

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

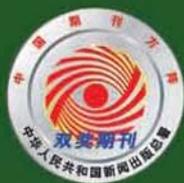
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

**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

2015年北京市两次红色预警期间PM<sub>2.5</sub>浓度特征 ..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM<sub>2.5</sub>变化特征对气象因素的响应 ..... 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM<sub>2.5</sub>中芳香酸的测定及来源解析 ..... 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 ..... 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 ..... 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 ..... 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 ..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 ..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO<sub>2</sub>交换通量变化过程及其环境影响 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 ..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 ..... 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 ..... 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 ..... 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 ..... 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 ..... 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 ..... 王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 ..... 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 ..... 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 ..... 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 ..... 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 ..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 ..... 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑炜 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 ..... 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 ..... 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 ..... 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 ..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 ..... 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 ..... 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 ..... 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX<sub>2</sub>的筛选及脱氮特性 ..... 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 ..... 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 ..... 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 ..... 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 ..... 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N<sub>2</sub>O排放及其影响因素 ..... 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N<sub>2</sub>O排放研究 ..... 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 ..... 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 ..... 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 ..... 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 ..... 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 ..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 ..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 ..... 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及其NH<sub>3</sub>-SCR活性探究 ..... 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

# 降水对沔河水质和水体微生物的影响

卢思丹, 孙寓姣\*, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳

(北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

**摘要:** 沔河作为重要的饮用水源地, 其水质条件问题一直受到关注, 除了通过化学方法探究沔河水体的污染状况外, 微生物的群落结构等信息也能在一定程度上反映水体污染情况, 并且通过了解微生物群落结构随水质的变化, 可以更深入地了解水污染与微生物的响应关系. 通过化学检测研究降水变化(丰水期与枯水期)造成的沔河水质改变, 并借助 Illumina 高通量测序方法的结果, 发现微生物群落的优势种属是不动杆菌属(*Acinetobacter*)、丛毛单胞菌科(Comamonadaceae)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和埃希氏杆菌属(*Escherichia*)等, 且丰水期优势菌属相比于枯水期出现了与人类活动相关的肠杆菌属和黄杆菌, 表明丰水期河水受到更多的人类活动的影响; 枯水期的沔河整体水质较丰水期较差, 但是枯水期的微生物群落结构更稳定, 多样性条件也更好.

**关键词:** 沔河; 降水; 水质; 微生物; Illumina 测序

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2563-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.019

## Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms

LU Si-dan, SUN Yu-jiao\*, ZHAO Xuan, WANG Lei, ZHEN Dan-yang

(College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In view of that the Fenghe River water pollution has become more and more serious, nitrogen and organic matter pollution were put forward as the important study targets. Community structure of the microorganisms could reflect the water pollution condition to a certain degree. By investigating the correlation between the water condition changes and the microbial community variation, it make possible to look upon river pollution from different perspectives. By the use of Illumina high-throughout sequencing, we found that the dominant genera were *Acinetobacter*, Comamonadaceae, *Pseudomonas* and *Escherichia* in Fenghe River aquatic environment. *Flavobacterium* and *Enterobacteriaceae* which are known as bacteria closely related to human activities, were found to account for larger percentages in the wet season than in the dry season, thus showing that the river was more influenced by anthropogenic activities in the wet season. The water quality was better in the wet season, while the microbial community structure was more stable and the diversity condition was better in the dry season. From the aspect of chemical pollution and microbe, this research helps to carry out planning for protection of drinking water sources and improvement of water environmental condition.

**Key words:** Fenghe River; precipitation; water pollution; microbe; Illumina sequencing

沔河地处西安市西南部, 属于渭河右岸的一级支流, 西安市第三大河流. 自 1998 年至今, 沔河及其支流被列为西安市地表饮用水源地, 国内河流的普遍污染现状与人们对饮用水源地水质安全的关注, 使沔河的污染状况在近些年得到更多研究<sup>[1,2]</sup>.

造成沔河污染的两大因素. 首先是降水和地表径流对河水水质条件的影响: 近年来, 人们生活、生产中的燃煤燃气及燃油量不断增加, 导致居住区、工厂等人类活动区排放的废气、粉尘等严重污染了人们生存的大气环境<sup>[3]</sup>, 同时由于降雨过程的发生, 空气中的粉尘颗粒物、可溶性的气体随雨水降落至地面, 对沔河河水造成污染. 有研究表明, 随着降雨的进行, 河流水体中 COD、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 等参数有明显下降趋势, 随后此类污染物浓度随着降雨引起的流量增大而上升, 最后随降雨量减小, 地表径流也相应减小, 水质恢复至正常; 而河流水体中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TN、TP 参数从降雨开始一直增大, 至降水

最大流量时达最大值, 随后这些参数随河流流量降低而下降<sup>[4]</sup>. 有研究发现, 地表径流造成水质变化的原因, 是由于降雨冲刷裸露土壤, 使土壤颗粒中的污染物如化肥、农药、牲畜的粪便等被雨水径流携带至水体中, 对水质造成污染, 导致河水水质发生变化<sup>[5]</sup>. 由此可见, 雨水降水量可以影响沔河枯水期与丰水期的变化. 造成河流污染的另一个因素是土地利用方式<sup>[6,7]</sup>, 国内外许多资料表明, 土地利用方式对流域水环境具有强烈的影响<sup>[8]</sup>, 人类在集水区内的活动, 如果未在适宜的土壤保育措施下进行, 都可能对水环境产生影响<sup>[8]</sup>.

微生物代谢作用是实现河流中很多污染物的循

收稿日期: 2015-11-11; 修订日期: 2016-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178048, 51378064); 北京师范大学自主科研基金项目(2014KJJC22)

作者简介: 卢思丹(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, 污水处理, E-mail: 1554619997@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: sunyujiao@bnu.edu.cn

环的主要方式. 比如, 环境中的氮素污染物, 是通过硝化细菌与反硝化细菌等生物作用得到降解. 硝化细菌以氨氮为底物, 氨氮浓度较低时难以满足硝化细菌的需求, 但浓度过高时又可能会抑制硝化细菌, 所以水体氨氮浓度对硝化细菌群落结构影响较大<sup>[9,10]</sup>. 对于其他降解有机物与氮污染物的细菌, 河流水体的污染物类型和浓度对微生物群落也造成很大的影响<sup>[11]</sup>. 河水中微生物的群落结构是对水质条件的良好反映<sup>[12]</sup>, 通过了解微生物在河流上下游与枯丰水期的优势种群分布及典型特征, 也可以帮助更深入地了解河流污染, 从而改进现有的饮用水源地治理保护方法<sup>[13,14]</sup>.

为了得到沱河水体中微生物的信息, 了解更多的河流污染与响应情况, 用 Illumina 测序方法进行细菌的测序来了解河水中微生物的名称、群落结构、多样性等信息<sup>[17]</sup>. Illumina 是目前最新的高通量测序方法之一, 高通量测序 (HTS) 技术又称“下一代”测序 (NGS) 技术, 能一次并行对几百万到上千万条 DNA 分别进行测序. 自 2005 年 Roche、Illumina 和 ABI 等公司推出下一代高通量测序仪以来, 基因组测序变得通量高、测序时间和成本不断下降, 使得 NGS 技术被广泛应用于基因组学、测全序、表观基因组学以及功能基因组学中.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究断面的设置

样品采集尽量考虑在河流每个分支设置采样点, 分别于丰水期和枯水期在沱河上下游干流和部分支流处设置了 12 个采样断面, 其分布情况见图 1.

### 1.2 水样采集

用有机玻璃采样器采集水深 0.5 m 左右处水样, 用于水体微生物基因组 DNA 提取的水样, 注入洗净灭菌后的玻璃瓶中低温带回. 其它水样用预先洗净的聚乙烯采样瓶采集, 低温带回实验室检测.

### 1.3 水质监测

现场监测获得了部分水质指标, 对于不能现场快速监测的项目, 即 TN (总氮)、 $\text{NH}_4^+$ -N (氨氮)、 $\text{NO}_3^-$ -N (硝氮)、 $\text{NO}_2^-$ -N (亚硝氮)、COD (化学需氧量)、BOD (生化需氧量)、TP (总磷) 等, 将水样送往检测中心, 采用纳氏试剂光度法测水中氨氮, 所用试剂为纳氏试剂; 采用酚二磺酸光度法测定硝酸盐氮, 所用试剂为氢氧化钠 (NaOH, 分析纯), 酚二磺酸等; 用 *N*-(1 氨基)-乙二胺光度法测定亚硝酸氮,

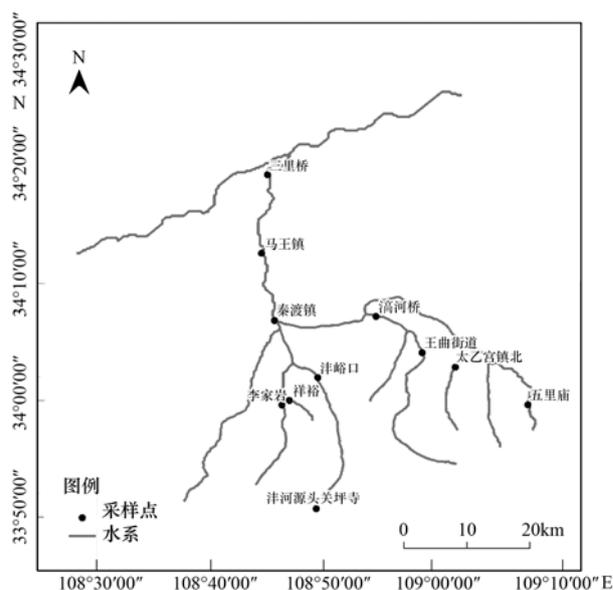


图 1 沱河水样采样点示意

Fig. 1 Twelve sampling sites of Fenghe River

所用试剂为  $\alpha$ -萘乙二胺试剂. 其它可能需要如: 碘化钾 (KI, 分析纯); 磷酸 ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ , 分析纯); 氨水 ( $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ , 分析纯); 高锰酸钾 ( $\text{KMnO}_4$ , 分析纯); 草酸钠 ( $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ , 分析纯) 等试剂. 对水体 pH、温度、溶解氧 (DO)、电导率等也进行了检测.

### 1.4 DNA 提取

水样于 24 h 内经 0.22  $\mu\text{m}$  醋酸纤维素滤膜过滤, 浓缩生物样品. 滤膜放置  $-20^\circ\text{C}$  保存. 使用 Omega Water DNA Kit (快速水质 DNA 提取试剂盒) 按其操作说明提取水体微生物的总 DNA. 1.2% 的琼脂糖凝胶电泳检测结果, 用 NanoDrop 仪器检测 DNA 浓度.

### 1.5 16S PCR (聚合酶链式反应) 及 Illumina 测序

使用带有 12 个 barcode 的引物 515F (5'-GTCC CAGCMGCCGCGGTAA-3') 和 909R (5'-CCCG YCAATTCMTTTRAGT-3') 来扩增 V4 高变区的 16S rDNA 基因, PCR 的混合物为 25  $\mu\text{L}$ , 其中以 1  $\mu\text{L}$  DNA 样品为模板, PCR 扩增体系含有: 2  $\times$  Mix Master 12.5  $\mu\text{L}$ , 1.0  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  上下游引物各 1  $\mu\text{L}$ , 无菌水补齐至 25  $\mu\text{L}$ . PCR 的扩增程序:  $94^\circ\text{C}/3$  min;  $94^\circ\text{C}/40$  s,  $56^\circ\text{C}/1$  min,  $72^\circ\text{C}/1$  min, 30 个循环,  $72^\circ\text{C}/10$  min. 使用无菌水替代 DNA 模板作为阴性对照. PCR 产物用 1.0% 琼脂糖电泳进行检测, 并切胶回收. 最后建库, Illumina 仪器上机测序, 对于测序结果, 根据每个样品引物上的 Barcode 识别双末端测序的原始序列, 去除引物, 得到 16S rRNA V6 片断, 质量控制. 将得到的干净序列用

UCHIME 筛选嵌合体并去除嵌合体序列,采用分阶段聚类算法(TSC)将去除了嵌合体的序列聚类成操作分类单元(OTUs),最后对 OTUs 进行分类。

## 2 结果与分析

### 2.1 沔河水质特征

降水量在河流的丰水期和枯水期有很大的不同,丰水期的河流水量受到直接降水和雨水汇流等补给而增大,枯水期由于降水较少,地表径流汇入也

少,所以水量较丰水期小。通过分析河流水质,如表 1 所示,从采样点 1~12,即从沔河上游到下游,各水质指标(氨氮、硝氮、亚硝态氮、化学需氧量与生化需氧量)呈现持续增加的规律,枯水期 COD 的平均浓度在  $22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,而在丰水期的浓度都  $< 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,丰水期的浓度明显小于枯水期。氨氮等指标也均在丰水期小于枯水期。可见丰水期的污染情况较枯水期更轻。这可能是因为自然降水受到流域气候和周围地区污染状况的影响,降水中携带污染物,污染物进入河流,对水质产生污染<sup>[15,16]</sup>。

表 1 沔河河水的氮指标与有机物含量<sup>1)</sup>

Table 1 Indexes of nitrogen pollution and contents of organic matter in Fenghe River

采样点	pH	DO / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	电导率 / $\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
E-1	7.53	9.65	4.73	70.23	0.08	0.72	0.00
E-2	7.70	10.86	6.60	85.78	0.07	0.75	0.00
E-3	7.78	10.36	8.59	112.17	0.10	1.04	0.01
E-4	7.59	10.57	9.20	105.74	0.16	1.11	0.00
E-5	9.17	9.96	12.50	295.60	0.13	4.41	0.03
E-6	8.38	10.59	8.66	138.76	0.18	1.61	0.01
E-7	8.21	10.25	10.75	231.47	0.17	2.65	0.02
E-8	8.30	9.71	12.47	392.91	0.35	4.71	0.00
E-9	8.04	10.75	11.62	317.43	0.80	3.82	0.00
E-10	8.02	9.63	11.71	325.06	1.19	4.19	0.00
E-11	7.83	8.99	12.38	269.35	0.68	3.34	0.00
E-12	7.85	9.02	12.86	274.38	0.65	3.30	0.00
T-1	8.42	8.25	10.90	71.40	0.02	0.77	0.00
T-2	8.96	8.35	15.10	90.30	0.03	1.04	0.00
T-3	8.47	8.37	17.30	122.40	0.00	1.63	0.00
T-4	8.68	8.49	17.80	127.20	0.02	1.97	0.02
T-5	8.49	8.34	18.60	322.00	0.53	4.21	0.54
T-6	8.68	9.19	14.10	142.30	0.02	2.79	0.05
T-7	8.94	8.82	17.80	222.00	0.00	4.14	0.01
T-8	8.41	7.46	18.60	568.00	0.44	4.87	0.85
T-9	8.64	8.35	18.40	275.00	0.00	3.34	0.04
T-10	8.41	7.94	20.00	215.20	0.00	3.12	0.00
T-11	8.50	7.14	20.10	230.00	0.00	3.01	0.00
T-12	8.59	6.81	21.20	296.00	0.13	3.72	0.00

1) E 表示丰水期; T 表示枯水期,下同

沔河的源头是陕西省长安区喂子坪乡鸡窝子以南的秦琳北侧,源头至丰裕口全段长为 20 km,源头处的河床为大块砾石,水质清澈。结合国内研究结果,分析沔河流域遥感图可以得出,流域内以上游地区的林地最多,其次是耕地面积,再其次是建设用地,而草地、水域和未利用地面积所占比重很小<sup>[18,19]</sup>。在沔河下游,土地利用程度增加,建设用地等所占比例增大<sup>[20]</sup>。这和水质数据上的氨氮等变化趋势相符合。

### 2.2 微生物多样性

从沔河的上游到下游地区,Illumina 测序得到的结果表明(如表 2),测出 OTU 数 4 370 个,多样性和检出的物种数目分别都有变化,但在大体上呈增加的趋势,并且丰水期的各项多样性及种类数平均都小于枯水期。其中枯水期的 Chao1 指数最大是 4 161.18,丰水期的最大 Chao1 指数是 3 365.33,明显小于枯水期。多样性指数的变化幅度枯水期大于丰水期,种数变化幅度在丰水期稍大于枯水期。这

说明枯水期的各项生物多样性程度较丰水期更好,而微生物的多样性既体现了生物之间及环境之间的复

杂关系,又体现了生物资源的丰富性,因此可见枯水期的群落结构也更稳定.

表 2 微生物多样性指数、丰富度指数及种分类水平的个数

Table 2 Diversity indexes, sequences per sample and observed species of microorganisms

采样点	PD_whole_tree 多样性指数	Chao1 指数	序列覆盖率	检出种数	Shannon 指数	Simpson 指数
E-1	128.406	2 844.106	0.809	1 367.9	8.880	0.993
E-2	145.173	3 996.282	0.761	1 594.2	9.441	0.996
E-3	133.607	3 451.201	0.787	1 447.5	9.058	0.994
E-4	126.022	3 155.688	0.807	1 345.5	8.948	0.994
E-6	118.608	3 548.579	0.788	1 369.8	8.698	0.992
E-7	146.756	3 778.956	0.767	1 623.9	9.650	0.997
E-8	151.257	4 088.302	0.750	1 693.2	9.713	0.997
E-9	162.181	4 161.188	0.736	1 796.9	9.889	0.998
E-10	148.859	3 518.398	0.771	1 610.2	9.556	0.996
E-11	139.573	3 952.579	0.762	1 661.8	9.785	0.998
E-12	146.165	3 641.969	0.769	1 633.1	9.707	0.997
T-1	98.841	2 590.208	0.840	1 169.7	8.769	0.994
T-2	102.054	3 242.048	0.828	1 113.0	7.991	0.984
T-3	101.960	3 365.333	0.821	1 209.4	8.738	0.994
T-4	108.515	3 132.630	0.817	1 290.6	8.983	0.995
T-5	103.186	2 582.575	0.836	1 235.1	8.907	0.994
T-6	103.996	2 939.065	0.830	1 158.2	8.327	0.989
T-7	124.724	3 338.136	0.788	1 496.0	9.321	0.996
T-8	134.271	3 577.286	0.780	1 563.8	9.561	0.997
T-9	111.225	3 671.965	0.805	1 315.5	8.828	0.993
T-10	98.058	2 626.322	0.828	1 258.6	8.836	0.993
T-11	109.765	3 042.962	0.812	1 376.2	9.300	0.996
T-12	104.983	2 942.974	0.824	1 261.7	8.900	0.994

### 3 讨论

#### 3.1 稀释度曲线

稀释度曲线是采用对测序序列进行随机抽样的方法,以抽到的序列数与它们所能代表 OTU 的数目构建曲线,即稀释性曲线.当曲线趋于平坦时,说明测序数据量合理,更多的数据量对发现新 OTU 的边际贡献很小;反之则表明继续测序还可能产生较多的 OTU.如图 2,结果中的大部分曲线在尾部的上升趋势均趋于平缓,当每个样品的序列达到4 000 时,检测出的细菌种类大都停留在1 300 个左右,说明本次测序的数据量合理,结果可靠.但是结果中丰水期的微生物种类数量平均约 767 个,枯水期约 916 个,枯水期的细菌种类平均值更高.

#### 3.2 微生物群落结构

由测序结果(N-5 数据缺失)得到,枯水期微生物群落结构中,如图 3,埃希式杆菌属(*Escherichia*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、丛毛单胞菌科(*Comamonadaceae*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和罗尔斯通菌属(*Ralstonia*)是占总菌群的比例最大的

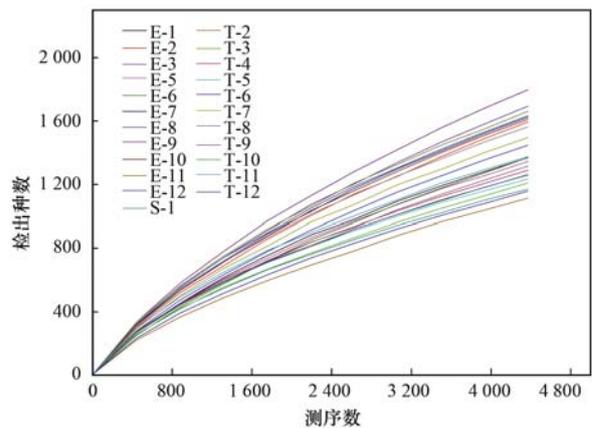


图 2 丰水期沔河水中微生物群落结构

Fig. 2 Microbial community structure of the Fenghe River water in the wet season

优势菌属,它们构成沔河在枯水期的基本群落结构.自上游到下游,埃希式杆菌和不动杆菌的数量明显减少,丛毛单胞菌科的数量也有小幅的减小,鞘脂杆菌相关细菌在下游增多并占较大比,这可能与难降解有机物在下游逐渐地降解相关,可见上下游的微生物群落发生规律性变化

在丰水期(图 4),沔河的微生物群落结构相比枯水期没有很大的变动:不动杆菌属(*Acinetobacter*)、黄杆菌属(*Flavobacterium*)、肠杆菌科(*Enterobacteriaceae*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)

和丛毛单胞菌科(*Comamonadaceae*)占细菌比例最大,丰水期与枯水期群落结构的区别是各个优势菌属的优势地位有所变化:在枯水期最多的埃希式杆菌属被丰水期的不动杆菌代替。

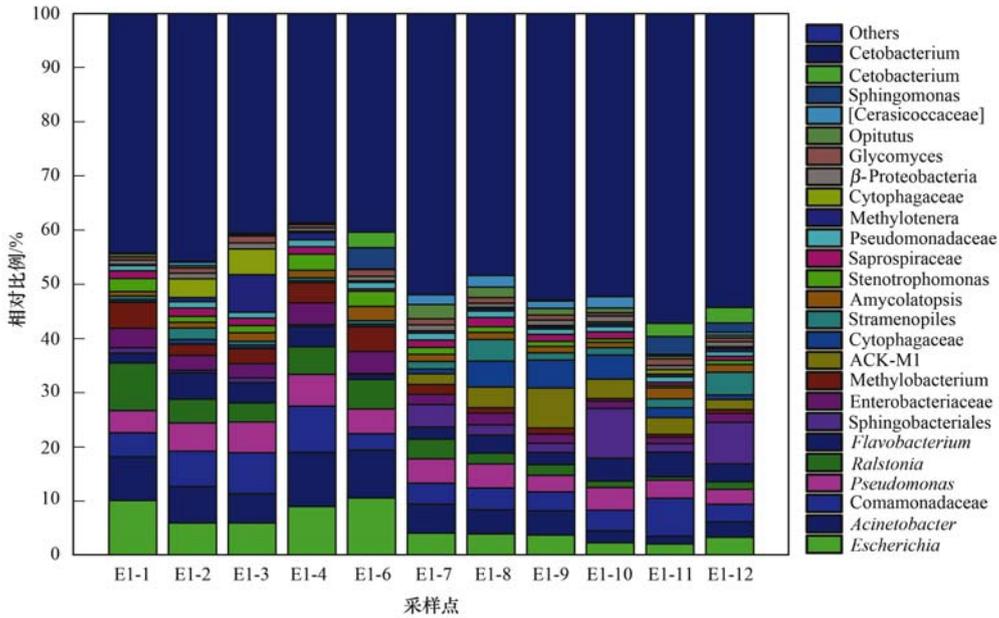


图 3 枯水期沔河水中微生物群落结构

Fig. 3 Microbial community structure of the Fenghe River water in the dry season

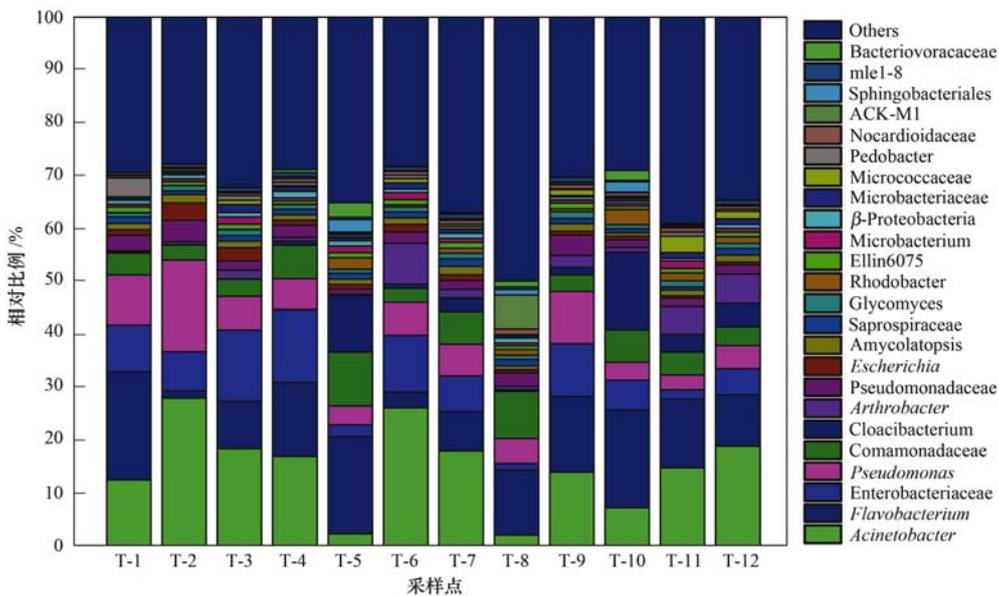


图 4 丰水期沔河水中微生物群落结构

Fig. 4 Microbial community structure of the Fenghe River water in the wet season

对比枯水期可发现,丰水期出现了相比在枯水期中更优势的黄杆菌属与肠杆菌科细菌,并占较大比例.黄杆菌纲主要存在于水生环境中,也会在食物中存在.肠杆菌科包括无芽孢、周身鞭毛或无鞭毛的革兰氏染色阴性直杆菌,化能有机

营养,兼营呼吸代谢和发酵代谢,部分种属可寄生人体,属于和人类活动有密切关系的细菌.可见丰水期由于降水量的增加,降水或者径流携带污染汇入河流,使沔河间接受到更多人类活动的干扰。

### 3.3 统计分析

通过 PCA(主成分分析)可以发现,枯水期与丰水期的沔河水中微生物群落分别呈显著的聚集分布,而两个时期的微生物群落结构有明显区别:丰水期分别聚类在图 5 中的左侧与右侧,这个结果表明,由于降水的影响,沔河上游到下游的微生物群落结构均发生了改变,而且相比于上下游的地理位置差异等因素造成的差异,降水对群落结构的影响更加显著. PCA 分析的结果也佐证了图 3、4 的结果.

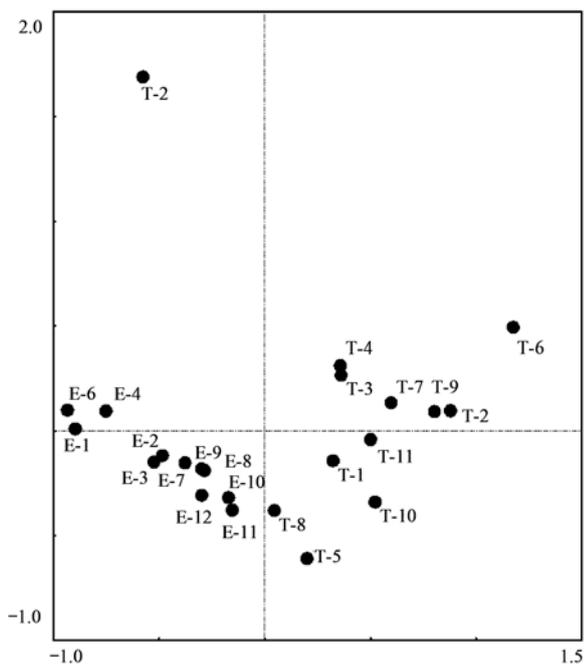


图 5 基于沔河水中微生物群落结构的 PCA 分析

Fig. 5 PCA analysis of the microbial community structures of the Fenghe River water

## 4 结论

沔河枯水期微生物群落的优势种属是埃希式杆菌属(*Escherichia*)、不动杆菌属(*Acinetobacter*)、丛毛单胞菌科(Comamonadaceae)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和罗尔斯通菌属(*Ralstonia*)等,丰水期的优势种属是不动杆菌属(*Acinetobacter*),黄杆菌属(*Flavobacterium*)、肠杆菌科(Enterobacteriaceae)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和丛毛单胞菌科(Comamonadaceae). 不同时期的沔河水中微生物群落结构明显不同:枯水期的水质较差,但微生物群落结构稳定,多样性条件也更好. 丰水期由于降水使河水受到更多的人类影响,尽管丰水期由于水量的稀释作用,水体质量得到保持甚至更好,可是丰水期的生物多样性变差,优势菌属结构中不动杆菌,黄

杆菌优势更明显,同时与人类活动干扰密切相关的种属(肠杆菌)在丰水期的数量增加、占比明显增大.

### 参考文献:

- [1] 王莉,林启才,沈炳岗,等. 沔河水污染特征及非点源污染负荷估算分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 235-238.
- [2] 李家科,李怀恩,董雯,等. 渭河关中段典型支流非点源污染监测与负荷估算[J]. 环境科学学报, 2011, 31(7): 1470-1478.
- [3] 柴春省,张永. 城市污水处理厂出水氨氮升高原因分析[J]. 中国科技信息, 2015, (21): 32-33.
- [4] 杨凯,袁林江,赵丙良. 降雨对沔河水质和污染特征的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(2): 50-54.
- [5] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91, 96.
- [6] Jung S, Eum J S, Jang C W, et al. Characteristics of nonpoint source pollution and relationship between land use and nutrient concentrations in the Han River Watershed [J]. Journal of Korean Society on Water Environment, 2012, 28(2): 255-268.
- [7] Xu K, Wang Y P, Su H, et al. Effect of land-use changes on nonpoint source pollution in the Xizhi River watershed, Guangdong, China[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(18): 2557-2566.
- [8] Litvinaitis A, Bagdžiūnaitė-Litvinaitienė L, Šinkovič E. Land use influence on water pollution: the research of Šalčia River catchment [C]. In: The 9th International Conference "Environmental Engineering". Vilnius: ICEE, 2014.
- [9] 杨柳燕,王楚楚,孙旭,等. 淡水湖泊微生物硝化反硝化过程与影响因素研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(1): 12-22, 50.
- [10] 张凯,张彩霞,张福祿. 浅谈黄河污染的主要原因和对策措施[J]. 治黄科技信息, 2014, (4): 6-8.
- [11] 鲍林林,陈永娟,王晓燕. 河流沉积物氮循环主要微生物的生态特征[J]. 微生物学通报, 2015, 42(6): 1141-1150.
- [12] 朱亮,孙凌宇,储如花,等. 城市纳污河流沉积物微生物群落结构特征[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 132-137.
- [13] 王佳,彭剑峰,宋永会,等. 浑河底泥微生物群落的季节性变化特征[J]. 环境科学研究, 2016, 29(2): 202-210.
- [14] 孙寓姣,赵轩,王蕾,等. 沔河水系脱氮微生物群落结构研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1451-1456.
- [15] Saeed A, Hashmi I. Evaluation of anthropogenic effects on water quality and bacterial diversity in Rawal Lake, Islamabad [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(5): 2785-2793.
- [16] Quero G M, Cassin D, Botter M, et al. Patterns of benthic bacterial diversity in coastal areas contaminated by heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) [J]. Frontiers in Microbiology, 2015, 6: 1053.
- [17] Jan A T, Azam M, Ali A, et al. Molecular characterization of Mercury Resistant Bacteria inhabiting polluted water bodies of different geographical locations in India [J]. Current

- Microbiology, 2012, **65**(1): 14-21.
- [18] 郭雯婧,陈新年,王海生,等.西北地区国内城市降水径流污染特征分析[J].科技创新与应用,2015,(5):86-87.
- [19] 李亚娇,郭雯婧,董雯,等.陕西沔河水环境特征及污染构成解析[J].中国农村水利水电,2014,(6):70-76.
- [20] 王夏晖,陆军,张庆忠,等.基于流域尺度的农业非点源污染物空间排放特征与总量控制研究[J].环境科学,2011,**32**(9):2554-2561.
- [21] 陈远,余兵,林加奖,等.改性竹炭固定化威尼斯不动杆菌吸附协同降解柴油废水的机理及动力学分析[J].环境科学学报,2015,**35**(8):2407-2413.
- [22] 罗国维,卢平,林世光.生物水解(酸化)法处理高浓度洁霉素废水的降解机理研究[J].中国环境科学,1995,**15**(4):284-288.

## 欢迎订阅 2016 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2016 年为 16 开本,120 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

## CONTENTS

Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During Two Red Alert Periods .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM <sub>2.5</sub> Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing .....	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City .....	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM <sub>2.5</sub> from the Northern Suburb of Nanjing in Winter .....	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea .....	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang .....	YANG Chun, Tashpolat Tiyip, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing .....	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors .....	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing .....	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO <sub>2</sub> Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China .....	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing .....	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River .....	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin .....	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms .....	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes .....	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands .....	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine .....	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation .....	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes .....	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode .....	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation .....	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process .....	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water .....	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing .....	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter .....	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation .....	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics .....	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX <sub>2</sub> from Sea Water .....	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges .....	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA) .....	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions .....	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N <sub>2</sub> O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N <sub>2</sub> O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments .....	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter .....	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau .....	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China .....	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir .....	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil .....	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil .....	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism .....	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

# 《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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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