, 2(1): 20-24.
- [12] 罗凡, 董滨, 何群彪. 饮用水消毒技术的应用及其研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(S2): 393-396.
- [13] 周惠平. 非典型分枝杆菌与感染 [J]. 中华医院感染学杂志, 2000, 10(6): 423.
- [14] Falkinham J O. Surrounded by mycobacteria: nontuberculous

- mycobacteria in the human environment [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2009, **107**(2): 356-367.
- [15] 何元春, 林浩添, 张菊梅, 等. 给水生物处理工艺微生物特性研究 [J]. *给水排水*, 2007, **33**(12): 22-27.
- [16] 李卫民, 张旭霞, 姜广路, 等. 采用 16S rRNA 序列分析法鉴定非结核分支杆菌 [J]. *中华结核和呼吸杂志*, 2003, **26**(1): 50-51.
- [17] 吴一繁, 高乃云, 乐林生. 饮用水消毒技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 17-131.
- [18] 鲁巍, 王云, 张晓健. 饮用水中几种细菌计数方法的比较 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(4): 167-169.
- [19] 白晓慧, 吴汉靓, 王海亮, 等. 饮用水中异养菌平板计数检测方法的比较 [J]. *净水技术*, 2007, **26**(5): 65-67.
- [20] 刘静. 饮用水组合氯化消毒工艺的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [21] Luh J, Mariñas B J. Inactivation of mycobacterium avium with free chlorine [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(14): 5096-5102.
- [22] Le Dantec C, Duguet J P, Montiel A, *et al.* Chlorine disinfection of atypical mycobacteria isolated from a water distribution system [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(3): 1025-1032.
- [23] Taylor R H, Falkinham J O III, Norton C D, *et al.* Chlorine, chloramine, chlorine dioxide, and ozone susceptibility of *Mycobacterium avium* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(4): 1702-1705.
- [24] Donnermair M M, Blatchley E R. Disinfection efficacy of organic chloramines [J]. *Water Research* 2003, **37**(7): 1557-1570.
- [25] Lee W, Westerhoff P. Formation of organic chloramines during water disinfection-chlorination versus chloramination [J]. *Water Research*, 2009, **43**(8): 2233-2239.
- [26] 唐峰. 给水管网中一氯胺消耗特性的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [27] 严晓玲. 消毒剂过硫酸氢钾复合盐性能实验研究的实验研究 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2007, **17**(4): 631-633.
- [28] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 5749-2006. 生活饮用水卫生标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ...	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ...	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, JIN Yun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《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)

2012年1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 15, 2012

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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行