

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

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

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM₁₀可替代源成分谱的建立方法及其应用 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe²⁺和 Fe³⁺对厌氧氨氧化污泥活性的影响 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N₂O 产生量的影响 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N₂O 产生的影响 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性

刘娜娜^{1,2,3}, 李斌^{1,2}, 刘瑞霞^{1,2*}, 宋永会^{1,2}, 吴畏³

(1. 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; 2. 中国环境科学研究院城市水环境科技创新基地, 北京 100012; 3. 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘要: 将超滤系统与孔径(相对分子质量)为 100×10^3 和 1×10^3 超滤膜结合, 对浑太水体中总溶解有机质(DOM)进行分级, 并运用三维荧光光谱技术对不同级有机质的荧光光谱特性进行了对比分析. 结果表明, 浑太水系水体的荧光图谱表现为紫外光区类腐殖质、可见光区类腐殖质、类色氨酸(短波和长波激发峰)4 个荧光峰, 其中, 类腐殖质荧光物质主要赋存于胶体形态(相对分子质量 $< 100 \times 10^3$)和真溶解态(相对分子质量 $< 1 \times 10^3$)中, 由于类蛋白质物质与水体中胶体的相互作用, 使得胶态类蛋白荧光物质也占有相当大的比例. 峰、枯两水期相比, 丰水期由于陆源汇流的冲击作用, 阻止了胶体颗粒的凝聚, 使 DOM 中小胶态和真溶解态有机质所占的质量分数较高. 通过比较不同粒径有机质的荧光指数、生物源指数、腐殖化指数以及 DOM 与荧光强度的相关性分析可以得出, 真溶解态中腐殖质主要源自于内源作用, 而胶态腐殖质具有陆源特征, 新产生的有机质在真溶解态中占有更大的比例, 水体中类腐殖质是溶解有机碳(DOC)的主要来源, 但由于浑太水系各采样断面存在不同程度的污染, 类蛋白质物质对 DOC 的贡献也不能忽略.

关键词: 浑太水系; 天然胶态有机质; 超过滤分级; 三维荧光光谱特性; DOM

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4103-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.009

Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds

LIU Na-na^{1,2,3}, LI Bin^{1,2}, LIU Rui-xia^{1,2}, SONG Yong-hui^{1,2}, WU Wei³

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Department of Urban Water Environmental Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. College of Material and Metallurgy, Northeast University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The ultrafiltration system with molecular mass of 100×10^3 and 1×10^3 membrane was used for the fractionation of total dissolved organic matter (DOM) in waters from Hunhe and Taizihe Watersheds. The fluorescence properties of colloidal organic matter with different sizes were investigated using a three-dimension excitation-emission matrix (3-D EEM) fluorescence spectroscopy. It was shown that the tryptophan-, fuvic- and humic-like materials were presented in the waters from Hunhe and Taizihe Watersheds, of which fuvic- and humic-like materials were mainly in colloidal form with small size (relative molecular mass $< 100 \times 10^3$) and truly dissolved phase (relative molecular mass $< 1 \times 10^3$). The adsorption of protein-like matters onto the colloid particles made the majority of these materials in colloidal phase though they had a low molecular mass. The higher percentages of small colloidal and truly dissolved organic carbon in total dissolved organic carbon (DOC) were observed in the water samples collected in wet season. Fluorescence index (FI), index of recent autochthonous contribution (BIX) and humification index (HIX) indicated that humic-like components in truly dissolved phase were mainly originated from autochthonous source and colloidal humic-like components were mainly derived from terrestrial organic matter. The recent autochthonous organic matter made a major contribution to truly dissolved phase. The humic-like matter was the domain of DOC content, but the contribution of protein-like materials to the organic carbon was not negligible due to the pollution of waterbody by industrial wastewater discharge.

Key words: Hunhe and Taizihe watersheds; natural colloidal organic matter; ultrafiltration fractionation; 3-D EEM fluorescence spectroscopy properties; DOM

天然水体是一个复杂的分散体系, 通常, 水体可分为三相: 悬浮颗粒相(颗粒直径大于 $0.45 \mu\text{m}$)、真溶解相(相对分子质量 $< 1 \times 10^3$)和胶体相(粒径大小介于相对分子质量 $1 \times 10^3 \sim 0.45 \mu\text{m}$). 水体中含有多类胶态分散微粒, 如矿物颗粒、具有高分散性的无机胶体(Fe、Mn 金属水合氧化物)、有机胶体(腐殖质)、大的生物聚合物以及藻类、细菌等生命物质^[1~3]. 由于有机胶体具有化学异质性, 易

于与水体中的金属离子和有机污染物等相结合^[4], 进而影响污染物在水体的分布、降解及对水生生物的毒性^[4~6]. 有机胶体的分子结构和表面化学特性

收稿日期: 2014-04-09; 修订日期: 2014-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(21277133); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07202-002-01)

作者简介: 刘娜娜(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境化学, E-mail: liunana_1990@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liurx@craes.org.cn

随着其来源、所含官能基团的数目和种类及溶液水化学参数的改变而改变,胶体的粒径大小决定其物化特性.同时,有机胶体作为微量污染物的载体,其絮凝沉降、扩散迁移及氧化降解等过程决定着污染物的去向和归宿^[7,8].三维荧光光谱法已广泛应用于天然水体中总溶解有机质(DOM)的荧光组分及其来源分析等研究^[9,10],近几年,将分离技术如:流动场流分级(FIFFF)、切向超过滤技术(CFUF)等与等离子体发射光谱、紫外和荧光光谱法相结合,用于天然水体中DOM的分级特性、不同粒径的分布特征以及有机胶体的荧光特性研究也取得了一定进展^[1,11,12].

浑太水系位于全国著名的老工业基地辽宁省,这里传统的重工业相对发达,人口稠密,城市生活污水和工业废水的排放成为水体有机胶体的重要来源,其中,海城河位于辽宁省海城市,是太子河的支流,主要接纳印染行业排放的废水^[13];蒲河发源于铁岭县横道河子乡想儿山,从东北流向西南途经11个乡镇,它受到工业和农业活动的共同影响;沈阳细河位于沈阳市内,成为市内生活污水和工业废水的排放明渠.采用超过滤系统对浑太水系部分水体枯水期和丰水期水体中的天然胶体进行分级,利用三维荧光光谱技术获得不同粒径有机质的荧光光谱特征,并分析不同粒径荧光物质的分布和来源,以期为进一步研究浑太水系天然胶体颗粒的水环境行为以及对痕量污染物的载体作用提供数据基础,为浑太水系的水环境改善以及我国水环境质量的修订提供参考.

1 材料与方法

1.1 采样点描述和水样采集

海城河是太子河的支流,沿岸分布着众多印染企业,采样点H1和H2分别位于海城市上、下游,在采样点H3下游与太子河交汇后流向大辽河(浑河下游);蒲河是浑河右岸主要支流,上游采样点P1位于沈阳市棋盘山水库下游大约200m处,中游采样点(P2)位于蒲河沈北段孝信桥下,水历经11个乡镇后于采样点P3下游汇入浑河;沈阳细河发源于沈阳市铁西新区卫工明渠南端,接纳沈阳市内的部分工业废水和生活污水,采样点X1、X2、X3分别位于细河吉力桥(X1)、大潘(X2)和细河入浑河口上游土台子桥(X3).本研究于2013年5~6月(枯水期,DS)和2013年8~9月(丰水期,WS),分别采集了上述9个研究断面的水样,采样点分布见

图1.

每个采样点采集表层水1L于玻璃瓶中,使用前,玻璃瓶先用表面活性剂浸泡48h,依次用自来水、超纯水洗净,晾干待用.取样时,先用采集水样冲洗3次,装满,不留气泡,放入装有冰块的保温箱避光低温保存,立即运回实验室,用0.7 μm的GF/F Whatman 玻璃纤维滤膜(马弗炉中于500℃烘4h)进行过滤,滤液用于超滤分级实验.

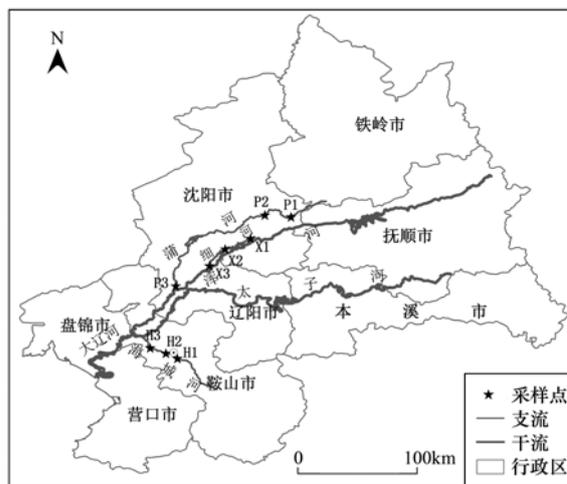


图1 浑太水系的采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in Hunhe and Taizihe Watersheds

1.2 天然水体胶体的分级

超滤装置采用美国 Millipore 公司生产的超滤系统(Model 8400 stirred ultrafiltration cells),再生纤维超滤膜相对分子质量截留为 1×10^3 和 100×10^3 .在浓缩操作模式下,将一定压力的氮气(≤ 75 psi)通过超滤池,开启磁力搅拌器,使得孔径小于膜截留分子量的溶液或胶体颗粒透过超滤膜,收集滤液.预实验表明,在 Millipore 公司建议的操作条件下,浓缩因子为2~10时,该超滤系统能达到理想的分级效果,其溶解有机碳(DOC)回收率为91%~102%.

为了减少膜对水样的干扰和影响,在天然水体样品分级之前,先将超滤膜放于超纯水中浸泡4~5h,然后将超滤膜装配到超滤装置中,采用大量的超纯水过滤清洗超滤膜,以减少膜材料残留对水样测定的影响,同时以超纯水过滤液作为空白.取过滤后的水样120mL(粒径 $< 0.7 \mu\text{m}$),分别通过相对分子质量为 1×10^3 和 100×10^3 的超滤膜,收集60~80mL的 $< 1 \times 10^3$ 、 $< 100 \times 10^3$ 和 $< 0.7 \mu\text{m}$ 过滤液,用于荧光光谱和TOC测定,将上述过滤液所得结果,采用差减法,得到小胶体(相对分子质量 $1 \times 10^3 \sim 100 \times 10^3$, $\text{COM}_{\text{小}}$)和大胶体(相对分子质量

$100 \times 10^3 \sim 0.7 \mu\text{m}$, $\text{COM}_{\text{天}}$) 有机质的荧光强度和有机碳含量。

1.3 荧光光谱分析和 TOC 测定

荧光光谱测定采用日立 (Hitachi) F-7000 荧光光谱分析仪, 配以 1 cm 石英比色皿, 150 W 氙灯为激发光源, PMT 电压为 700 V, 扫描波长范围为: 激发波长 $E_x = 200 \sim 450 \text{ nm}$, 发射波长 $E_m = 260 \sim 550 \text{ nm}$, 激发波长和发射波长增量均设为 5 nm, 狭缝宽度为 10 nm, 扫描速度为 $1200 \text{ nm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在实验过程中, 为检验仪器的稳定性和为数据后处理提供参比依据, 利用超纯水的拉曼光谱强度监控荧光仪的稳定性, 没有发现明显的仪器误差。对水样测定的同时也对超纯水和超纯水过滤液进行三维荧光数据扫描。为了避免内过滤效应, 较浓的水样经过适当的精确稀释后进行荧光光谱测定。采用 OriginPro 8.6 软件进行三维荧光光谱图的绘制及数据的相关性分析。

通过 $0.7 \mu\text{m}$ 膜的水样有机碳采用日本岛津公司生产的 TOC 分析仪 (Shimadzu, TOC-4100),

以此作为水样中 DOC 含量。实验用水为超纯水 (电阻率为 $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$), 所需试剂均为分析纯, 使用一系列不同浓度的邻苯二甲酸氢钾和碳酸氢钠/碳酸钠溶液分别作为总碳和无机碳标准。

2 结果与讨论

2.1 各河流水体中 DOM 荧光光谱组成

通过三维荧光光谱技术可以检测水体中 DOM 的荧光组分。结果发现, 无论是枯水期还是丰水期, 浑太水系各采样断面 DOM 主要有 4 个荧光峰: 类富里酸 (A 峰, $E_x/E_m = 230 \sim 270 \text{ nm}/385 \sim 460 \text{ nm}$)、类腐殖酸 (C 峰, $E_x/E_m = 290 \sim 350 \text{ nm}/390 \sim 460 \text{ nm}$)、类蛋白质色氨酸的长波激发峰 (B 峰, $E_x/E_m = 270 \sim 300 \text{ nm}/325 \sim 360 \text{ nm}$) 和短波激发峰 (D 峰, $E_x/E_m = 220 \sim 240 \text{ nm}/325 \sim 360 \text{ nm}$)^[9, 10, 12], 枯水期不同采样点水体中 DOM 的三维荧光光谱图见图 2, 枯、丰两水期各采样断面水体中 DOM 的荧光峰位置和强度如表 1 所示。

表 1 枯、丰水期各采样点水体中 DOM 的三维荧光峰位置和强度

Table 1 Fluorescence peak position and intensity of DOM for each water sample during dry and wet seasons

水期	样品点	D 峰		B 峰		C 峰		A 峰		$f_{(B+D)}/f_{(A+C)}$
		(E_x/E_m) /nm	荧光 强度	(E_x/E_m) /nm	荧光 强度	(E_x/E_m) /nm	荧光 强度	(E_x/E_m) /nm	荧光 强度	
枯水期 (DS)	H1	225/335	553	275/335	436	280/380	186	240/400	211	2.49
	H2	230/340	357	280/340	330	280/380	238	240/395	256	1.39
	H3	230/345	246	280/340	207	280/405	201	245/415	237	1.03
	P1	225/340	529	280/340	329	280/380	230	230/380	297	1.63
	P2	230/345	838	280/345	767	285/380	744	230/400	781	1.05
	P3	230/345	952	280/340	690	280/385	597	230/380	737	1.23
	X1	230/350	2 256	275/370	2 618	280/380	2 462	275/380	2 521	0.990
	X2	225/340	2 431	280/345	1 385	280/380	999	230/380	1 256	1.69
	X3	230/345	6 311	280/345	2 385	310/415	1 269	230/380	2 709	2.19
丰水期 (WS)	H1	240/380	277	280/380	260	280/415	283	240/420	355	0.840
	H2	245/380	346	280/380	324	280/410	330	245/410	414	0.900
	H3	245/380	325	280/380	298	280/405	304	245/405	382	0.910
	P1	245/380	267	280/380	265	280/420	287	250/420	351	0.830
	P2	235/380	591	285/380	581	280/405	630	245/420	679	0.890
	P3	230/350	655	280/380	552	280/410	505	245/395	626	1.07
	X1	230/345	1 026	280/350	1 410	280/380	1 124	270/385	1 009	1.14
	X2	250/320	2 751	275/335	4 126	320/420	18 060	250/420	10 870	0.240
	X3	230/345	1 675	295/380	2 272	310/420	7 725	230/420	8 831	0.240

尽管各采样断面水体中 DOM 的荧光组成相似, 但由表 1 可知, 各类荧光组分的荧光强度存在很大差异, 且各类荧光峰的中心位置发生不同程度的位移。在枯、丰两水期, 沈阳细河各采样点水体中类蛋白质 (峰 B + D) 和类腐殖质 (峰 A + C) 的荧光强度远大于蒲河和海城河各采样点的荧光强度, 蒲河次之。众所周知, 水体 DOM 的荧光组分的荧光

强度代表着该组分的浓度水平, 类蛋白荧光组分是由微生物和浮游植物的作用所产生的一些小分子类氨基酸物质, 主要来自于外源输入的生活污水和工业废水以及水体中自身的微生物的生命过程; 类腐殖质荧光组分由水底淤泥中有机质在微生物的作用下形成并通过扩散释放到上覆水体中, 同时外源输入的沿岸土壤溶解到水中的腐殖质也是重要的来

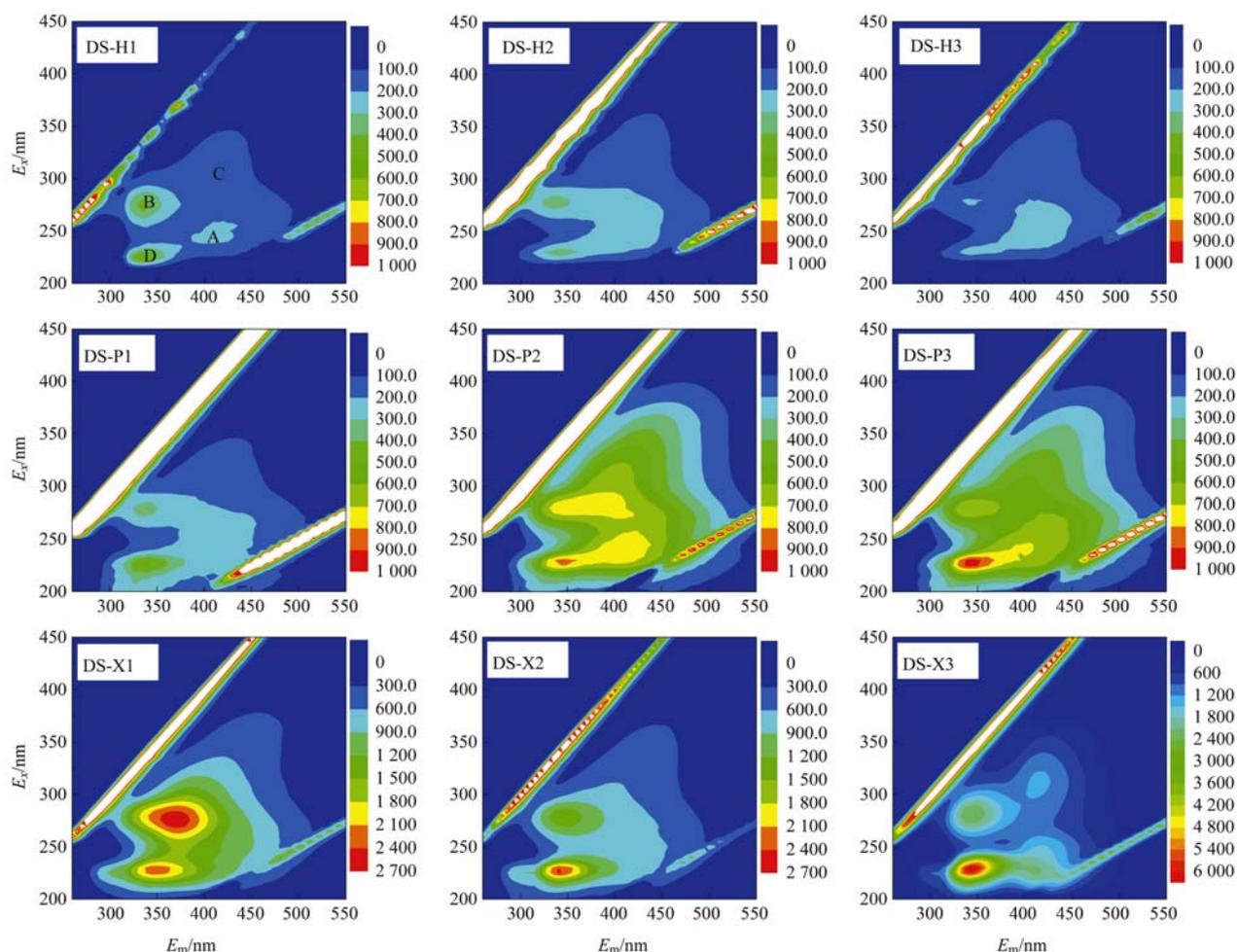


图 2 枯水期各采样点水体的三维荧光图谱

Fig. 2 Three-dimensional fluorescence spectra of DOM at each sampling site during dry season

源^[14,15],这些类腐殖质组分的相对分子量大小通常是在几百到几万的范围,其中很大部分是胶态高分子有机化合物^[16]. 沈阳细河水体中极高的类蛋白荧光与大量人为源排放的生活污水和工业废水是分不开的,较高的类腐殖质组分源于富有机质底泥中活跃的微生物作用.

对比 枯、丰两水期各采样点的荧光光谱特性(见表 1),除了个别点位,大部分采样断面在枯水期类蛋白物质的荧光强度高于丰水期蛋白物质的荧光强度,而类腐殖质的荧光强度变化正好相反. 类蛋白物质(峰 B + D)与类腐殖质(峰 A + C)的荧光强度的比值 $[f_{(B+D)}/f_{(A+C)}]$ 可以作为判断受污染河流水体中 DOM 来源的指标^[17]. 对枯水期不同河流各采样点的水体中类蛋白物质与类腐殖质的荧光强度的比值均大于 1,表明水体中 DOM 主要受到类蛋白组分的控制. 而对丰水期不同河流各采样断面,大部分水体中类蛋白物质与类腐殖质组分的荧光强度比值降低(小于 1),有的甚至更低(如细河采样点

X2 和 X3,小于 0.24). 荧光比值的变化,一方面由于水量增大产生的稀释作用使得水体中类蛋白荧光组分浓度降低,另一方面,尽管稀释作用同时导致内源产生的类腐殖质减低,但水流量增大使得 陆源输入的沿岸土壤溶解到水中的类腐殖质组分增加.

2.2 DOM 中不同荧光组分的粒径分布

水体中 DOM 包含胶态有机质(colloidal organic matter, COM, 相对分子量 $1 \times 10^3 \sim 0.7 \mu\text{m}$)和真溶解态有机质(ultrafiltrated organic matter, UOM, 相对分子量 $< 1 \times 10^3$), COM 具有巨大的比表面积,在水体中易吸附痕量污染物并影响其在水体中的迁移转化, COM 的粒径不同,其物化特性不同^[2,18]. 荧光强度间接代表荧光物质的相对含量. 依据以上荧光组分分析,按照不同荧光物质,即类富里酸、类腐殖酸和类蛋白物质(峰 B + D)的荧光强度,计算不同粒径各荧光组分在 DOM 中所占的质量分数,从而得到不同采样点水体中各荧光物质 3 个粒径(UOM、COM_小、COM_大)的比例分配(见图 3).

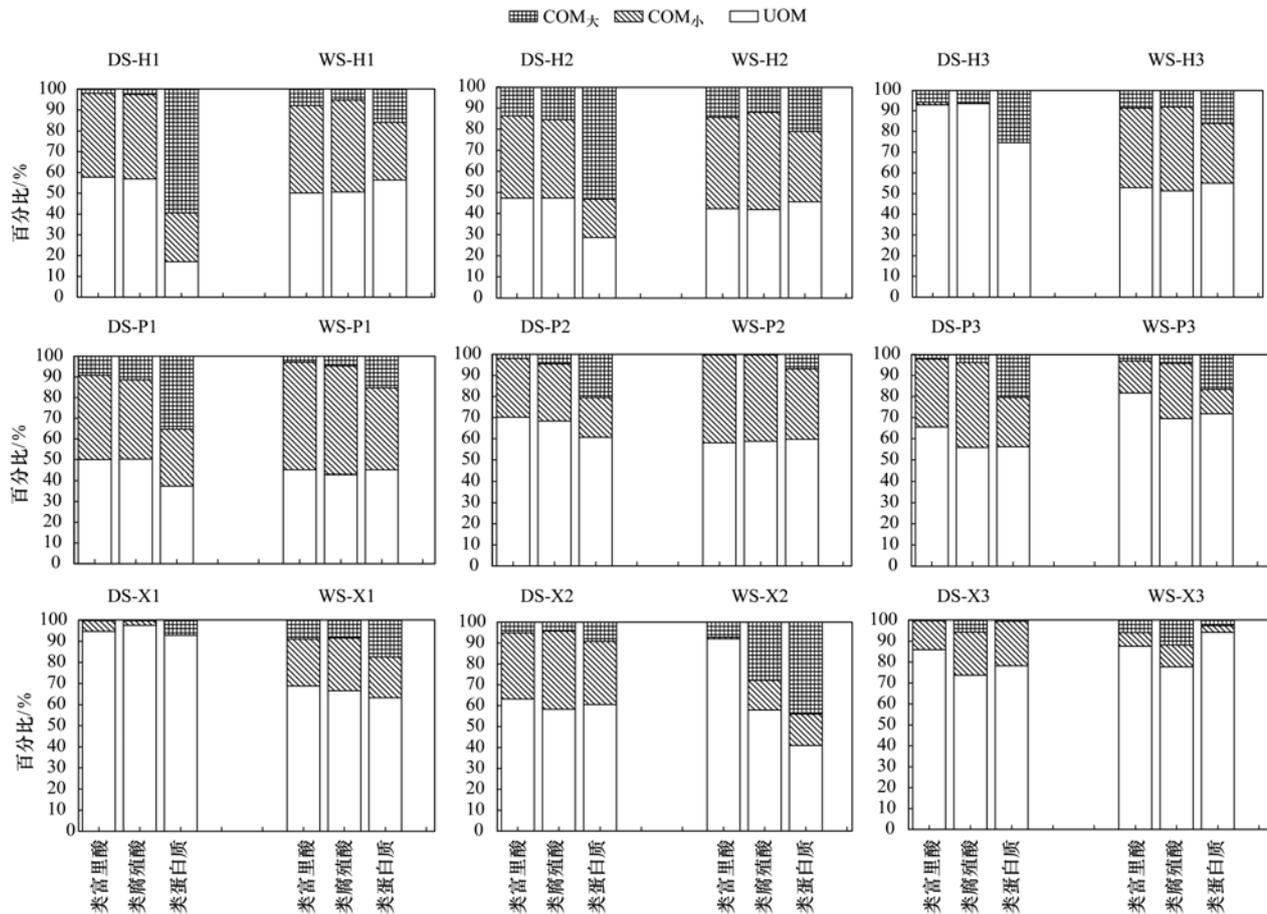


图3 各采样点不同荧光物质的粒径分配

Fig. 3 Distribution of fluorescence materials in different size fractions from each sample site

如图3所示,浑太水系各水体中胶态荧光物质占有一定比例,其比例分配随水体、采样断面以及水期的变化而不同,在海城河的水体中,类蛋白质物质胶体形态占总溶解态的25%~83%,类腐殖质的胶体形态占总溶解态的7%~60%,蒲河水体中相应的比例为28%~64%和20%~58%,沈阳细河水体中相应的比例为5%~58%和3%~45%。另外,由图3可见,对类腐殖质物质(A峰和C峰),蒲河所有采样断面以及海城河和细河的大部分采样断面的水体中,小胶态类腐殖质含量远大于大胶体的含量,表明类腐殖质荧光物质主要存在于相对分子质量 $<100 \times 10^3$ 的胶态或UOM中,这与文献[19, 20]报道相一致,他们发现类腐殖质荧光物质主要存在于相对分子质量 $<1 \times 10^3$ 和 $13 \times 10^3 \sim 150 \times 10^3$ 的有机组分中。理论上,类蛋白质物质主要存在于相对分子质量 $<2 \times 10^3$ 的溶解态中(纯物质色氨酸相对分子质量为204),但由图3可知,胶体形态的类蛋白荧光物质也占有相当大的比例,这主要是由于天然水体中,类蛋白有机质很容易附着在大量无机铁、

锰氧化物以及无机矿物等胶体颗粒的表面,与之发生表面吸附、络合、凝聚等相互作用,从而使自由的类蛋白质物质以胶体颗粒存在^[9]。

图4表明真溶解态、小胶体和大胶体有机碳在总DOC中的质量分数。海城河中除了采样点H3,其它水体中总DOC均以胶体形式存在,其中,小胶态有机碳占总COM的质量分数由枯水期的33%~40%增加到丰水期的95%,蒲河有机胶体占据65%~90%,大多以小胶体存在,而细河中UOM占据较大比例(18%~73%)。与枯水期相比,丰水期的大部分采样断面的DOM中小胶态和真溶解态的质量分数增加,这表明河流水位及水流速的增加对胶体的凝聚起到了阻止作用。

2.3 DOM与UOM荧光光谱特性的比较

荧光指数(FI)是在 $E_x = 370 \text{ nm}$, $E_m = 450 \text{ nm}$ 和 500 nm 下的荧光强度之比,它用来表征水体中DOM腐殖质的来源^[21],FI为1.4和1.9分别代表类腐殖质荧光物质的陆源特征值和内源微生物降解特征值^[22]。由表2结果可知,无论是丰水期还是枯

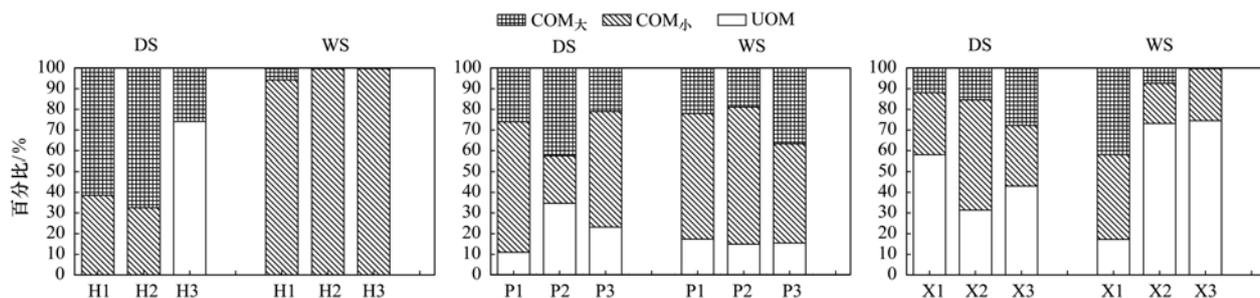


图 4 各采样断面不同粒径有机碳的分布

Fig. 4 Distribution of organic carbon in different size fractions from each sample site

水期,浑太水系各采样断面不同级有机质的 FI 范围是 1.62 ~ 4.61,表明水体中的腐殖质是陆源和内源的混合来源,有些主要是内源作用. 细河各水体具有相对较高的 FI,其中,采样断面 X3 的 FI 高于 2.2,这与其接纳大量的工业废水和生活污水密切相关. 丰水期与枯水期相比,蒲河与海城河各采样断面水体的 FI 没有规律性变化,但细河丰水期的 FI 均大于枯水期的 FI,这表明丰水期更多的腐殖质表现为内源特征,此结果主要是由于丰水期水流的冲击使底泥中更多的类腐殖质释放到了水体中. 比较不同级有机质的 FI 可以得出,DOM 的 FI 与相对分子质量小于 100×10^3 的有机质相当,而 UOM 的 FI 普遍高于 DOM 的 FI,表明真溶解态腐殖质多来源于微生物分解的内源,也间接说明了胶态腐殖质的陆源特征.

生物源指数 (BIX) 是 310 nm 激发波长下 380 发射波长处荧光强度与 420 ~ 435 nm 区间最大荧光

强度的比值,这个参数反映了新产生的 DOM 在整体 DOM 中所占的比例^[23]. 由表 2 可见,各水体中 BIX 在 0.26 ~ 1.44 范围内,其中,在枯水期,除了 X3 断面,细河的 BIX 普遍大于蒲河和海城河,在丰水期,X2 和 X3 表现了较低的 BIX,BIX 越低,说明 DOM 降解程度降低. 另外,在丰、枯两水期,各采样断面水体中 UOM 的 BIX 高于 DOM 及分子量小于 100×10^3 有机质的 BIX,表明真溶解态中新生有机质占有更大的比例,具有较强的新近自生源特征.

腐殖化指数 (HIX) 是 254 nm 波长激发光下 435 ~ 480 nm 间最高荧光值除以 300 ~ 345 nm 间最高荧光强度与 435 ~ 480 nm 间最高荧光强度之和^[24]. 如表 2 所示,尽管各河流水体的 HIX 具有较小的变化范围(0.41 ~ 0.92),但丰水期各水体的 HIX 稍高于枯水期的 HIX. 较高的腐殖质特性来源于丰水期的陆源汇流的冲击作用,同时水体自身微生物作用也受到严重影响,使得水体中 DOM 腐殖化程度增高.

表 2 各采样点不同级别胶体有机质的荧光定量指标

Table 2 Fluorescent quantitative parameters of different fractions derived from each water sample

水期	采样点	FI			BIX			HIX		
		<0.7 μm	< 100×10^3	UOM	<0.7 μm	< 100×10^3	UOM	<0.7 μm	< 100×10^3	UOM
枯水期 (DS)	H1	1.77	1.77	1.88	0.950	0.870	1.00	0.490	0.630	0.700
	H2	1.91	1.76	1.94	0.900	0.902	1.01	0.610	0.711	0.670
	H3	1.80	1.75	1.75	0.940	0.900	0.950	0.680	0.720	0.711
	P1	1.65	1.62	1.78	0.930	0.930	1.08	0.590	0.640	0.580
	P2	1.86	1.85	1.97	0.980	0.980	1.08	0.660	0.700	0.660
	P3	1.73	1.75	1.91	0.910	0.911	1.04	0.630	0.660	0.600
	X1	1.71	1.69	1.69	1.23	1.25	1.44	0.480	0.520	0.410
	X2	1.81	1.81	1.82	1.02	1.03	1.12	0.500	0.512	0.473
	X3	2.22	2.18	2.47	0.74	0.740	0.680	0.560	0.570	0.570
丰水期 (WS)	H1	1.72	1.73	1.86	0.840	0.830	0.930	0.780	0.800	0.740
	H2	1.74	1.74	1.95	0.871	0.860	0.970	0.730	0.760	0.700
	H3	1.75	1.77	1.86	0.870	0.860	0.960	0.740	0.770	0.710
	P1	1.63	1.70	1.95	0.820	0.841	1.02	0.760	0.790	0.740
	P2	1.85	1.86	2.15	0.970	0.980	1.13	0.740	0.750	0.712
	P3	1.73	1.75	1.87	0.900	0.900	1.04	0.670	0.690	0.620
	X1	1.88	1.82	1.87	0.950	0.980	1.08	0.510	0.550	0.510
	X2	4.18	4.21	4.61	0.270	0.320	0.38	0.750	0.840	0.911
	X3	3.92	3.47	4.07	0.269	0.270	0.26	0.900	0.910	0.920

2.4 DOC 和荧光强度的相关性

有研究表明, DOM 的荧光强度与 DOC 之间存在线性相关关系, DOM 中荧光有机质的含量可以较好地反映水体中有机碳的含量^[25]. 本文通过各河流不同采样断面中 DOC 与各荧光峰荧光强度的相关性分析可知(见图 5), DOC 与类腐殖酸和类富里酸有可接受的线性相关性, 其相关系数大于 0.72, 但与类蛋白质的长激发波荧光强度

及短激发波长荧光强度的相关系数差别较大(分别为 0.79 和 0.18), 这种差别可能来自于荧光峰的叠加和相互干扰. 以往研究发现, 天然水体中, 腐殖质占 DOC 的 50% ~ 90%^[26], 本研究的结果证实了水体中类腐殖质荧光物质是 DOC 的主要来源, 但由于浑太水系各采样断面受到不同程度的污染, 类蛋白质物质对 DOC 的贡献也不能忽略.

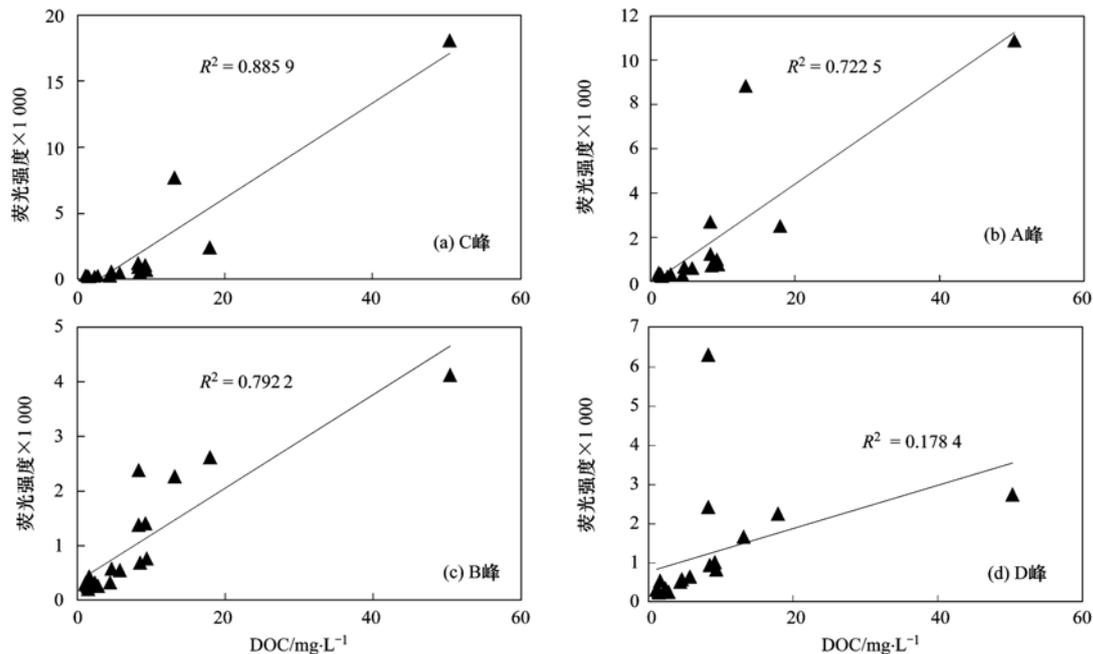


图 5 DOC 与荧光峰荧光强度的相关性

Fig. 5 Correlation of DOC and the fluorescence intensity

3 结论

(1) 浑太水系各研究断面的水体中三维荧光图谱表现为紫外光区类腐殖质、可见光区类腐殖质和类蛋白荧光组分. 沈阳细河各采样点水体中类蛋白质(峰 B + D)和类腐殖质(峰 A + C)的荧光强度远大于蒲河和海城河.

(2) DOM 中不同荧光物质的粒径分布随水体、采样断面以及水期的变化而不同, 类腐殖质荧光物质主要存在于相对分子质量 $< 100 \times 10^3$ 的胶态和真溶解态有机质中, 由于类蛋白质与水体中胶体的相互作用, 胶体形态的类蛋白荧光物质也占有相当大的比例, 真溶解态腐殖质多来源于微生物分解的内源, 而胶态腐殖质表现为陆源特征, 真溶解态中新产生的有机质比例较高, 具有较强的新近自生源特征.

(3) 水体中类腐殖质是 DOC 的主要控制因素,

但由于浑太水系各采样断面受到不同程度的污染, 类蛋白质物质对 DOC 的贡献也不能忽略.

参考文献:

- [1] 顾丽军, 杨毅, 刘敏, 等. 长江口滨岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4195-4203.
- [2] Lead J R, Wilkinson K J. Aquatic colloids and nanoparticles: current knowledge and future trends [J]. Environmental Chemistry, 2006, **3**(3): 159-171.
- [3] Buffle J. The key role of environmental colloids/nanoparticles for the sustainability of life[J]. Environmental Chemistry, 2006, **3**(3): 155-158.
- [4] Howard A G. On the challenge of quantifying man-made nanoparticles in the aquatic environment [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2010, **12**(1): 135-142.
- [5] Yang Y, Fu J, Peng H, et al. Occurrence and phase distribution of selected pharmaceuticals in the Yangtze Estuary and its coastal zone[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **190**(1-3): 588-596.
- [6] 付佳露, 杨毅, 彭欢, 等. 长江口水环境中纳米颗粒物初探

- [J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1924-1931.
- [7] Lee S, Han S, Gill G A. Estuarine mixing behavior of colloidal organic carbon and colloidal mercury in Galveston Bay, Texas [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(6): 1703-1708.
- [8] 石陶然, 张远, 于涛, 等. 滇池沉积物不同分子量溶解性有机质分布及其与 Cu 和 Pb 的相互作用[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(2): 137-144.
- [9] Liu R, Lead J R, Baker A. Fluorescence characterization of cross flow ultrafiltration derived freshwater colloidal and dissolved organic matter[J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(7): 1304-1311.
- [10] Baker A, Spencer R G. Characterization of dissolved organic matter from source to sea using fluorescence and absorbance spectroscopy[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **333**(1-3): 217-232.
- [11] Neubauer E, V D Kammer F, Hofmann T. Using FLOWFFF and HPSEC to determine trace metal-colloid associations in wetland runoff[J]. *Water Research*, 2013, **47**(8): 2757-2769.
- [12] Liu R, Lead J R, Zhang H. Combining cross flow ultrafiltration and diffusion gradients in thin-films approaches to determine trace metal speciation in freshwaters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, **109**: 14-26.
- [13] 马溪平, 吕晓飞, 张利红, 等. 辽河流域水质现状评价及其污染源解析[J]. 水资源保护, 2011, **27**(4): 1-4.
- [14] Murphy K R, Stedmon C A, Waite T D, *et al.* Distinguishing between terrestrial and autochthonous organic matter sources in marine environments using fluorescence spectroscopy[J]. *Marine Chemistry*, 2008, **108**(1): 40-58.
- [15] Nelson N B, Carlson C A, Steinberg D K. Production of chromophoric dissolved organic matter by Sargasso Sea microbes [J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 273-287.
- [16] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, **337**(2): 133-149.
- [17] Baker A. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of river waters impacted by a tissue mill effluent [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**(7): 1377-1382.
- [18] 黄文丹, 周立旻, 郑祥民, 等. 长江河口不同分子量溶解有机质的三维荧光光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(4): 1000-1004.
- [19] Wu F C, Wang L Y, Li W, *et al.* Natural organic matter and its significance in terrestrial surface environment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(1): 1-12.
- [20] Boehme J, Wells M. Fluorescence variability of marine and terrestrial colloids: examining size fractions of chromophoric dissolved organic matter in the Damariscotta River estuary [J]. *Marine Chemistry*, 2006, **101**(1-2): 95-103.
- [21] Mcknight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48.
- [22] 宋晓娜, 于涛, 张远, 等. 利用三维荧光技术分析太湖水体溶解性有机质的分布特征及来源[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2321-2331.
- [23] Huguet A, Vacherl L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [24] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, **38**(4): 742-746.
- [25] 黎司, 吉芳英, 周光明, 等. 三峡库区水体溶解有机质的荧光光谱特性[J]. 分析化学, 2009, **37**(9): 1328-1332.
- [26] 薛志欣, 杨桂朋, 夏延致. 水环境腐殖质的光化学研究进展 [J]. 海洋科学, 2008, **32**(11): 74-79.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 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