ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 37 卷 第 4 期
2016 年 4 月 15 日

目 次

2013 年 12 月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 …… 周敏,乔利平,朱书慧,李莉,楼晟荣,王红丽,陶士康,黄成,陈长虹(1179)
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 …… 黄子龙,曾立民,董华斌,李梅,朱彤(1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 …… 朱麟,马嫣,郑军,李时政,王利朋(1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 …… 苏捷,赵普生,陈一娜(1208)
重庆市主城区 $PM_{2.5}$ 时空分布特征 …… 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利(1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 …… 庞博,吉东生, 刘子锐,朱彬,王跃思(1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征 …… 何鹏飞,张鸿,李静,何龙, 罗骥 ,刘国卿,沈金灿,杨波,崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO_2 及 $\delta^{13}C(CO_2)$ 本底变化 …… 夏玲君, 周凌晞, 刘立新, 张根(1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 …… 刘婷,李露,张家泉,占长林,刘红霞,郑敬茹,姚瑞珍,曹军骥(1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 …… 刘建福,陈敬雄,辜时有(1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 …… 曹治国,余刚,吕香英,王梦蕾,李琦路,冯精兰,闫广轩,余浩,孙剑辉(1272)
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 …… 王丽,王利军,史兴民,卢新卫(1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 …… 刘寒冰,姜鑫,王新,杨兵,薛南冬,张石磊(1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 …… 张卫坤,甘华阳,闭向阳,王家生(1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 …… 薛勇, 周倩,李远,章海波,胡雪峰,骆永明(1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 …… 李广,章新平,许有鹏,宋松,王跃峰,季晓敏,项捷,杨洁(1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 …… 李莹杰,张列宇,吴易雯,李曹乐,杨天学,唐军(1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 …… 刘小红,司友斌,郭子薇,杜成竹,朱聪聪(1330)
我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 …… 曾明正, 黄廷林,邱晓鹏,王亚平,史建超,周石磊,刘飞(1337)
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 …… 韦虹,吴锦奎,沈永平,张伟,刘世伟,周嘉欣(1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 … 冯佳,郭宇宁,王飞,吕俊平,刘琪,谢树莲,程革,张建民(1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 …… 程建华,窦智勇,孙庆业(1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 …… 马秋梅,李玮,王毅,刘新亮,李勇,吴金水(1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 …… 张远瞩,贺秋芳,蒋勇军,李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 …… 邱祖凯,胡小贞,姚程,张文慧,许秋瑾,黄天寅(1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 …… 韩华杨,李正魁,王浩,朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 …… 高永霞,宋玉芝,于江华,朱广伟(1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 …… 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖(1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 …… 郭俊锐,李大鹏,刘焱见(1422)
锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 …… 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹(1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 …… 王岩,施钦,王辉,卞兆勇(1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 $Fe_3O_4@SiO_2$ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 …… 赖立,谢强,方文侃,邢明超,吴德意(1444)
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 …… 乔梦,齐维晓,赵旭,刘会娟,曲久辉(1451)
污水处理厂污泥水溶解性有机物的光谱特性分析 …… 牛天浩,周振,胡大龙,魏海娟,李晶,窦微笑,葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 …… 李祥,朱亮,黄勇,杨朋兵,崔剑虹,马航(1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 …… 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,徐乐中,沈耀良(1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 …… 王翻翻,钱飞跃,沈耀良,王建芳,张月茹,刘郭洵(1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 …… 何势,顾超超,魏欣,黄圣琳,刘振鸿,薛罡,高品(1485)
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 …… 杨伟强,王冬波,李小明,杨麒,徐秋翔,张志贝,李志军,向海弘,王亚利,孙剑(1492)
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 … 谢燕,陈曦,胡正华,陈书涛,张寒,凌慧,申双和(1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 …… 崔海,张亚红(1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 …… 贡璐,朱美玲,刘曾媛,张雪妮,解丽娜(1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 …… 刘江,江韬,黄容,张进忠,陈宏(1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 …… 王亚男,程立娟,周启星(1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 …… 罗瑶,李珊,谭文峰,刘凡,蔡崇法,邱国红(1539)
高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 …… 冯红梅,秦永胜,李筱帆,周金星,彭霞薇(1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 …… 戴晓虎,薛勇刚,刘华杰,戴翎翎,严寒,李宁(1553)
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 …… 金彩霞,司晓薇,王子英,张琴文(1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 …… 王兰君,王金花,朱鲁生,王军,赵祥(1568)
新型污染物卤代咔唑的环境行为及生态毒理效应 …… 林坤德,陈艳秋,袁东星(1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 …… 李蕾,王铁宇,王晓军,肖荣波,李奇锋,彭驰,韩存亮(1584)
《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

污水处理厂污泥水溶解性有机物的光谱特性分析

牛天浩[1],周振[1*],胡大龙[1],魏海娟[2],李晶[2],窦微笑[1],葛红花[1]
(1. 上海电力学院环境与化学工程学院, 上海 200090; 2. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘要: 污泥水是污水处理厂污泥浓缩、稳定、脱水等环节产生的废水,具有污染物浓度高、成分复杂的特点. 采用三维荧光光谱和红外光谱研究了污泥水中溶解性有机物(DOM)的光谱特性. 污泥水荧光性 DOM(FDOM)可利用平行因子分析划分为 6 个荧光组分,分别为类蛋白质组分 C1(275/355 nm)、C4(235/350 nm)和 C6(275/305 nm),及类腐殖酸组分 C2(250,340/440 nm)、C3(320/380 nm)和 C5(250/465 nm). 重力浓缩和机械浓缩污泥水中 COD 与所有类腐殖酸组分均正显著相关($P < 0.01$),类蛋白质组分对其影响不大. 离心脱水污泥水中组分 C1、C4 和 C5 含量明显上升. 深度脱水污泥水中 FDOM 荧光峰位置和强度与其它污泥水存在显著差异,C3 和 C6 分别较离心脱水污泥水升高 15.63 和 7.30 倍. 与浓缩污泥水相比,离心脱水污泥水中多糖和腐殖酸吸收峰增强,而深度脱水污泥水中蛋白质大量释放,金属离子会与腐殖酸和蛋白质络合引起 DOM 结构变化.

关键词:污泥水; 三维荧光光谱; 溶解性有机物; 污水处理; 傅里叶红外光谱
中图分类号: X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)04-1460-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.04.034

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants

NIU Tian-hao[1], ZHOU Zhen[1*], HU Da-long[1], WEI Hai-juan[2], LI Jing[2], DOU Wei-xiao[1], GE Hong-hua[1]
(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Chentou Wastewater Treatment Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: Reject water generated from sludge thickening, dewatering and stabilization process contains high-content and complex dissolved organic matters (DOM). The spectral characteristics of DOM in the reject water were investigated by three-dimensional excitation-emission matrix and Fourier transform infrared spectroscopy. Fluorescent DOM (FDOM) from reject water were decomposed into six components by parallel factor analysis, the protein-like C1 (275/355 nm), C4 (235/350 nm) and C6 (275/305 nm) and the humic-like C2 (250, 340/440 nm), C3 (320/380 nm) and C5 (250/465 nm). Soluble COD in the sludge thickening reject water was positively correlated with all the three humic-like substances at $P < 0.01$ level, and was insignificantly influenced by protein-like substances. The tryptophan-like C1, C4 and humic-like C5 increased in the centrifugal dewatering reject water (CDRW). FDOM in the advanced dewatering reject water (ADRW) were significantly different from those of other reject water in fluorescence peak locations and intensities, and humic-like C3 and tyrosine-like C6 in the DOM were 15.63 and 7.30 times higher than those in CDRW. Compared to sludge thickening reject water, infrared peaks related to polysaccharide and humic substances in CDRW were enhanced, and massive proteins were released into ADRW. DOM structures in ADRW were changed owing to the complexation between metals and both humic substances and proteins.

Key words: reject water; three-dimensional emission-excitation matrix; dissolved organic matters; wastewater treatment; Fourier transform infrared spectroscopy

为了维持微生物活性和固体平衡,污水生物处理系统需定期排放剩余污泥. 污泥需经过浓缩、稳定和脱水等环节实现减容化和稳定化. 随着环保要求的提高,近年来许多污水处理厂新增污泥深度脱水以将含水率降低至 <60%[1]. 伴随着含水率的降低,各污泥处理环节均会产生大量污泥水. 由于污泥来源、调理剂和脱水设备的差异,污泥水中溶解性有机物(DOM)浓度和组成变化很大[1,2]. 传统的 COD 和 TOC 等指标只能反映有机物总量,寻求恰当的表征技术揭示 DOM 的组分构成和降解特性,对污泥水水质特性评价及处理技术开发具有重要意义.

三维荧光光谱(3D-EEM)法具有前处理简单、不破坏样品结构、灵敏度高、选择性好、分析速度快等优点,能同时定性指示多种有机物的类型与性质,在污水 FDOM(荧光性有机物)等复杂多组分混合物分析中具有独特优势[3,4]. 近年来,3D-EEM 技术已广泛应用于城镇污水[4,5]、工业废水(石化[6,7]、中药[8]等)、污水处理厂出水[9]、微生物内

收稿日期: 2015-10-27; **修订日期**: 2015-11-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(51408352)
作者简介: 牛天浩(1991 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为污水处理技术,E-mail:blastcalf@126.com
* 通讯联系人,E-mail:zhouzhen@shiep.edu.cn

源代谢产物[10]中 FDOM 的研究. 对于污水中某些不具有荧光效应的 DOM，傅里叶红外光谱（FTIR）能够快速、简捷地进行宏观与整体鉴定[8]. 然而，对于污水处理领域面临的污泥水共性问题，对其 DOM 组分构成和特性分析的研究却鲜有报道. 污泥在不同处理环节中其间隙水、胞外聚合物（EPS）和胞内物质所含的荧光类有机物[3]均会进入污泥水 DOM 中. 因此，本研究拟在污泥处理系统各污泥水水质特性分析的基础上，采用3D-EEM 和 FTIR 研究污泥水中 DOM 组分的强度、来源及其与 COD 的内在联系，以期为污泥水的效应评价与处理技术研究提供数据支撑.

1　材料与方法

1.1　样品采集

实验所用污泥水和原污水取自上海市白龙港污水处理厂. 该厂剩余污泥经重力浓缩后加入聚丙烯酰胺（PAM）进入离心浓缩机，浓缩后污泥再投加一定量 PAM，进入离心脱水机将含水率降至 < 80%. 离心脱水后污泥与竹园、曲阳等污水厂的脱水污泥采用白龙港厂重力浓缩污泥稀释至含水率 93%，投加 CaO（20%）和 $FeCl_3$（8%）调理后，通过板框压滤将含水率降至 < 60% 外运填埋. 本研究中污泥水为重力浓缩、机械浓缩、离心脱水和深度脱水产生的上清液，采用 0.45 μm 滤膜过滤后用于 DOM 分析.

1.2　常规分析指标

溶解性 COD（SCOD）采用重铬酸钾法测定；多糖（PS）和蛋白质（PN）分别采用蒽酮比色法和 Lowry 法测定；DNA 利用 UV-2600 分光光度计（Shimadzu，日本）按照紫外吸收法测定；TOC 采用 Multi N/C 3100（Analytikjena，德国）测定；腐殖质（HS）采用 RF-5301 荧光光度计（Shimadzu，日本）测定 310/440 nm 下的激发（E_x）/发射（E_m）波长确定.

1.3　3D-EEM 分析

3D-EEM 采用 RF-5301 荧光光度计测定. 光源为氙灯，Ex 和 Em 波长狭缝宽度均为 5nm. Ex 和 Em 的扫描范围均为 220 ~ 500 nm，步长为 5 nm，扫描速度为1 000 nm·min^{-1}. 原污水、重力浓缩和机械浓缩污泥水用去离子水稀释 5 倍，离心脱水和深度脱水污泥水分别稀释 10 和 50 倍.

1.4　平行因子法分析（PARAFAC）

将扣除空白影响的 20 个原污水和污泥水样品的荧光矩阵组合成三维数据矩阵. 该数据矩阵使用包括 Nway toolbox ver 3.1 在内的 DOMFluor 工具箱在 MATLAB R2007a 上进行 PARAFAC 处理. 采用折半分析和随机初始化确定最优组分数，通过残差分析检验 PARAFAC 模型的有效性，并确定各荧光峰位置和强度（F_{max}）.

1.5　FTIR 分析

红外光谱扫描采用 FTIR-8400S 型岛津傅里叶变换红外光谱仪（Shimadzu，日本）. 水样注入蒸发皿中，溶入适量溴化钾晶体后，于干燥器中干燥. 干燥后样品添加适量溴化钾混合压片，检测时测定范围为4 000 ~ 400 cm^{-1}.

2　结果与讨论

2.1　污泥水水质特性分析

表 1 反映了原污水和各污泥水 DOM 组分的大小，其中 DOM 指标变化趋势相同，均为深度脱水 > 离心脱水 > 原污水 > 机械浓缩 > 重力浓缩. 各污泥水 DOM 成分和含量的差异与有机物在污泥中的分布密切相关. 活性污泥是由上清液、凝胶层 EPS、松散结合态 EPS（LB-EPS）、紧密结合态 EPS（TB-EPS）和细胞相构成的动态多层结构[3]. 在活性污泥中，PN 和 PS 主要分布于内层的细胞相和 TB-EPS 中，仅有少量 PN 分布于外层，而 PS 在外层的分布要高于 PN[11].

重力浓缩利用自然沉降分离污泥中的间隙水，污泥水 DOM 主要来源于污水生物处理后上清液中的惰性物质及少量污泥厌氧水解产生的有机物. 机械浓缩则是污泥调理后再离心造成部分凝胶层 EPS 剥离，因此其污泥水 DOM 略高于重力浓缩. 离心脱水则是加入调理剂后高速离心，造成部分结合态 EPS 剥离，其污泥水 DOM 明显高于机械浓缩. 从 PS 和 PN 含量来看，离心脱水污泥水为机械浓缩的 6.6 和 5.6 倍，而后者仅为重力浓缩的 1.9 和 2.1 倍，这也证明 PS 和 PN 主要分布于污泥内层. 深度脱水过程中，CaO 和 $FeCl_3$ 的加入会破坏污泥细胞结构，导致大量 EPS 和胞内物质溶出[12]. 因此，其污泥水 DOM 含量非常高，主要成分为 PN 和 HS，并含有较高浓度的 DNA 和 PS.

2.2　污泥水的三维荧光光谱分析

原污水及污泥水的 3D-EEM 如图 1 所示. 从中可知，重力浓缩、机械浓缩和离心脱水污泥水 FDOM 的荧光峰位置与原污水基本一致，包括 A（255/450 ~ 460 nm）、B（225 ~ 235/350 nm）和 T（280 ~ 290/350 ~ 360 nm）3 个主要荧光峰，还存在 C（315 ~ 335/420 ~ 440 nm）和 D（225 ~ 230/295 ~

表 1 原污水和污泥水 DOM 组分浓度/mg·L^{-1}

Table 1 DOM contents of raw wastewater and reject water/mg·L^{-1}

水样	原污水	污泥水			
		重力浓缩	机械浓缩	离心脱水	深度脱水
SCOD	125.4 ± 14.7	43.6 ± 10.2	69.1 ± 18.3	340.1 ± 18.3	2274.7 ± 93.6
TOC	34.5 ± 7.2	9.0 ± 1.9	15.8 ± 2.8	103.6 ± 3.0	567.7 ± 100.0
HS	27.7 ± 2.6	18.8 ± 2.8	23.8 ± 5.2	120.3 ± 5.6	339.3 ± 47.5
PS	4.7 ± 1.7	2.2 ± 1.1	4.1 ± 1.7	27.0 ± 3.5	51.8 ± 9.0
PN	16.6 ± 2.9	7.4 ± 3.1	15.7 ± 2.1	88.5 ± 1.2	292.0 ± 0.9
DNA	8.1 ± 0.7	5.1 ± 0.3	7.9 ± 0.8	43.8 ± 6.3	68.7 ± 1.6

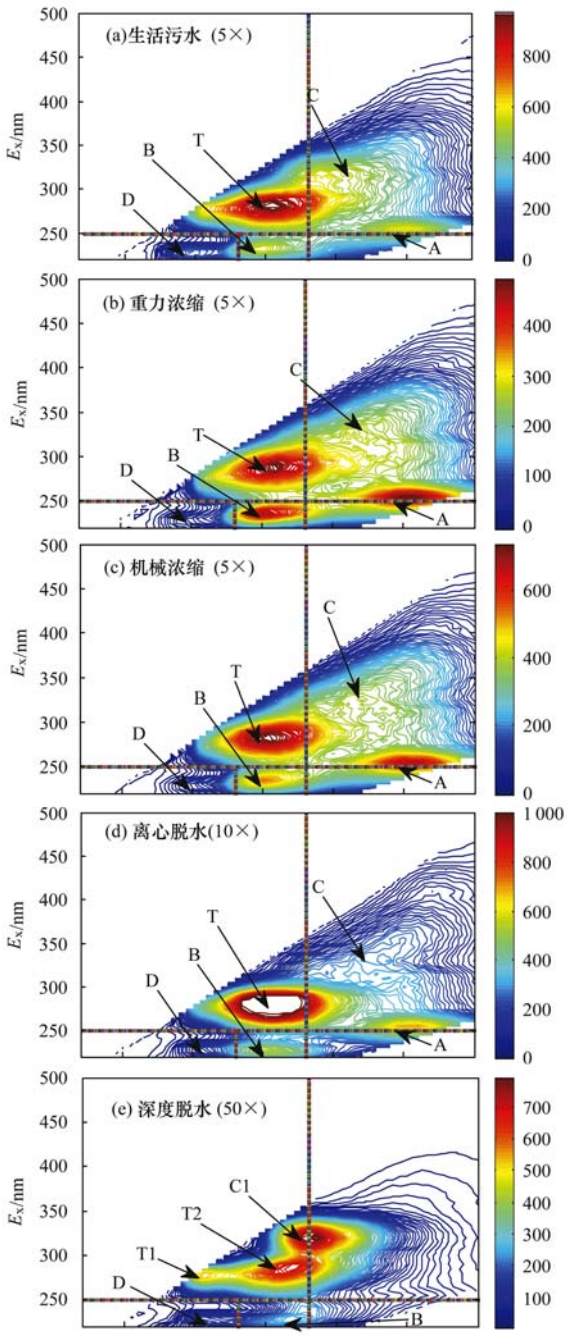


图 1 原污水和污泥水 DOM 的典型 EEM 图

Fig. 1 Typical EEM contour of DOM in raw wastewater and reject water

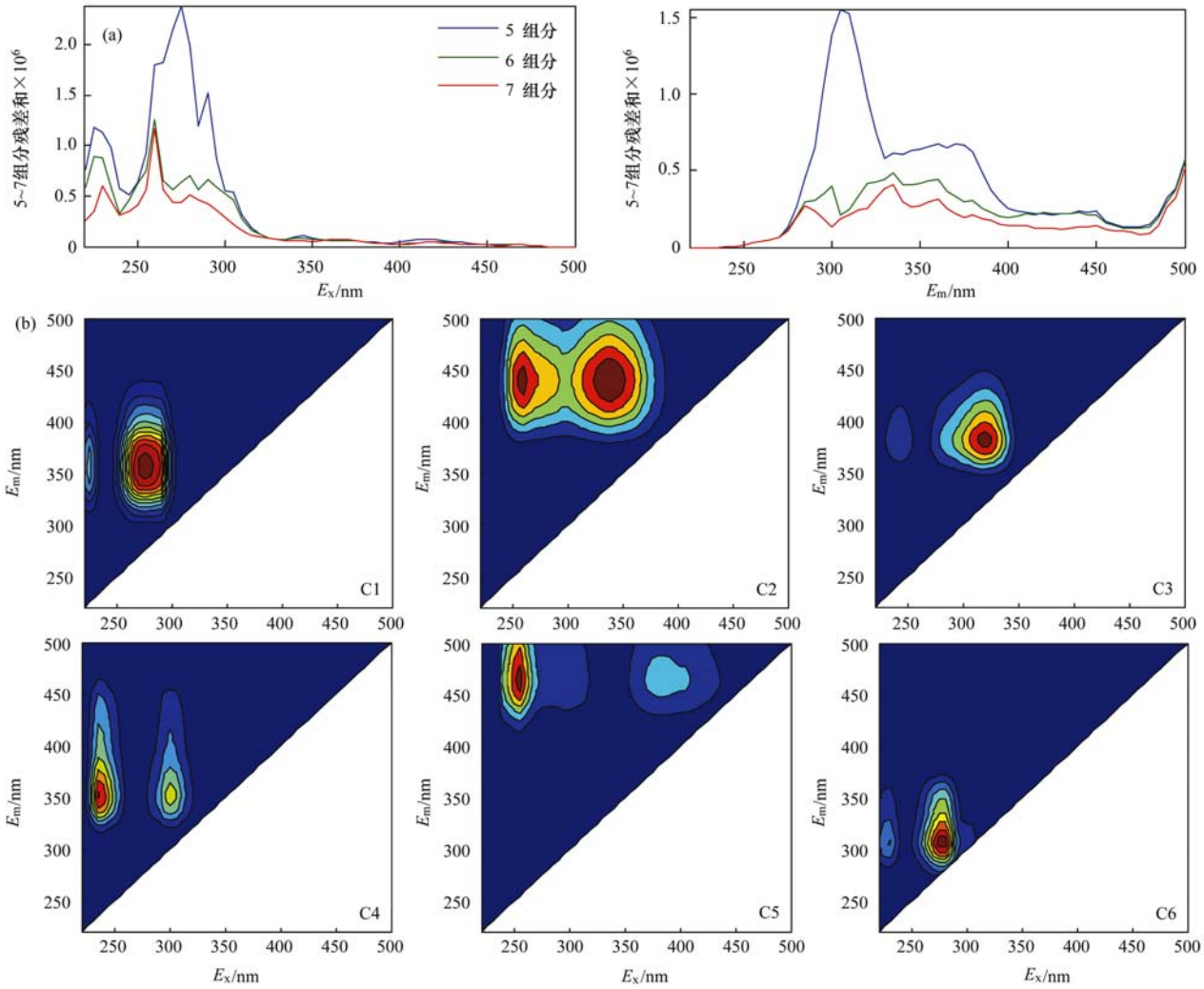
305 nm)两个荧光强度较低的峰. 深度脱水污泥水的荧光组分与其它污泥水和原污水存在明显差异. 除峰 B(230/375 nm)位置相近外,另 2 个主要荧光峰 C1(320/385 nm)和 T2(285/365 nm)则存在一定程度上的蓝移与红移. 在 280/310 nm(峰 T1)和 225/305 nm(峰 D)处则存在两个荧光强度较低的峰. 在深度脱水污泥水中,短波长腐殖酸峰 A 消失,这可能是其与 Fe^{3+} 络合形成沉淀猝灭所致[13].

2.3 荧光光谱的平行因子分析

为了深入研究 FDOM 的组成变化和荧光特性,采用 PARAFAC 解析原污水及各污泥水的 3D-EEM,结果见图 2. 由图 2(a)可知,当组分数为 6 时,其残差和明显小于组分数为 5 时,但与 7 组分模型的残差和较为接近,故认为 6 组分模型已经能够充分反映各样品的荧光信息[14]. 因此,原污水及各污泥水的 EEM 图谱可采用 6 组分模型分析. 6 个主要荧光组分[位置如图 2(b)]包括 3 个类蛋白质(C1、C4、C6)和 3 个类腐殖酸组分(C2、C3、C5).

组分 C1(275/355 nm)属于类色氨酸物质,主要为游离或结合的蛋白质或氨基酸,可用以指示完整的蛋白质[4,15]. 组分 C2 在 E_x 250 nm 和 340 nm, E_m 440 nm 处有两个荧光峰,分别为短波长和长波长类腐殖酸物质[3,16]; 组分 C3(320/380 nm)属于长波长海洋类腐殖酸,通常来源于污水或农业废弃物等人为源[16,17]; 组分 C4(235/350 nm)属于芳香族类蛋白质物质[18]; 组分 C5 (250/465 nm)主要为含高分子量和芳香族陆生性类腐殖酸[5,19]; 组分 C6 (275/305 nm)为类酪氨酸物质,通常与微生物产物相关[15,20,21].

原污水和污泥水中不同组分荧光峰的 F_{max} 如图 3 所示. 从中可知,原污水中类蛋白质组分的 F_{max} 均高于类腐殖酸组分. 与原污水相比,重力浓缩污泥水除组分 C4 的 F_{max} 相当外,其它组分均不同程度下降,这是因为污水中大部分有机物在生物处理系统中降解,而重力浓缩过程DOM释放量



(a)5 ~7 组分模型的残差分析；(b) PARAFAC 组分的 3D-EEM 等高线

图 2　原污水和污泥水样品的 PARAFAC 分析

Fig. 2　PARAFAC analysis of raw wastewater and reject water samples

不大. 相较于重力浓缩,机械浓缩污泥水中各荧光组分 F_{max} 均有所上升,且类腐殖酸组分的上升幅度(34. 3%)明显高于类蛋白质(20. 7%). 离心脱水污泥水中各荧光组分 F_{max} 均明显高于污泥浓缩. 与机械浓缩相比,离心脱水污泥水中类色氨酸组分含量明显增加,且类蛋白质组分 F_{max} 的上升幅度(112. 6%)明显高于类腐殖酸(63. 5%). 机械浓缩较低的离心力通常只能分离外层 EPS,而高转速的离心脱水可分离内层的 TB-EPS,造成大量蛋白质进入污泥水中[11].

与离心脱水相比,深度脱水通过碱性条件下污泥溶胞造成大量胞内物质释放进入污泥水中,组分 C1、C3 和 C6 的 F_{max} 均大幅度升高,而组分 C2、C4 和 C5 的 F_{max} 则低于离心脱水. 在深度脱水污泥水的 6 个荧光组分中,类腐殖酸组分 C3 的 F_{max} 较离心脱水升高幅度最大,达 15. 63 倍. 这是因为位于 315 ~ 325/380 ~ 390 nm 处的类腐殖酸物质是结合态 EPS

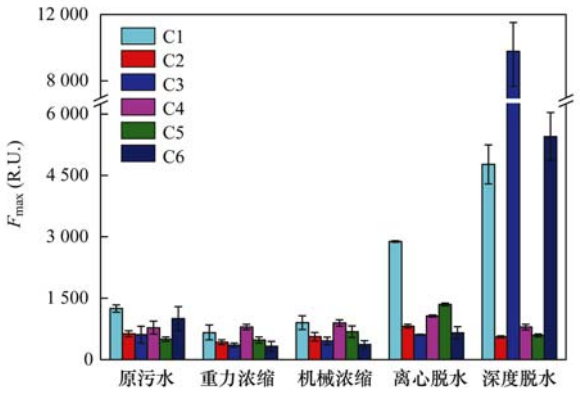


图 3　原污水和污泥水的荧光组分强度

Fig. 3　Intensities of fluorescent components from raw wastewater and reject water

的主要荧光组分[22]. 深度脱水污泥水中类色氨酸组分 C1 和类酪氨酸组分 C6 的 F_{max} 较离心脱水分别上升 0.65 和 7.30 倍. 这是由于虽然类色氨酸物质是污泥内层 TB-EPS 和细胞相中类蛋白质荧光组分的主要成分[3],但污泥溶胞产物 DOM 却多为类酪氨酸物质[23]. 荧光组分 C1、C3 和 C6 的大幅度升高证明深度脱水过程中存在大量结合态 EPS 的解离与细胞溶解.

2.4 荧光组分强度与 COD 的相关性分析

在离心脱水和深度脱水污泥水中,大量内层 EPS 和胞内物质会进入液相,因此其 FDOM 含量明显高于浓缩污泥水,且成分更为复杂. 而重力和机械浓缩污泥水 FDOM 主要来自污泥上清液和外层 EPS,对其荧光组分和 SCOD 进行相关分析,结果如图 4 所示. 结果表明,所有类腐殖酸荧光组分均与 SCOD 在 $P<0.01$ 水平上正显著相关,而类蛋白质组分中仅 C4 在 $P<0.05$ 水平上与 SCOD 正显著相关,组分 C1 和 C6 与 SCOD 不相关. 这说明浓缩污泥水中 SCOD 主要来自于类腐殖酸组分的贡献,类蛋白质组分对其影响不大. 这也与蛋白质在污泥外层 EPS 中分布比例很低的结论相吻合[11].

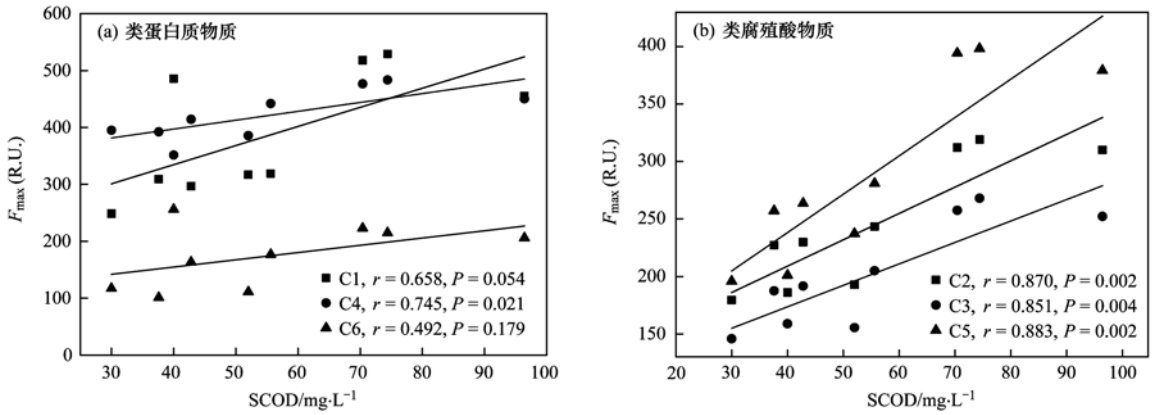


图 4 浓缩污泥水荧光组分与 COD 相关关系

Fig. 4 Correlation between fluorescent components and COD in reject water from sludge thickening

2.5 污泥水的红外光谱分析

原污水和污泥水 DOM 的 FTIR 光谱如图 5 所示. 从中可知,原污水和浓缩污泥水中存在类似的特征峰: 3 450 ~ 3 400 cm^{-1}处为 O—H 或 N—H 的伸缩振动[24], 2 926 ~ 2 918 cm^{-1}和2 854 ~ 2 849 cm^{-1}处的窄峰分别为—CH_2—的不对称和对称伸缩振动, 2 361 ~ 2 341 cm^{-1}处则是叁键和累积双键类物质吸收区[6], 1 637 ~ 1 629 cm^{-1}处则为双键的伸缩振动,1 120 ~ 1 111 cm^{-1}处为多糖中 C—O—C 的伸缩振动[8], 619 cm^{-1}处的峰则属于富里酸频段[25]. 与原污水和重力浓缩污泥水相比,机械浓缩污泥水在1 735 cm^{-1}和1 458 cm^{-1}处新出现的峰为羧酸和苯环骨架振动的特征峰[26].

离心脱水污泥水在1 107 cm^{-1}和1 188 cm^{-1}出现两个与多糖中 C—O—C 的伸缩振动密切相关的峰[26],且吸收峰强度较浓缩污泥水显著增强,说明脱水过程中 EPS 外层的 PS 大量释放. 离心脱水污泥水在 HS 频段的峰明显加强,且出现了与苯环的伸缩振动及其对位取代相关的新峰 673 cm^{-1}和 842 cm^{-1},这与污泥水中 HS 含量及荧光性类腐殖酸组分 F_{max} 上升相吻合. 深度脱水污泥水中2 926 ~ 2 848 cm^{-1}、1 735 cm^{-1}和 619 cm^{-1}处的峰消失,这与强碱性条件下羧酸、富里酸(CH_2)基团的消失密切相关[25,26]. 深度脱水污泥水在 538 cm^{-1}处出现的新峰则是铁与 DOM 形成的 Fe—O 键伸缩振动所致[27],与其 3D-EEM 中荧光峰 A 的猝灭相吻合. 深度脱水

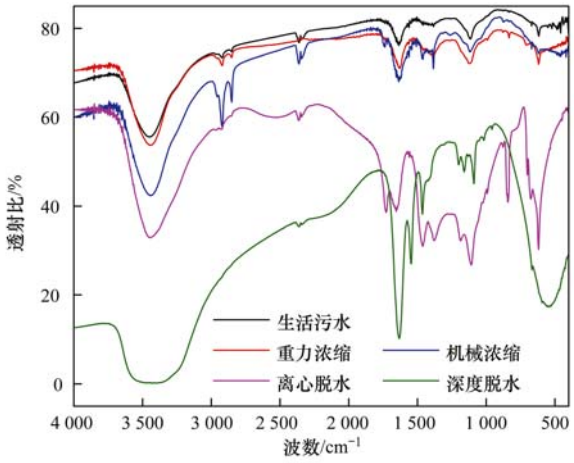


图 5 原污水和污泥水 DOM 的 FTIR 光谱图

Fig. 5 FTIR spectra of DOM in raw wastewater and reject water

污泥水在1 640 ~ 1 407 cm^{-1}蛋白质肽键频段的峰[25]明显加强，1 465 cm^{-1}和1 548 cm^{-1}是蛋白质二级结构所特有的峰[28]，这与深度脱水污泥水中蛋白质含量及荧光性类蛋白质组分 F_{max}的上升相吻合. 与其它污泥水的尖峰相比，深度脱水污泥水3 400 cm^{-1}处的吸收峰转化为钝峰，这可能是钙或铁与蛋白质络合造成光谱变化[8].

3　结论

（1）采用 EEM-PARAFAC 将污泥水中的 DOM 划分为 6 个荧光组分，类蛋白质 C1（275/355 nm）、C4（235/350 nm）和 C6（275/305 nm），及类腐殖酸 C2（250，340/440 nm）、C3（320/380 nm）和 C5（250/465 nm）.

（2）浓缩和离心脱水污泥水 DOM 的荧光峰位置与原污水基本一致，而深度脱水污泥水则存在显著差异. 两种浓缩污泥水中 SCOD 与所有类腐殖酸均正显著相关（$P<0.01$）. 离心脱水污泥水中，类色氨酸组分 C1、C4 和腐殖酸组分 C5 含量明显上升. 由于大量结合态 EPS 和胞内物质的溶解，深度脱水污泥水中类腐殖酸组分 C3 和类酪氨酸组分 C6 分别较离心脱水升高 15.63 和 7.30 倍.

（3）FTIR 分析表明，与浓缩污泥水相比，离心脱水污泥水中 PS 和 HS 吸收峰增强，而深度脱水污泥水中 PN 大量释放，金属离子会与腐殖酸和蛋白质络合引起 DOM 结构变化.

参考文献：

[1] Ren W C, Zhou Z, Jiang L M, *et al*. A cost-effective method for the treatment of reject water from sludge dewatering process using supernatant from sludge lime stabilization[J]. Separation and Purification Technology, 2015, **142**: 123-128.

[2] 周振，胡大龙，顾雨婷，等. 浓缩脱水污泥水混凝预处理效果及混凝剂的选择[J]. 环境工程学报，2014，**8**(11)：4575-4580.

[3] Yu G H, He P J, Shao L M. Novel insights into sludge dewaterability by fluorescence excitation-emission matrix combined with parallel factor analysis[J]. Water Research, 2010, **44**(3): 797-806.

[4] 李卫华，刘怡心，王伟，等. 污水处理厂及受纳水体样品的三维荧光光谱解析[J]. 光谱学与光谱分析，2015，**35**(4)：940-945.

[5] Zhou Z, Qiao W M, Xing C, *et al*. Characterization of dissolved organic matter in the anoxic-oxic-settling-anaerobic sludge reduction process[J]. Chemical Engineering Journal, 2015, **259**: 357-363.

[6] 孙青亮，吴昌永，胡翔，等. 石化污水厂二级出水溶解性有机物分级解析研究[J]. 中国环境科学，2012，**32**(11)：2017-2022.

[7] 刘明国，吴昌永，周岳溪，等. 臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究[J]. 环境科学，2014，**35**(2)：651-656.

[8] 宿程远，李伟光，王恺尧. DC 反应器处理中药废水过程中出水的光谱分析[J]. 中国环境科学，2015，**35**(4)：1103-1108.

[9] 杨建，高金华，常江. MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析[J]. 环境科学，2012，**33**(6)：1878-1883.

[10] 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.

[11] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al*. Stratification structure of sludge flocs with implications to dewaterability[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(21): 7944-7949.

[12] 姚萌，程国淡，谢小青，等. 城市污水厂污泥化学调理深度脱水机理[J]. 环境工程学报，2012，**6**(8)：2787-2792.

[13] 钟润生，张锡辉，管运涛，等. 三维荧光指纹光谱用于污染河流溶解性有机物来源示踪研究[J]. 光谱学与光谱分析，2008，**28**(2)：347-351.

[14] Wu H Y, Zhou Z Y, Zhang Y X, *et al*. Fluorescence-based rapid assessment of the biological stability of landfilled municipal solid waste[J]. Bioresource Technology, 2012, **110**: 174-183.

[15] Li X W, Dai X H, Takahashi J, *et al*. New insight into chemical changes of dissolved organic matter during anaerobic digestion of dewatered sewage sludge using EEM-PARAFAC and two-dimensional FTIR correlation spectroscopy[J]. Bioresource Technology, 2014, **159**: 412-420.

[16] Ishii S K L, Boyer T H. Behavior of reoccurring PARAFAC components in fluorescent dissolved organic matter in natural and engineered systems: a critical review[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(4): 2006-2017.

[17] Coble P G. Marine optical biogeochemistry: The chemistry of ocean color[J]. Chemical Reviews, 2007, **107**(2): 402-418.

[18] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al*. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(24): 5701-5710.

[19] Guo W D, Xu J, Wang J P, *et al*. Characterization of dissolved organic matter in urban sewage using excitation emission matrix fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis[J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(11): 1728-1734.

[20] Li W T, Chen S Y, Xu Z X, *et al*. Characterization of dissolved organic matter in municipal wastewater using fluorescence parafac analysis and chromatography multi-excitation/emission scan: a comparative study[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(5): 2603-2609.

[21] Baghoth S A, Sharma S K, Amy G L. Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation-emission matrices and PARAFAC[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 797-809.

[22] Zhen G Y, Lu X Q, Zhao Y C, *et al*. Enhanced dewaterability of sewage sludge in the presence of Fe(Ⅱ)-activated persulfate oxidation[J]. Bioresource Technology, 2012, **116**: 259-265.

[23] Lu L, Xing D F, Liu B F, *et al*. Enhanced hydrogen production from waste activated sludge by cascade utilization of organic matter in microbial electrolysis cells[J]. Water Research, 2012, **46**(4): 1015-1026.

[24] Saravanan R R, Seshadri S, Gunasekaran S, *et al*. Conformational analysis, X-ray crystallographic, FT-IR, FT-Raman, DFT, MEP and molecular docking studies on 1-(1-(3-methoxyphenyl) ethylidene) thiosemicarbazide [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2015, **139**: 321-328.

[25] 郗丽娟, 吕娜, 张海丰, 等. SMP 形成与降解机制分析及其对 MBR 膜过滤的影响[J]. 化工学报, 2013, **64**(8): 3003-3008.

[26] 郑蕾, 田禹, 孙德智. pH 值对活性污泥胞外聚合物分子结构和表面特征影响研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1507-1511.

[27] Safiur Rahman M, Whalen M, Gagnon G A. Adsorption of dissolved organic matter (DOM) onto the synthetic iron pipe corrosion scales (goethite and magnetite): Effect of pH[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **234**: 149-157.

[28] Maruyama T, Katoh S, Nakajima M, *et al*. FT-IR analysis of BSA fouled on ultrafiltration and microfiltration membranes[J]. Journal of Membrane Science, 2001, **192**(1-2): 201-207.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 4

Apr. 15, 2016

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013 ····· ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, *et al.* (1179)

Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer ····· HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, *et al.* (1188)

Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing ····· ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, *et al.* (1199)

Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing ····· SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics of $PM_{2.5}$ in Chongqing Urban Areas ····· LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, *et al.* (1219)

Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles ····· PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, *et al.* (1230)

Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen ····· HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, *et al.* (1240)

Monitoring Atmospheric CO_2 and $\delta^{13}C(CO_2)$ Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China ····· XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, *et al.* (1248)

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period ····· LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, *et al.* (1256)

Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water ····· LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)

Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing ····· CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, *et al.* (1272)

Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China ····· WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, *et al.* (1279)

Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS ····· LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, *et al.* (1287)

Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island ····· ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, *et al.* (1295)

Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility ····· XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, *et al.* (1306)

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan ····· LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, *et al.* (1313)

GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province ····· LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, *et al.* (1321)

Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City ····· LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, *et al.* (1330)

Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China ····· ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, *et al.* (1337)

Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang ····· WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, *et al.* (1345)

Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan ····· FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, *et al.* (1353)

Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City ····· CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)

Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments ····· MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, *et al.* (1371)

Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing ····· ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, *et al.* (1379)

Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China ····· QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, *et al.* (1389)

Effect of *Elodea nuttallii*-immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay ····· HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, *et al.* (1397)

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu ····· GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, *et al.* (1404)

Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae ····· CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, *et al.* (1413)

Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus ····· GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)

Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water ····· ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (1427)

Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process ····· WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, *et al.* (1437)

Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured $Fe_3O_4@SiO_2$ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide ····· LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, *et al.* (1444)

Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing ····· QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, *et al.* (1451)

Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants ····· NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, *et al.* (1460)

Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine ····· LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, *et al.* (1467)

Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor ····· WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, *et al.* (1472)

Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron ····· WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, *et al.* (1478)

Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter ····· HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, *et al.* (1485)

Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source ····· YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, *et al.* (1492)

Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System ····· XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, *et al.* (1499)

Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppec ····· CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)

Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin ····· GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, *et al.* (1516)

Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution ····· LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, *et al.* (1523)

Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with *Iris pseudacorus* L. and the Metabolic Analysis in Roots ····· WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)

Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors ····· LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, *et al.* (1539)

Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains ····· FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, *et al.* (1546)

Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis ····· DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, *et al.* (1553)

Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock ····· JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, *et al.* (1562)

Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of *Vicia-faba* and Garlic ····· WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, *et al.* (1568)

Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles ····· LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)

Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources: Method Proposed and Case Demonstration ····· LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, *et al.* (1584)

《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　刘　毅　汤鸿霄　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）

2016 年 4 月 15 日　第 37 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 4　Apr. 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	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：120.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行