

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

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

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926)	《环境科学》征订启事 (4057)
信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究

王文东^{1,2}, 周礼川¹, 丁真真³, 王洪平⁴, 孙学军⁴

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 嘉兴 314006; 3. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710064; 4. 西安水业运营有限公司曲江水厂, 西安 710061)

摘要: 腐殖酸广泛存在于各类地表水体中, 分子结构对其物化性质有着显著影响。为探明紫外辐射过程对腐殖酸化学稳定性的影响途径, 本研究采用光谱学和电化学技术考察了酚羟基和羧基等活性位点含量、胶体 Zeta 电位及其平均粒径等结构参数在辐射前后的变化特征。研究发现, 未经辐射的水样, 混凝过程对腐殖酸无明显去除效果。随着辐射时间的增加, 腐殖酸的去除率大幅提高。照射 3 h 后, 腐殖酸的去除率在 80% 以上。光谱分析结果表明, 紫外辐射后腐殖酸分子中部分具有荧光效应的基团可能发生脱落或重排, 但其芳香结构并未发生明显变化。胶体的 Zeta 电位和平均粒径均呈下降趋势, 不利于腐殖酸的聚集沉淀; 然而, 腐殖酸分子中的羟基含量在辐射后略有下降, 并伴随羧基和羰基等官能团的形成。活性位点数量及其反应活性的改善是腐殖酸化学稳定性下降的主要原因。

关键词: 紫外辐射; 腐殖酸; 红外光谱; 混凝; 化学稳定性

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3921-06

Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light

WANG Wen-dong^{1,2}, ZHOU Li-chuan¹, DING Zhen-zhen³, WANG Hong-ping⁴, SUN Xue-jun⁴

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Department of Environmental Technology and Ecology, Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 4. Qujiang Drinking Water Purification Plant, Water Industry Operations Company of Xi'an, Xi'an 710061, China)

Abstract: Humic acid widely presents in various surface waters. Molecular structure has significant impacts on its physical and chemical properties. To explore the stability variation of humic acid before and after the UV light radiation, spectroscopic and electrochemical analysis were applied in this paper. Structural parameters selected in the experiments include reactive sites, such as phenolic hydroxyl and carboxyl contents, Zeta potential, and colloidal size. It was found that there was little humic acid being removed in the solution without UV radiation pretreatment; while its remove ratio increased notably with radiation time. After 3 h pretreatment, humic acid removal ratio was above 80% in coagulation. Spectroscopy analysis results showed that partial of the groups with fluorescent effects might be shed or rearranged after the radiation; while its aromatic structure was not destroyed. Both the Zeta potential and average colloidal size decreased with the radiation time, which was not conducive to the aggregation of humic acid. However, —OH content decreased slightly after the UV radiation, and new carboxyl and carbonyl groups formed simultaneously. The increasing of the reactive sites and the improvement of the reaction effectiveness were the major reasons leading to humic acid stability decrease in PACl coagulation.

Key words: UV radiation; humic acid; infra-red spectrum; coagulation; chemical stability

天然水体中的腐殖酸主要为水生植物和低等浮游生物的分解产物, 约占总有机物量的 50% ~ 90%^[1,2]。其在水中呈疏松结构, 最小分散粒径约为 6 ~ 10 nm, 具有明显的胶体特征^[3]。腐殖酸可以产生令人不愉快的色和味, 为氯消毒过程中卤化物等有毒副产物的主要前驱物^[4~6]。此外, 腐殖酸对各种有毒有机物和重金属还具有强烈的吸附和络合作用^[7~10], 形成复合污染, 处理起来十分困难。强化混凝被认为是去除腐殖酸等消毒副产物前驱物最为可行的技术 (best available technology, BAT), 但该法对溶解性有机物的去除效果并不理想^[11,12]。研究发

现, 腐殖酸虽难以直接被微生物降解, 但其在紫外辐射条件下的去除效率却非常高, 这可能与紫外线的强氧化性能有关^[13,14]。Schnitzer 等^[15]认为紫外辐射后水中的腐殖酸并未彻底矿化, 大多转化为小分子芳香族化合物; 随着光照时间的增长, 部分有机碳转化为无机碳。光照作用除了能将水中的腐殖酸

收稿日期: 2013-01-03; 修订日期: 2013-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21007050); 西安市碑林区科技局项目 (GX1106); 浙江省水质科学与技术重点实验室开放基金项目

作者简介: 王文东 (1980 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: wwd@xauat.edu.cn

直接矿化外,还具有促进后续混凝过程絮体形成,提高混凝效果的功能^[16]. 这可能与光照过程中腐殖酸分子结构的变化有关;然而,现有研究对光照处理后腐殖酸结构变化特征的关注较少,理论研究的不足制约了有机物混凝技术的快速发展. 本研究采用全波长扫描光谱、三维荧光光谱、红外光谱和电位滴定等技术对紫外线辐射过程中腐殖酸水溶液化学凝聚性的影响途径进行了初步分析.

1 材料与方法

在碱性条件下溶解适量腐殖酸(Fluka humic acid, sigma-Aldrich),经 0.45 μm 滤膜去除悬浮杂质,滤出液 TOC 含量为 700 mg·L⁻¹,作为储备液供稀释使用. 混凝试验所用原水采用自来水配制. 通过向自来水中投加适量高岭土和腐殖酸母液,将浊度和 TOC 分别控制在 5 NTU 和 25.0 mg·L⁻¹. 通过投加适量的 0.01 mol·L⁻¹ NaOH 和 0.01 mol·L⁻¹ HNO₃ 调节原水 pH,各水质参数及其测定方法如表 1 所示. 除聚合氯化铝(PACl, Al₂O₃ ≤ 30%)外,本研究所用试剂均为分析纯.

表 1 原水水质参数及其分析方法

Table 1 Water quality parameters and analysis methods of raw water		
水质参数	数值	分析仪器或方法
水温/℃	20.0	温度计
浊度/NTU	5.0	浊度计
pH	7.5	玻璃电极法
TOC/mg·L ⁻¹	25.0	TOC 分析仪
碱度(以 CaCO ₃ 计)/mg·L ⁻¹	86.8	化学滴定法
硬度(以 CaCO ₃ 计)/mg·L ⁻¹	46.0	EDTA 滴定法
氟离子/mg·L ⁻¹	0.21	玻璃电极法

试验用紫外线处理系统为双层柱状不锈钢结构,内层为具有石英玻璃保护套管的紫外灯(购自陕西奥联科技有限公司),输出功率为 11 W;外层为反应腔. 反应腔上、下两侧分别设有进水口和出水口. 试验过程中,系统按序批式运行. 原水从进水口加入反应腔(出水口处于关闭状态),辐射处理后打开出水口取样.

腐殖酸溶液化学稳定性通过烧杯试验表征,利用六联智能搅拌仪(DC-506,上海自来水设备工程公司)控制颗粒碰撞频率及接触时间. 具体操作过程为,向腐殖酸溶液中投加 PACl 混凝剂后,在 200 r·min⁻¹ 的搅拌强度下反应 1 min,使其在短时间内混合均匀;而后在 50 r·min⁻¹ 的搅拌强度下反应 15 min,促进脱稳胶粒的聚集沉淀;待体系静沉 30 min 后取样并进行相关指标分析.

为评价紫外光照射前后腐殖酸结构及物化性质的变化规律,分别采用紫外-可见全波长分光光度计(Shimadzu UV-1800,日本)、荧光光度计(FP-6500,日本理学)和傅里叶红外光谱仪(FTIR-650,天津港东科技发展有限公司)进行样品分析. 三维荧光分析时,使用 150 W 氙弧灯为激发光源. 激发波长(λ_{ex})270~470 nm;发射波长(λ_{em})380~580 nm. 采用 Surfer 8.0 软件进行三维荧光图谱绘制.

采用马尔文 ZEN3690 Zeta 电位仪进行电位滴定试验. 试验中以 0.05 mol·L⁻¹ HCl 滴定水样 pH 至 3.0 以下,再以 0.05 mol·L⁻¹ NaOH 滴定使其 pH 升至 11.0 以上,记录溶液 pH 变化及相应滴定液的使用体积,绘制滴定曲线,评价腐殖酸分子活性位点的分布特征;同时,采用 Zeta 电位分析仪(ZC-2000ζ, Macrotech Nichion, 日本)评价 Zeta 电位和平均胶体粒径.

2 结果与讨论

2.1 紫外辐射对腐殖酸溶液化学稳定性的影响

原水经紫外辐射处理后,部分腐殖酸分子在矿化作用下分解为 CO₂,使得溶液中的有机组分含量降低. 研究表明,当紫外照射时间为 3 h 时,TOC 含量可降至 15.2 mg·L⁻¹,去除率在 40% 左右. 为评价原水经紫外辐射处理后其化学稳定性的变化规律,对不同照射时间的腐殖酸溶液进行稀释处理,使其总有机碳含量在 15.0 mg·L⁻¹. 而后进行混凝试验,出水中的总有机碳含量如图 1 所示. 从中可知,未经辐射处理的水样,混凝过程对 TOC 无明显去除效果. 随着紫外照射时间的增加,混凝过程中腐殖酸的去除效率不断提高. 照射 1.5 h 的水样,混凝出水中的 TOC 含量为 11.0 mg·L⁻¹;紫外辐射时间为

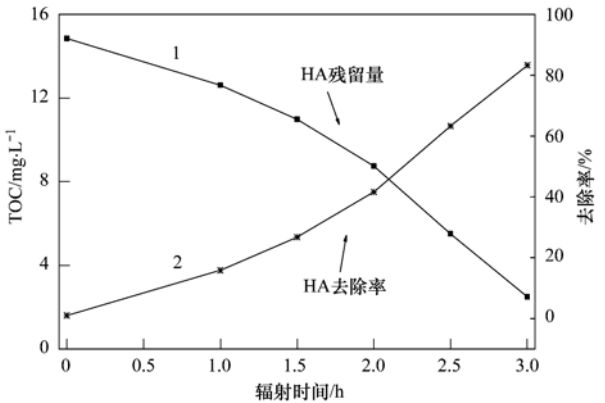


图 1 混凝出水中 HA 残余量随辐射时间的变化规律
Fig. 1 Variations of HA residual with UV radiation time in the coagulant effluent

3 h 时,出水中的 TOC 含量可降至 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,腐殖酸类物质的去除率高达 80% 以上。

同时,随着紫外照射时间的增长,混凝过程中形成的絮体颗粒也更为密实。加入等量 PACl 混凝药剂后,照射时间长的系统腐殖酸胶粒脱稳沉淀的效果也更明显。与其它高级氧化技术类似,紫外辐射过程中将引起腐殖酸分子结构的变化,特别是由于化学键的断裂使诸多大分子降解为中分子或小分子。为分析紫外辐射对其化学稳定性的影响途径,本研究分别采用光谱学和电化学技术考察了酚羟基/羧基等活性基团,胶体 Zeta 电位及其平均粒径等结构参数在辐射前后的变化特征。

2.2 紫外辐射前后腐殖酸水溶液的光谱特征

由全波长扫描光谱可知,腐殖酸水溶液在 400 ~ 600 nm 范围内存在明显吸收,且随着紫外照射时间的增加各波长处的吸光度呈现下降趋势(图 2)。未经紫外照射处理的腐殖酸的 E4/E6 值(465 nm 和 665 nm 处吸光度的比值)为 2.83,紫外照射 2 h 后为 2.00,表明腐殖酸的腐殖度随辐射时间呈下降趋势。除可见光区外,腐殖酸对能量的吸收主要集中在紫外区。随着紫外照射时间的增加,溶液在 254、285、330 和 350 nm 处的吸光度明显下降,进一步表明紫外辐射对腐殖酸存在矿化作用;然而,特征参数 E2/E3(腐殖酸碱溶液在波长 250 nm 和 365 nm 处吸光度的比值)基本稳定在 2.40 左右,表明紫外辐射对腐殖酸芳香结构的影响较小。

腐殖酸的三维荧光图谱中存在比较明显的特征峰(310/425 nm)和脊线(350 ~ 460 nm/450 ~ 580

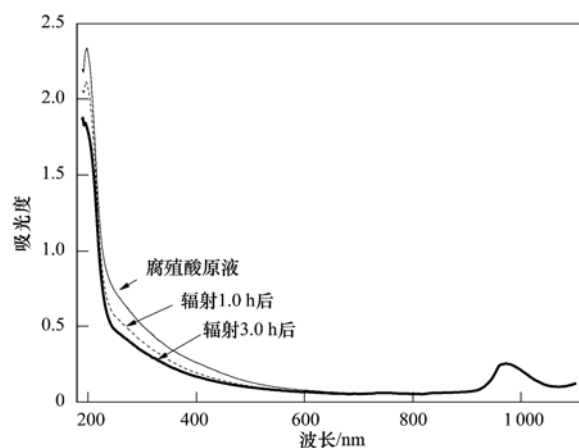


图 2 紫外辐射时间对 HA 溶液全波长吸收光谱的影响

Fig. 2 Effects of UV radiation on the light absorbency of HA solution

nm)。紫外辐射后虽然峰和脊的位置基本不变,指纹图谱却存在较大差异,特别是在峰和脊周围的区域(图 3)。随着照射时间的增加,脊的棱角逐渐减小,荧光强度却略有上升。表明腐殖酸的基本结构在照射前后没有明显变化,部分具有荧光效应的基团可能发生脱落或结构重排,使得刚性和共平面性结构增加,腐殖酸分子与溶剂和其它溶质分子间的相互作用减少。

与全波长扫描光谱类似,紫外辐射后腐殖酸的红外光谱存在明显变化。3500 ~ 2500 cm^{-1} 处强而宽的一OH 伸缩振动吸收在辐射后强度略有降低,表明腐殖酸分子中的羟基结构可能受到一定破坏;1708 ~ 2200 cm^{-1} 处的羧基和羰基官能团的伸缩振动吸收($\nu_{\text{C=O}}$)明显增强,这与1557 cm^{-1} 处羧酸类的 O—H 弯曲振动($\delta_{\text{O-H}}$)和酚类的 C—O 伸缩振动

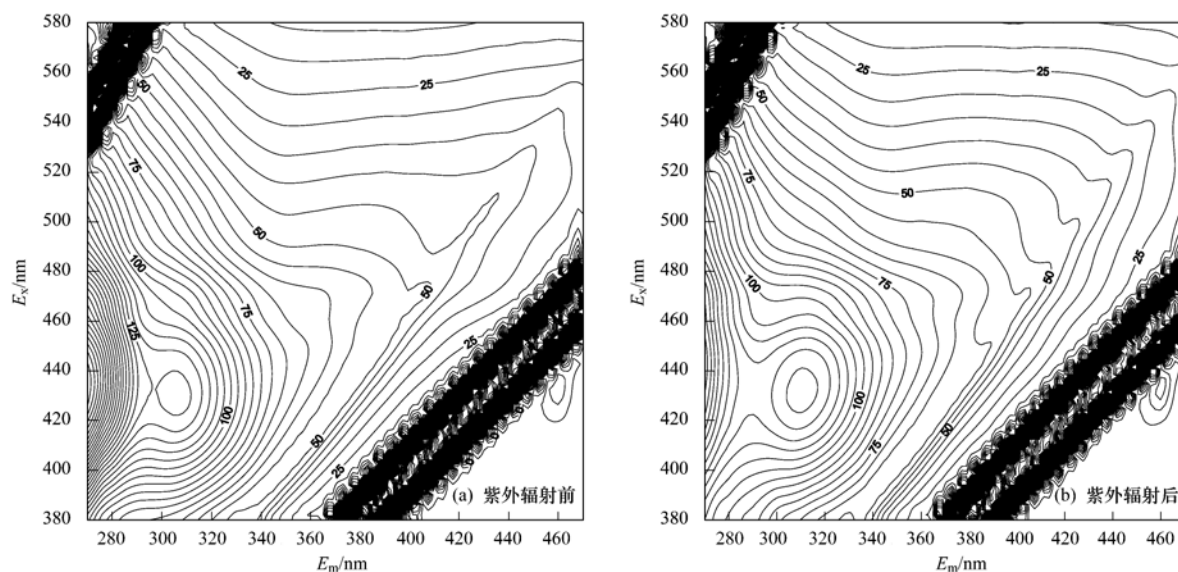


图 3 紫外辐射前后腐殖酸溶液三维荧光光谱变化规律

Fig. 3 3D fluorescence spectrum of HA before and after the UV radiation

峰($\nu_{C=O}$)的增强相一致(图4).除羟基和羧基等光能团发生变化外,腐殖酸的碳骨架和芳环均存在一定程度的弯曲和拉伸变形.

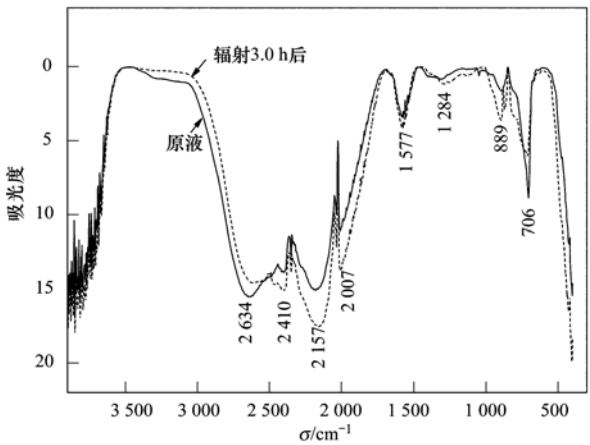


图4 紫外辐射对腐殖酸傅里叶红外光谱的影响
Fig. 4 Effects of UV radiation on the FT-IR spectrum of HA

2.3 紫外辐射前后腐殖酸水溶液的电化学特征

腐殖酸等大分子有机物具有酚羟基、羧基等弱酸性基团,在水溶液中易电离并与多价金属发生配位反应,使分子表面荷电^[17];因此,腐殖酸在水中具有胶体的一些性质.通过考察不同紫外照射时间下腐殖酸的荷电和和胶粒尺寸,发现腐殖酸的 Zeta 电位在紫外线照射后略有下降,20 min 后由原来的 -18 mV 降至 -22 mV,这可能与紫外光辐射过程中羧基和羰基等官能团含量的增加有关,不利于腐殖酸胶粒的聚集沉淀.与胶粒表面的荷电量相比,胶体粒径的变化更为显著.随着照射时间的增加,腐殖酸的平均粒径由照射前的2 100 nm迅速降至 1 000 nm,采用憎水胶体稳定理论难以给出紫外辐射后腐殖酸水溶液化学稳定性的下降途径(图5).

为验证紫外辐射后腐殖酸表面活性位点分布及

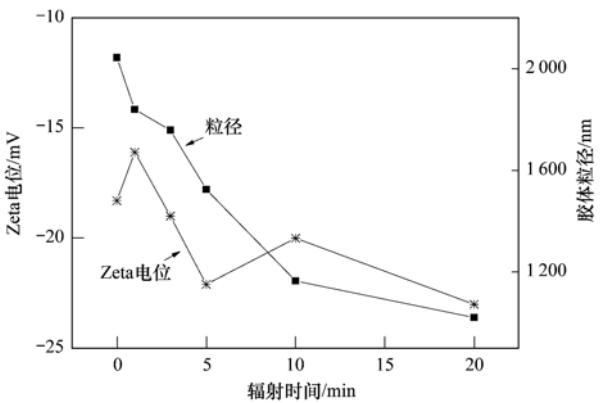


图5 腐殖酸胶体 Zeta 点位和平均粒径随辐射时间的变化
Fig. 5 Variations of HA Zeta potential and its average diameter versus radiation time

其官能团类型的变化特征,进一步考察了溶液的 电位滴定曲线.依据腐殖酸中酚羟基和羧基主要官能团的解离强度不同,可以确定二者在腐殖酸中的相对含量.一般认为溶液 pH 由 3.0 增至 8.0 时的投碱量与腐殖酸中的羧基含量相当;pH 由 8.0 增至 10.0 时的投碱量与酚羟基含量相当.不同辐射条件下腐殖酸结构中酚羟基和羧基的相对含量如表 2 所示.其中, V_1 、 V_2 和 V_3 分别对应滴定曲线上溶液 pH 为 3、8 和 10 时碱的投加体积.曲线 1、2 和 3 代表未经紫外线辐射、辐射 1.5 h 和辐射 3.0 h 条件下腐殖酸溶液的滴定曲线.依据碱液的投加体积和质量浓度可定量评价酚羟基和羧基的含量.由表 2 可知,未经紫外辐射时溶液中酚羟基和羧基的含量分别为 0.04 mmol 和 0.31 mmol.随着辐射时间的增加酚羟基的含量呈下降趋势,羧基含量逐渐上升.紫外辐射 3 h 后,二者的含量分别为 0.02 mmol 和 0.34 mmol,但二者之和基本保持不变.

表2 腐殖酸溶液中酚羟基和羧基含量分析

Table 2 Hydroxyl and carboxyl contents analysis in HA solution

辐射时间/h	V_1 /mL	V_2 /mL	V_3 /mL	n_{-COOH} /mmol	n_{-OH} /mmol	n /mmol
0.0	4.81	11.08	11.94	0.31	0.04	0.35
1.0	3.22	9.92	10.35	0.33	0.03	0.36
3.0	1.80	8.50	9.15	0.34	0.02	0.36

2.4 机制分析

综上所述可知,随着辐射时间的增加,胶粒的电位降低、平均粒径显著减小,不利于胶粒的脱稳沉淀,说明腐殖酸分子的去除过程不符合憎水胶体的混凝理论.大量研究已证实,腐殖酸分子中含有酚羟基、羧基、醇羟基、烯醇基、磺酸基、氨基、羰基和甲氧基等基团^[18~20].这些基团对水分子存在强

烈的吸附作用,使其周围包裹着一层较厚的水化膜,阻碍了分子间的聚集沉淀.小分子电解质对这类胶体稳定性的影响较小;为了降低其化学稳定性,常利用大分子物质的吸附架桥作用,在化学键或分子间力的作用下实现两个或多个亲水性胶粒连接.当桥接聚集体的质量达到临界值后,便从溶液中沉淀析出.

Al_{13} 是 PACl 中起絮凝作用的主要组分,投入水中后即可直接吸附在颗粒物表面,发挥很强的吸附架桥作用。然而,由 2.1 节分析可知,向未经紫外辐射处理的溶液中投加 PACl 后,对腐殖酸稳定性的影响仍较小,说明混凝药剂的吸附架桥功能并未发挥作用;而经照射处理后,投加 PACl 可有效降低腐殖酸的化学稳定性。这可能与紫外辐射前后腐殖酸结构中羟基和羧基等活性位点与 Al_{13} 结合强度的变化有关。与羟基等难以解离的官能团相比,羧基与 Al_{13} 的结合能力更强。由 2.2 和 2.3 节可知,随着照射时间的增加,溶液中羧基含量明显上升,使得混凝剂的吸附架桥作用得到加强。

腐殖酸是一种结构复杂的大分子有机物,表层结合位相对较少。由于空间位阻效应的影响,使得 Al_{13} 难以进入有机大分子内部并与之有效结合;而分子量较小的腐殖酸由于其结构中含有更多的非均质官能团、更大的 O/C 比和更高的活性位点利用率而具有更好的去除效果。因此,腐殖酸分子结构尤其是其活性位点数量和反应有效性的改善可能是造成其在投加 PACl 混凝剂后化学稳定大幅降低的主要原因。

3 结论

(1)通过本研究可知,未经辐射处理的水样,混凝过程对腐殖酸无明显去除效果。随着紫外照射时间的增加,腐殖酸的去除率大幅提高,形成的絮体颗粒也更为密实。腐殖酸的基本结构在照射前后虽然没有明显变化,但部分具有荧光效应的基团可能发生脱落重排,使得具有刚性和共平面性结构增加。

(2)紫外辐射处理后,羟基伸缩振动强度略有降低,而羧基和羰基等官能团的振动吸收明显增强,辐射过程中伴随着羟基的消亡和羧基、羰基等官能团的形成。紫外辐射 3 h 后,二者的含量分别为 0.02 mmol 和 0.34 mmol。

(3)腐殖酸胶体的 Zeta 电位经紫外线照射后略有下降。受活性位点数量和空间位阻效应的影响, Al_{13} 对未经紫外辐射处理的腐殖酸难以发挥吸附架桥作用;但是随着辐射时间的增加,溶液中羧基含量呈明显上升趋势。活性位点数量和反应有效性的改善可能是造成腐殖酸稳定性降低的主要原因。

参考文献:

- [1] Croué J P. Isolation of humic and non-humic NOM fractions: structural characterization [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2004, **92**(1-3): 193-207.
- [2] Liu G J, Zhang X R, Talley J W. Effect of copper(II) on natural organic matter removal during drinking water coagulation using aluminum-based coagulants [J]. Water Environment Research, 2007, **79**(6): 593-599.
- [3] 邓南圣, 吴峰. 环境光化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [4] Wang W D, Li H, Ding Z Z, et al. Effects of humic acid on residual Al control in drinking water treatment plants with orthophosphate addition[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2012, **6**(4): 470-476.
- [5] Choo K H, Kang S K. Removal of residual organic matter from secondary effluent by iron oxides adsorption [J]. Desalination, 2003, **154**(2): 139-146.
- [6] Ji Q H, Liu H J, Hu C Z, et al. Removal of disinfection by-products precursors by polyaluminum chloride coagulation coupled with chlorination [J]. Separation and Purification Technology, 2008, **62**(2): 464-469.
- [7] 王东升, 刘海龙, 晏明全, 等. 强化混凝与优化混凝: 必要性、研究进展和发展方向[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(4): 544-551.
- [8] Sadiq R, Kleiner Y, Rajani B. Water quality failures in distribution networks-Risk analysis using fuzzy logic and evidential reasoning [J]. Risk Analysis, 2007, **27**(5): 1381-1394.
- [9] Singer P C. DBPs in drinking water: Additional scientific and policy considerations for public health protection [J]. Journal of the American Water Works Association, 2006, **98**(10): 73-80.
- [10] 王东升. 微污染原水强化混凝技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] Federal R. Revisions to the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule (IESWTR), the Stage 1 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule (Stage 1 DBPR), and Revisions to State Primacy Requirements To Implement the Safe Drinking Water Act (SDWA) Amendments final rule [P]. 66--FR3770, January 16, 2001.
- [12] Bose P, Reckhow D A. The effect of ozonation on natural organic matter removal by alum coagulation [J]. Water Research, 2007, **41**(7): 1516-1524.
- [13] Wang W D, Li H, Ding Z Z, et al. Effects of advanced oxidation pretreatment on residual aluminum control in high humic acid water purification [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(7): 1079-1085.
- [14] 管自生, 姚建年, 马颖, 等. 紫外光辐射对 TiO_2 溶胶的影响研究 [J]. 高等学校化学学报, 2002, **23**(10): 1956-1959.
- [15] Schnitzer M, Khan S U. Humic substances in the environment [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1972.
- [16] 李华, 王文东, 王晓昌, 等. 臭氧-紫外预处理对高有机物原水混凝效果的影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1807-1812.
- [17] 王津南, 李爱民, 周友冬, 等. 弱碱性大孔吸附树脂对腐殖酸的吸附 [J]. 高等学校化学学报, 2009, **30**(1): 181-184.
- [18] He M C, Shi Y H, Lin C Y. Characterization of humic acids

- extracted from the sediments of the various rivers and lakes in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, **20**(11): 1294-1299.
- [19] Spaccini R, Piccolo A. Molecular characteristics of humic acids extracted from compost at increasing maturity stages[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(6): 1164-1172.
- [20] Leenheer J A, Wershaw R L, Reddy M M. Strong-acid, carboxyl-group structures in fulvic acid from the Suwannee River, Georgia. 1. Minor structures[J]. *Environmental Science and Technology*, 1995, **29**(2): 393-398.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1, 1.1, 1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 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