

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系

董倩倩¹, 张艾², 李咏梅², 陈玲², 黄清辉^{1*}

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 对黄浦江表层水样的过滤液进行紫外吸收光谱和荧光光谱扫描, 并测定了溶解有机碳(DOC)、*N*-亚硝基二甲胺(NDMA)及其生成潜能(NDMA-FP), 探讨了黄浦江溶解有机质(DOM)的光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系。结果表明, 黄浦江水中 NDMA-FP 随 DOC 浓度增加而增加($r=0.487$, $P<0.01$), 但与 DOM 的比吸收系数(SUVA₂₅₄)和腐殖化指数(HIX)均呈负相关($r=-0.605$, $P<0.01$; $r=-0.396$, $P<0.01$); NDMA-FP 还与相对较低分子量的类酪氨酸、类色氨酸等类蛋白物质的荧光强度呈显著正相关($r=0.421$, $P<0.01$; $r=0.426$, $P<0.01$), 而与类腐殖质的荧光强度则呈显著负相关($r=-0.422$, $P<0.01$)。因此, 黄浦江水中消毒副产物 NDMA 的生成潜能随着溶解有机质含量的增加而增加, 特别是与 DOM 中的类蛋白组分含量密切相关, 但随着 DOM 的芳香性和腐殖化程度的增强而减少。

关键词: 溶解有机质; 消毒副产物; *N*-亚硝基二甲胺; 比吸收系数; 腐殖化指数

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0958-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.020

Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River

DONG Qian-qian¹, ZHANG Ai², LI Yong-mei², CHEN Ling², HUANG Qing-hui¹

(1. Key Laboratory of Yangtze River Water Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Surface water samples from the Huangpu River were filtered to measure the UV absorption and fluorescence spectrum. Dissolved organic carbon (DOC), *N*-nitrosodimethylamine (NDMA), and its formation potential (NDMA-FP) were also analyzed to explore relationships between the properties of dissolved organic matter (DOM) and the formation potential of disinfection byproducts-NDMA in the Huangpu River. The study found that: NDMA-FP concentration increased with the increasing of DOC concentration ($r=0.487$, $P<0.01$), but it had negative relationships with SUVA₂₅₄ and HIX ($r=-0.605$, $P<0.01$; $r=-0.396$, $P<0.01$). NDMA-FP concentration had positive relationships with the fluorescence intensity of protein-like substances such as low-molecular-weight (LMW) tyrosine-like and tryptophan-like substances ($r=0.421$, $P<0.01$; $r=0.426$, $P<0.01$), but had a negative relationship with humic-like substance ($r=-0.422$, $P<0.01$). Therefore, NDMA formation potential increases with the increasing DOM content in the Huangpu River, which is significantly related with the protein-like substances, but decreases with the increasing aromaticity and humification of DOM.

Key words: dissolved organic matter; disinfection byproducts; *N*-nitrosodimethylamine; specific absorption coefficient; humification index

溶解有机质(DOM)在自然水体中普遍存在, 主要由腐殖质、多糖、蛋白质、酯类和核酸等组分构成。大部分的 DOM 组分能够吸收可见和紫外光, 被称为有色溶解有机质(CDOM), 其中一部分还能在一定的激发波长下产生荧光, 被称为荧光溶解有机质(FDOM)。溶解有机质具有高的反应活性, 能够与痕量有机污染物、重金属等发生吸附、络合及氧化/还原反应^[1], 它也是消毒副产物前体物质的主要来源^[2]。目前人们研究较多的消毒副产物有三卤甲烷(THMs)、卤乙酸(HAAs)等卤代烃化合物, 而

水中 DOM 的组成对形成不同消毒副产物的贡献有明显的差异^[3~5]。通常, 消毒副产物前体物是拥有苯环结构的腐殖质、木质素和丹宁酸等 DOM 组分, 会吸收与其浓度成正比的紫外辐射^[6], 有研究显示, DOM 的比吸收系数(SUVA₂₅₄)能够较好地反映

收稿日期: 2013-07-18; 修订日期: 2013-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071301, 50878165); 中央高校科研基本业务费专项(0400219216)

作者简介: 董倩倩(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境化学, E-mail: dong033407103@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qhhuang@tongji.edu.cn

其芳香性^[2].

近年来,*N*-亚硝基二甲胺(NDMA)作为一种新兴的、含氮的亚硝胺类消毒副产物,引起了科学家们的广泛关注^[7,8].关于消毒过程中 NDMA 的形成机制,多数人认为 NDMA 是由其前体物在氯消毒或氯胺消毒过程中发生氧化作用而生成的,水体中的一些溶解性有机质(DOM)是 NDMA 前体物的重要来源^[7].在对 NDMA 生成潜能与不同 DOM 组分的关系分析中,发现 DOM 中亲水性碱组分(HPIB)具有最大的单位质量 NDMA 生成潜能(NDMA-FP);用 SUVA₂₅₄ 预测 NDMA 的生成潜能时结果并不理想;在 DOM 荧光强度变化与 NDMA 的形成研究上也没有找到定量关系^[9,10].因此,本研究拟通过多种技术手段,包括利用平行因子分析(PARAFAC)将复杂的 DOM 成分分解为类蛋白、类腐殖质等荧光组分,试图在分析不同光学特性的 DOM 组分与 NDMA 生成潜能的关系上取得些突破.

1 材料与方法

1.1 样品采集与 DOM 测定

2012 年 2~12 月,每两个月一次对黄浦江上游至下游 11 个点位的表层水样进行采集.采集后的水样带回实验室,用 0.7 μm 孔径的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F, 450℃ 预灼 4 h)进行过滤,并存于棕色瓶内避光室温培养.

取适量 GF/F 过滤水样再经 0.22 μm 的醋酸纤维素酯膜(Millipore 公司)过滤后,进行紫外吸收、荧光光谱和总有机碳测定,经 28 d 室温培养的水样亦做上述测定.具体如下.

(1)紫外吸收光谱测定 用双光束紫外-可见分光光度计(北京普析通用 TU-1901 仪器,5 cm 比色皿)对样品进行吸收光谱扫描,波长扫描范围 800~200 nm.根据公式 $a_{\lambda} = 2.303 \times A(\lambda)/L$ 计算吸收系数 a_{λ} (m^{-1}),式中 λ 为波长(nm), $A(\lambda)$ 为特定波长处吸光度, L 为比色皿的光程.比吸收系数 SUVA₂₅₄ 是指物质在 254 nm 处的吸光度与 DOC 的比值,它能够很好地反映芳香性碳的含量^[2]. E_2/E_3 用来表示 250 nm 波长处吸光度与 365 nm 波长处吸光度的比值,其值的大小与 DOM 分子量的大小呈反比^[11].

(2)荧光光谱测定 用荧光光谱分析仪(F-4500,日本日立公司)对样品进行三维光谱(EEM)扫描,扫描范围 $E_{\text{ex}}/E_{\text{em}} = 240 \sim 400 \text{ nm}/300 \sim 550 \text{ nm}$,步长分别为 3 nm 和 2 nm;样品光谱数据经过扣除空白和拉曼归一化处理后,进行平行因子分析

(MATLAB Ver. 7.7.0),获得荧光组分^[12].腐殖化指数(HIX)用于表征 DOM 的腐殖化程度,定义为 254 nm 激发波长下,发射波长在 435~480 nm 与 300~345 nm 波段内的荧光强度积分值的比率;生物源指数(BIX)用于衡量新近水生生物生产的贡献,即 310 nm 激发波长下,发射波长在 380 nm 与 430 nm 处荧光强度的比值^[13,14].实验中所用空白均为超纯水.

(3)溶解有机碳(DOC)测定 将过滤后的样品酸化至 pH 2~3,用总有机碳分析仪(TOC-V_{CPN},日本岛津)测定 DOC 浓度,待炉温升至 720℃,基线稳定后,每个样品测定 2~3 次.由于样品 DOC 浓度较低,采用不可吹扫有机碳(NPOC)的方法进行测定.

1.2 NDMA 和 NDMA-FP 测定

采用高效液相色谱质谱联用仪(HPLC-MS/MS)进行检测^[15,16].①取适量 GF/F 滤液经过 0.45 μm 孔径的醋酸纤维素酯膜(Millipore 公司)过滤,获得的 250 mL 滤液与 5 mL 0.1 mol·L⁻¹一氯胺溶液(有效氯为 4 mmol·L⁻¹)反应 10 d,然后 0.48 mL 0.568 mol·L⁻¹抗坏血酸终止反应,将此阶段内产生的 NDMA 的总浓度作为 NDMA-FP.②用 XDB C18 柱(150 mm × 2.1 mm × 3.5 μm; Agilent)对 0.45 μm 滤液以及反应 10 d 后的样品分别进行 NDMA 的固相萃取,萃取速度控制在 10 mL·min⁻¹.采用美国 EPA521 推荐的 NDMA 固相萃取标准方法,用 15 mL 二氯甲烷将其洗脱下来.再向洗脱液中加入 1 mL 100 ng·mL⁻¹的 NDMA-d6 作为内标,在室温条件下,用氮气将洗脱液浓缩至 1 mL,加 0.5 mL 超纯水,再将接受瓶置于 45℃ 水浴中加热 15 min,直到洗脱液中的二氯甲烷完全挥发,最后加超纯水定容至 1 mL,进行 HPLC-MS/MS 测定.③色谱条件:色谱柱为 Agilent XDB-C18 柱(150 mm × 2.1 mm × 3.5 μm).流动相:甲醇(A)和 2 mmol·L⁻¹醋酸铵水溶液(B).梯度洗脱:0~4 min, A 由 10% 至 45%, B 由 90% 至 55%; 4~5 min, A 由 45% 升至 100%, B 由 55% 降至 0%; 10~11 min, A 由 100% 降至 10%, B 由 0% 升至 90%; 保持至 13 min.流速:150 μL·min⁻¹.进样量:10 μL.柱温:30℃.质谱条件:ESI 源正离子电离模式;SRM 扫描模式;喷雾电压为 4 500 V;离子源温度为 375℃;保护气 N₂ 和辅助气 N₂ 压力分别为 40 AU 和 8 AU;碰撞气为氩气,碰撞气压 1.5 m Torr. NDMA 出峰时间为 3.35 min, NDMA-d6 的出峰时间为 3.32 min.

2 结果与讨论

2.1 黄浦江表层水溶解有机质的光谱特征

黄浦江表层水溶解有机质的光谱特征参数如表 1 所示. 从 2 ~ 12 月, 黄浦江 DOC 的浓度在 2.93 ~ 5.94 mg·L⁻¹ 之间变化, 呈冬高夏低的趋势, 一方面冬季属于枯水期, 水量较小; 另一方面夏季光照强、温度高, DOC 发生光解以及被微生物利用的效率也大大提高. a_{355} 值在 3.45 ~ 4.73 m⁻¹ 之间变化, 我国

大多数河流和淡水湖泊中溶解有机质的吸收系数也分布在这个范围内^[17]. 黄浦江水中的 DOM 的 HIX 值在 0.41 ~ 0.90 范围内 (< 1.5), BIX 值在 1.05 ~ 1.35 范围内 (> 1) 变化, 可以认为黄浦江 DOM 基本上以新近的生物源组分为主^[18]. 另外 a_{355} 值和 SUVA₂₅₄ 在 8 月均达到一个最大值, 这可能与夏季旺盛的初级生产力有关, 因为藻类释放以及高等植物腐烂是水体 DOM 的重要来源. 同时, 这也从侧面说明了黄浦江 DOM 的新近生物源性质.

表 1 黄浦江溶解有机质的紫外吸收和荧光光谱特征参数¹⁾

Table1 UV absorption and fluorescence characteristics of DOM in the Huangpu River					
项目	冬季(2月)	春季(4月)	夏季(8月)	秋季(10月)	冬季(12月)
DOC/mg·L ⁻¹	5.94 ± 1.08	4.23 ± 0.45	3.31 ± 0.56	2.93 ± 0.89	5.05 ± 0.66
C1 荧光强度	3.76 ± 0.80	3.83 ± 0.74	1.63 ± 0.72	2.59 ± 0.88	5.73 ± 2.53
C2 荧光强度	3.68 ± 0.59	3.28 ± 0.72	1.49 ± 0.43	1.87 ± 0.50	4.70 ± 2.48
C3 荧光强度	0.60 ± 0.12	0.50 ± 0.09	1.01 ± 0.27	0.94 ± 0.31	0.59 ± 0.87
C4 荧光强度	0.38 ± 0.07	0.55 ± 0.08	0.48 ± 0.18	0.81 ± 0.18	0.82 ± 0.43
HIX	0.5 ± 0.15	0.43 ± 0.07	0.90 ± 0.40	0.61 ± 0.16	0.53 ± 0.16
BIX	1.16 ± 0.09	1.24 ± 0.07	1.05 ± 0.08	1.23 ± 0.14	1.35 ± 0.18
a_{355}/m^{-1}	3.85 ± 0.96	3.45 ± 0.81	4.73 ± 0.81	4.39 ± 0.73	4.18 ± 0.94
SUVA ₂₅₄ /L·(mg·m) ⁻¹	2.57 ± 0.33	5.02 ± 0.28	8.59 ± 1.90	7.91 ± 2.09	5.10 ± 0.68
E_2/E_3	7.99 ± 0.71	7.83 ± 0.72	7.37 ± 0.16	7.43 ± 0.37	7.88 ± 0.66
E_2/E_3^*	—	7.88 ± 0.69	7.65 ± 1.99	7.74 ± 0.45	8.11 ± 0.75
NDMA/ng·L ⁻¹	27.9 ± 11.2	46.3 ± 11.7	17.7 ± 12.0	24.7 ± 6.2	34.5 ± 9.4
NDMA-FP/ng·L ⁻¹	200.3 ± 67.8	132.8 ± 31.0	80.2 ± 21.2	97.9 ± 21.3	144.3 ± 33.9

1) E_2/E_3^* 为培养后的值; 6 月因为条件限制, 未能取得样品

如图 1 所示, 对 247 组 EEM 数据进行平行因子分析, 得到了类酪氨酸 C1 ($E_x/E_m = 280$ nm/319

nm)、类色氨酸 C2 ($E_x/E_m = 240, 289$ nm/350 nm)、类色氨酸 C4 ($E_x/E_m = 289$ nm/340 nm) 等 3 种类蛋

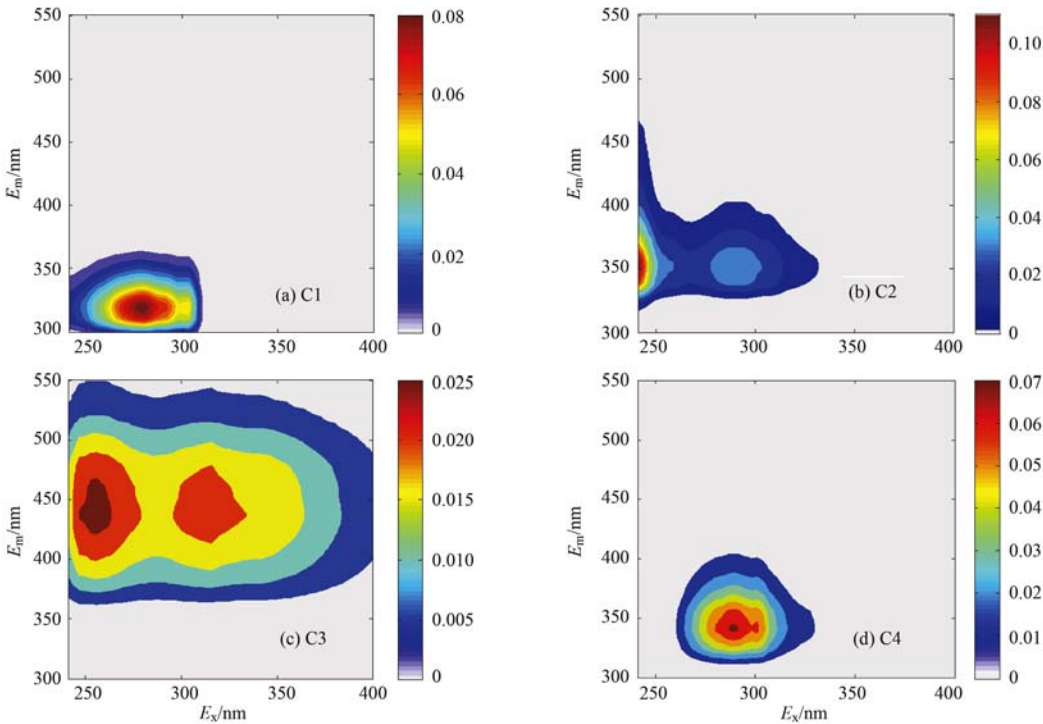


图 1 PARAFAC 分析得到的荧光组分

Fig. 1 Fluorescent components decomposed by PARAFAC

白组分和一种类腐殖质组分 C3 ($E_x/E_m = 256\text{ nm}$, $316\text{ nm}/437\text{ nm}$)^[19]. 通过培养实验发现, C1、C2 和 C3 属于微生物难降解组分, 而 C4 中的一部分可被微生物利用(暂未发表数据). 早期研究认为小分子的物质容易被微生物利用, 但后来有研究表明微生物更倾向于优先利用大分子物质^[20], 小分子物质则为大分子物质降解后的产物, 外部条件不变的情况下, 其再度被利用的可能性很小. 另外, 本研究还观察到培养后的水样, 其 DOM 的 E_2/E_3 值稍微有些升高(见表 1), 说明培养后 DOM 分子量降低^[11], 表明在培养的过程中, 大分子的物质被微生物优先分解了.

2.2 CDOM 与 NDMA 及其前体物的关系

一般认为, 在 DOC 含量高于 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SUVA_{254} 值大于 $2\sim3\text{ L}\cdot(\text{mg}\cdot\text{m})^{-1}$ 的水体中, 消毒副产物的生成潜能与 CDOM 有着很好的相关性^[21]. 在本研究中发现, NAMA-FP 浓度与 DOC 浓度呈显著正相关, 而与 SUVA_{254} 呈显著负相关(见表 2), 表明 DOM 中参与生成消毒副产物 NDMA 的物质芳香性较低, 亲水性有机物中低芳香性化合物对消毒副产物的生成贡献较大些, 与 Ndiongue 等^[22]的研究结果相符. 但是也不排除苯环作为氯化反应的活性官能团与氯胺发生卤代反应, 楚文海等^[23]发现酪氨酸作为氯仿的前体物, 与氯胺发生卤代反应, 而使紫外光谱吸收发生蓝移. NDMA 与 a_{355} 呈显著负相关, 与比吸收系数的相关性则很小. 这可能是因为卤化降低了疏水性酸的芳香性, 并导致其分子分解成更小的片段^[24], 如对氯苯酚, 氨基酸, 对氯甲基苯酚等, 从而减弱了其在 355 nm 波长处的吸收.

但是, Weishaar 等^[2]、Chen 等^[10]、Ates 等^[21]认为, SUVA_{254} 作为衡量消毒副产物生成潜能的指标, 并不十分可靠. 这些研究多集中在与三氯甲烷以及卤乙酸等消毒副产物的关系上. 一方面 SUVA_{254} 很难说明水样间的差异, 不能表明研究水体的地质、物理和环境因素(营养状态、流域土壤特性和土地利用特征、湖泊大小、河流流量等)的状况, 而这些因素往往决定了 DBP 前体的差异. 另一方面非芳香性组分也可能会参与形成消毒副产物. 例如叶绿素、蛋白质等物质在 254 nm 处没有吸收或吸收很小^[2]. 还有一些研究尝试用基于 SUVA_{254} 的模型来预测不同水样中消毒副产物的生成潜能, 但对 NDMA 的预测结果不理想^[10, 25]; 因为水体中的一些离子或者氨基类化合物也会成为影响模型的因素. 所以在选择单独使用 SUVA_{254} 来衡量水体消毒

副产物尤其是含氮消毒副产物生成潜能时, 依然需要谨慎.

表 2 NDMA 及其前体物与 DOM 光学特性的相关性¹⁾

Table 2 Relationship between NDMA, NDMA-FP and the optical properties of DOM		
	NDMA	NDMA-FP
NDMA-FP	0.249	1
DOC	0.101	0.487 **
SUVA_{254}	-0.338 *	-0.605 **
a_{355}	-0.506 **	-0.18
C1 荧光强度	0.300 *	0.421 **
C2 荧光强度	0.266	0.466 **
C3 荧光强度	-0.436 **	-0.422 **
C4 荧光强度	0.042	-0.06
HIX	-0.519 **	-0.396 **
BIX	0.521 **	0.234

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关; ** 表示在 0.01 水平上显著相关; $n = 55$

2.3 FDOM 与 NDMA 及其前体物的关系

自然水体中可通过亚硝化过程生成 NDMA, 这种转化机制中 NDMA-FP 被基本限定为二甲胺和含有二甲胺的叔胺等物质; 自由氯和氯胺会促进这一亚硝化过程的进行, 其本身也会与 DOM 发生反应^[7, 15]. 本研究发现 NDMA-FP 浓度与类酪氨酸和类色氨酸荧光强度有着显著的正相关性, 而与类腐殖质的荧光强度呈显著负相关(见表 2). 氨基酸类物质含有 1 个或多个 $-\text{NH}_2$, 在氯胺消毒过程中, 极有可能经过一系列反应形成 NDMA^[26, 27]. 而类腐殖质中含有较多的苯环, 芳香性较高, 并不是直接与氯胺发生反应生成 NDMA 的主要物质. 已有研究发现黄浦江中 NDMA 前体物主要以相对分子质量 $<1\,000$ 的有机物为主, 而这些有机物又主要以小分子的游离氨基化合物为主^[28]. 结合 DOM 的紫外吸收特征, 推断黄浦江 NDMA-FP 可能是小分子的低芳香性的氨基酸类物质. 虽然微生物对此类物质的作用很小, 但在自然条件下, 光照也是一个重要的影响因素. 在光照作用下, 这些小分子物质发生光解, 从而能够被微生物再度利用. 另外 DOM 在光照的作用下大部分反应基团会受到破坏, 其 SUVA_{254} 和荧光强度值能随着光照的时间增加而迅速下降(未发表数据). 光照也能降解痕量 NDMA, 在自来水和江水为背景的 2 种对比体系中, 光解 NDMA 去除率分别可达 96.7% 和 94.8%^[29]. 夏季, 黄浦江水 DOC 的浓度, 类酪氨酸和类色氨酸的含量以及 NAMA-FP 的浓度都要低于冬季, 一方面可归功于丰水期的稀释作用, 另一方面这类物质很容易发生光

漂白作用^[30],从而降低了其生成 NDMA 的潜力。

如果单独使用 $SUVA_{254}$ 来分析水体中 NDMA 的生成潜能不是很可靠,那么将它和荧光的相关指标结合起来,则可以说明一定的问题。HIX 的大小常被用来衡量 DOM 成熟度的高低^[31]。在本研究中发现,NDMA 及其生成潜能均与 HIX 呈显著负相关,也就是说随着腐殖化指数的升高,NDMA 前体物质的浓度会下降。说明在 DOM 趋于老化的过程中(微生物和光照的作用),它与氯消毒剂或者亚硝酸盐作用形成 NDMA 的能力会逐渐减弱。通常在无外源输入时,水体中 DOM 就会逐渐趋于老化。因此在饮用水处理中,建议加氯前使用紫外光接触或太阳光辐照,以降低 DOM 的反应性,削弱其生成 NDMA 的能力。

3 结论

黄浦江水体 NDMA 生成潜能随河水中溶解有机质含量增加而增加,其前体物并不是类腐殖质物质,而主要是分子量相对较低的类酪氨酸和类色氨酸物质;NDMA 生成潜能随 DOM 的芳香性和腐殖化程度增强而减少;在饮用水处理工艺中,若在氯胺消毒处理之前进行一定的光辐照处理,有可能大大降低 NDMA 的生成潜能。

参考文献:

- [1] Aiken G, Haitzer M, Ryan J N, *et al.* Interactions between dissolved organic matter and mercury in the Florida Everglades [J]. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 2003, **107**: 29-32.
- [2] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [3] 赵玉丽,李杏放. 饮用水消毒副产物: 化学特征与毒性[J]. *环境化学*, 2011, **30**(1): 20-33.
- [4] Marhaba T F, Van D. The variation of mass and disinfection by-product formation potential of dissolved organic matter fractions along a conventional surface water treatment plant[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, **74**(3): 133-147.
- [5] 罗锦洪,付青,郑丙辉,等. 水华期水体中 DOM 组成及其消毒副产物生成潜能[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, **20**(2): 210-218.
- [6] 陈超,张晓健,何文杰,等. 消毒副产物前体物的指标体系[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(4): 9-12.
- [7] 张强,刘燕,张云,等. 饮用水含氮消毒副产物 *N*-亚硝基二甲胺前体物研究进展[J]. *化学通报*, 2011, **74**(9): 817-821.
- [8] Choi J, Valentine R L. Formation of *N*-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine: a new disinfection by-product[J]. *Water Research*, 2002, **36**(4): 817-824.
- [9] Chen Z, Valentine, R L. Formation of *N*-Nitrosodimethylamine (NDMA) from humic substances in natural water [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(17): 6059-6065.
- [10] Chen B Y, Westerhoff P. Predicting disinfection by-product formation potential in water [J]. *Water Research*, 2010, **44**(13): 3755-3762.
- [11] 黄清辉,吴加学,蒋榆林,等. 舟山海域陆源溶解有机质变化及其对近岸羽状流的响应[J]. *海洋学报(中文版)*, 2011, **33**(1): 66-73.
- [12] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2008, **6**: 572-579.
- [13] Zhang Y, Zhang E, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(6): 2645-2659.
- [14] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [15] Munch J W, Bassett M V. Method 521 determination of nitrosamines in drinking water by solid phase extraction and capillary column gas chromatography with large volume injection and chemical ionization tandem mass spectrometry (MS/MS) [R]. National Exposure Research Laboratory, Office of Research and Development, 2004. EPA Document #: EPA/600/R-05/054.
- [16] Lv J, Li Y, Song Y. Reinvestigation on the ozonation of *N*-nitrosodimethylamine: Influencing factors and degradation mechanism[J]. *Water Research*, 2013, **47**(14): 4993-5002.
- [17] 陈锡超,纪颖琳,胡青,等. “引江济太”水系有色溶解有机质的特征与来源[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(1): 63-69.
- [18] 蔡明红,肖宜华,王峰,等. 北极孔斯峡湾表层沉积物中溶解有机质的来源与转化历史[J]. *海洋学报(中文版)*, 2012, **34**(6): 102-113.
- [19] Henderson R K, Baker A, Murphy K R, *et al.* Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: A review [J]. *Water Research*, 2009, **43**(4): 863-881.
- [20] Amon R M W, Benner R. Bacterial utilization of different size classes of dissolved organic matter [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, **41**(1): 41-51.
- [21] Ates N, Kitis M, Yetis U. Formation of chlorination by-products in waters with low $SUVA$ —correlations with $SUVA$ and differential UV spectroscopy [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4139-4148.
- [22] Ndiongue S, Huck P M, Slawson R M. Effects of temperature and biodegradable organic matter on control of biofilms by free chlorine in a model drinking water distribution system[J]. *Water Research*, 2005, **39**(6): 953-964.
- [23] 楚文海,高乃云,赵世峨,等. 在饮水中典型溶解性有机氮

- 酪氨酸氯化生成氯仿的机理分析[J]. 化学学报, 2009, **67**(21): 2505-2510.
- [24] Korshin G V, Kumke M U, Li C W, *et al.* Influence of chlorination on chromophores and fluorophores in humic substances[J]. Environmental Science and Technology, 1999, **33**(8): 1207-1212.
- [25] Sadiq R, Rodriguez M J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review [J]. Science of the Total Environment, 2004, **321**(1): 21-46.
- [26] Andrzejewski P, Kasprzyk-Hordern B, Nawrocki J. N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation during ozonation of dimethylamine-containing waters[J]. Water Research, 2008, **42**(4): 863-870.
- [27] Lee W, Westerhoff P, Croué J P. Dissolved organic nitrogen as a precursor for chloroform, dichloroacetonitrile, N-nitrosodimethylamine, and trichloronitromethane [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41**(15): 5485-5490.
- [28] 林琳, 徐斌, 覃操, 等. 黄浦江原水 NDMA 前体物的组成规律及其在常规净水工艺中的削减特性[J]. 给水排水, 2013, **39**(2): 61-65.
- [29] 徐冰冰, 陈忠林, 齐飞, 等. 紫外光降解水中痕量 NDMA 的效能研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1908-1913.
- [30] Moran M A, Sheldon W M, Zepp R G. Carbon loss and optical property changes during long-term photochemical and biological degradation of estuarine dissolved organic matter [J]. Limnology and Oceanography, 2000, **45**(6): 1254-1264.
- [31] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, *et al.* Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying [J]. Chemosphere, 1999, **38**(1): 45-50.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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