

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闯光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用

徐冬梅, 王艳花, 饶桂维

(浙江树人大学生物与环境工程学院, 杭州 310015)

摘要: 四环素类抗生素是目前世界上应用最为广泛的抗生素之一, 也是我国畜禽养殖业中使用量最大的兽药和饲料添加剂。由于该类物质不易被生物体吸收且当前的污水处理设施对抗生素不能彻底去除, 故大量抗生素及其代谢产物最终进入地表水环境, 其对水生生态系统和人体健康的潜在威胁值得关注。本研究以水生生态系统初级生产者淡水绿藻为受试生物, 系统考察四环素、金霉素和强力霉素对蛋白核小球藻、斜生栅藻细胞膜通透性和生长抑制作用的影响。结果表明, 抗生素暴露 96 h 后, 强力霉素在整个作用浓度范围内使供试淡水绿藻细胞膜通透性降低; 而金霉素和四环素低浓度暴露可以增大藻细胞膜通透性, 此后随着作用浓度的增大转为降低。3 种抗生素对淡水绿藻生长抑制率大致呈现强力霉素 > 四环素 > 金霉素的顺序趋势。斜生栅藻对四环素类抗生素的毒性响应较蛋白核小球藻更为敏感。

关键词: 四环素; 金霉素; 强力霉素; 淡水绿藻; 急性毒性; 细胞膜通透性

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)09-3386-05

Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics

XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei

(College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China)

Abstract: Tetracycline antibiotics are a group of antibiotics which has been extensively used in most countries and are also the most widely used veterinary drugs and food additives in aquaculture and livestock industries of China. Because the substances are poorly adsorbed in the gut of animals and are only partially eliminated in sewage treatment plants, the antibiotics and their metabolites reach surface water where they may affect the aquatic organisms and human health. Herein, using green algae as test organisms, we studied the effects of tetracycline (TC), chlortetracycline (CTC) and doxycycline (DC) on the cell permeability and growth inhibition of *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus*. After 96 h of antibiotics exposure, the permeability of the cell membranes of both algae was decreased in the entire concentration range of doxycycline and was increased after exposure to a low concentration of tetracycline and chlortetracycline, then was decreased with the increase of the two antibiotics concentrations. The growth inhibiting effects of these three antibiotics on *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* were in an order of DC > TC > CTC. The ecotoxic response of *Scenedesmus obliquus* to tetracycline antibiotics was more sensitive than *Chlorella pyrenoidosa*.

Key words: tetracycline (TC); chlortetracycline (CTC); doxycycline (DC); freshwater green algae; acute toxicity; cell permeability

四环素类抗生素(TCs)是由放线菌属产生的或半合成的一类广谱抗生素。由于其具有价格低廉、应用方便、抗菌谱广等优点,在畜禽和水产养殖业中被广泛用作兽药和饲料添加剂^[1,2]。我国是四环素类抗生素生产、销售和使用大国,该类抗生素也是我国使用最多的药物添加剂^[3]。目前的研究表明,抗生素类药物进入动物体内后,约 30%~90% 以母体化合物或代谢产物的形式通过尿液和粪便排出体外^[4,5]。由于污水处理厂现有的处理方式对抗生素不能彻底去除,故大量抗生素及其代谢产物将随污水处理厂的出水最终进入地表水环境^[6,7]。水产养殖的过量投放也是四环素类抗生素污染水体的重要途径^[8]。根据 Kolpin 等^[9]的分析结果,美国 30 个州 139 条河流水中四环素、土霉素的浓度最大值为 0.42 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。刘虹等^[10]研究表明,贵阳市城市

污水、南明河水和沉积物中四环素类抗生素以四环素污染为主,其最大浓度值分别为 11.0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、6.8 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 99.2 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。针对如此广泛的使用和由此带来的生态环境污染问题,四环素类抗生素对水生生态系统和人体健康的潜在威胁值得关注。而我国目前对于这一问题的研究尚显不足^[11]。

绿藻是水生态系统的初级生产者,也是监测评价水环境质量和污染物生态毒性的重要指示生物^[12,13]。外源污染物对绿藻的毒性作用将直接影响水生食物链的能量传递,进而对高营养级生物和整个水生生态系统产生影响。本研究以淡水生态毒理

收稿日期: 2012-12-20; 修订日期: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(20907046)

作者简介: 徐冬梅(1974~),女,博士,副教授,主要研究方向为生态毒理学, E-mail: dm25xu@163.com

研究中常用的蛋白核小球藻和斜生栅藻为模式生物,分析了四环素、金霉素和强力霉素对绿藻细胞膜通透性、生长抑制作用的影响. 这对于全面认识四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用、评价该类物质的生态风险具有现实意义.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试蛋白核小球藻和斜生栅藻购自中国科学院水生生物研究所,试验所用抗生素购自生工生物(上海)股份有限公司,其结构式见图 1. 其中四环素(TC)、金霉素(CTC)及强力霉素(DC)纯度分别大于 98.5%、97% 和 98%,参照文献[14]的方法进行配制. 具体方法为准确称取盐酸四环素、盐酸金霉素和强力霉素盐酸盐各1.0000 g,加入无菌水溶解定容至 1L,以 0.22 μm 的滤膜过滤除菌后使用. 其余试剂均为分析纯.

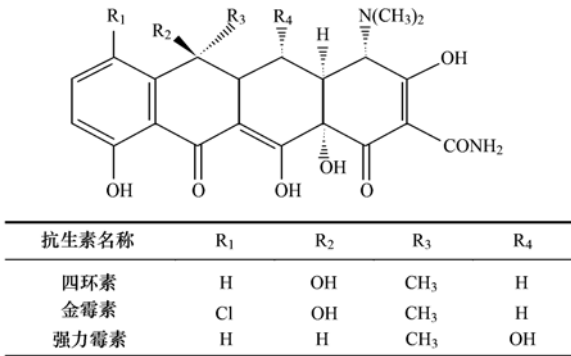


图 1 四环素类抗生素的基本结构
Fig. 1 Chemical structures for TCs

1.2 藻细胞的预培养

在无菌条件下将藻种接种至水生 4 号培养基中,于 PRX-350B 型智能人工气候箱中恒温光照培养至对数生长期,并进一步扩大培养. 培养条件为温度 25℃,光暗比 12 h: 12 h,光照 3 000 ~ 4 000 lx 静置培养,每天定时摇动 5 ~ 6 次,以减少藻细胞贴壁现象. 预培养 3 代,镜检细胞正常,进入对数生长期进行试验.

1.3 藻类毒性试验及相关指标测定

将处于对数生长期的蛋白核小球藻和斜生栅藻接种到 100 mL 锥形瓶中,试验初始藻细胞密度约 7.0 × 10⁵ 个·mL⁻¹,总体积 50 mL,抗生素浓度设置分别为 0、0.625、1.25、2.5、5、10、20、40、80、160 mg·L⁻¹,各浓度均设 3 个平行. 于抗生素中暴露 96 h 后用血球计数法计量细胞数量. 藻细胞膜透

透性参照 Cai 等^[15]的方法,用测得的由 FDA 水解生成荧光素的荧光强度与对照水藻荧光强度的比值,考察抗生素对藻细胞膜通透性的影响.

1.4 数据分析

利用 Origin 8.0 软件中非线性最小二乘拟合(NLSF)模块下的拟合工具,同时使用 DseResp、Weibull 与 Logit 这 3 种非线性函数模型对藻细胞 96 h 生长抑制数据进行非线性拟合,进而求得各个拟合模型的相关参数. 结果表明,DseResp 函数为最优拟合模型,应用该函数拟合计算出四环素类抗生素对淡水绿藻的 EC_{20-96 h}、EC_{50-96 h}、EC_{80-96 h} 值及相关参数,所得 95% 置信区间的拟合曲线即为抗生素对淡水绿藻的毒性-效应曲线. 藻细胞膜通透性数据结果采用 means ± SD 的形式表示,处理组和对照组之间的差异性用 SPSS 单因素方差分析中的 post-hoc LSD 检验进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 四环素类抗生素对淡水绿藻细胞膜通透性的影响

单细胞藻类对有毒化学品的反应表现为生理、生化、形态和细胞遗传以及藻类生长繁殖等各个方面^[16~18]. 而具有选择性通透性的细胞膜是细胞自我保护的第一道屏障,可以选择性控制物质进出细胞. 有毒污染物对细胞膜通透性的影响会介导这类物质的很多其他毒性^[19]. 由图 2 和图 3 蛋白核小球藻、斜生栅藻暴露于 3 种抗生素的细胞膜通透性结果可见,对于蛋白核小球藻而言,四环素和强力霉素的暴露导致藻细胞膜的通透性降低,1.25 mg·L⁻¹暴露组细胞膜通透性显著低于对照($P < 0.05$),自 2.5 mg·L⁻¹开始极显著低于对照($P < 0.005$). 低浓度

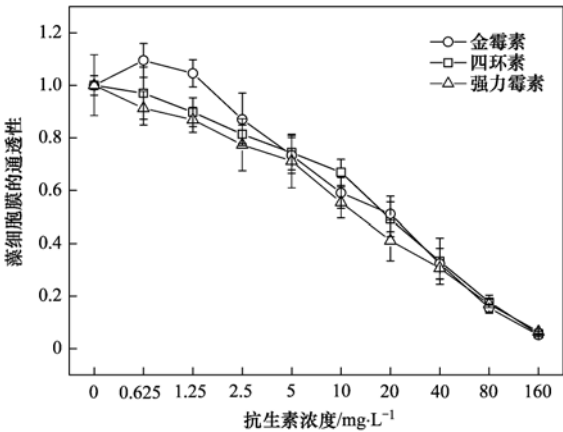


图 2 四环素类抗生素对蛋白核小球藻细胞膜通透性的影响
Fig. 2 Effects of tetracycline antibiotics on algal cell permeability of *Chlorella pyrenoidosa*

(0.625、1.25 mg·L⁻¹) 金霉素作用下,藻细胞膜通透性稍有增大,表明此时包括金霉素在内的物质可以更容易地进出细胞;自 2.5 mg·L⁻¹ 暴露组开始显著低于对照,此后随金霉素暴露浓度的增加藻细胞膜通透性极显著降低. 相对于蛋白核小球藻,低浓度四环素和金霉素(0.625 ~ 2.5 mg·L⁻¹) 均可以使斜生栅藻细胞膜通透性升高,但仅有 0.625 mg·L⁻¹ 金霉素暴露组藻细胞膜通透性显著高于对照; 10 mg·L⁻¹ 开始四环素和金霉素暴露组藻细胞膜通透性极显著降低. 而强力霉素在整个浓度范围内均使斜生栅藻细胞膜通透性降低并且自 5 mg·L⁻¹ 暴露组开始极显著低于对照. 四环素类抗生素作用下藻细胞膜通透性的降低表明通过被动运输进入细胞的抗生素数量降低,相应地藻细胞的吸收和运输物质能力亦有所减弱,进而影响到细胞的生长. 而由表 1 四环素类抗生素暴露组与对照组藻细胞膜通透性显著性差异结果可见,低浓度暴露下 3

种抗生素对蛋白核小球藻细胞膜通透性的影响较斜生栅藻更为明显.

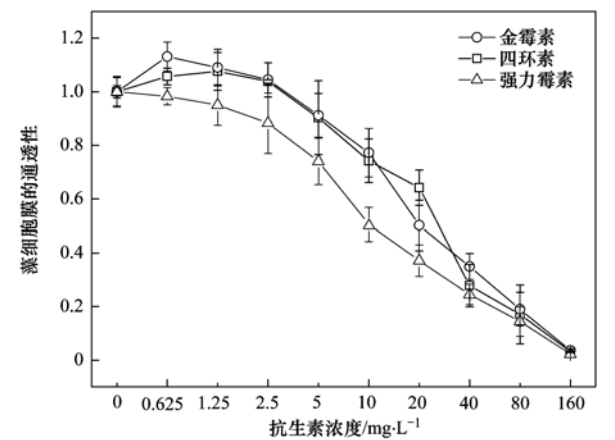


图 3 四环素类抗生素对斜生栅藻细胞膜通透性的影响
Fig. 3 Effects of tetracycline antibiotics on algal cell permeability of *Scenedesmus obliquus*

表 1 四环素类抗生素暴露组与对照组藻细胞膜通透性显著性差异¹⁾

抗生素浓度 /mg·L ⁻¹	四环素		金霉素		强力霉素	
	蛋白核小球藻	斜生栅藻	蛋白核小球藻	斜生栅藻	蛋白核小球藻	斜生栅藻
0.625	/	/	/	*	/	/
1.25	*	/	/	/	*	/
2.5	***	/	*	/	***	*
5	***	/	***	/	***	***
10	***	**	***	***	***	***
20	***	***	***	***	***	***
40	***	***	***	***	***	***
80	***	***	***	***	***	***
160	***	***	***	***	***	***

1) 试验暴露组与对照组的显著性差异, * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$

2.2 四环素类抗生素对淡水绿藻的生长抑制作用

图 4、图 5 为四环素类抗生素对蛋白核小球藻和斜生栅藻 96 h 生长抑制作用的剂量效应拟合曲线. 由图 4 可见,0.625 ~ 80 mg·L⁻¹ 相同浓度抗生素作用下,总体上强力霉素对蛋白核小球藻的生长抑制作用最为明显,四环素次之,金霉素最小;至 160 mg·L⁻¹,3 种抗生素对绿藻的生长抑制作用程度相当. 而对于斜生栅藻(图 5),同样是金霉素暴露下藻的生长抑制作用最小,四环素和强力霉素两条拟合曲线有部分交叉重叠,强力霉素对斜生栅藻的生长抑制作用稍大于四环素. 表 2 四环素类抗生素对淡水绿藻毒性效应拟合模型参数进一步验证了上述试验结果. 由表 2 可见,3 种抗生素暴露下斜生

栅藻 EC_{20-96 h}、EC_{50-96 h} 和 EC_{80-96 h} 变化趋势一致,即金霉素 > 四环素 > 强力霉素;而蛋白核小球藻 EC_{20-96 h} 与 EC_{50-96 h}、EC_{80-96 h} 值表现出相反的变化趋势(金霉素 < 四环素 < 强力霉素). 结合图 2 四环素类抗生素暴露下蛋白核小球藻细胞膜通透性结果推测这可能是由于低浓度暴露下金霉素显著增大了蛋白核小球藻细胞膜通透性,从而更多地表现为金霉素对藻细胞的直接毒性作用所致. Halling-Sørensen^[20] 研究证明,四环素类抗生素能够抑制铜绿微囊藻和绿藻的蛋白质合成. 并且可能通过抑制叶绿体合酶的活性,对植物生长产生抑制作用^[21]. Liu 等^[22] 通过室内滤纸培养试验考察了金霉素、四环素等 6 种抗生素对水稻、燕麦和黄瓜种子发芽的

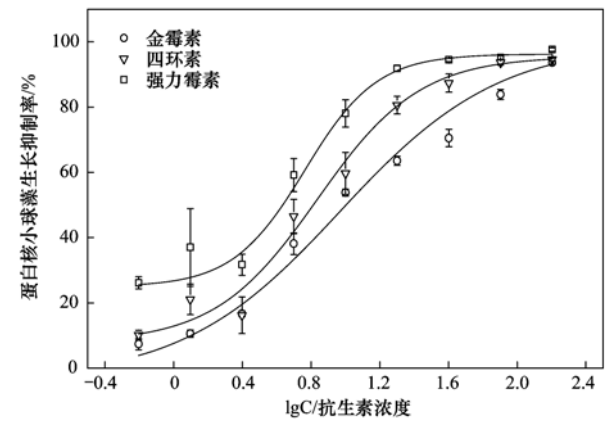


图4 四环素类抗生素对蛋白核小球藻 96 h 急性毒性的剂量效应拟合曲线

Fig. 4 Inhibition of *Chlorella pyrenoidosa* species growth in a 96-h acute treatment with tetracycline antibiotics

毒性作用。结果表明,金霉素对3种植物发芽率 EC_{10} 和 EC_{50} 值均小于四环素暴露组,其中金霉素对燕麦种子毒性作用的 EC_{10} 、 EC_{50} 分别约为四环素试验组的1/70和1/4。表明水环境介质中较低浓度暴露下,金霉素对植物生长产生的毒性作用比四环素更为明显。四环素和金霉素对淡水绿藻生长抑制作用的相对大小与Yang等^[23]用近头状伪蹄形藻(*Pseudokirchneriella subcapitata*)得到的结果是一致的。

而就蛋白核小球藻和斜生栅藻对四环素类抗生素的敏感性而言,由本研究抗生素暴露下绿藻细胞

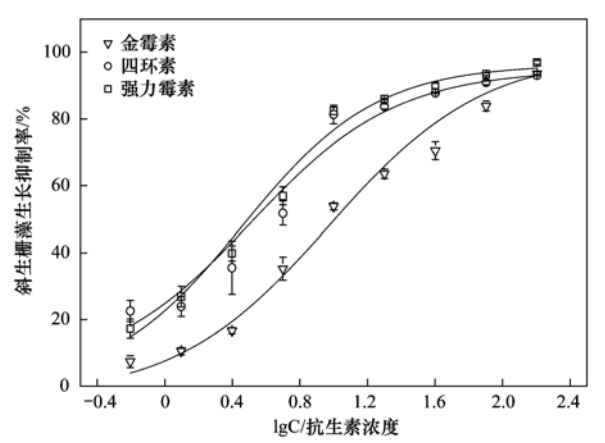


图5 四环素类抗生素对斜生栅藻 96 h 急性毒性的剂量效应拟合曲线

Fig. 5 Inhibition of *Scenedesmus obliquus* species growth in a 96-h acute treatment with tetracycline antibiotics

膜通透性和生长抑制结果可见,蛋白核小球藻和斜生栅藻对四环素类抗生素的毒性响应有所不同。除金霉素暴露组蛋白核小球藻和斜生栅藻 $EC_{20-96\text{ h}}$ 、 $EC_{50-96\text{ h}}$ 、 $EC_{80-96\text{ h}}$ 值非常接近外,斜生栅藻较蛋白核小球藻对四环素和强力霉素的毒性反应更为敏感。这可能是由于不同藻细胞其细胞膜中磷脂脂肪酸种类和相对含量不同的结果。本研究中小球藻和栅藻在分类上为不同种属,细胞膜C18脂肪酸的组成存在一定的差异^[24],使得外源污染物对藻细胞膜的流动性和选择透性的影响亦有所不同^[25]。

表2 四环素类抗生素对淡水绿藻 96 h 毒性效应曲线拟合模型参数

Table 2 Collective parameters for toxicities of the tetracycline antibiotics to freshwater green algae

藻种	抗生素	拟合模型参数 ¹⁾					R^2	EC _{20-96 h}	EC _{50-96 h}	EC _{80-96 h}
		A_1	A_2	$\lg x_0$	p	Span		/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹
蛋白核小球藻	四环素	7.87	95.59	0.84	1.46	87.72	0.997	2.65	6.86	17.78
	金霉素	-3.63	99.69	0.97	0.94	103.31	0.991	2.14	9.31	40.49
	强力霉素	24.92	96.27	0.76	2.07	71.35	0.988	2.96	5.79	11.32
斜生栅藻	四环素	3.77	94.76	0.51	1.01	90.99	0.973	0.83	3.27	12.87
	金霉素	-3.24	99.54	0.97	0.95	102.77	0.991	2.20	9.41	40.29
	强力霉素	-0.44	96.42	0.46	1.10	96.86	0.965	0.81	2.88	10.18

1) A_2 、 A_1 分别为拟合曲线的上、下渐近线; $\lg x_0$ 为拟合曲线中点(平均校正死亡率=50%处)的纵坐标; p 为拟合曲线中点(平均校正死亡率=50%处)的斜率; Span = abs($A_1 - A_2$)

3 结论

(1) 抗生素暴露 96 h 后,强力霉素在整个作用浓度范围内使供试淡水绿藻细胞膜通透性降低;而金霉素和四环素低浓度暴露可以增大藻细胞膜通透性,此后随着作用浓度的增大转为降低。低浓度暴露下3种抗生素对蛋白核小球藻细胞膜通透性的影响较斜生栅藻更为明显。

(2) 3种抗生素对淡水绿藻生长抑制率大致呈

现强力霉素>四环素>金霉素的顺序趋势。

(3) 供试淡水绿藻对四环素类抗生素的毒性响应有所不同,总体上斜生栅藻对四环素类抗生素的毒性响应较蛋白核小球藻更为敏感。

参考文献:

[1] 周启星, 罗义, 王美娥. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(3): 243-251.
[2] Bowman S M, Drzewiecki K E, Mojica E R E, et al. Toxicity and reductions in intracellular calcium levels following uptake of a tetracycline antibiotic in *Arabidopsis* [J]. Environmental Science

- & Technology, 2011, **45**(20): 8958-8964.
- [3] 李伟明, 鲍艳宇, 周启星. 四环素类抗生素降解途径及其主要降解产物研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(8): 2300-2308.
- [4] Chee-Sanford J C, Mackie R I, Koike S, *et al.* Fate and transport of antibiotic residues and antibiotic resistance genes following land application of manure waste [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, **38**(3): 1086-1108.
- [5] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. Chemosphere, 2006, **65**(5): 725-759.
- [6] Snyder S A, Westerhoff P, Yoon Y, *et al.* Pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disruptors in water: Implications for the water industry [J]. Environmental Engineering Science, 2003, **20**(5): 449-469.
- [7] Munir M, Wong K, Xagorarakis I. Release of antibiotic resistant bacteria and genes in the effluent and biosolids of five wastewater utilities in Michigan[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 681-693.
- [8] 姜蕾, 陈书怡, 杨蓉, 等. 长江三角洲地区典型废水中抗生素的初步分析[J]. 环境化学, 2008, **27**(3): 371-374.
- [9] Kolpin D W, Furlong E T, Meyer M T, *et al.* Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in US streams, 1999- 2000: A national reconnaissance [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(6): 1202-1211.
- [10] 刘虹, 张国平, 刘丛强, 等. 贵阳城市污水及南明河中氯霉素和四环素类抗生素的特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 687-692.
- [11] 刘锋, 陶然, 应光国, 等. 抗生素的环境归宿与生态效应研究进展[J]. 生态学报, 2010, **30**(16): 4503-4519.
- [12] Wen Y Z, Yuan Y L, Chen H, *et al.* Effect of chitosan on the enantioselective bioavailability of the herbicide dichlorprop to *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(13): 4981-4987.
- [13] Liu H J, Xiong M Y. Comparative toxicity of racemic metolachlor and *S*-metolachlor to *Chlorella pyrenoidosa* [J]. Aquatic Toxicology, 2009, **93**(2-3): 100-106.
- [14] 萨姆布鲁克 J, 拉塞尔 D W. 黄培堂等译. 分子克隆实验指南[M]. (第三版). 北京: 科学出版社, 2002. 713-1722.
- [15] Cai X Y, Liu W P, Sheng G Y. Enantioselective degradation and ecotoxicity of the chiral herbicide diclofop in three freshwater alga cultures[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, **56**(6): 2139-2146.
- [16] Wen Y Z, Chen H, Shen C S, *et al.* Enantioselectivity tuning of chiral herbicide dichlorprop by copper: Roles of reactive oxygen species [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(11): 4778-4784.
- [17] Chen J Q, Guo R X. Access the toxic effect of the antibiotic cefradine and its UV light degradation products on two freshwater algae [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **209**: 520-523.
- [18] 杨良, 葛飞, 喻方琴, 等. 十六烷基三甲基氯化铵与荧蒽对小球藻的联合毒性及其作用机制[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(1): 150-155.
- [19] Xu D M, Li C D, Chen H, *et al.* Cellular response of freshwater green algae to perfluorooctanoic acid toxicity [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2013, **88**: 103-107.
- [20] Halling-Sørensen B. Algal toxicity of antibacterial agents used in intensive farming [J]. Chemosphere, 2000, **40**(7): 731-739.
- [21] Kasai K, Kanno T, Endo Y, *et al.* Guanosine tetra and pentaphosphate synthase activity in chloroplasts of a higher plant: association with 70S ribosomes and inhibition by tetracycline [J]. Nucleic Acids Research, 2004, **32**(19): 5732- 5741.
- [22] Liu F, Ying G G, Tao R, *et al.* Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(5): 1636-1642.
- [23] Yang L H, Ying G G, Su H C, *et al.* Growth-inhibiting effects of twelve antibacterial agents and their mixtures on the freshwater microalga *Pseudokirchneriella subcapitata* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, **27**(5): 1201-1208.
- [24] 陆开宏, 林霞. 海、淡水驯化对 5 种微藻脂肪酸组成的影响 [J]. 水生生物学报, 2001, **25**(2): 179-184.
- [25] 蔡卫丹, 刘惠君, 方治国. *Rac*-及 *S*-异丙甲草胺对 2 种微藻毒性特征影响研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 448-453.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHU Xian-xuan, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-jing, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming, <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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

国内外公开发行人