

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟荪琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827) 《环境科学》征稿简则 (4053) 信息 (3736, 3930, 4043)	

多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征

钱锋^{1,2}, 吴婕赟³, 于会彬¹, 宋永会¹, 张美², 孔令昊², 何孟常^{2*}

(1. 中国环境科学研究院城市水环境科技创新基地, 北京 100012; 2. 北京师范大学环境学院/水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 3. 中国环境科学研究院国际合作部, 北京 100012)

摘要: 在太子河本溪城市段 7 个点位采集表层水样, 应用多元数理统计法研究其 DOM 的来源、组成、结构及腐殖化水平。推导出 9 个紫外光谱指数 ($SUVA_{254}$ 、 E_2/E_3 、 E_2/E_4 、 E_4/E_6 、 $S_{275-295}$ 、 $S_{350-400}$ 、 A_2/A_1 、 A_3/A_1 和 A_3/A_2) 用于研究 DOM 的组成与结构特征, 进一步评估 DOM 的腐殖化水平。研究表明: 太子河本溪城市段水体中 DOM 的腐殖化程度呈现城市河段及工业废水排放分布特征, 本溪钢铁厂排放废水所含的 DOM 为聚合程度低且相对分子质量较小的有机物; E_2/E_3 与 E_2/E_4 呈现极显著性正相关 ($P < 0.01$), 与 $S_{275-295}$ 、 $S_{350-400}$ 和 A_2/A_1 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 表明太子河本溪城市段水体 DOM 腐化程度不仅与有机物分子缩合度有关, 同时与富里酸和胡敏酸比值密切相关; DOM 组成结构特征与 A_2/A_1 、 $SUVA_{254}$ 和 $S_{275-295}$ 呈显著正相关, 而与 E_2/E_3 和 E_2/E_4 呈显著负相关; 得分图显示 7 个采样点分别位于 3 个 35% 置信度的椭圆内, 进一步验证太子河本溪城市段水体中 DOM 组成与结构、腐殖化水平呈现城市河段及工业废水排放分布特征, 表明太子河本溪城市段 DOM 深受人类活动的影响。

关键词: 水溶性有机物; 空间分布; 紫外光谱; 多元统计; 主成分分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3806-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.018

UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis

QIAN Feng^{1,2}, WU Jie-yun³, YU Hui-bin¹, SONG Yong-hui¹, ZHANG Mei², KONG Ling-hao², HE Meng-chang^{2*}

(1. Department of Urban Water Environmental Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. International Cooperation Center, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: This study investigated the ability of ultra violet-visible (UV-Visible) spectroscopy to analyze the origin, compositions, structure and humification level of dissolved organic matter (DOM). Seven surface water samples were collected from the Benxi City section of mainstream in Taizi River. Nine indices ($SUVA_{254}$, E_2/E_3 , E_2/E_4 , E_4/E_6 , $S_{275-295}$, $S_{350-400}$, A_2/A_1 , A_3/A_1 and A_3/A_2), deduced from elemental analysis and UV visible spectroscopy of DOM, were used to assess the humification degree. The results showed that the characteristics of DOM were distributed along urban river and industrial wastewater discharge, and the DOM of waste water from Benxi steel plant contained a low degree of condensation of small organic molecules. E_2/E_3 showed positive correlation with E_2/E_4 , and negative correlations with $S_{275-295}$, $S_{350-400}$, A_2/A_1 , indicating that humification degree of DOM was not only concerned with the degree of condensation of organic molecules, but also closely associated with the ratio between humic acid and fulvic acid. Composition structure of DOM showed significant positive correlations with A_2/A_1 , $SUVA_{254}$ and $S_{275-295}$, and significant negative correlations with E_2/E_3 and E_2/E_4 . Based on the loadings of DOM component and scores plot of sampling sites in Taizi River (Benxi City section), the characteristics of DOM were distinctly distributed along urban river and industrial wastewater discharge, proving that the river was deeply influenced by human activity.

Key words: dissolved organic matter; spatial distribution; UV-VIS spectroscopy; multivariable analysis; principal component analysis

溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 是指能通过 0.45 μm 孔径, 广泛存在于天然水体和人工水体中, 具有包括脂肪族、芳香族、醌类和酚类等官能团的多种有机质组成的异质混合物, 其相对分子质量大小由几百到几万不等^[1,2]。水体中 DOM 的含量、化学组成与有机物的来源、生物地球化学循环过程密切相关^[3,4], 显著影响水生态系统

健康。水体中 DOM 不仅能为生物体提供营养物质, 而且能与有机物或无机污染物结合, 增强其溶解性

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2016-05-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07020-002)

作者简介: 钱锋 (1981 ~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为环境水污染控制, E-mail: qianfeng@cares.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: hmc@bnu.edu.cn

和迁移转化能力^[5,6],因此其含量可间接地表征河流水体的环境特征^[7~9].近年来,人为活动对河流的干预不断加强,排入河流的污染物负荷逐步增大,导致水体有机质含量增加^[10].太子河本溪段作为本溪市主要受纳水体,工业废水污染是其水污染的主要来源,大量的污染物进入水体后,加剧了水质恶化.

紫外-可见吸收光谱作为最早表征有机质光谱特征的重要分析方法之一^[11,12],具备分析时间短、灵敏度高、成本低、无需分离且不破坏样品等优点^[13],被广泛应用于海洋、湖泊、河流等自然水体中天然有机物的来源、组成与结构、时空分布特征研究^[14,15].目前,研究主要集中于对 DOM 紫外-可见吸收光谱中特定波长的吸光度分析,如有机质在 254 和 280 nm 处的吸光度与 DOM 中含苯环官能团的化合物含量相关,已用于水体有机质和废水处理研究^[16,17].此外,其他吸收光谱参数,如 E_{250}/E_{365} (250 与 365 nm 下吸光度的比值)及 E_{253}/E_{203} (253 与 203 nm 下吸光度的比值)也常被用于水体有机质腐殖化程度或结构特性的研究^[18].但对于典型钢铁企业废水排入太子河本溪城市段水体中,应用多元统计法在一段波长下吸光度的研究甚少.

因此,本文通过分析太子河本溪城市段水体中 DOM 的紫外-可见光吸收光谱特性,研究城市河段 DOM 的来源、组成、结构及腐殖化水平,辨别影响有机物特征的关键因子,阐述 DOM 空间分布规律,揭示 DOM 腐殖化进程,以期进一步了解太子河本溪城市段水体中溶解有机质的特性.

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样点的设置

太子河属辽河流域,作为辽宁省本溪市境内的最大河流之一,其本溪市境内河流长度为 168 km,主要支流 25 条,集水面积 5 179 km²,占全流域集水面积的 37.3%.在太子河上游本溪满族自治县小市镇境内建有大型水库为观音阁水库,水库面积为 62 km².

在太子河本溪段 7 个点位采集表层水样(图 1).具体采样点包括:太子河:威宁大桥(T1)、华山街(T2)、本溪水文站(T3)、太子河本钢 1 号(T4)、太子河本钢 2 号(T5)、太子河本钢下游(T6)、太子河朴家湾(T7).每个样点采 3 次,将 3 次样品混合作为该样点样品.水样均保存在 500 mL 聚乙烯水样瓶中,并放入冷藏箱低于 4℃ 保存,运回

实验室后立即分析.

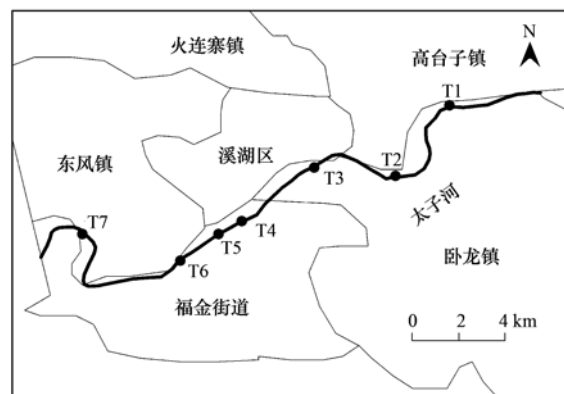


图 1 太子河本溪城市段采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Taizi River (Benxi City section)

1.2 紫外光谱检测

将 7 个采样点采集的样品用孔径为 0.45 μm 聚四氟乙烯滤膜过滤(美国,Millipore 滤膜),滤液中的有机物即为 DOM.应用日本岛津(TOC-L CPN CN200)TOC 分析仪测量水中 DOC 的含量;利用日本岛津公司的 UV-170 型紫外-可见分光光度计检测 DOM 的紫外光谱,设定扫描波长为 200 ~ 700 nm^[6].

2 结果与讨论

2.1 紫外光谱特征分析

有机化合物的紫外吸收光谱取决于分子结构,随分子复杂度的不同而异^[19].图 2 为 DOM 的紫外-可见扫描光谱图,从中可以看出,太子河本溪城市段水体 DOM 的吸光度随波长增大呈指数递减趋势,在 280 nm 附近出现吸收平台,主要由 DOM 中木质素磺酸及其衍生物对光的吸收所引起,DOM 单位摩尔紫外吸收强度,随不饱和共轭双键结构和芳香族的增加而增强^[20].由于溴化物和硝酸盐等无机离子的影响,在波长小于 240 nm 处,产生较为明显的紫外吸收峰^[21].T4 和 T5 采样点位于本溪钢铁厂附近,其重金属含量明显高于其他采样点,当腐殖酸与重金属结合后,其 Zeta 电位绝对值随聚合度增强而降低,腐殖酸分子 π 电子系统共轭程度增大,使得生色基团苯环间距进一步缩小,电子跃迁能量降低,导致吸收峰出现红移^[22].

2.2 水样 DOM 组成与结构特征

2.2.1 SUVA₂₅₄ 特征吸收值分析

有机物于 254nm 处的吸光度,主要是由包括芳香族化合物在内的,具有不饱和碳碳键的化合物的

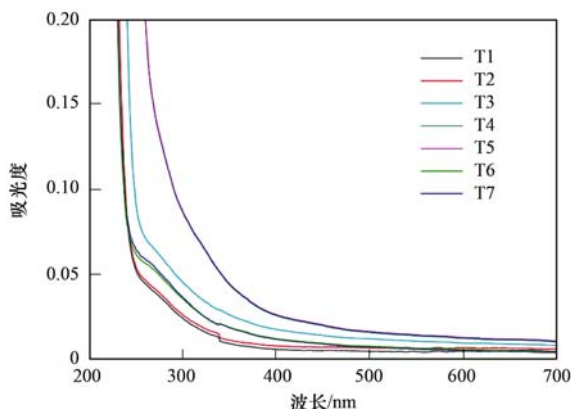


图2 太子河本溪段水体 DOM 紫外-可见光吸收光谱

Fig. 2 UV-Vis absorption spectra of DOM in water from Taizi River (Benxi City section)

不饱和共轭双键产生,该结构越多紫外吸收强度越大. 254nm 处的吸光度 (m^{-1}) 与溶液 DOC ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 浓度的比值^[23] 定义为 SUVA_{254} [$\text{L} \cdot (\text{m} \cdot \text{mg})^{-1}$],表征有机物芳化度、相对分子质量大小与有机质腐殖化水平,并且三者随着 SUVA_{254} 值的增大而增大. 如图3所示,进入城市段后,对采样点的 DOC 浓度比较,3 个采样点的 DOC 浓度变化不大,但河段 DOM 的 SUVA_{254} 值呈逐渐升高趋势,其值由 1.20 升高至 3.34. 本溪钢铁厂附近采样点 T4 和 T5 的 SUVA_{254} 值突然降低至 0.388 ~ 0.575 之间,其 DOM 芳香性结构降低的原因主要是金属离子和 DOM 形成的共沉淀,以及较高金属矿物悬浮颗粒物对 DOM 产生的选择性吸附,较高芳香性结构的部分从溶液相中脱离出来,因此表观看到的 DOM 芳香化特征降低. 随着沿岸陆源的输入作用,导致城市下游 (T6、T7) 的 SUVA_{254} 值开始逐渐升高.

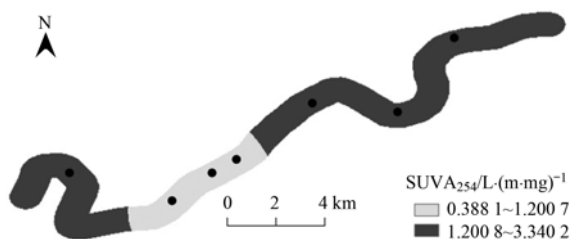


图3 太子河本溪城市段水体 DOM SUVA_{254} 的空间特征

Fig. 3 Spatial distribution of DOM SUVA_{254} in surface water from Taizi River (Benxi City section)

2.2.2 吸光度比值分析

E_2/E_3 (250 nm 与 365 nm 吸光度的比值) 在表征有机质腐殖化程度的同时,可指示有机物的来源^[17]. $E_2/E_3 < 3.5$ 时,有机质中富里酸含量小于胡

敏酸; $E_2/E_3 > 3.5$ 时,有机物中富里酸含量大于胡敏酸^[24]. 图4中可以看出,7 个采样点的 E_2/E_3 值均 > 3.5 ,在 3.741 ~ 12.665 之间,表明太子河本溪段水体中 DOM 的富里酸含量比胡敏酸的含量高,且呈现出从城市上游河段到城市中游河段 (T1 ~ T3) 逐渐降低的趋势;本溪钢铁厂附近采样点 (T4 ~ T5) 的 $E_2/E_3 > 12.0$,其值在 12.62 ~ 12.665 之间,由于 E_2/E_3 与有机质相对分子质量呈反比^[25,26],该采样点水体 DOM 的相对分子质量较其他采样点小,间接证明钢铁厂排放的 DOM 主要以相对分子质量较小的有机物为主.

E_2/E_4 (240 nm 与 420 nm 吸光度的比值) 表征有机物分子缩合度,其值随着 E_2/E_4 值的减小而增高^[27,28]. 城市上游和下游河段水体 (T1、T2、T3、T6、T7) DOM 的 E_2/E_4 值在 7.55 ~ 15.76 之间,而采样点 T4 和 T5 的 E_2/E_4 值分别高达 74.81 和 73.43,表明本溪钢铁厂附近水体 DOM 分子缩合度明显低于其他采样点.

E_4/E_6 (465 nm 与 665 nm 吸光度的比值) 与苯环 C 骨架的聚合程度有关^[8], E_4/E_6 值越大,有机质聚合程度越低;同时, E_4/E_6 值与有机物相对分子质量大小有关,相对分子质量降低时, E_4/E_6 值往往会增高^[29]. 因此,该值可部分反映有机质结构和相对分子质量等信息^[30]. 图4中可以看出, E_4/E_6 值在 T4 和 T5 高于其他采样点,表明本溪钢铁厂附近水体 DOM 聚合程度低,但相对分子质量低于其他采样点. 此结论与 E_2/E_3 的研究结果一致. 进一步表明本溪钢铁厂排放的废水 DOM 为聚合程度低且相对分子质量较小的有机物.

2.2.3 斜率分析

有机质的紫外光谱在两个狭窄的波长区域内 (275 ~ 295 nm 与 350 ~ 400 nm) 发生明显的变化,将此波长区域的紫外光谱吸光度作自然对数处理^[31],并以两个波长区域之间的对数值拟合直线,其斜率 ($S_{275 \sim 295}$ 和 $S_{350 \sim 400}$) 代表富里酸和胡敏酸比值^[32]. 太子河本溪城市段水体 DOM 的 $S_{275 \sim 295}$ 和 $S_{350 \sim 400}$ 值从城市上游段向城市中游段 (T1 ~ T3) 逐渐增大 (图5),表明富里酸与胡敏酸的比值沿城市上游段向城市中游段逐渐增大,间接证明了 DOM 中的富里酸从城市上游段向城市中游段逐渐增多,而胡敏酸逐渐减少,与 2.2.2 节结论相似. 城市中下游本溪钢铁厂附近采样点 T4 和 T5 的 $S_{275 \sim 295}$ 和 $S_{350 \sim 400}$ 值突然降低,表明本溪钢铁厂排放的污水中

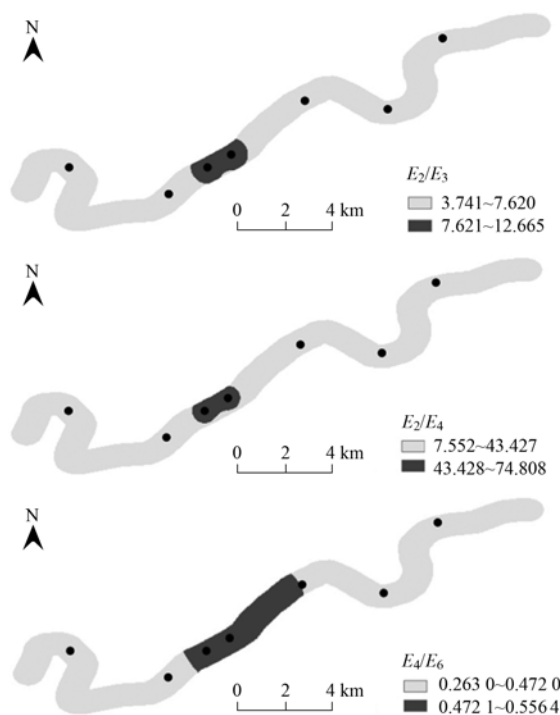


图4 太子河本溪城市段水体 DOM E_2/E_3 、 E_2/E_4 、 E_4/E_6 的空间特征

Fig. 4 Spatial distribution of DOM E_2/E_3 , E_2/E_4 , E_4/E_6 in surface water from Taizi River (Benxi City section)

胡敏酸相对含量较高. 随着水体稀释作用, 城市下游段的 $S_{275 \sim 295}$ 和 $S_{350 \sim 400}$ 值逐渐升高, 但略低于 T3 采样点, 本溪钢铁厂污水的排放对太子河影响较大.

2.2.4 面积分析

DOM 紫外光谱可划分为 260 ~ 280、460 ~ 480

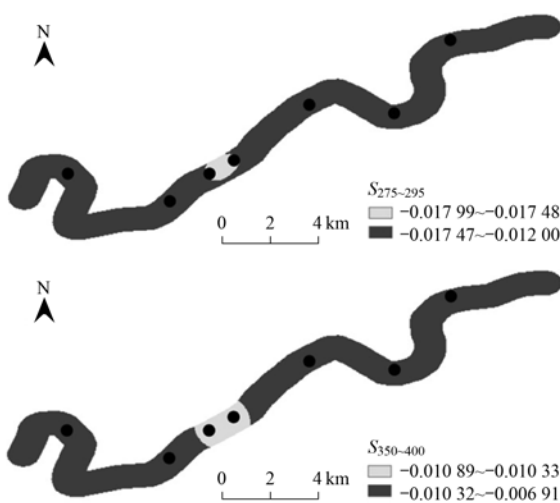


图5 太子河本溪城市段水体 DOM $S_{275 \sim 295}$ 、 $S_{350 \sim 400}$ 的空间特征

Fig. 5 Spatial distribution of DOM $S_{275 \sim 295}$, $S_{350 \sim 400}$ in surface water from Taizi River (Benxi City section)

和 600 ~ 700 nm 这 3 个区域, 对其相应波长区域积分后的面积分别为 A_1 、 A_2 和 A_3 , 其中, A_1 表示木质素和奎宁等有机质, 这类物质通常用于指示处于分解转化初期阶段; A_2 表示类蛋白等物质, 可指示有机质开始腐殖化; A_3 被认为是芳香类有机物, 可指示有机质已深度腐殖化^[33]. 此外, Albrecht 等^[34] 定义了 3 个腐殖化指数: A_2/A_1 、 A_3/A_1 和 A_3/A_2 分别表示 A_2 与 A_1 面积的比值, 反映木质素等物质在腐殖化开始的比例; A_3 和 A_1 面积的比值, 表示非腐殖化物质和腐殖化物质之间的关系; A_3 和 A_2 面积的比值, 表征有机质芳香度. 有机质的腐殖化程度随着比值的减小而降低.

从城市上游段到城市下游段(图6), A_2/A_1 、 A_3/A_1 和 A_3/A_2 的值整体呈现逐渐减小的趋势(A_2/A_1 由 0.1757 降为 0.1519, A_3/A_1 由 0.8087 降为 0.4808, A_3/A_2 由 4.6016 降为 3.1654), 说明木质素等物质在腐殖化开始时的比例逐渐降低, 腐殖化与非腐殖化物质的比值越来越小, 水体中 DOM 分子芳香度逐渐减小, 显而易见, DOM 的腐殖化程度整体上沿城市上游段向城市下游段逐渐降低. 但对 T4 和 T5 采样点分析发现, 该 3 个腐殖化指数值明

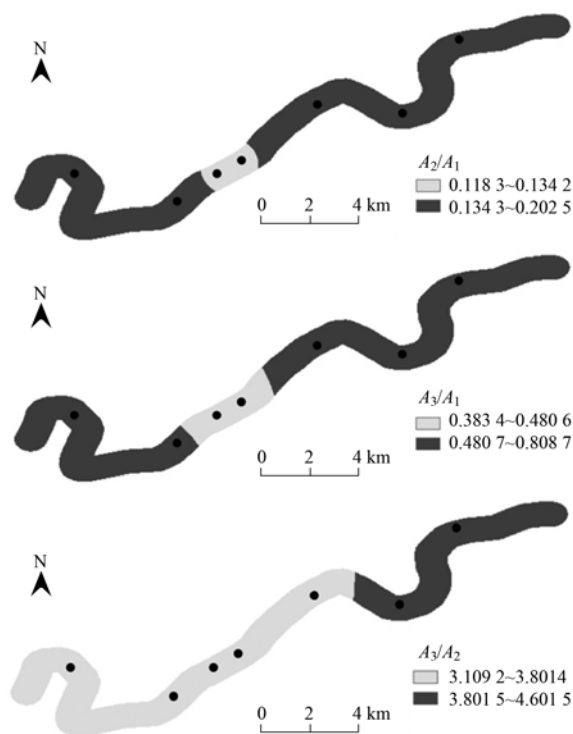


图6 太子河本溪城市段水体 DOM A_2/A_1 、 A_3/A_1 、 A_3/A_2 的空间特征

Fig. 6 Spatial distribution of DOM A_2/A_1 , A_3/A_1 , A_3/A_2 in surface water from Taizi River (Benxi City section)

显低于其他采样点的值,因此城市工业废水的排入明显影响河流的腐殖化程度.

2.3 相关性分析

表 1 列出了 9 个紫外光谱参数的皮尔逊相关性特征. 可以看出,太子河本溪城市段水体 DOM 的 E_2/E_3 与 E_2/E_4 呈现极显著性正相关($P < 0.01$),与 $S_{275-295}$ 、 $S_{350-400}$ 和 A_2/A_1 呈显著负相关($P < 0.05$),表明 DOM 腐化程度不仅与有机物分子缩合度有关,同时与富里酸和胡敏酸比值密切相关,与 2.2.2 节和 2.2.3 节的结论类似. T1 位于城市上游段,其水体 DOM 的腐殖化程度相对其他点位较高,主要是受上游农村生活污水和农业面源污染的影响.

表 1 太子河本溪城市段 DOM 9HIXs 皮尔逊相关性分析¹⁾

	SUVA ₂₅₄	E_2/E_3	E_2/E_4	E_4/E_6	$S_{275-295}$	$S_{350-400}$	A_2/A_1	A_3/A_1	A_3/A_2
SUVA ₂₅₄	1.000	-0.587	-0.521	-0.142	0.660	0.546	0.763 *	0.429	-0.112
E_2/E_3		1.000	0.982 **	0.707	-0.842 *	-0.780 *	-0.796 *	-0.616	-0.108
E_2/E_4			1.000	0.823 *	-0.728	-0.821 *	-0.729	-0.685	-0.278
E_4/E_6				1.000	-0.228	-0.675	-0.288	-0.643	-0.669
$S_{275-295}$					1.000	0.486	0.871 *	0.268	-0.416
$S_{350-400}$						1.000	0.824 *	0.971 **	0.552
A_2/A_1							1.000	0.706	0.002
A_3/A_1								1.000	0.703
A_3/A_2									1.000

1) ** 表示 0.01 水平下显著相关, * 表示 0.05 水平下显著相关

2.4 主成分分析

应用主成分分析(principal component analysis, PCA)对太子河本溪城市段水体中 DOM 的 9 个紫外参数进行分析,辨识影响 DOM 的关键因子. 两个成分(principal component, PC)可以通过主成分分析产生,两者的累积方差贡献率为 87.281%,原始指标的大部分特征可以得到反映. 若指标荷载系数的绝对值大于 0.6,则该指标为关键因子^[9,35]. 图 7 显示出主成分的因子荷载和采样点得分示意图. PC1 的累积方差贡献率为 63.273%,DOM 的组成结构特征与 A_2/A_1 、SUVA₂₅₄ 和 $S_{275-295}$ 呈显著正相关,而与 E_2/E_3 和 E_2/E_4 呈显著负相关. PC2 累积方差贡献率为 24.008%,DOM 腐殖化特征与 E_2/E_3 、 E_2/E_4 和 $S_{350-400}$ 呈显著正相关.

根据采样点位的得分矩阵,可得到 3 个置信椭圆(置信度为 35%),即城市上游区域河段(T1 和 T2)、城市区域重工业污染河段(T4 和 T5)与城市区域及城市下游河段(T3、T6 和 T7),见图 7,验证了水中的 DOM 各组分特征呈现沿城市区域变化. 此外,T4 和 T5 这 2 个采样点属于城市中游段部分,但受城市区域工业废水排放影响,表现出明显的差

异. 进入城市段后(T2、T3)水体 DOC 的腐殖化程度逐渐下降. 在本溪钢铁厂附近 T4 和 T5 采样点处,水体不断地接纳工业废水,导致其腐殖化程度突然降低,河水水质在一定程度上受到影响. 虽然城市下游段由于水体的稀释和自净作用,其腐殖化程度较 T4 和 T5 采样点处升高,但仍然呈逐渐下降趋势. 城市工业废水的排入对河流水体腐殖化程度影响较大. A_3/A_1 与 $S_{275-295}$ 也呈极显著正相关($P < 0.01$), A_2/A_1 与 SUVA₂₅₄、 $S_{275-295}$ 、 $S_{350-400}$ 值呈显著正相关($P < 0.05$),表明用 A_2/A_1 、 A_3/A_1 和 E_2/E_3 较其他指标表示太子河本溪城市段水体 DOM 的腐殖化水平更为准确.

异,独立存在一个置信椭圆内,揭示了太子河本溪城市段深受人类活动的影响.

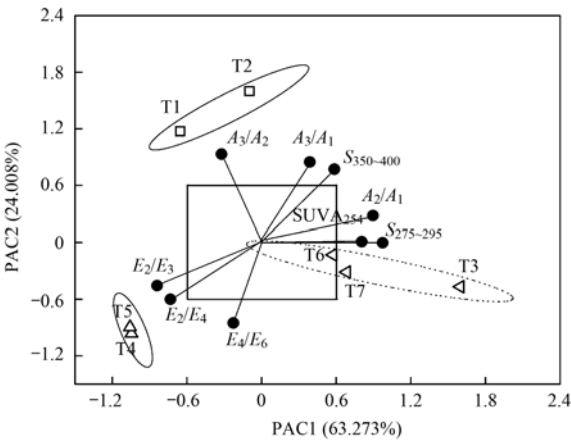


图 7 太子河本溪城市段水中 DOM 组分荷载图和采样点得分图
Fig. 7 Loadings of DOM component and scores plot of sampling sites in Taizi River (Benxi City section)

3 结论

(1)太子河本溪城市段水体中 DOM 的腐殖化程度呈现城市河段及工业废水污染分布特征,本溪钢铁厂排放废水所含的 DOM 为聚合程度低且相对分子质量较小的有机物.

(2) 9 个腐殖化指标中,太子河本溪城市段水体 DOM 的 E_2/E_3 与 E_2/E_4 呈现极显著性正相关 ($P < 0.01$), 与 $S_{275 \sim 295}$ 、 $S_{350 \sim 400}$ 和 A_2/A_1 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 表明 DOM 腐化程度不仅与有机物分子缩合度有关, 同时与富里酸和胡敏酸比值密切相关。

(3) DOM 组成结构特征与 A_2/A_1 、 $SUVA_{254}$ 和 $S_{275 \sim 295}$ 呈显著正相关, 而与 E_2/E_3 和 E_2/E_4 呈显著负相关。得分图显示 7 个采样点分别位于 3 个 35% 置信度的椭圆内, 间接验证太子河本溪城市段水体中 DOM 组成与结构、腐殖化水平呈现城市河段及工业废水污染分布特征, 表明太子河本溪城市段 DOM 深受人类活动的影响。

参考文献:

- [1] Nkansah K, Adedipe O, Dawson-Andoh B, *et al.* Determination of concentration of ACQ wood preservative components by UV-Visible spectroscopy coupled with multivariate data analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2015, **147**: 157-166.
- [2] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. *Soil Science*, 2000, **165**(4): 277-304.
- [3] Goldman J H, Rounds S A, Needoba J A. Applications of fluorescence spectroscopy for predicting percent wastewater in an urban stream[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(8): 4374-4381.
- [4] Osburn C L, Handsel L T, Mikan M P, *et al.* fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(16): 8628-8636.
- [5] Meng F G, Huang G C, Yang X, *et al.* Identifying the sources and fate of anthropogenically impacted dissolved organic matter (DOM) in urbanized rivers[J]. *Water Research*, 2013, **47**(14): 5027-5039.
- [6] 于会彬, 宋永会, 杨楠, 等. 三维荧光与神经网络研究城市河流沉积物孔隙水有机物组成与结构特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, **35**(4): 934-939.
- [7] Kumar V, Sharma V K, Kalonia D S. Second derivative tryptophan fluorescence spectroscopy as a tool to characterize partially unfolded intermediates of proteins [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2005, **294**(1-2): 193-199.
- [8] 占新华, 周立祥, 沈其荣, 等. 污泥堆肥过程中水溶性有机物光谱学变化特征[J]. *环境科学学报*, 2001, **21**(4): 470-474.
- [9] Yu H B, Song Y H, Xi B D, *et al.* Denitrification potential and its correlation to physico-chemical and biological characteristics of saline wetland soils in semi-arid regions [J]. *Chemosphere*, 2012, **89**(11): 1339-1346.
- [10] 王齐磊, 江韬, 赵铮, 等. 三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 879-887.
- [11] Chin Y P, Aiken G, O'Loughlin E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, **28**(11): 1853-1858.
- [12] 李志华, 张芹, 白旭丽, 等. 内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3487-3491.
- [13] Zhang M X, Yu H B, Jiang J Y, *et al.* Studies of elemental composition and UV visible spectroscopic properties of dissolved fulvic acids from saline soils around Wuliangsuhai lake, China [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2011, **20**(5): 1174-1182.
- [14] 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 等. 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[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3458-3466.
- [15] Nguyen P T, Lopez C, Bonnot C, *et al.* Study of the optical properties of dissolved organic matter in the Seine River Catchment (France) [A]. In: Xu J M, Wu J J, He Y (Eds.). *Functions of Natural Organic Matter in Changing Environment* [M]. Netherlands: Springer, 2013. 219-223.
- [16] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [17] Wang L Y, Wu F C, Zhang R Y, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fractions from Lake Hongfeng, Southwestern China Plateau [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(5): 581-588.
- [18] Korshin G V, Benjamin M M, Sletten R S. Adsorption of natural organic matter (NOM) on iron oxide: effects on NOM composition and formation of organo-halide compounds during chlorination[J]. *Water Research*, 1997, **31**(7): 1643-1650.
- [19] 李鸣晓, 何小松, 刘骏, 等. 鸡粪堆肥水溶性有机物特征紫外吸收光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(11): 3081-3085.
- [20] Peuravuori J, Pihlaja K. Isolation and characterization of natural organic matter from lake water: comparison of isolation with solid adsorption and tangential membrane filtration[J]. *Environment International*, 1997, **23**(4): 441-451.
- [21] Deflandre B, Gagné J P. Estimation of dissolved organic carbon (DOC) concentrations in nanoliter samples using UV spectroscopy[J]. *Water Research*, 2001, **35**(13): 3057-3062.
- [22] 朱先芳. 密云水库沉积物中腐殖酸特征及其与重金属吸附作用研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013.
- [23] 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 & Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [24] Minero C, Lauri V, Falletti G, *et al.* Spectrophotometric characterisation of surface lakewater samples: implications for the quantification of nitrate and the properties of dissolved organic matter[J]. *Annali di Chimica*, 2007, **97**(10): 1007-1116.
- [25] Wang F L, Bettany J R. Influence of freeze-thaw and flooding on the loss of soluble organic carbon and carbon dioxide from soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1993, **22**(4): 709-714.
- [26] De Haan H, De Boer T. Applicability of light absorbance and fluorescence as measures of concentration and molecular size of dissolved organic carbon in humic Lake Tjeukemeer[J]. *Water Research*, 1987, **21**(6): 731-734.

- [27] 陶澍, 崔军, 张朝生. 水生腐殖酸的可见-紫外光谱特征[J]. 地理学报, 1990, **45**(4): 484-489.
- [28] Strobel B W, Hansen H C B, Borggaard O K, *et al.* Composition and reactivity of DOC in forest floor soil solutions in relation to tree species and soil type[J]. Biogeochemistry, 2001, **56**(1): 1-26.
- [29] Chen Y, Senesi N, Schnitzer M. Information provided on humic substances by E_4/E_6 ratios[J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, **41**(2): 352-358.
- [30] Baes A U, Bloom P R. Fulvic acid ultraviolet-visible spectra: influence of solvent and pH[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, **54**(5): 1248-1254.
- [31] 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 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[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 933-941.
- [32] Yu H B, Xi B D, Su J, *et al.* Spectroscopic properties of dissolved fulvic acids: an indicator for soil salinization in arid and semiarid regions in China[J]. Soil Science, 2010, **175**(5): 240-245.
- [33] Zbytniewski R, Buszewski B. Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: chemical and spectroscopic properties [J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(4): 471-478.
- [34] Albrecht R, Le Petit J, Terrom G, *et al.* Comparison between UV spectroscopy and nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(6): 4495-4500.
- [35] dos Santos L M, Simões M L, de Melo W J, *et al.* Application of chemometric methods in the evaluation of chemical and spectroscopic data on organic matter from Oxisols in sewage sludge applications[J]. Geoderma, 2010, **155**(1-2): 121-127.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行