

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中 DOM 释放特征研究

谢理^{1,2}, 杨浩¹, 渠晓霞^{2,3}, 朱元荣^{2,3}, 鄢元波^{2,4}, 张明礼¹, 吴丰昌^{2*}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 4. 河海大学环境学院, 南京 210098)

摘要: 利用室内分解模拟实验, 研究了滇池外海优势挺水植物茭草和芦苇(成熟期)的叶在水环境中降解过程, 分析了其释放于水体中水溶性有机质(DOM)浓度和化学结构变化特征。结果表明, 植物分解可造成上覆水 pH 值升高, 茭草和芦苇分解过程中上覆水中 DOM 浓度的变化趋势基本一致。两种植物上覆水中水溶性有机碳(DOC)和水溶性有机氮(DON)的浓度均在 8 h 达到最大值, 水溶性有机磷(DOP)的浓度在 24 h 达到最大值。同时, 茭草和芦苇残体内 DOM 释放强度和速率的变化趋势也基本一致。两种植物 DOC、DON 和 DOP 的释放强度和速率都在 8 h 达到最大, 且 8 h 的释放强度、释放速率、释放比例依次为 DOC > DON > DOP。另外, 茭草和芦苇分解过程中 DOM 结构变化分析表明上覆水紫外吸收光谱中 SUVA₂₅₄ 值先升高再降低, 傅里叶红外光谱中—OH 特征峰消失, 三维荧光光谱中类腐殖酸单位有机碳荧光强度增强。

关键词: 茭草; 芦苇; 水溶性有机质; 紫外-可见光谱; 傅里叶红外光谱; 三维荧光光谱

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3458-09

Dissolved Organic Matter Release of *Zizania caduciflora* and *Phragmites australis* from Lake Dianchi

XIE Li^{1,2}, YANG Hao¹, QU Xiao-xia^{2,3}, ZHU Yuan-rong^{2,3}, YAN Yuan-bo^{2,4}, ZHANG Ming-li¹, WU Feng-chang²

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 4. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ground dry leaves of two emerged macrophytes *Zizania Caduciflora* and *Phragmites australis* from Lake Dianchi were soaked in distilled water in laboratory to track their DOM release process. The results showed that: ① during soaking, concentration of DOM which was released to the overlying water by the two species increased at first, then decreased and increased again at last. Concentrations of DOC, DON, and DOP released by both species reached their peaks at the 8th, 8th, and 24th hour, respectively; ② the two species showed the same DOM release trend, i. e., release rates and intensities of DOC, DON, and DOP by both species reached the peaks at the 8th hour, and for both of them, the release rates and intensities of DOC, DON, and DOP at the 8th hour followed the order of DOC > DON > DOP; ③ the SUVA₂₅₄ value obtained by the UV-visible spectroscopy increased at first and then decreased; ④ Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy showed that the characteristic peak —OH disappeared during the decomposition process; ⑤ intensity of the humic-acid fluorescence peak as showed by the 3D-EEM fluorescence intensity (F/DOC) increased along with degradation.

Key words: *Zizania caduciflora*; *Phragmites australis*; organic matter; UV-visible spectroscopy; Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy; three-dimensional excitation emission matrix fluorescence (3DEEM) spectroscopy

外源氮和磷等营养物质的输入是导致和促进湖泊营养化的主要因素, 然而在外源营养物输入得到一定控制后, 内源污染是进一步维持水体富营养化的重要因素^[1]。湖泊内源污染可以来源于水生生物死亡分解而释放的营养物、沉积物中营养物质的释放等。湖泊中的水生植物在生长过程中, 可吸收和利用氮、磷等营养物质, 且可通过新陈代谢作用来净化水质^[2], 但植物枯萎、死亡后, 在化学或微生物的作用下逐渐降解, 使其在生长期吸收、累积的营

养盐重新释放于水体。其中, 水生植物残体释放出的水溶性有机质(dissolved organic matter, DOM)能够直接溶于湖水, 比不可溶的有机质更难清除。水生植物的凋亡降解过程会向水体释放 DOM, 为湖泊

收稿日期: 2012-12-30; 修订日期: 2013-02-27

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(2010KYYW04); 国家自然科学基金项目(41130743, 41173094)

作者简介: 谢理(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为天然有机质, E-mail: xie705049124@126.com

* 通讯联系人, E-mail: wufengchang@vip.sklep.cn

富营养化提供营养源,加大富营养化湖泊治理难度.同时,湖泊水环境中的金属元素和有机污染物也能与 DOM 结合,进而改变其化学形态和迁移转化规律,影响水环境中各类生物的生长代谢,产生重要的生态效应^[3~6].因此,研究水生植物中 DOM 的释放规律和特征对于进一步认识湖泊水环境变化机制和富营养化的治理具有重要意义.

目前,国内外对于植物体内养分释放的研究对象主要集中在森林、草地和湿地生态体统凋落物的分解方面,研究的内容主要涉及植物体内养分的分解过程、分解速率、C/N、C/P 和纤维素等含量的变化等^[7~9],而对 DOM 的释放过程报道较少.且以往的研究主要是针对分解过程中 C、N、P 的释放量的变化^[10~12],很少涉及这一过程中有机质化学结构特征的变化,而对有机质化学结构特征变化的研究可能是进一步解释营养物释放本质及其对湖泊水环境影响的重要手段.滇池富营养化严重,水质为劣 V 类,是我国污染最严重的湖泊之一,目前对于滇池的研究主要集中在沉积物及水体中营养元素的分析^[13~16],鲜有关于滇池植物体内有机质的报道.本研究通过室内模拟实验初步分析了滇池优势挺水植物茭草和芦苇样品在死亡后残体中 DOM 向上覆水体释放的过程,同时利用紫外吸收光谱技术、三维荧光光谱技术、傅里叶红外光谱技术对释放出的 DOM 化学结构特征变化过程进行了分析,以期对滇池富营养化的进一步认识和治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

滇池北临昆明市,东经 102°36′~102°47′,北纬 24°40′~25°02′,是云南省境内面积最大的湖泊,也是我国第六大淡水湖泊.湖体呈南北向分布,总面积 298.34 km²,蓄水量 25.6 亿 m³,湖北部有一天然湖

堤-海埂,将湖体分隔为南北两个区域,北部为内湖,称为草海,面积占全湖的 3.58%,南区为滇池的主体,成为外海,面积占全湖的 96.42%.湖区为亚热带高原季风气候,年均气温 14.4℃,日照时数 2 371.70 h,无霜期 227 d,年降水量 1 036.10 mm.湖区挺水植物群落主要包括茭草(*Zizania caduciflora*)、芦苇(*Phragmites australis*)、香蒲(*Typha orientalis* Presl)、水凤仙(*Himalayan balsam*)和酸模叶蓼(*Polygonum lapathifolium*),其中茭草(*Zizania caduciflora*)与芦苇(*Phragmites australis*)占优势.

1.2 样品采集与实验设计

2010 年 10 月在滇池外海采集茭草叶和芦苇叶 2 种挺水植物叶样品(成熟期),样品采集后洗净、在 105℃烘箱中杀青,磨碎.称取 10 g 植物样品置于 1 L 烧杯中,加去离子水 350 mL(与提取植物 DOM 时固液比一致),进行室内模拟实验.实验期间,于 0、8、24、72、120、240、480 和 720 h 取上覆水,用 0.45 μm 的聚碳酸酯膜过滤,样品备用,分析各项指标.

1.3 样品分析与数据处理

植物 DOM 按照 He 等^[17]方法提取,固液比为 1:35,使用德国耶拿公司生产的 multi N/C 3100 TOC 分析仪测定 DOM 中水溶性总氮(TDN)、总碳(TDC)、无机碳(DIC)和有机碳(DOC)含量.水溶性总磷(TDP)、无机磷(DIP)、硝态氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)的测定方法参考文献^[17].由 TDP 与 DIP 的差值获得水溶性有机磷(DOP).同时,由于水溶性亚硝态氮含量很低,通过 TDN 与 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 差值获得水溶性有机氮(DON).植物样品总碳(TC)、总氮(TN)含量利用元素分析仪(Elementar vario macro EL, Germany)测定,总磷(TP)含量使用 SMT 法测定^[18].植物样品的基本参数,见表 1.

表 1 滇池茭草和芦苇样品基本参数/mg·g⁻¹

Table 1 Parameters of C, N and P in <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> /mg·g ⁻¹						
样品名称	TC	TN	TP	DOC	DON	DOP
茭草	413.10 ± 3.59	26.70 ± 0.38	4.7 ± 0.05	50.72 ± 0.84	3.95 ± 0.21	0.18 ± 0.02
芦苇	446.00 ± 4.91	35.40 ± 0.45	5.8 ± 0.07	71.05 ± 1.54	4.30 ± 0.13	2.60 ± 0.11

分解实验过程中,上覆水体中养分浓度测定方法与植物提取 DOM 测定方法一致.植物 DOM 释放强度(只考虑上覆水中实际测得的 DOM 含量)计算公式:

$$R_n = (c_n - c_{n-1}) \cdot (V_0 - \sum_{i=1}^{n-1} V_i) / m$$

式中, R_n 为释放强度,mg·g⁻¹; n 为取样次数; c_n 为第 n 次取样时上覆水中养分的浓度,mg·L⁻¹; c_{n-1} 为第 $n-1$ 次取样时上覆水中养分的浓度,mg·L⁻¹; V_0 为浸泡实验添加水的初始体积,L; V_i 为第 i 次取水样的体积,L; m 为植物样品的质量,g.

植物降解过程中上覆水样 DOM 表征,紫外吸

收特征使用 Agilent 8453 紫外-可见分光光度计(美国)分析. 另外, $SUVA_{254}$ 是指单位溶解性有机碳浓度下 254 nm 处的吸收系数, $SUVA_{254}$ 值的大小可以反映 DOM 的腐殖化程度, 值越大则腐殖化程度越大. 三维荧光光谱图使用 Perkin Elmer LS55 荧光光谱仪(美国)扫描. 取部分冷冻保存的上覆水样品, 冷冻干燥成粉末, 并碾碎后称取 5 mg 固体样品, 使用 Perkin Elmer Spectrum 100 红外光谱仪(美国)进行红外光谱分析.

2 结果与讨论

2.1 茭草和芦苇分解过程中 DOM 释放特征

2.1.1 上覆水中水溶性碳的变化过程

茭草和芦苇植物样品降解过程中, 上覆水 TDC 浓度均呈先升高后降低的趋势[图 1(a)]. 其中, 0~8 h 内茭草和芦苇上覆水中 TDC 浓度迅速上升, 8 h 达到最大值, 分别为 $1249.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1364.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 两种植物上覆水中 DOC 浓度变化趋势基本一致[图 1(b)], 分解前期 0~8 h 茭草与芦苇上覆水中的 DOC 浓度迅速上升, 并在 8 h 达到整个过程中的最大值, 分别为 $1249.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1364.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 可见, 0~8 h 是 DOM 释放的初始阶段, 茭草和芦苇残体中不断溶出 DOC, 使得上覆水中 DOC 的浓度明显升高. 植物残体分解过程中 DOC 的变化与微生物的活性密切相关. DOC 可作为微生物的碳源来促进微生物的周转, 而微生物在周转过程中通过分解植物残体以及本身的新陈代谢、死亡来增

加 DOC 的含量, 所以 DOC 与微生物之间是一种相辅相成的关系^[19]. 8 h 后, 大量繁殖微生物需要分解利用上覆水中有机碳来满足自身生长繁殖过程中对碳源的需求, 因此上覆水中 DOC 的浓度表现为急剧降低^[20~22]. 茭草和芦苇上覆水中 DOC 浓度分别在 240 h 和 480 h 后有一定程度的回升. 代静玉等^[20]的研究表明, 植物凋落物分解过程中, 苯醇溶出物、水溶性物质是最易分解的物质, 其次是半纤维素与纤维素, 木质素最难分解, 在凋落物分解初期, 苯醇溶出物与水溶性物质是淋滤液 DOM 的主要来源, 而 14 d 后逐渐过渡为半纤维素和纤维素. 可见, 是由于半纤维素和纤维素等大分子物质被分解, 向上覆水中补充水溶性物质而导致 DOC 浓度回升. 茭草和芦苇上覆水中 DIC 浓度基本呈上升的趋势[图 1(c)], 这是由于浸泡过程中 DOC 被微生物分解成 DIC 的缘故. 对茭草和芦苇样品降解过程中上覆水 pH 变化趋势也进行了测定(图 2). 浸泡初期, 有机酸的溶出使得上覆水 pH 降低, 8 h 后迅速升高, 240 h 左右开始缓慢下降. 整个浸泡过程中, 茭草上覆水的 pH 范围 6.91~8.39; 芦苇上覆水的 pH 范围 6.73~8.36. 浸泡结束时上覆水 pH 值呈现芦苇大于茭草. 其中, 240 h 之后, 两种植物上覆水 pH 值都保持在 7.5~8.4 左右, 而在分解纤维素和半纤维素的微生物中, 放线菌的最适 pH 为 7.5~8^[23], 因此在 240 h 后放线菌的活性增强, 进一步加速纤维素和半纤维素的分解, 使得 240 h 后 TDC 与 DOC 浓度上升.

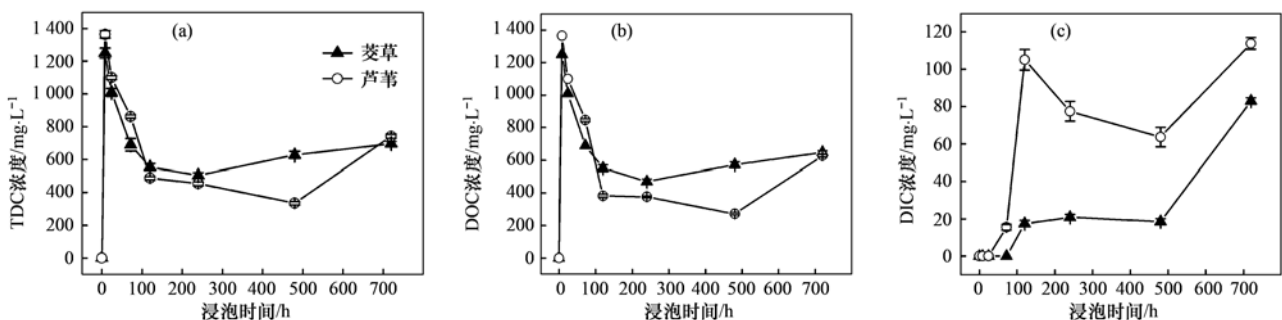


图1 浸泡植物上覆水 TDC、DIC、DOC 浓度变化

Fig. 1 Concentration changes of TDC, DIC and DOC in the overlying water during decomposition of the plants

2.1.2 上覆水体中水溶性氮的变化过程

茭草和芦苇上覆水中 TDN 浓度都呈现先升高后降低的趋势[图 3(a)], 0~8 h 是茭草和芦苇残体内 TDN 的释放阶段, 上覆水中 TDN 的浓度大幅度上升, 并在 8 h 达到最大值, 茭草为 $126.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 芦苇为 $258.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 8 h 后 TDN 的浓度

开始持续下降; 240 h 后基本达到平衡. 茭草和芦苇上覆水中 DON 的浓度变化呈“M”型曲线[图 3(b)], 0~8 h 植物残体内不断溶出 DON, 从而使得茭草和芦苇上覆水中 DON 浓度不断上升, 并在 8 h 达到最大值, 分别为 $87.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $49.99 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 8 h 后两种植物上覆水中 DON 浓度明显下

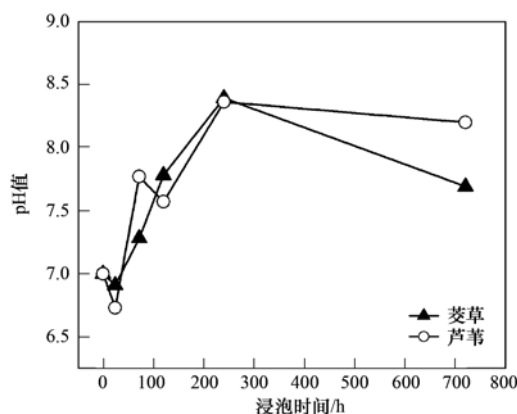


图2 浸泡植物上覆水 pH 值变化

Fig. 2 Variation of pH in the overlying water during decomposition of the plants

降,而相应时间段(0~72 h)内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度持续上升[图 3(c)],这可能是由于氨化作用,植物残体内释放出的 DON 被微生物分解后转化为 NH_4^+ ,而 NH_4^+ 溶于水常会导致水体呈碱性,这也可能是上覆水 pH 值在 8 h 后升高(图 2)的原因之一;茭草和芦苇上覆水中 DON 浓度分别在 240 h 和 120 h 后开始上升,并分别在 480 h 和 240 h 形成次级峰.有研究表明^[24],植物分解前期主要是易溶物质的迅速洗脱过程,而后期分解一般受微生物分解者的生物化学过程控制,由此推断次级峰的出现可能是由于植物残体内大分子蛋白质被分解,向上覆水中释放 DON 而导致.由于氨化作用,茭草与芦苇上覆水中 DON 浓度在出现次级峰后继续下降.茭草和芦苇上覆水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均在 72 h 达到最大值[图 3

(c)],分别为 $27.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $145.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;由于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 很不稳定易被氧化成硝态氮^[25],且上覆水可能形成厌氧环境,在反硝化作用下硝态氮又被转化为氮气,这一过程加速了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的损失,使得 72 h 后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度开始下降.而硝化作用会将氨转化为硝酸,硝酸溶于水会导致水体呈酸性.因此,300 h 后上覆水 pH 值开始降低(图 1).

2.1.3 上覆水体中水溶性磷的变化过程

在分解实验过程中两种植物上覆水中 TDP 和 DIP 浓度都呈现先升高后降低的趋势[图 4(a)和 4(b)].浸泡初期浓度迅速升高,并在 8 h 达到最大值,茭草 TDP 与 DIP 最大浓度分别为 $45.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $44.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;芦苇 TDP 与 DIP 最大浓度分别为 $127.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $122.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 8 h 后两种植物上覆水中 TDP 和 DIP 的浓度都处于持续降低状态.有研究表明^[26],水溶性磷可以与金属离子 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{3+} 等发生化学沉淀反应,被转化为 Fe-P 、 Al-P 、 Ca-P 等不溶性的磷,从而使得水溶性磷的含量降低.此外,容器器壁和植物残体对磷的吸附也会在一定程度上降低上覆水中 TDP 和 DIP 的含量^[27].两种植物上覆水 DOP 的浓度变化波动较大[图 4(c)],0~24 h 是上覆水 DOP 浓度的上升阶段,第 24 h 达到最大值,茭草为 $1.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,芦苇为 $8.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;24 h 后由于微生物对上覆水中有机磷的分解,DOP 的浓度开始下降;120 h 后两种植物上覆水中 DOP 浓度达到平衡;240 h 后上覆水中 DOP 浓度回升,可能是植物残体释放出的 DOP 大于微生物的消耗量导致.

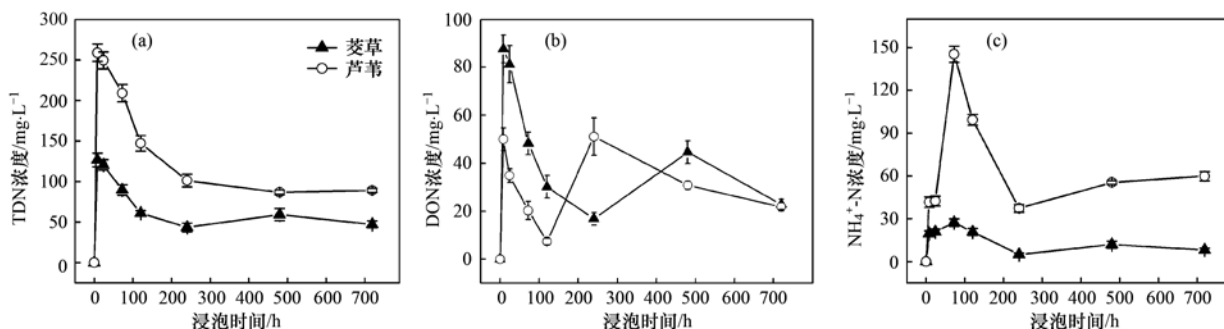
图3 浸泡植物上覆水 TDN、DON、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 3 Concentration changes of TDN, DON and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the overlying water during decomposition of the plants

2.2 植物降解过程中 DOM 释放强度与释放速率

2.2.1 溶解有机碳、氮和磷的释放强度变化特征

茭草、芦苇残体内水溶性有机质释放强度的变化过程如图 5 所示.从中可见,两种植物 DOC 的释放强度都呈现先增大后减小再增大的趋势,而 DON

和 DOP 的释放强度则呈现增大、减小、再增大、再减小的趋势.在浸泡初期 0~8 h 两种植物 DOC、DON 和 DOP 的释放强度都迅速增大,并在 8 h 达到整个浸泡过程中的最大值,茭草残体 DOC、DON 和 DOP 的最大释放强度分别为 49.99 、 3.51 、 0.05

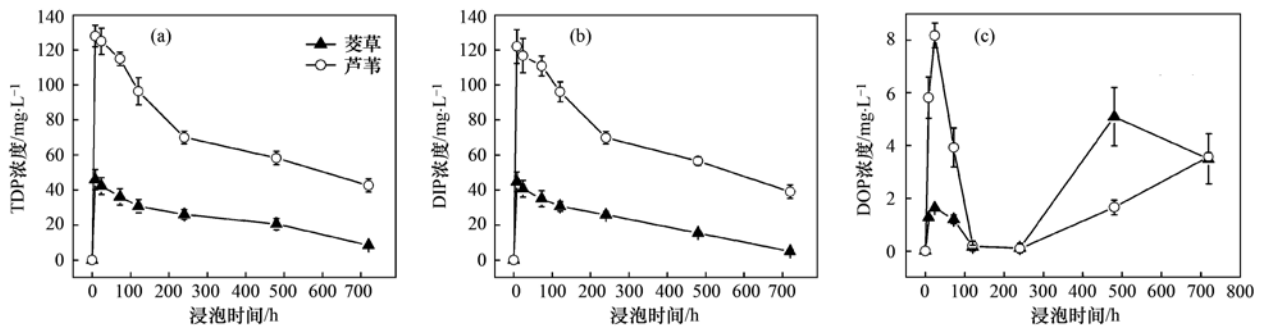


图4 浸泡植物上覆水 TDP、DIP、DOP 浓度变化

Fig. 4 Concentration changes of TDP, DIP and DOP in the overlying water during decomposition of the plants

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 分别占茭草残体初始 DOC、DON 和 DOP 含量的 98.57%、88.86%、28.57%; 芦苇残体 DOC、DON 和 DOP 的最大释放强度分别为 54.58、2.00、1.14 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 分别占芦苇残体初始 DOC、DON 和 DOP 含量的 76.68%、46.51%、43.85%。由此可见, 这一阶段是以茭草和芦苇残体内 DOC、DON 和 DOP 的溶出作用为主, 且两种植物的最大释放强度和此阶段的释放比例都呈现 $\text{DOC} > \text{DON} > \text{DOP}$ 。茭草和芦苇植物残体的 DOC、DON 和 DOP 释放强度都在某一时段呈现负值(茭草在 24 ~ 240 h, 芦苇 DOC 在 24 ~ 480 h; DON 在 24 ~ 120 h; DOP 在 24 ~ 240 h), 说明这些时段是以微生物对已溶出 DOC、DON 和 DOP 的分解作用为主, 植物残体的溶出作用较小。两种植物 DOC、DON 和 DOP 的释放

强度都在 120 h 左右降到负值, 而后继续升高; 茭草和芦苇的 DON 释放强度曲线分别在 480 h 和 240 h 形成次级峰[图 5(b)]; 茭草 DOP 释放强度曲线在 480 h 形成次级峰[图 5(c)], 这些次级峰都与各自浓度变化曲线的次级峰出现时间吻合[图 3(b)和图 4(c)], 都是由于植物体内大分子物质被分解进一步释放 DOM 所导致。由此可见, 整个浸泡过程中植物体内 DOM 的释放分为两个阶段, 一个是前 8 h 植物体内 DOM 的溶出阶段; 另一个是 120 h 后植物体内大分子物质被分解, 释放 DOM 的阶段。120 h 左右, 植物体内 DOM 的释放强度达到最小且上覆水中 DOM 浓度也达到最低, 因此这两种植物最好在死亡后 120 h 内回收, 以防止 DOM 进一步大量释放对滇池水体造成二次污染。

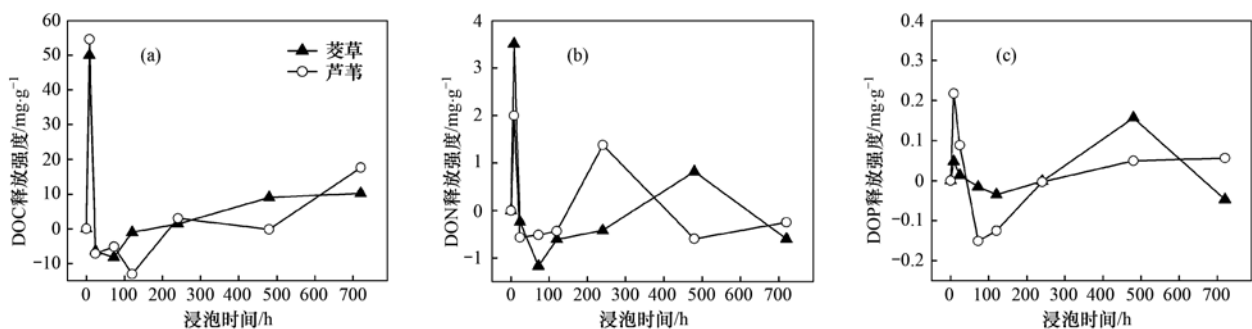


图5 DOC、DON、DOP 释放强度曲线

Fig. 5 Release intensities of DOC, DON and DOP by the two plants

2.2.2 溶解有机碳、氮和磷释放速率变化特征

水溶性有机质的释放速率即水溶性有机质的释放强度与浸泡时间的比值。浸泡过程中, 茭草、芦苇残体内水溶性有机质的释放速率变化趋势如图 6 所示, 从中可见, 两种植物 DOC 的释放强度都呈现先增大后减小再增大的趋势, 而 DON 和 DOP 的释放强度则呈现增大、减小、再增大、再减小的趋势。两种植物 DOC、DON 和 DOP 的释放速率在 0 ~ 8 h

阶段急剧上升, 并在 8 h 达到整个浸泡过程的最大值, 茭草 DOC、DON 和 DOP 的最大释放速率分别为 6.15、0.44 和 0.006 36 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 芦苇 DOC、DON 和 DOP 的最大释放速率分别为 6.82、0.25 和 0.029 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 可见两种植物的最大释放速率都呈现 $\text{DOC} > \text{DON} > \text{DOP}$ 。8 h 后两种植物 DOC、DON 和 DOP 的释放速率都开始减小。芦苇与茭草 DOC 的释放速率都在 24 h 达到最低[图 6(a)], 24

h 后 DOC 的释放速率再次增大并在 240 h 后达到平衡; DON 释放速率分别在 24 h 和 72 h 达到最低 [图 6(b)], 随后再次增大, 并分别在 240 h 和 480 h 后减小; DOP 的释放速率分别在 72 h 和 120 h 达到最低 [图 6(c)], 随后再次增大, 芦苇在 240 h 达到平衡, 而茭草并在 480 h 后减小。由此可见, 由于植

物体 DOM 在短时间内迅速溶出, 使得 DOM 在分解前期释放速率迅速增大, 随着溶出 DOM 被分解, 释放速率开始降低并出现负值, 此后虽然植物体内纤维素、半纤维素和大分子蛋白质等物质被分解会补充一定量 DOM, 但这一过程所需时间较长, 使得 DOM 释放速率增大幅度有限。

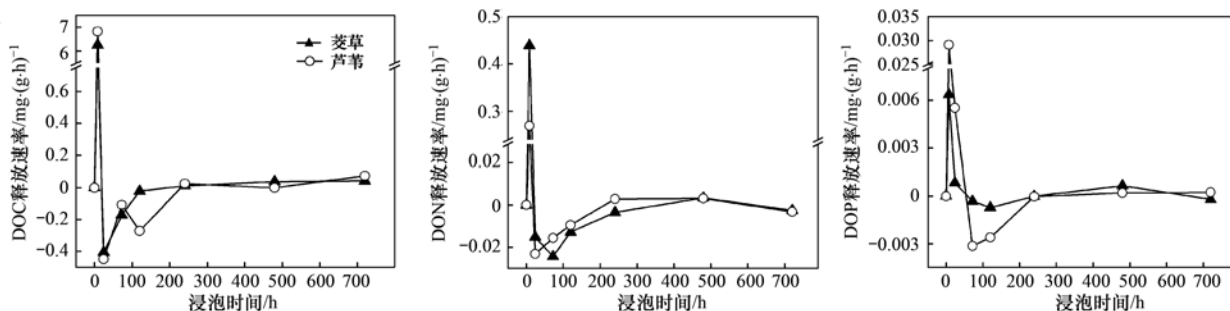


图 6 DOC、DON、DOP 释放速率曲线

Fig. 6 Release rates of DOC, DON and DOP by the two plants

2.3 植物降解过程中 DOM 化学结构变化特征

2.3.1 紫外-可见光谱特征值变化

浸泡过程中两种植物上覆水的 $SUVA_{254}$ 值呈现先升高后降低的趋势 (图 7). Nishijima 等^[28]认为紫外吸收, 特别是 254 nm 的吸收主要代表包括芳香族化合物在内的具有不饱和碳碳键的化合物, 这类化合物是较难分解的物质. 茭草和芦苇降解过程中上覆水体 DOM 在 24 ~ 240 h 内 $SUVA_{254}$ 值上升, 表明随着分解的进行, 易分解物质被逐步消耗而导致富含芳香环结构的腐殖质物质占有有机物的比例逐步升高; 上覆水体 DOM 的 $SUVA_{254}$ 值在 240 h 后降低. 李翠兰等^[29]对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质数量动态变化的研究表明, 分解期间腐殖物质的数量会在 15 d 左右开始减少. 因此, 可以推断是上覆水体

中腐殖物质数量的减少导致 $SUVA_{254}$ 值的降低. 腐殖质是天然水体中最重要的有机螯合剂, 可以和滇池水体中的重金属离子发生络合和螯合作用, 从而引起水体中重金属离子的富集^[30]. 因此, 浸泡过程中腐殖物质的减少, 会使得 DOM 与滇池水体中重金属作用降低. $A_{250\text{ nm}}/A_{365\text{ nm}}$ 指波长 250 nm 和 365 nm 处吸光度的比值. 比值的大小与 DOM 的芳香性成负相关, 该值越大则 DOM 的芳香性及分子量越小^[31]. 浸泡过程中两种植物上覆水的 $A_{250\text{ nm}}/A_{365\text{ nm}}$ 值在浸泡初期略有降低, 240 h 后保持不变. 表明浸泡初期上覆水 DOM 的芳香性有所增强, 240 h 后基本保持稳定.

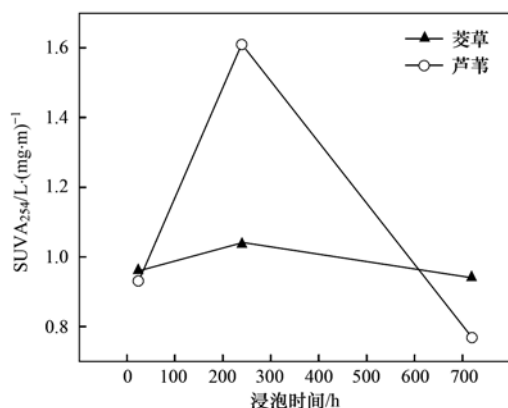


图 7 浸泡过程中 $SUVA_{254}$ 值的变化

Fig. 7 Change of the $SUVA_{254}$ values during decomposition of the two plants

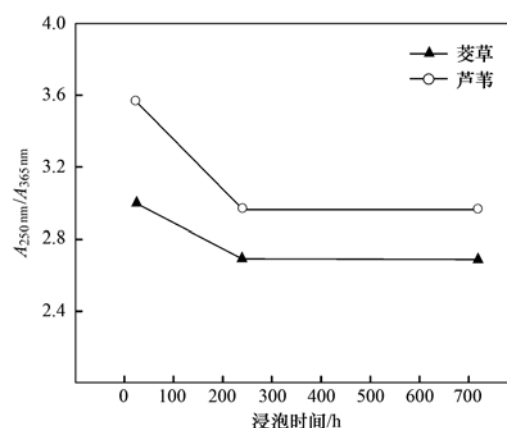


图 8 浸泡过程中 $A_{250\text{ nm}}/A_{365\text{ nm}}$ 值的变化

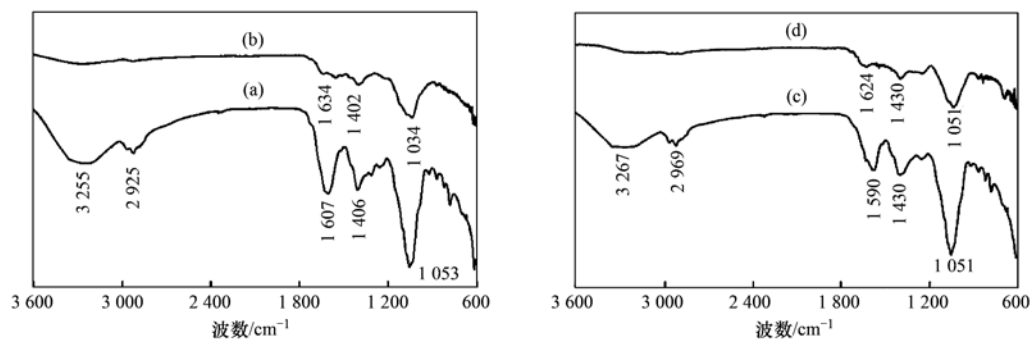
Fig. 8 Change of $A_{250\text{ nm}}/A_{365\text{ nm}}$ during decomposition of the two plants

2.3.2 傅里叶红外光谱分析

红外光谱显示, 24 h 和 720 h 上覆水 DOM 样品

之间存在一定差异(图9):实验进行24 h的DOM样品都在特征区存在5个明显的吸收峰,而720 h样品只存在3个吸收峰.两种植物浸泡24 h的样品中—OH($3\,267 \sim 3\,255\text{ cm}^{-1}$ 波数 cm^{-1})、—CH₂($2\,969 \sim 2\,925\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,430 \sim 1\,406\text{ cm}^{-1}$)、—C=O($1\,634 \sim 1\,590\text{ cm}^{-1}$)、—NH₂($1\,053 \sim 1\,051\text{ cm}^{-1}$)特征峰强度相对较强^[32~36],说明其含量大,是构成上覆水DOM的主要基团.与浸泡24 h的样品相比,浸泡720 h的样品只存在在—C=O($1\,624 \sim 1\,624\text{ cm}^{-1}$)、—CH₂($1\,430 \sim 1\,402\text{ cm}^{-1}$)、—NH₂($1\,053 \sim 1\,034\text{ cm}^{-1}$)特征峰,而不存在—OH,推断可能是由于醇类、酚类或有机酸被微生物分解

导致DOM中O—H发生断裂,可见浸泡过程中上覆水中DOM结构发生了变化.在构成上覆水DOM的官能团中—C=O、—NH₂是参与金属络合和螯合最重要的官能团^[37,38],且—C=O对金属离子的亲和力大大大于—NH₂.此外,含氧官能团—C=O、—OH能与滇池水体中有机污染物分子上的基团形成氢键,而氢键结合在某些非离子极性有机污染物的吸附中起重要作用.同时,可离子化官能团—OH能使一些含极性官能团的有机污染物通过共价键的方式与之发生作用^[39,40].因此,—OH被分解可能会使得DOM与滇池水体中有机污染物的相互作用降低.



(a) 茭草浸泡24 h; (b) 茭草浸泡720 h; (c) 芦苇浸泡24 h; (d) 芦苇浸泡720 h

图9 浸泡过程中傅里叶红外光谱的变化

Fig. 9 Change of the FT-IR spectra during decomposition of the two plants

2.3.3 三维荧光光谱分析

茭草和芦苇浸泡24 h、240 h、720 h上覆水DOM的三维荧光光谱见图10.由图10和表2可见,在浸

泡过程中两种植物上覆水DOM的三位荧光光谱始终都存在C峰,即类腐殖酸荧光峰,但不同浸泡阶段的FI值(单位溶解性有机碳浓度下荧光峰强度)

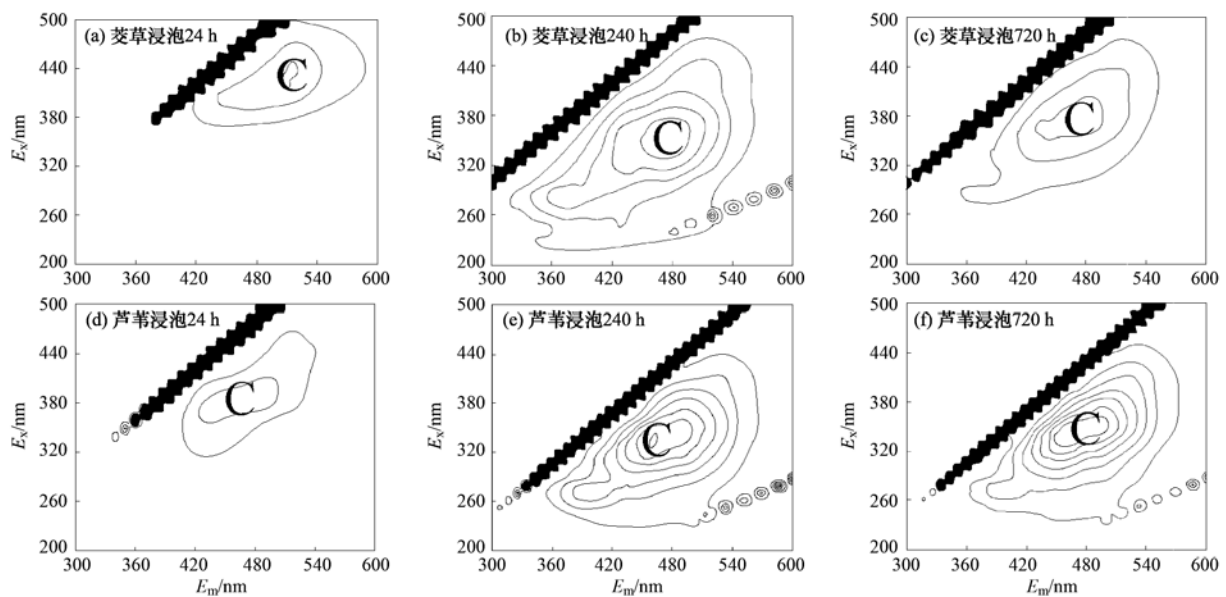


图10 浸泡过程中三维荧光光谱的变化

Fig. 10 Change of the 3D-EEM spectra during decomposition of the two plants

存在差异. 茭草和芦苇不同浸泡时期上覆水 DOM 的 FI 值都随着浸泡时间增加而升高. 研究表明^[41,42],DOM 的荧光强度会随 pH 值升高而增大,且这种变化主要与其结构中—OH 的电离作用有关. 因此,实验过程中上覆水 pH 值明显升高(图 2),红外光谱曲线中—OH 特征峰消失(图 9),可能是导致 DOM 荧光强度增大的重要原因. 此外,微生物降大分子分解为小分子有机物后,分子结构重排使得具有刚性和共平面性的结构增加,有机分子与溶剂或其他溶质分子的相互作用减少,减少了外转移能量,也会强化荧光的发射强度^[43,44].

表 2 荧光性质

Table 2 Characteristic values of the 3D-EEM spectra

样品	荧光峰类型	E_x/E_m	FI
茭草浸泡 24 h	C	430 nm/512 nm	0.12
茭草浸泡 240 h	C	350 nm/470 nm	0.37
茭草浸泡 720 h	C	370 nm/470 nm	0.43
芦苇浸泡 24 h	C	390 nm/468 nm	0.12
芦苇浸泡 240 h	C	350 nm/437 nm	0.73
芦苇浸泡 720 h	C	370 nm/453 nm	0.84

3 结论

(1)滇池优势挺水植物茭草和芦苇残体内 DOM 的释放过程可分为 3 个阶段:植物体内 DOM 快速溶出阶段(0~8 h),DOM 碳、氮和磷的释放强度、释放速率、释放比例均依次为 DOC>DON>DOP;微生物对上覆水中 DOM 的消耗阶段(8~120 或 8~240 h 左右),植物 DOM 的释放强度和速率降低并出现负值;DOM 进一步分解释放阶段(120 h 或 240 h 至 720 h),该阶段上覆水 DOM 浓度,植物 DOM 释放强度和速率都有所上升. 研究表明两种植物在死亡 120 h 内可快速释放大量营养物,可能成为滇池水体营养盐重要来源之一.

(2)茭草和芦苇残体内 DOM 释放过程中,上覆水中 DOM 的化学结构特征会随着时间推移而发生变化,且与 DOM 释放过程密切相关. 在这个过程中紫外吸收光谱中 SUVA₂₅₄ 值先升高再降低,傅里叶红外光谱中—OH 特征峰消失,三维荧光光谱中类腐殖酸单位有机碳荧光强度增强. DOM 释放过程结构变化也影响着其与滇池水体中各物质的相互作用.

参考文献:

[1] 李燕,王丽卿,张瑞雷. 5 种沉水植物死亡分解过程中氮磷营养物质的释放[J]. 上海环境科学, 2008, 27(2): 68-72.
[2] 赵芳. 白洋淀大型水生植物资源调查及对富营养化的影响[J]. 环境科学, 1994, 15(增刊): 21-23.

[3] 郭旭晶,席北斗,谢森,等. 乌梁素海沉积物孔隙水中溶解有机质的荧光及紫外光谱研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 440-444.
[4] 吴丰昌,邢宝山. 天然有机质及其在环境中的作用机理[M]. 北京:地质出版社, 2010. 120-122.
[5] 吴丰昌. 天然有机质及其与污染物的相互作用[M]. 北京:科学出版社, 2009. 50-51.
[6] 吴丰昌,王立英,黎文,等. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. 湖泊科学, 2008, 20(1): 1-12.
[7] 林波,刘庆,吴彦,等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 60-64.
[8] 郭继勋,祝延成. 羊草草原枯枝落叶分解的研究——主要优势植物的分解速率和损失率[J]. 生态学报, 1992, 12(4): 295-301.
[9] 李燕,王丽卿,张瑞雷. 淀山湖沉水植物死亡分解过程中营养物质的释放[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(2): 45-48.
[10] Howard-Williams C, Howard-Williams W. Nutrient leaching from the swamp vegetation of Lake Chilwa, a shallow African Lake[J]. Aquatic Botany, 1978, 4: 257-267.
[11] Kelley R H, Jack J D. Leaf litter decomposition in an ephemeral karst lake (Chaney Lake, Kentucky, U. S. A) [J]. Hydrobiologia, 2001, 482(1-3): 41-27.
[12] 孙志高,刘景双,于君宝,等. 模拟湿地水分变化对小叶章枯落物分解及氮动态的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2081-2093.
[13] 朱元荣,张润宇,吴丰昌. 滇池沉积物中氮的地球化学特征及其对水环境的影响[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 978-983.
[14] 李清光,王仕禄. 滇池流域硝酸盐污染的氮氧同位素示踪[J]. 地球与环境, 2012, 40(3): 321-327.
[15] 余方,潘学军,王彬,等. 固相萃取-羟基衍生化-气相色谱/质谱联用测定滇池水体中酚类内分泌干扰物[J]. 环境化学, 2010, 29(4): 744-748.
[16] 朱元荣,张润宇,吴丰昌. 滇池沉积物生物有效性氮和磷的分布及相互关系[J]. 环境科学研究, 2010, 23(8): 993-998.
[17] He Z Q, Mao J D, Honeycutt C W, et al. Characterization of plant-derived water extractable organic matter by multiple spectroscopic techniques [J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 45(6): 609-616.
[18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京:中国环境科学出版社, 2002. 243-279.
[19] 代静玉,周江敏,秦淑平. 几种有机物料分解过程中溶解性有机物质化学成分的变化[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 724-727.
[20] 代静玉,秦淑平,周江敏. 水杉凋落物分解过程中溶解性有机质的分组组成变化[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 207-210.
[21] Brown J R, Frederick L R. Decomposition of the water-soluble fraction of Sudan grass residue in soil[J]. Plant and Soil, 1968, 28(3): 467-470.
[22] Aoyama M. Use of high performance size exclusion

- chromatography to monitor the dynamics of water-soluble organic substances during the decomposition of plant residues in soil[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1996, **42**(1): 21-30.
- [23] 周群英, 王士芬. 环境工程微生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. 270-271.
- [24] 陈书秀, 江明喜. 三峡地区香溪河流域不同树种叶片凋落物的分解[J]. 生态学报, 2006, **26**(9): 2905-2912.
- [25] 王建超, 朱波, 汪涛, 等. 三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸出释放实验[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1144-1151.
- [26] 林智. 水溶性磷肥在茶园土壤中的转化[J]. 茶叶通讯, 1990, (2): 6-9.
- [27] 卢少勇, 张彭义, 余刚, 等. 茭草、芦苇与水葫芦的污染物释放规律[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(5): 554-557.
- [28] Nishijima W, Speitel G E Jr. Fate of biodegradable dissolved organic carbon produced by ozonation on biological activated carbon[J]. Chemosphere, 2004, **56**(2): 113-119.
- [29] 李翠兰, 张晋京, 窦森, 等. 玉米秸秆分解期间土壤腐殖质数量动态变化的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2009, **31**(6): 729-732.
- [30] 傅平青, 刘丛强, 吴丰昌. 水环境中腐殖质-金属离子键合作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(6): 143-148.
- [31] Dorado J, Gonzalez-Vila F J, Zancsda M C, et al. Pyrolytic descriptors responsive to changes in humic acid characteristics after long-term sustainable management of dryland farming systems in Central Spain[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003, **68-69**(8): 299-314.
- [32] Agnelli A, Celi L, Degl'innocenti A, et al. Chemical and spectroscopic characterization of the humic substances from sandstone-derived rock fragments[J]. Soil Science, 2000, **165**(4): 314-327.
- [33] Olk D C, Brunetti G, Senesi N. Decrease in humification of organic matter with intensified lowland rice cropping: a wet chemical and spectroscopic investigation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(4): 1337-1347.
- [34] Filip Z, Alberts J J, Cheshire M V, et al. Comparison of salt marsh humic acid with humic-like substances from the indigenous plant species *Spartina Alterniflora* (Loisel)[J]. Science of the Total Environment, 1988, **71**(2): 157-172.
- [35] Her N, Amy G, Chung J, et al. Characterizing dissolved organic matter and evaluating associated nanofiltration membrane fouling[J]. Chemosphere, 2008, **70**(3): 495-502.
- [36] Mukai H, Ambe Y. Characterization of a humic acid-like brown substance in airborne particulate matter and tentative identification of its origin[J]. Atmospheric Environment, 1986, **20**(5): 813-819.
- [37] Elliott H A, Denny C M. Soil adsorption of cadmium from solutions containing organic ligands[J]. Journal of Environmental Quality, 1982, **11**(4): 658-662.
- [38] 蒋疆, 王果, 林志亮, 等. 草炭溶解态有机物质与 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 络合物的红外光谱[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2002, **31**(2): 266-269.
- [39] Mott H V. Association of hydrophobic organic contaminants with soluble organic matter: Evaluation of the database of K_{doc} values[J]. Advances in Environmental Research, 2002, **6**(4): 577-593.
- [40] Klaus U, Mohamed S, Volk M, et al. Interaction of aquatic substances with aniazine and its derivatives: The nature of the bound residues[J]. Chemosphere, 1998, **37**(2): 341-361.
- [41] Coble P G, Green S A, Blough N V, et al. Characterization of dissolved organic matter in the Black Sea by fluorescence spectroscopy[J]. Nature, 1990, **348**(4): 432-435.
- [42] 傅平青, 刘丛强, 尹祚莹, 等. 腐殖酸三维荧光光谱特性研究[J]. 地球化学, 2004, **33**(3): 301-308.
- [43] 赵卫红, 王江涛, 崔鑫, 等. 海洋浮游植物生长过程中溶解有机物质的三维荧光光谱研究[J]. 高技术通讯, 2004, **16**(4): 425-430.
- [44] Ibrahim S, Mikhail B, Robert A, et al. Monitoring of effluent DOM biodegradation using fluorescence, UV and DOC measurements[J]. Chemosphere, 2006, **63**(3): 530-539.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人