

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周姗, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物炭及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280)	
《环境科学》征订启事 (3301)	
信息 (3353, 3472, 3535)	

采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程

王利君¹, 李志华^{1*}, 韩冬¹, 张天宇², 杨成建¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 蒙大拿州立大学数学科学系, 美国蒙大拿州, 博兹曼 59717)

摘要: 厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 是一种高效、节能的脱氮技术, 但是其启动过程和稳定状态的表征目前仍缺乏一个简单易行的方法. 针对这一问题, 在水质分析的基础上, 采用颜色空间重点监测 ANAMMOX 启动过程中污泥的颜色变化, 并借助高通量测序技术对微生物菌群的种类和数量等进行分析. 结果表明: ①根据水质特征, 整个启动过程可分为活性迟滞期、活性增强期、负荷提高期、稳定运行期. 与此同时, HSV、CIELAB 颜色空间的指标, 整体上呈现先降低后升高的趋势, 然后保持稳定. 污泥颜色的变化与水质的变化以及分子生物学特征中优势菌群的变迁一致, 因此, 三者之间具有相关性, 进而表明, 采用颜色空间可对 ANAMMOX 启动过程进行准确表征; ②当遇到高负荷引起的冲击时, H 、 S 、 a^* 、 b^* 、 C_{ab}^* 等指标与总无机氮 (TIN) 容积去除速率均呈现降低的趋势, 而 H_{ab} 出现了突升, 但均能准确反映出系统的冲击特性. 提出了基于颜色空间表征 ANAMMOX 启动各阶段的方法并建立了一套冲击过程指标体系, 为颜色空间在 ANAMMOX 系统中的应用提供了理论基础.

关键词: 厌氧氨氧化; 颜色空间; 高通量测序; 图像分析; 负荷冲击

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3393-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701134

Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space

WANG Li-jun¹, LI Zhi-hua^{1*}, HAN Dong¹, ZHANG Tian-yu², YANG Cheng-jian¹

(1. Key Laboratory of Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Department of Mathematical Sciences, Montana State University, Bozeman, MT, USA 59717, USA)

Abstract: Anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) is an efficient and energy-saving denitrification technology, but it still lacks a simple and easy method to characterize its start-up process and stable state. Based on the analysis of water quality, color space was used to monitor the color change of sludge during the start-up of ANAMMOX, and the species and quantity of microbial flora were analyzed by high-throughput sequencing technology. The results were as follows. ① According to water quality characteristics, the whole start-up process can be divided into activity lag phase, activity enhancement period, load increase period, and stable operation period. At the same time, HSV and CIELAB color space indicators decreased first, then increased, and finally remained stable. The change of sludge color was consistent with the change of water quality and the change of dominant bacteria based on the molecular biology testing, which implies correlations among these three. Therefore, color space can be used to characterize the start-up process of ANAMMOX. ② When subjected to shocks caused by high load, H , S , a^* , b^* , C_{ab}^* , and TIN volume removal rate all decreased, while H_{ab} suddenly increased. The impact characteristic of the system was accurately expressed by all of the color indicators. This paper proposes a color space-based method for characterizing all phases of the start-up of ANAMMOX and a shock process index system that provides a theoretical basis for applying color space in ANAMMOX systems.

Key words: ANAMMOX; color space; high-throughput sequencing; image analysis; load impact

厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 是近 20 年发展起来的新型脱氮技术^[1,2], 自发现之初就以高效、经济、节能的优势, 迅速吸引了众多研究者^[3~6]. 厌氧氨氧化菌富含细胞色素^[7], 使污泥显现红色, 称“红菌”, 因而颜色这一表观特征对 ANAMMOX 具有特殊的指示作用^[8]. ANAMMOX 启动耗时长, 运行管理复杂, 亟需一个简单、易行的方法进行表征. 赵志宏等^[9]提出污泥颜色可反映 ANAMMOX 的启动进程, 张海芹等^[10]、刘晓宇等^[11]叙述 ANAMMOX 特性时也都关注污泥颜色的变化. 但目前颜色在

ANAMMOX 系统中的应用仅涉及黑色、灰色或红色的简单主观判断, 并无定量和详细描述. 因此, 定量表征污泥颜色对 ANAMMOX 系统研究具有一定的意义.

科学上发展出了很多种模型便于人们定量描述

收稿日期: 2017-01-16; 修订日期: 2017-03-15

基金项目: 陕西省住房和城乡建设厅科技计划项目 (2015-K63); 西安市社会发展引导计划-社会发展科技示范项目 (2016063SF/SF09)

作者简介: 王利君 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水生物处理技术, E-mail: wanglijun919@163.com

* 通信作者, E-mail: lizhihua@xauat.edu.cn

颜色,如 RGB、HSV、YUV、CIELAB 等^[12-14]. 各种颜色空间在科学界已有相当广泛的应用,并且已经深入到人们生活的各个方面,如发展出的肤色检测系统^[15]、酿造啤酒^[16]、堆肥等^[12]. 但是颜色空间在污水处理领域系统性地应用鲜见报道^[17]. 另外,图像分析已经是科学界常用的技术手段之一^[18,19]. 故本文采用数码相机拍照的方式获取污泥图像,拟利用 ANAMMOX 污泥的特征红色来探究各颜色空间在污泥系统中的应用,以期找到一种表征 ANAMMOX 启动各阶段以及冲击过程的简单方法,进而对 ANAMMOX 系统的研究提供一定的理论基础.

1 材料与方法

1.1 试验装置

本试验所用装置为有机玻璃制成的 UASB 反应器,外加循环水保温层. 总有效容积 21.3 L,反应区有效容积 11.3 L,直径 120 mm,高径比 8.3. 由温控仪维持内部温度稳定在 $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,并用锡箔纸包裹,以防止光照的影响. 反应器上部沉淀区设有回流,回流液与模拟废水一起经蠕动泵由底部进入反应器.

1.2 试验废水

采用人工配水方案,主要由 NH_4Cl (按需添加), NaNO_2 (按需添加), KHCO_3 $1.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $0.01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.0056 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素浓缩液 I、II $1.25 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 组成. 其中,微量元素浓缩液 I: EDTA $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; 微量元素浓缩液 II: EDTA $15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 H_3BO_3 $0.014 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $0.99 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $0.025 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.43 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NiCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $0.19 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{Na}_2\text{SeO}_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $0.21 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.22 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 每次配水都以 N_2 吹脱除氧.

1.3 接种污泥

本试验接种污泥选择西安市某垃圾渗滤液处理厂污泥,该池运行条件为: MLSS $32440 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 进水 COD 与 NH_4^+-N 分别为 $15500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 沉淀性能较差. 污泥经多次洗泥后接种于反应器内,初始 MLSS $9985 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 充分曝 N_2 , 厌氧饥饿 13 h 左右,开始进水培养.

1.4 启动条件

反应器温度稳定在 $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$; HRT 为 24 h; 进水 pH 值用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ HCl}$ 调节至 7.0~7.5; 启动

初期进水 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 浓度为 $42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,经过活性迟滞期以后,间歇性大幅度提高基质浓度.

1.5 颜色空间

在 RGB 颜色空间中, R 值表示红色, G 值表示绿色, B 值表示蓝色,所有的颜色都可以由该三原色叠加而成; HSV 颜色空间也称六角锥体模型,包含 3 个指标,其中, H 值表示色调, S 值表示饱和度, V 值表示明度; CIELAB 空间是一个相对比较均匀的颜色系统,其中, L 值表示亮度, a^* 、 b^* 值表示色度. 3 种颜色空间可相互转化.

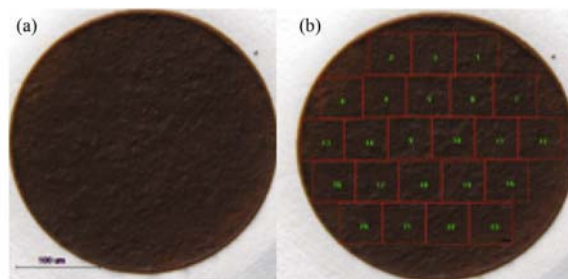
1.6 监测指标及测定方法

1.6.1 水质指标

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 均采用标准方法测定^[20], TIN 为三者之和; NH_4^+-N 消耗量: NO_2^--N 消耗量: NO_3^--N 生成量,称为三氮之比,理论值为 1: 1.32: 0.26.

1.6.2 颜色指标及分析方法

①定期取反应器中的污泥适量,取样时,向反应器内曝适量 N_2 , 使反应器内液体处于完全混合状态,取样后立即进行过滤,在滤纸上得到固体污泥; ②然后用数码相机 (Nikon COOLPIX P90) 对固体污泥进行拍摄,同一份样品拍摄不少于 20 张照片 [图 1(a)], 拍摄时注意选择合适的拍摄模式,使照片尽可能地反映出污泥的真实颜色,并且使污泥区域占照片面积的 2/3 左右; 本试验所拍照片并未控制外界光照条件,增加了实际应用的说服力; ③拍摄者根据看到的污泥真实颜色,从照片中选取至少 3 张与真实污泥颜色相近的照片,用图像分析软件 (Image-Pro Plus 6.0) 对各张照片中的污泥区域进行 RGB 值分析; ④分析时,用相同大小的取样框将无杂质的污泥区域分割成若干个分析对象 [图 1(b)], 统计分析得到 R 值、 G 值、 B 值; ⑤通过公式将得到的 R 、 G 、 B 值转化为 HSV、CIELAB 等颜色空间^[12,21] 中的 H 、 S 值以及 a^* 、 b^* 值; ⑥ Hue



(a) 过滤后的污泥样品示例, (b) 图像分析示例, 标尺长度 100 μm

图 1 颜色指标分析示例

Fig. 1 Example of color index analysis

(H_{ab})、Chroma (C_{ab}^*)是 CIELAB 空间中利用如下公式^[22]得到的两个指标: $H_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$; $C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$,其中 a^* 、 b^* 为色度。

1.6.3 高通量测序方法

选取接种污泥、培养第 76 d 以及第 213 d 的污泥进行高通量测序分析,方法见文献 [23,24]。

2 结果与讨论

2.1 反应器运行特性分析

反应器运行水质变化情况如图 2 所示,整个过程可分为 4 个阶段。

第 I 阶段:活性迟滞期(第 0 ~ 74 d),进出水 NH_4^+ -N 几乎相等[图 2(a)],系统对 NH_4^+ -N 的降解能力较弱;出水 NO_2^- -N 浓度在接种后由 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐渐升高至 $35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [图 2(b)],系统对 NO_2^- -N 的降解能力逐渐减弱;反应器 TIN 的去除率和容积去除速率也呈现逐渐降低的趋势,分别由 57% 降低至

5% 左右, $0.0615 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 降低至 $0.0121 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右[图 2(c)],整体脱氮能力逐渐减弱。此阶段,系统对 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 均有去除,ANAMMOX 特征虽已显现^[25],但不明显,三氮之比也呈现较大的波动(图 3)。

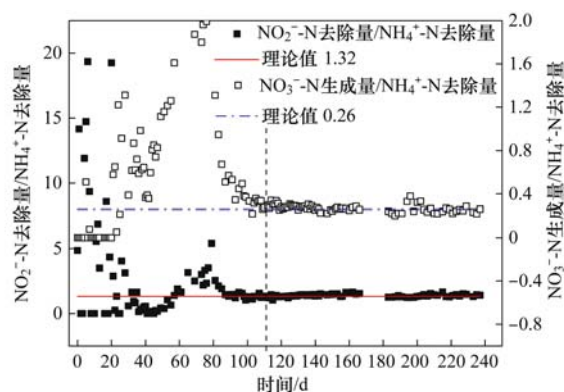


图 3 三氮之比的变化

Fig. 3 Variation of the ratio of three nitrogen forms

第 II 阶段:活性增强期(第 75 ~ 102 d),出水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度逐渐降低,二者去除率迅速升高至 95% 和 97% [图 2(a) 和 2(b)],ANAMMOX 特征明显;同时,TIN 去除率和容积去除速率分别升高至 80% 和 $0.0820 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,系统脱氮能力迅速增强。此时并未直接提高进水基质浓度(在负荷提高期之前,进水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度均在 $42 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右),而是让系统继续稳定运行一段时间。

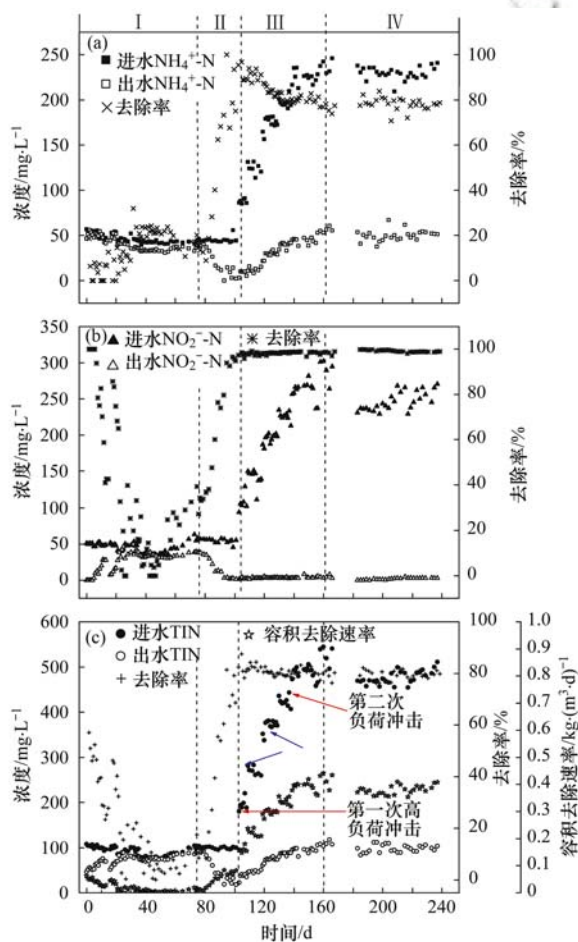
第 III 阶段:负荷提高期(第 103 ~ 160 d),从第 103 d 开始,间歇性大幅度提高进水基质浓度。此阶段,出水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度较低,三氮之比逐渐接近理论值 1:1.32:0.26(图 3),标志着 ANAMMOX 的成功启动^[2],此时,TIN 去除率稳定在 80% 左右,TIN 容积去除速率逐渐上升,最后达到最大值 $0.441 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,具有较强的 ANAMMOX 活性。

第 IV 阶段:系统启动成功后,一直维持稳定运行,第 167 ~ 182 d 之间未进行监测,第 183 d 恢复监测, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 去除率分别稳定在 80% 和 98% 左右,TIN 去除率和容积去除速率分别稳定在 80% 和 $0.380 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右。

2.2 颜色空间、水质及分子生物学的关联性分析

由 2.1 节所述水质特征可知,本研究中 ANAMMOX 系统启动的整个过程,TIN 容积去除速率,即脱氮能力,整体上呈现先降低后升高的趋势,然后保持稳定。

与此同时,整个培养阶段的分子生物学特征变化较大(图 4)。接种污泥的优势菌群为 *Ottowia* 属



(a)、(b)、(c) 分别为进出水 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、TIN 浓度及去除率的变化

图 2 反应器运行水质变化

Fig. 2 Variation of water quality during the operation

(6.92%) 和 *Thauera* 属 (2.12%) (图 4), 都具有反硝化功能^[26], 因此, 在接种初期系统具有一定的脱氮能力, TIN 去除率为 57%; 培养至第 76 d 时, 优势菌群变为 *Armatimonadetes_gp5* 属 (10.63%) (图 4), *Ottowia* 属和 *Thauera* 属的比例已分别降至 1.09%、1.66%, 因此在活性迟滞期 NO_2^- -N 的去除率呈现下降的趋势, 致使整体脱氮能力逐渐减弱; 在培养至第 213 d 时, 系统中则主要以厌氧氨氧化菌群为主:

Candidatus anammoxoglobus 属 (43.92%), *Candidatus kuenenia* 属 (1.88%), *Candidatus brocadia* 属 (0.91%) (图 4), 具有较高的 ANAMMOX 活性, TIN 容积去除速率维持在 $0.380 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右. 水质和分子生物学特征在整个培养过程中具有较高的一致性. 同时也表明在人工定向培养的条件下, 微生物菌群发生更替, 接种污泥的原有功能越来越弱甚至消失.

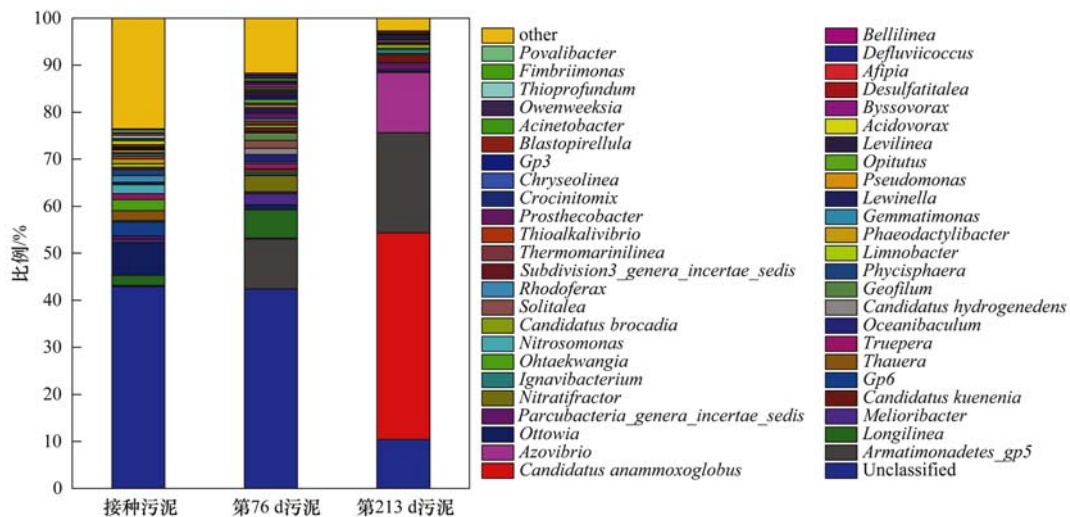


图 4 高通量测序结果

Fig. 4 High-throughput sequencing results

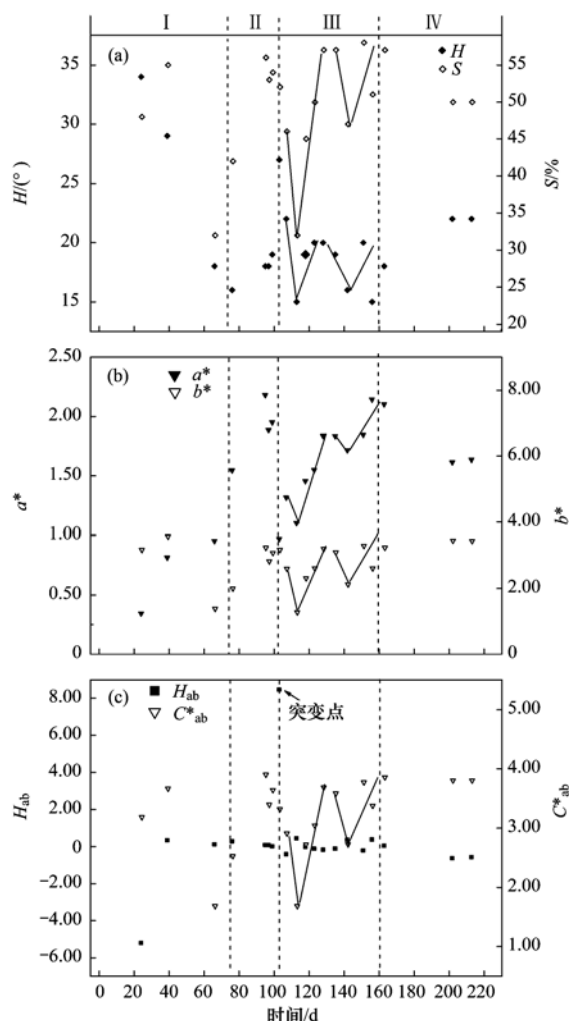
与水质和分子生物学特征一样, 整个培养过程的颜色空间指标也具有较大差异 (图 5). 在第 I 阶段, H 、 S 、 b^* 、 C_{ab}^* 的平均值分别由 32° 减小为 18° 、52% 减小为 32%、3.37 减小为 1.39、3.42 减小为 1.68; 在第 II 阶段, H 、 S 、 a^* 、 b^* 、 C_{ab}^* 均呈现上升的趋势 (图 5), 分别由 16° 升高为 27° 、42% 升高为 52%、1.55 升高为 1.95、2.00 升高为 3.08、2.53 升高为 3.64, 与 TIN 容积去除速率变化一致 [图 2(c)]; 在第 III 阶段, S 、 a^* 、 b^* 、 C_{ab}^* 的平均值分别由 45% 升高为 54%、1.28 升高为 1.88、2.39 升高为 2.86、2.74 升高为 3.43, H 的平均值虽未升高, 但只是略有降低, 总体上颜色指标与 TIN 容积去除速率都呈现上升的趋势; 在运行的最后阶段, 各颜色指标也都相对稳定 (图 5).

综上所述, 培养过程中的颜色各指标变化跟 TIN 容积去除速率和分子生物学特征保持一致, 即颜色指标也能很好地指示出 ANAMMOX 启动过程的特征. 表明颜色空间指标、出水水质及微生物群落之间具有很好的相关性, 故上述颜色空间可与水质结合, 综合研究 ANAMMOX 污泥系统的特征.

2.3 培养过程的负荷冲击及颜色的指示作用

当反应器运行至约第 100 d 时, TIN 去除率达到最大 [图 2(c)], 各颜色指标也增加到最大值, 此时 TIN 容积去除速率虽处于上升的趋势, 但仅在 $0.157 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右, 还未启动成功, 反应器抵抗冲击的能力较弱. 因此, 在第 III 阶段第一次大幅提高负荷后 [图 2(c)], TIN 去除率由 88% 降低至 78%, TIN 容积去除速率也由 $0.157 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 微降至 $0.148 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 反应器受到了冲击, 与此同时, 各颜色指标也呈现降低的趋势 (图 5). 另外, 此次冲击, TIN 去除率和容积去除速率波动较小, 但各颜色指标的下降趋势明显, 因此, 相比于水质, 颜色指标能更好地反映系统所受的冲击. 尤其是 H_{ab} , 出现了较大突变 [图 5(c)]; 污泥在经过初期培养后, 运行条件稳定的情况下, H_{ab} 一直稳定在 $-0.50 \sim 0.50$ 之间, 波动较小. 但是在第一次大幅提升负荷引起较大冲击时, H_{ab} 突升至 8.47, 很好地反映出系统受到了冲击.

第 III 阶段第一次提升负荷稳定后, 反应器的 ANAMMOX 活性稳步增强 [图 2(c)], 随后的两次



(a) HSV 空间中 H 和 S 的变化, (b) CIELAB 空间中 a^* 和 b^* 的变化, (c) H_{ab} 和 C^*_{ab} 的变化

图 5 反应器运行颜色指标变化

Fig. 5 Variation of color indicators

提升负荷并未影响系统的稳定, TIN 去除率几乎无波动, TIN 容积去除速率仍处于逐渐上升趋势, 颜色指标也呈上升趋势。

当反应器运行至第 130 d 提升负荷时, TIN 去除率几乎无变化, TIN 容积去除速率由 $0.356 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 降至 $0.332 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 与此同时, 各颜色指标也出现了下降的趋势(图 5)。这也再次证明相较于水质, 颜色指标能更灵敏地反映出反应器受到的冲击。因此基于颜色空间的冲击指标体系可准确、灵敏地反映出系统运行条件的变化。

3 结论

(1) 提出了基于颜色空间的表征 ANAMMOX 启动各阶段的方法, 该方法与水质和分子生物学技术具有一致性, 能准确表征 ANAMMOX 启动特性。

(2) 提出了基于颜色空间的冲击过程指标体系, 该体系可准确、灵敏地反映出系统运行条件的变化。尤其是 H_{ab} : 当反应器正常运行时, H_{ab} 一直维持稳定, 但是当提升负荷造成冲击时, H_{ab} 出现突升, 很好地反映出冲击过程。

参考文献:

- [1] van de Graaf A A, Mulder A, de Bruijn P, *et al.* Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, **61**(4): 1246-1251.
- [2] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [3] 赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵. 生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3171-3179.
Lai W Y, Zhou W L, He S B. Study on the start-up of anaerobic ammonium oxidation process in biological activated carbon reactor[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3171-3179.
- [4] Puylol D, Carvajal-Arroyo J M, Sierra-Alvarez R, *et al.* Nitrite (not free nitrous acid) is the main inhibitor of the anammox process at common pH conditions[J]. *Biotechnology Letters*, 2014, **36**(3): 547-551.
- [5] 刘常敬, 李泽兵, 郑照明, 等. 不同有机物对厌氧氨氧化耦合反硝化的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(1): 87-94.
Liu C J, Li Z B, Zheng Z M, *et al.* Effect of different organic matters on anammox coupling denitrifying [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(1): 87-94.
- [6] 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 等. 基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2652-2658.
Chen C J, Zhang H Q, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of microbial community in each compartment of ABR ANAMMOX reactor based on high-throughput sequencing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2652-2658.
- [7] van de Graaf A A, de Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [8] Xiong L, Wang Y Y, Tang C J, *et al.* Start-up characteristics of a granule-based Anammox UASB reactor seeded with anaerobic granular sludge[J]. *Biomed Research International*, 2013, **2013**: 396487.
- [9] 赵志宏, 廖德祥, 李小明, 等. 厌氧氨氧化微生物颗粒化及其脱氮性能的研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 800-804.
Zhao Z H, Liao D X, Li X M, *et al.* Cultivation and nitrogen removal characteristics of ANAMMOX granules [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(4): 800-804.
- [10] 张海芹, 王翻翻, 李月寒, 等. 不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(6): 2216-2221.
Zhang H Q, Wang F F, Li Y H, *et al.* Start-up performance of ANAMMOX enrichment with different inoculated sludge in anaerobic baffled reactor[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 2216-2221.
- [11] 刘晓宇, 王思慧, 薛耀琦, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥的快速培养与形成机理[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(3): 1223-

- 1227.
- Liu X Y, Wang S H, Xue Y Q, *et al.* Rapid cultivation and formation mechanism of ANAMMOX granular sludge [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10** (3): 1223-1227.
- [12] Viscarra Rossel R A, Minasny B, Roudier P, *et al.* Colour space models for soil science[J]. Geoderma, 2006, **133**(3-4): 320-337.
- [13] Khan M A I, Ueno K, Horimoto S, *et al.* CIELAB color variables as indicators of compost stability [J]. Waste Management, 2009, **29** (12): 2969-2975.
- [14] 李伟, 胡艳侠, 吕岑. 基于 HSV 空间的玉米果穗性状的检测[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2017, **43** (1): 112-116.
- Li W, Hu Y X, Lv C. Traits detection of corn ear based on HSV color space [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2017, **43** (1): 112-116.
- [15] Reeder A I, Iosua E, Gray A R, *et al.* Validity and reliability of the munsell soil color charts for assessing human skin color[J]. Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention, 2014, **23** (10): 2041-2047.
- [16] 王宏, 陈晓艺, 张军翔. 贺兰山东麓年轻红葡萄酒的 CIELab 颜色空间特征[J]. 食品科学, 2014, **35** (9): 20-23.
- Wang H, Chen X Y, Zhang J X. Characteristic analysis of young red wine from the eastern foot of Helan mountain based on CIELab color space parameters [J]. Food Science, 2014, **35** (9): 20-23.
- [17] 丁爽. 厌氧氨氧化关键技术及其机理的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014. 21-38.
- [18] Choodum A, Kanatharana P, Wongniramaikul W, *et al.* Using the iPhone as a device for a rapid quantitative analysis of trinitrotoluene in soil[J]. Talanta, 2013, **115**: 143-149.
- [19] Smoczyński L, Ratnaweera H, Kosobucka M, *et al.* Image analysis of sludge aggregates [J]. Separation and Purification Technology, 2014, **122**: 412-420.
- [20] 国家环境保护局. 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. 258-282.
- [21] Navarro P J, Alonso D, Stathis K. Automatic detection of microaneurysms in diabetic retinopathy fundus images using the L * a * b color space[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2016, **33** (1): 74-83.
- [22] Sharma G, Wu W C, Dalal E N. The CIEDE2000 color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations [J]. Color Research and Application, 2005, **30** (1): 21-30.
- [23] Cao S B, Du R, Li B K, *et al.* High-throughput profiling of microbial community structures in an ANAMMOX-UASB reactor treating high-strength wastewater[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, **100** (14): 6457-6467.
- [24] 蔡元锋, 贾仲君. 基于新一代高通量测序的环境微生物转录组学研究进展[J]. 生物多样性, 2013, **21** (4): 401-410.
- Cai Y F, Jia Z J. Progress in environmental transcriptomics based on next-generation high-throughput sequencing [J]. Biodiversity Science, 2013, **21** (4): 401-410.
- [25] Wang T, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Start-up of the Anammox process from the conventional activated sludge in a membrane bioreactor[J]. Bioresource Technology, 2009, **100** (9): 2501-2506.
- [26] 王学华, 黄俊, 宋吟玲, 等. 高效水解酸化 UASB 活性污泥的菌群结构分析[J]. 环境科学学报, 2014, **34** (11): 2779-2784.
- Wang X H, Huang J, Song Y L, *et al.* Analysis on bacterial community structure in UASB reactor's sludge with hydrolysis acidification capacity of a dyeing wastewater treatment process [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34** (11): 2779-2784.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-peí, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)