

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.3
第40卷 第3期

目次

2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估	尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)
利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响	李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)
京津冀郊区站点秋冬季大气 PM _{2.5} 来源解析	王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)
四川省典型工业行业 PM _{2.5} 成分谱分析	冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)
典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM _{2.5} 污染特征及来源解析	赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)
沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM _{2.5} 污染特征及来源分析	张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)
新乡冬季 PM _{2.5} 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析	闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071)
烟台市环境受体 PM _{2.5} 四季污染特征与来源解析	刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)
常州市冬季 PM _{2.5} 中类腐殖质昼夜特征分析	顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)
西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险	曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)
京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析	邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)
中国城市 O ₃ 浓度时空变化特征及驱动因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)
基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征	张倩倩, 张兴赢 (1132)
舟山市臭氧污染分布特征及来源解析	王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)
中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立	高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)
异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化	黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)
兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征	栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)
成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析	胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)
基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO ₂ 扩散通量估算	张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)
渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化	刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)
思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学	劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)
厦门湾海滩微塑料污染特征	刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)
高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析	王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)
鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素	何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)
成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征	吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)
丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析	张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)
蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响	刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)
基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价	苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)
生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响	黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)
城市不同材料屋面径流的污染负荷特性	何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)
BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)
微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除	吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)
鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除	邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)
Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性	易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)
两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素	程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)
静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响	俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)
4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制	王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)
以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析	徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)
进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响	李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)
除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)
CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能	马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)
不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能	袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)
ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水	李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)
室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性	谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)
不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征	任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)
降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征	付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)
IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析	刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)
温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响	于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)
零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化	牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)
牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响	彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)
环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响	张彦军, 郭胜利 (1446)
三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应	李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)
三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响	王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)
长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征	宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)
不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征	童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)
桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征	徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)
缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征	王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)
大气污染对居民健康影响研究进展	秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)
《环境科学》征订启事 (1042)	《环境科学》征稿简则 (1162)
信息 (1208, 1235, 1286)	

温度对硝化杆菌 (*Nitrobacter*) 活性动力学影响

于雪^{1,2}, 孙洪伟^{1,2*}, 李维维³, 祁国平³, 马娟^{1,2}, 陈永志^{1,2}, 吕心涛⁴

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省污水处理行业技术中心, 兰州 730070; 3. 甘肃省轻工研究院, 兰州 730070; 4. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京 100044)

摘要: 为探究温度对亚硝酸盐氧化细菌中硝化杆菌属 (*Nitrobacter*) 活性动力学影响, 本试验采用序批式活性污泥 (SBR) 反应器, 在通过改变系统进水亚硝态氮 (NO_2^- -N) 浓度达到富集 *Nitrobacter* 基础上, 以富含 *Nitrobacter* 污泥为对象 (宏基因组物种注释和丰度分析显示 *Nitrobacter* 占细菌总数 40.3%), 考察不同 NO_2^- -N 浓度梯度下亚硝酸盐氧化过程比亚硝态氮氧化速率 (SNiOR) 变化规律, 基于 Monod 模型考察系统温度对 *Nitrobacter* 活性动力学影响, 并进行统计学分析. 结果表明, 30℃ 条件下 SNiOR 达到最大 (以 N/VSS 计), 为 $1.31 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$. 统计学分析结果显示, Monod 方程可较好地反映不同温度条件下基质底物浓度对 *Nitrobacter* 活性影响. 基于菲尔普斯方程计算不同温度区间内温度系数 (θ) 可知, 当系统温度低于 25℃ 或高于 30℃ 时, 反应速率随温度变化越敏感.

关键词: 硝化杆菌; 比亚硝态氮氧化速率; 动力学; 温度系数; 宏基因组

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1426-05 DOI: 10.13227/j.hjks.201808261

Effect of Temperature on the Activity Kinetics of *Nitrobacter*

YU Xue^{1,2}, SUN Hong-wei^{1,2*}, LI Wei-wei³, QI Guo-ping³, MA Juan^{1,2}, CHENG Yong-zhi^{1,2}, LÜ Xin-tao⁴

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Sewage Treatment Industry Technical Center of Gansu Province, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Province Light Industry Research Institute, Lanzhou 730070, China; 4. Research and Development Center of Beijing Drainage Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: A sequencing batch reactor (SBR) was operated in this study to investigate the effect of temperature on the kinetics of *Nitrobacter* activity among nitrite oxidizing bacteria. At the beginning of the experiment, the NO_2^- -N concentration in the influent was changed to enrich *Nitrobacter*. Then, the sludge with enriched *Nitrobacter* was employed to determine the variation of the specific nitrite oxidation rate (SNiOR) during the nitrite oxidation process in batch tests. Metagenomics species annotation and abundance analysis showed that *Nitrobacter* accounted for 40.3% of the total bacterial population. The variation of SNiOR in the nitrite oxidation process was investigated under different NO_2^- -N concentrations. The effect of temperature on the kinetics of *Nitrobacter* was investigated using the Monod model. Furthermore, the kinetics model of the effect of temperature on *Nitrobacter* activity was fitted for statistical analysis. The results showed that SNiOR reached its maximum at 30℃, which was $1.31 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$. Statistical analysis showed that the Monod equation could describe the effect of substrate concentration on *Nitrobacter* activity under different temperature conditions. Calculating the temperature coefficient (θ) in different temperature intervals based on the Phelps equation, showed that when the system temperature is lower than 25℃ or higher than 30℃, the reaction rate is more sensitive to temperature changes.

Key words: *Nitrobacter*; specific nitrite oxidation rate; kinetic; temperature coefficient; metagenome

生物脱氮系统中, 氨氧化菌 (ammonia-oxidizing bacteria, AOB) 和亚硝酸盐氧化菌 (nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 以协同作用共存, 实现氨氮 (NH_4^+ -N) 向硝态氮 (NO_3^- -N) 转化, AOB 将 NH_4^+ -N 氧化为亚硝态氮 (NO_2^- -N), NOB 将 NO_2^- -N 进一步氧化为 NO_3^- -N. 其中 NOB 主要是由四类菌属构成: 硝化杆菌属 (*Nitrobacter*)、硝化球菌属 (*Nitrococcus*)、硝化刺菌属 (*Nitrospina*) 和硝化螺菌门 (*Nitrospira*)^[1]. 有研究表明, *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 是污水处理系统中最为常见的 NOB 菌属^[2], 在高底物浓度、高溶解氧条件下 *Nitrobacter* 含量远高于 *Nitrospira*^[3,4].

目前, 现有研究大多集中于氨氧化过程的控制因素^[5,6], 较少研究集中于环境因素对亚硝酸盐氧化过程的影响. 由于 *Nitrobacter* 菌群生长缓慢、对

环境因子的变化比较敏感, 所以目前大多污水处理厂面临硝化不完全这一困境, 且污水处理厂污泥中 NOB 占细菌总数比例一般低于 5%, 采用此类污泥研究 NOB 的性质容易影响试验结果的可靠性和稳定性^[7]. 此外, 温度变化会导致细菌的生理学变化, 比如细胞膜流动性降低、细菌中酶的活性也存在适应性问题等^[8,9]. 而目前鲜有文献报道温度变化对 *Nitrobacter* 菌群活性的影响. 此外, 微生物生化反应动力学的研究已日渐成熟, 提出了许多微生物受单一因素影响的抑制动力学模型^[10-16]. 在研

收稿日期: 2018-08-31; 修订日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51668031); 兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”项目 (152022); 甘肃省重点研发计划—工业类项目 (17YF1GA009)

作者简介: 于雪 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高氨氮废水生物脱氮, E-mail: yxjb0805@163.com

* 通信作者, E-mail: 12821306@qq.com

究某种因素对微生物影响时结合动力学模型, 并对其统计学分析已成为国内外研究热点^[17~22]. 生化反应动力学能够最直接地体现基质浓度和降解速率的变化关系, 进而描述微生物活性. 因此, 本试验在实现 *Nitrobacter* 富集基础上, 基于 Monod 模型考察系统温度对 *Nitrobacter* 活性动力学影响, 进而采用菲尔普斯方程, 获得温度变化对 *Nitrobacter* 活性影响程度, 指导生物脱氮技术在理论研究及实际工程中的应用.

1 材料与方法

1.1 试验用水、接种污泥及水质分析项目

本试验用水采用人工模拟废水, 其水质特性为: 原水采用去离子水, 进水 NO_2^- -N 通过投加 NaNO_2 溶液实现, 初始 pH 通过 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸 (HCl) 溶液和 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠 (NaOH) 溶液调节. 其他成分如下: 0.4 g NaHCO_3 , $0.9\text{ g KH}_2\text{PO}_4$, $1.2\text{ g K}_2\text{HPO}_4$, 0.9 mL 微量元素, 每升微量元素中含有: 1.25 g EDTA 、 $0.55\text{ g ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.4\text{ g CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $1.275\text{ g MnCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.4\text{ g CuSO}_4\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.05\text{ g Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $1.375\text{ g CaCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $1.25\text{ g FeCl}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $44.4\text{ g MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$. 此外, 硝化过程中溶解氧 (DO) 控制在 $4\sim 4.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 采用加热棒控制反应器内混合液的温度.

本试验接种污泥取自兰州市西固区兰炼污水处理厂氧化沟好氧段污泥, 具有良好生物脱氮性能, 初始混合液挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS) 为 $3\ 323\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

NO_2^- -N、 NO_3^- -N、混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 及 MLVSS 均采用国家标准方法测定^[22]; pH 值、 DO 和温度通过 WTW-Multi3420 实时监测; 宏基因组物种注释和丰度分析: ①污泥样品的 Scaffolds/Scaffigs 序列与 NCBI-NT 数据库中的细菌、古菌、真菌和病毒序列进行 BLASTN 比对 (E 值设定为 <0.001). ②通过 MEGAN^[23] 软件采取“最低共同祖先”算法^[24], 将参考序列不同物种分枝前的最后一级共同分类作为目标序列的物种分类注释信息. ③结合 Scaffolds/Scaffigs 序列在各样本中的丰度数据, 获得各样本在各个分类等级上的相对丰度分布.

1.2 *Nitrobacter* 富集装置及运行方式

采用有效容积为 7 L 的 SBR 装置富集 *Nitrobacter*, 控制装置内混合液温度为 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$, pH 为 $7.7\sim 8.1$, DO 控制在 $4.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在线监测 DO 值实时控制硝化终点. 通过梯度提高 NO_2^- -N 浓度对接种污泥进行驯化, 经过 419 个周期, 可处理进水 NO_2^- -N 浓度为 $700\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的人工模拟废水, 驯化后污泥 $\text{MLVSS} = (1485\pm 35)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 具体运行条件见表 1.

表1 NOB 富集过程运行条件

Table 1 Operational parameters of the enrichment AOB

阶段	NO_2^- -N浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	曝气时间 / min	运行周期	阶段	NO_2^- -N浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	曝气时间 / min	运行周期	阶段	NO_2^- -N浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	曝气时间 / min	运行周期
S ₁	10	35	19	S ₆	250	450	30	S ₁₁	500	390	30
S ₂	50	160	20	S ₇	300	480	30	S ₁₂	550	360	30
S ₃	100	320	20	S ₈	350	450	30	S ₁₃	600	360	30
S ₄	150	420	30	S ₉	400	420	30	S ₁₄	650	360	30
S ₅	200	430	30	S ₁₀	450	420	30	S ₁₅	700	360	30

1.3 温度对 *Nitrobacter* 活性影响批次试验

本试验采用有效容积为 3 L 的 SBR 反应器 (高 50 cm , 内径 15 cm). 运行方式: 瞬时进水 (1 min), 硝化 (通过在线监测 DO 值实时控制硝化终点), 静置沉淀 (30 min), 排水 (5 min).

批次试验以富含 *Nitrobacter* 的活性污泥为研究对象, 控制恒定 pH (7.5 ± 0.1)、 DO 浓度 ($4.0\sim 4.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下, 通过设定不同 NO_2^- -N 浓度, 基于批次试验考察不同温度对 *Nitrobacter* 活性及其 Monod 方程动力学参数的影响.

2 结果与讨论

2.1 *Nitrobacter* 的富集培养及群落结构分析

图 1 为 *Nitrobacter* 富集阶段 SBR 系统硝化开

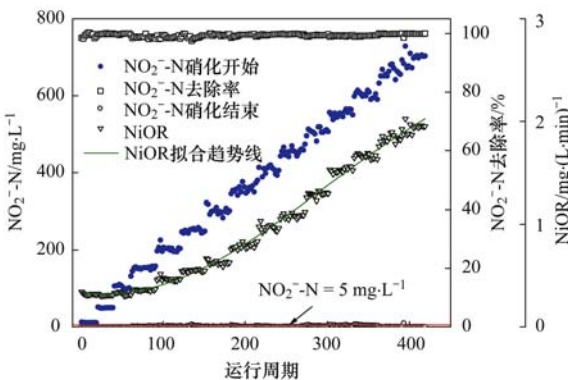


图1 *Nitrobacter* 富集培养阶段 SBR 系统硝化性能

Fig. 1 Nitrification performance of the SBR system during *Nitrobacter* enrichment

始、结束时 NO_2^- -N 浓度、亚硝态氮氧化速率 (NiOR) 以及 NO_2^- -N 去除率的变化规律. 试验运行过程中,

进水 NO_2^- -N 浓度从 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 梯度升高到 $700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 可以看出, 硝化结束时 NO_2^- -N 浓度均低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均值为 $2.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 整个试验周期 NO_2^- -N 去除率均达到 98% 以上, 系统具有良好的脱氮性能. 此外, 由于进水 NO_2^- -N 浓度的增加, NiOR 也逐渐增加 [$0.32 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1} \rightarrow 1.93 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$], 二者呈正相关. 当 NO_2^- -N $\geq 700 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NiOR 始终维持在 $1.80 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$ 以上, 表明 SBR 系统具有良好的亚硝酸盐氧化性能.

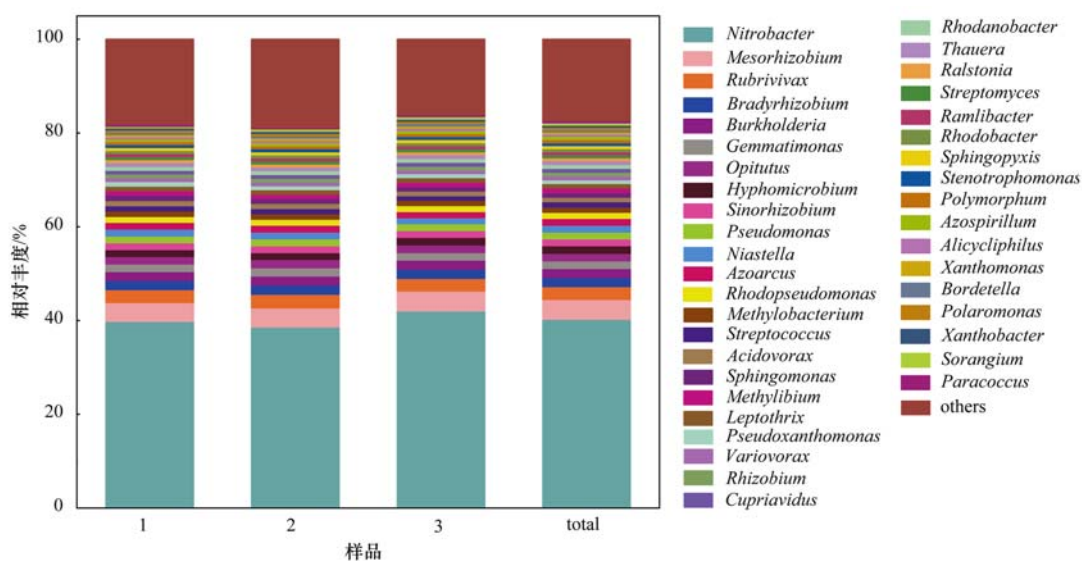


图 2 SBR 系统微生物群落组成结构

Fig. 2 Microbial community composition in the SBR system

2.2 不同温度条件对 *Nitrobacter* 的氧化性能影响

图 3 为不同温度条件下硝化反应开始、结束时 NO_2^- -N 浓度, 比亚硝态氮氧化速率 (SNiOR) 变化规律. 本试验共运行 246 个周期, 分为 3 个阶段. 阶段 I (第 1 ~ 56 周期): 梯度增加温度 ($15^\circ\text{C} \rightarrow 20^\circ\text{C} \rightarrow 25^\circ\text{C} \rightarrow 30^\circ\text{C} \rightarrow 35^\circ\text{C}$), 硝化反应开始 NO_2^- -N 浓度与 SNiOR 呈现出相同的变化趋势. 其中, 当温度分别为 15、20、25 和 30°C 时, 随着硝化开始 NO_2^- -N 浓度增加, SNiOR 均呈增加趋势, 当 $t = 30^\circ\text{C}$ 时, $r_{\max}$ (最大 SNiOR) 达到最大 (以 N/VSS 计), 为 $1.40 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$. 当温度增加到 35°C 时, 相比于 30°C 条件下 $r_{\max}$ 出现明显下降趋势, 为 $0.82 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$. 阶段 II (第 57 ~ 217 周期): *Nitrobacter* 活性恢复阶段, 为进一步验证 $30^\circ\text{C} \rightarrow 35^\circ\text{C}$ 时 *Nitrobacter* 活性降低这一现象, 本试验在 25°C 条件下进行了 160 个周期的 *Nitrobacter* 活性恢复, 恢复后硝化反应开始 NO_2^- -N = $60.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{SNiOR} = 0.97 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 达到 *Nitrobacter* 活性降低前水平. 阶段 III (第 218 ~ 246 周期): 梯度增加温度 ($35^\circ\text{C} \rightarrow 38^\circ\text{C} \rightarrow 40^\circ\text{C}$), $r_{\max}$ 呈下降趋势 [$1.03 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1} \rightarrow 0.58$

对微生物 16S rRNA 基因的特定区域进行靶向测序 (Targeted sequencing), 获得 SBR 系统内微生物群落的具体组成结构 (图 2). 通过 Origin 9.0 软件, 对各样本中的优势物种 (取总体丰度前 30 位物种) 在属水平上分析并绘制柱状图. 分析发现: 各平行样在属水平上微生物类型基本相同, 其中 *Nitrobacter* 平均相对丰度为 40.3%. 此外, 基因测序结果显示其余菌属在污泥微生物群落中占比均低于 5%, 表明经过富集培养后 SBR 系统污泥微生物中 *Nitrobacter* 占绝对优势地位.

$\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1} \rightarrow 0.32 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$]. 因此, 基于 SNiOR 表征 *Nitrobacter* 活性研究发现, 当温度介于 $15 \sim 30^\circ\text{C}$ 时, 随着温度的增加, *Nitrobacter* 活性逐渐增加, 当温度介于 $30 \sim 40^\circ\text{C}$ 时, *Nitrobacter* 活性随着温度的增加逐渐降低.

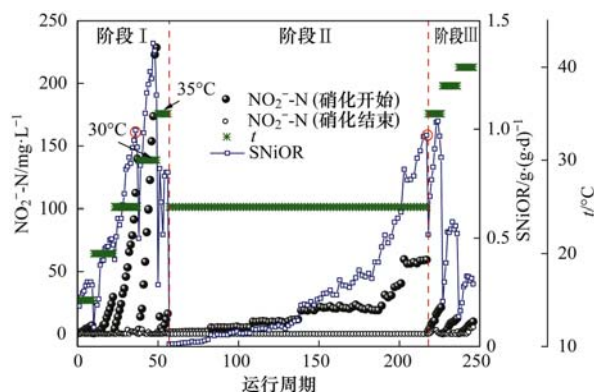


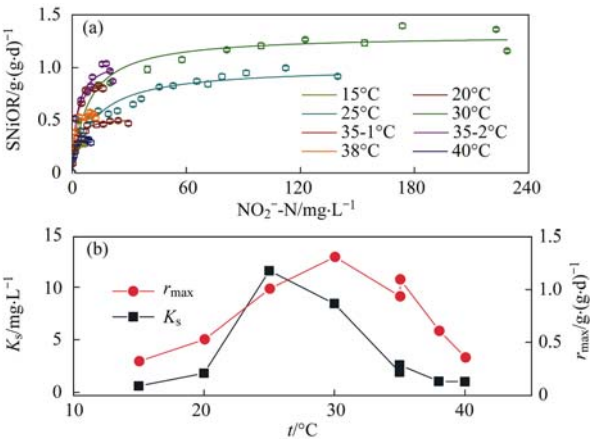
图 3 批次试验 *Nitrobacter* 氧化性能

Fig. 3 Batch test of *Nitrobacter* oxidation performance

2.3 温度对 *Nitrobacter* 菌属 Monod 方程动力学常数影响

为了更好地描述不同温度条件对 *Nitrobacter* 菌属生长动力学影响, 采用 Monod 方程对试验数据进

行非线性拟合, 分析拟合后动力学参数变化规律, 结果如图 4 所示. 从中可知, 在本试验浓度范围内, NO_2^- -N 浓度对 SNiOR 的影响均符合 Monod 方程[图 4(a)]. K_s 为基质半饱和常数(以 NO_2^- -N 计), 其物理意义为基质比降解速率达到最大比降解速率一半 ($r_{\max}/2$) 时的底物浓度. 由图 4(b) 可知, 当温度介



35-1℃是活性恢复前试验, 35-2℃是恢复后 35℃条件下的试验
图 4 不同温度条件下, NO_2^- -N 对 *Nitrobacter* 活性动力学拟合

Fig. 4 Dynamics fitting of *Nitrobacter* activity to NO_2^- -N under different temperature conditions

于 15 ~ 25℃ 之间时, K_s 随温度升高而增大, 当温度介于 25 ~ 40℃ 时, K_s 随温度升高而降低. 拟合结果显示, 30℃ 条件下 $r_{\max}$ 达到最大, 为 $1.31 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 表明在该温度条件下 *Nitrobacter* 活性最好. 此外, 40℃ 条件下 *Nitrobacter* 活性仅为 30℃ 条件下的 27%.

Monod 方程拟合后 *Nitrobacter* 动力学参数及其统计学分析结果见表 2. 其中, 可决系数 (R^2) 可表征试验数据与拟合曲线的接近程度, R^2 越大, 试验数据在拟合曲线附近越密集, 曲线拟合程度越高. 拟合结果发现不同温度条件下方程可决系数 (R^2) 均大于 0.94, 拟合结果较好. 统计学方差分析中 F 值与 P 值均能够预测自变量与因变量的关联程度. F 值是回归方程的显著性检验, P 值表示试验结果可信度, F 值越大, P 值越小, 可表明自变量和因变量显著相关, 方程拟合度越好, 且当 $P < 0.05$ 时, 自变量可用于预测因变量. 基于方差分析, 不同温度条件下 F 值较大, P 值均较小, 且 P 值均小于 0.001. 综上可知, 基于统计学分析, Monod 方程可较好的描述不同温度条件下底物浓度对 *Nitrobacter* 活性影响.

表 2 Monod 方程拟合后动力学参数以及统计学分析

Table 2 Monod model fitting parameters and statistical analysis results

温度/℃	动力学参数		统计学参数		
	$r_{\max}/\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$	$K_s/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	R^2	F 值	P 值
15	0.320	0.611	0.99	5 007.1	1.77×10^{-12}
20	0.527	1.826	0.98	1 880.3	1.47×10^{-14}
25	1.008	11.545	0.94	1 080.6	1.18×10^{-14}
30	1.31	8.423	0.94	1 085.9	6.13×10^{-9}
35	0.934	1.917	0.99	1 551.3	1.79×10^{-8}
35	1.096	2.598	0.96	802.4	2.61×10^{-9}
38	0.608	1.055	0.98	2 089.6	5.74×10^{-12}
40	0.355	1.025	0.96	859.63	2.05×10^{-10}

2.4 不同温度对 *Nitrobacter* 活性影响程度

在污水处理中, 温度系数 (θ) 可以衡量系统温度对反应速率和净化能力的影响^[25]. 可采用菲尔普斯方程 $r_2 = r_1 \cdot \theta^{t_2 - t_1}$ 计算系统不同温度区间内的 θ 值, 方程中 r 为不同温度 (t) 条件下基于 Monod 方程拟合后的最大比降解速率 ($r_{\max}$), θ 值的大小可反映 *Nitrobacter* 对温度变化的敏感性, θ 值偏离 1 的程度越大, 表明在该温度区间内温度变化对 *Nitrobacter* 活性影响越大. 由图 5 可知, 当 SBR 系统温度介于 15 ~ 30℃ 之间时, θ 值均大于 1, $r_{\max}$ 随着温度的增加而增加, 温度与 *Nitrobacter* 活性呈正相关(I). 而当系统温度介于 30 ~ 40℃ 之间时, θ 值均小于 1, $r_{\max}$ 随着温度的增加而降低, 温度与 *Nitrobacter* 活性呈负相关. 采用 θ 值偏离 1 的程度

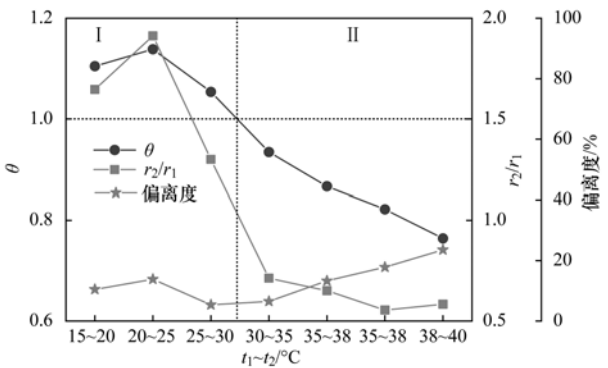


图 5 不同温度区间内, 温度系数变化规律

Fig. 5 Variation of the temperature coefficient in different temperature ranges

(偏离度) 衡量温度对 *Nitrobacter* 活性影响程度发现, 当温度介于 25 ~ 35℃ 之间时偏离度较小, 表明

在此温度范围内温度变化对 *Nitrobacter* 活性影响较小, 当系统温度小于 25℃ 或大于 35℃, 偏离度逐渐增加, 表明在此温度范围内温度变化对 *Nitrobacter* 活性影响较大。

3 结论

(1) 控制 $DO \geq 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $t = 25^\circ\text{C}$ 条件下, 以 NaNO_2 为唯一能源, 通过梯度提高 NO_2^- -N 浓度可实现 *Nitrobacter* 的富集, 经过 419 个周期, 宏基因组物种注释和丰度分析显示 *Nitrobacter* 占细菌总数 40.3%, *Nitrobacter* 成为优势菌种。

(2) 不同温度条件下 Monod 模型均较好地描述基质底物浓度对 *Nitrobacter* 活性的影响。拟合结果显示, 30℃ 条件下 SNiOR 达到最大, 为 $1.31 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 表明在该温度条件下 *Nitrobacter* 活性最好。

(3) 基于菲尔普斯方程计算不同温度区间内 θ 值可知, 当系统温度低于 25℃ 或高于 30℃ 时, *Nitrobacter* 活性随温度变化越敏感。

参考文献:

- [1] Stackebrandt E, Goebel B M. Taxonomic note: a place for DNA-DNA reassociation and 16S rRNA sequence analysis in the present species definition in bacteriology [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 1994, **44** (4): 846-849.
- [2] Peng Y Z, Zhu G B. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, **73**(1): 15-26.
- [3] Spieck E, Hartwig C, Cormack I, et al. Selective enrichment and molecular characterization of a previously uncultured Nitrospira-like bacterium from activated sludge [J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**: 405-415.
- [4] 包鹏, 王淑莹, 马斌, 等. 不同溶解氧间歇曝气对亚硝酸盐氧化菌的影响 [J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2696-2702.
- Bao P, Wang S Y, Ma B, et al. Effect of dissolve oxygen on the microbial community of the nitrite-oxidizing bacteria in an intermittent aeration reactor [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2696-2702.
- [5] 孙洪伟, 尤永军, 赵华南, 等. 游离氨对硝化菌活性的抑制及可逆性影响 [J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 95-100.
- Sun H W, You Y J, Zhao H N, et al. Inhibitory effect of free ammonia on the activity of nitrifying bacteria and recoverability [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 95-100.
- [6] Gabarró J, Ganigué R, Gich F, et al. Effect of temperature on AOB activity of a partial nitrification SBR treating landfill leachate with extremely high nitrogen concentration [J]. Bioresource Technology, 2012, **126**: 283-289.
- [7] 张宇坤, 王淑莹, 董怡君, 等. 游离氨和游离亚硝酸对亚硝态氮氧化菌活性的影响 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1242-1247.
- Zhang Y K, Wang S Y, Dong Y J, et al. Effect of FA and FNA on activity of nitrite-oxidising bacteria [J]. China Environmental Science, 2014, **34**(5): 1242-1247.
- [8] Madigan M T, Martinko J M, Parker J. Brock biology of microorganisms [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 2000.
- [9] 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 等. 温度对 ABR-MBR 复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 [J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3466-3472.
- Wu P, Lu S J, Xu L Z, et al. Effects of temperature on combined process of ABR and MBR for domestic sewage treatment and analysis of microbial community [J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3466-3472.
- [10] Goudar C T, Ganji S M, Pujar B G, et al. Substrate inhibition kinetics of phenol biodegradation [J]. Water Environmental Research, 2000, **72**(1): 50-55.
- [11] Edwards V H. The influence of high substrate concentrations on microbial kinetics [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1970, **12**(5): 679-712.
- [12] Andrews J F. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1968, **10**(6): 707-723.
- [13] Haldane J B S. Enzymes [M]. London: Longmans Green and Co, 1930.
- [14] Aiba S, Shoda M, Nagatani M. Kinetics of product inhibition in alcohol fermentation [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1968, **10**(6): 845-864.
- [15] Tessier G. Croissance des populations bactériennes et quantité d'aliment disponible [J]. Reviews Science, 1942, **80**: 209-216.
- [16] Luong J H T. Generalization of Monod kinetics for analysis of growth data with substrate inhibition [J]. Biotechnology and Biochemistry, 1987, **29**(2): 242-248.
- [17] Han K, Levenspiel O. Extended monod kinetics for substrate, product, and cell inhibition [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1988, **32**(4): 430-437.
- [18] Park S W, Bae W. Modeling kinetics of ammonium oxidation and nitrite oxidation under simultaneous inhibition by free ammonia and free nitrous acid [J]. Process Biochemistry, 2009, **44**(6): 631-640.
- [19] Carrera J, Jubany I, Carvallo L, et al. Kinetic models for nitrification inhibition by ammonium and nitrite in a suspended and an immobilised biomass systems [J]. Process Biochemistry, 2004, **39**(9): 1159-1165.
- [20] Ciudad G, Werner A, Bornhardt C, et al. Differential kinetics of ammonia- and nitrite-oxidizing bacteria: A simple kinetic study based on oxygen affinity and proton release during nitrification [J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(8): 1764-1772.
- [21] 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 等. 高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 [J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3544-3551.
- Tang C J, Xiong L, Wang Y Y, et al. Kinetic characteristics of high-rate ANAMMOX granules [J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3544-3551.
- [22] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [23] Huson D H, Mitra S, Ruscheweyh H J, et al. Integrative analysis of environmental sequences using MEGAN4 [J]. Genome Research, 2011, **21**(9): 1552-1560.
- [24] Huson D H, Auch A F, Qi J, et al. MEGAN analysis of metagenomic data [J]. Genome Research, 2007, **17**(3): 377-386.
- [25] 张自杰, 彭永臻. 对菲尔普斯 (Phelps) 公式、温度系数 θ 的实用价值与理论意义的探讨 [J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1983, (2): 71-80.

CONTENTS

Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017	YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>	(1011)
Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014	LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>	(1024)
Source Apportionment of PM _{2.5} in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>	(1035)
Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i>	(1043)
Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM _{2.5} During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City	ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>	(1052)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Heating and Non-heating Periods in Shenyang	ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>	(1062)
Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM _{2.5} During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment	YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>	(1071)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM _{2.5} During Four Seasons in Yantai City	LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>	(1082)
Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM _{2.5} During Winter in Changzhou	GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>	(1091)
Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China	CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>	(1101)
Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations	QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>	(1111)
Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1120)
Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation	ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying	(1132)
Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan	WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>	(1143)
Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China	GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>	(1152)
Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone	HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>	(1163)
Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City	LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>	(1172)
Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu	HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>	(1179)
Diffusive CO ₂ Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model	ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>	(1188)
Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea	LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>	(1198)
Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir	LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>	(1209)
Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China	LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>	(1217)
Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring	WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>	(1222)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River	HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>	(1236)
Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City	WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>	(1245)
Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>	(1252)
Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China	LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>	(1261)
Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI)	SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>	(1270)
Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland	HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>	(1280)
Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials	HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>	(1287)
Preparation of BiOCl-(NH ₄) ₃ PW ₁₂ O ₄₀ Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(1295)
High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source	WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>	(1302)
Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite	DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>	(1310)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar	YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>	(1318)
Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution	CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>	(1328)
Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions	YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1337)
Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant	WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou	(1347)
Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes	XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>	(1353)
Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(1360)
Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1367)
Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance	MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>	(1375)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times	YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>	(1382)
ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater	LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>	(1390)
Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature	XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>	(1396)
ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics	REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>	(1405)
Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process	FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>	(1412)
Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System	LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>	(1419)
Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i>	YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(1426)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron	NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems	PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>	(1439)
Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li	(1446)
Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area	LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>	(1457)
Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area	WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>	(1468)
Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management	NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>	(1475)
Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil	TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(1483)
Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin	XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>	(1491)
Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain	WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(1504)
Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents	QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang	(1512)