

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)

基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)

上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)

广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)

重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)

济南市夏、冬季 PM_{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)

聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)

夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)

晋城市冬季环境中挥发性有机物的污染特征及来源解析 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)

北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)

合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏楨, 王凤 (4060)

填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)

北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)

基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王朕, 滕彦国, 王金生 (4086)

透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)

黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)

黄河干流宁夏段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)

伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)

马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)

柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析 徐进, 何江涛, 彭颖, 曾颖 (4142)

地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)

三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)

蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)

铅改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)

洱河流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)

我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)

东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 储瑜, 何肖微, 曾中, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)

处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)

华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)

制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)

人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)

城市污水管网中不同生化作用的基质流向 姚翔译, 石炬, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)

微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)

UV 强化草酸络合 Fe³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)

焦化废水 A/O² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)

长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)

NaCl 盐度对 A²/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)

温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)

游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)

HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)

长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)

广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)

紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)

秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)

低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)

臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殿波 (4359)

再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)

黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)

村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)

《环境科学》征订启事 (3986) 《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

城市污水管网中不同生化作用的基质流向

姚翔译, 石焯, 桑浪涛, 金鹏康*, 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 为研究城市污水管网中有机污染物在生物代谢反应过程中的利用机制, 通过运行以实际管网沉积物为底物和以人工配置沉积物为底物的不同模拟条件下的污水管网中试系统, 对比分析了管网中污水与沉积物之间 COD、甲烷、硝态氮和硫酸根的迁移转化特性. 结果表明, 污水在模拟管网中流动一周期内, 污水中 COD 的总变化量为 $170.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中, 由沉积作用导致 COD 的变化量为 $101.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 由生化作用导致 COD 的变化量为 $69.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 同时, 在微生物的代谢作用下, 管网甲烷产量为 $7.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 污水中硝态氮减少量为 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 硫酸根减少量为 $21.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 依据公式推算, 在污水管网运行过程中, 发酵产甲烷过程消耗的 COD 为 $32.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 反硝化作用消耗的 COD 为 $8.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 硫酸盐还原菌还原硫酸盐消耗的 COD 为 $6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此可知, 沉积作用导致的 COD 变化量占 COD 总变化量的 65.38%; 生化作用导致的 COD 变化量占 COD 总变化量的 34.62%, 而发酵产甲烷、反硝化作用和硫酸盐还原菌还原硫酸盐这三项生化代谢作用消耗的 COD 共占生化作用降解 COD 的 68.01%, 该结果表明, 沉积作用是污水管网中有机污染物去除的主要方式, 而发酵产甲烷、反硝化作用和硫酸盐还原菌还原硫酸根是管网中生化作用去除有机污染物的重要过程.

关键词: 城市污水管网; 有机污染物; 基质流向; 沉积作用; 生化作用

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4242-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201801288

Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network

YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, JIN Peng-kang*, WANG Xiao-chang

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

Abstract: In order to investigate the consumption mechanism of organic contaminants in different biological metabolism pathways within an urban sewage network, a pilot-scale system using two kinds of sediments (urban sewage sediment and artificial sediment) was constructed. The pilot system was operated to study the migration and transformation characteristics of COD, methane, nitrate, and sulfate between sediment and sewage. Results showed that the variation of COD in sewage was $170.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, with change of COD by deposition and bioreaction of $101.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $69.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Due to biological metabolism, the generation of methane in sewers was of $7.39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; the decrease of nitrate and sulfate in sewage was $0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $21.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Based on our calculations, the consuming concentration of COD was $32.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for methane generation, $8.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for denitrification, and $6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ for sulfate degradation by sulfate reducing bacteria. The decrease in COD by deposition was responsible for 65.38% of total variation of COD in sewage. The decrease in COD by bioreaction was responsible for 34.62% of total variation in COD. Meanwhile, total variation values of COD for methane generation, denitrification, and sulfate degradation were responsible for 68.01% of COD variation by bioreaction. Deposition was therefore the main pathway for removal of organic contaminants from the sewer system; biochemical activities of methane generation, denitrification, and sulfate degradation also played important roles.

Key words: urban sewer system; organic contaminant; substrate flow; deposition; biochemical activities

目前, 城市污水处理主要集中于污水处理厂这种末端处理方式, 随着城市人口的不断增长, 工业化的大力推进, 污水处理厂原有设计处理量已然不能满足社会需求, 这导致污水处理厂不断扩建、新建, 浪费了不必要的自然资源与社会资源^[1,2]而连接污水处理厂的污水管网系统, 不仅仅是污水的输送装置^[3], 也可以看做是一个巨大的反应器^[4,5], 生活污水从住户排放, 直到进入污水处理厂, 其间要经过很长的排水管道, 在此期间, 污水水质会发生一定程度变化^[6], 部分大颗粒污染物会沉降至沉积层^[7,8]; 部分溶解态污染物会通过管网中微生物的新陈代谢作用被去除^[9~11]. 所以, 探索城市污水

管网中污染物质的迁移变化, 不仅可以发挥出管网对污染物质的处理潜力, 也可以有效改善污水处理厂的进水条件, 提升污水处理厂的处理效率. 因此, 研究污水管网中污染物质的变化规律十分重要.

有机污染物是污水管网中主要的污染物质之一, 其组成成分主要是蛋白质(40% ~ 60%)、碳水

收稿日期: 2018-01-31; 修订日期: 2018-03-13

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07313-001-01); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400701); 陕西省重点科技创新团队项目(2013KCT-13)

作者简介: 姚翔译(1994~), 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: xxywah@163.com

* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

化合物(25%~50%) 和脂肪(10%)^[12, 13]。在城市污水管网的厌氧环境中,存在着发酵产甲烷、反硝化作用和硫酸盐还原作用等生化反应,有机污染物作为基质被产甲烷菌、反硝化细菌和硫酸盐还原菌所消耗,有研究表明,城市污水管网的沉积层中,含有产甲烷菌和硫酸盐还原菌,大分子的有机污染物可被水解为小分子有机物质,并生成甲烷与硫化氢气体^[14, 15];相关研究也表明,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,为产甲烷和产硫化氢提供了物质基础,管网沉积层每平方米的甲烷产量可达 $(1.56 \pm 0.14) \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,硫化氢产量可达 $(9.20 \pm 0.39) \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ^[16, 17]; Almeida 等^[18]的研究认为在城市污水管网的厌氧环境中,水力停留时间为 1.5h,污水中的溶解态有机污染物通过微生物的水解和发酵作用后,可被去除 19%;氨氮的去除可达 6%。目前国内对于城市污水管网的研究,主要集中于研究污水管网的水力输送能力,而忽略了污水管网本身所具有的生化反应能力,尤其对有机物消耗去向的相关研究较少。为此,本研究针对城市污水管网中有机物的消耗流向,建立了一套模拟城市污水管网,用以研究城市污水管网中不同生化作用的基质流向特性。

1 材料与方法

1.1 实验装置

本次实验所用反应器为城市污水模拟管网^[19],位于西安市第五污水处理厂区内,以西安市城市污水为原水,反应器由管径为 200 mm 的有机玻璃质圆形管道组成,总有效长度 32 m,分四层管段设置,管道可调节坡度,并设有循环水箱和回流管。为模拟实际管网避光恒温的真实环境,在管道外层包裹有 2 cm 厚的黑色保温材料。为控制管道内污水流速和流量,在进水管和回流管上安装有阀门,通过调节阀门的开启度,实现流速和流量的控制。

1.2 模拟实验条件及进水水质

1.2.1 实验条件

污水管网模拟装置在室温条件下运行,实验温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,装置密封性良好,溶解氧为 $(0.3 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。实验进水通过污水管道内放置的潜污泵提升至模拟管网系统的循环水箱,之后在模拟管网系统中进行内循环以模拟实际城市污水管网。

1.2.2 进水水质

实验进水为西安市城市污水管网中的生活污

水,TCOD(总有机物)为 $417 \sim 730 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;TN(总氮)为 $39.80 \sim 61.72 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;TP(总磷)为 $6.95 \sim 9.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;pH 为 $6.5 \sim 7.50$ 。

1.3 样品采集

实验第一阶段采用污水与实际沉积物的组合,模拟污水管网在持续运行 180 d 后,由于颗粒态物质的沉降,会在管道底部形成厚度约为 60 mm 的沉积层,设置污水流速为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,运行时间为 25 d;实验第二阶段在模拟城市污水管网中铺设人工配置的石英砂与高岭土,模拟实际管道沉积物^[20],用以研究仅在沉积作用与吸附作用下模拟污水管网中污染物质的变化,消除了沉积物中污染物反向释放对污水水质的影响,铺设厚度为 60 mm,铺设沉积物密实度与实际污水管道沉积物相似,用灭菌污水运行反应器,并去除管壁生物膜,设置污水流速为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,运行时间为 61 d。

在第一阶段和第二阶段实验中,污水在模拟城市污水管网中停留的时间为 14 h,即每天 08:00 给模拟污水管网换新污水,运行 15 min 稳定后,在取样口采集进水样品、沉积物样品和甲烷气体;每天 22:00 在取样口采集出水样品、沉积物泥样和甲烷气体。

1.4 分析方法

CH_4 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°C ,保持 10 min。 N_2 作为尾气,流速为 $10.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。 Ar 作为载气,流速为 $48 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。使用标准气体混合气校准,其组分为 37% CO_2 、4% N_2 、0.802% H_2 以及 CH_4 。

化学需氧量 COD 采用重铬酸钾法测定;总氮采用碱性过硫酸钾消解法测定;总磷采用钼锑抗分光光度法测定^[21]。

实验所取样品均为随取随测,每个取样点的分析都设置 3 组平行样测定,取平均值作为最终的有效数据。

1.5 研究方法

在污水缓流状态($v = 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)下的模拟管网中,导致 COD 发生变化的原因有两方面。其一,污水流速较慢,部分吸附在颗粒态物质表面的含碳有机物会沉降于模拟管网的沉积层表面,导致 COD 发生变化;其二,含碳有机物作为微生物的主要营养物质,通过其新陈代谢作用被降解与消耗,从而导致 COD 发生变化,其中厌氧发酵产甲烷、反硝化

作用和硫酸盐还原菌还原硫酸根是 3 个主要降解途径. 要探索在生化作用中的基质流向, 需要知道生化作用导致的 COD 变化量, 以及在厌氧发酵产甲烷、反硝化作用和硫酸盐还原菌还原硫酸根作用中 COD 分别被消耗了多少.

1.5.1 生化作用导致 COD 的变化量

本次实验分为了两个阶段进行. 第一个阶段采用污水和城市污水管网沉积物的组合, 通过测量进水、出水的 COD, 可得到 COD 的总变化量; 第二阶段采用污水和人工配置沉积物的组合, 通过测量沉积物中 COD 的变化, 可得到因沉积作用而导致的 COD 变化量. 已知在缓流状态下, COD 的变化是沉积作用与生化因素共同作用的结果, 因此, 生化作用导致 COD 的变化量为 COD 总变化量与沉积作用导致 COD 变化量的差值.

1.5.2 发酵产甲烷与 COD 变化量的关系

在模拟污水管网中, 产甲烷细菌只能利用“三甲一乙”(甲酸、甲胺、甲醇和乙酸)和氢气与二氧化碳产甲烷^[16, 22]. 而以乙酸为底物的甲烷合成途径占总甲烷产量的 60%, 以氢和二氧化碳为底物的占 30%, 以甲基化合物为底物的占 10%^[23]. 设总甲烷量为 $M_{\text{甲烷}}$ (mL), 因为乙酸脱羧产甲烷的过程中, 甲烷的碳原子来自于乙酸 (CH_3COOH) 的甲基, 即产 1 mol 甲烷需消耗 1 mol 的乙酸, 60% 的总甲烷量所对应的乙酸量应为 $M_{\text{乙酸}}$ (mg):

$$M_{\text{乙酸}} = 60 \times \frac{0.6M_{\text{甲烷}}}{24.45} = 1.47M_{\text{甲烷}} \quad (1)$$

则对应消耗的污水中的乙酸浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 为:

$$\rho_{\text{乙酸}} = \frac{M_{\text{乙酸}}}{V_{\text{污水}}} = \frac{1.47M_{\text{甲烷}}}{V_{\text{污水}}} \quad (2)$$

式中, 乙酸的摩尔质量为 $60 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; 20°C 下气体的摩尔体积为 $24.45 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$. $V_{\text{污水}}$ 为管道内污水体积 (L). 因此, 用 COD 表征的乙酸浓度, 即以乙酸为底物发酵产甲烷使得 COD ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 产生的变化量为:

$$\Delta\text{COD}_{\text{乙酸}} = 1.07\rho_{\text{乙酸}} = \frac{M_{\text{乙酸}}}{V_{\text{污水}}} = \frac{1.57M_{\text{甲烷}}}{V_{\text{污水}}} \quad (3)$$

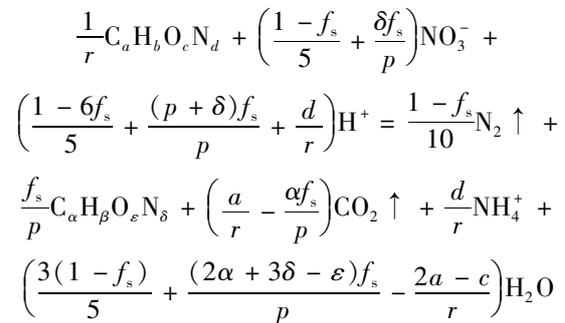
因此, 发酵产甲烷消耗的 COD 总量为:

$$\Delta\text{COD}_{\text{发酵}} = \frac{\Delta\text{COD}_{\text{乙酸}}}{0.6} = \frac{2.62M_{\text{甲烷}}}{V_{\text{污水}}} \quad (4)$$

1.5.3 反硝化作用与 COD 变化量的关系

反硝化细菌进行反硝化作用, 有机物作为碳源被转化. 在反硝化过程中, 含碳有机物作为碳源被转化为反硝化细菌的细胞物质, 设含碳有机物的平

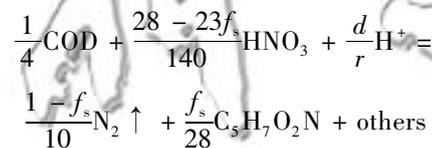
均分子式为 $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$, 细胞物质平均分子式为 $\text{C}_\alpha\text{H}_\beta\text{O}_\varepsilon\text{N}_\delta$, 同时 NO_3^- 被转化为 N_2 , 实现了污水的脱氮净化. 有如下化学计量关系^[24]:



式中, f_s ($f_s < 1$) 是反映细胞物质合成的参数, 由生化作用消耗的 COD 与进水硝态氮浓度的比值 (计做 ξ) 决定其值的大小, $r = 4a + b - 2c - 3d$, $p = 4\alpha + \beta + 5\delta - 2\varepsilon$. 则 f_s 与 ξ 的关系为:

$$\xi = \frac{20p}{7p - 7f_s(p - 5\delta)} \quad (5)$$

上述反应中, $1/r \text{ C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$ 提供 1 mol 电子需要 $1/4 \text{ mol}$ 氧气, 因此, 用化学需氧量表征的碳源消耗为 $1/4 \text{ COD}$. 而厌氧条件下的细胞物质平均分子式可表示为 $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$, 所以, 将上述反应式改写为:



因此, 设 NO_3^- -N 浓度为 $M_{\text{NO}_3^- \text{-N}}$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 则消耗的 COD 为:

$$\Delta\text{COD}_{\text{反硝化}} = 160 \times \frac{M_{\text{NO}_3^- \text{-N}}}{9(28 - 23f_s)} \quad (6)$$

并且 $p = 28$, $\delta = 1$, 因此:

$$\xi = \frac{80}{28 - 23f_s} \quad (7)$$

由式(7)得到:

$$f_s = \frac{28}{23} - \frac{80}{23\xi} \quad (8)$$

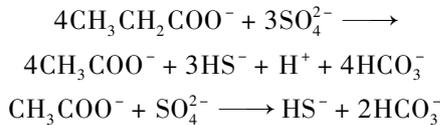
所以:

$$\Delta\text{COD}_{\text{反硝化}} = \frac{2\xi M_{\text{NO}_3^- \text{-N}}}{9} \quad (9)$$

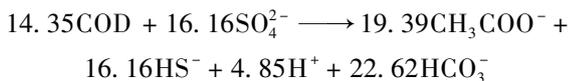
1.5.4 硫酸盐还原菌还原硫酸根作用与 COD 变化量的关系

硫酸盐还原菌 (SRB) 将硫酸盐还原为硫化氢 (H_2S) 的过程中, 有机物作为电子供体被消耗^[25, 26]. 根据宋秀兰等^[27]的研究, 硫酸盐还原菌

还原硫酸盐所消耗的基质中, 60.97% ~ 96.36% 为丙酸, 2.16% ~ 9.46% 为乙酸, 丙酸消耗量与乙酸消耗量的比例接近 10:1. 两种基质参与的硫酸盐还原过程的化学方程式如下:



将丙酸和乙酸分别用 COD 进行表征, 表征系数为 1.07 倍的乙酸量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 1.51 倍的丙酸量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 即:



设所测得硫酸根的量 $M_{\text{SO}_4^{2-}}$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 则:

$$\Delta\text{COD}_{\text{硫酸盐还原}} = 0.3M_{\text{SO}_4^{2-}} \quad (10)$$

2 结果与讨论

2.1 污水管网中有机污染物的沉降、生化代谢规律

模拟污水管网中污水总 COD 的变化量与沉积作用导致 COD 的变化量如图 1 和图 2 所示. 反应器运行第一阶段, 模拟污水管网中铺设了实际城市污水管网中的沉积物, 污水在 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速状态下, 经过 14 h 的水力停留时间, 污水中总 COD 的平均变化量为 $170.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 反应器运行第二阶段, 实际城市污水管网中的沉积物更换为人工配置沉积物, 用灭菌污水运行反应器, 并去除管壁生物膜, 使得管网中仅由沉积作用导致 COD 发生变化, 由此得到因沉积作用导致污水中 COD 的平均变化量为 $101.53\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 可见模拟污水管网中的污水在缓流状态下流动时, 沉积作用是导致 COD 变化的主要原因, 这一变化量占 COD 总变化量的 59.52%; 而沉积物向污水中释放有机污染物导致的 COD 变化很小, 可忽略不计. 因此, 污水在缓流状态下, 主要是污水中的有机污染物向沉积层中迁移, 沉积作用起了主导作用.

有机物在模拟污水管网中因沉积作用向沉积层转移的同时, 也作为微生物的主要营养物质, 通过微生物的新陈代谢作用而被降解转化. 因此, 在缓流状态下, 模拟污水管网中有机物的变化是沉积作用与生化作用共同作用的结果, 即模拟管网中由生化作用导致 COD 的总变化量为总 COD 变化量与沉积变化量之差, 为 $69.05\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 结果表明, 管网中存在的生化代谢过程也是污水中 COD 降解消耗的重要源头, 因此, 在管网厌氧条件下, 本研究对厌氧发酵产甲烷、反硝化作用和硫酸盐还原的 3 种

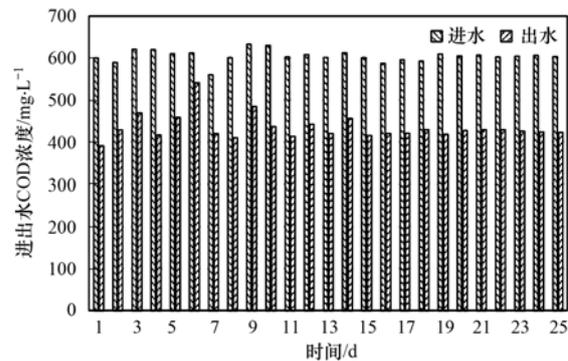


图1 污水管网进、出污水中 COD 的变化量

Fig. 1 COD variation of influent and effluent in sewer system

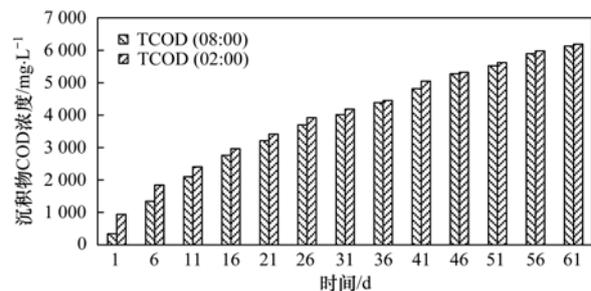


图2 污水管网沉积物中 COD 的变化量

Fig. 2 Variation of COD in sewer sediment

生化代谢过程中有机质的流向特性开展了进一步的研究.

2.2 厌氧发酵产甲烷降解转化的有机物质

反应器运行第一阶段, 在模拟污水管网中铺设实际城市污水管网中的沉积物, 使污水在 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流速状态下流动 14 h, 得到在这一时间段内甲烷的产量, 如图 3 所示. 在模拟污水管网中, 根据产甲烷菌所能利用的基质乙酸、氢和二氧化碳与甲基化合物, 及 3 种基质在产甲烷时所被消耗的比例关系, 得到了模拟管网中甲烷的产量与消耗的 COD 之间的关系, 如式(4).

模拟污水管网中的污水与沉积物中的有机质共同发酵产生的甲烷平均产量为 $12.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (20°C 下的体积为 $19.41\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$); 而单独由沉积物中基质在 14 h 内的甲烷平均产率为 $0.91\text{ g}\cdot\text{m}^{-2[17]}$, 模拟污水管网中沉积物的铺设面积为 5.87 m^2 , 模拟污水管网总容积为 $1\,004.8\text{ L}$, 气相体积为 472.37 L , 污水体积为 429.43 L , 因此, 单独消耗沉积物中有机物所产生的甲烷为:

$$M_{\text{沉积物甲烷}} = 0.91 \times 5.87 \times \frac{1\,000}{1\,004.8} = 5.32\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$$

其换算为 20°C 下的体积为 $8.13\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$, 所

以,在污水管道内每天由污水产生的甲烷总量为:

$$M_{\text{甲烷}} = (19.41 - 8.013) \times 472.37 = 5328.33 \text{ mL}$$

由此,根据式(4)可得到发酵产甲烷导致的污水 COD 消耗量为 $32.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

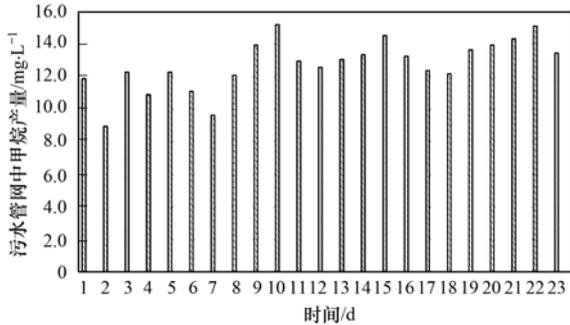


图3 污水管网中甲烷产量
Fig. 3 Methane production in sewer system

2.3 反硝化作用降解转化的有机物量

反应器运行第一阶段,实验得到了进、出水硝态氮浓度及进、出水时沉积物中所含硝态氮浓度,如图4和图5所示.模拟污水管网中的反硝化细菌在进行反硝化作用过程中,污水及沉积物中的含碳有机物为反硝化细菌提供了碳源,在此过程中,含碳有机物被消耗,导致污水 COD 降低,硝态氮被转化为了氮气,污水中硝态氮浓度降低,污水水质发生变化.

根据图4和图5数据,进水硝态氮浓度的平均值为 $0.63 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水硝态氮浓度的平均值为 $0.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硝态氮在水力停留时间内的平均变化量为 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;进水时沉积物中硝态氮平均浓度为 $0.17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水时沉积物中硝态氮平均浓度为 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均减少了 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由于沉积物中硝态氮浓度测定是沉积物间隙水中硝态氮,可以看出沉积物中硝态氮浓度非常低,在计算沉积物中硝态氮参与反硝化细菌的反硝化作用时可忽略不计.因此,根据式(9),可得到反硝化作用消耗污水中的 COD 为 $8.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.4 硫酸盐还原菌还原硫酸根降解转化的有机物量

反应器运行第一阶段,通过实验,测得了进、出水中硫酸根的浓度及进、出水时沉积物中所含硫酸根浓度,如图6和图7所示.在模拟污水管网中,硫酸盐还原菌将污水及沉积物中的硫酸根还原为了硫化氢气体,在此过程中,含碳有机物作为碳源被消耗,导致污水中 COD 降低,污水水质发生变化.根据图6与图7数据,进水硫酸根浓度的平均值为

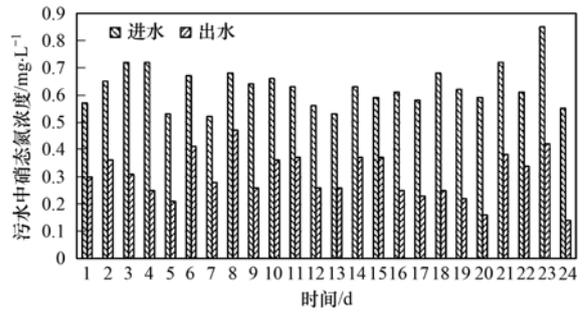


图4 污水管网进、出水硝态氮含量

Fig. 4 Nitrate variations in influent and effluent in sewer system

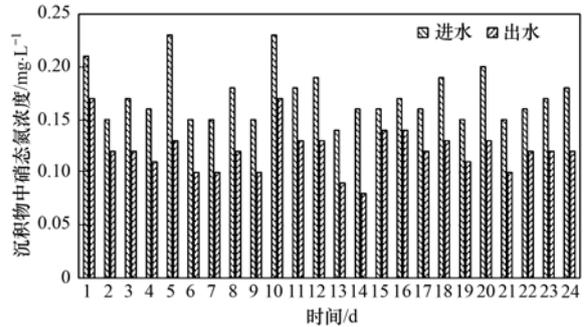


图5 污水管网进、出水时沉积物中硝态氮含量

Fig. 5 Variations in nitrate in sewer sediment

$64.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水硫酸根浓度的平均值为 $43.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,硫酸根在水力停留时间内的平均变化量为 $21.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;进水时沉积物中硫酸根平均浓度为 $10.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水时沉积物中硫酸根平均浓度为 $7.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均减少了 $2.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,相对于污水中的硫酸根浓度变化较小,可忽略不计.因此,根据式(10),可得到硫酸盐还原菌还原硫酸根消耗污水的 COD 为 $6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

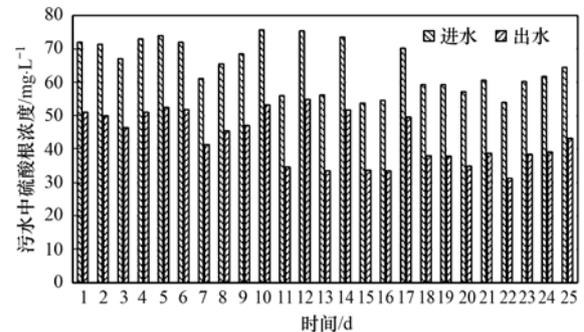


图6 污水管网进、出水硫酸根含量

Fig. 6 Sulfate variations in influent and effluent of the sewer system

结合上述 COD 的总变化量、沉积作用导致的 COD 变化量和生化作用导致的 COD 变化量可以看出,模拟城市污水管网中的污水在缓流状态下流动 14 h,污水 COD 的总变化量为 $170.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其中因沉积作用导致 COD 变化为 $101.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,占

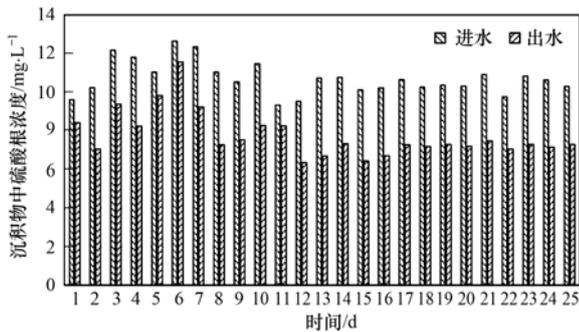


图7 污水管网进、出水时沉积物中硫酸根含量

Fig. 7 Variation in sulfate in sewer sediment

COD 总变化量的 59.52%；生化作用导致 COD 变化为 $69.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，发酵产甲烷、反硝化作用和硫酸盐还原菌还原硫酸盐作用分别消耗的 COD 为 32.51 、 8.04 和 $6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，总共占生化作用消耗 COD 的 68.01%。可见，在模拟城市污水管网中污水以缓流状态运行 14 h，其中的有机污染物的去除方式以沉积作用为主；而在生化作用消耗的有机物中，以发酵产甲烷、反硝化作用和硫酸盐还原菌还原硫酸盐作用为主。

3 结论

(1) 通过研究模拟城市污水管网中 COD 的变化规律，得到沉积作用导致的 COD 变化占到污水 COD 总变化的 65.38%，生化作用导致的 COD 变化占到污水 COD 总变化的 34.62%。这一结果表明，在污水缓流状态下，沉积作用是去除城市污水管网中有机污染物的主要原因，而生化作用也是有机污染物去除的重要途径。

(2) 在模拟污水管网的厌氧环境中，发酵产甲烷作用消耗的 COD 为 $32.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，反硝化消耗的 COD 为 $8.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，硫酸盐还原菌还原硫酸盐消耗的 COD 为 $6.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此，对有机基质的消耗，产甲烷菌的产甲烷作用是主要途径，其次是反硝化细菌的反硝化作用，最后是硫酸盐还原菌还原硫酸盐。

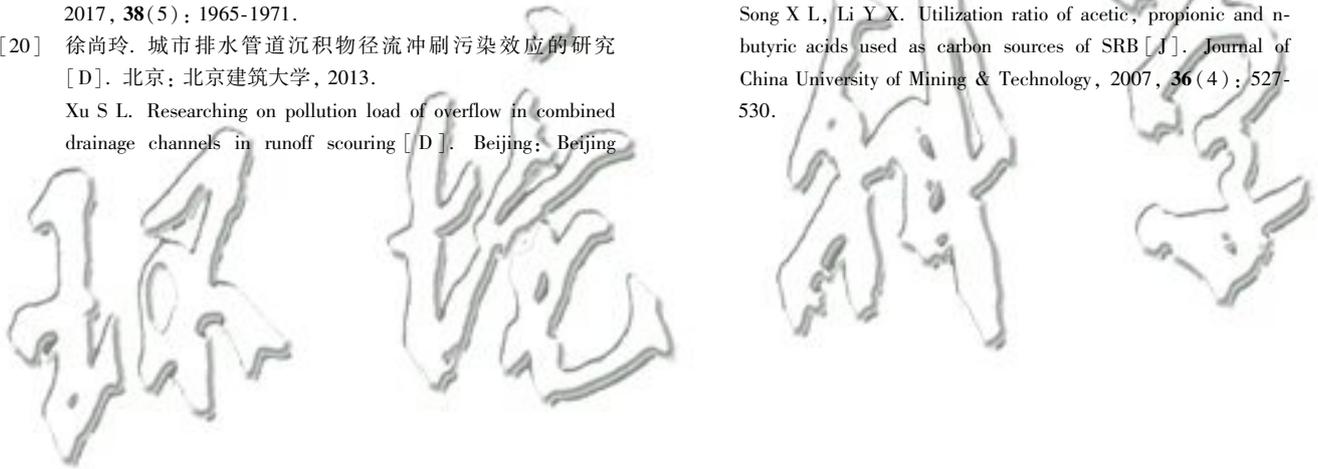
(3) 在城市污水管网中，发酵产甲烷作用、反硝化作用和硫酸盐还原菌还原硫酸盐作用消耗的 COD 总共占生化作用消耗 COD 的 68.01%，再加之污水流速较小时，沉积作用也会导致污水中有机污染物的减少，这就会造成污水处理厂进水碳源不足的问题。

参考文献:

[1] 周玉文. 城市排水管网事业面临的新挑战[J]. 给水排水, 2003, 29(2): 1.

- [2] 叶娟. 浅议城市排水管网的建设[J]. 中国市政工程, 2004, (2): 39-40.
Ye J. On construction of urban drainage pipe system[J]. China Municipal Engineering, 2004, (2): 39-40.
- [3] 高原, 王红武, 张善发, 等. 合流制排水管道沉积物及其模型研究进展[J]. 中国给水排水, 2010, 26(2): 15-18, 27.
Gao Y, Wang H W, Zhang S F, et al. Current research progress in combined sewer sediments and their models[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(2): 15-18, 27.
- [4] Hvitved-Jacobsen T, Raunkjaer K, Nielsen P H. Volatile fatty acids and sulfide in pressure mains[J]. Water Science and Technology, 1995, 31(7): 169-179.
- [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] 金鹏康, 郝晓宇, 王宝宝, 等. 城市污水管网中水质变化特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 1009-1014.
Jin P K, Hao X Y, Wang B B, et al. Characteristics of water quality variation in sewer networks [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 1009-1014.
- [7] Heaney J P, Wright L, Sample D, et al. Innovative wet-weather flow collection/control/treatment systems for newly urbanizing areas in the 21st century [A]. In: Rowney A C, Stahre P, Roesner L A, et al (Eds.). Sustaining Urban Water Resources in the 21st Century [M]. New York: American Society of Civil Engineers, 1999.
- [8] 金鹏康, 卞晓崢, 焦丁, 等. 城市污水管网污染物沉积与冲刷释放规律研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(5): 253-257.
Jin P K, Bian X Z, Jiao D, et al. On the pollutant deposition and erosion release in the urban sewer networks [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(5): 253-257.
- [9] 孙力平, 马耀平, 侯红娟, 等. 下水道中污染物质的转化过程[J]. 中国给水排水, 2001, 17(9): 67-69.
Sun L P, Ma Y P, Hou H J, et al. Discussion on the pollutants transformation in sewer [J]. China Water & Wastewater, 2001, 17(9): 67-69.
- [10] Elmaleh S, Delgado S, Alvarez M, et al. Forecasting of H₂S build-up in a reclaimed wastewater pipe [J]. Water Science and Technology, 1998, 38(10): 241-248.
- [11] 王宝宝, 金鹏康, 郝晓宇, 等. 城市污水管网中污染物转化规律的模拟研究 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(15): 24-27.
Wang B B, Jin P K, Hao X Y, et al. Simulation study on transformation of pollutants in urban sewer network [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(15): 24-27.
- [12] 黄满红, 李咏梅, 顾国维. 生活污水典型有机污染物与 ASMs 模型水质特性参数相关性研究 [J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1499-1505.
Huang M H, Li Y M, Gu G W. Relationship between typical organic matters in domestic wastewater and water characteristic parameters in activated sludge models [J]. Environmental Science, 2009, 30(5): 1499-1505.
- [13] 金鹏康, 常晋, 王先宝, 等. 不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 [J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3443-3448.
Jin P K, Chang J, Wang X B, et al. Variation of different carbon sources in the sewage treatment process [J]. Environmental

- Science, 2014, **35**(9): 3443-3448.
- [14] Hvitved J T. Sewer processes: microbial and chemical process engineering of sewer networks [J]. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*, 2003, **53**: 1689-1699.
- [15] 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.
- [16] 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 等. 城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2252-2258.
Sun G X, Jin P K, Song J N, *et al.* Distribution characteristics of methanogens in urban sewer system [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2252-2258.
- [17] Liu Y W, Ni B J, Ganigué R, *et al.* Sulfide and methane production in sewer sediments[J]. *Water Research*, 2015, **70**: 350-359.
- [18] Almeida M C, Butler D, Matos J S. In-sewer biodegradation study at the Costa do Estoril interceptor system [J]. *Urban Water*, 2000, **2**(4): 327-334.
- [19] 桑浪涛, 石烜, 张彤, 等. 城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1965-1971.
Sang L T, Shi X, Zhang T, *et al.* Law of pollutant erosion and deposition in urban sewage network[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1965-1971.
- [20] 徐尚玲. 城市排水管道沉积物径流冲刷污染效应的研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
Xu S L. Researching on pollution load of overflow in combined drainage channels in runoff scouring [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 方晓瑜, 李家宝, 芮俊鹏, 等. 产甲烷生化代谢途径研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, **21**(1): 1-9.
Fang X Y, Li J B, Rui J P, *et al.* Research progress in biochemical pathways of methanogenesis[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, **21**(1): 1-9.
- [23] 单丽伟, 冯贵颖, 范三红. 产甲烷菌研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2003, **23**(6): 42-46.
Shan L W, Feng G Y, Fan S H. Progress in genome and methanogenesis of methanogens [J]. *Journal of Microbiology*, 2003, **23**(6): 42-46.
- [24] Zhou S Q. Theoretical stoichiometry of biological denitrifications [J]. *Environmental Technology*, 2001, **22**(8): 869-880.
- [25] Barton L L. Sulfate-reducing bacteria [M]. Boston, MA: Springer, 1995. 1011-1015.
- [26] Sharma K R, Yuan Z G, De Haas D, *et al.* Dynamics and dynamic modelling of H₂S production in sewer systems [J]. *Water Research*, 2008, **42**(10-11): 2527-2538.
- [27] 宋秀兰, 李亚新. 乙酸、丙酸和丁酸为SRB碳源时的利用率 [J]. *中国矿业大学学报*, 2007, **36**(4): 527-530.
Song X L, Li Y X. Utilization ratio of acetic, propionic and n-butyric acids used as carbon sources of SRB [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2007, **36**(4): 527-530.



CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-jiang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)