

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

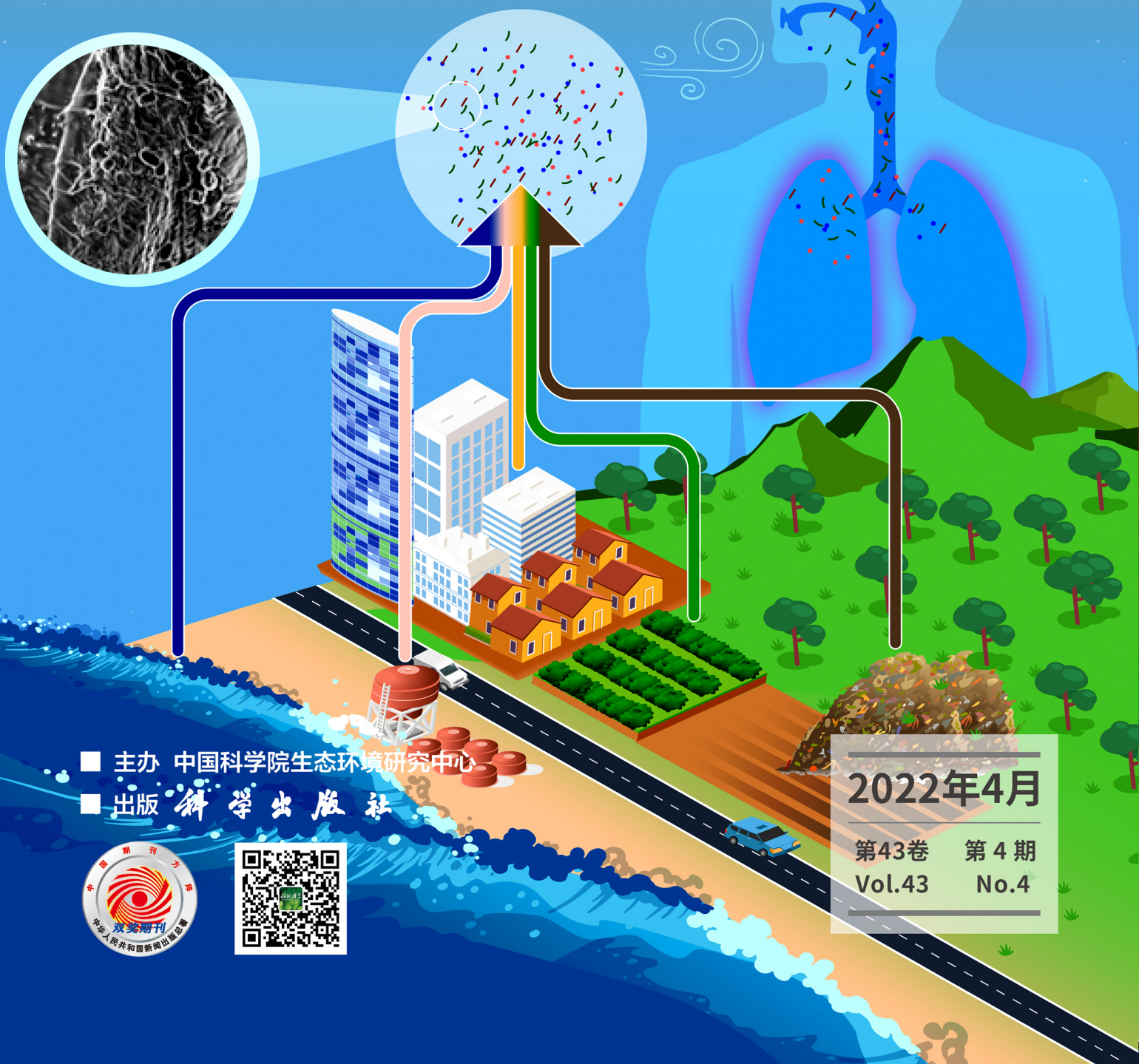
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期  
Vol.43 No.4

# 目次

|                                                                     |                                                      |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 2015~2019年河南省PM <sub>2.5</sub> 时空特征与驱动因素分析                          | 葛昱序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)                              |
| 郑州市大气PM <sub>2.5</sub> 中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据                 | 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)          |
| 宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析                                               | 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)               |
| 上海城区PM <sub>2.5</sub> 中有机组分及硝基芳香化合物分布特征                             | 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725) |
| 南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源                                            | 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新峰, 盖鑫磊 (1738)             |
| 春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化                                            | 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)                |
| 重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势                                          | 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)      |
| 珠三角石化园区VOCs排放特征及影响评价                                                | 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)   |
| 基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析                                              | 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)          |
| 基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源                                       | 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)                      |
| 基于SOA和O <sub>3</sub> 生成潜势的杭州市PM <sub>2.5</sub> 和O <sub>3</sub> 协同控制 | 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)                             |
| 超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响                                       | 王鹏程, 袁畅, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)         |
| 西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应                                               | 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)                              |
| 大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性                                    | 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)                          |
| 基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征                                         | 高宗源, 徐昶, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)     |
| 西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征                                                   | 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)                      |
| “三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析                                         | 廖雅, 侯晓妹, 任晓红 (1853)                                  |
| 中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重                                              | 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)        |
| 新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系                                       | 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)        |
| 珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素                                           | 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)                 |
| 河套灌区浅层地下水NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N时空变化及驱动因素                   | 袁宏颖, 杨树青, 张万峰, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)                   |
| 盐城地区地下水溶质来源及其成因分析                                                   | 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)                             |
| 白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义                                                | 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)                            |
| 东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素                                         | 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)              |
| 松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性                                                  | 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)                         |
| 区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响                                       | 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)           |
| 南北水调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素                                         | 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)          |
| 千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价                                      | 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)         |
| 蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险                                                | 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)                   |
| 基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价                                                 | 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)               |
| 小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响                                               | 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)       |
| 不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响                                         | 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)              |
| 南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析                                                 | 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)                     |
| 老化作用对微塑料吸附铅的影响及其机制                                                  | 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)   |
| 碳化泡沫负载Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 活化过硫酸盐降解罗丹明B                   | 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)                          |
| 低总氮浓度下Fe <sup>2+</sup> 促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮                            | 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)                  |
| 污水管道增强通风作用下臭气气液传质特性                                                 | 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)                              |
| 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价                                                | 张义, 周心功, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣 (2062)                         |
| 中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义                                           | 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)                            |
| 贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素                               | 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)                              |
| 地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征                                       | 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)                    |
| 矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价                                                | 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)                    |
| 农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价                                              | 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)                                  |
| 安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析                                                  | 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)                                 |
| 方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果                                               | 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)           |
| 伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响                                                | 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)         |
| 我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性                                           | 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)                              |
| 地膜覆盖和生物炭添加对菜地N <sub>2</sub> O排放的影响                                  | 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)                        |
| 氮肥运筹对稻田CH <sub>4</sub> 和N <sub>2</sub> O排放的影响                       | 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)                   |
| 松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性                                        | 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)                                  |
| 棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响                                       | 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)                          |
| pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响                                            | 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)                             |
| 生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响                                             | 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)                   |
| 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响                                          | 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)         |
| 九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征                                 | 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)        |
| 碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望                                            | 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)                             |
| 《环境科学》征订启事(1929)                                                    | 《环境科学》征稿简则(1975)                                     |
| 信息(1996, 2029, 2080)                                                |                                                      |

# 污水管道增强通风作用下氧气体液传质特性

杨洲<sup>1,2</sup>, 张志强<sup>1,2</sup>, 杨静<sup>1,2</sup>, 卢金锁<sup>1,2\*</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055)

**摘要:** 污水管道的厌氧环境是诱发  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CH}_4$  等有毒有害气体产生的主要原因, 结合我国污水收集系统内建筑排水立管与市政污水管道之间设置化粪池加剧了污水管道通风不畅的现状, 提出将建筑排水立管与污水管道直连形成的增强通风系统能够有效提高污水管道通风量, 来改善管道气相空间环境. 在此基础上, 结合实验和计算流体动力学 (CFD) 仿真方法, 以污水管道内污水流速和气相风速为出发点, 对污水管道内不同污水流速和不同气相风速条件下氧气体液传质规律进行探究, 旨在寻求增强管道内氧气传质的方法, 实现长期抑制管道内厌氧环境, 达到长久控制污水管道有害气体的目的. 结果表明, 增强气液两相流速均能强化氧气体液传质的能力, 气液流速平均每增加  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 氧体积分质系数  $K_L a$  增加  $3.5 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ ; 而较快的污水流速会降低水力停留时间, 既而缩短氧气的两相传质时间, 整体促进效果不如增强管道内气相风速. 同时, 以抑制  $\text{H}_2\text{S}$  产生的污水溶解氧浓度为评价指标, 气相风速平均每增加  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 有效控制  $\text{H}_2\text{S}$  的溶解氧管段长度增加 25 m.

**关键词:** 污水管道; 增强通风; 污水流速; 气相风速; 氧气传质

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-2055-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202107083

## Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation

YANG Zhou<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, YANG Jing<sup>1,2</sup>, LU Jin-suo<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The anaerobic environment of sewers is the main cause of the production of toxic and harmful gases such as hydrogen sulfide and methane. The installation of septic tanks between the drainage standpipes and municipal sewage pipes has aggravated the current situation of poor ventilation in sewage pipes. A system of enhanced ventilation has been formed. By connecting the drainage standpipes and sewage pipes, the system of enhanced ventilation can ameliorate the ventilation of sewage pipes and improve the gas-phase space environment. The experimental and computational fluid dynamics (CFD) simulation methods were established to explore the law of oxygen gas-liquid mass transfer under the different sewage flow rates or wind speeds. This study aimed to seek a method to enhance the oxygen mass transfer, suppress the anaerobic environment, and achieve the purpose of long-term control of harmful gases. The results showed that increasing the gas-liquid flow rates can accelerate the oxygen mass transfer, and the volumetric mass transfer coefficient increased by  $3.5 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$  for every increase of  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . However, the faster sewage reduced hydraulic retention time. The mass transfer time of oxygen was also shortened, and the promotion effect was not as good as that by enhancing the gas velocity in the pipelines. At the same time, when the average gas velocity increased by  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the lengths of pipes where dissolved oxygen could effectively inhibit  $\text{H}_2\text{S}$  increased by 25 m.

**Key words:** sewage pipelines; enhanced ventilation; sewage flow rate; wind speed; oxygen mass transfer

城市污水管道系统是一个相对密闭的空间体系, 在长距离输送污水过程中, 氧气被不断消耗且难以得到有效地补充, 容易形成厌氧环境. 管道内厌氧环境有利于厌氧菌的滋生和繁殖, 产生  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{S}$  等有毒有害气体, 进一步造成管道腐蚀和爆炸等问题, 给市政维护带来不利影响<sup>[1,2]</sup>. 如部分压力流污水管道中液态  $\text{CH}_4$  浓度高达  $20 \sim 25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而  $\text{CH}_4$  易燃, 易与空气混合形成爆炸性气体<sup>[3]</sup>.  $\text{H}_2\text{S}$  普遍存在于污水管道中, 浓度分布不均匀, 但其是一种强烈的神经性毒素,  $\varphi(\text{H}_2\text{S})$  达 0.07% 可以致人死亡, 严重危害工作人员的健康安全<sup>[4,5]</sup>. 此外, 污水管道中产生并释放的  $\text{H}_2\text{S}$  还可以吸附在混凝土管壁上造成腐蚀<sup>[6]</sup>.

目前, 针对污水管道有害气体常见的控制措施有: ①投加氧化剂, 提高污水的氧化还原电位 (ORP), 抑制厌氧菌的活性, 如鼓风曝气等<sup>[7]</sup>. ②投

加金属离子盐形成难溶的金属盐去除硫化物, 如铁盐等<sup>[8]</sup>. ③提高 pH 值, 破坏微生物的生存环境<sup>[9]</sup>. ④使用生物抑制剂或灭菌剂, 如投加钼酸盐和亚硝酸盐等<sup>[10]</sup>. 但是, 这些控制措施普遍缺乏长久的控制效果, 一旦药剂没有及时补充, 有害气体的产量会在短时间内迅速提升, 甚至高于控制前的产量. 此外, 这些控制措施也会导致额外的能量损耗和成本增加<sup>[11]</sup>.

为了减少污水管道内  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CH}_4$  等有毒有害气体产生和积累, 降低控制成本和潜在风险, 结合我国污水收集系统内建筑排水立管与市政污水管道之间设置化粪池加剧了污水管道通风不畅的现状. Lu

收稿日期: 2021-07-09; 修订日期: 2021-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51778523, 52000146)

作者简介: 杨洲 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市排水管网优化, E-mail: Yangzhou\_18@163.com

\* 通信作者, E-mail: lujinsuo@xauat.edu.cn

等<sup>[12]</sup>提出一种增强通风系统,如图 1 所示,通过取化粪池,将建筑排水立管与市政污水管道直接相连,使通过卫生器具排水形成负压而吸入的新鲜空气输送至污水管道,实现增强污水管道内的自然通风. 张二飞等<sup>[13]</sup>探究了建筑排水立管与污水管道直连系统的气流规律,发现立管吸入的新鲜空气有 94% 进入污水管道顶部空间. 在建筑排水立管与市政污水管道直连的基础上,通过在上下游建筑立管顶部安装风机,上游立管向内鼓入新鲜气体,下游立管向外排出气体,就可以实现污水管道内的持续通风.

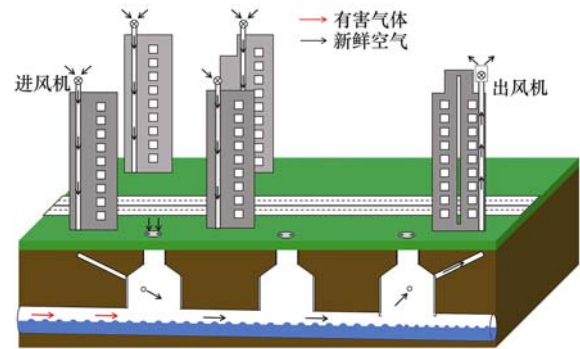


图 1 增强通风系统示意图  
Fig. 1 System diagram of enhanced ventilation

基于建筑排水立管与污水管道直连技术,污水管道内气相环境得以改善,氧气浓度增加. 因此,污水管道内氧气的气液传质成为限制建筑立管与污水管道直连技术控制液相内厌氧环境的关键因素. 本文从污水管道的污水流速和气相风速为出发点,探究污水流速和气相风速对氧气气液传质的影响,以寻求增强管道内氧气传质的办法,实现长期抑制管道内厌氧环境,达到长久控制污水管道有害气体的目的.

1 材料与方法

1.1 增强氧气气液传质实验

1.1.1 实验装置

因为现场难以满足实验要求,无法对数据进行有效监测,所以根据实际管道流速所产生的剪切力大小,设计本研究使用的罐式反应器,所用实验装置如图 2 所示. 装置主体由有机玻璃制成,罐体内径为 140 mm,高为 240 mm,反应器侧壁和顶部分别设有溶解氧(DO)探测口、进气口和出气口. 反应器密闭,放置于平稳的磁力搅拌器上,避免外部扰动. 反应器底部放置一个磁力搅拌器转子,顶部内设有扇叶. 同时,反应器外设有水浴加热箱以模拟实际污水管道恒温环境.

1.1.2 实验方法

实际污水管道内水样含有各种无机污染物、有

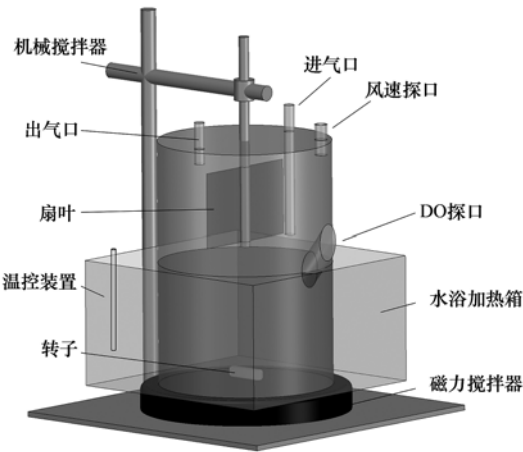


图 2 实验装置示意  
Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

机污染物和微生物等成分,且污水水质会随着时间的推移发生变化<sup>[14]</sup>. 为了得到污水管道内氧气气液传质的基础规律,避免因水质变化产生的随机影响,故将人工配制污水作为本次的实验用水,人工配制污水的主要成分与实际污水类似,见表 1,所以人工配制污水几乎不会影响数据测定. 依据实际重力流污水管道,反应器分为气相和液相两个部分,气液两相各占 50% 用于模拟充满度为 0.5 的污水管道. 污水流速借助反应器底部磁力搅拌器的不同搅拌速度对实际污水管道的污水流速进行模拟<sup>[15]</sup>. 结合污水管道实际情况,将本实验的水流速度设置为 4 个梯度:  $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $95\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )、 $0.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $190\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ )、 $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $285\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 和  $1.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $380\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ). 气相风速则由反应器顶部机械搅拌器转动产生,并通过 Testo-435 风速计实测确定.

本实验包括两个部分,分别是污水流速组和增强气相风速组. 实验设计如表 2 所示,在污水流速组,考虑到水流对气流的拖曳力,将风速设置为污水流速的 0.3 倍<sup>[16]</sup>. 同时,鉴于污水管道的水力停留时间,设增强氧气传质实验时间为 3 h. 实验开始前,将 1.8 L 的纯水加入反应器内,通入高压高纯氮气曝气,待水体 DO 降低至  $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  以下,然后持续通入空气,启动磁力搅拌器和机械搅拌器,开始实验.

表 1 人工配制污水组成成分

| Table 1 Components of artificial sewage |       |                           |    |                                                      |                           |
|-----------------------------------------|-------|---------------------------|----|------------------------------------------------------|---------------------------|
| 序号                                      | 组成成分  | 浓度<br>/mg·L <sup>-1</sup> | 序号 | 组成成分                                                 | 浓度<br>/mg·L <sup>-1</sup> |
| 1                                       | 葡萄糖   | 200                       | 9  | 碳酸氢钠                                                 | 130                       |
| 2                                       | 酵母    | 30                        | 10 | 碳酸氢钾                                                 | 50                        |
| 3                                       | 尿素    | 30                        | 11 | MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                 | 50                        |
| 4                                       | 蛋白胨   | 20                        | 12 | Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O | 25                        |
| 5                                       | 大豆蛋白胨 | 20                        | 13 | NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O | 25                        |
| 6                                       | 胰蛋白胨  | 20                        | 14 | 无水氯化钙                                                | 3                         |
| 7                                       | 酪蛋白胨  | 20                        | 15 | FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O                 | 2                         |
| 8                                       | 氯化铵   | 60                        | 16 | MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O                  | 2                         |

表 2 增强氧气气液传质实验工况  
Table 2 Enhanced oxygen gas-liquid mass transfer  
experimental conditions

| 实验组    | 污水流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 气相流速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|--------|------------------------------------|------------------------------------|
| 污水流速   | 0.3                                | 0.1                                |
|        | 0.6                                | 0.2                                |
|        | 0.9                                | 0.3                                |
|        | 1.2                                | 0.4                                |
| 增强气相风速 | 0.6                                | 0.2                                |
|        |                                    | 0.3                                |
|        |                                    | 0.4                                |
|        |                                    | 0.5                                |
|        |                                    | 0.6                                |
|        |                                    | 0.7                                |
|        |                                    | 0.8                                |
|        |                                    | 0.9                                |

1.1.3 实验参数分析

在实验运行期间,使用哈希便携式溶解氧检测仪检测水体 DO 变化,使用 Testo-435 风速计测定空气流速. 数据统计和图像处理由 Origin Lab 2018 完成.

1.2 CFD 仿真模拟

1.2.1 CFD 模型设计

通过罐体反应器探究管道内氧气传质的一般规律,但是罐体反应器无法呈现实际管道水体中溶解氧的分布规律. 为了解决这个问题,先通过罐体实验装置获得污水管道内氧气传质的基本规律,然后以实验获得的数据为基础,以实际污水管道尺寸为仿真模型,最终得到管道内水体溶解氧具体分布情况. 参照实际污水管道尺寸,选取一段长 30 m,充满度为 0.5 的 DN600 污水管道内液相部分为计算模型. 计算尺寸和边界条件设置如图 3 所示. 同时,为了得到管道内氧气气液传质与分布基础规律,计算模型初始处于完全厌氧状态,且不考虑溶解氧消耗.

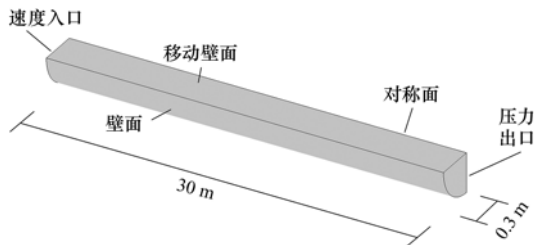


图 3 模型边界条件和计算尺寸示意  
Fig. 3 Model boundary condition, calculation  
dimension and schematic diagram

1.2.2 气-液界面的传质模型与控制方程

在气液交界面,氧气的传质涉及到两相界面运输,因此在气液交界面接入传质模型. 管道内气液交界面仿照 Edwinibonsu 的 CFD 模型设置为可移动的刚面,速度与水流速度一致<sup>[17]</sup>. 氧气的传质以菲克

定律为基础,借助 UDF 以源项的形式添加至组分运输方程实现传质. 组分运输方程如式 (1) 和式 (2) 所示.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_0) + \nabla \cdot (\rho v Y_0) = - \nabla \cdot J_0 + S_0 \quad (1)$$

$$S_0 = K_L \frac{A}{V}(c^* - c) = K_L a(c^* - c) \quad (2)$$

式中,  $Y_0$  为氧在液相中的质量分数;  $J_0$  是质量扩散项;  $S_0$  是相界面的传质源项;  $K_L$  为表面传质系数;  $A$  为气液交界面面积,假设恒定;  $V$  为水体体积;  $c^*$  为饱和氧浓度;  $c$  为液相主体内氧浓度;  $K_L a$  为体积传质系数( $\text{min}^{-1}$ ).

除组分运输模型,CFD 模拟还包括质量守恒方程、能量守恒方程和动量守恒方程等.

1.2.3 CFD 模型验证

网格粗糙度对仿真结果的准确性影响较大. 为了提高计算结果的准确性又能节省计算机资源,在模拟计算前要对网格的无关性进行验证. 通过调整网格大小,观察数据波动情况,以确定模拟结果的准确性和最优的网格数目. 以污水流动过程中底部的压强和溶解氧浓度为检验指标. 如图 4 所示,3 种网格模型的两个检验指标变化幅度均在 5% 以内,可以认为网格数量与模拟结果无关,最终选择 25 万网格模型为计算模型.

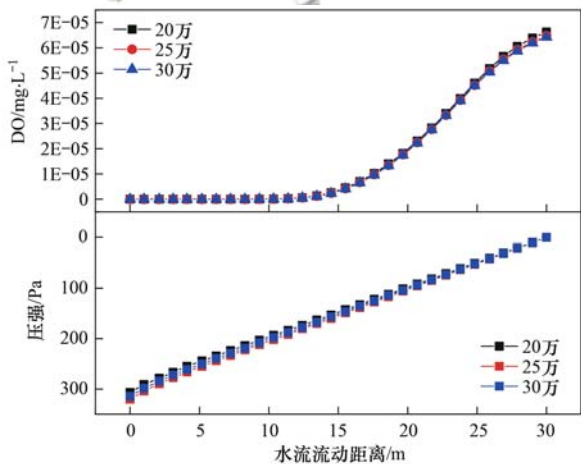


图 4 计算模型网格无关性验证  
Fig. 4 Verification of grid independence of computational model

通过比较单位比表面积氧传质速率对 CFD 模拟的准确性进行定量分析,见图 5. 从中可见,CFD 模拟的单位比表面积氧传质速率略大于实验值,且随着污水流速增加,差值也有所增加. 造成这种现象的原因可能在于 CFD 模型的污水体积远大于实验体积,因而在模型内存在更剧烈的紊流扩散,造成液面溶解氧浓度降低,因而具有更快的氧传质速率. 对比模拟值与实验值,最大误差为 6.3%,由此认为 CFD 模拟设置具有一定准确性.

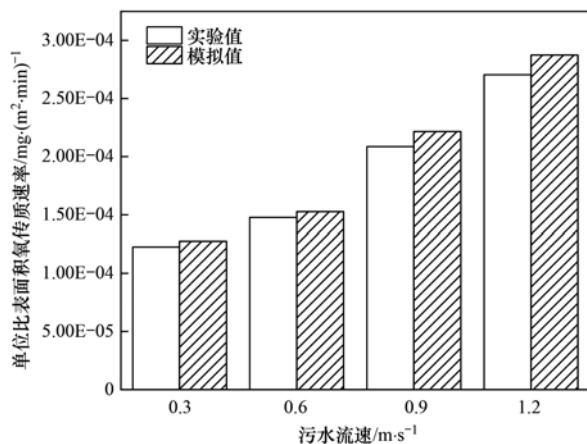


图5 单位比表面积氧传质速率对比

Fig. 5 Comparison of mass transfer rate of oxygen in specific surface area

## 2 结果与讨论

### 2.1 实验结果分析

#### 2.1.1 污水流速对氧传质的影响

反应器运行期间,定期检测水体的溶解氧(DO),以便发现不同污水流速下DO恢复情况,实验结果如图6所示.从DO恢复曲线可以看出,反应器运行期间水体DO含量稳定上升,且污水流速越大,水体DO上升越快.水体DO稳定上升与孙远军等<sup>[18]</sup>的研究认为溶解氧浓度先快速上升,然后缓慢恢复的观点略有不同.这主要原因可能是,其实验周期远大于污水管道的水力停留时间,管道停留时间内水体DO还处于快速上升阶段.

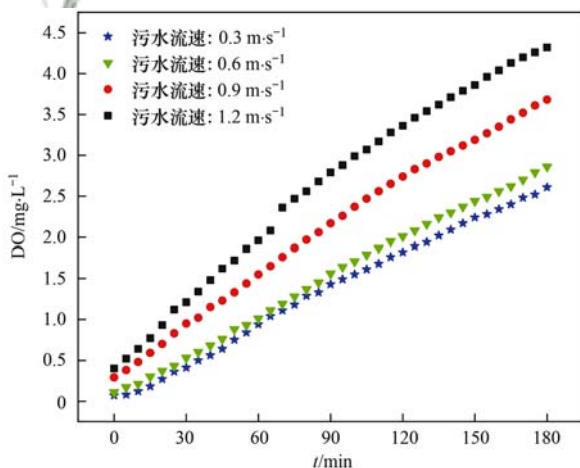


图6 水体DO在不同污水流速下的变化

Fig. 6 Changes in DO at different sewage flow rates

体积传质系数  $K_L a$  是表征氧气气液传质性能的重要参数,可以反映气液传质能力的强弱.体积传质系数  $K_L a$  具体计算方法见式(3)<sup>[19]</sup>.

$$\ln\left(\frac{c^* - c_0}{c^* - c}\right) = K_L a(t - t_0) \quad (3)$$

式中,  $c_0$  为液相中初始溶解氧浓度;  $c^*$  为饱和氧浓

度;  $c$  为液相主体内氧浓度;  $K_L a$  为体积传质系数;  $t$  为氧气传质时间;  $t_0$  为初始时间.

不同污水流速条件下体积传质系数  $K_L a$  变化如图7所示.随着污水流速加快,  $K_L a$  也在逐渐增加.这说明污水流速增大,水体的紊动程度增加,强化了氧气向水体传质能力<sup>[20]</sup>.在污水流速为 0.3、0.6、0.9 和 1.2  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的污水流速组,  $K_L a$  分别是 0.001 76、0.002 21、0.003 57 和 0.004 79  $\text{min}^{-1}$ ,依次增长 25.5%、102.8% 和 172.2%,平均每增加 0.1  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的水流流速,  $K_L a$  增加  $3.48 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ .

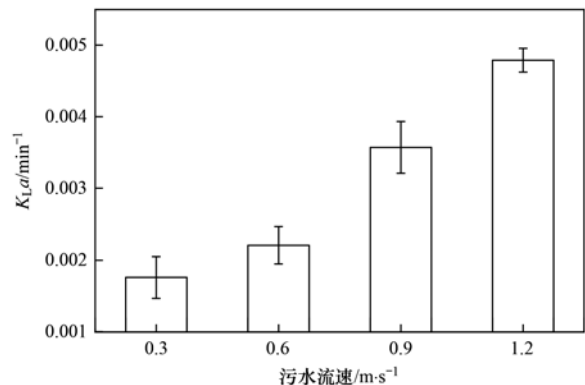
图7 不同污水流速下  $K_L a$  变化

Fig. 7 Changes in  $K_L a$  at different sewage flow rates

#### 2.1.2 气相风速对氧传质的影响

增强气相风速组的水体DO恢复情况与体积传质系数  $K_L a$  的变化见图8和图9.在增强气相风速组,水体DO变化趋势与污水流速的影响类似,几乎以线性趋势增长,且风速越高,水体DO恢复速度越快.造成这种现象的原因在于质量传质主要受到液相侧向下暴发运动有关的流向涡控制,较高的风速增强了气液界面紊流,因此增加了与液相侧暴发运动相关的流向涡出现的频率,从而增强传质<sup>[21]</sup>.同时,当气相风速从 0.2  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  逐步增加至 0.9

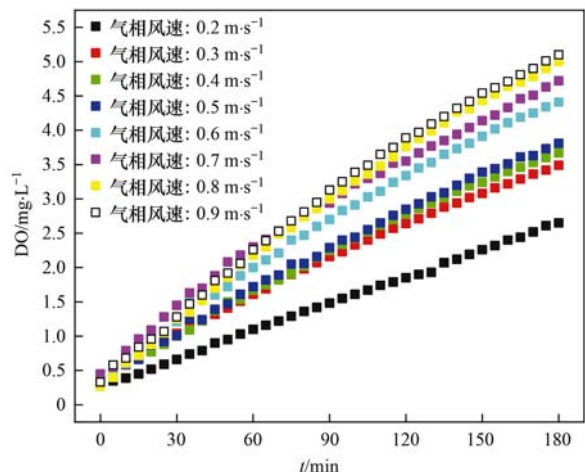


图8 水体DO在不同风速下的变化

Fig. 8 Changes in DO at different wind speeds

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $K_La$  分别是0.001 98、0.002 58、0.002 84、0.003 27、0.003 69、0.003 98、0.004 27和0.004 53  $\text{min}^{-1}$ ,依次增加 30.3%、43.4%、65.2%、86.4%、101.0%、115.7% 和 128.8%, 平均每增加 0.1  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的气相风速,  $K_La$  增加  $3.59 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ .

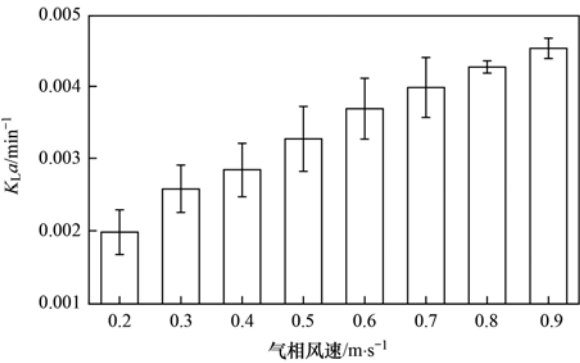


图9 不同风速下  $K_La$  变化  
Fig. 9 Changes in  $K_La$  at different wind speeds

2.2 仿真结果分析

耦合表面传质系数  $K_L$  和 CFD 模拟软件可对污水管道流动过程中氧气传质过程进行可视化分析.

2.2.1 污水管道溶解氧分布情况

污水管道溶解氧分布情况如图 10 所示. 管道内氧含量呈现表层高于深层、下游高于上游的趋势. 这种分布情况是由于管道内的溶解氧主要以两个方向传递扩散,沿着水深方向的浓度梯度扩散和随着污水流动过程中的表面氧传质. 同时,通过对管道内不同位置氧含量对比,临近壁面处的氧含量高于相

同深度的中心处氧含量. 造成这种现象的主要原因在于临近壁面的水流由于受到壁面剪切力的影响具有更低的流动速度,因而具有更长的水力停留时间即两相传质时间. 考虑到污水管道在长距离运输过程中,混凝土管壁会形成生物膜,且有害气体随污水往下运动并在管道内逐渐聚集<sup>[22]</sup>. 因此,管道内氧含量呈下游高于上游,壁面高于中心的分布趋势更有利于缓解污水管道有害气体产生与释放问题.

2.2.2 污水管道溶解氧浓度变化

选取污水管道气液交界面和出口断面为监测面,借助监测面的平均溶解氧浓度可判断管道内部溶解氧含量情况,如图 11. 由图 11(a)可知,在污水流速组,当水流流速从 0.3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  增加至 0.6  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,管道内溶解氧含量明显降低. 其主要原因在于,管道内溶氧含量受到传质速度和传质时间的双重影响,0.3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的水流速度虽然有较低的  $K_La$ ,却拥有更长的水力停留时间,即传质时间,所以 0.3  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的水流速度拥有更好的传质效果. 而当水流速度依次增加至 0.9  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  和 1.2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,管道内溶解氧含量只存在轻微的上升. 由此可见,较快的污水流速虽然可以加快氧气的传质,但是会受到因水流流速加快导致传质时间变短的负面影响. 同时,水流速度太快和太慢均会对污水管道长期运行造成不利影响<sup>[23,24]</sup>. 因此,通过改变污水管道内污水流速增强氧气的气液传质不是最优方案.

增强气相风速组管道监测面溶解氧变化情况如

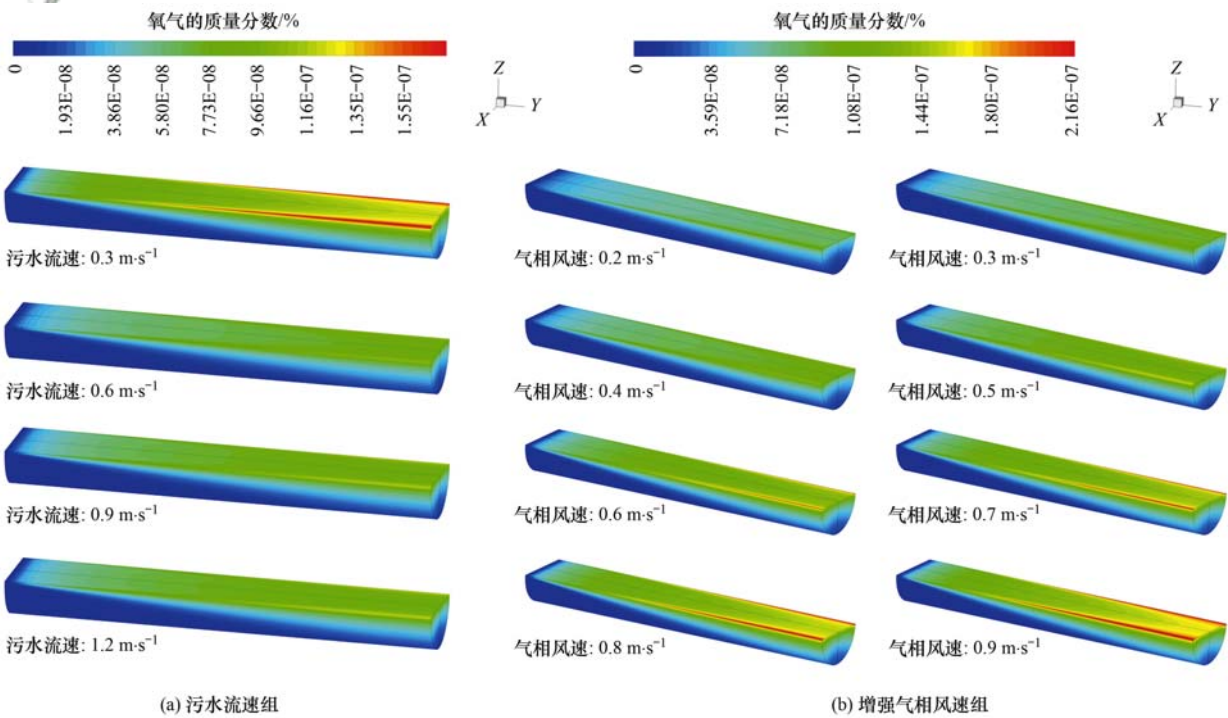


图 10 污水管道液相氧分布  
Fig. 10 Distribution of oxygen in the sewage

图 11(b). 风速从  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增加至  $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 管道内溶解氧含量逐渐提高. 其主要原因在于, 增强管道内气相风速只会提升氧气的两相传质能力, 而不会影响污水的水力停留时间, 所以通过增强管道风速只会起促进作用. 同时, 通过对比图 11, 可以发现增强风速组的溶解氧含量明显高于污水流速组的氧含量. 所以, 与污水流速组相比, 增强管道风速对提升管道内氧含量有更好的效果.

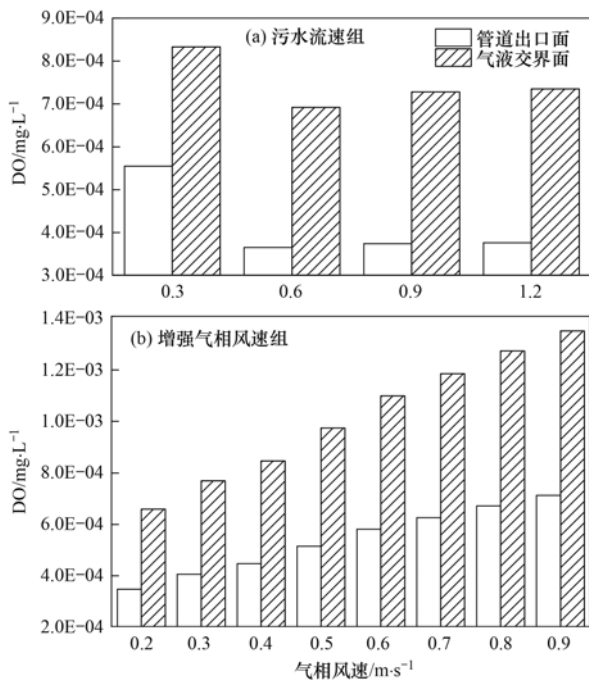


图 11 污水管道监测面溶解氧变化规律

Fig. 11 Changes in dissolved oxygen on the monitoring surfaces of the sewage pipeline

### 2.3 溶解氧浓度预测及效果评价

实际重力流污水管道除氧气气液传质外, 还存在 DO 消耗. 为了贴合实际污水管道, 以 DN600 的污水管道为例, 建立溶解氧物料守恒方程, 见式(4)和式(5). 经过数值求解便可获得整个污水管道在不同的气相风速下溶解氧分布情况.

$$V \frac{dc}{dt} = Q(c' - c) + \gamma(c) \quad (4)$$

$$\gamma(c) = K_L \frac{A}{V} (c' - c) - (r_w + r_f) \quad (5)$$

式中,  $\frac{dc}{dt}$  为管道内溶解氧浓度总变化率;  $V$  为管道液相总体积;  $A$  为管道气液交界面面积;  $Q$  为管道流量;  $c'$  为管道上游溶解氧浓度, 经过前期调研分析, 选取某市现存污水管道的溶解氧含量进行检测. 检测管道位于管网前段位置, 为分流制污水管道, 污水溶解氧浓度在  $5.23 \sim 6.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  范围内波动, 取  $5.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;  $\gamma(c)$  为管道内溶解氧净增加量;  $r_w$  为管道内液相溶解氧消耗速度, 取  $2$

$\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$  [25];  $r_f$  为管道内生物相溶解氧消耗速度, 取  $3.5 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$  [25].

不同气相风速时下游污水管道内溶解氧分布情况如图 12 所示. 可见, 气相风速越大, 管道溶解氧水平越高. 有研究表明, 污水管道液相溶解氧高于  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时便可抑制  $\text{H}_2\text{S}$  的产生, 所以指定溶解氧大于  $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  管段为有效控制管段 [26]. 气相风速从  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  增加至  $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 有效控制长度依次增长了 25、18、30、30、21、22 和 20 m, 平均气相风速增加  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 有效控制长度增加了 25 m.

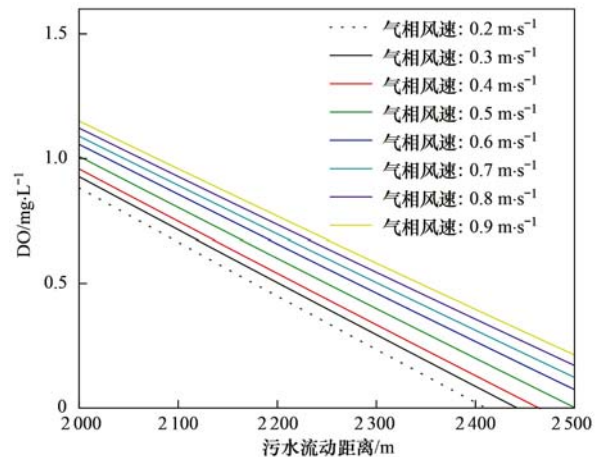


图 12 下游污水管道 DO 分布

Fig. 12 DO distribution in downstream sewer

### 3 结论

(1) 提高污水管道内的污水流速和气相风速都能强化氧气气液传质能力, 且强化效果相近. 平均每提高  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的流速, 氧气的体积传质系数  $K_L a$  增加  $3.5 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ .

(2) 提高污水管道内气相风速明显提升了管道内溶解氧含量, 且风速越快, 氧含量越高. 而由于受到传质时间的限制, 较快的污水流速对管道溶解氧含量几乎没有影响.

(3) 增强污水管道顶部的气相风速可以有效延长抑制  $\text{H}_2\text{S}$  的管段长度, 平均每增加  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的气相风速, 有效控制长度延长 25 m.

#### 参考文献:

- [1] Li W K, Zheng T L, Ma Y Q, et al. Current status and future prospects of sewer biofilms: their structure, influencing factors, and substance transformations [J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133815.
- [2] Liu Y C, Wu C, Zhou X H, et al. Sulfide elimination by intermittent nitrate dosing in sewer sediments [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, **27**: 259-265.
- [3] 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.
- [4] Li X, O'Moore L, Song Y R, et al. The rapid chemically

- induced corrosion of concrete sewers at high  $H_2S$  concentration [J]. *Water Research*, 2019, **162**: 95-104.
- [5] Park K, Lee H, Phelan S, *et al.* Mitigation strategies of hydrogen sulphide emission in sewer networks-a review [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, **95**: 251-261.
- [6] Wu M, Wang T, Wu K, *et al.* Microbiologically induced corrosion of concrete in sewer structures: a review of the mechanisms and phenomena [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117813.
- [7] Jiang G M, Keating A, Corrie S, *et al.* Dosing free nitrous acid for sulfide control in sewers: results of field trials in Australia [J]. *Water Research*, 2013, **47**(13): 4331-4339.
- [8] Cao J J, Zhang L, Hong J Y, *et al.* Different ferric dosing strategies could result in different control mechanisms of sulfide and methane production in sediments of gravity sewers [J]. *Water Research*, 2019, **164**, doi: 10.1016/j.watres.2019.114914.
- [9] 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.
- [10] Jiang G M, Gutierrez O, Yuan Z G. The strong biocidal effect of free nitrous acid on anaerobic sewer biofilms [J]. *Water Research*, 2011, **45**(12): 3735-3743.
- [11] Ganigue R, Gutierrez O, Rootsey R, *et al.* Chemical dosing for sulfide control in Australia: an industry survey [J]. *Water Research*, 2011, **45**(19): 6564-6574.
- [12] Lu J S, Zhang E F, Li K. Enhancing the ventilation of sewers by using inhaled air in the vertical stack of a building [J]. *Water Practice & Technology*, 2018, **13**(3): 555-565.
- [13] 张二飞, 卢金锁. 建筑排水立管直接接入污水管网的通风性能分析[J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(17): 112-115.  
Zhang E F, Lu J S. Improvement of sewer ventilation performance by directly linking with building vertical pipe [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(17): 112-115.
- [14] Chen H, Ye J F, Zhou Y F, *et al.* Variations in  $CH_4$  and  $CO_2$  productions and emissions driven by pollution sources in municipal sewers: an assessment of the role of dissolved organic matter components and microbiota [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114489.
- [15] Cao Y S, Alaerts G J. Influence of reactor type and shear stress on aerobic biofilm morphology, population and kinetics [J]. *Water Research*, 1995, **29**(1): 107-118.
- [16] Joyce J, Sorensen H W, Smith M M. Large diameter sewer and tunnel ventilation characteristics and odor control: Recent developments and case histories [J]. *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2000, **13**: 195-214.
- [17] Edwini-Bonsu S, Steffler P M. Air flow in sanitary sewer conduits due to wastewater drag: a computational fluid dynamics approach [J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2004, **3**(5): 331-342.
- [18] 孙远军, 卢士强, 邵一平, 等. 城市河流大气复氧试验研究 [A]. 见: 2019 中国环境科学学会科学技术年会论文集 (第一卷) [C]. 西安: 中国环境科学学会, 2019. 953-959.
- [19] Bannari R, Bannari A, Selma B, *et al.* Mass transfer and shear in an airlift bioreactor: using a mathematical model to improve reactor design and performance [J]. *Chemical Engineering Science*, 2011, **66**(10): 2057-2067.
- [20] 张晨, 王浩百, 胡华芬, 等. 人为扰动下河流复氧激增现象及机制分析 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 2167-2173.  
Zhang C, Wang H B, Hu H F, *et al.* Reaeration surging phenomenon with artificial disturbance and the implication for the impact of turbulent kinetic energy in river [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 2167-2173.
- [21] Komori S, Kurose R, Iwano K, *et al.* Direct numerical simulation of wind-driven turbulence and scalar transfer at sheared gas-liquid interfaces [J]. *Journal of Turbulence*, 2010, **11**(32), doi: 10.1080/14685248.2010.499128.
- [22] 刘艳涛, 卢金锁, 丁超. 污水管道有害气体分布规律模型研究 [J]. *给水排水*, 2017, **43**(4): 111-115.  
Liu Y T, Lu J S, Ding C. Study on harmful gases distribution model in sewage pipelines [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, **43**(4): 111-115.
- [23] Montes C, Kapelan Z, Saldarriaga J. Predicting non-deposition sediment transport in sewer pipes using random forest [J]. *Water Research*, 2021, **189**, doi: 10.1016/j.watres.2020.116639.
- [24] 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.
- [25] Hvitved-Jacobsen T, Vollertsen J, Nielsen A H. Sewer processes: microbial and chemical process engineering of sewer networks (2nd ed.) [M]. Boca Raton: CRC Press, 2013. 189-192.
- [26] 张团结, 武晨, 刘艳臣, 等. 曝气充氧对排水管网液相硫化物累积影响研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(11): 1953-1957.  
Zhang T J, Wu C, Liu Y C, *et al.* Study on the influence of oxygen aeration as a means of controlling sulfide accumulation of sewer system [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(11): 1953-1957.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                      |                                                              |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM <sub>2.5</sub> in Henan Province from 2015 to 2019                                                            | GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>                  | (1697) |
| Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data | QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>      | (1706) |
| Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo                                                                               | YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>     | (1716) |
| Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Shanghai                                                                                            | ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>        | (1725) |
| Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing                                                                           | CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>       | (1738) |
| Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta                                                           | JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>            | (1747) |
| Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing                                                                        | LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>          | (1756) |
| Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region                                      | ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>        | (1766) |
| Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study                                                                                               | LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>      | (1777) |
| Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System                           | WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>        | (1788) |
| Coordinated Control of PM <sub>2.5</sub> and O <sub>3</sub> in Hangzhou Based on SOA and O <sub>3</sub> Formation Potential                                                          | LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>            | (1799) |
| Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants                                                         | WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>  | (1808) |
| Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an                                                                                             | WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>                 | (1814) |
| Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn                              | TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>                  | (1821) |
| Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors                           | GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>          | (1829) |
| Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City                                                                                                          | YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>               | (1844) |
| Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning                                             | LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong                         | (1853) |
| Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight                                                  | QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>    | (1863) |
| Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang                                    | LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>              | (1873) |
| Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River                                                                    | TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>       | (1885) |
| Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District                                                   | YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> | (1898) |
| Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area                                                                                                        | WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>          | (1908) |
| Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake                                                                      | WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>        | (1920) |
| Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China                              | CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>          | (1930) |
| Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment                                                                                           | CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>            | (1941) |
| Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source                                                                     | GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>                | (1950) |
| Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors                                          | ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>              | (1958) |
| Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China                                               | MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>        | (1966) |
| Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria                                                           | JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>     | (1976) |
| Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity                                                                                                   | LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>                 | (1988) |
| Effects of Pollution Control of Xiaqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay                                                                  | ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>          | (1997) |
| Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands                                                            | WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-rui, <i>et al.</i>   | (2007) |
| Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City                                                                | YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>         | (2018) |
| Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms                                                                                                   | WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>      | (2030) |
| Carbonized Foam Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation                                                                 | WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>               | (2039) |
| Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe <sup>2+</sup> Under Low Nitrogen Concentration                                                                           | ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>       | (2047) |
| Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation                                                                                      | YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>         | (2055) |
| Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt                                                        | ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xian-min, <i>et al.</i>        | (2062) |
| Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China                                                               | WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>          | (2071) |
| Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China          | ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>               | (2081) |
| Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background                          | WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>      | (2094) |
| Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment                                                                          | WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>           | (2104) |
| Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment                                                                             | ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui                         | (2115) |
| Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City                                                                                                                  | CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long                    | (2124) |
| Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize                                                                                                     | REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>          | (2133) |
| Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings                                                                                                 | ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>    | (2142) |
| Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China                                                             | LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>             | (2151) |
| Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N <sub>2</sub> O Emission from a Vegetable Field                                                                         | HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>     | (2163) |
| Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emissions in Paddy Field                                                                           | ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>        | (2171) |
| Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River                       | WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue                         | (2182) |
| Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation                         | ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>             | (2192) |
| Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils                                                                                   | MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>          | (2204) |
| Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area                                                                          | ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>   | (2209) |
| Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil                                        | LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>     | (2219) |
| Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Jiulong River Estuary                                    | HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>          | (2226) |
| System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy                                                    | LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>         | (2237) |