

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛翌, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

不同环境因素下太湖中四环素的自然消减

段伦超^{1,2,3}, 王凤贺^{1,2,3*}, 纪营雪^{1,2,3}, 张帆^{1,2,3}, 赵斌^{1,2,3}, 王国祥^{1,2,3}

(1. 南京师范大学环境科学与工程系, 南京 210023; 2. 江苏省水土环境生态修复工程实验室, 南京 210023; 3. 南京师范大学水环境生态修复研究所, 南京 210023)

摘要: 四环素已经广泛应用于兽药生产和疾病治疗中, 并通过禽畜粪便等途径进入环境中, 基于四环素残留物的危害性, 采用了模拟自然环境状态的实验方法, 研究了四环素在不同环境状态(光照、底泥、重金属)下的自然消减过程. 结果表明, 四环素在自然光照下的消减不明显; 未杀菌底泥水体中, 四环素的消减速率大于杀菌底泥水体; 实验初期, 含硝酸铅水体中四环素消减缓慢, 随着时间延长, 消减速率加快, 而在硝酸镉水体中四环素短时间内消减趋势已经十分明显, 且消减速率大于硝酸铅水体; 以 $0.08 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 四环素为例, 四环素在光照下各环境因素中的消减速率依次为: 未杀菌底泥 (87.2%) > 杀菌底泥 (70.37%) > 硝酸镉水体 (64.2%) > 硝酸铅水体 (32.3%) > 空白组 (6.6%), 各环境因素均促进了四环素的消减. 避光时, 各环境因素中四环素的消减趋势与光照组相同, 但消减速率较光照组小, 表明光照对四环素的自然消减具有一定的促进作用.

关键词: 四环素; 消减; 光照; 底泥; 硝酸铅; 硝酸镉

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1318-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.016

Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions

DUAN Lun-chao^{1,2,3}, WANG Feng-he^{1,2,3}, JI Ying-xue^{1,2,3}, ZHANG Fan^{1,2,3}, ZHAO Bin^{1,2,3}, WANG Guo-xiang^{1,2,3}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Engineering Laboratory of Water and Soil Eco-remediation, Nanjing 210023, China; 3. Institute of Water Environmental Eco-remediation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Tetracycline (TC) has been widely used in veterinary medicines and disease treatments, and has been discharged into nature system due to manure application. To know the harmfulness of TC residues, and to investigate the natural attenuation of TC under different environmental conditions, simulated attenuation experiments in the presence of light, sediment, $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ and $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ were performed. Results showed that the natural attenuation of TC was not obvious under the sunlight, and the natural attenuation rate of TC in water with unsterilized sediment was greater than that with sterilized sediment. The natural attenuation of TC in water with $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ was slow at the first stage of the experiment, and progressively speeded up as time went on. However, the natural attenuation of TC in water with $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ was more rapid at the beginning, and significantly faster than that of $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. The natural attenuation rates of $0.08 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ TC under different conditions follow the sequence: unsterilized sediment (87.2%) > sterilized sediment (70.37%) > $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ (64.2%) > $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ (32.3%) > blank (6.6%), suggesting that all these factors can promote the natural attenuation of TC. Though the natural attenuation trend under different conditions in the dark is similar to that under the sunlight, the natural attenuation rate is less than that under the sunlight, which implicates that sunlight may promote the natural attenuation of TC.

Key words: tetracycline; attenuation; sunlight; sediment; $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$; $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$

抗生素作为广谱类药物, 被广泛应用于治疗人体疾病, 治疗和预防畜禽、水产品的细菌性病害, 在世界范围的使用量呈逐年递增趋势^[1]. 在美国, 作为促生长作用的抗生素使用量在近 40 年内增加了 80 倍^[2]. 中国每年兽用抗生素的平均使用量已高达 6 000t^[3,4]. 随着我国畜禽养殖业的繁荣和发展, 四环素类、大环内酯类、青霉素类、磺胺嘧啶类抗生素的使用日益广泛, 但是抗生素的不合理应用及不遵守正确的休药期导致大部分抗生素不能完全被

机体吸收, 抗生素及其衍生物作为微量污染物所造成的污染及由此产生的环境效应引起人们的关注^[5~7].

收稿日期: 2013-08-11; 修订日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101287); 江苏省科技支撑计划项目(BE2012758); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_388)

作者简介: 段伦超(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: duanlunchao@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wangfenghe@njnu.edu.cn

四环素(tetracycline, TC)作为一种典型人畜共用抗生素,应用较为广泛,TC是一种稠环芳烃化合物,属于难降解物质,在环境中残留危害较大,并可致突变、致癌^[8]. TC类抗生素及其中间代谢产物具有生物毒性,可以透过细菌的细胞壁,与细菌的遗传物质核糖核蛋白结合,抑制微生物的蛋白质合成,对生化处理过程的微生物都有明显的抑制作用^[9]. 同时其降解产物的溶血作用,对肝脏、胃肠有损害及可使牙齿染色等,长期低浓度的药物残留还会诱发病菌的耐药性^[10]. 因此,研究环境中残留TC的消减过程就显得尤为重要^[11]. 而目前,国内外用于TC类药物降解技术主要包括高锰酸钾氧化法^[12]、TiO₂光催化降解法^[13]、臭氧氧化法^[14]和电化学法^[15]等,但是TC在不同环境条件下的自然消减过程鲜有报道.

与抗生素相比,太湖的重金属污染问题吸引了更多学者的关注. 2012年Lu等^[16]在太湖水体检出Pb的浓度为0.95~4.30 μg·L⁻¹; 陈璐璐等^[17]研究指出,太湖中Cd的浓度为0.76~1.12 μg·L⁻¹,平均值为0.85 μg·L⁻¹; 2012年中国环境科学研究院秦延文等^[18]发现,太湖表层沉积物中Cd含量为0.20~2.88 mg·kg⁻¹,平均0.45 mg·kg⁻¹,超过背景

值3.46倍. Cd富集程度最为严重,具有较强的生态危害,其次是Pb,全湖Pb的含量在29.20~74.48 mg·kg⁻¹之间,平均值为38.27 mg·kg⁻¹; 2012年河海大学王沛芳等^[19]报道,太湖表层沉积物中Cd污染较重且分布较广,含量为1.62~3.29 mg·kg⁻¹,可提取态所占比例最高、迁移性最强,其次是Pb, Cd在太湖各湖区沉积物中存在中等潜在生态风险.

太湖流域人口密集、社会经济高速发展,是典型的水网地区,非常易于抗生素、重金属等污染物在水体中的搬运和迁移. 残留抗生素和重金属经污水排放、地表径流等途径进入太湖后,太湖水体中的Pb、Cd等重金属能否影响TC的自然消解,尚不明确. 本实验以TC为研究对象,主要分析在光照及避光条件下,TC在太湖底泥、重金属影响下的自然消减过程,重点研究了TC在不同环境下的自然消减速率,并探讨了TC的消减机制,以期在不同环境下太湖水体中TC的自然消减提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

TC为分析纯,购自上海国药集团化学试剂有限公司. TC分子结构式及形态见图1.

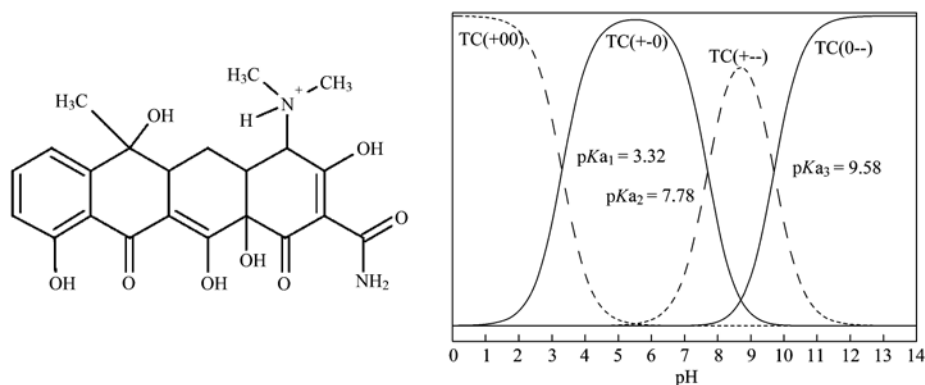


图1 四环素分子结构及形态

Fig. 1 Structure and speciation of tetracycline

TC有酰胺基(CONH₂)、二甲胺基N(CH₃)₂和酚羟基等官能团,此外还有两个含有酮基和烯醇基的共轭双键系统. 二甲胺基具有碱性(pK_a = 9.6),而三羰基甲烷系统和酚二酮系统具有酸性(pK_a分别为3.3和7.7). 因此四环素是一类两性化合物,它能和各种酸、碱反应形成较为稳定的盐.

底泥,2013年2月采自于太湖. 将底泥在自然条件下风干,用研钵研细. 一部分在烘箱内170℃干燥1h,并在紫外灭菌灯下照射15min,以杀灭底泥

中的微生物;另一部分为未杀菌底泥. 采集的太湖底泥中金属元素含量如表1所示.

实验所用仪器为紫外可见分光光度计(日本岛津,UV-2550);恒温干燥箱(上海精宏,DHG-9240A型);分析天平(美国丹佛,TP-214);紫外灭菌灯(ZWS 15W).

1.2 TC标准曲线

对一定浓度的TC溶液进行紫外光谱扫描,得到TC的紫外图谱,如图2(a)所示.

表 1 底泥中的金属元素含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Original content of metal in sediment/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

元素	Fe	Cu	Zn	Al	Pb	Cr	Cd	Mn	Ni	As
含量	4.8	ND	0.4	8.4	ND	ND	ND	2.1	1.8	0.2

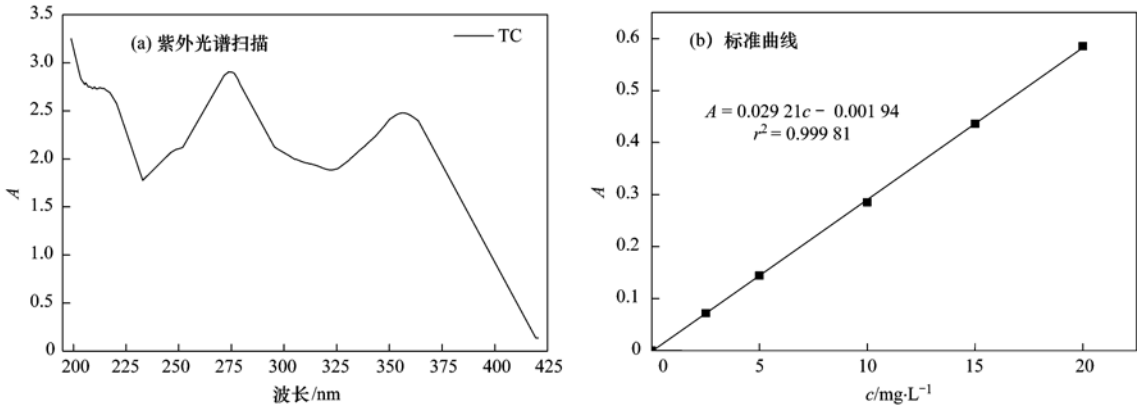


图 2 TC 溶液的紫外光谱扫描及其标准曲线
Fig. 2 UV absorbance of TC and its standard curve

由图 2(a)可知,TC 的紫外特征吸收峰为 274 nm 和 355 nm,本实验选取 274 nm 进行后续研究.

取 $25\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TC 标准溶液,配置 2.50、5.00、10.00、15.00、20.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TC 溶液,在 274 nm 处测量其吸光度,重复测定 3 次,取其平均值,即可得吸光度 A 与 TC 质量浓度 c 的线性回归方程,拟合曲线如图 2(b)所示.

由图 2(b)可知,TC 溶液在 $0\sim 20\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,TC 质量浓度与其吸光度之间有良好的线性关系, R^2 为 0.999 81.

1.3 实验方法

取 1 L 烧杯 25 个,每 5 个分为一组,于第二、三、四、五组中分别加入杀菌底泥 100 g、未杀菌底泥 100 g、硝酸镉 $0.03\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、硝酸铅 $0.03\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,第一组为空白对照组.于每组中配置 1 L 浓度分别为 0.02、0.03、0.04、0.08 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TC 溶液,放置于同一光照条件下,分别称重,并记录原始重量,每天称重并补加蒸馏水,以弥补蒸发散失的水分,定期用紫外分光光度计测定溶液中 TC 的浓度.另设避光条件下的实验组,除避光外,所有实验条件及方法同光照组.

根据公式(1),计算 TC 的消减率 r :

$$r = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中, c_0 为 TC 的初始质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; c_t 为 TC 在 t 时刻的质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [20].

2 结果与讨论

2.1 未杀菌底泥对 TC 自然消减的影响

图 3 为不同 TC 浓度的自然消减过程中,对照组与含未杀菌底泥水体中 TC 的浓度变化.

由图 3 可知,避光时对照组中剩余的 TC 浓度高于光照组,即表明光照下 TC 的降解速率大于避光组.光照和避光时,未杀菌底泥水体中 TC 的浓度都呈明显的降低趋势,主要是前期底泥的吸附作用所致.后期光照下 TC 呈先上升后下降的趋势,避光下的 TC 浓度趋于平稳.实验结束时,以图 3(a)为例(低 TC 浓度),在光照和避光下对照组 TC 的消减速率分别为 15.9% 和 3.3%,未杀菌底泥水体中 TC 的消减速率分别为 58.44% 和 68.7%;以图 3(d)为例(高 TC 浓度),光照和避光下,未杀菌底泥水体中的 TC 的趋势与图 3(a)相似,对照组 TC 的消减速率分别为 6.6% 和 6.8%,未杀菌底泥水体中 TC 的消减速率分别为 87.2% 和 90.3%.

自然状态下,一般认为光化学降解反应机制在于分子吸收光能变成激发态,从而引发各种反应,太阳光对 TC 的消减具有一定促进作用 [21]. 有的研究表明,TC 在水中还可通过与 $\cdot\text{O}_2$ 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 发生反应进行光解 [22~24]. Castillo 等 [25] 研究发现,在可见光照射下,TC 可通过基态电子转移产生阴离子自由基 ($\text{RF}^{\cdot-}$),并且进一步产生超氧阴离子自由基 $\text{O}_2^{\cdot-}$,同时激发三重态 $^3\text{RF}^*$ 可将能量传递给溶解氧产

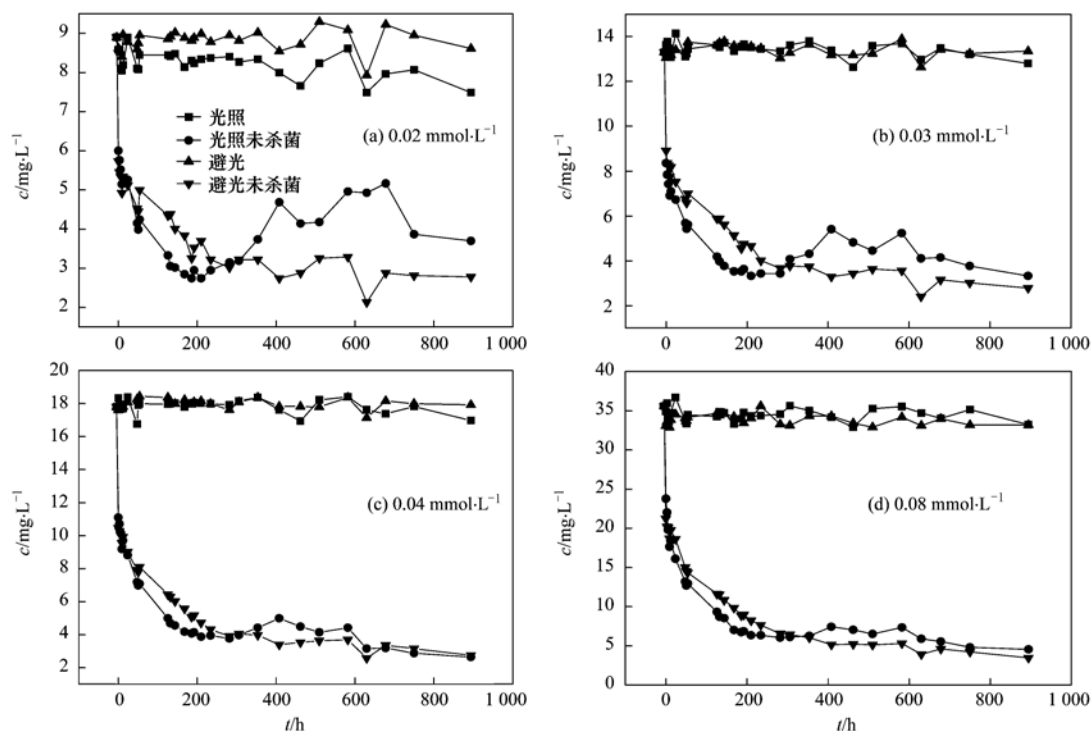


图3 对照组与含未杀菌底泥水体中 TC 的浓度变化

Fig. 3 Changes of the concentration of tetracycline in the blank group and the unsterilized sediment

生 $^1\text{O}_2$,并通过实验证明,强力霉素、甲稀土霉素、去甲金霉素和土霉素都可与 $^1\text{O}_2$ 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 发生反应进行光解;而 Addamo 等^[26]研究发现,直接光解对 TC 的降解和矿化作用不大.本实验同样得到了上述结论,TC 的直接光解速率非常缓慢,而且降解时间较长.

除长时间的光解和底泥的吸附外,底泥中的某些物质在受到光照时,会形成大量的自由基、过氧化物和单重态氧,这些物质加速了 TC 的降解^[27].同时底泥中的微生物也促进了 TC 的降解,TC 残留物的结构和理化性质在微生物作用下发生改变,从大分子化合物降解为小分子化合物,最终转变为 H_2O 和 CO_2 ,因而 TC 在含未杀菌底泥水体中的消减过程较快.而光照下 TC 浓度出现上升后又下降的现象,可能有 3 种原因:一是光照下 TC 的原有降解产物再次转化成母药而造成总量增长^[28];二是底泥中 TC 的吸附与解吸平衡被打破,解吸速率大于吸附速率,出现上升趋势;三是随着时间的延长,出现了耐药微生物,TC 对底泥呼吸的影响降低,从而加快了 TC 的降解^[11].

2.2 杀菌底泥对 TC 自然消减的影响

图 4 为不同浓度下的 TC 自然消减过程中,对照组与含杀菌底泥水体中 TC 的浓度变化.

由图 4 可知,不同浓度时($0.08 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 除外),避光下对照组中剩余的 TC 浓度高于光照组.由图 4(a)和 4(b)可知,含杀菌底泥的水体中,TC 的浓度出现了先上升后下降的趋势,且避光下的浓度大于光照组,均大于对照组.由图 4(c)和 4(d)可知,含杀菌底泥的水体中 TC 的浓度具有明显的下降趋势,且光照下的下降速率大于避光下,随着时间的延长趋于平衡.在光照和避光下,以图 4(a)为例(低 TC 浓度),杀菌底泥中 TC 并没有消减;以图 4(d)为例(高 TC 浓度),杀菌底泥中 TC 的消减速率分别为 70.37% 和 59.04%.

图 4(a)和 4(b)中低浓度组的 TC 浓度出现上升趋势,可能是因为杀菌底泥中的重金属由于扩散、解吸、溶解、氧化还原和络合作用,以及在物理、化学等因素的作用下,从底泥向水相释放,造成了水体中重金属含量的升高,而在取样测定吸光度时,部分金属加强了 TC 在该波长下的响应,同时部分金属也会在该波长下具有自身的响应,导致了测定时数据增大;而后 TC 浓度又出现下降趋势,除光照因素外,可能由于底泥中如光合菌、乳酸菌、放线菌、酵母菌、发酵丝状菌、芽孢杆菌、枯草杆菌、硝化细菌、酵母等具有降解抗生素功能的微生物并没有被完全杀灭^[29],而是以休眠体的形式存在于底泥中,随着时间的延长,微生物进而苏醒、繁殖,同时也对

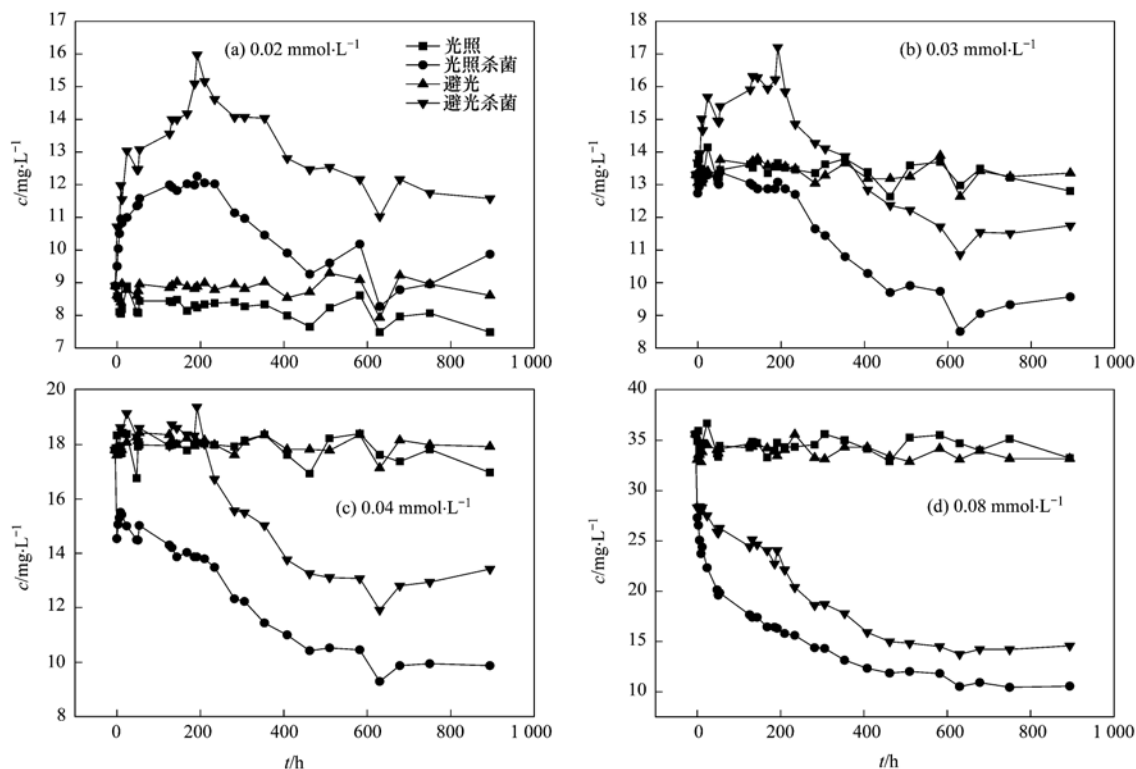


图4 对照组与含杀菌底泥水体中 TC 的浓度变化

Fig. 4 Changes of the concentration of tetracycline in the blank group and the sterilized sediment

TC 产生了耐药性,加快了 TC 的降解.而避光下的 TC 浓度大于光照组,也表明光照可以加速 TC 的消减.

图4(c)和4(d)表明,光照下含杀菌底泥的水体中,四环素的浓度低于避光组,且光照下的消减速率明显大于避光组.在底泥的吸附作用、自身的降解以及重金属的络合等作用下,四环素的浓度呈降低趋势.

2.3 水中硝酸镉对 TC 消减过程的影响

图5为不同 TC 浓度下,对照组与含硝酸镉水体 TC 消减过程中浓度的变化.

由图5可知,光照与避光下,对照组中 TC 浓度的变化趋势同以上实验组.不同 TC 浓度时,含硝酸镉水体中,TC 的浓度均表现为下降趋势,且避光下 TC 浓度要大于光照组,即避光下 TC 的消减速率要低于光照组,即光照促进了 TC 的消减.在光照和避光下,以图5(a)为例(低 TC 浓度),含硝酸镉水体中 TC 的消减速率分别为 70.7% 和 52.7%;以图5(d)为例(高 TC 浓度),含硝酸镉水体中 TC 的消减速率分别为 64.2% 和 48.1%.

TC 是两性化合物,其分子含有 1 个碱性基团、2 个酸性官能团,在酸性、中性和碱性条件下,通常

以正离子、中性和负离子形态存在^[30].本实验水体呈中性,此时 TC 以兼性离子存在,水体中加入镉离子后,为 TC 提供了较多的反应位点.随着 TC 浓度的增加,自身所提供的反应位点相应增多,可能发生了镉离子与 TC 的配位反应,其与镉离子通过络合作用,形成 2:1 的配合物,导致 TC 聚合后沉淀^[31~33].Dulisio 等^[34]认为在形成 2:1 配合物的过程中,这些金属离子与 TC 的络合主要是发生与二甲基氨基或者是羟基基团的配合. TC 与金属离子的络合过程中,只有官能团发生了电离. TC 在亲核和亲电试剂的作用下,容易发生水解并引起分子的重排,转化为容易降解的物质.某些金属离子,如镉离子对 TC 的水解和分子重排起到了催化作用.

2.4 水中硝酸铅对 TC 消减过程的影响

图6为不同 TC 浓度下,对照组与含硝酸铅水体中 TC 消减过程的浓度变化.

由图6可知,光照和避光下,对照组 TC 浓度的变化趋势同以上实验组.不同 TC 浓度时,含硝酸铅水体中 TC 浓度均表现为下降趋势,且 600 h 之前,光照和避光下四环素浓度的变化趋势几乎吻合;600 h 之后,光照下四环素的消减速率大于避光组,且趋势逐渐增大.在光照和避光下,以图6(a)为例

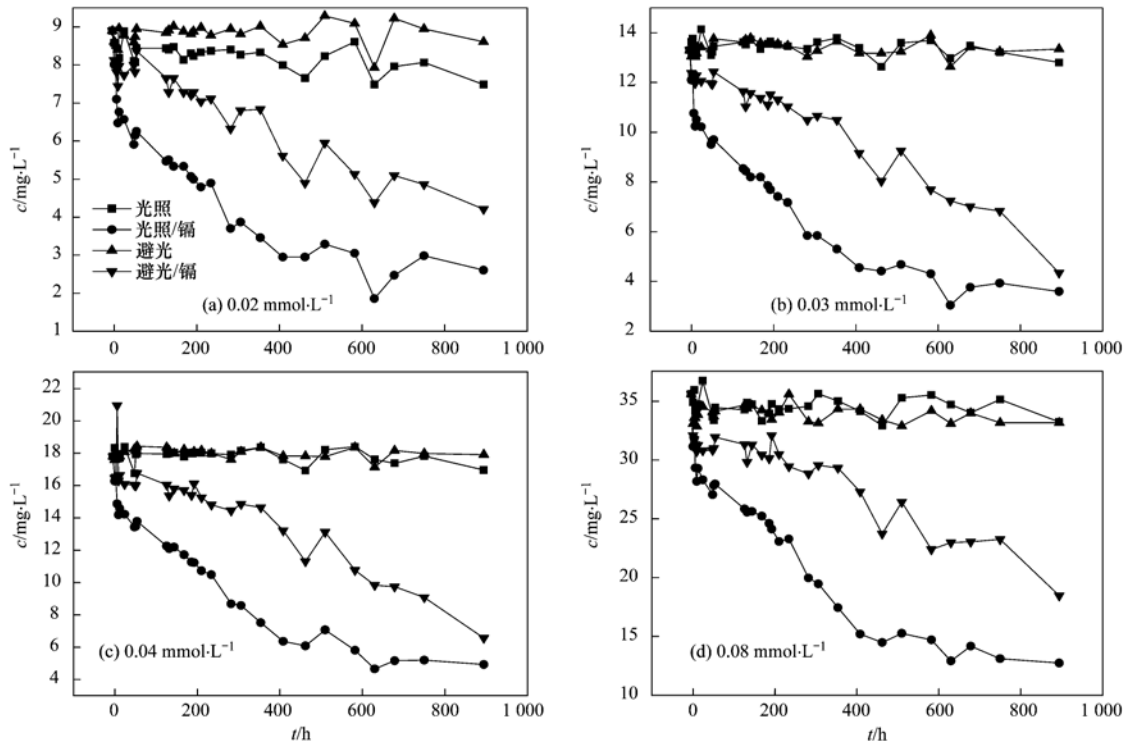


图 5 对照组与含硝酸镉水体中 TC 的浓度变化

Fig. 5 Changes of the concentration of tetracycline in the blank group and $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$

(低 TC 浓度), 含硝酸铅水体中 TC 的消减速率分别为 29.3% 和 14.8%; 以图 6(d) 为例(高 TC 浓度), 硝酸铅水体中 TC 的消减速率分别为 32.3% 和

15.7%。硝酸铅与 TC 的作用机制与硝酸镉相同, 都是形成了重金属-TC 配合物. 但与硝酸镉相比, 硝酸铅

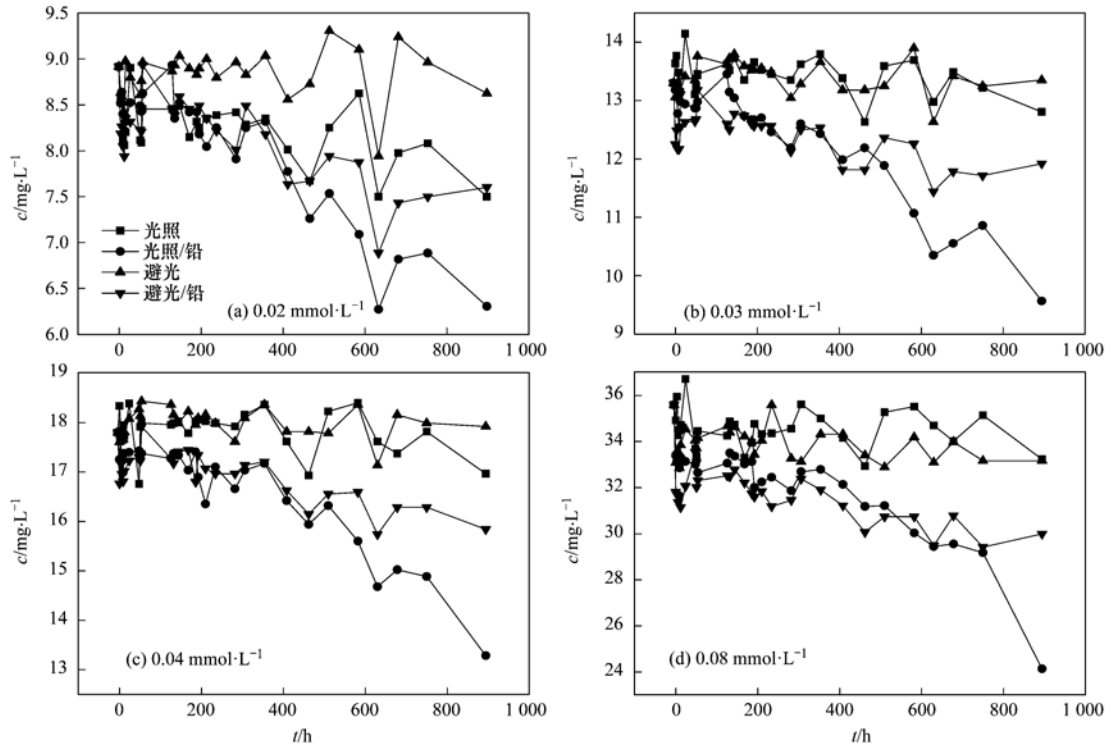


图 6 对照组与含硝酸铅水体中 TC 的浓度变化

Fig. 6 Change of the concentration of tetracycline in the blank group and $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$

对 TC 消减的促进作用较小,这主要是由于 TC 与不同金属离子形成配合物的难易程度不同^[35],以及提供的反应位点的活性不同,水体中镉离子比铅离子更容易与 TC 形成稳定的配合物。

3 结论

(1)自然光照下,TC 的降解缓慢;未杀菌底泥水体中,TC 的消减速率大于杀菌底泥,微生物起到了重要的作用;含硝酸镉水体中 TC 的消减速率大于含硝酸铅水体,硝酸镉对 TC 消减的促进作用大于硝酸铅。以 $0.08 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ TC 为例,TC 在各环境因素中的消减速率依次为:未杀菌底泥(87.2%) > 杀菌底泥(70.37%) > 硝酸镉(64.2%) > 硝酸铅(32.3%) > 空白组(6.6%),各环境因素都促进了 TC 的消减。

(2)避光下,空白组 TC 及高浓度 TC 的消减趋势与光照组相似。低浓度 TC 的消减受环境中金属离子及其他因素的影响较大。避光下的 TC 消减速率小于光照组,表明光照促进了 TC 的消减。

致谢:感谢南京师范大学韩睿明博士对论文修改过程中的指导。

参考文献:

- [1] Zuccato E, Castiglioni S, Bagnati R, *et al.* Source, occurrence and fate of antibiotics in the Italian aquatic environment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **179**(1-3): 1042-1048.
- [2] 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.
- [3] Zhao L, Dong Y H, Wang H. Residues of veterinary antibiotics in manures from feedlot livestock in eight provinces of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(5): 1069-1075.
- [4] 林琳, 安婧, 周启星. 土壤四环素污染对小白菜幼苗生长发育的生态毒性[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2430-2435.
- [5] 徐维海, 张干, 邹世春, 等. 典型抗生素类药物在城市污水处理厂中的含量水平及其行为特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1779-1783.
- [6] 李彦文, 莫测辉, 赵娜, 等. 菜地土壤中磺胺类和四环素类抗生素污染特征研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1762-1766.
- [7] Richardson B J, Lam P K S, Martin M. Emerging chemicals of concern: pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Asia, with particular reference to Southern China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(9): 913-920.
- [8] Gao P P, Mao D Q, Luo Y, *et al.* Occurrence of sulfonamide and tetracycline-resistant bacteria and resistance genes in aquaculture environment [J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2355-2364.
- [9] 唐礼庆, 何成达, 罗亚红, 等. 四环素类抗生素生产废水处理技术进展[J]. *环境科学与管理*, 2006, **31**(7): 99-102.
- [10] 程雪梅, 苏青云, 胡炎明. 液相色谱-串联质谱法分析海产品中四环素类药物残留[J]. *质谱学报*, 2009, **30**(2): 74-77.
- [11] 刘锋, 应光国, 周启星, 等. 抗生素类药物对土壤微生物呼吸的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1280-1285.
- [12] 李国亭, 郭宇杰, 汪宁改, 等. 高锰酸钾降解四环素的过程研究[J]. *华北水利水电学院学报*, 2009, **30**(5): 77-79.
- [13] 穆容心, 李丽媛, 邵芸, 等. TiO_2 纳米棒对四环素的光催化降解[J]. *环境化学*, 2010, **29**(3): 476-480.
- [14] Dalmázio I, Almeida M O, Augusti R, *et al.* Monitoring the degradation of tetracycline by ozone in aqueous medium via atmospheric pressure ionization mass spectrometry [J]. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 2007, **18**(4): 679-687.
- [15] Vedenyapina M D, Eremicheva Y N, Pavlov V A, *et al.* Electrochemical degradation of tetracycline [J]. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2008, **81**(5): 800-802.
- [16] Lu G H, Yang X F, Li Z H, *et al.* Contamination by metals and pharmaceuticals in northern Taihu Lake (China) and its relation to integrated biomarker response in fish [J]. *Ecotoxicology*, 2013, **22**(1): 50-59.
- [17] 陈璐璐, 周北海, 徐冰冰, 等. 太湖水体典型重金属镉和铬含量及其生态风险[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(10): 2290-2296.
- [18] 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 等. 太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4291-4299.
- [19] 王沛芳, 周文明, 王超, 等. 太湖沉积物重金属的形态特征及生态风险评价[J]. *重庆大学学报*, 2012, **35**(11): 136-143.
- [20] 朱向东, 王玉军, 孙瑞娟, 等. 溶液酸度对四环素类物质光降解和光催化降解速率的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2012, **28**(6): 742-745.
- [21] 杨佳朋, 孙晓春. 海水中农药的光化学降解研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2007, **37**(4): 550-556.
- [22] Halling-Sørensen B, Lykkeberg A, Ingerslev F, *et al.* Characterisation of the abiotic degradation pathways of oxytetracyclines in soil interstitial water using LC - MS - MS [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(10): 1331-1342.
- [23] Dimou A D, Sakkas V A, Albanis T A. Metolachlor photodegradation study in aqueous media under natural and simulated solar irradiation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, **53**(3): 694-701.
- [24] Groom C A, Halasz A, Paquet L, *et al.* Accumulation of HMX (octahydro- 1, 3, 5, 7-tetranitro- 1, 3, 5, 7-tetrazocine) in indigenous and agricultural plants grown in HMX-contaminated anti-tank firing-range soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(1): 112-118.
- [25] Castillo C, Criado S, Díaz M, *et al.* Riboflavin as a sensitizer in the photodegradation of tetracyclines. Kinetics, mechanism and microbiological implications [J]. *Dyes and pigments*, 2007, **72**

- (2): 178-184.
- [26] Addamo M, Augugliaro V, Di Paola A, *et al.* Removal of drugs in aqueous systems by photoassisted degradation[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2005, **35**(7-8): 765-774.
- [27] 李伟明, 包艳宇, 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.
- [28] 沈颖, 魏源送, 郑嘉熹, 等. 猪粪中四环素类抗生素残留物的生物降解[J]. *过程工程学报*, 2009, **9**(5): 962-968.
- [29] 刘伟, 王慧, 陈小军, 等. 抗生素在环境中降解的研究进展[J]. *动物医学进展*, 2009, **30**(3): 89-94.
- [30] Wang Y J, Jia D A, Sun R J, *et al.* Adsorption and cosorption of tetracycline and copper(II) on montmorillonite as affected by solution pH[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(9): 3254-3259.
- [31] Arias M, García-Falcón M S, García-Río L, *et al.* Binding constants of oxytetracycline to animal feed divalent cations[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, **78**(1): 69-73.
- [32] 万莹, 鲍艳宇, 周启星. 土壤有机质和镉对金霉素吸附-解吸的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(12): 3050-3055.
- [33] 陈华, 任晓惠, 罗汉金, 等. 改性纳米零价铁的制备及其去除水中的四环素[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(4): 767-771.
- [34] Doluisio J T, Martin A N. Metal complexation of the tetracycline hydrochlorides[J]. *Journal of Medicinal Chemistry*, 1963, **6**(1): 16-20.
- [35] 鲍艳宇, 周启星, 张浩. 阳离子类型对土霉素在 2 种土壤中吸附-解吸影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 551-556.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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

国内外公开发行人