

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)
河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH 和络合剂对五价铈在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李鑫,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)
苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆灵,郭光光,李响,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响

艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑*

(北京师范大学水科学研究院, 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 本文以重金属锌为研究对象, 应用重组人甲状腺激素受体(hTR)基因酵母快速测试方法, 检测溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响, 利用阳极溶出伏安法(ASV)检测溶解态腐殖酸与锌作用后, 生物有效态锌含量的变化, 同时利用三维荧光光谱中的激发-发射矩阵(3DEEM)技术初步考察腐殖酸与锌的作用机制. 结果表明, 氯化锌具有显著的抗甲状腺激素干扰效应, 其 RIC20(抑制率为 20% 时氯化锌的浓度)值为 $1.70 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 当腐殖酸与氯化锌作用后, 其抗甲状腺激素干扰效应降低了 30% ~ 50%, ASV 测试结果表明当腐殖酸和氯化锌溶液混合后, 生物有效态锌含量明显降低, 与生物测试结果相似; 紫外照射腐殖酸与氯化锌的混合体系后, 其抗甲状腺激素干扰效应上升, 但仍低于未加腐殖酸氯化锌溶液的抗甲状腺激素干扰效应值; 3DEEM 的测试结果表明氯化锌能够降低腐殖酸荧光峰的荧光强度, 能够直观地表征腐殖酸与氯化锌相互作用. 上述结果可为研究环境水体中锌的生物毒性及锌水质基准的制定提供基础数据和理论支持.

关键词: 溶解态腐殖酸; 锌; 甲状腺激素干扰效应; 阳极溶出伏安法; 三维荧光光谱

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0195-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605211

Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment

AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, SHEN Yang, LI Jian*

(Engineering Research Center of Ground Water Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: A rapid recombinant human thyroid (hTR) gene yeast bioassay was used to evaluate the effect of dissolved humic acid on thyroid receptor antagonistic activity of ZnCl_2 . The concentration of bio-available zinc after its reaction with dissolved humic acids was measured by anodic stripping voltammetry (ASV). Furthermore, the reaction mechanism of humic acid and zinc was investigated by three-dimensional excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy (3DEEM). The results revealed that ZnCl_2 demonstrated strong thyroid receptor antagonistic activity, and the concentration inhibiting 20% of the maximum effect of ZnCl_2 was $1.70 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. The thyroid receptor antagonistic activity of ZnCl_2 was reduced by 30% -50% after the reaction of dissolved humic acids. The results of ASV showed that the concentration of bio-available zinc was decreased after the reaction of dissolved humic acids, the result was similar to that of bioassay test. The thyroid receptor antagonistic activity of the mixed solution of humic acid and ZnCl_2 was increased after UV radiation treatment, however it was still lower than the antagonistic activity induced by ZnCl_2 . The results of 3DEEM showed that ZnCl_2 could reduce the fluorescence peak intensity of humic acid, which could intuitively characterize the interaction between humic acid and ZnCl_2 . The above results can provide basic data and theoretical support for zinc toxicity study in aquatic environment and the establishment of water quality criteria for zinc.

Key words: dissolved humic acid; zinc; thyroid disrupting effects; anodic stripping voltammetry; 3DEEM

甲状腺是脊椎动物重要的内分泌器官, 其分泌的甲状腺激素在人类和动物的生理过程中发挥着重要的调节作用. 一些环境化合物具有潜在的甲状腺激素干扰活性, 如酚类化合物、邻苯二甲酸酯类化合物、溴阻燃剂等^[1], 这些具有甲状腺激素干扰活性的化合物通常被称为甲状腺激素干扰物(TDCs). TDCs 已经成为继环境雌激素后一类重要的内分泌干扰物^[2]. 最新研究证实一些重金属离子, 如 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 具有甲状腺激素干扰活性, 能够抑制甲状腺激素三碘甲状腺原氨酸(T3)和甲状腺

激素受体(TR)结合^[3]. 重金属在水环境中的广泛分布可能会对水生生物甲状腺系统产生干扰, 因此急需开展环境水体中重金属甲状腺激素干扰效应的影响因素及其相关机制研究.

有研究证实腐殖酸是影响环境水体重金属生物学毒性的重要因素, 重金属的生物学毒性不仅与总

收稿日期: 2016-05-27; 修订日期: 2016-08-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001351); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-010)

作者简介: 艾扬(1991~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境中激素干扰物, E-mail: aiyang@mail.bnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lijian@bnu.edu.cn

量有关,更大程度上由其赋存形态决定,不同的形态产生不同的环境效应^[4]. 水体中重金属形态主要分为溶解态和颗粒态,文献^[5]报道了重金属的溶解态含量更接近天然水体中生物有效态的部分. 腐殖酸是一种广泛分布于地球生物环境中的复杂大分子有机物,具有丰富的活性功能基团,包括羧基、羟基、胺基、酚羟基等,能够与水体中的重金属离子发生络合反应,影响重金属离子在水环境中的形态转化、迁移和生物有效性. 例如水体中铜、锌的毒性与游离的金属离子浓度有关,当与腐殖酸形成络合物时降低了金属离子的浓度,从而抑制了金属离子的毒性^[6]. 腐殖酸与重金属离子的作用方式是形成络合物,络合物的形成可能会增加或降低金属离子的溶解性,这主要取决于 pH 值及重金属离子的饱和度^[7]. 目前已开展水体中重金属形态对其生物效应的影响研究^[8,9],但关于腐殖酸对重金属形态及其甲状腺激素干扰效应的影响研究报道较少.

阳极溶出伏安法(ASV)是检测水体中生物有效态重金属的重要方法. 其基本原理可表述为:ASV 将金属形态按其电极行为特征分为电极有效态和惰性态,电极有效态包括游离态和一些简单无机络合物,是可能的致毒形态^[10]. 鉴于 ASV 中电极动力学过程类似重金属通过生物膜进入细胞的过程,所以 ASV 的测试结果和生物毒性测试结果有较好的一致性^[11]. 本文还采用三维荧光光谱中的激发-发射矩阵(3DEEM)技术考察腐殖酸与重金属的作用机制,腐殖酸含有几种不同的荧光基团,在一定条件下能发射荧光,其荧光特性包含了与结构、官能团、构型、分子间相互作用的动力学等信息^[12,13],3DEEM 能够获得腐殖酸荧光强度随激发和发射波长同时变化的信息,已被广泛用于定性或定量描述腐殖酸的物理化学特性.

本文选择重金属锌作为研究对象,采用 ASV、3DEEM 技术和重组 TR 基因酵母方法,开展腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响及机制分析,以期为区域水环境中锌的生物学毒性及锌水质基准的制定提供基础数据和理论支持.

1 材料与方法

1.1 模拟水样的配制

模拟水样是由腐殖酸(化学纯,国药集团化学试剂有限公司)、氯化锌(97%,Strem Chemicals)和去离子水(Millipore)配制而成的混合水样. 称 20 mg 腐殖酸粉末,加入 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH(分析纯,

国药集团化学试剂有限公司)溶解于去离子水中, $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HNO_3 (分析纯,北京化工厂)调节 pH 值为 6.7, $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤,定容于 100 mL 容量瓶中,得到浓度为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的腐殖酸母液,去离子水稀释母液至腐殖酸浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 向腐殖酸溶液中添加不同浓度的氯化锌(7×10^{-6} 、 2×10^{-5} 、 7×10^{-5} 、 2×10^{-4} 、 $2 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$),配制模拟水样于暗处保存,12 h 内完成测试.

1.2 紫外照射

参考文献^[14]方法,将模拟水样装入石英蒸发皿中,254 nm 紫外照射 4 h,紫外灯强度为 30 W,照射距离为 3 cm. 利用日立高新科技公司的 F-7000 型荧光分光光度计对模拟水样进行三维荧光光谱扫描.

1.3 阳极溶出伏安法(ASV)

ASV 方法参考文献^[15]进行,并对富集时间、缓冲液 pH 值等条件进行了优化. 采用三电极系统,其中玻碳电极为工作电极,Ag-AgCl 为参比电极,铂片电极为辅助电极.

1.3.1 测定条件

富集时间:2 min;起始电位: -1.5 V ;终止电位: 0 V ;电位增量:0.008;振幅:0.05;脉冲宽度:0.02 s;采样宽度:0.017 s;脉冲周期:0.2 s;静置时间:10 s;测试缓冲液选择 pH 4.5 的醋酸-醋酸钠(HAc-NaAc)缓冲液.

1.3.2 测定方法

将模拟水样置于 50 mL 容量瓶中,加入测试缓冲液 5 mL,摇匀备用. 将溶液倒入电解槽中,插入电极,利用 CHI660D 型电化学工作站(上海辰华仪器有限公司)进行溶出伏安法扫描,实验在 N_2 的保护下进行.

1.4 重组基因酵母体外快速测试

重组 TR 基因酵母由中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室提供. 模拟水样的重组基因酵母体外快速测试方法参考文献^[16]进行,可简述为:选择对数生长期的酵母细胞,调节细胞密度使得 600 nm 处的吸光度 $D_{600 \text{ nm}}$ 值为 0.8 左右. 量取 2 mL 酵母细胞, $1000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 5 min,弃去上清液,加入 4.5 mL 模拟水样及 0.5 mL $10 \times \text{SD/-Leu/-Trp}$ 培养基;检测模拟水样抗甲状腺激素干扰效应时添加 $25 \mu\text{L}$ $10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 三碘甲状腺原氨酸(T3,98%,Sigma),每个样品设 4 组平行. 30°C 振荡培养 2 h 后,200 μL 溶液转移到 96 孔板中,测定 600 nm 处的吸光度,弃去 150 μL 上清液,加入

120 μL 测试缓冲液和 20 μL 氯仿(分析纯,北京化工厂), 30°C , $1\ 300\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 预培养 10 min 后加入 40 μL 2-硝基苯- β -D-吡喃半乳糖苷(ONPG,98%,百灵威科技有限公司)启动酶反应, 30°C , $800\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 反应 1 h,酶标仪(TECAN GENios A-5002,Austria)测定 420nm 处吸光度值。

1.5 数据处理

实验数据采用 Origin、Excel 软件进行统计处理。ASV 方法中,以氯化锌溶液浓度为横坐标,峰电流值为纵坐标,绘制校准曲线,模拟水样中生物有效态锌的浓度通过比对校准曲线得出。

模拟水样类/抗甲状腺激素干扰效应分别采用相对百分诱导活性 P 和相对百分抑制活性 I 表征,计算公式如下:

$$P = u/u_{\max}$$

$$I = 1 - P$$

式中, u 为加标水样检测的 β -半乳糖苷酶活性值,计算公式参考文献[17]; u_{\max} 为 T3 诱导的 β -半乳糖苷酶活性值。

2 结果与讨论

2.1 ASV 测试方法的建立

配制一系列浓度为 $1.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-3}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ZnCl_2 溶液,按实验方法进行检测,并绘制校准曲线,如图 1。 ZnCl_2 的线性范围为 $3.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-4}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,相关系数 R 为 0.999 2。参考文献[18]报道的方法,以 3 倍的标准偏差法(3σ)得出 ASV 方法的检测限为 $1.3 \times 10^{-7}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本文测定锌的线性范围与文献[19]报道范围 $2.143 \times 10^{-6} \sim 3.57 \times 10^{-4}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的结论类似。但与文献[20~22]报道锌的线性范围和灵敏度存在差异,这可能是由于 ASV 方法所用电极、缓冲液、测定参数等的选择不同。

2.2 添加溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响

采用快速测试方法对模拟水样甲状腺激素干扰效应进行检测,所有样品均未检出显著的酵母细胞急性毒性,实验空白控制较好(数据未列出)。实验结果如图 2 所示,氯化锌被检出有具有显著的抗甲状腺激素干扰效应,其 RIC20(抑制率为 20% 时氯化锌的浓度)值为 $1.70 \times 10^{-5}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,与文献[23]报道的 RIC20 值($9.1 \times 10^{-5}\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)较为一致。

当模拟水样中加入腐殖酸后,其抗甲状腺激素干扰效应明显降低,降低的百分比在 30%~50% 之

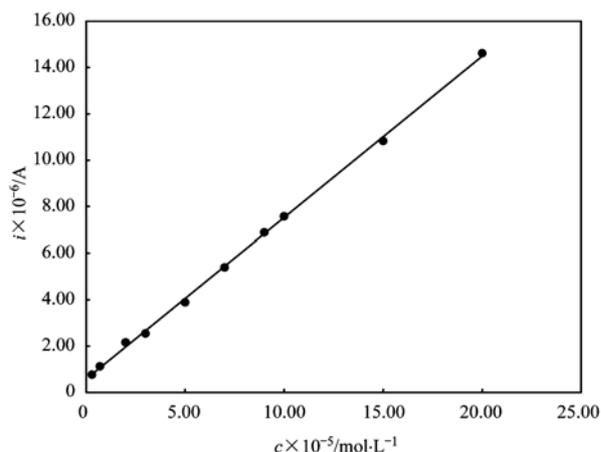


图 1 ZnCl_2 的校准曲线

Fig. 1 Calibration curve of ZnCl_2

间,可能的原因是腐殖酸与锌离子发生了络合反应,使游离态锌离子含量下降,从而降低其甲状腺激素干扰毒性。腐殖酸中含有羧基、羟基等官能团,金属离子能够和腐殖酸中的官能团发生络合反应^[6],使得游离态金属含量下降,而有机结合态的金属含量增加;游离态金属离子与有机结合态相比,其对生物体更具有毒性^[24],范文宏等^[25]的研究也发现腐殖酸能够促进重金属由非稳定态向稳定态转化,降低其生物学有效性,进一步佐证了本文的结论。

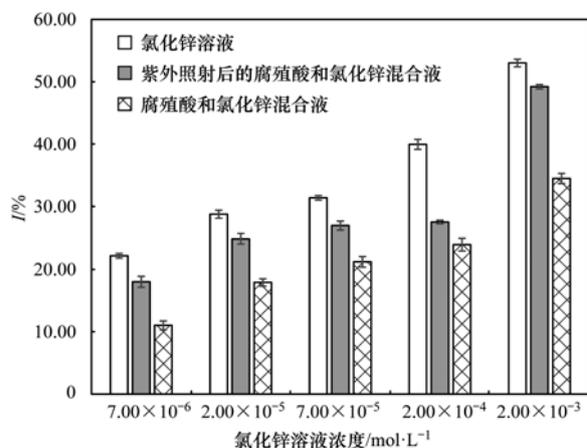


图 2 不同条件处理对 ZnCl_2 抗甲状腺激素干扰效应的影响

Fig. 2 Effect of different treatment conditions on antagonistic thyroid receptor activities of ZnCl_2

为了确保实验结果的可靠性,排除腐殖酸本身具有的类/抗甲状腺激素干扰效应而造成测试结果的假阳性,利用快速测试对不同浓度梯度腐殖酸溶液的甲状腺激素干扰效应进行检测,测试结果如图 3 所示,并未检测到腐殖酸具有显著的类/抗甲状腺激素干扰效应($P > 0.05$),表明腐殖酸并未对测试体系造成干扰,实验结果具有可靠性。

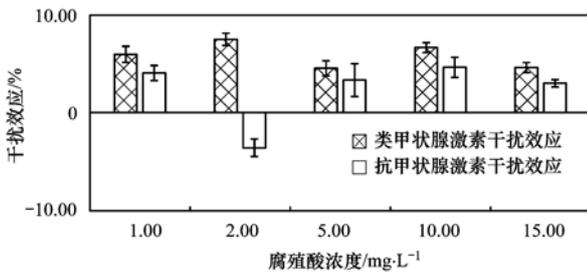


图3 腐殖酸类/抗甲状腺激素干扰效应

Fig. 3 Agonistic/Antagonistic thyroid receptor activities of humic acid

2.3 添加溶解态腐殖酸对生物有效态锌含量的影响

为了佐证上述结论,采用ASV方法对模拟水样中生物有效态锌浓度进行检测,结果见表1.实验结果表明,当腐殖酸和氯化锌溶液混合后,ASV检测到溶液中生物有效态锌的浓度显著降低,表明腐殖酸可能和锌发生了络合反应,形成腐殖酸-锌络合物.当腐殖酸浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随着氯化锌溶液浓度的升高,腐殖酸对锌的络合量增加,但生物有效态锌含量降低的百分比逐渐变小,与已有报道的实验结果一致,可能的原因是在同一条件下,腐殖酸体系中的结合位点是一定的,加入的锌离子越多,结合的百分比就越小^[26].

ASV的测试结果与甲状腺激素干扰效应测试结果间表现出相同的趋势,进一步证实溶解态腐殖酸能够降低水体中锌的甲状腺激素干扰效应.

表1 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 腐殖酸对生物有效态锌含量的影响Table 1 Effect of humic acid ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) on the concentration of bio-available zinc

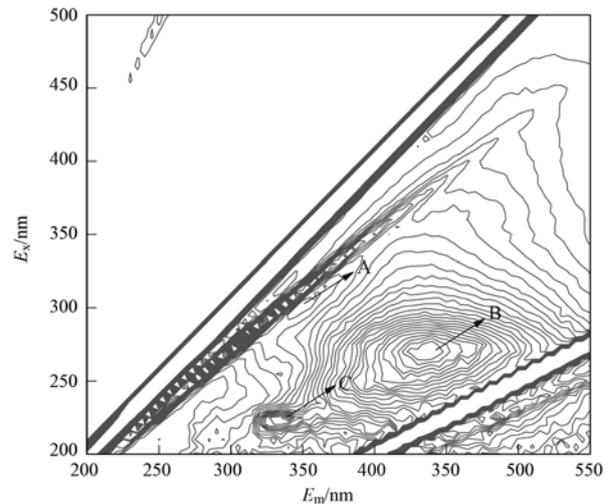
腐殖酸+氯化锌 / $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	生物有效态锌浓度 / $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	锌含量降低百分数 /%
$5 + 2 \times 10^{-3}$	1.88×10^{-3}	6.00
$5 + 2 \times 10^{-4}$	1.81×10^{-4}	9.50
$5 + 7 \times 10^{-5}$	6.22×10^{-5}	11.14
$5 + 2 \times 10^{-5}$	1.68×10^{-5}	16.00
$5 + 7 \times 10^{-6}$	4.99×10^{-6}	28.71

2.4 紫外照射对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响

腐殖酸分子中含有大量的发色团,能够直接吸收紫外和可见光,将所吸收的光能转化为化学能,并形成不稳定的激发态,引起自身降解,从而释放出与之结合的重金属离子,改变金属离子形态^[27].因此,本研究对模拟水样进行紫外照射后采用快速测试方法检测甲状腺激素干扰效应.测试结果(图2)表明,模拟水样经紫外照射后,水样的抗甲状腺激素干扰效应显著增加,但仍低于未加腐殖酸水样的抗

甲状腺激素干扰效应.这说明紫外照射能够破坏腐殖酸与锌的络合键位^[28],从而释放出部分锌,导致照射后模拟水样的甲状腺激素干扰效应增强.但是由于紫外照射并不能使腐殖酸完全降解,所以照射后模拟水样的甲状腺激素干扰效应仍低于未加腐殖酸水样的抗甲状腺激素干扰效应.

为了更加直观地表征腐殖酸与氯化锌的作用机制,对上述样品开展三维荧光光谱扫描.测试结果如图4和图5, $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 腐殖酸存在3个荧光峰,分别记为荧光峰A、B、C.荧光峰A的激发波长、发射波长分别为 $298 \sim 306 \text{ nm}$ 、 $345 \sim 356 \text{ nm}$ 处,即 E_x/E_m 为 $(298 \sim 306) \text{ nm} / (345 \sim 356) \text{ nm}$,荧光峰B位于 E_x/E_m 为 $(265 \sim 278) \text{ nm} / (424 \sim 447) \text{ nm}$ 处,荧光峰C位于 E_x/E_m 为 $(221 \sim 226) \text{ nm} / (328 \sim 342) \text{ nm}$ 处,与Hudson等^[29]报道腐殖酸的峰的位置相近,其中荧光峰A、C可能为类蛋白荧光基团,与芳香族氨基酸相关^[30],荧光峰B可能为类富里酸基团,与陆地还原性醌类相关^[31].文献^[32]报道了重金属可以和腐殖酸中的糖类官能团、醌基、羟基发生配位作用,形成复杂的络合物.当 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 腐殖酸溶液中加入氯化锌后,荧光峰A、B、C的荧光强度均降低,表明 Zn^{2+} 可能与荧光峰A、B、C所代表的有机物官能团发生了络合配位作用^[33].其中荧光峰B强度下降的趋势较大,可能的原因是荧光峰B富含醌基,与 Zn^{2+} 的络合能力较强.三维荧光光谱直观地反映出腐殖酸对 Zn^{2+} 的络合作用,可在此基础上进一步开展溶解态腐殖酸影响锌抗甲状腺激素干扰效应的作用机制研究.

图4 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 腐殖酸溶液的三维荧光光谱Fig. 4 3D fluorescence spectrum of humic acid ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

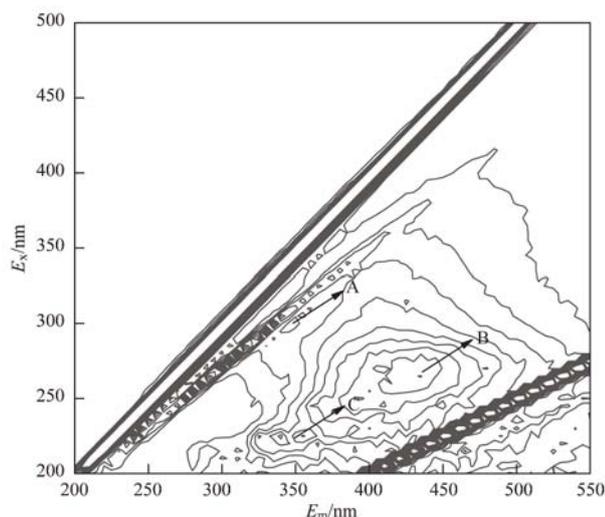


图5 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 腐殖酸和 $2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ZnCl_2 混合溶液的三维荧光光谱

Fig. 5 3D fluorescence spectrum of the mixed solution of humic acid ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and ZnCl_2 ($2 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

3 结论

(1) ASV 方法能检测出水体中生物有效态的锌含量, 本文建立的 ASV 方法对 ZnCl_2 检测的线性范围为 $3.0 \times 10^{-6} \sim 2.0 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 检测限为 $1.3 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 适用于工业废水中锌含量的检测。

(2) 腐殖酸和锌发生络合反应后, 会明显降低锌的抗甲状腺激素干扰效应, 紫外照射会使腐殖酸发生降解, 释放出部分锌, 使得模拟水样的抗甲状腺激素干扰效应上升, 但由于紫外照射并不能完全降解腐殖酸, 照射后模拟水样的甲状腺激素干扰效应仍低于未加腐殖酸水样的抗甲状腺激素干扰效应。

(3) 3DEEM 技术能够捕获溶解态腐殖酸与 Zn^{2+} 作用前后的荧光特性, 能够直观地反映腐殖酸对氯化锌的络合作用, 有利于进一步开展溶解态腐殖酸影响 Zn^{2+} 甲状腺激素干扰效应的作用机制研究。

参考文献:

- [1] Boas M, Feldt-Rasmussen U, Skakkebaek N E, *et al.* Environmental chemicals and thyroid function [J]. *European Journal of Endocrinology*, 2006, **154**(5): 599-611.
- [2] 李剑, 任姝娟, 李沫蕊, 等. 北京官厅水库水体甲状腺激素干扰效应检测及特征[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(7): 1884-1889.
Li J, Ren S J, Li M R, *et al.* Thyroid disrupting effects characterization of water from Guanting Reservoir, Beijing, China [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(7): 1884-1889.
- [3] Freake H C, Govoni K E, Guda K, *et al.* Actions and interactions of thyroid hormone and zinc status in growing rats [J]. *The Journal of Nutrition*, 2011, **131**(4): 1135-1141.
- [4] 兰亚琼. 水环境中镉离子与腐殖酸作用特性的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. 1-11.
Lan Y Q. Study on characteristics of heavy metals and humic acid in the water environment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. 1-11.
- [5] 刘清, 王子健, 汤鸿霄. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展[J]. *环境科学*, 1996, **17**(1): 89-92.
Liu Q, Wang Z J, Tang H X. Research progress in heavy metal speciation and toxicity and bioavailability of heavy metals [J]. *Environmental Science*, 1996, **17**(1): 89-92.
- [6] 李光林. 腐殖酸与几种重金属离子的相互作用及影响因素研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2002. 10-18.
Li G L. On the reaction of humic acids on some heavy metal ions and the affecting factors [D]. Chongqing: Southwest University, 2002. 10-18.
- [7] Gonzalez D, Almendros P, Alvarez J M. Mobility in soil and availability to triticale plants of copper fertilisers [J]. *Soil Research*, 2015, **53**(4): 412-422.
- [8] Apte S C, Batley G E, Bowles K C, *et al.* A comparison of copper speciation measurements with the toxic responses of three sensitive freshwater organisms [J]. *Environmental Chemistry*, 2005, **2**(4): 320-330.
- [9] Hauri J F, Horne A J. Copper chelation in discharged groundwater via EDTA addition: a real world application [J]. *Water Environment Research*, 2006, **78**(13): 2508-2513.
- [10] Pesavento M, Alberti G, Biesuz R. Analytical methods for determination of free metal ion concentration, labile species fraction and metal complexation capacity of environmental waters: a review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2009, **631**(2): 129-141.
- [11] Batley G E, Apte S C, Stauber J L. Speciation and bioavailability of trace metals in water: progress since 1982 [J]. *Australian Journal of Chemistry*, 2004, **57**(10): 903-919.
- [12] Chen J, LeBoeuf E J, Dai S, *et al.* Fluorescence spectroscopic studies of natural organic matter fractions [J]. *Chemosphere*, 2003, **50**(5): 639-647.
- [13] Banaitis M R, Waldrip-Dail H, Diehl M S, *et al.* Investigating sorption-driven dissolved organic matter fractionation by multidimensional fluorescence spectroscopy and PARAFAC [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, **304**(1): 271-276.
- [14] 吴敦虎, 任淑芬, 盛晓梅. 紫外光照射水中腐殖酸分解的研究[J]. *环境化学*, 1985, **4**(3): 56-60.
- [15] 李源, 任凤莲, 周恩荣, 等. 阳极溶出伏安法同时测定锌电解液中镉铜钴[J]. *冶金分析*, 2011, **31**(10): 14-17.
Li Y, Ren F L, Zhou E R, *et al.* Determination of cadmium, copper and cobalt in zinc electrolyte by anodic stripping voltammetry [J]. *Metallurgical Analysis*, 2011, **31**(10): 14-17.
- [16] Li J, Ren S J, Han S L, *et al.* A yeast bioassay for direct measurement of thyroid hormone disrupting effects in water without sample extraction, concentration, or sterilization [J]. *Chemosphere*, 2014, **100**: 139-145.
- [17] Li J, Wang Z J, Ma M, *et al.* Analysis of environmental endocrine disrupting activities using recombinant yeast assay in wastewater treatment plant effluents [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2010, **84**(5):

- 529-535.
- [18] 李建平, 陆继勇. 固体汞合金电极电位溶出法同时测定痕量锌、镉、铅[J]. 应用化学, 2006, **23**(9): 1006-1009.
Li J P, Lu J Y. Simultaneous determination of zinc, cadmium and lead by potential stripping analysis using silver-solid amalgam electrode[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2006, **23**(9): 1006-1009.
- [19] 张敏, 程发良. 稀土掺杂的类普鲁士蓝化学修饰电极上用阳极溶出伏安法测奶制品中的锌[J]. 东莞理工学报, 2005, **12**(3): 92-95.
Zhang M, Cheng F L. Cathodic tripping voltammetry for the determination of zinc in the milk samples on the rare earth Prussian blue analogue film[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2005, **12**(3): 92-95.
- [20] Nascimento D S, Insausti M, Band B S F, *et al.* Simultaneous determination of Cu, Pb, Cd, Ni, Co and Zn in bioethanol fuel by adsorptive stripping voltammetry and multivariate linear regression[J]. Fuel, 2014, **137**: 172-178.
- [21] Trindade J M, Martiniano L C, Gonçalves V R A, *et al.* Anodic stripping voltammetry coupled with design of experiments for simultaneous determination of Zn⁺², Cu⁺², Pb⁺², and Cd⁺² in gasoline[J]. Fuel, 2012, **91**(1): 26-32.
- [22] Tormin T F, Narciso L C D, Richter E M, *et al.* Batch-injection stripping voltammetry of zinc at a gold electrode: application for fuel bioethanol analysis[J]. Electrochimica Acta, 2015, **164**: 90-96.
- [23] Li J, Liu Y, Kong D D, *et al.* T-screen and yeast assay for the detection of the thyroid-disrupting activities of cadmium, mercury, and zinc[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(10): 9843-9851.
- [24] 朱先芳. 密云水库沉积物中腐殖酸特征及其与重金属吸附作用研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013. 12-16.
Zhu X F. Characterization of sedimentary humic acid and its interaction with heavy metals from Miyun Reservoir[D]. Beijing: Capital Normal University, 2013. 12-16.
- [25] 范文宏, 陈俊, 王琼. 胡敏酸对沉积物中重金属形态分布的影响[J]. 环境化学, 2007, **26**(2): 224-227.
Fan W H, Chen J, Wang Q. Influence of humic acid on species of heavy metals in sediments[J]. Environmental Chemistry, 2007, **26**(2): 224-227.
- [26] 刘保峰. 胡敏酸与锌、镍及锌-镉离子相互作用和影响因素研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2005. 30-35.
Liu B F. The interactions of humic acid with Zn²⁺, Ni²⁺ and co-existed Zn²⁺, Cd²⁺ and the affecting factors[D]. Chongqing: Southwest University, 2005. 30-35.
- [27] 薛志欣, 杨桂朋, 夏延致. 水环境腐殖质的光化学研究进展[J]. 海洋科学, 2008, **32**(11): 74-79.
Xue Z X, Yang G P, Xia Y Z. The photochemical reaction of humic substance in water[J]. Marine Sciences, 2008, **32**(11): 74-79.
- [28] Sensi N, Rizzi F R, Dellion P, *et al.* Fractal dimension of humic acids in aqueous suspension as a function of pH and time[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, **60**(6): 1773-1780.
- [29] Hudson N, Baker A, Reynolds D. Fluorescence analysis of dissolved organic matter in natural, waste and polluted waters-a review[J]. River Research and Applications, 2007, **23**(6): 631-649.
- [30] Wu F C, Tanoue E. Isolation and partial characterization of dissolved copper-complexing ligands in streamwaters [J]. Environment Science & Technology, 2001, **35**(18): 3646-3652.
- [31] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. Environment Science & Technology, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [32] 赵莹. 我国不同生态型湖泊沉积物有机质赋存形态及其与重金属相互作用研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012. 93-100.
Zhao X. Investigation on distribution of organic matter and its complexation with heavy metals in sediments of different ecological lakes in China [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012. 93-100.
- [33] 杨毅, 王晓昌, 金鹏康, 等. 不同来源溶解态腐殖酸与 Cu²⁺ 作用的荧光特性[J]. 环境工程学报, 2011, **3**(10): 1902-1905.
Yang Y, Wang X C, Jin P K, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved humic acids with different sources and copper ion complexation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **3**(10): 1902-1905.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172