

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发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)	

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¹, 杨敬畏¹, 李悦¹, 李帅^{1,2}, 张诗睿¹, 王文强¹, 张杰^{1,2}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 室温下接种成熟的好氧颗粒污泥于由独立的缺氧池和好氧池组成的缺氧/好氧交替连续流系统中, 以实际生活污水为进水基质, 探究曝气强度和水力停留时间对连续流系统的影响。研究表明在回流比为 2, 较小的曝气强度 ($0.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$) 和适当的水力停留时间 (9 h) 条件下更有利于污染物的去除, 此时 TP 平均去除率为 80.43%, TN 平均去除率为 83.6%, COD 平均去除率为 90.39%, 污泥浓度为 $2100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 污泥体积指数保持在 $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下, 颗粒粒径在 700 ~ 800 nm 之间。用 EEM-PARAFAC 模型对不同阶段的 EPS 表征结果表明, EPS 组成成分随着运行参数的改变而改变, 水力停留时间对连续流系统有更大的影响。此外通过高通量测序的方法评估连续流系统中的微生物多样性, 建立污染物去除模型, 并在系统中发现了与脱氮除磷相关的 11 种主要功能菌。

关键词: 连续流; 好氧颗粒污泥; 脱氮除磷; 缺氧好氧交替; 平行因子; 污染物去除模型

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2385-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009206

Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System

LI Dong¹, YANG Jing-wei¹, LI Yue¹, LI Shuai^{1,2}, ZHANG Shi-rui¹, WANG Wen-qiang¹, ZHANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Mature aerobic granular sludge was inoculated at room temperature in an anaerobic/aerobic alternating continuous flow system. The system consisted of two independent anaerobic and aerobic tanks. Actual domestic sewage was used as the influent to explore the influence of the gas intensity and hydraulic residence time on the continuous flow system. The results revealed that the conditions of a reflux ratio of 2, lower aeration intensity ($0.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$), and proper hydraulic residence time (9 h) were more conducive to the removal of pollutants. Under such conditions, the average removal rate of TP was 80.43%, the average removal rate of TN was 83.6%, the average removal rate of COD was 90.39%, the sludge concentration was approximately $2100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the sludge volume index was maintained below $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, and the particle size was 700-800 nm. The EEM-PARAFAC model was used to characterize and analyze the EPS at different stages. The results revealed that changing the parameters could change the composition of EPS. The hydraulic residence time had a greater impact on the continuous flow system than the aeration intensity. In addition, a preliminary conceptual reaction process model in the anaerobic/aerobic alternating continuous flow system was built using high-throughput pyrosequencing and phylogenetic assignment. Eleven major functional bacteria related to nitrogen and phosphorus removal were found in the system.

Key words: continuous flow; aerobic granular sludge; nitrogen and phosphorus removal; anaerobic and aerobic alternate; parallel factor analysis; preliminary conceptual reaction process model

与传统活性污泥工艺相比,好氧颗粒污泥工艺具有更高的处理性能和更高的生物量,所以被认为是很有前景的污水处理技术^[1,2]。近几十年来,国内外学者对于好氧颗粒污泥工艺的反应器构型和工艺参数优化等方面做了很多研究。其中最常见的是 SBR 反应器,其间歇性的进水和沉淀提供了比连续流更理想的环境^[3,4],但是在大型污水处理厂中, SBR 反应器运行较为复杂,不利于管理。所以现阶段对于连续流的研究是热点。

以往对采用单一曝气方式运行的连续流研究发现,单个颗粒中含有多种氧化还原区(包括好氧区

和厌氧区)为连续流系统的脱氮除磷提供了各种环境,但是存在去除率偏低、系统不稳定等问题。所以有学者进一步研究发现,适当地改变外部微环境可以提高去除效果,促进颗粒污泥的稳定性。Moura 等^[5]研究了时间间歇曝气运行模式(TiO 模式, 2 h 曝气和 1 h 无曝气)对 TN 和 COD 的影响,结果表明

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2020-10-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-001); 北京高校卓越青年科学家计划项目(BJJWZYJH01201910005019)

作者简介: 李冬(1976~),女,博士,教授,主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

该系统在 10 h 的水力停留时间条件下,TN 和 COD 去除率分别为 82% 和 85%,此外,Wosiack 等^[6]研究了连续流动床反应器在 TiO 模式下同时去除 TN 和 COD 的性能,实验结果表明在 158 min 曝气和 180 min 的循环条件下,COD 和 N 的去除率分别为 80% 和 88%. 以上研究表明,时间间歇操作产生的厌氧/好氧交替环境有利于提高连续流动反应器中污染物去除效率.但是以上研究还存在不能同步去除氮磷和通过时间间歇运行方式运行会增加连续流系统操作的复杂性等问题.

鉴于上述问题,有学者提出空间间歇运行的方式,Li 等^[7]使用一体式连续流反应器在内部分割出缺氧区、好氧区和颗粒污泥选择区,该系统同时具有硝化、反硝化和除磷等功能,在 4 个月的运行时间里,该系统具有较好的脱氮除磷性能,COD、TN 和 TP 的平均去除率分别为 95%、70.6% 和 77.4%,但是作者注意到在该连续流缺氧/好氧交替过程中,由于在同一反应器中均匀混合搅拌,缺氧区并未达到实际的微生物所需生存环境,溶解氧偏高,异养菌未能充分利用碳源,致使回流到好氧区的 COD 过高,丝状菌繁殖,反硝化及除磷性能受到影响,所以有必要对连续流空间间歇运行方式做进一步优化,并且以上研究均采用人工配水,人工配水的有机物易被微生物吸收利用,而实际生活污水水质成分复杂,由易生物降解物质、慢速降解物质和溶解性惰性物质组成,其中,溶解性惰性物质中包含不可生物降解的 COD,考虑到实践中对氮和磷去除的需求以及缺氧/好氧(A/O)工艺在大规模污水处理厂中使用广泛,所以使用连续流处理低浓度实际生活污水的可行性尚待进一步研究.

有研究表明流体剪切力、水力停留时间(HRT)、溶解氧(DO)和选择压等都对好氧颗粒污泥的运行具有重要的影响^[8~10].其中 DO 和 HRT 对颗粒的形成速度、结构和稳定性影响显著,被认为是影响好氧颗粒污泥稳定性的关键因素.但是现阶段大多数关于好氧颗粒污泥参数优化研究还集中于 SBR 反应器中,所以有必要研究 DO 和 HRT 对连续流系统的影响.

近年来平行因子分析(PARAFAC)与三维荧光光谱(EEM)结合已成为废水处理领域中表征溶解性有机物(DOM)的常用工具.而废水中 DOM 的不同有机成分在改变整体处理性能以及处理水体的水质方面起着重要作用^[11,12].所以利用平行因子分析方法对不同运行参数条件下连续流颗粒污泥的溶解性有机物质做进一步探究,并采用高通量测序方法评估连续流系统中微生物的多样性.

因此,本研究的目的:①提出缺氧/好氧两级连续流系统,该系统由独立的缺氧池和好氧池组成,并以实际生活污水为进水基质的条件下,研究曝气强度和水力停留时间对连续流系统的影响;②解析不同参数条件下的颗粒污泥 EPS,将污染物去除和污泥特性关联,进一步考察 HRT 和 DO 对好氧颗粒污泥连续流系统的影响;③通过高通量测序的方法评估连续流系统中的微生物多样性,归类功能菌群,并建立污染物去除模型.

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行参数

本研究采用的是由非曝气池和曝气池串联组成的缺氧/好氧交替连续流反应器,反应器均由有机玻璃制成,其中曝气池由好氧区和颗粒污泥选择区组成,非曝气池由缺氧区组成.为保留生物物质,本研究采用系统内部形成的水力剪切力(机械搅拌及曝气)完成缺/好氧区的交替过程从而代替蠕动泵压破颗粒的不利影响,其中回流比通过控制阀门开关来计算.颗粒污泥选择区为在好氧区内置的颗粒污泥选择装置,其特殊构造使其更好进行泥水分离防止气泡进入选择区内,然后使沉降的颗粒污泥返回好氧区,实现污泥的回收.内部选择装置由两部分组成:①圆柱形的腔室,在外部有 7 个排污口,用于排放水和污泥.②在腔室的底部有 2 个对称的三角形交换孔和 1 个特殊的挡板,利于颗粒的沉淀.

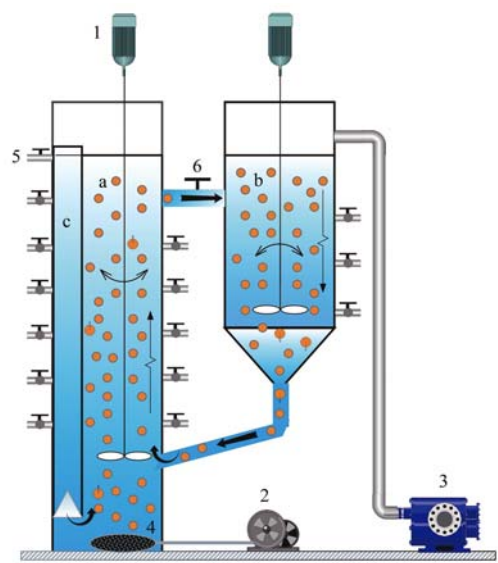
首先生活污水由水泵进入缺氧反应区(图 1 中 b 区),然后经过缺氧搅拌的生物反应后,带有颗粒污泥的废水流入好氧反应区(图 1 中 a 区).在颗粒污泥选择区(图 1 中 c 区)中,沉淀性能较好的颗粒污泥在没有水泵提供任何压力的情况下会自动回落到好氧区(图 1 中 a 区),实验装置如图 1 所示,各部分体积如表 1 所示.反应器具体运行参数见表 2.

表 1 反应器各部分体积

Table 1 Volume of each part of the reactor					
项目	区域	有效体积/L	直径/cm	高度/cm	高径比
曝气池	好氧区	20	18	100	5.55
曝气池	沉淀区	2	6	85	14.17
非曝气池	缺氧区	12	20	59	2.95

表 2 实验运行阶段及条件

Table 2 Operational conditions of the reactor		
阶段	曝气量/L·min ⁻¹	水力停留时间/h
阶段 I	1.0	13
阶段 II	0.6	13
阶段 III	0.6	9
阶段 IV	0.6	6



1. 搅拌器; 2. 曝气泵; 3. 进水泵; 4. 曝气盘; 5. 出水口; 6. 阀门;
a. 好氧区; b. 缺氧区; c. 颗粒污泥选择区

图1 缺氧/好氧交替连续流示意

Fig. 1 Schematic diagram of the anaerobic/aerobic alternating continuous flow system

1.2 接种污泥与实验用水

反应器接种实验室培养的成熟好氧颗粒污泥,反应器初始混合液浓度为 $2\,950\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 本实验用水为北京市某家属区化粪池污水,各项水质指标见表3.

表3 实验用水水质特征/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Water quality of the experimental water/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

指标	COD	NH_4^+-N	NO_3^--N	TN	TP
范围	180~350	28~60	0~2	35~70	2~6
均值	247.7	39.4	1.2	42.3	3.1

1.3 分析及计算方法

检测反应器出水碳、氮和磷的浓度,其中化学需氧量(COD)和总磷(TP)测定采用SB-3B型COD多参数快速测定仪,氨氮(NH_4^+-N)测定采用纳氏试剂光度法,亚硝酸盐氮(NO_2^--N)测定采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法,硝酸盐氮(NO_3^--N)测定采用紫外分光光度法^[13]. pH、DO和氧化还原电位(ORP)监测采用WTW多参数测定仪. MLSS按照称重法测定. 颗粒粒径采用Mastersize 2000型激光粒度仪测定.

本实验中HRT和回流比(R)按下式计算:

$R = \text{回流流量} / \text{进水流量}$

回流流量的测定按照管中流速及横截面积计算.

$\text{HRT} = \text{反应器体积} / \text{进水流量}$

1.4 EPS提取方法

胞外聚合物(EPS)是按照改良的热提取方法提

取^[14,15],首先在室温下取30 mL颗粒污泥于50 mL离心管用 $4\,000g$ 的作用力离心10 min,脱水后,颗粒污泥混合物用缓冲液定容到30 mL. 悬浮液在 $4\,000g$ 作用力下再次离心15 min,去除上清液. 随后,用上述缓冲溶液重新定容至30 mL. 将颗粒污泥悬浮液在水浴中加热至 60°C ,30 min,每隔10 min摇动1次,再将颗粒污泥混合物在 $20\,000g$ 和 4°C 下离心20 min. 进行3次样品平行测试. 胞外聚合物中蛋白质(PN)采用Lowry法测定,多糖(PS)采用葱酮硫酸法测定^[16,17].

1.5 三维荧光和平行因子分析

在本研究阶段,对不同阶段颗粒污泥的EPS进行了三维荧光扫描,采用扫描参数为:激发/发射波长间隔10 nm,扫描速度 $15\,000\text{ nm}\cdot\text{min}^{-1}$,激发带宽及发射带宽为10 nm,增益(PMT)为550 V,自动匹配响应时间. 得到扫描数据组后,采用Stedmon和Rasmus Bro开发的MALAB toolbox DOM Fluor对得到的结果进行平行因子法建模. 根据每个模型的残差确定每个样品中的组分数.

其他参数也用于深入分析数据:实验计算出腐殖化指数(HIX)^[18,19]以衡量腐化度. HIX的计算基于 E_x 在255 nm处 E_m 为435~480 nm和300~345 nm的发射光谱面积之比. 此外,根据McKnight等^[20]的研究,具有较低芳香性的微生物衍生的富里酸比有机或土壤来源的富里酸吸收更少的可见光和紫外线. 因此,Johnson等^[21]开发了一种使用荧光指数(FI)的计算方法,该方法高度概括了溶解有机物(DOM)的信息. 荧光指数的计算是基于 E_x 在370 nm处 E_m 为470 nm和520 nm的荧光发射强度之比.

1.6 微生物分析

此外,本章研究取系统阶段Ⅲ末期的好氧颗粒污泥为样品,对连续流系统中的微生物种群特性分析,样品于50 mL离心管中在 -20°C 下保存. 高通量测序及系统发育树的绘制工作由ALLWEGENE公司(中国,北京)完成,其DNA提取、PCR扩增、高通量测序及数据处理过程如文献[22]所述,使用E. Z. N. ASoil DNA试剂盒(OMEGA, Norcross, GA, USA)进行DNA的提取和纯化,提纯过的DNA在1%的琼脂胶内电泳. 细菌的16s RNA扩增用探针为:336-F(5'-GTACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和806-R(5'-GTGGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'),测序区段为V3-V4,使用TransGenAP221-02;TrasStart Fastpfu DNA扩增试剂盒(TransGen Biotech,中国,北京). 原始数据使用Mothur和QIIME处理. 每个样品中得到大于150 000个序列,每个序列440 bp. 得到的有效基因序列从门到属进行归类^[23],操作分类

单元(operational taxonomic units, OTUs)聚类时取变异系数 3%, 并使用 Chao 1 指数及 Shannon 指数进行系统多样性表征. 接着对 OTU 进行归类, 分析系统中微生物的功能菌群.

2 结果与讨论

2.1 运行各阶段除污效果

在室温下, 接种成熟的好氧颗粒污泥于缺氧/好氧两级交替连续流系统中, 并设定进水流量为 $2.45 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$, 设置理论交替循环次数为两次, 调节阀门测定管中流速, 设置回流比为 2, 缺氧区有效容积为 12 L, 好氧区有效容积为 20 L, 故反应器的 HRT 为 13 h, 调至好氧区内曝气量为 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 好氧区内溶解氧保持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 缺氧区内溶解氧在整个阶段均保持在 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

运行过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN、TP

和 COD 变化情况如图 2 所示, 接种后, 由于颗粒污泥在接种之前是在进水 COD/N 为 8:1 的连续流反应器中进行培养, 人工配水水质成分单一, 培养的好氧颗粒污泥抗冲击性能较差, 而且实际生活污水中有机物成分复杂且浓度波动大^[24], 所以前 3 d 的 COD 去除率在 80% 左右, 污染物去除性能较差, 但是这种水质的改变并没有对好氧颗粒污泥造成太大影响, 随着污泥适应了实际生活污水水质的运行环境, 连续流系统脱氮除磷能力上升, 说明好氧颗粒污泥系统有着较强的适应水质变化的能力.

在实验的第 II 阶段, 将好氧区内曝气量调为 $0.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 而保持 HRT 不变, 好氧区内此时溶解氧保持在 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 结果表明, 与之前学者^[25]所做研究不同, 随着 DO 的降低, COD 的平均利用率升高 7%, 污染物去除能力升高, 分析可能由于在 DO

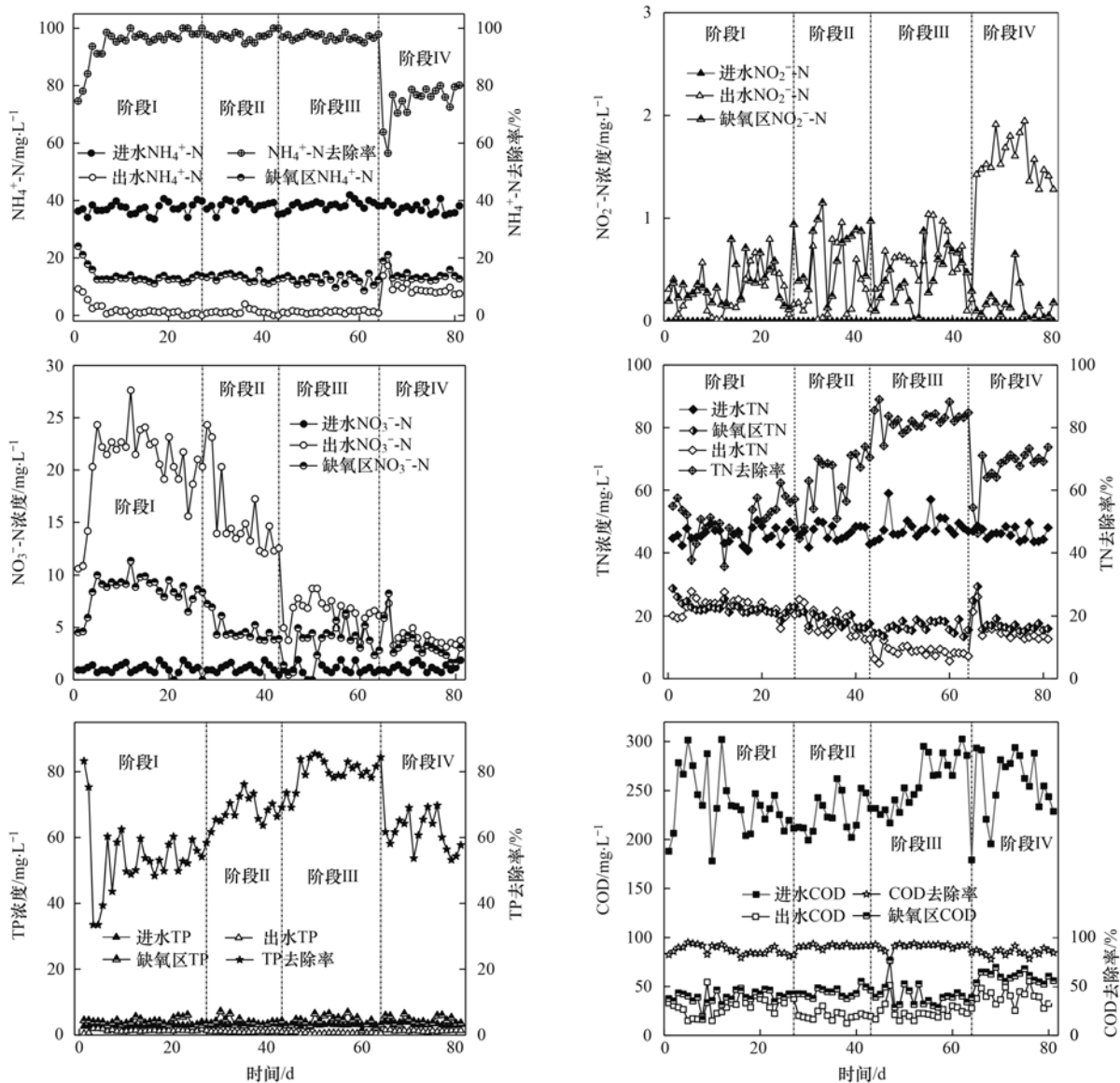


图2 运行过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN、TP 和 COD 变化情况

Fig. 2 Variations in the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, COD, TP, and TN concentrations during the process

差距较大的两级反应器交替过程中抑制了异养菌的生长,并且较高 DO 在回流过程中可能一部分带入缺氧环境,打破了部分缺氧环境导致异养菌活性降低.所以较高的 DO 并没有提高系统的氮磷去除能力,反而削弱了系统的反硝化及释磷能力.

随着实验的进一步运行和水力停留时间的缩短,有机负荷率增加,两级连续流系统内呈现出明显的 COD 浓度差,不仅提高了传质动力,亦有效抑制了丝状菌的过度生长^[26],在 44~64 d 时,TP 平均去除率为 80.43%,TN 平均去除率为 83.6%,COD 平均去除率为 90.39%,此时连续流系统的脱氮除磷性能最好,说明在空间上形成的缺氧/好氧间歇运行方式使得脱氮除磷过程不只依赖于颗粒本身,在 NO₃⁻-N 回流至缺氧段时,连续进水的基质补充条件下使连续流系统有着较高的脱氮除磷效率.继续缩短水力停留时间至 6 h 后,微生物吸收利用缓慢,异养菌与有机负荷接触时间较短,COD 利用率降低^[27],污染物去除能力下降.

综上连续流好氧颗粒污泥在较小的曝气量(0.6 mL·min⁻¹)和合适的水力停留时间下(9 h)脱氮除磷性能最好,进水 COD、TN 和 TP 平均浓度分别为 247.7、42.3 和 3.13 mg·L⁻¹,平均去除率分别为 90.39%、83.6%和 80.43%.

2.2 污泥特性的变化

2.2.1 污泥浓度及沉降性能的变化

连续流系统中污泥浓度及沉降性能的变化如图 3 和图 4 所示.接种污泥后,反应器内 MLSS 为 2 950 mg·L⁻¹,SVI 为 37 mL·g⁻¹.本实验过程中,每天从反应器中间位置取样口取均质泥水混合样品进行检测分析.实验开始后,进水水质由恒定不变的模拟生活污水到不稳定的实际生活污水不可避免地降低了好氧颗粒污泥的稳定性,在第 6 d 时 MLSS 下降到 2 500 mg·L⁻¹左右,SVI 上升至 50 mL·g⁻¹,在 DO 变低之后,可以看到部分颗粒解体,解体的颗粒在沉淀管的顶端排出系统,造成 MLSS 的继续减小,但是由于两级连续流中缺氧/好氧的交替环境促进颗粒密实,部分不太密实的颗粒解体之后又重新聚集成颗粒,所以看到 DO 的降低并没有造成对连续流系统中污泥的破坏,缩短水力停留时间后,不可避免的造成了好氧颗粒污泥的流失,MLSS 减少至 1 800 mg·L⁻¹,但是系统的处理性能并没有恶化,反而变好,在阶段Ⅲ运行的第 10 d 左右,MLSS 开始上升,最终稳定在 2 000 mg·L⁻¹左右,*f* 为 0.92,颗粒较为密实,系统也在这一阶段处理性能达到最好,说明连续流好氧颗粒污泥系统相对于 SBR 活性污泥系统污泥浓度较低.

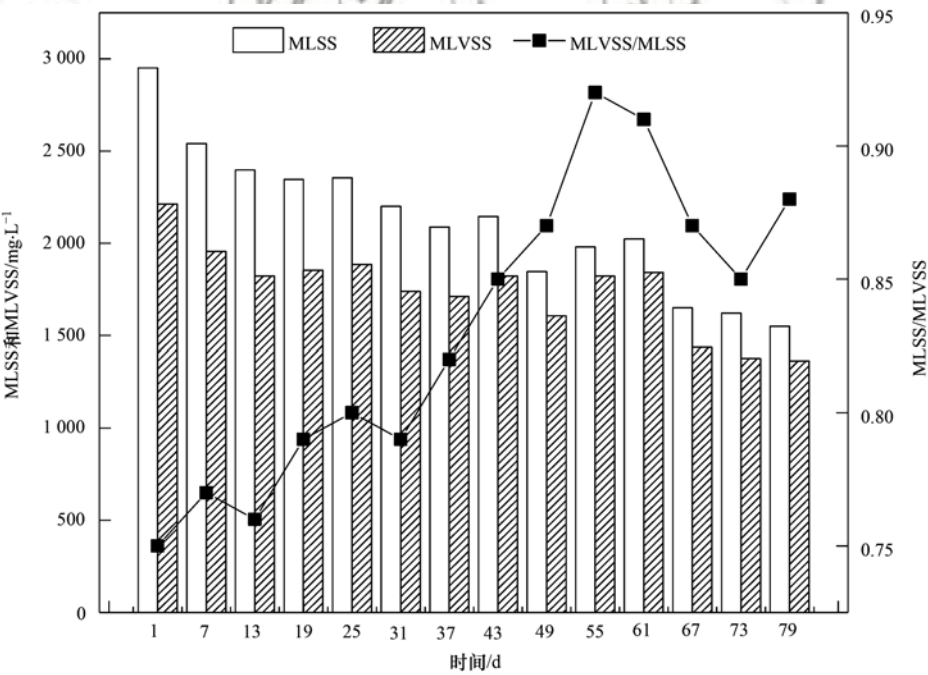


图 3 运行过程中 MLSS 和 MLVSS 变化情况

Fig. 3 Variation in the MLSS and MLVSS during the procession of operation

2.2.2 EPS 分析

EPS 对好氧颗粒的形成和稳定起着至关重要的作用^[28],EPS 含量被认为是蛋白质和多糖的总和,不同阶段下好氧颗粒污泥分泌的 EPS 含量(以 SS

计)如图 5, EPS 在实验前 6 d 由 50.85 mg·g⁻¹显著升高至 62.71 mg·g⁻¹,这是由于微生物在接触新环境时的自然反应是 EPS 升高的主要原因^[29],特别是蛋白质含量,由 45.17 mg·g⁻¹升高至 55.50

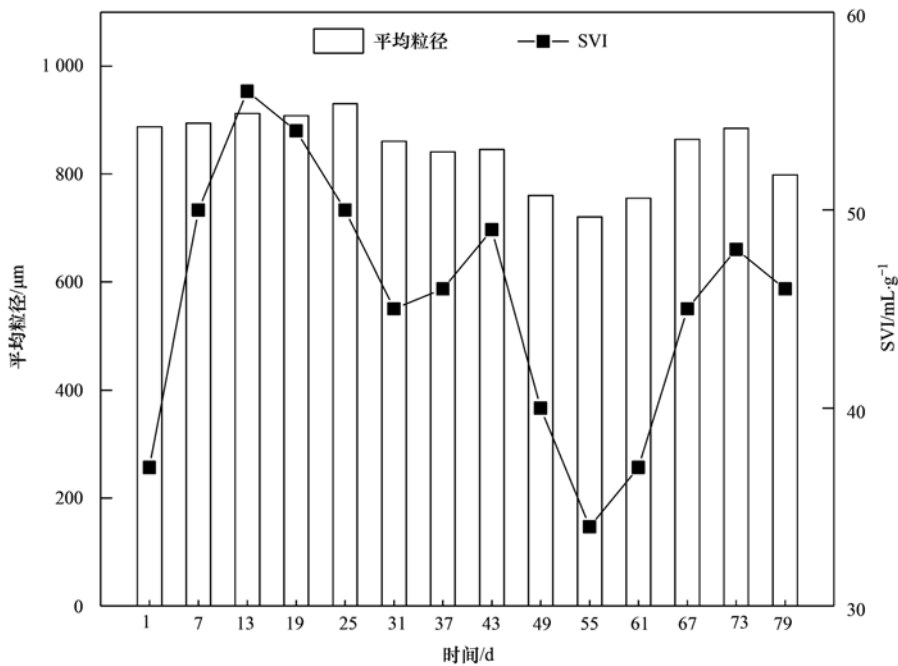


图 4 运行过程中 SVI 和颗粒粒径变化情况

Fig. 4 Variation in the SVI and particle size during the process of operation

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 降低曝气量后,意味着水力剪切力变小,好氧颗粒污泥分泌部分 EPS 以维持颗粒的稳定性,这与 He 等^[30]的研究结果一致.降低水力停留时间后, EPS 含量对 SVI 有显著影响, EPS 含量的增加导致 SVI 的下降.随着 EPS 从 $58.16 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 $80.41 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, SVI 从 $49 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 显著下降到 $40 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,好氧颗粒变得光滑致密,较高的 EPS 含量可以加速

好氧颗粒的形成,改善好氧颗粒的沉降性能^[26],所以在曝气量为 $0.6 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,水力停留时间为 9 h 时, PN/PS 值达到最高,导致颗粒污泥的疏水性增加,颗粒变得更加密实^[29,30].这可能是由于两级反应器中产生了基质浓度差,由于细菌的作用^[29],在缺氧阶段产生的 EPS 后来被消耗在好氧阶段,并且 PS 更容易在低基质环境中被消耗,颗粒基质中留下

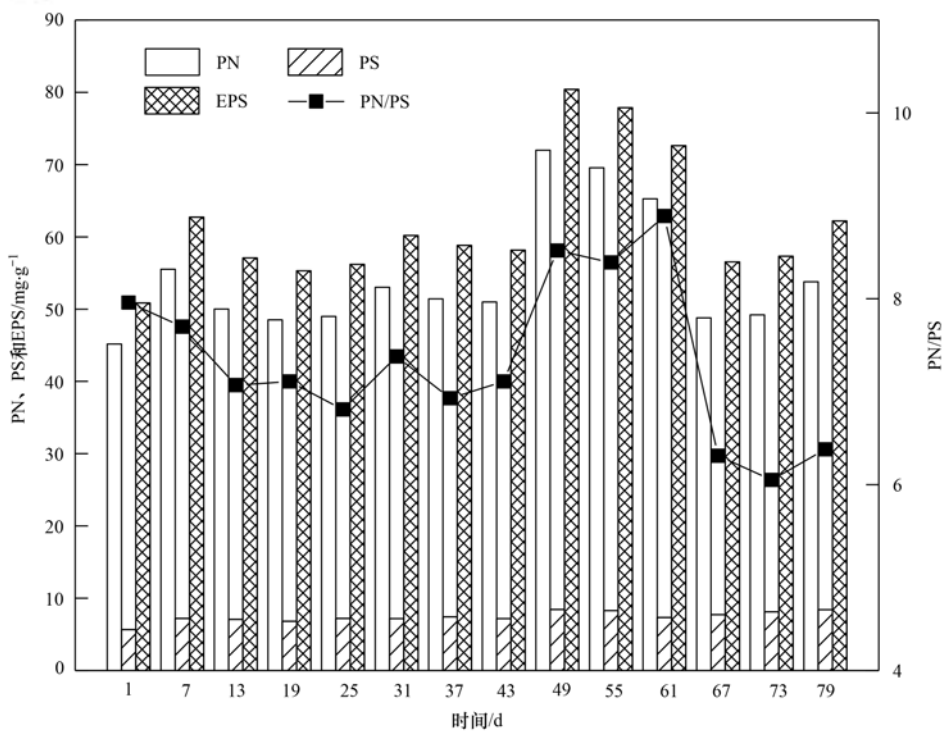


图 5 运行过程中 EPS 变化情况

Fig. 5 Variation in EPS during the process of operation

了更多的 PN,以维持其结构^[31].

2.2.3 三维荧光和平行因子分析

由于原始三维荧光图谱中各组分荧光峰互相重叠,无法单独研究单类物质荧光峰的变化特征,故利用平行因子分析方法进行分析.图6是连续流好氧

颗粒污泥在第1、31、49和79 d的EEM荧光光谱,表4为PARAFAC模型分析得到各阶段具体的结果.根据文献[32~35],将组分分别定义为色氨酸或类蛋白质、可溶性微生物副产物、疏水性酸物质和腐殖酸这4类物质.

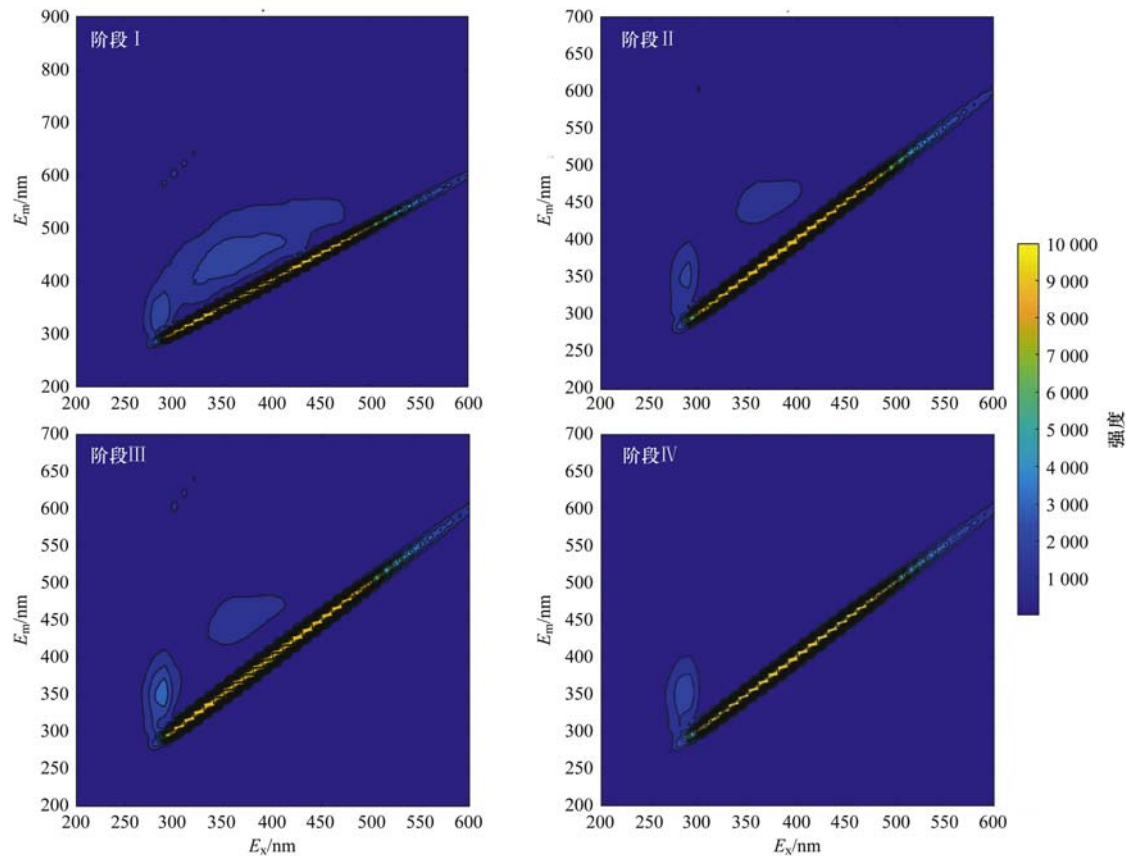


图6 运行过程中颗粒污泥三维荧光分析

Fig. 6 Analysis with 3D-EEM spectra of granular sludge during the proccession of operation

阶段 I 中分离出两种腐殖酸物质,此时颗粒污泥刚接种于连续流反应器中,腐殖酸成分主要是脂肪族和芳香族的高聚物,含有羧基、酚基等带负电官能团,有研究表明腐殖酸会影响污泥的絮凝力,不利于污泥颗粒化^[36].表5为 HIX 和 FI 的值,阶段 I 的好氧颗粒污泥 EPS 的荧光值为 1.221,是整个运行阶段中 FI 的最低值,HIX 的值较高对应较低的 H/C 比和更多的环结构,说明在进水基质为生活污水条件下好氧颗粒污泥的 DOM 来源于微生物的比例较高,并且腐化程度较高,经连续流系统处理后 HIX 值有所下降,FI 值有所上升,说明其腐殖化程度降低、水中由微生物产生的物质增多.随后曝气强度由 1.0 mL·min⁻¹降至 0.6 mL·min⁻¹后,组成成分仍然是色氨酸或类蛋白质和腐殖酸两类物质,颗粒污泥的 EPS 物质结构和组成变化较小,但荧光强度发生了变化,从 1.221 升高至 1.352.这表明连续流系统好氧颗粒污泥 EPS 的组成成分受曝气强度的影

响较小.随着 HRT 从 13 h 缩短至 9 h,FI 值从 1.352 增加到 2.014,HIX 值从 0.847 升高至 0.936,分析此阶段好氧颗粒污泥 EPS 的组成成分由 2 种增加至 4 种,出现了可溶性微生物副产物及疏水酸相关物质,水解和细胞裂解是将颗粒污泥转化为溶解形式的两个主要机制^[37],所以这表明缩短 HRT 将可生物降解的蛋白质水解为小分子或者是出现了细胞的裂解.由此出现了可溶性微生物副产物及疏水酸相关物质^[38],HIX 值升高也因为污泥水解和破坏产生的蛋白质很可能转化为腐殖质^[39].虽然有部分细菌死亡但是根据上述研究表明此阶段生物量增多,出水水质变好,说明合适的水力停留时间对微生物的生长代谢有促进作用,并淘洗掉了世代周期较长的细菌或活性受到了抑制,以此加速了生物量的生长.综上所述水力停留时间会改变 EPS 的组成,水力停留时间相对于曝气强度对连续流系统的 EPS 组成影响更大.

表 4 PARAFAC 模型分析所得各阶段组成成分

Table 4 Components of the PARAFAC model developed in this study			
成分	E_x/nm	E_m/nm	物质
I -C1	390	480	腐殖酸
I -C2	370	460	腐殖酸
I -C3	290	350	色氨酸或类蛋白
I -C4	325	400	海洋腐殖酸
II -C1	370	460	腐殖酸
II -C2	325	400	海洋腐殖酸
II -C3	290	350	色氨酸或类蛋白
III -C1	290	350	色氨酸或类蛋白
III -C2	325	380	可溶性微生物副产物
III -C3	435	470	腐殖酸
III -C4	350	435	与疏水酸有关
IV -C1	325	370	可溶性微生物副产物
IV -C2	290	350	色氨酸或类蛋白

表 5 运行过程中 HIX 和 FI 值的变化情况

Table 5 Variation in the HIX and FI during the procession of operation				
项目	阶段 I	阶段 II	阶段 III	阶段 IV
HIX	0.947	0.847	0.906	0.821
FI	1.221	1.352	2.014	1.469

3 微生物菌群多样性

本研究取阶段Ⅲ末期的泥样进行高通量检测,通过对连续流系统中的样品进行 MiSeq 测序,得到一共159 452条有效序列(tag),序列一致性阈值为97%时得到了1 412个 OTUs,与 He 等^[23]的研究结果一致,说明样品中微生物种群结构复杂度高.此外,用 Chao1 值表征该样品的物种丰富度,用 Shannon 值表示该样品的多样性程度.本样品的 Chao1 值为1 412,Shannon 值为 8.2,显著高于其他研究中的数值^[23,40],可得出结论缺氧/好氧交替连续流系统有着较高的微生物多样性,其微生物群落结构复杂度较高.

接着将样品中得到的有效基因分为若干不同的种群(从门级到属级逐一分类),本研究中重点研究了相对丰度大于 0.5% 的细菌群落.其中丰度最高的门为变形菌门(Proteobacteria,49%).变形菌门为污水处理中最为常见的门^[41].而变形菌门中丰富度最高的微生物是 β -Proteobacteria(相对丰度 26%)、 α -Proteobacteria(相对丰度 12%)、 δ -Proteobacteria(相对丰度 5.5%)和 γ -Proteobacteria(相对丰度 5.8%).第二优势菌门为拟杆菌门 Bacteroidetes,为反硝化产碱菌,属化能有机营养型,能够降解某些复杂的固体有机物(纤维素、脂类和蛋白质等),还存在部分固氮菌属,能起到脱氮的作用.

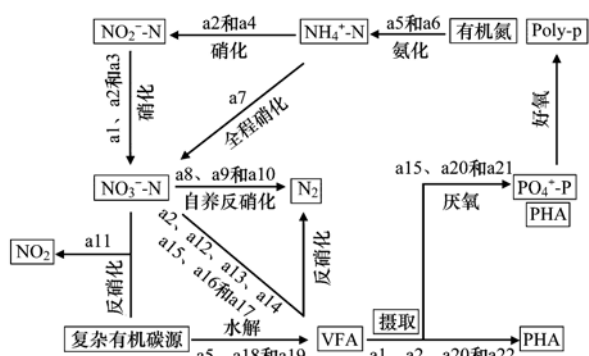
分别根据文献[42~50]的研究结果,分别将所得的微生物种群在科级和属级归类为不同的微生物

功能菌群,分析了连续流脱氮除磷系统的微生物群落结构.分类结果如表 6 所示,功能菌群有氨化细菌、氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂-)、反硝化菌(DNB)、异养硝化-好氧反硝化细菌(HN-AD)、聚磷菌(PAOs)和聚糖菌(GAOs).

表 6 科级和属级的脱氮除磷相关关键功能菌群

Table 6 Key functional groups involved in nitrogen and phosphorus removal at the family and genus levels			
功能菌群分类			相对丰度
功能	科	属	/%
AOB	Rhodocyclaceae	Zoogloea	8.06
	Nitrosomonadaceae	Nitrosomonas	0.51
	Nitrospiraceae	Nitrospira	6.67
NOB	Nitrospiraceae	Nitrospira	6.67
	Comamonadaceae		9.07
	Rhodocyclaceae	Zoogloea	8.06
	Rhizobiales_Incertae_Sedis	Rhizomicrobium	0.73
	Sterolibacteriaceae	Sulfuritalea	1.11
DNB	Rhodocyclaceae	Zoogloea	8.06
	Halomonadaceae	Halomonas	0.512
	Comamonadaceae	Comamonas	0.50
	Flavobacteriaceae	Flavobacterium	5.3
	Thiotrichaceae	Thiothrix	1.31
	Haliangiaceae	Haliangium	0.71
	Planctomycetes	SM1A02	0.66
	Burkholderiaceae	Lautropia	0.54
	Sterolibacteriaceae	Denitratisoma	1.18
	Chitinophagaceae	Ferruginibacter	0.74
PAOS	Flavobacteriaceae		5.36
	Saprospiraceae		7.18
	Halomonadaceae	Halomonas	0.512
GAOS	Comamonadaceae		9.07
	Rhodocyclaceae	Zoogloea	8.06
	Saprospiraceae		7.18
HN-AD	Xanthomonadaceae		0.78
	Chitinophagaceae	Terrimonas	0.55

结合功能菌群的分类结果,建立缺氧/好氧交替连续流系统对实际城镇生活污水的污染物去除模型如图 7,首先生活污水中的复杂有机物首先通过 *Ferribacteriu* 属和 *Ferruginibacter* 属水解为 VFA. 污水中的氮分为有机氮和无机氮,污水中的有机氮通过 *Bdellovibrio* 属和 *OM27_clade* 属的氨化作用分解含氮有机化合物释放 NH₄⁺-N,这些细菌具有循环利用有机氮的作用,其中 *OM27_clade* 属隶属于球孢菌科(*Bdellovibrionaceae*)的 *OM27* 进化枝成员,是未经培养的微生物群.污水中的 NH₄⁺-N 通过 *Zoogloea* 属及 *Nitrosomonas* 属硝化成 NO₂⁻-N,其由 *Comamonadaceae* 科、*Zoogloea* 属和 *Rhizomicrobium* 属进一步硝化成 NO₃⁻-N,同时还有全程硝化细菌 *Nitrospira* 属同时拥有氨氧化功能和亚硝酸氧化功能,将 NH₄⁺-N 硝化成硝氮.紧接着污水中 NO₃⁻-N 反硝化成为 N₂,在颗粒污泥中发现了几种反硝化细



a1: Comamonadaceae; a2: Zoogloea; a3: Rhizomicrobium;
 a4: Nitrosomonas; a5: Bdellovibrio; a6: OM27_clade; a7: Nitrospira;
 a8: Thiobacillus; a9: Sulfuritalea; a10: Ferruginibacter;
 a11: Denitratisoma; a12: Comamonas; a13: SM1A02;
 a14: Lautropia; a15: Halomonas; a16: Haliangium;
 a17: Flavobacterium; a18: Ferribacterium; a19: Ferruginibacter;
 a20: Saprospiraceae; a21: Flavobacteriaceae;
 a22: Xanthomonadaceae

图7 缺氧/好氧交替连续流系统对实际城镇生活污水的污染物去除模型

Fig. 7 Conceptual reaction process model in the anaerobic/aerobic alternating continuous flow system fed with real domestic wastewater

菌,第一种是利用VFA进行反硝化的细菌,有以VFA中的乙酸为碳源进行反硝化的*Halomonas*属和*Comamonas*属、也有利用其它VFA进行反硝化的*Zoogloea*属、*SM1A02*属、*Lautropia*属、*Haliangium*属和*Flavobacterium*属,第二种是自养反硝化细菌,有利用硫基进行自养反硝化的*Thiobacillus*属和*Sulfuritalea*属,也有利用铁进行自养反硝化的*Ferruginibacter*属,第三种是直接利用污水中复杂有机碳源进行反硝化的*Denitratisoma*属。可见,由于实际生活污水中的有机碳大部分以复杂化合物(如蛋白质,脂类和多糖)的形式存在,所以在连续流系统中发现了多种利用不同碳源的反硝化细菌,促进了生活污水中各种碳源的利用。

此外,3种与除磷相关的主要功能菌:Saprospiraceae科、Flavobacteriaceae科和Halomonas科在厌氧状态下摄取水中VFA将其转化为PHA储存在胞内,释放 PO_4^{3-} -P,好氧状态下将 PO_4^{3-} -P过量摄取并转化为Poly-P的形式储存在胞内。综上,在系统中发现了与脱氮除磷相关的11种主要功能细菌,所以在此缺氧/好氧交替连续流系统中微生物种群和群落结构的多样性使得连续流反应器有着较好的同步脱氮除磷性能。

4 结论

本研究表明,以实际生活污水为进水基质的连续流系统,以空间上形成缺氧/好氧环境的间歇运行

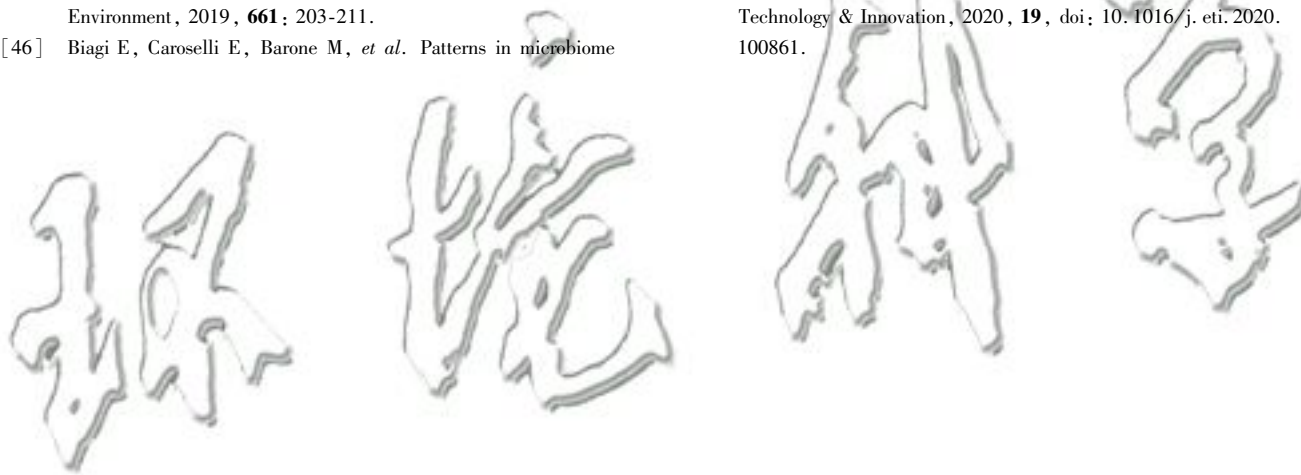
方式运行有着较好的脱氮除磷性能,较小的曝气强度($0.6 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$)和适当的水力停留时间(9h)条件下更有利于污染物的去除,进水COD、TN和TP平均浓度分别为247.7、45.3和3.13 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均去除率分别为90.39%、83.6%和80.43%。整个系统在此条件下能够稳定运行,好氧颗粒污泥形态完整,沉降性能良好。采用EEM-PARAFAC模型对不同阶段的EPS进行表征分析,结果表明缩短HRT将使可生物降解的蛋白质水解为小分子或是出现了细胞的裂解,但又由于生物量的增长,所以表明淘洗掉了世代周期较长的细菌或活性受到了抑制,水力停留时间相对于曝气强度对连续流系统有更大的影响。并在系统中发现了与脱氮除磷相关的11种主要功能菌。

参考文献:

- [1] Nanchaiah Y V, Reddy G K K. Aerobic granular sludge technology: mechanisms of granulation and biotechnological applications[J]. Bioresource Technology, 2018, 247: 1128-1143.
- [2] de Kreuk M K, Heijnen J J, van Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, 90(6): 761-769.
- [3] Wang F, Lu S, Wei Y J, et al. Characteristics of aerobic granule and nitrogen and phosphorus removal in a SBR[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2-3): 1223-1227.
- [4] Jahn L, Svardal K, Krampe J. Comparison of aerobic granulation in SBR and continuous-flow plants[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 231: 953-961.
- [5] Moura R B, Damianovic M H R Z, Foresti E. Nitrogen and carbon removal from synthetic wastewater in a vertical structured-bed reactor under intermittent aeration[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 98: 163-167.
- [6] Wosiack P A, Lopes D D, Damianovic M H R Z, et al. Removal of COD and nitrogen from animal food plant wastewater in an intermittently-aerated structured-bed reactor[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 154: 145-150.
- [7] Li S, Li D, Zhang S R, et al. Effect of aeration modes on simultaneous nitrogen and phosphorus removal and microbial community in a continuous flow reactor with granules[J]. Bioresource Technology, 2019, 294, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122154.
- [8] Zhou D D, Liu M Y, Wang J, et al. Granulation of activated sludge in a continuous flow airlift reactor by strong drag force[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2013, 118(2): 289-299.
- [9] Zhou D D, Dong S S, Gao L L, et al. Distribution characteristics of extracellular polymeric substances and cells of aerobic granules cultivated in a continuous-flow airlift reactor[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2013, 88(5): 942-947.
- [10] Sun Y W, Angelotti B, Wang Z W. Continuous-flow aerobic granulation in plug-flow bioreactors fed with real domestic wastewater[J]. Science of the Total Environment, 2019, 688: 762-770.
- [11] Wang B B, Chang Q, Peng D C, et al. A new classification paradigm of extracellular polymeric substances (EPS) in

- activated sludge: separation and characterization of exopolymers between floc level and microcolony level[J]. *Water Research*, 2014, **64**: 53-60.
- [12] Hao L, Liss S N, Liao B Q. Influence of COD: N ratio on sludge properties and their role in membrane fouling of a submerged membrane bioreactor[J]. *Water Research*, 2016, **89**: 132-141.
- [13] 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. 100-124.
- [14] Li X Y, Yang S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge [J]. *Water Research*, 2007, **41**(5): 1022-1030.
- [15] Yu G H, He P J, Shao L M, *et al.* Toward understanding the mechanism of improving the production of volatile fatty acids from activated sludge at pH 10.0 [J]. *Water Research*, 2008, **42**(18): 4637-4644.
- [16] Frølund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(4): 755-761.
- [17] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [18] Baghoth S A, Sharma S K, Amy G L. Tracking natural organic matter (NOM) in a drinking water treatment plant using fluorescence excitation-emission matrices and PARAFAC [J]. *Water Research*, 2011, **45**(2): 797-809.
- [19] Gabor R S, Burns M A, Lee R H, *et al.* Influence of leaching solution and catchment location on the fluorescence of water-soluble organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(7): 4425-4432.
- [20] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, *et al.* Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(1): 38-48.
- [21] Johnson M S, Couto E G, Abdo M, *et al.* Fluorescence index as an indicator of dissolved organic carbon quality in hydrologic flowpaths of forested tropical watersheds [J]. *Biogeochemistry*, 2011, **105**(1-3): 149-157.
- [22] Zhang W, Zhang Z, Wang Y, *et al.* Effect of turfgrass establishment on soil microbiota using illumina sequencing [J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2017, **16**(3): 679-686.
- [23] He Q L, Zhou J, Wang H Y, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in an A/O/A sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 1-8.
- [24] 李冬, 王樱桥, 李帅, 等. 生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1878-1884.
- Li D, Wang Y Q, Li S, *et al.* Impact of actual domestic sewage and simulated wastewater on an aerobic granular sludge system [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1878-1884.
- [25] Li D, Zhang S R, Li S, *et al.* Aerobic granular sludge operation and nutrients removal mechanism in a novel configuration reactor combined sequencing batch reactor and continuous-flow reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **292**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122024.
- [26] Long B, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Tolerance to organic loading rate by aerobic granular sludge in a cyclic aerobic granular reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **182**: 314-322.
- [27] 李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 等. 缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(1): 369-375.
- Li D, Guo Y Z, Lao H M, *et al.* Startup and stabilization of nitrification in an anoxic-aerobic continuous-flow reactor with granules [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(1): 369-375.
- [28] Frølund B, Palmgren R, Keiding K, *et al.* Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin [J]. *Water Research*, 1996, **30**(8): 1749-1758.
- [29] Sheng G P, Yu H Q, Yue Z B. Production of extracellular polymeric substances from *Rhodospseudomonas acidophila* in the presence of toxic substances [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, **69**(2): 216-222.
- [30] He Q L, Song Q, Zhang S L, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sequencing batch reactor with mixed carbon sources: reactor performance, extracellular polymeric substances and microbial successions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **331**: 841-849.
- [31] Corsino S F, Capodici M, Torregrossa M, *et al.* Fate of aerobic granular sludge in the long-term: the role of EPSs on the clogging of granular sludge porosity [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **183**: 541-550.
- [32] Plaza C, Brunetti G, Senesi N, *et al.* Molecular and quantitative analysis of metal ion binding to humic acids from sewage sludge and sludge-amended soils by fluorescence spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(3): 917-923.
- [33] Sheng G P, Yu H Q. Characterization of extracellular polymeric substances of aerobic and anaerobic sludge using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Water Research*, 2006, **40**(6): 1233-1239.
- [34] Baker A, Curry M. Fluorescence of leachates from three contrasting landfills [J]. *Water Research*, 2004, **38**(10): 2605-2613.
- [35] Hou X L, Liu S T, Feng Y. The autofluorescence characteristics of bacterial intracellular and extracellular substances during the operation of anammox reactor [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**, doi: 10.1038/srep39289.
- [36] 李定昌, 王琦, 高景峰, 等. 不同粒径成熟好氧颗粒污泥 EPS 的三维荧光光谱特性 [J]. *中国给水排水*, 2018, **34**(7): 26-31.
- Li D C, Wang Q, Gao J F, *et al.* Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of extracellular polymeric substances of mature aerobic granular sludge with different particle sizes [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, **34**(7): 26-31.
- [37] Cheng C, Zhou Z, Niu T H, *et al.* Effects of side-stream ratio on sludge reduction and microbial structures of anaerobic side-stream reactor coupled membrane bioreactors [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **234**: 380-388.
- [38] Cheng C, Zhou Z, Pang H J, *et al.* Correlation of microbial community structure with pollutants removal, sludge reduction and sludge characteristics in micro-aerobic side-stream reactor coupled membrane bioreactors under different hydraulic retention times [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **260**: 177-185.
- [39] Dai X H, Luo F, Dai L L, *et al.* Degradation of extracellular polymeric substances (EPS) in anaerobic digestion of dewatered sludge [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2013, **18**: 515-521.
- [40] He Q L, Zhang W, Zhang S L, *et al.* Performance and microbial population dynamics during stable operation and reactivation after extended idle conditions in an aerobic granular sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **238**: 116-121.

- [41] Zhang T, Shao M F, Ye L. 454 Pyrosequencing reveals bacterial diversity of activated sludge from 14 sewage treatment plants[J]. The ISME Journal, 2011, **6**: 1137-1147.
- [42] Aquilina L, Roques C, Boisson A, *et al.* Autotrophic denitrification supported by biotite dissolution in crystalline aquifers (1): new insights from short-term batch experiments [J]. Science of the Total Environment, 2017, **619-620**: 842-853.
- [43] Figdore B A, Stensel H D, Winkler M K H. Comparison of different aerobic granular sludge types for activated sludge nitrification bioaugmentation potential [J]. Bioresource Technology, 2018, **251**: 189-196.
- [44] Liu T, He X L, Jia G Y, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrification process using novel surface-modified suspended carriers for the treatment of real domestic wastewater [J]. Chemosphere, 2020, **247**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.125831.
- [45] Gui X F, Xu W C, Cao H B, *et al.* A novel phenol and ammonia recovery process for coal gasification wastewater altering the bacterial community and increasing pollutants removal in anaerobic/anoxic/aerobic system [J]. Science of the Total Environment, 2019, **661**: 203-211.
- [46] Biagi E, Caroselli E, Barone M, *et al.* Patterns in microbiome composition differ with ocean acidification in anatomic compartments of the Mediterranean coral *Astroides calycularis* living at CO₂ vents[J]. Science of the Total Environment, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138048.
- [47] Ding S Z, Bao P, Wang B, *et al.* Long-term stable simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process treating real domestic sewage using suspended activated sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **339**: 180-188.
- [48] Wang K C, Zhou Z, Zheng Y, *et al.* Understanding mechanisms of sludge *in situ* reduction in anaerobic side-stream reactor coupled membrane bioreactors packed with carriers at different filling fractions [J]. Bioresource Technology, 2020, **316**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123925.
- [49] Liao R H, Shen K, Li A M, *et al.* High-nitrate wastewater treatment in an expanded granular sludge bed reactor and microbial diversity using 454 pyrosequencing analysis [J]. Bioresource Technology, 2013, **134**: 190-197.
- [50] Watari T, Kotcharoen W, Omine T, *et al.* Formation of denitrifying granules in an upflow sludge blanket reactor with municipal sewage and sodium nitrate feeding [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, **19**, doi: 10.1016/j.eti.2020.100861.



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 Amphotically 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)