

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
菹草腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响

孙雅君^{1,2}, 王铁宇^{2*}, 彭霞薇^{1*}, 王佩^{2,3}

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 选择集中分布氟化工相关企业的山东省小清河水系, 自上游至莱州湾入海口采集 10 个表层沉积物样点 (XQ1 ~ XQ10), 采用高效液相色谱/质谱联用 (HPLC/MS-MS) 监测全氟化合物 (perfluoroalkyl substances, PFASs), 分析影响细菌群落结构的基础环境因子, 提取细菌 DNA 并运用第二代 Illumina MiSeq 测序技术分析其细菌群落结构. 结果表明, 在小清河流域沉积物中 12 种 PFASs 均有不同程度检出, 并以全氟辛酸 (PFOA) 为主, 生产企业集中区下游样点 XQ5 的 PFOA 浓度在 4、7 月分别高达 $456.2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $748.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. PFOA 是小清河 4 月影响微生物群落结构的关键因子, 与群落丰富度和均匀度呈显著负相关; 硫杆菌属 (*Thiobacillus*) 在低浓度 PFOA 条件下数量较少, 但在高浓度 PFOA 下数量较高且成为优势菌种, 初步证明硫杆菌属是 PFOA 污染响应的敏感物种, 有作为指示微生物的潜质; PFOA 在浓度较低时 ($< 100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) 对微生物群落结构的影响不显著.

关键词: 全氟化合物; 全氟辛酸; 微生物群落; 环境因子; 沉积物; 冗余分析

中图分类号: X172; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2496-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.023

Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China

SUN Ya-jun^{1,2}, WANG Tie-yu^{2*}, PENG Xia-wei^{1*}, WANG Pei^{2,3}

(1. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to reveal the relationship between Perfluoroalkyl substances (PFASs) contamination and the bacterial community composition, surface sediment samples were collected along the Xiaoqing River in Shandong Province in April and July 2014 (XQ1-XQ10), where many PFASs manufacturers were located. PFASs were quantified by HPLC/MS-MS, related environmental factors affecting the microbial community structure were measured, and the microbial community structure in surface sediments was measured by the second-generation sequencing technology Illumina MiSeq. The results not only revealed the degree of PFASs pollution in the sediments of Xiaoqing River, but also illustrated the relationship between PFASs pollution and the microbial community structure. Among the twelve kinds of PFASs detected in this study, PFOA was the predominant compound, and the highest PFOA concentrations were detected in the sample of XQ5 (April: $456.2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$; July: $748.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) located at the downstream of Xiaoqing River with many fluoropolymer producing facilities. PFOA contamination was the main factor affecting the microbial community structure in April, accordingly community richness and evenness were significantly negatively correlated with PFOA levels. The abundance of *Thiobacillus* increased with the increasing PFOA concentration in the sediment PFOA. This suggested that *Thiobacillus* was sensitive to PFOA pollution and might be the potential indicator to reveal the degree of PFOA pollution in sediment. When the concentrations of PFOA were below $100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, no significant effects on the microbial community structure were observed.

Key words: perfluoroalkyl substances; PFOA; microbial community; environmental factors; sediment; redundancy analysis

全氟化合物 (perfluoroalkyl substances, PFASs) 具有化学稳定性、高表面活性、疏水疏油和耐热性等优良特性. 自 20 世纪中期被广泛用于农药、造纸、黏合剂和石油化工等工业生产和民用领域^[1,2]. 由于大规模的生产使用, PFASs 已在全球范围内不同的环境介质以及野生动物和人体内被检出^[1,3]. 其中全氟辛酸 (perfluorooctanoic acid, PFOA) 和全氟辛烷基磺酸 (perfluorooctane sulfonate, PFOS) 是目前应用最广泛的两种 PFASs, 也是多种其他 PFASs 在

环境中的最终转化产物^[4]. 2009 年 PFOS 及其盐类被正式列入《关于持久性有机污染物 (POPs) 的斯德哥尔摩公约》, 成为一类使用和排放受到严格制约的 PFASs, 而 PFOA 虽受一些发达国家的管控, 但在

收稿日期: 2015-01-13; 修订日期: 2015-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171394); 科技基础性工作专项 (2013FY111110); 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-TZ-12)

作者简介: 孙雅君 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域污染风险评价与生态修复, E-mail: sunyajun126@163.com
* 通讯联系人, E-mail: wangty@cees.ac.cn; xiaweipeng@163.com

我国仍存在一定规模的生产和排放^[5]. 目前,国内外关于 PFOA 和 PFOS 对生态系统的毒性研究多集中在针对模式动物的肝脏毒性、遗传和免疫毒性、生殖和发育毒性、内分泌干扰效应和潜在致癌性等方面^[7],而其对植物和微生物生态效应的研究涉及不多,关于 PFASs 对细菌群落变化可能造成影响方面的研究更是几乎没有.

前期调查研究发现^[6],位于山东的小清河流域集中分布较大规模的 PFASs 类物质生产企业,环境样品中具有较高浓度的 PFOA. 因此,本研究从该地区采集受不同程度 PFASs 污染的表层沉积物样品,分析沉积物中 PFASs 的含量和相关理化指标,采用第二代 Illumina MiSeq 测序技术分析细菌群落多样性^[8]. 而且,采用冗余分析方法探索了 PFOA 污染和微生物群落结构变化之间的内在联系,以期揭示 PFOA 对微生物群落的生态效应及风险评价提供相关理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

小清河位于山东省中部,发源于济南市,于寿光县羊口镇入海. 据调查,山东省的氟聚合物生产企业主要分布在小清河沿岸,并在淄博市桓台县形成产业集聚(XQ5 点位附近,图 1),主要工业产品包括含氟制冷剂、生产农药和药物的中间体、聚四氟乙烯(PTFE)和四氟乙烯(TFE)等^[6]. 截至 2012 年底,上游附近氟工业区平均年产 3.7 万 t PTFE、5 万 t TFE、1 万 t 六氟丙烯和超过 20 万 t 不同的氟化制冷剂^[9]. 前期调查研究表明沉积物样品中所检测的 17 种 PFASs,共 12 种有不同程度地检出,生产企业排放的工业废水使得小清河中 PFOA 的暴露水平高达 $3\,648.6\text{ kg}\cdot\text{a}^{-1}$,显著高于国内外其它区域 PFOA 的暴露量^[6].

1.2 样品的采集和处理,

分别于 2014 年 4 月和 7 月用底泥采样器(WHL15-HL-CN 型)采集 10 个 0~15 cm 表层沉积物样品(图 1),每一样点将 2 m×2 m 面积的四周及中间共 5 份表层沉积物混匀,装入聚丙烯塑料瓶,样品立即置于冰盒保存和运输,返回实验室后取一部分置于 -20℃ 保存,供细菌分子生物学分析,其余样品室内风干、研磨、过 2 mm 筛,用于 PFASs 和理化性质分析.

1.3 PFASs 的测定

1.3.1 试剂和仪器

12 种 PFASs 包括全氟丁酸(perfluorobutanoic

acid, PFBA)、全氟戊酸(perfluoropentanoic acid, PFPeA)、全氟己酸(perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟庚酸(perfluoroheptanoic acid, PFHpA)、全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)、全氟壬酸(perfluorononanoic acid, PFNA)、全氟癸酸(perfluorodecanoic acid, PFDA)、全氟十一酸(perfluoroundecanoic acid, PFUDA)、全氟十二酸(perfluorododecanoic acid, PFDoA)、全氟丁烷磺酸(perfluorobutane sulfonate, PFBS)、全氟己烷磺酸(perfluorohexane sulfonate, PFHxS)和全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS). PFASs 和质量标记物纯度均 > 98% (Wellington 实验室,加拿大). 乙酸铵(~98%)、氨水(28%~30% NH₃ basis)、氢氧化钠和盐酸(HCl, ≥ 37%)均购自 Sigma-Aldrich 公司(St. Louis, 美国),色谱纯甲醇和乙腈购自 J. T. Baker 公司(Phillipsburg, 美国).

Supelco ENVI-Carb 净化小柱(250 mg, 3 mL)购自 Sigma-Aldrich 公司(St. Louis, 美国),Oasis WAX 固相萃取小柱(6 cc, 150 mg, 30 μm)购自 Waters 公司(Milford, 美国,氮吹仪所用高纯氮纯度 > 99.999%,安捷伦 1290 高效液相系统串联安捷伦 6460 三重四级杆质谱系统(安捷伦科技, Palo Alto, 美国),超声清洗机(KQ5200 型,中国昆山).



图 1 小清河流域沉积物采样点位分布示意

Fig. 1 Sediment sampling sites along the Xiaoqing River

1.3.2 样品前处理及仪器分析

称取 2 g 沉积物样品置于 50 mL 聚丙烯离心管,加入 2 mL 100 mmol·L⁻¹ NaOH 的乙腈水溶液(乙腈:水,8:2),超声 30 min,然后加入 20 mL 乙腈,振荡 30 min,再加入 2 mol·L⁻¹ 盐酸溶液 0.1 mL 后在 3 000 r·min⁻¹ 离心 15 min. 取上清液置于另一 50 mL 离心管,剩余物质加入 10 mL 乙腈,重复上述步骤一次,两次获得的上清液置于同一个离心管,用高纯氮气吹至 1 mL 浓缩液. 该 1 mL 萃取液继续用 ENVI-Carb 和 OASIS-WAX 固相萃取小柱净化.

Envi-Carb 小柱用 3 次 1 mL 乙腈活化后,将 1 mL 浓缩液过柱收集,并再次用 3 次 1 mL 乙腈清洗小柱,将 4 mL 收集到的浓缩液加超纯水稀释至 100 mL,再用 OASIS WAX 小柱净化. OASIS WAX 小柱依次用 4 mL 0.1% 的氨水/甲醇溶液、4 mL 甲醇及 4 mL 超纯水活化后,将 100 mL 稀释液过柱,使溶液中的 PFASs 吸附在柱上,而后用 4 mL 25 mmol·L⁻¹ 醋酸铵淋洗. 风干小柱后用 4 mL 甲醇和 4 mL 0.1% 氨水/甲醇溶液洗脱,整个固相萃取过程将流速控制在每秒 1 滴. 将洗脱液高纯氮气吹至 1 mL,过 0.22 μm 尼龙滤膜,进行 HPLC/MS-MS 检测^[6].

1.3.3 色谱-质谱条件

液相系统所用色谱柱为 Agilent ZORBAX Eclipse Plus C18, 2.1 mm × 100 mm, 3.5 μm, 前接 3 μm 在线过滤器,柱温 40℃,进样量 5 μL. 流动相为 2 mmol·L⁻¹ 乙酸铵 (A) 和 乙腈 (B), 流速 0.3 mL·min⁻¹, 初始比例为 80% A 和 20% B, 保持 0.5 min, 经 8 min 变为 10% A 和 90% B, 保持 2 min 后, 回到初始状态保持 5 min. 质谱条件为电喷雾电离负源 (ESI⁻), 雾化温度 350℃, 雾化器压力 40 psi, 辅助气 (N₂) 流量 9 L·min⁻¹, 毛细管电压 3 500 V.

1.3.4 质量控制及保证

在样品采集过程中,除用聚丙烯瓶盛装外,另用 3 层聚丙烯袋做密封处理,并设置场地空白和运输空白. 分析过程中严格控制并避免了含氟材料特别是 PTFE 的使用. 所有实验容器和装置在使用前均经超纯水和甲醇预处理,分析过程加入程序空白、试剂空白和回收率等质控处理. 采用内标法定量, PFASs 基质加标回收率为 75% ~ 117%. 检测限 (LOD) 和定量限 (LOQ) 分别设定为信噪比 (S/N) > 3 和 > 10 的浓度,其中 LOD (以干重计) 为 0.002 ~ 0.01 ng·g⁻¹, LOQ (以干重计) 为 0.01 ~ 0.04 ng·g⁻¹. 标准偏差均在合理范围内 (±20%), 所有空白处理均低于检测限.

1.4 主要环境因子的测定

沉积物 pH 值、总氮 (TN) 分别用 pH 计 (W 样品: 超纯水 = 1:2.5)、凯氏定氮法测定,全磷 (TP) 选用酸溶-钼锑抗比色法 (LY/T 1232-1999)^[10] 和紫外可见分光光度计 (UV2700, 日本岛津公司) 比色测定,有机碳 (TOC) 采用催化燃烧法^[11] 并用总碳分析仪 (型号: Multi N/C 3100, 德国 Analytik jena 公司) 测定,沉积物的颗粒组成根据土壤粒级划分标准^[12] 用激光衍射系统 Malvern Master Sizer 2000 (MalvernCo, 英国) 测定,水体电导率和溶解氧采用

智能多参数水质分析仪 (5B-2H, 北京连华) 进行测定.

1.5 微生物群落结构分析

1.5.1 DNA 提取和 MiSeq 测序流程

DNA 提取: 称取沉积物样品 0.5 ~ 0.7 g, 采用 DNA 提取试剂盒 Fast DNA SPIN Kit for Soil (MP Biomedicals, 美国), 按说明书步骤提取总 DNA, 利用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 纯度和浓度, 最终使用无菌水稀释样品至 1 ng·μL⁻¹.

PCR 扩增: 16S rDNA 的 V4 去扩增^[13], 使用带 Barcode 的特异性引物 515F: 5'-GTGCCAGCMGCCG CGGTAA-3', 引物 806R: 5'-GGACTACHVGGGTWT CTAAT-3'. PCR 的反应体系为每 30 μL 反应混合液包含: 15 μL Phusion® High-Fidelity PCR Master Mix with GC Buffer (New England Biolabs, 美国), 细菌 DNA 模板 10 μL, 引物 3 μL 和 2 μL 的 H₂O. PCR 扩增在 Bio-rad T100 梯度 PCR 仪上进行, 反应条件为: 98℃ 预变性 1 min; 随后进行 30 个 PCR 扩增 (98℃ 变性 10 s, 50℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 30 min); 最后 72℃ 延伸 5 min. PCR 产物用 2% 的琼脂糖凝胶电泳检测. 根据 PCR 产物浓度进行等浓度混样, 充分混匀后使用 1 × TAE 浓度 2% 的琼脂糖凝胶电泳纯化 PCR 产物, 割胶回收目标条带. 使用 NEB Next® Ultra™ DNA Library Prep Kit for Illumina 文库试剂盒 (New England Biolabs, 美国) 进行文库构建, 经 Qubit 荧光定量和 Agilent Bioanalyzer 2100 system 文库检测合格后, 使用 Illumina 公司的 MiSeq 平台进行 250 bp/300bp 双末端测序法上机测序.

1.5.2 信息分析流程和 OTU 列表生成

利用双末端 (Paired-End) 测序得到的原始数据, 存在一定比例的干扰数据. 首先对原始数据进行拆分, 去除末端接头序列和引物序列, 并截去 barcode 序列和 PCR 扩增引物序列, 再将拆分的数据使用 FLASH (V1.2.7, <http://ccb.jhu.edu/software/FLASH/>) 对每个样品进行拼接^[14], 过滤去除序列集合中长度小于平均长度 70% 的序列, 并去除其中的嵌合体序列, 最终得到有效数据 (Clean Tags). 用 QIIME^[15] 和 UPARSE 软件 (<http://drive5.com/uparse/>)^[16] 对序列进行聚类, 根据 97% 相似性将序列聚类成 OTU (Operational taxonomic units), 并为每个 OTU 选取代表序列进行注释^[13], 从而得到每个样品的 OTU 和分类谱系的基本分析结果.

1.5.3 微生物群落结构分析

对样品 OTU 进行丰度、多样性指数等分析, 其

中 Chao 指数和 Observed_species 分析均是对物种丰富度的直观反映,Shannon 指数既考虑到样品中分类总数,也包含每个分类所占的比例. 结合三方面不同 alpha 多样性指数的整合分析,可知样品内群落的多样性、均匀度等信息. 在以上分析基础上,进行聚类分析、RDA 统计比较分析,挖掘样品间的物种组成差异和环境因子的相关性.

1.6 数据处理和分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 19.0 软件(Pearson 相关性分析)对数据进行分析. 使用 CANOCO 5.0 软件对 MiSeq 测序揭示的细菌群落结构与环境因子进行冗余分析(redundancy analysis,RDA).

2 结果与讨论

2.1 小清河表层沉积物中 PFASs 的暴露水平

沉积物样品中所检测的 12 种 PFASs,均有不同程度检出. 如图 2 所示,两次采样 PFASs 含量分别为 8.5 ~ 465.6 ng·g⁻¹和 1.3 ~ 803.5 ng·g⁻¹,平均值分别为 109.5 ng·g⁻¹和 104.3 ng·g⁻¹. 各个沉积

物样点浓度最高的 PFASs 均是 PFOA,含量分别为 3.8 ~ 456.2 ng·g⁻¹和 0.6 ~ 748.7 ng·g⁻¹,平均值为 103.1 ng·g⁻¹和 96.3 ng·g⁻¹. PFASs 浓度最高的 XQ5 点位在两个月份 PFOA 的含量分别达 456.2 ng·g⁻¹和 748.7 ng·g⁻¹,占 PFASs 的 97.9% 和 93.2%. 高浓度的 PFOA 证明该区域存在点源污染且已证实污染源位于 XQ5 上游^[6],其它点位 PFOA 浓度相对低应是由于小清河主河道的稀释作用. 沉积物中较高水平的 PFOA 暴露与前期该流域水体研究结果相一致^[6,17].

有研究表明,环渤海 11 条水系河道内和沿海沉积物中 PFAS 平均值为 0.535 ng·g⁻¹和 0.578 ng·g⁻¹,且最高值均未超过 2 ng·g⁻¹,PFOA 仅占其中的 8% 和 30%^[17]. Meng 等^[18]根据平衡分配预测沉积物中 PFOA 的无效应浓度参考值为 0.70 μg·g⁻¹. 据此可知,小清河流域 PFOA 浓度显著高于其它环渤海水系,且 7 月污染源附近浓度已高出参考值,由此带来的危害和生态风险不容忽视.

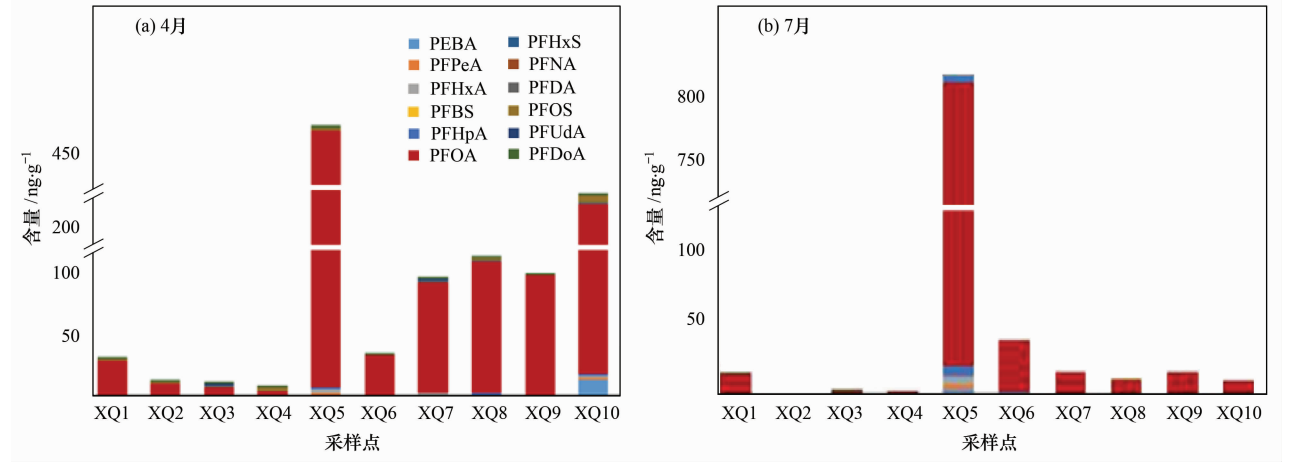


图 2 4 月和 7 月沉积物样点 PFASs 浓度

Fig. 2 PFASs concentrations of sediments samples in April and July, 2014

2.2 小清河表层沉积物中细菌多样性分析

PFOA 浓度最高的 XQ5 点位在 4 月细菌的丰富度和均匀度指数为研究区沉积物各样点最低(表 1). XQ4 和 XQ5 点位物种分类树(图 3)选取相对丰度前 10 的物种,4 月 PFOA 浓度最低的 XQ4 其优势菌种为变形菌门(Proteobacteria)的硫杆菌属(Thiobacillus)、Dok59、Sulfurimonas、Sulfuritalea,分别占所选取物种的比率为 45.78%、19.2%、10.10%、10.09%; PFOA 浓度最高的 XQ5 其优势菌种为变形菌门(Proteobacteria)的硫杆菌属(Thiobacillus)和 Sulfurimonas,分别占所选取物种的

比率为 47.56% 和 47.97%. 表明受高浓度 PFOA 污染点位的优势菌种类减少,均匀度降低. 优势菌种硫杆菌属(Thiobacillus)在 XQ4 和 XQ5 占有物种的比率为 4.52% 和 22.81%,说明当 PFOA 浓度较高时硫杆菌属(Thiobacillus)的含量和比重会明显升高. 7 月 XQ5 样点 PFOA 的污染最重,达到 748.7 ng·g⁻¹,但细菌微生物的丰富度和均匀度和其它样点相比没有显著降低.

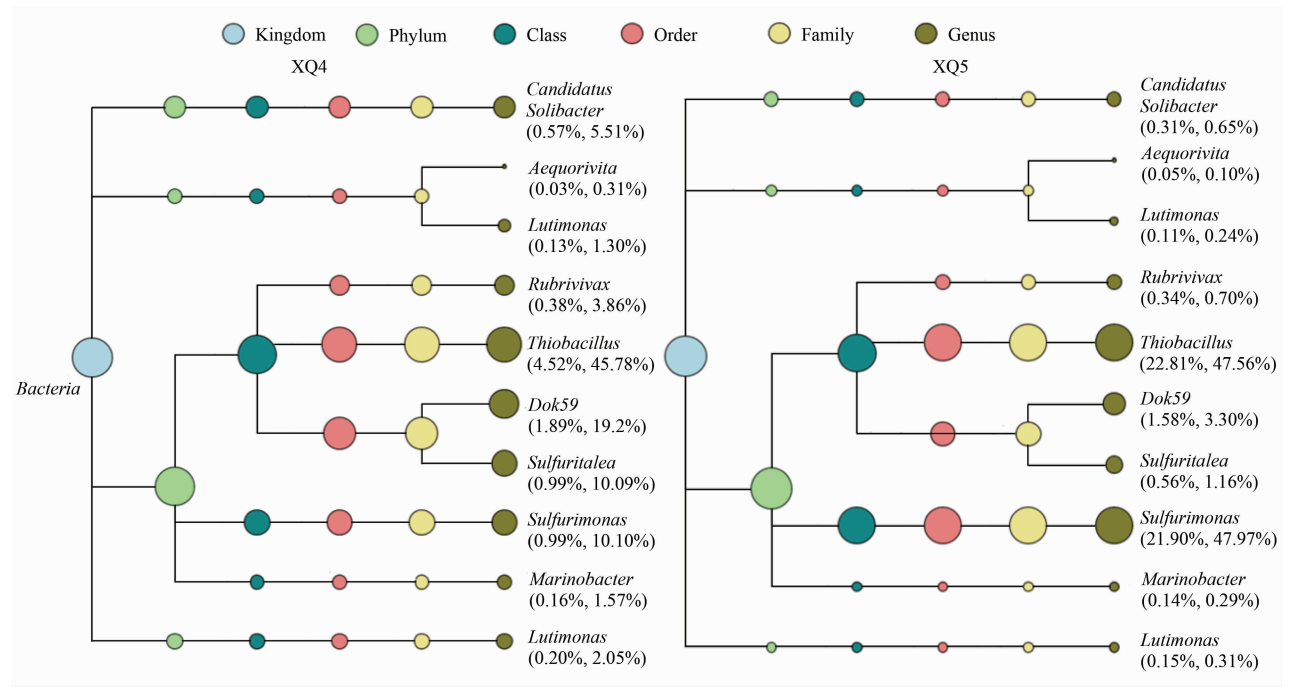
有研究表明,硫杆菌属(Thiobacillus)中的一些种在去除环境中重金属和相关生产工艺上发挥着重要作用,如氧化亚铁硫杆菌(Thiobacillus

ferrooxidans) 和 氧化硫硫杆菌 (*Thiobacillus thiooxidans*) 对重金属具有良好的沥滤效果,这种微生物浸矿技术可用于冶炼金属^[19]、废旧线路板中黄金和铜的浸出^[20]以及废旧催化剂加工程序^[21]; 脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*) 在废水同步脱硫反硝化处理工艺中起主要作用^[22]. 同时有研究

证实用于浸铀实验的 *Thiobacillus thiooxidans* 适应培养体系的氟浓度能力可达 40 mg·L⁻¹, 且其耐氟能力通过驯化可以提高^[23]. 以上关于硫杆菌属 (*Thiobacillus*) 在环境中作用和耐氟能力的研究表明该菌属有作为 PFOA 污染指示菌种和生态效应研究的潜质.

表 1 4 月和 7 月沉积物细菌群落多样性统计结果

样品	4 月					7 月				
	Reads	OTU	Chao	Observed_species	Shannon	Reads	OTU	Chao	Observed_species	Shannon
XQ1	78 706	4 468	3 433. 5	2 190. 8	9. 53	53 884	3 105	2 368. 0	1 383. 4	7. 63
XQ2	35 109	3 174	2 957. 6	1 903. 0	9. 37	53 641	3 363	2 566. 8	1 618. 6	8. 71
XQ3	10 029	1 629	2 608. 9	1 628. 9	8. 53	18 574	2 289	2 095. 6	1 503. 6	8. 92
XQ4	29 621	2 977	2 999. 7	1 886. 0	9. 05	52 025	3 214	2 542. 8	1 486. 3	8. 06
XQ5	29 866	2 319	2 508. 7	1 340. 9	6. 76	46 660	3 080	2 553. 2	1 549. 5	8. 41
XQ6	96 014	4 878	3 809. 8	2 251. 9	9. 44	17 177	2 440	2 270. 2	1 650. 0	9. 11
XQ7	67 234	4 344	3 646. 5	2 165. 0	9. 65	23 262	2 483	2 478. 8	1 552. 7	8. 46
XQ8	15 124	2 697	2 858. 2	2 121. 0	9. 89	26 421	3 076	2 821. 1	1 961. 6	9. 51
XQ9	29 390	3 445	3 549. 2	2 270. 7	9. 60	13 091	2 005	2 175. 2	1 517. 2	8. 69
XQ10	77 623	3 975	3 279. 5	1 859. 9	8. 83	8 487	1 542	1 500. 9	1 265. 8	8. 87



圆圈的大小表示该分类的相对丰度大小,分类名下方数字前者表示占有物种的比率,后者表示占有选取物种的百分率

图 3 4 月 XQ4 和 XQ5 物种分类树

Fig. 3 Species classification trees of XQ4 and XQ5 in April, 2014

2.3 环境因子与微生物群落关系分析

2.3.1 表层沉积物的环境因子分析

水体及沉积物环境因子值如表 2 所示,研究区沉积物整体呈弱碱性,两个月平均温度分别为 22.2℃ 和 31.3℃. 整体上,两个月 pH 值、含水量、颗粒物粒度含量差异不大,但 DO、盐度、氮、磷营

养盐浓度则表现出 4 月高于 7 月,4、7 月 TN 平均浓度分别为 0.90 g·kg⁻¹ 和 0.82 g·kg⁻¹,全磷平均浓度分别为 0.96 g·kg⁻¹ 和 0.75 g·kg⁻¹. 大多数样点有机碳含量在 7 月含量高于 4 月,尤其是 XQ5 由 14.5 g·kg⁻¹ 波动到 62.2 g·kg⁻¹. 4 月 XQ5 环境因子指标与其它样点比无明显差异,而 7 月该点的有

机碳和总氮含量明显高于其它样点,分别为 $62.2 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 产生这种现象的原因可能有三点:一是由于年中是氟化工行业生产旺季^[24],含大量有机物的工业废水被排放并沉积在河底;二是

微生物生理活动,如对 C,N 的矿化作用,表现出随着受污染程度加深其周转效率越低^[25];三是水体沉积物 PFOA 的吸附行为主要受沉积物中有机碳的影响,化合物的富集随有机碳的增加而增加^[26,27].

表 2 4 月和 7 月沉积物样品环境因子

		水环境指标					沉积物指标						
月份	样品	温度 /℃	DO /mg·L ⁻¹	电导率 /mS·cm ⁻¹	盐度 /‰	pH	TOC /g·kg ⁻¹	TN /g·kg ⁻¹	TP /g·kg ⁻¹	含水量 /%	黏粒 /%	粉砂 /%	砂粒 /%
4	XQ1	21.9	6.8	1.5	0.8	7.7	20.8	1.4	1.45	38.4	12.7	42.2	45.1
	XQ2	21.8	8.8	1.4	0.7	7.8	19.4	0.9	1.03	36.0	13.0	43.5	43.5
	XQ3	21.3	8.8	1.8	1.0	7.6	13.7	1.4	1.18	42.6	13.7	45.0	41.3
	XQ4	23.9	10.3	6.8	3.8	7.7	20.3	0.8	1.38	30.3	17.1	38.1	44.8
	XQ5	23.8	7.7	6.5	3.6	7.9	14.5	0.4	0.52	43.3	11.2	40.1	48.7
	XQ6	24.3	7.5	2.7	1.4	7.9	21.5	1.4	1.40	47.1	15.2	36.9	48.0
	XQ7	22.3	12.9	3.3	1.8	7.8	20.6	0.8	0.87	39.4	11.3	50.9	37.7
	XQ8	22.5	9.4	2.8	1.5	8.0	16.2	1.3	0.74	30.4	8.6	21.6	69.7
	XQ9	19.9	9.8	7.0	4.3	8.2	17.8	0.7	0.51	28.0	15.0	28.8	56.2
	XQ10	19.9	10.5	28.8	19.9	8.0	7.3	0.3	0.50	26.9	10.7	34.4	54.9
7	XQ1	31.7	5.8	1.7	0.7	8.2	26.1	1.2	1.27	40.0	8.9	26.8	64.4
	XQ2	31.1	5.1	1.3	0.6	7.9	16.1	0.6	0.88	34.7	10.7	27.4	62.0
	XQ3	33.2	6.6	2.2	0.7	8.0	23.0	1.3	0.94	36.9	11.6	37.0	51.4
	XQ4	25.6	7.0	3.6	1.9	7.7	19.3	0.5	1.09	31.8	10.4	36.2	53.3
	XQ5	27.6	7.2	3.7	1.8	7.7	62.2	2.7	0.32	51.9	13.2	34.9	51.9
	XQ6	32.2	4.1	1.8	0.8	7.7	26.9	1.3	1.11	40.8	18.5	31.8	49.7
	XQ7	34.0	5.7	3.1	1.4	7.6	15.8	0.6	0.68	39.6	12.1	15.9	72.0
	XQ8	31.7	3.3	2.0	0.9	7.6	18.7	0.8	0.79	33.4	10.5	37.9	51.6
	XQ9	31.4	5.7	2.9	1.3	7.8	17.7	0.8	0.21	30.5	16.2	24.2	59.6
	XQ10	32.3	8.4	7.1	3.4	7.9	10.7	0.3	0.24	30.4	7.7	15.0	77.4

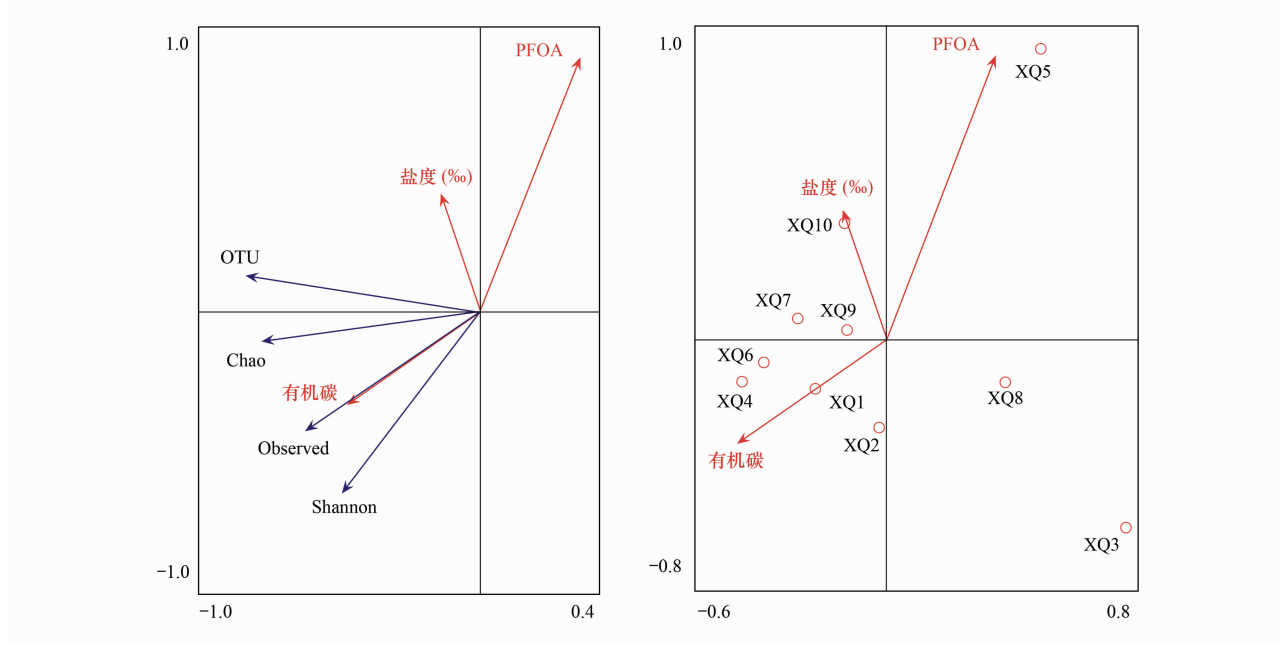


图 4 4 月 RDA 分析结果

Fig. 4 RDA analysis results of sediments in April, 2014

2.3.2 冗余分析

对环境因子和细菌群落数据 (OTU、Chao、

Observed_species、Shannon) 进行 Pearson 相关性分析,并对环境因子进行多次 CCA 筛选. 结果表明,

TOC、盐度和 PFOA 浓度是影响该区域 4 月细菌群落结构的主要环境因子. 基于此进行 RDA 冗余分析,可以看出,细菌多样性信息的 72.4% 能够为以上 3 个变量所解释. 其中,第一排序轴解释信息量达 65.5%,第二排序轴为 6.9%,群落数据与环境因子排序轴的相关系数为0.861 6和0.818 6,能够较好地反映样点细菌群落数据与环境因子之间的关系. 由 RDA 排序图可知(图 4),PFOA 是影响细菌群落分布的关键因素,有机碳次之,PFOA 与 OTU,Chao 和 Observed_species 均呈负相关,与 Shannon 指数呈极显著负相关($r = -0.780, P < 0.01$),表明 PFOA 能显著影响小清河细菌群落丰富度和均匀度. XQ5 点位受 PFOA 影响最为显著,XQ10(位于入海口)受盐度影响最为显著,PFOA 次之,其它点位(PFOA 浓度低于 $100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)与有机碳关系较为密切. 7 月环境因子与细菌群落结构之间没有发现明显的相关关系,PFOA 对细菌群落影响亦不显著,尚有待进一步研究.

3 结论

(1) 小清河流域沉积物中普遍检出 PFASs,并以 PFOA 为主,4 月和 7 月采样点 PFOA 含量分别为 $3.8 \sim 456.2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.6 \sim 7548.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. XQ5 样点位于污染源附近,其 PFOA 浓度在 4、7 月分别达最高值 $456.2 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $748.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 该流域 PFOA 浓度显著高于环渤海其它水系,且 7 月污染源附近沉积物中 PFOA 浓度已高出有关参考值.

(2) PFOA 是小清河 4 月影响微生物群落结构的关键因子,与群落丰富度和均匀度均呈显著负相关. PFOA 污染最重的 XQ5 点位细菌群落丰富度和均匀度指数为各样点中最低. 但 PFOA 在浓度较低时($<100 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$),对微生物群落结构的影响并不显著. 7 月 PFOA 对细菌群落结构影响不显著.

(3) 硫杆菌属(*Thiobacillus*)在低浓度 PFOA 条件下数量较少,但在高浓度 PFOA 下数量较高且成为优势菌种,初步证明硫杆菌属(*Thiobacillus*)是 PFOA 污染响应的敏感物种,有作为指示微生物的潜质.

参考文献:

[1] Paul A G, Jones K C, Sweetman A J, *et al.* A first global production, emission, and environmental inventory for perfluorooctane sulfonate [J]. Environmental Science and Technology, 2009, **43**(2): 386-392.

[2] Prevedouros K, Cousins I T, Buck R C, *et al.* Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates[J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(1): 32-44.

[3] Buck R C, Franklin J, Berger U, *et al.* Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in the environment: Terminology, classification, and origins [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2011, **7**(4): 513-541.

[4] Olsen G W, Burris J M, Mandel J H, *et al.* Serum perfluorooctane sulfonate and hepatic and lipid clinical chemistry tests in fluorochemical production employees[J]. Occupational and Environmental Medicine, 1999, **41**(9): 799-806.

[5] Wang T Y, Wang P, Meng J, *et al.* A review of sources, multimedia distribution and health risks of perfluoroalkyl acids (PFAAs) in China [J]. Chemosphere, 2015, **129**: 87-99, <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.09.021>.

[6] Wang P, Lu Y L, Wang T Y, *et al.* Occurrence and transport of 17 perfluoroalkyl acids in 12 coastal rivers in south Bohai coastal region of China with concentrated fluoropolymer facilities[J]. Environmental Pollution, 2014, **190**: 115-122.

[7] Lau C, Anitole K, Hodes C, *et al.* Perfluoroalkyl acids: a review of monitoring and toxicological findings[J]. Toxicological Sciences, 2007, **99**(2): 366-394.

[8] Caporaso J G, Lauber C L, Walters W A, *et al.* Ultra-high-throughput microbial community analysis on the Illumina HiSeq and MiSeq platforms [J]. The ISME Journal, 2012, **6**(8): 1621-1624.

[9] 张建宏. 东岳集团有限公司 2012 年年度报告[R]. 山东: 东岳集团有限公司, 2012. 1-5.

[10] LY/T 1232-1999, 森林土壤全磷的测定[S].

[11] 5310B, EPA USEPA 方法与标准[S].

[12] 钱亦兵, 吴兆宁, 杨海峰, 等. 古尔班通古特沙漠南部风沙土粒度分布的空间异质性[J]. 干旱区地理, 2009, **32**(5): 655-661.

[13] Caporaso J G, Lauber C L, Walters W A, *et al.* Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, **108**(1): 4516-4522.

[14] Magoč T, Salzberg S L. FLASH: fast length adjustment of short reads to improve genome assemblies[J]. Bioinformatics, 2011, **27**(21): 2957-2963.

[15] Wang Q, Garrity G M, Tiedje J M, *et al.* Naïve Bayesian Classifier for Rapid Assignment of rRNA Sequences into the New Bacterial Taxonomy [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(16): 5261-5267.

[16] Edgar R C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads[J]. Nature Methods, 2013, **10**(10): 996-998.

[17] Zhu Z Y, Wang T Y, Wang P, *et al.* Perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances in sediments from South Bohai coastal watersheds, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, **85**(2): 619-627.

[18] Meng J, Wang T Y, Wang P, *et al.* Perfluoroalkyl substances and organochlorine pesticides in sediments from Huaihe watershed in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, **26**(11): 2198-2206.

[19] Pathak A, Dastidar M G, Sreekrishnan T R. Bioleaching of heavy metals from sewage sludge by indigenous iron-oxidizing microorganisms using ammonium ferrous sulfate and ferrous sulfate as energy sources: a comparative study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **171**(1-3): 273-278.

[20] Chi T D, Lee J C, Pandey B D, *et al.* Bioleaching of gold and copper from waste mobile phone PCBs by using a cyanogenic bacterium [J]. Minerals Engineering, 2011, **24**(11): 1219-1222.

[21] Santhiya D, Ting Y P. Use of adapted *Aspergillus niger* in the bioleaching of spent refinery processing catalyst[J]. Journal of Biotechnology, 2006, **121**(1): 62-74.

[22] 车轩, 罗国芝, 谭洪新, 等. 脱氮硫杆菌的分离鉴定和反硝化特性研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2931-2937.

[23] 刘金辉, 吴为荣, 刘亚洁, 等. 浸铀过程中氧化硫硫杆菌的耐氟性试验研究[J]. 金属矿山, 2009, (5): 50-66.

[24] 张建宏. 东岳集团有限公司 2014 年中期报告[R]. 山东: 东岳集团有限公司, 2014. 6-42.

[25] 谢龙莲, 陈秋波, 王真辉, 等. 环境变化对土壤微生物的影响[J]. 热带农业科学, 2004, **24**(3): 39-46.

[26] 汤婕, 张银龙. 土壤/沉积物中全氟辛酸(PFOA)、全氟辛烷磺酸(PFOS)吸附-解吸行为研究进展[J]. 土壤, 2014, **46**(4): 599-606.

[27] Christopher P H, Richard G L. Sorption of perfluorinated surfactants on sediments [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(23): 7251-7256.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and δ ¹³ C _{DIC} of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17β-estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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)

2015 年 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行