

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
花胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律

孙光溪, 金鹏康*, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 实验通过一套 1 200 m 的 PVC 管式反应器来模拟城市污水管网, 利用气相色谱法、液相色谱法和 454 高通量测序等手段, 研究了城市污水管网中产甲烷过程中的物质变化和产甲烷菌分布特性规律。结果表明, 管网中甲烷含量沿程升高, 说明管网中存在产甲烷菌; 产甲烷菌主要包含甲烷八叠球菌属 (*Methanosarcina*)、广古菌门中的菌属 (*Euryarchaeota_unclassified*) 和甲烷杆菌科中的菌属 (*Methanobacteriaceae_unclassified*) 这 3 种优势菌属, 且在管网 800 ~ 1 000 m 处有广古菌门中的菌属 (*Euryarchaeota_unclassified*) 取代甲烷八叠球菌属 (*Methanosarcina*) 成为第一优势菌属的演替现象; 管网中产甲烷可利用基质有甲酸、甲醇、甲胺、乙酸, 其中乙酸为主要基质, 这些基质在管网中先增加后降低的变化趋势导致了管网中产甲烷菌演替现象的发生。

关键词: 城市污水管网; 454 高通量测序; 甲烷; 产甲烷菌; 演替现象

中图分类号: X172; X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2016)06-2252-07 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.2016.06.031

Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System

SUN Guang-xi, JIN Peng-kang*, SONG Ji-na, WANG Xian-bao, YANG Ke-yao

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A study was conducted through a 1 200 m-PVC-pipe-reactor, which was used to simulate the urban sewer system. Gas chromatography, liquid chromatography and 454 high-throughput sequencing were utilized to study the variation of substrates during the methanogenic process and the distribution characteristics of methanogens in the sewer system. The results showed that the concentration of methane increased along the sewer system, which illustrated that methanogens existed in the sewer network. The methanogens mainly contained *Methanosarcina*, *Euryarchaeota_unclassified* and *Methanobacteriaceae_unclassified*. The distinct succession which *Euryarchaeota_unclassified* replaced *Methanosarcina* to be the first dominant microbial genus between 800-1 000 m of the sewer system. Formic acid, methanol, methylamine, acetic acid and hydrogen were available substrates for methanogens. Among these substrates, acetic acid was the primary substrate for methanogen. The variation trends of these substrates were first increasing and then decreasing along the length of the sewer system, which led to the succession phenomenon of methanogens in the sewer system.

Key words: urban sewer system; 454 high-throughput sequencing; methane; methanogens; succession phenomenon

城市污水管网是一个收集、运输城市污水的系统, 是城市水利基建的重要组成部分^[1]。然而, 污水在管网内的运输过程中水质发生了变化, 生化需氧量(BOD)、化学需氧量(COD)会有不同程度的变化^[2-6], 溶解性有机碳(DOC)也存在着降低的现象^[7-9]。同时, 在污水运输过程中, 还发现管网的管壁上有生物膜的形成^[10-12], 由此人们开始关注污水管网中微生物对水质的改变作用。

在城市污水管网中, 由于污水中含有挥发性脂肪酸(VFA)等物质, 为产甲烷过程提供了物质基础^[13-15]。先前研究发现, 在管网中, 确实有 CH₄ 的产生^[16-18]。管网中 CH₄ 的产生对管网的运行管理和污水处理带来极大的隐患。CH₄ 是一种温室气体, 管网中的 CH₄ 排放到空气当中会加剧温室效应^[19,20]; 当管网内 CH₄ 浓度超过 5% 时有爆炸的危险^[21,22]; 管网内 CH₄ 的产生会带走一部分 COD, 这不利于后续污水处理厂的生物脱氮除磷的过

程^[23,24], 因此管网中 CH₄ 的产生是值得关注的问题。CH₄ 的产生与管网中的产甲烷菌有关, 因此研究管网中的产甲烷菌 also 具有重要意义。然而, 目前对管网内产甲烷菌的演替规律了解甚少。

基于此, 本文通过建立一套 1 200 m 管道系统, 对污水管网内 CH₄ 沿程变化及产甲烷菌的分布特性进行研究, 并探明了产甲烷菌可利用基质与产甲烷菌分布之间的关系。

1 材料与方法

1.1 实验条件和原水水质

反应器为城市污水模拟管网反应器^[25], 以西安

收稿日期: 2015-12-04; 修订日期: 2016-01-04

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07313001); 新世纪优秀人才项目(NCET-12-1043); 陕西省创新团队项目(IRT 2013KCT-13)

作者简介: 孙光溪(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水与废水的深度处理技术, E-mail: huanjingsgx@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: pkjin@hotmail.com

市城市污水作为原水,在室温下运行,实验温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$,pH 为 7.2 ± 0.3 ,密封性良好. 管网沿程的溶解氧(DO)为 $(0.3 \pm 0.05)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,沿程变化不大,总体变化趋势为沿程降低,且由于管网始端和末端暴露在空气中,溶解氧相对含量较高,溶解氧沿程变化如图 1 所示.

在反应器连续运行期间,通过控制管网坡度为 5‰和污水充满度 0.6,来使污水流速为 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,水力停留时间为 1h. 污水依靠重力进入模拟管段. 在反应器连续运行期间,原水的水质状况如表 1 所示.

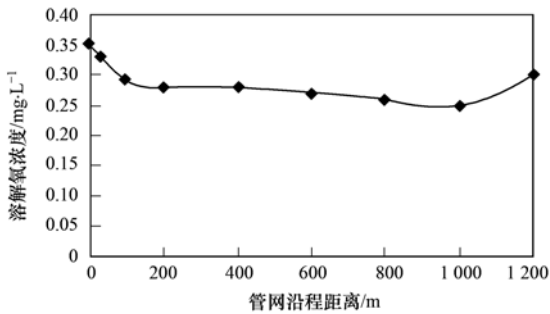


图 1 管网沿程中溶解氧的变化
Fig. 1 Variation of dissolved oxygen along the length of the sewer system

表 1 城市污水管网中的水质特性

Table 1 Characteristics of wastewater quality in urban sewer networks				
水质指标	COD/mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	TN/mg·L ⁻¹	TP/mg·L ⁻¹
数值	350 ~ 370	35 ~ 43	42 ~ 48	7.2 ~ 8.5

1.2 取样方法

在 800 m 的管网系统中选取 8 个取样点,其中选取原水作为 0 m 处的取样点,然后一次在分别选取 30、100、200、400、600、800、1 000 和 1 200 m 处作为剩余的 8 个取样点进行水质分析,分析指标包括 COD、氨氮(NH₄⁺-N)、总氮(TN)、总磷(TP)等常规指标及发酵产物. 对于生物分析所需要的生物膜样品采集,以 30、100、200、400、600、800、1 000 和 1 200 m 作为生物膜取样点. 首先将 8 个位置的管段两端的活结松开,取下管段,将管段里的有机玻璃条取出,用无菌棉签将适量的生物膜从有机玻璃载体上刮入一次性培养皿中并将培养皿盖好,然后立即放入装有干冰的保温盒并送至实验室 - 20℃ 保存.

1.3 分析方法

1.3.1 乙酸分析

水样分析之前用 3% 的磷酸将水样的 pH 调节到 4 左右,再将水样用 0.45 μm 滤膜过滤. 分析仪器为 GC-2014 气相色谱仪(日本岛津). 氢火焰离子化检测器(FID),色谱柱为 DB-FFAP(30 m × 0.5 μm × 0.32 mm). 升温程序:初始柱温 100℃ 保持 2 min,以 10 °C·min⁻¹ 的速度升至 120℃ 保持 2 min,再以 6 °C·min⁻¹ 升至 200℃ 保持 2 min. 进样口温度 200℃,检测器温度 230℃,进样量 1 μL. N₂ 作为载气和补偿气,速率均为 20 mL·min⁻¹. H₂ 速率为 35 mL·min⁻¹,空气为 350 mL·min⁻¹.

1.3.2 甲醇分析

测定甲醇和乙醇的浓度选用方法为气相色谱

法,进样方式为顶空进样. 分析仪器为 GC-2014 气相色谱仪(日本岛津),色谱柱为 CB-5(30 m × 0.5 μm × 0.32 mm),FID 检测器,并配有 AOC-5000 顶空自动进样器. 升温程序:50℃ 保持 5 min,以 5 °C·min⁻¹ 的速度升至 100℃,保持 2 min,以 5 °C·min⁻¹ 的升温速度升至 200℃. 进样口温度为 200℃,检测器温度为 280℃;载气流量为 5.0 mL·min⁻¹;分流比 2:1. 顶空自动进样器条件:加热平衡温度为 80℃,加热平衡时间 30 min;取样针温度为 90℃;进样体积 1.0 mL.

1.3.3 甲酸分析

分析仪器选用 LC2010AHT 液相色谱仪(日本岛津),色谱柱为 Hypersil BDS C18(250 mm × 4.6 mm × 5 μm),紫外检测器,波长设置为 210 nm. 流动相为 0.02 mol·L⁻¹ KH₂PO₄: 甲醇(体积比为 95:5),用磷酸调节 pH 到 2. 流速设置为 1.0 mL·min⁻¹,柱温 30℃,进样体积 10 μL.

1.3.4 甲胺分析

甲胺浓度采用液相色谱法进行测定. 上机测样之前对样品进行 PITC 衍生化处理,并用 C18 柱进行固相萃取. 分析仪器选用 LC2010AHT 液相色谱仪(日本岛津),色谱柱为 Hypersil BDS C18(250 mm × 4.6 mm × 5 μm),紫外检测器,波长设置为 240 nm. 流动相为乙腈:水(体积比为 30:70),流速设置为 1.0 mL·min⁻¹,柱温 30℃,进样体积 10 μL.

1.3.5 CH₄ 分析

CH₄ 的测定选用气相色谱法,分析仪器为 GC-2014 气相色谱仪(日本岛津). 检测器为热导检测

器(TCD),色谱柱型号为TDX-01 填充柱. 柱温设置为100℃,保持10 min. N₂ 作为尾气,流速为10.0 mL·min⁻¹. Ar 作为载气,流速为48 mL·min⁻¹. 使用标准气体混合气校准,其组分为37% CO₂、4% N₂、0.802% H₂ 以及CH₄.

1.3.6 其他水质分析

实验中COD、NH₄⁺-N、TN 和TP 的测定采用国家标准方法.

1.3.7 DNA 提取和PCR 扩增

采用Power Soil DNA 提取试剂盒(MO Biomedical, U. S.)对生物膜样本中的DNA 进行提取,提取方法按照试剂盒制造商提供的方法使用说明书进行. 对于产甲烷菌基因片段的扩增,选用特异性引物MLf 5'-GGTGGTGTGGMGATTCACACARTAYGCWACAGC-3'和MLr 5'-TTCATTGCRTAGTTWGGRTAGTT-3'^[26]. PCR 反应体系(20 μL): 5 × FastPfu Buffer 4 μL, dNTPs 2 μL, 引物各0.8 μL, FastPfu 聚合酶0.4 μL,模板DNA 10 ng,加无菌水至20 μL. PCR 条件: 95℃ 预变性2 min,95℃ 变性30 s,55℃ 退火30 s,72℃ 延伸30 s,25 个循环,最后72℃ 延伸5 min. 2% 琼脂糖凝胶电泳检测PCR 产物.

1.3.8 产甲烷菌454 高通量测序

用AeyPrepDNA 凝胶回收试剂盒切胶回收PCR 产物,Tris-HCl 洗脱,并用2% 琼脂糖电泳检测. 参照电泳初步定量结果,将PCR 产物用QuantiFluorTM-ST 蓝色荧光定量系统(Promega 公司)进行检测定量,之后按照每个样本的测序要求,进行相应比例的混合. 用Roche GS FLX Titanium emPCR 试剂盒对混合物进行emPCR 扩增,扩增后的混合物按照454 平台的标准方法,在Roche 454 GS FLX + Titanium 平台上进行上机测序.

2 结果与分析

2.1 管网系统中CH₄ 气体的产生

图2 中展现了管网中CH₄ 的含量的变化趋势,结果表明CH₄ 含量较低均在3% 以下,远小于50%,所以管网内甲烷化程度较低^[27]. 从中可以看出,CH₄ 在管网中的变化规律是沿程增加的. 在0 ~ 30 m 处,没有CH₄ 的产生,这可能由于在管网始端,污水中溶解氧含量较高,不适合产甲烷菌富集生长,此外污水中的有机物质以大分子有机物为主,这些大分子有机物质无法被产甲烷菌直接利用. 随着管网沿程距离的不断增加,管道内CH₄ 的含量也不断升高,在1 200 m 处达到最大值,其含量为2.75%. CH₄ 含量沿程升高,这是由于管道内的水解发酵过程使得大分子物质转化为VFA(乙酸)等小分子物质,产甲烷菌得以不断利用乙酸等可利用基质,使得CH₄ 在管网中不断产生并得到积累,故管网中的CH₄ 含量随之升高.

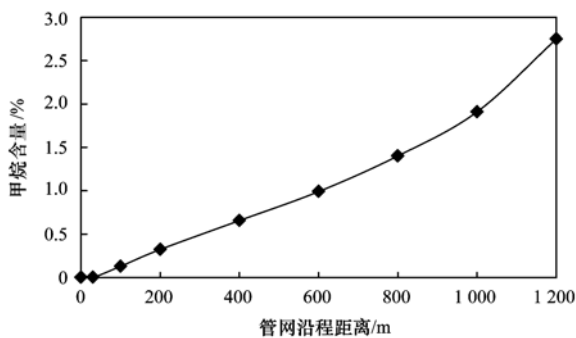


图2 管网沿程中CH₄ 含量的变化

Fig. 2 Variation of CH₄ along the length of the sewer system

2.2 管网系统中产甲烷菌的沿程分布特性

2.2.1 管网系统中产甲烷菌的构成及多样性分布

表2反映了管网中产甲烷菌的构成及其相对丰

表2 管网中产甲烷菌的构成¹⁾/%

Table 2 Composition of methanogens in the sewer system/%

类型	管网沿程距离/m						
	100	200	400	600	800	1 000	1 200
<i>Methanosarcina</i>	0.25	0.49	0.57	0.63	0.64	0.30	0.30
<i>Euryarchaeota_unclassified</i>	0.37	0.30	0.24	0.26	0.25	0.54	0.54
<i>Methanobacteriaceae_unclassified</i>	0.22	0.075	0.058	0.005 3	0.007 0	0.062	0.060
<i>Methanosarcinaceae_unclassified</i>	0.035	0.079	0.097	0.089	0.085	0.031	0.026
<i>Methanospirillum</i>	0.059	0.013	0	0	0.012	0.029	0.022
<i>Archaea_unclassified</i>	0.007 6	0.029	0.011	0.011	0.005 6	0.015	0.013
<i>Methanobacterium</i>	0.045	0	0	0	0	0.009 0	0.007 8
<i>Environmental_samples_norank</i>	0.007 0	0	0.016	0	0	0.005 7	0.025
<i>Methanosaeta</i>	0	0.011	0	0	0	0.002 8	0.002 4
Others	0.006 4	0.003	0.008	0.004 7	0.000 4	0.005 5	0.003 8

1) 表中数值表示相对丰度

度情况,从中可以看出,管网中检测到的产甲烷菌共有 9 种,其中甲烷八叠球菌属 (*Methanosarcina*)、广古菌门中的菌属 (*Euryarchaeota_unclassified*)、甲烷杆菌科中的菌属 (*Methanobacteriaceae_unclassified*) 和古菌门中的菌属 (*Archaea_unclassified*) 在管网中始终存在.

图 3 展现了管网沿程产甲烷菌的多样性变化. Shannon 指数是表征物种多样性的指标^[28],因此在图 3 中是通过 Shannon 指数来反映产甲烷菌的多样性变化. 由于在管网初始端 30 m 处的生物膜样本中没有生成有效序列,即在 30 m 处没有检测到产甲烷菌,故 30 m 处不存在产甲烷菌,这可以很好地解释图 2 中 30 m 处没有 CH₄ 的生成. 从中可以看出,100 ~ 600 m 之间 Shannon 指数沿程降低,由 100 m 处的 2.7 降低至 600 m 处的 1.58,600 ~ 800 m 处的 Shannon 指数保持稳定,说明管网 800 m 之前产甲烷菌的多样性沿程降低,且在 600 ~ 800 m 之间保持稳定;在管网 1 000 m 处,Shannon 指数突然升高,此后一直保持稳定,Shannon 指数稳定在 2.2 左右,说明管网末端多样性较为丰富且保持稳定.

2.2.2 管网系统中产甲烷菌菌群结构分析

图 4 所示的是产甲烷菌的热图分析,是在属水平下进行的分析,不同的颜色代表了不同的相对丰度值,蓝色相对丰度最低,红色相对丰度最高,图顶的分支表示了样本之间的结构相似性. 由于 30 m 没有产甲烷菌,因此管网 30 m 处的样本不参与热

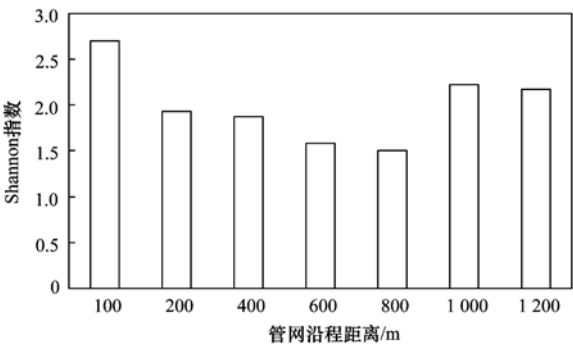


图 3 产甲烷菌多样性在管网中的沿程变化

Fig. 3 Variation of diversity of methanogens along the sewer system

图分析. 图 4 中聚类结果表明,管网 100 ~ 1 200 m 中的产甲烷菌群落结构共分为两大类,其中 200 ~ 800 m 为一类,100、1 000 和 1 200 m 为一类. 200 ~ 800 m 这一类中,600 m 和 800 m 中的群落结构最为相近,而在 100、1 000 和 1 200 m 的这一类中,以 1 000 m 和 1 200 m 的群落结构最为相似;在 800 m 和 1 000 m 这一相邻位置处,群落结构发生了明显的改变,说明在该处存在着产甲烷菌的演替现象. 同时,根据图中的颜色分布可以看出,在管网中的优势菌群有甲烷八叠球菌属 (*Methanosarcina*)、广古菌门中的菌属 (*Euryarchaeota_unclassified*) 和甲烷杆菌科中的菌属 (*Methanobacteriaceae_unclassified*),其中甲烷八叠球菌属 (*Methanosarcina*) 和广古菌门中的菌属 (*Euryarchaeota_unclassified*) 为主要优势菌群.

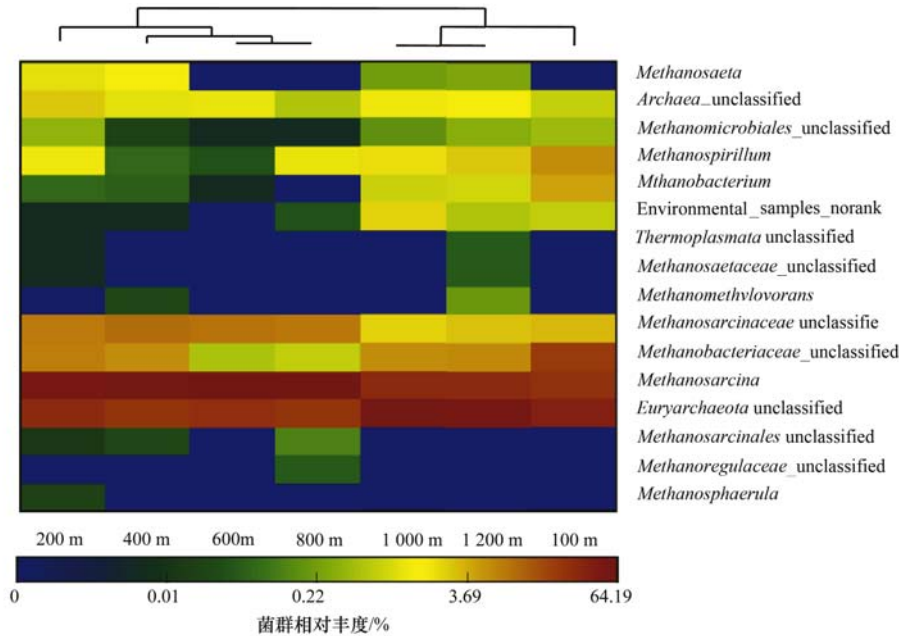


图 4 产甲烷菌聚类(热图)分析

Fig. 4 Hierarchical cluster (heatmap) analysis of methanogens

2.2.3 产甲烷菌的菌属演替过程

优势菌群是一个群落中的主要构成部分,基于1.2.2节的结果对管网中的优势产甲烷菌进行进一步的分析。图5反映了管网中优势产甲烷菌相对丰度的沿程变化,结果表明,甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)、广古菌门中的菌属(*Euryarchaeota_unclassified*)和甲烷杆菌科中的菌属(*Methanobacteriaceae_unclassified*),这3种产甲烷菌相对丰度变化规律较为明显。在管网30 m处,3种菌属都不存在,在管网100~800 m范围内,甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)的相对丰度在3种优势菌属中最高,且随着管网距离的增加相对丰度也不断增加,与之相反,广古菌门中的菌属(*Euryarchaeota_unclassified*)和甲烷杆菌科中的菌属(*Methanobacteriaceae_unclassified*)在管网100~800 m的范围内相对丰度的沿程变化趋势与甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)严格相反,它们的相对丰度在管网中沿程降低,其中甲烷杆菌科中的菌属(*Methanobacteriaceae_unclassified*)在600~800 m之间失去优势地位,相对丰度均在0.7%以下;在管网1000~1200 m范围内,甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)的相对丰度降低并保持稳定,广古菌门中的菌属(*Euryarchaeota_unclassified*)和甲烷杆菌科中的菌属(*Methanobacteriaceae_unclassified*)相对丰度升高并保持稳定,其中广古菌门中的菌属(*Euryarchaeota_unclassified*)超过甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)成为3种菌属中相对丰度最高的菌属。从图5中可以看出,600 m和800 m、1000 m和1200 m的优势菌属的相对丰度变化不大,这与图4中的群落结构分析可以很好地对应起来,也说明了群落中的优势菌属的构成基本反映了群落结构的

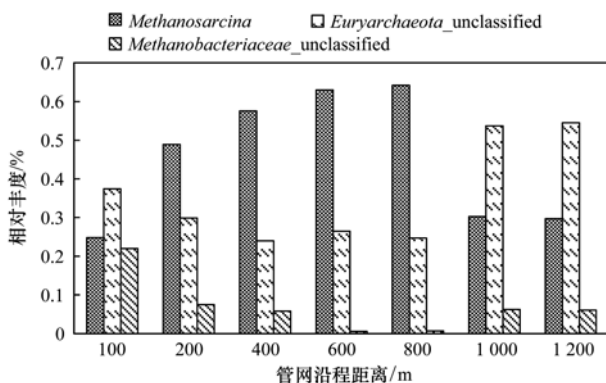


图5 优势产甲烷菌相对丰度在管网中的沿程变化

Fig. 5 Variation of relative abundance of dominant methanogens along the length of the sewer system

构成情况。同时,在800~1000 m的过程中,3种产甲烷菌的相对丰度、优势地位和变化趋势都发生了改变,说明在该管网范围内,产甲烷菌群中菌属发生了演替过程,即在该处广古菌门中的菌属(*Euryarchaeota_unclassified*)取代了甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)成为第一优势菌属。

2.3 产甲烷菌可利用基质的变化规律

图6反映了产甲烷菌可利用基质的变化情况。管道中存在的产甲烷菌可利用基质有甲酸、甲醇、甲胺、乙酸(“三甲一乙”)和 H_2 ,其中乙酸的含量最高,而甲胺的含量极低。由于 H_2 是气相产物且在管网中的含量很低,本文对 H_2 不做过多论述。“三甲一乙”这4种基质在管网中的变化规律基本一致,均呈现出先增加后降低的变化趋势。乙酸在整个管网中含量最高,在管网0~600 m沿程增加并在600 m处达到最大值 $8.67 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并在600~800 m处保持稳定,而后开始沿程逐渐下降;甲酸在管网0~400 m沿程增加并在400 m处达到最大值 $3.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而后开始沿程降低;甲醇在30 m处达到最大值 $2.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后开始沿程降低;而甲胺在整个管网中的含量之中保持在很低的水平且浓度不超过 $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在800 m处含量最高 $0.011 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这4种基质在管网中均存在含量降低的现象,说明这4种基质在管网中都被产甲烷菌利用生成 CH_4 。在管网中,乙酸是含量最高的产甲烷可利用基质,即

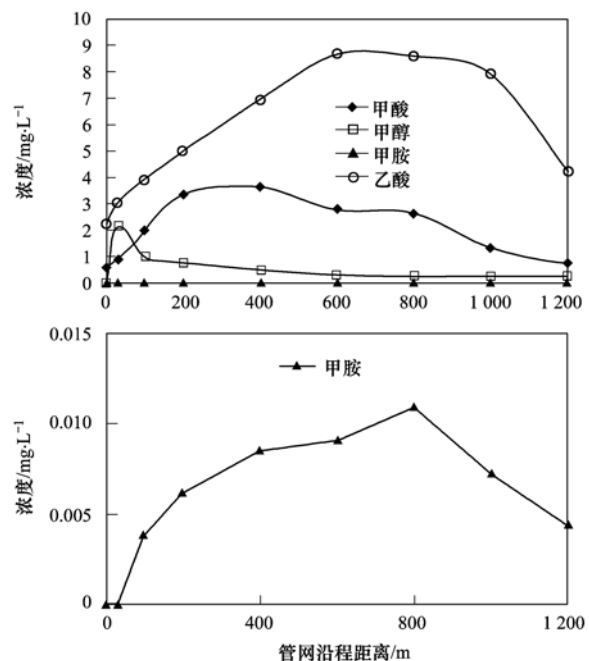


图6 管网中产甲烷菌可以用基质的沿程变化

Fig. 6 Variation of available substrates of methanogens along the length of the sewer system

产甲烷菌可以利用的乙酸多,且根据厌氧三阶段理论,在发酵产甲烷过程中 72% 的 CH_4 主要来自于乙酸^[29],说明在管网中产甲烷菌主要利用乙酸. 管网中 0~800 m 处甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)相对丰度最高,主要利用乙酸生成 CH_4 ^[30,31],甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)的相对丰度在该范围内沿程增加,这很好地解释了在 0~800 m 乙酸含量的变化情况,且 600~800 m 乙酸含量保持稳定,而甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)的相对丰度也保持稳定;管网 800 m 处以后,乙酸含量下降,且微生物代谢过程中使得某些中间产物富集,这对甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)而言,环境开始变得恶劣,这就使得其在该环境下处于不利的地位,竞争能力下降,从而相对丰度下降,广古菌门中的菌属(*Euryarchaeota_unclassified*)和甲烷杆菌科中的菌属(*Methanobacteriaceae_unclassified*)在该环境下竞争优势增强,相对丰度增加.

3 结论

(1)城市污水管网中生成 CH_4 的量较低,管网中甲烷化程度较低. 在管网初始端没有 CH_4 的产生,而后随着管网距离的增加, CH_4 在管网中呈现出了逐渐增加的变化趋势.

(2)城市污水管网中产甲烷菌主要包含,甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)、广古菌门中的菌属(*Euryarchaeota_unclassified*)和甲烷杆菌科中的菌属(*Methanobacteriaceae_unclassified*)这 3 种. 产甲烷菌的群落结构在 800~1 000 m 发生了明显的改变,在管网该范围内发生了广古菌门中的菌属(*Euryarchaeota_unclassified*)取代甲烷八叠球菌属(*Methanosarcina*)成为第一优势菌属的演替过程.

(3)城市污水管网中产甲烷菌可利用基质“三甲一乙”中乙酸含量最高,甲胺含量始终维持在极低的水平. 这些物质在管网中均呈现出了先增加后降低的变化趋势,其中乙酸在 600~800 m 含量维持稳定. 由于不同产甲烷菌属适应的物质条件和环境条件不同,因此这些物质条件和环境条件的改变,使得产甲烷菌在管网中的分布发生了改变.

参考文献:

- [1] Mohanakrishnan J, Sharma K R, Meyer R L, et al. Variation in biofilm structure and activity along the length of a rising main sewer[J]. Water Environment Research, 2009, **81**(8): 800-808.
- [2] Tanaka N, Takenaka K. Control of hydrogen sulfide and degradation of organic matter by air injection into a wastewater force main[J]. Water Science and Technology, 1995, **31**(7): 273-282.
- [3] Leu H G, Ouyang C F, Su J L. Effects of flow velocity changes on nitrogen transport and conversion in an open channel flow[J]. Water Research, 1996, **30**(9): 2065-2071.
- [4] Raunkjær K, Nielsen P H, Hvitved-Jacobsen T. Acetate removal in sewer biofilms under aerobic conditions[J]. Water Research, 1997, **31**(11): 2727-2736.
- [5] Warith M A, Kennedy K, Reitsma R. Use of sanitary sewers as wastewater pre-treatment systems [J]. Waste Management, 1998, **18**(4): 235-247.
- [6] Gasperi J, Gromaire M C, Kafi M, et al. Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems[J]. Water Research, 2010, **44**(20): 5875-5886.
- [7] Chen G H, Leung D H W. Utilization of oxygen in a sanitary gravity sewer[J]. Water Research, 2000, **34**(15): 3813-3821.
- [8] Chen G H, Leung D H W, Huang J C. Removal of dissolved organic carbon in sanitary gravity sewer [J]. Journal of Environmental Engineering, 2001, **127**(4): 295-301.
- [9] Chen G H, Leung D H W, Hung J C. Biofilm in the sediment phase of a sanitary gravity sewer[J]. Water Research, 2003, **37**(11): 2784-2788.
- [10] Aesøy A, Storfjell M, Mellgren L, et al. A comparison of biofilm growth and water quality changes in sewers with anoxic and anaerobic (septic) conditions [J]. Water Science and Technology, 1997, **36**(1): 303-310.
- [11] Jiang F, Leung D H W, Li S Y, et al. A biofilm model for prediction of pollutant transformation in sewers [J]. Water Research, 2009, **43**(13): 3187-3198.
- [12] Sharma K, Derlon N, Hu S H, et al. Modeling the pH effect on sulfidogenesis in anaerobic sewer biofilm[J]. Water Research, 2014, **49**: 175-185.
- [13] Gutierrez O, Mohanakrishnan J, Sharma K R, et al. Evaluation of oxygen injection as a means of controlling sulfide production in a sewer system[J]. Water Research, 2008, **42**(17): 4549-4561.
- [14] Sharma K R, Yuan Z G, de Haas D, et al. Dynamics and dynamic modelling of H_2S production in sewer systems [J]. Water Research, 2008, **42**(10): 2527-2538.
- [15] Gutierrez O, Park D, Sharma K R, et al. Effects of long-term pH elevation on the sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms[J]. Water Research, 2009, **43**(9): 2549-2557.
- [16] Mohanakrishnan J, Gutierrez O, Meyer R L, et al. Nitrite effectively inhibits sulfide and methane production in a laboratory scale sewer reactor[J]. Water Research, 2008, **42**(14): 3961-3971.
- [17] Jiang G M, Gutierrez O, Sharma K R, et al. Effects of nitrite concentration and exposure time on sulfide and methane production in sewer systems [J]. Water Research, 2010, **44**(14): 4241-4251.

- [18] Liu Y W, Ni B J, Ganigué R, *et al.* Sulfide and methane production in sewer sediments[J]. *Water Research*, 2015, **70**: 350-359.
- [19] Choudhary V R, Patil V P, Jana P, *et al.* Nano-gold supported on Fe_2O_3 : a highly active catalyst for low temperature oxidative destruction of methane green house gas from exhaust/waste gases [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2008, **350**(2): 186-190.
- [20] 王佳, 宋永会, 彭剑峰, 等. 浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落结构时空特征[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(11): 1670-1676.
- [21] Massie C, Stewart G, McGregor G, *et al.* Design of a portable optical sensor for methane gas detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, **113**(2): 830-836.
- [22] Pilão R, Ramalho E, Pinho C. Explosibility of cork dust in methane/air mixtures [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, **19**(1): 17-23.
- [23] Auguet O, Pijuan M, Guasch-Balcells H, *et al.* Implications of Downstream Nitrate Dosage in anaerobic sewers to control sulfide and methane emissions [J]. *Water Research*, 2015, **68**: 522-532.
- [24] Liu Y W, Ni B J, Sharma K R, *et al.* Methane emission from sewers[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **524-525**: 40-51.
- [25] Jin P K, Wang B, Jiao D, *et al.* Characterization of microflora and transformation of organic matters in urban sewer system[J]. *Water Research*, 2015, **84**: 112-119.
- [26] Luton P E, Wayne J M, Sharp R J, *et al.* The *mcrA* gene as an alternative to 16S rRNA in the phylogenetic analysis of methanogen populations in landfill[J]. *Microbiology*, 2002, **148**(11): 3521-3530.
- [27] 李海红, 巴琦玥, 闫志英, 等. 不同原料厌氧发酵及其微生物种群的研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(15): 1449-1457.
- [28] Fierer N, Jackson R B. The diversity and biogeography of soil bacterial communities[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(3): 626-631.
- [29] 何强, 孙兴福, 艾海男, 等. 两相一体式污泥浓缩消化反应器运行效能及其微生物特性[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(11): 2039-2046.
- [30] 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 等. IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2715-2722.
- [31] 董慧峪, 季民. 剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌群多样性的比较研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1421-1427.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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