

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨

陈卓¹, 崔琦^{1,2}, 曹可凡¹, 陆韵^{1*}, 巫寅虎¹, 胡洪营^{1,3,4*}

(1. 清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 国家环境保护环境微生物利用与安全控制重点实验室, 北京 100084; 2. 中建水务环保有限公司, 北京 100044; 3. 清华大学环境学院环境前沿技术北京实验室, 北京 100084; 4. 清华-伯克利深圳学院深圳环境科学与新能源技术工程实验室, 深圳 518055)

摘要: 污水再生利用的关键是水质安全保障和风险控制. 微生物风险是再生水安全利用过程中需要优先控制的重要问题. 本文系统探讨了我国现行污水再生利用标准中的病原微生物控制要求, 分析了基于病原微生物指示指标浓度控制的必要性与不足, 提出了引入微生物去除能力保障控制的必要性, 并详细介绍了其制定方法与保障措施. 今后, 需进一步深入探讨基于浓度控制与保障能力控制相结合的污水再生利用微生物控制方法, 以期为我国再生水安全利用提供技术支撑.

关键词: 再生水; 水质安全保障; 微生物风险; 浓度控制; 保障能力控制

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2558-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010024

Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods

CHEN Zhuo¹, CUI Qi^{1,2}, CAO Ke-fan¹, LU Yun^{1*}, WU Yin-hu¹, HU Hong-ying^{1,3,4*}

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, State Environmental Protection Key Laboratory of Microorganism Application and Risk Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Construction Water & Environment Co., Ltd., Beijing 100044, China; 3. Beijing Laboratory for Environmental Frontier Technologies, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Shenzhen Environmental Science and New Energy Technology Engineering Laboratory, Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The key to water reclamation and reuse is water quality safety insurance and risk control. Microbial risk control is an important issue that requires priority during the safe reuse of reclaimed water. This paper systematically summarizes the control requirements for microbial indicators in China's current water reuse standards, focusing on the necessity and deficiencies of water quality targets and microbial indicator concentration control. The performance targets based on the removal requirements of microorganisms together with the methodology and implementation strategies are introduced in detail for the first time. In the future, it is necessary to further explore the microbial control method of water reclamation based on the combination of water quality targets and performance targets, which could provide support for the safe reuse of reclaimed water in China.

Key words: reclaimed water; safety insurance; microbial risk; water quality control; performance control

水资源短缺、水环境污染、水生态破坏和水空间萎缩等突出水问题是我国和全球面临的重大课题,也是制约社会经济可持续发展的重要因素之一. 污水再生利用是改善我国水资源短缺、水环境污染现状,促进经济社会可持续发展和满足人民日益增长的生态环境需求的有效途径^[1,2]. 我国污水再生利用设施建设发展迅速,但整体利用水平仍然偏低,具有巨大发展空间和利用潜力^[3]. 2015年国务院发布的《水污染防治行动计划》(即“水十条”)中明确指出,应开展高品质再生水补充饮用水水源等研究. 再生水标准中规定了A等级和B等级等高品质再生水的水质要求和利用途径,我国在再生水生产和利用方面具有很大拓展空间^[4~6].

污水再生利用的关键是水质安全保障和风险控制. 其中,由病原微生物引发的生物风险感染几率高、致害剂量低、显效时间短和危害程度大,是再生水水质安全保障和风险控制的關鍵^[7,8]. 再生水中

病原微生物的类型、浓度水平和风险水平等已逐渐成为公共卫生领域关注的重要话题. 表1为城镇污水处理厂经二级处理后典型病原微生物的浓度分布水平. 可以看出,未消毒的二级出水中仍有相当数量病原微生物的存在.

再生水处理是控制微生物风险的关键环节,随着再生水利用规模和应用范围的不断扩大,再生水处理过程对微生物的控制要求日趋严格^[5]. 系统探讨污水再生利用微生物控制标准及其制定方法,对于再生水处理和利用过程的风险防范具有重要意义.

收稿日期: 2020-10-08; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51738005); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908317)

作者简介: 陈卓(1988~),女,博士,助理研究员,主要研究方向为再生水病原微生物风险及控制, E-mail: zhuochen@mail.tsinghua.edu.cn

* 通信作者, E-mail: luyun@tsinghua.edu.cn; hyhu@tsinghua.edu.cn

表 1 城镇污水处理厂二级出水中(消毒前)病原微生物浓度分布水平^[9]
Table 1 Concentration distribution levels of pathogenic microorganisms in secondary effluent (before disinfection) of municipal wastewater treatment plants

病原微生物	含量/个·(100 mL) ⁻¹	病原微生物	含量/copies·L ⁻¹
粪肠球菌	900 ~ 10 ⁴	腺病毒	10 ³ ~ 10 ⁵
粪大肠菌	10 ⁴ ~ 10 ⁶	诺如病毒	10 ~ 10 ³
梭状芽孢杆菌孢子	50 ~ 8 000	轮状病毒	0 ~ 10 ³
贾第鞭毛虫	10 ~ 2 500	肠道病毒	10 ³ ~ 10 ⁵ PFU·L ⁻¹

1 再生水微生物浓度控制要求

目前,污水再生利用过程的微生物浓度控制(water quality targets)主要是在再生水厂进水口、出水口等环节设置关键控制点,通过规定关键控制点的水质控制指标及其浓度限值(准则值),保障再生水安全利用^[10].

1.1 我国现行再生水标准中微生物浓度控制要求

从 2002 年开始,我国陆续颁布了城市污水再生利用系列水质国家标准^[3,11],这些标准中规定了常规水质指标及其浓度限值和采样检测频率.针对再生水不同利用途径,在已颁布的上述国家标准中,《城市污水再生利用 农田灌溉用水水质》(GB 20922-2007)为强制性国家标准,其余为推荐性国家标准.城市污水再生利用系列国家标准中所规定的微生物控制指标及其限值如图 1 所示.

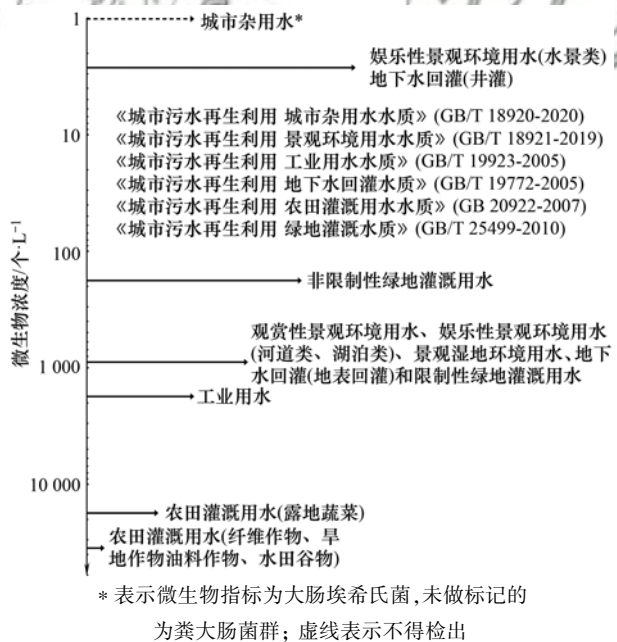


图 1 我国污水再生利用标准中微生物控制指标及其限值^[12-17]
Fig. 1 Microbial control indicators and their limits in wastewater reuse standards of China

具体而言,我国现有污水再生利用标准中对微生物的控制要求,参考和借鉴了国外标准规范中的微生物浓度控制要求,同时结合我国国情,选择粪大肠菌群(或总大肠菌群)等细菌类病原指示微生物

作为评价指标^[18].与其他国家/地区(如美国、欧盟、澳大利亚和日本等)的控制要求相比,我国对于城市杂用、工业用水和农田灌溉用水等利用途径的微生物浓度控制要求较为严格^[3].

1.2 再生水微生物浓度控制的必要性与不足

目前,我国再生水生物风险控制和管理手段以对再生水厂出水中病原指示微生物的浓度控制为主.浓度限值适用于定量监测和评价,便于行政主管部门和监管部门进行水质达标监管.微生物控制的目标是降低感染风险,而感染风险可通过再生水中微生物浓度模拟计算得出^[19],因此基于浓度控制的标准限值是再生水微生物控制的根本依据.但微生物浓度控制方法也存在一些不足,主要包括以下几方面.

1.2.1 检测手段

(1) 检测值准确性不高 目前国内外标准规范中多采用总大肠菌群和粪大肠菌群作为指示指标^[20],主要采用基于培养法的传统检测手段对上述指示指标进行检测.由于传统检测手段包含稀释和富集等操作步骤,得到的计数结果可能存在较大偏差.另外,水中部分细菌不可培养,计数结果会低估实际的细菌数量^[21].

(2) 测定时间长且结果时效性较差 传统的培养法往往需要较长的培养和验证时间,改进后的固定酶底物法仍然需要 18 ~ 24 h 的测定时间^[22].因此,传统微生物检测手段难以快速准确地反映再生水厂出水微生物浓度变化.

1.2.2 控制指标

病原微生物指示指标存在一定的局限性.目前各国国家/地区标准规范中的再生水微生物指标主要包括总大肠菌群、粪大肠菌群、大肠杆菌和总异养菌群等病原指示菌,但病原指示菌与水中某些病原微生物(如条件致病菌和病毒等)之间的相关性较低^[23-25],仅以病原指示菌作为微生物指标无法全面反映再生水的生物风险.

1.2.3 纠正措施

针对再生水厂出水的微生物浓度控制对处理工艺的调控缺乏针对性.当出水浓度超标时难以快速和准确地定位故障单元并进行有针对性的消毒剂量

调节.

2 再生水微生物去除能力标准

美国、澳大利亚等再生水利用先行国家,除浓度标准外,主要通过技术标准和处理工艺要求两个方面来保障再生水水质安全,并出台了用以指导项目实施开展的技术性文件及针对不同再生水利用途径的指南^[3].

以美国为例,美国环保署(US EPA)发布的指南^[26]涉及污水再生处理和利用各个方面,包括再生水的处理措施及技术能力要求等.美国国家水资源研究中心(National Water Research Institute, NWRI)则颁布了再生水直接补充饮用水源指南以及适用于某个州的指导性框架.该指南不仅要求了病原指示微生物浓度限值,还对各处理单元应承担的微生物去除负荷进行了规定,即去除能力标准.

2.1 能力标准的制定流程

能力标准(performance targets)是指为满足再生水的微生物风险控制需求,规定某些微生物指示指标在污水再生处理过程所需减少的量,从而达到预防或降低微生物风险的效果^[10].根据世界卫生组织(WHO)和NWRI颁布的相关指南^[10],能力标准制定流程如图2所示.主要步骤包括:①综合安全性、普遍性、可检测性等多方面因素选定目标微生物;②根据文献及相关报告估计目标微生物在原水中的最大浓度,通过微生物定量风险评估(quantitative microbial risk assessment, QMRA)确定出水中可接受的该目标微生物的最大浓度限值;③根据上述原水中最大初始浓度以及出水中最大可接受的浓度,给出指南中的各项病原微生物指标的对数去除率基准值,并设定额外的对数去除要求以保障处理系统的可靠性.

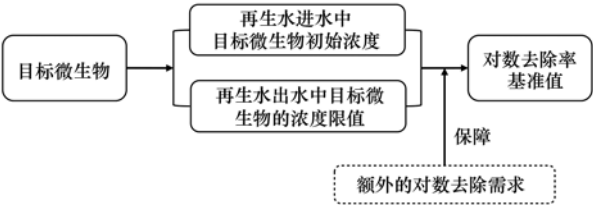


图2 能力标准的制定流程
Fig. 2 Formulation procedure of performance targets

2.2 能力标准的制定方法

2.2.1 目标微生物及进水浓度的确定

表2为美国NWRI推荐的再生水直接补充饮用水源(direct potable reuse, DPR)以及加州公共卫生部(California Department of Public Health, CDPH)给出的再生水间接补充饮用水源(indirect potable

reuse, IPR)的微生物去除标准要求^[27].

表2 美国典型DPR与IPR项目深度处理工艺的微生物去除要求

Table 2 Microbial removal requirements for advanced treatment processes of typical DPR and IPR projects in the US

微生物指示指标	去除率标准 ¹⁾	
	DPR	IPR
肠道病毒	12	12
隐孢子虫	10	10
贾第鞭毛虫	10	10
总大肠菌群	9	

1) 表示对数去除率所需达到的最低要求

由于致病性病毒难以单独监测,美国NWRI推荐的肠道病毒指示指标为MS2噬菌体.MS2噬菌体是感染大肠杆菌的病毒,其大小、形状和RNA含量均与肠道病毒相似,可作为水中肠道病毒指示指标,常用于水中病毒存活状况及去除效果评价^[27].

而WHO在模拟病毒感染风险时,采用轮状病毒作为肠道病毒指示指标进行剂量效应计算^[28].肠道病原菌的指示指标为总大肠菌群,因为污水中病原菌的浓度远低于病原指示菌(例如总大肠菌群或大肠杆菌)浓度,测定病原指示菌浓度变化能够较为灵敏地反映深度处理工艺中病原菌的处理效果.与病毒感染剂量相比,许多病原菌的感染剂量更大.

由于隐孢子虫和贾第鞭毛虫较小,且对游离氯和氯胺消毒具有抵抗力,是较难从水中去除的原生动物.臭氧、二氧化氯和紫外线消毒均对贾第鞭毛虫和隐孢子虫有较好的灭活效果,但膜过滤技术对于原生动物的去除十分有效.当过滤出水浊度<0.3 NTU时,可以认为隐孢子虫和更大的原生动物已被有效去除.美国NWRI未对贾第鞭毛虫的去除能力进行要求,其认为隐孢子虫卵囊去除率达到10 log时,可同时确保贾第鞭毛虫孢囊的去除达到相同或更高效果.在确定目标微生物后,经过文献调研,确定肠道病毒、隐孢子虫和贾第鞭毛虫在原水(未经处理的污水)中出现的最大浓度(most probable number, MPN)为 $10^5 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[19].对于肠道致病菌,以沙门氏菌作为指示菌,其在原水中的最大浓度也取为 $10^5 \text{ MPN} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.2.2 出水浓度限值及对数去除率的确定

在计算出水可接受的目标微生物最大浓度时,首先应确定可容许的健康风险水平.美国EPA标准规定^[19],再生水直接补充饮用水源水中病原微生物浓度应满足年感染风险 $\leq 10^{-4}$;而WHO标准规定,感染风险应不超过每人每年 10^{-6} 的伤残调整寿命年(DALY,其反映因各种疾病造成的早死与残疾所导致的健康寿命年损失),相当于每人每年 2.5×10^{-3} 的轮状病毒感染风险.在确定感染风险及暴露

量后,根据剂量效应曲线进行计算,得到目标微生物的再生水出水浓度限值(再生水直接补充饮用水源的单次摄入量以最大值 $2\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 计,其他利用途径的暴露量需根据暴露途径重新估算)。

例如,对于轮状病毒,其剂量效应曲线符合 Beta-Poisson 模型($\alpha=0.26$, $\beta=0.426$):

$$P_i = 1 - (1 - P_a)^{1/365}$$

(1)

$$P_i = 1 - [1 + (d/\beta)]^{-\alpha}$$

(2)

式中, P_i 表示单次致病风险, P_a 表示年致病风险, α 和 β 表示剂量反应关系因子, d 表示目标微生物单次暴露剂量。

根据美国 EPA 标准要求其年致病风险 $\leq 10^{-4}$,以单次摄入量 $2\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$,暴露频率每天 1 次计,即可计算出再生水出水中可接受的最大浓度值为 $2.2\times 10^{-7}\text{ MPN}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

根据目标微生物进水浓度以及出水浓度限值,可以确定在可容许健康风险水平下需达到的对数去除率,计算方法为:

$$\log_{10}(\text{removal requirements}) = \log(c_{\text{RW}}/c_{\text{FW}})$$

(3)

式中, c_{RW} 为污水原水中目标微生物浓度, c_{FW} 为再生水出水中目标微生物浓度。

表 3 为美国 CDPH 给出的病原微生物浓度水平以及对数去除率标准要求。沙门氏菌年感染风险上限 10^{-4} 的浓度限值是根据实际暴发的疫情数据,利用 Beta-Poisson 剂量反应模型计算得到的。虽然作为监测指标的总大肠菌群在污水原水中的浓度要高于 $10^5\text{ MPN}\cdot\text{L}^{-1}$,但专家组认为,总大肠菌群和其他病原菌在处理过程中灭活或去除效果相似,若总大肠菌群的对数去除率达到 9 log,可同时确保沙门氏菌及其他肠道致病菌的去除率达到相同水平。

在确定肠道病毒的去除能力标准时,专家组认为 12 log 的去除率要求不仅可以保障肠道病毒的年平均感染风险小于 10^{-4} ,还包含几个数量级的安全系数,因此即使偶然存在高浓度病毒排放进入下水道的风险,也可以保障公众健康安全。

经过论证,专家组认为,隐孢子虫的去除率标准要求也比满足每年感染风险上限 10^{-4} 的要求高 2~3 个数量级。

表 3 美国 CDPH 推荐的再生水间接补充饮用水源 (IPR) 项目病原微生物最低去除要求^[27]

Table 3 Minimum removal requirements for the indirect potable reuse (IPR) projects recommended by the USA CDPH

项目	肠道病毒	贾第鞭毛虫	隐孢子虫	肠道致病菌
再生水出水中可接受的最大浓度/ $\text{MPN}\cdot\text{L}^{-1}$	2.2×10^{-7} (轮状病毒)	6.8×10^{-6}	3×10^{-5}	5.3×10^{-5} (沙门氏菌)
污水原水中的最大浓度/ $\text{MPN}\cdot\text{L}^{-1}$	10^5	10^5	10^5	10^5
对数去除率要求	11.7	10.2	9.5	9.3
推荐的对数去除率	12	10	10	9

2.3 能力标准的特点与优势

能力标准对污水再生处理过程的典型微生物去除程度(通常以对数去除率表示)提出要求,能够提升系统的可靠性和安全性。能力标准的制定过程遵循以下原则:①选取的目标微生物具有高感染性(如轮状病毒)或浓度远高于致病菌(如总大肠菌群);②以最大值作为进水中目标微生物的初始浓度;③出水中可接受的目标微生物浓度以再生水利用过程中最大暴露量以及最大感染风险进行计算;④标准规定的对数去除率要求略高于计算得到的对数去除率要求。

这些原则保障了能力标准的高安全性,结合完备的保障方法,通过可在线监测的替代性指标以及针对不同处理工艺的负荷分配体系,可使其在实际工程的控制与监管中具有更高的可实施性。能力标准与浓度标准相互支撑,应用于运行管理,可以大大提高污水再生利用的安全性。之后可通过加标测试等方式进一步评价和验证处理工艺是否达到所推荐的对数去除率要求。

3 微生物控制能力标准的保障措施

3.1 基于关键控制点的再生水微生物安全保障体系

关键控制点方法(critical control point, CCP)用于再生水处理过程管理,可以针对微生物风险进行控制,以防止、消除该风险或将其降低到可接受水平^[29,30]。CCP 方法还要求针对监控措施制定具体的行动或调查方案。对于每个 CCP(即某个处理单元),需要监控关键控制参数或其替代性指标,以评估处理过程是否按预期运行。

在实际污水再生利用和管理中,难以通过复杂的测试分析体系(包括预处理、仪器、设备、方法等)定期测定和监控微生物在污水再生处理和消毒过程中的变化规律。亟需寻找一种比常规病原指示微生物更容易监测或可以在线监测、且其在污水再生处理和消毒过程中的去除率或变化与拟控制污染物的去除率有稳定相关关系的指标,即替代性指标。替代性指标提供了一种可快速实时

评估水质特征的方法,而无需进行困难复杂的特定污染物分析^[31].例如,再生水消毒过程中,微生物自身的灭活可能会引起再生水中 pH、浊度、电导率、紫外吸光度(UV₂₅₄)、三维荧光光谱(EEM)和色度等指标的变化. Gerrity 等^[32]的研究发现 ΔUV₂₅₄ 和 ΔEEM 荧光强度的变化与臭氧消毒过程病原指示微生物(大肠杆菌、枯草芽孢杆菌和 MS2 噬菌体)的灭活之间存在显著关联性.因此,消毒工艺可设定剩余消毒剂剂量等指标作为替代性指标.紫外吸光度(UV₂₅₄)、三维荧光光谱(EEM)和色度等有机物表征指标也可以作为臭氧消毒效果

评价的替代性指标.澳大利亚的 West Wodonga 再生水厂将滤池水浊度作为替代性指标,其限值设定为 < 2 NTU,氯消毒池余氯的限值设定为 > 1 mg·L⁻¹^[30~33].

以反渗透(RO)工艺为例,其处理流程中的关键控制点以及用以评估运行状况的监测指标如图 3、表 4 和表 5 所示^[31,32].确定关键控制点后,再对相应的处理单元运行状况进行监控,在启动阶段各项监测内容的采样频率普遍高于运行阶段.通过在试运行期间更严苛的监控,保障系统在实际生产中的安全可靠运行.

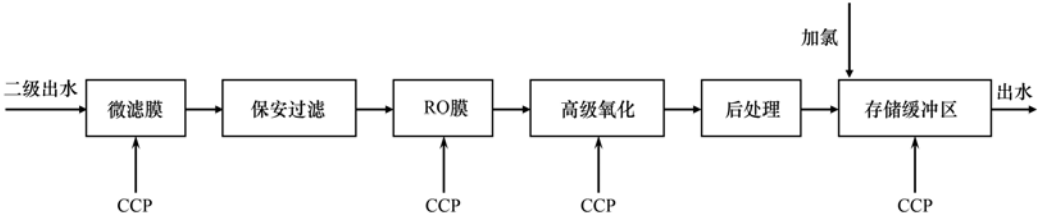


图 3 再生水处理工艺流程关键控制点 (CCP) 示例^[30]

Fig. 3 Typical critical control points (CCP) of treatment processes in a water reclamation plant

表 4 启动(试运行)阶段的监测内容及采样方式^[34,35]

Table 4 Monitoring parameters and sampling methods at the start-up (trial run) stage

处理单元	监测内容	采样方式; 频率
二级出水	出水浊度、BOD、TSS 和微生物指标	在线连续自动采样和手动采样; 每天
微滤/超滤	压力衰减测试和浊度	离线测试; 每天
反渗透 (RO)	进出水 TOC 和 EC	在线连续自动采样和手动采样; 每天
紫外线/高级氧化	紫外传感器	在线连续自动采样和校准; 每周
	出水大肠杆菌及总大肠菌群	手动采样; 每周
	进水紫外透过率	在线连续自动采样和手动采样; 每天
	进出水氯胺	手动采样; 每天
加氯储存	出水游离余氯	在线连续自动采样和手动采样; 每天

表 5 运行阶段的监测内容及采样方式^[34,35]

Table 5 Monitoring parameters and sampling methods during operational stage

处理单元	监测内容	采样方式; 频率
二级出水	出水浊度	在线连续自动采样和手动采样; 每周
	氨氮、BOD、TSS 和微生物指标	手动采样; 每周
微滤/超滤	压力衰减测试	离线测试; 每天
	浊度	在线连续自动采样和手动采样; 每周
反渗透 (RO)	进出水 TOC 和 EC	在线连续自动采样和手动采样; 每周
紫外线/高级氧化	紫外传感器	在线连续自动采样和校准; 每周
	进水紫外透过率	在线连续自动采样和手动采样; 每周
	进出水氯胺	在线连续自动采样和手动采样; 每周
	出水游离余氯	在线连续自动采样和手动采样; 每周

3.2 基于处理工艺要求(去除负荷分配)的再生水风险控制技术保障体系

目前,美国等国家/地区已经建立了基于风险控制的对数去除负荷分配体系,以保障再生水直接/间接补充饮用水源的安全性^[33].

除了明确整个处理流程的微生物去除率要求

外,还提出可通过多级屏障水质安全保障(multiple-barrier approach)实现微生物风险控制.根据美国 EPA 水回用技术指南以及厂商提供的运行参数,对某一单元的对数去除率上限提出要求,规定任一单元的对数去除率负荷上限不超过 6 log.表 6 为美国得克萨斯州再生水补充饮用水源项目的病原微生物

对数去除负荷分配示例^[35]。

表 6 美国得克萨斯州再生水补充饮用水源项目
病原微生物对数去除负荷分配示例¹⁾

Table 6 Logarithmic removal credit allocations of pathogenic
microorganisms in potable water reuse projects in Texas, USA

处理工艺/技术	隐孢子虫		贾第鞭毛虫		病毒	
	TCEQ	UER	TCEQ	UER	TCEQ	UER
微滤或超滤	4	4	4	4	0	0
膜生物反应器	0	4	0	4	0	0
反渗透	0	2	0	2	0	2
纳滤	0	—	0	—	0	—
氯消毒	0	0	1	1	3	3
紫外线消毒	4	4	4	4	4	4
紫外线/光解	4	≥4	4	≥4	4	≥4
高级氧化	4	6	4	6	4	6
臭氧处理	3	3	3	3	5	5
臭氧-生物活性炭	3	3	3	4	5	5

1) TCEQ 表示按德州环境质量委员会 (Texas Commission on Environmental Quality) 要求限制; UER 表示对数去除率上限 (upper end reduction value); 所有数据为对数去除率

从表 6 中可以看出,RO、纳滤等膜过滤技术虽然均对病原微生物有截留作用,但在指南中并未被分配消毒负荷,这主要是出于系统可靠性的考虑. 每一个处理单元都有所需的故障响应时间 (failure response time, FRT),同时再生水补充饮用水源系统中有一个必要的环节是存储缓冲区,若某一单元的 FRT 大于存储缓冲区的停留时间,则分配消毒负荷时不应将该单元考虑在内. 对于每个单元,其故障响应时间由采样间隔、系统周转时间以及系统修正时间等因素决定.

例如,膜过滤单元需要进行膜完整性测试以保障运行,但是膜完整性测试需要停产,通常 12 h 才进行一次 (即采样间隔为 12 h),若存储缓冲区的停留时间少于 12 h,则分配消毒负荷时不应将膜过滤单元考虑在内. 同时,为减少建设存储缓冲区的投资费用,也可考虑膜完整性的在线检测方法以及可靠的替代性指标等^[34,36]。

4 结论与展望

(1) 水质安全保障和风险控制是污水再生利用的关键,微生物风险控制是再生水生物风险研究的重点关注对象. 目前,我国现行污水再生利用标准中对于微生物风险的控制,以对再生水出水中病原指示微生物的浓度控制为主,但仅以病原指示菌作为微生物指标无法全面反映再生水的生物风险.

(2) 再生水微生物风险能力控制标准由于其高安全性以及高可行性的特点,可以更好地应用于运行管理和指导实际工程,并通过关键控制点、替代性指标和多级屏障水质安全保障等保障措施实现对污

水再生处理和消毒工艺的实时反馈和调控.

(3) 再生水浓度控制标准和去除能力保障标准互相支撑,将有助于构建日趋完备的污水再生利用微生物控制标准体系,提高我国再生水安全保障能力.

参考文献:

[1] 曲久辉, 赵进才, 任南琪, 等. 城市污水再生与循环利用的关键基础科学问题[J]. 中国基础科学, 2017, 19(1): 6-12.
Qu J H, Zhao J C, Ren N Q, et al. Critical fundamental scientific problems in reclamation and reuse of municipal wastewater[J]. China Basic Science, 2017, 19(1): 6-12.

[2] 胡洪营, 石磊, 许春华, 等. 区域水资源介循环模式: 概念·结构·特征[J]. 环境科学研究, 2015, 28(6): 839-847.
Hu H Y, Shi L, Xu C H, et al. Water meta-cycle for regional water sustainable management: concept, system structure and advantages[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(6): 839-847.

[3] 李昆, 魏源送, 王健行, 等. 再生水回用的标准比较与技术经济分析[J]. 环境科学学报, 2014, 34(7): 1635-1653.
Li K, Wei Y S, Wang J X, et al. Water reclamation: standards comparison and cost analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(7): 1635-1653.

[4] T/CSES 07-2020, 水回用指南: 再生水分级与标识[S].

[5] 杜寅. 美国再生水管理立法及其借鉴[J]. 生态经济, 2016, 32(1): 176-180.
Du Y. Reclaimed water management legislation in the US and its enlightenments[J]. Ecological Economy, 2016, 32(1): 176-180.

[6] 刘静, 陈莹, 赵辉, 等. 关于促进我国再生水利用的思考[J]. 中国水利, 2017, (15): 6-8, 11.
Liu J, Chen Y, Zhao H, et al. Integrate actions for the utilization of reclaimed water in China [J]. China Water Resources, 2017, (15): 6-8, 11.

[7] Toze S. Water reuse and health risks — real vs. perceived[J]. Desalination, 2006, 187(1-3): 41-51.

[8] Soller J A, Schoen M E, Bartrand T, et al. Estimated human health risks from exposure to recreational waters impacted by human and non-human sources of faecal contamination [J]. Water Research, 2010, 44(16): 4674-4691.

[9] 李国强. 紫外 LED 对再生水中病原指示菌的灭活及复活特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.

[10] World Health Organization. Potable reuse: guidance for producing safe drinking-water [R]. Geneva: World Health Organization, 2017.

[11] 刘祥举, 李育宏, 于建国. 我国再生水水质标准的现状分析及建议[J]. 中国给水排水, 2011, 27(24): 23-25, 29.
Liu X J, Li Y H, Yu J G. Present status and suggestions on reclaimed water quality standard in China[J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(24): 23-25, 29.

[12] GB/T 18920-2020, 城市污水再生利用 城市杂用水水质[S].

[13] GB/T 18921-2019, 城市污水再生利用 景观环境用水水质[S].

[14] GB/T 19923-2005, 城市污水再生利用 工业用水水质[S].

[15] GB/T 19772-2005, 城市污水再生利用 地下水回灌水质[S].

[16] GB 20922-2007, 城市污水再生利用 农田灌溉用水水质[S].

[17] GB/T 25499-2010, 城市污水再生利用 绿地灌溉水质[S].

[18] 周律, 邢丽贞, 段艳萍, 等. 再生水回用于景观水体的水质要求探讨[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 38-42.

- Zhou L, Xing L Z, Duan Y P, *et al.* On water quality of reclaimed water for waterscape recharge[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, **33**(4): 38-42.
- [19] WaterReuse Research Foundation. Potable reuse: state of the science report and equivalency criteria for treatment trains[M]. Alexandria, VA: WaterReuse Research Foundation, 2013.
- [20] ISO 20761, Water reuse in urban areas-Guidelines for water reuse safety evaluation-Assessment parameters and methods[S].
- [21] 胡玉霞. 水体细菌微生物多波长透射光谱解析方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [22] 王晋宇, 赵旭坤, 郭志宇, 等. 酶底物法与多管发酵法检测总大肠菌群差异分析[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(20): 139-141.
- Wang J Y, Zhao X K, Guo Z Y, *et al.* Analysis of difference between enzyme substrate technique and multiple tube fermentation technique in determination of total Coliforma[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(20): 139-141.
- [23] 庞宇辰. 再生水中有害细菌在氯消毒及储存过程中的变化特性[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [24] Cui Q, Liu H, Yang H W, *et al.* Bacterial removal performance and community changes during advanced treatment process: A case study at a full-scale water reclamation plant[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **705**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135811.
- [25] 崔丙健, 高峰, 胡超, 等. 不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5151-5163.
- Cui B J, Gao F, Hu C, *et al.* Effect of different reclaimed water irrigation methods on bacterial community diversity and pathogen abundance in the soil-pepper ecosystem[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5151-5163.
- [26] US Environmental Protection Agency. Guidelines for water reuse[R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2012.
- [27] NWRI. Examining the criteria for direct potable reuse: recommendations of an NWRI independent advisory panel[M]. Fountain Valley, CA: National Water Research Institute, 2013.
- [28] World Health Organization. Quantitative microbial risk assessment: application for water safety management[M]. Geneva: World Health Organization, 2016.
- [29] 姜晓华, 汤芳, 孙丽娟, 等. 基于 HACCP 原理的再生水粪大肠菌安全控制管理研究[J]. *中国给水排水*, 2015, **31**(14): 7-11, 15.
- Jiang X H, Tang F, Sun L J, *et al.* Control of fecal coliform in reclaimed water based on HACCP principles[J]. *China Water & Wastewater*, 2015, **31**(14): 7-11, 15.
- [30] WaterReuse Research Foundation. Critical control point assessment to quantify robustness and reliability of multiple treatment barriers of a DPR scheme[R]. Alexandria, VA: WaterReuse Foundation, 2016.
- [31] 胡洪营, 杜焯, 吴乾元, 等. 系统工程视野下的再生水饮用回用安全保障体系构建[J]. *环境科学研究*, 2018, **31**(7): 1163-1173.
- Hu H Y, Du Y, Wu Q Y, *et al.* Building the security guarantee system for water potable reuse in the vision of systematic engineering[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(7): 1163-1173.
- [32] Gerrity D, Gamage S, Jones D, *et al.* Development of surrogate correlation models to predict trace organic contaminant oxidation and microbial inactivation during ozonation. *Water Research*, 2012, **46**(19): 6257-6272.
- [33] 孙傅, 陈吉宁, 董欣. 城市排水领域应用 HACCP 体系的研究与实践进展[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(2): 1-4.
- Sun F, Chen J N, Dong X. Progress in research and practice of application of HACCP system to urban sewerage system[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, **23**(2): 1-4.
- [34] Water Reuse Research Foundation. Framework for direct potable reuse[Z]. Alexandria, VA: WaterReuse Association, 2015.
- [35] Water Association, National Water Research Institute (NWRI). Guidance framework for direct potable reuse in arizona[R]. Tucson, AZ: Water & Energy Sustainable Technology (WEST), 2018.
- [36] Schoen M E, Ashbolt N J, Jahne M A, *et al.* Risk-based enteric pathogen reduction targets for non-potable and direct potable use of roof runoff, stormwater, and greywater[J]. *Microbial Risk Analysis*, 2017, **5**: 32-43.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)